



การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 11

Vol.1

ด้านสารสนเทศ การเกษตร
วิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

8 - 9 พฤษภาคม 2569

โรงแรมรอยัล ภูเก็ต ซิตี้ จังหวัดภูเก็ต
จัดโดย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร



The 11th National Conference and The 7th International Conference
on Informatics, Agriculture, Management, Business Administration,
Engineering, Sciences and Technology (IAMBEST 2026)

Organized by:

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Prince of Chumphon Campus and
University Network

© Copyright 2026 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Prince of Chumphon
Campus All rights reserved. part of this publication may be reproduced, stored in a
retrieval system or transmitted in any form or by any mea electronic, mechanical,
photocopying, recording or otherwise, without written permission from King Mongkut's Institute
Technology Ladkrabang, Prince of Chumphon Campus. All full papers in the proceedings
are reviewed and accept for publication. Responsibility for the contents of the paper's rests
with the authors.

Published by:

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Prince of
Chumphon Campus, Chumphon 17/1 Moo 6 Chumco Pathio
Chumphon 86160 Thailand 86160
Tel: (+66) 77 506 - 410

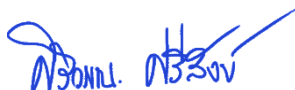


สารจากรองอธิการบดี สจล-ชุมพร
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

การประชุมทางวิชาการระดับประเทศ The 11th National Conference on Informatics, Agriculture, Management, Business Administration, Engineering, Sciences and Technology และการประชุมทางวิชาการระดับนานาชาติ The 7th International Conference on Informatics, Agriculture, Management, Business Administration, Engineering, Sciences and Technology (IAMBEST 2026) เป็นการประชุมวิชาการที่รวมผู้เชี่ยวชาญ นักวิชาการและนักวิจัย ในด้านต่างๆ เช่น สารสนเทศ การเกษตร การจัดการและบริหารธุรกิจ วิศวกรรมศาสตร์ และวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มนุษย์ศาสตร์และสังคมศาสตร์

จัดขึ้นโดยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์จังหวัดชุมพร (สจล-ชุมพร) ร่วมกับเครือข่ายมหาวิทยาลัย และสมาคมวิชาชีพกว่า 15 สถาบัน ระหว่างวันที่ 8-9 พฤษภาคม 2569 ณ โรงแรมรอยัล ภูเก็ต ซิตี้ จังหวัดภูเก็ต โดยมีจุดประสงค์เพื่อเป็นเวทีแลกเปลี่ยนเรียนรู้ระหว่างนักวิชาการ นักวิจัย และบุคลากรทางการศึกษา รวมทั้งผู้เชี่ยวชาญในหลากหลายสาขาวิชา รวมทั้งแลกเปลี่ยนการเรียนรู้ อัปเดต ความก้าวหน้าและการพัฒนาในวงการวิชาการและวิจัยระหว่างกัน ทำให้เกิดการสร้างเครือข่ายและสามารถบูรณาการองค์ความรู้ต่างๆ ไปพัฒนา ชุมชน สังคม ประเทศชาติ ให้มีความเจริญก้าวหน้าต่อไป

ในนามของประธานคณะกรรมการจัดงานประชุมวิชาการ IAMBEST 2026 โดย สจล-ชุมพร ขอขอบคุณ คณะทำงานและผู้นำเสนองานทุกท่านที่เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้การจัดประชุมวิชาการครั้งนี้ ด้วยความสำเร็จเป็นที่ประจักษ์ ซึ่งการจัดประชุมวิชาการในครั้งนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนางานทางวิชาการและวิจัย และเกิดการ แลกเปลี่ยนในการสร้างนวัตกรรมและเทคโนโลยีใหม่ อันจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาประเทศต่อไป



(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริวรรณ ศรีสังข์)

รองอธิการบดี วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



IAMBEST
KMITL PRINCE OF CHUMPHON
8-9 MAY 2026



Dr. David L. Hyten Jr.
University of Nebraska-Lincoln (USA)

Keynote Speaker

Topic: Genomic Tools to Accelerate Soybean Improvement in an Era of Climate Volatility

Contents

สารจาการองอธิการบดี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	ก
Keynote	ข
สารบัญ	ค
กำหนดการประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติ ประจำปี 2569	ช
รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 11	ณ
การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 11	
ภาคบรรยาย	
กลุ่ม A : Agriculture (ด้านการเกษตร)	
OA-08 การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์รุกรานลำดับชั้นจากเปลือกทุเรียนโดยการปรับสภาพทางชีวภาพด้วยเชื้อรา	2
<i>ณัฐนันท์ คงทอง กนกพร บุญญะอดิชาติ กัญญาชลา กิรติรวี และ พรประพา คงตระกูล</i>	
OA-18 ผลของการฉีดพ่นโซเดียมซัลเฟตและระยะเวลาการเก็บเกี่ยวผลผลิตต่อสารทุติยภูมิและการสะสมซัลเฟตในเมือกผักปลัง	12
<i>ณัฐพร วันสา พรไพรินทร์ รุ่งเจริญทอง สุนทรี แสงจันทร์ และ ศุภชัย อำคา</i>	
กลุ่ม E : Engineering (ด้านวิศวกรรมศาสตร์)	
OE-23 ผลของการบ่มแข็งเทียมต่อสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสม AA2055	19
<i>อรณิชา ธีระเกียรติ และ ปฏิภาณ จัยเจิม</i>	
OE-25 การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานไม้ปาเลทในอุตสาหกรรมขนส่งอย่างยั่งยืน	25
<i>พุทธิพงศ์ เลชะชัยวรกุล เซาว์นวัศ อรรถานันท์ วิศนีย์ ยิ่งประเสริฐ ธีรเชษฐ์ แผงธีระสุขมัย สุตารัตน์ ดวงประทุม ครุชนาถ ศิราไกรสร และ ณัฐวรพล รัชสิริวัชรบุล</i>	
OE-79 ปัจจัยที่มีผลต่อการซื้อรถไฟฟ้าของพนักงานรัฐวิสาหกิจการประปาส่วนภูมิภาค	32
<i>โชติรส แก้วจาเครือ เอกชัย ศิริกิจพาณิชย์กุล และ สโรช บุญศิริพันธ์</i>	
OE-81 การศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการออกแบบรูปแบบการจัดวางสินค้ากรณีศึกษาลังสินค้าบริษัทผลิตเครื่องใช้ไฟฟ้า	43
<i>สุภาภรณ์ สุวรรณรังษี และ ชารอน หนานเด</i>	
OE-85 เทคนิคการวัดแรงปฏิกิริยาขณะดึงรองเท้าบูทออกจากดินชื้นด้วยทรานสดิวเซอร์แบบวงแหวนแปดเหลี่ยม	54
<i>ธานินทร์ สีหามาตร ไชยรัตน์ เพชรศิริ ดิษฐพร ตุงโสธานนท์ และ ชมพูนุช กุลเกตุวงศ์</i>	
OE-94 การศึกษาเชิงตัวเลขเกี่ยวกับสมรรถนะทางความร้อนของระบบระบายความร้อนแบบช่องขนาดเล็กหลายชั้นสำหรับแบตเตอรี่ทรงกระบอก	62
<i>อรรถพันธ์ มังสา นภัสสร บุญรอด และ ศกรินทร์ ชินกุลพิทักษ์</i>	
OE-105 อิทธิพลของหน้าตัดไม้ต่อสมรรถนะของแบบจำลองสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้สำหรับการทำนายความชื้นของไม้ยางพารา	72
<i>นันทนัช ประดิษฐ์ วรธรรม์ นกน้อย พชรพร เชียงเงิน และ สิรินาฏ น้อยพิทักษ์</i>	
OE-106 การทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดในสับปะรดฤดูแลดัดด้วยเทคนิคภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัลอินฟราเรดย่านใกล้	81
<i>ทักษพร จันทรปิ่น ทดลักษ์ณ์ จงสร้อย ปณชิตา แยมเปลี่ยน และ สิรินาฏ น้อยพิทักษ์</i>	
OE-107 การทำนายค่าความแน่นเนื้อของผลกล้วยน้ำว้าแบบไม่ทำลายด้วยเทคนิคภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัลอินฟราเรดย่านใกล้	91
<i>พชรพร เชียงเงิน ศิริพัฒ ศรีเจริญ นันทนัช ประดิษฐ์ และ สิรินาฏ น้อยพิทักษ์</i>	

Contents National Conference

กลุ่ม E : Engineering (ด้านวิศวกรรมศาสตร์)

- OE-109 การประเมินสหสัมพันธ์สำหรับสัดส่วนช่องว่างของการไหลแบบสองเฟสในช่องทางการไหล
ขนาดไมโคร 102
มณฑนา กันทาฝัน ศักรินทร์ ชินกุลพิทักษ์ และ ศิระ สายศร
- OE-119 การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแม่เหล็กถาวรด้วยเทคนิค
การมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบยูนิโพล่า 112
ตะวัน บุญช่วย พงศธร กลิ่นมะลิ ณัฐกานต์ ชนาชน และ นิคม ก้านจักร

กลุ่ม S : Sciences (ด้านวิทยาศาสตร์)

- OS-05 การประเมินคุณภาพน้ำและการวิเคราะห์เมตาจีโนมเพื่อจำแนกลักษณะชุมชนจุลินทรีย์
ในน้ำพุร้อน จังหวัดกาญจนบุรี ประเทศไทย 121
ศิรดา อินทราฉัตรจามร ชนินาท เตชะวิทย์ปกรณ์ และ ชมภูษ กสิมวงษ์
- OS-06 การเตรียมถ่านชีวภาพพुरुณลำดับชั้นจากเปลือกฝักโกโก้โดยการปรับสภาพด้วยเชื้อรา
Colletotrichum sp. 129
สโรชา นิลสถิตย์ กัญญาชลา กิรติรวี กนกพร บุญญะอดิชาติ และ พรประพา คงตระกูล
- OS-26 ผลของสารให้ความหวานและสารก่อเจลจากพืชต่อคุณสมบัติทางเนื้อสัมผัสและประสาทสัมผัส
ของผลิตภัณฑ์กัมมีมะม่วงมหาชนก 137
ชามาวีร์ จันทร์ท้วม และ ภาริกา รุ่งพิชยพิเชฐ
- OS-31 การคัดเลือกและพัฒนากระบวนการผลิตมัยคอโปรตีนจากรา *Aspergillus oryzae*
เพื่อการประยุกต์ใช้ระดับอุตสาหกรรม 147
วรารัตน์ ศรีประพัฒน์ ภรณ์ สว่างศรี นัยเนตร เจริญสันติ ทานากะ และ รังสิมันต์ อีระวงศ์ภิญโญ
- OS-38 การปกคลุมและความชุ่มชื้นของอิพีไบโอตาบนหญ้าทะเลในบริเวณทะเลอันดามันตอนบน
ประเทศไทย 157
*ปาไลดา อาทลี พลชาติ โชติการ ณัฐริดา ธรรมกิริติ ปฐมพงศ์ พรามณโชติ รัตนภรณ์ แซงซิม ธัญญภัทร ชำนินา
มุฮัมหมัด ทิมบุ และ สุธินี สินธก*
- OS-97 การพัฒนากระบวนการสกัดเส้นใยอาหารเฮมิเซลลูโลสจากเศษเหลือตรีผลา การพิสูจน์เอกลักษณ์
ทางเคมีกายภาพเพื่อการประยุกต์ใช้เป็นพรีไบโอติก 163
*กมลชนก ผาดจันทิก สมชาย หลวงสนาม สุกัญญา มิ่งใหญ่ พิมพ์กา กาญจนคำเกิง อาณัฐชัย มัยอุเทศ
และ ภัทรวิทย์ รัชชทอง*

กลุ่ม T : Technology (ด้านเทคโนโลยี)

- OT-07 ผลของการปรับสภาพทางชีวภาพด้วยเชื้อรา *Colletotrichum sp.* ต่อการเกิดรูพรุน
ลำดับชั้นในถ่านกัมมันต์จากเปลือกผลอะโวคาโด 172
จุฑารัตน์ เกิดกัน1 กัญญาชลา กิรติรวี กนกพร บุญญะอดิชาติ และ พรประพา คงตระกูล
- OT-28 ระบบตู้ปลาอัจฉริยะสำหรับติดตามและควบคุมสภาพแวดล้อมแบบเรียลไทม์ 181
ณัฐวุฒิ จุลเสวก ญาณพัฒน์ ศิริโสทร และ อรรถพล บิลโลย์
- OT-55 เว็บไซต์พลิเคชันช่วยเหลือการทดสอบแอปพลิเคชันภายในองค์กร 187
*ชโยดม เปี่ยมไทย สุกัญญา วรณชชา Kaushik Bhatt ฮุสนา ชำสุติน ชาคริต สุขมหา Htoo Aein Lwin
พุทธิพงศ์ กุศลทิพย์เจริญ Phone Naing Kha ศิลา ศิริมาสกุล และ รัตติกร สมบัติแก้ว*
- OT-70 การพยากรณ์เสถียรภาพทางการเงินแบบหลายกลุ่มของบริษัทจดทะเบียนโดยใช้การเรียนรู้
ของเครื่อง กรณีศึกษาตลาดหลักทรัพย์แห่งประเทศไทย 195
เปรมารัช วิลาลัย และ สุภัคพงศ์ จินารัตน์
- OT-87 เว็บไซต์สำหรับติดตามและจัดการงานของหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติ 205
กรรณก สัทธาพงษ์ และ รัตติกร สมบัติแก้ว

Contents National Conference

กลุ่ม T : Technology (ด้านเทคโนโลยี)

OT-89	การพัฒนาระบบตรวจจับชิ้นงานให้รองรับการตั้งค่าพารามิเตอร์ในกระบวนการผลิต <i>อินทรีรา เรื่องชาติรี และ รัตติกร สมบัติแก้ว</i>	215
OT-113	ระบบการจัดการช่วยเหลือผู้ประสบภัยน้ำท่วมด้วยเทคนิค RAG และการรู้จำเสียงพูด <i>ชิน ชินินทกุล ปวเรศ แอนโทนี ปราณีประชาชน โสชญา สุนทรชัย และ อัญชิษา สายทอง</i>	223

ภาคโปสเตอร์

กลุ่ม A : Agriculture (ด้านเกษตร)

PA-72	การเปรียบเทียบคุณภาพทุเรียนหมอนทองที่ผลิตในฤดูกลางและนอกฤดูกลางในจังหวัดชุมพร <i>อัญชิษา รุ่งงาม พรรณีภา ย้วยล สุริย์ณห์ สุภาพวานิช อัญจนา จันทร์ประทิว อาชญา และ โอภาส สืบสาย</i>	233
PA-93	ผลของสเปกตรัมแสงแอลอีดีต่อการเจริญเติบโตและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ของสละระแห่น ภายใต้ระบบควบคุมสภาพแวดล้อม <i>ภาณุภัทร โยธี และ ทศรัตน์ โชคทวีพาณิชย์</i>	241
PA-103	ผลของการเสริมหนอนนก (<i>Tenebrio molitor</i>) และหนอนแมลงวันลาย (<i>Hermetia illucens</i>) ในอาหารต่อการเจริญเติบโต ประสิทธิภาพการใช้อาหาร และอัตราการรอดตายของปลาชะโอน (<i>Ompok bimaculatus</i>) <i>ณัฐพร สังขระเขต ธนภัทร สอนตะโก ภูวดล หมิ่นวงศ์ นันทน์ภัส สุวรรณรัตน์ และ ธนากร เหมะสถล</i>	252
PA-127	การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของกิจกรรมสวนป่าสัก: กรณีศึกษาสวนป่าแม่เกาะ จังหวัดลำปาง <i>ณลินี อินทิม นพรัตน์ ศักดิ์ศิริวาระ และ วิรงรอง ดวงใจ</i>	261

กลุ่ม E : Engineering (ด้านวิศวกรรมศาสตร์)

PE-19	อิทธิพลของปริมาณธาตุทองแดงต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของอะลูมิเนียมเจือเกรด 1100 ใน กระบวนการหล่อขึ้นรูป <i>สุนิสา คำสุข พัทธญาภา สุทธิสถิต และ กัญญารัตน์ ศรีเมือง</i>	217
PE-84	การประยุกต์ใช้การถ่ายภาพเสียงในการจัดการลมรั่วเพื่อลดการใช้พลังงานและต้นทุน ในภาคอุตสาหกรรม <i>นพรัตน์ โสตสง พิเศษ แก้วกระจ่าง และ ดิษฐพร ตุงโสธานนท์</i>	279
PE-101	การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของเมล็ดกาแฟโรบัสต้าระหว่างการคั่วด้วยระบบลมร้อน แบบฟลูอิดไคซ์เบด <i>พฤตินัย บัวเขียว ณัฐพงษ์ รัตนเดช รัฐพงษ์ สุวลักษณ์ กิตติศักดิ์ เพ็ชรพันธ์ อรรพรรณ หนูอิม อภิลักษณ์ เอียดเอื้อ รณชาติ มั่นศิลป์ และ ทรงธรรม ไชยพงษ์</i>	285
PE-142	การพัฒนาโปรแกรม LabVIEW เพื่อการเลือกขนาดมอเตอร์และแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า <i>ธนากร ทองสง มานพ มาสมทบ บุรินทร์ เกิดทรัพย์ และ วรชัชล วัฒนะ</i>	294
PE-146	การศึกษาระยะการป้อนของกระบวนการปรับปรุงทรงโลหะเพื่อลดของเสียจากวัตถุดิบ และต้นทุนการผลิต <i>ณรงค์ฤทธิ์ จันทะเกษ อรชุน บุญโต ปัญญา แดงวิไลลักษณ์ และ วิสิทธิ์ เอกวานิช</i>	305
PE-147	การปรับปรุงคุณภาพการประกอบชิ้นส่วนแบตเตอรี่ด้วยระบบป้องกันความผิดพลาด <i>จิรพัฒน์ คงทอง ณัฐดนัย อ่วมเกตุ วชร กาลาสี และ วิสิทธิ์ เอกวานิช</i>	313

Contents National Conference

กลุ่ม S : Sciences (ด้านวิทยาศาสตร์)

PS-35	การศึกษาการตกผลึกของเนยโกโก้ร่วมกับไขมันที่อุดมด้วยไตรกลีเซอไรด์ชนิด sn-1,3-ไดสเตียโรอิล-2-โอเลอยล์-กลีเซอรอล <i>ดาวอำพรรณ คงมีผล Chaeyeon Lee Kim In-Hwan และ โสภาค สอนไว</i>	321
PS-53	ความคงตัวระหว่างการเก็บรักษาของเมล็ดโกโก้อบแห้งบรรจุภายใต้สภาวะสุญญากาศ: การเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางเคมี สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และจุลชีววิทยา <i>จุฑาภรณ์ ลิ้มสุวรรณมณี จันทิรา วงศ์วิเชียร และ จตุพร คงทอง</i>	329
PS-73	การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และจุลินทรีย์ของไบโหม่อนและผักโขมจีน เพื่อพัฒนาสูตรผงปรุงรส <i>นารี พันธุ์จินดาวรรณ และ กมลวรรณ ชูชีพ</i>	340
PS-91	การคัดแยก การจัดจำแนก และคัดเลือกจุลินทรีย์ที่มีศักยภาพสำหรับการหมักโกโก้ <i>อานันท์นิตย์ คุ่ยยกสุย มณฑกานต์ ทองสม สิริกุล เพชรพล และ วิไลวรรณ ไชยศรี</i>	348
PS-99	การประยุกต์ใช้โปรตีน Phagocytosis Activating Protein (PAP) ร่วมกับ Inactivated <i>Vibrio harveyi</i> (IVH) เพื่อกระตุ้นภูมิคุ้มกันต่อโรคในกุ้งขาว (<i>Litopenaeus vannamei</i>) <i>ปัญชลิกา เดชะมา</i>	357

กลุ่ม T : Technology (ด้านเทคโนโลยี)

PT-09	การพัฒนาแบบจำลองเชิงประจักษ์ที่หลากหลายสำหรับการทำนายความชื้นของข้าวเปลือก ระหว่างการอบแห้งด้วยอากาศร้อนชื้น <i>นิตยา จันทกา และ ชัยวัฒน์ รัตนมีชัยสกุล</i>	367
PT-98	การปรับสภาพทางชีวภาพผักตบชวาด้วยเอนไซม์ที่สกัดจากก้อนเชื้อเห็ดแก่ เพื่อเพิ่มผลผลิตแก๊สชีวภาพ <i>วชิรญาณ ทัศนภูไพรี และ ประไพพิศ ชัยรัตนโมกร</i>	372

กำหนดการประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติ ประจำปี 2569

Program IAMBEST2026: Oral Presentation

Day 1: Registration Day		Fri 8 May 2026	
15:30-17:00	Registration and installation of poster and soft file presentation (ppt or pdf format)		
16:00-18:30	Organizing committee and session chair meeting		
Day 2: Opening Day		Sat 9 May 2026	
Sessions		National Session	
	(2) Sci. and Agri.	(1) Management and B.A.	(3) Tech.
Chairperson	K. Eawsakul P. Nittayacharn	A. Jansuri R. Taweephol	C. Rattanamechaikul S. Ketkaew
Room	Hay Room	Nakha Room	Bon Room
08:30-10:30	S52, S54, S61, S68, S78, A41, A42, A83	MB21, MB27, MB37, MB96, MB117, MB143	IS01, T7, T28, T55, T87, T89, T113, T70
10:30-10:50	Coffee Break		
10:50-11:10	Opening Ceremony (Ballroom2)		
11:10-12:00	Keynote: Genomic Tools to Accelerate Soybean Improvement in an Era of Climate Volatility, Dr. David L. Hyten Jr. University of Nebraska-Lincoln (USA)		
12:00-13:00	Lunch Break (Ballroom1)		
	(3) Soc. Sci. & Humanities	(4) Info., Eng. and Tech.	(5) Soc. Sci. & Humanities
Chairperson	N. Chanthap R. T. Palayon	S. Saisorn W. Duanthongsuk	M. Subongkod R. Dangwilailux
Room	Hay Room	Raya Room	Maithon Room
13:00-15:30	S54, SS13, SS56, SS80, SS111, SS112	I95, T20, T64, E10, E24, E29, E39, E63, E69	SS34, SS36, SS128, SS129, SS130, SS131, SS132, SS134
15:30-15:45	Coffee Break		
	(3) Soc. Sci. & Humanities	(5) Eng.	(9) Eng.
Chairperson	N. Chanthap R. T. Palayon	S. Chuayboon N. Srisang	W. Srithaworn B. Buddhakerd
Room	Hay Room	Raya Room	Maithon Room
15:45-18:00	SS118, SS120, SS125, SS126	E65, E66, E77, E82, E88, E100, E133	MB135, MB32, MB67, MB74, MB104, MB138, MB92, MB150, MB151
18:30-21:00	Banquet & Awarding (Ballroom1)		

Note: Each oral presentation is allocated for 15 min.

กำหนดการประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติ ประจำปี 2569

Program IAMBEST2026: Poster Presentation

Day 1: Registration Day		Fri 8 May 2026	
15:30-17:00	Registration and installation of poster and soft file presentation (ppt or pdf format)		
16:00-18:30	Organizing committee and session chair meeting		
Day 2: Opening Day		Sat 9 May 2026	
10:30-10:50	Coffee Break		
10:50-11:10	Opening Ceremony (Ballroom2)		
11:10-12:00	Keynote: Genomic Tools to Accelerate Soybean Improvement in an Era of Climate Volatility, Dr. David L. Hyten Jr. University of Nebraska-Lincoln (USA)		
12:00-13:00	Lunch Break (Ballroom1)		
International Session		National Session	
(1) Agri.		(4) Sci. and Agri.	
(2) Sci.		(5) Soc. Sci. & Humanities	
Sessions			
Chairperson	P. Phansak N. Suwannarat	K. Bunya-atchart P. Narkthewan	M. Subongkod R. Dangwilailux
Room	Foyer	Foyer	Foyer
14:00-15:30	A14, A71, A76, A86, A123	T9, T98, E19, E84, E101, E142, E146, E147	S35, S53, S73, S91, S99, A72, A93, A103, A127
15:30-15:45			
18:30-21:00			
Coffee Break		Coffee Break	
Banquet & Awarding (Ballroom1)		Banquet & Awarding (Ballroom1)	

Note: Each poster presentation is allocated for 10 min.

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 11

1. รศ.ดร.มนต์สรวง ยางทอง	นักวิชาการอิสระ
2. ดร.กฤษฎา นิมพลวัฒน์	นักวิชาการอิสระ
3. ดร.พรณรัตน์ อารณพิศาล	นักวิชาการอิสระ
4. ดร.สรารุช แซ่ตั้ง	นักวิชาการอิสระ
5. อ.ฉัฐภาพร พีระเดชมณตรี	นักวิชาการอิสระ
6. ผศ.ดร.กมล บุษบรรณ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
7. ดร.สตีธร ธนานิธิโชติ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
8. ดร.ทงศักดิ์ แข่งขัน	บริษัท สหวิริยาสตีลอินดัสทรี จำกัด (มหาชน)
9. อ.นรุตม์ชัย สมใจ	มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
10. รศ.ดร.สุพัตรา กาญจนประทุม	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
11. รศ.ดร.เพ็ญญารัตน์ สายศิริรัตน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
12. ผศ.ดร.ธนาภณ เจียรณีย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
13. ผศ.ดร.ธีรารุณี ภูสันติสัมพันธ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
14. รศ.ดร.นิลาวัลย์ สว่างรัตน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตระยอง
15. ผศ.ดร.ฐิติรัตน์ ถาวรสุจริตกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตระยอง
16. ดร.ธิดิ ทองคำงาม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
17. อ.อนิรุทธิ์ เจริญสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก เขตพื้นที่จ้กรพงษภูวนาร
18. ผศ.ดร.สินิทธา สุขสวัสดิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
19. ผศ.ดร.ก๊าวหน้า จงวัฒนารักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
20. ดร.พุทธิพงษ์ เลชะชัยวรกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
21. ศ.ดร.วรรณณี จันทร์แก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
22. ผศ.ดร.อุมาพร ชิมมากทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตนครศรีธรรมราช
23. ดร.อภิรักษ์ เสือเดช	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตสงขลา
24. ผศ.ดร.ธนาภิญญา อัดตฤทธิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
25. ผศ.ดร.ลัดดาวัลย์ คำมะปะนา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์
26. รศ.ดร.เทวรัตน์ ตรีอำรรค	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
27. ผศ.ดร.ภระวี ตรีอำรรค	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
28. ดร.ธนาการ เป้าทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
29. ผศ.ดร.พรชัย หาระโคตร	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
30. ดร.พิพัฒน์ จันทร์ประดิษฐ์	มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์
31. ผศ.ชาญณวุฒ ไชยรักษา	มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
32. ผศ.ดร.พลวัต ช่อผูก	มหาวิทยาลัยบูรพา
33. ผศ.นฤมล อริยพิมพ์	มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ
34. ดร.ชินทร ศรีวิฑูรย์	มหาวิทยาลัยแม่โจ้-ชุมพร
35. ผศ.ดร.พาริส หงษ์สกุล	มหาวิทยาลัยรังสิต
36. ผศ.ดร.ภัทรณ์ชชา โชติคุณากิตติ	มหาวิทยาลัยรังสิต
37. ผศ.พิมลวรรณ ตรีพัฒนสิทธิ์	มหาวิทยาลัยรังสิต
38. ผศ.วัฒนา ศรีถาวร	มหาวิทยาลัยรังสิต
39. รศ.ดร.นิตยา จันกา	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
40. ผศ.ดร.พงษ์สันต์ ตันหยง	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
41. ดร.ชนพงษ์ อารณพิศาล	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

42. ผศ.ดร.นภัสพร นิชะวานนท์	มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา
43. ผศ.ดร.วรลักษณ์ เขียวมีส่วน	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
44. ผศ.วรชัย ศรีสมุดคำ	มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์
45. ผศ.ดร.ไอลัดดา โองกลาง	มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
46. รศ.ดร.ไสว บัวแก้ว	มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
47. ผศ.ดร.จาดุรนต์ ทิพย์วงศ์	มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี
48. ผศ.ณัชชารีย์ ทวีธีรรัฐกิจ	มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี
49. ดร.ชนิษฐา พัฒนสิงห์	มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี
50. ดร.สารภี ชนะทัฬ	มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี
51. รศ.ดร.ภาคภูมิ ศรีรมรื่น	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
52. ผศ.ดร.คมกริช นันทะโรจงศ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
53. ผศ.ดร.สมมาส แก้วล้วน	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
54. ผศ.ดร. อภิญา อิงอาจ	มหาวิทยาลัยศิลปากร
55. รศ.ดร.จุฑารัตน์ เอี้ยวกฤตยากร	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
56. รศ.ดร.ภาสกร เวสสะโกศล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
57. ดร.เจตติกล ฐิติอัชฌาย์	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี
58. ผศ. (พิเศษ) ดร.ปรีชา ตั้งสุขชัยศิริ	วิทยาลัยพัฒนศึกษาบึงพระพิษณุโลก
59. รศ.ดร.ชัยรัตน์ เตชะวุฒิพร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
60. รศ.ดร.ช่อแก้ว อนิลบล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
61. รศ.ดร.สันติ ต้นตระกูล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
62. ผศ.ดร.สิริมา สินธุสาราญ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
63. ดร.จิราพร อ่อนมันคง	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
64. ดร.ธนากร ทั้งเรื่อง	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
65. รศ. ว่าที่ร้อยตรี ดร.กิตติศักดิ์ เพ็ชรพันธ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
66. รศ.ดร.ชัยวัฒน์ รัตนมีชัยสกุล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
67. รศ.ดร.โซชน ศรีเกตุ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
68. รศ.ดร.นฤปดี ศรีสังข์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
69. รศ.ดร.นารัตระพี นาคะวัจนะ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
70. รศ.ดร.ปัญญา แดงวิไลลักษณ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
71. รศ.ดร.บุญยวีร์ จามจรีกุลกาญจน์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
72. รศ.ดร.พรประพา คงตระกูล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
73. รศ.ดร.พรรณิภา ยั่วยล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
74. รศ.ดร.เพชรารณ ชัชวาลชาญชนกิจ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์

75. รศ.ดร.ศรีรัตน์ ช่วยบุญ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
76. รศ.วชร กาลาสี	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
77. ผศ.ดร.กนกพร บุญญะอดิชาติ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
78. ผศ.ดร.ชนัดดา ภาวโสทร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
79. ผศ.ดร.ชมพูนุช กุลเกตุวงศ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
80. ผศ.ดร.ชุตินันต์ บุญนวล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
81. ผศ.ดร.ณัฐพงศ์ รัตนเดช	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
82. ผศ.ดร.ดวงใจ พิสุทธิธาราชัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
83. ผศ.ดร.ดิษฐพร ตุงโสธานนท์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
84. ผศ.ดร.ธนรรชมลวรรณ พลมัน	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
85. ผศ.ดร.พัชราภรณ์ นาคเทวัญ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
86. ผศ.ดร.ไพบุลย์ โพธิ์หวั่งประสิทธิ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
87. ผศ.ดร.มนตรี ไชยชาญยุทธ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
88. ผศ.ดร.มัลลิกา สูงกภู	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
89. ผศ.ดร.วลัยพร ทองประดับ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
90. ผศ.ดร.วารุณี ลิ่มมัน	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
91. ผศ.ดร.วิสิทธิ์ เอกวานิช	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
92. ผศ.ดร.อดิเรก สุริยะวงศ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
93. ผศ.ดร.อัญญา จันทร์ปะทิว อาฮูจา	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
94. ผศ.ดร.อุษณีย์ เสวกวัชร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
95. ผศ.วรพงษ์ นลินานนท์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์

96. ผศ.วราภรณ์ วัฒนะ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
97. ผศ.วัชรระ ศิลป์แสวตรี	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
98. ดร.กมลวรรณ ชูชีพ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
99. ดร.กัญญาชลา กীরติรวี	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
100. ดร.กิตติ แก้วเขียว	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
101. ดร.ฐาปกรณ์ สากลปัญญา	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
102. ดร.ปิวิงษา พุทธเกิด	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
103. ดร.ปัญญา ปิติไกรสร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
104. ดร.รัชนิวรรณ แดงวิไลลักษณ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
105. ดร.ศักรินทร์ ชินกุลพิทักษ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
106. ดร.ศิวกร ศอกจะบก	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
107. ดร.สุภาพร ชุมเพ็ญ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
108. ดร.อธิป จันทร์สุริย์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
109. อ.จุมพล กุลยวน	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
110. อ.ธัญญ์ หุตากร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
111. อ.นภสรพี สิทธิวัจน์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์

ภาคบรรยาย

การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์รูพรุนลำดับชั้นจากเปลือกทุเรียนโดยการปรับสภาพทางชีวภาพด้วยเชื้อรา
Phytophthora palmivora
 Synthesis of Hierarchical Porous Activated Carbon from Durian Peel via Biological
 Pretreatment with *Phytophthora palmivora*

ณัฐนันท์ คงทอง¹ กนกพร บุญยะอติชาติ¹ กัญญชลา กิรติรวี² และ พรประพา คงตระกูล^{1,*}
 Nattanun Kongthong¹, Kanokpon Bunyaatichart¹, Kanchalar Keeratirawee² and Pornprapa Kongtragoul^{1,*}

¹ภาควิชาเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร 86160 ประเทศไทย

²ภาควิชาวิทยาศาสตร์พื้นฐานทั่วไป สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร 86160 ประเทศไทย

¹Department of Agricultural Technology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Prince of Chumphon Campus, Chumphon Province, 86160, Thailand

²Department of General Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Prince of Chumphon Campus, Chumphon Province, 86160, Thailand

*Corresponding author: Pornprapa Kongtragoul, e-mail address: pornprapa.ko@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

เปลือกผลทุเรียนเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีปริมาณมากและมีศักยภาพสูงในการแปรรูปเป็นวัสดุคาร์บอนที่มีมูลค่าเพิ่ม งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์รูพรุนลำดับชั้นจากเปลือกทุเรียน โดยการปรับสภาพทางชีวภาพด้วยราเทียม (oomycete) *Phytophthora palmivora* เป็นเวลา 21 วัน ที่อุณหภูมิห้อง ตามด้วยกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่ 800 °C ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectroscopy บ่งชี้ว่าเปลือกผลทุเรียนที่ผ่านการปรับสภาพทางชีวภาพด้วย *P. palmivora* มีการย่อยสลายโครงสร้างลิกโนเซลลูโลสบางส่วน และแสดงให้เห็นถึงปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวเพิ่มขึ้น การวิเคราะห์ด้วย Raman spectroscopy พบค่าอัตราส่วนความเข้ม (I_D/I_G) มากกว่า 1 บ่งชี้ถึงโครงสร้างคาร์บอนที่มีความไม่เป็นระเบียบสูง การวิเคราะห์ด้วย X-ray Diffraction (XRD) ยืนยันการเกิดคาร์บอนที่มีความไม่เป็นระเบียบสูง โดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเหล่านี้สัมพันธ์กับความแตกต่างของค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนรวม นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ด้วย Brunauer-Emmett-Teller (BET) พบว่าสัดส่วนของรูพรุนขนาดกลาง (mesopores) ในช่วง 20 ถึง 50 nm เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ผ่านการปรับสภาพทางชีวภาพ การวิเคราะห์ด้วย Scanning Electron Microscopy (SEM) แสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพทางชีวภาพด้วย *P. palmivora* ช่วยเพิ่มความพรุนในถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียน แนวทางนี้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและยั่งยืนสำหรับการเพิ่มมูลค่าวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร โดยมีศักยภาพในการพัฒนาต่อยอดเป็นถ่านกัมมันต์รูพรุนลำดับชั้นที่มีคุณสมบัติของวัสดุสามารถประยุกต์ใช้ในหลากหลายด้าน เช่น การดูดซับเอทิลีนและการปรับปรุงดิน

คำสำคัญ: เปลือกทุเรียน, การกระตุ้นทางชีวภาพ, โครงสร้างรูพรุนระดับชั้น, ถ่านกัมมันต์, เชื้อราก่อโรค

Abstract

Durian peel is an abundant agricultural residue with high potential for conversion into value-added carbon materials. This study aimed to synthesize hierarchical porous carbon from durian peel via biological pretreatment using the oomycete *Phytophthora palmivora* for 21 days at room temperature, followed by carbonization at 800 °C. The results from Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectroscopy indicated that durian peel after biological pretreatment with *P. palmivora* underwent partial degradation of lignocellulosic structures and showed an increased presence of oxygen-containing functional groups on the surface. Raman spectroscopy analysis revealed an intensity ratio (I_D/I_G) greater than 1, indicating a highly disordered carbon structure. X-ray diffraction (XRD) analysis confirmed the formation of amorphous carbon. These structural changes were associated with differences in specific surface area and total pore volume. Furthermore, Brunauer-Emmett-Teller (BET) analysis showed an increased proportion of mesopores in the range of 20 to 50 nm compared to the sample without biological pretreatment. Scanning Electron Microscopy (SEM) analysis demonstrated that biological pretreatment with *P. palmivora* enhanced porosity in durian peel residues. This approach offers an environmentally friendly and sustainable pathway for valorizing agricultural waste, with potential for further development into hierarchical porous activated carbon. The material properties can be tailored for various applications, such as ethylene adsorption and soil improvement.

Keywords: Durian peel, Biological pretreatment, Hierarchical porosity, Activated carbon, phytopathogenic fungi

1. บทนำ

ทุเรียนเป็นผลไม้เศรษฐกิจที่มีความสำคัญอย่างยิ่งของประเทศไทย โดยในปี พ.ศ. 2567 มีพื้นที่ปลูกมากกว่า 1.7 ล้านไร่ และให้ผลผลิตรวมมากกว่า 1.2 ล้านตัน [1] อย่างไรก็ตาม การบริโภคและการแปรรูปทุเรียนก่อให้เกิดเปลือกทุเรียนเหลือทิ้งในปริมาณสูง คิดเป็นร้อยละ 75-80 ของน้ำหนักผลทั้งหมด [2, 3] ส่งผลให้เกิดปัญหาขยะอินทรีย์จำนวนมากที่ย่อยสลายและกำจัดได้ยาก นอกจากนี้ ลักษณะทางกายภาพของเปลือกทุเรียนที่มีหนามแหลมคมยังเพิ่มความเสี่ยงต่อการบาดเจ็บในกระบวนการขนย้ายและกำจัด [4] ดังนั้น การจัดการเปลือกทุเรียนอย่างยั่งยืนควบคู่กับการเพิ่มมูลค่าวัสดุเหลือทิ้งจึงเป็นประเด็นที่มีความสำคัญทั้งในเชิงสิ่งแวดล้อมและเศรษฐกิจ การแปรสภาพเปลือกทุเรียนให้เป็นวัสดุคาร์บอนถือเป็นแนวทางที่มีศักยภาพ [5] เนื่องจากเปลือกทุเรียนมีคาร์บอนสูงและประกอบด้วยชีวโพลีเมอร์หลัก ได้แก่ ลิกนิน (lignin) และเซลลูโลส (cellulose) [2, 6] ลิกนินมีส่วนช่วยให้ได้ผลผลิตคาร์บอน (carbon yield) สูง ขณะที่เซลลูโลสเอื้อต่อการก่อตัวของโครงสร้างรูพรุนระหว่างกระบวนการคาร์บอนในเซชัน [7] โดยทั่วไป การผลิตถ่านกัมมันต์ (activated carbon) มักอาศัยการกระตุ้นด้วยสารเคมี เช่น KOH หรือ ZnCl₂ เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะ [8] อย่างไรก็ตาม แนวโน้มในปัจจุบันให้ความสำคัญกับการพัฒนาโครงสร้าง “รูพรุนลำดับชั้น (hierarchical porosity)” ซึ่งประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็ก (micropores) ขนาดกลาง (mesopores) และขนาดใหญ่ (macropores) ร่วมกัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแพร่ การถ่ายเทมวล และการเข้าถึงตำแหน่งดูดซับของโมเลกุลเป้าหมาย [9]

แนวทางหนึ่งที่น่าสนใจคือการปรับสภาพทางชีวภาพ (biological pretreatment) โดยใช้จุลินทรีย์ย่อยสลายโครงสร้างลิกโนเซลลูโลสก่อนการเผา เพื่อลดการใช้สารเคมีและส่งเสริมการเกิดโครงสร้างรูพรุน งานวิจัยก่อนหน้ารายงานว่าการใช้จุลินทรีย์ย่อยสลายชีวมวลสามารถช่วยสร้างวัสดุคาร์บอนที่มีสมบัติการดูดซับดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ [9] ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เชื้อรา *P. palmivora* ซึ่งเป็นเชื้อสาเหตุโรคผลเน่าในทุเรียนมาใช้ประโยชน์ในทางกลับกัน เนื่องจากมีชุดเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายองค์ประกอบผนังเซลล์พืช เช่น เซลลูโลส เอมีเซลลูโลส และเพกติน รวมถึงเอนไซม์ในกลุ่ม carbohydrate-active enzymes (CAZymes) [10] การปรับสภาพเปลือกทุเรียนด้วยเชื้อราก่อนคาร์บอนในเซชันคาดว่าจะทำให้โครงสร้างภายในเกิดการคลายตัวและเกิดช่องว่างมากขึ้น ซึ่งอาจเอื้อต่อการก่อตัวของรูพรุนหลายระดับในถ่านกัมมันต์ได้ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแนวทางการผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีโครงสร้างรูพรุนลำดับชั้นจากเปลือกทุเรียน โดยใช้กระบวนการปรับสภาพทางชีวภาพด้วยเชื้อรา *P. palmivora* เพื่อสร้างวัสดุดูดซับที่มีศักยภาพ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งในกระบวนการทำถ่านกัมมันต์ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 800°C ทำให้เชื้อรา *P. palmivora* ถูกทำลายอย่างสมบูรณ์ ไม่สามารถมีชีวิตรอดหรือก่อโรคได้ ดังนั้นวัสดุที่ได้จึงไม่มีเชื้อราที่มีชีวิตหลงเหลืออยู่ก่อนนำไปใช้งาน และสามารถต่อยอดสู่การประยุกต์ใช้งานด้านการดูดซับ เช่น การดูดซับก๊าซเอทิลีนเพื่อชะลอการสุกของผลไม้ได้อย่างปลอดภัยในอนาคต [11] การปรับปรุงดินช่วยปรับสภาพดินให้ร่วนซุย ช่วยลดการปนเปื้อนในดิน [12] และมีรายงานการเติมผงถ่านกัมมันต์ลงในอาหารเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อเพื่อช่วยในการพัฒนาของต้นกล้า [13]

2. วิธีการศึกษา

2.1 การเตรียมและแยกเชื้อรา *P. palmivora*

นำตัวอย่างโรคจากผลทุเรียนมาแยกเชื้อบริสุทธิ์ โดยวิธีเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ (Tissue transplanting) ตัดบริเวณรอยต่อเนื้อเยื่อที่เป็นโรคกับเนื้อเยื่อปกติ เป็นชิ้นส่วนขนาด 5x5 mm วางบนอาหาร water agar (WA) ตัดขอบโคโลนีของเส้นใยเชื้อที่เจริญออกจากชิ้นตัวอย่าง เพาะเชื้อในอุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24-36 ชั่วโมง ตัดขอบโคโลนีของเส้นใยเชื้อที่เจริญออกจากชิ้นเชื้อทำให้เป็นเชื้อบริสุทธิ์ ด้วยวิธี single sporangium isolation ใช้ cork borer ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 cm ตัดชิ้นเชื้อใส่ในน้ำกลั่นนิ่งฆ่าเชื้อปริมาตร 200 µL นำไปเลี้ยงในอาหาร WA เป็นเวลา 12-24 ชั่วโมง จากนั้นตัดชิ้นวุ้นที่มีสปอร์เพียงสปอร์เดียวภายใต้กล้องจุลทรรศน์ เลี้ยงในอาหาร Carrot agar (CA) เป็นเวลา 5-7 วัน [14] นำเชื้อรา *P. palmivora* ที่ได้มาเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 7 วัน มาตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเชื้อรารายใต้กล้องจุลทรรศน์

2.2 การเตรียมวัตถุดิบและการปรับสภาพด้วยเชื้อรา

คัดเลือกเปลือกทุเรียนพันธุ์หมอนทองที่ไม่มีร่องรอยโรคและไม่มีบาดแผล ทำการหั่นเปลือกเป็นชิ้นขนาดเท่ากัน ล้างทำความสะอาดและฆ่าเชื้อผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์ (เช่น Clorox® 10%) เป็นเวลา 10 นาที ล้างด้วยน้ำกลั่นนิ่งฆ่าเชื้อ 2-3 นาที แล้วผึ่งให้แห้งในสภาพปลอดเชื้อ และแบ่งการเตรียมเป็น 2 กลุ่มทดลอง ดังนี้

กลุ่มที่ 1 เปลือกทุเรียนที่ไม่ผ่านการปรับสภาพทางชีวภาพ (Non-biological pretreatment of durian peel; NBPD) คัดเลือกและทำความสะอาดเปลือกทุเรียนเพื่อลดสิ่งสกปรก ตัดลดขนาดให้ได้ 1x1 cm อบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน (Hot Air Oven)

ที่อุณหภูมิ 105°C เวลา 24 ชั่วโมง เพื่อลดความชื้น และนำไปปั่นด้วยเครื่องบดสมุนไพรรุ่น ECO และนำมาร่อนให้มีขนาด 40-65 mesh จากนั้นนำไปยังกระบวนการไพโรไลซิสต่อไป

กลุ่มที่ 2 เปลือกทุเรียนผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา *P. palmivora* (Biological pretreatment of durian peel; BPD) ตัดลดขนาดให้มีขนาดที่พอดี ทำบาดแผล หรือจุดเปิดบนผิวเปลือก (เช่น ตัดปลายหนาม หรือเจาะผิว) จากนั้นใช้ cork borer (เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 cm) ตัดชิ้นวุ้นบริเวณขอบโคโลนีที่กำลังเจริญของเชื้อรา วางลงบนตำแหน่งบาดแผลของเปลือกทุเรียน บ่มในภาชนะปิดที่ควบคุมความชื้น ที่อุณหภูมิประมาณ 25°C เป็นเวลา 21 วัน ให้สภาวะเหมาะสมต่อการทำงานของเชื้อรา เพื่อให้เชื้อราทำการย่อยสลายโครงสร้างของเปลือกทุเรียน จากนั้นล้างทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่น และนำไปอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน (Hot Air Oven) ที่อุณหภูมิ 105°C เวลา 24 ชั่วโมง เพื่อลดความชื้น และนำไปปั่นด้วยเครื่องบดสมุนไพรรุ่น ECO และนำมาร่อนให้มีขนาด 40-65 mesh จากนั้นนำไปยังกระบวนการไพโรไลซิสต่อไป โดยดัดแปลงมาจากวิธีการของ Chandra (2009) [15] (ศศิลา, 2560) [16]

2.3 การเผาคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization)

นำผงเปลือกทุเรียนจากทั้งสองกลุ่ม NBPD และ BPD (Figure 1C และ 1G) เข้าสู่กระบวนการเผาคาร์บอนไนเซชันภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนในเตาเผาแบบท่อ (tube furnace) โดยใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 800°C ภายใต้บรรยากาศ N₂ โดยมีอัตราการไหล 0.2 L/min และมีอัตราการให้ความร้อน 10°C/min เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อถ่านกัมมันต์อุณหภูมิลดลง นำไปเก็บไว้ในโถดูดความชื้น และการเตรียมใช้งาน โดยนำถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียนล้างผ่านน้ำด้วย DI water จนค่า pH เป็นกลาง (Figure 1D และ 1H) โดยดัดแปลงมาจากวิธีการของ Chang et al. 2020 [17] จากนั้นนำมาวิเคราะห์สมบัติของวัสดุด้วยเทคนิคดังนี้ ได้แก่ ศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectrometer วิเคราะห์โครงสร้างคาร์บอน Raman Spectroscopy (Raman) วิเคราะห์โครงสร้างผลึก X-ray Diffraction (XRD) วิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุน Brunauer-Emmett-Teller (BET) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning Electron Microscope (SEM)



Figure 1 Physical characteristics of durian peel and the activated carbon process. (A-D) Control group: (A) durian peel, (B) Dried durian peel, (C) NBPD Powder, (D) Activated carbon from durian peel, (E-H) Preparation of activated carbon by fungal activation: (E) Durian peel and *P. palmivora* (F) Biological Pretreatment Durian peel (G) BPD Powder (H) Activated carbon from Biological Pretreatment durian peel.

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเชื้อราสาเหตุโรค *P. palmivora*

ทำการแยกเชื้อสาเหตุโรครากเน่าโคนเน่าจากผลทุเรียน (Figure 2A) ด้วยวิธี tissue transplanting technique บนอาหารเลี้ยงเชื้อ carrot agar (CA) และทำให้เชื้อบริสุทธิ์ด้วยวิธี single spore isolation พบว่าโคโลนีของเชื้อมีลักษณะเป็นเส้นใยสีขาวบาง เรียงตัวเป็นแฉกคล้ายกลีบดอกไม้ ปลายแหลม (Figure 2B) จากการตรวจสอบลักษณะทางจุลทรรศน์ พบว่าเส้นใยมีลักษณะใส ไม่มีผนังกัน (non-septate hyphae) มีการแตกกิ่งแบบ simple sympodium หรือแตกกิ่งไม่เป็นระเบียบ (Figure 2C) การสร้าง chlamydospore มีลักษณะเป็นทรงกลมแบน ผนังหนา (Figure 2D) ขณะที่ sporangium มีรูปร่างแบบ ovate หรือ

elongate elliptical และมี papilla บริเวณปลาย (Figure 2E) ลักษณะทางสัณฐานวิทยาดังกล่าวสอดคล้องกับคุณลักษณะของเชื้อในสกุล *Phytophthora* ตามเกณฑ์การจัดจำแนกของ Dreth (1994) [18] จึงสามารถยืนยันได้ว่าเชื้อที่แยกได้คือ *P. palmivora*

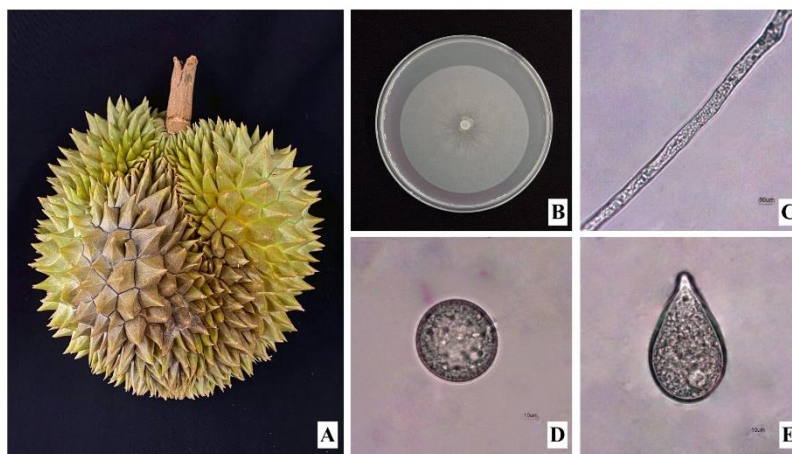


Figure 2 Morphological characteristics of *Phytophthora palmivora* on carrot agar: (A) Symptoms of root rot and stem rot, (B) Colony, (C) mycelium, (D) Chlamydozoospores, (E) Sporangium.

3.2 ผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์รูปทรงลำดับชั้นด้วยเทคนิค FT-IR

จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันโดยใช้เทคนิค FT-IR ของเปลือกทุเรียนที่ไม่ผ่านกระบวนการทางชีวภาพ (S-NBPD) และเปลือกทุเรียนที่ผ่านกระบวนการทางชีวภาพ (S-BPD) ถ่านกัมมันต์จากทั้งสองกระบวนการที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 800°C (NBPD และ BPD) แสดงผลดัง Figure 3 ทุกตัวอย่างพบแถบการดูดกลืนของหมู่ O-H บริเวณประมาณ 3300 cm^{-1} และหมู่ C-H ของแอลเคนในช่วง 2,900-2,800 cm^{-1} อย่างไรก็ตาม ความเข้มของแถบดังกล่าวลดลงอย่างชัดเจนในตัวอย่าง S-BPD และ S-NBPD หลังการเผา แสดงถึงการสลายตัวของหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ในระหว่างกระบวนการคาร์บอนไอเซนชัน นอกจากนี้พบแถบของหมู่คาร์บอนิล (C=O) ที่ประมาณ 1,720 cm^{-1} ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนในตัวอย่าง BPD และ NBPD รวมถึงแถบของพันธะ Aromatic C=C และการโค้งงอของ N-H ในช่วง 1,600-1,500 cm^{-1} และแถบของพันธะ C-O และ/หรือ C-N ในช่วง 1,300-1,000 cm^{-1} [19,20] เมื่อเปรียบเทียบถ่านกัมมันต์ทั้งสองชนิด พบว่า NBPD มีการลดลงของหมู่ฟังก์ชัน O-H และ C-H มากกว่า BPD บ่งชี้ว่าโครงสร้างคาร์บอนมีความหนาแน่น เกิดอะโรมาติกแบบหลายวงเพิ่มขึ้น และความเป็นระเบียบสูงขึ้น มีลักษณะใกล้เคียงคาร์บอนเชิงกราฟิติก (graphitic carbon) มากกว่า ขณะที่ BPD มีหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบตกค้างบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ ช่วยเพิ่มความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาเคมีและประสิทธิภาพการดูดซับของวัสดุ ในทำนองเดียวกัน เปลือกทุเรียนที่ผ่านการปรับสภาพทางชีวภาพ (S-BPD) แสดงปริมาณหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ชีวภาพมากกว่า S-NBPD จากการย่อยสลายบางส่วนของโครงสร้างลิกนินและเซลลูโลสโดยเชื้อรา *P. palmivora* ทำให้พื้นผิวมีหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเพิ่มขึ้นและหมู่อะโรมาติกมากขึ้นบนพื้นผิววัสดุถ่านกัมมันต์ [21] ผลดังกล่าวสอดคล้องกับรายงานของ Cheng et al. (2021) [17] ที่ได้ศึกษาการปรับสภาพชีวมวลด้วยเชื้อรา *Phanerochaete chrysosporium* พบว่าเป็นเชื้อราย่อยสลายลิกนินแตกออกเป็นชิ้นเล็ก พบหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนจำนวนมาก ทำให้พีคลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

3.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างคาร์บอนของถ่านกัมมันต์ด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy

จากการวิเคราะห์สเปกตรัมโครงสร้างคาร์บอนของถ่านกัมมันต์ด้วยเทคนิค Raman ของถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียนที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพทางชีวภาพ (BPD) แสดงพีคสัญญาณ D-band ที่ตำแหน่ง 1,351.507 cm^{-1} และ G-band ที่ตำแหน่ง 1,562.674 cm^{-1} แสดงผลดัง Figure 4 ซึ่งสัมพันธ์กับโหมดการสั่นสะเทือนของคาร์บอนที่มีความไม่เป็นระเบียบและคาร์บอนแบบ

sp² ตามลำดับ [18,19] โดยมีค่าอัตราส่วนความเข้มของพีก I_D/I_G เท่ากับ 1.08 บ่งชี้ว่าวัสดุมีโครงสร้างคาร์บอนที่มีความไม่เป็นระเบียบ โดยมีลักษณะเป็นโครงสร้างแบบ Diamond-like carbon แสดงบริเวณ sp² ขนาดเล็กและมีการจัดเรียงตัวไม่สมบูรณ์

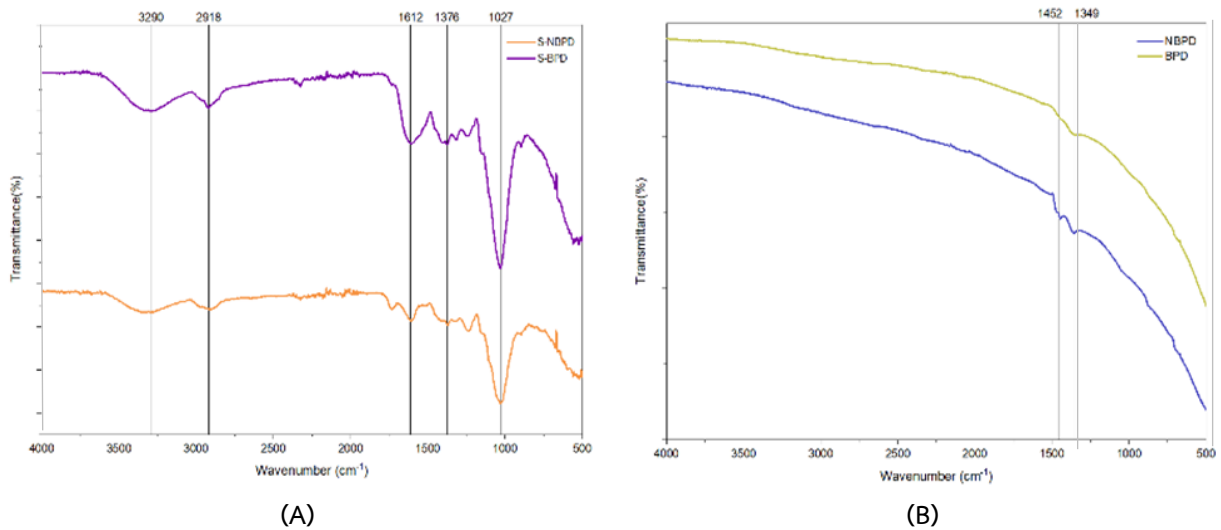


Figure 3 FTIR spectra of (A) the sample non-biological pretreatment of durian peel (S-NBPD), and sample biological pretreatment of durian peel (S-BPD), (B) non-biological pretreatment of durian peel (NBPD), and biological pretreatment of durian peel (BPD).

ของโครงสร้าง อย่างไรก็ตาม การปรากฏของพีก G-band ยังคงยืนยันการมีอยู่ของโครงสร้างคาร์บอนแบบ sp² บางส่วน ซึ่งสอดคล้องกับรายงานที่ระบุว่าค่า I_D/I_G ใกล้เคียงหรือมากกว่า 1 แสดงถึงวัสดุคาร์บอนที่มีโครงสร้างไม่เป็นระเบียบ [20] บ่งชี้ว่ากระบวนการปรับสภาพทางชีวภาพร่วมกับการเผาที่อุณหภูมิ 800°C ส่งผลให้เกิดโครงสร้างคาร์บอนที่มีความไม่เป็นระเบียบจำนวนมาก ซึ่งเอื้อต่อการสร้างรูพรุน (Porosity) และเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสสำหรับการประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ เช่น ในการดูดซับเอทิลีน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Cheng et al. 2021 [17] บ่งชี้ว่าคาร์บอนที่มีรูพรุนตามลำดับชั้นหลังจากการสลายตัวโดยกลินินที่ย่อยสลายมีโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบมากขึ้นส่งผลให้โครงสร้างมีรูพรุนสูงและไม่เป็นระเบียบ นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhang, 2019 [9] รายงานว่าชีวมวลที่ผ่านการปรับสภาพด้วยจุลินทรีย์มีแนวโน้มเกิดโครงสร้างคาร์บอนแบบคาร์บอนอะมอร์ฟัส จากการจัดเรียงตัวแบบสุ่มของแผ่นคาร์บอนอะโรมาติก โครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบดังกล่าวส่งผลให้วัสดุมีพื้นที่ผิวจำเพาะ S_{BET} สูงขึ้น และสอดคล้องกับผลการกระจายขนาดรูพรุนที่แสดงถึงความพรุนที่เพิ่มขึ้นของวัสดุ

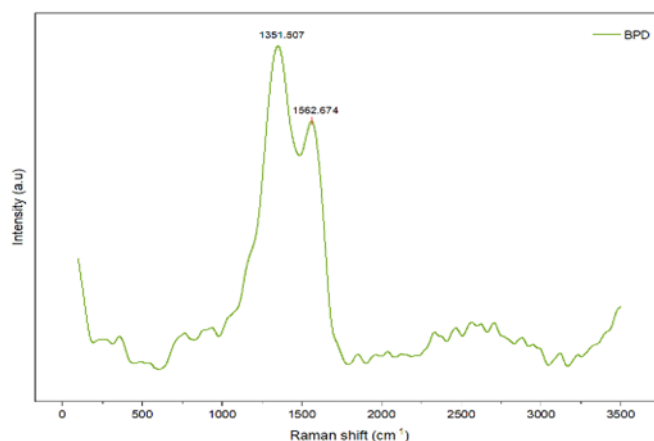


Figure 4 Raman spectra of activated carbon from biologically pretreated durian peel (BPD).

3.4 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของถ่านกัมมันต์รูพรุนลำดับชั้นด้วย XRD

จากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของถ่านกัมมันต์รูพรุนลำดับชั้น ของถ่านกัมมันต์ที่ไม่ผ่านกระบวนการทางชีวภาพ (NBPD) และถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการทางชีวภาพ (BPD) แสดงผลดัง Figure 5 พบว่าทั้งสองตัวอย่าง มีจุดพิกที่คล้ายคลึงกัน แสดงให้เห็นสองจุดสูงกว้างที่ประมาณ 24.5° และ 43.2° [21] ซึ่งเชื่อมโยงกับคาร์บอนทิวไรโบสเตอร์ดิกหรือคาร์บอนที่ไม่เป็นระเบียบ (คาร์บอนไร้รูปทรง) เรียงตัวตามทิศทางคริสตัลลोगราฟฟิค 002 และ 100 ซึ่งสอดคล้องกับการจัดเรียงแบบหกเหลี่ยมของวัสดุคาร์บอนเชิงกราฟิติก [9] เป็นโครงสร้างที่มีรูพรุนสูงเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างผลึกพบว่า NBPD พิกสัญญาณที่มีจุดสูงสุด 002 ลดลงและมีการเคลื่อนมาตำแหน่งที่ต่ำกว่าของ BPD เมื่อผ่านกระบวนการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Cheng et al. 2021 [17] พบว่าความเข้มของจุดแพร่กระจายกว้าง (002) ลดลงเมื่อชีวมวลดิบผ่านกระบวนการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ บ่งชี้ว่าตัวอย่าง PCAC-x มีความไม่เป็นระเบียบมากกว่าตัวอย่าง AC-x ในบรรดาอัตราส่วนทั้งสาม ตัวอย่าง PCAC-1 มีความไม่เป็นระเบียบสูงที่สุด ทำให้เอื้อต่อการดูดซับมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ที่หาค่า I_{002}/I_G ในระดับสูง บ่งชี้ถึงความสมดุลระหว่างความเป็นระเบียบและไม่เป็นระเบียบในโครงสร้างวัสดุ

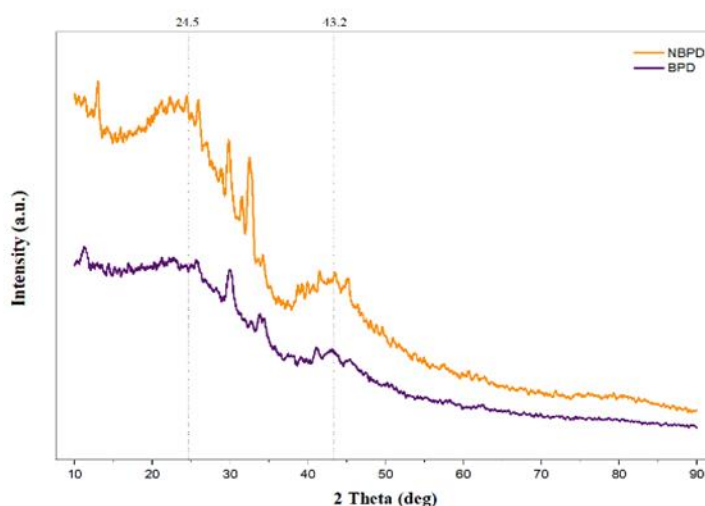


Figure 5 XRD spectra of the non-biological pretreatment of durian peel (NBPD), biological pretreatment of durian peel (BPD).

3.5 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและโครงสร้างรูพรุน BET

ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและโครงสร้างรูพรุนด้วยเทคนิค BET และการกระจายขนาดรูพรุน แสดงผลดัง Table 1 ของถ่านกัมมันต์จากเปลือกผลทุเรียนที่ไม่ผ่านการปรับสภาพทางชีวภาพ (NBPD) และถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการปรับสภาพทางชีวภาพ (BPD) โดยจำแนกรูพรุนตามขนาดเป็น ultramicropores (< 0.7 nm), micropores (< 2 nm), mesopores (2-50 nm) และ macropores (> 50 nm) [9] ผลการศึกษาพบว่ากลุ่ม NBPD มีค่าปริมาตรรูพรุน (pore volume) สูงกว่ากลุ่ม BPD ในทุกช่วงขนาดของรูพรุน สะท้อนให้เห็นว่าการปรับสภาพทางชีวภาพด้วย *P. palmivora* ส่งผลให้ปริมาตรรูพรุนรวมของวัสดุลดลง อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาการกระจายสัดส่วนของรูพรุนในแต่ละช่วงขนาด พบความแตกต่างเชิงโครงสร้างที่มึนัยสำคัญต่อการทำงานของวัสดุ เช่น ความสามารถในการดูดซับ ซึ่งในช่วง mesopores ขนาด 2.00-10.00 nm เป็นรูพรุนขนาดเล็ก กลุ่ม NBPD มีสัดส่วนปริมาตรรูพรุนสูงกว่ากลุ่ม BPD เล็กน้อย (49.51% และ 47.26% ตามลำดับ) แสดงให้เห็นว่ารูพรุนช่วงนี้มีบทบาทสำคัญต่อโครงสร้างของวัสดุทั้งสองชนิด ในทำนองเดียวกัน mesopores ขนาด 10.00-20.00 nm กลุ่ม NBPD มีค่าสูงกว่ากลุ่ม BPD (16.14% และ 14.80% ตามลำดับ) ในทางตรงกันข้าม กลุ่ม BPD แสดงสัดส่วนปริมาตรรูพรุนในช่วง mesopores ขนาด 20.00-50.00 nm สูงกว่ากลุ่ม NBPD อย่างชัดเจน (13.91% เทียบกับ 9.74%) ซึ่งบ่งชี้ว่าการปรับสภาพทางชีวภาพส่งเสริม

การพัฒนาของรูพรุนขนาดใหญ่ ขณะที่สัดส่วนของ macropores (> 50 nm) ของทั้งสองกลุ่มมีค่าใกล้เคียงกัน โดยกลุ่ม NBPD และ BPD มีค่าเท่ากับ 24.51% และ 24.03% ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของ mesopores ขนาด 20.00-50.00 nm ในถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการปรับสภาพทางชีวภาพสะท้อนถึงการพัฒนาโครงสร้างรูพรุนแบบลำดับขั้น ซึ่งเกิดจากการทำงานร่วมกันของรูพรุนหลายขนาด โดย macropores ทำหน้าที่เป็นช่องทางรับและกระจายโมเลกุลเข้าสู่วัสดุ mesopores ช่วยลดความต้านทานการถ่ายเทมวลและส่งผ่านโมเลกุลไปยังบริเวณดูดซับ ขณะที่ micropores และ ultramicropores เป็นตำแหน่งที่เกิดการดูดซับจริงเนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง [9] โครงสร้างดังกล่าวช่วยให้วัสดุมีสมดุลระหว่างอัตราการดูดซับและความสามารถในการแพร่ของโมเลกุล โดยเฉพาะในกรณีของก๊าซเอทิลีน [11] mesopores 2.00-50.00 nm มีบทบาทสำคัญในฐานะช่องทางการแพร่เข้าสู่รูพรุนขนาดเล็ก ช่วยลดความต้านทานการถ่ายเทมวลและเพิ่มอัตราการดูดซับต่อหน่วยเวลา ส่งผลให้วัสดุสามารถดูดซับเอทิลีนได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้โครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบและการมีหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวยังอาจเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิววัสดุกับโมเลกุลก๊าซ ทำให้กระบวนการดูดซับโดยรวมดีขึ้น [22]

Table 1 Pore volume and pore volume percentage of activated carbon from Non-biological pretreatment of durian peel (NBPD) and Biological pretreatment of durian peel (BPD).

Pore Range (nm)	Pore Volume (cm ³ /g)		Percentage (%)	
	NBPD	BPD	NBPD	BPD
2.00 – 10.00	0.07829	0.02065	49.51	47.26
10.00 – 20.00	0.02547	0.00647	16.14	14.80
20.00 – 50.00	0.01537	0.00608	9.74	13.91
> 50.00	0.03868	0.01050	24.51	24.03

3.6 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวถ่านกัมมันต์ด้วย SEM

การวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์จากเปลือกผลทุเรียนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 1,000 และ 2,000 เท่า แสดงให้เห็นความแตกต่างของโครงสร้างพื้นผิวระหว่างตัวอย่างที่ไม่ผ่านการปรับสภาพทางชีวภาพ (NBPD) และตัวอย่างที่ผ่านการปรับสภาพทางชีวภาพ (BPD) อย่างชัดเจน ดังแสดงใน Figure 6 ถ่านกัมมันต์กลุ่มไม่ปรับสภาพ NBPD (Figure 6A, B) มีพื้นผิวค่อนข้างเรียบและพบรูพรุนขนาดใหญ่กระจายตัวไม่สม่ำเสมอ ลักษณะดังกล่าวสะท้อนถึงการเกิดโพรงจากกระบวนการคาร์บอนเนชันของชีวมวลที่โครงสร้างลิกโนเซลลูโลสยังคงค่อนข้างสมบูรณ์ ส่งผลให้การก่อตัวของรูพรุนมีลักษณะเป็นโพรงขนาดใหญ่และไม่ต่อเนื่อง ในทางตรงกันข้าม ถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียนที่ผ่านการปรับสภาพทางชีวภาพด้วย *P. palmivora* (BPD) (Figure 6C, D) แสดงพื้นผิวที่มีความสลับซับซ้อนมากขึ้น และพบรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากกระจายตัวอยู่ทั่วโครงสร้างวัสดุ ลักษณะดังกล่าวบ่งชี้ว่ากระบวนการปรับสภาพทางชีวภาพได้ย่อยสลายโครงสร้างลิกโนเซลลูโลสบางส่วน ทำให้โครงสร้างเส้นใยภายในเกิดการคลายตัวและเกิดเป็นช่องว่างขนาดเล็กก่อนการเผา [10] การเกิดรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากในตัวอย่าง BPD สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ BET ซึ่งพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการปรับสภาพทางชีวภาพมีปริมาตร รูพรุนรวมและพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำกว่าโครงสร้างที่ไม่ผ่านการปรับสภาพทางชีวภาพ และมีสัดส่วนของรูพรุนขนาดกลางเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในช่วง mesopores ขนาดใหญ่ ซึ่งเอื้อต่อการแพร่และการถ่ายเทมวลของโมเลกุลเข้าสู่โครงสร้างภายในวัสดุ การเปลี่ยนแปลงลักษณะพื้นผิวที่สังเกตได้จาก SEM จึงสนับสนุนการเกิดโครงสร้างรูพรุนแบบลำดับขั้น อันเป็นผลมาจากการปรับสภาพทางชีวภาพก่อนกระบวนการคาร์บอนเนชัน

4. สรุป

จากการปรับสภาพเปลือกทุเรียนทางชีวภาพด้วยเชื้อรา *P. palmivora* ก่อนกระบวนการคาร์บอนเนชันที่อุณหภูมิ 800°C ส่งผลให้ถ่านกัมมันต์รูพรุนลำดับขั้นที่ได้มีโครงสร้างรูพรุนลำดับขั้นที่ซับซ้อนกว่ากลุ่มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ โดยผล

การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติพบว่าตัวอย่างที่ผ่านการปรับสภาพทางชีวภาพด้วยเชื้อรา (BPD) มีหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนบนพื้นผิวมากกว่ากลุ่มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (NBPD) และมีโครงสร้างคาร์บอนไร้รูปทรง (Amorphous carbon) ที่มีค่าอัตราส่วน I_D/I_G ประมาณ 1.08 ซึ่งบ่งชี้ถึงความไม่เป็นระเบียบของโครงสร้างที่เหมาะสมต่อการดูดซับ นอกจากนี้ กลุ่มที่ผ่านการปรับสภาพทางชีวภาพมีสัดส่วนของรูพรุนขนาดกลาง (mesopores) ในช่วง 20 ถึง 50 nm เพิ่มสูงขึ้น และมีสัญญาณวิทยาของพื้นผิวที่ซับซ้อนขึ้น เนื่องจากการย่อยสลายทางชีวภาพของ *P. palmivora* ทำให้สามารถสังเคราะห์เป็นวัสดุถ่านกัมมันต์รูพรุนลำดับชั้น เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ด้านการเกษตร เช่น การดูดซับเอทิลีนเพื่อชะลอการสุกของผลไม้ หรือการปรับปรุงดิน และถือเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรอย่างยั่งยืน

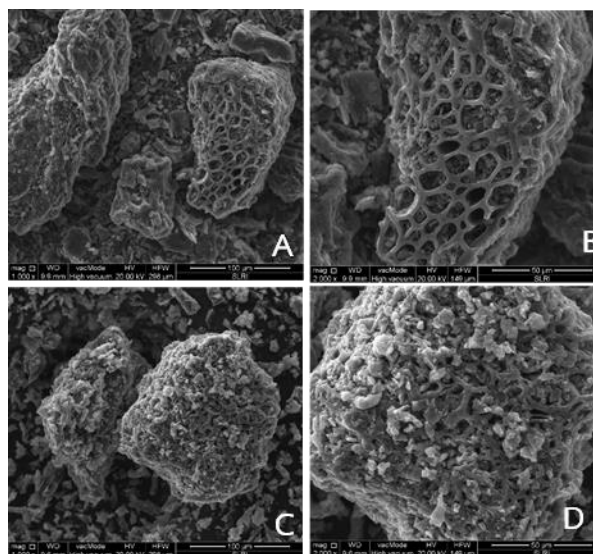


Figure 6 SEM images of hierarchical porous carbon at different magnifications: (A) NBPD at 1,000x, (B) NBPD at 2,000x, (C) BPD at 1,000x, and (D) BPD at 2,000x.

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อภิสิทธิ์ชัย เอียดเอื้อ นายดำรงดี มิ่งขวัญศิริ และ นายธนภัทร พลธีราช จากภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี คณะเทคโนโลยีนวัตกรรมบูรณาการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร เป็นอย่างสูง ที่กรุณาให้การสนับสนุนด้านการเผาถ่านกัมมันต์ การวิเคราะห์ข้อมูล รวมถึงให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ต่อการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2567. ข้อมูลเศรษฐกิจการเกษตร. เข้าถึงได้จาก: เว็บไซต์ <https://impexpth.oae.go.th/export> (เข้าถึงเมื่อ พ.ศ. 2567)
- [2] ประพันธ์ พุ่มพร และสุภาพร พงศ์ธรพฤกษ์. 2562. การใช้ประโยชน์จากเปลือกทุเรียนสำหรับผลิตสารกรองน้ำเพื่อดูดซับธาตุเหล็ก. วารสารวิชาการวิทยาศาสตร์และวิทยาศาสตร์ประยุกต์. 2(2): 33-44.
- [3] Panakal, E. J., Cheenkachorn, K., Gundupalli, M. P., Kitiborwornkul, N., and Sriariyanun, M. 2021. Impact of sulfuric acid pretreatment of durian peel on the production of fermentable sugar and ethanol. *Journal of the Indian Chemical Society*. 98(12): 100264.
- [4] วริศชนม์ นิลนนท์. 2557. ศึกษากระบวนการผลิตบรรจุภัณฑ์จากเปลือกทุเรียนในระดับห้องปฏิบัติการ. จันทบุรี: คณะเทคโนโลยีการเกษตร, มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี.
- [5] Shen, J., Zhao, C., Liu, Y., Zhang, R., Liu, G., and Chen, C. 2019. Biogas production from anaerobic co-digestion of durian shells with chicken, dairy, and pig manures. *Energy Conversion and Management*. 198: 110535.

- [6] วรณา สายแก้ว. 2559. การกำจัดเหล็กทั้งหมดด้วยถังกรองที่บรรจุทรายร่วมกับเปลือกส้มโอ. *วารสารเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี*. 6(1): 136–1457
- [7] ปานใจ สื่อประเสริฐสิทธิ์. 2545. *การลดปริมาณโครเมียม (VI) ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ถ่านกัมมันต์*. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- [8] Tian, W., Zhang, H., Duan, X., Sun, H., Shao, G., and Wang, S. 2020. Porous carbons: structure-oriented design and versatile applications. *Advanced Functional Materials*. 30: 1909265.
- [9] Zhang, W., Cheng, H., Niu, Q., Fu, M., Huang, H., and Ye, D. 2019. Microbial targeted degradation pretreatment: A novel approach to preparation of activated carbon with specific hierarchical porous structures, high surface areas, and satisfactory toluene adsorption performance. *Environmental Science & Technology*. 53(13): 7632–7640.
- [10] Ospina-Giraldo, M. D., Griffith, J. G., Laird, E. W., and Mingora, C. 2010. The CAZyome of *Phytophthora* spp.: A comprehensive analysis of the gene complement coding for carbohydrate-active enzymes. *BMC Genomics*. 11: 525.
- [11] Tepamatr, P. 2023. Efficacy of palladium-modified activated carbon in improving ethylene removal to delay the ripening of Gros Michel banana. *Journal of Agriculture and Food Research*, 12, 100561.
- [12] Hilber, I., & Bucheli, T. D. 2010. Activated carbon amendment to remediate contaminated sediments and soils: A review. *Global NEST Journal*, 12(3), 305–317.
- [13] อธิชาติ พวงเกษ, พัชรา ลาภประสานยิ่ง, เฉลิมศรี ทองพิงสุข และเฉลิมศรี นนทสวัสดิ์ศรี 2566. ผลของธาตุเหล็ก ผงถ่านกัมมันต์ และวุ้น ต่อการเกิดใบเหลือง และการเจริญเติบโตของปทุมมาลูกผสมสายพันธุ์สีม่วง (Violet) ที่เพาะเลี้ยงในสภาพปลอดเชื้อ. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 12(3), 451–462.
- [14] Kaosiri, T., Zentmyer, G. A., and Erwin, D. C. 1978. Stalk length as a taxonomic criterion for *Phytophthora palmivora* isolates from cacao. *Canadian Journal of Botany*. 56: 1730–1738.
- [15] Chandra, T. C., Mirna, M. M., Sunarso, J., Sudaryanto, Y., and Ismadji, S. 2009. Activated carbon from durian shell: Preparation and characterization. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 40: 457–462.
- [16] ศศิพา ฉิมพลี. 2560. *การพัฒนากระบวนการใช้ถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียนเพื่อกำจัดโครเมียมในน้ำเสียจากการวิเคราะห์ซีไอดี*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรม กลุ่มวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมทางทะเล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา,ชลบุรี.
- [17] Cheng, H., Ye, G., Wang, X., Su, C., Zhang, W., Yao, F., Wang, Y., Jiao, Y., Huang, H., and Ye, D. 2021. Micro-mesoporous carbon fabricated by *Phanerochaete chrysosporium* pretreatment coupling with chemical activation: Promoting effect and toluene adsorption performance. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 9(5): 105054.
- [18] Drenth, A. 1994. *Molecular genetic evidence for a new sexually reproducing population of Phytophthora infestans in Europe*. Ph.D. Thesis, Wageningen University, The Netherlands.
- [19] Ong, H. C., Chen, W.-H., Singh, Y., Gan, Y. Y., Chen, C.-Y., and Show, P. L. 2020. A state-of-the-art review on thermochemical conversion of biomass for biofuel production: A TG-FTIR approach. *Energy Conversion and Management*. 209: 112634.
- [20] Ferrari, A. C., and Robertson, J. 2000. Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon. *Physical Review B*. 61(20): 14095–14107.
- [21] Sriprom, P., Krusong, W., and Assawasaengrat, P. 2021. Preparation of activated carbon from durian rind with different activations and its optimization. *Journal of Renewable Materials*.

-
- [22] Hong, S. J., Riahi, Z., Khan, A., Lee, J. G., Kim, B. Y., Min, S. C., Shin, G. H., & Kim, J. T. (2025). Active packaging film utilizing cerium metal-organic frameworks doped with titanium dioxide as ethylene scavengers for postharvest ripening control of avocados. *Food Chemistry*, 489, 145025.

ผลของการฉีดพ่นโซเดียมซีลีเนตและระยะเวลาการเก็บเกี่ยวผลผลิต
ต่อสารทุติยภูมิและการสะสมซีลีเนียมในเมือกผักปลั่ง

Effect of foliar application of sodium selenate and harvest time on
phytochemicals and selenium accumulation in ceylon spinach mucilage

ณัฐพร วันสา¹ พรไพรินทร์ รุ่งเจริญทอง² สุนทรี่ แสงจันทร์³ และ ศุภชัย อัมคา^{1,*}

Nattaporn Wansa¹, Pornpairin Rungcharoenthong², Suntree Sangjan³ and Suphachai^{1,*}

¹ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140 ประเทศไทย

²ภาควิชาวิทยาศาสตร์และนวัตกรรมชีวภาพ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140 ประเทศไทย

³ภาควิชาวิทยาศาสตร์กายภาพและวัสดุศาสตร์ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140 ประเทศไทย

¹ Department of Soil Science, Faculty of Agriculture at KamphaengSaen, Kasetsart University, KamphaengSaen Campus, NakhonPathom Province, 73140, Thailand

² Department of Botany, Faculty of Liberal Arts and Science, Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus, NakhonPathom Province, 73140, Thailand

³ Department of Physical Science and Materials Science, Faculty of Liberal Arts and Science, Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus, NakhonPathom Province, 73140, Thailand

*Corresponding author: Suphachai Amkha, e-mail address: agrscak@ku.ac.th

บทคัดย่อ

การเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการของพืชผักด้วยธาตุซีลีเนียมเป็นแนวทางสำคัญในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ผักเพื่อสุขภาพ การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลของการฉีดพ่นโซเดียมซีลีเนตทางใบต่อการสะสมซีลีเนียม ปริมาณคลอโรฟิลล์ (a, b และ ทั้งหมด) แคโรทีนอยด์ สารประกอบฟีนอล ฟลาโวนอยด์ และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในเมือกผักปลั่งเขียว วางแผนการทดลองแบบสุ่ม สมบูรณ์ภายในบล็อก จำนวน 5 ซ้ำ และ 3 กรรมวิธี ได้แก่ การเก็บเกี่ยวผักปลั่งเขียวหลังฉีดพ่นโซเดียมซีลีเนตที่ 0, 5, 10 และ 15 วันหลังฉีดพ่น โดยทำการเก็บตัวอย่างผักปลั่งเขียวที่ 0, 5, 10 และ 15 วันหลังการฉีดพ่น มาปั่นและสกัดเฉพาะเมือก แล้ววิเคราะห์หาปริมาณการสะสมซีลีเนียม และสารทุติยภูมิของพืช ได้แก่ ปริมาณคลอโรฟิลล์ (เอ บี และทั้งหมด) แคโรทีนอยด์ ฟีนอลทั้งหมด ฟลาโวนอยด์ทั้งหมด และฤทธิ์ยับยั้งอนุมูลอิสระในเมือกผักปลั่ง ผลการทดลองพบว่า ระยะเวลาหลังการฉีดพ่นมีผลต่อการสะสมซีลีเนียมและสารทุติยภูมิของพืชอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.01$) โดยปริมาณซีลีเนียมในเมือกผักปลั่งสูงสุดที่ 10 วันหลังการฉีดพ่น ขณะที่เมือกผักปลั่งมีปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมด ฟีนอลทั้งหมด ฟลาโวนอยด์ทั้งหมด และฤทธิ์ยับยั้งอนุมูลอิสระสูงสุดที่ 15 วันหลังการฉีดพ่น ดังนั้นผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าหากมุ่งเน้นการเสริมซีลีเนียมควรเก็บเกี่ยวที่ 10 วันหลังการฉีดพ่น แต่หากมุ่งเน้นคุณค่าด้านสารต้านอนุมูลอิสระควรเก็บเกี่ยวที่ 15 วันหลังการฉีดพ่น

คำสำคัญ: โซเดียมซีลีเนต, ผักปลั่ง, ซีลีเนียม, สารทุติยภูมิ, ฤทธิ์ยับยั้งอนุมูลอิสระ

Abstract

Biofortification of vegetables with selenium is an important strategy for developing health-promoting plant products. This study aimed to evaluate the effects of foliar application of sodium selenate on selenium accumulation and bioactive constituents in the mucilage of green ceylon spinach. The experiment was arranged in a randomized complete block design with five replications and three treatments based on harvest time after foliar spraying: 0, 5, 10, and 15 days after spraying (DAS). Plant samples were collected at each harvest time, homogenized and the mucilage fraction was isolated for analysis. Selenium accumulation and selected phytochemicals were determined, including chlorophyll (a, b, and total), carotenoids, total phenolic content, total flavonoid content, and antioxidant activity. The results indicated that harvest time after foliar application significantly affected selenium accumulation and phytochemical traits in the mucilage ($p \leq 0.01$). Selenium concentration in the mucilage was highest at 10 DAS. In contrast, the mucilage exhibited the greatest total chlorophyll, total phenolic content, and antioxidant activity at 15 DAS. These findings suggest that harvest at 10 DAS is optimal when the primary objective is selenium enrichment, whereas harvest at 15 DAS is preferable when maximizing antioxidant-related bioactive value.

Keywords: sodium selenate, ceylon spinach, selenium, phytochemical compounds, antioxidants activity

1. บทนำ

ซีลีเนียม (Selenium; Se) เป็นธาตุอาหารรองที่มีความสำคัญต่อสุขภาพมนุษย์ในฐานะองค์ประกอบของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระหลายชนิด เช่น glutathione peroxidase อย่างไรก็ตามซีลีเนียมได้ถูกจัดเป็นธาตุอาหารจำเป็นของพืช แต่จัดเป็น “ธาตุที่เป็นประโยชน์” (beneficial element) ซึ่งสามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตและเพิ่มความทนทานต่อความเครียดได้เมื่ออยู่ในระดับที่เหมาะสม [1], [2] หลายประเทศทั่วโลกได้กำหนดค่าประมาณความต้องการซีลีเนียมที่ควรได้รับประจำวัน (Recommended Dietary Allowance; RDA) ผู้ใหญ่ที่มีอายุมากกว่า 19 ปีขึ้นไป ควรได้รับซีลีเนียมประมาณ 55-77 ไมโครกรัมต่อวัน แต่ไม่ควรเกิน 400 ไมโครกรัมต่อวัน ซึ่งเพียงพอต่อการทำงานของเอนไซม์ glutathione peroxidase ซึ่งเป็นเอนไซม์ทำหน้าที่กำจัดอนุมูลอิสระต่างๆที่เป็นอันตรายต่อเซลล์ หรือเปลี่ยนแปลงเซลล์ปกติให้กลายเป็นเซลล์มะเร็ง [3] จึงเกิดแนวคิดการเพิ่มปริมาณซีลีเนียมในพืชอาหาร (selenium biofortification) เพื่อยกระดับคุณค่าทางโภชนาการของพืชผัก และลดความเสี่ยงจากการขาดซีลีเนียมในมนุษย์

ซีลีเนียมในรูปซีลีเนต (SeO_4^{2-}) สามารถถูกดูดซึมเข้าสู่พืช ผ่านระบบลำเลียงเช่นเดียวกับซัลเฟต เนื่องจากมีโครงสร้างทางเคมีคล้ายคลึงกับซัลเฟต [4] ซีลีเนียมช่วยกระตุ้นระบบต้านอนุมูลอิสระ ลดความเสียหายจาก reactive oxygen species (ROS) และเพิ่มเสถียรภาพของเยื่อหุ้มเซลล์ [5] นอกจากนี้ยังมีรายงานว่าซีลีเนียมในระดับที่เหมาะสมสามารถเพิ่มปริมาณคลอโรฟิลล์ และประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงในพืชหลายชนิด [6] ตลอดจนมีบทบาทในการกระตุ้นการสังเคราะห์สารประกอบฟีนอลซึ่งเป็นสารต้านอนุมูลอิสระตามธรรมชาติ [7] ซึ่งสอดคล้องกับ [8] ศึกษาผลของการพ่นทางใบด้วย sodium selenate และ nano-selenium (nano-Se) ต่อลักษณะทางชีวเคมีของพืช *Artemisia annua* L. พบว่าการฉีดพ่นโซเดียมซีลีเนตสามารถเพิ่มปริมาณคลอโรฟิลล์เอ คลอโรฟิลล์บี และคลอโรฟิลล์ทั้งหมดได้ เช่นเดียวกับกับการศึกษาการให้โซเดียมซีลีเนตที่ความเข้มข้น 15 30 45 60 75 90 และ 105 มิลลิกรัม/ลิตรกับเมล็ดข้าว พบว่าการให้โซเดียมซีลีเนตความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้มีปริมาณสารประกอบฟีนอลเพิ่มมากขึ้น [9] และสอดคล้องกับ [10] รายงานว่าการให้โซเดียมซีลีเนตด้วยวิธีการฉีดพ่นที่ความเข้มข้นสูง ทำให้พืชมีการสะสมสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และมาลอนไดไฮดริลสูงขึ้น

ผักปลั่งเป็นผักพื้นบ้านที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง เนื่องจากเป็นแหล่งของแร่ธาตุ โปรตีน น้ำมัน คาร์โบไฮเดรต เส้นใย แคโรทีนอยด์ กรดอินทรีย์ และวิตามิน สารพฤกษเคมี (phytochemical compounds) และสารต้านอนุมูลอิสระโดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนเมือก (mucilage) ผักปลั่ง [11] ซึ่งมีศักยภาพในการพัฒนาเป็นผักเพื่อสุขภาพ (functional vegetable) อย่างไรก็ตามข้อมูลเกี่ยวกับการให้ซีลีเนียมทางใบต่อการสะสมซีลีเนียม ระยะเวลาการเก็บเกี่ยว และการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบชีวเคมีในเมือกผักปลั่งเขียวยังมีจำกัด โดยเฉพาะในมิติที่เชื่อมโยงระหว่างการสะสมซีลีเนียม ปริมาณคลอโรฟิลล์ สารประกอบฟีนอล และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลของการฉีดพ่นโซเดียมซีลีเนตทางใบต่อการสะสมซีลีเนียมในเมือกผักปลั่งเขียว และการเปลี่ยนแปลงของคลอโรฟิลล์ แคโรทีนอยด์ ฟีนอลทั้งหมด ฟลาโวนอยด์ทั้งหมด ฤทธิ์ยับยั้งอนุมูลอิสระ และการสะสมซีลีเนียมในช่วงเวลาต่างๆ หลังการฉีดพ่นในเมือกผักปลั่ง

2. วิธีการศึกษา

เพาะเมล็ดผักปลั่งจากศูนย์วิจัยและพัฒนาพืชผักเขตร้อน ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตร กำแพงแสน ด้วยพีทมอส เมื่อต้นกล้าอายุ 30 วันหลังเพาะเมล็ด ย้ายกล้าผักปลั่งลงแปลงปลูกขนาดกว้าง 1 เมตร ยาว 4 เมตร และระยะห่างระหว่างแปลงย่อย 0.5 เมตร จำนวน 15 แปลงย่อย ในชุดดินกำแพงแสน เป็นดินลึก เนื้อดินเป็นดินร่วนปนทราย และปฏิกริยาดินเป็นด่างเล็กน้อย ดังแสดงสมบัติของดินบางประการ (Table 1) ปลูกแบบแถวคู่ ระยะห่างระหว่าง 0.75 เมตร และระยะห่างระหว่างต้น 1 เมตร แล้วคลุมด้วยฟางรดน้ำให้ชุ่มด้วยระบบน้ำหยด และการจัดการปุ๋ยดำเนินการใส่ปุ๋ยเคมีสูตร 15-15-15 อัตรา 25 กิโลกรัมต่อไร่ จำนวน 2 ครั้ง เมื่อผักปลั่งอายุครบ 7 และ 21 วันหลังย้ายกล้า

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ภายในบล็อก (randomized complete block design; RCBD) จำนวน 5 ซ้ำ และ 4 ตำรับการทดลอง ได้แก่ การเก็บเกี่ยวผักปลั่งเขียวหลังฉีดพ่นโซเดียมซีลีเนตที่ 0 5 10 และ 15 วันหลังฉีดพ่น (days after spraying; DAS) กำหนดให้ฉีดพ่นโซเดียมซีลีเนตที่ความเข้มข้น 60 มิลลิกรัม/ลิตร อัตรา 20 มิลลิกรัม/ต้น เมื่อผักปลั่งอายุ 30 วันหลังย้ายกล้า จากนั้นทำการเก็บเกี่ยวยอดผักปลั่งความยาว 1 เมตร หลังจากฉีดพ่นโซเดียมซีลีเนตทางใบที่อายุ 0 5 10 และ 15 DAS แล้วนำตัวอย่างพืชที่ได้นำมาสกัดเมือกด้วยวิธี Hot Water Extraction [12] โดยนำตัวอย่างมาสับให้ละเอียด แล้วทำการชั่งผักปลั่งหนัก 30 กรัม ใส่ น้ำกรองปริมาณ 30 มิลลิกรัม (อัตรา 1:1) ใส่ปีกเกอร์ แล้วนำไปต้มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30 นาที จากนั้นนำมาปั่นให้ละเอียด คั้นน้ำด้วยถุงกรองชา และผ้าขาวบาง แล้วนำน้ำที่คั้นได้มาเข้าเครื่องปั่นเหวี่ยง 5,000 รอบ อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที จากนั้นนำส่วนตะกอนและเมือกผักปลั่ง ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 70

องศาเซลเซียส ประมาณ 5-6 วันจนแห้งสนิท แล้วนำส่วนเมือกของผักปลังที่อบจนแห้งสนิทเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณสารพฤกษเคมี โดยนำเมือกผักปลังแช่ในสารละลาย Dimethylsulfoxide (DMSO) ปริมาตร 5 มิลลิลิตร บ่มในที่มืดที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 440, 645 และ 663 นาโนเมตร เพื่อคำนวณหาปริมาณคลอโรฟิลล์เอ คลอโรฟิลล์บี และคลอโรฟิลล์ทั้งหมด [13] และแคโรทีนอยด์ [14] ฟีนอลทั้งหมด นำตัวอย่างเมือกผักปลังบดละเอียดสกัดด้วย 80% methanol จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงเพื่อให้เกิดการตะกอน ดูดสารละลายส่วนใสใส่ลงในหลอดทดลอง แล้วเติมด้วยสารละลาย folin-ciocalteu สารละลาย 20% sodium carbonate และน้ำกลั่น แล้วเขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ 30 นาทีที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 765 นาโนเมตร [15] ฟลาโวนอยด์ทั้งหมด นำตัวอย่างเมือกผักปลังบดละเอียดสกัดด้วย 80% methanol จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงเพื่อให้เกิดการตะกอน ดูดสารละลายส่วนใสใส่ลงในหลอดทดลอง แล้วเติมสารละลาย 5% Sodium nitrite ร่วมกับ 10% aluminum-chloride และ 2 M Sodium Hydroxide และน้ำกลั่น 200 ไมโครลิตร เขย่าสารละลายให้เข้ากัน บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที จากนั้นนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 415 นาโนเมตร [16] ฤทธิ์ยับยั้งอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH [17] ส่วนการสะสมซีลีเนียมทั้งหมดในเมือกผักปลัง บดตัวอย่างพืชให้ละเอียดแล้วชั่งตัวอย่างพืชแห้ง 1 กรัม แล้วย่อยตัวอย่างพืชด้วยกรดไนตริก และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (1:1) จนกระทั่งได้สารละลายใส จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็น กรองด้วยกระดาษกรอง และปรับปริมาตรให้เป็น 50 มิลลิลิตร วัดปริมาณซีลีเนียมด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma (ICP) ความยาวคลื่น 465 นาโนเมตร [18]

Table 1 Some soil properties used in this experiment

Parameters	Value	Result
Soil pH (1:1; soil: H ₂ O)	7.69	Slightly alkaline
Soil organic matter (%)	1.24	Moderately low
Available phosphorus (mg/kg)	130.05	Very high
Exchangeable potassium (mg/kg)	98.48	High
Total selenium (mg/kg)	0.091	Low
Soil texture	Sandy loam	-

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

ผลของการฉีดพ่นโซเดียมซีลีเนตทางใบต่อปริมาณคลอโรฟิลล์ แคโรทีนอยด์ ฟีนอลทั้งหมด ฟลาโวนอยด์ทั้งหมด ฤทธิ์ยับยั้งอนุมูลอิสระ และปริมาณการสะสมซีลีเนียมในเมือกผักปลัง พบว่าระยะเวลาหลังการฉีดพ่นฉีดพ่นโซเดียมซีลีเนตทางใบที่ 0 5 10 และ 15 DAS มีผลต่อปริมาณคลอโรฟิลล์เอ คลอโรฟิลล์บี คลอโรฟิลล์ทั้งหมด และแคโรทีนอยด์ (Table 2) ฟีนอลทั้งหมด ฟลาโวนอยด์ทั้งหมด และฤทธิ์ยับยั้งอนุมูลอิสระ (Table 3) รวมทั้งปริมาณการสะสมซีลีเนียมในเมือกผักปลัง (Table 4) อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ

3.1 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ บี คลอโรฟิลล์ทั้งหมด และแคโรทีนอยด์

ผลของระยะเวลาการเก็บเกี่ยวยอดผักปลังหลังการฉีดพ่นโซเดียมซีลีเนตทางใบที่ 0 5 10 และ 15 DAS ต่อปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ บี และคลอโรฟิลล์ทั้งหมดในเมือกผักปลัง พบว่าระยะเวลาการเก็บเกี่ยวยอดผักปลังหลังการฉีดพ่นโซเดียมซีลีเนตทางใบที่ 15 วัน ให้ปริมาณคลอโรฟิลล์เอ (0.46 mg/g DW) คลอโรฟิลล์ บี (0.23 mg/g DW) และปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมด (0.69 mg/g DW) สูงที่สุดและแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาการเก็บเกี่ยวยอดผักปลังหลังการฉีดพ่นโซเดียมซีลีเนตทางใบที่ 0 5 และ 10 DAS (Table 2) โดยเฉพาะปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดเพิ่มขึ้นเกือบ 2 เท่าเมื่อเทียบกับ 5 DAS (0.44 mg/g FW) แสดงให้เห็นว่าการให้โซเดียมซีลีเนตมีผลต่อการสร้างคลอโรฟิลล์ในพืชเพิ่มขึ้นในระยะหลังการฉีดพ่น ในขณะที่ปริมาณแคโรทีนอยด์สูงสุดพบที่ 15 DAS (0.18 mg/g DW) และไม่แตกต่างจาก 10 DAS (0.70 mg/g DW) และสูงกว่า 0 และ 5 DAS (0.09 และ 0.11 mg/g DW) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Table 2) แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของคลอโรฟิลล์ที่ 15 DAS อาจเกิดจากบทบาทของซีลีเนียมในการปกป้องคลอโรพลาสต์จาก oxidative stress และเสริมเสถียรภาพของเยื่อหุ้มไทลาคอยด์ ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสง [2] จากรายงานของ [5] ระบุว่าซีลีเนียมในระดับที่เหมาะสมสามารถ

เพิ่มปริมาณคลอโรฟิลล์และส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช ในส่วนของแคโรทีนอยด์ที่เพิ่มขึ้นในระยะ 10–15 DAS อาจสะท้อนกลไก photoprotective response ต่อการเพิ่มขึ้นของ reactive oxygen species (ROS) ภายหลังการได้รับซีลีเนียม [6]

Table 2 Effect of harvest time after sodium selenates application on total chlorophyll and carotenoids in ceylon spinach mucilage

Days after spraying sodium selenate (DAS)	Chlorophyll A (mg/g DW)	Chlorophyll B (mg/g DW)	Total chlorophyll (mg/g DW)	Carotenoids (mg/g DW)
0	0.21d	0.10d	0.31c	0.09c
5	0.24c	0.12c	0.36c	0.11bc
10	0.36b	0.18b	0.54b	0.15ab
15	0.46a	0.23a	0.69a	0.18a
F-test	**	**	**	**
CV (%)	7.71	6.49	6.61	12.22

** = significantly difference at 99 % by LSD method

3.2 ปริมาณฟีนอลทั้งหมด ฟลาโวนอยด์ทั้งหมด และฤทธิ์ยับยั้งอนุมูลอิสระ

ผลของระยะเวลาการเก็บเกี่ยวอดผักปลังหลังการฉีดพ่นโซเดียมซีลีเนตทางใบที่ 0 5 10 และ 15 DAS ต่อปริมาณฟีนอลทั้งหมด ฟลาโวนอยด์ทั้งหมด และฤทธิ์ยับยั้งอนุมูลอิสระในเมือกผักปลัง พบว่าฟีนอลทั้งหมดเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในช่วง 10–15 DAS โดย 10 DAS ให้ค่าสูงสุด (482.12 mg GAE/g DW) รองลงมาคือ 15 DAS (463.61 mg GAE/g DW) และต่ำสุดที่ 0 วัน (235.00 mg GAE/g DW) (Table 3) เช่นเดียวกันกับปริมาณฟลาโวนอยด์ที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนที่ 10 และ 15 DAS โดย 15 DAS ให้ค่าสูงสุด (72.40 mg QE/g DW) รองลงมาคือ 10 DAS (68.35 mg QE/g DW) และต่ำสุดที่ 0 DAS (42.10 mg QE/g DW) (Table 3) ในขณะที่ฤทธิ์ยับยั้งอนุมูลอิสระ (% inhibition) เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาหลังการฉีดพ่น โดย 15 DAS ให้ค่าสูงสุด (74.25%) รองลงมาคือ 10 DAS (69.17%) และต่ำสุดที่ 0 DAS (32.00%) ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มของฟีนอลและฟลาโวนอยด์ทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของฟีนอลและฟลาโวนอยด์ทั้งหมด และค่าฤทธิ์ยับยั้งอนุมูลอิสระในช่วง 10–15 DAS บ่งชี้ว่าซีลีเนียมมีบทบาทกระตุ้นเส้นทาง phenylpropanoid pathway ซึ่งเกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์สารฟีนอล [4] ซึ่งสารฟีนอลมีสมบัติในการให้ไฮโดรเจนหรืออิเล็กตรอนแก่อนุมูลอิสระจึงสัมพันธ์โดยตรงกับค่าฤทธิ์ยับยั้งอนุมูลอิสระที่เพิ่มขึ้น

ดังนั้นผลการทดลองชี้ว่าช่วง 10–15 DAS เป็นระยะที่เหมาะสมต่อการเก็บเกี่ยวผักปลังเขียวเพื่อให้ได้คุณค่าทางโภชนาการและฤทธิ์ยับยั้งอนุมูลอิสระสูงสุด ดังนั้นการใช้โซเดียมซีลีเนตในระดับที่เหมาะสมจึงมีศักยภาพในการพัฒนา functional vegetable และ biofortification strategy ซึ่งการฉีดพ่นโซเดียมซีลีเนตทางใบสามารถเพิ่มปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมด ฟีนอล ฟลาโวนอยด์ และฤทธิ์ยับยั้งอนุมูลอิสระในเมือกผักปลังได้อย่างมีนัยสำคัญ

3.3 ปริมาณซีลีเนียมในเมือกผักปลัง

ผลของระยะเวลาการเก็บเกี่ยวอดผักปลังหลังการฉีดพ่นโซเดียมซีลีเนตทางใบที่ 0 5 10 และ 15 DAS ต่อการสะสมซีลีเนียมในเมือกผักปลัง พบว่าระยะเวลาหลังการฉีดพ่นมีผลต่อปริมาณซีลีเนียมในเนื้อเยื่อพืชอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังแสดงใน Table 4 โดยการสะสมซีลีเนียมเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในช่วง 10 DAS และลดลงเมื่อเข้าสู่ระยะ 15 DAS กล่าวคือ ที่ 5 DAS ปริมาณซีลีเนียมในเมือกผักปลังเท่ากับ 109.22 mg/kg DW แสดงถึงการดูดซึมซีลีเนียมเข้าสู่เนื้อเยื่ออย่างรวดเร็วภายหลังการให้ทางใบ ต่อมาในระยะ 10 DAS ปริมาณซีลีเนียมเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเป็น 205.73 mg/kg DW ซึ่งเป็นค่าที่สูงที่สุดในการทดลองสะท้อนถึงช่วงเวลาที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซึมและเคลื่อนย้ายซีลีเนียมภายในเซลล์ อย่างไรก็ตามเมื่อเข้าสู่ระยะ 15 DAS ปริมาณซีลีเนียมลดลงเหลือ 95.00 mg/kg DW ซึ่งแตกต่างจากช่วง 5 และ 10 DAS อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Table 4) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการสะสมซีลีเนียมในพืชมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงการตามช่วงเวลาและสภาพทางสรีรวิทยาของพืชอย่างต่อเนื่อง กล่าวคือภายหลังการฉีดพ่น (5 วันแรก) ซีลีเนียมในรูปซีลีเนตถูกดูดซึมเข้าสู่ใบอย่างรวดเร็วผ่านระบบลำเลียงแบบซัลเฟต เนื่องจากซีลีเนตมีโครงสร้างทางเคมีคล้ายคลึงกับซัลเฟต พืชจึงสามารถรับเข้าสู่เซลล์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อเข้าสู่ระยะ 10 DAS

การสะสมซีลีเนียมเพิ่มขึ้นสูงสุด สะท้อนถึงช่วงที่กระบวนการดูดซึม การเคลื่อนย้ายภายในเซลล์ และการเปลี่ยนรูปทางชีวเคมี (biotransformation) อยู่ในระดับสมดุลที่เอื้อต่อการสะสมในเนื้อเยื่อ อย่างไรก็ตาม เมื่อเข้าสู่ระยะ 15 DAS ปริมาณซีลีเนียมลดลง แสดงให้เห็นว่าพืชมีการปรับตัวและควบคุมระดับซีลีเนียมภายในเซลล์ เช่น เมื่อมวลชีวภาพเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของซีลีเนียมต่อหน่วยน้ำหนักสดจึงลดลง หรือการเปลี่ยนรูปเป็นสารอินทรีย์ เช่น selenomethionine และ selenocysteine ซึ่งอาจถูกนำไปใช้ในกระบวนการเมแทบอลิซึมภายในพืช รวมทั้งกระบวนการกำจัดความเป็นพิษ ในรูปสารประกอบซีลีเนียมที่ระเหยได้ หรือการกระจายตัวไปยังส่วนอื่นของพืช ดังนั้นการเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุด แล้วลดลงในระยะถัดมา จึงสะท้อนถึงธรรมชาติของการสะสมธาตุเสริมประโยชน์ ซึ่งพืชมีระบบควบคุมภายในเพื่อรักษาสมดุล ไม่ให้เกิดการสะสมเกินระดับที่อาจเป็นพิษ [1], [2] จากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าระยะ 10 DAS เป็นช่วงเวลาที่เหมาะสมต่อการเก็บเกี่ยวด้านการเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ (biofortification) เนื่องจากให้ปริมาณซีลีเนียมสูงสุด โดยสรุปการฉีดพ่นโซเดียมซีลีเนตทางใบมีผลต่อการสะสมซีลีเนียมในเมื่อผักปลังอย่างมีนัยสำคัญ และการสะสมมีค่าสูงสุดในช่วง 10 DAS แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการจัดการระยะเวลาเก็บเกี่ยวในการผลิตผักเสริมซีลีเนียมเพื่อเพิ่มคุณค่าทางสุขภาพ

Table 3 Effect of harvest time after sodium selenates application on total phenol, total flavonoids and DPPH in ceylon spinach mucilage

Days after spraying sodium selenate (DAS)	Total phenol (mg GAE/g DW)	Total flavonoids (mg QE/g DW)	DPPH (% inhibition)
0	235.00c	38.75c	32.00d
5	272.24b	42.10c	38.77c
10	482.12a	68.35b	69.17b
15	463.61a	72.40a	74.25a
F-test	**	**	**
CV (%)	16.27	12.76	17.13

** = significantly difference at 99 % by LSD

Table 4 Effect of harvest time after sodium selenates application on selenium accumulation in ceylon spinach mucilage

Days after spraying sodium selenate (DAS)	Selenium accumulation (mg/kg DW)
0	3.25d
5	109.22b
10	205.73a
15	95.00c
F-test	**
CV (%)	12.92

** = significantly difference at 99% by LSD

4. สรุป

การฉีดพ่นโซเดียมซีลีเนียมทางใบมีผลต่อการสะสมซีลีเนียมในเมือกผักปลังอย่างมีนัยสำคัญ โดยปริมาณซีลีเนียมในเนื้อเยื่อสูงสุดที่ 10 DAS ขณะที่ปริมาณคลอโรฟิลล์ ฟีนอล ฟลาโวนอยด์ และฤทธิ์ยับยั้งอนุมูลอิสระสูงสุดในช่วง 15 DAS ดังนั้นหากต้องการเพิ่มปริมาณซีลีเนียมในผลิตผล ควรเก็บเกี่ยวที่ 10 DAS แต่หากมุ่งเน้นคุณค่าด้านฤทธิ์ยับยั้งอนุมูลอิสระ ควรเก็บเกี่ยวที่ 15 DAS แสดงให้เห็นว่าการจัดการช่วงเวลาเก็บเกี่ยวจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการพัฒนาผักปลังเสริมซีลีเนียมเพื่อเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการและสุขภาพ

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาจากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และสำนักงานวิจัยการเกษตร (สวก.) ที่สนับสนุนงบประมาณดำเนินการวิจัย โครงการความหลากหลายทางพันธุกรรมของผักปลังสำหรับการเพิ่มซีลีเนียม สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารฟังก์ชันประเภทบิสกิตเพื่อสุขภาพ ภายใต้แผนงานวิจัย เรื่อง “การพัฒนาศักยภาพบุคลากรวิจัยเพื่อยกระดับความสามารถในการแข่งขันภาคอุตสาหกรรมเกษตร” (Talent Mobility-SISKU)

6. เอกสารอ้างอิงจากเว็บไซต์

- [1] Terry, N., Zayed, A. M., de Souza, M. P. and Tarun, A. S. 2000. Selenium in higher plants. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 51: 401–432.
- [2] Pilon-Smits, E. A. H., Quinn, C. F., Tapken, W., Malagoli, M. and Schiavon, M. 2009. Physiological functions of beneficial elements. *Curr. Opin. Plant Biol.* 12: 267–274.
- [3] สำนักโภชนาการ กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข. 2563. ปริมาณสารอาหารอ้างอิงที่ควรได้รับประจำวันสำหรับคนไทย พ.ศ. 2563.
- [4] White, P. J., Bowen, H. C., Parmaguru, P., Fritz, M., Spracklen, W. P., Spiby, R. E., Meacham, M. C., Mead, A., Harriman, M., Trueman, L. J., Smith, B. M., Thomas, B. and Broadley, M. R. 2004. Interactions between selenium and sulphur nutrition in *Arabidopsis thaliana*. *J. Exp. Bot.* 55: 1927–1937.
- [5] Hasanuzzaman, M., Hossain, M. A. and Fujita, M. 2010. Selenium-induced up-regulation of antioxidant defense systems. *Biol. Trace Elem. Res.* 143: 1704–1721.
- [6] Hawrylak-Nowak, B. 2008. Effect of selenium on selected macronutrients in maize plants. *J. Plant Nutr.* 31: 2033–2043.
- [7] Rios, J. J., Blasco, B., Cervilla, L. M., Rosales, M. A., Sanchez-Rodriguez, E., Romero, L. and Ruiz, J. M. 2008. Production and detoxification of H₂O₂ in lettuce plants exposed to selenium. *Ann. Appl. Biol.* 152: 107–116.
- [8] Logvinenko, L., Golubkina, N., Fedotova, I., Bogachuk, M., Fedotov, M., Kataev, V., Alpatov, A., Shevchuk, O., and Caruso, G. 2022. Effect of Foliar Sodium Selenate and Nano Selenium Supply on Biochemical Characteristics, Essential Oil Accumulation and Mineral Composition of *Artemisia annua* L. *Molecules*, 27(23).
- [9] Du, B., Chen, H., and Xing, D. 2018. Effects of Foliar Selenium Fertilizer on Agronomical Traits and Selenium, Cadmium Contents of Different Rape Varieties. *Computational Intelligence and Intelligent Systems*, Singapore.
- [10] Lara, T., Lessa, J. H. L., Souza, K., Corguinha, A., Martins, F. A. D., Lopes, G., and Guilherme, L. 2019. Selenium biofortification of wheat grain via foliar application and its effect on plant metabolism. *Journal of Food Composition and Analysis*, 81.
- [11] Chaurasiya, A. K., Pal, R. K., Verma, P. K., Katiyar, A., Razauddin, and Kumar, N. 2021. An updated review on Malabar spinach (*Basella alba* and *Basella rubra*) and their importance. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*.

-
- [12] Tosif M. M., Najda A., Bains A., Kaushik R, Dhull S. B., Chawla P., Walasek-Janusz M. 2021. A Comprehensive Review on Plant-Derived Mucilage: Characterization, Functional Properties, Applications, and Its Utilization for Nanocarrier Fabrication. *Polymers (Basel)*. 13(7): 1066.
- [13] Arnon, D. I. 1949. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in beta vulgaris. *Plant Physiol*. 24: 1-15.
- [14] Barnes, J. D., Balaguer, L., Manrique, E., Elvira S. and Davison AW. 1992. A reappraisal of the use of DMSO for the extraction and determination of chlorophylls-a and chlorophylls-b in lichens and higher-plants. *Environmental and Experimental Botany*. 32: 85-100.
- [15] Singleton, V. L., Orthofer, R., and Lamuela-Raventos, R. M. 1999. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteu reagent. *Methods Enzymol*. 299: 152-178.
- [16] Tunna, T. S., Zaidul, I. S. M., Ahmed, Q. U., Ghafoor, K., Al-Juhaimi FY., Uddin, MS., Hasan, M. and Ferdous, S. 2015. Analyses and profiling of extract and fractions of neglected weed *Mimosa pudica* Linn. Traditionally used in Southeast Asia to treat diabetes. *S. Afr. J. Bot*. 99: 144-152.
- [17] Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., and Berset, C. 1995. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *Food Science and Technology*. 28: 25-30.
- [18] Li, X., Luo, Y., Zeng, C., Zhong, Q., Xiao, Z., Mao, X. and Cao, F. 2023. Selenium accumulation in plant foods and selenium intake of residents in a moderately selenium-enriched area of Mingyueshan, Yichun, China. *Journal of Food Composition and Analysis*. 116: 105089.

ผลของการบ่มแข็งเทียมต่อสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสม AA2055 Effect of Artificial Aging on Mechanical Properties of AA2055 Aluminum Alloy

อรณิชา ธีระเกียรติ¹ และ ปฎิภาณ จุ้ยเจิม^{1,*}
Oranicha Theerakiat and Patiphan Juijerm^{1,*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร 10900 ประเทศไทย
¹Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok, 10900, Thailand
*Corresponding author: Patiphan Juijerm, e-mail address: fengppj@ku.ac.th

บทคัดย่อ

อะลูมิเนียมผสม AA2055 จัดอยู่ในกลุ่มอะลูมิเนียม-ลิเทียมรุ่นที่สาม ซึ่งมีความแข็งแรงสูงและถูกนำไปใช้ในงานโครงสร้างด้านอากาศยาน งานวิจัยนี้ศึกษาผลของการบ่มแข็งเทียมที่อุณหภูมิ 155, 175 และ 195°C ในเวลาต่างๆ ต่อการเปลี่ยนแปลงความแข็งและสมบัติแรงดึงของอะลูมิเนียมผสม AA2055 โดยขึ้นงานผ่านกระบวนการอบละลายเฟสที่ 520°C และ ชุบเย็นอย่างรวดเร็วก่อนเข้าสู่การบ่มแข็งเทียม ทำการทดสอบความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์สและการทดสอบแรงดึง ผลการทดลองพบว่าทุกอุณหภูมิแสดงพฤติกรรมทั่วไปของกระบวนการตกผลึกของตะกอน ประกอบด้วยช่วง under-aged, peak-aged และ over-aged โดยเวลาในการเข้าสู่สภาวะ peak-aged ลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น จาก 120 ชั่วโมงที่ 155°C เหลือ 24 ชั่วโมงที่ 175°C และ 6 ชั่วโมงที่ 195°C สภาวะที่ให้ค่าความแข็งสูงสุดคือ 155°C เป็นเวลา 120 ชั่วโมง (115.5 HV) ซึ่งให้ค่าความเค้นดึงสูงสุดมีค่ามากที่สุดเช่นกัน (513.9 MPa) ขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิการบ่มแข็งแม้ทำให้เข้าสู่ peak-aged ได้รวดเร็วขึ้น แต่ส่งผลให้ค่าความแข็งและค่าความต้านทานแรงดึงลดลง เป็นผลจากการเร่งการเติบโตและการหยาบตัวของตะกอนเสริมความแข็งแรง ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิและเวลาการบ่มแข็งเทียมมีบทบาทสำคัญต่อการควบคุมสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมผสม AA2055 และสามารถใช้เป็นแนวทางในการออกแบบสภาวะการบ่มเพื่อให้ได้สมดุลระหว่างความแข็งแรงของวัสดุและประสิทธิภาพในการผลิต

คำสำคัญ: AA2055, การบ่มแข็งเทียม, ความแข็ง, สมบัติแรงดึง

Abstract

AA2055 is a third-generation Al–Li alloy widely used in aerospace structural applications due to its high specific strength. This study investigates the effect of artificial aging at 155, 175, and 195 °C for various aging times on the hardness evolution and tensile properties of AA2055 alloy. The alloy was solution-treated at 520 °C followed by water quenching prior to artificial aging. Micro-Vickers hardness tests and tensile tests were performed to evaluate the mechanical response at various aging times. All aging conditions exhibited typical precipitation hardening behavior consisting of under-aged, peak-aged, and over-aged stages. The time to reach peak-aged condition decreased significantly with increasing aging temperature, from 120 h at 155 °C to 24 h at 175 °C and 6 h at 195 °C. The highest hardness (115.5 HV) and ultimate tensile strength (513.9 MPa) were obtained after aging at 155 °C for 120 h. Although higher aging temperatures accelerated the precipitation process and shortened the time to peak aging, resulted in lower peak hardness and tensile strength due to precipitate coarsening. The results demonstrate that aging temperature and time strongly influence the mechanical performance of AA2055 and provide guidance for optimizing aging parameters to balance strength and processing efficiency.

Keywords: AA2055, artificial aging, hardness, tensile properties

1. บทนำ

อะลูมิเนียมผสมเกรด AA2055 จัดอยู่ในกลุ่มอะลูมิเนียม-ลิเทียมรุ่นที่สาม (third-generation Al–Li alloy) ซึ่งได้รับการพัฒนาเพื่อใช้งานโครงสร้างที่ต้องการความแข็งแรงสูงและน้ำหนักเบา โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมการบินและอวกาศ เช่น โครงสร้างปีก เครื่องบิน โครงสร้างลำตัว และชิ้นส่วนที่รับแรงดึงสูง [1,2] การเติมธาตุ Li ช่วยลดความหนาแน่นและเพิ่ม

มอดูลสียืดหยุ่นของวัสดุ ในขณะที่การปรับสัดส่วน Cu/Li และการเติมธาตุ Ag และ Mg มีบทบาทสำคัญในการควบคุมชนิดและเสถียรภาพของตะกอนเสริมความแข็งแรง [1,3] ด้วยเหตุนี้ AA2055 จึงเป็นวัสดุที่มีศักยภาพสูงสำหรับงานโครงสร้างที่ต้องการสมดุลระหว่างน้ำหนักและความแข็งแรง โดยทั่วไป อะลูมิเนียมผสมกลุ่ม Al-Cu-Li แสดงสมบัติทางกลที่เหนือกว่าอะลูมิเนียมผสมแบบดั้งเดิมในกลุ่ม 2xxx และ 7xxx เนื่องจากมีกลไกการเสริมความแข็งแรงจากการตกผลึกของตะกอน (precipitation hardening) ที่มีเสถียรภาพสูง ส่งผลให้มีสมบัติทางกลที่ดี [2,3]

กลไกการเสริมความแข็งแรงของอะลูมิเนียมผสมกลุ่มนี้เกิดจากกระบวนการตกผลึกของตะกอน โดยตะกอนหลักที่มีบทบาทสำคัญคือเฟส T1 (Al_2CuLi) ซึ่งตกผลึกบนระนาบ {111} ของเมทริกซ์อะลูมิเนียมและมีลักษณะเป็นแผ่นบาง (plate-like precipitates) [4,5] ตะกอนชนิดนี้สามารถขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงเป็นกลไกหลักที่ควบคุมค่าความแข็งแรงและความต้านทานแรงดึงของโลหะผสม AA2055 [4,6] อย่างไรก็ตาม ขนาด ความหนาแน่น และการกระจายตัวของตะกอน T1 ขึ้นอยู่กับสภาวะการบ่มแข็งเทียม (artificial aging) โดยตรง งานวิจัยก่อนหน้ารายงานว่าเมื่ออุณหภูมิหรือเวลาการบ่มเพิ่มขึ้น จะเกิดการหยาบตัว (coarsening) ของตะกอน รวมถึงการเกิดเฟสรอง เช่น θ' (Al_2Cu) หรือ Ω phase ซึ่งส่งผลให้ค่าความแข็งแรงและความต้านทานแรงดึงลดลง [1,4] นอกจากนี้ การศึกษาทางจุลภาคยังแสดงให้เห็นว่าปฏิสัมพันธ์ระหว่างตะกอนกับดิสโลเคชันมีบทบาทสำคัญต่อพฤติกรรมการเสียรูปของวัสดุ [5]

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นการศึกษาที่สภาวะ over-aging หรืออุณหภูมิสูงมาก รวมถึงการทดสอบที่อุณหภูมิใช้งานจริง ในขณะที่การเปรียบเทียบพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงและสมบัติแรงดึงของ AA2055 ภายใต้ช่วงอุณหภูมิการบ่มแข็งเทียมที่แตกต่างกันอย่างเป็นระบบยังมีรายงานจำกัด โดยเฉพาะการเชื่อมโยงผลการทดสอบเชิงกลกับวิวัฒนาการของตะกอนเสริมความแข็งแรงในช่วง under-aged (UA), peak-aged (PA) และ over-aged (OA) ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิการบ่มแข็งเทียมที่ 155 175 และ 195 °C ต่อการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงและสมบัติแรงดึงของอะลูมิเนียมผสม AA2055 พร้อมทั้งวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างผลการทดสอบเชิงกลกับกลไกการเสริมความแข็งแรงที่เกี่ยวข้องกับวิวัฒนาการของตะกอนในโครงสร้างจุลภาคจากข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2. วิธีการศึกษา

งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงของอะลูมิเนียมผสม AA2055 ภายใต้กระบวนการบ่มแข็งเทียมที่อุณหภูมิ 155 175 และ 195 °C โดยดำเนินการเตรียมชิ้นงานผ่านกระบวนการอบละลายเฟสและการเย็นตัวอย่างรวดเร็วก่อนเข้าสู่การบ่มแข็งเทียม จากนั้นทำการทดสอบความแข็งแรงแบบไมโครวิกเกอร์ส (Micro-Vickers hardness test) และการทดสอบแรงดึงในแต่ละช่วงเวลาการบ่มแข็ง เพื่ออธิบายพฤติกรรมเพิ่มความแข็งแรงและการเสื่อมสภาพจากการบ่มแข็ง รายละเอียดของขั้นตอนการทดลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ การเตรียมชิ้นงานและกรรมวิธีทางความร้อน การทดสอบความแข็งแรง และการทดสอบแรงดึง ดังแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

2.1 ชิ้นงานและกรรมวิธีทางความร้อน

วัสดุที่ใช้คืออะลูมิเนียมผสม AA2055 ขึ้นรูปขึ้นงานตามมาตรฐาน ASTM E8/E8M ด้วยวิธีไวร์คัท มีองค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก) ประกอบด้วย Al 93.30, Cu 3.7, Li 1.15, Ag 0.4, Mg 0.4, Zn 0.5, Mn 0.3, Zr 0.11, Fe 0.09 และ Si 0.05 ชิ้นงานถูกอบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 520 °C ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 °C/min ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน และคงอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้เกิดการกระจายตัวของธาตุผสมอย่างสม่ำเสมอ จากนั้นทำการเย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วยการชุบลงในน้ำที่อุณหภูมิห้องเพื่อรักษาโครงสร้างในสภาวะสารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวด (supersaturated solid solution) หลังการเย็นตัว ชิ้นงานถูกนำเข้าสู่กระบวนการบ่มแข็งเทียมที่อุณหภูมิ 155 175 และ 195 °C โดยอุณหภูมิทั้งสามค่านี้อ้างอิงจากช่วงอุณหภูมิที่มีการศึกษาในงานวิจัยก่อนหน้าเกี่ยวกับอะลูมิเนียมผสมกลุ่ม Al-Cu-Li ซึ่งมักศึกษาผลของการบ่มแข็งเทียมที่อุณหภูมิต่ำกว่า 200 °C ต่อการเปลี่ยนแปลงของตะกอนและสมบัติทางกล [4,7,8] การเลือกอุณหภูมิทั้งสามค่านี้มีจุดประสงค์เพื่อแทนสภาวะการบ่มที่มีจลนศาสตร์แตกต่างกัน ตั้งแต่การตกผลึกที่ค่อนข้างช้าไปจนถึงการเกิดและหยาบตัวของตะกอนที่รวดเร็วขึ้น เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของ AA2055 ได้อย่างชัดเจน งานวิจัยนี้ได้ทำการบ่มแข็งเทียมเป็นระยะเวลาต่างๆ ตามตารางที่ 1 เมื่อครบกำหนดเวลาในแต่ละเงื่อนไข ชิ้นงานถูกนำออกจากเตาและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศจนถึงอุณหภูมิห้องก่อนทำการทดสอบความแข็งแรงและการทดสอบแรงดึง

Table 1 Experimental matrix of artificial aging temperatures and times for AA2055 alloy.

Conditions	Ageing Time (h)													
	0.5	1	2	4	6	9	12	15	24	48	72	120	168	
Temperature (°C)	155	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
	175	-	/	-	-	/	/	-	/	/	/	/	/	/
	195	-	/	-	-	/	/	/	-	/	/	/	-	/

Note: The symbol “/” indicates ageing conditions employed, whereas “-” denotes conditions not applied.

2.2 การทดสอบความแข็ง

การทดสอบความแข็งดำเนินการด้วยวิธีไมโครวิกเกอร์ส โดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งรุ่น Mitutoyo MVK-H1 กำหนดแรงกดที่ 100 gf และระยะเวลาคงแรงกด 15 วินาที ก่อนการทดสอบ ชิ้นงานถูกเตรียมผิวโดยการขัดด้วยกระดาษทรายลำดับเบอร์ตั้งแต่ 300 ถึง 2,000 และขัดละเอียดด้วยสารแขวนลอยอะลูมินา เพื่อให้ได้ผิวชิ้นงานที่เรียบและปราศจากรอยขีดข่วนที่อาจส่งผลต่อค่าความแข็ง ในแต่ละเงื่อนไขการบ่มแข็งได้ทำการกดวัดจำนวน 5 ตำแหน่ง โดยเว้นระยะห่างระหว่างรอยกดอย่างเพียงพอเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบซึ่งกันและกัน ในการคำนวณผลได้ทำการตัดค่าความแข็งสูงสุดและต่ำสุดออกเพื่อลดอิทธิพลของค่าที่อาจเบี่ยงเบนจากตำแหน่งการกด ดังนั้นค่าความแข็งที่รายงานจึงเป็นค่าเฉลี่ยของผลการวัด 3 ค่าที่เหลือ และค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) คำนวณจากผลการวัด 3 ค่าดังกล่าว

2.3 การทดสอบแรงดึง

การทดสอบแรงดึงดำเนินการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง โดยใช้อัตราความเครียดที่ 10^{-3} วินาที⁻¹ เงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM E8/E8M และหาจุดครากด้วยวิธี 0.2% offset ในแต่ละเงื่อนไขการบ่มแข็ง ได้ทำการทดสอบแรงดึงจำนวน 3 ชิ้นงาน

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงความแข็งของอะลูมิเนียมผสม AA2055 ภายใต้การบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 155 175 และ 195°C เพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการพัฒนาสมบัติทางกล โดยมุ่งเน้นการระบุช่วง under-aged, peak-aged และ over-aged ของแต่ละอุณหภูมิ ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งและเวลาการบ่มแข็งที่เทียบ พบว่าทุกอุณหภูมิแสดงพฤติกรรมของการเพิ่มความแข็งในลักษณะทั่วไปของกระบวนการบ่มแข็งที่เทียบ กล่าวคือค่าความแข็งเพิ่มขึ้นในช่วง under-aged ก่อนเข้าสู่สภาวะ peak-aged และค่าความแข็งลดลงเมื่อเข้าสู่ช่วง over-aged เป็นผลจากการหายตัวของตะกอนผลึกของแข็ง ค่าความแข็งเริ่มต้นหลังการอบละลายและการเย็นตัวอย่างรวดเร็วมีค่า 105.1 HV สะท้อนสภาวะสารละลายของแข็งอิ่มตัวที่ยังยวดก่อนเกิดการตกผลึกของตะกอน ในช่วง under-aged ของชิ้นงานที่อุณหภูมิ 155 และ 175°C ค่าความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงเล็กน้อยในช่วงต้นซึ่งสัมพันธ์กับการเกิดและสลายตัวของ GP zones หรือตะกอนกึ่งเสถียรก่อนเปลี่ยนแปลงเป็นตะกอนหลักที่เสถียรกว่า ขณะที่อุณหภูมิ 195°C ไม่ปรากฏช่วงดังกล่าวอย่างชัดเจน เนื่องจากอุณหภูมิสูงเร่งจลนศาสตร์ของการตกผลึก ทำให้ค่าความแข็งเข้าสู่ช่วง peak-aged อย่างรวดเร็ว ที่อุณหภูมิ 195°C พบว่าค่าความแข็งของการบ่มแข็งที่ 1 และ 6 ชั่วโมงมีค่าใกล้เคียงกันมาก (113.7 และ 113.8 HV ตามลำดับ) งานวิจัยนี้ได้กำหนดให้เวลา 6 ชั่วโมงเป็นจุด peak-aged เชิงปรากฏ (apparent peak-aged condition) เนื่องจากเป็นช่วงที่อัตราการเปลี่ยนแปลงความแข็งเข้าใกล้ศูนย์ก่อนเริ่มลดลงอย่างต่อเนื่อง ในทางตรงกันข้าม ที่อุณหภูมิ 155 °C แสดงช่วง under-aged ยาวนานที่สุดโดยเข้าสู่ช่วง peak-aged ที่เวลา 120 ชั่วโมง ด้วยค่าความแข็งสูงสุด 115.5 HV และลดลงเล็กน้อยเป็น 115.1 HV ที่เวลา 168 ชั่วโมง การลดลงเพียงเล็กน้อยนี้แสดงถึงเสถียรภาพของตะกอนผลึกของแข็งที่อุณหภูมิต่ำ และสะท้อนการเกิด over-aging ที่ช้ากว่าเมื่อเทียบกับการบ่มแข็งที่อุณหภูมิสูง ในขณะที่อุณหภูมิ 175°C แสดงช่วง peak-aged อย่างชัดเจนที่เวลาการบ่มแข็งที่เทียบ 24 ชั่วโมง ด้วยค่าความแข็งสูงสุดที่ 111.5 HV ก่อนที่ค่าความแข็งจะลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิ พบว่าเวลาในการเข้าสู่สภาวะ peak-aged ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น จาก 120 ชั่วโมงที่ 155°C

เหลือ 24 ชั่วโมงที่ 175°C และเพียง 6 ชั่วโมงที่ 195°C สะท้อนถึงการเร่งจลนศาสตร์ของกระบวนการตกผลึกที่อุณหภูมิสูงขึ้น เมื่อผ่านช่วง peak-aged ค่าความแข็งลดลงอย่างชัดเจนเนื่องจากการหยาบตัวและการเติบโตของตะกอนเสริมความแข็งแรง โดยพฤติกรรมดังกล่าวปรากฏชัดที่ 175 และ 195 °C ขณะที่ที่ 155 °C ยังไม่แสดงช่วง over-aged อย่างเด่นชัดภายในช่วงเวลาทำการทดลอง

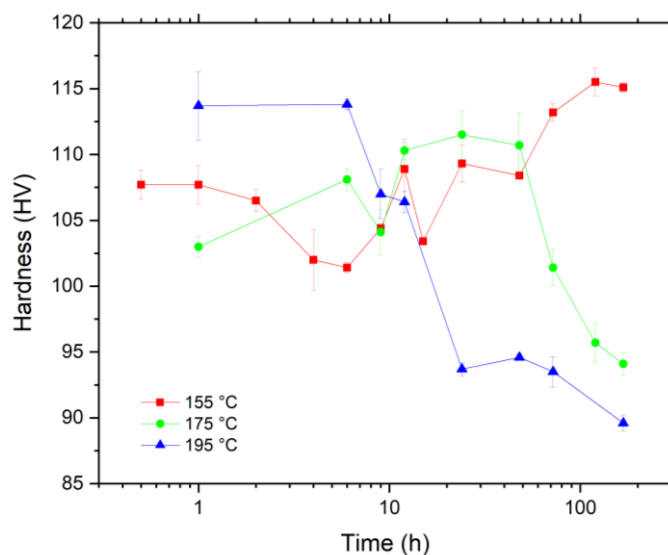


Figure 1 Hardness evolution of AA2055 during artificial aging at different temperatures (155–195°C) as a function of aging time (h, logarithmic scale). Error bars represent standard deviation from three hardness measurements.

แนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดสอบแรงดึงในรูปแบบที่ 2 โดย ชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งที่ 155°C เป็นเวลา 120 ชั่วโมง ให้ค่าความเค้นดึงสูงสุด (UTS) สูงที่สุด เท่ากับ 513.9 MPa รองลงมาคือ 175°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และต่ำที่สุดคือ 195°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ซึ่งมีค่า 476.4 และ 473.0 MPa ตามลำดับ แนวโน้มของค่าความเค้นครากและค่าการยืดตัวเป็นไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ สภาวะที่ให้ค่าความแข็งสูงกว่าจะให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงกว่า ขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิการบ่มมีแนวโน้มทำให้ความสามารถในการยืดตัวลดลง พฤติกรรมดังกล่าวสอดคล้องกับลักษณะทั่วไปของกระบวนการบ่มแข็งเทียมในอะลูมิเนียมผสมกลุ่ม Al-Cu-Li ซึ่งการเพิ่มความแข็งแรงเกิดจากการก่อตัวและการกระจายตัวของตะกอนเสริมความแข็งแรงในระยะเริ่มต้น และการลดลงของความแข็งแรงในช่วง over-aged เกิดจากการหยาบตัวและการเติบโตของตะกอนที่ลดประสิทธิภาพในการขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน

ในเชิงโครงสร้างจุลภาค อะลูมิเนียมผสมกลุ่ม Al-Cu-Li โดยเฉพาะ AA2055 มีตะกอนเสริมความแข็งแรงหลักคือ T1 (Al₂CuLi) ซึ่งตกผลึกบนระนาบ {111} ของเมทริกซ์อะลูมิเนียมและมีลักษณะเป็นแผ่นบาง [1,4,5] ตะกอนชนิดนี้มีบทบาทสำคัญต่อการเพิ่มความแข็งแรงและความต้านทานแรงดึง เนื่องจากสามารถขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะเมื่อมีการกระจายตัวของตะกอนอย่างละเอียดและมีความหนาแน่นสูง จากงานวิจัยของ Balducci และคณะ [4] แสดงว่า ในสภาวะ peak-aged ของ AA2055 โครงสร้างจุลภาคมีตะกอน T1 เป็นหลัก ขณะที่ในช่วง over-aged จะเกิดการหยาบตัว และบางส่วนอาจเกิดการเปลี่ยนเฟสเป็น θ' (Al₂Cu) หรือ Ω phase ซึ่งมีองค์ประกอบใกล้เคียงกัน แต่มีเสถียรภาพทางความร้อนแตกต่างกัน การหยาบตัวของตะกอนทำให้ระยะห่างระหว่างตะกอนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการขัดขวางดิสโลเคชันลดลง ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มการลดลงของความแข็งแรงและความต้านทานแรงดึง ที่สังเกตได้ในช่วง over-aged การที่สภาวะ 155 °C ให้ค่าความแข็งแรงและค่าความเค้นดึงสูงสุด สะท้อนถึงสภาวะที่มีความหนาแน่นของตะกอน T1 ที่เหมาะสมและมีขนาดละเอียดที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิ 175 และ 195°C การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้จลนศาสตร์ของการตกผลึกและการเติบโตของตะกอนเกิดเร็วขึ้น ทำให้เข้าสู่ช่วง peak-aged เร็วกว่า แต่ในขณะเดียวกันก็เร่งการหยาบตัวของตะกอนเช่นกัน นอกจากนี้ จากงานวิจัยของ Jiang และคณะ [6] พบว่าขนาดและความหนาแน่นของตะกอน T1 มีผลโดยตรงต่อสมบัติทางกล โดยเมื่อความหนาแน่นของตะกอนลดลงหรือขนาดเพิ่มขึ้น จะทำให้ความต้านทานแรงดึงลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในงานวิจัยนี้ที่

พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งที่ 195°C แม้จะเข้าสู่ peak-aged อย่างรวดเร็ว แต่ให้ค่าความต้านทานแรงดึงต่ำกว่าสถานะที่บ่มแข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่า ในมุมมองเชิงกลไก การเสริมความแข็งของ AA2055 เกิดจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างดิสโลเคชันกับตะกอน T1 เป็นหลัก โดย Dongmei และคณะ [5] รายงานว่าดิสโลเคชันสามารถถูกยึดเหนี่ยว (pinned) โดยตะกอน T1 และ β_1 phase ทำให้เกิดการแบ่งโซนภายในเกรนและเพิ่มความต้านทานการเสียรูป อย่างไรก็ตาม เมื่อขนาดตะกอนเพิ่มขึ้นในช่วง over-aging กลไกการต้านทานจะเปลี่ยนจากการตัดผ่าน (shearing) ไปสู่กลไก Orowan ส่งผลให้ค่าความแข็งลดลงตามที่สังเกตได้ในงานวิจัยนี้ ดังนั้น ความแตกต่างของอุณหภูมิการบ่มแข็งเทียมในงานวิจัยนี้จึงส่งผลต่อสมดุลระหว่างการเกิด การเติบโต และการหยาบตัวของตะกอนเสริมความแข็งโดยตรง

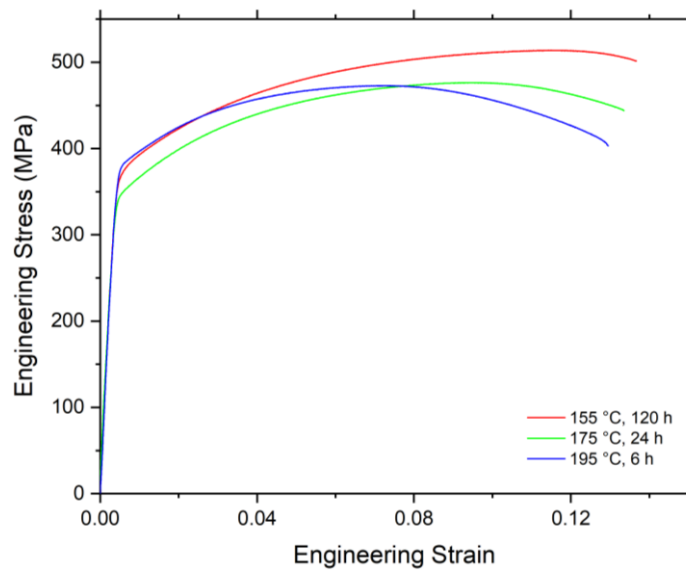


Figure 2 Engineering stress–strain curves of AA2055 at peak-aged conditions for different ageing temperatures.

พฤติกรรมเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของ AA2055 ภายใต้การบ่มแข็งเทียมที่อุณหภูมิต่างกันมีความสัมพันธ์โดยตรงกับวิวัฒนาการของตะกอนเสริมความแข็งในโครงสร้างจุลภาค โดยเฉพาะตะกอน T1 ซึ่งเป็นเฟสหลักที่ควบคุมความแข็งและความต้านทานแรงดึงของโลหะผสมกลุ่ม Al–Cu–Li [1,4,5] สถานะการบ่มแข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่า (155°C) ส่งผลให้เกิดการกระจายตัวของตะกอนขนาดเล็กและมีความหนาแน่นสูงที่สุด จึงให้ค่าความแข็งและค่าความต้านทานแรงดึงที่สูงที่สุด ขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิการบ่มแข็งเร่งจลนศาสตร์ของการตกผลึกและการหยาบตัวของตะกอน ทำให้เข้าสู่สถานะ peak-aged ได้เร็วขึ้นแต่ลดประสิทธิภาพในการขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน ผลที่ได้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการควบคุมอุณหภูมิและเวลาการบ่มแข็งเทียมเป็นปัจจัยสำคัญต่อการออกแบบสมดุลระหว่างความแข็งแรงและเสถียรภาพเชิงโครงสร้างของ AA2055 ซึ่งมีความสำคัญต่อการประยุกต์ใช้งานที่ต้องการสมบัติทางกลสูงภายใต้สภาวะการใช้งานที่แตกต่างกัน

4. สรุป

จากการศึกษาพฤติกรรมความแข็งและสมบัติแรงดึงของอะลูมิเนียมผสม AA2055 ภายใต้การบ่มแข็งเทียมที่อุณหภูมิ 155, 175 และ 195°C สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. การบ่มแข็งเทียมทุกอุณหภูมิแสดงพฤติกรรมตามกลไกทั่วไปของกระบวนการตกผลึกของตะกอน โดยประกอบด้วยช่วง under-aged, peak-aged และ over-aged
2. เวลาในการเข้าสู่สถานะ peak-aged ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่ออุณหภูมิการบ่มแข็งเพิ่มขึ้น จาก 120 ชั่วโมงที่ 155°C เหลือ 24 ชั่วโมงที่ 175°C และ 6 ชั่วโมงที่ 195°C แสดงถึงการเร่งจลนศาสตร์ของกระบวนการตกผลึก
3. สถานะที่ให้ค่าความแข็งสูงสุดคือ 155°C เป็นเวลา 120 ชั่วโมง โดยมีค่าความแข็ง 115.5 HV และมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดมากที่สุดเช่นกัน เท่ากับ 513.9 MPa
4. เมื่ออุณหภูมิการบ่มแข็งเทียมเพิ่มขึ้น แม้จะเข้าสู่ peak-aged ได้รวดเร็วขึ้น แต่ค่าความแข็งและค่าความเค้นดึงสูงสุดสูงมีแนวโน้มลดลง เป็นผลจากการหยาบตัวของตะกอนเสริมความแข็งในโครงสร้างจุลภาค

5. แนวโน้มของสมบัติแรงดึงสอดคล้องกับผลการทดสอบความแข็ง โดยสถานะที่ให้ค่าความแข็งสูงกว่าจะให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงกว่า สะท้อนบทบาทสำคัญของตะกอน T1 ในการเสริมความแข็งของอะลูมิเนียมผสม AA2055

6. ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าอุณหภูมิและเวลาการบ่มแข็งเทียมเป็นตัวแปรสำคัญในการออกแบบกระบวนการผลิตของอะลูมิเนียมผสม AA2055 โดยสถานะการบ่มที่อุณหภูมิต่ำกว่าเหมาะสมสำหรับกรณีที่ต้องการสมบัติทางกลสูงสุด ขณะที่การบ่มที่อุณหภูมิสูงกว่าสามารถลดระยะเวลาการผลิตได้ แต่ค่าความแข็งและความต้านทานแรงดึงสูงสุด จะมีค่าลดลง ดังนั้น การเลือกสถานะการบ่มจึงควรพิจารณาาร่วมกันทั้งด้านสมรรถนะของวัสดุและประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต

สำหรับการศึกษาต่อไป ควรมีการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคโดยใช้เทคนิค transmission electron microscopy (TEM) เพื่อยืนยันชนิด ลักษณะการกระจายตัว และการหยาบตัวของตะกอนเสริมความแข็งภายใต้สถานะการบ่มแข็งที่แตกต่างกัน

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับทุนสนับสนุนในการทำงานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Balducci, E., Ceschini, L., & Messieri, S. (2018). High Temperature Tensile Tests of the Lightweight 2099 and 2055 Al-Cu-Li Alloy: A Comparison: Balducci, Ceschini, and Messieri. *JOM*, 70(11), 2716-2725.
- [2] Prasad, N. E., Gokhale, A., & Wanhill, R. J. (Eds.). (2013). Aluminum-lithium alloys: processing, properties, and applications. Butterworth-Heinemann.
- [3] Rioja, R. J., & Liu, J. (2012). The evolution of Al-Li base products for aerospace and space applications. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 43(9), 3325-3337.
- [4] Balducci, E., Ceschini, L., Messieri, S., Wenner, S., & Holmestad, R. (2017). Effects of overaging on microstructure and tensile properties of the 2055 Al-Cu-Li-Ag alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 707, 221-231.
- [5] Dongmei, J., Changqing, Y., Xiang, L., & Hui, Y. (2020). Hot deformation behavior and microstructure characteristic of 2055 Al-Li alloy during uniaxial compression. *Materials Research Express*, 7(7), 076507.
- [6] Jiang, B., Yi, D., Yi, X., Zheng, F., Wang, H., Wang, B., ... & Hu, Z. (2018). Effect of trace amounts of added Sc on microstructure and mechanical properties of 2055 aluminum alloy. *Materials Characterization*, 141, 248-259.
- [7] Han, J., Wang, H., Xu, A., & Niu, K. (2021). Enhanced matrix precipitation of T1 (Al₂CuLi) phase in AA2055 Al-Li alloy during stress aging process. *Materials Science and Engineering: A*, 827, 142057.
- [8] Duan, S., Liu, Z., Guo, F., Pan, Y., Matsuda, K., & Zou, Y. (2023). Precipitates evolution during artificial aging and their influence on mechanical properties of a cast Al-Cu-Li alloy. *Journal of Materials Research and Technology*, 22, 2502-2517.

การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานไม้พาเลทในอุตสาหกรรมขนส่งอย่างยั่งยืน Enhancing Wood Pallet Utilization Efficiency for Sustainability in the Transportation Industry

พุทธิพงศ์ เลขะชัยวรกุล¹ เชาวนวัศ อรรถานิธิ¹ วิศนีย์ ยิ่งประเสริฐ² ชีรเชษฐ์ แพ่งธีระสุขมัย¹
สุดารัตน์ ดวงประทุม³ ครุฑนาถ ศิราไกรศรี⁴ และ ณัฐวรพล รัชสิริวัชรบุล^{1*}

Putipong Lakachaiworakun^{1*}, Chaowat Autthanit¹, Wissanee Yngprasert³, Thirachet Paengteerasukkamai¹,
Sudarat Duangprathum², Krutthanart Sirakraisorn⁴ and Natworapol Rachsirivatcharabul^{1*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมจัดการอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย

²คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี สุราษฎร์ธานี ประเทศไทย

³สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย

⁴บริษัท เชฟ (ประเทศไทย) จำกัด

¹Department of Sustainable Industrial Management Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Bangkok Thailand

²Faculty of Science and Industrial Technology Prince of Songkla University, Surat Thani Campus Thailand

³Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Bangkok, Thailand

⁴CHEP (THAILAND) CO., LTD.

*Corresponding author: Natworapol Rachsirivatcharabul, e-mail address: natworapol.r@rmutp.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความทนทานของไม้พาเลทที่ใช้ไม้สนในระบบโลจิสติกส์ ซึ่งมักประสบปัญหาการแตกหักและการเสื่อมสภาพจากภาระงานและสภาพแวดล้อม โดยเฉพาะปัจจัยด้านอุณหภูมิและความชื้นที่ส่งผลต่อโครงสร้างภายใน การศึกษาเน้นการประยุกต์ใช้วัสดุปรับปรุงผิว 2 รูปแบบ ได้แก่ การพ่นสเปรย์ยาง (Rubber Spray Coating) และการใช้เทปกาวกระดาษ (Paper Adhesive Tape) เพื่อยืดอายุการใช้งานผ่านการทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางกล ได้แก่ ความต้านทานแรงดัด ค่าความชื้น อัตราการดูดซึมน้ำ และอัตราการพองตัวของเนื้อไม้ ผลการวิจัยพบว่า การปรับปรุงผิวด้วยการพ่นสเปรย์ยางมีประสิทธิภาพสูงสุดในการป้องกันความชื้น โดยทำหน้าที่เป็นเกราะป้องกัน (Moisture Barrier) ได้อย่างดีเยี่ยม มีอัตราการดูดซึมน้ำร้อยละ 14.88 และส่งผลให้การพองตัวของไม้ลดลงเหลือเพียงร้อยละ 2.88 นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มขีดความสามารถในการรับแรง โดยให้ค่าความต้านทานแรงดัด (MOR) สูงที่สุดถึง 59.47 MPa ในขณะที่การใช้เทปกาวกระดาษมีข้อจำกัดด้านความชื้นอย่างเห็นได้ชัด โดยมีอัตราการดูดซึมน้ำสูงถึงร้อยละ 35.24 และมีอัตราการพองตัวสูงที่สุดร้อยละ 8.61 สรุปได้ว่าการพ่นสเปรย์ยางเป็นแนวทางที่เหมาะสมที่สุดในการเพิ่มความทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่รุนแรงและรักษามาตรฐานคุณภาพของไม้พาเลทในระยะยาว ซึ่งเมื่อสามารถลดอัตราการแตกหักและการซ่อมบำรุงไม้พาเลทลงได้ จะส่งผลโดยตรงต่อการลดปริมาณการตัดต้นไม้ใหม่เพื่อนำมาทดแทนอุปกรณ์ที่ชำรุดก่อนเวลาอันควร อันนำไปสู่การจัดการทรัพยากรธรรมชาติที่มีประสิทธิภาพ การลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์ในห่วงโซ่อุปทาน และการพัฒนาอุตสาหกรรมขนส่งที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: ไม้พาเลท, การพ่นสเปรย์ยาง, เทปกาวกระดาษ, อุตสาหกรรมขนส่งอย่างยั่งยืน

Abstract

This research aims to increase the efficiency and durability of pine wood pallets used in logistics systems, which often encounter problems of breakage and deterioration from workloads and environmental conditions, especially temperature and humidity factors that affect the internal structure. This study focuses on the application of two types of surface improvement materials: Rubber Spray Coating and Paper Adhesive Tape, to extend the service life through physical and mechanical property testing, including bending strength, moisture content, water absorption rate, and thickness swelling rate. The research results found that surface improvement with rubber spray coating is most effective in moisture protection, acting as an excellent moisture barrier, with a water absorption rate of 14.88% and resulting in wood swelling reduced to only 2.88%. Additionally, it helps increase load-bearing capacity, providing the highest Modulus of Rupture (MOR) at 59.47 MPa. In contrast, the use of paper adhesive tape has clear limitations regarding moisture, with a water absorption rate as high as 35.24% and the highest swelling rate at 8.61%. In conclusion, rubber spray coating is the most suitable approach for increasing durability against harsh environments and maintaining long-term quality standards for wood

pallets. When the breakage and maintenance rates of wood pallets are reduced, it directly results in reducing the cutting of new trees to replace equipment that is damaged prematurely, leading to efficient natural resource management, the reduction of carbon footprint in the supply chain, and the development of a sustainable, environmentally friendly transportation industry.

Keywords: Wood Pallets, Rubber Spray Coating, Paper Tape, Sustainable Transportation Industry

1. บทนำ

ในปัจจุบัน ระบบโลจิสติกส์และการขนส่งสินค้าถือเป็นหัวใจสำคัญของการขับเคลื่อนเศรษฐกิจ โดยมี "ไม้พาเลท" (Wood Pallet) เป็นอุปกรณ์พื้นฐานที่สำคัญในการรองรับและเคลื่อนย้ายสินค้าอย่างมีประสิทธิภาพ อุตสาหกรรมพาเลทไม้มาตรฐาน (มอก. 588-2528) ขนาด 1200x1000 มม. เป็นหัวใจสำคัญของโลจิสติกส์ยุคใหม่ที่เน้นเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) และการลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์ ผ่านโมเดลธุรกิจให้เช่าและนำกลับมาใช้ใหม่ อย่างไรก็ตาม กระบวนการหมุนเวียนใช้งานมักเผชิญปัญหาการชำรุดและแตกหักของชิ้นส่วน (แผ่นไม้และลูกเต๋า) ซึ่งกลายเป็นต้นทุนสำคัญในการซ่อมแซมและใช้ทรัพยากรส่วนเกิน ดังแสดงใน Figure 1 อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาข้อมูลการใช้งานจริงในอุตสาหกรรมร่วมกับบริษัทที่ทำธุรกิจเกี่ยวกับการให้เช่าพาเลทในระบบขนส่ง พบว่าระบบการหมุนเวียนพาเลทไม้ประสบปัญหาการชำรุดสูง โดยมีอัตราการส่งกลับมาซ่อมบำรุงเฉลี่ยสูงถึงร้อยละ 50.50 ต่อปี ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ด้วยแผนภูมิแกงปลาและแผนภูมิพาเรโตระบุว่า สาเหตุหลักที่สำคัญที่สุดคือ การแตกหักของไม้พาเลทที่ไม่สามารถซ่อมแซมได้ ซึ่งคิดเป็นสัดส่วนสูงถึงร้อยละ 44.52 ปัญหาการแตกหักดังกล่าวมีปัจจัยเร่งมาจากภาระน้ำหนักมหาศาลและการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม โดยเฉพาะความชื้นและอุณหภูมิที่ส่งผลต่อเสถียรภาพทางมิติของไม้ ความเสียหายเหล่านี้ไม่เพียงแต่ส่งผลกระทบต่อต้นทุนการซ่อมบำรุงและประสิทธิภาพในระบบขนถ่ายอัตโนมัติเท่านั้น แต่ยังส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากต้องมีการตัดต้นไม้ในสัดส่วนต้นสน 1 ต้น ต่อพาเลทไม้เพียง 8 ตัว เพื่อนำมาทดแทนส่วนที่ชำรุด ซึ่งจากการประเมินพบว่าการชำรุดของพาเลทไม้สร้างการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงถึง 3,740.136 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อปี [1]

เพื่อตอบโจทย์การจัดการทรัพยากรอย่างยั่งยืนและลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาแนวทางการเพิ่มความทนทานให้กับไม้พาเลท โดยประยุกต์ใช้วัสดุปรับปรุงผิว 2 รูปแบบ ได้แก่ การพ่นสเปรย์ยาง และการใช้เทปกาวยาง เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการป้องกันความชื้นและรักษาความแข็งแรงตามลักษณะการแตกหักที่พบบ่อย (อาทิ การแตกแนวตั้งฉากและขนานเส้นไม้) ผลการศึกษานี้ไม่เพียงแต่มุ่งหวังที่จะลดอัตราการชำรุดของพาเลทไม้เพื่อประโยชน์เชิงพาณิชย์ แต่ยังเป็นการส่งเสริมแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) [2] ที่ช่วยลดปริมาณการตัดต้นไม้และลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก อันนำไปสู่เป้าหมายความยั่งยืนในอุตสาหกรรมการขนส่งอย่างเป็นรูปธรรม



Figure 1 Circular Pallet Management

2. วิธีการศึกษา

การศึกษานี้มุ่งทดสอบและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการปรับปรุงผิวไม้พาลาเท ทั้งในด้านสมบัติทางกายภาพและทางกล โดยครอบคลุมตั้งแต่การเตรียมชิ้นงานตามมาตรฐานควบคุม ไปจนถึงการทดสอบความสามารถในการต้านทานความชื้นและการรับแรงดัด เพื่อใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาคุณภาพไม้สำหรับอุตสาหกรรมการขนส่งอย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1 การเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ (Material Preparation)

คณะผู้จัดทำได้จัดเตรียมชิ้นงานทดสอบที่ทำจากไม้พาลาเท (เป็นชิ้นส่วนในการประกอบ, ไม้สนเรดิเอตา: *Pinus radiata*) โดยควบคุมขนาดและรูปทรงให้เป็นไปตามมาตรฐาน มอก. 588-2528 [3] จากนั้นจึงดำเนินการจำแนกชิ้นงานออกเป็น 3 กลุ่มทดลอง เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการปรับปรุงผิวรูปแบบต่างๆ โดยมาตรฐานของไม้พาลาเทจะมีความชื้นอยู่ที่ 10 - 14% (Dry Basis) และในการทดสอบถูกตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง โดยแบ่งกลุ่มได้ดังนี้

กลุ่มที่ 1 ไม้สนแบบปกติ (Normal) ชิ้นงานในกลุ่มนี้จะไม่มีการผ่านกระบวนการปรับปรุงผิวหรือเคลือบสารใด ๆ ลงบนเนื้อไม้ เพื่อใช้เป็นตัวแทนของไม้พาลาเทมาตรฐานในสภาวะปกติ สำหรับใช้เป็นค่าอ้างอิงพื้นฐาน (Baseline) ในการเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพและทางกลกับกลุ่มทดลองอื่นๆ โดยทำซ้ำกัน 3 ครั้ง ($n = 3$) ดังแสดงใน Figure 2a

กลุ่มที่ 2 กลุ่มปรับปรุงผิวด้วยการพ่นสเปรย์ยาง (Rubber Spray Coating) ชิ้นงานในกลุ่มนี้จะผ่านการทำความสะอาดพื้นผิวและดำเนินการพ่นเคลือบด้วยสเปรย์ยางโพลีเมอร์ (Rubber Spray) ให้ครอบคลุมทั่วทั้งชิ้นงานมีความหนาประมาณ 0.1-0.2 มิลลิเมตร เพื่อสร้างชั้นฟิล์มบาง โดยทำซ้ำกัน 3 ครั้ง ($n = 3$) ดังแสดงใน Figure 2b

กลุ่มที่ 3 กลุ่มปรับปรุงผิวด้วยเทปกาวกระดาษ (Paper Adhesive Tape) ชิ้นงานในกลุ่มนี้จะผ่านการปิดทับด้วยเทปกาวกระดาษ 1 ชั้น โดยมีความหนา 0.2 มิลลิเมตร โดยทำซ้ำกัน 3 ครั้ง ($n = 3$) ดังแสดงใน Figure 2c

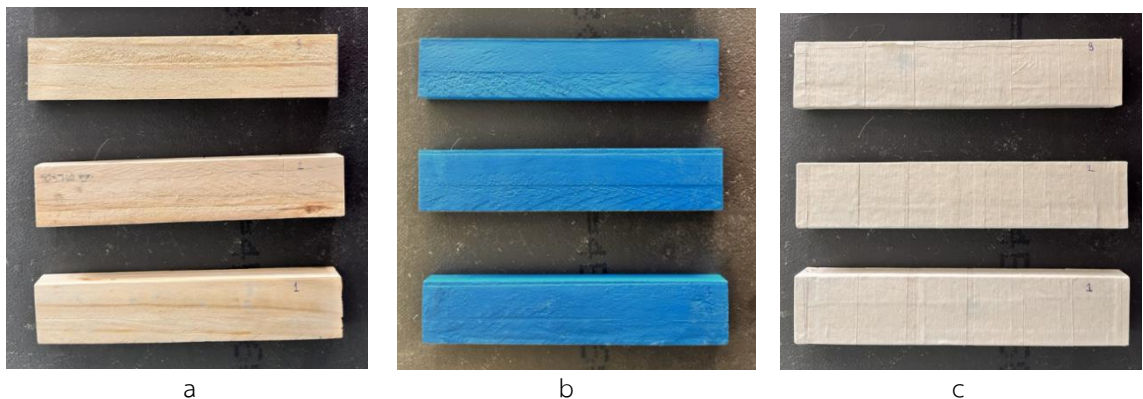


Figure 2 Material Preparation a) Normal b) Rubber Spray Coating c) Paper Adhesive Tape

2.2 การทดสอบสมบัติของพาลาเทไม้

2.2.1 ความชื้นในวัสดุ

การหาความชื้นของวัสดุดำเนินการโดยตัดชิ้นงานทดสอบขนาด 60 x 40 x 20 มิลลิเมตร แล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส บันทึกน้ำหนักทุกๆ 2 ชั่วโมงจนชิ้นงานมีน้ำหนักคงที่ [4] เพื่อให้มั่นใจว่าความชื้นในเนื้อไม้ถูกขจัดออกจนหมด จากนั้นจึงนำค่าน้ำหนักที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณความชื้น (Moisture Content) ดังแสดงใน Figure 3

$$MC_{db} (\%) = (W_w - W_d) / W_d \times 100 \quad (1)$$

MC_{db} คือ ค่าความชื้นเทียบกับน้ำหนักแห้ง (Moisture Content - Dry Basis) มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ (%)

W_w คือ น้ำหนักของไม้ขณะชื้น หรือน้ำหนักก่อนเข้าตู้อบ (Wet Weight)

W_d คือ น้ำหนักของไม้ที่แห้งสนิท หรือน้ำหนักหลังจากออกจากตู้อบจนค่าคงที่ (Dry Weight / Oven-dry Weight)

2.2.2 การพองตัว และการดูดซึมน้ำ

ชิ้นงานทดสอบขนาด 60 x 40 x 20 มิลลิเมตร จะถูกนำไปแช่น้ำสะอาดที่อุณหภูมิห้อง เพื่อประเมินสมบัติทางกายภาพ โดยมีการบันทึกค่าน้ำหนักและมิติของชิ้นงานด้วยไมโครมิเตอร์ที่ระยะเวลา 12 และ 24 ชั่วโมง [4-5] ข้อมูลที่บันทึกได้จะนำมาเปรียบเทียบเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการต้านทานความชื้นและอัตราการพองตัวของวัสดุแต่ละประเภท ดังนี้

การพองตัวตามความหนา (Thickness Swelling: TS)

$$TS (\%) = (T_2 - T_1) / T_1 \times 100 \quad (2)$$

TS (%) คือ คือการวัดการขยายตัวของความหนาวัสดุเมื่อได้รับความชื้นหรือแช่น้ำ เพื่อดูความเสถียรทางขนาด (Dimensional Stability)

T_1 คือ ความหนาของชิ้นทดสอบก่อนแช่น้ำ (มิลลิเมตร)

T_2 คือ ความหนาของชิ้นทดสอบหลังแช่น้ำ (มิลลิเมตร)

การดูดซึมน้ำ (Water Absorption: WA)

$$WA (\%) = (W_2 - W_1) / W_1 \times 100 \quad (3)$$

WA (%) คือ คือการวัดปริมาณน้ำที่วัสดุดูดซับเข้าไปหลังจากแช่น้ำในช่วงเวลาที่กำหนด โดยคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ (%) เทียบกับน้ำหนักแห้ง

W_1 คือ น้ำหนักของชิ้นทดสอบก่อนแช่น้ำ (กรัม)

W_2 คือ น้ำหนักของชิ้นทดสอบหลังแช่น้ำ (กรัม)

2.2.3 การต้านทานแรงดัด

ดำเนินการทดสอบโดยใช้ชิ้นงานที่มีขนาด 200 x 40 x 20 มิลลิเมตร นำเข้าทดสอบด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine: UTM) เพื่อหาค่าความต้านทานแรงดัดของไม้ในแต่ละกลุ่มทดลอง โดยจะทำการบันทึกค่าแรงสูงสุด (Maximum Load) และข้อมูลการเสียรูปของชิ้นงานแต่ละชิ้นเพื่อนำไปวิเคราะห์ผลทางสถิติต่อไป [5] ดังแสดงใน Figure 3c

ค่าความต้านทานแรงดัด (MOR)

$$MOR = \frac{3PL}{2db^2} \quad (4)$$

MOR คือ ค่าความต้านทานแรงดัดสูงสุด (นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร หรือ MPa)

P คือ แรงกดสูงสุดที่ไม้รับได้จนกระทั่งหัก (Maximum Load) (นิวตัน)

L คือ ระยะห่างระหว่างจุดรองรับ (Span Length) (มิลลิเมตร)

d คือ ความกว้างของชิ้นงานทดสอบ (มิลลิเมตร)

b คือ ความหนาหรือความสูงของชิ้นงานทดสอบ (มิลลิเมตร)

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 ความชื้นในวัสดุ

จากการทดสอบสมบัติทางกายภาพพบว่า กระบวนการปรับปรุงผิวมีอิทธิพลต่อระดับความชื้นสะสมภายในเนื้อไม้อย่างชัดเจน โดยกลุ่ม ติดเทปกาวกระดาษสามารถรักษาค่าความชื้นได้ต่ำที่สุด (11.37%) เนื่องจากความแนบสนิทของวัสดุช่วยป้องกันความชื้นภายนอกและอาจเกิดปรากฏการณ์ดูดซับความชื้นออกจากผิวไม้ (Wicking effect) ในขณะที่กลุ่ม ฟันสเปรย์อย่างมีความชื้นสูงที่สุด (14.88%) ซึ่งวิเคราะห์ได้ว่าชั้นเคลือบยางทำหน้าที่เป็นแผ่นกั้น (Barrier) ที่หนาแน่นเกินไป จนเกิดการกักเก็บความชื้น (Moisture Entrapment) และขัดขวางการระเหยของน้ำออกจากเนื้อไม้ตามธรรมชาติเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม

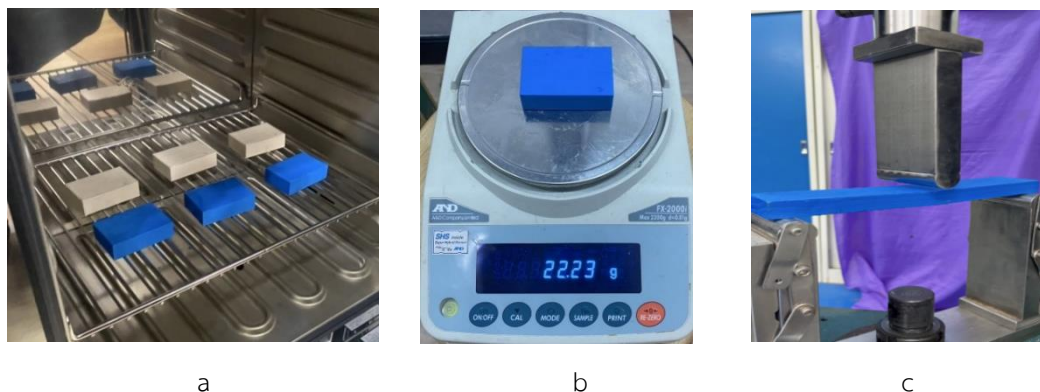


Figure 3 Wooden Pallet Property Testing a) Oven-Dry Moisture Test b) Specimen Weighing c) UTM Testing

Table 1 Moisture content of wood specimens

Conditions	Moisture Content (%)	SD
Normal	12.86	0.10
Rubber Spray Coating	14.88	0.27
Paper Adhesive Tape	11.37	0.16

ในเชิงวิศวกรรม ข้อมูลนี้ชี้ให้เห็นว่าการใช้เทปกาวกระดาษเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดความชื้นสะสมระยะสั้น อย่างไรก็ตาม แมสเปอร์ย้างจะมีค่าความชื้นสะสมสูงกว่า แต่ชั้นฟิล์มดังกล่าวอาจมีบทบาทสำคัญในการป้องกันการแทรกซึมของน้ำในสภาวะวิกฤต ซึ่งจำเป็นต้องนำผลการทดสอบนี้ไปวิเคราะห์ร่วมกับอัตราการดูดซึมน้ำ (Water Absorption) และค่าความแข็งแรงแรงดัด (MOR) เพื่อประเมินเสถียรภาพและประสิทธิภาพโดยรวมของไม้พาเลทในการใช้งานจริง

3.2 การพองตัว และการดูดซึมน้ำ

จากการทดสอบอัตราการพองตัว (Swelling) ของชิ้นงานไม้หลังการทดสอบแช่น้ำ พบว่า กลุ่มพ่นสเปรย์ยาง (Rubber Spray Coating) มีประสิทธิภาพในการควบคุมเสถียรภาพทางมิติได้ดีที่สุด โดยมีอัตราการพองตัวต่ำที่สุดเพียง 2.88% ซึ่งลดลงจากกลุ่มปกติที่มีค่า 3.83% อย่างเห็นได้ชัด ผลการทดลองนี้ยืนยันว่าชั้นฟิล์มยางช่วยปิดผนึกรูพรุนและรอยแตกขนาดเล็กบนผิวหน้าไม้ ทำให้โมเลกุลของน้ำไม่สามารถแทรกซึมเข้าสู่โครงสร้างผนังเซลล์ไม้ได้โดยง่าย ส่งผลให้ไม้มีการขยายตัวน้อยที่สุดเมื่อต้องสัมผัสกับความชื้นโดยตรง ดังแสดงใน **Table 2**

Table 2 Swelling percentage of treated wood specimens

Conditions	Swelling (%)	SD
Normal	3.83	0.03
Rubber Spray Coating	2.88	0.34
Paper Adhesive Tape	8.61	0.24

ในทางกลับกัน กลุ่มติดเทปกาวกระดาษ (Paper Adhesive Tape) มีอัตราการพองตัวสูงที่สุดถึง 8.61% ซึ่งสูงกว่ากลุ่มปกติกว่า 2 เท่า สาเหตุสำคัญเกิดจากสมบัติทางกายภาพของกระดาษที่เป็นวัสดุช่วยดูดซับและกักเก็บน้ำ (Hygroscopic material) ไว้ที่บริเวณผิวสัมผัส ประกอบกับอาจเกิดการแทรกซึมของน้ำเข้าสู่ช่องว่างระหว่างเทปกาวกับเนื้อไม้ ทำให้ความชื้นถูกขังอยู่ภายในและกระตุ้นให้เส้นใยไม้ขยายตัวอย่างรุนแรง สรุปได้ว่าการปรับปรุงผิวด้วยสเปรย์ยางเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดในการป้องกันการบิดงอและการเปลี่ยนแปลงขนาดของไม้พาเลทในสภาวะเปียกชื้น

Table 3 Water absorption of treated wood specimens

Conditions	Water absorption (%)	SD
Normal	28.22	0.84
Rubber Spray Coating	21.21	0.94
Paper Adhesive Tape	35.24	0.96

Table 3 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพการต้านทานการดูดซับน้ำของชิ้นงานไม้ พบว่า กลุ่มพ่นสเปรย์ยาง (Rubber Spray Coating) มีความสามารถในการป้องกันน้ำได้ดีที่สุด โดยมีค่าการดูดซับน้ำต่ำที่สุดที่ 21.21% ซึ่งลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม (28.22%) ผลการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่าชั้นฟิล์มโพลีเมอร์จากยางทำหน้าที่เป็นเกราะป้องกันผิวหน้าไม้ (Surface Barrier) ที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถปิดกั้นช่องว่างและรูพรุนภายในเนื้อไม้ ส่งผลให้โมเลกุลของน้ำไม่สามารถซึมลึกเข้าสู่โครงสร้างภายในได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการพองตัวที่ต่ำในหัวข้อก่อนหน้า

ในทางตรงกันข้าม กลุ่มติดเทปกาวกระดาษ (Paper Adhesive Tape) มีค่าการดูดซับน้ำสูงที่สุดถึง 35.24% ซึ่งสูงกว่ากลุ่มปกติอย่างชัดเจน สาเหตุหลักมาจากสมบัติของเนื้อเทปที่เป็นกระดาษซึ่งมีอัตราการซึมน้ำสูงในตัวเอง (Wicking effect) และเมื่อกระดาษเปียกชื้นจะกลายเป็นแหล่งสะสมน้ำที่แนบติดกับผิวไม้ ส่งผลให้น้ำดูดซับน้ำเข้าไปมากกว่าปกติเป็นจำนวนมาก ดังนั้นในเชิงวิศวกรรมการผลิตพาเลท การพ่นสเปรย์ยางจึงเป็นเทคนิคที่เหมาะสมที่สุดในการเพิ่มความทนทานต่อสภาวะเปียกชื้น และช่วยยืดอายุการใช้งานของวัสดุได้จริง

3.3 การต้านทานแรงดัด

จากการทดสอบสมบัติทางกลเพื่อหาค่าความต้านทานแรงดัดสูงสุด พบว่ากระบวนการปรับปรุงผิวช่วยยกระดับความสามารถในการรับแรงของไม้ได้อย่างดีเยี่ยม โดยกลุ่ม พ่นสเปรย์ยาง (Rubber Spray Coating) มีค่า MOR สูงที่สุดถึง 59.47 MPa ซึ่งเพิ่มขึ้นจากกลุ่มปกติที่มีค่า 35.14 MPa อย่างก้าวกระโดดถึง 69% ในขณะที่กลุ่ม ติดเทปกาวกระดาษมีค่า MOR อยู่ที่ 42.57 MPa แม้จะให้ค่าที่สูงกว่ากลุ่มปกติแต่ยังคงมีประสิทธิภาพต่ำกว่ากลุ่มพ่นสเปรย์ยางอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ที่ต่ำในทุกกลุ่มยังสะท้อนถึงความสม่ำเสมอของวัสดุปรับปรุงผิวและความแม่นยำในการทดสอบ

Table 4 Modulus of Rupture (MOR) of wood specimens

Conditions	MOR (MPa)	SD
Normal	35.14	3.37
Rubber Spray Coating	59.47	1.68
Paper Adhesive Tape	42.57	0.61

ในเชิงวิศวกรรมวัสดุ การที่กลุ่มพ่นสเปรย์ยางให้ค่าความแข็งแรงสูงที่สุดนั้น วิเคราะห์ได้ว่าชั้นฟิล์มโพลีเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูงช่วยเพิ่มความเหนียวที่ผิวหน้า (Surface Toughness) และทำหน้าที่ช่วยกระจายเค้นแรงดึง (Tensile Stress) ในระหว่างการทดสอบแรงดัดได้ดีกว่าไม้เปล่าหรือไม้ที่ติดเทปกาวเพียงบางส่วน ส่งผลให้ชิ้นงานสามารถต้านทานการแตกหักได้มากขึ้น สรุปได้ว่าการพ่นสเปรย์ยางเป็นเทคนิคที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเพิ่มขีดความสามารถในการรับภาระบรรทุก (Load-bearing capacity) ของไม้พาเลท ซึ่งช่วยเพิ่มความปลอดภัยและอายุการใช้งานในเชิงอุตสาหกรรมได้อย่างมีนัยสำคัญ

ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกายภาพและทางกล พบความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญระหว่าง ระดับความชื้นที่เหมาะสม และความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้น ในกลุ่มที่พ่นสเปรย์ยาง โดยการที่ชั้นฟิล์มยางช่วยรักษาความชื้นให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมและคงที่ ส่งผลให้โครงสร้างเส้นใยภายในเนื้อไม้มีความแข็งแรงและไม่เปราะหักง่ายจากการดูดซับน้ำที่มากเกินไป ซึ่งความชื้นที่ลดลงนี้ทำงานควบคู่ไปกับคุณสมบัติของโพลีเมอร์ยางที่ช่วยเพิ่มความเหนียวที่ผิวหน้า (Surface Toughness) และช่วยกระจายแรงกดขณะทดสอบ ส่งผลให้ค่าแรงดัดสูงสุด (MOR) ของกลุ่มพ่นยางเพิ่มขึ้นอย่างโดดเด่น สรุปได้ว่าการพ่นสเปรย์ยางเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการปรับปรุงคุณภาพไม้พาเลท เนื่องจากช่วยสร้างเสถียรภาพทางมิติควบคู่ไปกับการยกระดับขีดความสามารถในการรับภาระบรรทุก ทำให้ไม้มีความทนทานต่อการใช้งานและลดการแตกหักเสียหายได้ดีที่สุดในทุกเงื่อนไขการทดสอบ

4. สรุป

จากการทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางกล โดยกลุ่มที่พ่นสเปรย์สามารถสร้างชั้นฟิล์มป้องกันน้ำที่สมบูรณ์ ส่งผลให้ค่าการดูดซับน้ำและการพองตัวต่ำที่สุด ซึ่งการรักษาความชื้นให้อยู่ในระดับที่คงที่นี้ช่วยป้องกันไม่ให้เส้นใยไม้บวมพองจนสูญเสียแรงยึดเกาะ ทำงานควบคู่กับคุณสมบัติของยางที่ช่วยเพิ่มความเหนียวที่ผิวหน้า (Surface Toughness) และช่วยกระจายแรงกด ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงแรงดัด (MOR) เพิ่มขึ้นอย่างโดดเด่นที่สุดในทุกเงื่อนไขการทดสอบ สรุปได้ว่าการพ่นสเปรย์เป็นเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพไม้พลาที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ทั้งในด้านเสถียรภาพทางมิติและความสามารถในการรับภาระบรรทุก การใช้สเปรย์ปรับปรุงผิวไม้ช่วยให้ไม้พลาทนทานขึ้นและลดการแตกหักเสียหาย ส่งผลให้สามารถยืดอายุการใช้งานและลดความถี่ในการจัดหาไม้ใหม่มาทดแทน ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียนที่ช่วยลดทั้งต้นทุนทางธุรกิจและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระยะยาว

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้ศึกษาขอขอบพระคุณ บริษัท เซฟ ประเทศไทย จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์และสนับสนุนวัสดุในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้เป็นอย่างดี ขอขอบคุณ นายธราธิป ชูแก้ว และ นายณพัทธ์ รัมภ์อุดม นักศึกษาจาก สาขาวิชาวิศวกรรมเทคโนโลยีนิวเคลียร์เพื่อความยั่งยืน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร สำหรับความมุ่งมั่นในการดำเนินการทดลองและจัดเก็บข้อมูลอย่างถี่ถ้วน ขอขอบคุณ นายวีระชาติ รอดพันธ์ จาก มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี ที่ให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนการปฏิบัติงานทางห้องปฏิบัติการอย่างดียิ่ง คณะผู้ศึกษาขอขอบพระคุณทุกท่านที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการสนับสนุนให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] พุทธิพงศ์ เลขชะยวรรกุล, ญัฐพิชญา เอี่ยมเจริญโชค และ ปฐมพงษ์ จำนงค์พันธ์. 2568. การศึกษาปัญหาและแนวทางแก้ไขการใช้งานไม้พลาในอุตสาหกรรมการขนส่งอย่างยั่งยืน. ใน: ด้านสารสนเทศ การเกษตร วิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ครั้งที่ 10 : IAMBEST 2025 1-2 พฤษภาคม 2568. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์, ชุมพร. หน้า 102-108.
- [2] de Carvalho Araújo, C. K., Salvador, R., Moro Piekarski, C., Sokulski, C. C., de Francisco, A. C. and de Carvalho Araújo Camargo, S. K. 2019. Circular economy practices on wood panels: A bibliographic analysis. Sustainability. 11: 1057.
- [3] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2528. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ไม้แปรรูป (มอก. 588-2528). กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพมหานคร.
- [4] ชัยรัตน์ ศรีวิบุต, อานนท์ ดี Kamnerdwam, ชัยรัตน์ หอมเขียว, สงวน ราวังกง และธนัตถ์ รัตนวิไล. 2565. สูตรการผสมที่เหมาะสมโดยวิธีพื้นผิวตอบสนองต่อสมบัติแรงดัดของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้สำหรับวัสดุโครงสร้างที่สัมผัสความชื้นสูง. วารสารเทคโนโลยีอุตสาหกรรม. 18(1). 1-20.
- [5] Rachsirivatcharabul, N., Dangwilailux, P., Kalasee, W., Autthanit, C. and Lakachaiworakun, P. 2026. Repurposing Senescent Oil Palm Trunks into Sustainable Plywood: A Green Alternative to Conventional Disposal Practices. J. Korean Wood Sci. Technol. 54: 94-109.

ปัจจัยที่มีผลต่อการซื้อรถไฟฟ้าของพนักงานรัฐวิสาหกิจการประปาส่วนภูมิภาค An Analysis of Factors Affecting Electric Vehicle Purchase Decisions among Provincial Waterworks Authority Employees

โชติรส แก้วจาเครือ¹ เอกชัย ศิริกิจพานิชกุล^{2,*} และ สโรช บุญศิริพันธ์²
Chotirot Kaewjakhrua¹, Ackchai Sirikijpanichkul^{2,*} and Saroch Boonsiripant²

¹สาขาวิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐานและการบริหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10900 ประเทศไทย

²ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10900 ประเทศไทย

¹Department of Engineering Program in Infrastructure Engineering and Management, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok Campus, Bangkok, 10900, Thailand

²Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Kasetsart University Bangkok Campus, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding Author: Ackchai Sirikijpanichkul, e-mail address: fengacs@ku.ac.th

บทคัดย่อ

ยานยนต์ไฟฟ้าเป็นหนึ่งในกลไกสำคัญในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากภาคการคมนาคม ซึ่งมีบทบาทต่อการบรรลุเป้าหมายความเป็นกลางทางคาร์บอนของประเทศไทย งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจเลือกใช้ยานยนต์ไฟฟ้าของพนักงานการประปาส่วนภูมิภาค ซึ่งเป็นกลุ่มที่มีลักษณะเฉพาะด้านรายได้และสวัสดิการที่แตกต่างจากผู้บริโภคทั่วไป การศึกษานี้ประยุกต์ใช้แบบจำลองโลจิตพหุนาม (MNL) ภายใต้กรอบแนวคิดทฤษฎีอรรถประโยชน์สุ่ม (RUT) โดยใช้ข้อมูลจากแบบสอบถามกลุ่มตัวอย่างจำนวน 383 คน วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SPSS ตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ครอบคลุมทั้งปัจจัยด้านประชากรศาสตร์ (อายุ รายได้ เพศ) และปัจจัยเชิงพฤติกรรม (ความตั้งใจในการซื้อรถยนต์ไฟฟ้า) เพื่อสะท้อนพฤติกรรมการตัดสินใจของผู้บริโภคในบริบทองค์กรภาครัฐ ผลการศึกษาพบว่า พนักงานส่วนใหญ่มีแนวโน้มเลือกใช้รถยนต์ไฮบริดมากที่สุด รองลงมาคือรถยนต์ไฟฟ้าแบบแบตเตอรี่ และรถยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน โดยตัวแปรความตั้งใจในการซื้อรถยนต์ไฟฟ้ามีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.001$) ต่อการเลือกใช้ยานยนต์ไฟฟ้า ขณะที่อายุมีความสัมพันธ์เชิงลบกับการเลือกซื้อรถยนต์ไฟฟ้าแบบแบตเตอรี่ ทั้งนี้ แบบจำลองสามารถพยากรณ์การเลือกประเภทยานยนต์ได้ถูกต้องโดยรวม 65.27% งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาพฤติกรรมการเลือกยานยนต์ในกลุ่มพนักงานรัฐวิสาหกิจ ซึ่งยังมีการศึกษาอย่างจำกัดในประเทศไทย และมีส่วนช่วยเติมเต็มองค์ความรู้ด้านพฤติกรรมการยอมรับยานยนต์ไฟฟ้าในระดับองค์กร ทั้งนี้ ผลการศึกษาสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนการกำหนดนโยบายส่งเสริมการใช้ยานยนต์ไฟฟ้าในหน่วยงานภาครัฐ และการขับเคลื่อนการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในระยะยาว

คำสำคัญ: ยานยนต์ไฟฟ้า, แบบจำลองโลจิตพหุนาม, พฤติกรรมการเลือกยานยนต์

Abstract

The transition to electric vehicles (EVs) has become a critical pathway for reducing greenhouse gas emissions in the transportation sector and supporting Thailand's commitments to carbon neutrality and net-zero emissions. Despite the growing body of literature on EV adoption, existing studies predominantly focus on general consumers, with limited attention to public sector employees whose decision-making behavior may be shaped by institutional and organizational contexts. This study aims to investigate the determinants of vehicle choice among employees of the Provincial Waterworks Authority (PWA), a Thai state enterprise characterized by stable income structures and welfare systems. This study employs the Multinomial Logit Model (MNL) within the framework of Random Utility Theory (RUT) to analyze discrete vehicle choice behavior. Data were collected through a structured questionnaire from 383 respondents and analyzed using SPSS. The explanatory variables include demographic attributes (age, income, and gender) and behavioral factors (intention to purchase EVs), capturing both individual and attitudinal dimensions of decision-making. The empirical results reveal that hybrid electric vehicles are the most preferred option, followed by battery electric vehicles and internal combustion engine vehicles. The intention to purchase EVs significantly increases the likelihood of choosing EV alternatives ($p < 0.001$), while age exhibits a negative association with the adoption of battery electric vehicles. The model achieves an overall predictive accuracy of 65.27%, indicating a satisfactory level of explanatory power. This

study contributes to the literature by providing empirical evidence on EV adoption behavior within a public sector organizational context, which remains underexplored in Thailand. The findings offer policy-relevant insights for designing targeted interventions to promote EV adoption among public sector employees and support national strategies for sustainable transportation and emissions reduction.

Keywords: Electric Vehicles, Multinomial Logit Model, Vehicle Choice Behavior, Public Sector, Sustainable Transportation

1. บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยกำลังเผชิญกับความท้าทายด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพอากาศ สุขภาพของประชาชน และเสถียรภาพด้านสิ่งแวดล้อมของประเทศ การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจึงเป็นประเด็นสำคัญของการพัฒนาที่ยั่งยืนในระดับนโยบายของประเทศ รัฐบาลไทยได้กำหนดเป้าหมายในการมุ่งสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอน (Carbon Neutrality) ภายในปี พ.ศ. 2593 และการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero Emissions) ภายในปี พ.ศ. 2065 ซึ่งถือเป็นกรอบสำคัญในการขับเคลื่อนการพัฒนาประเทศให้สอดคล้องกับแนวโน้มด้านสภาพภูมิอากาศของโลก [1] การเติบโตของตลาดรถยนต์ไฟฟ้าได้รับแรงสนับสนุนจากนโยบายภาครัฐ การพัฒนาเทคโนโลยีแบตเตอรี่ และการขยายโครงสร้างพื้นฐานสถานีชาร์จไฟฟ้าในหลายประเทศทั่วโลก โดยรายงาน Global EV Outlook ระบุว่ายอดขายรถยนต์ไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งสะท้อนถึงการเปลี่ยนผ่านของระบบการคมนาคมไปสู่เทคโนโลยีพลังงานสะอาด [2] แนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืนขององค์การสหประชาชาติ โดยเฉพาะ SDG 11 เมืองและชุมชนที่ยั่งยืน และ SDG 13 การรับมือการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ซึ่งมุ่งลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากภาคการคมนาคม [3] สำหรับประเทศไทย การเติบโตของตลาดยานยนต์ไฟฟ้าเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา โดยรายงานของ Krungsri Research ระบุว่าจำนวนรถยนต์ไฟฟ้าแบบแบตเตอรี่ (BEV) เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ พร้อมกับขยายตัวของสถานีชาร์จไฟฟ้าในหลายพื้นที่ทั่วประเทศ [4] ในระดับองค์กรภาครัฐ กระทรวงมหาดไทยซึ่งเป็นหน่วยงานกำกับดูแลการประปาส่วนภูมิภาค (กปภ.) ได้ให้ความสำคัญกับการดำเนินงานด้านความยั่งยืน รวมถึงการลดการใช้พลังงานและการส่งเสริมการใช้ยานยนต์ไฟฟ้าในหน่วยงาน โดยการประปาส่วนภูมิภาคได้กำหนดนโยบายการพัฒนาความยั่งยืนขององค์กรตามหลัก Environmental, Social and Governance (ESG) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานและลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก [5] ด้วยบทบาทของการประปาส่วนภูมิภาคในการให้บริการสาธารณูปโภคทั่วประเทศ การส่งเสริมให้พนักงานใช้ยานยนต์ไฟฟ้าจึงเป็นแนวทางสำคัญที่สามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการเดินทาง และสนับสนุนการดำเนินงานขององค์กรให้สอดคล้องกับแนวคิดองค์กรสีเขียว อย่างไรก็ตาม แม้วางานวิจัยเกี่ยวกับการยอมรับยานยนต์ไฟฟ้าจะมีจำนวนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงที่ผ่านมา แต่การศึกษาส่วนใหญ่มีมุมมองไปที่กลุ่มผู้บริโภคทั่วไปหรือภาคเอกชน โดยให้ความสำคัญกับปัจจัยด้านเศรษฐศาสตร์และเทคโนโลยี เช่น ราคา ระยะทาง และต้นทุนการใช้งานเป็นหลัก ขณะที่การศึกษาที่มุ่งเน้นพฤติกรรมการตัดสินใจของบุคลากรในองค์กรภาครัฐหรือรัฐวิสาหกิจ ซึ่งมีโครงสร้างรายได้ ความมั่นคงในการจ้างงาน และระบบสวัสดิการที่แตกต่างจากภาคเอกชน ยังมีอยู่อย่างจำกัด นอกจากนี้ งานวิจัยที่ผ่านมาโดยเฉพาะในบริบทของประเทศไทย ยังขาดการวิเคราะห์เชิงพฤติกรรมในระดับองค์กร (organizational-level behavior) ที่สะท้อนถึงการตัดสินใจของบุคลากรภายในหน่วยงานรัฐ ซึ่งอาจได้รับอิทธิพลจากทั้งปัจจัยส่วนบุคคลและบริบทเชิงสถาบัน (institutional context) อีกทั้ง แม้แบบจำลองโลจิสติกพหุนาม (MNL) จะถูกนำมาใช้ในการศึกษาพฤติกรรมทางเลือกยานยนต์อย่างแพร่หลาย แต่การประยุกต์ใช้แบบจำลองดังกล่าวในกลุ่มพนักงานรัฐวิสาหกิจ โดยเฉพาะในหน่วยงานด้านสาธารณูปโภค ยังไม่ปรากฏอย่างชัดเจนในงานวิจัยที่ผ่านมา ดังนั้น การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจซื้อยานยนต์ไฟฟ้าของพนักงานการประปาส่วนภูมิภาค โดยพิจารณาทางเลือกยานยนต์ 3 ประเภท ได้แก่ รถยนต์ไฟฟ้าแบบแบตเตอรี่ (BEV) รถยนต์ไฟฟ้าแบบไฮบริด (HEV) และรถยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน (ICE) ภายใต้กรอบแนวคิดทฤษฎีอรรถประโยชน์สุ่ม (RUT) และแบบจำลองโลจิสติกพหุนาม (MNL) โดยผลการศึกษาคาดว่าจะสนับสนุนการกำหนดนโยบายส่งเสริมยานยนต์ไฟฟ้าในองค์กรภาครัฐ และการขับเคลื่อนเป้าหมายความเป็นกลางทางคาร์บอนของประเทศไทย

2. วิธีการศึกษา

ในการศึกษานี้ ผู้วิจัยได้ทบทวนทฤษฎี แนวคิด และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อใช้เป็นพื้นฐานในการพัฒนาแบบจำลองการวิเคราะห์และกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาเรื่อง “ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้อรถยนต์ไฟฟ้าของพนักงานรัฐวิสาหกิจการประปาส่วนภูมิภาค” จากกรอบแนวคิดดังกล่าว ผู้วิจัยได้พัฒนาแบบสอบถามให้ครอบคลุมข้อมูลลักษณะทั่วไปของผู้ตอบ ปัจจัยด้านคุณลักษณะของรถยนต์ ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมและนโยบายภาครัฐ และความตั้งใจในการซื้อรถยนต์ไฟฟ้า การศึกษานี้ใช้

แนวคิดทฤษฎีอรรถประโยชน์สุ่ม (RUT) และแบบจำลองโลจิสติกพหุนาม (MNL) เพื่ออธิบายพฤติกรรมการเลือกจากหลายทางเลือก โดยเก็บรวบรวมข้อมูลจากแบบสอบถามออนไลน์ กำหนดขนาดกลุ่มตัวอย่างตามหลักสถิติ และตรวจสอบความครบถ้วนของข้อมูล ก่อนนำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SPSS ทั้งนี้ ใช้สถิติเชิงพรรณนาเพื่ออธิบายลักษณะกลุ่มตัวอย่าง และใช้แบบจำลองโลจิสติกพหุนาม (MNL) เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ กับการตัดสินใจเลือกประเภทยานยนต์

2.1 ประชากรและตัวอย่างในการวิจัย

ประชากรที่ใช้ในการศึกษาคั้งนี้คือพนักงานการประปาส่วนภูมิภาค เป็นหน่วยงานรัฐวิสาหกิจที่มีบทบาทสำคัญด้านสาธารณูปโภค และมีลักษณะเฉพาะด้านความมั่นคงของรายได้และสวัสดิการ ซึ่งส่งผลให้พฤติกรรมการตัดสินใจเลือกยานยนต์แตกต่างจากผู้บริโภคทั่วไป อีกทั้งองค์กรมีการกระจายหน่วยงานครอบคลุมทั่วประเทศ จึงสามารถสะท้อนพฤติกรรมในภาพรวมได้ โดยพนักงานปฏิบัติงานในสำนักงานใหญ่และการประปาส่วนภูมิภาคเขต 1-10 รวมทั้งสิ้น 8,923 คน การกำหนดขนาดกลุ่มตัวอย่างใช้สูตรของทาร์โร ยามาเน่ [6] แสดงดัง Equation (1) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และค่าความคลาดเคลื่อน 0.05 ได้จำนวนกลุ่มตัวอย่าง 383 คน จากนั้นผู้วิจัยได้จัดสรรจำนวนตัวอย่างตามสัดส่วนของจำนวนพนักงานในแต่ละหน่วยงาน (Proportionate Allocation) ตามที่แสดงใน Table 1 และใช้วิธีการคัดเลือกแบบไม่อาศัยความน่าจะเป็น (Non-Probability Sampling) โดยกำหนดโควตาตามสัดส่วนของแต่ละเขต (Quota Sampling)

$$n = \frac{N}{1 + Ne^2} \quad (1)$$

Where; n = the sample size of the population
 N = the total population of employees of the Provincial Waterworks Authority
 e = the margin of error accepted, set at 0.05 (5%)

Table 1 Proportional Allocation of the Required Sample Size

Organizational Unit	Number of Employees (Persons)	Sample Size (Persons)
Provincial Waterworks Authority Head Office	1,247	54
Provincial Waterworks Authority Region 1	901	39
Provincial Waterworks Authority Region 2	1,056	45
Provincial Waterworks Authority Region 3	760	33
Provincial Waterworks Authority Region 4	798	34
Provincial Waterworks Authority Region 5	661	28
Provincial Waterworks Authority Region 6	795	34
Provincial Waterworks Authority Region 7	601	26
Provincial Waterworks Authority Region 8	654	28
Provincial Waterworks Authority Region 9	748	32
Provincial Waterworks Authority Region 10	702	30
Total	8,923	383

2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูลในการศึกษาคั้งนี้คือแบบสอบถาม (Questionnaire) ซึ่งเป็นคำถามปลายปิด (Closed-ended questions) เพื่อให้สามารถนำข้อมูลไปวิเคราะห์เชิงสถิติได้ แบบสอบถามพัฒนาขึ้นจากการทบทวนวรรณกรรม แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการยอมรับและการตัดสินใจเลือกใช้รถยนต์ไฟฟ้า โดยออกแบบให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการวิจัย และแบ่งออกเป็น 5 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม เป็นคำถามแบบเลือกตอบ (Multiple Choice) เกี่ยวกับลักษณะทางประชากรศาสตร์ ใช้เพื่ออธิบายลักษณะกลุ่มตัวอย่าง

ส่วนที่ 2 ปัจจัยด้านคุณลักษณะของรถยนต์ ใช้มาตราส่วนประมาณค่าแบบ Likert Scale 5 ระดับ เพื่อวัดความคิดเห็นเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้อรถยนต์ไฟฟ้า

ส่วนที่ 3 ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมและนโยบายภาครัฐ ใช้มาตราส่วนประมาณค่าแบบ Likert Scale 5 ระดับ เพื่อวัดความคิดเห็นเกี่ยวกับปัจจัยภายนอกที่มีผลต่อรถยนต์ไฟฟ้า

ส่วนที่ 4 ความตั้งใจในการตัดสินใจซื้อรถยนต์ไฟฟ้า ใช้มาตราส่วนประมาณค่าแบบ Likert Scale 5 ระดับ เพื่อวัดระดับความตั้งใจในการซื้อรถยนต์ไฟฟ้าในอนาคต

ส่วนที่ 5 การตัดสินใจเลือกรถยนต์ เป็นการจำลองสถานการณ์ทางเลือก โดยให้ผู้ตอบเลือกยานยนต์เพียงหนึ่งทางเลือกจาก 3 ประเภท ได้แก่ รถยนต์ไฟฟ้าแบบแบตเตอรี่ (BEV) , รถยนต์ไฟฟ้าแบบไฮบริด (HEV) และ รถยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน (ICE) ซึ่งแต่ละทางเลือกกำหนดคุณลักษณะของยานยนต์ที่แตกต่างกัน เพื่อจำลองเงื่อนไขการตัดสินใจของผู้บริโภคในสถานการณ์ที่ใกล้เคียงกับสภาพจริง

2.3 การตรวจสอบคุณภาพของเครื่องมือวิจัย

เพื่อให้เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูลมีความถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือ ผู้วิจัยได้ดำเนินการตรวจสอบคุณภาพของแบบสอบถามในสองขั้นตอน ได้แก่ การตรวจสอบความตรงเชิงเนื้อหา (Content Validity) และการทดสอบความเชื่อมั่นของเครื่องมือ (Reliability) [7]

2.3.1 การตรวจสอบความตรงเชิงเนื้อหา (Content Validity)

ผู้วิจัยได้นำแบบสอบถามที่พัฒนาขึ้นเสนอให้ผู้เชี่ยวชาญจำนวน 3 ท่าน ทำการพิจารณาตรวจสอบความสอดคล้องระหว่างข้อคำถามกับวัตถุประสงค์ของการวิจัย โดยใช้ดัชนีความสอดคล้องของเนื้อหา (Index of Item-Objective Congruence: IOC) ผลการประเมินพบว่า ข้อคำถามทุกข้อมีค่า IOC มากกว่า 0.50 ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ แสดงว่าแบบสอบถามมีความสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการวิจัยและสามารถนำไปใช้เก็บรวบรวมข้อมูลได้

2.3.2 การทดสอบความเชื่อมั่นของเครื่องมือ (Reliability)

หลังจากปรับปรุงแบบสอบถามตามข้อเสนอแนะของผู้เชี่ยวชาญแล้ว ผู้วิจัยได้ทำการทดลองใช้แบบสอบถามกับกลุ่มตัวอย่างที่มีลักษณะใกล้เคียงกับกลุ่มตัวอย่างจริงจำนวน 30 คน เพื่อตรวจสอบความเชื่อมั่นของแบบสอบถาม โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ Cronbach's Alpha ผลการทดสอบพบว่า ค่า Cronbach's Alpha เท่ากับ 0.87 ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้มีค่าความเชื่อมั่นไม่น้อยกว่า 0.70 (ค่าระหว่าง 0.713-0.966) ซึ่งถือว่าอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ตามเกณฑ์ของ Nunnally [8] และสามารถนำไปใช้เก็บรวบรวมข้อมูลสำหรับการวิจัยได้อย่างเหมาะสม

2.4 สมการอรรถประโยชน์สำหรับการตัดสินใจเลือกยานยนต์

การวิเคราะห์พฤติกรรมกรรมการตัดสินใจเลือกของผู้บริโภคสามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีอรรถประโยชน์แบบสุ่ม (RUT) ซึ่งระบุว่าผู้บริโภคจะเลือกทางเลือกที่ให้อรรถประโยชน์สูงสุดภายใต้ข้อจำกัดของข้อมูลและปัจจัยที่เกี่ยวข้อง [9] โดยอรรถประโยชน์ของแต่ละทางเลือกขึ้นอยู่กับลักษณะส่วนบุคคลและปัจจัยเชิงพฤติกรรม เช่น อายุ รายได้ และความตั้งใจในการใช้รถยนต์ไฟฟ้า ในงานวิจัยนี้กำหนดทางเลือกยานยนต์ 3 ประเภท ได้แก่ รถยนต์ไฟฟ้าแบบแบตเตอรี่ (BEV) , รถยนต์ไฟฟ้าแบบไฮบริด (HEV) และ รถยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน (ICE) โดยกำหนดให้ รถยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน (ICE) เป็นกลุ่มอ้างอิง (Reference Category) แม้ว่า รถยนต์ไฟฟ้าแบบแบตเตอรี่ (BEV) และ รถยนต์ไฟฟ้าแบบไฮบริด (HEV) จะอยู่ในกลุ่มยานยนต์ไฟฟ้าเช่นเดียวกัน แต่มีความแตกต่างด้านแหล่งพลังงานและเทคโนโลยี จึงอาจส่งผลให้ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจแตกต่างกัน สำหรับ รถยนต์ปลั๊กอินไฮบริด (PHEV) ไม่ได้รวมในการศึกษา เนื่องจากมีสัดส่วนการใช้งานในตลาดยังจำกัด และเพื่อลดความซับซ้อนของแบบจำลองโลจิสติกพหุนาม (MNL) ตามแนวคิดทฤษฎีอรรถประโยชน์แบบสุ่ม สามารถเขียนแสดงดัง Equation (2) ได้ดังนี้

$$U_{jn} = V_{jn} + \varepsilon_{jn} \quad (2)$$

Where; U_{in} = the total utility of individual n associated with alternative i
 V_{in} = the observable component of utility
 ε_{in} = the unobservable or random component of utility

ส่วนของอรรถประโยชน์ที่สามารถวัดค่าได้ V_{in} สามารถกำหนดให้อยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์เชิงเส้นของตัวแปรอิสระที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจของผู้บริโภค ซึ่งสามารถเขียนแสดงดัง Equation (3) ได้ดังนี้

$$V_{in} = \beta_0 + \beta_1 X_{1n} + \beta_2 X_{2n} + \dots + \beta_k X_{kn} \quad (3)$$

Where; β_k = the coefficient of the k -th independent variable
 X_{kn} = the independent variable k influencing the decision of individual n

ในงานวิจัยนี้ ตัวแปรอิสระที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ ได้แก่ ปัจจัยด้านลักษณะส่วนบุคคลและปัจจัยด้านพฤติกรรมผู้บริโภค เช่น ความตั้งใจในการซื้อรถยนต์ไฟฟ้า อายุ รายได้ และเพศของผู้ตอบแบบสอบถาม ซึ่งปัจจัยเหล่านี้คาดว่าจะมีอิทธิพลต่อระดับอรรถประโยชน์ของยานยนต์แต่ละประเภท จึงสามารถกำหนดฟังก์ชันอรรถประโยชน์ของแต่ละทางเลือกให้อยู่ในรูปแบบ Equation (4) และ (5) ได้ดังนี้

$$V_{BEV} = \beta_0 + \beta_1 \text{Intention} + \beta_2 \text{Age} + \beta_3 \text{Income} + \beta_4 \text{Gender} \quad (4)$$

$$V_{HEV} = \beta_0 + \beta_1 \text{Intention} + \beta_2 \text{Age} + \beta_3 \text{Income} + \beta_4 \text{Gender} \quad (5)$$

โดยกำหนดให้ รถยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน (ICE) เป็นกลุ่มอ้างอิง (Reference Category) สำหรับการเปรียบเทียบผลของแบบจำลอง จากสมการอรรถประโยชน์ดังกล่าว สามารถนำไปสู่การวิเคราะห์ความน่าจะเป็นของการเลือกยานยนต์แต่ละประเภทโดยใช้แบบจำลองโลจิทพหุนาม (MNL) [10]

2.5 แบบจำลองโลจิทพหุนาม (Multinomial Logit Model: MNL)

เนื่องจากการตัดสินใจเลือกประเภทยานยนต์ในงานวิจัยนี้มีมากกว่าสองทางเลือก ได้แก่ รถยนต์ไฟฟ้าแบบแบตเตอรี่ (BEV), รถยนต์ไฟฟ้าแบบไฮบริด (HEV) และรถยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน (ICE) ดังนั้น การวิเคราะห์พฤติกรรมตัดสินใจเลือกจึงใช้ แบบจำลองโลจิทพหุนาม (MNL) ซึ่งสามารถใช้วิเคราะห์ความน่าจะเป็นของการเลือกทางเลือกใดทางเลือกหนึ่งจากหลายทางเลือกได้ความน่าจะเป็นที่บุคคล n จะเลือกทางเลือก i สามารถเขียนได้ดัง Equation (6)

$$P_{in} = \frac{e^{V_{in}}}{\sum_{j=1}^J e^{V_{jn}}} \quad (6)$$

Where; P_{in} = the probability that individual n selects alternative i
 V_{in} = the utility associated with alternative i for individual n
 V_{jn} = the utility associated with alternative j for individual n
 J = the total number of available alternatives

สมการนี้แสดงให้เห็นว่าความน่าจะเป็นของการเลือกขึ้นอยู่กับค่าอรรถประโยชน์สัมพันธ์ของแต่ละทางเลือก [11] การประมาณค่าพารามิเตอร์ใช้วิธี Maximum Likelihood Estimation เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ที่อธิบายอิทธิพลของตัวแปรอิสระต่อการตัดสินใจเลือก [12] โดยกำหนดให้ รถยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน (ICE) เป็นกลุ่มอ้างอิง (Reference Category) สำหรับเปรียบเทียบกับ รถยนต์ไฟฟ้าแบบแบตเตอรี่ (BEV) และ รถยนต์ไฟฟ้าแบบไฮบริด (HEV)

2.6 การกำหนดตัวแปรในการวิเคราะห์แบบจำลอง

ในการศึกษาพฤติกรรมตัดสินใจเลือกประเภทยานยนต์ของผู้บริโภค การกำหนดตัวแปรในแบบจำลองถือเป็นขั้นตอนสำคัญที่ช่วยอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจเลือกของผู้บริโภคกับผลลัพธ์ของการตัดสินใจดังกล่าว โดยการศึกษาครั้งนี้ได้กำหนดตัวแปรสำหรับใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองโลจิทพหุนาม (MNL) ซึ่งประกอบด้วยตัวแปรตาม (Dependent Variable) และตัวแปรอิสระ (Independent Variables) ในการศึกษาครั้งนี้ ผู้วิจัยจึงกำหนดตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับลักษณะส่วนบุคคลของผู้ตอบแบบสอบถามและปัจจัยด้านพฤติกรรมผู้บริโภค เพื่อใช้ในการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยดังกล่าวต่อการตัดสินใจเลือกประเภทยานยนต์

2.6.1. ตัวแปรตาม (Dependent Variable)

ตัวแปรตามในงานวิจัยนี้คือ การตัดสินใจเลือกประเภทยานยนต์ของผู้ตอบแบบสอบถาม ซึ่งกำหนดเป็นตัวแปรเชิงคุณภาพ (Categorical Variable) ที่มีหลายทางเลือก โดยแบ่งออกเป็น 3 ประเภทยานยนต์ ได้แก่ รถยนต์ไฟฟ้าแบบแบตเตอรี่ รถยนต์ไฟฟ้าแบบไฮบริด และรถยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองโลจิสติกพหุนาม (MNL) ได้กำหนดค่าของตัวแปรตามดัง Table 2 ในการวิเคราะห์แบบจำลองนี้ได้กำหนดให้ รถยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน (ICE) เป็นกลุ่มอ้างอิง (Reference Category) เพื่อใช้เป็นฐานในการเปรียบเทียบความน่าจะเป็นในการเลือกยานยนต์ประเภทอื่น

Table 2 Variable definition of vehicle choice

Variable	Description
BEV	Battery Electric Vehicle
HEV	Hybrid Electric Vehicle
ICE	Internal Combustion Engine

2.6.2 ตัวแปรอิสระ (Independent Variables)

ตัวแปรอิสระที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วยปัจจัยด้านลักษณะประชากรศาสตร์และปัจจัยด้านพฤติกรรมผู้บริโภค ซึ่งคาดว่าจะมีอิทธิพลต่อการตัดสินใจเลือกประเภทยานยนต์ โดยตัวแปรดังกล่าวได้มาจากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการยอมรับรถยนต์ไฟฟ้าและพฤติกรรมผู้บริโภคในตลาดยานยนต์ไฟฟ้า [13] ตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองสามารถแสดงได้ดัง Table 3 ต่อไปนี้

Table 3 Definition of variables used in the model

Variable	Description
Intention	Intention to purchase electric vehicle
Age	Age of respondent
Income	Monthly income of respondent
Gender	Gender of respondent

ปัจจัยดังกล่าวสะท้อนถึงลักษณะทางเศรษฐกิจสังคมและพฤติกรรมของผู้บริโภค ซึ่งมีบทบาทต่อการตัดสินใจเลือกใช้ยานยนต์ไฟฟ้า ทั้งนี้ แม้ว่าปัจจัยด้านคุณลักษณะของรถยนต์ และปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมและนโยบายภาครัฐ เช่น การรับรู้ด้านสิ่งแวดล้อม โครงสร้างพื้นฐานสถานีชาร์จ และมาตรการสนับสนุนจากภาครัฐ จะถูกรวมอยู่ในแบบสอบถาม แต่ไม่ได้ถูกนำมาใช้ในแบบจำลองโลจิสติกพหุนาม (MNL) ในการวิเคราะห์แบบจำลอง ผู้วิจัยเลือกใช้ตัวแปรหลัก ได้แก่ ความตั้งใจในการซื้อรถยนต์ไฟฟ้า อายุ รายได้ และเพศ ซึ่งสามารถสะท้อนพฤติกรรมทางเลือกได้โดยตรง และช่วยลดความซับซ้อนของแบบจำลอง รวมถึงหลีกเลี่ยงปัญหาความแปรปรวนร่วมระหว่างตัวแปร

2.7 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติใช้โปรแกรม SPSS โดยแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ได้แก่ การวิเคราะห์สถิติเชิงพรรณนา และการวิเคราะห์สถิติเชิงอนุมาน

2.7.1 การวิเคราะห์สถิติเชิงพรรณนา (Descriptive Statistics)

การวิเคราะห์สถิติเชิงพรรณนาใช้เพื่ออธิบายลักษณะทั่วไปของกลุ่มตัวอย่างและระดับความคิดเห็นของผู้ตอบแบบสอบถาม โดยใช้สถิติพื้นฐาน ได้แก่ ความถี่ (Frequency) และค่าเปอร์เซ็นต์ (Percentage) เพื่ออธิบายข้อมูลด้านประชากรศาสตร์ของผู้ตอบแบบสอบถาม เช่น เพศ อายุ ระดับการศึกษา รายได้ รวมถึงข้อมูลเกี่ยวกับพฤติกรรมการใช้รถยนต์ของกลุ่มตัวอย่าง นอกจากนี้ยังใช้ค่าเฉลี่ย (Mean) และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) เพื่อวิเคราะห์และอธิบายระดับความคิดเห็นของผู้ตอบแบบสอบถามเกี่ยวกับปัจจัยด้านคุณลักษณะของรถยนต์ ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมและนโยบายภาครัฐ

ตลอดจนความตั้งใจในการตัดสินใจซื้อรถยนต์ไฟฟ้า ทั้งนี้ การวิเคราะห์ดังกล่าวมีวัตถุประสงค์เพื่อแสดงภาพรวมของข้อมูลและลักษณะการกระจายของข้อมูลก่อนนำไปใช้ในการวิเคราะห์เชิงอนุมานในขั้นตอนถัดไป [14]

2.7.2 การวิเคราะห์สถิติเชิงอนุมาน (Inferential Statistics)

การวิเคราะห์สถิติเชิงอนุมานในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ใช้ แบบจำลองโลจิสทิกพหุนาม (MNL) เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจเลือกประเภทยานยนต์ของผู้ตอบแบบสอบถาม โดยกำหนดให้ตัวแปรตามเป็น การเลือกประเภทยานยนต์ (Vehicle Choice) ซึ่งประกอบด้วย 3 ทางเลือก ได้แก่ รถยนต์ไฟฟ้าแบบแบตเตอรี่ (BEV) รถยนต์ไฮบริด (HEV) และรถยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน (ICE) ทั้งนี้ ในการประมาณค่าแบบจำลองได้กำหนดให้ รถยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน (ICE) เป็นกลุ่มอ้างอิง (Reference Category) เพื่อใช้เป็นฐานในการเปรียบเทียบความน่าจะเป็นของการเลือกทางเลือกอื่น ๆ แบบจำลองดังกล่าวถูกนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ ได้แก่ ความตั้งใจในการซื้อรถยนต์ไฟฟ้า อายุ รายได้ และเพศ กับความน่าจะเป็นในการเลือกประเภทยานยนต์ของผู้ตอบแบบสอบถาม โดยการประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองดำเนินการด้วยวิธี Maximum Likelihood Estimation (MLE) ทั้งนี้กำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติไว้ที่ 0.05 เพื่อใช้ในการทดสอบอิทธิพลของตัวแปรอิสระที่มีต่อความน่าจะเป็นในการเลือกประเภทยานยนต์ของผู้ตอบแบบสอบถาม

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากแบบสอบถามที่เก็บรวบรวมจากกลุ่มตัวอย่างพนักงานรัฐวิสาหกิจการประปาส่วนภูมิภาค จำนวน 383 คน โดยแบ่งการนำเสนอผลการศึกษาก่อนเป็น 5 ส่วน ได้แก่ ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม ปัจจัยด้านคุณลักษณะของรถยนต์ ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมและนโยบายภาครัฐ ความตั้งใจในการตัดสินใจซื้อรถยนต์ไฟฟ้า และแบบประเมินการเลือกยานยนต์ โดยแบบสอบถามแบ่งออกเป็น 5 ส่วน ได้แก่

3.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทั่วไปของกลุ่มตัวอย่าง

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถามจากกลุ่มตัวอย่างจำนวน 383 คน พบว่า ผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่เป็นเพศชาย จำนวน 274 คน คิดเป็น 71.5% และเพศหญิง จำนวน 109 คน คิดเป็น 28.5% โดยส่วนใหญ่อยู่ในช่วงอายุ 35-44 ปี จำนวน 202 คน คิดเป็น 52.7% รองลงมาคือช่วงอายุ 25-34 ปี คิดเป็น 33.9% ในด้านระดับการศึกษา พบว่าส่วนใหญ่สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี คิดเป็น 64.2% และมีรายได้เฉลี่ยต่อเดือนอยู่ในช่วง 10,001-20,000 บาท คิดเป็น 38.4% เมื่อพิจารณาพฤติกรรมการใช้ยานยนต์ พบว่าผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่มีใบอนุญาตขับขี่รถยนต์ คิดเป็น 97.1% และมีรถยนต์ครอบครองจำนวน 1 คัน คิดเป็น 66.8% โดยประเภทรถยนต์ที่ใช้งานในปัจจุบันส่วนใหญ่เป็นรถยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน (ICE) คิดเป็น 73.4% รองลงมาคือรถยนต์ไฮบริด (HEV) คิดเป็น 13.1% ในด้านพฤติกรรมการเดินทาง พบว่าส่วนใหญ่มีระยะทางการเดินทางต่อวันอยู่ในช่วง 21-40 กิโลเมตร คิดเป็น 31.6% และมีค่าใช้จ่ายด้านพลังงานต่อเดือนอยู่ในช่วง 2,001-3,500 บาท คิดเป็น 37.6% นอกจากนี้ ผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่ระบุว่าสามารถติดตั้งเครื่องชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าที่บ้านได้ คิดเป็น 83.0%

3.2 ปัจจัยด้านคุณลักษณะของรถยนต์

ผลการวิเคราะห์ระดับความคิดเห็นของผู้ตอบแบบสอบถามเกี่ยวกับปัจจัยด้านคุณลักษณะของรถยนต์ไฟฟ้า โดยใช้ค่าเฉลี่ย (Mean) และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) พบว่า โดยภาพรวมผู้ตอบแบบสอบถามให้ความสำคัญกับปัจจัยด้านคุณลักษณะของรถยนต์ไฟฟ้าอยู่ในระดับสูง ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าคุณลักษณะของยานยนต์มีบทบาทสำคัญต่อการตัดสินใจเลือกซื้อรถยนต์ไฟฟ้า เมื่อพิจารณาเป็นรายปัจจัย พบว่า ความประหยัดพลังงาน มีค่าเฉลี่ยสูงสุด (Mean = 4.45, S.D. = 0.714) รองลงมาคือ ความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจเมื่อเปรียบเทียบกับราคาของรถยนต์ไฟฟ้า (Mean = 4.30, S.D. = 0.822) และความน่าเชื่อถือของเทคโนโลยี (Mean = 4.19, S.D. = 0.847) นอกจากนี้ ปัจจัยด้านราคาของรถยนต์ที่อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ และชื่อเสียงของแบรนด์รถยนต์ ยังมีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับสูงเช่นกัน ขณะที่ปัจจัยด้านพิธีการชำระหนี้ครั้งเดียวและความเร็วในการชาร์จไฟฟ้า มีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับค่อนข้างสูง แต่มีความสำคัญรองลงมาเมื่อเปรียบเทียบกับปัจจัยด้านความประหยัดพลังงานและความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ

3.3 ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมและนโยบายภาครัฐ

ผลการวิเคราะห์ระดับความคิดเห็นของผู้ตอบแบบสอบถามเกี่ยวกับปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมและนโยบายภาครัฐ โดยใช้ค่าเฉลี่ย (Mean) และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) พบว่า โดยภาพรวมผู้ตอบแบบสอบถามให้ความสำคัญกับ

ปัจจัยดังกล่าวในระดับสูง ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าการสนับสนุนจากภาครัฐและความตระหนักด้านสิ่งแวดล้อมมีบทบาทสำคัญต่อการตัดสินใจเลือกใช้รถยนต์ไฟฟ้า เมื่อพิจารณาเป็นรายปัจจัย พบว่า ผู้ตอบแบบสอบถามให้ความสำคัญกับ นโยบายส่งเสริมการใช้พลังงานสะอาดและการลดมลพิษทางอากาศ ในระดับสูง รองลงมาคือ มาตรการสนับสนุนจากภาครัฐ เช่น เงินอุดหนุนหรือสิทธิประโยชน์ทางภาษีสำหรับผู้ใช้รถยนต์ไฟฟ้า รวมถึง การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านสถานีชาร์จไฟฟ้า ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มความสะดวกในการใช้งานรถยนต์ไฟฟ้า

3.4 ความตั้งใจในการตัดสินใจซื้อรถยนต์ไฟฟ้า

ผลการวิเคราะห์ระดับความคิดเห็นเกี่ยวกับความตั้งใจในการตัดสินใจซื้อรถยนต์ไฟฟ้า โดยใช้ค่าเฉลี่ย (Mean) และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) พบว่า โดยภาพรวมผู้ตอบแบบสอบถามมีระดับความตั้งใจในการพิจารณาเลือกใช้รถยนต์ไฟฟ้าอยู่ในระดับค่อนข้างสูง เมื่อพิจารณาเป็นรายข้อ พบว่า ผู้ตอบแบบสอบถามมีความตั้งใจเลือกซื้อรถยนต์ไฟฟ้าหากค่าใช้จ่ายด้านพลังงานต่ำกว่ารถยนต์น้ำมัน มากที่สุด (Mean = 4.25, S.D. = 0.801) รองลงมาคือ ความตั้งใจเลือกซื้อรถยนต์ไฟฟ้าหากมีสถานีชาร์จไฟฟ้าเพียงพอและสามารถเข้าถึงได้สะดวก (Mean = 4.20, S.D. = 0.942) และการพิจารณาความคุ้มค่าในระยะยาวของรถยนต์ไฟฟ้า (Mean = 4.10, S.D. = 0.983) ตามลำดับ ในขณะที่ปัจจัยด้านการใช้รถยนต์ไฟฟ้าแทนรถยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน (Mean = 3.99, S.D. = 0.961) และการพิจารณาให้รถยนต์ไฟฟ้าเป็นตัวเลือกรแรกในการซื้อรถยนต์ (Mean = 3.60, S.D. = 1.198) มีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับค่อนข้างสูงเช่นกัน แต่มีระดับความสำคัญรองลงมา ส่วนความตั้งใจในการซื้อรถยนต์ไฟฟ้าภายในระยะเวลา 1 ปีมีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับปานกลาง (Mean = 3.50, S.D. = 1.162)

3.5 ผลการวิเคราะห์แบบจำลอง Multinomial Logit Model

การวิเคราะห์การตัดสินใจเลือกประเภทยานยนต์ของผู้ตอบแบบสอบถามในการศึกษานี้ ใช้แบบจำลองโลจิทพหุนาม (MNL) โดยกำหนดให้ตัวแปรตามเป็นการเลือกประเภทยานยนต์ 3 ทางเลือก ได้แก่ รถยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน (ICE) รถยนต์ไฟฟ้าแบบแบตเตอรี่ (BEV) และรถยนต์ไฮบริด (HEV) โดยกำหนดให้ รถยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน (ICE) เป็นกลุ่มอ้างอิง (Reference Category) ขณะที่ตัวแปรอิสระที่นำมาพิจารณาในแบบจำลอง ได้แก่ ความตั้งใจในการซื้อรถยนต์ไฟฟ้า อายุ รายได้ และเพศ ผลการประมาณค่าของแบบจำลองโลจิทพหุนาม (MNL) แสดงดัง Table 4

Table 4 Results of the Multinomial Logit Model for Vehicle Choice

Factors	Battery Electric Vehicle (BEV)		Hybrid Electric Vehicle (HEV)	
	β	P-value	β	P-value
(Intercept)	-3.172	0.022*	-0.026	0.981
Intention	1.597	<0.001***	1.025	<0.001***
Age	-0.969	0.011*	-0.564	0.079
Income	-0.125	0.646	-0.130	0.570
Gender	0.792	0.095	-0.023	0.950
Final Log-Likelihood (LL)	-555.058			
Likelihood Ratio Chi-square	52.811***			
df	8			
Nagelkerke Pseudo R ²	0.158			
Number of Observations	383			

Note: ICE (Internal Combustion Engine) is the reference category.

***, **, * denote significance at the 1%, 5%, and 10% levels, respectively.

ผลการประมาณค่าของแบบจำลองแสดงดัง Table 4 พบว่าแบบจำลองมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่า Likelihood Ratio Chi-square เท่ากับ 52.811 ($p < 0.001$) แสดงว่าแบบจำลองสามารถอธิบายความแตกต่างของการเลือกประเภทยานยนต์ของผู้ตอบแบบสอบถามได้อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ ค่า Nagelkerke Pseudo R² เท่ากับ 0.158 แสดงว่าแบบจำลองสามารถอธิบาย

ความแปรปรวนของการตัดสินใจเลือกประเภทยานยนต์ได้ประมาณ 15.8% เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรในแบบจำลองพบว่า ความตั้งใจในการซื้อรถยนต์ไฟฟ้า (Intention) เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเลือกใช้รถยนต์ไฟฟ้าแบบแบตเตอรี่ (BEV) และรถยนต์ไฮบริด (HEV) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $p < 0.001$ แสดงให้เห็นว่าผู้ที่มีระดับความตั้งใจในการซื้อรถยนต์ไฟฟ้าสูงมีแนวโน้มที่จะเลือกใช้ยานยนต์ไฟฟ้ามากกว่ารถยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน นอกจากนี้ ตัวแปร อายุ (Age) ยังมีอิทธิพลต่อการเลือกใช้รถยนต์ไฟฟ้าแบบแบตเตอรี่ โดยมีค่า $p\text{-value} = 0.011$ ขณะที่ตัวแปร รายได้ (Income) และ เพศ (Gender) ไม่พบว่ามีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อการเลือกประเภทยานยนต์ในแบบจำลองนี้

จากผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง สามารถเขียนสมการอรรถประโยชน์ของการเลือกใช้ยานยนต์ไฟฟ้าได้ดัง Equation (7) และ (8)

$$U_{BEV} = -3.172 + 1.597X_{Intention} - 0.969X_{Age} - 0.125X_{Income} + 0.792X_{Gender} \quad (7)$$

$$U_{HEV} = -0.026 + 1.025X_{Intention} - 0.564X_{Age} - 0.130X_{Income} + 0.023X_{Gender} \quad (8)$$

จากสมการอรรถประโยชน์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่า ความตั้งใจในการซื้อรถยนต์ไฟฟ้ามีบทบาทสำคัญต่อการตัดสินใจเลือกใช้ยานยนต์ไฟฟ้า โดยเฉพาะรถยนต์ไฟฟ้าแบบแบตเตอรี่ (BEV) ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์เป็นบวก แสดงให้เห็นว่าระดับความตั้งใจที่เพิ่มขึ้นจะเพิ่มโอกาสในการเลือกใช้ยานยนต์ไฟฟ้า ขณะที่อายุมีค่าสัมประสิทธิ์เป็นลบสำหรับ รถยนต์ไฟฟ้าแบบแบตเตอรี่ (BEV) สะท้อนว่ากลุ่มผู้ตอบแบบสอบถามที่มีอายุน้อยกว่ามีแนวโน้มที่จะเลือกใช้รถยนต์ไฟฟ้ามากกว่า

เพื่อตรวจสอบความสามารถของแบบจำลองในการพยากรณ์การเลือกประเภทยานยนต์ได้ทำการเปรียบเทียบค่าที่แบบจำลองพยากรณ์กับค่าจริงของการเลือกยานยนต์ของผู้ตอบแบบสอบถาม ผลการวิเคราะห์แสดงดัง Table 5 พบว่าแบบจำลองสามารถพยากรณ์การเลือกประเภทยานยนต์ได้ถูกต้องโดยรวม 65.24% ของกลุ่มตัวอย่างทั้งหมด โดยแบบจำลองสามารถพยากรณ์การเลือกใช้รถยนต์ไฮบริด (HEV) ได้ถูกต้องสูงสุดคิดเป็น 96.15% ขณะที่การพยากรณ์การเลือกใช้รถยนต์ไฟฟ้าแบบแบตเตอรี่ (BEV) และรถยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน (ICE) มีความถูกต้องในระดับต่ำ

Table 6 Prediction Accuracy of the Multinomial Logit Model

Mode	Correct	Wrong	Percentage Correct
Battery Electric Vehicle (BEV)	0	76	0.00
Hybrid Electric Vehicle (HEV)	250	10	96.15
Internal Combustion Engine (ICE)	0	47	0.00
Overall	250	133	65.24

Note: Prediction accuracy was calculated by comparing the actual vehicle choice with the predicted response category from the Multinomial Logit Model.

4. สรุป

ผลการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจเลือกใช้รถยนต์ไฟฟ้าของพนักงานรัฐวิสาหกิจ การประปาส่วนภูมิภาค โดยใช้แบบจำลองโลจิสติกพหุนาม (MNL) เพื่ออธิบายพฤติกรรมการเลือกประเภทยานยนต์ระหว่างรถยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน (ICE) รถยนต์ไฟฟ้าแบบแบตเตอรี่ (BEV) และรถยนต์ไฮบริด (HEV) จากการวิเคราะห์ข้อมูลแบบสอบถามจำนวน 383 ตัวอย่าง สามารถสรุปผลการศึกษาดังนี้

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทั่วไปของกลุ่มตัวอย่างพบว่า ผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่เป็นเพศชาย คิดเป็น 71.5% และอยู่ในช่วงอายุ 35–44 ปี คิดเป็น 52.7% โดยส่วนใหญ่สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีและมีรายได้เฉลี่ยต่อเดือนอยู่ในช่วง 10,001–20,000 บาท ในด้านพฤติกรรมการใช้ยานยนต์ พบว่าผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่มีใบอนุญาตขับขี่รถยนต์ และมีรถยนต์ครอบครองจำนวน 1 คัน โดยรถยนต์ที่ใช้งานในปัจจุบันส่วนใหญ่เป็นรถยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน (ICE) คิดเป็น 73.4% นอกจากนี้ ผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่มีระยะทางการเดินทางต่อวันอยู่ในช่วง 21–40 กิโลเมตร และมีค่าใช้จ่ายด้านพลังงานต่อเดือนอยู่ในช่วง 2,001–3,500 บาท อีกทั้งยังพบว่าผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่มีความพร้อมในการติดตั้งเครื่องชาร์จรถยนต์ไฟฟ้าที่บ้าน ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงศักยภาพในการเปลี่ยนผ่านไปสู่การใช้ยานยนต์ไฟฟ้าในอนาคต

ในด้านปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการตัดสินใจเลือกใช้รถยนต์ไฟฟ้า ผลการวิเคราะห์ระดับความคิดเห็นพบว่า ปัจจัยด้านคุณลักษณะของรถยนต์ไฟฟ้าได้รับการให้ความสำคัญในระดับสูง โดยเฉพาะด้านความประหยัดพลังงาน ความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ และความน่าเชื่อถือของเทคโนโลยี ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าผู้บริโภคให้ความสำคัญกับประสิทธิภาพการใช้งานและผลประโยชน์ทางเศรษฐกิจในการตัดสินใจเลือกใช้ยานยนต์ไฟฟ้า ในขณะที่ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมและนโยบายภาครัฐ ยังพบว่ามิมีบทบาทสำคัญต่อทัศนคติของผู้บริโภค โดยเฉพาะมาตรการสนับสนุนจากรัฐ เช่น การให้สิทธิประโยชน์ทางภาษี เงินอุดหนุน และการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านสถานีชาร์จไฟฟ้า ซึ่งเป็นปัจจัยที่ช่วยเพิ่มความมั่นใจให้กับผู้บริโภคในการเลือกใช้รถยนต์ไฟฟ้า

นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ระดับความคิดเห็นเกี่ยวกับ ความตั้งใจในการซื้อรถยนต์ไฟฟ้า พบว่าโดยภาพรวมผู้ตอบแบบสอบถามมีระดับความตั้งใจในการเลือกใช้รถยนต์ไฟฟ้าอยู่ในระดับค่อนข้างสูง โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อความตั้งใจในการเลือกใช้รถยนต์ไฟฟ้ามากที่สุดคือ ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่ต่ำกว่ารถยนต์น้ำมัน รองลงมาคือความเพียงพอของสถานีชาร์จไฟฟ้า และความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจในระยะยาว

สำหรับผลการวิเคราะห์แบบจำลองโลจิสติกพหุนาม (MNL) พบว่าแบบจำลองมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่า Likelihood Ratio Chi-square เท่ากับ 52.811 ($p < 0.001$) แสดงว่าแบบจำลองสามารถอธิบายความแตกต่างของการเลือกประเภทยานยนต์ของผู้ตอบแบบสอบถามได้อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ค่า Nagelkerke Pseudo R^2 เท่ากับ 0.158 แสดงว่าแบบจำลองสามารถอธิบายความแปรปรวนของการตัดสินใจเลือกประเภทยานยนต์ได้ประมาณ 15.8%

เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรในแบบจำลอง พบว่า ความตั้งใจในการซื้อรถยนต์ไฟฟ้า (Intention) เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเลือกใช้รถยนต์ไฟฟ้าแบบแบตเตอรี่ (BEV) และรถยนต์ไฮบริด (HEV) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.001 แสดงให้เห็นว่าผู้ที่มีระดับความตั้งใจในการซื้อรถยนต์ไฟฟ้าสูงมีแนวโน้มที่จะเลือกใช้ยานยนต์ไฟฟ้ามากกว่ารถยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน ขณะเดียวกัน อายุของผู้ตอบแบบสอบถาม ยังพบว่าไม่มีอิทธิพลต่อการเลือกใช้รถยนต์ไฟฟ้าแบบแบตเตอรี่ โดยค่าสัมประสิทธิ์ที่มีค่าเป็นลบสะท้อนให้เห็นว่ากลุ่มผู้บริโภคที่มีอายุน้อยมีแนวโน้มที่จะเลือกใช้รถยนต์ไฟฟ้ามากกว่ากลุ่มผู้บริโภคที่มีอายุมากกว่า ในขณะที่ตัวแปร รายได้และเพศ ไม่พบว่าไม่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจเลือกประเภทยานยนต์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

โดยสรุป ผลการศึกษานี้สะท้อนให้เห็นว่า ความตั้งใจเชิงพฤติกรรมของผู้บริโภคเป็นปัจจัยสำคัญที่สุดที่มีอิทธิพลต่อการยอมรับยานยนต์ไฟฟ้า ขณะเดียวกันปัจจัยด้านคุณลักษณะของเทคโนโลยีและการสนับสนุนจากนโยบายภาครัฐยังมีบทบาทสำคัญในการส่งเสริมการใช้รถยนต์ไฟฟ้า ดังนั้น การพัฒนานโยบายส่งเสริมยานยนต์ไฟฟ้าของประเทศไทยควรให้ความสำคัญกับการสร้างแรงจูงใจทางเศรษฐกิจ การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านสถานีชาร์จไฟฟ้า และการสร้างความตระหนักรู้ด้านสิ่งแวดล้อมของผู้บริโภค เพื่อสนับสนุนการเปลี่ยนผ่านสู่ระบบการขนส่งที่ใช้พลังงานสะอาดและลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในระยะยาว

5. กิตติกรรมประกาศ

การศึกษานี้วิจัยเรื่อง “ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจเลือกใช้รถยนต์ไฟฟ้าของพนักงานรัฐวิสาหกิจการประปาส่วนภูมิภาค” ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างยิ่งจากรองศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย ศิริกิจพาณิชย์กุล อาจารย์ที่ปรึกษาหลักและรองศาสตราจารย์ ดร.สุโรช บุญศิริพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ซึ่งได้ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็น ตลอดจนตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของงานวิจัยด้วยความเอาใจใส่เป็นอย่างดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ การประปาส่วนภูมิภาค ที่ให้ความอนุเคราะห์และสนับสนุนข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาวิจัย ตลอดจนพนักงานการประปาส่วนภูมิภาคทุกท่านที่ให้ความร่วมมือในการตอบแบบสอบถาม ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้การศึกษานี้สามารถดำเนินการได้อย่างสมบูรณ์

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2565. เป้าหมายความเป็นกลางทางคาร์บอนและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ของประเทศไทย. กรุงเทพมหานคร.
- [2] International Energy Agency (IEA). 2024. Global EV Outlook 2024: Trends in electric vehicles. International Energy Agency, Paris.
- [3] United Nations. 2015. Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development. United Nations, New York.
- [4] Krungsri Research. 2567. ภาพรวมอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้า. กรุงเทพฯ: ธนาคารกรุงศรีอยุธยา. เข้าถึงได้จาก : <https://www.krungsri.com/en/research/industry/industry-horizon/ih-202401> (เข้าถึงเมื่อ 25 มกราคม 2568).

-
- [5] การประปาส่วนภูมิภาค. 2566. รายงานความยั่งยืนการประปาส่วนภูมิภาค. กรุงเทพมหานคร.
- [6] Yamane, T. 1973. Statistics: An Introduction Analysis. New York: Harper & Row.
- [7] วรัญญา แสนชัย และวิชญ์ สุमितสุวรรณค์. 2568. ปัจจัยที่ส่งผลต่อความสุขในการปฏิบัติงานของแพทย์ในโรงพยาบาลรัฐ สังกัดสำนักงานปลัดกระทรวงสาธารณสุข. วารสารการบริหารปกครอง มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์. 14. 51-68
- [8] Nunnally, J. C. 1978. Psychometric Theory. 2nd ed. McGraw-Hill Book Company, New York.
- [9] McFadden, D. 1974. Conditional logit analysis of qualitative choice behavior. In: Zarembka, P. (ed.). Frontiers in Econometrics. Academic Press, New York. pp. 105-142.
- [10] Ben-Akiva, M. and Lerman, S. R. 1985. Discrete Choice Analysis: Theory and Application to Travel Demand. MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- [11] Train, K. E. 2009. Discrete Choice Methods with Simulation. 2nd ed. Cambridge University Press, Cambridge.
- [12] Greene, W. H. 2018. Econometric Analysis. 8th ed. Pearson Education Limited, Harlow.
- [13] Rezvani, Z., Jansson, J. and Bodin, J. 2015. Advances in consumer electric vehicle adoption research: A review and research agenda. Transportation Research Part D: Transport and Environment. 34: 122-136.
- [14] Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J. and Anderson, R. E. 2019. Multivariate Data Analysis. 8th ed. Cengage Learning, Hampshire.

การศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการออกแบบรูปแบบการจัดวางสินค้า กรณีศึกษาลังสินค้าบริษัทผลิตเครื่องใช้ไฟฟ้า

A Study of Optimal Parameter Determination for Product Layout Design A Case Study of the Warehouse of an Electrical Appliance Manufacturing Company

สุภาภรณ์ สุวรรณรังษี^{1,*} และ ชารอน ฆมานเด¹
Supaporn Suwannarongsri^{1,*} and Charon Manday¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมขนถ่ายวัสดุและโลจิสติกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพมหานคร 10800 ประเทศไทย
¹Department of Materials Handling Technology and Logistics Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North, Bangkok, 10800, Thailand
^{*}Corresponding Author: supaporn.suwannarongsri, e-mail address: supaporn.s@eng.kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบรูปแบบการจัดวางสินค้า โดยการประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2 ระดับ จากการศึกษาสภาพปัญหาภายในคลังสินค้าของบริษัทกรณีศึกษาโดยการจัดทำแบบสอบถามพบปัญหาการเบิกจ่ายสินค้าใช้ระยะเวลามากกว่า 180 วินาที ตามเกณฑ์ที่บริษัทกำหนด จากปัญหาดังกล่าวได้ประยุกต์ใช้ Why-Why Analysis เพื่อวิเคราะห์หาแนวทางในการแก้ไขปัญหา จากการวิเคราะห์พบว่าควรมีการออกแบบรูปแบบการจัดวางสินค้าโดยประยุกต์ใช้โปรแกรมสำหรับจำลองสถานการณ์จำนวน 3 รูปแบบที่เหมาะสมกับบริษัทกรณีศึกษา ได้แก่ รูปแบบที่ 1 FSN รูปแบบที่ 2 GROUP และรูปแบบที่ 3 MIXED จากนั้นทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อระยะเวลาการเบิกจ่ายสินค้า พบว่ามีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง 2 ปัจจัย คือ ปัจจัยที่ 1 รูปแบบการจัดวางสินค้าซึ่งประกอบด้วย 2 ระดับคือ FSN และ GROUP ปัจจัยที่ 2 ความเร็วของรถโฟล์คลิฟต์ ซึ่งประกอบด้วย 2 ระดับคือ 3 km/h และ 5 km/h จากการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2 ระดับ ที่ระดับนัยยะสำคัญ 0.05 ทำให้สามารถได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการเบิกจ่ายสินค้าทั้ง 3 รูปแบบประกอบด้วย โดยรูปแบบการจัดวางสินค้าที่เหมาะสมคือ รูปแบบ GROUP กำหนดความเร็ว 4 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ส่งผลให้ระยะเวลาในการเบิกจ่ายสินค้านี้มีค่าเท่ากับ 157.38 วินาที ลดลงจากเดิมร้อยละ 32.46

คำสำคัญ: การจัดวางสินค้า, การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล, พารามิเตอร์ที่เหมาะสม, การจำลองสถานการณ์

Abstract

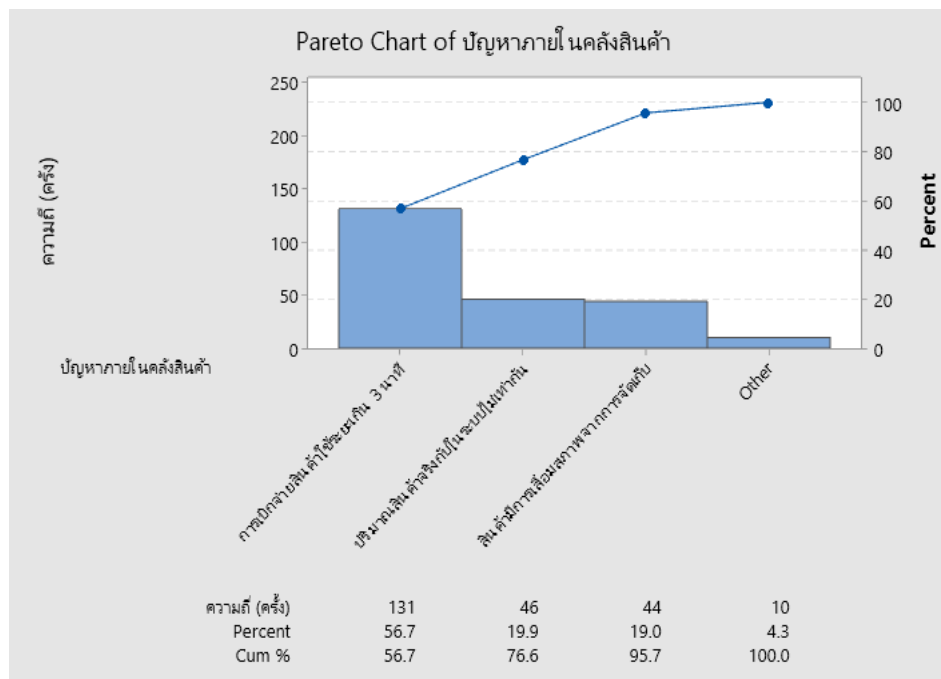
This study aims to determine the optimal parameter values for designing product layout patterns by applying a two-level factorial experimental design. Based on an investigation of problems within the warehouse of the case study company through questionnaires, it was found that the product retrieval time exceeded 180 seconds, which is above the company's specified standard. To address this issue, Why-Why Analysis was applied to identify the root causes and determine appropriate solutions. The analysis indicated that a redesign of the product layout was necessary. Three suitable layout models were developed using simulation software: (1) FSN, (2) GROUP, and (3) MIXED. Subsequently, factors affecting product retrieval time were studied. Two main factors were identified: (1) product layout pattern, with two levels—FSN and GROUP, and (2) forklift speed, with two levels—3 km/h and 5 km/h. Using a two-level factorial experimental design at a significance level of 0.05, the optimal parameters for product retrieval across all three layout models were determined. The results showed that the most suitable configuration was the GROUP layout with a forklift speed of 4 km/h, resulting in a retrieval time of 157.38 seconds. This represents a reduction of 32.46% compared to the original condition.

Keywords: Product placement, Design of Experiments, Optimal parameters, Simulation

1. บทนำ

ปัจจุบันความต้องการใช้เครื่องใช้ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์มีแนวโน้มเติบโตขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากการพัฒนาเครื่องใช้ไฟฟ้ารุ่นใหม่ที่มีความสำคัญด้านสุขภาพ รวมถึงความสามารถในการเชื่อมโยงการทำงานผ่านอินเทอร์เน็ตตามกระแสนิยมของผู้บริโภครุ่นใหม่ นอกจากนี้การเพิ่มช่องทางการจัดจำหน่ายผ่านการทำตลาดสินค้าออนไลน์ ทำให้ผู้บริโภคสามารถเข้าถึงข้อมูลและตัดสินใจซื้อได้สะดวกมากขึ้น การขยายตัวของชุมชนเมืองที่หนุนความต้องการใช้เครื่องใช้ไฟฟ้าบางประเภทเพิ่มมากขึ้น เช่น ร้านสะดวกซื้อ (เครื่องซักผ้าและเครื่องอบผ้าหยอดเหรียญ) ที่ขยายสาขามากขึ้น นอกจากนี้ภาวะโลกร้อนช่วยหนุนความต้องการเครื่องปรับอากาศเพิ่มขึ้น ซึ่งไทยยังมีอัตราการส่งออกเครื่องปรับอากาศเป็นอันดับที่ 3 ของโลก ซึ่งมีอัตราการเติบโตเฉลี่ยทบต้นต่อปีร้อยละ 7.18 [1] จากแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้นในการผลิตอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ และเพื่อให้การส่งมอบอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าที่ผลิตมีประสิทธิภาพมากขึ้น การจัดเก็บสินค้าคงคลังจึงเป็นสิ่งสำคัญเพื่อให้ทันต่อการส่งออกสินค้าทั้งภายในประเทศและต่างประเทศ ดังนั้นการบริหารจัดการคลังสินค้า การจัดเก็บสินค้าคงคลังจึงเป็นสิ่งสำคัญเพื่อให้ทันต่อการส่งออกสินค้าทั้งภายในประเทศและต่างประเทศ ดังนั้นการบริหารจัดการคลังสินค้า ทั้งในด้านของพื้นที่และการจัดวางสินค้าจึงเป็นสิ่งสำคัญส่วนหนึ่งที่คลังสินค้าต้องคำนึงถึง หากมีการบริหารจัดการระบบคลังสินค้าที่เป็นระบบจะทำให้ลดระยะเวลาในการขนย้ายสินค้าและง่ายต่อการตรวจนับจำนวนสินค้าคงคลังจริง จากกรณีศึกษาคลังสินค้าของบริษัทผลิตและประกอบอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ ด้านการจัดเก็บวัตถุดิบ พบปัญหาภายในคลังสินค้าคือ เบิกจ่ายสินค้าใช้เวลานานเกิน 180 วินาที, สินค้าที่มีอยู่จริงในคลังสินค้ากับสินค้าในระบบมีปริมาณไม่เท่ากัน และสินค้ามีการเสื่อมสภาพจากการจัดเก็บ

จากการสัมภาษณ์ผู้ที่เกี่ยวข้องภายในคลังสินค้าถึงปัญหาที่พบในระบบคลัง แล้วนำมาทำแบบสอบถามเพื่อหาความถี่ของปัญหาที่เกิดขึ้นจากผู้ที่เกี่ยวข้องประกอบด้วย หัวหน้าคลังสินค้า ผู้ดูแลระบบจัดการคลังสินค้า และพนักงานภายในคลังสินค้าจำนวน 32 คนพบปัญหาดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ปัญหาที่พบภายในคลังสินค้า

จากการวิเคราะห์แผนภูมิพาเรโต พบว่าปัญหาที่ควรได้รับการแก้ไขคือ การเบิกจ่ายสินค้าใช้ระยะเวลาเกิน 180 วินาที คิดเป็นร้อยละ 56.7 เนื่องมาจากการจัดวางสินค้ารูปแบบเดิมไม่มีการกำหนดตำแหน่งสินค้าที่ชัดเจนส่งผลต่อระยะเวลาการเบิกจ่ายสินค้าเกิน 180 วินาที

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

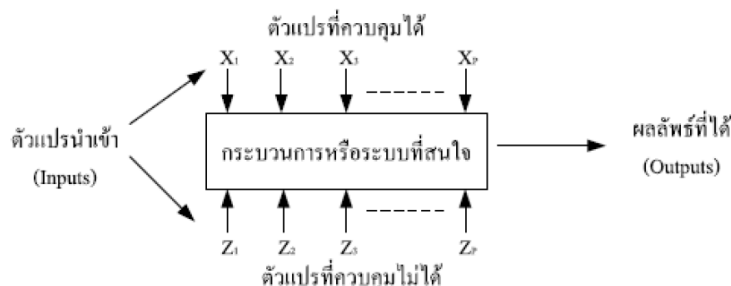
2.1 ทฤษฎีการจัดวางสินค้า

[1] ระบบการจัดเก็บสินค้าตามประเภทของสินค้า (Group) ระบบนี้เป็นรูปแบบการจัดเก็บสินค้าตามแต่ละประเภทของสินค้าให้อยู่ในหมวดหมู่ หรือกลุ่มเดียวกัน ตำแหน่งที่ใกล้กัน เพื่อให้ง่ายต่อการดูแลรักษา การตรวจนับสินค้า สินค้ามีการแบ่งตามประเภทสินค้า และในแต่ละโซนพื้นที่ที่กำหนด เพื่อให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นในเรื่องการค้นหาสินค้า

[2] การจัดกลุ่มตามอัตราการใช้งานหรือเรียกอีกอย่างว่าการวิเคราะห์ FSN มีวัตถุประสงค์ในการจำแนก สินค้าคงคลังออกเป็นทั้งหมด 3 กลุ่มโดยมี กลุ่มสินค้าที่มีการหมุนเวียนอัตราการใช้งานที่สูง เคลื่อนไหวเร็ว (F - Fast Moving) กลุ่มสินค้าที่มีการหมุนเวียนอัตราการใช้งานที่ช้าเคลื่อนไหวช้า (S - Slow Moving) และกลุ่ม สุดท้ายคือกลุ่มสินค้าที่ไม่มีการหมุนเวียนอัตราการใช้งานหรือไม่มีการเคลื่อนไหว (N - Non Moving) การจัดกลุ่มนี้ใช้เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบผังคลังสินค้าว่า สินค้าตัวไหนควรจัดเก็บอยู่ที่ไหน เพื่อให้เหมาะสมต่อการเข้าถึง

2.2 การออกแบบการทดลอง

[3] การออกแบบการทดลอง คือ การทดสอบเพียงครั้งเดียวหรือต่อเนื่อง โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรนำเข้า (Input Variable) ในระบบหรือกระบวนการที่สนใจศึกษา เพื่อที่จะทำให้สามารถสังเกตและชี้ถึงสาเหตุต่างๆที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ที่ได้ (Out puts or Responses) จากกระบวนการหรือระบบนั้น โดยตัวแปรนำเข้าจะถูกจัดแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ควบคุมได้ เรียกว่า ตัวแปร (หรือปัจจัย) ที่ควบคุมได้ (Controllable Variables or Factor) หรือ ตัวแปร (หรือปัจจัย) ที่สามารถออกแบบได้ (Design Variable or Factors) และกลุ่มที่ไม่สามารถควบคุมได้ เรียกว่า ตัวแปร (หรือปัจจัย) ที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable or Noise Variables Factors) ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการ

การทดลองแฟคทอเรียลคือ การทดลองที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในการออกแบบแผนการทดลองเนื่องจากสามารถศึกษาปัจจัยได้หลายปัจจัยพร้อมกัน โดยมีวัตถุประสงค์หลักคือ ศึกษาผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย หรือที่เรียกว่า อันตรกิริยา (Interactions)

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

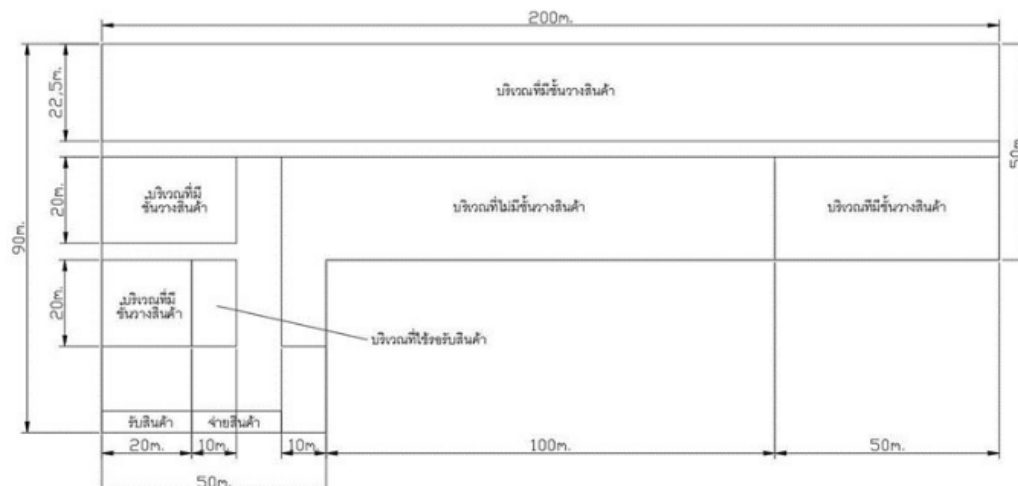
[4] การปรับปรุงประสิทธิภาพการจัดการคลังสินค้าของบริษัทจำหน่ายก๊าซอุตสาหกรรมทำการใช้การจำลองสถานการณ์ (Simulation) โดยวิเคราะห์สินค้าด้วย FSN Analysis เพื่อจัดกลุ่มตาม อัตราการหมุนเวียน และปรับเปลี่ยนตามแห่งเก็บสินค้าให้เหมาะสม นอกจากนี้ยังเปรียบเทียบ 2 วิธีการหยิบสินค้า ได้แก่ Discrete Order Picking และ Batch Picking ผลการศึกษาพบว่า การใช้Batch Picking ร่วมกับการจัดวางสินค้าใหม่ช่วยลด ระยะเวลาหยิบสินค้าเฉลี่ยลงร้อยละ 25.62 และลดระยะทางรวมร้อยละ 77.72 ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการจัดส่งและลดต้นทุนของบริษัท

[5] งานวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อลดปริมาณของเสียจากกระบวนการฉีดพลาสติก (Injection Molding) ในโรงงานแห่งหนึ่ง โดยปัญหาหลักที่พบคือชิ้นงานมีขนาดโตกว่ากำหนด ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์และต้นทุนการผลิต การวิจัยเริ่มจากการวิเคราะห์หาสาเหตุด้วยแผนภาพสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) และนำไปวิจัยที่มีความสำคัญสูงสุด 3 มาทำการทดลองโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ 2k Factorial Design ผลการทดลองพบว่าปัจจัยทั้ง 3 มีผลต่อคุณภาพของชิ้นงานทั้งในด้าน Main Effect และ Interaction Effect เมื่อนำค่าที่เหมาะสมมาปรับปรุงกระบวนการ สามารถลดของเสียจาก 39.05% เหลือเพียง 2.78% ซึ่งเป็นไปตามเป้าหมายของบริษัทในการลดของเสียลงไม่น้อยกว่า 50%

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 ศึกษาสภาพปัญหาภายในคลังสินค้า

จากคลังสินค้าของบริษัทกรณีศึกษา พบว่าภายในคลังสินค้าจะประกอบไปด้วย จุดรับสินค้า จุดพักสินค้า พื้นที่จัดเก็บ และจุดจ่ายสินค้า ในขั้นตอนการเบิกจ่ายสินค้ารูปแบบเดิม ไม่มีการระบุตำแหน่งการจัดวางสินค้าที่ชัดเจนเนื่องจากบริเวณ การพิจารณาจัดวางสินค้ารูปแบบเดิมจะจัดวางตามประสบการณ์ของพนักงานในคลังสินค้า โดยเลือกลงสินค้าบริเวณพื้นที่ว่าง อีกทั้งยังไม่มีกรอบตำแหน่งในการจัดวางสินค้าที่ชัดเจนส่งผลต่อระยะเวลาในการค้นหาสินค้า แสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 แผนผังคลังสินค้าบริษัทกรณีศึกษา

จากข้อมูลระยะเวลาการเบิกจ่ายสินค้าในตารางที่ 1 พบว่าระยะเวลาในการเบิกจ่ายสินค้ารูปแบบเดิมใช้เวลาเฉลี่ย 233.03 วินาที สูงกว่าเวลามาตรฐานที่กำหนด โดยบริษัทกรณีศึกษามีการกำหนดระยะเวลาการเบิกจ่ายสินค้าที่ 3 นาที หรือ 180 วินาที

3.2 การวิเคราะห์สภาพปัญหาภายในคลังสินค้า

จากนั้นได้ทำการวิเคราะห์เพื่อหาแนวทางการแก้ไขปัญหการจัดวางสินค้าโดยใช้ทฤษฎี Why-Why Analysis แสดงผลการวิเคราะห์ตามตารางที่ 2 จากผลการวิเคราะห์พบแนวทางแก้ไขปัญหา โดยเสนอการออกแบบรูปแบบการจัดวางสินค้า 3 รูปแบบที่เหมาะสมกับคลังสินค้าของบริษัทกรณีศึกษา ได้แก่ 1. จัดวางสินค้าตามการเคลื่อนไหว (FSN) 2. จัดวางสินค้าตามกลุ่มสินค้า (Group) 3. จัดวางสินค้ารูปแบบผสม (Mixed)

ตารางที่ 1 เวลาในการเบิกจ่ายสินค้ารูปแบบเดิม

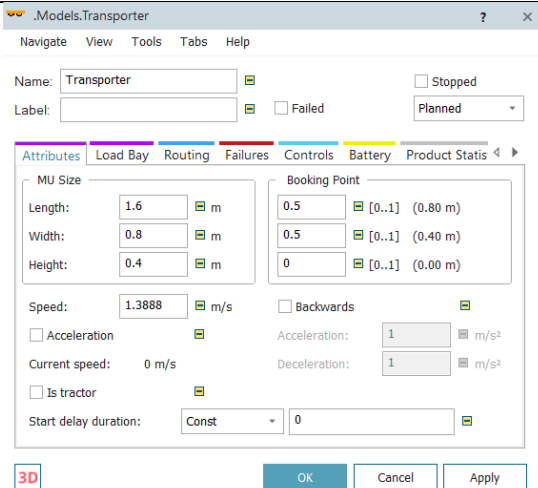
รหัสสินค้า	จำนวนพาเลท	เวลาต่อ 1 พาเลท (วินาที)	รหัสสินค้า	จำนวนพาเลท	เวลาต่อ 1 พาเลท (วินาที)
C152	6	405.00	C387	2	172.00
C154	10	332.00	C39	5	210.00
C18	35	204.63	C51	10	255.00
C181	11	121.00	C61	45	293.00
C248	3	316.00	C630	6	248.67
C28	21	315.00	C65	11	248.00
C298	4	47.25	C7	13	210.00
C302	7	142.00	C72	19	394.00
C315	8	179.38	C8	30	260.93
C320	3	66.67	C81	3	215.33
C322	5	41.00	C83	20	322.00
				เวลาเฉลี่ย	233.03

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์หาแนวทางในการแก้ไขปัญหา

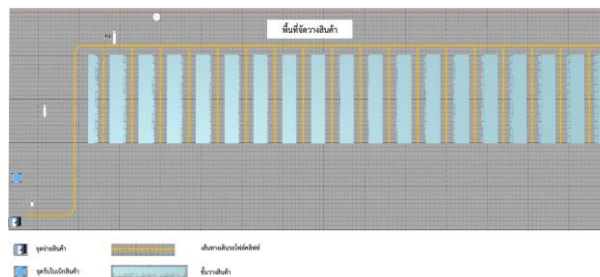
ปัญหา	ทำไม 1	ทำไม 2	ทำไม 3	แนวทางการแก้ไข ปัญหา	ประโยชน์ที่ จะได้รับ
เวลาเฉลี่ยในการเบิกจ่าย ต้องสินค้าเกิน 180 วินาที/1 พาเลท	เพราะจะต้อง จัดสินค้า ก่อนที่จะนำ ออกมายังจุด จ่ายสินค้าทุก ครั้ง ทำไมถึงต้อง จัดสินค้าก่อน นำออกมายัง จุดจ่ายสินค้า	เพราะไม่มี ตำแหน่งการจัด วางสินค้าจึงต้อง จัดสินค้าตามใบ เบิกก่อนที่จะนำ ออกมา	เพราะบริษัทยังไม่มี การจัดวางสินค้าที่ ชัดเจน	1. เสนอแนวทางการ การจัดวางสินค้า โดยใช้การจัดวาง 3 รูปแบบ 2. หาความเร็วของ รถโฟล์คลิฟท์ที่ ปลอดภัยและใน เหมาะสมในการ การเบิกจ่ายสินค้า	1.สามารถ กำหนดการจัดวาง สินค้าให้เป็นระเบียบ มากยิ่งขึ้น 2.สามารถกำหนด ความเร็วในการขับ รถโฟล์คลิฟท์ให้ ปลอดภัย 3.เลือกรูปแบบการ จัดวางที่เหมาะสม ที่สุด
		เพราะตอน จัดเก็บสินค้า ใช้ ประสบการณ์ ของพนักงานใน การจัดเก็บ ทำไมถึงใช้ ประสบการณ์ ของพนักงานใน การจัดเก็บ	เพราะบริเวณที่จัด วางสินค้าแบบ ตรงไหนมีพื้นที่ว่างก็ จะวางตรงนั้น		

3.3 การสร้างแบบจำลองสถานการณ์

ผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้โปรแกรม Tecnomatix Plant Simulation 2201 เพื่อใช้วิเคราะห์ระยะเวลาในการเบิกจ่ายสินค้าทั้ง 3 รูปแบบ โดยกำหนดข้อมูลรถโฟล์คลิฟท์ให้มีขนาดความยาว 1.6 เมตร ความกว้าง 0.8 เมตร และความสูง 0.4 เมตร เคลื่อนที่ด้วยความเร็วไม่เกิน 5 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ตามกฎหมายความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงานเกี่ยวกับรถยก แสดงดังภาพที่ 4 และแบบจำลองพื้นที่จัดวางสินค้าดังภาพที่ 5



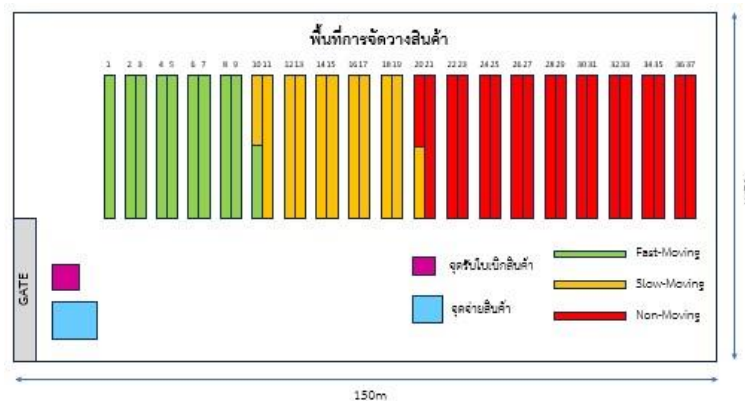
ภาพที่ 4 การกำหนดพารามิเตอร์ของรถโฟล์คลิฟต์



ภาพที่ 5 แบบจำลองพื้นที่การจัดวางสินค้า

3.3.1 การจัดวางสินค้ารูปแบบที่ 1 (FSN)

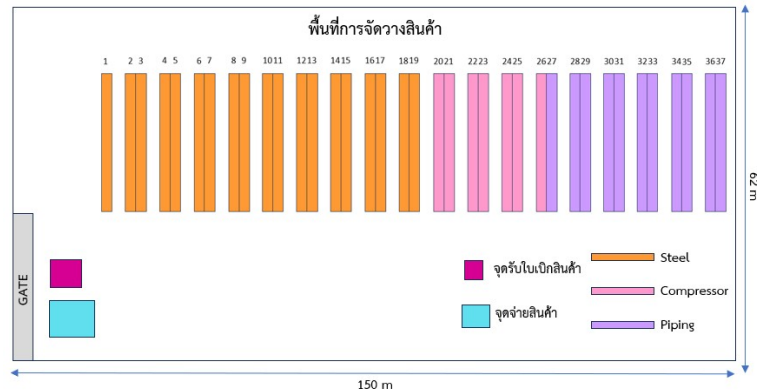
การจัดกลุ่มโดยให้สินค้าที่มีอัตราการใช้งานสะสมร้อยละ 80 เป็นกลุ่ม F มีจำนวน 132 Part number สินค้าที่มีอัตราการใช้งานสะสมร้อยละ 15 เป็นกลุ่ม S มีจำนวน 231 Part number และให้สินค้าที่มีอัตราการใช้งานสะสมร้อยละ 5 เป็นกลุ่ม N มีจำนวน 457 Part number การจัดวางสินค้ารูปแบบที่ 1 ประยุกต์การจัดตำแหน่งสินค้าโดยจัดสินค้าที่มีอัตราการรับสินค้าเข้าและจ่ายออกเรียงจากสูงไปต่ำ ผลการจัดตำแหน่งสินค้าแสดงดังภาพที่ 6 ได้ระยะทางในการเบิกจ่ายสินค้าทั้งหมด 47,658 เมตร หรือ 161.00 เมตรต่อ 1 พาเลท



ภาพที่ 6 ตำแหน่งการจัดวางสินค้ารูปแบบ FSN

3.3.2 การจัดวางสินค้ารูปแบบที่ 2 (GROUP)

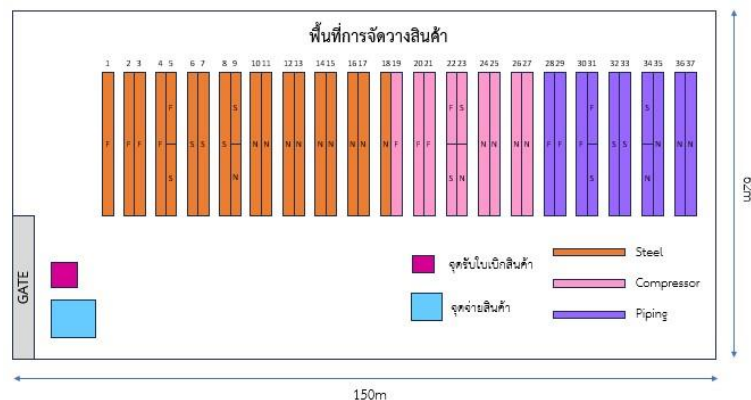
จากข้อมูลบริเวณที่ต้องการปรับปรุงมีกลุ่มสินค้าทั้งหมด 3 กลุ่ม ทำการจัดกลุ่มสินค้าจากการรับสินค้าและจ่ายสินค้าออก โดยเรียงจากมากไปน้อย พบว่ากลุ่มที่มีการรับและจ่ายสินค้าออกมากที่สุดคือ Steel มีจำนวน 404 Part number กลุ่มรองลงมาคือ Compressor มีจำนวน 174 Part number และกลุ่มสุดท้ายคือ Piping มีจำนวน 242 Part number การจัดวางสินค้ารูปแบบที่ 2 แสดงดังภาพที่ 7 ได้ระยะทางในการเบิกจ่ายสินค้าทั้งหมด 51,393 เมตร หรือ 173.63 เมตรต่อ 1 พาเลท



ภาพที่ 7 ตำแหน่งการจัดวางสินค้ารูปแบบ GROUP

3.3.3 การจัดวางสินค้ารูปแบบที่ 3 (MIXED)

จากการแบ่งกลุ่มสินค้าแบบ Group พบว่ากลุ่มที่มีการรับและจ่ายสินค้าออกมากที่สุดคือ Steel รองลงมาคือ Compressor และ Piping โดยกำหนดให้เป็น FSN Analysis เมื่อมีอัตราการใช้งานสะสมร้อยละ 80, 15 และ 5 เป็นกลุ่ม F, S, N ตามลำดับ การจัดวางสินค้ารูปแบบที่ 3 นำมาจัดตำแหน่งการจัดวางสินค้าให้อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม ผลการจัดตำแหน่งสินค้าแสดงดังภาพที่ 8 ระยะทางในการเบิกจ่ายสินค้าทั้งหมด 50,523 เมตร หรือ 170.69 เมตรต่อ 1 พาเลท



ภาพที่ 8 ตำแหน่งการจัดวางสินค้ารูปแบบ MIXED

3.4 ออกแบบการทดลองเชิงแพททอเรียล

การออกแบบการทดลองเชิงแพททอเรียลแบบ 2 ระดับ จากการศึกษาสภาพปัญหาภายในคลังสินค้า และศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อเวลาในการเบิกสินค้า คือ 1. รูปแบบการจัดวางสินค้าโดยมีทั้งหมด 3 รูปแบบที่นำเสนอข้างต้น โดยคัดเลือกระดับจากระยะทางรวมต่ำที่สุดและสูงที่สุดในการเบิกจ่ายสินค้า 2. ความเร็วของรถโฟล์คคลิฟต์ ผู้วิจัยได้ทำการกำหนดความเร็วของรถโฟล์คคลิฟต์ในการขับภายในคลังสินค้า ไม่เกิน 5 กิโลเมตร ต่อชั่วโมง [7] ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ปัจจัยและระดับของปัจจัยในการทดลอง

ปัจจัย	ระดับปัจจัย	
	Low (-)	High (+)
รูปแบบการจัดวางสินค้า (m)	FSN (47,658)	GROUP (51,393)
ความเร็ว (km / h)	3	5

จากจำนวนปัจจัยดังกล่าวพบว่าจำนวนจำนวนที่ทำการทดลองทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 6 การทดลอง จากจำนวนการทดลองดังกล่าวจำนวนการทำซ้ำ 1 ครั้งทำให้ Degree of Freedom ในการทำการทดลองเป็น 0 ดังนั้นผู้จัดทำจึงทำการเพิ่มจุด Center Point 2 จุด เพื่อให้ Degree of Freedom Error เท่ากับ 1 ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการทดลองจากการออกแบบการทดลอง

รูปแบบการจัดวางสินค้า (A)	ความเร็ว (B)	ระยะเวลาในการเบิกจ่าย (RESPONSE) หน่วย SEC
FSN	4	145.56
GROUP	4	157.13
FSN	5	116.58
GROUP	3	209.22
FSN	3	193.87
GROUP	5	125.88

4. ผลการทดลอง

4.1 การทดสอบการแจกแจงและการกระจายตัวของข้อมูล

การทดสอบเพื่อหาความเหมาะสมของแบบจำลอง ตามสมมติฐานที่ระดับนัยยะสำคัญ 0.05 ข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ ทดสอบโดยที่แกน X คือ ค่าเศษเหลือ และแกน Y คือค่าความเป็นปกติมาตรฐาน โดยที่กราฟมีลักษณะเส้นตรง แสดงดังภาพที่ 9 จึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ

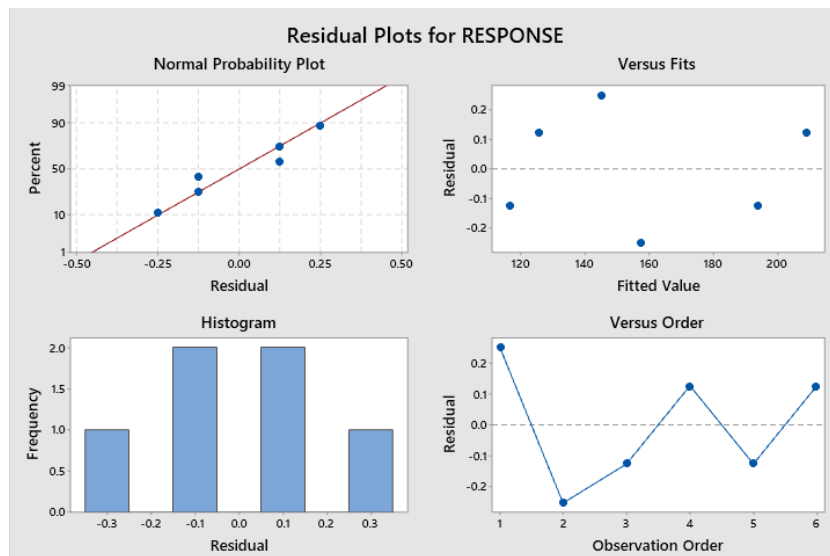
การตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง พบว่า กราฟ Histogram สามารถลากเส้นโค้งที่มีลักษณะคล้ายกับระฆังคว่ำแสดงว่าเศษตกค้างของข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ

กราฟ Versus Fits แสดงการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residual) เทียบกับ Fitted Value มีลักษณะกระจายตัวอยู่รอบเส้นกลาง ไม่ที่รูปแบบที่แน่นอน แสดงว่าเศษตกค้างเป็นแบบสุ่มและมีความแปรปรวนที่เท่ากัน

กราฟ Versus Order เป็นกราฟที่ใช้ตรวจสอบดูว่าส่วนตกค้างนั้นขึ้นอยู่กับเวลาหรือไม่ จากการตรวจสอบพบว่าลักษณะของข้อมูลเป็นรูปแบบไม่มีแนวโน้มรวมถึงการกระจายตัวรอบค่าศูนย์แสดงว่าข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน

4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

จากการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง สรุปผลได้ว่าไม่มีความผิดปกติจากการทดลองที่เกิดขึ้น และข้อมูลมีความน่าเชื่อถือ จากข้อมูลจากตารางที่ 4 ได้นำมาทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อศึกษาอิทธิพลที่มีปัจจัยร่วมของปัจจัยทั้งหมดที่ส่งผลกระทบต่อระยะเวลาในการเบิกจ่ายสินค้า โดยได้กำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ 95% โดยทำการวิเคราะห์ผลจากโปรแกรม Minitab ดังภาพที่ 10 และ ภาพที่ 11



ภาพที่ 9 Residual Plots

Design Summary

Factors: 2 Base Design: 2, 4
 Runs: 6 Replicates: 1
 Blocks: 1 Center pts (total): 2

All terms are free from aliasing.

ภาพที่ 10 ผลการวิเคราะห์ Full Factorial Design

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		161.387	0.218	740.48	0.001	
A	12.073	6.037	0.178	33.92	0.019	1.00
B	-80.315	-40.158	0.218	-184.25	0.003	1.00
A*B	-3.025	-1.513	0.218	-6.94	0.091	1.00
Ct Pt		-10.043	0.377	-26.60	0.024	1.00

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.435899	100.00%	99.99%	99.85%

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	4	6812.77	1703.19	8963.77	0.008
Linear	2	6669.15	3334.57	17549.62	0.005
A	1	218.65	218.65	1150.73	0.019
B	1	6450.50	6450.50	33948.51	0.003
2-Way Interactions	1	9.15	9.15	48.16	0.091
A*B	1	9.15	9.15	48.16	0.091
Curvature	1	134.47	134.47	707.70	0.024
Error	1	0.19	0.19		
Total	5	6812.96			

ภาพที่ 11 ผลการวิเคราะห์ Variance for Response

จากภาพที่ 11 พบว่า รูปแบบการจัดวางสินค้า (A) และ ความเร็วของรถโฟล์คคลิฟต์ (B) ทั้ง 2 ปัจจัยมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 จึงสามารถสรุปได้ว่า ปัจจัยทั้งสองมีผลต่อระยะเวลาในการเบิกจ่ายสินค้า ที่ระดับนัยยะสำคัญ 0.05 ปัจจัยร่วมระหว่างรูปแบบการจัดวางสินค้า (A) และความเร็วของรถโฟล์คคลิฟต์ (B) มีค่า P-value มากกว่า 0.05 จึงสามารถสรุปได้ว่า ปัจจัยร่วมทั้งสองไม่มีผลต่อระยะเวลาในการเบิกจ่ายสินค้า สามารถแสดงสมการความสัมพันธ์ของระยะเวลาการเบิกจ่ายสินค้าได้ดังสมการที่ 1

$$\text{Response} = 322.02 + 6.037A - 40.16B - 10.04CTPT \quad (1)$$

โดยที่ A คือ รูปแบบการจัดวางสินค้า โดยที่ รูปแบบ FSN แทนค่า A เท่ากับ -1 รูปแบบ GROUP แทนค่า A เท่ากับ 1 ส่วน B คือความเร็วของรถโฟล์คลิฟต์ และ CTPT คือ Center point แทนค่า เท่ากับ 1

4.3 ผลการทดลองหาสถานะที่เหมาะสม (Response Optimizer)

จากการวิเคราะห์เพื่อหาสถานะที่เหมาะสมของทั้งสองปัจจัย พบว่ารูปแบบการจัดวางสินค้าที่เหมาะสม คือ รูปแบบ GROUP มีระยะทางรวม 51,393 เมตร และความเร็วของรถโฟล์คลิฟต์ที่เหมาะสม คือ 4 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งจะทำให้ได้ระยะเวลาในการเบิกจ่ายสินค้าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 180 วินาที ตามที่บริษัทต้องการ ดังภาพที่ 12 และ 13 ตามที่บริษัทกำหนด

Parameters

Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
RESPONSE	Target	116.58	180	209.22	1	1

Solution

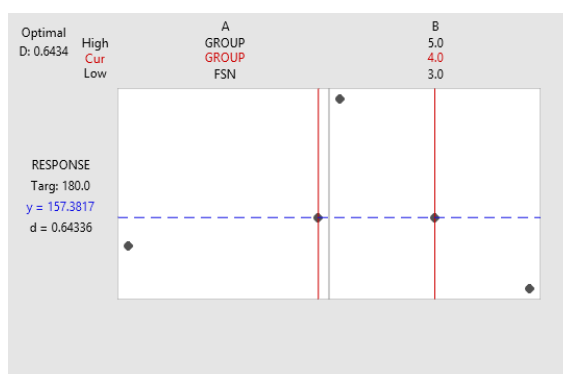
Solution	RESPONSE		Composite Fit	Composite Desirability
	A	B		
1	GROUP	4	157.382	0.643356

Multiple Response Prediction

Variable	Setting
A	GROUP
B	4

Response	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
RESPONSE	157.38	1.76	(149.79, 164.97)	(145.38, 169.39)

ภาพที่ 12 ผลการวิเคราะห์ Response Optimizer



ภาพที่ 13 ค่าการวิเคราะห์ระดับที่เหมาะสมตามที่กำหนด

4.4 ผลการเปรียบเทียบก่อนและหลังปรับปรุง

เพื่อเป็นการยืนยันผลว่าจุดเหมาะสมที่ได้จากผลการวิจัยที่พบว่าพารามิเตอร์ของรูปแบบการจัดวางสินค้าใหม่ คือ รูปแบบ GROUP และพารามิเตอร์ของความเร็วของรถโฟล์คลิฟต์ที่เหมาะสมสอดคล้องกับความปลอดภัยตามกฎหมายโรงงาน คือ 4 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และเปรียบเทียบกับการจัดวางสินค้านรูปแบบเดิม ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบผลก่อน-หลังปรับปรุง

หัวข้อ	ก่อนการปรับปรุง	หลังการปรับปรุง	ลดลงร้อยละ
ระยะเวลาการเบิกจ่ายสินค้า	233.03 วินาที	157.38 วินาที	32.46

จากตารางที่ 5 จะเห็นได้ว่าผลการเปรียบเทียบระยะเวลาการเบิกจ่ายสินค้ารูปแบบเดิมใช้ระยะเวลา 233.03 วินาที ส่วนรูปแบบหลังการปรับปรุงโดยการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับคลังสินค้า โดยพบว่ารูปแบบการจัดวางสินค้าที่เหมาะสมที่สุดคือ รูปแบบ GROUP โดยจะเน้นการจัดวางสินค้าตามประเภทสินค้าเพื่อให้ง่ายต่อการจัดเก็บและเบิกจ่ายสินค้า ซึ่งความเร็วที่เหมาะสมที่สุดคือ 4 กิโลเมตรต่อชั่วโมง พบว่าได้ระยะเวลาในการเบิกจ่ายสินค้าหลังการปรับปรุงคือ 157.38 วินาที ซึ่งระยะเวลาการเบิกจ่ายสินค้าลดลงจากเดิมร้อยละ 32.46

5. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษา วิเคราะห์ปัญหา ออกแบบรูปแบบการจัดวางสินค้า และหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการจัดวางสินค้าภายในคลังสินค้าบริษัทกรณีศึกษา พบว่าสาเหตุของปัญหาคือระยะเวลาการเบิกจ่ายสินค้าใช้ระยะเวลาเกิน 180 วินาที โดยจากปัญหาดังกล่าวผู้จัดทำจึงทำการวิเคราะห์แนวทางการแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยใช้ ทฤษฎี Why-Why Analysis พบว่าการแก้ไขปัญหาคือการออกแบบรูปแบบการจัดวางสินค้าใหม่ให้กับบริษัท โดยผู้วิจัยได้ออกแบบรูปแบบการจัดวางสินค้าให้กับบริษัททั้งหมด 3 รูปแบบ คือ 1.FSN 2.MIXED 3.GROUP โดยใช้โปรแกรมจำลองสถานการณ์ Tecnomatix Plant Simulation 2201 มาสร้างแบบจำลอง เพื่อทำการค้นหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการเบิกจ่ายสินค้า พบว่ามีปัจจัยทั้งหมด 2 ปัจจัย คือ 1.รูปแบบการจัดวางสินค้า 2.ความเร็วของรถโฟล์คลิฟต์ โดยผู้วิจัยได้ทำการการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2 ระดับ และทำการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม พบว่า รูปแบบการจัดวางสินค้าที่เหมาะสมคือ รูปแบบ GROUP และความเร็วของรถโฟล์คลิฟต์ที่เหมาะสมคือ 4 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ได้สมการความสัมพันธ์ $Response = 322.02 + 6.037A - 40.16B - 10.04CTPT$ พบว่าระยะเวลาในการเบิกจ่ายสินค้ามีค่าเท่ากับ 157.38 วินาที ซึ่งระยะเวลาการเบิกจ่ายสินค้าลดลงจากเดิมร้อยละ 32.46 การนำรูปแบบการจัดวางสินค้าแบบ Group ไปใช้ร่วมกับการกำหนดค่าการทำงานที่เหมาะสม จะช่วยลดระยะเวลาในการเบิกจ่ายสินค้าเพิ่มประสิทธิภาพ ลดต้นทุน และสามารถกำหนดเป็นนโยบายของบริษัททำให้การทำงานเกิดประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานนโยบายและยุทธศาสตร์การค้า.2568. รายงานการศึกษาความสามารถทางการแข่งขันเครื่องปรับอากาศไทย, กระทรวงพาณิชย์. กรุงเทพมหานคร.
- [2] ชีรวัฒน์ แก่นในเมือง. 2564. การใช้วิธีวิเคราะห์เอฟเอสเอ็น และอีซีอาร์เอส สำหรับการปรับปรุงประสิทธิภาพการจัดการคลังสินค้า กรณีศึกษา บริษัท AAA. ค้นคว้าอิสระมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, กรุงเทพมหานคร.
- [3] จตุวรรษ ภูสีม่วง. 2565. การเพิ่มประสิทธิภาพการหยิบกรอบแว่นตาโดยทฤษฎี FSN – ANALYSIS กรณีศึกษา บริษัท ไทยออปติคอล จำกัด มหาชน. ค้นคว้าอิสระมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต, กรุงเทพมหานคร.
- [4] D.C., Montgomery. 2005. Design and Analysis of Experiments. 6th ed. John Wiley & Sons, USA.
- [5] ปิยะวัฒน์ ปริดาวัฒน์, วริยา ปานปรุง และวลัยลักษณ์ อัครธีรวงศ์. 2022. การปรับปรุงประสิทธิภาพการจัดการคลังสินค้าโดยการจำลองสถานการณ์กรณีศึกษาบริษัทจำหน่ายก๊าซอุตสาหกรรม. Journal of Applied Statistics and Information Technology. 7. 26-47.
- [6] ปฐมพงษ์ หอมศรี และจักรพรรณ คงชนะ. 2556. การลดของเสียในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนฉีดพลาสติกสำหรับชิ้นส่วนยานยนต์โดยใช้หลักการออกแบบการทดลอง. วิศวกรรมสารเกษมบัณฑิต. 3. 73-95.
- [7] บริษัท เอ็นเนอร์ยีแอดวานซ์ จำกัด. 2563. รถโฟล์คลิฟท์ในโรงงานจำกัดความเร็วไว้เท่าไร.เข้าถึงได้จาก: <https://www.energyadvance.co.th/forklift-speed-limit/> (เข้าถึงเมื่อ: 7 เมษายน 2569).

เทคนิคการวัดแรงปฏิกิริยาขณะดึงรองเท้าบูทออกจากดินชื้นด้วยทรานสดิวเซอร์แบบวงแหวนแปดเหลี่ยม Technique for Measuring Reaction Forces during Pulling a Boot out of Wet Soil Using an Extended Octagonal Ring Transducer

ธาณินทร์ สีหามาตร์¹ ไชยรัตน์ เพชรศิริ² ดิษฐพร ตุงโสธานนท์¹ และ ชมพูนุช กุลเกตุวงศ์^{1,*}

Thanin Seehamart¹ Chairat Phetkeeree² Dithaporn Thungsotanon¹ and Chompoonud Kulketwong^{1,*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร 86160 ประเทศไทย

²งานบริการห้องปฏิบัติการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร 86160 ประเทศไทย

¹Department of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Prince of Chumphon Campus, Chumphon Province, 86160, Thailand

¹Scientific Laboratory Service Center, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Prince of Chumphon Campus, Chumphon Province, 86160, Thailand

*Corresponding author: Chompoonud Kulketwong, e-mail address: chompoonud.ku@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

แรงฉุดรั้งที่เกิดขึ้นระหว่างการถอนรองเท้าบูทจากสถานะดินแฉะถือเป็นหัวใจสำคัญในการวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างผู้ปฏิบัติงานและสภาพแวดล้อม ซึ่งข้อมูลดังกล่าวสามารถนำไปต่อยอดการออกแบบอุปกรณ์สวมใส่ในเชิงเกษตรกรรม การวิเคราะห์การยศาสตร์และชีวกลศาสตร์ประยุกต์ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเทคนิคการวัดแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นขณะดึงรองเท้าบูทออกจากดินชื้น โดยใช้ทรานสดิวเซอร์ชนิดวงแหวนแปดเหลี่ยมเพื่อตรวจวัดแรงในระบบพิกัดฉากจากขาทั้งสองข้างระหว่างการเคลื่อนไหวจริง จากการทดสอบกับอาสาสมัครชาย 15 ราย ภายใต้ปัจจัยควบคุมของชนิดรองเท้าบูท 2 รูปแบบ และระดับความชื้นดินที่ 36.24% และ 33.67% (db) ผลลัพธ์บ่งชี้ว่าเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นสามารถบันทึกการเปลี่ยนแปลงของแรงได้แบบต่อเนื่องตามเวลาจริง และแสดงพฤติกรรมการถ่ายโอนน้ำหนักระหว่างขาทั้งสองข้างในช่วงยกเท้าและวางเท้ากลับลงสู่ดินได้อย่างชัดเจน เมื่อพิจารณาแรงสูงสุดในแนวตั้ง พบว่า เมื่อความชื้นดินลดลงจาก 36.24% เป็น 33.67% ค่าแรงสูงสุดมีค่าแตกต่างกันเฉลี่ย 10.8% และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างรองเท้าบูท 2 แบบ พบว่าค่าแรงสูงสุดแตกต่างกันเฉลี่ย 9.8% และ 3.6% ภายใต้ความชื้นดิน 36.24% และ 33.67% ตามลำดับ ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าเทคนิคที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้เป็นเครื่องมือพื้นฐานสำหรับศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างรองเท้ากับดินชื้น และสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดในงานวิจัยด้านการยศาสตร์ ชีวกลศาสตร์ และการออกแบบรองเท้าสำหรับงานเกษตรต่อไปได้

คำสำคัญ: แรงปฏิกิริยา, การยศาสตร์, ชีวกลศาสตร์

Abstract

The pulling force generated during boot extraction from wet soil is a key factor in analyzing the interaction between workers and their environment. Such information can be further applied to the design of agricultural wearable equipment, as well as to ergonomic and applied biomechanical analyses. This study aimed to develop a technique for measuring the reaction forces occurring during boot extraction from wet soil by using an octagonal ring transducer to measure orthogonal forces from both legs during actual movement. Experiments were conducted with 15 male volunteers under controlled conditions involving two types of boots and two soil moisture contents, 36.24% and 33.67% (db). The results indicated that the developed instrument was capable of continuously recording force variations in real time and clearly demonstrating the weight transfer behavior between both legs during foot lifting and subsequent placement back onto the soil. Regarding the maximum vertical force, when the soil moisture content decreased from 36.24% to 33.67%, the average difference in the maximum force was 10.8%. In addition, a comparison between the two boot types showed average differences in the maximum force of 9.8% and 3.6% at soil moisture contents of 36.24% and 33.67%, respectively. These findings demonstrate that the developed technique can serve as a fundamental tool for investigating boot-soil interaction and can be further extended to research in ergonomics, biomechanics, and boot design for agricultural applications.

Keywords: reaction force, ergonomics, biomechanics

1. บทนำ

การทำงานด้านการเกษตรในพื้นที่ชื้นหรือพื้นที่ดินโคลนเป็นกิจกรรมที่พบได้ทั่วไป โดยเฉพาะในงานเกษตรกรรมประเภทนาข้าว ซึ่งเกษตรกรมักสวมใส่รองเท้าบูทยาง (Rubber boots) เพื่อป้องกันการสัมผัสกับน้ำหรือดินโคลน รวมถึงลดความเสี่ยงจากโรคที่เกิดจากเชื้อโรคในบริเวณน้ำขัง เช่น โรคฉี่หนูและโรคเมลิออยโดสิส [1, 2] อย่างไรก็ตาม รองเท้าบูทที่มีจำหน่ายทั่วไปมักผลิตในลักษณะขึ้นรูปเป็นชั้นเดียว ทำให้ขนาดรองเท้าไม่เหมาะสมกับลักษณะเท้าของผู้ใช้งาน [3] เมื่อใช้งานในสภาพดินชื้นหรือดินโคลนซึ่งมีคุณสมบัติในการอุ้มน้ำและมีแรงยึดเหนี่ยวสูง อาจทำให้รองเท้าบูทจมลงในดินและต้องใช้แรงมากในการดึงเท้าขึ้นจากดินโคลน [4] แรงยึดเหนี่ยวดังกล่าวยังส่งผลให้เกิดการถ่ายเทน้ำหนักไปยังเท้าอีกข้างหนึ่ง ทำให้เท้าด้านที่รองรับน้ำหนักจมลึกกลงไปในดินมากขึ้น ส่งผลให้ผู้ปฏิบัติงานต้องใช้แรงเพิ่มขึ้นเพื่อก้าวเดิน ซึ่งอาจก่อให้เกิดความเมื่อยล้าและเพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุในการทำงานได้ [5]

ดังนั้น แรงที่เกิดจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างรองเท้าบูทกับดินชื้นจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความสะดวกและประสิทธิภาพในการทำงานของเกษตรกร หากสามารถตรวจวัดแรงที่เกิดขึ้นระหว่างการยกเท้าขึ้นจากดินโคลนได้อย่างแม่นยำ โดยเฉพาะแรงในระบบพิกัดฉาก (F_x , F_y และ F_z) จะช่วยให้สามารถนำข้อมูลดังกล่าวไปใช้ในการออกแบบรองเท้าบูทที่เหมาะสมกับสภาพการทำงาน รวมถึงใช้เป็นข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ทางด้านการยศาสตร์ (Ergonomics) เพื่อปรับปรุงสภาพการทำงานของผู้ปฏิบัติงานได้ [6,7]

ทรานสดิวเซอร์แบบวงแหวนแปดเหลี่ยม (Extended Octagonal Ring Transducer: EOR) เป็นเครื่องมือวัดแรงที่เหมาะสมสำหรับงานวัดแรงหลายแกน เนื่องจากมีความไวสูง โครงสร้างกะทัดรัด และสามารถแยกการวัดแรงในแต่ละทิศทางได้ดี เมื่อออกแบบตำแหน่งติดตั้งสเตรนเกจอย่างเหมาะสม [8] และมีการนำมาประยุกต์ใช้เพื่อการวัดอย่างแพร่หลาย เช่น การวัดแรงจุดลากของรถแทรกเตอร์ด้วยทรานสดิวเซอร์แบบวงแหวนแปดเหลี่ยมแบบคู่ [9] การใช้ EOR เพื่อวัดแรงขณะตัดเฉือนดินในแนวราบและแนวตั้ง [10] และงานวัดแรงของกระบวนการผลิต เช่น การออกแบบ drill dynamometer สำหรับติดตามแรงตัดระหว่าง การเจาะ ซึ่งสามารถใช้ตรวจวัดแรงที่เกิดขึ้นระหว่างการทำงานของเครื่องจักรได้อย่างมีประสิทธิภาพ [11] ดังนั้น บทความวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาเทคนิคการวัดแรงปฏิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างรองเท้าบูทและดินชื้น โดยใช้ทรานสดิวเซอร์แบบวงแหวนแปดเหลี่ยมยึดเป็นตัวตรวจวัดแรง เพื่อศึกษาพฤติกรรมของแรงที่เกิดขึ้นขณะดึงรองเท้าบูทขึ้นจากดินชื้น ซึ่งข้อมูลที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบอุปกรณ์หรือรองเท้าสำหรับงานเกษตรให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งานต่อไป

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาการถ่ายโอนแรงจากขาข้างหนึ่งไปยังอีกข้างหนึ่งขณะยกเท้าขึ้นจากดินโคลนในงานวิจัยนี้ อาศัยกรอบแนวคิดทางชีวกลศาสตร์ของร่างกายร่วมกับหลักแรงปฏิริยาจากพื้นและปฏิสัมพันธ์ระหว่างเท้ากับดิน โดยร่างกายมนุษย์สามารถพิจารณาเป็นระบบที่ประกอบด้วยกระดูก ข้อต่อ เอ็นยึดข้อ เอ็นกล้ามเนื้อ และกล้ามเนื้อ ซึ่งทำงานร่วมกันในลักษณะของระบบคาน โดยเฉพาะกลไกของขาในช่วงรับน้ำหนักที่สามารถอธิบายได้ด้วยแนวคิดคานลำดับสอง ดังแสดงใน Figure 1 ซึ่งช่วยขยายแรงจากกล้ามเนื้อให้เพียงพอต่อการพยุงและเคลื่อนย้ายน้ำหนักของร่างกาย [12] เมื่อขาข้างหนึ่งเริ่มยกตัวออกจากพื้น น้ำหนักตัวจะถูกถ่ายไปยังขาอีกข้างผ่านการเปลี่ยนตำแหน่งของจุดศูนย์กลางมวลและการปรับสมดุลของข้อเท้า เข่า และสะโพกของขารับน้ำหนัก ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงภายในระบบกระดูกและกล้ามเนื้ออย่างต่อเนื่อง [13, 14] ขณะเดียวกัน แรงปฏิริยาจากพื้นซึ่งเป็นแรงตอบสนองจากพื้นต่อเท้าจะมีบทบาทสำคัญต่อการรองรับน้ำหนัก การทรงตัว และการยกเท้า [15] โดยในกรณีของดินโคลน แรงดังกล่าวไม่ได้ขึ้นอยู่กับน้ำหนักตัวและการเคลื่อนไหวเท่านั้น แต่ยังมีสัมพันธ์กับแรงยึดเกาะ แรงเฉือน และแรงต้านจากดินชื้นที่กระทำต่อพื้นรองเท้าด้วย ดังนั้น การยกเท้าขึ้นจากดินโคลนจึงเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องพร้อมกันทั้งกลไกคานของขา การถ่ายน้ำหนักระหว่างขา และการเปลี่ยนแปลงของแรงปฏิริยาจากพื้น ซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญสำหรับการวิเคราะห์แรงที่เกิดขึ้นในระบบพิกัดฉากระหว่างการเคลื่อนไหวดังกล่าว

3. วิธีดำเนินการ

3.1 การออกแบบชุดทดสอบ

การออกแบบการทดลองในงานวิจัยนี้มุ่งพัฒนาชุดทดสอบสำหรับวัดแรงที่เกิดขึ้นขณะยกเท้าขึ้นจากดินโคลน โดยประยุกต์ใช้เซนเซอร์วัดแรงที่ผู้วิจัยได้พัฒนาเพื่อใช้ตรวจวัดแรงที่เกิดขึ้นในระบบพิกัดฉาก [16] ภายหลังจากติดตั้งเซนเซอร์เข้ากับชุดทดลองจริง ได้ทำการสอบเทียบระบบใหม่อีกครั้งเพื่อประเมินความถูกต้องของการวัดภายใต้สภาพการใช้งานจริง ผลการสอบเทียบพบว่า แรงในแนวแกนด้านแคบ (แกน y) ของ EOR มีความคลาดเคลื่อนสูงประมาณ 20 % ซึ่งสูงกว่าระดับที่ยอมรับได้

สำหรับการวิเคราะห์เชิงปริมาณ จึงไม่นำข้อมูลในแกนดังกล่าวมาใช้ในการวิเคราะห์ผลของงานวิจัยนี้ อย่างไรก็ตาม แกนอื่นของเซนเซอร์ (x และ z) ยังคงมีความถูกต้องและให้ผลสอดคล้องกับผลการสอบเทียบที่รายงานไว้ในงานวิจัยก่อนหน้า [16]

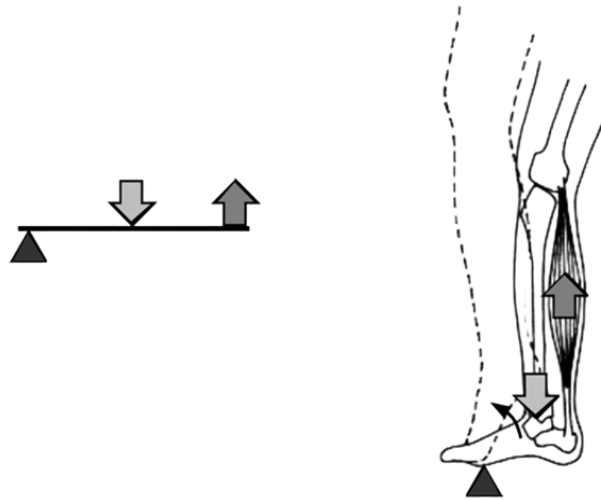


Figure 1 Second-class lever system. [12]

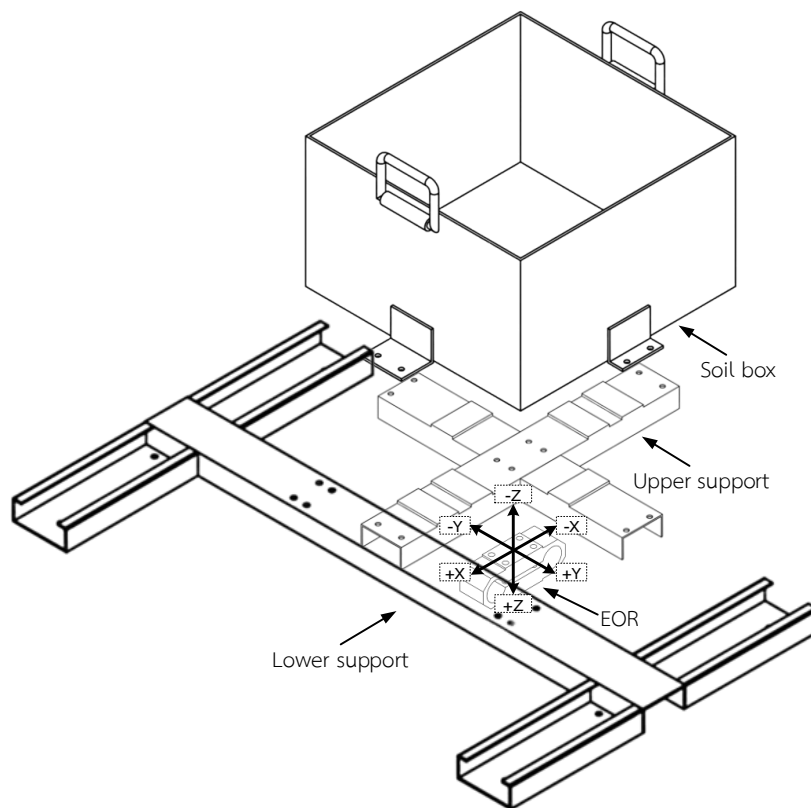


Figure 2 Force measurement setup for stepping and boot extraction.

โครงสร้างของชุดทดลองถูกออกแบบให้สอดคล้องกับลักษณะการถ่ายโอนแรงของรยางค์ล่างขณะยกเท้าจากดินโคลน ดังแสดงใน Figure 2 โดยประกอบด้วยฐานยึดติดพื้น ชุดรองรับด้านบน EOR และกระบะดินสำหรับจำลองสภาพแวดล้อมการยืนในดินโคลน ในขณะที่ชุดทดลองจริงดังแสดงใน Figure 3 ประกอบด้วยชุดกระบะดินจำนวน 2 กระบะ และ EOR จำนวน 2 ตัว เพื่อรองรับแรงที่เกิดขึ้นจากการทดลองของขาทั้งสองข้างและติดตั้งคานสำหรับใช้ยึดจับเพื่อช่วยการทรงตัวของอาสาสมัคร รวมถึงมีการติดอุปกรณ์เซฟตี้และห่วงจับยึดเพื่อเพิ่มความปลอดภัยและเสถียรภาพขณะทดลองและสามารถถ่ายถอดแรงจากการเคลื่อนไหวของผู้ทดลองมายังเซนเซอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขณะเดียวกันยังเปิดโอกาสให้ดินภายในกระบะมีการกระจายตัวและเสียรูป

ใกล้เคียงกับสภาพการใช้งานจริง ข้อมูลแรงพลศาสตร์จะถูกส่งไปสู่อุปกรณ์แปลงสัญญาณและนำเข้าไปบันทึกข้อมูลในคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์



Figure 3 Apparatus for measuring reaction forces during the extraction of boots from wet soil.



Figure 4 Boot thickness measurement points.

สำหรับการทดสอบจริง ใช้อาสาสมัครเพศชายจำนวน 15 คน อายุระหว่าง 21-23 ปี ส่วนสูง 165-185 cm และน้ำหนัก 60-90 kg โดยใช้งานรองเท้าบู๊ตเกษตรจำนวน 2 แบบในการทดลอง ค่าความแข็งของวัสดุรองเท้าถูกตรวจด้วยเครื่อง Shore A durometer ยี่ห้อ Desik ณ จุดที่รองเท้าบู๊ตมีโอกาสเกิดการเสียหาย ที่ตำแหน่ง A, B และ C ดังแสดงใน Figure 4 และผลใน Table 1 พบว่ารองเท้าบู๊ตแบบที่ 1 มีค่าความแข็งสูงกว่าแบบที่ 2 ในตำแหน่ง A และ C ซึ่งอาจมีผลต่อแรงที่เกิดขึ้นระหว่างการดึงรองเท้าออกจากดินขึ้น ในขั้นตอนการเตรียมดินที่ใช้ทดสอบ ดินร่วนเหนียวปนทราย (อนุภาคขนาดทราย 64.11 % อนุภาคขนาดทรายแป้ง 9.14 % และอนุภาคขนาดดินเหนียว 26.75 %) จะถูกนำมาผสมน้ำให้มีเปอร์เซ็นต์ความชื้นของดินแบบฐานแห้งเท่ากับ 36.24% และ 33.67% (dry basis, db) และกวนให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยโม่ผสมปูนเป็นระยะเวลา 10 นาที แล้วนำมาบรรจุลงในกระบะดินตามปริมาณที่กำหนด แล้วปิดสนิทกระบะดินด้วยแผ่นพลาสติก เพื่อรักษาความชื้นและบ่มดินให้สม่ำเสมอก่อนการทดลองเป็นระยะเวลา 1 คืน โดยที่ค่าความชื้นทั้งสองระดับถูกเลือกเพื่อใช้เปรียบเทียบพฤติกรรมแรงภายใต้สภาพดินขึ้นที่มีความสามารถในการยึดเกาะและเสีรูปร่างได้เมื่อมีแรงภายนอกกระทำกับรองเท้า จึงเหมาะสำหรับใช้จำลองสภาวะการยกเท้าออกจากดินขึ้น

ระหว่างการทดลอง อาสาสมัครจะยืนบริเวณกึ่งกลางของกระบะดินในลักษณะที่เท้าทั้งสองข้างรับน้ำหนักอย่างสมดุล โดยพิจารณาจากข้อมูลน้ำหนักที่อ่านได้จาก EOR และปล่อยให้ดินโคลนไหลคลุมบริเวณรองเท้า จากนั้นให้อาสาสมัครยกเท้าขวา

และเท้าซ้ายตามลำดับ โดยทำซ้ำในแต่ละแบบรองเท้า ผลจากการออกแบบการทดลองนี้ช่วยให้สามารถศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างชนิดรองเท้า และแรงที่เกิดขึ้นระหว่างการยกเท้าได้อย่างเป็นระบบ

Table 1 Hardness values at various locations

Type of boots	Material	Hardness Values (Shore A) at specific locations		
		A	B	C
1	PVC	72	60	71.5
2	PU	44	60.5	42

3.2 การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลแรงที่ได้จากเซนเซอร์ EOR ทั้งสองตัวถูกนำมาประมวลผลเพื่อพิจารณาความสามารถของชุดทดลองในการตรวจวัดแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นขณะดึงรองเท้าบูทออกจากดินขึ้น โดยในการศึกษานี้พิจารณาเฉพาะข้อมูลจากแนวแกนที่ผ่านการตรวจสอบความถูกต้องและมีเสถียรภาพเพียงพอสำหรับการใช้งานจริง ได้แก่ แกน x และแกน z ขณะที่ข้อมูลจากแกน y ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนภายหลังการติดตั้งค่อนข้างสูง จะไม่นำมาใช้ในการแปลผลการทดลอง ข้อมูลแรงถูกพิจารณาในลักษณะสัญญาณตามเวลาที่ได้ทำการบันทึกค่า เพื่อแสดงรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของแรงในช่วงก่อนยกเท้า ขณะยกเท้า และหลังวางเท้ากลับลงสู่ดิน โดยแยกพิจารณาระหว่างขาข้างที่ถูกยกและขาข้างที่ยังคงรับน้ำหนักอยู่ในดินโคลน

การวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการแสดงให้เห็นว่าชุดทดลองที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของแรงที่สัมพันธ์กับพฤติกรรมเคลื่อนไหวจริงได้อย่างต่อเนื่องและสอดคล้องกับลักษณะการถ่ายน้ำหนักของร่างกาย กล่าวคือเมื่ออาสาสมัครยกเท้าข้างหนึ่งขึ้นจากดิน แรงที่วัดได้จากขาข้างที่ถูกยกและขาข้างที่รับน้ำหนักจะเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางตรงกันข้ามอย่างไร ข้อมูลที่ได้จึงถูกนำเสนอในรูปกราฟแรง-เวลา เพื่อใช้ยืนยันว่าระบบสามารถใช้ติดตามแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างรองเท้าบูทกับดินขึ้นได้จริง และสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นเครื่องมือสำหรับการศึกษาพฤติกรรมแรงในงานวิจัยลักษณะนี้ต่อไปได้

4. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

ผลการศึกษาพบว่า ชุดทดสอบแรงปฏิกิริยาขณะดึงรองเท้าบูทออกจากดินขึ้นที่พัฒนาขึ้นร่วมกับทรานสดิวเซอร์แบบวงแหวนแปดเหลี่ยมสามารถใช้งานได้อย่างจริงในการตรวจวัดแรงที่เกิดขึ้นระหว่างการเคลื่อนไหวของอาสาสมัคร แรงในแนว แกน x และแกน z มีการเปลี่ยนแปลงต่อเนื่องตามช่วงเวลาของการทดลอง และสามารถสะท้อนพฤติกรรมการถ่ายน้ำหนักของร่างกายระหว่างขาซ้ายและขาขวาได้อย่างชัดเจน โดยกราฟใน Figure 5 และ Figure 6 จะให้อาสาสมัครทำการทดสอบโดยการดึงขาข้างขวาขึ้นก่อน (ทิศทางบวกหรือลบสามารถพิจารณาได้จาก Figure 2) ค่าของแรงที่ปรากฏเป็นลบในกราฟไม่ได้หมายถึงน้ำหนักกดลง แต่เกิดจากการกำหนดทิศทางอ้างอิงของแกนแรงในระบบการวัด โดยเมื่อแรงกระทำสวนทางกับทิศบวกที่กำหนดไว้ ค่าที่บันทึกจึงแสดงเป็นค่าลบ ขาข้างซ้ายที่ยังคงอยู่ในดินจะรับน้ำหนักลดลงเนื่องจากผลของแรงยึดเหนี่ยวของดินขึ้น [17] กับรองเท้า ซึ่งพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในตอนเริ่มต้นนี้จะแตกต่างกับหลักการถ่ายโอนน้ำหนักของร่างกายมนุษย์ แต่เมื่อแรงดึงของขาขวามีค่ามากเพียงพอต่อการเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวของดินขึ้นและน้ำหนักดินที่ยึดเกาะและทับถมอยู่บนรองเท้าบูท แรงทั้งหมดจะถูกถ่ายโอนไปสู่ขาข้างซ้ายอย่างทันทีทันใดและมีค่าสูงที่สุดมากกว่าน้ำหนักรวมของอาสาสมัคร ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวจะเกิดขึ้นในทำนองเดียวกันกับการทดสอบดึงขาข้างซ้ายขึ้นจากดินโคลน

จากกราฟแรง-เวลา ที่ได้จากการทดลอง พบว่าสามารถแยกช่วงสำคัญของการเคลื่อนไหวได้อย่างชัดเจน ได้แก่ ช่วงก่อนยกเท้า ช่วงเริ่มดึงเท้าออกจากดิน ช่วงที่รองเท้ากำลังหลุดพ้นจากดิน และช่วงวางเท้ากลับลงสู่ผิวดิน โดยในช่วงเริ่มยกเท้าขึ้นจากดินขึ้น แสดงให้เห็นว่าชุดทดลองสามารถติดตามพฤติกรรมแรงแบบพลวัตที่เกิดขึ้นจริงระหว่างรองเท้าบูทออกจากดินขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้ แม้แรงในแนวแกน x จะมีขนาดน้อยกว่าแรงในแนวแกน z แต่ยังสามารถแสดงแนวโน้มของแรงในแนวราบ (แกน x) ซึ่งหากมีค่ามากเกินไปจะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพเชิงกลของร่างกาย [18] ร่างกายจะโน้มไปด้านหน้า-หลังหรือซ้าย-ขวาได้ง่าย ทำให้จุดศูนย์ถ่วงออกนอกฐานรองรับและล้มได้ อันเป็นผลจากแรงต้านของดินโคลนร่วมกับการเปลี่ยนตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงและการกระจายแรงรับน้ำหนักที่ไม่สมดุล

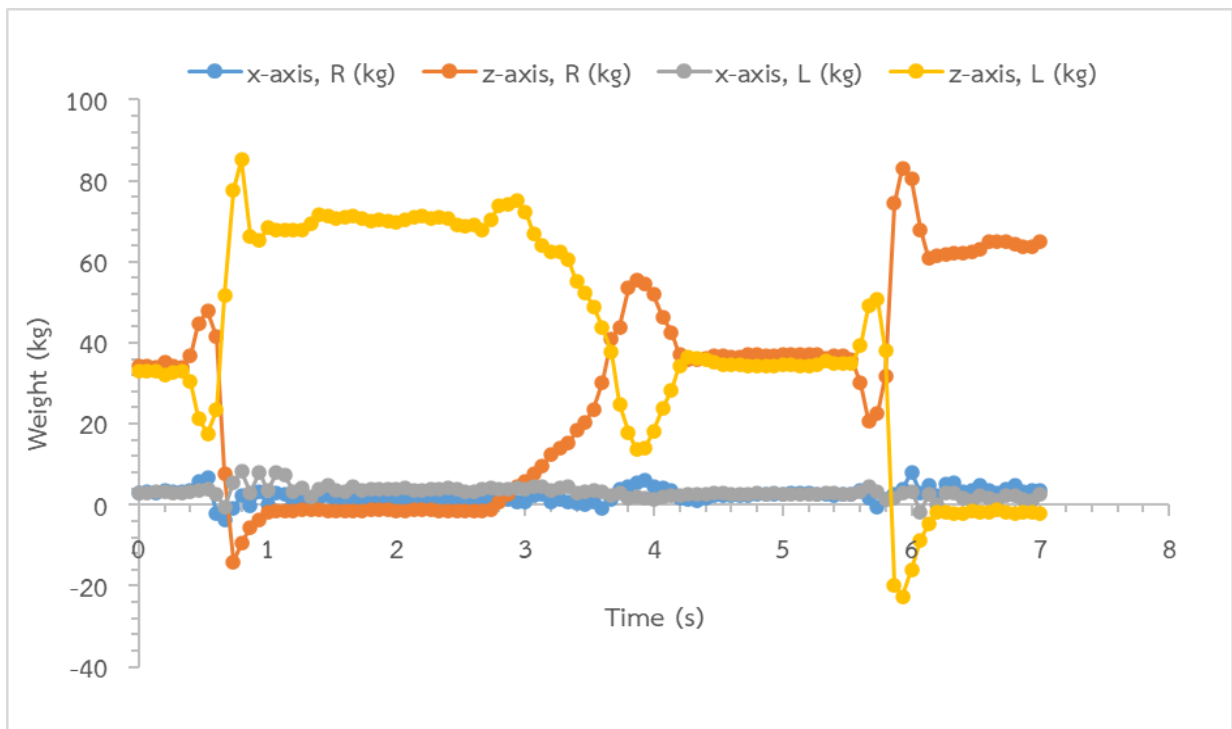


Figure 5 Interaction forces from Boot Type 1 at soil moisture content of 36.24% (db).

เมื่อพิจารณาลักษณะของดินในการทดลอง พบว่าความชื้นของดินมีผลต่อพฤติกรรมแรงที่เกิดขึ้นอย่างชัดเจน โดยเมื่อดินมีความชื้นในระดับ 36.24% ส่งผลให้รองเท้าบู๊ทแบบที่ 1 สามารถถูกยกขึ้นจากดินได้ง่ายกว่าที่ระดับความชื้น 33.67 % และมีค่าสูงสุดในแนว z เท่ากับ 85.2 kg ในทางกลับกัน เมื่อดินมีความชื้นเปลี่ยนเป็น 33.67 % ทำให้รองเท้าบู๊ทยึดเกาะกับดินที่มีความเหนียวมากขึ้น เนื่องจากเริ่มเข้าใกล้ Plastic limit มากขึ้น และต้องใช้แรงในการยกเท้ามากขึ้น โดยให้ค่าสูงสุดเท่ากับ 95.6 kg เมื่อเปรียบเทียบระหว่างความชื้นทั้งสองระดับ พบว่าค่าแรงสูงสุดแตกต่างกันเฉลี่ยอยู่ที่ 10.8 % ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าระบบทดสอบที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจจับผลของการเปลี่ยนแปลงความชื้นดินที่มีต่อแรงดึงรองเท้าออกจากดินขึ้นได้อย่างชัดเจน

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาผลของชนิดรองเท้าบู๊ท พบว่าคุณลักษณะของรองเท้าอาจมีผลต่อแรงที่เกิดขึ้นระหว่างการดึงเท้าออกจากดินขึ้น โดยปัจจัยที่เกี่ยวข้องอาจรวมถึงชนิดของวัสดุ ความแข็งและความยืดหยุ่นของโครงสร้างรองเท้า ลักษณะผิวสัมผัส รวมถึงความกระชับของรองเท้าขณะสวมใส่ ซึ่งอาจส่งผลต่อการถ่ายแรงและการหลุดของส้นเท้าระหว่างการยกเท้าออกจากดิน อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ไม่ได้มุ่งแยกวิเคราะห์หรืออิทธิพลของปัจจัยดังกล่าวเป็นรายตัวแปรโดยตรง จึงยังไม่สามารถสรุปได้อย่างชัดเจนว่าปัจจัยใดเป็นสาเหตุหลักของความแตกต่างของแรงที่ตรวจวัดได้ โดยรองเท้าบู๊ทแบบที่ 1 เมื่อเปรียบเทียบกับแบบที่ 2 ภายใต้สภาวะดินที่มีความชื้น 36.24% และ 33.67% พบว่าค่าแรงสูงสุดมีความแตกต่างกันโดยเฉลี่ย 9.8% และ 3.6% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจจับความแตกต่างของแรงที่เกิดขึ้นจากชนิดของรองเท้าบู๊ทได้จริง แม้บทความฉบับนี้จะไม่ได้มุ่งเน้นการวิเคราะห์เชิงสถิติอย่างละเอียดก็ตาม

จุดเด่นสำคัญของระบบนี้คือสามารถวัดแรงปฏิกิริยาจากขาทั้งสองข้างได้พร้อมกันในระหว่างการทดลองจริง ทำให้เห็นลักษณะการถ่ายน้ำหนักของร่างกายขณะดึงเท้าออกจากดินขึ้นได้อย่างชัดเจน อีกทั้งยังสามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของแรงตามลำดับช่วงเวลาของการเคลื่อนไหวได้ดี จึงเหมาะสำหรับใช้เป็นต้นแบบของระบบทดสอบแรงปฏิกิริยาระหว่างรองเท้ากับดินในงานวิจัยด้านการกายศาสตร์ ด้านชีวกลศาสตร์ และด้านการออกแบบรองเท้าสำหรับงานเกษตร แต่ควรหาวิธีการปรับปรุงระบบการวัดที่ผิดพลาดในแนวแกน y นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ยังไม่ได้ควบคุมเวลาหรืออัตราเร็วในการยกเท้าอย่างเข้มงวด ซึ่งอาจส่งผลต่อค่าของแรงที่วัดได้ เนื่องจากดินขึ้นมีพฤติกรรมต้านทานต่อการเคลื่อนที่แตกต่างกันตามอัตราการยกเท้า ประเด็นดังกล่าวจึงควรได้รับการพิจารณาเพิ่มเติมในการศึกษาครั้งต่อไป

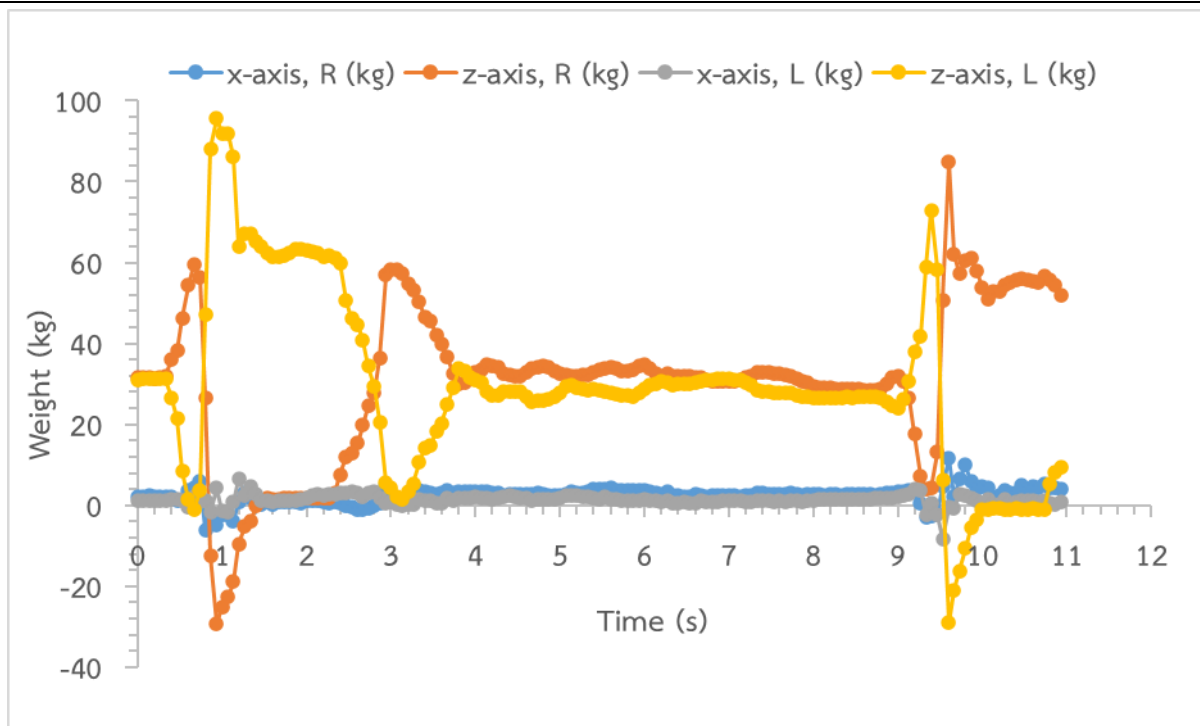


Figure 6 Interaction forces from Boot Type 1 at soil moisture content of 33.67% (db).

4. สรุป

ชุดทดลองที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ตรวจวัดแรงปฏิกิริยาขณะดึงรองเท้าบูทออกจากดินขึ้นได้จริง สัญญาณแรงที่วัดได้มีความต่อเนื่อง สอดคล้องกับพฤติกรรมเคลื่อนไหวของอาสาสมัคร และสามารถแสดงความแตกต่างของแรงที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาพดินและชนิดของรองเท้าได้อย่างชัดเจน ผลลัพธ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าระบบทดสอบที่พัฒนาขึ้นมีศักยภาพในการนำไปใช้เป็นเครื่องมือพื้นฐานสำหรับการศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์กับดินขึ้นและการพัฒนางานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่อไป แต่ควรมีการพัฒนาให้สามารถวัดค่าแรงในแนวแกน y ให้มีความแม่นยำมากขึ้น

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] โรงพยาบาลกรุงเทพ. 2569. ฉี่หนู หน้าฝนน้ำท่วมต้องระวังให้หนัก. เข้าถึงได้จาก : <https://www.bangkokhospital.com/th/bangkok/content/leptospirosis-be-careful-in-rainy-season-and-flood>. (เข้าถึงเมื่อ 3 กุมภาพันธ์ 2569).
- [2] กรมควบคุมโรค. 2569. เมลิออยโดสิส (Meloidosis). เข้าถึงได้จาก : https://www.ddc.moph.go.th/disease_detail.php?d=99. (เข้าถึงเมื่อ 3 กุมภาพันธ์ 2569).
- [3] สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. 2569. รองเท้าบูทยาง (Rubber Boot). เข้าถึงได้จาก : https://rubber.oie.go.th/file/16_รองเท้าบูทยาง.pdf. (เข้าถึงเมื่อ 3 กุมภาพันธ์ 2569).
- [4] ยงยุทธ โอสถสกา. 2557. คุณภาพดินเพื่อการเกษตร. สมาคมดินและปุ๋ยแห่งประเทศไทย, กรุงเทพมหานคร.
- [5] Sakai J. Two-wheel Tractor Engineering for Asian Wet Land Farming. 1999. Shin-norinsha, Tokyo.
- [6] กองความปลอดภัยแรงงาน กรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน. 2569. ความสำคัญของการยศาสตร์ (Ergonomics). เข้าถึงได้จาก : https://osh.labour.go.th/index.php?option=com_content&view=article&id=52:-m-m-s&catid=10:ergonomics&Itemid=201. (เข้าถึงเมื่อ 3 กุมภาพันธ์ 2569).
- [7] กิตติ อินทรานนท์. 2559. การยศาสตร์ ERGONOMICS. พิมพ์ครั้งที่ 3. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.
- [8] Godwin, R. J. 1975. An extended octagonal ring transducer for use in tillage studies. Journal of Agricultural Engineering Research. 20(4): 347-352.

-
- [9] Chen, Y., McLaughlin, N. B. and Tessier, S. 2007. Double extended octagonal ring (DEOR) drawbar dynamometer. *Soil and Tillage Research*. 93(2): 462-471.
- [10] Pitla, S. K., Wells, L. G. and Shearer, S. A. 2009. Integration of an extended octagonal ring transducer and soil coulterometer for identifying soil compaction. *Applied Engineering in Agriculture*. 25: 647-652.
- [11] Karabay, S. 2007. Analysis of drill dynamometer with octagonal ring type transducers for monitoring of cutting forces in drilling and allied process. *Materials and Design*. 28(2): 673-684.
- [12] Tözeren, A. 2000. *Human body dynamics: Classical mechanics and human movement*. Springer, New York.
- [13] Kuo, A. D., Donelan, J. M., & Ruina, A. 2010. *Dynamic principles of gait and their clinical implications*. *Physical Therapy*, 90(2): 157-174.
- [14] Tesio, L., & Rota, V. 2019. The motion of body center of mass during walking: A review oriented to clinical applications. *Frontiers in Neurology*, 10: 999.
- [15] Winter, D. A. 2009. *Biomechanics and motor control of human movement* (4th ed.). John Wiley & Sons, New York.
- [16] กนิษฐา เทียนศิริ, ดิษฐพร ตุงโสธานนท์ และ ชมพูนุช กุลเกตุวงศ์. 2568. การออกแบบเซนเซอร์วัดแรงแบบวงแหวนแปดเหลี่ยมสำหรับวัดแรงตัดเฉือนของเครื่องกัด. ใน: การประชุมวิชาการระดับชาติ IAMBEST ครั้งที่ 10. 30 เมษายน - 2 พฤษภาคม 2568. จังหวัดเพชรบุรี. หน้า 79-86.
- [17] Dong C, Yu G, Gong Y, et al. 2023. Experimental study on pull-out behaviour of piles in cohesive sedimentary beds subject to water jet and vibration loading. *Applied Ocean Research*, 141: 103787.
- [18] Lugade V, Lin V, Chou LS. 2011. Center of mass and base of support interaction during gait. *Gait & Posture*, 33(3): 406-411.

**การศึกษาเชิงตัวเลขเกี่ยวกับสมรรถนะทางความร้อนของระบบระบายความร้อนแบบช่องทางเล็กหลายชั้น
สำหรับแบตเตอรี่ทรงกระบอก****Numerical study on the thermal performance of a multi-layer mini-channel cooling
system for cylindrical batteries**อรรถพันธ์ มังสา¹ นภัสสร บุญรอด¹ และ ศักรินทร์ ชิงกุลพิทักษ์^{1,*}Autthapan Mangsa¹, Naphatso Bunrot¹ and Sakkarin Chingulpitak^{1,*}¹ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร 86160 ประเทศไทย¹Department of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Prince of Chumphon Campus, Chumphon Province, 86160, Thailand

*Corresponding author: Sakkarin Chingulpitak, e-mail address: sakkarin.ch@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาเชิงตัวเลขเกี่ยวกับสมรรถนะทางความร้อนของโครงสร้างกระจายความร้อนสำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนทรงกระบอก 21700 จำนวน 16 เซลล์ ได้ทำการออกแบบโครงสร้างกระจายความร้อนร่วมกับท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 3 mm หลายชั้น ซึ่งแต่ละชั้นมีท่อมินิแชนเนลจำนวน 5 ท่อ โดยพิจารณารูปแบบการไหลทิศทางเดียวและการไหลสลับทิศทาง การวิเคราะห์ดำเนินการภายใต้อัตราการคายประจุ 4C ที่อุณหภูมิของน้ำทางเข้า 20°C ช่วงอัตราการไหลของน้ำ 0.24-0.51 L/min และจำนวนชั้นของท่อ 2 3 และ 4 ชั้น ในการศึกษานี้ได้ทำการศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของระบบการจัดการความร้อนแบตเตอรี่โดยพิจารณาค่าอุณหภูมิสูงสุดของแบตเตอรี่และความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างเซลล์แบตเตอรี่ ผลจากการศึกษาพบว่า การเพิ่มขึ้นของอัตราการไหล การเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหล และการเปลี่ยนแปลงจำนวนชั้นของท่อส่งผลต่อสมรรถนะทางความร้อนของระบบการจัดการความร้อนแบตเตอรี่อย่างมีนัยสำคัญ โครงสร้างกระจายความร้อนสำหรับแบตเตอรี่ทรงกระบอกที่มีจำนวนชั้นของท่อมินิแชนเนล 3 ชั้น ที่อัตราการไหล 0.51 L/min และรูปแบบการไหลสลับทิศทางให้สมรรถนะทางความร้อนเหมาะสมที่สุด ซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิสูงสุดของแบตเตอรี่และความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างเซลล์แบตเตอรี่ได้ที่ 23.45°C และ 0.17°C ตามลำดับ

คำสำคัญ: ระบบการจัดการความร้อนแบตเตอรี่, การระบายความร้อนด้วยของเหลว, แบตเตอรี่ทรงกระบอก, มินิแชนเนล

Abstract

This research numerically investigated the thermal performance of a heat distribution structure for a cylindrical 21700 lithium-ion battery module consisting of 16 cells. The heat distribution structure was designed and integrated with multi-layer tubes of 3 mm inner diameter, where each layer contains five mini-channel tubes. The parallel-flow and alternate-flow directions were considered in the integration. The numerical analysis was conducted under a 4C discharge rate, an inlet water temperature of 20°C, water flow rates ranging from 0.24 to 0.51 L/min and tube layer numbers of 2, 3 and 4. In this study, the thermal performance of the battery thermal management system was investigated based on the maximum battery temperature and the temperature difference between the battery cells. The numerical results revealed that increasing the flow rate, the variation in flow configuration and varying the number of tube layers significantly affect the thermal performance of the battery thermal management system. The heat distribution structure for the cylindrical battery module, consisting of three layers of mini-channel tubes and employing a double one-way-flow configuration at a flow rate of 0.51 L/min, demonstrates the optimal thermal performance. The maximum battery temperature and the temperature difference between the battery cells were controlled at 23.45°C and 0.17°C, respectively.

Keywords: Battery thermal management system, Liquid cooling, Cylindrical battery, Mini-channel

1. บทนำ

ในปัจจุบันโลกกำลังเผชิญปัญหาภาวะโลกร้อนเนื่องจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากรถยนต์สันดาปภายในแบบเดิม ในช่วงปี 2020-2025 ที่ผ่านมารถยนต์ไฟฟ้ามีแนวโน้มยอดขายในตลาดรถยนต์ทั่วโลกเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง [1] แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนเป็นส่วนประกอบหลักสำคัญของรถยนต์ไฟฟ้า เนื่องจากมีความหนาแน่นของพลังงานแบตเตอรี่สูงและอายุการใช้งานรอบการชาร์จยาวนาน [2-3] อย่างไรก็ตาม แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมีข้อจำกัดด้านอุณหภูมิที่ส่งผลต่อสมรรถนะการทำงานและอายุการใช้งาน อีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยในการใช้งานแบตเตอรี่ โดยอุณหภูมิการทำงานที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 20-40°C และความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างเซลล์ไม่ควรเกิน 5°C [4] ดังนั้น ระบบการจัดการความร้อนแบตเตอรี่จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับรถยนต์ไฟฟ้า

ที่ผ่านมาได้มีการศึกษาระบบการจัดการความร้อนแบตเตอรี่สำหรับรถยนต์ไฟฟ้าโดยวิธีการต่างๆ เช่น การระบายความร้อนด้วยอากาศ การระบายความร้อนด้วยของเหลว และการใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะ [5] การศึกษาเชิงตัวเลขระบบการจัดการความร้อนแบตเตอรี่โดยการระบายความร้อนด้วยการอากาศ การเพิ่มครีบบระบายความร้อน และการระบายความร้อนด้วยของเหลวสำหรับเซลล์แบตเตอรี่แบบปริซึม (Prismatic cell) งานวิจัยทำการศึกษารเปรียบเทียบการระบายความร้อนภายใต้ อัตราการคายประจุ 2.71C อัตราการไหลเชิงมวล 0-2 กรัมต่อวินาที ผลการศึกษาพบว่า การระบายความร้อนด้วยอากาศใช้กำลังไฟฟ้ามากกว่า การระบายความร้อนด้วยน้ำ 2-3 เท่า นอกจากนี้การเสริมแผ่นทำความเย็นช่วยให้ระบายความร้อนดีขึ้นแต่ทำให้น้ำหนักเพิ่มขึ้นประมาณ 40% ต่อหนึ่งหน่วยเซลล์ ในขณะที่การระบายความร้อนด้วยของเหลวมีสมรรถนะมากที่สุด [6] ในการศึกษาเชิงการจำลองการออกแบบท่อระบายความร้อนด้วยของเหลวแบบสามชั้นที่จัดเรียงสลับกัน (three-layer staggered liquid-cooled pipe: TSLP) สำหรับแบตเตอรี่ทรงกระบอก 32700 ได้ประเมินสมรรถนะการระบายความร้อนด้วยค่าอุณหภูมิสูงสุดของแบตเตอรี่และความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดระหว่างเซลล์ นอกจากนี้ยังหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมโดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (response surface methodology) ซึ่งพิจารณาปัจจัยที่ส่งผลในการศึกษาได้แก่ อัตราการไหลขาเข้า อุณหภูมิแวดล้อม และอัตราการทำให้ของไหลทำงานเย็นลงหน้า ผลจากการศึกษาพบว่า การจัดวางการไหลแบบสวนทางกัน (staggered counter-flow) สามารถควบคุมอุณหภูมิสูงสุดและความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างเซลล์ไว้ที่ 36.17°C และ 2.43°C ตามลำดับ อีกทั้งผลที่ได้จากการหาความเหมาะสมแสดงให้เห็นว่าภายใต้อุณหภูมิแวดล้อม 35/40/45°C ที่ความเร็วของไหลขาเข้า 0.044/0.047/0.049 m/s และอัตราการทำให้ของไหลทำงานเย็นลงหน้า 3.6-3.9°C/min [7] การศึกษาเชิงการทดลองและจำลองเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะระบบการจัดการความร้อนแบตเตอรี่ทรงกระบอกด้วยการระบายความร้อนด้วยของเหลว โดยออกแบบแผ่นระบายความร้อนสองชนิดคือแผ่นระบายความร้อนที่ติดตั้งด้านข้างของโมดูลแบตเตอรี่และแผ่นระบายความร้อนที่ติดตั้งระหว่างแถวของเซลล์แบตเตอรี่ ภายใต้อัตราการคายประจุต่างๆ ผลจากการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าแผ่นระบายความร้อนที่ติดตั้งระหว่างแถวของเซลล์แบตเตอรี่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ดีกว่าแผ่นระบายความร้อนที่ติดตั้งด้านข้างของโมดูลแบตเตอรี่ รวมไปถึง [8] การศึกษาเชิงการจำลองโดยออกแบบโครงสร้างระบายความร้อนด้วยช่องทางระบายความร้อนด้วยของเหลวรูปทรงคดเคี้ยว (serpentine-shaped cooling channel: SSCC) เพื่อพัฒนาและเพิ่มสมรรถนะการระบายความร้อนโมดูลแบตเตอรี่ ภายใต้ความเร็วของไหล ความสูงของช่องทางของเหลว และอัตราการคายประจุที่แตกต่างกัน ที่มุมสัมผัส 60° และอุณหภูมิแวดล้อม 298 K ผลการจำลองพบว่าที่อัตราการคายประจุ 5C ความสูงของช่องทางของเหลว 50 mm และความเร็วของไหล 0.3 m/s สามารถลดอุณหภูมิสูงสุดของแบตเตอรี่ได้ถึง 46 K เมื่อเทียบกับโมดูลที่ไม่มีการระบายความร้อน และสามารถควบคุมความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างเซลล์ไม่เกิน 3 K นอกจากนี้ พบว่ากำลังปั๊ม (pumping power) และความดันตก (pressure drop) ส่งผลต่อสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของโมดูลแบตเตอรี่มากกว่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วของไหล นอกจากนี้ [9] การศึกษาเชิงการทดลองและจำลองโครงสร้างระบายความร้อนด้วยของเหลว 6 ชนิด ได้แก่ น้ำ (Water) เอทิลีนไกลคอล (Ethylene Glycol) สารผสมน้ำ-ไกลคอล อัตราส่วน 50:50 (Water-Glycol mixture, 50:50) กลีเซอริน (Glycerin/Glycerol) เอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol) และโพรพิลีนไกลคอล (Propylene Glycol) ภายใต้ความเร็วของไหล 1-5 m/s และอัตราการคายประจุ 1-3C ภายในโครงสร้างที่มีท่อทางของเหลวรูปทรงคดเคี้ยว (serpentine-shaped cooling channel: SSCC) งานวิจัยได้ศึกษาอย่างครอบคลุมถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อสมรรถนะการระบายความร้อนและค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (Coefficient of Performance: COP) พบว่าน้ำให้สมรรถนะการระบายความร้อนที่ดีที่สุด ภายใต้อัตราการคายประจุที่ 2C และความเร็วของไหลที่ 2 m/s เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่สูงถึง 8149.2 W/m²·K และมีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะที่ 247 ในขณะที่เอทิลีนไกลคอล (Ethylene Glycol) ให้ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างเซลล์ที่ต่ำกว่า แต่มีค่าความหนืดสูง ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะเพียง 93

การระบายความร้อนด้วยของเหลวผ่านท่อระบายความร้อนในโครงสร้างระบายความร้อนมีความเรียบง่ายและปลอดภัยมากกว่าช่องทางระบายความร้อน [10] ในการศึกษาเชิงการจำลองระบบการจัดการความร้อนแบบผสมผสาน โครงสร้างรังผึ้งผสาน การระบายความร้อนด้วยของเหลวผ่านท่อขนาดเล็กหลายชั้นที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2 mm โดยทำการศึกษากายใต้อัตราการคายประจุที่ 3C อุณหภูมิแวดล้อม 35°C เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของการจัดวางทิศทางการไหล จำนวนชั้นของท่อขนาดเล็ก อัตราการไหลของไหล และความพรุนของโครงสร้างที่ส่งผลต่อสมรรถนะการระบายความร้อน จากผลการศึกษาเชิงตัวเลขพบว่า โครงสร้างรังผึ้งที่มีความพรุนผสานด้วยท่อขนาดเล็กหลายชั้น สามารถระบายความร้อนได้ดีกว่าโครงสร้างที่ใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะ และลดน้ำหนักของโครงสร้างได้ 60% เมื่อเทียบกับโครงสร้างแผ่นระบายความร้อนอะลูมิเนียมแบบทึบ ซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิสูงสุดของแบตเตอรี่และความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างเซลล์แบตเตอรี่ไว้ที่ 48.1°C และ 2.6°C ตามลำดับ อีกทั้ง [11] การศึกษาเชิงตัวเลขระบบการจัดการความร้อนแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน 21700 ด้วยการระบายความร้อนด้วยของเหลวแบบผสมผสานทางตรงและทางอ้อม โดยทำการจำลองการระบายความร้อนด้วยการแช่ (immersion cooling) และการไหลผ่าน (flow cooling) รวมถึงความเร็วของไหลที่ไหลผ่านท่อระบายความร้อน รูปแบบทิศทางการไหลแบบขนานและสวนทางกัน ได้วิเคราะห์ผลกระทบของการระบายความร้อนภายใต้อัตราการคายประจุ 3-6C และอุณหภูมิแวดล้อม 25°C ช่วงความเร็วของไหลที่ไหลผ่านท่อระบายความร้อน 0.1-0.2 m/s และช่วงความเร็วของไหลที่ไหลผ่านแบตเตอรี่โดยตรง 0.05-0.1 m/s โดยใช้น้ำและ HFE-7100 เป็นของไหลทำงาน ผลจากการวิเคราะห์พบว่า การระบายความร้อนแบบไหลผ่านโดยตรงร่วมกับการไหลผ่านท่อระบายความร้อนในทิศสวนทางกันโดยใช้น้ำสามารถลดอุณหภูมิสูงสุดและรักษาความแตกต่างของอุณหภูมิได้ดีกว่า HFE-7100 ซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิสูงสุดของแบตเตอรี่ได้ที่ 32.15°C และความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างเซลล์ 3.04°C เช่นเดียวกัน [12] การศึกษาเชิงการจำลองระบบระบายความร้อนด้วยการแช่ (immersion cooling) ผสานท่อระบายความร้อนด้วยของเหลวที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 6 mm งานวิจัยนี้ทำการศึกษาที่อัตราการคายประจุที่ 3C อุณหภูมิแวดล้อม 25 และ 40°C จำนวนท่อ 5-14 ท่อ และช่วงความเร็วของไหล 0.01-0.6 m/s เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบที่มีต่อสมรรถนะการระบายความร้อน ผลจากการศึกษาพบว่า ระบบระบายความร้อนแบบแช่ด้วยน้ำมันแร่ร่วมกับการใช้ท่อระบายความร้อนด้วยน้ำ จำนวน 10 ท่อ ที่ความเร็ว 0.2 m/s อุณหภูมิแวดล้อม 25°C สามารถควบคุมอุณหภูมิสูงสุดให้ต่ำกว่า 43.3°C และความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างเซลล์ 2.62°C ในขณะที่อุณหภูมิแวดล้อม 40°C สามารถควบคุมอุณหภูมิสูงสุดให้ต่ำกว่า 55.72°C และความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างเซลล์ 3.51°C

จากการทบทวนเอกสารงานวิจัยข้างต้นพบว่า งานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นการศึกษาการระบายความร้อนด้วยของเหลวทางอ้อม (Indirect cooling) สำหรับแบตเตอรี่ทรงกระบอก ทั้งรูปแบบช่องทางระบายความร้อน แผ่นระบายความร้อน และท่อระบายความร้อน แม้ว่าจะมีการพัฒนาระบบระบายความร้อนแบบท่อระบายความร้อน และแบบผสมผสาน อย่างไรก็ตามมีเพียงบางงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับสมรรถนะทางความร้อนภายใต้สภาวะอัตราการคายประจุที่สูง โดยการระบายความร้อนด้วยของเหลวผ่านท่อขนาดเล็ก (mini-channel) หลายชั้น ที่ความเร็วของไหลต่ำ ควบคู่กับรูปแบบทิศทางการไหลที่แตกต่างกัน สำหรับโครงสร้างระบายความร้อนแบตเตอรี่ทรงกระบอก โดยคำนึงถึงสมรรถนะการระบายความร้อนควบคู่กับความเหมาะสมในการใช้งานจริง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอระบบการระบายความร้อนด้วยของเหลวทางอ้อม ด้วยโครงสร้างกระจายความร้อนสำหรับแบตเตอรี่ทรงกระบอก 21700 ร่วมกับท่อระบายความร้อนขนาดเล็กหลายชั้น เพื่อศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลของไหล จำนวนชั้นของท่อ และทิศทางการไหลต่อสมรรถนะการระบายความร้อนของระบบ

2. แบบจำลองและระเบียบวิธีการวิจัย

2.1 แบบจำลองทางกายภาพ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมรรถนะการระบายความร้อนของโครงสร้างกระจายความร้อนสำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 21 mm ความสูง 70 mm จำนวน 16 เซลล์ โดยจัดเรียงแบบตรงกัน 4 คอลัมน์ 4 แถว ผสานการทำงานของท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 3 mm ซึ่งจัดวางอยู่ระหว่างแถวของเซลล์แบตเตอรี่ จำนวน 5 ท่อ ในหนึ่งชั้น แผ่นระบายความร้อนอะลูมิเนียมซึ่งประกบกันเป็นโครงสร้างสัมผัสโดยตรงกับผิวของแบตเตอรี่ โดยมีขนาดความกว้าง 114 mm ความยาว 114 mm และความสูง 70 mm ดัง Figure 1 โครงสร้างกระจายความร้อนสำหรับแบตเตอรี่ทรงกระบอก 21700 โดยใช้น้ำเป็นของไหลทำงาน คุณสมบัติทางวัสดุที่ใช้ในการจำลอง ดัง Table 1

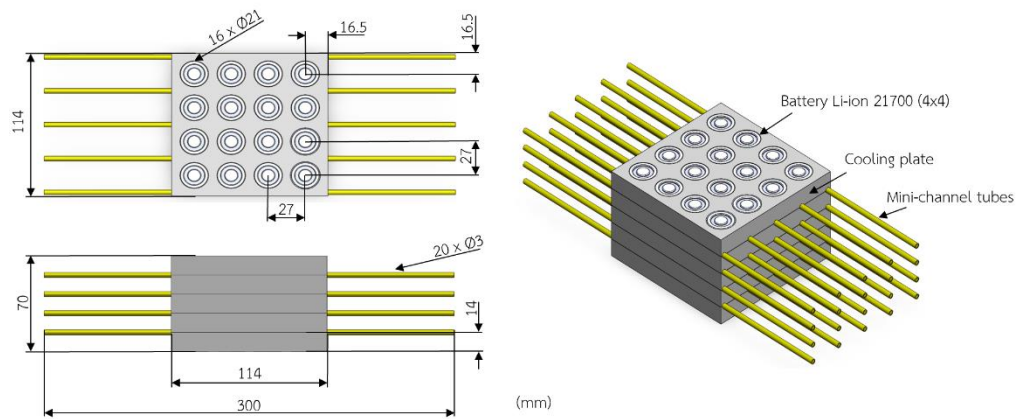


Figure 1 Heat dissipation structure for cylindrical batteries

Table 1 Thermo-physical properties of the battery [13]

Battery type	21700
Diameter x height	21 x 70 mm
Nominal capacity	3.0 Ah
Cut off voltage	2.7 V and 4.2 V
Density	2765 kg/m ³
Specific heat capacity	1028 J/kg·K
Thermal conductivity coefficient	3.5 W/m·K

2.2 แบบจำลองแบตเตอรี่

การศึกษากลไกการเกิดความร้อนโดยใช้แบบจำลองความร้อน [13] อ้างอิงตามมาตรฐานดังต่อไปนี้ (1) คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุแบตเตอรี่และความร้อนภายในแบตเตอรี่มีความสม่ำเสมอ (2) ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าระหว่างการชาร์จมีความสม่ำเสมอทั่วทั้งแบตเตอรี่ (3) ไม่คำนึงถึงการแผ่รังสีความร้อน สมการการอนุรักษ์พลังงานของแบตเตอรี่ (Energy conservation equation of battery)

$$\rho_b c_b \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k_b \nabla T) + Q_{gen} \quad (1)$$

โดยที่ ρ_b , k_b และ c_b คือความหนาแน่น ค่าการนำความร้อนและความจุความร้อนจำเพาะของแบตเตอรี่ ตามลำดับ T_b และ t คืออุณหภูมิแบตเตอรี่และเวลา และ Q_{gen} คืออัตราการเกิดความร้อนภายในเซลล์แบตเตอรี่ สมการแบบจำลองอัตราการเกิดความร้อนของแบตเตอรี่ [14]

$$Q_{gen} = \frac{1}{V} \left[I(U_{ocv} - U) + IT \frac{U_{ocv}}{\partial T} \right] \quad (2)$$

โดยที่ V คือปริมาตรของแบตเตอรี่ I คือกระแสไฟฟ้าในการชาร์จประจุ T คืออุณหภูมิแบตเตอรี่ U_{ocv} คือแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด U คือแรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่ และ $\frac{\partial U_{ocv}}{\partial T}$ คือสัมประสิทธิ์เอนโทรปีของแบตเตอรี่ งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบทางความร้อนที่เกิดจากการคายประจุของแบตเตอรี่ที่อัตรา 4C โดยรายละเอียดคุณลักษณะของแบตเตอรี่ ดังแสดงใน Table 1

2.3 การคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical computation)

การศึกษาแบบจำลองโครงสร้างกระจายความร้อนสำหรับแบตเตอรี่ทรงกระบอก โดยวิเคราะห์การเกิดความร้อนภายใน การนำความร้อน และการพาความร้อนจากเซลล์แบตเตอรี่จนถึงท่อระบายความร้อน ซึ่งใช้สมการการคำนวณดังแสดงใน Table 2

Table 2 Mathematical modeling

Continuity Equation	$\frac{\partial \rho_w}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_w \vec{v}) = 0$	(3)
Momentum Conservation Equation	$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_w \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho_w \vec{v} \vec{v}) = -\nabla P + \mu_w \nabla^2 \vec{v}$	(4)
Energy Conservation Equation	$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_w C_{pw} T_w) + \nabla \cdot (\rho_w C_{pw} \vec{v} T_w) = -\nabla \cdot (k_w \nabla T_w)$	(5)
Energy Conservation Equation of Battery	$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_b C_{pb} T_b) = -\nabla \cdot (k_b \nabla T_b) + q_g$	(6)

การคำนวณจำนวนเรย์โนลด์ส (Reynolds number) เพื่อการประเมินลักษณะการไหลของน้ำ

$$Re = \frac{\rho_w v_{max} D}{\mu_w} \quad (7)$$

โดยที่ ρ_w และ μ_w คือความหนาแน่นของน้ำและความหนืดสัมบูรณ์ของน้ำ v_{max} และ D คือความเร็วสูงสุดของน้ำและเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ สำหรับอัตราการไหลของน้ำที่ 0.51 L/min จำนวนชั้นของท่อมินิแซนเนล 2 ชั้น และอุณหภูมิของน้ำ 20°C โดยมีลักษณะการไหลเป็นแบบราบเรียบ (Laminar flow) ซึ่งมีจำนวนเรย์โนลด์สเท่ากับ 405

สมรรถนะการระบายความร้อนของระบบถูกประเมินจากอัตราการถ่ายเทความร้อนรวม (Total heat transfer rate, Q_w) จากแบตเตอรี่ไปยังสารหล่อเย็นโดยใช้สมการ

$$Q_w = \dot{m}_w C_{p,w} (T_{w,avg,out} - T_{w,avg,in}) \quad (8)$$

โดยที่ \dot{m}_w คืออัตราการไหลเชิงมวลของน้ำ $C_{p,w}$ คือความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ และ $T_{w,avg,in}$ กับ $T_{w,avg,out}$ คืออุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำขาเข้าและขาออก อีกหนึ่งตัวแปรที่สำคัญของสมรรถนะทางความร้อนของระบบระบายความร้อนในงานวิจัยนี้คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างเซลล์แบตเตอรี่ (ΔT) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\Delta T = T_{max} - T_{min} \quad (9)$$

โดยที่ T_{max} คืออุณหภูมิของแบตเตอรี่เซลล์ที่สูงที่สุด และ T_{min} คืออุณหภูมิของแบตเตอรี่เซลล์ที่ต่ำที่สุด

2.4 การประเมินสมรรถนะของระบบจัดการความร้อนแบตเตอรี่

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ อัตราการไหล จำนวนชั้นของท่อมินิแชนเนล และทิศทางการไหล เป็นตัวแปรในการศึกษาเพื่อ ประเมินสมรรถนะของระบบจัดการความร้อนแบตเตอรี่ โดยพิจารณาจากอุณหภูมิสูงสุดของแบตเตอรี่ (maximum battery temperature) และความแตกต่างของอุณหภูมิตั้งระหว่างเซลล์แบตเตอรี่ (temperature difference) การศึกษานี้มีการออกแบบ รูปแบบทิศทางการไหลของน้ำสองรูปแบบ ได้แก่ รูปแบบการไหลทิศทางเดียว (parallel-flow) และรูปแบบการไหลสลับทิศทาง (flow-alternate direction) ดังแสดงใน Figure 2 (b) และ (c) นอกจากนี้มีการแบ่งเงื่อนไขการจำลองออกเป็น 6 กรณีศึกษา ซึ่ง กรณีศึกษาที่ 1-3 เป็นรูปแบบการไหลทิศทางเดียว และกรณีศึกษาที่ 4-6 เป็นรูปแบบการไหลสลับทิศทาง โดยทั้งสองรูปแบบมี จำนวนชั้นของท่อมินิแชนเนล 2 3 และ 4 ชั้น ช่วงอัตราการไหลของน้ำ 0.24-0.51 L/min แสดงดัง Table 3

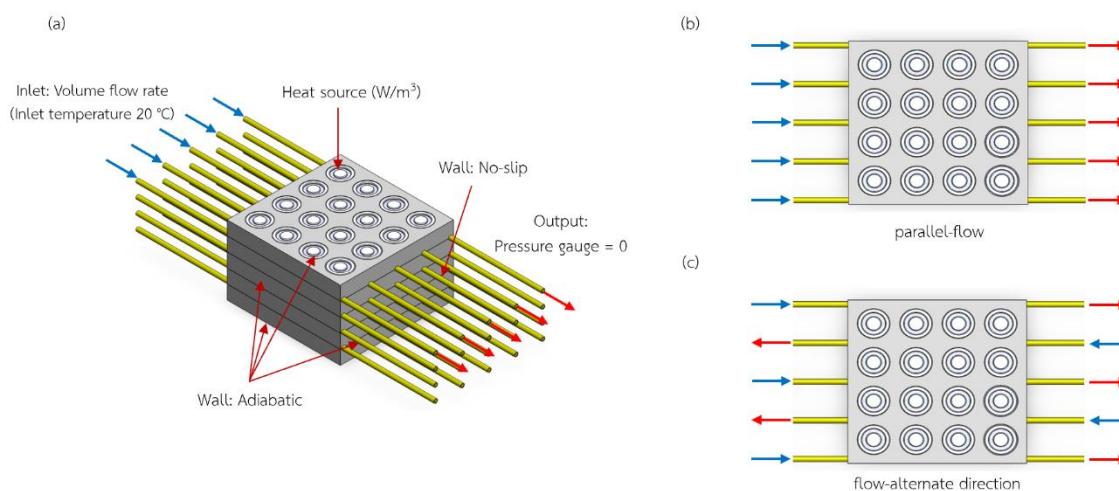


Figure 2 (a) Boundary conditions (b) Parallel-flow (c) Flow-alternate direction

2.5 วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข

งานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างแบบจำลองสามมิติและวิเคราะห์โดยใช้ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบและซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณเชิงตัวเลขทางวิศวกรรม เนื่องจากโครงสร้างกระจายความร้อนมีการหุ้มฉนวนบริเวณพื้นที่ผิวรอบนอกที่สัมผัสกับอากาศจึงกำหนดให้เป็นเงื่อนไขแบบฉนวนความร้อน (Adiabatic condition) ดังแสดงใน Figure 2 (a) แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแต่ละเซลล์กำหนดให้เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนคงที่ (Constant heat source) ที่ค่า 140394 W/m^3 การดำเนินการศึกษาเชิงการจำลองภายใต้อัตราการคายประจุที่ 4C ช่วงอัตราการไหลของน้ำ 0.24-0.51 L/min แบบจำลองการคำนวณนี้ได้ถูกสร้างเมช (Meshing) โดยการเลือกใช้เมชแบบหกเหลี่ยม (Hexahedral Meshes) สำหรับท่อมินิแชนเนลกำหนดเงื่อนไขขอบเขตทางเข้าเป็นอัตราการไหลเชิงปริมาตรคงที่ (Constant volumetric flow rate inlet) ที่อุณหภูมิของน้ำทางเข้า 20°C และทางออกเป็นแบบความดันคงที่ (pressure outlet) แบบจำลองนี้ใช้การวิเคราะห์การไหลแบบลามินาร์ (Laminar flow model) สำหรับอัตราการไหลที่แตกต่างกัน กำหนดตัวแก้สมการแบบความดันเป็นตัวแปรหลัก (pressure-based solver) ใช้อัลกอริทึมที่เชื่อมโยงค่าความดันและความเร็วของของไหล (SIMPLE algorithm) โดยคำนวณสมการโมเมนตัมและสมการพลังงานด้วยวิธีการแปลงสมการเชิงอนุพันธ์เป็นสมการพีชคณิตบนเมช (Second-order upwind discretization) ในการคำนวณแบบจำลองนี้เพื่อให้มั่นใจในผลลัพธ์และหลีกเลี่ยงอิทธิพลจากจำนวนเมช (Mesh number) ได้ทำการทดสอบความเป็นอิสระของเมช (Mesh independence) ด้วยจำนวนขององค์ประกอบ (Elements) ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสูงสุดของแบตเตอรี่ โดยใช้โครงสร้างกระจายความร้อนที่มีจำนวนท่อมินิแชนเนล 2 ชั้น ที่อัตราการไหล 0.24 L/min ซึ่งทดสอบจำนวนเมชตั้งแต่ 1,679,559 ถึง 6,992,171 องค์ประกอบ จากผลการจำลองพบว่า อุณหภูมิสูงสุดของแบตเตอรี่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเพิ่มจำนวนขององค์ประกอบ อย่างไรก็ตามดังแสดงใน Figure 3 อุณหภูมิสูงสุดของแบตเตอรี่มีการเปลี่ยนแปลงเพียง 0.4% เมื่อจำนวนเมชเพิ่มขึ้น

จาก 3,199,313 เป็น 6,992,171 องค์ประกอบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มจำนวนองค์ประกอบส่งผลต่ออุณหภูมิสูงสุดของแบตเตอรี่เพียงเล็กน้อย ดังนั้น ในการศึกษานี้จึงเลือกใช้เมชจำนวน 3,199,313 องค์ประกอบ

Table 3 Numerical analysis parameters

Case	Direction flow	Number of mini-channel layer	Hight of layer (mm)
1	parallel-flow	2	14
2	parallel-flow	3	17.5
3	parallel-flow	4	23.3
4	flow-alternate direction	2	14
5	flow-alternate direction	3	17.5
6	flow-alternate direction	4	23.3
Water flow rate (L/min)		0.24 0.33 0.42 and 0.51	
Temperature of inlet water (°C)		20	

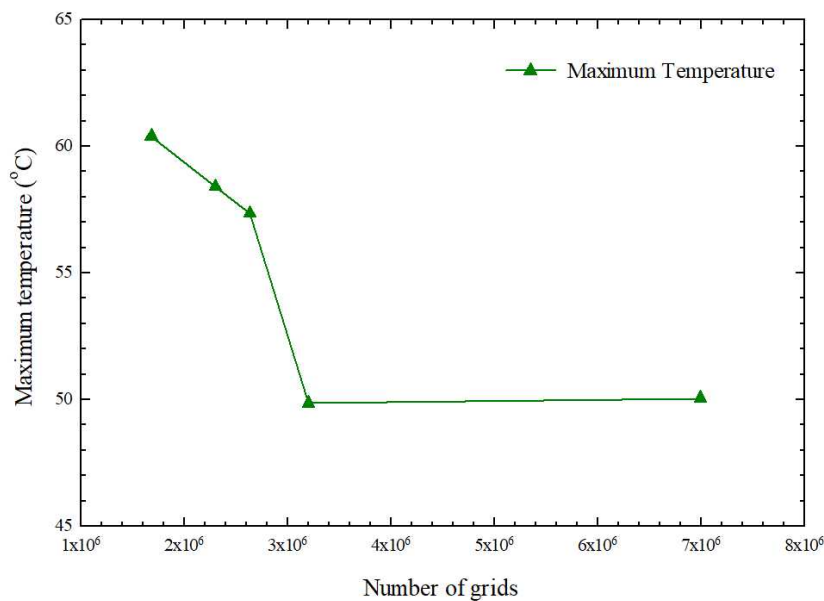


Figure 3 Grid independence

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากผลการคำนวณที่ได้นำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองการเกิดความร้อนของเซลล์แบตเตอรี่ประเภท 21700 [13] ในงานทดลองได้ดำเนินการระหว่างการคายประจุด้วยอัตรา 4C และอุณหภูมิแวดล้อม 35°C ผลจากการเปรียบเทียบผลการคำนวณและผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (absolute error) 2.6% แสดงดัง Figure 4

3.2 อิทธิพลของจำนวนชั้นของท่อมินิแชนเนล

ในงานวิจัยนี้ได้ทำวิเคราะห์อิทธิพลของโครงสร้างกระจายความร้อนที่มีจำนวนชั้นของท่อมินิแชนเนลแตกต่างกัน 3 กรณีศึกษา ได้แก่ 2 3 และ 4 ชั้นกับรูปแบบการไหลทิศทางเดียวและรูปแบบการไหลสลับทิศทางที่ส่งผลต่ออุณหภูมิสูงสุดของแบตเตอรี่และความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างเซลล์แบตเตอรี่ ภายใต้อัตราการคายประจุที่ 4C อุณหภูมิน้ำที่ทางเข้า 20°C จากผลการคำนวณซึ่งแสดงดัง Figure 5 พบว่า โครงสร้างกระจายความร้อนที่มีท่อมินิแชนเนล 4 ชั้น ในรูปแบบการไหลทิศทางเดียว มี

ค่าอุณหภูมิสูงสุดของแบตเตอรี่อยู่ที่ 23.5°C และความแตกต่างของอุณหภูมิจากเซลล์แบตเตอรี่ 0.88°C ภายใต้อัตราการไหล 0.24 L/min เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นเป็น 0.51 L/min ทำให้อุณหภูมิสูงสุดของแบตเตอรี่ลดลงเหลือ 22.27°C ขณะที่สามารถรักษาความแตกต่างของอุณหภูมิจากเซลล์แบตเตอรี่ได้ที่ 0.6°C การเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลในช่วง 0.24 ถึง 0.42 L/min ส่งผลให้ความแตกต่างของอุณหภูมิจากเซลล์แบตเตอรี่ลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อนภายในท่อ อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงของความแตกต่างของอุณหภูมิจากเซลล์แบตเตอรี่เริ่มคงที่ เมื่ออัตราการไหลเพิ่มเป็น 0.51 L/min เนื่องจากความสามารถในการระบายความร้อนของน้ำเข้าสู่ภาวะอิ่มตัว

ผลจากการคำนวณดังแสดงใน Figure 5 แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของทิศทางการไหลที่มีผลต่อความแตกต่างของอุณหภูมิจากเซลล์แบตเตอรี่อย่างชัดเจน โดยพบว่า โครงสร้างกระจายความร้อนที่มีท่อมินิแชนเนล 3 ชั้น ภายใต้อัตราการไหล 0.24 L/min สามารถควบคุมอุณหภูมิสูงสุดของแบตเตอรี่ได้ที่ 23.78°C และความแตกต่างของอุณหภูมิจากเซลล์แบตเตอรี่ 0.18°C ในขณะที่อุณหภูมิสูงสุดของแบตเตอรี่มีค่า 23.85°C และความแตกต่างอุณหภูมิจากเซลล์แบตเตอรี่เท่ากับ 0.83°C สำหรับรูปแบบการไหลทิศทางเดียว ซึ่งแสดงให้เห็นว่ารูปแบบการไหลสลับทิศทางสามารถลดความแตกต่างของอุณหภูมิได้ถึง 0.65°C และสามารถรักษาความสม่ำเสมอของอุณหภูมิได้อย่างดี เนื่องจากน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำเข้าไปในโครงสร้างกระจายความร้อนทั้งด้านหน้าและด้านหลัง ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนออกจากแบตเตอรี่อย่างสม่ำเสมอทั้งด้านหน้าและด้านหลัง

การเพิ่มจำนวนชั้นของมินิแชนเนลส่งผลให้อุณหภูมิสูงสุดของแบตเตอรี่ลดลงเพียงเล็กน้อย เนื่องจากการเพิ่มจำนวนชั้นของมินิแชนเนลทำให้อัตราการไหลในแต่ละท่อมินิแชนเนลลดลงส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อนลดลง อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของจำนวนชั้นของท่อมินิแชนเนลส่งผลให้ความแตกต่างของอุณหภูมิจากเซลล์แบตเตอรี่เปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด Figure 5 แสดงให้เห็นว่า ที่อัตราการไหล 0.24 L/min การเพิ่มขึ้นของจำนวนชั้นของท่อมินิแชนเนลจาก 2 ชั้น เป็น 4 ชั้น ภายใต้รูปแบบการไหลทิศทางเดียวทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิจากเซลล์แบตเตอรี่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มจำนวนชั้นของท่อมินิแชนเนลทำให้อุณหภูมิของเซลล์แบตเตอรี่บริเวณใกล้ทางเข้าของน้ำมีอุณหภูมิต่ำลงจากการระบายความร้อนที่มากเกินไป เมื่อเพิ่มอัตราการไหลเป็น 0.51 L/min การเพิ่มจำนวนชั้นของท่อมินิแชนเนลส่งผลต่อความแตกต่างของอุณหภูมิจากเซลล์แบตเตอรี่น้อยลง ซึ่งผลมาจากศักยภาพการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้น ในขณะเดียวกัน การเพิ่มจำนวนชั้นของท่อมินิแชนเนลจาก 2 ชั้น เป็น 3 ชั้น ภายใต้รูปแบบการไหลสลับทิศทางช่วยให้การระบายความร้อนของโครงสร้างกระจายความร้อนมีความสม่ำเสมอมากขึ้นส่งผลให้ความแตกต่างของอุณหภูมิจากเซลล์แบตเตอรี่ลดลงอย่างเห็นได้ชัด แต่เมื่อเพิ่มจำนวนชั้นของท่อมินิแชนเนลขึ้นเป็น 4 ชั้น ทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิจากเซลล์แบตเตอรี่เพิ่มขึ้น เนื่องจกอัตราการไหลของจำนวนท่อมินิแชนเนล 4 ชั้นลดลง ทำให้การระบายความร้อนของเซลล์แบตเตอรี่ในตำแหน่งตรงกลางของโครงสร้างกระจายความร้อนลดลงส่งผลให้อุณหภูมิของเซลล์แบตเตอรี่เพิ่มขึ้น

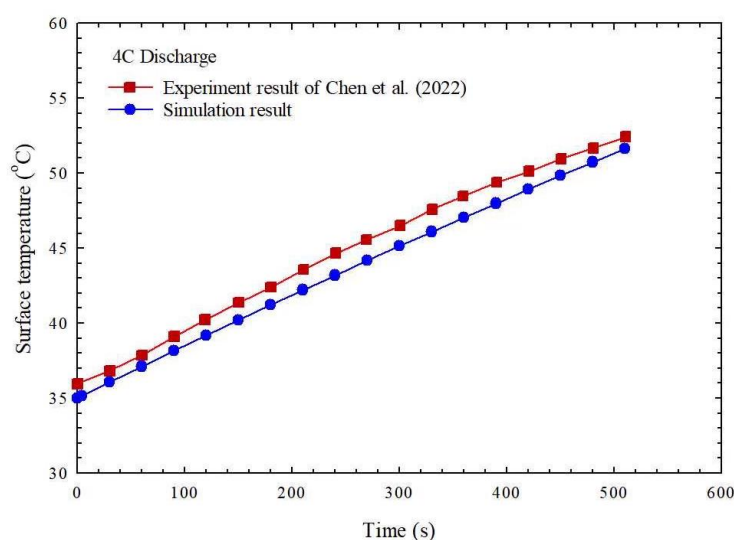


Figure 4 Comparison of the numerical simulation results with experimental data

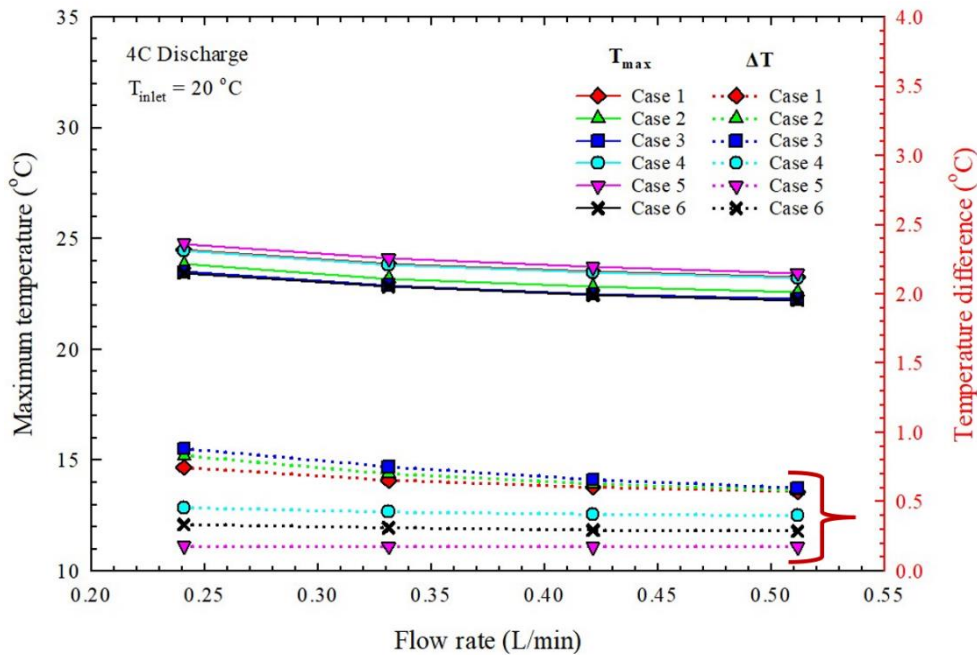


Figure 5 Effect of coolant flow rate on maximum surface temperature and temperature difference of battery

4. สรุป

ระบบจัดการความร้อนแบตเตอรี่ด้วยโครงสร้างกระจายความร้อนสำหรับแบตเตอรี่ทรงกระบอกลิเทียมไอออน 21700 ที่มีการระบายความร้อนด้วยของเหลวผ่านท่อมินิแชนเนลหลายชั้น จากผลการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าสามารถควบคุมอุณหภูมิสูงสุดของแบตเตอรี่ให้ต่ำกว่า 40°C และรักษาความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างเซลล์แบตเตอรี่ให้ต่ำกว่า 5°C ได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลส่งผลดีต่อการพาความร้อนของน้ำ เมื่ออัตราการไหลเพิ่มจาก 0.24 L/min เป็น 0.51 L/min ทำให้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสูงสุดและความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างเซลล์แบตเตอรี่ลดลง นอกจากนี้ การเพิ่มจำนวนชั้นของท่อมินิแชนเนลส่งผลให้อุณหภูมิสูงสุดของแบตเตอรี่ลดลงและความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างเซลล์แบตเตอรี่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ และรูปแบบทิศทางการไหลส่งผลต่อความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างเซลล์แบตเตอรี่อย่างเห็นได้ชัด ภายใต้จำนวนชั้นของท่อมินิแชนเนล 3 ชั้น อัตราการไหล 0.24 L/min ในรูปแบบการไหลสลับทิศทางการไหลมีความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างเซลล์แบตเตอรี่น้อยกว่ารูปแบบการไหลทิศทางเดียวมีค่าอยู่ที่ 0.65°C

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร และ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับการสนับสนุนในการทำงานของงานวิจัยนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] BloombergNEF. 2568. Electric Vehicle Outlook 2025. เข้าถึงได้จาก: เว็บไซต์ <https://about.bnef.com/insights/clean-transport/electric-vehicle-outlook/#key-numbers> (เข้าถึงเมื่อ 28 กุมภาพันธ์ 2569).
- [2] Zubi, G., Dufo-López, R., Carvalho, M., & Pasaoglu, G. 2018. The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives. *Renewable and sustainable energy reviews*, 89, 292-308.
- [3] Gasmelseed, A., Ismael, M. A., Said, M. A., & Ahmad, F. 2024. Numerical investigation and optimization of liquid battery thermal management system considering nanofluids, structural, and flow modifications under high discharge cycles. *Case Studies in Thermal Engineering*, 64, 105573.

-
- [4] Rao, Z., Qian, Z., Kuang, Y., & Li, Y. 2017. Thermal performance of liquid cooling based thermal management system for cylindrical lithium-ion battery module with variable contact surface. *Applied Thermal Engineering*, 123, 1514-1522.
- [5] Chen, D., Jiang, J., Kim, G. H., Yang, C., & Pesaran, A. 2016. Comparison of different cooling methods for lithium ion battery cells. *Applied thermal engineering*, 94, 846-854.
- [6] Liu, F., Sun, Y., Yang, Q., Qin, W., Cheng, X., & Zeng, J. 2025. Optimization of three-layer staggered liquid cooling system for high-rate charging of large cylindrical battery module in electric vehicles. *Applied Thermal Engineering*, 128585.
- [7] Kim, B. R., Nguyen, T. N., & Park, C. W. 2023. Cooling performance of thermal management system for lithium-ion batteries using two types of cold plate: Experiment and MATLAB/Simulink-Simscape simulation. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 145, 106816.
- [8] Nema, P. K., Muthukumar, P., & Thangavel, R. 2026. Electrochemical-thermal coupled modeling of a serpentine-shaped liquid cooling channel for lithium-ion battery packs with high discharge rates. *International Journal of Thermal Sciences*, 220, 110299.
- [9] Sourirajan, L., Keçebaş, A., Baskar, S., Vinayagam, G., Subramanian, M., Arputharaj, B. S., ... & Saleel, C. A. 2025. Multi-parametric thermal and fluidic optimization of serpentine-cooled battery modules for electric vehicles: Experimental and CFD insights. *Applied Thermal Engineering*, 129418.
- [10] An, Z., Zhang, J., Gao, W., Liu, H., & Gao, Z. 2024. Lightweight hybrid lithium-ion battery thermal management system based on 3D-printed scaffold. *Journal of Energy Storage*, 78, 110141.
- [11] Sadeh, M., Tousi, M., Sarchami, A., Sanaie, R., Kiani, M., Ashjaee, M., & Houshfar, E. 2024. A novel hybrid liquid-cooled battery thermal management system for electric vehicles in highway fuel-economy condition. *Journal of Energy Storage*, 86, 111195.
- [12] Zou, Z., Xie, J., Luo, Y., Zhang, G., & Yang, X. 2024. Numerical study on a novel thermal management system coupling immersion cooling with cooling tubes for power battery modules. *Journal of Energy Storage*, 83, 110634.
- [13] Chen, X., Zhou, F., Yang, W., Gui, Y., & Zhang, Y. 2022. A hybrid thermal management system with liquid cooling and composite phase change materials containing various expanded graphite contents for cylindrical lithium-ion batteries. *Applied Thermal Engineering*, 200, 117702.
- [14] Bernardi, D., Pawlikowski, E., & Newman, J. 1985. A general energy balance for battery systems. *Journal of the electrochemical society*, 132(1), 5-12.

อิทธิพลของหน้าตัดไม้ต่อสมรรถนะของแบบจำลองสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้
สำหรับการทำนายความชื้นของไม้ยางพารา

Effect of Wood Section on the Performance of Near-Infrared Spectroscopy Models
for Moisture Content Prediction in Rubberwood

นันทนัช ประดิษฐ์¹ วรวรรธน์ นกน้อย¹ พชรพร เชียงเงิน¹ และ สิรินาถ น้อยพิทักษ์^{1,*}

Nanthanat Pradit¹, Worawat Noknoi¹, Pacharaphon Chiangngoen¹ and Sirinad Noypitak^{1,*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140 ประเทศไทย

¹Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University Kamphaeng Saen
Campus, Nakhon Pathom Province, 73140, Thailand

*Corresponding author: Sirinad Noypitak, e-mail address: fengsn@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของหน้าตัดไม้ต่อสมรรถนะของแบบจำลองสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (Near-Infrared Spectroscopy: NIRS) สำหรับการทำนายค่าความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูป โดยเปรียบเทียบการวัดสเปกตรัมบนหน้าตัดขวาง (Cross section) และหน้าตัดแนวสัมผัส (Tangential section) และพัฒนาแบบจำลองการทำนายด้วยวิธี Partial Least Squares Regression (PLSR) ผลการศึกษาพบว่าพื้นผิวหน้าตัดขวางของไม้ยางพาราแปรรูปให้ประสิทธิภาพในการทำนายสูงกว่าพื้นผิวหน้าตัดไม้แนวสัมผัส โดยการปรับสเปกตรัมด้วยวิธี Multiplicative Scatter Correction (MSC) ให้ผลการทำนายดีที่สุด ซึ่งให้ค่า R_c^2 เท่ากับ 0.944, RMSEC เท่ากับ 1.712% db, R_p^2 เท่ากับ 0.973, RMSEP เท่ากับ 1.572% db และค่า RPD เท่ากับ 7.06 ขณะที่สเปกตรัมของพื้นผิวหน้าตัดแนวสัมผัส เมื่อปรับสเปกตรัมด้วยวิธี Smoothing ให้ผลการทำนายดีที่สุด โดยมีค่า R_c^2 เท่ากับ 0.951, RMSEC เท่ากับ 2.140% db, R_p^2 เท่ากับ 0.935, RMSEP เท่ากับ 2.223% db และค่า RPD เท่ากับ 4.30 ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าลักษณะหน้าตัดไม้มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของแบบจำลอง NIRS จากผลการวิจัยนี้จึงแนะนำให้ผู้ประกอบการแปรรูปไม้ยางพาราในการใช้เทคนิค NIRS กับหน้าตัดขวางในการทำนายความชื้นในไม้ยางพาราแปรรูปเพื่อควบคุมคุณภาพและสนับสนุนมาตรฐานอุตสาหกรรมไม้ยางพาราเพื่อการส่งออก

คำสำคัญ: ความชื้น, ไม้ยางพาราแปรรูป, สเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้, หน้าตัดขวาง, หน้าตัดแนวสัมผัส

Abstract

This study aimed to investigate the effect of wood section on the performance of near-infrared spectroscopy (NIRS) models for predicting the moisture content of processed rubberwood. Spectral measurements were obtained from the cross section and tangential section surfaces, and prediction models were developed using Partial Least Squares Regression (PLSR). The results showed that the cross-section surface of processed rubberwood provided higher prediction performance than the tangential-section surface. The best prediction performance for the cross section was obtained using Multiplicative Scatter Correction (MSC), yielding $R_c^2 = 0.944$, RMSEC = 1.712% db, $R_p^2 = 0.973$, RMSEP = 1.572% db, and RPD = 7.06. For the tangential section, the best prediction performance was obtained using the smoothing method, with $R_c^2 = 0.951$, RMSEC = 2.140% db, $R_p^2 = 0.935$, RMSEP = 2.223% db, and RPD = 4.30. These results indicate that wood section significantly influences the performance of NIRS prediction models. Therefore, the use of NIRS measurements on the cross section is recommended for predicting the moisture content of processed rubberwood to support quality control and industrial standards in rubberwood processing for export.

Keywords: Moisture content, Rubberwood, Near-infrared spectroscopy, Cross section, Tangential section

1. บทนำ

ยางพารา (*Hevea brasiliensis* Mull. Arg.) เป็นพืชเศรษฐกิจสำคัญของประเทศไทย โดยในปี พ.ศ. 2566 ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกยางพารามากกว่า 24 ล้านไร่ [1] ไม้ยางพาราเป็นผลพลอยได้จากการโค่นต้นยางที่มีอายุมากมีผลผลิตน้ำยางลดลง [2] โดยในปี พ.ศ. 2567 มูลค่าการส่งออกไม้ยางพาราแปรรูปสูงกว่า 1 แสนล้านบาท [3] หลังการแปรรูป ไม้ยางพาราจะต้องผ่านการจำแนกเกรดและควบคุมคุณภาพก่อนการส่งออก โดยหนึ่งในปัจจัยสำคัญคือค่าความชื้นของเนื้อไม้ ซึ่งต้องไม่เกินร้อยละ 12 มาตรฐานแห้ง (dry basis) ตามข้อกำหนดของมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม [4] ปัจจุบันการตรวจสอบความชื้นในอุตสาหกรรมไม้ยางพารายังคงใช้เครื่องวัดความชื้นแบบเข็มตอก (probe meter) ซึ่งอาจทำให้ชิ้นไม้เสียหาย หรือเครื่องวัดความชื้นแบบดิจิทัล (digital moisture meter) ที่ต้องกำหนดค่าความถ่วงจำเพาะของไม้ก่อนใช้งาน ทำให้กระบวนการวัดมีความซับซ้อนและอาจเกิดความคลาดเคลื่อนของผลการวัด [5]

เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (Near-Infrared Spectroscopy: NIRS) ได้รับการประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในการประเมินสมบัติทางเคมีและกายภาพของไม้โดยไม่ทำลายตัวอย่าง เช่น คาร์โบไฮเดรต ลิกนิน และความชื้น เนื่องจากการดูดกลืนพลังงานแสงในย่านอินฟราเรดย่านใกล้มีความสัมพันธ์กับการสั่นของพันธะเคมีในระดับโมเลกุล [6] ทำให้สามารถประเมินองค์ประกอบของวัสดุเกษตรได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ เช่น การทำนายความชื้นในไม้สนสด [7] และการทำนายความชื้นของแผ่นวีเนียร์ [8] และวรรณรัตน์ [5] ได้ใช้เทคนิค NIRS ในการตรวจสอบความชื้นไม้ยางพาราแปรรูปอย่างแม่นยำ $R_p = 0.96$, $RMSEP = 4.63\%$ db และ $RPD = 3.7$ อย่างไรก็ตามงานวิจัยของ Defo et al. [9] ได้ทำการศึกษาการใช้เทคนิค NIRS ร่วมกับวิธี PLSR เพื่อทำนายปริมาณความชื้นในไม้โอ๊คแดงสดที่มีหน้าตัดต่างกัน ผลการทำนายพบว่าโมเดลที่สร้างจากไม้หน้าตัดขวาง (Cross section) ให้ผลการทำนายสูงสุดเมื่อเทียบกับโมเดลหน้าตัดแนวรัศมี (Radial section) และหน้าตัดแนวสัมผัส (Tangential section) โดยมีค่า $R_p = 0.9$, 0.8 และ 0.7 ตามลำดับ ซึ่งเป็นสิ่งที่น่าสนใจว่าการใช้หน้าตัดไม้ที่แตกต่างกันด้วยเทคนิค NIRS อาจส่งผลกับความแม่นยำของแบบจำลองการทำนายความชื้นไม้ยางพารา

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของหน้าตัดไม้ต่อประสิทธิภาพของแบบจำลองการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปโดยใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ เพื่อสนับสนุนการประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ยางพาราอบแห้งสำหรับการส่งออกของประเทศไทย

2. วิธีการศึกษา

2.1 การเตรียมตัวอย่างไม้ยางพารา

ตัวอย่างไม้ยางพาราแปรรูปเกรด AB ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไม้ยางพาราแปรรูป. มอก. 2423-2567 [4] และเกรด C ตามการปฏิบัติงานจริงของโรงเลื่อย ถูกเก็บจากโรงเลื่อยในตำบลสองสลึง อำเภอแกลง จังหวัดระยอง ซึ่งผลิตในช่วงเดือนกันยายน-ตุลาคม พ.ศ. 2565 เพื่อใช้เป็นชุดข้อมูลสำหรับการสร้างสมการทำนาย (calibration set) จำนวน 42 ตัวอย่าง โดยได้ข้อมูลค่าความชื้นทั้งหมด 462 ข้อมูล และจากโรงเลื่อยในตำบลวังหัว อำเภอแกลง จังหวัดระยอง ซึ่งผลิตในช่วงเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2568 เพื่อใช้เป็นชุดข้อมูลสำหรับทดสอบสมการ (prediction set) จำนวน 13 ตัวอย่าง โดยได้ข้อมูลค่าความชื้นทั้งหมด 137 ข้อมูล

ไม้ยางพาราที่ได้จากกระบวนการเลื่อยมีลักษณะหน้าตัดหลัก ได้แก่ หน้าตัดแนวสัมผัส (Tangential section) และหน้าตัดขวาง (Cross section) หลังผ่านกระบวนการอบแห้งจนมีค่าความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 12 มาตรฐานแห้ง (dry basis) ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) [4] ตัวอย่างทั้งหมดถูกนำมายังห้องปฏิบัติการและตัดเป็นชิ้นขนาด $1 \times 3 \times 1$ in (หนา \times ยาว \times กว้าง) จากนั้นขีดแต่งพื้นผิวทุกด้านให้เรียบและสม่ำเสมอ ก่อนดำเนินการปรับค่าความชื้นเพื่อให้หลากหลายที่ใช้ในการสร้างและทดสอบสมการทำนาย โดยมีขั้นตอนดังนี้

1) ตัวอย่างไม้ยางพาราถูกปรับเพิ่มความชื้นโดยตัดแปลงจากวิธีของ Kobori et al. [10] เพื่อจำลองสภาวะการเก็บรักษาไม้แปรรูปที่อาจสัมผัสน้ำฝน ตัวอย่างถูกแช่น้ำเป็นเวลา 24 hr จากนั้นพักในสภาวะควบคุมที่อุณหภูมิ 25°C เป็นเวลา 15 min เพื่อให้ความชื้นกระจายตัวเข้าสู่สภาวะสมดุลก่อนเริ่มการทดลอง ตัวอย่างจำนวน 27 ตัวอย่าง (calibration set 21 ตัวอย่าง และ prediction set 6 ตัวอย่าง) ถูกอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน (FD240, BINDER, Tuttlingen, Germany) ที่อุณหภูมิ 40°C โดยแบ่งช่วงเวลารอบที่ 0 hr จากนั้นเป็นทุก 3 hr จำนวน 8 ช่วงเวลา อดต่อทุก 6 hr จำนวน 4 ช่วงเวลา อดต่อทุก 12 hr จำนวน 2 ช่วงเวลา และอดต่อทุก 24 hr จำนวน 2 ช่วงเวลา รวมทั้งสิ้น 17 ช่วงเวลา หลังการอบในแต่ละช่วงเวลา ตัวอย่างถูกบรรจุในถุง

ชิปล็อกและพักในสภาวะอุณหภูมิคงที่ (25°C, ความชื้นสัมพัทธ์ 50%) เป็นเวลา 15 min เพื่อลดความผันผวนของค่าความชื้นก่อนการสแกนด้วยเครื่อง NIRS โดยไม้ยางพาราที่มีค่าความชื้นในช่วง 6.33-44.00% db

2) การจำลองสภาวะการเก็บรักษาในโกดัง โดยตัวอย่างไม้ยางพาราจำนวน 28 ตัวอย่าง (calibration 21 ตัวอย่าง และ prediction set 7 ตัวอย่าง) ถูกใช้เพื่อจำลองสภาวะการเก็บรักษาในโกดังภายใต้สภาพอากาศของประเทศไทย โดยแบ่งเป็น 5 ช่วงเวลา ตัวอย่างถูกทำให้แห้งสนิท (0% db) ด้วยการอบในตู้อบลมร้อน (FD240, BINDER, Tuttlingen, Germany) ที่อุณหภูมิ $103 \pm 2^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 72 hr จากนั้นนำตัวอย่างไปวางในสภาวะแวดล้อมที่มีอุณหภูมิ 27-32°C และความชื้นสัมพัทธ์ 58-86% เพื่อให้เกิดการดูดซับความชื้นใหม่ โดยการปรับเพิ่มความชื้นจำนวน 5 รอบ เป็นระยะเวลา 0.5, 3, 6, 9 และ 12 hr ตามลำดับ ส่งผลให้ไม้มีค่าความชื้นในช่วง 0.14-7.26% db

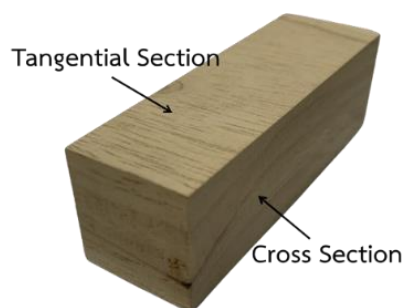
3) การชั่งน้ำหนักเพื่อกำหนดค่าความชื้นอ้างอิง โดยตัวอย่างทั้งหมดถูกชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งดิจิทัลความละเอียด 4 ตำแหน่ง (Analytical Balance, Sartorius QUINTIX224-1S, Sartorius Lab Instruments GmbH & Co. KG, Göttingen, Germany) โดยชั่งน้ำหนักก่อนการสแกน (W_1) ด้วยเครื่อง NIRS และชั่งน้ำหนักหลังการสแกน (W_2) เพื่อใช้ในการคำนวณค่าความชื้นอ้างอิง

2.2 การวัดค่าสเปกตรการดูดกลืนแสงของไม้ยางพาราแปรรูป

สเปกตรการดูดกลืนแสงในย่านอินฟราเรดย่านใกล้ของตัวอย่างไม้ยางพาราแปรรูปถูกวัดด้วยเครื่อง Fourier Transform Near-Infrared Spectrometer (FT-NIR MPA, Bruker Co., Karlsruhe, Germany) ดัง Figure 1(A) ในช่วงเลขคลื่น 12,489-3,594 cm^{-1} (800-2700 nm) ด้วยโหมดการวัดแบบสะท้อนกลับ (reflectance mode) ความละเอียด 32 cm^{-1} และ scan average 32 ครั้ง สำหรับตัวอย่างไม้ยางพาราแต่ละชิ้น กำหนดตำแหน่งการวัดสเปกตร 4 ตำแหน่ง บนพื้นผิวหน้าตัดด้านขวาง (Cross section) และหน้าตัดแนวสัมผัส (Tangential section) ซึ่งเป็นพื้นผิวที่เกิดจากกระบวนการแปรรูปด้วยการเลื่อยตามสภาพการใช้งานจริง ดัง Figure 1(B) โดยแต่ละตำแหน่งอยู่ห่างจากขอบไม้ด้านละ 1.5 in และทำการวัดซ้ำตำแหน่งละ 2 ครั้ง รวมเป็น 8 สเปกตรต่อตัวอย่าง การกำหนดตำแหน่งและจำนวนการวัดอ้างอิงตามแนวทางของ Defo et al. [9]



(A)



(B)

Figure 1 Experimental setup and rubberwood samples used in this study: (A) FT-NIR spectrometer, (B) tangential and cross sections of rubberwood

2.3 การหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของตัวอย่างไม้ยางพาราแปรรูปด้วยวิธีมาตรฐาน ASTM D143

ภายหลังการปรับเพิ่มและลดความชื้นของตัวอย่างไม้ยางพาราแปรรูปภายใต้สภาวะควบคุมในแต่ละช่วง ตัวอย่างถูกนำมาหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้น (moisture content; MC) บนพื้นฐานน้ำหนักแห้ง (dry basis; db) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D143 [11] โดยการชั่งน้ำหนักตัวอย่างก่อนการสแกนด้วยเครื่อง NIRS (W_1) และหลังการสแกน (W_2) จากนั้นคำนวณค่าน้ำหนักเฉลี่ยก่อนการอบ (W_w) ตามสมการที่ (1) หลังจากนั้น ตัวอย่างถูกนำไปอบในตู้อบลมร้อน (FD240, BINDER, Tuttlingen, Germany) ที่อุณหภูมิ $103 \pm 2^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 72 hr หรือจนกระทั่งน้ำหนักคงที่ แล้วนำออกจากตู้อบและชั่งน้ำหนักทันทีเพื่อให้ได้น้ำหนักมวลแห้ง (W_d) โดยใช้เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัลความละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Analytical Balance, Sartorius QUINTIX224-1S,

Sartorius Lab Instruments GmbH & Co. KG, Göttingen, Germany) ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของตัวอย่างไม้ยางพาราแปรรูปคำนวณจากอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักน้ำที่สูญเสียไปและน้ำหนักมวลแห้ง ตามสมการที่ (2)

$$W_w = \frac{W_1 + W_2}{2} \quad (1)$$

$$MC (\% \text{ db}) = \left[\frac{W_w - W_d}{W_d} \right] \times 100 \quad (2)$$

- เมื่อ W_1 = น้ำหนักก่อนการสแกนด้วยเครื่อง NIRS (g)
 W_2 = น้ำหนักหลังการสแกนด้วยเครื่อง NIRS (g)
 W_w = น้ำหนักเฉลี่ยของไม้เปียก (g)
 W_d = น้ำหนักของไม้ที่หลังอบแห้ง (g)
 MC = ปริมาณความชื้นของตัวอย่าง (% dry basis)

2.4 การวิเคราะห์ทางสถิติ

2.4.1 การตรวจสอบข้อมูลผิดปกติของค่าอ้างอิง

ข้อมูลเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่ใช้เป็นค่าอ้างอิงถูกตรวจสอบความผิดปกติของข้อมูล (outlier) โดยใช้การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal Component Analysis; PCA) กับข้อมูลสเปกตรัม ซึ่งไม่พบข้อมูลผิดปกติ ขณะที่การตรวจสอบข้อมูลผิดปกติของค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของตัวอย่างไม้ยางพาราแปรรูปดำเนินการโดยพิจารณาค่า Standard score (Z-score; Z) ตามสมการที่ (3) โดยค่าที่มากกว่า 3 หรือน้อยกว่า -3 ถูกจัดเป็นข้อมูลผิดปกติและถูกตัดออกจากชุดข้อมูลตามเกณฑ์ของ Meier et al. [12]

$$Z = \frac{MC_i - \overline{MC}}{SD} \quad (3)$$

- เมื่อ Z_i = ค่ามาตรฐาน (Z-score) ของเปอร์เซ็นต์ความชื้นของตัวอย่างที่ i
 MC_i = ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของตัวอย่างที่ i
 \overline{MC} = ค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความชื้นของตัวอย่างทั้งหมด
 SD = ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลเปอร์เซ็นต์ความชื้นทั้งหมด

2.4.2 การวิเคราะห์สร้างสมการทำนายความชื้น

สเปกตรารการดูดกลืนแสงของตัวอย่างไม้ยางพาราถูกนำมาวิเคราะห์และปรับแต่งทางคณิตศาสตร์ (spectral preprocessing) ได้แก่ การทำ Smoothing แบบ Savitzky Golay, First Derivative แบบ Savitzky Golay, Second Derivative แบบ Savitzky Golay, First derivative, Second derivative, Multiplicative Scatter Correction (MSC) และ Standard Normal Variate (SNV) เพื่อลดอิทธิพลของสัญญาณรบกวนและการกระเจิงของแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ชุดข้อมูลทั้งหมดถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มข้อมูลสำหรับสร้างสมการทำนาย (calibration set) จำนวน 450 ตัวอย่าง และกลุ่มข้อมูลสำหรับทดสอบสมการทำนาย (prediction set) จำนวน 133 ตัวอย่าง จากนั้นสร้างสมการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นโดยใช้วิธี Partial Least Squares Regression (PLSR) แบบ Leave-one-out full cross-validation ด้วยโปรแกรม The Unscrambler 9.8 (CAMO, USA) โดยกำหนดให้สเปกตรารการดูดกลืนแสงเป็นตัวแปรอิสระ และค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่ได้จากวิธีมาตรฐานเป็นตัวแปรตาม ประสิทธิภาพของสมการทำนายถูกประเมินจากค่า Coefficient of determination of calibration (R_c^2) ที่มีค่าสูง และค่า Root mean square error of calibration (RMSEC) ที่มีค่าต่ำสำหรับชุดสร้างสมการ จากนั้นนำสมการที่ได้ไปทดสอบด้วยชุด

ข้อมูลทดสอบและประเมินสมรรถนะของสมการจากค่า Coefficient of determination of prediction (R_p^2), ค่า Root mean square error of prediction (RMSEP) และค่า Residual prediction deviation (RPD) โดยค่า RPD คำนวณจากอัตราส่วนระหว่างค่า Standard deviation (SD) ของกลุ่มข้อมูลทดสอบต่อค่า Standard error of prediction (SEP) ซึ่งจะใช้เป็นตัวชี้วัดในการตรวจสอบความแม่นยำในการทำนายของสมการหากค่า RPD อยู่ในช่วง 0.0-2.3 บ่งชี้ความสามารถในการทำนายที่ต่ำมาก ไม่แนะนำให้ใช้งาน ค่า 2.4-3.0 บ่งชี้ความถูกต้องในการทำนายที่ต่ำ ค่า 3.1-4.9 แสดงความถูกต้องในการทำนายที่ระดับปานกลาง ค่า 5.0-6.4 แสดงถึงความถูกต้องในการทำนายที่ดี ค่า 6.5-8.0 แสดงความถูกต้องในการทำนายที่ดีมาก และค่า RPD มากกว่า 8.0 แสดงถึงความถูกต้องในการทำนายที่ยอดเยี่ยม [13] แล้วทำการเปรียบเทียบแบบจำลองในการทำนายความชื้นที่สร้างจากหน้าตัดขวาง (Cross section) และหน้าตัดแนวสัมผัส (Tangential section)

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 ผลการตรวจสอบข้อมูลผิดปกติของค่าอ้างอิงความชื้นไม้ยางพาราแปรรูป

การตรวจสอบความผิดปกติของสเปกตรากการดูดกลืนแสงจากเครื่อง Fourier Transform Near-Infrared Spectrometer (FT-NIR) ด้วยวิธีวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal Component Analysis; PCA) ไม่พบข้อมูลสเปกตรามีความผิดปกติ ขณะที่การตรวจสอบข้อมูลค่าอ้างอิงของเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปด้วยวิธี Z-score โดยกำหนดเกณฑ์ที่ต่ำกว่า -3 หรือสูงกว่า 3 พบข้อมูลผิดปกติจำนวน 16 ตัวอย่าง จากตัวอย่างทั้งหมด 599 ตัวอย่าง เมื่อคัดข้อมูลดังกล่าวออกเหลือตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ทั้งหมด 583 ตัวอย่าง

3.2 ผลวิเคราะห์ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูป

ผลการวิเคราะห์ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูปเพื่อเป็นค่าอ้างอิงตามวิธีมาตรฐาน ASTM (2000) โดยข้อมูลเปอร์เซ็นต์ความชื้นของตัวอย่างไม้ยางพาราแปรรูปมี 2 กลุ่ม โดยกลุ่ม Calibration set ได้จากโรงเลื่อยใน ต.สองสลึง อ.แกลง จ.ระยอง (ผลิตช่วง ก.ย. - ต.ค. 2565) และกลุ่ม Prediction set ได้จากโรงเลื่อย ต.วังหว้า อ.แกลง จ.ระยอง (ผลิตช่วง มิ.ย. 2568) โดยได้ค่าสถิติพื้นฐานของเปอร์เซ็นต์ความชื้น ได้แก่ ต่ำสุด สูงสุด ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ดัง Table 1

Table 1 Moisture content statistics of rubberwood samples in calibration and prediction sets.

Sample sets	Number of samples	Moisture Content (% db)			
		Minimum	Maximum	Average	Standard deviation
Calibration set	450	0.14	44.00	10.67	8.68
Prediction set	133	1.16	1.23	11.60	9.57
Total	583	0.14	44.00	10.89	8.89

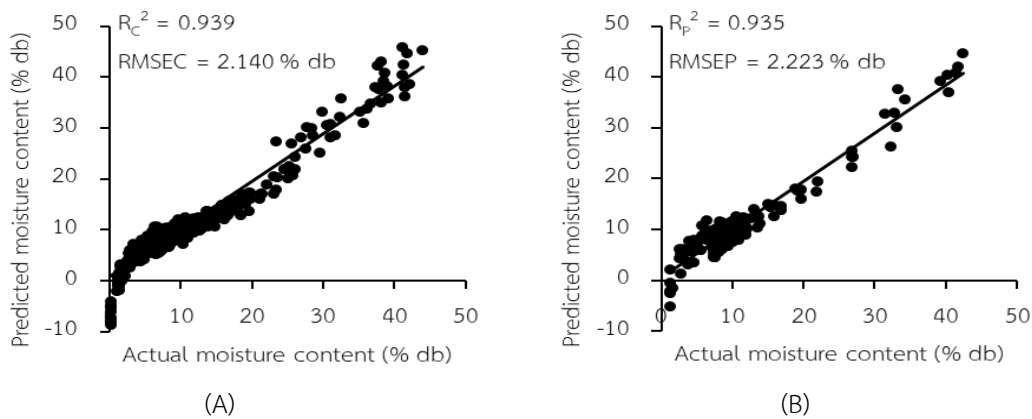
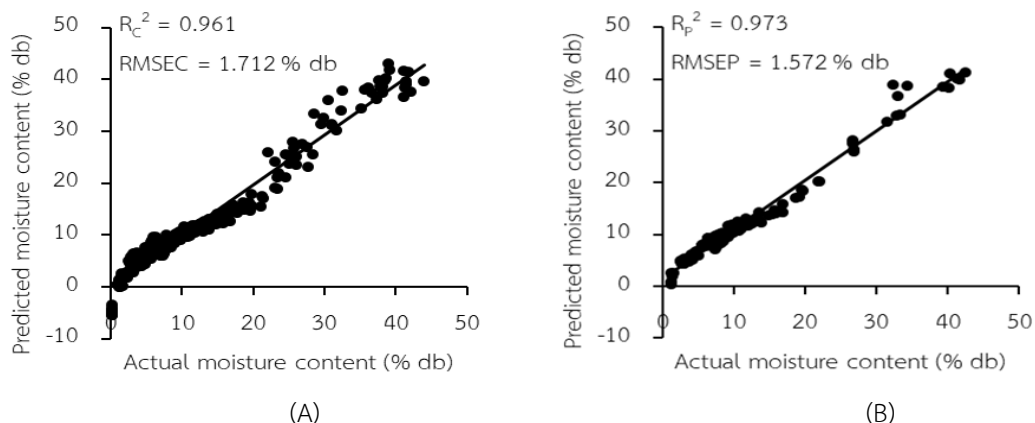
3.3 สเปกตรากการดูดกลืนแสงของไม้ยางพาราแปรรูป

สเปกตรากการดูดกลืนแสงบนหน้าตัดแนวสัมผัส (Tangential section) ของไม้ยางพาราแปรรูปที่วัดด้วยเทคนิค Near-Infrared Spectroscopy (NIRS) ดัง Figure 2(A) พบพิกัดสำคัญที่ 10,213 cm^{-1} และ 8,315 cm^{-1} สัมพันธ์กับการสั่นของพันธะ O-H ของน้ำ [14] พิกัดที่ 6,896 cm^{-1} สัมพันธ์กับการสั่นของพันธะ O-H ของน้ำ [14] และแป้ง [15] พิกัดที่ 5,199 cm^{-1} สัมพันธ์กับการสั่นของพันธะ O-H ของน้ำ [14] พิกัดที่ 3,656 cm^{-1} สัมพันธ์กับการสั่นของพันธะ C-H [14] เมื่อปรับแต่งสเปกตรากการดูดกลืนแสงด้วยวิธีอนุพันธ์ลำดับที่สอง ดัง Figure 2(B) ทำให้พิกัดเด่นชัดขึ้นและสามารถแยกสัญญาณที่ซ้อนทับได้ พบพิกัดเด่นที่ 8,655 cm^{-1} สัมพันธ์กับการสั่นของหมู่ CH_3 [15] พิกัดที่ 7,066 cm^{-1} สัมพันธ์กับการสั่นของหมู่ CH_2 [15] พิกัดที่ 5,615 cm^{-1} สัมพันธ์กับการสั่นของเซลลูโลส [14] พิกัดที่ 4,798 และ 4,397 cm^{-1} สัมพันธ์กับการสั่นของแป้ง [15] พิกัดที่ 4,019 cm^{-1} สัมพันธ์กับการสั่นของเซลลูโลส [14] สำหรับสเปกตรากการดูดกลืนแสงบนหน้าตัดขวาง (Cross section) ดัง Figure 2(C) พบพิกัดสำคัญที่ 10,213 และ 8,315 cm^{-1} สัมพันธ์กับการสั่นของพันธะ O-H ของน้ำ [14] พิกัดที่ 6,881 cm^{-1} สัมพันธ์กับการสั่นของพันธะ O-H ของน้ำ [14] พิกัดที่ 5,199 cm^{-1} สัมพันธ์กับการสั่นของพันธะ O-H ของน้ำ [14] พิกัดที่ 3,625 cm^{-1} สัมพันธ์กับการสั่นของพันธะ C-H [14] และเมื่อสเปกตรากการปรับแต่งด้วยอนุพันธ์ลำดับที่สอง ดัง Figure 2(D) แสดงพิกัดเด่นชัดและแยกสัญญาณที่ซ้อนทับ พบพิกัดเด่นที่ 8,655 cm^{-1} สัมพันธ์กับการสั่นของหมู่ CH_3 [15] พิกัดที่ 7,066 cm^{-1} สัมพันธ์กับการสั่นของหมู่ CH_2 [15] พิกัดที่ 5,614 cm^{-1} สัมพันธ์

Table 2 Comparison of prediction performance of tangential section and cross section models for moisture content in processed rubberwood.

Section	Pretreatments	LV	R_c^2	RMSEC (% db)	R_p^2	RMSEP (% db)	RPD
Tangential Section	Original	3	0.954	2.161	0.808	4.174	2.99
	Smoothing (11 point)	3	0.951	2.140	0.935	2.223	4.30
	1 st derivative (3 point)	2	0.950	2.011	0.933	2.476	3.89
	2 nd derivative (23 point)	2	0.945	1.935	0.924	2.634	3.74
	MSC	4	0.961	2.055	0.937	2.384	4.16
	SNV	3	0.952	2.050	0.936	2.409	4.01
Cross Section	Original	5	0.938	1.867	0.949	2.156	5.34
	Smoothing (21 point)	5	0.939	1.920	0.963	1.835	5.52
	1 st derivative (13 point)	4	0.946	1.946	0.968	1.715	5.62
	2 nd derivative (9 point)	3	0.950	2.025	0.953	2.056	5.70
	MSC	5	0.944	1.712	0.973	1.572	7.06
	SNV	5	0.944	1.895	0.977	1.446	6.79

MSC: Multiplicative Scatter Correction, SNV: Standard normal variate.

**Figure 3** Scatter plots of the PLSR model for moisture content prediction in tangential-section rubberwood based on MSC-preprocessed NIRS spectra: (A) calibration and (B) prediction.**Figure 4** Scatter plots of the PLSR model for moisture content prediction in cross-section rubberwood based on smoothing-preprocessed NIRS spectra: (A) calibration and (B) prediction.

สัมพันธ์กับการสั่นของพันธะ C-H [15] พีคที่ 8,640 cm^{-1} สัมพันธ์กับการสั่นของหมู่ CH_3 [15] พีคที่ 7,529 cm^{-1} สัมพันธ์กับการสั่นของพันธะ C-H [15] พีคที่ 7,113 cm^{-1} สัมพันธ์กับการสั่นของพันธะ O-H [16] พีคที่ 5,153 และ 4,767 cm^{-1} สัมพันธ์กับการสั่นของพันธะ O-H ของน้ำ [14] พีคที่ 4,366 cm^{-1} สัมพันธ์กับการสั่นของโปรตีน [14] พีคที่ 3,672 cm^{-1} สัมพันธ์กับการสั่นของพันธะ C-H [14] และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์การถดถอยของแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับแบบจำลองการทำนายค่าความชื้นบนหน้าตัดขวาง (Cross section) ที่ปรับแต่งสเปกตราด้วยวิธี Smoothing ดัง Figure 5(B) โดยพบพีคที่สำคัญที่ 10,383 cm^{-1} สัมพันธ์กับการสั่นของพันธะ O-H ของน้ำ [14] พีคที่ 8,733 cm^{-1} สัมพันธ์กับการสั่นของ Aromatic [15] พีคที่ 8,239 cm^{-1} สัมพันธ์กับการสั่นของหมู่ CH_2 [15] พีคที่ 7,606 cm^{-1} สัมพันธ์กับการสั่นของพันธะ C-H [15] พีคที่ 6,958 cm^{-1} สัมพันธ์กับการสั่นของแป้ง [14] พีคที่ 5,863 cm^{-1} สัมพันธ์กับการสั่นของพันธะ C-H [16] พีคที่ 5,307 cm^{-1} สัมพันธ์กับการสั่นของพันธะ O-H [16] พีคที่ 4,906 cm^{-1} สัมพันธ์กับการสั่นของหมู่ CONH_2 [15] พีคที่ 4,644 cm^{-1} สัมพันธ์กับการสั่นของพันธะ C-H [14] พีคที่ 4,397 cm^{-1} สัมพันธ์กับการสั่นของ Cellulose [14] พีคที่ 3,795 cm^{-1} สัมพันธ์กับการสั่นของพันธะ O-H [16] แสดงให้เห็นว่าการทำนายค่าความชื้นมีความสัมพันธ์กับทั้งการดูดกลืนของน้ำและองค์ประกอบทางเคมีของเนื้อไม้ ซึ่งสะท้อนถึงอิทธิพลของโครงสร้างหน้าตัดไม้ต่อประสิทธิภาพของเทคนิค NIRS ในการทำนายค่าความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูป

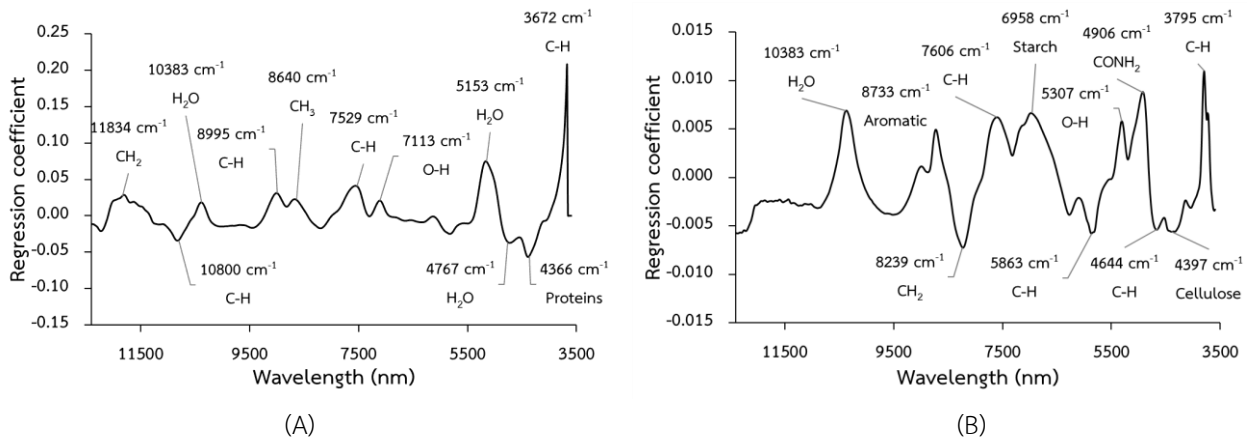


Figure 5 Regression coefficients of the optimal PLSR models for moisture content prediction in processed rubberwood: (A) tangential section spectra preprocessed using MSC and (B) cross-section spectra preprocessed using smoothing.

4. สรุป

การศึกษาผลของหน้าตัดไม้ต่อสมรรถนะของแบบจำลอง Near-Infrared Spectroscopy (NIRS) สำหรับการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูป โดยผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของแบบจำลองพบว่า แบบจำลองที่สร้างจากสเปกตรานหน้าตัดขวางให้ความแม่นยำในการทำนายสูงกว่าหน้าตัดแนวสัมผัส โดยแบบจำลองที่ปรับแต่งสเปกตราด้วยวิธี Multiplicative Scatter Correction (MSC) ให้ผลการทำนายที่ดีที่สุด $R_p^2 = 0.973$, RMSEP = 1.572% db และ RPD = 7.06 ซึ่งอยู่ในระดับดีมาก ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าลักษณะหน้าตัดไม้มีอิทธิพลต่อสมรรถนะของแบบจำลอง NIRS ในการทำนายค่าความชื้นของไม้ยางพาราแปรรูป โดยหน้าตัดขวางมีศักยภาพเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้เทคนิคดังกล่าวในการประเมินความชื้นของไม้ในอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ยางพารา

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษา และคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ที่กรุณาให้การสนับสนุนงบประมาณวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2566. รายงานสถานการณ์ยางพาราประจำปี 2566. สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร เข้าถึงได้จาก : [https://www.oae.go.th/assets/portals/1/fileups/prcaidata/files/para%20rubber %2066.pdf](https://www.oae.go.th/assets/portals/1/fileups/prcaidata/files/para%20rubber%2066.pdf) (เข้าถึงเมื่อ 26 มีนาคม 2568).
- [2] จิรวัดน์ รียาพันธ์. 2556. คุณสมบัติทางเคมีและเชิงกลของไม้ยางพารา 7 โคลนพันธุ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร.
- [3] อุตสาหกรรมพัฒนามูลนิธิ สถาบันพลาสติก. 2567. รายงานสภาวะอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยางและไม้ยางพาราของไทย. สถาบันพลาสติก. เข้าถึงได้จาก : <https://rubber.oie.go.th/box/Article/65969/รายงานสภาวะอุตสาหกรรม%20เดือนสิงหาคม%202567.pdf>. (เข้าถึงเมื่อ 25 เมษายน 2568).
- [4] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. 2567. กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไม้ยางพาราแปรรูป. มอก. 2423-2567. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กรุงเทพมหานคร.
- [5] วรวรรธน นกน้อย. 2561. การทำนายปริมาณความชื้น ความถ่วงจำเพาะ และความแข็งแรงไม้ยางพาราด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร.
- [6] Siesler HW, Ozaki Y, Kawata S and Heise HM. 2008. Near-infrared spectroscopy: Principles, instruments, applications. 1st edn. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA.
- [7] Watanabe K, Mansfield SD and Avramidis S. 2011. Application of near-infrared spectroscopy for moisture-based sorting of green hem-fir timber. *Journal of wood science*. 57: 288-94.
- [8] Adedipe O and Dawson-Andoh B. 2008. Predicting moisture content of yellow-poplar (*Liriodendron tulipifera* L.) veneer using near infrared spectroscopy. *Forest Products Journal*. 58: 28-33.
- [9] Defo M, Fortin Y and Duchesne I. 2007. Determination of moisture content and density of fresh-sawn red oak lumber by near infrared spectroscopy. *Wood and Fiber Science*. 39: 202-15.
- [10] Kobori H, Gorretta N, Rabatel G, Bellon-Maurel V, Chaix G, Roger J-M and Tsuchikawa S. 2013. Applicability of Vis-NIR hyperspectral imaging for monitoring wood moisture content (MC). *Holzforschung*. 67: 307-14.
- [11] American Society for Testing and Materials (ASTM). Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber (ASTM D143-94). West Conshohocken, PA: ASTM International; 2000.
- [12] Meier KJ, Brudney JL and Bohte J. 2014. Applied Statistics for Public and Nonprofit Administration. 8th edn. Wadsworth, Boston, USA.
- [13] Williams P. 2007. Near-infrared technology in food science and technology. John Wiley and Sons, Inc, New Jersey.
- [14] Workman J and Weyer L. 2012. Practical Guide and Spectral Atlas for Interpretive Near-Infrared Spectroscopy. 2nd edn. CRC Press, Boca Raton.
- [15] Osborne BG, Fearn T and Hindle PH. 1993. Practical NIR spectroscopy with applications in food and beverage analysis. 2nd edn. Longman Scientific & Technical, Harlow, Essex, England.
- [16] Williams P and Norris K. 2001. Near-Infrared Technology in the Agricultural and Food Industries. 2nd edn. American Association of Cereal Chemists, USA.

การทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดในสับประดุกแลตัดแต่งด้วยเทคนิคภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัลอินฟราเรดย่านใกล้

Prediction of Total Soluble Solids in Fresh Cut Phu Lae Pineapple by Near Infrared-Hyperspectral Imaging

ทักษพร จันทร์ปัน¹ ทตลักษณ์ จงสร้อย¹ ปันพิตา แยมเปลียน² และ สิรินาถ น้อยพิทักษ์^{1,*}
Taksapron Janpan¹, Thattalak Jongsoi¹, Pantita Yamplien² and Sirinad Noypitak^{1,*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140 ประเทศไทย

²ภาควิชาเกษตรกลวิธาน คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10900 ประเทศไทย

¹Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom Province, 73140, Thailand

²Department of Farm Mechanics Faculty of Agriculture, Kasetsart University, Bangkok, 10900, Thailand.

* Corresponding author: Sirinad Noypitak, e-mail address: fengsnn@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัลอินฟราเรดย่านใกล้ (Near infrared-hyperspectral imaging; NIR-HSI) เพื่อทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (Total Soluble Solids; TSS) ในสับประดุกแลตัดแต่งพร้อมบริโภค และศึกษาความเป็นไปได้ในการสร้างแผนภาพจำลองการกระจายตัวของความหวานเชิงพื้นที่ ข้อมูลภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัลถูกบันทึกในรูปแบบการสะท้อนแสง (Reflectance mode) ครอบคลุมย่านความยาวคลื่น 860-1700 nm จากกลุ่มตัวอย่างสับประดุกจำนวน 149 ชิ้น จากนั้นสกัดค่าการดูดกลืนแสงเพื่อนำมาสร้างแบบจำลองทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS) ด้วยเทคนิค Partial least squares regression (PLSR) แบบ Leave-one-out cross validation จากผลการวิจัยพบว่า การเตรียมข้อมูลสเปกตรัมด้วยกระบวนการปรับแต่งข้อมูลแบบ Smoothing ส่งผลให้แบบจำลองมีประสิทธิภาพการทำนายดีที่สุด โดยแสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของการทดสอบแบบไขว้ (Correlation coefficient for cross-validation) เท่ากับ 0.80 และมีค่าความคลาดเคลื่อนในการทดสอบสมการของการพิสูจน์แบบไขว้ (Root mean square error of cross validation; RMSECV) เท่ากับ 1.47 °Brix ผลลัพธ์จากการทำนายยังสามารถนำไปแสดงเป็นแผนภาพการกระจายตัวเชิงพื้นที่ของปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดบนพื้นผิวหน้าตัดของชิ้นสับประดุกได้ อย่างไรก็ตาม เพื่อยกระดับเสถียรภาพและความแม่นยำของแบบจำลองให้พร้อมต่อยอดสู่การใช้งานจริงในภาคอุตสาหกรรม งานวิจัยในอนาคตจึงควรขยายขนาดกลุ่มตัวอย่างให้ครอบคลุมความแปรปรวนของระดับความหวานที่หลากหลายมากยิ่งขึ้น

คำสำคัญ: สับประดุกตัดแต่ง, ภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัลอินฟราเรดย่านใกล้, ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด, แผนภาพความหวาน

Abstract

This research aimed to study the application of near infrared-hyperspectral imaging (NIR-HSI) technology to predict the total soluble solids (TSS) in ready-to-eat fresh-cut Phu Lae pineapples and investigate the feasibility of generating spatial sweetness distribution maps. Hyperspectral images were acquired in reflectance mode across a wavelength range of 860-1700 nm from 149 pineapple samples. Subsequently, absorbance values were extracted to develop a prediction model for TSS using the partial least squares regression (PLSR) method with leave-one-out cross-validation. The results revealed that spectral data preprocessed with the smoothing method yielded the highest prediction performance. The model demonstrated a correlation coefficient for cross-validation (R_{cv}) of 0.80 and a root mean square error of cross-validation (RMSECV) of 1.47 °Brix. Furthermore, the prediction results could be successfully applied to construct a spatial distribution map of the total soluble solids on the cross-sectional surface of the pineapple samples. However, to enhance the robustness and accuracy of the model for practical industrial applications, future research should expand the sample size to encompass a wider variability of sweetness levels.

Keywords: Fresh-cut pineapple, Near infrared-hyperspectral imaging, Total soluble solids, Sweetness distribution map

1. บทนำ

สับปะรด (*Ananas comosus* (L.) Merr.) เป็นพืชเศรษฐกิจเกษตรศาสตร์ที่สำคัญของประเทศไทย สถานการณ์การค้าในตลาดโลกปัจจุบันพบว่า การส่งออกสับปะรดสดของไทยกำลังเผชิญภาวะชะลอตัว โดยในปี พ.ศ.2567 ประเทศไทยส่งออกปริมาณ 0.112 ล้านตัน คิดเป็นมูลค่า 5,657 ล้านบาท [1] แต่ภาครัฐยังคงตั้งเป้าหมายเชิงรุกเพื่อผลักดันมูลค่าการส่งออกให้เติบโตสู่ระดับ 18,268 และ 18,542 ล้านบาท ในปี พ.ศ. 2568 และ 2569 ตามลำดับ [2] สับปะรดภูแลนั้นจัดอยู่ในกลุ่มสายพันธุ์ควีน (Queen) และเป็นสินค้าสิ่งบ่งชี้ทางภูมิศาสตร์ (GI) ของจังหวัดเชียงราย มีจุดเด่นคือผลมีขนาดเล็ก น้ำหนักประมาณ 0.15 ถึง 1 กิโลกรัม เปลือกค่อนข้างหนาทำให้ทนทานต่อการขนส่ง เนื้อมีสีทอง กลิ่นหอม รสชาติหวาน และมีแกนที่กรอบสามารถรับประทานได้ [3] และ [4] ปัจจุบันผู้บริโภคมีความต้องการผลไม้สดตัดแต่งพร้อมบริโภค (Fresh-cut) เพิ่มสูงขึ้น ทั้งในประเทศและต่างประเทศ เช่น ประเทศออสเตรเลีย ซึ่งสับปะรดตัดแต่งจากไทยยังคงได้รับความนิยมและครองส่วนแบ่งการตลาดเป็นอันดับหนึ่งอย่างต่อเนื่อง [5] โดยมาตรฐานสินค้าเกษตรกำหนดให้สับปะรดส่งออกต้องมีความสุกแก่ที่เหมาะสมกับสายพันธุ์ เนื้อมีสีเหลือง โดยผลิตภัณฑ์จะต้องมาจากแปลงปลูกและโรงคัดบรรจุที่ได้มาตรฐาน Good Agricultural Practices (GAP) และ Good Manufacturing Practice (GMP) และมีค่าความหวานหรือปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (Total Soluble Solids; TSS) ไม่น้อยกว่า 12 องศาบริกซ์ (°Brix) [6] ซึ่งในบางตลาดปลายทางอาจมีความต้องการความหวานที่ระดับ 13-14 °Brix

ปัจจุบันการตรวจสอบคุณภาพความหวานของสับปะรดในระดับอุตสาหกรรม มักใช้วิธีการสุ่มตรวจแบบทำลายตัวอย่าง ด้วยการตัดเนื้อบางส่วนจากตำแหน่งที่กำหนดเพื่อนำมาคั้นน้ำเพื่อวัดค่าด้วยรีแฟรกโตมิเตอร์ (Refractometer) ซึ่งไม่สามารถสะท้อนคุณภาพความหวานได้ตลอดผลสับปะรดได้ ทั้งยังมีข้อจำกัดคือการทำลายทำให้สูญเสียตัวอย่างนั้นๆ ใช้เวลานาน และสิ้นเปลืองแรงงาน เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (Near-Infrared Spectroscopy; NIRS) ได้รับความนิยมในการประเมินคุณภาพสับปะรดแบบไม่ทำลายตัวอย่าง แต่ส่วนใหญ่มีมุมมองเน้นการทำนายคุณภาพในสับปะรดแบบเต็มผล ซึ่งมีข้อจำกัดสำคัญคือ ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นเพียงค่าเฉลี่ยเพียงค่าเดียวต่อหนึ่งผล ทำให้ไม่สามารถระบุความแตกต่างของระดับความหวานที่เกิดขึ้นในแต่ละบริเวณตลอดผลสับปะรดได้อย่างละเอียด เทคนิคการถ่ายภาพไฮเปอร์สเปกตรัลอินฟราเรดย่านใกล้ (Near-Infrared Hyperspectral Imaging; NIR-HSI) จึงเป็นการรวมเทคนิคการถ่ายภาพเข้ากับสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (NIRS) ส่งผลให้สามารถจัดเก็บข้อมูลเชิงพื้นที่ และข้อมูลเชิงสเปกตรัมได้พร้อมกันในการวัดเพียงครั้งเดียว แม้กระบวนการสร้างสมการทำนายจะอาศัยหลักการพื้นฐานเดียวกับเทคนิคถ่ายภาพเข้ากับสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (NIRS) แต่จุดแตกต่างที่สำคัญของเทคนิค NIR-HSI คือ สามารถแสดงแผนภาพการกระจายตัวขององค์ประกอบเคมีที่ต้องการศึกษา จากการวิจัยที่ผ่านมาได้มีการประยุกต์ใช้เทคนิคการวัดแสงเพื่อประเมินคุณภาพสับปะรดอย่างแพร่หลาย เช่น งานวิจัยของ Tantinatrakun et al. [7] ได้นำเทคนิคภาพ (NIR-HSI) มาทำนายดัชนีความสุกแก่ ของสับปะรดแบบเต็มผล ให้ค่าความแม่นยำพิจารณาจากการตรวจสอบความถูกต้อง R_{cv}^2 เท่ากับ 0.72 และ RMSECV 1.68 ในขณะที่ Semyalo et al. [8] ได้พัฒนาระบบสเปกโทรสโกปีช่วงคลื่นที่มองเห็นและอินฟราเรดย่านใกล้ (VIS-NIRS) แบบออนไลน์ ในการทำนายค่าความหวาน (TSS) ของสับปะรดได้อย่างแม่นยำโดยมีค่า R เท่ากับ 0.88 และ RMSEC 1.04 % นอกจากนี้ Chang et al. [9] ได้ศึกษาการใช้ระบบภาพไฮเปอร์สเปกตรัลช่วงคลื่นที่มองเห็นและอินฟราเรดย่านใกล้ (VIS-NIR-HSI) ร่วมกับการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) ในการจำแนกระยะความสุกแก่ของสับปะรด (ดิบ สุก และสุกเกินไป) ซึ่งให้ความแม่นยำในการจำแนกสูงถึงร้อยละ 97.22 สำหรับการประเมินคุณภาพในสับปะรดตัดแต่งพร้อมบริโภค Mollazade et al. [10] ได้นำระบบภาพมัลติสเปกตรัล (Multispectral imaging) มาประยุกต์ใช้เพื่อสร้างแผนภาพการกระจายตัวของความหวาน ซึ่งสามารถทำนายค่าได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยมีค่า R เท่ากับ 0.52 และมีค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ (MAPE) 14.72 % อย่างไรก็ตาม เทคนิคดังกล่าวยังมีข้อจำกัดเรื่องความละเอียดของข้อมูลสเปกตรัม ที่บันทึกเพียงบางช่วงความยาวคลื่นเท่านั้น ซึ่งอาจไม่ครอบคลุมข้อมูลการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่ซับซ้อนขององค์ประกอบภายในเนื้อสับปะรดได้ทั้งหมด

เนื่องจากสับปะรดเป็นผลไม้ที่มีโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาซับซ้อนที่เกิดจากการรวมตัวของผลย่อย ส่งผลให้การเจริญเติบโตและการกระจายตัวของความหวานไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นผลไม้ การใช้วิธีสุ่มวัดเพียงจุดใดจุดหนึ่งด้วยการวัดค่าความหวานจากเครื่องรีแฟรกโตมิเตอร์ (Refractometer) หรือวิธีการวัดเฉพาะจุดด้วยเทคนิค NIRS จึงไม่อาจสะท้อนคุณภาพโดยรวมของชิ้นสับปะรดตัดแต่งได้ทั้งหมด เทคนิค NIR-HSI ซึ่งให้ข้อมูลสเปกตรัลอินฟราเรดย่านใกล้ในทุกพิทเชลของข้อมูลภาพช่วยแก้ปัญหาข้อจำกัดการวัดได้เฉพาะจุดของเทคนิค NIRS ทำให้สามารถแสดงความแปรปรวนเชิงพื้นที่ (Spatial variability) ของปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดภายในชิ้นสับปะรดตัดแต่งได้อย่างแม่นยำ อันนำไปสู่การประเมินคุณภาพที่ครอบคลุมทั้งชิ้นผลไม้ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อนำเทคนิคภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัลอินฟราเรดย่านใกล้ (NIR-HSI) มาประยุกต์ใช้สร้างสมการทำนายและแสดงแผนภาพการกระจายตัว (Distribution map) ของค่าความหวานในสับปะรดภูแลแบบตัดแต่งพร้อมบริโภค

(Fresh-cut) เพื่อยกระดับมาตรฐานการควบคุมคุณภาพสับประรดดูแลตัดแต่งเพื่อการส่งออก และสร้างความเชื่อมั่นให้แก่ผู้บริโภคต่อไป

2. วิธีการศึกษา

2.1 การเตรียมตัวอย่างสับประรดตัดแต่ง

สับประรดสายพันธุ์ภูแล จากสวนในตำบลนางแล อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย ถูกสุ่มเก็บตัวอย่างผลสับประรดที่มีระยะความสุกแก่ (Maturity stages) ที่แตกต่างกัน ครอบคลุมตั้งแต่ระยะดิบ ห่าม และสุกดังแสดงใน Figure 1 เพื่อให้ได้ช่วงข้อมูลค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS) ที่มีความแปรปรวนกว้างและครอบคลุมเพียงพอสำหรับการสร้างแบบจำลอง นำสับประรดผลสดมาพักไว้ที่อุณหภูมิห้อง (25°C) เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นหั่นครึ่งลูกตามแนวนอน แล้วตัดแบ่งให้มีขนาดหนา 2.5 cm และทำการหั่นเนื้อสับประรดให้เป็นชิ้นรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด 2.5 x 2.5 cm² เพื่อให้ได้ชิ้นตัวอย่างที่มีขนาดและรูปทรงของตัวอย่างที่มีความสม่ำเสมอและมีพื้นผิวหน้าตัดที่เรียบเสมอกัน เพื่อควบคุมระยะห่างระหว่างพื้นผิวตัวอย่างกับเลนส์กล้องให้คงที่ตลอดการสแกน ซึ่งจะช่วยลดปัญหาการกระเจิงของแสง และการเกิดเงาสะท้อนในขณะทำการบันทึกภาพด้วยระบบถ่ายภาพไฮเปอร์สเปกตรัลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

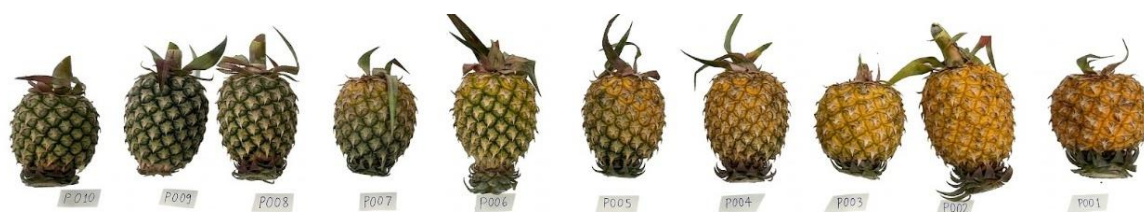


Figure 1 Preparation of pineapple samples

2.2 การวัดภาพไฮเปอร์สเปกตรัลอินฟราเรดย่านใกล้

นำชิ้นตัวอย่างสับประรดตัดแต่งรูปทรงสี่เหลี่ยมมาสแกนด้วยเครื่องถ่ายภาพไฮเปอร์สเปกตรัล (N17E, SPECIM Spectral Imaging Ltd., Oulu, Finland) ในช่วงความยาวคลื่น 860-1700 nm ความละเอียด 3.24 nm รูปแบบการวัดเป็นแบบสะท้อนกลับ (Reflectance mode) โดยวางตัวอย่างสับประรดลงบนภาชนะที่ควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่ผ่านกล้องถ่ายภาพ 9 mm/s ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงฮาโลเจน ขนาด 20 W (DECOSTAR, Carrollton, GA, US) ที่ทำมุม 45 องศากับตัวอย่างเพื่อลดเงาสะท้อน ความสูงระหว่างกล้องถ่ายภาพ CCD (Xeva 992, Xenics Infrared Solution Ltd., Oulu, Finland) กับตัวอย่างเท่ากับ 7 cm ดังแสดงใน Figure 2 ข้อมูลความเข้มแสงที่บันทึกได้จะมีลักษณะเป็น 3 มิติ (Hypercube) ประกอบด้วยข้อมูลเชิงพื้นที่ประกอบด้วยแกน x ขนาด 320 pixel และแกน y ขนาดบันทึกตามความยาวของวัตถุที่เคลื่อนที่ผ่านกล้องถ่ายภาพ และข้อมูลเชิงสเปกตรัม แกนความยาวคลื่นของชิ้นสับประรดโดยในแต่ละพิกเซลจะมีข้อมูลสเปกตรัมบรรจุอยู่ 1 เส้น มีจำนวนการเก็บข้อมูลการสะท้อนแสง 256 ค่า

2.3 การทดสอบหาปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS) ด้วยเครื่องรีแฟรกโตมิเตอร์ (Refractometer)

ภายหลังจากการสแกนภาพด้วยเทคนิค NIR-HSI ทันททีให้นำตัวอย่างสับประรดชิ้นเดิมมาทำการสกัดน้ำคั้น และกรองผ่านผ้าขาวบางเพื่อแยกกากออกให้ได้น้ำคั้นสับประรดที่ใส จากนั้นนำน้ำคั้นที่ได้หยดลงบนหน้าเลนส์ปริซึมของเครื่องรีแฟรกโตมิเตอร์แบบดิจิทัล (Digital refractometer) เพื่อตรวจวัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS) โดยมีหน่วยเป็นองศาบริกซ์ (°Brix) ตามมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ มกอช. 4-2546 [6] โดยทำการวัดซ้ำจำนวน 3 ครั้งต่อ 1 ชิ้นตัวอย่างสับประรด (Triplicate) แล้วนำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ย จากนั้นบันทึกผลลัพธ์ที่ได้เพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง (Reference data) สำหรับการสร้างแบบจำลองสมการทำนายทางเคมีเมตริกซ์ในขั้นตอนต่อไป

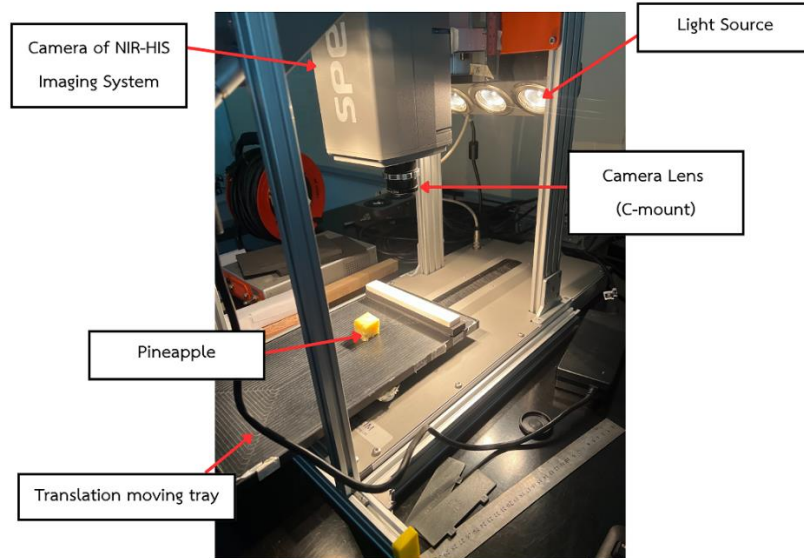


Figure 2 Measurement of reflectance using near infrared hyperspectral Imaging (NIR-HSI)

2.4 การวิเคราะห์สร้างสมการทำนาย

2.4.1 ตรวจสอบความผิดปกติของข้อมูลค่าอ้างอิง

นำข้อมูลปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS) ซึ่งเป็นค่าอ้างอิงมาตรวจสอบข้อมูลที่ผิดปกติ (Outlier) โดยพิจารณาจากค่ามาตรฐาน (Standard score; Z) ถ้าหากค่า Z ของตัวอย่างใดมีค่ามากกว่า 3 หรือน้อยกว่า -3 ถือว่าตัวอย่างนั้นเป็นข้อมูลที่ผิดปกติ ก่อนที่จะมีการสร้างสมการสอบเทียบมาตรฐาน (Calibration model)

2.4.2 ตรวจสอบความผิดปกติของข้อมูลสเปกตรา

นำข้อมูลสเปกตรามาตรวจสอบความผิดปกติของข้อมูล โดยตรวจดูความผิดปกติของเส้นสเปกตราด้วยสายตาก่อน และตรวจดูด้วยการวิเคราะห์ด้วยวิธี Principal component analysis (PCA) ด้วยโปรแกรม The Unscrambler 9.8 (Camo, USA) ถึงข้อมูลสเปกตราที่ผิดปกติจากกลุ่มข้อมูลทั้งหมด ซึ่งไม่พบข้อมูลผิดปกติ

2.4.3 การวิเคราะห์ข้อมูลและสร้างสมการทำนาย

การวิเคราะห์ข้อมูลภาพถ่ายไฮเปอร์คิวบ์ (Hypercube) เริ่มต้นจากการปรับเทียบมาตรฐานแสง (Image calibration) เพื่อแปลงข้อมูลภาพดิบให้เป็นค่าการสะท้อนแสงสัมพัทธ์ (Relative reflectance; R) โดยคำนวณตามสมการที่ 1 จากนั้นนำค่าการสะท้อนแสงสัมพัทธ์ที่ได้มาแปลงเป็นค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance; A) ดังแสดงในสมการที่ 2

$$R(x,y,\lambda) = \frac{I_s - I_D}{I_w - I_D} \quad (1)$$

- เมื่อ
- R = ค่าการสะท้อนแสงสัมพัทธ์ที่ความยาวคลื่น λ
 - I_s = ค่าความเข้มแสงของตัวอย่างที่ความยาวคลื่น λ
 - I_D = ค่าความเข้มแสงของแหล่งอ้างอิงสีดำที่ความยาวคลื่น λ
 - I_w = ค่าความเข้มแสงของแหล่งอ้างอิงสีขาวที่ความยาวคลื่น λ

$$A = \log \left(\frac{1}{R} \right) \quad (2)$$

เมื่อ A คือ ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)

R คือ ค่าการสะท้อนแสงสัมพัทธ์ (Relative reflectance)

ภายหลังจากการแปลงค่าสเปกตรัม เพื่อให้เหลือเฉพาะข้อมูลสเปกตรัมในบริเวณพื้นที่ที่สนใจ (Region of interest; ROIs) จากนั้นนำข้อมูลค่าการดูดกลืนแสงจากทุกพิกเซลในบริเวณดังกล่าวมาคำนวณหาค่าเฉลี่ย เพื่อให้ได้สเปกตรัมตัวแทนจำนวน 1 เส้นสเปกตรัมต่อ 1 ชิ้นตัวอย่าง ดังแสดงใน Figure 3 (a)

จากนั้นนำข้อมูลสเปกตรัมเฉลี่ยของทุกตัวอย่างมาตรวจสอบความผิดปกติและผ่านกระบวนการปรับแต่งข้อมูลทางคณิตศาสตร์ (Pretreatment) เพื่อลดอิทธิพลของการกระเจิงแสงและสัญญาณรบกวน โดยประยุกต์ใช้วิธีการต่างๆ ได้แก่ Smoothing, First derivative, Second derivative, Multiplicative scatter correction (MSC) และ Standard normal variate (SNV) ผ่านโปรแกรม The Unscrambler 9.8 (Camo, USA) จากนั้นนำชุดข้อมูลสเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งแล้วจำนวน 60 ตัวอย่าง มาสร้างสมการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS) ด้วยเทคนิค Partial least squares regression (PLSR) แบบ Leave-one-out cross validation พิจารณาสมการทำนายที่ดีที่สุดจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ของการสร้างสมการ (R_c) ที่มีค่าสูงสุด ค่าความคลาดเคลื่อนในการสร้างสมการ (RMSEC) ต่ำสุด ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ของการทดสอบแบบไขว้ (R_{cv}) ที่มีค่าสูงสุด ค่าความคลาดเคลื่อนของการทดสอบสมการการพิสูจน์แบบไขว้ (RMSECV) ที่มีค่าต่ำสุด

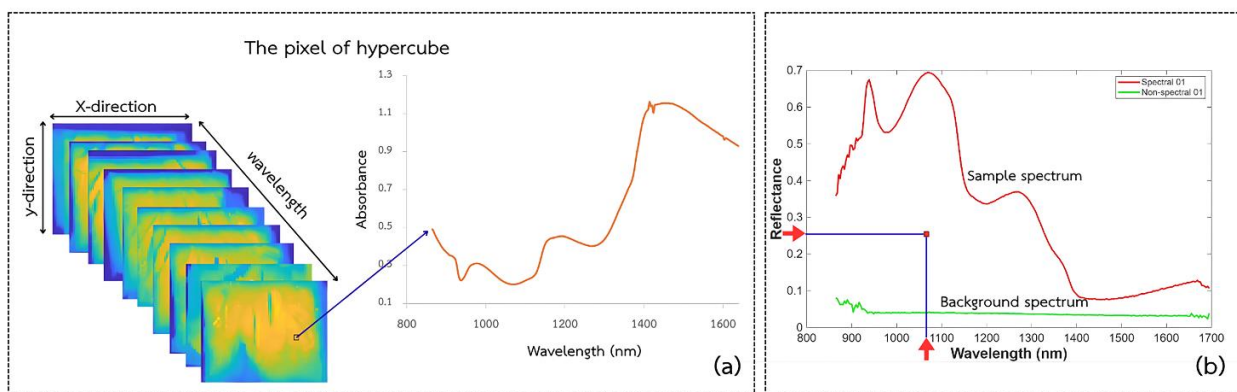


Figure 3 Reflectance spectra of (a) the pixel selected as the fresh-cut pineapples representative, and (b) the threshold setting used to separate the sample part from the background part.

2.5 การแสดงแผนภาพการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS Prediction diagram)

การแสดงแผนภาพการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS Prediction diagram) การแสดงแผนภาพการทำนายเริ่มต้นจากการพล็อตสเปกตรัมเพื่อแยกพื้นที่ภาพในส่วนที่เป็นบริเวณขึ้นสับประรดตัวอย่าง (Sample part) ออกจากส่วนที่เป็นพื้นหลังภาพ (Background) โดยพิจารณาค่า Threshold ที่เหมาะสมเท่ากับ 0.25 ที่ความยาวคลื่น 1085 nm เป็นตำแหน่งความยาวคลื่นที่สามารถแยกความแตกต่างได้อย่างชัดเจน ดังแสดงใน Figure 3 (b) จากนั้นทำการคำนวณค่าเฉลี่ยสเปกตรัมเฉพาะส่วนที่เป็นพื้นที่เนื้อสับประรดที่ต้องการ นำข้อมูลของทุกตัวอย่างมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงในแต่ละความยาวคลื่นกับปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS) แล้วคัดเลือกตำแหน่งความยาวคลื่นที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) สูงที่สุด มาสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ด้วยสมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple linear regression) เมื่อต้องการแสดงแผนภาพการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS) ในชิ้นตัวอย่างสับประรดที่สนใจ จึงนำค่าความชัน (Slope) ของสมการถดถอยที่ได้นั้น มาประยุกต์ใช้โดยคูณเข้ากับข้อมูลค่าการดูดกลืนแสงในแต่ละพิกเซล (Pixel) ของความยาวคลื่นที่ถูกคัดเลือกไว้ และบวกด้วยค่าจุดตัดแกนตั้ง (Intercept) ส่งผลให้ได้ค่าทำนายปริมาณของแข็งที่ละลาย

น้ำได้ทั้งหมด (TSS) ในทุกๆ พิกเซลของภาพถ่ายไฮเปอร์คิวบ์ (Hypercube) จากนั้นนำผลลัพธ์มาแสดงข้อมูลการกระจายตัวของค่าที่ทำนายได้ด้วยแถบสี (Color bar) แบบ JET ซึ่งไล่ระดับจากสีน้ำเงินไปจนถึงสีแดง เพื่อใช้แสดงแผนภาพจากบริเวณที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS) ซึ่งเป็นความหวานต่ำไปสู่บริเวณที่มีความหวานสูง แผนภาพดังกล่าวจะช่วยให้มองเห็นการกระจายตัวของความหวานที่แตกต่างกันในแต่ละบริเวณบนพื้นผิวหน้าตัดขนาด $2.5 \times 2.5 \text{ cm}^2$ ของชิ้นสับประรดสดได้อย่างชัดเจนและรวดเร็ว โดยกระบวนการประมวลผลข้อมูลภาพทั้งหมดดำเนินการผ่านโปรแกรม MATLAB R2025b (MathWorks, USA)

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 การวิเคราะห์ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS) ของสับประรด

จากการตรวจสอบความผิดปกติ (outliers) ของค่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่ได้จากเครื่อง NIR hyperspectral-imaging ของสับประรด จำนวน 149 ตัวอย่าง ไม่พบความผิดปกติของเส้นสเปกตรัม เมื่อตรวจสอบค่าอ้างอิงพบว่า ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS) จากการพิจารณาค่ามาตรฐาน (Z-score) กลุ่มที่ใช้สร้างสมการการทำนาย ไม่พบความผิดปกติของข้อมูล และในการวิเคราะห์การสร้างสมการเพื่อทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS) ดังแสดงใน Table 1

Table 1 Statistical data on the Total Soluble Solids (TSS) of pineapple samples for analysis using Partial least squares regression (PLSR).

Parameter	No.	Min	Max	Mean	SD
Total Soluble Solids (°Brix)	149	10.63	23.36	16.77	2.43

3.2 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสับประรด

สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสับประรดจากเครื่อง Hyperspectral imaging ดังแสดงใน Figure 4 (a) เมื่อนำค่าการดูดกลืนแสงมาปรับแต่งด้วยวิธี Second derivative ทำให้เกิดพีคเด่น และลดอิทธิพลการกระเจิงแสง ดังแสดงใน Figure 4 (b) พบตำแหน่งพีคการดูดกลืนแสงที่เด่นชัดที่ตำแหน่งของพันธะ C-H ที่ความยาวคลื่น 915 nm, 1100 nm, 1280 nm และ 1360 nm และพันธะ N-H ที่ความยาวคลื่น 1047 nm

3.3 ผลการสร้างสมการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS) ของสับประรด

การสร้างสมการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS) ซึ่งนำข้อมูลสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 860-1700 nm สับประรดทั้งหมดมาปรับแต่งด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ พบว่าการปรับแต่งด้วยวิธี Smoothing แบบ Savitzky Golay จำนวน 13 จุด ดังแสดงใน Table 2 ให้ผลการสร้างสมการทำนายที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทุกสมการมีค่า R_c เท่ากับ 0.85 และค่า RMSEC เท่ากับ 1.28 °Brix และมีค่า R_{cv} เท่ากับ 0.80 และค่า RMSECV เท่ากับ 1.47 °Brix ดังแสดงใน Figure 5 (a) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hong and Chia [11] ที่ได้ประยุกต์ใช้เทคนิค NIRS ในการทำนายค่าความหวานของสับประรดแบบเต็มผล อย่างไรก็ตาม ผลการสร้างสมการทำนายในงานวิจัยนี้ให้ค่าความแม่นยำหรือค่าความสัมพันธ์ที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับงานดังกล่าว ซึ่งมีค่า R_p เท่ากับ 0.73 และ RMSEP เท่ากับ 1.21 °Brix ทั้งนี้ความแตกต่างของผลลัพธ์อาจเกิดจากลักษณะการวัดโดยการศึกษาดังกล่าวทำการวัดบนสับประรดเต็มผลที่มีพื้นผิวขรุขระและใช้การวัดเพียงบางตำแหน่ง ส่งผลให้เกิดการกระเจิงของแสงและสูญเสียข้อมูลบางส่วน ในขณะที่งานวิจัยนี้มีการกำหนดบริเวณตัวอย่างเพื่อลดอิทธิพลของพื้นผิวไม่สม่ำเสมอ ซึ่งแสดงให้เห็นว่างานวิจัยนี้สมการทำนายมีความแม่นยำ และค่าความคลาดเคลื่อนที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยควรเพิ่มข้อมูลตัวอย่าง และเพิ่มความแปรปรวนของกลุ่มตัวอย่างให้มากขึ้นจะช่วยให้สมการทำนายมีสมรรถนะสูงขึ้นกับการใช้ทำงานในอนาคต

เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression coefficient) ดังแสดงใน Figure 5 (b) สเปกตรัมที่ผ่านการปรับแต่งด้วยวิธี Smoothing แบบ Savitzky Golay จำนวน 13 จุด ความยาวคลื่นที่ 880 nm เป็นการสั่นของ C-H third overtone ของ CHCl_3 [12] ความยาวคลื่นที่ 900 nm เป็นการสั่นของ C-H third overtone ของ CH_3 [12] ความยาวคลื่น 960 nm เป็นการสั่นของ O-H second overtone ของ Oxygen-Hydrogen [12] อย่างไรก็ตาม พบตำแหน่งความยาวคลื่นที่สัมพันธ์กับปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้อย่างเด่นชัด ได้แก่ ความยาวคลื่น 1440 nm เป็นการสั่นของ O-H first overtone ของ Sucrose [13] และความยาวคลื่น 1215 nm เป็นการสั่น C-H second overtone ของ การยืดพันธะ (Stretching Vibration) ในโมเลกุลน้ำตาลและ

โครงสร้างของกรดอินทรีย์ [10] ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงอิทธิพลขององค์ประกอบทางเคมีเฉพาะตัวภายในเนื้อสับประรด ที่มีบทบาทสำคัญต่อคุณลักษณะทางเคมีกายภาพของตัวอย่าง

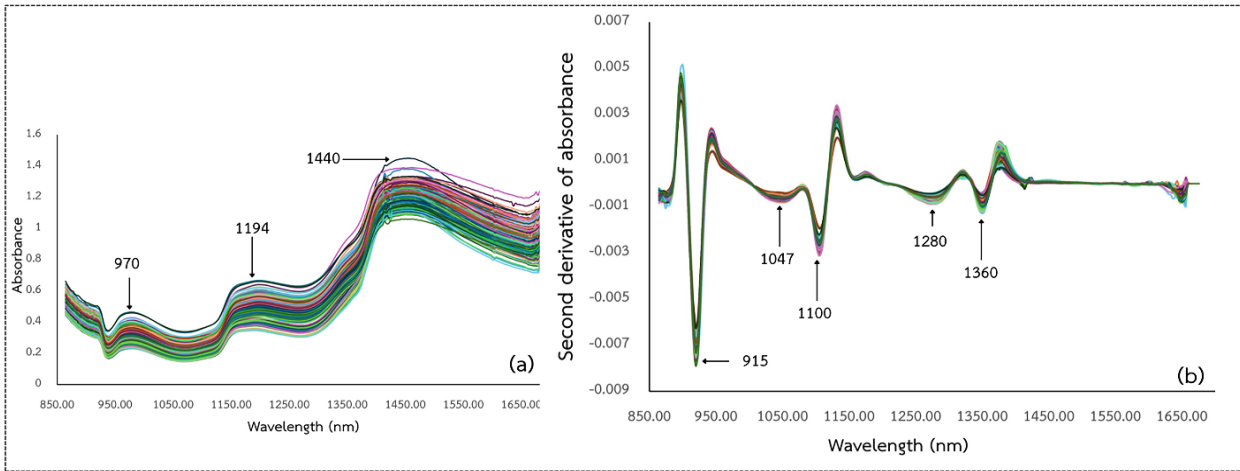


Figure 4 Absorbance spectra of (a) pineapple samples and (b) spectra pretreated using second derivative methods.

Table 2 Results of the PLSR models for predicting Total Soluble Solids (TSS) of pineapple samples using NIR hyperspectral imaging.

Pretreatment	LV	R_c	RMSEC ($^{\circ}$ Brix)	R_{cv}	RMSECV ($^{\circ}$ Brix)
Absorbance	8	0.81	1.41	0.77	1.56
Smoothing	10	0.85	1.28	0.80	1.47
1st Derivative	5	0.81	1.42	0.78	1.51
2 nd Derivative	6	0.87	1.18	0.79	1.50
MSC	5	0.80	1.47	0.76	1.57
SNV	5	0.80	1.47	0.76	1.58

LV: Latent Variables, SNV: Standard Normal Variate, MSC: Multiplicative Scatter Correction

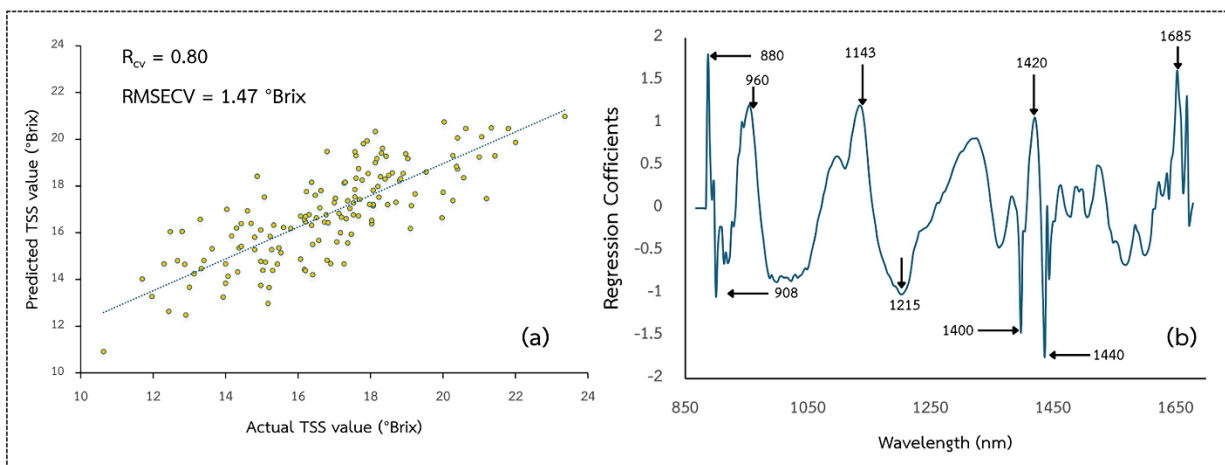


Figure 5 (a) Cross-validation prediction results and (b) regression coefficients of the PLSR model for predicting the total soluble solids (TSS) of pineapple samples.

3.4 ผลการสร้างแผนภาพการทำนายค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS)

จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสะท้อนแสงทุกความยาวคลื่นและปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS) ดังแสดงใน Figure 6 พบว่าที่ความยาวคลื่น 1024 nm มีความสัมพันธ์สูงที่สุดกับค่าความหวาน R เท่ากับ 0.88 แสดงดังสมการที่ 3 การสร้างแผนภาพการกระจายตัว (Distribution map) ค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS) ของข้อมูลตัวอย่าง สับปะรดที่ปรับแต่งสเปกตรัมแบบ Second derivative ซึ่งสมการทำนายค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS) ถูกนำไปใช้กับแต่ละ pixel ในระนาบความยาวคลื่น 1024 nm ของ hypercube เพื่อสร้างแผนภาพการกระจายตัวของค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS) ของตัวอย่างสับปะรด ในช่วง 10.63 °Brix – 23.36 °Brix สามารถเทียบเคียงค่าความหวานจากระดับความเข้มสีน้ำเงินแสดงค่าต่ำสุด 10 °Brix ถึงระดับสีแดงแสดงค่าสูงสุด 24°Brix ดังแสดงใน Figure 7 แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการแสดงการจำลองค่าความหวานของสับปะรดตัดแต่งก่อนการส่งขาย แก่ผู้บริโภคได้

$$\hat{y} = 1248.1(X_{1024}) + 23.9598 \quad (3)$$

เมื่อ \hat{y} = ค่าความหวานที่ทำนายได้

X_{1024} = ค่าการดูดกลืนแสงของความยาวคลื่นที่มีความสัมพันธ์สูงที่สุดกับค่าความหวานจริง

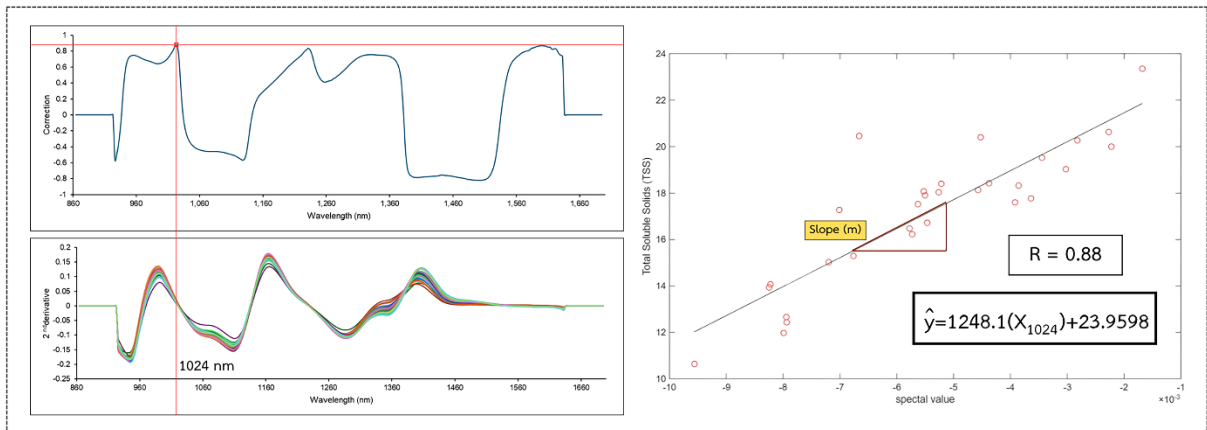


Figure 6 Relationship between absorbance at all wavelengths and total soluble solids content

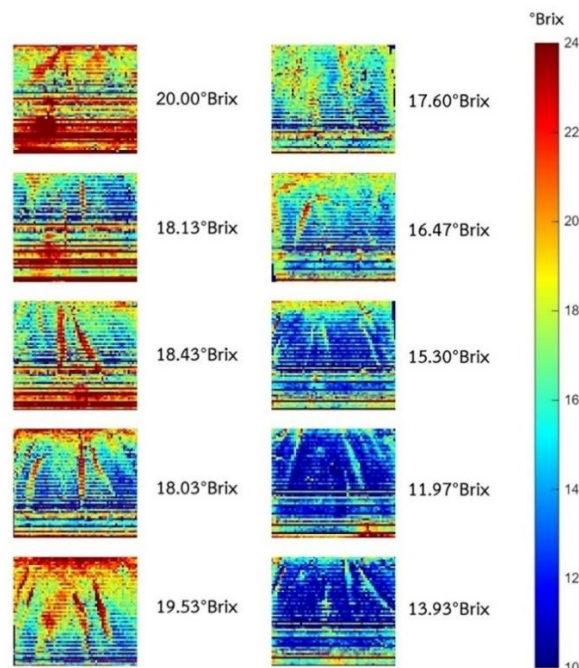


Figure 7 Spatial distribution map of total soluble solids (TSS) in a pineapple samples.

4. สรุป

เทคโนโลยีการถ่ายภาพไฮเปอร์สเปกตรัลอินฟราเรดย่านใกล้ (NIR-HSI) มีศักยภาพสูงในการนำมาประยุกต์ใช้สร้างแบบจำลองเพื่อทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด ($^{\circ}\text{Brix}$) ของสับปะรดได้อย่างมีประสิทธิภาพ การวิเคราะห์ข้อมูลการดูดกลืนแสงตลอดช่วงความยาวคลื่นด้วยเทคนิควิธี (PLSR) ให้ประสิทธิภาพของแบบจำลองที่ดีที่สุด โดยมีค่า (R_c) เท่ากับ 0.85 และมีค่า RMSEC เท่ากับ 1.28 $^{\circ}\text{Brix}$ ในขณะที่ผลการทดสอบความถูกต้อง (R_{cv}) เท่ากับ 0.80 และ RMSECV เท่ากับ 1.47 $^{\circ}\text{Brix}$ ยิ่งไปกว่านั้น เทคนิค NIR-HSI ยังสามารถนำผลลัพธ์มาสร้างเป็นแผนภาพแสดงการกระจายตัวของระดับค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS) บนพื้นที่ผิวหน้าตัดของชิ้นสับปะรดได้อย่างชัดเจนและรวดเร็ว สำหรับแนวทางการศึกษาวิจัยในอนาคตควรมีการพัฒนาและปรับปรุงสมการทำนายให้ครอบคลุม และแม่นยำมากยิ่งขึ้น โดยการเพิ่มจำนวนตัวอย่างสับปะรดให้ครอบคลุมช่วงความแปรปรวนของข้อมูลค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS) ที่กว้างขึ้น การลดอิทธิพลของการกระเจิงแสงจากชิ้นสับปะรดที่ยังมีเนื้อไม่เรียบเสมอกัน ซึ่งจะช่วยยกระดับความแม่นยำและเสถียรภาพในการทำนายความหวานของสับปะรด หรือยกระดับประยุกต์ใช้ในเชิงการค้าต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ที่สนับสนุนทุนการศึกษา และคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ที่กรุณาสับสนุนงบประมาณวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2567. รายงานสถานการณ์การผลิตและการตลาดสับปะรด ปี 2567. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพมหานคร.
- [2] คณะอนุกรรมการขับเคลื่อนการพัฒนาสับปะรด. 2565. แผนพัฒนาด้านสับปะรด พ.ศ. 2566 - 2570. สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, กรุงเทพมหานคร.
- [3] กรมทรัพย์สินทางปัญญา. 2564. สับปะรดภูแล เชียงราย (สิ่งบ่งชี้ทางภูมิศาสตร์). กระทรวงพาณิชย์. เข้าถึงได้จาก : เว็บไซต์ <https://www.ipthailand.go.th> (เข้าถึงเมื่อ 10 มีนาคม 2569).
- [4] กรมประชาสัมพันธ์. 2567. 'กลุ่มแปลงใหญ่สับปะรดภูแล เชียงราย' เป้าหมายนำร่อง '1' ท้องถิ่น 1 สินค้าเกษตรมูลค่าสูง'. สำนักนายกรัฐมนตรี. เข้าถึงได้จาก : เว็บไซต์ <https://www.prd.go.th> (เข้าถึงเมื่อ 10 มีนาคม 2569).
- [5] กรมการค้าต่างประเทศ. 2567. ออสเตรเลียประกาศผลไตสวน AD สินค้าสับปะรดตัดแต่ง ผู้ส่งออกไทยพ้นข้อหาทุบตลาด. กระทรวงพาณิชย์. เข้าถึงได้จาก : เว็บไซต์ <https://thaitr.dft.go.th> (เข้าถึงเมื่อ 2 เมษายน 2569).
- [6] สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ. 2546. มาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ (มกอช.4-2546) สับปะรด. สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพมหานคร.
- [7] Tantintrakun, A., Sukwanit, S., Thompson, A. K. and Teerachaichayut, S. 2023. Nondestructive evaluation of SW-NIRS and NIR-HSI for predicting the maturity index of intact pineapples. *Postharvest Biol. Technol.* 195: 112141.
- [8] Semyalo, D., Kwon, O., Wakholi, C., Min, H. J. and Cho, B.-K. 2024. Nondestructive online measurement of pineapple maturity and soluble solids content using visible and near-infrared spectral analysis. *Postharvest Biol. Technol.* 209: 112706.
- [9] Chang, H., Meng, Q., Wu, Z., Tang, L., Qiu, Z., Ni, C., Chu, J., Fang, J., Huang, Y. and Li, Y. 2025. Accurate Ripening Stage Classification of Pineapple Based on a Visible and Near-Infrared Hyperspectral Imaging System. *J. AOAC Int.* 108: 293-303.
- [10] Mollazade, K., Hashim, N. and Zude-Sasse, M. 2023. Towards a Multispectral Imaging System for Spatial Mapping of Chemical Composition in Fresh-Cut Pineapple (*Ananas comosus*). *Foods.* 12: 3243.
- [11] Hong, F. W. and Chia, K. S. 2020. Investigation of Parameters That Affect the Acquired Near Infrared Diffuse Reflected Signals in Non-Destructive Soluble Solids Content Prediction. *Eng. J.* 24: 79-92.

-
- [12] Workman, J. and Weyer, L. 2012. Practical Guide and Spectral Atlas for Interpretive Near-Infrared Spectroscopy. 2nd edn. CRC Press, Boca Raton, FL.
- [13] Osborne, B. G., Fearn, T. and Hindle, P. H. 1993. Practical NIR spectroscopy with application in food and beverage analysis. Longman Scientific and Technical, Harlow.

การทำนายค่าความแน่นเนื้อของผลกล้วยน้ำว้าแบบไม่ทำลายด้วย
เทคนิคภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัลอินฟราเรดย่านใกล้
Non-destructive Prediction of Firmness in Namwa Banana
Using Near-Infrared Hyperspectral Imaging

พชรพร เชียงเงิน¹, ศิริพุด ศรีเจริญ¹, นันทนัช ประดิษฐ์¹ และ สิรินาถ น้อยพิทักษ์^{1,*}

Pacharaphon Chiangngoen¹, Siriput Srijaroen¹, Nanthanat Pradit¹, Sirinad Noypitak^{1,*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140 ประเทศไทย

¹Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University Nakhon Pathom, Nakhon Pathom Province, 73140, Thailand.

*Corresponding author: Sirinad Noypitak, e-mail address: fengsn@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาศักยภาพของเทคนิคภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัลอินฟราเรดย่านใกล้ (Near-infrared hyperspectral imaging; NIR-HSI) ในการทำนายค่าความแน่นเนื้อของผลกล้วยน้ำว้า (*Musa ABB* cv. Namwa) และสร้างแผนภาพการกระจายตัวของค่าความแน่นเนื้อภายในผลกล้วย ตัวอย่างกล้วยน้ำว้าจำนวน 70 ผล ถูกบ่มที่อุณหภูมิ 25 ± 1 °C เป็นเวลา 0–9 วัน และตรวจวัดสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 864–1696 nm ด้วยระบบ NIR-HSI ในโหมดการสะท้อนกลับ (reflectance mode) ข้อมูลสเปกตรัมถูกนำมาสร้างสมการทำนายด้วยวิธี Partial Least Squares Regression (PLSR) แบบ Leave-one-out full cross-validation ผลการศึกษาพบว่า การปรับแต่งสเปกตรัมด้วยวิธี First derivative ให้ประสิทธิภาพการทำนายดีที่สุด โดยมีค่า R_c^2 เท่ากับ 0.88 ค่า RMSEC เท่ากับ 0.81 N และค่า R_{cv}^2 เท่ากับ 0.79 ค่า RMSECV เท่ากับ 1.05 N นอกจากนี้ ข้อมูลภาพจากระบบ HSI ยังสามารถนำมาสร้างแผนภาพการกระจายตัวของค่าความแน่นเนื้อในระดับพิกเซล ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติภายในผลกล้วยในแต่ละระยะการบ่มได้อย่างชัดเจน ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าเทคนิค NIR-HSI สามารถใช้เป็นเครื่องมือแบบไม่ทำลายในการประเมินคุณภาพและระดับความสุกของผลกล้วยน้ำว้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการคัดแยกและควบคุมคุณภาพผลไม้ในระดับอุตสาหกรรม

คำสำคัญ: กล้วยน้ำว้า, ไฮเปอร์สเปกตรัลอินฟราเรดย่านใกล้, ระยะการสุก, ความแน่นเนื้อ

Abstract

This study aimed to investigate the potential of near-infrared hyperspectral imaging (NIR-HSI) for predicting the firmness of Namwa banana (*Musa ABB* cv. Namwa) and for generating spatial distribution maps of firmness within the fruit. A total of 70 banana samples were ripened at 25 ± 1 °C for 0–9 days, and spectral data were collected in the wavelength range of 864–1696 nm using an NIR-HSI system in reflectance mode. The spectral data were used to develop prediction models based on Partial Least Squares Regression (PLSR) with Leave-one-out full cross-validation. The results showed that spectral preprocessing using the First derivative provided the best prediction performance, with $R_c^2 = 0.88$ and RMSEC = 0.81 N for calibration, and $R_{cv}^2 = 0.79$ and RMSECV = 1.05 N for cross-validation. In addition, hyperspectral images were used to generate pixel-wise spatial distribution maps of firmness, which clearly illustrated the variation of internal properties of banana fruits during different ripening stages. These results demonstrate that NIR-HSI can be used as a non-destructive technique for evaluating fruit quality and ripening stages of Namwa bananas and has strong potential for application in fruit grading and quality control in the agricultural and food industries.

Keywords: Namwa banana, Near-infrared hyperspectral imaging, Ripening stage, Firmness

1. บทนำ

กล้วยน้ำว้า (*Musa ABB* cv. Namwa) เป็นหนึ่งในผลไม้เศรษฐกิจที่มีความสำคัญของประเทศไทย ทั้งในด้านการบริโภคภายในประเทศและการส่งออกไปยังต่างประเทศ เช่น จีน ญี่ปุ่น และประเทศในกลุ่มอาเซียน โดยในปี พ.ศ. 2568 ประเทศไทยส่งออกกล้วยสดมากกว่า 170,000 ตัน สร้างรายได้กว่า 7 พันล้านบาท [1] กล้วยน้ำว้ามีคุณค่าทางโภชนาการสูงและสามารถปลูก

ได้ตลอดทั้งปี ทำให้เป็นผลไม้ที่มีบทบาทสำคัญทั้งในระดับครัวเรือนและเชิงพาณิชย์ อย่างไรก็ตาม กล้วยมีอายุการเก็บรักษาสั้น เนื่องจากกระบวนการสุก (ripening process) เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้สีของเปลือกเปลี่ยนจากเขียวเป็นเหลืองและปรากฏจุดสีน้ำตาล รวมถึงเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เคมี และสรีรวิทยาภายในผล เช่น การสลายของคลอโรฟิลล์ การย่อยสลายแป้งเป็นน้ำตาล และการอ่อนตัวของเนื้อผลระหว่างกระบวนการสุก ค่าความแน่นเนื้อ (firmness) เป็นหนึ่งในพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้บ่งบอกระดับความสุกและคุณภาพของผลไม้ ดังนั้นค่าความแน่นเนื้อจึงถูกนำมาใช้เป็นตัวชี้วัดในการคัดแยก คุณภาพผลไม้ การประเมินระดับความสุก และการควบคุมคุณภาพผลผลิตในกระบวนการหลังการเก็บเกี่ยว [2] โดยค่าความแน่นเนื้อจะลดลงอย่างต่อเนื่องในระหว่างกระบวนการสุก และสามารถใช้เป็นเกณฑ์ในการคัดแยกระดับความสุก รวมถึงกำหนดความเหมาะสมสำหรับการขนส่ง การเก็บรักษา และการจำหน่ายได้ โดยกล้วยที่มีค่าความแน่นเนื้อสูงเหมาะสำหรับการขนส่งและการเก็บรักษาระยะยาว ในขณะที่ค่าความแน่นเนื้อต่ำเหมาะสำหรับการจำหน่ายและบริโภคทันที [3, 4]

การประเมินระดับความสุกของกล้วยนิยมใช้วิธีการแบบทำลายตัวอย่าง (destructive methods) เช่น การวัดค่าความแน่นของเนื้อด้วยเครื่องกด (Universal Testing Machine: UTM) แม้ว่าวิธีดังกล่าวจะให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำ แต่ไม่สามารถใช้ติดตามตัวอย่างเดิมซ้ำได้ และไม่เหมาะสมต่อการประเมินในกระบวนการผลิตจำนวนมาก [5] ด้วยเหตุนี้การพัฒนาเทคนิคการตรวจวัดแบบไม่ทำลาย (Nondestructive techniques) จึงได้รับความสนใจ เนื่องจากสามารถประเมินคุณภาพผลไม้ได้อย่างรวดเร็ว มีความต่อเนื่อง และไม่ทำให้ผลเสียหาย [6]

ในปัจจุบันเทคนิคการถ่ายภาพไฮเปอร์สเปกตรัลอินฟราเรดย่านใกล้ (Near-Infrared hyperspectral imaging; NIR-HSI) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมสามารถตรวจสอบคุณภาพของตัวอย่างได้อย่างรวดเร็วโดยไม่ทำลายตัวอย่าง เทคนิค NIR-HSI เป็นการผสมผสานระหว่างการถ่ายภาพและ สเปกโทรสโกปีในย่านอินฟราเรดใกล้ ทำให้สามารถบันทึกข้อมูลทั้งเชิงภาพและข้อมูลเชิงสเปกตรัมได้พร้อมกันในเวลาเดียวกัน หลักการสร้างสมการทำนายมีลักษณะคล้ายกับเทคนิค Near-Infrared Spectroscopy (NIRS) อย่างไรก็ตาม เทคนิค NIR-HSI จำเป็นต้องมีขั้นตอนการสกัดเส้นสเปกตรัมจากภาพถ่ายเชิงสเปกตรัมด้วยซอฟต์แวร์ที่เหมาะสม จากนั้นจึงนำข้อมูลสเปกตรัมที่ได้ไปสร้างความสัมพันธ์กับค่าที่ได้จากวิธีมาตรฐานโดยใช้วิธีเคโมเมตริกซ์ (chemometrics) เทคนิคนี้ได้รับการพัฒนาอย่างกว้างขวางในงานประเมินคุณภาพผลไม้ [6, 7] เนื่องจากสามารถบันทึกข้อมูลสเปกตรัมในทุกพิกเซลของตัวอย่าง ทำให้สามารถตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีของผลไม้ได้อย่างละเอียด จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามีการวิจัยที่ประยุกต์ใช้เทคนิค NIR-HSI ในการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีของเนื้อผลไม้ได้อย่างละเอียด เช่น Rajkumar et al. [8] ได้ใช้เทคนิค NIR-HSI ในช่วงความยาวคลื่น 400–1000 nm เพื่อจำแนกระดับความสุกของกล้วย พบว่าสามารถทำนายค่า ของแข็งที่ละลายน้ำทั้งหมด (TSS) ความชื้น และความแน่นของเนื้อ และ Chu et al. [9] ได้ใช้ Visible–near infrared hyperspectral imaging (Vis–NIR HSI) กับกล้วยพันธุ์ Fenjiao (*Musa ABB*, dwarf banana) เพื่อจำแนกความสุกและประเมินคุณภาพภายในของผล พบว่าระบบสามารถทำนายค่า SSC ($R_p^2 = 0.80, RMSEP=0.89\%$) และ ปริมาณกรด TA ($R_p^2 = 0.75, RMSEP=7.36\%$) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสะท้อนถึงศักยภาพของ NIR-HSI ในการตรวจวัดคุณภาพของกล้วยแบบไม่ทำลายได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้ งานวิจัยล่าสุดยังแสดงให้เห็นว่าเทคนิค NIR-HSI มีศักยภาพในการทำนายคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น ความแน่นเนื้อ และองค์ประกอบทางเคมีของผลไม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ [10, 11] อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ใช้เทคนิคนี้ในการทำนายค่าความแน่นเนื้อและแสดงการกระจายตัวเชิงพื้นที่ภายในผลกล้วยน้ำว่ายังมีรายงานค่อนข้างจำกัด แม้ว่าวิธีการประเมินความสุกด้วยการวัดค่าสีหรือภาพ RGB จะมีต้นทุนต่ำและใช้งานง่าย แต่สามารถประเมินได้เพียงลักษณะภายนอก ในขณะที่ NIR-HSI แม้มีต้นทุนสูงกว่า แต่สามารถสะท้อนคุณสมบัติภายในของผลไม้ได้ เนื่องจากสเปกตรัมมีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบทางเคมี เช่น น้ำ แป้ง และน้ำตาล ซึ่งสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของความแน่นเนื้อ

ดังนั้นการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงของกล้วยน้ำว่าในช่วงการบ่ม 0–9 วัน โดยใช้เทคนิค NIR-HSI และเปรียบเทียบกับวิธีการวัดแบบทำลาย ได้แก่ ค่าความแน่นเนื้อ (firmness) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลสเปกตรัมกับระดับความสุกของผลกล้วยน้ำว่า และแสดงผลแผนภาพการกระจายตัวของความแน่นเนื้อในผลกล้วยน้ำว่า แบบไม่ทำลายในการควบคุมคุณภาพผลผลิตในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

2. วิธีการศึกษา

2.1 การเตรียมตัวอย่างกล้วยน้ำว่า

ตัวอย่างกล้วยน้ำว่า (*Musa ABB* cv. 'Namwa') ถูกเก็บจากสวนในจังหวัดสุพรรณบุรี โดยเลือกผลที่มีอายุหลังดอกบานประมาณ 80–90 วัน ซึ่งอยู่ในระยะที่สุก (mature green stage) และมีขนาดใกล้เคียงกัน ตัวอย่างถูกคัดเลือกให้มีสภาพสมบูรณ์

ไม่ซ้ำ และปราศจากความเสียหายทางกายภาพ จากนั้นทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่น เช็ดให้แห้ง และบรรจุลงในกล่องบ่ม ก่อนนำไปเก็บในห้องควบคุมอุณหภูมิที่ 25 ± 1 °C ตัวอย่างถูกบ่มเป็นเวลา 0–9 วันเพื่อจำลองการเปลี่ยนแปลงระดับความสุระหว่างการเก็บรักษา โดยในแต่ละวันทำการสุ่มเลือกกล้วยจำนวน 7 ผลจากทุกกล่องรวมกัน เพื่อลดอิทธิพลของความแตกต่างระหว่างกล่อง รวมตัวอย่างทั้งหมด 70 ผล กล้วยแต่ละผลถูกตรวจวัดด้วยเทคนิคแบบไม่ทำลาย (NIR-HSI) ก่อน จำนวน 2 ครั้งต่อผล และนำค่าที่ได้มาเฉลี่ยเพื่อเป็นค่าตัวแทนของตัวอย่าง จากนั้นจึงนำตัวอย่างเดียวกันไปวิเคราะห์ด้วยวิธีแบบทำลายเพื่อใช้เป็นค่ามาตรฐาน สำหรับการวิเคราะห์ความสัมพันธ์กับข้อมูลสเปกตรัมและภาพที่ได้จากการวัด

2.2 การวัดค่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างผลกล้วยน้ำว้าด้วยเครื่องไฮเปอร์สเปกโทรอินฟราเรดย่านใกล้

ตัวอย่างผลกล้วยน้ำว้าถูกตรวจวัดสเปกตรัมด้วยระบบ Near-Infrared Hyperspectral Imaging (NIR-HSI) โดยใช้ระบบถ่ายภาพไฮเปอร์สเปกตรัม (ImSpector N17E, Specim, Spectral Imaging Ltd., Oulu, Finland) ในช่วงความยาวคลื่น 864–1696 nm ความละเอียดสเปกตรัม 3.24 nm แหล่งกำเนิดแสงใช้หลอดทั้งสแตนฮาโลเจนขนาด 20 W จำนวน 6 หลอด (DECOSTAR, Carrollton, GA, USA) จัดวางทำมุม 45° กับตัวอย่าง ตัวอย่างถูกวางบนถาดเลื่อนและสแกนด้วยความเร็ว 10 mm/s โดยกำหนด exposure time 9 ms และ frame rate 36 Hz กล้องถ่ายภาพอินฟราเรด (Xeva 992, Xenics Infrared Solutions, Leuven, Belgium) ถูกติดตั้งเหนือพื้นผิวตัวอย่างที่ระยะ 26 cm และวัดในโหมดการสะท้อนกลับ (reflectance mode) ภาพที่ได้มีขนาด 256 pixels (spectral) \times 320 pixels (spatial) และถูกบันทึกเป็นข้อมูล 3 มิติ (hypercube) ด้วยโปรแกรม LUMO software (Specim's LUMO Software Suite; Spectral Imaging Ltd., Oulu, Finland) ก่อนการวัดตัวอย่างทุกครั้งมีการปรับเทียบระบบด้วยค่า dark reference (0% reflectance) โดยปิดชัตเตอร์ของเลนส์กล้อง และค่า white reference (99.9% reflectance) โดยใช้แผ่น Spectralon [12] ดังแสดงใน Figure 1

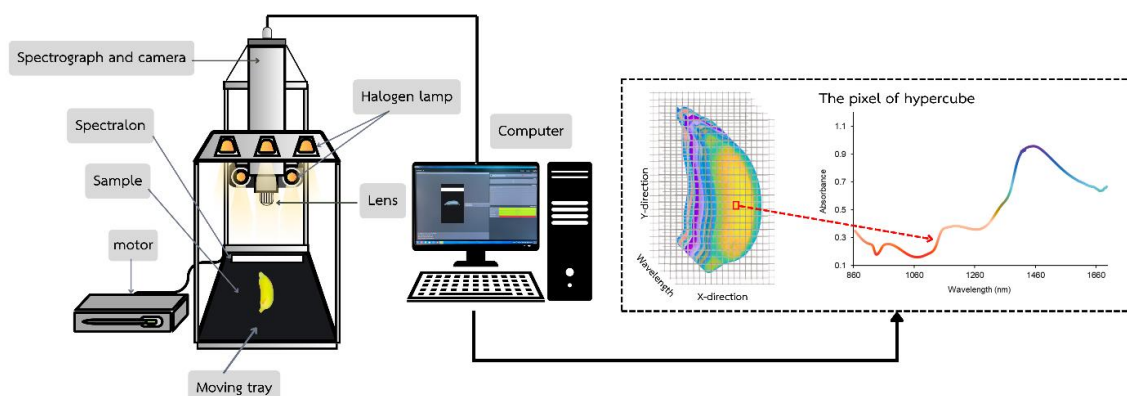


Figure 1 Measurement of absorbance using near infrared hyperspectral Imaging (NIR-HSI).

2.3 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของกล้วยน้ำว้า

2.3.1 การวัดค่าความแน่นเนื้อของกล้วยน้ำว้า (Firmness Measurement)

การวัดค่าความแน่นเนื้อของกล้วยน้ำว้าทำโดยไม่ปอกเปลือก เพื่อประเมินแรงต้านการกดทะลุของผลทั้งผล ซึ่งสะท้อนความแข็งแรงของเนื้อภายใต้เปลือกในสภาพจริงของผลไม้ โดยใช้เครื่องทดสอบแรงแบบสากล (Universal Testing Machine; รุ่น 5567, Instron Engineering Co., High Wycombe, England) พร้อมหัวกดปลายหน้าตัดเรียบเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.6 mm ตัวอย่างถูกวางบนกระดานระยละเอียดแห่งอัดตัวแน่นเพื่อพยุงให้ผลอยู่ในแนววงที่ ป้องกันการเคลื่อนที่ของตัวอย่างระหว่างการกด [13, 14] การกดกระทำที่ผิวด้านข้างของผลกล้วยบริเวณระหว่างสันผล เนื่องจากบริเวณดังกล่าวมีความสม่ำเสมอของโครงสร้างเนื้อผลมากกว่าส่วนสันหรือปลายผล ซึ่งอาจมีความแปรปรวนของความหนาและโครงสร้างภายในสูง การเลือกตำแหน่งนี้จึงช่วยลดความแปรปรวนของข้อมูลและเพิ่มความแม่นยำในการวัดค่าความแน่นเนื้อ โดยทำการวัดด้านละ 1 จุด รวม 2 จุดต่อผล ภายใต้ความเร็วในการกด 0.2 mm/s และระยะการกด 6 mm [15] ดังแสดงใน Figure 2 เครื่องบันทึกกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรง (force, N) และระยะการกด (distance, mm) โดยค่าความแน่นเนื้อ (firmness) กำหนดจากค่าแรงสูงสุดของกราฟ และนำค่าจากทั้งสองตำแหน่งมาเฉลี่ยเป็นค่าความแน่นเนื้อของผล [16] ดังแสดงในสมการที่ 1

$$\text{การคำนวณหาค่าความแน่นเนื้อ} \quad (\text{Firmness, N/mm}) = \frac{F_{\max}}{\text{Deformation}} \quad (1)$$

เมื่อ F_{\max} = ค่าแรงสูงสุด (N)
Deformation = ระยะการกด ณ จุดที่แรงสูงสุด (mm)



Figure 2 Firmness measurement of Namwa banana using a universal testing machine.

2.4 การวิเคราะห์สร้างสมการทำนาย

2.4.1 ตรวจสอบความผิดปกติของข้อมูลค่าอ้างอิง

นำข้อมูลค่าความแน่นเนื้อ (firmness) ซึ่งเป็นค่าอ้างอิงมาตรวจสอบข้อมูลที่ผิดปกติ (Outlier) โดยพิจารณาจากค่ามาตรฐาน (Standard score; Z) ถ้าหากค่า Z ของตัวอย่างใดมีค่ามากกว่า 3 หรือน้อยกว่า -3 ถือว่าตัวอย่างนั้นเป็นข้อมูลที่ผิดปกติ [17] ก่อนที่จะมีการสร้างสมการสอบเทียบมาตรฐาน (Calibration model)

2.4.2 ตรวจสอบความผิดปกติของข้อมูลสเปกตรา

นำข้อมูลสเปกตรามาตรวจสอบความผิดปกติของข้อมูล โดยตรวจสอบความผิดปกติของเส้นสเปกตรากับด้วยสายตา และตรวจดูด้วยการวิเคราะห์ด้วยวิธี Principal component analysis (PCA) ด้วยโปรแกรม The Unscrambler 9.8 (Camo, USA) ถึงข้อมูลสเปกตราน่าผิดปกติจากกลุ่มข้อมูลทั้งหมด ซึ่งไม่พบข้อมูลผิดปกติ

2.4.3 การวิเคราะห์ข้อมูลและสร้างสมการ

นำข้อมูลภาพสเปกตรัมแบบ 3 มิติ (Hypercube) มาประมวลผลโดยเลือกเฉพาะบริเวณที่สนใจ (Region of interest; ROI) ซึ่งเป็นส่วนของผลกล้วยน้ำว้า และตัดข้อมูลพื้นหลัง (background) ออก โดยกำหนด ROI ด้วยเทคนิคการแยกส่วนภาพ จากการกำหนดค่า threshold เพื่อแยกพิกเซลของตัวอย่างออกจากพื้นหลัง ทั้งนี้ได้ทำการพล็อตสเปกตรัมของตำแหน่งที่เป็นตัวอย่าง และพื้นหลัง เพื่อพิจารณาค่า threshold ที่เหมาะสม ซึ่งกำหนดไว้ที่ 0.3 ที่ความยาวคลื่น 1056 nm จากนั้นทำการเฉลี่ยค่าสเปกตรัมของทุกพิกเซลภายใน ROI เพื่อให้ได้สเปกตรัมเฉลี่ย 1 สเปกตรัมต่อ 1 ตัวอย่าง โดยใช้โปรแกรม Evince (Prediktera, Umeå, Sweden) และนำค่าความเข้มแสงของสเปกตรัมมาแปลงเป็นค่าการสะท้อนแสงสัมพัทธ์ (relative reflectance; R) ดังสมการที่ 2 และแปลงเป็นค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ดังสมการที่ 3 [18]

$$R(x,y,\lambda) = \frac{I_s - I_D}{I_w - I_D} \quad (2)$$

เมื่อ R = ค่าการสะท้อนแสงสัมพัทธ์ที่ความยาวคลื่น (ไร้นหน่วย)
 I_s = ค่าความเข้มแสงของตัวอย่างที่ความยาวคลื่น (ไร้นหน่วย)

$I_D =$ ค่าความเข้มแสงของแหล่งอ้างอิงสีดำที่ความยาวคลื่น (ไร้หน่วย)

 $I_W =$ ค่าความเข้มแสงของแหล่งอ้างอิงสีขาวที่ความยาวคลื่น (ไร้หน่วย)

การคำนวณเปลี่ยนค่าการสะท้อนแสงสัมพัทธ์ (Reflectance) เป็นค่าการดูดกลืน (Absorbance)

$$A = \log \left(\frac{1}{R} \right) \quad (3)$$

เมื่อ

A = ค่าการดูดกลืน (Absorbance) (ไร้หน่วย)

R = ค่าการสะท้อนแสงสัมพัทธ์ (Reflectance) (ไร้หน่วย)

2.4.4 การพัฒนาสมการสอบเทียบเพื่อการทำนายค่าความแน่นเนื้อในผลกล้วยน้ำว้า

การพัฒนาสมการทำนายค่าความแน่นเนื้อในผลกล้วยน้ำว้าทั้งหมดเพื่อสร้างสมการสอบเทียบ (calibration model) ข้อมูลสเปกตรัมถูกปรับแต่งทางคณิตศาสตร์ (spectral preprocessing) ด้วยเทคนิคต่างๆ ได้แก่ Smoothing, อนุพันธ์อันดับหนึ่ง (First derivative), อนุพันธ์อันดับสอง (Second derivative), Multiplicative Scatter Correction (MSC) และ Standard Normal Variate (SNV) โดยใช้โปรแกรม The Unscrambler 9.8 (Camo, USA) เพื่อลดสัญญาณรบกวนและอิทธิพลจากการกระเจิงของแสง จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาปรับแต่งไปสร้างสมการทำนายค่าความแน่นเนื้อ (firmness) ของผลกล้วยน้ำว้า โดยใช้ตัวอย่างทั้งหมด 70 ผล ด้วยวิธี Partial Least Squares Regression (PLSR) และใช้เทคนิค Leave-one-out full cross-validation พิจารณาสมการทำนายที่ดีที่สุด คือค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของการสร้างสมการ (R_c^2) ที่มีค่าสูงสุด ค่าความคลาดเคลื่อนในการสร้างสมการ (RMSEC) ที่มีค่าต่ำสุด ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของการทดสอบสมการการพิสูจน์แบบไขว้ (R_{cv}^2) ที่มีค่าสูงสุด ค่าความคลาดเคลื่อนของการทดสอบสมการการพิสูจน์แบบไขว้ (RMSECV) ที่มีค่าต่ำสุด

2.4.5 การแสดงแผนภาพการทำนายค่าความแน่นเนื้อในผลกล้วยน้ำว้า

วิธีการสร้างแผนภาพการทำนายการกระจายตัวของค่าความแน่นเนื้อของผลกล้วยน้ำว้า ด้วยโปรแกรม MATLAB R2023a (MathWorks Inc., USA) ซึ่งแผนภาพการทำนายการกระจายตัวของค่าความแน่นเนื้อถูกแสดงเป็นภาพสองมิติ (2D) ภาพ hypercube ของตัวอย่างที่สนใจถูกนำมาลบพื้นหลังออก เหลือเพียงส่วนของตัวอย่างผลกล้วยน้ำว้าที่ตำแหน่งที่สนใจ (ROI) ค่า regression coefficients ของสมการทำนาย Partial Least Squares Regression (PLSR) ที่ดีที่สุดถูกนำมาใช้ในการทำนายค่าความแน่นเนื้อโดยคูณกับเส้นสเปกตรัมในแต่ละพิกเซลของภาพ ROI แล้วแสดงแผนภาพการกระจายตัวของค่าความแน่นเนื้อบนผิวผลกล้วยน้ำว้า โดยกำหนดระดับสเกลสีตั้งแต่ สีน้ำเงินสำหรับค่าความแน่นเนื้อต่ำไปจนถึงสีแดงสำหรับค่าความแน่นเนื้อสูง

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 คุณลักษณะของผลกล้วยน้ำว้าในแต่ละระยะการบ่ม

จากการทดลองนำผลกล้วยน้ำว้าจำนวน 70 ผล ซึ่งผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 25 ± 1 °C ในช่วงการบ่ม 0–9 วัน เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพภายนอก พบว่าในช่วงเริ่มต้นการบ่ม (วัน 0) เปลือกผลมีสีเขียวเข้ม ผิวตึง และเนื้อค่อนข้างแข็ง เมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้น สีเปลือกค่อยๆ เปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีเหลือง และเริ่มปรากฏจุดสีน้ำตาลเล็กน้อยในช่วงปลายการบ่ม (วัน 8–9) ดังแสดงใน Figure 3 พร้อมกับการเพิ่มขึ้นของความนุ่มและกลิ่นหอมของผล การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวสอดคล้องกับรายงานของ Subedi et al. [4] ที่ระบุว่า การเปลี่ยนแปลงสีและกลิ่นของกล้วยระหว่างการบ่มสัมพันธ์กับการสลายตัวของคลอโรฟิลล์และการสะสมของน้ำตาล ลักษณะภายนอกเหล่านี้สามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ระดับความสุกของผลไม้ และสามารถใช้ร่วมกับค่าความแน่นเนื้อ (firmness) เพื่อช่วยจำแนกระดับความสุกของผลกล้วยน้ำว้าได้

3.2 ผลการวิเคราะห์ค่าทางสถิติของความแน่นเนื้อในผลกล้วยน้ำว้า

จากการตรวจสอบความผิดปกติ (outliers) ของข้อมูลค่าความแน่นเนื้อของผลกล้วยน้ำว้าจำนวน 70 ตัวอย่าง พบค่าผิดปกติจำนวน 1 ตัวอย่าง ซึ่งถูกตัดออกจากการวิเคราะห์เพื่อป้องกันผลกระทบต่อสมการทำนาย เมื่อพิจารณา

มาตรฐาน (Z-score) ของข้อมูลที่ใช้ในการสร้างสมการทำนาย พบว่าข้อมูลที่เหลือทั้งหมดอยู่ในช่วงค่าที่เหมาะสมและไม่พบค่าผิดปกติของตัวอย่าง ข้อมูลค่าความแน่นเนื้อของผลกล้วยน้ำว้าที่ใช้ในการสร้างและทดสอบสมการทำนายแสดงดัง Table 1



Figure 3 Physical characteristics of Namwa banana at different ripening stages.

Table 1 Statistical data of firmness of Namwa banana used for Partial Least Squares Regression (PLSR) analysis.

Parameters	No.	Min	Max	Mean	SD
Firmness (N)	69	0.63	7.56	3.10	2.31

3.3 ผลการวิเคราะห์ค่าความแน่นเนื้อของผลกล้วยน้ำว้าในแต่ละระยะการบ่ม

จากการวิเคราะห์ค่าความแน่นเนื้อของผลกล้วยน้ำว้าในแต่ละระยะการบ่ม พบว่าค่าความแน่นเนื้อมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้น โดยในช่วงต้นของการบ่ม (วัน 0–1) ผลกล้วยมีค่าความแน่นเนื้อเฉลี่ยสูง แสดงถึงเนื้อผลที่แข็งและมีโครงสร้างผนังเซลล์ที่คงรูปดี ในขณะที่ช่วงปลายการบ่ม (วัน 8–9) ค่าความแน่นเนื้อลดลงอย่างชัดเจน สะท้อนถึงการอ่อนตัวของเนื้อผลตามกระบวนการสุกของกล้วย ดังแสดงใน Table 2 และ Figure 4 การลดลงดังกล่าวเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผนังเซลล์ โดยเฉพาะการสลายตัวของเพกตินให้เป็นเพกตินที่ละลายน้ำได้ รวมถึงการย่อยสลายของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลส ส่งผลให้ความแข็งแรงของเนื้อผลลดลง ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับรายงานของ Sirisomboon et al. [16] ที่พบว่า การลดลงของค่าความแน่นเนื้อมีความสัมพันธ์กับการสลายตัวของเพกตินในผนังเซลล์ ซึ่งเกี่ยวข้องกับการทำงานของเอนไซม์ polygalacturonase และ pectin methyl esterase ระหว่างกระบวนการสุกของผลไม้

Table 2 Average firmness (N) of Namwa banana at different ripening stages.

ripening stages (Day)	Firmness (N)
0	5.8317±0.31 ^e
1	6.3033±0.65 ^f
2	4.8159±0.74 ^d
3	5.7802±0.32 ^e
4	2.4033±0.72 ^c
5	1.7478±0.34 ^b
6	0.9455±0.26 ^a
7	1.0185±0.15 ^a
8	0.7528±0.09 ^a
9	0.7455±0.09 ^a

Values are presented as mean \pm standard deviation. Different lowercase letters within the same column indicate significant differences at $p < 0.05$ according to Duncan's Multiple Range Test.

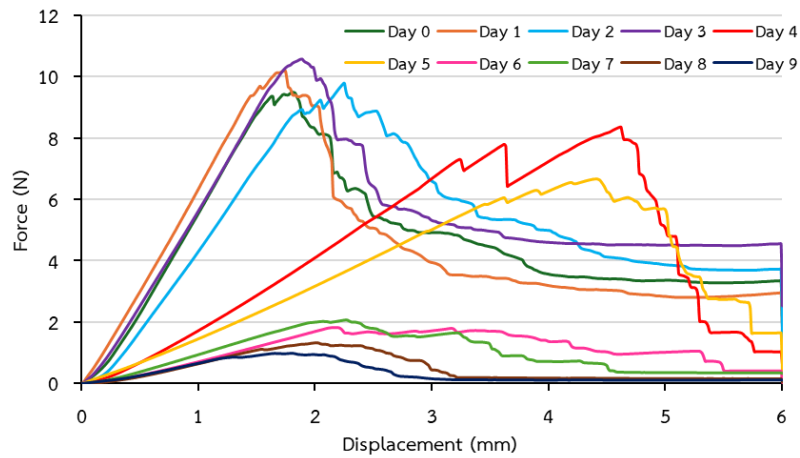


Figure 4 Changes in firmness of Namwa banana during ripening.

3.4 สเปกตรารการดูดกลืนแสงของผลกล้วยน้ำว้า

จากการวัดสเปกตรารการดูดกลืนแสงของผลกล้วยน้ำว้าจากเครื่อง Hyperspectral imaging ในช่วงความยาวคลื่น 864–1696 nm พบว่าสเปกตรารการดูดกลืนแสงของตัวอย่างในแต่ละระยะการบ่มมีรูปแบบใกล้เคียงกัน แต่ระดับการดูดกลืนแสงมีความแตกต่างกันในบางช่วงคลื่น ดังแสดงใน Figure 9 (a) โดยพบแถบการดูดกลืนหลักที่ประมาณ 970 nm (O–H ของน้ำ), 1196 nm (C–H ของคาร์โบไฮเดรต) และ 1450 nm (O–H) [19] เมื่อนำสเปกตรารไปปรับแต่งด้วย Second derivative ดังแสดงใน Figure 9 (b) ทำให้ตำแหน่งพีคเด่นชัดขึ้นและลดอิทธิพลของการกระเจิงแสง โดยพบพีคเพิ่มเติมที่ 1157 nm (C–O), 1339 nm (C–H), 1407 nm (O–H) และ 1453 nm (N–H) [19-21] ซึ่งสัมพันธ์กับองค์ประกอบทางเคมีภายในผลกล้วย

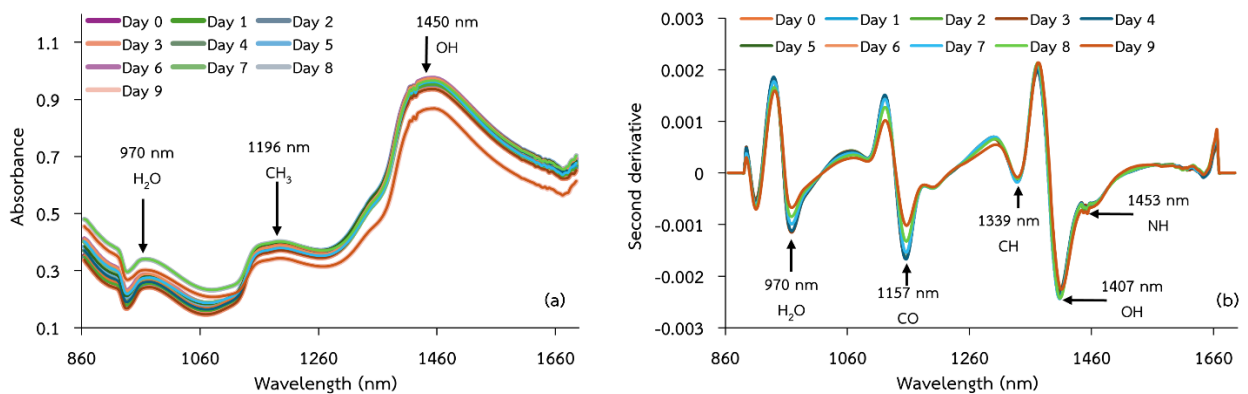


Figure 5 Absorbance spectra of Namwa banana: (a) raw spectra and (b) spectra preprocessed using Second derivative methods.

3.5 ผลการสร้างสมการทำนายความแน่นเนื้อของผลกล้วยน้ำว้าด้วยวิธี Partial Least Squares Regression (PLSR) โดยใช้ข้อมูลสเปกตรารจากเครื่อง Hyperspectral Imaging (HSI)

การสร้างสมการทำนายค่าความแน่นเนื้อของผลกล้วยน้ำว้า ซึ่งนำข้อมูลสเปกตรารในช่วงความยาวคลื่น 864–1696 nm มาปรับแต่งด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์หลายรูปแบบ พบว่าการปรับแต่งด้วยวิธี First derivative ดังแสดงใน (Table 3) ให้ผลการสร้างสมการทำนายที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทุกสมการ โดยมีค่า R_c^2 เท่ากับ 0.88 และค่า RMSEC เท่ากับ 0.81 N และมีค่า R_{cv}^2 เท่ากับ 0.79 และค่า RMSECV เท่ากับ 1.05 N ดังแสดงใน Figure 6 (a) ซึ่งแสดงว่าสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการทำนายค่าความแน่นเนื้อของผลกล้วยน้ำว้าได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chen et al. [10] ที่รายงานว่าสามารถใช้เทคนิค VIS-NIR-HSI

ในการทำนายค่าความแน่นเนื้อและแสดงการกระจายตัวเชิงพื้นที่ของผลโกจิเบอร์รี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยให้ค่าความแม่นยำ R_p^2 เท่ากับ 0.91 และ RMSEP เท่ากับ 0.524 แสดงให้เห็นว่าสัญญาณสเปกตรัมสามารถนำมาใช้ประเมินค่าความแน่นเนื้อได้ โดยสเปกตรัมมีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบภายใน เช่น น้ำและคาร์โบไฮเดรต (O-H, C-H) อย่างไรก็ตามค่า R_{cv}^2 ที่ลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับค่า R_c^2 แสดงให้เห็นว่าความสามารถในการทำนายลดลงเนื่องจากจำนวนตัวอย่างที่ยังมีจำนวนน้อย ส่งผลให้ช่วงและการกระจายของค่าความแน่นเนื้อไม่ครอบคลุมอย่างเพียงพอ ดังนั้นควรเพิ่มจำนวนตัวอย่างให้ครอบคลุมช่วงค่าความแน่นเนื้อที่กว้างขึ้น และมีการกระจายตัวของข้อมูลอย่างสม่ำเสมอตลอดช่วง เพื่อเพิ่มความแม่นยำของสมการการทำนาย นอกจากนี้ควรมีการเพิ่มการทดลองด้านรสชาติ ความหวาน และปริมาณแป้ง เพื่อรวมเป็นค่าดัชนีวัดคุณภาพกล้วยน้ำว้าก่อนการส่งออก ซึ่งจะช่วยยกระดับคุณภาพสินค้ากล้วยไทยได้

เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (regression coefficient) ดังแสดงใน Figure 6 (b) พบว่าความยาวคลื่นที่มีอิทธิพลต่อการทำนายค่าความแน่นเนื้อ ได้แก่ 919 nm ซึ่งสัมพันธ์กับพันธะ O-H ของน้ำ, 1043 nm และ 1180 nm ซึ่งสัมพันธ์กับพันธะ C-H ของคาร์โบไฮเดรต [19] และบริเวณ 1443 nm ซึ่งสัมพันธ์กับพันธะ O-H นอกจากนี้ยังพบพิคบริเวณ 1561 nm และ 1652 nm ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับพันธะของโปรตีนและองค์ประกอบอินทรีย์อื่นภายในเนื้อผลกล้วย [20, 21] ความยาวคลื่นเหล่านี้สะท้อนถึงการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบทางเคมีภายในผลกล้วยระหว่างกระบวนการสุก ซึ่งส่งผลต่อค่าความแน่นเนื้อของผล

Table 3 Results of the PLSR model for predicting firmness of Namwa banana using hyperspectral imaging (HSI) spectral data.

Pretreatment	LV	R_c^2	RMSEC (N)	R_{cv}^2	RMSECV (N)
Absorbance	6	0.84	0.89	0.77	1.11
Smoothing	6	0.81	0.99	0.76	1.12
First derivative	4	0.88	0.81	0.79	1.05
Second derivative	2	0.83	0.95	0.76	1.13
MSC	3	0.73	0.79	0.71	1.26
SNV	2	0.71	1.22	0.70	1.27

LV: latent variables, SNV: standard normal variate, MSC: Multiplicative Scatter Correction

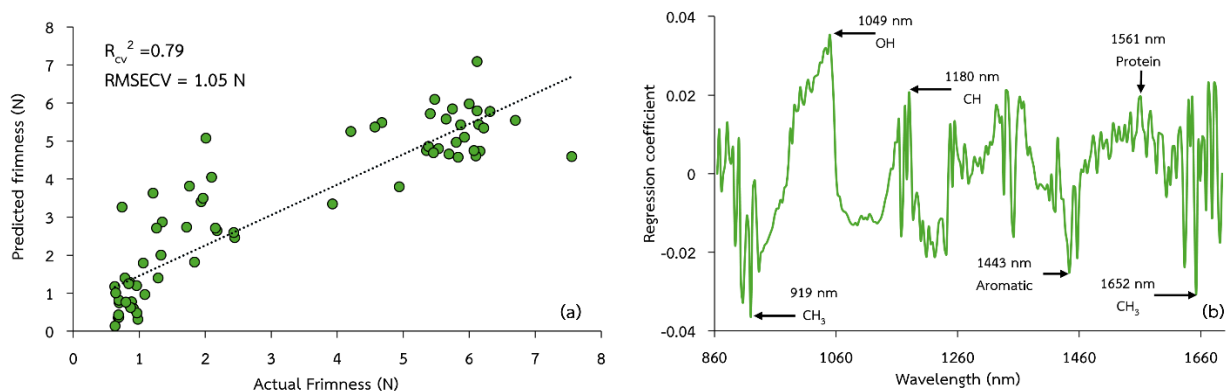


Figure 6 Graph of (a) prediction results for firmness in cross-validation and (b) regression coefficients for firmness prediction of Namwa banana using the PLSR method.

3.6 ผลการสร้างแผนภาพการทำนายค่าความแน่นเนื้อของกล้วยน้ำว้า

จาก Figure 7 (a) แสดงภาพถ่ายจริงของผลกล้วยน้ำว้าในแต่ละระยะการบ่ม ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงของสีเปลือกจากสีเขียวในระยะดิบไปเป็นสีเหลืองในระยะสุก อย่างไรก็ตามการประเมินความแน่นเนื้อด้วยการสังเกตด้วยสายตาเพียงอย่างเดียวไม่สามารถแยกระดับความแตกต่างได้อย่างชัดเจน ดังนั้นจึงได้สร้างแผนภาพการกระจายตัวของค่าความแน่นเนื้อ โดยกำหนดสเกลสีตั้งแต่สีน้ำเงินที่ค่าความแน่นเนื้อต่ำ (0 N) ไปจนถึงสีแดงที่ค่าความแน่นเนื้อสูง (10 N) ดังแสดงใน Figure 7 (b) แผนภาพการกระจายตัวแสดงให้เห็นว่าในช่วงต้นของการบ่มกล้วยมีค่าความแน่นเนื้อสูง ซึ่งปรากฏเป็นบริเวณสีแดงเข้มและสีเหลือง ขณะที่เมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้นค่าความแน่นเนื้อจะลดลงและปรากฏเป็นสีน้ำเงินมากขึ้น สะท้อนถึงการอ่อนตัวของเนื้อผลในระหว่างกระบวนการสุก ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของเทคนิค NIR-HSI ในการประเมินคุณภาพผลไม้แบบไม่ทำลาย และสามารถแสดงการกระจายตัวของความแน่นเนื้อภายในผลกล้วยน้ำว้าได้ในระดับพิกเซล

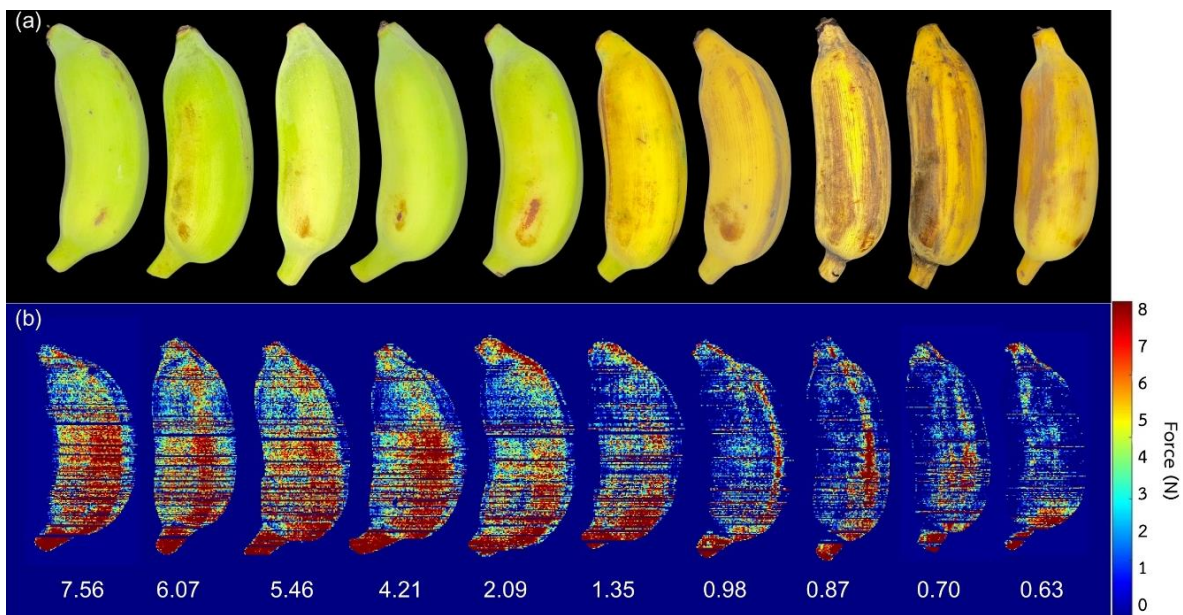


Figure 7 Prediction map of firmness (N) distribution of Namwa banana at different ripening stages

4. สรุป

ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าเทคนิคการถ่ายภาพไฮเปอร์สเปกตรัลอินฟราเรดย่านใกล้ (Near-Infrared Hyperspectral Imaging; NIR-HSI) ในช่วงความยาวคลื่น 864–1696 nm สามารถนำมาใช้ในการประเมินคุณภาพของผลกล้วยน้ำว้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยข้อมูลสเปกตรัมที่ได้จากระบบ NIR-HSI สามารถนำมาสร้างสมการด้วยวิธี PLSR เพื่อทำนายค่าความแน่นเนื้อ (firmness) ของผลกล้วยน้ำว้าได้ โดยให้ค่าความถูกต้องในการสร้างสมการที่ดีที่สุดมีค่า R_c^2 เท่ากับ 0.88 และค่า RMSEC เท่ากับ 0.81 N ขณะที่ผลการทดสอบสมการที่ดีที่สุดมีค่า R_{cv}^2 เท่ากับ 0.79 และค่า RMSECV เท่ากับ 1.05 N ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการทำนายที่อยู่ในระดับดี นอกจากนี้เทคนิค NIR-HSI ยังสามารถนำมาสร้างแผนภาพการกระจายตัวของค่าความแน่นเนื้อในแต่ละพิกเซลของตัวอย่าง ทำให้สามารถแสดงการกระจายตัวเชิงพื้นที่ของคุณสมบัติภายในผลกล้วยน้ำว้าได้ ผลการศึกษานี้สะท้อนถึงศักยภาพของเทคนิค NIR-HSI ในการตรวจวัดคุณภาพผลไม้แบบไม่ทำลาย ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการประเมินคุณภาพผลผลิตและการคัดแยกระดับความสุกของผลไม้ในระดับอุตสาหกรรมได้ในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ที่สนับสนุนทุนการศึกษา และคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ที่กรุณาสับสนุนงบประมาณวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Progress Thai Trading. 2025. Annual fruit export report of Thailand 2025. Available from: <https://www.progressthaitrading.co.th/>. (Accessed: 10 November 2025).
- [2] Ofosu DO, Appiah F and Banful B. 2020. Interactive effect of variety and irradiation dose on postharvest behaviour of fruits of two plantain (*Musa sp* AAB) varieties from the green stage to the onset of ripening. *Am. J. Plant Sci.* 11: 372-381.
- [3] Dadzie BK and Orchard JE. 1997. Routine post-harvest screening of banana/plantain hybrids: criteria and methods. Bioversity International, Rome.
- [4] Subedi P and Walsh K. 2011. Assessment of sugar and starch in intact banana and mango fruit by SWNIR spectroscopy. *Postharvest Biology Technology* 62: 238-245.
- [5] Jha SN, Narsaiah K, Basediya AL, Sharma R, Jaiswal P, Kumar R and Bhardwaj R. 2011. Measurement techniques and application of electrical properties for nondestructive quality evaluation of foods—A review. *J. Food Sci. Technol.* 48: 387-411.
- [6] Nicolai BM, Beullens K, Bobelyn E, Peirs A, Saeys W, Theron KI and Lammertyn J. 2007. Nondestructive measurement of fruit and vegetable quality by means of NIR spectroscopy: A review. *Postharvest biology technology* 46: 99-118.
- [7] Huang H, Liu L and Ngadi MO. 2014. Recent developments in hyperspectral imaging for assessment of food quality and safety. *Sensors* 14: 7248-7276.
- [8] Rajkumar P, Wang N, Elmasry G, Raghavan GV and Gariépy Y. 2012. Studies on banana fruit quality and maturity stages using hyperspectral imaging. *J. Food Eng.* 108: 194-200.
- [9] Chu X, Miao P, Zhang K, Wei H, Fu H, Liu H, Jiang H and Ma Z. 2022. Green Banana maturity classification and quality evaluation using hyperspectral imaging. *Agriculture* 12: 530.
- [10] Chen Y, Jiang X, Liu Q, Wei Y, Wang F, Yan L, Zhao J, Cao X and Xing H. 2024. A hyperspectral imaging technique for rapid non-destructive detection of soluble solid content and firmness of wolfberry. *J. Food Meas. Charact.* 18: 7927-7941. <https://doi.org/10.1007/s11694-024-02775-5>
- [11] Huang C, Liang D, Wang X, Shi Y, Zhou D, Jiang J, Hu Y and Sun Y. 2025. Structured hyperspectral imaging and machine learning for non-destructive kiwifruit firmness prediction, classification, and intelligent post-harvest management. *J. Food Compos. Anal.* 108026. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2025.108026>
- [12] Yang HY, Inagaki T, Ma T and Tsuchikawa S. 2017. High-resolution and non-destructive evaluation of the spatial distribution of nitrate and its dynamics in spinach (*Spinacia oleracea L.*) leaves by near-infrared hyperspectral imaging. *Front. Plant Sci.* 8: 1937. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01937>
- [13] Ramaswamy H and Tung M. 1989. textural changes as related to colour of ripening bananas.
- [14] Katsuragi H and Durian D. 2007. Unified force law for granular impact cratering. *Nature physics* 3: 420-423.
- [15] Sirisomboon P and Pornchaloempong P. 2011. Instrumental textural properties of mango (cv Nam Doc Mai) at commercial harvesting time. *Int. J. Food Prop.* 14: 441-449.
- [16] Sirisomboon P, Tanaka M, Fujita S and Kojima T. 2007. Evaluation of pectin constituents of Japanese pear by near infrared spectroscopy. *J. Food Eng.* 78: 701-707.
- [17] Meier KJ, Brudney JL and Bohte J. 2014. Applied statistics for public and nonprofit administration. 9thend. Cengage Learning, Boston, MA.
- [18] Ma T, Li X, Inagaki T, Yang H and Tsuchikawa S. 2018. Noncontact evaluation of soluble solids content in apples by near-infrared hyperspectral imaging. *J. Food Eng.* 224: 53-61. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.12.028>

-
- [19] Osborne BG, Fearn T and Hindle PH. 1993. Practical NIR spectroscopy with applications in food and beverage analysis. 2ndedn. Longman Scientific & Technical, Harlow.
- [20] Williams P and Norris KH. 1987. Near-infrared technology in the agricultural and food industries. 2ndedn. American Association of Cereal Chemists, St. Paul, MN.
- [21] Workman J and Weyer L. 2012. Practical guide and spectral atlas for interpretive near-infrared. 2ndedn. CRC Press, Boca Raton, FL.

การประเมินสหสัมพันธ์สำหรับสัดส่วนช่องว่างของการไหลแบบสองเฟสในช่องทางการไหลขนาดไมโคร Evaluation of Void Fraction Correlations for Two-Phase Flow in Micro-Scale Channel

มันทนา กันทาฟัน¹ ศักรินทร์ ชิงกุลพิทักษ์¹ และ ศิระ สายศรี^{1,*}
Manthana Kanthafun¹, Sakkarin Chingulpitak¹ and Sira Saisorn^{1,*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร 86160 ประเทศไทย
¹Department of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Prince of Chumphon Campus Chumphon Province, 86160, Thailand
*Corresponding author: Sira Saisorn, e-mail address: sira.sa@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาค่าสัดส่วนช่องว่างของการไหลสองสถานะภายในท่อตรงขนาดไมโครภายใต้สภาวะการเดือดของสารทำความเย็น R-134a สำหรับการไหลในทิศทางขึ้นในแนวตั้งภายในท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1 mm และความยาว 500 mm การทดลองดำเนินการภายใต้เงื่อนไขความดันอิ่มตัว 8 bar ช่วงฟลักซ์ความร้อน 1–60 kW/m² และช่วงฟลักซ์มวล 250–820 kg/m²s ในการศึกษานี้ได้ประยุกต์ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพถ่ายจากการทดลองเพื่อประเมินค่าสัดส่วนช่องว่าง โดยใช้กล้องความเร็วสูงบันทึกภาพรูปแบบการไหลภายในท่อโปร่งใสและนำมาประมวลผลเพื่อแยกสถานะของของไหล จากนั้นคำนวณสัดส่วนพื้นที่ของของไหลสถานะแก๊สภายในท่อซึ่งใช้เป็นตัวแทนของค่าสัดส่วนช่องว่างของการทดลอง ผลการทดลองที่ได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการคำนวณที่ได้จากสมการสหสัมพันธ์ที่มีอยู่ในงานวิจัยที่ผ่านมา โดยประเมินความแม่นยำด้วยค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมบูรณ์เพื่อคัดเลือกสมการที่เหมาะสม ผลการวิเคราะห์พบว่าแบบจำลองในกลุ่ม Drift-flux model ให้ความสอดคล้องกับข้อมูลการทดลองมากที่สุด โดยเฉพาะสมการสหสัมพันธ์ของ Morooka et al., [1] ให้ค่า MAE ต่ำสุดเท่ากับ 5.9% และข้อมูลทั้งหมดอยู่ภายในช่วงความคลาดเคลื่อน $\pm 15\%$ เมื่อเปรียบเทียบกับสมการสหสัมพันธ์อื่นๆ ที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนสูงกว่า แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการทำนายที่เหมาะสมสำหรับเงื่อนไขการทดลองของงานวิจัยนี้

คำสำคัญ: การไหลสองสถานะ, สัดส่วนช่องว่าง, ท่อขนาดไมโคร, การไหลขณะเดือด, Drift-flux model

Abstract

This research investigated the void fraction of two-phase flow in a straight microtube under boiling conditions of refrigerant R-134a for vertical upward flow. The experiments were conducted using a tube with an inner diameter of 1 mm and a length of 500 mm at a saturation pressure of 8 bar, with heat flux ranging from 1 to 60 kW/m² and mass flux ranging from 250 to 820 kg/m²s. In this study, an experimental image analysis technique was applied to evaluate the void fraction by using a high-speed camera to record the flow patterns inside a transparent tube, followed by image processing to distinguish the fluid phases. The gas-phase area fraction inside the tube was calculated and used as a representative value of the experimental void fraction. The obtained results were compared with predictions from existing correlations. Their predictive accuracy was evaluated using the mean absolute error (MAE) to identify the most suitable correlation. The results revealed that models in the drift-flux category were capable of predicting the present experimental data with good agreement, with the correlation of Morooka et al. yielding the lowest MAE of 5.9% and all data points falling within the $\pm 15\%$ error range. Compared to other correlations with higher deviations, this indicates superior predictive capability under the present experimental conditions.

Keywords: Two-phase flow, Void fraction, Micro-channel, Flow boiling, Drift-flux model

1. บทนำ

การไหลสองสถานะภายใต้สภาวะการเดือดภายในท่อขนาดเล็กและท่อระดับไมโครได้รับความสนใจอย่างมากในงานด้านวิศวกรรมความร้อน เนื่องจากการประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ระบบทำความเย็น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง และระบบระบายความร้อนประสิทธิภาพสูง พฤติกรรมการไหลในท่อขนาดไมโครมีความแตกต่างจากท่อขนาดปกติอย่างมีนัยสำคัญ อันเนื่องมาจากอิทธิพลของแรงตึงผิว แรงเฉื่อย และแรงโน้มถ่วงที่เปลี่ยนแปลงไปตามขนาดเรขาคณิตของช่องทางการไหล หนึ่งในพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้ในการอธิบายลักษณะการไหลสองสถานะคือ ค่าสัดส่วนช่องว่างเป็นพารามิเตอร์สำคัญ

ของการไหลสองสถานะ เนื่องจากมีผลโดยตรงต่อความดันตกคร่อม อัตราการถ่ายเทความร้อน และลักษณะการไหล โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่องทางไหลขนาดไมโครซึ่งมีข้อจำกัดด้านขนาดและพฤติกรรมไหลที่แตกต่างจากระดับมาโคร

สมการสหสัมพันธ์สำหรับการทำนายค่าสัดส่วนช่องว่างสามารถแบ่งออกได้เป็นหลายกลุ่ม โดย [2] ได้อธิบายการจัดกลุ่มของสมการสหสัมพันธ์ดังกล่าว พร้อมทั้งแสดงรูปแบบสมการพื้นฐานของแต่ละแบบจำลอง ได้แก่ homogeneous correlation ซึ่งพิจารณาการไหลของแก๊สและของเหลวเป็นของผสมเดียวกัน, Slip flow correlation ซึ่งคำนึงถึงความแตกต่างของความเร็วระหว่างสองเฟส และ Drift-flux correlation ซึ่งอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของเฟสและการกระจายตัวของแก๊สภายในของไหล เพื่อให้เข้าใจพฤติกรรมของการไหลสองสถานะและการทำนายค่าสัดส่วนช่องว่างอย่างเป็นระบบ

งานวิจัยที่ผ่านมาในส่วนนี้จึงถูกนำเสนอโดยพิจารณาตามลักษณะและขนาดของช่องทางไหล โดยเริ่มจากการไหลในท่อหรือระบบขนาดใหญ่ (macro-scale) ซึ่งเป็นพื้นฐานของการพัฒนาแบบจำลองต่างๆ

ในระบบการไหลขนาดใหญ่ ได้มีการใช้เทคนิคการวัดที่มีความละเอียดสูงเพื่อศึกษาการกระจายตัวของเฟสภายในหน้าตัด เช่น การใช้เครื่อง X-ray CT scanner ซึ่งช่วยให้สามารถวิเคราะห์ค่าสัดส่วนช่องว่างได้อย่างแม่นยำ โดย [1] ได้ทำการทดลองในช่วงความดัน 0.49–0.98 MPa และ mass flux $3-5 \times 10^6$ kg/m²h พบว่าค่า void fraction เพิ่มขึ้นตามคุณภาพไอและฟลักซ์มวล แต่ลดลงเมื่อความดันเพิ่มขึ้น และสามารถอธิบายได้ดีด้วยแบบจำลอง drift-flux อย่างไรก็ตาม สมการ Zuber–Findlay มีแนวโน้มประเมินค่าต่ำในช่วง void fraction สูงมาก ในขณะที่เดียวกันยังมีการพัฒนาแบบจำลองเชิงกลศาสตร์ของไหลเพื่อใช้อธิบายพฤติกรรมของการไหลสองสถานะในช่วงเงื่อนไขที่กว้างขึ้น โดยแบบจำลอง two-fluid ถูกนำมาใช้ในการพิจารณาแรงเสียดทานระหว่างเฟสและผลของรูปแบบการไหล ซึ่ง [3] ได้วิเคราะห์และรวบรวมกฎการปิดสำหรับรหัส CATHARE ภายใต้สภาวะความดันสูงในช่วง 0.1–16 MPa โดยอาศัยข้อมูลจากการทดลองหลายแหล่ง เช่น การไหลในท่อแนวตั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 mm ไปจนถึงชุดแท่งเชื้อเพลิง (Rod bundle) เพื่อพัฒนา interfacial friction correlation ที่ขึ้นอยู่กับค่าสัดส่วนช่องว่างและรูปแบบการไหล เช่น การไหลแบบแยกชั้นและแบบกระจาย นอกจากนี้ยังได้เสนอวิธีการคำนวณแรงเสียดทานที่ผนังท่อและการถ่ายเทความร้อนระหว่างเฟส เพื่อให้แบบจำลองมีความต่อเนื่องและลดความไม่เสถียรในการคำนวณ

ในขณะเดียวกันแม้จะมีการพัฒนาเทคนิคการวัดและแบบจำลองอย่างต่อเนื่อง งานวิจัยในท่อนวดยังคงแสดงให้เห็นข้อจำกัดของแบบจำลองที่มีอยู่ โดยพบว่าพฤติกรรมของค่าสัดส่วนช่องว่างและความดันตกคร่อมขึ้นอยู่กับรูปแบบการไหลอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่ง [4] ได้รายงานจากการไหลสองสถานะแก๊ส-ของเหลวแบบไหลลงแนวตั้งในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 34 mm โดยใช้สารทำงาน air-water ภายใต้สภาวะ adiabatic งานทดลองประกอบด้วยข้อมูลทั้งหมด 194 จุดการทดลอง ในช่วงความเร็วผิวของแก๊ส 0.019–3.24 m/s และของเหลว 0.015–1.40 m/s การศึกษามุ่งเน้นการวิเคราะห์ค่า void fraction และ pressure drop รวมถึงการเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่มีอยู่ว่าพฤติกรรมของ void fraction และ pressure drop ขึ้นอยู่กับชนิดของรูปแบบการไหลอย่างมีนัยสำคัญ

นอกจากนี้ ปัจจัยทางเรขาคณิตของช่องทางไหลยังมีบทบาทสำคัญต่อพฤติกรรมของการไหลสองสถานะ โดยเฉพาะในกรณีที่มีท่อเอียง ซึ่งส่งผลต่อแรงลอยตัวและการกระจายตัวของเฟสภายในท่อ จากการศึกษาการไหลแบบสลักในท่อเอียง ± 10 องศา ที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 และ 2 in ความยาวท่อที่ 80 ft โดยใช้อากาศและน้ำ (Air-Water) เป็นสารทำงานหลัก และมีการใช้สารละลายน้ำ-กลีเซอรินเพื่อศึกษาผลของความหนืดในการทดลองทำที่ความดันบรรยากาศ พบว่ามุมเอียงมีอิทธิพลต่อความเร็วของฟองก๊าซและการกักตัวของของเหลวอย่างมีนัยสำคัญ โดยความสัมพันธ์ของความเร็วฟองก๊าซสามารถอธิบายได้ในรูปแบบของแบบจำลอง drift-flux ซึ่ง [5] ได้แสดงให้เห็นว่าจำเป็นต้องมีการพัฒนาสมการสหสัมพันธ์เฉพาะสำหรับการทำนายในท่อเอียง เพื่อให้สามารถครอบคลุมพฤติกรรมของการไหลได้อย่างแม่นยำมากยิ่งขึ้น

อย่างไรก็ตามพิจารณาการไหลสองสถานะในท่อขนาดเล็กและขนาดไมโคร พบว่าพฤติกรรมของการไหลมีความแตกต่างจากท่อขนาดใหญ่อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากอิทธิพลของแรงตึงผิว ขนาดของช่องทางไหล และการครอบงำของแรงระหว่างเฟส ส่งผลให้รูปแบบการไหลและการกระจายตัวของเฟสมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น

ในบริบทดังกล่าว ได้มีการรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลจากงานวิจัยที่ผ่านมาเพื่อประเมินความสามารถของแบบจำลองทำนายต่างๆ โดย [6] ได้ศึกษาค่า void fraction จากฐานข้อมูลที่ครอบคลุมท่อในช่วงขนาด 0.5–13.84 mm รวมถึงสารทำงานหลายชนิด เช่น R410a, R404a, R134a, R290, R12 และ R22 ภายใต้ทั้งสภาวะ adiabatic และ diabatic และทิศทางการไหลทั้งแนวนอนและแนวตั้งไหลขึ้น ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองทำนายจำนวน 11 สมการให้ความแม่นยำแตกต่างกัน โดยสมการสหสัมพันธ์ที่พัฒนาขึ้นใหม่สามารถทำนายได้ดีที่สุด โดยมีค่า mean absolute relative error ประมาณ 9.8% และยังมีการเสนอแนวทางทางเลือกใช้สมการสหสัมพันธ์ที่เหมาะสมกับท่อขนาดเล็ก

สำหรับการไหลสองสถานะในช่องทางขนาดเล็กที่ใช้สารทำความเย็น พฤติกรรมของค่าสัดส่วนช่องว่างยังคงขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของของไหลและรูปแบบหน้าตัดของช่องทางไหลอย่างชัดเจน โดยการศึกษาการควบแน่นของสารทำความเย็น R-134a ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก 2 ถึง 4.91 mm ความยาวประมาณ 305 mm ในท่อขนาดเล็กที่มีหน้าตัดหลากหลายรูปแบบ (สี่เหลี่ยมจัตุรัส, สี่เหลี่ยมผืนผ้า และวงกลม) ทดลองในช่วงฟลักซ์มวล 140–800 kg/m²s พบว่าค่า void fraction มีความสัมพันธ์กับแรงตึงผิวและขนาดของช่องทางไหลอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่ง [7] ได้ใช้เทคนิคการประมวลผลภาพดิจิทัลในการวัดค่าเชิงปริมาณ และครอบคลุมรูปแบบการไหลหลายลักษณะ เช่น Intermittent และ Wavy flow ผลการศึกษานำไปสู่การพัฒนาแบบจำลองใหม่ที่สามารถทำนายค่า void fraction สำหรับการควบแน่นในช่องทางขนาดเล็กได้ดีขึ้น สะท้อนให้เห็นถึงความจำเป็นของการพัฒนาแบบจำลองที่สอดคล้องกับเงื่อนไขเฉพาะของการไหลในระดับขนาดเล็ก

นอกจากนี้การไหลสองสถานะในท่อไมโครแบบท่อตรง ซึ่งมีลักษณะการไหลที่แตกต่างจากท่อขนาดใหญ่และท่อที่มีรูปทรงซับซ้อน ปัจจัยด้านทิศทางการไหลและสภาวะการไหลมีผลต่อพฤติกรรมของค่าสัดส่วนช่องว่างอย่างมีนัยสำคัญ โดย [8] ได้ศึกษาการไหลสองสถานะอากาศ-น้ำภายในท่อไมโครมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.5 mm ทั้งในแนวอนและแนวตั้ง ภายใต้สภาวะ adiabatic และพบว่าทิศทางการไหลมีผลต่อการกระจายตัวของเฟสและค่า void fraction อย่างชัดเจน อีกทั้งแบบจำลองที่มีอยู่ยังไม่สามารถทำนายค่าได้อย่างแม่นยำในทุกช่วงเงื่อนไข

ในขณะที่ [9] ได้ศึกษาการเดือดสองสถานะของสารทำความเย็น R-123 ภายในท่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.1 mm ภายใต้ช่วงมวลฟลักซ์สูงประมาณ 500–2000 kg/m²s ฟลักซ์ความร้อน 10–200 kW/m² และความดันอิ่มตัวประมาณ 0.12–0.2 MPa โดยพบว่าพารามิเตอร์การไหล เช่น มวลฟลักซ์และคุณภาพไอน้ำ มีผลต่อค่า critical heat flux (CHF) และสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนอย่างมีนัยสำคัญ แม้ว่าแบบจำลองที่มีอยู่สามารถทำนายแนวโน้มได้ แต่ยังคงมีความคลาดเคลื่อนในบางช่วงเงื่อนไข

อย่างไรก็ตามการศึกษาในท่อไมโครแบบขดเกลียวภายใต้สภาวะ adiabatic แสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางมีผลต่อการกระจายตัวของเฟสและค่าสัดส่วนช่องว่างอย่างชัดเจน โดย [10,11] รายงานว่าค่า void fraction และรูปแบบการไหลสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองในกลุ่ม drift-flux เนื่องจากผลการทดลองพบการเกิด throat-annular และ annular flow และค่า void fraction ไม่สอดคล้องกับ homogeneous flow model เนื่องจากอิทธิพลของแรงหนีศูนย์กลาง

ในส่วนของการไหลเดือดสองสถานะของสารทำความเย็นในท่อขนาดเล็ก มีการศึกษาที่ครอบคลุมทั้งรูปแบบการไหลและสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน โดย [12] ได้ทำการทดลองการไหลเดือดของสารทำความเย็น R-134a ในท่อขนาด 1 mm ภายใต้ทิศทางการไหล 3 รูปแบบ ได้แก่ แนวอน แนวตั้งไหลขึ้น และแนวตั้งลง ผลการศึกษาพบว่าทิศทางการไหลมีผลต่อรูปแบบการไหล การถ่ายเทความร้อน และความดันตกคร่อมอย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งข้อมูลการทดลองดังกล่าวยังถูกนำไปเปรียบเทียบกับสมการทำนายเพื่อประเมินความแม่นยำของแบบจำลอง

จากการสำรวจเอกสารงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่ามีเพียงบางงานวิจัยที่ศึกษาการทำนายค่าสัดส่วนช่องว่างของการไหลสองสถานะของสารทำความเย็น R-134a ในท่อขนาดไมโครภายใต้สภาวะการเดือด เนื่องจากพฤติกรรมการไหลมีความซับซ้อนและขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการไหลหลายปัจจัย เช่น ขนาดท่อ สารทำงาน รูปแบบการไหล ทิศทางการไหล และช่วงพารามิเตอร์การไหลที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งสมการสหสัมพันธ์ส่วนใหญ่ถูกพัฒนาขึ้นจากข้อมูลการทดลองในท่อขนาดปกติ ทำให้ความสามารถในการทำนายสำหรับท่อขนาดไมโครมีข้อจำกัดและมีความคลาดเคลื่อนสูงเมื่อใช้งานจริง

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าจะมีการศึกษาข้อมูลการทดลองของการไหลเดือดของสารทำความเย็น R-134a ในท่อของ 1 mm โดย [12] แล้วก็ตามแต่ชุดข้อมูลดังกล่าวยังไม่ได้ถูกนำมาวิเคราะห์ค่าสัดส่วนช่องว่างอย่างเป็นระบบ โดยใช้เทคนิคการประมวลผลภาพร่วมกับการเปรียบเทียบสมการสหสัมพันธ์ที่หลากหลาย

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาค่าสัดส่วนช่องว่างของการไหลสองสถานะของสารทำความเย็น R-134a ภายในท่อไมโครที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1 mm สำหรับการไหลขึ้นในแนวตั้งภายใต้สภาวะการเดือด โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ภาพจากกล้องความเร็วสูงในการประเมินค่าสัดส่วนช่องว่างจากข้อมูลการทดลอง และทำการเปรียบเทียบกับสมการสหสัมพันธ์จากงานวิจัยที่ผ่านมา เพื่อประเมินความสามารถในการทำนายและคัดเลือกสมการที่เหมาะสมสำหรับเงื่อนไขการทดลองที่ศึกษา

2. วิธีการศึกษา

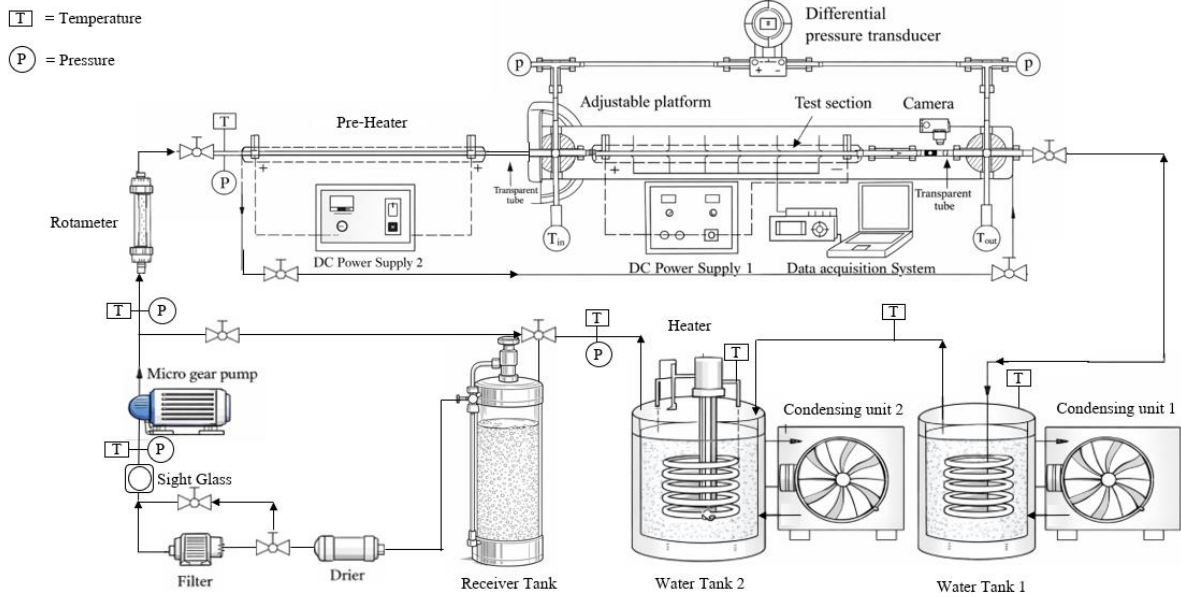


Figure 1 Schematic diagram of the experimental setup for boiling two-phase flow

งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองการไหลสองสถานะของสารทำความเย็น R-134a ภายใต้สภาวะการเดือด ซึ่งอ้างอิงจากงานของ [12] โดยพิจารณาการไหลในทิศทางขึ้นในแนวตั้ง โดยใช้ท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1 mm และความยาวท่อ 500 mm การทดลองดำเนินการภายใต้เงื่อนไขความดันอิ่มตัว 8 bar ช่วงฟลักซ์ความร้อน 1–60 kW/m² และช่วงฟลักซ์มวล 250–820 kg/m²s

ระบบการทดลองประกอบด้วยวงจรสารทำความเย็น R-134a ซึ่งไหลผ่านอุปกรณ์หลัก ได้แก่ ตัวกรอง (filter/drier) เครื่องวัดอัตราการไหลแบบ rotameter ชุด pre-heater และเข้าสู่ชุดทดสอบ (test section) โดยอัตราการไหลสามารถควบคุมได้ด้วยการปรับความเร็วของปั๊ม และมีการใช้แหล่งจ่ายไฟ DC จำนวน 2 ชุด สำหรับควบคุม pre-heater และ test section แยกจากกัน เพื่อกำหนดคุณภาพไอที่ทางเข้าและควบคุมฟลักซ์ความร้อนที่ผนังท่อให้คงที่

ในส่วนของชุดทดสอบ ใช้ท่อสแตนเลสที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1 mm และความยาว 500 mm โดยผนังด้านนอกหุ้มฉนวนเพื่อลดการสูญเสียความร้อน และติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลชนิด T-type หลายตำแหน่งตามแนวท่อเพื่อวัดอุณหภูมิของผิวท่อและของไหล นอกจากนี้มีการติดตั้ง pressure transducer สำหรับวัดความดัน และใช้มัลติมิเตอร์ในการวัดกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับฮีตเตอร์ เพื่อใช้คำนวณฟลักซ์ความร้อนที่ผนังท่อ โดยเครื่องมือวัดมีความไม่แน่นอนประมาณ $\pm 2\%$ สำหรับกระแสไฟฟ้า และ $\pm 1\%$ สำหรับแรงดันไฟฟ้า

จากแผนผังชุดอุปกรณ์ทดลองการไหลสองสถานะขณะเกิดการเดือด แสดงดัง Figure 1 มีส่วนสำหรับการบันทึกภาพรูปแบบการไหลจากการทดลองโดยติดตั้งกล้องความเร็วสูง ความเร็วชัตเตอร์ในช่วง 1/15 – 1/10,000 s ในการบันทึกภาพที่ตำแหน่งถัดจากชุดทดสอบ (test section) เพื่อให้ได้ภาพการไหลที่มีเสถียรภาพหลังจากของไหลผ่านบริเวณให้ความร้อน จากนั้นนำภาพที่ได้ไปประมวลผลด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ภาพเพื่อแยกรูปแบบการไหลและวิเคราะห์ค่าสัดส่วนช่องว่าง

ในการทดลองแต่ละกรณี มีการควบคุมเงื่อนไขให้คงที่ ได้แก่ ความดันอิ่มตัว อัตราการไหล และคุณภาพไอที่ทางเข้า โดยปรับกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับ pre-heater เพื่อควบคุมคุณภาพไอ และปรับกำลังไฟฟ้าที่ test section เพื่อกำหนดฟลักซ์ความร้อน ทั้งนี้ ระบบจะถูกปล่อยให้เข้าสู่สภาวะคงตัว (steady state) ก่อนทำการบันทึกข้อมูล เพื่อให้ค่าที่วัดได้มีความน่าเชื่อถือ

2.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์สัดส่วนช่องว่างจากข้อมูลการทดลอง

สำหรับการวิเคราะห์ค่าสัดส่วนช่องว่าง ใช้วิธี Image Analysis จากภาพถ่ายที่ได้จากการทดลองโดยจะมีขั้นตอนดังนี้

2.1.1 การแยกรูปแบบการไหล

ในการทดลองนี้ใช้ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1 mm แบบท่อตรงไหลขึ้นในแนวตั้ง ที่ความดัน 8 bar โดยทำการจัดแบ่งข้อมูลตามค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ 10, 26 และ 32 mL/s และ ช่วงพลังความร้อน 1–60 kW/m² ซึ่งมีทั้งหมด 22 เงื่อนไขการทดลอง

จาก 22 เงื่อนไขการทดลอง แต่ละเงื่อนไขการทดลองได้ทำการคัดเลือกรูปภาพ จำนวน 50 ภาพ เพื่อใช้เป็นตัวแทนของรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นจริง ซึ่งสำหรับการทดลองนี้จะมีภาพถ่ายทั้งหมดจำนวน 1,100 ภาพ โดยพิจารณาจากลักษณะการกระจายตัวรูปแบบการไหลภายในท่อการทดลอง

รูปแบบการไหลที่พบในการทดลองประกอบด้วย

- Slug flow
- Throat-annular flow
- Annular flow
- Annular-rivulet flow
- Churn flow

ทั้งนี้ ในกรณีที่ เป็น Churn flow จะไม่นำข้อมูลไปใช้ในการคำนวณวิเคราะห์หาสัดส่วนช่องว่าง (Void fraction) เนื่องจากเป็นสถานะที่การเคลื่อนที่ของสองสถานะมีความไม่เสถียรและมีความผันผวนสูง ส่งผลให้ข้อมูลไม่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์เชิงปริมาณ

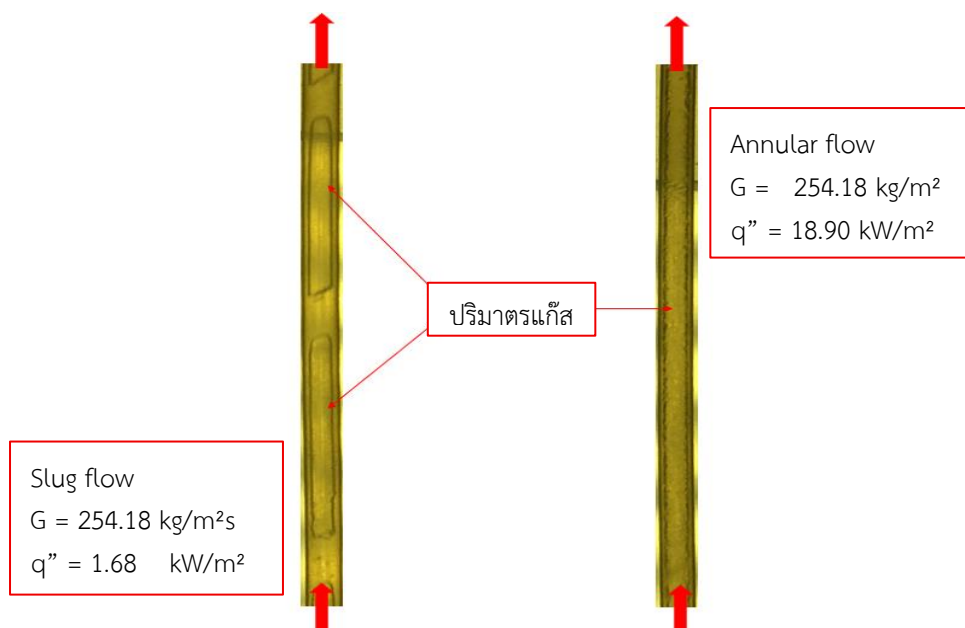


Figure 2 Photographs of two-phase flow used for gas volume fraction analysis

2.1.2 การวิเคราะห์ภาพถ่าย

ภาพที่ถูกคัดเลือกจะถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณของแก๊สภายในท่อทดลอง ดังแสดงใน Figure 2 โดยใช้เทคนิค Image Analysis ในการประมวลผลภาพเพื่อแยกบริเวณของเฟสแก๊สและเฟสของเหลวภายในท่อ จากนั้นทำการวิเคราะห์ปริมาตรของเฟสแก๊สจากภาพโดยอาศัยความแตกต่างของค่าความสว่างในแต่ละพิกเซล เพื่อระบุตำแหน่งของรอยต่อระหว่างแก๊สและของเหลว จากนั้นประมวลผลตามรูปทรงของปริมาตรแก๊สเพื่อให้ได้ค่าปริมาตรแก๊สภายในท่อ และนำค่าปริมาตรแก๊ส (V_g) ที่ได้ไปใช้ในการประมาณปริมาณของแก๊สภายในท่อทดลอง

2.2 วิธีการคำนวณค่าสัดส่วนช่องว่างและการประเมินความแม่นยำของสหสัมพันธ์

หลังจากได้ค่าปริมาตรแก๊สภายในท่อทดลองแล้ว นำค่าดังกล่าวไปคำนวณหาค่าสัดส่วนช่องว่าง (α) ซึ่งนิยามเป็นอัตราส่วนของปริมาตรแก๊ส (V_g) ต่อปริมาตรรวมของของไหลภายในท่อ (V_{TW}) ดังแสดงในสมการที่ 1

$$\alpha = \frac{V_g}{V_{TW}} \quad (1)$$

หลังจากคำนวณค่าสัดส่วนช่องว่างจากข้อมูลการทดลองแล้ว ค่าดังกล่าวถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากสหสัมพันธ์ต่างๆ เพื่อประเมินความแม่นยำในการทำนาย โดยใช้ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมบูรณ์ (Mean Absolute Error: MAE) และร้อยละของจำนวนจุดข้อมูลที่อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด (Percentage of data point : POD) : $\pm 15\%$ ดังที่แสดงในสมการที่ 2 และ 3 ตามลำดับ

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{\alpha(i)_{pred} - \alpha(i)_{exp}}{\alpha(i)_{exp}} \right| \quad (2)$$

$$POD(\leq 15\%) = \frac{\text{จำนวนจุดข้อมูลที่อยู่ในช่วงความคลาดเคลื่อนที่กำหนด}}{\text{จำนวนจุดข้อมูลทั้งหมด}} \times 100 \quad (3)$$

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 การวิเคราะห์ค่าสัดส่วนช่องว่างตามแบบจำลอง

สำหรับการทำนายสัดส่วนช่องว่างสามารถแบ่งแบบจำลองได้เป็น 3 รูปแบบ คือ Homogeneous Model, Slip model และ Drift Flux Model ในการศึกษาทำการวิเคราะห์ความสอดคล้องของข้อมูลการทดลองกับแบบจำลองทั้ง 3 รูปแบบ เพื่อพิจารณาความเหมาะสมในการอธิบายพฤติกรรมการไหล

3.1.1. Homogeneous Model

แบบจำลอง Homogeneous สมมติให้ของไหลทั้งสองสถานะมีความเร็วเท่ากัน (no slip, $S = 1$) โดยแบบจำลองนี้เป็นกรณีพื้นฐานที่ใช้เป็นเกณฑ์อ้างอิง เนื่องจากไม่พิจารณาความแตกต่างของความเร็วระหว่างเฟส สามารถคำนวณค่าสัดส่วนช่องว่างได้จาก

$$\alpha = \frac{1}{1 + \left(\frac{1-x}{x}\right) \left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)} \quad (4)$$

โดยที่

α คือ สัดส่วนช่องว่าง (void fraction) (-)

x คือ คุณภาพมวล (mass quality) (-) อัตราส่วนมวลของเฟสแก๊สต่อมวลรวมของของไหล

ρ_g, ρ_l คือ ความหนาแน่นของเฟสแก๊สและของเหลว (kg/m^3)

3.1.2. Slip Model

แบบจำลอง Slip พิจารณาความแตกต่างของความเร็วระหว่างเฟส โดยนิยามผ่านค่า “slip ratio (S)” ซึ่งเป็นอัตราส่วนของความเร็วของเฟสแก๊ส (u_g) ต่อความเร็วของเฟสของเหลว (u_l) ดังสมการที่ 5

$$S = \frac{u_g}{u_l} \quad (5)$$

และสามารถคำนวณค่าสัดส่วนช่องว่างแบบจำลองนี้ได้จาก

$$\alpha = \frac{1}{1 + \left(\frac{1-x}{x}\right) \left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right) S} \quad (6)$$

3.1.3. Drift Flux Model

แบบจำลอง Drift Flux เป็นแบบจำลองกึ่งเชิงประจักษ์ที่พิจารณาการกระจายตัวของเฟสและความเร็วสัมพัทธ์ โดยสามารถเขียนในรูปของ superficial velocity ได้ดังนี้

$$\alpha = \frac{j_g}{C_0(j_g + j_l) + V_{gj}} \quad (7)$$

โดยที่

j_g และ j_l คือ ความเร็วเชิงปริมาตรของเฟสแก๊สและของเหลว (superficial velocity) (m/s)

C_0 คือ ค่าพารามิเตอร์การกระจายตัวของเฟส (distribution parameter) (-)

V_{gj} คือ ความเร็วลอยตัวสัมพัทธ์ของเฟสแก๊ส (drift velocity) (m/s)

ในการประเมินความสอดคล้องของข้อมูลการทดลองกับ Homogeneous Model โดยทำการตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่าง “Volumetric quality (β)” ซึ่งนิยามเป็นอัตราส่วนของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเฟสแก๊ส (Q_g) ต่ออัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมของทั้งสองเฟส ดังแสดงในสมการที่ 8 กับ “Void fraction (α)” เนื่องจากแบบจำลอง Homogeneous ถูกพัฒนามาบนสมมติฐานว่าความเร็วของสถานะของเหลวและสถานะแก๊สเท่ากัน ซึ่งให้ค่า Void fraction มีค่าใกล้เคียงกับ Volumetric quality จากผลการเปรียบเทียบความสัมพันธ์พบว่า Void fraction เพิ่มขึ้นเมื่อ Volumetric quality เพิ่มขึ้น ในช่วง 0.75–1.0 อย่างไรก็ตามที่ Volumetric quality < 0.75 พบว่าค่า Void fraction มีค่าต่ำกว่าที่แบบจำลอง Homogeneous ทำนาย แสดงให้เห็นว่าการไหลจริงมีความแตกต่างของความเร็วระหว่างสองสถานะอยู่ จึงไม่สอดคล้องกับสมมติฐานของแบบจำลอง Homogeneous

$$\beta = \frac{Q_g}{Q_l + Q_g} \quad (8)$$

สำหรับการประเมินความสอดคล้องของข้อมูลการทดลองกับ Slip Model ใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง “Slip ratio (S)” และ “Mass quality (x)” จากผลการเปรียบเทียบความสัมพันธ์พบว่า ค่า Slip ratio ส่วนใหญ่อยู่ในช่วงประมาณ 0.8–1.0 และมีแนวโน้มเข้าใกล้ค่า 1 เมื่อ Mass quality เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าความแตกต่างของความเร็วระหว่างสถานะของเหลวและแก๊สลดลงในช่วงที่ปริมาณของไหลสถานะแก๊สเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ข้อมูลได้แสดงความแปรปรวนของค่า Mass quality สะท้อนถึงความไม่สม่ำเสมอของการกระจายสถานะและอิทธิพลของรูปแบบการไหลที่แตกต่างกัน ผลดังกล่าวบ่งชี้ว่าการไหลมีการสลับไหลระหว่างสถานะเกิดขึ้นจริง และสนับสนุนการใช้แบบจำลองที่คำนึงถึงความแตกต่างของความเร็วระหว่างสถานะในการอธิบายพฤติกรรมกรรมการไหล

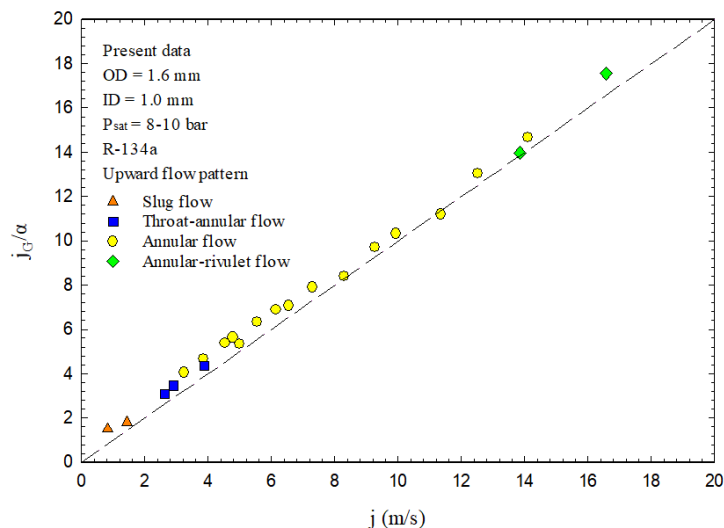


Figure 3 Velocity–flux relationship based on the Drift Flux Model

สุดท้ายจากการประเมินความสอดคล้องของข้อมูลการทดลองกับ Drift Flux Model โดยกราฟในระนาบ Velocity-Flux ของ Drift Flux Model เพื่อประเมินความสอดคล้องของข้อมูลการทดลองกับแบบจำลองดังกล่าว จึงทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง “Superficial Velocity (j)” และ “อัตราส่วนของความเร็วสถานะของแก๊สและสัดส่วนช่องว่าง (j/α)” ดังแสดงใน Figure 3 จากผลการวิเคราะห์พบว่า ข้อมูลส่วนใหญ่มีแนวโน้มอยู่ในบนเส้นแนวโน้มของแบบจำลอง Drift-flux และมีการกระจายตัวของข้อมูลอย่างสม่ำเสมอตลอดช่วงของค่า Superficial velocity แสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์สอดคล้องกับสมมติฐานของ Drift Flux Model

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาผลของการกระจายตัวของสถานะแก๊สและความแตกต่างของความเร็วระหว่างสถานะของของไหล พบว่าข้อมูลจากรูปแบบการไหลที่ต่างกันสามารถจัดอยู่ในแนวโน้มเดียวกันได้ค่อนข้างดี ผลดังกล่าวสะท้อนถึงความสามารถของแบบจำลองในการอธิบายพฤติกรรมการไหลสองสถานะในท่อขนาดไมโครภายใต้เงื่อนไขการทดลองนี้ได้อย่างเหมาะสม

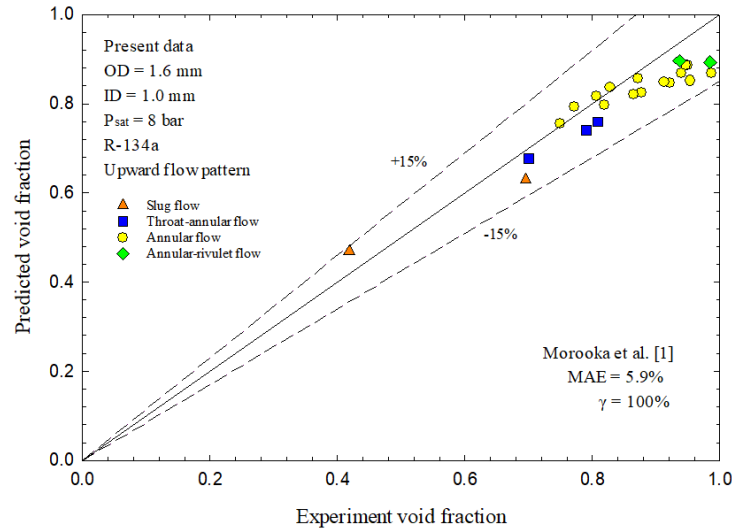


Figure 4 Comparison between experimental void fraction data and the correlation model [1]

3.2 การทำนายค่าสัดส่วนช่องว่างด้วยสมการสหสัมพันธ์

จากมีสมการสหสัมพันธ์สำหรับการทำนายค่าสัดส่วนช่องว่างในงานวิจัยที่ผ่านมา ในการศึกษาครั้งนี้ได้นำสมการสหสัมพันธ์มาเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลอง เพื่อประเมินความแม่นยำในการทำนายสำหรับการไหลสองสถานะในท่อขนาดไมโครภายใต้เงื่อนไขที่ศึกษา โดยทำการเปรียบเทียบค่าสัดส่วนช่องว่างที่ได้จากการทำนายกับค่าที่ได้จากการทดลอง และประเมินความแม่นยำด้วยค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมบูรณ์ (Mean Absolute Error: MAE) และร้อยละของจำนวนจุดข้อมูลที่อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด เมื่อเทียบกับจำนวนจุดข้อมูลทั้งหมด (Percentage of data point : POD) : $\pm 15\%$ ดังแสดงใน Table 1

Table 1 Comparison between experimental void fraction data and values predicted by existing correlations in the literature

Correlation or model	Upward Flow 8 bar	
	MAE	γ
Drift-flux model		
Morooka et al. [1]	5.9	100.0
Gardenghi et al. [6]	6.9	90.9
Bonnecaze et al. [5]	9.9	81.8
Bestion [3]	12.1	63.6
Winkler et al. [7]	14.2	45.5

จาก Table 1 เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับสมการสหสัมพันธ์ต่างๆ พบว่า สมการของ [1] (สมการที่ 9) ให้ความแม่นยำสูงสุด โดยมีค่า MAE ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับสหสัมพันธ์อื่น แสดงให้เห็นว่าสมการดังกล่าวมีความสอดคล้องกับข้อมูลการทดลองของงานวิจัยนี้มากที่สุด เนื่องจาก [1] ทำการทดลองในท่อแนวตั้งไหลขึ้น (vertical upward flow) เช่นเดียวกับงานวิจัยนี้ ซึ่งส่งผลให้กลไกการเคลื่อนที่และการกระจายตัวของเฟสภายในท่อมีลักษณะใกล้เคียงกัน โดยในงานวิจัยของ [1] รูปแบบการไหลที่พบส่วนใหญ่เป็นรูปแบบการไหลแบบ annular flow ซึ่งสอดคล้องกับรูปแบบการไหลหลักที่พบในการทดลองของงานวิจัยนี้ ส่งผล

ให้โครงสร้างการกระจายตัวของแก๊สและของเหลวภายในท่อมีลักษณะคล้ายคลึงกัน อีกทั้งช่วง mass flux ที่ใช้ในการทดลองของทั้งสองงานอยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน ซึ่งส่งผลต่อการเกิดลักษณะการไหลในรูปแบบเดียวกัน นอกจากนี้ ในงานของ [1] มีการวัดค่าสัดส่วนช่องว่างของการทดลองในหลายตำแหน่งตามแนวการไหลซึ่งมีความละเอียดของจุดวัดค่อนข้างสูง และนำข้อมูลที่ได้มาประเมินเป็นค่าเฉลี่ยของระบบ ทำให้ข้อมูลที่ใช้ในการพัฒนาความสัมพันธ์มีความครอบคลุมและสะท้อนพฤติกรรมการไหลจริงได้ดี แนวทางดังกล่าวมีความสอดคล้องกับแนวคิดการประเมินค่า void fraction ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ปัจจัยเหล่านี้จึงทำให้ความสัมพันธ์ของ [1] สามารถใช้ทำนายค่า void fraction ของข้อมูลการทดลองในงานวิจัยนี้ได้อย่างเหมาะสม

$$\alpha = \frac{j_g}{1.08U_M + 0.45} \quad (9)$$

4. สรุป

จากการวิเคราะห์สมการสหสัมพันธ์ที่เหมาะสมสำหรับการทำนายสัดส่วนช่องว่างของการไหลสองสถานะภายในท่อตรงขนาดไมโครภายใต้สภาวะการเดือดของสารทำความเย็น R-134a สำหรับในทิศทางการไหลขึ้นในแนวตั้ง โดยใช้ท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1 mm พบว่าสมการสหสัมพันธ์ที่เหมาะสมจัดอยู่ในกลุ่ม Drift-flux model โดยเฉพาะสมการสหสัมพันธ์ของ [1] ซึ่งสามารถทำนายค่าสัดส่วนช่องว่างของข้อมูลการทดลองในงานวิจัยนี้ได้แม่นยำสูงสุดเมื่อเทียบกับสหสัมพันธ์อื่น โดยให้ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมบูรณ์ (MAE) เท่ากับ 5.9% และข้อมูลทั้งหมดอยู่ภายในช่วงความคลาดเคลื่อน $\pm 15\%$ ผลการทำนายดังกล่าวสอดคล้องกับลักษณะการไหลของงานวิจัยนี้ ซึ่งเป็นการไหลขึ้นในแนวตั้งและมีรูปแบบการไหลหลักเป็น annular flow เช่นเดียวกับที่รายงานในงานของ [1] จึงทำให้สมการดังกล่าวสามารถทำนายค่า void fraction ของข้อมูลการทดลองในงานวิจัยนี้ได้อย่างเหมาะสม

นอกจากนี้ ผลการศึกษาายังแสดงให้เห็นว่าทิศทางการไหลและลักษณะรูปแบบการไหลมีบทบาทสำคัญต่อความสามารถในการทำนายสัดส่วนช่องว่าง โดยในกรณีของการไหลแบบ annular flow การกระจายตัวของเฟสภายในท่อมีลักษณะเฉพาะ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อค่าความสัดส่วนช่องว่าง ทำให้สมการสหสัมพันธ์ที่พัฒนาจากเงื่อนไขการไหลที่ใกล้เคียงกันสามารถให้ผลการทำนายที่แม่นยำ

ทั้งนี้ ผลการวิจัยสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการเลือกใช้สมการสหสัมพันธ์ที่เหมาะสมสำหรับการไหลสองสถานะในท่อขนาดไมโคร โดยเฉพาะในกรณีของการไหลเดือดของสารทำความเย็นในท่อแนวตั้ง และยังสามารถนำไปต่อยอดในการปรับปรุงสมการสหสัมพันธ์เดิม หรือพัฒนาแบบจำลองใหม่ให้สอดคล้องกับลักษณะการไหลในระดับไมโครมากยิ่งขึ้น รวมถึงการขยายการศึกษาไปยังเงื่อนไขการไหลและรูปแบบการไหลอื่นๆ เพื่อเพิ่มความครอบคลุมและความแม่นยำในการทำนาย

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร และ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับการสนับสนุนในการทำงานของงานวิจัยนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Morooka, S., Ishizuka, T., Iizuka, M., & Yoshimura, K. 1989. Experimental study on void fraction in a simulated BWR fuel assembly (Evaluation of cross-sectional averaged void fraction). Nucl. Eng. Des. 114, 91–98.
- [2] Xu, Y., & Fang, X. 2014. Correlations of void fraction for two-phase refrigerant flow in pipes. Appl. Therm. Eng. 64(1-2), 242–251.
- [3] D. Bestion. 1990. The physical closure laws in the CATHARE code. Nuclear Engineering and Design. 229–245.
- [4] Bouyahiaoui, H., Saidj, F., Arabi, A., Al-Sarkhi, A., & Azzi, A. 2024. Vertically downward gas-liquid flow Void fraction and pressure drop. Int. J. Multiph. Flow. 172.
- [5] R. H. Bonnecaze, W. Erskine Jr., and E. J. Greskovich. 1971. Holdup and pressure drop for two-phase slug flow in inclined pipelines. AIChE Journal. pp. 1109–1118.
- [6] Gardenghi, Á. R., Filho, E. d. S., Chagas, D. G., Scagnolatto, G., Oliveira, R. M., & Tibiriçá, C. B. 2020. Overview of Void Fraction Measurement Techniques, Databases and Correlations for Two-Phase Flow in Small Diameter Channels. Flu. 5(4).
- [7] J. Winkler, J. Killion, and S. Garimella. 2012. Void fractions for condensing refrigerant flow in small channels. Part II: Void fraction measurement and modeling, International Journal of Refrigeration. 246–262.
- [8] Abedini, A., Nouri Borujerdi, A., Najafi, M., & Noghrehabadi, A. (2024). Experimental void fraction measurement approach of small channel two-phase flow. Meas.: Sens. 36.
- [9] Roldão, T. C. B., & Tibiriçá, C. B. 2024. Critical heat flux, heat transfer and pressure drop at high mass fluxes for R123 in a single microchannel. Int. J. Heat Mass Transf., 222.
- [10] Saisorn, S., Benjawun, P., Suriyawong, A., Asirvatham, L. G., Mondal, P. K., & Wongwiset, S. 2023. Two-phase flow structures in a helically coiled microchannel: An experimental investigation. Phys. Fluids. 35(10).
- [11] Saisorn, S., Benjawun, P., Suriyawong, A., & Wongwiset, S. (2025). Experimental investigation on flow pattern and void fraction for two-phase gas-liquid upflow in a vertical helically coiled micro-channel. Int. J. Thermofluids. 26.
- [12] Saisorn, S., Wongpromma, P., & Wongwiset, S. 2018. The difference in flow pattern, heat transfer and pressure drop characteristics of mini-channel flow boiling in horizontal and vertical orientations. Int. J. Multiph. Flow. 101, 97–112.

การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแม่เหล็กถาวร ด้วยเทคนิคการมอดูเลตความกว้างพัลส์แบบยูนิโพล่า Speed Control of Permanent Magnet DC Motors using Unipolar Pulse Width Modulation Technique

ตะวัน บุญช่วย¹ พงศธร กลิ่นมะลิ¹ ณัฐกานต์ ชนาชน¹ และ นิคม ก้านจักร^{1*}
Tawan Bunchuai¹, Pongsatorn Klinmali¹, Nattakarn Chanachon¹ and Nikom kanjak^{1*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร 86160 ประเทศไทย

¹Department of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Prince of Chumphon Campus, Chumphon Province, 86160, Thailand

*Corresponding author: Nikom kanjak, e-mail address: nikom.ka@kmit.ac.th

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแม่เหล็กถาวร โดยใช้เทคนิคการมอดูเลตความกว้างพัลส์ (PWM) ร่วมกับวงจร H-Bridge เพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ซึ่งสามารถปรับได้ทั้งขนาดและทิศทางของการหมุน นอกจากนี้ ได้ออกแบบระบบควบคุมแบบป้อนกลับโดยใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วน-อินทิกรัล (PI) เพื่อให้มอเตอร์สามารถติดตามค่าความเร็วอ้างอิงและลดความคลาดเคลื่อนในสถานะคงตัว มีการพัฒนาและสร้างชุดต้นแบบเพื่อทดสอบการทำงานภายใต้สภาวะต่างๆ ได้แก่ การหมุนเดินหน้า การหมุนกลับ การเบรก และการเปลี่ยนแปลงโหลด รวมถึงการจำลองระบบด้วย MATLAB/Simulink เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของมอเตอร์ ผลการศึกษาพบว่าระบบสามารถควบคุมความเร็วได้ตามที่กำหนด และรองรับการทำงานครบทั้ง 4 จตุภาค โดยผลการทดลองสอดคล้องกับทฤษฎีของมอเตอร์กระแสตรง อีกทั้งระบบแบบป้อนกลับมีประสิทธิภาพดีกว่าแบบเปิดวงจร จึงเหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้งานในระบบควบคุมมอเตอร์

คำสำคัญ: มอเตอร์กระแสตรงชนิดแม่เหล็กถาวร, PWM, H-Bridge, การควบคุมความเร็ว, PI Controller, การควบคุมแบบป้อนกลับ

Abstract

This paper presents a speed control method for a permanent magnet DC motor using Pulse Width Modulation (PWM) combined with an H-bridge circuit to regulate the applied voltage, enabling both magnitude and direction control. A closed-loop control system with a proportional-integral (PI) controller is designed to achieve accurate speed tracking and reduce steady-state error. An experimental prototype is developed to evaluate system performance under various operating conditions, including forward and reverse motoring, braking, and load variations. In addition, a MATLAB/Simulink model is implemented to analyze the motor behavior. The results show that the proposed system can effectively control motor speed and achieve four-quadrant operation. The experimental waveforms are consistent with theoretical characteristics, and the closed-loop system provides better performance than the open-loop system. Therefore, the proposed method is suitable for motor drive applications requiring high accuracy and reliability.

Keywords: Permanent magnet DC motor, PWM, H-bridge, speed control, PI controller, closed-loop control

1. บทนำ

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแม่เหล็กถาวรเป็นอุปกรณ์ที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในระบบอุตสาหกรรมและระบบควบคุมอัตโนมัติ เนื่องจากมีโครงสร้างที่เรียบง่าย ขนาดกะทัดรัด และสามารถควบคุมความเร็วรอบได้สะดวก อีกทั้งยังให้แรงบิดเริ่มต้นสูงและมีประสิทธิภาพในการทำงานที่ดี [1] อย่างไรก็ตาม ในการใช้งานจริง มอเตอร์มักทำงานภายใต้สภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงของโหลดและแรงดันไฟฟ้า ซึ่งส่งผลให้ความเร็วรอบของมอเตอร์เกิดความคลาดเคลื่อนจากค่าที่กำหนด หากไม่มีระบบควบคุมที่เหมาะสม อาจส่งผลให้กระบวนการผลิตเกิดความผิดพลาด คุณภาพของผลิตภัณฑ์ลดลง รวมถึงอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า และเพิ่มการสูญเสียพลังงานในระบบ [2] การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสามารถทำได้หลายวิธี โดยเทคนิคที่ได้รับความนิยมในปัจจุบันคือการมอดูเลตความกว้างพัลส์ (Pulse Width Modulation: PWM) ซึ่งสามารถควบคุมแรงดันเฉลี่ยที่ป้อนให้กับมอเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ [3] และมักถูกนำมาใช้ร่วมกับวงจร H-Bridge เพื่อควบคุมทั้งระดับแรงดันไฟฟ้าและทิศทางของการหมุนของมอเตอร์ [2], [5] อย่างไรก็ตาม การควบคุมแบบวงเปิดด้วย PWM เพียงอย่างเดียวไม่สามารถ

รักษาความเร็วรอบให้คงที่ได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลด [4] ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องใช้ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ โดยตัวควบคุมแบบสัดส่วน-อินทิกรัล (Proportional-Integral: PI) เป็นวิธีที่ได้รับความนิยม เนื่องจากสามารถลดค่าความคลาดเคลื่อนในสถานะคงตัวและปรับปรุงการตอบสนองของระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ [4], [7] อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่เกี่ยวข้องยังขาดการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบภายใต้สภาวะโหลดที่เปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน โดยเฉพาะในสภาวะการทำงานที่หลากหลาย เช่น การกลับทิศทางและการเบรก [6] ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์และประเมินสมรรถนะของระบบควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแม่เหล็กถาวร โดยใช้เทคนิค PWM ร่วมกับตัวควบคุมแบบ PI ผ่านวงจร H-Bridge ภายใต้สภาวะการทำงานที่หลากหลาย

2. วิธีการศึกษา

2.1 การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแม่เหล็กถาวร

การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแม่เหล็กถาวรสามารถทำได้โดยการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดอาร์เมเจอร์ ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้เนื่องจากมีโครงสร้างการควบคุมที่ไม่ซับซ้อนและสามารถตอบสนองได้รวดเร็ว ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า กระแส และความเร็วรอบของมอเตอร์สามารถอธิบายได้จากสมการพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ดังสมการที่ (1)

$$V_t = E_a + I_a R_a \quad (1)$$

โดยที่ V_t คือ แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขดอาร์เมเจอร์ E_a คือ แรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ (Back EMF) I_a คือ กระแสอาร์เมเจอร์ และ R_a คือ ความต้านทานของขดอาร์เมเจอร์

แรงดันไฟฟ้าย้อนกลับมีความสัมพันธ์กับความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ ดังสมการที่ (2)

$$E_a = K_e \omega \quad (2)$$

โดยที่ K_e คือ ค่าคงที่ของมอเตอร์ และ ω คือ ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์

จากสมการ (1) และ (2) จะเห็นได้ว่า ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์มีความสัมพันธ์โดยตรงกับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับอาร์เมเจอร์ ดังนั้น การปรับค่าระดับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์จึงสามารถใช้ในการควบคุมความเร็วรอบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

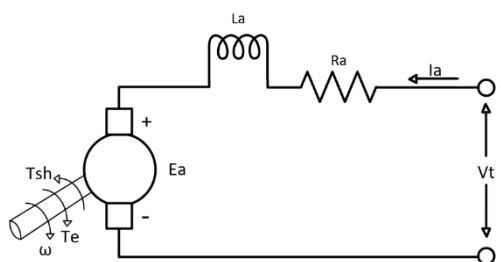


Figure 1 Equivalent circuit of permanent magnet DC motor

มอเตอร์ที่ใช้ในการทดลองเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแม่เหล็กถาวร โดยมีพิกัดแรงดันไฟฟ้า 180 โวลต์ กระแสพิกัด 2.7 แอมแปร์ ความเร็วพิกัด 2500 รอบต่อนาที และกำลังไฟฟ้า 0.4 กิโลวัตต์ รายละเอียดดังกล่าวแสดงอยู่บนป้ายชื่อของมอเตอร์ ดังภาพประกอบที่ 2

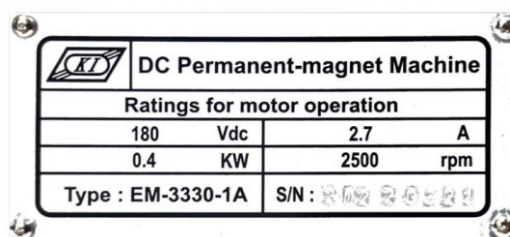


Figure 2 Nameplate of DC permanent-magnet machine

2.2 การทำงานของมอเตอร์ใน 4 จตุภาค

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ขับเคลื่อนด้วยวงจร H-Bridge สามารถทำงานได้ครบทั้ง 4 จตุภาค (Four-Quadrant Operation) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในระบบ โดยแต่ละจตุภาคสามารถอธิบายได้ดังนี้

- Quadrant I: Forward Motoring (+V, +I)
เป็นสถานะที่มอเตอร์หมุนในทิศทางเดินหน้า โดยแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามี่ค่าเป็นบวก พลังงานไฟฟ้าถูกส่งจากแหล่งจ่ายไปยังมอเตอร์เพื่อขับเคลื่อนโหลด
- Quadrant II: Forward Braking (+V, -I)
เป็นสถานะการเบรกขณะมอเตอร์หมุนในทิศทางเดินหน้า โดยแรงดันไฟฟ้ายังคงเป็นบวก แต่กระแสไฟฟ้ามี่ทิศทางเป็นลบ แสดงว่าพลังงานจากมอเตอร์ถูกส่งกลับไปยังแหล่งจ่าย
- Quadrant III: Reverse Motoring (-V, -I)
เป็นสถานะที่มอเตอร์หมุนกลับทิศทาง โดยแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามี่ค่าเป็นลบ ทำให้มอเตอร์ขับเคลื่อนโหลดในทิศทางตรงกันข้ามกับการหมุนเดินหน้า
- Quadrant IV: Reverse Braking (-V, +I)
เป็นสถานะการเบรกในทิศทางกลับทางหมุน โดยแรงดันไฟฟ้ามี่ค่าเป็นลบ แต่กระแสไฟฟ้ามี่ค่าเป็นบวก ส่งผลให้พลังงานถูกส่งกลับไปยังแหล่งจ่าย

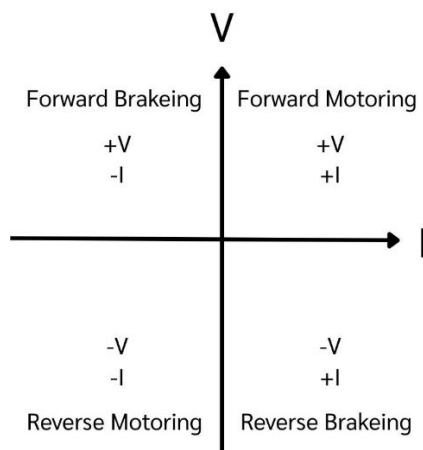


Figure 3 Four-quadrant operation of DC motor

การควบคุมการทำงานในทั้ง 4 จตุภาคสามารถทำได้โดยการควบคุมการเปิด-ปิดของสวิตช์กำลังในวงจร H-Bridge ซึ่งช่วยให้สามารถควบคุมทั้งทิศทางหมุนและลักษณะการทำงานของมอเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.3 ชุดจำลองการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแม่เหล็กถาวรด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

การออกแบบชุดจำลองสำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแม่เหล็กถาวรในงานวิจัยนี้ ใช้วงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงแบบ H-Bridge ร่วมกับเทคนิคการควบคุมแบบ Pulse Width Modulation (PWM) เพื่อควบคุมค่าแรงดันเฉลี่ยที่จ่ายให้กับมอเตอร์

หลักการของ PWM คือการปรับอัตราส่วนระหว่างช่วงเวลาที่ยุติสวิตช์เปิดต่อคาบเวลาทั้งหมดของสัญญาณ หรือที่เรียกว่า Duty Cycle ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (3)

$$D = \frac{T_{on}}{T} \quad (3)$$

โดยที่ D คือ Duty Cycle T_{on} คือ ช่วงเวลาที่สวิตช์เปิด และ T คือ คาบเวลาของสัญญาณ

แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่จ่ายให้กับมอเตอร์สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (4)

$$V_t = D \cdot V_{in} \quad (4)$$

จากสมการ (4) จะเห็นได้ว่า การปรับค่า Duty Cycle ส่งผลโดยตรงต่อแรงดันเฉลี่ยที่ป้อนให้กับมอเตอร์ และส่งผลต่อความเร็วรอบของมอเตอร์ตามลำดับ สัญญาณ PWM ถูกสร้างขึ้นโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ดังภาพประกอบที่ 4

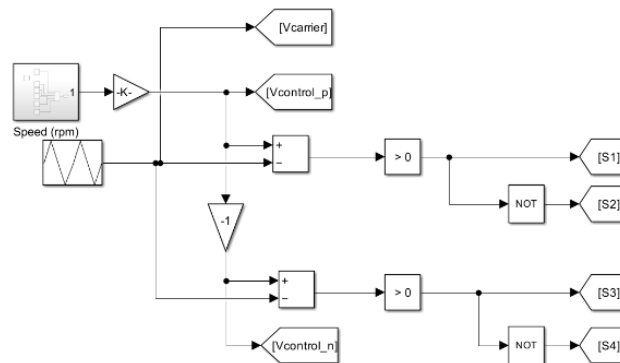


Figure 4 PWM signal generation in MATLAB/Simulink

วงจร H-Bridge ถูกนำมาใช้เพื่อควบคุมทั้งระดับแรงดันและทิศทางการหมุนของมอเตอร์ โดยอาศัยการสลับการเปิด-ปิดของสวิตช์กำลังในวงจร กล่าวคือ เมื่อสวิตช์ S_1 และ S_4 ทำงาน มอเตอร์จะหมุนในทิศทางเดินหน้า และเมื่อสวิตช์ S_2 และ S_3 ทำงาน มอเตอร์จะหมุนกลับทิศทาง แบบจำลองระบบควบคุมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแม่เหล็กถาวรถูกสร้างขึ้นในโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยมีองค์ประกอบหลัก ได้แก่ แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น ตัวเก็บประจุ อุปกรณ์สวิตช์กำลังชนิด IGBT และไดโอด ดังแสดงในรูปที่ 5

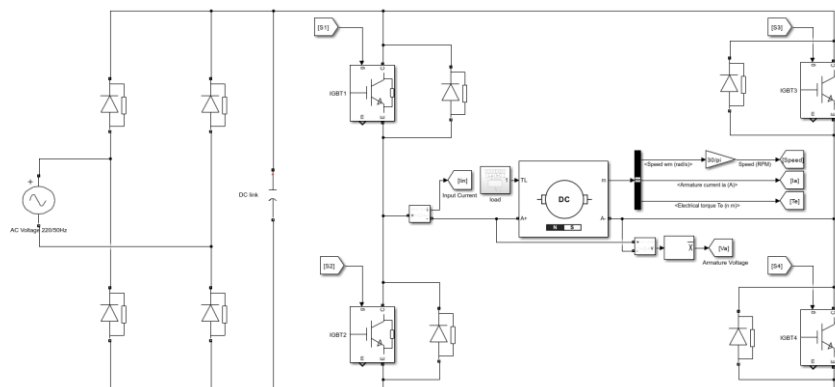


Figure 5 Simulation model of permanent magnet DC motor control system

แบบจำลองดังกล่าวถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาพฤติกรรมการทำงานของมอเตอร์ภายใต้สภาวะต่าง ๆ ได้แก่ การสตาร์ทมอเตอร์ การหมุนเดินหน้าและย้อนกลับ การทำงานภายใต้โหลด รวมถึงการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของมอเตอร์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ลักษณะการตอบสนองของระบบควบคุมและประเมินประสิทธิภาพของวิธีการควบคุมที่นำเสนอ

2.4 การควบคุมความเร็วรอบแบบป้อนกลับด้วยตัวควบคุม PI

การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแม่เหล็กถาวรสามารถทำได้โดยการปรับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดอาร์เมเจอร์ผ่านการควบคุมค่า Duty Cycle ของสัญญาณ PWM เพื่อให้ความเร็วของมอเตอร์เป็นไปตามค่าที่ต้องการ ในงานวิจัยนี้ใช้โครงสร้างการควบคุมแบบป้อนกลับ (Closed-loop control) ดังภาพประกอบที่ 6

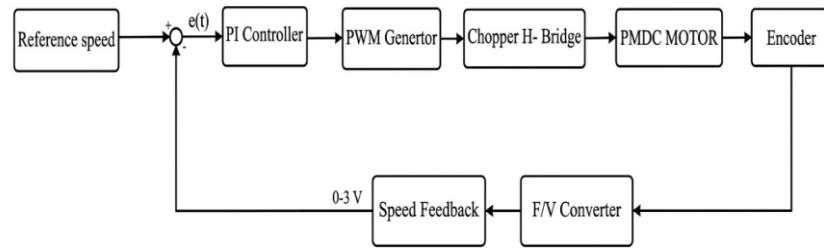


Figure 6 Block diagram of feedback control system

ในระบบควบคุมแบบป้อนกลับนี้ ความเร็วของมอเตอร์ถูกวัดด้วย Encoder และแปลงเป็นสัญญาณแรงดันผ่านวงจร Frequency-to-Voltage Converter (F/V Converter) ในช่วง 0–3 โวลต์ จากนั้นสัญญาณดังกล่าวถูกแปลงเป็นข้อมูลดิจิทัลด้วย Analog-to-Digital Converter (ADC) เพื่อนำไปใช้เป็นสัญญาณป้อนกลับของระบบควบคุม

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันที่อ่านได้จาก ADC และแรงดันอินพุตสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (5)

$$V_s = \frac{\text{ADC}}{4095} V_{\text{ref}} \quad (5)$$

โดยที่ V_s คือ ค่าแรงดันสัญญาณที่วัดได้ ADC คือ ค่าดิจิทัลจากตัวแปลง ADC และ V_{ref} คือ ค่าแรงดันอ้างอิงของ ADC ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6)

$$\omega(t) = K_v \cdot V_s(t) \quad (6)$$

โดยที่ $\omega(t)$ คือ ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ $V_s(t)$ คือ แรงดันจาก F/V Converter และ K_v คือ ค่าคงที่การแปลงแรงดันเป็นความเร็ว

ค่าความคลาดเคลื่อนของระบบนิยามได้ดังสมการที่ (7)

$$e(t) = \omega_{\text{ref}}(t) - \omega(t) \quad (7)$$

โดยที่ $e(t)$ คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของระบบ $\omega_{\text{ref}}(t)$ คือ ความเร็วอ้างอิง และ $\omega(t)$ คือ ความเร็วที่วัดได้

ตัวควบคุมแบบ PI ใช้ค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวในการสร้างสัญญาณควบคุมเพื่อปรับค่า Duty Cycle ของสัญญาณ PWM โดยสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (8)

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (8)$$

โดยที่ $u(t)$ คือ สัญญาณควบคุม K_p คือ อัตราขยายเชิงสัดส่วน K_i คือ อัตราขยายเชิงอินทิกรัล t คือ เวลา และ τ คือ ตัวแปรเวลาในกระบวนการอินทิกรัล ซึ่งแสดงถึงการสะสมค่าความคลาดเคลื่อนของระบบตั้งแต่เวลาเริ่มต้นถึงเวลาปัจจุบัน

สัญญาณควบคุมที่ได้จากตัวควบคุม PI จะถูกนำไปกำหนดค่า Duty Cycle ของสัญญาณ PWM เพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ดังสมการที่ (9)

$$D(t) = \frac{u(t)}{V_{\text{dc}}} \quad (9)$$

โดยที่ $D(t)$ คือ ค่า Duty Cycle ของสัญญาณ PWM $u(t)$ คือ สัญญาณควบคุมจากตัวควบคุม PI และ V_{dc} คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของแหล่งจ่าย

จากสมการ (9) จะเห็นได้ว่า ค่า Duty Cycle มีความสัมพันธ์โดยตรงกับสัญญาณควบคุมของระบบ ซึ่งถูกกำหนดจากค่าความคลาดเคลื่อนของความเร็ว ดังนั้น ระบบควบคุมสามารถปรับแรงดันเฉลี่ยที่จ่ายให้กับมอเตอร์ได้อย่างเหมาะสม ส่งผลให้ความเร็วของมอเตอร์สามารถติดตามค่าความเร็วอ้างอิงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สัญญาณ PWM ที่ได้จะถูกส่งไปยังวงจร H-Bridge เพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ โดยโครงสร้างโดยรวมของระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์แสดงดังภาพประกอบที่ 7

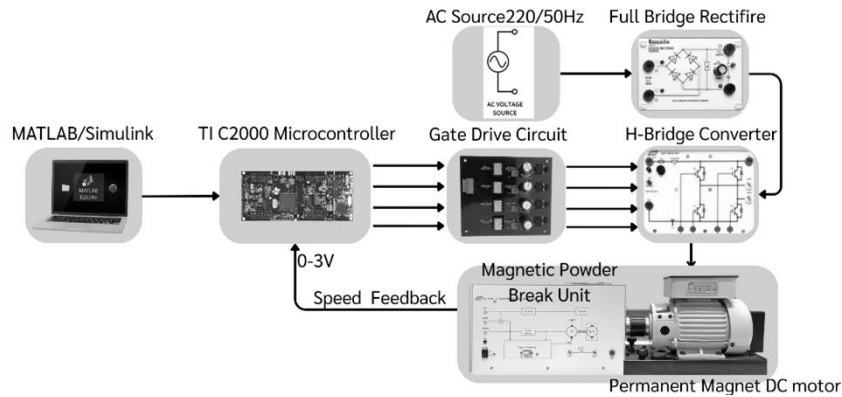


Figure 7 Block diagram of speed control system for permanent magnet DC motor

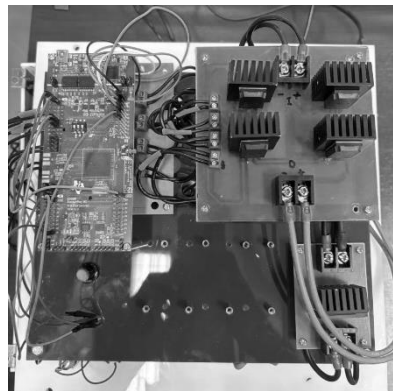


Figure 8 speed control system for permanent magnet DC motor

ระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ แหล่งจ่ายกำลัง ส่วนควบคุม และส่วนป้อนกลับของระบบ โดยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ จะถูกแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อป้อนให้กับวงจรขับมอเตอร์

ในส่วนของการควบคุม ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่สร้างสัญญาณ PWM และประมวลผลอัลกอริทึมควบคุมแบบ PI เพื่อกำหนดค่า Duty Cycle ให้เหมาะสมกับสภาวะการทำงานของมอเตอร์สำหรับสัญญาณป้อนกลับ ความเร็วของมอเตอร์ถูกวัดด้วย Encoder ซึ่งติดตั้งอยู่ในชุด Magnetic Powder Brake Unit โดยอุปกรณ์ดังกล่าวทำหน้าที่เป็นทั้งโหลดและอุปกรณ์วัดความเร็ว จากนั้นสัญญาณความเร็วจะถูกส่งกลับมายังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อใช้ในการคำนวณสัญญาณควบคุมของระบบ

พารามิเตอร์ของตัวควบคุม PI ที่ใช้ในการทดลองเพื่อให้สามารถทำซ้ำการทดลองและอ้างอิงผลการศึกษได้ งานวิจัยนี้ได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PI ดังนี้

- $K_p = 0.0089$
- $K_i = 0.1209$

ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PI ถูกกำหนดโดยวิธีการเชิงประจักษ์ร่วมกับการลองปรับค่า (Empirical trial-and-error tuning) โดยดำเนินการปรับค่า K_p เพื่อเพิ่มความรวดเร็วในการตอบสนองของระบบ และปรับค่า K_i เพื่อลดความคลาดเคลื่อนใน

สภาวะคงตัว จากนั้นประเมินผลการตอบสนองของระบบในโดเมนเวลา ได้แก่ ค่า overshoot, settling time และ steady-state error เพื่อให้ได้สมดุลระหว่างความเร็วในการตอบสนองและความเสถียรของระบบ

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 ผลการทดสอบและวิเคราะห์การทำงานใน 4 จตุภาคของมอเตอร์

จากการทดสอบชุดต้นแบบของระบบควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแม่เหล็กถาวร พบว่าระบบสามารถควบคุมการทำงานของมอเตอร์ได้ครบทั้ง 4 จตุภาค โดยผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามักมีลักษณะสอดคล้องกับทฤษฎีการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ดังภาพประกอบที่ 9–12

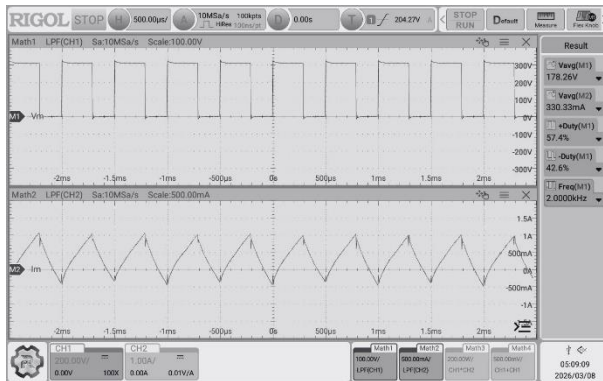


Figure 9 Operation in Quadrant I

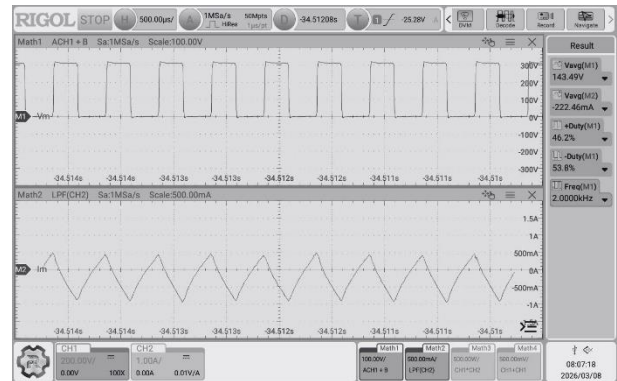


Figure 10 Operation in Quadrant II

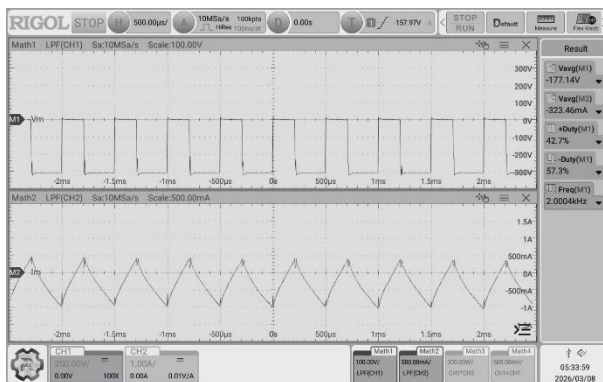


Figure 11 Operation in Quadrant III

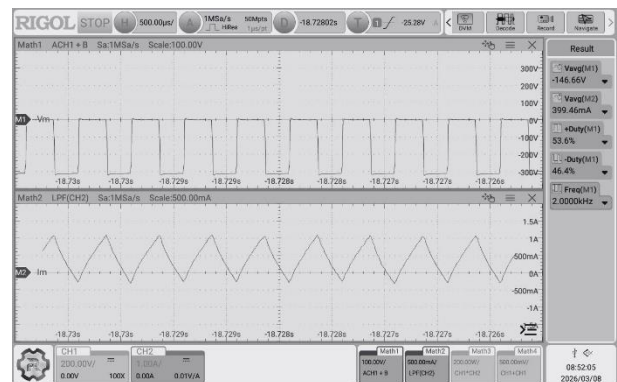


Figure 12 Operation in Quadrant IV

ภาพประกอบที่ 9–12 แสดงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากมอเตอร์ในแต่ละสภาวะการทำงาน โดยใช้ ออสซิลโลสโคปในการแสดงผล ซึ่งกำหนดสเกลของช่องสัญญาณ CH1 (แรงดันไฟฟ้า) เท่ากับ 200 V/div และ CH2 (กระแสไฟฟ้า) เท่ากับ 1 A/div

จากผลการทดลองสามารถสรุปลักษณะการทำงานในแต่ละจตุภาคได้ดังนี้

1. Quadrant I มอเตอร์ทำงานในโหมดขับเคลื่อนโหลด โดยแรงดันและกระแสมีค่าเป็นบวก แสดงถึงการรับพลังงานจากแหล่งจ่าย
2. Quadrant II มอเตอร์อยู่ในสภาวะเบรก โดยกระแสมีทิศทางตรงกันข้ามกับแรงดัน แสดงถึงการส่งพลังงานกลับไปยังแหล่งจ่าย (regenerative braking)
3. Quadrant III มอเตอร์หมุนในทิศทางกลับทิศทาง โดยแรงดันและกระแสมีค่าเป็นลบ แสดงถึงการขับเคลื่อนโหลดในทิศทางย้อนกลับ
4. Quadrant IV มอเตอร์อยู่ในสภาวะการเบรกในทิศทางกลับทางหมุน โดยกระแสมีทิศทางตรงกันข้ามกับแรงดัน แสดงถึงการส่งพลังงานกลับไปยังแหล่งจ่าย

ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับทฤษฎีการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และยืนยันว่าระบบควบคุมสามารถควบคุมการทำงานของมอเตอร์ได้ครบทั้ง 4 จุดภาคอย่างมีประสิทธิภาพ

3.2 ผลการทดสอบในโหมดการควบคุม Open-loop และ Closed-loop

การทดสอบระบบควบคุมทั้งในโหมด Open-loop และ Closed-loop เพื่อศึกษาการตอบสนองของระบบภายใต้การเปลี่ยนแปลงความเร็วและโหนดของมอเตอร์ โดยกำหนดเงื่อนไขการทดสอบดังนี้

1. ปรับความเร็วรอบจาก 0 rpm เป็น 2500 rpm
2. ปรับความเร็วรอบจาก 2500 rpm เป็น 2000 rpm
3. เพิ่มโหนดให้กับมอเตอร์
4. ปลดโหนดออกจากมอเตอร์
5. ปรับความเร็วรอบจาก 2000 rpm เป็น -2500 rpm
6. ปรับความเร็วรอบจาก -2500 rpm เป็น -2000 rpm
7. เพิ่มโหนดให้กับมอเตอร์
8. ปลดโหนดออกจากมอเตอร์
9. ปรับความเร็วรอบจาก -2000 rpm เป็น 0 rpm

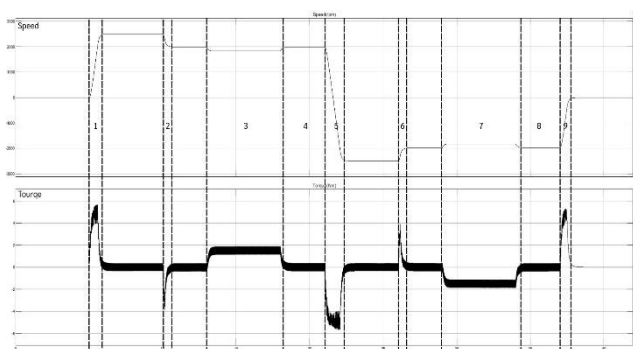


Figure 13 Open-loop operation of the system
in MATLAB/Simulink

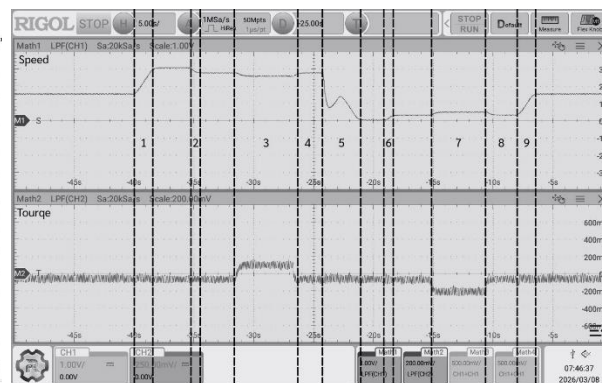


Figure 14 Open-loop operation of
the experimental prototype system

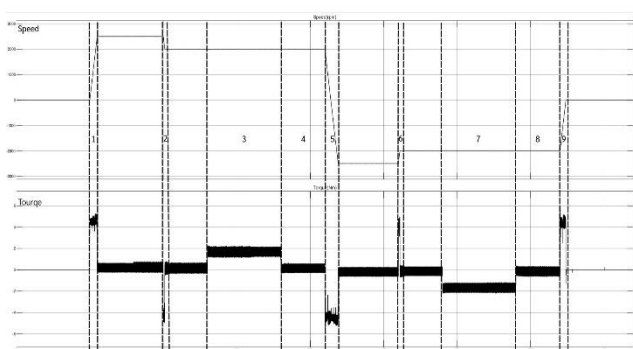


Figure 15 Closed-loop operation of the system
in MATLAB/Simulink

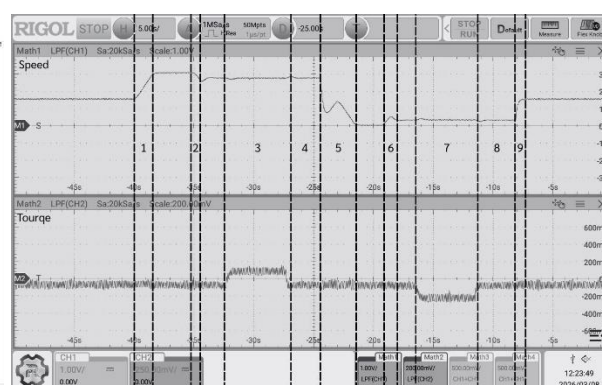


Figure 16 Closed-loop operation of
the experimental prototype system

ภาพประกอบที่ 14 และ ภาพประกอบที่ 16 แสดงผลการตอบสนองของระบบในโหมด Open-loop และ Closed-loop ตามลำดับ โดย สัญญาณความเร็วและแรงบิดถูกแปลงให้อยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้าเพื่อแสดงผลผ่านเครื่องออสซิลโลสโคป จากผลการทดลองพบว่า ระบบควบคุมแบบ Closed-loop สามารถรักษาค่าความเร็วของมอเตอร์ให้ใกล้เคียงกับค่าที่กำหนดได้ดีกว่าการควบคุมแบบ Open-loop โดยเฉพาะในสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงของโหนด

4. สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแม่เหล็กถาวรโดยใช้เทคนิค Pulse Width Modulation (PWM) ร่วมกับวงจรขับแบบ H-Bridge เพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์ จากผลการทดลองของชุดต้นแบบพบว่าสามารถควบคุมการทำงานของมอเตอร์ได้ครบทั้ง 4 จตุภาค ได้แก่ การหมุนเดินหน้า การเบรกในทิศทางเดินหน้า การหมุนกลับทิศทาง และการเบรกในทิศทางหมุนกลับทาง นอกจากนี้ยังได้ทำการทดสอบระบบควบคุมทั้งในโหมด Open-loop และ Closed-loop เพื่อศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของระบบ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการควบคุมแบบ Closed-loop โดยใช้ตัวควบคุม PI สามารถปรับค่าความเร็วของมอเตอร์ให้เข้าใกล้ค่าความเร็วอ้างอิงได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถรักษาเสถียรภาพของระบบได้แม้ในสถานะที่มีการเปลี่ยนแปลงของโหลด ดังนั้นระบบควบคุมที่นำเสนอในงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในงานอุตสาหกรรมหรือระบบควบคุมอัตโนมัติที่ต้องการความแม่นยำในการควบคุมความเร็วได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร เขตอุดมศักดิ์ ที่ให้การสนับสนุนด้านสถานที่ เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย รวมทั้งขอขอบพระคุณ อาจารย์ประจำสาขาที่ได้ให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะ และคำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ตลอดระยะเวลาของการดำเนินงานวิจัย นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ สนับสนุน และอำนวยความสะดวกในการดำเนินการทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูล จนทำให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] R. Krishnan, *Electric Motor Drives: Modeling, Analysis, and Control*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 2001.
- [2] A. Altay and A. B. Yildiz, "Complete electrical equivalent circuit based modeling and analysis of permanent magnet direct current (DC) motors," *WSEAS Transactions on Circuits and Systems*, vol. 21, pp. 1–10, 2022, doi: 10.37394/23201.2022.21.20.
- [3] M. F. Fazdi and P.-W. Hsueh, "Parameters identification of a permanent magnet DC motor: A review," *Electronics*, vol. 12, no. 24, p. 2559, 2023, doi: 10.3390/electronics12245559.
- [4] A. A. Hassan, N. K. Al-Shamaa, and K. K. Abdalla, "Comparative study for DC motor speed control using PID controller," *International Journal of Engineering & Technology (IJET)*, vol. 9, no. 6, pp. 906–912, 2018, doi: 10.21817/ijet/2017/v9i6/170906069.
- [5] A. Divakar, J. Joseph, J. T. George, N. N. Prabhu, and A. Nabi, "A study on DC motor operations and speed control using microcontroller," *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, vol. 5, no. 4, pp. 2450–2456, 2016, doi: 10.15662/IJAREEIE.2016.0504038.
- [6] S. Seeraji, E. G. Ovy, T. Alam, A. Zamee, and A. R. A. Emon, "A flexible closed-loop PMDC motor speed control system for precise positioning," *International Journal of Robotics and Automation*, vol. 2, no. 3, pp. 1–6, 2011.
- [7] K. Sukmee, N. Boonyuen, and N. Sengtrakul, "A study on P/PI controller for controlling speed of DC motor," Bachelor of Engineering Project Report, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand, 2019.
- [8] S. Meesuk, S. Chotiruengnapa, S. Thapankaew, and S. Kitsirikul, "Closed loop control for a DC motor," Bachelor of Engineering Project Report, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand, 2013.
- [9] N. Limpattanasamran, N. Phruksawanit, N. Chanthee, and N. Choeydo, "Four quadrant control of DC machine," Bachelor of Engineering Project Rep

การประเมินคุณภาพน้ำและการวิเคราะห์เมตาจีโนมเพื่อจำแนกลักษณะชุมชนจุลินทรีย์ในน้ำพุร้อน
จังหวัดกาญจนบุรี ประเทศไทย

Integrating Water Quality Assessment and Metagenomic Analysis to Characterize Microbial
Communities in Hot Springs, Kanchanaburi, Thailand

ศิรดา อินทรฉัตรจามร¹ ชนินาท เตชะวิทย์ปกรณ์¹ และ ชมพูนุช กลิ่นวงษ์^{1,2,*}

Sirada Intrachattajamorn¹, Chaninart Techawitayapakorn¹ and Chompunuch Glinwong^{1,2,*}

¹สาขาวิชาพันธุศาสตร์ ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330 ประเทศไทย

²หน่วยวิจัยเชื้อเพลิงชีวภาพด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชีวภาพ ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330 ประเทศไทย

¹Fields of Genetics, Department of Botany, Faculty of science, Chulalongkorn University, Bangkok, 10330, Thailand

²Biofuels by biocatalysts research unit, Department of Botany, Faculty of science, Chulalongkorn University, Bangkok, 10330, Thailand

*Corresponding author: Chompunuch Glinwong, e-mail address: chompunuch.v@chula.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษาคุณภาพน้ำและข้อมูลทางจุลชีววิทยาในน้ำพุร้อน สามารถใช้เป็นเครื่องมือสำคัญสำหรับการตรวจติดตามสภาพแวดล้อมและประเมินความอุดมสมบูรณ์ของทรัพยากรธรรมชาติ ปัจจุบันมีการศึกษาคุณภาพน้ำด้วยการตรวจด้านกายภาพ ธรณีวิทยา และเคมีของน้ำจากบ่อน้ำพุร้อนในประเทศไทยเป็นจำนวนมาก อย่างไรก็ตาม ยังขาดข้อมูลทางชีววิทยาโดยเฉพาะ การศึกษาจุลินทรีย์ซึ่งเป็นสิ่งมีชีวิตที่ไวต่อสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลง จุลินทรีย์จึงสามารถใช้เป็นตัวชี้วัดทางชีวภาพได้ดี ในการศึกษาครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณลักษณะคุณภาพน้ำที่เก็บตัวอย่างจากบ่อน้ำพุร้อนในจังหวัดกาญจนบุรี การประเมินคุณภาพของน้ำร่วมกับการศึกษาทางด้านจุลชีววิทยาซึ่งเป็นข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในเชิงอนุรักษ์ทางพันธุกรรมและการประยุกต์ใช้ทางวิชาการ ทำการศึกษาโดยการเก็บตัวอย่างดินจากน้ำพุร้อนลิ้นถิ่น น้ำพุร้อนหินดาด และดินจากอุทยานแห่งชาติไทรโยค จังหวัดกาญจนบุรี จากนั้นทำการสกัดเมตาจีโนมิกส์ดีเอ็นเอด้วยชุดสกัด NucleoSpin® Soil Kit (Macherey-Nagel, Germany) และเตรียม 16S rRNA library จากนั้นหาลำดับนิวคลีโอไทด์ด้วยเทคนิค Illumina next generation sequencing พบว่า จากคุณภาพน้ำพุร้อนทั้ง 2 แหล่ง องค์ประกอบของแร่ธาตุไม่เกินมาตรฐาน จากการศึกษากลุ่มแบคทีเรียพบว่า Phylum Proteobacteria พบมากที่สุดในตัวอย่างเป็นน้ำพุร้อน และพบ Phylum Verrucomicrobiota ในตัวอย่างดินจากอุทยานแห่งชาติไทรโยคมากที่สุด

คำสำคัญ: คุณภาพน้ำ, แร่ธาตุในน้ำพุร้อน, จุลินทรีย์ทนร้อน, เมตาจีโนมิกส์, ตัวบ่งชี้ทางชีวภาพ

Abstract

The study of water quality and microbiological data in hot springs can serve as an important tool for monitoring environmental conditions and assessing the richness of natural resources. Currently, there are numerous studies on water quality thru physical, geological, and chemical examinations of hot spring water in Thailand. However, there is a lack of biological data, particularly studies on microorganisms, which are sensitive to changing environments. Microorganisms can therefore serve as good biological indicators. This study aims to examine the water quality characteristics of samples collected from hot springs in Kanchanaburi province. The assessment of water quality, along with microbiological studies, provides useful information for genetic conservation and academic applications. The study involved collecting soil samples from Lin Thin Hot Spring, Hin Dat Hot Spring, and soil from Sai Yok National Park in Kanchanaburi province. The metagenomic DNA was extracted using the NucleoSpin® Soil Kit (Macherey-Nagel, Germany) and a 16S rRNA library was prepared. The nucleotide sequences were determined using Illumina next-generation sequencing technology. It was found that the mineral composition of both hot spring sources did not exceed the standards. The study of bacterial groups revealed that the Phylum Proteobacteria was the most abundant in the hot spring samples, while the Phylum Verrucomicrobiota was the most abundant in the soil samples from Sai Yok National Park.

Keywords: Water quality, Minerals in hot springs, Thermophilic microorganisms, Metagenomics, Biomarkers

1. บทนำ

ปัจจุบันการศึกษาคุณภาพน้ำทั้งทางด้านกายภาพ ด้านเคมีของน้ำพุร้อน เป็นหัวข้อวิจัยที่ได้รับความสำคัญโดยเฉพาะ การพัฒนาแหล่งท่องเที่ยวในพื้นที่อุทยานแห่งชาติแหล่งต่าง ๆ มีการศึกษาคุณลักษณะคุณภาพน้ำจากบ่อน้ำพุร้อนทั้งภาคเหนือ ภาคตะวันตก ภาคกลาง และภาคใต้ของประเทศไทยเป็นจำนวนมาก แต่ยังมีข้อมูลวิเคราะห์ของกลุ่มแบคทีเรียที่พบในแหล่ง น้ำพุร้อนค่อนข้างน้อย ส่วนใหญ่มีการชี้วัดด้านกายภาพ ธรณีวิทยา และเคมี โดยอาศัยมาตรฐานในส่วนของการวัดมาตรฐานด้านกายภาพ และเคมีของ คุณภาพน้ำบาดาลที่จะใช้บริโภคได้ของกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ซึ่งกำหนดค่าพารามิเตอร์คุณภาพทางเคมี ปริมาณของแข็ง ตลอดจนคุณลักษณะการตรวจพบจุลินทรีย์บางชนิด และการตรวจหาโลหะหนักบางชนิดเป็นปัจจัยในการคัดกรอง คุณภาพของแหล่งน้ำเบื้องต้น อย่างไรก็ตามในประเทศไทยยังขาดมาตรฐานในส่วนของการวัดมาตรฐานด้านกายภาพ และเคมีของ น้ำพุร้อน โดยเฉพาะฐานข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการประเมินความอุดมสมบูรณ์ทางชีวภาพ มักไม่มีการประเมินร่วมกับค่าพารามิเตอร์ ทางสิ่งแวดล้อมที่ตรวจวัดคุณภาพน้ำ ในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะรวบรวมศึกษาคุณภาพน้ำและกลุ่มแบคทีเรียที่พบในแหล่งน้ำ พุร้อน โดยก่อนหน้าการศึกษาชุมชนเมตาจีโนมในดินน้ำพุร้อนประเทศไทยมีข้อมูลจำกัดและไม่มากพอที่จะสรุปเชื่อมโยงกับข้อมูล ทางนิเวศวิทยาและสิ่งแวดล้อมได้ เนื่องจากขาดข้อมูลหลายมิติ เบื้องต้นที่พบมักเป็นการเก็บตัวอย่างเพื่อศึกษาคุณภาพน้ำ การปนเปื้อน หรือเก็บตัวอย่างเพื่อคัดแยกเชื้อจุลินทรีย์ที่ต้องการเฉพาะกลุ่มเท่านั้น จากการทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้องพบว่า การศึกษาน้ำพุร้อนในประเทศไทยส่วนใหญ่มุ่งเน้นการวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมี ขณะที่การศึกษาด้าน ความหลากหลายของจุลินทรีย์ยังมีจำนวนจำกัด โดยเฉพาะการศึกษาที่เชื่อมโยงข้อมูลคุณภาพน้ำกับโครงสร้างชุมชนจุลินทรีย์โดย ใช้เทคนิคเมตาจีโนมิกส์ ดังนั้น การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อเติมเต็มช่องว่างองค์ความรู้ดังกล่าวโดยประยุกต์ใช้การวิเคราะห์เม ตาจีโนมิกส์ร่วมกับข้อมูลคุณภาพสิ่งแวดล้อมในแหล่งน้ำพุร้อนของประเทศไทย เบื้องต้นในบทความวิจัยนี้ได้ทำการสำรวจเบื้องต้น ถึงแหล่งน้ำพุร้อนในจังหวัดกาญจนบุรีซึ่งมีความสำคัญในฐานะเป็นแหล่งท่องเที่ยวเชิงประวัติศาสตร์ร่วมกับเชิงอนุรักษ์ใน ภาคตะวันตกของประเทศไทย ด้วยระยะทางอยู่ไม่ไกลจากกรุงเทพมหานครทำให้มีนักท่องเที่ยวในแต่ละปีจำนวนมาก แหล่ง น้ำพุร้อนมีบทบาทสำคัญในเรื่องของการเป็นแหล่งนันทนาการรวมทั้งเป็นแหล่งความรู้ท้องถิ่นชุมชนซึ่งมีองค์การบริหารตำบลเป็น ผู้ดูแลรวมทั้งจัดสรรทรัพยากรสำหรับการท่องเที่ยวในเชิงนิเวศในชุมชนท้องถิ่น การศึกษาชนิดและปริมาณของจุลินทรีย์ที่ค้นพบที่ สามารถจะนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงอนุรักษ์ตลอดจนการตรวจติดตามสภาพแวดล้อมเนื่องจากจุลินทรีย์เป็นสิ่งมีชีวิตที่มีความไวต่อ สภาพแวดล้อม การตอบสนองโดยการเปลี่ยนแปลงกลุ่มของประชากรจุลินทรีย์ในสภาพแวดล้อมที่มีการปนเปื้อนสารพิษเมื่อเทียบกับในสภาวะธรรมชาติได้อย่างรวดเร็ว งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะรวบรวมข้อมูลในเรื่องของความหลากหลายของจุลินทรีย์ซึ่งมี ลักษณะเฉพาะตัวในแหล่งน้ำพุร้อนของจังหวัดกาญจนบุรีสำหรับการใช้เป็นแหล่งอ้างอิงทางความรู้ รวมทั้งสายพันธุ์จุลินทรีย์ที่มี ประโยชน์สามารถประยุกต์ใช้ทางด้านอุตสาหกรรมต่อไป

2. วิธีการศึกษา

2.1 เก็บตัวอย่างดินจากน้ำพุร้อนลันถัน และน้ำพุร้อนหินดาด จังหวัดกาญจนบุรี

เลือกเก็บดินจากอุทยานแห่งชาติไทรโยคบริเวณบ่อน้ำพุร้อนลันถัน และบ่อน้ำพุร้อนหินดาด จังหวัดกาญจนบุรี Figure 1 แสดงแผนที่ตำแหน่งเก็บตัวอย่าง โดยเก็บตัวอย่างแบบจ้วง (Grab Sampling) เก็บตัวอย่างครั้งเดียวที่จุดเดียวในเวลาใดเวลาหนึ่ง ที่กึ่งกลางความกว้างและความลึกของแหล่งน้ำ วัดอุณหภูมิและกำหนดให้จุดเก็บตัวอย่างดินมีอุณหภูมิที่ 35 ถึง 40 องศาเซลเซียส 4 จุด โดยเก็บจุดละ 3 ถึง 5 กรัม นำตัวอย่างดินทั้ง 4 จุดผสมให้เข้ากันอย่างสม่ำเสมอด้วยช้อนตัก (spatula) เก็บในภาชนะที่ สะอาด และปิดสนิท โดยดินจากน้ำพุร้อนลันถันจะแบ่งเป็น 2 ชุดการทดลอง คือดินจากน้ำพุร้อนลันถันที่มีการผสมกับน้ำพุร้อน และอีกชุดการทดลองมีเพียงดินจากน้ำพุร้อนลันถัน และเก็บตัวอย่างจุดอ้างอิงในธรรมชาติแวดล้อมข้างเคียง (reference sites) 1 จุด คือน้ำพุร้อนหินดาด ตามคู่มือปฏิบัติการเก็บตัวอย่างแหล่งน้ำ [1]

2.2 การศึกษาคุณลักษณะทางเคมีและพารามิเตอร์ทางสิ่งแวดล้อมจากน้ำพุร้อน

การตรวจสอบอุณหภูมิ และค่าความเป็นกรดต่างวัดโดยตรงขณะทำการเก็บตัวอย่างในจุดเก็บ สารประกอบและแร่ธาตุ วิเคราะห์ตามมาตรฐานห้องปฏิบัติการวิเคราะห์ Copper, Manganese, Zinc, Lead, Nickel และ Cadmium ตรวจสอบด้วยวิธี Digestion, Direct Air-Acetylene Flame method (APHA: 3120B) Cyanide ตรวจสอบด้วยวิธี Distillation Colorimetric method (APHA: 4500-CN(E)) Chromium, Hexa ตรวจสอบด้วยวิธี Digestion, Direct Air-Acetylene Flame method และ Inductive Couple Plasma Method (APHA: 3500-Cr(B)) [2]

2.3 การศึกษากลุ่มแบคทีเรียที่พบจากน้ำพุร้อน

สกัดเมตาจีโนมิกส์ดีเอ็นเอด้วยชุดสกัด NucleoSpin® Soil Kit (Macherey-Nagel, Germany) ใส่ตัวอย่าง 250-500 mg ใน NucleoSpin® Bead Tube Type A จากนั้นเติม Buffer SL1 หรือ Buffer SL2 ปริมาตร 700 µl จากนั้นเติมสารละลาย Enhancer SX ปริมาตร 150 µl เพื่อให้ได้ปริมาณดีเอ็นเอสูงสุด จากนั้น vortex แนวนอนกับ vortexer ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 5 นาที และนำไปปั่นเหวี่ยง 11,000 × g เป็นเวลา 2 นาที ดูดของเหลวใส่ไปยังหลอด microcentrifuge ใหม่ พร้อมเติมสารละลาย Buffer SL3 ปริมาตร 150 µl และ vortex 5 วินาที จากนั้นบ่มที่ 0-4°C เป็นเวลา 5 นาที และนำไปปั่นเหวี่ยง 11,000 × g เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นเตรียม NucleoSpin® Inhibitor Removal Column (วงแดง) ใส่หลอด microcentrifuge ใหม่ และดูดสารจากชั้นตอนก่อนหน้าปริมาตร 700 µl ใส่บน filter และปั่นเหวี่ยง 11,000 × g เป็นเวลา 1 นาที ทั้ง NucleoSpin® Inhibitor Removal Column (วงแดง) เติมสารละลาย Buffer SB ปริมาตร 250 µl และ vortex 5 วินาที จากนั้นเตรียม NucleoSpin® Soil Column (วงเขียว) ใส่หลอด microcentrifuge ใหม่ และดูดสารจากชั้นตอนก่อนหน้าปริมาตร 550 µl ลงบน column และปั่นเหวี่ยง 11,000 × g เป็นเวลา 1 นาที และดูดสารละลายที่เหลือลงบน column และปั่นเหวี่ยง 11,000 × g เป็นเวลา 1 นาที อีกครั้ง จากนั้นชะล้าง 4 ครั้งโดยครั้งแรกชะล้างด้วยสารละลาย Buffer SB ปริมาตร 500 µl ใส่ใน column และปั่นเหวี่ยง 11,000 × g เป็นเวลา 30 วินาที ครั้งที่ 2 ชะล้างด้วยสารละลาย Buffer SW1 ปริมาตร 550 µl ใส่ใน column และปั่นเหวี่ยง 11,000 × g เป็นเวลา 30 วินาที ครั้งที่ 3 ชะล้างด้วยสารละลาย Buffer SW2 ปริมาตร 700 µl ใส่ใน column vortex 2 วินาที และปั่นเหวี่ยง 11,000 × g เป็นเวลา 30 วินาที และครั้งที่ 4 ชะล้างด้วยสารละลาย Buffer SW2 ปริมาตร 700 µl ใส่ใน column vortex 2 วินาที และปั่นเหวี่ยง 11,000 × g เป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นปั่นเหวี่ยง 11,000 × g เป็นเวลา 2 นาที เพื่อให้ทำให้เยื่อ silica แห้ง จากนั้นนำ NucleoSpin® Soil Column (วงเขียว) ใส่หลอด microcentrifuge ใหม่ และเติมสารละลาย Buffer SE ปริมาตร 50-100 µl เปิดฝาบ่มที่อุณหภูมิห้อง 1 นาที จากนั้นปิดฝาและปั่นเหวี่ยง 11,000 × g เป็นเวลา 30 วินาที จะได้ดีเอ็นเอที่บริสุทธิ์พร้อมสำหรับขั้นตอนต่อไป

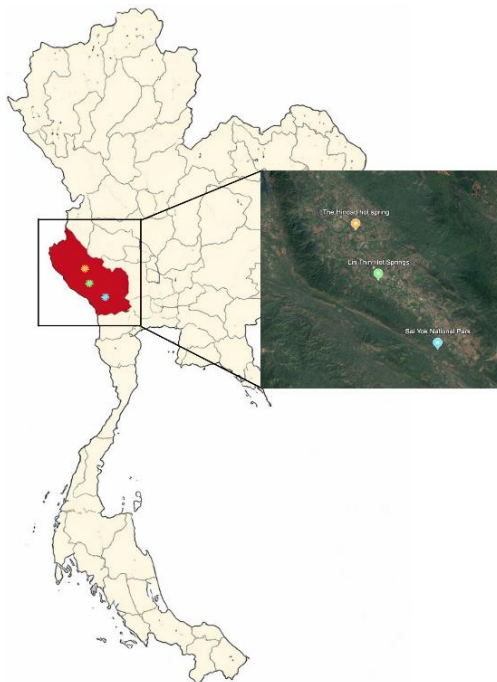


Figure 1 Illustrates the sampling location map for Hin Dad Hot Spring, Lin Thin Hot Spring, and Sai Yok National Park, Kanchanaburi Province. The coordinates were referenced from Google Earth, and the map was generated using Artificial Intelligence (AI) tools for visual presentation.

2.4 การตรวจสอบคุณภาพของดีเอ็นเอ และเตรียม 16S rRNA library (ณิชภัทร วิเศษชลธาร, 2562)

ตรวจสอบคุณภาพดีเอ็นเอที่สกัดได้โดยวิธี 0.8% agarose gel electrophoresis วัดค่าดูดกลืนแสงของดีเอ็นเอ ที่ความยาวคลื่น 260 นาโนเมตร และค่าดูดกลืนแสงของโปรตีนที่ความยาวคลื่น 280 นาโนเมตรด้วยเครื่อง Epoch micro plate spectrophotometer (BioTek, USA) ซึ่งค่าที่ได้จะต้องมีค่าระหว่าง 1.7-2.0 และมีความเข้มข้นของปริมาณดีเอ็นเอ ในตัวอย่าง 200 ng/µl จึงยอมรับได้ว่าดีเอ็นเอที่สกัดมีความบริสุทธิ์

2.5 การหาลำดับนิวคลีโอไทด์ด้วยเทคนิค Illumina next generation sequencing

อ่านลำดับนิวคลีโอไทด์ตามวิธีการโดยศูนย์วิทยาศาสตร์โอมิกส์และชีวสารสนเทศ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย วิเคราะห์ข้อมูลดัชนีความหลากหลายของแบคทีเรียในตัวอย่าง โดยใช้ Shannon-Wiener index [3] วิเคราะห์ผลลำดับนิวคลีโอไทด์ด้วยโปรแกรมทางชีวสารสนเทศโดยจัดกลุ่มลำดับเบสด้วยวิธี Amplicon Sequence Variants (ASVs) ด้วยโปรแกรม Dada2 จัดจำแนกแบคทีเรียที่อยู่ในตัวอย่าง (taxonomic classification) โดยโปรแกรม QIIME2 (version 2020.6)

$$H' = - \sum_{i=1}^S (p_i \ln p_i)$$

โดย H' คือ ค่าดัชนีความหลากหลายชนิด Shannon-Wiener index

p_i = สัดส่วนของความมากมายของจำนวนชนิดที่ i เทียบกับจำนวนทั้งหมด (N)

โดย $p_i = ni/N$ เมื่อ $i = 1, 2, 3, \dots, S$

S = จำนวนชนิดที่พบในสังคม

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 ผลการทดสอบคุณภาพน้ำ

ผลการทดสอบคุณภาพน้ำของตัวอย่างแหล่งธรรมชาติ ดัง Table 1 แสดงให้เห็นองค์ประกอบของแร่ธาตุต่างๆ ที่พบในแหล่งน้ำธรรมชาติของน้ำพุร้อนทั้ง 2 แหล่งมีค่าไม่เกินค่ามาตรฐานตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 8 (พ.ศ. 2537) เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน ในแหล่งน้ำประเภทที่ 2 [4] อธิบายได้ว่าเป็นแหล่งน้ำคุณภาพดีเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้เพื่อการนันทนาการที่ร่างกายต้องสัมผัสน้ำโดยตรง

Table 1 Water Quality Test Results of Hot Spring Samples

Parameters/Samples	Hin Dat Hot Spring	Lin Thin Hot Spring	Standard	Method
pH	7.0	7.0	-	Eletromatic
Temperature (°C)	40	50	(Degree C)	Thermometer
Nickel (mg/L)	<0.01	<0.01	≤0.1 mg/L Ni	APHA: 3120B
Copper (mg/L)	<0.03	<0.03	≤0.1 mg/L Cu	APHA: 3120B
Nitrate (mg/L)	4.0	3.5	≤5 mg/L	APHA: 4500-NO3(D)
Manganese (mg/L)	0.014	<0.01	≤1.0 mg/L Mn	APHA: 3120B
Zinc (mg/L)	0.021	0.025	≤1.0 mg/L Zn	APHA: 3120B
Cadmium (mg/L)	<0.001	<0.001	≤0.005 mg/L Cd	APHA: 3120B
Lead (mg/L)	<0.01	<0.01	≤0.05 mg/L Pb	APHA: 3120B
Chromium, Hexa (mg/L)	<0.01	<0.01	≤0.05 mg/L Cr6+	APHA: 3500-Cr(B)
Mercury, Total (mg/L)	<0.0001	<0.0001	≤0.002 mg/L Hg	APHA: 3112B
Arsenic (mg/L)	<0.02	<0.02	≤0.05 mg/L As	APHA: 3120B
Cyanide (mg/L)	<0.01	<0.01	≤0.005 mg/L CN	APHA: 4500-CN(E)
Coliform, Total	280	1,600	≤5,000 MPN/100 mL	APHA: 9221B
<i>Escherichia coli</i>	ND	ND	Not expected to be found	APHA: 9221G

3.2 การศึกษากลุ่มแบคทีเรียที่พบจากน้ำพุร้อน

ผลการวิเคราะห์คุณภาพเมตาจีโนมิกส์ดีเอ็นเอของตัวอย่างแหล่งธรรมชาติ 3 แหล่ง ในปริมาณความเข้มข้น 50 ng/ μ L ด้วยเทคนิค 0.8% agarose gel electrophoresis ดัง Figure 2 เห็นแถบดีเอ็นเอชัดเจนและมีความหนา ไม่พบรอยปื้น (smear) จึงสรุปได้ว่าดีเอ็นเอที่ได้จากการสกัดเมตาจีโนมิกส์มีคุณภาพสมบูรณ์ดีและมีความบริสุทธิ์มากพอที่จะนำไปวิเคราะห์และอ่านผลลำดับนิวคลีโอไทด์ด้วยเทคนิค Illumina next generation sequencing

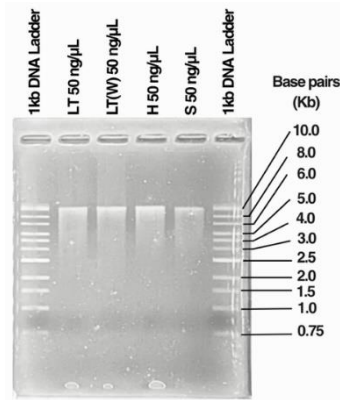


Figure 2 The DNA quality analysis of samples from three natural sources, standardized to a concentration of 50 ng/ μ L, was performed using 0.8% agarose gel electrophoresis. In this analysis, LT represents soil samples from Lin Thin Hot Spring; LT (W) represents soil samples from Lin Thin Hot Spring mixed with hot spring water; H represents soil samples from Hin Dad Hot Spring; and S represents soil samples from Sai Yok National Park.

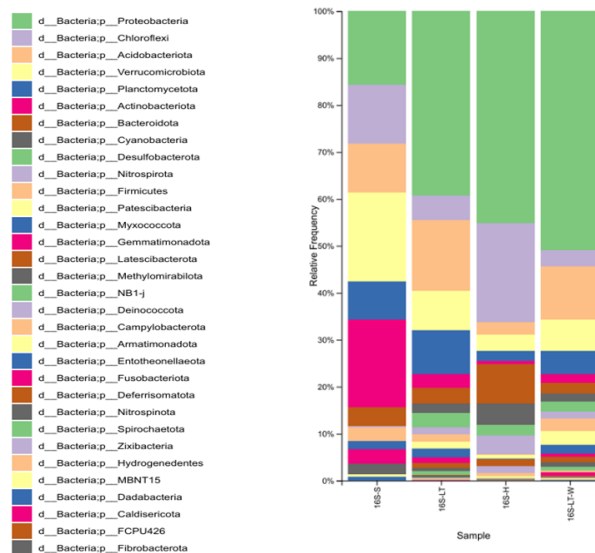


Figure 3 Analysis of the taxonomic profile at the Phylum level of the microbial communities.

Taxonomic profile ของแต่ละตัวอย่างในระดับ Phylum ดัง Figure 3 โดย Phylum Proteobacteria พบได้มากที่สุด ในน้ำพุร้อนหินดาด ดินลื่นถัน และดินลื่นถันผสมน้ำ ในสัดส่วน 45.1888% 39.4050% และ 50.9200% ตามลำดับ ซึ่งต่างจากดิน ไทรโยคที่พบ Phylum Verrucomicrobiota ในสัดส่วน 19.0050% Phylum Proteobacteria คือไฟลัมของแบคทีเรียแกรมลบที่มีความหลากหลายพบได้ในสภาพแวดล้อมของดินหลายชนิด มีลักษณะเฉพาะคือมีกระบวนการเผาผลาญหลายรูปแบบ ได้แก่ เฮเทอโรโทรฟ (heterotrophs) เคมีลิโทโทรฟ (chemolithotrophs) และเคมีโฟโตโทรฟ (chemophototrophs) [5] ซึ่งมีหน้าที่ในการตรึงไนโตรเจนด้วย โปรตีนโอแบคทีเรียสามารถแบ่งออกเป็นห้ากลุ่มย่อย ได้แก่ α , β , γ , δ และ ϵ โปรตีนโอแบคทีเรีย

จัดเป็นกลุ่มจุลินทรีย์ที่ใหญ่ที่สุดและมีลักษณะทางฟิโนไทป์ที่หลากหลายมากในเชิงวิวัฒนาการ (Maheshwari and Sankar, 2023) ในขณะที่ Verrucomicrobiota ที่พบเป็นกลุ่มใหญ่ที่สุดในสัดส่วนดีเอ็นเอรวมจากตัวอย่างดินแหล่งธรรมชาติจากเขตอุทยานแห่งชาติ เป็นไฟลัมของแบคทีเรียแกรมลบที่มีเพียงไม่กี่ชนิดที่ได้รับการอธิบาย ชนิดที่ระบุได้ถูกแยกได้จากน้ำจืด น้ำทะเล ดิน มีการระบุชนิดที่ยังไม่สามารถเพาะเลี้ยงได้จำนวนหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับโฮสต์ยูแคริโอต รวมถึงกระบวนการซิมไบออนต์ของโปรติสต์ มีรายงานว่าแบคทีเรียซิมไบโอติกเหล่านี้ในลำไส้ของมนุษย์ที่ถือว่าเป็นโพรไบโอติกที่มีคุณประโยชน์ Verrucomicrobiota มีอยู่มากมายในสิ่งแวดล้อม มีรายงานถึงกิจกรรมการทำงานในระบบนิเวศที่จำกัดและค่อนข้างไม่ทำงาน อย่างไรก็ตามมีรายงานสายพันธุ์ Verrucomicrobiota ใหม่ที่เกี่ยวข้องกับเนื้อเยื่อรากพืช ช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชและยับยั้งโรคพืชจากแบคทีเรียในมะเขือเทศ [6] และ Taxonomic profile ของแต่ละตัวอย่างในระดับ Genus ที่ผู้วิจัยวิเคราะห์เพิ่มเติม พบว่าในน้ำพุร้อนหินดาดจะพบ Genus Rheinheimera มากที่สุดในสัดส่วน 13.550% และไม่พบในแหล่งธรรมชาติอื่น ทั้งนี้มีรายงานพบ Genus Rheinheimera ของแบคทีเรียชนิดหนึ่งที่อยู่ในวงศ์ Chromatiaceae (วงศ์แบคทีเรียสีม่วงที่สังเคราะห์แสงได้) ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมลบ รวมถึงแบคทีเรียในกลุ่มแกมมาโพรตีโอแบคทีเรียที่อาศัยอยู่ในสิ่งแวดล้อมในทะเล [7] และแหล่งน้ำจากป่าชายเลน [8] แบคทีเรียกลุ่มนี้มีบทบาทเด่นในกระบวนการเผาผลาญคาร์โบไฮเดรต และมีหลักฐานบ่งชี้ถึงวัฏจักรแบบไม่ใช้ออกซิเจน การพบแบคทีเรียกลุ่มนี้ในตัวอย่างดินจากน้ำพุร้อนหินดาดแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการทนต่ออุณหภูมิที่สูง พบ Genus WD2101 soil group มากที่สุดในสัดส่วน 4.631% ในดินลึกลับผสมน้ำพบ Genus Sphingobium ในสัดส่วน 6.338% และในดินตัวอย่างไทรโยคพบ Genus Candidatus Udaeobacter ในสัดส่วน 16.450% มีรายงานว่ากลุ่ม Udaeobacter เป็นหนึ่งในแบคทีเรียที่พบได้ทั่วไปและมีความสำคัญมากในดินทั่วโลก แต่เพาะเลี้ยงได้ยากมาก การได้มาซึ่งข้อมูลแบคทีเรียกลุ่มนี้มาจากการวิเคราะห์ผ่านเมตาจีโนมเป็นส่วนใหญ่ จึงทำให้ในปัจจุบันยังไม่มีข้อมูลระบุหน้าที่ในระบบนิเวศที่มากเพียงพอ และเป็นประเด็นที่ยังต้องได้รับการค้นคว้าวิจัยต่อไป ทั้งนี้ในส่วนของปัจจัยทางนิเวศวิทยาที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพน้ำยังมีการเก็บข้อมูลเพิ่มเติมเพื่อการสรุปผลวิจัยต่อไป เป็นที่น่าสนใจว่า ลักษณะของน้ำพุร้อนในจังหวัดกาญจนบุรีมักผุดขึ้นตามรอยแตกของหินปูน และหินทรายอาร์โคสในยุคมีโซโซอิก มีอุณหภูมิค่อนข้างสูง ทั้งนี้ น้ำพุร้อนลึกลับ และหินดาด น้ำร้อนจะมีน้ำใสสะอาด ไม่มีกลิ่นกำมะถัน รุนแรง และมีคราบผลึกคาร์บอเนตสีขาว โดยสภาพแวดล้อมโดยรอบ บ่อน้ำพุร้อนมักตั้งอยู่ท่ามกลางธรรมชาติอันอุดมสมบูรณ์ เช่น ริมแม่น้ำแควน้อย มีลักษณะนิเวศริมน้ำ (Riparian Zone) ที่ร่มรื่น

อุณหภูมิที่ร้อนทำให้เป็นแหล่งที่อยู่อาศัยของจุลินทรีย์ทนร้อน (Thermophiles) จากการวิเคราะห์บ่งชี้ว่ามีกลุ่ม Candidatus บ่งชี้ว่าเป็นกลุ่มที่เสนอขึ้นมาใหม่ ซึ่งยังไม่ได้รับการเพาะเลี้ยงอย่างเป็นทางการในห้องปฏิบัติการ แต่ได้รับการระบุผ่านการวิเคราะห์ทางพันธุกรรม อย่างไรก็ตาม การข้อจำกัดของการเก็บตัวอย่างจากบ่อน้ำพุร้อนในประเทศไทยยังคงมีอยู่มาก เนื่องจากการเข้าถึงดินก้นบ่อเก็บ อาจเป็นไปได้ยากในบางกรณี โดยเฉพาะในพื้นที่ซึ่งยังไม่มีการพัฒนาเป็นแหล่งท่องเที่ยว หรือบางจุดในการศึกษาได้แก่ บ่อน้ำร้อนลึกลับที่มีจุดกำเนิดอยู่ในแม่น้ำแควน้อย การได้มาซึ่งน้ำร้อนเป็นการขุดบ่อลึกลงไปยังส่วนพื้นตลิ่งแม่น้ำซึ่งมักมีน้ำท่วมถึงบริเวณดังกล่าว การขึ้นลงของน้ำและระดับน้ำในแม่น้ำแควน้อยส่งผลต่อการเข้าถึงตัวบ่อ และเนื่องจากมีความลึกมาก ในงานวิจัยนี้จึงได้เก็บตัวอย่างส่วนของดินลึกลับ โดยการนำดินปากบ่อน้ำร้อนผสมน้ำร้อนในบ่อ เพื่อลดข้อจำกัดการเก็บตัวอย่างบริเวณภายในบ่อน้ำร้อนซึ่งมีความลึกมาก ยากแก่การลงไปเก็บ และเป็นข้อจำกัดในการเข้าถึงดินภายในก้นบ่อ ผู้วิจัยจึงใช้ดินที่เก็บได้ช่วงปากบ่อด้านบนผสมกับน้ำร้อนภายในบ่อ เพื่อให้ตัวอย่างดินผสมเข้ากับน้ำร้อนที่มีจุลินทรีย์ในบ่อน้ำร้อนในส่วน of ตัวอย่างดินบ่อน้ำร้อนลึกลับ

3.3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรมทางชีวสารสนเทศ

ค่า Alpha diversity โดยจะใช้ Shannon entropy เป็นดัชนีที่ใช้ในการพิจารณาความหลากหลายและการกระจายตัว จะอธิบายได้ว่า ดินลึกลับจะมีความหลากหลายของจุลินทรีย์สูง และมีการกระจายที่สม่ำเสมอมากกว่าแหล่งธรรมชาติอื่น ๆ

Figure 4 แสดง Principal Coordinates Analysis (PCoA) ในรูปแบบ 3 มิติ สำหรับการวิเคราะห์จุลินทรีย์/ Microbiome หรือสถิติเพื่อเทียบความคล้ายคลึง ของกลุ่มตัวอย่างค่า Beta diversity โดยจะใช้ค่า Weighted UniFrac Emperor ดัง Figure 4 ในการคำนวณค่า Beta diversity และพิจารณาจากข้อมูลลำดับวิวัฒนาการและความอุดมสมบูรณ์ของแต่ละชนิดของจุลินทรีย์ในแต่ละชุมชน พบว่าน้ำพุร้อนหินดาดมีความแตกต่างจากตัวอย่างแหล่งธรรมชาติอื่นมากที่สุด จุดสีน้ำเงินและสีส้ม ซึ่งแสดงโพรไฟล์ของดินลึกลับและน้ำร้อนลึกลับตามลำดับ อยู่ค่อนข้างใกล้กันในระนาบ Axis 1 แสดงว่า องค์ประกอบหรือลักษณะที่คล้ายคลึงกันมากกว่ากลุ่มอื่น ในขณะที่จุดสีแดงและสีเขียว ซึ่งแสดงโพรไฟล์ของน้ำพุร้อนหินดาดและดินจากแหล่งอ้างอิงธรรมชาติในอุทยานแห่งชาติไทรโยคอยู่ห่างจากกลุ่มอื่นและห่างจากกันเองอย่างชัดเจน หมายความว่ากลุ่มตัวอย่างสีแดงและสีเขียว มีลักษณะเฉพาะตัวที่แตกต่างจากกันอย่างมาก Axis 1 (57.87%) เป็นแกนที่สำคัญที่สุด เพราะอธิบายความแตกต่างของข้อมูลได้

เกินครึ่ง หากจุดแยกกันตามแนวราบ (ซ้าย-ขวา) แสดงว่าเป็นความต่างที่มีนัยสำคัญสูงมาก ในขณะที่ Axis 2 (37.41%) อธิบายความแตกต่างรองลงมาในแนวตั้ง Axis 3 (4.727%) อธิบายความต่างได้น้อยมาก ความแตกต่างในมิตินี้อาจไม่ใช่ประเด็นหลักของงานวิจัย ทั้งนี้ ผู้วิจัยมีการวางแผนในการเก็บตัวอย่างในฤดูกาลอื่นเพิ่ม เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของผลการทดลองที่เกิดจากการเก็บตัวอย่าง การศึกษานี้เก็บตัวอย่างเพียงครั้งเดียวในแต่ละพื้นที่ ดังนั้นผลคุณภาพน้ำจึงสะท้อนสภาพแวดล้อมเฉพาะช่วงเวลาเก็บตัวอย่าง และอาจไม่ครอบคลุมความแปรผันตามเวลา

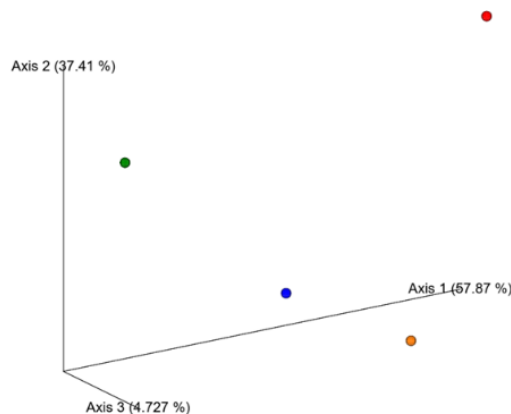


Figure 4 The Beta diversity analysis is presented, where the red dots represent Hin Dad Hot Spring, the blue dots represent Lin Thin soil, the orange dots represent Lin Thin soil mixed with water, and the green dots represent reference soil from nearby natural sources within Sai Yok National Park.

4. สรุป

จากผลการทดลองค่าพารามิเตอร์ทางด้านสิ่งแวดล้อมตลอดจนองค์ประกอบทางเคมีและคุณลักษณะทางด้านจุลชีววิทยาของบ่อน้ำพุร้อนในจังหวัดกาญจนบุรีทั้ง 2 แหล่ง ได้แก่ น้ำพุร้อนลินถิน และน้ำพุร้อนหินดาด แสดงให้เห็นว่าน้ำจากแหล่งตัวอย่างในช่วงเวลาที่เก็บตัวอย่างมีคุณภาพดี สามารถที่จะใช้ในการอุปโภคได้อย่างปลอดภัย แต่สำหรับการบริโภคอาจต้องผ่านกระบวนการลดการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ สามารถใช้เป็นแหล่งสันทนการในการท่องเที่ยวเชิงสุขภาพ ไม่มีการปนเปื้อนจากกิจกรรมการเกษตรหรือน้ำที่มาจากแหล่งชุมชน และผลการทดสอบตัวอย่างน้ำและดินยังไม่พบการปนเปื้อนโลหะหนักอันตรายในปริมาณสูงกว่ามาตรฐานจากสายแร่ใต้ดิน คุณภาพน้ำมีลักษณะเป็นน้ำผิวดินที่พบจุลินทรีย์ในธรรมชาติ จุลินทรีย์ที่พบเป็นส่วนใหญ่คือกลุ่มที่มีการเกี่ยวข้องกับการหมุนเวียนวัฏจักรแร่ธาตุในสิ่งแวดล้อมและส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช พบแบคทีเรียสกุล *Sphingobium* ซึ่งมักเกี่ยวข้องกับการย่อยสลายสารมลพิษหรือสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ทั้งนี้ ปัจจัยสำคัญที่ทำหน้าที่เป็นปัจจัยคัดเลือกทางนิเวศวิทยา คือ อุณหภูมิของน้ำพุร้อนในช่วง 40-50°C ที่มีบทบาทในการกำหนดโครงสร้างชุมชนจุลินทรีย์ ส่งผลให้จุลินทรีย์ที่สามารถทนร้อน (Thermotolerant microbes) และจุลินทรีย์ที่ชอบเจริญในอุณหภูมิสูง (Thermophilic microbes) ปรับตัวได้ดีมีแนวโน้มเป็นชนิดเด่นในโครงสร้างชุมชนของจุดศึกษา การพบแบคทีเรียบางกลุ่มในสัดส่วนสูงจึงสะท้อนอิทธิพลของสภาพแวดล้อมต่อองค์ประกอบและความหลากหลายของชุมชนจุลินทรีย์ในระบบนิเวศน้ำพุร้อน

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณองค์การบริหารส่วนตำบลลินถิน องค์การบริหารส่วนตำบลหินดาด จังหวัดกาญจนบุรี และ และแหล่งทุนกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) งบประมาณอุดหนุนการวิจัยพื้นฐานจากหน่วยงานภาครัฐการวิจัยพื้นฐาน (Fundamental fund, FF) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย รหัสทุน DIS_FF_68_319_2300_087 และทุนระดับบัณฑิตศึกษา จุฬาฯ เพื่อเฉลิมฉลองวโรกาสที่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวทรงเจริญพระชนมายุครบ 72 พรรษา

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมควบคุมมลพิษ. (2553). วิธีปฏิบัติสำหรับเก็บตัวอย่างน้ำจากแหล่งน้ำ. เข้าถึงได้จาก:
<https://www.pcd.go.th/publication/4209/> (เข้าถึงเมื่อ 30 เมษายน 2568)

-
- [2] Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 24th Edition. เข้าถึงได้จาก:
<https://www.standardmethods.org/> (เข้าถึงเมื่อ 20 พฤศจิกายน 2568)
- [3] ทิพย์ลดา ทองตะเภา และคณะ. (2565). สมบัติบางประการของดินและความหลากหลายของแบคทีเรียในดินในพื้นที่แปลง
ศึกษารูปแบบการฟื้นฟูป่าอนุรักษ์เสื่อมสภาพ เพื่อสร้างระบบนิเวศและความมั่นคงทางอาหารอย่างยั่งยืน ระยะเริ่มต้น
โครงการ ณ อุทยานแห่งชาติศรีน่าน จังหวัดน่าน เข้าถึงได้จาก [https://ag2.kku.ac.th/kaj/PDF.cfm?filename=23-
Soi09_O.pdf&id=4798&keeptrack=3](https://ag2.kku.ac.th/kaj/PDF.cfm?filename=23-Soi09_O.pdf&id=4798&keeptrack=3) (เข้าถึงเมื่อ 30 เมษายน 2568)
- [4] คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ. (2537). *ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ* (ประกาศฉบับลงวันที่ 24 กุมภาพันธ์
2537). ประธานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ
- [5] Bandopadhyay, S., and Shade, A. (2024). Chapter 3 - Soil bacteria and archaea, Editor(s): Eldor A. Paul, Serita
D. Frey, Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry (Fifth Edition), Elsevier, 2024, Pages 41-74, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822941-5.00003-X>.
- [6] Choi, M., Kaari, M., Kaari, M., and Seon-Woo Lee, H. J. L. (2025). Novel Verrucomicrobiota strains associated
with plant root tissue enhance plant growth and suppress bacterial wilt in tomato Front. Microbiol.,
Volume 16. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1712154>.
- [7] Yoon, J.H., Park, S.E., Kang, S.J., and Oh, T.K. (2007). *Rheinheimera aquimaris* sp. nov., Isolated from seawater
of the East Sea in Korea. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 57(7),
1386–1390.
- [8] Zhang W, Zhu S, Cheng Y, Ding L, Li S, Peng N, and He S. (2020). *Rheinheimera mangrovi* sp. nov., a bacterium
isolated from mangrove sediment. *Int J Syst Evol Microbiol.* 70(12), 6188-6194. doi:
10.1099/ijsem.0.004513. PMID: 33052808.
-

การเตรียมถ่านชีวภาพรูพรุนลำดับชั้นจากเปลือกฝักโกโก้โดยการปรับสภาพด้วยเชื้อรา *Colletotrichum* sp. Preparation of Hierarchical Porous Biochar from Cocoa Pod Husk via Fungal Pretreatment with *Colletotrichum* sp.

สรโรชา นิสถิตย์¹ กัญญ์ชลา กิรติรวี² กนกพร บุญญะอดิชาติ^{1,*} และ พรประพา คงตระกูล¹

Sarocha Ninsathit¹, Kanchalar Keeratirawee², Kanokpon Bunya-atichart^{1,*} and Pornprapa Kongtragoul¹

¹ภาควิชาเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร 86160 ประเทศไทย

²ภาควิชาพื้นฐานทั่วไป สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร 86160 ประเทศไทย

¹Department of Agricultural Technology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Prince of Chumphon Campus, Chumphon Province, 86160, Thailand

²Department of General Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Prince of Chumphon Campus, Chumphon Province, 86160, Thailand

*Corresponding author: Kanokpon Bunya-atichart, e-mail address: kanokpon.bu@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

เปลือกฝักโกโก้เป็นของเสียทางการเกษตรที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงฤดูการเก็บเกี่ยว ก่อให้เกิดปัญหาด้านการจัดการ เนื่องจากมีโครงสร้างแข็งและย่อยสลายได้ยาก ส่งผลให้มักถูกทิ้งโดยไม่ได้รับการใช้ประโยชน์อย่างเหมาะสม งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์นำเชื้อรา *Colletotrichum* sp. ซึ่งเป็นเชื้อราสาเหตุโรคบนผลโกโก้ย่อยสลายผนังเซลล์ผล เพื่อปรับสภาพทางชีวภาพของเปลือกฝัก ก่อนนำไปผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่ 800 °C เพื่อเตรียมถ่านชีวภาพรูพรุนลำดับชั้น ผลการศึกษาพบว่าถ่านชีวภาพที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรามีพื้นที่ผิวจำเพาะ 76.97 m²/g และปริมาตรรูพรุนรวม 0.03283 cm³/g ซึ่งสูงกว่าชุดควบคุมมากกว่าสองเท่า โดยมีขนาดรูพรุนเฉลี่ย 1.71–6.18 nm บ่งชี้ถึงโครงสร้างรูพรุนลำดับชั้นที่ประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็ก และรูพรุนขนาดกลางผสมผสานกัน การวิเคราะห์ Fourier transform Infrared (FT-IR) Spectroscopy แสดงการลดลงของหมู่ฟังก์ชันลิกลโนเซลลูโลสและการพัฒนาโครงสร้างคาร์บอนเชิงอะโรมาติก ขณะที่ Raman spectroscopy มีค่า I_D/I_G เท่ากับ 0.96 แสดงถึงระดับความไม่เป็นระเบียบของโครงข่ายคาร์บอนรวมกับการจัดเรียงตัวแบบ sp² ผล X-Ray Diffraction, XRD บ่งชี้โครงสร้างกราฟไฟต์มีการจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบและลักษณะคาร์บอนแบบอสัณฐาน และภาพ Scanning electron microscope, SEM ยืนยันการเกิดรูพรุนกระจายทั่วพื้นผิววัสดุ ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพทางชีวภาพด้วยเชื้อรา *Colletotrichum* sp. เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการเพิ่มพื้นที่ผิวของเปลือกฝักโกโก้ และนำมาใช้เป็นวัสดุเริ่มต้นในการเตรียมวัสดุรูพรุนลำดับชั้นได้

คำสำคัญ: ถ่านชีวภาพรูพรุนลำดับชั้น, กระบวนการชีวภาพ, เปลือกฝักโกโก้, *Colletotrichum* sp.

Abstract

Cocoa pod husk is an agricultural waste that increases rapidly during the harvesting season and causes problems in agricultural waste management. Due to its rigid structure and low biodegradability, this resource is often discarded without proper utilization. This study proposes the use of *Colletotrichum* sp., a fungal pathogen causing anthracnose disease in cocoa pods to degrade pod cell walls, as a biological pretreatment agent for cocoa pod husk before carbonization at 800 °C to prepare biochar. The results indicated that biochar pretreated with *Colletotrichum* sp. exhibited a specific surface area of 76.97 m²/g and a total pore volume of 0.03283 cm³/g, which were more than twice those of the control sample. The average pore size ranged from 1.71 to 6.18 nm, indicating a hierarchical pore structure composed of both micropores and mesopores. Fourier transform Infrared (FT-IR) Spectroscopy analysis revealed a reduction in lignocellulosic functional groups and the development of aromatic carbon structures. The structural analysis using Raman spectroscopy showed I_D/I_G ratio of 0.96, reflecting a relatively high degree of structural disorder combined with sp² carbon organization. The crystalline structure analyzed using X-Ray Diffraction (XRD) technique, indicating analysis indicated a disordered graphitic structure with predominantly amorphous carbon characteristics, while Scanning electron microscope, SEM images confirmed the formation of a complex porous network uniformly distributed across the material surface. These findings demonstrate that biological pretreatment using *Colletotrichum* sp. is an effective approach for this structure led to an increase surface area of cocoa pod husks and can be used as a precursor material for the preparation of porous carbon.

Keywords: Hierarchical Porous Biochar, Biological Pretreatment, Cocoa Pod Husk, *Colletotrichum* sp.

1. บทนำ

โกโก้เป็นพืชเศรษฐกิจใหม่ที่กำลังได้รับการส่งเสริมอย่างต่อเนื่องจากกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ เนื่องจากเมล็ดโกโก้เป็นวัตถุดิบต้นน้ำที่สำคัญในอุตสาหกรรมอาหาร เครื่องดื่ม เครื่องสำอาง และเวชภัณฑ์ ซึ่งมีแนวโน้มความต้องการสูงในตลาดผู้บริโภค [1] อย่างไรก็ตาม กระบวนการผลิตเมล็ดโกโก้ส่งผลให้เกิดวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรปริมาณมาก โดยเฉพาะเปลือกฝักโกโก้ (cocoa pod husk) ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 67-76 ของน้ำหนักผลโกโก้สด โดยการผลิตเมล็ดโกโก้แห้ง 1 ตัน จะได้เปลือกฝักโกโก้เหลือทิ้งสูงถึงประมาณ 10 ตัน [2] การเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของขยะชีวมวลในช่วงฤดูเก็บเกี่ยวก่อให้เกิดปัญหาด้านการจัดการเนื่องจากเปลือกฝักโกโก้เป็นวัสดุที่ย่อยสลายได้ยาก จึงส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและถือเป็นการสูญเสียทรัพยากรโดยเปล่าประโยชน์ [3]

ปัจจุบันมีการพัฒนาวิธีเพิ่มมูลค่าวัสดุเหลือใช้ประเภทเปลือกผลิตผลสดเหล่านี้ โดยการเปลี่ยนให้เป็นถ่านชีวภาพ (biochar) และถ่านกัมมันต์ (activated carbon) ซึ่งเป็นวัสดุที่ถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลาย เช่น การบำบัดน้ำเสีย [4] การกรองอากาศ [5-7] การกักเก็บพลังงาน [8] และการดูดซับก๊าซเอทิลีนเพื่อชะลอการสุกของผลไม้ [9] เปลือกฝักโกโก้จัดเป็นแหล่งวัตถุดิบที่มีศักยภาพสูงในการผลิตถ่านกัมมันต์ เนื่องจากมีองค์ประกอบของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในสัดส่วนที่เหมาะสมต่อการพัฒนาโครงสร้างรูพรุน [10, 11] อย่างไรก็ตาม ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตด้วยวิธีการดั้งเดิมมักประสบปัญหาโครงสร้างรูพรุนที่มีขนาดเล็กเกินไป โดยส่วนใหญ่มีเพียงรูพรุนขนาดเล็ก (micropores) เป็นหลัก ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการแพร่กระจายของโมเลกุลสารดูดซับขนาดใหญ่ และลดประสิทธิภาพการทำงานในระบบที่มีความซับซ้อน [12, 13]

งานวิจัยในปัจจุบันจึงให้ความสำคัญกับการเตรียมถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนลำดับชั้น (hierarchical porous carbon) ซึ่งประกอบด้วยรูพรุนหลายระดับ ได้แก่ รูพรุนขนาดเล็ก (micropores) <2 nm, ขนาดกลาง (mesopores) 2–50 nm และขนาดใหญ่ (macropores) >50 nm เชื่อมโยงถึงกัน เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะและเพิ่มประสิทธิภาพการเข้าถึงตำแหน่งการดูดซับของโมเลกุล [14] หนึ่งในแนวทางที่มีประสิทธิภาพคือการปรับสภาพทางชีวภาพ (biological pretreatment) ด้วยเชื้อราที่สามารถย่อยสลายลิกโนเซลลูโลส เช่น *Aspergillus* spp. [14], *Phanerochaete chrysosporium* [7] และ *Trichoderma viride* [6, 15] ซึ่งช่วยทำให้โครงสร้างของวัสดุหลวมลงและสร้างโพรงเริ่มต้นก่อนเข้าสู่กระบวนการเผาคาร์บอนในเซชัน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ใช้เชื้อรา *Colletotrichum* sp. ซึ่งเป็นเชื้อราสาเหตุโรคแอนแทรคโนสบนผลโกโก้และมีความสามารถในการย่อยสลายผนังเซลล์พืช มาประยุกต์ใช้ในการปรับสภาพเปลือกฝักโกโก้ เป็นถ่านชีวภาพที่มีรูพรุนแบบลำดับชั้น

2. วิธีการศึกษา

2.1 การเตรียมและแยกเชื้อราสาเหตุโรคแอนแทรคโนสจากผลโกโก้

เก็บตัวอย่างผลโกโก้ที่แสดงอาการโรคแอนแทรคโนส (พบแผลบวมสีน้ำตาลเข้มบนผิวผล) ซึ่งคาดว่าเกิดจากเชื้อรา *Colletotrichum* sp. จากนั้นแยกเชื้อราสาเหตุโดยวิธี Tissue Transplanting Technique โดยตัดชิ้นส่วนเนื้อเยื่อบริเวณขอบแผลขนาด 0.5 x 0.5 cm นำมาฆ่าเชื้อที่ผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์ (Clorox[®]) ความเข้มข้น 10% เป็นเวลา 3-5 นาที หลังจากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นนิ่งฆ่าเชื้อ 1-2 นาที ซับให้แห้งด้วยกระดาษทิชชูหนึ่งฆ่าเชื้อ แล้ววางชิ้นส่วนเนื้อเยื่อลงบนอาหาร water agar (WA) เมื่อสังเกตเห็นเส้นใยเจริญออกมาจากชิ้นเนื้อเยื่อ ใช้ cork borer ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 cm ตัดย้ายปลายเส้นใยย้ายลงบนอาหาร potato dextrose agar (PDA) และบ่มที่อุณหภูมิห้อง

จากนั้นทำเชื้อให้บริสุทธิ์ด้วยวิธี single spore isolation ตามวิธีดัดแปลงของ Ho and Ko (1997) [16] โดยเขียนเส้นใยบริเวณที่มีสปอร์ของเชื้อราจากจานเพาะเชื้อใส่ลงใน microtube ที่มีน้ำกลั่นนิ่งฆ่าเชื้อปริมาตร 200 µl เขย่าให้สปอร์กระจายด้วยเครื่อง Vortex นำไปเลี้ยงในอาหาร WA เป็นเวลา 6-12 ชั่วโมง จากนั้นตัดชิ้นส่วนที่มีสปอร์เดี่ยวภายใต้กล้องจุลทรรศน์ ตัดย้ายลงบนจานเพาะเชื้ออาหาร PDA และเลี้ยงในอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5-7 วัน จึงได้เชื้อรา *Colletotrichum* sp. บริสุทธิ์สำหรับนำไปใช้ในการทดลอง พร้อมทั้งตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของโคโคนี เส้นใย (mycelium) และโคโคนีเดีย (conidia) ภายใต้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 400 เท่า โดยบันทึกภาพและรายละเอียดลักษณะเพื่อใช้ในการจำแนกชนิด

2.2 การเตรียมวัตถุดิบ

เตรียมเปลือกฝักโกโก้ โดยได้รับความอนุเคราะห์จากร้าน J&O COCOA จังหวัดชุมพร โดยคัดเลือกฝักที่สมบูรณ์ ไม่มีร่องรอยการเข้าทำลายของโรคและแมลง ล้างทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่นและแบ่งการเตรียมเป็น 2 กลุ่มทดลอง ดังนี้:

กลุ่มควบคุม (เปลือกฝักโกโก้ไม่ปรับสภาพทางชีวภาพ): นำเปลือกฝักโกโก้มาทำความสะอาดพื้นผิวด้วยสารละลาย Clorox[®] 10% เป็นเวลา 5 นาที ล้างด้วยน้ำกลั่นนิ่งฆ่าเชื้อ 2-3 นาที ซับให้แห้ง (Figure 1A) หั่นเป็นชิ้นขนาด 1 x 1 cm (Figure

1B) นำไปอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน (Hot air oven) ที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จนแห้งสนิท (Figure 1C) จากนั้นนำมาบดด้วยเครื่องบดและคัดขนาดด้วยตะแกรงร่อนขนาด 40-65 mesh (Figure 1D)

กลุ่มปรับสภาพชีวภาพ (biological pretreatment) เปลือกฝักโกโก้ผ่านการย่อยสลายด้วยเชื้อรา: นำเปลือกฝักโกโก้ผ่าครึ่งฝักและทำความสะอาดพื้นผิวตามวิธีข้างต้น จากนั้นทำการปลูกเชื้อโดยใช้เข็มที่ผ่านการนึ่งฆ่าเชื้อเจาะบนผิวเปลือกฝัก 1-3 จุด แล้ววางชิ้นวุ้นที่มีเชื้อรา *Colletotrichum* sp. เจริญอยู่บนอาหาร (culture disc) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 cm วางบนรอยแผล (ดัดแปลงวิธีจาก Cheng et al., 2020 และ 2021 [6, 7]) นำเปลือกฝักโกโก้ที่ปลูกเชื้อแล้ว บ่มในกล่องพลาสติกที่มีการควบคุมความชื้น บ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 7-20 วัน จากนั้นนำเปลือกฝักโกโก้ที่ผ่านการปรับสภาพทางชีวภาพ ล้างด้วยน้ำ DI (Figure 1F) และหั่นเป็นชิ้นขนาด 1 x 1 cm (Figure 1G) และนำไปอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จนแห้งสนิท (Figure 1H) นำมาบดด้วยเครื่องบดและร่อนด้วยตะแกรงร่อนขนาด 40-65 mesh (Figure 1I) ดัดแปลงวิธีจาก Chandra et al., 2009 [16] และ Ramirez-Valencia et al., 2024 [8]

2.3 การคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization)

นำผงเปลือกฝักโกโก้ที่ผ่านการเตรียมจากขั้นตอนที่ 2.2 ทั้งส่วนที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพทางชีวภาพ เข้าสู่กระบวนการเผาภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนในเตาเผาแบบท่อ (Tube furnace) ที่อุณหภูมิ 800 °C โดยใช้อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน (N₂) 0.2 L/min เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่ออุณหภูมิลดลงจนถึงอุณหภูมิห้อง นำวัสดุคาร์บอนที่ได้มาล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน (DI water) ซ้ำหลายครั้งจนกระทั่งน้ำล้างมีค่า pH เป็นกลาง (Figure 1E และ 1J) ตามวิธีการของ Ramirez-Valencia et al. (2024) [8] จากนั้นนำไปอบแห้งและเก็บในโหลสุญญากาศเพื่อนำไปวิเคราะห์หุ้มฟังก์ชันบนพื้นผิวโดยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectroscopy), วิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี (Raman spectroscopy), วิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-Ray Diffraction, XRD), คุณสมบัติของรูพรุนด้วยเทคนิคการวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิว (Brunauer, Emmett and Teller, BET) และถ่ายภาพลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านชีวภาพรูพรุนลำดับชั้นด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

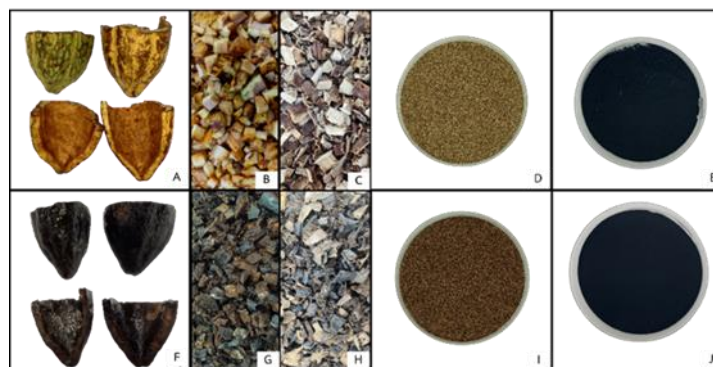


Figure 1 Physical appearance of cocoa pod husk and carbon materials at different stages: (A–E) Control group: (A) Raw, (B) Chopped, (C) Dried, (D) Ground, and (E) Carbonized husk, (F–J) Bio-pretreated group: (F) After *Colletotrichum* sp. pretreatment, (G) Chopped, (H) Dried, (I) Ground, and (J) Hierarchical porous biochar after carbonization.

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 การแยกและจัดจำแนกเชื้อรา *Colletotrichum* sp. สาเหตุโรคแอนแทรคโนสบนผลโกโก้

จากการเก็บตัวอย่างผลโกโก้ที่แสดงอาการโรคแอนแทรคโนส พบลักษณะแผลบวมสีน้ำตาลเข้ม ขยายตัวเป็นวงซ้อนกัน (concentric ring) และพบกลุ่มสปอร์สีขาวครีมเจริญอยู่บริเวณกลางแผล (Figure 2A) เมื่อทำการแยกเชื้อและนำมาเลี้ยงบนอาหาร PDA พบว่าโคโลนีมีเส้นใยสีขาวฟู (Figure 2B) พลิกดูด้านหลังจานเพาะเชื้อมีสีครีมถึงน้ำตาลอ่อน (Figure 2C) และจากการตรวจสอบภายใต้กล้องจุลทรรศน์ พบว่าเส้นใยมีลักษณะใส ไม่มีสี และมีผนังกัน (septate hyphae) (Figure 2D) โคนเดี่ยว

มีรูปร่างคล้ายทรงกระบอกหรือรูปไข่ (cylindrical to ellipsoidal) ปลายทั้งสองด้านมีลักษณะมน ผิวเรียบ และไม่สร้างผนังกัน (aseptate) โดยอยู่รวมกันเป็นกลุ่ม (Figure 2E) ลักษณะดังกล่าวสอดคล้องกับลักษณะจำแนกของเชื้อราในสกุล *Colletotrichum* ตามการจัดจำแนกอนุกรมวิธานที่รายงานโดย Weir et al. (2012) [18] จึงสามารถสรุปได้ว่าเชื้อราที่แยกได้เป็นเชื้อรา *Colletotrichum* sp. ซึ่งเป็นสาเหตุของโรคแอนแทรกโนสบนผลโกโก้ นอกจากนี้ การนำเปลือกฝักโกโก้ที่เป็นโรคแอนแทรกโนสตามธรรมชาติมาใช้เป็นวัตถุดิบเริ่มต้นสำหรับการเตรียมถ่านชีวภาพ และถ่านชีวภาพนี้ถูกรายงานว่าสามารถใช้สำหรับการดูดซับเอทิลีนได้ [19, 20] ทั้งนี้ สำหรับการเตรียมถ่านกัมมันต์ด้วยการใช้เชื้อราชนิดอื่น ได้แก่ *Phanerochaete chrysosporium*, *Trichoderma viride*, and *Aspergillus tubingensis* ที่มีพื้นที่ผิวแบบรูพรุนลำดับชั้นยังต้องมีการใช้กระบวนการคาร์บอนไนซ์และการกระตุ้น จึงจะสามารถพัฒนาโครงข่ายรูพรุนลำดับชั้นที่สมบูรณ์จนได้พื้นที่ผิวจำเพาะสูงมากได้ [14]

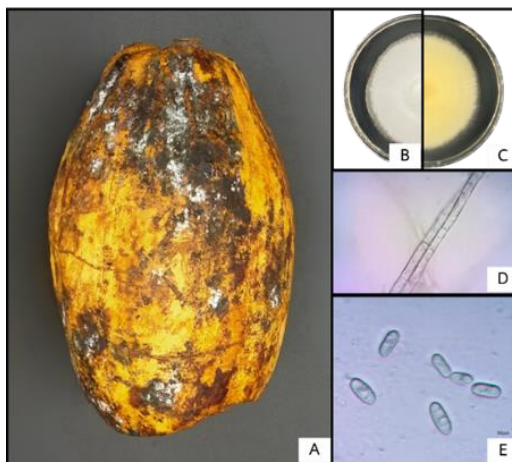


Figure 2 Morphological characteristics of *Colletotrichum* sp. isolated from infected cocoa pods: (A) Symptoms of pod anthracnose, (B) Front of fungal colony, (C) Reverse of fungal colony on PDA, (D) Septate mycelium under light microscope (400x), and (E) Characteristics of conidia (400x).

3.2 ผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวด้วยเทคนิค FT-IR

ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR เพื่อเปรียบเทียบหมู่ฟังก์ชันระหว่างเปลือกฝักโกโก้ที่ผ่านการปรับสภาพ (CFNC) และไม่ผ่านการปรับสภาพ (CNC) ก่อนการคาร์บอนไนเซชัน (Figure 3A) และถ่านชีวภาพรูพรุนลำดับชั้นที่ผ่านการปรับสภาพ (CFC) และไม่ผ่านการปรับสภาพ (CC) หลังการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 800 °C (Figure 3B) พบว่ามีความแตกต่างกัน โดยสเปกตรัมของ CFNC และ CNC ปรากฏพีกเด่นที่ตำแหน่งประมาณ 3304 cm^{-1} (O-H stretching), 1604 cm^{-1} (C-O stretching หรือ C=C aromatic stretching) และ 1035 cm^{-1} (C-O stretching) ซึ่งแสดงถึงองค์ประกอบหลักของลิกโนเซลลูโลส [5, 7, 19, 21] ภายหลังเมื่อผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน พบว่าพีกส่วนใหญ่ของ CFC และ CC ลดลงหรือหายไปเนื่องจากการสลายตัวด้วยความร้อน (thermal decomposition) ของสารประกอบอินทรีย์ที่ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds, VOCs) โดยปรากฏพีกที่โดดเด่นเพียงตำแหน่งเดียวที่ประมาณ 1374 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับการบิดตัวของหมู่แอลเคน (C-H bending) ในโครงสร้างโครงข่ายคาร์บอนแบบอะโรมาติก [7, 21] โดยการเปลี่ยนแปลงนี้ยืนยันว่าเปลือกฝักโกโก้ได้เปลี่ยนสภาพเป็นวัสดุคาร์บอนที่มีความเสถียรสูงและมีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างคาร์บอนที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับรายงานของ Cheng et al., 2021 [7] ซึ่งศึกษาการปรับสภาพชีวมวลด้วยเชื้อรา *Phanerochaete chrysosporium* ร่วมกับการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium Hydroxide, KOH) และคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 800 °C โดยพบว่าพีกของหมู่ฟังก์ชันลิกโนเซลลูโลสลดลง โดยก่อนการคาร์บอนไนเซชันปรากฏพีกเด่นในช่วง 3640 cm^{-1} และ 3410 cm^{-1} เมื่อผ่านการคาร์บอนไนเซชันเหลือพีกเด่นในช่วง 1040 cm^{-1} นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับ Kong et al. (2024) [22] ที่รายงานว่าเชื้อราสามารถผลิตเอนไซม์เพื่อย่อยสลายโครงสร้างลิกนินและเซลลูโลส ส่งผลให้โครงสร้างชีวมวลเกิดการแตกตัวก่อนเข้าสู่กระบวนการคาร์บอนไนเซชัน

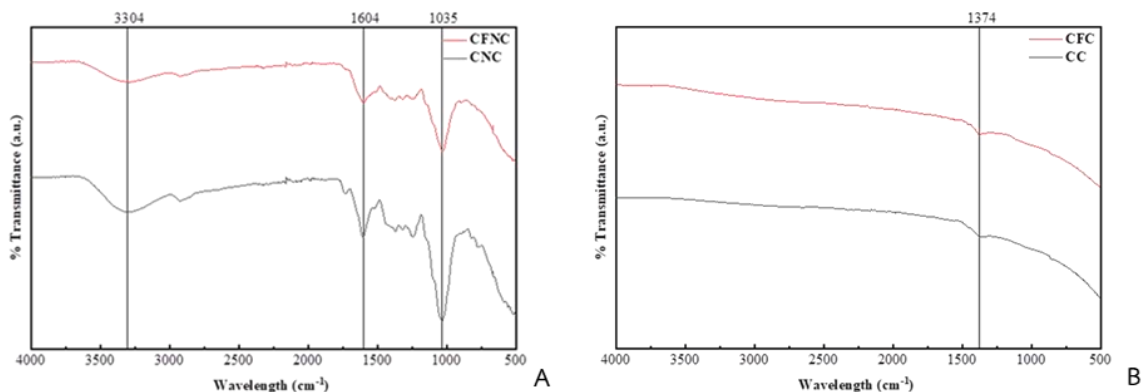


Figure 3 FT-IR spectra of cocoa pod husk materials: (A) Raw cocoa pod husk and (B) Hierarchical porous biochar (CFC).

3.3 ผลการศึกษาโครงสร้างโมเลกุลด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy

ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมรามานของ CFC (Figure 4) พบพิกัดสัญญาณหลัก 2 ตำแหน่งที่สำคัญ คือ D-band ที่ตำแหน่ง 1344.76 cm^{-1} ซึ่งบ่งบอกถึงความไม่เป็นระเบียบหรือจุดบกพร่องในโครงสร้างคาร์บอน (defect-induced mode) และ G-band ที่ตำแหน่ง 1599.31 cm^{-1} ซึ่งบ่งบอกถึงการสั่นสะเทือนของโครงสร้างผลึกกราฟิตที่มีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ (E_{2g} mode of sp^2 carbon atoms) [7, 20, 23] เมื่อพิจารณาอัตราส่วนความเข้มของพิกัด (I_D/I_G) พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.96 ซึ่งแสดงถึงระดับความไม่เป็นระเบียบในโครงข่ายคาร์บอนต่ำถึงปานกลาง ค่าดังกล่าวบ่งชี้ว่ากระบวนการปรับสภาพทางชีวภาพร่วมกับการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ $800 \text{ }^\circ\text{C}$ ส่งผลให้เกิดโครงสร้างคาร์บอนที่มีการจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ ซึ่งเอื้อต่อการสร้างรูพรุน (porosity) และเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสสำหรับการพัฒนาเป็นวัสดุรูพรุนลำดับชั้นในอนาคต ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Charoensuk et al., 2024 [20] ที่ได้ทำการเตรียมถ่านชีวภาพ (biochar) จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและทำการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ $500 \text{ }^\circ\text{C}$ พบว่าอัตราส่วนความเข้มของพิกัด (I_D/I_G) มีค่าประมาณ 0.83–0.91 ทำให้มีระดับคาร์บอนในโครงสร้างพื้นผิวที่เหมาะสมต่อการใช้งาน

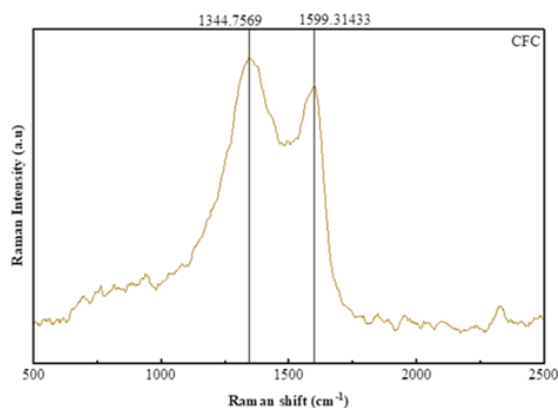


Figure 4 Raman spectrum of hierarchical porous biochar (CFC) pretreated with *Colletotrichum* sp., showing D and G bands.

3.4 ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD

เทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน สเปกโทรสโกปี เป็นเทคนิคที่อาศัยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เมื่อรังสีเอ็กซ์ถูกฉายลงบนสารตัวอย่างแล้วจะเกิดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ โดยจะทำการวัดรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของถ่านชีวภาพจากเปลือกฝักโกโก้ โดย CC และ CFC (Figure 5) แสดงพีกกว้างที่บริเวณประมาณ 24° และ 30° ซึ่งสัมพันธ์กับระนาบ {002} ของโครงสร้างกราฟิตที่มีการซ้อนทับกันอย่างไม่เป็นระเบียบ [6,7] ลักษณะพีกที่กว้าง และมีความเข้มต่ำบ่งชี้ว่าวัสดุที่ได้มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน (amorphous carbon) เป็นหลัก ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของถ่านชีวภาพที่มีความพรุนสูง [22] เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างผลึกพบว่า CFC พิกัดสัญญาณที่มีจุดสูงสุด {002} ลดลงและมีการเคลื่อนมาตำแหน่งที่ต่ำกว่าของ CC เมื่อผ่านกระบวนการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ เนื่องจากมีการเพิ่มระยะชั้นของวัสดุ CFC ขึ้น [14] อย่างไรก็ตาม การปรากฏของระนาบ {002} แสดงให้เห็นว่าการเผา

ที่อุณหภูมิ 800 °C เริ่มทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของชั้นแผ่นคาร์บอนลักษณะคล้ายกราฟีน (Graphene-like sheets) ในระดับจุลภาค

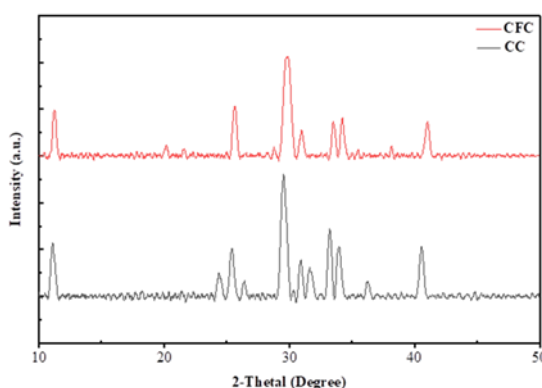


Figure 5 XRD patterns of biochar from cocoa pod husk: Control group (CC) and Bio-pretreated group (CFC).

3.5 คุณสมบัติของรูพรุนด้วยเทคนิค BET และลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านชีวภาพรูพรุนลำดับชั้นด้วยกล้อง SEM

ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและโครงสร้างรูพรุนด้วยเทคนิค BET (Table 1) พบว่า CFC มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 76.97 m²/g ซึ่งสูงกว่า CC ที่มีพื้นที่ผิวเพียง 34.77 m²/g นอกจากนี้ CFC ยังมีปริมาตรรูพรุนรวม 0.03283 cm³/g สูงกว่าเท่าตัว จากผลการศึกษาขนาดรูพรุน พบว่าขนาดรูพรุนในช่วง 1.71-6.18 nm บ่งชี้ว่าวัสดุมีโครงสร้างประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็ก และขนาดกลางผสมผสานกัน ซึ่งเป็นคุณสมบัติเด่นของโครงสร้างรูพรุนลำดับชั้น อย่างไรก็ตาม Zhang et al., 2019 [14] รายงานผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจากการปรับสภาพด้วยเชื้อ *Trichoderma viride* ได้พื้นที่ผิว 2290 m²/g

เมื่อพิจารณาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า พบความแตกต่างของพื้นผิวอย่างชัดเจน โดย CC (Figure 6A) มีพื้นผิวค่อนข้างเรียบและรูพรุนมีขนาดไม่สม่ำเสมอ ในขณะที่ CFC (Figure 6B) ปรากฏโครงข่ายรูพรุนที่สลับซับซ้อนและมีการกระจายตัวของรูพรุนทั่วพื้นผิวในลักษณะเป็นโพรง (cavities) ที่ชัดเจนกว่า ผลลัพธ์นี้ยืนยันว่าการปรับสภาพทางชีวภาพด้วยเชื้อรา *Colletotrichum* sp. ช่วยทำลายโครงสร้างลิกโนเซลลูโลสที่แข็งแรงของเปลือกฝักโกโก้ [22] และเปิดช่องว่างภายในเนื้อวัสดุให้สลายตัวได้ดียิ่งขึ้นในระหว่างการเผา

Table 1 Surface properties and pore structure of Control group (CC) and Bio-pretreated group (CFC).

Sample Code	BET surface area (m ² /g)	Total pore volume (cm ³ /g)	Average pore diameter (nm)	BJH adsorption pore diameter (nm)
CC (Control)	34.77	0.0140	1.61	8.40
CFC (Bio-pretreated)	76.97	0.03283	1.71	6.18

4. สรุป

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นการปรับสภาพด้วยเชื้อรา *Colletotrichum* sp. ก่อนการคาร์บอนไนเซชันสามารถพัฒนาโครงสร้างรูพรุนของถ่านชีวภาพจากเปลือกฝักโกโก้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR, Raman spectroscopy, XRD, BET และ SEM พบถ่านชีวภาพจากชุดที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา (CFC) มีพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนรวม และการกระจายตัวของรูพรุนทั้งในระดับเล็ก (micropore) และระดับกลาง (mesopore) มากกว่าชุดควบคุม (CC) โดยโครงสร้างที่ได้มีลักษณะเป็นคาร์บอนที่มีโครงข่ายไม่เป็นระเบียบ ซึ่งเอื้อต่อการพัฒนาพื้นที่ผิวสูง ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพทางชีวภาพด้วยเชื้อรา *Colletotrichum* sp. เป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมในการเพิ่มมูลค่าของเสียทางการเกษตรให้กลายเป็นวัสดุคาร์บอนที่มีศักยภาพสำหรับการประยุกต์ใช้ในอนาคต

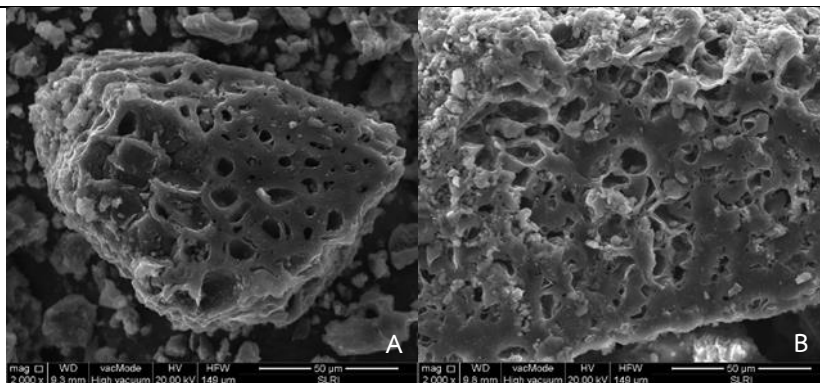


Figure 6 SEM images of hierarchical porous biochar at 2,000× magnification: (A) Control group (CC); and (B) Bio-pretreated group (CFC).

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ร้าน J&O Cocoa ที่อนุเคราะห์เปลือกฝักโกโก้วัตถุดิบสำคัญในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ และขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อภิสิทธิ์ เอียดเอื้อ นายดำรงดี มิ่งขวัญศิริ และนายธนภัทร พลธิราช จากภาควิชาชีววิทยาและนาโนเทคโนโลยี คณะเทคโนโลยีนวัตกรรมบูรณาการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร เป็นอย่างสูง ที่กรุณาให้การสนับสนุนด้านการเผ่าถ่านชีวภาพ การวิเคราะห์ข้อมูล รวมถึงให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ต่อการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] สภาอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย. 2567. โลกไร้พรมแดนธุรกิจใหม่ สร้างโอกาสให้ SME ไทย. เข้าถึงได้จาก : เว็บไซต์ <https://km.fti.or.th/docs/km/fti-knowledge-sharing-11172/vol-26> (เข้าถึงเมื่อ 13 มีนาคม 2568).
- [2] Gomez Hoyos, C., Mazo Marquez, P., Penagos Velez, L., Serpa Guerra, A., Eceiza, A., Urbina, L., Velasquez-Cock, J., Ganan Rojo, P., Velez Acosta, L. and Zuluaga, R. 2020. Cocoa shell: an industrial by-product for the preparation of suspensions of holocellulose nanofibers and fat. *Cellulose*. 27: 10873-10884.
- [3] Heidarinejad, Z., Dehghani, M. H., Heidari, M., and Ali, I. 2020. Methods for preparation and activation of activated carbon: a review. *Environmental Chemistry Letters*. 18: 393–415.
- [4] Hao, Z., Wang, C., Yan, Z., Jiang, H., and Xu, H. 2018. Magnetic particles modification of coconut shell-derived activated carbon and biochar for effective removal of phenol from water. *Chemosphere*. 211: 962-969.
- [5] Vieillard, J., Bouazizi, N., Bargougui, R., Brun, N., Fotsing Nkuigui, P., Oliviero, E., Thoumire, O., Couvrat, N., Djoufac Woumfo, E., Ladam, G., Mofaddel, N., Azzouz, A. and Derf, F. Le. 2018. Cocoa shell-deriving hydrochar modified through aminosilane grafting and cobalt particle dispersion as potential carbon dioxide adsorbent, *Chemical Engineering Journal*. 342: 420-428.
- [6] Cheng, H., Sun, Y., Wang, X., Zou, S., Ye, G., Huang, H. and Ye, D. 2020. Hierarchical porous carbon fabricated from cellulose-degrading fungus modified rice husks: Ultrahigh surface area and impressive improvement in toluene adsorption. *Journal of Hazardous Materials*. 392: 122298.
- [7] Cheng, H., Ye, G., Wang, X., Su, C., Zhang, W., Yao, F., Wang, Y., Jiao, Y., Huang, H. and Ye D. 2021. Micro-mesoporous carbon fabricated by *Phanerochaete chrysosporium* pretreatment coupling with chemical activation: Promoting effect and toluene adsorption performance. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 9: 105054.
- [8] Ramirez-Valencia, L. D., Lopez-Suarez, F. E., Conde, L. R., Bailon-García, E., Bueno-Lopez, A. and Perez-Cadenas, A. F. 2024. Cocoa husk as precursor of carbonaceous materials for supercapacitor electrodes. *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 963: 118325.

-
- [9] ปวีณพล คุณารูป และวาสนา พิทักษ์พล. 2560. ผลของสารดูดซับเอทิลีนต่อการชะลอการสุกและคุณภาพการแปรรูปเป็นกล้วยกรอบของกล้วยไข่พันธุ์พระตะบอง. ว. เกษนเกษตร. 45(ฉบับพิเศษ 1): 374-380.
- [10] Martínez-Ángel, J. D., Villamizar-Gallardo, R. A. and Ortiz-Rodríguez, O. O. 2015. Characterization and evaluation of cocoa (*Theobroma cacao* L.) pod husk as a renewable energy source. *Agrociencia*. 49(3): 329-345.
- [11] Tsai, W. T., Hsu, C. H., Lin, Y. Q., Tsai, C. H., Chen, W. S. and Chang, Y.T. 2020. Enhancing the Pore Properties and Adsorption Performance of Cocoa Pod Husk (CPH)-Derived Biochars via Post-Acid Treatment Processes. 8(2): 144.
- [12] Li, J., Holze, R., Moyo, S., Wang, S., Li, S., Tang, T., and Chen, X. 2021. Three-dimensional hierarchical porous carbon derived from natural resources for highly efficient treatment of polluted water. *Environ Sci Eur*. 33: 98.
- [13] Xia, C. and Shi, S. Q. 2016. Self-activation for activated carbon from biomass: theory and parameters. *Green Chem*. 18: 2063-2071.
- [14] Zhang, W., Cheng, H., Niu, Q., Fu, M., Huang, H., and Ye, D. 2019. Microbial Targeted Degradation Pretreatment: A Novel Approach to Preparation of Activated Carbon with Specific Hierarchical Porous Structures, High Surface Areas, and Satisfactory Toluene Adsorption Performance. *Environ. Sci. Technol*. 53: 7632–7640.
- [15] Liu, Z., Jinguang, H., Shen, F., Tian, D., Huang, M., He, J., Zou, J., Zhao, L., and Zeng, Y. 2021. *Trichoderma* bridges waste biomass and ultra-high specific surface area carbon to achieve a high-performance supercapacitor. *Journal of Power Sources*. 497: 229880.
- [16] Ho, W. C., and Ko, W. H. 1997. A simple method for obtaining single-spore isolates of fungi, Department of Plant Pathology, Beaumont Agricultural Research Center, University of Hawaii at Manoa, Hilo, Hawaii 96720, USA, 38: 41-44
- [17] Chandra, T. C., Mirna, M. M., Sunarso, J., Sudaryanto, Y., and Ismadji, S. 2009. Activated carbon from durian shell: Preparation and characterization. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 40: 457-462.
- [18] Weir, B.S., Johnston, P. R., and Damm, U. 2012. The *Colletotrichum gloeosporioides* species complex. *Studies in Mycology*. 73: 115–180.
- [19] Tepamatr, P. 2023. Efficacy of a palladium-modified activated carbon in improving ethylene removal to delay the ripening of Gros Michel banana. *Journal of Agriculture and Food Research*. 12: 100561.
- [20] Charoensuk, P., Chaiwong, S., Suwunwong, T., Halley, P. J., and Suwantong, O. 2024. Preparation and utilization of biochar from agricultural wastes as ethylene absorber for ‘Gros Michel’ banana ripening. *Industrial Crops & Products*. 222: 119860.
- [21] Ahmad, F., Daud, W. M. A. W., Ahmad, M. A., and Radzi, R. 2012. Cocoa (*Theobroma cacao*) shell-based activated carbon by CO₂ activation in removing of Cationic dye from aqueous solution: Kinetics and equilibrium studies. *Chemical Engineering Research and Design*. 90: 1480-1490.
- [22] Kong, W., Zhang, X., Fu, X., Zhou, C., Fan, L., and Zhang, W. 2024. Biological pretreatment with white rot fungi for preparing hierarchical porous carbon from Banlangen residues with high performance for supercapacitors and dye adsorption. *Front. Microbiol*. 15: 1374974.
- [23] Cordova, B. M., Santa Cruz, J. P., Huamani-Palomino, R. G., Baena-Moncada, A. M., 2020. Simultaneous adsorption of a ternary mixture of brilliant green, rhodamine B and methyl orange as artificial wastewater onto biochar from cocoa pod husk waste. Quantification of dyes using the derivative spectrophotometry method. *N. J. Chem*. 44, 8303–8316.
-

ผลของสารให้ความหวานและสารก่อเจลจากพืชต่อคุณสมบัติทางเนื้อสัมผัสและประสาทสัมผัส ของผลิตภัณฑ์กัมมี่มะม่วงมหาชนก

Effects of Sweeteners and Plant-Based Gelling Agents on the Physical and Sensory Properties of Mahachanok Mango Gummy

ชามาวีร์ จันทรทั่วม¹ และ ภาริกา รุ่งพิชัยพิเชฐ^{1,*}
Chamarwee Jantuum¹ and Parika Rungpichayapichet^{1,*}

¹ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม 73000 ประเทศไทย

¹Department of Food Technology, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakhon Pathom Province, 73000, Thailand

*Corresponding author: Parika Rungpichayapichet, e-mail address: rungpichayapichet_p@su.ac.th

บทคัดย่อ

ในปัจจุบัน แนวโน้มการบริโภคอาหารเพื่อสุขภาพและอาหารจากพืชมีการเติบโตอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ขนมหวาน เช่น กัมมี่ ซึ่งโดยทั่วไปมีปริมาณน้ำตาลสูง ถูกพัฒนาและปรับปรุงสูตรเพื่อลดปริมาณน้ำตาลและตอบสนองความต้องการของผู้บริโภค โดยการใช้สารให้ความหวานทดแทนร่วมกับสารก่อเจลจากพืชแทนการใช้วัตถุติดแบบดั้งเดิม ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการใช้มอลติทอลร่วมกับสตีเวียทดแทนน้ำตาลซูโครสและชนิดของสารก่อเจลจากพืช ได้แก่ อะการ์ (AG), เพกทินชนิด High methoxyl pectin (HM-PEC), เพกทินชนิด Low methoxyl pectin (LM-PEC) รวมถึงสารก่อเจลผสม ได้แก่ Agar:Arrowroot Starch (AG:S), Agar:Low methoxyl pectin (AG:LM-PEC), Agar:Guar gum (AG:GG) และ Low methoxyl pectin:Carrageenan (LM:CAR) ที่อัตราส่วน 1:1 ต่อคุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ค่าสี (L^* , a^* , b^*) ปริมาณน้ำอิสระ (a_w) และค่าความเป็นกรดต่าง (pH) รวมถึงคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสด้วยวิธี Texture Profile Analysis (TPA) และทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัสด้วยวิธี 9-point hedonic scale ของผลิตภัณฑ์กัมมี่มะม่วงมหาชนกโดยใช้เนื้อมะม่วงมหาชนกเป็นองค์ประกอบหลักในปริมาณ 60% (w/w) ผลการศึกษาพบว่าการใช้มอลติทอลร่วมกับสตีเวียทำให้ผลิตภัณฑ์มีค่า a_w สูงขึ้น ค่า a^* ลดลง และค่า b^* เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ขณะที่ค่า L^* และคุณสมบัติด้านเนื้อสัมผัสไม่แตกต่างกันอย่าง มีนัยสำคัญ ($p \geq 0.05$) ผลิตภัณฑ์กัมมี่มะม่วงมหาชนกที่ใช้ LM-PEC ให้ค่าความแน่นเนื้อ ความเหนียว และความเคี้ยวได้สูงที่สุด และค่า a_w ต่ำที่สุด (0.75 ± 0.01) แสดงถึงความสามารถในการสร้างโครงข่ายเจลที่มีความหนาแน่นผ่านกลไกการเชื่อมขวางเชิงไอออนิก ขณะที่สูตรที่ใช้ AG เป็นสารก่อเจลจะให้ค่า a_w สูงและค่าความแน่นเนื้อต่ำกว่าสารก่อเจลชนิดอื่นๆ ซึ่งเห็นถึงโครงสร้างเจลที่อ่อนกว่าและมีความสามารถในการกักเก็บน้ำที่ต่ำ จากการทดลองพบว่า การใช้ LM-PEC ร่วมกับมอลติทอลและสตีเวียมีความเหมาะสมสำหรับการพัฒนาผลิตภัณฑ์กัมมี่สูตรจากพืชและลดการใช้น้ำตาลโดยยังคงคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสและการยอมรับของผู้บริโภคในระดับเหมาะสม

คำสำคัญ: กัมมี่, มะม่วงมหาชนก, สารให้ความหวานแทนน้ำตาล, สารก่อเจลทดแทนเจลาติน, คุณสมบัติทางกายภาพ

Abstract

The increasing trend in health and wellness, together with the growing consumption of plant-based foods, has led to the reformulation of confectionery products such as gummies, which are typically high in sugar, to reduce sugar content and meet consumer demands through the use of sugar substitutes in combination with plant-based gelling agents in place of conventional ingredients. Accordingly, this study investigated the effects of substituting sucrose with a maltitol–stevia blend and the impact of various plant-based gelling agents on the quality of Mahachanok mango gummies. The gummies were formulated using Mahachanok mango puree as the main ingredient at 60% (w/w). The gelling agents evaluated included agar (AG), high-methoxyl pectin (HM-PEC), and low-methoxyl pectin (LM-PEC), as well as 1:1 binary blends: Agar Starch (AG), Agar Pectin (AG), Agar Gum (AG), and Low-Methoxyl Pectin (LM-PEC). Physical properties, including color (L^* , a^* , b^*), water activity (a_w), and pH, were analyzed. Texture profile analysis (TPA) and sensory evaluation using a 9-point hedonic scale were also conducted. Results indicated that the maltitol–stevia substitution significantly increased a_w , decreased a^* , and increased b^* ($p < 0.05$), while L^* and textural attributes were not significantly different from the control ($p > 0.05$). Among the gelling agents, LM-PEC yielded the highest hardness, gumminess, and

chewiness values, while maintaining the lowest aw (0.75 ± 0.01), suggesting the formation of a dense gel network stabilized by ionic cross-linking. In contrast, AG-based formulations exhibited higher aw and lower hardness, indicating a weaker gel structure with lower water-holding capacity. In conclusion, the combination of LM-PEC with a maltitol–stevia blend is a viable strategy for developing plant-based, reduced-sugar mango gummies with desirable textural properties and acceptable consumer preference and overall product quality.

Keywords: Gummy, Mahachanok mango, Sugar substitutes, Gelatin substitutes, Physical properties

1. บทนำ

กัมมี่เป็นผลิตภัณฑ์ขนมหวานในกลุ่มเยลลี่กึ่งแข็ง (semi-solid jelly) ที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในกลุ่มผู้บริโภค เนื่องจากมีรสหวานหรือหวานอมเปรี้ยว และมีลักษณะเด่นด้านเนื้อสัมผัสที่นุ่ม หนึบ และยืดหยุ่น (chewy and elastic) วัตถุดิบหลักที่ใช้ในการผลิตโดยทั่วไปประกอบด้วย เจลาติน น้ำตาล กลูโคสไซรัป รวมถึงสารแต่งสี กลิ่น และรส เพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางประสาทสัมผัส [1] จากแนวโน้มการดูแลสุขภาพแบบองค์รวม (health and wellness) และความนิยมในการบริโภคอาหารจากพืชที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง [2] ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์กัมมี่รูปแบบดั้งเดิมซึ่งมีปริมาณน้ำตาลสูงได้รับการพัฒนาสูตรมากขึ้น เช่น การเสริมวิตามินและสารอาหาร การลดปริมาณน้ำตาล (low-sugar) โดยใช้สารให้ความหวานทดแทน (sugar substitutes) รวมถึงการเลือกใช้สารก่อเจลจากพืชเพื่อทดแทนเจลาติน โดย [1] รายงานว่าการใช้คาราจีแนนร่วมกับเพกทินสามารถช่วยเพิ่มความเสถียรของโครงสร้างเจล ลดการแยกน้ำ (syneresis) และเพิ่มความแข็งแรงของเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์กัมมี่ ขณะเดียวกัน การลดปริมาณน้ำตาลส่งผลโดยตรงต่อโครงสร้างของกัมมี่ เนื่องจากน้ำตาลมีบทบาทสำคัญต่อค่า a_w และความแข็งของผลิตภัณฑ์ โดย Mudgil et al. (2022) รายงานว่าการใช้สารให้ความหวานทดแทนอาจทำให้โครงสร้างเจลอ่อนตัวลง หากไม่มีการปรับสูตรไฮโดรคอลลอยด์ร่วมด้วย [3] นอกจากนี้ ผลิตภัณฑ์กัมมี่เชิงพาณิชย์ส่วนใหญ่มักใช้น้ำผลไม้หรือกลิ่นรสผลไม้เป็นส่วนประกอบ ขณะที่การใช้เนื้อผลไม้จริงสามารถช่วยเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ และตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคที่มุ่งเน้นสุขภาพได้ดียิ่งขึ้น โดยประเทศไทยเป็นผู้ส่งออกมะม่วงตัดแต่งแช่แข็งรายสำคัญ ในปี พ.ศ. 2567 มีปริมาณการส่งออกประมาณ 2.4 พันตัน มูลค่าประมาณ 400 ล้านบาท ซึ่งพันธุ์ที่ได้รับความนิยมคือ “มหาชนก” เนื่องจากมีเนื้อ สีส้มเข้ม อุดมด้วยเบต้าแคโรทีน และมีกลิ่นรสเป็นเอกลักษณ์ [4] อย่างไรก็ตาม กระบวนการตัดแต่งก่อนแช่เยือกแข็งก่อให้เกิด เศษเนื้อจำนวนมาก การนำเศษเนื้อดังกล่าวมาใช้เป็นวัตถุดิบในผลิตภัณฑ์กัมมี่จึงเป็นแนวทางในการเพิ่มมูลค่า และสอดคล้องกับแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (circular economy) ดังนั้น การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์กัมมี่จากเศษเนื้อมะม่วงมหาชนก โดยศึกษาผลของการใช้สารให้ความหวานทดแทนร่วมกับสารก่อเจลจากพืชแทนเจลาติน ต่อคุณสมบัติด้านเนื้อสัมผัสและคุณสมบัติทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์กัมมี่มะม่วงมหาชนก

2. วิธีการศึกษา

การศึกษานี้ออกแบบการทดลองแบบเป็นขั้นตอน (Stepwise Experimental Design) เพื่อศึกษาผลของปัจจัยต่อคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์กัมมี่จากมะม่วงมหาชนก กำหนดปัจจัยที่ศึกษา 2 ปัจจัย ได้แก่ (1) ชนิดของสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาล และ (2) ชนิดของสารก่อเจลจากพืชทดแทนเจลาติน โดยผลที่ได้ในแต่ละขั้นตอนถูกนำไปใช้เป็นสูตรพื้นฐานในการทดลองขั้นถัดไป

2.1 สูตรพื้นฐานของกัมมี่มะม่วงมหาชนก

จากผลการศึกษาขั้นต้น ได้กำหนดสูตรพื้นฐานของกัมมี่มะม่วงมหาชนกโดยมีส่วนประกอบคือ เจลาติน 6.67% (w/w) น้ำตาลซูโครส 20.17% (w/w) กลูโคสไซรัป 12.76% (w/w) กรดซิตริก 0.40% (w/w) และปริมาณเนื้อมะม่วงมหาชนกปั่นละเอียด (เพียงแระ) 60% (w/w) ขั้นตอนการผลิตเริ่มจากการบวมเจลาตินในเพียงแระมะม่วงมหาชนกเป็นเวลา 15 นาทีเพื่อให้เจลาตินพองตัว (hydration) จากนั้นให้ความร้อนแก่น้ำตาลทรายและกลูโคสไซรัปจนละลายใสเป็นเนื้อเดียวกัน จึงเติมเจลาตินที่ผ่านการบวมลงในส่วนผสม กวนผสมอย่างต่อเนื่องจนเจลาตินละลายสมบูรณ์ ให้ความร้อนต่อเนื่องโดยลดอุณหภูมิของส่วนผสมลงเหลือประมาณ 70 ± 5 °C ตรวจสอบค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (Total Soluble Solids, TSS) ให้อยู่ในช่วงที่ 70 ± 5 °Brix แล้วจึงเติมกรดซิตริกและผสมให้เข้ากัน แล้วจึงเทลงแม่พิมพ์ซิลิโคนพักไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 8 ชั่วโมงเพื่อให้เจลเซตตัวสมบูรณ์

2.2 การศึกษาผลของสารให้ความหวานต่อคุณลักษณะคุณภาพของผลิตภัณฑ์กัมมี่มะม่วงมหาชนก

ในการศึกษาผลของสารให้ความหวาน ได้เลือกใช้สารให้ความหวาน 2 ชนิดร่วมกัน ได้แก่ มอลทิทอล ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารให้ความหวานชนิดให้มวล (bulking sweetener) และสตีเวีย ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารให้ความหวานความเข้มข้นสูง (intense sweetener) เพื่อทดแทนการใช้น้ำตาลซูโครส โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ความหวานรวมของผลิตภัณฑ์ใกล้เคียงกับสูตรพื้นฐานในข้อ 2.1 ในการคำนวณปริมาณสารให้ความหวาน อาศัยหลักการค่าความหวานสัมพัทธ์ (relative sweetness; RS) [7] ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบระดับความหวานของสารให้ความหวานแต่ละชนิดกับซูโครส โดยกำหนดให้ซูโครสมีค่า RS เท่ากับ 1.00 และสามารถคำนวณความหวานรวมในรูป sucrose equivalent (SE) ได้ดังสมการ

$$SE = W \times RS$$

โดยที่ W คือ ปริมาณสาร (กรัม) และ RS คือ ค่าความหวานสัมพัทธ์

สูตรเดิมมีน้ำตาลซูโครส 20.17 กรัม จึงมีความหวานรวมเท่ากับ

$$SE_{target} = 20.17 \times 1.00 = 20.17$$

ในสูตรใหม่ กำหนดให้ใช้มอลทิทอลแทนน้ำตาลในปริมาณเท่ากัน (20.17 กรัม) ซึ่งมอลทิทอลมีค่า $RS = 0.95$ ดังนั้นให้ความหวานเท่ากับ

$$SE_{maltitol} = 20.17 \times 0.95 = 19.1615$$

จึงยังขาดความหวานอยู่

$$SE_{deficit} = 20.17 - 19.1615 = 1.0085$$

สตีเวียมีค่า $RS = 270$ และมีความบริสุทธิ์ 98% ดังนั้นค่า RS ที่ใช้จริงคือ

$$RS_{stevia} = 270 \times 0.98 = 264.6$$

ปริมาณสตีเวียที่ต้องเติมคำนวณจาก

$$W_{stevia} = \frac{SE_{deficit}}{RS_{stevia}} = \frac{1.0085}{264.6} = 0.0038 \text{ กรัม}$$

ดังนั้น สูตรทดแทนน้ำตาลประกอบด้วยมอลทิทอล 20.17 กรัม และสตีเวีย 0.0038 กรัม ซึ่งให้ค่าความหวานรวมใกล้เคียงกับสูตรเดิม ทั้งนี้ ปริมาณกลูโคสไซรัปถูกกำหนดให้คงที่ในทุกสูตร เพื่อควบคุมตัวแปรและลดผลกระทบต่อคุณลักษณะทางกายภาพและเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์

2.3 การศึกษาผลของชนิดของสารก่อเจลจากพืชต่อคุณลักษณะคุณภาพของผลิตภัณฑ์กัมมี่มะม่วงมหาชนก

สารก่อเจลจากพืชที่เลือกมาศึกษาในการทดลองนี้ ได้แก่ อะการ์ (agar; AG), คาราจีแนน (carrageenan; CAR), เพกทินชนิด High methoxyl pectin (HM-PEC) เพกทินชนิด Low methoxyl pectin (LM-PEC) กัวร์กัม (Guar gum; GG) และแป้งท้าวยายม่อม (Arrowroot starch, S) โดยศึกษาผลของการใช้สารก่อเจลจากพืชเดี่ยว ได้แก่ AG, HM-PEC และ LM-PEC และผลของสารก่อเจลจากพืชผสม 2 ชนิด ได้แก่ AG:S, AG:LM-PEC, AG:GG และ LM-PEC:CAR ในอัตราส่วน 1:1 โดยกำหนดการใช้สารก่อเจลจากพืชทดแทนเจลาตินในสูตรที่ปริมาณ 6.67% (w/w) ซึ่งสูตรส่วนประกอบแสดงดัง Table 1 และมีขั้นตอนการผลิตแสดงดัง Figure 1 ผลิตภัณฑ์กัมมี่มะม่วงมหาชนกที่ได้จะนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติทางเนื้อสัมผัส และประเมินคุณลักษณะและการยอมรับทางประสาทสัมผัส

Table 1 Ingredients (% w/w) used for preparation of Mahachanok mango gummies.

Treatment	AG	HM-PEC	LM-PEC	AG:S	AG:GG	AG:LM-PEC	LM-PEC:CAR
Puree	60	60	60	60	60	60	60
Maltitol	20.17	20.17	20.17	20.17	20.17	20.17	20.17
Glucose syrup	12.76	12.76	12.76	12.76	12.76	12.76	12.76
Citric acid	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
Stevia	0.0038	0.0038	0.0038	0.0038	0.0038	0.0038	0.0038
Gelling agent							
- AG	6.67	-	-	3.335	3.335	3.335	-
- HM-PEC	-	6.67	-	-	-	-	-
- LM-PEC	-	-	6.67	-	-	3.335	3.335
- S	-	-	-	3.335	-	-	-
- GG	-	-	-	-	3.335	-	-
- CAR	-	-	-	-	-	-	3.335

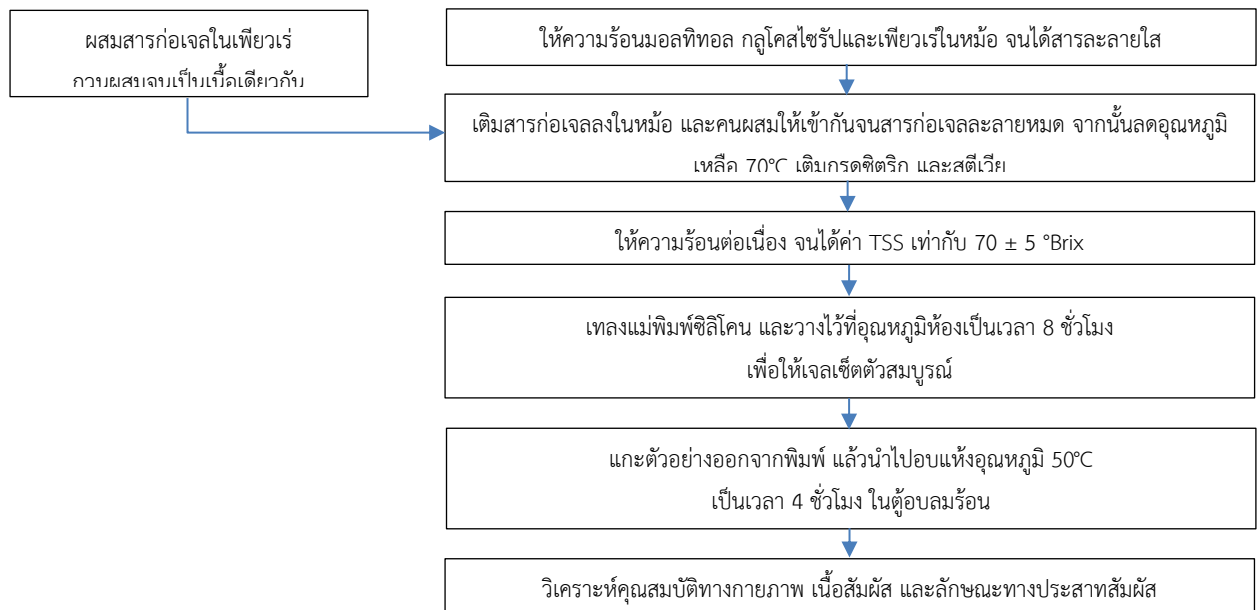


Figure 1 Processing steps for preparation of Mahachanok mango gummies

2.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเนื้อสัมผัส

วิเคราะห์ค่าสีด้วยเครื่องวัดสี (Konica Minolta, รุ่น CM-5, Japan) ระบุค่า CIE LAB L*, a*, b* รายงานค่าเป็น L* (ความสว่าง), a* (สีแดง-เขียว) และ b* (สีเหลือง-น้ำเงิน) วิเคราะห์ค่า a_w ด้วยเครื่อง Aw meter (Aqua Lab, รุ่น 4TE, USA) วิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ด้วยเครื่อง pH meter (Mettler, รุ่น Seven Compact S220, Switzerland) โดยทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ สำหรับการวิเคราะห์คุณสมบัติด้านเนื้อสัมผัสดำเนินการด้วยวิธี Texture Profile Analysis (TPA) โดยใช้เครื่อง Texture Analyzer (TA-XT2i Stable Micro Systems, UK) ร่วมกับหัวกดทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร (P/50) รายงานค่าความแน่นเนื้อ (hardness) การเกาะตัวกันของเนื้อ (cohesiveness) ความแข็ง (springiness) ความเหนียว (gumminess) ความเคี้ยวได้ (chewiness) และความยืดหยุ่น (resilience) โดยกำหนดเงื่อนไขการทดสอบ ดังนี้ ความเร็วก่อนการทดสอบ (pre-test speed) 1.0 มม./วินาที ความเร็วระหว่างการทดสอบ (test speed) 5.0 มม./วินาที และความเร็วหลังการทดสอบ (post-test speed) 5.0 มม./วินาที กำหนดระยะการกด (strain) เท่ากับร้อยละ 75 ของความสูงตัวอย่าง และกำหนด

ช่วงเวลาห่างระหว่างการกด (time between cycles) เท่ากับ 3 วินาที โดยตั้งค่าแรงเริ่มต้น (trigger force) เท่ากับ 10 กรัม [17] ทำการวิเคราะห์จำนวน 6 ซ้ำในแต่ละสูตร

2.5 การวิเคราะห์คุณลักษณะและประเมินความชอบทางประสาทสัมผัส

คุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์กัมมีมะม่วงมหาชนก ประเมินด้วยวิธี 9-point hedonic scale ซึ่งเป็นการให้คะแนนความชอบ 9 ระดับ โดยใช้ผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 40 คน ทำการทดสอบความชอบในคุณลักษณะต่างๆ ได้แก่ สี กลิ่นรสมะม่วงมหาชนก รสชาติ เนื้อสัมผัส (ความแข็ง-ความยืดหยุ่น) และความชอบโดยรวม

2.6 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (Analysis of Variance: ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแบบ Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 วิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS Statistics (Version 16)

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 ผลการศึกษาผลของสารให้ความหวานต่อคุณลักษณะคุณภาพของผลิตภัณฑ์กัมมีมะม่วงมหาชนก

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างผลิตภัณฑ์กัมมีมะม่วงมหาชนกที่ใช้สารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลซูโครส แสดงใน Table 2 พบว่าสารให้ความหวานมีผลต่อค่า a_w ค่าสี a^* ค่าสี b^* และค่า pH อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แต่ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อค่า L^* ($p \geq 0.05$) สูตรที่ใช้สารให้ความหวานมอลทิทอลร่วมกับสตีเวียมีค่า a_w สูงกว่าสูตรน้ำตาลซูโครสอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าน้ำตาลแอลกอฮอล์มีประสิทธิภาพในการลดค่า a_w ต่ำกว่าน้ำตาลซูโครส ทั้งนี้ความสามารถในการลดค่า a_w ขึ้นกับประสิทธิภาพในการตรึงน้ำอิสระและลดการเคลื่อนที่ของน้ำในระบบ โดยซูโครสสามารถสร้างปฏิสัมพันธ์กับน้ำและก่อให้เกิดแรงออสโมติกในสารละลายได้เร็วส่งผลให้ water mobility ลดลงมากกว่า [5,6] ขณะที่มอลทิทอลแม้ทำหน้าที่เป็น bulking agent แต่ละลายได้ช้ากว่าซูโครส [7] จึงอาจทำให้มีน้ำอิสระเหลืออยู่ในระบบมากกว่า ในด้านสี พบว่าการใช้มอลทิทอลร่วมกับสตีเวียไม่ส่งผลต่อค่าความสว่าง (L^*) ของตัวอย่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนชนิดของสารให้ความหวานไม่ได้ส่งผลต่อระดับความสว่างโดยรวมของเมทริกซ์เจล ทั้งนี้ค่า L^* สัมพันธ์กับลักษณะการสะท้อนและการกระเจิงแสงของโครงสร้างภายในระบบเจล ซึ่งขึ้นกับความแตกต่างของดัชนีหักเหแสงระหว่างเฟส [10] ดังนั้นค่าสี L^* ที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจึงบ่งชี้ว่าโครงสร้างของเจลที่ใช้สารให้ความหวานยังใกล้เคียงกับการใช้น้ำตาลซูโครส อย่างไรก็ตาม การใช้มอลทิทอลร่วมกับสตีเวียส่งผลให้ค่า a^* ลดลง และค่า b^* เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเทียบกับสูตรซูโครส แสดงให้เห็นว่าชนิดของสารให้ความหวานมีผลต่อเม็ดสีที่รับรู้ได้ของผลิตภัณฑ์ แม้ไม่ส่งผลต่อความสว่างโดยรวม การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวอาจอธิบายได้จากสารให้ความหวานมีผลต่อสภาพแวดล้อมรอบรวงควัตถุและพฤติกรรมของการกระเจิงแสงภายในระบบเจล โดยมีรายงานว่าสารให้ความหวานสามารถเปลี่ยนโครงสร้างของระบบกัมมีผ่านกลไกการจับน้ำและการปรับความหนืดของเฟสต่อเนื่อง ซึ่งส่งผลต่อคุณลักษณะทางกายภาพที่เกี่ยวข้องกับการมองเห็น [3] นอกจากนี้ การเปลี่ยนชนิดของน้ำตาลหรือสารให้ความหวานในสูตรอาจส่งผลต่อการหักเหของแสงในระบบ ทำให้ค่า b^* เปลี่ยนแปลงได้ [10] ในส่วนของค่า pH พบว่าการใช้มอลทิทอลร่วมกับสตีเวียทำให้ผลิตภัณฑ์มีค่า pH สูงกว่าสูตรซูโครสอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ความแตกต่างดังกล่าวอาจเกิดจากการเปลี่ยนสภาวะแวดล้อมของเฟสต่อเนื่องเมื่อมีการแทนที่ซูโครสด้วยสารให้ความหวานประเภทน้ำตาลแอลกอฮอล์ ซึ่งสามารถเกิดปฏิสัมพันธ์กับน้ำและองค์ประกอบอื่นในระบบ ส่งผลต่อการจัดเรียงของโมเลกุลน้ำและสมดุลเคมีของสารละลาย แม้ว่าสารดังกล่าวจะไม่ใช้สารที่มีฤทธิ์เป็นด่างโดยตรงก็ตาม โดยมีรายงานว่าการใช้สารให้ความหวานทางเลือกสามารถเปลี่ยนสภาพแวดล้อมและคุณสมบัติเชิงโครงสร้างของเมทริกซ์กัมมีได้ [3] สำหรับคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัส แสดงดังตารางที่ 3 พบว่าการทดแทนซูโครสด้วยมอลทิทอลร่วมกับสตีเวียไม่ทำให้ค่า hardness, springiness, cohesiveness, gumminess, chewiness และ resilience แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) แสดงว่าการเปลี่ยนชนิดของสารให้ความหวานไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงของโครงสร้างโครงข่ายเจลอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้อาจเนื่องจากมอลทิทอลทำหน้าที่เป็น bulking agent ซึ่งช่วยคงปริมาณของแข็งรวมและความเข้มข้นของเฟสต่อเนื่องให้ใกล้เคียงกับสูตรซูโครส ส่งผลให้สภาวะการเกิด junction zone และความหนาแน่นของโครงข่ายพอลิเมอร์ยังคงอยู่ในระดับใกล้เคียงเดิม [3,11] สอดคล้องกับรายงานของ Song et al. ที่ระบุว่าสมบัติทางเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์กัมมีขึ้นกับชนิดและความเข้มข้นของไฮโดรคอลลอยด์เป็นหลัก มากกว่าชนิดของสารให้ความหวานเมื่อปริมาณของแข็งรวมใกล้เคียงกัน [12] อีกทั้งยังมีรายงานว่าปริมาณน้ำและชนิดของสารก่อเจลเป็นปัจจัยหลัก

ที่กำหนดความแข็งและสมบัติเชิงกลของกัมมีน้ำตาลต่ำ [8] ดังนั้น ผลการศึกษานี้จึงแสดงให้เห็นว่าการใช้มอลทิทอลร่วมกับสตีเวียสามารถทดแทนน้ำตาลซูโครสได้โดยไม่กระทบต่อโครงสร้างเชิงกลของผลิตภัณฑ์กัมมีอย่างมีนัยสำคัญ แม้จะส่งผลให้ค่า a^* ลดลงค่า b^* เพิ่มขึ้น และค่า pH สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับสูตรซูโครส

Table 2 Effects of Maltitol and Stevia as Sugar Substitutes on the Physical Properties of Mahachanok Mango Gummies

Treatment	a_w	L^{*ns}	a^*	b^*	pH
Sucrose	0.82 ± 0.00^b	32.83 ± 2.45	2.03 ± 0.07^a	5.40 ± 0.46^b	3.41 ± 0.01^b
Maltitol:Stevia	0.87 ± 0.02^a	37.64 ± 1.82	0.27 ± 0.13^b	9.06 ± 0.84^a	3.48 ± 0.01^a

Note: Different uppercase letters in the same column indicated significant differences ($p < 0.05$)

^{ns} means non-significant difference ($p \geq 0.05$)

Table 3 Effects of Maltitol and Stevia as Sugar Substitutes on the Textural Properties of Mahachanok Mango Gummies.

Parameter	Sucrose	Maltitol:Stevia
Hardness (g) ^{ns}	$16,566.72 \pm 2,767.08$	$16,264.52 \pm 1,121.23$
Springiness ^{ns}	0.96 ± 0.02	0.94 ± 0.01
Cohesiveness ^{ns}	0.65 ± 0.04	0.63 ± 0.01
Gumminess ^{ns}	$10,819.55 \pm 2,348.41$	$10,256.35 \pm 4,962.76$
Chewiness ^{ns}	$10,427.80 \pm 2,364.43$	$10,347.67 \pm 3,898.82$
Resilience ^{ns}	0.40 ± 0.04	0.42 ± 0.01

Note: ^{ns} means non-significant difference ($p \geq 0.05$)

3.2 ผลการศึกษาผลของชนิดของสารก่อเจลจากพืชทดแทนเจลาติน

ลักษณะปรากฏของผลิตภัณฑ์กัมมีมะม่วงมหาชนกที่ใช้สารก่อเจลจากพืชต่างชนิดกัน แสดงดัง Figure 2 และผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพแสดงใน Table 4 พบว่าชนิดของสารก่อเจลมีผลต่อค่า a_w ค่า L^* a^* b^* ค่า pH และคุณสมบัติทางเนื้อสัมผัสอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แสดงให้เห็นว่าความแตกต่างของกลไกการเกิดเจลและลักษณะโครงข่ายของสารก่อเจลมีบทบาทโดยตรงต่อการตรึงน้ำ การกระเจิงแสง และพฤติกรรมเชิงกลของระบบเจล ซึ่งสอดคล้องกับรายงานคุณสมบัติของกัมมีขึ้นกับชนิดและโครงสร้างของไฮโดรคอลลอยด์เป็นหลัก [3] จากผลการทดลองพบว่าสูตรสารก่อเจลเดี่ยว LM-PEC ให้ค่า a_w ต่ำที่สุด (0.75 ± 0.01) รองลงมาคือ HM-PEC (0.82 ± 0.01) ขณะที่ AG:GG ให้ค่าสูงที่สุด (0.89 ± 0.01) ความแตกต่างดังกล่าวสะท้อนความสามารถในการตรึงน้ำของสารก่อเจลที่แตกต่างกัน โดย LM-PEC เกิดเจลผ่านการเชื่อมโยงเชิงไอออนิกระหว่างหมู่คาร์บอกซิลกับ Ca^{2+} จากเนื้อมะม่วงตามแบบจำลอง egg-box ทำให้เกิด junction zone จำนวนมากและโครงข่ายสามมิติที่มีความหนาแน่นสูง ส่งผลให้ water mobility ลดลงและให้ค่า a_w ต่ำ [13] เมื่อ LM-PEC ถูกผสมกับสารก่อเจลชนิดอื่น เช่น agar หรือ carrageenan (สูตร AG:LM-PEC และ LM-PEC:CAR) พบว่าค่า a_w เพิ่มสูงกว่าสูตร LM-PEC เดี่ยว แสดงถึงการลดความต่อเนื่องของโครงข่ายเชิงไอออนิกของเพกทิน เนื่องจากการเกิดเจลของ LM-PEC อาศัยการจัดเรียงสายโซ่พอลิเมอร์ที่ต่อเนื่องและตำแหน่งจับ Ca^{2+} ที่สอดคล้องกัน การมีพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีกลไกการเกิดเจลแตกต่างกันเข้าร่วมในระบบจะรบกวนการจัดเรียงตัวและการเกิด junction zone ของ LM-PEC ทำให้ความหนาแน่นของจุดเชื่อมโยงและความต่อเนื่องของโครงข่ายลดลง ส่งผลให้น้ำอิสระคงเหลือในระบบมากขึ้นจึงส่งผลให้มีค่า a_w สูงขึ้นในสูตรที่เป็นเจลผสม (สูตร AG:LM-PEC และ LM-PEC:CAR) [8,11,13] ในทางตรงกันข้าม สูตร AG:GG ซึ่งมี guar gum เป็นองค์ประกอบร่วมทำหน้าที่เพิ่มความหนืดมากกว่าสร้างเจล จึงมีน้ำอิสระคงเหลือในระบบสูงและให้ค่า a_w สูงที่สุด [1,3] ในด้านสี พบว่าชนิดของสารก่อเจลมีผลต่อค่า L^* อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดย AG:S ให้ค่า L^* สูงที่สุดที่ 47.96 ± 0.29 รองลงมาคือ HM-PEC ที่ 46.12 ± 0.30 ขณะที่ AG:GG ให้ค่าต่ำ

ที่สุดที่ 28.61 ± 1.28 ค่า L^* สะท้อนระดับความสว่างและความโปร่งใสของเมทริกซ์เจล ซึ่งสัมพันธ์กับระดับการกระเจิงแสงภายในระบบ โดยการกระเจิงแสงจะเพิ่มขึ้นเมื่อโครงสร้างมีความไม่สม่ำเสมอหรือมีความแตกต่างของดัชนีหักเหระหว่างเฟส [10] สูตรที่มีเพกทิน เช่น HM-PEC และ LM-PEC ให้โครงข่ายเจลที่มีความต่อเนื่องและสม่ำเสมอมากกว่า เนื่องจากการเกิดเจลผ่านแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลภายใต้สภาวะกรดและของแข็งละลายสูง [13] จึงให้ค่า L^* สูงกว่า ในทางตรงกันข้าม สูตร AG:GG ซึ่งมี guar gum เป็นองค์ประกอบร่วมให้โครงสร้างที่ไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้การกระเจิงแสงภายในเมทริกซ์เพิ่มขึ้นและค่าความสว่าง (L^*) ลดลง ทั้งนี้การเปลี่ยนชนิดของไฮโดรคอลลอยด์สามารถเปลี่ยนโครงสร้างจุลภาคและพฤติกรรมการกระเจิงแสงของระบบกัมมี ซึ่งส่งผลต่อการรับรู้สีของผลิตภัณฑ์ [3] สำหรับค่า a^* พบว่าสูตร AG:S ให้ค่าสูงที่สุดที่ 9.23 ± 0.10 ขณะที่ AG:GG ให้ค่าต่ำที่สุดที่ -0.02 ± 0.02 ค่า a^* สะท้อนโทนสีแดงของผลิตภัณฑ์ ซึ่งขึ้นกับทั้งความเข้มข้นของเม็ดสีและโครงสร้างภายในของระบบเจล โดยการที่ AG:S มีการเติมแป้งในสูตรอาจทำให้เกิดโครงสร้างเจลแบบสองเฟสที่มีอนุภาคแบ่งกระจายในโครงข่ายเยื่อการ ส่งผลให้ความไม่โปร่งใสและความต่างของดัชนีหักเหในระบบเพิ่มขึ้น จึงเกิดการกระเจิงและการสะท้อนกลับของแสงมากขึ้น ส่งผลให้สัดส่วนแสงสีแดงที่สะท้อนออกจากตัวอย่างเพิ่มขึ้นจึงทำให้ค่า a^* สูงขึ้น [10] แม้สูตร AG:GG จะมีการกระเจิงแสงสูง แต่โครงสร้างเจลที่มีการกักน้ำสูงและความต่างของดัชนีหักเหระหว่างเฟส ทำให้การกระเจิงเกิดอย่างไม่จำเพาะต่อช่วงคลื่น ส่งผลให้การสะท้อนแสงขาวเพิ่มขึ้นและเกิดการเจือจางของสีพื้นจากมะม่วง จึงทำให้โทนสีแดงที่รับรู้ลดลงและค่า a^* ต่ำกว่าสูตร AG:S อย่างมีนัยสำคัญ ในด้านค่า b^* พบว่าสูตร HM-PEC ให้ค่าสูงที่สุดที่ 29.76 ± 0.17 รองลงมาคือ AG:S ที่ 28.20 ± 0.27 ขณะที่ AG:GG ให้ค่าต่ำที่สุดที่ 3.88 ± 0.11 ค่า b^* สะท้อนความเข้มของสีเหลืองจากแคโรทีนอยด์ ซึ่งจะแสดงออกชัดเจนเมื่อเมทริกซ์มีความโปร่งใสและมีการกระเจิงแสงต่ำ [10] ดังนั้น สูตรที่มีค่า L^* สูง เช่น HM-PEC จึงมีค่า b^* สูงเช่นกัน ในขณะที่ AG:GG มีค่า L^* และ b^* ต่ำ สะท้อนว่าการกระเจิงแสงที่เพิ่มขึ้นลดความชัดเจนของสีเหลืองที่รับรู้ สำหรับค่า pH พบว่าสูตร AG และ AG:GG มีค่าเท่ากันที่ 3.10 ± 0.01 และ 3.10 ± 0.00 ตามลำดับ ขณะที่ AG:LM-PEC มีค่า pH สูงที่สุดที่ 3.53 ± 0.02 ความแตกต่างดังกล่าวสัมพันธ์กับองค์ประกอบของสารก่อเจล โดยเพกทินเป็น polysaccharide ที่มีหมู่ carboxyl ซึ่งมีบทบาทต่อสมดุลกรดต่างของระบบและระดับการแตกตัวของไอออน [13] สูตรที่มีเพกทินจึงมีแนวโน้มให้ค่า pH สูงกว่า agar ซึ่งเป็น neutral polysaccharide [11] และเพกทินยังมีหมู่คาร์บอกซิลที่มีบทบาทต่อสมดุลกรดต่างของระบบเจล [11]

ในส่วนของคุณสมบัติทางเนื้อสัมผัสพบว่าชนิดของสารก่อเจลมีผลต่อค่า hardness, springiness, cohesiveness, gumminess, chewiness และ resilience อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ซึ่งแสดงดัง Figure 3 โดยผลการทดลองพบว่า สูตร LM-PEC ให้ค่า hardness สูงที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับค่า a_w ต่ำที่สุด และสะท้อนการเกิดโครงข่ายเพกทินแบบไอออนิกที่มีความหนาแน่นสูงจาก ionic crosslinking [8,11,13] ขณะที่ AG:GG ให้ค่า hardness ต่ำที่สุดและมีค่า a_w สูงที่สุด แสดงถึงโครงสร้างที่ไม่ต่อเนื่องและพึ่งพาความหนืดมากกว่าโครงข่ายสามมิติถาวร [14] ซึ่งความแข็งแรงของเจลที่ลดลงในสูตรที่มี guar gum สัมพันธ์กับความสามารถในการสร้างโครงข่ายเจลของพอลิเมอร์ชนิดนี้ที่ต่ำกว่าเพกทินและคาราจีแนน [1,12] อย่างไรก็ตาม ค่า springiness และ resilience ไม่ได้เพิ่มขึ้นตามค่า hardness ในทุกสูตร แสดงให้เห็นว่าความแข็งแรงของเจลไม่ได้เทียบเท่ากับความสามารถในการคืนรูปของระบบ โดยสูตร HM-PEC แม้มีค่า hardness ต่ำกว่า LM-PEC แต่มีแนวโน้มให้ความยืดหยุ่นสูงกว่าเนื่องจากเจลของ HM-PEC อาศัยแรงยึดเหนี่ยวทุติยภูมิ เช่น พันธะไฮโดรเจนและแรงไฮโดรโฟบิก ซึ่งสามารถคลายตัวและจัดเรียงใหม่ได้ภายใต้แรงกดจึงเอื้อต่อการคืนรูปหลังการเสียรูป ขณะที่เพกทินชนิด LM-PEC ซึ่งเกิดการเชื่อมขวางเชิงไอออนิกกับแคลเซียมมีโครงข่ายค่อนข้างแข็งและยืดหยุ่นต่ำกว่า ส่งผลให้ค่า springiness และ resilience ไม่เพิ่มตามค่า hardness ทั้งนี้สมบัติเชิงกลและพฤติกรรมการคืนรูปของกัมมีขึ้นอยู่กับชนิดของไฮโดรคอลลอยด์และโครงข่ายโครงข่ายเจลเป็นหลัก [1,8,12,13] นอกจากนี้ ค่า gumminess และ chewiness ซึ่งคำนวณจาก hardness ร่วมกับ cohesiveness และ springiness ตามหลัก Texture Profile Analysis จึงสะท้อนผลรวมของสมบัติเชิงกลของเจลมากกว่าค่า hardness เพียงอย่างเดียว [16] ในส่วนของผลการทดสอบคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสโดยผู้ทดสอบจำนวน 40 คน แสดงใน Figure 4 ผลการทดสอบพบว่า ความแตกต่างของการรับรู้ทางประสาทสัมผัสที่เกิดจากชนิดของสารก่อเจลอย่างชัดเจนในทุกคุณลักษณะ ได้แก่ สี กลิ่น รสมะม่วง รสชาติ ความตึง-ยืดหยุ่น และความชอบโดยรวม โดยสูตรที่ใช้สารก่อเจลเดี่ยว LM-PEC ได้รับคะแนนความชอบในด้านเนื้อสัมผัสและความชอบโดยรวมสูงที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์เนื้อสัมผัสที่พบว่า LM-PEC ให้ค่า hardness, gumminess และ chewiness สูงที่สุด และมีค่า a_w ต่ำที่สุด (0.75 ± 0.01) การเกิดโครงข่ายเจลที่มีความหนาแน่นจาก ionic crosslinking ส่งผลให้โครงสร้างมีความแข็งแรง ขณะเดียวกันยังคงความยืดหยุ่นในระดับที่เหมาะสม จึงก่อให้เกิดการรับรู้ทางเนื้อสัมผัสที่ผู้บริโภคให้การยอมรับสูง ซึ่งสอดคล้องกับรายงานว่าความชอบของผู้บริโภคต่อ กัมมีสัมพันธ์กับสมบัติเชิงกลและโครงข่ายของเจล [1,12,16] ในทางตรงกันข้าม สูตร AG:GG ได้รับคะแนนความชอบด้านเนื้อสัมผัสและความชอบโดยรวมต่ำ ซึ่งสัมพันธ์กับค่า hardness ต่ำที่สุดและค่า a_w สูงที่สุด (0.89 ± 0.01) โครงสร้างเจลที่พึ่งพาความหนืดมากกว่าการสร้างโครงข่ายสามมิติถาวรส่งผลให้ความแน่น

และความคงรูปของผลิตภัณฑ์ลดลง สำหรับสูตร HM-PEC และสูตรผสมอื่นๆ เช่น AG:S และ AG:LM-PEC มีแนวโน้มให้คะแนนด้านสีและกลิ่นรสใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าชนิดของสารก่อเจลมีอิทธิพลต่อการรับรู้ด้านเนื้อสัมผัสมากกว่าด้านสีและกลิ่นรส ซึ่งส่วนใหญ่ขึ้นกับองค์ประกอบของเนื้อมะม่วงมหาชนกในสูตร โดย LM-PEC แสดงศักยภาพในการสร้างสมดุลระหว่างความแข็งแรงเชิงโครงสร้างและความพึงพอใจทางประสาทสัมผัสได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสารก่อเจลชนิดอื่น



Figure 2 Appearance of Mahachanok mango gummies formulated with different plant-derived gelling agents.

Table 4 Effect of Gelling Agent Type on Physical Properties of Mango Gummies.

Treatment	a_w	L^*	a^*	b^{*ns}	pH
AG	0.86 ± 0.01^b	31.26 ± 0.98^c	1.24 ± 0.07^b	6.51 ± 1.10	3.10 ± 0.01^f
HM-PEC	0.82 ± 0.01^c	46.12 ± 0.30^a	1.22 ± 0.12^b	29.76 ± 0.17	3.18 ± 0.02^e
LM-PEC	0.75 ± 0.01^d	37.24 ± 0.66^b	1.29 ± 0.12^b	11.94 ± 1.00	3.29 ± 0.01^c
AG:S	0.86 ± 0.01^b	47.96 ± 0.29^a	9.23 ± 0.10^a	28.20 ± 0.27	3.34 ± 0.02^b
AG:LM	0.86 ± 0.02^b	35.83 ± 1.82^b	0.25 ± 0.13^c	9.25 ± 0.84	3.53 ± 0.02^a
AG:GG	0.89 ± 0.01^a	28.61 ± 1.28^d	-0.02 ± 0.02^d	3.88 ± 0.11	3.10 ± 0.00^f
LM:CAR	0.86 ± 0.05^b	35.83 ± 1.43^b	0.25 ± 0.22^c	9.25 ± 0.40	3.24 ± 0.05^d

Note: Different uppercase letters in the same column indicated significant differences ($p < 0.05$)

^{ns} means non-significant difference ($p \geq 0.05$)

4. สรุป

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์กัมมีมะม่วงมหาชนกจากพืช โดยศึกษาผลของการทดแทนน้ำตาลด้วยสารให้ความหวาน และชนิดของสารก่อเจลจากพืชต่อคุณสมบัติทางกายภาพ เนื้อสัมผัส และลักษณะทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ผลการศึกษากการทดแทนน้ำตาลด้วยมอลทิทอลร่วมกับสตีเวีย พบว่าการทดแทนน้ำตาลซูโครสด้วยมอลทิทอลร่วมกับสตีเวียส่งผลให้ค่า a_w ค่า a^* , ค่า b^* และค่า pH แตกต่างจากสูตรควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยค่า a_w เพิ่มขึ้น ค่า a^* ลดลง และค่า b^* เพิ่มขึ้น ขณะที่ค่า L^* และคุณสมบัติด้านเนื้อสัมผัส ได้แก่ hardness, springiness, cohesiveness, gumminess, chewiness และ resilience ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \geq 0.05$) แสดงว่าการควบคุมปริมาณของแข็งรวมในระบบสามารถคงโครงสร้างเชิงกลของเจลได้แม้มีการเปลี่ยนชนิดของสารให้ความหวาน ในส่วนของชนิดของสารก่อเจลจากพืชมีผลต่อค่า a_w ค่าสี (L^* , a^* , b^*) ค่า pH และคุณสมบัติด้านเนื้อสัมผัสทุกพารามิเตอร์อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) สูตรที่ใช้ LM-PEC ให้ค่า a_w ต่ำที่สุด (0.75 ± 0.01) และให้ค่า hardness, gumminess และ chewiness สูงที่สุด สะท้อนการเกิดโครงข่ายเจลที่มีความหนาแน่นจากกลไกการเชื่อมขวางเชิงไอออนิก (egg-box model) ในทางตรงกันข้าม สูตรที่ใช้ AG มีค่า a_w เท่ากับ 0.86 ± 0.01 และสูตร AG:GG มีค่า a_w สูงที่สุด (0.89 ± 0.01) พร้อมทั้งให้ค่า hardness ต่ำที่สุด แสดงถึงโครงสร้างเจลที่อ่อนกว่าและมีความสามารถในการกักเก็บน้ำต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ LM-PEC ผลการประเมินทางประสาทสัมผัสพบว่าสูตรที่ใช้ LM-PEC ได้รับคะแนนความชอบโดยรวมสูงสุด สูตรที่ประกอบด้วยเพียงมะม่วงมหาชนกที่ปริมาณ 60% (w/w) ร่วมกับการทดแทนน้ำตาลด้วยมอลทิทอลและสตีเวีย และใช้ LM-PEC เป็นสารก่อเจลจึงเหมาะสมสำหรับการพัฒนาผลิตภัณฑ์กัมมีจากพืชที่สามารถทดแทนเจลาตินและลดปริมาณน้ำตาลได้ โดยยังคงคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสและการยอมรับของผู้บริโภค อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัด โดยยังไม่ได้ศึกษาความคงตัวระหว่างการเก็บรักษาและอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ รวมถึงยังไม่ได้ประเมินคุณภาพด้านจุลินทรีย์ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อความปลอดภัยและอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ ดังนั้น การศึกษาต่อไปควรครอบคลุมการประเมินด้านดังกล่าว เพื่อสนับสนุนการพัฒนาผลิตภัณฑ์ในระดับที่สามารถนำไปใช้ได้จริงมากยิ่งขึ้น

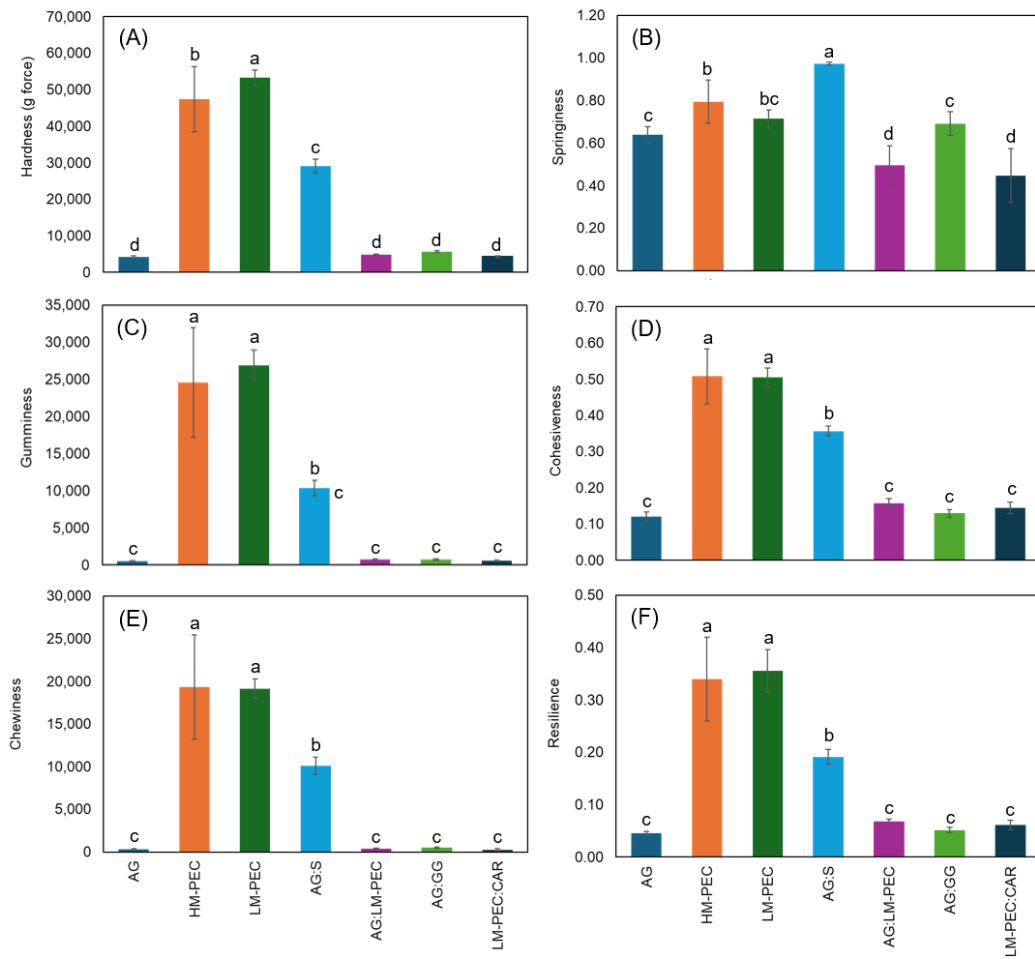


Figure 3 Textural properties (A) Hardness, (B) Springiness, (C) Gumminess, (D) Cohesiveness, (E) Chewiness, and (F) Resilience of Mahachanok mango gummies prepared with different plant-based gelling agents.

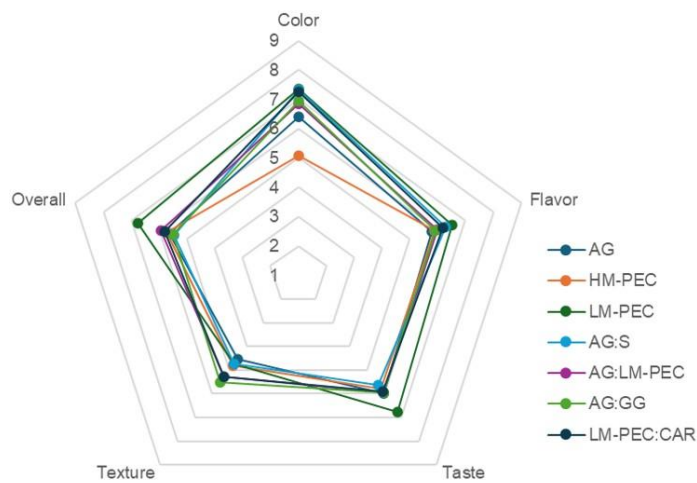


Figure 4 Sensory characteristics of Mahachanok mango gummies prepared by different gelling agents.

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ให้การสนับสนุนด้านสถานที่และคณาจารย์ในภาควิชาที่ให้คำแนะนำทางวิชาการ ขอขอบคุณบริษัท สวิฟท์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เนื้อมะม่วงมหาชนกบั่นละเอียด รวมถึงขอขอบคุณนักวิทยาศาสตร์ เพื่อนนักศึกษา และผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้จนสำเร็จ ล่วงด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Rawat, S., Sharma, V. and Kaur, J. 2024. Application of plant-based hydrocolloids on the textural profile of vegan gummies supplemented with turmeric and black pepper. *Int. J. Food Sci.*
- [2] Bangkok Dusit Medical Services (BDMS). 2569. แนวโน้ม Health and Wellness ในประเทศไทย. เข้าถึงได้จาก: <https://www.bdms.co.th> (เข้าถึงเมื่อ 5 กุมภาพันธ์ 2569).
- [3] Mudgil, D., Barak, S. and Khatkar, B. S. 2022. Impact of alternative sweeteners on rheological and structural characteristics of gel-based confectionery systems. *LWT-Food Sci. Technol.* 154: 112705.
- [4] กรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ. 2567. สถิติการส่งออกมะม่วงแช่แข็งของประเทศไทย. เข้าถึงได้จาก: <https://www.ditp.go.th> (เข้าถึงเมื่อ 5 กุมภาพันธ์ 2567).
- [5] Sandulachi, E. 2012. Water activity concept and its role in food preservation. *Bull. Tech. Univ. Moldova.* 40-48.
- [6] สุนัน ปานสาคร, จตุรงค์ ลังกาพินธุ์, ศุภณัฐ พริกบุญจันทร์ และอาทิพัฒน์ ศรีชุมพล. 2564. ผลของการดองน้ำออกบางส่วนโดยวิธีออสโมซิสต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์เมลอนกึ่งแห้ง. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.* 29(4): 715-728.
- [7] อังศิมา ศิริวัฒนาศิลป์. 2564. ผลของสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและโครงสร้างระดับจุลภาคของผลิตภัณฑ์วุ้นกะทิลดน้ำตาล. *วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยศิลปากร, นครปฐม.*
- [8] Figueroa, L. E., Hughes, M. H., Tarifa, M. C., Brugnoli, L. I. and Genovese, D. B. 2025. Development and stability of low-sugar, plant-based gummy candies prepared via an innovative ionotropic gelation technique. *Food Humanit.* 5: 100708.
- [9] Purohit, A., Singh, R. and Patel, A. 2023. Effect of sugar reduction on water activity and textural properties of confectionery gels. *Food Hydrocolloids.* 139: 108523.
- [10] McClements, D. J. 2015. *Food Emulsions: Principles, Practices, and Techniques.* 3rd edn. CRC Press, Boca Raton.
- [11] Imeson, A. 2009. Agar. In: *Handbook of Hydrocolloids*, Phillips, G. O. and Williams, P. A. Woodhead Publishing, Cambridge. pp. 82-107.
- [12] Song, X., Chiou, B. S., Xia, Y., Chen, M., Liu, F. and Zhong, F. 2022. The improvement of texture properties and storage stability for kappa carrageenan in developing vegan gummy candies. *J. Sci. Food Agric.* 102(9): 3693-3702.
- [13] Voragen, A. G. J., Schols, H. A. and Visser, R. G. F. 2009. Pectin. In: *Handbook of Hydrocolloids*, Phillips, G. O. and Williams, P. A. Woodhead Publishing, Cambridge. pp. 303-325.
- [14] Phillips, G. O. and Williams, P. A. 2009. *Handbook of Hydrocolloids.* 2nd edn. Woodhead Publishing, Cambridge.
- [15] ฉัญญาภรณ์ ศิริเลิศ. 2549. การประเมินลักษณะเนื้อสัมผัสในอาหาร. *วารสารเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยสยาม.* 3(1): 6-13.
- [16] Spence, C. 2015. Multisensory flavor perception. *Cell.* 161: 24-35.
- [17] Chuensun, T. (2025). Optimization of gelatin gummy properties influenced by black garlic vinegar and honey. *Natural and Life Sciences Communicatio*

การคัดเลือกและพัฒนากระบวนการผลิตมัยคอปโรตีนจากรา *Aspergillus oryzae* เพื่อการประยุกต์ใช้ ระดับอุตสาหกรรม

Selection and Process Development of Mycoprotein Production from *Aspergillus oryzae* for Industrial Application

วรารัตน์ ศรีประพัฒน์^{1,*}, ภาณี สว่างศรี¹, นัยเนตร เจริญสันติ ทานากะ¹ และ รังสิมันต์ วีระวงศ์ภิญโญ¹

Wararat Sriprapat^{1,*}, Paranee Sawangsrri¹, Naiyanate Jaroensanti Tanaka¹ and Rangsimun Theerawongpinyo¹

¹สำนักวิจัยพัฒนาเทคโนโลยีชีวภาพ กรมวิชาการเกษตร จังหวัดปทุมธานี 12110 ประเทศไทย

¹Biotechnology Research and Development Office, Department of Agriculture, Pathum Thani Province, 12110, Thailand

*Corresponding author: Wararat Sriprapat, e-mail address: jankmutt@gmail.com

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อคัดเลือกและพัฒนากระบวนการผลิตมัยคอปโรตีนจากเชื้อรา *Aspergillus oryzae* เพื่อการประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรม โดยแยกเชื้อจากอาหารหมัก ลูกแป้ง และดิน รวม 20 ไอโซเลท และคัดเลือกสายพันธุ์ที่มีศักยภาพในการผลิตโปรตีนสูงสุดโดยพบว่าไอโซเลท KK มีอัตราการเจริญของเส้นใยและการผลิตโปรตีนสูงสุด จึงนำมาศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการเพาะเลี้ยงในอาหารเหลว ผลการทดสอบแหล่งคาร์บอนพบว่าผงรำข้าวเป็นแหล่งคาร์บอนที่เหมาะสมที่สุด ให้ปริมาณโปรตีน 257.65 mg/g dry weight ขณะที่เปปโตเนอเป็นแหล่งไนโตรเจนที่เหมาะสมที่สุด ให้ปริมาณโปรตีนสูงสุด 379.70 mg/g dry weight การทดสอบค่า pH ช่วง 5.0–7.0 ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งการเจริญและการผลิตโปรตีนเมื่อนำสภาวะที่เหมาะสมไปประยุกต์ใช้ในระบบถังหมักขนาด 5 ลิตร ที่ความเร็วรอบการกวนที่ 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 72 ชั่วโมง พบว่าเชื้อเจริญในลักษณะก้อนเส้นใยขนาดใหญ่และสม่ำเสมอ ไม่พบการปนเปื้อนของสปอร์ การผลิตให้ชีวมวลแห้งรวม 300 กรัม มีปริมาณโปรตีน 395.45 mg/g dry weight คิดเป็นโปรตีนรวม 118.64 กรัม การประเมินต้นทุนระดับห้องปฏิบัติการพบว่า มีต้นทุนเฉลี่ย 3.00 บาทต่อกรัมชีวมวล และ 7.58 บาทต่อกรัมโปรตีน ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นศักยภาพของกระบวนการผลิตมัยคอปโรตีนจาก *A. oryzae* ในการพัฒนาเป็นแหล่งโปรตีนทางเลือก โดยการใช้รำข้าวเป็นวัตถุดิบต้นทุนต่ำควบคู่กับเปปโตเนอส่งผลให้เกิดก้อนเส้นใยขนาดใหญ่ที่เหมาะสมต่อการใช้งานในระดับอุตสาหกรรม

คำสำคัญ: มัยคอปโรตีน, *Aspergillus oryzae*, การคัดเลือกสายพันธุ์, การเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิต, โปรตีนทางเลือก

Abstract

This study aimed to select and develop a mycoprotein production process from *Aspergillus oryzae* for industrial applications. A total of 20 isolates were obtained from fermented foods, traditional starter culture and soil, and screened for their protein production potential. Isolate KK exhibited the highest mycelial growth rate and protein accumulation. Therefore, it was selected for further optimization in submerged culture. Among the carbon sources tested, rice bran powder was identified as the most suitable, yielding a protein content of 257.65 mg/g dry weight. Peptone was the optimal nitrogen source, providing the highest protein content of 379.70 mg/g dry weight. Evaluation of pH in the range of 5.0–7.0 showed no significant differences in both growth and protein production. Under the optimized conditions, scale-up production was conducted in a 5-L bioreactor at 100 rpm for 72 h. The fungus formed large and uniform mycelial pellets without spore contamination. This characteristic is desirable for alternative protein applications. The process yielded a total dry biomass of 300 g with a protein content of 395.45 mg/g dry weight, corresponding to 118.64 g of total protein. Laboratory-scale cost analysis revealed an average production cost of 3.00 THB per gram of biomass and 7.58 THB per gram of protein. These results demonstrate the potential of the mycoprotein production process from *A. oryzae* as an alternative protein source, in which the use of rice bran as a low-cost substrate combined with peptone promotes the formation of large mycelial pellets suitable for industrial applications.

Keywords: Mycoprotein, *Aspergillus oryzae*, strain selection, process optimization, alternative protein

1. บทนำ

จากการเพิ่มขึ้นของประชากรโลกและผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่ก่อให้เกิดอุณหภูมิสูงขึ้นและภาวะภัยแล้ง ส่งผลต่อความมั่นคงทางอาหารในหลายภูมิภาค ขณะเดียวกันกระแสการบริโภคอาหารเพื่อสุขภาพและอาหารเฉพาะบุคคลมีแนวโน้มเติบโตอย่างต่อเนื่อง ภาครัฐจึงมีนโยบายส่งเสริมอุตสาหกรรมชีวภาพและธุรกิจด้านสุขภาพเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันในตลาดโลก การพัฒนาผลิตภัณฑ์โปรตีนจากจุลินทรีย์จึงเป็นแนวทางสำคัญในการรองรับอุตสาหกรรมอาหารทางเลือก โดยเฉพาะ มัยคอโปรตีน (mycoprotein) หรือโปรตีนจากรา ซึ่งเป็นโปรตีนที่ได้จากการเพาะเลี้ยงจุลินทรีย์และมีศักยภาพในการพัฒนาเป็นแหล่งโปรตีนทางเลือกในอนาคต

มัยคอโปรตีนจัดเป็นโปรตีนคุณภาพสูง ให้พลังงานต่ำ มีเส้นใยสูง และมีกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่สำคัญ เช่น โอเมก้า-6 และ โอเมก้า-3 รวมถึงมีกรดอะมิโนจำเป็นหลายชนิด [1] จึงได้รับความสนใจในฐานะแหล่งโปรตีนเพื่อสุขภาพ โดยเฉพาะในกลุ่มผู้บริโภคที่ลดหรือหลีกเลี่ยงการบริโภคเนื้อสัตว์ (non-meat-based protein) ประกอบกับความตระหนักด้านสวัสดิภาพสัตว์และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้ตลาดโปรตีนทางเลือกขยายตัวอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะหลังสถานการณ์การแพร่ระบาดของ COVID-19 ปัจจัยที่มีผลต่อชีวมวลและโปรตีนที่ผลิตจากรา ได้แก่ สภาพและระยะเวลาของการหมัก สายพันธุ์จุลินทรีย์ที่ใช้ ส่วนประกอบของสารอาหาร เป็นต้น [2] ซึ่งส่วนประกอบของสารอาหารที่เหมาะสมจะแตกต่างกันไปตามสายพันธุ์ของจุลินทรีย์ โดยงานวิจัยของ Karimi และคณะ [3] พบว่าเมื่อเลี้ยงรา 5 สายพันธุ์ ได้แก่ *Aspergillus oryzae*, *Neurospora intermedia*, *Rhizopus oryzae*, *Monascus purpureus*, และ *Fusarium venenatum* ในอาหารที่ใช้ vinasses หรือน้ำที่ผ่านกระบวนการกลั่นเอทานอลมาเป็นส่วนประกอบ โดยเพาะเลี้ยงในสภาวะอาหารเหลวเป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง ในเครื่องเขย่าที่ควบคุมอุณหภูมิ 35°C พบว่า *A. oryzae*, *N. intermedia* และ *R. oryzae* มีการเจริญเติบโตได้ดีที่สุด โดยสามารถผลิตชีวมวล (biomass) ได้ถึง 103, 78.6 และ 27.9 g ตามลำดับ ซึ่งได้โปรตีนประมาณ 44.7%, 57.6% และ 50.9% ตามลำดับ และจากงานวิจัยของ Sar และคณะ [4] ที่ได้ทำการเพาะเลี้ยง *A. oryzae* ในน้ำทิ้งของกระบวนการผลิตปลาแปรรูปโดยไม่มีการเติมอาหารชนิดอื่น เป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง ในสภาวะเขย่า พบว่า *A. oryzae* สามารถเจริญเติบโตและผลิตชีวมวลได้ถึง 42 g/L นอกจากนี้จากงานวิจัยของ Souza Filho และคณะ [5] พบว่าเมื่อเพาะเลี้ยงจุลินทรีย์ 5 สายพันธุ์ ในวัสดุผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมแปรรูปถั่วที่ปริมาณ 100 มิลลิลิตร (Erlenmeyer flasks: 35°C เขย่าที่ 150 rpm เป็นเวลา 48 ชั่วโมง) และ 3.5 L (airlift bioreactor : 35±2°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง) เพื่อผลิตอาหารวิแกนที่มีโปรตีนเข้มข้น พบว่า *A. oryzae* สามารถเจริญเติบโตและผลิตโปรตีนได้สูงที่สุด อย่างไรก็ตาม งานวิจัยเหล่านี้มักเน้นไปที่วัสดุหรือสายพันธุ์ของประเทศตนเอง ขณะที่ในประเทศไทย รายงานการผลิตมัยคอโปรตีนจากเชื้อสายพันธุ์ที่แยกได้ภายในประเทศยังมีน้อย และยังไม่มีการใช้วัสดุทางการเกษตรของไทยในการผลิตมัยคอโปรตีน ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการคัดเลือกและศึกษากระบวนการผลิตมัยคอโปรตีนจากเชื้อ *A. oryzae* ที่แยกได้ภายในประเทศ พร้อมทั้งประเมินต้นทุนและขยายการผลิตระดับ 5 L เพื่อสนับสนุนอุตสาหกรรมอาหารทางเลือกในไทย และเป็นแนวทางในการเสริมสร้างความมั่นคงทางอาหารในอนาคต

2. วิธีการศึกษา

2.1 การคัดเลือกเชื้อ *Aspergillus oryzae* ที่มีศักยภาพในการผลิตโปรตีนสูง

นำเชื้อรา *A. oryzae* ที่รวบรวมอยู่ใน culture collection ของสำนักวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีชีวภาพ กรมวิชาการเกษตร ซึ่งแยกได้จากอาหารหมัก ลูกแป้ง และดิน มาเพาะเลี้ยงในอาหารเหลว Potato Dextrose Broth (PDB) โดยเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 35°C เป็นเวลา 16 ชั่วโมง เพื่อกระตุ้นการเจริญเติบโตเบื้องต้น จากนั้นนำเชื้อไปแยกให้บริสุทธิ์บนอาหารแข็ง Potato Dextrose Agar (PDA) และศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาและการเจริญเติบโต ทำการคัดเลือกสายพันธุ์ (isolate) ที่มีอัตราการเจริญเติบโตสูงและมีการสร้างสปอร์ต่ำ เพื่อลดความเสี่ยงด้านความปลอดภัยและเหมาะสมต่อการผลิตในระดับอุตสาหกรรม จากนั้นนำสายพันธุ์ที่คัดเลือกได้ไปเพาะเลี้ยงในอาหารเหลว PDB ภายใต้สภาวะเขย่า 100–150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 35°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง หลังการเพาะเลี้ยง ทำการแยกชีวมวลเส้นใยออกจากอาหารเลี้ยงเชื้อโดยการกรองผ่านในลอนเมมเบรนขนาด 0.45 µm และนำตัวอย่างชีวมวลไปวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนด้วยวิธี BCA Protein Assay Kit การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตโปรตีนของแต่ละสายพันธุ์วางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) จำนวน 20 กรรมวิธี (สายพันธุ์) ๆ ละ 10 ซ้ำ ดังแสดงใน Table 1 จากนั้นวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อคัดเลือกสายพันธุ์ที่มีอัตราการเจริญเติบโตสูง และสามารถผลิตชีวมวลและโปรตีนได้ในปริมาณสูงสุด

Table 1 List of *A. oryzae* strains used for comparative evaluation of protein production efficiency.

No.	Isolate Code and Source
1	<i>A. oryzae</i> Y1
2	<i>A. oryzae</i> Y2
3	<i>A. oryzae</i> Y3
4	<i>A. oryzae</i> KH
5	<i>A. oryzae</i> KK
6	<i>A. oryzae</i> M1
7	<i>A. oryzae</i> M2
8	<i>A. oryzae</i> Hu
9	<i>A. oryzae</i> จากลูกแป้งพิจิตร
10	<i>A. oryzae</i> จากลูกแป้งสุรินทร์
11	<i>A. oryzae</i> จากลูกแป้งบุรีรัมย์
12	<i>A. oryzae</i> จากลูกแป้งชัยภูมิ
13	<i>A. oryzae</i> จากลูกแป้งศรีสะเกษ
14	<i>A. oryzae</i> จากลูกแป้งนครศรีธรรมราช 1
15	<i>A. oryzae</i> จากลูกแป้งนครศรีธรรมราช 2
16	<i>A. oryzae</i> จากลูกแป้งแพร่
17	<i>A. oryzae</i> จากลูกแป้งสงขลา
18	<i>A. oryzae</i> จากลูกแป้งร้อยเอ็ด
19	<i>A. oryzae</i> จากลูกแป้งปัตตานี
20	<i>A. oryzae</i> จากลูกแป้งอุบล

2.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตโปรตีนในระบบ Submerged Fermentation

นำเชื้อ *A. oryzae* ที่คัดเลือกในข้อ 2.1 มาศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตโปรตีน โดยเลี้ยงในสภาวะอาหารเหลว ปริมาตร 100 mL ซึ่งสูตรอาหารเลี้ยงเชื้อที่ปรับปรุงมาจากสูตรของ Carlsen และ Nielsen [6] คือ glucose 20 กรัม KH₂PO₄ 2.8 กรัม MgSO₄ 0.6 กรัม CaCl₂ 1.5 กรัม และ FeSO₄ 0.01 กรัม 100 mL ใช้สปอร์เชื้อเริ่มต้น (inoculum) จำนวน 1×10⁸ สปอร์ ในอัตรา 3% (v/v) นำไปเพาะเลี้ยงในเครื่องเขย่า (Innova 4340 Refrigerated Incubator Shaker, USA) ที่ความเร็ว 100 rpm และอุณหภูมิ 28°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง การทดสอบแต่ละปัจจัยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.2.1 ค่า pH เริ่มต้น โดยค่า pH ที่จะศึกษาคือ pH 5.0, 5.5, 6.0 และ 7.0 การทดสอบปัจจัยแหล่งความเป็นกรด-ด่าง เริ่มต้นที่เหมาะสมในการผลิตโปรตีนในระบบ Submerged Fermentation วางแผนการทดลองแบบ CRD 4 กรรมวิธี จำนวน 10 ซ้ำ โดยใช้ขวดเพาะเลี้ยง 1 ใบต่อหน่วยการทดลอง จากนั้นนำเส้นใยราที่ผลิตได้มาวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนด้วยด้วย BCA Protein Assay Kit แล้วทำการคัดเลือกสภาวะที่เชื้อมีอัตราการเติบโตและสามารถผลิตโปรตีนได้ปริมาณสูง

2.2.2 แหล่งคาร์บอน การทดลองนี้จะใช้แหล่งคาร์บอนเกรดอาหาร (Food grade) เพื่อการผลิตมัยคอโปรตีน โดยแหล่งคาร์บอนที่จะใช้ศึกษา ได้แก่ น้ำตาลกลูโคส น้ำตาลซูโครส แป้งข้าวเจ้า และผงรำข้าว การทดสอบปัจจัยแหล่งคาร์บอนที่เหมาะสมในการผลิตโปรตีนในระบบ Submerged Fermentation วางแผนการทดลองแบบ CRD 4 กรรมวิธี จำนวน 10 ซ้ำ โดยใช้ขวดเพาะเลี้ยง 1 ใบต่อหน่วยการทดลอง จากนั้นนำเส้นใยราที่ผลิตได้มาอบที่ 40°C บดให้ละเอียด ผสมกับ 0.1% SDS ในอัตราส่วน 1:3 (w/v) และเหวี่ยงปั่น 25 นาที ที่ 8,000 rpm จากนั้นนำส่วนใสไปวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนด้วย BCA Protein Assay Kit เพื่อตรวจสอบและคัดเลือกสภาวะที่เชื้อมีการเจริญเติบโตและสามารถผลิตโปรตีนได้สูงสุด

2.2.3 แหล่งไนโตรเจน โดยแหล่งไนโตรเจน Food grade ที่จะใช้ศึกษา ได้แก่ เปปโตน แอมโมเนียมคลอไรด์ (NH₄Cl) แอมโมเนียมซัลเฟต ((NH₄)₂SO₄) สารสกัดจากยีสต์ (Yeast extract) การทดสอบปัจจัยแหล่งไนโตรเจนที่เหมาะสมในการผลิตโปรตีนในระบบ Submerged Fermentation วางแผนการทดลองแบบ CRD 4 กรรมวิธี จำนวน 10 ซ้ำ โดยใช้ขวดเพาะเลี้ยง

1 ใบต่อหน่วยการทดลอง จากนั้นนำเส้นใยราที่ผลิตได้มาวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนด้วยด้วย BCA Protein Assay Kit แล้วทำการคัดเลือกสภาวะที่เชื้อมีอัตราการเติบโตและสามารถผลิตโปรตีนได้ปริมาณสูง

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 การคัดเลือกเชื้อ *Aspergillus oryzae* ที่มีศักยภาพในการผลิตโปรตีนสูง

ทำการแยกเชื้อจากอาหารหมัก ลูกแป้ง และดิน ได้เชื้อซึ่งเป็น *Aspergillus oryzae* จำนวน 20 ไอโซเลท ซึ่งมีสีเส้นใย 2 แบบ คือ สีขาว และสีเขียว (Figure 1) และเมื่อทำการศึกษการเจริญของราพบว่า มี 5 ไอโซเลท ได้แก่ isolate KK, KH, Y1, Y2 และ Y3 มีการเจริญเติบโตรวดเร็ว ผลการวิเคราะห์อัตราการเจริญของเส้นใย แสดงดัง Figure 2 เมื่อวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนด้วย BCA Protein Assay เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตโปรตีนของราแต่ละ isolate พบว่า รา *A. oryzae* isolate KK มีปริมาณโปรตีนมากที่สุด รองลงมาคือ M2, Hu, Y2 และ Y3 ตามลำดับ (Figure 3) ดังนั้น เมื่อพิจารณาจากอัตราการเจริญของเส้นใยและการผลิตโปรตีนจึงคัดเลือก isolate KK มาเพื่อใช้ในการศึกษาการผลิตมัยคอโปรตีนในขั้นต่อไป

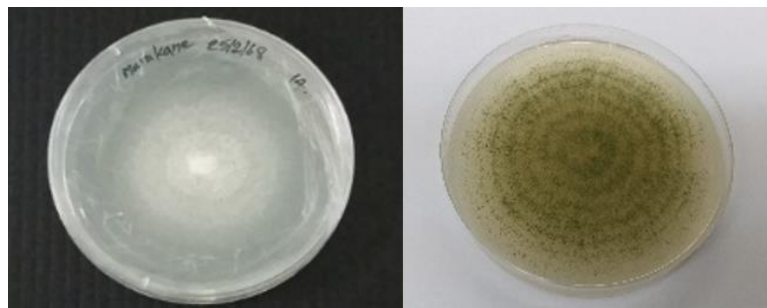


Figure 1 Variation in mycelial color (white and green) among *A. oryzae* isolates.

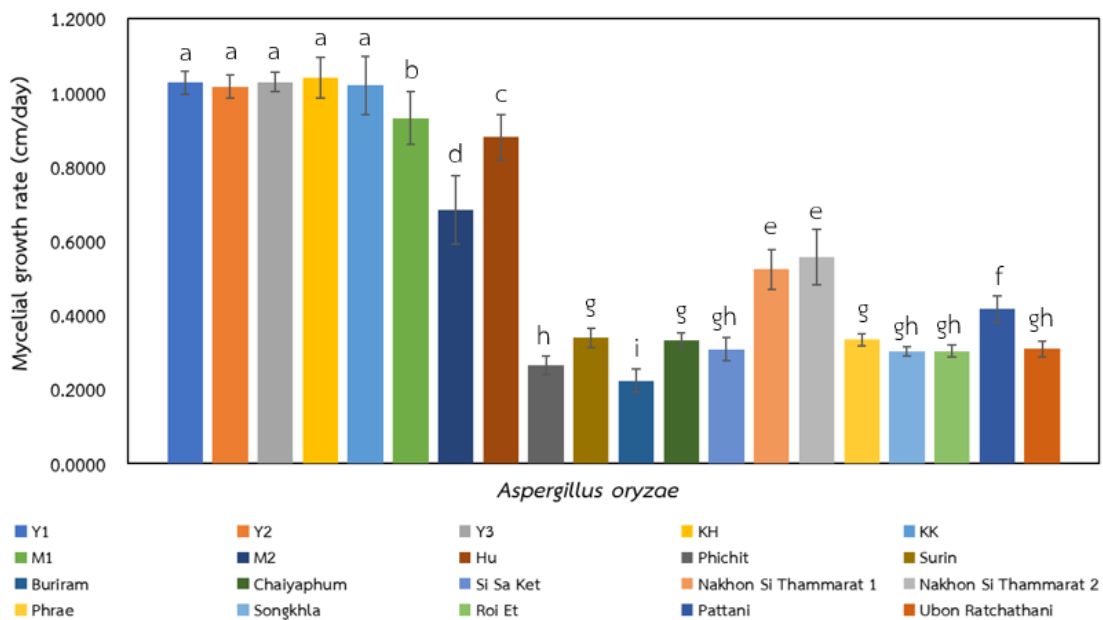


Figure 2 Comparison of mycelial growth rate of *A. oryzae* isolates obtained from fermented foods, starter cultures (look pang), and soil. Error bars represent mean \pm SD (n = 10). Different letters (a-h) indicate significant differences ($p < 0.05$).

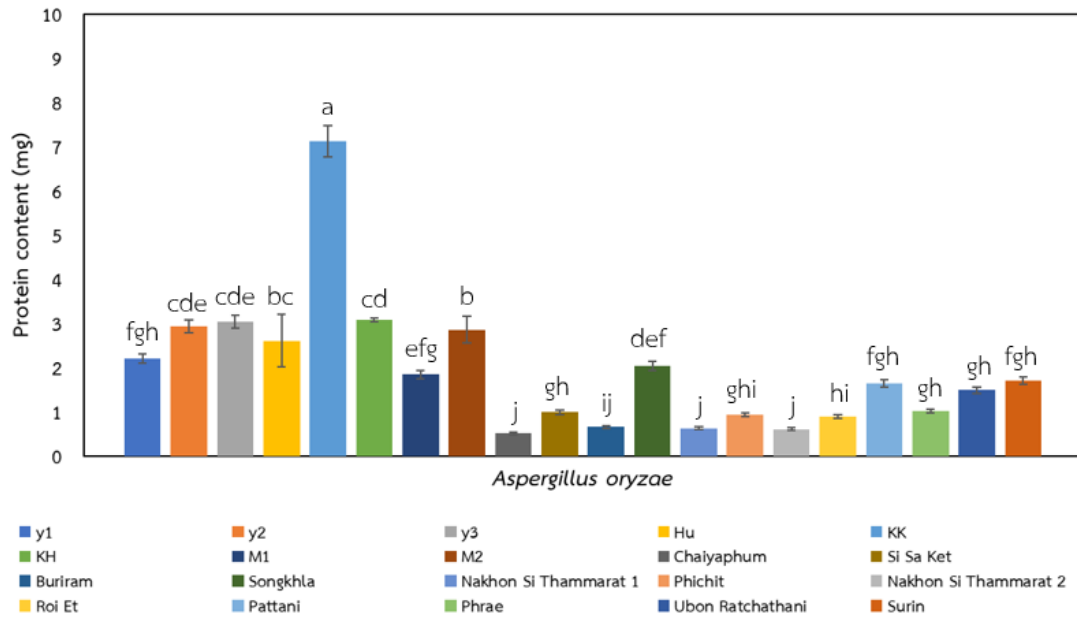


Figure 3 Comparison of protein content among *A. oryzae* isolates obtained from fermented foods, starter cultures (look pang), and soil. Error bars represent mean \pm SD (n = 10). Different letters (a–j) indicate significant differences ($p < 0.05$).

3.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตโปรตีนในระบบ Submerged Fermentation

เชื้อ *A. oryzae* ที่ผ่านการคัดเลือกจากขั้นตอนที่ 2.2 ถูกนำมาศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตโปรตีน โดยทำการเลี้ยงเชื้อในระบบ Submerged Fermentation ในอาหาร PDB ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ภายใต้การเขย่าอย่างต่อเนื่องด้วยเครื่องเขย่าแบบหมุน ที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 24–72 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำหัวเชื้อ (inoculum) มาใช้ในอัตราส่วน 3% (v/v) ในการทดสอบผลของแหล่งคาร์บอนต่อการเจริญเติบโตและการผลิตโปรตีน สูตรอาหารที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย glucose monohydrate 19 กรัม $(\text{NH}_4)_2 \text{SO}_4$ 7.3 กรัม KH_2PO_4 1.5 กรัม $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 1.0 กรัม NaCl 1.0 กรัม $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 1.0 กรัม และ tracer metal solution ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร เมื่อทดสอบปัจจัยความเป็นกรด-ด่าง หรือ pH เริ่มต้นที่เหมาะสมในการผลิตโปรตีนในระบบ Submerged Fermentation ได้แก่ pH 5.0, 5.5, 6.0 และ 7.0 ผลการทดลองไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ของการเจริญและการผลิตโปรตีนจากเชื้อ *A. oryzae* isolate KK (Figure 4-6) แสดงให้เห็นว่าเชื้อ *A. oryzae* isolate KK สามารถเจริญและผลิตโปรตีนได้ในช่วง pH 5.0 – 7.0

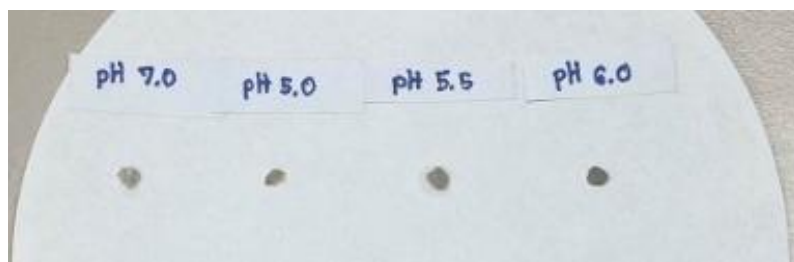


Figure 4 Morphology of fungal mycelia under submerged cultivation at different initial pH levels.

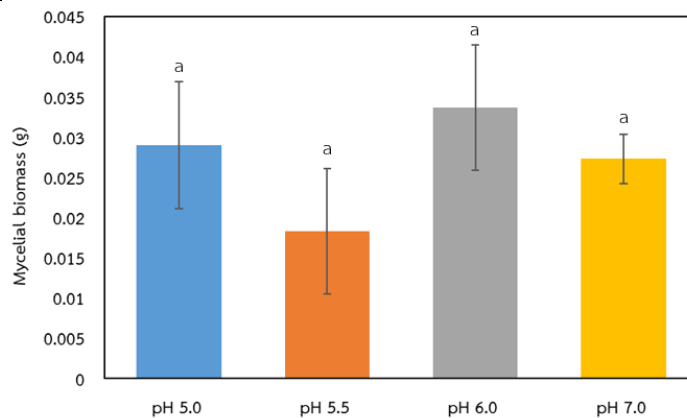


Figure 5 Mycelial biomass of *A. oryzae* isolate KK cultivated in media with different initial pH values, measured at the same time point (72 hours). Error bars represent mean \pm SD (n = 10). Different letters indicate significant differences ($p < 0.05$).

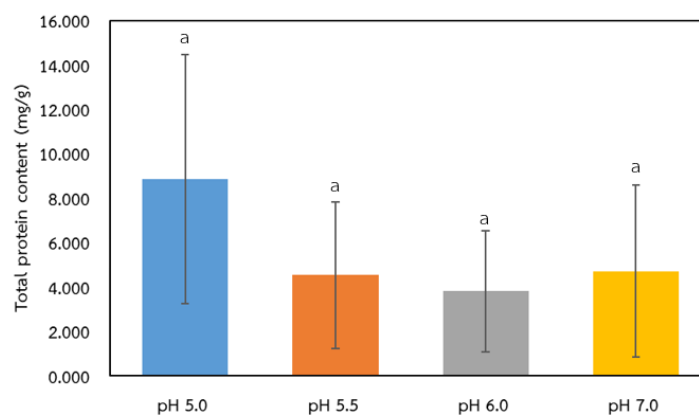


Figure 6. Protein production of *A. oryzae* isolate KK cultivated in media with different initial pH values, measured at the same time point (72 hours). Error bars represent mean \pm SD (n = 10). Different letters indicate significant differences ($p < 0.05$).

เมื่อทดสอบปัจจัยแหล่งคาร์บอนที่เหมาะสมในการผลิตโปรตีน โดยทดสอบกับกลูโคส ซูโครส แป้งข้าวเจ้า และผงรำข้าว ผลการทดลองพบว่า เชื้อ *A. oryzae* isolate KK เจริญเติบโตได้ดี โดยมีน้ำหนักแห้งของเส้นใยมากที่สุดเมื่อใช้ผงรำข้าว เป็นแหล่งคาร์บอน (7.38 g) รองลงมาคือ แป้งข้าวเจ้า ซูโครส และกลูโคส ตามลำดับ (Figure 7-8) และเมื่อวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนทั้งหมดพบว่า *A. oryzae* isolate KK สามารถผลิตโปรตีนได้มากที่สุด คือ 257.65 mg/g dry weight เมื่อใช้ผงรำข้าว เป็นแหล่งคาร์บอน รองลงมาคือ กลูโคส ซูโครส และแป้งข้าวเจ้า ตามลำดับ (132.91, 110.36 และ 90.47 mg/g dry weight) (Figure 9) การที่ผงรำข้าวเป็นแหล่งคาร์บอนให้ผลดีที่สุดอาจเป็นผลมาจาก C/N ratio ที่เหมาะสม เส้นใยสูง และการปลดปล่อยคาร์บอนช้า สนับสนุนการเจริญและการผลิตโปรตีนอย่างต่อเนื่องของรา ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ ที่ระบุว่า rice bran ช่วยเพิ่มการผลิตโปรตีนและน้ำหนักเส้นใยของเชื้อรา [7]

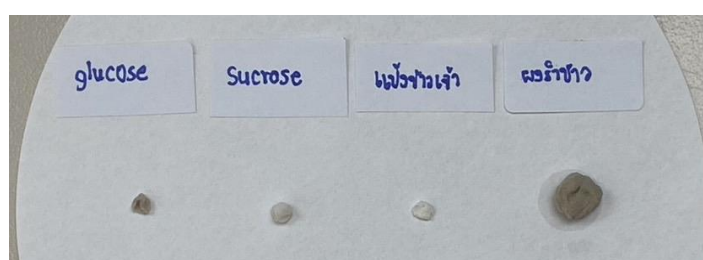


Figure 7 Morphology of fungal mycelia under submerged cultivation with different carbon sources.

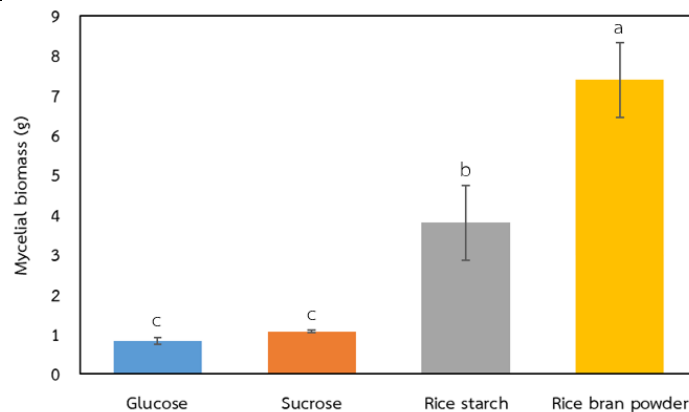


Figure 8 Mycelial biomass of *A. oryzae* isolate KK cultivated in media containing different carbon sources, measured at the same time point (72 hours). Error bars represent mean \pm SD (n = 10). Different letters indicate significant differences ($p < 0.05$).

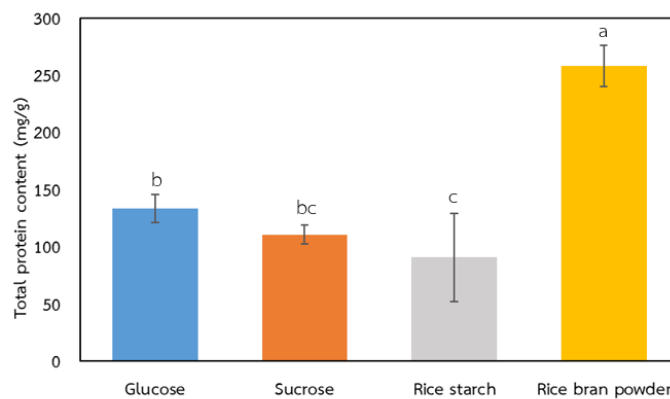


Figure 9 Protein production of *A. oryzae* isolate KK cultivated in media containing different carbon sources, measured at the same time point (72 hours). Error bars represent mean \pm SD (n = 10). Different letters indicate significant differences ($p < 0.05$).

เมื่อทดสอบปัจจัยแหล่งไนโตรเจนที่เหมาะสมในการผลิตโปรตีน โดยใช้ เปปโตน แอมโมเนียมคลอไรด์ แอมโมเนียมซัลเฟต และ Yeast Extract ผลการทดลองพบว่าเชื้อ *A. oryzae* isolate KK เจริญเติบโตได้ดีเมื่อใช้เปปโตน และ Yeast Extract เป็นแหล่งไนโตรเจน รองลงมาคือแอมโมเนียมคลอไรด์ และแอมโมเนียมซัลเฟต ตามลำดับ (Figure 10-11) และเมื่อวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนทั้งหมดพบว่า *A. oryzae* isolate KK สามารถผลิตโปรตีนได้มากที่สุด คือ 379.70 mg/g dry weight เมื่อใช้เปปโตนเป็นแหล่งไนโตรเจน รองลงมาคือ Yeast Extract แอมโมเนียมคลอไรด์ และแอมโมเนียมซัลเฟต ตามลำดับ (228.26, 108.04 และ 70.68 mg/g dry weight) (Figure 12) การใช้เปปโตนเป็นแหล่งไนโตรเจนให้ผลดีที่สุดอาจเป็นผลจาก organic nitrogen assimilation ที่ง่ายต่อการดูดซึมและเมตาบอลิซึมของเชื้อรา filamentous ทำให้สามารถสังเคราะห์โปรตีนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลนี้สอดคล้องกับรายงานก่อนหน้าที่ระบุว่า peptone และ yeast extract ช่วยเพิ่มการผลิตโปรตีนและการเจริญของเชื้อ *Aspergillus* spp. [8]



Figure 10 Morphology of fungal mycelia under submerged cultivation with different nitrogen sources.

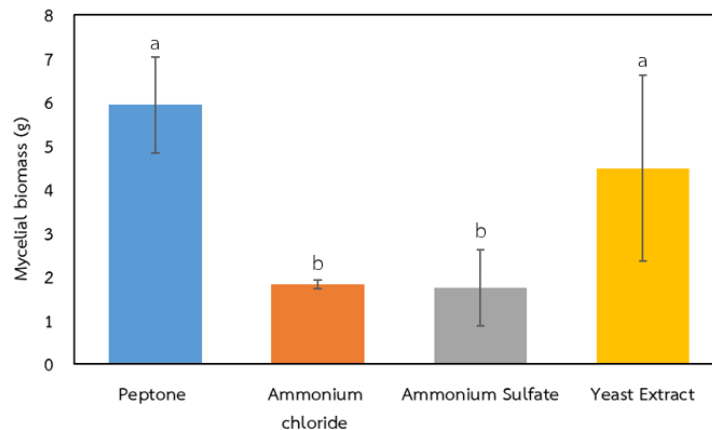


Figure 11 Mycelial biomass of *A. oryzae* isolate KK cultivated in media containing different nitrogen sources, measured at the same time point (72 hours). Error bars represent mean \pm SD (n = 10). Different letters indicate significant differences ($p < 0.05$).

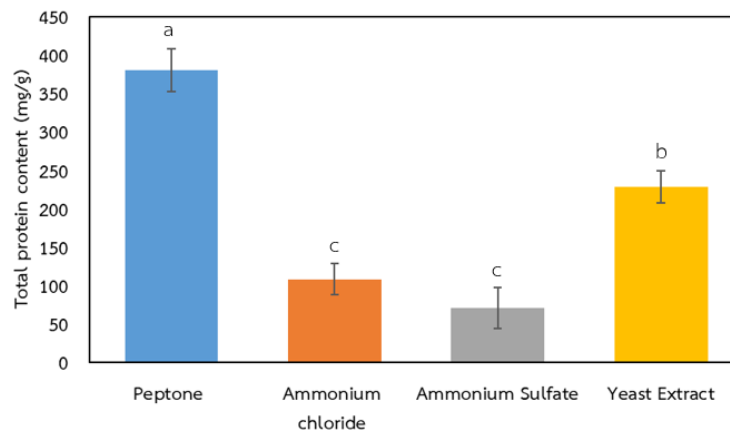


Figure 12 Protein production of *A. oryzae* isolate KK cultivated in media containing different nitrogen sources, measured at the same time point (72 hours). Error bars represent mean \pm SD (n = 10). Different letters indicate significant differences ($p < 0.05$).

3.3 การศึกษาคุณลักษณะโปรตีนและต้นทุนการผลิตมัยคอปโรตีนระดับห้องปฏิบัติการ

ทำการขยายขนาดการผลิตโดยเพาะเลี้ยงเชื้อในระบบถังหมักขนาดเล็กปริมาตร 5 ลิตร เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและประเมินศักยภาพเชิงเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการผลิต โดยใช้ผงรำข้าวและเปปโตเนเป็นแหล่งคาร์บอนและไนโตรเจนหลัก ควบคุมค่า pH ที่ 6.0 อุณหภูมิ 28°C ความเร็วรอบการกวน 100 rpm ควบคุมค่า DO ที่ 40% และอัตราการเติมอากาศ (aeration rate) 1.6 vvm เป็นเวลา 72 ชั่วโมง โดยใช้สปอร์เชื้อเริ่มต้น (inoculum) จำนวน 1×10^8 สปอร์ ในอัตรา 3% (v/v) ผลการทดลองพบว่าเชื้อมีการเจริญในลักษณะก้อนเส้นใย (mycelial pellets) ขนาดใหญ่จำนวนมาก และเมื่อทำการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ไม่พบการปนเปื้อนของสปอร์ร่วมกับเส้นใยโปรตีน (Figure 13) โดยลักษณะการเกิด pellet morphology ในการเพาะเลี้ยงแบบอาหารเหลวถือเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทออกซิเจน ความหนืดของอาหารเลี้ยง และผลผลิตชีวมวลในระบบหมัก [9] โครงสร้างก้อนเส้นใยที่สม่ำเสมอและไม่พบสปอร์ปนเปื้อนยังเป็นลักษณะที่เหมาะสมต่อการพัฒนาเป็นแหล่งโปรตีนทางเลือก เนื่องจากช่วยลดความเสี่ยงด้านความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์ในกลุ่มโปรตีนทางเลือกและ single-cell protein [10] จากการประเมินผลผลิตพบว่า *A. oryzae* isolate KK ให้ชีวมวลแห้งจำนวน 300 กรัม โดยมีปริมาณโปรตีน 395.45 mg/g dry weight รวมโปรตีนทั้งหมด 118.64 g หรือประมาณร้อยละ 39.5 ของน้ำหนักแห้ง ซึ่งสอดคล้องกับรายงานก่อนหน้านี้ที่ระบุว่า *A. oryzae* สามารถผลิตชีวมวลที่มีโปรตีนประมาณ 40–50% ของน้ำหนักแห้ง [3] นอกจากนี้ ตัวชี้วัดเชิงอุตสาหกรรมของกระบวนการผลิต ได้แก่ อัตราการผลิตโปรตีน (protein productivity) 0.33 g/L·h และ สัมประสิทธิ์ผลผลิต (yield coefficient)

0.59 g protein/g substrate ซึ่งสะท้อนถึงศักยภาพในการผลิตเชิงพาณิชย์ เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ พบว่ากระบวนการเพาะเลี้ยงในสีกษานี้มี productivity และปริมาณโปรตีนใกล้เคียง ซึ่งอาจเป็นผลจากการปรับลักษณะก้อนเส้นใย (pellet morphology) และสูตรอาหารที่เหมาะสม [4]

จากการประเมินต้นทุนการผลิตในระดับห้องปฏิบัติการ พบว่ามีต้นทุนรวมประมาณ 899.17 บาทต่อการเพาะเลี้ยง 5 ลิตร คิดเป็น ต้นทุนเฉลี่ย 3.00 บาท/g biomass และ 7.58 บาท/g protein (Table 2) ข้อมูลดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่ากระบวนการผลิตในระดับถึงหมักขนาดเล็กมีศักยภาพด้านผลผลิตโปรตีนในระดับที่สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ [3] และเมื่อเปรียบเทียบกับแหล่งโปรตีนอื่นๆ ได้แก่ โปรตีนถั่วเหลือง (~10–12 บาท/g protein) และโปรตีนถั่วลันเตา (~8–10 บาท/g protein) พบว่าการผลิตมัยคโคโปรตีนในระดับห้องปฏิบัติการมีความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ในระดับต้น อย่างไรก็ตาม การเพิ่มประสิทธิภาพสูตรอาหารเพาะเลี้ยงและการปรับขนาดการผลิตอาจช่วยลดต้นทุนต่อหน่วยและเพิ่มความสามารถในการแข่งขันเชิงพาณิชย์ของผลิตภัณฑ์มัยคโคโปรตีนในอนาคต

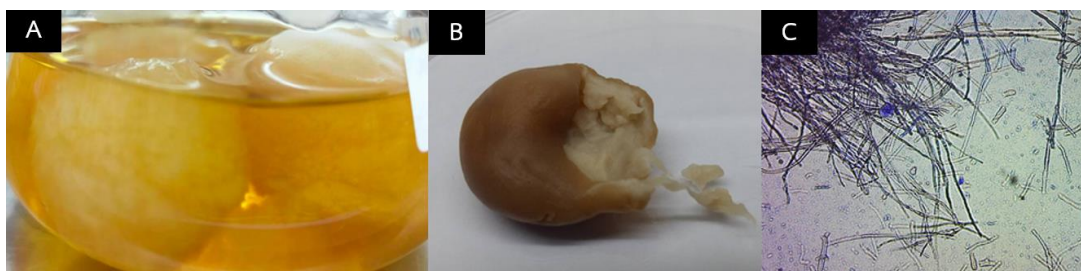


Figure 13 Morphology of protein-rich mycelial fibers from *Aspergillus oryzae* isolate KK. (a) Large mycelial pellets in submerged fermentation; (b) smooth surface with dense interior; and (c) no spores observed under microscopy.

เมื่อพิจารณาโครงสร้างต้นทุนการผลิต พบว่าแหล่งไนโตรเจน โดยเฉพาะเปปโติน เป็นองค์ประกอบที่มีสัดส่วนต้นทุนสูงที่สุดในสูตรอาหารเพาะเลี้ยง ซึ่งสอดคล้องกับรายงานที่ระบุว่าแหล่งไนโตรเจนอินทรีย์มักเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อทั้งผลผลิตชีวมวลและต้นทุนรวมของกระบวนการผลิตราเส้นใย [2] ดังนั้น การเพิ่มความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการผลิตจึงควรมุ่งเน้นการปรับลดหรือทดแทนแหล่งไนโตรเจนดังกล่าวด้วยวัตถุดิบทางเลือกที่มีต้นทุนต่ำกว่าและหาได้ในประเทศ เช่น กากถั่วเหลืองกากเบียร์ หรือกากมันสำปะหลัง ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมเกษตรและอาหารของไทย และมีรายงานว่าสามารถใช้เป็นแหล่งธาตุอาหารสำหรับการเพาะเลี้ยงจุลินทรีย์และเชื้อราได้อย่างมีประสิทธิภาพ [11] อย่างไรก็ตาม จำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อประเมินผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงแหล่งไนโตรเจนต่ออัตราการเจริญ การสะสมโปรตีน และคุณภาพชีวมวล ตลอดจนการวิเคราะห์ความเป็นไปได้เชิงเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ในระดับกึ่งอุตสาหกรรม เพื่อยืนยันศักยภาพการขยายขนาดการผลิตในอนาคต

Table 2 Economic assessment of laboratory-scale mycoprotein production per batch (72 h fermentation).

No.	Input	Volume	Unit Cost (THB)*	Loading Rate (g/l)	Amount Required for 5 L (g)	Total Cost (THB)
1	Glucose	500 g	1,610	20	100	322
2	KH ₂ PO ₄	500 g	1,025	2.8	14	28.70
3	MgSO ₄	500 g	2,205	0.6	3	13.23
4	CaCl ₂	500 g	1,205	1.5	7.5	18.08
5	FeSO ₄ ·7H ₂ O	500 g	1,600	0.01	0.05	0.16
6	Peptone	500 g	2,390	20	100	478
7	Rice bran powder	500 g	200	20	100	40
Total Cost						899.17

* Unit prices of materials are based on purchases from multiple suppliers in Thailand (2026).

4. สรุป

การศึกษานี้คัดเลือกเชื้อรา *A. oryzae* isolate KK ที่มีศักยภาพในการผลิตมัยคอร์โปรตีน และประเมินสภาวะที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยงแบบอาหารเหลว พบว่าแหล่งคาร์บอนและไนโตรเจนมีผลต่อการผลิตโปรตีนอย่างชัดเจน โดยผงรำข้าวและเปปโตนให้ปริมาณโปรตีนสูงสุด ขณะที่ช่วง pH 5.0–7.0 ไม่ส่งผลแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญต่อการเจริญของเชื้อ เมื่อขยายการผลิตในถังหมักขนาด 5 L ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม สามารถผลิตชีวมวลแห้งได้ 300 g มีโปรตีน 395.45 mg/g dry weight หรือ ร้อยละ 39.5 ของน้ำหนักแห้ง คิดเป็นโปรตีนรวม 118.64 g การประเมินต้นทุนในระดับห้องปฏิบัติการพบว่ามีต้นทุนเฉลี่ย 3.00 บาท/g biomass และ 7.58 บาท/g protein ข้อมูลดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่า กระบวนการผลิตมัยคอร์โปรตีนจากเชื้อ *A. oryzae* isolate KK มีความเป็นไปได้เชิงเศรษฐศาสตร์ในระดับต้น และสามารถต่อยอดสู่การพัฒนาในระดับสูงขึ้นได้ในอนาคต เช่น การปรับแหล่งไนโตรเจนและคาร์บอนโดยใช้วัสดุเกษตรราคาถูกเพิ่มเติม รวมถึงการปรับลักษณะก้อนเส้นใยและเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ เพื่อเพิ่มศักยภาพเชิงอุตสาหกรรม

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณในการดำเนินงานวิจัยเรื่อง “การพัฒนาการผลิตมัยคอร์โปรตีนจากรา *Aspergillus oryzae* เพื่อเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการในอุตสาหกรรมอาหารทางเลือก” (ทะเบียนวิจัย FF68-26-02-68-01) และขอขอบคุณ ว่าที่ ร.ต. ชนินทร์ นาคขำ นักวิชาการเกษตร สำนักวิจัยพัฒนาเทคโนโลยีชีวภาพ กรมวิชาการเกษตร ที่ให้การสนับสนุนด้านการวิเคราะห์โปรตีน และอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัยในระบบถังหมักจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Zeng, Y., Pu, X., Yang, J., Du, J., Yang, X., Li, X. and Zhou, J. 2022. Strategies of functional food for health promotion: A review. *Food Sci. Hum. Wellness*. 11: 135–149.
- [2] Ahmed, M. G., Gouda, S. A., Donia, S. and Hassanein, N. M. 2025. Production of single cell protein by fungi from different food wastes. *Biomass Convers. Biorefin*. 15: 5447–5462.
- [3] Karimi, S., Mahboobi Soofiani, N., Lundh, T., Mahboubi, A., Kiessling, A. and Taherzadeh, M. J. 2019. Evaluation of filamentous fungal biomass cultivated on vinasse as an alternative nutrient source of fish feed: Protein, lipid and mineral composition. *Fermentation*. 5: 99.
- [4] Sar, T., Ferreira, J. A. & Taherzadeh, M. J. 2020. Conversion of fish processing wastewater into fish feed ingredients through submerged cultivation of *Aspergillus oryzae*. *Systems Microbiology and Biomanufacturing*. 1: 100–110.
- [5] Souza Filho, P. F., Andersson, D., Ferreira, J. A. and Taherzadeh, M. J. 2018. Mycoprotein: Environmental impact and health aspects. *World J. Microbiol. Biotechnol*. 34: 11.
- [6] Carlsen, M. and Nielsen, J. 2001. Influence of carbon source on α -amylase production by *Aspergillus oryzae*. *Appl. Microbiol. Biotechnol*. 57: 346–349.
- [7] Anupama, & Ravindra, P. 2001. Studies on production of single cell protein by *Aspergillus niger* in solid state fermentation of rice bran. *Brazilian Archives of Biology and Technology*. 44: 79–88.
- [8] Cao, L., El Mashad, H.M., Pan, Z., et al. 2025. Production of filamentous fungal biomass (*Aspergillus awamori*) in pellet form from almond hull extract. *Food Bioprocess Technology*. 18: 8735–8750.
- [9] Papagianni, M. 2004. Fungal morphology and metabolite production in submerged mycelial processes. *Biotechnol. Adv*. 22: 189–259.
- [10] Hadi, J. and Brightwell, G. 2021. Safety of alternative proteins: Technological, environmental and regulatory aspects of cultured meat, plant-based meat, insect protein and single-cell protein. *Foods*. 10: 1226.
- [11] Couto, S. R. and Sanromán, M. A. 2006. Application of solid-state fermentation to food industry—A review. *J. Food Eng*. 76: 291–302.

การปกคลุมและความชุกชุมของอีพีไบโอตาบนหญ้าทะเลในบริเวณทะเลอันดามันตอนบน ประเทศไทย Epibiotic Cover and Abundance on Seagrass in the Northern Andaman Sea, Thailand

ปาลิดา อาหลี^{1,2,*}, พลชาติ โชติการ^{1,2}, ณัฐริดา ธรรมกิติ^{1,2}, ปฐมพงศ์ พรมณีโชติ^{1,2}, รัตนภรณ์ เสงขิม^{1,2}, ฉัญญภัทร ชำนินา^{1,2}, มุฮัมหมัด หีมบู^{1,2}
 และ สุธินี สีนุท^{1,2}

Palida Arlee^{1,2,*}, Ponlachart Chotikarn^{1,2}, Natthida Thammakeerati^{1,2}, Pathompong Pramneechote^{1,2},
 Rattanaporn Sengkhim^{1,2}, Thanyapat Chamnina^{1,2}, Muhammad Heembo^{1,2} and Sutinee Sinutok^{1,2}

¹คณะกรรมการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จังหวัดสงขลา 90110 ประเทศไทย

²ศูนย์วิจัยสมุทรศาสตร์ชายฝั่งและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จังหวัดสงขลา 90110 ประเทศไทย

¹Faculty of Environmental Management, Prince of Songkla University, Songkhla Province, 90110, Thailand

²Coastal Oceanography and Climate Change Research Center, Prince of Songkla University, Songkhla Province, 90110, Thailand

*Corresponding author: Palida Arlee, e-mail address: 6410210777@psu.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบร้อยละการปกคลุมของอีพีไบโอตาบนใบหญ้าทะเลระหว่างพื้นที่ศึกษา และวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยสิ่งแวดล้อมกับระดับการปกคลุมของอีพีไบโอตาในระบบนิเวศหญ้าทะเลบริเวณทะเลอันดามันตอนบน ประเทศไทย การศึกษาในครั้งนี้ดำเนินการสำรวจภาคสนามในสองพื้นที่ ได้แก่ เกาะพระทอง จังหวัดพังงา และอ่าวตังเซ็น จังหวัดภูเก็ต โดยทำการสุ่มวางกรอบตัวอย่างขนาด 25 × 25 เซนติเมตร พื้นที่ละ 6 ซ้ำ เพื่อประเมินร้อยละการปกคลุมของอีพีไบโอตาบนใบหญ้าทะเล พร้อมทั้งตรวจวัดปัจจัยคุณภาพน้ำ ได้แก่ อุณหภูมิ ความเค็ม ค่า pH ความเข้มข้นของไนเตรต ฟอสเฟต ข้อมูลที่ได้ถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างพื้นที่ศึกษาและประเมินความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสิ่งแวดล้อมกับระดับการปกคลุมของอีพีไบโอตา ผลการศึกษาพบว่าร้อยละการปกคลุมของอีพีไบโอตามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างพื้นที่ศึกษา ($p < 0.05$) โดยบริเวณเกาะพระทองมีค่าเฉลี่ยของการปกคลุมสูงที่สุด ($67 \pm 6\%$) ในขณะที่อ่าวตังเซ็นมีค่าเฉลี่ยต่ำที่สุด ($25 \pm 3\%$) ดัชนีความหลากหลายแสดงแนวโน้มในทิศทางตรงกันข้ามโดยอ่าวตังเซ็นมีความหลากหลายเฉลี่ยสูง (1.0 ± 0.2) เมื่อเทียบกับเกาะพระทอง (0.7 ± 0.1) สะท้อนให้เห็นว่าพื้นที่ที่มีความอุดมสมบูรณ์ของสารอาหารสูงอาจเอื้อต่อการเจริญของอีพีไบโอตาบางชนิดเป็นหลัก ในขณะที่ปัจจัยด้านอุณหภูมิ ความเค็ม และค่า pH ไม่พบความสัมพันธ์ที่ชัดเจนกับระดับการปกคลุมของอีพีไบโอตา ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าอีพีไบโอตาบนใบหญ้าทะเลสามารถใช้เป็นตัวชี้วัดทางชีวภาพในการติดตามการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมได้ในระยะยาว

คำสำคัญ: ระบบนิเวศหญ้าทะเล, ร้อยละการปกคลุมของอีพีไบโอตา, ตัวชี้วัดทางชีวภาพ, การเพิ่มขึ้นของธาตุอาหาร, ปัจจัยสิ่งแวดล้อม

Abstract

This study aimed to compare the percentage cover of epibiota on seagrass leaves between study sites and to examine the relationships between environmental factors and epibiota cover in seagrass ecosystems along the upper Andaman Sea, Thailand. Field surveys were conducted at two locations: Koh Phra Thong, Phang Nga Province, and Ao Tang Khen, Phuket Province. At each site, six replicate quadrats (25 × 25 cm) were randomly placed to estimate the percentage cover of epibiota on seagrass leaves. In addition, water quality parameters, including temperature, salinity, pH, nitrate, and phosphate concentrations, were measured. The collected data were analyzed to compare differences between sites and to assess the relationships between environmental variables and epibiota cover. The results showed that epibiota cover differed significantly between the study sites ($p < 0.05$), with the highest mean cover recorded at Koh Phra Thong ($67 \pm 6\%$) and the lowest at Ao Tang Khen ($25 \pm 3\%$). In contrast, the diversity index exhibited an opposite trend, with Ao Tang Khen showing a higher mean diversity value (1.0 ± 0.2) compared to Koh Phra Thong (0.7 ± 0.1). These findings suggest that areas with higher nutrient availability may favor the dominance of certain epibiota taxa, leading to increased cover but reduced diversity. Meanwhile, temperature, salinity, and pH showed no clear relationships with epibiota cover. This study highlights the potential of epibiota on seagrass leaves as bioindicators for long-term monitoring of environmental changes in coastal ecosystems.

Keywords: Seagrass ecosystem, Epibiota cover, Bioindicator, Nutrient enrichment, Environmental factors

1. บทนำ

ระบบนิเวศหญ้าทะเลเป็นหนึ่งในระบบนิเวศชายฝั่งที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อความหลากหลายทางชีวภาพ การรักษาสมดุลของระบบนิเวศ และการกักเก็บคาร์บอนในระดับโลก หญ้าทะเลทำหน้าที่เป็นแหล่งอนุบาลสัตว์น้ำ แหล่งอาหารของสิ่งมีชีวิตหลายชนิด และมีบทบาทสำคัญในการสะสมคาร์บอนสีน้ำเงิน (blue carbon) ซึ่งช่วยบรรเทาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ [1, 16] อย่างไรก็ตาม รายงานระดับโลกชี้ให้เห็นว่าพื้นที่หญ้าทะเลกำลังลดลงอย่างต่อเนื่องจากแรงกดดันของกิจกรรมมนุษย์และการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ [21] การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ น้ำไหลบ่าจากแผ่นดิน และภาวะยูโทรฟิเคชันส่งผลกระทบโดยตรงต่อโครงสร้างและหน้าที่ของระบบนิเวศดังกล่าว [11] หนึ่งในองค์ประกอบสำคัญของระบบนิเวศหญ้าทะเลคือ “อีพีไบโอตา” (epibiota) ซึ่งหมายถึงสิ่งมีชีวิตที่อาศัยยึดเกาะบนผิวใบหรือส่วนต่างๆ ของหญ้าทะเล เช่น สาหร่ายสีเขียว สาหร่ายสีแดงและสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง กลุ่มไฮโดรซัว อีพีไบโอตามีบทบาททั้งในเชิงบวกและเชิงลบต่อพืชเจ้าบ้าน โดยสามารถเพิ่มความซับซ้อนของถิ่นอาศัยและเป็นแหล่งอาหารให้สัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังขนาดเล็ก [7] แต่ในขณะเดียวกัน หากมีการสะสมมากเกินไปจะลดการส่องผ่านของแสงและประสิทธิภาพในการสังเคราะห์ด้วยแสงของหญ้าทะเล [12, 19] การเพิ่มขึ้นของสารอาหารในน้ำ โดยเฉพาะไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ถูกระบุว่าเป็นปัจจัยสำคัญที่กระตุ้นการเจริญของสาหร่ายอิงอาศัย [14, 15] ซึ่งอาจนำไปสู่การเสื่อมโทรมของแหล่งหญ้าทะเลในระยะยาว งานวิจัยก่อนหน้าส่วนใหญ่ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสารอาหารกับชีวมวลของอีพีไบโอตา หรือผลกระทบต่อประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงของหญ้าทะเล [8, 12] ขณะที่การศึกษาความหลากหลายเชิงชนิดและความชุกชุมของอีพีไบโอตาในบริบทของปัจจัยสิ่งแวดล้อมหลายตัวแปรยังมีค่อนข้างจำกัด โดยเฉพาะในพื้นที่ชายฝั่งทะเลอันดามันของประเทศไทย แม้ว่าพื้นที่ดังกล่าวจะมีความสำคัญด้านทรัพยากรหญ้าทะเลในระดับประเทศก็ตาม [22, 23] การทำความเข้าใจโครงสร้างประชาคมอีพีไบโอตาและความสัมพันธ์กับปัจจัยสิ่งแวดล้อมจึงมีความสำคัญต่อการใช้เป็นตัวชี้วัดทางชีวภาพ (bioindicator) สำหรับประเมินสถานะคุณภาพสิ่งแวดล้อมของแหล่งหญ้าทะเล ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาร้อยละการปกคลุมและความชุกชุมของอีพีไบโอตาบนหญ้าทะเลในพื้นที่ศึกษา เพื่อเปรียบเทียบโครงสร้างประชาคมระหว่างสถานีเก็บตัวอย่าง และเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบประชาคมอีพีไบโอตากับปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ เช่น สารอาหารในน้ำ ความเค็ม และอุณหภูมิ เพื่อประเมินศักยภาพของอีพีไบโอตาในการใช้เป็นตัวบ่งชี้สถานะการเปลี่ยนแปลงของระบบนิเวศหญ้าทะเลในพื้นที่ชายฝั่งอันดามันตอนบนของประเทศไทย

2. วิธีการศึกษา

การศึกษานี้เป็นการวิจัยภาคสนามเพื่อสำรวจร้อยละการปกคลุมและความชุกชุมของอีพีไบโอตาบนหญ้าทะเล และวิเคราะห์ความสัมพันธ์กับปัจจัยสิ่งแวดล้อมในพื้นที่ชายฝั่งทะเลอันดามันตอนบน ประเทศไทย ดำเนินการเก็บตัวอย่างในช่วงเดือนมกราคมถึงเดือนกุมภาพันธ์ ปี พ.ศ. 2568 โดยกำหนดสถานีศึกษา ครอบคลุมสองพื้นที่ คือ เกาะพระทอง (พังงา) และอ่าวดังเขิน (ภูเก็ต) โดยเก็บข้อมูลในช่วงฤดูกลางเดียวกัน (Figure 1) ซึ่งแสดงตำแหน่งของพื้นที่ศึกษาเพื่อเปรียบเทียบร้อยละการปกคลุมและความชุกชุมของอีพีไบโอตา ซึ่งมีลักษณะการใช้ประโยชน์ชายฝั่งแตกต่างกัน รวมทั้งศึกษาความสัมพันธ์กับปัจจัยสิ่งแวดล้อม เพื่อเปรียบเทียบโครงสร้างประชาคมอีพีไบโอตาและคุณภาพสิ่งแวดล้อมระหว่างพื้นที่

2.1 พื้นที่ศึกษาและการออกแบบการเก็บตัวอย่าง

กำหนดสถานีเก็บตัวอย่างจำนวนสองพื้นที่ ที่มีความแตกต่างทางกายภาพ และความอุดมสมบูรณ์ของหญ้าทะเลภายในแหล่งหญ้าทะเลแตกต่างกัน โดยหญ้าทะเลที่พบชนิดหลัก ได้แก่ *Halophila ovalis* และ *Cymodocea serrulata* โดยทำการสุ่มเก็บตัวอย่างจากชนิดหญ้าทะเลที่พบในพื้นที่ศึกษา โดยในแต่ละพื้นที่วางแปลงตัวอย่าง (Quadrat) ขนาด 25 × 25 เซนติเมตร 6 จุดต่อชนิดหญ้าทะเลในช่วงน้ำล้น โดยพบว่าร้อยละการปกคลุมอยู่ในช่วงประมาณ 50–80% และเก็บตัวอย่างหญ้าทะเลที่มีอีพีไบโอตาจำนวน 3 ตัวอย่างต่อแปลงตัวอย่างไว้ในขวดเก็บตัวอย่างที่มีฟอรัลลินความเข้มข้นร้อยละ 4 เพื่อนำไปจำแนกชนิดในห้องปฏิบัติการ รวมถึงเก็บข้อมูลคุณภาพน้ำ (อุณหภูมิ (°C), ความเค็ม (psu), pH) และตัวอย่างน้ำเพื่อตรวจวิเคราะห์ไนเตรต ฟอสเฟต และแอมโมเนีย

2.2 การวิเคราะห์อีพีไบโอตา

ในห้องปฏิบัติการ เลือกใบหญ้าทะเลที่ใช้วิเคราะห์ตัวอย่างสิ่งมีชีวิตแบบสุ่มมาส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ และคอมพิวเตอร์ คำนวณร้อยละพื้นที่การปกคลุมของอีพีไบโอตาพร้อมบันทึกภาพประกอบและจำแนกชนิดตัวอย่างสิ่งมีชีวิตเพื่อระบุชนิดในการรายงานการวิเคราะห์ตัวอย่าง โดยใช้หนังสือคู่มือ BRT Book Series, Area-Based No.11 SEAWEEDS OF MU KO THA LAE TAI (SE Thailand) Methodologies and field guide to the dominant species

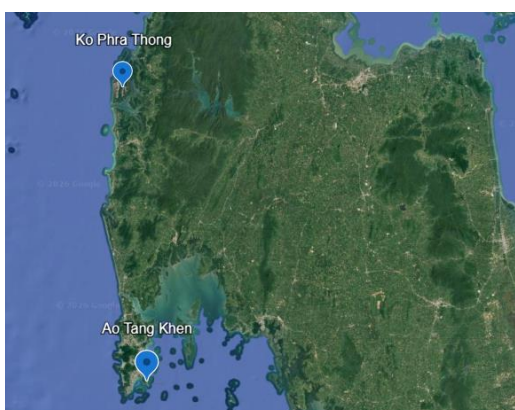


Figure 1 Map of the study sites, Koh Phra Thong and Ao Tang Khen, showing sampling locations along the Andaman Sea coast of Thailand.

2.3 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติใช้ One-way ANOVA ก่อนการวิเคราะห์ได้ทำการทดสอบการกระจายตัวแบบปกติ (normality) และความแปรปรวนเท่ากัน (homogeneity of variance) โดยใช้โปรแกรม R ในการวิเคราะห์ นอกจากนี้จะวิเคราะห์ดัชนีความหลากหลาย (Shannon Diversity Index) และวิเคราะห์ความสัมพันธ์ด้วย Pearson correlation ในแต่ละพื้นที่

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ร้อยละการปกคลุมและความชุกชุมของอีพีไบโอตัว

ผลการศึกษาพบว่า ร้อยละการปกคลุมของอีพีไบโอตัวมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญระหว่างพื้นที่ศึกษา ($p < 0.05$) (Figure 2) โดยบริเวณเกาะพระทองมีการปกคลุมเฉลี่ยเท่ากับประมาณ $67 \pm 6\%$ เป็นอีพีไบโอตัวกลุ่มสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง (ไฮโดรซัว) ในขณะที่อ่าวตังเซ็นมีค่าเฉลี่ยประมาณ $25 \pm 3\%$ เป็นอีพีไบโอตัวกลุ่มสาหร่ายสีเขียวและสาหร่ายสีแดง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของระดับความชุกชุมของอีพีไบโอตัวอย่างชัดเจนระหว่างสองพื้นที่ศึกษา อย่างไรก็ตาม ค่าดัชนีความหลากหลายชนิด (Shannon Diversity Index) แสดงแนวโน้มในทิศทางตรงกันข้าม (Figure 3) โดยอ่าวตังเซ็นมีความหลากหลายเฉลี่ยสูงกว่าประมาณ 1.0 ± 0.2 เมื่อเทียบกับเกาะพระทองที่มีค่าเฉลี่ยประมาณ 0.7 ± 0.1 สะท้อนให้เห็นว่าพื้นที่ที่มีความอุดมสมบูรณ์ของสารอาหารสูงอาจเอื้อต่อการเจริญของอีพีไบโอตัวบางชนิดเป็นหลัก ส่งผลให้เกิดการครอบงำของชนิด (species dominance) และทำให้ค่าความหลากหลายลดลง [14, 15] อย่างไรก็ตาม หากปริมาณอีพีไบโอตัวสูงเกินไปอาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงของหญ้าทะเล โดยลดการส่องผ่านของแสง [12, 19] ซึ่งอาจเป็นกลไกหนึ่งที่ทำให้พื้นที่ที่มีสารอาหารสะสมสูงมีความเสี่ยงต่อการเสื่อมโทรมในระยะยาว

3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอีพีไบโอตัวกับปัจจัยสิ่งแวดล้อม

การวิเคราะห์คุณภาพน้ำแสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของไนเตรตมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับร้อยละการปกคลุมของอีพีไบโอตัว (Table 2) ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดที่ว่า การเพิ่มขึ้นของธาตุอาหาร โดยเฉพาะไนโตรเจน สามารถกระตุ้นการเจริญเติบโตของสาหร่ายอิงอาศัยบนใบหญ้าทะเล ส่งผลให้เกิดการสะสมของอีพีไบโอตัวมากขึ้นในพื้นที่ที่มีการสะสมสารอาหารสูง [14, 15] กลไกดังกล่าวเกี่ยวข้องกับการเพิ่มอัตราการแบ่งเซลล์และการสังเคราะห์ด้วยแสงของสาหร่ายอิงอาศัยเมื่อมีธาตุอาหารเพียงพอ ทำให้พื้นที่ผิวของใบหญ้าทะเลถูกปกคลุมโดยสิ่งมีชีวิตอิงอาศัยเพิ่มขึ้น (Table 1)

ในทางตรงกันข้าม ฟอสเฟตและแอมโมเนียแสดงความสัมพันธ์เชิงลบกับร้อยละการปกคลุมของอีพีไบโอตัว (Table 2) ผลลัพธ์ดังกล่าวอาจสะท้อนถึงการใช้อาหารอย่างรวดเร็วโดยประชาคมสาหร่ายอิงอาศัยในบริเวณที่มีการเจริญเติบโตสูง ซึ่งทำให้ความเข้มข้นของธาตุอาหารในคอลัมน์น้ำลดลงในช่วงเวลาที่มีการเก็บตัวอย่าง นอกจากนี้ อีพีไบโอตัวยังมีบทบาทสำคัญในกระบวนการหมุนเวียนธาตุอาหารภายในระบบนิเวศหญ้าทะเล โดยสามารถดูดซับและกักเก็บธาตุอาหารไว้ในชีวมวลของตนเอง ส่งผลให้ความเข้มข้นของธาตุอาหารที่วัดได้ในน้ำลดลง [13, 15] ผลการศึกษานี้สนับสนุนแนวคิดที่ว่า โครงสร้างประชาคม

อีพีไบโอไตมีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับพลวัตของธาตุอาหาร และสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้การเพิ่มขึ้นของสารอาหารในระบบนิเวศชายฝั่งได้

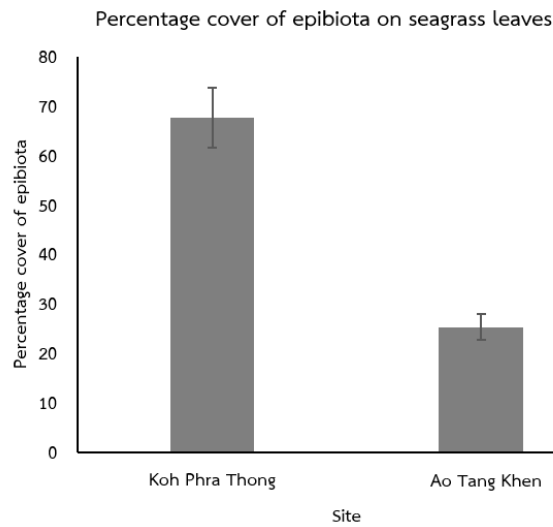


Figure 2 Percentage cover of epibiota on seagrass leaves at the study sites. Values are presented as mean \pm standard error (SE), n = 6.

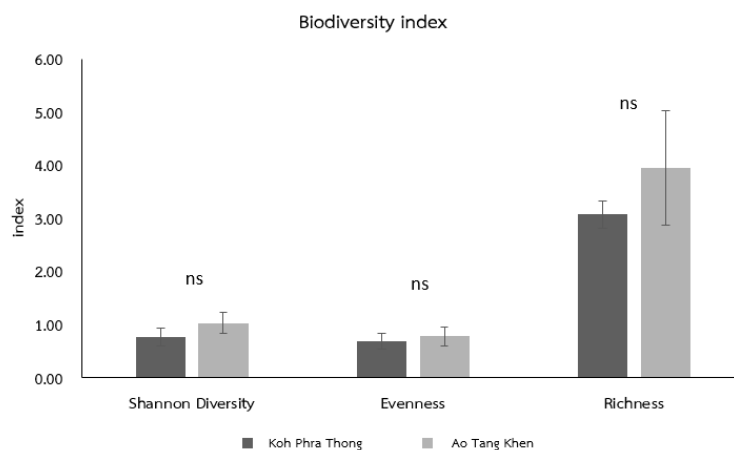


Figure 3 Shannon diversity index of epibiota communities on seagrass leaves at the study sites. Values are presented as mean \pm SE (n = 6). ns indicates no significant difference ($p > 0.05$).

Table 1 Mean water quality parameters in each study area.

Site	pH	Salinity (psu)	Temperature (°C)	Nitrate (mg/L)	Phosphate (mg/L)	Ammonia (mg/L)
Koh Phra Thong	8.79 \pm 0.02	31.48 \pm 0.07	28.52 \pm 0.15	5.02 \pm 0.06	<0.01	0.13 \pm 0.00
Ao Tang Khen	8.18 \pm 0.02	28.52 \pm 0.09	31.56 \pm 0.05	0.73 \pm 0.09	<0.01	0.28 \pm 0.03

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยคุณภาพน้ำ ได้แก่ ไนเตรต (Nitrate) ฟอสเฟต (Phosphate) และแอมโมเนีย (Ammonia) กับร้อยละการปกคลุมของอีพีไบโอไต (% Epibiota cover) ในพื้นที่ศึกษา 2 แห่ง ได้แก่ เกาะพระทอง และอ่าวตังเซ็น พบแนวโน้มความสัมพันธ์ที่แตกต่างกันในแต่ละพารามิเตอร์ ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของไนเตรตมีแนวโน้มความสัมพันธ์เชิงบวกกับร้อยละการปกคลุมของอีพีไบโอไต โดยพื้นที่เกาะพระทองซึ่งมีค่าไนเตรตสูง (5.02 mg/L)

มีร้อยละการปกคลุมของอีพีไบโอตัวสูง (67%) ในขณะที่อ่าวตังเซ็นซึ่งมีค่าไนเตรดต่ำกว่า (0.73 mg/L) มีร้อยละการปกคลุมของอีพีไบโอตัวต่ำกว่า (25%) ในทางตรงกันข้าม แอมโมเนียแสดงแนวโน้มความสัมพันธ์เชิงลบกับร้อยละการปกคลุมของอีพีไบโอตัว โดยอ่าวตังเซ็นซึ่งมีค่าแอมโมเนียสูงกว่า (0.28 mg/L) กลับมีร้อยละการปกคลุมของอีพีไบโอตัวต่ำกว่า เมื่อเทียบกับเกาะพระทองที่มีค่าแอมโมเนียต่ำกว่า (0.13 mg/L) แต่มีการปกคลุมของอีพีไบโอตัวสูงกว่า สำหรับฟอสเฟต พบว่าค่าความเข้มข้นในทั้งสองพื้นที่มีค่าใกล้เคียงกันมาก (น้อยกว่า 0.01 mg/L) ส่งผลให้ไม่สามารถแสดงแนวโน้มความสัมพันธ์ที่ชัดเจนระหว่างฟอสเฟตและร้อยละการปกคลุมของอีพีไบโอตัวได้

Table 2 Relationship Trend between Epibiota Cover and Water Quality Parameters

Variable	Relationship trend
Nitrate	Positive
Phosphate	Negative
Ammonia	Negative

4. สรุป

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาร้อยละการปกคลุมและความชุกชุมของอีพีไบโอตัวบนใบหญ้าทะเล เปรียบเทียบโครงสร้างประชาคมระหว่างพื้นที่ศึกษา และวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอีพีไบโอตัวกับปัจจัยสิ่งแวดล้อมในบริเวณทะเลอันดามันตอนบน ประเทศไทย ผลการศึกษาพบว่า ร้อยละการปกคลุมและค่าดัชนีความหลากหลายของอีพีไบโอตัวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญระหว่างพื้นที่ศึกษา โดยพื้นที่ที่มีความเข้มข้นของธาตุอาหารสูงมีแนวโน้มพบร้อยละการปกคลุมของอีพีไบโอตัวมากกว่า แต่มีค่าดัชนีความหลากหลายต่ำกว่า ซึ่งสะท้อนถึงการครอบงำของชนิด (species dominance) ในสภาพแวดล้อมที่มีสารอาหารสูง ในทางตรงกันข้าม พื้นที่ที่มีระดับการปกคลุมน้อยกว่ามีแนวโน้มพบความหลากหลายของชนิดสูงกว่า นอกจากนี้ การวิเคราะห์ความสัมพันธ์เพียร์สันแสดงให้เห็นว่าไนเตรดเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อระดับการปกคลุมของอีพีไบโอตัว ขณะที่ อุณหภูมิ ความเค็ม และค่า pH ไม่มีความสัมพันธ์เด่นชัด ผลการศึกษาสามารถอธิบายรูปแบบความแตกต่างของประชาคมอีพีไบโอตัวในแต่ละพื้นที่ และยืนยันความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบ ประชาคมกับปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับภาวะยูโทรฟิเคชันได้อย่างชัดเจน ทั้งนี้ อีพีไบโอตัวมีศักยภาพในการใช้เป็นตัวบ่งชี้ทางชีวภาพสำหรับประเมินสภาพคุณภาพสิ่งแวดล้อมของแหล่งหญ้าทะเล ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการติดตามสถานภาพทรัพยากรชายฝั่งและการวางแผนจัดการอย่างยั่งยืนในอนาคต นอกจากนี้ ความแตกต่างของชนิดหญ้าทะเล เช่น *Halophila ovalis* ซึ่งมีใบขนาดเล็กและบาง และ *Cymodocea serrulata* ซึ่งมีใบยาวและหนากว่า อาจมีผลต่อพื้นที่ผิวและความสามารถในการรองรับการเกาะของอีพีไบโอตัว ส่งผลต่อโครงสร้างประชาคมที่พบในแต่ละพื้นที่ศึกษา

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และคณาจารย์สาขาการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้คำแนะนำทางวิชาการอันเป็นประโยชน์ตลอดระยะเวลาการดำเนินงานวิจัย ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาคสนามและผู้ช่วยวิจัยทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในการเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์ข้อมูล ตลอดจนชุมชนในพื้นที่ศึกษาที่อำนวยความสะดวกในการเข้าพื้นที่

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยและการสนับสนุนเครื่องมือวิทยาศาสตร์จากศูนย์วิจัยสมุทรศาสตร์ชายฝั่งและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และได้รับงบประมาณอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (กองทุนส่งเสริม ววน.) และมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ คำรับรองเลขที่ ENV6801379S ผู้วิจัยขอขอบพระคุณทุกหน่วยงานที่เกี่ยวข้องที่มีส่วนช่วยให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Alongi, D. M. (2018). Blue carbon: Coastal sequestration for climate change mitigation. Springer.

-
- [2] Baker, N. R. (2008). Chlorophyll fluorescence: A probe of photosynthesis in vivo. *Annual Review of Plant Biology*, 59, 89–113.
- [3] Ballesteros, E. (1992). Marine benthic vegetation of the Mediterranean: Some ecological and biogeographical considerations. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*, 30, 23–88.
- [4] Borowitzka, M. A., & Lethbridge, R. C. (1989). Seagrass epiphytes. In A. W. D. Larkum, A. J. McComb, & S. A. Shepherd (Eds.), *Biology of seagrasses* (pp. 458–499). Elsevier.
- [5] Brodersen, K. E., et al. (2015). Seagrass-mediated oxygen and pH dynamics in relation to epiphyte presence. *Marine Biology*, 162, 201–211.
- [6] Cebrián, J., Enriquez, S., Fortes, M., Agawin, N., Vermaat, J. E., & Duarte, C. M. (1999). Epiphyte accrual on *Posidonia oceanica* leaves: Implications for light absorption. *Botanica Marina*, 42, 123–128.
- [7] Chen, Y. Y., Edgar, G. J., & Fox, R. J. (2021). The nature and ecological significance of epifaunal communities within marine ecosystems. *Oceanography and Marine Biology*, 59, 585–719.
- [8] Cornelisen, C. D., & Thomas, F. I. M. (2002). Ammonium and nitrate uptake by leaves of the seagrass *Thalassia testudinum*. *Marine Ecology Progress Series*, 236, 93–103.
- [9] Cui, L., Jiang, Z., Huang, X., Chen, Q., Wu, Y., Liu, S., Li, J., & Macreadie, P. I. (2021). Eutrophication reduces seagrass contribution to coastal food webs. *Ecosphere*, 12(6).
- [10] Denny, M., Gaylord, B., & Helmuth, B. (2016). Physical limits to biological performance: The role of temperature in the distribution of marine organisms. *Annual Review of Marine Science*, 8, 159–182.
- [11] Doney, S. C., et al. (2012). Climate change impacts on marine ecosystems. *Annual Review of Marine Science*, 4, 11–37.
- [12] Drake, L. A., Dobbs, F. C., & Zimmerman, R. C. (2003). Effects of epiphyte load on optical properties and photosynthetic potential of seagrasses. *Limnology and Oceanography*, 48(1), 456–463.
- [13] Duarte, C. M. (1990). Seagrass nutrient content. *Marine Ecology Progress Series*, 67, 201–207.
- [14] Duarte, C. M. (1995). Submerged aquatic vegetation in relation to different nutrient regimes. *Ophelia*, 41(1), 87–112.
- [15] Fourqurean, J. W., & Zieman, J. C. (2002). Nutrient content of the seagrass *Thalassia testudinum*: Seasonal variation and evidence for nutrient limitation. *Marine Biology*, 140(4), 1157–1164.
- [16] Fourqurean, J. W., et al. (2012). Seagrass ecosystems as a globally significant carbon stock. *Nature Geoscience*, 5(7), 505–509.
- [17] Prado, P., et al. (2007). Macrograzers strongly influence patterns of epiphytic assemblages in seagrass meadows. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 350(1–2), 130–143.
- [18] Rodríguez, R. A., & Figueroa, F. L. (2018). Effect of light and pH changes on the growth of epiphytic algae and associated epibiota on seagrass blades. *Marine Ecology Progress Series*, 601, 23–32.
- [19] Sand-Jensen, K. (1977). Effects of epiphytes on eelgrass photosynthesis. *Aquatic Botany*, 3, 55–63.
- [20] Short, F. T. (1987). Effects of sediment nutrients on seagrasses: Literature review and mesocosm experiments. *Aquatic Botany*, 27(1), 41–57.
- [21] Waycott, M., et al. (2009). Accelerating loss of seagrasses across the globe threatens coastal ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(30), 12377–12381.
- [22] กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง. (2563ก). รายงานการสำรวจและประเมินสถานภาพทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง ปะการังและหญ้าทะเล ปีงบประมาณ 2564. สืบค้นจาก <https://www.dmcr.go.th/detailLib/7910>
- [23] กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง. (2563ข). แผนที่หญ้าทะเล ปี 2563. สืบค้นจาก <https://www.dmcr.go.th/detailLib/6012>
- [24] กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง. (2566). แผนที่ออนไลน์ทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง. ศูนย์ข้อมูลภูมิสารสนเทศทางทะเลและชายฝั่ง.
-

การพัฒนากระบวนการสกัดเส้นใยอาหารเฮมิเซลลูโลสจากเศษเหลือตรีผลา
 การพิสูจน์เอกลักษณ์ทางเคมีกายภาพเพื่อการประยุกต์ใช้เป็นพรีไบโอติก

Development of Hemicellulosic Dietary Fiber Extraction from Triphala Residues and
 Physicochemical Characterization for Prebiotic Use

กมลชนก ผาดจันท์ก¹ สมชาย หลวงสนาม² สุกัญญา มิ่งใหญ่³ พิมพิกา กาญจนคำเก็ง⁴ อาณัฐชัย ม้ายอุเทศ^{5,6}
 และ ภัทรวิทย์ รักษ์ทอง^{2,7,*}

Kamolchanok Padjuntuk¹, Somchai Luangsanam², Sukanya Mingyui³, Pimpika Kanchanadumkerng⁴, Arnatchai Maiuthed^{5,6}
 and Pattarawit Rukthong^{2,7,*}

¹คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ จังหวัดนครนายก 26120 ประเทศไทย

²สาขาวิชาเทคโนโลยีเภสัชกรรม มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ จังหวัดนครนายก 26120 ประเทศไทย

³ศูนย์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมเกษตร คณะเทคโนโลยีและนวัตกรรมผลิตภัณฑ์การเกษตร มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ จังหวัดนครนายก 26120 ประเทศไทย

⁴ภาควิชาอาหารเคมี คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10400 ประเทศไทย

⁵ภาควิชาเภสัชวิทยา คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10400 ประเทศไทย

⁶ศูนย์ชีวเภสัชศาสตร์เพื่อสุขภาพวัยชรา คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10400 ประเทศไทย

⁷ศูนย์เพื่อความเป็นเลิศทางวิจัยด้านนวัตกรรมพืชและสมุนไพร สถาบันยุทธศาสตร์ทางปัญญาและวิจัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10110 ประเทศไทย

¹Faculty of Pharmacy, Srinakharinwirot University, Nakhon Nayok Province, 26120, Thailand.

²Department of Pharmaceutical Technology, Faculty of Pharmacy, Srinakharinwirot University, Nakhon Nayok Province, 26120, Thailand.

³Agricultural and Industrial Research and Development Center, Faculty of Agricultural Product Innovation and Technology, Srinakharinwirot University, Nakhon Nayok Province, 26120, Thailand.

⁴Department of Food Chemistry, Faculty of Pharmacy, Mahidol University, Bangkok, 10400, Thailand.

⁵Department of Pharmacology, Faculty of Pharmacy, Mahidol University, Bangkok, 10400, Thailand.

⁶Centre of Biopharmaceutical Science for Healthy Ageing, Faculty of Pharmacy, Mahidol University, Bangkok, 10400, Thailand.

⁷Center for Excellence in Plant and Herbal Innovation Research, Strategic Wisdom and Research Institute,

Srinakharinwirot University, Bangkok, 10110, Thailand.

* Corresponding author: Pattarawit Rukthong, e-mail address: pattarawit@g.swu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการสกัดเฮมิเซลลูโลสจากเศษเหลือในระบบการสกัดสารสำคัญตรีผลาด้วยวิธีสารละลายด่าง (Alkaline extraction) ในระดับกึ่งอุตสาหกรรม และประเมินลักษณะโครงสร้างทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี รวมถึงคุณสมบัติความเป็นพรีไบโอติกของเฮมิเซลลูโลสที่ได้ เศษเหลือในระบบการสกัดสารสำคัญตรีผลาสามารถสกัดได้ เฮมิเซลลูโลสร้อยละผลผลิตเท่ากับ 1.30 ± 0.25 ของน้ำหนักแห้ง โดยลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนจากกากใยหยาบ สีน้ำตาลเข้มเป็นผงละเอียดสีน้ำตาลอมเขียว การวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าเฮมิเซลลูโลสที่สกัดได้มีโครงสร้างเป็นอสัณฐาน พื้นผิวขรุขระและไม่สม่ำเสมอ ขณะที่การวิเคราะห์ฟังก์ชันด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR) พบพีคสำคัญของพอลิแซ็กคาไรด์บริเวณ $3,402$, $2,851$ และ $1,029 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งยืนยันว่าเฮมิเซลลูโลสที่สกัดได้มีไซแลนเป็นองค์ประกอบหลัก แต่ยังมีพบลินินปนเปื้อนบางส่วน นอกจากนี้ การประเมินสมบัติพรีไบโอติกพบว่าเฮมิเซลลูโลสสามารถส่งเสริมการเจริญของจุลินทรีย์โพรไบโอติก *Lactobacillus plantarum* และ *Bifidobacterium adolescentis* โดยจำนวนเซลล์เพิ่มขึ้น 1.78 ± 0.16 และ $1.97 \pm 1.07 \Delta \log \text{CFU/mL}$ ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเฮมิเซลลูโลสจากเศษเหลือในระบบการสกัดสารสำคัญหรือจากการสกัดสมุนไพรตรีผลามีศักยภาพในการพัฒนาเป็นสารพรีไบโอติกจากวัสดุเหลือใช้สมุนไพร

คำสำคัญ: เฮมิเซลลูโลส, เศษเหลือในระบบการสกัดสารสำคัญ, การสกัดด้วยสารละลายด่าง, สมบัติพรีไบโอติก, ตรีผลา

Abstract

This study aimed to extract hemicellulose from residues generated during the extraction of bioactive compounds from Triphala using an alkaline extraction method at a semi-industrial scale, and to evaluate the physical structure, chemical characteristics, and prebiotic properties of the extracted hemicellulose. The extraction process yielded hemicellulose with a percentage yield of $1.30 \pm 0.25\%$ on a dry weight basis. The physical appearance of the material changed from coarse dark-brown fibrous residues to a fine greenish-brown powder. Scanning electron microscopy (SEM) analysis revealed that the extracted hemicellulose exhibited an amorphous structure with a rough and irregular surface morphology. Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) analysis showed characteristic polysaccharide absorption peaks at $3,402$, $2,851$, and $1,029 \text{ cm}^{-1}$, confirming that the extracted hemicellulose mainly consisted of xylan, although minor lignin residues were still detected. Furthermore, the prebiotic activity evaluation demonstrated that the extracted hemicellulose promoted the

growth of probiotic bacteria, namely *Lactobacillus plantarum* and *Bifidobacterium adolescentis*, with increases of 1.78 ± 0.16 and $1.97 \pm 1.07 \Delta \log \text{CFU/mL}$, respectively. These results suggest that hemicellulose derived from residues of the Triphala extraction process has potential as a prebiotic ingredient from herbal by-products.

Keywords: hemicellulose, bioactive compound extraction residues, alkaline extraction, prebiotic activity, Triphala

1. บทนำ

ใยอาหาร (dietary fiber) เป็นองค์ประกอบสำคัญของอาหารที่มีบทบาทต่อการส่งเสริมสุขภาพและการป้องกันโรคไม่ติดต่อเรื้อรัง โดยเฉพาะโรคที่เกี่ยวข้องกับระบบทางเดินอาหารและเมตาบอลิซึม โดยทั่วไปใยอาหาร หมายถึง พอลิเมอร์ของคาร์โบไฮเดรตที่มีหน่วยโมโนเมอร์ตั้งแต่ 10 หน่วยขึ้นไป ซึ่งไม่ถูกย่อยโดยเอนไซม์ในลำไส้เล็กของมนุษย์ และอาจเป็นสารที่มีอยู่ตามธรรมชาติในอาหาร สารที่ได้จากการแปรรูปวัตถุดิบ หรือสารสังเคราะห์ โดยต้องมีผลทางสรีรวิทยาที่เป็นประโยชน์ต่อสุขภาพ [3, 5, 8] โดยเฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) เป็นหนึ่งในองค์ประกอบหลักของใยอาหารจากพืช พบมากในผนังเซลล์พืชรองจากเซลลูโลส ปัจจุบัน เฮมิเซลลูโลสได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นในอุตสาหกรรมอาหารและผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพ เนื่องจากมีสมบัติเชิงหน้าที่ (functional properties) ที่หลากหลาย เช่น ความสามารถในการอุ้มน้ำ การปรับปรุงเนื้อสัมผัสของอาหาร และการทำหน้าที่เป็นแหล่งตั้งต้นสำหรับการผลิตสารพรีไบโอติก เนื่องจากสามารถถูกย่อยให้เป็นโอลิโกแซ็กคาไรด์ เช่น ไซโลโอลิโกแซ็กคาไรด์ (XOS) ซึ่งมีรายงานว่าสามารถส่งเสริมการเจริญของจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ได้ [1]

จุลินทรีย์ในลำไส้มีบทบาทสำคัญต่อสุขภาพของมนุษย์ โดยเฉพาะในผู้ที่มีความเสี่ยงต่อโรคเมตาบอลิซึม เช่น โรคอ้วนและโรคเบาหวานชนิดที่ 2 ซึ่งมักมีความสัมพันธ์กับภาวะเสียสมดุลของจุลินทรีย์ในลำไส้ (gut microbiota dysbiosis) โดยเฉพาะการลดลงของจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ในกลุ่ม *Bifidobacterium* และ *Lactobacillus* ซึ่งมีบทบาทต่อการควบคุมสมดุลของระบบเมตาบอลิซึมของร่างกาย มีรายงานว่า *Bifidobacterium adolescentis* สามารถช่วยลดภาวะอ้วนผ่านการปรับองค์ประกอบของจุลินทรีย์ในลำไส้และเมตาบอลิซึมของทริปโตเฟน (tryptophan) [13] ขณะที่ *Lactobacillus plantarum* มีรายงานว่าสามารถช่วยปรับปรุงการเผาผลาญกลูโคสและไขมันในผู้ป่วยเบาหวานชนิดที่ 2 และภาวะก่อนเบาหวาน [15] นอกจากนี้ ใยอาหารในกลุ่มเฮมิเซลลูโลสที่มีโครงสร้างเป็นไซแลน เช่น ไซโลโอลิโกแซ็กคาไรด์ (Xylooligosaccharides; XOS) ยังสามารถทำหน้าที่เป็นพรีไบโอติก โดยกระตุ้นการเจริญของแบคทีเรียในสกุล *Bifidobacterium* และส่งเสริมการผลิตกรดไขมันสายสั้น ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อสมดุลของจุลินทรีย์ในลำไส้และสุขภาพเมตาบอลิซึมของร่างกาย [1]

ตรีผลา (Triphala) เป็นตำรับสมุนไพรที่มีการใช้มาอย่างยาวนานทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศ ประกอบด้วยผลไม้สามชนิด ได้แก่ สมอไทย (*Terminalia chebula*), สมอพิเภก (*Terminalia bellirica*) และมะขามป้อม (*Phyllanthus emblica*) โดยในบริบทของการแพทย์แผนไทยถูกจัดอยู่ในตำรับยาแผนไทยแห่งชาติ ใช้เพื่อช่วยปรับสมดุลธาตุในร่างกาย ส่งเสริมการทำงานของระบบทางเดินอาหาร และเป็นยาระบายอ่อน ๆ ตามแนวคิดธาตุทั้งสี่ของการแพทย์แผนไทย โดยเฉพาะในกลุ่มผู้สูงอายุหรือผู้ที่มีปัญหาด้านการขับถ่าย [17] ในต่างประเทศตรีผลาถูกใช้เป็นตำรับยาสำคัญในระบบอายุรเวทของอินเดีย และได้รับความสนใจอย่างแพร่หลายในรูปแบบผลิตภัณฑ์เสริมอาหารและอาหารเพื่อสุขภาพ โดยมีรายงานการใช้เพื่อส่งเสริมสุขภาพทางเดินอาหาร การต้านอนุมูลอิสระ และการดูแลสุขภาพโดยรวม ปัจจุบันตรีผลาถูกนำไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์ในหลายประเทศ ซึ่งการแปรรูปตรีผลาในระดับอุตสาหกรรมทั้งในประเทศและต่างประเทศมักก่อให้เกิดเศษเหลือทิ้งในปริมาณมาก ซึ่งยังคงมีองค์ประกอบของผนังเซลล์พืชและพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีคุณค่าเหลืออยู่ [2]

มีรายงานที่เกี่ยวข้องใช้พอลิแซ็กคาไรด์จากมะขามป้อมเป็นแหล่งคาร์บอน จากรายงานของ Huang, Zhou [4] พบว่าพอลิแซ็กคาไรด์จากพืชในสกุล *Phyllanthus* สามารถส่งเสริมการเจริญของจุลินทรีย์ในกลุ่ม *Lactobacillus* ได้ โดยจุลินทรีย์สามารถใช้ประโยชน์จากผลิตภัณฑ์ย่อยของพอลิแซ็กคาไรด์เป็นแหล่งคาร์บอน โดยในงานวิจัยนี้พบว่าเศษเหลือตรีผลามีปริมาณใยอาหารทั้งหมด 73.21 g/100 g โดยส่วนใหญ่เป็นใยอาหารไม่ละลายน้ำ 70.98 g/100 g และใยอาหารละลายน้ำ 2.23 g/100 g ซึ่งสะท้อนการคงอยู่ของพอลิแซ็กคาไรด์ในผนังเซลล์พืช เช่น เฮมิเซลลูโลส

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการเพิ่มมูลค่าเศษเหลือในระบบการสกัดสารสำคัญตรีผลาตามแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสกัดเฮมิเซลลูโลสในระดับกึ่งอุตสาหกรรม พร้อมทั้งวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีกายภาพ (Physicochemical properties) และสมบัติเชิงหน้าที่ (Functional properties) ประเมินศักยภาพของเฮมิเซลลูโลสในการเป็นแหล่งพรีไบโอติกสำหรับสนับสนุนการเจริญของเชื้อพรีไบโอติกกลุ่ม *Lactobacillus* sp. และ *Bifidobacterium* sp. ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อการรักษาสมดุลจุลินทรีย์ในลำไส้และการส่งเสริมสุขภาพ

2. วิธีการศึกษา

2.1 การเตรียมวัตถุดิบก่อนสกัด

อบเศษเหลือจากการสกัดสารสำคัญตรีผลาที่ 60°C จนกระทั่งมีความชื้นไม่เกินร้อยละ 5 บดลดขนาดด้วยเครื่องบดสมุนไพรกำลังสูง (Powder Grinder) ขนาด 4,500 กรัม ได้เป็นเศษเหลือตรีผลาชนิดหยาบ กระบวนการดังกล่าวแสดงใน Figure 1 (Part 1)

2.2 การสกัดเฮมิเซลลูโลสด้วยสารละลายต่าง (ดัดแปลงจาก Zhong, Wang [16])

นำเศษเหลือตรีผลาที่บดเตรียมไว้มากำจัดลิกนินโดยแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้นร้อยละ 8 โดยใช้ตัวทำละลายเป็นเอทานอล (Ethanol) ความเข้มข้นร้อยละ 30 ในอัตราส่วนเศษเหลือตรีผลา 1 ส่วน ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4.4 ส่วน โดยใช้วัตถุดิบเริ่มต้น 5 กิโลกรัม ที่ไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 – 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 – 9 ชั่วโมง ล้างทำความสะอาดเศษด้วยน้ำกลั่นและปรับสภาพจนเป็นกลาง (pH≈7) กรองแยกส่วนด้วยผ้ากรองไนลอนหลายความถี่ ตั้งแต่ช่วง 40 – 500 เมช นำส่วนตะกอนบนตาข่าย 400 – 500 เมช อบแห้งที่อุณหภูมิ 60 – 80 องศาเซลเซียส จนความชื้นไม่เกินร้อยละ 5 กระบวนการดังกล่าวแสดงใน Figure 1 (Part 2)

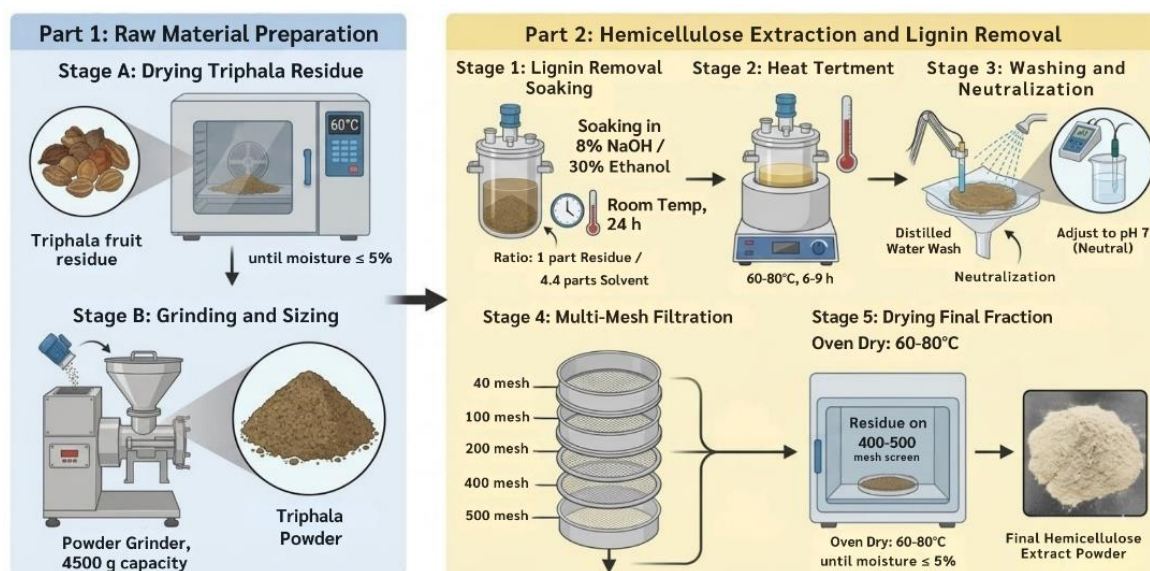


Figure 1 Experimental workflow for raw material preparation and hemicellulose extraction from Triphala residue.

2.3 การตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ

2.3.1 การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา (Scanning Electron Microscopy: SEM)

ศึกษาลักษณะโครงสร้างพื้นผิวและการจัดเรียงตัวของเส้นใยเฮมิเซลลูโลสด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยนำตัวอย่างที่แห้งสนิทมาติดลงบนแท่นวางตัวอย่าง (Stub) ด้วยเทปกาวนำไฟฟ้าและทำการเคลือบผิวด้วยทองคำ (Gold sputtering) เพื่อให้ตัวอย่างสามารถนำไฟฟ้าได้ จากนั้นนำเข้าเครื่องเพื่อถ่ายภาพลักษณะสัณฐานวิทยา โดยบันทึกภาพที่ กำลังขยาย 100 เท่า และ 1,000 เท่า เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบความเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผิวระหว่างตัวอย่างแต่ละชุด การทดลอง

2.3.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FTIR)

วิเคราะห์หาเอกลักษณ์ของหมู่ฟังก์ชันทางเคมีที่เป็นองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลสด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectrophotometer โดยทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงเลขคลื่น 4,000 – 500 cm^{-1} และดำเนินการวิเคราะห์ผลของสเปกตรัมที่ได้ (Spectral analysis)

2.4 การประเมินคุณสมบัติความเป็นพรีไบโอติก

เริ่มจากการเตรียมกล้าเชื้อ (inoculum preparation) โดยเลี้ยงจุลินทรีย์ในอาหารเหลว MRS broth และบ่มที่อุณหภูมิ 37°C จนเข้าสู่ระยะ stationary phase จากนั้นทำการถ่ายเชื้อลงสู่ชุดการทดลอง การทดสอบพรีไบโอติกใช้ modified MRS broth ที่ปราศจากเดกซ์โทรส (modified MRS broth without dextrose) เพื่อกำจัดแหล่งคาร์โบไฮเดรตอื่นออก และเติมเฮมิเซลลูโลสจากเศษเหลือตรีผลาที่ความเข้มข้น 0.5% (w/v) เป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตเพียงแหล่งเดียว ในการทดลองนี้ได้จัดเตรียมชุดควบคุมเชิงลบ (negative control) โดยใช้ modified MRS broth ที่ไม่มีการเติมแหล่งคาร์โบไฮเดรต เพื่อใช้ยืนยันว่าการเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์เกิดจากการใช้เฮมิเซลลูโลสเป็นแหล่งคาร์บอน

ชุดการทดลองถูกบ่มที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยสำหรับ *Bifidobacterium adolescentis* ทำการบ่มภายใต้สภาวะไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic conditions) ขณะที่ *Lactobacillus plantarum* บ่มในสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญของจุลินทรีย์ ทำการเก็บตัวอย่างที่เวลาเริ่มต้น (0 ชั่วโมง) และหลังการบ่ม (24 ชั่วโมง) จากนั้นนำไปเจือจางแบบลำดับส่วน (serial dilution) และเพาะเลี้ยงบนอาหาร MRS agar ด้วยเทคนิค drop plate แล้วบ่มเพื่อให้เกิดโคโลนี ก่อนนับจำนวนและรายงานผลในหน่วย CFU/mL การทดลองทั้งหมดดำเนินการอย่างน้อย 3 ซ้ำ (triplicate) และรายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยขั้นตอนทั้งหมดแสดงใน Figure 2

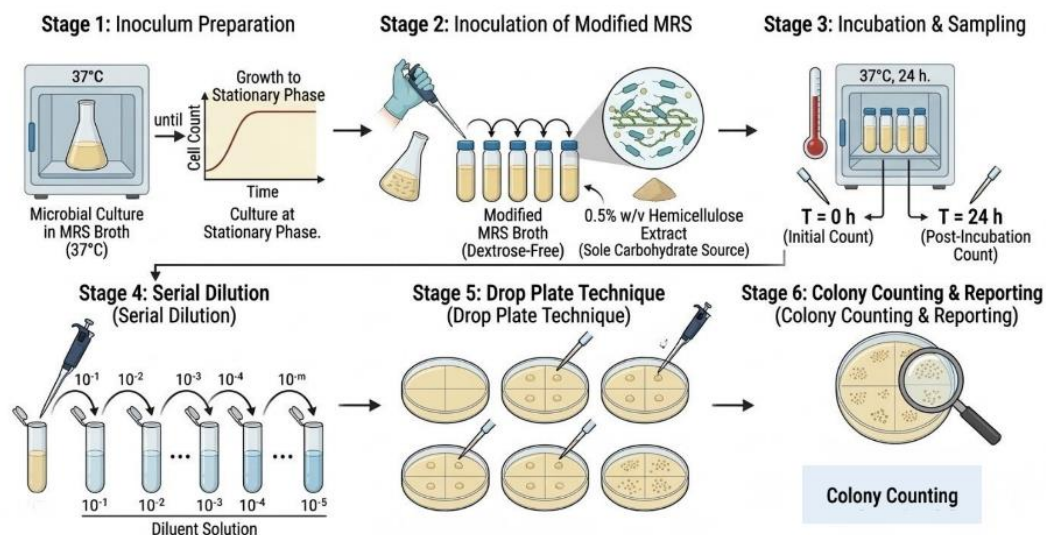


Figure 2 Prebiotic activity evaluation of hemicellulose extraction.

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 ผลผลิตของเฮมิเซลลูโลสที่สกัดด้วยสารละลายต่าง

จากการสกัดเฮมิเซลลูโลสจากเศษเหลือทิ้งของตรีผลาด้วยสารละลายต่าง (Alkaline Extraction) ในระดับกึ่งอุตสาหกรรม พบว่า กระบวนการสกัดสามารถแยกส่วนประกอบของเฮมิเซลลูโลสออกจากโครงสร้างผนังเซลล์ของเศษเหลือตรีผลา ให้ร้อยละผลผลิต (%Yield) เท่ากับ 1.30 ± 0.25 โดยน้ำหนักแห้ง

เมื่อพิจารณาลักษณะทางกายภาพเปรียบเทียบระหว่างวัตถุดิบตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ที่สกัดได้ (Figure 3) พบความเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน โดยเศษเหลือทิ้งตรีผลาตั้งต้น (Figure 3a) มีลักษณะเป็นกากใยหยาบ สีน้ำตาลเข้ม ในขณะที่เฮมิเซลลูโลสที่ผ่านการสกัดและทำแห้งแล้ว (Figure 3b) มีลักษณะเป็นผงละเอียด สีน้ำตาลอมเขียว ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของสีแสดงให้เห็นถึงการกำจัดสารเจือปนประเภทลิกนินและองค์ประกอบอื่น ๆ ออกจากโครงสร้างหลักในระหว่างกระบวนการสกัด โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhang, Wang [14] ได้รายงานว่า การกำจัดลิกนินจากลำต้นข้าวโพดด้วย sodium chlorite ภายใต้สภาวะกรดอ่อนทำให้ตัวอย่างค่อย ๆ เปลี่ยนเป็นสีขาว ซึ่งบ่งชี้ว่าลิกนินถูกกำจัดออกและได้ hemicellulose ก่อนนำไปสกัด hemicellulose ด้วยสารละลายต่างและทำให้ตกตะกอนด้วยเอทานอลได้เฮมิเซลลูโลสบริสุทธิ์ 78.32 %

ผลผลิตของเฮมิเซลลูโลสค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับรายงานอื่น ๆ ทั้งนี้อาจเกิดจากหลายปัจจัย ได้แก่ (1) ลักษณะของวัตถุดิบตั้งต้นซึ่งเป็นเศษเหลือจากกระบวนการสกัดสารสำคัญ อาจทำให้เฮมิเซลลูโลสบางส่วนถูกสกัดออกไปแล้วก่อนหน้า (2) สภาวะการสกัด เช่น ความเข้มข้นของสารละลายต่าง อุณหภูมิ และระยะเวลา อาจยังไม่เหมาะสมต่อการดึงเฮมิเซลลูโลสออกมาได้สูงสุด (3) การสูญเสียตัวอย่างในขั้นตอนการล้าง การกรอง และการทำให้แห้ง (Figure 1)



Figure 3 Physical appearance of (a) Triphala waste powder and (b) extracted hemicellulose using alkaline extraction method.

3.2 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเฮมิเซลลูโลสที่สกัดได้

เมื่อพิจารณาลักษณะพื้นผิวของเฮมิเซลลูโลสที่สกัดได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 100 เท่า (Figure 4a) และ 1,000 เท่า (Figure 4b) พบว่าตัวอย่างมีลักษณะพื้นผิวขรุขระ ไม่สม่ำเสมอ และมีรอยย่น ซึ่งสะท้อนถึงการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผนังเซลล์พืชภายหลังการสกัดด้วยสารละลายต่าง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Huang, Zhou [4] ศึกษาการสกัดพอลิแซ็กคาไรด์จากผลมะขามป้อม (*Phyllanthus emblica*) ซึ่งพอลิแซ็กคาไรด์ที่สกัดด้วยเทคนิค ultrasonic-microwave synergistic extraction (PEP-U) แสดงให้เห็นพื้นผิวที่ ขรุขระ มีรูพรุน และมีการแตกตัวของโครงสร้างมากกว่า โดยมีลักษณะของอนุภาคที่ไม่สม่ำเสมอและมีการกระจายตัวสูง นอกจากนี้มีรายงานของ Lara-Serrano, Sáez Angulo [7] ซึ่งพบว่าการปรับสภาพชีวมวลลิกโนเซลลูโลสสามารถทำให้โครงสร้างท่อลำเลียงของพืชถูกทำลายและเพิ่มความพรุนของพื้นผิวได้ และรายงานของ Zhang, Wang [14] ทำการแยกเฮมิเซลลูโลสจาก corn stalk โดยกำจัดลิกนินด้วย sodium chlorite ภายใต้สภาวะกรดอ่อน สกัดด้วยสารละลาย KOH 5% และตกตะกอนด้วยเอทานอล 95% เพื่อให้ได้เฮมิเซลลูโลสที่มีความบริสุทธิ์สูง สามารถทำให้โครงสร้างเส้นใยเดิมเปลี่ยนแปลงและเกิดลักษณะไม่เป็นระเบียบมากขึ้น

การวิเคราะห์ด้วย SEM สามารถให้ข้อมูลเชิงสัณฐานวิทยาของพื้นผิวเท่านั้น และไม่สามารถใช้ยืนยันลักษณะเชิงผลึกหรือความเป็นอนิสตรอนของโครงสร้างได้โดยตรง ดังนั้น การระบุความเป็นอนิสตรอนของตัวอย่างควรใช้เทคนิคเพิ่มเติม เช่น X-ray diffraction (XRD) เพื่อยืนยันโครงสร้างเชิงผลึกของพอลิแซ็กคาไรด์ต่อไป

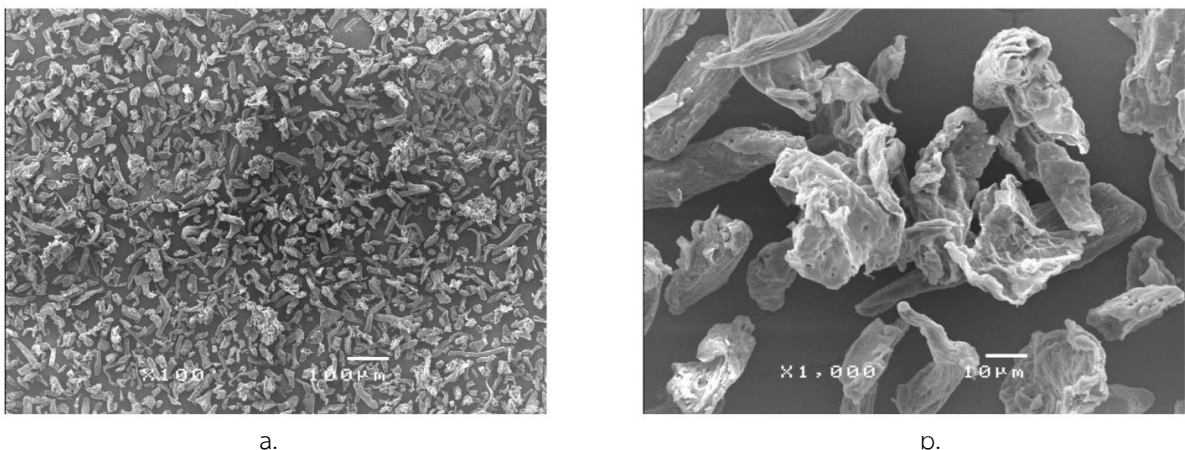


Figure 4 SEM micrographs of the extracted hemicellulose at different magnifications: (a) 100x and (b) 1,000x.

3.3 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FTIR)

จากการวิเคราะห์สเปกตรัมอินฟราเรดของตัวอย่างที่สกัดได้จากเศษเหลือตรีผลา (Figure 5) พบแถบการดูดกลืนแสงที่สำคัญซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างของพอลิแซ็กคาไรด์ประเภทเฮมิเซลลูโลส โดยสเปกตรัมปรากฏแถบการดูดกลืนกว้างบริเวณ $3,402\text{ cm}^{-1}$ และ $2,851\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเกิดจากการสั่นของพันธะ O-H stretching และ C-H stretching ตามลำดับ ซึ่งเป็นลักษณะพื้นฐานของพอลิเมอร์ในผนังเซลล์พืช [9, 10]

นอกจากนี้ พีคที่บริเวณ $1,029\text{ cm}^{-1}$ เกิดจากการสั่นของพันธะ C-O และ C-O-C ในพันธะไกลโคซิดิก ซึ่งเป็นลักษณะของโครงสร้างพอลิแซ็กคาไรด์ ซึ่งงานวิจัยของ Kačuráková, Capek [6] ที่ได้ทำการศึกษาสเปกตรัมของคาร์โบไฮเดรตในผนังเซลล์พืชและเฮมิเซลลูโลสหลายชนิด โดยระบุว่าช่วงคลื่นระหว่าง $1,200\text{--}800\text{ cm}^{-1}$ เป็นบริเวณ Fingerprint region สามารถใช้ในการจำแนกลักษณะของคาร์โบไฮเดรตในผนังเซลล์พืช โดยต้องพิจารณาารูปแบบสเปกตรัมโดยรวมร่วมกันมากกว่าการอ้างอิงจากพีคเพียงตำแหน่งเดียว และพบพีคขนาดเล็กบริเวณ 901 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของ β -glycosidic linkage ที่เชื่อมต่อระหว่างหน่วยน้ำตาลไซโลสในสายโซ่หลักของเฮมิเซลลูโลส [6, 9] เมื่อพิจารณาาร่วมกับลักษณะของวัตถุติดจากพืชและวิธีการสกัดด้วยสารละลายต่าง ๆ ซึ่งมีความเหมาะสมต่อการแยกสารในกลุ่มเฮมิเซลลูโลส จึงสามารถกล่าวได้ว่าตัวอย่างที่สกัดได้มีลักษณะเป็นพอลิแซ็กคาไรด์จากผนังเซลล์พืช และมีแนวโน้มเป็นสารสกัดกลุ่มเฮมิเซลลูโลส

เมื่อพิจารณาความบริสุทธิ์ของสาร พบว่าพีคที่เกี่ยวข้องกับลิแกนด์บริเวณ $1,571\text{ cm}^{-1}$ และ $1,218\text{ cm}^{-1}$ (Aromatic ring vibration) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่สัมพันธ์กับโครงสร้างอะโรมาติก (Aromatic skeletal vibration) และพันธะ C-O ในหน่วยกัวยซิล (Guaiacyl unit) ของลิแกนด์ตามลำดับ เป็นการบ่งชี้ว่ายังมีลิแกนด์บางส่วนปนเปื้อนอยู่ในเฮมิเซลลูโลสที่สกัดได้ [9, 10] โดยสังเกตได้จากสีของเฮมิเซลลูโลสที่ยังคงสีน้ำตาลอมเขียวอยู่

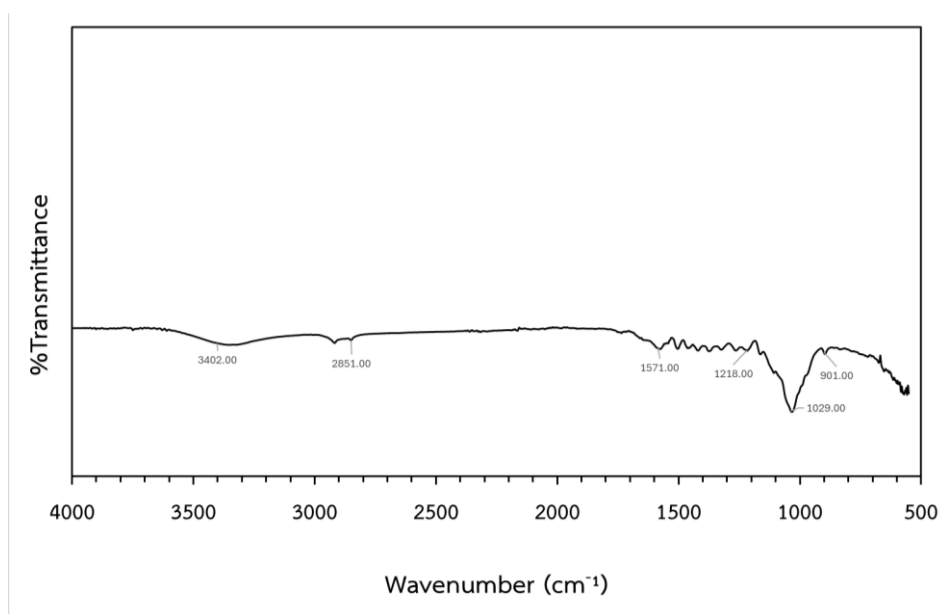


Figure 5 FTIR spectrum of extracted hemicellulose within the wavenumber range of $4000\text{--}500\text{ cm}^{-1}$.

3.4 ผลการประเมินคุณสมบัติความเป็นพรีไบโอติก

จากการทดสอบความสามารถในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์โพรไบโอติก (Figure 6) พบว่าเฮมิเซลลูโลสที่สกัดได้สามารถทำหน้าที่เป็นแหล่งคาร์บอนที่มีความสามารถในการเป็นพรีไบโอติก โดยพบว่าจำนวนของ *Lactobacillus plantarum* และ *Bifidobacterium adolescentis* เพิ่มขึ้นเท่ากับ 1.78 ± 0.16 และ $1.97 \pm 1.07 \Delta \log \text{CFU/mL}$ ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการใช้ไซแลน (Xylan) ซึ่งใช้เป็นสารเปรียบเทียบ โดยให้ค่าการเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์เท่ากับ 1.81 ± 0.59 และ $2.17 \pm 1.03 \Delta \log \text{CFU/mL}$ ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเฮมิเซลลูโลสที่สกัดได้สามารถส่งเสริมการเจริญของจุลินทรีย์ทั้งสองสายพันธุ์ได้ในระดับที่ใกล้เคียงกับสารมาตรฐาน โดยพบว่า *B. adolescentis* มีการเพิ่มจำนวนสูงกว่า *L. plantarum* อย่างชัดเจน ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับความสามารถของจุลินทรีย์ในสกุล *Bifidobacterium* ในการใช้ประโยชน์จาก

คาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อน โดยเฉพาะสารในกลุ่มไซแลนหรือผลิตภัณฑ์ย่อย เช่น ไซโลโอลิโกแซ็กคาไรด์ (xylooligosaccharides; XOS) ซึ่งได้รับการรายงานว่าสามารถกระตุ้นการเจริญของจุลินทรีย์กลุ่มนี้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ [1]

กลไกที่เป็นไปได้ของการส่งเสริมการเจริญดังกล่าวเกี่ยวข้องกับความสามารถของจุลินทรีย์ในการผลิตเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายเอมิเซลลูโลส เช่น xylanase, β -xylosidase และเอนไซม์ในกลุ่มไกลโคซิเดส ซึ่งสามารถย่อยพันธะไกลโคซิดิกของไซแลนให้เป็นโอลิโกแซ็กคาไรด์และน้ำตาลโมเลกุลขนาดเล็ก เพื่อนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานและคาร์บอนในกระบวนการเมแทบอลิซึมของจุลินทรีย์ [1, 12]

นอกจากนี้ผลการทดลองยังสอดคล้องกับรายงานของ Huang, Zhou [4] ที่พบว่าพอลิแซ็กคาไรด์จากพืชในสกุล *Phyllanthus* สามารถส่งเสริมการเจริญของจุลินทรีย์ในกลุ่ม *Lactobacillus* ได้ โดยจุลินทรีย์สามารถผลิตเอนไซม์ เช่น ไซแลนเนส (xylanase) เพื่อย่อยสลายพันธะไกลโคซิดิกของไซแลนให้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเล็ก และนำไปใช้ในกระบวนการเมแทบอลิซึม ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการลดความเสี่ยงของโรคเมตาบอลิก เช่น โรคอ้วนและโรคเบาหวานชนิดที่ 2 และเมื่อเปรียบเทียบกับรายงานของ Rajan, D'Souza [11] ซึ่งพบว่าจุลินทรีย์สามารถเพิ่มจำนวนได้ในช่วง 5.8–8.6 log cells/mL พบว่าผลการทดลองในงานวิจัยนี้แสดงแนวโน้มที่สอดคล้องกัน โดยเอมิเซลลูโลสสามารถส่งเสริมการเจริญของจุลินทรีย์โพรไบโอติกได้อย่างชัดเจน

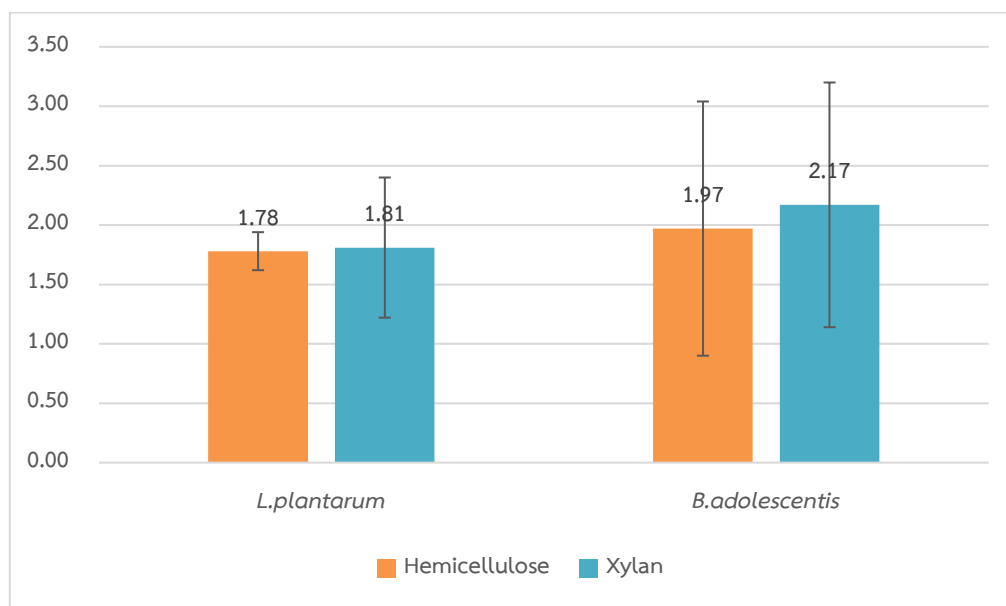


Figure 6 Effect of hemicellulose extracted from *Triphala* residues on the growth of probiotic bacteria compared with xylan.

4. สรุป

จากการศึกษาการสกัดเอมิเซลลูโลสจากเศษเหลือในระบบการสกัดสารสำคัญตรีผลาด้วยวิธีการสกัดด้วยสารละลายต่างในระดับกึ่งอุตสาหกรรม (5 กิโลกรัมต่อหน่วยการผลิต) พบว่า กระบวนการสกัดสามารถแยกองค์ประกอบของเอมิเซลลูโลสออกจากโครงสร้างผนังเซลล์พืชได้ โดยให้ร้อยละผลผลิต (%Yield) เท่ากับ 1.30 ± 0.25 โดยน้ำหนักแห้ง การเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพระหว่างวัตถุดิบตั้งต้นและเอมิเซลลูโลสจากเศษเหลือตรีผลาที่สกัดได้มีการกำจัดองค์ประกอบบางส่วน เช่น ลิกนินและสารประกอบอื่น ๆ ออกจากโครงสร้างของวัตถุดิบ สังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงของลักษณะปรากฏและสี การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่า เอมิเซลลูโลสจากเศษเหลือตรีผลาที่สกัดได้มีลักษณะโครงสร้างเป็นอสัณฐาน พื้นผิวมีความขรุขระและไม่สม่ำเสมอ แสดงให้เห็นว่ากระบวนการสกัดสามารถทำให้โครงสร้างของผนังเซลล์พืชคลายตัวและแยกองค์ประกอบของเอมิเซลลูโลสออกมาได้ ผล FT-IR บ่งชี้ว่าเป็นพอลิแซ็กคาไรด์จากผนังเซลล์พืชที่มีพันธะแบบเบตา มีแนวโน้มเป็นเอมิเซลลูโลสเมื่อพิจารณาาร่วมกับวัตถุดิบและวิธีการสกัดที่ใช้ โดยยังพบลิกนินตกค้างบางส่วน ผลการประเมินคุณสมบัติความเป็นโพรไบโอติกพบว่าเอมิเซลลูโลสที่สกัดได้สามารถส่งเสริมการเจริญของจุลินทรีย์โพรไบโอติก ได้แก่ *Lactobacillus plantarum* และ *Bifidobacterium adolescentis* ได้ โดยมีค่าเพิ่มของจำนวนจุลินทรีย์เท่ากับ 1.78 ± 0.16 และ $1.97 \pm 1.07 \Delta \log \text{CFU/mL}$ ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการใช้ไซแลนเป็นสารเปรียบเทียบ แสดงให้เห็นว่าเอมิเซลลูโลสจากเศษเหลือตรีผลาที่สกัดได้มีความสามารถในการทำหน้าที่เป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ และ

สามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการพัฒนาพรีไบโอติกได้ แต่เนื่องจากผลผลิตของเฮมิเซลลูโลสที่ได้อยู่ในระดับค่อนข้างต่ำและยังมีลิกนินปะปนอยู่บางส่วน จึงควรมีการศึกษาปรับปรุงสภาวะการสกัดในงานวิจัยต่อไป เช่น การปรับความเข้มข้นของสารละลายต่างอัตราส่วนของตัวทำละลาย อุณหภูมิและระยะเวลาในการสกัด หรือการประยุกต์ใช้เทคนิคเสริม เช่น การใช้คลื่นอัลตราโซนิค หรือการฟอกขาวในการกำจัดองค์ประกอบอื่น ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดและลดสิ่งเจือปนในผลิตภัณฑ์

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒสำหรับการสนับสนุนงานโครงการวิจัยนี้สำเร็จสมบูรณ์ ขอขอบคุณทุนในการวิจัยจากศูนย์เพื่อความเป็นเลิศทางวิจัยด้านนวัตกรรมพืชและสมุนไพร (CEPHIR) และสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) เลขที่สัญญา CRP6705032390

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Achary, A.A. and Prapulla, S.G. 2011. Xylooligosaccharides (XOS) as an emerging prebiotic: Microbial synthesis, utilization, structural characterization, bioactive properties, and applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 10: 2–16.
- [2] Baliga, M.S., et al. 2012. Scientific validation of the ethnomedicinal properties of the Ayurvedic drug Triphala: A review. *Chinese Journal of Integrative Medicine*. 18: 946–954.
- [3] Dhingra, D., et al. 2012. Dietary fibre in foods: A review. *Journal of Food Science and Technology*. 49: 255–266.
- [4] Huang, H., et al. 2025. Study on the extraction, antioxidant and prebiotic activity of the polysaccharides from the fruits of *Phyllanthus emblica* L. *Frontiers in Nutrition*. 12.
- [5] Jones, J.M. 2014. CODEX-aligned dietary fiber definitions help to bridge the ‘fiber gap’. *Nutrition Journal*. 13: 34.
- [6] Kačuráková, M., et al. 2000. FT-IR study of plant cell wall model compounds: Pectic polysaccharides and hemicelluloses. *Carbohydrate Polymers*. 43: 195–203.
- [7] Lara-Serrano, M., et al. 2018. Second-generation bioethanol production combining simultaneous fermentation and saccharification of IL-pretreated barley straw. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 6: 7086–7095.
- [8] Lattimer, J.M. and Haub, M.D. 2010. Effects of dietary fiber and its components on metabolic health. *Nutrients*. 2: 1266–1289.
- [9] Pandey, K.K. 1999. A study of chemical structure of soft and hardwood and wood polymers by FTIR spectroscopy. *Journal of Applied Polymer Science*. 71: 1969–1975.
- [10] Rai, P.S., Unnikrishnan, S. and Chandrashekar, A. 2025. Influence of alkali treatment on physiochemical and morphological properties of palmyra fibers. *Industrial Crops and Products*. 224: 120298.
- [11] Rajan, K., et al. 2021. Production and characterization of high value prebiotics from biorefinery-relevant feedstocks. *Frontiers in Microbiology*. 12.
- [12] Rastall, R.A. and Gibson, G.R. 2015. Recent developments in prebiotics to selectively impact beneficial microbes and promote intestinal health. *Current Opinion in Biotechnology*. 32: 42–46.
- [13] Zhang, B., et al. 2025. *Bifidobacterium adolescentis* CCFM8630 exerts anti-obesity effects by modulating gut microbiota-related tryptophan metabolism. *Food Science and Human Wellness*. 14: 9250191.
- [14] Zhang, Y., et al. 2021. Separation and characterization of biomass components (cellulose, hemicellulose, and lignin) from corn stalk. *BioResources*. 16: 7205–7219.
- [15] Zhong, H., et al. 2024. Effects of *Lactobacillus plantarum* supplementation on glucose and lipid metabolism in type 2 diabetes mellitus and prediabetes: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Clinical Nutrition ESPEN*. 61: 377–384.

-
- [16] Zhong, L., et al. 2021. Alkali-catalyzed organosolv pretreatment of lignocellulose enhances enzymatic hydrolysis and results in highly antioxidative lignin. *Energy & Fuels*. 35: 5039–5048.
- [17] กรมการแพทย์แผนไทยและการแพทย์ทางเลือก. 2564. ตำรับยาแผนไทยแห่งชาติ. กระทรวงสาธารณสุข, กรุงเทพมหานคร. หน้า 197–198.

ผลของการปรับสภาพทางชีวภาพด้วยเชื้อรา *Colletotrichum* sp. ต่อการเกิดรูพรุนลำดับชั้นในถ่านกัมมันต์จากเปลือกผลอะโวคาโด

Effect of Biological Pretreatment Using *Colletotrichum* sp. on the Formation of Hierarchical Porous Structure in Avocado Peel-derived Activated Carbon

จuthารัตน์ เกิดกัน^{1,*}, กัญญ์ชลา กิระศิริ^{2,*}, กนกพร บุญญะอดิชาติ¹ และ พรประพา คงตระกูล¹
Jutharat Koedkun^{1,*}, Kanchalar Keeratirawee^{2,*}, Kanokpon Bunya-atichart¹ and Pornprapa Kongtragoul¹

¹ภาควิชาเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร 86160 ประเทศไทย

²ภาควิชาพื้นฐานทั่วไป สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร 86160 ประเทศไทย

¹Department of Agricultural Technology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Prince of Chumphon Campus, Chumphon Province, 86160, Thailand

²Department of General Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Prince of Chumphon Campus, Chumphon Province, 86160, Thailand

*Corresponding author: Jutharat Koedkun, Kanchalar Keeratirawee, e-mail address: Jutharat2808@gmail.com, Kanchalar.ke@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

เปลือกผลอะโวคาโดเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีศักยภาพในการนำมาเพิ่มมูลค่าเป็นวัสดุคาร์บอน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการปรับสภาพและไม่ปรับทางชีวภาพด้วยเชื้อรา *Colletotrichum* sp. ต่อการพัฒนาโครงสร้างรูพรุนลำดับชั้นของถ่านกัมมันต์ของเปลือกผลอะโวคาโด ปรับสภาพทางชีวภาพด้วยการวางชิ้นส่วนเชื้อรา *Colletotrichum* sp. บนเปลือกผลอะโวคาโด ทำการบ่มเชื้อนาน 21 วัน ที่อุณหภูมิห้อง ก่อนนำเปลือกผลไปเผาด้วยกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน ผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของถ่านที่ได้จากการปรับสภาพยืนยันชนิดของเชื้อราและศักยภาพในการย่อยสลายโครงสร้างลิกโนเซลลูโลส จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR) แสดงการเปลี่ยนแปลงของหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์บนพื้นผิววัสดุหลังการปรับสภาพ เช่น -CH, C=O และ C-O-C ลดลง ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของโมเลกุลโดยเทคนิค Raman spectroscopy (Raman) พบพีค D-band และ G-band โดยมีอัตราส่วนความเข้มของพีค (I_D/I_G) ประมาณ 1.2 และ การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD) บ่งชี้ว่าถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการปรับสภาพทางชีวภาพมีโครงสร้างคาร์บอนไม่เป็นระเบียบ นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ Brunauer-Emmett-Teller (BET) และ ผลการวิเคราะห์ Scanning electron microscope (SEM) ยืนยันได้ว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้มีโครงสร้างรูพรุนแบบลำดับชั้นที่ประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็กและขนาดกลางร่วมกัน ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพทางชีวภาพด้วยเชื้อรา *Colletotrichum* sp. เป็นแนวทางที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและมีศักยภาพในการพัฒนาถ่านกัมมันต์จากเปลือกอะโวคาโดเพื่อการประยุกต์ใช้งานด้านการดูดซับ

คำสำคัญ: ถ่านกัมมันต์, เชื้อราก่อโรค, เปลือกอะโวคาโด, รูพรุนลำดับชั้น, กระบวนการทางชีวภาพ

Abstract

Avocado peel is an abundant agricultural waste that can be converted into carbon materials. This study aimed to investigate the effect of biological pretreatment using *Colletotrichum* sp. on the development of hierarchical porous activated carbon derived from avocado peel. The biomass was subjected to fungal pretreatment prior to carbonization and compared with non-biologically pretreated samples. Morphological characterization revealed the identity and successful colonization of *Colletotrichum* sp., as well as its capability to partially degrade lignocellulosic components and modify the precursor structure. Analysis using Fourier Transform Infrared (FTIR) spectroscopy showed a reduction in organic functional groups such as -CH, C=O, and C-O-C after pretreatment, indicating the partial decomposition of biomass constituents. Raman spectroscopy exhibited distinct D-band and G-band peaks with an intensity ratio (I_D/I_G) of approximately 1.2, suggesting the formation of disordered carbon structures. X-ray diffraction (XRD) further confirmed the predominantly amorphous carbon nature of the biologically pretreated activated carbon. Moreover, Brunauer-Emmett-Teller (BET) surface area analysis and Scanning Electron Microscopy (SEM) observations verified the development of a hierarchical porous structure composed of micro and mesopores. These findings demonstrate that biological pretreatment using *Colletotrichum* sp. is an environmentally friendly and effective strategy for enhancing pore

development in avocado peel-derived activated carbon, with promising potential for adsorption and advanced functional carbon material applications.

Keywords: Activated carbon, phytopathogenic fungi, avocado peel, stratified pores, biological process

1. บทนำ

อะโวคาโด (*Persea americana* Mill.) เป็นพืชเศรษฐกิจที่กำลังได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นในประเทศไทย เนื่องจากมีคุณค่าทางโภชนาการสูงและได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอาหารและผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพ ในปี ค.ศ. 2025 มูลค่าตลาดอะโวคาโดทั่วโลกอยู่ที่ประมาณ 20 พันล้านดอลลาร์สหรัฐ และยังคงมีแนวโน้มเติบโตอย่างต่อเนื่องเนื่องจากความต้องการบริโภคที่เพิ่มขึ้นทั่วโลกและยังคงมีแนวโน้มเติบโตอย่างต่อเนื่อง [1,2] สำหรับประเทศไทย ความต้องการบริโภคอะโวคาโดที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้มีการส่งเสริมการปลูกเป็นพืชเศรษฐกิจทางเลือก โดยเฉพาะในพื้นที่สูงอย่างจังหวัดตากและเพชรบูรณ์ รวมถึงการขยายตัวสู่พื้นที่ภาคใต้ เช่น จังหวัดชุมพร ในรูปแบบเกษตรอินทรีย์และพืชแซมเพื่อกระจายความเสี่ยงทางการเกษตร [3-5] อย่างไรก็ตาม การขยายตัวของอุตสาหกรรมแปรรูปอะโวคาโดได้ก่อให้เกิดวัสดุเหลือทิ้งในปริมาณมาก โดยเฉพาะเปลือกอะโวคาโด ซึ่งหากขาดการจัดการที่เหมาะสมจะก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางขยะชีวภาพ ในขณะเดียวกัน เปลือกอะโวคาโดกลับเป็นชีวมวลที่มีศักยภาพสูงในการนำมาเพิ่มมูลค่า ตามแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) และการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า [1]

เปลือกอะโวคาโดประกอบด้วยสารลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulosic components) เป็นองค์ประกอบหลัก ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่เหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการผลิตวัสดุคาร์บอน [6] โดยเฉพาะถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงและมีโครงสร้างรูพรุนที่ซับซ้อน เหมาะสำหรับการใช้งานด้านการดูดซับ ตัวเร่งปฏิกิริยา การบำบัดน้ำและอากาศ การกักเก็บพลังงานในอุปกรณ์ไฟฟ้าเคมี ตลอดจนการประยุกต์ใช้ในงานทางการแพทย์และอุตสาหกรรมขั้นสูง [7] อย่างไรก็ตาม กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์แบบดั้งเดิมมักอาศัยการใช้พลังงานสูงและสารเคมีรุนแรงในขั้นตอนการกระตุ้น (Activation) เพื่อสร้างโครงสร้างรูพรุน ส่งผลให้เกิดต้นทุนการผลิตและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม [8] ด้วยเหตุนี้ แนวทางการปรับปรุงสภาพทางชีวภาพ (Biological pretreatment) โดยใช้จุลินทรีย์ในการย่อยสลายโครงสร้างชีวมวลเบื้องต้นก่อนกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน จึงได้รับความสนใจเพิ่มขึ้น กระบวนการดังกล่าวช่วยสร้างช่องว่างในระดับจุลภาคภายในโครงสร้างชีวมวล ซึ่งเอื้อต่อการเกิดโครงสร้างรูพรุนลำดับชั้น (Hierarchical porous structure) ที่ประกอบด้วยรูพรุนขนาดไมโครพอร์ (Micropores) เมโซพอร์ (Mesopores) และมาโครพอร์ (Macropores) ผสมผสานกันอย่างเหมาะสม [9] โครงสร้างรูพรุนลักษณะนี้มีบทบาทสำคัญต่อประสิทธิภาพการใช้งานของถ่านกัมมันต์ โดยช่วยเพิ่มทั้งพื้นที่ผิวและการแพร่กระจายของสารภายในเนื้อวัสดุ

เชื้อราก่อโรคพืชหลายชนิดมีความสามารถโดดเด่นในการผลิตเอนไซม์ย่อยสลายผนังเซลล์พืช (Cell wall degrading enzymes) เช่น เซลลูเลส และเอนไซม์ในกลุ่มที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายลิกนิน [10] โดยเฉพาะเชื้อราในสกุล *Colletotrichum* sp. ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของโรคแอนแทรคโนสในอะโวคาโด มีศักยภาพสูงในการหลั่งเอนไซม์เพื่อทำลายพันธะของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และเพกตินอย่างมีประสิทธิภาพ [11] โดยเชื้อราจะย่อยสลายชีวมวลได้โดยอาศัยเอนไซม์ที่เข้าไปย่อยสลายโครงสร้างหลักของผนังเซลล์ เช่น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ทำให้โครงสร้างที่เดิมมีความแข็งและซับซ้อนค่อย ๆ ถูกย่อยสลาย และรวมไปถึงการเข้าทำลายของเส้นใยเชื้อรา จึงเกิดช่องว่างและรูพรุนในหลายระดับ ส่งผลให้วัสดุมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ทำให้เชื้อรากลุ่มนี้มีความน่าสนใจในการนำมาประยุกต์ใช้เป็นเครื่องมือทางชีวภาพสำหรับการช่วยสร้างช่องว่างภายในชีวมวลก่อนกระบวนการกระตุ้นทางเคมี โดยคุณ Cheng et al., 2020 ได้นำกลีบข้าวมาเพาะเชื้อรา *Trichoderma viride* ให้ย่อยโครงสร้างก่อนนำไปผ่านเข้าสู่กระบวนการคาร์บอนไนเซชัน การใช้เชื้อราปรับปรุงสภาพกลีบก่อนผลิตคาร์บอนช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวและโครงสร้างรูพรุนได้มากขึ้น ซึ่งอาจช่วยให้สารกระตุ้นสามารถแพร่กระจายได้อย่างทั่วถึงและส่งเสริมการเกิดโครงสร้างรูพรุนลำดับชั้นได้ดียิ่งขึ้น [12]

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ศึกษาการประยุกต์ใช้เชื้อรา *Colletotrichum* sp. เพื่อการปรับแต่งโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากเปลือกอะโวคาโดยังมีอยู่อย่างจำกัด ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาผลของการปรับปรุงสภาพทางชีวภาพด้วยเชื้อรา *Colletotrichum* sp. ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างรูพรุนลำดับชั้นของถ่านกัมมันต์จากเปลือกอะโวคาโด เพื่อประเมินศักยภาพในการเปลี่ยนบทบาทของเชื้อราก่อโรคพืชไปสู่การเป็นเครื่องมือทางชีวภาพสำหรับการผลิตวัสดุหน้าที่ใช้ในการดูดซับ (Functional materials) และการเพิ่มมูลค่าวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรอย่างยั่งยืน

2. วิธีการศึกษา

2.1 การแยกและจัดจำแนกเชื้อราสาเหตุโรคจากอะโวคาโด

เก็บตัวอย่างผลอะโวคาโดที่แสดงอาการของโรค มาทำการแยกเชื้อโดยวิธี Tissue transplanting technique โดยตัดชิ้นส่วนพีชระหว่างส่วนที่เป็นโรคและไม่เป็นโรค ขนาด 0.5 x 0.5 เซนติเมตร มาทำการฆ่าเชื้อบริเวณพื้นผิวภายนอกด้วยสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์ (Clorox®) 10% ประมาณ 3-5 นาที แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นนึ่งฆ่าเชื้อประมาณ 3-5 นาที ซับด้วยกระดาษทิชชูที่นึ่งฆ่าเชื้อให้แห้ง จากนั้นนำชิ้นส่วนพีชมาวางบนอาหาร water agar (WA) ในตู้ปลอดเชื้อ Laminar air flow และนำมาเลี้ยงไว้เป็นเวลา 2-3 วัน ที่อุณหภูมิประมาณ 25 องศาเซลเซียส และมีความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 70% RH เมื่อสังเกตเห็นเส้นใยของเชื้อราที่เจริญออกมา ใช้ Cork borer ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 เซนติเมตร ตัดบริเวณปลายเส้นใย แล้วนำไปวางบนอาหาร Potato dextrose agar (PDA) ที่อุณหภูมิห้องและทำการแยกเชื้อราให้บริสุทธิ์ด้วยวิธี Single spore isolation ตามวิธีที่ดัดแปลงจาก Ho and Ko., 1997 [13] แล้วนำไปเลี้ยงในอาหาร WA เป็นเวลา 12-24 ชั่วโมง จากนั้นตัดชิ้นรุ่นที่มีสปอร์เดี่ยวภายใต้กล้องจุลทรรศน์ตัดย้ายลงบนอาหาร PDA และเลี้ยงในอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5-7 วัน

เตรียมเชื้อราที่เลี้ยงบนอาหาร PDA ในอุณหภูมิห้อง จากนั้นนำผลอะโวคาโดที่ไม่มีการเข้าทำลายของโรค มาทดสอบด้วยวิธี Point inoculation technique ทำการฆ่าเชื้อบริเวณพื้นผิวด้านนอกด้วย Clorox® 10% แช่ประมาณ 5 นาที และล้างด้วยน้ำกลั่นนึ่งฆ่าเชื้อประมาณ 2-3 นาที ซับด้วยกระดาษทิชชูที่นึ่งฆ่าเชื้อให้แห้ง แล้วนำเข็มที่ผ่านการนึ่งฆ่าเชื้อมาเจาะบนผลอะโวคาโด 1-3 แผล และนั้นใช้ Cork borer ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ตัดชิ้นส่วนเชื้อที่เลี้ยงบนอาหาร PDA ไปวางบนผลอะโวคาโด และนำไปวางในกล่องพลาสติกให้ความชื้นด้วยน้ำกลั่นนึ่งฆ่าเชื้อโดยเทลงในกล่องปริมาณ 500 มิลลิลิตร วางผลอะโวคาโดบนตระแกรงลวดภายในกล่อง ปิดฝา เพื่อทำการบ่มเชื้อในอุณหภูมิประมาณ 25 องศาเซลเซียส และสังเกตการเกิดโรคเป็นเวลา 7-14 วัน

2.2 การเตรียมเปลือกอะโวคาโดและกระบวนการปรับสภาพทางชีวภาพ

ส่วนที่ 1 เปลือกอะโวคาโดที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพทางชีวภาพ (Avocado peel non-biological pretreatment ; NABP) คัดเลือกผลอะโวคาโด ที่มีเซลล์ลูโลสกับลินินสูง โดยเลือกผลที่ไม่มีการเข้าทำลายของโรคและแมลง นำผลอะโวคาโดมาทำการผ่าแล้วนำเนื้อและเมล็ดออก แล้วล้างทำความสะอาดเปลือก แล้วนำมาหั่นเป็นชิ้นให้มีขนาด 1x1 เซนติเมตร (Figure 1 A) และนำไปอบให้แห้งด้วยตู้อบลมร้อน (Hot air oven) ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง (Figure 1 B) แล้วนำไปบดและร่อนให้มีขนาดเล็ก 40-60 เมส ด้วยเครื่องบด (Grinder machine) [14,15] (Figure 1 C)

ส่วนที่ 2 เปลือกอะโวคาโดที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพทางชีวภาพ (Avocado peel biological pretreatment ; ABP) คัดเลือกผลอะโวคาโด ที่มีเซลล์ลูโลสกับลินินสูง โดยเลือกผลที่ไม่มีการเข้าทำลายของโรคและแมลง นำผลอะโวคาโดมาผ่านกระบวนการสภาพทางชีวภาพ (Biological pretreatment) ทำการผ่า แล้วล้างทำความสะอาดเปลือก จากนั้นทำการปลูกเชื้อโดยใช้เข็มที่ผ่านการนึ่งฆ่าเชื้อเจาะบนผิวเปลือก 1-3 จุด แล้ววางชิ้นรุ่นที่มีเชื้อรา *Colletotrichum* sp. เจริญอยู่บนอาหาร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร วางบนรอยแผล นำอะโวคาโดที่ปลูกเชื้อแล้ว บ่มในกล่องพลาสติกที่มีการควบคุมความชื้น บ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 21 วัน จากนั้นนำอะโวคาโดที่ผ่านกระบวนการทางชีวภาพ ล้างด้วยน้ำ DI และหั่นเป็นชิ้นขนาด 1x1 เซนติเมตร (Figure 1 E) และนำไปอบให้แห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จนแห้งสนิท (Figure 1 F) นำมาบดด้วยเครื่องบดและร่อนด้วยตระแกรงร่อน (Figure 1 G) ดัดแปลงวิธีจาก Chandra et al., 2009 [14] และ Ramirez-Valencia et al., 2024 [16]

2.3 การเตรียมถ่านกัมมันต์แบบรูพรุนลำดับขั้น

ผงเปลือกอะโวคาโดจากขั้นตอนที่ 2.2 ทั้งกลุ่มที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพทางชีวภาพ ถูกนำเข้าสู่กระบวนการคาร์บอนเซชันภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนในเตาเผาแบบท่อ (Tube furnace) ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน (N₂) คงที่ที่ 0.2 ลิตรต่อนาที และอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ตามวิธีการของ Ramirez-Valencia et al., 2024 [16] เมื่อสิ้นสุดกระบวนการและปล่อยให้ระบบเย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้อง วัสดุคาร์บอนที่ได้ถูกนำมาล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนซ้ำหลายครั้งจนกระทั่งน้ำล้างมีค่า pH เป็นกลาง (Figure 1 D และ 1 H) จากนั้นนำไปอบแห้งและเก็บในภาชนะดูดความชื้น ก่อนนำไปวิเคราะห์คุณลักษณะทางเคมีและโครงสร้างด้วยเทคนิค FTIR, XRD, Raman, BET และ SEM

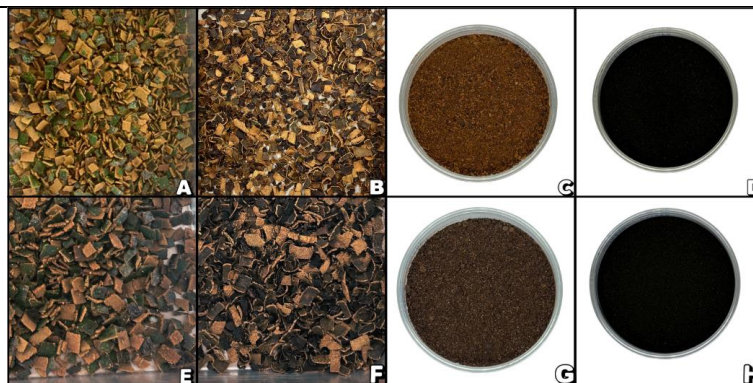


Figure 1 Physical appearance of Avocado Peels and carbon materials at different stages: (A-D) Avocado peel Non-Biological Pretreatment: (A) Chopped, (B) Dried, (C) Ground, and (D) Carbonized husk, (E-H) Avocado peel Biological Pretreatment: (E) Chopped, (F) Dried, (G) Ground, and (H) Hierarchical porous carbon a filter carbonization.

2.4 วิเคราะห์สมบัติของวัสดุถ่านกัมมันต์

การวิเคราะห์สมบัติของวัสดุครอบคลุมทั้งด้านองค์ประกอบเคมี โครงสร้าง และสัณฐานวิทยา โดยศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) เพื่อระบุชนิดของพันธะและหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญ วิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลและระดับความเป็นระเบียบของคาร์บอนด้วย Raman spectroscopy (Raman) มีการตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วย X-ray Diffraction (XRD) นอกจากนี้ ประเมินพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนด้วยวิธี Brunauer-Emmett-Teller method (BET) และศึกษาลักษณะพื้นผิวกับโครงสร้างรูพรุนด้วย Scanning Electron Microscopy (SEM) เพื่อสนับสนุนการอธิบายสมบัติของวัสดุ

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 การแยกและจัดจำแนกเชื้อรา *Colletotrichum* sp. สาเหตุโรคน้ำตาลไหม้ในผลไม้

จากการเก็บตัวอย่างผลไม้ที่แสดงอาการของโรค พบลักษณะอาการเริ่มต้นเป็นจุดแผลสีน้ำตาลถึงดำ มีรูปร่างกลมบนผิวผล ต่อมาแผลมีการขยายขนาดและยุบตัวลง ซึ่งเป็นลักษณะจำเพาะของโรคแอนแทรคโนส (Figure 2 A) เมื่อนำตัวอย่างมาทำการแยกเชื้อและเลี้ยงบนอาหาร PDA พบว่าโคโคนีมีเส้นใยสีขาว ลักษณะฟู และเมื่อพิจารณาด้านหลังของจานเพาะเชื้อมีสีครีมถึงน้ำตาลอ่อน (Figure 2 B, 2 C) การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาภายใต้กล้องจุลทรรศน์พบว่า เส้นใย (Mycelium) มีลักษณะใส ไม่มีสี และมีผนังกัน (Septate hyphae) (Figure 2 D) โคนิเดีย (Conidia) มีรูปร่างทรงกระบอกถึงรูปไข่ (Cylindrical to ellipsoidal) ปลายมน ผิวเรียบ (Figure 2 E) โดยพบการรวมตัวเป็นกลุ่ม ลักษณะดังกล่าวสอดคล้องกับลักษณะจำเพาะของเชื้อราในสกุล *Colletotrichum* sp. ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของโรคแอนแทรคโนสในผลไม้

3.2 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์โครงสร้างรูพรุนแบบลำดับขั้นด้วยเทคนิค FT-IR

จากการวิเคราะห์สเปกตรัม FT-IR ของตัวอย่างที่ไม่ผ่านการปรับสภาพทางชีวภาพ (NABP) และผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา (ABP) ทั้งก่อนการเผา (Figure 3 A) และหลังการเผา (Figure 3 B) แสดงให้เห็นความแตกต่างของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิววัสดุอย่างชัดเจน ก่อนการเผา ตัวอย่าง ABP แสดงความเข้มของสัญญาณที่เกี่ยวข้องกับหมู่ -CH, C=O และ C-O-C สูงกว่า NABP ซึ่งสะท้อนถึงการคงอยู่ขององค์ประกอบอินทรีย์จากชีวมวล เช่น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน [17, 18] หลังการเผา พบว่าความเข้มของแถบการดูดกลืนที่เกี่ยวข้องกับหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ลดลงอย่างชัดเจนในทั้งสองตัวอย่าง บ่งชี้ถึงการสลายตัวของสารอินทรีย์และการเปลี่ยนผ่านสู่โครงสร้างคาร์บอน บ่งชี้ถึงการสลายตัวบางส่วนของหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ที่อาจเกิดขึ้นในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างก่อนการเผา [19, 20] หลังการเผา พบว่าความเข้มของแถบการดูดกลืนที่เกี่ยวข้องกับหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ส่วนใหญ่ลดลงอย่างมากในทั้งสองตัวอย่าง แสดงถึงการสลายตัวของโครงสร้างอินทรีย์และการเปลี่ยนผ่านไปสู่โครงสร้างคาร์บอน ตรวจพบสัญญาณอ่อนของหมู่ C-O-C และ C-H โดยเฉพาะในตัวอย่าง ABP ซึ่งบ่งชี้ว่ายังคงมีหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนหลงเหลืออยู่บางส่วน ในขณะที่ตัวอย่าง NABP แสดงค่าการดูดกลืนที่ต่ำกว่าอย่างชัดเจนในทุกช่วงความถี่ NABP มีค่าการดูดกลืนต่ำในทุกช่วงความถี่

แสดงถึงการลดลงของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว โดยเฉพาะหมู่ที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ ซึ่งบ่งชี้ว่ามีระดับการคาร์บอนไนซ์สูงขึ้น และการกำจัดหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่า ความแตกต่างระหว่างตัวอย่าง ABP และ NABP ชี้ให้เห็นว่า กระบวนการเตรียมและการเผามีผลต่อโครงสร้างทางเคมีของวัสดุ ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับรายงานของ Mabalane et al., 2024 [19] ที่รายงานว่า ก่อนการเผาพบหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์หลัก ได้แก่ -CH (ประมาณ 2,920-2,850 cm^{-1}), C=O/C=C (ประมาณ 1,600-1,650 cm^{-1}) และ C-O/C-O-C (ประมาณ 1,000-1,200 cm^{-1}) ซึ่งเป็นลักษณะของชีวมวลอะโวคาโด หลังการเผาความเข้มของพีคดังกล่าวลดลงอย่างชัดเจน แสดงถึงการสลายตัวของสารอินทรีย์และการเกิดโครงสร้างคาร์บอนที่มีความเสถียรสูงขึ้น โดยมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงสอดคล้องกับผลการศึกษาอย่างชัดเจน

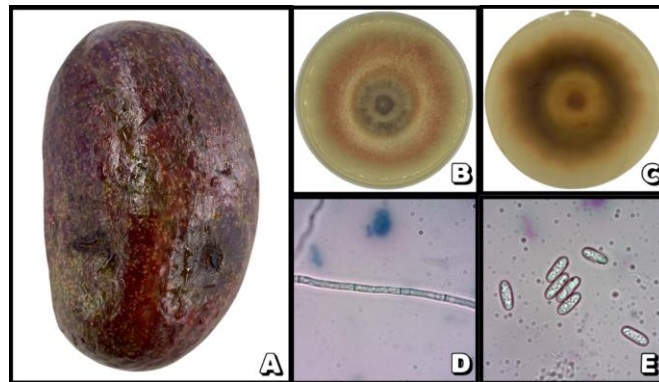


Figure 2 Morphological characteristics of *Colletotrichum* sp. isolated from infected Avocado Peels : (A) Symptoms of pod anthracnose, (B) Front of fungal colony, (C) Reverse of fungal colony on PDA, (D) Septate mycelium under light microscope, and (E) Characteristics of conidia (400x).

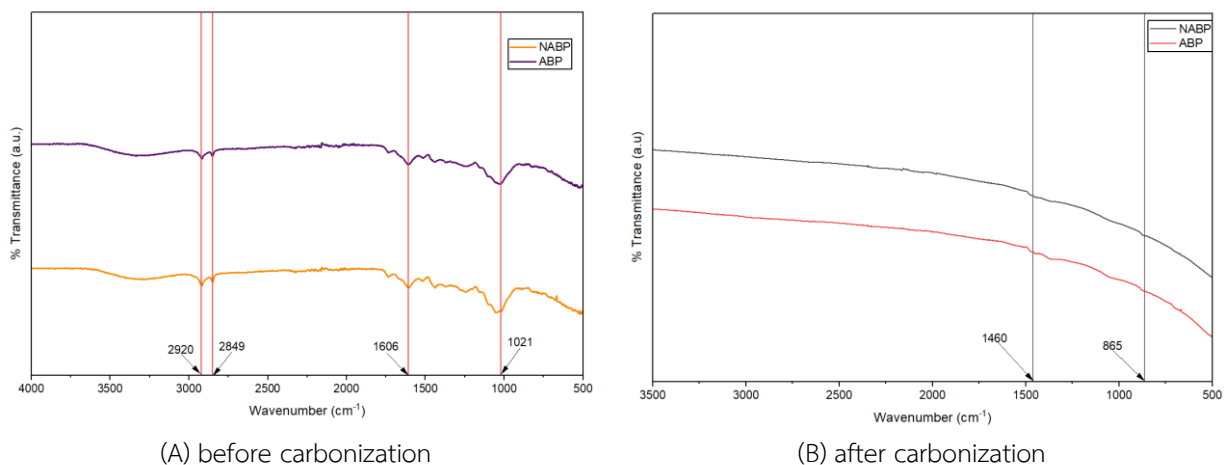


Figure 3 FT-IR spectra of activated carbon derived from avocado peel: (A) before and (B) after carbonization of avocado peel non-biological pretreatment (NABP) and avocado peel biological pretreatment (ABP).

3.3 ผลการศึกษาโครงสร้างโมเลกุลด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี (Raman Spectroscopy)

ผลการวิเคราะห์สเปกตรัม Raman ของคาร์บอนรูพรุนลำดับชั้น (ABP) ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเชื้อรา *Colletotrichum* sp. ดังแสดงใน Figure 4 พบแถบสัญญาณหลัก 2 แถบที่เป็นลักษณะจำเพาะของวัสดุคาร์บอน ได้แก่ แถบ D (D Band) ที่ตำแหน่งประมาณ 1,350 cm^{-1} และ แถบ G (G Band) ที่ตำแหน่งประมาณ 1,550 cm^{-1} โดยแถบ D มีความสัมพันธ์กับโหมดการสั่นของพันธะคาร์บอนในบริเวณที่มีความไม่เป็นระเบียบหรือจุดบกพร่องของโครงสร้างคาร์บอน (Defect-induced mode) ขณะที่แถบ G เกิดจากการสั่นของพันธะ C-C ในระนาบของอะตอมคาร์บอนแบบ sp^2 ซึ่งแสดงถึงระดับความเป็นระเบียบของโครงสร้างกราฟิต (E_{2g} Mode) เมื่อพิจารณาอัตราส่วนความเข้มของแถบ D และ G (I_D/I_G) พบว่า ABP แสดงค่าในระดับค่อนข้างสูง ซึ่งบ่งชี้ถึงความไม่เป็นระเบียบ และลักษณะดังกล่าวแสดงถึงผลของกระบวนการปรับสภาพทางชีวภาพด้วยเชื้อรา *Colletotrichum* sp. ร่วมกับกระบวนการเผาที่อุณหภูมิสูง ซึ่งมีส่วนช่วยเพิ่มโครงสร้างคาร์บอนและส่งเสริมการเกิดโครงสร้างรู

พจนแบบลำดับชั้น [21] โดยมีความสอดคล้องกับรายงานของ Khalil et al., 2020 [22] ที่รายงานว่า การปรับสภาพคาร์บอนจากชีวมวลสามารถทำให้ค่าอัตราส่วน I_D/I_G เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งแสดงถึงการเพิ่มขึ้นของความไม่เป็นระเบียบของโครงสร้าง และการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างที่มีการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเกิดจากการย่อยสลายหรือการแปรสภาพของโครงสร้างอะโรมาติกและการเกิดตำแหน่งออกฤทธิ์ใหม่บนพื้นผิวคาร์บอน ส่งผลให้โหมดการสั่นแบบ Defect-induced ของแถบ D ถูกกระตุ้นมากขึ้น ค่า I_D/I_G ที่สูงขึ้น จึงเป็นตัวบ่งชี้ระดับความไม่เป็นระเบียบของโครงสร้าง และระดับการพัฒนาของโครงสร้างคาร์บอนรูพรุนได้อย่างเหมาะสม

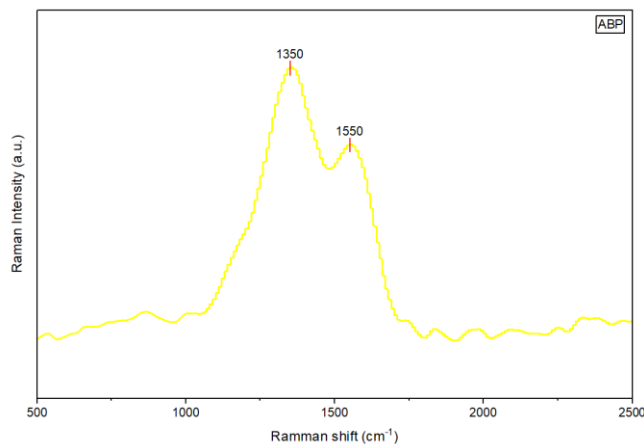


Figure 4 Raman spectrum of hierarchical porous carbon (ABP) pretreated with *Colletotrichum* sp., showing D and G bands.

3.4 ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD

จากผลการวิเคราะห์ XRD ของ NABP และ ABP (Figure 5) แสดงให้เห็นว่า NABP มีลักษณะผลึก (crystallinity) สูงกว่า โดยปรากฏพีคหลักบริเวณ 2θ 26-30° และ 43-45° ซึ่งสอดคล้องกับระนาบ (002) และ (100) ของโครงสร้างกราฟไฟต์ตามมาตรฐาน NABP แสดงพีค (002) ที่มีความแคบ คม และมีความเข้มสูงกว่า ABP รวมถึงมีค่า D-Spacing ต่ำกว่า สะท้อนถึงการซ้อนตัวของชั้นกราฟไฟต์ที่เป็นระเบียบมากกว่า ในขณะที่ ABP แสดงลักษณะโครงสร้างไม่เป็นผลึกสูงขึ้น โดยมีพีค (002) ที่กว้างกว่า ความเข้มต่ำกว่า และค่า d-spacing สูงขึ้น บ่งบอกถึงการซ้อนตัวของ graphene layers ที่หลวมมากขึ้น และการเกิดความไม่เป็นระเบียบในโครงสร้างที่มากขึ้น ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มพื้นที่ผิว และก่อให้เกิดโครงสร้าง Micropores และ Mesopores ในปริมาณมาก ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Cheng et al., 2021 [24] และ Cheng et al., 2020 [12] ที่รายงานว่า การปรับสภาพชีวมวลด้วยจุลินทรีย์ทำให้โครงสร้างลิโกลอสถุย่อยและกระบวนการจัดเรียงตัวเดิม ส่งผลให้คาร์บอนที่ได้หลังการคาร์บอนในเซชันมีระดับความเป็นระเบียบลดลง การวิเคราะห์ด้วย XRD จึงแสดงพีคที่กว้างและความเข้มของพีค (002) ลดลง ซึ่งเป็นลักษณะของคาร์บอนโครงสร้างไม่เป็นระเบียบที่เพิ่มขึ้น และเอื้อต่อการเกิดโครงสร้างรูพรุนลำดับชั้นของถ่านกัมมันต์

3.5 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของรูพรุนและลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์เทคนิค BET

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างรูพรุนด้วยเทคนิค BET จาก Table 1 แสดงให้เห็นว่าถ่านกัมมันต์จากเปลือกอะโวคาโดทั้งแบบที่ไม่ผ่านการบวกรวมการทางชีวภาพ (NABP) และแบบที่ผ่านการบวกรวมการทางชีวภาพ (ABP) มีโครงสร้างรูพรุนแบบลำดับชั้น (Hierarchical porous structure) ครอบคลุมช่วงขนาด 2.00-10.00, 10.00-20.00, 20.00-50.00 และมากกว่า 50.00 นาโนเมตร ซึ่งอยู่ในช่วง Mesopores ถึง Macropores ตามการจำแนกของ IUPAC โครงสร้างดังกล่าวเอื้อต่อกลไกการดูดซับอย่างเป็นระบบ เนื่องจากรูพรุนแต่ละช่วงขนาดทำหน้าที่สนับสนุนกัน โดยพบว่า รูพรุนช่วง 2.00-10.00 นาโนเมตร มีสัดส่วนสูงที่สุดในทั้งสองตัวอย่าง (NABP 49.48% และ ABP 50.00%) จัดเป็นช่วงที่มีบทบาทสำคัญต่อความจุการดูดซับ เนื่องจากขนาดใกล้เคียงกับโมเลกุลของสารดูดซับ ทำให้สามารถเข้าไปยึดเกาะภายในรูพรุนได้ดีขึ้น [23] และทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวคาร์บอนกับโมเลกุลได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงทำหน้าที่เป็นตำแหน่งดูดซับหลัก (Active adsorption sites) ขณะที่รูพรุนช่วง 10.00-20.00 นาโนเมตร (NABP 17.82%, ABP 16.24%) และ 20.00-50.00 นาโนเมตร (NABP 13.89%, ABP 12.85%) ทำหน้าที่เป็นโครงข่ายช่องทางลำเลียงมวล (Mass transfer network) ช่วยลดข้อจำกัดด้านการแพร่และเพิ่มอัตราการดูดซับของระบบ ส่วนรูพรุนขนาดมากกว่า 50.00 นาโนเมตร ซึ่งจัดเป็น Macropores ทำหน้าที่เป็นช่องเปิดและแหล่งสะสมโมเลกุลในระยะเริ่มต้นก่อนการแพร่เข้า

สู่โครงสร้างภายใน โดยพบสัดส่วนใน ABP (20.91%) สูงกว่า NABP (18.81%) สะท้อนให้เห็นว่า ABP มีโครงสร้างที่เปิดและเอื้อต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลมากกว่า ลักษณะโครงสร้างรูพรุนหลายระดับดังกล่าวสอดคล้องกับรายงานของ Cheng et al., 2020 และ Cheng et al., 2021 ที่ระบุว่าคาร์บอนที่มีโครงสร้าง Meso-Macro porous แบบลำดับชั้นสามารถให้ทั้งความจุการดูดซับสูงและอัตราการดูดซับที่รวดเร็วได้พร้อมกัน [12, 24]

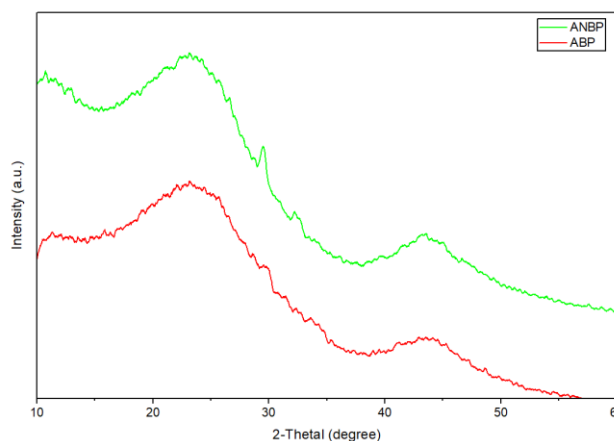


Figure 5 XRD patterns of activated carbon from avocado peel: avocado peel non-biological pretreatment (NABP) and avocado peel biological pretreatment (ABP).

Table 1 Pore size distribution and pore volume contribution of hierarchical porous carbon derived from avocado peel subjected to non-biological (NABP) and biological pretreatment (ABP).

Pore Range (nm)	Pore Volume (cm ³ /g)		Percentage (%)	
	NABP	ABP	NABP	ABP
2.00-10.00	0.04331	0.04205	49.48	50.00
10.00-20.00	0.01560	0.01366	17.82	16.24
20.00-50.00	0.01216	0.01081	13.89	12.85
>50.00	0.01647	0.01759	18.81	20.91

3.6 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวถ่านกัมมันต์ด้วยเทคนิค SEM

เมื่อพิจารณาลักษณะพื้นฐานวิทยาศาสตร์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า พบว่าตัวอย่าง NABP (Figure 6 A) มีพื้นผิวค่อนข้างเรียบและรูพรุนกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ ในขณะที่ตัวอย่าง ABP (Figure 6 B) ปรากฏโครงข่ายรูพรุนที่ซับซ้อน มีโพรง (Cavities) และช่องว่างเชื่อมต่อกันทั่วพื้นผิวอย่าง ภาพ SEM ดังกล่าวยืนยันว่าการปรับสภาพทางชีวภาพด้วยเชื้อรา *Colletotrichum* sp. มีบทบาทในการทำลายโครงสร้างลิกโนเซลลูโลสของเปลือกอะโวคาโด ส่งผลให้เกิดโครงสร้างรูพรุนที่เพิ่มขึ้นและมีลักษณะลำดับชั้นมากขึ้นภายหลังการคาร์บอนไนเซชัน

4. สรุป

จากการปรับสภาพทางชีวภาพด้วยเชื้อรา *Colletotrichum* sp. ส่งผลให้ถ่านกัมมันต์จากเปลือกอะโวคาโดมีโครงสร้างรูพรุนแบบลำดับชั้น (Hierarchical porous structure) ที่ซับซ้อนและมีความเป็นระเบียบสูงกว่ากลุ่มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพอย่างชัดเจน โดยผลการวิเคราะห์ด้วยลักษณะทางวิทยาศาสตร์ผ่านเทคนิค SEM และโครงสร้างระดับโมเลกุลจาก Raman spectroscopy ที่ปรากฏค่าอัตราส่วน I_D/I_G ในระดับ 1.2 สะท้อนถึงโครงสร้างคาร์บอนที่มีความไม่เป็นระเบียบของโครงสร้างสูง ซึ่งเอื้อประโยชน์ต่อการเก็บสะสมประจุและการถ่ายเทมวลสาร สำหรับการทดลองครั้งนี้อาจมีข้อจำกัดด้านกระบวนการปรับสภาพทางชีวภาพของเชื้อราที่เหมาะสม แต่อย่างไรก็ตาม กระบวนการปรับสภาพทางชีวภาพก็เป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพในการยกระดับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรให้เป็นวัสดุคาร์บอนมูลค่าสูงที่มีศักยภาพสำหรับนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับต่อไป

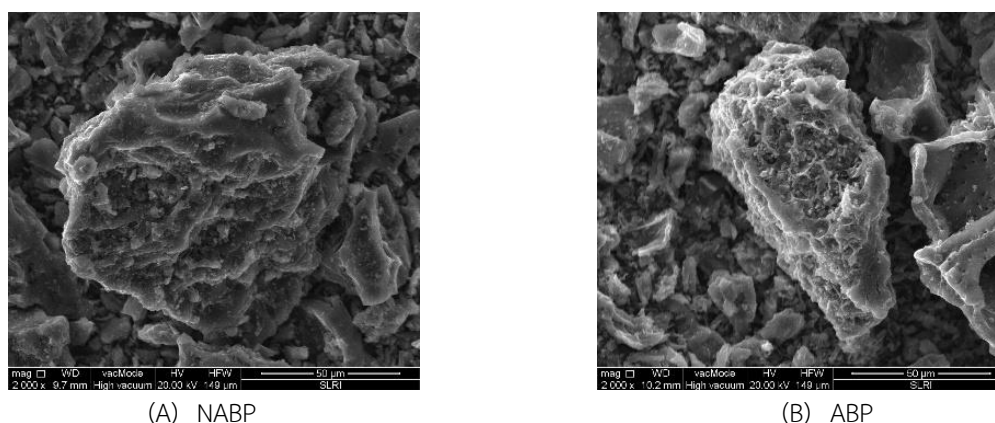


Figure 6 SEM images of hierarchical porous carbon surfaces at 1,000x magnification: (A) avocado peel non-biological pretreatment (NABP) and (B) Avocado peel Biological Pretreatment (ABP).

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อภิสิทธิ์ชัย เอียดเอื้อ และ นายดำรงดี มิ่งขวัญศิริ ภาควิชาคานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี คณะ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร เป็นอย่างสูง ที่ได้กรุณาให้การสนับสนุนด้านการเผ่าถ่านกัมมันต์ การวิเคราะห์หีข้อมูล ตลอดจนให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ ส่งผลให้งานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] IndexBox, "Global avocado market overview 2024," 2025. [Online]. Available: <https://www.indexbox.io/blog/avocado-world-market-overview-2024-4/>
- [2] Rabobank. (2025, March). Global avocado update 2025. Rabobank Industry Note. <https://www.rabobank.com/knowledge/d011484311>
- [3] กรมส่งเสริมการเกษตร. 2564. สถานการณ์การผลิตและการตลาดอะโวคาโดในประเทศไทย. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. เข้าถึงได้จาก: เว็บไซต์ <https://www.doae.go.th> (เข้าถึงเมื่อ 31 มกราคม 2568).
- [4] นิราศิณี คงตวงศ์. 2565. การวิเคราะห์ต้นทุนและผลตอบแทนจากการผลิตอะโวคาโดของเกษตรกรในจังหวัดตาก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยรัตนนคร, พิษณุโลก.
- [5] Khaosod. 2560. สร้างรายได้เสริม ด้วย ‘อะโวคาโด’ พืชแซมสวนทุเรียนที่ชุมพร ไม้เมืองหนาวแต่ปลูกได้ในภาคใต้. เข้าถึงได้จาก: เว็บไซต์ <https://www.khaosod.co.th> (เข้าถึงเมื่อ 31 มกราคม 2568)
- [6] Azeez, M. O., Oyedepo, J. A., and Adebayo, G. B. 2020. Production and characterization of activated carbon from avocado (*Persea americana*) peel. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*. 14: 100336.
- [7] Ioannidou, O. and Zabaniotou, A. 2007. Agricultural residues as precursors for activated carbon production— A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 11(9): 1966-2005.
- [8] Wang, J. and Kaskel, S. 2012. KOH activation of carbon-based materials for energy storage. *Journal of Materials Chemistry*. 22(45): 23710-23725.
- [9] Zhang, W. et al. 2019. Microbial targeted degradation pretreatment: A novel approach to preparation of activated carbon with specific hierarchical porous structures. *Environmental Science & Technology*. 53(13): 7632-7640.
- [10] Agrios, G. N. 2005. *Plant Pathology*. 5th edn. Elsevier Academic Press, Burlington.
- [11] De Silva, D. D., Ades, P. K., Hyde, K. D., and Taylor, P. W. J. 2017. Pathogenicity of *Colletotrichum* species and plant defence responses. *Plant Pathology*. 66(4): 633-647.

-
- [12] Cheng, H., Sun, Y., Wang, X., Zou, S., Ye, G., Huang, H. and Ye, D. 2020. Hierarchical porous carbon fabricated from cellulose-degrading fungus modified rice husks: Ultrahigh surface area and impressive improvement in toluene adsorption. *Journal of Hazardous Materials*. 392: 122298.
- [13] Ho, W. C., and Ko, W. H. 1997. A simple method for obtaining single-spore isolates of fungi, Department of Plant Pathology, Beaumont Agricultural Research Center, University of Hawaii at Manoa, Hilo, Hawaii 96720, USA, 38: 41-44
- [14] Chandra, T. C., Mirna, M. M., Sunarso, J., Sudaryanto, Y., and Ismadji, S. 2009. Activated carbon from durian shell: Preparation and characterization. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 40: 457-462.
- [15] Elewa, A. M., Amer, A. A., Attallah, M. F., Gad, H. A., Al-Ahmed, Z. A. M., and Ahmed, I. A. 2023. Chemically activated carbon based on biomass for adsorption of Fe(III) and Mn(II) ions from aqueous solution. *Materials*. 16(3): 1251.
- [16] Ramírez-Valencia, L. D., Lopez-Suarez, F. E., Conde, L. R., Bailon-García, E., Bueno-Lopez, A. and Perez-Cadenas, A. F. 2024. Cocoa husk as a precursor of carbonaceous materials for supercapacitors electrodes. *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 963: 1-12.
- [17] Pandey, K. K. 1999. A study of chemical structure of soft and hardwood and wood polymers by FTIR spectroscopy. *Journal of Applied Polymer Science*. 71(12): 1969-1975.
- [18] Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D. H., and Zheng, C. 2007. Characteristics of hemicellulose, cellulose, and lignin pyrolysis. *Fuel*. 86(12-13): 1781-1788.
- [19] Xu, F., Yu, J., Tesso, T., Dowell, F., and Wang, D. 2013. Qualitative and quantitative analysis of lignocellulosic biomass using infrared techniques: A mini-review. *Applied Energy*. 104: 809-823.
- [20] Mabalane, K., Thabede, P. M., and Shooto, N. D. 2024. Activated carbon from paper waste as potential adsorbents for methylene blue and hexavalent chromium. *Applied Sciences*. 14(11): 4585.
- [21] Mabalane, K., Malagón-Romero, D. H., Velasco-Peña, M. A., Arrubla-Vélez, J. P., Clavijo-Barreto, L. F., Barrera-Mendoza, I. N. and Jiménez-Montero, E. D. 2024. Preparation and characterization of biochar derived from avocado seed for environmental applications. *Journal of Environmental Chemical Engineering*.
- [22] Khalil, A. M., Msaadi, R., Sassi, W., Ghanmi, I., Pires, R., Michely, L., Snoussi, Y., Chevillot-Biraud, A., Lau-Truong, S., and Chehimi, M. M. 2022. Facile diazonium modification of pomegranate peel biochar: A stupendous derived relationship between thermal and Raman analyses. *Carbon Letters*. 32: 1519-1529.
- [23] Thommes, M., Kaneko, K., Neimark, A.V., Olivier, J.P., Rodriguez-Reinoso, F., Rouquerol, J. and Sing, K.S.W. (2015). Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 87(9-10), 1051-1069. <https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117>
- [24] Cheng, H., Ye, G., Wang, X., Su, C., Zhang, W., Yao, F., Wang, Y., Jiao, Y., Huang, H. and Ye, D. 2021. Micro-mesoporous carbon fabricated by Phanerochaete chrysosporium pretreatment coupling with chemical activation: Promoting effect and toluene adsorption performance. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 9: 105054.
-

ระบบตู้ปลาอัจฉริยะสำหรับติดตามและควบคุมสภาพแวดล้อมแบบเรียลไทม์ A Real-Time Smart Aquarium Monitoring and Control System

ณัฐวุฒิ จุลเสวก¹ ญาณพัฒน์ ศิริโสตร์¹ และ อรรถพล ปิลไลย์^{1,*}
Nattawut Junsavake¹, Yanapat Sirisot¹ and Attapon Pillai^{1,*}

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีดิจิทัล คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต จังหวัดภูเก็ต 83000 ประเทศไทย
¹Department of Digital Technology program and Technology, Phuket Rajabhat University, Phuket Province, 83000, Thailand
*Corresponding author: Attapon Pillai, e-mail: attapon.p@pkru.ac.th

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยเรื่อง ระบบตู้ปลาอัจฉริยะสำหรับติดตามและควบคุมสภาพแวดล้อมแบบเรียลไทม์ มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบตู้ปลาอัจฉริยะโดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยี Internet of Things (IoT) เพื่อสนับสนุนการดูแลตู้ปลาสำหรับนักเลี้ยงปลาทั่วไปและผู้ประกอบการร้านปลา ให้สามารถควบคุมและติดตามสภาพแวดล้อมภายในตู้ปลาได้อย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพ ระบบถูกออกแบบให้สามารถควบคุมการให้อาหารปลาอัตโนมัติด้วยเซอร์โวมอเตอร์ การเปิด-ปิดไฟส่องสว่าง และการควบคุมพัดลมระบายความร้อนผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตจากระยะไกล โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 เป็นหน่วยประมวลผลหลัก และใช้เซนเซอร์วัดอุณหภูมิแบบดิจิทัล DS18B20 ซึ่งมีความแม่นยำและเสถียรภาพในการวัดสูง ข้อมูลที่ตรวจวัดได้จะถูกประมวลผลและแสดงผลแบบเรียลไทม์ผ่านเว็บแอปพลิเคชันที่รองรับการใช้งานทั้งบนสมาร์ตโฟนและคอมพิวเตอร์ ทำให้สามารถตรวจสอบสถานะและสั่งงานระบบได้ทุกที่ทุกเวลา นอกจากนี้ ระบบยังประยุกต์ใช้โมดูล ESP32-CAM ในการถ่ายทอดภาพภายในตู้ปลาแบบเรียลไทม์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการติดตามและตรวจสอบสภาพแวดล้อม รวมถึงพฤติกรรมของปลาได้อย่างต่อเนื่องผ่านแอปพลิเคชัน ช่วยให้ผู้ใช้สามารถเฝ้าระวังและดูแลตู้ปลาได้อย่างใกล้ชิดแม้อยู่ในระยะไกล

คำสำคัญ: ระบบตู้ปลาอัจฉริยะ, อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง, บอร์ด esp32, การควบคุมระยะไกล, การตรวจวัดอุณหภูมิ

Abstract

The research project titled A Real-Time Smart Aquarium Monitoring and Control System aims to develop an intelligent aquarium system by applying Internet of Things (IoT) technology to support aquarium care for general fish hobbyists and aquarium business operators. The system is designed to enable continuous and efficient monitoring and control of the internal aquarium environment. It provides automatic fish feeding using a servo motor, lighting control, and cooling fan control via remote internet connectivity. The ESP32 microcontroller serves as the main processing unit, while the DS18B20 digital water temperature sensor is utilized due to its high accuracy and stability. The collected data are processed and displayed in real time through a web application compatible with both smartphones and computers, allowing users to monitor system status and control operations anytime and anywhere. In addition, the system integrates an ESP32-CAM module to provide real-time video streaming inside the aquarium. This feature enhances the ability to monitor environmental conditions and observe fish behavior continuously through the application, enabling users to supervise and manage the aquarium closely even from a remote location.

Keywords: Smart Aquarium System, Internet of Things (IoT), ESP32 Board, Remote Control, Water Temperature Monitoring

1. บทนำ

ในปัจจุบัน เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things: IoT) ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการพัฒนาระบบควบคุมอัตโนมัติและระบบไซเบอร์-กายภาพ (Cyber-Physical Systems: CPS) ซึ่งสามารถตรวจวัด ประมวลผล และสั่งการอุปกรณ์ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตแบบเรียลไทม์ แนวคิดดังกล่าวถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านสมาร์ทโฮม เกษตรอัจฉริยะ และระบบติดตามสภาพแวดล้อมอย่างแพร่หลาย [1] อย่างไรก็ตาม ในบริบทของการเลี้ยงปลาสวยงาม การดูแลตู้ปลายังคงอาศัยแรงงานมนุษย์เป็นหลัก ส่งผลให้เกิดปัญหาการให้อาหารไม่สม่ำเสมอ การควบคุมอุณหภูมิไม่เหมาะสม และไม่สามารถตรวจสอบสภาพตู้ปลาได้ตลอดเวลา โดยเฉพาะในกลุ่มผู้เลี้ยงที่มีข้อจำกัดด้านเวลา ปัญหาดังกล่าวอาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพและอัตราการรอดของปลา

จากการทบทวนวรรณกรรม พบว่างานวิจัยก่อนหน้าได้มีการพัฒนาระบบให้อาหารปลาอัตโนมัติด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ และเซนเซอร์พื้นฐาน [2] รวมถึงระบบตรวจวัดอุณหภูมิและควบคุมอุปกรณ์ผ่านเครือข่ายไร้สาย [3] อย่างไรก็ตาม หลายระบบยังขาดการบูรณาการการแสดงผลแบบเรียลไทม์ผ่านเว็บแอปพลิเคชัน และยังไม่มีการผสมผสานระบบสภาพสดเพื่อสนับสนุนการติดตามเชิงทัศนภาพอย่างครบวงจร [4] นอกจากนี้ งานวิจัยบางส่วนมุ่งเน้นเฉพาะการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ทางกายภาพ โดยยังไม่ครอบคลุมการควบคุมอุปกรณ์หลายประเภทในแพลตฟอร์มเดียว

ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยฉบับนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) ออกแบบและพัฒนาระบบตู้ปลาอัจฉริยะบนสถาปัตยกรรม IoT โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 เป็นหน่วยประมวลผลหลัก (2) พัฒนาระบบควบคุมการให้อาหารปลา การเปิด-ปิดไฟ และพัดลมระบายความร้อนผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต (3) ตรวจวัดและแสดงผลอุณหภูมิแบบเรียลไทม์ด้วยเซนเซอร์ดิจิทัล และ (4) เสริมด้วยระบบสตรีมภาพสดด้วยโมดูล ESP32-CAM เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการติดตามสภาพแวดล้อมภายในตู้ปลา แนวทางดังกล่าวมุ่งตอบโจทย์การลดภาระผู้ใช้งาน เพิ่มความแม่นยำในการควบคุม และยกระดับการจัดการตู้ปลาให้มีความเป็นระบบและเชื่อถือได้ในเชิงวิศวกรรม

2. วิธีการศึกษา

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบ A Real-Time Smart Aquarium Monitoring and Control System สำหรับผู้เลี้ยงปลาสวยงามในครัวเรือนและผู้ประกอบการร้านปลาสวยงามที่มีข้อจำกัดด้านเวลา โดยประยุกต์ใช้สถาปัตยกรรม Internet of Things (IoT) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมและติดตามสภาพแวดล้อมภายในตู้ปลาแบบเรียลไทม์

ระบบใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 เป็นหน่วยประมวลผลหลัก รับข้อมูลจากเซนเซอร์วัดอุณหภูมิแบบดิจิทัล DS18B20 และควบคุมอุปกรณ์ ได้แก่ เซอร์โวมอเตอร์สำหรับการให้อาหารปลา วงจรรีเลย์สำหรับควบคุมไฟและพัดลมระบายความร้อน พร้อมทั้งติดตั้งโมดูล ESP32-CAM สำหรับการสตรีมภาพสดผ่านเครือข่าย Wi-Fi โปรแกรมพัฒนาด้วยภาษา C++ บน Arduino IDE โดยกำหนดให้มีการอ่านค่าอุณหภูมิทุก 5 วินาที และแสดงผลผ่านเว็บแอปพลิเคชัน การประเมินผลครอบคลุมความแม่นยำของการวัดอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) และระยะเวลาการตอบสนองของระบบ เพื่อยืนยันความเหมาะสมต่อการใช้งานจริง

2.1 การออกแบบโครงสร้างระบบ

ระบบถูกออกแบบภายใต้แนวคิดสถาปัตยกรรมแบบ Edge Computing โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 เป็นหน่วยประมวลผลหลัก ทำหน้าที่รับข้อมูลจากเซนเซอร์และควบคุมอุปกรณ์เอาต์พุตผ่านสัญญาณดิจิทัลและ PWM โครงสร้างระบบแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ (1) ส่วนตรวจวัดข้อมูล (Sensing Layer) (2) ส่วนประมวลผลและควบคุม (Control Layer) และ (3) ส่วนแสดงผลและติดต่อผู้ใช้ (Application Layer) ผ่านเว็บแอปพลิเคชัน

2.2 การพัฒนาระบบฮาร์ดแวร์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการพัฒนาระบบประกอบด้วย เซนเซอร์วัดอุณหภูมิแบบดิจิทัล DS18B20 ซึ่งทำงานบนโปรโตคอล One-Wire ให้ค่าความละเอียด 0.0625 องศาเซลเซียส เซอร์โวมอเตอร์สำหรับควบคุมกลไกการให้อาหารปลา วงจรรีเลย์ 5 V สำหรับควบคุมการเปิด-ปิดไฟและพัดลมระบายความร้อน และโมดูล ESP32-CAM สำหรับการสตรีมภาพแบบเรียลไทม์ อุปกรณ์ทั้งหมดเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง 5 V และ 12 V ตามข้อกำหนดของแต่ละอุปกรณ์

2.3 การพัฒนาซอฟต์แวร์และการสื่อสารข้อมูล

โปรแกรมควบคุมถูกพัฒนาด้วยภาษา C++ บนแพลตฟอร์ม Arduino IDE โดยกำหนดให้ ESP32 เชื่อมต่อเครือข่ายเพื่อรับ-ส่งข้อมูลไปยังเว็บเซิร์ฟเวอร์ ข้อมูลอุณหภูมิจะถูกอ่านค่าทุก 5 วินาที และส่งไปยังเว็บแอปพลิเคชันเพื่อแสดงผลแบบเรียลไทม์ ผู้ใช้งานสามารถสั่งงานอุปกรณ์ผ่านหน้าเว็บ ซึ่งคำสั่งจะถูกส่งกลับมายังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อดำเนินการควบคุมทันที



Figure 1 (A) Hardware components

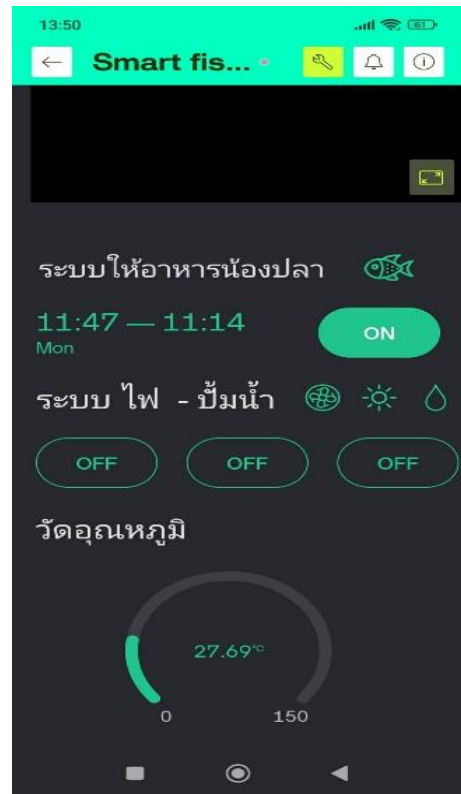


Figure 1 (B) User interface via mobile application.

Figure 1 (A) แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมตู้ปลาอัจฉริยะ ประกอบด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์และแผงวงจรทดลอง (Breadboard) ทำหน้าที่เป็นหน่วยประมวลผลหลัก ระบบไฟ LED สำหรับให้แสงสว่างและควบคุมรอบเวลาเปิด-ปิดภายในตู้ปลา ระบบกล้องสำหรับตรวจสอบภาพแบบเรียลไทม์ และการเชื่อมต่อสายสัญญาณไปยังอุปกรณ์ต่างๆ เช่น บั๊มน้ำ เครื่องให้อาหารอัตโนมัติ และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ ภายในตู้ปลาใช้เป็นพื้นที่ติดตั้งอุปกรณ์และเลี้ยงปลา

Figure 1 (B) แสดงหน้าจอแอปพลิเคชันสำหรับควบคุมและติดตามการทำงานของระบบตู้ปลาอัจฉริยะจากระยะไกล โดยสามารถสั่งงานระบบให้อาหาร เปิด-ปิดระบบไฟ และควบคุมบั๊มน้ำ รวมถึงแสดงค่าอุณหภูมิน้ำแบบเรียลไทม์ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต เพื่อเพิ่มความสะดวกและประสิทธิภาพในการดูแลตู้ปลา

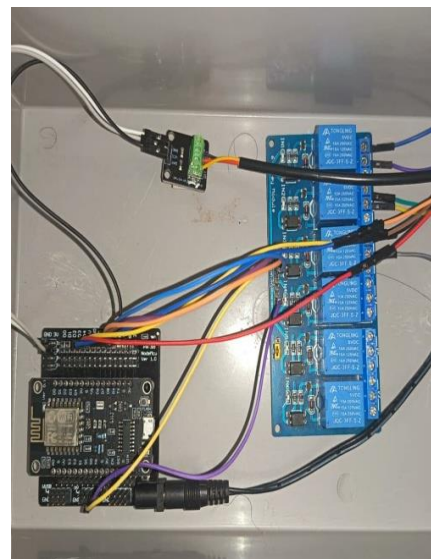
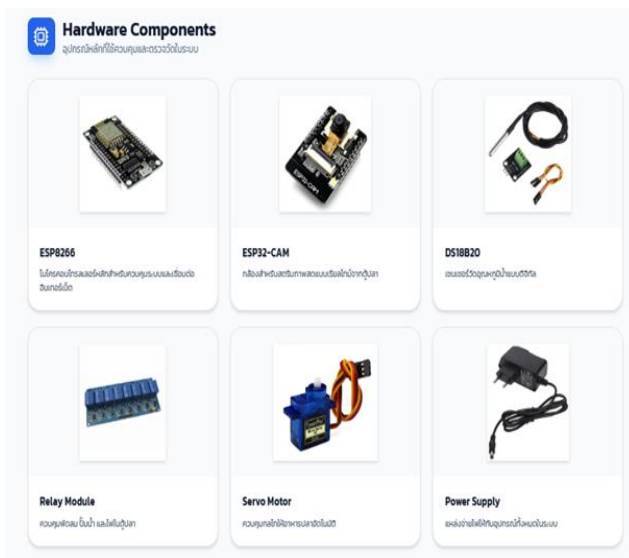
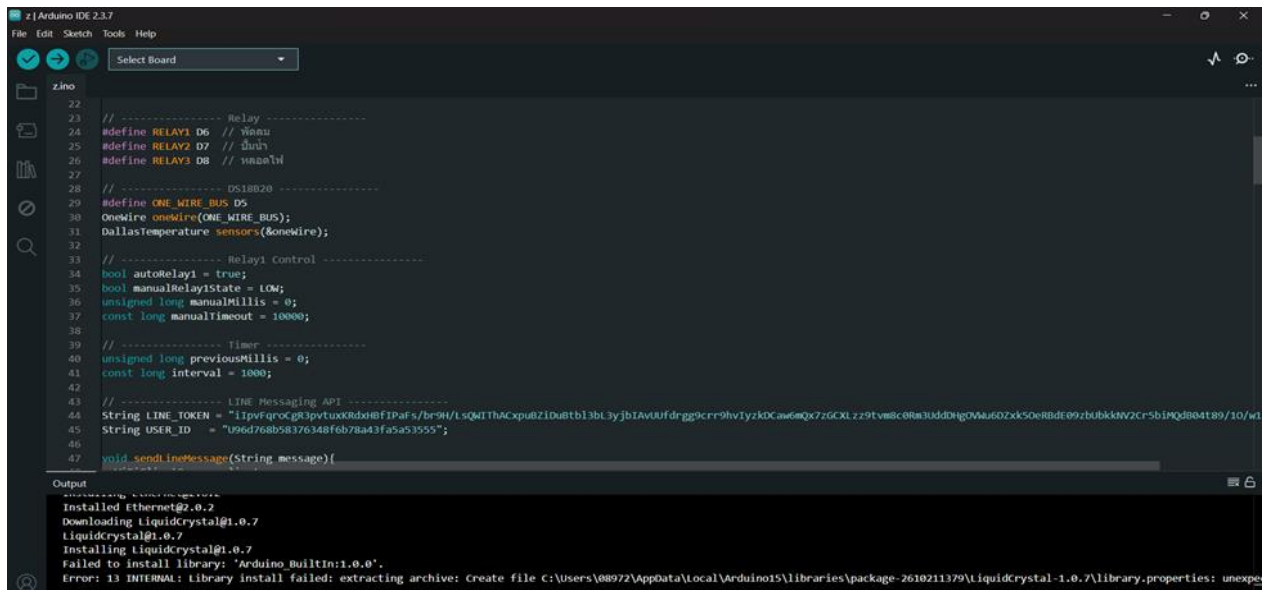


Figure 2 System hardware components

Figure 2 แสดงอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการพัฒนาระบบตู้ปลาอัจฉริยะ โดยมีบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP8266 ทำหน้าที่เป็นหน่วยประมวลผลหลักและเชื่อมต่อเครือข่ายอินเทอร์เน็ต กล้อง ESP32-CAM ใช้สำหรับตรวจสอบภาพภายในตู้ปลาแบบเรียลไทม์ผ่านระบบออนไลน์ เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ DS18B20 ทำหน้าที่ตรวจวัดอุณหภูมิน้ำและส่งข้อมูลเข้าสู่ระบบควบคุม รีเลย์โมดูลใช้สำหรับสั่งงานอุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น ระบบไฟส่องสว่างและปั้มน้ำ เซอร์โวมอเตอร์ทำหน้าที่ควบคุมกลไกการให้อาหารปลาโดยอัตโนมัติ แหล่งจ่ายไฟ (Power Supply) ทำหน้าที่จ่ายพลังงานให้กับอุปกรณ์ทั้งหมดอย่างเหมาะสม อุปกรณ์แต่ละส่วนเชื่อมต่อกันผ่านวงจรควบคุมบนแผงวงจรทดลอง (Breadboard) เพื่อความสะดวกในการพัฒนาและทดสอบการทำงาน โครงสร้างดังกล่าวช่วยให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและรองรับการควบคุมแบบอัตโนมัติผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต



```

zino
22
23 // ----- Relay -----
24 #define RELAY1 D6 // พัดลม
25 #define RELAY2 D7 // ปั้มน้ำ
26 #define RELAY3 D8 // พาสายไฟ
27
28 // ----- DS18B20 -----
29 #define ONE_WIRE_BUS D5
30 OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
31 DallasTemperature sensors(&oneWire);
32
33 // ----- Relay1 Control -----
34 bool autoRelay1 = true;
35 bool manualRelay1State = LOW;
36 unsigned long manualMillis = 0;
37 const long manualTimeout = 10000;
38
39 // ----- Timer -----
40 unsigned long previousMillis = 0;
41 const long interval = 1000;
42
43 // ----- LINE Messaging API -----
44 String LINE_TOKEN = "1ipvfqoG83pvtuxKrdxhBFIpafs/br9H/Lsq4IThAcxpu8Z1Du8t13bl3yjb1AVuUfdr9gcr9hV1yzkCaw6qx7z6CXLz9Tvm8c0Rm3uddHqVw460Zkx50eR8dE09zbubkkwV2cr5b1PqdB04t89/10/w1";
45 String USER_ID = "U9ed768b58376348feb78a43fa5a3555";
46
47 void sendLineMessage(String message){
  
```

Output

```

Installed Ethernet@1.0.2
Downloading LiquidCrystal@1.0.7
LiquidCrystal@1.0.7
Installing LiquidCrystal@1.0.7
Failed to install library: 'Arduino_BuiltIn:1.0.0'.
Error: 13 INTERNAL: Library install failed: extracting archive: create file c:\users\08972\AppData\Local\Arduino15\libraries\package-2610211379\LiquidCrystal-1.0.7\library.properties: unexpe
  
```

Figure 3 Program code for controlling a smart aquarium system using ESP8266

Figure 3 แสดงโค้ดโปรแกรมที่พัฒนาด้วยภาษา C++ บนแพลตฟอร์ม Arduino สำหรับควบคุมการทำงานของระบบตู้ปลาอัจฉริยะ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP8266 เป็นหน่วยประมวลผลหลัก ระบบเชื่อมต่อกับเครือข่าย Wi-Fi และแอปพลิเคชัน Blynk เพื่อรับคำสั่งและแสดงผลข้อมูลแบบเรียลไทม์ มีการควบคุมเซอร์โวมอเตอร์สำหรับกลไกการให้อาหารปลา ทั้งแบบสั่งงานทันทีและตั้งเวลาอัตโนมัติผ่านโมดูล RTC นอกจากนี้ยังควบคุมรีเลย์สำหรับพัดลม ปั้มน้ำ และหลอดไฟตามคำสั่งจากผู้ใช้หรือเงื่อนไขที่กำหนดในโปรแกรม ระบบอ่านค่าอุณหภูมิจากเซนเซอร์ DS18B20 เพื่อนำมาวิเคราะห์และสั่งเปิด-ปิดพัดลมโดยอัตโนมัติเมื่ออุณหภูมิเกินค่าที่ตั้งไว้ โค้ดยังรองรับโหมดควบคุมแบบ Manual และ Auto พร้อมกลไกหน่วงเวลาเพื่อป้องกันการทำงานซ้ำซ้อน อีกทั้งมีการเชื่อมต่อกับ LINE Messaging API เพื่อส่งการแจ้งเตือนสถานะการทำงานของอุปกรณ์และเหตุการณ์สำคัญไปยังผู้ใช้งาน โครงสร้างโปรแกรมถูกออกแบบให้ทำงานแบบวนลูป (Loop) และประมวลผลตามช่วงเวลา (Interval) เพื่อเพิ่มความเสถียรและประสิทธิภาพของระบบโดยรวม

2.4 การพัฒนาซอฟต์แวร์และการสื่อสารข้อมูล

การทดสอบแบ่งออกเป็น 3 ด้าน ได้แก่ (1) ความแม่นยำของการวัดอุณหภูมิ โดยเปรียบเทียบค่าที่วัดได้กับเทอร์มิสเตอร์มาตรฐาน (2) ความถูกต้องของการควบคุมอุปกรณ์ เช่น การหมุนของเซอร์โวมอเตอร์และการทำงานของรีเลย์ และ (3) ระยะเวลาความหน่วงของการสื่อสารข้อมูลผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต โดยวัดเวลาเฉลี่ยในการตอบสนองของระบบเป็นวินาที ผลการทดลองถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อประเมินเสถียรภาพและความเหมาะสมต่อการใช้งานจริงของระบบต้นแบบ

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

ผลการทดสอบระบบ A Real-Time Smart Aquarium Monitoring and Control System แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถทำงานได้ครบถ้วนตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ โดยการประเมินความแม่นยำของเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ DS18B20 เมื่อ

เปรียบเทียบกับเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยไม่เกิน ± 0.5 องศาเซลเซียส ซึ่งอยู่ในช่วงความถูกต้องตามคุณลักษณะทางเทคนิคของอุปกรณ์ [5] สะท้อนให้เห็นถึงความเสถียรและความน่าเชื่อถือของระบบตรวจวัดอุณหภูมิ

3.1 ผลการทดสอบความแม่นยำของการวัดอุณหภูมิ

ผลการทดลองเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่วัดได้จากเซนเซอร์ DS18B20 กับเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานภายใต้สภาวะน้ำอุณหภูมิ 25–30 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยไม่เกิน ± 0.5 องศาเซลเซียส ซึ่งอยู่ในช่วงความถูกต้องตามข้อกำหนดของอุปกรณ์ ค่าที่วัดได้มีความต่อเนื่องและไม่เกิดสัญญาณรบกวนที่มีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถตรวจวัดอุณหภูมิได้อย่างเสถียรและเหมาะสมต่อการใช้งานในตู้ปลาสวยงาม

3.2 ผลการทดสอบการควบคุมอุปกรณ์และการตอบสนองของระบบ

การทดสอบการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์และวงจรรีเลย์ภายใต้การสั่งงานผ่านเว็บแอปพลิเคชัน พบว่าสามารถตอบสนองต่อคำสั่งได้ถูกต้องครบถ้วนทุกครั้งที่ทดสอบ โดยมีระยะเวลาการตอบสนองเฉลี่ยประมาณ 1–2 วินาที นับตั้งแต่ผู้ใช้งานส่งคำสั่งจนถึงการทำงานของอุปกรณ์จริง ระบบสตรีมภาพผ่าน ESP32-CAM สามารถแสดงผลได้ต่อเนื่องภายใต้เครือข่าย Wi-Fi ที่มีความเสถียร ผลการทดลองสะท้อนว่าระบบมีความพร้อมในการใช้งานจริง สามารถลดภาระการดูแล และเพิ่มความสะดวกแก่ผู้เลี้ยงปลาได้อย่างมีประสิทธิภาพจริง

Table 1 Response time results of the device control system measured across five experimental trials, showing consistent operation with an average response time within the range of 1–2 seconds.

Experiment	Response Time (s)
1	1.2
2	1.5
3	1.4

Table 1 แสดงเวลาตอบสนองที่วัดได้ของระบบควบคุมอุปกรณ์ผ่านแอปพลิเคชันบนเว็บในการทดลองสามครั้ง เวลาตอบสนองที่บันทึกไว้คือ 1.2 วินาที 1.5 วินาที และ 1.4 วินาที ตามลำดับ โดยมีเวลาตอบสนองเฉลี่ยประมาณ 1.37 วินาที ผลลัพธ์แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของระบบที่สม่ำเสมอและเสถียร เนื่องจากความแปรปรวนระหว่างการทดลองมีน้อยมาก ซึ่งบ่งชี้ว่าการสื่อสารระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์และแอปพลิเคชันบนเว็บผ่าน Wi-Fi ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะสมสำหรับการใช้งานควบคุมแบบเรียลไทม์

4. สรุป

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนา ระบบควบคุมอุปกรณ์ตู้ปลาอัจฉริยะผ่านเว็บแอปพลิเคชัน โดยอาศัยสถาปัตยกรรมระบบสมองกลฝังตัวร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ โมดูลสื่อสาร Wi-Fi เซอร์โวมอเตอร์ และวงจรรีเลย์ เพื่อสร้างระบบควบคุมระยะไกลที่มีความเสถียรและสามารถทำงานได้แบบเรียลไทม์ โดยมีกลุ่มเป้าหมายคือ ผู้เลี้ยงปลาทั่วไป และผู้ประกอบการปลาสวยงาม ที่ต้องการเพิ่มความสะดวก ความแม่นยำ และประสิทธิภาพในการบริหารจัดการตู้ปลา ผลการทดสอบเชิงประสิทธิภาพแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถตอบสนองต่อคำสั่งควบคุมได้อย่างถูกต้องครบถ้วน โดยมีค่าเวลาหน่วงเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1–2 วินาที ซึ่งอยู่ในระดับที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานจริงในเชิงเศรษฐศาสตร์ ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถช่วยลดต้นทุนแรงงานในการดูแลตู้ปลา ลดความสูญเสียจากความผิดพลาดของมนุษย์ เช่น การลืมให้อาหารหรือการเปิด-ปิดอุปกรณ์ไม่ตรงเวลา และลดค่าใช้จ่ายจากการตรวจสอบพนักงานบ่อยครั้ง โดยเฉพาะในกรณีของผู้ประกอบการที่มีหลายตู้หรือหลายจุดเลี้ยง นอกจากนี้ การใช้โครงสร้างฮาร์ดแวร์ต้นทุนต่ำร่วมกับเทคโนโลยี IoT ทำให้ระบบมีความคุ้มค่า (Cost-Effectiveness) และสามารถขยายระบบเพิ่มเติมได้โดยไม่เพิ่มต้นทุนในสัดส่วนที่สูง สรุปได้ว่าผลการวิจัยมีความสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ทั้งด้านวิศวกรรมและด้านการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงเศรษฐกิจ และมีศักยภาพในการนำไปใช้งานจริงเพื่อเพิ่มผลผลิต ลดต้นทุน และยกระดับมาตรฐานการจัดการตู้ปลาในระยะยาว

5. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความรู้และความกรุณาและการสนับสนุนจากหลายฝ่าย ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่ได้ให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะเชิงวิชาการ และแนวทางในการปรับปรุงแก้ไขงานวิจัยอย่างต่อเนื่อง ตลอดจนให้การสนับสนุนด้านองค์ความรู้ทางวิศวกรรมและการพัฒนาระบบขอขอบคุณผู้ช่วยเหลือในการทดสอบระบบ การจัดเตรียมอุปกรณ์ และการเก็บรวบรวมข้อมูล

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] สมชาย ใจดี และ สมหญิง รักเรียน, “การพัฒนาระบบตรวจวัดอุณหภูมิน้ำด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์,” วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, ปีที่ 28, ฉบับที่ 2, หน้า 145–153, 2563.
- [2] J. Smith and A. Brown, “Design and development of a water temperature monitoring system using microcontroller,” International Journal of Science and Technology, vol. 12, no. 2, pp. 45–52, 2020.
- [3] วิชัย พงษ์ศรี. การออกแบบระบบไมโครคอนโทรลเลอร์เบื้องต้น. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ซีไอเอ็มเคชั่น, 2561.
- [4] Bolton, W. Instrumentation and Control Systems. 2nd ed. Oxford: Elsevier, 2015.
- [5] นางสาวกมลชนก แสสนสุข. การออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมตู้ปลาอัตโนมัติ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีสารสนเทศ, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2563.
- [6] Lee, K. H. Environmental Monitoring System for Aquatic Applications. Doctoral Dissertation, Department of Computer Engineering, Kasetsart University, Bangkok, Thailand, 2018.
- [7] นายวิชัย พงษ์ศรี และนายธนภุต ศรีสุข, “การพัฒนาระบบตรวจวัดอุณหภูมิน้ำสำหรับตู้ปลาอัจฉริยะ,” ใน รายงานการประชุมวิชาการระดับชาติด้านเทคโนโลยีสารสนเทศ ครั้งที่ 10, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น, หน้า 125–130, 2564.
- [8] Johnson, R. P., and Wang, Y., “Design of an IoT-Based Aquarium Monitoring System,” in Proceedings of the 8th International Conference on Electrical Engineering, King Mongkut’s University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand, pp. 210–215, 2019.
- [9] สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, “เทคโนโลยีเซนเซอร์สำหรับงานด้านสิ่งแวดล้อม,” แหล่งที่มา: <https://www.nstda.or.th>, เข้าถึงเมื่อวันที่ 20 ธันวาคม 2567

เว็บแอปพลิเคชันช่วยเหลือการทดสอบแอปพลิเคชันภายในองค์กร Web Application for Supporting Internal Application Testing

ชโยดม เปี่ยมไทย¹ สุกัญญา วรรณขาว² Kaushik Bhatt² ฮุสนา ซำซูดิน² ชาคกริต สุขมหา² Htoo Aein Lwin² พุทธิพงษ์ กุศลทิพย์เจริญ²

Phone Naing Kha² ศิลา ศิริมาสกุล^{1,*} และ รัตติกร สมบัติแก้ว¹

Jayodom Piamthai¹, Sukanya Wannakhaw², Kaushik Bhatt², Husna Sumsudin², Chakrit Sukmaha², Htoo Aein Lwin²,
 Phutthiphong Kusontipcharoen², Phone Naing Kha², Silar Sirimasakul^{1,*} and Rattikorn Sombutkaew¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร 86160 ประเทศไทย

²บริษัท อินเทอร์เน็ตเนชั่นแนล แมเนจเม้นท์ แอนด์ เซอร์วิสเชส (ประเทศไทย) ซอยฉลองกรุง 31 แขวงลำปลาทิว เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 ประเทศไทย

¹Department of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Prince of Chumphon Campus, Chumphon Province, 86160, Thailand

²International management and services (Thailand), Bangkok, 10520, Thailand

*Corresponding author: Silar Sirimasakul, e-mail address: silar.si@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้ นำเสนอเว็บแอปพลิเคชันช่วยเหลือการทดสอบแอปพลิเคชันภายในองค์กร เพื่อช่วยเหลือในการทดสอบ ETL บนแอปพลิเคชันภายในองค์กรให้ผู้ใช้สามารถทดสอบการทำงานของ ETL ภายในแอปพลิเคชันพร้อมรับรายงานการทดสอบได้อย่างง่ายดาย ในระบบ CI/CD รวมถึงสามารถตั้งค่าการทดสอบเพื่อความยืดหยุ่นในการทดสอบเวอร์ชันต่างๆ ที่มีอยู่ของแอปพลิเคชัน โดยทดสอบผ่านการเลือกแอปพลิเคชัน และเวอร์ชันที่ต้องการจะทดสอบแล้วกดเริ่มเพื่อให้ทำการทดสอบอัตโนมัติ เพื่อให้ง่ายสำหรับทีม Tester และบุคลากรในองค์กรที่ไม่ได้มีประสบการณ์การใช้ระบบ CI/CD เพื่อจะทดสอบระบบได้ เพื่อนำเสนอแนวคิดและแนวทางการดำเนินการทดสอบอัตโนมัติให้ผู้ที่สนใจนำไปศึกษาหรือปรับใช้ตามความต้องการ โดยจากการทดสอบการทำงานเว็บแอปพลิเคชันจะพบว่าสามารถลดขั้นตอนที่ยุ่งยากเพื่อลดเวลาการทำงานและลดภาระของผู้ใช้งานทีม Tester ได้

คำสำคัญ: ทดสอบ, AWS, CI/CD

ABSTRACT

This academic paper presents a web application for supporting internal application testing, for assisting in ETL testing on an internal application with the goal of allowing users to test application's functionality and receiving reports easily within CI/CD system that can also be configured for additional flexibility of testing multiple version of same application that can be test by choosing a desired application along with it's version then press start to begin testing automatically. which allowed tester team and any internal employees to easily run test even without an experience with CI/CD system for reduced complexity. To introduce the ideas and logic for automated testing for anyone interested in this topic. from testing it can be concluded that this web application can reduce some obnoxious steps which reduce worktime and workload for tester team employee

Keywords: test, AWS, CI/CD

1. บทนำ

เนื่องจากการที่ภายในบริษัท มีความจำเป็นที่จะต้องทดสอบการทำงานแอปพลิเคชันต่างๆผ่านระบบ CI/CD ใน Azure pipeline เพื่อทดสอบการทำงานแอปพลิเคชันบน AWS cloud [1] ซึ่งต้องใช้ command แบบเฉพาะตัวในการสั่งงานและใช้งาน จึงเป็นเรื่องยากที่จะให้บุคลากรภายในที่ไม่ใช่ Tester มาใช้งานระบบ ผนวกกับจำนวนที่น้อยของ Tester ในบริษัท ทำให้เกิดความ ต้องการในการสร้างอุปกรณ์ที่ช่วยเหลือในการทดสอบ เว็บแอปพลิเคชันนี้จึงถูกจัดทำขึ้นเพื่ออำนวยความสะดวกการทดสอบให้ ง่ายดายขึ้นสำหรับผู้ที่ไม่มีประสบการณ์ใช้งานระบบ CI/CD ด้วย Interface ที่เข้าถึงและใช้งานได้อย่างง่ายดายพร้อมระบบลือคอิน ตรวจสอบสิทธิการเข้าถึงและเข้าทดสอบของผู้ใช้ ดังนั้นบทความนี้จึงเป็นการนำเสนอการพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันในส่วนต่างๆ ที่เกี่ยวข้องพร้อมอธิบายหลักการการทำงาน การออกแบบ การทดสอบ และประเมินการทำงานโดยภาพรวม

2. วิธีการศึกษา

ผู้จัดทำได้ต่อยอดจากโปรเจกต์ที่มีการริเริ่มอยู่แล้วภายในบริษัท อินเทอร์เน็ตในชั้นแนล แมเนจเม้นท์ แอนด์ เซอร์วิสซึ่งพัฒนาด้วย Angular และ .NET 8 [2] เพื่อนำมาใช้ทดสอบกระบวนการ Deploy และกระบวนการ ETL [3] ของแอปพลิเคชันต่างๆ ภายในองค์กร ทั้งการทดสอบเดี่ยว และการทดสอบระหว่างเวอร์ชันการ Deploy ที่ต่างกันของแอปพลิเคชัน และ แก้ไขเพิ่มลบ ข้อมูลแอปพลิเคชันที่จะทดสอบตามสิทธิการเข้าถึงของผู้ใช้งาน โดยจะเริ่มจากการศึกษาความต้องการภายในทีม Tester ผ่านการประชุมภายใน และการสอบถามรอบนอก เพื่อนำข้อมูลความต้องการและปัญหาที่พบเจอมาออกแบบขั้นตอนการทำงานและ ส่วนประกอบต่างๆภายในแอปพลิเคชัน แล้วตั้งการทดสอบตามการใช้งานที่ผู้ใช้จะทำและทดสอบจุดที่อาจเป็นช่องโหว่ในระบบ รักษาความปลอดภัยภายในเว็บไซต์

โดยในการทำงานหลักจะดำเนินการตามในรูปที่ 1 ผู้ใช้จะสามารถเลือกแอปพลิเคชันที่จะทดสอบ, environment ที่จะทดสอบภายใน AWS cloud, เวอร์ชันที่จะทำการทดสอบ ประเภทการทดสอบ(เดี่ยว หรือ เปรียบเทียบเวอร์ชัน) แล้วเมื่อทำการรัน เว็บแอปพลิเคชันจะส่งคำขอ API ไปยัง Azure Pipeline เพื่อทำการทดสอบ Deploy แอปพลิเคชัน ภายใน AWS step function [4] แล้วส่งอีเมลแจ้งการทดสอบให้กับผู้พัฒนาภายในทีมและบันทึกข้อมูลการทำงานที่ได้ไว้ใน Amazon S3 bucket ก่อนจะส่ง ข้อมูลผ่าน API กลับไปยังหน้าเว็บเพื่อแสดงภายในหน้าแสดงผลการทดสอบและเก็บข้อมูลภายในฐานข้อมูล PostgreSQL โดยจะมีการแบ่งการออกแบบ Use-case , การออกแบบ Sitemap , และการออกแบบฐานข้อมูล โดยมีรายละเอียดดังนี้

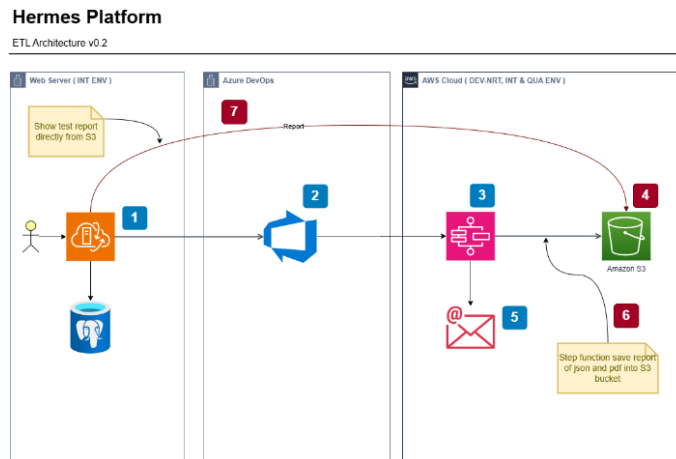


Figure 1 Overview of Web application for supporting internal applications testing

2.1 การออกแบบ Use-case Diagram

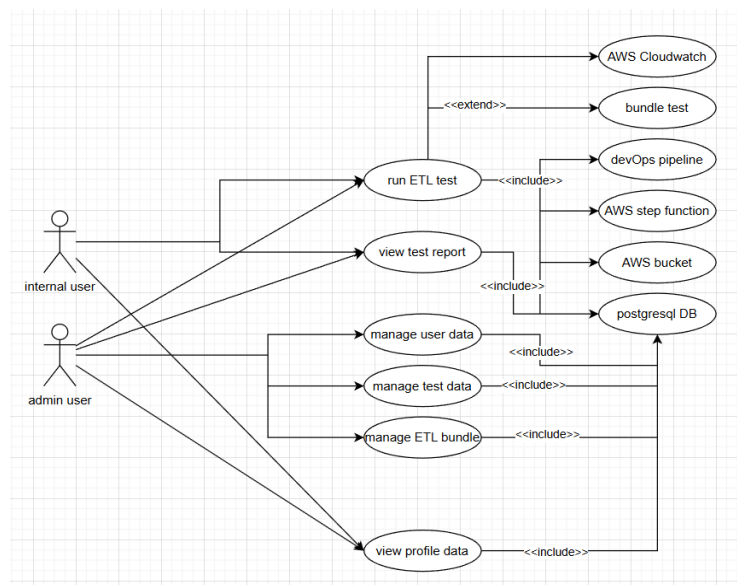


Figure 2 Use-case diagram of Web application for supporting internal applications testing

การออกแบบกระบวนการทำงานของเว็บแอปพลิเคชันช่วยเหลือการทดสอบแอปพลิเคชันภายในองค์กรจะดำเนินการสอดคล้องกับรูปที่สอง โดยจะมีการกำหนด Use-case diagram ที่มีผู้ใช้งานภายในระบบ (Actors) ที่เกี่ยวข้อง 2 บทบาท โดยจะต้อง Login ผ่านระบบ Azure AD [5] ก่อนการใช้งานเพื่อรับสิทธิการเข้าถึงที่ถูกต้อง ดังนี้

1. ผู้ใช้ภายในองค์กร (Internal user) สามารถเข้าทดสอบการทำงานแอปพลิเคชันและเช็คผลการดำเนินการทดสอบได้
2. ผู้ใช้งานแอดมิน (Admin user) สามารถเข้าทดสอบแอปพลิเคชันและตรวจสอบผลได้เช่นเดียวกับผู้ใช้ปกติและสามารถแก้ไขข้อมูลการทดสอบและข้อมูลผู้ใช้ รวมถึงสร้าง Bundle ข้อมูลเพื่อทดสอบ ETL ได้

2.2 การออกแบบ Sitemap Diagram

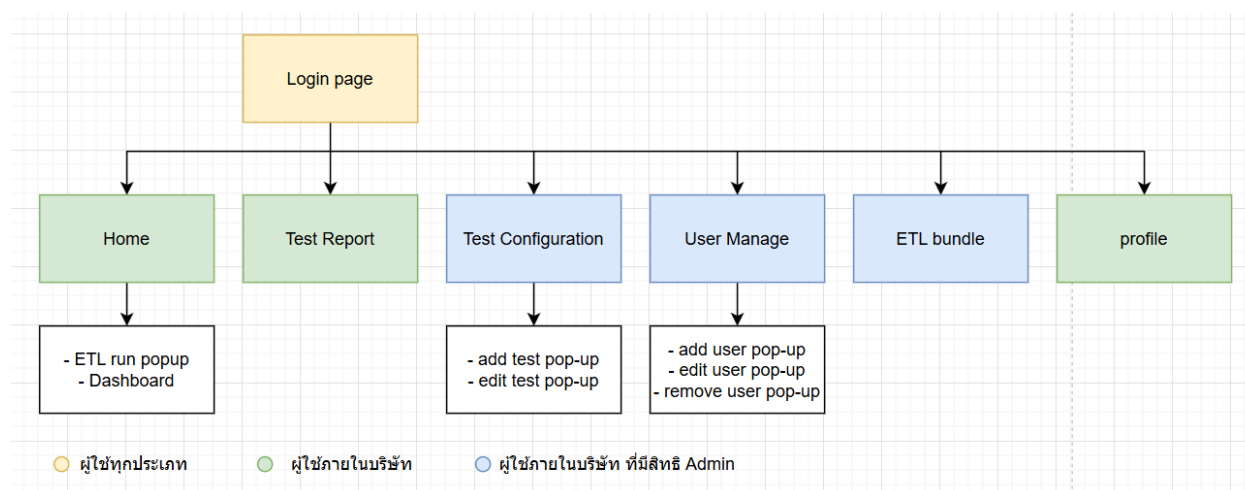


Figure 3 Sitemap of Web application for supporting internal applications testing

ในรูปที่ 3 แสดงโครงสร้างหน้าเว็บไซต์ของระบบ แบ่งเป็นหน้าเพจต่าง ๆ และเส้นทางการเข้าถึงแต่ละหน้าเพจเพื่อให้ผู้ใช้งานแต่ละบทบาทเข้าถึงเนื้อหาตามการใช้งานของตนเองได้สะดวกมีรายละเอียดดังนี้

หน้าหรือเพจที่ผู้ใช้ทุกประเภทเข้าใช้งานได้มีดังนี้

1. หน้า Login page สำหรับการเข้าสู่ระบบเพื่อใช้งานผ่านอีเมลบริษัท
2. หน้า Home ซึ่งจะเป็นหน้าหลักในการทดสอบการทำงานและการทำ ETL บนแอปพลิเคชันภายใน โดยมีส่วนประกอบย่อยดังนี้
 - 2.1 ส่วน ตารางแสดงการทำงานการทดสอบก่อนหน้าที่ดำเนินการอยู่หรือดำเนินการเสร็จสิ้นแล้วว่าเป็นอย่างไร พร้อมปุ่มดาวน์โหลด PDF สรุปการทดสอบ
 - 2.2 ส่วน run ETL pop-up เพื่อสั่งการเริ่มทำงานทดสอบ ETL บนแอปพลิเคชัน เวอร์ชัน และประเภทการทดสอบที่เลือกเอาไว้
 - 2.3 หน้า Test Report ซึ่งเป็นหน้าแสดงรายงานการทดสอบโดยละเอียดให้กับผู้ใช้งาน
3. Test Configuration ซึ่งเป็นหน้าแสดง เพิ่ม และแก้ไขข้อมูลในการทดสอบตั้งแต่ ชื่อแอปพลิเคชัน เวอร์ชันที่จะทดสอบ Environment ที่จะทดสอบ ข้อมูลเพิ่มเติม
 - 3.1 ส่วนตารางแสดงข้อมูลซึ่งเป็นแบบฟอร์มในตัวซึ่งให้ผู้ใช้สามารถแก้ไขข้อมูลได้
 - 3.2 ส่วนปุ่มเปิด pop-up เพิ่มการทดสอบใหม่
4. User Manage ซึ่งเป็นหน้าจัดแสดง แก้ไข ลบ เพิ่ม ข้อมูลผู้ใช้งานภายในหน้าเว็บแอปพลิเคชันตั้งแต่ อีเมลผู้ใช้งาน สิทธิการเข้าถึง และ environment ที่สามารถทดสอบได้
 - 4.1 ส่วนตารางแสดงข้อมูลต่างๆของผู้ใช้งาน
 - 4.2 ส่วนปุ่มเปิด pop-up เพื่อแก้ไขข้อมูลของผู้ใช้
 - 4.3 ส่วนปุ่มเปิด pop-up เพื่อลบข้อมูลของผู้ใช้
 - 4.4 ส่วนปุ่มเปิด pop-up เพื่อเพิ่มข้อมูลของผู้ใช้

5. ETL Bundle ซึ่งเป็นหน้าในการสร้างชุดข้อมูลพิเศษ (bundle) เพื่อใช้ในการทดสอบ ETL แบบจำเพาะด้วยข้อมูลจำลองที่เตรียมล่วงหน้า
6. Profile ซึ่งเป็นหน้าแสดงข้อมูลของผู้ใช้ปัจจุบันภายในหน้าเว็บ

2.3 การออกแบบฐานข้อมูล

2.3.1 การออกแบบความสัมพันธ์ระหว่างตารางข้อมูลการทดสอบที่ดำเนินอยู่

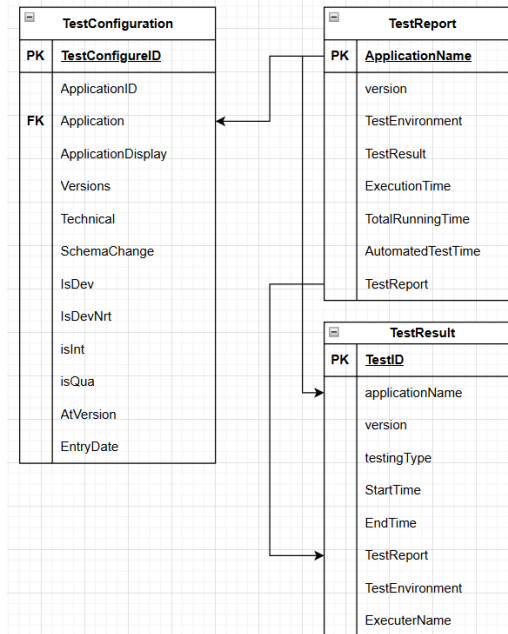


Figure 4 Data table relations between test data related tables

จากรูปที่ 4 แผนผังการเก็บข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบแอปพลิเคชันจะถูกแบ่งเป็น 3 ตารางหลักดังนี้

1. TestResult เก็บข้อมูลผลการทดสอบที่ถูกเริ่มต้นไปแล้วเพื่อนำไปเสนอในตารางหลัก
2. TestReport เก็บข้อมูลรายงานผลการทำงานการทดสอบแบบละเอียดมากขึ้น
3. TestConfiguration เก็บข้อมูลการทดสอบของแอปพลิเคชันในเวอร์ชันหรือ Environment ต่างๆที่สามารถทดสอบได้ภายในหน้าเว็บ

2.3.2 การออกแบบความสัมพันธ์ระหว่างตารางข้อมูลเกี่ยวกับข้อมูลผู้ใช้

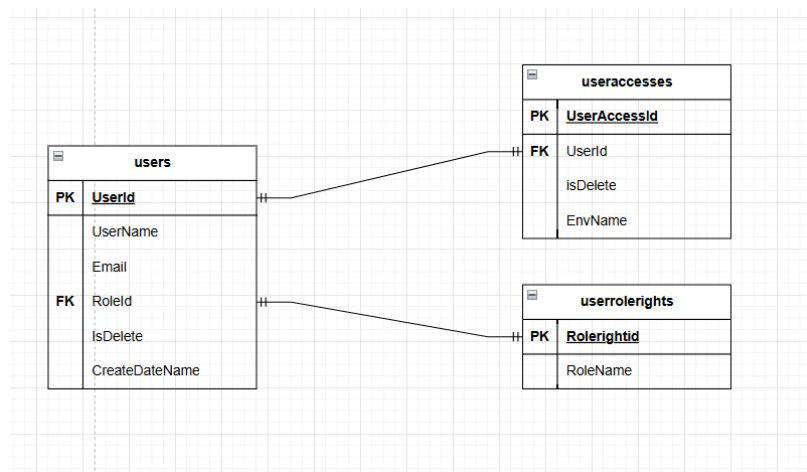


Figure 5 Data table relations between user data related tables

1. Users เก็บข้อมูลผู้ใช้งานภายในระบบ
2. Useraccess เก็บข้อมูลสิทธิการเข้าถึงการทดสอบแอปพลิเคชันภายใน environment ใดบ้าง รวมถึง สถานการณ์ถูกลบทิ้งของบัญชี
3. Userrolerights เก็บข้อมูลระดับสิทธิการเข้าถึงหน้าเว็บบ่อยภายในเว็บแอปพลิเคชัน

3. ผลการออกแบบและทดสอบระบบการใช้งาน

ในส่วนนี้จะเป็นการแสดงผลหน้าเว็บแอปพลิเคชันช่วยเหลือการทดสอบแอปพลิเคชันภายในองค์กรที่ได้ทำการออกแบบ พัฒนา และทดสอบใช้งานจริงโดยทีม Tester ภายในบริษัทเพื่อตรวจสอบความพึงพอใจ โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 ส่วนเว็บไซต์

ส่วนเว็บไซต์ที่ได้จะประกอบไปด้วย หน้า Login, หน้าหลัก , หน้า Test Report, หน้า Test Configuration, หน้า User Manage, หน้า ETL bundle, และหน้า Profile ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.1.1 หน้า login

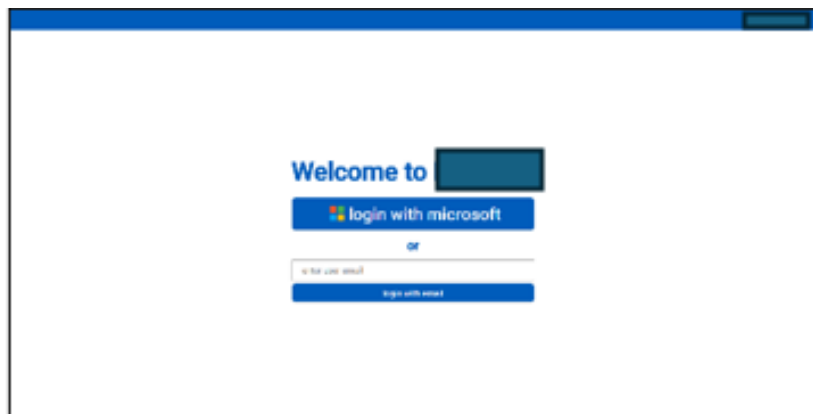
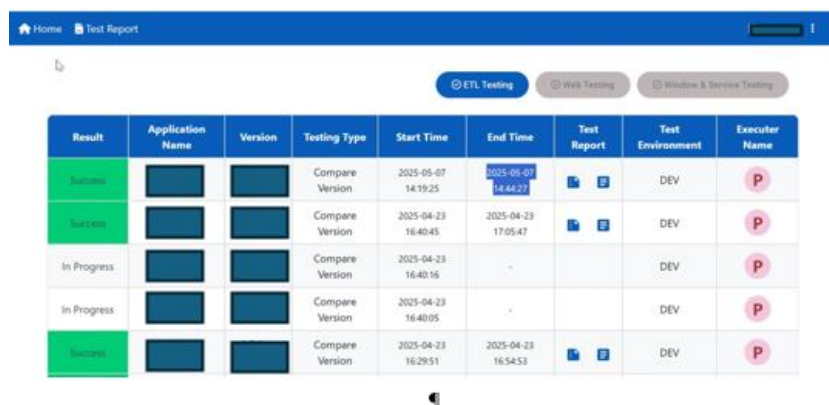


Figure 6 Login page

หน้าหลักในรูปที่ 6 ประกอบไปด้วยแถบการล็อกอินผ่าน Azure AD ด้วยบัญชีบริษัท พร้อมแถบล็อกอินที่ใช้ อีเมลเปล่าเช็คความตรงกับอีเมลในฐานะข้อมูลหรือไม่ระหว่างที่รอการอนุมัติบัญชี Azure AD ระหว่างการพัฒนาเพื่อความง่ายตายในการทดสอบ

3.1.2 หน้าหลัก




Result	Application Name	Version	Testing Type	Start Time	End Time	Test Report	Test Environment	Executor Name
Success			Compare Version	2025-05-07 14:19:25	2025-05-07 14:44:27		DEV	P
Success			Compare Version	2025-04-23 16:40:45	2025-04-23 17:05:47		DEV	P
In Progress			Compare Version	2025-04-23 16:40:56	-		DEV	P
In Progress			Compare Version	2025-04-23 16:40:05	-		DEV	P
Success			Compare Version	2025-04-23 16:29:51	2025-04-23 16:54:53		DEV	P

Figure 7 Home page

หน้าหลักในรูปที่ 7 ประกอบไปด้วยตารางติดตามผลการทดสอบที่อัปเดตทุก 10 วินาที พร้อมปุ่มดาวน์โหลดเอกสารสรุปผลเมื่อเสร็จสิ้น และปุ่มเริ่มการทดสอบใหม่ด้านบนขวาของตาราง

3.13 หน้า Test Report

Test Report



Application Name	Version	Test Environment	Test Result	Execution Time	Total Running Time	Automated Test Version	Test Report
		DEV-NET		2025-09-18 07:27:50	0h 22m 42s		
		DEV-NET		2025-09-23 02:48:05	0h 25m 2s		
		DEV-NET		2025-09-23 02:48:05	0h 25m 2s		
		DEV-NET		2025-09-23 02:48:05	0h 25m 2s		
		DEV-NET		2025-09-23 02:48:05	0h 25m 2s		
		DEV-NET		2025-09-23 02:48:05	0h 25m 2s		

Figure 8 Test Report page

หน้า test report ในรูปที่ 8 ประกอบไปด้วยตารางจะแสดงข้อมูลการทดสอบอย่างละเอียดพร้อมทั้งปุ่มกรองข้อมูลที่หัวตาราง

3.1.4 หน้า Test Configuration

Test Configuration



Application	Version	Technical	Environment	Status
				Start
				Start
				Start
				Start
				Start
				Start
				Start
				Start
				Start

Figure 9 Test Configuration page

หน้า Test configuration ในรูปที่ 9 ประกอบไปด้วยตารางแสดงข้อมูลการตั้งค่าการทดสอบที่สามารถทำได้ รวมถึงรายละเอียดชื่อแอปพลิเคชัน เวอร์ชัน ข้อมูลการเปลี่ยนแปลง ข้อมูล Environment ที่ทดสอบได้ โดยข้อมูลจะสามารถถูกแก้ไขได้ภายในตารางเลยแล้วกดปุ่มบันทึกที่อยู่ทางขวาสุดเพื่อยืนยันการแก้ไข และยังมีปุ่มเพิ่มการตั้งค่าใหม่อยู่ทางฝั่งขวาบนของตาราง รวมถึงแถบค้นหาการตั้งค่าฝั่งบนซ้าย และแถบเลือกหน้าฝั่งขวาล่างอีกด้วย

3.15 หน้า User Management

หน้า User management ในรูปที่ 10 ประกอบไปด้วยตารางแสดงข้อมูลผู้ใช้งานที่มีอยู่ในระบบปัจจุบันพร้อมปุ่มแก้ไขและปุ่มลบทางฝั่งขวาของตาราง โดยจะมีปุ่มเพิ่มข้อมูลผู้ใช้งานใหม่อยู่ฝั่งขวาบนของตาราง และยังมีปุ่มเพิ่มการตั้งค่าใหม่อยู่ทางฝั่งขวาบนของตาราง รวมถึงแถบค้นหาการตั้งค่าฝั่งบนซ้าย และแถบเลือกหน้าฝั่งขวาล่างอีกด้วย



Figure 10 User Management Page

3.1.6 หน้า ETL bundle

หน้า ETL bundle จะประกอบไปด้วยแถบเลือกแพ็คเกจเพื่อการแก้ไข โดยเมื่อเลือก กล่องข้อความหลักจะแสดงข้อมูลภายในเพื่อให้ผู้ใช้แก้ไขและตั้งค่าเพิ่มเติม และมีปุ่มบันทึกอยู่ด้านล่างเพื่อบันทึกข้อมูลหลังเสร็จสิ้นการแก้ไขและเก็บข้อมูลในระบบ AWS cloudwatch [6] โดยหน้านี้ไม่ได้รับการอนุญาตให้เปิดเผยรูปภาพจากทางบริษัท

3.1.7 หน้า profile

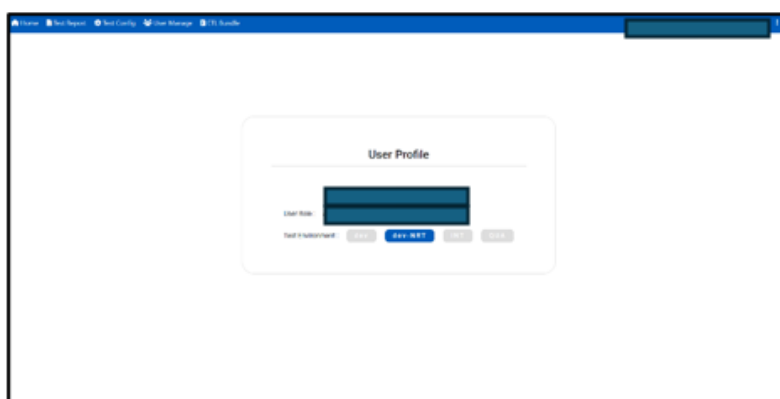


Figure 11 Profile page

3.1 การทดสอบใช้งานจริง

จากการวางแผนการดำเนินงาน ได้มีการกำหนด Pain point ของทีม Tester ให้ได้ออกมาเป็นขอบเขตทางการทำงานหลัก การตั้งค่าการทำงาน และการยืนยันตัวตนดังในรูปที่ 12 โดยเน้นการช่วยให้การทดสอบการ ETL บนแอปพลิเคชันภายในบริษัทนั้นง่ายตายและรวดเร็ว จากปรกติที่ต้องใช้คำสั่งในระบบ CI/CD พร้อมสคริปต์ Selenium ในการ Deploy แล้วทดสอบการทำงาน ซึ่งปรกติใช้เวลาประมาณ 10 – 30 นาทีไม่รวมเวลาระหว่างการทดสอบอัตโนมัติ สำหรับ Tester 1 คนสามารถลดมาเหลือ 1-5 นาที ในการตั้งค่าและเริ่มทดสอบ ปล่อยให้ระบบทำงานอัตโนมัติแล้วไปจัดการงานส่วนอื่นได้ รวมเวลาประมาณ 20-35 นาที ในกระบวนการและทดสอบอัตโนมัติ ซึ่งได้ผลใกล้เคียงกับงานวิจัยอื่นๆในการทดสอบ CI/CD อัตโนมัติที่ลดเวลาไปได้ถึง 50% จากการทดสอบปรกติ[7] รวมถึงเป็นมิตรต่อผู้ใช้ที่ไม่มีประสบการณ์ใช้ระบบ CI/CD ผลลัพธ์ภาพรวมออกมาดังนี้

4. สรุป

จากการทดลองเว็บแอปพลิเคชันช่วยเหลือการทดสอบแอปพลิเคชันภายในองค์กร ได้ผลลัพธ์ว่าสามารถทำงานการทดสอบการทำงานระหว่างเวอร์ชันได้ผ่านระบบ CI/CD ภายใน Azure Pipeline ได้รวมถึงแสดงผลการทดสอบได้ตามต้องการ ระบบการตั้งค่าการทดสอบและตั้งค่าผู้ใช้สามารถใช้ได้รวมถึงแสดงสิทธิผู้ใช้งานที่ถูกตั้งไว้และมอบสิทธิการเข้าถึงให้ตามสมควรหลังเข้าสู่ระบบผ่านระบบ login โดย Azure AD แล้ว แม้ยังมีปัญหาทางความปลอดภัยอยู่บ้างภายในหน้าเว็บจากการใช้ local storage เก็บข้อมูลสิทธิการใช้งาน ใช้งาน Azure AD เพื่อยืนยันตัวตนเท่านั้น ซึ่งกลายเป็นช่องโหว่ให้บุคลากรภายในกระจายข้อมูล หรือแก้ไขข้อมูลความปลอดภัยเพื่อการโจมตีได้ ซึ่งสามารถแก้ไขได้ผ่านการเปลี่ยนเป็นรับ role จาก Azure AD เพื่อทำหน้าที่ยืนยันตัวตนและมอบสิทธิการใช้งาน

<ul style="list-style-type: none"> • การทำงานหลัก <ul style="list-style-type: none"> ◦ สามารถเข้าถึงเพื่อใช้ทดสอบการทำงานระหว่างเวอร์ชันต่างๆของแอปในองค์กรหรือทดสอบแอปเดี่ยวได้ ◦ แสดงรายงานผลการทดสอบได้ • การตั้งค่าภายใน <ul style="list-style-type: none"> ◦ สามารถแก้ไข เพิ่ม ค้นหา การตั้งค่าการทดสอบแอปได้ ◦ สามารถแก้ไข เพิ่ม ลบ ค้นหา รายชื่อผู้ใช้และสิทธิการเข้าถึงภายในระบบ • การยืนยันตัวตน <ul style="list-style-type: none"> ◦ สามารถยืนยันผู้ใช้ผ่านระบบloginได้ ◦ มอบสิทธิการใช้งานตามที่กำหนดไว้ได้ 	<p>เสร็จสิ้น</p> <p>เสร็จสิ้น</p> <p>เสร็จสิ้น</p> <p>เสร็จสิ้น</p> <p>เสร็จสิ้น</p> <p>เสร็จสิ้น</p>
--	---

Figure 12 project goals boundary

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท International management & service(Thailand) co,ltd ที่ได้ช่วยเหลือในการดำเนินการสหกิจศึกษา และเอื้อเฟื้อสถานที่ เวลามอบความรู้ ประสบการณ์ต่างๆ ให้กับผมในช่วงเวลาที่ได้ร่วมทำงานภายในบริษัท ขอขอบคุณพี่ๆ ภายในบริษัทที่ดูแลสั่งสอนอย่างดี รวมถึงอาจารย์ มิตรสหาย และครอบครัวที่คอยสนับสนุนกันมาโดยตลอดมา

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Paul Kervan, 2567 “What is AWS? Ultimate guide to Amazon Web Services” เข้าถึงได้จาก: <https://www.techtarget.com/searchaws/definition/Amazon-Web-Services> (เข้าถึงเมื่อ 2 ตุลาคม 2568)
- [2] learn.microsoft, 2567 “Introduction to .NET” เข้าถึงได้จาก: <https://learn.microsoft.com/en-us/dotnet/core/introduction?WT.mc.id=dotnet-35129-website> (เข้าถึงเมื่อ 1 กันยายน 2568)
- [3] geekforgeeks, 2568 ”ETL process in data warehouse” เข้าถึงได้จาก: <https://www.geeksforgeeks.org/dbms/etl-process-in-data-warehouse/> (เข้าถึงเมื่อ 2 ตุลาคม 2568)
- [4] AWS, 2568 “AWS step-function” เข้าถึงได้จาก: <https://docs.aws.amazon.com/step-functions/latest/dg/welcome.html> (เข้าถึงเมื่อ 17 กันยายน 2568)
- [5] Wesley Chai, 2563 “Microsoft Windows Azure Active Directory” เข้าถึงได้จาก <https://www.techtarget.com/searchwindowsserver/definition/Microsoft-Windows-Azure-Active-Directory-Windows-Azure-AD> (เข้าถึงเมื่อ 17 กันยายน 2568)
- [6] AWS, 2567 ”What is Amazon CloudWatch” เข้าถึงได้จาก: <https://docs.aws.amazon.com/AmazonCloudWatch/latest/monitoring/WhatIsCloudWatch.html> (เข้าถึงเมื่อ 30 กันยายน 2568)
- [7] Nikhil Yogesh Joshi (พฤษภาคม 2565) “Implementing Automated Testing Frameworks in CI/CD Pipelines: Improving Code Quality and Reducing Time to Market” International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication 10(6):106

การพยากรณ์เสถียรภาพทางการเงินแบบหลายกลุ่มของบริษัทจดทะเบียนโดยใช้การเรียนรู้ของเครื่อง
กรณีศึกษาตลาดหลักทรัพย์แห่งประเทศไทย
Multi-Class Financial Stability Prediction of Listed Firms Using Machine Learning Evidence
from the Thai Stock Market

เปรมารัช วิลาลัย¹ และ สุภคพงศ์ จินารัตน์^{1,*}
Premarat Vilalai¹ and Supakpong Jinarat^{1,*}

¹สาขาเทคโนโลยีสารสนเทศ วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต กรุงเทพมหานคร 10210 ประเทศไทย
¹Information Technology Program, College of Engineering and Technology, Dhurakij Pundit University, Bangkok, 10210, Thailand
^{*}Corresponding author: Supakpong Jinarat, e-mail address: supakpong.jin@dpu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองสำหรับการพยากรณ์เสถียรภาพทางการเงินแบบหลายกลุ่มของบริษัทจดทะเบียนในตลาดหลักทรัพย์แห่งประเทศไทย ภายใต้สภาวะข้อมูลไม่สมดุล โดยจำแนกบริษัทออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ Distress Zone, Grey Zone และ Safe Zone ข้อมูลนำเข้าประกอบด้วยตัวชี้วัดทางการเงินจำนวน 24 ตัวแปร และทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่อง 6 วิธี ได้แก่ Logistic Regression, Random Forest, Extra Trees, HistGradientBoosting, SVM และ XGBoost

กระบวนการทดลองประกอบด้วยการทำความสะอาดข้อมูล การเข้ารหัสตัวแปรเป้าหมาย การแบ่งข้อมูลแบบ stratified เป็นชุดฝึกและชุดทดสอบ การประมวลผลล่วงหน้า และการประเมินผลด้วยวิธี 5-fold stratified cross-validation โดยใช้ Accuracy และ Macro-F1 เป็นตัวชี้วัด ทั้งนี้เลือกใช้ Macro-F1 เป็นเกณฑ์หลักในการคัดเลือกโมเดล เนื่องจากเหมาะสมกับปัญหาการจำแนกหลายกลุ่มภายใต้ข้อมูลไม่สมดุล

ผลการทดลองจาก 5-fold cross-validation พบว่า XGBoost ให้ผลดีที่สุด โดยมีค่า Macro-F1 เท่ากับ 0.8814 รองลงมาคือ Extra Trees และ HistGradientBoosting เมื่อประเมินโมเดล XGBoost บนชุดข้อมูลทดสอบ พบว่าให้ค่า Accuracy เท่ากับ 0.90 และ Macro-F1 เท่ากับ 0.89 โดยโมเดลมีผลการทำนายดีที่สุดในกลุ่ม Grey Zone และยังคงรักษาประสิทธิภาพที่ดีในกลุ่ม Distress Zone และ Safe Zone

ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่า XGBoost มีศักยภาพสูงสำหรับการพยากรณ์เสถียรภาพทางการเงินแบบหลายกลุ่มของบริษัทจดทะเบียนในประเทศไทย และสามารถรองรับปัญหาข้อมูลไม่สมดุลได้อย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องมือสนับสนุนการวิเคราะห์ความเสี่ยงทางการเงินและระบบเตือนภัยล่วงหน้าในอนาคต

คำสำคัญ: การพยากรณ์เสถียรภาพทางการเงิน, การจำแนกหลายกลุ่ม, การเรียนรู้ของเครื่อง, XGBoost, ตลาดหลักทรัพย์แห่งประเทศไทย

Abstract

This study aims to develop a machine learning model for multi-class financial stability prediction of listed firms in the Stock Exchange of Thailand under imbalanced data conditions. Firms were classified into three categories: Distress Zone, Grey Zone, and Safe Zone. The input data consisted of 24 financial indicators, and the performance of six machine learning algorithms was compared, including Logistic Regression, Random Forest, Extra Trees, HistGradientBoosting, SVM, and XGBoost. The experimental procedure included data cleaning, target label encoding, stratified train-test splitting, preprocessing, and model evaluation using 5-fold stratified cross-validation. Accuracy and Macro-F1 were used as the evaluation metrics, while Macro-F1 was selected as the primary criterion for model selection because it is more appropriate for multi-class classification under class imbalance.

The results of the 5-fold cross-validation showed that XGBoost achieved the best performance with a Macro-F1 score of 0.8814, followed by Extra Trees and HistGradientBoosting. When evaluated on the hold-out test set, the XGBoost model achieved an accuracy of 0.90 and a Macro-F1 score of 0.89. The model performed best on the Grey Zone class while maintaining strong performance on both Distress Zone and Safe Zone. The findings indicate that XGBoost has strong potential for multi-class financial stability prediction of Thai listed firms and

can effectively handle imbalanced financial data. This study can serve as a useful reference for developing financial risk assessment tools and early warning systems in future applications.

Keywords Financial stability prediction, multi-class classification, machine learning, XGBoost, Stock Exchange of Thailand

1. บทนำ

เสถียรภาพทางการเงินของบริษัทจดทะเบียนเป็นปัจจัยพื้นฐานสำคัญต่อความเชื่อมั่นของนักลงทุนและระบบเศรษฐกิจโดยรวม ความล้มเหลวทางการเงิน (Financial Distress) ไม่เพียงแต่ส่งผลกระทบต่อผู้ถือหุ้น แต่ยังส่งผลกระทบต่อเจ้าหน้าที่และพนักงานของบริษัท ในยุคดิจิทัล เทคโนโลยีสารสนเทศและการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการสร้างแบบจำลองเพื่อพยากรณ์ความเสี่ยงทางการเงิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในยุคปัจจุบันที่ภาคธุรกิจต้องเผชิญกับความไม่แน่นอนทางเศรษฐกิจ ทั้งจากผลกระทบหลังวิกฤตการณ์แพร่ระบาดของโรคโควิด-19 และความผันผวนของตลาดโลก ส่งผลให้เสถียรภาพของภาคธุรกิจประปรายมากขึ้น การมีระบบเตือนภัยล่วงหน้า (Early Warning System) ที่มีประสิทธิภาพจึงเป็นเครื่องมือสำคัญสำหรับผู้กำหนดนโยบาย นักลงทุน และผู้บริหาร เพื่อเตรียมรับมือและลดความสูญเสียทางเศรษฐกิจ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยส่วนใหญ่มีมุมมองเน้นการจำแนกประเภทแบบทวิภาค (Binary Classification) คือ ล้มละลายและไม่ล้มละลาย ซึ่งอาจไม่เพียงพอต่อการวิเคราะห์ในสถานการณ์จริงที่ต้องการทราบระดับความรุนแรงของปัญหา [1]

ในอดีตการพยากรณ์ความล้มเหลวทางการเงินมักพึ่งพาแบบจำลองทางสถิติแบบดั้งเดิม โดยเฉพาะแบบจำลอง Altman's Z-score ที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า แบบจำลอง Z-score มีข้อจำกัดที่สำคัญหลายประการ โดยเฉพาะการอาศัยเทคนิควิเคราะห์จำแนกกลุ่มแบบพหุคูณ (Multiple Discriminant Analysis MDA) ซึ่งตั้งสมมติฐานว่าข้อมูลต้องมีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) และกลุ่มความแปรปรวนต้องเท่าเทียมกัน ซึ่งในความเป็นจริงข้อมูลทางการเงินมักไม่เป็นไปตามข้อสมมติฐานดังกล่าวและมักพบค่าผิดปกติ (Outliers) ที่ทำให้แบบจำลองขาดความแม่นยำ ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยในยุคหลังจึงหันมาให้ความสำคัญกับการใช้ อัตราส่วนทางการเงิน (Financial Ratios) แบบแยกส่วนเชิงลึก แทนการใช้ค่าดัชนีรวมเพียงค่าเดียว เนื่องจากอัตราส่วนทางการเงินสามารถสะท้อนมิติการดำเนินงานที่หลากหลาย ทั้งด้านสภาพคล่อง (Liquidity) โครงสร้างหนี้สิน (Leverage) ความสามารถในการทำกำไร (Profitability) และประสิทธิภาพในการดำเนินงาน (Activity) ได้อย่างลึกซึ้งและเฉพาะเจาะจงกว่า การวิจัยเชิงประจักษ์ยืนยันว่า อัตราส่วนทางการเงิน เช่น อัตราส่วนหนี้สินต่อส่วนของผู้ถือหุ้น (D/E Ratio) หรืออัตราส่วนกระแสเงินสด สามารถใช้เป็นตัวชี้วัดและพยากรณ์โอกาสล้มละลายได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับเทคนิคขั้นสูงจะสามารถพิสูจน์ความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นได้ดีกว่าการใช้แบบจำลอง Z-score เพียงอย่างเดียว

ในยุคดิจิทัล เทคโนโลยีการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการสร้างแบบจำลองเพื่อพยากรณ์ความเสี่ยงทางการเงิน เนื่องจากความสามารถในการประมวลผลข้อมูลหลายมิติและค้นหารูปแบบที่ซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม ปัญหาท้าทายที่สำคัญที่สุดประการหนึ่งในการวิเคราะห์ข้อมูลความล้มเหลวทางการเงิน คือ สภาวะข้อมูลไม่สมดุล (Class Imbalance) กล่าวคือ จำนวนบริษัทที่ประสบความล้มเหลวทางการเงิน (Minority Class) มักมีสัดส่วนที่น้อยมากเมื่อเทียบกับบริษัทที่มีสถานะปกติ (Majority Class) [9] หากนำข้อมูลที่ไม่สมดุลนี้ไปฝึกฝนแบบจำลองโดยตรง อัลกอริทึมจะมีแนวโน้มทำนายผลเอนเอียงไปทางกลุ่มบริษัทปกติ ทำให้ค่าความแม่นยำรวม (Overall Accuracy) ดูเหมือนจะสูง แต่ในความเป็นจริงกลับล้มเหลวในการตรวจจับบริษัทที่กำลังจะล้มละลายก่อให้เกิด Type II Error ที่สูง ดังนั้น การบูรณาการเทคนิคการจัดการข้อมูลไม่สมดุล เช่น การสุ่มข้อมูลเพิ่ม (Oversampling) หรือเทคนิคผสมผสาน จึงเป็นกระบวนการสำคัญที่จะช่วยดึงประสิทธิภาพสูงสุดของอัลกอริทึมออกมา [10] นอกจากนี้งานวิจัยในปัจจุบันพบว่างานวิจัยส่วนใหญ่มีมุมมองเน้นการจำแนกประเภทแบบทวิภาค (Binary Classification) คือ ล้มละลายและไม่ล้มละลาย ซึ่งอาจไม่เพียงพอต่อการวิเคราะห์ในสถานการณ์จริงที่ซับซ้อน หน่วยงานกำกับดูแลและนักลงทุนมีความจำเป็นต้องทราบระดับความรุนแรงของปัญหาทางการเงิน เพื่อการกำหนดมาตรการช่วยเหลือหรือตัดสินใจลงทุนได้อย่างเหมาะสม จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องพบว่า อัตราส่วนทางการเงิน (Financial Ratios) เป็นตัวบ่งชี้ที่มีประสิทธิภาพสูงในการพยากรณ์ความล้มเหลว โดยสามารถจำแนกออกเป็นกลุ่มหลักๆ ได้ดังนี้

1) อัตราส่วนสภาพคล่อง (Liquidity Ratios) เช่น Current Ratio (CR) ซึ่งงานวิจัยล่าสุดของ [2] พบว่าเป็นปัจจัยสำคัญในการระบุความเสี่ยงในธุรกิจค้าปลีก โดยค่าที่ต่ำกว่าเกณฑ์เป็นสัญญาณเตือนภัยล่วงหน้าที่มีนัยสำคัญ

2) อัตราส่วนหนี้สิน (Leverage Ratios) เช่น Debt-to-Equity Ratio (DER) ซึ่งชี้ให้เห็นว่าบริษัทที่มีโครงสร้างหนี้สูงมีความเสี่ยงต่อการล้มละลายสูงกว่าอย่างชัดเจนในช่วงวิกฤตเศรษฐกิจ [3]

3) อัตราส่วนความสามารถในการทำกำไร (Profitability Ratios) เช่น Return on Assets (ROA) และ Return on Equity (ROE) ซึ่งได้รับการยืนยันจาก [4] ว่าเป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลสูงสุดในการจำแนกบริษัทที่มีสถานะปกติและล้มละลาย และ

4) อัตราส่วนกระแสเงินสด (Cash Flow Ratios) ซึ่งพบว่าเป็นตัวพยากรณ์ที่แม่นยำกว่างบกำไรขาดทุนในระยะยาว เนื่องจากสะท้อนสภาพคล่องที่แท้จริงของกิจการ [5-6] อย่างไรก็ตาม ข้อมูลทางการเงินมักประสบปัญหาความไม่สมดุลของข้อมูล (Class Imbalance) ซึ่งกลุ่มบริษัทที่ล้มละลายจะมีจำนวนน้อยมากเมื่อเทียบกับบริษัทปกติ ทำให้แบบจำลองทั่วไปมีความแม่นยำต่ำในการทำนายกลุ่มเสี่ยง [7] งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์เสถียรภาพทางการเงินแบบ 3 ระดับ (Multi-class) สำหรับบริษัทจดทะเบียนในตลาดหลักทรัพย์แห่งประเทศไทย (SET และ mai) โดยประยุกต์ใช้เทคนิคการจัดการข้อมูลไม่สมดุลร่วมกับอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่อง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจสอบสัญญาณเตือนภัยล่วงหน้า

ความล้มเหลวทางการเงิน (Financial Distress/Failure) หมายถึง สภาวะที่กิจการประสบปัญหาทางการเงินจนไม่สามารถชำระหนี้หรือภาระผูกพันเมื่อถึงกำหนดได้ อันเนื่องมาจากการขาดสภาพคล่องหรือมีภาระหนี้สินสูงเกินไป ซึ่งก่อให้เกิดต้นทุนความเสียหายต่อผู้ถือหุ้น เจ้าหนี้ และระบบเศรษฐกิจโดยรวม Gerstenberg (1951) อธิบายว่าความล้มเหลวทางการเงินสะท้อนผ่านเหตุการณ์ เช่น การผิดนัดชำระหนี้ (Bond Default) การไม่สามารถจ่ายเงินปันผลหุ้นบุริมสิทธิ หรือการเข้าสู่กระบวนการล้มละลายทางกฎหมาย [1] ขณะที่ Edward Altman แบ่งระดับความล้มเหลวออกเป็น 3 ระดับ ได้แก่

(1) ความล้มเหลวทางเศรษฐกิจ (Economic Failure)

(2) การไม่สามารถชำระหนี้ได้ (Insolvency) และ

(3) การล้มละลาย (Bankruptcy) ซึ่งเป็นระดับรุนแรงที่สุด [2-4] เป็นรากฐานสำคัญ ขณะที่งานในประเทศไทย [9], [11] ยืนยันว่าอัตราส่วนด้านสภาพคล่องและโครงสร้างทุนมีนัยสำคัญในการพยากรณ์บริษัทจดทะเบียนในตลาดหลักทรัพย์แห่งประเทศไทย

ทฤษฎีโครงสร้างทุนและความล้มเหลวทางการเงิน การอธิบายสาเหตุของความล้มเหลวทางการเงินมีความเชื่อมโยงกับทฤษฎีโครงสร้างทุนที่สำคัญ ได้แก่

(1) ทฤษฎีตัวแทน (Agency Theory) อธิบายความขัดแย้งระหว่างผู้ถือหุ้น (Principal) และผู้บริหาร (Agent) หากผู้บริหารดำเนินนโยบายที่ไม่สอดคล้องกับผลประโยชน์ระยะยาว จะก่อให้เกิดต้นทุนตัวแทน (Agency Cost) และเพิ่มความเสี่ยงต่อภาวะล้มเหลวทางการเงิน

(2) ทฤษฎีการชั่งน้ำหนัก (Trade-off Theory) กิจการจะกำหนดโครงสร้างทุนโดยชั่งน้ำหนักระหว่างประโยชน์จาก Tax Shield กับต้นทุนของความล้มเหลวทางการเงิน หากมีหนี้สูงเกินไป ต้นทุนความล้มเหลวจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

(3) ทฤษฎีลำดับชั้นการจัดหาเงินทุน (Pecking Order Theory) กิจการจะเลือกใช้เงินทุนภายในก่อน จากนั้นจึงก่อหนี้และออกหุ้นใหม่เป็นลำดับสุดท้าย บริษัทที่พึ่งพาหนี้สินมากจึงมีความเสี่ยงล้มเหลวสูงกว่าปกติ

ทฤษฎีความล้มเหลวทางการเงิน มีแนวคิดหลัก 3 แนวทาง ได้แก่

(1) Bankruptcy Theory Scott (1981) พัฒนาจาก Gambler's Ruin Model โดยเสนอว่าความน่าจะเป็นในการล้มละลายขึ้นอยู่กับความผันผวนของกำไรสะสมและมูลค่าตลาดของทุน

(2) Option Theory มองว่าการล้มละลายเปรียบเสมือน Call Option ที่หมดอายุโดยไร้มูลค่า เมื่อมูลค่าสินทรัพย์ต่ำกว่าหนี้สิน

(3) Cash-flow / Liquid Asset Theory พัฒนาโดย William Beaver ซึ่งเสนอว่าความล้มเหลวเกิดขึ้นเมื่อกระแสเงินสดไม่เพียงพอชำระหนี้ [3]

อัตราส่วนทางการเงินเพื่อการพยากรณ์ งานวิจัยทั้งในต่างประเทศและประเทศไทยยืนยันว่าอัตราส่วนทางการเงินเป็นเครื่องมือสำคัญในการพยากรณ์ โดยแบ่งเป็น 4 กลุ่มหลัก ได้แก่ Liquidity Ratios เช่น Current Ratio Leverage Ratios เช่น D/E Ratio Profitability Ratios เช่น ROA, ROE และ Activity Ratios เช่น Total Asset Turnover

แบบจำลองทางสถิติแบบดั้งเดิม

1. แบบจำลอง Altman Z-Score ในปี 1968 Edward Altman พัฒนา Z-Score โดยใช้ Multiple Discriminant Analysis (MDA) [4] และแบ่งระดับความเสี่ยงเป็น Safe, Grey และ Distress Zone ต่อมาได้พัฒนา Z'-Score, Z''-Score และ EM-Score สำหรับตลาดเกิดใหม่ [2], [10] และ [12] พบว่าแบบจำลองดังกล่าวยังคงมีประสิทธิภาพในบริบทไทย

2. แบบจำลอง Ohlson และ Zmijewski โดย Ohlson พัฒนา O-Score โดยใช้ Logistic Regression [5] ส่วน Zmijewski ใช้ Probit Model [6] ซึ่งลดข้อจำกัดของ MDA อย่างไรก็ตาม งานของ [7-8] ชี้ว่าแบบจำลองสถิติมีข้อจำกัดด้านสมมติฐาน การประยุกต์ใช้ข้ามช่วงเวลา และปัญหาการตกแต่งกำไร

Machine Learning และปัญหาข้อมูลไม่สมดุล เพื่อแก้ข้อจำกัดของโมเดลสถิติ งานวิจัยสมัยใหม่จึงใช้ Machine Learning เช่น ANN, SVM, Random Forest และ XGBoost ซึ่งสามารถจัดการความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นได้ และ Narvekar และ Guha [13] พบว่า XGBoost และ RF ให้ค่า ROC AUC สูงกว่า 0.99 ในข้อมูลสหรัฐฯ ขณะที่ [14] พบว่า RF ให้ผลดีที่สุดในกลุ่มธนาคาร ส่วน [15] ยืนยันศักยภาพของ ANN ในการศึกษาแบบข้ามประเทศ ปัญหาสำคัญคือ “Class Imbalance” ซึ่งบริษัทล้มละลายมีสัดส่วนน้อย [16] เสนอเทคนิคการปรับสมดุลข้อมูล เช่น SMOTE และ ADASYN เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการพยากรณ์

2. วิธีการศึกษา

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์เสถียรภาพทางการเงินแบบ 3 ระดับ (Multi-class) สำหรับบริษัทจดทะเบียนในตลาดหลักทรัพย์แห่งประเทศไทย (SET และ mai) โดยใช้ข้อมูลระหว่างปี พ.ศ. 2563 ถึง 2567 ซึ่งครอบคลุมช่วงเวลาแห่งความผันผวนทางเศรษฐกิจ โดยแบ่งสถานะของบริษัทออกเป็น (1) กลุ่มสถานะมั่นคง (Stable) (2) กลุ่มที่ต้องเฝ้าระวัง (Watchlist) และ (3) กลุ่มที่มีแนวโน้มล้มละลาย (Likely Bankruptcy) การศึกษานี้จะประยุกต์ใช้ตัวแปรอัตราส่วนทางการเงินร่วมกับเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องภายใต้สถานะข้อมูลไม่สมดุล เพื่อยกระดับประสิทธิภาพของระบบสัญญาณเตือนภัยล่วงหน้า (Early Warning System) ให้มีความแม่นยำ ทันทต่อสถานการณ์ และเป็นประโยชน์สูงสุดต่อทุกภาคส่วนในตลาดทุนไทย

2.1 การรวบรวมข้อมูลและการสร้างตัวแปร

ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาเป็นข้อมูลรายปีของบริษัทจดทะเบียนในตลาดหลักทรัพย์แห่งประเทศไทยกลุ่มหุ้นยั่งยืน SET ESG Ratings ครอบคลุมช่วงระยะเวลาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2563 ถึง 2568 เป็นรายไตรมาส รวมทั้งสิ้น 2,365 กลุ่มตัวอย่าง โดยผู้วิจัยได้ทำการสกัดคุณลักษณะ (Feature) จำนวน 25 ตัวแปร จากงบการเงินที่ผ่านการตรวจสอบแล้วและข้อมูลตลาด ดังแสดงในตารางที่ 1

Table 1 Definitions of Financial Indicators (X1–X24)

ID	Financial Indicator	Name	Description	Formula / Source
X1	EPS	Earnings Per Share	Net profit earned per common share	$(\text{Net Profit} - \text{Preferred Dividends}) / \text{Weighted Average Number of Common Shares Outstanding}$
X2	CFO	Net Cash Flow from Operating Activities	Net cash generated from operating activities	Derived from the statement of cash flows
X3	CFI	Net Cash Flow from Investing Activities	Net cash used in or generated from investing activities	Derived from the statement of cash flows
X4	CFF	Net Cash Flow from Financing Activities	Net cash received from or used in financing activities	Derived from the statement of cash flows
X5	NCF	Net Cash Flow	Total net cash flow of the firm	$\text{CFO} + \text{CFI} + \text{CFF}$
X6	ROE	Return on Equity	Profitability relative to average shareholders' equity	$(\text{Net Profit} / \text{Average Shareholders' Equity}) \times 100$
X7	ROA	Return on Assets	Profitability relative to average total assets	$(\text{Net Profit} / \text{Average Total Assets}) \times 100$
X8	GP	Gross Profit	Profit remaining after deducting cost of goods sold from sales	$\text{Sales} - \text{Cost of Goods Sold}$

ID	Financial Indicator	Name	Description	Formula / Source
X9	NPM	Net Profit Margin	Percentage of net profit generated from total revenue	$(\text{Net Profit} / \text{Total Revenue}) \times 100$
X10	EBIT %	EBIT Margin	Percentage of earnings before interest and tax relative to total revenue	$(\text{EBIT} / \text{Total Revenue}) \times 100$
X11	D/E	Debt-to-Equity Ratio	Proportion of total liabilities relative to shareholders' equity	$\text{Total Liabilities} / \text{Shareholders' Equity}$
X12	ICR	Interest Coverage Ratio	Ability of the firm to cover interest expenses from operating earnings	$\text{EBIT} / \text{Interest Expense}$
X13	CR	Current Ratio	Ability to meet short-term obligations using current assets	$\text{Current Assets} / \text{Current Liabilities}$
X14	QR	Quick Ratio	Ability to meet short-term obligations using highly liquid assets	$(\text{Current Assets} - \text{Inventories}) / \text{Current Liabilities}$
X15	FAT	Fixed Asset Turnover	Efficiency in generating sales from fixed assets	$\text{Sales} / \text{Average Net Fixed Assets}$
X16	TAT	Total Asset Turnover	Efficiency in generating sales from total assets	$\text{Sales} / \text{Average Total Assets}$
X17	IT	Inventory Turnover	Efficiency in selling inventory during the period	$\text{Cost of Goods Sold} / \text{Average Inventory}$
X18	ASP	Average Sale Period	Average number of days required to sell inventory	$365 / \text{Inventory Turnover}$
X19	ART	Accounts Receivable Turnover	Efficiency in collecting receivables from credit sales	$\text{Net Credit Sales} / \text{Average Accounts Receivable}$
X20	ACP	Average Collection Period	Average number of days required to collect receivables	$365 / \text{Accounts Receivable Turnover}$
X21	APT	Accounts Payable Turnover	Efficiency in paying trade payables	$\text{Net Credit Purchases} / \text{Average Accounts Payable}$
X22	APP	Average Payment Period	Average number of days required to pay trade payables	$365 / \text{Accounts Payable Turnover}$

ID	Financial Indicator	Name	Description	Formula / Source
X23	CC	Cash Cycle	Length of time between cash outflow and cash inflow in operations	$ASP + ACP - APP$
X24	DY	Dividend Yield	Rate of return received from dividends relative to market price	$(\text{Dividend per Share} / \text{Market Price per Share}) \times 100$

2.2 การนิยามตัวแปรเป้าหมายและการประมวลผลข้อมูล

ตัวแปรตาม (Target Variable) ถูกแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม (Class) ได้แก่ (1) Stable บริษัทที่มีส่วนของผู้ถือหุ้นเป็นบวก และไม่มีสัญญาณความล้มเหลว (2) Watchlist บริษัทที่แสดงสัญญาณเตือนภัยล่วงหน้า เช่น มีผลขาดทุนสุทธิติดต่อกัน หรือมีอัตราส่วนทางการเงินต่ำกว่าเกณฑ์ และ (3) Likely Bankruptcy บริษัทที่เข้าสู่กระบวนการฟื้นฟูกิจการ ถูกเพิกถอน หรือมีสถานะทางการเงินวิกฤต

2.3 การสร้างแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องสำหรับพยากรณ์เสถียรภาพทางการเงิน

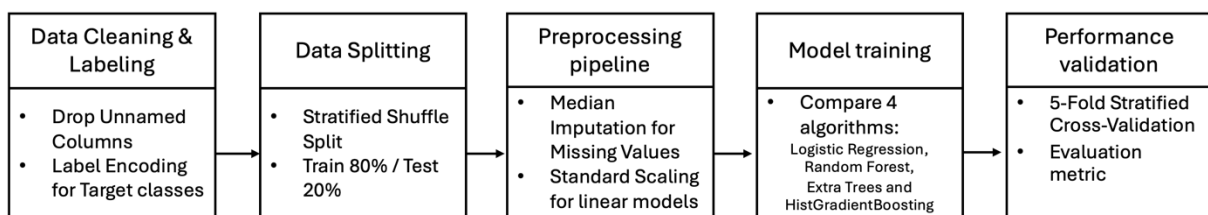


Figure 1 Overview of the Experimental Workflow for Multi-Class Financial Stability Prediction

ในการศึกษาครั้งนี้ได้กำหนดกระบวนการวิเคราะห์ข้อมูลและพัฒนาแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่อง โดยเน้นการจัดการกับข้อมูลทางการเงินที่มีลักษณะหลายกลุ่มและมีความไม่สมดุลของข้อมูล ดังมีรายละเอียดขั้นตอนดังนี้

2.3.1 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาและการเตรียมข้อมูล (Data Collection and Preparation)

ข้อมูลที่น่าสนใจมาศึกษาประกอบด้วยอัตราส่วนทางการเงิน (Financial Ratios) ของบริษัทจดทะเบียนในตลาดหลักทรัพย์แห่งประเทศไทย โดยมีการคัดเลือกคุณลักษณะ (Features) ที่สำคัญจำนวน 24 ตัวแปร (กำหนดเป็น X_1 ถึง X_{24}) เพื่อใช้เป็นปัจจัยนำเข้า (Inputs) ในการพยากรณ์สถานะทางการเงิน

สำหรับตัวแปรเป้าหมาย (Target Variable) ได้จำแนกเสถียรภาพทางการเงินออกเป็น 3 ระดับ ได้แก่: 1) กลุ่มมั่นคง (Stable) 2) กลุ่มเฝ้าระวัง (Watchlist) 3) กลุ่มมีแนวโน้มล้มละลาย (Likely Bankruptcy) ในขั้นตอนการเตรียมข้อมูล ผู้วิจัยได้ดำเนินการทำความสะอาดข้อมูล (Data Cleaning) โดยการตัดข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับช่องออก และใช้เทคนิค Label Encoding เพื่อแปลงสถานะทั้ง 3 กลุ่มให้อยู่ในรูปแบบรหัสตัวเลข (0, 1, 2) เพื่อให้แบบจำลองสามารถนำไปประมวลผลทางสถิติได้

2.3.2 การประมวลผลข้อมูลและกระบวนการ Pipeline (Data Preprocessing Pipeline)

ในการเตรียมข้อมูลเพื่อให้แบบจำลองมีความแม่นยำและลดความคลาดเคลื่อน ผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้กระบวนการ Pipeline ในการจัดการข้อมูลอย่างเป็นระบบ โดยเริ่มต้นจากการจัดการค่าที่สูญหาย (Missing Values) ด้วยเทคนิคการแทนที่ด้วยค่ามัธยฐาน (Median Imputation) ของแต่ละคุณลักษณะ เพื่อลดทอนผลกระทบที่อาจเกิดจากค่าสุดโต่ง (Outliers) ซึ่งมักปรากฏในข้อมูลอัตราส่วนทางการเงิน จากนั้นจึงดำเนินการปรับมาตรฐานข้อมูล (Scaling) ด้วยวิธี Standard Scaling เพื่อปรับระดับค่าของคุณลักษณะที่มีหน่วยวัดและช่วงข้อมูลแตกต่างกันให้อยู่ในมาตรฐานเดียวกัน (Standardization) ส่งผลให้แบบจำลองสามารถเรียนรู้ความสัมพันธ์ของข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

2.3.3 การแบ่งชุดข้อมูล (Data Splitting)

ผู้วิจัยได้ดำเนินการแบ่งชุดข้อมูลสำหรับการทดลองด้วยเทคนิค Stratified Shuffle Split โดยกำหนดสัดส่วนชุดฝึกสอน (Training Set) ร้อยละ 80 และชุดทดสอบ (Test Set) ร้อยละ 20 เพื่อให้มั่นใจว่าสัดส่วนการกระจายตัวของบริษัทในแต่ละสถานะทางการเงินทั้ง 3 กลุ่ม มีความใกล้เคียงและสอดคล้องกันทั้งในชุดข้อมูลที่ใช้ฝึกสอนและชุดข้อมูลที่ใช้ทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลอง

2.3.4 การตรวจสอบความถูกต้องและการวัดประสิทธิภาพ (Performance Validation)

การประเมินผลใช้เทคนิค 5-Fold Stratified Cross-Validation เพื่อลดความคลาดเคลื่อนจากการสุ่มข้อมูล และกำหนดให้ Macro-averaged F1-Score เป็นตัวชี้วัดหลัก (Primary Metric) เนื่องจากเป็นค่าที่สามารถสะท้อนประสิทธิภาพในการจำแนกกลุ่มข้อมูลที่มีสัดส่วนไม่เท่ากันได้อย่างเป็นธรรมมากกว่าการใช้ค่าความแม่นยำ (Accuracy) เพียงอย่างเดียว

$$Accuracy = \frac{(TP + TN)}{(TP + TN + FP + FN)}$$

$$Precision = \frac{TP}{(TP + FP)}$$

$$Recall = \frac{TP}{(TP + FN)}$$

$$F1_{score} = \frac{2 \times (Precision \times Recall)}{(Precision + Recall)}$$

$$F1_{Macro} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K F1_i$$

ในสมการประเมินผล TP (True Positive) หมายถึงจำนวนตัวอย่างที่แบบจำลองทำนายว่าเป็นคลาสเป้าหมายและทำนายได้ถูกต้อง TN (True Negative) หมายถึงจำนวนตัวอย่างที่แบบจำลองทำนายว่าไม่เป็นคลาสเป้าหมายและทำนายได้ถูกต้อง FP (False Positive) หมายถึงจำนวนตัวอย่างที่แบบจำลองทำนายว่าเป็นคลาสเป้าหมาย แต่ความจริงไม่ใช่ และ FN (False Negative) หมายถึงจำนวนตัวอย่างที่แบบจำลองทำนายว่าไม่เป็นคลาสเป้าหมาย แต่ความจริงเป็นคลาสเป้าหมายนั้น สำหรับค่า K ในสมการ Macro-F1 หมายถึงจำนวนคลาสทั้งหมดของปัญหาการจำแนก ส่วน $F1_i$ หมายถึงค่า F1-score ของคลาสที่ i ซึ่งถูกคำนวณแยกสำหรับแต่ละคลาสก่อนนำมาเฉลี่ยเป็นค่า Macro-F1

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองด้วย 5-Fold Cross-Validation

ตารางที่ 2 แสดงผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองที่ใช้ในการพยากรณ์เสถียรภาพทางการเงินแบบหลายกลุ่ม โดยประเมินด้วยวิธี 5-Fold Cross-Validation และใช้ค่า Macro-F1 เป็นเกณฑ์หลักในการจัดอันดับ เนื่องจากชุดข้อมูลมีลักษณะไม่สมดุลระหว่างคลาส การใช้ตัวชี้วัดดังกล่าวจึงเหมาะสมกว่าการพิจารณา accuracy เพียงอย่างเดียว เพราะสามารถสะท้อนประสิทธิภาพของโมเดลในทุกคลาสได้อย่างสมดุล

ผลการทดลองพบว่า XGBoost ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด โดยมีค่า Macro-F1 เท่ากับ 0.8814 จัดอยู่ในอันดับที่ 1 รองลงมาคือ ExtraTrees ซึ่งมีค่า Macro-F1 เท่ากับ 0.8803 และ HistGradientBoosting ซึ่งมีค่า Macro-F1 เท่ากับ 0.8705 ตามลำดับ ผลลัพธ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าโมเดลในกลุ่ม ensemble และ boosting สามารถเรียนรู้รูปแบบความสัมพันธ์ของตัวชี้วัดทางการเงินได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเหมาะสมกับโจทย์การจำแนกหลายกลุ่มภายใต้สภาวะข้อมูลไม่สมดุล

ในขณะที่ RandomForest ให้ค่า Macro-F1 เท่ากับ 0.8509 ซึ่งแม้อยู่ในระดับที่ดี แต่ยังต่ำกว่า XGBoost, ExtraTrees และ HistGradientBoosting เล็กน้อย ส่วน SVM (RBF) มีค่า Macro-F1 เท่ากับ 0.7882 และ Logistic Regression (multinomial) มีค่า Macro-F1 เท่ากับ 0.7583 ซึ่งเป็นค่าต่ำสุดในบรรดาโมเดลทั้งหมด สะท้อนให้เห็นว่าโมเดลเชิงเส้นและโมเดล

ที่ต้องอาศัยการสร้างขอบเขตการจำแนกแบบทั่วไปอาจยังไม่สามารถอธิบายความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนของข้อมูลทางการเงินได้ดีเท่ากับโมเดลประเภท tree-based ensemble

เมื่อพิจารณาผลการจัดอันดับโดยรวม จะเห็นได้ว่าแบบจำลองที่อยู่ในกลุ่ม tree-based methods ครองอันดับสูงสุดทั้งหมด โดยเฉพาะ XGBoost และ ExtraTrees ที่ให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกันมาก อย่างไรก็ตาม XGBoost ยังคงมีค่ามากที่สุด จึงถูกเลือกเป็นแบบจำลองที่ดีที่สุด สำหรับการนำไปประเมินผลเพิ่มเติมบนชุดข้อมูลทดสอบจริงในขั้นตอนถัดไป

ผลการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่า การประยุกต์ใช้เทคนิค boosting และ ensemble learning มีศักยภาพสูงในการพยากรณ์เสถียรภาพทางการเงินของบริษัทจดทะเบียนในตลาดหลักทรัพย์แห่งประเทศไทย โดยเฉพาะเมื่อข้อมูลมีความไม่สมดุลและตัวแปรอิสระมีความสัมพันธ์เชิงซับซ้อนหลายมิติ

Table 2 Comparative Results of Models Based on 5-Fold Cross-Validation

Rank	Model	Macro-F1
1	XGBoost	0.8814
2	ExtraTrees	0.8803
3	HistGradientBoosting	0.8705
4	RandomForest	0.8509
5	SVM (RBF)	0.7882
6	Logistic Regression (multinomial)	0.7583

Table 3 Performance of the Best-Performing Model (XGBoost) on the Test Set

Class	Precision	Recall	F1-score	Support
Distress Zone	0.92	0.83	0.87	92
Grey Zone	0.91	0.93	0.92	274
Safe Zone	0.89	0.90	0.89	106
Macro Avg	0.90	0.89	0.89	472
Weighted Avg	0.90	0.90	0.90	472
Accuracy	0.90	-	-	472

4.2 ผลการทดสอบโมเดลที่ดีที่สุด (XGBoost) บนชุดข้อมูลทดสอบ

ภายหลังจากคัดเลือกโมเดล XGBoost ให้เป็นโมเดลที่ดีที่สุดจากขั้นตอน 5-fold cross-validation ผู้วิจัยได้นำโมเดลดังกล่าวมาทดสอบเพิ่มเติมบนชุดข้อมูลทดสอบที่ไม่เคยถูกใช้ในการฝึกมาก่อน ผลการทดลองพบว่า XGBoost ให้ค่า accuracy เท่ากับ 0.90 และมีค่า macro-averaged F1-score เท่ากับ 0.89 ขณะที่ weighted-average F1-score เท่ากับ 0.90 แสดงให้เห็นว่าโมเดลยังคงมีประสิทธิภาพที่ดีและมีเสถียรภาพเมื่อนำไปใช้กับข้อมูลใหม่

เมื่อพิจารณารายคลาส พบว่าโมเดลให้ผลดีที่สุดในกลุ่ม Grey Zone โดยมีค่า precision เท่ากับ 0.91, recall เท่ากับ 0.93 และ F1-score เท่ากับ 0.92 จากจำนวนตัวอย่าง 274 ตัวอย่าง สะท้อนให้เห็นว่าโมเดลสามารถจำแนกบริษัทในกลุ่ม Grey Zone ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง และสามารถตรวจจับตัวอย่างจริงของกลุ่มนี้ได้ครอบคลุม

สำหรับกลุ่ม Distress Zone โมเดลให้ค่า precision เท่ากับ 0.92, recall เท่ากับ 0.83 และ F1-score เท่ากับ 0.87 จากจำนวน 92 ตัวอย่าง ค่าความแม่นยำที่สูงบ่งชี้ว่าเมื่อโมเดลทำนายว่าบริษัทอยู่ในกลุ่มเสี่ยง ผลการทำนายมักถูกต้อง อย่างไรก็ตาม ค่า recall ที่ต่ำกว่าคลาสอื่นสะท้อนว่ายังมีบางกรณีของบริษัทที่อยู่ในภาวะเสี่ยงจริงแต่ไม่ถูกตรวจจับได้ครบถ้วน

ในส่วนของกลุ่ม Safe Zone โมเดลให้ค่า precision เท่ากับ 0.89, recall เท่ากับ 0.90 และ F1-score เท่ากับ 0.89 จากจำนวน 106 ตัวอย่าง แสดงให้เห็นถึงความสามารถของโมเดลในการจำแนกบริษัทที่มีเสถียรภาพทางการเงินได้อย่างสมดุล ทั้งในด้านความแม่นยำและความครอบคลุม

โดยภาพรวม ผลการทดลองรายคลาสแสดงให้เห็นว่า XGBoost สามารถพยากรณ์ได้ดีในทุกกลุ่ม และค่าที่ได้ของแต่ละคลาสไม่แตกต่างกันมากนัก ซึ่งสะท้อนว่าโมเดลไม่ได้เอนเอียงไปยังคลาสที่มีจำนวนข้อมูลมากเพียงอย่างเดียว แม้ว่าชุดข้อมูลจะมีลักษณะไม่สมดุลก็ตาม นอกจากนี้ ค่า macro-average precision เท่ากับ 0.90, macro-average recall เท่ากับ 0.89 และ macro-average F1-score เท่ากับ 0.89 ยังยืนยันว่าโมเดลมีความสามารถในการจำแนกทั้งสามกลุ่มได้อย่างสมดุล

ผลการวิจัยนี้จึงสนับสนุนว่า XGBoost เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสำหรับงาน การพยากรณ์เสถียรภาพทางการเงินแบบหลายกลุ่ม ของบริษัทจดทะเบียนในตลาดหลักทรัพย์แห่งประเทศไทย ภายใต้สภาวะข้อมูลไม่สมดุล และมีศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้เพื่อสนับสนุนการประเมินความเสี่ยงทางการเงินและระบบเตือนภัยล่วงหน้าในอนาคต

4. สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์เสถียรภาพทางการเงินแบบหลายกลุ่มของบริษัทจดทะเบียนในตลาดหลักทรัพย์แห่งประเทศไทย โดยประยุกต์ใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องภายใต้สภาวะข้อมูลไม่สมดุล วัตถุประสงค์สำคัญของการศึกษาคือการจำแนกบริษัทออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ Distress Zone, Grey Zone และ Safe Zone เพื่อสนับสนุนการประเมินสถานะทางการเงินและการเฝ้าระวังความเสี่ยงได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

ในการทดลอง ผู้วิจัยได้เปรียบเทียบแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องจำนวน 6 วิธี ได้แก่ Logistic Regression, Random Forest, Extra Trees, HistGradientBoosting, SVM (RBF) และ XGBoost โดยใช้ Macro-F1 เป็นตัวชี้วัดหลักในการคัดเลือกโมเดล เนื่องจากเหมาะสมกับปัญหาการจำแนกหลายกลุ่มที่มีข้อมูลไม่สมดุล ผลการเปรียบเทียบจาก 5-fold cross-validation พบว่า XGBoost ให้ผลดีที่สุด โดยมีค่า Macro-F1 เท่ากับ 0.8814 สูงกว่าโมเดลอื่นเล็กน้อย โดยเฉพาะเมื่อเปรียบเทียบกับ Extra Trees และ HistGradientBoosting ซึ่งให้ผลใกล้เคียงกัน

เมื่อทดสอบโมเดล XGBoost บนชุดข้อมูลทดสอบที่ไม่เคยใช้ในการฝึกมาก่อน พบว่าโมเดลให้ค่า Accuracy เท่ากับ 0.90 และ Macro-F1 เท่ากับ 0.89 สะท้อนว่าโมเดลมีความสามารถในการพยากรณ์ที่ดีและยังคงรักษาสมดุลของประสิทธิภาพในทุกคลาสได้ แม้ว่าข้อมูลจะมีลักษณะไม่สมดุลก็ตาม เมื่อพิจารณารายคลาส พบว่าโมเดลให้ผลดีที่สุดในกลุ่ม Grey Zone ขณะที่กลุ่ม Distress Zone แม้จะมีค่า precision สูง แต่ค่า recall ต่ำกว่าคลาสอื่นเล็กน้อย แสดงว่ายังมีบางกรณีของบริษัทที่มีความเสี่ยงจริงแต่ไม่ถูกตรวจจับได้ครบถ้วน

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า XGBoost เป็นแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับการพยากรณ์เสถียรภาพทางการเงินแบบหลายกลุ่ม ในบริบทของตลาดหลักทรัพย์แห่งประเทศไทย และเหมาะสมกับการจัดการปัญหาข้อมูลไม่สมดุล งานวิจัยนี้มีส่วนช่วยยืนยันว่าเทคนิค machine learning โดยเฉพาะกลุ่ม ensemble และ boosting สามารถนำมาใช้เป็นเครื่องมือสนับสนุนการวิเคราะห์ความเสี่ยงทางการเงินและระบบเตือนภัยล่วงหน้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สำหรับงานวิจัยในอนาคต อาจพิจารณาเพิ่มจำนวนข้อมูลและขยายขอบเขตช่วงเวลาของข้อมูลให้ครอบคลุมมากขึ้น รวมถึงทดลองเทคนิคการจัดการข้อมูลไม่สมดุลเพิ่มเติม เช่น oversampling, undersampling หรือ cost-sensitive learning ตลอดจนการวิเคราะห์ความสำคัญของตัวแปรและการอธิบายผลของโมเดล เพื่อเพิ่มความสามารถในการตีความและการประยุกต์ใช้ในเชิงปฏิบัติ

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] E. Gerstenberg, Financial Organization and Management of Business, Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice-Hall, 1951.
- [2] E. I. Altman, Corporate Financial Distress and Bankruptcy, 2nd ed. New York, NY, USA: Wiley, 1993.
- [3] W. Beaver, "Financial ratios as predictors of failure," Journal of Accounting Research, vol. 4, pp. 71–111, 1966.
- [4] E. I. Altman, "Financial ratios, discriminant analysis and the prediction of corporate bankruptcy," The Journal of Finance, vol. 23, no. 4, pp. 589–609, Sep. 1968.

-
- [5] J. A. Ohlson, “Financial ratios and the probabilistic prediction of bankruptcy,” *Journal of Accounting Research*, vol. 18, no. 1, pp. 109–131, 1980.
- [6] M. E. Zmijewski, “Methodological issues related to the estimation of financial distress prediction models,” *Journal of Accounting Research*, vol. 22, pp. 59–82, 1984.
- [7] T. Laitinen et al., “Limitations of traditional bankruptcy models,” *Accounting & Finance*, vol. 63, no. 2, pp. 1453–1478, 2023.
- [8] J. S. Grice and M. T. Dugan, “The limitations of bankruptcy prediction models,” *Review of Quantitative Finance and Accounting*, vol. 17, no. 2, pp. 151–166, 2001.
- [9] ม. รุ่งอินทร์, “การพยากรณ์ความล้มเหลวทางการเงินของบริษัทจดทะเบียนในตลาดหลักทรัพย์แห่งประเทศไทย,” *วิทยานิพนธ์ บัญชีมหาบัณฑิต*, 2564.
- [10] ก. อรุณรัตน์ และคณะ, “ผลกระทบของ COVID-19 ต่อโอกาสการล้มละลายของบริษัทจดทะเบียนในประเทศไทย,” *วารสารวิชาการทางบัญชีและการเงิน*, ปีที่ 18, ฉบับที่ 2, 2566.
- [11] ร. อานาภรณ์, “การพยากรณ์ความล้มละลายด้วย Altman’s Z-Score ในกลุ่มธุรกิจสื่อและสิ่งพิมพ์ของไทย,” *วารสารบริหารธุรกิจ*, ปีที่ 43, ฉบับที่ 4, หน้า 89–105, 2563.
- [12] ก. ถาวรธรรมฤทธิ์, “การประยุกต์ใช้ Altman’s Z-Score ในกลุ่มธุรกิจวัสดุก่อสร้าง,” *วิทยานิพนธ์บัญชีมหาบัณฑิต*, 2552.
- [13] N. Narvekar and R. Guha, “Machine learning for corporate bankruptcy prediction,” *Expert Systems with Applications*, vol. 182, 2021.
- [14] M. Rustam et al., “Bankruptcy prediction in banking sector using machine learning,” *IEEE Access*, vol. 10, 2022.
- [15] K. Gajdosikova et al., “Cross-national bankruptcy prediction using ANN,” *Sustainability*, vol. 18, no. 3, 2026.
- [16] H. He and E. A. Garcia, “Learning from imbalanced data,” *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, vol. 21, no. 9, pp. 1263–1284, 2009.x

เว็บไซต์สำหรับติดตามและจัดการงานของหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติ

Web Application for Monitoring and Managing Autonomous Mobile Robot Tasks

กรกนก สัทธาพงษ์¹ และ รัตติกร สมบัติแก้ว^{1,*}Kornkanok Sattapong¹ and Rattikorn Sombutkaew^{1,*}¹ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร 86160 ประเทศไทย¹Department of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Prince of Chumphon Campus, Chumphon Province, 86160, Thailand

*Corresponding author: Rattikorn Sombutkaew, e-mail address: rattikorn.so@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาเว็บไซต์สำหรับติดตามและจัดการงานของหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อแก้ไขปัญหาการบริหารจัดการงานที่มีความซับซ้อนและเกิดความล่าช้า อันเนื่องมาจากข้อมูลและกระบวนการทำงานที่กระจายอยู่ในหลายส่วนของระบบ ระบบที่พัฒนาขึ้นนี้ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางในการรวบรวมข้อมูลและกระบวนการทำงานทั้งหมดไว้ในเว็บไซต์เดียว ช่วยให้ผู้ใช้สามารถตรวจสอบสถานะการทำงานของหุ่นยนต์แบบเรียลไทม์ รวมถึงสามารถติดตามและจัดการงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

เว็บไซต์ที่พัฒนาขึ้นรองรับฟังก์ชันการทำงานที่สำคัญหลายประการ ได้แก่ การแสดงรายการงานในรูปแบบตาราง การเลือกแสดงคอลัมน์ การค้นหาและการกรองข้อมูล การแสดงรายละเอียดงานผ่าน Tooltip และหน้าต่างป๊อปอัพ รวมถึงฟังก์ชันสำหรับการจัดการงาน เช่น การโอนย้ายวัสดุอัตโนมัติ และการลบงานจำนวนมาก ฟังก์ชันเหล่านี้ช่วยเพิ่มความสะดวกในการใช้งาน ลดความซับซ้อนในการติดตามและจัดการงาน และช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงข้อมูลสำคัญได้อย่างรวดเร็วส่งผลให้การดำเนินงานมีประสิทธิภาพมากขึ้น

ผลการทดสอบการทำงานของระบบพบว่า เว็บไซต์สามารถทำงานได้อย่างถูกต้องตามที่ต้องการและสามารถรองรับการติดตามและจัดการงานของหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว ระบบช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการติดตามงาน ลดความผิดพลาดในการดำเนินงาน และช่วยให้การประสานงานระหว่างส่วนต่างๆ ของระบบให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ระบบยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระบบอุตสาหกรรมที่มีการใช้งานหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติได้อย่างเหมาะสม

คำสำคัญ: หุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติ, ระบบติดตามและจัดการงาน, เว็บไซต์, การติดตามแบบเรียลไทม์, ระบบอุตสาหกรรม

Abstract

This paper presents the design and development of a web application for monitoring and managing tasks of autonomous mobile robots. The objective of the system is to address the complexity and delays in task management caused by fragmented data and distributed operational processes across different parts of the system. The developed system functions as a centralized platform that integrates task information and operational processes into a single web application. This allows users to monitor the operational status of robots in real time and manage tasks more efficiently.

The developed web application supports several important functions, including displaying task records in a table format, column selection, task searching and filtering, and displaying task details through a tooltip and pop-up windows. In addition, the system provides task management features such as automatic material transfer and bulk task removal. These functions enhance usability, reduce the complexity involved in monitoring and managing robot tasks, and allow users to quickly access important task information. As a result, operational processes become more efficient and systematic.

The results of system testing indicate that the web application operates correctly according to the system design and is capable of supporting real-time monitoring and efficient task management of autonomous mobile robots. The system improves operational efficiency, reduces potential errors in operations, and enhances coordination among different components of the system. Furthermore, the developed system can be effectively applied in industrial environments where autonomous mobile robots are utilized.

Keywords: Autonomous Mobile Robot, Task Monitoring and Management System, Web application, Real-Time Monitoring, Industrial Systems

1. บทนำ

ในปัจจุบันหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติถูกนำมาใช้ในระบบอุตสาหกรรม [1] เพื่อช่วยในการขนส่งและโอนย้ายวัสดุภายในกระบวนการผลิตซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดำเนินงานและลดขั้นตอนการทำงานของมนุษย์ อย่างไรก็ตามกระบวนการติดตามและจัดการงานของหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติยังคงมีความซับซ้อน เนื่องจากข้อมูลและขั้นตอนการดำเนินงานกระจายอยู่ในหลายระบบ เช่น ระบบกำหนดตำแหน่งหุ่นยนต์ ระบบวางแผนเส้นทาง ระบบจัดสรรงานของหุ่นยนต์ และระบบติดตามสถานะของหุ่นยนต์ ส่งผลให้ผู้ใช้งานต้องสลับการใช้งานหลายระบบเพื่อเข้าถึงข้อมูลซึ่งอาจทำให้เกิดความล่าช้าและความผิดพลาดในการดำเนินงานได้ จากปัญหาดังกล่าวจึงมีการพัฒนาเว็บไซต์สำหรับติดตามและจัดการงานของหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติเพื่อเป็นศูนย์กลางในการรวบรวมข้อมูลและกระบวนการทำงานทั้งหมดไว้ในระบบเดียว โดยผู้ใช้งานสามารถตรวจสอบสถานะการทำงานของหุ่นยนต์แบบเรียลไทม์ [2] และรองรับระบบหุ่นยนต์หลายตัวในสภาพแวดล้อมอุตสาหกรรม รวมถึงจัดการงานผ่านหน้าเว็บไซต์ได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว

นอกจากนี้ระบบที่พัฒนาขึ้นยังสามารถรวมการติดตามสถานะของหุ่นยนต์ การจัดการงาน และการควบคุมกระบวนการทำงานไว้ในแพลตฟอร์มเดียว พร้อมรองรับการสื่อสารแบบเรียลไทม์และการขยายตัวของจำนวนหุ่นยนต์ในอนาคตซึ่งช่วยลดความซับซ้อนของการดำเนินงานและเพิ่มประสิทธิภาพในการบริหารจัดการระบบหุ่นยนต์ในสภาพแวดล้อมอุตสาหกรรมให้มีความต่อเนื่องและมีเสถียรภาพมากยิ่งขึ้น

2. วิธีการศึกษา

ขั้นตอนแรกผู้จัดทำได้ออกแบบภาพรวมการทำงานของระบบเพื่อกำหนดกระบวนการทำงานโดยรวม จากนั้นศึกษาการใช้งานโปรแกรมและภาษาที่ใช้ในการพัฒนา เพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้ โดยแบ่งกระบวนการออกเป็นขั้นตอนย่อยเพื่อแสดงลำดับการทำงานอย่างเป็นระบบ หลังจากนั้นจึงพัฒนาระบบและทดสอบการทำงานของแต่ละส่วนเพื่อยืนยันความถูกต้อง ก่อนนำมารวมกันเพื่อทดสอบระบบแบบครบวงจร พร้อมทั้งตรวจสอบและแก้ไขข้อผิดพลาดเพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างสมบูรณ์

2.1 ภาพรวมการสื่อสารของเว็บไซต์สำหรับติดตามและจัดการงานของหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติ

หลังจากตรวจสอบการใช้งานโปรแกรมและภาษาที่ใช้ในการพัฒนาขององค์กรแล้ว ผู้จัดทำจึงได้ออกแบบภาพรวมการสื่อสารของระบบเว็บไซต์สำหรับติดตามและจัดการงานของหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติดังรูปที่ 1 ประกอบด้วย 4 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนหน้าบ้าน (Front-end) เว็บเซิร์ฟเวอร์ (Web Server) ส่วนหลังบ้าน (Back-end หรือส่วน Application) และฐานข้อมูล (Database)

การทำงานเริ่มต้นจากผู้ใช้งานเข้าถึงระบบผ่านหน้าเว็บไซต์ในส่วนของ Front-end [3] ซึ่งทำหน้าที่แสดงผลข้อมูลและรับคำสั่งจากผู้ใช้งาน โดย Front-end จะสื่อสารกับ Web Server ผ่านโปรโตคอล HTTP [4] สำหรับการร้องขอข้อมูลทั่วไป และ SignalR [2] สำหรับการรับข้อมูลแบบ Real-Time เช่น การอัปเดตสถานะของหุ่นยนต์หรือข้อมูลที่มีการเปลี่ยนแปลง จากนั้น Web Server จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการรับคำร้องขอจาก Front-end และส่งต่อข้อมูลไปยัง Back-end (Application) ผ่านระบบข้อความ RabbitMQ [5] เพื่อให้ Back-end ทำการประมวลผลคำสั่งต่าง ๆ ของระบบ หลังจากประมวลผลเสร็จสิ้น Back-end จะเชื่อมต่อกับฐานข้อมูลผ่าน API [6] เพื่ออ่านหรือบันทึกข้อมูลของระบบ ก่อนส่งผลลัพธ์กลับไปยัง Web Server และแสดงผลให้ผู้ใช้งานผ่านหน้า Front-end ทำให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างเป็นลำดับขั้นตอนและรองรับการแสดงผลข้อมูลแบบ Real-Time ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.2 การออกแบบเว็บไซต์

ในขั้นตอนการออกแบบเว็บไซต์จะยึดหลักความเรียบง่าย ชัดเจน และตอบสนองต่อการใช้งานจริงของผู้ปฏิบัติงาน (Operator) โดยมุ่งเน้นให้ผู้ใช้งานสามารถติดตาม ตรวจสอบสถานะ และจัดการงานของหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติได้อย่างสะดวก พร้อมลดความซับซ้อนของระบบเพื่อให้ใช้งานได้ง่ายและรวดเร็ว

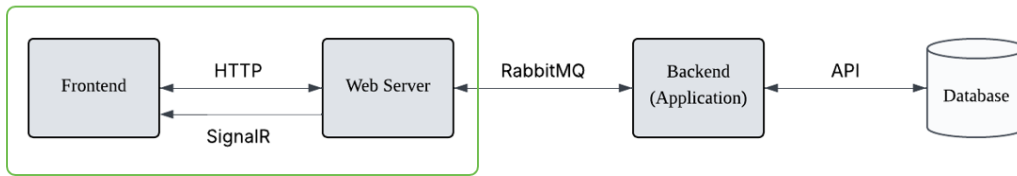


Figure 1 System Communication Overview of Web Application for Monitoring and Managing Autonomous Mobile Robot Tasks

2.2.1 การออกแบบส่วนแสดงรายการงานทั้งหมดในรูปแบบตาราง (Task Table)

จากรูปที่ 2 แสดงการออกแบบหน้ารายการงานทั้งหมดในรูปแบบตาราง ซึ่งเป็นฟีเจอร์สำคัญที่ช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถดูข้อมูลของงานทุกประเภทได้อย่างชัดเจน โดยตารางแสดงข้อมูลในรูปแบบของคอลัมน์ (Grid Columns)

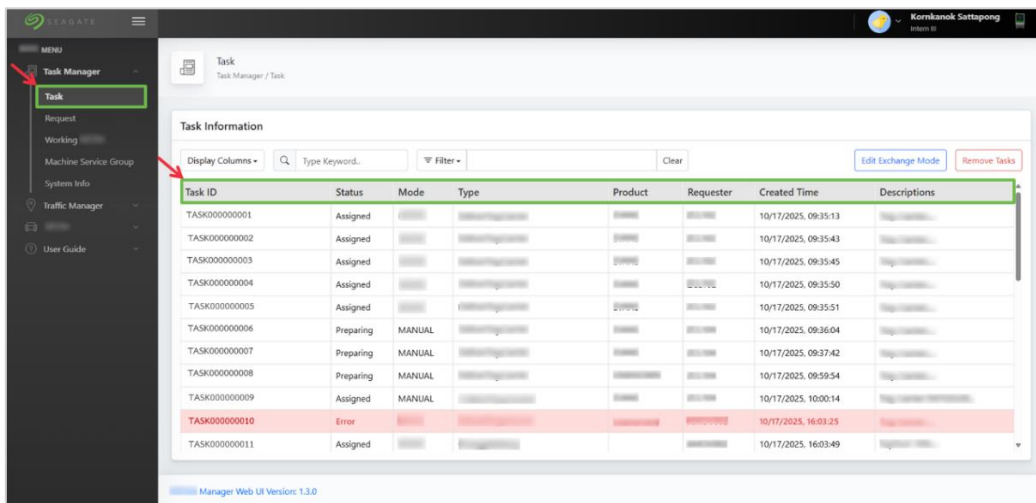


Figure 2 Design of The Task List Display in a Table Format

2.2.2 การออกแบบฟีเจอร์การเลือกคอลัมน์ (Display Columns)

จากรูปที่ 3 แสดงการออกแบบฟีเจอร์การเลือกคอลัมน์ ซึ่งเป็นฟีเจอร์ส่วนหนึ่งของหน้า Task Information เพื่อช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถปรับแต่งการแสดงผลข้อมูลภายในตารางงานได้ตามความต้องการ

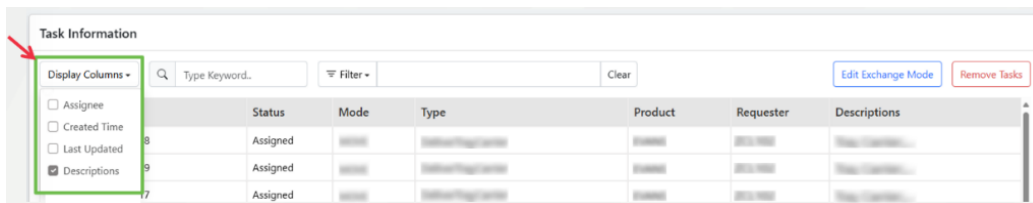
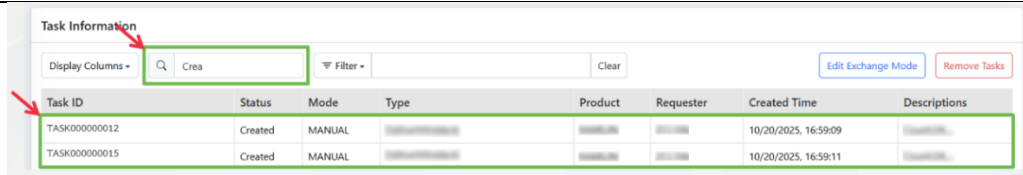


Figure 3 Design of the Column Selection Feature

2.2.3 การออกแบบฟีเจอร์การค้นหาข้อมูลงาน (Type Keyword)

จากรูปที่ 4 แสดงการออกแบบฟีเจอร์การค้นหาข้อมูลงาน ซึ่งเป็นฟีเจอร์ส่วนหนึ่งของหน้า Task Information เพื่อช่วยให้ผู้ใช้งานค้นหาได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ



The screenshot shows a search interface for tasks. At the top, there is a search bar with the text 'Crea' and a search icon. Below the search bar is a table with the following columns: Task ID, Status, Mode, Type, Product, Requester, Created Time, and Descriptions. Two rows are visible in the table, both with a status of 'Created' and a mode of 'MANUAL'. The first row has a Task ID of TASK000000012 and a created time of 10/20/2025, 16:59:09. The second row has a Task ID of TASK000000015 and a created time of 10/20/2025, 16:59:11. There are also buttons for 'Edit Exchange Mode' and 'Remove Tasks'.

Figure 4 Example of Task Data Search

2.2.4 การออกแบบฟิวเจอร์การกรองข้อมูลงาน (Filter Tasks by Topic)

จากรูปที่ 5 แสดงการออกแบบฟิวเจอร์การกรองข้อมูลงาน ซึ่งเป็นฟิวเจอร์ส่วนหนึ่งของหน้า Task Information เพื่อช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถกรองข้อมูลงานที่เกี่ยวข้องกับความต้องการในขณะนั้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ

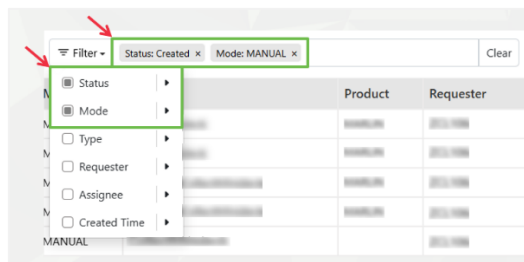
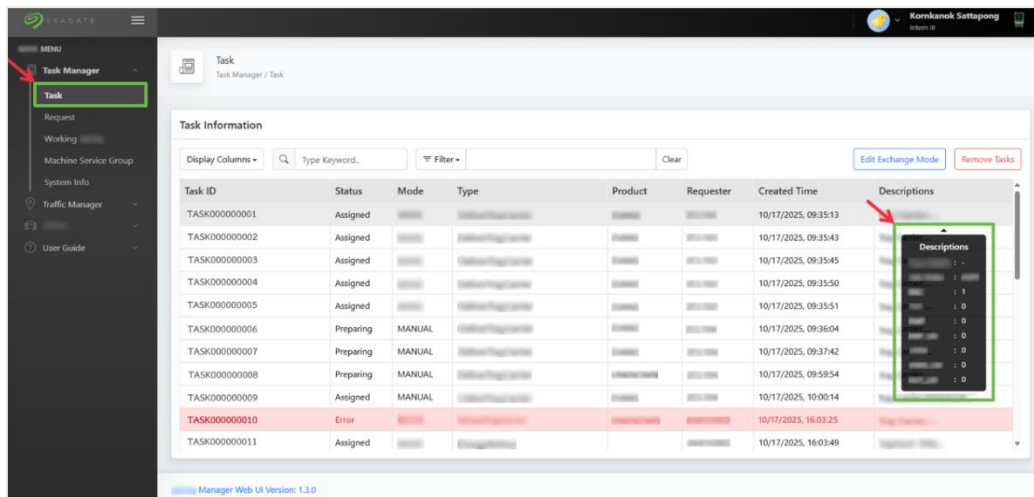


Figure 5 Example of Filtering Data by Selecting the Status and Mode Categories Along with Their Corresponding Sub-Options

2.2.5 การออกแบบฟิวเจอร์แสดงรายละเอียดงานผ่าน Tooltip (Tooltip for Each Row)

จากรูปที่ 6 แสดงการออกแบบฟิวเจอร์รายละเอียดงานผ่าน Tooltip ซึ่งเป็นฟิวเจอร์ส่วนหนึ่งของหน้า Task Information เพื่อช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถดูรายละเอียดเพิ่มเติมของรายการงานในคอลัมน์ Descriptions ได้ทันที โดยไม่ต้องเปิดหน้าต่างใหม่ ทำให้การตรวจสอบข้อมูลของงานเป็นไปอย่างสะดวกและรวดเร็วยิ่งขึ้น



The screenshot shows a table of task information. The table has columns for Task ID, Status, Mode, Type, Product, Requester, Created Time, and Descriptions. A tooltip is shown over the 'Descriptions' column for the task with ID TASK000000010, which has a status of 'Error'. The tooltip displays the text 'Descriptions' and a list of characters. The table also includes a search bar and a filter dropdown menu.

Figure 6 Example of Task Detail Display Through a Tooltip

2.2.6 การออกแบบหน้าต่างป๊อปอัพแสดงรายละเอียดรายการงาน (Popup Task Details)

จากรูปที่ 7 แสดงการออกแบบหน้าต่างป๊อปอัพรายละเอียดของรายการงาน ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของหน้า Task Information เพื่อช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถดูและตรวจสอบรายละเอียดเพิ่มเติมของรายการงานในคอลัมน์ Descriptions ผ่านหน้าต่างป๊อปอัพ โดยการแสดงรายละเอียดงานในหน้าต่างป๊อปอัพแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ดังนี้

2.2.6.1 หมายเลข 1 แสดงในส่วน Head Section

ระบบจะแสดงข้อมูลสำคัญของงาน ประกอบด้วย Task ID และ Details

2.2.6.2 หมายเลข 2 แสดงในส่วน Descriptions Section

ระบบจะแสดงข้อมูลของคำอธิบายของรายการงานนั้น ๆ

2.2.6.3 หมายเลข 3 แสดงในส่วน Action Section

ระบบจะแสดงปุ่มสำหรับการดำเนินการกับงานนั้น ๆ โดยปุ่มที่ปรากฏจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของงาน ดังนี้

1. ปุ่มพื้นฐานที่แสดงทุกรายการงาน ได้แก่ ปุ่ม Remove และปุ่ม Close หรือไอคอนกากบาท
2. ในกรณีที่ Status = Error ระบบจะแสดงปุ่ม Retry Task พร้อมกับแสดงข้อความผิดพลาด (Error Message)
3. ในกรณีที่ Mode = Robot ระบบจะแสดงปุ่ม Assign Task และ Abort Task เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถสั่ง Assign Task และ Abort Task ได้ทันที พร้อมทั้งเลือกเหตุผลประกอบการดำเนินการ
4. ถ้าหากข้อมูลงานไม่เข้าเงื่อนไขใด ๆ ในข้างต้น ระบบจะไม่แสดงปุ่มในส่วนของ Action Section

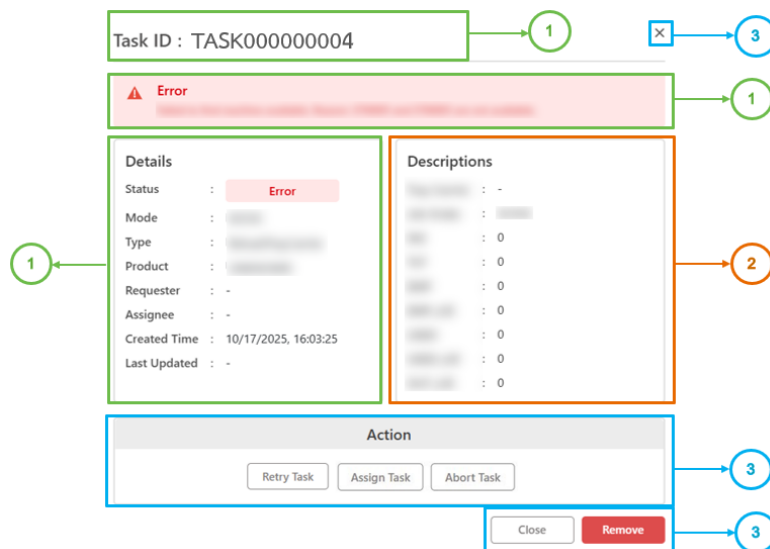


Figure 7 Example of a Task Popup When the Task Status = Error. The System Displays the Retry Task Button, and When the Mode = Robot, The Assign Task and Abort Task Buttons are Available.

2.2.7 การออกแบบหน้าของการโอนย้ายวัสดุอัตโนมัติ (Edit Exchange Mode)

จากรูปที่ 8 - 10 แสดงการออกแบบหน้าสำหรับการโอนย้ายวัสดุอัตโนมัติ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของหน้า Task Information เพื่อช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถจัดการข้อมูลเครื่องจักรและประเภทวัสดุที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการโอนย้ายวัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเข้าถึงฟังก์ชันผ่านปุ่ม Edit Exchange Mode ประกอบด้วยฟังก์ชันหลัก ได้แก่ การเพิ่มเครื่องจักร (Add Machine) การแก้ไขประเภทวัสดุ (Edit Material Type) และการลบเครื่องจักรออกจากรายการ (Remove Machines)

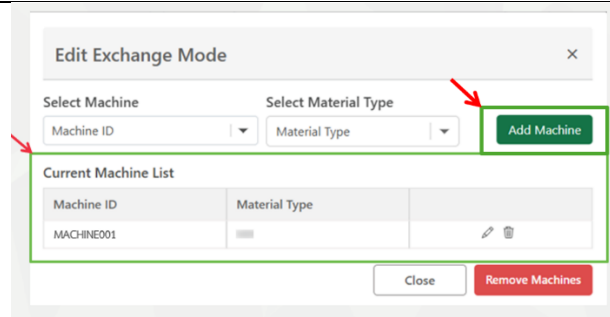


Figure 8 Example Displaying the List of Machine ID and Material Type After Clicking the Add Machine Button

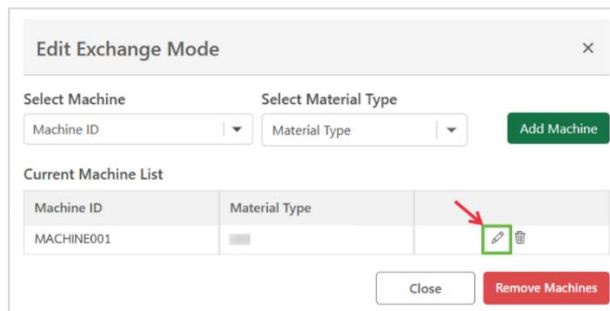


Figure 9 Example of Editing the Material Type for a Specific Machine ID in The List

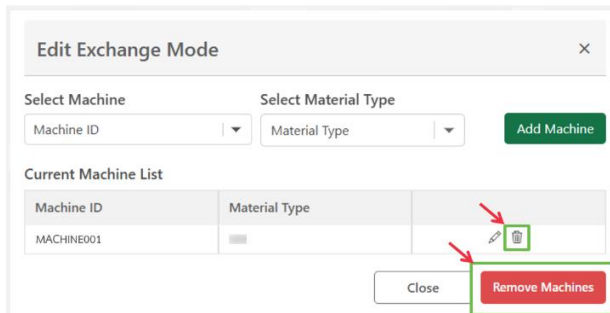


Figure 10 Example of Removing a Single Machine ID or Multiple Machines Simultaneously

2.2.8 การออกแบบหน้าของการลบงานจำนวนมาก (Remove Tasks)

จากรูปที่ 11 - 12 แสดงการออกแบบหน้าสำหรับการลบงานจำนวนมาก ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของหน้า Task Information เพื่อช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถลบงานหลายรายการพร้อมกันได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว โดยเข้าถึงฟังก์ชันผ่านปุ่ม Remove Tasks ซึ่งมีการคัดกรองข้อมูลก่อนดำเนินการลบ ได้แก่ ผู้ร้องขอ (Requester) ประเภทงาน (Task Type) และช่วงวันที่และเวลา (Date Time Range) เพื่อให้สามารถเลือกและลบงานที่ไม่จำเป็นหรือล้าสมัยออกจากระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

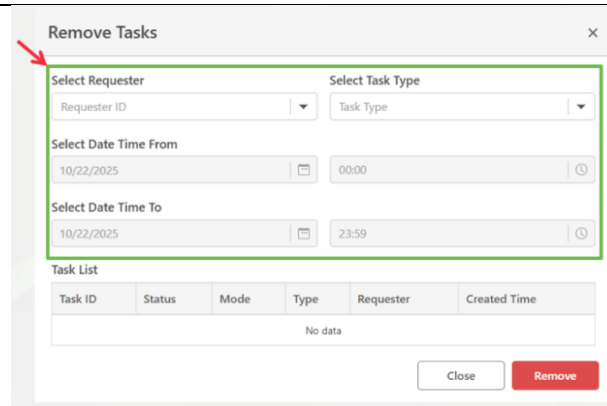
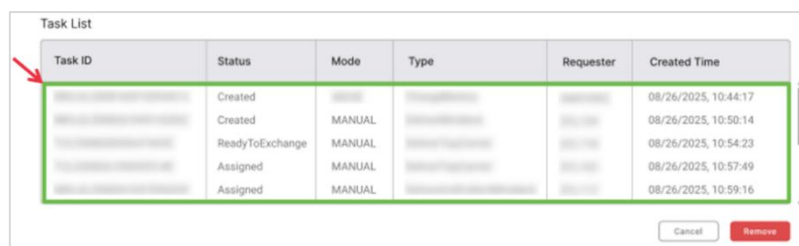


Figure 11 The Filtering Criteria Must Be Selected Before Clicking the Remove Button



Task ID	Status	Mode	Type	Requester	Created Time
	Created				08/26/2025, 10:44:17
	Created	MANUAL			08/26/2025, 10:50:14
	ReadyToExchange	MANUAL			08/26/2025, 10:54:23
	Assigned	MANUAL			08/26/2025, 10:57:49
	Assigned	MANUAL			08/26/2025, 10:59:16

Figure 12 Example Displaying the Task List Based on the Selected Filtering Conditions

2.2.9 ความใหม่ของระบบที่นำเสนอ (Novelty of Proposed System)

ระบบที่นำเสนอเป็นแพลตฟอร์มเว็บแบบรวมศูนย์สำหรับติดตามและจัดการงานของหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติ โดยรวมการแสดงผล การควบคุม และการจัดการงานไว้ในระบบเดียว ต่างจากระบบทั่วไปที่แยกการทำงานเป็นหลายส่วน ส่งผลให้ลดความซับซ้อนและลดเวลาในการตัดสินใจ นอกจากนี้ระบบยังรองรับการทำงานแบบเรียลไทม์และมีระบบจัดการข้อผิดพลาด ทำให้เหมาะสำหรับการใช้งานในสภาพแวดล้อมอุตสาหกรรมจริง

2.3 การรองรับการขยายระบบ

เพื่อรองรับการเพิ่มจำนวนของหุ่นยนต์และปริมาณงานในอนาคต ระบบถูกออกแบบให้มีความสามารถในการขยายตัว (Scalability) โดยใช้สถาปัตยกรรมแบบกระจาย (Distributed Architecture) ร่วมกับโครงสร้างพื้นฐานบนคลาวด์ (Cloud Infrastructure) [7] เพื่อช่วยลดคอขวดและเพิ่มความยืดหยุ่นในการประมวลผล นอกจากนี้ระบบยังถูกออกแบบในลักษณะสถาปัตยกรรมแบบโมดูลาร์ (Modular Architecture) โดยมีการใช้ตัวกลางรับส่งข้อความ (Message Broker: RabbitMQ) เพื่อรองรับการสื่อสารแบบอะซิงโครนัส (Asynchronous Communication) และสนับสนุนแนวคิดการกระจายงานในระบบหลายตัวแทน (Multi-Agent Task Allocation) [8] ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและรองรับการขยายตัวของระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.4 ระบบความปลอดภัย

เนื่องจากระบบมีการสั่งงานและควบคุมหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติ ความปลอดภัยจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณา ระบบจึงมีการออกแบบกลไกการพิสูจน์ตัวตน (Authentication) และการกำหนดสิทธิ์ผู้ใช้งานแบบ Role-based Access Control (RBAC) ผู้ใช้งานถูกแบ่งออกเป็นระดับต่าง ๆ ได้แก่ ผู้ดูแลระบบ (Administrator) และผู้ปฏิบัติงาน (Operator) โดยแต่ละระดับจะมีสิทธิ์ในการเข้าถึงและจัดการข้อมูลที่แตกต่างกัน เช่น ผู้ดูแลระบบสามารถจัดการหุ่นยนต์และงานทั้งหมดได้ ขณะที่ผู้ปฏิบัติงานสามารถสั่งงานหุ่นยนต์ได้เฉพาะบางส่วน นอกจากนี้ระบบยังใช้การสื่อสารผ่าน HTTPS เพื่อเพิ่มความปลอดภัยของข้อมูล และป้องกันการเข้าถึงระบบโดยไม่ได้รับอนุญาต

2.5 ระบบบันทึกข้อมูล

ระบบมีการบันทึกข้อมูลการทำงานของหุ่นยนต์และผู้ใช้งาน เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ย้อนหลังและตรวจสอบความผิดพลาด โดยข้อมูลที่ถูกรับบันทึกประกอบด้วยสถานะของหุ่นยนต์ การดำเนินการของงาน และการสั่งงานจากผู้ใช้งาน ข้อมูล Log จะถูกจัดเก็บในฐานข้อมูลของระบบ และสามารถนำมาใช้วิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบ รวมถึงตรวจสอบปัญหาที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงานได้ นอกจากนี้ระบบยังช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบ และรองรับการปรับปรุงระบบในอนาคต

2.6 การจัดการข้อผิดพลาดของเครือข่าย

เพื่อรองรับกรณีที่เกิดปัญหาการเชื่อมต่อเครือข่ายระหว่างหุ่นยนต์และเว็บไซต์ ระบบถูกออกแบบให้สามารถจัดการข้อผิดพลาดได้ โดยมีการตรวจสอบสถานะการเชื่อมต่ออย่างต่อเนื่อง หากเกิดการตัดการเชื่อมต่อ ระบบจะดำเนินการเชื่อมต่อใหม่โดยอัตโนมัติ นอกจากนี้ระบบยังมีการจัดเก็บข้อมูลคำสั่งและสถานะของหุ่นยนต์ไว้ชั่วคราว โดยใช้ตัวกลางรับส่งข้อความ (Message Broker: RabbitMQ) เพื่อช่วยจัดคิวข้อความและรักษาความต่อเนื่องของข้อมูล เมื่อการเชื่อมต่อกลับมา ระบบจะส่งข้อมูลที่ค้างอยู่โดยอัตโนมัติ เพื่อลดความผิดพลาดของข้อมูลและป้องกันการสั่งงานซ้ำซ้อน

3. ผลการทดสอบการทำงานของระบบ

หลังจากดำเนินการออกแบบและพัฒนาระบบเว็บไซต์สำหรับติดตามและจัดการงานของหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติเสร็จสิ้นแล้ว ได้ทำการทดสอบเพื่อประเมินความถูกต้องและประสิทธิภาพของระบบ โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ การทดสอบฟังก์ชัน การทดสอบประสิทธิภาพ และการประเมินผล ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 1 – 3

3.1 การทดสอบฟังก์ชันการทำงานของระบบ

เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการทำงานในแต่ละฟังก์ชันหลักของระบบ โดยทำการทดสอบการแสดงผลข้อมูล การค้นหาการกรองข้อมูล และการจัดการงานของหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติ เพื่อให้มั่นใจว่าระบบสามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้ โดยผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 1

Table 1 Functional Testing Results

No.	Test Case	Test Result	Function Correctness
1	Display of All Task Records in a Table Format	Pass	Correct
2	Display of the Column Selection Feature	Pass	Correct
3	Display of the Task Search Function	Pass	Correct
4	Display of the Task Filtering Function	Pass	Correct
5	Display of Task Details Through a Tooltip	Pass	Correct
6	Display of Task Details in a Popup	Pass	Correct
7	Display of the Automatic Material Transfer Function	Pass	Correct
8	Display of the Bulk Task Removal Function	Pass	Correct

3.2 การทดสอบประสิทธิภาพของระบบ

เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบ ได้ทำการทดสอบค่าความหน่วง (Latency) โดยวัดระยะเวลาการตอบสนองระหว่างการสั่งงานของผู้ใช้งานและการอัปเดตข้อมูลของหุ่นยนต์ ซึ่งระบบใช้เทคโนโลยี SignalR สำหรับการสื่อสารแบบเรียลไทม์ระหว่างเซิร์ฟเวอร์และผู้ใช้งาน โดยผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 2

Table 2 Latency Performance Test Results

Number of Robots	Average Latency (ms)	System Status
1	120	Normal
2	135	Normal
3	150	Normal
4	170	Normal
5	190	Normal
6	220	Normal

3.3 การประเมินผลเชิงปริมาณ

เพื่อประเมินผลเชิงปริมาณของระบบ ได้ทำการเปรียบเทียบการทำงานก่อนและหลังการใช้งานระบบ โดยใช้ตัวชี้วัด ได้แก่ ระยะเวลาในการค้นหางาน อัตราความผิดพลาด ระยะเวลาในการดำเนินงาน และความพึงพอใจของผู้ใช้งาน โดยผลการประเมิน แสดงดังตารางที่ 3

Table 3 Quantitative Evaluation Results

No.	Metric	Before Implementation	After Implementation
1	Task Search Time	45 seconds	12 seconds
2	Error Rate	15%	3%
3	Operation Time	5 minutes	2 minutes
4	User Satisfaction	3.2 / 5	4.56 / 5

4. สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาเว็บไซต์สำหรับติดตามและจัดการงานของหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติในรูปแบบแพลตฟอร์ม รวมศูนย์ เพื่อช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถติดตามสถานะของหุ่นยนต์และจัดการงานได้แบบเรียลไทม์ผ่านเว็บไซต์เดียว ผลการทดสอบ ฟังก์ชันการทำงานของระบบพบว่า ระบบสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องตามที่ต้องการแบบไว้ทุกฟังก์ชัน และการทดสอบประสิทธิภาพ ของระบบพบว่า ระบบสามารถรองรับการเชื่อมต่อของหุ่นยนต์ได้สูงสุด 6 ตัว โดยมีค่าเวลาหน่วงเฉลี่ยของระบบอยู่ระหว่าง 120 – 220 มิลลิวินาที ซึ่งเหมาะสมสำหรับการติดตามแบบเรียลไทม์ในสภาพแวดล้อมอุตสาหกรรม และผลการประเมินเชิงปริมาณ พบว่า ระบบสามารถลดระยะเวลาในการค้นหางานจาก 45 วินาที เหลือ 12 วินาที ลดอัตราความผิดพลาดจาก 15% เหลือ 3% ลดระยะเวลาในการดำเนินงานจาก 5 นาที เหลือ 2 นาที และผู้ใช้งานมีความพึงพอใจต่อระบบเพิ่มขึ้นจาก 3.2 เป็น 4.56 คะแนน แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดำเนินงานได้อย่างชัดเจน

นอกจากนี้ระบบยังรองรับการขยายตัวในอนาคต การรักษาความปลอดภัยของข้อมูล การบันทึกข้อมูลย้อนหลัง และการจัดการข้อผิดพลาดของเครือข่าย ซึ่งช่วยเพิ่มความเสถียรของระบบ และทำให้ระบบสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในสภาพแวดล้อม อุตสาหกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ บริษัท ซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด ที่ได้ต้อนรับและดูแลนักศึกษาเป็นอย่างดีตลอดระยะเวลา การดำเนินโครงการสหกิจศึกษา รวมทั้งความเอื้อเฟื้อและความเป็นกันเองของทีมงาน ทำให้ข้าพเจ้ารู้สึกอบอุ่นและเป็นส่วนหนึ่ง ขององค์กร ผู้จัดทำจะจดจำประสบการณ์อันมีค่านี้ไว้และนำไปใช้เป็นแรงบันดาลใจในการทำงานในอนาคต

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Loganathan, A. and Ahmad, N. S. 2023. A systematic review on recent advances in autonomous mobile robot navigation. Engineering Science and Technology, an International Journal. 40: 101343.
- [2] Microsoft. n.d. Introduction to SignalR. เข้าถึงได้จาก : เว็บไซต์ <https://learn.microsoft.com/en-us/aspnet/signalr/overview/getting-started/introduction-to-signalr> (เข้าถึงเมื่อ 08 พฤศจิกายน 2568).
- [3] Redux. n.d. Redux Documentation. เข้าถึงได้จาก : เว็บไซต์ <https://redux.js.org/> (เข้าถึงเมื่อ 08 พฤศจิกายน 2568).
- [4] GeeksforGeeks. n.d. Hypertext Transfer Protocol (HTTP). เข้าถึงได้จาก : เว็บไซต์ <https://www.geeksforgeeks.org/blogs/http-full-form> (เข้าถึงเมื่อ 07 พฤศจิกายน 2568).
- [5] GeeksforGeeks. n.d. Introduction to RabbitMQ. เข้าถึงได้จาก : เว็บไซต์ <https://www.geeksforgeeks.org/blogs/introduction-to-rabbitmq> (เข้าถึงเมื่อ 08 พฤศจิกายน 2568).
- [6] Akamai Technologies. n.d. How Do APIs Work. เข้าถึงได้จาก : เว็บไซต์ <https://www.akamai.com/glossary/how-do-apis-work> (เข้าถึงเมื่อ 07 พฤศจิกายน 2568).
- [7] Colombo, A. W., Karnouskos, S. and Bangemann, T. 2014. Industrial cloud-based cyber-physical systems. Springer International Publishing, Cham.
- [8] Khosravi, M. R., Samadi, M. and Rahmani, A. M. 2020. Task allocation in multi-robot systems: A review. Journal of Intelligent & Robotic Systems. 98(3-4): 513-535.

การพัฒนาระบบตรวจจับชิ้นงานให้รองรับการตั้งค่าพารามิเตอร์ในกระบวนการผลิต Developing the Vision System to Support Parameter Setting via Recipe Files

อินทิรา เรืองชาตรี¹ และ รัตติกร สมบัติแก้ว^{1*}

Inthira Rueangchatri¹ and Rattikorn Sombutkaew^{1*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร 86160 ประเทศไทย

¹Department of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Prince of Chumphon Campus, Chumphon Province, 86160, Thailand

*Corresponding author: Rattikorn Sombutkaew, email address: rattikorn.so@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาระบบตรวจจับชิ้นงานที่รองรับการตั้งค่าพารามิเตอร์ผ่านไฟล์ Recipe เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นในการบำรุงรักษาและการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ในกระบวนการผลิต จากระบบเดิมที่ผู้ใช้งานต้องกำหนดค่าพารามิเตอร์แบบฮาร์ดโค้ดภายในโปรแกรมหลัก ระบบนี้ถูกพัฒนาด้วยภาษาซีชาร์ปร่วมกับโปรแกรม Cognex VisionPro เพื่อโหลดพารามิเตอร์ต่างๆ สำหรับใช้ในการตรวจจับตำแหน่งชิ้นงาน การแสดงผลกราฟิก และการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนเพื่อปรับตำแหน่งการติดตั้งชิ้นงานให้มีความแม่นยำ โดยผู้ใช้งานสามารถแก้ไขพารามิเตอร์ต่างๆ ได้โดยไม่ต้องแก้ไขซอร์สโค้ด จากผลการทดสอบการใช้งานด้วยภาพจำนวน 1,000 ภาพ พบว่าระบบใหม่ให้ผลลัพธ์ตรงกับระบบเดิม และเมื่อใช้งานในสายการผลิตจริงสามารถลดอัตราความล้มเหลวจาก 2.55% เหลือ 0.76% และลดเวลาการหยุดทำงานของเครื่องจักรจาก 1.35% เหลือ 0.19%

คำสำคัญ: ระบบตรวจสอบชิ้นงาน, ไฟล์ Recipe, ฮาร์ดโค้ด, ค่าความคลาดเคลื่อน

Abstract

This article discusses the development of a flexible vision system that allows for parameter configuration via a recipe file, enhancing maintenance and ease of parameter adjustments in the production process. In the earlier version of the system, users had to define parameters using fixed values directly in the main program. The new system, built with the C# programming language and utilizing Cognex VisionPro software, enables the loading of various parameters for detecting workpiece positions, displaying graphical outcomes, and calculating offset values for more precise installation of workpieces. This allows users to modify parameters without needing to alter the source code. Testing with 1,000 images demonstrated that the updated system achieved results consistent with the original. Additionally, when deployed on the production line, it led to a reduction in failure rates from 2.55% to 0.76% and minimized machine downtime from 1.35% to 0.19%.

Keywords: Vision system, Recipe file, Hardcode, Offset values

1. บทนำ

ในปัจจุบันระบบตรวจสอบชิ้นงานด้วยกล้องหรือระบบวิชัน (Vision System) ถูกนำมาใช้กับเครื่องจักรที่อยู่ในกระบวนการผลิตเป็นจำนวนมาก [1] โดยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการประมวลผลภาพ เช่น ค่าความเข้มของแสง รูปทรงอ้างอิงของชิ้นงานหรือเครื่องมือที่ใช้ [2] จะถูกกำหนดไว้ในรูปแบบของฮาร์ดโค้ดที่อยู่ในโปรแกรมหลัก เมื่อมีการผลิตชิ้นงานที่หลากหลยรูปแบบหรือปรับเปลี่ยนสภาพแวดล้อมในการผลิตจะทำให้ค่าพารามิเตอร์เดิมที่กำหนดไว้นั้นไม่เหมาะสมในการผลิต จึงส่งผลให้เกิดความผิดพลาดในการตรวจจับชิ้นงานและมีผลกระทบต่ออัตราการผลิตโดยรวมของกระบวนการผลิตในแต่ละครั้ง

นอกจากนี้ผู้ใช้งานระบบเป็นพนักงานประจำเครื่องหรือทีมบำรุงรักษาที่อยู่ในสายการผลิตไม่สามารถปรับแก้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่อยู่ในโปรแกรมหลักได้ด้วยตนเอง ซึ่งจำเป็นต้องรอให้ทีมพัฒนาซอฟต์แวร์ดำเนินการแก้ไขและคอมไพล์โปรแกรมใหม่เท่านั้น ส่งผลให้การตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของสายการผลิตและกระบวนการบำรุงรักษาเป็นไปอย่างล่าช้า

ดังนั้นการพัฒนาระบบตรวจจับชิ้นงานให้รองรับการตั้งค่าพารามิเตอร์ผ่านไฟล์ Recipe มีจุดประสงค์ในการช่วยให้ผู้ใช้งานระบบสามารถปรับแก้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ให้เหมาะสมกับชิ้นงานได้ด้วยตนเองผ่านไฟล์ Recipe ทำให้ลดความผิดพลาดในการตรวจสอบชิ้นงาน เพิ่มความยืดหยุ่นให้กับกระบวนการผลิต และลดระยะเวลาการบำรุงรักษาลงซึ่งส่งผลให้อัตราการผลิตโดยรวมเพิ่มขึ้นได้ [3-4]

2. วิธีการศึกษา

ในขั้นตอนแรกผู้จัดทำได้ศึกษาการทำงานของระบบตรวจจับชิ้นงาน (Vision System) เดิมที่ใช้งานอยู่ในสายการผลิตพบว่าชุดคำสั่งในการรับค่าพารามิเตอร์ (Recipe Parameter) ถูกจัดเก็บในรูปแบบฮาร์ดโค้ดภายในโปรแกรมหลักตั้งภาพรวมในรูปแบบที่ 1 ในระหว่างกระบวนการผลิตเมื่อเกิดข้อผิดพลาดในการตรวจจับชิ้นงานหรือจำเป็นต้องปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตชิ้นงาน ผู้ใช้งานหรือทีมบำรุงรักษา (Users) ต้องประสานงานไปยังกับทีมพัฒนาซอฟต์แวร์ (Dev) เพื่อให้ดำเนินการแก้ไขโค้ดและคอมไพล์ระบบใหม่ทุกครั้งซึ่งวิธีการเดิมนั้นผู้ใช้งานไม่สามารถทำได้ทันทีจึงส่งผลกระทบต่อผลผลิตของสายการผลิต

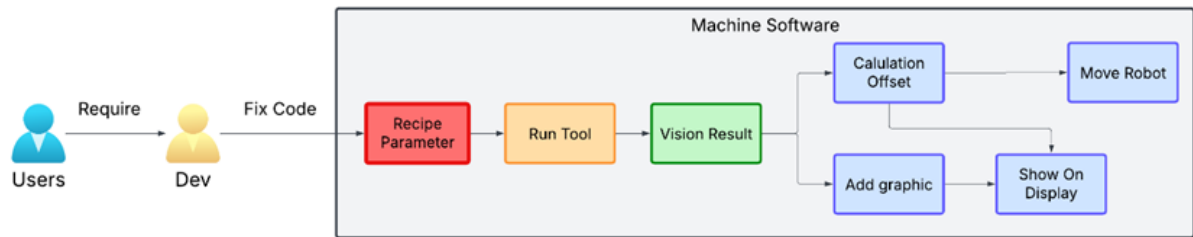


Figure 1 Overview of the Hard-Coded Vision Processing System

ผู้จัดทำจึงได้ออกแบบระบบตรวจจับชิ้นงานให้รองรับการตั้งค่าพารามิเตอร์ผ่านไฟล์ Recipe ภายนอกจากผู้ใช้งานที่อยู่ในกระบวนการผลิตที่ตั้งแสดงในรูปแบบที่ 2 เมื่อระบบเริ่มต้นทำงานจะทำการโหลดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จากไฟล์ Recipe เข้าสู่หน่วยความจำเพื่อใช้ในการประมวลผลของระบบตรวจจับชิ้นงานในกระบวนการผลิต โดยการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งชิ้นงาน (Calculation Offset) เพิ่มการแสดงผล (Add Graphic) แสดงผลในหน้าจอ (Show On Display) และการเคลื่อนหุ่นยนต์ (Move Robot) โดยระบบซอฟต์แวร์ถูกพัฒนาขึ้นด้วยภาษา C# [5] ร่วมกับไลบรารีประมวลผลภาพระดับอุตสาหกรรม [6] ทั้งนี้ผู้ใช้งานหรือทีมบำรุงรักษาที่มีสิทธิ์เข้าถึงไฟล์จะสามารถปรับแก้ค่าพารามิเตอร์ภายในไฟล์ Recipe ได้โดยตรงซึ่งไม่จำเป็นต้องแก้ไขซอร์สโค้ดของโปรแกรมหลัก

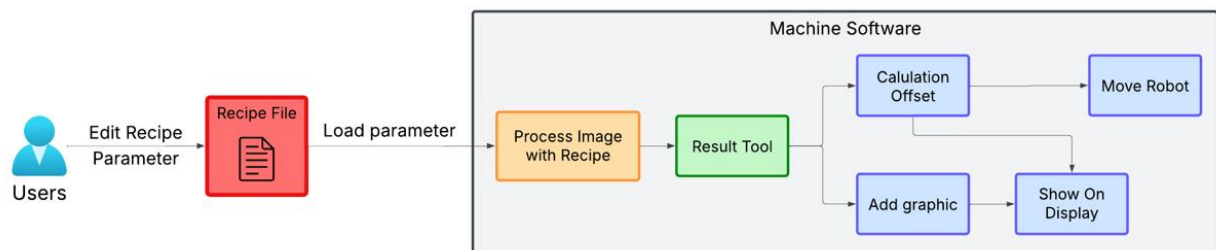


Figure 2 Overview of the Recipe File Vision Processing System

2.1 การออกแบบโครงสร้างไฟล์ Recipe เริ่มต้น

การออกแบบโครงสร้างของไฟล์ Recipe เริ่มต้นของระบบจำเป็นต้องมีความสอดคล้องกับค่าพารามิเตอร์ของ Recipe เดิมที่เขียนอยู่ในรูปแบบของฮาร์ดโค้ด ผู้จัดทำจึงได้กำหนดให้มีเครื่องมือพื้นฐานที่จำเป็นในไฟล์ Recipe เพื่อให้การทำงานของระบบที่ออกแบบใหม่ถูกต้องตามการทำงานของระบบเดิม [2-3] ซึ่งมีทั้งหมด 6 เครื่องมือ ดังนี้

1. Camera Image Tool เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับรับภาพเข้าสู่ระบบประมวลผลภาพ
2. Input Collection Tool เป็นเครื่องมือที่ทำหน้าที่รับค่าพารามิเตอร์อินพุตที่ส่งมาจากซอฟต์แวร์
3. Image Size Tool เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับรับค่าพารามิเตอร์ขนาดและตำแหน่งของภาพที่ได้จากการคำนวณในซอฟต์แวร์ เช่น จุดศูนย์กลาง ความกว้าง และความสูง เป็นต้น
4. Arm Result Tool เป็นเครื่องมือที่ใช้บันทึกผลลัพธ์ของการตรวจจับวงกลมด้านซ้ายและขวาบนแขนจับของหุ่นยนต์ที่ได้จากการประมวลผลภาพของไฟล์ Recipe
5. HDD Result Tool เป็นเครื่องมือที่ใช้บันทึกผลลัพธ์ของการตรวจจับวงกลมของฮาร์ดดิสก์ที่ได้จากการประมวลผลภาพของไฟล์ Recipe

6. Bearing Result Tool เป็นเครื่องมือที่ใช้บันทึกผลลัพธ์ของการตรวจจับวงกลมของแบริ่งที่ได้จากการประมวลผลภาพของไฟล์ Recipe

2.2 การออกแบบการจัดการไฟล์ Recipe

การออกแบบการจัดการไฟล์ Recipe แบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่อยู่ในระบบพบไฟล์ Recipe และกรณีที่ไม่พบไฟล์ Recipe อยู่ในตำแหน่งที่กำหนดดังแสดงในรูปที่ 3 เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของโครงสร้างไฟล์ Recipe และเตรียมความพร้อมของระบบก่อนเริ่มต้นการทำงาน โดยอาศัยหลักการจัดการ Recipe Management System (RMS) [3-4]

1. กรณีพบไฟล์ Recipe ระบบจะทำการโหลดข้อมูลและตรวจสอบโครงสร้างภายในไฟล์ โดยให้ความสำคัญกับเครื่องมือรับภาพ (Camera Image Tool) เป็นลำดับแรก ซึ่งเครื่องมือรับภาพต้องอยู่ในลำดับที่ 1 เท่านั้น เนื่องจากเครื่องมือประมวลผลอื่นๆ จำเป็นต้องอ้างอิงข้อมูลภาพ หากลำดับเปลี่ยนไปจะทำให้เกิดความผิดพลาดของโครงสร้างข้อมูลและส่งผลให้ระบบไม่สามารถโหลดไฟล์ Recipe ได้ นอกจากนี้ระบบยังตรวจสอบเครื่องมือพื้นฐานอื่น ๆ ทั้งหมด ได้แก่ Input Collection, Image Size, Arm Result, HDD Result และ Bearing Result หากพบว่าภายในไฟล์ขาดเครื่องมือใดไประบบจะสร้างเครื่องมือดังกล่าวขึ้นมาอัตโนมัติเพื่อให้โครงสร้างของไฟล์ Recipe นั้นครบถ้วนและเป็นไปตามที่กำหนด

2. กรณีไม่พบไฟล์ Recipe ระบบจะทำการสร้างไฟล์ Recipe ชุดใหม่ขึ้นมาโดยอัตโนมัติและเรียงลำดับเครื่องมือพื้นฐานตามโครงสร้างที่ออกแบบไว้ โดยเริ่มต้นจาก Camera Image Tool และตามด้วยเครื่องมือประมวลผล และเครื่องมือสำหรับส่งออกผลลัพธ์ ไฟล์ Recipe ที่ถูกสร้างขึ้นจะเป็นเพียงไฟล์เริ่มต้นซึ่งประกอบด้วยเครื่องมือพื้นฐานที่จำเป็นเท่านั้น โดยยังไม่มีการกำหนดค่าพารามิเตอร์การประมวลผลภาพอย่างสมบูรณ์ ผู้ใช้งานต้องนำไฟล์ดังกล่าวไปปรับแต่งและกำหนดพารามิเตอร์เพิ่มเติมก่อนจึงจะสามารถนำไปใช้ในการประมวลผลได้อย่างถูกต้อง

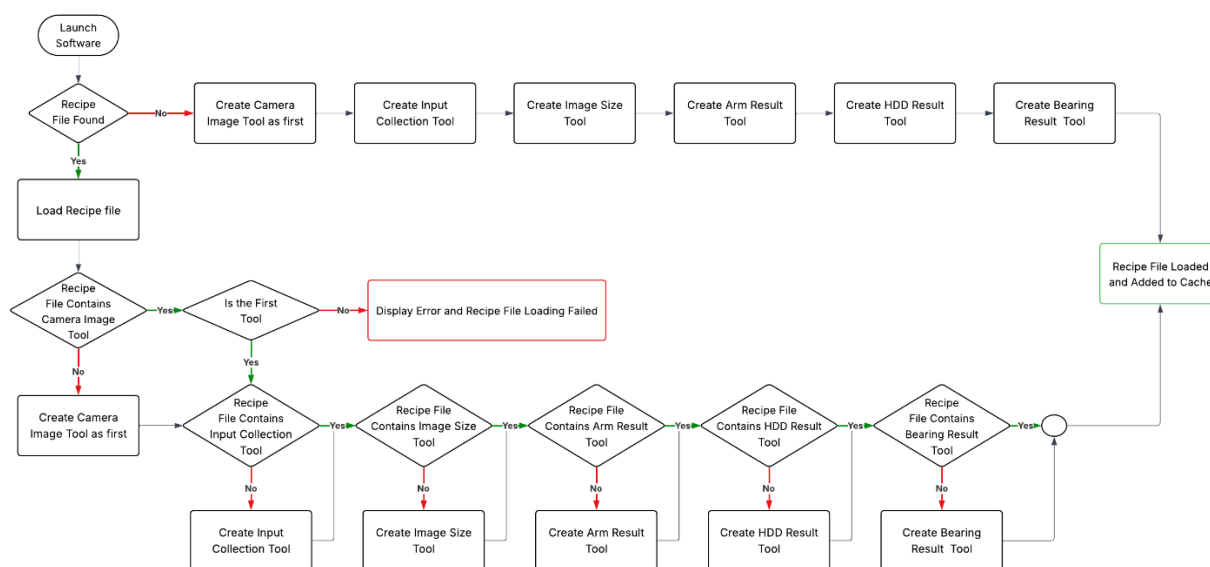


Figure 3 Design of the Recipe File Management System

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

ในส่วนนี้เป็นการทดสอบการทำงานและตรวจสอบความถูกต้องของระบบตรวจสอบชิ้นงานที่รองรับการตั้งค่าพารามิเตอร์ผ่านไฟล์ Recipe ที่ได้ออกแบบพัฒนาระบบเสร็จสิ้นแล้วพบว่า การทดสอบเป็นดังตารางที่ 1-6 โดยแบ่งการทดสอบเป็นส่วนต่างๆ ดังนี้

3.1 การทดสอบการสร้างไฟล์ Recipe

ตารางที่ 1 แสดงผลการทดสอบการสร้างไฟล์ Recipe เริ่มต้นอัตโนมัติของระบบเมื่อไม่พบไฟล์ในตำแหน่งที่กำหนด เพื่อให้ระบบสามารถดำเนินงานต่อไปได้โดยไม่เกิดข้อผิดพลาด

Table 1 Table Default Recipe File Creation Test

No.	Condition	Result	Accuracy
1	Recipe file not found	New Recipe file created with basic tools	100%
2	Recipe file found	Existing Recipe file loaded	100%

จากผลการทดสอบ เมื่อระบบไม่พบไฟล์ Recipe ในตำแหน่งที่กำหนด ระบบจะทำการสร้างไฟล์ใหม่พร้อมติดตั้งเครื่องมือพื้นฐาน 6 ชนิดโดยอัตโนมัติ ซึ่งแสดงโครงสร้างลำดับเครื่องมือดังรูปที่ 4 เพื่อให้มั่นใจว่าระบบมีองค์ประกอบครบถ้วนตามสถาปัตยกรรมที่ออกแบบไว้ก่อนเริ่มกระบวนการประมวลผลภาพ

**Figure 4** Internal structure of basic tools within the automatically generated Recipe file

3.2 การทดสอบการโหลดไฟล์ Recipe

ตารางที่ 2 แสดงผลการทดสอบการโหลดไฟล์ Recipe จากไฟล์ที่อยู่ในตำแหน่งที่กำหนด เพื่อตรวจสอบโครงสร้างของไฟล์และความพร้อมในการนำไปใช้ในกระบวนการประมวลผลต่อไป

Table 2 Table Recipe File Loading Test

No.	Condition	Result	Accuracy
1	Valid Recipe structure	Recipe file is successfully loaded	100%
2	Camera Image Tool in first position	Recipe file is successfully loaded	100%
3	Camera Image Tool is not in the first position	Load error detected	100%
4	All Default tools are present	Recipe file is successfully loaded	100%
5	Some Default tools are missing	Missing Default tools created automatically	100%

จากการทดสอบการโหลดไฟล์ Recipe เพื่อยืนยันว่าระบบมีการตรวจสอบความถูกต้องของโครงสร้างก่อนเริ่มทำงาน โดยหากไฟล์มีลำดับเครื่องมือที่ถูกต้องตามเงื่อนไข แสดงดังรูปที่ 5 ระบบจะทำการโหลดข้อมูลเข้าสู่หน่วยความจำเพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการประมวลผลภาพในลำดับถัดไป

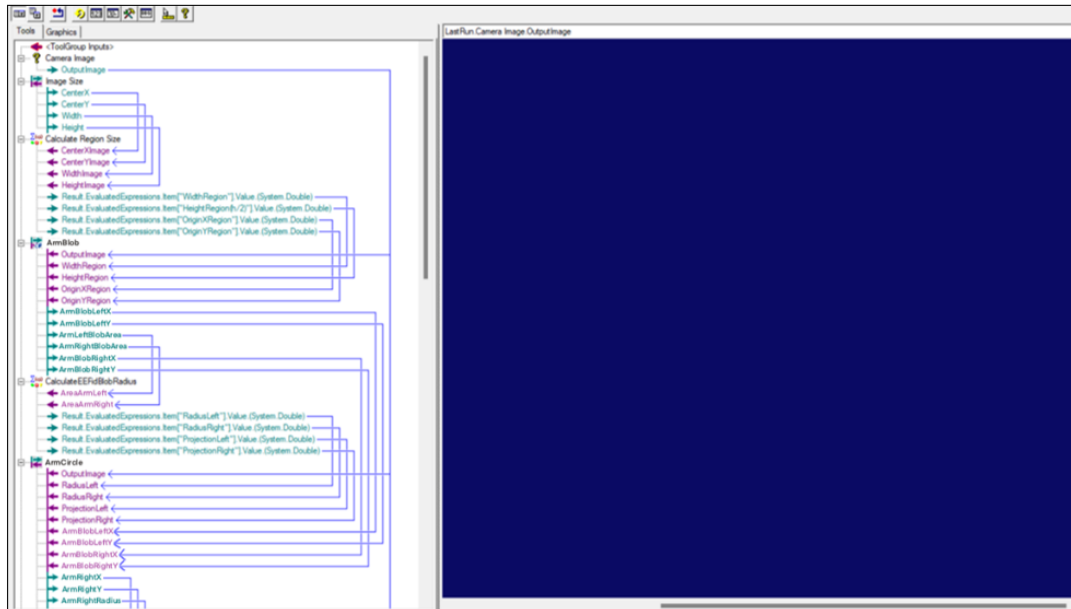


Figure 5 Verification and successful loading of the tool structure within the Recipe file

3.3 การทดสอบการประมวลผลภาพในโหมดจำลอง

ตารางที่ 3 แสดงการทดสอบการประมวลผลภาพของไฟล์ Recipe ในโหมดจำลอง เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของระบบที่พัฒนาขึ้น โดยใช้ชุดข้อมูลภาพจำนวน 1,000 ภาพประกอบด้วยภาพที่ประมวลผลสำเร็จ 879 ภาพ และภาพที่ประมวลผลไม่สำเร็จจำนวน 121 ภาพ ในการประมวลผลผ่านไฟล์ Recipe ที่ตรงกับรูปแบบของฮาร์ดแวร์ เพื่อวิเคราะห์ความสามารถของระบบในการตรวจจับตำแหน่งของชิ้นงานและประเมินความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลภาพ

Table 3 Table Vision Processing Test in Simulation Mode

No.	Condition	Result	Accuracy/SD
1	Process 1000 images	879 Passed / 121 Failed	87.90%
2	Display part position offset value	Offset values displayed	100%
3	Display part position graphics	Graphics displayed	100%
4	A processing error occurs	Error message displayed	100%
5	Part Position Offset X	Mean: 0.025 mm	SD: ± 1.171 mm
6	Part Position Offset Y	Mean: 0.148 mm	SD: ± 21.127 mm
7	Rotation Angle Offset	Mean: 0.310°	SD: $\pm 4.517^\circ$

3.4 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของการประมวลผลกับระบบเดิม

ตารางที่ 4 แสดงการทดสอบการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบที่พัฒนาขึ้นกับระบบเดิมที่ใช้การกำหนดค่าพารามิเตอร์แบบฮาร์ดแวร์ โดยใช้ชุดข้อมูลภาพเดียวกันจำนวน 1,000 ภาพ เพื่อประเมินความถูกต้องของไฟล์ Recipe ที่สร้างใหม่ ซึ่งจะต้องได้ผลลัพธ์ตรงกับระบบเดิม

Table 4 Table Comparison of Vision Processing Results

Images	Results from Hard-code system	Results from Recipe file system	Matching Results	Accuracy
1,000	Part position and Offset values	Part position and Offset values	1,000	100%

3.5 การทดสอบการประมวลผลภาพในโหมดการผลิตจริง

ตารางที่ 5 แสดงการทดสอบการประมวลผลภาพของไฟล์ Recipe ในโหมดการผลิตจริง เพื่อยืนยันว่าระบบตรวจสอบชิ้นงานที่ใช้ไฟล์ Recipe สามารถทำงานร่วมกับเครื่องจักรในสายการผลิตจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Table 5 Table Vision Processing Test in Real Production

No.	Condition	Result	Accuracy
1	Capture images from the production camera	Images processed	100%
2	Display part position offset values	Offset values displayed	100%
3	Display part position graphics	Graphics displayed	100%
4	Send results to the machine	Part placement successful	100%
5	Save results to the log file	Data saved	100%
6	Average Processing Time (8 tests)	7.705 ms	-

3.6 การทดสอบการใช้งานฟังก์ชันต่างๆ ของไฟล์ Recipe

ตารางที่ 6 แสดงการทดสอบการใช้งานฟังก์ชันต่างๆ ของไฟล์ Recipe โดยมีการทดสอบ 9 ฟังก์ชัน มีรายละเอียดดังนี้

Table 6 Table Recipe Functions

No.	Test Item	Accuracy
1	Display vision processing results on the main system interface	100%
2	Display the data structure and tool sequence within the Recipe file	100%
3	Load workpiece images from storage for processing	100%
4	Save workpiece images to storage	100%
5	Capture images from the camera for processing	100%
6	Execute image processing using the Run Recipe command	100%
7	Modify parameters within the Recipe file	100%
8	Save and back up the Recipe file	100%
9	Close the Recipe editing window	100%

3.7 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างระบบเดิมและระบบที่ปรับปรุงใหม่

ในส่วนนี้เป็นการเปรียบเทียบระหว่างระบบเดิมที่มีพารามิเตอร์แบบฮาร์ดโค้ดกับระบบที่พัฒนาขึ้นใหม่ในรูปแบบไฟล์ Recipe ซึ่งออกแบบมาเพื่อรองรับการปรับแต่งพารามิเตอร์โดยวิศวกรผู้เชี่ยวชาญ เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการตรวจจับชิ้นงาน โดยจากการทดสอบพบว่าระบบใหม่ช่วยลดอัตราความผิดพลาด (Failure Rate) และลดระยะเวลาที่เครื่องจักรหยุดทำงาน (Downtime) ดังรูปที่ 6

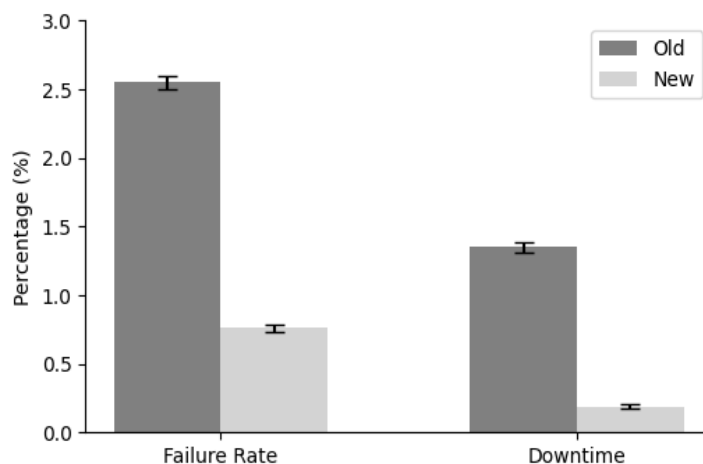


Figure 6 Comparison of failure rate and downtime between the conventional hard-coded system and the proposed recipe-based system

จากกราฟเปรียบเทียบ พบว่าระบบใหม่สามารถลดอัตราความผิดพลาด (Failure Rate) จาก 2.55% เหลือเพียง 0.76% ผลลัพธ์นี้เกิดจากความยืดหยุ่นของระบบไฟล์ Recipe ที่ช่วยให้วิศวกรสามารถวิเคราะห์และปรับจูนพารามิเตอร์ (เช่น ค่า Threshold หรือ Search Region) ให้สอดคล้องกับสภาพแวดล้อมและลักษณะของชิ้นงานจริงที่หน้างานได้อย่างละเอียด ในส่วนของระยะเวลาที่เครื่องจักรหยุดทำงาน (Downtime) ระบบใหม่ช่วยลดค่าเฉลี่ยจาก 1.35% ลงเหลือ 0.19% เนื่องจากเมื่อเกิดปัญหาในการตรวจจับ วิศวกรสามารถดำเนินการแก้ไขและทดสอบค่าพารามิเตอร์ใหม่ผ่านระบบ Recipe ได้ทันทีโดยไม่ต้องทำการหยุดเครื่องจักรเพื่อแก้ไขโค้ด ส่งผลให้ภาพรวมของระบบมีความเสถียรและความพร้อมในการใช้งานสูงขึ้น

4. สรุป

จากการออกแบบและพัฒนาระบบตรวจสอบชิ้นงานให้รองรับการตั้งค่าพารามิเตอร์ผ่านไฟล์ Recipe พบว่าระบบสามารถสร้างและโหลดไฟล์ Recipe จากตำแหน่งที่อยู่ไฟล์ที่กำหนดได้อย่างถูกต้องตามการทำงานของระบบเดิม โดยมีการตรวจสอบโครงสร้างของเครื่องมือภายในไฟล์ให้เป็นไปตามที่กำหนด ส่งผลให้ระบบสามารถประมวลผลภาพและดำเนินการตรวจสอบชิ้นงานได้อย่างถูกต้องทั้งในโหมดจำลองและการใช้งานจริงในกระบวนการผลิต นอกจากนี้ผู้ใช้งานยังสามารถปรับแก้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ภายในไฟล์ Recipe ได้ด้วยตนเอง ซึ่งช่วยลดระยะเวลาในการบำรุงรักษาระบบและเพิ่มความยืดหยุ่นในการปรับใช้งานกับชิ้นงานแต่ละประเภท

จากผลการทดสอบประสิทธิภาพของระบบพบว่า การนำไฟล์ Recipe ที่ผู้ใช้งานปรับปรุงแก้ไขแล้วมาใช้ในกระบวนการผลิตจริงสามารถช่วยลดอัตราความล้มเหลวในการตรวจสอบชิ้นงาน (Failure Rate) จาก 2.55% เหลือ 0.76% และช่วยลดระยะเวลาการหยุดทำงานของเครื่องจักร (Downtime) จาก 1.35% เหลือ 0.19% แสดงให้เห็นว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและความแม่นยำของกระบวนการตรวจสอบชิ้นงานได้อย่างมีนัยสำคัญ รวมทั้งช่วยลดความล่าช้าในกระบวนการผลิตและเพิ่มความยืดหยุ่นในการจัดการค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบตรวจสอบชิ้นงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

แม้ระบบจะมีความยืดหยุ่นสูง แต่ยังมีข้อควรระวังด้านความผิดพลาดจากการตั้งค่าพารามิเตอร์ ซึ่งบริหารจัดการโดยกำหนดให้เฉพาะทีมบำรุงรักษาหรือวิศวกรผู้เชี่ยวชาญเป็นผู้ปรับแต่งไฟล์ Recipe เท่านั้น นอกจากนี้ยังอาศัยขั้นตอนการสำรองไฟล์ (Backup) ทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนแปลง เพื่อให้สามารถกู้คืนกลับไปใช้ค่าพารามิเตอร์เดิมที่เสถียรได้ทันทีหากพบข้อผิดพลาด

โดยผู้ใช้งานยังคงต้องรักษาลำดับของเครื่องมือและส่งผลลัพธ์ที่ซอฟต์แวร์ต้องการให้เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด เพื่อให้ระบบประมวลผลข้อมูลได้อย่างถูกต้อง

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ บริษัท ซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด ที่ได้ให้การสนับสนุนและเปิดโอกาสให้เข้ามาเป็นส่วนหนึ่งขององค์กรผ่านการทำโครงการสหกิจศึกษา ตลอดจนการเอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำงานและอุปกรณ์ในการปฏิบัติงาน และการช่วยเหลือด้วยความใจดีของพนักงานที่ปรึกษาในทุก ๆ ด้านที่มีให้เสมอมา

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Karabegović, I., Vojić, S. and Doleček, V. 2006. 3D Vision in industrial robot working process. In: Proceeding of the 12th International Power Electronics and Motion Control Conference, Portorož, Slovenia. pp. 1-4.
- [2] Xue, B., Sun, C., Chu, H., Meng, Q. and Jiao, S. 2021. Method of electronic component location, grasping and inserting based on machine vision. In: Proceeding of the 2021 International Conference on Machine Learning, Qingdao, China. pp. 1-6.
- [3] Lu, A., Hanan, J., Drinkwine, K. and Gupta, G. 2014. Implementation of an advanced recipe management system in a fully automated 300mm fab. In: Proceeding of the 2014 25th Annual SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference (ASMC), Saratoga Springs, NY. pp. 1-6.
- [4] Cognex. (n.d.). Recipes in Cognex Designer. เข้าถึงได้จาก: เว็บไซต์ https://docs.cognex.com/designer_443/web/EN/designer/Content/Designer_Topics/Designer_Project/System/Recipes_ismc/recipes.htm (เข้าถึงเมื่อ 3 พฤศจิกายน 2568).
- [5] Microsoft. (n.d.). C# Guide. เข้าถึงได้จาก: เว็บไซต์ <https://learn.microsoft.com/en-us/dotnet/csharp/> (เข้าถึงเมื่อ 30 ตุลาคม 2568).
- [6] Cognex. (n.d.). VisionPro Software. เข้าถึงได้จาก: เว็บไซต์ <https://www.cognex.com/en/products/machine-vision-software/visionpro-software> (เข้าถึงเมื่อ 3 พฤศจิกายน 2568).

ระบบการจัดการช่วยเหลือผู้ประสบภัยน้ำท่วมด้วยเทคนิค RAG และการรู้จำเสียงพูด Relief Management System of Flood Victims Using Retrieval-Augmented Generation (RAG) and Speech Recognition

ชิน ชนินทกุล^{1,*} ปวเรศ แอนโทนี ปราณีประชาชน¹ โสชนา สุนทรชัย¹ และ อัญชิสา สายทอง¹

Chin Chanintakul^{1,*}, Pawaret Anthony Praneepachachon¹, Sochaya Suntornchai¹ and Anchisa Saithong¹

¹โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร (ฝ่ายมัธยม) กรุงเทพมหานคร 10110 ประเทศไทย

¹Srinakharinwirot University Prasarnmit Demonstration School (Secondary), Bangkok, 10110, Thailand

*Corresponding author: Chin Chanintakul, e-mail address: chin.chanintakul@gmail.com

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันภัยพิบัติน้ำท่วมส่งผลกระทบต่อชีวิต สุขภาพ ทรัพย์สิน และโครงสร้างพื้นฐานที่ประชาชนต้องพึ่งพา แม้ว่าจะมีหน่วยงานที่รับผิดชอบในการให้ความช่วยเหลือ แต่ยังคงพบปัญหาความล่าช้าในการประเมินสถานการณ์ ข้อมูลภาคสนามที่ไม่ครบถ้วน และข้อจำกัดด้านการสื่อสารจากผู้ประสบภัยในภาวะฉุกเฉิน งานวิจัยนี้จึงพัฒนาระบบการจัดการช่วยเหลือผู้ประสบภัยน้ำท่วมโดยประยุกต์ใช้เทคนิคการรู้จำเสียงพูด (Speech Recognition) ร่วมกับ Retrieval-Augmented Generation (RAG) เพื่อเพิ่มความรวดเร็วและแม่นยำในการจัดการเหตุฉุกเฉิน ประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ (1) การรับข้อมูลเสียงแบบเรียลไทม์จากผู้ประสบภัย (2) การแปลงเสียงเป็นข้อความ (3) การประมวลผลและค้นคืนข้อมูลด้วยเทคนิค RAG โดยใช้เวกเตอร์ความหมายและฐานข้อมูล FAISS และ (4) การจัดลำดับความเร่งด่วนด้วยโมเดลภาษา Gemini Flash บน Google Vertex AI โดยใช้ชุดข้อมูลสังเคราะห์จำนวน 1,500 ประโยค ซึ่งแบ่งเป็น 3 ระดับ ได้แก่ Emergency, Moderate และ Normal ผลการทดสอบด้วยข้อมูลจำลองจำนวน 60 ข้อความ พบว่าระบบมีความแม่นยำรวม 98.33% โดยสามารถจำแนกกรณี Emergency และ Normal ได้ถูกต้องทั้งหมด และ Moderate ได้ถูกต้อง 19 จาก 20 กรณี นอกจากนี้ มีการประเมินด้วยวิธี 5-fold cross-validation ซึ่งให้ค่าความแม่นยำในแต่ละรอบเท่ากับ 80.33%, 73.00%, 76.00%, 72.67% และ 71.33% ตามลำดับ โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 74.67% แสดงถึงความสามารถในการทำงานกับข้อมูลที่หลากหลายได้อย่างสม่ำเสมอ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีแบบกฎ (rule-based) ระบบที่พัฒนาขึ้นมีความแม่นยำสูงกว่า (80.00% เทียบกับ 63.33%) สะท้อนถึงข้อได้เปรียบของการวิเคราะห์เชิงบริบท ระบบต้นแบบยังถูกพัฒนาในรูปแบบเว็บไซต์เพื่อรองรับการใช้งานจริง ช่วยลดระยะเวลาคัดกรองและสนับสนุนการตัดสินใจของหน่วยกู้ภัย และสามารถต่อยอดสู่การใช้งานจริงในอนาคต

คำสำคัญ: ปัญญาประดิษฐ์, การรู้จำเสียงพูด, ระบบช่วยเหลือผู้ประสบภัย, Retrieval-Augmented Generation (RAG), การจัดการภัยพิบัติ

Abstract

Flooding is one of the disasters that heavily affects many areas in Thailand, impacting people's lives, health, property, and infrastructure. Despite the presence of responsible agencies, challenges remain, including delays in situation assessment, incomplete on-site information, and communication difficulties from victims during emergencies. This project proposes a flood-response system that integrates speech recognition with Retrieval-Augmented Generation (RAG) to improve the speed and accuracy of emergency handling. The system operates through four main steps: (1) receiving real-time voice input from victims, (2) converting voice into text, (3) processing and retrieving information using RAG with semantic embeddings and a FAISS database, and (4) classifying urgency levels using the Gemini Flash model on Google Vertex AI. A synthetic dataset of 1,500 sentences was created and divided into three triage categories: Emergency, Moderate, and Normal. Experimental results on 60 simulated test cases display an overall accuracy of 98.33%, with all Emergency and Normal cases correctly classified (20/20) and 19/20 in Moderate cases correctly identified. Additionally, a 5-fold cross-validation was conducted to evaluate the model's generalization performance. The system displays accuracies of 80.33%, 73.00%, 76.00%, 72.67%, and 71.33% across the five folds, with an average accuracy of approximately 74.67%, indicating consistent performance across different data splits. The system was also compared with a rule-based baseline, achieving higher accuracy (80.00% vs. 63.33%), demonstrating the advantage of this method processing over keyword-based methods. Overall, the prototype reduces triage time, improves prioritization

accuracy, and supports rescue teams in making faster and more informed decisions. The system is designed to be simple and accessible, allowing victims to request help more effectively. It can be further developed for deployment in disaster management centers and extended to other emergency scenarios to reduce future losses.

Keywords: speech recognition, flood-response system, disaster management, retrieval-augmented generation (RAG)

1. บทนำ

ในปัจจุบันเหตุการณ์ภัยพิบัติน้ำท่วมยังคงเป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อประชาชนในหลายพื้นที่ของประเทศ ทั้งในเขตเมืองและชนบท น้ำท่วมสามารถเกิดขึ้นอย่างฉับพลันและขยายวงกว้างภายในเวลาเพียงไม่กี่ชั่วโมง สร้างความเสียหายรุนแรงต่อชีวิต ทรัพย์สิน ระบบสาธารณสุข และความปลอดภัยของชุมชน [1] อย่างไรก็ตามการเข้าช่วยเหลือมักพบอุปสรรคหลายประการ โดยเฉพาะการประเมินสถานการณ์ที่ทำได้ยากเนื่องจากข้อจำกัดในการเข้าถึงพื้นที่และผู้ประสบภัยได้อย่างทั่วถึง มากไปกว่านั้น ผู้ประสบภัยอาจเกิดความรู้สึกโดดเดี่ยวและถูกตัดขาดจากสังคม ซึ่งนำมาสู่ความเสี่ยงด้านสุขภาพกายและจิตใจที่เพิ่มสูงขึ้น [2]

ข้อจำกัดดังกล่าวทำให้การคัดกรองและจัดลำดับความสำคัญในการช่วยเหลือดำเนินไปอย่างยากลำบากและต้องอาศัยการไตร่ตรองอย่างถี่ถ้วน ปัญหาเหล่านี้นำไปสู่ความล่าช้าในการจัดส่งเจ้าหน้าที่และทรัพยากรไปยังพื้นที่เสี่ยงอันตราย ซึ่งอาจก่อให้เกิดวิกฤตซ้อนทับ เช่น ผู้ประสบภัยขาดแคลนอาหาร น้ำดื่ม ยารักษาโรค หรือถูกตัดขาดจากเส้นทางคมนาคมเป็นระยะเวลานาน ปัจจัยเหล่านี้สะท้อนให้เห็นว่าน้ำท่วมไม่ใช่เพียงปัญหาทางธรรมชาติ แต่ยังเป็นปัญหาด้านการสื่อสารและการบริหารจัดการข้อมูลที่ต้องได้รับการแก้ไขอย่างจริงจังและเร่งด่วน เพื่อให้การช่วยเหลือเข้าถึงผู้ประสบภัยได้อย่างปลอดภัย และได้ประสิทธิภาพสูงสุด [3]

งานวิจัยนี้ตระหนักได้ถึงความสามารถในการช่วยเหลือผู้ประสบภัยในปัจจุบันไม่สามารถพึ่งพาเพียงการลงพื้นที่หรือการตอบสนองตามการแจ้งเหตุแบบทั่วไปได้อีกต่อไป เมื่อพิจารณาระบบรับแจ้งเหตุที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน พบว่ามีทั้งพาระบบสายด่วน (Call Center) ซึ่งอาศัยเจ้าหน้าที่มนุษย์ในการรับสาย ทำให้มักเกิดปัญหาคู่สายเต็ม (Overloaded) ในยามวิกฤต ส่งผลให้ผู้ประสบภัยต้องรอสายนานและการประเมินสถานการณ์เกิดความล่าช้า [4] นอกจากนี้ระบบคัดกรองอัตโนมัติแบบดั้งเดิมที่อิงกฎเกณฑ์ (Rule-based) ยังมีข้อจำกัดในการตรวจจับเพียงคำสำคัญ (Keyword matching) ทำให้ขาดความยืดหยุ่นและไม่สามารถทำความเข้าใจความหลากหลายของภาษาพูดหรือบริบทเชิงลึกในยามตื่นตระหนกได้ ในขณะเดียวกัน การที่ผู้คนหันไปขอความช่วยเหลือผ่านแพลตฟอร์มโซเชียลมีเดีย แม้จะแพร่กระจายได้รวดเร็ว แต่ข้อมูลมักกระจัดกระจายและไม่มีการจัดระเบียบ (Unstructured Data) ทำให้ยากต่อการรวบรวมอย่างเป็นระบบ [5]

ข้อจำกัดของระบบเดิมเหล่านี้ ทำให้สถานการณ์น้ำท่วมที่เต็มไปด้วยข้อมูลจำนวนมาก ไม่ได้รับการจัดการอย่างมีประสิทธิภาพ [6] ทั้งที่ข้อมูลเหล่านั้นมีความหลากหลาย ทั้งในด้านความเร่งด่วน ประเภทของความช่วยเหลือที่ต้องการ ระดับความเสี่ยงของผู้แจ้ง และบริบทของพื้นที่ การจัดลำดับความสำคัญของข้อมูล (Prioritization) จึงเป็นกลไกสำคัญที่จะช่วยให้หน่วยงานสามารถตัดสินใจได้อย่างมีระบบ โดยคำนึงถึงความปลอดภัยของผู้ประสบภัยเป็นอันดับแรก นอกจากนี้ การแบ่งหมวดหมู่ข้อมูล (Categorization) เช่น ความต้องการด้านการอพยพ อาหาร ยา การช่วยเหลือผู้ป่วยติดเตียง หรือการช่วยเหลือสัตว์เลี้ยง [7] ยังเป็นขั้นตอนที่ช่วยลดความผิดพลาดในการสื่อสาร และช่วยให้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดถูกจัดสรรอย่างเหมาะสม [8] การคัดแยกและจัดลำดับข้อมูลจึงไม่ใช่เพียงขั้นตอนทางเทคนิค แต่เป็นหัวใจสำคัญของระบบการจัดการภัยพิบัติ

เพื่อก้าวข้ามข้อจำกัดของระบบที่มีอยู่อย่างเดิม งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการนำเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์เข้ามาช่วยแก้ปัญหา โดยเฉพาะในสถานะฉุกเฉินที่ผู้ประสบภัยอาจอยู่ในภาวะตื่นตระหนกและไม่สะดวกในการพิมพ์ข้อความแจ้งเหตุ การสื่อสารด้วยเสียงจึงเป็นช่องทางที่รวดเร็ว เป็นธรรมชาติ และสะท้อนความเร่งด่วนได้ดีที่สุด [9] โดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสองแขนงหลัก ได้แก่ การรู้จำเสียงพูด (Speech Recognition) และ Retrieval-Augmented Generation (RAG) โดยเทคนิค Speech Recognition จะทำหน้าที่รับข้อมูลเสียงและแปลงเป็นข้อความอย่างแม่นยำ ในขณะที่เทคนิค RAG จะนำข้อความดังกล่าวมาสร้างเป็นเวกเตอร์เชิงความหมาย (Semantic Embedding) เพื่อค้นหาข้อมูลที่เกี่ยวข้องจากฐานข้อมูล [10,11] จากนั้นจึงส่งต่อข้อมูลบริบทที่ค้นพบไปยังโมเดลภาษาขนาดใหญ่ (Large Language Model) เพื่อทำการวิเคราะห์เชิงลึกและจัดจำแนกประเภทข้อมูล

ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบการจัดการช่วยเหลือผู้ประสบภัยน้ำท่วม (Flood Triage System) ที่สามารถรับข้อมูลจากเสียงพูดของผู้ประสบภัยนำไปประมวลผลเพื่อจัดหมวดหมู่และเรียงลำดับความเร่งด่วนของการเข้าช่วยเหลือ

ระบบดังกล่าวจะช่วยให้หน่วยกู้ภัยสามารถประเมินสถานการณ์ได้อย่างรวดเร็ว ลดข้อผิดพลาดในการรับแจ้งเหตุ และสามารถดำเนินการบริหารจัดการทรัพยากรเพื่อเข้าช่วยเหลือผู้ประสบภัยได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

2. วิธีการศึกษา

การพัฒนากระบวนการจัดการช่วยเหลือผู้ประสบภัยน้ำท่วมนี้ มีจุดมุ่งหมายเพื่อรับข้อมูลเสียงจากผู้ประสบภัยแบบเรียลไทม์ในรูปแบบจำลองศูนย์รับแจ้งเหตุ (Call Center) และนำไปจัดหมวดหมู่พร้อมเรียงลำดับความสำคัญของการช่วยเหลือ (Triage) เพื่อลดความล่าช้าและเพิ่มประสิทธิภาพในการตัดสินใจของเจ้าหน้าที่ โดยแบ่งขั้นตอนการดำเนินงานหลักออกเป็น 5 ส่วน เพื่อให้ระบบทำงานได้อย่างครอบคลุมตั้งแต่การรับข้อมูลจนถึงการวิเคราะห์ผลลัพธ์

2.1 การรับข้อมูลและการแปลงเสียง (Speech-to-Text Processing)

เมื่อผู้ประสบภัยติดต่อเข้ามาในระบบผ่านแพลตฟอร์มรับแจ้งเหตุ เสียงพูดจะถูกบันทึกและส่งเข้าสู่โมดูลการรู้จำเสียงพูด (Speech Recognition) เพื่อแปลงเสียงพูดภาษาไทยให้อยู่ในรูปแบบข้อความ (Text) เทคโนโลยีนี้อาศัยการวิเคราะห์คลื่นเสียงและนำไปเทียบกับฐานข้อมูลเสียงและภาษาเพื่อตีความเนื้อหาออกมาอย่างแม่นยำ [10] การเปลี่ยนข้อมูลเสียงเป็นข้อความช่วยลดข้อจำกัดด้านการสื่อสาร และเพิ่มความรวดเร็วในการรับข้อมูลจากผู้ประสบภัยที่กำลังเผชิญเหตุการณ์จริง นอกจากนี้ระบบยังได้รับการออกแบบให้รองรับประโยคที่ไม่สมบูรณ์หรือมีคำศัพท์ที่แสดงถึงความตื่นตระหนก ซึ่งมักเกิดขึ้นในสถานการณ์วิกฤต ระบบการรู้จำเสียงพูด (Speech Recognition) ถูกพัฒนาให้รองรับภาษาไทย โดยใช้โมเดลการรู้จำเสียงพูดที่สามารถแปลงเสียงพูดเป็นข้อความได้แบบเรียลไทม์ ซึ่งเหมาะสมกับบริบทของการใช้งานในสถานการณ์ฉุกเฉิน

2.2 การสร้างและจัดการชุดข้อมูล (Data Generation and Preparation)

เพื่อให้สามารถควบคุมรูปแบบของข้อมูลและความสมดุลของแต่ละหมวดหมู่ได้อย่างเหมาะสม งานวิจัยนี้จึงใช้วิธีการสร้างข้อมูลสังเคราะห์ (Synthetic Data) โดยออกแบบประโยคตามรูปแบบสถานการณ์ที่คาดว่าจะเกิดขึ้นจริงในบริบทของผู้ประสบภัยน้ำท่วม เช่น การร้องขอความช่วยเหลือในภาวะฉุกเฉิน การแจ้งความต้องการพื้นฐาน และการสอบถามข้อมูลทั่วไป โดยอาศัยรูปแบบประโยค (sentence patterns) และคำสำคัญ (keywords) ที่เกี่ยวข้องกับระดับความเร่งด่วนในแต่ละหมวดหมู่ เพื่อให้ข้อมูลมีความหลากหลายและครอบคลุมสถานการณ์ที่แตกต่างกัน

โดยในการจัดหมวดหมู่ข้อมูล งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้แนวคิดระบบคัดแยกผู้ป่วย (Triage) เพื่อแบ่งระดับความเร่งด่วนออกเป็น 3 หมวดหมู่หลัก ได้แก่

Table 1 Distribution of data across categories

Category	Description	Number of Sentences
Emergency	Critical situations that may pose a threat to life and require immediate assistance.	500
Moderate	Medium-level urgent situations that require prompt attention but are not immediately life-threatening.	500
Normal	Non-life-threatening situations where assistance can be delayed or waited for.	500

2.3 การประมวลผลด้วยเทคนิค RAG (Retrieval-Augmented Generation)

ข้อความที่ผ่านการแปลงจากเสียงจะถูกนำมาประมวลผลด้วยเทคนิคการสร้างเวกเตอร์ฝังความหมาย (Semantic Embeddings) เพื่อค้นหาข้อมูลที่มีความคล้ายคลึงกันในฐานข้อมูล ซึ่งจะช่วยในการจัดหมวดหมู่หรือระบุประเภทของการร้องขอความช่วยเหลือได้อย่างเป็นระบบ [12] ระบบทำการแปลงประโยคทั้งหมดในชุดข้อมูลให้เป็นเวกเตอร์ความหมายด้วยโมเดล SentenceTransformer (paraphrase-multilingual-MiniLM-L12-v2) จากนั้นจัดเก็บเวกเตอร์เหล่านี้ลงใน FAISS Vector Index โดยใช้ไลบรารี FAISS (Facebook AI Similarity Search) ในรูปแบบ IndexFlatIP (Inner Product) เมื่อมีข้อความใหม่เข้ามา ระบบจะทำการค้นหาประโยคที่มีบริบทความหมายใกล้เคียงที่สุดจำนวน 6 ประโยค (TOP_K = 6) เพื่อดึงมาเป็นตัวอย่างอ้างอิง

โดยค่า $TOP_K = 6$ หมายถึงการดึงประโยคที่มีความคล้ายคลึงทางความหมายมากที่สุดจำนวน 6 ประโยคจากฐานข้อมูลมาใช้เป็นบริบทอ้างอิงในการประมวลผลของโมเดลภาษา ซึ่งช่วยให้ระบบสามารถพิจารณาข้อมูลที่เกี่ยวข้องได้อย่างครอบคลุมมากยิ่งขึ้น การกำหนดค่า TOP_K ระดับนี้เป็นการสร้างสมดุลระหว่างความแม่นยำและปริมาณข้อมูลอ้างอิงที่ใช้ โดยถ้ายิ่งค่า TOP_K น้อยเกินไปอาจทำให้บริบทไม่เพียงพอ ขณะที่ค่าที่หากค่ามากเกินไปอาจทำให้เกิดข้อมูลรบกวนและลดประสิทธิภาพของการจำแนก และในส่วนของขั้นตอนการค้นคืนข้อมูล ระบบใช้ค่า Cosine Similarity ในการวัดความคล้ายคลึงระหว่างเวกเตอร์ของข้อความ โดยค่าที่สูงแสดงถึงความใกล้เคียงของบริบทมากขึ้น และถูกนำมาใช้ในการคัดเลือกข้อมูลอ้างอิงที่เกี่ยวข้องสำหรับกระบวนการของโมเดลภาษา

2.4 การประเมินและจัดหมวดหมู่ด้วย Large Language Model

ในขั้นตอนสุดท้าย ระบบจะส่งประโยคคำร้องขอความช่วยเหลือที่ได้รับจากผู้ประสบภัย พร้อมกับบริบทอ้างอิงที่ดึงมาจากกระบวนการ Retrieval-Augmented Generation (RAG) เข้าสู่โมเดลภาษาขนาดใหญ่ (Large Language Model: LLM) โดยเลือกใช้โมเดล Gemini Flash ผ่านแพลตฟอร์ม Google Cloud's Vertex AI การทำงานผ่านกระบวนการ Prompt Engineering ช่วยให้โมเดลสามารถประเมินและจัดหมวดหมู่ระดับความเร่งด่วนของข้อความได้อย่างมีประสิทธิภาพ ระบบกำหนดให้ผลลัพธ์ของโมเดลเป็นการจำแนกระดับความเร่งด่วนออกเป็น 3 หมวดหมู่ ได้แก่ Emergency, Moderate และ Normal โดยอาศัยการประมวลผลร่วมระหว่างเทคนิค RAG และโมเดลภาษา

ในเบื้องต้น ระบบยังถูกทดสอบด้วยชุดข้อมูลจำลองขนาดเล็กจำนวน 60 ตัวอย่าง ซึ่งประกอบด้วยข้อความในแต่ละระดับความเร่งด่วน ได้แก่ Emergency, Moderate และ Normal กลุ่มละ 20 ตัวอย่าง เพื่อประเมินความสามารถของระบบในการจำแนกสถานการณ์ในกรณีตัวอย่างที่ควบคุมได้ นอกจากนี้ยังมีการประเมินประสิทธิภาพของระบบดำเนินการโดยใช้วิธี 5-fold cross-validation ซึ่งเป็นการแบ่งชุดข้อมูลออกเป็น 5 ส่วน และทำการสลับชุดข้อมูลสำหรับการฝึกและการทดสอบในแต่ละรอบ เพื่อให้ได้ผลการประเมินที่มีความน่าเชื่อถือและลดอคติจากการแบ่งข้อมูลเพียงครั้งเดียว ในแต่ละรอบของการทดสอบ ระบบจะเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่โมเดลทำนายกับค่าจริง (ground truth) ของข้อมูล หากผลลัพธ์ตรงกันจะนับเป็นการจำแนกถูกต้อง และนำมาใช้ในการคำนวณค่าความแม่นยำ (Accuracy) ของระบบ โดยคำนวณจากสัดส่วนของจำนวนข้อมูลที่จำแนกได้ถูกต้องต่อจำนวนข้อมูลทั้งหมด โดยงานวิจัยนี้ยังมีการพัฒนาวิธีพื้นฐานแบบกฎ (rule-based classifier) เพื่อใช้เป็นเกณฑ์เปรียบเทียบกับระบบที่นำเสนอ โดยวิธีดังกล่าวอาศัยการตรวจจับคำสำคัญ (keyword matching) เพื่อจำแนกระดับความเร่งด่วนของสถานการณ์โดยไม่พิจารณาบริบทเชิงความหมายของข้อความอย่างลึกซึ้ง และถูกนำมาใช้เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับระบบที่พัฒนาขึ้นภายใต้ชุดข้อมูลเดียวกัน

2.5 ระบบต้นแบบและส่วนติดต่อผู้ใช้ (Prototype System and User Interface)

นอกจากการประเมินประสิทธิภาพของโมเดลแล้ว งานวิจัยนี้ยังได้พัฒนาระบบต้นแบบในรูปแบบเว็บไซต์ (web-based prototype) เพื่อสาธิตการทำงานของ ระบบการจัดการช่วยเหลือผู้ประสบภัยน้ำท่วม (Flood Triage System) ในบริบทการใช้งานจริง โดยระบบถูกออกแบบให้มีส่วนติดต่อผู้ใช้ที่เรียบง่ายและสามารถใช้งานได้สะดวก ทำให้ผู้ใช้งานสามารถป้อนข้อมูลในรูปแบบข้อความหรือบันทึกเสียงเพื่อรายงานสถานการณ์ที่เกี่ยวข้องกับเหตุการณ์น้ำท่วม ซึ่งข้อมูลเสียงจะถูกแปลงเป็นข้อความก่อนเข้าสู่กระบวนการประมวลผล จากนั้นระบบจะนำข้อความเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Retrieval-Augmented Generation (RAG) ร่วมกับโมเดลภาษา เพื่อพิจารณาบริบทและระดับความเร่งด่วนของสถานการณ์ ผลลัพธ์ที่แสดงบนหน้าเว็บไซต์ประกอบด้วยระดับความเร่งด่วนของสถานการณ์ 3 ระดับ ได้แก่ Emergency, Moderate และ Normal ซึ่งได้จากการประมวลผลของโมเดลภาษา นอกจากนี้ ระบบยังแสดงค่าความคล้ายคลึงเชิงความหมาย (Cosine Similarity) จากขั้นตอนการค้นคืนข้อมูล เพื่อสะท้อนระดับความสอดคล้องระหว่างข้อความของผู้ใช้งานกับข้อมูลอ้างอิงในฐานความรู้

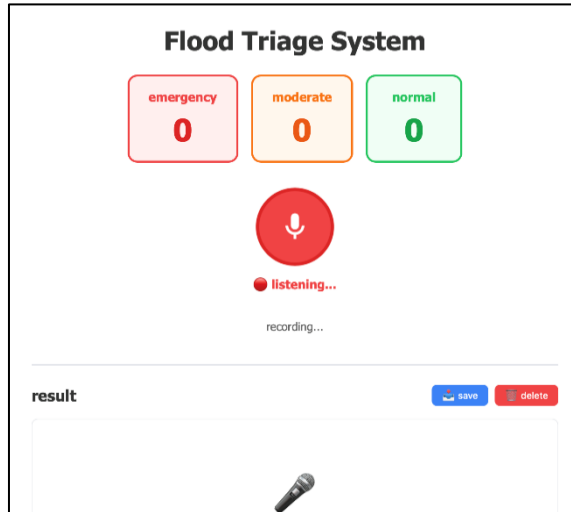


Figure 1 User interface of the Flood Triage System showing the main input page where users can record voice messages or submit information for emergency assessment.

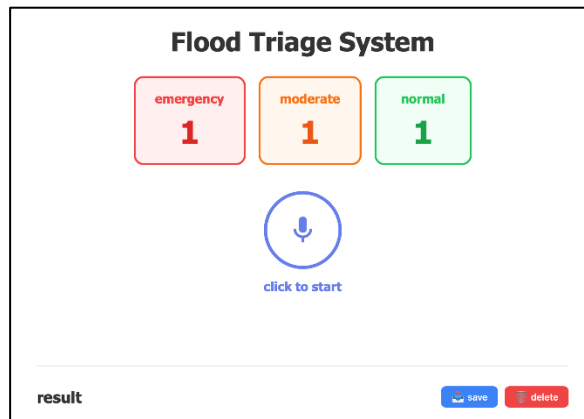


Figure 2 System processing interface after receiving a user input, displaying the analysis process for determining the urgency level of the reported situation.

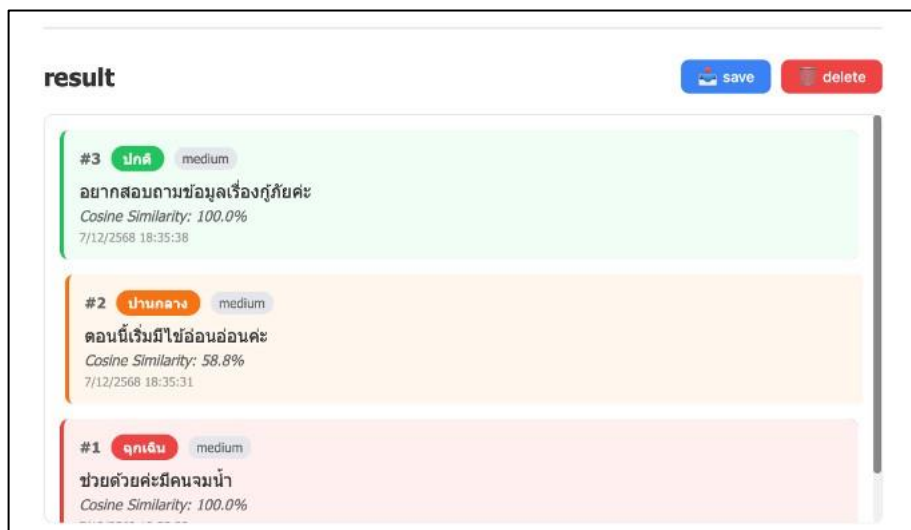


Figure 3 Example output displaying classified reports categorized into Emergency, Moderate, and Normal levels.

นอกจากนี้ระบบยังแสดงข้อความต้นฉบับที่ผู้ใช้งานส่งเข้ามาควบคู่กับผลการจำแนกระดับความเร่งด่วน เพื่อให้เจ้าหน้าที่สามารถตรวจสอบข้อมูลและใช้ประกอบการตัดสินใจในการจัดลำดับความสำคัญของการช่วยเหลือได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 ผลการทดสอบเบื้องต้นด้วยชุดข้อมูลสังเคราะห์

ในการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจัดการช่วยเหลือผู้ประสบภัยน้ำท่วม (Flood Triage System) ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบระบบด้วยชุดข้อมูลจำลองสถานการณ์ที่สร้างขึ้นเพื่อให้ใกล้เคียงกับข้อความที่มักพบในบริบทของการประสบภัยน้ำท่วมจริง โดยแบ่งระดับความเร่งด่วนออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ Emergency, Moderate, และ Normal กลุ่มละ 20 ข้อความ รวมทั้งหมด 60 ข้อความ การออกแบบชุดทดสอบได้คำนึงถึงความหลากหลายของสถานการณ์ เช่น ภาวะฉุกเฉินด้านสุขภาพ อาการเจ็บป่วยที่ยังพอรอดได้ ไปจนถึงการสอบถามข้อมูลทั่วไป เพื่อทดสอบความสามารถของระบบในการแยกแยะ “ความเร่งด่วน” ของข้อความอย่างเหมาะสม

ผลการทดสอบพบว่า ระบบสามารถจำแนกข้อความในกลุ่ม Emergency ได้ถูกต้องทั้งหมด 100% ซึ่งถือเป็นผลลัพธ์ที่มีความสำคัญมาก เนื่องจากกลุ่มนี้เกี่ยวข้องกับกรณีที่มีความเสี่ยงต่อชีวิตโดยตรง การที่ระบบสามารถตรวจจับและส่งสัญญาณเตือนอย่างแม่นยำ ย่อมแสดงถึงความพร้อมของระบบในการนำไปใช้งานจริงในสถานการณ์ที่เวลาเป็นสิ่งสำคัญที่สุด สำหรับกลุ่ม Normal ระบบสามารถจำแนกได้ถูกต้อง 100% เช่นเดียวกัน โดยไม่เกิดกรณี “ประเมินเกินจริง” ที่ทำให้ข้อความธรรมดาถูกมองว่าเป็นเหตุฉุกเฉิน ผลลัพธ์ลักษณะนี้ช่วยยืนยันว่า ระบบมีการใช้เหตุผลอยู่บนพื้นฐานเชิงบริบท ไม่ได้ตอบแบบสุ่มหรือมีอคติว่าทุกสถานการณ์ล้วนเป็นอันตราย ในส่วนของกลุ่ม Moderate ระบบจำแนกถูกต้อง 19 ข้อจาก 20 ข้อ มีเพียง 1 ข้อเท่านั้นที่ระบบประเมินว่าเป็น Normal แทน Moderate ซึ่งเป็นข้อความก้ำกึ่งที่ไม่มีความเสี่ยงชัดเจน แม้จะมีการร้องขอสิ่งของจำเป็น แต่ยังไม่จัดว่าอยู่ในระดับที่มีความเสี่ยงต่อร่างกายโดยตรง ทำให้ผลลัพธ์นี้ถือว่าอยู่ในระดับที่ยอมรับได้สำหรับระบบต้นแบบ

ภาพรวมของการทดสอบสะท้อนให้เห็นว่า ระบบสามารถจำแนกระดับความเร่งด่วนของข้อความได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีความแม่นยำสูงในกลุ่มที่สำคัญต่อชีวิต และมีพฤติกรรมของโมเดลที่สอดคล้องกับความหมายของข้อมูลตัวอย่างที่ใช้ในฐานความรู้ (RAG) จึงสามารถกล่าวได้ว่า ระบบการจัดการช่วยเหลือผู้ประสบภัยน้ำท่วม (Flood Triage System) อยู่ในเกณฑ์ “พร้อมใช้งานระดับต้นแบบ (Prototype-ready)” และสามารถพัฒนาต่อยอดเพื่อใช้งานจริงในบริบทภัยพิบัติได้ในอนาคต

Table 2 Classification Performance of the System Across Emergency Levels

Emergency Level (Category)	Number of Test Messages	Correctly Classified	Misclassified	Accuracy (%)
Emergency	20	20	0	100%
Moderate	20	19	1	95%
Normal	20	20	0	100%
Total	60	59	1	98.33%

3.2 การประเมินแบบ Cross-Validation

เพื่อประเมินความสามารถของระบบในการทำงานกับข้อมูลที่หลากหลายและลดอคติจากการแบ่งชุดข้อมูลเพียงครั้งเดียว งานวิจัยนี้ได้ใช้วิธี 5-fold cross-validation โดยแบ่งชุดข้อมูลออกเป็น 5 ส่วน และทำการสลับใช้แต่ละส่วนเป็นชุดทดสอบในแต่ละรอบ

Table 3 Performance of the Flood Triage System using 5-Fold Cross-Validation

Fold	Number of Test Samples	Correct Predictions	Accuracy (%)
Fold 1	300	241	80.33
Fold 2	300	219	73.00
Fold 3	300	228	76.00
Fold 4	300	218	72.67
Fold 5	300	214	71.33
Average	-	224	74.67
Standard Deviation	-	-	3.24

3.3 การเปรียบเทียบกับวิธีพื้นฐาน

เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบในเชิงเปรียบเทียบ งานวิจัยนี้ถูกทำการทดลองเพิ่มเติมโดยนำระบบที่พัฒนาขึ้นไปเปรียบเทียบกับวิธีพื้นฐานแบบกฎ (rule-based) ซึ่งอาศัยการตรวจจับคำสำคัญในการจำแนกระดับความเร่งด่วน โดยทั้งสองวิธีถูกทดสอบบนชุดข้อมูลเดียวกันเพื่อให้เกิดความเป็นธรรมในการเปรียบเทียบผลลัพธ์

Table 4 Comparison of Classification Performance between the Proposed System and the Baseline Method

Method	Accuracy (%)
Proposed System (RAG + LLM)	80.00
Rule-based Baseline	63.33

จากผลการทดลองพบว่าระบบที่พัฒนาขึ้นมีความแม่นยำสูงกว่าวิธีพื้นฐานอย่างชัดเจน โดยมีความแม่นยำ 80.00% เมื่อเทียบกับ 63.33% ของวิธีแบบกฎ ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าการใช้เทคนิค Retrieval-Augmented Generation (RAG) ร่วมกับโมเดลภาษา สามารถช่วยให้ระบบเข้าใจบริบทของข้อความได้ดีกว่า และลดข้อจำกัดของการจำแนกแบบอาศัยคำสำคัญเพียงอย่างเดียว

นอกจากการประเมินประสิทธิภาพของโมเดลแล้ว งานวิจัยนี้ยังได้พัฒนาระบบต้นแบบในรูปแบบเว็บไซต์เพื่อสาธิตการทำงานของ ระบบการจัดการช่วยเหลือผู้ประสบภัยน้ำท่วม (Flood Triage System) ในการใช้งานจริง โดยระบบถูกออกแบบให้มีส่วนติดต่อผู้ใช้ที่เรียบง่ายและสามารถใช้งานได้สะดวก ผู้ใช้งานสามารถส่งข้อความหรือบันทึกเสียงเพื่อรายงานสถานการณ์ที่เกี่ยวข้องกับเหตุการณ์น้ำท่วม ระบบจะทำการประมวลผลข้อความด้วยโมเดลภาษาและเทคนิค Retrieval-Augmented Generation (RAG) เพื่อวิเคราะห์บริบทของข้อความ จากนั้นระบบจะแสดงผลการประเมินระดับความเร่งด่วนของสถานการณ์ออกเป็น 3 ระดับ ได้แก่ Emergency, Moderate และ Normal

3.4 การอภิปรายผลและข้อจำกัดของงานวิจัย

นอกจากนี้ ความผิดพลาดในการจำแนกระดับความเร่งด่วนอาจส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยของผู้ประสบภัย โดยเฉพาะในกรณีที่สถานการณ์ถูกประเมินต่ำกว่าความเป็นจริง (underestimation) ซึ่งอาจทำให้การช่วยเหลือล่าช้าและเพิ่มความเสี่ยงต่อชีวิต ระบบยังมีข้อจำกัดด้านความทนทานต่อสัญญาณรบกวน เนื่องจากกระบวนการรู้จำเสียงพูดอาจได้รับผลกระทบจากเสียงรบกวนหรือการพูดที่ไม่ชัดเจนในสถานการณ์จริง ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความถูกต้องของข้อมูลที่เข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์

การนำระบบไปใช้งานจริงในภาคสนามยังต้องพิจารณาปัจจัยเพิ่มเติม เช่น ความเสถียรของระบบ การรองรับผู้ใช้งานจำนวนมาก และความพร้อมของโครงสร้างพื้นฐาน ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัดบางประการ เนื่องจากชุดข้อมูลที่ใช้ในการพัฒนาและทดสอบระบบเป็นข้อมูลสังเคราะห์ (Synthetic Data) ซึ่งอาจยังไม่สามารถสะท้อนลักษณะของข้อมูลในสถานการณ์จริงได้อย่างครบถ้วน เช่น เสียงรบกวน ความแตกต่างของสำเนียง และการสื่อสารภายใต้ความตื่นตระหนก นอกจากนี้ ขนาดของชุดข้อมูลทดสอบยังมีจำนวนจำกัด ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความสามารถในการสรุปผลเชิงทั่วไปของระบบ ซึ่งในอนาคต งานวิจัยสามารถพัฒนาเพิ่มเติมโดยการใช้ข้อมูลจริง (real-world data) และประยุกต์เทคนิค

การเพิ่มความหลากหลายของข้อมูล (data augmentation) เช่น การเพิ่มสัญญาณรบกวน (noise injection) และการปรับความเร็วของเสียง (speed perturbation) เพื่อเพิ่มความทนทานและความแม่นยำของระบบในสภาพแวดล้อมจริง

4. สรุป

จากการพัฒนาและทดสอบระบบการจัดการช่วยเหลือผู้ประสบภัยน้ำท่วมที่ประยุกต์ใช้เทคนิค Retrieval-Augmented Generation (RAG) ร่วมกับเทคโนโลยีการรู้จำเสียงพูด พบว่าระบบสามารถประมวลผลคำขอความช่วยเหลือจากผู้ประสบภัยและจัดลำดับความเร่งด่วนของสถานการณ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยในการทดสอบเบื้องต้นด้วยชุดข้อมูลจำลองขนาดเล็กจำนวน 60 ตัวอย่าง ระบบสามารถจำแนกกรณีฉุกเฉิน (Emergency) ได้ถูกต้องทั้งหมด 20 กรณี จำแนกระดับปานกลาง (Moderate) ได้ถูกต้อง 19 จาก 20 กรณี และจำแนกระดับปกติ (Normal) ได้ถูกต้องทั้งหมด 20 กรณี ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงศักยภาพของระบบในการจำแนกสถานการณ์ที่มีความเสี่ยงสูงได้อย่างแม่นยำ

เมื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบด้วยวิธี 5-fold cross-validation พบว่าระบบมีค่าความแม่นยำในแต่ละรอบอยู่ที่ 80.33%, 73.00%, 76.00%, 72.67% และ 71.33% ตามลำดับ โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 74.67% ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าระบบสามารถทำงานได้อย่างสม่ำเสมอในภาพรวม และมีความสามารถในการจัดการกับข้อมูลที่หลากหลายได้ในระดับที่น่าพอใจ นอกจากนี้ ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นถึงข้อได้เปรียบของการใช้เทคนิค Retrieval-Augmented Generation (RAG) ร่วมกับโมเดลภาษา โดยเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีพื้นฐานแบบกฎ (rule-based) พบว่าระบบที่พัฒนาขึ้นมีความแม่นยำสูงกว่า (80.00% เทียบกับ 63.33%) ซึ่งสะท้อนถึงความสามารถในการวิเคราะห์เชิงบริบทของระบบที่มีประสิทธิภาพมากกว่าวิธีการที่อาศัยคำสั่งเพียงอย่างเดียว งานวิจัยนี้ยังได้พัฒนาระบบต้นแบบในรูปแบบเว็บไซต์เพื่อสาดิการทำงานของระบบในสถานการณ์จริง โดยผู้ใช้งานสามารถส่งข้อความหรือบันทึกเสียงเพื่อรายงานสถานการณ์น้ำท่วม และระบบจะทำการวิเคราะห์พร้อมแสดงระดับความเร่งด่วนของสถานการณ์ได้แบบเรียลไทม์ ซึ่งช่วยสะท้อนถึงความเป็นไปได้ในการนำระบบไปประยุกต์ใช้งานจริงในบริบทของการจัดการภัยพิบัติ

5. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ด้วยความร่วมมือและการสนับสนุนจากหลายภาคส่วน ทางผู้วิจัยขอขอบพระคุณทุกท่านเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคุณพิรเชษฐ ปอแก้ว ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางการทดลอง ทบทวนผลการดำเนินงาน และให้การสนับสนุนในการลงมือทดลองตลอดระยะเวลาของโครงการ จนนำไปสู่ความสำเร็จของงานวิจัยนี้ ขอขอบพระคุณคุณพิรเชษฐ ปอแก้ว อีกครั้ง ที่รับผิดชอบในการจัดเตรียมและตรวจสอบความถูกต้องของชุดคำแปลอ้างอิง (Reference Corpus) ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ทำให้การประเมินค่า BLEU Score มีความน่าเชื่อถือ

ขอขอบพระคุณศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (National Electronics and Computer Technology Center: NECTEC) ที่ให้การสนับสนุนด้านองค์ความรู้และทรัพยากรในการทำวิจัยทำให้ผู้วิจัยสามารถเข้าถึงข้อมูลและเทคโนโลยีใหม่ ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณอาจารย์ธนาวัฒน์ เพียรคำ และวิชาเอกวิทยาศาสตร์และนวัตกรรมทางการแพทย์ ที่ให้การสนับสนุนและคำแนะนำอันมีค่าแก่พวกเราตลอดการดำเนินงานวิจัย และขอขอบคุณ ครอบครัวและเพื่อนร่วมงาน ทุกท่านที่ให้ความสนใจและแรงสนับสนุนทางด้านจิตใจ ทำให้ผู้วิจัยสามารถทุ่มเทและทำงานวิจัยนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Yu, Q., Wang, Y. and Li, N. 2022. Extreme flood disasters: Comprehensive impact and assessment. *Water*. 14(8): 1211
- [2] Zhong, S., Yang, L., Toloo, S., Wang, Z., Tong, S., Sun, X., Crompton, D., FitzGerald, G. and Huang, C. 2018. The long-term physical and psychological health impacts of flooding: A systematic mapping. *Science of the Total Environment*. 626: 165-194.
- [3] Sienkiewicz-Matyjurek, K. 2021. Complementarity of communication and coordination in ensuring effectiveness of emergency management networks. *Sustainability*. 13(1): 221.

-
- [4] Kaufhold, M. A., Bayer, M. and Reuter, C. 2020. Rapid relevance classification of social media posts in disasters and emergencies: A system and evaluation. *Information Processing & Management*. 57(1): 102132.
- [5] Reuter, C., Hughes, A. L. and Kaufhold, M. A. 2018. Social media in crisis management: An evaluation and analysis of crisis informatics research. *International Journal of Human-Computer Interaction*. 34(4): 280-294.
- [6] Akter, S. and Wamba, S. F. 2019. Big data and disaster management: a systematic review and agenda for future research. *Annals of Operations Research*. 283(1): 939-959.
- [7] Wilson, B., Tate, E. and Emrich, C. T. 2021. Flood recovery outcomes and disaster assistance barriers for vulnerable populations. *Frontiers in Water*. 3: 752307.
- [8] Boonmee, C., Arimura, M. and Asada, T. 2017. Facility location and routing in disaster relief: A review. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 21: 340-360.
- [9] Ghaffarzadegan, S., Feng, J. and Rostami, M. 2016. Emotion recognition in stressful and emotional speech for emergency dispatch. *IEEE Transactions on Affective Computing*. 9(4): 431-441.
- [10] Nassif, A. B., Shahin, I., Attili, I., Mutawa, M. and Babu, K. 2019. Speech recognition using deep learning algorithms: A systematic review. *IEEE Access*. 7: 19143-19165.
- [11] Lewis, P., Perez, E., Piktus, A., Petroni, F., Karpukhin, V., Goyal, N., Küttler, H., Lewis, M., Yih, W. T., Rocktäschel, T., Riedel, S. and Kiela, D. 2020. Retrieval-augmented generation for knowledge-intensive NLP tasks. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 33: 9459-9474.
- [12] Reimers, N. and Gurevych, I. 2019. Sentence-BERT: Sentence embeddings using Siamese BERT-networks. *Proceedings of the 2019 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing*. 3982-3992.

ภาคโปสเตอร์

การเปรียบเทียบคุณภาพทุเรียนหอมทองที่ผลิตในฤดูกลางและนอกฤดูกลางในจังหวัดชุมพร Quality Comparison of in-season and off-season 'Monthong' Durian Produced in Chumphon Province

อัญชิสา รังงาม¹ พรรณิภา ชัยยล^{1*} สุริยณ์ท์ สุภาพวานิช² อัญจนา จันทร์ปะทิว อาชญา¹ และ โอภาส สืบสาย¹
Aunchisa Rewngam¹, Pannipa Youryon^{1*}, Suriyan Supapvanich², Anjana Janpatiw Ahuja¹ and Opart Suebsay¹

¹ภาควิชาเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร 86160 ประเทศไทย

²ภาควิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 ประเทศไทย

¹Department of Agricultural Technology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Prince of Chumphon Campus, Chumphon Province, 86160, Thailand

²Department of Industrial Education and Technology King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, 10520, Bangkok, Thailand

*Corresponding author: Pannipa Youryon, e-mail address : pannipa.yo@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

การผลิตทุเรียนในปัจจุบันมีทั้งการผลิตในฤดูกลางและการผลิตนอกฤดูกลางมีความแตกต่างกันในด้านการจัดการการผลิต สภาพพื้นที่ปลูก ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพหลังการเก็บเกี่ยว งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบคุณภาพของทุเรียนพันธุ์หอมทอง ที่ผลิตในพื้นที่ตำบลรับร่อ อำเภอท่าแซะ และตำบลถ้ำสิงห์ อำเภอเมือง จังหวัดชุมพร โดยศึกษาลักษณะทางกายภาพ ได้แก่ ความกว้างของผล ความยาวของผล ความหนาแน่นของหนาม ความหนาของเปลือก น้ำหนักผล เเปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้ง เเปอร์เซ็นต์เนื้อต่อผล และคุณภาพทางเคมี ได้แก่ ค่าสีเนื้อ (L*) และ (b*) ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS) จากผลการทดลองพบว่า ทุเรียนจากตำบลรับร่อในฤดูกลางมีความหนาของเปลือกและเปอร์เซ็นต์เนื้อต่อผลสูงที่สุด ขณะที่ทุเรียนจากตำบลถ้ำสิงห์ทั้งในและนอกฤดูกลางมีความหนาของเปลือกน้อยกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.01$) นอกจากนี้ ทุเรียนจากตำบลรับร่อและตำบลถ้ำสิงห์ ในช่วงนอกฤดูกลางมีน้ำหนักผลมากกว่าทุเรียนในฤดูกลาง ส่วนความหนาแน่นของหนามในพื้นที่ตำบลถ้ำสิงห์ทั้งในและนอกฤดูกลางมีค่าสูงกว่าตำบลรับร่อมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.01$) สำหรับคุณภาพด้านสีเนื้อ พบว่าค่าความสว่าง (L*) ของเนื้อทุเรียนจากตำบลรับร่อนอกฤดูกลางมีค่าสูงที่สุด ขณะที่ค่าความเป็นสีเหลือง (b*) ของเนื้อทุเรียนจากตำบลถ้ำสิงห์ในฤดูกลางมีค่าสูงที่สุดมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.01$) ในขณะที่ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS) ไม่พบความแตกต่างทางสถิติ ดังนั้นทุเรียนพื้นที่ตำบลถ้ำสิงห์ในฤดูกลางมีคุณภาพดีที่สุดในด้านคุณภาพเนื้อและองค์ประกอบทางเคมี ขณะที่ตำบลรับร่อมีความโดดเด่นด้านน้ำหนักผลและสัดส่วนเนื้อต่อผล

คำสำคัญ: พื้นที่ปลูก, หลังการเก็บเกี่ยว, หอมทอง

Abstract

Durian production at present occurs in both in-season and off-season periods, which differ in terms of production management and growing environments, consequently affecting postharvest quality. This study aimed to compare the quality of 'Monthong' durian cultivated in Rap Ro Subdistrict, Tha Sae District, and Tham Sing Subdistrict, Mueang District, Chumphon Province. Physical characteristics were evaluated, including fruit width, fruit length, spine density, rind thickness, fruit weight, percentage of dry weight, and flesh-to-fruit ratio. Chemical qualities were also analyzed, including flesh color parameters (L* and b*) and total soluble solids (TSS). The results showed that in-season durian from Rap Ro Subdistrict had the highest rind thickness and flesh-to-fruit ratio. In contrast, durian from Tham Sing Subdistrict, both in-season and off-season, had significantly lower rind thickness ($p \leq 0.01$). Additionally, off-season durian from both Rap Ro and Tham Sing exhibited higher fruit weight than in-season durian. Spine density in Tham Sing, in both seasons, was significantly higher than that in Rap Ro ($p \leq 0.01$). Regarding color quality, the highest lightness (L*) value was found in off-season durian from Rap Ro, whereas the highest yellowness (b*) value was observed in in-season durian from Tham Sing, with significant differences ($p \leq 0.01$). However, no significant difference was found in total soluble solids (TSS). In conclusion, in-season durian from Tham Sing Subdistrict exhibited superior quality in terms of flesh characteristics and chemical composition, while Rap Ro Subdistrict showed advantages in fruit weight and flesh proportion.

Keywords: Cultivation areas, Postharvest, ‘Monthong’

1. บทนำ

ทุเรียน (*Durio zibethinus* Murr.) เป็นไม้ผลเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย และได้รับการยอมรับว่าเป็น “ราชาแห่งผลไม้” เนื่องจากมีมูลค่าทางเศรษฐกิจสูงและเป็นที่ต้องการของตลาดทั้งในและต่างประเทศ โดยเฉพาะประเทศจีน ฮองกง และกลุ่มประเทศในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ส่งผลให้ประเทศไทยเป็นหนึ่งในผู้ส่งออกทุเรียนรายสำคัญของโลก และสามารถสร้างรายได้เข้าสู่ประเทศไทยในแต่ละปีเป็นจำนวนมาก [1] ปัจจุบันเกษตรกรไทยมีองค์ความรู้และความสามารถในการผลิตทุเรียนคุณภาพสูง รวมถึงมีการรวมกลุ่มผลิตในรูปแบบแปลงใหญ่ และดำเนินการผลิตตามมาตรฐาน ทำให้ได้ผลผลิตที่มีคุณภาพและสามารถแข่งขันในตลาดทั้งในและต่างประเทศได้ [2] การผลิต “ทุเรียนนอกฤดู” เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่จะเพิ่มมูลค่าให้กับผลผลิต โดยเกษตรกรสามารถควบคุมการออกดอกให้ตรงกับช่วงเวลาที่ต้องการ เพื่อลดการกระจุกตัวของผลผลิตในฤดูเดียวกัน และช่วยให้สามารถจำหน่ายได้ในราคาที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตาม การผลิตนอกฤดูจำเป็นต้องมีการจัดการที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ผลผลิตที่มีคุณภาพตรงตามความต้องการของตลาด [3] จังหวัดชุมพรเป็นหนึ่งในแหล่งผลิตทุเรียนที่สำคัญของประเทศไทย โดยมีปริมาณผลผลิตอยู่ในช่วงประมาณ 1.1–3.0 แสนตันต่อปี และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงหลายปีที่ผ่านมา ทั้งนี้ผลผลิตส่วนใหญ่จะออกสู่ตลาดในฤดูกาลคิดเป็นประมาณร้อยละ 70–80 ขณะที่ผลผลิตนอกฤดูกาลมีสัดส่วนประมาณร้อยละ 20–30 [4] โดยทั่วไป ผลไม้ที่ผลิตในฤดูกาลมักมีคุณภาพด้านความสด รสชาติ และราคาที่เหมาะสมกว่า ขณะที่ผลไม้นอกฤดูช่วยเพิ่มทางเลือกในการบริโภคตลอดทั้งปี แต่บางครั้งอาจมีคุณภาพแตกต่างจากผลไม้ในฤดู [5] ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย โดยเฉพาะสภาพพื้นที่ปลูกและการจัดการสวน เช่น สภาพภูมิอากาศ ปริมาณน้ำฝน และธาตุอาหารในดิน ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อการเจริญเติบโตและคุณภาพของผลผลิต ตัวอย่างเช่น ปริมาณน้ำฝนที่มากเกินไปในช่วงก่อนการเก็บเกี่ยว อาจกระตุ้นให้ต้นทุเรียนแตกใบอ่อน ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของเนื้อทุเรียน [6] เช่นเดียวกับผลไม้ชนิดอื่น คุณภาพของผลผลิตยังขึ้นอยู่กับฤดูกาลผลิตอีกด้วย [7] ดังนั้นการผลิตทุเรียนในปัจจุบันซึ่งมีทั้งในฤดูกาลและนอกฤดูกาล อาจก่อให้เกิดความแตกต่างทั้งในด้านการจัดการผลิตและสภาพพื้นที่ปลูก การศึกษาคุณภาพทุเรียนในพื้นที่อำเภอท่าแซะและอำเภอมือง จังหวัดชุมพร โดยเปรียบเทียบปัจจัยด้านพื้นที่ปลูก และฤดูกาลผลิต จึงมีความสำคัญ เพื่อทำความเข้าใจความแตกต่างของคุณภาพผลผลิตในแต่ละพื้นที่ และเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการพัฒนาระบบการผลิตทุเรียนให้มีประสิทธิภาพและได้มาตรฐานยิ่งขึ้นในอนาคต

2. วิธีการศึกษา

ทุเรียนพันธุ์หมอนทอง จากตำบลรั้ว อำเภอมือง จังหวัดชุมพร และตำบลลำสิงห์ อำเภอมือง จังหวัดชุมพร โดยทุเรียนรั้วในฤดูเก็บเกี่ยววันที่ 27 กรกฎาคม พ.ศ. 2568 ทุเรียนรั้วนอกฤดูเก็บเกี่ยววันที่ 11 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2569 ทุเรียนลำสิงห์ในฤดูเก็บเกี่ยววันที่ 16 กรกฎาคม พ.ศ. 2568 และทุเรียนลำสิงห์นอกฤดูเก็บเกี่ยววันที่ 25 พฤศจิกายน พ.ศ. 2568 ทำการเก็บเกี่ยว 110 วัน หลังดอกบาน โดยนำมาป่ายข้าวด้วยเอทีฟอน 26 เปอร์เซนต์ หลังจากนั้นทำการบันทึกผลลักษณะทางกายภาพและเคมี

2.1 วิเคราะห์คุณภาพทางเคมี

2.1.1 ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (Total soluble solids; TSS)

นำเนื้อทุเรียน 3 กรัมผสมกับน้ำกลั่น 9 มิลลิลิตร นำไปปั่นด้วยเครื่อง Homoginizer รุ่น Model PRO200 แล้วนำไปเข้าเครื่อง Centrifuge ที่ความเร็วรอบ 5,000 รอบ/นาที เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำส่วนใสไปวัดปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ด้วยเครื่อง Refractometer รุ่น PAL-1 รายงานค่าเป็นองศาบริกซ์ (°Brix) [8]

2.1.2 สีของเนื้อ

วัดค่าสีเนื้อทุเรียนด้วยเครื่องวัดสี Chroma meter บริษัท Minolta ประเทศญี่ปุ่น รุ่น CR-400 ค่าสีในการทดลอง รายงานผลเป็นค่าความสว่าง L^* และค่าความเป็นสีเหลือง b^*

2.1.3 ปริมาณแคโรทีนอยด์

นำตัวอย่างเนื้อทุเรียน 5 กรัม สกัดด้วยอะซิโตน 95.5% ปริมาณ 15 มิลลิลิตร เป็นเวลา 48 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส แล้วนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV/VIS spectrophotometer ยี่ห้อ Labtech รุ่น UV9100A ที่ความยาวคลื่น 470, 645 และ 662 นาโนเมตร [9]

ปริมาณแคโรทีนอยด์ = Chlorophyll A [Chla] = $(9.784 \times D_{662}) - (0.99 \times D_{644})$

Chlorophyll B [Chlb] = $(21.426 \times D_{644}) - (4.65 \times D_{662})$

Carotenoid = $(100 \times D_{470}) - (1.90 \times [ChA]) - (63.14 \times [ChB]) / 214$

2.1.4 เเปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้ง

นำเนื้อทุเรียนน้ำหนัก 10 กรัมไปอบในตู้อบลมร้อนยี่ห้อ Binder รุ่น BF ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักแห้งเพื่อนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้งด้วยสูตร [10]

2.1.5 ความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระ (DPPH free radical scavenging activity)

สกัดทุเรียนโดยใช้เมทานอล (Methanol) เป็นตัวทำละลาย โดยนำเนื้อทุเรียน 5 กรัม ผสมกับเมทานอล 50 มิลลิลิตร แล้วปั่นให้เข้ากันด้วยเครื่อง Homogenizer จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่อง Centrifuge ที่ความเร็ว 12,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที เก็บสารสกัดส่วนใสเพื่อนำไปวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH free radical scavenging activity ตามวิธีของ [11] โดยใช้สารสกัด 50 ไมโครลิตร ทำปฏิกิริยากับน้ำกลั่น 2.45 มิลลิลิตร และสารละลาย DPPH 0.25 มิลลิลิตร แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตรทันที (A0) จากนั้นตั้งทิ้งไว้ในที่มืดที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที ก่อนวัดค่าการดูดกลืนแสงอีกครั้ง (A30) และคำนวณเปอร์เซ็นต์การยับยั้ง DPPH

2.1.6 ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ (Ferric reducing antioxidant)

นำเนื้อทุเรียน 5 กรัม ผสมกับเอทานอล 80% ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ปั่นด้วย Homogenizer แล้วเติมน้ำกลั่น 15 มิลลิลิตร จากนั้นปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่อง Centrifuge เพื่อแยกส่วนใส นำสารสกัด 0.3 มิลลิลิตร ทำปฏิกิริยากับสารละลาย FRAP (Acetate buffer, TPTZ และ $FeCl_3$) ตั้งทิ้งไว้ในที่อุณหภูมิห้อง 30 นาที แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 630 นาโนเมตร คำนวณกิจกรรมสารต้านอนุมูลอิสระโดยเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน Trolox แสดงผลเป็นหน่วย (mmol kg⁻¹) [12]

2.1.7 เเปอร์เซ็นต์เนื้อต่อผล

ชั่งน้ำหนักผลของทุเรียน และน้ำหนักเนื้อพร้อมเมล็ด นำไปคำนวณจากสมการ ดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเนื้อต่อผล} = \frac{\text{น้ำหนักเนื้อพร้อมเมล็ด}}{\text{น้ำหนักของผล}} \times 100$$

2.1.8 การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) ตามแผนการทดลองแบบ 2x2 Factorial in Completely Randomized Design; Factorial in CRD เพื่อตรวจสอบผลของปัจจัยและปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) โดยใช้โปรแกรม SPSS for Windows เวอร์ชัน 30 ในการวิเคราะห์ข้อมูล

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 ลักษณะทางกายภาพ

จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของผลทุเรียน ได้แก่ ความกว้างผล ความยาวผล ความหนาแน่นของหนาม และความหนาของเปลือก ผลของทุเรียนที่ปลูกในพื้นที่ตำบลรั้ว อำเภอกำแพงแสน และตำบลถ้ำสิงห์ อำเภอมือง จังหวัดชุมพร ในฤดูการและนอกฤดูการผลิต พบว่าขนาดความกว้างของผลทุเรียนจากพื้นที่ตำบลรั้วและตำบลถ้ำสิงห์ทั้งสองฤดูการไม่มีความแตกต่างทางสถิติ (Figure 1A) ด้านความยาวของผล พบว่าทุเรียนในพื้นที่ตำบลถ้ำสิงห์นอกฤดูมีความยาวสูงสุด รองลงมาคือพื้นที่ตำบลรั้วนอกฤดู ถ้ำสิงห์ในฤดู และรั้วในฤดู ตามลำดับซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P \leq 0.01$) ในด้านความหนาแน่นของหนาม พบว่าทุเรียนจากพื้นที่ตำบลถ้ำสิงห์ในฤดู มีความหนาแน่นของหนามสูงสุด รองลงมาคือ พื้นที่ตำบลรั้วในฤดู ถ้ำสิงห์นอกฤดู และรั้วนอกฤดู ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญอย่างยิ่ง ($P \leq 0.001$) (Figure 1C) ดังงานวิจัยของ Aziz et al.; Lim and Luder [10,13] ระบุว่าทุเรียนพันธุ์หมอนทอง มีความหนาแน่นของหนามอยู่ที่ 20-26 หนาม/25 cm² สำหรับความหนาของเปลือกพบว่าผลทุเรียนในพื้นที่ตำบลรั้วมีความหนาของเปลือกสูงกว่าพื้นที่ตำบลถ้ำสิงห์ทั้งสองฤดูการผลิต และผลของทุเรียนจากพื้นที่ถ้ำสิงห์ในฤดูการมีความหนาของเปลือกน้อยที่สุด ซึ่งมีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญอย่างยิ่ง ($P \leq 0.001$) (Figure 1D) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Brand-Williams et al. [14] รายงานว่าเปลือกของทุเรียนพันธุ์หมอนทองมีความหนาของเปลือกอยู่ที่ 1.3-1.7 เซนติเมตร ความหนาของเปลือกผลเป็นลักษณะที่มีความสำคัญต่อคุณภาพ

ผลผลิต เนื่องจากมีผลต่อสัดส่วนของเนื้อทุเรียน ทุเรียนที่ผลิตในฤดูมีลักษณะทางกายภาพสูงกว่าการผลิตนอกฤดู โดยเฉพาะด้านความหนาแน่นของหนามและความหนาเปลือกผล Aziz et al. [10] และลักษณะทางกายภาพของผลทุเรียนสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามฤดูกาลผลิตและสภาพแวดล้อมในการปลูก โดยความแตกต่างดังกล่าวอาจเกิดจากความแตกต่างของสภาพแวดล้อม ดิน โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wisutiamonkul et al. [15] รายงานว่าปัจจัยด้านพื้นที่ปลูกสามารถส่งผลกระทบต่อคุณลักษณะทางกายภาพของผลไม้เขตร้อนได้

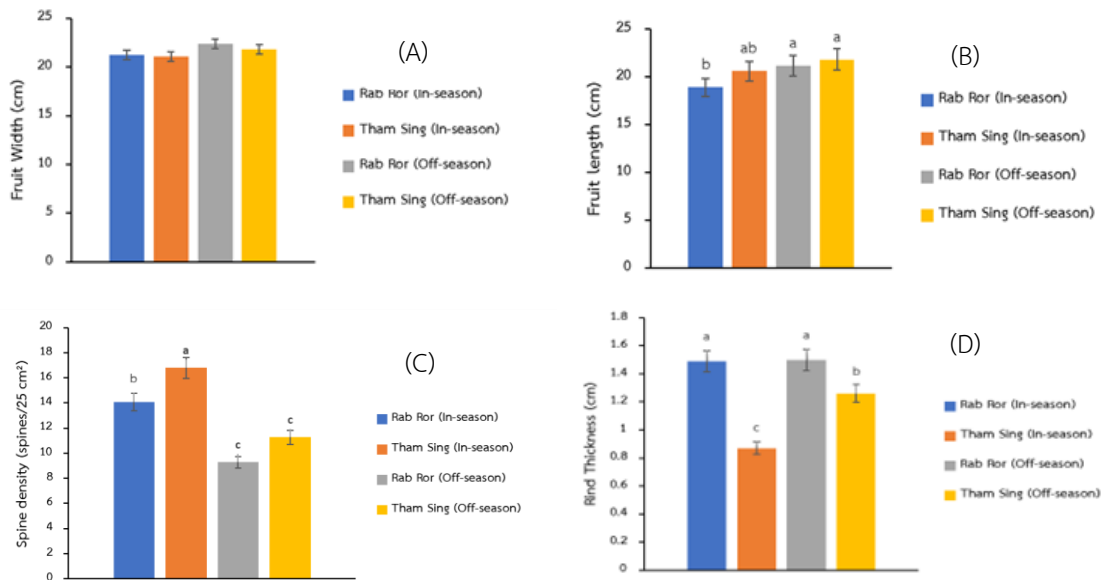


Figure 1 Physical characteristics of durian fruits, including fruit width (A), fruit length (B), spine density (C), and rind thickness (D), of durians grown in Rab Ror, Tha Sae District, and Tham Sing, Mueang Chumphon District, Chumphon Province, during the in-season and off-season production.

3.2 น้ำหนักผล เเปอร์เซ็นต์เนื้อต่อผล และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้ง

จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของทุเรียนด้าน น้ำหนักผล เเปอร์เซ็นต์เนื้อต่อผล และน้ำหนักแห้ง ของทุเรียนที่ปลูกในพื้นที่ตำบลรับร้อ อำเภอกำแพง และตำบลถ้ำสิงห์ อำเภอมือง จังหวัดชุมพร ทั้งในและนอกฤดูกาลผลิต พบว่าน้ำหนักผลของพื้นที่ตำบลรับร้อนอกฤดูมีน้ำหนักผลสูงที่สุด รองลงมาคือ พื้นที่ตำบลถ้ำสิงห์นอกฤดู พื้นที่ถ้ำสิงห์ในฤดู และพื้นที่ตำบลรับร้อในฤดูตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.001$) (Figure 2A) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Subhadrabandhu and Ketsa [11] ระบุว่าทุเรียนพันธุ์หมอนทองมีน้ำหนักผล 2.5-4 กิโลกรัมต่อผล การติดผลน้อยของต้นทุเรียนส่งผลให้ผลมีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากต้นสามารถจัดสรรอาหารไปเลี้ยงผลได้อย่างเพียงพอ ในขณะที่การติดผลจำนวนมากทำให้ผลมีขนาดเล็กลงจากการแย่งอาหารกัน กรมวิชาการเกษตร, 2560; FAO, 2011 [16,17] สำหรับเปอร์เซ็นต์เนื้อต่อผลมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญอย่างยิ่ง ($P < 0.01$) (Figure 2B) พบว่าทุเรียนจากพื้นที่ตำบลรับร้อในฤดูมีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือ พื้นที่ตำบลถ้ำสิงห์ในฤดู พื้นที่ตำบลรับร้อนอกฤดู และพื้นที่ตำบลถ้ำสิงห์นอกฤดู ตามลำดับ โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Voon et al. [18] พบว่าเปอร์เซ็นต์เนื้อต่อผลของทุเรียนพันธุ์หมอนทองมีค่าอยู่ที่ 30-35 เปอร์เซ็นต์ ในด้านเปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้งมีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) (Figure 2C) พบว่าทุเรียนจากพื้นที่ตำบลถ้ำสิงห์ในฤดูมีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้งสูงที่สุด รองลงมาคือ พื้นที่ตำบลรับร้อในฤดู พื้นที่ตำบลถ้ำสิงห์นอกฤดู และพื้นที่ตำบลรับร้อนอกฤดู ดังงานวิจัยของ Ketsa and Daengkanit [19] ระบุว่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้งของทุเรียนพันธุ์หมอนทองมีค่าอยู่ที่ 32-38 เปอร์เซ็นต์

3.3 ค่าสีและปริมาณแคโรทีนอยด์

จากการศึกษาคุณภาพด้านสีของเนื้อทุเรียน ได้แก่ ความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) และปริมาณแคโรทีนอยด์ (Carotenoids) ของทุเรียนที่ปลูกในพื้นที่ปลูกตำบลรับร้อ อำเภอกำแพง และตำบลถ้ำสิงห์ อำเภอมือง จังหวัดชุมพร ในและนอกฤดูกาลผลิต พบว่าค่าความสว่างของสีเนื้อ (L^*) มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) (Figure 3A) มีค่าสูงที่สุดในทุเรียนจากพื้นที่ตำบลรับร้อนอกฤดู รองลงมาคือ พื้นที่ตำบลถ้ำสิงห์ในฤดู พื้นที่ตำบลถ้ำสิงห์นอกฤดู และพื้นที่ตำบลรับร้อในฤดู

ตามลำดับ ในส่วนของค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P < 0.01$) (Figure 3B) พบว่าทุเรียนจากพื้นที่ตำบลลำสิงห์ในฤดูมีค่าความเป็นสีเหลืองมากที่สุด รองลงมาคือ พื้นที่ตำบลลำสิงห์นอกฤดู พื้นที่ตำบลรับร่อนนอกฤดู และพื้นที่ตำบลรับร่อนในฤดู ตามลำดับ ดังงานวิจัยของ Haruekit et al. [20] ระบุว่าทุเรียนมีค่าความสว่าง (L^*) อยู่ที่ 70-85 mg kg^{-1} และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) มีค่าอยู่ที่ 38-58 mg kg^{-1} ซึ่งแตกต่างกันตามแหล่งปลูก และสภาพแวดล้อม ในส่วนของปริมาณแคโรทีนอยด์ (Carotenoids) ซึ่งเป็นรงควัตถุที่ให้สีเหลืองในเนื้อทุเรียนมีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) (Figure 3C) โดยค่าที่สูงที่สุดพบในทุเรียนพื้นที่ลำสิงห์นอกฤดู รองลงมาคือ พื้นที่ตำบลลำสิงห์ในฤดู พื้นที่ตำบลรับร่อนในฤดู และพื้นที่ตำบลรับร่อนนอกฤดู ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Voon et al.; Haruekit et al. [18,20] พบว่าเนื้อทุเรียนในฤดูมีค่าความสว่าง (L^*) ต่ำกว่า แต่มีค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) สูงกว่าทุเรียนนอกฤดู ซึ่งอาจเกิดจากการสะสมแคโรทีนอยด์ที่สูงกว่าและมีปริมาณความชื้นต่ำกว่า ส่งผลให้สีเหลืองมีความเข้มมากขึ้น แต่มีการสะท้อนแสงลดลง ในทางตรงกันข้ามทุเรียนนอกฤดูมีค่า L^* สูงกว่า เนื่องจากมีความชื้นสูงและมีการสะสมรงควัตถุน้อยกว่า ทำให้มีลักษณะสีที่ซีดกว่า

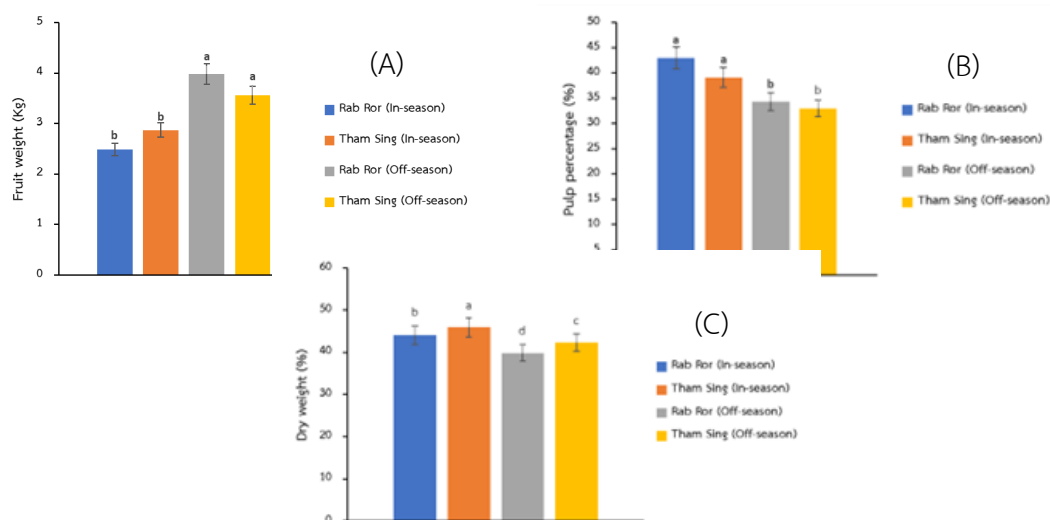


Figure 2 Fruit weight (A), pulp percentage (B), and dry weight (C) of durians grown in Rap Ror, Tha Sae District, and Tham Sing Subdistrict, Mueang District, Chumphon Province, during the in-season and off-season production.

3.4 ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้

จากการศึกษาคุณภาพทางด้านเคมีของเนื้อทุเรียนในด้านปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (Total Soluble Solids; TSS) ของทุเรียนพื้นที่ตำบลรับร่อน อำเภอท่าแซะ และตำบลลำสิงห์ อำเภอเมือง จังหวัดชุมพร ในฤดูและนอกฤดูการผลิต พบว่าค่า TSS มีค่าใกล้เคียงกันซึ่งไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($P \geq 0.05$) (Figure 4) ค่าที่สูงที่สุดพบในทุเรียนจากพื้นที่ตำบลลำสิงห์ในฤดู รองลงมา คือ พื้นที่ลำสิงห์นอกฤดู พื้นที่รับร่อนในฤดู และพื้นที่รับร่อนนอกฤดูตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของเนื้อทุเรียนไม่มีความแตกต่างในพื้นที่ แต่ในฤดูการผลิตมีความแตกต่างทางสถิติ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Srimoon et al.; Hau and Hieu [21,22] โดยทั่วไปทุเรียนที่ผลิตในฤดูมีแนวโน้มให้คุณภาพผลผลิตสูงกว่านอกฤดู เนื่องจากสภาพแวดล้อมเหมาะสมต่อการสะสมสารอาหารและน้ำตาล ส่งผลให้ค่าของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS) สูงกว่า ขณะที่การผลิตนอกฤดูต้องอาศัยการจัดการเพื่อปรับปรุงคุณภาพผลผลิต Sanwanangkul.; Srimoon et al. [23,19]

3.5 ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ

จากการวิเคราะห์ค่า DPPH (radical scavenging assay) และ FRAP (Ferric Reducing Antioxidant Power) ของผลทุเรียนที่ปลูกในพื้นที่ตำบลรับร่อน อำเภอท่าแซะ และตำบลลำสิงห์ อำเภอเมือง จังหวัดชุมพร ในฤดูและนอกฤดูการผลิต ผลการทดลองพบว่า DPPH มีค่าสูงสุดในทุเรียนที่ปลูกในพื้นที่ตำบลลำสิงห์นอกฤดู รองลงมา คือพื้นที่รับร่อนนอกฤดู พื้นที่รับร่อนในฤดู และมีค่าต่ำที่สุดในพื้นที่ตำบลลำสิงห์ในฤดู ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าค่า DPPH ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($P \geq 0.05$) (Figure 5A) ในส่วนของค่า FRAP พบว่าทุเรียนที่ผลิตนอกฤดูการผลิตมีแนวโน้มสูงกว่าในฤดูการผลิต มีค่าสูงสุดในพื้นที่ตำบลรับร่อนนอกฤดู รองลงมาคือ

พื้นที่ตำบลถ้ำสิงห์นอกฤดูและพื้นที่ตำบลถ้ำสิงห์ในฤดู และมีค่าต่ำที่สุดในพื้นที่ตำบลรับร้อในฤดู ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) (Figure 5B) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสภาพแวดล้อมมีบทบาทสำคัญต่อศักยภาพในการต้านอนุมูลอิสระของทุเรียน Thaipong et al; Benzie et al. [24,25] และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Srimoon et al. [19] ระบุว่าฤดูกาลผลิตมีผลต่อความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของทุเรียน โดยทุเรียนที่ผลิตนอกฤดูมีแนวโน้มแสดงค่า DPPH และ FRAP สูงกว่าทุเรียนในฤดู

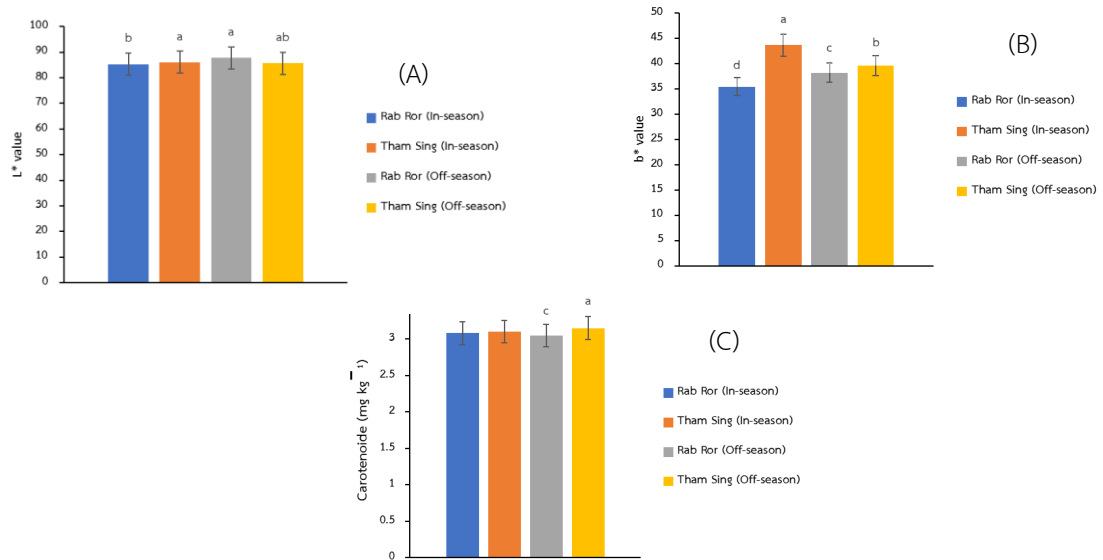


Figure 3 L* value (A), b* value (B), and carotenoid (C) of durians grown in Rap Ror, Tha Sae District, and Tham Sing Subdistrict, Mueang District, Chumphon Province, during the in-season and off-season production.

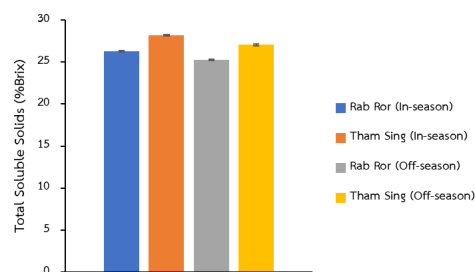


Figure 4 Total Soluble Solids; TSS of durians grown in Rap Ror, Tha Sae District, and Tham Sing Subdistrict, Mueang District, Chumphon Province, during the in-season and off-season production.

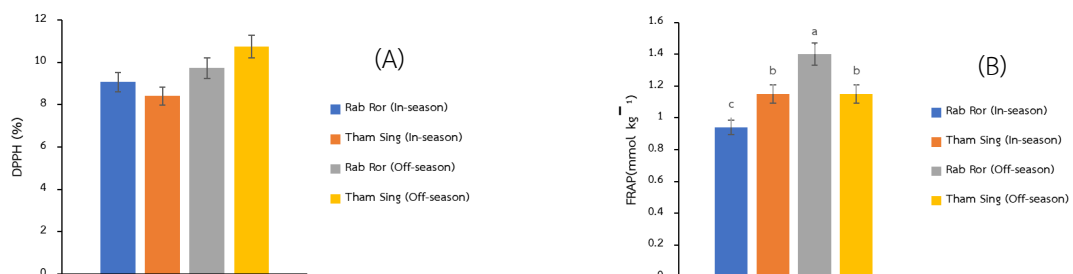


Figure 5 DPPH radical scavenging activity (A) ferric reducing antioxidant power (FRAP) (B) of durians grown in Rap Ror, Tha Sae District, and Tham Sing Subdistrict, Mueang District, Chumphon Province, during the in-season and off-season production.

4. สรุป

การศึกษาการเปรียบเทียบคุณภาพทุเรียนพันธุ์หมอนทองที่ผลิตในฤดูกลางและนอกฤดูกลางในจังหวัดชุมพร พบว่าฤดูกลางผลิตมีผลต่อคุณภาพของทุเรียนอย่างมีนัยสำคัญ โดยทุเรียนที่ผลิตในฤดูกลางมีลักษณะทางกายภาพที่ดีกว่า ได้แก่ ความยาวของผล น้ำหนักผล และเปอร์เซ็นต์เนื้อต่อผลสูงกว่า นอกจากนี้ยังมีค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (TSS) สูงกว่า ซึ่งแสดงถึงคุณภาพด้านรสชาติที่ดีกว่า ในขณะที่ทุเรียนที่ผลิตนอกฤดูกลางมีค่าความสว่าง (L^*) และปริมาณแคโรทีนอยด์สูงกว่า รวมถึงมีค่าความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระในรูปแบบ FRAP สูงกว่า ส่วนค่า DPPH พบว่ามีแนวโน้มสูงขึ้นในทุเรียนที่ผลิตนอกฤดูกลาง นอกจากนี้พื้นที่ปลูกมีผลต่อคุณภาพของทุเรียนทั้งด้านกายภาพและเคมีอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นทุเรียนพื้นที่ตำบลลำสิงห์ในฤดูมีคุณภาพดีที่สุด ในขณะที่ทุเรียนจากพื้นที่ตำบลรั้วมีมีค่าของน้ำหนักผลและเปอร์เซ็นต์เนื้อต่อผลดีที่สุด

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ ที่ให้การสนับสนุนด้านสถานที่ เครื่องมือ และอุปกรณ์ทางวิทยาศาสตร์ในการทำวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2565. สถานการณ์การผลิตและการตลาดทุเรียนของประเทศไทย. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพมหานคร.
- [2] กรมส่งเสริมการเกษตร. 2564. แนวทางการผลิตทุเรียนคุณภาพเพื่อการส่งออก. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพมหานคร.
- [3] ประทีป ศรีสุวรรณ. 2565. การจัดการทุเรียนนอกฤดูเพื่อเพิ่มมูลค่าผลผลิต. วารสารเกษตรกรรมไทย. 54(2): 45-52.
- [4] สมชาย ใจดี, และคณะ. (2565). การวิเคราะห์ศักยภาพการผลิตทุเรียนในจังหวัดชุมพร. วารสารการจัดการ มหาวิทยาลัยราชภัฏ, 10(2), 45-60.
- [5] Kader, A. A. 2002. Postharvest Technology of Horticultural Crops. University of California, Agriculture and Natural Resources.
- [6] Subhadrabandhu, S. and Ketsa, S. 2001. Durian: King of Tropical Fruit. CAB International, Wallingford, UK.
- [7] Morton, J. F. 1987. Fruits of Warm Climates. Creative Resource Systems, Winterville, North Carolina.
- [8] Ferguson, I. B., Volz, R. K. and Woolf, A. B. 1999. Preharvest factors affecting physiological disorders of fruit. Postharvest Biology and Technology. 15: 255-262.
- [9] International Organization for Standardization (ISO). 2016. Fruit and vegetable products – Determination of soluble solids content. ISO Standard, Geneva.
- [10] Lichtenthaler, H. K. 1987. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. Methods in Enzymology.
- [11] Aziz, N. A. A., Ho, L. H., Azlan, A. and Khoo, H. E. 2019. Nutritional composition and bioactive compounds in durian (*Durio zibethinus* Murr.). Foods. 8(3): 96.
- [12] Slinkard, K. and Singleton, V. L. 1997. Total phenol analysis: Automation and comparison with manual methods. American Journal of Enology and Viticulture. 28: 49-55.
- [13] Lim, T. K. and Luders, L. 1998. Durian flowering, pollination and incompatibility studies. Annals of Applied Biology. 132: 151-165.
- [14] Wisutiamonkul, A., Promdang, S., Ketsa, S. and van Doorn, W. G. 2015. Carotenoids in durian fruit pulp during growth and postharvest ripening. Food Chemistry. 180: 301-305.
- [15] Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E. and Berset, C. 1995. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. LWT - Food Science and Technology. 28: 25-30.
- [16] กรมวิชาการเกษตร. 2560. คู่มือการผลิตทุเรียนคุณภาพ. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพมหานคร.

-
- [17] Food and Agriculture Organization (FAO). 2011. Crop yield response to plant density and resource allocation. FAO, Rome.
- [18] Voon, Y. Y., Hamid, N. S. A., Rusul, G., Osman, A. and Quek, S. Y. 2006. Physicochemical, antioxidant and sensory properties of Malaysian durian cultivars. *International Journal of Food Science and Technology*. 41: 96–107.
- [19] Ketsa, S. and Daengkanit, T. 1998. Physiological changes during postharvest ripening of durian fruit (*Durio zibethinus* Murr.). *Postharvest Biology and Technology*. 12: 193–202.
- [20] Haruenkit, R., Poovarodom, S., Vearasilp, S., Namiesnik, J., Sliwka-Kaszynska, M., Park, Y. S. and Gorinstein, S. 2010. Comparison of bioactive compounds, antioxidant activity and color of Thai tropical fruits. *Journal of Food Composition and Analysis*. 23: 762–769.
- [21] Srimoon, R., Niyomwan, S. and Ngiewthaisong, S. 2025. Comparison of early and late season phytochemical content in Mon Thong durian cultivar (*Durio zibethinus* Murray). *Current Applied Science and Technology*. 25(6): e0262051.
- [22] Hau, T. V. and Hieu, N. T. 2017. Off-season production of durian in the Mekong Delta, Vietnam. *Can Tho University Journal of Science*.
- [23] Sangwanangkul, P. 2000. Growth and maturation of durian fruit cv. Monthong grown in different locations.
- [24] Thaipong, K., Boonprakob, U., Crosby, K., Cisneros-Zevallos, L. and Byrne, D. H. 2006. Comparison of ABTS, DPPH, FRAP and ORAC assays for estimating antioxidant activity from guava fruit extracts. *Journal of Food Composition and Analysis*. 19: 669–675.
- [25] Benzie, I. F. F. and Strain, J. J. 1996. The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of antioxidant power. *Analytical Biochemistry*. 239: 70–76.

ผลของสเปกตรัมแสงแอลอีดีต่อการเจริญเติบโตและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของสะระแหน่
ภายใต้ระบบควบคุมสภาพแวดล้อม
Effects of LED Light Spectra on Growth and Bioactive Compounds of Kitchen Mint
(*Mentha cordifolia* Opiz ex Fresen) under Controlled Environmental Cultivation

ภาณุภัทร โยธี¹ และ หทัยรัตน์ โชคทวีพานิชย์^{1,*}

Phanuphat Yothee¹ and Hathairat Chokthaweepanich^{1,*}

¹วิทยาลัยบูรณาการศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900 ประเทศไทย

¹ School of Integrated Science, Kasetsart University, Bangkok, 10900, Thailand

*Corresponding author: Hathairat Chokthaweepanich, e-mail address: hathairat.ch@ku.th

บทคัดย่อ

สะระแหน่ (*Mentha cordifolia* Opiz ex Fresen) เป็นพืชเศรษฐกิจสำคัญที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม อย่างไรก็ตาม การผลิตในระบบเปิดมักประสบปัญหาความแปรปรวนจากสภาพแวดล้อมและศัตรูพืช ส่งผลให้คุณภาพผลผลิตไม่สม่ำเสมอ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของสเปกตรัมแสงจากหลอด LED ต่อการเจริญเติบโตและการสะสมปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของสะระแหน่ภายใต้สภาวะควบคุม โดยวางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) ประกอบด้วยแสงแอลอีดีที่มีความยาวคลื่นแสงต่างกัน 6 สเปกตรัมแสง ได้แก่ แสงสีแดง (R) แสงสีน้ำเงิน (B) แสงสีแดงร่วมกับแสงสีน้ำเงิน (RB) แสงสีแดงร่วมกับแสงแดงไกล (R-Fr) แสงสีน้ำเงินร่วมกับแสงแดงไกล (B-Fr) และแสงสีแดงร่วมกับแสงสีน้ำเงินและแสงแดงไกล (RB-Fr) ทุกสเปกตรัมแสงถูกควบคุมให้มีความเข้มแสงอยู่ในช่วง 200-215 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ เป็นเวลา 12 ชั่วโมง นาน 6 สัปดาห์ ผลการทดลองพบว่า สเปกตรัมแสงมีผลต่อการเจริญเติบโตและการสะสมสารสำคัญของสะระแหน่อย่างมีนัยสำคัญ โดยสเปกตรัมแสง R-Fr ส่งเสริมความสูงของต้น ความยาวปล้อง น้ำหนักสด และน้ำหนักแห้งสูงสุด ขณะที่สเปกตรัมแสง B-Fr ให้ประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงมากที่สุด ด้านสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ พบว่า สเปกตรัมแสง R กระตุ้นการสะสมน้ำตาลทั้งหมดและฟลาโวนอยด์รวมมากที่สุด ส่วนการให้สเปกตรัมแสง RB-Fr ช่วยเพิ่มการสะสมสารประกอบฟีนอลิก วิตามินซี และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระในระดับสูง ดังนั้น การเสริมแสงแดงไกลช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโต ผลผลิต และปริมาณสารสำคัญของสะระแหน่ได้อย่างมีประสิทธิภาพภายในโรงงานผลิตพืชด้วยแสงเทียม

คำสำคัญ: สะระแหน่, สเปกตรัมแสง, แสงแดงไกล, การเจริญเติบโต, สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ

Abstract

Kitchen mint (*Mentha cordifolia* Opiz ex Fresen) is an economically important herb widely used in the food and beverage industry. However, open-field cultivation is often constrained by environmental variability and pest incidence, resulting in inconsistent product quality. This study aimed to investigate the effects of light-emitting diode (LED) spectra on growth performance and bioactive compound accumulation of kitchen mint under controlled environmental conditions. The experiment was conducted using a completely randomized design (CRD) with six LED spectral treatments: red (R); blue (B); red and blue (RB); red and far-red (R-Fr); blue and far-red (B-Fr); and combination of red, blue and far-red (RB-Fr). All treatments were maintained at a light intensity of 200–215 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ under a 12 h photoperiod for six weeks. The results revealed that light spectra significantly affected both plant growth and phytochemical accumulation. The R-Fr treatment significantly enhanced plant height, internode length, fresh and dry biomass, whereas B-Fr spectrum maximized photosynthetic efficiency. Regarding bioactive compounds, monochromatic red light (R) promoted the highest total sugar and flavonoid contents, while the combined RB-Fr treatment significantly increased total phenolics, vitamin C, and antioxidant capacity. These findings suggest that the supplementation of far-red light effectively enhances growth performance, yield, and bioactive compound accumulation of kitchen mint under plant factory with artificial lighting (PFAL) systems.

Keywords: Kitchen mint (*Mentha cordifolia*), light spectrum, far-red light, growth, bioactive compounds

1. บทนำ

สะระแหน่ (*Mentha cordifolia* Opiz ex Fresen) เป็นพืชสมุนไพรและเครื่องเทศที่สำคัญในวงศ์ Lamiaceae มีถิ่นกำเนิดในแถบยุโรปตอนใต้และทะเลเมดิเตอร์เรเนียน แต่ปัจจุบันได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้โดยเฉพาะในประเทศไทย ซึ่งนิยมใช้เป็นส่วนประกอบหลักในอาหารเพื่อเพิ่มกลิ่นรส [1] ใบสะระแหน่อุดมไปด้วยน้ำมันหอมระเหยและสารประกอบฟีนอลิกหลายชนิด เช่น เมนทอล (menthol) เมนโทน (menthone) และฟลาโวนอยด์ ซึ่งมีฤทธิ์ทางชีวภาพที่สำคัญ ได้แก่ การต้านอนุมูลอิสระ ต้านจุลชีพ และช่วยผ่อนคลาย ทำให้มีความต้องการสูงในอุตสาหกรรมอาหาร เครื่องดื่ม อุตสาหกรรมยา เวชสำอาง และผลิตภัณฑ์อาหารเสริม [2-4] อย่างไรก็ตาม การผลิตสะระแหน่ในระบบเกษตรดั้งเดิมประสบปัญหาสำคัญด้านความแปรปรวนของสภาพแวดล้อม ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพและปริมาณของสารสำคัญ นอกจากนี้ สะระแหน่ยังเป็นพืชที่อ่อนแอต่อโรคและศัตรูพืช เช่น โรคใบสนิม โรครากเน่าโคนเน่า รวมถึงเพลี้ยและหนอนชอนใบ ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการผลิตในเชิงพาณิชย์และการส่งออก [5-6] ด้วยเหตุนี้ เทคโนโลยีโรงงานผลิตพืชด้วยแสงเทียม (Plant Factory with Artificial Lighting: PFAL) จึงเข้ามามีบทบาทสำคัญในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว เนื่องจากสามารถควบคุมปัจจัยสภาพแวดล้อม ทั้งอุณหภูมิ ความชื้น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และคุณภาพแสงได้อย่างแม่นยำ ทำให้ได้ผลผลิตที่มีความสม่ำเสมอและปราศจากศัตรูพืช [7-8]

ปัจจัยที่สำคัญที่สุดประการหนึ่งในการปลูกพืชระบบปิด คือ การจัดการคุณภาพแสง โดยการใช้หลอดไดโอดเปล่งแสง (LED) ซึ่งสามารถเลือกความยาวคลื่นที่จำเพาะต่อการเจริญเติบโตของพืชได้ โดยเฉพาะแสงสีแดง (600-700 nm) ที่มีบทบาทหลักในการกระตุ้นการสังเคราะห์ด้วยแสงและการเพิ่มมวลชีวภาพ และแสงสีน้ำเงิน (400-500 nm) ที่ส่งเสริมการพัฒนาของโครงสร้างใบและการสร้างคลอโรฟิลล์ [9-11] นอกจากนี้ การประยุกต์ใช้แสงแดงไกล (700-800 nm) ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง ตลอดจนสามารถเหนี่ยวนำให้พืชมีการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยา ส่งผลให้ผลผลิตเพิ่มขึ้น [12] แม้ว่าจะมีรายงานการศึกษาผลของแสง LED ต่อพืชหลายชนิด แต่การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมแสง LED ที่มีความจำเพาะต่อการเจริญเติบโตและการสะสมสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในสะระแหน่ยังมีอยู่อย่างจำกัด ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลของสเปกตรัมแสงแอลอีดีที่แตกต่างกันต่อการเจริญเติบโต และการสะสมสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของสะระแหน่ภายใต้ระบบควบคุมสภาพแวดล้อม เพื่อเป็นแนวทางในการเพิ่มคุณภาพผลผลิตของสะระแหน่สำหรับต่อยอดสู่ระดับอุตสาหกรรมอย่างยั่งยืนต่อไป

2. วิธีการศึกษา

2.1 การเตรียมตัวอย่างพืช

นำกิ่งสะระแหน่กิ่งแก่กิ่งอ่อนที่มีสีเขียว ยาว 2 เซนติเมตร ปักขาลงในฟองน้ำที่มีความชื้นอิ่มตัว ภายในภาชนะที่มีย้ำน้ำสะอาดผสมสารเร่งรากในอัตราส่วน 15 มิลลิลิตรต่อน้ำ 1 ลิตร เป็นเวลา 7 วัน จนกระทั่งเกิดรากใหม่ จากนั้นย้ายปลูกลงวางปลูกในระบบไฮโดรโปนิคส์แบบ Nutrient Film Technique (NFT) ซึ่งมีค่า EC = 2.0–2.4 mS/cm และ pH อยู่ในช่วง 5.5-6.0 และภายใต้ระบบ PFAL ที่ให้สเปกตรัมแสงสีต่างกัน โดยวางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) จำนวน 10 กิ่งต่อหน่วยทดลอง ได้แก่ แสงสีแดง (R) แสงสีน้ำเงิน (B) แสงสีแดงร่วมกับแสงสีน้ำเงิน (RB) ในอัตราส่วน 1:1 แสงสีแดงร่วมกับแสงสีแดงไกล (R-Fr) ในอัตราส่วน 3:1 แสงสีน้ำเงินร่วมกับแสงสีแดงไกล (B-Fr) ในอัตราส่วน 3:1 และแสงสีแดงร่วมกับแสงสีน้ำเงินและแสงแดงไกล (RB-Fr) ในอัตราส่วน 3:3:2 (Figure 1) ซึ่งความเข้มแสง PPFD ที่พืชได้รับอยู่ในช่วง 200–215 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ โดยวัดด้วยเครื่องวัดสเปกตรัมและปริมาณของแสง รุ่น PG200N ของบริษัท UPRtek (UPRtek PG200N Handheld Spectral PAR Meter) ให้แสงจำนวน 12 ชั่วโมงต่อวัน [13] เป็นเวลา 6 สัปดาห์ และควบคุมอุณหภูมิอากาศในห้องที่ 25 องศาเซลเซียส

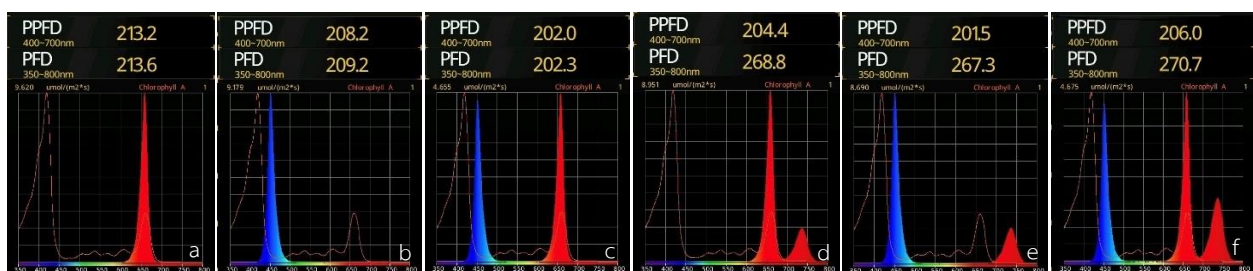


Figure 1 Light spectra of LED treatments used in the experiment: (a) red, (b) blue, (c) red and blue, (d) red and far-red, (e) blue and far-red, and (f) combination of red, blue and far-red LED.

2.2 ประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง (Fv/Fm)

เมื่อสระแชนมีอายุครบ 6 สัปดาห์หลังปลูก เก็บข้อมูลประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืชด้วยเครื่องวัดประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืชแบบพกพา (Photosynthesis sensor) ยี่ห้อ Sendot ภายใต้สภาพแสงของแต่ละชุดการทดลอง จำนวน 3 ใบต่อต้น ใบละ 3 ตำแหน่ง คือ บริเวณด้านซ้าย กึ่งกลาง และด้านขวาของแผ่นใบ หลีกเลียงบริเวณเส้นกลางใบ (midrib) โดยวัดค่าการเรืองแสงพื้นฐาน Minimal fluorescence (F_0) และค่าการเรืองแสงสูงสุด Maximum fluorescence (F_m) จากนั้นคำนวณหาประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงสูงสุดของระบบ Photosystem II (F_v/F_m) ค่าการเรืองแสงที่แปรผัน Variable fluorescence (F_v) คำนวณได้จากผลต่างระหว่าง F_m และ F_0 และสามารถคำนวณค่า (F_v/F_m) ได้จากสมการ ดังนี้

$$\text{ประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง (F}_v\text{/F}_m\text{)} = (F_m - F_0) / F_m$$

โดยที่ F_0 = ค่าการเรืองแสงขั้นต่ำของใบในสภาวะมืด

F_m = ค่าการเรืองแสงสูงสุดของใบหลังได้รับแสงกระตุ้น

F_v = ค่าการเรืองแสงที่แปรผัน ($F_m - F_0$)

2.3 การประเมินการเจริญเติบโต

นำต้นสระแชนมาวิเคราะห์การเจริญเติบโต โดยบันทึกข้อมูลด้านความสูงของลำต้น ความกว้างทรงพุ่ม น้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง เส้นผ่านศูนย์กลางของลำต้น ความยาวปล้อง (วัดข้อที่ 6 นับจากยอดลงมา) และความกว้างใบ โดยวัดใบที่ 6 นับจากยอดลงมา และวัดจำนวน 3 ใบ/ต้น

2.4 การประเมินปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ

วิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์ โดยชั่งตัวอย่างใบสระแชนสด 0.5 กรัม เติมห่วงทำละลายอะซิโตน-เฮกเซน อัตราส่วน 4:6 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ตั้งไว้ในที่มืด 12 ชั่วโมง จากนั้นนำสารสกัดไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 663 และ 645 นาโนเมตร [14] แล้วคำนวณปริมาณ Chlorophyll a และ Chlorophyll b ตามสมการ

$$\text{Chlorophyll a (mg/100ml)} = 0.999A_{663} - 0.0989A_{645}$$

$$\text{Chlorophyll b (mg/100ml)} = -0.328A_{663} + 1.77A_{645}$$

จากนั้นเตรียมตัวอย่างใบสระแชน จำนวน 1 กรัม บดให้ละเอียด สกัดด้วยตัวทำละลาย 60% Ethanol ปริมาตร 15 มิลลิลิตร นำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 8,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที แล้วกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1 นำสารสกัดที่ได้บรรจุในขวดแก้วที่บดแสงและเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส โดยสารสกัดที่ได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ จำนวน 5 ซ้ำต่อชุดการทดลอง ได้แก่ (1) ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวม (Total phenolic content: TPC) ด้วยวิธี Folin-Ciocalteu colorimetric method ที่ความยาวคลื่น 765 นาโนเมตร [15] (2) ปริมาณฟลาโวนอยด์รวม (Total flavonoid content: TFC) ด้วยวิธี Aluminum chloride ($AlCl_3$) colorimetric method ที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร [16] (3) ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (Total sugar) ด้วยวิธี Phenol-Sulfuric acid method ที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร [17] (4) การวิเคราะห์ปริมาณวิตามินซี (Vitamin C) ที่ความยาวคลื่น 491 นาโนเมตร [18] (5) ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant Power) ด้วยวิธี FRAP (Ferric Reducing Antioxidant Power) assay ที่ความยาวคลื่น 593 นาโนเมตร [19] และวิธี DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) assay ที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร [20]

2.5 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

นำข้อมูลทั้งหมดมาวิเคราะห์ความแปรปรวน ด้วยวิธี Analysis of Variance (ANOVA) แล้วเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Least Significant Difference (LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยโปรแกรมสำเร็จรูป Statistix 8.0

3. ผลการศึกษา

3.1 ประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง

การศึกษาประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงของสระแหน่ในระบบควบคุมสภาพแวดล้อมโดยใช้แหล่งกำเนิดแสงจากหลอด LED พบว่าสเปกตรัมแสงส่งผลต่อความสามารถในการสังเคราะห์ด้วยแสงของของสระแหน่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Figure 2) โดยสเปกตรัมแสง B-Fr มีค่าประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงสูงสุดที่ 0.617 ส่วนสระแหน่ที่ได้รับสเปกตรัมแสง RB มีค่าประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงต่ำสุดที่ 0.303 นอกจากนี้ จากผลการทดลองสังเกตได้ว่า ประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงของสระแหน่ที่ได้รับการเสริมช่วงแสงแดงไกล (Fr) มีแนวโน้มสูงกว่าการได้รับแสงเดี่ยวหรือผสมที่ไม่มีแสงแดงไกล

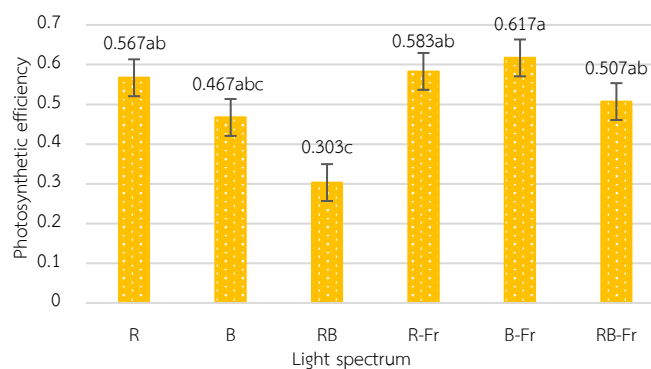


Figure 2 Photosynthetic efficiency of kitchen mint under different LED light spectra: a, b, c-letters indicate significant differences ($p < 0.05$, LSD test, $n=3$).

3.2 การเจริญเติบโตของสระแหน่

จากการศึกษาผลของสเปกตรัมแสงต่อการเจริญเติบโตของต้นสระแหน่ พบว่า สเปกตรัมของแสงส่งผลต่อความสูงของต้นสระแหน่อย่างมีนัยสำคัญ (Figure 3A) โดยสเปกตรัมแสง R-Fr กระตุ้นให้สระแหน่มีความสูงเฉลี่ยมากที่สุด (53.21 เซนติเมตร) ซึ่งแตกต่างจากชุดการทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนสระแหน่ที่มีความสูงรองลงมา ได้แก่ สระแหน่ที่ปลูกภายใต้แสง RB-Fr, B-Fr, และ R ซึ่งมีค่าความสูงเฉลี่ยเท่ากับ 42.50, 41.52 และ 40.16 เซนติเมตร ตามลำดับ ขณะที่สระแหน่ที่ได้รับสเปกตรัมแสง RB มีค่าความสูงเฉลี่ยต่ำสุด (24.82 เซนติเมตร) ซึ่งสอดคล้องกับผลของความยาวปล้องของสระแหน่ โดยสระแหน่ที่ปลูกภายใต้สเปกตรัมแสง R-Fr มีความยาวปล้องเฉลี่ยสูงที่สุด (80.33 มิลลิเมตร) รองลงมาคือ สระแหน่ที่ปลูกภายใต้สเปกตรัมแสง B-Fr, RB-Fr และ R ซึ่งมีความยาวปล้องเฉลี่ยเท่ากับ 67.71, 56.89 และ 53.29 มิลลิเมตร ตามลำดับ ส่วนสระแหน่ที่ได้รับสเปกตรัมแสง RB มีค่าความยาวปล้องเฉลี่ยต่ำสุด (31.52 มิลลิเมตร) ดัง Figure 3D เป็นที่น่าสังเกตว่าการเพิ่มสเปกตรัมแสง Fr มีแนวโน้มที่จะส่งเสริมการยืดตัวของลำต้นและปล้องเมื่อเทียบกับชุดการทดลองที่ใช้สเปกตรัมแสงเดี่ยวหรือผสม อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาความกว้างทรงพุ่มและเส้นผ่านศูนย์กลางของลำต้น พบว่า สเปกตรัมแสงที่ให้แก่สระแหน่ไม่ส่งผลต่อความกว้างทรงพุ่มและเส้นผ่านศูนย์กลางของลำต้น แต่พบแนวโน้มว่าการเสริมสเปกตรัมแสง Fr ส่งเสริมความกว้างทรงพุ่มและเส้นผ่านศูนย์กลางของลำต้นได้ดี (Figure 3B, 3C) นอกจากนี้ จากผลการทดลอง พบว่า สเปกตรัมแสงมีผลต่อขนาดใบของสระแหน่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Figure 3D) โดยการให้สเปกตรัมแสง B ส่งเสริมให้มีขนาดใบมากที่สุด (37.05 มิลลิเมตร) ขณะที่สระแหน่ที่ได้รับสเปกตรัมแสง R-Fr มีขนาดใบน้อยที่สุด (30.63 มิลลิเมตร) แต่การเสริมด้วยสเปกตรัมแสง Fr ไม่ได้ส่งผลให้ขนาดใบแตกต่างจากการที่ไม่ได้รับแสง Fr ใดๆก็ตาม เป็นที่น่าสังเกตว่าการได้รับสเปกตรัมแสง B มีแนวโน้มที่จะส่งเสริมขนาดใบมากกว่าชุดการทดลองที่ไม่ได้รับสเปกตรัมแสง B

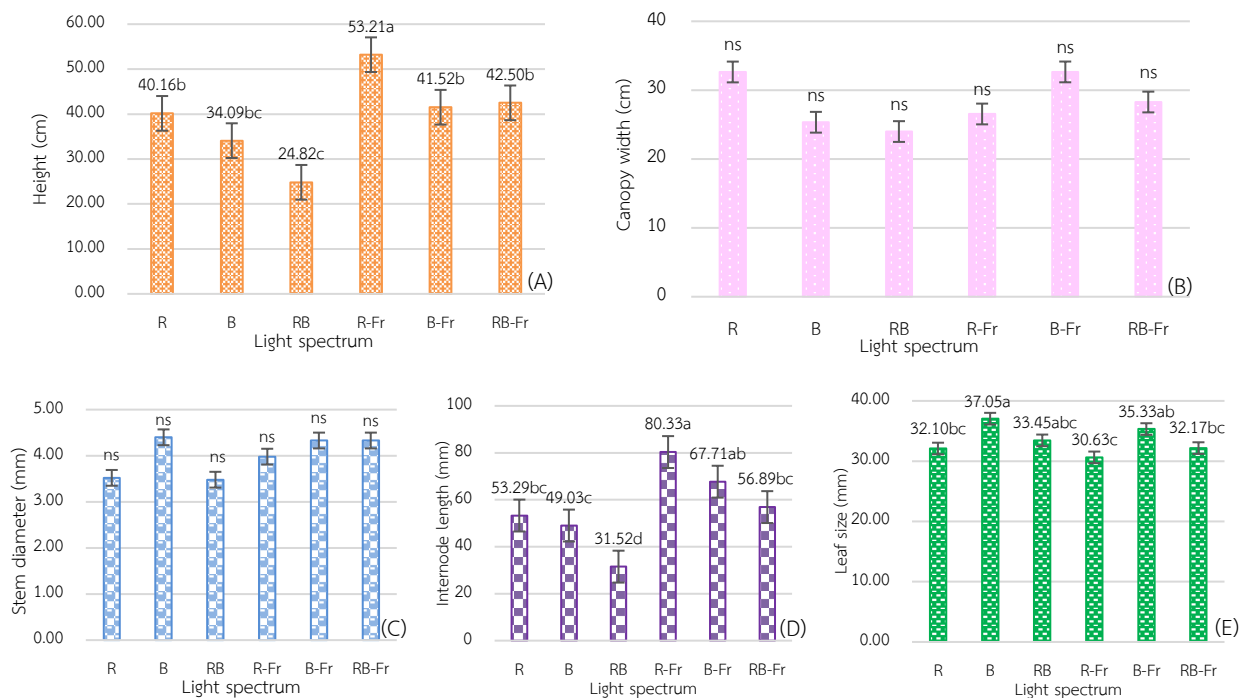


Figure 3 Impact of LED light on kitchen mint growth: (A) plant height, (B) canopy width, (C) stem diameter, (D) internode length, and (E) leaf size. ns = non-significant; a, b, c- letters indicate significant differences ($p < 0.05$, LSD test, $n = 10$).

น้ำหนักต้นเฉลี่ยของสระแหน่ที่ปลูกภายใต้สเปกตรัมแสงที่ต่างกัน พบว่า สเปกตรัมแสงมีผลต่อน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของสระแหน่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Figure 4) โดยสระแหน่ที่ปลูกภายใต้สเปกตรัมแสง R-Fr มีน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งเฉลี่ยมากที่สุด เท่ากับ 111.30 และ 10.63 กรัมต่อต้น ตามลำดับ ในขณะที่สเปกตรัมแสง RB ส่งผลให้น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งเฉลี่ยของสระแหน่น้อยที่สุด คือ 48.16 และ 4.12 กรัมต่อต้น ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม พบว่า สระแหน่ที่ได้รับการเสริมสเปกตรัมแสง Fr มีแนวโน้มที่จะกระตุ้นน้ำหนักต้นของสระแหน่มากกว่าชุดการทดลองที่ไม่ได้รับสเปกตรัมแสง Fr

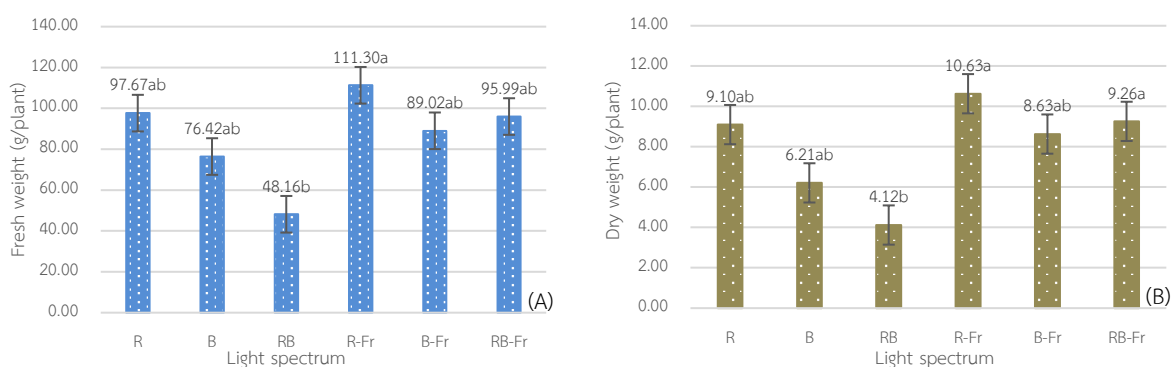


Figure 4 Weight of kitchen mint grown under different LED light spectra: (A) fresh weight and (B) dry weight. a, b, c- letters indicate significant differences ($p < 0.05$, LSD test, $n = 10$).

3.3 ปริมาณน้ำตาลและวิตามินซี

ผลการทดลองดังแสดงใน Table 1 พบว่า สเปกตรัมแสง R ส่งผลให้มีการสะสมน้ำตาลทั้งหมดในสระแหน่มากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ (5.62 mg glucose/g FW) ในขณะที่ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดของสระแหน่ที่ปลูกภายใต้การเสริมสเปกตรัมแสง Fr ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ อย่างไรก็ตาม การเสริมสเปกตรัมแสง Fr มีผลต่อการสร้างวิตามินซี โดยการให้

สเปกตรัมแสง RB-Fr กระตุ้นให้สาระแน่มมีการสร้างวิตามินซีสูงที่สุด (2.62 mg AA/g FW) รองลงมาคือ สเปกตรัมแสง B-Fr (2.15 mg AA/g FW) ในขณะที่สาระแน่มที่ปลูกภายใต้สเปกตรัมแสง R และ B เดี่ยว ๆ มีปริมาณวิตามินซีต่ำที่สุด

Table 1 total sugar and vitamin C of kitchen mint grown under different LED light spectra.

Treatment	Total sugar (mg glucose/g FW)	Vitamin C (mg AA/g FW)
Red	5.62±0.35 ^a	1.02±0.05 ^c
Blue	4.07±0.24 ^b	1.18±0.24 ^c
Red + Blue	3.88±0.36 ^b	1.24±0.45 ^c
Red + Far-red	3.87±0.22 ^b	1.44±0.23 ^c
Blue + Far-red	4.20±0.26 ^b	2.15±0.16 ^b
Red + Blue + Far-red	4.17±0.22 ^b	2.62±0.29 ^a
Mean	4.30	1.64
p-value	<0.01	<0.01
C.V. (%)	7.79	15.18

Note: Data was expressed as mean ± SD; and shown as an average value of the five replications. Different letters indicated statistically significant differences based on LSD at $p \leq 0.05$.

3.4 ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ

เมื่อพิจารณาปริมาณคลอโรฟิลล์ พบว่า สเปกตรัมแสงไม่มีผลต่อปริมาณคลอโรฟิลล์เอ แต่มีผลต่อปริมาณคลอโรฟิลล์บี อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Table 2) โดยสเปกตรัมแสง R ส่งเสริมการสะสมคลอโรฟิลล์บีมากที่สุด (3.02 mg/100 ml) และ สเปกตรัมแสง B มีปริมาณคลอโรฟิลล์บีน้อยที่สุด (2.69 mg/100 ml)

Table 2 Pigment contents in kitchen mint grown under different LED light spectra.

Treatment	Chlorophyll a (mg /100ml)	Chlorophyll b (mg/100 ml)
Red	1.89±0.01	3.02±0.16 ^a
Blue	1.91±0.01	2.69±0.14 ^c
Red + Blue	1.89±0.02	2.99±0.26 ^{ab}
Red + Far-red	1.90±0.01	2.82±0.03 ^{bc}
Blue + Far-red	1.90±0.01	2.96±0.09 ^{ab}
Red + Blue + Far-red	1.91±0.02	2.91±0.27 ^{ab}
Mean	1.90	2.90
p-value	ns	<0.01
C.V. (%)	0.76	4.41

Note: Data was expressed as mean ± SD; and shown as an average value of the five replications. Different letters indicated statistically significant differences based on LSD at $p \leq 0.05$.

การให้แสงที่มีสเปกตรัมแสงต่างกันมีผลต่อปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของสาระแน้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Table 3) โดยพบว่า สเปกตรัมแสง R และ RB-Fr ส่งเสริมการสร้างสารประกอบฟีนอลิกรวมในสาระแน่มากที่สุด คือ 75.80 และ 75.75 mg GAE/g FW ตามลำดับ ในขณะที่สเปกตรัมแสง R-Fr ให้ค่าสารประกอบฟีนอลิกรวมน้อยที่สุด (56.70 mg GAE/g FW) สำหรับปริมาณฟลาโวนอยด์รวม พบว่าสเปกตรัมแสง R กระตุ้นการสร้างฟลาโวนอยด์รวมมากที่สุด (2.30 mg QE/g FW) รองลงมาคือสเปกตรัมแสง B-Fr, RB-Fr, RB, B และ R-Fr โดยมีฟลาโวนอยด์รวมเท่ากับ 2.04, 1.99, 1.94, 1.53 และ 1.41 mg QE/g FW ตามลำดับ

นอกจากนี้ พบว่า สเปกตรัมแสงจาก LED มีผลต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสาระแน้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติทั้งในวิธี FRAP และ DPPH (Table 3) โดยเมื่อมีการให้สเปกตรัมแสงแบบผสม RB-Fr ส่งผลต่อค่าความสามารถในการให้อิเล็กตรอนของสารต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี FRAP สูงสุด (13.02 mg TE/g FW) ซึ่งแตกต่างจากสเปกตรัมแสงอื่นอย่างมีนัยสำคัญ รองลงมาคือ B-Fr (12.33 mg TE/g FW) และ RB (11.99 mg TE/g FW) ตามลำดับ ขณะที่การให้สเปกตรัมแสงเดี่ยว (R, B) และ R-Fr ให้ค่าต่ำกว่า ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การผสมผสานช่วงคลื่นแสง โดยเฉพาะการมีสเปกตรัมแสง Fr ร่วมด้วย ช่วยเพิ่มศักยภาพในการรีดิวซ์ของสารต้านอนุมูลอิสระในพืชได้ดีกว่าแสงเดี่ยว

ในทำนองเดียวกัน ค่าความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH แสดงแนวโน้มที่สอดคล้องกัน โดยแสง RB-Fr ให้ค่าสูงสุด (25.06 mg TE/g FW) รองลงมาคือ B-Fr (23.08 mg TE/g FW) ซึ่งมีค่าสูงกว่าสเปกตรัมแสงอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ขณะที่สเปกตรัมแสง B ให้ค่าต่ำที่สุด (12.11 mg TE/g FW) แสดงให้เห็นว่าสเปกตรัมแสงสีน้ำเงินเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอในการกระตุ้นการสร้างสารต้านอนุมูลอิสระในระดับสูง แต่เมื่อทำงานร่วมกับสเปกตรัมแสงแดงไกลจะเกิดผลเสริม (synergistic effect) อย่างเด่นชัด

Table 3 Total phenolic content (TPC), total flavonoid content (TFC), Antioxidant activity (FRAP and DPPH assays) in kitchen mint grown under different LED light spectra

Treatment	TPC (mg GAE/g FW)	TFC (mg QE/g FW)	FRAP reducing power (mg TE/g FW)	DPPH radical scavenging activity (mg TE/g FW)
Red	75.80±4.69 ^a	2.30±0.26 ^a	10.97±0.13 ^c	17.39±2.41 ^c
Blue	64.65±5.58 ^b	1.53±0.10 ^c	10.10±0.14 ^c	12.11±0.44 ^f
Red + Blue	62.38±2.08 ^{bc}	1.94±0.10 ^b	11.99±0.16 ^b	16.20±0.26 ^d
Red + Far-red	56.70±4.86 ^c	1.41±0.10 ^c	10.24±0.17 ^c	13.46±0.46 ^e
Blue + Far-red	65.88±2.89 ^b	2.04±0.24 ^b	12.33±0.24 ^{ab}	23.08±0.77 ^b
Red + Blue + Far-red	75.75±5.33 ^a	1.99±0.07 ^b	13.02±0.31 ^a	25.06±0.53 ^a
Mean	66.82	1.87	11.44	17.93
p-value	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
C.V. (%)	7.36	8.77	6.38	3.70

Note: Data was expressed as mean ± SD; and shown as an average value of the five replications. Different letters indicated statistically significant differences based on LSD at $p \leq 0.05$.

4. วิจัยรณผล

4.1 ประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง

จากการวิเคราะห์ผลการทดลอง พบว่า สเปกตรัมแสง B-Fr กระตุ้นให้สาระแน่มมีประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงสูงที่สุด (0.617) ขณะที่สเปกตรัมแสง RB ให้ค่าต่ำที่สุด (0.313) โดยสาระแน่มที่ปลูกภายใต้สเปกตรัมแสง R ให้ค่าประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงไม่แตกต่างจากสาระแน่มที่ปลูกภายใต้สเปกตรัมแสง R-Fr และ RB-Fr แสดงว่าสัดส่วนของสเปกตรัมแสง

มีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง ทั้งนี้ค่าประสิทธิภาพของการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืชปกติมีค่า 0.79-0.85 ซึ่งหากต่ำกว่า 0.76 แสดงว่าพืชเกิดความเครียด โดยค่าที่ได้นี้บ่งชี้ว่าสระแทนกำลังได้รับความเครียดจากสเปกตรัมแสง จึงทำให้มีค่าประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงน้อยกว่าค่าปกติ อย่างไรก็ตาม มีรายงานว่า สเปกตรัมแสง B ซึ่งอยู่ในช่วงความยาวคลื่นแสง 400-500 nm มีประสิทธิภาพในการกระตุ้นการสังเคราะห์ด้วยแสงและควบคุมการปิดเปิดของปากใบ แต่การที่ได้รับสเปกตรัมแสง B อย่างเดียวส่งผลต่อการลดอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงในพืชบางชนิด เช่น ผักสลัด ผักเกี๊ยวหิมะ เป็นต้น [21-22] ในขณะที่สเปกตรัมแสง R ซึ่งอยู่ในช่วงความยาวคลื่นแสง 600-700 nm มีประสิทธิภาพสูงในการกระตุ้นการสังเคราะห์ด้วยแสง เนื่องจากคลอโรฟิลล์ดูดซับแสงสีแดงได้ดี ทำให้ได้อัตราการสังเคราะห์แสงสูงสุดเมื่อเทียบกับสเปกตรัมแสงสีเดียวอื่นๆ แสงสีแดงกระตุ้นการทำงานของ photosystem II (PSII) ส่งเสริมการสร้างชีวมวลและการพัฒนาของคลอโรพลาสต์ [23] ส่วนการเสริมสเปกตรัมแสง Fr ร่วมกับสเปกตรัมแสงอื่นมีแนวโน้มช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง เนื่องจากสเปกตรัมแสง Fr กระตุ้นการทำงานของ photosystem I (PSI) ปรับสมดุลแสงสีแดงที่ขับเคลื่อนโดย PSII และเร่งการขนส่งอิเล็กตรอน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเพิ่มเข้าไปในสเปกตรัมสีแดง-น้ำเงิน [12, 24-25] ซึ่งผลการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่า การใช้แสงหลายช่วงคลื่นร่วมกันเป็นสเปกตรัมที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงของสระแทนภายใต้ระบบควบคุมสภาพแวดล้อม

4.2 การเจริญเติบโตของสระแทน

สเปกตรัมแสงมีผลต่อการเจริญเติบโตของสระแทน โดยเฉพาะความสูงต้น ความยาวปล้อง ขนาดใบ และน้ำหนักชีวมวล ซึ่งจากผลการวิเคราะห์การเจริญเติบโตของต้นสระแทน พบว่า สเปกตรัมแสง Fr ส่งเสริมให้ต้นสระแทนมีอัตราการเจริญเติบโตสูงขึ้นเมื่อเทียบกับต้นที่ไม่ได้รับสเปกตรัมแสง Fr เนื่องจาก สเปกตรัมแสงช่วง Fr มีบทบาทสำคัญในการปรับเปลี่ยนสัณฐานวิทยาของพืช โดยส่งผลต่อการเพิ่มความสูงของต้น การเปลี่ยนแปลงมุมใบ และการขยายพื้นที่ใบ ซึ่งลักษณะดังกล่าวช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการรับแสงและส่งเสริมการสะสมชีวมวล [25-26] นอกจากนี้ แสงแดงไกลยังกระตุ้นการตอบสนองแบบหลีกเลี่ยงร่มเงา ซึ่งเกี่ยวข้องกับการยืดตัวของลำต้นและการขยายขนาดใบ [26-27] การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวมีส่วนช่วยให้พืชสามารถดักจับแสงได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น และนำไปสู่การเพิ่มผลผลิตชีวมวลได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในระบบการปลูกพืชในโรงงานผลิตพืชด้วยแสงเทียม (PFAL)

4.3 ปริมาณน้ำตาลและวิตามินซี

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดของสระแทนที่ปลูกภายใต้สเปกตรัมแสงที่ต่างกัน พบว่า สเปกตรัมแสง R ส่งเสริมการสะสมน้ำตาลทั้งหมดในสระแทนได้มากที่สุด เนื่องมาจากสเปกตรัมแสง R เป็นช่วงความยาวคลื่นแสงที่คลอโรฟิลล์ดูดกลืนได้สูงสุด จึงมีบทบาทสำคัญต่ออัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงและการสร้างคาร์โบไฮเดรต ส่งผลให้มีการสะสมของน้ำตาลเพิ่มขึ้น [28] ในส่วนของวิตามินซี พบว่าการใช้สเปกตรัมแสงผสมโดยเฉพาะ RB-Fr และ B-Fr ส่งผลให้มีการสะสมวิตามินซีในสระแทนสูงกว่าการใช้สเปกตรัมแสงเดี่ยว ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Bi et al. [29] ที่พบว่า การใช้สเปกตรัมแสง Fr ร่วมกับแสง R สามารถเพิ่มปริมาณวิตามินซีในผักกาดหอม พร้อมทั้งเพิ่มปริมาณน้ำตาลที่ละลายน้ำได้

4.4 ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า สเปกตรัมแสง LED ไม่มีผลต่อปริมาณ chlorophyll a อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งอาจบ่งชี้ว่า chlorophyll a เป็นรงควัตถุหลักที่ไม่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพแสงภายใต้สภาวะการทดลองนี้ ในทางตรงกันข้าม ปริมาณ chlorophyll b ได้รับอิทธิพลจากสเปกตรัมแสงอย่างมีนัยสำคัญ โดยการให้สเปกตรัมแสง R เพียงอย่างเดียวให้ค่าสูงที่สุด ขณะที่สเปกตรัมแสง B ให้ค่าต่ำที่สุด อย่างไรก็ตาม จากการวิเคราะห์ข้อมูล พบว่า สเปกตรัมแสง Fr ไม่ได้ส่งผลต่อปริมาณคลอโรฟิลล์ เนื่องจากสเปกตรัมแสงสีแดงไกลทำหน้าที่เป็นกลไกส่งสัญญาณเป็นหลัก โดยกระตุ้นการตอบสนองแบบหลีกเลี่ยงร่มเงามากกว่าที่จะเป็นตัวกระตุ้นการผลิตคลอโรฟิลล์โดยตรง จึงส่งผลให้ใบที่ได้รับสเปกตรัมแสง Fr มีปริมาณคลอโรฟิลล์ต่ำ [23]

นอกจากนี้ สเปกตรัมแสง LED มีผลต่อปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของสระแทนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยสระแทนที่ได้รับสเปกตรัมแสง R มีอิทธิพลต่อการสะสมสารประกอบฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระมากกว่าสเปกตรัมแสง B เนื่องจาก แสงสีแดงทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นการสังเคราะห์สารในกลุ่มฟีนอลโพรพานอยด์ (phenylpropanoid) ซึ่งช่วยเพิ่มการสังเคราะห์กรดฟีนอลิกในพืช [31] และสอดคล้องกับงานทดลองของ Lee et al. [32] ที่รายงานว่า สเปกตรัมแสงสีแดงกระตุ้นให้เกิดการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารประกอบฟีนอลิก และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระในโหระพามากกว่าสเปกตรัมแสงสีน้ำเงิน อย่างไรก็ตาม พบว่า การเสริมสเปกตรัมแสง Fr ร่วมกับสเปกตรัมแสง B และ RB

ทำให้สระแหน่มีการสะสมสารประกอบฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yu et al. [33] ที่รายงานว่า สเปกตรัมแสง Fr ส่งเสริมการสังเคราะห์สารประกอบฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ในมินต์ (*Mentha haplocalyx* Briq.)

5. สรุป

ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า สเปกตรัมแสงจากหลอด LED มีบทบาทสำคัญต่อการเจริญเติบโตและการสะสมสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของสระแหน่ภายใต้ระบบควบคุมสภาพแวดล้อม โดยการให้สเปกตรัมแสง B-Fr ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง ส่วนการเสริมสเปกตรัมแสงแดงไกล (far-red) ร่วมกับแสงสีแดงช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตด้านความสูง ความยาวปล้อง และชีวมวลของพืชได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ ในด้านสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ พบว่า สเปกตรัมแสงสีแดงเดี่ยวเหมาะสมต่อการกระตุ้นการสะสมฟลาโวนอยด์ ในขณะที่การใช้สเปกตรัมแสง RB-Fr สามารถเพิ่มปริมาณสารประกอบฟีนอลิก วิตามินซี และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระได้สูงสุด ดังนั้น การจัดการสเปกตรัมแสงโดยเฉพาะการเสริมแสงแดงไกล เป็นแนวทางที่มีศักยภาพในการเพิ่มทั้งผลผลิตและคุณภาพของสระแหน่ในระบบโรงงานผลิตพืช (PFAL) เพื่อยกระดับการผลิตเชิงพาณิชย์และความสม่ำเสมอของคุณภาพผลผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสถาบันสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์สำหรับการสนับสนุนทุนวิจัย และวิทยาลัยบูรณาการศาสตร์ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่และเครื่องมือในการทำวิจัยครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] ัญญลักษณ์ แดงเสมอ. 2567. การพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตสระแหน่สำหรับอุตสาหกรรมอาหารภายใต้สภาพแวดล้อมควบคุม. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, กรุงเทพมหานคร.
- [2] Kokkini, S. and Vokou, D. 1989. *Mentha spicata* (Lamiaceae) chemotypes growing wild in Greece. Econ. Bot. 43: 192–202.
- [3] Pytlakowska, K., Kita, A., Janoska, P., Połowniak, M., Kozik, V., 2012. Multi-element analysis of mineral and trace elements in medicinal herbs and their infusions. Food Chem. 135: 494-501.
- [4] de Sousa Barros, A., de Moraes, S. M., Ferreira, P. A. T., Vieira, I. G. P., Craveiro, A. A., Fontenelle dos Santos, R. O., de Menezes, J. E. S. A., da Silva, F. W. F. and de Sousa, H. A. 2015. Chemical composition and functional properties of essential oils from *Mentha* species. Ind. Crop. Prod. 76: 557-564.
- [5] Canter, P., Thomas, H. and Ernst, E. 2005. Bringing medicinal plants into cultivation: opportunities and challenges for biotechnology. Trends Biotechnol. 23: 180-185.
- [6] Kala, C. P. 2006. Problems and prospects in the conservation and development of the Himalayan medicinal plants sector. Sustain. Dev. 9: 370-389.
- [7] Kozai, T. 2013. Plant factory in Japan – Current situation and perspectives. Chronica Hortic. 53: 8-11.
- [8] สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.). 2564. 3 ทศวรรษ สวทช. ก้าวการขับเคลื่อนประเทศด้วยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี: เกษตรและอาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, ปทุมธานี.
- [9] ธรรมศักดิ์ ทองเกตุ. 2558. โรงงานผลิตพืช (ผัก) Plant factory. วารสารเกษตรกรรม. 1: 32-33.
- [10] Johkan, M., Shoji, K., Goto, F., Hashida, S.N. and Yoshihara, T. 2010. Blue light-emitting diode irradiation improves seedling quality and growth after transplanting in *Lactuca sativa* L. Acta Horticulturae. 907: 179-184.
- [11] Bian, Z., Yang, Q. and Liu, W. 2015. Effects of light quality on the accumulation of bioactive compounds in plants: A review. Plant Growth Regul. 76: 189-206.
- [12] Li, J., Li, Y., Chen, Y., Xu, S., Wu, X., Wu, C., Zhang, N. and Cao, K. 2024. Quantifying the effects of far-red light on lettuce photosynthesis and growth using a 3D modelling approach. Front. Plant Sci. 15: 1492431.

- [13] ธรรมศักดิ์ ทองเกตุ, อารีย์รัตน์ ประทุมสูตร, ศิลาศุภา อินต๊ะแสน, สุภาวิณี สีมูลละ, นงลักษณ์ บดีรัฐ และเฟิร์น อัครวงศ์. 2567. การตอบสนองของต้นอ่อนวงศ์กะหล่ำต่อสเปกตรัมแสงแอลอีดี. วารสารแก่นเกษตร. 52: 936-949.
- [14] Nagata, M. and Yamashita, I. 1992. Simple method for simultaneous determination of chlorophyll and carotenoids in tomato fruit. J. Jpn. Soc. Food Sci. Technol. 39: 925-928.
- [15] Slinkard, K. and Singleton, V.L. 1977. Total phenol analysis: Automation and comparison with manual methods. Am. J. Enol. Vitic. 28: 49-55.
- [16] Zhishen, J., Mengcheng, T. and Jianming, W. 1999. The determination of flavonoid contents in mulberry and their scavenging effects on superoxide radicals. Food Chem. 64: 555-559.
- [17] Dubois, M., Gilles, K.A., Hamilton, J.K., Rebers, P.A. and Smith, F. 1956. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. Anal. Chem. 28: 350-356.
- [18] Desai, A. P. and Desai, S. 2019. UV spectroscopic method for determination of vitamin C (ascorbic acid) content in different fruits in South Gujarat region. Int. J. Environ. Sci. Nat. Res. 21(2): 41-44.
- [19] Benzie, I.F.F. and Strain, J.J. 1996. The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of antioxidant power: The FRAP assay. Anal. Biochem. 239: 70-76.
- [20] Blois, M.S. 1958. Antioxidant determinations by the use of a stable free radical. Nature. 181: 1199-1200.
- [21] Liu, J. and van Iersel, M.W. 2021. Photosynthetic physiology of blue, green, and red light: Light intensity effects and underlying mechanisms. Front. Plant Sci. 12: 619987.
- [22] Zhang, H., Tu, Y., Kang, T., Song, W. and Zheng, L. 2021. Blue light dosage affects photosynthesis, chlorophyll, and antioxidant properties of *Mesembryanthemum crystallinum*. Photosynthetica 59(4): 547-556.
- [23] Thornton, O.R., Tran, C. and Li, W. 2023. Impact of light wavelengths on photosynthetic rates in spinach. Asian J. Res. Bot. 9: 8-13.
- [24] Zhen, S., van Iersel, M. and Bugbee, B. 2021. Why far-red photons should be included in the definition of photosynthetic photons and the measurement of horticultural fixture efficacy. Front. Plant Sci. 12: 693445.
- [25] Tan, T., Li, S., Fan, Y., Wang, Z., Raza, M.A., Shafiq, I., Wang, B., Wu, X., Yong, T., Wang, X., Wu, Y., Yang, F. and Yang, W. 2022. Far-red light: A regulator of plant morphology and photosynthetic capacity. Crop J. 10: 300-309.
- [26] Park, Y. and Runkle, E.S. 2018. Far-red radiation and photosynthetic photon flux density independently regulate seedling growth but interactively regulate flowering. Environ. Exp. Bot. 155: 206-216.
- [27] Meng, Q., Kelly, N. and Runkle, E.S. 2019. Substituting green or far-red radiation for blue radiation induces shade avoidance and promotes growth in lettuce and kale. Environ. Exp. Bot. 162: 383-391.
- [28] ลิลลี่ กาวีตะ มาลี ณ นคร ศรีสม สุวรรณวงศ์ และ สุรียา ตันติวิวัฒน์. 2552. สรีรวิทยาของพืช. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาพฤกษศาสตร์, กรุงเทพมหานคร.
- [29] Bi, X., Xu, H., Yang C., Zhang, H., Li, W., Su, W., Zheng, M. and Lei, B. 2024. Investigating the influence of varied ratios of red and far-red light on lettuce (*Lactuca sativa*): effects on growth, photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence. Front. Plant Sci. 15: 1430241.
- [30] Liu, J. and van Iersel, M.W. 2023. Far-red photons increase light capture but have lower photosynthetic capacity than red photons. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 148(6): 253-265.
- [31] Park, W.T., Yeo, S.K., Sathasivam, R., Park, J.S., Kim, J.K. and Park, S.U. 2020. Influence of light-emitting diodes on phenylpropanoid biosynthetic gene expression and phenylpropanoid accumulation in *Agastache rugosa*. Appl. Biol. Chem. 63: 25.
- [32] Lee, D.Y., Kim, M.J., Choi, I.-L., Kim, Y., Kim, J. and Kang, H.-M. 2025. Effect of LED light quality on the growth and photomorphogenesis of basil in closed-type plant factory. Not. Bot. Horti. Agrobi. 53: 14409.

-
- [33] Yu, L., Bu L., Li D., Zhu K., Zhang, Y., Wu, S., Chang, L., Ding, X. and Jiang, Y. 2024. Effects of Far-Red Light and Ultraviolet Light-A on Growth, Photosynthesis, Transcriptome, and Metabolome of Mint (*Mentha haplocalyx* Briq.). *Plants* 13: 3495.

ผลของการเสริมหนอนนก (*Tenebrio molitor*) และหนอนแมลงวันลาย (*Hermetia illucens*)
 ในอาหารต่อการเจริญเติบโต ประสิทธิภาพการใช้อาหาร และอัตราการรอดตาย
 ของปลาชะโอน (*Ompok bimaculatus*)

Effects of Dietary Inclusion of Mealworm (*Tenebrio molitor*) and Black Soldier Fly Larvae
 (*Hermetia illucens*) on Growth Performance, Feed Utilization, and Survival
 of Sheatfish (*Ompok bimaculatus*)

ณัฐพร สังขรเขต¹ ธนภัทร สอนตะโก² ภูวดล หมิ่นวงศ์² นันทน์ภัส สุวรรณรัตน์^{2,*} และธนากร เหมะสกล²

Nataporn Sangkhonkhet¹, Thanapat Sontako², Phuwadon Meaunwong², Nannaphat Suwannarat^{2,*}
 and Thanakorn Haemasaton²

¹งานบริการห้องปฏิบัติการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร 86160 ประเทศไทย

²ภาควิชาเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร 86160 ประเทศไทย

¹Scientific Laboratory Service Center, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Prince of Chumphon Campus, Chumphon Province, 86160, Thailand

²Department of Agricultural Technology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Prince of Chumphon Campus, Chumphon Province, 86160, Thailand

*Corresponding author: Nannaphat Suwannarat, e-mail address: Nannaphat.su@kmit.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลของการเสริมหนอนนก (*Tenebrio molitor*) และหนอนแมลงวันลาย (*Hermetia illucens*) ในสูตรอาหารต่อการเจริญเติบโต ประสิทธิภาพการใช้อาหาร อัตราการรอดตาย และคุณภาพน้ำของปลาชะโอน (*Ompok bimaculatus*) โดยดำเนินการทดลอง 2 ชุด แยกตามชนิดของแมลง ภายใต้แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design; CRD) ประกอบด้วย 4 ทริตเมนต์ ได้แก่ ระดับการเสริม 0, 5, 10 และ 15% โดยมี 4 ซ้ำ ต่อทริตเมนต์ เป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์ ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางโภชนาการ พบว่า อาหารทดลองทุกสูตรมีปริมาณโปรตีนใกล้เคียงกัน (~30%) ขณะที่ปริมาณไขมันเพิ่มขึ้นตามระดับการเสริมแมลง สำหรับการทดลองหนอนนก ระดับการเสริม 10-15% ส่งผลให้การเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการใช้อาหารดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับสูตรควบคุม ($p < 0.05$) ในขณะที่การทดลองหนอนแมลงวันลาย ระดับ 5% และ 15% ให้ค่าการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการใช้อาหารที่ดีที่สุด อัตราการรอดตายไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญระหว่างทริตเมนต์ (95-100%; $p > 0.05$) และคุณภาพน้ำอยู่ในช่วงที่เหมาะสมตลอดการทดลอง ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าโปรตีนจากหนอนนกและหนอนแมลงวันลายสามารถใช้เป็นแหล่งโปรตีนทางเลือกในอาหารปลาชะโอนได้ อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับชนิดของแมลงและระดับการเสริมในสูตรอาหาร

คำสำคัญ: โปรตีนจากแมลง, หนอนแมลงวันลาย, หนอนนก, ปลาชะโอน, อาหารสัตว์น้ำทางเลือก

Abstract

This study aimed to evaluate the effects of dietary inclusion of mealworm (*Tenebrio molitor*) and black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) on growth performance, feed utilization, survival, and water quality of sheatfish (*Ompok bimaculatus*). Two independent feeding trials were conducted separately for each insect type using a Completely Randomized Design (CRD), comprising four dietary treatments (0%, 5%, 10%, and 15% inclusion levels), with four replicates per treatment, over an 8-week period. Proximate analysis showed that all experimental diets contained similar crude protein levels (~30%), while lipid content increased with increasing insect inclusion levels. In the mealworm trial, dietary inclusion at 10-15% significantly improved growth performance and feed utilization compared with the control ($p < 0.05$). In the black soldier fly trial, the best performance was observed at 5% and 15% inclusion levels. Survival rates ranged from 95% to 100% and did not differ significantly among treatments ($p > 0.05$), while water quality parameters remained within suitable ranges throughout the experiment. These results indicate that mealworm and black soldier fly larvae can be used as alternative protein sources in diets for sheatfish. However, their effectiveness depends on the insect type and inclusion level under specific experimental conditions.

Keywords: insect protein, black soldier fly larvae, mealworm, sheatfish, alternative aquafeed

1. บทนำ

อุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมีบทบาทสำคัญในการผลิตโปรตีนเพื่อรองรับความต้องการของประชากรโลกที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม การพึ่งพาปลาเป็นแหล่งโปรตีนหลักส่งผลให้เกิดข้อจำกัดด้านต้นทุนและความยั่งยืน เนื่องจากทรัพยากรปลาทะเลมีแนวโน้มลดลง [1] ในปัจจุบัน การใช้แหล่งโปรตีนทางเลือกได้รับความสนใจเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะโปรตีนจากแมลง ได้แก่ หนอนแมลงวันลาย (*Hermetia illucens*) และหนอนนก (*Tenebrio molitor*) ซึ่งมีองค์ประกอบโปรตีนและไขมันสูง สามารถผลิตได้จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร และสอดคล้องกับแนวคิดเศรษฐกิจชีวภาพหมุนเวียน (BCG model) [2, 3] งานวิจัยก่อนหน้านี้รายงานว่า แมลงสามารถใช้เป็นแหล่งโปรตีนในอาหารปลาได้อย่างมีประสิทธิภาพ [4, 5] โดยหนอนแมลงวันลายมีศักยภาพในการทดแทนปลาป่นในอาหารสัตว์น้ำ [6] ขณะที่หนอนนกมีองค์ประกอบทางโภชนาการที่เหมาะสมต่อการพัฒนาเป็นอาหารทางเลือก [7] อย่างไรก็ตาม องค์ประกอบทางโภชนาการของแมลงแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการใช้อาหารของปลาแตกต่างกัน ปลาชะโอน (*Ompok bimaculatus*) เป็นปลาน้ำจืดเศรษฐกิจที่มีศักยภาพในการเพาะเลี้ยง และมีการศึกษาทางพันธุกรรมและการเจริญเติบโตอย่างต่อเนื่อง [8] แต่ข้อมูลเกี่ยวกับการใช้แมลงเป็นแหล่งโปรตีนในอาหารปลาชนิดนี้ยังมีจำกัด การศึกษานี้จึงมุ่งประเมินผลของการเสริมหนอนนกและหนอนแมลงวันลายในอาหารต่อสมรรถนะการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการใช้อาหารของปลาชะโอน

การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเป็นหนึ่งในภาคการผลิตอาหารที่มีการเติบโตอย่างรวดเร็วของโลก และมีบทบาทสำคัญต่อความมั่นคงทางอาหาร โดยเฉพาะในด้านการจัดหาโปรตีนคุณภาพสูงให้แก่ประชากรที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม ความยั่งยืนของอุตสาหกรรมดังกล่าวยังคงขึ้นอยู่กับการพัฒนาอาหารสัตว์น้ำที่มีประสิทธิภาพและต้นทุนเหมาะสม ซึ่งแหล่งโปรตีนถือเป็นองค์ประกอบหลักของสูตรอาหารสัตว์น้ำ โดยปลาป่นยังคงเป็นวัตถุดิบโปรตีนที่นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากมีกรดอะมิโนจำเป็นที่สมดุลและมีความสามารถในการย่อยได้สูง [1] อย่างไรก็ตาม ทรัพยากรปลาทะเลที่ใช้ผลิตปลาป่นมีแนวโน้มลดลง ขณะที่ความต้องการใช้ปลาป่นเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตอาหารสัตว์น้ำเพิ่มขึ้น และเกิดข้อจำกัดด้านความยั่งยืน [1] ดังนั้น การค้นหาแหล่งโปรตีนทางเลือกเพื่อทดแทนปลาป่นจึงเป็นประเด็นสำคัญในการพัฒนาอาหารสัตว์น้ำในระยะยาว ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา โปรตีนจากแมลงได้รับความสนใจอย่างมากในฐานะแหล่งโปรตีนทางเลือก เนื่องจากมีปริมาณโปรตีนและไขมันสูง มีองค์ประกอบกรดอะมิโนที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำ และสามารถผลิตได้จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรหรือของเสียอินทรีย์ ทำให้เป็นวัตถุดิบที่มีศักยภาพด้านความยั่งยืนและสอดคล้องกับแนวคิดเศรษฐกิจชีวภาพหมุนเวียน (bio-circular economy) [2, 3, 9] นอกจากนี้ แมลงยังมีประสิทธิภาพในการใช้ทรัพยากรพื้นที่และน้ำต่ำกว่าวัตถุดิบโปรตีนแบบดั้งเดิม

แมลงที่ได้รับความสนใจในด้านอาหารสัตว์น้ำ ได้แก่ หนอนแมลงวันลาย (*H. illucens*) และหนอนนก (*T. molitor*) โดยหนอนแมลงวันลายมีศักยภาพในการเปลี่ยนของเสียอินทรีย์เป็นชีวมวลที่มีโปรตีนสูง และสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในสูตรอาหารสัตว์น้ำได้ [6, 10] ขณะที่หนอนนกมีองค์ประกอบโปรตีนและไขมันสูง รวมถึงมีความน่ากินของอาหารที่ดี [11] งานวิจัยหลายฉบับรายงานว่า การใช้โปรตีนจากแมลงสามารถทดแทนปลาป่นได้บางส่วนโดยไม่ส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการใช้อาหารของปลา [4, 5] อย่างไรก็ตาม องค์ประกอบทางโภชนาการและคุณสมบัติทางชีวภาพของแมลงแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของปลาแตกต่างกัน

นอกจากผล ด้านการเจริญเติบโตแล้ว แมลงยังมีองค์ประกอบชีวโมเลกุล เช่น ไคติน กรดไขมันสายกลาง และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ซึ่งอาจมีบทบาทในการส่งเสริมสุขภาพและระบบภูมิคุ้มกันของสัตว์น้ำ โดยมีรายงานว่าสามารถช่วยปรับปรุงสุขภาพของระบบทางเดินอาหารและการตอบสนองทางภูมิคุ้มกันได้ [3, 7, 11, 12] อย่างไรก็ตาม ผลลัพธ์ดังกล่าวยังขึ้นอยู่กับชนิดของแมลงและระดับการใช้ในสูตรอาหาร ปลาชะโอน (*O. bimaculatus*) เป็นปลาน้ำจืดเศรษฐกิจที่มีศักยภาพในการเพาะเลี้ยงในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เนื่องจากมีอัตราการเจริญเติบโตดีและเป็นที่ต้องการของตลาด [8, 14] อย่างไรก็ตาม ข้อมูลเกี่ยวกับการใช้โปรตีนจากแมลงในสูตรอาหารของปลาชนิดนี้ยังมีจำกัด

การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลของการเสริมหนอนนกและหนอนแมลงวันลายในสูตรอาหารต่อการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการใช้อาหารของปลาชะโอน โดยมุ่งเน้นการวิเคราะห์ผลแยกตามชนิดของแมลง เพื่อให้ได้ข้อมูลพื้นฐานสำหรับการพัฒนาอาหารสัตว์น้ำที่มีความยั่งยืนในอนาคต

2. วิธีการศึกษา

2.1 แผนการทดลอง

การศึกษานี้แบ่งออกเป็น 2 การทดลองแยกตามชนิดของแมลง ได้แก่ หนอนนก (*T. molitor*) และหนอนแมลงวันลาย (*H. illucens*) โดยแต่ละการทดลองวางแผนแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design; CRD) ประกอบด้วย 4 ทรีตเมนต์ ได้แก่ สูตรอาหารที่มีการเสริมแมลงในระดับ 0% (ชุดควบคุม), 5%, 10% และ 15% โดยแต่ละทรีตเมนต์มี 4 ซ้ำ รวมทั้งหมด 16 หน่วยทดลองต่อการทดลอง แสดงใน Figure 1

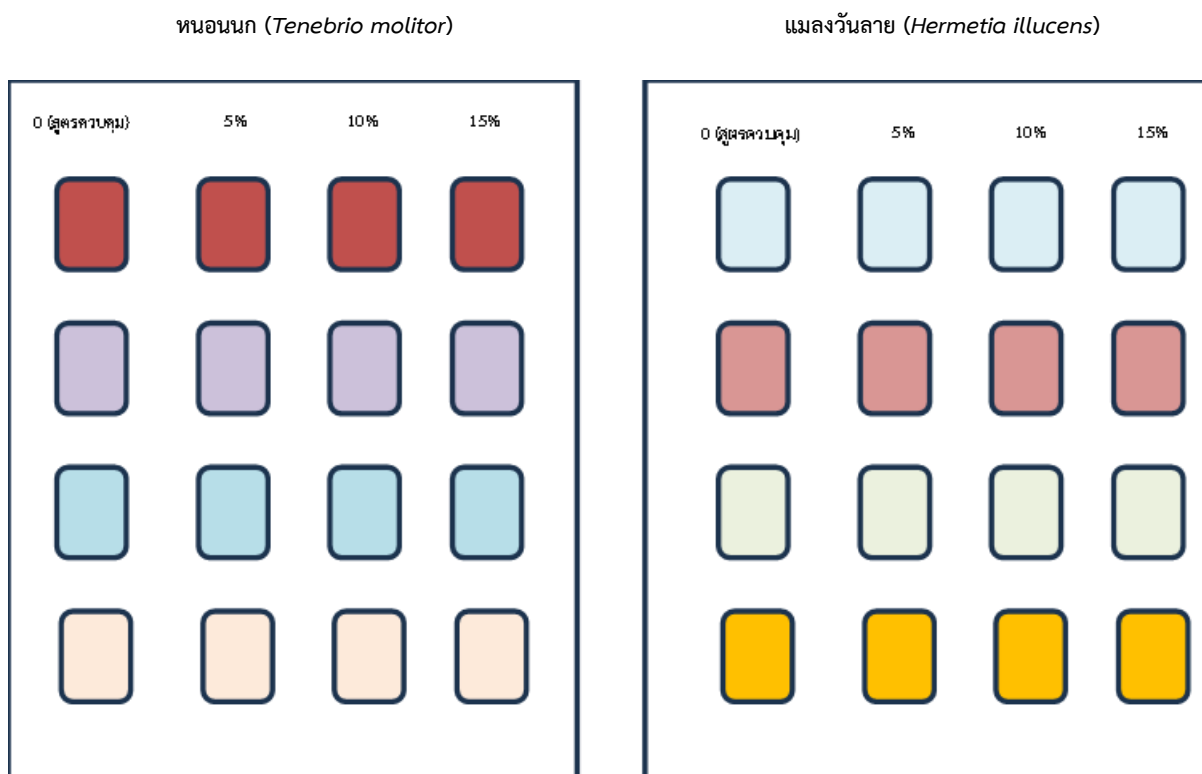


Figure 1 Experimental design of the feeding trial for sheatfish using mealworm (*T. molitor*) and black soldier fly larvae (*H. illucens*) at different dietary protein levels.

2.2 สัตว์ทดลองและสภาพการเลี้ยง

ก่อนเริ่มการทดลอง ได้ทำการชั่งน้ำหนักปลาเพื่อประเมินความสม่ำเสมอของขนาดเริ่มต้น โดยปลาที่ใช้ในการทดลอง หนอนนกมีน้ำหนักเฉลี่ยเริ่มต้นอยู่ที่ประมาณ 2.13 ± 0.08 กรัม/ตัว และการทดลองหนอนแมลงวันลายมีน้ำหนักเฉลี่ยเริ่มต้นอยู่ที่ประมาณ 3.15 ± 0.09 กรัม/ตัว ทั้งนี้ เมื่อวิเคราะห์ทางสถิติภายในแต่ละการทดลอง พบว่าน้ำหนักเริ่มต้นของปลาในแต่ละทรีตเมนต์ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ปลาถูกให้อาหารทดลองวันละ 2 ครั้ง (เวลา 08:00 และ 17:00 น.) แบบให้กินจนอิ่ม (apparent satiation) เป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์ โดยมีการติดตามและลดการสูญเสียของอาหารที่เหลือ ในระหว่างการทดลอง มีการควบคุมคุณภาพน้ำให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม โดยตรวจวัดอุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ และค่าความเป็นกรด-ด่างอย่างสม่ำเสมอ

2.3 การเตรียมอาหารและองค์ประกอบทางโภชนาการ

อาหารทดลองถูกออกแบบให้มีปริมาณโปรตีนใกล้เคียงกันประมาณ 30% โดยปรับระดับการเสริมหนอนนก (*T. molitor*) หรือหนอนแมลงวันลาย (*H. illucens*) ตามทรีตเมนต์ที่กำหนด ได้แก่ 0%, 5%, 10% และ 15% ของสูตรอาหาร วัตถุดิบทั้งหมดถูกผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน เติมน้ำในปริมาณที่เหมาะสม และอัดเป็นเม็ดอาหาร จากนั้นนำไปอบแห้งและเก็บรักษาในภาชนะปิด

สนธิที่อุณหภูมิห้องจนกว่าจะนำไปใช้ องค์ประกอบทางเคมีของอาหารทดลอง คือ โปรตีน ไขมัน เถ้า และความชื้น ทำการวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐานของ AOAC (2005) เพื่อให้มั่นใจว่าสูตรอาหารมีคุณค่าทางโภชนาการ

2.4 การวัดการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการใช้อาหาร

ทำการสุ่มตัวอย่างปลาเพื่อตรวจวัดน้ำหนักตัวและจำนวนปลาเป็นระยะทุก 2 สัปดาห์ พร้อมทั้งบันทึกค่าน้ำหนักเริ่มต้นและน้ำหนักสุดท้ายของการทดลองค่าการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการใช้อาหารถูกคำนวณตามสมการ

2.4.1 อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (Specific Growth Rate; SGR, %/วัน)

$$SGR = \frac{\ln W_f - \ln W_i}{t} \times 100$$

2.4.2 อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ (Feed Conversion Ratio; FCR)

$$FCR = \frac{\text{ปริมาณอาหารที่กิน (กรัม)}}{\text{น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (กรัม)}}$$

2.4.3 อัตราการรอดตาย (Survival Rate; SR, %)

$$SR = \frac{N_f}{N_i} \times 100$$

โดยที่ W_i และ W_f หมายถึง น้ำหนักเริ่มต้นและน้ำหนักสุดท้าย (กรัม) ตามลำดับ, t คือ ระยะเวลาในการเลี้ยง (วัน), และ N_i และ N_f คือ จำนวนปลาเริ่มต้นและจำนวนปลาสิ้นสุดการทดลอง ตามลำดับ

2.5 การวิเคราะห์ทางสถิติ

ข้อมูลทั้งหมดแสดงในรูปค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Mean \pm SD) และทำการวิเคราะห์แยกตามการทดลองแต่ละชุด ความแตกต่างระหว่างทรีตเมนต์วิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way Analysis of Variance; ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี (Duncan's Multiple Range Test) โดยกำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ $P < 0.05$

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 องค์ประกอบทางโภชนาการของอาหารทดลอง

จาก Table 1 พบว่า อาหารทดลองทุกสูตรมีปริมาณโปรตีนดิบอยู่ในช่วง 29.8–30.5% และไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) แสดงให้เห็นว่าสูตรอาหารสามารถควบคุมระดับโปรตีนให้มีความสม่ำเสมอระหว่างทรีตเมนต์ได้ตามที่ออกแบบ ในทางตรงกันข้ามปริมาณไขมันดิบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับการเสริมแมลง โดยสูตรควบคุมมีค่า $6.2 \pm 0.2\%$ ขณะที่สูตรที่เสริมในระดับ 15% มีค่าสูงสุดเท่ากับ $8.2 \pm 0.3\%$ และแตกต่างจากสูตรควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แนวโน้มดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าการเสริมแมลงมีผลต่อปริมาณไขมันในอาหาร สำหรับปริมาณเถ้าและความชื้น พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างทรีตเมนต์ ($p > 0.05$) โดยมีค่าอยู่ในช่วง 8.2–8.5% และ 9.7–10.1% ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเสริมแมลงไม่มีผลต่อองค์ประกอบแร่ธาตุและความชื้นของอาหาร การเพิ่มระดับการเสริมแมลงในสูตรอาหารไม่มีผลต่อปริมาณโปรตีนดิบ แต่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณไขมัน ซึ่งอาจส่งผลต่อพลังงานรวมของอาหาร

3.2 ต้นทุนอาหารทดลอง

จากตารางที่ 2 พบว่า ต้นทุนอาหารมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับการเสริมแมลงในทุกทรีตเมนต์ การเพิ่มของต้นทุนแตกต่างกันระหว่างชนิดของแมลง การใช้หนอนนกส่งผลให้ต้นทุนอาหารเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเพิ่มจาก 24.75 บาท/กก. ในสูตรควบคุม เป็น 53.43, 81.55 และ 110.73 บาท/กก. ในระดับการเสริม 5%, 10% และ 15% ตามลำดับ ในขณะที่การใช้หนอนแมลงวันลายทำให้ต้นทุนอาหารเพิ่มขึ้นในอัตราที่ต่ำกว่า โดยในระดับ 5% และ 10% มีต้นทุนใกล้เคียงกับสูตรควบคุม (25.24 และ 28.50 บาท/กก. เทียบกับ 24.68 บาท/กก.) และเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในระดับ 15% (58.00 บาท/กก.) ผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าชนิดของแมลงมีผลต่อโครงสร้างต้นทุนอาหาร โดยหนอนแมลงวันลายมีศักยภาพในการควบคุมต้นทุนได้ดีกว่าหนอนนก โดยเฉพาะในระดับการเสริมต่ำถึงปานกลาง

Table 1 Chemical composition of experimental diets supplemented with Mealworms and Black soldier fly larvae at different levels (% dry weight).

ทรีตเมนต์	โปรตีนดิบ (%)	ไขมันดิบ (%)	เถ้า (%)	ความชื้น(%)
สูตรควบคุม 0%	29.8 ± 0.3 ^a	6.2 ± 0.2 ^c	8.5 ± 0.3 ^a	10.1 ± 0.4 ^a
สูตรทดลอง 5%	30.1 ± 0.4 ^a	6.8 ± 0.3 ^{bc}	8.4 ± 0.2 ^a	10.0 ± 0.3 ^a
สูตรทดลอง 10%	30.3 ± 0.2 ^a	7.5 ± 0.4 ^{ab}	8.3 ± 0.3 ^a	9.8 ± 0.2 ^a
สูตรทดลอง 15%	30.5 ± 0.3 ^a	8.2 ± 0.3 ^a	8.2 ± 0.2 ^a	9.7 ± 0.3 ^a

Table 2 Cost of experimental diets supplemented with different levels of Mealworms and Black soldier fly larvae (Baht per kilogram).

ทรีตเมนต์	ระดับการเสริม (%)	ต้นทุนหนอนนก (บาท/กก.)	ต้นทุนหนอนแมลงวันลาย (บาท/กก.)
สูตรควบคุม	0%	24.75	24.68
สูตรทดลอง	5%	53.43	25.24
สูตรทดลอง	10%	81.55	28.50
สูตรทดลอง	15%	110.73	58.00

3.3 ผลของการเสริมหนอนนกและหนอนแมลงวันลายต่อการเจริญเติบโตประสิทธิภาพการใช้อาหาร และต้นทุนอาหารของปลาชะโอน

3.3.1 ผลการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการใช้อาหาร การเสริมหนอนนก (*T. molitor*) จาก **Table 3** พบว่า การเสริมหนอนนก ในสูตรอาหารมีผลต่อการเจริญเติบโตของปลาชะโอนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) น้ำหนักสุดท้ายและน้ำหนักเพิ่มมีค่าเพิ่มขึ้นตามระดับการเสริม โดยปลาที่ได้รับอาหารเสริมในระดับ 15% มีค่าน้ำหนักสุดท้าย (11.10 ± 0.60 กรัม) และน้ำหนักเพิ่ม (8.97 ± 0.50 กรัม) สูงสุด และแตกต่างจากสูตรควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ขณะที่สูตรควบคุมมีค่าต่ำสุด (9.12 ± 0.45 และ 7.00 ± 0.40 กรัม ตามลำดับ) ค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (Specific Growth Rate; SGR) มีค่าเพิ่มขึ้นตามระดับการเสริม โดยมีค่าสูงสุดในระดับ 15% (2.92 ± 0.10 %/วัน) และต่ำสุดในสูตรควบคุม (2.41 ± 0.11 %/วัน) ซึ่งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในขณะที่ค่าอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ (Feed Conversion Ratio; FCR) มีค่าลดลงตามระดับการเสริม โดยสูตรควบคุมมีค่า FCR สูงสุด (2.21 ± 0.10) และระดับการเสริม 15% มีค่าต่ำสุด (1.78 ± 0.08) ซึ่งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) สำหรับอัตราการรอดตาย (Survival Rate; SR) ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างทรีตเมนต์ ($p > 0.05$) โดยมีค่าอยู่ในช่วง 96.25–100.00%

3.3.2 ผลการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการใช้อาหาร การเสริมหนอนแมลงวันลาย (*H. illucens*) จาก **Table 4** พบว่า การเสริมหนอนแมลงวันลาย ในสูตรอาหารมีผลต่อการเจริญเติบโตของปลาชะโอนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) น้ำหนักสุดท้ายและน้ำหนักเพิ่มมีความแตกต่างกันระหว่างทรีตเมนต์ โดยปลาที่ได้รับอาหารเสริมในระดับ 15% มีค่าน้ำหนักสุดท้าย (10.30 ± 0.55 กรัม) และน้ำหนักเพิ่ม (7.15 ± 0.45 กรัม) สูงสุด และแตกต่างจากสูตรควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ขณะที่สูตรควบคุมมีค่าต่ำสุด (9.25 ± 0.48 และ 6.10 ± 0.40 กรัม ตามลำดับ) ค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (Specific Growth Rate; SGR) มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยมีค่าสูงสุดในระดับ 15% (2.81 ± 0.11 %/วัน) และต่ำสุดในสูตรควบคุม (2.38 ± 0.12 %/วัน) สำหรับค่าอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ (Feed Conversion Ratio; FCR) พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างทรีตเมนต์ ($p < 0.05$) โดยระดับการเสริม 10% มีค่า FCR สูงสุด (2.45 ± 0.15) ขณะที่ระดับการเสริม 5% และ 15% มีค่าต่ำกว่า (1.95 ± 0.10 และ 1.88 ± 0.09 ตามลำดับ) ในขณะที่ยอดอัตราการรอดตาย (Survival Rate; SR) ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างทรีตเมนต์ ($p > 0.05$) โดยมีค่าอยู่ในช่วง 95.00–98.75%

Table 3 Growth and feed efficiency of Sheatfish supplemented with Mealworms.

ทริตเมนต์	น้ำหนักสุดท้าย (กรัม)	น้ำหนักเพิ่ม (กรัม)	SGR (%/วัน)	FCR	อัตราการรอดตาย (%)
0%	9.12 ± 0.45 ^c	7.00 ± 0.40 ^c	2.41 ± 0.11 ^c	2.21 ± 0.10 ^a	96.25 ± 2.50 ^a
5%	9.85 ± 0.50 ^{bc}	7.72 ± 0.42 ^{bc}	2.58 ± 0.12 ^{bc}	2.05 ± 0.09 ^{ab}	97.50 ± 2.04 ^a
10%	10.75 ± 0.55 ^{ab}	8.62 ± 0.45 ^{ab}	2.85 ± 0.12 ^{ab}	1.85 ± 0.09 ^{bc}	98.75 ± 1.25 ^a
15%	11.10 ± 0.60 ^a	8.97 ± 0.50 ^a	2.92 ± 0.10 ^a	1.78 ± 0.08 ^c	100.00 ± 0.00 ^a

หมายเหตุ: แสดงค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n = 4) ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p < 0.05)

Table 4 Growth and feed efficiency of Sheatfish supplemented with Black soldier fly larvae.

ทริตเมนต์	น้ำหนักสุดท้าย (กรัม)	น้ำหนักเพิ่ม (กรัม)	SGR (%/วัน)	FCR	อัตราการรอดตาย (%)
0%	9.25 ± 0.48 ^c	6.10 ± 0.40 ^c	2.38 ± 0.12 ^c	2.20 ± 0.11 ^b	95.00 ± 3.54 ^a
5%	10.10 ± 0.52 ^{ab}	6.95 ± 0.42 ^{ab}	2.76 ± 0.13 ^{ab}	1.95 ± 0.10 ^c	96.25 ± 2.50 ^a
10%	9.80 ± 0.50 ^{bc}	6.65 ± 0.41 ^{bc}	2.60 ± 0.11 ^{bc}	2.45 ± 0.15 ^a	96.25 ± 2.50 ^a
15%	10.30 ± 0.55 ^a	7.15 ± 0.45 ^a	2.81 ± 0.11 ^a	1.88 ± 0.09 ^c	98.75 ± 1.25 ^a

หมายเหตุ: แสดงค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n = 4) ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p < 0.05)

3.4 ค่าเฉลี่ยคุณภาพน้ำในระหว่างการทดลองเลี้ยงปลาชะโอน

ผลการตรวจวัดคุณภาพน้ำตลอดระยะเวลาการทดลอง พบว่า ค่าพารามิเตอร์ด้านคุณภาพน้ำโดยรวมอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงปลาชะโอน (*O. bimaculatus*) ทั้งในชุดการทดลองที่ใช้หนอนนกและหนอนแมลงวันลาย ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 7.2 แสดงถึงสภาพน้ำที่เป็นกลาง ขณะที่อุณหภูมิน้ำเฉลี่ยเท่ากับ 28.9 องศาเซลเซียส ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของปลาน้ำจืดเขตร้อน ค่าความเค็มเฉลี่ย 0.1 พีพีที บ่งชี้ว่าสภาพน้ำเป็นน้ำจืด ค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (Dissolved Oxygen; DO) อยู่ในช่วง 5.4–5.6 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเพียงพอต่อการดำรงชีวิตของปลา สำหรับค่าความเข้มข้นของแอมโมเนียและไนไตรต์พบว่าอยู่ในระดับต่ำ โดยการทดลองที่ใช้หนอนนกมีค่าแอมโมเนียและไนไตรต์เฉลี่ยเท่ากับ 0.8 และ 0.14 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ขณะที่การทดลองที่ใช้หนอนแมลงวันลายมีค่าเท่ากับ 0.4 และ 0.11 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ค่าคุณภาพน้ำตลอดการทดลองอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม และไม่พบปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมที่อาจรบกวนต่อผลการทดลองด้านการเจริญเติบโต ประสิทธิภาพการใช้อาหาร และอัตราการรอดตายของปลา แสดงใน Figure 2

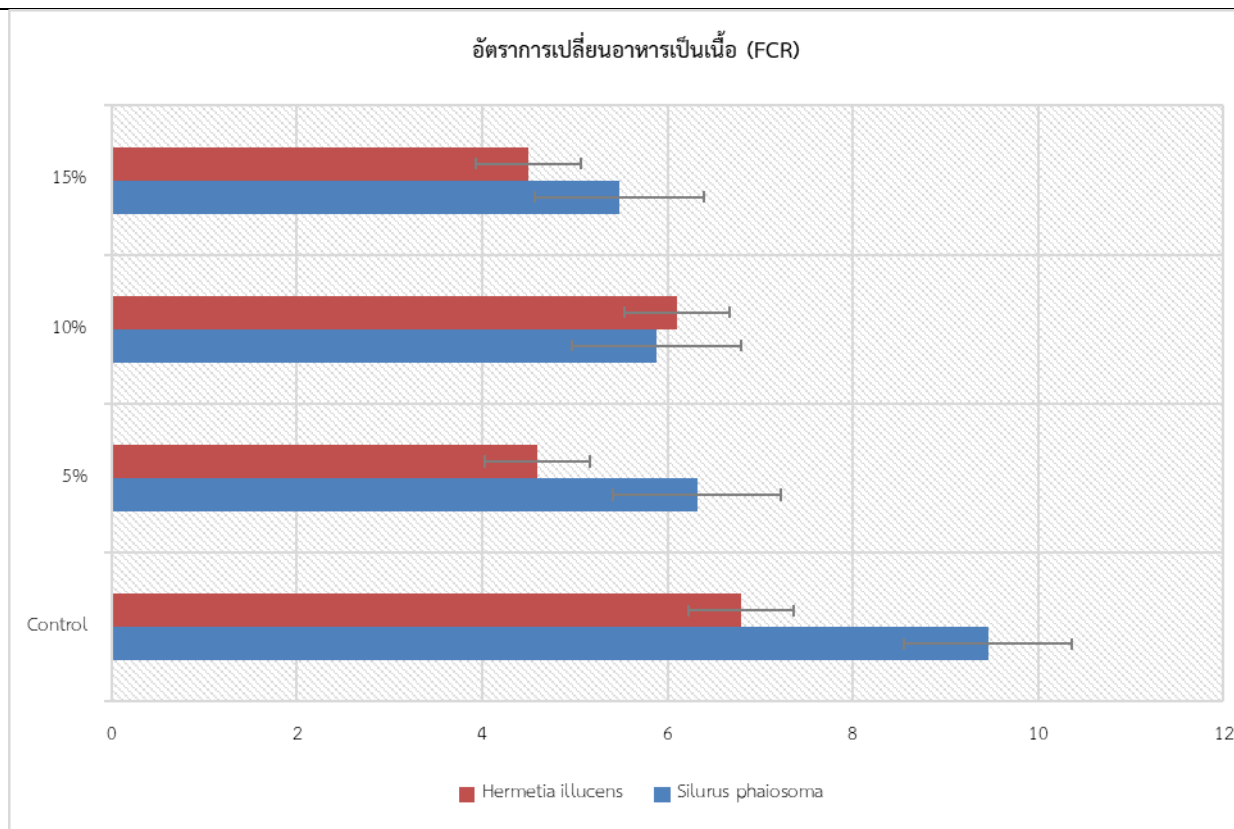


Figure 2 Feed conversion ratio (FCR) of sheatfish (*Ompok bimaculatus*) fed diets supplemented with black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) at different inclusion levels. Values are presented as mean \pm standard deviation (Mean \pm SD).

3.5 การวิจารณ์ผล

ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า การใช้โปรตีนจากแมลงเป็นวัตถุดิบในสูตรอาหารสามารถส่งผลต่อการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการใช้อาหารของปลาชะโอน (*O. bimaculatus*) โดยผลที่ได้มีความแตกต่างกันตามชนิดของแมลงและระดับการเสริม ซึ่งสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการศึกษาที่มุ่งประเมินศักยภาพของหนอนนกและหนอนแมลงวันลายเป็นแหล่งโปรตีนทางเลือก ในส่วนของการเสริมหนอนนก (*T. molitor*) พบว่าการเพิ่มระดับการเสริมส่งผลให้ค่าการเจริญเติบโต ได้แก่ น้ำหนักสุดท้าย น้ำหนักเพิ่ม และค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (SGR) เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ขณะที่ค่าอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ (FCR) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพการใช้อาหารที่ดีขึ้น ผลดังกล่าวสอดคล้องกับรายงานของ [4, 5] ที่ระบุว่าโปรตีนจากแมลงมีองค์ประกอบกรดอะมิโนที่เหมาะสมและมีค่าการย่อยได้สูง จึงสามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ หนอนนกยังมีปริมาณไขมันและพลังงานสูง ซึ่งอาจช่วยเพิ่มพลังงานที่ใช้ในการเจริญเติบโตของปลา [7] อย่างไรก็ตาม แม้ว่าการเสริมหนอนนกในระดับสูงจะให้ผลเชิงบวกต่อการเจริญเติบโต แต่ต้นทุนอาหารเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนตามระดับการเสริม ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มของวัตถุดิบโปรตีนทางเลือกที่มีราคาสูงเมื่อใช้ในปริมาณมาก [4] ส่งผลให้การใช้หนอนนกในเชิงพาณิชย์อาจต้องพิจารณาความเหมาะสมระหว่างประสิทธิภาพการผลิตและต้นทุน สำหรับการเสริมหนอนแมลงวันลาย (*H. illucens*) พบว่าการเจริญเติบโตของปลาที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในระดับการเสริม 15% อย่างไรก็ตาม ค่า FCR ไม่ได้ลดลงอย่างสม่ำเสมอในทุกระดับการเสริม โดยเฉพาะในระดับ 10% ที่มีค่า FCR สูงกว่าที่ระดับอื่น ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับองค์ประกอบทางเคมีของแมลง เช่น ปริมาณไคตินที่อาจส่งผลต่อการย่อยและการใช้ประโยชน์ของสารอาหารในสัตว์น้ำ [3] ปรากฏการณ์ดังกล่าวสอดคล้องกับรายงานของ [5] ที่ระบุว่าการใช้แมลงในสูตรอาหารสัตว์น้ำอาจมีข้อจำกัดในบางระดับการเสริม และจำเป็นต้องกำหนดระดับที่เหมาะสม ต้นทุนอาหาร พบว่า การใช้หนอนแมลงวันลายมีต้นทุนต่ำกว่าหนอนนกอย่างชัดเจน โดยเฉพาะในระดับการเสริมต่ำถึงปานกลาง (5–10%) ซึ่งมีต้นทุนใกล้เคียงกับสูตรควบคุม ผลดังกล่าวสอดคล้องกับแนวคิดเศรษฐกิจชีวภาพและการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากหนอนแมลงวันลายสามารถผลิตได้จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและมีต้นทุนการผลิตต่ำ [2, 9] นอกจากนี้ ยังมีรายงานว่าหนอนแมลงวันลายเป็นวัตถุดิบที่มีศักยภาพในการทดแทนปลา

ปนในสูตรอาหารสัตว์น้ำโดยไม่กระทบต่อการเจริญเติบโตในระดับที่เหมาะสม [6] ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า แมลงทั้งสองชนิดมีศักยภาพในการใช้เป็นแหล่งโปรตีนทางเลือกในอาหารปลา โดยหนอนนกเหมาะสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพการเจริญเติบโต ขณะที่หนอนแมลงวันลายมีข้อได้เปรียบด้านต้นทุน อย่างไรก็ตาม การเลือกใช้ควรพิจารณาระดับการเสริมที่เหมาะสมร่วมกับต้นทุนการผลิต เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำอย่างยั่งยืน

4. สรุป

การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการใช้โปรตีนจากแมลงเป็นวัตถุดิบในสูตรอาหารปลาชะโอน (*O. bimaculatus*) สามารถส่งผลต่อการเจริญเติบโต ประสิทธิภาพการใช้อาหาร และต้นทุนอาหาร โดยผลที่ได้มีความแตกต่างกันตามชนิดของแมลงและระดับการเสริม การเสริมหนอนนก (*T. molitor*) ส่งผลให้การเจริญเติบโตของปลาเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามระดับการเสริม โดยปลาที่ได้รับอาหารในระดับ 15% มีค่าน้ำหนักสุดท้าย น้ำหนักเพิ่ม และค่าอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (SGR) สูงที่สุด ขณะที่ค่าอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ (FCR) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงถึงประสิทธิภาพการใช้อาหารที่ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม การเพิ่มระดับการเสริมหนอนนกส่งผลให้ต้นทุนอาหารเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ในขณะที่การเสริมหนอนแมลงวันลาย (*H. illucens*) ให้ผลต่อการเจริญเติบโตในลักษณะที่ขึ้นอยู่กับระดับการเสริม โดยระดับ 15% ให้ค่าการเจริญเติบโตและ SGR สูงที่สุด และมีค่า FCR ต่ำ อย่างไรก็ตามระดับการเสริม 10% ให้ค่า FCR สูงกว่าชนิดอื่น แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการใช้อาหารอาจไม่เป็นไปในทิศทางเดียวกันในทุกระดับการเสริม ต้นทุนอาหาร พบว่า การใช้หนอนแมลงวันลายมีความได้เปรียบด้านต้นทุนเมื่อเปรียบเทียบกับหนอนนก โดยเฉพาะในระดับการเสริมต่ำถึงปานกลาง (5–10%) ซึ่งมีต้นทุนใกล้เคียงกับสูตรควบคุม ขณะที่การใช้หนอนนกทำให้ต้นทุนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามระดับการเสริม การใช้หนอนนก เหมาะสมสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของปลา ในขณะที่หนอนแมลงวันลายมีศักยภาพในการเป็นแหล่งโปรตีนทางเลือกที่ช่วยควบคุมต้นทุนอาหาร ดังนั้นการเลือกใช้วัตถุดิบควรพิจารณาาร่วมกันระหว่างประสิทธิภาพการผลิตและต้นทุน เพื่อให้เกิดความเหมาะสมต่อระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำอย่างยั่งยืน

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Tacon, A. G., and Metian, M. 2015. Feed matters: satisfying the feed demand of aquaculture. *Reviews in Fisheries Science and Aquaculture*, 23(1), 1-10.
- [2] Norsuwan, T., Utthasuk, K., Punyasai, T., Saltikulnukarn, T., Chaima, R., Suppakitpaisarn, P., and Kaeomuangmoon, T. 2021. การเกษตรในเมืองกับ BCG Economic Model Urban Agriculture and BCG Economic Model. *Journal of Agri. Research and Extension*, 38(3), 100-116.
- [3] Sogari, G., Amato, M., Biasato, I., Chiesa, S., & Gasco, L. (2019). The potential role of insects as feed: A multi-perspective review. *Animals*, 9(4), 119.
- [4] Henry, M., Gasco, L., Piccolo, G., and Fountoulaki, E. 2015. Review on the use of insects in the diet of farmed fish: past and future. *Animal Feed Science and Technology*, 203, 1-22.
- [5] Nogales-Mérida, S., Gobbi, P., Józefiak, D., Mazurkiewicz, J., Dudek, K., Rawski, M., & Józefiak, A. (2019). Insect meals in fish nutrition. *Reviews in Aquaculture*, 11(4), 1080-1103.
- [6] Srisakda, W., Thongdonphum, B., Simking, P., & Vanichkul, K. (2025). ศักยภาพของหนอนแมลงวันลายในการเป็นแหล่งโปรตีนทดแทนปลาปนในอาหารต่อการเจริญเติบโต อัตราการรอดตาย และความเข้มสีของปลาแพนซีคาร์ป. *Wichha Journal Nakhon Si Thammarat Rajabhat University*, 44(2), 136-149.
- [7] Sinsranoi, S., Laosam, P., Khempaka, S., Suwanangul, S., Luekamlang, K., & Sangsawad, P. (2025). องค์ประกอบทางเคมี และโครงสร้างโปรตีนของหนอนนก (*Tenebrio molitor*) แต่ละระยะการเจริญเติบโต เพื่อการพัฒนาเป็นแหล่งอาหารทางเลือกในอนาคต. *Journal of Home Economics Technology and Innovation*, 4(1), 48-71.
- [8] Duangwongsa, J. (2024). Estimation of genetic parameters of growth traits for butter catfish (*Ompok bimaculatus* (Bloch, 1794)) using single-trait and multiple-trait model by restricted maximum likelihood (REML) (Doctoral dissertation, Maejo University).
- [9] Ungskul, T., Butlang, N., Dokho, N., Thongcharoen, P., Wan-on, P., Ritthikan, W., & Noknoi, C. (2025). โมเดลเศรษฐกิจสู่การพัฒนาที่ยั่งยืน: เปรียบเทียบกรณีศึกษาองค์กรไทย และต่างประเทศ. *Journal for Strategy and Enterprise Competitiveness*, 4(12), 21-35.

-
- [10] พินพนิต บุญช่วย, จิราพร กุลสาริน, ชลธิชา อุทัยศรี ผดุงกุล, ปิยะฉัตร สาหัสชาติ, กมลพร สิทธิไตร ย์, สุวิทย์ โชตินันท์, และ ยุทธนาพิมล ศิริผล. (2568). สัตว์ส่วนอาหารที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยงตัวอ่อนแมลงทหารเสื้อ (*Hermetia illucens*) เพื่อใช้น้ำมันเป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์มูลค่าเพิ่ม.วารสารวิจัย และส่งเสริม วิชาการ เกษตร,42(1), 143-162.
- [11] Patpai, W., Thodthasi, S., Yindee, W., Reebreangrum, K., Tubmarerng, C., Phabu, K., & Ruampattana, K. (2025). ผลของระดับหนอนแมลงวันลายในสูตรอาหารต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโต ของ ลูกปลา นิล. Journal of Science and Technology Phetchabun Rajabhat University, 5(2), 84-96.
- [12] Pechsiri, J., Chainapong, T., & Panritdam, T. (2021). The Efficiency of Catfish Processing Waste in the Formulated Diets on Cage Culture of Hybrid Catfish (*Clarias macrocephalus* x *C. gariepinus*) ประสิทธิภาพของเศษเหลือจากการแปรรูปปลาตุก ในสูตรอาหารสำเร็จรูปต่อการเลี้ยงปลาตุกผสม (*Clarias macrocephalus* x *C. gariepinus*) ในกระชัง. *Wichcha Journal Nakhon Si Thammarat Rajabhat University*, 40(1), 16-30.
- [13] Ponjaruen, S., Maneepitaksanti, W., Kaewruang, W., Senawong, T., Apinyanuwat, S., & Tapingkae, W. (2018). การทดแทนปลาป่นด้วยใบหม่อนป่นในสูตรอาหารปลาน้ำจืดเศรษฐกิจ. *Journal of Agricultural Research and Extension*.
- [14] Sangpud, C., Kaewkong, S., Kaewchamngong, T., Borirak-arawin, M., & Srinounpan, C. (2026). Induction Local Wisdom on Capture, Aquaculture, and Traditional Recipe “Kaeng Tom Som” of Butter Catfish: Enhancing the Social, and Sustainability Status of the Pak Phanang Basin Communities, Nakhon Si Thammarat, Thailand. *วารสารวิจัย วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และการเกษตร*, 7(1), 37-48.

การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของกิจกรรมสวนป่าสัก: กรณีศึกษาสวนป่าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง
Carbon Footprint Assessment of Teak Plantation:
A case study Mae-Moh Forest Plantation Lampang province

นลินี อินทิม^{1,*} นพรัตน์ คัคคุริวาระ¹ และ วิรงรอง ดวงใจ²
Nalinee Intim^{1,*}, Nopparat Kaakkurivara¹ and Wirongrong Duangjai²

¹ภาควิชาวิศวกรรมป่าไม้ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900 ประเทศไทย

²ภาควิชาวนวัฒนวิทยา คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900 ประเทศไทย

¹Department of Forest Engineering, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Chatuchak, Bangkok, 10900, Thailand

²Department of Silviculture, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Chatuchak, Bangkok, 10900, Thailand

*Corresponding author: Nalinee Intim, e-mail address: nalinee.in@ku.th

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของกิจกรรมสวนป่าสัก กรณีศึกษาสวนป่าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ภายใต้ขอบเขตการประเมินแบบ Business-to-Business (B2B) หรือ cradle-to-gate โดยครอบคลุม 2 กระบวนการหลัก ได้แก่ กระบวนการวนวัฒนวิธีและกระบวนการทำไม้ กำหนดหน่วยหน้าที่เป็นกิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อไร่ (kgCO₂eq/rai) ตลอดรอบการผลิต 30 ปี ผลการศึกษา พบว่า กระบวนการวนวัฒนวิธีมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเท่ากับ 86.08 kgCO₂eq/rai โดยกิจกรรมที่มีการปล่อยสูงสุด คือ การใส่ปุ๋ยบำรุง (54.08 kgCO₂eq/rai) ขณะที่กระบวนการทำไม้มีการปล่อย 14.20 kgCO₂eq/m³ โดยกิจกรรมที่มีการปล่อยสูงสุด คือ การขนส่งไม้ระยะสั้น (5.30 kgCO₂eq/m³) เมื่อพิจารณาตลอดรอบการผลิต 30 ปี พบว่า ปีที่ 15 มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงที่สุด เนื่องจากเป็นช่วงที่มีการดำเนินกิจกรรมการทำไม้ซึ่งใช้เครื่องจักรกลและเชื้อเพลิงในปริมาณสูง ผลการศึกษาสะท้อนให้เห็นว่า กิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการใช้เครื่องจักรกลและปุ๋ยเคมีเป็นแหล่งการปล่อยก๊าซเรือนกระจกหลักของระบบ ดังนั้น แนวทางในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกควรมุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้เครื่องจักรกล เช่น การเลือกใช้เครื่องจักรให้เหมาะสมกับลักษณะงาน การบำรุงรักษาอย่างสม่ำเสมอ รวมถึงการจัดการธาตุอาหารอย่างเหมาะสม โดยลดการใช้ปุ๋ยเคมีและส่งเสริมการใช้ปุ๋ยอินทรีย์ เพื่อให้เกิดการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ: การปล่อยก๊าซเรือนกระจก, สวนป่า, สัก, วนวัฒนวิธี, การทำไม้

Abstract

This study aims to assess the carbon footprint of teak plantation activities in the Mae-Moh plantation, Lampang Province, Thailand. The system boundary was defined as a Business-to-Business (B2B) or cradle-to-gate approach, covering two main processes: silvicultural practices and logging operations. The functional unit was defined as kilograms of carbon dioxide equivalent per rai (kgCO₂eq/rai) over a 30-year rotation period. The results indicated that greenhouse gas emissions from silvicultural practices were 86.08 kgCO₂eq/rai, with fertilization identified as the major contributing activity (54.08 kgCO₂eq/rai). For logging operations, emissions were 14.20 kgCO₂eq/m³, with short distance transportation contributing the highest emissions (5.30 kgCO₂eq/m³). Over the 30-year rotation, the highest emissions occurred in year 15 due to intensive logging activities requiring substantial use of machinery and fuel. The findings suggest that activities involving machinery use and chemical fertilizers are the primary sources of greenhouse gas emissions in the system. Therefore, mitigation strategies should focus on improving machinery efficiency, such as selecting appropriate equipment and ensuring proper maintenance, as well as optimizing nutrient management by reducing chemical fertilizer use and promoting organic alternatives. These approaches can enhance resource efficiency and reduce environmental impacts in teak plantation management.

Keywords: Greenhouse gas emissions, Forest plantation, Teak, Silvicultural practices, Logging operations

1. บทนำ

ในปัจจุบัน ปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศเป็นประเด็นสำคัญระดับโลกที่มีสาเหตุหลักจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมของมนุษย์ ส่งผลให้หลายประเทศให้ความสำคัญกับการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยมีคาร์บอนฟุตพริ้นท์ (Carbon Footprint) มาใช้ในการประเมินและจัดการการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เพื่อสนับสนุนการวางแผนลดการปล่อยและเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันทางเศรษฐกิจ ตลอดจนเป็นการเตรียมความพร้อมในกรณีที่ภาครัฐกำหนดให้มีการรายงานข้อมูลก๊าซเรือนกระจกขององค์กรต่างๆ [1]

ภาคป่าไม้มีบทบาทสำคัญต่อวัฏจักรคาร์บอนของโลก โดยเป็นทั้งแหล่งกักเก็บคาร์บอนและแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจก จากกิจกรรมการจัดการสวนป่า เช่น การปลูก การบำรุงรักษา และการทำไม้ ในบริบทของประเทศไทย ภาครัฐมีเป้าหมายในการเพิ่มพื้นที่ป่าเศรษฐกิจเพื่อการใช้ประโยชน์ให้ได้ร้อยละ 15 ของพื้นที่ประเทศ ภายในปี พ.ศ. 2580 [2] เพื่อรองรับอุตสาหกรรมป่าไม้และความต้องการใช้ทรัพยากรป่าไม้โดยไม่ลดทอนทรัพยากรป่าไม้เดิม สวนป่าเศรษฐกิจจึงมีบทบาทสำคัญในการสร้างสมดุลระหว่างการใช้ประโยชน์ทางเศรษฐกิจและการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติอย่างยั่งยืน โดยเฉพาะไม้สัก (*Tectona grandis*) ซึ่งเป็นไม้เศรษฐกิจที่มีมูลค่าสูงและเป็นที่ต้องการในตลาดทั้งในและต่างประเทศ อย่างไรก็ตาม การศึกษาคาร์บอนฟุตพริ้นท์ในประเทศไทยส่วนใหญ่ยังมุ่งเน้นในภาคอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม อุตสาหกรรมก่อสร้าง และอุตสาหกรรมพลาสติก และบรรจุภัณฑ์ [3]

ดังนั้น การศึกษานี้จึงมุ่งประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของกิจกรรมสวนป่าสัก กรณีศึกษาสวนป่าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยสวนป่าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เป็นพื้นที่สวนป่าสักที่มีการดำเนินกิจกรรมด้านวนวัฒนวิธและการทำไม้อย่างต่อเนื่อง กำหนดขอบเขตการประเมินแบบ Cradle-to-Gate (Business-to-Business: B2B) ครอบคลุม 2 กระบวนการหลัก ได้แก่ กระบวนการวนวัฒนวิธ และกระบวนการทำไม้ โดยมุ่งเน้นการวิเคราะห์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมต่างๆ เพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงปริมาณสำหรับใช้เป็นแนวทางในการวางแผนลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในภาคสวนป่าอย่างมีประสิทธิภาพ

2. วิธีการศึกษา

2.1 พื้นที่ศึกษา

สวนป่าแม่เมาะ สังกัดองค์การอุตสาหกรรมป่าไม้เขตลำปาง สำนักงานองค์การอุตสาหกรรมป่าไม้ภาคเหนือบน ที่ตั้งสำนักงานสวนป่า เลขที่ 126 หมู่ที่ 7 ตำบลบ้านดง อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง พิกัด (UTM) 576618 E / 2037124 N ความสูงจากระดับน้ำทะเลปานกลางเฉลี่ย 300 - 500 เมตร มีพื้นที่บริหารจัดการโดยงานสวนป่าแม่เมาะทั้งสิ้น 14,077 ไร่ โดยดำเนินการปลูกสร้างสวนป่าไม้สักเป็นหลัก ดัง Figure 1

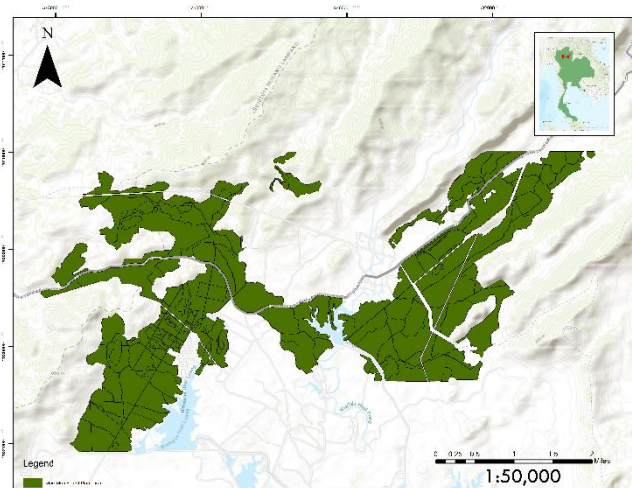


Figure 1 Mae Moh Forest Plantation.

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมสวนป่าสัก ในพื้นที่สวนป่าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง รูปแบบ Business-to-Business (B2B) ครอบคลุมตั้งแต่กระบวนการวนวัฒนวิธจนถึงกระบวนการทำไม้

โดยกระบวนการที่ไม่ได้กำหนดให้อยู่ในขอบเขตของการศึกษา คือ การใช้แรงงานคน การเดินทางของคนงานทั้งไปและกลับจากที่ทำงาน การใช้แรงงานสัตว์ กิจกรรมส่วนสำนักงาน และการกักเก็บคาร์บอน ดัง Figure 2

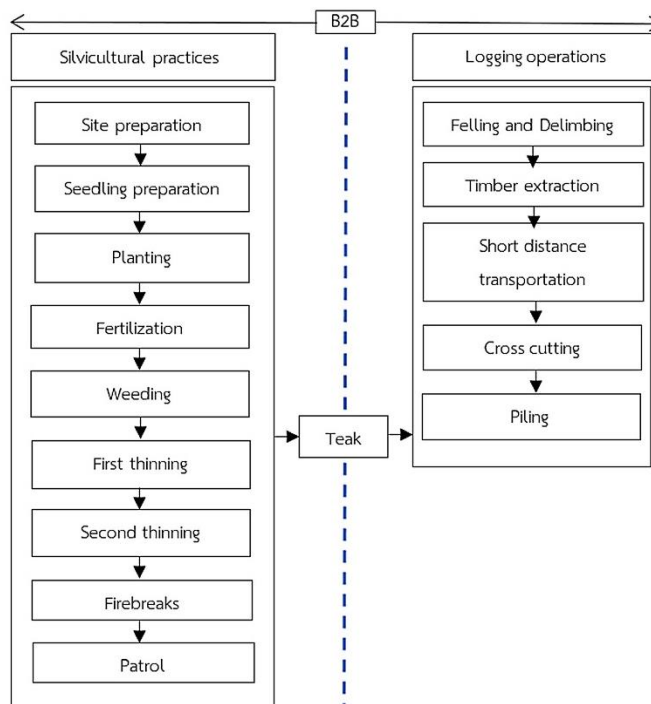


Figure 2 Scope of carbon footprint analysis

2.2 การเก็บรวบรวมข้อมูล

ข้อมูลปฐมภูมิในการศึกษานี้รวบรวมจากกิจกรรมภายในสวนป่าแม่เกาะ จังหวัดลำปาง โดยแบ่งออกเป็น 2 กระบวนการหลัก ได้แก่ กระบวนการวนวัฒนวิธี (silvicultural practices) และกระบวนการทำไม้ (logging operations) การเก็บรวบรวมข้อมูลดำเนินการในช่วงเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2566 โดยการสำรวจภาคสนามร่วมกับการรวบรวมข้อมูลจากการปฏิบัติงานจริงของสวนป่า สำหรับกิจกรรมที่ไม่สามารถเก็บข้อมูลได้โดยตรงในช่วงเวลาดังกล่าว ได้รวบรวมจากเอกสารบันทึกการดำเนินงานของสวนป่า และการประสานงานกับเจ้าหน้าที่ผู้ปฏิบัติงานในพื้นที่ ทั้งนี้ เพื่อให้ข้อมูลครอบคลุมกิจกรรมตลอดรอบการดำเนินงานของสวนป่า

กระบวนการวนวัฒนวิธี (silvicultural practices) ประกอบด้วย การเตรียมพื้นที่ การเตรียมกล้าไม้ และการปลูก โดยใช้แรงงานคนในการขุดหลุมและกำจัดวัชพืชร่วมกับการใช้ปุ๋ย ได้แก่ ปุ๋ยอินทรีย์ ปุ๋ยยูเรีย สูตร 46-0-0 และปุ๋ยเคมี สูตร 15-15-15 ซึ่งมีการใส่ปุ๋ยบำรุงอย่างต่อเนื่องในช่วงปีที่ 1-4 นอกจากนี้ มีการกำจัดวัชพืชโดยใช้เครื่องตัดหญ้าในช่วงปีที่ 1-4 การทำแนวกันไฟดำเนินการในช่วงเดือนพฤศจิกายนถึงธันวาคมของทุกปี โดยใช้แรงงานคนร่วมกับเครื่องจักรกล และมีการลาดตระเวนตรวจสอบพื้นที่โดยรถกระบะตามแผนการป้องกันไฟป่าและการบุกรุกพื้นที่ สำหรับกิจกรรมตัดขยายระยะดำเนินการจำนวน 2 ครั้ง ในช่วงอายุประมาณ 15 และ 22 ปี โดยกิจกรรมดังกล่าวถูกนำไปพิจารณาไว้ในกระบวนการทำไม้ ทั้งนี้ ได้มีการเก็บข้อมูลปริมาณการใช้น้ำมันเชื้อเพลิง ปริมาณปุ๋ย และทรัพยากรอื่น ๆ โดยมีหน่วยการทำงานเป็นไร่ (rai)

กระบวนการทำไม้ (logging operations) ใช้รูปแบบการทำไม้แบบ Tree Length (TL) โดยใช้เลื่อยโซ่ยนต์ในการตัดฟัน ลิดกิ่ง และตัดปลายยอด จากนั้นทำการชักลากไม้ด้วยรถแทรกเตอร์ไปยังกองไม้ริมทาง และทำการวัดขนาดไม้รายท่อน ได้แก่ เส้นรอบวงบริเวณโคน กลาง และปลายท่อน รวมถึงความยาวของไม้ เพื่อนำไปคำนวณปริมาตรไม้ท่อน นอกจากนี้ มีการเก็บข้อมูลจำนวนเที่ยวในการชักลาก การขนส่งไม้ด้วยรถบรรทุกติดตั้งระบบรอก (winch) โดยบันทึกจำนวนไม้ต่อเที่ยว ระยะทาง และระยะเวลา เมื่อถึงจุดหมอนไม้จะดำเนินการตัดทอนตามขนาดที่กำหนด ตีตรา และคัดแยกไม้ตามขนาด โดยใช้ทั้งแรงงานคนและเครื่องจักรกล ภายหลังจากการรวมกองไม้จะรอการจำหน่ายต่อไป ทั้งนี้ ได้มีการเก็บข้อมูลปริมาณการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงของเครื่องจักรกลต่าง ๆ โดยมีหน่วยการทำงานเป็นลูกบาศก์เมตร (m³) โดยแต่ละกระบวนการจะประกอบไปด้วยกิจกรรมการดำเนินงาน และปัจจัยนำเข้า ดังแสดงใน Table 1

Table 1 Activities and resources used in each process

Scope	Activities	Resource
Silvicultural practices	Site preparation	Diesel
	Seedling preparation	Plastics bags
	Planting	Organic Fertilizing, Fertilizing 46-0-0, Fertilizing 15-15-15
	Fertilization	Fertilizing 46-0-0, Fertilizing 15-15-15
	Weeding	Gasoline
	First thinning	Diesel, Gasoline
	Second thinning	Diesel, Gasoline
	Firebreaks	Diesel
	Patrol	Diesel
Logging operations	Felling and Delimiting	Gasoline, Lubricant
	Timber extraction	Diesel
	Short distance transportation	Diesel
	Cross cutting	Gasoline, Lubricant
	Piling	Diesel

2.3 การประเมินค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

1. ประยุกต์ใช้ค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Emission Factor: EF) จากองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) [4] ในการคำนวณ ดังแสดงใน Table 2

Table 2 Emission Factor: EF

Resource	unit	Emission Factor (EF)
Diesel	L	2.7446
Gasoline	L	2.1896
Lubricant	L	0.8319
Plastics bags	kg	2.3990
Organic Fertilizing	kg	0.1097
Fertilizing 46-0-0	kg	3.3036
Fertilizing 15-15-15	kg	1.5083

ที่มา: Thailand Greenhouse Gas Management Organization (2022)

2. การประเมินค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเป็นการคำนวณจากข้อมูลปริมาณและข้อมูลหัตถกรรมที่ได้มาจากการเก็บรวบรวมและแสดงผลให้อยู่ในรูปของกิโกรัมของคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (CO₂ equivalent) สามารถคำนวณโดยใช้สมการ

$$\text{CO}_2 \text{ emission} = \text{Activity Data} \times \text{Emission Factor (EF)} \quad (1)$$

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 การปล่อยก๊าซเรือนกระจก

การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของกิจกรรมสวนป่าสัก กรณีศึกษาสวนป่าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ครอบคลุมทั้งกระบวนการรวนวัฒนธรรมและกระบวนการทำไม้ โดยอ้างอิงตามแผนการปลูกสร้างสวนป่ารอบตัดฟัน 30 ปี พบว่า กิจกรรมหลักประกอบด้วย การสำรวจพื้นที่ การเตรียมกล้าไม้ และการเตรียมพื้นที่โดยใช้รถแทรกเตอร์ร่วมกับแรงงานคนในการจัดเตรียมหลุมปลูกและกำหนดระยะปลูก 4x4 เมตรในระยะเริ่มต้นมีการใส่ปุ๋ยอินทรีย์ร่วมกับปุ๋ยเคมี ได้แก่ ปุ๋ยยูเรีย สูตร 46-0-0 และปุ๋ยเคมี สูตร 15-15-15 และมีการใส่ปุ๋ยบำรุงอย่างต่อเนื่องในช่วงปีที่ 1-4 โดยปีที่ 1 ใส่ปุ๋ยยูเรียเพิ่มเติม 2 ครั้ง ขณะที่ปีที่ 2-4 เน้นการใช้ปุ๋ยเคมี สูตร 15-15-15 นอกจากนี้ ยังมีการกำจัดวัชพืชและบำรุงรักษาอย่างต่อเนื่องในช่วงปีที่ 1-4 ในระยะต่อมามีการตัดขยายระยะจำนวน 2 ครั้ง ในช่วงอายุประมาณ 15 และ 22 ปี และมีการทำไม้ในปีสุดท้ายคือ ปีที่ 30 ขณะที่กิจกรรมการทำแนวกันไฟและการลาดตระเวนดำเนินการอย่างต่อเนื่องทุกปี โดยรายละเอียดของกิจกรรมในแต่ละช่วงปีแสดงดัง Table 3

Table 3 Activity Schedule for the Mae-Moh Forest Plantation

	Site preparation	Seedling preparation	Planting	Organic Fertilizing	Fertilizing 46-0-0	Fertilizing 15-15-15	weeding	First thinning	Second thinning	Firebreaks	Patrol	Felling and Delimiting	Timber extraction	Short distance	Gross cutting	Piling
Year 0	/	/	/	/	/	/				/	/					
Year 1					/**		/***			/	/					
Year 2						/**	/***			/	/					
Year 3						/	/***			/	/					
Year 4						/	/**			/	/					
Year 5-14										/	/					
Year 15								/		/	/	/	/	/	/	/
Year 16-21										/	/					
Year 21										/	/					
Year 22								/	/	/	/	/	/	/	/	/
Year 23-29										/	/					
Year 30										/	/	/	/	/	/	/

Remark: ** Do it 2 times a year, *** Do it 3 times a year

เมื่อทราบการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากทั้งกระบวนการรวนวัฒนธรรมและกระบวนการทำไม้แล้ว สามารถนำมาคำนวณเป็นปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกแบบรายปี เพื่อให้ทราบว่าในแต่ละปีมีการดำเนินกิจกรรมอะไรบ้าง ค่ารวมค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดให้อยู่ในหน่วย kgCO₂eq/rai ดัง Figure 3 โดยพบว่า กระบวนการรวนวัฒนธรรมมีการปล่อยสูงสุดในช่วงปีแรกของการปลูก โดยปีที่ 1 มีค่าการปล่อยเท่ากับ 40.028 kgCO₂eq/rai (ร้อยละ 14.47) รองลงมาคือ ปีที่ 2 และปีที่ 3 เท่ากับ 24.369 (ร้อยละ 8.81) และ 21.352 kgCO₂eq/rai (ร้อยละ 7.72) ตามลำดับ สะท้อนให้เห็นว่า กิจกรรมในช่วงเริ่มต้นมีความเข้มข้นของการดำเนินงานเนื่องจากมีการดำเนินกิจกรรมหลายประเภทพร้อมกัน เช่น การเตรียมพื้นที่ การปลูก และการใส่ปุ๋ย เมื่อพิจารณาในเชิงองค์ประกอบ พบว่า การใช้ปุ๋ยยูเรีย สูตร 46-0-0 และ ปุ๋ยเคมี สูตร 15-15-15 เป็นปัจจัยสำคัญที่

ส่งผลต่อการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เนื่องจากปุ๋ยเคมี สูตร 15-15-15 ก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ (N₂O) ซึ่งมีศักยภาพในการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อนสูงกว่าคาร์บอนไดออกไซด์ถึง 298 เท่า ส่งผลให้ช่วงปีที่มีการใส่ปุ๋ยต่อเนื่อง (ปีที่ 1-4) มีค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในระดับค่อนข้างสูง โดยปุ๋ยที่มีปริมาณไนโตรเจนมาก ก็จะส่งผลให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่มากขึ้น [5] ในส่วนของกระบวนการทำไม้ พบว่า ปีที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงสุดคือ ปีที่ 15 การตัดขายระยะครั้งที่ 1 เท่ากับ 173.546 kgCO₂eq/rai (ร้อยละ 37.31) รองลงมาคือ ปีที่ 22 และปีที่ 30 เท่ากับ 152.721 (ร้อยละ 32.84) และ 138.837 (ร้อยละ 29.85) kgCO₂eq/rai ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า กิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการใช้เครื่องจักรกลและเชื้อเพลิงมีค่าความเข้มข้นของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงต่อหน่วยผลผลิต เนื่องจากต้องใช้พลังงานในการตัดฟัน ชักลาก และขนส่งไม้

ดังนั้น เมื่อพิจารณาภาพรวมตลอดรอบการผลิต 30 ปี พบว่า การปล่อยก๊าซเรือนกระจกรวมมีค่าเท่ากับ 741.698 kgCO₂eq/rai โดยเป็นการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกระบวนการรวนวัชพินวิธี 276.594 kgCO₂eq/rai (ร้อยละ 37.29) และจากกระบวนการทำไม้ 465.104 kgCO₂eq/rai (ร้อยละ 62.71) ซึ่งมีสัดส่วนสูงกว่าอย่างชัดเจน สะท้อนให้เห็นว่า กระบวนการทำไม้เป็นแหล่งการปล่อยก๊าซเรือนกระจกหลักของระบบ อันเนื่องมาจากการใช้เครื่องจักรกลและเชื้อเพลิงในปริมาณสูง นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาในระดับรายปี พบว่า ปีที่ 15 มีการปล่อยสูงที่สุด เท่ากับ 180.100 kgCO₂eq/rai (ร้อยละ 24.08) และเป็นช่วงที่มีผลต่อการปล่อยโดยรวมของระบบมากที่สุด

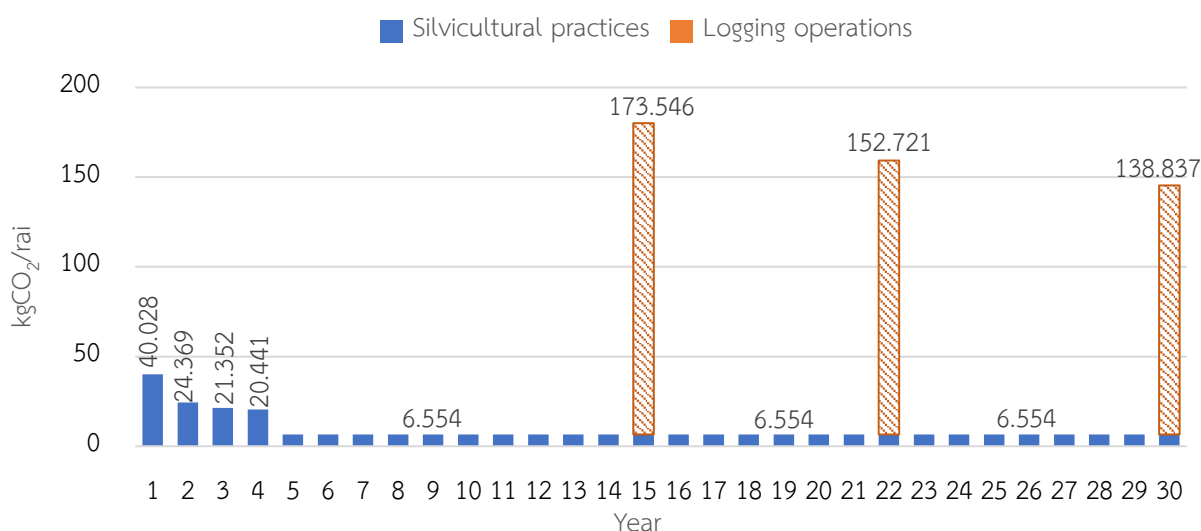


Figure 3 Annual carbon footprint from silvicultural practices and logging operations over a 30-year rotation in a teak plantation. (kgCO₂eq/rai)

3.2 กระบวนการรวนวัชพินวิธี

จากการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในกระบวนการรวนวัชพินวิธี พบว่า มีการปล่อยรวมเท่ากับ 86.080 kgCO₂eq/rai โดยกิจกรรมที่มีการปล่อยสูงที่สุด ได้แก่ การใส่ปุ๋ยบำรุงในช่วงปีที่ 1-4 เท่ากับ 54.082 kgCO₂eq/rai (ร้อยละ 62.83) รองลงมาคือ การกำจัดวัชพินในช่วงปีที่ 1-4 เท่ากับ 10.018 kgCO₂eq/rai (ร้อยละ 11.64) และการเตรียมพื้นที่ เท่ากับ 9.387 kgCO₂eq/rai (ร้อยละ 10.91) ในขณะที่กิจกรรมการลาดตระเวนมีการปล่อยต่ำที่สุด เท่ากับ 0.281 kgCO₂eq/rai (ร้อยละ 0.33) ดังแสดงใน Table 4

Table 4 Greenhouse gas emissions of the silvicultural practices

Activity	Area (rai)	Consumption	Consumption /rai	Carbon Footprint (kgCO ₂ e/rai)	Percentage
Site preparation	172.50	590.00 L	3.42	9.387	10.91
Seedling preparation	2.00	1.00 kg	0.50	1.200	1.39
Planting				4.839	5.62
Organic Fertilizing	2.00	27.25 kg	13.63		
Fertilizing 46-0-0	2.00	1.44 kg	0.72		
Fertilizing 15-15-15	2.00	1.28 kg	0.64		
Fertilization				54.082	62.83
Fertilizing 46-0-0	2.00	9.00 kg	4.50		
Fertilizing 15-15-15	2.00	52.00 kg	26.00		
Weeding	201.50	83.81 L	0.42	10.018	11.64
Firebreaks	8.75	20.00 L	2.29	6.273	7.29
Patrol	13,934.00	1425.60 L	0.10	0.281	0.33
Total				86.080	100.00

เมื่อพิจารณาในกิจกรรมการใส่ปุ๋ยบำรุง ซึ่งเป็นกิจกรรมหลักที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงสุด ดัง Figure 4 พบว่าการใส่ปุ๋ยในช่วงปีที่ 1-4 มีการใช้ปุ๋ยทั้ง 2 ชนิด ได้แก่ ปุ๋ยยูเรีย สูตร 46-0-0 และปุ๋ยเคมี สูตร 15-15-15 โดยปุ๋ยเคมี สูตร 15-15-15 มีสัดส่วนการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงกว่า เท่ากับ 39.216 kgCO₂e/rai (ร้อยละ 72.51) ขณะที่ปุ๋ยสูตร 46-0-0 มีค่าเท่ากับ 14.866 kgCO₂e/rai (ร้อยละ 27.49) ผลดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่า การใช้ปุ๋ยเคมี โดยเฉพาะปุ๋ยสูตร 15-15-15 เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในกระบวนการวนวัฒนวิธี เนื่องจากมีการใช้อย่างต่อเนื่องในช่วงการบำรุงรักษา

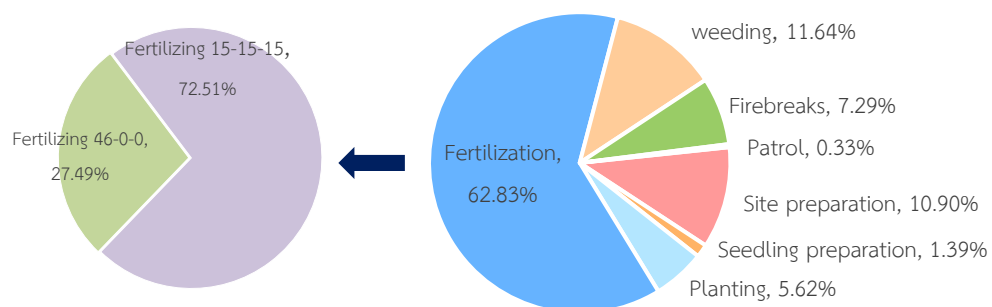


Figure 4 The amount of greenhouse gas emissions of the silvicultural practices

ดังนั้นเพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในกระบวนการวนวัฒนวิธีนั้นมีอยู่ 2 แนวทาง คือ การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการใช้ปุ๋ยทั้ง 2 ชนิด โดยการใส่ปุ๋ยทั้งปุ๋ยเคมี สูตร 15-15-15 และ ปุ๋ยยูเรีย สูตร 46-0-0 ยังถือว่าเป็นปัจจัยหลักและสำคัญที่ช่วยให้พืชเติบโตได้อย่างมีประสิทธิภาพ สมบูรณ์ แข็งแรง และมีความพร้อมในการให้ผลผลิตที่ดีได้ การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจึงควรมุ่งเน้นไปที่การใส่ปุ๋ยอย่างไรให้เหมาะสม โดยอาจจะทำการวิเคราะห์ค่าดินเพื่อให้ใส่ปุ๋ยเท่าที่จำเป็นตามความต้องการของพืช รวมถึงควรมีจัดการธาตุอาหารแบบผสมผสาน โดยการใช้ปุ๋ยเคมีผสมผสานกับปุ๋ยอินทรีย์ให้มากขึ้น เนื่องจากผลการศึกษาของ สถาบัน Rodale ได้เก็บข้อมูลเปรียบเทียบระหว่างเกษตรกรอินทรีย์กับเกษตรกรเคมีเป็นเวลา 27 ปี พบว่าพื้นที่เกษตรกรอินทรีย์มีปริมาณคาร์บอนในดินสูงขึ้นเกือบร้อยละ 30 สามารถเก็บกักน้ำได้ดีทำให้พืชทนทานต่อความแล้งและโรคพืช เกษตรอินทรีย์สามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถึงร้อยละ 40 ของปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั่วโลก [6] และค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของปุ๋ยอินทรีย์ถือว่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับปุ๋ยเคมีอื่นๆ จึงเป็นปุ๋ยทางเลือกอีกชนิดที่น่าจะมี

การนำมาผสมผสานให้มีการใช้เพิ่มมากยิ่งขึ้น และการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการใช้น้ำมันเชื้อเพลิง โดยอาจจะมีการปรับเปลี่ยนใช้เครื่องจักรกลที่มีกำลังเครื่องยนต์ที่เหมาะสมกับงาน มีการนำเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ คำนึงถึงช่วงเวลาที่เหมาะสมกับการกำจัดวัชพืช รวมทั้งปัจจัยเรื่องการดูแลรักษาเครื่องจักรกลให้เหมาะสมอยู่เสมอ เพื่อให้สามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพและประหยัดเชื้อเพลิงมากที่สุด

3.3 กระบวนการทำไม้

จากการเก็บข้อมูลของต้นสักกลุ่มตัวอย่างที่ตัดฟัน จำนวน 53 ต้น โดยวัดขนาดเส้นรอบวงบริเวณโคน กลาง และปลายท่อน รวมถึงความยาวของไม้ พบว่า เส้นรอบวงบริเวณโคนมีค่าต่ำสุด 69.00 เซนติเมตร และค่าสูงสุด 177.00 เซนติเมตร ส่วนความยาวของไม้มีค่าต่ำสุด 7.27 เมตร และค่าสูงสุด 17.12 เมตร ขณะที่ปริมาตรไม้มีค่าต่ำสุด 0.121 และค่าสูงสุด 1.128 ลูกบาศก์เมตร โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.489 ลูกบาศก์เมตร ดังแสดงใน Table 5

Table 5 Quantitative Data on Tree Characteristics in the Teak Plantation (n=53)

Teak logs	Min	Max	Avg	S.D.
Girth (Base) (cm)	69.00	177.00	105.208	21.492
Girth (Middle) (cm)	41.00	98.00	68.385	11.584
Girth (End) (cm)	34.80	70.00	49.084	7.854
Length (m)	7.27	17.12	12.702	1.861
Volume (m ³)	0.121	1.128	0.489	0.207

จากการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของกระบวนการทำไม้ทั้งหมด เท่ากับ 14.196 kgCO₂eq/m³ โดยกิจกรรมที่มีการปล่อยสูงที่สุด ได้แก่ การขนส่งไม้ระยะสั้น โดยใช้รถจหนั่ง มีค่าเท่ากับ 5.298 kgCO₂eq/m³ (ร้อยละ 37.32) รองลงมาคือ การชักลากไม้ด้วยรถแทรกเตอร์ เท่ากับ 4.239 kgCO₂eq/m³ (ร้อยละ 29.86) และการรวบรวมกองไม้ เท่ากับ 4.128 kgCO₂eq/m³ (ร้อยละ 29.44) ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า กิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนย้ายไม้เป็นปัจจัยหลักที่ก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในกระบวนการทำไม้ เนื่องจากมีการใช้เครื่องจักรกลและเชื้อเพลิงในปริมาณสูงต่อการดำเนินงาน ขณะที่กิจกรรมการตัดฟันไม้มีการปล่อยต่ำที่สุด เท่ากับ 0.193 kgCO₂eq/m³ (ร้อยละ 1.36) ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าการใช้เครื่องจักรมีผลต่อการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากกว่ากิจกรรมที่ใช้แรงงานเป็นหลักดังแสดงใน Table 6

Table 6 Greenhouse gas emission from Logging operations

Activity	List	Volume (m ³)	Consumption (L)	Consumption (L/m ³)	EF	Carbon Footprint (kgCO ₂ eq/m ³)	Percentage
Felling and	Gasoline	25.90	2.12	0.08	2.1896	0.193	1.36
Delimiting	Lubricant		0.43	0.02	0.8319		
Timber extraction	Diesel	25.90	40.00	1.54	2.7446	4.239	29.86
Short distance transportation	Diesel	25.90	50.00	1.93	2.7446	5.298	37.32
Cross cutting	Gasoline	16.42	1.90	0.12	2.1896	0.286	2.02
	Lubricant		0.66	0.04	0.8319		
Piling	Diesel	16.42	25.00	1.50	2.7446	4.128	29.44
Total						14.196	100.00

เมื่อพิจารณาเป็นรายกิจกรรมของการขนส่งระยะสั้น การชักลากไม้ และการรวมกอง ดัง Figure 5 ซึ่งเป็น 3 กิจกรรมหลักที่มีค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงสุดและมีสัดส่วนการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่ใกล้เคียงกันนั้น พบว่า ทั้ง 3 กิจกรรมมีการใช้น้ำมันดีเซลและใช้เครื่องจักรกลหนักเหมือนกัน คือ รถจอบหนักรถแทรกเตอร์ที่มีกำลังแรงม้ามาก มีการเผาไหม้เคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา ซึ่งการเผาไหม้เคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาจะปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากกว่าการเผาไหม้แบบอยู่กับที่ของเลื่อยโซ่ยนต์ที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่น้อยมากเมื่อเทียบกับเครื่องจักรกลหนัก ผลดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่า กิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนย้ายไม้เป็นแหล่งการปล่อยก๊าซเรือนกระจกหลักของกระบวนการทำไม้

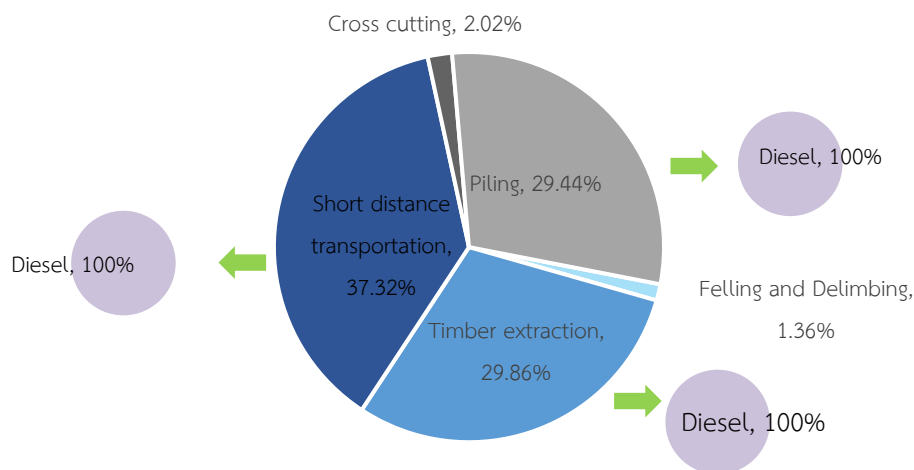


Figure 5 The amount of greenhouse gas emissions of the Logging operations

ดังนั้น การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในกระบวนการทำไม้ควรมุ่งเน้นไปที่การวางแผนการดำเนินงานให้มีประสิทธิภาพ โดยสามารถนำระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) มาช่วยวิเคราะห์ตั้งแต่ขั้นตอนการวางแผนปลูก การสำรวจพื้นที่ และข้อมูลตำแหน่งต่าง ๆ เช่น ตำแหน่งต้นไม้ เส้นทางน้ำ และสภาพภูมิประเทศ เพื่อกำหนดตำแหน่งจุดหมอนไม้ จุดรวมกอง และเส้นทางการชักลากและขนส่งให้เหมาะสม ซึ่งจะช่วยลดระยะทางและความลาดชันของเส้นทาง ส่งผลให้ลดการใช้เครื่องจักรกลและการใช้เชื้อเพลิงได้ นอกจากนี้ ควรเลือกใช้เครื่องจักรกลให้เหมาะสมกับลักษณะพื้นที่และภาระงาน รวมถึงมีการบำรุงรักษาอย่างสม่ำเสมอ และปรับเปลี่ยนเมื่อมีอายุการใช้งานสูง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานและลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ทั้งนี้ การวางแผนการทำไม้ตั้งแต่ระยะเริ่มต้นจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงานทั้งในด้านเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม ในส่วนของการจัดการเศษไม้หลังการทำไม้ เช่น ตอไม้ กิ่งไม้ และปลายไม้ ควรปล่อยทิ้งไว้ในพื้นที่เพื่อให้อยู่สลายตามธรรมชาติ ซึ่งจะช่วยเพิ่มอินทรีย์วัตถุ ธาตุอาหาร และความชื้นในดิน อันเป็นแนวทางที่เหมาะสมต่อการฟื้นฟูป่าระบบนิเวศ [7] ขณะที่การเผาเศษไม้ แม้จะช่วยลดปริมาณได้รวดเร็ว แต่ก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในปริมาณสูงและทำให้สูญเสียธาตุอาหารในดิน จึงควรหลีกเลี่ยงหรือจำกัดการใช้ในระบบการจัดการป่าไม้ที่ยั่งยืน [8]

4. สรุปและข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษา พบว่า แหล่งการปล่อยก๊าซเรือนกระจกหลักในสวนป่าสัก ได้แก่ กิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการใช้เครื่องจักรกลและเชื้อเพลิงในกระบวนการทำไม้ เช่น การชักลากและการขนส่งไม้ รวมถึงการใช้ปุ๋ยเคมีในช่วงการปลูกและบำรุงรักษา โดยกิจกรรมเหล่านี้มีระดับการปล่อยที่แตกต่างกันตามลักษณะการดำเนินงาน ประเภทและขนาดของเครื่องจักร สภาพภูมิประเทศ และเส้นทางภายในพื้นที่ ดังนั้น การศึกษาข้อมูลเพิ่มเติม เช่น กำลังและอายุของเครื่องจักร ระยะทางในการขนส่ง และปริมาตรไม้ที่ดำเนินการในแต่ละกิจกรรม จะช่วยเพิ่มความแม่นยำของการประเมิน และนำไปสู่การกำหนดแนวทางลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การดำเนินงานในสวนป่าควรคำนึงถึงนโยบายการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของประเทศ ซึ่งตั้งเป้าหมายสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอน (Carbon Neutrality) ภายในปี ค.ศ. 2050 และการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิเป็นศูนย์ (Net Zero GHG Emissions) ภายในปี ค.ศ. 2065 รวมถึงการยกระดับเป้าหมายการลดก๊าซเรือนกระจกตาม NDC (Nationally Determined Contribution) จากร้อยละ 20-25 เป็นร้อยละ 30-40 ภายในปี ค.ศ. 2030 [9] ทั้งนี้ยังสอดคล้องกับนโยบาย Thailand 4.0 ที่มุ่งพัฒนาเศรษฐกิจด้วยนวัตกรรมและเทคโนโลยีสมัยใหม่เพื่อความยั่งยืน

แนวทางในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมในสวนป่า ควรเริ่มตั้งแต่การวางแผนการปลูกที่เหมาะสม วิเคราะห์ธาตุอาหารในดินเพื่อจัดการธาตุอาหารแบบผสมผสาน และส่งเสริมการใช้ปุ๋ยอินทรีย์เพื่อลดการพึ่งพาปุ๋ยเคมี สำหรับ กระบวนการทำไม้ ควรประยุกต์ใช้เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศ (GIS) เพื่อการวางแผนเส้นทางและการปรับปรุงถนนภายในสวนป่าให้ เหมาะสม ที่วางแผนเครือข่ายถนนในสวนป่าอย่างมีประสิทธิภาพ และช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและต้นไม้ที่ยังเหลืออยู่ [10] ตลอดจนเลือกใช้เครื่องจักรกลที่มีขนาดเหมาะสมกับลักษณะงาน และบำรุงรักษาเครื่องจักรอย่างสม่ำเสมอ เพื่อยืดอายุการใช้ งานและลดการใช้พลังงานอย่างสิ้นเปลือง

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ นายรณกฤต ฤทธิยา หัวหน้าสวนป่าแม่เกาะ นางสาวสุพรรณิภา สุทธิคุณ พนักงาน (ระดับ 4) ผู้ช่วยหัวหน้าสวนป่าแม่เกาะ รวมถึงเจ้าหน้าที่สวนป่าแม่เกาะทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ และความร่วมมือในการสำรวจและเก็บรวบรวมข้อมูลภาคสนาม และ ขอขอบพระคุณคณาจารย์และบุคลากรภาควิชาวิศวกรรมป่าไม้ทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนขอขอบพระคุณครอบครัว เพื่อน และผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่าน ที่ให้กำลังใจและการสนับสนุนจนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] ประภัตร ไทยประดิษฐ์, เสรีย์ ตูประกาย, มงคล รัชชะ, และโกวิท สุวรรณหงษ์. 2566. การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์ กรณีศึกษา: กระบวนการผลิตแก๊วไม้. วารสารสุขภาพและสิ่งแวดล้อมปีที่ 8.3.178-186.
- [2] กรมป่าไม้. 2563. นโยบายป่าไม้แห่งชาติ. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. เข้าถึงได้จากเว็บไซต์ https://forestinfo.forest.go.th/Content/file/policy/national_forest_policy.pdf?utm_source=chatgpt.com, (เข้าถึงเมื่อ 11 สิงหาคม 2568)
- [3] องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน). 2559. บริษัทและผลิตภัณฑ์ที่ได้รับการรับรองคาร์บอนฟุตพริ้นท์. เข้าถึง ได้จากเว็บไซต์ <https://thaicarbonlabel.tgo.or.th/index.php?lang= TH&mod=Y0hKdlpVmpk SE5WWhCd2NtOTJZV3c9>, (เข้าถึงเมื่อ 11 ธันวาคม 2566)
- [4] องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน). 2565. Emission Factor. เข้าถึงได้จากเว็บไซต์ <https://thaicarbonlabel.tgo.or.th/index.php?lang=TH&mod= Y0hKdlpVmpkSE5mWlcxcGMzTnBiMjQ9>, (เข้าถึงเมื่อ 9 ธันวาคม 2566)
- [5] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2007. Climate Change 2007 Impacts, Adaptation and Vulnerability. IPCC Forth Assessment Report, เข้าถึงได้จากเว็บไซต์ https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ar4_wg2_full_report.pdf, (เข้าถึงเมื่อ 30 ธันวาคม 2567)
- [6] Grain. 2021. Agroecology vs. climate chaos: Farmers leading the battle in Asia, <https://grain.org/en/article /6632- agroecology-vs-climate-chaos-farmers-leading-the-battle-in-asia>, (เข้าถึงเมื่อ 24 มกราคม 2567)
- [7] Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2010. Criteria and indicators for sustainable forest management, เข้าถึงได้จากเว็บไซต์ <https://www.fao.org/forestry/sfm/en/>, (เข้าถึงเมื่อ 15 สิงหาคม 2568)
- [4] World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development. 2013. Technical guidance for calculating scope 3 emissions (version 1.0). เข้าถึงได้จากเว็บไซต์ https://ghgprotocol.org/sites/default/ files/standards/Scope3_Calculation_Guidance_0.pdf, (เข้าถึงเมื่อ 13 สิงหาคม 2568)
- [9] สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2566. ลดโลกร้อนด้วย Carbon Neutrality และ Net Zero Emissions. เข้าถึงได้จากเว็บไซต์ <https://url.in.th/luoGk>, (เข้าถึงเมื่อ 20 ธันวาคม 2566)
- [10] Picchio R., Pignatti G., Marchi E., Latterini F., Benanchi M., Foderi C., Venanzi R., Verani S. 2018. The Application of Two Approaches Using GIS Technology Implementation in Forest Road Network Planning in an Italian Mountain Setting. Forests. 9(5), 277; <https://doi.org/10.3390/f9050277>.

อิทธิพลของปริมาณธาตุทองแดงต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของอะลูมิเนียมเจือเกรด 1100
ในกระบวนการหล่อขึ้นรูป
Effect of Copper Addition on Property Changes of Cast 1100 Aluminum Alloy

สุนิสา คำสุข^{1,*} พัชญาภา สุทธิสถิต¹ และ กัญญารัตน์ ศรีเมือง¹
Sunisa Khamsuk^{1,*}, Patchayapa Suttisatit¹ and Kanyarat Srumuang¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จังหวัดชลบุรี 20131 ประเทศไทย

¹Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University, Chonburi Province, 20131, Thailand

*Corresponding author: Sunisa Khamsuk, e-mail address: sunisak@eng.buu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาอิทธิพลของปริมาณธาตุทองแดงต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของอะลูมิเนียมเจือเกรด 1100 ในกระบวนการหล่อขึ้นรูป ในการศึกษาครั้งนี้ทำการหลอมแผ่นอะลูมิเนียมเจือเกรด 1100 ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการเติมผงทองแดงในปริมาณร้อยละ 1 ถึง 5 โดยน้ำหนัก แท่งโลหะเจือที่ได้จากการหล่อขึ้นรูปจะทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ความแข็ง ความแข็งแรงดึง และโครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ เครื่องทดสอบความแข็ง เครื่องทดสอบบอเนกประสงค์ และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่า การเติมทองแดงทำให้น้ำหนักของช่องว่างระหว่างกิ่งของเดนไดรต์ลดลง ปริมาณเฟสที่สองเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความแข็งและความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ค่าความแข็งและความแข็งแรงดึงของอะลูมิเนียมเจือเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 141 และ 64 ตามลำดับ เมื่อเติมธาตุทองแดงในปริมาณ ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก องค์ความรู้ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการหล่อโลหะเพื่อปรับปรุงสมบัติของอะลูมิเนียมให้สามารถนำไปใช้งานทางวิศวกรรมที่ต้องการความแข็งแรงสูง

คำสำคัญ: ธาตุทองแดง, อะลูมิเนียมเจือ, ความแข็ง, ความแข็งแรงดึง, โครงสร้างจุลภาค

Abstract

This research aims to investigate the influence of copper content on the properties of aluminum alloy grade 1100 during the casting process. Aluminum 1100 sheets were melted, followed by the addition of copper powder at concentrations of 1–5 wt%. The resulting cast alloy ingots were analyzed for chemical composition, hardness, tensile strength, and microstructure using a spectrometer, hardness tester, universal testing machine, and scanning electron microscope (SEM), respectively. The results indicated that the addition of copper led to a reduction in secondary dendrite arm spacing (SDAS) and an increase in second-phase particles, which significantly improved both hardness and tensile strength. Specifically, at 5 wt% copper addition, the hardness and tensile strength increased by 141% and 64%, respectively, compared to the base alloy. This knowledge can be applied in the metal casting industry to enhance the mechanical properties of commercial-grade aluminum for engineering applications requiring high strength.

Keywords: Copper, Aluminum alloy, Hardness, Tensile strength, Microstructure

1. บทนำ

ปัจจุบันอะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมเจือถูกนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เป็นจำนวนมาก เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมอากาศยาน อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ อุตสาหกรรมโครงสร้าง และอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากอะลูมิเนียมมีสมบัติที่หลากหลายประการ ทั้งน้ำหนักเบา ทนการกัดกร่อน ยืดหยุ่นตัวสูง จุดหลอมเหลวต่ำ และขึ้นรูปง่าย [1] ถึงแม้ว่าอะลูมิเนียมจะมีข้อดีตามที่กล่าวมาข้างต้น แต่อะลูมิเนียมยังไม่สามารถนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความแข็งแรงสูงได้ ทำให้มีการวิจัยและพัฒนาวิธีการเพิ่มความแข็งแรงให้แก่อะลูมิเนียมอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้สามารถนำอะลูมิเนียมไปใช้ในงานที่หลากหลายตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้งานได้มากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมยานยนต์ที่ต้องการชิ้นส่วนที่มีน้ำหนักเบาและความแข็งแรงสูง เพื่อลดการใช้พลังงานและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่ก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน กลไกที่ถูกนำมาใช้ในการเพิ่มความแข็งแรงให้แก่อะลูมิเนียมประกอบด้วย การลดขนาดของเกรน การทำให้เป็นสารละลายของแข็ง

การตกตะกอนเฟสที่สอง และการขึ้นรูปเย็น [2] จากกลไกการเพิ่มความแข็งแรงที่กล่าวมานี้ การทำให้เป็นสารละลายของแข็งและการตกตะกอนเฟสที่สอง เป็นกลไกที่นิยมใช้สำหรับการเพิ่มความแข็งแรงให้แก่อะลูมิเนียม เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและต้นทุนต่ำ ธาตุที่นิยมเติมเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้แก่อะลูมิเนียม คือ ทองแดง แมกนีเซียม ซิลิกอน สังกะสี และแมงกานีส [3-7] จากการศึกษาของ Lia และคณะ (2024) พบว่าการเติมธาตุทองแดงปริมาณร้อยละ 0.32 โดยน้ำหนักในกระบวนการหล่อขึ้นรูปอะลูมิเนียมเจือผสมซิลิกอน แมกนีเซียม และแมงกานีสด้วยกระบวนการหล่อสูญญากาศ พบว่าค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 2 [8] ขณะที่ Surani และคณะ (2024) พบว่าการเติมธาตุทองแดงในปริมาณร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนักในอะลูมิเนียมเจือเกรด 365 ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่อทวน ค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 9.73 [9]

ธาตุทองแดงเป็นหนึ่งในธาตุที่นิยมเติมในอะลูมิเนียมเนื่องจากเมื่อเติมในอะลูมิเนียมแล้วทำให้จุดหลอมเหลวของอะลูมิเนียมต่ำลงและสามารถทำให้เกิดสารละลายของแข็งได้ง่าย ซึ่งแตกต่างจากการเติมธาตุอื่น เช่น แมงกานีส เหล็ก หรือ เซอร์โคเนียม ที่ทำให้จุดหลอมเหลวของอะลูมิเนียมสูงขึ้น ยกต่อการหล่อหลอมขึ้นรูป จากงานวิจัยในอดีต Ahmed และคณะ (2023) พบว่าการเติมธาตุทองแดงในปริมาณร้อยละ 1 ถึง 10 โดยน้ำหนักลงในอะลูมิเนียมความบริสุทธิ์สูง (ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5) ค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นในช่วงการเติมทองแดงร้อยละ 1 ถึง 8 จากนั้นลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเป็นร้อยละ 10 [3] ในขณะที่ Adeosun และคณะ (2011) รายงานว่าค่าความแข็งแรงดึงของอะลูมิเนียมเจือเกรด 6063 เพิ่มขึ้นในช่วงการเติมทองแดงร้อยละ 1 ถึง 3 เมื่อเพิ่มปริมาณสูงขึ้นค่าความแข็งแรงดึงจะลดลงอย่างต่อเนื่อง และคณะผู้วิจัยพบว่าการเติมทองแดงมากกว่าร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก ค่าความแข็งแรงดึงจะต่ำกว่าอะลูมิเนียมเจือที่ไม่ได้เติมทองแดง โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ปริมาณทองแดงร้อยละ 20 ค่าความแข็งแรงดึงอยู่ที่ประมาณ 45 เมกะปาสคาล เท่านั้น ซึ่งต่ำกว่าก่อนการเติมทองแดงมาก (ค่าเดิมประมาณ 100 เมกะปาสคาล) [10] จากผลการวิจัยข้างต้นแสดงให้เห็นว่า แม้การเติมทองแดงจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับอะลูมิเนียมได้ แต่ปริมาณการเติมที่เหมาะสมเพื่อให้ได้สมบัติสูงสุดนั้นยังมีความแตกต่างกันตามชนิดของโลหะพื้น (Matrix) ดังนั้น อิทธิพลของปริมาณทองแดงที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของอะลูมิเนียมแต่ละเกรดยังคงเป็นประเด็นที่จำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติม

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงดำเนินการศึกษาอิทธิพลของปริมาณธาตุทองแดงต่อการเปลี่ยนโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมเจือเกรด 1100 ในกระบวนการหล่อขึ้นรูป

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

วัสดุหลักที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ 2 ชนิด คือ แผ่นอะลูมิเนียมเจือเกรด 1100 และผงทองแดง ซึ่งรายละเอียดของวัสดุแต่ละชนิดมีดังนี้

แผ่นอะลูมิเนียมเจือเกรด 1100 ที่ใช้ในงานวิจัยนี้จัดจำหน่ายโดยบริษัท เอส ซี เอ็ม สตีล จำกัด แผ่นอะลูมิเนียมเจือที่ใช้มีความหนา 3 มิลลิเมตร กว้าง 4 เมตร และยาว 4 เมตร อะลูมิเนียมเจือที่ใช้ในการวิจัยนี้มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.31 โดยมีธาตุหลักเป็นธาตุเจือหลักประมาณร้อยละ 0.49 องค์ประกอบทางเคมีของอะลูมิเนียมเจือจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์รุ่น OES ARL easySpark แสดงในตารางที่ 1

ผงทองแดงที่ใช้เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้แก่อะลูมิเนียมเจือ และศึกษาอิทธิพลของปริมาณธาตุทองแดงต่อวิวัฒนาการโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมเจือในงานวิจัยนี้ ผงทองแดงมีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.95-99.98

Table 1 Chemical composition of 1100 aluminum alloy (wt.%)

Cu	Si	Fe	Other	Al
0.06	0.08	0.49	0.06	99.31

2.2 การหล่อขึ้นรูปแท่งโลหะอะลูมิเนียม-ทองแดงเจือ

การหล่อขึ้นรูปอะลูมิเนียม-ทองแดงเจือในครั้งนี้ เริ่มจากตัดแผ่นอะลูมิเนียมเจือเกรด 1100 ให้เป็นแผ่นเล็กขนาดความกว้างประมาณ 3 ± 0.5 เซนติเมตรและความยาว 4 ± 0.5 เซนติเมตร จากนั้นนำแผ่นอะลูมิเนียมใส่เข้าหลอมแกรไฟต์ ทำการหลอมอะลูมิเนียมเจือที่อุณหภูมิ 750 ± 10 องศาเซลเซียส ในเตาไฟฟ้าภายใต้บรรยากาศปกติ จากนั้นทำการเติมผงทองแดงปริมาณร้อยละ 1, 2, 3, 4 และ 5 โดยน้ำหนัก ในอะลูมิเนียมเจือหลอมเหลว ทำการคนผสมด้วยแท่งแกรไฟต์ จากนั้นทำการหล่ออะลูมิเนียม-ทองแดงเจือในแม่พิมพ์โลหะทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 32 มิลลิเมตร สูง 390 มิลลิเมตร (รูปที่ 1 (a) ที่อุณหภูมิ 550 ± 10 องศาเซลเซียส ปล่อยให้ให้น้ำโลหะแข็งตัวในแม่พิมพ์เป็นเวลา 120 ± 5 วินาที จากนั้นนำแม่พิมพ์จุ่มน้ำให้แท่งโลหะเจือที่แข็งตัวแล้วเย็นตัว แท่งอะลูมิเนียมเจือที่ผสมทองแดงในปริมาณร้อยละ 1 ถึง 5 โดยน้ำหนักจะถูกนำไปตัดตามรูปที่ 1 (b) จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้จากการตัดทั้ง 3 ชิ้น (ชิ้นงานบริเวณด้านบน ตรงกลางและด้านล่างของชิ้นงานหล่อ) ไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีตามตำแหน่งที่ระบุในรูปที่ 1 (c) ด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ เพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุทองแดงในอะลูมิเนียมเจือปริมาณธาตุทองแดงในแท่งอะลูมิเนียมเจือหลังการหล่อขึ้นรูปแสดงในตารางที่ 2 จากผลการวิเคราะห์พบว่าธาตุทองแดงมีการกระจายตัวในเนื้ออะลูมิเนียมเจือค่อนข้างสม่ำเสมอ

Figure 1 (a) Permanent mold used in the research, (b) positions of specimen cutting, and (c) positions of chemical composition analysis.

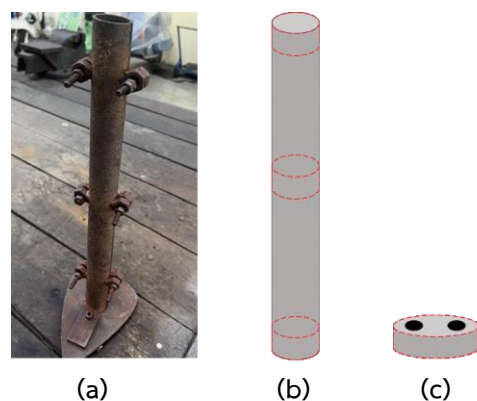


Table 2 Chemical composition of the aluminum-copper alloy ingots.

Aluminum alloy	Chemical composition (wt.%)								SD
	Top section		Middle section		Bottom section		Average (wt.%)		
	Cu	Al alloy	Cu	Al alloy	Cu	Al alloy	Cu	Al alloy	
As-received 1100Al	0.06	99.94	0.06	99.94	0.05	99.95	0.06	99.94	0.01
Al-1%wt. Cu	1.13	98.26	1.10	98.19	1.19	98.21	1.14	98.22	0.05
Al-2%wt. Cu	2.19	97.19	2.21	97.15	2.21	97.27	2.20	97.20	0.01
Al-3%wt. Cu	3.32	96.56	3.45	96.97	3.47	96.66	3.41	96.73	0.08
Al-4% wt. Cu	4.09	95.87	4.05	95.47	4.01	95.51	4.05	95.61	0.04
Al-5% wt. Cu	5.54	93.21	5.79	93.42	5.58	93.74	5.63	93.46	0.13

2.3 การหล่อขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ

การหล่อขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบเริ่มจากนำแท่งอะลูมิเนียม-ทองแดงเจือที่ได้จากการหล่อขึ้นรูปและวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุในเนื้อโลหะในหัวข้อที่ 2.2 ทั้ง 6 เจือมาตัดและทำการหลอมอีกครั้งที่อุณหภูมิ 750 ± 10 องศาเซลเซียส (เหนือจุดหลอมเหลวเพื่อเพิ่มความไหลตัว) ด้วยเตาไฟฟ้าภายใต้บรรยากาศปกติ จากนั้นทำการหล่อในแม่พิมพ์โลหะทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร สูง 120 มิลลิเมตร ที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 550 ± 10 องศาเซลเซียส ปล่อยให้เนื้อโลหะแข็งตัวในแม่พิมพ์เป็นเวลา 120 ± 5 วินาที จากนั้นนำแม่พิมพ์พร้อมชิ้นงานทดสอบที่แข็งตัวแล้วจุ่มในน้ำเพื่อให้ชิ้นงานทดสอบเย็นตัว

2.4 การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลและโครงสร้างจุลภาค

สมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมเจือและอะลูมิเนียมเจือผสมทองแดงที่ปริมาณต่าง ๆ จะทำการศึกษาค่าความแข็งและความแข็งแรงดึง โดยค่าความแข็งทำการวัดด้วยเครื่องทดสอบความแข็งรุ่น Innovatest Europe BV ด้วยหัวทดสอบบรินเนลล์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร แรงกด 6.25 กิโลกรัมแรง จำนวนทั้งหมด 5 ตำแหน่ง ชิ้นงานที่ใช้สำหรับการทดสอบความแข็งเตรียมผิวหน้าทดสอบโดยการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 240 ถึง 1,000 ส่วนการทดสอบความแข็งแรงดึงใช้เครื่องทดสอบเนกประสงค์รุ่น NRI-TS500-50B ขนาดแรงดึงสูงสุด 5 ตัน การทดสอบดำเนินการที่อุณหภูมิห้องด้วยอัตราเร็วแรงดึงที่ 1 มิลลิเมตรต่อนาที ชิ้นงานทดสอบแรงดึงเตรียมตามมาตรฐาน ASTM E8 ขนาดช่วงเส้นผ่าศูนย์กลางช่วงทดสอบ 6 ± 0.1 มิลลิเมตร และขนาดความยาวช่วงทดสอบ 24 ± 1 มิลลิเมตร จำนวน 5 ชิ้นงานต่อเงื่อนไข

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 การทดสอบความแข็ง

ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมเจือและอะลูมิเนียมเจือผสมทองแดงที่ปริมาณต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 2 ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมบริสุทธิ์สูงและอะลูมิเนียมเจือเกรด 6063 ที่เติมธาตุทองแดงขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่อจากงานวิจัยของ Ahmed และคณะ (2023) และ Adeosun และ คณะ (2011) ถูกนำเสนอในรูปที่ 2 ด้วย เพื่อทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของอะลูมิเนียมและอะลูมิเนียมเจือเมื่อเติมธาตุทองแดง จากการศึกษาพบว่าค่าความแข็งเฉลี่ยของอะลูมิเนียมเจือคือ 20.99 HB เมื่อทำการเติมทองแดงในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนักพบว่าค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเป็น 28.42 HB ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมเจือเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็น 35.88, 42.68, 43.60 และ 50.67 HB เมื่อเติมผงทองแดงปริมาณร้อยละ 2, 3, 4 และ 5 โดยน้ำหนักตามลำดับ สาเหตุที่ทำให้ความแข็งของอะลูมิเนียมเจือเพิ่มขึ้นน่าจะเกิดจากทองแดงละลายในอะลูมิเนียมในระหว่างกระบวนการหล่อทำให้เกิดเป็นสารละลายของแข็งอะลูมิเนียมทองแดง (α -Al phase) และจากแผนภาพเฟสอะลูมิเนียมทองแดงพบว่า การเติมทองแดงในอะลูมิเนียมทำให้เกิดเฟสที่ 2 คือ เฟสที่ตัว-คอปเปอร์ไดอะลูไมด์ (θ , Al_2Cu) ที่เกิดจากทองแดงทำปฏิกิริยาเคมีกับอะลูมิเนียมเกิดเป็นสารประกอบโลหะ θ เฟสขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมเจือเกรด 1100 เพิ่มขึ้น เฟสที่ 2 ที่เกิดขึ้นและการแทนที่ของอะตอมทองแดงในโครงสร้างผลึก (Solid Solution) ก่อให้เกิดความเค้นในโครงข่ายผลึกซึ่งทำหน้าที่ขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันตามกลไกการเพิ่มความแข็งแรงด้วยสารละลายของแข็งและกลไกการตกตะกอนเฟสที่ 2 ทำให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น การศึกษาครั้งนี้ค้นพบว่าค่าความแข็งของอะลูมิเนียมเจือเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณทองแดงและค่าความแข็งของอะลูมิเนียมเจือเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 141 เมื่อเติมธาตุทองแดงร้อยละ 5 เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Ahmed et al. (2023) และ Adeosun et al. (2011) พบว่าแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของความแข็งสอดคล้องกัน อย่างไรก็ตาม ความแตกต่างของค่าความแข็งเริ่มต้นระหว่าง Al 1100 Al 6063 และ อะลูมิเนียมบริสุทธิ์สูง (Pure Al) อาจมีสาเหตุมาจากอุณหภูมิการหล่อและการเตรียมหลังการหล่อแตกต่างกัน โดย Al 6063 ผ่านกระบวนการทำให้เป็นสารละลายของแข็ง (Homogenization) ซึ่งทำให้โครงสร้างกลายเป็นเนื้อเดียว ในขณะที่ Al 1100 ในการศึกษานี้ และ อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ของ Ahmed และคณะอยู่ในสภาวะการหล่อแบบปกติ (As-cast) ซึ่งยังคงมีความเค้นตกค้างและโครงสร้างผลึกที่ละเอียดจากการเย็นตัวในแม่พิมพ์ และสาเหตุที่ Al 1100 ในงานวิจัยนี้มีค่าความแข็งต่างจากอะลูมิเนียมบริสุทธิ์สูงเนื่องจากงานวิจัยอ้างอิงทำการหลอมที่อุณหภูมิสูงกว่า (อุณหภูมิในการทดลอง 1000 องศาเซลเซียส) ซึ่งอาจทำให้การละลายของธาตุมีความสมบูรณ์มากกว่า และในการหล่อขึ้นรูปในงานวิจัยนี้ทำการหล่อที่อุณหภูมิ 550 องศาเพื่อให้เนื้อโลหะไหลตัวดี ซึ่งสูงกว่างานวิจัยอ้างอิงทำให้อัตราการเย็นตัวช้ากว่า เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าความแข็ง พบว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของ Al 1100 เมื่อเติมธาตุทองแดงร้อยละ 1 ถึง 5 โดยน้ำหนักนั้นสูงกว่าอะลูมิเนียมบริสุทธิ์และ Al 6063 สาเหตุที่อัตราการเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งของ Al 1100 สูงกว่าอะลูมิเนียมบริสุทธิ์และ Al 6063 น่าจะเกิด

จากธาตุทองแดงอาจจะไปจับตัวกับโลหะเจืออื่นๆ ในอะลูมิเนียมเจือเกิดเป็นสารประกอบโลหะขึ้นทำให้ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมเจือสูงกว่าอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ แต่อย่างไรก็ตามในส่วนขององค์ประกอบทางเคมีของสารละลายของแข็งอะลูมิเนียมเจือหลังผสมทองแดงและเฟสอื่นๆ ของอะลูมิเนียมเจือผสมทองแดงจะทำการศึกษาโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้วยเทคนิควิเคราะห์ธาตุ EDS ต่อไป

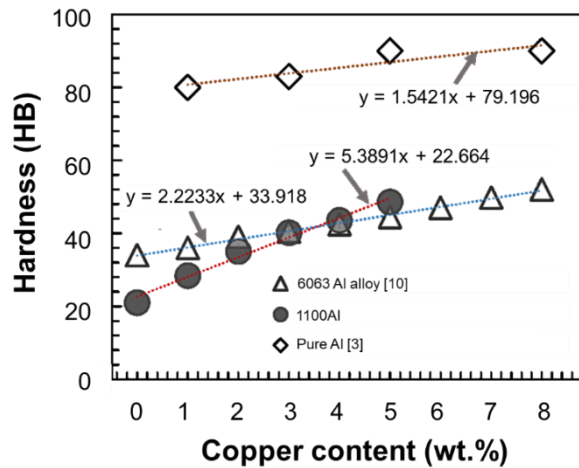


Figure 2 Hardness of the aluminum alloy as a function of copper content.

3.2 การทดสอบแรงดึง

กราฟความเค้นความเครียดของอะลูมิเนียมเจือเกรด 1100 และอะลูมิเนียมเจือผสมทองแดงแสดงในรูปที่ 3 จากผลการทดสอบแรงดึงพบว่าค่าความเค้นของอะลูมิเนียมเจือเกรด 1100 ค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนถึงความแข็งแรงสูงสุดจากนั้นค่าความเค้นลดลงอย่างรวดเร็วจนกระทั่งเกิดการแตกหัก เมื่อทำการเติมธาตุทองแดง พบว่าพฤติกรรมการต้านทานแรงดึงของอะลูมิเนียมเจือมีการเปลี่ยนแปลง กราฟความเค้นความเครียดในช่วงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบชั่วคราวของการทดสอบแรงดึงมีความชันสูงกว่าอะลูมิเนียมเจือเกรด 1100 หล่อ และความแข็งแรงดึงของอะลูมิเนียมเจือผสมทองแดงเพิ่มขึ้นแต่ค่าการยืดลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณทองแดง สาเหตุที่การยืดตัวของอะลูมิเนียมเจือลดลงน่าจะเกิดจากอนุภาคเฟสที่ 2 มีความแข็งและเปราะกระจายตัวอยู่ตามขอบเกรน ซึ่งเป็นจุดรวมความเค้น (Stress concentration) ทำให้เกิดการแตกหักแบบเปราะมากขึ้นเมื่อปริมาณทองแดงสูงขึ้น นอกจากนี้ผลการทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่าธาตุทองแดงเพิ่มอัตราการแข็งตัวเนื่องจากความเครียด (Strain hardening rate) ในอะลูมิเนียมเจือเกรด 1100 ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดึงสูงสุดของอะลูมิเนียมเจือที่ไม่ผสมทองแดงและอะลูมิเนียมเจือผสมทองแดงแสดงในรูปที่ 4 งานวิจัยของ Ahmed และ คณะ (2023) และ Adeosun และ คณะ (2011) จะนำมาแสดงในรูปที่ 4 เพื่อทำการเปรียบเทียบ

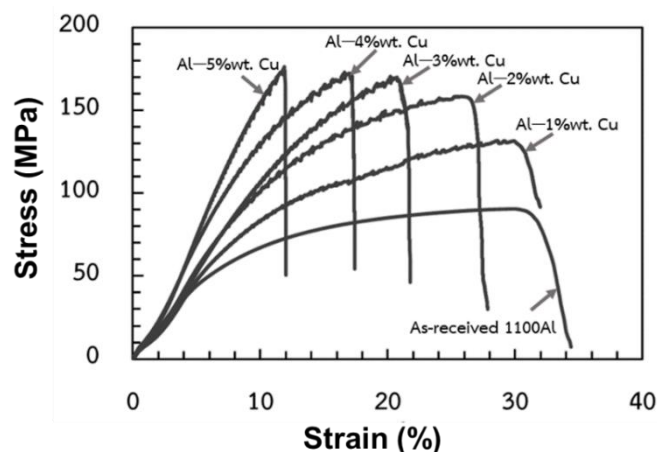


Figure 3 Stress-strain relationship of aluminum alloy and aluminum-copper alloys.

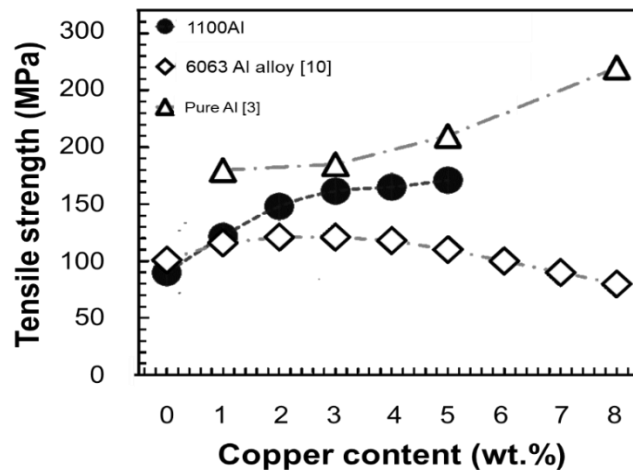


Figure 4 Tensile strength of the 1100 aluminum alloy as a function of copper addition.

จากรูปที่ 4 พบว่าค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดึงสูงสุดของอะลูมิเนียมเจือเกรด 1100 คือ 89.9 MPa ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของอะลูมิเนียมเจือเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณทองแดง การเพิ่มขึ้นของค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดึงน่าจะเกิดจากอะตอมของทองแดงเข้าไปแทนที่อะตอมของอะลูมิเนียมทำให้โครงสร้างอะตอมบิดเบี้ยวและเกิดความเค้นในบริเวณดังกล่าวทำให้ขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันและการเกิดผลึกเฟสที่ 2 ในระหว่างกระบวนการหล่อ ผลึกเฟสที่ 2 ที่เกิดขึ้นช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับอะลูมิเนียม [11] จากการศึกษาครั้งนี้พบว่า การเติมทองแดงเพิ่มความสามารถในการต้านทานแรงดึงของอะลูมิเนียมเป็นอย่างมาก ผลการศึกษานี้มีความคล้ายคลึงกับผลการทดสอบแรงดึงของอะลูมิเนียมความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5 แต่มีความแตกต่างจากอะลูมิเนียมเจือเกรด 6063 ซึ่งมีส่วนผสมของอะลูมิเนียมในปริมาณร้อยละ 98.7 และแมกนีเซียมร้อยละ 0.571 สาเหตุอาจเกิดจากธาตุทองแดงที่เติมไปทำปฏิกิริยากับธาตุเจือเกิดตะกอนเฟสที่ 2 ต่างชนิดทำให้พฤติกรรมด้านความแข็งแรงดึงแตกต่างกัน [12]

3.3 การศึกษาโครงสร้างจุลภาค

ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของอะลูมิเนียมเจือและอะลูมิเนียมเจือผสมทองแดงแสดงในรูปที่ 5 จากการศึกษาพบว่าอะลูมิเนียมเจือเกรด 1100 หลังการหล่อขึ้นรูปมีเฟสที่ 2 กระจายตัวบนเฟสสารละลายของแข็งอะลูมิเนียมเจือและพบโครงสร้างเดนไดรต์ในชิ้นงานที่มีขนาดของช่องว่างระหว่างแกนขนาดใหญ่ ผลึกเฟสที่ 2 ที่เกิดขึ้นในอะลูมิเนียมเกรด 1100 นี้มีทั้งหมด 5 รูปร่างคือ รูปร่างทรงกลม เส้นสั้นทึบ เส้นสั้นประกายกระจุก เส้นยาวแตกแขนง ก้อนอิสระขนาดใหญ่ รูปทรงผลึกเฟสที่ 2 ที่กล่าวมานั้นแสดงในวงกลมเส้นปะในรูปที่ 5 (a) ขนาดของช่องว่างระหว่างแกนของเดนไดรต์มีขนาดเล็กลงเมื่อเติมทองแดงร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (รูปที่ 5 (b)) ปริมาณของผลึกเฟสที่ 2 รูปทรงกลมและรูปทรงเส้นสั้นทึบมากขึ้น และพบผลึกเฟสที่ 2 รูปทรงคล้ายอักษรจีนในชิ้นงานนี้ เมื่อทำการเติมธาตุทองแดงพบว่าขนาดของช่องว่างระหว่างแกนของเดนไดรต์เล็กลงและปริมาณผลึกเฟสที่ 2 เพิ่มขึ้น (รูปที่ 5 (c) – (f)) ซึ่งจากผลการทดลองนี้พบว่า การเติมธาตุทองแดงส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมเกรด 1100 เป็นอย่างมาก

ผลการทดสอบ EDS ของอะลูมิเนียมเจือเกรด 1100 และอะลูมิเนียมเจือผสมทองแดงร้อยละ 1 และร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก แสดงในรูปที่ 6 (a) – (c) ตามลำดับ ผลึกเฟสที่ 2 ในอะลูมิเนียมเจือส่วนใหญ่เป็นสารประกอบโลหะ AlFeCu (รูปที่ 6 (a) และ (b)) ซึ่งมักพบในอะลูมิเนียมเจือที่มีธาตุเหล็กเป็นองค์ประกอบ การตกผลึกเฟสที่ 2 นี้ อาจเป็นผลมาจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วหลังจากการหล่อขึ้นรูปทำให้ธาตุเหล็กและธาตุทองแดงแยกตัวออกจากสารละลายของแข็งของอะลูมิเนียมเจือ นอกจากนี้ยังพบสารประกอบโลหะ Al_2Cu ที่อยู่ในรูปของผลึกทรงกลมกระจายตัวอยู่ในสารละลายของแข็งอะลูมิเนียมเจือ (รูปที่ 6 (c)) จากการศึกษาครั้งนี้พบว่า การเติมธาตุทองแดงทำให้เกิดสารประกอบโลหะ AlFeCu และ Al_2Cu เพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้ค่าความแข็งแรงและความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณธาตุทองแดงเพิ่มขึ้น

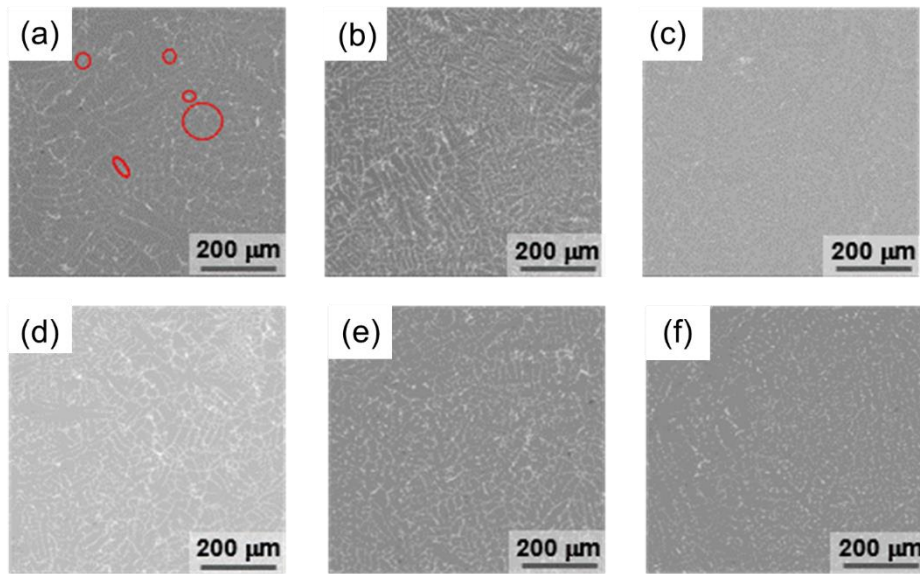


Figure 5 SEM micrographs of aluminum alloys with various copper contents: (a) 0 wt.%, (b) 1 wt.%, (c) 2 wt.%, (d) 3 wt.%, (e) 4 wt.%, and (f) 5 wt.%.

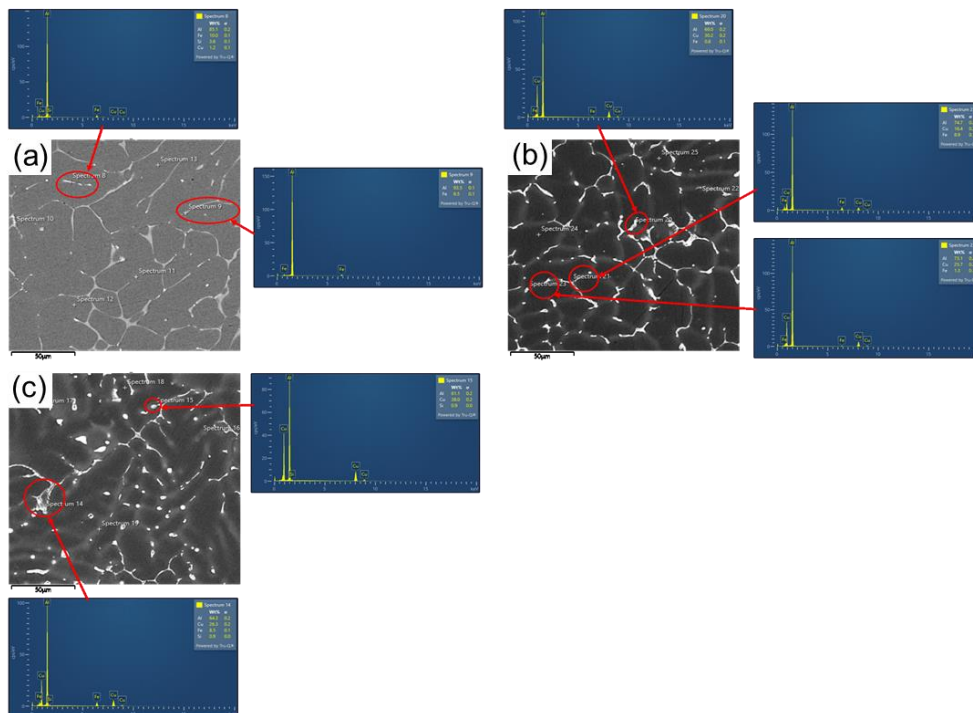


Figure 6 EDS analysis results of (a) 1100 Al alloy, (b) Al-3Cu, and (c) Al-4Cu aluminum alloy specimens.

4. สรุป

จากผลการศึกษาอิทธิพลของปริมาณธาตุทองแดงต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของอะลูมิเนียมเจือเกรด 1100 ในกระบวนการหล่อขึ้นรูปสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ธาตุทองแดงมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งและความแข็งแรงดึงของอะลูมิเนียมเจือเกรด 1100 การเติมธาตุทองแดงทำให้ค่าความแข็งของอะลูมิเนียมเพิ่มสูงขึ้น ค่าความแข็งอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณธาตุทองแดง ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นร้อยละ 141 เมื่อเติมธาตุทองแดงปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก
2. ค่าความแข็งแรงดึงของอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้นแต่เปอร์เซ็นต์การยืดตัวลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณธาตุทองแดง
3. การเติมธาตุทองแดงทำให้โครงสร้างของอะลูมิเนียมเจือละเอียดขึ้นและปริมาณผลึกเฟสที่ 2 เพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณธาตุทองแดง

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา สำหรับการสนับสนุนสถานที่เครื่องมือวิจัย และทุนโครงการวิศวกรรม

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Georgantzia, E., Gkantou, M., Kamaris, G.S. 2021. Aluminium alloys as structural material: A review of research. Eng. Struct. 227:1-16.
- [2] Han, S.Z., Choi, E.A., Lim, S.H., Kim, S., Lee, J. 2021. Alloy design strategies to increase strength and its tradeoffs together. Prog. Mater. Sci. 117: 1-51.
- [3] Ahmed, M. S., Anwar, M. S., Islam, M. S., Arifuzzaman, M. 2023. Experimental study on the effects of three alloying elements on the mechanical, corrosion and microstructural properties of aluminum alloys. Results Mater. 20: 1-10.
- [4] Rana, R. S., Purohit, R. and Das, D. 2012. Reviews on the influences of alloying elements on the microstructure and mechanical properties of aluminum alloys and aluminum alloy composites. IJSRP. 2:1-7.
- [5] Yan, X., Sui, Y., Zhou, H., Sun, W., Jiang, Y., Wang, Q. 2023. Influence of the Mg content on the microstructure and mechanical properties of Al-xMg-2.0Si-0.6Mn alloy. Mater. Res. Technol. 23:3880-3891.
- [6] Fu, J. & Cui, K. 2022. Effect of Mn content on the microstructure and corrosion resistance of Al-Cu -Mg-Mn alloys. J. Alloys Compd. 896
- [7] Zhao, J., Luo, L., Zheng, X., Zhang, T., Luo, H., Li, Z. Liu, T. 2024. The effect of Mn content on a novel Al-Mg-Si-Sc-Zr alloy produced by laser powder bed fusion: The microstructure and mechanical behavior. J. Mater. Res. Technol. 28: 989-100.
- [8] Jia, Z., Zhou, G., Liu, F., Ding, L., Weng, Y., Xiang, K., Zhao, H. 2024. Effects of Cu content and heat treatment process on microstructures and mechanical properties of Al-Si-Mg-Mn-xCu cast aluminum alloys. Trans. Nonferrous Met. Soc. China. 34(3): 737-754.
- [9] Surani, K., Galindo, M.V., Patel, H., Velkin, V.I., Siddiqui, I.H., Kumar, A., Giri, J. 2024. Effect of copper addition on mechanical properties and microstructures of LM25 cast alloys. AIP Advances. 14: 1-12.
- [10] Adeosun, S. O., Balogun, S. A., Osoba, L. O., Ayoola, W. A., Oladoye, A. M. 2011. Effect of Cu and Zn Addition on the Mechanical Properties of Structural Aluminum Alloy. JMMT. 3:103-110.
- [11] Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. 2018. Materials Science and Engineering: An Introduction. Wiley
- [12] Belov, N. A., Eskin, D. G., Avxentieva, N. N. 2005. Casting Aluminum Alloys. Elsevier.

การประยุกต์ใช้การถ่ายภาพเสียงในการจัดการลมรั่วเพื่อลดการใช้พลังงานและต้นทุนในภาคอุตสาหกรรม Application of Acoustic Imaging for Compressed Air Leak Management to Reduce Energy Consumption and Operating Costs in Industry

นพรัตน์ โสตสง¹ พิเชษ แก้วกระจ่าง² และ ดิษฐพร ตุงโสธานนท์^{1,*}
Nopparat Sodsong¹, Pichet Kaewkarjung² and Dithaporn Thungsotanon^{1,*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร 86160 ประเทศไทย
²หน่วยงานพันธมิตรสำหรับกรณีศึกษาในภาคอุตสาหกรรม จังหวัดปทุมธานี ประเทศไทย

¹Department of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Prince of Chumphon Campus, Chumphon Province, 86160, Thailand

²Industrial Case Study Partner, Pathum Thani Province, 1200, Thailand

*Corresponding author: Dithaporn Thungsotanon, e-mail address: dithaporn.th@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

การรั่วไหลของลมอัดในระบบจ่ายลมของโรงงานอุตสาหกรรมเป็นหนึ่งในสาเหตุสำคัญของการสูญเสียพลังงานและการเพิ่มต้นทุนดำเนินงาน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินศักยภาพของเทคโนโลยีการถ่ายภาพเสียงในการตรวจจับและจัดการลมรั่วในโรงงานอุตสาหกรรม โดยเปรียบเทียบกับวิธีการตรวจสอบแบบดั้งเดิมที่อาศัยการสังเกตและประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงาน การดำเนินการวิจัยใช้กล้องถ่ายภาพเสียงตรวจสอบระบบลมอัดของโรงงานในแต่ละรอบการติดตามผลรายเดือน เพื่อสำรวจจุดรั่วและปริมาณการรั่วไหล พร้อมทั้งบันทึกข้อมูลตำแหน่งจุดรั่ว ประเภทอุปกรณ์ และระดับความสำคัญของจุดรั่วในแต่ละไลน์การผลิต เพื่อนำข้อมูลไปใช้ในการวางแผนซ่อมบำรุง ผลการศึกษาพบว่า การใช้การถ่ายภาพเสียงช่วยลดเวลาการตรวจสอบได้ประมาณ 50% และภายหลังการดำเนินการซ่อมบำรุง จำนวนจุดรั่วลดลงจาก 99 จุด เหลือ 31 จุด อัตราการรั่วรวมลดลงจาก 1,556.26 เป็น 400.63 L/min พลังงานสูญเสียลดลงจาก 12,867 เป็น 3,258 kWh/month และต้นทุนการสูญเสียลดลงจาก 46,322 เป็น 11,730 baht/month ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การถ่ายภาพเสียงเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการยกระดับการตรวจสอบลมรั่วและเพิ่มความน่าเชื่อถือในการปฏิบัติงานของวิศวกรซ่อมบำรุง ช่วยให้การจัดการซ่อมบำรุงมีความเป็นระบบมากขึ้น และสนับสนุนการลดการใช้พลังงานและต้นทุนในภาคอุตสาหกรรมได้อย่างเป็นรูปธรรม

คำสำคัญ: การถ่ายภาพเสียง, การรั่วไหลของลมอัด, การอนุรักษ์พลังงาน

Abstract

Compressed air leakage in industrial distribution systems is a major source of energy loss and increased operating costs. This study aimed to evaluate the potential of acoustic imaging technology for detecting and managing compressed air leaks in industrial plants, comparing it with conventional inspection methods based on operator observation and experience. Monthly inspections of the compressed air system were conducted using an acoustic imaging camera to identify leak points and leakage rates. Data on leak locations, equipment types, and leak priority levels in each production line were also recorded for maintenance planning. The results showed that acoustic imaging reduced inspection time by approximately 50%. Following maintenance implementation, the number of leak points decreased from 99 to 31, the total leakage rate decreased from 1,556.26 to 400.63 L/min, energy loss decreased from 12,867 to 3,258 kWh/month, and the cost of energy loss decreased from 46,322 to 11,730 baht/month. The findings demonstrate that acoustic imaging is an effective tool for improving compressed air leak inspection, enhancing the reliability of maintenance operations, supporting more systematic maintenance management, and tangibly reducing energy consumption and operating costs in industrial applications.

Keywords: acoustic imaging, compressed air leakage, energy conservation

1. บทนำ

ระบบอัตโนมัติ เป็นระบบพื้นฐานที่มีบทบาทสำคัญในโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากถูกนำมาใช้งานในอุปกรณ์นิวเมติก ระบบควบคุมวาล์ว และกระบวนการผลิตต่าง ๆ แต่เนื่องด้วยระบบท่อที่ใช้ในการส่งผ่านลมอัดมีความซับซ้อนทำให้ระบบต้องมีการดูแลเป็นพิเศษเพื่อหาจุดรั่วซึมและนำไปสู่การสูญเสียพลังงานโดยเปล่าประโยชน์ ระบบลมอัดเป็นระบบที่มีการสูญเสียพลังงานได้ในหลายขั้นตอน ตั้งแต่การผลิต การจ่าย จนถึงการใช้งานปลายทาง โดยเฉพาะการรั่วไหลของลมอัดในระบบท่อและอุปกรณ์ประกอบ ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้คอมเพรสเซอร์ต้องทำงานมากกว่าที่จำเป็น ส่งผลต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าและต้นทุนการดำเนินงานของสถานประกอบการ [1, 2]

การสูญเสียจากลมรั่วอาจอยู่ในระดับที่มีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพของระบบลมอัด หากไม่มีการตรวจสอบและบำรุงรักษาอย่างต่อเนื่อง [2, 3] ด้วยเหตุนี้ การตรวจสอบและจัดการลมรั่วจึงเป็นหนึ่งในมาตรการสำคัญของการอนุรักษ์พลังงานและการปรับปรุงประสิทธิภาพระบบลมอัดในภาคอุตสาหกรรม [4-6] แต่เนื่องด้วย วิธีการตรวจสอบลมรั่วแบบดั้งเดิมมักอาศัยการฟังเสียง การสังเกต หรือประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงานเป็นหลัก ซึ่งอาจมีข้อจำกัดในด้านความรวดเร็ว ความสม่ำเสมอของผลตรวจ และความชัดเจนในการระบุตำแหน่งรั่ว โดยเฉพาะในสภาพแวดล้อมที่มีเสียงรบกวนหรือมีอุปกรณ์จำนวนมากภายในพื้นที่ผลิต [7] หรือไลน์ผลิต

ในช่วงที่ผ่านมา เทคโนโลยีการถ่ายภาพเสียง (acoustic imaging) ได้รับความสนใจมากขึ้นในการประยุกต์ใช้เพื่อตรวจสอบลมรั่ว เนื่องจากสามารถแสดงตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงรั่วในลักษณะภาพซ้อนทับกับภาพจริง ทำให้การระบุตำแหน่งจุดรั่วและการประมาณอัตราการรั่วไหลทำได้ง่ายและรวดเร็ว ผู้ตรวจสอบสามารถค้นหา ยืนยันตำแหน่ง และบันทึกหลักฐานประกอบการซ่อมบำรุงได้อย่างรวดเร็วและเป็นระบบมากขึ้น [7, 8] เทคโนโลยีดังกล่าวจึงมีศักยภาพที่จะช่วยลดข้อจำกัดของวิธีตรวจสอบแบบดั้งเดิม และสนับสนุนการจัดการลมรั่วให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นในบริบทของโรงงานอุตสาหกรรม

แม้ว่างานวิจัยก่อนหน้า [1, 4, 7] จะกล่าวถึงความสำคัญของการลดลมรั่วและการใช้เทคนิคตรวจจัดการรั่วในระบบลมอัด แต่การแสดงผลด้วยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการถ่ายภาพเสียงร่วมกับกระบวนการซ่อมบำรุงจริงในโรงงานอุตสาหกรรมยังมีอยู่จำกัด โดยเฉพาะในประเด็นการเปรียบเทียบกับวิธีการตรวจสอบแบบดั้งเดิม การนำข้อมูลไปใช้จัดลำดับความสำคัญของจุดรั่ว และการเชื่อมโยงผลการตรวจสอบกับการลดการสูญเสียพลังงานและต้นทุนดำเนินงานในระดับปฏิบัติการ ซึ่งเป็นประเด็นสำคัญที่ควรได้รับการศึกษาเพิ่มเติม เพื่อสนับสนุนการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีนี้ในงานวิศวกรรมบำรุงรักษาและการอนุรักษ์พลังงานในภาคอุตสาหกรรม

ดังนั้น บทความนี้จึงมุ่งนำเสนอการประยุกต์ใช้การถ่ายภาพเสียงในการจัดการลมรั่วในโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อประเมินประสิทธิภาพของเทคโนโลยีการถ่ายภาพเสียงในการตรวจจับและยืนยันตำแหน่งลมรั่ว เปรียบเทียบประสิทธิภาพการตรวจสอบกับแนวทางดั้งเดิมที่อาศัยการสังเกตและประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงาน และ ประเมินความเหมาะสมของข้อมูลที่ได้ออกการวางแผนซ่อมบำรุงและการลดการสูญเสียพลังงานและต้นทุน ทั้งนี้ การศึกษานี้ดำเนินการร่วมกับสถานประกอบการภาคอุตสาหกรรมที่มีข้อกำหนดด้านการรักษาความปลอดภัยของข้อมูล จึงนำเสนอผลในลักษณะข้อมูลสรุปเชิงเปรียบเทียบและเชิงสัดส่วน โดยไม่เปิดเผยรายละเอียดเชิงลึกของกระบวนการผลิตหรือข้อมูลภายในของสถานประกอบการ

2. วิธีการศึกษา

การศึกษานี้เป็นการศึกษาเชิงประยุกต์ในสภาพแวดล้อมอุตสาหกรรมจริง โดยมุ่งประเมินการใช้เทคโนโลยีการถ่ายภาพเสียงเพื่อช่วยในการจัดการลมรั่วในระบบลมอัดของโรงงานอุตสาหกรรม ภายใต้ขอบเขตการศึกษารอบคลุมพื้นที่การผลิตหลักหลายส่วนของโรงงาน ซึ่งประกอบด้วย ท่อจ่ายลมอัด จุดใช้งานลมอัด และอุปกรณ์ปลายทางในกระบวนการผลิต โดยมุ่งเน้นการศึกษาไปที่ “จุดรั่ว” (leak point) ของระบบท่อ ข้อต่อ วาล์ว ชุดกรอง/ปรับแรงดัน สายลม และอุปกรณ์นิวเมติกต่างๆ ทั้งนี้ การนำเสนอในบทความฉบับนี้อยู่ในระดับภาพรวม โดยไม่เปิดเผยรายละเอียดเชิงลึกของผังการผลิตหรือโครงสร้างภายในของสถานประกอบการ

เครื่องมือหลักที่ใช้ในการศึกษาคือกล้องถ่ายภาพเสียงระดับอุตสาหกรรม Fluke รุ่น ii900 [8] ซึ่งใช้ไมโครโฟนอาร์เรย์แบบดิจิทัลในการตรวจจับสัญญาณเสียงความถี่สูงและประมวลผลเป็นภาพแสดงตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงรั่วซ้อนทับกับภาพจริง ทำให้สามารถระบุตำแหน่งการรั่วไหลของลมอัดได้รวดเร็วและชัดเจนมากขึ้น การตรวจสอบทั้งหมดดำเนินการในสภาพ การปฏิบัติงานจริง ขณะเครื่องจักรและระบบการผลิตทำงานตามสภาวะปกติ เพื่อให้ข้อมูลที่ได้สะท้อนลักษณะการรั่วไหลที่เกิดขึ้นจริงภายใต้สภาวะการใช้งานของโรงงาน

การเก็บข้อมูลดำเนินการต่อเนื่องตั้งแต่เดือนมีนาคม 2568 ถึงเดือนตุลาคม 2568 ยกเว้นเดือนมิถุนายน 2568 ซึ่งไม่ได้ดำเนินการสำรวจ เนื่องจากเป็นช่วงที่สายการผลิตมีการเดินเครื่องอย่างต่อเนื่องและมีภาระการผลิตสูง ส่งผลให้มีข้อจำกัดด้านการเข้าถึงพื้นที่และการเข้าตรวจสอบบางตำแหน่งเพื่อความปลอดภัยและไม่ให้กระทบต่อกระบวนการผลิต การสำรวจในแต่ละรอบดำเนินการโดยตรวจสอบแนวท่อจ่ายลมอัด จุดเชื่อมต่อ และอุปกรณ์ที่มีโอกาสเกิดการรั่ว เช่น ข้อต่อ วาล์ว ชุด FRL สายลม และอุปกรณ์นิวเมติก เมื่อพบตำแหน่งต้องสงสัยจึงใช้กล้องถ่ายภาพเสียงในการยืนยันตำแหน่งรั่วและบันทึกหลักฐานภาพสำหรับใช้อ้างอิงในการซ่อมบำรุง ข้อมูลที่บันทึกประกอบด้วยตำแหน่งของจุดรั่ว ประเภทอุปกรณ์ ลักษณะการรั่ว และข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการประเมินลำดับความสำคัญของการซ่อมแซม

การจัดลำดับความสำคัญของจุดรั่วพิจารณาจากบริบทการผลิตของแต่ละพื้นที่ร่วมกับข้อจำกัดในการดำเนินงานจริง โดยคำนึงถึงความสามารถในการหยุดไลน์การผลิตเพื่อเข้าซ่อม ระดับการรั่วไหลของแต่ละจุด และข้อจำกัดด้านงบประมาณที่สามารถจัดสรรได้ในแต่ละเดือนหรือแต่ละไตรมาส จุดรั่วที่อยู่ในไลน์การผลิตที่สามารถหยุดเครื่องได้ง่าย มีอัตราการรั่วสูง หรือก่อให้เกิดการสูญเสียพลังงานในระดับมาก จะได้รับการพิจารณาให้มีลำดับความสำคัญสูงกว่าจุดรั่วที่อยู่ในพื้นที่ซึ่งไม่สามารถหยุดการผลิตได้ทันที หรือเป็นจุดรั่วขนาดเล็กที่ยังไม่คุ้มค่าต่อการดำเนินการแก้ไขในช่วงเวลานั้น แนวทางดังกล่าวช่วยให้การวางแผนซ่อมบำรุงสอดคล้องกับข้อจำกัดเชิงปฏิบัติการของโรงงานและเหมาะสมต่อการบริหารจัดการทรัพยากร

การประเมินอัตราการรั่ว พลังงานสูญเสีย และต้นทุนการสูญเสีย ดำเนินการโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการตรวจสอบด้วยกล้องถ่ายภาพเสียงเป็นข้อมูลตั้งต้นในการคำนวณอัตราการรั่วไหลของแต่ละจุด จากนั้นจึงนำค่าที่ได้มาประเมินย้อนกลับเป็นปริมาณพลังงานสูญเสียและต้นทุนที่เกี่ยวข้องภายใต้เงื่อนไขการใช้งานของระบบลมอัดของโรงงาน วิธีการดังกล่าวช่วยให้สามารถเชื่อมโยงผลจากการตรวจพบจุดรั่วกับผลกระทบด้านพลังงานและต้นทุนได้อย่างเป็นรูปธรรม และใช้เป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจในการจัดลำดับความสำคัญของงานซ่อมบำรุง

สำหรับการเปรียบเทียบกับวิธีการตรวจสอบแบบดั้งเดิมที่อาศัยการสังเกตและประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงาน การประเมินผลมุ่งเน้นทั้งด้านเวลาในการปฏิบัติงานและประสิทธิภาพของข้อมูลที่ได้ โดยพิจารณาจาก 1) ความรวดเร็วในการสำรวจและยืนยันตำแหน่งรั่ว 2) ความชัดเจนของการระบุตำแหน่งรั่วเมื่อเทียบกับแนวทางดั้งเดิม 3) ความสามารถในการจัดทำรายงานเพื่อสนับสนุนการแจ้งซ่อมและการติดตามผล และ 4) ความเหมาะสมของข้อมูลที่ได้ต่อการจัดลำดับความสำคัญของงานซ่อมบำรุง ทั้งนี้ ผลการประเมินถูกนำเสนอในลักษณะเชิงเปรียบเทียบและเชิงสัดส่วน เพื่อสะท้อนประโยชน์ของเทคโนโลยีการถ่ายภาพเสียงต่อกระบวนการตรวจสอบและการบริหารจัดการลมรั่วในโรงงานอุตสาหกรรม

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

การประยุกต์ใช้การถ่ายภาพเสียงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการตรวจสอบลมรั่วในระบบลมอัดได้อย่างชัดเจน เมื่อพิจารณา ร่วมกับการตรวจสอบด้วยวิธีสังเกตและการวางแผนและจัดการซ่อมบำรุงอย่างต่อเนื่อง เครื่องมือนี้ช่วยให้การค้นหาและยืนยันตำแหน่งรั่วทำได้รวดเร็วขึ้น ลดความคลาดเคลื่อนจากการพึ่งพาประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงาน และทำให้การตรวจสอบมีความเป็นระบบมากขึ้นและสามารถลดเวลาที่ใช้ในการตรวจสอบลดลงได้ประมาณ 50% เมื่อมีการนำเครื่องมือมาใช้

ตัวชี้วัดสำคัญหลังดำเนินการมีแนวโน้มลดลงทั้งหมดเมื่อเทียบกับค่าก่อนดำเนินการ ดังแสดงใน Figure 1 ไม่ว่าจะเป็นจำนวนจุดรั่ว อัตราการรั่ว การสูญเสียพลังงาน และต้นทุนการดำเนินงาน ข้อมูลเหล่านี้ชี้ให้เห็นทิศทางการเปลี่ยนแปลงที่ดีขึ้นอย่างชัดเจน โดยจำนวนจุดรั่วลดลงจาก 99 จุด เหลือ 31 จุด ขณะที่อัตราการรั่วรวมลดลงจาก 1,556.26 L/min เหลือเพียง 400.63 L/min และพลังงานสูญเสียรวมลดลงจาก 12,867 kWh/month เหลือ 3,258 kWh/month ผลเหล่านี้แสดงให้เห็นว่าการถ่ายภาพเสียงไม่ได้ช่วยเฉพาะการ “พบ” จุดรั่วเท่านั้น แต่ยังช่วยยกระดับความสามารถของกระบวนการตรวจสอบทั้งหมด โดยเฉพาะในด้านความเร็วและความชัดเจนในการระบุตำแหน่งแหล่งรั่ว ซึ่งเป็นข้อจำกัดสำคัญของการตรวจสอบแบบดั้งเดิมที่อาศัยการฟังเสียงและประสบการณ์เป็นหลัก

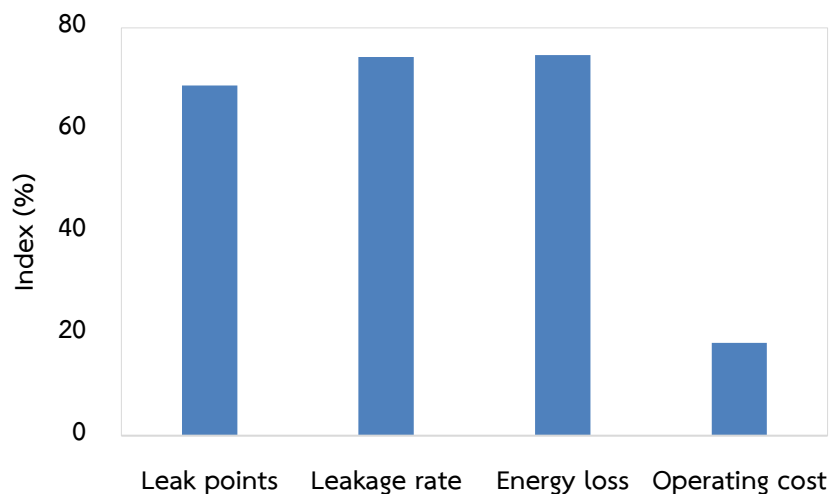


Figure 1 Results after implementing compressed air leak repairs

อีกหนึ่งประเด็นสำคัญของผลการศึกษา คือ การถ่ายภาพเสียงช่วยให้ข้อมูลจากการตรวจสอบมีความพร้อมต่อการใช้งานในการวางแผนซ่อมบำรุงมากขึ้น เนื่องจากข้อมูลที่ได้ไม่ได้มีเพียงการระบุว่ามีหรือไม่มี แต่ยังประกอบด้วยหลักฐานภาพตำแหน่งจุดรั่ว ปริมาณการรั่วและข้อมูลประกอบถึงความยากง่ายในการซ่อมแซมรอยรั่วในแต่ละตำแหน่ง เพื่อวางแผนซ่อมบำรุงได้อย่างเป็นระบบ และยังสามารถทำงานประสานไปกับวิธีการตรวจสอบด้วยการสังเกตได้เป็นอย่างดี สามารถกำหนด location tag และการจัดทำ leak list เพื่อส่งต่อการดำเนินการแก้ไขได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ

หากพิจารณาข้อมูลใน Figure 2 พบว่า การใช้การถ่ายภาพเสียงมีข้อได้เปรียบมากกว่าวิธีสังเกตในหลายด้าน ได้แก่ ความรวดเร็วในการตรวจสอบ ความชัดเจนในการระบุตำแหน่งรั่ว ความถูกต้อง ข้อมูลประกอบการแจ้งซ่อม และสามารถในการติดตามผลหลังการแก้ไข จุดเด่นเหล่านี้มีความสำคัญมากในบริบทอุตสาหกรรม เนื่องจากช่วยลดความคลุมเครือของงานซ่อมลดการตรวจสอบซ้ำ และเพิ่มประสิทธิภาพของการสื่อสารระหว่างฝ่ายตรวจสอบ ฝ่ายซ่อมบำรุง และฝ่ายปฏิบัติการ ในมุมของการบริหารจัดการ การมีหลักฐานเชิงประจักษ์และรหัสตำแหน่งที่ชัดเจน ช่วยให้การจัดลำดับความสำคัญของงานซ่อมทำได้ง่ายขึ้น อีกทั้งยังช่วยติดตามผลได้อย่างต่อเนื่องในรอบการตรวจครั้งถัดไป ดังนั้น การถ่ายภาพเสียงไม่ได้มีความสำคัญที่ความสามารถในการตรวจพบจุดรั่วเพียงอย่างเดียว แต่รวมถึงการทำให้ข้อมูลที่ได้มีลักษณะ “ตรวจสอบย้อนกลับได้” และพร้อมใช้งานจริงในระบบบำรุงรักษา

ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการจัดการการรั่วไหลในระบบลมอัดเป็นหนึ่งในมาตรการสำคัญในการลดการสูญเสียพลังงานและเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ [4] โดยการใช้เทคโนโลยีการถ่ายภาพเสียงช่วยลดข้อจำกัดของวิธีการตรวจสอบแบบดั้งเดิมที่อาศัยการสังเกตและประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงาน เนื่องจากสามารถระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดเสียงรั่วได้ชัดเจนขึ้นภายใต้สภาพแวดล้อมการผลิตจริง ทำให้การค้นหา การยืนยันตำแหน่ง และการจัดทำข้อมูลประกอบการซ่อมบำรุงมีความเป็นระบบมากขึ้น นอกจากนี้ ข้อมูลที่ได้จากการตรวจสอบยังช่วยสนับสนุนการตัดสินใจเลือกจุดซ่อมที่มีความสำคัญก่อนดำเนินการ ซึ่งมีส่วนช่วยให้การลดการสูญเสียพลังงานและต้นทุนดำเนินงาน ให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากในเชิงปฏิบัติการ [7]

แม้ว่าบทความนี้จะไม่เปิดเผยข้อมูลเชิงลึกของสถานประกอบการ แต่ผลการศึกษาสะท้อนให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการถ่ายภาพเสียงสามารถใช้เป็นเครื่องมือสนับสนุนการจัดการลมรั่วที่มีประสิทธิภาพได้จริงและมีความเหมาะสมต่อการนำมาใช้งานในด้านวิศวกรรมการบำรุงรักษาสสมัยใหม่ที่เน้นการแก้ปัญหาที่ต้นเหตุของปัญหา

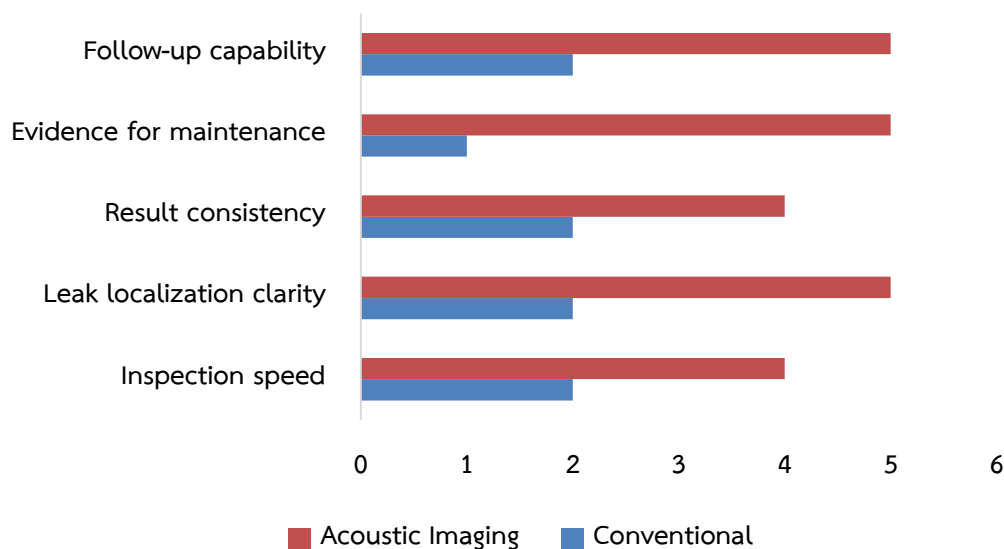


Figure 2 Process comparison between the conventional approach and inspection using acoustic imaging

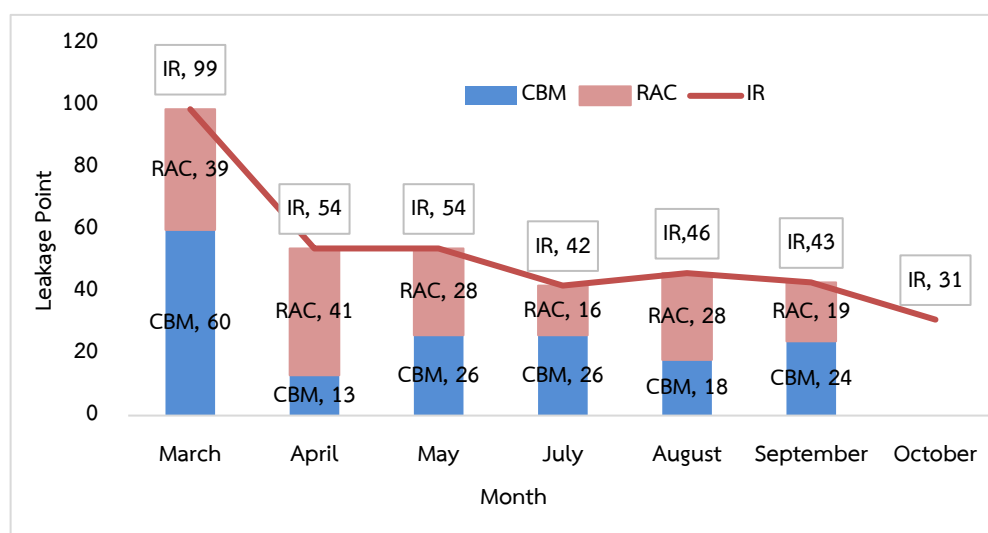


Figure 3 Monthly trend of leakage points after the implementation of acoustic imaging combined with maintenance actions

จาก Figure 3 จุดรั่วที่ตรวจพบ (IR: Issue Raised) จุดรั่วที่ยังคงค้างอยู่ (RAC: Remaining and Carrying issue) และจุดรั่วที่ได้รับการแก้ไขแล้ว (CBM: Closed by Maintenance) พบว่า ภายหลังจากการนำกล้องถ่ายภาพเสียงมาใช้ในช่วงเริ่มต้นของการดำเนินงาน สามารถตรวจพบจุดรั่วสำคัญและดำเนินการแก้ไขได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้จำนวนจุดรั่วรวมลดลงอย่างเด่นชัดจากเดือนแรกของการติดตามผล โดยแนวโน้มดังกล่าวสะท้อนว่าเครื่องมือช่วยให้การค้นหาและระบุตำแหน่งจุดรั่วได้ตรงจุดมากขึ้น เมื่อมีการติดตามต่อเนื่องในระยะเวลาถัดมา พบว่าจำนวนจุดรั่วอยู่ในระดับที่ควบคุมได้และไม่เพิ่มขึ้นกลับไปอยู่ในระดับเริ่มต้น แสดงให้เห็นว่าแนวทางการตรวจสอบร่วมกับการวางแผนซ่อมบำรุงสามารถช่วยควบคุมปัญหาการรั่วไหลได้อย่างต่อเนื่อง

ทั้งนี้ จุดรั่วที่ยังคงเหลืออยู่ในช่วงท้ายของการติดตามส่วนใหญ่เป็นจุดรั่วขนาดเล็กหรือจุดรั่วที่มีอัตราการสูญเสียต่ำ ซึ่งเมื่อพิจารณาร่วมกับต้นทุนในการเข้าซ่อม พบว่ายังไม่อยู่ในระดับที่คุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์สำหรับการดำเนินการแก้ไขในทันที ผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่า การประยุกต์ใช้การถ่ายภาพเสียงไม่ได้ช่วยเพียงการลดจำนวนจุดรั่วในระยะเริ่มต้นเท่านั้น แต่ยังช่วยให้การจัดการจุดรั่วเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ โดยมุ่งเน้นการแก้ไขจุดรั่วที่ก่อให้เกิดการสูญเสียพลังงานในระดับสูง และควบคุมไม่ให้เกิดปัญหากลับมาสะสมเพิ่มขึ้นในระยะติดตามผล ดังนั้น ผลการศึกษานี้จึงสนับสนุนข้อเสนอว่า การถ่ายภาพเสียงมี

ศักยภาพในการยกระดับกระบวนการจัดการมลรั่วจากแนวทางที่ต้องพึ่งพาประสบการณ์ของผู้ตรวจ ไปสู่กระบวนการตรวจสอบที่รวดเร็ว เป็นระบบ และตรวจสอบย้อนกลับง่ายขึ้น ซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญของการลดการใช้พลังงานและต้นทุนในภาคอุตสาหกรรม

4. สรุป

การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า การประยุกต์ใช้การถ่ายภาพเสียงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจสอบมลรั่วในระบบลมอัดของภาคอุตสาหกรรมได้อย่างชัดเจน โดยช่วยลดเวลาการตรวจสอบได้ประมาณ 50% และภายหลังการดำเนินการซ่อมบำรุง จำนวนจุดรั่วลดลงจาก 99 จุด เหลือ 31 จุด อัตราการรั่วรวมลดลงจาก 1,556.26 L/min เหลือ 400.63 L/min พลังงานสูญเสียลดลงจาก 12,867 kWh/month เหลือ 3,258 kWh/month และมูลค่าความสูญเสียด้านพลังงานลดลงจาก 46,322 baht/month เหลือ 11,730 baht/month ผลดังกล่าวสะท้อนว่า การถ่ายภาพเสียงช่วยให้การค้นหาและยืนยันตำแหน่งรั่วทำได้รวดเร็ว เป็นระบบ และสนับสนุนการวางแผนซ่อมบำรุงได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้เป็นกรณีศึกษาในสถานประกอบการแห่งเดียวและควรขยายการศึกษาไปยังหลายสถานประกอบการ และเพิ่มเติมการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีดังกล่าว

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดิษฐพร ตุงโสธานนท์ สำหรับคำปรึกษาและข้อเสนอแนะทางวิชาการที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ รวมถึงขอขอบคุณสถานประกอบการและทีมงานที่ให้การสนับสนุนข้อมูลภาคสนามและความร่วมมือในการดำเนินโครงการ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Dudić, S., Ignjatović, I., Šešlija, D., Blagojević, V. and Stojiljković, M. 2012. Leakage quantification of compressed air using ultrasound and infrared thermography. *Measurement* 45(7): 1689-1694.
- [2] Çağman, S., Soyulu, E. and Ünver, Ü. 2022. A research on the easy-to-use energy efficiency performance indicators for energy audit and energy monitoring of industrial compressed air systems. *J. Clean. Prod.* 365: 132698. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.133276.
- [3] Gryboś, D. and Leszczyński, J.S. 2024. A Review of Energy Overconsumption Reduction Methods in the Utilization Stage in Compressed Air Systems. *Energies* 17(6): 1495. DOI: 10.3390/en17061495.
- [4] Nehler, T. 2018. Linking energy efficiency measures in industrial compressed air systems with non-energy benefits – A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 89: 72-87.
- [5] Mousavi, S., Kara, S. and Kornfeld, B. 2014. Energy Efficiency of Compressed Air Systems. *Procedia CIRP* 15: 313-318.
- [6] Radgen, P., Blaustein, E. 2001. *Compressed Air Systems in the European Union Energy, Emissions, Savings Potential and Policy Actions*. LOG_X Publisher, Stuttgart.
- [7] International Organization for Standardization. 2013. ISO 11011:2013 Compressed air Energy efficiency Assessment เข้าถึงได้จาก: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/46580/1045954dfd514f5aaacaec2a569e646f/ISO-11011-2013.pdf>. (เข้าถึงเมื่อ 25 กุมภาพันธ์ 2569).
- [8] Fluke. 2026. Fluke ii900 Industrial Acoustic Imager (Specifications). เข้าถึงได้จาก: <https://www.fluke.com/en-th/product/industrial-imaging/sonic-industrial-imager-ii900>. (เข้าถึงเมื่อ 25 กุมภาพันธ์ 2569).

การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของเมล็ดกาแฟโรบัสต้าระหว่างการคั่วด้วยระบบลมร้อนแบบฟลูอิดซ์เบด Physical Properties Changes of Robusta Coffee Beans during Hot Air Fluidized Bed Roasting

พฤตินัย บัวเขียว¹ ญัฐพงศ์ รัตนเดช^{1,*} รัฐพงษ์ สุวลักษณ์¹ กิตติศักดิ์ เพ็ชรพันธ์¹ อรวรรณ หนูอิม¹ อภิลักษณ์ เอียดเอื้อ² รณชาติ มั่นศิลป์³
 และ ทรงธรรม ไชยพงษ์⁴

Nuttapong Ruttanadech^{1,*}, Phruektinai Buakhiao¹, Rattapong Suwalak¹, Kittisak Phetpan¹, Orawan Nooaim¹,
 Apiluck Eiad-ua² Ronnachart Munsin³ and Songtham ChaiyaPong⁴

¹ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร 86110 ประเทศไทย

²ภาควิชาเทคโนโลยีและนวัตกรรมเทคโนโลยี คณะเทคโนโลยีวิศวกรรมบูรณาการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 ประเทศไทย

³ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จังหวัดเชียงใหม่ 50220 ประเทศไทย

⁴34/3 หมู่ 6 ตำบลพลวง เกอเขาคิชฌกูฏ จังหวัดจันทบุรี 22210 ประเทศไทย

¹Department of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Prince of Chumphon Campus, Chumphon Province, 86160, Thailand

²School of Integrated Innovation Technology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand

³Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang Mai Province, 50220, Thailand

⁴34/3 Moo 6, Phluang Subdistrict, Khao Khitchakut District, Chanthaburi, 22210, Thailand

*Corresponding author: Nuttapong Ruttanadech, e-mail address: nuttapong.ru@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของเมล็ดกาแฟโรบัสต้า (*Coffea canephora*) ระหว่างการคั่วด้วยระบบลมร้อนแบบฟลูอิดซ์เบด โดยใช้เครื่องคั่วต้นแบบที่พัฒนาขึ้นสำหรับการคั่วกาแฟขนาดไม่เกิน 2 kg เมล็ดกาแฟโรบัสต้าจากจังหวัดชุมพรที่มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 10-12% ถูกนำมาคั่วภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้องคั่วเริ่มต้น 3 ระดับ ได้แก่ 100, 110 และ 120 °C ร่วมกับความเร็วมวล 3 ระดับ ได้แก่ 4.71, 5.28 และ 5.86 m/s โดยทำการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความชื้น ขนาดเมล็ด ความหนาแน่น และค่าสีในระบบ CIE Lab ที่เวลาคั่ว 6, 8, 10 และ 15 min ผลการทดลองพบว่าเมื่อเวลาการคั่วเพิ่มขึ้น ความชื้นของเมล็ดกาแฟลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง Drying phase (ช่วง 0-6 min) ก่อนเข้าสู่ค่าสมดุลต่ำกว่า 0.5% (w.b.) เมื่อเวลาการคั่วมากกว่า 8 min ขนาดเมล็ดกาแฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเวลาการคั่ว โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (D_v) เพิ่มขึ้นจาก 0.61-0.76 cm ที่ 6 min เป็น 0.66-0.78 cm ที่ 15 min อันเป็นผลจากการสลายตัวของสารอินทรีย์ภายในเมล็ด ซึ่งก่อให้เกิดแรงดันก๊าซภายใน ขณะที่ค่าความหนาแน่นรวม (ρ_b) ลดลงจาก 0.29-0.46 g/cm³ ที่ 6 min เหลือ 0.22-0.36 g/cm³ ที่ 15 min สำหรับค่าความสว่าง (L) ลดลงจากประมาณ 50 ในช่วงต้น เหลือประมาณ 30 ที่ 8-10 min สะท้อนถึงการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) และคาราเมลไลเซชัน นอกจากนี้ความเร็วมวลที่สูงขึ้นส่งผลให้ขนาดเมล็ดลดลง และค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้น เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนออกจากเมล็ดที่สูงเกินไป ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะการคั่วและการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของเมล็ดกาแฟ ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบและควบคุมกระบวนการคั่วกาแฟด้วยระบบลมร้อนเพื่อให้ได้คุณภาพผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสม โดยสภาวะที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิห้องคั่วเริ่มต้น 110 °C ความเร็วมวลในช่วงที่ 2 เท่ากับ 5.28 m/s และความเร็วมวลหลังอุณหภูมิถึง 160 °C เท่ากับ 4.71 m/s

คำสำคัญ: กาแฟโรบัสต้า, การคั่วกาแฟ, ฟลูอิดซ์เบด, สมบัติทางกายภาพ, เครื่องคั่วต้นแบบ

Abstract

This research aimed to investigate the physical properties of robusta coffee beans (*Coffea canephora*) during hot air fluidized bed roasting using a prototype roaster with a capacity of up to 2 kg. Robusta coffee beans from Chumphon Province, with an initial moisture content of approximately 10-12% (w.b.), were roasted under three initial chamber temperatures (100, 110, and 120 °C) combined with three-stage air velocities (4.71, 5.28, and 5.86 m/s). Key physical properties, including moisture content, bean size, bulk density, and color parameters (CIE Lab), were analyzed at roasting times of 6, 8, 10, and 15 min. The results indicated that moisture content decreased rapidly during the drying phase (0-6 min), reaching an equilibrium value below 0.5% (w.b.) after 8 min of roasting. Bean expansion was observed with increasing roasting time, as reflected by the increase in geometric mean diameter (D_v) from 0.61–0.76 cm at 6 min to 0.66-0.78 cm at 15 min. This expansion was attributed to the thermal degradation of organic compounds, leading to internal gas pressure buildup. Correspondingly, bulk density (ρ_b) decreased from 0.29-0.46 g/cm³ at 6 min to 0.22-0.36 g/cm³ at 15 min. The

lightness value (L) declined from approximately 50 at the initial stage to around 30 at 8–10 min, indicating the progression of Maillard reactions and caramelization. Furthermore, higher air velocity resulted in reduced bean expansion and increased bulk density due to excessive heat removal from the bean surface. These findings demonstrate a clear relationship between roasting conditions and the physical properties changes of coffee beans. The results provide fundamental insights for the design and control of fluidized bed roasting systems to achieve optimal product quality. The optimal roasting conditions identified in this research were an initial chamber temperature of 110 °C, an intermediate air velocity of 5.28 m/s, and a reduced air velocity of 4.71 m/s after the bean temperature reached 160 °C.

Keywords: coffee roasting, fluidized bed, Robusta coffee, physical properties, prototype roaster

1. บทนำ

กาแฟเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมอาหารของหลายประเทศทั่วโลก รวมทั้งประเทศไทย โดยกาแฟเป็นพืชสำคัญที่สร้างรายได้ให้แก่เกษตรกรมากกว่า 1,700 million baht/year กาแฟสายพันธุ์โรบัสต้า (*Coffea canephora pierre ex froehner*) มีการปลูกแพร่หลายในภาคใต้ของประเทศ โดยเฉพาะจังหวัดชุมพร ระนอง สุราษฎร์ธานี พังงา กระบี่ และสตูล เนื่องจากสามารถเจริญเติบโตได้ดีในสภาพภูมิอากาศที่มีความชื้นสูง ทนทานต่อโรคและแมลง และให้ผลผลิตต่อพื้นที่สูง โดยในปีเพาะปลูก 2565/66 ภาคใต้มีพื้นที่ปลูกกาแฟโรบัสต้าประมาณ 96,743 ไร่ ให้ผลผลิตรวมประมาณ 7,932 ton [1] กาแฟโรบัสต้ามีปริมาณคาเฟอีนสูงกว่ากาแฟอาราบิก้าประมาณ 2 เท่า หรือประมาณ 2% (w.t.) เหมาะสำหรับการผลิตกาแฟเข้ม กาแฟสำเร็จรูป และการผสมในกาแฟเบลนด์ [2]

กระบวนการคั่วกาแฟเป็นขั้นตอนสำคัญในการพัฒนาคุณภาพของกาแฟ ความร้อนที่เมล็ดกาแฟได้รับระหว่างการคั่วจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งทางกายภาพและทางเคมีภายในเมล็ด ส่งผลต่อสี กลิ่น รสชาติ และคุณภาพของผลิตภัณฑ์กาแฟ กระบวนการคั่วสามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วงหลัก ได้แก่ ช่วง Drying phase ซึ่งเป็นช่วงที่น้ำในเมล็ดกาแฟระเหยออก เมล็ดกาแฟเปลี่ยนสีจากเขียวเป็นเหลืองอ่อน ช่วง Maillard phase เริ่มตั้งแต่อุณหภูมิ 160 °C เกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) ระหว่างกรดอะมิโนและน้ำตาลรีดิวซ์ สร้างสาร Melanoidin สีน้ำตาล และช่วง Development time ช่วงหลัง First crack เมล็ดกาแฟขยายตัว เกิดน้ำมันกาแฟออกมายังผิวเมล็ด และสารประกอบกลิ่นรสต่างๆ [3, 4]

ปัจจุบันเครื่องคั่วกาแฟมีหลายรูปแบบ ได้แก่ เครื่องคั่วแบบดรัม (Drum roasters) เครื่องคั่วแบบแรงเหวี่ยง (Centrifugal roasters) และเครื่องคั่วแบบ Tangential roasters แต่เนื่องด้วยปัญหาของเครื่องคั่วกาแฟทั่วไปที่ไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิและความสม่ำเสมอของเมล็ดกาแฟคั่วได้ ระบบฟลูอิดไรซ์เบดลมร้อน (Hot air fluidized bed roasting) จึงได้รับความสนใจมากขึ้น เนื่องจากสามารถให้ความร้อนกับเมล็ดกาแฟได้อย่างสม่ำเสมอผ่านการถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อน (Convective heat transfer) และช่วยลดเวลาในการคั่ว [5] หลักการทำงานคือการใช้กระแสลมร้อนพัดผ่านเมล็ดกาแฟจากด้านล่างขึ้นบน ทำให้เมล็ดกาแฟลอยตัวและเคลื่อนที่ต่อเนื่อง ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนมีประสิทธิภาพและเกิดการคั่วอย่างสม่ำเสมอ [6]

อย่างไรก็ตาม ข้อมูลเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของเมล็ดกาแฟโรบัสต้าระหว่างการคั่วด้วยระบบลมร้อนแบบฟลูอิดไรซ์เบดในบริบทของกาแฟโรบัสต้าชุมพรยังมีจำกัด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของเมล็ดกาแฟโรบัสต้าจากจังหวัดชุมพรระหว่างการคั่วด้วยระบบลมร้อนแบบฟลูอิดไรซ์เบด ได้แก่ ความชื้น ขนาดเมล็ด ความหนาแน่น และค่าสี CIE Lab ภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความเร็วลมที่แตกต่างกัน เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการออกแบบและควบคุมกระบวนการคั่วกาแฟต่อไป

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัตถุประสงค์

เมล็ดกาแฟโรบัสต้าดิบ (Green coffee beans) ที่ใช้ในการทดลองเป็นเมล็ดกาแฟที่ปลูกในจังหวัดชุมพรผ่านกระบวนการแปรรูปแบบแห้ง (Dry process) คัดเลือกให้มีขนาดใกล้เคียงกัน มีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 10-12% ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช.) 268/2558 ว่าด้วยกาแฟคั่ว (Thai community product standard, TCPS 268/2558) และจัดเก็บในสภาวะควบคุมอุณหภูมิและความชื้นก่อนการทดลอง

2.2 เครื่องคั่วกาแฟแบบฟลูอิดซ์เบดลมร้อน

การทดลองใช้เครื่องคั่วกาแฟต้นแบบที่พัฒนาขึ้นโดยใช้หลักการฟลูอิดซ์เบดลมร้อน ดังแสดงใน Figure 1 โดยสามารถรองรับกาแฟได้สูงสุด 2 kg ระบบให้ความร้อนใช้ฮีตเตอร์ลมร้อนขนาด 19,800 W ร่วมกับโบลเวอร์ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์สามเฟส กำหนดความเร็วรอบที่ 3,006 RPM (ความเร็วลมขาเข้า 5.28 m/s) ควบคุมอุณหภูมิและความเร็วลมผ่านระบบควบคุมแบบกึ่งอัตโนมัติ วัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ที่อุณหภูมิเมล็ดกาแฟ (Bean temperature, BT) โดยเทอร์โมคัปเปิล BT ติดตั้งที่ตำแหน่งใจกลางชั้นเมล็ดกาแฟ (Bean bed) ภายในห้องคั่ว และอุณหภูมิอากาศขาเข้า (Environment temperature, ET) โดยเทอร์โมคัปเปิล ET ติดตั้งที่บริเวณอากาศร้อนขาเข้า (Inlet air stream) หลักการทำงานคือการใช้กระแสลมร้อน พัดผ่านเมล็ดกาแฟจากด้านล่างขึ้นบน ทำ

ให้เมล็ดกาแฟลอยตัว

และเคลื่อนที่ต่อเนื่อง

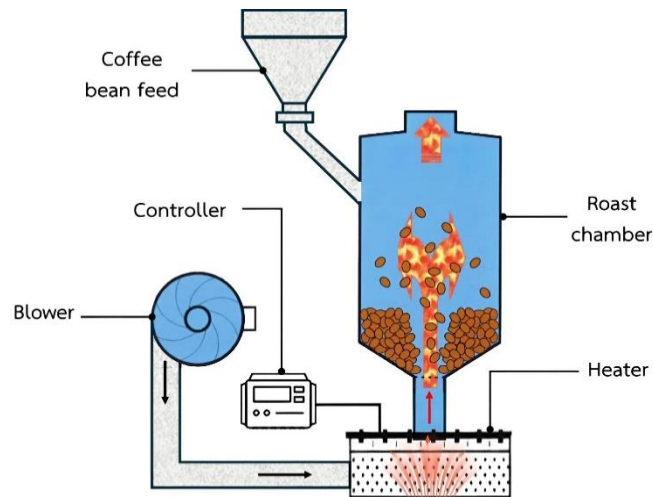


Figure 1 Hot Air Fluidized Bed Roasting

2.3 ขั้นตอนและเงื่อนไขการทดลอง

ออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full factorial) ซึ่งเป็นการทดลองที่นำทุกระดับของทุกปัจจัยมาจัดรวมกันครบทุกแบบ เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ผลของแต่ละปัจจัยและผลรวมกันได้อย่างชัดเจน โดยศึกษาผลของอุณหภูมิห้องคั่ว เริ่มต้น 3 ระดับ ได้แก่ 100 °C (Set A), 110 °C (Set B) และ 120 °C (Set C) ร่วมกับความเร็วลมในกระบวนการคั่วที่กำหนดเป็น 3 ช่วงเวลา ในช่วงที่ 1 (0–1 min) กำหนดให้ความเร็วลมคงที่ที่ 6.72 m/s สำหรับทุกเงื่อนไขการทดลอง เพื่อให้เกิดการฟลูอิดเซชันของเมล็ดกาแฟอย่างสม่ำเสมอในระยะเริ่มต้น ในช่วงที่ 2 (ตั้งแต่ 1 min จนกระทั่งอุณหภูมิห้องคั่วถึง 160 °C) ปรับความเร็วลมเป็น 3 ระดับ ได้แก่ 4.71, 5.28 และ 5.86 m/s ในช่วงที่ 3 (หลังจากอุณหภูมิห้องคั่วถึง 160 °C จนสิ้นสุดการคั่วที่ 15 min) ปรับความเร็วลมเป็น 3 ระดับ ได้แก่ 4.14, 4.71 และ 5.28 m/s เมื่อพิจารณาาร่วมกันของอุณหภูมิห้องคั่วเริ่มต้นและความเร็วลมในช่วงที่ 2 และช่วงที่ 3 ทำให้ได้เงื่อนไขการทดลองทั้งหมด 27 เงื่อนไข แบ่งเป็น Set A (A1–A9), Set B (B1–B9) และ Set C (C1–C9) แต่ละเงื่อนไขใช้เมล็ดกาแฟ 1 kg ทำ 4 ซ้ำ เก็บตัวอย่างที่เวลา 6, 8, 10 และ 15 min รายละเอียดเงื่อนไขการทดลองแสดงใน Table 1

2.4 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ

2.4.1 ความชื้น วัดโดยวิธีอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน (Hot air oven) ที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 h ชั่งน้ำหนักเมล็ดกาแฟก่อนและหลังอบ และคำนวณค่าความชื้นมาตรฐานเปียก (%w.b.) จากสมการที่ 1

$$M_c = [(M_o - M_b) / M_o] \times 100 \quad (1)$$

โดย

M_c คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (%w.b.)

M_o คือ น้ำหนักเมล็ดกาแฟก่อนอบ (g)

M_b คือ น้ำหนักเมล็ดกาแฟหลังอบ (g)

Table 1 Experimental conditions for hot air fluidized bed coffee roasting

Factor	Level 1	Level 2	Level 3
Initial chamber temperature (°C)	100	110	120
Air velocity during phase 2 (m/s) (1 min to 160 °C)	4.71	5.28	5.86
Air velocity during phase 3 (m/s) (>160 °C to end)	4.14	4.71	5.28

หมายเหตุ: ความเร็วลมในช่วงที่ 1 (0–1 min) กำหนดให้คงที่ที่ 6.72 m/s สำหรับทุกเงื่อนไขการทดลอง

การทดลองออกแบบแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ (3 × 3 × 3) ทำให้ได้เงื่อนไขการทดลองทั้งหมด 27 เงื่อนไข (A1–C9)

การเก็บตัวอย่างดำเนินการที่เวลาการคั่ว 6, 8, 10 และ 15 min

แต่ละเงื่อนไขใช้เมล็ดกาแฟปริมาณ 1 kg และทำการทดลองซ้ำจำนวน 4 ซ้ำ

2.4.2 ขนาดเมล็ดกาแฟ วัดความกว้าง (a) ความยาว (b) และความหนา (c) ของเมล็ดกาแฟ 30 beans/sample ด้วยเวอร์เนียร์คาลิเปอร์ คำนวณค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (Geometric mean diameter, $D_g = (abc)^{(1/3)}$) และพื้นที่ผิวเมล็ด ($S = \pi D_g^2$)

2.4.3 ความหนาแน่น วัดความหนาแน่นรวม (Bulk density, ρ_b) โดยการชั่งน้ำหนักเมล็ดกาแฟในภาชนะปริมาตรที่ทราบค่า และวัดความหนาแน่นเนื้อ (True density, ρ_s) โดยใช้หลักการแทนที่ด้วยทรายละเอียด รายงานหน่วยเป็น g/cm^3

2.4.4 ค่าสี วิเคราะห์โดยใช้เครื่องวัดสีในระบบ CIE Lab โดยค่า L แทนความสว่าง (0=ดำ, 100=ขาว) ค่า a แทนแกนสีแดง-เขียว และค่า b แทนแกนสีเหลือง-น้ำเงิน

2.4.5 การวิเคราะห์ทางสถิติ วิเคราะห์ความแปรปรวนด้วย One-way ANOVA และทดสอบความแตกต่างด้วย Duncan's multiple range test (DMRT) ที่ระดับนัยสำคัญ $p \leq 0.05$

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของเมล็ดกาแฟ

ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเมล็ดกาแฟดังแสดงใน Figure 2 พบว่าความชื้นของเมล็ดกาแฟลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง Drying phase (0–6 min) ความชื้นเริ่มต้นของเมล็ดกาแฟดิบก่อนเข้าเครื่องคั่วอยู่ที่ 10–12% (w.b.) ตามมาตรฐาน มผช. 268/2558 อย่างไรก็ตาม ค่าความชื้น ณ $t = 0$ min ที่วัดได้ในกาทดลองอยู่ที่ $4.00 \pm 0.12\%$ (w.b., $n = 4$) เนื่องจากในช่วง Phase 1 (0–1 min) กระแสลมร้อนความเร็วสูง (6.72 m/s) ทำให้ความชื้นลดลงอย่างรวดเร็ว ก่อนเริ่มบันทึกข้อมูล สอดคล้องกับรายงานของ Mwithiga และ Jindal [7] ที่พบว่ากระแสลมร้อนที่สูงส่งผลให้ความชื้นของวัสดุลดลง ความชื้นลดลงต่อเนื่องจนเข้าสู่ค่าสมดุลต่ำกว่า 0.5% (w.b.) เมื่อเวลาการคั่วเกิน 8 min กลไกการสูญเสียความชื้นในระบบฟลูอิดิซ์เบดเกิดจากการระเหยของน้ำภายในเมล็ดกาแฟออกสู่กระแสลมร้อนที่ไหลผ่านอย่างต่อเนื่อง โดยอัตราการระเหยขึ้นอยู่กับการถ่ายเทมวลระหว่างผิวของเมล็ดกาแฟกับอากาศที่ไหลผ่าน [8, 9] ค่าความชื้นที่ต่ำมากในช่วงท้ายของการคั่ว (เช่น $0.02 \pm 0.02\%$ w.b. ที่ $t = 15$ min สำหรับเงื่อนไข B5) เป็นผลของการระเหยน้ำที่สมบูรณ์ภายใต้สภาวะฟลูอิดิซ์เบดซึ่งมีพื้นที่สัมผัสระหว่างลมร้อนและผิวเมล็ดกาแฟสูง สอดคล้องกับรายงานของ Wang และ Lim [10] ที่พบว่า การคั่วด้วยระบบลมร้อนสามารถลดความชื้นกาแฟลงสู่ระดับต่ำกว่า 0.1% (w.b.) ทั้งนี้ค่าความชื้นที่ต่ำมากในช่วงท้ายของการคั่วถือเป็นลักษณะเฉพาะของระบบฟลูอิดิซ์เบดซึ่งมีพื้นที่สัมผัสระหว่างอากาศและเมล็ดกาแฟสูงและการอบแห้งแบบ Convective เกิดขึ้นอย่างเข้มข้น

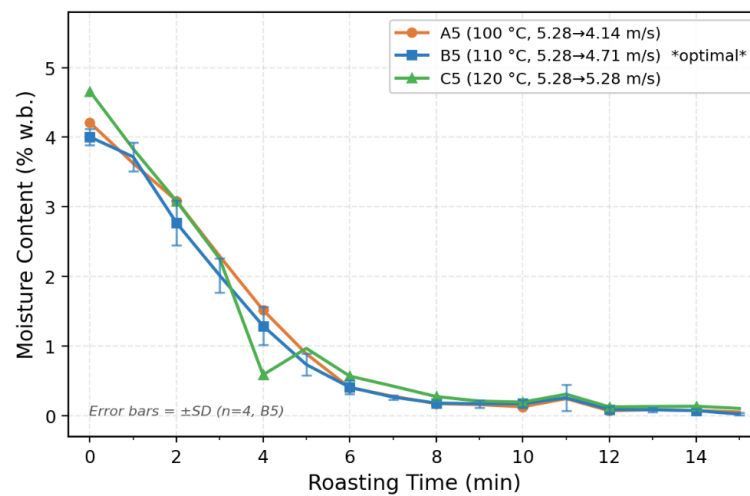
เงื่อนไข B5 (อุณหภูมิเริ่มต้น 110 °C, ความเร็วลมช่วงที่ 2 5.28 m/s, ความเร็วลมหลัง 160 °C ที่ 4.71 m/s) ให้การลดลงของความชื้นที่สม่ำเสมอและต่อเนื่องมากที่สุด เนื่องจากการผสมผสานระหว่างอุณหภูมิและความเร็วลมที่เหมาะสมทำให้อัตราการให้ความร้อนและอัตราการถ่ายเทความร้อนในเมล็ดกาแฟมีความสม่ำเสมอ [11] ในทางตรงกันข้าม ความเร็วลมที่สูงเกินไปส่งผลให้ค่าความชื้นในเมล็ดกาแฟหลังคั่วมีแนวโน้มสูงกว่า อาจเนื่องจากลมที่แรงเกินไปอาจระบายความร้อนออกจากเมล็ด

กาแฟเร็วเกินไป ทำให้เมล็ดกาแฟบางส่วนได้รับความร้อนไม่เพียงพอ ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Mwithiga และ Jindal [10] ที่พบว่าอุณหภูมิการคั่วมีอิทธิพลสำคัญต่ออัตราการสูญเสียความชื้นของกาแฟ

3.2 การเปลี่ยนแปลงขนาดของเมล็ดกาแฟ

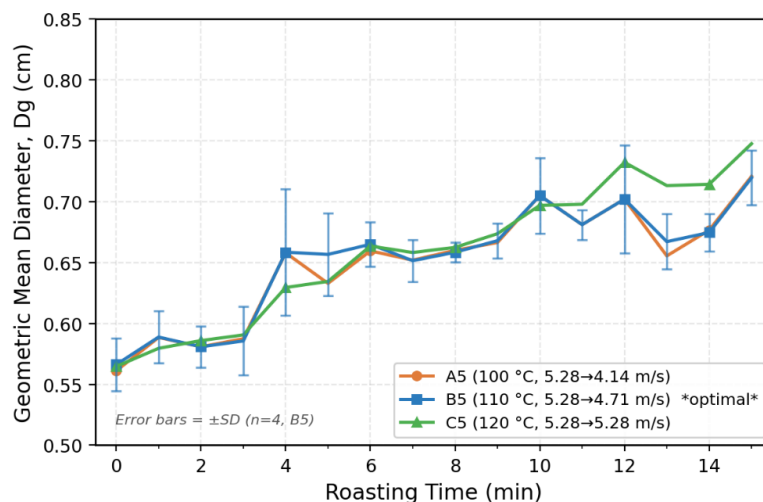
ผลการศึกษการเปลี่ยนแปลงขนาดของเมล็ดกาแฟดังแสดงใน Figure 3 พบว่าขนาดของเมล็ดกาแฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเวลาการคั่ว โดยค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (Dg) ของเมล็ดกาแฟเพิ่มขึ้นจาก 0.61-0.76 cm ที่ 6 min เป็น 0.66-0.78 cm ที่ 15 min ส่วนพื้นที่ผิวเมล็ด (S) เพิ่มขึ้นจากประมาณ 1.18-1.92 cm² เป็นประมาณ 1.38-1.92 cm² การขยายตัวของเมล็ดเกิดจากการสลายตัวของสารประกอบอินทรีย์ภายในเมล็ดกาแฟซึ่งทำให้เกิดก๊าซ CO₂ ไอน้ำ และก๊าซอื่นๆ สร้างแรงดันภายในโครงสร้างเซลล์ นำไปสู่การขยายตัวของโครงสร้างภายใน [12] ผลนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Schenker et al. [13] ที่รายงานว่ากาแฟคั่วสามารถขยายตัวได้ 40-60% เมื่อเทียบกับกาแฟดิบ

ความเร็วลมมีอิทธิพลต่อขนาดเมล็ดอย่างมีนัยสำคัญ โดยเงื่อนไขที่มีความเร็วลมสูง (5.86 m/s) มีแนวโน้มให้ขนาดเมล็ดและพื้นที่ผิวลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากความเร็วลมสูงทำให้การกระจายความร้อนในเมล็ดกาแฟไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้บางส่วน



ไม่ได้ได้รับความร้อนเพียงพอและไม่เกิดความพรุณ ลมที่แรงเกินไปยังทำให้ความร้อนเข้าสู่ใจกลางเมล็ดไม่ทัน จึงไม่เกิดการขยายตัวในใจกลางเมล็ดกาแฟอย่างสมบูรณ์ [11, 14] เงื่อนไขที่มีอุณหภูมิเริ่มต้น 110 °C ร่วมกับความเร็วมต่ำในช่วงก่อนและหลัง 160 °C (เงื่อนไข B1 และ B4) ให้ขนาดเมล็ดที่ใหญ่ที่สุดในแต่ละช่วงเวลา

Figure 2 Moisture of Robusta coffee air fluidized bed initial chamber (Phase 2 air (1 min to ET=160 velocity



content (% w.b.) beans during hot roasting at three temperatures velocity 5.28 m/s °C, post-160 °C 4.71 m/s)

Figure 3 Geometric mean diameter (D_g , cm) of Robusta offee beans during hot air fluidized bed roasting at three initial chamber temperatures (Phase 2 air velocity 5.28 m/s (1 min to ET=160°C), post-160°C velocity 4.71 m/s)

3.3 การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของเมล็ดกาแฟ

ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของเมล็ดกาแฟดังแสดงใน Figure 4 พบว่าค่าความหนาแน่นรวม (ρ_b) ของเมล็ดกาแฟมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาการคั่วเพิ่มขึ้น โดยลดลงจากช่วง 0.29-0.46 g/cm³ ที่ 6 min เหลือเพียง 0.22-0.36 g/cm³ ที่ 15 min ค่าความหนาแน่นรวมที่สูงที่ $t = 0$ min (เช่น 0.567 g/cm³ สำหรับเงื่อนไข B5) แสดงถึงสถานะเมล็ดกาแฟดิบก่อนเริ่มกระบวนการคั่วที่ยังไม่เกิดการขยายตัว ในขณะที่การลดลงอย่างรวดเร็วภายใน 6 min แรกเกิดจากการขยายตัวเชิงปริมาตรอย่างรวดเร็ว เนื่องจากแรงดันก๊าซ CO₂ และไอน้ำที่สะสมภายในโครงสร้างเมล็ดกาแฟในช่วง Drying phase การลดลงของความหนาแน่นรวมเกิดจากการสูญเสียความชื้นและมวลของสารอินทรีย์ระหว่างการคั่ว ในขณะที่ปริมาตรเพิ่มขึ้นจากการขยายตัว โดยทั่วไปกาแฟคั่วจะมีความหนาแน่นต่ำกว่ากาแฟดิบประมาณ 20-40% [15] ผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานของ Pittia et al. [9] ที่รายงานการลดลงของความหนาแน่นเนื่องจากการก่อตัวของรูพรุน (Pore formation) ในระหว่างการคั่ว

ความเร็วลมหลัง 160 °C มีอิทธิพลต่อความหนาแน่นรวมอย่างมีนัยสำคัญ โดยเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นรวมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาขนาดเมล็ดที่พบว่าความเร็วลมสูงทำให้เมล็ดกาแฟขยายตัวได้น้อย ส่งผลให้ความหนาแน่นสูงขึ้น [14] สำหรับความหนาแน่นเนื้อ (ρ_s) พบว่ามีความผันแปรค่อนข้างมาก (0.68-2.76 g/cm³) อาจเนื่องมาจากความไม่สม่ำเสมอของการกระจายขนาดรูพรุนภายในเมล็ด เนื่องจากค่า ρ_s มีความผันแปรสูงและไม่แสดงแนวโน้มที่ชัดเจน จึงไม่นำมาวิเคราะห์เชิงสถิติ (ANOVA/DMRT) ในงานวิจัยนี้ โดยเน้นการรายงาน ρ_b เป็นพารามิเตอร์หลักในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของเมล็ดกาแฟระหว่างการคั่ว

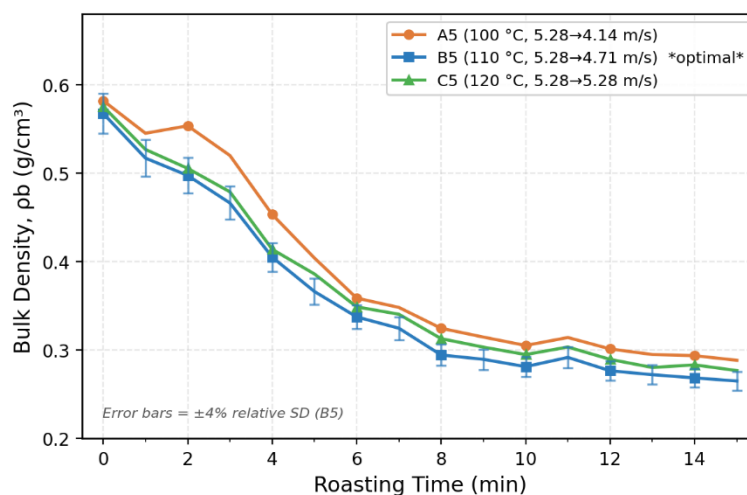


Figure 4 Bulk density (ρ_b , g/cm³) of Robusta coffee beans during hot air fluidized bed roasting at three initial chamber temperatures (Phase 2 air velocity 5.28 m/s (1 min to ET=160 °C), post-160 °C velocity 4.71 m/s)

3.4 การเปลี่ยนแปลงค่าสีของเมล็ดกาแฟ

ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าสีของเมล็ดกาแฟดังแสดงใน Figure 5 พบว่าค่าความสว่าง (L) ของเมล็ดกาแฟลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการคั่ว (0-6 min) จากค่าเริ่มต้น 46-56 เหลือ 30-40 จากนั้นลดลงอย่างช้าๆ และเข้าสู่ค่าสมดุลที่ 28-35 เมื่อเวลาการคั่วถึง 8-10 min การลดลงของค่า L ในช่วงแรกเกิดจากปฏิกิริยาการเมลานิเซชันของน้ำตาลที่ถูกกระตุ้น

อย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิเมล็ดกาแฟเพิ่มขึ้น จากนั้นการลดลงช้าๆ ในภายหลังเกิดจากความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่ลดลง [1-6] สอดคล้องกับทฤษฎีการเกิด Maillard reaction และ Caramelization ที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและสะสมในระหว่างการคั่ว [3]

ความเร็วลมมีผลต่อค่า L อย่างมีนัยสำคัญ โดยเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้น ค่า L มีแนวโน้มสูงขึ้น (สีอ่อนกว่า) เนื่องจากลมที่แรงเกินไปจะลดเวลาสัมผัสกับความร้อน ทำให้ความร้อนไม่สามารถแทรกซึมเข้าสู่เมล็ดได้อย่างทั่วถึง ส่งผลให้ปฏิกิริยาสีน้ำตาลเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ [17] เงื่อนไข B5 ให้ค่า L = 31.63 ± 0.45 (n = 4) ที่ 15 min ซึ่งอยู่ในช่วง L = 30–35 สำหรับกาแฟคั่วระดับกลาง (Medium roast) ตามมาตรฐาน มผช. 268/2558 นอกจากนี้ยังให้ความชื้นสุดท้าย 0.023 ± 0.018% (w.b., n = 4) ต่ำกว่าเกณฑ์ 5% (w.b.) และผ่านการประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญ Q Robusta grader ว่าให้กลิ่นรสที่สมดุลที่สุดในบรรดา 27 เงื่อนไข โดยคุณสมบัติทางกายภาพของเงื่อนไข B5 ได้สรุปและแสดงรายละเอียดไว้ใน Table 2

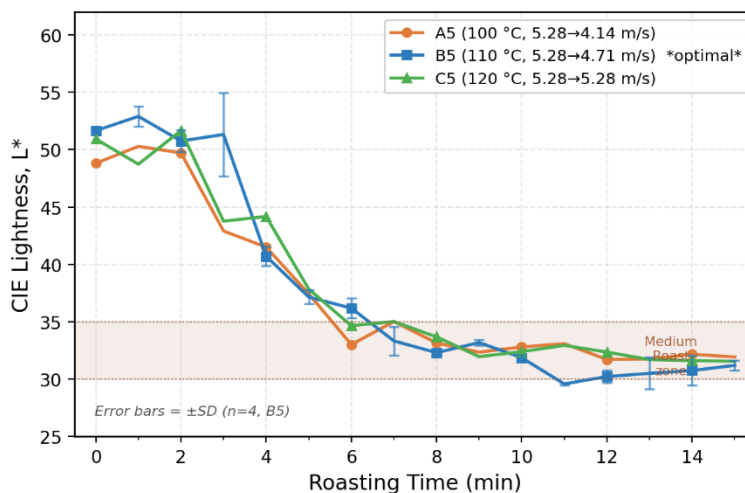


Figure 5 Lightness (L) of Robusta coffee beans during hot air fluidized bed roasting at three initial chamber temperatures (Phase 2 air velocity 5.28 m/s (1 min to ET=160 °C), post-160 °C velocity 4.71 m/s)

Table 2 Summary of physical properties changes of robusta coffee beans during hot air fluidized bed roasting (Condition B5)

Roasting time (min)	M_c (%w.b.)	D_g (cm)	ρ_b (g/cm ³)	L
0	4.00 ± 0.12 ^a	0.565 ± 0.021 ^a	0.567 ^{a†}	46.43 ± 0.20 ^a
6	0.41 ± 0.10 ^b	0.664 ± 0.018 ^b	0.338 ± 0.030 ^b	37.31 ± 0.89 ^b
8	0.18 ± 0.04 ^b	0.658 ± 0.008 ^b	0.295 ± 0.040 ^c	31.51 ± 0.24 ^c
10	0.17 ± 0.05 ^b	0.705 ± 0.031 ^c	0.281 ± 0.030 ^c	30.32 ± 0.27 ^c
15	0.02 ± 0.02 ^b	0.719 ± 0.022 ^c	0.265 ± 0.020 ^c	31.63 ± 0.45 ^c

หมายเหตุ: M_c , D_g และ L คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย และค่าความสว่าง

ρ_b ที่เวลา 6–15 min แสดงเป็น Mean ± SD

† ρ_b ที่ t = 0 min เป็นค่าอ้างอิงก่อนคั่วจากการวัดครั้งเดียว

ตัวอักษรที่แตกต่างกัน (a, b, c) คือ ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (DMRT, p < 0.05)

4. สรุป

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของเมล็ดกาแฟโรบัสต้าจากจังหวัดชุมพรระหว่างการคั่วด้วยระบบลมร้อนแบบฟลูอิดไรซ์เบด พบว่าความชื้นลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง Drying phase (0-6 min) จาก 10-12% (w.b.) ก่อนคั่ว เหลือน้อยกว่า

0.5% (w.b.) เมื่อเวลาการคั่วถึง 8 min โดยอุณหภูมิเริ่มต้นและความเร็วลมมีอิทธิพลต่ออัตราการสูญเสียความชื้น ขณะที่ขนาดเมล็ดเพิ่มขึ้นตามเวลาการคั่ว ค่า D_g เพิ่มขึ้นจาก 0.61-0.76 cm ที่ 6 min เป็น 0.66-0.78 cm ที่ 15 min เนื่องจากการขยายตัวของโครงสร้างภายในเมล็ดจากแรงดันก๊าซ ความเร็วลมสูงทำให้เมล็ดขยายตัวได้น้อยกว่า ความหนาแน่นรวม (ρ_b) ลดลงจาก 0.29-0.46 g/cm³ ที่ 6 min เหลือ 0.22-0.36 g/cm³ ที่ 15 min โดยความเร็วลมหลัง 160 °C มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ค่า L ลดลงจากประมาณ 50 ในช่วงต้น เหลือประมาณ 30 ที่ 8-10 min สะท้อนถึงการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) และคาราเมลไลเซชัน สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการคั่วกาแฟโรบัสต้าให้ได้ระดับกาแฟคั่วกลางคือ อุณหภูมิเริ่มต้น 110 °C Phase 2 ความเร็วลม 5.28 m/s และ Phase 3 ความเร็วลม 4.71 m/s (หลัง 160 °C) ผลการวิจัยนี้สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบและพัฒนาเครื่องคั่วกาแฟด้วยระบบลมร้อนแบบฟลูอิดเบด เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์กาแฟโรบัสต้าชุมพรที่มีคุณภาพตามมาตรฐาน มผช. 268/2558 (TCPS 268/2558)

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) หรือ สวก. ปีงบประมาณ พ.ศ. 2566 รหัสโครงการ PRP6605030470 คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตอุดมศักดิ์ ที่ให้อุปกรณ์และสถานที่ในการทดสอบ วิสาหกิจชุมชนกลุ่มกาแฟบ้านถ้ำสิงห์ โรงคั่วกาแฟอภิเขต อำเภอเมือง จังหวัดชุมพร โรงคั่วกาแฟ Kim coffee home roaster อำเภอละแม จังหวัดชุมพร ตลอดจนผู้เชี่ยวชาญ ผู้ทรงคุณวุฒิ คณะกรรมการ สวก. และทุกท่านที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2566. สถิติการเกษตรของประเทศไทย ปีการเกษตร 2565/66. กรุงเทพฯ: กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- [2] Clifford, M. N. and Willson, K. C. (Eds.). 2012. Coffee: Botany, Biochemistry and Production of Beans and Beverage. Springer, New York.
- [3] Schenker, S. and Rothgeb, T. 2017. The roast—Creating the bean's flavor potential. In *The Craft and Science of Coffee*. Academic Press, London. pp. 245-271.
- [4] Illy, A. and Viani, R. (Eds.). 2005. Espresso Coffee: The Science of Quality. 2nd edn. Academic Press, London.
- [5] Schwartzberg, H. G. 2002. Batch coffee roasting; Roasting energy use; Reducing that use. In *Proceedings of the 19th ASIC Coffee Conference*. Trieste.
- [6] Raemy, A. and Lambelet, P. 1982. A calorimetric study of self-heating in coffee and chicory. *J. Food Technol.* 17(4): 451-460.
- [7] Mwithiga, G. and Jindal, V. K. 2003. Physical changes during coffee roasting in rotary conduction-type heating units. *J. Food Process Eng.* 26(6): 543-558.
- [8] Franca, A. S., Mendonca, J. C. F. and Oliveira, S. D. 2005. Composition of green and roasted coffees of different cup qualities. *LWT Food Sci. Technol.* 38(7): 709-715.
- [9] Pittia, P., Dalla Rosa, M. and Lerici, C. R. 2001. Textural changes of coffee beans as affected by roasting conditions. *LWT Food Sci. Technol.* 34(3): 168-175.
- [10] Wang, X. N. and Lim, L. T. 2012. Effect of roasting conditions on carbon dioxide degassing behavior of coffee. *Food Res. Int.* 49(1): 148-154.
- [11] Baggenstoss, J., Poisson, L., Kaegi, R., Perren, R. and Escher, F. 2008. Coffee roasting and aroma formation: Application of different time-temperature conditions. *J. Agric. Food Chem.* 56(14): 5836-5846.
- [12] Schenker, S., Heinemann, C., Huber, M., Pompizzi, R., Perren, R. and Escher, F. 2002. Impact of roasting conditions on the formation of aroma compounds in coffee beans. *J. Food Sci.* 67(1): 60-66.
- [13] Hernández, J. A., Heyd, B. and Trystram, G. 2008. Prediction of brightness and surface area kinetics during coffee roasting. *J. Food Eng.* 89(2): 156-163.

-
- [14] Al-Shemmeri, M., Fryer, P., Farr, R. and Lopez-Quiroga, E. 2024. Development of coffee bean porosity and thermophysical properties during roasting. *Journal of Food Engineering*. 378: 112096.
- [15] Crozier, T. W., Stalmach, A., Lean, M. E. and Crozier, A. 2012. Espresso coffees, caffeine and chlorogenic acid intake: Potential health implications. *Food Funct.* 3(1): 30-33.
- [16] Bekedam, E. K., Schols, H. A., Van Boekel, M. A. and Smit, G. 2006. High molecular weight melanoidins from coffee brew. *J. Agric. Food Chem.* 54(20): 7658-7666.
- [17] Quast, L. B. and Aquino, A. D. 2004. Kinetics of the colour changes of peanuts during roasting. *Braz. J. Chem. Eng.* 21(3): 419-428.

การพัฒนาโปรแกรม LabVIEW เพื่อการเลือกขนาดมอเตอร์และแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า LABVIEW-BASED PROGRAM DEVELOPMENT FOR MOTOR AND BATTERY SIZING IN ELECTRIC VEHICLES

ธนาธร ทองสง¹, มานพ มาสมทบ², บุรินทร์ เกิดทรัพย์³ และ วรรัชชล วัฒนะ^{1,*}

Thanadorn Thongsong¹, Manop Masomtob², Burin Kerdsup³ and Wassachol Wattana^{1,*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร 86160 ประเทศไทย

²ศูนย์เทคโนโลยีพลังงานแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ จังหวัดปทุมธานี 12120 ประเทศไทย

³ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ จังหวัดปทุมธานี 12120 ประเทศไทย

¹Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Prince of Chumphon Campus, Chumphon, 86160, Thailand

²National Energy Technology Center, National Science and Technology Development Agency, Pathum Thani, 12120, Thailand

³National Electronics and Computer Technology Center, National Science and Technology Development Agency, Pathum Thani, 12120, Thailand

*Corresponding author: Wassachol Wattana, e-mail address: wassachol.wa@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาโปรแกรมจำลองระบบส่งกำลังของยานยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicle: EV) บนแพลตฟอร์ม LabVIEW เพื่อใช้เป็นเครื่องมือทางเลือกที่มีต้นทุนต่ำและสามารถเข้าถึงได้ง่าย เมื่อเปรียบเทียบกับ MATLAB/Simulink ซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูงและจำเป็นต้องใช้เครื่องมือเสริมเพิ่มเติม โปรแกรมจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถประมวลผลข้อมูลรูปแบบการขับขี่ (Driving Cycle) ร่วมกับพารามิเตอร์ของยานยนต์ เพื่อคำนวณแรงต้านการเคลื่อนที่ กำลังฉุดลากที่ต้องใช้ พลังงานของมอเตอร์ แรงบิด (Torque) ความเร็วรอบ (RPM) และพลังงานที่ใช้ทั้งหมดของระบบ (Energy Consumption) ได้มีการพัฒนาแบบจำลองแบตเตอรี่โดยอาศัยข้อมูลอัตราการคายประจุ (C-rate) สถานะประจุของแบตเตอรี่ (State of Charge: SOC) และแรงดันของเซลล์แบตเตอรี่ (cell voltage) ผ่านเทคนิคตารางค่าข้อมูล (Lookup Table) เพื่อจำลองพฤติกรรมการคายประจุและการชาร์จประจุของแบตเตอรี่ รวมถึงการคำนวณกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบ โดยมีการจำลองระบบให้สามารถรองรับการทำงานของระบบเบรกแบบสร้างพลังงานกลับ (Regenerative Braking) และสามารถคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าของเซลล์แบตเตอรี่ได้แบบไดนามิกในแต่ละช่วงเวลา ผลลัพธ์จากโปรแกรมจำลองบนแพลตฟอร์ม LabVIEW ถูกนำไปตรวจสอบความถูกต้องโดยนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกับข้อมูลอ้างอิงจากมาตรฐาน New European Driving Cycle (NEDC) และแพลตฟอร์ม PowerCal ของสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ผลจากการเปรียบเทียบพบว่าค่าการใช้พลังงาน แรงบิด และกำลังของมอเตอร์มีความสอดคล้องกับข้อมูลอ้างอิงในระดับที่ยอมรับได้ แสดงถึงความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น เครื่องมือจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปใช้ประเมินขนาดมอเตอร์และแบตเตอรี่ที่เหมาะสมสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า รวมทั้งสนับสนุนงานออกแบบ การวิจัย และการพัฒนาระบบยานยนต์ไฟฟ้าในอนาคตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: ยานยนต์ไฟฟ้า (EV), Driving Cycle, State of Charge (SOC), Lookup Table, Regenerative Braking

Abstract

This study aims to develop a powertrain system simulation program for electric vehicles (EVs) using the LabVIEW platform as a low-cost and easily accessible alternative to MATLAB/Simulink, which requires high licensing fees and additional toolboxes. The developed simulation program processes driving cycle data together with vehicle parameters to calculate resistance forces, required traction power, motor energy, torque, rotational speed (RPM), and total system energy consumption. A battery model was developed based on the discharge rate (C-rate), state of charge (SOC), and cell voltage using a lookup table technique to simulate the charging and discharging behavior of the battery, as well as to calculate the electrical power delivered to the system. The simulation system is designed to support regenerative braking operation and can dynamically calculate the battery cell current at each time step.

The simulation results obtained from the LabVIEW platform were validated by comparison with reference data from the New European Driving Cycle (NEDC) standard and the Power Cal platform of the National Science and Technology Development Agency (NSTDA). The comparison results indicate that the energy consumption, motor torque, and motor power are in good agreement with the reference data, demonstrating

the accuracy and reliability of the developed model. The proposed simulation tool can be used to evaluate appropriate motor and battery sizes for electric vehicles and effectively supports future electric vehicle system design, research, and development.

Keywords: Electric Vehicle (EV), Driving Cycle, State of Charge (SOC), Lookup Table, Regenerative Braking

1. บทนำ

ในยุคปัจจุบัน แนวโน้มการพัฒนาและใช้งานยานยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicle: EV) มีการเติบโตอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่สามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและมลพิษทางอากาศ อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพในการใช้พลังงานสูงกว่าเครื่องยนต์สันดาปภายใน [2] หน่วยงานต่าง ๆ ทั้งภาครัฐและเอกชน รวมถึง ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีพลังงานแห่งชาติ (National Energy Technology Center: ENTEC) ได้มีบทบาทสำคัญในการส่งเสริมการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีด้านยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทย โดยมุ่งเน้นการสร้างองค์ความรู้และเครื่องมือวิเคราะห์สมรรถนะของระบบขับเคลื่อน เพื่อรองรับการเปลี่ยนผ่านสู่ระบบพลังงานสะอาดในอนาคต

การออกแบบระบบขับเคลื่อนของยานยนต์ไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มสมรรถนะโดยรวมของยานยนต์ หัวใจหลักของระบบขับเคลื่อนคือ มอเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล และ แบตเตอรี่ ซึ่งเป็นแหล่งจ่ายพลังงานหลัก [3] การเลือกขนาดของมอเตอร์และแบตเตอรี่ที่เหมาะสมจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลการขับขี่จริง เช่น ความเร็ว การเร่ง ความชันของถนน และเวลา ซึ่งแสดงในรูปแบบการขับขี่ (Driving Cycle) [4] ข้อมูลดังกล่าวสามารถใช้ในการคำนวณค่าพลังงาน แรงบิด และความเร็วรอบของมอเตอร์ เพื่อประเมินสมรรถนะของระบบขับเคลื่อนในสภาพการใช้งานต่างๆ ที่ผ่านมา การคำนวณและจำลองระบบขับเคลื่อนมักทำโดยใช้ซอฟต์แวร์ MATLAB ซึ่งมีความสามารถด้านการคำนวณเชิงตัวเลขสูง แต่ต้องอาศัยการเขียนโค้ดที่ซับซ้อนและไม่เหมาะกับผู้ที่ไม่มีพื้นฐานด้านการโปรแกรมมากนัก ในขณะที่ซอฟต์แวร์ LabVIEW มีจุดเด่นด้านการพัฒนาโปรแกรมเชิงกราฟิก (Graphical Programming) ที่สามารถเชื่อมโยงโมดูลการคำนวณ การนำเข้าข้อมูล และการแสดงผลได้อย่างเป็นระบบและเข้าใจง่าย [5]

ในปัจจุบัน ยานยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicle: EV) ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทั่วโลก รวมถึงในประเทศไทย เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่ช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและมลพิษทางอากาศ อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพในการใช้พลังงานสูงกว่าเครื่องยนต์สันดาปภายใน (Internal Combustion Engine: ICE) [6] ภาครัฐจึงให้ความสำคัญกับการส่งเสริมยานยนต์ไฟฟ้าทุกประเภท ทั้งรถยนต์ส่วนบุคคล รถจักรยานยนต์ไฟฟ้า และรถโดยสารไฟฟ้า เพื่อผลักดันประเทศสู่ “สังคมคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Society)” ตามแนวทางการพัฒนาที่ยั่งยืนรัฐบาลไทยได้จัดทำยุทธศาสตร์การส่งเสริมอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้าแบบครบวงจร ตั้งแต่การผลิตชิ้นส่วนหลัก เช่น แบตเตอรี่ มอเตอร์ และระบบควบคุม ไปจนถึงการสนับสนุนสถานีอัดประจุไฟฟ้า (EV Charging Station) เพื่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานรองรับการใช้งานจริง โดยมีเป้าหมายให้มีการใช้ยานยนต์ไฟฟ้ากว่า 30% ของยานพาหนะทั้งหมดภายในปี พ.ศ. 2573 [7] ในภาคการขนส่งสาธารณะ หน่วยงานหลักอย่างองค์การขนส่งมวลชนกรุงเทพ (ขสมก.) ได้เริ่มนำรถโดยสารไฟฟ้ามาให้บริการ เพื่อทดแทนรถดีเซลที่มีอายุการใช้งานสูง ขณะที่ภาคเอกชนไทย เช่น บริษัท สกูลส์ซี อินโนเวชั่น จำกัด และบริษัท ไทยสมายล์บัส จำกัด ได้ร่วมพัฒนาและผลิตรถโดยสารไฟฟ้า รวมถึงร่วมมือกับหน่วยงานรัฐ เช่น การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (EGAT) และสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (NSTDA) ในการศึกษาการดัดแปลงรถโดยสารเก่าให้เป็นรถไฟฟ้า [8,9] ดังนั้นการพัฒนาและส่งเสริมยานยนต์ไฟฟ้าในประเทศไทยถือเป็นแนวทางสำคัญในการยกระดับระบบคมนาคมให้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ลดการใช้พลังงานฟอสซิล และเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของอุตสาหกรรมยานยนต์ในประเทศ ซึ่งจะเป็พื้นฐานสำคัญสำหรับการออกแบบและจำลองสมรรถนะของระบบขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้า

ดังนั้นการศึกษานี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาโปรแกรมบน LabVIEW เพื่อใช้แทนการจำลองด้วย MATLAB โดยเน้นให้ผู้ใช้สามารถนำเข้าข้อมูลจาก Driving Cycle เพื่อคำนวณค่าพลังงาน แรงบิด และความเร็วรอบของมอเตอร์ได้แบบอัตโนมัติ พร้อมแสดงผลผ่านอินเทอร์เฟซแบบโต้ตอบ ซึ่งจะช่วยให้การวิเคราะห์และออกแบบระบบขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้าทำได้สะดวก แม่นยำ และเหมาะสมกับการนำไปใช้ในงานวิจัยและการเรียนการสอนต่อไป ดังนั้นวัตถุประสงค์ในการศึกษานี้คือ เพื่อพัฒนาโปรแกรมจำลองยานยนต์ไฟฟ้า (EV simulation program) โดยใช้ LabVIEW ในการเลือกขนาดมอเตอร์และแบตเตอรี่ ตลอดจนจำลองพฤติกรรมโดยรวมของระบบยานยนต์ไฟฟ้า และสามารถใช้ ทดแทน โปรแกรม MATLAB ในการคำนวณยานยนต์ไฟฟ้าได้ โดยมีขอบเขตการศึกษาดังนี้ โปรแกรมพัฒนาด้วยซอฟต์แวร์ LabVIEW เวอร์ชัน 2020 โดยใช้แบตเตอรี่ Panasonic NCR18650-BD,

โดยมีแรงดันไฟฟ้าเข้ามอเตอร์อินเวอร์เตอร์ที่ 540V, 500V, 480V ในการจำลอง ทำการจำลองพฤติกรรมโดยรวมของระบบยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งรวมถึงการไหลของพลังงาน การตอบสนองของระบบส่งกำลัง และสมรรถนะของระบบ พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลลัพธ์กับมาตรฐานของ PowerCal จากฐานข้อมูลของศูนย์ความเป็นเลิศด้านยานยนต์ไฟฟ้าประเทศไทย สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) [1] ตลอดจนสร้างแพลตฟอร์มการจำลองที่มีความยืดหยุ่น สามารถปรับแต่งได้ และสามารถต่อยอดสำหรับการวิจัย การทดสอบ และการพัฒนาระบบยานยนต์ไฟฟ้าในอนาคตได้

2. การพัฒนาโมดูลการคำนวณและอัลกอริทึมควบคุมบนแพลตฟอร์ม LabVIEW

การศึกษานี้มุ่งพัฒนาโปรแกรมจำลองการคำนวณกำลังและพลังงานของระบบขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้าบนแพลตฟอร์ม LabVIEW เพื่อใช้เป็นเครื่องมือช่วยในการเลือกขนาดมอเตอร์ไฟฟ้าและแบตเตอรี่ให้เหมาะสมกับเงื่อนไขการขับขี่ของรถไฟฟ้าที่กำหนด โปรแกรม LabVIEW ถูกนำมาใช้ในการจำลององค์ประกอบสำคัญของยานยนต์ไฟฟ้า ได้แก่ แบบจำลองพฤติกรรมแบตเตอรี่ สมรรถนะและประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้า รวมถึงแบบจำลองการเบรกแบบสร้างพลังงานกลับ (Regenerative braking) โดยผลการจำลองสามารถนำไปเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่อ้างอิงจากมาตรฐานของ Simulink เพื่อประเมินความสอดคล้องของระบบจำลองภายใต้ต้นทุนการพัฒนาที่ต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญ โดยขั้นตอนการพัฒนาเริ่มจากการกำหนดพารามิเตอร์พื้นฐานของรถ เช่น มวลรถ พื้นที่หน้าตัด ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ และข้อมูลแบตเตอรี่ ซึ่งจะถูกนำมาใช้ในสมการแรงและกำลังตามพลศาสตร์ยานยนต์ ระบบการคำนวณถูกแบ่งออกเป็นโมดูลย่อย ได้แก่ โมดูลการนำเข้าข้อมูล Driving Cycle โมดูลคำนวณแรงต้านทานการเคลื่อนที่ โมดูลคำนวณกำลังที่ล้อต้องการ โมดูลประสิทธิภาพมอเตอร์และ ระบบส่งกำลัง และโมดูลจำลองสถานะประจุของแบตเตอรี่ State of Charge (SOC) โดยแต่ละโมดูลถูกเชื่อมโยงเข้าด้วยกันเพื่อสร้างแบบจำลองการทำงานของรถโดยสารไฟฟ้าทั้งระบบ แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถใช้ประเมินสมรรถนะภายใต้วัฏจักรการขับขี่ต่างๆ ทดสอบผลกระทบของมวลรถ ความเร็วเฉลี่ย ความชันของเส้นทาง ตลอดจนวิเคราะห์กำลังและพลังงานที่ต้องการในสภาพการใช้งานจริง ส่งผลให้สามารถใช้เป็นเครื่องมือสนับสนุนการออกแบบระบบส่งกำลัง ขนาดมอเตอร์ และขนาดแบตเตอรี่ให้เหมาะสมกับรถโดยสารไฟฟ้าต้นแบบ

ในการออกแบบอัลกอริทึมควบคุมและเขียนโค้ดของซอฟต์แวร์ผ่านโปรแกรม LabVIEW นั้นถูกแบ่งหน้าตาออกเป็น 5 ส่วนประกอบดังแสดงใน Figure 1

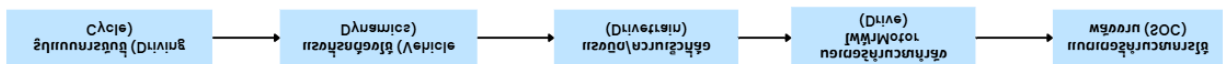


Figure 1 Calculation procedure.

1. หน้าต่างโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นทำหน้าที่เป็นส่วนติดต่อผู้ใช้ (User Interface) สำหรับกำหนดค่าการจำลองและปรับแต่งพารามิเตอร์ที่จำเป็นต่อการทำงานของระบบ โดยผู้ใช้สามารถเลือกและตั้งค่าต่าง ๆ ได้อย่างยืดหยุ่น ได้แก่ การเลือกชุดข้อมูล Driving Cycle ที่ต้องการทดสอบ การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมควบคุม เช่น ข้อมูลทางกายภาพของยานพาหนะ พารามิเตอร์ของระบบส่งกำลัง ชุดข้อมูลประสิทธิภาพของมอเตอร์ และพารามิเตอร์ของชุดแบตเตอรี่ นอกจากนี้ ยังสามารถกำหนดค่าที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณประสิทธิภาพพลังงานและอัตราการกักคืนพลังงานจากระบบเบรกแบบสร้างพลังงานกลับได้อย่างละเอียด การกำหนดค่าดังกล่าวทำให้แบบจำลองสามารถจำลองพฤติกรรมของรถโดยสารไฟฟ้าได้อย่างแม่นยำและยืดหยุ่น เป็นต้น หน้าต่างโปรแกรมที่สร้างขึ้นดังแสดงใน Figure 2

2. กระบวนการทั้งหมดถูกพัฒนาและดำเนินการภายในโปรแกรม LabVIEW เพื่อแปลงข้อมูลจาก Driving Cycle ให้เป็นตัวแปรเชิงกลศาสตร์ที่จำเป็นสำหรับการคำนวณพลังงานของรถโดยสารไฟฟ้า โดยโครงสร้างการคำนวณแรงต้านหลักที่เกิดขึ้นระหว่างการเคลื่อนที่ของรถโดยสารไฟฟ้า ประกอบด้วยแรงต้านการกลิ้ง (Rolling Resistance), แรงต้านอากาศ (Aerodynamic Resistance), แรงต้านทางลาด (Grade Resistance) และแรงเฉื่อยจากการเร่งความเร็ว (Inertial Resistance) ทั้งหมดถูกรวมเพื่อหาแรงต้านรวม (Total Resistance Force) และใช้คำนวณกำลังที่ต้องการของระบบขับเคลื่อน (Power Demand) รวมถึงพลังงานที่ใช้ตลอดช่วงเวลา (Energy Consumption) ดังแสดงใน Figure 3 โดยที่แรงต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณแสดงใน Table 1

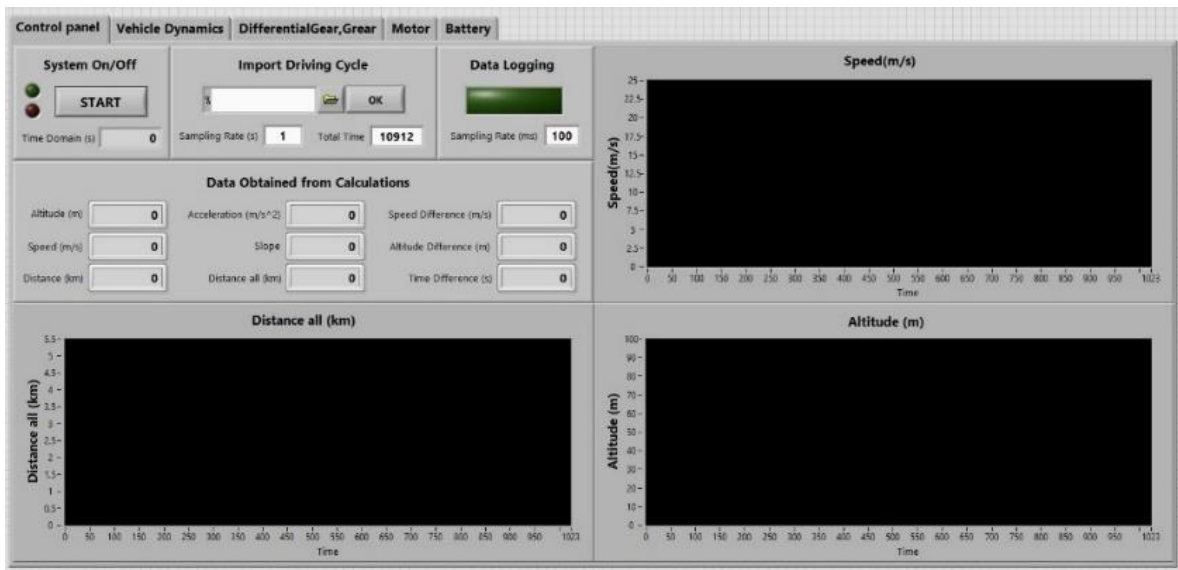


Figure 2 Driving cycle LabVIEW Home tab for driving cycle dataset selection.

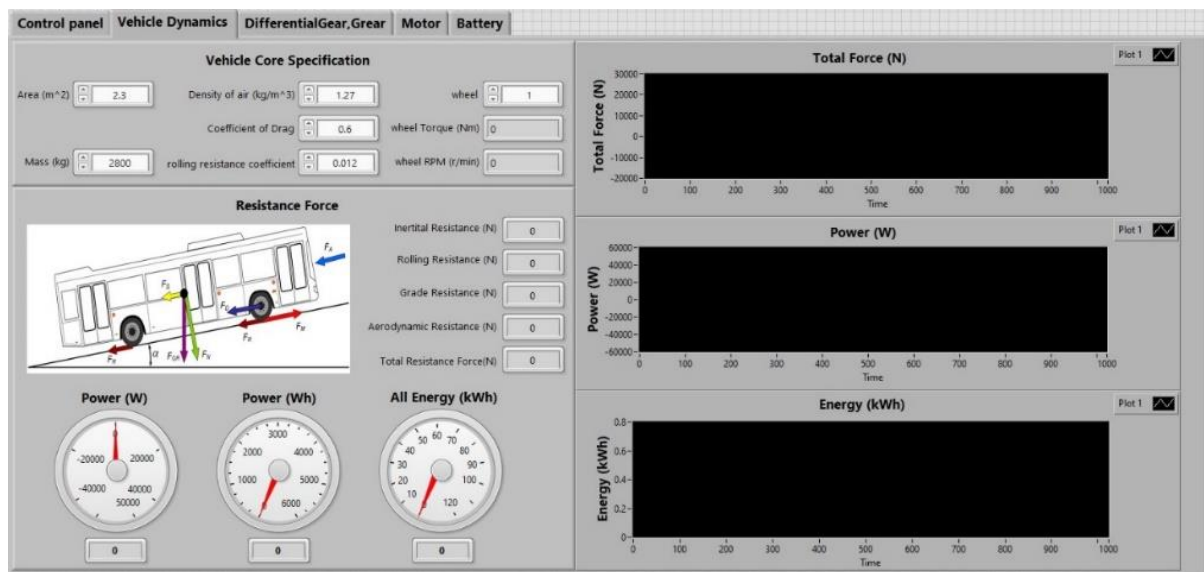


Figure 3 LabVIEW Home tab for vehicle physical parameter configuration.

3. เริ่มจากการคำนวณความเร็วของยานยนต์ (Speed) เพื่อนำไปหาความเร็วรอบของล้อ (Wheel RPM) จากนั้นจึงคำนวณความเร็วรอบของดิฟเฟอเรนเชียล (Differential Gear RPM) และความเร็วรอบของชุดเกียร์ (Gear RPM) ตามลำดับในการคำนวณดังกล่าวได้พิจารณาค่าประสิทธิภาพของระบบส่งกำลัง (Efficiency, η) ร่วมกับอัตราทดเกียร์ (Gear Ratio) และกำลังของมอเตอร์ (Motor Power) เพื่อให้สอดคล้องกับสภาวะการทำงานจริงของระบบ ผลลัพธ์ที่ได้ถูกนำมาใช้ในการประเมินแรงบิดที่ล้อและแรงบิดในชุดเกียร์ในแต่ละช่วงการทำงาน โดยรายละเอียดแสดงดัง Figure 4

Table 1 Equations used for calculating various forces.

ประเภทแรง กำลัง และพลังงาน	ความหมาย	สมการที่ใช้	ตัวแปรและความหมาย
Rolling Resistance Force (แรงต้านการกลิ้ง)	แรงต้านที่เกิดจากการสัมผัสระหว่างยางและพื้นถนน	$F_r = M \cdot g \cdot C_r \cdot \cos \alpha$	M = มวลรถ (kg) g = ความเร่งโน้มถ่วง (9.81 m/s ²) C_r = สัมประสิทธิ์แรงต้านการกลิ้ง α = มุมความชันถนน (rad หรือ deg)
Aerodynamic Resistance (แรงต้านอากาศ)	แรงต้านที่เกิดจากการเคลื่อนที่ผ่านอากาศ	$F_a = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_d \cdot V^2$	ρ = ความหนาแน่นอากาศ (kg/m ³) A = พื้นที่หน้าตัดรถ (m ²) C_d = สัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ V = ความเร็วรถ (m/s)
Grade Resistance (แรงต้านทางลาด)	แรงต้านจากน้ำหนักรถบนถนนที่มีความชัน	$F_g = M \cdot g \cdot \sin \alpha$	M = มวลรถ (kg) g = ความเร่งโน้มถ่วง (9.81 m/s ²) α = มุมความชันถนน
Inertial Resistance (แรงเฉื่อยจากการเร่ง)	แรงที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วของรถ	$F_i = M \cdot a$	M = มวลรถ (kg) a = อัตราเร่งของรถ (m/s ²)
Total Resistance Force (แรงต้านรวม)	แรงต้านทั้งหมดที่มอเตอร์ต้องเอาชนะ	$F_{Total} = F_r + F_a + F_g + F_i$	F_r = แรงต้านการกลิ้ง (N) F_a = แรงต้านอากาศ (N) F_g = แรงต้านทางลาด (N) F_i = แรงเฉื่อย (N)
Power Demand (กำลังที่ต้องการ)	กำลังที่มอเตอร์ต้องจ่ายในแต่ละช่วงเวลา	$P(t) = F_{Total}(t) \cdot V(t)$	$P(t)$ = กำลังแต่ละช่วงเวลา (W) $F_{Total}(t)$ = แรงต้านรวมแต่ละช่วงเวลา (N) $V(t)$ = ความเร็วรถแต่ละช่วงเวลา (m/s)
Energy Consumption (พลังงานที่ใช้)	พลังงานไฟฟ้ารวมที่ใช้ตลอดช่วงการขับขี่	$E = \int_{t_0}^{t_1} P(t) dt$	E = พลังงาน (Wh) $P(t)$ = กำลังแต่ละช่วงเวลา (W) t_0 และ t_1 = เวลา (s)

4. การประเมินพฤติกรรมของมอเตอร์ไฟฟ้าในยานยนต์ไฟฟ้าจำเป็นต้องใช้ข้อมูลเชิงประสิทธิภาพ เช่น ความเร็วรอบ (RPM), แรงบิด (Torque), และประสิทธิภาพ (Efficiency) ภายใต้ระดับแรงดันไฟฟ้าต่าง ๆ (480 V, 500 V และ 540 V) ของทางเข้าของ มอเตอร์อินเวอร์เตอร์ (Motor Inverter) ข้อมูลดังกล่าวถูกนำเข้าไปโปรแกรม LabVIEW เพื่อใช้สำหรับประมาณค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ในสภาวะที่เปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าแบตเตอรี่จริงดังแสดงใน Figure 5

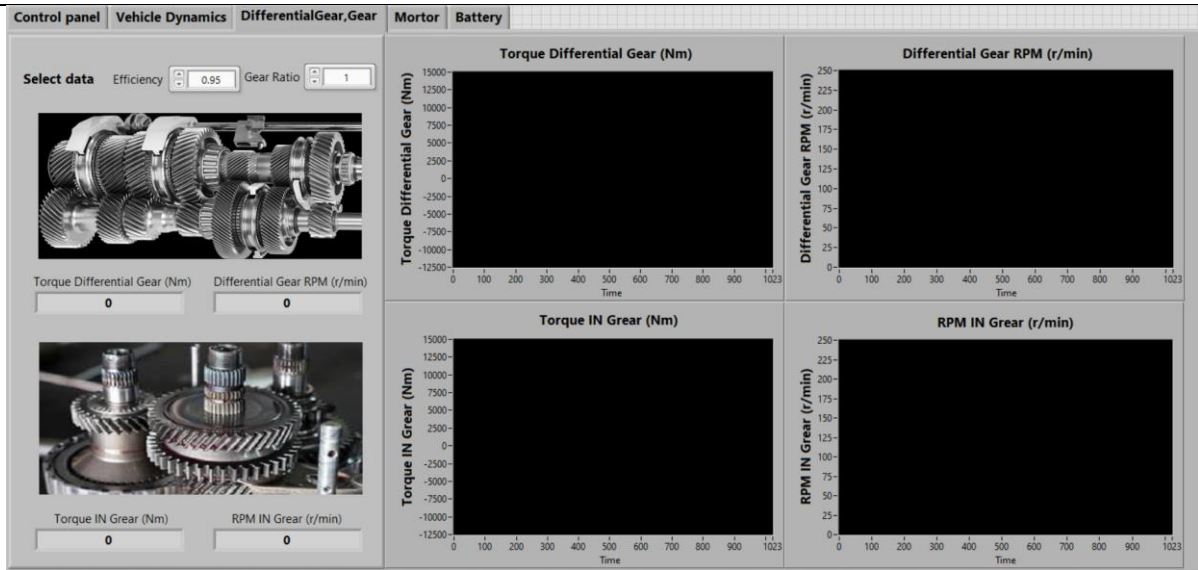


Figure 4 LabVIEW Home tab for displaying torque and rotational speed of the powertrain system.

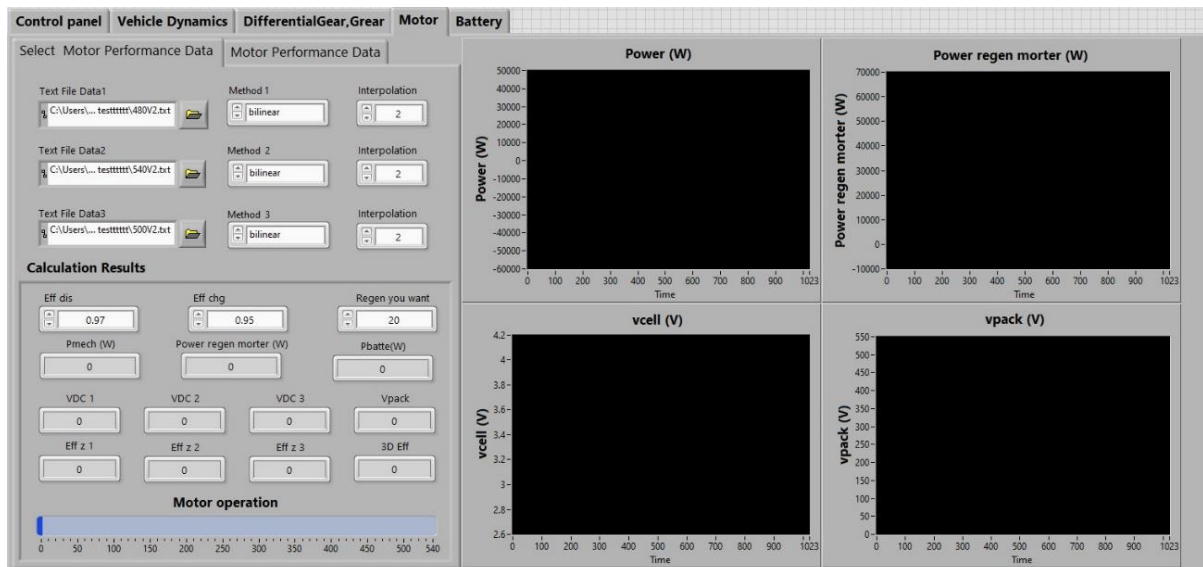


Figure 5 LabVIEW Home tab displaying motor performance data

5. การพัฒนาแบบจำลองแบตเตอรี่ในงานวิจัยนี้อาศัยข้อมูลเชิงทดลองของเซลล์แบตเตอรี่ชนิด 18650 (NCR18650BD) เพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง C-rate, State of Charge (SOC) และ แรงดันเซลล์ (Vcell) โดยข้อมูลแรงดันในแต่ละ C-rate ถูกนำมาจากโปรแกรม MATLAB R2025a ยังมีการใช้ข้อมูลจากโปรแกรม MATLAB ซึ่งอาจขัดแย้งกับบทนำที่กล่าวว่าการโปรแกรม MATLAB มีค่าสิทธิ์ที่แพงจึงมีการพัฒนาโปรแกรม LabVIEW เพื่อใช้ทดแทนสำหรับการคำนวณแบบเรียลไทม์ดังแสดงใน Figure 6

แบบจำลองแบตเตอรี่ในงานนี้รวมทั้งฟังก์ชันการคำนวณกำลังแบตเตอรี่จำนวนเซลล์อนุกรม-ขนาน, กระแสเซลล์, C-rate, SOC และแรงดันเซลล์ พิจารณาผลของ C-rate และ SOC ต่อแรงดันเซลล์ Vcell ของแบตเตอรี่ 18650 แบบ Panasonic NCR18650BD แบบจำลองถูกพัฒนาใน LabVIEW เพื่อจำลองพฤติกรรมแบตเตอรี่ระหว่างการคายประจุและการชาร์จจากระบบ Regenerative Braking ได้อย่างแม่นยำและการเลือกใช้ขนาดของ Epack แบตเตอรี่และขนาดมอเตอร์ Vpack เพื่อใช้การคำนวณแบตเตอรี่

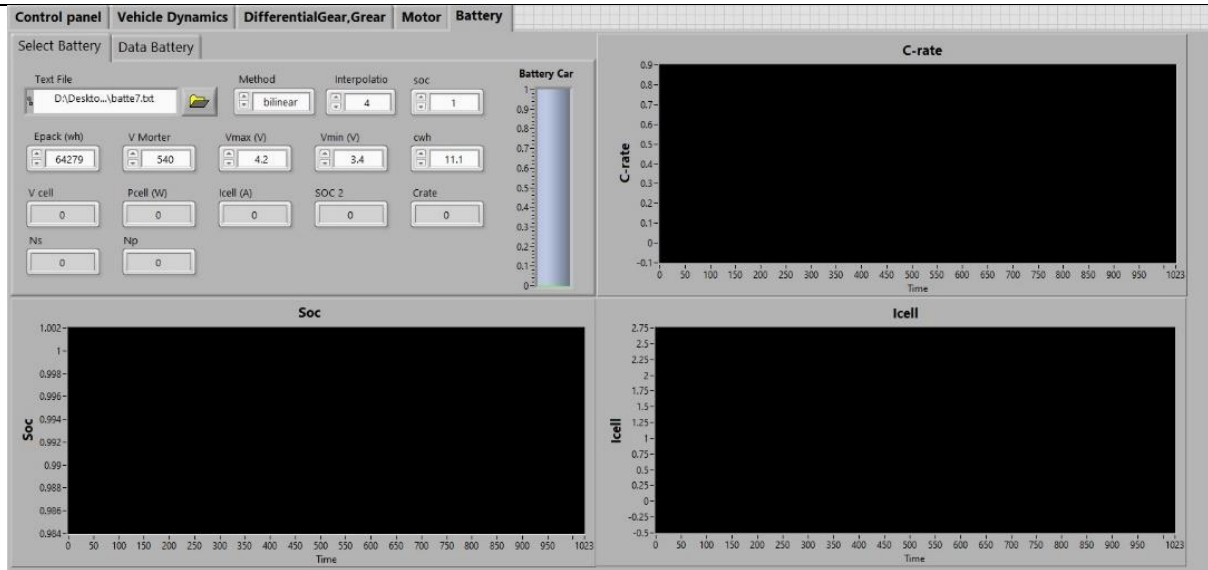


Figure 6 LabVIEW Home tab displaying battery capacity data

4. ผลการศึกษาและการอภิปรายผล

ผลการศึกษาได้มีการพัฒนาโปรแกรมด้วย MATLAB และ LabVIEW เพื่อใช้ในการคำนวณและเลือกขนาดของมอเตอร์และแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้า โดยอาศัยพารามิเตอร์สำคัญ เช่น น้ำหนักรถ ความเร็ว และรูปแบบการขับขี่ตามมาตรฐาน NEDCจากการนำโปรแกรม LabVIEW ไปประยุกต์ใช้ในการเลือกขนาดของมอเตอร์และแบตเตอรี่ พบว่า โปรแกรมสามารถคำนวณค่ากำลังของมอเตอร์และความจุของแบตเตอรี่ที่เหมาะสมได้ โดยผลลัพธ์ที่ได้มีความสอดคล้องกับค่าที่คำนวณจากสมการทางทฤษฎี และสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบระบบขับเคลื่อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ ยังได้มีการเปรียบเทียบผลลัพธ์กับเครื่องมือ PowerCal ซึ่งพบว่าแนวโน้มของค่าที่คำนวณได้มีความสอดคล้องกันเพื่อประเมินความแม่นยำของโปรแกรม ได้มีการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จาก LabVIEW กับผลการคำนวณทางทฤษฎี ผลลัพธ์จาก MATLAB และเครื่องมือ PowerCal ดังแสดงใน Figure 9 และ Figure 11 พบว่า แนวโน้มของกราฟมีความสอดคล้องกันอย่างชัดเจน โดยค่าที่ได้จาก LabVIEW มีความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยประมาณ 3–5% และมีค่าสูงสุดไม่เกิน 8% เมื่อเทียบกับค่าทางทฤษฎี ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้สำหรับงานออกแบบในระดับเบื้องต้น

นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบผลการศึกษาเกี่ยวกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าแนวโน้มของค่ากำลังและพลังงานที่ต้องการมีลักษณะใกล้เคียงกัน แม้อาจมีความแตกต่างเล็กน้อยในช่วง ซึ่งอาจเกิดจากความแตกต่างของค่าที่อ่านได้ของโปรแกรม อย่างไรก็ตามแนวโน้มโดยรวมยังคงสอดคล้องกัน ซึ่งช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลการศึกษา จุดเด่นสำคัญของการศึกษานี้ คือ การแสดงให้เห็นว่าโปรแกรม LabVIEW สามารถนำมาใช้ในการเลือกขนาดของมอเตอร์และแบตเตอรี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยให้ผลลัพธ์ที่มีความน่าเชื่อถือ และมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้เมื่อเปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎี การจำลองด้วย MATLAB และเครื่องมือ PowerCal อีกทั้งยังสามารถแสดงผลในรูปแบบกราฟและรองรับการใช้งานแบบเรียลไทม์ ซึ่งเหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในงานออกแบบและการศึกษาที่เกี่ยวข้อง

ผลการทดสอบโปรแกรมโดยใช้ชุดข้อมูลจำลองของยานยนต์ไฟฟ้าพบว่า โปรแกรมสามารถคำนวณค่ากำลังมอเตอร์ที่เหมาะสมได้สอดคล้องกับหลักการทางทฤษฎี และค่าที่ได้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับน้ำหนักรถและความเร็วที่กำหนด กล่าวคือเมื่อเพิ่มน้ำหนักหรือเพิ่มความเร็วสูงสุดที่ต้องการ ค่ากำลังและแรงบิดของมอเตอร์จะเพิ่มขึ้นตามลำดับ ซึ่งเป็นไปตามสมการแรงต้านการเคลื่อนที่และสมการกำลังทางกล นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลการจำลองกรณีการขับขึ้นทางลาดชัน พบว่า ค่ากำลังที่ต้องการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อมุมลาดชันเพิ่มขึ้น (แสดงใน Figure 7) ซึ่งจะเห็นว่าปัจจัยด้านความลาดชันมีผลกระทบโดยตรงต่อการเลือกขนาดมอเตอร์ หากเลือกมอเตอร์ที่มีกำลังต่ำเกินไป อาจไม่สามารถรองรับสภาวะการขับขี่จริงได้อย่างเพียงพอ

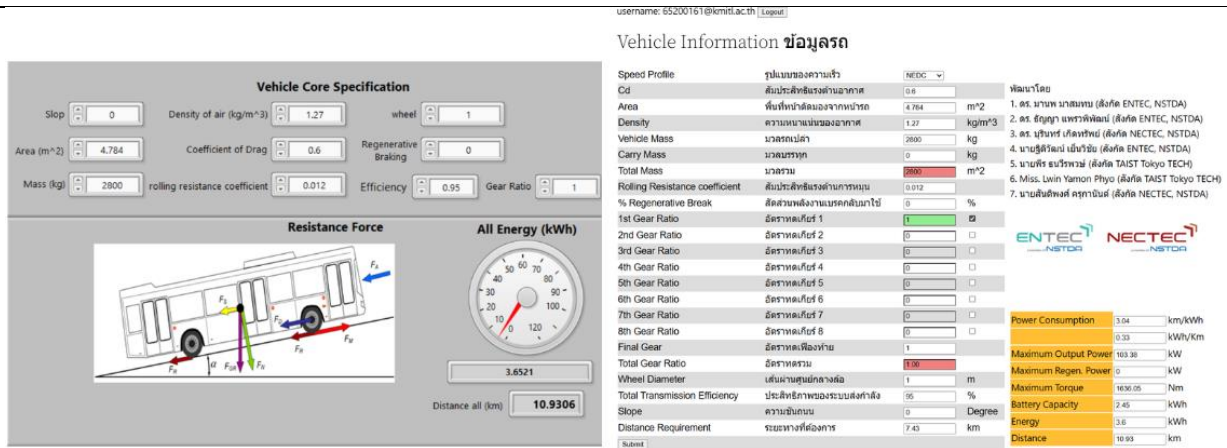


Figure 7 User Interface of the LabVIEW-based program for configuring key parameters of electric vehicles.

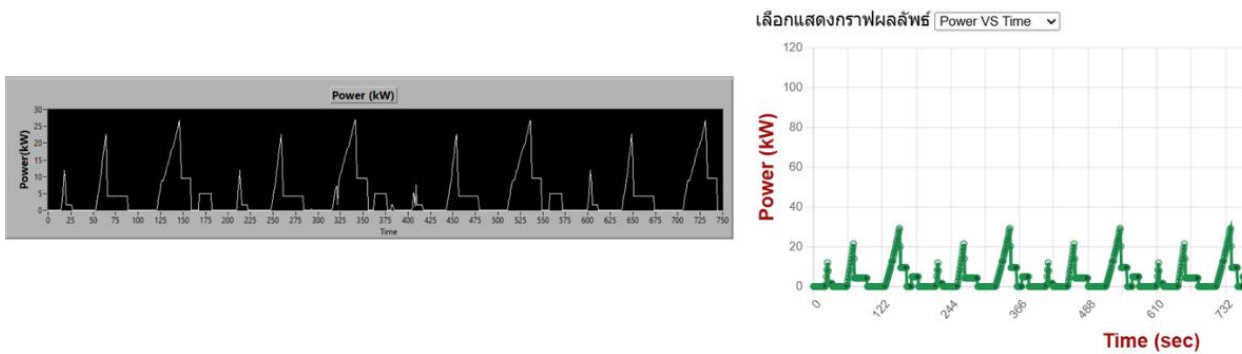


Figure 8 Motor power demand over time calculated from total resistive forces (rolling, aerodynamic, grade, and inertial) based on a Vehicle Dynamics Model in LabVIEW using the NEDC driving cycle.

มีการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าระหว่างอัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม LabVIEW กับค่ามาตรฐานอ้างอิงจาก สวทช. (Figure 8) โดยพิจารณาทั้งค่า Peak Power และพฤติกรรมในช่วงเร่ง-ชะลอความเร็วของระบบ พบว่าแนวโน้มของสัญญาณมีความสอดคล้องกันอย่างน้อยมีนัยสำคัญ

จากการวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลทั้งหมด 1,200 จุด พบว่ามีจำนวน 118 จุดที่มีความคลาดเคลื่อนแตกต่างจากศูนย์ คิดเป็นร้อยละ 9.83 ของข้อมูลทั้งหมด โดยค่าความคลาดเคลื่อนส่วนใหญ่อยู่ในช่วงไม่เกิน 8% (Figure 8) และมักเกิดขึ้นในช่วงที่ กำลังไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เมื่อพิจารณาการกระจายของค่าความคลาดเคลื่อน พบว่าสามารถจำแนกได้เป็นระดับต่าง ๆ ได้แก่ 1% จำนวน 33 จุด, 2% จำนวน 42 จุด, 3% จำนวน 4 จุด, 4% จำนวน 11 จุด, 5% จำนวน 14 จุด, 6% จำนวน 4 จุด, 7% จำนวน 2 จุด และ 8% จำนวน 1 จุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนส่วนใหญ่กระจุกตัวอยู่ในช่วง 1-2% และมีแนวโน้มลดลงเมื่อระดับเปอร์เซ็นต์เพิ่มขึ้น

เกณฑ์การพิจารณาความคลาดเคลื่อนดังกล่าวอ้างอิงตามมาตรฐานสากลด้านการวัดกำลังไฟฟ้า ได้แก่ IEEE (IEEE Std 1459-2010) และ International Electrotechnical Commission (IEC 61000-4-30) ซึ่งกำหนดทั้งนิยามการคำนวณและวิธีการวัดค่ากำลังไฟฟ้าอย่างเป็นระบบ ส่งผลให้ผลการวิเคราะห์มีความถูกต้อง น่าเชื่อถือ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าและพลังงานในระบบจริงได้อย่างเหมาะสม

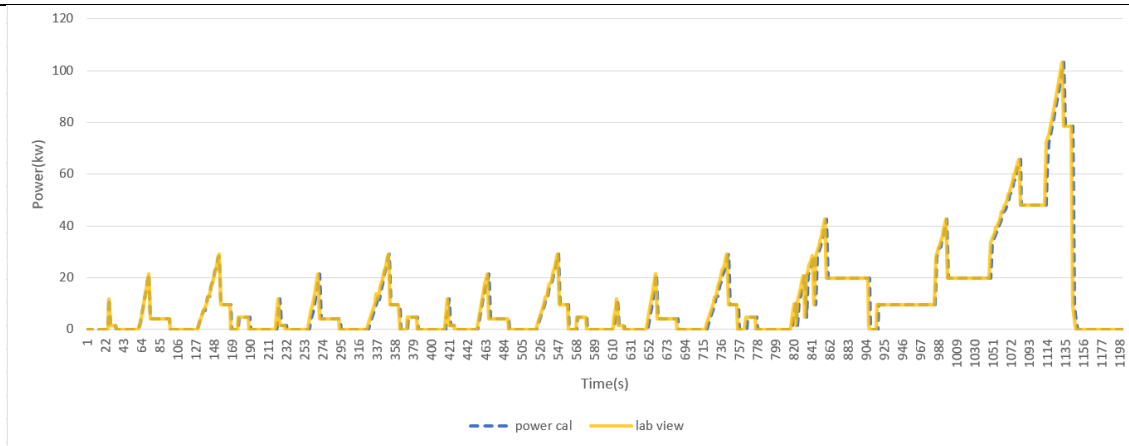


Figure 9 Comparison of calculated power between PowerCal [1] and LabVIEW under the NEDC driving cycle.

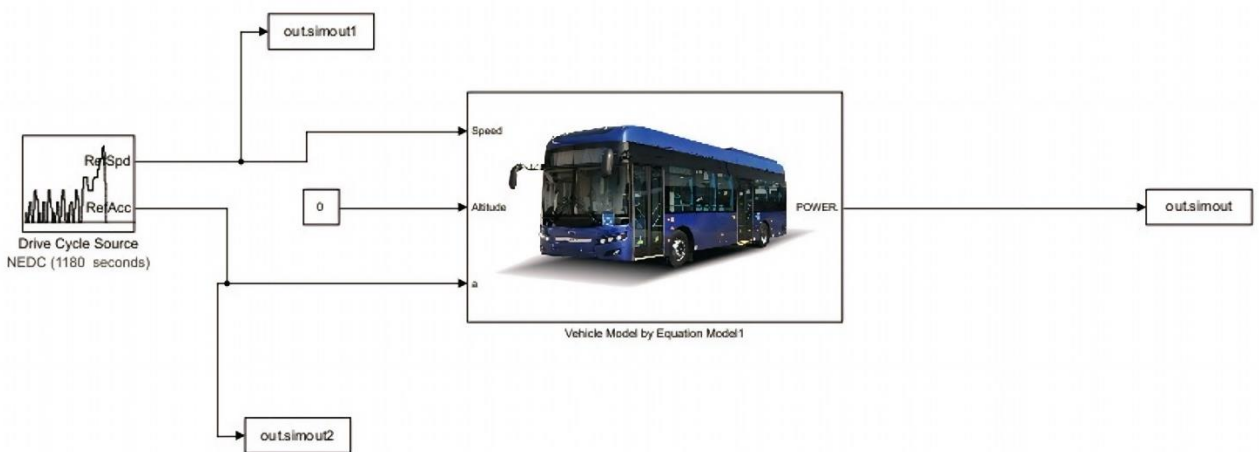


Figure 10 Extraction of calculated power data from MATLAB Simulink.

นอกจากนี้ ได้มีการเปรียบเทียบผลการคำนวณกำลังไฟฟ้าระหว่างโปรแกรม Matlab และ LabVIEW (Figure 10 และ 11) พบว่าแนวโน้มของสัญญาณมีความสอดคล้องกันทั้งในส่วนของค่า Peak Power ช่วงกำลังเป็นศูนย์ และพฤติกรรมในช่วงเร่ง-ชะลอความเร็วของระบบ โดยค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลแต่ละจุดของ Power มีค่าไม่เกิน 8% ผลการเปรียบเทียบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าผลการคำนวณจาก LabVIEW มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือเมื่อเทียบกับ Matlab และสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าและพลังงานของระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากผลการศึกษาพบว่า โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถช่วยลดความซับซ้อนของกระบวนการคำนวณกำลังไฟฟ้า จากเดิมที่ต้องดำเนินการหลายขั้นตอนด้วยวิธีเชิงตัวเลขและการคำนวณด้วยมือ เหลือเพียงการประมวลผลอัตโนมัติภายในระบบเดียว ส่งผลให้ลดโอกาสเกิดความผิดพลาดจากมนุษย์ (human error) และเพิ่มความสม่ำเสมอของผลลัพธ์ ทั้งนี้ การประเมินประสิทธิภาพของโปรแกรมดำเนินการโดยเปรียบเทียบผลการคำนวณกับค่ามาตรฐานอ้างอิงและผลจากโปรแกรม Matlab โดยใช้ตัวชี้วัดค่าความคลาดเคลื่อนเชิงเปอร์เซ็นต์ในแต่ละจุดข้อมูล อย่างไรก็ตาม โปรแกรมยังอาศัยข้อมูลป้อนเข้าที่ถูกต้องและเหมาะสม หากข้อมูลไม่สอดคล้องกับสภาพการใช้งานจริง อาจส่งผลให้การเลือกขนาดมอเตอร์คลาดเคลื่อนได้

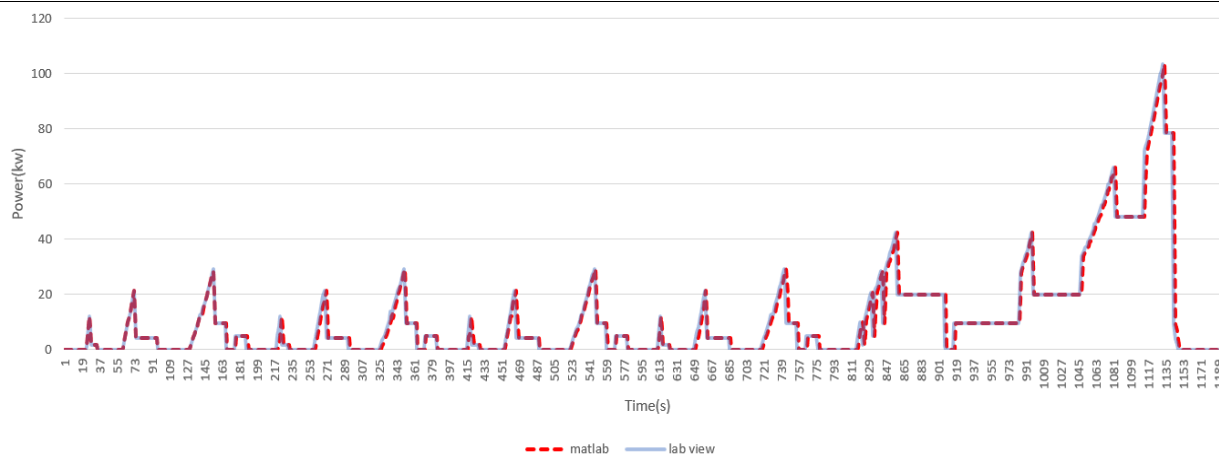


Figure 11 Comparison of power calculation results between MATLAB and LabVIEW using the NEDC driving cycle.

5. สรุปผลการศึกษา

โปรแกรมจำลองที่พัฒนาด้วย LabVIEW สามารถคำนวณค่ากำลังและพลังงานของระบบขับเคลื่อนยานยนต์ไฟฟ้าได้สอดคล้องกับค่ามาตรฐานอ้างอิง และให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับโปรแกรม Matlab โดยจากการวิเคราะห์ข้อมูลจำนวน 1,200 จุด พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนส่วนใหญ่ไม่เกิน 8% และมีเพียง 118 จุด (ร้อยละ 9.83) ที่มีค่าคลาดเคลื่อนแตกต่างจากศูนย์ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ทางวิศวกรรม ส่งผลให้สามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือเพียงพอสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าและพลังงานของระบบจริง เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานหรือผลลัพธ์จากโปรแกรมอื่น นอกจากนี้ โปรแกรมยังช่วยลดความซับซ้อนของกระบวนการคำนวณและลดความผิดพลาดจากการคำนวณด้วยมือ โดยสามารถใช้เป็นเครื่องมือสนับสนุนการตัดสินใจในการออกแบบและวิเคราะห์ระบบขับเคลื่อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม ความแม่นยำของผลลัพธ์ยังขึ้นอยู่กับความถูกต้องของข้อมูลนำเข้า และในงานวิจัยนี้ยังไม่ได้พิจารณาผลกระทบของอุณหภูมิและการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่และมอเตอร์ ซึ่งอาจมีผลต่อค่ากำลังและประสิทธิภาพของระบบในสภาวะการใช้งานจริง

ดังนั้น ในการพัฒนาต่อยอด ควรมีการปรับปรุงแบบจำลองให้ครอบคลุมปัจจัยด้านอุณหภูมิและการเสื่อมสภาพของอุปกรณ์ รวมถึงการเชื่อมต่อข้อมูลแบบ Real-time จาก GPS และเซนเซอร์ภายนอก ตลอดจนการพัฒนาแบบจำลองความร้อนของมอเตอร์และอินเวอร์เตอร์ เพื่อเพิ่มความแม่นยำและความสมจริงของผลการจำลองให้สอดคล้องกับสภาวะการใช้งานจริงมากยิ่งขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ศูนย์เทคโนโลยีพลังงานแห่งชาติ (ENTEC) และศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่สนับสนุนการศึกษานี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.). n.d. PowerCal. เข้าถึงได้จาก: <https://powercal.nstda.or.th/> (เข้าถึงเมื่อ: 8 พฤศจิกายน 2568).
- [2] International Energy Agency (IEA). 2024. Global EV Outlook 2024: Scaling up Electric Vehicle Adoption Worldwide. Paris: IEA, pp. 12–15.
- [3] Ehsani, M., Gao, Y., Longo, S. and Ebrahimi, K. 2018. Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles. CRC Press, pp. 102–105.
- [4] Miri, I., Fotouhi, A. and Ewin, N. 2021. Electric vehicle energy consumption modelling and estimation—A case study. International Journal of Energy Research, 45(1), pp. 501–520.
- [5] National Instruments. 2023. *LabVIEW User Manual*. Austin, TX: National Instruments Corporation, pp. 30–35.

-
- [6] United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific (UNESCAP). 2024. EV in ASEAN and Thailand.
- [7] The Investor. 2025. Thailand rolls out measures to promote EV development. เข้าถึงได้จาก:
<https://theinvestor.vn/thailand-rolls-out-measures-to-promote-ev-development-d16631.html> (เข้าถึงเมื่อ: 8 พฤศจิกายน 2568).
- [8] UNESCAP. 2025. From streets to rivers: Driving Bangkok's sustainable transport future. เข้าถึงได้จาก:
<https://www.unescap.org/blog/streets-rivers-driving-bangkoks-sustainable-transport-future> (เข้าถึงเมื่อ: 8 พฤศจิกายน 2568).
- [9] Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT). n.d. EGAT receives model electric bus developed by Thais to support green public transport. เข้าถึงได้จาก:
<https://www.unescap.org/sites/default/d8files/event-documents/ESCAP-2022-RP-Transitioning-to-Electric-Public-Buses-Thailand%20%281%29.pdf> (เข้าถึงเมื่อ: 8 พฤศจิกายน 2568).

การศึกษาระยะการป้อนของกระบวนการปรับรูปทรงโลหะเพื่อลดของเสียจากวัตถุดิบและต้นทุนการผลิต Analysis on the Feed Distance of Metal Forming Process for Reducing Raw Material Waste and Production Costs

ณรงค์ฤทธิ์ จันทะเกษ¹ อรชุน บุญโต² ปัญญา แดงวิลัยลักษณ์¹ และ วิสิทธิ์ เอกวานิช^{1,*}
Narongrit Jantaket¹, Orachoon Boonto², Panya Dangwilailux¹ and Visit Eakvanich^{1,*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร 86160 ประเทศไทย

²บริษัท ซัมมิต โอโต บอดี อินดัสตรี จำกัด จังหวัดสมุทรปราการ 10540 ประเทศไทย

¹Department of Mechanical Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Prince of Chumphon Campus, Chumphon Province, 86160, Thailand

²Summit Auto Body Industry Co.,Ltd., Samut Prakan Province, 10540, Thailand

*Corresponding author: Visit Eakvanich, e-mail address: visit.ea@kmit.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาศึกษาและปรับแก้ระยะการป้อนชิ้นงาน (Feed distance) ในกระบวนการปรับรูปทรงโลหะเพื่อช่วยลดปริมาณการสูญเสียวัตถุดิบและต้นทุนการผลิตโดยไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของชิ้นงาน ประกอบด้วย การทบทวนข้อมูลการผลิตปัจจุบันและการประสานงานกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ แผนกผลิต แผนกควบคุมคุณภาพ และแผนกออกแบบชุดพิมพ์ เพื่อหาแนวทางการปรับแก้ระยะการป้อนชิ้นงาน การจำลองผ่านโปรแกรม SolidWorks (2024) เพื่อดูคุณภาพชิ้นงาน และการทดลองในสภาวะการผลิตจริงโดยปรับค่าระยะการป้อน ที่ระดับ 240, 239 และ 238 มิลลิเมตร ตามลำดับ พร้อมเก็บข้อมูลชิ้นงานตัดรอบตัว (Blank) และเศษวัสดุจากแต่ละรอบการทดลองเพื่อนำมาชั่งน้ำหนักโดยใช้อุปกรณ์ชั่งดิจิทัล ความละเอียดสูง ชิ้นงานทั้งหมดจะถูกนำไปป้อนให้จบกระบวนการ และส่งให้หน่วยงานควบคุมคุณภาพตรวจเช็คความถูกต้องตามคุณภาพที่กำหนด ผลการทดลองพบว่า ระยะการป้อนชิ้นงานที่ระยะ 240 มิลลิเมตร ช่วยให้มีปริมาณเศษวัสดุลดลงร้อยละ 0.72 และช่วยลดต้นทุนการผลิตได้ร้อยละ 1.81 เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการเดิม โดยยังคงรักษาคุณภาพชิ้นงานให้อยู่ในมาตรฐานที่กำหนด สรุปได้ว่าการปรับแก้ระยะการป้อนชิ้นงานเป็นแนวทางที่มีศักยภาพในการเพิ่มการใช้ประโยชน์ของวัสดุและลดต้นทุนการผลิต อีกทั้งยังสามารถนำผลลัพธ์ไปประยุกต์ใช้กับสายการผลิตอื่นที่มีลักษณะใกล้เคียงกันเพื่อส่งเสริมศักยภาพการทำงานขององค์กรในระยะยาว

คำสำคัญ: ระยะการป้อนชิ้นงาน, กระบวนการปรับรูปทรง, การสูญเสียวัสดุ, ต้นทุนการผลิต

Abstract

This research aims to analyze and optimize the feed distance in the metal forming process to reduce raw material waste and lower production costs without compromising the quality of the final workpiece. This study investigated a review of the existing production data and close coordination with key departments—Production, Quality Control, and Die Design—to identify feasible improvement methods related to feed distance adjustment. The SolidWorks (2024) software was used to evaluate the quality of the workpiece at each feed interval. Experimental trials were conducted under actual production conditions by modifying the feed distance to 240, 239, and 238 millimeters, respectively. For each trial level, both the blank workpiece and scrap material were collected and measured using a high-precision digital weighing instrument. All blank pieces were subsequently processed through the remaining die operations and submitted to the Quality Control department for evaluation of dimensional accuracy and conformance to product specifications. The experimental results reveal that a feed length of 240 millimeters contributes to a 0.72 % reduction in material scrap and a 1.81 % reduction in production costs, while maintaining product quality within customer acceptance criteria. The findings demonstrate that feed distance optimization is an effective approach for improving material utilization and enhancing manufacturing efficiency. Moreover, it can also be applied to similar production lines to support long-term cost reduction and operational improvement.

Keywords: Feed distance, Metal forming process, Raw material waste, Production costs

1. บทนำ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนโลหะด้วยกระบวนการปั๊มปรับรูปทรงได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถผลิตชิ้นงานได้ในปริมาณมาก มีความแม่นยำสูง และใช้ระยะเวลาในการผลิตที่สั้น อย่างไรก็ตาม การควบคุมการใช้วัตถุดิบให้เกิดศักยภาพสูงสุดยังคงเป็นประเด็นที่ท้าทายสำหรับทุกองค์กร โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภาวะเศรษฐกิจที่ต้นทุนวัตถุดิบมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง หากมีการใช้วัตถุดิบที่ไม่เหมาะสม หรือเกิดการสูญเสียในรูปแบบของเศษวัสดุ (Scrap) มากเกินไป จะส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น และอาจทำให้ความสามารถในการแข่งขันขององค์กรลดลง หนึ่งในปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อปริมาณเศษวัสดุของวัตถุดิบคือ การตั้งค่าระยะป้อนวัสดุในกระบวนการปั๊ม เนื่องจากระยะการป้อนชิ้นงานที่ไม่เหมาะสมจะก่อให้เกิดพื้นที่เหลือทิ้งมากเกินไป ส่งผลให้สัดส่วนวัตถุดิบที่ใช้ไปกับการผลิตสูงขึ้น ในขณะที่เดียวกันยังส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงาน หากการปรับระยะการป้อนชิ้นงานไม่ได้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม ซึ่งอาจทำให้เกิดปัญหาคุณภาพ (Quality issue) ตามมา เช่น ชิ้นงานไม่เป็นไปตามสเปก เกิดความเสียหาย หรือไม่สามารถนำไปประกอบในกระบวนการถัดไปได้

การปรับรูปทรงโลหะแผ่นด้วยเครื่องปั๊มเป็นกระบวนการผลิตที่ใช้ในการดัดแปลงรูปทรงของวัตถุดิบให้เป็นชิ้นส่วนผลงานหรือชิ้นงานตามรูปแบบที่กำหนด โดยอาศัยชุดพิมพ์หรืออุปกรณ์สนับสนุนกระบวนการผลิตสำหรับการปรับรูปทรง (Die หรือ Forming Tool) ภายใต้สภาวะที่วัสดุยังคงอยู่ในสถานะของแข็ง การปั๊มปรับรูปทรงโลหะสามารถจัดแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มหลักได้แก่ (1) กระบวนการตัดเฉือน (Shearing) โดยจะครอบคลุมการตัดแยกชิ้นงาน (Blanking) ดังแสดงใน Figure 1 (a) ซึ่งเป็นกระบวนการเริ่มต้นที่สำคัญในงานผลิต โดยใช้ชุดชุดพิมพ์ตัดแผ่นโลหะให้ได้รูปทรงตามแบบที่กำหนด ชิ้นส่วนที่ได้จากการตัดจะถูกนำไปผ่านกระบวนการถัดไปเพื่อต่อ ยอดเป็นผลงานตามวัตถุประสงค์ และการเจาะช่องหรือรู (Piercing) ดังแสดงใน Figure 1 (b) เป็นกระบวนการเฉือนแผ่นโลหะเพื่อสร้างช่องเปิดตามบริเวณที่กำหนด โดยใช้ 펀ช์และดายในการทำให้วัสดุขาดออกจากกัน ลำดับนี้มักทำต่อจากการตัดชิ้นงาน แต่สามารถออกแบบให้ทำพร้อมกันได้ในจังหวะเดียว (2) กระบวนการดัดโค้ง (Bending) เป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปแผ่นโลหะด้วยแรงกด ทำให้ชิ้นงานเกิดมุมหรือส่วนโค้งตามต้องการ โดยทั่วไปความหนาของแผ่นโลหะจะไม่แปรเปลี่ยนแต่จะเกิดการยืดตัวด้านนอกและการอัดตัวด้านในของแนวดัดหรือปรับเปลี่ยนรูปร่างชิ้นงาน และการปรับรูปชิ้นงาน (Forming) เมื่อแผ่นโลหะชุดพิมพ์กดทับ โลหะจะไม่สามารถกลับสภาพเป็นรูปเดิมได้อีก และเกิดการแปรสภาพอย่างถาวร ทำให้แผ่นโลหะเปลี่ยนลักษณะไปตามแบบของชุดพิมพ์ (Die) ที่ออกแบบไว้ กระบวนการนี้จึงทำให้สร้างผลงานได้หลายลักษณะ เช่น การโค้งงอ พับขอบ ดึงลึก หรือปรับรูปทรงทรงสามมิติ และ (3) กระบวนการดึงปรับรูปทรง (Drawing) เป็นลำดับการปรับรูปทรงโลหะแผ่นที่ใช้แรงดันจากชุดพิมพ์ และ หมัดปั๊ม (Punch) เพื่อดึงแผ่นโลหะให้ยึดตัวลงไปในโพรงชุดพิมพ์ จนเกิดเป็นงานที่มีความลึก และ รูปลักษณะสามมิติ เช่น ถ้วย ครอบ ฝาครอบ หรือชิ้นส่วนยานยนต์ต่างๆ [1-3]

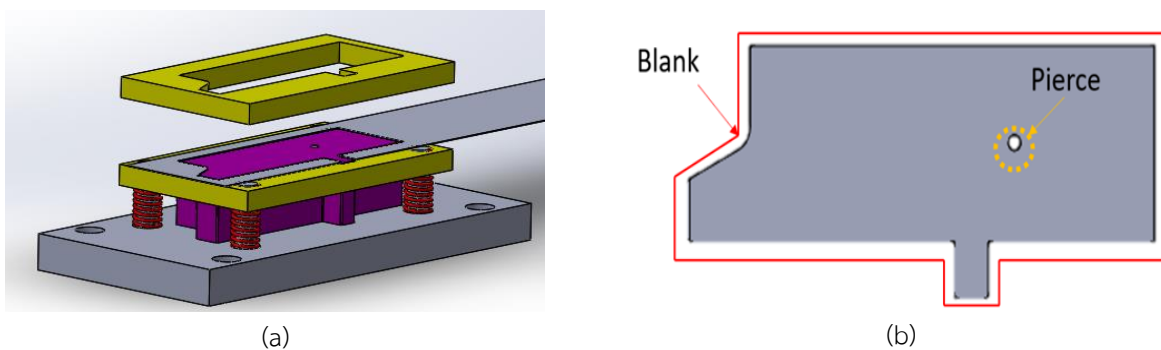


Figure 1 Shearing processes. (a) Blanking process. (b) Piercing process.

ระยะการป้อนชิ้นงาน หรือ อัตราป้อน (Feed) หมายถึงระยะทางที่วัสดุแผ่นโลหะ (Sheet metal หรือ strip) ถูกป้อนเข้าสู่จุดอ้างอิงของการทำงานของชุดพิมพ์ในแต่ละรอบการปั๊ม (ต่อช่วงเวลาการทำงานของชุดอุปกรณ์) อัตราป้อนจึงเป็นตัวกำหนดว่าในรอบของการปั๊มงาน ชุดอุปกรณ์จะนำโลหะแผ่นเข้ามายังบริเวณชุดพิมพ์มากน้อยเพียงใด เพื่อให้การปรับรูปทรง การเจาะ หรือการตัดชิ้นงานเกิดในจุดที่ถูกต้อง การตั้งค่าอัตราป้อนที่เหมาะสมจะส่งผลให้การป้อนวัสดุมีความต่อเนื่อง ราบรื่น และแม่นยำ [4-7] โดยทั่วไปอัตราป้อนจะใช้หน่วยเป็นมิลลิเมตรต่อจังหวะ (mm./stroke) โดยที่ จังหวะ (Stroke) คือ รอบการเคลื่อนที่ลงและขึ้นหนึ่งรอบของเครื่องปั๊ม และจะเกิดการป้อนวัสดุใหม่เข้าสู่ชุดพิมพ์ในแต่ละรอบนั้น ตัวอย่างเช่น Feed = 240 mm/stroke หมายถึงเครื่องปั๊มจะป้อนแผ่นโลหะไปข้างหน้า 240 มิลลิเมตรทุกครั้งที่เกิดลงหนึ่งรอบ ดังแสดงใน Figure 2

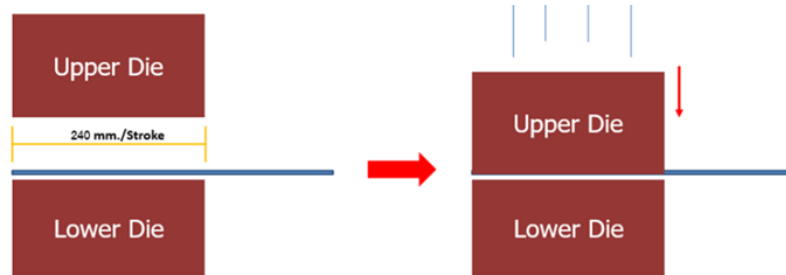


Figure 2 The sequence of operations for metal forming process in 1 stroke.

งานวิจัยนี้จึงมีความสำคัญ เนื่องจากมุ่งเน้นการปรับแก้กระบวนการผลิต โดยเฉพาะการกำหนดระยะเวลาการป้อนชิ้นงานให้เหมาะสมที่สุด เพื่อให้เกิดการใช้วัตถุดิบอย่างมีประสิทธิภาพ ลดการสูญเสียที่ไม่จำเป็นในรูปแบบของเศษวัสดุ ซึ่งจะช่วยให้องค์กรสามารถลดต้นทุนการผลิตต่อหน่วยและเพิ่มความสามารถในการแข่งขัน

2. วิธีการศึกษา

2.1 ศึกษาปัญหาและสภาพปัจจุบัน

การเก็บรวบรวมข้อมูลจากงานผลิตพบว่า ในไลน์การผลิตเกิดงานเสียในกระบวนการผลิตสูงที่สุด ดังแสดงใน Figure 3 (a) เนื่องจากสาเหตุหลักคือระยะป้อนชิ้นงานหรืออัตราป้อนที่ไม่เหมาะสม โดยที่หากกำหนดขนาดรอบตัวชิ้นงานมากเกินไปจะก่อให้เกิดเศษวัสดุมากขึ้นและกรณีกำหนดขนาดรอบตัวชิ้นงานน้อยเกินไปก็ส่งผลทำให้ชิ้นงานเสียรูปได้ ดังแสดงใน Figure 3 (b)



(a)



(b)

Figure 3 Metal forming process. (a) Blanking process. (b) Raw material waste.

2.2 สำรวจแนวทางปรับแก้การผลิต

แนวทางปรับแก้การผลิตได้แก่ การปรับระบบป้อนชิ้นงาน (Feeding system) ที่อุปกรณ์ Mini Roll Feeder การลดขนาดชิ้นงานตัดรอบตัว (Blank size) เป็นการออกแบบแผ่นเหล็กเริ่มต้นให้มีขนาดที่เหมาะสมกับชิ้นงานมากที่สุด โดยคำนึงถึงระยะขอบที่ทำให้ชิ้นงานไม่เสียหาย และการปรับลดค่าระยะป้อนชิ้นงานซึ่งเป็นการปรับระยะการป้อนแผ่นเหล็กให้สั้นลง ดังแสดงใน Figure 4 (a) สำหรับ 243 มิลลิเมตร และ Figure 4 (b) สำหรับ 240 มิลลิเมตร โดยยังคงรักษาคุณภาพของชิ้นงานและการทำงานของชุดพิมพ์ให้คงเดิม และทำการออกแบบเบื้องต้นผ่านการจำลองด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ SolidWorks (2024) ก่อนการทดลองจริง [8-10] จากข้อมูลชิ้นงานปัจจุบันมีระยะการป้อนชิ้นงานอยู่ที่ 243 มิลลิเมตร โดยจะทำการทดลองที่ค่า 240, 239 และ 238 มิลลิเมตร ตามลำดับ

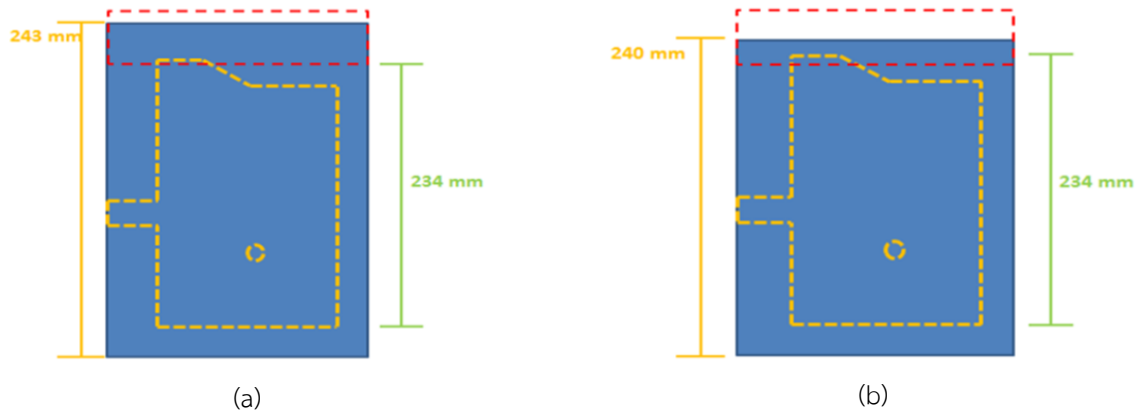


Figure 4 Feed distance. (a) 243 millimeter. (b) 240 millimeter.

2.3 ดำเนินแผนการปรับแก้

(1) ประชุมภายในเพื่อเสนอแนวทางควบคุม จัดประชุมร่วมระหว่างหน่วยงานผลิต (Production), วิศวกรรม (Engineering) และควบคุมคุณภาพ (QA) พิจารณาปัญหาที่เกิดขึ้นจากเศษวัสดุจำนวนมาก เสนอแนวคิดเบื้องต้นในการปรับค่าระยะการป้อน เพื่อเพิ่มศักยภาพการใช้วัสดุ และกำหนดชิ้นงานที่ใช้เก็บข้อมูล

(2) ติดต่อหน่วยงานที่เกี่ยวข้องเพื่อจัดเก็บข้อมูล ได้แก่ หน่วยงานออกแบบชุดพิมพ์ เป็นหน่วยที่มีความชำนาญด้านข้อมูลการทำงานของชุดพิมพ์ จึงเป็นฝ่ายหลักในการเสริมข้อมูลเชิงเทคนิคเกี่ยวกับการลดขนาดชิ้นงานตัดรอบตัว และการปรับระยะการป้อนให้เหมาะสม หน่วยงานควบคุมคุณภาพ มีหน้าที่สำคัญในการตรวจสอบและควบคุมคุณภาพของชิ้นงาน เพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด และฝ่ายวางแผนและควบคุมการผลิต เป็นหน่วยงานที่มีหน้าที่ในการจัดตารางการผลิตและควบคุมลำดับการชิ้นงาน เพื่อไม่ให้กระทบต่อแผนการผลิตหลัก

(3) ทำงานทดสอบในหน่วยงานผลิต (Production trial) นำค่าระยะป้อนที่ปรับใหม่ไปตั้งค่ากับเครื่องปั๊มจริง ทดสอบปั๊มชิ้นงานในสภาวะการทำงานปกติ และสังเกตพฤติกรรมการป้อนแผ่นโลหะและการเกิดของเสีย ดังแสดงใน Figure 5 (a)

(4) เก็บข้อมูลผลการทดลองและตรวจสอบคุณภาพชิ้นงาน ได้แก่ ชั่งน้ำหนักเศษวัสดุ (Scrap weight) และชิ้นงานจริง (Product weight) เพื่อคำนวณอัตราการใช้ นำชิ้นงานที่ผลิตได้ส่งให้หน่วยงานตรวจเช็คคุณภาพ เพื่อตรวจสอบ ขนาด รูปทรง ความคมของขอบชิ้นงาน และบันทึกข้อมูลผลการทดสอบก่อนและหลังปรับระยะการป้อนชิ้นงาน ดังแสดงใน Figure 5 (b)

(5) คำนวณผลการประหยัดต้นทุน



(a)



(b)

Figure 5 Materials and methods. (a) Production trial. (b) Quality assurance (QA).

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

ผลการวิจัยครั้งนี้เป็นการลดระยะป้อนชิ้นงาน เพื่อให้เกิดการใช้งานวัสดุอย่างคุ้มค่าและลดต้นทุนการผลิตลงให้มากที่สุด โดยผลการศึกษาแบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ผลจากการทดสอบด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ และผลจากการทดสอบจริงจากการทดลองที่กระบวนการผลิต

3.1 ผลการจำลองเพื่อตรวจสอบคุณภาพชิ้นงานด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์

จากผลการจำลองการป้อนชิ้นงานด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ SolidWorks (2024) การเปรียบเทียบระยะการป้อนชิ้นงาน ที่ค่า 240, 239 และ 238 มิลลิเมตร พบว่าผลการกระจายค่าความเครียดสมมูล (Equivalent Strain: ESTRN) ของทั้งสองกรณีมีแนวโน้มใกล้เคียงกันอย่างมาก โดยบริเวณพื้นที่หลักของชิ้นงานแสดงผลเป็นสีน้ำเงินถึงสีฟ้า ซึ่งเป็นบริเวณที่มีค่าความเครียดต่ำ ชิ้นงานไม่มีการเปลี่ยนรูปหรือเสียรูปถาวร และยังคงอยู่ในช่วงการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic deformation) ในขณะที่บริเวณที่ปรากฏเป็นสีส้มถึงสีแดง จะพบเฉพาะในส่วนของขอบตัดและบริเวณเศษวัสดุ ซึ่งเป็นพื้นที่ที่ได้รับแรงป้อนโดยตรงและมีการเปลี่ยนรูปตามลักษณะของลำดับการตัดโลหะ บริเวณที่เกิดไม่ใช้ส่วนของงานที่นำไปใช้งานจริง จึงไม่ส่งผลต่อคุณลักษณะหรือความเที่ยงตรงของชิ้นงาน ดังแสดงใน Figure 6 และ Figure 7 สำหรับระยะการป้อนชิ้นงาน 240 และ 238 มิลลิเมตร ตามลำดับ

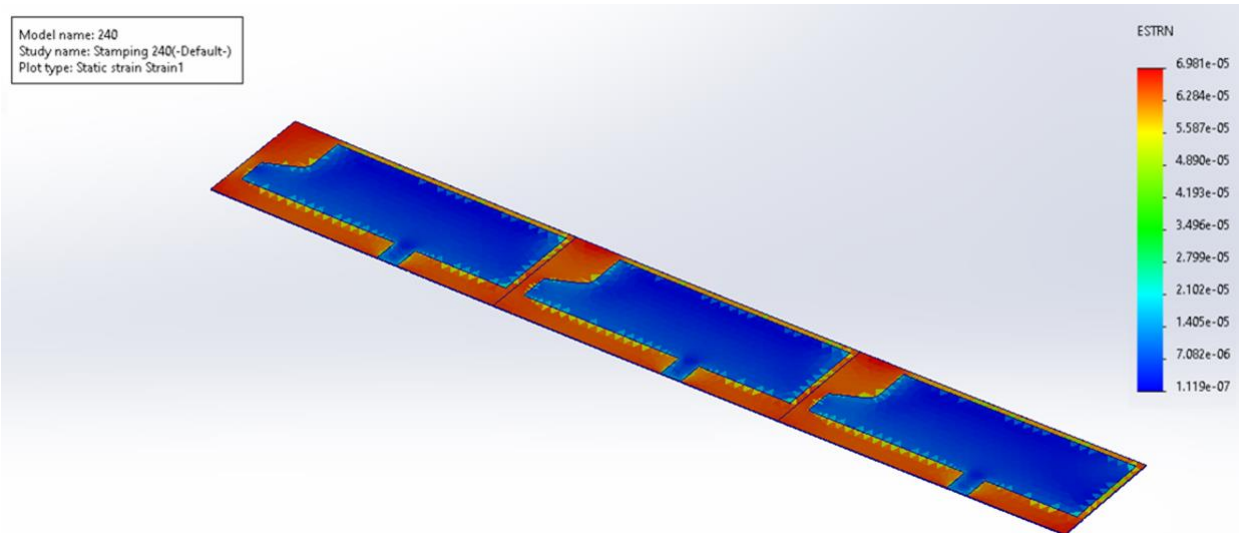


Figure 6 Equivalent Strain: ESTRN at the feed distance of 240 millimeter.

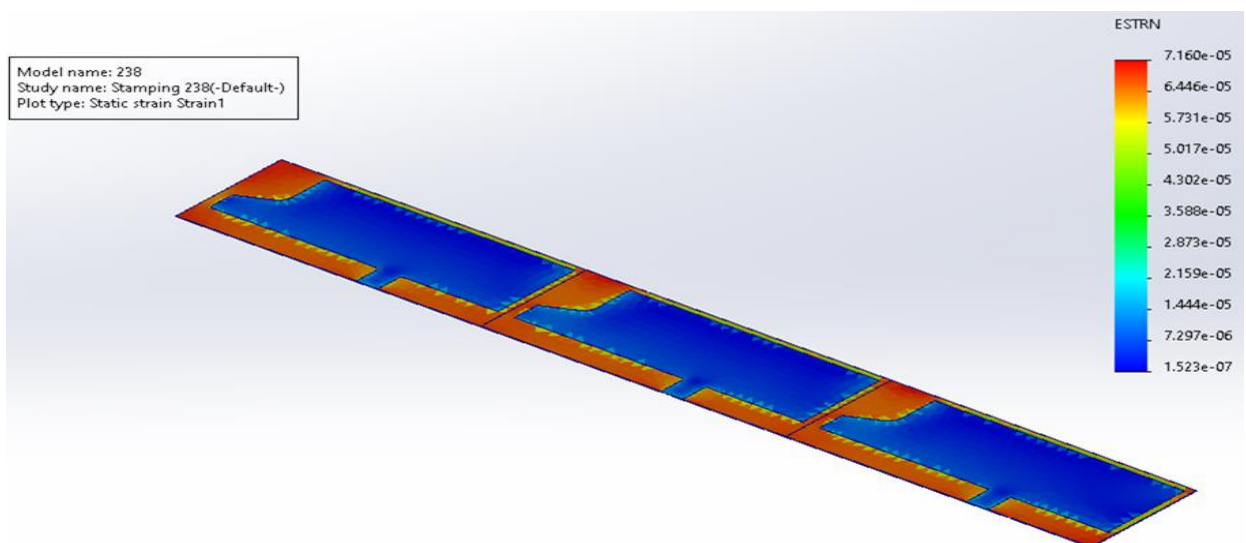


Figure 7 Equivalent Strain: ESTRN at the feed distance of 238 millimeter.

ผลการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การลดระยะการป้อนชิ้นงานจาก 240 มิลลิเมตร เหลือ 238 มิลลิเมตร ไม่ก่อให้เกิดความเสียหายหรือการเสีรूपกับชิ้นงาน และสามารถลดการสูญเสียวัสดุได้โดยยังคงรักษาคุณภาพของชิ้นงานให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ อย่างไรก็ตาม การจำลองด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์เป็นการศึกษาภายใต้เงื่อนไขเชิงอุดมคติ (Ideal conditions) ซึ่งยังไม่ได้นำปัจจัยที่เกิดขึ้นจริงในกระบวนการผลิตเข้ามาพิจารณา เช่น ความคลาดเคลื่อนของชุดอุปกรณ์ การสั่นสะเทือน การสึกหรอของชุดพิมพ์ ความไม่สม่ำเสมอของวัสดุ หรือทักษะของผู้ทำงาน ดังนั้น ผลการจำลองจึงใช้เป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจเบื้องต้นเท่านั้น และจำเป็นต้องนำไปยืนยันผลด้วยการทดลองในสภาวะการผลิตจริงร่วมกับการตรวจเช็คโดยหน่วยควบคุมคุณภาพ เพื่อให้ได้ข้อสรุปที่ถูกต้องและเพิ่มความน่าเชื่อถือ

3.2 ผลจากการทดสอบจริงจากการทดลองที่กระบวนการผลิต

จากการทดลองปรับค่าระยะการป้อนแผ่นวัสดุในสภาวะการผลิตจริงในหน่วยงานผลิตและรวมถึงการเก็บข้อมูลด้านปริมาณเศษวัสดุและต้นทุนที่เกี่ยวข้อง ทั้งในสภาวะก่อนปรับและหลังปรับโดยมีการป้อนชิ้นงานค่า 240, 239 และ 238 มิลลิเมตร ตามลำดับพบว่า ระยะการป้อนแผ่นวัสดุมีผลโดยตรงต่ออัตราการสูญเสียวัสดุในกระบวนการผลิต ดังแสดงใน Figure 8 (a) และสามารถนำผลที่ได้จากการทดลองที่ระยะการป้อนแผ่นวัสดุ 240 มิลลิเมตร ไปทำนายจำนวนเศษวัสดุก่อนและหลังปรับแก้ของชิ้นงานในปี พ.ศ.2568 ดังแสดงใน Figure 8 (b) และผลการเปรียบเทียบก่อนและหลังการปรับแก้ระยะการป้อนแผ่นวัสดุจาก 243 มิลลิเมตร เป็น 240 มิลลิเมตร ดังแสดงใน Table 1

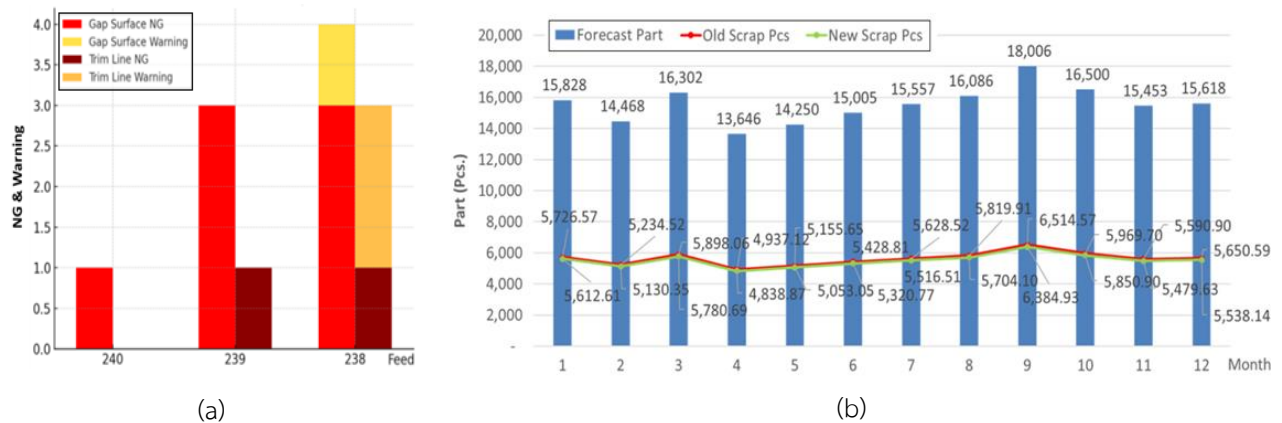


Figure 8 Experimental data. (a) NG & Warning. (b) Raw material waste at the feed distance of 240 millimeter.

Table 1 Comparison results before and after modification.

Description (unit)	Before	After	Results
Feed distance (mm.)	243	240	3 ↓
Scrap weight per piece (kg)	0.0635	0.0615	0.02 ↓
Cost per piece (bath)	13.24	13.00	0.24 ↓
Total cost (bath)	206,014	202,278	3,736 ↓
Scrap reduction (%)		0.72	↓
Cost reduction (%)		1.81	↓

ผลการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ปริมาณเศษวัสดุลดลงจากเดิมร้อยละ 0.72 เมื่อใช้ค่าระยะการป้อนแผ่นวัสดุ 240 มิลลิเมตร ปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นต่อการผลิตหนึ่งรอบลดลง แสดงให้เห็นว่าการกำหนดระยะป้อนใหม่สามารถลดการสูญเสียวัสดุได้อย่างมีศักยภาพ และช่วยเพิ่มอัตราการใช้ประโยชน์ของแผ่นวัสดุให้คุ้มค่ามากขึ้น ต้นทุนการสูญเสียวัสดุลดลงจากเดิมร้อยละ 1.81 จากการคำนวณต้นทุนตามราคาวัตถุดิบ พบว่าต้นทุนสูญเสียลดลงตามสัดส่วนของเศษงานที่ลดลง ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตรวมลดลงในระดับที่มีนัยสำคัญ และเป็นประโยชน์ต่อการควบคุมต้นทุนในระยะยาว

4. สรุป

จากงานวิจัยการศึกษาระยะการป้อนของกระบวนการปรับปรุงทรงโลหะเพื่อลดของเสียจากวัตถุดิบและต้นทุนการผลิต ได้ทำการทดลองปรับค่าระยะป้อนชิ้นงานภายใต้สภาวะการผลิตจริง โดยกำหนดค่าทดลองที่ระดับ 240, 239 และ 238 มิลลิเมตร ตามลำดับ พร้อมทำงานเก็บข้อมูลทางด้านน้ำหนักของชิ้นงานตัดรอบตัวและเศษงานที่เกิดขึ้นในแต่ละรอบการทดลอง รวมถึงการนำชิ้นงานที่ผ่านการทดลองทั้งหมดไปผ่านกระบวนการป้อนให้จบกระบวนการ เพื่อให้หน่วยงานควบคุมคุณภาพตรวจสอบมิติและคุณภาพของชิ้นงานตามเกณฑ์ที่ตั้งไว้ จากผลการทดลองพบว่า การปรับระยะป้อนชิ้นงานมีผลโดยตรงต่อปริมาณเศษวัสดุที่เกิดขึ้นในการผลิต โดยเมื่อระยะป้อนถูกปรับลดลงให้เหมาะสมจะทำให้สามารถใช้พื้นที่ของแผ่นโลหะได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ส่งผลให้เศษวัสดุที่เกิดขึ้นมีปริมาณลดลงอย่างชัดเจน โดยค่าระยะป้อนชิ้นงานที่ให้ผลดีที่สุดในงานทดลองครั้งนี้ คือระยะป้อนที่สามารถลดปริมาณเศษวัสดุได้มากที่สุดโดยไม่ทำให้คุณภาพของชิ้นงานลดลงหรือผิดจากมาตรฐานการตรวจสอบชิ้นงาน การศึกษาผลข้อมูลหลังการทดลองในกรณีที่ระยะการป้อนแผ่นวัสดุ 240 มิลลิเมตร พบว่า ปริมาณเศษวัสดุลดลงร้อยละ 0.72 เมื่อเทียบกับกระบวนการผลิตก่อนการปรับแก้ที่ระยะการป้อนแผ่นวัสดุ 243 มิลลิเมตร ซึ่งถือเป็นการลดความบกพร่องวัสดุต่อกระบวนการผลิต นอกจากนี้ต้นทุนรวมในการผลิตต่อชิ้นงานก็ลดลงตามไปด้วย โดยต้นทุนลดลง ร้อยละ 1.81 ทำให้เห็นว่าการใช้ปริมาณวัสดุที่น้อยลงต่อชิ้นงานส่งผลโดยตรงต่อการลดต้นทุนวัตถุดิบ และช่วยเพิ่มศักยภาพในด้านต้นทุนของทั้งระบบการผลิต ด้านคุณภาพของชิ้นงานพบว่า ชิ้นงานที่ผ่านการทดลองจากทุกระดับค่าระยะป้อน ยังคงอยู่ภายใต้ข้อกำหนดของลูกค้ำ และไม่พบมิติผิดเพี้ยนเกินกว่าค่าควบคุม (Tolerance) ที่กำหนด หน่วยงานควบคุมคุณภาพให้การยืนยันว่าคุณภาพของชิ้นงานหลังการทดลองยังอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถส่งมอบให้ลูกค้ำได้โดยไม่ต้องปรับแก้หรือทำงานซ้ำ ซึ่งเป็นข้อสรุปที่ยืนยันว่าการลดระยะการป้อนไม่ได้ส่งผลเสียต่อคุณภาพของชิ้นงาน

การปรับแก้ระยะการป้อนชิ้นงานเป็นแนวทางที่สามารถลดการสูญเสียวัสดุ เพิ่มศักยภาพการใช้วัตถุดิบ และลดงบประมาณการผลิตได้จริงโดยไม่กระทบต่อคุณภาพของชิ้นงาน ความสำเร็จที่เกิดขึ้นทำให้เห็นว่าวิธีนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานลักษณะเดียวกันในสายการผลิตอื่น ๆ เพื่อต่อยอดศักยภาพขององค์กรในระยะยาว และเป็นข้อมูลสนับสนุนที่สำคัญสำหรับการต่อยอดโครงการปรับแก้กระบวนการผลิตในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัท ชัมมิท โอโต บอดี อินดัสตรี จำกัด จังหวัดสมุทรปราการ ที่ให้ความอนุเคราะห์สนับสนุนอุปกรณ์การดำเนินงานและสถานที่ห้องปฏิบัติงาน และขอขอบคุณ คุณธีรชัย ศิริวัฒน์สกุล หัวหน้าแผนกฝ่ายป้อน คุณสุริยงค์ คลังสำโรง ผู้จัดการแผนกป้อน คุณอรุณ บุญโต ผู้จัดการแผนกป้อน คุณเดชาชชา ครบุรี วิศวกรฝ่ายผลิต และคุณชลิตา พิบุรณ์พรรณ รวมถึงพี่ๆ และพนักงานทุกท่านในฝ่ายผลิต ที่ให้คำแนะนำ ช่วยเหลือ และคอยดูแลอย่างอบอุ่นจนในที่สุดทำงานวิจัยนี้ได้สำเร็จ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Hagenah, H., Schulte, R., Vogel, M., Hermann, J., Scharrer, H., Lechner, M., Merklein, M. 2019. M. 4.0 in metal forming - questions and challenges. *Procedia CIRP*. 79: 649–654.
- [2] Gronostajski, Z., Pater, Z., Madej, L., Gontarz, A., Lisiecki, L., Lukaszek-Solek, A., Luksza, J., Mróz, S., Muskalski, Z., Muzykiewicz, W., et al. 2019. Recent development trends in metal forming. *Arch. Civ. Mech. Eng.* 19: 898–941.
- [3] Trzepieciński, Tomasz. 2020. Recent developments and trends in sheet metal forming. *Metals*. 10(6): 779.
- [4] Han, S.S. 1997. The influence of tool geometry on friction behavior in sheet metal forming. *J. Mater. Process. Technol.* 63: 129–133.
- [5] Wang, P.Y., Wang, Z.J., Xiang, N., Li, Z.X. 2020. Investigation on changing loading path in sheet metal forming by applying a property-adjustable flexible-die. *J. Manuf. Process.* 53: 364–375.
- [6] Figueiredo, L., Ramalho, A., Oliveira, M.C., Menezes, L.F. 2011. Experimental study of friction in sheet metal forming. *Wear*. 271: 1651–1657.
- [7] Seshacharyulu, K., Bandhavi, C., Naik, B.B., Rao, S.S., Singh, S.K. 2018. Understanding friction in sheet metal forming-A review. *Mater. Today Proc.* 5: 18238–18244.

-
- [8] Yuan, B., Wang, Z. 2017. A multi-deformable bodies solution method coupling finite element with meshless method in sheet metal flexible-die forming. *Procedia Eng.* 207: 1641–1646.
- [9] Ma, N., Zhu, T., Ogawa, R., Liu, Y., Harada, Y. 2016. Development of 3D thick shell and its application to sheet metal forming simulation. In: *Proceeding of the 10th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes Numisheet*, Bristol, UK. pp. 5–6.
- [10] Kumar, R.U. 2018. Role of CFD in sheet metal forming. *Int. J. Tech. Innov. Mod. Eng. Sci.* 4: 458–462.

การปรับปรุงคุณภาพการประกอบชิ้นส่วนแบตเตอรี่ด้วยระบบป้องกันความผิดพลาด Improving Battery Assembly Quality through Error-Prevention Systems

จิรพัฒน์ คงทอง¹ ณัฐดนัย อ่วมเกต² วชร กาลาสี^{1,*} และ วิสิทธิ์ เอกวานิช¹

Jeeraphat Kongthong¹, Natdanai Ouamket², Wachara Kalasee^{1,*} and Visit Eakvanich¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร 86160 ประเทศไทย
²บริษัท ซัมมิท ออโต บอดี้ อินดัสตรี จำกัด จังหวัดสมุทรปราการ 10540 ประเทศไทย

¹Department of Mechanical Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Prince of Chumphon Campus, Chumphon Province, 86160, Thailand

²Summit Auto Body Industry Co.,Ltd., Samut Prakan Province, 10540, Thailand

*Corresponding author: Wachara Kalasee, e-mail address: wachara.ka@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการปรับปรุงกระบวนการประกอบชิ้นส่วนแบตเตอรี่ในอุตสาหกรรมยานยนต์ จากการศึกษาพบปัญหาการติดตั้งน็อตไม่ครบถ้วน ทำให้เกิดการเคลมสินค้าและความสูญเสียในช่วงเดือนพฤษภาคม – มิถุนายน พ.ศ. 2568 เมื่อพิจารณาข้อมูลการผลิตจำนวน 63,810 ชิ้น พบข้อบกพร่อง 3 ชิ้น คิดเป็นอัตรา 47.2 ส่วนในล้านส่วน (PPM) ซึ่งมากกว่าข้อกำหนดไว้ที่ไม่เกิน 0.65 ส่วนในล้านส่วน อีกทั้งยังตรวจพบจุดเสี่ยงภายในกระบวนการจำนวน 16 ตำแหน่ง ที่สามารถทำให้เกิดชิ้นงานไม่ผ่านมาตรฐาน และคิดหาสาเหตุของปัญหาด้วยแนวทางการระบุปัจจัยต้นเหตุเชิงระบบ โดยพิจารณาปัจจัยด้าน เครื่องจักร วิธีการ และสภาพการทำงานโดยรวมในไลน์ผลิต หลังจากประเมินพบว่า แรงดันลมที่ใช้ในการผลิตไม่เหมาะสม วิธีการทำงานขาดความชัดเจน และยังไม่มียุทธศาสตร์การป้องกันข้อบกพร่องก่อนเข้าสู่ขั้นตอนถัดไป แนวทางการปรับปรุงประกอบด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดความดันลมแบบดิจิทัล การกำหนดค่าควบคุมให้เหมาะสมกับลักษณะการทำงาน ประยุกต์ใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติ (PLC) และออกแบบกลไกอุปกรณ์ป้องกันความผิดพลาด (Poka-Yoke) ก่อนนำส่งสินค้า ผลที่ได้คือของเสียลดลงเหลือ 0 ส่วนในล้านส่วน (PPM) และสามารถควบคุมคุณภาพได้ต่อเนื่อง นอกจากนี้ผลของรอบเวลาการทำงานรวมลดลง 13.8 วินาที คิดเป็นร้อยละ 3.3 ซึ่งเห็นชัดว่าแนวทางที่นำมาใช้ได้ผลจริงอย่างมีนัยสำคัญ และช่วยเพิ่มความมั่นใจด้านคุณภาพขององค์กร

คำสำคัญ: อุปกรณ์ป้องกันความผิดพลาด (Poka-Yoke), ระบบควบคุมอัตโนมัติ (PLC), รอบเวลาการทำงาน

Abstract

This study focuses on improving the battery component assembly process in the automotive industry. The investigation identified an issue of incomplete nut installation, which led to product claims and losses during May–June 2025. The total production volume of 63,810 units, 3 defective units were found, representing 47.2 parts per million (PPM). This exceeded the requirement of no more than 0.65 PPM. In addition, 16 potential risk points were identified within the process that could result in nonconforming products. A systematic root cause analysis was conducted, considering factors related to machinery, methods, and overall working conditions on the production line. The evaluation revealed that the air pressure used in production did not meet the required specification, work procedures lacked clarity, and no screening system was in place before products moved to the next process. Improvement measures included installing a digital air pressure monitoring device, setting appropriate control parameters aligned with actual operating conditions, applying an automatic control system (PLC), and designing an error-prevention systems (Poka-Yoke) before product shipment. As a result, defects were reduced to 0 PPM, and quality could be consistently controlled. Moreover, the overall cycle time decreased by 13.8 seconds, or 3.3 percent. The findings clearly demonstrate that the implemented approach was effective and significantly enhanced organizational confidence in product quality.

Keywords: Error-prevention systems (Poka-Yoke), Automatic control system (PLC), Cycle time

1. บทนำ

ปัญหาของอุตสาหกรรมยานยนต์ในปัจจุบัน โดยเฉพาะคุณภาพของงานและการส่งมอบที่ต้องตรงเวลา ส่งผลให้ต้องปรับปรุงระบบการทำงานให้มากขึ้น เพื่อให้ผลผลิตออกมาได้มาตรฐาน และลดปัญหาที่อาจเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิต สำหรับธุรกิจชิ้นส่วนรถยนต์จะจัดลำดับผู้ผลิตตามบทบาทในเครือข่ายผู้ผลิตและผู้ส่งมอบ (Tier structure) ลักษณะจะเป็นเหมือนลำดับขั้น ผู้ผลิตรถยนต์จะอยู่ระดับบนสุด จากนั้นจะแบ่งเป็นผู้ผลิตชิ้นส่วนในแต่ละระดับตามหน้าที่ ได้แก่ ผู้ผลิตชิ้นส่วนลำดับที่ 1 (1st Tier) ผลิตและส่งมอบระบบหรือชุดประกอบสำเร็จรูปให้ผู้ผลิตรถยนต์โดยตรง โดยเป็นองค์กรขนาดใหญ่ที่มีเทคโนโลยีพร้อมและเงินทุนสูง ขณะที่ผู้ผลิตชิ้นส่วนลำดับที่ 2 (2nd Tier) และ ผู้ผลิตชิ้นส่วนลำดับที่ 3 (3rd Tier) ผลิตชิ้นงานย่อยและวัตถุดิบเพื่อสนับสนุนห่วงโซ่อุปทาน จากข้อมูลสถิติร่วมกับผลการติดตามของเสียย้อนหลังของกลุ่มอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์พบว่า ปัญหาชิ้นงานไม่มีหน้าที่เกิดจากฝ่ายผลิตแผนกประกอบเป็นสาเหตุที่เกิดความเสียหายมากที่สุด เนื่องจากเป็นของเสียที่ทำให้หลุดรอดไปถึงผู้ผลิตรถยนต์หลัก (Original equipment manufacturer, OEM) มากที่สุด โดยไม่พบในขั้นตอนการตรวจสอบภายใน ทำให้เสียความน่าเชื่อถือ รวมถึงการที่ก่อให้เกิดการร้องเรียน การเคลมสินค้า และเพิ่มต้นทุนคุณภาพ ทฤษฎีและหลักการด้านกระบวนการผลิตเป็นแนวคิดสำคัญที่ช่วยให้เข้าใจระบบการทำงานของโรงงานอุตสาหกรรม และใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน โดยระบบการผลิตสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ปัจจัยนำเข้า (Input) กระบวนการแปรสภาพ (Conversion process) และผลผลิต (Output) ปัจจัยนำเข้าเป็นทรัพยากรที่ใช้ในกระบวนการผลิตเพื่อให้บรรลุเป้าหมายขององค์กร โดยสามารถอธิบายตามแนวคิด 4M ได้แก่ คน (Man) เครื่องจักร (Machine) วัสดุ (Material) และวิธีการทำงาน (Method) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพของผลผลิต ประสิทธิภาพของกระบวนการทำงาน และความสำเร็จของระบบ

ระบบควบคุมการผลิตระบบอัตโนมัติในโรงงาน (Programmable logic controller, PLC) [1-2] เพื่อสั่งการและควบคุมการทำงานของเครื่องจักรในไลน์การผลิตให้เชื่อมโยงตามเงื่อนไขที่วางไว้ สามารถทำงานได้ต่อเนื่อง เหมาะกับสภาพพื้นที่ทำงานในโรงงาน และรองรับงานยากๆ ได้ค่อนข้างดี กลไกการทำงาน เริ่มด้วยการรับสัญญาณจากอุปกรณ์ต่างๆ เช่น เซนเซอร์หรือสวิตช์ จากนั้นจะถูกส่งข้อมูลเข้าสู่หน่วยประมวลผลเพื่อแปรผันตามโปรแกรมที่กำหนดไว้ แล้วจึงส่งคำสั่งออกไปควบคุมอุปกรณ์ปลายทาง เช่น มอเตอร์ วาล์ว หรืออุปกรณ์แสดงผล ทำให้กระบวนการผลิตมีความแม่นยำสูง ภาษาแลดเดอร์ (Ladder) เป็นรูปแบบการเขียนโปรแกรมที่ใช้กันทั่วไปกับระบบ PLC ในอุตสาหกรรม ลักษณะมีรูปแบบคล้ายแผงวงจรควบคุมไฟฟ้า แสดงผลที่ออกมาเป็นเส้นแนวตั้งและแนวนอน เปรียบเสมือนขั้นบันได ใช้แสดงเงื่อนไข และลำดับการทำงานของอุปกรณ์ภายในโปรแกรมจะใช้สัญลักษณ์แทน อินพุต เอาต์พุต และเงื่อนไขเชิงตรรกะ เช่น การสั่งเปิด-ปิด การทำงานแบบต่อเนื่องกัน ลักษณะการแสดงผลแบบนี้ช่วยให้ตรวจสอบ ปรับปรุง และดูแลรักษาโปรแกรมได้สะดวก ยิ่งในไลน์ผลิตที่ต้องแก้ปัญหาให้ทันเวลา เนื่องจากโครงสร้างของภาษาไปทิศทางเดียวกับแนวคิดการควบคุมแบบรีเลย์ดั้งเดิม ภาษา C และ C++ เป็นภาษาที่ใช้กันทั่วไปในการพัฒนาโปรแกรมสำหรับบอร์ดควบคุม และระบบอัตโนมัติ การใช้งานร่วมกับ Arduino เหมาะกับงานควบคุมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากโครงสร้างของภาษาเข้าใจง่าย ช่วยกำหนดลำดับของเรื่องทำงานได้ชัดเจน และควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ได้อย่างละเอียด การทำโปรแกรมด้วย C++ บน Arduino ช่วยให้พัฒนาให้โปรแกรมยืดหยุ่น และสามารถใส่ไลบรารีสำเร็จรูปมาช่วยลดเวลา ทั้งนี้การเลือกใช้ภาษา C หรือ C++ ขึ้นอยู่กับลักษณะงานและข้อจำกัดด้านประสิทธิภาพของระบบ [3-4]

เทคนิคการป้องกันความผิดพลาดโดยไม่ได้ตั้งใจ (Poka-Yoke) [5-6] คือ การป้องกันไม่ให้เกิดการทำงานที่ผิดพลาด ลดความเสี่ยงตอนทำงาน และช่วยควบคุมคุณภาพการผลิต หรือ การออกแบบอุปกรณ์ป้องกันเพื่อไม่ให้เกิดความผิดพลาดขึ้นตั้งแต่ต้นทาง หลักการที่สำคัญของ Poka-Yoke คือ ทำให้กระบวนการทำงานข้อผิดพลาดเกิดได้ยาก หรือหากเกิดความผิดพลาดจะตรวจเจอได้ในทันที ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ เช่น การระบุตำแหน่งชิ้นส่วนให้สามารถประกอบได้เพียงทิศทางเดียว การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อจัดการความถูกต้อง หรือการตั้งเงื่อนไขไม่ให้เครื่องทำงานเมื่อข้อมูลไม่ครบถ้วน สามารถช่วยลดความผิดพลาดในการทำงานและลดของเสียในกระบวนการผลิตได้ โดยเฉพาะในโรงงานอุตสาหกรรมที่นำแนวคิดการป้องกันข้อผิดพลาดตั้งแต่ต้นทางมาใช้ในสายการผลิต เช่น การใช้เซนเซอร์ตรวจจับตำแหน่งชิ้นส่วนก่อนการประกอบ [7] การใช้ระบบตรวจจับร่วมกับระบบหยุดเครื่องอัตโนมัติในขั้นตอนการประกอบ ซึ่งช่วยลดของเสียและลดเวลาหยุดไลน์การผลิต [8] รวมถึงการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจสอบและระบบแจ้งเตือนเมื่อเกิดความผิดปกติในกระบวนการผลิต [9-10]

งานวิจัยนี้จึงมีความสำคัญ เนื่องจากมุ่งเน้นการศึกษาสาเหตุของข้อบกพร่องกรณีปัญหาชิ้นงานไม่มีหน้าที่เกิดจากฝ่ายผลิตแผนกประกอบ ช่วยลดปัญหาการร้องเรียนและการเคลมสินค้า ซึ่งจะช่วยให้องค์กรสามารถลดต้นทุนการผลิตต่อหน่วยและเพิ่มความสามารถในการแข่งขัน

2. วิธีการศึกษา

2.1 ศึกษาปัญหาและสภาพปัจจุบัน

การเก็บรวบรวมข้อมูลจากงานผลิตชิ้นงานประกอบ (Assembly departments) ในเดือน เมษายน-พฤษภาคม 2568 พบว่า มีปัญหาด้านคุณภาพของกระบวนการผลิตชิ้นงานประกอบชิ้นส่วนแบตเตอรี่ (Support battery) ในกระบวนการผลิตพบของเสียจากปัญหาชิ้นงานไม่มีนัท (Missing nut) ดังแสดงใน Figure 1 (a) เนื่องจากมีชิ้นงานหลุดไปยังภายนอกส่งผลให้เสียเวลาเสียรายได้ และภายในกระบวนการผลิตเกิดของเสียที่ซ่อมแซม จากข้อมูลการผลิตในระยะเวลา 2 เดือน ทั้งหมด 63,810 ชิ้น พบของเสียจากปัญหาชิ้นงานไม่มีนัทเป็นชิ้นส่วนภายในที่ต้องทำลายจำนวน 5 ชิ้น คิดเป็นร้อยละ 0.0078 ชิ้นส่วนภายในที่ไม่ทำลายจำนวน 11 ชิ้น คิดเป็นร้อยละ 0.0172 และชิ้นส่วนที่หลุดไปยังภายนอก จำนวน 3 ชิ้น คิดเป็นร้อยละ 0.0047 หรือ 47 PPM ดังแสดงใน Figure 1 (b) ซึ่งเกินจากข้อกำหนดต้องมีชิ้นส่วนที่หลุดไปยังภายนอกไม่เกิน 0.65 PPM

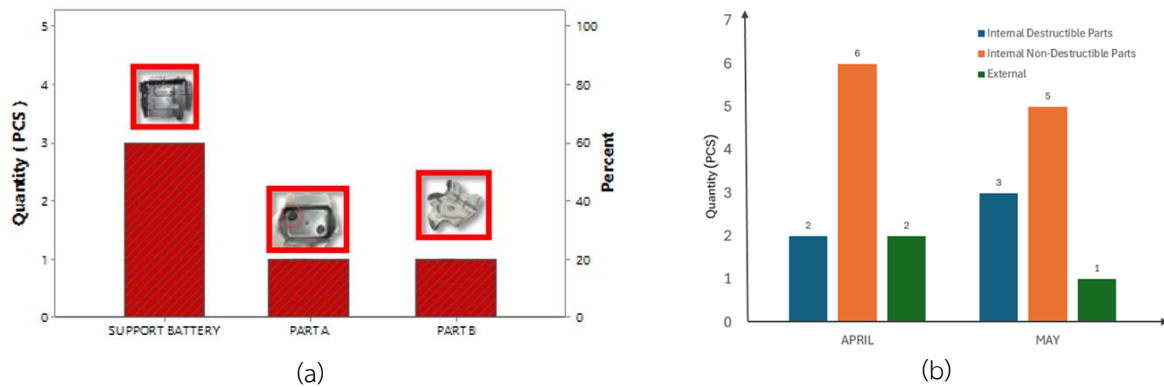


Figure 1 Missing nut. (a) Assembly department. (b) Support battery.

2.2 สำรวจแนวทางปรับแก้การผลิต

แนวทางปรับแก้การผลิตโดยการตรวจสอบและปรับปรุงระบบกระบวนการผลิตชิ้นงานประกอบชิ้นส่วนแบตเตอรี่ในส่วนต่าง ๆ ได้แก่ แม็กกาซีน (Magazine) สำหรับบรรจุชิ้นงาน หุ่นยนต์หยิบชิ้นงาน (Robot gripper) เครื่องเชื่อมประจำตำแหน่งแบบจุด (Stationary spot welding) ดังแสดงใน Figure 2 (a) หุ่นยนต์เชื่อมแบบจุด (Robot spot) ตัวล็อกชิ้นงาน (Jig) ดังแสดงใน Figure 2 (b) ตัวปรับแรงดันลม (Air regulator) ดังแสดงใน Figure 2 (c) โดยประยุกต์ใช้แนวคิด 4M ร่วมกับการดูแลเอกสารสอบถามพนักงานและหัวหน้างาน รวมถึงขอคำแนะนำจากคนที่มีประสบการณ์ เพื่อให้เข้าใจปัญหาตามสภาพการทำงานจริง จากนั้นวางแผนแก้ไขขั้นตอนการทำงาน (Work instruction, WI) และประยุกต์ใช้ระบบป้องกันความผิดพลาด Poka-Yoke ร่วมกับระบบควบคุมการผลิตระบบอัตโนมัติ PLC ในกระบวนการผลิตต่างๆ ภายในโรงงาน

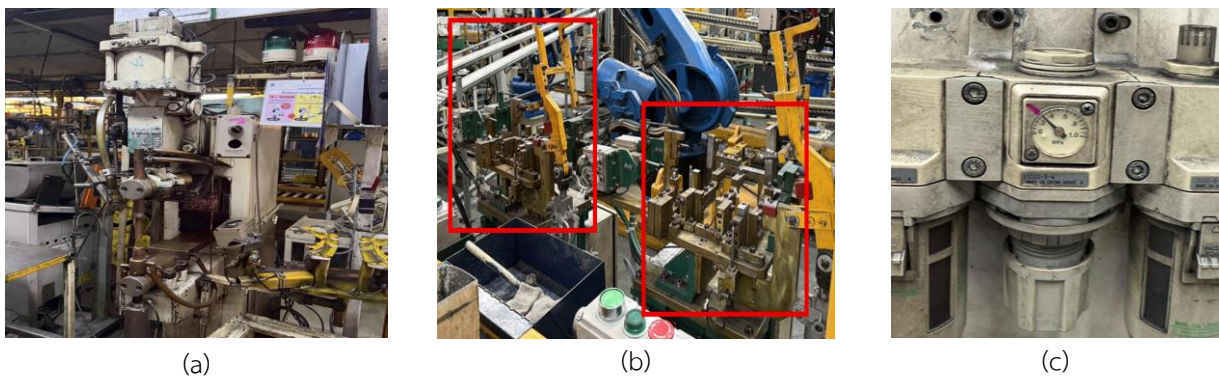


Figure 2 Support battery departments. (a) Stationary spot welding. (b) Jig. (c) Air regulator.

2.3 ดำเนินแผนการปรับแก้

การปรับปรุงกระบวนการผลิตครั้งนี้มุ่งเน้นการลดข้อบกพร่องด้วยการประยุกต์ใช้ระบบกันพลาด Poka-Yoke ร่วมกับระบบเซนเซอร์ เพื่อป้องกันการเกิดปัญหาชิ้นงานไม่มีน้ท ในกระบวนการเชื่อมแบบจุด (Spot welding) โดยมีการประชุมร่วมกันระหว่างฝ่ายผลิต (Production) ฝ่ายวิศวกรรมการผลิต (Production engineering) ฝ่ายควบคุมคุณภาพ (Quality assurance, QA) และฝ่ายซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน (Preventive maintenance, PM) เพื่อกำหนดแนวทางปรับปรุงกระบวนการให้สามารถควบคุม และป้องกันข้อบกพร่อง จากการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา ได้กำหนดมาตรการแก้ไขโดยมุ่งเน้นการควบคุมค่าแรงดันลมในกระบวนการเชื่อมแบบจุดของเครื่องเชื่อมประจำตำแหน่ง และติดตั้งเซนเซอร์ตรวจจับพร้อมระบบ PLC เพื่อป้องกันการเกิดปัญหาชิ้นงานไม่มีน้ท

(1) ทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดความดันลมแบบดิจิทัล (Digital pressure sensor) ในระบบลมของเครื่องเชื่อมแบบจุดเพื่อตรวจเช็คค่าความดันลมให้อยู่ในค่าที่ตั้งไว้หากค่าแรงดันผิดปกติ ระบบจะสามารถแจ้งเตือน หรือป้องกันการทำงาน ดังแสดงใน Figure 3 (a)

(2) ออกแบบและติดตั้งเซนเซอร์ตรวจจับโลหะแบบไม่สัมผัส (Inductive proximity sensor) พร้อมระบบ PLC เพื่อควบคุมการตรวจสอบเซนเซอร์กับหุ่นยนต์หยิบชิ้นงานเก็บรวบรวมขนาดของชิ้นส่วน เพื่อติดตั้งเซนเซอร์ตรวจจับจำนวน 2 จุด พร้อมออกแบบคู่มือกับสลักนำทิศทาง (Guide pin) ดังแสดงใน Figure 3 (b) และ Figure 4 (a) เพื่อให้รองรับต่อการตรวจสอบความถูกต้อง โดยมีขั้นตอนการทำงานของ Poka-Yoke จะแบ่งการตรวจสอบชิ้นงานเป็น 3 ครั้ง ครั้งที่ 1 จะทำการตรวจสอบ จุดที่ 1 และ 2 พร้อมกัน ครั้งที่ 2 จะทำการตรวจสอบจุดที่ 3 และครั้งที่ 3 จะทำการตรวจสอบจุดที่ 4 ดังแสดงใน Figure 4 (b) หลังจากตรวจสอบครบ หุ่นยนต์หยิบชิ้นงานจะส่งไปยังกระบวนการถัดไป หากไม่ครบหุ่นยนต์หยิบชิ้นงานจะนำชิ้นงานไปใส่ในตะกร้าเหลืองเพื่อรอซ่อม



Figure 3 Materials and methods. (a) Digital pressure sensor. (b) Poka-Yoke (Inductive sensor and guide pin).

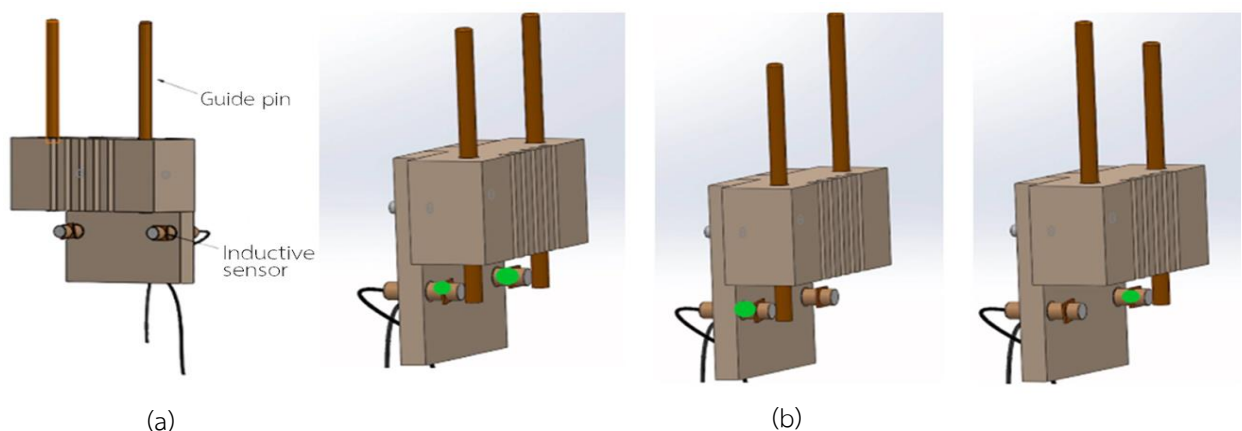


Figure 4 Poka-Yoke (a) Inductive sensor and guide pin. (b) Workpiece Inspection.

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

ผลการวิจัยครั้งนี้เป็นการวิเคราะห์ปัญหาการเกิดชิ้นงานขาดชิ้นส่วนประกอบประเภทนัทยึด ซึ่งพบในกระบวนการประกอบชิ้นส่วนแบตเตอรี่ โดยอ้างอิงข้อมูลจากการเก็บรวบรวมภายในพื้นที่โรงงานจริง และการประสานงานกับฝ่ายควบคุมคุณภาพ จากนั้นจึงเสนอมาตรการปรับปรุงโดยประยุกต์ใช้ระบบ Poka-Yoke และระบบควบคุม PLC พร้อมทั้งเปรียบเทียบประสิทธิภาพก่อนและหลังการดำเนินการแก้ไข

3.1 ผลการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมค่าแรงดันลมของเครื่องเชื่อมประจำตำแหน่ง

จากการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมค่าแรงดันลมของระบบเดิมควบคุมแรงดันลมด้วยตัวปรับแรงดัน (Regulator) สามารถแสดงค่าแรงดันได้เพียงอย่างเดียว ไม่สามารถตรวจสอบความผิดปกติแบบทันที หรือสั่งหยุดทำงานอัตโนมัติ เมื่อค่าแรงดันไม่เป็นไปตามที่กำหนดไว้ จึงได้มีการติดตั้งอุปกรณ์วัดความดันแบบดิจิทัล และตั้งค่าความดันลมให้อยู่ช่วงค่ามาตรฐานที่ใช้งาน คือ 0.4-0.6 เมกะปาสกาล เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการผิดพลาดในกระบวนการเชื่อมนัท (Nut welding) โดยที่เมื่อแรงดันต่ำกว่า 0.4 เมกะปาสกาล หรือสูงกว่า 0.6 เมกะปาสกาล จะทำให้เกิดเสียงแจ้งเตือนการทำงาน ระบบการทำงานจะหยุดการทำงาน

3.2 ผลการติดตั้งระบบป้องกันความผิดพลาด Poka-Yoke

จากการทดลองติดตั้งระบบป้องกันความผิดพลาด Poka-Yoke ได้เริ่มทดสอบโดยนำชิ้นงานที่มีสถานะผ่าน (OK) และไม่ผ่าน (NG) เข้าตรวจสอบคุณภาพแบบตรวจครบทุกชิ้นภายใต้สภาวะการผลิตจริง จำนวนรวม 30 ชิ้น แบ่งเป็นชิ้นงาน OK จำนวน 5 ชิ้น และ NG จำนวน 25 ชิ้น ได้แก่ กรณีที่ไม่มีนัทจุดที่ 1 จำนวน 5 ชิ้น, กรณีที่ไม่มีนัทจุดที่ 2 จำนวน 5 ชิ้น, กรณีที่ไม่มีนัทจุดที่ 3 จำนวน 5 ชิ้น, กรณีที่ไม่มีนัทจุดที่ 4 จำนวน 5 ชิ้น, กรณีที่ไม่มีนัทจุดที่ 5 จำนวน 5 ชิ้น และกรณีที่มีนัทถูกต้องทั้งหมดจำนวน 5 ชิ้น พบว่า ระบบระบบป้องกันความผิดพลาด Poka-Yoke สามารถทำงานได้ถูกต้องไม่มีความผิดพลาดในทุกๆ กรณีของการทดลอง ดังแสดงใน Table 1-6

Table 1 Poka-Yoke testing results in the case of no nut at point 1.

Part description	Piece	Results			
		Point 1	Point 2	Point 3	Point 4
Missing nut point 1	1	NG	OK	OK	OK
	2	NG	OK	OK	OK
	3	NG	OK	OK	OK
	4	NG	OK	OK	OK
	5	NG	OK	OK	OK

Table 2 Poka-Yoke testing results in the case of no nut at point 2.

Part description	Piece	Results			
		Point 1	Point 2	Point 3	Point 4
Missing nut point 2	1	OK	NG	OK	OK
	2	OK	NG	OK	OK
	3	OK	NG	OK	OK
	4	OK	NG	OK	OK
	5	OK	NG	OK	OK

Table 3 Poka-Yoke testing results in the case of no nut at point 3.

Part description	Piece	Results			
		Point 1	Point 2	Point 3	Point 4
Missing nut point 3	1	OK	OK	NG	OK
	2	OK	OK	NG	OK
	3	OK	OK	NG	OK
	4	OK	OK	NG	OK
	5	OK	OK	NG	OK

Table 4 Poka-Yoke testing results in the case of no nut at point 4.

Part description	Piece	Results			
		Point 1	Point 2	Point 3	Point 4
Missing nut point 4	1	OK	OK	OK	NG
	2	OK	OK	OK	NG
	3	OK	OK	OK	NG
	4	OK	OK	OK	NG
	5	OK	OK	OK	NG

Table 5 Poka-Yoke testing results in the case of no nut at point 4.

Part description	Piece	Results			
		Point 1	Point 2	Point 3	Point 4
Missing nut	1	NG	NG	NG	NG
	2	NG	NG	NG	NG
	3	NG	NG	NG	NG
	4	NG	NG	NG	NG
	5	NG	NG	NG	NG

Table 6 Poka-Yoke testing results in the case of nut installed correctly.

Part description	Piece	Results			
		Point 1	Point 2	Point 3	Point 4
Nut installed correctly	1	OK	OK	OK	OK
	2	OK	OK	OK	OK
	3	OK	OK	OK	OK
	4	OK	OK	OK	OK
	5	OK	OK	OK	OK

3.3 ผลของรอบเวลาการทำงานก่อนและหลังปรับปรุง

ผลของรอบเวลาการทำงาน (Cycle Time, CT) ก่อนและหลังการปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อลดข้อบกพร่องด้วยอุปกรณ์ควบคุมค่าแรงดันลมแบบดิจิทัลในระบบลมของเครื่องเชื่อมประจำตำแหน่ง และการประยุกต์ใช้ระบบป้องกันความผิดพลาด Poka-Yoke เพื่อยืนยันเงื่อนไขการทำงานก่อนส่งต่อขั้นตอนถัดไปพบว่า การทำงานมีความไหลลื่นขึ้นและเวลาใน

การตรวจคุณภาพของชิ้นงานของพนักงานลดลงอย่างมาก ดังแสดงใน Figure 5 (a) โดยที่ผลของรอบเวลาการทำงานรวมลดลงจาก 416.1 วินาที เหลือเพียง 402.3 วินาที (ลดลง 13.8 วินาที ประมาณ 3.3%) ดังแสดงใน Figure 5 (b)

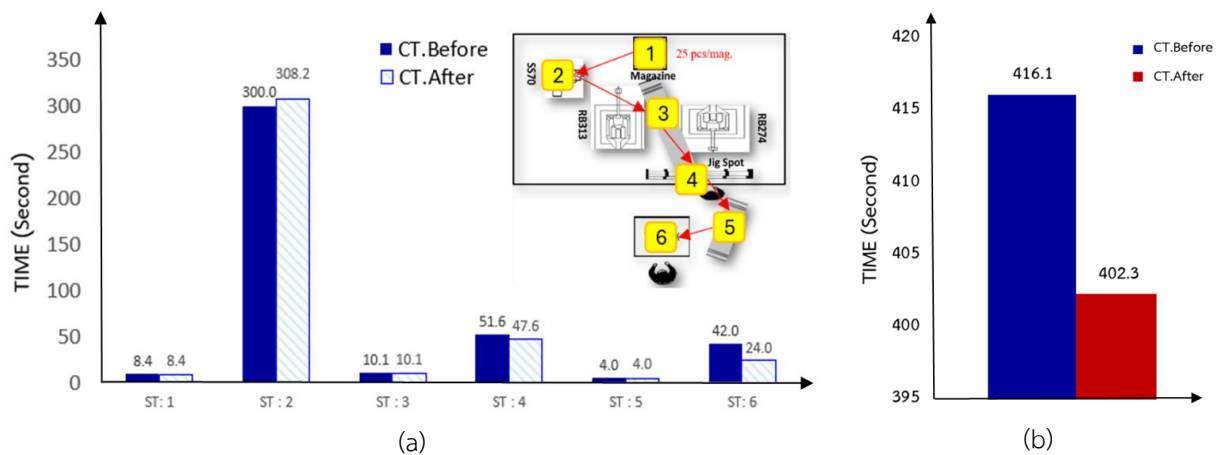


Figure 5 Cycle Time for support battery. (a) Working time. (b) Total cycle time.

ผลการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า แนวทางปรับปรุง ได้แก่ การปรับขั้นตอนการทำงาน และการเพิ่มระบบเซนเซอร์ตรวจจับ ช่วยลดงานที่ไม่จำเป็น การตรวจซ้ำ และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการทั้งหมดได้อย่างมีนัยสำคัญ

4. สรุป

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการปรับปรุงกระบวนการประกอบชิ้นส่วนแบตเตอรี่ในอุตสาหกรรมยานยนต์ เพื่อแก้ไขปัญหาชิ้นงานไม่มียี่ห้อที่เกิดจากฝ่ายผลิตแผนกประกอบ เพื่อช่วยลดปัญหาการร้องเรียน การเคลมสินค้า และลดต้นทุนการผลิตต่อหน่วยและเพิ่มความสามารถในการแข่งขัน ด้วยวางแผนแก้ไขขั้นตอนการทำงาน และการประยุกต์ใช้ระบบป้องกันความผิดพลาด Poka-Yoke ทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดความดันลมแบบดิจิทัลในระบบลมของเครื่องเชื่อมประจำตำแหน่ง ร่วมกับระบบเซนเซอร์ตรวจจับโลหะแบบไม่สัมผัสพร้อมระบบ PLC เพื่อควบคุมการตรวจสอบเซนเซอร์กับหุ่นยนต์หยิบชิ้นงานเก็บรวบรวมขนาดของชิ้นส่วน โดยทำการทำสอบชิ้นงานภายใต้กระบวนการทำงานจริงเปรียบเทียบประสิทธิภาพก่อนและหลังการดำเนินการแก้ไข พบว่า สามารถป้องกันไม่ให้เกิดการผิดพลาดในกระบวนการเชื่อมนี้ กรณีแรงดันต่ำกว่า 0.4 เมกะปาสกาล หรือสูงกว่า 0.6 เมกะปาสกาล โดยจะทำให้เกิดเสียงแจ้งเตือนการทำงาน ระบบการทำงานจะหยุดการทำงาน และผลการทดสอบระบบป้องกันความผิดพลาด Poka-Yoke ได้เริ่มทดสอบโดยนำชิ้นงานที่มีสถานะผ่านและไม่ผ่านเข้าตรวจสอบคุณภาพแบบตรวจครบทุกชิ้นภายใต้สภาวะการผลิตจริง จำนวนรวม 30 ชิ้น พบว่า ระบบระบบป้องกันความผิดพลาด Poka-Yoke สามารถทำงานได้ถูกต้องไม่มีความผิดพลาดในทุกๆ กรณีของการทดลอง นอกจากนี้ผลของรอบเวลาการทำงานก่อนและหลังการปรับปรุงพบว่า การทำงานมีความไหลลื่นขึ้นและเวลาในการตรวจคุณภาพของชิ้นงานของพนักงานลดลงอย่างมาก โดยที่ผลของรอบเวลาการทำงานรวมลดลง 13.8 วินาที คิดเป็นร้อยละ 3.3

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัท ชัมมิท โอโต บอดี อินดัสตรี จำกัด จังหวัดสมุทรปราการ ที่ให้ความอนุเคราะห์สนับสนุนอุปกรณ์การดำเนินงานและสถานที่ห้องปฏิบัติงาน และขอขอบคุณ คุณสุริยา บรรโล ผู้จัดการฝ่ายผลิต คุณณัฐดนัย อ่วมเกต วิศวกรฝ่ายผลิต คุณนุชชรา ยางทอง วิศวกรฝ่ายผลิต และทีมงานฝ่ายผลิตทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำ ช่วยเหลือ และคอยดูแลอย่างอบอุ่นจนในที่สุดทำงานวิจัยนี้ได้สำเร็จ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] DeGuglielmo, N.P., Basnet, S.M., Dow, D.E. 2020. Introducing ladder logic and programmable logic controller (PLC). In: Proceeding of the 2020 Annual Conference of the Northeast Section (ASEE-NE), Bridgeport, CT, USA. pp. 1-5.

-
- [2] Thong-un, N., Wongsaroj, W. 2022. Productivity enhancement using low-cost smart wireless programmable logic controllers: A case study of an oyster mushroom farm. *Comput. Electron. Agric.* 195: 106798.
- [3] Sanver, U., Yavuz, E., Eyupoglu, C., Uzun, T. 2018. Design and implementation of a programmable logic controller using PIC18F4580. In: *Proceeding of 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, Moscow and St. Petersburg, Russia. pp. 231–235.
- [4] Hudedmani, M.G., Umayal, R.M., Kabberalli, S.K., Hittalmani, R. 2017. Programmable logic controller (PLC) in automation. *Adv. j. grad. res.* 2(1): 37–45.
- [5] ศรีนยา ประทีปชนะชัย, ธนรัช มั่นมงคล, และสุทธิดา การะเวก. 2568. การประยุกต์ใช้แนวคิดโพคา-โยเกะในการออกแบบอุปกรณ์ป้องกันความผิดพลาดเพื่อลดความสูญเสียในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์. *วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี.* 20(1). 1–13.
- [6] Berndt, R. 2016. Decision diagrams for the verification of consistency in automotive product data. Ph.D. Thesis, Friedrich-Alexaender-Universität Erlangen–Nürnberg, Universitätsbibliothek Erlangen–Nürnberg.
- [7] Lazarevic, M., Mandic, J., Sremcevic, N. 2019. A systematic literature review of poka-yoke and a novel approach to theoretical aspects. *J. Mech. Eng.* 65(7–8): 454–467.
- [8] Purba, H.H., Tosa, F.A., Santoso, Y. 2019. Using poka-yoke method for detection defect product in assembly component automotive. *J. Ind. Eng. Manag.* 12(3): 456–467.
- [9] Prabowo, R. F., Aisyah, S. 2020. Poka-yoke method implementation in industries: A systematic literature review. *J. Indust. Engin. Manag.* 1(1): 12–24.
- [10] Bubber, D., Babber, G., Jain, R.K. 202 2. Implementing lean tool: Poka-Yoke in tractor component manufacturing industry. *Int. J. Sci. Tech. Dev.* 8(2): 46–55.

การศึกษาการตกผลึกของเนยโกโก้ร่วมกับไขมันที่อุดมด้วยไตรกลีเซอไรด์ชนิด sn-1,3-ไดสเตียรอยล์-2-โอเลอยล์-กลีเซอรอล
Study of crystallization of Cocoa butter in the presence of sn-1,3-distearoyl-2-oleoyl-glycerol rich fats

ดาวอำพรณ คงมีผล¹ Chaeyeon Lee² Kim In-Hwan² และ โสภาค สอนไว^{1,*}
Daoampan Kongmeepol¹, Chaeyeon Lee², Kim In-Hwan² and Sopark Sonwai^{1,*}

¹ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม 73000 ประเทศไทย

²ภาควิชาชีวการแพทย์และวิทยาศาสตร์ชีวภาพแบบบูรณาการบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกาหลี โซล 02841 สาธารณรัฐเกาหลี

¹Department of Food Technology, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakhonpathom Province, 73000, Thailand

²Department of Integrated Biomedical and Life Sciences, Graduate School, Korea University, Seoul, 02841, Republic of Korea

*Corresponding author: Sopark Sonwai, e-mail address: sonwai_s@su.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการตกผลึกของเนยโกโก้ร่วมกับไขมันที่อุดมด้วยไตรกลีเซอไรด์ชนิด sn-1,3-ไดสเตียรอยล์-2-โอเลอยล์-กลีเซอรอล หรือไขมัน SOS โดยศึกษาที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างไขมัน SOS ต่อเนยโกโก้ 2 อัตราส่วน ได้แก่ 5/95 และ 15/85 เปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม (เนยโกโก้ 100%) จากการศึกษาปริมาณของแข็งในรูปผลึก สมบัติทางสัณฐานวิทยาของผลึก สภาพอัญรูปของผลึก เทอร์โมแกรมของการตกผลึกและการหลอมเหลวและความแข็งพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของไขมัน SOS ปริมาณของแข็งในรูปผลึกเพิ่มขึ้นและเทอร์โมแกรมของการตกผลึกและการหลอมเหลวแสดงให้เห็นว่ามีอุณหภูมิของการตกผลึกและหลอมเหลวสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับเนยโกโก้ ในทางกลับกันผลการวิเคราะห์ความแข็งของไขมันผสมแสดงว่ามีแนวโน้มอ่อนตัวลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงขนาดและความหนาแน่นของโครงข่ายผลึก (crystalline network) เมื่อมีการเติมไขมัน SOS ลงในเนยโกโก้ ทั้งนี้การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์แบบมุมกว้าง (WAXS) ยืนยันว่าทั้งเนยโกโก้และไขมันผสมแสดงโครงสร้างผลึกแบบ β_2 หรือโครงสร้าง V ซึ่งเป็นโครงสร้างที่เหมาะสมต่อคุณภาพของช็อกโกแลต ดังนั้นการเติมไขมัน SOS ในระดับที่มีการศึกษา (5% และ 15%) แสดงให้เห็นว่าไม่ส่งผลกระทบต่อสภาพอัญรูปของผลึกและยังมีคุณสมบัติเชิงโครงสร้างที่เหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาช็อกโกแลตทนความร้อนได้

คำสำคัญ: เนยโกโก้, การตกผลึก, ไขมันชนิดที่มีไตรกลีเซอไรด์ชนิด SOS ในปริมาณสูง

Abstract

This study investigated the crystallization behavior of cocoa butter blended with sn-1,3-distearoyl-2-oleoyl-glycerol rich fats (SOS fat) at 2 weight ratios of 5/95 and 15/85 (SOS fat/cocoa butter), compared with a control sample (100% cocoa butter). The solid fat content (SFC), crystal morphology, polymorphic forms, crystallization and melting thermograms, and hardness were evaluated. The results showed that increasing the proportion of SOS fat led to an increase in SFC, while the crystallization and melting thermograms exhibited slightly higher crystallization and melting temperatures compared with cocoa butter. In contrast, hardness analysis revealed a decreasing trend in the blended fats. This reduction in hardness may be attributed to changes in crystal size and the density of the crystalline network upon incorporation of SOS fat into cocoa butter. Wide-angle X-ray scattering (WAXS) analysis confirmed that both cocoa butter and the blends crystallized predominantly in the β_2 (form V) polymorphic structure, which is desirable for optimal chocolate quality. Therefore, the incorporation of SOS fat at the studied levels (5% and 15%) did not adversely affect the polymorphic form of the crystals and maintained structural characteristics suitable for application in the development of heat-resistant chocolate products.

Keywords: Cocoa butter, Crystallization, SOS-rich fat

1. บทนำ

เนยโกโก้ (cocoa butter) เป็นองค์ประกอบไขมันของเมล็ดโกโก้ และเป็นส่วนผสมไขมันที่สำคัญในช็อกโกแลต พฤติกรรมการตกผลึกของเนยโกโก้จึงเป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดคุณภาพของช็อกโกแลต-โดยส่วนประกอบกรดไขมัน (fatty acid) หลักของเนยโกโก้ ได้แก่กรดสเตียริก (S, 33.7–40.2%) กรดโอเลอิก (O, 26.3–35.0%) และกรดปาล์มมิก (P, 25.0–33.7%) และเนยโกโก้ประกอบด้วยไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) ที่มีกรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงเดี่ยว 3 ชนิด ได้แก่ 1,3-dipalmitoyl-2-oleoyl-glycerol (POP) 13.0–21.0%, 1-Palmitoyl-2-oleoyl-3-stearoyl-glycerol (POS) 27.0–47.0% และ sn-1,3-distearoyl-2-oleoyl-glycerol (SOS) 22.0–30.0% [3,13] ในช็อกโกแลตนั้นเนยโกโก้จะต้องตกผลึกในโครงสร้าง V (β_2) เท่านั้น เพราะเป็นโครงสร้างผลึกที่เสถียรซึ่งส่งผลให้ได้ช็อกโกแลตที่มีสมบัติที่ดีหลายประการ เช่น ความกรอบ ความมันวาว เนื้อสัมผัสที่เรียบเนียน ความรู้สึกในปากและการทนทานต่อการเกิดฝ้าขาว [23]

ในปัจจุบันตลาดของช็อกโกแลตในประเทศที่มีสภาพอากาศเขตร้อนและกึ่งเขตร้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภูมิภาคเอเชีย มีอัตราการเติบโตอย่างรวดเร็ว โดยคาดว่าจะมีมูลค่าตลาดรวมสูงถึง 51,161.3 ล้านดอลลาร์สหรัฐภายในปี 2033 และมีอัตราการเติบโตเฉลี่ยต่อปี (CAGR) ประมาณ 7% ในช่วงปี 2026 ถึง 2033 [8] อย่างไรก็ตามเนยโกโก้มีช่วงอุณหภูมิการหลอมเหลวอยู่ที่ 26–30°C ส่งผลให้ช็อกโกแลตเกิดการอ่อนตัวหรือเสียรูปได้ง่ายภายใต้สภาวะแวดล้อมดังกล่าวและส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ [1, 10, 28] แม้ว่าการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวอาจไม่ส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์โดยตรง แต่ลักษณะปรากฏที่ด้อยลง เช่น การอ่อนตัวหรือการเสียรูปของช็อกโกแลต สามารถลดความน่าดึงดูดใจของผลิตภัณฑ์ในสายตาผู้บริโภค และก่อให้เกิดความสูญเสียทางเศรษฐกิจในระดับอุตสาหกรรม [6, 7] จึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาช็อกโกแลตทนความร้อนขึ้นมาสสำหรับจำหน่ายในประเทศที่มีสภาพอากาศร้อน ซึ่งแนวทางหลักในการพัฒนาช็อกโกแลตทนความร้อนสามารถจำแนกได้เป็น 3 แนวทางได้แก่ การเสริมสร้างโครงสร้างทางจุลภาคให้มีความแข็งแรงมากขึ้น การเติมพอลิเมอร์ที่สามารถยึดจับน้ำมันหรือไขมัน และการเพิ่มจุดหลอมเหลวของเฟสไขมัน [24]

การพัฒนาช็อกโกแลตทนความร้อนด้วยวิธีการเพิ่มจุดหลอมเหลวของเฟสไขมันได้รับความนิยมเป็นอย่างมากเนื่องจากสามารถเพิ่มปริมาณของแข็งในรูปผลึกได้ส่งผลให้ช็อกโกแลตมีความคงตัวทางความร้อนสูงขึ้นและสามารถคงรูปได้ดีภายใต้อุณหภูมิสูง [10, 24] นอกจากนี้ วิธีการนี้ยังสามารถรักษาคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของช็อกโกแลตได้อีกด้วย [4, 25] โดยทั่วไปทดแทนเนยโกโก้บางส่วนด้วยไขมันที่มีโครงสร้างไตรกลีเซอไรด์คล้ายคลึงกับเนยโกโก้ เช่น ไขมันเมล็ดมะม่วง เชียบัตเตอร์ ไขมันโกกัม ไขมันแชล เนยอิลิป และน้ำมันปาล์มส่วนกลาง (palm mid-fraction) ซึ่งเป็นไขมันที่มีปริมาณ SOS หรือ POP ในระดับสูง [15, 16] สหภาพยุโรปอนุญาตให้เติมไขมันดังกล่าวลงในช็อกโกแลตได้ไม่เกิน 5% ของน้ำหนักทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ [26] แต่สำหรับเฟสไขมันที่มีการผสมสัดส่วนของไตรกลีเซอไรด์ที่ไม่เหมาะสมอาจเกิดปัญหาความไม่เข้ากันและส่งผลให้เกิดการอ่อนตัวของช็อกโกแลตได้ [9, 22]

Tran et al. (2015) ได้รายงานไว้ว่าการเติมไขมันมะม่วงซึ่งจัดเป็นไขมันที่มี SOS ในปริมาณสูง (29.4-40%) ลงในช็อกโกแลตสามารถปรับปรุงความทนทานต่อความร้อนของช็อกโกแลตได้ [25] รวมทั้ง Hachiya et al. (1989) ได้รายงานไว้ว่าการเติมไขมันที่มี SOS ในปริมาณสูงลงในช็อกโกแลต จะช่วยเร่งการตกผลึกของเนยโกโก้ และทำให้ช็อกโกแลตมีสมบัติทางความร้อนที่เสถียรเพิ่มขึ้น [11] อย่างไรก็ตามการเติมไขมันชนิดต่าง ๆ ลงในช็อกโกแลตอาจส่งผลกระทบต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ในหลายด้าน เช่น พฤติกรรมการตกผลึกของไขมัน สมบัติทางความร้อน สัณฐานและลักษณะปรากฏของผลึก ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาพฤติกรรมการตกผลึกของไขมันดังกล่าวร่วมกับเนยโกโก้ก่อนเพื่อให้แน่ใจว่าไขมันที่จะใช้นั้นจะไม่ส่งผลในด้านลบต่อพฤติกรรมการตกผลึกของเนยโกโก้ [25]

แม้ว่าจะมีการรายงานไว้ว่าไขมันที่มี SOS ในปริมาณสูงสามารถประยุกต์ใช้ในการพัฒนาช็อกโกแลตทนความร้อนได้ แต่อย่างไรก็ตามยังไม่มีรายงานถึงการเติมไขมันที่มีไตรกลีเซอไรด์ชนิด SOS ในปริมาณสูงเกิน 50% ลงในช็อกโกแลต โดยเฉพาะในแง่ที่ว่าไขมันที่มี SOS ในปริมาณสูงระดับนั้นจะส่งผลต่อพฤติกรรมการตกผลึกของเนยโกโก้ในช็อกโกแลตอย่างไร ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของไขมันที่มี SOS ในปริมาณสูง (87% ขององค์ประกอบไขมัน) ต่อการตกผลึกของเนยโกโก้ โดยจะศึกษาพฤติกรรมการตกผลึกและการหลอมเหลว ปริมาณไขมันแข็งในรูปผลึก สัณฐานวิทยาของผลึก และสภาพอัญรูปผลึกของไขมันผสมระหว่างไขมันที่มี SOS ในปริมาณสูงกับเนยโกโก้ เพื่อให้เห็นถึงศักยภาพรวมถึงความเป็นไปได้ในการใช้ไขมันที่มี SOS ในปริมาณสูงดังกล่าวในการผลิตช็อกโกแลตทนความร้อนต่อไป

2. วิธีการศึกษา

2.1 การเตรียมไขมันผสม

ไขมัน SOS ที่ใช้ในการศึกษาในงานวิจัยนี้มีปริมาณ SOS สูงถึง 87% (ในที่นี้จะเรียกว่าไขมัน SOS) ซึ่งได้รับมาจาก Department of Integrated Biomedical and Life Sciences, Graduate School, Korea University ประเทศสาธารณรัฐเกาหลี ซึ่งถูกผลิตด้วย การทำอินเทอร์เอสเตอริฟิเคชันแบบใช้เอนไซม์ [19] และเนยโกโก้ (CB) เชิงพาณิชย์ถูกจัดซื้อจากบริษัท MC Foods จำกัด (กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย) สำหรับการเตรียมไขมันผสมจะทำการละลายไขมัน SOS และ CB ที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 10 นาทีและจะทำการผสมกันที่อัตราส่วนโดยน้ำหนัก (%wt) 5/95 และ 15/85 (ไขมัน SOS/CB) จากนั้นจะนำไปเก็บที่อุณหภูมิ 4°C จนกว่าจะนำตัวอย่างน้ำมันผสมไปทำการวิเคราะห์

2.2 ปริมาณของแข็งในรูปผลึก

ปริมาณของแข็งในรูปผลึกถูกวัดด้วยเครื่อง pulse-Nuclear Magnetic Resonance (p-NMR) spectrometer ตามวิธีมาตรฐาน AOCS Official Method Cd 16b-93 สำหรับการวัด SFC ของเนยโกโก้และไขมันชนิดใกล้เคียง [2] โดยละลายตัวอย่างน้ำมันผสมใส่ในหลอด NMR ให้มีความสูง 2 เซนติเมตร แล้วให้ความร้อนที่ 80°C เป็นเวลา 10 นาที เพื่อทำลายผลึกเดิม จากนั้นทำให้ตัวอย่างเกิดการตกผลึกในโครงสร้าง β โดยทำให้เย็นที่อุณหภูมิ 0°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นเก็บไว้ที่ 26°C เป็นเวลา 40 ชั่วโมง เพื่อให้ระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลเสมือน ซึ่งส่งผลให้ค่าปริมาณของแข็งในรูปผลึกมีความคงที่และทำให้เย็นลงที่ 0°C อีก 2 ชั่วโมง ก่อนปรับอุณหภูมิตัวอย่างให้อยู่ในอุณหภูมิที่ต้องการเป็นเวลา 60 นาที ก่อนทำการวิเคราะห์

2.3 สมบัติทางสัณฐานวิทยาของผลึก

ลักษณะปรากฏผลึกและโครงสร้างเครือข่ายผลึกของน้ำมันผสมที่ตกผลึกภายใต้สภาวะคงที่ที่อุณหภูมิ 25°C ถูกวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบโพลาไรซ์ (polarized light microscopy: PLM) ที่มีการติดตั้งกล้องดิจิทัลไว้ ละลายตัวอย่างน้ำมันผสมที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำตัวอย่างมาหยดบนสไลด์ 15 ไมโครลิตรและปิดด้วยกระจกปิดสไลด์ แล้วเก็บตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิ 25°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งใช้เลนส์ 20x เพื่อถ่ายภาพของผลึกไขมัน

2.4 สภาพอัญรูปของผลึก

ละลายตัวอย่างไขมันผสมที่ 80°C จากนั้นเทใส่แม่พิมพ์และปล่อยให้เย็นที่ 4°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นเก็บไว้ที่ 26°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง เพื่อให้ตัวอย่างไขมันตกผลึกในโครงสร้างผลึกที่เสถียรอย่างสมบูรณ์และก่อนการวิเคราะห์จะเย็นลงอีกครั้งที่ 4 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นวิเคราะห์ตัวอย่างไขมันโดยใช้ D8 Discover X-ray Diffraction (XRD) ควบคู่กับรังสี Cu-K α ที่มุม 2 θ 1.3–35° ด้วยอัตราการสแกน 1.5/นาที ตามระยะห่างสั้น (d) (Å) ที่ระบุโดยใช้ซอฟต์แวร์การเลี้ยวเบน EVA โครงสร้างที่แตกต่างกันถูกกำหนดตามลักษณะระยะห่างของเนยโกโก้: โครงสร้างฟอร์ม α (d = 4.15 Å); โครงสร้างฟอร์ม β' (d = 3.8–4.3 Å) และโครงสร้างฟอร์ม β (d = 4.5/4.6 Å)

2.5 เทอร์โมแกรมของการตกผลึกและการหลอมเหลว

วิเคราะห์เทอร์โมแกรมของการตกผลึกและการหลอมเหลวของตัวอย่างด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) ตามขั้นตอนของ AOCS [2] บรรจุตัวอย่างลงในภาชนะอะลูมิเนียม (Aluminum pan) 30 ไมโครลิตร และปิดผนึกให้แน่นหนา โดยจะให้ความร้อนกับตัวอย่างตั้งแต่ 20°C - 80°C ในอัตราเร็ว 30°C/นาที และคงไว้เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นจะถูกทำให้เย็นลงที่ -60°C ในอัตราเร็ว 10°C/นาที และคงไว้เป็นเวลา 30 นาที แล้วให้ความร้อนตัวอย่างในอัตราเร็ว 5°C/นาที ถึง 80°C ซึ่งจะถูกวิเคราะห์พฤติกรรมของการตกผลึกและการหลอมละลายของตัวอย่างด้วยซอฟต์แวร์ที่มาพร้อมกับเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC)

2.6 ความแข็ง

ละลายตัวอย่างไขมันผสมที่ 80°C จากนั้นเทใส่แม่พิมพ์และปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นเก็บไว้ที่ 26°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง เพื่อให้ตัวอย่างไขมันตกผลึกในโครงสร้างผลึกที่เสถียรอย่างสมบูรณ์และก่อนการวิเคราะห์จะเย็นลงอีกครั้งโดยการแช่เย็นที่ 4°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง สำหรับการวัดความแข็งของไขมันจะวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Texture Analyzer, Model TA-XT2i, Stable Micro System, UK) ด้วยหัววัดแบบเข็ม P/2N โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังนี้: ความสูง

ของตัวอย่าง 10 มิลลิเมตร, ความลึกในการแทงทะลุ 5 มิลลิเมตร, ความเร็วก่อนการทดสอบ (pre speed) 1 มิลลิเมตร/วินาที, ความเร็วระหว่างการทดสอบ (test speed) 2 มิลลิเมตร/วินาที และความเร็วหลังการทดสอบ (post speed) 10 มิลลิเมตร/วินาที

2.7 การวิเคราะห์ทางสถิติ

การทดลองทั้งหมดจะวิเคราะห์ทางสถิติโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Least Significant Difference (LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยทำการวิเคราะห์ทั้งหมด 3 ซ้ำด้วยโปรแกรม SPSS เวอร์ชัน 26.0

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 ปริมาณของแข็งในรูปผลึก

ปริมาณของแข็งในรูปผลึกของไขมันส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกายภาพและเนื้อสัมผัสของช็อกโกแลต [18] ไขมันผสมที่อัตราส่วนต่างๆ มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งในรูปผลึกใกล้เคียงกับเนยโกโก้ในทุกช่วงอุณหภูมิดังแสดงใน Figure 1 และตัวอย่างทั้งหมดมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และลดลงอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงกว่า 25°C และไม่พบของแข็งในรูปผลึกที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิร่างกายหรือสูงกว่า 37°C [12] โดยทั่วไปแล้วการเติมไขมันที่มีจุดหลอมเหลวสูงลงในช็อกโกแลตจะต้องมีปริมาณของแข็งในรูปผลึกคงเหลือที่อุณหภูมิร่างกายน้อยกว่า 3% เพื่อไม่ให้เกิดความรู้สึกเป็นไข (waxiness) [17]

นอกจากนี้จากลักษณะการหลอมเหลวของไขมันผสมทั้ง 2 อัตราส่วนแสดงให้เห็นว่ามีความเหมาะสมสำหรับการนำมาประยุกต์ใช้ในการพัฒนาช็อกโกแลตที่ทนต่ออุณหภูมิสูงเพื่อให้เหมาะสมสำหรับประเทศเขตร้อนและกึ่งร้อนได้เนื่องจากมีปริมาณของแข็งในรูปผลึกสูงกว่า 50% ที่อุณหภูมิ 25°C [4]

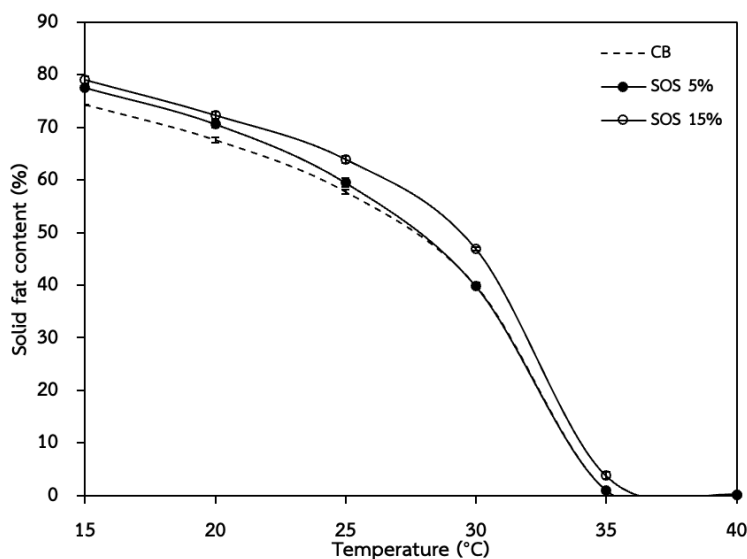


Figure 1 Solid fat content measured of Cocoa butter and the SOS/CB blends (5/95 and 15/85) measured from 15-40°C.

3.2 สมบัติทางสัณฐานวิทยาของผลึก

ภาพถ่ายทางสัณฐานวิทยาของผลึกของไขมันผสมที่อัตราส่วนต่างๆ และเนยโกโก้ แสดงใน Figure 2 ลักษณะสัณฐานวิทยาของผลึก CB มีลักษณะเป็นแบบทรงกลม (spherulite) ประกอบด้วยผลึกรูปเข็มที่โตร่วมกันจากจุดศูนย์กลางเดียวกันแผ่ออกในแนวรัศมี ลักษณะสัณฐานวิทยาของ CB สอดคล้องกับรายงานของ [5] สำหรับไขมันผสมที่ทั้ง 2 อัตราส่วนยังคงมีลักษณะของผลึกเป็นแบบทรงกลม แต่พบว่ามีความหนาแน่นและกระจายตัวอย่างหนาแน่นมากขึ้นเมื่อมีอัตราส่วนของไขมัน SOS สูงขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเกิดนิวเคลียสที่เพิ่มขึ้นและการเติบโตของผลึกที่ช้าลง การเปลี่ยนแปลงขนาดและสัณฐานวิทยาของผลึกของไขมันผสมเกิดจากองค์ประกอบของไตรกลีเซอไรด์ที่แตกต่างกัน [14] อย่างไรก็ตาม การที่สัณฐานวิทยาของผลึกของไขมันผสมเปลี่ยนไปเมื่อมีการเติมไขมัน SOS ในปริมาณมากขึ้นนั้นคาดว่าจะไม่ส่งผลกระทบต่อด้านเนื้อสัมผัสของช็อกโกแลต ทั้งนี้เป็นเพราะยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่จะ

ส่งผลต่อเนื้อสัมผัสของช็อกโกแลตได้มากกว่า (stronger influence) เช่น ปริมาณและขนาดของส่วนผสมที่เป็นอนุภาคของแข็งอื่นๆ เช่น น้ำตาล นมผง และ cocoa solids

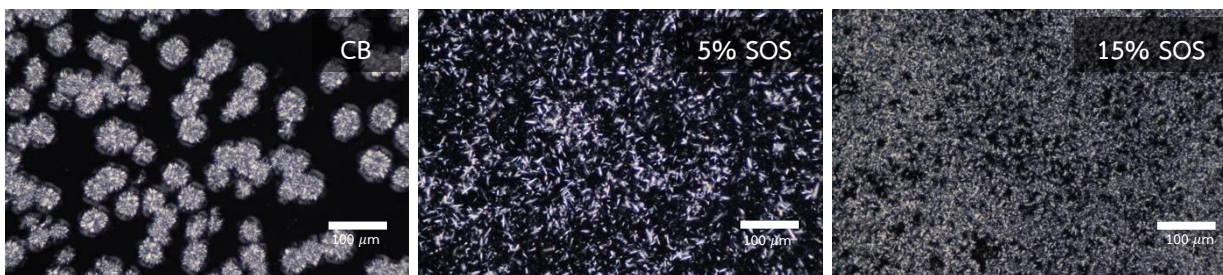


Figure 2 Crystal microstructure of Cocoa butter and the SOS/CB blends (5/95 and 15/85) observed under polarized light microscopy

3.3 สภาพัฒนารูปของผลึก

ผลการศึกษาลึ่วเบนรังสีเอ็กซ์แบบมุมกว้าง (WAXS) ของเนยโกโก้และไขมันผสม แสดงใน Figure 3 เนยโกโก้และไขมันผสมที่อัตราส่วน 5% และ 15% SOS แสดงจุดการลึ่วเบนที่เหมือนกัน โดยมีการแสดงจุดสูงสุดของการลึ่วเบนรังสีเอ็กซ์ที่สอดคล้องกับระยะห่าง (d-spacing) ของโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ในการจัดเรียงตัวเป็นผลึกที่ 4.60, 3.98, 3.86, 3.75 และ 3.67 Å ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับระยะห่างของโมเลกุลของโครงสร้างผลึก β_2 ตามที่ [21, 28] รายงานไว้ และนอกจากนี้ระดับการเติมที่ 15% เป็นระดับสูงสุดที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์ช็อกโกแลตตามที่สหภาพยุโรปกำหนด [4] และจากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าไขมันผสมระหว่างเนยโกโก้และไขมัน SOS มีศักยภาพที่จะสามารถนำมาประยุกต์ใช้ผลิตภัณฑ์ช็อกโกแลตได้ เนื่องจากโครงสร้างผลึก β_2 เป็นโครงสร้างที่เสถียร ซึ่งจะส่งผลให้ได้ช็อกโกแลตที่มีสมบัติที่ดีหลายประการ เช่น ความกรอบ ความมันวาว เนื้อสัมผัสที่เรียบเนียน [23]

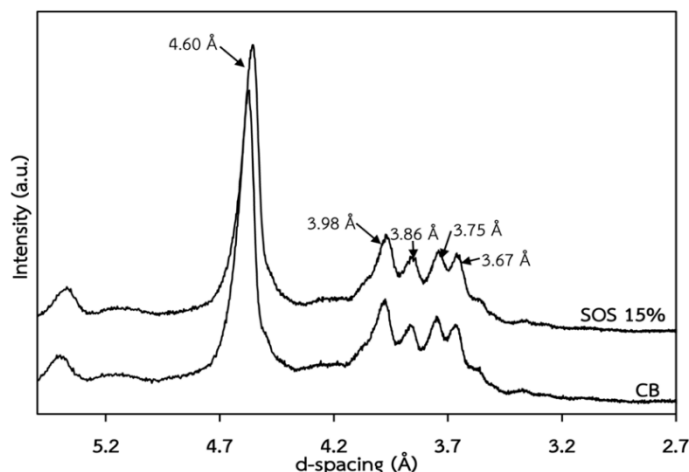


Figure 3 X-ray diffraction patterns in WAXS of cocoa butter and the SOS/CB blends (5/95 and 15/85).

3.4 เทอร์โมแกรมของการตกผลึกและการหลอมเหลว

เทอร์โมแกรมการตกผลึกของเนยโกโก้และไขมันผสมที่อัตราส่วนแตกต่างกันแสดงดังใน Figure 4a เนยโกโก้เริ่มตกผลึกที่ 15.14°C (T_{co}) และแสดงจุดสูงสุดการตกผลึกที่ 10.83°C และสำหรับไขมันผสมมีแนวโน้มเริ่มตกผลึกที่อุณหภูมิสูงขึ้นจาก 15.14°C เป็น 15.91°C เมื่ออัตราส่วนของไขมัน SOS เพิ่มสูงขึ้น เทอร์โมแกรมการหลอมเหลวของเนยโกโก้และไขมันผสมที่อัตราส่วนแตกต่างกันแสดงใน Figure 4b เนยโกโก้แสดงจุดสูงสุดการหลอมเหลวที่ 19.35°C พร้อมไหล่พิค (shoulder peak) ทางด้านอุณหภูมิต่ำกว่า ส่วนไขมันผสมมีเทอร์โมแกรมการหลอมเหลวคล้ายคลึงกับเนยโกโก้แต่มีแนวโน้มหลอมเหลวในอุณหภูมิที่สูงขึ้น และปรากฏไหล่พิคที่ชัดเจนขึ้นเมื่ออัตราส่วนของไขมัน SOS เพิ่มสูงขึ้น การที่ไขมันผสมมีอุณหภูมิของการตกผลึกและการหลอมเหลวสูงขึ้นมาจากของเนยโกโก้เนื่องมาจากไตรกลีเซอไรด์ชนิด SOS มีจุดหลอมเหลวสูง ซึ่งสอดคล้องกับไขมันผสม

ระหว่างเนยอิลิปที่มีปริมาณ SOS สูงและน้ำมันปาล์มส่วนกลางที่รายงานโดย Aumpai et al. (2022) ว่ามีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของการตกผลึกและการหลอมเหลวสูง [4] ซึ่งการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิดังกล่าวเพียงเล็กน้อยอาจจะช่วยให้ช็อกโกแลตทนความร้อนได้มากขึ้นโดยไม่ส่งผลให้พฤติกรรมการละลายในปากเปลี่ยนแปลงไปอย่างมีนัยสำคัญ

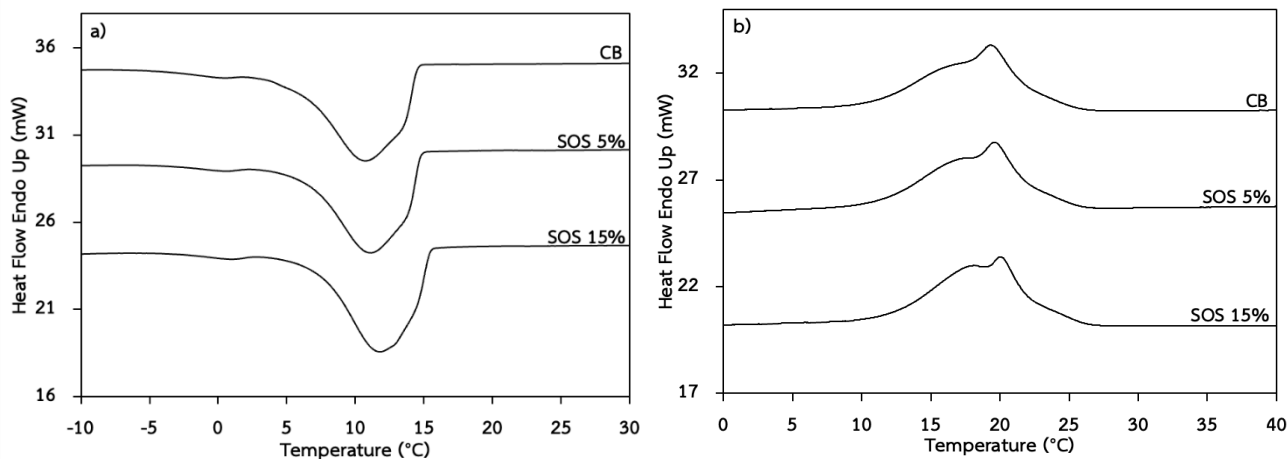


Figure 4 DSC thermograms of cocoa butter and the SOS/CB blends (5/95 and 15/85) (a) crystallization and (b) melting.

3.5 ความแข็ง

ความแข็งของเนยโกโก้และไขมันผสมที่อัตราส่วนแตกต่างกันแสดงใน Figure 5 ค่าความแข็งของเนยโกโก้ (212.39 ± 6.87 กรัม) และไขมันผสมที่อัตราส่วนที่มี SOS 5% ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) และค่าความแข็งของไขมันผสมที่อัตราส่วนต่างๆ มีแนวโน้มอ่อนตัวลงเมื่ออัตราส่วนของไขมัน SOS เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นไปได้ว่าไขมัน SOS นั้นมีองค์ประกอบไตรกลีเซอไรด์โดยรวมที่แตกต่างไปจากของเนยโกโก้ซึ่งมีไตรกลีเซอไรด์ชนิด POP, POS และ SOS เป็นส่วนประกอบหลัก ในขณะที่ไขมัน SOS ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีไตรกลีเซอไรด์ชนิด SOS เป็นส่วนประกอบหลัก ความแตกต่างดังกล่าวจึงส่งผลให้เกิดความไม่เข้ากันบางส่วนของไขมันทั้ง 2 ชนิดเนื่องจาก eutectic effect ส่งผลให้ไขมันผสมที่มี SOS ในปริมาณ 15% แม้จะมีการตกผลึกในปริมาณที่มากกว่า (ทำให้มีปริมาณของแข็งในรูปผลึกของไขมันสูงกว่าและมีอุณหภูมิของการตกผลึกและการหลอมเหลวสูง) แต่อาจมีความแข็งแรงของโครงข่ายผลึกที่ต่ำกว่า จึงส่งผลให้มีค่าความแข็งที่ต่ำกว่า [21]

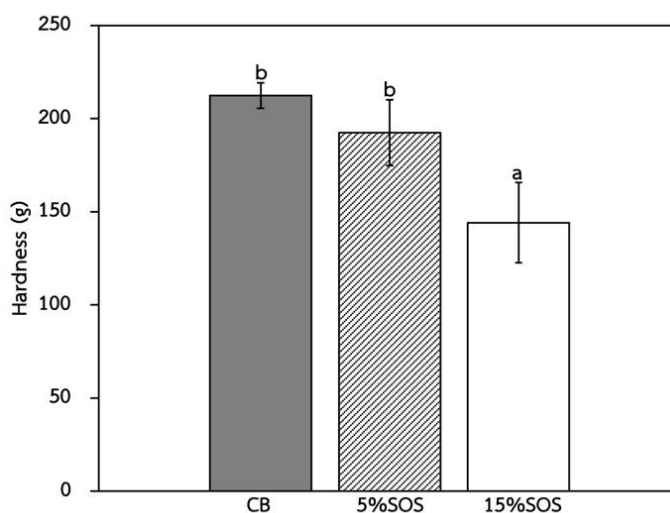


Figure 5 The hardness of cocoa butter and the SOS/CB blends (5/95 and 15/85) measured at 26°C after tempering. Values are expressed as mean \pm SD with difference letters indicating significant differences ($p < 0.05$).

4. สรุป

จากการศึกษาผลของการตกผลึกของไขมัน SOS ต่อเนยโกโก้แสดงให้เห็นว่าไขมันผสมทุกอัตราส่วนมีพฤติกรรมการตกผลึกและการหลอมเหลวคล้ายคลึงกับเนยโกโก้ และไม่ส่งผลกระทบต่อพหุคูณการตกผลึกของเนยโกโก้ นอกจากนี้ค่าปริมาณของแข็งในรูปผลึกมีแนวโน้มใกล้เคียงกันในทุกอุณหภูมิและไม่พบของแข็งในรูปผลึกที่อุณหภูมิสูงกว่า 37°C ถึงแม้ว่าสมบัติทางสัณฐานวิทยาผลึกของไขมันผสมจะแสดงความแตกต่างเล็กน้อยในแง่ของขนาดและการกระจายตัว แต่จากการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์แบบมุมกว้าง (WAXS) ยืนยันว่าทั้งเนยโกโก้และไขมันผสมแสดงโครงสร้างผลึกแบบ β_2 ซึ่งเป็นโครงสร้างที่เหมาะสมต่อคุณภาพของช็อกโกแลต ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าไขมัน SOS มีศักยภาพที่จะใช้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ช็อกโกแลตทนความร้อนได้ โดยปริมาณสูงสุดที่เติมไม่ควรเกิน 15% ในเฟสไขมันของช็อกโกแลต แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังคงมีข้อจำกัดบางประการที่ควรพิจารณา เนื่องจากไขมัน SOS มีกระบวนการผลิตที่ค่อนข้างซับซ้อนและมีปริมาณจำกัด ดังนั้นการศึกษานี้จึงมุ่งเน้นเฉพาะระดับการเติมที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริง ซึ่งอาจยังไม่ครอบคลุมพฤติกรรมในทุกช่วงความเข้มข้นของไขมันผสมระหว่างเนยโกโก้และไขมัน SOS

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คณะอาจารย์ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร และบุคลากรจากภาควิชาชีวการแพทย์และวิทยาศาสตร์ชีวภาพแบบบูรณาการ มหาวิทยาลัยเกาหลีที่ให้การสนับสนุนและความอนุเคราะห์เป็นอย่างดี จนทำให้งานนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Afoakwa, E. O. 2016. *Chocolate science and technology*. John Wiley & Sons.
- [2] AOCS, F. D. 1998. Official methods and recommended practices of the American Oil Chemists' Society. AOCS, 5: 2-93.
- [3] Asep, E. K., Jinap, S., Tan, T. J., Russly, A. R., Harcharan, S., & Nazimah, S. A. H. 2008. The effects of particle size, fermentation and roasting of cocoa nibs on supercritical fluid extraction of cocoa butter. *Journal of Food Engineering*, 85(3): 450-458.
- [4] Aumpai, K., Tan, C. P., Huang, Q., & Sonwai, S. 2022. Production of cocoa butter equivalent from blending of illipe butter and palm mid-fraction. *Food Chem*, 384, 132535.
- [5] Biswas, N., Cheow, Y. L., Tan, C. P., Kanagaratnam, S., & Siow, L. F. 2017. Cocoa butter substitute (CBS) produced from palm mid-fraction/palm kernel oil/palm stearin for confectionery fillings. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 94(2): 235-245.
- [6] Briones, V., & Aguilera, J. M. 2005. Image analysis of changes in surface color of chocolate. *Food Research International*, 38(1): 87-94.
- [7] da Silva, T. L. T., Grimaldi, R., & Gonçalves, L. A. G. 2017. Temperature, time and fat composition effect on fat bloom formation in dark chocolate. *Food Structure*, 14: 68-75.
- [8] Grand View Research. 2024. *Asia Pacific chocolate market size, share & trends analysis report*. Retrieved from <https://www.grandviewresearch.com/horizon/outlook/chocolate-market/asia-pacific>
- [9] Ghazani, S. M., & Marangoni, A. G. (2018). The ternary solid state phase behavior of triclinic POP, POS, and SOS and its relationship to CB and CBE properties. *Crystal Growth & Design*, 19(2): 704-713.
- [10] Ghazani, S. M., Zou, L., Rakitsky, W. G., & Marangoni, A. G. 2018. Algal butter, a novel cocoa butter equivalent: chemical composition, physical properties, and functionality in chocolate. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 95(10): 1239-1251.
- [11] Hachiya, I., Koyano, T., & Sato, K. 1989. Seeding effects on solidification behavior of cocoa butter and dark chocolate. I. Kinetics of solidification. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 66(12): 1757-1762.

- [12] Haque Akanda, M. J., MR, N., FS, A., Shaarani, S., Mamat, H., Lee, J. S., AH, M., Selamat, J., Khan, F., & Matanjun, P. 2020. Hard fats improve the physicochemical and thermal properties of seed fats for applications in confectionery products. *Food Reviews International*, 36(6): 601-625.
- [13] Jahurul, M. H., Zaidul, I. S., Nik Norulaini, N. A., Sahena, F., Abedin, M. Z., Mohamed, A., & Mohd Omar, A. K. 2014. Hard cocoa butter replacers from mango seed fat and palm stearin. *Food Chem*, 154: 323-329.
- [14] Jahurul, M. H. A., Zaidul, I. S. M., Norulaini, N. A. N., Sahena, F., Abedin, M. Z., Ghafoor, K., & Mohd Omar, A. K. 2014. Characterization of crystallization and melting profiles of blends of mango seed fat and palm oil mid-fraction as cocoa butter replacers using differential scanning calorimetry and pulse nuclear magnetic resonance. *Food Research International*, 55: 103-109.
- [15] Jin, J., Akoh, C., Jin, Q., & Wang, X. 2018. Preparation of mango kernel fat stearin-based hard chocolate fats via physical blending and enzymatic interesterification. *Lwt*, 97.
- [16] Jin, J., Jin, Q., Wang, X., & Akoh, C. C. 2019. Improving heat and fat bloom stabilities of “dark chocolates” by addition of mango kernel fat-based chocolate fats. *Journal of Food Engineering*, 246: 33-41.
- [17] Kadivar, S., De Clercq, N., Mokbul, M., & Dewettinck, K. 2016. Influence of enzymatically produced sunflower oil based cocoa butter equivalents on the phase behavior of cocoa butter and quality of dark chocolate. *LWT - Food Science and Technology*, 66: 48-55.
- [18] Kang, K. K., Jeon, H., Kim, I.-H., & Kim, B. H. 2013. Cocoa butter equivalents prepared by blending fractionated palm stearin and shea stearin. *Food Science and Biotechnology*, 22(2): 347-352.
- [19] Lee, C., Sonwai, S., Lee, J., Kim, B. H., Kim, H.-W., & Kim, I.-H. 2025. Preparation of high-purity 1,3-distearoyl-2-oleoylglycerol (StOSt) via a two-step enzymatic interesterification combined with two-step solvent fractionation. *Journal of Biotechnology*, 408: 50-60.
- [20] Loisel, C., Keller, G., Lecq, G., Bourgaux, C., & Ollivon, M. 1998. Phase transitions and polymorphism of cocoa butter. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 75(4): 425-439.
- [21] Marangoni, A., & McGauley, S. 2002. Relationship between Crystallization Behavior and Structure in Cocoa Butter. *Crystal Growth & Design - CRYST GROWTH DES*, 3.
- [22] Smith, K. W., Bhaggan, K., & Talbot, G. 2013. Phase behavior of symmetrical monounsaturated triacylglycerols. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 115(8): 838-846.
- [23] Sonwai, S., Kaphueakngam, P., & Flood, A. 2014. Blending of mango kernel fat and palm oil mid-fraction to obtain cocoa butter equivalent. *Journal of Food Science and Technology*, 51(10): 2357-2369.
- [24] Stortz, T., & Marangoni, A. 2011. Heat resistant chocolate. *Trends in Food Science & Technology - TRENDS FOOD SCI TECHNOL*, 22: 201-214.
- [25] Tran, P. D., Van de Walle, D., Hinneh, M., Delbaere, C., De Clercq, N., Tran, D. N., & Dewettinck, K. 2015. Controlling the stability of chocolates through the incorporation of soft and hard StOSt-rich fats. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 117(11): 1700-1713.
- [26] Union, E. 2000. Directive 2000/36/EC of the European Parliament and of the Council relating to cocoa and chocolate products intended for human consumption. *Off. J. Eur. Communities EG*, 197: 19-25.
- [27] Wille, R., & Lutton, E. 1966. Polymorphism of cocoa butter. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 43(8): 491-496.
- [28] Yao, Y., Liu, W., Zhang, D., Li, R., Zhou, H., Li, C., & Wang, S. 2020. Dynamic changes in the triacylglycerol composition and crystallization behavior of cocoa butter. *Lwt*, 129: 109490.

ความคงตัวของระหว่างการเก็บรักษาของเมล็ดโกโก้อบแห้งบรรจุภายใต้สภาวะสุญญากาศ:
การเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางเคมี สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และจุลชีววิทยา
Storage Stability of Vacuum-Packed Dried Cocoa Beans: Changes in Chemical,
Bioactive, and Microbiological Quality

จุฑาภรณ์ ลิ้มสุวรรณมณี¹ จันทิรา วงศ์วิเชียร^{1*} และ จตุพร คงทอง¹
Jutaporn Limsuwanmanee¹, Chantira Wongwichian^{1,*} and Jatuporn Khongtong¹

¹สาขาวิชาวิทยาการการประกอบอาหาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช จังหวัดนครศรีธรรมราช 80280 ประเทศไทย

¹ Culinary Science Program, Faculty of Science and Technology, Nakhon Si Thammarat Rajabhat University, Nakhon Si Thammarat Province, 80280, Thailand

*Corresponding author: Chantira Wongwichian, e-mail address: chantira_won@nstru.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของระยะเวลาการเก็บรักษาต่อองค์ประกอบทางเคมี สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ องค์ประกอบกรดไขมัน คุณภาพทางจุลชีววิทยาของเมล็ดโกโก้อบแห้ง โดยทำการเก็บรักษาเมล็ดโกโก้อบแห้งในสภาวะสุญญากาศที่อุณหภูมิห้อง และทำการวิเคราะห์คุณภาพตัวอย่างในวันที่ 0, 30, 60 และ 90 ของการเก็บรักษา ผลการศึกษาพบว่าองค์ประกอบทางเคมี รวมถึงปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระของเมล็ดโกโก้อบแห้งมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาการเก็บรักษาอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยพบปริมาณสารประกอบฟีนอลิก เริ่มต้นเท่ากับ 93.33 mg GAE/g dry weight และลดลงเหลือ 65.25 mg GAE/g dry weight ในวันสุดท้ายของการเก็บรักษา ซึ่งมีความสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของค่า IC₅₀ จากการทดสอบด้วยวิธี DPPH จาก 0.82 mg/mL เป็น 0.94 mg/mL ภายใน 90 วันของการเก็บรักษา ซึ่งอาจเกิดจากการเสื่อมสภาพของสารสำคัญอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาออกซิเดชันและการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในระหว่างการเก็บรักษา ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบกรดไขมันส่วนใหญ่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามระยะเวลาการเก็บรักษา สำหรับการประเมินคุณภาพทางจุลชีววิทยาพบว่าปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดของเมล็ดโกโก้อบแห้งอยู่ในระดับที่ไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานตลอดระยะเวลาการศึกษา อย่างไรก็ตามตามตรวจพบปริมาณยีสต์และราที่เกินเกณฑ์มาตรฐานเมื่อสิ้นสุดการเก็บรักษาเป็นเวลา 90 วัน ซึ่งบ่งชี้ว่าการเก็บรักษาเป็นระยะเวลานานอาจส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยทางจุลชีววิทยาของผลิตภัณฑ์ ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาการเก็บรักษาที่มีผลต่อคุณภาพทางเคมีและจุลชีววิทยาของเมล็ดโกโก้อบแห้ง ข้อมูลที่ได้จากการศึกษานี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการกำหนดระยะเวลาการเก็บรักษาที่เหมาะสมของเมล็ดโกโก้อบแห้ง เพื่อรักษาคุณภาพและความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์ในระหว่างการเก็บรักษา

คำสำคัญ: เมล็ดโกโก้อบแห้ง, การเก็บรักษา, สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ, กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ

Abstract

This study aimed to evaluate the effect of storage duration on the chemical composition, bioactive compounds, antioxidant activity, fatty acid profile, and microbiological quality of dried cocoa beans. Samples were vacuum-packed and stored at room temperature, and analyses were conducted on days 0, 30, 60, and 90. The results showed that chemical composition, particularly bioactive compounds and antioxidant activity, decreased significantly during storage ($p < 0.05$). The total phenolic content declined from 93.33 to 65.25 mg GAE/g dry weight over 90 days. A similar trend was observed in antioxidant activity, as indicated by an increase in IC₅₀ values from 0.82 to 0.94 mg/mL based on the DPPH assay. These changes were likely associated with oxidative degradation and other chemical reactions occurring during storage. In contrast, most fatty acids showed a slight increase over time. Total microbial counts remained within acceptable limits throughout the storage period. However, yeast and mold levels exceeded standard limits after 90 days, suggesting potential risks to product safety during extended storage. Overall, storage duration significantly affected the chemical and microbiological quality of dried cocoa beans. The findings provide useful information for determining appropriate storage conditions and shelf life to maintain product quality and safety.

Keywords: Dried cocoa beans, Storage, Bioactive compounds, Antioxidant activity

1. บทนำ

โกโก้ (*Theobroma cacao* L.) เป็นพืชเศรษฐกิจสำคัญที่ใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตช็อกโกแลตและผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิด โดยเมล็ดโกโก้เป็นแหล่งสำคัญของสารอาหารและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง เช่น โพลีฟีนอล ฟลาโวนอยด์ เมทิลแซนทีน รวมถึงสารต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อการส่งเสริมสุขภาพและการป้องกันโรคต่างๆ [1,2] นอกจากนี้ยังพบว่าเมล็ดโกโก้มีองค์ประกอบของกรดไขมันที่สำคัญ เช่น กรดโอเลอิก กรดสเตียริก และกรดปาล์มมิก ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของไขมันโกโก้และมีบทบาทต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ช็อกโกแลต [3] สารประกอบโพลีฟีนอลในโกโก้ โดยเฉพาะกลุ่มฟลาโวนอล เช่น catechin และ epicatechin รวมถึง procyanidins เป็นสารสำคัญที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูง และมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติทางชีวภาพหลายประการ เช่น การต้านการอักเสบ การป้องกันโรคหัวใจและหลอดเลือด และการลดความเสี่ยงของโรคเรื้อรัง [2] อย่างไรก็ตาม คุณภาพของเมล็ดโกโก้ไม่ได้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีเพียงอย่างเดียว แต่ยังได้รับอิทธิพลจากหลายปัจจัยตั้งแต่กระบวนการเพาะปลูกจนถึงกระบวนการหลังการเก็บเกี่ยว ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อองค์ประกอบทางเคมีและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของเมล็ดโกโก้ ได้แก่ สายพันธุ์ของโกโก้ สภาพภูมิอากาศและดินในพื้นที่ปลูก ระดับความสุกของผลโกโก้ รวมถึงกระบวนการหลังการเก็บเกี่ยว เช่น การหมัก การอบแห้ง และการเก็บรักษา [2,4] กระบวนการเหล่านี้มีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนากลิ่นและรสชาติของโกโก้ รวมทั้งส่งผลต่อปริมาณสารประกอบทางชีวภาพที่มีอยู่ในเมล็ดโกโก้

กระบวนการหลังการเก็บเกี่ยวของเมล็ดโกโก้มีผลอย่างมากต่อคุณภาพทางเคมีและคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวสามารถก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบฟีนอลิก กรดไขมัน และสารประกอบทางชีวภาพอื่นๆ ซึ่งส่งผลต่อกลิ่น รสชาติ และคุณค่าทางโภชนาการของโกโก้ [5] นอกจากนี้ระยะเวลาการเก็บรักษายังเป็นอีกปัจจัยสำคัญที่อาจส่งผลกระทบต่อความสัมพันธ์ของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ การเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบทางเคมี และคุณภาพทางจุลชีววิทยาของเมล็ดโกโก้ การเก็บรักษาผลิตภัณฑ์จากโกโก้เป็นระยะเวลานานอาจทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบสำคัญส่งผลให้ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระลดลง รวมถึงอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบกรดไขมันและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ [3,6] ในขณะเดียวกัน การควบคุมคุณภาพทางจุลชีววิทยาในระหว่างการเก็บรักษาถือเป็นปัจจัยสำคัญต่อความปลอดภัยของอาหาร เนื่องจากเมล็ดโกโก้อาจปนเปื้อนจุลินทรีย์จากสิ่งแวดล้อมในระหว่างกระบวนการผลิตและการเก็บรักษา จุลินทรีย์บางชนิด เช่น ยีสต์ รา และแบคทีเรีย สามารถเจริญเติบโตได้ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมและอาจก่อให้เกิดการเสื่อมคุณภาพของผลิตภัณฑ์หรือการผลิตสารพิษจากเชื้อรา ซึ่งส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยของอาหาร [7] การควบคุมคุณภาพทางจุลชีววิทยาในระหว่างการเก็บรักษาจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการรักษาความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์โกโก้ นอกจากนี้คุณภาพทางเคมีและจุลชีววิทยาแล้ว คุณภาพทางประสาทสัมผัสยังเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการยอมรับของผู้บริโภค โดยลักษณะทางประสาทสัมผัสของโกโก้ เช่น กลิ่น รสชาติ สี และเนื้อสัมผัส อาจได้รับอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบทางเคมีที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการแปรรูปและการเก็บรักษา [8]

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการเก็บรักษาเมล็ดโกโก้ส่วนใหญ่มีมุมมองไปที่ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการหมักหรือการแปรรูปในรูปแบบต่างๆ ขณะที่ข้อมูลเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของเมล็ดโกโก้อบแห้ง โดยเฉพาะภายใต้สภาวะบรรจุแบบสุญญากาศยังมีอยู่อย่างจำกัด นอกจากนี้ ยังขาดข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับผลของระยะเวลาการเก็บรักษาภายใต้สภาวะดังกล่าวต่อองค์ประกอบทางเคมี สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และความปลอดภัยทางจุลชีววิทยาของเมล็ดโกโก้อบแห้ง

ดังนั้น การศึกษาการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบทางเคมี สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ และคุณภาพทางจุลชีววิทยาของเมล็ดโกโก้อบแห้งในระหว่างการเก็บรักษาจึงมีความสำคัญ โดยเฉพาะภายใต้สภาวะสุญญากาศซึ่งอาจช่วยชะลอการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและการเจริญของจุลินทรีย์ ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาดังกล่าวสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการกำหนดระยะเวลาการเก็บรักษาที่เหมาะสม เพื่อรักษาคุณภาพและคุณค่าทางโภชนาการของเมล็ดโกโก้ รวมทั้งช่วยสนับสนุนการพัฒนาอุตสาหกรรมโกโก้และผลิตภัณฑ์โกโก้ให้มีมาตรฐานและคุณภาพที่สูงขึ้น

2. วิธีการศึกษา

2.1 การสุ่มตัวอย่างและการเตรียมตัวอย่าง

ผลโกโก้ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นสายพันธุ์ลูกผสม สุ่มตัวอย่างผลโกโก้จากสวนโกโก้ในพื้นที่ 15 ไร่ ในเขตอำเภอท่าศาลา จังหวัดนครศรีธรรมราช โดยสุ่มเก็บตัวอย่างผลโกโก้ที่มีลักษณะปลอดภัย และได้รับการดูแลอย่างดี จำนวน 15 ต้นๆ ละ 3 ผล แต่ลดต้นเลือกเก็บผลโกโก้ระยะสุกที่ 4 (fully ripe) โดยสังเกตดูสีผิวของเปลือกผลโกโก้ด้วยสายตาร่วมกับการพิจารณาอายุของผล

โกโก้หลังจากติดผล อายุประมาณ 5-6 เดือน ผลโกโก้มีเปลือกสีเหลืองทั้งผล ทำการเตรียมตัวอย่างโดยนำตัวอย่างผลโกโก้มาล้างทำความสะอาด ปอกเปลือก คว้านเมล็ด จากนั้นนำเมล็ดโกโก้ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 55°C จนมีความชื้นไม่เกิน 7% ซึ่งตัวอย่างเมล็ดโกโก้อบแห้งลงในบรรจุภัณฑ์พลาสติกชนิดลามิเนต (Nylon/LLDPE) ฤกษ์ละ 100 กรัม และทำการบรรจุแบบสุญญากาศ เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง (28±2°C) ทำการสุ่มตัวอย่างในวันที่ 0, 30, 60 และ 90 ของการเก็บรักษาเพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงคุณภาพ งานวิจัยนี้ได้ใช้เมล็ดโกโก้ที่ไม่ผ่านการหมักเพื่อลดความแปรปรวนของตัวอย่างเริ่มต้น และทำให้สามารถแยกผลของระยะเวลาการเก็บรักษาออกจากผลของกระบวนการหมักได้อย่างชัดเจน เนื่องจากการหมักเป็นกระบวนการที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีอย่างมีนัยสำคัญและไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้เมล็ดโกโก้ที่ไม่ผ่านการหมักมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในระดับสูง ซึ่งเหมาะสมสำหรับใช้เป็นตัวอย่างตั้งต้นในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงและการเสื่อมสภาพของสารสำคัญระหว่างการเก็บรักษา แม้ว่าการหมักจะเป็นขั้นตอนมาตรฐานในอุตสาหกรรมโกโก้ แต่เมล็ดโกโก้ที่ไม่ผ่านการหมักกำลังได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นในผลิตภัณฑ์เชิงสุขภาพและอาหารฟังก์ชัน เนื่องจากมีปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพสูง ดังนั้นการศึกษาความคงตัวของระหว่างการเก็บรักษาของวัตถุดิบประเภทนี้จึงมีความสำคัญในเชิงการประยุกต์ใช้

2.2 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางเคมี สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และจุลินทรีย์

องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ปริมาณความชื้น โปรตีน ไขมัน เถ้า และคาร์โบไฮเดรต ตามวิธีของ AOAC [9] ปริมาณน้ำอิสระ (a_w) โดยใช้เครื่องวัดค่าวอเตอร์แอกติวิตี องค์ประกอบของกรดไขมัน ตามวิธีของ AOAC [9] สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ได้แก่ ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก [10] ปริมาณฟลาโวนอยด์ โดยวิธี aluminum chloride colorimetry [11] วิเคราะห์ปริมาณทีโอโบรมีนโดยกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ ด้วยวิธี In-house method based on AOAC [9] 980.14 วิเคราะห์ปริมาณคาเฟอีนโดยบริษัท ห้องปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย) จำกัด ด้วยวิธี In-house method based on Compendium of method for food analysis [12] กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ ได้แก่ DPPH [13] ABTS [14] และ FRAP [15] วิเคราะห์ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด ตามวิธีของ AOAC [9] ยีสต์และรา โดยวิธี BAM [16]

2.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

งานวิจัยนี้วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely randomized design : CRD) ดำเนินการทดลอง 3 ซ้ำ วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างสิ่งทดลองโดยใช้ Duncan's multiple range test ซึ่งกำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ $p < 0.05$ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

จากการศึกษาก่อนหน้านี้พบว่าผลโกโก้ในระยะที่ 4 มีปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สำคัญในเมล็ดโกโก้ ได้แก่ สารประกอบฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ ทีโอโบรมีน คาเฟอีน และ กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระสะสมในปริมาณสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับผลโกโก้ในระยะอื่นๆ ทางผู้วิจัยจึงคัดเลือกผลโกโก้ระยะที่ 4 มาทำการศึกษาความคงตัวของเมล็ดโกโก้ในระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 90 วัน ผลการศึกษามีดังต่อไปนี้

3.1 องค์ประกอบทางเคมี

ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดโกโก้อบแห้งในระหว่างการเก็บรักษาเป็นเวลา 90 วัน แสดงดัง Table 1 ค่า a_w และปริมาณความชื้นของเมล็ดโกโก้ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา โดยค่า a_w เริ่มต้นเท่ากับ 0.56 ± 0.01 และปริมาณความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ $5.70 \pm 0.01\%$ (โดยน้ำหนักแห้ง) แสดงถึงความคงตัวของสถานะความชื้นในระบบสุญญากาศ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของเมล็ดโกโก้อบแห้งที่กำหนดให้มีความชื้นไม่เกิน 7% เมล็ดโกโก้ที่มีความชื้นสูงอาจเอื้อต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ เช่น แบคทีเรีย ยีสต์ และรา ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพของเมล็ดโกโก้ [17] โดยทั่วไปการลดความชื้นของอาหารให้มีค่า a_w ต่ำกว่า 0.60 สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และช่วยยืดอายุการเก็บรักษาได้ [18] นอกจากนี้ บรรจุภัณฑ์ยังเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยยืดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ โดยการบรรจุแบบสุญญากาศร่วมกับบรรจุภัณฑ์ลามิเนตที่มีอะลูมิเนียมพอลิเมอร์สามารถชะลอการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน รวมทั้งป้องกันการซึมผ่านของแก๊สและความชื้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ การเก็บรักษาในถุงสุญญากาศยังถูกนำมาใช้เพื่อรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ประเภทธัญพืชและเมล็ดพืชหลายชนิด [19]

ปริมาณไขมันของเมล็ดโกโก้อบแห้งลดลงเล็กน้อยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในช่วงเริ่มต้นของการเก็บรักษา ก่อนจะคงที่ในช่วงหลัง ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Jonfia-Essien & Tettey [20] ที่พบว่าปริมาณไขมันของเมล็ดโกโก้มีแนวโน้ม

ลดลงเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้น การลดลงของปริมาณไขมันอาจเกิดจากกิจกรรมของเอนไซม์ไลเปส ซึ่งทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายไขมันสะสมที่อยู่ในรูปของไตรกลีเซอไรด์ ให้แตกตัวเป็นกลีเซอรอล และกรดไขมันอิสระ ส่งผลให้ปริมาณไขมันรวมในเมล็ดลดลง โดยทั่วไปเมล็ดพืชที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระสูงกว่า 2% มักบ่งชี้ถึงการเสื่อมคุณภาพของเมล็ดในระดับสูง นอกจากนี้การปนเปื้อนของเชื้อรายังสามารถเร่งกระบวนการเสื่อมคุณภาพของเมล็ดได้ เนื่องจากจุลินทรีย์ดังกล่าวสามารถผลิตเอนไซม์ที่ช่วยย่อยสลายไขมันให้กลายเป็นกรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้คุณภาพของเมล็ดลดลงระหว่างการเก็บรักษา ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของกรดไขมันอิสระยังถือเป็นตัวบ่งชี้สำคัญของการเสื่อมสภาพของเมล็ดพืชในระหว่างการเก็บรักษา [21] อย่างไรก็ตาม ปริมาณไขมันอยู่ในช่วง 41.62–41.94% (โดยน้ำหนักแห้ง) ซึ่งต่ำกว่าช่วงที่รายงานโดย Afoakwa [8] เล็กน้อย (45–55%) ความแตกต่างดังกล่าวอาจเกิดจากความแตกต่างของสายพันธุ์ แหล่งปลูก หรือกระบวนการหลังการเก็บเกี่ยว นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณไขมันลดลงอย่างมีนัยสำคัญระหว่างการเก็บรักษา ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับกระบวนการออกซิเดชันของไขมันหรือการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในเมล็ด

ในส่วนของปริมาณโปรตีน พบว่ามีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องจากวันแรกถึงวันสุดท้ายของการเก็บรักษาอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) (Table 1) โดยพบว่าปริมาณโปรตีนลดลงจาก 14.65% (โดยน้ำหนักแห้ง) ในวันแรกของการเก็บรักษาเป็น 14.18% (โดยน้ำหนักแห้ง) ในวันที่ 30 และลดลงอย่างต่อเนื่องจนเหลือ 13.83% (โดยน้ำหนักแห้ง) ในวันสุดท้ายของการเก็บรักษา แต่ยังคงอยู่ในช่วงใกล้เคียงกับรายงานของ Afoakwa [8] (10–15%)

แนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับรายงานของ Rawel et al. [21] ที่พบว่าปริมาณโปรตีนของเมล็ดโกโก้ลดลงระหว่างการเก็บรักษา การลดลงของโปรตีนอาจเกิดจากการสลายตัวของโปรตีนภายในเมล็ดโกโก้เป็นโพลิโกเปปไทด์และกรดอะมิโนอิสระ [23] นอกจากนี้ การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโพลีฟีนอลและโปรตีนจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันยังอาจส่งผลให้ปริมาณโปรตีนลดลงได้ [24] รวมทั้งการทำงานของเอนไซม์โปรตีเอสที่ยังคงอยู่ในเมล็ดโกโก้ระหว่างการเก็บรักษาอาจเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการลดลงของโปรตีน [23]

สำหรับองค์ประกอบทางเคมีอื่น ๆ พบว่าปริมาณคาร์โบไฮเดรตและเยื่อใยในเมล็ดโกโก้บ่มแห้งมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ระหว่างการเก็บรักษา โดยปริมาณคาร์โบไฮเดรตลดลงจาก $26.02 \pm 0.01\%$ เป็น $25.13 \pm 0.01\%$, $23.86 \pm 0.02\%$ และ $22.54 \pm 0.02\%$ (โดยน้ำหนักแห้ง) ตามลำดับ ขณะที่ปริมาณเยื่อใยลดลงจาก $14.11 \pm 0.11\%$ เป็น $13.40 \pm 0.03\%$, $12.05 \pm 0.02\%$ และ $11.36 \pm 0.01\%$ (โดยน้ำหนักแห้ง) ตามลำดับ นอกจากนี้ ปริมาณเถ้ายังมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในช่วง 30 วันแรกของการเก็บรักษา โดยมีค่าเริ่มต้นเท่ากับ $3.59 \pm 0.01\%$ (โดยน้ำหนักแห้ง) และเปลี่ยนแปลงเป็น $3.77 \pm 0.02\%$ (โดยน้ำหนักแห้ง) หลังการเก็บรักษา 30 วัน การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวน่าจะเกิดจากผลเชิงสัมพัทธ์อันเนื่องมาจากการลดลงขององค์ประกอบอื่น เช่น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และใยอาหารระหว่างการเก็บรักษา ส่งผลให้สัดส่วนของเถ้าเพิ่มขึ้นเมื่อพิจารณาในรูปเปอร์เซ็นต์

3.2 องค์ประกอบของกรดไขมัน

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของกรดไขมันในเมล็ดโกโก้บ่มแห้งระหว่างการเก็บรักษา 90 วัน แสดงดัง Table 2 พบว่ากรดไขมันหลัก ได้แก่ stearic acid, oleic acid และ palmitic acid ไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา ($p > 0.05$) แสดงถึงความคงตัวของโครงสร้างไขมันหลักภายใต้สภาวะสุญญากาศ ตามรายงานของ Torres-Moreno et al. [3] ระบุว่าไขมันโกโก้ทั่วไปจะมี stearic acid อยู่ที่ 33–37%, oleic acid 30–37% และ palmitic acid 24–30% linoleic acid และ arachidic acid ลดลงอย่าง มีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) อย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาการเก็บรักษา โดย linoleic acid ลดลงจาก 2.57 เป็น 2.45% (โดยน้ำหนักแห้ง) บ่งชี้ถึงความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรดไขมันไม่อิ่มตัว กรดไขมันรองบางชนิด ได้แก่ palmitoleic acid, heptadecanoic acid และ myristic acid เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น ขณะที่ behenic acid, alpha-linolenic acid และ lignoceric acid ไม่พบการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) การเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบกรดไขมันในระหว่างการเก็บรักษาถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพของโกโก้ โดยเฉพาะในด้านรสชาติ กลิ่น และคุณค่าทางโภชนาการ แม้ว่าเมล็ดโกโก้จะผ่านกระบวนการอบแห้งเพื่อลดความชื้นและยืดอายุการเก็บรักษาแล้ว แต่ยังคงสามารถเกิดการสลายตัวของกรดไขมันได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันและในบางกรณีอาจเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส แม้ว่าเมล็ดพืชนั้นจะถูกอบแห้งเพื่อลดความชื้นแล้วก็ตาม ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสสามารถเกิดขึ้นได้จากการทำงานของน้ำหรือเอนไซม์ไลเปส (lipase) ที่ยังคงหลงเหลืออยู่ในเมล็ด ส่งผลให้เกิดกรดไขมันอิสระซึ่งอาจก่อให้เกิดกลิ่นและรสชาติที่ไม่พึงประสงค์ [25] ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมัน ได้แก่ อุณหภูมิสูงในระหว่างการเก็บรักษา ความชื้นของสภาพแวดล้อมที่สามารถซึมเข้าสู่เมล็ด รวมถึงการสัมผัสกับแสงและออกซิเจน ซึ่งสามารถเร่งการเกิดออกซิเดชันของไขมันได้ ดังนั้น การเก็บรักษาเมล็ดโกโก้ใน

สภาพแวดล้อมที่แห้งและมีอุณหภูมิต่ำ การบรรจุในภาชนะที่บดแสงและจำกัดการสัมผัสกับออกซิเจน เช่น การบรรจุแบบสุญญากาศ รวมทั้งการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นของพื้นที่เก็บรักษาให้อยู่ในระดับต่ำ จึงเป็นแนวทางสำคัญในการชะลอการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันในเมล็ดโกโก้ [25] ในการศึกษาครั้งนี้ เมล็ดโกโก้บดแห้งถูกเก็บรักษาภายใต้สภาวะที่สามารถชะลอการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพ ส่งผลให้รูปแบบและปริมาณของกรดไขมันมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา 90 วัน

Table 1 The a_w value and chemical composition of dried cocoa beans during storage

Chemical composition	Storage time (day)			
	0	30	60	90
% (dry weight basis)				
a_w^{ns}	0.56±0.01	0.57±0.01	0.56±0.01	0.56±0.01
Moisture ^{ns}	5.70±0.01	5.77±0.09	5.63±0.34	5.46±0.40
Fat (%)	41.94±0.15 ^a	41.67±0.02 ^b	41.64±0.02 ^b	41.62±0.03 ^b
Protein	14.65±0.30 ^a	14.18±0.01 ^b	13.93±0.01 ^b	13.83±0.02 ^b
Carbohydrate	26.02±0.01 ^a	25.13±0.01 ^b	23.86±0.02 ^c	22.54±0.02 ^d
Fiber	14.11±0.11 ^a	13.40±0.03 ^b	12.05±0.02 ^c	11.36±0.01 ^d
Ash	3.59±0.01 ^a	3.77±0.02 ^b	3.76±0.01 ^b	3.72±0.08 ^b

Note: Different letters (a, b, ...) within the same row indicate significant differences ($p<0.05$).

3.3 สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ

จากการวิเคราะห์สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของเมล็ดโกโก้บดแห้งในระหว่างการเก็บรักษา พบว่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) อย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา โดยลดลงชัดเจนหลังวันที่ 30 และลดลงต่อเนื่องจนถึงวันสุดท้าย โดยเมล็ดโกโก้บดแห้งในวันแรกของการเก็บรักษามีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกเท่ากับ 93.33 ± 1.93 mg GAE/g dry weight และลดลงเหลือ 65.25 ± 1.06 mg GAE/g dry weight ในวันสุดท้ายของการเก็บรักษา (Figure 1A) ปริมาณ ฟลาโวนอยด์ มีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) เช่นเดียวกัน โดยมีการลดลงแบบค่อยเป็นค่อยไปตลอดช่วงการเก็บรักษา โดยมีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 64.90 ± 1.39 mg quercetin/g sample และลดลงเหลือ 51.94 ± 0.55 mg quercetin/g sample เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการเก็บรักษา (Figure 1B) ในส่วนของปริมาณทีโอบิรมิน พบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) แม้ว่าจะมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยในช่วงแรก โดยมีปริมาณอยู่ในช่วง $920\pm 0.00 - 890\pm 0.05$ mg/100 g (Figure 1C) ขณะที่ปริมาณคาเฟอีนมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาการเก็บรักษา โดยมีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 119.02 ± 0.03 mg/100 g และลดลงเหลือ 85.41 ± 0.55 mg/100 g ในวันสุดท้ายของการเก็บรักษา (Figure 1D)

การลดลงของสารประกอบฟีนอลิกในเมล็ดโกโก้บดแห้งระหว่างการเก็บรักษาเป็นกระบวนการสำคัญที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางเคมี รสชาติ และคุณค่าทางโภชนาการของโกโก้ นอกจากนี้การลดลงของสารประกอบฟีนอลิกระหว่างการเก็บรักษาอาจส่งผลให้ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระลดลงและทำให้ลักษณะทางประสาทสัมผัสเปลี่ยนแปลงไป สารประกอบฟีนอลิกสามารถถูกออกซิไดส์โดยเอนไซม์โพลีฟีนอลออกซิเดสในระหว่างกระบวนการหมักและการอบแห้ง [22] ปัจจัยที่มีผลต่อการสลายตัวของสารประกอบฟีนอลิกในเมล็ดโกโก้บดแห้ง ได้แก่ อุณหภูมิในการเก็บรักษาที่สูงจะสามารถเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารประกอบฟีนอลิกทำให้เกิดการเสื่อมสภาพได้รวดเร็วขึ้น นอกจากนี้ ความชื้นในสภาพแวดล้อมยังสามารถกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์และปฏิกิริยาทางเคมีอื่น ๆ ที่นำไปสู่การสลายตัวของสารประกอบฟีนอลิก รวมทั้งการสัมผัสกับแสงและออกซิเจนซึ่งเป็นปัจจัยที่เร่งกระบวนการออกซิเดชัน [27] ดังนั้น การเก็บรักษาเมล็ดโกโก้ในสภาพแวดล้อมที่แห้งและมีอุณหภูมิต่ำ รวมทั้งการใช้บรรจุภัณฑ์สุญญากาศหรือบรรจุภัณฑ์ที่จำกัดการสัมผัสกับออกซิเจน จึงเป็นแนวทางสำคัญในการชะลอการสลายตัวของสารประกอบฟีนอลิกในระหว่างการเก็บรักษา

Table 2 Changes in fatty acid composition of dried cocoa beans during storage

Fatty acid composition (% dry weight basis)	Storage time (day)			
	0	30	60	90
Stearic acid ^{ns}	37.74±0.80	38.43±0.07	38.57±0.39	38.77±0.05
Oleic acid ^{ns}	32.65±0.09	32.52±0.06	32.55±0.48	32.27±0.10
Palmitic acid ^{ns}	24.79±0.67	24.18±0.01	24.03±0.08	24.03±0.77
Linoleic acid	2.57±0.03 ^a	2.49±0.00 ^b	2.46±0.00 ^c	2.45±0.01 ^d
Arachidic acid	1.39±0.00 ^a	1.37±0.00 ^b	1.35±0.00 ^c	1.32±0.01 ^d
Behenic acid ^{ns}	0.24±0.00	0.24±0.00	0.24±0.00	0.25±0.01
Alpha Linoleic acid ^{ns}	0.20±0.00	0.20±0.00	0.20±0.00	0.20±0.00
Heptadecanoic acid	0.19±0.00 ^c	0.19±0.00 ^c	0.20±0.00 ^b	0.24±0.00 ^a
Lignoceric acid ^{ns}	0.14±0.00	0.12±0.00	0.12±0.01	0.13±0.03
Myristic acid	0.07±0.00 ^c	0.07±0.00 ^c	0.08±0.00 ^b	0.10±0.00 ^a
Palmitoleic acid	0.20±0.00 ^b	0.19±0.00 ^b	0.20±0.00 ^b	0.24±0.00 ^a

Note: Different letters (a, b, ...) within the same row indicate significant differences ($p < 0.05$).

สำหรับพลาไวโนอยด์ พบว่าสารกลุ่มนี้มีความไวต่อออกซิเจนในบรรยากาศ ซึ่งอาจทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและส่งผลให้เกิดการเสื่อมสภาพได้ [29] รายงานว่าพลาไวโนอยด์ในเมล็ดโกโก้มีแนวโน้มเกิดการออกซิเดชันได้ง่ายเมื่อเก็บรักษาในสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม เช่น อุณหภูมิสูงหรือการสัมผัสกับแสง นอกจากนี้ การเปลี่ยนแปลงของค่า pH ความชื้น และปฏิกิริยาทางเคมีต่างๆ ระหว่างการเก็บรักษา อาจส่งผลต่อความเสถียรของพลาไวโนอยด์และนำไปสู่การลดลงของปริมาณสารดังกล่าว ดังนั้น การควบคุมสภาพแวดล้อมในการเก็บรักษา เช่น การเก็บในที่เย็นและหลีกเลี่ยงแสง จึงสามารถช่วยรักษาความคงตัวของ พลาไวโนอยด์ในเมล็ดโกโก้ได้

ทีโอโบรมีนเป็นอัลคาลอยด์สำคัญที่พบในเมล็ดโกโก้ และมีบทบาททางสรีรวิทยาหลายประการ เช่น การกระตุ้นระบบประสาท การขยายหลอดเลือด และการแสดงฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ โดยทั่วไปทีโอโบรมีนเป็นสารที่มีความเสถียรค่อนข้างสูง อย่างไรก็ตาม ในระยะยาวอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงได้จากปัจจัยทางสิ่งแวดล้อม เช่น การสัมผัสกับออกซิเจน แสง และอุณหภูมิ การสลายตัวของทีโอโบรมีนอาจเกี่ยวข้องกับกระบวนการออกซิเดชันที่ส่งผลให้มีปริมาณลดลงเมื่อเวลาผ่านไป การศึกษาของ Jinap et al. [29] รายงานว่าระหว่างการเก็บรักษาเมล็ดโกโก้ที่ผ่านการอบแห้งแล้ว ปริมาณทีโอโบรมีนอาจลดลงเล็กน้อยเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน นอกจากนี้ González-Ríos et al. [30] ยังพบว่าอุณหภูมิในการเก็บรักษาที่สูงสามารถเร่ง การสลายตัวของทีโอโบรมีนได้เช่นเดียวกับสารประกอบอื่น ๆ ในเมล็ดโกโก้

สำหรับคาเฟอีน แม้ว่าจะเป็นสารที่มีความเสถียรทางเคมีค่อนข้างสูง แต่ก็สามารถเกิดการสลายตัวได้ภายใต้สภาวะบางประการ เช่น อุณหภูมิสูง ความชื้นสูง และการสัมผัสกับแสง Kim et al. [31] รายงานว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิสูงสามารถเร่ง การสลายตัวของสารออกฤทธิ์ในเมล็ดโกโก้ รวมถึงคาเฟอีนได้ นอกจากนี้ ความชื้นในสภาพแวดล้อมยังสามารถกระตุ้นปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ซึ่งอาจเร่งการเสื่อมสภาพของคาเฟอีนได้ การศึกษาของ Ashihara et al. [32] ยังระบุว่า การสัมผัสกับออกซิเจนและแสงเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้คาเฟอีนสลายตัว ดังนั้น การเก็บรักษาเมล็ดโกโก้ในที่แห้ง อุณหภูมิต่ำ และหลีกเลี่ยงการสัมผัสกับแสงและอากาศ จึงเป็นแนวทางที่ช่วยรักษาความคงตัวของคาเฟอีนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

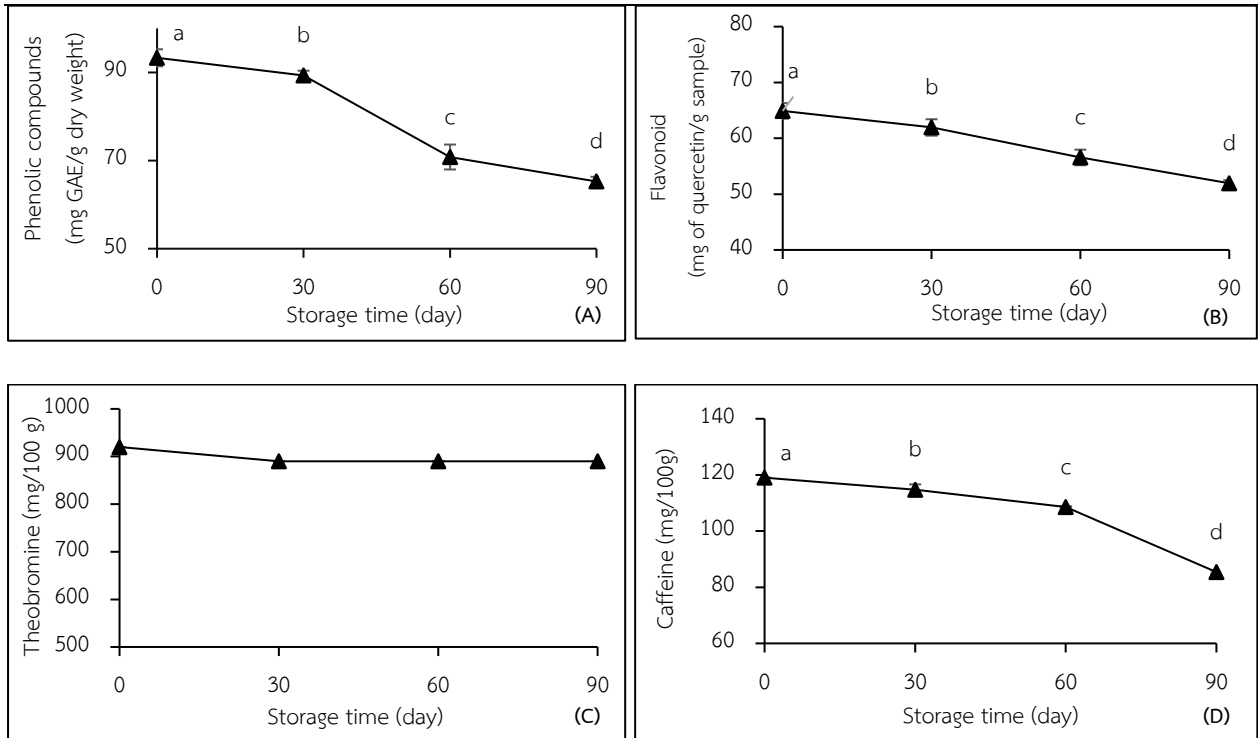


Figure 1 Changes in bioactive compounds of dried cocoa beans during storage: phenolic compound (A), flavonoid (B), theobromine (C), and caffeine (D)

3.4 กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ

ผลการทดสอบกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระของเมล็ดโกโก้บดแห้งในระหว่างการเก็บรักษาด้วยวิธี DPPH, ABTS และ FRAP บ่งชี้ไปในทิศทางเดียวกันว่า ประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา 90 วัน โดยค่า IC_{50} ของ DPPH และ ABTS มีค่าสูงขึ้น ในขณะที่ค่า FRAP มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง (Figure 2) โดยวิธีการทดสอบแต่ละวิธีสามารถสะท้อนศักยภาพในการต้านอนุมูลอิสระผ่านกลไกที่แตกต่างกัน ได้แก่ ความสามารถในการให้ไฮโดรเจน การกำจัดอนุมูลอิสระ และความสามารถในการรีดิวซ์ของสารต้านอนุมูลอิสระ จากผลการทดลองพบว่าเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระของเมล็ดโกโก้บดแห้งมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยการทดสอบด้วยวิธี DPPH ซึ่งรายงานผลในรูปค่า IC_{50} พบว่าเมล็ดโกโก้ในวันแรกของการเก็บรักษามีค่า IC_{50} ต่ำที่สุด เท่ากับ 0.82 ± 0.01 mg/mL ขณะที่ในวันที่ 30, 60 และ 90 ของการเก็บรักษา ค่า IC_{50} เพิ่มขึ้นเป็น 0.87 ± 0.01 , 0.89 ± 0.01 และ 0.94 ± 0.01 mg/mL ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของค่า IC_{50} สะท้อนให้เห็นถึงการลดลงของประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระของเมล็ดโกโก้เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้น ในทำนองเดียวกัน ผลการทดสอบด้วยวิธี ABTS พบว่าค่า IC_{50} ของเมล็ดโกโก้ในวันแรกของการเก็บรักษามีค่าเท่ากับ 0.79 ± 0.02 mg/L และเพิ่มขึ้นเป็น 0.96 ± 0.02 , 1.11 ± 0.02 และ 1.28 ± 0.03 mg/L ในวันที่ 30, 60 และ 90 ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงการลดลงของฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้น สำหรับการทดสอบด้วยวิธี FRAP พบว่าเมล็ดโกโก้ในวันแรกของการเก็บรักษามีความสามารถในการรีดิวซ์สูงที่สุดเท่ากับ 11.34 ± 0.09 mg Trolox/g sample และมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาการเก็บรักษาที่ 30, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารออกฤทธิ์สำคัญกับฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของเมล็ดโกโก้ในระหว่างการเก็บรักษา พบว่าปริมาณสารออกฤทธิ์สำคัญมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาการเก็บรักษาที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีความสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของค่า IC_{50} จากการทดสอบด้วยวิธี DPPH และ ABTS และการลดลงของค่ากิจกรรมจากวิธี FRAP ผลการศึกษาดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าการลดลงของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในเมล็ดโกโก้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับการลดลงของศักยภาพในการต้านอนุมูลอิสระ การลดลงของกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระในระหว่างการเก็บรักษาอาจเกิดจากการเสื่อมสภาพของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ เช่น สารประกอบฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการให้ไฮโดรเจนและการรีดิวซ์อนุมูลอิสระ เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้น สารเหล่านี้อาจเกิดการออกซิเดชันหรือสลายตัว ส่งผลให้ความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระ DPPH และ ABTS ลดลง นอกจากนี้ การเสื่อมสภาพของสารต้านอนุมูลอิสระยังส่งผลต่อความสามารถในการรีดิวซ์ของตัวอย่าง ทำให้ค่าที่ได้จากการ

ทดสอบ FRAP ลดลงเช่นกัน ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับรายงานของ Bae et al. [33] ที่พบว่าค่ากิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระจากการทดสอบ DPPH, ABTS และ FRAP ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเก็บรักษาเมล็ดพืชในสถานะที่มีอุณหภูมิและความชื้นสูง นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับการศึกษาของ Gokmen et al. [34] Siddhuraju & Becker [35] ซึ่งรายงานว่ากิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระของเมล็ดพืชอบแห้งมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น เนื่องจากการสลายตัวของสารต้านอนุมูลอิสระและการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารประกอบฟีนอลระหว่างกระบวนการเก็บรักษา

3.4 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางจุลินทรีย์

ผลการวิเคราะห์คุณภาพทางจุลินทรีย์ของเมล็ดโกโก้อบแห้งในระหว่างกระบวนการเก็บรักษา พบว่าในช่วง 60 วันแรกของการเก็บรักษาไม่ตรวจพบปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด อย่างไรก็ตาม ในวันที่ 90 ของการเก็บรักษาพบปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดเท่ากับ 1.5×10^3 CFU/g ซึ่งยังคงอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดให้ไม่เกิน 1×10^6 CFU/g สำหรับปริมาณยีสต์และรา พบว่าในวันที่ 0, 30 และ 60 ของการเก็บรักษาไม่ตรวจพบเชื้อดังกล่าว แต่ตรวจพบในวันที่ 90 ของการเก็บรักษา โดยมีปริมาณเท่ากับ 1.2×10^3 CFU/g (Table 3) ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดให้มีปริมาณไม่เกิน 100 CFU/g [36]

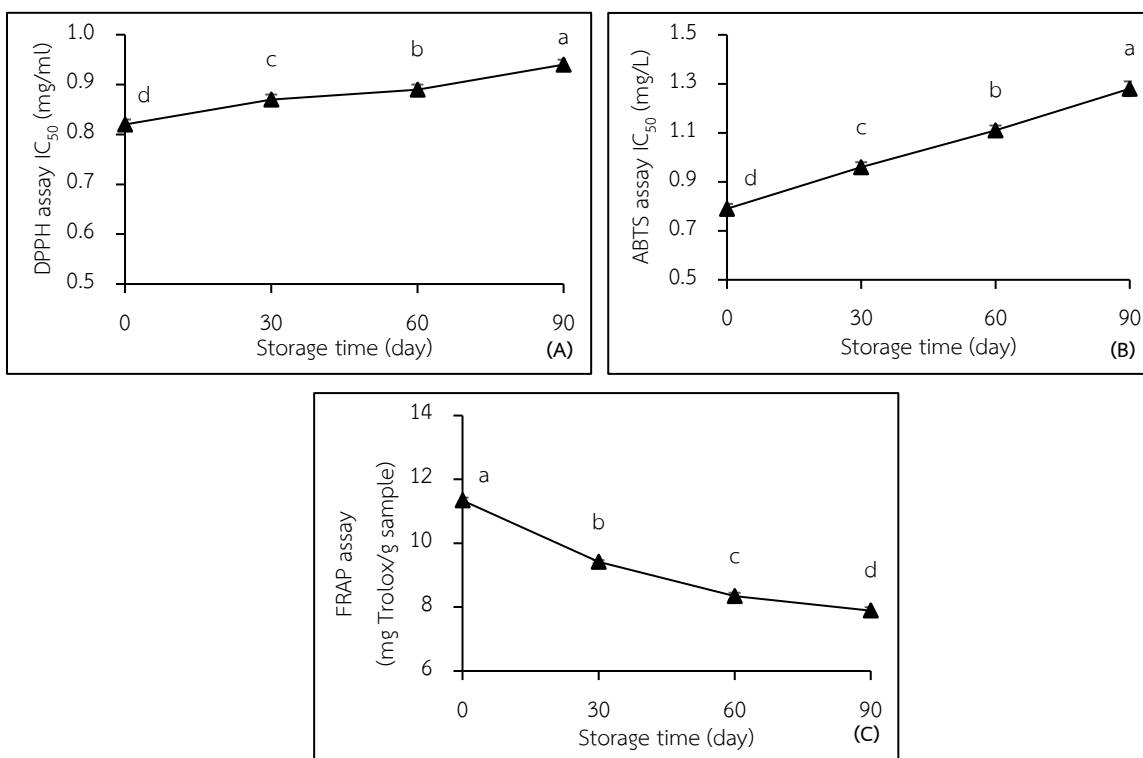


Figure 2 Changes in antioxidant activities of dried cocoa beans during storage determined by DPPH (A), ABTS (B), and FRAP assay (C)

Table 3 Total viable count, yeast and mold of dried cocoa beans during storage

Microbiological analysis	Storage time (day)			
	0	30	60	90
Total viable count (CFU/g)	Not detected	Not detected	Not detected	1.5×10^3
Yeast and mold (CFU/g)	Not detected	Not detected	Not detected	1.2×10^3

ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงนัยสำคัญเชิงอุตสาหกรรมในการจัดการการเก็บรักษาเมล็ดโกโก้บดแห้ง โดยพบว่าการบรรจุแบบสุญญากาศสามารถช่วยคงสภาพของกรดไขมันหลัก ได้แก่ stearic, oleic และ palmitic acids ได้อย่างมีประสิทธิภาพตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา 90 วัน แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของเทคโนโลยีดังกล่าวในการชะลอการเสื่อมสภาพทางออกซิเดชันของไขมันในระดับอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตาม ในช่วงปลายของการเก็บรักษาพบว่าปริมาณอีสต์และราเพิ่มขึ้นจนเกินเกณฑ์มาตรฐาน แม้จะใช้การบรรจุแบบสุญญากาศ ซึ่งบ่งชี้ถึงความเสี่ยงด้านความปลอดภัยทางจุลินทรีย์ และสามารถพิจารณาเป็น “จุดควบคุมวิกฤต (critical control point; CCP)” ในกระบวนการเก็บรักษา ดังนั้น การกำหนดอายุการเก็บรักษาและสภาวะการเก็บรักษาที่เหมาะสมจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ผู้ประกอบการควรให้ความสำคัญ เพื่อให้มั่นใจในคุณภาพและความปลอดภัยของวัตถุดิบในระดับอุตสาหกรรม

4. สรุป

ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาการเก็บรักษามีผลต่อคุณภาพของเมล็ดโกโก้บดแห้งอย่างมีนัยสำคัญ แม้ว่าค่า a_w และปริมาณความชื้นจะยังคงอยู่ในช่วงที่เหมาะสมตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา 90 วัน แต่อย่างไรก็ตาม องค์ประกอบทางเคมีบางชนิด ได้แก่ ไขมัน โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และเยื่อใย มีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่องค์ประกอบกรดไขมันหลักยังคงค่อนข้างคงตัวระหว่างการเก็บรักษา นอกจากนี้ ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ โดยเฉพาะสารประกอบฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ และคาเฟอีน ลดลงตามระยะเวลาการเก็บรักษา ส่งผลให้กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระที่ประเมินด้วยวิธี DPPH, ABTS และ FRAP ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ สอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของค่า IC_{50} ในช่วงการเก็บรักษา ในด้านคุณภาพทางจุลินทรีย์ พบว่าปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ แม้ว่าจะตรวจพบอีสต์และราในช่วงปลายการเก็บรักษา จากผลการศึกษานี้บ่งชี้ว่าระยะเวลาการเก็บรักษาไม่ควรเกิน 60 วัน เพื่อคงปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม โดยเฉพาะในผลิตภัณฑ์ที่เน้นคุณค่าทางสุขภาพ นอกจากนี้ ควรควบคุมสภาวะการเก็บรักษา เช่น ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ บรรจุภัณฑ์ที่ป้องกันออกซิเจนและความชื้น เพื่อลดการเสื่อมสภาพของสารสำคัญและการเจริญของจุลินทรีย์ สำหรับการศึกษาในอนาคตควรมุ่งเน้นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการเก็บรักษาที่สามารถชะลอการเสื่อมของสารสำคัญได้ดียิ่งขึ้น เช่น การใช้บรรยากาศดัดแปร การเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ หรือการใช้สารต้านออกซิเดชันจากธรรมชาติร่วมกับบรรจุภัณฑ์ นอกจากนี้ ควรมีการศึกษาการเปลี่ยนแปลงเชิงจุลนาศาสตร์ของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ เพื่อใช้ในการพยากรณ์อายุการเก็บรักษาอย่างแม่นยำในระดับอุตสาหกรรม

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (อว.) ผู้วิจัยขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเป็นอย่างสูงที่ได้ให้การสนับสนุนงบประมาณและสิ่งอำนวยความสะดวกที่เอื้อต่อการดำเนินงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Aprotosoie, A. C., Luca, S. V. and Miron, A. 2016. Flavor chemistry of cocoa and cocoa products—An overview. *Compr. Rev. Food Sci. F.* 15: 73–91.
- [2] Scapagnini, G., Davinelli, S., Di Renzo, L., De Lorenzo, A., Olarte, H. H., Micali, G., Cicero, A. F. and Gonzalez, S. 2014. Cocoa bioactive compounds: significance and potential for the maintenance of skin health. *Nutrients.* 6: 3202–3213.
- [3] Torres-Moreno, M., Torrescasana, E., Salas-Salvadó, J. and Blanch, C. 2015. Nutritional composition and fatty acids profile in cocoa beans and chocolates with different geographical origin and processing conditions. *Food Chem.* 166: 125–132.
- [4] Caligiani, A., Marseglia, A., Prandi, B., Palla, G. and Sforza, S. 2016. Influence of fermentation level and geographical origin on cocoa bean oligopeptide pattern. *Food Chem.* 211: 431–439.
- [5] Cortez, D., Quispe-Sanchez, L., Mestanza, M., Oliva-Cruz, M., Yoplac, I., Torres, C. and Chavez, S. G. 2023. Changes in bioactive compounds during fermentation of cocoa (*Theobroma cacao*) harvested in Amazonas-Peru. *Curr. Res. Food Sci.* 6: 100494.

- [6] Ramos-Escudero, F., Casimiro-Gonzales, S., Fernández-Prior, Á., Cancino Chávez, K., Gómez-Mendoza, J., de la Fuente-Carmelino, L. and Muñoz, A. M. 202. Colour, fatty acids, bioactive compounds and total antioxidant capacity in commercial cocoa beans (*Theobroma cacao* L.). *LWT*. 147: 111629.
- [7] De Vuyst, L. and Weckx, S. 2016. The cocoa bean fermentation process: from ecosystem analysis to starter culture development. *J. Appl. Microbiol.* 121: 5–17.
- [8] Afoakwa, E. O. 2010. *Chocolate Science and Technology*. Wiley-Blackwell, Oxford.
- [9] AOAC. 2019. *Official Methods of Analysis of AOAC International*. 21st edn. AOAC International, Washington DC.
- [10] Amin, I., Norazaidah, Y. and Hainida, K. I. E. 2006. Antioxidant activity and phenolic content of raw and blanched *Amaranthus* species. *Food Chem.* 94: 47–52.
- [11] Prommuak, C., Eknankul, W. and Shotipruk, A. 2008. Extraction of flavonoids and carotenoids from Thai silk waste and antioxidant activity of extract. *Sep. Purif. Technol.* 62: 444–448.
- [12] Department of Medical Sciences (DMS), & Association of Clinical Food Scientists (Thailand) (ACFS). (2003). *Compendium of methods for food analysis* (1st ed.). Bangkok, Thailand.
- [13] Cavin, A., Hostettmann, K., Dyatmyko, W. and Potterat, O. 1998. Antioxidant and lipophilic constituents of *Tinospora crispa*. *Planta Med.* 64: 393–396.
- [14] Pannala, A. S., Chan, T. S., O'Brien, J. and Rice-Evans, C. 2001. Flavonoid B-ring chemistry and antioxidant activity: fast reaction kinetics. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 282: 1161–1168.
- [15] Benzie, I. F. F. and Strain, J. J. 1996. The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of antioxidant power: The FRAP assay. *Anal. Biochem.* 239: 70–76.
- [16] BAM. 2002. *Bacteriological Analytical Manual*. U.S. Food and Drug Administration, Center for Food Safety and Applied Nutrition.
- [17] Tardzenyuy, M. E., Jianguo, Z., Akyene, T. and Mbuwel, M. P. 2020. Improving cocoa beans value chain using a local convection dryer: a case study of Fako division Cameroon. *Sci. Afr.* 8: e00343.
- [18] สุกนธ์ชิน ศรีงาม. 2540. วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร.
- [19] Kumar, S., Mohapatra, D., Kotwaliwale, N. and Singh, K. K. 2020. Efficacy of sensor assisted vacuum hermetic storage against chemical fumigated wheat. *J. Stored Prod. Res.* 88: 101640.
- [20] Jonfia-Essien, W. A. and Tettey, E. 2016. Fat content and free fatty acid level of cocoa beans (*Theobroma cacao*) relative to fermentation and storage periods. In: Navarro, S., Jayas, D. S. and Alagusundaram, K. (eds.). *Proceedings of the 10th International Conference on Controlled Atmosphere and Fumigation in Stored Products (CAF2016)*. CAF Permanent Committee Secretariat, Winnipeg, Canada. pp. 58–61.
- [21] จวงจันทร์ ดวงพัตรา. 2521. เทคโนโลยีเมล็ดพันธุ์. ภาควิชาพืชไร่ คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร.
- [22] Rawel, H. M., Huschek, G., Tchewonpi Sagu, S. and Homann, T. 2019. Cocoa bean proteins: characterization, changes and modifications due to ripening and post-harvest processing. *Nutrients.* 11: 428.
- [23] Afoakwa, E. O., Quao, J., Takrama, J., Budu, A. S. and Saalia, F. K. 2011. Effect of pulp preconditioning on acidification, proteolysis, sugars and free fatty acids concentration during fermentation of cocoa (*Theobroma cacao*) beans. *Int. J. Food Sci. Nutr.* 62: 755–764.
- [24] Nazaruiddin, R., Seng, L. K., Hassan, O. and Said, M. 2006. Effect of pulp preconditioning on the content of polyphenols in cocoa beans (*Theobroma cacao*) during fermentation. *Ind. Crops Prod.* 24: 87–94.
- [25] Rossi, M., Alamprese, C. and Ratti, S. 2007. Effect of drying conditions on lipid oxidation in nuts. *J. Agric. Food Chem.* 55: 6278–6283.
- [26] Villeneuve, P. and Berger, M. 2013. Lipid oxidation in cocoa products. *J. Agric. Food Chem.* 61: 150–156.
- [27] Othman, A., Ismail, A., Ghani, N. A. and Adenan, I. 2007. Antioxidant capacity and phenolic content of cocoa beans. *Food Chem.* 100: 1523–1530.

-
- [28] Pérez-Vizcaino, F. and Duarte, J. 2012. Flavonoids and the cardiovascular system: a review. *Mol. Aspects Med.* 33: 672–688.
- [29] Jinap, S., Thien, J. and Yap, T. N. 1995. Effect of drying on acidity and volatile fatty acids content of cocoa beans. *J. Sci. Food Agric.* 68: 213–216.
- [30] González-Ríos, O., Suárez-Quiroz, M., Boulanger, R. and Barel, M. 2007. Impact of ecological post-harvest processing on coffee aroma: II. roasted coffee. *J. Food Compos. Anal.* 20: 480–490.
- [31] Kim, G. Y., Lee, J., Lim, S., Kang, H., Ahn, S. I., Jhoo, J. W. and Ra, C. S. 2019. Effect of antioxidant addition on milk beverage supplemented with coffee and shelf-life prediction. *Food Sci. Anim. Resour.* 39: 903–917.
- [32] Ashihara, H. and Crozier, A. 2013. Caffeine: a well-known but little mentioned xanthine alkaloid in cocoa. *Plant Physiol. Biochem.* 72: 159–165.
- [33] Bae, H., Jayaprakasha, G. K., Crosby, K., Jifon, J. and Patil, B. S. 2014. Effect of drying and storage conditions on the antioxidant activity of plant seeds. *J. Food Sci. Technol.* 51: 2151–2159.
- [34] Gokmen, V., Serpen, A. and Fogliano, V. 2013. Evaluation of antioxidant capacities of food by DPPH, ABTS and FRAP assays: a comparative study. *Food Chem.* 134: 1026–1033.
- [35] Siddhuraju, P. and Becker, K. 2003. Antioxidant properties of various solvent extracts of total phenolic constituents from three different agroclimatic origins of drumstick tree (*Moringa oleifera* Lam.) leaves. *J. Agric. Food Chem.* 51: 2144–2155.
- [36] กองอาหาร. 2566. ประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 442) พ.ศ. 2566 เรื่อง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเมล็ดโกโก้. เข้าถึงได้จาก : เว็บไซต์ <https://food.fda.moph.go.th/food-law/announ-moph-442> (เข้าถึงเมื่อ 1 มีนาคม 2569)

การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และจุลินทรีย์ของใบหม่อนและผักโขมจีนเพื่อพัฒนาสูตรผงปรุงรส Study of Physical, Chemical and Microbiological Properties of Mulberry Leaves and Chinese Spinach for Seasoning Powder Formulation Development

นารี พันธุ์จินดาวรรณ¹ และ กมลวรรณ ชูชีพ^{2,*}
Naree Phanchindawan¹ and Kamonwan Chucheep^{2,*}

¹งานบริการห้องปฏิบัติการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร 86160 ประเทศไทย

²ภาควิชาพื้นฐานทั่วไป สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร 86160 ประเทศไทย

¹Scientific Laboratory Service Center, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Prince of Chumphon Campus, Chumphon Province, 86160, Thailand

²Department of General Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Prince of Chumphon Campus, Chumphon Province, 86160, Thailand

*Corresponding author: Kamonwan Chucheep, e-mail address: kamonwan.ch@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และจุลินทรีย์ของใบหม่อน (*Morus alba* L.) และผักโขมจีน (*Amaranthus tricolor* L.) และเพื่อพัฒนาสูตรผงปรุงรสที่ใช้พืชทั้งสองชนิดเป็นส่วนผสมทดแทนโมโนโซเดียมกลูตาเมต การศึกษานี้พัฒนาผงปรุงรส 4 สูตร ได้แก่ สูตรดั้งเดิม สูตร 1 (เติมผักโขมจีน 2 กรัม) สูตร 2 (เติมใบหม่อน 2 กรัม) และสูตร 3 (เติมผักโขมจีนและใบหม่อนอย่างละ 1 กรัม) ผลการศึกษาพบว่า ผักโขมจีนและใบหม่อนมีค่า a_w (0.35 และ 0.34 ตามลำดับ) และความชื้น (5.43% และ 4.36% ตามลำดับ) ที่เหมาะสมสำหรับการเก็บรักษา ผักโขมจีนมีปริมาณโพแทสเซียมและเหล็กสูงกว่าใบหม่อนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในขณะที่ใบหม่อนมีค่า pH สูงกว่า การเติมวัตถุดิบทั้งสองชนิดส่งผลให้ผงปรุงรรมีปริมาณแคลเซียมและเหล็กเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรดั้งเดิม การตรวจสอบคุณภาพจุลินทรีย์แสดงให้เห็นว่าผงปรุงรสทุกสูตรมีความปลอดภัยจากจุลินทรีย์ก่อโรค จากการประเมินทางประสาทสัมผัสโดยใช้วิธี การทดสอบแบบ 5-point hedonic scale พบว่า สูตรดั้งเดิมได้คะแนนความชอบโดยรวมสูงสุด (3.96 ± 0.86) รองลงมาคือ สูตร 3 (3.66 ± 1.30) และสูตร 1 (3.62 ± 0.78) ซึ่งได้คะแนนความชอบโดยรวมมากกว่า 3.5 จาก 5 ถือว่าอยู่ในระดับที่ผู้บริโภคยอมรับได้ ในขณะที่สูตร 2 (3.20 ± 0.97) ยังต้องได้รับการปรับปรุงเพิ่มเติม ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าใบหม่อนและผักโขมจีนสามารถนำมาใช้เป็นส่วนผสมเชิงฟังก์ชันในผงปรุงรสเพื่อเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ โดยเฉพาะสูตร 1 และสูตร 3 มีศักยภาพในการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์

คำสำคัญ: ผงปรุงรส, ใบหม่อน, ผักโขมจีน, คุณสมบัติทางเคมี, การทดแทนโมโนโซเดียมกลูตาเมต

Abstract

This research aimed to investigate the physical, chemical, and microbiological properties of mulberry leaves (*Morus alba* L.) and Chinese spinach (*Amaranthus tricolor* L.), and to develop seasoning powder formulations using these plant materials as ingredients to substitute monosodium glutamate (MSG). Four seasoning powder formulations were developed: a control formula, Formula 1 (supplemented with 2 g Chinese spinach), Formula 2 (supplemented with 2 g mulberry leaves), and Formula 3 (supplemented with 1 g each of Chinese spinach and mulberry leaves). Results revealed that both Chinese spinach and mulberry leaves exhibited suitable water activity (a_w values of 0.35 and 0.34, respectively) and moisture content (5.43% and 4.36%, respectively) for storage stability. Chinese spinach demonstrated significantly higher potassium and iron content than mulberry leaves ($p \leq 0.05$), while mulberry leaves showed significantly higher pH values. The incorporation of both plant materials resulted in a significant increase in calcium and iron content in the seasoning powders compared to the control formula. Microbiological quality assessment confirmed that all formulations were free from pathogenic microorganisms. Sensory evaluation using a 5-point hedonic scale indicated that the control formula received the highest overall acceptability score (3.96 ± 0.86), followed by Formula 3 (3.66 ± 1.30) and Formula 1 (3.62 ± 0.78), both of which exceeded the acceptable threshold of 3.5 out of 5. Formula 2 (3.20 ± 0.97) requires further formulation improvement. These findings demonstrate that Chinese spinach and mulberry leaves can be successfully utilized as functional ingredients in seasoning powder

formulations to enhance nutritional value, with Formulas 1 and 3 showing commercial development potential as natural alternatives to conventional flavor enhancers.

Keywords: seasoning powder, mulberry leaves, Chinese spinach, chemical properties, monosodium glutamate substitution

1. บทนำ

ผงปรุงรสเป็นผลิตภัณฑ์เสริมรสชาติที่ผสมผสานระหว่างเนื้อสัตว์กับเครื่องปรุงรสต่างๆ ได้แก่ เกลือแกง น้ำตาล กระเทียม พริกไทย และโมโนโซเดียมกลูตาเมต จากนั้นนำไปอบแห้งและบดเป็นผง [1] โดยผงชูรส 1 ซ้อนชา มีปริมาณโซเดียม 492 มิลลิกรัม คิดเป็นร้อยละ 24.6 ของปริมาณโซเดียมสูงสุดที่ร่างกายรับได้ต่อวัน [2] หากมีการเติมผงชูรสในการประกอบอาหาร ต้องลดการเติมเครื่องปรุงรสอื่นๆ ในอาหาร รวมถึงลดปริมาณการบริโภคอาหารอื่นๆ ที่มีโซเดียมเป็นส่วนประกอบ เช่น ขนมขบเคี้ยวต่างๆ การใช้เกลือในปริมาณสูงนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มรสชาติและยืดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ อย่างไรก็ตาม องค์การอนามัยโลกได้กำหนดแนวทางการบริโภคเกลือที่เหมาะสมไม่เกิน 5 กรัมต่อวัน หรือเทียบเท่าโซเดียม 2,000 มิลลิกรัมต่อวัน จากข้อมูลการสำรวจของกรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข [2] พบว่า คนไทยบริโภคเกลือเฉลี่ย 8.8 กรัมต่อคนต่อวัน ซึ่งสูงกว่าคำแนะนำขององค์การอนามัยโลกถึงร้อยละ 76 ส่งผลให้เกิดปัญหาสุขภาพ โดยเฉพาะโรคไม่ติดต่อเรื้อรัง ได้แก่ โรคความดันโลหิตสูง โรคหัวใจและหลอดเลือด โรคไต และโรคหลอดเลือดสมอง ด้วยเหตุนี้ จึงจำเป็นต้องหาสิ่งทดแทนที่ช่วยลดปัญหาดังกล่าว ซึ่งประเทศไทยมีความหลากหลายทางชีวภาพของพืชผักที่มีคุณสมบัติทางโภชนาการสูง โดยเฉพาะผักใบเขียวที่อุดมไปด้วยวิตามิน เกลือแร่ และสารประกอบฟีนอลิก ที่มีคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระ เช่น ใบหม่อน (*Morus alba* L.) [3] และผักโขมจีน (*Amaranthus tricolor* L.) [4] พืชทั้ง 2 ชนิดนี้เป็นพืชผักที่มีศักยภาพสูงในการนำมาพัฒนาเป็นผงปรุงรสทางเลือก โดยใบหม่อนมีองค์ประกอบทางเคมีที่โดดเด่น ได้แก่ โปรตีน (15-25% dry weight) โยอาหาร (18-22% dry weight) และสารประกอบฟลาโวนอยด์ เช่น เควอเรติน (Quercetin) และรูติน (Rutin) ที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและลดความดันโลหิต [5, 6] นอกจากนี้ ใบหม่อนยังอุดมด้วยสาร 1-deoxynojirimycin (DNJ) ซึ่งเป็น iminosugar ที่ออกฤทธิ์ยับยั้งเอนไซม์ α -glucosidase ในลำไส้เล็ก ช่วยชะลอการย่อยและดูดซึมน้ำตาล ส่งผลให้ระดับน้ำตาลในเลือดหลังมื้ออาหารไม่สูงขึ้นอย่างรวดเร็ว [5, 7] จึงเหมาะสำหรับการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพ ส่วนผักโขมจีนมีคุณค่าทางโภชนาการที่โดดเด่นในด้านเบตาแคโรทีน (β -carotene) วิตามินซี และเหล็ก รวมทั้งมีสารเบตาไซยานิน (Betacyanin) ให้สีม่วงแดงธรรมชาติและมีคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระสูง [8] นอกจากนี้ ยังมีรสชาติที่มีความเค็มธรรมชาติจากเกลือธรรมชาติ ทำให้สามารถทดแทนการใช้เกลือแกงได้ในระดับหนึ่ง

แม้ว่าจะมีการศึกษาเกี่ยวกับการใช้พืชผักในการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพ แต่ยังมีช่องว่างทางวิชาการในการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และจุลินทรีย์ของใบหม่อนและผักโขมจีนเพื่อการพัฒนาผงปรุงรสทางเลือก การวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และจุลินทรีย์ ของสูตรผงปรุงรสจากใบหม่อน และผักโขมจีน และเพื่อทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคต่อสูตรผงปรุงรสจากใบหม่อนและผักโขมจีน

2. วิธีการศึกษา

2.1 ขั้นตอนการทำผงปรุงรส

จัดเตรียมวัตถุดิบตั้งต้นที่เป็นส่วนผสมของผงปรุงรส ได้แก่ ผักโขมจีน ใบหม่อน รากผักชี หอมแดง และกระเทียม นำมาล้างน้ำทำความสะอาด ซอยรากผักชี หอมแดง และกระเทียม ให้บาง นำไปอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3-5 ชั่วโมง ส่วนผักโขมจีนและใบหม่อนนำไปต้มในน้ำร้อนเดือด เป็นเวลา 2 นาที ตักวางไว้ให้สะเด็ดน้ำ แล้วนำหั่นเป็นชิ้นเล็กๆ นำไปอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบดเป็นผงด้วยเครื่องปั่นให้ละเอียด โดยร่อนผ่านตะแกรงขนาด 40 mesh แล้วเก็บวัตถุดิบตั้งต้นแต่ละชนิดใส่ถุงซิปล็อกหรือภาชนะที่ปิดสนิท เมื่อต้องการเตรียมผงปรุงรส ซึ่งส่วนผสมแต่ละชนิดมาคลุกผสมให้เข้ากัน

2.2 การพัฒนาสูตรผงปรุงรส

พัฒนาสูตรผงปรุงรสจากสูตรดั้งเดิมที่จัดอยู่ในกลุ่มผงปรุงรสจากสมุนไพรพื้นบ้าน หรือผงนัวธรรมชาติ [9] โดยไม่มีโมโนโซเดียมกลูตาเมต เป็นสูตรที่เน้นความหวานจากหอมแดง และโซเดียมต่ำกว่าผงปรุงรสทั่วไป (Table 1) สูตร 1 ใส่ผักโขมจีนและลดปริมาณน้ำตาล สูตร 2 ใส่ใบหม่อนและลดปริมาณน้ำตาล สูตร 3 ใส่ผักโขมจีนและใบหม่อน และลดปริมาณน้ำตาล

2.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี

- วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ค่าปริมาณน้ำอิสระ (Water Activity: a_w) ด้วยเครื่อง Water Activity และปริมาณความชื้น ด้วยวิธีการของ AOAC [10]

- วิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ด้วยเครื่อง pH meter ปริมาณโพแทสเซียม แคลเซียม โซเดียม และเหล็กของผงปรุงรส โดยใช้วิธี Dry ashing ที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง จากนั้นนำเถ้าที่ได้ไปละลายด้วย 1 N HCl แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณธาตุอาหารด้วยเทคนิค Inductively Coupled Plasma – Optical Emission Spectrometry: ICP-OES [11] และปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ด้วยวิธีดีเอ็นเอส (DNS method) โดยดัดแปลงจากวิธีของ Tunde [12]

Table 1 Ingredients of each seasoning powder formulations.

Materials	Quantity (g)			
	Control Formula	Formula 1	Formula 2	Formula 3
Coriander Root	0.1	0.1	0.1	0.1
Salt	2	2	2	2
Ground Pepper	1	1	1	1
Shallots	10	10	10	10
Garlic	1	1	1	1
Cane Sugar	3	1	1	1
Chinese Spinach	-	2	-	1
Mulberry Leaves	-	-	2	1

2.4 การวิเคราะห์คุณภาพทางจุลินทรีย์

ซั่งตัวอย่างผงปรุงรส 25 กรัม ใส่ถุงกรอง เต็ม Buffered peptone water (BPW) 225 มิลลิลิตร ลงไป ตีให้เข้ากันด้วยเครื่อง stomacher จะได้ตัวอย่างอาหารเจือจางความเข้มข้น 10^{-1} เจือจางสารละลายอาหารจนถึงความเข้มข้น 10^{-3} จากนั้นดูดสารละลายตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร ลงบนชุดแผ่นทดสอบ 3M Petrifilm™ แล้วค่อยๆ วางตัวกดบนแผ่นฟิล์มด้านบน แล้วออกแรงกดตรงกลางตัวกดเพื่อให้สารละลายแผ่กระจายเต็มวง นำแผ่นทดสอบแต่ละชนิดไปบ่มที่อุณหภูมิต่างๆ ดังนี้

- Total number of microorganisms บ่มที่ 37°C, 24 h
- *E. coli* บ่มที่ 37°C, 24 h
- Yeasts และ Molds บ่มที่ 25°C, 3 วัน

การทดสอบเชื้อ *Salmonella* sp. ใช้เทคนิคการกระจายสารละลายตัวอย่างอาหารที่ผ่านการเจือจาง 0.1 มิลลิลิตร บนอาหาร XLD agar ใช้แท่งแก้วสามเหลี่ยมเกลี่ยให้ทั่วผิวหน้าอาหาร บ่มที่ 37 องศาเซลเซียส 1 สัปดาห์ จากนั้นทำการตรวจนับโคโลนีของเชื้อที่เจริญบนผิวหน้าอาหาร XLD

2.5 การประเมินทางประสาทสัมผัส

ทำการตมน้ำซุบโดยใช้ผงปรุงรส จำนวน 20 กรัม ต่อน้ำร้อน 0.5 ลิตร กรองด้วยผ้าขาวบาง เพื่อไม่ให้มีตะกอน จากนั้นให้ผู้ทดสอบ จำนวน 50 คน ได้ชิมและทำแบบประเมินลักษณะด้านประสาทสัมผัสโดยใช้วิธีการทดสอบแบบ 5 – point hedonic scale ที่มีระดับคะแนนตั้งแต่ 1-5 โดย 1 หมายถึง ไม่ชอบมากที่สุด และ 5 หมายถึง ชอบมากที่สุด ในด้านสี กลิ่น รสชาติ และ ความชอบโดยรวม

2.6 การวิเคราะห์ทางสถิติ

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้โปรแกรม IBM SPSS Statistics โดยเปรียบเทียบข้อมูลการวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างผักโขมจีนและใบหอมโดยใช้วิธี t-test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างผงปรุงรสแต่ละสูตรด้วยวิธี Duncan's multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัตถุดิบ

ผักโขมจีนและใบหม่อนมีปริมาณน้ำอิสระ (a_w) 0.35 ± 0.01 และ 0.34 ± 0.01 ตามลำดับ (Table 2) ซึ่งไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ค่า a_w ที่ได้อยู่ในระดับที่เหมาะสมสำหรับการป้องกันการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ทำให้ผลิตภัณฑ์เสื่อมสภาพ ซึ่งสอดคล้องกับหลักการที่ว่าผลิตภัณฑ์ที่มีค่า a_w ต่ำกว่า 0.6 จะมีความคงตัวของจุลินทรีย์ที่ดี ผักโขมจีนมีความชื้น $5.43 \pm 0.37\%$ ซึ่งสูงกว่าใบหม่อนที่มีความชื้น $4.36 \pm 0.70\%$ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) อาจเนื่องมาจากโครงสร้างเนื้อเยื่อและกระบวนการแห้งที่แตกต่างกัน แต่ค่าความชื้นที่วัดได้นี้อยู่ในระดับที่เหมาะสมสำหรับการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์แห้ง ค่า a_w ที่วัดได้ ($0.34-0.35$) สอดคล้องกับรายงานของ Gurtler *et al.* [13] ที่ระบุว่าผลิตภัณฑ์อาหารแห้งที่มีค่า a_w ต่ำกว่า 0.60 จะมีความคงตัวของจุลินทรีย์ที่ดี เนื่องจากจุลินทรีย์ส่วนใหญ่ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ในสภาวะดังกล่าว

Table 2 water activity (a_w) and moisture content of Chinese spinach and mulberry leaves.

Materials	a_w	Moisture content (%)
Chinese Spinach	0.35 ± 0.01	5.43 ± 0.37
Mulberry Leaves	0.34 ± 0.01	4.36 ± 0.70
t-test 95%	ns	*

ns = no significant difference among materials.

* = significant difference among materials.

3.2 คุณสมบัติทางเคมีของวัตถุดิบ

จาก Table 3 ที่แสดงถึงคุณสมบัติทางเคมีของผักโขมจีนและใบหม่อน พบว่า ใบหม่อนมีค่า pH 7.71 ± 0.03 ซึ่งสูงกว่าผักโขมจีนที่มีค่า pH 6.64 ± 0.06 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ค่า pH ของใบหม่อนที่เป็นด่างอ่อนนี้อาจมีผลต่อสีของผลิตภัณฑ์สุดท้ายเนื่องจากสารคลอโรฟิลล์มีความคงตัวที่ต่างกัน ในสภาวะ pH ที่ต่างกัน และรสชาติของผลิตภัณฑ์

สำหรับปริมาณธาตุอาหาร ผักโขมจีนมีปริมาณเหล็ก (Fe) สูงมาก คือ 103.24 ± 27.56 mg/kg ซึ่งสูงกว่าใบหม่อนที่มีปริมาณเหล็ก 60.41 ± 13.45 mg/kg แต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ปริมาณเหล็กที่สูงในทั้งสองวัตถุดิบ โดยเฉพาะผักโขมจีน สามารถช่วยเสริมคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ได้ ปริมาณเหล็กในผักโขมจีน (103.24 ± 27.56 mg/kg) และใบหม่อน (60.41 ± 13.45 mg/kg) ที่พบในการศึกษานี้อยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกับรายงานของ Olusanya *et al.* [4] ซึ่งพบว่าผักโขมจีนมีปริมาณเหล็กสูงและมีศักยภาพในการเสริมคุณค่าทางโภชนาการให้กับผลิตภัณฑ์อาหาร

นอกจากนี้ผักโขมจีนยังมีปริมาณโพแทสเซียม (K) สูงมาก คือ $4.14 \pm 1.06\%$ ในขณะที่ใบหม่อนมีเพียง $1.20 \pm 0.40\%$ ปริมาณโพแทสเซียมที่สูงในผักโขมจีนเป็นข้อได้เปรียบด้านโภชนาการ เนื่องจากโพแทสเซียมเป็นแร่ธาตุที่สำคัญสำหรับการทำงานของระบบหัวใจและหลอดเลือด ปริมาณโพแทสเซียมที่สูงในผักโขมจีน ($4.14 \pm 1.06\%$) สอดคล้องกับรายงานของ Sarker *et al.* [14] ที่พบปริมาณโพแทสเซียมสูงในผักโขมจีนสายพันธุ์ต่างๆ ซึ่งใบของผักโขมจีนมีแร่ธาตุสำคัญ ได้แก่ แมกนีเซียม แคลเซียม โพแทสเซียม ฟอสฟอรัส เหล็ก สังกะสี ทองแดง และแมงกานีส ทำให้ผักโขมจีนเป็นแหล่งแร่ธาตุที่มีคุณค่าสำหรับการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพ

ปริมาณแคลเซียม (Ca), โซเดียม (Na) และน้ำตาลรีดิวซ์ของทั้งสองตัวอย่างให้ผลไม่แตกต่างทางสถิติ โดยมีปริมาณแคลเซียมประมาณ 2% โซเดียมต่ำมาก ($0.03-0.07\%$) และน้ำตาลรีดิวซ์ประมาณ 2.6-2.7%

3.3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีของวัตถุดิบกับเกลือ

จาก Table 4 ที่แสดงถึงปริมาณธาตุอาหารในวัตถุดิบเปรียบเทียบกับเกลือซึ่งเป็นส่วนผสมหลักในผงปรุงรส พบว่า ผักโขมจีนมีปริมาณโพแทสเซียมสูงที่สุด ($4.14 \pm 1.06\%$) รองลงมาคือใบหม่อน ($1.20 \pm 0.40\%$) และเกลือซึ่งมีปริมาณโพแทสเซียมต่ำที่สุด ($0.46 \pm 0.02\%$) ค่าที่ได้มีความแตกต่างทางสถิติ เกลือมีปริมาณสูงสุดตามธรรมชาติ ($41.83 \pm 4.92\%$) ในขณะที่ผักโขมจีนและใบหม่อนมีปริมาณโซเดียมต่ำมาก ($0.03-0.07\%$) ปริมาณเหล็กของผักโขมจีนสูงที่สุด (103.24 ± 27.56 mg/kg) รองลงมาคือใบหม่อน (60.41 ± 13.45 mg/kg) และเกลือต่ำที่สุด (8.35 ± 2.56 mg/kg)

Table 3 Chemical properties of Chinese spinach and mulberry leaves.

Materials	pH	Fe	K	Ca	Na	Reducing sugar
		(mg/kg)	(%)	(%)	(%)	
Chinese Spinach	6.64±0.06	103.24±27.56	4.14±1.06	2.08±0.57	0.07±0.02	2.62±0.36
Mulberry Leaves	7.71±0.03	60.41±13.45	1.20±0.40	2.27±0.64	0.03±0.01	2.77±0.31
t-test 95%	*	*	*	ns	ns	ns

ns = no significant difference among materials.

* = significant difference among materials.

Table 4 Nutrient concentrations of Chinese spinach, mulberry leaves and salt.

Materials	K (%)	Ca (%)	Na (%)	Fe (mg/kg)
Chinese Spinach	4.14±1.06 ^c	2.08±0.57 ^b	0.07±0.02 ^a	103.24±27.56 ^c
Mulberry Leaves	1.20±0.40 ^b	2.27±0.64 ^b	0.03±0.01 ^a	60.41±13.45 ^b
Salt (NaCl)	0.46±0.02 ^a	0.03±0.03 ^a	41.83±4.92 ^b	8.35±2.56 ^a
P≤0.05	*	*	*	*

* = significant difference among materials.

3.4 คุณสมบัติทางเคมีของผงปรุงรสแต่ละสูตร

หลังการเตรียมผงปรุงรสแต่ละสูตร ได้ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของผงปรุงรสแต่ละสูตร (Table 5) พบว่า การเติมผักโขมจีน (สูตร 1) ส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมเพิ่มขึ้นสูงสุด (0.54±0.01%) เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรดั้งเดิม (0.07±0.00%) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงให้เห็นว่าการเติมวัตถุดิบนี้สามารถเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการได้จริง สูตร 2 และสูตร 3 มีปริมาณแคลเซียมเพิ่มขึ้นในระดับปานกลาง (0.37±0.08% และ 0.40±0.02% ตามลำดับ) การเพิ่มขึ้นของปริมาณแคลเซียมเมื่อเติมผักโขมจีน (สูตร 1: 0.54±0.01%) สอดคล้องกับการศึกษาของ Singh *et al.* [15] ที่รายงานว่า การเติมผักโขมจีนในผลิตภัณฑ์อาหารส่งผลให้ปริมาณแคลเซียมเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญถึง 84.91% ยืนยันศักยภาพของผักโขมจีนในการเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์

ปริมาณเหล็กของสูตร 1 (54.46±18.46 mg/kg) สูงกว่าสูตรดั้งเดิม (29.58±8.19 mg/kg) แต่ผลที่ได้ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ปริมาณโพแทสเซียมและโซเดียมของผงปรุงรสทุกสูตรให้ผลที่ไม่มีความต่างทางสถิติ การที่ปริมาณโซเดียมไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเป็นข้อดี เนื่องจากการบริโภคโซเดียมในปริมาณสูงอาจส่งผลเสียต่อสุขภาพ โดยเฉพาะผู้ที่มีปัญหาความดันโลหิตสูง

Table 5 Nutrient concentrations of each seasoning powder formulations.

seasoning powder formulations	K (%)	Ca (%)	Na (%)	Fe (mg/kg)
Control Formula	1.38±0.06	0.07±0.00 ^c	4.25±0.12	29.58±8.19 ^c
Formula 1 Chinese Spinach	1.47±0.04	0.54±0.01 ^a	3.93±0.15	54.46±18.46 ^a
Formula 2 Mulberry Leaves	1.41±0.08	0.37±0.08 ^b	3.89±0.36	33.93±3.65 ^b
Formula 3 Chinese Spinach + Mulberry Leaves	1.44±0.03	0.40±0.02 ^b	4.00±0.29	38.90±3.96 ^b
P≤0.05	ns	*	ns	*

ns = no significant difference among seasoning powder formulations.

* = significant difference among seasoning powder formulations.

3.5 คุณภาพด้านจุลินทรีย์ของผงปรุงรส

ผงปรุงรสทุกสูตรมีความปลอดภัยทางจุลินทรีย์ โดยไม่พบจุลินทรีย์ก่อโรคที่สำคัญ ได้แก่ *E. coli/coliform*, Yeasts and Molds และ *Salmonella* sp. ในทุกตัวอย่าง (Table 6) แสดงให้เห็นว่ากระบวนการผลิตและการเตรียมวัตถุดิบมีความเหมาะสม จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดที่ความเข้มข้น 10^{-3} มีค่าอยู่ในช่วง 183-342 CFU โดยสูตร 2 (ใบหม่อน) มีจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดต่ำที่สุด (183 ± 10.79 CFU) ส่วนสูตร 3 (ผสมผักโขมจีนและใบหม่อน) มีจำนวนสูงที่สุด (342 ± 10.41 CFU) ซึ่งยังคงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ สำหรับผลิตภัณฑ์อาหารแห้ง แสดงว่าผลิตภัณฑ์มีอายุการเก็บรักษาที่เหมาะสม การที่สูตร 2 (ใบหม่อน) มีจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดต่ำที่สุด (183 ± 10.79 CFU) อาจเนื่องมาจากฤทธิ์ต้านจุลินทรีย์ของสารประกอบฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ในใบหม่อน ซึ่งมีรายงานว่าสารสกัดจาก *Morus* spp. มีฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรียก่อโรคทั้งชนิด Gram-positive เช่น *Staphylococcus aureus* และ Gram-negative เช่น *Escherichia coli* และ *Salmonella* spp. [16] อย่างไรก็ตาม ผงปรุงรสทุกสูตรมีจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดอยู่ในระดับที่ยอมรับได้สำหรับผลิตภัณฑ์อาหารแห้ง

Table 6 Microbiological qualities of each seasoning powder formulations.

Test microorganisms	Number of microbes (CFU/g) at concentration 10^{-3}			
	Control Formula	Formula 1	Formula 2	Formula 3
Total number of microorganisms	317±2.52	238±20.66	183±10.79	342±10.41
<i>E. coli/coliform</i>	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0
Yeasts and Molds	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0
<i>Salmonella</i> sp.	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0

<1.0: below detection limit

3.6 การประเมินการยอมรับของผู้บริโภค

จากการประเมินความพึงพอใจของผู้บริโภคทางประสาทสัมผัส (Table 7) พบว่า สูตรดั้งเดิมได้คะแนนสูงสุดในทุกด้าน ได้แก่ สี (4.06 ± 0.91), กลิ่น (4.20 ± 0.86), รสชาติ (3.86 ± 0.93) และความชอบโดยรวม (3.96 ± 0.86) สูตร 1 (ผักโขมจีน) ได้คะแนนรองลงมาในด้านสีและความชอบโดยรวม โดยได้คะแนนสี 3.76 ± 0.87 , กลิ่น 3.70 ± 0.81 , รสชาติ 3.04 ± 1.03 และความชอบโดยรวม 3.62 ± 0.78 สูตร 2 (ใบหม่อน) ได้คะแนนต่ำที่สุดในทุกด้าน โดยเฉพาะด้านรสชาติ (2.80 ± 0.88) และความชอบโดยรวม (3.20 ± 0.97) สูตร 3 (ผสมทั้งสองชนิด) ได้คะแนนอยู่ในระดับปานกลาง โดยได้คะแนนความชอบโดยรวม 3.66 ± 1.30 ซึ่งใกล้เคียงกับสูตร 1

การที่สูตรดั้งเดิมได้คะแนนสูงสุดเป็นเรื่องที่คาดได้ เนื่องจากผู้บริโภครุ่นเดียวกับรสชาติและกลิ่นของสูตรดั้งเดิม คะแนนความชอบโดยรวมของสูตร 1 ที่ระดับ 3.62 ± 0.78 และสูตร 3 ที่ 3.66 ± 1.30 ซึ่งเกินเกณฑ์ยอมรับที่ 3.5 สอดคล้องกับการศึกษาของ Olusanya *et al.* [4] ที่รายงานว่า การเติมผงใบผักโขมจีนในปริมาณที่เหมาะสม (2%) ยังคงได้รับการยอมรับจากผู้บริโภคในระดับใกล้เคียงกับกลุ่มควบคุม ในขณะที่การเติมในปริมาณสูงจะส่งผลให้คะแนนการยอมรับลดลง ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ยืนยันแนวโน้มดังกล่าว สำหรับสูตร 2 (ใบหม่อน) ที่ได้คะแนนรสชาติต่ำที่สุด (2.80 ± 0.88) อาจเกี่ยวข้องกับกลิ่นและรสเฉพาะตัวของใบหม่อนที่อาจไม่คุ้นเคยสำหรับผู้บริโภค ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Jin *et al.* [6] ที่แนะนำว่าควรมีการปรับกระบวนการแปรรูปใบหม่อนเพื่อลดกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ก่อนนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์อาหาร"

ข้อจำกัดและข้อเสนอแนะ

การศึกษานี้มีข้อจำกัดด้านจำนวนผู้ทำการประเมินทางประสาทสัมผัสและระยะเวลาการศึกษา การศึกษาเพิ่มเติมควรรวมถึงการทดสอบอายุการเก็บรักษา การวิเคราะห์สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และการศึกษาการยอมรับของผู้บริโภคในระยะยาว นอกจากนี้ ควรศึกษาเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของแต่ละสูตร รวมทั้งการศึกษาวิธีการเพิ่มการยอมรับของสูตรที่มีใบหม่อนเป็นส่วนผสม

Table 7 Sensory evaluation results of each seasoning powder formulations.

seasoning powder formulations	color	odor	taste	overall likability
Control Formula	4.06±0.91 ^b	4.20±0.86 ^c	3.86±0.93 ^c	3.96±0.86 ^b
Formula 1 Chinese Spinach	3.76±0.87 ^{ab}	3.70±0.81 ^b	3.04±1.03 ^{ab}	3.62±0.78 ^b
Formula 2 Mulberry Leaves	3.50±1.20 ^a	3.12±0.87 ^a	2.80±0.88 ^a	3.20±0.97 ^a
Formula 3 Chinese Spinach + Mulberry Leaves	3.78±0.89 ^{ab}	3.48±1.09 ^{ab}	3.42±1.34 ^b	3.66±1.30 ^b
P≤0.05	*	*	*	*

* = significant difference among seasoning powder formulations.

4. สรุป

ผักโขมจีนและใบหม่อนมีคุณสมบัติทางกายภาพที่เหมาะสมสำหรับการใช้เป็นส่วนผสมในผงปรุงรส โดยมีค่า a_w และความชื้นที่เอื้อต่อการเก็บรักษา ผักโขมจีนโดดเด่นด้วยปริมาณโพแทสเซียมและเหล็กที่สูง ขณะที่ใบหม่อนมีค่า pH ที่เป็นด่างอ่อน การเติมผักโขมจีนและใบหม่อนในผงปรุงรสช่วยเพิ่มปริมาณแคลเซียมและเหล็ก โดยเฉพาะสูตรที่เติมผักโขมจีนซึ่งให้ปริมาณแคลเซียมเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ปริมาณโซเดียมไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งเป็นผลดีต่อสุขภาพ ด้านความปลอดภัยทางจุลินทรีย์ไม่พบจุลินทรีย์ก่อโรคที่สำคัญในผงปรุงรสทุกสูตร และมีจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ทั้งนี้ สูตรดั้งเดิมได้รับการยอมรับสูงสุด แต่สูตรที่เติมผักโขมจีน (สูตร 1) และสูตรผสม (สูตร 3) ได้คะแนนความพึงพอใจในระดับที่ยอมรับได้ โดยมีศักยภาพในการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์ อย่างไรก็ตาม ผงปรุงรสสูตร 1 (เติมผักโขมจีน 2 กรัม) เป็นสูตรที่มีความสมดุลระหว่างคุณค่าทางโภชนาการและการยอมรับของผู้บริโภค จึงเหมาะสมสำหรับการพัฒนาต่อไป ส่วนผลปรุงรสสูตร 2 (ใบหม่อน) ควรได้รับการปรับปรุงเพื่อเพิ่มการยอมรับ

การวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าใบหม่อนและผักโขมจีนสามารถนำมาใช้เป็นส่วนผสมในผงปรุงรสเพื่อเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการได้จริง และมีศักยภาพในการเป็นทางเลือกสำหรับผู้บริโภคที่ต้องการผลิตภัณฑ์ที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพมากขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับงบประมาณสนับสนุนจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรฯ และขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิเคราะห์ดินและพืช สจล. วิทยาเขตชุมพรฯ ที่สนับสนุนการทำวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน. 2547. “ผงปรุงรส” มพช. 494/2547. เข้าถึงได้จาก : เว็บไซต์ <https://fic.nfi.or.th> >law > upload > file1 (เข้าถึงเมื่อ 4 มกราคม 2568).
- [2] สำนักโภชนาการ. 2567. ผงปรุงรส. [เข้าถึงได้จาก : เว็บไซต์ <https://nutrition2.anamai.moph.go.th> > download (เข้าถึงเมื่อ 4 มกราคม 2568).
- [3] Chen, C., Razali, U. H. M., Saikim, F. H., AMahyudin, A. and Noor, N. Q. I. M. 2021. *Morus alba* L. Plant: Bioactive Compounds and Potential as a Functional Food Ingredient. *Foods*. 10 (3) : 689 . doi:10.3390/foods10030689.
- [4] Olusanya, R.N., Kolanisi, U. and Ngobese, N. Z. 2023. Mineral Composition and Consumer Acceptability of Amaranthus Leaf Powder Supplemented Ujeqe for Improved Nutrition Security. *Foods*. 12(11):2182. doi: 10.3390/foods12112182.
- [5] Vichasilp, C., Nakagawa, K., Sookwong, P., Higuchi, O., Luemunkong, S. and Miyazawa, T. 2012. Development of high 1-deoxynojirimycin (DNJ) content mulberry tea and use of response surface methodology to optimize tea-making conditions for highest DNJ extraction. *LWT - Food Science and Technology*. 45(2): 226-232.

-
- [6] Jin, Y. C., Tu, J., Han, X. Y., Zhuo, J., Liu, G. H., Han, Y. H., Du, H. J., Wang, J. and Xiao, H. 2022. Characteristics of Mulberry Leaf Powder Enriched With γ -Aminobutyric Acid and Its Antioxidant Capacity as a Potential Functional Food Ingredient. *Front Nutr.* 9:900718. doi: 10.3389/fnut.2022.900718.
- [7] Kimura, T., Nakagawa, K., Kubota, H., Kojima, Y., Yamagishi, K., Oita, S., Oikawa, S. and Miyazawa, T. 2007. Food-grade mulberry powder enriched with 1-deoxynojirimycin suppresses the elevation of postprandial blood glucose in humans. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(14): 5869–5874.
- [8] Khanam, U. K. S. and Oba, S. 2013. Bioactive substances in leaves of two amaranth species, *Amaranthus tricolor* and *A. hypochondriacus*. *Canadian Journal of Plant Science*. 93(1).
<https://doi.org/10.4141/cjps2012-117>.
- [9] วิทวัส สัจจาพงศ์. 2568. ผงปรุงรสจากพืชพื้นบ้าน: นวัตกรรมทางเลือกเพื่อสุขภาพและความยั่งยืนของชุมชน. เข้าถึงได้จาก :
เว็บไซต์ <https://www.up.ac.th/NewsReadBlog2.aspx?itemID=34580> (เข้าถึงเมื่อ 31 มีนาคม 2569).
- [10] Association of Official Analytical Chemists (AOAC). 2000. Official methods of analysis. 17th edn. Gaithersburg, MD, USA.
- [11] Allen, S. E., Grimshaw, H. M., Parkinson, J. A. and Quarmby, C. 1974. Chemical analysis of ecological materials. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- [12] Tunde, A. (2020). Production of Glucose from Hydrolysis of Potato Starch. *World Scientific News*, 145:128-143.
- [13] Gurtler, J. B., Doyle, M. P. and Kornacki, J. L. 2014. *The Microbiological Safety of Low Water Activity Foods and Spices*. Springer, New York.
- [14] Sarker, U., Hossain, M. M. and Oba, S. 2020. Nutritional and antioxidant components and antioxidant capacity in green morph *Amaranthus* leafy vegetable. *Sci Rep.* 10: 1336. doi: 10.1038/s41598-020-57687-3
- [15] Singh, S., Punia, D. and Khetarpaul, N. 2009. Nutrient composition of products prepared by incorporating amaranth (*Amaranthus tricolor*) leaf powder. *Nutr. Food Sci.* 39(1): 34–40.
- [16] Hemavathi, S. U., Preeti, Y. H., Arpitha, H. B. and Banupriya, G. M. 2024. *Antimicrobial properties of mulberry (Morus spp.) against pathogenic bacteria and fungi review paper*. *International Journal of Advanced Biochemistry Research* 2024; SP-8(8): 1438-144

การคัดแยก การจัดจำแนก และคัดเลือกจุลินทรีย์ที่มีศักยภาพสำหรับการหมักโกโก้ Isolation, Identification, and Selection of Potential Microorganisms for Cocoa Fermentation

อานันท์นิตย์ คุ้ยยกสุย¹ มณฑกานต์ ทองสม² สิริกุล เพชรทวล² และ วิลาวรรณ ไชยสร^{2*}
Arnannit Kuyyogsuy¹, Montakarn Thongsom², Sirikun Pethuan² and Wilaiwan Chaisorn^{2*}

¹สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช จังหวัดนครศรีธรรมราช 80280 ประเทศไทย

²สาขาวิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช จังหวัดนครศรีธรรมราช 80280 ประเทศไทย

¹Department of Chemistry, Faculty of Science and Technology, Nakhon Si Thammarat Rajabhat University, Nakhon Si Thammarat Province, 80280, Thailand

²Department of Biology, Faculty of Science and Technology, Nakhon Si Thammarat Rajabhat University, Nakhon Si Thammarat Province, 80280, Thailand

* Corresponding author: Wilaiwan Chaisorn, e-mail: chaisorn.w@gmail.com

บทคัดย่อ

กระบวนการหมักเมล็ดโกโก้เป็นขั้นตอนวิกฤตที่มีผลต่อการสร้างกลิ่นรสและคุณภาพทางประสาทสัมผัส แต่การหมักแบบธรรมชาติมักประสบปัญหาความไม่แน่นอนของคุณภาพ โดยวัตถุประสงค์ในการศึกษานี้เพื่อคัดแยกและจำแนกจุลินทรีย์ในหมักโกโก้จากกระบวนการหมักและพัฒนาเป็นกล้าเชื้อสำหรับหมักโกโก้ โดยแยกเชื้อจุลินทรีย์จากกระบวนการหมักเมล็ดโกโก้ของผู้ประกอบการที่ให้เมล็ดหลังการหมักผ่านเกณฑ์มาตรฐาน จำแนกสายพันธุ์โดยวิเคราะห์ลำดับเบสบริเวณ 16S rDNA วิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์โดยใช้โปรแกรม BLASTN เปรียบเทียบกับข้อมูลใน GenBank ของ NCBI และทดสอบประสิทธิภาพในการเป็นกล้าเชื้อสำหรับหมักเมล็ดโกโก้ ผลการคัดแยกเชื้อจุลินทรีย์ 3 กลุ่มหลักคือ ยีสต์ แบคทีเรียแลคติก แบคทีเรียผลิตกรดอะซิติก จากผลการทดลองพบว่า ยีสต์ไอโซเลต Y5 แบคทีเรียแลคติกไอโซเลต L4 แบคทีเรียผลิตกรดอะซิติกไอโซเลต A22 เป็น 3 ไอโซเลต ที่เมื่อหมักร่วมกันแล้วให้ประสิทธิภาพการหมักดีที่สุด ผลการจัดจำแนกจุลินทรีย์ด้วยเทคนิค 16S rDNA พบว่ายีสต์ไอโซเลต Y5 เป็นเชื้อ *Saccharomyces cerevisiae* (ค่าความใกล้เคียง 99.99 %) แบคทีเรียไอโซเลต A22 เป็น *Acetobacter aceti* (ค่าความใกล้เคียง 99.5 %) และแบคทีเรียไอโซเลต L4 คือ *Lactococcus lactis* (ค่าความใกล้เคียง 99.0 %) เมื่อนำทั้ง 3 สายพันธุ์มาพัฒนาเป็นกล้าเชื้อและศึกษาประสิทธิภาพของกล้าเชื้อจุลินทรีย์ที่คัดแยกได้ต่อการหมักโกโก้ พบว่าเมล็ดโกโก้เกิดกระบวนการหมัก มีลักษณะสีปรากฏและกลิ่นเป็นที่ยอมรับของผู้เชี่ยวชาญในการหมักโกโก้ การใช้กล้าเชื้อผสม (mixed starter culture) ช่วยควบคุมกระบวนการหมักให้มีความสม่ำเสมอ ลดการสูญเสียจากการหมักที่ไม่สมบูรณ์ ส่งเสริมการสร้างสารตั้งต้นของกลิ่นรส (Flavor precursors) ที่จำเพาะเจาะจง ช่วยยกระดับคุณภาพของเมล็ดโกโก้ให้ได้มาตรฐาน

คำสำคัญ: การคัดแยกเชื้อ, การหมักโกโก้, ยีสต์, แบคทีเรียอะซิติก, แบคทีเรียแลคติก

Abstract

Cocoa bean fermentation is a critical stage influencing the development of flavor, aroma, and sensory attributes; however, spontaneous fermentation often leads to inconsistent quality. This study aimed to isolate and identify microorganisms from natural cocoa fermentation to develop a starter culture for standardized production. Microorganisms were isolated from successful commercial fermentations meeting standard criteria. Strains were classified by analyzing the 16S rDNA sequence. Nucleotide sequences were analyzed using BLASTN software and compared with data in NCBI's GenBank. The screening identified three primary microbial groups: yeast, lactic acid bacteria (LAB), and acetic acid bacteria (AAB). The synergistic combination of yeast isolate Y5, LAB isolate L4, and AAB isolate A22 demonstrated the highest fermentation efficiency. Molecular identification via 16S rDNA confirmed isolate Y5 as *Saccharomyces cerevisiae* (99.99% similarity), A22 as *Acetobacter aceti* (99.5% similarity), and L4 as *Lactococcus lactis* (99.0% similarity). Performance testing of this mixed starter culture revealed effective fermentation, producing beans with color and aroma profiles highly acceptable to cocoa experts. The application of this specialized mixed starter culture facilitates a controlled fermentation process, reduces losses from incomplete fermentation, and promotes the formation of specific flavor precursors, thereby enhancing cocoa bean quality to meet precise industrial standards.

Keywords: Isolation, Cocoa fermentation, Yeast, Acetic acid bacteria, Lactic acid bacteria

1. บทนำ

โกโก้ (*Theobroma cacao* L.) พืชในวงศ์ Sterculiaceae ที่มีถิ่นกำเนิดดั้งเดิมจากกลุ่มน้ำอเมซอนตอนบน ได้กลายเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีนัยสำคัญในภูมิภาคอาเซียน โดยจากการรายงานของสถาบันวิจัยพืชสวน กรมวิชาการเกษตร พบว่า ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกสูงเป็นอันดับ 4 ของภูมิภาค ในขณะที่ภาพรวมของอาเซียนในช่วงปี พ.ศ. 2561/2562 มีปริมาณการผลิตคิดเป็น 5% ของผลผลิตโลก (ประมาณ 237,000 ตัน) ส่งผลให้เกิดการขยายตัวของอุตสาหกรรมแปรรูปโกโก้ถึง 17.9% และการเติบโตของตลาดช็อกโกแลตอีก 5% สะท้อนถึงโอกาสทางการค้าที่ยั่งยืน ความสำคัญของกระบวนการหมักต่อคุณภาพผลิตผลเป็นหัวใจสำคัญในการขับเคลื่อนคุณภาพของช็อกโกแลต มิได้อยู่ที่สายพันธุ์เพียงอย่างเดียว หากแต่ขึ้นอยู่กับกระบวนการหมัก (Fermentation) เพื่อเปลี่ยนเมล็ดสดให้เป็นเมล็ดแห้งที่มีคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสที่พึงประสงค์ การหมักโกโก้เป็นขั้นตอนสำคัญในกระบวนการแปรรูปเมล็ดโกโก้ ซึ่งมีบทบาทโดยตรงต่อการพัฒนาคุณภาพของผลิตภัณฑ์โกโก้และช็อกโกแลต ทั้งในด้านรสชาติ กลิ่น และลักษณะทางกายภาพของเมล็ด การหมักเป็นกระบวนการทางชีวเคมีที่เกี่ยวข้องกับจุลินทรีย์หลายกลุ่ม ได้แก่ ยีสต์ แบคทีเรียกรดแลคติก และแบคทีเรียกรดอะซิติก ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการสร้างแอลกอฮอล์ กรดอินทรีย์ และสารตั้งต้นของกลิ่นรส ซึ่งส่งผลต่อสี กลิ่น และรสชาติของโกโก้ [1] ส่งผลให้เกิดการสร้างสารตั้งต้นของกลิ่นรส (Flavor precursors) ที่สำคัญ [2] การใช้กล้าเชื้อจุลินทรีย์ที่คัดเลือกช่วยควบคุมกระบวนการหมักให้มีความสม่ำเสมอ ลดการปนเปื้อน และเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้ได้มาตรฐานมากขึ้น [3] อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดในปัจจุบันคือการพึ่งพามิปัญญาชาวบ้าน (Indigenous Knowledge) เช่น การหมักในถังไม้ปิดทับด้วยใบตอง ซึ่งเป็นการหมักแบบธรรมชาติ (Spontaneous Fermentation) อาศัยเชื้อจุลินทรีย์ตามธรรมชาติที่ติดมากับเมล็ดโกโก้หรือที่มีในสภาวะการหมักนั้นๆ ซึ่งปัญหาที่พบคือความไม่เสถียรของโปรไฟล์กลิ่นรสในแต่ละรอบการผลิต รวมถึงการสูญเสียผลผลิตจากสภาวะการหมักที่ไม่สมบูรณ์ เนื่องจากปัจจัยด้านจุลินทรีย์และสิ่งแวดล้อมที่ไม่สามารถควบคุมได้ การใช้กล้าเชื้อผสมในการหมักโกโก้เป็นนวัตกรรมที่เปลี่ยนกระบวนการหมักแบบดั้งเดิมให้มีความแม่นยำและเป็นวิทยาศาสตร์มากขึ้น โดยการเติมจุลินทรีย์คัดสายพันธุ์ทั้งยีสต์และแบคทีเรียจะช่วยควบคุมสภาวะในกองหมักให้มีความสม่ำเสมอ ส่งผลให้ระยะเวลาการหมักสั้นลงในขณะที่สามารถดึงศักยภาพของลักษณะทางประสาทสัมผัสที่เป็นเอกลักษณ์ออกมาได้อย่างเต็มที่ ทั้งการเพิ่มสารประกอบความหอมกลุ่มเอสเทอร์และการลดความขมฝาดที่เกินพอดี ช่วยให้เกษตรกรสามารถผลิตเมล็ดโกโก้คุณภาพสูงที่มีมาตรฐานคงที่ ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญในการยกระดับผลผลิตสู่ตลาดคราฟต์ช็อกโกแลตและสร้างมูลค่าเพิ่มทางเศรษฐกิจได้อย่างยั่งยืน ตามแนวทางการพัฒนาคุณภาพอาหารในระดับสากล [4, 5]

ดังนั้นในการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อคัดแยกและจำแนกจุลินทรีย์ในหมักโกโก้จากกระบวนการหมักแบบธรรมชาติในพื้นที่จังหวัดนครศรีธรรมราชและเพื่อใช้เป็นกล้าเชื้อสำหรับการหมักโกโก้

2. วิธีการศึกษา

2.1 การคัดแยกยีสต์ในกระบวนการหมักโกโก้

2.1.1 การคัดแยกยีสต์

นำตัวอย่างเมล็ดโกโก้หมักที่ระยะเวลาการหมัก 48 ชั่วโมง จำนวน 25 กรัม มาทำการเจือจางด้วยสารละลายเปปโตเน ความเข้มข้น 0.1% ปริมาณ 225 ml ให้มีระดับความเจือจางเท่ากับ 10^{-1} และทำการเจือจางต่อให้มีระดับการเจือจาง 10^{-3} ปีเปิดสารละลายเจือจางจากหลอดที่มีความเข้มข้นที่ระดับ 10^{-3} ปริมาตร 0.1 ml มา spread บนอาหาร Yeast extract Peptone Dextrose agar (YPD agar) ที่เติม Tetracycline 0.01 g/l บ่มที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส นาน 2 วัน นับจำนวนยีสต์ทั้งหมดและคำนวณในหน่วย CFU/ml [2] ทำการแยกเชื้อที่มีลักษณะที่แตกต่างกันจนได้เชื้อบริสุทธิ์

2.1.2 การศึกษาความสามารถในการทนแอลกอฮอล์ของยีสต์

นำยีสต์ที่คัดแยกได้มาศึกษารูปร่างเซลล์ใต้กล้องจุลทรรศน์ จากนั้นศึกษาความสามารถในการทนแอลกอฮอล์ด้วยการเลี้ยงในอาหาร Yeast extract Peptone Dextrose broth (YPD broth) ที่มีการเติมเอทานอล 6% ทำการทดลองโดยเตรียมหัวเชื้อยีสต์บริสุทธิ์ที่คัดแยกได้ 58 โอไซเลต ในอาหารเหลว YPD ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 24 ชั่วโมง วัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร (OD600) เท่ากับ 0.5 จากนั้นเปิดหัวเชื้อ 10 % โดยปริมาตรลงในอาหารเหลว YPD ที่มีการเติมเอทานอล 6% หมักในสภาวะนิ่งที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส นาน 72 ชั่วโมง วัดค่า

ดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร (OD600) เปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมเอทานอล 6% โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ คัดเลือกไอโซเลตของยีสต์ที่สามารถเจริญเติบโตได้มาศึกษาการผลิตแอลกอฮอล์ในการหมักเมล็ดโกโก้ต่อไป

2.1.3 การศึกษาความสามารถในการผลิตแอลกอฮอล์ของยีสต์ในการหมักเมล็ดโกโก้

นำยีสต์ที่คัดแยกได้มาศึกษาความสามารถในการผลิตแอลกอฮอล์ในการหมักเมล็ดโกโก้ ทำการทดลองโดยเตรียมหัวเชื้อยีสต์บริสุทธิ์ที่คัดแยกได้ 5 ไอโซเลต ในอาหารเหลว YPD ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง วัดค่าดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร (OD600) เท่ากับ 0.5 จากนั้นเปิดหัวเชื้อ 10 % โดยปริมาตรใส่ลงในฟลาสก์ที่มีเมล็ดโกโก้ 200 กรัม ทำการหมักสภาวะนิ่งที่มีการปิดภาชนะหมักปิดสนิท ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส นาน 4 วัน เก็บสารละลายวิเคราะห์ปริมาณแอลกอฮอล์ด้วยเครื่องอูบูลิโอมิเตอร์ (Ebulliometer) เปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมจุลินทรีย์ โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ คัดเลือกไอโซเลตของยีสต์ที่ผลิตแอลกอฮอล์ได้สูงมาศึกษาการหมักเมล็ดโกโก้ต่อไป

2.2 การคัดแยกแบคทีเรียแลคติกในกระบวนการหมักโกโก้

2.2.1 การคัดแยกแบคทีเรียกรดแลคติก

นำตัวอย่างเมล็ดโกโก้หมักที่ระยะเวลาการหมัก 4 วัน จำนวน 25 กรัม มาทำการเจือจางด้วยสารละลายเปปโตน ความเข้มข้น 0.1% ให้มีระดับความเจือจางเท่ากับ 10^{-1} และทำการเจือจางต่อเนื่องให้มีระดับความเข้มข้นที่เหมาะสม เปิดสารละลายเจือจางจากหลอดที่มีความเข้มข้นที่เหมาะสมปริมาตร 0.1 ml มา spread บนจานอาหารเลี้ยงเชื้อ MRS agar ที่มีการเติม 2% CaCO_3 และ Cycloheximide 0.01 g/l เกลี่ยให้กระจายทั่วจานจนแห้ง นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส นาน 2 วัน คัดเลือกโคโลนีที่เกิดวงใสบนอาหารเลี้ยงเชื้อ นับจำนวนแบคทีเรียกรดแลคติกที่เกิดวงใสทั้งหมด และคำนวณในหน่วย CFU/ml [3] ทำการแยกเชื้อที่มีลักษณะที่แตกต่างกันจนได้เชื้อบริสุทธิ์ นำไอโซเลตของเชื้อที่คัดแยกได้มาทดสอบแกรมแบคทีเรียและการทดสอบเอนไซม์คะตาเลส (Catalase Test) โดยหยด H_2O_2 เข้มข้น 3% ลงบนสไลด์จากนั้นเขี่ยโคโลนีลงไปผสมเขย่าด้วยกัน แล้วสังเกตการเกิดฟอง ถ้าเกิดฟองจะให้ผลเป็นบวก แต่ถ้าไม่เกิดฟองจะให้ผลเป็นลบ โดยแบคทีเรียกรดแลคติกจะให้ผลเป็นลบไม่เกิดฟองก๊าซ โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ

2.2.2 การศึกษาความสามารถในการผลิตกรดของแบคทีเรียแลคติกในการหมักเมล็ดโกโก้

นำแบคทีเรียแลคติกที่คัดแยกได้มาศึกษาความสามารถในการผลิตกรดในการหมักเมล็ดโกโก้ ทำการทดลองโดยเตรียมหัวเชื้อแบคทีเรียแลคติกบริสุทธิ์ที่คัดแยกได้ 6 ไอโซเลต ในอาหารเหลว MRS ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง วัดค่าดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร (OD600) เท่ากับ 0.5 จากนั้นเปิดหัวเชื้อ 10% โดยปริมาตรลงในฟลาสก์ที่มีเมล็ดโกโก้ 200 กรัม ทำการหมักสภาวะนิ่ง ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส นาน 5 วัน เก็บสารละลายวิเคราะห์ปริมาณกรดโดยวิธีไทเทรต เปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมจุลินทรีย์ โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ คัดเลือกไอโซเลตของแบคทีเรียแลคติกที่ผลิตกรดได้สูงมาศึกษาการหมักเมล็ดโกโก้ต่อไป

2.3 การคัดแยกแบคทีเรียผลิตกรดอะซิติกในกระบวนการหมักโกโก้

2.3.1 การคัดแยกแบคทีเรียผลิตกรดอะซิติก

นำตัวอย่างเมล็ดโกโก้หมักที่ระยะเวลาการหมัก 6 วัน จำนวน 25 กรัม มาทำการเจือจางด้วยสารละลายเปปโตน ความเข้มข้น 0.1% ให้มีระดับความเจือจางเท่ากับ 10^{-1} ทำการเจือจางต่อเนื่องให้มีระดับที่เหมาะสม เปิดสารละลายเจือจางจากหลอดที่มีความเข้มข้นที่เหมาะสมปริมาตร 0.1 ml มา spread บนจานอาหาร Acetobacter agar ที่เติม Cycloheximide 0.01 g/l นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส นาน 1-2 วัน นับจำนวนแบคทีเรียกรดอะซิติกทั้งหมดและคำนวณในหน่วย CFU/ml คัดเลือกโคโลนีที่เกิดวงใส [5] ทำการแยกเชื้อที่มีลักษณะที่แตกต่างกันจนได้เชื้อบริสุทธิ์ นำไอโซเลตของเชื้อที่คัดแยกได้มาทดสอบแกรมแบคทีเรีย และการทดสอบเอนไซม์คะตาเลส (Catalase Test) โดยหยด H_2O_2 เข้มข้น 3% ลงบนสไลด์จากนั้นเขี่ยโคโลนีลงไปผสมเขย่าด้วยกันแล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลง ถ้าเกิดฟองจะให้ผลเป็นบวก แต่ถ้าไม่เกิดฟองจะให้ผลเป็นลบ โดยแบคทีเรียกรดอะซิติกจะให้ผลเป็นบวกเกิดฟองก๊าซ

2.3.2 การศึกษาความสามารถในการผลิตกรดของแบคทีเรียกรดอะซิติกในการหมักเมล็ดโกโก้

นำแบคทีเรียผลิตกรดอะซิติกที่คัดแยกมาศึกษาความสามารถในการผลิตกรดในการหมักเมล็ดโกโก้ทำการทดลองโดยเตรียมเลี้ยงหัวเชื้อแบคทีเรียผลิตกรดอะซิติกบริสุทธิ์ที่คัดแยกได้ในอาหารเหลว Acetobacter broth ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส

ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง วัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร (OD600) เท่ากับ 0.5 จากนั้นเปิดหัวเชื้อ 10% โดยปริมาตรลงในพลาสติกที่มีเมล็ดโกโก้ที่ผ่านการหมักด้วยยีสต์สายพันธุ์มาตรฐาน *Saccharomyces cerevisiae* TISTR 5107 นาน 4 วัน ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส โดยมีแอลกอฮอล์เริ่มต้น 6% จำนวน 200 กรัม ทำการหมักสถานะนิ่ง ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส นาน 4 วัน โดยทำการเปิดคลุกเคล้าเมล็ดทุกวัน เก็บสารละลายวิเคราะห์ปริมาณกรดเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมจุลินทรีย์ โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ คัดเลือก ไอโซเลตของแบคทีเรียผลิตภัณฑ์ที่ผลิตกรดได้สูงมาศึกษาการหมักเมล็ดโกโก้ต่อไป

2.4. การศึกษาประสิทธิภาพของกล้าเชื้อจุลินทรีย์ที่คัดแยกได้ต่อการหมักโกโก้

เตรียมเมล็ดโกโก้โดยการนำผลสดโกโก้มาล้างฆ่าเชื้อด้วยสารละลายคลอรีนเพื่อลดจุลินทรีย์ปนเปื้อนจากวัตถุดิบ จากนั้นกับแกะเอาเมล็ดโกโก้สำหรับการทดลอง 1000 g ใส่ในภาชนะหมัก โดยทำการเติมหัวเชื้อจุลินทรีย์แต่ละสายพันธุ์จากทั้ง 3 กลุ่มเชื้อประกอบด้วย ยีสต์ไอโซเลต Y3 และ Y5 แบคทีเรียแลคติก ไอโซเลต L2 และ L4 แบคทีเรียผลิตภัณฑ์ A3 และ A22 โดยแบ่งออกเป็นชุดการทดลอง คือ Y3L2A3, Y3L2A22, Y3L4A3, Y3L4A22, Y5L2A3, Y5L2A22, Y5L4A3 และ Y5L4A22 โดยเติมหัวเชื้อสายพันธุ์ละ 5% ของวัตถุดิบที่ใช้ในการหมัก ผสมให้เชื้อกระจายตัวอย่างทั่วถึง จากนั้นทำการหมักในสภาวะบรรยากาศจริงในเดือน กรกฎาคม 2566 ซึ่งมีอุณหภูมิกลางวันประมาณ 31-36 องศาเซลเซียส อุณหภูมิกลางคืน 24-27 องศาเซลเซียส และความชื้นประมาณ 80-90% ทำการหมักเป็นระยะเวลา 8 วัน โดยควบคุมสภาวะการหมักในช่วงแรก 4 วันแรกเป็นสภาวะไร้อากาศ และ 4 วันในระยะถัดไปเป็นสภาวะมีอากาศโดยจะเปิดภาชนะหมักเพื่อคลุกเคล้าเมล็ดโกโก้ทุกวัน ทำการเก็บตัวอย่างไปวิเคราะห์เอทานอลด้วยเครื่องอีบูลลิโอมิเตอร์ (Ebulliometer) วิเคราะห์กรดโดยการไทเทรต และศึกษากลิ่นรสที่ได้โดยและลักษณะคุณภาพของเมล็ดโกโก้หลังการหมักที่มีคุณภาพดี (Fully Fermented) ต้องมีสีน้ำตาลหรือน้ำตาลแดงเมื่อผ่าดูเนื้อใน (ไม่ม่วง) มีกลิ่นหอมช็อกโกแลต/ผลไม้ ไม่เหม็นเปรี้ยวหรือเหม็นรา เนื้อในร่วน มีรอยแยก เกณฑ์ประเมินหลักคือการทำ Cut Test (ทดสอบการตัด) โดยเมล็ดคุณภาพดีต้องเป็นสีน้ำตาลมากกว่า 60% ของตัวอย่างทั้งหมด โดยใช้ผู้เชี่ยวชาญที่มีประสบการณ์ในการทำโกโก้หมัก 15 คนเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมจุลินทรีย์ โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ

2.5 การศึกษาการจัดจำแนกสายพันธุ์ของของจุลินทรีย์ที่แยกได้จากกระบวนการหมักโกโก้ด้วยเทคนิคทางอนุชีววิทยา

นำเชื้อยีสต์ไอโซเลต Y5 และแบคทีเรียไอโซเลต A22 และ L4 คัดแยกได้มาวิเคราะห์สายพันธุ์โดย เริ่มต้นจากการสกัดดีเอ็นเอรวม (Total genomic DNA) จากตัวอย่างด้วยชุดสกัดสำเร็จรูปและตรวจสอบปริมาณด้วยเครื่อง NanoDrop จากนั้นนำดีเอ็นเอแม่แบบมาเพิ่มปริมาณยีน 16S rDNA ในส่วนวี 3 (V3 region) ด้วยเทคนิค PCR โดยใช้ไพรเมอร์สากล 338F (ที่มีการเติม GC-clamp ที่ปลาย 5') และ 518R เพื่อให้ได้ชิ้นส่วนดีเอ็นเอที่มีความยาวประมาณ 230 คู่เบส ผลผลิต PCR ที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์ เมื่อได้ลำดับนิวคลีโอไทด์ของยีน 16S rDNA ที่สมบูรณ์แล้วให้นำข้อมูลทั้งหมดที่ได้มาระบุสายพันธุ์ของแบคทีเรียด้วยโปรแกรม Blastn ในฐานข้อมูล GenBank (<https://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi>) ของ National Center for Biotechnology Information (NCBI) เพื่อเปรียบเทียบกับลำดับนิวคลีโอไทด์กับฐานข้อมูล โดยเปรียบเทียบจากเปอร์เซ็นต์ของความเหมือนในการจำแนกสายพันธุ์ (% Identities)

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 ผลการคัดแยกเชื้อจุลินทรีย์ในกระบวนการหมักโกโก้

3.1.1 ผลการคัดแยกยีสต์ในกระบวนการหมักโกโก้

3.1.1.1 การคัดแยกยีสต์

ในการคัดแยกเชื้อยีสต์ในกระบวนการหมักเมล็ดโกโก้ด้วยอาหารแข็ง Yeast extract Peptone Dextrose agar (YPD agar) ที่มีการเติมยาปฏิชีวนะ Tetracycline 0.01 g/l เพื่อยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย ตัวอย่างเมล็ดโกโก้ที่ผ่านกระบวนการหมักจากผู้ประกอบการ All about cocoa หรือ โกโก้ตาหลวง อ.ทุ่งสง จ.นครศรีธรรมราช ซึ่งมีการหมักในถังไม้ขนาดกว้าง 1×1×1 เมตร (กว้าง ×ยาว ×สูง) โดยเป็นถังที่ใช้ในการหมัก 2 ครั้งต่อเดือน โดยเลือกตัวอย่างเมล็ดโกโก้ที่ผ่านการหมักมาแล้ว 48 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่าเชื้อยีสต์ทั้งหมด 9.4×10^5 CFU/g โดยสามารถคัดแยกไอโซเลตของเชื้อที่แตกต่างกันได้จำนวน 58 ไอโซเลตในการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาภายใต้กล้องจุลทรรศน์โดยย้อมด้วยสี Methylene blue พบว่ามีเชื้อจำนวน 32 ไอโซเลตที่มีเซลล์ขนาดใหญ่เห็นได้ชัดเจนภายใต้กล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 400 เท่า โดยพบรูปร่างเซลล์ 4 ลักษณะ ได้แก่ ที่มีการสืบพันธุ์

แบบแตกหน่อจำนวน 28 ไอโซเลต เซลล์แบบกระสวยที่มีสืบพันธุ์แบบการแตกหน่อจำนวน 3 ไอโซเลต เซลล์รูปร่างไข่ (Oval) และ เซลล์กลม (Round) และเซลล์รูปร่างท่อนที่มีการสืบพันธุ์แบบ Fission จำนวน 1 ไอโซเลต สำหรับอีก 26 ไอโซเลต เซลล์ขนาดเล็ก ไม่สามารถมองเห็นได้ชัดที่กำลังขยาย 400 เท่าและไม่พบการสืบพันธุ์แบบแตกหน่อหรือแบ่งเซลล์ โดยลักษณะเซลล์ของยีสต์เซลล์ รูปร่างไข่และเซลล์กลมที่พบมีความคล้ายคลึงกับการศึกษาของ [6] ซึ่งคัดแยกเชื้อยีสต์ในการหมักเมล็ดโกโก้

3.1.1.2 ผลของความสามารถในการทนแอลกอฮอล์ของยีสต์

นำยีสต์ที่คัดแยกได้จำนวน 58 (ไอโซเลต Y1-Y58) ไอโซเลตที่ผ่านการศึกษารูปร่างเซลล์ได้กล้องจุลทรรศน์ เมื่อศึกษาความสามารถในการทนแอลกอฮอล์ด้วยการเลี้ยงในอาหาร Yeast extract Peptone Dextrose broth (YPD broth) ที่มีการเติมเอทานอล 6% หลังจากการเลี้ยงที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส นาน 72 ชั่วโมง พบว่า 5 ไอโซเลต ที่สามารถเจริญเติบโตได้ คือ ไอโซเลต Y2, Y3, Y5, Y6, และ Y7 โดยค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร (OD600) เท่ากับ 1.58 ± 0.12 , 2.43 ± 0.23 , 2.25 ± 0.09 , 1.08 ± 0.11 และ 0.82 ± 0.13 ตามลำดับ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเชื้อทั้ง 5 ไอโซเลตสามารถเจริญเติบโตได้ในสภาวะที่มีแอลกอฮอล์ 6% ทั้งนี้จากการเก็บตัวอย่างของเหลวที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการหมักในระบบหมักของผู้ประกอบการมาวิเคราะห์ปริมาณแอลกอฮอล์ พบว่า มีแอลกอฮอล์อยู่ในช่วง 4-6% ในช่วง 48-72 ชั่วโมงของการหมัก ซึ่งของเหลวที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักนี้ผู้ประกอบการนำมาแปรรูปเป็นไวน์โกโก้ ดังนั้นเชื้อยีสต์ที่คัดแยกได้มีความสามารถในการทนแอลกอฮอล์ได้ในระดับที่รองรับสภาวะที่จะเกิดขึ้นจริงในกระบวนการหมัก ยีสต์สายพันธุ์เด่นในการหมักโกโก้ เช่น *Saccharomyces cerevisiae* และ *Pichia kudriavzevii* สามารถทนต่อความเข้มข้นของเอทานอลได้สูงถึง 10-12% [7] โดยคุณสมบัติการทนแอลกอฮอล์ของยีสต์ช่วยรับประกันประสิทธิภาพในการเปลี่ยนน้ำตาลเป็นเอทานอลและเอทานอลหมักน้อยเพกทิน ซึ่งเป็นรากฐานสำคัญในการสะสมสารตั้งต้นเพื่อใช้ในปฏิกิริยาออกซิเดชันคายความร้อนของแบคทีเรียกรดอะซิติกในระยะถัดไป [1]

3.1.1.3 ผลของความสามารถในการผลิตแอลกอฮอล์ของยีสต์ในการหมักเมล็ดโกโก้

นำยีสต์ที่คัดแยกได้จำนวน 5 ไอโซเลตมาศึกษาความสามารถในการผลิตแอลกอฮอล์ในการหมักเมล็ดโกโก้ โดยใช้หัวเชื้อยีสต์ทั้ง 5 ไอโซเลต คือ Y2, Y3, Y5, Y6, และ Y7 ปริมาตร 10% ของเมล็ดโกโก้ หลังจากการเลี้ยงที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส นาน 4 วัน พบว่ายีสต์ทั้ง 5 ไอโซเลต ที่สามารถเจริญเติบโตได้และมีการผลิตแอลกอฮอล์ เท่ากับ 2.5 ± 0.13 , 3.85 ± 0.07 , 3.2 ± 0.02 , 2.85 ± 0.11 และ $2.38 \pm 0.21\%$ ตามลำดับ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ายีสต์ไอโซเลต Y3 และ Y5 มีความสามารถในการผลิตแอลกอฮอล์ในกระบวนการหมักโดยใช้เมล็ดโกโก้เป็นวัตถุดิบได้สูงที่สุด จากการสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีและกลิ่นของเมล็ดโกโก้พบว่า เชื้อยีสต์ไอโซเลต Y5 และ Y7 เมล็ดโกโก้ที่ได้จากกระบวนการหมักมีลักษณะสีน้ำตาลอ่อน มีกลิ่นที่คล้ายกับชุดควบคุมคือ เมล็ดโกโก้ที่ได้จากกระบวนการหมักของผู้ประกอบการที่ระยะเวลาหมักเท่ากัน ในขณะที่ยีสต์ไอโซเลต Y2, Y3 และ Y6 จะมีลักษณะสีของเมล็ดโกโก้ออกเป็นสีชาวมขมพุ่มอ่อน มีกลิ่นแอลกอฮอล์ที่ชัดเจน ทั้งนี้ปริมาณของแอลกอฮอล์ที่ยีสต์ผลิตขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำตาลซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการเจริญและการผลิตแอลกอฮอล์ โดยในเนื้อหุ้มเมล็ดของโกโก้จะพบน้ำตาลกลูโคส 8-13% น้ำตาลซูโครส 0.4-1.0 และพบปริมาณ ฟรุคโตสเล็กน้อย [8] ซึ่งปริมาณน้ำตาลของเยื่อหุ้มเมล็ดโกโก้ในการศึกษาครั้งนี้เท่ากับ 7% ทั้งนี้ความหวานหรือปริมาณน้ำตาลขึ้นกับอายุของผลโกโก้ สายพันธุ์ พื้นที่ปลูก และฤดูกาล โดยยีสต์จะใช้น้ำตาลกลูโคสที่เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวได้ในอัตราที่สูงกว่าการใช้น้ำตาลซูโครสที่เป็นน้ำตาลโมเลกุลคู่ ส่งผลให้สามารถผลิตแอลกอฮอล์ได้สูงกว่าในระยะเวลาหมักที่เท่ากัน

3.2 การคัดแยกแบคทีเรียแลคติกในกระบวนการหมักโกโก้

3.2.1 การคัดแยกแบคทีเรียกรดแลคติก

ในการคัดแยกแบคทีเรียแลคติกในการหมักเมล็ดโกโก้ด้วยอาหาร MRS agar ที่มีการเติม 2% CaCO_3 และ ยาปฏิชีวนะ Cycloheximide 0.01 g/l เพื่อยับยั้งยีสและรา โดยใช้ตัวอย่างเมล็ดโกโก้จากที่ผ่านกระบวนการหมักจากผู้ประกอบการ All about cocoa หรือ โกโก้ตาหลวง อ.ทุ่งสง จ.นครศรีธรรมราช ที่ระยะเวลาหมัก 4 วัน จากผลการทดลองพบว่า มีเชื้อแบคทีเรียแลคติก 6.9×10^4 CFU/g ทำการเก็บโคลนินของเชื้อที่เกิดบริเวณวงไสบนอาหารเลี้ยงเชื้อได้จำนวน 26 (L1-L26) ไอโซเลตจากแบคทีเรียทั้งหมดที่คัดแยกได้ โดยทั้ง 26 ไอโซเลตที่มีลักษณะเป็นแบคทีเรียรูปท่อน หรือท่อนสั้น ย้อมติดสีแกรมบวก 7 ไอโซเลต (L2, L3, L4, L5, L6, L15 และ L23) แกรมลบ 19 ไอโซเลต (L1, L7, L8, L9, L10, L11, L12, L13, L14, L16, L17, L18, L19, L20, L21 L22 L24 L25 และ L26) เซลล์มีการจัดเรียงตัวแบบเซลล์เดี่ยวหรือเซลล์เดี่ยวต่อกันเป็นเส้นสาย มีเชื้อจำนวน 3 ไอโซเลตที่ให้ผลการทดสอบ Catalase เป็นบวก และ 23 ไอโซเลตให้ผลเป็นลบ ซึ่งลักษณะคุณสมบัติของแบคทีเรียแลคติกจะต้องย้อมติดสีแกรมบวก

และให้ผล Catalase เป็นลบ ดังนั้นจากผลการทดลองพบว่าไอโซเลต L2, L3, L4, L5, L6 และ L15 ที่แสดงให้เห็นว่าเป็นแบคทีเรียแลคติก ทั้งนี้จากผลการทดสอบที่ไอโซเลตอื่นๆ แสดงวงใสในอาหารที่มีการเติม 2% CaCO₃ ไม่ใช่แบคทีเรียแลคติกอาจเนื่องจากแบคทีเรียเหล่านั้นมีความสามารถในการผลิตกรดแล้วเกิดการย่อย CaCO₃ ได้เช่นกัน

3.2.2 ผลของความสามารถในการผลิตกรดของแบคทีเรียแลคติกในการหมักเมล็ดโกโก้

เมื่อทดสอบความสามารถในการผลิตกรดของแบคทีเรียแลคติกที่คัดแยกได้จำนวน 6 ไอโซเลตในกระบวนการหมักเมล็ดโกโก้ ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส นาน 5 วัน พบว่าทั้ง 6 ไอโซเลต สามารถผลิตกรดได้ทั้งหมด โดยมีปริมาณกรดเท่ากับ 1.8 ± 0.16 , 0.8 ± 0.20 , 1.2 ± 0.14 , 0.4 ± 0.09 , 0.9 ± 0.19 และ 0.6 ± 0.13 สำหรับไอโซเลต L2, L3, L4, L5, L6 และ L15 ตามลำดับ โดยไอโซเลต L2 และ L4 เป็นไอโซเลตที่ให้ปริมาณกรดสูงที่สุด จึงถูกคัดเลือกไปศึกษาในการทดลองต่อไป

3.3. การคัดแยกแบคทีเรียผลิตกรดอะซิติกในกระบวนการหมักโกโก้

3.3.1 การคัดแยกแบคทีเรียผลิตกรดอะซิติก

ในการคัดแยกแบคทีเรียอะซิติกในตัวอย่างเมล็ดโกโก้หมักที่ระยะเวลาการหมัก 6 วันด้วยอาหาร Acetobacter agar ที่เติม Cycloheximide 0.01 g/L โดยทำการเก็บโคโลนีของเชื้อที่เกิดบริเวณวงใสบนอาหาร จำนวน 39 (A1-A39) ไอโซเลตจากแบคทีเรียทั้งหมดที่คัดแยกมีรูปร่างท่อน ที่มีลักษณะเป็นแบคทีเรียรูปท่อน หรือท่อนสั้น มีเชื้อจำนวน 12 ไอโซเลต (A3, A6, A15, A20, A21, A22, A29, A30, A32, A33, A34 และ A36) ย้อมติดสีแกรมลบ และ ไอโซเลตที่เหลือทั้ง 27 ไอโซเลตย้อมติดสีแกรมบวก เซลล์มีการจัดเรียงตัวแบบเซลล์เดี่ยวหรือเซลล์เดี่ยวต่อกันเป็นเส้นสาย มีเชื้อจำนวน 13 ไอโซเลตที่ให้ผลการทดสอบ Catalase เป็นบวก ซึ่งลักษณะคุณสมบัติของแบคทีเรียอะซิติกจะต้องย้อมติดสีแกรมลบ และให้ผล Catalase เป็นบวก ดังนั้นจากผลการทดลองที่ได้จึงคัดเลือกแบคทีเรียไอโซเลต A3, A6, A15, A20, A21, A22, A29, A30, A32, A33, A34 และ A36 ไปศึกษาการผลิตกรดในการหมักเมล็ดโกโก้

3.3.2 ผลของความสามารถในการผลิตกรดของแบคทีเรียกรดอะซิติกในการหมักเมล็ดโกโก้

การทดสอบความสามารถในการผลิตกรดของแบคทีเรียอะซิติกที่คัดแยกได้จำนวน 13 ไอโซเลตในกระบวนการหมักเมล็ดโกโก้ ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส นาน 4 วัน พบว่าทั้ง 13 ไอโซเลต สามารถผลิตกรดได้ทั้งหมด โดยมีปริมาณกรดอยู่ในช่วง 0.4 ± 0.09 ถึง 3.0 ± 0.23 % โดยสองไอโซเลตที่มีการผลิตกรดสูงที่สุดคือ ไอโซเลต A3 และ A22 โดยมีปริมาณกรดเท่ากับ 2.8 ± 0.06 และ 3.0 ± 0.23 % ตามลำดับ (Table 1) แบคทีเรียกรดอะซิติกเจริญได้รวดเร็วและสูงที่สุดเมื่อเยื่อหุ้มเมล็ดโกโก้ถูกย่อยสลายและมีอากาศเพียงพอ ซึ่งในระยะที่ 2 ของกระบวนการหมัก จะมีการเปิดระบบหมักเพื่อคลุกเคล้าเมล็ดโกโก้ ซึ่งจะเป็นการเพิ่มอากาศเข้าไปในระบบหมักซึ่งจะเป็นช่วงที่แบคทีเรียอะซิติกมีการเจริญเติบโตดี โดยเป็นระยะที่ยีสต์และแบคทีเรียแลคติกเจริญเติบโตลดลง แบคทีเรียกรดอะซิติก (เช่น *Acetobacter aceti* หรือ *Gluconobacter* spp.) จะเริ่มมีบทบาทเด่นในช่วง 48-72 ชั่วโมง ของการหมัก [1] กระบวนการนี้สำคัญมากเพราะจะทำให้เอนไซม์ภายในเมล็ดผสมคลุกเคล้ากับสารประกอบฟีนอลิกและโปรตีน ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการพัฒนาสีน้ำตาลและกลิ่นหอมเฉพาะตัวของโกโก้ [9] จากผลการทดลองนี้จึงคัดเลือกไอโซเลตของแบคทีเรียผลิตกรดอะซิติกไอโซเลต A3 และ A22 ไปศึกษาการหมักเมล็ดโกโก้ต่อไป

Table 1 The amount of acid produced by acetic bacteria during the fermentation of cocoa beans at 35 °C for 4 days.

Isolates	Acid (%)	Isolates	Acid (%)
A3	2.8 ± 0.06	A30	2.1 ± 0.13
A6	0.6 ± 0.16	A32	2.1 ± 0.08
A15	1.2 ± 0.22	A33	1.5 ± 0.31
A20	1.0 ± 0.14	A34	0.7 ± 0.21
A21	0.4 ± 0.09	A36	1.0 ± 0.28
A22	3.0 ± 0.23	A39	1.3 ± 0.19
A29	2.4 ± 0.15	Control	0.03 ± 0.19

3.4 ผลของประสิทธิภาพของกล้าเชื้อจุลินทรีย์ที่คัดเลือกได้ต่อการหมักโกโก้

เมื่อนำเอาเชื้อจุลินทรีย์แต่ละชนิดที่มีประสิทธิภาพดีที่สุกจากการทดลองก่อนหน้าจากทั้ง 3 กลุ่มเชื้อประกอบด้วย ยีสต์ไอโซเลต Y3 และ Y5 แบคทีเรียแลคติก ไอโซเลต L2 และ L4 แบคทีเรียผลิตกรดอะซิติก A3 และ A22 มาศึกษาประสิทธิภาพในการเป็นกล้าเชื้อหมักเมล็ดโกโก้ โดยแบ่งออกเป็นชุดการทดลอง คือ Y3L2A3, Y3L2A22, Y5L4A3, Y5L4A22, Y5L2A3, Y5L2A22, Y5L4A3 และ Y5L4A22 และหมักที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส นาน 8 วัน โดยควบคุมสภาวะการหมักในช่วงแรก 4 วันแรกเป็นสภาวะไร้อากาศ ผลการทดลองเบื้องต้นพบว่าที่ระยะเวลาการหมัก 2 วันหลังการหมักมีปริมาณแอลกอฮอล์สูงสุดของทุกชุดการทดสอบอยู่ในช่วง 5.80 -9.20 % และพบกรดตั้งแต่ช่วงแรกของการหมักซึ่งเป็นกรดแลคติกที่เกิดขึ้นได้ในสภาวะที่มีออกซิเจนต่ำ และพบกรดสูงที่ระยะเวลา 8 วันของการหมักอยู่ในช่วง 1.80-2.80% ซึ่งคาดว่าเป็นกลุ่มกรดอะซิติก เนื่องจากหลังจากเก็บตัวอย่างวันที่ 4 แล้วจะมีการเปิดระบบหมักเพื่อคลุกเคล้าซึ่งเป็นการเพิ่มออกซิเจนเข้าสู่ระบบส่งผลให้แบคทีเรียกลุ่มอะซิติกเจริญเติบโตได้ และมีการเปลี่ยนเอทานอลที่ยีสต์ผลิตขึ้นในช่วงแรกของการหมักเปลี่ยนเป็นกรดอะซิติก ปริมาณแอลกอฮอล์ลดลงอย่างเห็นได้ชัดจนคงเหลืออยู่ในช่วง 1.60-2.20% ดังแสดงใน Table 2 โดยยีสต์และแบคทีเรียกรดแลคติกจะย่อยสลายน้ำตาลและเพกทินในเนื้อหุ้มเมล็ดให้เป็นเอทานอลและกรดแลคติกภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน ซึ่งเนื้อเยื่อนั้นเปลี่ยนกลายเป็นของเหลวสีขาวใส มีความขุ่นเล็กน้อย มีเอทานอลและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้น และ 4 วันในระยะถัดไปเป็นสภาวะมีอากาศโดยจะเปิดภาชนะหมักเพื่อคลุกเคล้าเมล็ดโกโก้ทุกวัน แบคทีเรียกรดอะซิติกจะเปลี่ยนเอทานอลเป็นกรดอะซิติกผ่านปฏิกิริยาคายความร้อน ทำให้อุณหภูมิสูงถึง 45-50°C ซึ่งส่งผลให้เมล็ดตาย (Seed death) จะควบคุมการออกซิไดซ์ เอทานอลและกรด (ซิตริก, มาลิก, แลคติก) กรดอะซิติก และกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ภายในเมล็ดเพื่อสร้างสารตั้งต้นของกลิ่นรสซ็อกโกแลตและลดความฝาดลงอย่างมีนัยสำคัญ [1] โดยกรดแลคติกที่เกิดขึ้นจะซึมเข้าไปในเนื้อเยื่อของเมล็ดโกโก้ (Cotyledon) ร่วมกับกรดอะซิติก ทำให้เกิดสภาวะความเป็นกรดที่เหมาะสมในการกระตุ้นเอนไซม์ภายในเมล็ด เช่น เอนไซม์โปรตีเอสซึ่งจะย่อยโปรตีนให้กลายเป็นกรดอะมิโนและเปปไทด์สายสั้น ซึ่งเป็นสารตั้งต้นสำคัญในการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) ระหว่างการคั่ว เพื่อสร้างกลิ่นซ็อกโกแลตที่พึงประสงค์ [10] จากการทดลองพบว่าสีของเมล็ดโกโก้ที่ผ่านการหมักแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มคือ เมล็ดมีเมือกหุ้มสีขาวมีความขุ่นสูง และเมล็ดสีน้ำตาลมีความขุ่นที่ต่ำกว่าซึ่งมีลักษณะสีปรากฏและกลิ่นคล้ายคลึงกับเมล็ดที่ผ่านการหมักของผู้ประกอบการ

3.5 ผลการจัดจำแนกสายพันธุ์ของของจุลินทรีย์ที่แยกได้จากกระบวนการหมักโกโก้ด้วยเทคนิคทางอนุชีววิทยา

ผลการจัดจำแนกจุลินทรีย์ที่แยกได้โดยการเพิ่มจำนวน 16s rDNA เปรียบเทียบกับฐานข้อมูล GenBank พบว่าเชื้อยีสต์ไอโซเลต Y5 เป็นเชื้อ *Saccharomyces cerevisiae* โดยมีค่าความใกล้เคียง 99.99% เชื้อแบคทีเรียไอโซเลต A22 เป็นเชื้อ *Acetobacter aceti* โดยมีค่าความใกล้เคียง 99.5% ในขณะที่แบคทีเรียไอโซเลต L4 คือ เชื้อ *Lactococcus lactis* โดยมีค่าความใกล้เคียง 99% สอดคล้องกับจากผลการศึกษารายงานว่ามีจุลินทรีย์ธรรมชาติอยู่ในระบบการหมักได้แก่ *S. cerevisiae*, *H. uvarum*, *H. guilliermondii*, *Lactobacillus fermentum*, *Pediococcus* sp., *Acetobacter pasteurianus* โดยยีสต์แบคทีเรียอะซิติก และแบคทีเรียแลคติกเป็นจุลินทรีย์ที่มีการเจริญและมีปริมาณมากในระบบหมัก ซึ่งมีผลต่อกลิ่นรสของโกโก้แมสที่ได้ โดยยีสต์ใช้คาร์โบไฮเดรตจากเนื้อเยื่อสีขาวที่ห่อหุ้มเมล็ดโกโก้ทั้งแบบแอโรบิกและสภาวะไร้ออกซิเจนเพื่อผลิตเอทานอลและทำให้เนื้อเยื่อสีขาวกลายเป็นของเหลวผ่านการ Deleptonization จึงลดความหนืดของเนื้อเยื่อสีขาว [1] บทบาทของแบคทีเรียแลคติกคือการแปลงน้ำตาลในเนื้อเยื่อสีขาวที่ห่อหุ้มเมล็ดโกโก้เป็นกรดอินทรีย์ ส่วนใหญ่เป็นกรดแลคติกและผลิตภัณฑ์อื่นๆ และเมื่อมีอากาศเข้ามาเพิ่มขึ้นในแบคทีเรียผลิตกรดอะซิติกเริ่มเติบโตและออกซิไดซ์เอทานอลที่ผลิตครั้งแรกโดยยีสต์เป็นกรดอะซิติกส่งผลให้เกิดการพัฒนาของสารตั้งต้นของรสชาติ [11]

4. สรุป

การศึกษาจุลินทรีย์ในกระบวนการหมักโกโก้พบเชื้อยีสต์ 10^4 CFU/g แบคทีเรียกรดแลคติก (LAB) 10^3 CFU/g และแบคทีเรียกรดอะซิติก (AAB) โดยจากการคัดเลือกไอโซเลตที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในด้านการหมักเอทานอลและการผลิตกรดพบว่าไอโซเลต Y5 (*Saccharomyces cerevisiae*), L4 (*Lactococcus lactis*) และ A22 (*Acetobacter aceti*) จากการผลิตแอลกอฮอล์และกรดสูงที่สุด โดยชุดกล้าเชื้อทดสอบมีปริมาณแอลกอฮอล์สูงที่สุดของทุกชุดการทดสอบอยู่ในช่วง 5.80-9.20% ในสภาวะไม่มีอากาศ และพบกรดอยู่ในช่วง 1.80-2.80% ในช่วงสภาวะมีอากาศ และเมื่อวิเคราะห์สายพันธุ์ด้วย 16S rDNA พบว่ามีค่าความคล้ายคลึงทางพันธุกรรม 99.0-99.99% เมื่อเทียบเคียงข้อมูลทางพันธุกรรมกับฐานข้อมูล GenBank เมื่อนำจุลินทรีย์ทั้ง

3 สายพันธุ์มาพัฒนาเป็นก๊อแล้เชื้อผสม พบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการหมักให้เกิดแอลกอฮอล์และกรดเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการหมัก เกิดลักษณะทางประสาทสัมผัสที่เป็นเอกลักษณ์ เมล็ดโกโก้เกิดกระบวนการหมักเมื่อประเมินด้วยวิธี Sensory evaluation พบว่ามีลักษณะสีปรากฏและกลิ่นคล้ายคลึงกับเมล็ดที่ผ่านการหมักของผู้ประกอบการ มีสีและกลิ่นเป็นที่ยอมรับของผู้เชี่ยวชาญในการหมักโกโก้ และมีคุณภาพด้านสีและกลิ่นเป็นที่ยอมรับของผู้เชี่ยวชาญในระดับเทียบเท่ากับการหมักมาตรฐานเชิงพาณิชย์ โดยจากผลการทดลองเมื่อนำเชื้อที่คัดแยกได้มาพัฒนาเป็นก๊อแล้เชื้อผสม (Mixed starter culture) สำหรับการหมักโกโก้จะช่วยควบคุมคุณภาพของการหมักให้มีประสิทธิภาพส่งผลต่อคุณภาพของเมล็ดโกโก้หลังการหมักที่มีคุณลักษณะที่ดีตรงกับความต้องการของตลาด

Table 2 Total of alcohol and acid produced during the fermentation of cocoa beans using three isolated microbial strains at 35°C for 8 days.

Parameters	Experimental set	Fermentation time (Day)				
		0	2	4	6	8
Alcohol (%)	Y3L2A3	0.08	9.20	5.00	2.60	1.80
	Y3L2A22	0.08	7.20	4.60	3.00	2.00
	Y3L4A3	0.08	8.00	3.80	2.60	2.00
	Y3L4A22	0.08	6.40	5.00	3.20	3.00
	Y5L2A3	0.08	7.40	2.60	2.20	2.20
	Y5L2A22	0.08	7.00	5.20	3.00	1.90
	Y5L4A3	0.08	7.20	2.40	2.20	2.20
	Y5L4A22	0.08	5.80	3.80	2.60	1.60
	Control	0.00	0.50	0.80	0.30	0.30
Acid (%)	Y3L2A3	0.30	0.70	1.60	1.90	2.20
	Y3L2A22	0.30	0.80	1.20	1.70	1.90
	Y3L4A3	0.30	0.60	1.30	1.90	2.80
	Y3L4A22	0.30	1.10	1.80	2.40	2.90
	Y5L2A3	0.30	0.80	1.30	1.50	1.80
	Y5L2A22	0.30	1.00	1.40	1.80	2.20
	Y5L4A3	0.30	0.90	1.50	1.90	2.70
	Y5L4A22	0.30	0.90	1.25	1.60	2.45
	Control	0.10	0.10	0.25	0.20	0.30

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (อว.) ประจำปีงบประมาณ 2566 ผู้วิจัยขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเป็นอย่างสูงที่ได้ให้การสนับสนุนงบประมาณและสิ่งอำนวยความสะดวกที่เอื้อต่อการดำเนินงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Schwan, R. F., and Wheals, A. E. 2004. The microbiology of cocoa fermentation. *Crit Rev Food Sci Nutr.* 44(4): 205-221.
- [2] Afoakwa, E. O., Paterson, A., Fowler, M., and Ryan, A. 2008. Flavor formation and character in cocoa and chocolate: A critical review. *Crit Rev Food Sci Nutr.* 48(9): 840-857.
- [3] Matabaro, E., Ishimwe, N., Uwimbabazi, E. and Lee, B. H. 2017. Current immunoassay methods for the rapid detection of aflatoxin in milk and dairy products. *Compr Rev Food Sci F.* 18: 808-820.
- [4] วิลาวัลย์ คำป้อ, และ สุพรรณษา สิทธิโชค. 2565. ผลของการใช้กล้าเชื้อผสมต่อคุณภาพและการพัฒนาสารให้กลิ่นรสในระหว่างการหมักเมล็ดโกโก้. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร*, 10(2): 45-58.
- [5] De Vuyst, L., and Weckx, S. 2016. The cocoa bean fermentation process: from ecosystem analysis to starter culture development. *J Appl Microbiol.* 121(1), 5-17.
- [6] อรพิน ภูมิภมร, จันทนา จินดา, บุญให้ แผลมเพชร และ ปิยนุชนาคะ. 2540. การหมักโกโก้ IV : การประเมินคุณภาพทางเคมีและประสาทสัมผัสของโกโก้ หมักด้วยกล้าเชื้อผสม. *วิทยาสารเกษตรศาสตร์ สาขาวิทยาศาสตร์*. 31: 419-428.
- [7] Ho, V. T. T., Fleet, G. H., and Zhao, J. 2014. Unravelling the impacts of microbial community interactions on the sequences of bacterial and fungal species during Vietnam cocoa bean fermentation. *Int J Food Microbiol.* 189: 10-22.
- [8] Jones, R.P. and Greenfield, P.F. 1987. Ethanol and the fluidity of the yeast plasma membrane. *Yeast.* 3: 223-232.
- [9] De Vuyst, L., & Weckx, S. 2016. The cocoa bean fermentation process: From proprietary artifacts to fermented food innovation. *Curr Opin Food Sci.* 7: 52-58.
- [10] Lima, L. J. R., Almeida, M. H., Nout, M. J. R., and Schwan, R. F. 2011. *Thelebolus microsporus* and Lactic Acid Bacteria in cocoa bean fermentation. *Int J Food Microbiol.* 144(3): 354-364.
- [11] Misnawi, J.S., Jamilah, B. and Nazamid, S., 2003. Effects of Cocoa Liquor Roasting on Polyphenol Content, Hydrophobicity and Astringency. *ASEAN Food J.* 12: 103-114.

การประยุกต์ใช้โปรตีน Phagocytosis Activating Protein (PAP) ร่วมกับ Inactivated *Vibrio harveyi* (IVH) เพื่อกระตุ้นภูมิคุ้มกันต่อโรคในกุ้งขาว (*Litopenaeus vannamei*)

Application of Phagocytosis Activating Protein (PAP) and Inactivated *Vibrio harveyi* (IVH) to Enhance Immune Response in Pacific White Shrimp (*Litopenaeus vannamei*)

ปัญชลิกา เดชชะมา^{1,2*}
Panchalika Deachamag^{1,2*}

¹สถานวิจัยจีโนมและชีวสารสนเทศ ²สาขาวิทยาศาสตร์ชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จังหวัดสงขลา 90110 ประเทศไทย
¹Center for Genomics and Bioinformatics Research, ²Division of Biological Science, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Songkhla Province, 90110, Thailand

*Corresponding author: Panchalika Deachamag, e-mail address: dpanchalika@gmail.com

บทคัดย่อ

โปรตีน Phagocytosis Activating Protein (PAP) เป็นโปรตีนที่เกี่ยวข้องกับการกระตุ้นกระบวนการฟาโกไซโทซิสและการทำงานของระบบภูมิคุ้มกัน โดยมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับ macrophage activating factor ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการกระตุ้นการตอบสนองของภูมิคุ้มกันแบบไม่จำเพาะ งานวิจัยก่อนหน้านี้รายงานว่าโปรตีน PAP สามารถกระตุ้นระบบภูมิคุ้มกันในกุ้งกุลาดำ (*Penaeus monodon*) และช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานต่อการติดเชื้อไวรัสตัวแดงดวงขาว (White Spot Syndrome Virus; WSSV) ซึ่งเป็นเชื้อไวรัสที่ก่อให้เกิดความเสียหายอย่างรุนแรงต่ออุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงกุ้งทั่วโลก อย่างไรก็ตาม การประยุกต์ใช้โปรตีน PAP ร่วมกับเชื้อแบคทีเรียที่ถูกทำให้ไม่ก่อโรคเพื่อกระตุ้นภูมิคุ้มกันในกุ้งขาว (*L. vannamei*) ยังมีรายงานจำกัด การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินศักยภาพของโปรตีน PAP ที่ผลิตในแบคทีเรีย *Escherichia coli* สายพันธุ์ BL21 ร่วมกับเชื้อ *V. harveyi* ที่ถูกทำให้ไม่สามารถก่อโรคได้ (inactivated *V. harveyi*; IVH) ในการกระตุ้นระบบภูมิคุ้มกันของกุ้งขาว โปรตีน PAP และเซลล์ IVH ถูกนำมาผสมในอาหารเพื่อให้กุ้งทดลองกิน จากนั้นประเมินการตอบสนองของระบบภูมิคุ้มกันจากการแสดงออกของยีน *Prophenoloxidase (ProPO)* ซึ่งเป็นยีนสำคัญในระบบภูมิคุ้มกันแบบไม่จำเพาะ โดยตรวจวัดด้วยเทคนิค Reverse Transcription Polymerase Chain Reaction (RT-PCR) และใช้กุ้งที่ได้รับอาหารผสมโปรตีน Glutathione S-transferase (GST) เพียงอย่างเดียวเป็นกลุ่มควบคุม ผลการทดลองพบว่ากุ้งที่ได้รับอาหารผสม GST-PAP ร่วมกับ IVH มีการแสดงออกของยีน *ProPO* เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม ($p < 0.05$) โดยระดับการแสดงออกของยีนเพิ่มขึ้นเป็น 2.02 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม ภายหลังจากได้รับอาหารกระตุ้นภูมิคุ้มกันเป็นเวลา 3 วัน เมื่อทดสอบความต้านทานต่อโรคด้วยการให้เชื้อ WSSV หลังจากเลี้ยงกุ้งด้วยอาหารผสม GST-PAP ร่วมกับ IVH เป็นเวลา 3 วัน และเลี้ยงต่อด้วยอาหารปกติอีก 15 วัน พบว่ากุ้งมีอัตราการรอดชีวิต (RPS) เท่ากับ 50% ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการใช้โปรตีน PAP ร่วมกับ IVH สามารถเสริมการตอบสนองของระบบภูมิคุ้มกันในกุ้งขาวได้อย่างมีประสิทธิภาพ และช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการติดเชื้อ WSSV แนวทางดังกล่าวจึงมีศักยภาพในการพัฒนาเป็นสารกระตุ้นภูมิคุ้มกันสำหรับการป้องกันโรคในอุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงกุ้งในอนาคต และอาจช่วยลดความสูญเสียจากการระบาดของโรคในระบบการเพาะเลี้ยงเชิงพาณิชย์ได้

คำสำคัญ: โปรตีนกระตุ้นการจับกินสิ่งแปลกปลอม (PAP), สารกระตุ้นภูมิคุ้มกัน, กุ้งขาว (*Litopenaeus vannamei*), โปรตีนออกซิเดส (ProPO), ไวรัสตัวแดงดวงขาว (WSSV)

Abstract

Phagocytosis Activating Protein (PAP) is a protein associated with the stimulation of phagocytic activity and immune responses. It is similar to macrophage activating factors, which play an important role in the activation of the innate immune system. Previous studies have reported that PAP can stimulate immune responses in black tiger shrimp (*P. monodon*) and enhance resistance against White Spot Syndrome Virus (WSSV) infection, one of the most destructive viral pathogens causing severe economic losses in shrimp aquaculture worldwide. However, studies on the application of PAP in combination with inactivated bacterial components to enhance immunity in Pacific white shrimp (*L. vannamei*) are still limited. The objective of this study was to evaluate the potential of PAP produced in *Escherichia coli* strain BL21 together with inactivated *V. harveyi* (IVH) to stimulate immune responses in Pacific white shrimp. Recombinant PAP protein and IVH cells were incorporated into shrimp feed and administered to experimental shrimp. The immune response was evaluated

by examining the expression of the *Prophenoloxidase (ProPO)* gene, a key component of the shrimp innate immune system, using Reverse Transcription Polymerase Chain Reaction (RT-PCR). Shrimp fed with feed supplemented with Glutathione S-transferase (GST) protein alone were used as the control group. The results showed that shrimp fed with feed containing GST-PAP combined with IVH exhibited significantly increased *ProPO* gene expression compared with the control group ($p < 0.05$), with expression levels reaching approximately 2.02 fold relative to the control. Furthermore, WSSV challenge tests demonstrated that shrimp fed with the GST-PAP and IVH supplemented diet for 3 days and subsequently maintained on a normal diet for 15 days showed a survival rate (RPS) of 50%. These findings indicate that PAP in combination with IVH can effectively enhance immune responses and increase resistance to WSSV infection in *L. vannamei*. This approach may serve as immunostimulants to prevent diseases in shrimp aquaculture.

Keywords: Phagocytosis Activating Protein, immunostimulant, *Litopenaeus vannamei*; Prophenoloxidase, White Spot Syndrome Virus

1. บทนำ

อุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงกุ้งทะเลเป็นหนึ่งในภาคการผลิตสัตว์น้ำที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของหลายประเทศทั่วโลก โดยเฉพาะในภูมิภาคเอเชีย อย่างไรก็ตามการเลี้ยงกุ้งเชิงพาณิชย์ต้องเผชิญกับปัญหาโรคระบาดหลายชนิด โดยเฉพาะโรคไวรัสตัวแดงดวงขาว (WSSV) ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ก่อให้เกิดความเสียหายอย่างรุนแรงต่ออุตสาหกรรมการเลี้ยงกุ้งทั่วโลก [1,2] ไวรัสนี้เป็นไวรัสชนิด DNA ที่มีความสามารถในการแพร่กระจายได้อย่างรวดเร็วในแหล่งเพาะเลี้ยง และสามารถก่อให้เกิดการตายของกุ้งในอัตราสูงภายในระยะเวลาอันสั้น ส่งผลให้เกิดความสูญเสียทางเศรษฐกิจอย่างมากในหลายประเทศ [1,3,4] โดยทั่วไปกุ้งมีระบบภูมิคุ้มกันแบบไม่จำเพาะ (innate immune system) ซึ่งเป็นกลไกหลักในการป้องกันเชื้อโรค โดยประกอบด้วยการทำงานของเซลล์เม็ดเลือดและปัจจัยในสารน้ำ เช่น ระบบโปรเฟโนออกซิเดส (ProPO) ที่มีบทบาทสำคัญในการตอบสนองต่อเชื้อก่อโรคและสิ่งแปลกปลอมในร่างกาย [5] อย่างไรก็ตาม ภายใต้สภาวะการเลี้ยงเชิงพาณิชย์ที่มีความหนาแน่นสูง ระบบภูมิคุ้มกันตามธรรมชาติของกุ้งอาจไม่เพียงพอในการป้องกันการติดเชื้อไวรัสรุนแรง เช่น WSSV ได้ จากปัญหาดังกล่าวจึงมีความพยายามในการพัฒนาแนวทางต่างๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบภูมิคุ้มกันในกุ้ง โดยหนึ่งในแนวทางที่ได้รับความสนใจคือการใช้สารกระตุ้นภูมิคุ้มกัน (immunostimulants) ซึ่งสามารถช่วยกระตุ้นการตอบสนองของระบบภูมิคุ้มกันและเพิ่มความสามารถในการต้านทานโรคของกุ้งได้ [6] งานวิจัยในช่วงหลายปีที่ผ่านมาได้รายงานว่าการเสริมสารกระตุ้นภูมิคุ้มกันในอาหารสามารถเพิ่มการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับระบบภูมิคุ้มกันในกุ้งขาว (*L. vannamei*) รวมถึงช่วยเพิ่มอัตราการรอดชีวิตหลังการติดเชื้อ WSSV ได้อย่างมีนัยสำคัญ [7] นอกจากนี้ยังมีรายงานว่าสารชีวภาพและสารสกัดจากธรรมชาติหลายชนิดสามารถช่วยเสริมการตอบสนองของระบบภูมิคุ้มกันและเพิ่มความต้านทานต่อเชื้อโรคในกุ้งขาวได้ [8-11] โปรตีน PAP เป็นโปรตีนที่มีบทบาทในการกระตุ้นการทำงานของเซลล์ภูมิคุ้มกัน โดยมีรายงานว่าสามารถแสดงออกเป็น macrophage activating factor ซึ่งเกี่ยวข้องกับกระบวนการตอบสนองทางภูมิคุ้มกัน [12] จากการศึกษาก่อนหน้านี้ ได้มีการแยกยีนโปรตีน PAP ซึ่งประกอบด้วย 144 amino acid (GenBank accession no. AY680836) จากฮีโมลิฟของกุ้ง *Penaeus monodon* ที่ติดเชื้อ WSSV การใช้โปรตีน PAP สามารถกระตุ้นระบบภูมิคุ้มกันในกุ้งกุลาดำ (*P. monodon*) ที่ถูกชักนำด้วยเชื้อไวรัส WSSV ส่งผลให้กุ้งมีความสามารถในการกำจัดเชื้อและเพิ่มความต้านทานต่อการติดเชื้อซ้ำได้ [13]

ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้ ผู้วิจัยจึงมีความสนใจศึกษาการประยุกต์ใช้โปรตีน PAP ที่ผลิตในแบคทีเรีย *E. coli* สายพันธุ์ BL21 ร่วมกับเชื้อ *V. harveyi* ที่ถูกทำให้ไม่สามารถก่อโรคได้ (inactivated *V. harveyi*; IVH) เพื่อใช้เป็นสารกระตุ้นภูมิคุ้มกันในกุ้งขาว (*L. vannamei*) โดยนำโปรตีนและเซลล์แบคทีเรียที่เตรียมได้มาผสมในอาหารกุ้ง เพื่อศึกษาผลต่อการกระตุ้นการตอบสนองของระบบภูมิคุ้มกันของกุ้ง โดยประเมินจากการแสดงออกของยีน *ProPO* รวมทั้งเปรียบเทียบอัตราการรอดชีวิตของกุ้งภายหลังการทดสอบความต้านทานต่อเชื้อไวรัส WSSV

2. วิธีการศึกษา

2.1 การเตรียมดีเอ็นเอลูกผสม pGEX-PAP ในแบคทีเรีย *E. coli* สายพันธุ์ BL21

นำเชื้อแบคทีเรีย *E. coli* สายพันธุ์ Top10 ที่มีดีเอ็นเอลูกผสม pGEX-PAP เลี้ยงในอาหารเหลว LB ที่มี ampicillin ความเข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ปริมาตร 1 มิลลิลิตร เขย่าที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส นาน 16-18 ชั่วโมง นำมาปั่นเหวี่ยงแยกเซลล์ที่ความเร็ว 10,000 รอบต่อนาที นาน 5 นาที เทส่วนใสทิ้ง นำตะกอนมาละลายใน solution I (50 mM glucose, 25 mM Tris-HCl pH 8.0 และ 10 mM EDTA) ปริมาตร 100 ไมโครลิตร แล้วนำไป vortex ที่อุณหภูมิห้อง นาน 5 นาที เติมน้ำ solution II (0.2 N NaOH, 1% SDS) ปริมาตร 200 ไมโครลิตร บ่มบนน้ำแข็ง นาน 5 นาที แล้วเติมน้ำ solution III (5M potassium glacial acetic acid) ปริมาตร 300 ไมโครลิตร บ่มบนน้ำแข็งเป็นเวลา 30 นาที ปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 12,000 รอบต่อนาที นาน 15 นาที ดูดส่วนใสขึ้นมาใส่หลอดใหม่แล้วเติม Isopropanol ปริมาตร 1 เท่าของสารละลายที่ได้ วางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 30 นาที ปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 12,000 รอบต่อนาที นาน 15 นาที เทส่วนใสทิ้ง แล้วล้างตะกอนด้วย 70% ethanol ปริมาตร 500 ไมโครลิตร ปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 12,000 รอบต่อนาที นาน 5 นาที เทส่วนใสทิ้ง แล้วทำตะกอนให้แห้งโดยใช้เครื่องทำแห้งระบบสุญญากาศ (vacuum) ละลายตะกอนด้วยน้ำ DI แล้วนำไปหาปริมาณและคุณภาพดีเอ็นเอ โดยวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 260 นาโนเมตร และ 280 นาโนเมตร ตรวจสอบผลสมิตที่ได้โดยการทำ 1.2% agarose gel electrophoresis และย้ายเข้าสู่แบคทีเรีย *E. coli* สายพันธุ์ BL21 ด้วยวิธีการ Transformation โดยนำเซลล์ *E. coli* BL21 ที่เตรียมให้มีสภาพเป็น competent cell มาผสมกับพลาสมิดดีเอ็นเอรีคอมบิแนนท์ จากนั้นบ่มบนน้ำแข็ง เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปทำ heat shock ที่อุณหภูมิ 42 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 วินาที และนำกลับมาบ่มบนน้ำแข็งอีกครั้งประมาณ 5 นาที หลังจากนั้นเติมอาหารเลี้ยงเชื้อ LB broth ปริมาตร 500 ไมโครลิตร และนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้เซลล์ฟื้นตัวและแสดงออกของยีนดื้อยาปฏิชีวนะ จากนั้นนำเซลล์ไปเปลี่ยนบนอาหารเลี้ยงเชื้อ LB ampicillin ความเข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร และบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16-18 ชั่วโมง โคลนินที่เจริญบนอาหารเลี้ยงเชื้อคัดเลือกลงจะนำไปใช้ในการทดลองการผลิตโปรตีนต่อไป

2.2 การผลิตโปรตีนลูกผสม GST-PAP จากดีเอ็นเอลูกผสม pGEX-PAP ในแบคทีเรีย *E. coli* สายพันธุ์ BL21

นำแบคทีเรีย *E. coli* สายพันธุ์ BL21 ที่มีดีเอ็นเอลูกผสม pGEX-PAP เลี้ยงบนอาหาร LB agar ที่มี Ampicillin ความเข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส นาน 16-18 ชั่วโมง เพื่อแยกให้เป็นโคลนเดี่ยวๆ จากนั้นถ่ายเชื้อลงในอาหารเหลว 2XYT มี Ampicillin ความเข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร บ่มเลี้ยงในเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 180 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส นาน 16-18 ชั่วโมง เพื่อเตรียมเป็นหัวเชื้อ นำ 10% ของหัวเชื้อมาเลี้ยงในอาหารเหลว 2XYT มี Ampicillin ความเข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร บ่มเลี้ยงในเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 180 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร (OD600) เมื่อวัดค่าการดูดกลืนแสงได้ประมาณ 0.4-0.6 ทำการดูดเชื้อเก็บไว้ปริมาตร 1 มิลลิลิตร เพื่อเป็นเซลล์ในสถานะที่ไม่มีการชักนำการแสดงออก จากนั้นจึงกระตุ้นให้แบคทีเรียสร้างโปรตีนลูกผสมด้วยสารละลาย IPTG (Isopropyl- β -D-1-thiogalacto-pyranoside) ความเข้มข้น 1.0 มิลลิโมลาร์ แล้วนำเซลล์ในส่วนที่ไม่มีการชักนำให้มีการแสดงออก และมีการชักนำให้มีการแสดงออกไปบ่มเลี้ยงในเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 180 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส นาน 5 ชั่วโมง ทำการเก็บตะกอนเซลล์โดยหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 4,000 รอบต่อนาที 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที เทส่วนใสทิ้ง นำเซลล์ที่ได้มาละลายด้วยสารละลาย PBS เติมน้ำสารละลาย Lysozyme (1mg/ml) นำไปทำให้เซลล์แตกด้วยคลื่นความถี่สูง (sonication) แล้วนำสารละลายปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 10,000 รอบต่อนาที 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที แยกเก็บสารละลายส่วนใส (soluble protein) และตะกอน (insoluble protein) ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส ตรวจสอบวัดปริมาณโปรตีนโดยใช้วิธี Lowry และ ELISA วิเคราะห์โปรตีนโดยวิธี Sodium Dodecyl Sulfate Polyacrylamide Gel Electrophoresis (SDS-PAGE) และ Western blotting

2.3 การเตรียมสารละลายของเชื้อ *V. harveyi* ที่อ่อนกำลัง (IVH)

เลี้ยง *V. harveyi* ในอาหาร nutrient broth ที่มี 2% ของ NaCl ล้างตะกอนด้วย PBS ที่มี 0.1% Thimerosal บ่มที่ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เก็บที่ 4 องศาเซลเซียส หาน้ำหนักของตะกอนเซลล์ เพื่อผสมในอาหารกึ่ง อัตราส่วนอ้างอิงจากปริมาณที่ใช้ศึกษาจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ [13]

2.4 การเตรียมอาหารเสริมกุ้ง

โดยนำอาหารสำเร็จรูปมาบดละเอียด เติมน้ำ และสารละลายที่สกัดได้จากแบคทีเรียผสมกัน และอัดให้เม็ดเป็นเม็ดใหม่ เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อใช้เป็นอาหารทดลอง

2.5 การกระตุ้นด้วยการกินอาหารผสมสารกระตุ้นภูมิคุ้มกัน

ใช้กุ้ง 10-15 กรัม จากฟาร์มเลี้ยงที่ไม่เคยมีประวัติเกิดการติดเชื้อ นำกุ้งลงเลี้ยงในตู้ที่มีการให้อากาศตลอดเวลา แบ่งออกเป็น 5 กลุ่ม กลุ่มละ 9 ตัว ให้อาหารซึ่งผสมสารสกัดในปริมาณต่างกันออกไปอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 7 วัน สุ่มเก็บตัวอย่าง ครั้งละ 3 ตัว (3N) ทุกกลุ่ม ในวันที่ 3 วันที่ 5 และวันที่ 7 โดยกลุ่มการทดลองมีดังนี้

กลุ่มที่ 1: สารสกัด GST - PAP (ปริมาณ 16 ไมโครกรัม/น้ำหนักกุ้ง 1 กรัม)

กลุ่มที่ 2: สารสกัด IVH (ปริมาณ 300 ไมโครกรัม/น้ำหนักกุ้ง 1 กรัม)

กลุ่มที่ 3: สารสกัด GST (ปริมาณ 16 ไมโครกรัม/น้ำหนักกุ้ง 1 กรัม)

กลุ่มที่ 4: สารสกัด IVH (ปริมาณ 300 ไมโครกรัม/น้ำหนักกุ้ง 1 กรัม)

สารสกัด GST - PAP (ปริมาณ 16 ไมโครกรัม/น้ำหนักกุ้ง 1 กรัม)

กลุ่มที่ 5: กลุ่มควบคุม (อาหารปกติไม่ผสมสารสกัด)

2.6 การศึกษาผลของอาหารเสริมโดยการใช้การแสดงออกของยีน *ProPO* เป็นตัวบ่งชี้ด้านระบบภูมิคุ้มกัน

ภายหลังได้รับอาหารในระยะเวลา 3 วัน: 5 วัน: 7 วัน ช่วงเวลาละ 3 ตัว (3N) มาทำการสกัด total RNA และทำ RT-PCR เพื่อตรวจสอบการแสดงออกของยีน *ProPO* ดังนี้ เจาะเลือดกุ้ง ปริมาตร 100 ไมโครลิตร/ตัว เติม TRIzol reagent 100 ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากันเติม chloroform 20 ไมโครลิตร หมุนเหวี่ยงที่ 12,000 รอบต่อนาที ที่ 2-8 องศาเซลเซียส 15 นาที ดูดส่วนใสด้านบน มาตกตะกอน RNA โดยเติม isopropyl alcohol 0.5 มิลลิลิตร หมุนเหวี่ยงที่ 12,000 รอบต่อนาที ที่ 2-8 องศาเซลเซียส 10 นาที ได้ตะกอนใสติดอยู่ที่ก้นหลอดล้างตะกอนด้วย 75% ethanol นำตะกอนไปทำให้แห้งละลายตะกอนโดยปราศจาก RNase แล้วนำไปหาปริมาณและคุณภาพของ RNA โดยวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 260 นาโนเมตร และ 280 นาโนเมตร ใช้ total RNA 4 ไมโครกรัม นำมาทำ Reverse Transcription (RT) โดยใช้ random primer 500 นาโนกรัม บ่มที่ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที เติมสารสำหรับทำ RT ประกอบด้วย 0.6 mM dNTP, RT buffer, 0.2 U AMV และปราศจาก RNase ปริมาตรรวมเป็น 25 ไมโครลิตร บ่มที่อุณหภูมิ 48 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงและทำ polymerase chain reaction (PCR) ปริมาตร 25 ไมโครลิตร ประกอบด้วย 100 นาโนกรัม cDNA, 0.4 μ M ของแต่ละ primer, 0.2 mM ของแต่ละ dNTP, 10 mM Tris-HCl (pH 9.0), 50 mM KCl, 0.1% TritonX-100, 1.5 mM MgCl₂ และ 2.5U Taq DNA polymerase ทำ PCR โดยใช้สภาวะ 94 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที จำนวน 1 รอบ 94 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที 72 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที จำนวน 30 รอบ และ 72 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที จำนวน 1 รอบ และกำหนด primer สำหรับยีน *proPO* ไพรเมอร์ถูกออกแบบจากลำดับยีน *proPO* ของกุ้ง *P. monodon* จากฐานข้อมูล GenBank (accession no. AF099741.1) และ primer สำหรับยีน β -actin ถูกใช้เป็นยีนอ้างอิงภายใน โดยไพรเมอร์ถูกออกแบบจากลำดับยีน β -actin ของกุ้ง *P. monodon* (GenBank accession no. AF100986) ดังนี้

5' primer (*proPO*-F): 5' GTACTGGCGGGAGGACTA 3'

3' primer (*proPO*-R): 5' CCGTTGCGATCGACCATG 3'

5' primer (*Actin* 1): 5' CAGATCATGTTYGAGACCTTC 3'

3' primer (*Actin* 2): 5' GATGTCCACGTCGCACTTCAT 3'

ทำการตรวจสอบดีเอ็นเอที่ได้โดยนำมาแยกบน 1.8% agarose gel ย้อมด้วย ethidium bromide และ เปรียบเทียบความเข้มข้นของแถบดีเอ็นเอโดยใช้ Gel Documentation system และ 1D image analysis software (Gibco BRL,USA) วิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติด้วยความแปรปรวนแบบสองปัจจัย (two-way analysis of variance; two-way ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ด้วยวิธี Tukey's multiple comparison test โดยกำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ $p < 0.05$

2.7 การทดสอบความสามารถในการต้านทานต่อ WSSV ในกุ้งขาวเมื่อได้รับอาหารเสริมในระยะเวลาที่เหมาะสม

หลังจากได้ข้อมูลอาหารของแต่ละกลุ่มและระยะเวลาที่มีการกระตุ้นระบบภูมิคุ้มกันได้ดีที่สุดแล้วจึงทำการฉีดเชื้อ WSSV ความเข้มข้นที่ทำให้เกิดอัตราการตายเป็น 50% โดยใช้กุ้งกลุ่มละ 15 ตัว บันทึกอัตราการตายของแต่ละกลุ่มเป็นเวลา 15 วัน เปรียบเทียบอัตราการมีชีวิตรอดโดยใช้ค่าเปอร์เซ็นต์การมีชีวิตรอด (Relative percent survival ; RPS) เป็นตัวชี้วัด

$$RPS = 1 - \left[\frac{\text{The percentage mortality of test group}}{\text{The percentage mortality of positive group}} \right] \times 100$$

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 การผลิตโปรตีนลูกผสม GST-PAP จากดีเอ็นเอลูกผสม pGEX-PAP ในแบคทีเรีย *E. coli* สายพันธุ์ BL21

การสกัดดีเอ็นเอลูกผสม pGEX-PAP และทำการย้ายเข้าสู่แบคทีเรีย *E. coli* สายพันธุ์ BL21 นำแบคทีเรีย *E. coli* สายพันธุ์ BL21 ที่มีลำดับดีเอ็นเอที่ผลิตโปรตีนลูกผสม GST-PAP ที่เชื่อมอยู่บนเวกเตอร์ pGEX มาชักนำให้เกิดการสร้างโปรตีนลูกผสม GST-PAP นำโปรตีนมาเปรียบเทียบการแสดงออกของโปรตีนลูกผสม pGEX-PAP ก่อนการชักนำ และหลังการชักนำด้วย IPTG ทำการสกัดโปรตีนลูกผสม GST-PAP จากเซลล์แบคทีเรีย นำมาวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนลูกผสม GST-PAP ด้วยวิธี SDS-PAGE (Figure 1) การวิเคราะห์โปรตีนโดยวิธี Western Blotting เพื่อยืนยันความถูกต้องของโปรตีน pGEX-PAP โดยทำการย้ายโปรตีน จากแผ่นโพลีอะคริลามัดเจลสู่แผ่นไนโตรเซลลูโลสเมมเบรน (Figure 2) การหาปริมาณโปรตีนโดยวิธี Lowry ได้ค่าความเข้มข้นของโปรตีนผสมกับอาหารกุ้งในอัตราความเข้มข้นตามที่กำหนด และใช้เทคนิค ELISA ในการตรวจวิเคราะห์หาปริมาณ GST ในสารตัวอย่างคำนวณหาค่าความเข้มข้นของ GST เทียบกับกราฟมาตรฐานได้ความเข้มข้นของโปรตีน GST เท่ากับ 1.50 นาโนกรัม/ไมโครลิตร และ โปรตีน GST-PAP เท่ากับ 0.85 นาโนกรัม/ไมโครลิตร

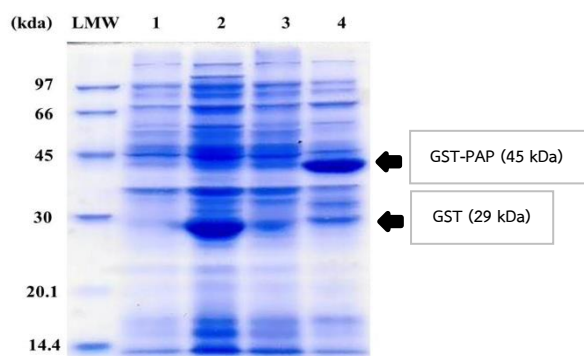


Figure 1 SDS-PAGE analysis of recombinant protein expression. Lane LMW shows the low molecular weight protein marker (kDa). Lane 1 represents the insoluble fraction of GST protein under non-induced conditions. Lane 2 shows the insoluble fraction of GST protein after induction. Lane 3 represents the insoluble fraction of GST-PAP protein under non-induced conditions. Lane 4 shows the insoluble fraction of GST-PAP protein after induction.

จากผลการศึกษาการผลิตโปรตีนลูกผสม GST-PAP ในระบบแบคทีเรีย *E. coli* สายพันธุ์ BL21 พบว่าสามารถชักนำการแสดงออกของโปรตีนได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วย IPTG ซึ่งสอดคล้องกับรายงานที่ระบุว่า *E. coli* ยังคงเป็นระบบหลักที่นิยมใช้ในการผลิตโปรตีนลูกผสม เนื่องจากมีความง่ายในการเพาะเลี้ยง การเจริญเติบโตที่รวดเร็ว และมีระบบพันธุกรรมที่เข้าใจอย่างดี [14] อย่างไรก็ตาม แม้ระบบดังกล่าวจะมีประสิทธิภาพสูง แต่ยังคงมีข้อจำกัดสำคัญ โดยเฉพาะปัญหาการพับตัวของโปรตีนและการเกิด inclusion bodies ซึ่งเป็นอุปสรรคหลักต่อการได้โปรตีนในรูปแบบที่ละลายน้ำได้และมีฤทธิ์ทางชีวภาพ โดยมีรายงานว่า การแสดงออกของโปรตีนในระดับสูงอาจเกินขีดความสามารถของเซลล์เจ้าบ้านในการพับโปรตีน ส่งผลให้เกิดการรวมตัวของโปรตีนในรูปแบบที่ไม่ทำงาน [15] ในงานวิจัยนี้พบว่าโปรตีน GST-PAP มีความเข้มข้นต่ำกว่าโปรตีน GST เพียงอย่างเดียว ซึ่งอาจเกิดจากความซับซ้อนของโครงสร้างโปรตีนลูกผสมและประสิทธิภาพของ solubility tag ที่ไม่สามารถเพิ่มการละลายได้ในทุกกรณี โดยมีรายงานประสิทธิภาพของ fusion tag เช่น GST อาจแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของโปรตีนเป้าหมาย และไม่สามารถคาดการณ์ได้ล่วงหน้า [16] นอกจากนี้การเลือกใช้ fusion tag และสถานะการเหนี่ยวนำ เช่น อุณหภูมิและความเข้มข้นของ IPTG มีผลอย่างมี

นัยสำคัญต่อการเพิ่ม yield และ solubility ของโปรตีนลูกผสม [17] ในส่วนของการวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน การใช้วิธี Lowry ร่วมกับ ELISA ช่วยให้สามารถตรวจวัดโปรตีนได้ทั้งในเชิงปริมาณรวมและความจำเพาะของโปรตีนที่มี GST tag โดยงานวิจัยด้าน immunoassay รายงานว่า ELISA เป็นเทคนิคที่มีความไวและความจำเพาะสูง สามารถตรวจวัดโปรตีนในระดับความเข้มข้นต่ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเหมาะสำหรับการตรวจสอบโปรตีนลูกผสมในตัวอย่างชีวภาพ [18]

โดยภาพรวม ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าการผลิตโปรตีนลูกผสมใน *E. coli* แม้จะเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพสูง แต่ยังคงต้องมีการปรับสภาวะการแสดงออกและเลือกใช้เทคนิคที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการพับตัวและการละลายของโปรตีน ทั้งนี้ การปรับปรุงกระบวนการ เช่น การลดอุณหภูมิในการเหนี่ยวนำ หรือการคัดเลือก fusion tag ที่เหมาะสม อาจช่วยเพิ่มปริมาณโปรตีนที่อยู่ในรูปแบบที่ใช้งานได้ในอนาคต [14–17]

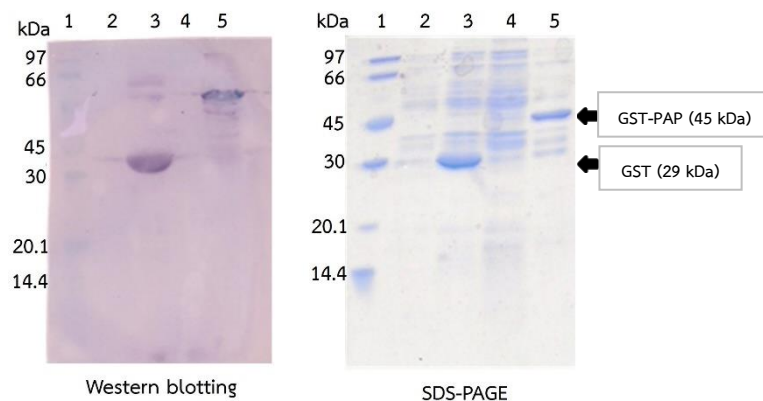


Figure 2 Expression analysis of recombinant proteins by SDS-PAGE and Western blotting. The left panel shows the Western blot membrane, and the right panel shows the corresponding SDS-PAGE gel. Lane 1: low molecular weight protein marker (kDa). Lane 2: non-induced pGEX. Lane 3: induced pGEX. Lane 4: non-induced pGEX-PAP. Lane 5: induced pGEX-PAP. The expected protein bands corresponding to GST (~29 kDa) and the GST-PAP fusion protein (~45 kDa).

3.2 ศึกษาผลของอาหารเสริมโดยการใช้การแสดงออกของยีน *ProPO* เป็นตัวบ่งชี้การกระตุ้นภูมิคุ้มกัน โดยใช้ยีน β -actin เป็น internal standard

จากการทำ PCR ของยีน β -actin เทียบกับ PCR ของยีน *proPO* เพื่อหาแถบที่มีการแสดงออกมากที่สุด (Figure 3) ระดับการแสดงออกของยีน *proPO* ในแต่ละกลุ่มพบว่า กลุ่มควบคุม (Control) มีค่าการแสดงออกต่ำที่สุดในทุกช่วงเวลา (3, 5 และ 7 วัน) ขณะที่กลุ่มที่ได้รับ GST-PAP และ GST-PAP+IVH มีระดับการแสดงออกของยีน *proPO* สูงขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม โดยเฉพาะกลุ่ม GST-PAP+IVH แสดงระดับการแสดงออกสูงสุดในทุกช่วงเวลา รองลงมาคือกลุ่ม GST-PAP ส่วนกลุ่ม IVH และ GST มีค่าการแสดงออกอยู่ในระดับปานกลางและใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลา พบว่าในทุกกลุ่มมีแนวโน้มการแสดงออกของยีนลดลงเล็กน้อยในวันที่ 5 และ 7 เมื่อเทียบกับวันที่ 3 อย่างไรก็ตาม กลุ่มที่ได้รับ GST-PAP และ GST-PAP+IVH ยังคงมีระดับการแสดงออกสูงกว่ากลุ่มอื่นอย่างต่อเนื่อง ผลการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย two-way ANOVA แสดงให้เห็นว่ากลุ่ม GST-PAP และ GST-PAP+IVH มีการแสดงออกของยีน *proPO* สูงกว่ากลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในทุกช่วงเวลา ซึ่งความเข้มของแถบ DNA ของยีน *proPO* ที่ได้เมื่อเทียบกับยีน β -actin พบว่ากลุ่มที่ได้รับอาหารผสม GST-PAP+IVH สูงที่สุดที่ 3 วัน ซึ่งหมายความว่ามีการกระตุ้นภูมิคุ้มกันสูงสุด จึงเลือกใช้การทดสอบการรอดชีวิตของกุ้งโดยให้อาหารผสม PAP+IVH เป็นเวลา 3 วัน ดังนั้นอาหารที่ใช้เลี้ยงกุ้งจะแบ่งเป็น 4 กลุ่มดังนี้

1. อาหารปกติ ให้กุ้งที่มีการฉีดเชื้อ WSSV เป็น positive control
2. อาหารปกติ ให้กุ้งที่ไม่มีการฉีดเชื้อ WSSV แต่ฉีด PBS เป็น negative control
3. อาหารผสม GST 3 วัน แล้วฉีดเชื้อ WSSV
4. อาหารผสมโปรตีน GST-PAP+IVH โดยใช้เลี้ยงกุ้งเป็นเวลา 3 วัน แล้วฉีดเชื้อ WSSV

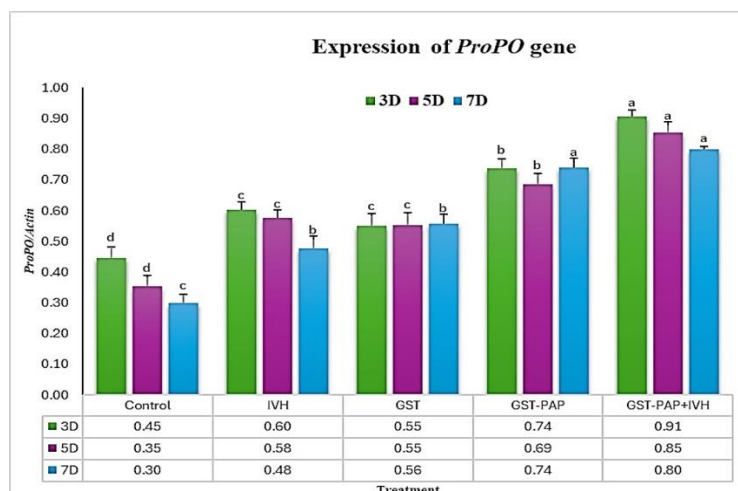


Figure 3 Expression of the *ProPO* gene, an indicator of immune activation, normalized against β -actin as the internal control gene. ($p < 0.05$)

จากผลการศึกษาการแสดงออกของยีน *ProPO* ซึ่งใช้เป็นตัวบ่งชี้การกระตุ้นระบบภูมิคุ้มกันในกุ้งขาว (*L. vannamei*) พบว่ากลุ่มที่ได้รับอาหารเสริม GST-PAP และโดยเฉพาะกลุ่ม GST-PAP+IVH มีระดับการแสดงออกของยีนสูงกว่ากลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในทุกช่วงเวลา ($p < 0.05$) ซึ่งสะท้อนถึงประสิทธิภาพของสารกระตุ้นภูมิคุ้มกันที่สามารถกระตุ้นระบบภูมิคุ้มกันแบบไม่จำเพาะ (innate immune system) ของกุ้งได้อย่างชัดเจน โดยเฉพาะระบบโปรฟีนอลออกซิเดส (prophenoloxidase system) ซึ่งเป็นกลไกสำคัญในการตอบสนองต่อเชื้อก่อโรค [5,7] ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับรายงานที่พบว่า การเสริมสารกระตุ้นภูมิคุ้มกันในอาหารสามารถเพิ่มการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับภูมิคุ้มกัน เช่น *ProPO*, antimicrobial peptides และ pattern recognition receptors ในกุ้งขาว ซึ่งส่งผลให้มีความสามารถในการต้านทานเชื้อไวรัส WSSV เพิ่มขึ้น [7, 10, 11] โดยเฉพาะการใช้สารกระตุ้นร่วมกัน (combination immunostimulants) เช่น โปรตีนลูกผสมร่วมกับแบคทีเรียที่ถูกทำให้ไม่ก่อโรค สามารถเสริมฤทธิ์กัน (synergistic effect) ในการกระตุ้นภูมิคุ้มกันได้ดีกว่าการใช้เพียงชนิดเดียว [9,10] การที่กลุ่ม GST-PAP+IVH แสดงระดับการแสดงออกของยีน *ProPO* สูงที่สุดในวันที่ 3 อาจสะท้อนถึงการตอบสนองระยะต้น (early immune response) ของกุ้งต่อสารกระตุ้นภูมิคุ้มกัน ซึ่งสอดคล้องกับรายงานที่ระบุว่า การกระตุ้นระบบ *ProPO* มักเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วภายในระยะเวลาไม่กี่วันหลังได้รับสิ่งกระตุ้น และอาจลดลงเมื่อเวลาผ่านไปเนื่องจากกลไกการควบคุมสมดุลของระบบภูมิคุ้มกัน [8,11] การใช้ยีน β -actin เป็น internal control ในการวิเคราะห์ครั้งนี้ เนื่องจากเป็น housekeeping gene ที่มีการแสดงออกค่อนข้างคงที่ และถูกนำมาใช้เป็นตัวอ้างอิงในงานศึกษาการแสดงออกของยีนในกุ้งอย่างแพร่หลาย [7] ทำให้สามารถเปรียบเทียบระดับการแสดงออกของยีน *ProPO* ระหว่างกลุ่มทดลองได้อย่างน่าเชื่อถือ จากผลการทดลองพบว่ากลุ่ม GST-PAP+IVH มีการแสดงออกของยีน *ProPO* สูงที่สุดในวันที่ 3 จึงนำไปใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบการทดลองต่อเนื่อง โดยเลือกช่วงเวลา 3 วัน เป็นระยะเวลาในการให้อาหารเสริมก่อนการทดสอบความต้านทานต่อเชื้อ WSSV ซึ่งเป็นแนวทางที่สอดคล้องกับหลักการออกแบบการทดลองด้าน immunostimulation ที่มักเลือกช่วงเวลาที่เกิดการตอบสนองสูงสุดเพื่อนำไปทดสอบผลทางชีวภาพ เช่น อัตราการรอดชีวิต [6,11]

3.3 การทดสอบการรอดชีวิตของกุ้งหลังฉีดเชื้อ WSSV

การทดลองเพื่อศึกษาเปอร์เซ็นต์อัตราการรอดของกุ้งขาวหลังจากได้รับเชื้อ WSSV เมื่อได้รับอาหารกลุ่มต่างๆ แล้ว (Figure 4) สามารถคำนวณการมีชีวิตรอด Relative percent survival (RPS) ดัง Figure 5 โดยพบว่ากลุ่ม GST มีค่า RPS อยู่ที่ 14% กลุ่ม GST-PAP+IVH มีค่า RPS อยู่ที่ 50%

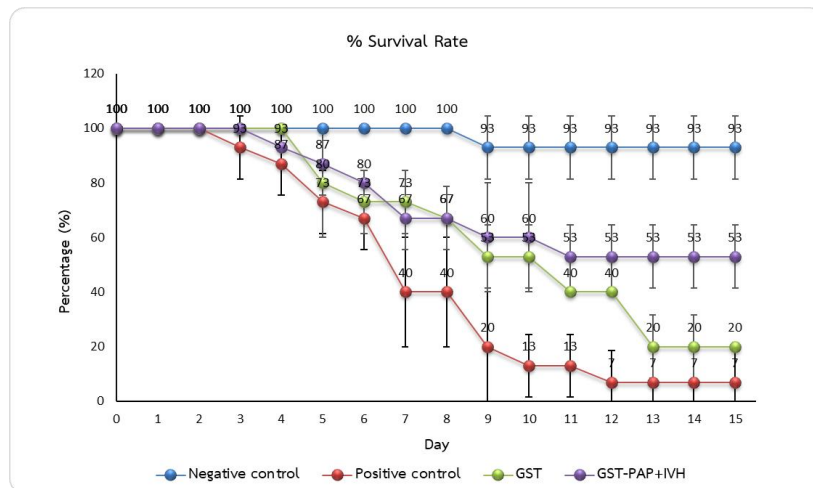


Figure 4 Survival rate of shrimp in different experimental groups after challenge with WSSV

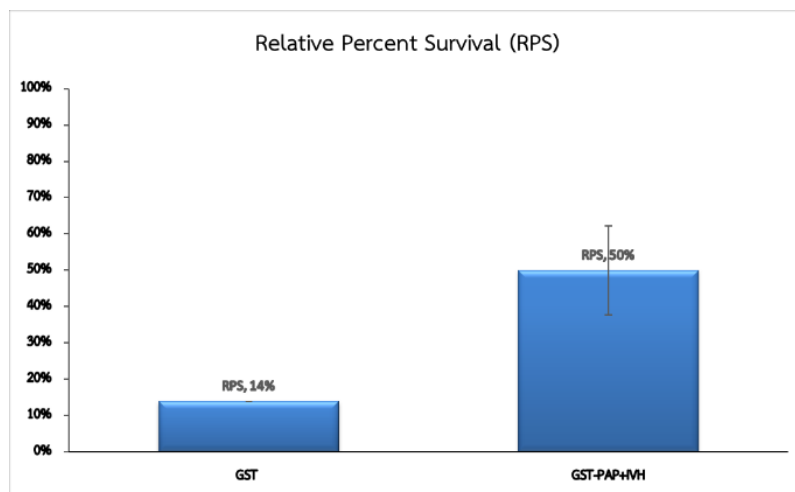


Figure 5 The relative percent survival (RPS) of shrimp in the GST and GST-PAP+IVH groups

จากผลการทดสอบอัตราการรอดชีวิตของกุ้งภายหลังการติดเชื้อไวรัส WSSV พบว่ากลุ่มที่ได้รับอาหารผสมโปรตีนลูกผสม GST-PAP+IVH มีอัตราการรอดชีวิตสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มทดลองอื่นๆ โดยมีค่า RPS เท่ากับ 50% ในขณะที่กลุ่ม GST เพียงอย่างเดียวมีค่า RPS เพียง 14% ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับรายงานระบุว่าสารเสริม immunostimulants ในอาหารกุ้งสามารถเพิ่มอัตราการรอดชีวิตภายหลังการติดเชื้อ WSSV ได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะสารที่สามารถกระตุ้นระบบภูมิคุ้มกันแบบไม่จำเพาะ เช่น ระบบ ProPO การสร้าง reactive oxygen species และ antimicrobial peptides [6, 7, 10] นอกจากนี้ยังมีรายงานว่าการใช้สารกระตุ้นภูมิคุ้มกันร่วมกันสามารถก่อให้เกิดผลเสริมฤทธิ์ (synergistic effect) ส่งผลให้การตอบสนองของระบบภูมิคุ้มกันมีประสิทธิภาพสูงขึ้น และเพิ่มความสามารถในการกำจัดเชื้อก่อโรคได้ดียิ่งขึ้น [9, 11] โดยผลการแสดงออกของยีน ProPO ในการทดลองก่อนหน้า พบว่ากลุ่ม GST-PAP+IVH มีระดับการแสดงออกสูงสุดในวันที่ 3 จะเห็นได้ว่าการกระตุ้นระบบภูมิคุ้มกันในระยะเริ่มต้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับอัตราการรอดชีวิตของกุ้งภายหลังการติดเชื้อ WSSV ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดที่ว่า การตอบสนองของภูมิคุ้มกันแบบ innate ในระยะต้นเป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดความสามารถในการต้านทานโรคในสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง [7,8] กลไกที่เป็นไปได้ของการเพิ่มอัตราการรอดชีวิตในกลุ่ม GST-PAP+IVH อาจเกี่ยวข้องกับการกระตุ้นระบบภูมิคุ้มกันหลาย pathways พร้อมกัน โดยโปรตีน PAP อาจมีบทบาทในการกระตุ้นการทำงานของเซลล์เม็ดเลือดและการตอบสนองแบบ macrophage-like ในขณะที่ inactivated *Vibrio harveyi* (IVH) อาจทำหน้าที่เป็น pathogen-associated molecular patterns (PAMPs) ที่กระตุ้น pattern recognition receptors (PRRs) ส่งผลให้เกิดการกระตุ้น cascade ของระบบ ProPO และ immune signaling pathways อื่น ๆ อย่างมีประสิทธิภาพ [12,14] ซึ่งกลไกดังกล่าวได้รับการยืนยันในงานวิจัยสมัยใหม่ที่แสดง

ให้เห็นว่าการกระตุ้น PRRs สามารถเพิ่มความต้านทานต่อ WSSV ได้อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ แนวโน้มของอัตราการรอดชีวิตที่ลดลงในช่วงเวลาหลังวันที่ 7-15 ในทุกกลุ่ม อาจสะท้อนถึงความรุนแรงของเชื้อ WSSV ซึ่งเป็นไวรัสที่สามารถก่อให้เกิดการติดเชื้ออย่างรวดเร็วและรุนแรง อย่างไรก็ตาม กลุ่มที่ได้รับ GST-PAP+IVH ยังคงมีอัตราการรอดชีวิตสูงกว่ากลุ่มอื่นอย่างต่อเนื่อง แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการกระตุ้นภูมิคุ้มกันที่สามารถยืดระยะเวลาการต้านทานเชื้อได้

4. สรุป

ในการศึกษานี้ โปรตีนลูกผสม GST-PAP ถูกผลิตจากดีเอ็นเอลูกผสม pGEX-PAP ในแบคทีเรีย *E. coli* สายพันธุ์ BL21 โดยชักนำการแสดงออกของโปรตีนด้วยสาร IPTG จากนั้นนำโปรตีนที่ได้มาผสมในอาหารกุ้งในอัตรา 6% ของน้ำหนักอาหารต่อกุ้งน้ำหนัก 1 กรัม เพื่อประเมินศักยภาพในการกระตุ้นระบบภูมิคุ้มกันผลการวิเคราะห์การแสดงออกของยีน *ProPO* ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้สำคัญของการตอบสนองทางภูมิคุ้มกันในกุ้ง พบว่ากลุ่มกุ้งที่ได้รับอาหารผสมโปรตีน GST-PAP ร่วมกับ IVH เป็นเวลา 3 วัน มีระดับการแสดงออกของยีน *ProPO* เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม แสดงให้เห็นว่าโปรตีนลูกผสมดังกล่าวสามารถกระตุ้นระบบภูมิคุ้มกันของกุ้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากผลการกระตุ้นภูมิคุ้มกันดังกล่าว ผู้วิจัยจึงนำไปประเมินความสามารถในการเพิ่มความต้านทานต่อเชื้อไวรัสตัวแดงดวงขาว (WSSV) โดยทำการฉีดเชื้อในระดับความเข้มข้นที่ทำให้กุ้งตาย 50% ภายใน 3-5 วัน และติดตามอัตราการรอดชีวิตเป็นระยะเวลา 15 วัน ผลการทดลองพบว่า กุ้งที่ได้รับอาหารผสมโปรตีน GST-PAP ร่วมกับ IVH มีอัตราการรอดชีวิตสูงกว่ากลุ่มควบคุมที่ได้รับอาหารเม็ดปกติ และกลุ่มที่ได้รับโปรตีน GST เพียงอย่างเดียวอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับผลการกระตุ้นการแสดงออกของยีน *ProPO* ที่เพิ่มขึ้น ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าโปรตีนลูกผสม GST-PAP ร่วมกับ IVH มีศักยภาพในการกระตุ้นระบบภูมิคุ้มกันและเพิ่มความต้านทานต่อการติดเชื้อ WSSV ในกุ้งขาว โดยอาจนำไปประยุกต์ใช้เป็นสารเสริมในอาหารกุ้งเพื่อเพิ่มอัตราการรอดและลดความสูญเสียในอุตสาหกรรมเพาะเลี้ยงกุ้งในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.วิไลวรรณ โชติเกียรติ สำหรับความอนุเคราะห์เชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการผลิตโปรตีนลูกผสม วัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมี รวมทั้งคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการดำเนินงานวิจัย ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยจีโนมและชีวสารสนเทศ และหลักสูตรเทคโนโลยีชีวภาพ สาขาวิทยาศาสตร์ชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ สำหรับการสนับสนุนด้านสถานที่ และเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Lightner, D. V. 1996. A handbook of shrimp pathology and diagnostic procedures for diseases of cultured penaeid shrimp. World Aquaculture Society, Baton Rouge, Louisiana.
- [2] Lo, C. F., Ho, C. H., Peng, S. E., Chen, C. H., Hsu, H. C., Chiu, Y. L., Chang, C. F., Liu, K. F., Su, M. S., Wang, C. H. and Kou, G. H. 1996. White spot syndrome baculovirus (WSBV) detected in cultured and captured shrimp, crabs and other arthropods. *Diseases of Aquatic Organisms*. 27: 215-225.
- [3] Zhu, F., Du, H., Miao, Z. G., Quan, H. Z. and Xu, Z. R. 2009. Protection of *Procambarus clarkii* against white spot syndrome virus using inactivated WSSV. *Fish and Shellfish Immunology*. 26: 685-690.
- [4] Lightner, D. V. 2011. Virus diseases of farmed shrimp in the Western Hemisphere (the Americas): A review. *Journal of Invertebrate Pathology*. 106: 110-130.
- [5] Charoensapsri, W., Amparyup, P., Hirano, I., Aoki, T. and Tassanakajon, A. 2009. Gene silencing of a prophenoloxidase activating enzyme in the shrimp *Penaeus monodon* increases susceptibility to *Vibrio harveyi* infection. *Developmental and Comparative Immunology*. 33: 811-820.
- [6] Abdel-Tawwab, A. M., Monier, M. N. and Hoseinifar, H. M. 2019. Dietary immunostimulants enhance immune responses and disease resistance in shrimp aquaculture: A review. *Reviews in Aquaculture*. 11: 1539-1556.
- [7] Arunrut, S., Sittidilokratna, S., Petchkasem, P. and Tassanakajon, A. 2020. Characterization of immune-related genes in Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) in response to white spot syndrome virus infection. *Fish and Shellfish Immunology*. 98: 437-445.

-
- [8] Zhang, X., Wang, Y., Li, H. and Chen, J. 2022. Taxifolin inhibits white spot syndrome virus infection and enhances innate immune responses in Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *Viruses*. 14(12): 2789.
- [9] Elshopekey, G. E., Elazab, A. M. and Sayed, M. A. 2024. Dietary supplementation of *Gracilaria verrucosa* improves growth performance and immune response of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) challenged with WSSV. *BMC Veterinary Research*. 20: 34.
- [10] Wang, H., Wang, L., Liu, Y. and Song, J. 2021. Effects of dietary immunostimulants on immune gene expression and disease resistance in Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *Aquaculture Reports*. 21: 100872.
- [11] Zhao, Y., Xu, L. and Wang, Z. 2023. Enhancement of immune response and growth performance in *Litopenaeus vannamei* fed dietary lipopolysaccharide. *Fish and Shellfish Immunology*. 134: 108595.
- [12] Segade, F., Claudio, E., Hurlé, B., Ramos, S. and Lazo, P. S. 1996. Differential regulation of the ribosomal protein L26 gene in macrophage activation. *Life Sciences*. 58(4): 277-285.
- [13] Deachamag, P., Intaraphad, U., Phongdara, A. and Chotigeat W. 2006. Expression of a Phagocytosis Activating Protein (PAP) gene in immunized black tiger shrimp. *Aquaculture*. 255(1-4):165–172.
- [14] de Marco, A. 2025. Recent advances in recombinant production of soluble proteins in *Escherichia coli*. *Microbial Cell Factories*. 24: 21.
- [15] Rosano, G. L. and Ceccarelli, E. A. 2023. Additives for soluble recombinant protein expression in *Escherichia coli*. *Fermentation*. 10: 120.
- [16] Costa, S., Almeida, A., Castro, A. and Domingues, L. 2024. Insights into the performance of solubility tags for recombinant protein expression. *International Journal of Molecular Sciences*. 27(2): 1057.
- [17] Ojima-Kato, T. 2025. Advances in recombinant protein production in microorganisms and functional peptide tags. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*. 89(1): 1-10.
- [18] Li, X., Zhang, Y., Chen, H. and Wang, Q. 2024. Recombinant proteins and ELISA sensitivity in immunodiagnosis. *Frontiers in Microbiology*. 14: 1420226.

การพัฒนาแบบจำลองเชิงประจักษ์ที่หลากหลายสำหรับการทำนายความชื้นของข้าวเปลือกระหว่างการอบแห้งด้วยอากาศร้อนชื้น

Development of various empirical models for predicting moisture content of paddy during humidified hot air drying

นิตยา จันกา¹ และ ชัยวัฒน์ รัตนมีชัยสกุล^{2,*}

Nittaya Junka¹ and Chaiwat rattanamechaiskul^{2,*}

¹สาขาเทคโนโลยีการผลิตพืช คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม จังหวัดนครปฐม 73000 ประเทศไทย

²ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร 86160 ประเทศไทย

¹Division of Crop Production Technology, Faculty of Science and Technology, Nakhon Pathom Rajabhat University, Nakhon Pathom Province, 73000, Thailand

²Department of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Prince of Chumphon Campus, Chumphon Province, 86160, Thailand

*Corresponding author: Chaiwat rattanamechaiskul, e-mail address: chaiwat.ra@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองเชิงประจักษ์ที่หลากหลายสำหรับการทำนายความชื้นของข้าวเปลือกระหว่างการอบแห้งด้วยอากาศร้อนชื้น ซึ่งมีลักษณะพฤติกรรมการควบแน่นของไอน้ำในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการ ความชื้นของข้าวเปลือกจะไม่ลดลงอย่างต่อเนื่องเหมือนการอบแห้งด้วยอากาศร้อน แบบจำลองที่พัฒนาได้แก่ Page, two-term exponential, diffusion approximation และ logarithmic drying model ถูกใช้ในการทำนายโดยประยุกต์ร่วมกับสมการ Exponential Rise to Maximum (ERM) เพื่ออธิบายช่วงการควบแน่น ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองถูกประมาณค่าด้วยวิธีการถดถอยแบบกำลังสองน้อยที่สุดและใช้สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เป็นดัชนี ผลการศึกษาพบว่า แบบจำลองที่พัฒนาให้ค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.9950–0.9966 ซึ่งสูงกว่าแบบจำลอง Page เดิมอย่างมีนัยสำคัญ โดยแบบจำลอง modified diffusion approximation ให้สัมสัมพันธ์สูงที่สุด

คำสำคัญ: การอบแห้ง, อากาศร้อนชื้น, ข้าวเปลือก, แบบจำลองเชิงประจักษ์, การควบแน่น

Abstract

This study aimed to develop various empirical models for predicting the moisture content of paddy during humidified hot air drying, which exhibits a condensation phenomenon at the initial stage of the process. The paddy moisture content does not decrease continuously as in conventional hot air drying. The Page, two-term exponential, diffusion approximation, and logarithmic drying models were employed and combined with the Exponential Rise to Maximum (ERM) equation to describe the condensation period. Model parameters were estimated using the least squares regression method, and the coefficient of determination (R^2) was used as the performance indicator. The results showed that the developed models achieved high prediction accuracy, with R^2 values ranging from 0.9950 to 0.9966, which were significantly higher than those obtained from the conventional Page model. Among these models, the modified diffusion approximation model provided the highest correlation.

Keywords: drying, humidified hot air, paddy, empirical model, condensation

1. บทนำ

การอบแห้งเป็นขั้นตอนสำคัญหลังการเก็บเกี่ยวซึ่งมีผลโดยตรงต่อคุณภาพและความปลอดภัยทางอาหารของข้าวเปลือก เนื่องจากข้าวเปลือกภายหลังการเก็บเกี่ยวมีความชื้นสูง จำเป็นต้องลดความชื้นให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษาและการแปรรูปในระยะยาว [1] การอบแห้งด้วยอากาศร้อนเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรม [2] อย่างไรก็ตาม วิธีดังกล่าวยังมีข้อจำกัดสำคัญคืออัตราการถ่ายเทความร้อนในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการค่อนข้างต่ำ เนื่องจากอุณหภูมิเริ่มต้นของเมล็ดข้าวเปลือกต่ำกว่าอุณหภูมิของตัวกลางอบแห้งเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะในกรณีของเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดเซชัน [3-4] ส่งผลให้ต้องใช้ระยะเวลาานานกว่าความร้อนจะถ่ายโอนเข้าสู่แกนกลางของเมล็ดข้าว ส่งผลให้อัตราการอบแห้งและประสิทธิภาพการใช้

พลังงานในช่วงต้นของกระบวนการอยู่ในระดับต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนประสิทธิภาพมีความสัมพันธ์โดยตรงกับอุณหภูมิของวัสดุอบแห้ง [5-6]

การเปลี่ยนตัวกลางการอบแห้งเป็นอากาศร้อนชื้น (Humidified Hot Air: HHA) สามารถช่วยลดข้อจำกัดดังกล่าวได้ เนื่องจากกลไกการถ่ายเทความร้อนและมวลที่เกิดขึ้นมีลักษณะแตกต่างจากการอบแห้งด้วยอากาศร้อนทั่วไปอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะปรากฏการณ์การควบแน่นของไอน้ำบนผิวของเมล็ดข้าวในช่วงต้นของกระบวนการอบแห้ง เมื่ออุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกต่ำกว่าอุณหภูมิควบแน่นของอากาศร้อนชื้น การควบแน่นของไอน้ำจะก่อให้เกิดการปลดปล่อยความร้อนแฝง (latent heat) ส่งผลให้อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนประสิทธิภาพ และช่วยเร่งอัตราการอบแห้งในระยะเริ่มต้นของกระบวนการได้อย่างมีประสิทธิภาพ [7]

อย่างไรก็ตาม พฤติกรรมการอบแห้งด้วยอากาศร้อนชื้นมีความซับซ้อนมากกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อน เนื่องจากกระบวนการถ่ายเทความร้อนและมวลเกิดขึ้นพร้อมกันทั้งในรูปของการควบแน่น การระเหย และการแพร่ความร้อนภายในเมล็ดข้าวเปลือก ส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงความชื้นในช่วงต้นของกระบวนการไม่เป็นไปในลักษณะลดลงอย่างต่อเนื่อง ดังเช่นการอบแห้งด้วยอากาศร้อนแบบทั่วไป แต่สามารถเกิดการเพิ่มขึ้นของความชื้นที่ผิวเมล็ดระยะเวลาสั้น ๆ ในช่วงการควบแน่นก่อนเข้าสู่ระยะการอบแห้ง [7] พฤติกรรมดังกล่าวทำให้การอธิบายและการทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นด้วยแบบจำลองการอบแห้งเชิงประจักษ์ที่มีมานั้นเป็นไปได้ยาก [8-10] อีกทั้งต้องใช้พารามิเตอร์ที่ซับซ้อนและยากต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรม

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาแบบจำลองการอบแห้งเชิงประจักษ์ที่หลากหลาย อธิบายจลนพลศาสตร์การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยอากาศร้อนชื้นโดยประยุกต์สมการแบบ Exponential Rise to Maximum (ERM) ในช่วงการควบแน่นร่วมกับแบบจำลองการอบแห้งเชิงประจักษ์ที่มีมา (Page, Two-term exponential, Diffusion Approximation และ Logarithmic drying) พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทำนาย เพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดในการทำนายความชื้นของข้าวเปลือกด้วยอากาศร้อนชื้น

2. วิธีการศึกษา

ข้อมูลการทดลองที่นำมาพัฒนาแบบจำลองคือจลนพลศาสตร์การอบแห้งข้าวเปลือกสายพันธุ์พิษณุโลก 2 จากศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดเซชันที่อุณหภูมิอากาศ 100°C ความเร็วลม 2.5 m/s ความชื้นสัมพัทธ์ 31.3 % ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกที่ 33.9 % ความชื้นสุดท้ายที่ 22.6 % ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 จลนพลศาสตร์การอบแห้งข้าวเปลือกด้วยอากาศร้อนชื้น

ระยะเวลา (s)	ความชื้น (%)
0	33.9
30	35.5
60	35.4
120	34.8
240	32.5
360	29.5
480	26.2
600	22.6

สำหรับแบบจำลองการอบแห้งเชิงประจักษ์ที่มีมาเลือกใช้แบบจำลองของ Page ดังสมการที่ 1

$$M(t) = a * \exp(-k * (t^n)) \quad (1)$$

เปรียบเทียบกับแบบจำลองที่ได้พัฒนาโดยประยุกต์สมการแบบ ERM ในช่วงการควบแน่น ดังนี้ Modified Page model (สมการที่ 2)

$$M(t) = M_e + (M_0 - M_e) * \exp(-k * t) + A * (1 - \exp(-b * t)) * \exp(-k_2 * t) \quad (2)$$

Modified two-term exponential model (สมการที่ 3)

$$M(t) = M_e + (M_0 - M_e) * [a * \exp(-k * t) + (1 - a) * \exp(-ka * t)] + A * (1 - \exp(-b * t)) * \exp(-k_2 * t) \quad (3)$$

Modified diffusion approximation model (สมการที่ 4)

$$M(t) = M_e + (M_0 - M_e) * \exp(-B * t) + A * (t / (theta + t)) * \exp(-k_2 * t) \quad (4)$$

Modified logarithmic drying model (สมการที่ 5)

$$M(t) = M_e + (M_0 - M_e) * ((a * \exp(-k * t) + (1 - a)) * (1 + alpha * (1 - \exp(-b * t)) * \exp(-k_2 * t))) \quad (5)$$

เมื่อ M_0 คือ ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก (%)

M_e คือ ความชื้นสมดุลของข้าวเปลือก (%)

$M(t)$ คือ ความชื้นของข้าวเปลือกที่ระยะเวลาต่างๆ (%)

t คือ ระยะเวลาอบแห้ง (s)

a, k, n, A, b, k_2, B คือ ค่าคงที่ (-)

$theta$ คือ hyperbolic time scale (s)

$alpha$ คือ condensation factor amplitude (-)

การหาค่าคงที่ของแต่ละแบบจำลองใช้วิธีการถดถอยแบบกำลังสองน้อยที่สุด เมื่อได้ค่าความชื้นจากแบบจำลองแล้วทำการตรวจสอบความสัมพันธ์กับค่าความชื้นที่ได้จากการทดลองโดยใช้สัมประสิทธิ์การตัดสินใจหรือ R^2 เป็นดัชนีชี้วัด

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

รูปที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นของข้าวเปลือกที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลอง Page ซึ่งเป็นแบบจำลองเชิงประจักษ์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการอบแห้งด้วยอากาศร้อนทั่วไป จากรูปพบว่าแบบจำลอง Page ให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ $R^2 = 0.9822$ แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถอธิบายแนวโน้มการลดลงของความชื้นในภาพรวมได้ในระดับหนึ่ง อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณารายละเอียดของข้อมูลในช่วงต้นของกระบวนการอบแห้ง พบว่าแบบจำลอง Page ไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมการเพิ่มขึ้นของความชื้นในระยะเริ่มต้นซึ่งเป็นช่วงการควบแน่นได้อย่างเหมาะสมเนื่องจากโครงสร้างของสมการเดิมถูกพัฒนาภายใต้สมมติฐานว่าความชื้นของวัสดุจะลดลงอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาการอบแห้งสอดคล้องกับการอบแห้งด้วยอากาศร้อนแบบทั่วไป [8] แต่ไม่สอดคล้องกับพฤติกรรมการอบแห้งด้วยอากาศร้อนชื้นที่มีปรากฏการณ์การควบแน่นของไอน้ำบนผิวเมล็ดข้าวในช่วงต้นของกระบวนการ ซึ่งเป็นช่วงที่อุณหภูมิของเมล็ดข้าวมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิควบแน่นของอากาศร้อนชื้น [7] ดังนั้น แบบจำลอง Page มีข้อจำกัดในการอธิบายกลไกทางฟิสิกส์ของการอบแห้งด้วยอากาศร้อนชื้น ส่งผลให้ไม่มีความแม่นยำในการทำนายความชื้นของเมล็ดข้าวในช่วงต้นของกระบวนการอบแห้ง

รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นจากการทดลองกับค่าความชื้นที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาโดยประยุกต์สมการ ERM เพื่ออธิบายพฤติกรรมการควบแน่นในช่วงต้นของกระบวนการอบแห้ง ร่วมกับแบบจำลองเชิงประจักษ์ที่หลากหลาย ได้แก่ (a) modified Page (b) modified two-term exponential (c) modified diffusion approximation และ (d) modified logarithmic drying model จากผลการวิเคราะห์พบว่า แบบจำลองทั้งหมดที่พัฒนาให้ค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.9950–0.9966 ซึ่งมีค่าสูงกว่าแบบจำลอง Page เดิม แสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้สมการ ERM สามารถอธิบายพฤติกรรมการเพิ่มขึ้นของความชื้นเมล็ดข้าวในช่วงการควบแน่นได้อย่างเหมาะสมและช่วยเพิ่มความแม่นยำในการทำนายความชื้นตลอดกระบวนการอบแห้งโดยเฉพาะแบบจำลอง modified diffusion approximation (รูปที่ 2(c)) ให้ค่า R^2 สูงถึง 0.9966 สะท้อนให้เห็นว่าแบบจำลองดังกล่าวสามารถอธิบายทั้งพฤติกรรมการควบแน่นในช่วงต้นและการอบแห้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นอย่างชัดเจนว่า

การพัฒนาแบบจำลองการอบแห้งสำหรับอากาศร้อนชื้นจำเป็นต้องคำนึงถึงกลไกการถ่ายเทความร้อนและมวลที่เกิดขึ้นในช่วงการควบแน่น ซึ่งไม่สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองการอบแห้งเชิงประจักษ์แบบดั้งเดิม การประยุกต์สมการ ERM จึงเป็นแนวทางแก้ปัญหาในการพัฒนาแบบจำลองที่มีความแม่นยำ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมกระบวนการอบแห้งในระดับอุตสาหกรรมได้

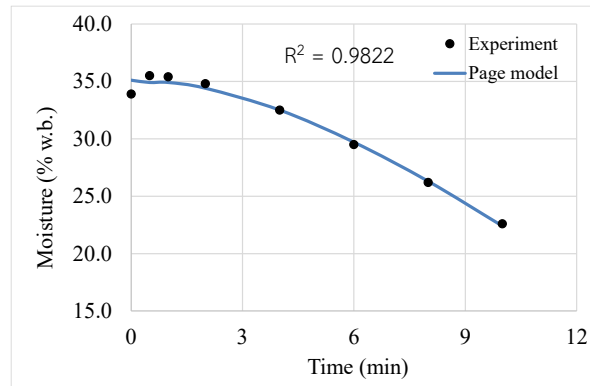


Figure 1 Validation of the relationship between experimental moisture content and Page model predictions.

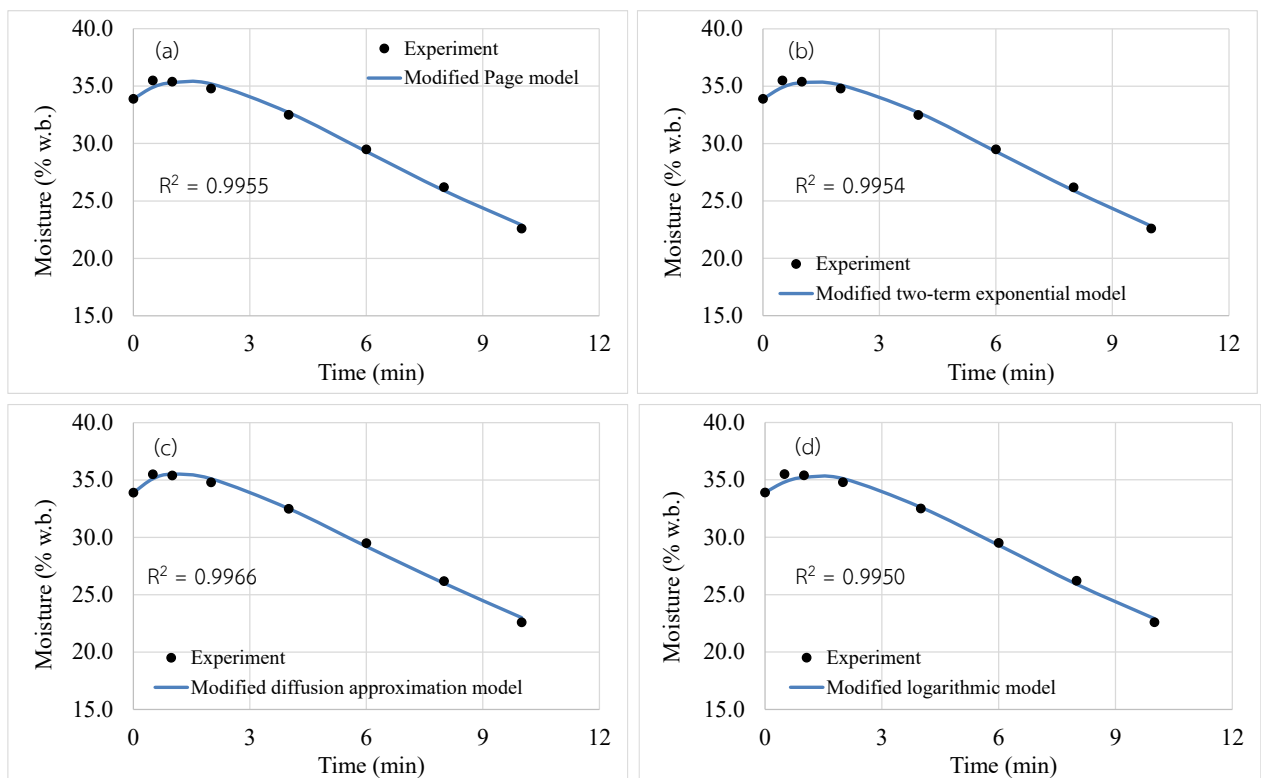


Figure 2 Validation of the relationship between experimental moisture content and predictions from the developed models: (a) modified Page, (b) modified two-term exponential, (c) modified diffusion approximation, and (d) modified logarithmic drying models

4. สรุป

แบบจำลองการอบแห้งเชิงประจักษ์โดยประยุกต์สมการ ERM สามารถอธิบายพฤติกรรมการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยอากาศร้อนชื้นซึ่งมีช่วงของการควบแน่นได้ โดยให้ค่า R^2 สูงในช่วง 0.9950–0.9966 จากการเปรียบเทียบแบบจำลองทั้งหมดของขอบเขตที่ได้ทำการศึกษาพบว่า แบบจำลอง modified diffusion approximation ให้ความแม่นยำในการทำนายสูงที่สุด แสดงให้

เห็นว่าแนวทางการประยุกต์ ERM เป็นวิธีที่มีศักยภาพในการพัฒนาแบบจำลองการอบแห้งสำหรับอากาศร้อนชื้น และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบและควบคุมกระบวนการอบแห้งในระดับอุตสาหกรรมได้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Müller, A., Nunes, T. M., Maldaner, V., Coradi, C. P., Moraes, S. R., Martens, S., Leal, F. A., Pereira, F. V. and Marin, K. C. 2022. Rice Drying, Storage and Processing: Effects of Post-Harvest Operations on Grain Quality. *Rice. Sci.* 29: 16-30.
- [2] Dolatabadi, H., Soleimanipour, A. and Vakilian, A. K. 2026. Effects of drying method, post-drying delay, and tempering on milling quality and color retention of paddy rice at various moisture contents: A systematic review. *J. Cereal Sci.* 127: 104358.
- [3] Junka, N. and Rattanamechaiskul, C. 2021. Mathematical modelling to control fungal growth in paddy dried using fluidisation. *Biosyst. Eng.* 204: 312-325.
- [4] Junka, N. and Rattanamechaiskul, C. 2022. Drying modelling of amylose fatty acid complex formation for reducing rapidly available glucose of geographical indication rice during high-temperature fluidisation. *J. Food Eng.* 318: 110899.
- [5] Prakotmak, P., Rattanamechaiskul, C. and Junka, N. 2025. Modeling of multiphase heat transfer and transport behaviors of paddy in rotary drum drying by CFD-DEM. *Case Stud. Therm. Eng.* 73: 106551.
- [6] Chokphoemphun, S., Hongkong, S. and Chokphoemphun, S. 2024. Artificial neural network for drying behavior prediction of paddy in developed chamber fluidized-bed dryer. *Comput. Electron. Agric.* 220: 108888.
- [7] Junka, N., Rattanamechaiskul, C., Wongs-Aree, C. and Soponronnarit, S. 2021. Drying and mathematical modelling for the decelerated rancidity of treated jasmine brown rice using different drying media. *J. Food Eng.* 289: 110165.
- [8] Biswas, R., Hossain, M. A. and Zzaman, W. 2022. Thin layer modeling of drying kinetics, rehydration kinetics and color changes of osmotic pre-treated pineapple (*Ananas comosus*) slices during drying: Development of a mechanistic model for mass transfer. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 80: 103094.
- [9] Granella, S. J., Bechlin, T. R. and Christ, D. 2022. Moisture diffusion by the fractional-time model in convective drying with ultrasound-ethanol pretreatment of banana slices. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 76: 102933.
- [10] Zou, D., Chen, X., Gu, Z., Jiang, Q., Chen, H., Zhao, L., Hou, J., Ji, W., Luo, Z. and Zhu, L. 2025. Modeling and comparative analysis of solar drying behavior of yam (*Rhizoma dioscoreae*) slices. *Renew. Energy* 242: 122406.

การปรับสภาพทางชีวภาพผักตบชวาด้วยเอนไซม์ที่สกัดจากก้อนเชื้อเห็ดเก่าเพื่อเพิ่มผลผลิตแก๊สชีวภาพ Biological pretreatment of water hyacinth with enzymes extracted from spent mushroom substrate for enhancing biogas production

วชิรญาณ ทศกฏไพรี^{1,*} และ ประไพพิศ ชัยรัตนมนกร¹

Wachiraya Totsakotpairee^{1,*} and Prapaipid Chairattanamanokorn¹

¹ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900 ประเทศไทย

¹Department of Environmental Technology and Management, Faculty of Environment, Kasetsart University, Bangkok, 10900, Thailand

*Corresponding author: Wachiraya Totsakotpairee, e-mail address: wachiraya.tot@ku.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการปรับสภาพผักตบชวาด้วยเอนไซม์เซลลูเลสที่ผลิตจากก้อนเชื้อเห็ดนางฟ้าภูฐานเก่า (*Pleurotus pulmonarius*) โดยทำการสกัดเอนไซม์ด้วย 0.05 M สารละลายโซเดียมซิเตรตบัฟเฟอร์ pH 4.8 ที่อัตราส่วนก้อนเชื้อเห็ดเก่าต่อบัฟเฟอร์ 60:150, 60:300 และ 60:600 แล้วทำการเขย่าที่ 150 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง พบว่าที่อัตราส่วนก้อนเชื้อเห็ดเก่าต่อบัฟเฟอร์ 60:150 มีค่ากิจกรรมของเอนไซม์สูงสุดเท่ากับ 0.214 ± 0.002 U/ml เนื่องจากมีความเข้มข้นของเอนไซม์สูงสุดแต่ที่อัตราส่วน 60:600 นั้นมีค่ากิจกรรมของเอนไซม์ต่ำเนื่องจากความเจือจางของเอนไซม์ (Dilution effect) และการสกัดเอนไซม์เซลลูเลสนั้นก็กิจกรรมของเอนไซม์จะให้ผลดีที่สุดในช่วงที่ 2-3 เมื่อทำการสกัดเพื่อเปรียบเทียบกิจกรรมของเอนไซม์โดยใช้สารละลายโซเดียมซิเตรตบัฟเฟอร์และน้ำ พบว่ากิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลสนั้นไม่มีความแตกต่างทางนัยสำคัญ เมื่อนำเอนไซม์ไปปรับสภาพผักตบชวาพบว่าการปรับสภาพผักตบชวาด้วยเอนไซม์เซลลูเลสที่สกัดด้วยน้ำเป็นเวลา 1 วัน (1D_W) ให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ซึ่งสูงที่สุดเท่ากับ 12.84 ± 2.04 mg/g SMS แต่เมื่อนำไปหมักร่วมกับกากตะกอนไม่ใช้อากาศเป็นเวลา 10 วัน พบว่าตัวอย่างผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเอนไซม์ที่สกัดจากสารละลายโซเดียมซิเตรตบัฟเฟอร์และปรับสภาพเป็นเวลา 3 วัน (3D) นั้นให้ผลผลิตแก๊สมีเทนสูงที่สุดเท่ากับ 157.82 ± 10.98 mL/g VS

คำสำคัญ: การหมัก, แก๊สชีวภาพ, กิจกรรมของเอนไซม์, การสกัดเอนไซม์, การปรับสภาพ

Abstract

This study investigated the pretreatment of water hyacinth using cellulase enzymes derived from spent mushroom substrate (SMS) of *Pleurotus pulmonarius*. The enzymes were extracted using a 0.05 M sodium citrate buffer (pH 4.8) at SMS-to-buffer ratios of 60:150, 60:300, and 60:600 (w/v), with agitation at 150 rpm for 2, 4, and 6 hours at room temperature. The results revealed that the 60:150 ratio yielded the highest cellulase activity of 0.214 ± 0.002 U/ml due to the higher enzyme concentration, whereas the 60:600 ratio resulted in lower activity caused by the dilution effect. Peak cellulase activity was observed within 2–3 hours of extraction. Furthermore, a comparison between the use of sodium citrate buffer and distilled water for extraction showed no significant difference in cellulase activity. Regarding the pretreatment of water hyacinth, the highest reducing sugar yield 12.84 ± 2.04 mg/g SMS was obtained from a 1-day pretreatment using water-extracted enzymes (1D_W). However, following a 10-day co-digestion with anaerobic sludge, the water hyacinth pretreated with buffer-extracted enzymes for 3 days (3D) achieved the highest methane yield of 157.82 ± 10.98 mL/g VS.

Keywords: Anaerobic fermentation, Biogas, Enzyme activity, Enzyme extraction, Pretreatment

1. บทนำ

ในอุตสาหกรรมการปลูกเห็ดจะพบก้อนเชื้อเห็ดเก่า (Spent mushroom substrate; SMS) เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการผลิตเห็ดหลังจากการเก็บเกี่ยวเห็ด โดยในการผลิตเห็ด 1 กิโลกรัมมีการใช้ก้อนเชื้อเห็ดประมาณ 5 กิโลกรัม [1] ก้อนเชื้อเห็ดเหล่านี้จะกลายเป็นขยะเหลือทิ้งทางการเกษตร การกำจัดก้อนเชื้อเห็ดเก่านิยมนำไปเผาหรือฝังกลบหรือนำไปผลิตเป็นปุ๋ยชีวภาพและปุ๋ยหมัก ในก้อนเชื้อเห็ดจะพบเอนไซม์ที่ทำงานนอกเซลล์ (Extracellular enzyme) [2] ที่สามารถย่อยสลายวัสดุลิกโนเซลลูโลสได้ เช่น ผักตบชวาที่นิยมนำมาผลิตพลังงานชีวภาพ เนื่องจากมีปริมาณลิกนินน้อย [3] ทำให้จุลินทรีย์สามารถเข้าถึงโครงสร้างของ

เซลล์โลสเพื่อทำการย่อยสลายได้ โดยการผลิตแก๊สชีวภาพจากผักตบชวา นิยมนำมาปรับสภาพก่อนเข้าสู่กระบวนการหมัก การศึกษาของ Barua, Goud และ Kalamdhad [3] ทำการปรับสภาพผักตบชวาโดยใช้จุลินทรีย์ *Bordetella muralis*, *Citrobacter werkmanii* และ *Paenibacillus* sp. พบว่าการทดสอบศักยภาพแก๊สมีเทนทางชีวเคมีของผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพแล้วจะเร่งระยะเวลาในการไฮโดรไลซิสเร็วกว่าผักตบชวาที่ยังไม่ผ่านการปรับสภาพ โดยผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพแล้วมีแก๊สชีวภาพสะสมมากกว่าผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ อย่างไรก็ตามงานวิจัยส่วนใหญ่พึ่งพาการใช้จุลินทรีย์บริสุทธิ์หรือ เอนไซม์เชิงพาณิชย์ที่มีต้นทุนสูง งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับของเสียโดยเลือกศึกษาก้อนเชื้อเห็ดนางฟ้าภูฐานเก่าและใช้กากตะกอนไม่ใช้อากาศ ซึ่งเป็นสายพันธุ์ที่นิยมเพาะปลูกอย่างแพร่หลายในประเทศไทยทำให้เป็นวัสดุเหลือทิ้งที่เข้าถึงง่ายเป็น แหล่งผลิตเอนไซม์เซลลูเลสแบบหยาบเพื่อใช้ในการปรับสภาพผักตบชวา นอกจากนี้การใช้ 0.05 M สารละลายโซเดียมซิเตรต บัฟเฟอร์ (pH 4.8) ซึ่งเป็นสารละลายมาตรฐานที่มีคุณสมบัติในการรักษาเสถียรภาพของเอนไซม์และป้องกันการเสียสภาพของ เอนไซม์ [4]

งานวิจัยครั้งนี้ศึกษาผลของการปรับสภาพผักตบชวาด้วยวิธีชีวภาพ โดยใช้เอนไซม์เซลลูเลสที่สกัดจากก้อนเชื้อเห็ดเก่า ก่อนการหมักกับกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ (Anaerobic sludge) ที่อุณหภูมิ 37 °C โดยปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ 1. อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักก้อนเชื้อเห็ดกับปริมาตรสารละลายในการสกัดเอนไซม์ 2. ระยะเวลาในการเขย่าสำหรับการสกัด เอนไซม์จากก้อนเชื้อเห็ดเก่าและ 3. ระยะเวลาในการปรับสภาพผักตบชวาด้วยเอนไซม์เซลลูเลสที่สกัดจากก้อนเชื้อเห็ด 4. ชนิดของ ตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัดเอนไซม์เซลลูเลส

2. วิธีการศึกษา

2.1 การเตรียมวัสดุในการทดลอง

นำผักตบชวามาล้างก่อนดินที่ติดจากรากให้สะอาดและตัดให้มีขนาด 5 cm โดยแบ่งส่วนหนึ่งไปวิเคราะห์คุณสมบัติ อีกส่วนนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำมาปั่นให้เป็นผงแล้วกรองด้วยตะแกรงขนาด 500 µm แล้วเก็บไว้ในถุง ซิปล็อกเพื่อใช้งานในครั้งต่อไป

ก้อนเชื้อเห็ดเก่าจะนำมาแกะออกจากถุงพลาสติกแล้วทำให้ร่วนซุยแล้วคลุกให้เป็นเนื้อเดียวกันแล้วเก็บไว้ในถุงซิปล็อก และเก็บไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 °C

กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศจะถูกนำมาบ่มที่อุณหภูมิ 37 °C เป็นเวลา 2 อาทิตย์ก่อนนำไปใช้งาน

2.2 การศึกษาคุณสมบัติของผักตบชวา, ก้อนเชื้อเห็ดเก่าและกากตะกอนไม่ใช้อากาศ

นำผักตบชวาและก้อนเชื้อเห็ดที่ผ่านการทำให้ร่วนซุยและกากตะกอนมาอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงจน น้ำหนักคงที่แล้วใส่ในเตาซีเคเตอร์จนอุณหภูมิคงที่แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก ค่าที่ได้นำไปคำนวณตามสมการที่ 1 และสมการที่ 2 หลังจากนั้น น้ำหนักครุซีเบิ้ลแล้วทำการจดบันทึกค่าและนำตัวอย่างผักตบชวา, ก้อนเชื้อเห็ดเก่าและกากตะกอนใส่ครุซีเบิ้ลพร้อมชั่ง น้ำหนักของตัวอย่างแล้วนำมาเผาที่อุณหภูมิ 550 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อครบเวลานำมาใส่เตาซีเคเตอร์รอให้อุณหภูมิคงที่แล้ว นำไปชั่งน้ำหนัก ค่าที่ได้นำมาคำนวณตามสมการที่ 3 และสมการที่ 4 โดยทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำในแต่ละชุดการทดลอง

$$\% \text{ ความชื้น} = \left[\frac{\text{น้ำหนักก่อนอบ} - \text{น้ำหนักหลังอบ}}{\text{น้ำหนักก่อนอบ}} \right] \times 100 \quad (1)$$

$$\% \text{ ของแข็งทั้งหมด} = 100 - (\% \text{ ความชื้น}) \quad (2)$$

$$\% \text{ ค่าของแข็งที่ระเหยได้} = \left[\frac{\text{น้ำหนักก่อนเผา} - \text{น้ำหนักหลังเผา}}{\text{น้ำหนักก่อนเผา}} \right] \times 100 \quad (3)$$

$$\% \text{ คาร์บอน} = \% \text{ ค่าของแข็งที่ระเหยได้ทั้งหมด} \div 1.83 \quad (4)$$

2.2.3 วิเคราะห์ปริมาณลิกโนเซลลูโลส

นำผักตบชวามาอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วชั่งน้ำหนักแห้งโดยกำหนดให้เป็น (A) จากนั้นนำตัวอย่างที่ ได้จากการอบมาแช่ใน 24% KOH เป็นเวลา 4 ชั่วโมงแล้วทำการล้างจนน้ำที่ได้มีสีใสแล้วนำตัวอย่างไปอบที่อุณหภูมิ 80 °C เป็น เวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลานำไปใส่ในเตาซีเคเตอร์แล้วทำการชั่งน้ำหนัก น้ำหนักที่ได้กำหนดให้เป็น (B) หลังจากนั้นนำตัวอย่างที่ ชั่งน้ำหนักแล้วมาแช่ใน 72% H₂SO₄ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาแล้วนำไปต้มด้วย 5% H₂SO₄ ในน้ำเดือดเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อครบเวลานำมาล้างจนน้ำที่ได้มีสีใสแล้วนำตัวอย่างไปอบที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงแล้วชั่งน้ำหนักแห้ง โดยกำหนดน้ำหนักที่

ได้เป็น (C) เมื่อชั่งน้ำหนักเสร็จแล้วนำตัวอย่างที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อเผาเสร็จแล้วนำไปใส่ในเตาเคเตอร์ร้อให้อุณหภูมิคงที่แล้วนำมาชั่งน้ำหนักโดยกำหนดน้ำหนักเป็น (D) แล้วนำมาคำนวณตามสมการที่ 5, 6 และ 7 ตามลำดับ [5] โดยทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำในแต่ละชุดการทดลอง

$$\% \text{ เซลลูโลส} = [(B - C) / A] \times 100 \quad (5)$$

$$\% \text{ เฮมิเซลลูโลส} = [(A - B) / A] \times 100 \quad (6)$$

$$\% \text{ ลิกนิน} = [(C - D) / A] \times 100 \quad (7)$$

2.3 การสกัดเอนไซม์, การวิเคราะห์กิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลสและการวิเคราะห์น้ำตาลรีดิวซ์ซิง

2.3.1 การเตรียมการสกัดเอนไซม์และวิเคราะห์กิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลส

เอนไซม์จากก้อนเชื้อเห็ดสกัดด้วยสารละลาย 0.05 M โซเดียมซิเตรตบัฟเฟอร์ที่ pH 4.8 สกัดที่อัตราส่วนของก้อนเชื้อเห็ดต่อสารละลายโซเดียมซิเตรตบัฟเฟอร์ที่แตกต่างกัน คือ 60:150, 60:300 และ 60:600 โดยทำการชั่งก้อนเชื้อเห็ดเก่าที่ผ่านการทำให้ร้อนซุยแล้วเติมสารละลาย 0.05 M โซเดียมซิเตรตบัฟเฟอร์ pH 4.8 เขย่าด้วยเครื่องบ่มเขย่า (Shaking Incubator) ที่ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้องทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำในแต่ละชุดการทดลอง เมื่อครบเวลาการสกัดนำมาคั้นด้วยผ้าขาวบางแล้วนำส่วนใสที่ได้ไปปั่นเหวี่ยงที่ 8000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 10 นาที

การวิเคราะห์กิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลสโดยการนำสารละลายที่ผ่านการปั่นเหวี่ยง 0.5 ml ใส่ลงในหลอดทดลองร่วมกับ 0.05 M สารละลายโซเดียมซิเตรตบัฟเฟอร์ pH 4.8 ปริมาตร 0.5 ml และกระดาษกรอง Whatman NO.1 ขนาด 1x6 cm แล้วนำไปบ่มในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath) ที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 60 นาที เมื่อครบเวลานำมาเติมสารละลายกรดไดไนโตรซาลิไซลิก (Dinitrosalicylic acid; DNS) ปริมาตร 3 ml แล้วนำไปต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 5 นาทีแล้วแช่ในน้ำเย็น หลังจากนั้นนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 540 nm ในส่วนของแบล็กใส่ในน้ำกลั่น 0.5 ml แทนเอนไซม์ที่สกัดได้จากก้อนเชื้อเห็ดเก่าโดยทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำในแต่ละชุดการทดลอง

$$1 \text{ FPU} = \text{ปริมาณเอนไซม์ที่ย่อยสลายเซลลูโลสให้เป็นกลูโคส 1 } \mu\text{mol ในเวลา 1 นาที}$$

2.3.2 การวิเคราะห์น้ำตาลรีดิวซ์ซิง

การเตรียมสารละลายมาตรฐานน้ำตาลกลูโคสซิงกลูโคส 0.1 g ละลายในน้ำกลั่น 100 ml แล้วเปิดใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 25 ml ที่ความเข้มข้น 0.1-1 mg/ml แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนครบ 25 ml

การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ซิงจะนำตัวอย่างที่ผ่านการปรับสภาพแล้วมาคั้นด้วยผ้าขาวบางเอาส่วนที่เป็นของเหลวปั่นเหวี่ยงที่ 8000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ปิดตึงตัวอย่างส่วนใส 0.5 มิลลิลิตรแล้วเติม 0.05 M สารละลายโซเดียมซิเตรตบัฟเฟอร์ pH 4.8 ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตรและเติมสารละลาย DNS ปริมาตร 3 มิลลิลิตรแล้วนำไปต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 5 นาทีแล้วแช่ในน้ำเย็น หลังจากนั้นนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร ส่วนแบล็กจะใช้น้ำกลั่นแทนการใช้ตัวอย่างและใช้สารละลายน้ำตาลกลูโคสเป็นสารละลายมาตรฐาน [6] ทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำในแต่ละชุดการทดลอง

การเตรียมสารละลายกรดไดไนโตรซาลิไซลิกความเข้มข้น 0.1% (Dinitrosalicylic acid; DNS) ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 5 g ชั่ง 3,5-กรดไดไนโตรซาลิไซลิก 98% (3,5-Dinitrosalicylic acid: DNS) 0.25 g และชั่งโซเดียมโพแทสเซียมทราเตอไรด์ 99% (KNaC₄H₄O₆·4H₂O) 75 g นำสารแต่ละชนิดผสมน้ำกลั่นเล็กน้อยแล้วนำมาผสมกันและปรับปริมาตรในขวดปรับปริมาตรขนาด 250 ml และเก็บสารละลายไว้ในขวดสีชาที่อุณหภูมิห้อง โดยดัดแปลงวิธีจาก [6]

2.4 การปรับสภาพผักตบชวาด้วยเอนไซม์ที่สกัดจากก้อนเชื้อเห็ดเก่าและการหมัก

2.4.1 การปรับสภาพผักตบชวาด้วยเอนไซม์ที่สกัดจากก้อนเชื้อเห็ดเก่า

การปรับสภาพผักตบชวาด้วยเอนไซม์ที่สกัดจาก 0.05 M สารละลายโซเดียมซิเตรตบัฟเฟอร์ pH 4.8 และน้ำกลั่น pH 4.8 จากก้อนเชื้อเห็ดเก่าโดยใช้ผักตบชวาที่ผ่านการทำให้เป็นผงแล้วแช่ด้วยเอนไซม์จากก้อนเชื้อเห็ดโดยใช้อัตราส่วน 1FPU/g ของผักตบชวาแล้วคลุกให้เป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นปิดด้วยฟอยล์แล้วนำไปบ่มในตู้บ่มควบคุมอุณหภูมิที่ 50 °C เป็นเวลา 1, 3 และ 5 วัน เก็บตัวอย่างสารละลายเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ซิงที่เกิดขึ้น

2.4.2 การหมัก

ผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพแล้วปริมาณ 0.7 g หมักร่วมกับกากตะกอนไม่ใช้อากาศที่อุณหภูมิ 37 °C โดยใช้อัตราส่วนของแข็งที่ระเหยได้ของเชื้อต่อของแข็งที่ระเหยได้ของผักตบชวา 2:1 [7] ทำการหมักผักตบชวาโดยใช้ค่าของแข็งทั้งหมด 1% ปรับ pH เท่ากับ 7 และเติมสารอาหารเพิ่มเติม K_2HPO_4 145 g/L, KH_2PO_4 75 g/L, $CaCl_2$ 400 mg/L, KCl 12.5 g/L, $NiSO_4 \cdot 6H_2O$ 2.2 g/L, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 4.6 g/L, $CoCl_2 \cdot 6H_2O$ 1000 mg/L, $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ 200 mg/L, yeast extracted 3 g/L และ $NaHCO_3$ 1.5 g/L หมักในขวดแก้วขนาด 120 ml มีปริมาตรการหมัก 70 ml ขวดถูกปิดฝาด้วยจุกยางแคปด้วยแคปอะลูมิเนียม หลังจากนั้นทำการไล่อากาศด้วยแก๊สอาร์กอนเป็นเวลา 5 นาที ชุดควบคุมใช้ผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพแทนผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพ ส่วนแบลงค์ (Blank) เป็นกากตะกอนไม่ใช้อากาศเติมสารอาหารเพิ่มและน้ำกลั่น โดยทุกชุดการทดลองและทุกขั้นตอนการวิเคราะห์ดำเนินการทดลองจำนวน 3 ซ้ำและรายงานผลในรูปแบบค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

2.5 การวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบมีเทน

การวัดปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลาวัดโดยตรงจากขวดหมักโดยใช้กระบอกฉีดแก๊ส (Gas-tight syringe) จากนั้นวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบของแก๊สมีเทนด้วยเครื่อง Gas Chromatography (SHIMADZU GC-2014) ที่ติดตั้ง Thermal conductivity detector (TCD) โดยใช้ Activated charcoal column คำนวณแก๊สมีเทนสะสม (Cumulative methane) จากสมการที่ 8

$$\text{แก๊สมีเทนสะสม} = \frac{\text{ผลรวมของปริมาตรแก๊สมีเทนสะสมตลอดระยะเวลาการทดลอง} - \text{แบลงค์}}{\text{น้ำหนักของแข็งระเหยง่ายของซบสเตรทเริ่มต้นที่ใส่ในขวดหมัก}} \quad (8)$$

2.6 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การวิเคราะห์ผลทางสถิติของข้อมูลจากการทดลอง 3 ซ้ำ (TriPLICATE) แสดงผลในรูปแบบค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Mean \pm SD) โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel ในการคำนวณ สำหรับปัจจัยเดี่ยว ได้แก่ ชนิดของสารละลายสกัด, ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ซึ่งเกิดขึ้นและปริมาตรแก๊สมีเทนที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะการปรับสภาพคงที่ดำเนินการวิเคราะห์ด้วยสถิติความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA)

ในส่วนของการศึกษาอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย ได้แก่ อัตราส่วนและระยะเวลาในการสกัด, ระยะเวลาการปรับสภาพและชนิดของสารละลายสกัดรวมถึงปริมาตรแก๊สมีเทนที่มีต่อชนิดของสารละลายและระยะเวลาการปรับสภาพผักตบชวา วิเคราะห์โดยใช้สถิติความแปรปรวนแบบสองทางชนิดมีซ้ำ (Two-way ANOVA with replication) ทั้งนี้กำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 ($p < 0.05$)

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 คุณสมบัติทางเคมีของผักตบชวา (Water Hyacinth: WH), ก้อนเชื้อเห็ดเก่า (Spent Mushroom Substrate: SMS) และกากตะกอนไม่ใช้อากาศ (Anaerobic Sludge; AS)

ผักตบชวาที่ผ่านการอบนํ้ามาปั่นเพื่อลดขนาดเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุกลไกโนเซลลูโลสกับเอนไซม์ ทั้งนี้ผักตบชวาที่ใช้ในการศึกษามีค่าความชื้น 90.36 \pm 0.41% ค่าของแข็งทั้งหมด 9.64 \pm 0.41% ค่าของแข็งที่ระเหยได้ 83.91 \pm 1.54% ปริมาณคาร์บอน 46.62 \pm 0.86% เมื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนมีค่าเท่ากับ 1.31 \pm 0.47% ส่วนปริมาณเซลลูโลส 47.29 \pm 5.19% เฮมิเซลลูโลส 21.24 \pm 14.77% และลิกนิน 19.01 \pm 3.53% ก้อนเชื้อเห็ดเก่ามีค่าความชื้น 33.75 \pm 2.05% ค่าของแข็งทั้งหมด 66.25 \pm 2.05% ค่าของแข็งที่ระเหยได้ 90.97 \pm 0.05% ส่วนกากตะกอนไม่ใช้อากาศมีค่าของแข็งทั้งหมด 5.67 \pm 0.15% ค่าของแข็งที่ระเหยได้ 57.55 \pm 0.22% และปริมาณคาร์บอนเท่ากับ 31.97 \pm 0.12% ดังแสดงใน Table 1 ในการทดลองนี้ทำการเลือกผักตบชวาเพื่อใช้ในการศึกษาเนื่องจากผักตบชวามีโครงสร้างของลิกนินน้อยเมื่อนำไปปรับสภาพจะทำให้เอนไซม์เข้าถึงโครงสร้างของเซลลูโลสได้ [3]

Table 1 Characteristics of water hyacinth, spent mushroom substrate and anaerobic sludge

Characteristics	Water hyacinth	Spent mushroom substrate	Anaerobic sludge
Moisture content (%)	90.36±0.41	33.75±2.05	-
Total solid (%)	9.64±0.41	66.25±2.05	5.67±0.15
Volatile solid (%)	83.91±1.54	90.97±0.05	57.55±0.22
Carbon (%)	46.62±0.86	-	31.97±0.12
Nitrogen (%)	1.31±0.47	-	-
Cellulose (%)	47.29±5.19	-	-
Hemicellulose (%)	21.24±14.77	-	-
Lignin (%)	19.01±3.53	-	-

3.2 ผลของอัตราส่วนของก้อนเชื้อเห็ดนางฟ้าภูฐานแก่ต่อ 0.05 M สารละลายโซเดียมซัลเฟตระดับพีเออร์และระยะเวลาในการสกัดเอนไซม์เซลลูเลสจากก้อนเชื้อเห็ดนางฟ้าภูฐานแก่

การสกัดเอนไซม์เซลลูเลสจากก้อนเชื้อเห็ดนางฟ้าภูฐานแก่ด้วยสารละลาย 0.05 M โซเดียมซัลเฟตระดับพีเออร์ pH 4.8 ที่อัตราส่วนก้อนเชื้อเห็ดแก่ต่อสารละลายโซเดียมซัลเฟตระดับพีเออร์ 60:150, 60:300 และ 60:600 แล้วทำการเขย่าที่ 150 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง พบว่าที่อัตราส่วนก้อนเชื้อเห็ดแก่ต่อสารละลายโซเดียมซัลเฟตระดับพีเออร์ 60:150 ทำการเขย่าเป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมงนั้นมีค่ากิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลสเท่ากับ 0.53 ± 0.00 , 0.47 ± 0.01 และ 0.49 ± 0.02 U/g ตามลำดับ ที่อัตราส่วน 60:300 ทำการเขย่าเป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมงนั้นมีค่ากิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลสเท่ากับ 0.57 ± 0.02 , 0.56 ± 0.02 และ 0.52 ± 0.03 U/g ตามลำดับและที่อัตราส่วน 60:600 ทำการเขย่าเป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมงนั้นมีค่ากิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลสเท่ากับ 0.61 ± 0.04 , 0.58 ± 0.02 และ 0.53 ± 0.04 U/g จาก Figure 1 ผลกิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลสพบว่าที่อัตราส่วน 60:600 ทำการเขย่าเป็นเวลา 2 ชั่วโมงนั้นมีกิจกรรมของเอนไซม์สูงที่สุดเนื่องจากมีปริมาตรของตัวทำละลายมากพอที่จะสกัดเอนไซม์ แต่เมื่อพิจารณาถึงความเข้มข้นของเอนไซม์นั้นจะเห็นได้ว่ามีความเข้มข้นของเอนไซม์ต่ำซึ่งเป็นผลจากความเจือจางของเอนไซม์ (Dilution effect) ดังแสดงในตารางที่ 3 ที่อัตราส่วนก้อนเชื้อเห็ดแก่ต่อสารละลายโซเดียมซัลเฟตระดับพีเออร์ 60:600 ทำการเขย่าเป็นเวลา 2 ชั่วโมงมีค่ากิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลสเท่ากับ 0.061 ± 0.004 U/ml แต่ที่อัตราส่วน 60:150 ทำการเขย่าเป็นเวลา 2 ชั่วโมงนั้นมีค่าเท่ากับ 0.214 ± 0.002 U/ml จากผลดังกล่าวจะเห็นได้ว่าที่อัตราส่วนก้อนเชื้อเห็ดแก่ต่อสารละลายโซเดียมซัลเฟตระดับพีเออร์ 60:150 และเขย่าเป็นเวลา 2 ชั่วโมง นั้นเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในทางปฏิบัติ เพราะแม้ค่ากิจกรรมของเอนไซม์ทั้งหมดจะน้อยดังแสดงใน Table 2 แต่ความเข้มข้นเชิงปริมาตรนั้นสูงกว่าและอัตราส่วนของก้อนเชื้อเห็ดแก่ต่อสารละลายโซเดียมซัลเฟตระดับพีเออร์กับระยะเวลาในการเขย่านั้นมีความแตกต่างทางนัยสำคัญ เนื่องจากเมื่อระยะเวลาในการเขย่าเพิ่มขึ้น กิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลสมีค่ากิจกรรมของเอนไซม์ลดลงเพราะเอนไซม์เซลลูเลสจะให้ค่ากิจกรรมของเอนไซม์สูงสุดอยู่ที่ ชั่วโมงที่ 2-3 หากนานกว่านั้นเอนไซม์จะเกิดการเสื่อมสภาพส่งผลให้กิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลสลดลง [8] โดยเมื่อระยะเวลาในการเขย่าเพิ่มขึ้นในชั่วโมงที่ 4-6 และทำการเขย่าที่อุณหภูมิห้องนั้นอาจทำให้เอนไซม์เสถียรภาพ (Stability) เนื่องจากอุณหภูมิส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเอนไซม์ [9] เมื่อเปรียบเทียบผลกิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลสที่สกัดจากก้อนเชื้อเห็ดแก่ที่กับการศึกษาของ Afsar et al. [10] พบว่าผลที่ได้สอดคล้องกันและมีกิจกรรมของเอนไซม์อยู่ในช่วง 0.3-0.5 U

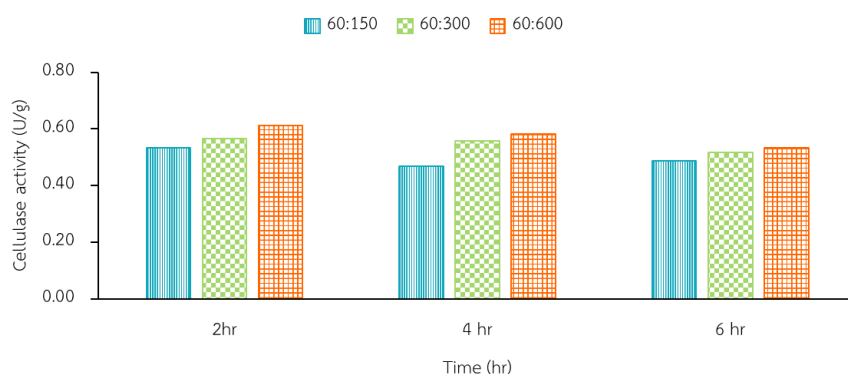


Figure 1 Cellulase activity in solute extracted from spent mushroom substrate at various substrate-to-buffer ratios (60:150, 60:300, and 60:600) and shaking times (2, 4, and 6 hours).

Table 2 Total cellulase activity (U) in solute extracted from spent mushroom substrate at various substrate-to-buffer ratios (60:150, 60:300, and 60:600) and shaking times (2, 4, and 6 hours).

Ratios / time	Total cellulase activity (U)		
	2 hr	4 hr	6hr
60:150	32.03±0.28	28.17±0.34	29.30±1.03
60:300	34.02±1.08	33.51±1.13	31.02±1.84
60:600	36.80±2.18	34.98±0.93	31.95±2.24

Table 3 Cellulase activity (U/ml) in solute extracted from spent mushroom substrate at various substrate-to-buffer ratios (60:150, 60:300, and 60:600) and shaking times (2, 4, and 6 hours).

Ratios / time	Cellulase activity (U/ml)		
	2 hr.	4 hr.	6 hr.
60:150	0.214±0.002	0.188±0.002	0.195±0.007
60:300	0.113±0.004	0.112±0.004	0.103±0.006
60:600	0.061±0.004	0.058±0.002	0.053±0.004

3.3 การเปรียบเทียบกิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลสจากการใช้ 0.05 M สารละลายโซเดียมซิติเรตบัฟเฟอร์ pH 4.8 และน้ำกลั่น pH 4.8

การสกัดเอนไซม์เซลลูเลสที่อัตราส่วนก้อนเชื้อเห็ดแก่ต่อสารละลาย 60:150 และเขย่าที่ 150 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยเปรียบเทียบกิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลสระหว่างการสกัดก้อนเชื้อเห็ดแก่ด้วยสารละลายโซเดียมซิติเรตบัฟเฟอร์และน้ำกลั่น พบว่าการสกัดเอนไซม์ด้วยสารละลายโซเดียมซิติเรตบัฟเฟอร์มีกิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลสเท่ากับ 0.48 ± 0.04 U/g และเอนไซม์เซลลูเลสที่สกัดด้วยน้ำกลั่นมีกิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลสเท่ากับ 0.44 ± 0.05 U/g จากผลดังกล่าวจะเห็นได้ว่ากิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลสที่สกัดจากสารละลายโซเดียมซิติเรตบัฟเฟอร์นั้นมีค่าสูงกว่ากิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลสที่สกัดด้วยน้ำกลั่นเล็กน้อย ดังแสดงใน Table 4 และเมื่อทำการทดสอบทางสถิติพบว่ากิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลสที่ใช้สารละลายโซเดียมซิติเรตบัฟเฟอร์และน้ำกลั่นนั้นไม่มีความแตกต่างทางนัยสำคัญ เนื่องจากเอนไซม์เซลลูเลสจากก้อนเชื้อเห็ดนางฟ้าภูฏานมีคุณสมบัติในการละลายน้ำได้ดี [11] การนำไปเขย่าร่วมกับตัวทำละลายทั้งสองทำให้เอนไซม์ที่เกาะตามเส้นใยและซี่เลื่อยถูกชะละลายออกมาได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามเมื่อนำเอนไซม์ที่สกัดได้ไปใช้งานในขั้นตอนถัดไป พบว่าเอนไซม์ที่สกัดด้วยสารละลายโซเดียมซิติเรตบัฟเฟอร์มีประสิทธิภาพสูงกว่า เนื่องจากมีความสามารถรักษาสมดุลกรด-เบส (pH) และช่วยคงความเสถียรของเอนไซม์ได้ดีกว่าการใช้น้ำกลั่น [4]

Table 4 Comparison of cellulase activity extracted from spent mushroom substrate using 0.05 M sodium citrate buffer (pH 4.8) and DI water (pH 4.8) at a ratio of 60:150 with shaking for 2 hours.

Ratio	0.05 M Sodium citrate buffer pH 4.8 (U/g)	DI water pH 4.8 (U/g)
60:150	0.48±0.04	0.44±0.05

3.4 การปรับสภาพผักตบชวาด้วยเอนไซม์เซลลูเลสที่สกัดจากก้อนเชื้อเห็ดนางฟ้าภูฐานเก่า

การปรับสภาพผักตบชวาจะนำเอนไซม์ที่สกัดได้จากหัวข้อที่ 3.3 มาปรับสภาพผักตบชวาเป็นเวลา 1, 3 และ 5 วันในตู้บ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เมื่อครบระยะเวลา นำตัวอย่างที่ผ่านการปรับสภาพมาวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ซึ่งที่เกิดขึ้น พบว่าการปรับสภาพผักตบชวาด้วยเอนไซม์เซลลูเลสที่สกัดด้วยสารละลายโซเดียมซิเตรตบัฟเฟอร์และทำการปรับสภาพเป็นเวลา 1, 3 และ 5 วันมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ซึ่งเท่ากับ 12.84 ± 2.04 , 11.96 ± 0.48 และ 7.62 ± 0.48 mg/g SMS ตามลำดับ ส่วนผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วยเอนไซม์เซลลูเลสที่สกัดด้วยน้ำกลั่นนั้นมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ซึ่งเท่ากับ 13.89 ± 0.51 , 10.24 ± 1.73 และ 6.24 ± 1.12 mg/g SMS ตามลำดับ ดังแสดงใน Figure 2 จะเห็นได้ว่าเมื่อระยะเวลาในการปรับสภาพเพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ซึ่งที่เกิดขึ้นมีปริมาณลดลงและเมื่อทำการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี One-way ANOVA พบว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ซึ่งที่ได้จากการปรับสภาพผักตบชวาด้วยเอนไซม์เซลลูเลสที่สกัดด้วยสารละลายโซเดียมซิเตรตบัฟเฟอร์หรือน้ำกลั่นในแต่ละระยะเวลามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับจุลินทรีย์อาจนำน้ำตาลรีดิวซ์ซึ่งไปใช้ทำให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ซึ่งลดลงในวันที่ 3 และ 5 อย่างต่อเนื่อง [12] ส่วนเมื่อวิเคราะห์ผลทางสถิติของวันที่ 1 โดยเปรียบเทียบระหว่างสารละลายโซเดียมซิเตรตบัฟเฟอร์กับน้ำกลั่นพบว่าไม่มีความแตกต่างทางนัยสำคัญรวมถึงผลของวันที่ 3 และ 5 และเมื่อนำมาวิเคราะห์ผลทางสถิติร่วมกันระหว่างปัจจัยด้านระยะเวลาที่ปัจจัยชนิดของสารละลายสกัดพบว่าไม่มีความแตกต่างกันทางนัยสำคัญและจาก Figure 2 ในวันที่แรกของการปรับสภาพจะเห็นว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ซึ่งของตัวอย่างที่ใช้เอนไซม์ที่สกัดด้วยน้ำกลั่นนั้นมีปริมาณมากกว่าตัวอย่างที่ใช้เอนไซม์ที่สกัดด้วยสารละลายโซเดียมซิเตรตบัฟเฟอร์อาจเป็นเพราะน้ำกลั่นมีความแรงของประจุต่ำ ทำให้เกิดความแตกต่างของแรงดันออสโมติกเมื่อนำไปปรับสภาพผักตบชวาทำให้น้ำสามารถซึมเข้าสู่เนื้อเยื่อของผักตบชวาได้อย่างรวดเร็ว ทำให้โครงสร้างของผักตบชวาเกิดการพองตัว (Swelling) ได้เต็มที่ในวันที่แรกซึ่งการพองตัวที่เกิดขึ้นจะไปขยายรูพรุน (Pore size) ของผักตบชวาให้เอนไซม์เข้าไปทำปฏิกิริยาได้ไวขึ้น [13] แต่หากพิจารณาผลในระยะยาวจะเห็นว่าผลการปรับสภาพที่ใช้เอนไซม์ที่สกัดด้วยสารละลายโซเดียมซิเตรตบัฟเฟอร์ให้ผลผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ซึ่งมากกว่าตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นและเมื่อพิจารณาค่า pH ดังแสดงในตารางที่ 5 พบว่าตัวอย่างที่ใช้เอนไซม์ที่สกัดด้วยสารละลายโซเดียมซิเตรตบัฟเฟอร์คงความเสถียรของ pH ได้ดีกว่าเอนไซม์ที่สกัดด้วยน้ำกลั่น โดยช่วง pH ที่ทำให้เอนไซม์เซลลูเลสทำงานได้ดีที่สุด (Optimal pH) อยู่ในช่วง 4.5-5.5 เมื่อ pH มีค่าลดลงตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นนั้นจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเอนไซม์ลดลง

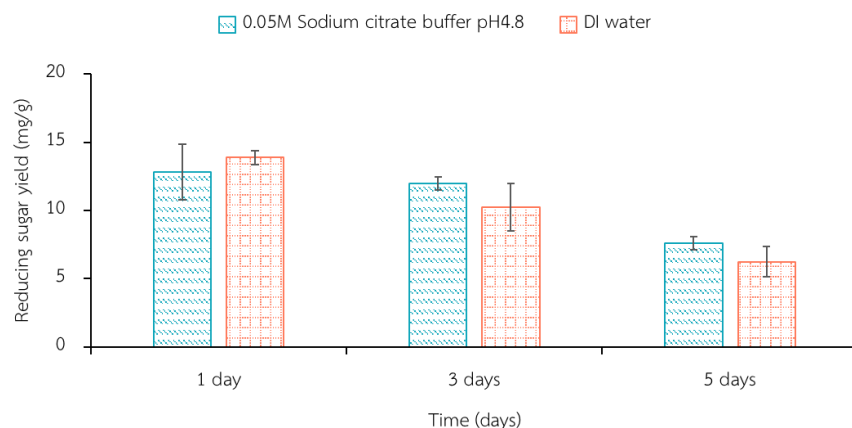


Figure 2 Reducing sugar after pretreatment for 1, 3 and 5 days

Table 5 pH after pretreatment for 1, 3 and 5 days

Conditions	1 day	3 days	5 days
0.05 M sodium citrate buffer pH 4.8	4.7	4.58	4.40
DI water pH 4.8	4.62	4.41	4.20

3.5 การผลิตแก๊สมีเทนจากการย่อยสลายผักตบชวาแบบไม่ใช้อากาศเป็นเวลา 10 วัน

กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศจะเปลี่ยนสารอินทรีย์ให้กลายเป็นแก๊สชีวภาพ โดยในการทดลองนี้จะใช้กากตะกอนไม่ใช้อากาศหมักร่วมกับผักตบชวาที่ได้ผ่านการปรับสภาพ มาหมักเป็นเวลา 10 วันเพื่อผลิตแก๊สมีเทน โดยจากการทดลองพบว่าในตัวอย่างที่ใช้เอนไซม์ที่สกัดจากสารละลายโซเดียมซิเตรตบัพเฟอร์แล้วปรับสภาพเป็นเวลา 3 วัน (3D) ให้ผลผลิตแก๊สมีเทนสูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 157.82 ± 10.98 ml/g VS ตามด้วยตัวอย่าง 5D, 3D_W, 1D, 1D_W, 5D_W และ Control มีค่าเท่ากับ 155.47 ± 3.62 , 147.26 ± 2.79 , 134.86 ± 4.41 , 132.34 ± 8.87 , 125.23 ± 14.94 และ 97.95 ± 8.61 ml/g VS ตามลำดับ เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ซึ่งหลังการปรับสภาพกับผลผลิตแก๊สมีเทน พบว่าตัวอย่างที่ให้ผลผลิตแก๊สมีเทนสูงสุด (3D) ไม่ใช่ตัวอย่างที่มีปริมาณน้ำตาลเริ่มต้นสูงสุด (1D_W) การที่กลุ่ม 1D_W มีระดับน้ำตาลสูงในวันแรกของการปรับสภาพ คาดว่าเป็นผลจากโครงสร้างผักตบชวาเกิดการพองตัว ทำให้เอนไซม์เข้าทำปฏิกิริยากับสายโซ่เซลลูโลสในบริเวณที่ไม่มีผลึก (Amorphous region) ซึ่งเข้าถึงได้ง่ายได้อย่างรวดเร็ว [14] อย่างไรก็ตาม เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นในวันที่ 3 และ 5 ปริมาณน้ำตาลของกลุ่มน้ำกลั่นกลับลดลงและต่ำกว่ากลุ่มบัพเฟอร์ ปรากฏการณ์นี้อธิบายได้จากความสามารถในการรักษาสมดุลกรด-เบส (Buffering capacity) ของสารละลายโซเดียมซิเตรตบัพเฟอร์ ซึ่งช่วยชะลอการเสื่อมสภาพของเอนไซม์ [15] ส่งผลให้เกิดการย่อยสลายโครงสร้างลิกโนเซลลูโลสอย่างต่อเนื่อง การปลดปล่อยน้ำตาลอย่างสม่ำเสมอช่วยลดความเสี่ยงของการเกิดสภาวะกรดสะสม (Acidosis) อย่างกะทันหัน ทำให้กลุ่มจุลินทรีย์สร้างมีเทน (Methanogens) สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและเสถียรภาพ [16] ปริมาณแก๊สมีเทนของกลุ่มที่ใช้สารละลายบัพเฟอร์จึงมีแนวโน้มสูงกว่า

เมื่อวิเคราะห์ผลทางสถิติของแก๊สมีเทนสะสมระหว่างกลุ่มที่ใช้สารละลายโซเดียมซิเตรตบัพเฟอร์และน้ำกลั่นในระยะเวลาการปรับสภาพเดียวกัน พบว่าความแตกต่างของผลผลิตในวันที่ 1 (1D กับ 1D_W) และวันที่ 3 (3D กับ 3D_W) ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่วันที่ 5 (5D กับ 5D_W) มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ สาเหตุเนื่องมาจากการปรับสภาพเป็นระยะเวลา ยาวนานถึง 5 วัน ภายใต้อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส การใช้สารละลายบัพเฟอร์ (5D) สามารถช่วยรักษาสภาพการทำงานของเอนไซม์เอาไว้ได้ ในขณะที่กลุ่มน้ำกลั่น (5D_W) ขาดคุณสมบัติดังกล่าว ส่งผลให้เอนไซม์สูญเสียเสถียรภาพอย่างรุนแรงจากอุณหภูมิ และการลดลงของค่า pH (อ้างอิง) นอกจากนี้เมื่อเข้าสู่กระบวนการหมักความเป็นบัพเฟอร์ที่ตกค้างอยู่ในกลุ่ม 5D ยังมีส่วนช่วยต้านทานกรดอินทรีย์ที่จุลินทรีย์ผลิตขึ้นในระยะแรก (Acidogenesis) สภาพแวดล้อมโดยรวมของกลุ่ม 5D จึงมีความเหมาะสมต่อการผลิตแก๊สมีเทนมากกว่ากลุ่ม 5D_W อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์สถิติของผลแก๊สมีเทนสะสมในแต่ละตัวอย่างพบว่ามีความแตกต่างกันทางนัยสำคัญรวมถึงการวิเคราะห์ระหว่างตัวอย่างที่ใช้เอนไซม์ที่สกัดด้วยสารละลายโซเดียมซิเตรตบัพเฟอร์และน้ำร่วมกับระยะเวลาในการปรับสภาพพบว่ามีความแตกต่างกันทางนัยสำคัญ ส่วนการวิเคราะห์ตัวอย่างชนิดของตัวทำลายกับระยะเวลาในการปรับสภาพพบว่าตัวอย่างที่ใช้เอนไซม์ที่สกัดด้วยโซเดียมซิเตรตบัพเฟอร์ในการปรับสภาพในระยะเวลา 1, 3 และ 5 วันมีความแตกต่างกันทางนัยสำคัญแต่ในตัวอย่างที่ใช้น้ำกลั่นนั้นไม่มีความแตกต่างกันทางนัยสำคัญ จะเห็นได้ว่าการใช้สารละลายโซเดียมซิเตรตบัพเฟอร์ในการสกัดเอนไซม์เซลลูเลสนั้นส่งผลต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ซึ่งและปริมาณแก๊สมีเทนสะสมที่เกิดขึ้น

เมื่อทำการเปรียบเทียบผลแก๊สมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาในการหมักพบว่าปริมาณแก๊สมีเทนสะสมในตัวอย่างชุดควบคุมกับตัวอย่างที่ผ่านการปรับสภาพมาแล้ว ชุดตัวอย่างที่ผ่านการปรับสภาพมาแล้วมีปริมาณของแก๊สมีเทนสะสมเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Ilo et al. [17] ที่ทำการปรับสภาพผักตบชวาโดยใช้เชื้อรา *Trichoderma atroviride* พบว่าการปรับสภาพช่วยเพิ่มผลผลิตแก๊สมีเทนจาก 135 ml/g VS เป็น 210-223 ml/g VS ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองในงานวิจัยนี้ ปริมาณแก๊สมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่าเนื่องจาก *T. atroviride* มีศักยภาพในการผลิตเอนไซม์เซลลูเลสได้ดีกว่า

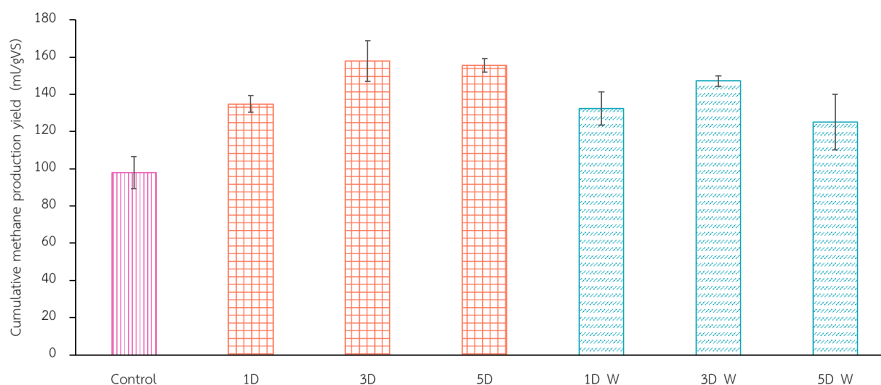


Figure 3 Cumulative methane production yield for 10 days

4. สรุป

การสกัดเอนไซม์เซลลูเลสจากก้อนเชื้อเห็ดนางฟ้าภูฐานเก่าโดยใช้ไซโตเดียมซีเตรตบัพเฟอร์และน้ำที่อัตราส่วน 60:150 และทำการเขย่าที่ 150 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 2 ชั่วโมงให้กิจกรรมของเอนไซม์เซลลูเลสที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีความเข้มข้นสูงที่สุดเมื่อนำเอนไซม์เซลลูเลสไปปรับสภาพผักตบชวาพบว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ซึ่งเกิดขึ้นมีค่าใกล้เคียงกันและเมื่อนำไปหมักร่วมกับกากตะกอนเป็นเวลา 10 วันพบว่าตัวอย่างผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพเป็นเวลา 3 วันและใช้เอนไซม์เซลลูเลสที่สกัดจากสารละลายไซโตเดียมซีเตรตบัพเฟอร์นั้นให้ผลผลิตแก๊สมีเทนสะสมมากที่สุดเท่ากับ 157.82 ± 10.98 ml/g VS การปรับสภาพผักตบชวาก่อนการนำไปหมักเป็นการแสดงศักยภาพของการปรับสภาพผักตบชวาที่มีผลต่อการเพิ่มผลผลิตแก๊สมีเทนรวมถึงสามารถนำไปศึกษาเพิ่มเติมในระดับ pilot scale ได้ในอนาคต ส่วนการสกัดเอนไซม์เซลลูเลสนั้นในการทดลองนี้เป็นเพียงการใช้เอนไซม์หยาบ (Crude enzyme) ในอนาคตสามารถนำไปปรับปรุงประสิทธิภาพโดยการทำเอนไซม์บริสุทธิ์ขึ้น (Purification) เพื่อดูความแตกต่างของผลการทดลองที่เกิดขึ้นรวมถึงการคำนวณถึงความคุ้มค่าในการใช้งานและการใช้การปรับสภาพทางชีวภาพ (Biological pretreatment) เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและเป็นการจัดการวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรให้เกิดประโยชน์ทดแทนการฝังกลบหรือการเผา

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อมและกองทุนคณะสิ่งแวดล้อมที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Dedousi, M., et al., *Utilization of spent substrates and waste products of mushroom cultivation to produce new crops of Pleurotus ostreatus, Pleurotus eryngii and Agaricus bisporus*. Carbon Resources Conversion, 2024. 7(2).
- [2] Pérez-Chávez, A.M., M.M. Alberti, and E. Albertó, *Evaluation of ligninolytic activity in spent mushroom substrate from four cultivated mushrooms*. Journal of Bioresources and Bioproducts, 2022. 7(4): p. 288-294.
- [3] Barua, V.B., V.V. Goud, and A.S. Kalamdhad, *Microbial pretreatment of water hyacinth for enhanced hydrolysis followed by biogas production*. Renewable Energy, 2018. 126: p. 21-29.
- [4] Yunan, N.A.M., T.Y. Shin, and V. Sabaratnam, *Upcycling the Spent Mushroom Substrate of the Grey Oyster Mushroom Pleurotus pulmonarius as a Source of Lignocellulolytic Enzymes for Palm Oil Mill Effluent Hydrolysis*. J Microbiol Biotechnol, 2021. 31(6): p. 823-832.

-
- [5] P. J. Van Soest, J. B. Robertson, and B.A. Lewis, *Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition*. Journal of Dairy Science, 1991. 74(10): p. 3583-3597.
- [6] Miller, G.L., *Use of Dinitrosalicylic Acid Reagent for Determination of Reducing Sugar*. Analytical chemistry, 1959. 31: p. 426-429.
- [7] Demichelis, F., et al., *Effect of inoculum origin and substrate-inoculum ratio to enhance the anaerobic digestion of organic fraction municipal solid waste (OFMSW)*. Journal of Cleaner Production, 2022. 351.
- [8] Devi, R., et al., *Comparative assessment on lignocellulose degrading enzymes and bioethanol production from spent mushroom substrate of Calocybe indica and Volvariella volvacea*. Environ Sci Pollut Res Int, 2024. 31(27): p. 38878-38892.
- [9] Guo, J., et al., *Effect of Deep Eutectic Solvents on the Activity and Stability of Cellulases and Pectinases*. ACS Omega, 2023. 8(48): p. 45678-45686.
- [10] Afsar, M., et al., *A multifaceted analysis of spent mushroom substrate of selected oyster mushrooms for enzymatic activity, proximate composition, and antimicrobial activity*. Italian Journal of Food Science, 2024. 36(1): p. 165-174.
- [11] Karthika Devi, S., et al., *Sequestration and purification of essential enzyme from Pleurotus florida compost waste and its application studies*. Journal of Applied Biology & Biotechnology, 2020. 8(1): p. 64-68.
- [12] Ostby, H., et al., *Enzymatic processing of lignocellulosic biomass: principles, recent advances and perspectives*. J Ind Microbiol Biotechnol, 2020. 47(9-10): p. 623-657.
- [13] Nakagame, S., et al., *Enhancing the enzymatic hydrolysis of lignocellulosic biomass by increasing the carboxylic acid content of the associated lignin*. Biotechnol Bioeng, 2011. 108(3): p. 538-48.
- [14] Jiang, X., et al., *Unveiling the Inhibition of Enzymatic Hydrolysis of Cellulose by Lignin-Derived Phenolics: Interfacial Kinetics and Molecular Simulations*. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2024. 12(26): p. 9957-9968.
- [15] Vats, A., A.S. Kurade, and S. Mutnuri, *Recovery of Lignocellulolytic Enzymes and Valorization of Spent Mushroom Substrate*. Environment and Natural Resources Journal, 2022. 20(1): p. 1-9.
- [16] Barua, V.B., V. Rathore, and A.S. Kalamdhad, *Anaerobic co-digestion of water hyacinth and banana peels with and without thermal pretreatment*. Renewable Energy, 2019. 134: p. 103-112.
- [17] Ilo, O.P., et al., *The effects of Trichoderma atroviride pretreatment on the biogas production from anaerobic digestion of water hyacinth*. Energy & Environment, 2022. 35(3): p. 1339-1358.



General

LABROOM



CABINET



LABORATORY CHAIR

📍 48/3 Moo 6 Soi Virunrard, Settakit Rd.,
Thamai, Kratumban, Samut Sakhon 74110
Thailand
48/3 หมู่ 6 ซอยวิรุณราชฎร์ ถนนเศรษฐกิจ ตำบลท่าไม้
อำเภอกระทุ่มแบน จังหวัดสมุทรสาคร 74110

☎ Tel. +66 2 431 6061-6
✉ E-mail : sales@skpower.co.th





HANGING CABINET



BALANCE TABLE



ISLAND BENCH



CONTACT INFORMATION

48/3 Moo 6 Soi Virunrard, Settakit Rd., Thamai, Kratumban, Samut Sakhon 74110 Thailand
48/3 หมู่ 6 ซอยวิรุณราชบุรี ถนนเศรษฐกิจ ตำบลท่าไม้ อำเภอกะหฤ์มแบบ จังหวัดสมุทรสาคร 74110

Tel. +66 2 431 6061-6 | E-mail : sales@skpower.co.th

