



RMUTK RATTANAKOSIN
ราชมนักกรุงเทว **RMUTR**

BS BANSOMDEJ
Rajabhat University **EEAAT**
Electrical Engineering Academic Association (Thailand)

IMAKE
nt โครงการสมาคม
แห่งชาติ



KMITL Prince of Chumpon
FIGHT TOGETHER
Happy Learning Campus



การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 9

Vol.1 ด้านสารสนเทศ การเกษตร
วิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

29 - 31 พฤษภาคม 2567

โรงแรมดิwana พลาซ่า กระบี่ อำเภอนาง จังหวัดกระบี่
จัดโดย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

เอกสารประกอบการประชุมวิชาการระดับชาติ ประจำปี2567

ด้านสารสนเทศ การเกษตร วิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ครั้งที่ 9 : IAMBEST 2024

จัดโดย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร และ
เครือข่ายมหาวิทยาลัย

สงวนลิขสิทธิ์ตามกฎหมาย

ทัศนคติและข้อคิดเห็นใดๆ ที่ปรากฏในบทความภายในเอกสารรายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการ
IAMBEST 2024 เป็นทัศนะของผู้เขียน คณะกรรมการจัดการประชุมไม่จำเป็นต้องเห็นพ้องด้วยกับทัศนะ
เหล่านั้น และไม่ถือว่าเป็นความรับผิดชอบของคณะกรรมการจัดการประชุม ความรับผิดชอบด้านเนื้อหา
และการตรวจร่างบทความแต่ละบทความของผู้แต่งแต่ละท่าน กรณีมีการฟ้องร้องเรียนเรื่องการละเมิด
ลิขสิทธิ์ถือเป็นความรับผิดชอบของผู้เขียนแต่เพียงฝ่ายเดียว

พิมพ์ครั้งที่ 1 วันที่ 29 พฤษภาคม พ.ศ. 2567

ออกแบบปก นายสรารัฐ สวัสดิ์

จัดพิมพ์โดย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์

จังหวัดชุมพร 17/1 หมู่ 6 ตำบลชุมโค อำเภอปะทิว จังหวัดชุมพร 86160

โทรศัพท์(077) 506 - 410



Keynote Speaker

Topic: Driving Technology and Innovation
with Bio-Circular-Green Economy

Prof. Dr. Apanee Luengnaruemitchai

CHAIRPERSON, Energy, Chemicals and Biomaterials
Program Board from Program Management Unit
for Competitiveness (PMUC)



สารจาการองอธิการบดี
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร



การประชุมทางวิชาการระดับประเทศ The 9th National Conference on Informatics, Agriculture, Management, Business administration, Engineering, Sciences and Technology และการประชุมทางวิชาการระดับนานาชาติ The 5th International Conference on Informatics, Agriculture, Management, Business Administration, Engineering, Sciences and Technology (IAMBEST 2024) เป็นการประชุมจากผู้เชี่ยวชาญ นักวิชาการและนักวิจัย ในด้านต่างๆ เช่น สารสนเทศ การเกษตร การจัดการและการบริหารธุรกิจ วิศวกรรมศาสตร์ และวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ซึ่งจัดขึ้นโดยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ระหว่างวันที่ 29 - 31 พฤษภาคม 2567

โดยมีจุดประสงค์เพื่อเป็นเวทีแลกเปลี่ยนเรียนรู้ระหว่างนักวิชาการ นักวิจัย และบุคลากรทางการศึกษา รวมทั้งผู้เชี่ยวชาญในหลากหลายแขนง ความก้าวหน้าและการพัฒนาในวงการวิจัย ซึ่งทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนเรียนรู้ระหว่างกัน เกิดสร้างเครือข่ายและสามารถบูรณาการองค์ความรู้ต่างๆ ไปพัฒนา ชุมชน สังคม ประเทศชาติ ให้มีความเจริญก้าวหน้าต่อไป

ในนามของประธานคณะกรรมการจัดงานประชุมวิชาการ IAMBEST 2024 ผมขอขอบคุณคณะทำงานและผู้นำเสนอผลงานทุกท่านที่เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้การจัดประชุมประสบความสำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าการจัดประชุมในครั้งนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนางานทางวิชาการ งานวิจัยและเกิดการสร้างนวัตกรรมอันเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาประเทศตามความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของทุกท่าน ขอขอบคุณครับ

(รองศาสตราจารย์ ดร.คำรณวิทย์ ทิพย์มณี)
รองอธิการบดี วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สารบัญ

สารจาการองอธิการบดีสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	ก
วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร	
Keynote	ข
สารบัญ	ค
กำหนดการประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติ ประจำปี 2567	ช
โปรแกรมการนำเสนอการประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 9	ญ
รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 9	ณ
ภาคบรรยาย	1
กลุ่ม I : Informatics (ด้านสารสนเทศ)	
OI - 94 การพัฒนาระบบทดสอบอีเมลฟิชชิง	2
สุภาษา อยู่ชมบุญ สมศักดิ์ วลัยรัชต์ และ รัตติกร สมบัติแก้ว	
OI - 97 เว็บแอปพลิเคชันพัฒนาทักษะภาษาอังกฤษ	12
นภัสรพี ลิทธิวิจน์ ณิชกานต์ กายฤทธิ์ มนัสวี ปรีดตะพงศาศัย สักกะพันธ์ คล้ายดอกจันทร์ เย็นยิ่ง จงจิตต์	
นารารอร สว่างวงศ์ และ กาญจนา ม่วงทองคำ	
กลุ่ม A : Agriculture (ด้านการเกษตร)	
OA - 44 ประสิทธิภาพการดึงดูดของน้ำมันหอมระเหยจากชะพลูช้างต่อแมลงวันผลไม้ (เพศผู้)	21
ชนิด <i>Bactrocera dorsalis</i>	
สุภคจี วุฒิกุลประพันธ์ และ คำณวิทย์ ทิพย์มณี	
OA - 53 การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอาร์เอ็นเออินเตอร์เฟียร์เรนซ์เพื่อควบคุมเชื้อไวรัสสาเหตุโรคใบด่างมันสำปะหลัง	28
วรารัตน์ ศรีประพัฒน์ บุญเรือนรัตน์ เรืองวิเศษ ภรณ์ สว่างศรี ปิยนุช ศรชัย และ จิราภรณ์ จิระคกุล	
OA - 69 ผลของอุณหภูมิ น้ำทะเลที่ต่างกันต่อ อัตรารอด อัตราการลงเกาะ อัตราการเปลี่ยนระยะ พฤติกรรมการลงเกาะ	34
และพฤติกรรมการกินอาหารของเพรียงหิน (<i>Amphibalanus amphitrite</i>)	
มัคคุเทศก์ หมวดทองอ่อน และ มณฑล แก่นมณี	
OA - 73 ผลของสาร azoxystrobin ร่วมกับ salicylhydroxamic acid ต่อเชื้อรา <i>Fusarium</i> spp. สาเหตุโรคกิ่งแห้ง	44
บนต้นกล้วยเรียน	
ธนพร ทองเทพ พรณิภา ย้วยล สรัญญา วลัยเสวี และ พรประพา คงตระกูล	
OA - 74 ผลของสาร fluazinam ต่อเชื้อรา <i>Colletotrichum</i> spp. สาเหตุโรคแอนแทรคโนสของต้นกล้วยเรียน	50
ในห้องปฏิบัติการ	
ณัฐพร ถิ่นวงศ์ยอด พรณิภา ย้วยล สรัญญา วลัยเสวี และ พรประพา คงตระกูล	
OA - 76 ชนิดและร้อยละการปกคลุมของสัตว์ทะเลหน้าดินเกาะติดบริเวณแนวปะการังเทียมเกาะจรเข้ จังหวัดชุมพร	56
นฤตล อินทรโยธา1 และ มณฑล แก่นมณี	
OA - 80 การคัดเลือกสายพันธุ์ถั่วฝักยาวโดยการวิเคราะห์แบบหลายลักษณะ	66
ปราโมทย์ พรสุริยา อภิลิทธิ์ ชิตวณิช วชิราภรณ์ เรือนแป้น และ ณัฐญา เรือนแป้น	

OA - 83	ความเข้มข้นของการให้โซเดียมซัลเฟตชนิดผงทางใบต่อผลผลิต สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และการสะสมซัลเฟตในผักปลังขาว BA019 ที่ปลูกในชุดดินกำแพงแสน	73
	ณัฐพร วันสา พรไพรินทร์ รุ่งเจริญทอง หทัยรัตน์ โชคทวีพาณิชย์ เยาวรัตน์ ศรีสกุลแก้ว สุรพงษ์ ดำรงกิตติกุล อัครชัย โสมกุล วิทยา เศรษฐวิทยา และ ศุภชัย อำคา	

กลุ่ม E : Engineering (ด้านวิศวกรรมศาสตร์)

OE - 6	การสอบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตของเมล็ดถั่วแดงหลวงด้วยแบบจำลองดีอีเอ็ม	81
	ปรีดา ปรากฏมาก	
OE - 19	การออกแบบจิ้งหรีดด้วยเครื่องสเปาท์ฟลูอิดเบรตร่วมกับไมโครเวฟ	92
	กิตติ สถาพรประสารณ์ และ กฤษณ์ อภิญญาวิศิษฐ์	
OE - 31	เครื่องประจุแบตเตอรี่ด้วยพลังงานแสงอาทิตย์	102
	พีรวิทย์ แก้วรักษ์ และ ปุณณภัทร ภูมิภาค	
OE - 32	วิธีการใหม่สำหรับประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส	112
	พีรวิทย์ แก้วรักษ์ และ ปุณณภัทร ภูมิภาค	
OE - 33	การประยุกต์ใช้เครื่องหมุนเหวี่ยงแบบจานร่วมกับเครื่องล้างใบโอติเซล ด้วยไบโอชาร์ในกระบวนการผลิตไบโอติเซล	121
	สุรศักดิ์ พงษ์ศิริ อธิพล จักรเจริญ อรสา ชูละเอียด และ วารุณี ลิ้มมัน	
OE - 46	การหาค่าความชื้นของใบกล้วยไม้สดสกุลหวายพันธุ์ขาวสนานด้วยเทคนิคภาพไฮเปอร์สเปกตรัล	130
	อินพราเรตยานไกล์	
	พชรพร เขียงเงิน พชร สืบทรง ชุตินา กาบแก้ว และ สิรินาฏ น้อยพิทักษ์	
OE - 49	ผลกระทบของการปะทะของไหลต่อการถ่ายเทความร้อนเคอเดนแผ่นเหล็กกริดร้อน	140
	วิสิทธิ์ เอกวานิช ศักรินทร์ ชินกุลพิทักษ์ กันตภณ สาระทวย และ ปัญญา แดงวิไลลักษณ์	
OE - 54	ระบบการแจ้งเตือนการใช้งานและทำนายรายจ่ายสำหรับค่าน้ำและค่าไฟฟ้าในหนึ่งครอบครัว	150
	ธีรภัฏฐ์ กุลนันท์กาญจนา ธนวิชัย อนุวงศ์พินิจ และ บุญยชนะ ภูระหงษ์	
OE - 55	สภาวะที่เหมาะสมในการล้างใบโอติเซลโดยเครื่องล้างใบโอติเซลด้วยถ่านไบโอชาร์	160
	อัมรินทร์ กลิ่นหอม อธิพล จักรเจริญ อรสา ชูละเอียด สิทธิพร ทองภูเบศร์ และ วารุณี ลิ้มมัน	
OE - 61	การประเมินโมเดลการเรียนรู้เชิงลึกสำหรับการตรวจจับและจำแนกความเสียหายของตู้คอนเทนเนอร์	170
	ธีรศักดิ์ อัครสวัสดิ์ และ รัชนิ กุลยานนท์	
OE - 63	การผลิตถ่านชีวภาพแม่เหล็กจากขี้เลื่อยไม้ยางพาราสำหรับการกำจัดตะกั่ว	178
	ธาวิน พินทอง อธิพล จักรเจริญ อรสา ชูละเอียด นพดล เกตุพิมล และ วารุณี ลิ้มมัน	
OE - 71	การศึกษาการฟื้นฟูถ่านชีวภาพจากเปลือกสละที่ผ่านการดูดซับเมทิลีนบลู	187
	อัฐ แจ่มมงคล อธิพล จักรเจริญ อรสา ชูละเอียด และ วารุณี ลิ้มมัน	
OE - 78	อิทธิพลของความเค็มแรงดึงที่ส่งผลต่อความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อน	194
	อุดมศักดิ์ สว่างวงศ์ และ ณัฐนันท์ มูลสระคู	
OE - 100	การศึกษาสมบัติของฟิล์มเทอร์โมพลาสติกจากสตาร์ชข้าวสังข์หยด	199
	เพชรลดา จิระวรรณ กรรณก อุบลชลเขต และ เสาวณีย์ สิงห์สโรทัย	

กลุ่ม S : Sciences (ด้านวิทยาศาสตร์)

OS - 10	การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ด้วยกระบวนการชีวสังเคราะห์โดยใช้สารสกัดจากใบชะมวง และฤทธิ์ต้านเชื้อรา <i>Phytophthora palmivora</i>	209
	อรสา ชูละเอียด พรประพา คงตระกูล และ อุษา สุขชา	

OS - 21	การเปรียบเทียบวิธีการใส่ค่าสูญหาย ในการวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติก เมื่อตัวแปรตามมีการสูญหายแบบนอนอินฟอร์เรเบิล <i>อภิชาติ ฉัตรเรืองเลิศ และ อนุภาพ สมบูรณ์สวัสดิ์</i>	218
OS - 51	แบบจำลองเกสซาลงศาสตร์เชิงสรีรวิทยาในการคาดการณ์เกสซาลงศาสตร์บริเวณอวัยวะเป้าหมายของสารเงินสดีนและเมแทบอลิไตในหนู <i>อาชัญวิชัย ศุภมิตรภุชญา ธิติอนันต์ กุลศิริรัตน์ ตุลยา โพธารส นวพร อาดำ อาณัฐชัย ม้ายอุเทศ น้ำฝน อัครกิจกุลโรจน์ และ ภัทรวิทย์ รักษ์ทอง</i>	226
OS - 56	ผลของอัตราส่วนคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและแคลเซียมคลอไรด์ต่อสมบัติของไฮโดรเจลสำหรับการสังเคราะห์วัสดุเชิงประกอบไฮโดรเจลผสมถ่านชีวภาพ <i>เนติศา คำเขียว มุจลินทร์ ผลจันทร์ สุรศักดิ์ กุยมาลี ธวัฒน์ สร้อยทอง และ เนตราพร ดวงสง</i>	238
OS - 66	ผลของ Citral ต่อการเจริญและการก่อตัวของไบโอฟิล์มของเชื้อกลุ่ม Oral Streptococci <i>เกษมชาติ พรหมสอน พิมพ์ภา กาญจนคำกิ่ง และ กานต์ วงศาริยะ</i>	249
OS - 79	การวิเคราะห์คุณภาพและการประเมินการยอมรับทางประสาทสัมผัสของตัวอย่างไวน์ลำไยที่มีกรรมวิธีการผลิตแตกต่างกัน <i>ธนารักษ์ ม่อมละมุล ธมลวรรณ วาเหลา ภัททิรา พงษ์นาคินทร์ และ วันวิสาข์ ทวีชื่นสกุล</i>	256
กลุ่ม T : Technology (ด้านเทคโนโลยี)		
OT - 45	การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของดินถล่มโดยใช้การเรียนรู้ของเครื่องในจังหวัดภูเก็ต <i>พันแสง แพงวังทอง และ พิพันธ์ เรืองแสง</i>	265
OT - 64	การออกแบบและพัฒนาโดรนเกษตรสำหรับการปลูกป่า <i>ศธา วาทกิจ ภาวทร อุตพันธ์ วารุณี พลจันทร์ ศศิวิมล ดาวไธสง และ ชลธร โพธิ์แก้ว</i>	275
ภาคโปสเตอร์		284
กลุ่ม A : Agriculture (ด้านการเกษตร)		
PA - 11	ผลการใช้สารจับใบเรลลินต่อการเก็บเกี่ยวด้วยเครื่องเกี่ยวนาเพื่อผลิตเมล็ดพันธุ์ข้าวเหลืองหลังนาจังหวัดน่าน <i>กัณทิมา ทองศรี ภักดิ์สร วัฒนกุลภาคิน ศุภลักษณ์ สัตยสมิตสถิต ธนชาติ ทรัพย์จี และ นิภาภรณ์ พรหมรา</i>	285
กลุ่ม E : Engineering (ด้านวิศวกรรมศาสตร์)		
PE - 70	การศึกษาเชิงเปรียบเทียบรูปแบบการวัดสเปกตรัมเนียร์อินฟราเรดที่มีต่อสมรรถนะของแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องสำหรับการประเมินความเสถียรเชิงกลในน้ำยางข้น <i>พิสิษฐ์ สุทโธ กิตติศักดิ์ เพ็ชรพันธ์ และ ชิน ยอด ลัม</i>	296
กลุ่ม S : Sciences (ด้านวิทยาศาสตร์)		
PS - 5	การคัดแยกกราเอนโดไฟท์จากพืชกระท่อม (<i>Mitragyna speciosa</i>) ในเขตจังหวัดฉะเชิงเทรา <i>กฤษณะ บุญมี เกวลิน ปูเงิน และ ณัฐพล รุ่งจินดามัย</i>	306
PS - 68	การเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟเพื่อใช้ในการดูดซับเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) <i>อรสา ชูละเอียด กัญญาชลา กิรติวี และ พรประพา คงตระกูล</i>	312
PS - 91	การประยุกต์ใช้เครื่องหมายโมเลกุล EST-SSRs สำหรับการทำโปรไฟล์พันธุกรรมในบางจีโนไทป์ของสตรอเบอร์รี่ <i>ปรียา พวงสำลี หวังสมนึก อาภาพร ไชยสัตย์ และ พงศ์ปณต หวังสมนึก</i>	320

กลุ่ม T : Technology (ด้านเทคโนโลยี)

- PT - 29 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่หลากหลายเพื่อทำนายนการสัคคสารประกอบพินอลิกทังหมดของกะหล่ำปลีแดง
ด้วยเอทานอล
นิตยา จันกา และ ชัยวัฒน์ รัตนมีชัยสกุล

331

กำหนดการประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติ ประจำปี 2567
ด้านสารสนเทศ การเกษตร การจัดการ บริหารธุรกิจ วิศวกรรมศาสตร์
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ (IAMBEST 2024)
ในระหว่างวันที่ 29 - 31 พฤษภาคม 2567
ณ โรงแรม Deevana Plaza Krabi Aonang จังหวัดกระบี่

วัน/เวลา	กิจกรรม	ห้องประชุม
วันพุธที่ 29 พฤษภาคม พ.ศ. 2567		
13.00 - 17.30 น.	Upload ไฟล์โปสเตอร์และบรรยายเพื่อนำเสนอประชุมวิชาการระดับชาติ และระดับนานาชาติ	Hornbill Ballroom
วันพฤหัสบดีที่ 30 พฤษภาคม พ.ศ. 2567		
08.00 - 08.50 น.	ลงทะเบียน Upload ไฟล์นำเสนอโปสเตอร์และบรรยายเพื่อนำเสนอประชุมวิชาการระดับชาติ และระดับนานาชาติ	Hornbill Ballroom
09.00 - 09.20 น.	พิธีเปิดการประชุมวิชาการระดับชาติ และระดับนานาชาติ	Hornbill Ballroom
09.20 - 09.35 น.	พักรับประทานอาหารว่างและเครื่องดื่ม	Foyer
09.35 - 10.10 น.	ปาฐกถาพิเศษ เรื่อง Driving Technology and Innovation with Bio-Circular-Green Economy ผู้บรรยายพิเศษ ศ.ดร.อาภาณี เหลืองนฤมิตชัย ประธานคณะกรรมการอนุกรรมการแผนงานกลุ่มพลังงานเคมีและวัสดุชีวภาพ (PMUC)	Hornbill Ballroom 2
10.10 - 10.40 น.	ร่วมหารือแนวทางการพัฒนาการศึกษา (หน่วยงานด้านศึกษา และตัวแทนสถาบันด้านการศึกษา)	Hornbill Ballroom 2
10.15 - 12.00 น.	Oral Presentation International Session I: Social Science & Humanities, Management and Business administration นำเสนอภาคบรรยาย ระดับชาติ กลุ่ม 1 ด้านการจัดการและบริหารธุรกิจ กลุ่ม 2 ด้านวิศวกรรมศาสตร์ นำเสนอภาคโปสเตอร์ ระดับชาติ ด้านวิทยาศาสตร์ ด้านเกษตรศาสตร์ ด้านเทคโนโลยี ด้านบริหารและการจัดการ ด้านวิศวกรรม ด้านสังคมศาสตร์และมนุษยศาสตร์	Hornbill Ballroom 2 Broadbill Meeting Room Deevana Krabi Meeting room Foyer
10.30 - 12.00 น.	Session: PMUC meet & consult ทุนวิจัยกับหน่วยงาน หน่วยบริหารและจัดการทุนด้านการเพิ่มความสามารถในการแข่งขันของประเทศ (บพข.) แผนงานกลุ่มพลังงาน เคมี และวัสดุชีวภาพ	Starling Lobby Lounge
12.00 - 13.00 น.	รับประทานอาหารกลางวัน	Kingfisher Restaurant

วัน/เวลา	กิจกรรม	ห้องประชุม
วันพฤหัสบดีที่ 30 พฤษภาคม พ.ศ. 2567		
12.30 – 12.45 น.	Upload ไฟล์เพื่อนำเสนอประชุมวิชาการระดับชาติ และระดับนานาชาติ	
13.00 – 14.30 น.	Oral Presentation International Session II: Technology and Engineering Poster Presentation International Session V: Sciences and Business Administration	Hornbill Ballroom 2 Foyer
	นำเสนอภาคบรรยาย ระดับชาติ กลุ่ม 3 ด้านวิศวกรรมศาสตร์ กลุ่ม 4 ด้านวิทยาศาสตร์ กลุ่ม 5 ด้านสังคมศาสตร์และมนุษยศาสตร์	Hornbill Ballroom 1 Broadbill Meeting Room Deevana Krabi Meeting room
13.00 – 14.00 น.	Session: PMUC meet & consult ทุนวิจัยกับหน่วยงาน หน่วยบริหารและจัดการทุนด้านการเพิ่มความสามารถในการแข่งขันของประเทศ (บพข.) แผนงานกลุ่มพลังงาน เคมี และวัสดุชีวภาพ	
14.30 – 14.45 น.	รับประทานอาหารว่างและเครื่องดื่ม	Foyer
14.45 – 18.00 น.	Oral Presentation International Session III: Informatics and Engineering Session IV: Sciences and Agriculture นำเสนอภาคบรรยาย ระดับชาติ กลุ่ม 6 ด้านสารสนเทศ ด้านเทคโนโลยี และด้านวิศวกรรมศาสตร์ กลุ่ม 7 ด้านเกษตรศาสตร์	Hornbill Ballroom 2 Broadbill Meeting Room Hornbill Ballroom 1 Deevana Krabi Meeting room
18.30 – 21.00 น.	รับประทานอาหารเย็น	Hornbill Ballroom 1+2
วันศุกร์ที่ 31 พฤษภาคม พ.ศ. 2567		
09.00 – 10.30 น.	นำเสนอผลงานภาคโปสเตอร์ และนำเสนอผลงานภาคบรรยาย Oral Presentation International Session 1 Engineering นำเสนอภาคบรรยาย ระดับชาติ กลุ่ม 1 ด้านการจัดการและบริหารธุรกิจ กลุ่ม 2 ด้านวิศวกรรมศาสตร์ นำเสนอภาคโปสเตอร์ ระดับชาติ ด้านสารสนเทศ วิทยาศาสตร์ ด้านเกษตรศาสตร์ ด้านบริหารและการจัดการ ด้านวิศวกรรม ด้านวิทยาศาสตร์ ด้านเทคโนโลยี ด้านสังคมศาสตร์และ มนุษยศาสตร์	Hornbill Ballroom 2 Broadbill Meeting Room Deevana Krabi Meeting room Foyer
10.30 – 10.45 น.	พักรับประทานอาหารว่างและเครื่องดื่ม	Foyer

วัน/เวลา	กิจกรรม	ห้องประชุม
10.45 – 11.30 น.	Oral Presentation International	
	Session 1 Technology and Engineering	Hornbill Ballroom 2
	Session 2 Agriculture and Sciences	Broadbill Meeting Room
		Foyer
	Poster Presentation International	
	Sciences and Business administration	
	นำเสนอภาคบรรยาย ระดับชาติ	
	กลุ่ม 1 ด้านสารสนเทศ เทคโนโลยี และ วิศวกรรมศาสตร์	Hornbill Ballroom 1
	กลุ่ม 2 ด้านวิทยาศาสตร์ เกษตรศาสตร์ และสังคมศาสตร์และมนุษยศาสตร์	Deevana Krabi Meeting room

กำหนดการประชุมวิชาการระดับชาติ ประจำปี 2567
ด้านสารสนเทศ การเกษตร การจัดการ บริหารธุรกิจ วิศวกรรมศาสตร์
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์
(IAMBEST 2024)
ในวันที่ 30 พฤษภาคม 2567

โปรแกรมการนำเสนอผลงานระดับชาติ

ภาคบรรยาย

กลุ่ม 2: ด้านวิศวกรรมศาสตร์

Deevana Krabi Meeting room

Chairperson	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปณัยภัทร ภูมิภาค		สจล.วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
	ดร.รัตติกร สมบัติแก้ว		สจล.วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
	อาจารย์นภัสรพี สิทธิวัจน์		สจล.วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
เวลานำเสนอ	รหัส	เรื่อง	
10.15 - 10.30	OE-33	การประยุกต์ใช้เครื่องหมุนเหวี่ยงแบบจานร่วมกับเครื่องล้างใบโอติเซลด้วยใบโอชาร์ในกระบวนการผลิตใบโอติเซล สุรศักดิ์ ฟองหิรัญศิริ ธัชพล จุ่งเจริญ อรสา ชูละเอียด และ วารุณี ลิ้มมัน	
10.30 – 10.45	OE-49	ผลกระทบของการปะทะของไหลต่อการถ่ายเทความร้อนเดือนบนแผ่นเหล็กกริดร้อน วิสิทธิ์ เอกวานิช ศักรินทร์ ชินกุลพิทักษ์ กัณตภณ สารทวย และ ปัญญา แดงวิไลลักษณ์	
10.45 – 11.00	OE-54	ระบบการแจ้งเตือนการใช้งานและทำนายรายจ่ายสำหรับค่าน้ำและค่าไฟฟ้าในหนึ่งครอบครัว ธีรพัทธ์ กุลนันท์กาญจนา ธนวิทย์ อนุวงศ์พินิจ และ บุญยชนะ ภูระหงษ์	
11.00 – 11.15	OE-55	สถานะที่เหมาะสมในการล้างใบโอติเซลโดยเครื่องล้างใบโอติเซลด้วยถ่านใบโอชาร์ อัมรินทร์ กลิ่นหอม ธัชพล จุ่งเจริญ อรสา ชูละเอียด สิทธิพร ทองภูเบศร์ และ วารุณี ลิ้มมัน	
11.15 – 11.30	OE-63	การผลิตถ่านชีวภาพแม่เหล็กจากขี้เลื่อยไม้ยางพาราสำหรับการกำจัดตะกั่ว ชาวิน พินทอง ธัชพล จุ่งเจริญ อรสา ชูละเอียด นพดล เกตุพิมล และ วารุณี ลิ้มมัน	
11.30 – 11.45	OE-71	การศึกษาการฟื้นฟูถ่านชีวภาพจากเปลือกสละที่ผ่านการดูดซับเมทิลีนบลู อัฐิ แจ่มกมล ธัชพล จุ่งเจริญ อรสา ชูละเอียด และ วารุณี ลิ้มมัน	
11.45 – 12.00	OE-78	อิทธิพลของความเค้นแรงดึงที่ส่งผลต่อความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อน อุดมศักดิ์ สว่างวงศ์ และ ณัฐนันท์ มูลสระคู	
พักรับประทานอาหารกลางวัน			

กลุ่ม 3: ด้านวิศวกรรมศาสตร์

Hornbill Ballroom 1

Chairperson	รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริโรตม์ เกตุแก้ว		มหาวิทยาลัยรามคำแหง
	รองศาสตราจารย์ ดร.ปณยวีร์ จามจรีกุลกาญจน์		สจล.วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรัญ ดวงสุวรรณ		สจล.วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
เวลานำเสนอ	รหัส	เรื่อง	
13.30 – 13.45	OE-19	การอบแห้งจิ้งหรีดด้วยเครื่องสเปาท์ฟลูอิดเบดร่วมกับไมโครเวฟ กิตติ สถาพรประสารณ์ และ ฤชณ อภิญาวิศิษฐ์	
13.45 – 14.00	OE-06	การสอบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตของเมล็ดถั่วแดงหลวงด้วยแบบจำลองดีอีเอ็ม ปรีดา ปรากฏมาก	
14.00 – 14.15	OE-46	การทำนายค่าความชื้นของใบกล้วยไม้สดสกุลหวายพันธุ์ขาวสนานด้วยเทคนิคภาพไฮเปอร์ สเปกตรัลอินฟราเรดย่านใกล้ พชรพร เชียงเงิน พชร สืบทรง ชุตินา กาบแก้ว และ สิรินาถ น้อยพิทักษ์	
14.15 – 14.30	OE-61	การประเมินโมเดลการเรียนรู้เชิงลึกสำหรับการตรวจจับและจำแนกความเสียหายของตู้คอนเทนเนอร์ ธีรศักดิ์ อัสสวัสต์ และ รัชนี กุลยานนท์	
14.30 – 14.45	OE-100	การศึกษาสมบัติของฟิล์มเทอร์โมพลาสติกจากสตาร์ชข้าวสังข์หยด เพชรลดา จิระวรรณ กรกนก อุบลชลเขต และ เสาวณีย์ สิงห์สโรทัย	
พักรับประทานอาหารว่างและเครื่องดื่ม			

กลุ่ม 4: ด้านวิทยาศาสตร์

Broadbill Meeting Room

Chairperson	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริฉัตรณัฏฐ์ ภักดีพรหมมา		สจล.วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนัดดา ภาวโหลทร		สจล.วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
	ดร.กมลวรรณ ชูชีพ		สจล.วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
เวลานำเสนอ	รหัส	เรื่อง	
13.00 – 13.15	OS-10	การสังเคราะห์ฮอร์โมนกลูตาไมนด้วยกระบวนการชีวสังเคราะห์โดยใช้สารสกัดจากใบชะมวง และฤทธิ์ต้านเชื้อรา <i>Phytophthora palmivora</i> อรสา ชูละเอียด พรประพา คงตระกูล และ อุษา สุขชา	
13.15 – 13.30	OS-21	การเปรียบเทียบวิธีการใส่ค่าสูญหาย ในการวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติก เมื่อตัวแปรตามมีการสูญหายแบบนอนอินฟอร์เมด อภิชาติ ฉัตรเรืองเลิศ และ อนุภาพ สมบูรณ์สวัสดิ์	
13.30 – 13.45	OS-51	แบบจำลองเกสซ์จอนศาสตร์เชิงสรีรวิทยาในการคาดการณ์เกสซ์จอนศาสตร์บริเวณอวัยวะเป้าหมายของสารเจนิสทินและเมแทบอลิไตในหนู อาชัยวิษฐ์ ศุภมิตรภุชญา ธิติอนันต์ กุลศิริรัตน์ ตูลยา ไพธารส นวพร อาดำ อาณัฐชัย ม้ายอุเทศ น้ำฝน อัครกิจกุลโรจน์ และ ภัทรวิทย์ รักษาทอง	
13.45 – 14.00	OS-56	ผลของอัตราส่วนคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและแคลเซียมคลอไรด์ต่อสมบัติของไฮโดรเจลสำหรับการสังเคราะห์วัสดุเชิงประกอบไฮโดรเจลผสมถ่านชีวภาพ เนติศดา คำเขียว มุจลินทร์ ผลจันทร์ สุรศักดิ์ กุยมาลี ธวัชณ์ สร้อยทอง และ เนตราพร ดังสง	
14.00 – 14.15	OS-66	ผลของ Citral ต่อการเจริญและการก่อตัวของไบโอฟิล์มของเชื้อกลุ่ม Oral Streptococci เกษมชาติ พรหมสอน พิมพิทา กาญจนคำแข็ง และ กานต์ วงศาริยะ	
14.15 – 14.30	OS-79	การวิเคราะห์คุณภาพและการประเมินการยอมรับทางประสาทสัมผัสของตัวอย่างไวน์ลำไยที่มีกรรมวิธีการผลิตแตกต่างกัน ธนารักษ์ ม่อมละมุล ธมลวรรณ วาเหลา ภัททิรา พงษ์นาคินทร์ และ วันวิสาข์ ทวีชื่นสกุล	
พักรับประทานอาหารว่างและเครื่องดื่ม			

กลุ่ม 6: ด้านเทคโนโลยี ด้านสารสนเทศ และด้านวิศวกรรมศาสตร์ Hornbill Ballroom

Chairperson	รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยวัฒน์ รัตนมีชัยสกุล สจล.วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ รองศาสตราจารย์ ดร.สิรินาฏ น้อยพิทักษ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ กุศล สจล.วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์	
เวลานำเสนอ	รหัส	เรื่อง
15.00 – 15.15	OT-45	การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของดินถล่มโดยใช้การเรียนรู้ของเครื่องในจังหวัดภูเก็ต พันแสง พงษ์วังทอง และ พัทธน์ เรืองแสง
15.15 – 15.30	OT-64	การออกแบบและพัฒนาโดรนเกษตรสำหรับการปลูกป่า ศธา วาทกิจ ภาวทร อุตพันธ์ วารุณี พลจันทร์ ศศิวิมล ดาวไธสง และ ชลธร โพธิ์แก้ว
15.30 – 15.45	OE-28	พฤติกรรมการเสียรูปและการทำนายความเค้นไหลของอะลูมิเนียมผสม AA6110 ที่บ่มแข็ง ต่างกันโดยใช้ระบบเครือข่ายประสาท ปฎิภาณ จัยเจิม
15.45 – 16.00	OE-31	เครื่องประจุแบตเตอรี่ด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ พีรวิทย์ แก้วรักษ์ และ ปุณย์ภัทร ภูมิภาค
16.00 – 16.15	OE-32	วิธีการใหม่สำหรับประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส พีรวิทย์ แก้วรักษ์ และ ปุณย์ภัทร ภูมิภาค
16.15 – 16.30	OI-94	การพัฒนาระบบทดสอบอีเมลฟิชชิง สุภาชา อยู่ชมบุญ สมศักดิ์ วลัยรัชต์ และ รัตติกร สมบัติแก้ว
16.30 – 16.45	OI-97	เว็บแอปพลิเคชันพัฒนาทักษะภาษาอังกฤษ นภัสรพี สิทธิวัฒน์ ณิชกานต์ กายฤทธิ์ มนัสวี ปรีตตะพงคาชัย สักกะพันธ์ คล้ายดอกจันทร์ เย็นยิ่ง จงจิตต์ นารารอ สว่างวงศ์ และ กาญจนา ม่วงทองคำ

กลุ่ม 7 : ด้านเกษตรศาสตร์

Deevana Krabi Meeting room

Chairperson	รองศาสตราจารย์ ดร.นิตยา จันกา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กนกพร บุญญะอดิชาติ นารี พันธุ์จันทารวรรณ	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม สจล.วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ สจล.วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
เวลา	าเสนอ	รหัส เรื่อง
14.45 – 15.00		OA-44
ประสิทธิภาพการดึงดูดของน้ำมันหอมระเหยจากชะพลูช้างต่อแมลงวันผลไม้ (เพศผู้) ชนิด <i>Bactrocera dorsalis</i> สุภาจี้ วุฒิกุลประพันธ์ และ คำรณวิทย์ ทิพย์มณี		
15.00 – 15.15		OA-53
การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอาร์เอ็นเออินเตอร์เฟอเรนซ์เพื่อควบคุมเชื้อไวรัสสาเหตุโรคใบด่าง มันสำปะหลัง วรารัตน์ ศรีประพัฒน์ บุญเรือนรัตน์ เรืองวิเศษ ภรณ์ สว่างศรี ปิยนุช ศรชัย และ จิราภรณ์ จิระคกุล		
15.15 – 15.30		OA-69
ผลของอุณหภูมิน้ำทะเลที่ต่างกันต่อ อัตรารอด อัตราการลงเกาะ อัตราการเปลี่ยนระยะ พฤติกรรมลงเกาะ และพฤติกรรมกินอาหารของเพรียงหิน (<i>Amphibalanus amphitrite</i>) มัทศุเทศก์ หมวดทองอ่อน และ มณฑล แก่นมณี		
15.30 – 15.45		OA-73
ผลของสาร azoxystrobin ร่วมกับ salicylhydroxamic acid ต่อเชื้อรา <i>Fusarium</i> spp. สาเหตุโรคกิ่งแห้งบนต้นกล้วยเรียน ธนพร ทองเทพ พรรณิภา ย้วยล สรัญญา วัลยะเสวี และ พรประพา คงตระกูล		
15.45 – 16.00		OA-74
ผลของสาร fluazinam ต่อเชื้อรา <i>Colletotrichum</i> spp. สาเหตุโรคแอนแทรคโนสของ ต้นกล้วยเรียนในห้องปฏิบัติการ ณัฐพร ถิ่นวงศ์ยอด พรรณิภา ย้วยล สรัญญา วัลยะเสวี และ พรประพา คงตระกูล		
16.00 – 16.15		OA-76
ชนิดและร้อยละการปกคลุมของสัตว์ทะเลหน้าดินเกาะติดบริเวณแนวปะการังเทียม เกาะจรเข้มะ จังหวัดชุมพร นฤดล อินทรโยธา และ มณฑล แก่นมณี		
16.15 – 16.30		OA-80
การคัดเลือกสายพันธุ์ถั่วฝักยาวโดยการวิเคราะห์แบบหลายลักษณะ ปราโมทย์ พรสุริยา อภิสิทธิ์ ชิตวณิช วชิราภรณ์ เรือนแป้น และ ณัฏฐยา เรือนแป้น		
16.30 – 16.45		OA-83
ความเข้มข้นของการให้ไซเตียมซีลีเนตฉีดพ่นทางใบต่อผลผลิต สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและ การสะสมซีลีเนียมในผักปลังขาว BA019 ที่ปลูกในชุดดินกำแพงแสน ณัฏฐพร วันสา พรไพรินทร์ รุ่งเจริญทอง หทัยรัตน์ โชคทวีพาศิษฐ์ ยาวรัตน์ ศรีสกุลแก้ว สุรพงษ์ ดำรงกิตติกุล อัศวชัย โสมกุล วิทยา เศรษฐวิทยา และ ศุภชัย อำคา		

ภาคโปสเตอร์

Committee		รองศาสตราจารย์ ดร.พรณิภา ยั่วยล	สจล.วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
		รองศาสตราจารย์ ดร.ปณยวีร์ จามจุรีกุลกาญจน์	สจล.วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
		ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนิดดา ภาวโลทร	สจล.วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
เวลานำเสนอ	รหัส	เรื่อง	
10.30 – 10.40	PB-86	ปัจจัยที่มีผลต่อการตั้งใจมาท่องเที่ยวของนักท่องเที่ยวในจังหวัดชุมพร ธนพัฒน์ ไชยสังข์ และ เพ็ชรภรณ์ ชัชวาลชาญชนกิจ	
10.40 – 10.50	PA-11	ผลการใช้สารจิบเบอเรลลินต่อการเก็บเกี่ยวด้วยเครื่องเกี่ยวนาเพื่อผลิตเมล็ดพันธุ์ข้าวเหลือง หลังนาจังหวัดน่าน กัณทิมา ทองศรี ภักดิ์สร วัฒนกุลภาคิน ศุภลักษณ์ สัตยสมิทธิสถิต ธนชาติ ทรัพย์จี และ นิภาภรณ์ พรณรธา	
10.50 – 11.00	PT-29	โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่หลากหลายเพื่อทำนายการสักระยะการประกอบพืชนอกฤดูทั้งหมดของ กะหล่ำปลีแดง ด้วยเอทานอล นิตยา จันกา และ ชัยวัฒน์ รัตนมีชัยสกุล	
11.00 – 11.10	PE-70	การศึกษาเชิงเปรียบเทียบรูปแบบการวัดสเปกตรัมเนียร์อินฟราเรดที่มีต่อสมรรถนะของ แบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องสำหรับการประเมินความเสถียรเชิงกลในน้ำยางขึ้น ฟิลิฏฐ์ สุทธิโส กิตติศักดิ์ เพ็ชรพันธ์ และ ชิน ฮอค ลัม	
11.10 – 11.20	PS-05	การคัดแยกกราเอนโดไฟท์จากพืชกระท่อม (<i>Mitragyna speciosa</i>) ในเขตจังหวัดฉะเชิงเทรา กฤษณะ บุญมี เกวลิน ปูเงิน และ ณัฐวุฒิ รุ่งจินดามัย	
11.20 – 11.30	PS-68	การเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟเพื่อใช้ในการดูดซับเฟอร์รัสไอออน (Fe ²⁺) อรสา ชูละเอียด กัญญ์ชลา กิรติรวี และ พรประพา คงตระกูล	
11.30 – 11.40	PS-91	การประยุกต์ใช้เครื่องหมายโมเลกุล EST-SSRs สำหรับการทำให้โปรไฟล์พันธุกรรมในบางจีโนไทป์ ของสตรอเบอร์รี่ ปรียา พวงสำลี หวังสมนึก อาภาพร ไชยสัตย์ และ พงศ์ปณต หวังสมนึก	
11.40 – 11.50	PSS-93	ปัจจัยที่มีผลต่อความต้องการศึกษาต่อในระดับบัณฑิตศึกษาศาสนาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร พิชชา บัวครั้น	
พักรับประทานอาหารกลางวัน			

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิ ของระดับชาติ

รศ.ดร.มนต์สรวง ยางทอง	นักวิชาการอิสระ
ดร.ปาน กิมปี	นักวิชาการอิสระ
ดร.พรรณรัตน์ อาภรณ์พิศาล	นักวิชาการอิสระ
ดร.สราวุธ แซ่ตั้ง	นักวิชาการอิสระ
อ.ฮัดสัน สิริสุพวงศ์	นักวิชาการอิสระ
รศ.ดร.สรพงศ์ เบญจศรี	มหาวิทยาลัยทักษิณ
รศ.ดร.เพ็ญญารัตน์ สายศิริรัตน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.นพพร บัวอินทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตระยอง
ดร.ธิตี ทองคำงาม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
ผศ.ดร.นรเศรษฐ์ วิชัยพานิชย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.ลินิทร่า สุขสวัสดิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.พุทธิพงศ์ เลขาชัยวรกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
รศ.ดร.เพ็ญศรี นิรินัง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผศ.ดร.กระวี ตรีอานรรค	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ผศ.ดร.พรชัย ทาระโคตร	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
ดร.พิพัฒน์ จันทร์ประดิษฐ์	มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์
ผศ.ชาญณวุฒ ไชยรักษา	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ดร.ชานน ชลวัฒน์นะ	มหาวิทยาลัยบูรพา
ดร.ชรินทร์ ศรีวิฑูรย์	มหาวิทยาลัยแม่โจ้-ชุมพร
รศ.ดร.นิตยา จันทา	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
ผศ.ดร.พงษ์สันต์ ต้นหยง	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
ดร.ชนพงษ์ อาภาณพิศาล	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
ผศ.ดร.นภัสร นิยะวานนท์	มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา
ผศ.ดร.กฤษณ์พนธ์ พรรณรัตน์ชัย	มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์
ผศ.ดร.จาดรนต์ ทิพย์วงศ์	มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี
ผศ.ดร.ธันว์ สุวรรณเดชา	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
รศ.ดร.ภาคภูมิ ศรีมรินทร์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผศ.ดร.สมมาส แก้วล้วน	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผศ.ดร.สรารัตน์ มนต์ขลัง	มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตสารสนเทศเพชรบุรี
รศ.ดร.จุฑารัตน์ เอื้อยกุลดวยการ	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผศ.ดร.สุธิตา ชูสว่าง	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผศ.ดร.อลิษา ทนิกแก้ว	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ดร.ประชา คำภักดี	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
นพ.วิชญ์ อนิลบล	โรงพยาบาลละแม
ผศ.ดร.สายพิน ปันทอง	สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์
รศ.ดร.สุริยันธ์ สุภาพวานิช	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.จิตราภรณ์ วงศางาม	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.พจนา สีขาว	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ดร.จรงค์ศักดิ์ พุ่มนวน	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ดร.จิราพร อ่อนมันคง	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.ชัยวัฒน์ รัตน์มีชัยสกุล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
รศ.ดร.อัชพล จุ่งเจริญ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
รศ.ดร.ปัญญา แดงวิไลลักษณ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
รศ.ดร.พรประพา คงตระกูล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
รศ.ดร.พรณิภา ยั่วล	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
รศ.ดร.เพชรภรณ์ ชัชวาลชาญชนิก	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
รศ.ดร.ร่วมจิตร์ นกเขา	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
รศ.ดร.ศิระ สายศร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
รศ.ดร.ศิริวรรณ ศรีสังข์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
รศ.วชร กาลาสี	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
ผศ. ว่าที่ร้อยตรี ดร.กิตติศักดิ์ เพ็ชรพันธ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์

The 9th National Conference on Informatics, Agriculture, Management,
Business Administration, Engineering, Science and Technology



ภาคบรรยาย

การพัฒนาระบบทดสอบอีเมลฟิชชิง

Development of a Phishing Email Testing System

สุภา อยู่มบุญ¹ สมศักดิ์ วลัยรัชต์¹ และ รัตติกร สมบัติแก้ว^{1*}

Supacha Youchboon¹, Somsak Walairacht¹ and Rattikorn Sombutkaew¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

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

*Corresponding author: Rattikorn Sombutkaew, e-mail address: rattikorn.so@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้นำเสนอเกี่ยวกับการพัฒนาระบบทดสอบอีเมลฟิชชิงเพื่อทดสอบความเสี่ยงขององค์กรต่อภัยคุกคามประเภทฟิชชิง โดยการจำลองอีเมลฟิชชิงส่งให้กลุ่มผู้ใช้งานภายในองค์กรด้วยรูปแบบเหตุการณ์เสมือนจริงเพื่อสร้างประสบการณ์และความคุ้นเคยต่อรูปแบบของอีเมลฟิชชิง โดยเพิ่มฟังก์ชันการใช้งานในโอเพนซอร์ส Gophish ให้มีประสิทธิภาพอย่างเต็มที่ ได้แก่ การตั้งค่าการบันทึก การตั้งค่าเมลเชิร์ฟเวอร์ การตั้งค่า Namecheap การตั้งค่าเซิร์ฟเวอร์ให้รันตลอดเวลา การสร้างใบรับรอง SSL/TLS หรือ Certificate การตั้งค่าการรายงานทางอีเมล (Email Reporting) การตั้งค่าเว็บฮุก (Webhooks Settings) การตั้งค่าการแจ้งเตือนไปยัง Line notify การตั้งค่าการรวบรวมเป้าหมายฟิชชิง (Lure) การตั้งค่าการสร้างรายงาน Gophish และการออกแบบอีเมลฟิชชิงสำหรับใช้ในการทดสอบ จากการพัฒนาระบบด้วยโอเพนซอร์สทำให้ทราบถึงขั้นตอนและกระบวนการในการพัฒนาระบบ รวมถึงสามารถจัดทำรายงานในการทดสอบอีเมลฟิชชิงเพื่อนำข้อมูลมาใช้ในการพัฒนารูปแบบการจัดการความเสี่ยงขององค์กรต่อภัยคุกคามทางไซเบอร์ได้

คำสำคัญ: ภัยคุกคามทางไซเบอร์, ฟิชชิง, การจำลองอีเมลฟิชชิง, โอเพนซอร์ส Gophish

Abstract

The creation of an email phishing test system to assess an organization's susceptibility to phishing attacks is presented in this paper. To gain experience and familiarity with the format of phishing emails, a virtual event format is used to simulate a phishing email sent to a group of users within the organization. Gophish has become fully powerful by incorporating open-source functionality, including recording settings. Mail server configurations Namecheap settings Setting the Service to Run. Always create an SSL/TLS certificate or Certificate Settings for email reporting (Email reporting) Webhook settings Line notification settings Settings for collecting phishing targets (lure). Setting up Gophish report generation and creating phishing emails for testing purposes. The procedures and methods for creating the system were understood following the system's open-source testing. among other things, having the ability to generate reports on phishing email tests and use the data to build a risk management strategy for an organization against online dangers.

Keywords: Cyber Attack, Phishing, Phishing simulator, Open Source Gophish

1. บทนำ

ภัยคุกคามไซเบอร์ที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาปี ค.ศ. 2021 และ 2022 จากการวิเคราะห์ที่นำเสนอในรายงาน ENISA Threat Landscape 2022 [1] ได้ระบุและมุ่งเน้นไปที่กลุ่มภัยคุกคามหลักคือ Ransomware, Malware, Social Engineering, Threats against data, Threats against availability: Denial of Service, Threats against availability: Internet threats, Disinformation – misinformation และ Supply Chain Attacks โดยกลุ่มอันตรายเหล่านี้ถูกเน้นเนื่องจากความสำคัญซึ่งการโจมตีฟิชชิ่งเป็นภัยคุกคามไซเบอร์อย่างหนึ่ง [2] ที่ทำให้ข้อมูลระบบที่สำคัญในองค์กรถูกเปิดเผยหรือนำไปใช้ในวัตถุประสงค์ที่ไม่พึงประสงค์และอาจส่งผลกระทบร้ายแรงต่อองค์กร ดังนั้นการพัฒนาระบบทดสอบอีเมลฟิชชิ่งจึงเป็นเรื่องสำคัญต่อความน่าเชื่อถือและมีผลต่อมาตรฐานด้านไอทีขององค์กรเป็นอย่างยิ่ง ในแต่ละองค์กรจึงจำเป็นต้องจัดการเรื่องความเสี่ยงของข้อมูลให้ผ่านมาตรฐานทางด้านไอทีเพื่อประสิทธิภาพขององค์กร การจำลองอีเมลฟิชชิ่งเป็นการส่งอีเมลให้กับกลุ่มผู้ใช้งานภายในองค์กรเพื่อวัดระดับความเสี่ยงขององค์กรต่อภัยคุกคามประเภทฟิชชิ่ง มีลักษณะเป็นการจำลองรูปแบบเหตุการณ์เสมือนจริงเพื่อสร้างประสบการณ์และความคุ้นเคยต่อรูปแบบของอีเมลฟิชชิ่ง รวมถึงฝึกฝนเทคนิควิธีในการสังเกตและแยกแยะอีเมลฟิชชิ่งให้กับบุคลากรในองค์กร

ในการพัฒนาระบบทดสอบอีเมลฟิชชิ่งผู้จัดทำได้ร่วมกับบริษัท เอชอินโฟเทค จำกัด โดยการใช้ซอฟต์แวร์ฟรี Gophish เป็นซอฟต์แวร์ที่ช่วยในการสร้างและจัดการการทดสอบอีเมลฟิชชิ่งได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยการเพิ่มฟังก์ชันการทำงานต่างๆ เข้าไปเพื่อให้ระบบที่ออกแบบตอบสนองความต้องการในการใช้งาน

2. วิธีการศึกษา

การจำลองอีเมลฟิชชิ่งหรือการทดสอบฟิชชิ่ง คือองค์กรส่งอีเมล (Email) หลอกลวงซึ่งคล้ายกับอีเมลที่เป็นอันตรายไปยังเจ้าหน้าที่ของตนเองเพื่อวัดการตอบสนองต่อฟิชชิ่งและการโจมตีทางอีเมลที่คล้ายกัน อีเมลมักเป็นรูปแบบหนึ่งของการฝึกอบรม แต่การทดสอบดังกล่าวมักทำร่วมกับการฝึกอบรมก่อนหน้า และมักจะตามด้วยองค์ประกอบการฝึกอบรมเพิ่มเติม โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีนี้สำหรับผู้ที่ไม่ "ล้มเหลว" ด้วยการเปิดไฟล์แนบในอีเมล คลิกลิงก์เว็บไซต์ที่หลอกลวง หรือป้อนข้อมูลประจำตัว [2]

การจำลองอีเมลฟิชชิ่ง โดยฟิชชิ่งเป็นคำเปรียบเทียบกับภัยคุกคามจาก Fishing ที่แปลว่า การตกปลา ในการตกปลาจะต้องมีเหยื่อล่อมาทำให้ปลาติดเบ็ดซึ่งเป็นการเปรียบเทียบสถานการณ์ โดยการส่งข้อความ อีเมล หรือเว็บไซต์ปลอม เพื่อเป็นเหยื่อล่อให้ผู้ใช้งานเข้ามาติดเบ็ด และหลอกล่อผู้ใช้ให้กรอกข้อมูลส่วนตัวต่าง ๆ หรือส่งโปรแกรมให้ติดตั้งลงในเครื่องคอมพิวเตอร์ตามที่แฮกเกอร์ต้องการ โดย Phishing คือ การหลอกลวง หรือภัยทางอินเทอร์เน็ตชนิดหนึ่งที่เกิดจากการพยายามหลอกลวงผู้ใช้งาน โดยการสร้างอีเมล หรือหน้าเว็บปลอมขึ้นมา เพื่อหวังผลให้ผู้ใช้งานเกิดความสับสน และทำธุรกรรมต่างๆ บนเว็บไซต์ปลอม โดยข้อมูลต่างๆ ที่ผู้ใช้งานกรอกบนหน้าเว็บปลอมเหล่านี้ จะถูกดักข้อมูลและบันทึกไว้เพื่อใช้ในการปลอมแปลง และเข้าถึงข้อมูลของผู้เสียหายโดยที่ไม่ได้รับอนุญาต

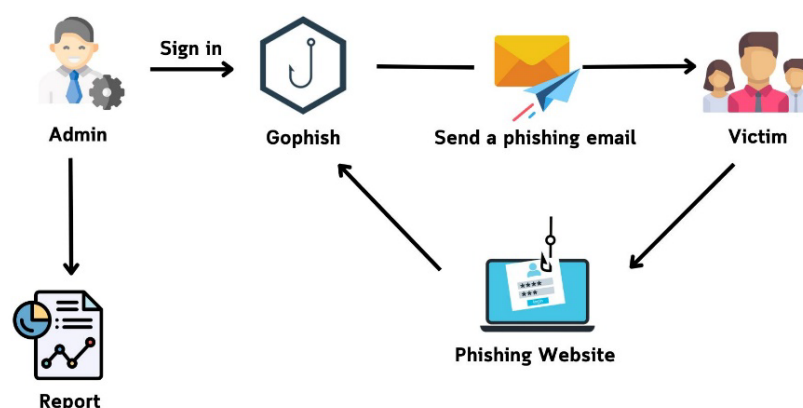


Figure 1 Overview of Phishing Email Testing

การพัฒนาระบบทดสอบอีเมลฟิชชิงแสดงดังรูปที่ 1 เริ่มจากผู้ดูแลระบบ (Admin) ทำการเข้าสู่ระบบ Gophish เพื่อตั้งค่าต่างๆ ในระบบ Gophish สำหรับส่งอีเมลไปยังเหยื่อหรือกลุ่มเป้าหมาย (Victim) ที่ได้กำหนดไว้ เมื่อเหยื่อหรือกลุ่มเป้าหมายได้รับอีเมลและทำการคลิกลิงก์ในหน้าอีเมลจะนำไปสู่หน้าเว็บไซต์ฟิชชิง (Phishing Website) ที่ได้ออกแบบไว้ให้เหยื่อหรือกลุ่มเป้าหมายกรอกข้อมูลของตนเองลงไป จากนั้นผู้ดูแลระบบรวบรวมข้อมูลของเหยื่อไปทำรายงาน (Report) สรุปผลการทดสอบฟิชชิง ในการพัฒนาระบบใช้เครื่องมือต่างๆ คือ โอเพนซอร์ส Gophish [3] เซอร์วิส AWS (Amazon Web Services) [4] โปรแกรม PuTTYgen [5] โปรแกรม WinSCP [6] MailGun [7] Namecheap [8] แพลตฟอร์ม Make (formerly Integromat) [9] ภาษา Golang [10] เอชทีเอ็มแอล (HTML) [11] ซีเอสเอส [12] และรีจาวาสคริปต์ [13] เพื่อเพิ่มฟังก์ชันการใช้งานต่างๆ

จากการใช้งานเบื้องต้นของโอเพนซอร์ส Gophish พบว่าในบางฟังก์ชันเบื้องต้นจำเป็นต้องมีการตั้งค่าและติดตั้งเพิ่มเติมจึงจะสามารถใช้งานได้ ผู้จัดทำจึงได้เพิ่มประสิทธิภาพของการทำงานของระบบ Gophish ด้วยฟังก์ชันต่างๆ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. การเพิ่มโดเมนและความปลอดภัย การเข้าสู่ระบบ Gophish เบื้องต้นพบว่าการเข้าสู่ระบบต้องเข้าผ่าน IP หรือ Public IP ผู้จัดทำจึงได้พัฒนาระบบ Gophish โดยการเพิ่มโดเมนและทำการเพิ่มใบรับรองหรือ certified ให้กับโดเมนเพื่อเพิ่มความปลอดภัยให้กับระบบ Gophish
2. ฟังก์ชัน Logging หรือการเก็บบันทึกข้อมูลการทำงานของ Gophish เนื่องจากการใช้งานเบื้องต้นไม่มีการเก็บข้อมูลการใช้งานระบบ Gophish ผู้จัดทำจึงเพิ่มฟังก์ชัน Logging เข้าไป
3. การเพิ่ม Mail Gateway เป็นตัวกลางในการส่งอีเมลไปยังกลุ่มเป้าหมาย จากฟังก์ชัน Sending Profiles เบื้องต้นของระบบ Gophish พบว่าไม่สามารถใช้งานในการส่งอีเมลไปยังเหยื่อหรือกลุ่มเป้าหมายได้ ผู้จัดทำจึงเลือกใช้ MailGun เป็น Mail Gateway เพื่อเป็นตัวกลางในการส่งอีเมลไปยังเหยื่อหรือกลุ่มเป้าหมายที่กำหนด
4. ฟังก์ชัน Service Settings จากการใช้งาน Gophish เบื้องต้นพบว่าหากผู้ใช้ปิดหน้าต่างของ AWS จะไม่สามารถเข้าใช้งาน Gophish ได้ ถ้าหากต้องการใช้งานระบบ Gophish อีกครั้งผู้ใช้งานต้องทำการเชื่อมต่อใหม่ ผู้จัดทำจึงได้พัฒนาระบบ Gophish โดยการตั้งค่าให้เปิดเซอร์วิสให้ทำงานตลอดเวลา
5. ฟังก์ชัน Email Report เป็นการตั้งค่าการรายงานหรือ Report อีเมลจากเหยื่อหรือกลุ่มเป้าหมายให้สามารถใช้งานได้ เนื่องจากฟังก์ชัน Email Report เบื้องต้นจะพบว่าไม่สามารถใช้งานได้จริง
6. ฟังก์ชันเว็บฮุก (Webhooks) จากฟังก์ชัน User & Group ของระบบ Gophish ผู้จัดทำได้ทำการเพิ่มฟังก์ชัน LURE หรือการรวบรวมกลุ่มเป้าหมาย และกำหนดการตั้งค่าการแจ้งเตือนข้อมูลหรือเหตุการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นส่งอีเมลไปยังอีเมลและแจ้งเตือนข้อความไปยัง Line Notify ของผู้ดูแลระบบ
7. ฟังก์ชัน Goreport เป็นการสร้างรายงานและรวบรวมข้อมูลจากการทดสอบฟิชชิงที่เกิดขึ้น

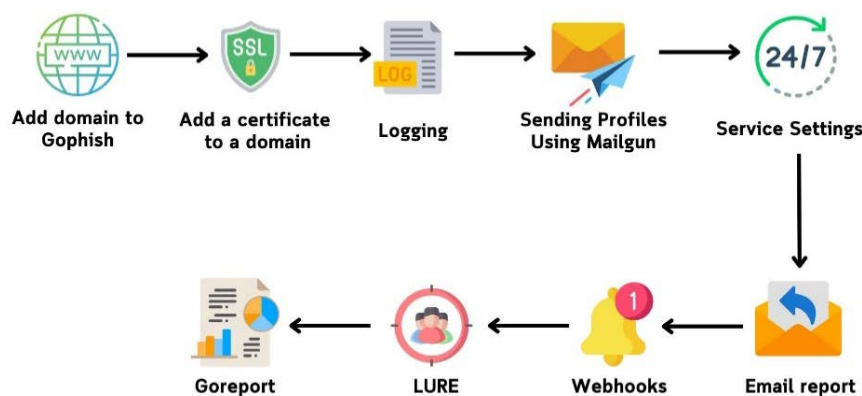


Figure 2 Overview of functions added to the Gophish system

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

ในส่วนนี้เป็นการออกแบบการจำลองอีเมลฟิชซิงเพื่อทำการทดสอบระบบโดยมีการจำลองเหตุการณ์ 2 ครั้งดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.1 การออกแบบการจำลองอีเมลฟิชซิงครั้งที่ 1

ในการทดสอบฟิชซิงครั้งที่ 1 มีจำนวนผู้ทดสอบทั้งหมด 20 คน โดยเริ่มจากการสร้างหน้า Email Template การสร้างหน้า Landing Page การตั้งค่าเมลเซิร์ฟเวอร์ การตั้งค่ากลุ่มเป้าหมาย การตั้งค่าโดเมนในการทดสอบฟิชซิง การตั้งค่า Webhooks การตั้งค่าการแจ้งเตือนไปยัง Line notify และการตั้งค่าการสร้างแคมเปญของ Gophish จากรูปที่ 3 ผู้จัดทำได้ออกแบบสถานการณ์ (Scenario) เป็นการแจ้งเตือนอีเมลของผู้ที่ทดสอบถูกเพิ่มไปในรายการผู้ติดต่อของอีเมลบุคคลอื่น

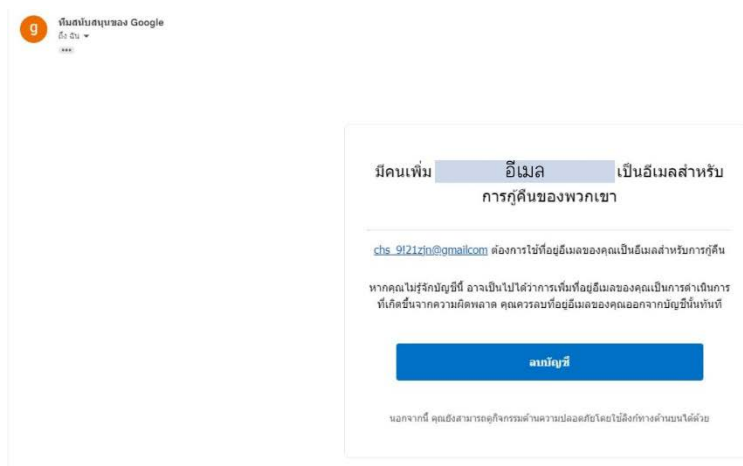


Figure 3 First phishing Email Simulation

3.2 การออกแบบการจำลองอีเมลฟิชซิงครั้งที่ 2

ในการทดสอบฟิชซิงครั้งที่ 2 มีจำนวนผู้ทดสอบทั้งหมด 20 คน โดยเริ่มจากการสร้างหน้า Email Template การสร้างหน้า Landing Page การตั้งค่าเมลเซิร์ฟเวอร์ การตั้งค่ากลุ่มเป้าหมาย การตั้งค่าโดเมนในการทดสอบฟิชซิง การตั้งค่า Webhooks การตั้งค่าการแจ้งเตือนไปยัง Line notify และการตั้งค่าการสร้างแคมเปญของ Gophish จากรูปที่ 4 ผู้จัดทำได้ออกแบบสถานการณ์ (Scenario) เป็นการอัปเดตข้อมูลการติดต่อของพนักงาน

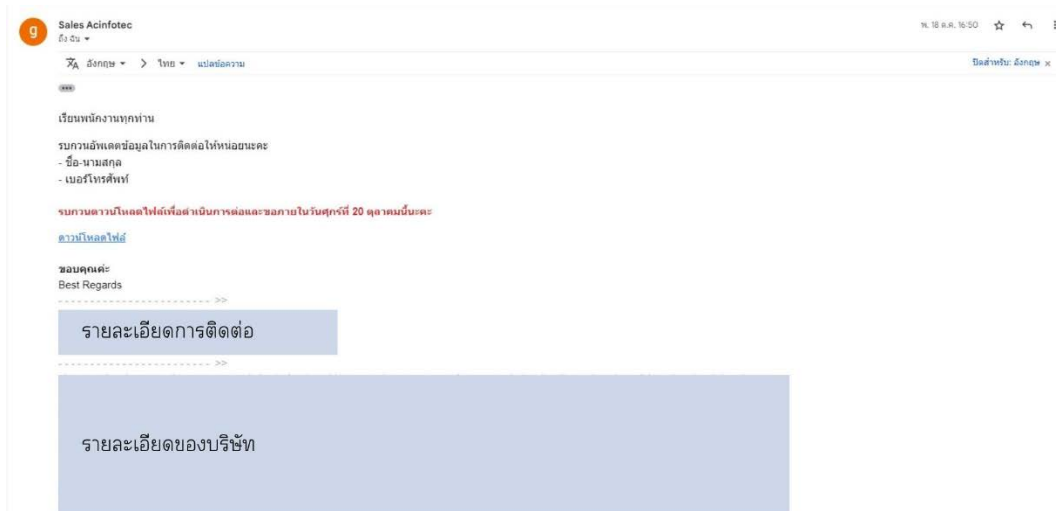


Figure 4 Second phishing email simulation

3.3 ผลลัพธ์สำหรับการทดสอบฟิชชิงครั้งที่ 1

จากผลลัพธ์การทดสอบฟิชชิงครั้งที่ 1 อีเมลที่ถูกส่งมีทั้งหมด 20 อีเมล อีเมลที่ถูกเปิดมีทั้งหมด 20 อีเมล มีการคลิกลิงก์จากอีเมลทั้งหมด 5 อีเมล และมีการกรอกข้อมูลทั้งหมด 1 คน การกรอกข้อมูลนี้มาจากผู้ที่ถูกทดสอบทำการรายงานอีเมลเนื่องจากพบว่าเป็นอีเมลฟิชชิง โดยอีเมลดังกล่าวถูกรายงานไปยังผู้ดูแลระบบของบริษัท หลังจากนั้นผู้ดูแลระบบได้ทำการทดสอบอีเมลที่ถูกรายงานจึงทำให้ค่าพารามิเตอร์ของอีเมลนั้นถูกรายงานกลับมายังระบบ Gophish ผลลัพธ์จากการทดสอบฟิชชิงครั้งที่ 1 แสดงในรูปที่ 5 ซึ่งกรอบหมายเลข 1 แสดงชื่อ-นามสกุล (First Name and Last Name) อีเมล (Email) ตำแหน่ง (Position) สถานะ (Status) ของผู้ถูกทดสอบมีสถานะการเปิดอีเมล (Email Opened) และกรอบหมายเลข 2 แสดงข้อมูลว่าผู้ถูกทดสอบมีสถานะการกรอกข้อมูล (Submitted Data) ในรูปที่ 6 แสดงตัวอย่างข้อมูลของเหยื่อแต่ละราย รูปที่ 7 แสดงรายงานที่ได้สรุปจากการทดสอบ และรูปที่ 8 แสดงการแจ้งเตือนเหตุการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากการทดสอบฟิชชิงครั้งที่ 1 ไปยัง Line notify เพื่อให้ผู้ดูแลระบบทราบถึงเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น

จากการทดสอบอีเมลฟิชชิงครั้งที่ 1 พบว่าองค์กรมีความเสี่ยงเล็กน้อยต่อภัยคุกคามทางไซเบอร์โดยวิธีอีเมลฟิชชิง เป็นผลมาจากรูปแบบของ Scenario เป็นรูปแบบการแจ้งเตือนอีเมลได้ถูกเพิ่มเข้าในรายการกู้คืน ทำให้ผลการทดสอบครั้งนี้สะท้อนให้เห็นว่าพนักงานส่วนใหญ่มีความรู้ความตระหนักเกี่ยวกับอีเมลฟิชชิงเป็นอย่างดี

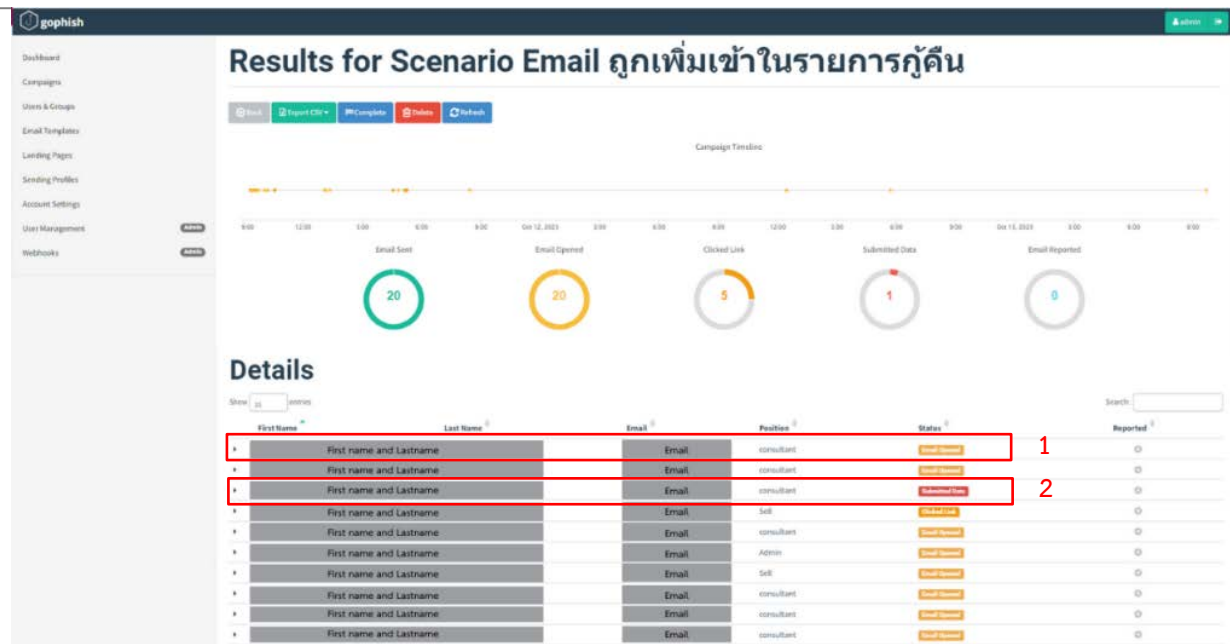


Figure 5 Results for the first phishing test

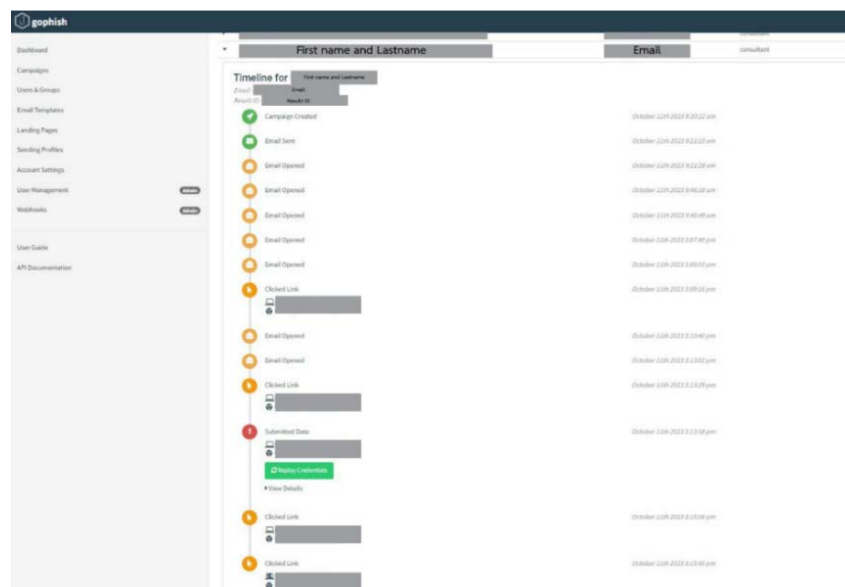


Figure 6 Example of first phishing test

Summary of Events

The following table summarizes who opened and clicked on emails sent in this campaign.

Email Address	Open	Click	Data	Report	OS	Browser
Email Address	✓	✗	✗	✗	N/A	N/A
Email Address	✓	✗	✗	✗	N/A	N/A
Email Address	✓	✓	✓	✗	Windows 10	Chrome 116.0.0
Email Address	✓	✓	✗	✗	Windows 7	Chrome 109.0.0
Email Address	✓	✗	✗	✗	N/A	N/A
Email Address	✓	✗	✗	✗	N/A	N/A
Email Address	✓	✗	✗	✗	N/A	N/A
Email Address	✓	✗	✗	✗	N/A	N/A
Email Address	✓	✗	✗	✗	N/A	N/A
Email Address	✓	✗	✗	✗	N/A	N/A
Email Address	✓	✗	✗	✗	N/A	N/A
Email Address	✓	✗	✗	✗	N/A	N/A
Email Address	✓	✗	✗	✗	N/A	N/A
Email Address	✓	✗	✗	✗	N/A	N/A
Email Address	✓	✗	✗	✗	N/A	N/A
Email Address	✓	✗	✗	✗	N/A	N/A
Email Address	✓	✓	✗	✗	iOS 16.6	Chrome Mobile iOS 117.0.5938
Email Address	✓	✓	✗	✗	Windows 7	Chrome 109.0.0
Email Address	✓	✓	✗	✗	Windows 10	Chrome 116.0.0
Email Address	✓	✗	✗	✗	N/A	N/A
Email Address	✓	✗	✗	✗	N/A	N/A

Figure 7 Report of first phishing test

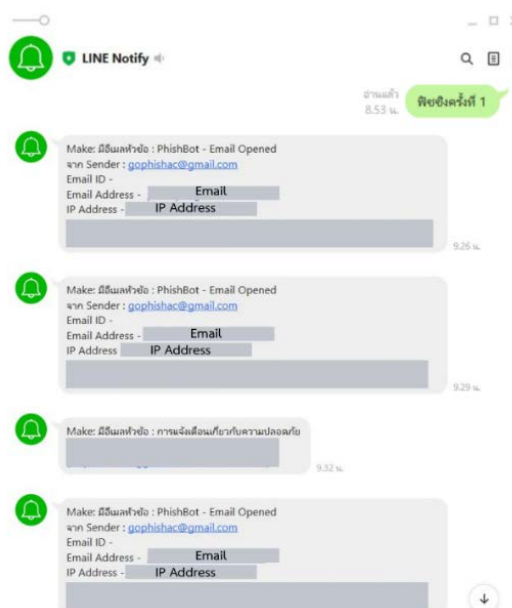


Figure 8 Example of First phishing Test Line Notify

3.4 ผลลัพธ์สำหรับการทดสอบฟิชชิงครั้งที่ 2

ผลลัพธ์การทดสอบฟิชชิงครั้งที่ 2 อีเมลที่ถูกส่งมีทั้งหมด 20 อีเมล อีเมลที่ถูกเปิดมีทั้งหมด 15 อีเมล และมีการคลิกลิงก์จากอีเมลทั้งหมด 1 อีเมล ผลลัพธ์จากการทดสอบรูปที่ 9 ในกรอบหมายเลข 1 เป็นการแสดง ชื่อ-นามสกุล (First Name and Last Name) อีเมล (Email) ตำแหน่ง (Position) สถานะ (Status) ซึ่งผู้ถูกทดสอบมีสถานะการเปิดอีเมล (Email Opened) และในกรอบหมายเลข 2 ผู้ถูกทดสอบมีสถานะอีเมลถูกส่งแล้ว (Email Sent) ส่วนในรูปที่ 10 เป็นตัวอย่างข้อมูลของเหยื่อแต่ละราย และรูปที่ 11 แสดงการแจ้งเตือนเหตุการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากการทดสอบฟิชชิงครั้งที่ 2 ไปยัง Line notify เพื่อให้ผู้ดูแลระบบทราบถึงเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น

จากการทดสอบอีเมลฟิชชิงครั้งที่ 2 พบว่าองค์กรมีความเสี่ยงต่อภัยคุกคามทางไซเบอร์โดยวิธีอีเมลฟิชชิงในรอบที่สอง ลดลง เป็นผลมาจากรูปแบบ Scenario เป็นรูปแบบการอัปเดตข้อมูลการติดต่อภายในองค์กร ซึ่งผลการทดสอบครั้งนี้สะท้อนให้เห็นว่าพนักงานส่วนใหญ่มีความรู้ความตระหนักเกี่ยวกับอีเมลฟิชชิงเป็นอย่างดี แต่ยังคงมีบางส่วนที่ประมาทและมองข้ามจุดสังเกตในเนื้อหาอีเมล

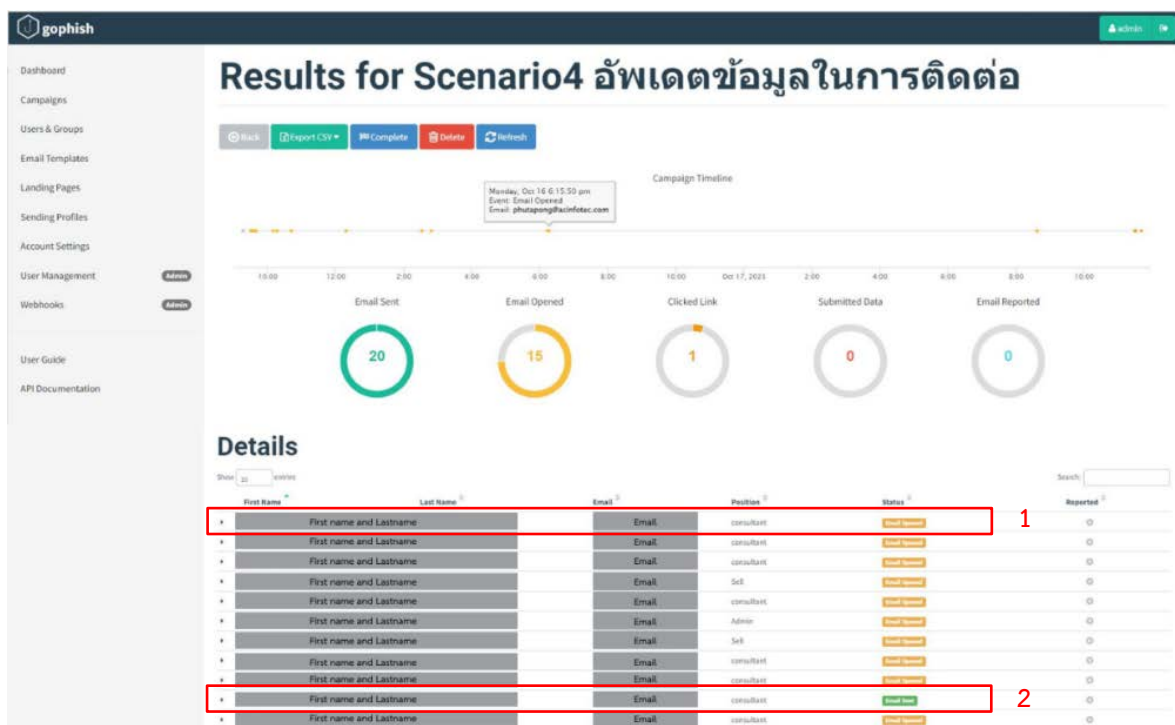


Figure 9 Results for the second phishing test

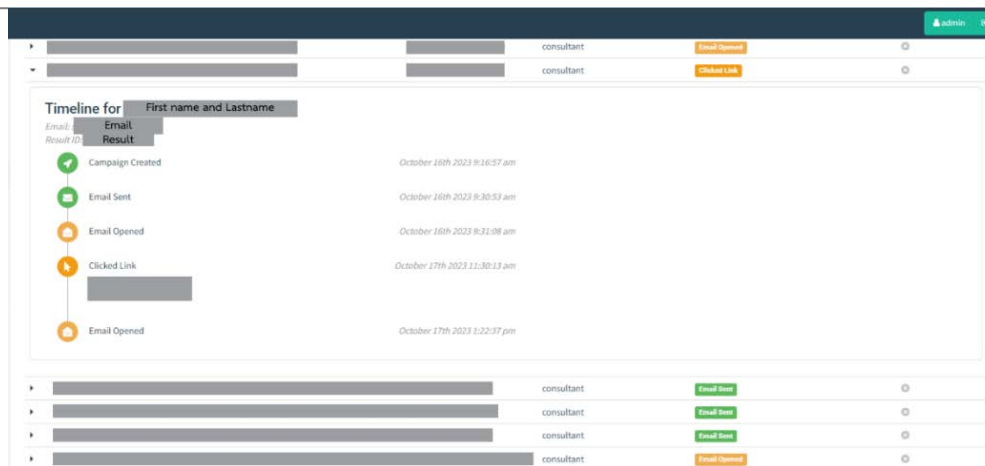


Figure 10 Example of the second phishing test's description

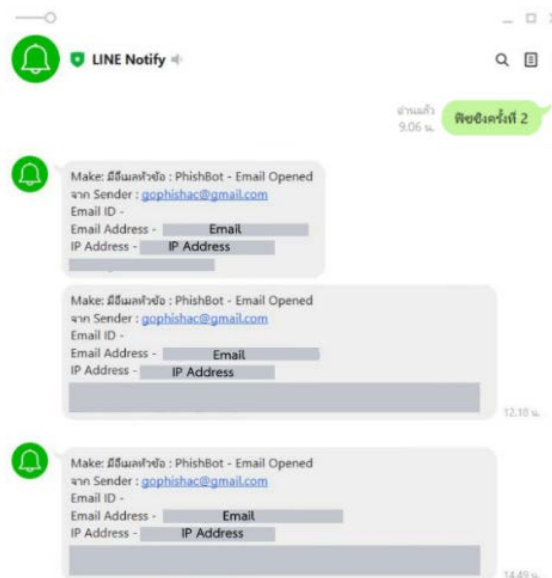


Figure 11 Example of the second phishing test's Line Notify

4. สรุป

จากการพัฒนาระบบทดสอบอีเมลฟิชซิงด้วยการเพิ่มฟังก์ชันการใช้งานต่างๆ เข้าไปในระบบโอเพนซอร์ส Gophish พบว่าระบบการเพิ่มเติมฟังก์ชันการทำงานและการตั้งค่าเพิ่มเติมตามที่ได้ออกแบบไว้ตอบโจทยความต้องการต่อการใช้งานของบริษัทเป็นอย่างมาก จากผลการทดสอบที่ได้ทั้งสองครั้งจะเห็นได้ว่าองค์กรไม่ควรมองข้ามพนักงานกลุ่มที่มีความประมาทรวมถึงควรผลักดันการสื่อสารและให้ข้อมูลเรื่องของภัยคุกคามฟิชซิงที่หลากหลายมากขึ้นภายในองค์กร และควรรักษามาตรการในการให้ความรู้เกี่ยวกับฟิชซิงอีเมลและพิจารณาปรับปรุงเพิ่มเติมเทคนิคใหม่ๆ ในการทดสอบฟิชซิงอย่างสม่ำเสมอ เพื่อให้พนักงานมีความตระหนักถึงรูปแบบภัยคุกคามที่มีในปัจจุบัน นอกจากนั้นควรเพิ่มเรื่องการสื่อสารถึงขั้นตอนและวิธีในการรับมืออีเมลฟิชซิง โดยอาจสื่อสารให้พนักงานเข้าใจขั้นตอนที่พึงปฏิบัติเมื่อตระหนักได้แล้วว่าได้รับอีเมลปลอมและขั้นตอนในการรายงานอีเมลฟิชซิงไปยังกลุ่มบุคคลที่รับผิดชอบ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ บริษัท เอซีอินโฟเทค จำกัด ซึ่งเป็นบริษัทผู้เชี่ยวชาญในการให้คำปรึกษาด้านการปรับปรุงองค์กร การบริหารความเสี่ยงและการปฏิบัติตามข้อกำหนด และโซลูชันที่เกี่ยวข้องกับมาตรฐานทางด้านไอที ที่ได้ให้โอกาสและสถานที่ในการทำโครงการร่วมกับบริษัท รวมทั้งการช่วยเหลือของพนักงานที่ปรึกษาในทุก ๆ ด้านที่มีให้เสมอมา

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] “Simulated phishing” URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Simulated_phishing เข้าถึงครั้งสุดท้ายวันที่ 16 ตุลาคม 2566
- [1] “4 ภัยออนไลน์ที่ธุรกิจต้องเจอยุคดิจิทัล” URL: https://www.etda.or.th/th/ADTE/etda_4cybersecurity.aspx สำนักงานพัฒนาธุรกรรมทางอิเล็กทรอนิกส์ เข้าถึงครั้งสุดท้ายวันที่ 17 เมษายน 2567
- [3] Ifigeneia Lella, Eleni Tsekmezoglou, Rossen Svetozarov Naydenov, Cosmin Ciobanu, Apostolos Malatras, Marianthi Theocharidou – European Union Agency for Cybersecurity, ENISA THREAT LANDSCAPE 2022, Agamemnonos 14 , Chalandri 15231, Attiki, Greece, European Union Agency for Cybersecurity, 2022
- [4] “โกฟิช” URL: <https://www.onworks.net/th/software/app-gophish> เข้าถึงครั้งสุดท้ายวันที่ 4 พฤศจิกายน 2566
- [5] “AWS (Amazon Web Services) คืออะไร” URL: <https://appmaster.io/th/blog/aws-amazon-web-services-khuue-aair> เข้าถึงครั้งสุดท้ายวันที่ 4 ตุลาคม 2566
- [6] “Puttygen aka Putty Key Generator” URL: <https://www.puttygen.com/> เข้าถึงครั้งสุดท้ายวันที่ 18 ตุลาคม 2566
- [7] “WinSCP (วินเอสซีพี) คืออะไร เป็นโปรแกรมสำเร็จรูป FTP Client” URL: <https://www.mindphp.com> เข้าถึงครั้งสุดท้ายวันที่ 10 ตุลาคม 2566
- [8] “ทดสอบ Security Awareness ในองค์กรด้วย Gophish” URL: <https://www.cyfence.com/article/test-enterprise-security-awareness-with-gophish/> เข้าถึงครั้งสุดท้ายวันที่ 17 ตุลาคม 2566
- [9] “Namecheap” URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Namecheap> เข้าถึงครั้งสุดท้ายวันที่ 17 ตุลาคม 2566
- [10] แอ บ บีย แคลร์ เตลา ครูซ “แพลตฟอร์ม Make (formerly Integromat)” URL: <https://www.poptin.com/blog/th/create-seamless-sales-funnel-integromat/?topic=topic:facebook-marketplace> เข้าถึงครั้งสุดท้ายวันที่ 18 ตุลาคม 2566
- [11] “Golang คืออะไร? ดีอย่างไร? รวมสิ่งที่ควรรู้เกี่ยวกับ Golang” URL: <https://blog.skooldio.com/what-is-golang/> เข้าถึงครั้งสุดท้ายวันที่ 19 ตุลาคม 2566
- [12] “เอชทีเอ็มแอล” URL: <https://www.wikiwand.com/th/เอชทีเอ็มแอล> เข้าถึงครั้งสุดท้ายวันที่ 23 ตุลาคม 2566
- [13] “CSS คืออะไร ซีเอสเอส คือ ภาษาที่ใช้ในการจัดรูปแบบเอกสาร HTML ให้มีความสวยงาม” URL: <https://www.wikiwand.com/th/เอชทีเอ็มแอล> เข้าถึงครั้งสุดท้ายวันที่ 23 ตุลาคม 2566
- [14] “JavaScript (JS) คืออะไร” URL: <https://aws.amazon.com/th/what-is/javascript/> เข้าถึงครั้งสุดท้ายวันที่ 23 ตุลาคม 2566

เว็บแอปพลิเคชันพัฒนาทักษะภาษาอังกฤษ Web Application for Developing English Language Skills

นภัสรพี สิทธิวัฒน์¹ นิชกานต์ กายฤทธิ์¹ มนัสวี ปริตตะพงษ์ชัย¹ สักกะพันธ์ คล้ายดอกจันทร์² เย็นย้ง จงจิตต์^{3,*}
นารารอ สว่างวงศ์⁴ และ กาญจนา ม่วงทองคำ⁴

Naphasrapee Sittiwatjana¹, Nitchakarn Kaiyarit¹, Manatsawee Parittapongsachai¹, Sakapan Klaydokjan²,
Yenyong ChongChit^{3,*}, Naraon Sawangwong⁴ and Kanchana Maungthongkum⁴

¹ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

²ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

³ภาควิชาพื้นฐานทั่วไป สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

⁴ฝ่ายสนับสนุนงานวิชาการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

¹Department of Information Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Prince of Chumphon Campus

²Department of Electrical Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Prince of Chumphon Campus

³Department of General Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Prince of Chumphon Campus

⁴Supporting Academic Affair, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Prince of Chumphon Campus

*Corresponding author: Yenyong ChongChit, E-mail address: Yenyong.ch@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้ขอเสนอเว็บแอปพลิเคชันพัฒนาทักษะภาษาอังกฤษ ระบบที่สร้างขึ้นได้แบ่งผู้ใช้งานออกเป็น 2 กลุ่มคือนักศึกษากับอาจารย์ (ผู้ดูแลระบบ) ส่วนของนักศึกษาได้แบ่งการใช้งานตามลำดับดังนี้ แบบทดสอบก่อนเรียน บทเรียน 5 บท (ซึ่งประกอบด้วยบทฟัง การพูด) แบบทดสอบท้ายบทเรียน และการสอบหลังเรียน ส่วนของอาจารย์สามารถเข้าถึงคะแนนของนักศึกษาแต่ละคนในฐานข้อมูลได้ นอกจากนี้อาจารย์สามารถแก้ไข เพิ่ม และลบเนื้อหาที่เกี่ยวข้องได้ เว็บแอปพลิเคชันนี้ได้รับการพัฒนาจากภาษา HTML, JavaScript, PHP, SQL ร่วมกับโปรแกรม VS Code, MySQL, Apache Tomcat และ Figma ระบบนี้แบ่งการทำงานหลักหน้าออกเป็น 9 ส่วนสำคัญนั้นคือ 1) ล็อกอิน การลงทะเบียน และหน้าสำหรับผู้ใช้คนใหม่ 2) แบบทดสอบก่อนเรียน 3) หน้าสำหรับเลือกบทเรียน 4) หน้าของบทเรียนที่ได้เลือกแล้ว 5) แบบฝึกหัดท้ายบท รวมทั้งการพูดโต้ตอบกับระบบ 6) การสอบพูด 7) ข้อมูลส่วนตัวของผู้ใช้งาน 8) แบบทดสอบหลังเรียน และ 9) การแสดงคะแนนของผู้เรียน (สำหรับอาจารย์เท่านั้น) จากผลการทดลองระบบ ทำให้เห็นได้ชัดเจนว่าการทำงานของเว็บแอปพลิเคชันในแต่ละส่วน ทำงานได้อย่างถูกต้อง มีประสิทธิภาพ และได้ติดตั้งระบบไว้ในเซิร์ฟเวอร์เรียบร้อยแล้ว

คำสำคัญ: เว็บแอปพลิเคชัน, การพัฒนาทักษะภาษาอังกฤษ, HTML/JavaScript, PHP และ SQL

Abstract

This article illustrates web application for developing English language skills. The system is divided into 2 user groups is that students and English teachers (Administrator). Initially, students' part which they have to follow sequential processes as: pre-test, 5 lessons learning (consisted in listening and speaking), practices and post-test. On the other part, English teachers (Administrator) are able to access to the database to see all student's score. Additionally, these teachers can edit or add or delete any relevant data. The web application is developed by HTML, JavaScript, PHP, SQL programming language with VS Code, MySQL, Apache Tomcat and Figma. The system is divided into 9 major section is that; 1) Login, Registration and New users page 2) Pre-test 3) Lesson selection page (total 5 lessons) 4) Selected lesson 5) Practices (included speaking exercises) 6) Speaking test 7) User's personal data 8) Post-test and 9) Students' score demonstration (teacher only). Experimentally, it's clear to see that all function of the system exactly and productive operates. Furthermore, the web application is deployed on a functionally server.

Keywords: Web Application, Developing English Language Skills, HTML/JavaScript, PHP and SQL

1. บทนำ

ภาษาอังกฤษคือภาษาสากลอันเป็นที่ยอมรับสำหรับการสื่อสารของโลก [1] รวมไปถึงการศึกษาหาความรู้ด้านต่างๆ อันเป็นความรู้ที่ทันสมัยหรือความรู้ที่ปรับปรุงใหม่ ล้วนแต่เผยแพร่ออกเป็นภาษาอังกฤษทั้งสิ้น กว่าที่จะแปลจากภาษาอังกฤษให้เป็นหนังสือภาษาไทยจะต้องใช้เวลาสัก 2 ปี นั่นทำให้ความรู้ที่ทันสมัยไม่ใช่ว่าความรู้ที่ทันสมัยแล้ว เพราะความรู้อาจพัฒนาไปอีกแล้ว ดังนั้น การมีความรู้ความสามารถในภาษาอังกฤษจะช่วยให้คุณสามารถหาความรู้ใหม่ได้เร็วกว่าคนที่มีความรู้และความสามารถด้านภาษาอังกฤษน้อยหรือไม่มีเลย [2] ผู้ศึกษาหาความรู้ขั้นสูงจำเป็นต้องมีทักษะด้านภาษาอังกฤษ โดยเฉพาะอย่างยิ่งนักศึกษาในสถาบันอุดมศึกษา จำเป็นต้องมีทักษะภาษาอังกฤษเพื่อการต่อยอดความรู้ ด้วยการอ่านจากตำราภาษาอังกฤษ บทความในอินเทอร์เน็ต [3] บทความวิชาการจากงานประชุมวิชาการ (Conferences) หรือบทความวิจัยจากวารสารวิชาการ (Journals) หากแต่นักศึกษาของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร (สจล. ชุมพร) ส่วนใหญ่มีทักษะด้านภาษาอังกฤษน้อย โดยเฉพาะการฟัง การพูด และไวยากรณ์ (จากคำบอกเล่าของ อาจารย์เย็นยิ่ง จงจิตต์ อาจารย์วิชาภาษาอังกฤษ ภาควิชาพื้นฐานทั่วไป สจล. ชุมพร, สิงหาคม 2566) ด้วยสาเหตุที่นักศึกษาประสบข้อจำกัดด้านภาษาอังกฤษ อาจารย์เย็นยิ่งและผู้จัดทำ จึงมีเจตนาที่จะสร้างเว็บแอปพลิเคชันตัวหนึ่งมาเป็นเครื่องมือช่วยให้นักศึกษาได้พัฒนาทักษะภาษาอังกฤษของตัวเอง ด้วยจุดประสงค์เริ่มต้นนี้ คณะผู้จัดทำจึงศึกษาเว็บแอปพลิเคชันที่ช่วยพัฒนาทักษะภาษาอังกฤษว่ามีตัวไหนใช้งานได้เหมาะสม ผู้จัดทำพบว่าเว็บไซต์ <https://apps.apple.com/app/id1238639729> เป็นสิ่งที่นำมาศึกษาให้เป็นตัวอย่าง หากแต่เป็นเว็บแอปพลิเคชันที่เข้าไปใช้งานได้อย่างเดียว ผู้สอนไม่สามารถเห็นคะแนนของนักเรียนแต่ละคนได้ ดังนั้นผู้จัดทำจึงได้สร้างการทำงานส่วนหนึ่งของเว็บแอปพลิเคชัน (ที่พัฒนาขึ้นมาเอง) ให้ผู้สอนสามารถเข้าไปดูคะแนนของนักศึกษาแต่ละคนได้บนหน้าเว็บ ซึ่งเป็นข้อมูลที่เรียกมาจากฐานข้อมูลของระบบ

2. ขั้นตอนการศึกษาและการออกแบบ

ในหัวข้อนี้ผู้จัดขออธิบายขั้นตอนการศึกษา การออกแบบภาพรวมของเว็บแอปพลิเคชัน (Wireframe) และฐานข้อมูล ซึ่งได้แบ่งออกเป็น 3 ส่วนสำคัญนั่นคือ การรวบรวมความต้องการจาก อาจารย์เย็นยิ่ง ด้วยการสัมภาษณ์ว่าเว็บแอปพลิเคชันตัวนี้สมควรมีการทำงานอย่างไร การนำความต้องการมาวิเคราะห์เพื่อการออกแบบหน้าเว็บ (การทำงานหน้าฉากหรือเรียกว่า Front-End) อย่างสุดท้ายคือการออกแบบฐานข้อมูลเพื่อให้เก็บข้อมูลหรือเรียกใช้งานข้อมูลได้ตามต้องการ (งานส่วนนี้เรียกว่างานหลังฉากหรือ Back-End) ผู้จัดทำได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.1 – 2.4

2.1 การรวบรวมความต้องการของผู้ใช้งาน (User Requirement)

ข้อมูลทั้งหมดมาจากการสัมภาษณ์ อาจารย์เย็นยิ่ง จากคำเรียกของการพัฒนาซอฟต์แวร์หรือเว็บไซต์จะเรียกว่า การรวบรวมความต้องการของผู้ใช้งาน หรือคำเรียกของการออกแบบ UX/UI ด้วยหลักการ Design Thinking จะเรียกว่าการเข้าใจใจผู้ใช้งาน (Empathize) นั่นเอง [4] ดังต่อไปนี้

1. นักศึกษาทำการลงทะเบียนก่อน (Registration) เพื่อให้ทราบว่านักศึกษาคนไหนชื่อ-นามสกุลคืออะไร เรียนอยู่สาขาวิชาอะไร ซึ่งนำมาวิเคราะห์ข้อมูลได้ในอนาคต
2. เมื่อลงทะเบียนเสร็จแล้ว นักศึกษาต้องทำการล็อกอิน (Login) เพื่อยืนยันตัวตนก่อนใช้งานระบบ
3. ขั้นตอนต่อมาให้ทำการทดสอบก่อนเรียน (Pre-test) เพื่อวัดความทักษะก่อนเข้าเรียน หากทำการทดสอบก่อนเรียนเสร็จแล้วให้ทดสอบคะแนน (บันทึกลงในฐานข้อมูล)
4. ถัดมาจะเข้าสู่การเลือกบทเรียน (เว็บแอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้นมาตัวนี้เริ่มที่ 5 บทเรียนก่อน) ผู้เรียนจะต้องเลือกบทใดบทหนึ่งก่อน จึงจะเข้าสู่การฝึกฟัง เริ่มจากมีบทพูดให้อ่านไปพร้อมกับเสียงพูด จะทำให้เห็นและได้ยินอย่างชัดเจนว่าคำศัพท์เหล่านั้นเขียนอย่างไรและออกเสียงอย่างไร
5. ถัดมาจะเข้าสู่การฝึกพูดโดยเลือกได้ว่าจะเป็นผู้พูด A หรือ B หากเลือกผู้พูด A ระบบจะเป็น B ให้โดยอัตโนมัติ หากเลือกเป็นผู้พูด B ระบบก็จะเปลี่ยนเป็น A ให้ในทันที

6. เมื่อเรียนบทใดบทหนึ่งจนหมดเนื้อหาแล้ว จะเข้าสู่แบบฝึกท่ายบทเรียน ผู้เรียนจะต้องฝึกฟังและตอบคำถามแบบปรนัย ต่อจากนั้นจะเป็นการฝึกพูด โดยมีปุ่มให้กดเพื่อเริ่มการพูด ระบบทำการบันทึกเสียงพูด แล้วนำไปประมวลผลเพื่อตรวจสอบความถูกต้อง แบบฝึกหัดเหล่านี้นักเรียนต้องทำทุกข้อ ไม่อย่างนั้นจะส่งคะแนนไปเก็บในฐานข้อมูลไม่ได้

7. ผู้เรียนต้องเรียนให้ครบทุกบท ซึ่งจะต้องทำตามข้อ 4-6 (แต่ละบทมีขั้นตอนเหมือนกัน แต่เนื้อหาไม่เหมือนกัน) ผู้เรียนต้องทำแบบฝึกหัดให้ครบทุกบทด้วย ไม่อย่างนั้นจะทำ Pre-test ไม่ได้

8. ขั้นตอนสุดท้ายของผู้เรียนคือการทำแบบทดสอบหลังเรียน (Pre-test) ซึ่งคะแนนจะนำไปเก็บไว้ในฐานข้อมูล

9. ผู้สอนสามารถเรียกคะแนนของผู้เรียนที่อยู่ในฐานข้อมูล ให้แสดงผลบนเว็บไซต์ได้

ด้วยความต้องการของผู้ใช้งานทั้ง 9 ข้อที่สำคัญนี้ ทำให้ผู้จัดทำสามารถออกแบบเว็บไซต์ได้เป็น 9 ส่วน ซึ่งจะขยายความไว้ในหัวข้อที่ 2.2 การออกแบบภาพรวมของเว็บแอปพลิเคชัน (Wireframe)

2.2 การออกแบบภาพรวมของเว็บแอปพลิเคชัน (Wireframe)

ในส่วนนี้จะเป็นภาพรวมของเว็บไซต์ด้วยการใช้โปรแกรม Figma เพื่อให้เข้าใจเว็บไซต์นี้ได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งแบ่งการทำงานหน้าฉากของเว็บไซต์เป็น 9 ส่วนสำคัญ ซึ่งออกแบบตามความต้องการของผู้ใช้งานทั้ง 9 ข้อ ดังรูปที่ 1 (Figure 1)

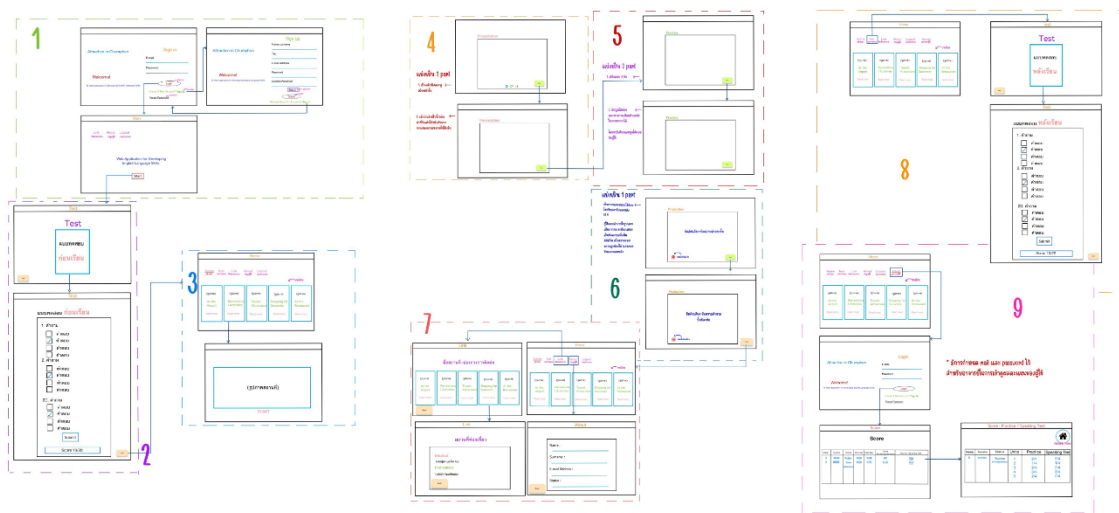


Figure 1 Wireframe of Developing English Language Skills Web Application.

ผู้จัดทำขออธิบายเพิ่มเติมว่าแต่ละส่วนของ Wireframe คืออะไรบ้าง ดังต่อไปนี้

1. หน้าล็อกอิน ลงทะเบียน และหน้าสำหรับผู้ใช้นิใหม่
2. แบบทดสอบก่อนเรียน
3. หน้าหลักสำหรับผู้ใช้งานเลือกบทเรียน (ทั้งหมด 5 บทเรียน ให้เลือกเรียนทีละบท)
4. บทเรียน ซึ่งแสดงเนื้อหาของบทเรียน รวมทั้งการฝึกฟังและฝึกพูด
5. แบบฝึกหัดท่ายบทและการฝึกพูดโต้ตอบกับระบบ
6. การฝึกพูด
7. ลิงก์นำไปสู่เว็บไซต์ที่เกี่ยวข้องกับบทเรียน และข้อมูลส่วนตัวของผู้ใช้งาน
8. แบบทดสอบหลังเรียน
9. หน้าสำหรับดูคะแนนของนักเรียนแต่ละคน (สำหรับอาจารย์เท่านั้น)

2.3 การออกแบบฐานข้อมูล

ในส่วนนี้จะเป็นการออกแบบฐานข้อมูล การออกแบบนี้จะอ้างอิงจากข้อมูลที่ต้องการเก็บเอาไว้ และต้องการเรียกใช้งาน ซึ่งผู้จัดทำได้ทำการวิเคราะห์และทดสอบการทำงานแล้ว พบว่ามีตารางที่เกี่ยวข้องกัน 14 ตาราง ผู้จัดทำขออธิบายด้วยการใช้แผนภาพความสัมพันธ์ของข้อมูล (ER Diagram) ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2 (Figure 2)

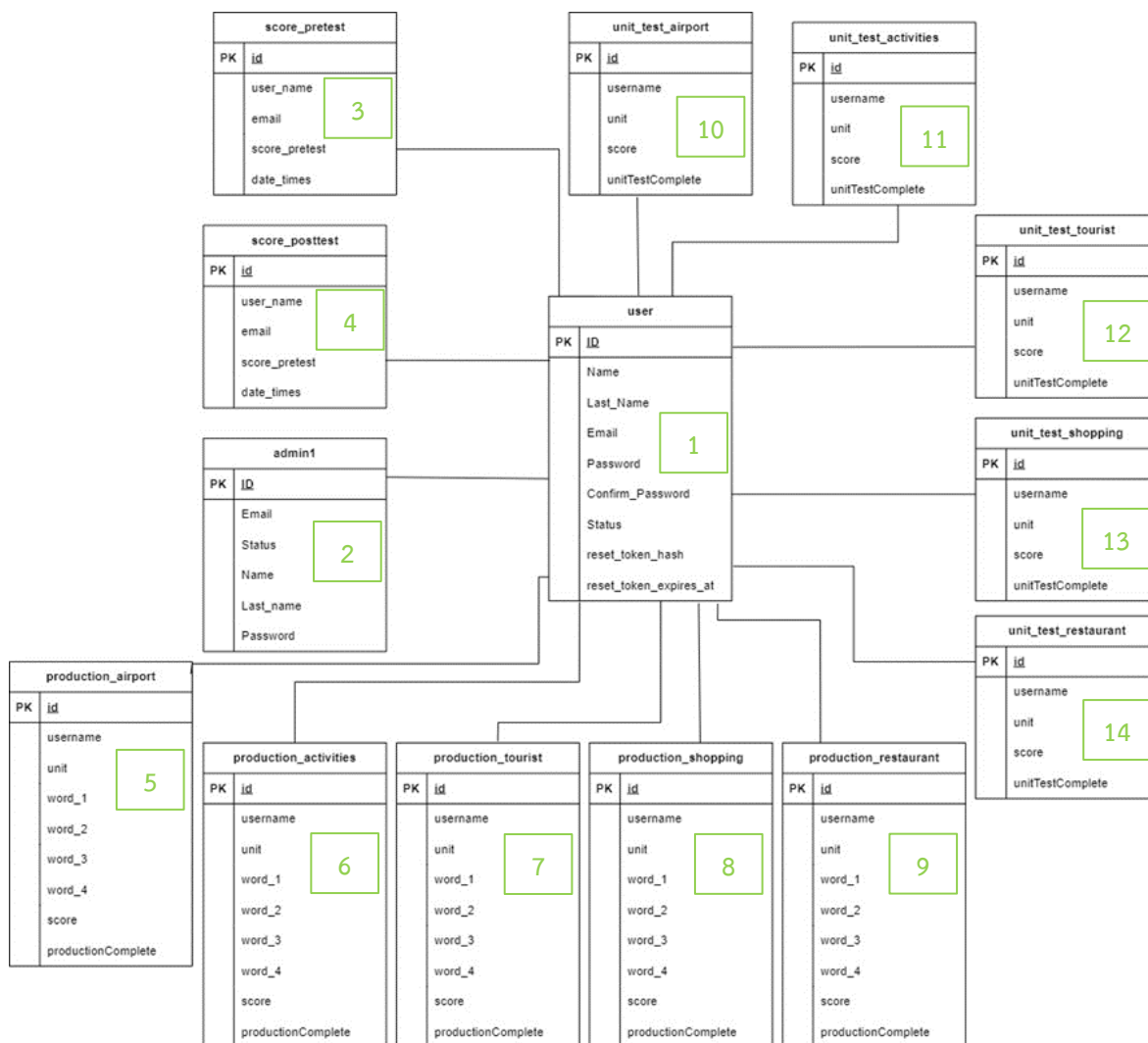


Figure 2 ER diagram of the web application.

จาก Figure 2 ซึ่งเป็นแผนภาพความสัมพันธ์ของข้อมูลที่อยู่ในฐานข้อมูล 14 ตารางซึ่งครอบคลุมข้อมูลทั้งหมดที่ต้องการเก็บไว้ในฐานข้อมูลและเรียกใช้งาน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ผู้ใช้งาน เก็บข้อมูล ชื่อจริง นามสกุล อีเมล รหัสผ่าน ยืนยันรหัสผ่าน และสถานะ
2. ผู้ดูแลระบบ เก็บข้อมูล ชื่อจริง นามสกุล อีเมล รหัสผ่าน และสถานะ
3. คะแนนของข้อสอบก่อนเรียน เก็บข้อมูล ชื่อผู้ใช้ อีเมล คะแนน และเวลาที่ทำข้อสอบก่อนเรียน
4. คะแนนของข้อสอบหลังเรียน เก็บข้อมูล ชื่อผู้ใช้ อีเมล คะแนน และเวลาที่ทำข้อสอบหลังเรียน
5. คะแนนแบบฝึกหัดของบทเรียนที่ 1 เก็บข้อมูล ชื่อผู้ใช้ ชื่อบทเรียน คะแนน และเวลาที่ทำแบบฝึกหัดของบทเรียนที่ 1
6. คะแนนแบบฝึกหัดของบทเรียนที่ 2 เก็บข้อมูล ชื่อผู้ใช้ ชื่อบทเรียน คะแนน และเวลาที่ทำแบบฝึกหัดของบทเรียนที่ 2
7. คะแนนแบบฝึกหัดของบทเรียนที่ 3 เก็บข้อมูล ชื่อผู้ใช้ ชื่อบทเรียน คะแนน และเวลาที่ทำแบบฝึกหัดของบทเรียนที่ 3
8. คะแนนแบบฝึกหัดของบทเรียนที่ 4 เก็บข้อมูล ชื่อผู้ใช้ ชื่อบทเรียน คะแนน และเวลาที่ทำแบบฝึกหัดของบทเรียนที่ 4
9. คะแนนแบบฝึกหัดของบทเรียนที่ 5 เก็บข้อมูล ชื่อผู้ใช้ ชื่อบทเรียน คะแนน และเวลาที่ทำแบบฝึกหัดของบทเรียนที่ 5
10. คำตอบและคะแนนของบทเรียนที่ 1 เก็บข้อมูล ชื่อผู้ใช้ ชื่อบทเรียน คำตอบข้อที่ 1 คำตอบข้อที่ 2 คำตอบข้อที่ 3 คำตอบข้อที่ 4 และเวลาที่ทำแบบทดสอบพูดของบทเรียนที่ 1
11. คำตอบและคะแนนของบทเรียนที่ 2 เก็บข้อมูล ชื่อผู้ใช้ ชื่อบทเรียน คำตอบข้อที่ 1 คำตอบข้อที่ 2 คำตอบข้อที่ 3 คำตอบข้อที่ 4 และเวลาที่ทำแบบทดสอบพูดของบทเรียนที่ 2

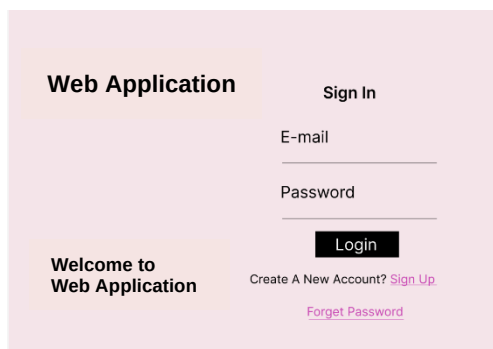
12. คำตอบและคะแนนของบทเรียนที่ 3 เก็บข้อมูล ชื่อผู้ใช้ ชื่อบทเรียน คำตอบข้อที่ 1 คำตอบข้อที่ 2 คำตอบข้อที่ 3 คำตอบข้อที่ 4 และเวลาที่ทำแบบทดสอบพูดของบทเรียนที่ 3

13. คำตอบและคะแนนของบทเรียนที่ 4 เก็บข้อมูล ชื่อผู้ใช้ ชื่อบทเรียน คำตอบข้อที่ 1 คำตอบข้อที่ 2 คำตอบข้อที่ 3 คำตอบข้อที่ 4 และเวลาที่ทำแบบทดสอบพูดของบทเรียนที่ 4

14. คำตอบและคะแนนของบทเรียนที่ 5 เก็บข้อมูล ชื่อผู้ใช้ ชื่อบทเรียน คำตอบข้อที่ 1 คำตอบข้อที่ 2 คำตอบข้อที่ 3 คำตอบข้อที่ 4 และเวลาที่ทำแบบทดสอบพูดของบทเรียนที่ 5

2.4 การออกแบบหน้าฉากของเว็บแอปพลิเคชัน (Front-End Design)

ในส่วนนี้คือหน้าเว็บสำหรับการใช้งานจริง ที่ผู้จัดทำได้ทำการออกแบบและสร้างเสร็จแล้ว ซึ่งหน้าเว็บบางส่วนผู้จัดทำขอปิดบังข้อมูลไว้ก่อน เนื่องจากเป็นแบบทดสอบก่อนเรียน แบบฝึกหัด และแบบทดสอบหลังเรียน หากแต่หน้าเว็บและการทำงานของระบบสามารถทำงานได้จริง หน้าเว็บที่ได้ออกแบบไว้ ดังแสดงไว้ใน Figure 3 - 14



Web Application

Sign In

E-mail

Password

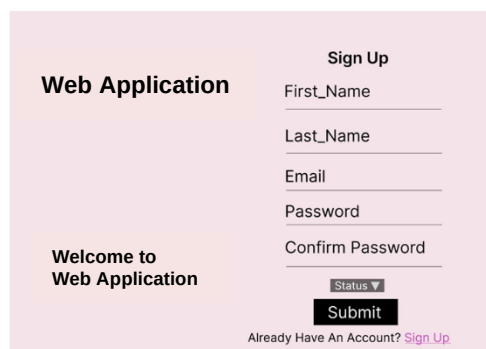
Login

Welcome to Web Application

Create A New Account? [Sign Up](#)

[Forget Password](#)

Figure 3 Login



Web Application

Sign Up

First_Name

Last_Name

Email

Password

Confirm Password

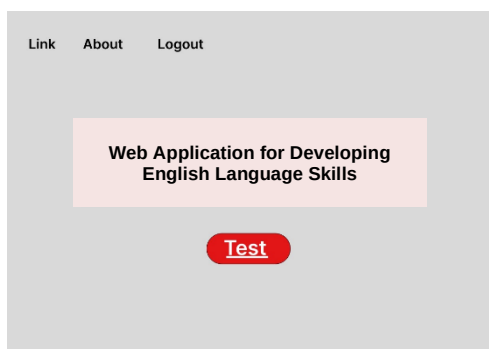
Status

Submit

Welcome to Web Application

Already Have An Account? [Sign Up](#)

Figure 4 Sign-up

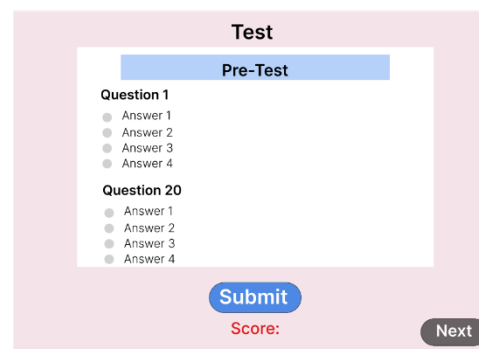


Link About Logout

Web Application for Developing English Language Skills

Test

Figure 5 First page or Landing page



Test

Pre-Test

Question 1

- Answer 1
- Answer 2
- Answer 3
- Answer 4

Question 20

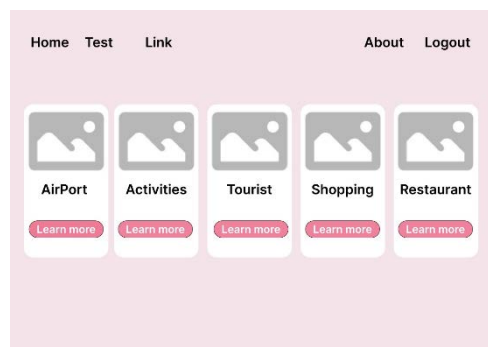
- Answer 1
- Answer 2
- Answer 3
- Answer 4

Submit

Score:

Next

Figure 6 Pre-test



Home Test Link About Logout

AirPort Activities Tourist Shopping Restaurant

Learn more Learn more Learn more Learn more Learn more

Figure 7 Lesson selection



Listen&Learn

1.Presentation of conversation

Employee:	Hello
Tourist:	Hi
Employee:	How are you?
Tourist:	I'm good. What about you?
Employee:	I'm blessed!
Tourist:	How much does this cost?
Employee:	100 Bath.

0:00 / 0:52

Next

Figure 8 Reading and Listening in a lesson

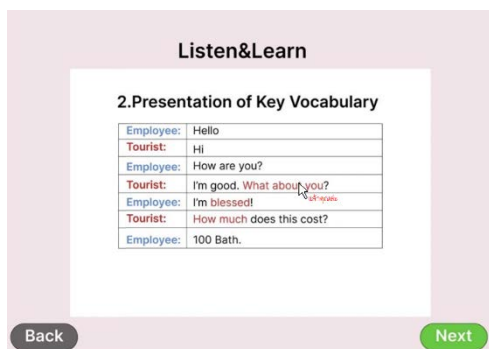


Figure 9 Speaking in an exercise.

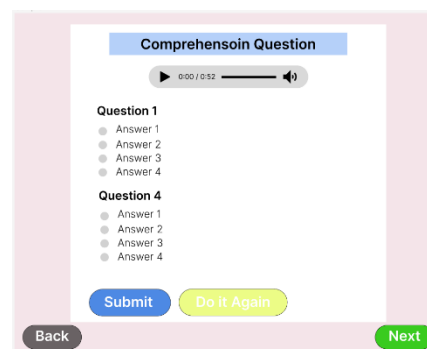


Figure 10 Multiple choice test and listening in an exercise.

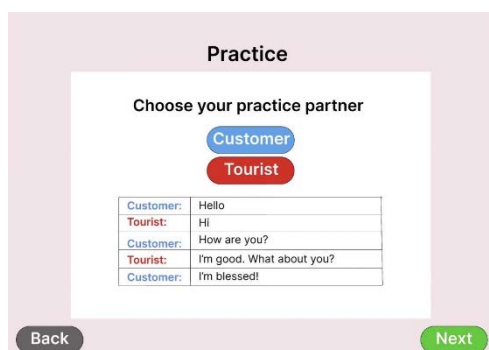


Figure 11 Speaking practice which select between Customer and Tourist.

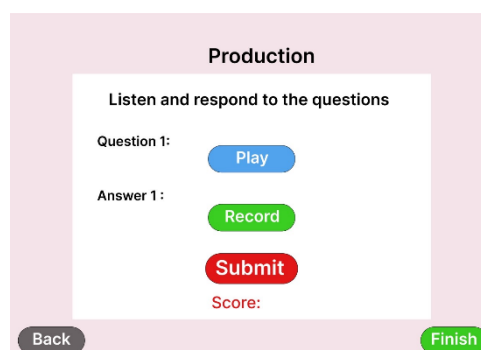


Figure 12 Speaking test.



Figure 13 Links to relevant places in these lessons.

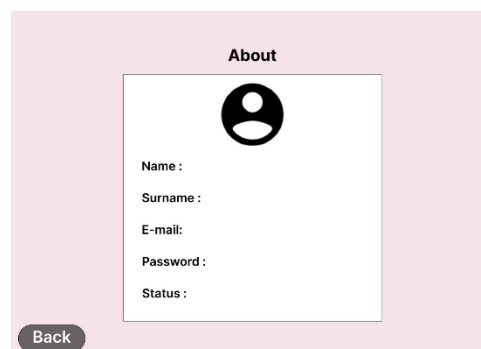


Figure 14 A user's personal data.

จาก Figure 3 – 14 ผู้จัดทำจะขออธิบายเพิ่มเติมดังนี้ เริ่มจาก Figure 3 คือหน้าเว็บสำหรับ Login เพื่อใช้งานระบบ ถัดมา Figure 4 คือหน้าเว็บสำหรับสมัครใช้งานระบบ ตามด้วย Figure 5 คือหน้าแรกของการใช้งานระบบ จากนั้นจะเข้าสู่ Figure 6 ซึ่งเป็นแบบทดสอบก่อนเรียนที่มีทั้งหมด 20 ข้อ เมื่อทำแบบทดสอบก่อนเรียนเสร็จแล้วจะเข้าสู่ Figure 7 ซึ่งมีบทเรียนให้เลือก 5 บทเริ่มเรียนจากบทใดก่อนก็ได้ เมื่อเลือกบทเรียนใดบทเรียนหนึ่งแล้วจะเข้าสู่ Figure 8 ซึ่งเป็นการฝึกฟัง โดยที่หน้านี้จะมีย่บทสนทนาให้อ่านด้วย เมื่อผู้เรียนฝึกฟังเพียงพอแล้วจะเข้าสู่ Figure 9 เป็นการแสดงคำแปลจากหน้าที่แล้ว ต่อจากนั้นจะเข้าสู่ Figure 10 เป็นการฝึกฟังเพื่อจับใจความแล้วตอบคำถาม ต่อจากนั้นเป็น Figure 11 หน้านี้คือการฝึกพูดโดยเลือกได้ว่าจะเป็น Employee หรือ Tourist ผู้เรียนสามารถเลือกเป็นอย่างไรก็ได้ก่อนได้ แล้วทำการฝึกพูดโดยเลือกเป็นอีกบทบาทได้ด้วย ถัดมาคือ Figure 12 เป็นการทดสอบพูด เริ่มจากกด Play เพื่อฟังคำถาม เมื่อต้องการตอบให้กด Record แล้วให้ผู้เรียนพูดคำตอบ (ระบบจะตรวจความถูกต้องจากคำที่สำคัญ) Figure 13 คือลิงก์ไปยังเว็บไซต์ที่เกี่ยวข้องกับบทเรียน และหน้าสุดท้าย Figure 14 คือโปรไฟล์ของผู้เรียนคนที่ Login เข้ามาเพื่อใช้งานระบบ

3. ผลการทดลองและการวิจารณ์

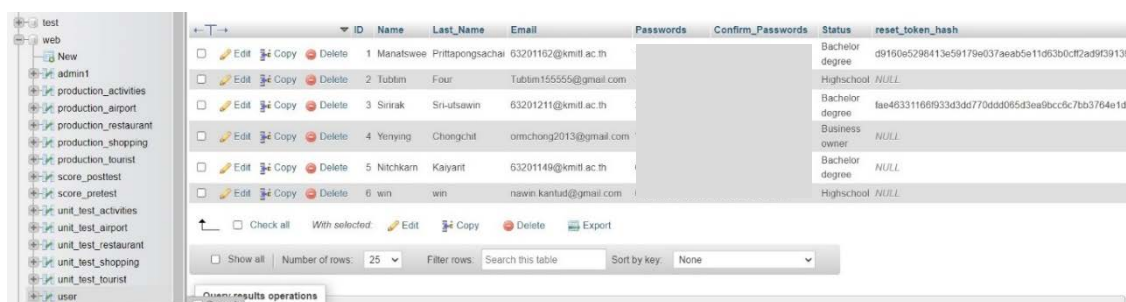
ในหัวข้อนี้ผู้จัดทำจะกล่าวถึงผลการทดลอง 4 อย่างนั่นคือ การเก็บข้อมูลจากการลงทะเบียน การเก็บผลคะแนนสอบก่อนเรียนและสอบหลังเรียน การเรียกดูคะแนนสอบของผู้เรียนบนหน้าเว็บ การเรียกผลคะแนนของผู้เรียนในส่วนของการฝึกหัดทำยบทของผู้เรียนแต่ละคน และการเรียกผลคะแนนสอบการพูดของแต่ละคน ซึ่งผู้จะเข้าดูข้อมูลเหล่านี้ได้คือผู้สอนเท่านั้น

3.1 การทดลองเก็บข้อมูลจากการลงทะเบียน

ผลการทดลองจะเป็นดัง Table 1 และยืนยันผลด้วย Figure 15 เป็นการทดลองลงทะเบียนทั้งหมด 5 ครั้ง ซึ่งแต่ละครั้งต้องใส่ข้อมูลตาม Figure 4 และผู้จัดทำขอปิดบังข้อมูลส่วนที่เป็น Password กับ Confirm Password เนื่องจากเป็นสิ่งที่ไม่ควรเปิดเผยต่อสาธารณะ

Table 1 New user's data collection into the database (Sign-up).

Experiment	First name	Last name	E-mail	Password	Confirm Password
1	Success	Success	Success	Success	Success
2	Success	Success	Success	Success	Success
3	Success	Success	Success	Success	Success
4	Success	Success	Success	Success	Success
5	Success	Success	Success	Success	Success

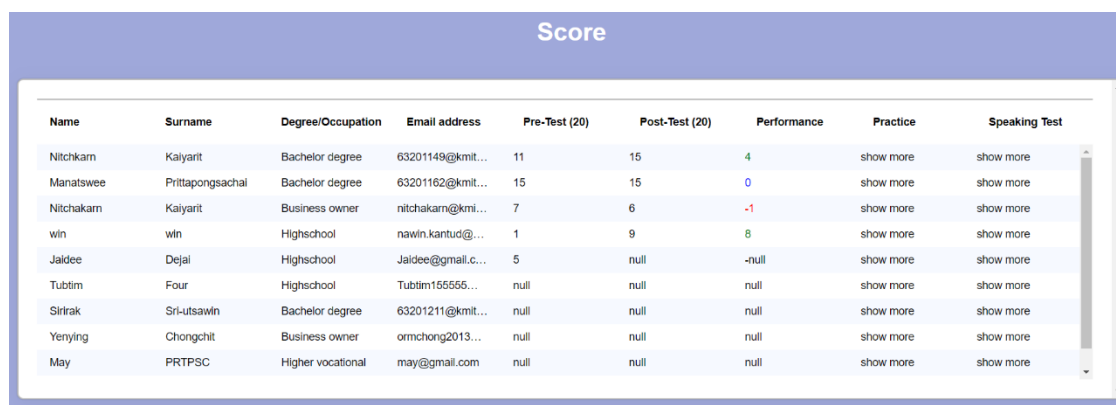


ID	Name	Last_Name	Email	Passwords	Confirm_Passwords	Status	reset_token_hash
1	Manatswee	Prittapongsachai	63201162@kmit.ac.th			Bachelor degree	d9160e5298413e59179e037aeb5e11d53b0c2ad9f9139
2	Tubtim	Four	Tubtim155555@gmail.com			Highschool	NULL
3	Sirirak	Sri-utsawin	63201211@kmit.ac.th			Bachelor degree	fae46331166933d3d770dd065d3ee9bcc8c7b3764e1d5
4	Yenyong	Chongchit	ormchong2013@gmail.com			Business owner	NULL
5	Nitchkam	Kaiyarit	63201149@kmit.ac.th			Bachelor degree	NULL
6	win	win	nawin.kantud@gmail.com			Highschool	NULL

Figure 15 User data retaining into the database.

จาก Table 1 และ Figure 15 ทำให้เห็นได้ว่าข้อมูลจากการลงทะเบียนสามารถนำไปเก็บไว้ในฐานข้อมูลได้สำเร็จ ครบทุกความต้องการของการลงทะเบียน

3.2 การเก็บผลคะแนนสอบก่อนเรียนและสอบหลังเรียนและการเรียกดูคะแนน



Name	Surname	Degree/Occupation	Email address	Pre-Test (20)	Post-Test (20)	Performance	Practice	Speaking Test
Nitchkam	Kaiyarit	Bachelor degree	63201149@kmit...	11	15	4	show more	show more
Manatswee	Prittapongsachai	Bachelor degree	63201162@kmit...	15	15	0	show more	show more
Nitchakam	Kaiyarit	Business owner	nitchakam@kmit...	7	6	-1	show more	show more
win	win	Highschool	nawin.kantud@...	1	9	8	show more	show more
Jaldee	Dejai	Highschool	Jaldee@gmail.c...	5	null	-null	show more	show more
Tubtim	Four	Highschool	Tubtim15555...	null	null	null	show more	show more
Sirirak	Sri-utsawin	Bachelor degree	63201211@kmit...	null	null	null	show more	show more
Yenyong	Chongchit	Business owner	ormchong2013...	null	null	null	show more	show more
May	PRTOSC	Higher vocational	may@gmail.com	null	null	null	show more	show more

Figure 16 Pre-test and Post-test score demonstration on webpage.

จาก Figure 16 จะเห็นข้อมูลได้อย่างชัดเจนว่ามีนักศึกษาลงทะเบียนเข้ามาใช้ระบบแล้ว 9 คน นักศึกษาที่ได้ทำการทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียนแล้ว จะมีคะแนนปรากฏให้เห็น สำหรับคนที่ยังไม่ได้ทำการทดสอบจะปรากฏคำว่า null ที่คอลัมน์ Pre-Test (20) มีนักศึกษาทำการทดสอบแล้ว 5 คนแต่ละมีคะแนนแตกต่างกันไป ที่คอลัมน์ Post-Test (20) นักศึกษาที่ทดสอบแล้วมี 4 คน สำหรับคอลัมน์ Performance หมายความว่า เป็นการเปลี่ยนแปลงทักษะของผู้เรียน หากคะแนนสอบหลังเรียนมากกว่าก่อนเรียน ตัวเลขจะแสดงเป็นสีเขียว (นำคะแนนสอบหลังเรียนเป็นตัวตั้งลบด้วยคะแนนสอบก่อนเรียน) หากคะแนนสอบก่อนเรียนและหลังเรียนเท่ากัน ตัวเลขที่ได้จะเป็น 0 และแสดงผลด้วยสีฟ้า หากคะแนนสอบก่อนเรียนมากกว่าคะแนนสอบหลังเรียน ตัวเลขที่ได้จะเป็นสีแดงและมีเครื่องหมายติดลบด้วย ส่วนคอลัมน์ Practice และ Speaking Test ได้แสดงข้อความว่า show more ข้อความนี้สามารถคลิกเข้าไปดูคะแนนส่วนของแบบฝึกหัดท้ายบทและคะแนนสอบพูดของแต่ละคนได้

3.3 การเก็บและการเรียกดูผลคะแนนของผู้เรียนในส่วนของแบบฝึกหัดท้ายบทของผู้เรียนแต่ละคนบนหน้าเว็บ

Practice			
Name	Units	Score (4)	Date Time
Manatswee	unittestAirport	1	2024-03-06 22:28:36
Manatswee	unittestAirport	3	2024-03-13 19:46:08
Manatswee	unittestAirport	4	2024-04-07 14:23:39
Manatswee	unittestAirport	2	2024-04-11 16:48:02
Manatswee	unittestAirport	2	2024-04-11 19:10:53
Manatswee	unittestActivities	1	2024-04-07 15:14:40
Manatswee	unittestTourist	3	2024-03-06 22:50:46
Manatswee	unittestShopping	3	2024-03-06 22:54:56
Manatswee	unittestRestaurant	2	2024-03-06 22:59:05

Figure 17 A student score for Practice

ใน Figure 17 จะเห็นได้ว่ามี 4 คอลัมน์นั่นคือ Name, Units, Score (4) คะแนนเต็ม 4 คะแนน และ Date/time เริ่มที่คอลัมน์ Name เป็นการบอกชื่อของผู้เรียน Units คือคอลัมน์ที่บอกว่าผู้เรียนได้ทำแบบฝึกหัดท้ายบทของบทไหน คอลัมน์ Score จะบอกคะแนนที่ได้ สุดท้ายคือคอลัมน์ Date/Time จะบอกว่าผู้เรียนคนนั้นเข้ามาทำแบบฝึกหัดท้ายบทเรียนวันที่เท่าไรและเวลาอะไร

3.4 การเก็บและการเรียกดูผลคะแนนสอบการพูดของแต่ละคน

Production							
Name	Units	word1	word2	word3	word4	Score	Date Time
Manatswee	productionAirport	Run	And it caught.	International	The couple.	0	2024-03-07 00:39:49
Manatswee	productionAirport	play	add hot	add hot	add hot	0	2024-03-13 20:17:15
Manatswee	productionAirport	play car	record	play car	Play card	0	2024-03-13 20:20:31
Manatswee	productionAirport	play hard	play car	Alexa	play	0	2024-03-13 20:29:49
Manatswee	productionAirport	the city center	meow meow	Airport	at the airport	2	2024-03-13 20:34:19
Manatswee	productionAirport	at the airport	today	100	200 baht	2	2024-04-11 16:53:03
Manatswee	productionAirport	at the airport	one day	100 baht	200 baht	2	2024-04-11 19:20:11
Manatswee	productionActivities	activities	And	activities	Airport	0	2024-03-07 01:22:53
Manatswee	productionActivities	okay okay	cancel	cancel	patient	0	2024-03-13 20:11:33

Figure 18 A student score for speaking test

จาก Figure 18 มีอยู่ทั้งหมด 8 คอลัมน์ เริ่มที่คอลัมน์ 1 Name เป็นการบอกว่าผู้เรียนชื่ออะไร ถัดไปคอลัมน์ที่ 2 Units คือการบอกว่าผู้เรียนทำการสอบพูดของบทเรียนที่ชื่อว่าอะไร ส่วนคอลัมน์ที่ 3 ถึง 6 คือ word1, word2, word3 และ word4 ตามลำดับ เป็นการบอกว่าผู้เรียนได้พูดคำที่เป็นคำตอบ (คำสำคัญ) ของแต่ละข้อว่าอย่างไร หากพูดได้ถูกต้องคะแนนจะปรากฏให้เห็นในคอลัมน์ที่ 7 นั่นคือคอลัมน์ชื่อว่า Score ส่วนคอลัมน์ 8 คือ Date/Time เป็นการบอกว่าผู้เรียนคนนี้เข้ามาสอบการพูดวันที่เท่าไรและเวลาอะไร

4. สรุป

จากผลการทดลองและการใช้ระบบ ซึ่งระบบแบ่งเป็น 9 ส่วนที่สำคัญนั้นคือ 1) ล็อกอิน การลงทะเบียน และหน้าสำหรับผู้ใช้งานใหม่ 2) แบบทดสอบก่อนเรียน 3) หน้าสำหรับเลือกบทเรียน 4) หน้าของบทเรียนที่ได้เลือกแล้ว 5) แบบฝึกหัดท้ายบท รวมทั้งการพูดโต้ตอบกับระบบ 6) การสอบพูด 7) ข้อมูลส่วนตัวของผู้ใช้งาน 8) แบบทดสอบหลังเรียน และ 9) การแสดงคะแนนของผู้เรียน (สำหรับอาจารย์เท่านั้น) ผู้จัดทำพบข้อมูลที่ชัดเจนว่าเว็บแอปพลิเคชันพัฒนาทักษะภาษาอังกฤษสามารถทำงานได้ครบทุกฟังก์ชัน ตามที่ผู้จัดทำคาดหวังไว้ ซึ่งแสดงผลสรุปไว้ใน Table 2 In Summarize

Table 2 In summarize.

Detail	Complete	Collapse
Login	√	
Sign-up	√	
Pre-test score retaining into database (Multiple choice)	√	
Practice score retaining into database (Multiple choice)	√	
Practice score retaining into database (Speaking)	√	
Post-test score retaining into database (Multiple choice)	√	
Pre-test and Post-test score demonstration	√	
Practice score (Speaking) demonstration	√	
Practice score (Multiple choice) demonstration	√	

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] สำราญ คำยิ่ง. 2549. Advanced English Grammar for High Learners. ห้างหุ้นส่วนจำกัด วิ.เจฟรันติง, กรุงเทพมหานคร
- [2] Timothy J. O'Leary and Linda I. O'Leary. คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (Computer Essentials 2013). ผลิตและจัดพิมพ์โดย สำนักพิมพ์แมคกรอ-ฮิล, กรุงเทพมหานคร จัดจำหน่ายโดย บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด (มหาชน), กรุงเทพมหานคร
- [3] The world's largest web developer site. เข้าถึงได้จาก : เว็บไซต์ <https://www.w3schools.com> (เข้าถึงล่าสุดเมื่อ 15 เมษายน 2567)
- [4] รศ.ดร.ปานใจ ธารทัศนวงศ์. 2565. Fundamental of Software Engineering & Digital Transformation. พิมพ์ครั้งที่ 1. จัดพิมพ์และจัดจำหน่ายโดย บริษัท ไอดีซี พรีเมียร์ จำกัด, กรุงเทพมหานคร
- [5] บัญชา ปะสีละเตสัง. 2562. พัฒนา Web Application ด้วย PHP และ MariaDB. จัดพิมพ์และจัดจำหน่ายโดย บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด (มหาชน), กรุงเทพมหานคร
- [6] จตุรพัชร พัฒนทรงศิริไธ. 2559. พัฒนาเว็บแอปพลิเคชันด้วย JavaScript. จัดพิมพ์และจัดจำหน่ายโดย บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด (มหาชน), กรุงเทพมหานคร
- [7] ผศ.ดร.วรรณวิภา ติตะสรี. 2548. คู่มือเรียน SQL ด้วยตัวเอง. พิมพ์ครั้งที่ 4. จัดพิมพ์โดย บริษัท โปรวิชั่น จำกัด, กรุงเทพมหานคร จัดจำหน่ายโดย บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด (มหาชน), กรุงเทพมหานคร

ประสิทธิภาพการดึงดูดของน้ำมันหอมระเหยจากชะพลูช้างต่อแมลงวันผลไม้ (เพศผู้)

ชนิด *Bactrocera dorsalis*Attractant Efficacy of Essential Oil from *Piper colubrinum* Link against Fruit Fly,
*Bactrocera dorsalis*สุกศจี วุฒิกุลประพันธ์¹ และ คำณววิทย์ ทิพย์มณี^{1,*}Supasajee Wuttikunprapan¹ and Kamronwit Tipmanee^{1,*}¹ภาควิชาเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง¹Department of Agricultural Tehnology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok*Corresponding author: Kamronwit Tipmanee, e-mail address: kamronwit.ex@gmail.com

บทคัดย่อ

น้ำมันหอมระเหยจากชะพลูช้าง (*Piper colubrinum* Link.) มีองค์ประกอบของสารเมทิลยูจินอล (methyl eugenol) อยู่ถึง 44.50% ซึ่งสารเมทิลยูจินอลมีคุณสมบัติในการดึงดูดแมลงวันผลไม้ (เพศผู้) *Bactrocera dorsalis* (Hendel) ในปัจจุบันเกษตรกรมีการเลือกใช้สารล่อแมลงวันผลไม้เพศผู้อย่างเมทิลยูจินอลสังเคราะห์ซึ่งเป็นสารกึ่งเคมีในการป้องกันกำจัด เนื่องจากแมลงวันผลไม้ชนิดนี้เป็นแมลงศัตรูผลไม้ที่สำคัญที่สุดในการเพาะปลูกผลไม้เปลือกอ่อน มีพืชอาศัยเป็นจำนวนมาก เช่น มะม่วง ชมพู่ ฝรั่ง เป็นต้น โดยที่แมลงวันผลไม้เพศเมียจะทำการวางไข่ในผลไม้และเจริญเติบโตเป็นตัวหนอนอาศัยอยู่ในผลไม้ ทำให้ผลไม้เกิดการเน่าเสีย ส่งผลให้ผลผลิตลดลงทั้งคุณภาพและปริมาณ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของน้ำมันหอมระเหยจากชะพลูช้างต่อการดึงดูดแมลงวันผลไม้ (เพศผู้) เพื่อนำไปใช้ทดแทนสารเมทิลยูจินอลสังเคราะห์ ในการทดสอบประสิทธิภาพของน้ำมันหอมระเหยจากชะพลูช้างเพื่อเทียบกับสารสังเคราะห์เมทิลยูจินอลในห้องปฏิบัติการ โดยวิธีการดึงดูดโดยใช้เครื่อง Olfactometer พบว่าน้ำมันหอมระเหยจากชะพลูช้างนั้นมีประสิทธิภาพการดึงดูดแมลงวันผลไม้ (เพศผู้) ได้ดีกว่าสารสังเคราะห์เมทิลยูจินอล โดยที่ความเข้มข้นของชะพลูช้างที่สามารถดึงดูดแมลงวันผลไม้ (เพศผู้) ได้ดีที่สุดคือ 12% ที่เวลา 180 นาที ในขณะที่สารสังเคราะห์เมทิลยูจินอลต้องใช้เวลานานถึง 360 นาที ถึงจะเริ่มมีประสิทธิภาพในการดึงดูดแมลงวันผลไม้ ดังนั้นน้ำมันหอมระเหยจากชะพลูช้าง จึงเป็นอีกทางเลือกที่ดีในการดึงดูดแมลงวันผลไม้ (เพศผู้) ทดแทนการใช้สารเมทิลยูจินอลสังเคราะห์เนื่องจากไม่เป็นอันตรายต่อผู้ใช้และไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

คำสำคัญ: น้ำมันหอมระเหย, เมทิลยูจินอล, แมลงวันผลไม้, ชะพลูช้าง

Abstract

Essential oil from *Piper colubrinum* Link. contains 44.50% methyl eugenol. Methyl eugenol can attract (male) fruit flies. *Bactrocera dorsalis* (Hendel). At present, farmers are choosing to use synthetic methyl eugenol as a lure for male fruit flies, which is a semi-chemical for protection and eradication. Because of this type of fruit fly It is the most important fruit pest in soft-shelled fruit cultivation. There are many host plants such as mango, apple, guava, etc. Female fruit flies lay eggs in the fruit and grow into larvae that live in the fruit. Causes the fruit to spoil. As a result, the output will decrease in both quality and quantity. The objective of this research was to test the effectiveness of essential oil from in attracting (male) fruit flies to use as a replacement for synthetic methyl eugenol. To test the effectiveness of essential oil from *Piper colubrinum* Link against synthetic methyl eugenol in the laboratory. By the method of attracting using a machine Olfactometer It was found that essential oil from *Piper colubrinum* Link was more effective at attracting (male) fruit flies than the synthetic methyl eugenol. The concentration of *Piper colubrinum* Link that was most effective at attracting (male) fruit flies was 12% at 180 minutes, while the synthetic methyl eugenol took up to 360 minutes to become effective. To attract fruit flies Therefore, essential oil from *Piper colubrinum* Link Therefore, it is another good alternative for attracting fruit flies (male) instead of using synthetic methyl eugenol because it is not harmful to users and is not toxic to the environment.

Keywords: essential oil, methyl eugenol (ME), *Bactrocera dorsalis*, *Piper colubrinum* Link.

1. บทนำ

ประเทศไทยมีการนำเข้าสารเคมีต่าง ๆ ที่ใช้ป้องกันกำจัดแมลงและวัชพืชต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อผลผลิตทางการเกษตร ซึ่งมีแนวโน้มจะเพิ่มขึ้นมากทุกปี โดยในปี 2564 เฉพาะสารเมทิลยูจีนอล (methyl eugenol) มีการนำเข้าปริมาณมากถึง 9,584 กิโลกรัม คิดเป็นมูลค่า 3,171,532.80 บาท (สำนักควบคุมพืชและวัสดุการเกษตร, 2564) [1] ซึ่งการป้องกันกำจัดแมลงวันผลไม้มีหลากหลายวิธี จากรายงานของจันทนาและคณะ (2561) [2] พบว่าการใช้เทคโนโลยีแบบผสมผสานในการควบคุมแมลงวันผลไม้ในแปลง ได้แก่ การรักษาความสะอาดแปลงปลูกและห่อผลด้วยพลาสติกให้มิดชิดสามารถป้องกันแมลงวันผลไม้ได้ 100% การใช้กับดักแมลงรูปแบบต่าง ๆ เป็นวิธีการหนึ่งในการป้องกันและกำจัดแมลง เช่น กับดักชนิดกาบต่าง ๆ ควบคู่กับสารดึงดูดแมลงที่หาได้ง่าย เช่น กะเพราหรือสารสังเคราะห์ ได้แก่ methyl eugenol เป็นต้น ซึ่งถูกนำมาใช้ในการกำจัดแมลงวันผลไม้ (ประพันธ์และมานนท์, 2555) [3] ชลธิราและคณะ (2557) [4] พบว่ากับดักสำเร็จรูปเหยื่อล่อ methyl eugenol เป็นกับดักที่ดีที่สุดสำหรับล่อแมลงวันผลไม้ในสวนชมพู ซึ่งเกษตรกรส่วนใหญ่มักเลือกใช้สารเคมีสังเคราะห์เนื่องจากสะดวกและง่ายต่อการใช้งาน (ณัฐพงศ์และดวงเดือน, 2561) [5] อย่างไรก็ตามทำให้มีผลกระทบต่อตามมาหลายประการทั้งต่อตัวเกษตรกรเองโดยเฉพาะผลกระทบต่อสุขภาพ สารเคมีเหล่านี้อาจเกิดการตกค้างสู่ผู้บริโภคในรูปแบบของผลผลิต นอกจากนี้ยังส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศและสิ่งแวดล้อมเป็นวงกว้าง ทั้งทางตรงและทางอ้อม อีกทั้งยังมีการพบว่า แมลงวันผลไม้มีความต้านทานต่อสารสังเคราะห์มากขึ้น (Haider *et al.*, 2011) [6]

แมลงวันผลไม้จัดเป็นแมลงที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจซึ่งอาจมีผลกระทบต่อพืชเศรษฐกิจมากถึง 250 ชนิด ทั้งผักและผลไม้ส่งผลกระทบต่อผลผลิตและคุณภาพผลผลิต (Qian, Y., *et al.*, 2023) [7] ซึ่งแมลงวันผลไม้ชนิด *Bactrocera dorsalis* (Hendel) มักทำลายพืชผลโดยตัวเมียจะทำการวางไข่ไว้ในผลไม้ ซึ่งหากวางไข่แล้วไข่ก็จะเจริญไปเป็นตัวหนอนอาศัยภายในผลไม้ ทำให้ผลไม้เน่าเสียส่งผลกระทบต่อเกษตรกรเป็นอย่างมากทั้งด้านคุณภาพปริมาณ แมลงวันผลไม้จัดอยู่ในอันดับ (Order) Diptera ตัวเต็มวัยบินหาอาหารได้ไกล มีศัตรูธรรมชาติ คือ ตัวงและต่อแตนกินไข่และตัวอ่อน (Von Ellenrieder, 2004) [8] จากรายงานของกรกชและณัฐวุฒิ (2554) [9] กล่าวว่า แมวแมลงวันผลไม้ส่วนใหญ่จะทำลายในส่วนของผลก็ตาม แต่แมลงวันผลไม้ก็สามารถเข้าทำลายทุกส่วนของพืชได้ไม่ว่าจะเป็นส่วนดอก ใบ ลำต้น และราก ซึ่งแมลงวันผลไม้มีพืชอาศัยเป็นจำนวนมาก

เมทิลยูจีนอลเป็นสารสำคัญในการดึงดูดแมลงวันผลไม้เพศผู้ ชนิด *Bactrocera dorsalis* ซึ่งสารเมทิลยูจีนอลพบในพืชมากกว่า 450 ชนิด (Tan, K.-H., *et al.*, 2021) [10] ซึ่งในประเทศไทยมีพืชสมุนไพรที่มีองค์ประกอบของสารเมทิลยูจีนอลอยู่หลายชนิด จากรายงานของ อนงค์ (2552) [11] พบว่ากะเพรามีเมทิลยูจีนอลอยู่ถึงร้อยละ 37.70 ซึ่งสามารถดึงดูดแมลงวันผลไม้เพศผู้ได้ดีกว่าสารสังเคราะห์เมทิลยูจีนอลได้ถึง 2 เท่า ทั้งนี้การทดสอบประสิทธิภาพน้ำมันหอมระเหยจากชะพลูช้างเพื่อดึงดูดแมลงวันผลไม้ (เพศผู้) นั้นนับว่าเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่ดีและเหมาะสมที่จะทำให้มีการนำสมุนไพรมาใช้ประโยชน์ในการควบคุมแมลงวันผลไม้เป็นอย่างมาก เนื่องจากไม่มีการตกค้างและไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมรวมทั้งยังปลอดภัยต่อเกษตรกรผู้ใช้และที่สำคัญลดการนำเข้าสารเคมีสังเคราะห์จากต่างประเทศอีกด้วย

2. วิธีการศึกษา

2.1 การเตรียมสารสกัดจากพืชสมุนไพร

การเตรียมน้ำมันหอมระเหยจากสมุนไพร คือ ชะพลูช้าง (*Piper Colubrinum* Link) ที่ได้จาก จ.อุบลราชธานี โดยการนำส่วนของใบมาทำการปั่นให้ละเอียด นำมาสกัดเอาน้ำมันหอมระเหยโดยวิธีการกลั่นด้วยน้ำ (water distillation) โดยเติมน้ำให้พอท่วม ต้มจนเดือดเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ไขส่วนที่เป็นน้ำมันหอมระเหยเก็บไว้ในภาชนะที่บดแสงในตู้เย็นอุณหภูมิ 12 °C เพื่อใช้ในการทดสอบกับแมลงในขั้นตอนต่อไป

2.2 การตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบของสารโดย GC-MS

นำน้ำมันหอมระเหยจากชะพลูช้างที่ได้มาทำการวิเคราะห์หาชนิดและองค์ประกอบทางเคมีโดยเครื่อง gas chromatography-mass spectrophotometer (GC-MS) ชนิด Triple Quadrupole ยี่ห้อ Thermo Scientific รุ่น TRACE 1300 โดยใช้วิธีการ Acquisition สำหรับการวิเคราะห์ ซึ่งวิธีการนี้ช่วยให้สามารถระบุและวิเคราะห์สารได้อย่างแม่นยำ (<https://rmsc12.dmsc.moph.go.th/web/file/KM/4-1สรุปการเรียนรู้-แผนภูมิ%20GC-MS-MS.pdf>) [12]

2.3 การเตรียมแมลงทดสอบ

สุ่มเก็บตัวอย่างมะเฟืองที่มีการเข้าทำลายของแมลงวันผลไม้ (*Bactrocera dorsalis*) จากแปลงมะเฟืองของโรงเรียนวัดชุมทอง บริเวณเขต ลาดกระบัง จังหวัด กรุงเทพมหานคร แล้วนำมาเพาะเลี้ยงในกล่องพลาสติกขนาด 27×18×10 cm โดยติดตะแกรงมุ้งลวดบนฝาด้านบน แล้วด้านล่างรองด้วยขี้เลื่อยเพื่อให้หนอนสามารถเข้าดักแด้ได้โดยแมลงวันผลไม้ตัวเต็มวัยเลี้ยงด้วยน้ำผึ้งและน้ำ ที่อุณหภูมิห้องแล้วคัดตัวเต็มวัยทั้งตัวผู้และตัวเมียอายุ 7 วันขึ้นไป นำไปใส่อีกกล่องเพื่อทำการผสมพันธุ์และวางไข่ในผลไม้ เพื่อใช้แมลง รุ่นที่ 2 หลังออกจากดักแด้แล้วมาเป็นตัวเต็มวัยและใช้เพศผู้เพื่อมาทดสอบในขั้นตอนต่อไป

2.4 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

2.4.1 การทดสอบประสิทธิภาพของน้ำมันหอมระเหยจากชะพลูช้างต่อแมลงวันผลไม้ โดยวิธีการดึงดูด

ทดสอบด้วยวิธีการดึงดูดโดยนำแมลงวันผลไม้ *Bactrocera Dorsalis* (เพศผู้) จำนวน 20 ตัว/ครั้ง มาทำการรวมด้วย CO₂ เพื่อให้่ายต่อการปล่อยแมลงลงในช่องตรงกลางของเครื่อง olfactrometer หยดนํ้ามันหอมระเหยจากชะพลูช้าง ที่ระดับความเข้มข้น 0,2,4,6,8,10 และ 12% µL/L air ปริมาตร 100 µL บนกระดาษกรอง Whatman® เบอร์ 1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 cm หยดทิ้งไว้ 5 นาที ที่อุณหภูมิห้อง ก่อนนำกระดาษกรองวางไว้ตามช่องของเครื่อง บันทึกเปอร์เซ็นต์การดึงดูดที่ 5,10,15,30,45,60,90,120,150,180 และ 210 นาที วางแผนการทดลองแบบ CRD มี 3 ซ้ำ เปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม (ethanol 95%)

2.4.2 การทดสอบประสิทธิภาพของเมทิลยูจินอลสังเคราะห์ต่อแมลงวันผลไม้ โดยวิธีการดึงดูด

ทดสอบด้วยวิธีการดึงดูดโดยนำแมลงวันผลไม้ *Bactrocera Dorsalis* (เพศผู้) จำนวน 20 ตัว/ครั้ง มาทำการรวมด้วย CO₂ เพื่อให้่ายต่อการปล่อยแมลงลงในช่องตรงกลางของเครื่อง olfactrometer หยดสารเมทิลยูจินอลสังเคราะห์ ที่ระดับความเข้มข้น 0,2,4,6,8,10 และ 12% µL/L air ปริมาตร 100 µL บนกระดาษกรอง Whatman® เบอร์ 1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 cm หยดทิ้งไว้ 5 นาที ที่อุณหภูมิห้อง ก่อนนำกระดาษกรองวางไว้ตามช่องของเครื่อง บันทึกเปอร์เซ็นต์การดึงดูดที่ 5,10,15,30,45,60,90,120,150,180,210,240,300,330 และ 360 นาที วางแผนการทดลองแบบ CRD มี 3 ซ้ำ เปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม (ethanol 95%)

2.4.3 หลักการทำงานของเครื่อง Olfactrometer

หลักการทำงานของเครื่อง Olfactrometer ประกอบด้วยช่องตรงกลางสำหรับปล่อยแมลงทดสอบ เชื่อมต่อกับท่อใสขนาดเล็กไปยังช่องสำหรับวางสารที่แยกกันอย่างชัดเจนจำนวน 4 ด้านในแนวนอน เพื่อให้สามารถนำสารมาทดสอบได้อย่างแม่นยำ มีหลักการทำงานโดยใช้การผสมผสานของอากาศบริสุทธิ์กับสารทดสอบ ซึ่งอากาศมาจาก Pump และแต่ละสารจะถูกนำไปใส่แยกในแต่ละช่อง ที่มีการควบคุมอัตราการไหลของอากาศด้วย flow meter เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ ในการทดลองซึ่งดัดแปลงมาจาก (van Emden *et al.*, 2018) [13] (Figure 1)

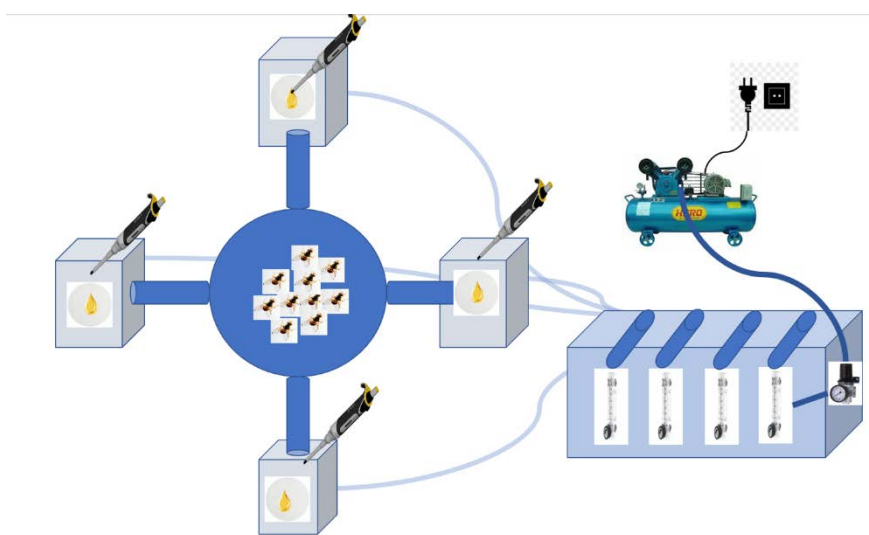


Figure 1 The olfactrometer

2.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

การหาความแตกต่างทางสถิติของค่าเฉลี่ย

วางแผนการทดลองแบบ CRD (completely randomized design) นำข้อมูลที่ได้ทั้งหมดมาวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติโดยเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธีการ DMRT (Duncan's new multiple range test) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SAS

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

การตรวจองค์ประกอบสารสำคัญในชะพลูช้าง [Table 1] พบว่ามีสารสำคัญ คือ methyl eugenol ถึงร้อยละ 44.50 รองลงมาคือ acetyleugenol ร้อยละ 27.88 ต่อมาพบสาร Eugenol ร้อยละ 10.89 และสารสำคัญอื่นๆ รวมกันแล้วร้อยละ 16.73 ซึ่งสาร methyl eugenol มีฤทธิ์ทางด้านการดึงดูด หรือ เป็นฟีโรโมน เพื่อดึงดูดแมลงวันผลไม้ (เพชผู้) ชนิด *Bactrocera dorsalis* Hendel ในปัจจุบันพบว่าการใช้สารเคมีหรือสารสังเคราะห์นั้นแมลงเกิดความต้านทานต่อสารที่ใช้ ซึ่งน้ำมันหอมระเหยจากพืชสมุนไพรไทยก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการป้องกันกำจัดแมลงศัตรูผลไม้ ซึ่งจากรายงานของจันทนาและคณะ (2561) [2] พบว่าสารสำคัญอย่าง methyl eugenol มีประสิทธิภาพในการดึงดูดแมลงวันผลไม้เพชผู้ได้ดี และสารเมทิลยูจินอลพบในพืชมากกว่า 450 ชนิด (Tan, K.-H., *et al.*, 2021) [10] ซึ่งพบว่ยังไม่มียางงานการตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชะพลูช้าง

Table 1 The main components in *Piper colubrinum* Link essential oils.

Chemical components	%
Methyl Eugenol	44.50
Acetyleugenol	27.88
Eugenol	10.89
Beta-Ocimene	3.57
Bicyclogermacrene	2.99
Beta-elemene	1.60
Germacrene-D	1.43
Trans-caryophyllene	1.25
Other compounds	5.89
Total	100.00

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนแมลงที่เข้าหาสาร ณ ช่วงเวลาต่าง ๆ พบว่าน้ำมันหอมระเหยจากชะพลูช้างมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ 180 นาที ซึ่งต่างจากสารสังเคราะห์ methyl eugenol (ME) จะเริ่มมีประสิทธิภาพที่เวลา 240 นาที และพบว่าน้ำมันหอมระเหยจากชะพลูช้างที่ความเข้มข้น 10% มีประสิทธิภาพในการดึงดูดถึง 15 ตัวและที่ความเข้มข้น 1% มีประสิทธิภาพในการดึงดูดเพียง 3 ตัวจากแมลงทดสอบ 20 ตัวเท่านั้น ในขณะที่ผลการทดลองของสารสังเคราะห์เมทิลยูจินอลนั้นพบว่าประสิทธิภาพการดึงดูดนั้นต้องใช้เวลานานกว่าน้ำมันหอมระเหยจากชะพลูช้างนานมากกว่า 1 ชั่วโมง และมีประสิทธิภาพการดึงดูดที่ความเข้มข้น 10% เพียง 4 ตัว เท่านั้นเนื่องจากแมลงทดสอบเลือกเข้าหา blank (ชุดว่างเปล่า) และ control (Alc.95%) เป็นจำนวนมาก จากรายงานของ Sarwar and Salman (2015) [14] พบว่าแมลงสามารถพัฒนาสร้างความต้านทานต่อสารเคมีได้ [Figure 2]

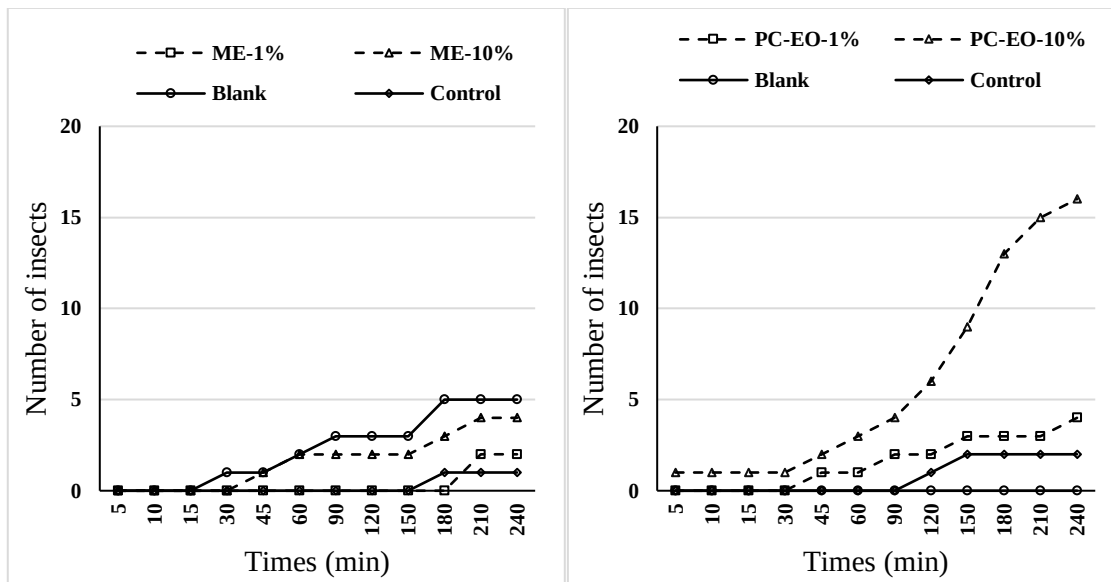


Figure 2 Attractiveness percentage of *Piper colubrinum* Link (PC-EOs) essential oil and synthetic compound of methyl eugenol (ME) at concentrations ranging from 1-10% with volume of 100 μ l on the male oriental fruit fly, *Bactrocera dorsalis*

จากการทดลองพบว่าน้ำมันหอมระเหยจากชะพลูซึ่งมีความเข้มข้น 12% ณ ช่วงเวลา 180 นาทีมีประสิทธิภาพการดึงดูดสูงถึง 3.33 ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) เมื่อเทียบกับความเข้มข้น 2% (Table 2) ในขณะที่สารสังเคราะห์เมทิลยูจินอลต้องใช้เวลานานถึง 240 นาทีถึงจะเริ่มมีประสิทธิภาพ ที่ความเข้มข้น 12% มีประสิทธิภาพในการดึงดูด 2.67 โดยมีชุดควบคุม คือ Alc.95% (Table 3) จากผลการทดลองสามารถบอกได้ว่าน้ำมันหอมระเหยจากชะพลูซึ่งมีความเข้มข้น 12% มีประสิทธิภาพในการดึงดูดแมลงวันผลไม้ (เพศผู้) ชนิด *Bactrocera dorsalis* Hendel ได้เป็นอย่างดี ซึ่งจากรายงานของทวิศักดิ์ [8] พบว่าการใช้กับดักร่วมกับสารสังเคราะห์เมทิลยูจินอลสามารถดึงดูดแมลงวันผลไม้ชนิด *Bactrocera dorsalis* ได้ดี ในขณะที่ผลการทดลองในห้องปฏิบัติการพบว่าน้ำมันหอมระเหยจากชะพลูซึ่งมีประสิทธิภาพทั้งการดึงดูดและใช้เวลาน้อยกว่าสารสังเคราะห์เมทิลยูจินอลอยู่มาก ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Haider *et al.*, (2011) [6] พบว่าแมลงวันผลไม้มีความต้านทานต่อสารสังเคราะห์มากขึ้น

Table 2 Attractant efficacy of essential oil from *Piper colubrinum* Link at concentrations of 0,2,4,6,8,10 and 12% at 180 minutes, volume 100 μ l on the male of oriental fruit fly, *Bactrocera dorsalis*.

Essential oil (<i>Piper colubrinum</i> Link.)						
Concentration (%)	Attraction (%)					
0	0.00 $\pm$ 0.00	-	-	-	-	-
2	5.67 $\pm$ 0.58 ^A	1.67 $\pm$ 0.58 ^B	-	-	-	-
4	-	4.67 $\pm$ 1.15 ^A	2.33 $\pm$ 0.58 ^A	-	-	-
6	-	-	4.00 $\pm$ 1.00 ^A	2.33 $\pm$ 0.58 ^B	-	-
8	-	-	-	4.33 $\pm$ 0.58 ^A	1.67 $\pm$ 1.58 ^B	-
10	-	-	-	-	3.00 $\pm$ 0.00 ^A	2.67 $\pm$ 0.58 ^A
12	-	-	-	-	-	3.33 $\pm$ 0.58 ^A
P	<0.001	>0.0158	>0.0668	>0.0132	>0.0161	>0.232
Sig.	**	**	*	**	**	*
%CV	14.43	28.82	25.78	17.32	17.5	19.25

Table 3 Attractant efficacy of synthetic methyl eugenol (ME) at concentrations of 0,2,4,6,8,10 and 12% at 240 minutes, volume 100 μ l on the male of oriental fruit fly, *Bactrocera dorsalis*.

Methyl eugenol						
Concentration (%)	Attraction (%)					
0	0.00 $\pm$ 0.00	-	-	-	-	-
2	2.67 $\pm$ 0.58 ^A	1.67 $\pm$ 0.58 ^B	-	-	-	-
4	-	4.33 $\pm$ 0.58 ^A	2.33 $\pm$ 0.58 ^B	-	-	-
6	-	-	4.67 $\pm$ 0.58 ^A	2.33 $\pm$ 0.58 ^B	-	-
8	-	-	-	5.67 $\pm$ 0.58 ^A	4.67 $\pm$ 0.58 ^A	-
10	-	-	-	-	3.67 $\pm$ 0.58 ^A	3.33 $\pm$ 1.52 ^A
12	-	-	-	-	-	2.67 $\pm$ 1.15 ^A
P	>0.0013	>0.0048	>0.0078	>0.0021	>0.1012	>0.579
Sig.	**	**	**	**	*	*
CV (%)	30.62	19.25	16.5	14.43	13.85	45.13

4. สรุปผลการวิจัย

จากการทดสอบโดยวิธีการดึงดูดของน้ำมันหอมระเหยจากชะพลูช้างและสารสังเคราะห์เมทิลยูจินอลต่อแมลงวันผลไม้ (เพศผู้) ที่ความเข้มข้น 2,4,6,8,10 และ 12% จากผลการทดลองพบว่าน้ำมันหอมระเหยจากชะพลูช้างใช้เวลาในการดึงดูดเพียง 180 นาทีเท่านั้นจึงมีประสิทธิภาพในการดึงดูดสูง ในขณะที่สารสังเคราะห์เมทิลยูจินอลต้องใช้เวลาถึง 240 นาทีถึงจะมีประสิทธิภาพในการดึงดูด ซึ่งข้อมูลเหล่านี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการดึงดูดแมลงวันผลไม้ (เพศผู้) ในสภาพแปลงเพื่อลดอัตราการขยายพันธุ์ของแมลงวันผลไม้ อีกทั้งน้ำมันหอมระเหยจากชะพลูช้างนั้นเป็นสารจากธรรมชาติ จึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่ดีให้กับเกษตรกร เนื่องจากไม่เป็นอันตรายต่อผู้ใช้และไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนจากหน่วยงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) โครงการการพัฒนาผลิตภัณฑ์น้ำมันหอมระเหยจากพืชสมุนไพรในการควบคุมแมลงศัตรูพืชและสัตว์ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ ประจำปี 2565 (สัญญาเลขที่ N12A650837)

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักควบคุมพืชและวัสดุการเกษตร. 2564. รายละเอียดการนำเข้าวัตถุดิบอันตรายทางการเกษตร ปี 2564. กรมวิชาการเกษตร. เข้าถึงได้จาก : เว็บไซต์ https://www.doa.go.th/ard/?page_id=386 (เข้าถึงเมื่อ 13 พฤศจิกายน 2566).
- [2] จันทนา ใจจิตร, สัญญณี ศรีศุข, อรทัย เอื้อตระกูล, สุรพล สุขพันธ์, ศิริจันทร์ อินทร์น้อย, อรัญญา ภู่วิไล, วิไลวรรณ พรหมคำ, วันชัย ถนอมทรัพย์. 2561. การใช้เทคโนโลยีแบบผสมผสานเพื่อควบคุมแมลงวันผลไม้ในชมพู ฝรั่ง และพุทรา ในพื้นที่จังหวัดราชบุรี นครปฐม และสมุทรสาคร. วารสารวิจัยเกษตรไทย, ปีที่ 36(ฉบับที่ 3), หน้า 302-315.
- [3] ประพันธ์ ปรานโสภณ และมานนท์ สุตันทวงศ์. 2555. “การใช้กับ ดักแมลงวันผลไม้”. แหล่งข้อมูล <http://www0.tint.or.th/nkc/.../nkc5001q.html> ค้นเมื่อ 15 มกราคม 2562.

- [4] ชลธิรา แสงศิริ ไพพรรณ แพเจริญ พิไลวรรณ เพชรเลี่ยม และ ธนพร ขจรผล. 2557. ผลของรูปแบบกับดักและเหยื่อล่อที่มีต่อแมลงวันผลไม้. แก่นเกษตร 42 ฉบับพิเศษ 3 :674-679.
- [5] ณัฐพงศ์ เมธีธรรมสรณ์, และ ดวงเดือน วัฏฏานุรักษ์. "ผลของสารสกัดหยาบจากใบสาบเสือในการควบคุมแมลงวันผลไม้ *Bactrocera dorsalis* (Hendel)" วารสารวิจัยไร่ไพพรรณี ปีที่ 12, ฉบับที่ 2 (พฤษภาคม - สิงหาคม 2561)
- [6] Haider, H., S. Ahmed and R.R. Khan. (2011). Determination of level of insecticide resistance in fruit fly, *Bactrocera zonata* (Saunders) (Diptera: Tephritidae) by bait bioassay. Int. J. Agri and Bio. 13: 815-8
- [7] Qian, Y., Zhang, J., Yu, Y., Jiang, Q., Yan, B., Song, X., Yu, X., & Cheng, Z. 2023. Preparation of long-lasting releasing methyl eugenol fiber membrane and its trapping analysis on *Bactrocera dorsalis*. Polymer, Volume 285.
- [8] Von Ellenrieder, N. 2004. Oriental fruit fly (*Bactrocera dorsalis* complex). California Department of Food and Agriculture. Available online at http://www.cdffa.ca.gov/phpps/ppd/PDF/bactrocera_dorsalis_complex.pdf
- [9] กรกช อินทราพิชชุ ญัฐวุฒิ ธาณี. 2554. การควบคุมโดยชีววิธีแมลงวันผลไม้ด้วยพืช. สำนักวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 85 หน้า.
- [10] Tan, K.-H., Wee, S.-L., Nishida, R., & Shelly, T. E. 2021. Attraction of feral *Bactrocera dorsalis* males (Diptera: Tephritidae) to natural versus commercial sources of methyl eugenol. [Journal of Asia-Pacific Entomology], Volume 24, Pages: 1095-1100.
- [11] อนงค์ ทองทับ. 2552. การใช้ใบกะเพราดึงดูดแมลงวันทองแทนฟีโรโมน. วารสารวิทยาศาสตร์แห่งมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี: 66-73.
- [12] การใช้งานเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ-แมสสเปกโตรมิเตอร์ เข้าถึงได้จาก <https://rmisc12.dmsc.moph.go.th/web/file/KM/4-1สรุปการเรียนรู้-แผนภูมิ%20GC-MS-MS.pdf> (เข้าถึงเมื่อวันที่ 3 มกราคม 2567)
- [13] van Emden, H.F., Vamvatsikos, P. and Hardie, J. (2018). Cultivar-specific plant odour preferences of a generalist aphid parasitoid *Aphidius colemani* and a possible mechanism for maternal priming of resistance to toxic plant chemistry. *Physiological Entomology*, 44(1), doi: <https://doi.org/10.1111/phen.12270>
- [14] Sarwar, M and M. Salman. (2015). Insecticides Resistance in Insect Pests or Vectors and Development of Novel Strategies to Combat Its Evolution. *Int.J. Bioinf and Biomed Engineer*. 1(3): 344-351

การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอาร์เอ็นเออินเตอร์เฟียร์เรนซ์เพื่อควบคุมเชื้อไวรัสสาเหตุโรคใบด่างมันสำปะหลัง The application of RNA interference (RNAi) technology to control the virus causing cassava mosaic disease

วรารัตน์ ศรีประพัฒน์^{1,*}, บุญเรือนรัตน์ เรืองวิเศษ¹, ภาณี สว่างศรี¹, ปิยนุช ศรชัย¹ และจิราภรณ์ จิระคกุล²

Wararat Sriprapat^{1,*}, Boonruanrat Ruangwised¹, Paranee Sawangsri¹, Piyanuch Sornchai¹ and Jiraporn Jirakukul²

¹สำนักวิจัยพัฒนาเทคโนโลยีชีวภาพ กรมวิชาการเกษตร ถนนรังสิต-นครนายก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี

²สถาบันพัฒนาและฝึกอบรมโรงงานต้นแบบ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร

¹Biotechnology Research and Development Office, Department of Agriculture, Ransit-Nakhonnayok Rd, Thanyaburi, Pathum Thani

²Pilot Plant Development and Training Institute, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok

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

บทคัดย่อ

โรคใบด่างมันสำปะหลังเป็นปัญหาสำคัญที่สร้างผลกระทบต่อการผลิตมันสำปะหลังของไทย เนื่องจากทำให้ผลผลิตมันสำปะหลังเสียหาย เกษตรกรไม่สามารถเก็บผลผลิตได้ โดยเชื้อไวรัส Sri Lankan Cassava Mosaic Virus (SLCMV) สามารถเข้าทำลายมันสำปะหลังได้ทุกระยะการเจริญเติบโต งานวิจัยนี้จะพัฒนาสารชีวภาพจากเทคโนโลยีอาร์เอ็นเออินเตอร์เฟียร์เรนซ์เพื่อลดอัตราการเกิดโรคในท่อนพันธุ์มันสำปะหลัง โดยทำการออกแบบและสังเคราะห์อาร์เอ็นเอสายคู่จากยีนของไวรัส SLCMV เป้าหมาย 3 ยีน ได้แก่ AV1, AV2 และ AC1 ซึ่งเกี่ยวข้องกับการสร้างโปรตีนห่อหุ้มอนุภาค การเพิ่มปริมาณไวรัส และการเคลื่อนย้ายไวรัสจากเซลล์ไปสู่ส่วนต่างๆ ของพืชอาศัย โดยเมื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพ dsRNA กับท่อนพันธุ์มันสำปะหลัง พบว่า dsRNA-AC1-2 สามารถลดระดับความรุนแรงของการเกิดโรคได้ดีที่สุด ส่งผลให้ท่อนพันธุ์มันสำปะหลังมีระดับการเกิดโรคเฉลี่ย เท่ากับ $28.33 \pm 1.44\%$ รองลงมาคือ dsRNA-AV1-3, dsRNA-AC1-1 และ dsRNA-AV1-2 ตามลำดับ ซึ่งจะท่อนพันธุ์มันสำปะหลังมีระดับการเกิดโรคเฉลี่ย เท่ากับ $35.83 \pm 1.44\%$, $52.5 \pm 2.5\%$ และ $54.17 \pm 1.44\%$ ตามลำดับ จากการตรวจสอบเชื้อไวรัสในท่อนพันธุ์มันสำปะหลังที่เป็นโรคใบด่างที่ผ่านการแช่ท่อนพันธุ์ด้วย dsRNA พบว่าบางท่อนพันธุ์ไม่สามารถตรวจพบเชื้อ SLCMV ได้ ซึ่งได้แก่ท่อนพันธุ์ที่แช่ใน dsRNA-AV1-1, dsRNA-AV1-2, dsRNA-AV1-3, dsRNA-AV2-1, dsRNA-AC1-1 และ dsRNA-AC1-2 แสดงว่า dsRNA สามารถลดการติดเชื้อไวรัสสาเหตุโรคใบด่างในท่อนพันธุ์ได้ 70% ส่งผลให้พืชมีระดับความรุนแรงของโรคลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม

คำสำคัญ: อาร์เอ็นเออินเตอร์เฟียร์เรนซ์, อาร์เอ็นเอสายคู่, โรคใบด่างมันสำปะหลัง, การควบคุมโรค

Abstract

Cassava mosaic disease (CMD) is a significant issue affecting cassava production in Thailand, causing considerable damage to cassava crops. Consequently, farmers struggle to harvest their crops, and the Sri Lankan Cassava Mosaic Virus (SLCMV) can destroy cassava at all stages of growth. This research will utilize RNA interference technology to reduce the incidence of CMD in cassava. This involves designing and synthesizing double-stranded RNA from the genes of the SLCMV, namely AV1, AV2, and AC1, which are associated with the production of capsid proteins, virus replication, and intracellular movement of the virus within plant tissues. When testing the effectiveness of dsRNA, it was found that dsRNA-AC1-2 was the most effective in reducing the severity of the disease, resulting in an average disease index level of $28.33 \pm 1.44\%$. This was followed by dsRNA-AV1-3, dsRNA-AC1-1, and dsRNA-AV1-2, with average disease incidence levels of $35.83 \pm 1.44\%$, $52.5 \pm 2.5\%$, and $54.17 \pm 1.44\%$, respectively. After analyzing cassava plants treated with dsRNA, it was found that certain cuttings, including those treated with dsRNA-AV1-1, dsRNA-AV1-2, dsRNA-AV1-3, dsRNA-AV2-1, dsRNA-AC1-1, and dsRNA-AC1-2, showed no visible signs of SLCMV infection. This indicates that dsRNA can reduce viral infection causing CMD in plants by 70%, resulting in a decrease in disease severity compared to the control group.

Keywords: RNA interference, cassava mosaic disease, double-stranded RNA, disease control

1. บทนำ

มันสำปะหลัง (*Manihot esculenta* Crantz) เป็นพืชเศรษฐกิจของไทยที่ทนทานต่อสภาพดินฟ้าอากาศที่แปรปรวนสามารถเจริญเติบโตได้ในพื้นที่ ๆ ดินมีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ เกษตรกรไทยสามารถปลูกมันสำปะหลังได้ทุกภาคและปลูกได้ตลอดปี จากรายงานในปี พ.ศ. 2563 พบว่าไทยผลิตมันสำปะหลังมากเป็นอันดับ 3 ของโลกรองจากไนจีเรียและคองโก [1] อย่างไรก็ตาม ปัญหาที่สร้างผลกระทบให้กับการผลิตมันสำปะหลังของประเทศไทยที่สุดคือโรคใบด่างมันสำปะหลัง (Cassava Mosaic Disease, CMD) ประเทศไทยพบการระบาดของโรคใบด่างมันสำปะหลังครั้งแรกในปี พ.ศ. 2561 สาเหตุเกิดจากเชื้อไวรัส Sri Lankan Cassava Mosaic Virus (SLCMV) ซึ่งเป็นโรคที่มีความสำคัญทำให้เกิดความเสียหายต่อมันสำปะหลัง 80-100 เปอร์เซ็นต์ เกษตรกรไม่สามารถเก็บผลผลิตได้ โดยเชื้อ SLCMV สามารถเข้าทำลายมันสำปะหลังได้ทุกระยะการเจริญเติบโต สามารถติดมากับท่อนพันธุ์ และมีแมลงหี้ยชวายเป็นแมลงพาหะ [2] ปัจจุบันโรคใบด่างมันสำปะหลังยังไม่มีวิธีรักษา [3] งานวิจัยนี้มีแนวคิดที่จะพัฒนาสารชีวภาพจากเทคโนโลยีอาร์เอ็นเออินเตอร์เฟียร์เรนซ์ (RNA interference, RNAi) เพื่อลดอัตราการติดเชื้อไวรัส SLCMV ในท่อนพันธุ์มันสำปะหลัง โดย RNAi เป็นกระบวนการรบกวนการทำงานของ RNA เป้าหมายที่มีอยู่ในเซลล์ของสิ่งมีชีวิตด้วยการส่งผ่าน RNA สังเคราะห์เข้าไปในสิ่งมีชีวิตเป้าหมาย อาจมีทั้งการสังเคราะห์ RNA สายคู่ขนาดเล็ก (small interfering RNA, siRNA) หรืออาจสังเคราะห์เป็นอาร์เอ็นเอสายคู่ (double stranded RNA, dsRNA) ดังนั้น RNA ที่สังเคราะห์ได้ภายนอกของเป้าหมาย เมื่อถูกส่งเข้าไปภายในเซลล์ของเป้าหมายจะมีผลไปรบกวนการทำงานของ RNA ภายในเซลล์ ส่งผลทำให้เกิดความผิดปกติขึ้น ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี RNAi เพื่อเป็นเครื่องมือในการควบคุมโรคและแมลงศัตรูพืช เช่น การประยุกต์ใช้เพื่อควบคุมโรคใบด่างที่เกิดจากเชื้อไวรัส Tobacco Etch Virus (TEV) และการยับยั้งโรคเหี่ยวที่เกิดจากเชื้อรา *Verticillium* spp. เป็นต้น [4-5] ซึ่งข้อมูลที่ได้งานวิจัยนี้จะเป็นทางเลือกในการควบคุมการแพร่ระบาดของโรคใบด่างมันสำปะหลังอย่างยั่งยืนและเป็นมิตรสภาพแวดล้อม สอดคล้องกับยุทธศาสตร์ชาติและนโยบายกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ที่มุ่งเน้นการนำเทคโนโลยีชีวภาพและนวัตกรรมจากงานวิจัยขยายผลไปสู่ภาคการเกษตร เพื่อนำไปใช้ในการแก้ปัญหาได้ต่อไป

2. วิธีการศึกษา

2.1 การสังเคราะห์ dsRNA เพื่อการยับยั้งไวรัสสาเหตุโรคใบด่างมันสำปะหลัง

ออกแบบ RNA สายคู่หรือ dsRNA เริ่มจากการหาตำแหน่งยีนเป้าหมายบนจีโนมเชื้อไวรัส โดยการใช้โปรแกรมทาง bioinformatics เพื่อช่วยในการหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่กระบวนการ RNAi จะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยยีนเชื้อ Sri Lankan cassava mosaic virus เป้าหมายคือยีนที่เกี่ยวข้องกับ nuclear shuttle protein, movement protein, AV2 protein และ coat protein ของ Sri Lankan cassava mosaic virus จากนั้นทำการผลิต vector-dsRNA และผลิต dsRNA ด้วยเทคนิค *In vivo* transcription โดยจะเพิ่มปริมาณในระบบเซลล์แบคทีเรีย (*E. coli*) โดยเฉพาะเลี้ยงในระบบถังหมักแบบ spinner flask เป็นเวลา 16 ชั่วโมง จากนั้นทำการกระตุ้นการผลิต dsRNA ด้วย Isopropyl-beta-D-thiogalactopyranoside และทำการสกัด dsRNA ด้วย Trizol [6]

2.2 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของ dsRNA ที่มีผลต่อการควบคุมโรคใบด่างมันสำปะหลัง

ทดสอบหา dsRNA ที่สามารถลดการเพิ่มจำนวนของเชื้อไวรัสเป้าหมายโดยทำการทดสอบแบบ Infectivity test โดยนำท่อนมันสำปะหลังพันธุ์เกษตรศาสตร์ 50 มาฆ่าเชื้อบริเวณผิวด้วย Sodium hypochlorite ความเข้มข้น 20% (v/v) จากนั้นทำการตัดต้นมันสำปะหลังให้มีความยาวท่อนละประมาณ 7 เซนติเมตร แล้วทำการแช่โคนท่อนมันสำปะหลังลงใน dsRNA ที่ผลิตได้ที่มีความเข้มข้น 1,500 ng/mL โดยแช่เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปปลูกลงดินปลูก ทำการรดน้ำทุกวัน ทดสอบเป็นเวลา 1-4 สัปดาห์ สังเกตลักษณะระดับความรุนแรงของโรค (Disease severity) โดยดัดแปลงจาก Terry [7] โดยแบ่งระดับความรุนแรงออกเป็น 5 ระดับ (0-4) คือ ระดับที่ 0 คือไม่แสดงอาการของโรค ระดับที่ 1 คือแสดงอาการต่างเล็กน้อยบนแผ่นใบ ระดับที่ 2 คือแสดงอาการต่างเต็มบนแผ่นใบ และใบเริ่มม้วนลู่รูป ระดับที่ 3 คือแสดงอาการต่างทั่วทั้งใบ ใบบิดม้วนงอ เริ่มลู่รูป และระดับที่ 4 คือแสดงอาการใบบิดม้วนงอ ใบลู่รูปอย่างรุนแรง จากนั้นนำค่ามาวิเคราะห์ดัชนีการเกิดโรค (Disease index, DI) [8] ดังสมการ

$$\%DI = \frac{(0 \times N_0) + (1 \times N_1) + (2 \times N_2) + (3 \times N_3) + (4 \times N_4)}{N \times C} \times 100$$

เมื่อ	0-4	= คะแนนความรุนแรงของโรค
	N_0-N_4	= จำนวนต้นที่เกิดโรคในแต่ละระดับ
	N	= จำนวนพืชที่ประเมินโรคทั้งหมด
	C	= ระดับคะแนนความรุนแรงของโรคสูงสุด

จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างใบมันสำปะหลังจากการทดสอบจำนวน 1 กรัม ตัดให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ บดด้วยโกร่งให้ละเอียด แล้วทำการสกัดดีเอ็นเอด้วยวิธี CTAB ตามวิธีการของ Agrawal และคณะ [9] แล้วจึงนำไปตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PCR โดยใช้ไพรเมอร์ที่จำเพาะต่อยีน AV1 ของเชื้อไวรัส SLCMV (forward: 5'-GTT GAA GGT ACT TAT TCC C-3' และ reverse: 5'-TAT TAA TAC GGT TGT AAA CGC-3') [10]

2.3 แผนการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อก (Randomized Complete Block Design; RCB) 7 กรรมวิธี 3 ซ้ำๆ ละ 10 ท่อน พันธุ์มันสำปะหลัง โดยใช้น้ำกลั่นนิ่งฆ่าเชื้อเป็นชุดควบคุม การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างตัวแปรจะใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95% ($p < 0.05$) (SPSS version 20)

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

เมื่อออกแบบและผลิต RNA สายคู่หรือ dsRNA ได้ 6 รูปแบบ คือ dsRNA-AV1-1, dsRNA-AV1-2, dsRNA-AV1-3, dsRNA-AV2-1, dsRNA-AC1-1 และ dsRNA-AC1-2 จาก *E. coli* ในถังหมักแบบ spinner flask ในอาหาร LB ปริมาตร 5000 ml จะได้ dsRNA ความเข้มข้นในช่วง 2,300-2,500 ng/ μ l เมื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพ dsRNA ในการยับยั้งการเกิดโรคกับท่อนพันธุ์มันสำปะหลังพันธุ์เกษตรศาสตร์ 50 ที่ติดเชื้อ โดยใช้ความเข้มข้นของ dsRNA 1,500 ng/ μ l พบว่า dsRNA-AC1-2 สามารถลดระดับความรุนแรงของการเกิดโรคได้ดีที่สุด ส่งผลให้ท่อนมันสำปะหลังมีระดับการเกิดโรคเฉลี่ย เท่ากับ $28.33 \pm 1.44\%$ รองลงมาคือ dsRNA-AV1-3, dsRNA-AC1-1 และ dsRNA-AV1-2 ตามลำดับ โดยจะทำให้มันสำปะหลังมีระดับการเกิดโรคเฉลี่ย เท่ากับ $35.83 \pm 1.44\%$, $52.5 \pm 2.5\%$ และ $54.17 \pm 1.44\%$ ตามลำดับ ซึ่งผลการวิเคราะห์ระดับความรุนแรงของโรคและดัชนีการเกิดโรคของท่อนพันธุ์มันสำปะหลังจากไวรัส SLCMV เมื่อเพาะเลี้ยงเป็นระยะเวลา 30 วัน แสดงดังตารางที่ 1 และภาพที่ 1

Table 1 The average severity values of cassava after 30 days of treatment with dsRNA-AV1-1, dsRNA-AV1-2, dsRNA-AV1-3, dsRNA-AV2-1, dsRNA-AC1-1, and dsRNA-AC1-2 are presented. The data represent the means of three individual experiments.

Treatment	Disease severity				
	0	1	2	3	4
Control	0	0	0	1.33	8.67
dsRNA-AV1-1	0	0	2.33	4.33	3.33
dsRNA-AV1-2	0.67	3	2.33	2	2
dsRNA-AV1-3	1.67	3.33	4	1	0
dsRNA-AV2-1	0	0	2.33	3	4.67
dsRNA-AC1-1	1	1.67	2.67	4.67	0
dsRNA-AC1-2	3	3.67	2.33	1	0

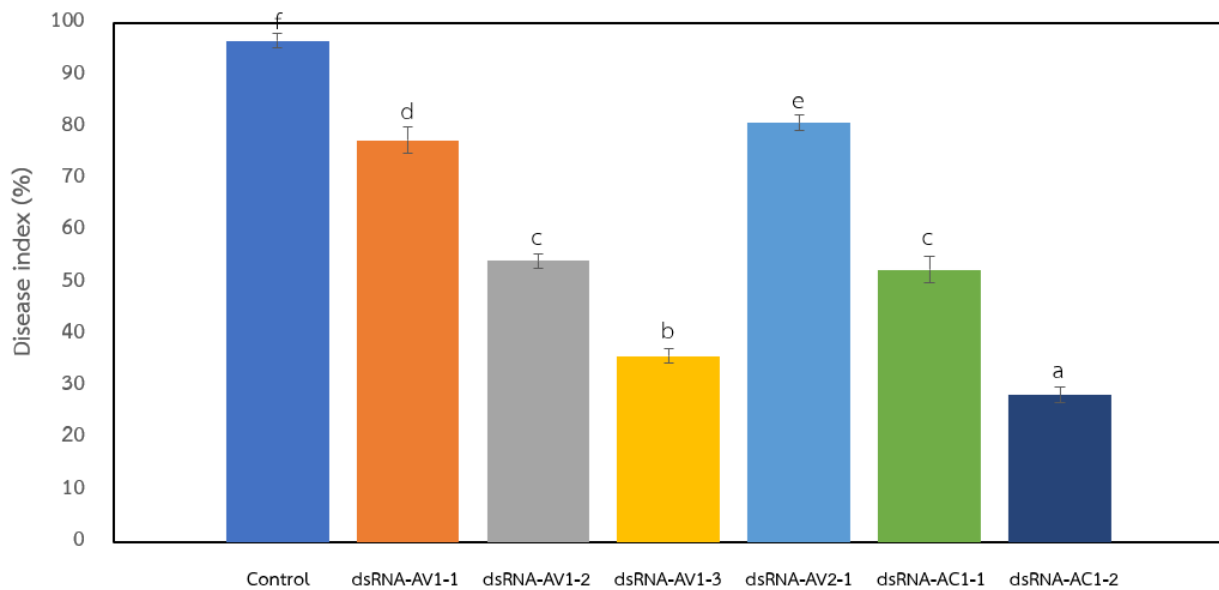


Figure 1 Impact of dsRNA on cassava plant disease index (%). The values are expressed as means $\pm$ standard deviations. There is no significant difference ($p < 0.05$) between the values in the same letter.

จากการตรวจสอบเชื้อไวรัสในท่อนพันธุ์มันสำปะหลังที่เป็นโรคใบด่างที่ผ่านการแช่ท่อนพันธุ์ด้วย dsRNA พบว่าเมื่อนำมันสำปะหลังมาสกัดดีเอ็นเอเพื่อการวิเคราะห์การติดเชื้อไวรัส SLCMV ด้วยเทคนิค PCR พบว่าบางท่อนพันธุ์ไม่สามารถตรวจพบเชื้อ SLCMV ได้ ซึ่งได้แก่ท่อนพันธุ์ที่แช่ใน dsRNA-AV1-1, dsRNA-AV1-2, dsRNA-AV1-3, dsRNA-AV2-1, dsRNA-AC1-1 และ dsRNA-AC1-2 แสดงว่า dsRNA สามารถลดการติดเชื้อไวรัสสาเหตุใบด่างในท่อนพันธุ์ได้ ส่งผลให้พืชแสดงระดับความรุนแรงของโรคลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (ภาพที่ 2-3) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ntui และคณะ (2015) [11] ที่ศึกษาการดัดแปลงพันธุกรรมมันสำปะหลังเพื่อให้เกิดความต้านทานโรคใบด่างด้วยกระบวนการ RNAi โดยใช้ยีน AV1 และ AV2 ของเชื้อไวรัส SLCMV เป็นต้นแบบในการสังเคราะห์ vector ซึ่งผลการวิจัยพบว่ามันสำปะหลังดัดแปลงพันธุกรรมที่มีการแสดงออกของ hairpin SLCMV AV2::AV1 มีความต้านทานต่อการเกิดโรคใบด่าง ซึ่งความต้านทานมีความสัมพันธ์กับการกระบวนการรบกวนการทำงานของ RNA หลังการแปลรหัส (post-transcription) เนื่องจากเกิดการผลิต siRNA ที่จำเพาะต่อยีนไวรัส นอกจากนี้ งานวิจัยของ Tuo และคณะ (2021) [12] ที่ศึกษาการดัดแปลงพันธุกรรมมันสำปะหลังเพื่อให้เกิดความต้านทานโรคใบด่างจากเชื้อไวรัส Cassava Common Mosaic Virus (CsCMV) ด้วยกระบวนการ RNAi พบว่ามันสำปะหลังดัดแปลงพันธุกรรมสามารถต้านทานการเกิดโรคใบด่างได้

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากพืชดัดแปลงพันธุกรรมยังไม่ถูกยอมรับในหลายประเทศ ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงทำการประยุกต์ใช้เทคนิคการส่ง dsRNA จากภายนอก หรือ Exogenous dsRNA โดยทำการจุ่มแช่ท่อนพันธุ์ด้วย dsRNA เพื่อให้เกิดกระบวนการ RNAi ที่สามารถเพิ่มความต้านทานโรคใบด่างในมันสำปะหลังได้ ซึ่งการประยุกต์ใช้ Exogenous dsRNA ถูกศึกษาแล้วในพืชหลายชนิด เช่น งานวิจัยของ McLoughlin และคณะ (2018) และงานวิจัยของ Koch และคณะ (2016) ซึ่งได้ทำการฉีดพ่น dsRNA และ siRNA ให้กับต้นคาโนลาและต้นข้าวบาร์เลย์ โดย dsRNA และ siRNA ถูกออกแบบจะมีความจำเพาะกับเชื้อ *Sclerotinia sclerotiorum* และ *Botrytis cinerea* ที่เป็นสาเหตุโรครดต้นเน่าในคาโนลา และเชื้อ *Fusarium graminearum* สาเหตุโรค Fusarium head blight (FHB) ในข้าวบาร์เลย์ [13-14] โดยพบว่าเทคนิคนี้สามารถช่วยลดการเกิดโรคต้นเน่าในคาโนลาและข้าวบาร์เลย์ได้เช่นเดียวกัน ซึ่งพืชจะดูดซึมและเคลื่อนย้ายสารเหล่านี้ไปในเนื้อเยื่อพืช โดยจะเคลื่อนย้ายผ่านทางระบบท่อลำเลียงของพืช (plant vascular system) จากนั้น siRNA และ dsRNA เหล่านี้จะถูกดูดซึมเข้าไปในเซลล์ของราก่อโรค ส่งผลให้สามารถลดการเกิดโรคในพืช

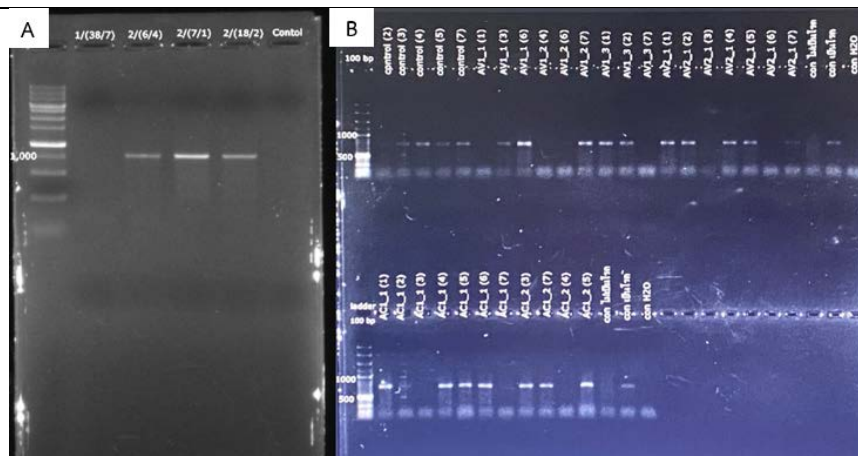


Figure 2 PCR diagnostic technique was employed to identify Sri Lankan cassava mosaic disease in cassava treated with dsRNA-AV1-1, dsRNA-AV1-2, dsRNA-AV1-3, dsRNA-AV2-1, dsRNA-AC1-1, and dsRNA-AC1-2 on (A) day 0 and (B) day 30.

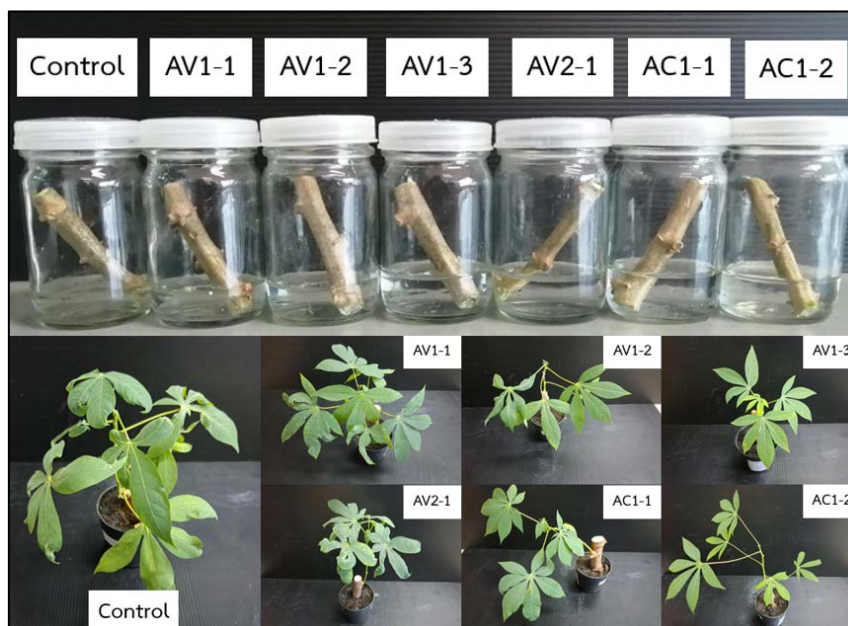


Figure 3 Cassava mosaic disease symptoms in cassava after treatment with dsRNA-AV1-1, dsRNA-AV1-2, dsRNA-AV1-3, dsRNA-AV2-1, dsRNA-AC1-1, and dsRNA-AC1-2 for 30 days.

4. สรุป

การสังเคราะห์ dsRNA จากยีน AV1, AV2 และ AC1 ของไวรัส SLCMV ซึ่งเกี่ยวข้องกับการสร้างโปรตีนห่อหุ้มอนุภาค การเพิ่มปริมาณไวรัส และการเคลื่อนย้ายไวรัสจากเซลล์ไปสู่ส่วนต่างๆ ของพืชอาศัย โดยเมื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพ dsRNA กับท่อนพันธุ์มันสำปะหลัง พบว่า dsRNA-AC1-2 สามารถลดระดับความรุนแรงของการเกิดโรคได้ดีที่สุด ส่งผลให้ท่อนพันธุ์มันสำปะหลัง มีระดับการเกิดโรคเฉลี่ย เท่ากับ $28.33 \pm 1.44\%$ รองลงมาคือ dsRNA-AV1-3, dsRNA-AC1-1 และ dsRNA-AV1-2 ตามลำดับ ซึ่งส่งผลให้มันสำปะหลังมีระดับการเกิดโรคเฉลี่ย เท่ากับ $35.83 \pm 1.44\%$, $52.5 \pm 2.5\%$ และ $54.17 \pm 1.44\%$ ตามลำดับ จากการตรวจสอบเชื้อไวรัสในท่อนพันธุ์มันสำปะหลังที่เป็นโรคใบด่างที่ผ่านการแช่ท่อนพันธุ์ด้วย dsRNA พบว่าบางท่อนพันธุ์ไม่สามารถตรวจพบเชื้อ SLCMV ได้ ส่งผลให้พืชมีระดับความรุนแรงของโรคลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ที่สนับสนุนงบประมาณในการวิจัย (ทะเบียนวิจัย FF65-13-01-65-02-03-66) ขอขอบคุณ คุณธิญญ์รัส นาครักษ์จิระโชติ คุณศรัณภรณ์ งามล้วน คุณทรงพล พรหมเย็น และคุณอัครชัย บุรมย์ สำนักวิจัยพัฒนาเทคโนโลยีชีวภาพ กรมวิชาการเกษตร ที่ช่วยในการทดสอบก่อนพันธุ์มันสำปะหลัง

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Office of Agricultural Economics. 2022. Agricultural Statistics of Thailand 2021. Office of Agricultural Economics, Bangkok.
- [2] National Agricultural Big Data Center. 2020. Analysis of situation of cassava mosaic disease. เข้าถึงได้จาก : เว็บไซต์ <http://www.nabc.go.th/disaster/baidang> (เข้าถึงเมื่อ 12 ธันวาคม 2563).
- [3] Komchadluek. 2021. Department of Agricultural Extension accelerates the cure of cassava mosaic disease, joins KU researchers to find disease-resistant varieties to plant instead. เข้าถึงได้จาก : เว็บไซต์ <http://www.komchadluek.net/news/457726> (เข้าถึงเมื่อ 10 ธันวาคม 2564).
- [4] Lindbo, J.A., Silva-Rosales, L., Proebsting, W.M. and Dougherty, W.G. 1993. Induction of a highly specific antiviral state in transgenic plants: implications for regulation of gene expression and virus resistance. *Plant Cell*. 5(12): 1749-1759.
- [5] Zhang, T., Jin, Y., Zhao, J.H., Gao, F., Zhou, B.J., Fang, Y.Y. and Guo, H.S. 2016. Host-induced gene silencing of the target gene in fungal cells confers effective resistance to the cotton wilt disease pathogen *Verticillium dahliae*. *Mol. Plant*. 9: 939-942.
- [6] Afifah, A., Nounurai, P., Ferniah, R.S., Kusumaningrum, H.P., Wulandari, D. and Budiharjo, A. 2020. An optimised trizol-based protocol for the improvement of rna extraction yield of tomato stem. *Pertanika J. Trop. Agric. Sci*. 44(3): 673-684.
- [7] Terry, E.R. 1976. Description and evaluation of cassava mosaic disease in Africa. In E. Terry and R. MacIntyre (Eds.), *The International Exchange and Testing of Cassava Germ Plasm in Africa: proceedings of an interdisciplinary workshop*. Ottawa, Canada.
- [8] McKinney, H.H. 1923. A new system of grading plant diseases. *J. Agric. Res*. 26: 195-218.
- [9] Agrawal, G. K., Pandey, R. N. and Agrawal, V.P. 1992. Isolation of DNA from *Cheorospondias asillaris* leaves. *Biotech. Biodiv. Lett*. 2: 19-24.
- [10] Saokham, K., Hemniam, N., Roekwan, S., Hunsawattanakul, S., Thawinampan, J. and Siriwan, W. 2021. Survey and molecular detection of Sri Lankan cassava mosaic virus in Thailand. *PLoS One*. 16(10): e0252846.
- [11] Ntui, V.O., Kong, K., Khan, R.S., Igawa, T., Janavi, G.J., Rabindran, R., Nakamura, I., Mii, M. 2015. Resistance to Sri Lankan cassava mosaic virus (SLCMV) in genetically engineered cassava cv. KU50 through RNA silencing. *PLoS One*. 10(4): e0120551.
- [12] Tuo, D., Zhou, P., Yan, P., Cui, H., Liu, Y., Wang, H., Yang, X., Liao, W., Sun, D., Li, X., Shen, W. 2021. A cassava common mosaic virus vector for virus-induced gene silencing in cassava. *Plant Methods*. 17(1): 74.
- [13] McLoughlin, A.G., Wytinck, N., Walker, P.L., Girard, I.J., Rashid, K.Y., de Kievit, T., Fernando, W.G.D., Whyard, S. and Belmonte, M.F. 2018. Identification and application of exogenous dsRNA confers plant protection against *Sclerotinia sclerotiorum* and *Botrytis cinerea*. *Sci. Rep*. 8(1): 7320.
- [14] Koch, A., Beidenkopf, D., Furch, A., Weber, L., Rossbach, O. and Abdellatef, E. 2016. An RNAi-based control of *Fusarium graminearum* infections through spraying of long dsRNAs involves a plant passage and is controlled by the fungal silencing machinery. *PLoS Pathog*. 12: e1005901.

ผลของอุณหภูมิน้ำทะเลที่ต่างกันต่อ อัตรารอด อัตราการลงเกาะ อัตราการเปลี่ยนระยะ พฤติกรรมการลงเกาะ
และพฤติกรรมการกินอาหารของเพรียงหิน (*Amphibalanus amphitrite*)
Effect of different sea water temperature on survival rate, settlement rate,
rate of metamorphosis, settlement behavior and feeding behavior of rock barnacle
(*Amphibalanus amphitrite*)

มัทคุเทศก์ หมดทองอ่อน^{1,*} และ มณฑล แก่นมณี¹
Makkutedd Hmodtongoon^{1,*} and Monthon Ganmanee¹

¹หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

¹Program in Fisheries Science, Faculty of Agricultural Technology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520 Thailand

*Corresponding author: Makkutedd Hmodtongoon, e-mail address: 63604051@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษาในครั้งนี้ใช้เพรียงหิน *Amphibalanus amphitrite* เพื่อทดสอบผลจากอุณหภูมิน้ำทะเล 3 ระดับคือ 30°C, 32°C และ 35°C ต่อ อัตรารอด อัตราการลงเกาะ อัตราการเปลี่ยนระยะ พฤติกรรมการลงเกาะของตัวอ่อนเพรียงหินระยะ Nauplius, Cyprids, Juvenile และพฤติกรรมการกินอาหารของเพรียงหินระยะ Adult โดยอัตรารอดของระยะ Nauplius V ที่อุณหภูมิ 30°C, 32°C และ 35°C เท่ากับ 97.54±2.00%, 96.36±2.97% และ 73.49±3.81% ตามลำดับ อัตรารอดของระยะ Nauplius VI ที่อุณหภูมิ 30°C (70.72±6.51%) สูงกว่าที่อุณหภูมิ 32°C (46.57±5.50%) และที่อุณหภูมิ 35°C ตัวอ่อนในระยะดังกล่าวตายทั้งหมด อัตรารอดของระยะ Cyprids ในอุณหภูมิ 32°C (31.02±5.29%) สูงกว่าที่อุณหภูมิ 30°C (7.74±1.66%) และระยะ Juvenile ในอุณหภูมิ 32°C (19.94±5.71%) สูงกว่าที่อุณหภูมิ 30°C (3.91±0.85%) อัตราการลงเกาะของระยะ Cyprids ที่ 32°C (28.13±7.40%) สูงกว่า 30°C (5.21±1.61%) และพฤติกรรมการลงเกาะที่ 32°C มีอัตราการลงเกาะแบบชั่วคราว (10.16±4.82%) และอัตราการลงเกาะแบบถาวร (21.65±4.23%) สูงกว่า 30°C (6.91±1.89% และ 8.71±2.09%) ตามลำดับ สำหรับการเปลี่ยนระยะจาก Nauplius V-VI, Nauplius VI-Cyprids และ Cyprids-Juvenile ที่อุณหภูมิ 32°C (283, 3.50 และ 29.50 ชั่วโมง) ใช้เวลาน้อยกว่าอุณหภูมิ 30°C (378, 12 และ 100 ชั่วโมง) และอัตราพฤติกรรมการกินอาหารสูงสุดที่อุณหภูมิ 32°C, 30°C และ 35°C เท่ากับ 412±73, 389±164 และ 347±134 ครั้ง/10 นาที ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าพฤติกรรมการกินอาหารของเพรียงหินระยะ Adult ลดลงเมื่ออุณหภูมิน้ำทะเลเพิ่มสูงขึ้นและมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิผิวน้ำทะเลเพิ่มสูงขึ้นเป็น 35°C จะทำให้อัตรารอดของประชากรเพรียงหินระยะ Nauplius และอัตราการกินอาหารของตัวเต็มวัยลดลงอย่างเห็นได้ชัด

คำสำคัญ: อุณหภูมิน้ำทะเล, การรอด, การลงเกาะ, การกินอาหาร, ตัวอ่อนเพรียงหิน

Abstract

This study used rock barnacles *Amphibalanus amphitrite* to test the effect of three levels of sea temperature 30°C, 32°C, and 35°C on survival rate, settlement rate, rate of metamorphosis, settlement behavior of nauplius, cyprids, juvenile larvae and feeding behavior of adult rock barnacles. The survival rate of the Nauplius V stage at 30°C, 32°C, and 35°C equal to 97.54±2.00%, 96.36±2.97% and 73.49±3.81% respectively. The survival rate of the nauplius VI stage at 30°C (70.72 ±6.51%) was higher than that at 32°C (46.57±5.50%) and at 35°C all larvae at that stage died. The survival rate of the cyprids stage at 32°C (31.02±5.29%) was higher than that at 30°C (7.74±1.66%) and the juvenile stage at 32°C (19.94±5.71%) was higher than that at 30°C (3.91±0.85%). The settlement rate of cyprids at 32°C (28.13±7.40%) was higher than that at 30°C (5.21±1.61%) and the

settlement behavior at 32°C had a temporary settlement rate of $10.16 \pm 4.82\%$ and a permanent settlement rate, $21.65 \pm 4.23\%$, was significantly higher than that at 30°C ($6.91 \pm 1.89\%$ and $8.71 \pm 2.09\%$), respectively. For the metamorphosis from Nauplius V-VI, Nauplius VI-Cyprids and Cyprids-Juvenile at 32°C (283, 3.50 and 29.50 hour) it took less time than at 30°C (378, 12 and 100 hour) and the feeding behavior rate maximum intake at 32°C, 30°C, and 35°C equal to 412 ± 73 , 389 ± 164 , and 347 ± 134 times/10 min, respectively. From the results of the experiment, it was found that the feeding behavior rate of adult rock barnacles decreased when the sea temperature increased and was significantly different. Therefore, if the sea surface temperature increases to 35°C the survival rate of nauplius rock barnacle populations and the feeding behavior rate of adults will decrease significantly.

Keywords: Sea water temperature, Survival, Settlement, Feeding, Rock barnacle larva

1. บทนำ

ปัจจุบันอุณหภูมิของโลกเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับหลายศตวรรษที่ผ่านมาก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global warming) ภาวะดังกล่าวมีสาเหตุมาจากปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse effect) ซึ่งเกิดจากการสะสมของกลุ่มก๊าซเรือนกระจกที่ประกอบด้วย คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน คาร์บอนมอนอกไซด์ ไอน้ำ และออกไซด์ของไนโตรเจน ก๊าซเหล่านี้ส่วนใหญ่มาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล (Fossil fuel) และสารอินทรีย์ต่าง ๆ โดยเฉพาะซากพืช ทำให้การสะท้อนกลับของรังสีจากดวงอาทิตย์ที่เข้ามาสู่ผิวหน้าของโลกลดลง เกิดการสะสมความร้อนเอาไว้ในชั้นบรรยากาศและบริเวณผิวหน้าของโลก [1] ภาวะโลกร้อนจึงเป็นสาเหตุสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อทั้งทางตรงและทางอ้อมต่อประชากรสัตว์ทะเลส่วนใหญ่ที่เป็นสัตว์เลือดเย็น (Ectothermic animals) ซึ่งต้องปรับอุณหภูมิของร่างกายตามอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมภายนอก หากสิ่งมีชีวิตเหล่านี้อาศัยอยู่ในสภาพแวดล้อมใกล้กับขีดจำกัดอุณหภูมิสูงสุด (Maximum thermal limit) และมีแนวโน้มว่าอุณหภูมิพื้นผิวน้ำทะเลจะสูงขึ้นในอนาคต [2] จึงเป็นที่น่าสนใจว่าสัตว์ทะเลจะมีความสามารถในการอยู่รอดได้หรือไม่ โดยตั้งสมมติฐานไว้ 2 ประการคือ 1) ย้ายแหล่งที่อยู่อาศัยไปยังละติจูดที่สูงขึ้น 2) สร้างกลไกในการปรับตัวเพื่อให้สามารถอยู่รอดในสภาพที่อุณหภูมิสูงกว่าขีดจำกัดทั้งทางสรีระและทางพันธุกรรม ส่วนกลุ่มที่ไม่สามารถอยู่รอดได้ก็จะสูญพันธุ์ไปจากพื้นที่ดังกล่าวทำให้โครงสร้างของชุมชนในระบบนิเวศนั้นเปลี่ยนแปลงไปอย่างถาวร ดังนั้นสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในระบบนิเวศหาดหินของเขตน้ำขึ้น-น้ำลง (Intertidal rocky shore) โดยเฉพาะสัตว์หน้าดินเป็นกลุ่มเคลื่อนที่ได้ช้าหรือเกาะติดกับพื้นผิว (Sessile animals) ต้องประสบกับความเครียดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Thermal stress) เกือบตลอดเวลาจากอิทธิพลของระดับน้ำขึ้น-น้ำลงทั้งในรอบวันและตามฤดูกาล สิ่งมีชีวิตในกลุ่มนี้จึงมักใช้เป็นตัวแทนในการคาดการณ์ผลจากภาวะโลกร้อนต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตในทะเล [3]

เพรียงหิน (Rock barnacle หรือ Acorn barnacle) เป็นสัตว์ทะเลไม่มีกระดูกสันหลังกลุ่มครัสเตเชียน (Crustaceans) ที่พบได้ทั่วไปในชายฝั่งทะเลทั้งเขตร้อนและเขตอบอุ่นทั่วโลก ดำรงชีวิตด้วยการยึดติดลำตัวโดยใช้ส่วนฐาน (Shell base) กับพื้นผิวแข็ง (Hard substrata) ลำตัวประกอบด้วยเปลือกหุ้มรอบตัว (Shell plate) จำนวน 4-8 ชิ้นขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ กินอาหารโดยใช้รยางค์ (Cirri) ดักจับสารแขวนลอยในมวลน้ำ โดยช่วงที่เป็นตัวอ่อนจะดำรงชีวิตเป็นแพลงก์ตอนมีสองระยะ คือ 1) ระยะที่เป็นแพลงก์ตอน และ 2) ระยะที่ดำรงชีวิตด้วยการยึดติดกับพื้นผิวแข็งในเขตน้ำขึ้น-น้ำลง (Biphasic life cycle) ซึ่งได้รับอิทธิพลทั้งปัจจัยทางสภาพแวดล้อมในทะเล (Oceanic changes) และบนบก (Terrestrial changes) จึงเป็นสัตว์ทะเลชนิดหนึ่งที่นิยมใช้ในการศึกษาเกี่ยวกับความเครียดจากอุณหภูมิต่อการดำรงชีวิตในด้านต่าง ๆ ยกตัวอย่างเช่น Crickenberger และ Wetthey [4] ศึกษาอิทธิพลจากอุณหภูมิต่อการกระจายตัวของเพรียงหินด้วยการเก็บตัวอย่างตัวเต็มวัยมาเพาะเลี้ยงในอุณหภูมิ 4 ระดับ คือ 10, 13, 16 และ 19°C ผลคือไม่พบความแตกต่างของการปฏิสนธิระหว่างหน่วยการทดลอง 10°C (78%) และ 13°C (78%) ซึ่งมีอัตราการปฏิสนธิสูงสุด รองลงมาคือ 16°C (28%) และน้อยที่สุด 19°C (0%) Nishizaki และ Carrington [5] ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลจากอุณหภูมิที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการกินอาหารของเพรียงหินระยะ Juvenile จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการดักจับอาหารในมวลน้ำด้วย Cirri มีประสิทธิภาพสูงสุดในน้ำทะเลที่มีอุณหภูมิ 10-15°C เมื่อเพิ่มระดับอุณหภูมิจนถึง 25°C ปรากฏว่ามีอัตรา

การโบกพัด Cirri เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และ Konya และ Miki [6] ศึกษาเกี่ยวกับอุณหภูมิที่ส่งผลต่อการลงเกาะของตัวอ่อนเพรียงหินโดยเลี้ยงด้วยน้ำทะเลความเค็ม 32 ppt ที่อุณหภูมิ 6 ระดับ คือ 10, 15, 20, 25, 30 และ 37°C ผลการทดลองปรากฏว่าตัวอ่อนเพรียงหินระยะ Cyprids มากกว่า 50% ลงเกาะที่อุณหภูมิระหว่าง 20-30°C โดยที่อุณหภูมิ 15°C และ 37°C การลงเกาะลดลงเหลือเพียง 6% และไม่เกิดการลงเกาะที่อุณหภูมิ 10°C แต่ Cyprids ยังคงสามารถมีชีวิตรอดอยู่ได้ เป็นต้น

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยมีดังนี้ เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ 30°C, 32°C และ 35°C ต่อ

- 1) อัตรารอดและช่วงเวลาการเปลี่ยนระยะของตัวอ่อนระยะ Nauplius V-Juvenile อัตราการลงเกาะและพฤติกรรมการลงเกาะของตัวอ่อนระยะ Cyprids
- 2) พฤติกรรมการกินอาหารของเพรียงหิน *Amphibalanus amphitrite* ระยะ Adult

2. วิธีการศึกษา

2.1 สถานที่และการเก็บตัวอย่างพ่อแม่พันธุ์

เก็บตัวอย่างพ่อแม่พันธุ์เพรียงหิน *Amphibalanus amphitrite* ที่มีขนาด Rostro carinal diameter อยู่ระหว่าง 8-12 มม. จากชายฝั่งทะเลอ่าวไทย 3 แห่ง คือ หาดเจ้าสำราญ จังหวัดเพชรบุรี หาดทุ่งวัวแล่น และหาดพระจอมเกล้าฯ จังหวัดชุมพร ในเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2566 โดยในช่วงเวลาที่เก็บตัวอย่างมีอุณหภูมิผิวน้ำทะเลอยู่ระหว่าง 27-30°C และระดับความเค็ม 27-32 ppt ในเดือนพฤษภาคม [7] โดยใช้เหล็กสกัดส่วนฐาน (Cement gland) ที่เกาะยึดกับพื้นผิวให้เกิดความเสียหายกับตัวเพรียงหินน้อยที่สุด นำพ่อแม่พันธุ์มาล้างทำความสะอาดและขัดสิ่งสกปรกออกด้วยแปรงขนาดเล็กจากนั้นนำมาพักในถังโปร่งแสงที่ใส่น้ำทะเลจากพื้นที่เก็บตัวอย่างและให้ออกซิเจนตลอดเวลาด้วยปั๊มออกซิเจนแบบพกพา คอยให้อาหารพ่อแม่พันธุ์ด้วยผงสาหร่ายสไปรูลินาวันละ 1-2 ครั้งในช่วงเวลา 9.30 น. และ 17.00 น. ก่อนที่จะลำเลียงมาถึงสถานที่เพาะเลี้ยงโดยใช้เวลาพักฟื้นพ่อแม่พันธุ์ 1-2 วัน

2.2 อาหารที่ใช้ในการเพาะเลี้ยง

เตรียมน้ำสำหรับเพาะเลี้ยงและหั่วเชื้อ *Chlorella* sp. น้ำเค็ม โดยใช้สูตรอาหารประกอบด้วย 1. ปุ๋ยนา 16-20-0 (0.15 กรัม/ลิตร) 2. ยูเรีย 46-0-0 (0.3 กรัม/ลิตร) 3. รำข้าวละเอียด (0.5 กรัม/ลิตร) และ 4. ปูนขาว (0.09 กรัม/ลิตร) ละลายส่วนผสมให้เข้ากันด้วยน้ำความเค็ม 20-30 ppt ที่ผ่านการกรองด้วยถุงกรองตาข่ายขนาด 40 ไมครอน โดยใช้ตู้ปลาขนาด 12 นิ้ว ในอัตราส่วน 1:5 ของระดับน้ำ สูงประมาณ 25 ซม. จากฐานตู้ เติมหั่วเชื้อ *Chlorella* sp. 4-5 ลิตร/น้ำเค็ม 10-15 ลิตร และให้อากาศจากปั๊มออกซิเจนตลอดเวลาเพื่อป้องกันการตกตะกอน โดยตามปกติจะใช้เวลาเพาะเลี้ยงประมาณ 2-3 วัน ในบริเวณที่มีแสงสว่าง เมื่อสีของน้ำเปลี่ยนเป็นสีเขียวเข้มจึงสามารถนำไปใช้อุบลาลตัวอ่อนได้ โดยใช้สไลด์ Sedgewick-Rafter Counting Chamber มีกรอบขนาด 50x20 มม. ความลึก 1 มม. มีความจุ 1 มล. สุ่มนับ 3 ครั้ง ตามสมการ [8]

$$C = \frac{NV_2}{V_1}$$

เมื่อ

C = ความหนาแน่นของแพลงก์ตอน (เซลล์/ลิตร)

N = ค่าเฉลี่ยของจำนวนแพลงก์ตอนที่นับได้ในน้ำ 1 มล.

V₁ = ปริมาณน้ำที่กรองผ่านถุงกรองแพลงก์ตอน (ลิตร)

V₂ = ปริมาณตัวอย่างแพลงก์ตอนในขวดเก็บตัวอย่าง (มล.)

2.3 การกระตุ้นพ่อแม่พันธุ์ให้เกิดการสืบพันธุ์

วิธีการทำให้แห้ง (Dry treatment) โดยนำพ่อแม่พันธุ์มาใส่ในภาชนะที่แห้งสนิทในที่ร่มนานประมาณ 3-4 ชั่วโมง แล้วนำกลับมาใส่ในตู้เลี้ยงตามเดิมเพื่อให้เกิดการผสมพันธุ์และวางไข่ (หากไม่เกิดการผสมพันธุ์ให้เพิ่มเวลาการตากแห้ง 30-45 นาที) คอยสังเกตและบันทึกผล ดัดแปลงจาก วิจิตร [9] จากการใช้อธิบายกล่าวพบว่ามีความคล้ายคลึงกับสภาพแวดล้อมในระบบนิเวศของเขตน้ขึ้น-น้ำลง ซึ่งเป็นแหล่งที่อยู่อาศัยเดิมของพ่อแม่พันธุ์เพรียงหิน *Amphibalanus amphitrite* [10]

2.4 การเพาะเลี้ยงตัวอ่อนระยะ Nauplius-Cyprids

เมื่อตัวอ่อนในระยะแรก Nauplius I ถูกปล่อยออกมาตัวอ่อนจะลอกคราบเป็น Nauplius II ภายในระยะเวลา 1-2 ชั่วโมง ให้กินแพลงก์ตอนพืช *Chlorella* sp. ประมาณ 30 มล. ความเข้มข้นรวม 1×10^5 เซลล์ มล.⁻¹ 1 ครั้ง/วัน เวลา 10.00 น. ปิดปั๊ม ออกซิเจนขณะให้อาหารและคอยสังเกตการเปลี่ยนระยะด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่า (ใช้ฟอรมาลีนความเข้มข้น 4% ในการหยุดการเคลื่อนไหวของตัวอ่อน) เพื่อเตรียมแยกตัวอ่อนไปเพาะเลี้ยงโดยสุ่มตัวอย่าง 1 ชั่วโมง/ครั้ง ในระยะ Nauplius I-II และ 3 ชั่วโมง/ครั้ง ในระยะ Nauplius III-Cyprids การบันทึกผลให้ใช้แสงไฟความสว่างสูงในการล่อตัวอ่อนมาบริเวณผิวน้ำและใช้ปิเปตต์แก้วดูดตัวอ่อน เมื่อตัวอ่อนพัฒนาถึงระยะ Nauplius IV จึงเตรียมแยกตัวอ่อนจากตู้พ่อแม่พันธุ์ ดัดแปลงจาก Yu และคณะ [11]

2.5 การเก็บตัวอ่อนระยะ Nauplius IV

เมื่อพบตัวอ่อนพัฒนาเข้าสู่ระยะ Nauplius IV สุ่มนับปริมาณ 3 ครั้ง (ใช้สมการในหัวข้อ 2.2) หากมี Nauplius IV 70-90% ให้ถ่ายน้ำโดยซ่อนถุงกรองตาข่ายขนาด 320 ไมครอน อยู่ด้านบนและ 160 ไมครอน อยู่ด้านล่างเพื่อดักจับตัวอ่อนระยะ Nauplius IV ที่มีขนาดเล็ก จากนั้นแยกไปเพาะเลี้ยงในตู้โปร่งแสงขนาด 10 นิ้ว (ใช้น้ำเค็มที่ผ่านการกรองและล้างถุงกรองเพื่อให้ตัวอ่อนหลุดออกมาจากถุงกรอง) ใช้น้ำจืดผสมด้วยเกลือวิทยาศาสตร์ 30 กรัม/น้ำ 1 ลิตร (ตรวจสอบการปนเปื้อนของคลอรีนทุกครั้ง) ให้ได้ความเค็ม 30-32 ppt อุณหภูมิ 28-29°C เปิดแสง 12 ชั่วโมง/ปิดแสง 12 ชั่วโมง และให้ *Chlorella* sp. 1 ครั้ง/วัน ปริมาณ 2-5 ลิตร เปลี่ยนถ่ายน้ำ 3 ครั้ง/สัปดาห์ (ใช้ถุงกรองตาข่ายขนาด 160 ไมครอน ขณะที่เปลี่ยนน้ำ) ตรวจสอบคุณภาพน้ำ (อัลคาไลน์ แอมโมเนีย กรด-เบส ไนโตรเจน ความเค็ม และอุณหภูมิ) ให้คงที่เสมอ ดัดแปลงจาก Jonsson และคณะ [12]

2.6 การเตรียมวัสดุลงเกาะของตัวอ่อนระยะ Cyprids

ใช้ถาด 6 หลุม สำหรับทดลองขนาดหลุมประมาณ 2.6x6.4 ซม. (กว้างxยาว) และใช้แผ่นอะคริลิกวางที่ก้นหลุมเพื่อเป็นวัสดุในการลงเกาะโดยนำวัสดุดังกล่าวมาทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่นและนำไปแช่ในน้ำเค็มที่ผ่านการกรองด้วยถุงกรองตาข่ายขนาด 160 ไมครอน และให้ออกซิเจนตลอดเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นนำมาตากให้แห้งและนำไปอบในตู้อบลมร้อน (Hot air oven) ประมาณ 100°C เพื่อฆ่าจุลินทรีย์ขนาดเล็ก ดัดแปลงจาก Dineen และ Hines [13]

2.7 ขั้นตอนการทดลอง

ดำเนินการทดลองเป็นระยะเวลาประมาณ 1 เดือนจนกระทั่งตัวอ่อนระยะ Nauplius IV เปลี่ยนเป็นระยะ Juvenile โดยใช้แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (CRD) แบ่งเป็นการทดลองที่มีระดับอุณหภูมิแตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 30°C, 32°C และ 35°C ซึ่งควบคุมอุณหภูมิด้วยอ่างควบคุมอุณหภูมิ (Water Bath) เริ่มจากนำตัวอ่อนระยะ Nauplius IV ใส่ในถาด 6 หลุม สำหรับทดลอง 40 ตัว/หลุม โดยใช้น้ำทะเลเทียมความเค็ม 32 ppt ที่ผ่านการกรองแล้ว (กระดาดกรอง 3 ไมครอน) ใส่ในแต่ละหลุมประมาณ 10 มล. ภายใต้การให้แสงสว่างอย่างต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมง ปรับระดับอุณหภูมิ 1°C/2 ชั่วโมง จากอุณหภูมิห้องจนถึงระดับอุณหภูมิตามที่กำหนดของแต่ละหน่วยการทดลอง สุ่มตัวอย่างและบันทึกผลด้วยกล้องจุลทรรศน์ 3 ชั่วโมง/1 ครั้ง/1 ตัว (Nauplius IV 40-8= 32 ตัว: ไม่นับรวมกับ Nauplius ที่ตายแล้ว) โดยไม่นำถาด 6 หลุม สำหรับทดลองออกจากอ่างควบคุมอุณหภูมิ เมื่อครบตามระยะเวลาที่กำหนดจึงนำแผ่นอะคริลิกมาบันทึกผล โดยทำซ้ำ 6 ครั้ง/1 หน่วยการทดลองหากตัวอ่อนระยะ Cyprids ลงเกาะช้ากว่าระยะเวลาที่กำหนดให้เปลี่ยนถ่ายน้ำเค็มที่ผ่านการกรองในหลุมให้มีความเค็ม อุณหภูมิ ปริมาณน้ำให้อยู่ระดับเดียวกันของแต่ละหน่วยการทดลองด้วยปิเปตต์แก้ว 12 ชั่วโมง/1 ครั้ง เพื่อความคงที่ของตัวแปร หลังจากพบการลงเกาะครั้งแรกในหน่วยการทดลองและเปลี่ยนระยะจาก Cyprids เป็นระยะ Juvenile ให้เพาะเลี้ยงอีก 2-4 วัน ด้วยแพลงก์ตอนพืช *Chlorella* sp. ความเข้มข้นรวม 1×10^5 เซลล์ มล.⁻¹ 1 ครั้ง/วัน เวลา 10.00 น. ประมาณ 1-2 มล. คอยสังเกตและบันทึกผล

บันทึกภาพพฤติกรรมของเพรียงหินตัวเต็มวัยที่อุณหภูมิ 3 ระดับ คือ 30°C, 32°C และ 35°C ในระหว่างการให้อาหารด้วยกล้องดิจิทัลเป็นเวลา 10 นาที ทำซ้ำ 6 ครั้ง/1 หน่วยการทดลองแล้วนำข้อมูลมาประมวลผลด้วยโปรแกรม Kinovea ดัดแปลงจาก Nishizaki และ Carrington [5], Nishizaki และ Carrington [14]

2.8 การบันทึกข้อมูล

1. บันทึกระยะเวลารวมในการเปลี่ยนระยะของตัวอ่อนโดยเริ่มบันทึกระยะ Nauplius V-Juvenile ในหน่วยการทดลองตลอด 24 ชั่วโมง (สุ่มตัวอย่าง 3 ชั่วโมง/1 ครั้ง)

2. บันทึกอัตราการรอดเป็นร้อยละของตัวอ่อนทุกระยะตลอดการทดลองแล้วนำมาคำนวณตามสมการ

$$\text{อัตราการรอด (\%)} = \frac{\text{จำนวนตัวอ่อนทั้งหมดเมื่อสิ้นสุดการทดลอง} \times 100}{\text{จำนวนตัวอ่อนระยะ Nauplius IV เริ่มต้นการทดลอง}}$$

3. บันทึกอัตราการลงเกาะแบบยึดติดชั่วคราวและแบบถาวรเป็นจำนวนตัวอ่อนระยะ Cyprids ที่ลงเกาะบนแผ่นอะคริลิกในหน่วยการทดลองแล้วนำมาคำนวณตามสมการ

$$\text{อัตราการลงเกาะ, แบบถาวร (\%)} = \frac{\text{จำนวนเฉลี่ยตัวอ่อนระยะ Cyprids, Juvenile ที่ลงเกาะบนแผ่นอะคริลิก} \times 100}{\text{จำนวนตัวอ่อนระยะ Nauplius IV เริ่มต้นการทดลอง}}$$

$$\text{อัตราการลงเกาะแบบชั่วคราว (\%)} = \frac{\text{จำนวนเฉลี่ยตัวอ่อนระยะ Cyprids ที่ลงเกาะแบบชั่วคราวบนแผ่นอะคริลิก} \times 100}{\text{จำนวนตัวอ่อนระยะ Nauplius IV เริ่มต้นการทดลอง}}$$

4. บันทึกช่วงเวลาในตัวอ่อนลงเกาะครั้งแรกและบันทึกความเร็วการลงเกาะของตัวอ่อนระยะ Cyprids โดยการนำหน่วยการทดลองมาคำนวณตามสมการ

$$\text{อัตราการลงเกาะตามช่วงเวลา (\%)} = \frac{\text{จำนวนเฉลี่ยตัวอ่อนระยะ Cyprids ที่ลงเกาะบนแผ่นอะคริลิกครั้งแรก} \times 100}{\text{จำนวนตัวอ่อนระยะ Nauplius IV เริ่มต้นการทดลอง}}$$

5. บันทึกภาพและวิดีโอเป็นจำนวนครั้งการเกิดพฤติกรรมของเพรียงหินตัวเต็มวัยที่อุณหภูมิ 3 ระดับ โดยแบ่งพฤติกรรมเป็น 2 ลักษณะ คือ 1. ความถี่ของการโบกพัด Cirri (การยึดและการหัด Cirri) 2. ความถี่ของการเปิด-ปิดฝา Operculum (ไม่มีการยึดและการหัด Cirri)

2.9 การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์อัตราการรอด ระยะเวลารวมในการเปลี่ยนระยะและพฤติกรรมการลงเกาะของระยะ Cyprids โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel และใช้โปรแกรม Kinovea เพื่อบันทึกพฤติกรรมการกินอาหารแบ่งเป็น 2 ลักษณะ คือ ความถี่ของการโบกพัด Cirri และความถี่ของการเปิด-ปิดฝา Operculum นำมาวิเคราะห์หาความแปรปรวนแบบ One-Way Analysis of Variance: ANOVA ด้วยโปรแกรม SPSS for Window version 29.0.0.0

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 อัตรารอดของตัวอ่อนเพรียงหินระยะ Nauplius V-Juvenile

ผลอัตราการรอดในระดับอุณหภูมิ 30°C, 32°C และ 35°C มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 1) ระยะ Nauplius V มีอัตราการรอดสูงที่สุดคือ 97.54±2.00% ที่ 30°C รองลงมาคือ 96.36±2.97% ที่ 32°C และอัตราการรอดต่ำที่สุดคือ 73.49±3.81% ที่ 35°C สำหรับระยะ Nauplius VI มีอัตราการรอดสูงที่สุดคือ 70.72±6.51% ที่ 30°C และรองลงมาคือ 46.57±5.50% ที่ 32°C ส่วนระยะ Cyprids มีอัตราการรอดสูงที่สุดคือ 31.02±5.29% ที่ 32°C และรองลงมาคือ 7.74±1.66% ที่ 30°C สุดท้ายในระยะ Juvenile มีอัตราการรอดสูงที่สุดคือ 19.94±5.71% ที่ 32°C รองลงมาคือ 3.91±0.85% ที่ 30°C และสำหรับระดับอุณหภูมิ 35°C ตัวอ่อนเพรียงหินระยะ Nauplius V มีอัตราการรอดเป็น 0% จากผลการทดลองบ่งชี้ว่าพ่อแม่พันธุ์เพรียงหิน *Amphibalanus amphitrite* ที่เก็บมาจากหาดเจ้าสำราญ จังหวัดเพชรบุรี หาดทุ่งวัวแล่น และหาดพระจอมเกล้าฯ จังหวัดชุมพร ที่มีอุณหภูมิผิวน้ำทะเลอยู่ระหว่าง 27-30°C ทำให้อัตราการรอดของระยะ Nauplius V สูงที่สุดในระดับอุณหภูมิ 30°C ซึ่งเป็นระดับอุณหภูมิผิวน้ำทะเลที่ใกล้เคียงระบบนิเวศที่พ่อแม่พันธุ์เคยอาศัยอยู่ โดย Walker [15] รายงานว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยทางสภาวะแวดล้อมที่ส่งผลต่ออัตราการรอด การพัฒนา และการเพิ่มจำนวนประชากรของเพรียงหินในระบบนิเวศแตกต่างกันไปตามแต่ละสายพันธุ์ขึ้นอยู่กับปัจจัยทางสภาพแวดล้อมที่ใช้เป็นแหล่งที่อยู่อาศัย

Table 1 Minimum, Maximum and Mean $\pm$ SD of survival rate Nauplius V, Nauplius VI, Cyprids, Juvenile at temperature levels 30°C, 32°C and 35°C

Temperature level		Survival rate (%)			
		Nauplius V	Nauplius VI	Cyprids	Juvenile
30°C	Minimum, Maximum	94.64, 100.00	60.07, 78.47	5.21, 9.68	3.13, 5.47
	Mean $\pm$ SD	97.54 $\pm$ 2.00	70.72 $\pm$ 6.51	7.74 $\pm$ 1.66	3.91 $\pm$ 0.85
32°C	Minimum, Maximum	91.07, 98.66	39.71, 55.13	25.78, 40.04	13.03, 28.91
	Mean $\pm$ SD	96.36 $\pm$ 2.97	46.57 $\pm$ 5.50	31.02 $\pm$ 5.29	19.94 $\pm$ 5.71
35°C	Minimum, Maximum	70.31, 80.00			
	Mean $\pm$ SD	73.49 $\pm$ 3.81	0	0	0

3.2 อัตราการเปลี่ยนระยะของตัวอ่อนเพรียงหินระยะ Nauplius V-Juvenile

ผลการเปลี่ยนระยะตั้งแต่ระยะ Nauplius V-Juvenile มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในอุณหภูมิทั้ง 3 ระดับ โดยที่ 32°C มีการเปลี่ยนระยะเร็วที่สุดจาก Nauplius V-VI= 283 ชั่วโมง จาก Nauplius VI-Cyprids= 3.50 ชั่วโมง และ Cyprids-Juvenile= 29.50 ชั่วโมง สำหรับที่ 30°C มีความเร็วในการเปลี่ยนระยะ Nauplius V-VI= 378 ชั่วโมง จาก Nauplius VI-Cyprids= 12 ชั่วโมง และ Cyprids-Juvenile= 100 ชั่วโมง (ระดับอุณหภูมิ 35°C มีอัตราการเป็น 0% ตั้งแต่ระยะ Nauplius V) โดย Rao และ Lin [16] ใช้พ่อแม่พันธุ์เพรียงหินจากชายฝั่งของประเทศจีนที่มีอุณหภูมิผิวน้ำทะเล 24-26°C รายงานว่าช่วงที่เหมาะสมต่อการเปลี่ยนระยะที่สุดของตัวอ่อน Nauplius V-Cyprids อยู่ในช่วงอุณหภูมิผิวน้ำทะเล 26-33°C ใกล้เคียงกับในประเทศไทยที่มีช่วงอุณหภูมิผิวน้ำทะเลประมาณ 27-30°C ตัวอ่อนเพรียงหิน *Amphibalanus amphitrite* จึงมีอัตราการเปลี่ยนแปลงระยะได้เร็วในช่วงอุณหภูมิผิวน้ำทะเล 31-32°C ซึ่งการเปลี่ยนระยะ (Metamorphosis) ของเพรียงหิน *A. amphitrite* (ภาพที่ 1) แบ่งเป็น 2 ช่วง คือ ระยะที่ตัวอ่อนว่ายน้ำอย่างอิสระเรียกว่า Planktonic เริ่มตั้งแต่ระยะ Nauplius I ถึงระยะ Cyprids และระยะของตัวเต็มวัยที่ต้องยึดเกาะอยู่กับที่เรียกว่า Sessile เริ่มตั้งแต่ Early settled cyprids ที่ลงเกาะแบบยึดติดถาวร (Settlement) ระยะ Juvenile และตัวเต็มวัย (Adult) [17]

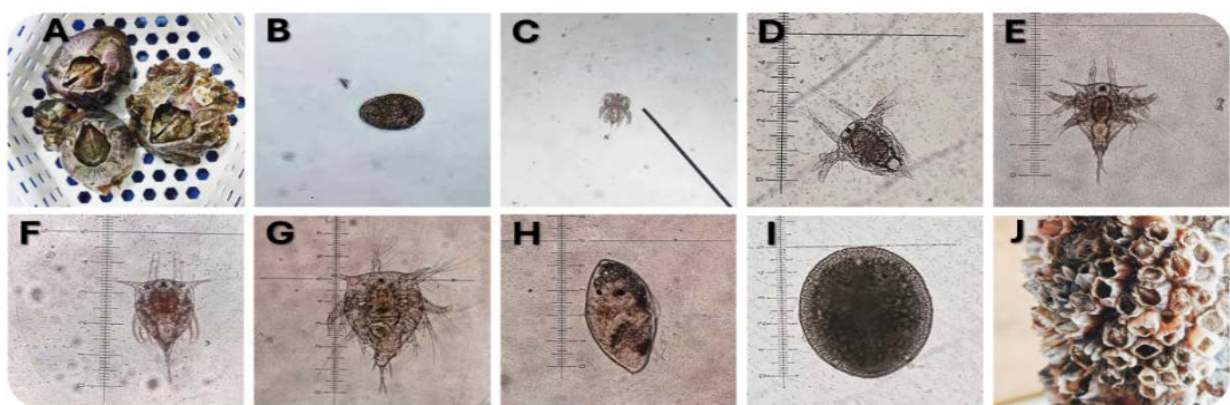


Figure 1 Metamorphosis of the *Amphibalanus amphitrite* (A= Barnacle breeder, B= Egg, C= Nauplius I, D= Nauplius II-III, E= Nauplius IV, F= Nauplius V, G= Nauplius VI, H= Cyprids, I= Juvenile and J= Adult)

3.3 พฤติกรรมการลงเกาะของตัวอ่อนเพรียงหินระยะ Cyprids

พฤติกรรมการลงเกาะของตัวอ่อนเพรียงหิน *Amphibalanus amphitrite* ในระยะ Cyprids มี 2 แบบ คือ การสำรวจพื้นผิวที่จะลงเกาะในช่วงแรกด้วยลักษณะการลงไปเดินบนพื้นผิวเรียกว่าพฤติกรรมการลงเกาะแบบชั่วคราว เมื่อสภาพแวดล้อมใน

บริเวณนั้นเหมาะสมแก่การอยู่อาศัยจึงลงเกาะแบบถาวรและเปลี่ยนเป็นระยะ Juvenile [18] จากผลการทดลองพบว่าที่ระดับอุณหภูมิ 32°C 1. อัตราการลงแบบชั่วคราว: จำนวนตัวเฉลี่ย= 3.25 ตัว และอัตราการลงเกาะ= 10.16% 2. อัตราการลงเกาะแบบถาวร: จำนวนตัวเฉลี่ย= 6.93 ตัว และอัตราการลงเกาะ= 21.65% สูงกว่าที่ระดับอุณหภูมิ 30°C 1. อัตราการลงแบบชั่วคราว: จำนวนตัวเฉลี่ย= 2.21 ตัว และอัตราการลงเกาะ= 6.91% 2. อัตราการลงเกาะแบบถาวร: จำนวนตัวเฉลี่ย= 2.79 ตัว และอัตราการลงเกาะ= 8.71% จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการลงเกาะแบบชั่วคราวและการลงเกาะแบบถาวรมีความสัมพันธ์กัน โดยจำนวนตัวเฉลี่ยและอัตราการลงเกาะแบบถาวรมีอัตราสูงกว่าการลงเกาะแบบชั่วคราว โดย Daugherty [19], Matsumura และคณะ [18] ให้เหตุผลว่าเมื่อ Cyprids ลงสำรวจพื้นผิวจะหลั่งสารออกมาตอนลงเกาะบนพื้นผิวมีลักษณะคล้ายกาวเพื่อใช้ในการยึดติดในระยะเวลานั้น ๆ เรียกว่า สารยึดติดชั่วคราว (Temporary adhesive) สร้างมาจาก Temporary adhesive gland และฮอร์โมนฟีโรโมน (Pheromone) ที่เรียกว่า Settlement-Inducing Protein Complex (SIPC) ซึ่งทำหน้าที่ดึงดูดให้ Cyprids ตัวอื่น ๆ ลงเกาะในพื้นที่ใกล้เคียงกันเพื่อประโยชน์ต่อการสืบพันธุ์ในตัวเต็มวัย โดยอุณหภูมิผิวน้ำทะเลจะส่งผลต่อสารยึดติดชั่วคราวหรือที่เรียกว่า Cyprids footprint และสารยึดติดถาวร หากมีระดับของอุณหภูมิที่ไม่เหมาะสมจะทำให้ Cyprids ไม่สามารถยึดติดกับพื้นผิวที่ต้องการลงเกาะได้

3.4 อัตราการลงเกาะตามช่วงเวลาของตัวอ่อนเพรียงหิน

ในระดับอุณหภูมิ 30°C เริ่มมีการลงสำรวจพื้นที่บนแผ่นอะคริลิกของตัวอ่อนระยะ Cyprids ในลักษณะการลงไปเดินด้วยขาคู่หน้า (Attachment disc) และหลั่งสารสารยึดติดชั่วคราว (Temporary adhesive) [20] หลังจากเปลี่ยนระยะจาก Nauplius VI ประมาณ 16 ชั่วโมง เวลา 03.00 น. โดยมีอัตราพฤติกรรมการลงเกาะแบบชั่วคราว= 6.25% เพิ่มสูงขึ้นในเวลา 06.00 น. (9.38%) และลดต่ำลงในเวลา 09.00 น. (7.81%) เมื่อผ่านไปอีก 24 ชั่วโมง Cyprids เริ่มลงเกาะบนแผ่นอะคริลิกและหลั่งสารยึดติดแบบถาวร (Permanent adhesive) เมื่อถึงเวลา 09.00 น. มีอัตราพฤติกรรมการลงเกาะแบบถาวร= 9.38% ต่อมาในเวลา 12.00 น. ลดเหลือ 7.81% และมีค่าคงที่= 9.38% จนถึงเวลา 18.00 น. ที่ระดับอุณหภูมิ 32°C เริ่มมีการลงสำรวจพื้นที่บนแผ่นอะคริลิกของตัวอ่อนระยะ Cyprids หลังจากเปลี่ยนระยะจาก Nauplius VI เพียง 3 ชั่วโมง ในเวลา 12.00 น. โดยมีอัตราพฤติกรรมการลงเกาะแบบชั่วคราว= 7.81% และมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ ในเวลา 15.00 น. (13.51%) ถึงเวลา 18.00 น. (18.75%) หลังจากนั้นจึงมีอัตราพฤติกรรมการลงเกาะแบบถาวร= 25.00% ในเวลา 24.00 น. (30.21%) ในเวลา 03.00 น. และเวลา 06.00 น. (38.71%) (ภาพที่ 2) (เปิดแสดงตลอดเวลาการทดลอง) ความเข้มแสงในช่วงกลางวัน-กลางคืนไม่มีผลต่อพฤติกรรมการลงเกาะตามที่ Lynn และคณะ [21] รายงานว่าช่วงของแสงมีอิทธิพลค่อนข้างน้อยในเพรียงหินระยะ Cyprids แต่หากมีความเข้มแสงที่มากเกินไปจะส่งผลต่อการลงเกาะอย่างมากในระยะสุดท้ายซึ่งมีสาเหตุมาจากเพรียงหินระยะ Cyprids มีพฤติกรรมที่ถูกดึงดูดด้วยแสงได้ง่ายและว่ายเข้าหาแสงเพื่อตรวจสอบพื้นที่ในการลงเกาะแต่เมื่อเริ่มเปลี่ยนระยะกลับชอบพื้นที่ที่มีแสงน้อยโดยจะตอบสนองในเชิงลบต่อช่วงความยาวคลื่นแสงสีเหลือง 570-600 nm

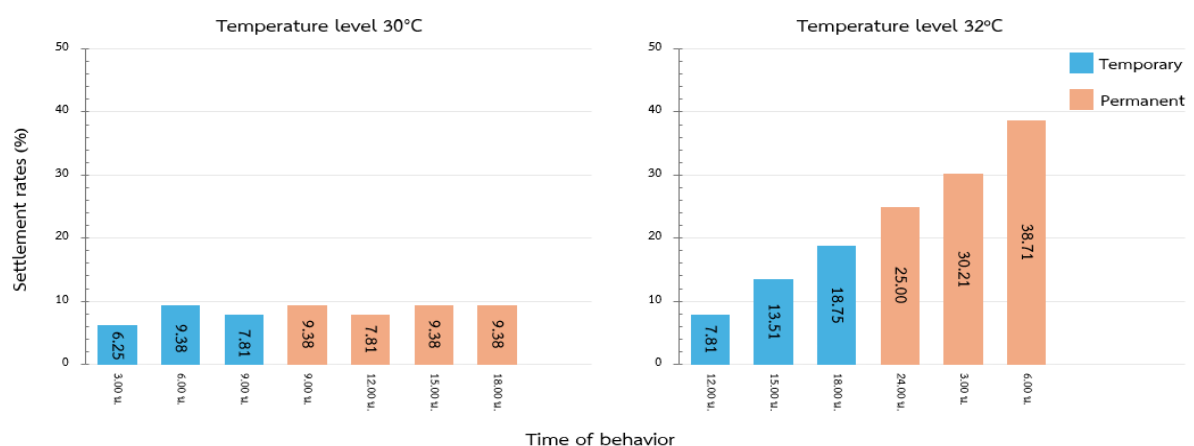


Figure 2 Time of behavior settlement rate of cyprids in temperature between 30°C and 32°C.

3.5 อัตราการลงเกาะของตัวอ่อนเพรียงหินระยะ Cyprids ที่สามารถลงเกาะและเปลี่ยนระยะเป็น Juvenile

หลังจากที่ตัวอ่อนเพรียงหินระยะ Cyprids ลงเกาะแบบถาวรบนแผ่นอะคริลิกและหลังสารยึดติดแบบถาวร (Permanent adhesive) เพื่อเชื่อมลำตัวติดกับพื้นผิวและเข้าสู่กระบวนการเปลี่ยนระยะเป็น Juvenile โดยการสละหัวและตาที่ไม่จำเป็นทิ้งไป [22] ในระดับอุณหภูมิ 32°C มีจำนวนเฉลี่ยตัวอ่อนระยะ Cyprids ที่เปลี่ยนเป็นระยะ Juvenile = 6.38 ตัว และมีอัตราการลงเกาะ = 28.13% ส่วนระดับอุณหภูมิ 30°C มีจำนวนเฉลี่ยตัวอ่อนระยะ Cyprids ที่เปลี่ยนเป็นระยะ Juvenile = 1.38 ตัว มีอัตราการลงเกาะ = 5.21% โดยอุณหภูมิทั้ง 2 ระดับมีอัตราการลงเกาะไม่ถึง 50% Nasrolahi และคณะ [23], Yu และ Chan [24] รายงานว่าในน้ำทะเลอุณหภูมิ 28°C มีความเหมาะสมต่อการลงเกาะและการเปลี่ยนระยะเป็น Juvenile โดยอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่ส่งผลโดยตรงต่อการใช้พลังงานสำรองที่ Cyprids สะสมไว้จากการกินอาหารตั้งแต่ระยะ Nauplius เพื่อใช้ในการเปลี่ยนระยะซึ่งตัวอ่อนระยะ Cyprids จะไม่กินอาหาร (Non feeding cyprids) และใช้พลังงานสำรองในการดำรงชีวิตเป็นหลัก

3.6 พฤติกรรมการกินอาหารของเพรียงหินระยะ Adult

พฤติกรรมการกินอาหารของเพรียงหินตัวเต็มวัยในระดับอุณหภูมิ 35°C มีอัตราความถี่ของการโบกพัด Cirri (จำนวนเฉลี่ยครั้ง/10 นาที) ต่ำที่สุดในอุณหภูมิ 3 ระดับ อยู่ที่ 347 ครั้ง/10 นาที รองลงมาคือระดับอุณหภูมิ 30°C = 389 ครั้ง/10 นาที และในระดับอุณหภูมิ 32°C มีอัตราความถี่ของการโบกพัด Cirri สูงที่สุดคือ 412 ครั้ง/10 นาที ส่วนผลของความถี่ของการเปิด-ปิดฝา Operculum (จำนวนเฉลี่ยครั้ง/10 นาที) มีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 3 ระดับ คือ ระดับอุณหภูมิ 30°C = 0.33 ครั้ง/10 นาที ระดับอุณหภูมิ 32°C = 2.50 ครั้ง/10 นาที และระดับอุณหภูมิ 35°C = 1.33 ครั้ง/10 นาที โดย Nishizaki และ Carrington [5] รายงานว่าเมื่อเพิ่มระดับอุณหภูมิถึง 25°C เพรียงหินมีอัตราการโบกพัด Cirri เพิ่มขึ้น แต่ที่อุณหภูมิ 35°C จะส่งผลกระทบต่อทางชีววิทยาต่อเพรียงหินสังเกตได้จากอัตราการโบกพัด Cirri ที่ลดลง (Maximum effective) สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Ritz และ Foste [25] ที่ใช้พ่อแม่พันธุ์เพรียงหินจากสภาวะแวดล้อมที่มีอุณหภูมิผิวน้ำทะเลแตกต่างกัน โดยเพรียงหินที่อาศัยอยู่ในช่วง 12-21°C มีอัตราการโบกพัด Cirri สูงสุดที่อุณหภูมิ 31°C และจำนวนประชากร 50% อยู่ในอาการโคม่าที่อุณหภูมิ 37°C แต่เพรียงหินที่มาจากระบบนิเวศของทะเลชายฝั่งในเขตร้อนมีอัตราการโบกพัดน้ำของ Cirri สูงสุดที่อุณหภูมิ 21°C และสามารถทนต่ออุณหภูมิผิวน้ำทะเลได้สูงถึง 40°C ก่อนที่จำนวนประชากร 50% อยู่ในอาการโคม่า จากผลการศึกษาเหล่านี้สามารถบ่งชี้ได้ว่าเพรียงหิน *Amphibalanus amphitrite* ตัวเต็มวัยที่อาศัยอยู่ในช่วงอุณหภูมิผิวน้ำทะเล 27-30°C ในระบบนิเวศชายฝั่งทะเลของประเทศไทยจะสามารถทนต่ออุณหภูมิผิวน้ำทะเลได้สูงกว่า 40°C

4. สรุป

ผลการวิเคราะห์อัตราการรอดของตัวอ่อนเพรียงหิน *Amphibalanus amphitrite* ระยะ Nauplius V-Juvenile พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$) โดยระยะ Nauplius V มีค่าสูงที่สุดในระดับอุณหภูมิ 30°C ($97.54 \pm 2.00\%$) รองลงมาคือ 32°C ($96.36 \pm 2.97\%$) และต่ำสุดที่ 35°C ($73.49 \pm 3.81\%$) ส่วนในระยะ Nauplius VI มีอัตราการรอดสูงที่ 30°C ($70.72 \pm 6.51\%$) รองลงมาคือ 32°C ($46.57 \pm 5.50\%$) สำหรับระยะ Cyprids มีอัตราการรอดสูงที่สุดที่ 32°C ($31.02 \pm 5.29\%$) รองลงมาคือที่ 30°C ($7.74 \pm 1.66\%$) และระยะ Juvenile มีค่าสูงที่สุดที่ 32°C ($19.94 \pm 5.71\%$) รองลงมาคือที่ 30°C ($3.91 \pm 0.85\%$) (อุณหภูมิ 35°C ตัวอ่อนระยะ Nauplius VI ตายทั้งหมด) ผลการวิเคราะห์อัตราการเปลี่ยนระยะของตัวอ่อนเพรียงหิน *A. amphitrite* พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$) โดยในระดับอุณหภูมิ 32°C ใช้เวลาในการเปลี่ยนระยะน้อยที่สุดจากระยะ Nauplius V-VI (283 ชั่วโมง) รองลงมาคือ 30°C (378 ชั่วโมง) สำหรับระยะ Nauplius VI-Cyprids ใช้เวลาน้อยสุดที่ 32°C (3.50 ชั่วโมง) รองลงมาคือ 30°C (12 ชั่วโมง) และระยะ Cyprids-Juvenile ใช้เวลาการเปลี่ยนระยะเร็วสุดที่อุณหภูมิ 32°C (29.50 ชั่วโมง) รองลงมาคือระดับอุณหภูมิ 30°C (100 ชั่วโมง) (อุณหภูมิ 35°C ตัวอ่อนระยะ Nauplius VI ตายทั้งหมด) ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมการลงเกาะของตัวอ่อนเพรียงหิน *A. amphitrite* ระยะ Cyprids พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$) โดยมีอัตราการลงเกาะแบบชั่วคราวและแบบถาวรสูงสุดที่ระดับอุณหภูมิ 32°C ($10.16 \pm 4.82\%$ และ 21.65 ± 4.23 ตามลำดับ) เปลี่ยนเป็น Juvenile 28.13% รองลงมาคือ 30°C ($6.91 \pm 1.89\%$ และ $8.71 \pm 2.09\%$ ตามลำดับ) เปลี่ยนเป็น Juvenile 5.21% ผลการวิเคราะห์

พฤติกรรมการกินอาหารของตัวอ่อนเพรียงหิน *A. amphitrite* ระยะ Adult พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$) โดยมีแนวโน้มที่อัตราการกินอาหารลดลงเมื่ออุณหภูมิผิวน้ำทะเลสูงขึ้น ที่ระดับอุณหภูมิ 32°C มีค่าสูงสุดรองลงมาคือ 30°C และที่ 35°C มีค่าน้อยที่สุด (412 ± 73 , 389 ± 164 และ 347 ± 134 ครั้ง/10 นาที ตามลำดับ) และผลของความถี่ของการเปิด-ปิดฝา Operculum (จำนวนเฉลี่ยครั้ง/10 นาที) ไม่ต่างกันทั้งอุณหภูมิ 3 ระดับ คือ ระดับอุณหภูมิ 30°C = 0.33 ครั้ง/10 นาที, ระดับอุณหภูมิ 32°C = 2.50 ครั้ง/10 นาที และระดับอุณหภูมิ 35°C = 1.33 ครั้ง/10 นาที จากการเปรียบเทียบผลการศึกษานี้กับรายงานการศึกษาอื่น ๆ แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยทางสภาวะแวดล้อมในระบบนิเวศที่มีอิทธิพลต่อการอยู่รอด การพัฒนาของตัวอ่อน การเพิ่มจำนวนประชากรและการลงเกาะของสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังซึ่งรูปแบบการตอบสนองที่เกิดจากอุณหภูมิจะแสดงออกมาทางสรีรวิทยาและพฤติกรรมในการดำรงชีวิตเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในระบบนิเวศที่เป็นแหล่งอาศัยเกินขีดจำกัดทั้งทางสรีระและทางพันธุกรรมกว่าที่สิ่งมีชีวิตชนิดนั้นจะสามารถปรับตัวและอยู่รอดได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณอาจารย์แสวลี วิบูลย์กิจ และสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร เขตอุดมศักดิ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ห้องปฏิบัติการและที่พักระหว่างทำการทดลอง

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] มนนา ทพสุต. 2561. ภาวะโลกร้อน: ปัญหาที่ท้าทายในศตวรรษที่ 21. หน้า 1-9. ในการประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติมหาวิทยาลัยศรีปทุม. ครั้งที่ 13. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยศรีปทุม.
- [2] อรุณี สมมณี. 2527. ผลของอุณหภูมิต่อสิ่งมีชีวิต. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [3] Seebacher, F., White, C.R. and Franklin, C.E. 2014. Physiological plasticity increases resilience of ectothermic animals to climate change. NATURE CLIMATE CHANGE. 5: 61-66.
- [4] Crickenberger, S. and Wetthey, D.S. 2017. Reproductive physiology, temperature and biogeography: the role of fertilization in determining the distribution of the barnacle *Semibalanus balanoides*. The Marine Biological Association of the United Kingdom. 98: 1411-1424.
- [5] Nishizaki, M. and Carrington, E. 2014. Temperature and water flow influence feeding behavior and success in the barnacle *Balanus glandula*. MARINE ECOLOGY PROGRESS SERIES Mar Ecol Prog Ser. 507: 207-218.
- [6] Kon-ya, K. and Miki, W. 1994. Effects of Environmental Factors on Larval Settlement of the Barnacle *Balanus amphitrite* Reared in the Laboratory. Fisheries Science. 60(5): 563-565.
- [7] Yan, Y., Chan, B. and Williams, G. 2006. Reproductive development of the barnacle *Chthamalus malayensis* in Hong Kong: implications for the life-history patterns of barnacles on seasonal, tropical shores. Marine Biology. 148: 875-887.
- [8] ลัดดา วงศ์รัตน์ และ โสภณา บุญญาวิวัฒน์. 2546. คู่มือวิธีการเก็บและวิเคราะห์แพลงก์ตอน. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [9] วิจิตร ตุงซี. 2557. เนื้อเยื่อวิทยาและองค์ประกอบทางเคมีของอวัยวะสืบพันธุ์และฤดูวางไข่ของปลิงขาว *Holothuria scabra* แถบภาคใต้ของประเทศไทยฝั่งอันดามัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาชีววิทยา. คณะมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [10] Dineen, J.F. and Hines, A.H. 1992. Interactive effects of salinity and adult extract upon settlement of the estuarine barnacle *Balanus improvisus* (Darwin, 1854). J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 156: 239-252.
- [11] Yu, S.P., Nakaoka, M. and Chan, B.K.K. 2020. The gut retention time of microplastics in barnacle naupliar larvae from different climatic zones and marine habitats. Environmental Pollution. 20: 115865.

-
- [12] Jonsson, P.R., Wrangé, A.L., Lind, U., Abramova, A., Ogemark, M and Blomberg, A. 2018. The Barnacle *Balanus improvisus* as a Marine Model-Culturing and Gene Expression. Journal of Visualized Experiments. 138: 1-11.
- [13] Dineen, J.F. and Hines, A.H. 1994. Effects of salinity and adult extract on settlement of the oligohaline barnacle *Balanus subalbidus*. Marine Biology. 119: 423-430.
- [14] Nishizaki, M. and Carrington, E. 2014. The effect of water temperature and flow on respiration in barnacles: patterns of mass transfer versus kinetic limitation. The Journal of Experimental Biology. 217: 2101-2109.
- [15] Walker, L. 2020. The effect of temperature on the recruitment of acorn barnacles in the Sapelo Island salt marshes. Research Gate. 341612380.
- [16] Rao, X. and Lin, G. 2019. Effects of age, salinity and temperature on the metamorphosis and survival of *Capitulum mitella* cyprids (Cirripedia: Thoracica: Scalpellomorpha). Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom. 19: 1-8.
- [17] Denny, M.W. and Gaines, S.D. 2007. BARNACLES. 61-62. In Danny, M.W. and Gaines, S.D. ENCYCLOPEDIA OF TIDEPOOLS AND ROCKY SHORES. 1. London: University of California.
- [18] Matsumura, K., Nagano, M., Kato-Yoshinaga, Y., Yamazaki, M., Clare, A.S. and Fusetani, N. 1998. Immunological studies on the settlement-inducing protein complex (SIPC) of the barnacle *Balanus amphitrite* and its possible involvement in larva-larva interactions. R. Soc. Lond. 265: 1825-1830.
- [19] Daugherty, M.J. 2016. REARING TEMPERATURE AFFECTS THE EXPRESSION OF PROTEINS IN THE ADHESIVE OF THE STRIPED ACORN BARNACLE, *BALANUS AMPHITRITE*. Master of Science. Biological Sciences. California Polytechnic State University.
- [20] Alsaab, A., Aldred, N. and Clare, A.S. 2017. Automated tracking and classification of the settlement behavior of barnacle cyprids. J. R. Soc. Interface. 14: 20160957.
- [21] Lynn, K.D., Flynn, P.T., Manríquez, K., Manríquez, P.H., Pulgar, J., Duarte, C. and Quijon, P.A. 2021. Artificial light at night alters the settlement of acorn barnacles on a man-made habitat in Atlantic Canada. Marine Pollution Bulletin. 163: 111928.
- [22] Fontaine, D. 2016. Temporal and Spatial Patterns of Barnacle Settlement within the Southern, CA Rocky Intertidal. Undergraduate Honors Theses. Department of Environmental and Ocean Sciences, University of San Diego.
- [23] Yu, S.P. and Chan, B.K.K. 2020. Intergenerational microplastics impact the intertidal barnacle *Amphibalanus amphitrite* during the planktonic larval and benthic adult stages. Environmental Pollution. 267: 115560.
- [24] Nasrolahi, A., Havenhand, J., Wrangé, A.L. and Pansch, C. 2016. Population and life-stage specific sensitivities to temperature and salinity stress in barnacles. Scientific Reports. 6: 32263.
- [25] Ritz, D.A. and Foster, B.A. 1968. COMPARISON OF THE TEMPERATURE RESPONSES OF BARNACLES FROM BRITAIN, SOUTH AFRICA AND NEW ZEALAND, WITH SPECIAL REFERENCE TO TEMPERATURE ACCLIMATION IN *ELMINIUS MODESTUS*. J. mar. biol. Ass. U.K. 48: 545-559.
-

ผลของสาร azoxystrobin ร่วมกับ salicylhydroxamic acid ต่อเชื้อรา *Fusarium* spp.

สาเหตุโรคกิ่งแห้งบนต้นกล้าทุเรียน

Effect of azoxystrobin with salicylhydroxamic acid on *Fusarium* spp.

causing dieback disease on durian seedlings

ธนพร ทองเทพ^{1*}, พรรณิภา ย้วยล¹, สรัญญา วลัยเสวี² และ พรประพา คงตระกูล¹

Thanaphon Thongthep^{1*}, Pannipa Youryon¹, Sarunya Valyasevi² and Pornprapa Kongtragoul¹

¹ภาควิชาเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

²ภาควิชากีฏวิทยาและโรคพืช คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

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

² Department of Entomology and Plant Pathology, Faculty of Agriculture, Chiang Mai University, Chiang Mai

*Corresponding author: ธนพร ทองเทพ, e-mail address: 66206010@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

โรคกิ่งแห้งที่เกิดจากเชื้อรา *Fusarium* spp. เป็นปัญหาสำคัญของการผลิตต้นกล้าทุเรียน ส่งผลให้ปริมาณ และคุณภาพของทุเรียนลดลง เนื่องจากเชื้อราสาเหตุโรคอาจติดไปสู่แปลงปลูกเข้าทำลายต้นทุเรียนตลอดช่วงการปลูกทำให้ต้นทุเรียนมีอาการทรุดโทรมและตาย จึงมีแนวทางในการศึกษาสารเคมีกลุ่ม quinone outside inhibitors ชนิดของสารเคมีป้องกันกำจัดเชื้อราที่นำมาศึกษา คือ azoxystrobin (FRAC code 11) เพื่อทดแทนสารป้องกันกำจัดเชื้อรากลุ่มเดิมที่ใช้เป็นเวลานาน สำหรับการศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเก็บตัวอย่างโรค แยก จัดจำแนกตามลักษณะสัณฐานวิทยา ทดสอบความสามารถในการก่อโรค และประเมินประสิทธิภาพของสารเคมีป้องกันกำจัดเชื้อรา azoxystrobin (11) ที่ระดับความเข้มข้น 0, 1, 10 และ 100 ppm ร่วมกับ salicylhydroxamic acid (SHAM) ในสภาพห้องปฏิบัติการ สามารถแยกเชื้อราได้ 4 ไอโซเลท จากต้นกล้าทุเรียน คือ CMF1_1, CMF1_2, CMF1_3 และ CMF1_4 พบลักษณะโคโลนีสีขาว ลักษณะเส้นใยใส ไม่มีสี สร้างสปอร์ 2 รูปแบบ คือ macroconidia และ microconidia จัดจำแนกเป็นเชื้อรา *Fusarium* spp. และทุกไอโซเลทก่อให้เกิดโรคบนใบทุเรียนได้ ทั้งนี้พบว่าสาร azoxystrobin ทุกระดับความเข้มข้นที่ทดสอบร่วมกับ SHAM สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราทุกไอโซเลทได้ 100 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ: โรคกิ่งแห้ง, azoxystrobin, *Fusarium* spp.

Abstract

Dieback disease caused by *Fusarium* spp. is a significant problem in durian seedling production, resulting in a decrease in the quantity and quality of durian. As a result, the disease-causing fungus may spread to the planting plot and destroy the durian trees throughout the growing period, causing the durian trees to deteriorate and die. Therefore, there are guidelines for studying chemical fungicides the quinone outside inhibitor groups. The fungicide used in the study is azoxystrobin (FRAC code 11), which replaces the same group of fungicides used for a long time. The objectives of this study were to collect disease samples, isolate and classify them according to morphological characteristics, conduct a pathogenicity test, and evaluate the effectiveness of the fungicide azoxystrobin (11) at concentrations of 0, 1, 10, and 100 ppm in combination with salicylhydroxamic acid (SHAM) in vitro. Four fungal isolates could be isolated from durian seedlings, namely CMF1_1, CMF1_2, CMF1_3, and CMF1_4. All isolates were presented with the white colonies. The hyphae are transparent and colorless and produce two types of spores: macroconidia and microconidia. They were classified as *Fusarium* spp. All isolates can be infected on durian leaves. All concentrations of azoxystrobin with SHAM completely inhibited all isolates.

Keywords: Dieback, azoxystrobin, *Fusarium* spp.

1. บทนำ

ทุเรียน (*Durio zibethinus* L.) เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย เพราะเป็นประเทศผู้ผลิตและส่งออกทุเรียนรายใหญ่ของโลก อีกทั้งสามารถปลูกได้ทั่วทุกภาคของประเทศ โดยในปี พ.ศ. 2566 มีพื้นที่ต้นทุเรียนที่ให้ผลผลิต 1,057,574 ไร่ ได้ผลผลิตประมาณ 1,476,174 ตัน และผลผลิตต่อไร่ 1,396 กิโลกรัม เพิ่มขึ้นจากปี พ.ศ. 2565 มีพื้นที่ 978,799 ไร่ ผลผลิต 1,335,728 ตัน และผลผลิตต่อไร่ 1,365 กิโลกรัม [1] จากความสนใจปลูกทุเรียนของเกษตรกร ส่งผลให้มีแนวโน้มของพื้นที่ปลูกทุเรียนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้มีความต้องการต้นกล้าทุเรียนเพิ่มขึ้นตามการขยายตัวของพื้นที่ปลูก ดังนั้นขั้นตอนการเพาะชำต้นกล้าทุเรียนจึงจำเป็นต้องผลิตต้นกล้าให้ได้คุณภาพดี แต่ปัญหาของการผลิตต้นกล้าทุเรียนที่สำคัญคือการเกิดโรคตั้งแต่ระยะเริ่มเพาะชำและอนุบาลต้นกล้า สาเหตุส่วนใหญ่เกิดจากการเข้าทำลายของเชื้อรา โรคที่พบบ่อย ได้แก่ โรคกิ่งแห้ง และเชื้อราสาเหตุโรคอาจติดไปสู่แปลงปลูกเข้าทำลายต้นทุเรียนตลอดช่วงการปลูกทำให้ต้นทุเรียนมีอาการทรุดโทรมและตาย ส่งผลกระทบทั้งปริมาณและคุณภาพของทุเรียน

ดังนั้นจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาสารชนิดอื่นที่มีกลไกการออกฤทธิ์ที่แตกต่าง ในการวิจัยครั้งนี้สนใจสารเคมีกลุ่ม quinone outside inhibitors ที่มีกลไกการออกฤทธิ์ยับยั้งกระบวนการหายใจระดับเซลล์ ชนิดของสารเคมีป้องกันกำจัดเชื้อราที่นำมาศึกษา คือ azoxystrobin (FRAC code 11) ที่มีจุดจับจำเพาะ การขนส่งอิเล็กตรอนในไมโทคอนเดรีย (mitochondria) โดยสารจะเข้าเกาะที่ ubiquinone ของไซโทโครม บี (cytochrome b) ตำแหน่งที่อยู่บริเวณด้านนอกของเยื่อหุ้มชั้นใน (inner membrane) ไมโทคอนเดรีย เป็นส่วนหนึ่งของ cytochrome bc₁ complex หรือ complex III [2] เพื่อเป็นทางเลือกให้แก่เกษตรกรผู้เพาะชำกล้าทุเรียนนำมาใช้เพื่อการจัดการทดแทนหรือสลับกลุ่มสารเคมีป้องกันกำจัดโรคที่ต่างกลไกเพื่อลดการดื้อต่อสารเคมีของเชื้อราสาเหตุโรค งานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) เพื่อเก็บตัวอย่างโรค แยก จัดจำแนกตามลักษณะสัณฐานวิทยา (2) ทดสอบความสามารถในการก่อโรค (3) เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของการเคมีป้องกันกำจัดเชื้อรา azoxystrobin ร่วมกับ salicylhydroxamic acid (SHAM) ในสภาพห้องปฏิบัติการ

2. วิธีการศึกษา

2.1 เก็บรวบรวมและแยกเชื้อรา *Fusarium* spp. จากสาเหตุโรคต้นกล้าทุเรียน

เก็บรวบรวมตัวอย่างโรคที่สำคัญ นำมาทำการแยกเชื้อราโดยวิธี tissue transplanting โดยตัดชิ้นส่วนพืชบริเวณแผลที่พืชโดนเข้าทำลาย ให้มีขนาด 0.5x0.5 cm ซ้ำเชื้อบริเวณพื้นผิวโดยแช่ sodium hypochlorite (10% Clorox) ประมาณ 3-5 นาที และล้างด้วยน้ำกลั่นที่ผ่านการนึ่งฆ่าเชื้อ ประมาณ 3-5 นาที ซับด้วยกระดาษทิชชูที่ผ่านการนึ่งฆ่าเชื้อให้แห้ง แล้วนำมาวางบนอาหาร Water Agar (WA) เมื่อสังเกตเห็นเส้นใยของเชื้อราที่เจริญออกมาใช้ cork borer ตัดบริเวณปลายเส้นใย วางบนอาหาร PDA เป็นเวลา 7 วัน และแยกเชื้อราให้บริสุทธิ์ด้วยวิธี single spore ดัดแปลงวิธีจาก Ho and Ko, 1997 [3] โดยใช้ cork borer ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 cm ตัดชิ้นเชื้อใส่ในน้ำกลั่นนึ่งฆ่าเชื้อปริมาตร 500 µl นำไปเลี้ยงในอาหาร WA เป็นเวลา 12-24 ชั่วโมง จากนั้นตัดชิ้นชิ้นที่มีสปอร์เพียงสปอร์เดียวภายใต้กล้องจุลทรรศน์ เลี้ยงในอาหาร PDA เป็นเวลา 5-7 วัน

2.2 ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเชื้อ *Fusarium* spp. สาเหตุโรคต้นกล้าทุเรียน

นำเชื้อราบริสุทธิ์จากการแยกด้วยวิธี single spore isolation เลี้ยงบนอาหารเลี้ยงเชื้อ PDA ใช้ cork borer ขนานเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 เซนติเมตร ตัดเส้นใยบริเวณขอบโคโลนีของเชื้อ วางให้ด้านที่มีเส้นใยของเชื้อคว่ำลงบนอาหารบริเวณกลางจานเลี้ยงเชื้อ บ่มไว้ที่อุณหภูมิห้องจนเชื้อเจริญเติบโตเต็มจานเลี้ยงเชื้อเป็นระยะเวลา 7 วัน หลังจากนั้นใช้เข็มเย็บเส้นใยของเชื้อรา แล้วหยดด้วยน้ำกลั่นนึ่งฆ่าเชื้อบนแผ่นสไลด์ และศึกษาคูภายใต้กล้องจุลทรรศน์

2.3 ทดสอบความสามารถในการก่อโรคของเชื้อรา *Fusarium spp.*

นำเชื้อราที่แยกได้เลี้ยงบนอาหาร PDA ที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปทุเรียนที่ไม่เป็นโรค มาทดสอบด้วยวิธี detached leaf มาทำความสะอาดฆ่าเชื้อบริเวณพื้นผิวโดยแช่ 10% Clorox ประมาณ 5 นาที และล้างด้วยน้ำกลั่นที่ผ่านการนึ่งฆ่าเชื้อ ประมาณ 2-3 นาที ซับด้วยกระดาษทิชชูที่ผ่านการนึ่งฆ่าเชื้อให้แห้ง จากนั้นนำเข็มที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้วมาเจาะบนใบทุเรียน 6 แผล ใช้ cork borer ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 เซนติเมตร ที่ลนไฟฆ่าเชื้อแล้ว ตัดชิ้นส่วนเชื้อราที่แยกได้ จากการเลี้ยงบนอาหาร PDA นำไปปลูกเชื้อบนใบทุเรียน และให้ความชื้นโดยนำกระดาษทิชชูที่ผ่านการนึ่งฆ่าเชื้อ โดยชุบน้ำกลั่นนึ่งฆ่าเชื้อให้ชุ่ม จากนั้นพันขั้วใบทุเรียน แล้วนำไปใส่กล่องพลาสติก ให้ความชื้นด้วยการนำน้ำกลั่นนึ่งฆ่าเชื้อเทลงในกล่อง ปริมาณ 500 มิลลิลิตร โดยวางตระแกรงลวดไว้ในกล่องเพื่อไม่ให้ใบติดกันกล่อง จากนั้นปิดฝา เพื่อทำการบ่มเชื้อไว้ที่อุณหภูมิห้องและ สังเกตการณ์เกิดโรค

2.4 ทดสอบประสิทธิภาพของสารเคมีป้องกันกำจัดเชื้อรา azoxystrobin ต่อการยับยั้งเชื้อรา *Fusarium spp.* สาเหตุโรคต้นกล้าทุเรียนในสภาพห้องปฏิบัติการ

นำเชื้อราที่แยกได้ เลี้ยงบนอาหาร PDA ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 7 วัน ทดสอบการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อรา โดยสารป้องกันกำจัดเชื้อรา azoxystrobin ที่ระดับความเข้มข้น 0, 1, 10 และ 100 ppm ร่วมกับ salicylhydroxamic acid (SHAM) ที่ความเข้มข้น 100 ppm จากนั้นทำการย้ายชิ้นเชื้อ โดยใช้ cork borer ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 มิลลิเมตร ตัดบริเวณของโคโลนีของเชื้อราแต่ละไอโซเลท และนำไปเลี้ยงบนอาหาร PDA ที่ผสมสารป้องกันกำจัดเชื้อราวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design) ทำการทดลองความเข้มข้นละ 4 ซ้ำ เปรียบเทียบกับการเจริญของโคโลนีเชื้อรา กับชุดควบคุม คือ อาหารเลี้ยงเชื้อ PDA ที่ไม่ได้ผสมสารป้องกันกำจัดเชื้อรา โดยการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของโคโลนีเชื้อรา เพื่อคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ยับยั้งการเจริญเติบโตทางเส้นใยของเชื้อรา โดยใช้สูตรดังนี้ Percentage Inhibition of Mycelial Growth (PIMC) = $\frac{R1-R2}{R1} \times 100$ โดยกำหนดให้ R1 = เส้นผ่านศูนย์กลางโคโลนีของเชื้อราบนอาหารเลี้ยงเชื้อชุดควบคุม R2 = เส้นผ่านศูนย์กลางโคโลนีของเชื้อราบนอาหารเลี้ยงเชื้อชุดทดลอง

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 แยกเชื้อรา *Fusarium spp.* จากแปลงเพาะชำกล้าทุเรียน

จากการเก็บรวบรวมตัวอย่างโรคกิ่งแห้ง ที่คาดว่าเกิดจากเชื้อรา *Fusarium spp.* ของต้นกล้าทุเรียน ในพื้นที่ตำบลตากแดด อำเภอเมือง จังหวัดชุมพร พบลักษณะอาการบริเวณกิ่งและใบแห้งบิดเบี้ยว (Figure 1A) มีกลุ่มสปอร์สีขาวติดอยู่บริเวณกิ่ง (Figure 1B) เมื่อตัดตามยาว พบสีน้ำตาลตรงแกนของกิ่ง (Figure 1C) ทำการแยกเชื้อราโดยวิธี tissue transplanting ได้จำนวน 4 ไอโซเลท คือ CMF1_1, CMF1_2, CMF1_3 และ CMF1_4 ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ วีระณีย์ และคณะ [4] กล่าวว่า อาการ dieback ของทุเรียนมีลักษณะอาการใบบิดเบี้ยวบริเวณปลายยอด และเมื่อสภาพอากาศร้อน ทำให้เกิดลักษณะไหม้ที่บริเวณปลายหรือขอบใบ



Figure 1 Symptoms of dieback in durian seedlings. Dry, twisted branches and leaves (A), spores on the branches (B), Brown at the core of the branch (C).

3.2 ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาเชื้อรา *Fusarium* spp. สาเหตุโรคต้นกล้าทุเรียน

จากตัวอย่างเชื้อราที่แยกได้จำนวน 4 ไอโซเลต คือ CMF1_1, CMF1_2, CMF1_3 และ CMF1_4 นำมาศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา ด้านหน้าพบลักษณะโคโลนีมีสีขาว และด้านหลังเป็นวงสีส้ม (Figure 2A) เมื่อนำไปตรวจสอบภายใต้กล้องจุลทรรศน์พบว่าทั้ง 4 ไอโซเลต มีลักษณะเส้นใยใส ไม่มีสี (Figure 2B) มีการสร้างสปอร์ 2 รูปแบบ คือ macroconidia ลักษณะรูปร่างเรียวยาว (fusiform) ไม่มีสี ส่วนปลายมีลักษณะมน (blunt) ส่วน basal cell มีลักษณะเป็น foot-shape (Figure 2C) และ microconidia มีลักษณะรูปร่างคล้ายรูปไข่ ใส มีผนังกัน 1 เซลล์ (Figure 2D) ซึ่งไอโซเลต CMF1_1 มีขนาด macroconidia และ microconidia ความกว้าง × ความยาว เฉลี่ยเท่ากับ $3.8 \pm 0.83 \times 21 \pm 2.23 \mu\text{m}$, $3.6 \pm 0.89 \times 10.4 \pm 0.89 \mu\text{m}$ (Figure 2C, D) ไอโซเลต CMF1_2 มีขนาด macroconidia และ microconidia ความกว้าง × ความยาว เฉลี่ยเท่ากับ $4.4 \pm 0.55 \times 18.8 \pm 2.16 \mu\text{m}$, $3.4 \pm 0.55 \times 10.6 \pm 1.34 \mu\text{m}$ ไอโซเลต CMF1_3 มีขนาด macroconidia และ microconidia ขนาดความกว้าง × ความยาว เฉลี่ยเท่ากับ $4.8 \pm 0.44 \times 19.6 \pm 0.89 \mu\text{m}$, $4.2 \pm 0.83 \times 12 \pm 2.73 \mu\text{m}$ และ ไอโซเลต CMF1_4 มีขนาด macroconidia และ microconidia ความกว้าง × ความยาว เฉลี่ยเท่ากับ $4.6 \pm 0.55 \times 19.4 \pm 0.89 \mu\text{m}$, $3.6 \pm 1.34 \times 10.8 \pm 1.78 \mu\text{m}$ (Figure 2C) จากลักษณะดังกล่าวทั้ง 4 ไอโซเลต จัดจำแนกได้เป็นเชื้อรา *Fusarium* sp. ซึ่งสอดคล้องกับ Leslie and Summerell, 2006 [5] และ Fourie et al. [6] ที่ได้ศึกษาอนุกรมวิธานตามลักษณะทางสัณฐานวิทยาเชื้อรา *Fusarium* spp. พบว่าเชื้อราชนิดนี้มีการสร้างสปอร์ 2 รูปแบบ คือ macroconidia และ microconidia

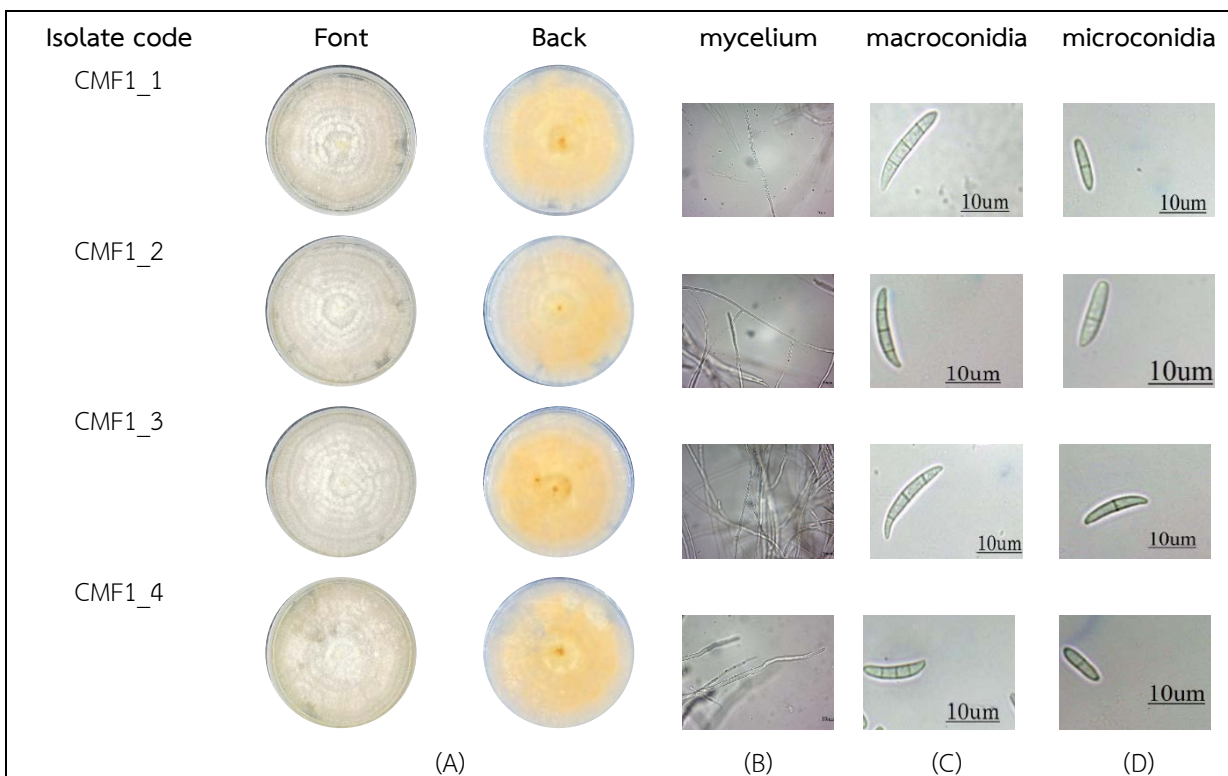


Figure 2 Morphological characteristics of *Fusarium* spp. causing durian disease; colony (A), mycelium (B), macroconidia (C) and microconidia (D).

3.3 ทดสอบความสามารถในการก่อโรคของเชื้อรา *Fusarium* spp.

จากการทดสอบความสามารถในการก่อโรคของเชื้อรา *Fusarium* spp. โดยการปลูกเชื้อลงบนใบทุเรียน ทั้ง 4 ไอโซเลต คือ CMF1_1, CMF1_2, CMF1_3 และ CMF1_4 สามารถก่อให้เกิดโรคบนใบทุเรียนได้ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยใบทุเรียนจะแสดงอาการเส้นกลางใบเป็นสีน้ำตาล และบนใบเป็นสีเหลืองลามจนเต็มแผ่นใบ (Figure 3) ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Hoa et al. [7] ที่พบว่า เชื้อรา *F. solani* สามารถก่อโรคกับทุเรียนได้ โดยทำให้ทุเรียนแสดงอาการแผลแห้งสีน้ำตาลถึงดำ

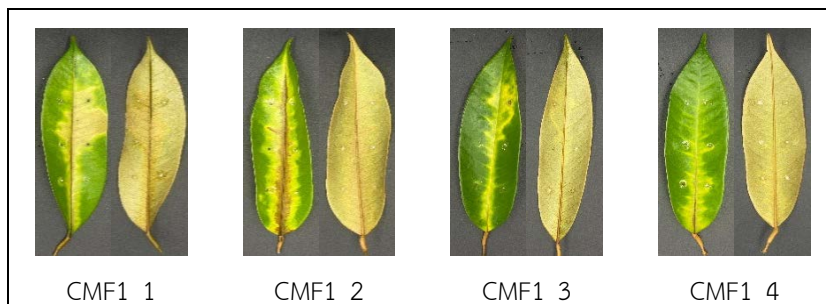


Figure 3 Symptoms on durian leaves infected by *Fusarium* spp.

3.4 ประสิทธิภาพของสารเคมีป้องกันกำจัดเชื้อรา azoxystrobin ต่อการยับยั้งเชื้อรา *Fusarium* spp. สาเหตุโรคต้นกล้าทุเรียนในสภาพห้องปฏิบัติการ

จากการศึกษาประสิทธิภาพของสาร azoxystrobin ร่วมกับ SHAM ต่อการเจริญเติบโตของเชื้อรา *Fusarium* spp. จำนวน 4 ไอโซเลต คือ CMF1_1, CMF1_2, CMF1_3 และ CMF1_4 พบว่าสาร azoxystrobin ที่ระดับความเข้มข้น 0, 1, 10 และ 100 ppm ร่วมกับ SHAM ที่ความเข้มข้น 100 ppm สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราทั้ง 4 ไอโซเลต ได้ 100 เปอร์เซ็นต์ สอดคล้องกับรายงานของ Song et al. [8] ที่พบว่าสารเคมีป้องกันกำจัดเชื้อรา azoxystrobin ที่ระดับความเข้มข้น 1.0 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเส้นใย และยับยั้งการออกของสปอร์ต่อเชื้อรา *Fusarium fujikuroi* ทั้งนี้ Nalumpang et al. [9] ได้ศึกษาผลของ azoxystrobin ร่วมกับ SHAM ต่อการเจริญเติบโตของเชื้อรา *Phytophthora infestans* พบว่าเมื่อผสม SHAM ร่วมกับสารเคมีดังกล่าวสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญเติบโตทางเส้นใยของเชื้อราเพิ่มขึ้น เพราะ SHAM ช่วยเพิ่มการยับยั้งร่วมกับ azoxystrobin ต่อขบวนการใช้ออกซิเจนของเส้นใย จึงสามารถยับยั้งกระบวนการหายใจได้

Table 1 Inhibitory effect of azoxystrobin at , 1, 10 and 100 ppm on the mycelial growth of four isolates of *Fusarium* spp. for 4 day.

Concentration (ppm)	Colony diameter (mm)*				Percent inhibition(%)			
	CMF1_1	CMF1_2	CMF1_3	CMF1_4	CMF1_1	CMF1_2	CMF1_3	CMF1_4
0	31.895 ^A	29.050 ^A	26.680 ^A	25.698 ^A	-	-	-	-
SHAM (100)	15.728 ^B	15.560 ^B	13.453 ^B	10.868 ^B	60.11	56.09	61.01	71.00
1	5.000 ^C	5.000 ^C	5.000 ^C	5.000 ^C	100.00	100.00	100.00	100.00
10	5.000 ^C	5.000 ^C	5.000 ^C	5.000 ^C	100.00	100.00	100.00	100.00
100	5.000 ^C	5.000 ^C	5.000 ^C	5.000 ^C	100.00	100.00	100.00	100.00
Concentrations	**	**	**	**				
CV. (%)	6.33	7.85	12.22	8.71				

*Values expressed are means with 4 replications. The different letters are significantly different as determined by least significant difference test at $p < 0.01$

4. สรุป

จากการเก็บตัวอย่างโรคกิ่งแห้งในต้นกล้วยเรียน แยกเชื้อรา *Fusarium* sp. ได้ 4 ไอโซเลท คือ CMF1_1, CMF1_2, CMF1_3 และ CMF1_4 ทุกไอโซเลทก่อให้เกิดโรคบนใบกล้วยเรียน 100 เปอร์เซ็นต์ และพบว่าสารเคมีป้องกันกำจัดเชื้อรา azoxystrobin ที่ระดับความเข้มข้น 1, 10, และ 100 ppm. ร่วมกับ SHAM สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตทางเส้นใยของเชื้อราทุกไอโซเลท ได้ 100 เปอร์เซ็นต์

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาพืชสวน ภาควิชาเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลงไปได้ด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2566. สถานการณ์สินค้าเกษตรที่สำคัญและแนวโน้ม ปี 2567. (ระบบออนไลน์). เข้าถึงได้จาก : เว็บไซต์ <http://www.oae.go.th> (เข้าถึงเมื่อ 2 มกราคม 2567).
- [2] จิตา เดชยวบ. 2559. สารเคมีที่ใช้ป้องกันกำจัดโรคพืช. พิมพ์ครั้งที่1. กรุงเทพฯ. 195 หน้า.
- [3] วีระณีย์ ทองศรี. 2560. โรคตายลามจากยอด (dieback) และโรคราสีชมพู (pink disease) ใน ทุเรียน. เคหการเกษตร. 41: 89-91
- [4] Leslie F J. and Summerell A. B. The *Fusarium* Laboratory Manual. 2006. Kansas State University, Manhattan.
- [5] G. Fourie, E. T., Steenkamp, R.C., Ploetz, T. R., Gordon and A. Viljoen. 2011. Current status of the taxonomic position of *Fusarium oxysporum* formae specialis cubense within the *Fusarium oxysporum* complex. Infection, Genetics and Evolution 11 (2011) 533–542.
- [6] Wong, C., H., and Wen., H., K., 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
- [7] Hoa N.V., D. T. K. Uyen, N. T. Hieu, and N. M. Chau. 2013. A new finding pathogen on durian in south Vietnam and preliminary results on varieties screen against *Phytophthora* spp. Southern Horticultural Research Institute, Vietnam.
- [8] Song Y., Chen X., Sun J., Bai Y., Jin L., Lin Y., Sun Y., Cao H., and Chen Y. 2022. In Vitro Determination of Sensitivity of *Fusarium fujikuroi* to Fungicide Azoxystrobin and Investigation of Resistance Mechanism. J. Agric. Food Chem. 2022, 70, 9760–9768
- [9] Nalumpang S., Poti T., and Akimitsu K. 2021. Effect of salicylhydroxamic acid on mycelial growth and baseline sensitivity to azoxystrobin in *Phytophthora infestans* causing potato late blight in Thailand. 2021Vol. 17(4):1485-1496

ผลของสาร fluazinam ต่อเชื้อรา *Colletotrichum* spp. สาเหตุโรคแอนแทรคโนสของต้นกล้าทุเรียน ในห้องปฏิบัติการ

Effects of fluazinam on *Colletotrichum* spp. causing anthracnose disease of durian seedling in vitro

ณัฐพร ถิ่นวงศ์ยอด^{1*}, พรรณิภา ย้วยล¹, สรัญยา วัลยะเสวี² และ พรประพา คงตระกูล¹

Nataporn Thinwongyod^{1*}, Pannipa Youryon¹, Sarunya Valyasevi² and Pornprapa Kongtragoul¹

¹ภาควิชาเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

²ภาควิชากีฏวิทยาและโรคพืช คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

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

²Department of Entomology and Plant Pathology, Faculty of Agriculture, Chiang Mai University, Chiang Mai

*Corresponding author: ณัฐพร ถิ่นวงศ์ยอด, e-mail address: 66206006@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

เชื้อรา *Colletotrichum* spp. สาเหตุโรคแอนแทรคโนสบนใบทุเรียนทำให้เกิดความเสียหายต่อผลผลิต และ คุณภาพของต้นกล้าทุเรียนลดลง เป็นปัญหาสำคัญของแปลงเพาะกล้าทุเรียนที่สามารถเข้าทำลายได้ทุกช่วงอายุเติบโตของต้นทุเรียน จึงมีแนวทางในการศึกษาสารเคมีป้องกันกำจัดเชื้อราชนิดใหม่ที่มีรหัสบนสลากของผลิตภัณฑ์ (FRAC code) ต่างกัน ทดแทนกลุ่มที่มีการใช้กันมาอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน และคาดว่าอาจเกิดการดื้อต่อสารเคมีดังกล่าว สำหรับการศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อแยก และจำแนกลักษณะทางสัณฐานของเชื้อสาเหตุโรคแอนแทรคโนสของทุเรียน ทดสอบความสามารถในการก่อโรค และประเมินประสิทธิภาพของสารเคมี fluazinam ที่ระดับความเข้มข้น 0, 1, 10 และ 100 พีพีเอ็ม ในสภาพห้องปฏิบัติการ สามารถแยกเชื้อราได้จำนวน 4 ไอโซเลท CMC1-1, CMC1-2, CMC1-3 และ CMC1-4 จากอาการโรคแอนแทรคโนสบนใบทุเรียน มีลักษณะโคโลนีมีเส้นสีขาว ลักษณะเส้นใยฟู มีโคนเดี่ยวลักษณะรีคล้ายรูปไข่ ปลายมน เส้นใยมีลักษณะใส ไม่มีสี และพบว่าทั้ง 4 ไอโซเลทก่อให้เกิดโรคบนใบทุเรียน 100 เปอร์เซ็นต์ พบว่าสารเคมี fluazinam ที่ 100 พีพีเอ็ม สามารถยับยั้งเชื้อได้ 78.99-90 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ: fluazinam, โรคแอนแทรคโนส, *Colletotrichum* spp.

Abstract

Colletotrichum spp. causes anthracnose disease on durian leaves that damages the yield and reduces the quality of durian seedlings. It is a significant problem in durian seedling nurseries that can infest any growth stage of the durian tree. Therefore, there are guidelines for studying new fungicides with different codes on the product labels (FRAC codes) to replace groups that have been used continuously for a long time and are expected to develop resistance to chemical fungicides. The objectives of this study were to isolate and classify the morphological characteristics of the pathogen of durian anthracnose, to conduct the pathogenicity test, and evaluate the efficiency of fluazinam at concentrations of 0, 1, 10, and 100 ppm *in vitro*. Four isolates, CMC1-1, CMC1-2, CMC1-3, and CMC1-4 were isolated from anthracnose disease symptoms on the leaves of durian seedlings. All isolates were presented to the white colony. The conidia are oval shaped with rounded tips, and septate mycelia are transparent and colorless. All four isolates infected durian leaves at 100%. It was found that the fluazinam at 100 ppm was able to inhibit all isolates by 78.99-90 percent.

Keywords: Anthracnose, *Colletotrichum* spp., fluazinam

1. บทนำ

ทุเรียน (Durian) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Durio zibethinus* อยู่ในวงศ์ (Family) Bombacaceae ทุเรียนเป็นผลไม้เขตร้อน เป็นพืชประจำถิ่นบริเวณภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เป็นผลไม้สำคัญของประเทศไทย [1] เป็นพืชที่ได้รับความนิยมปลูกอีกชนิดหนึ่งของประเทศไทย มีแนวโน้มในการปลูกทุเรียนเพิ่มขึ้นเป็นอาชีพหลัก ในปี 2566 มีเนื้อที่ให้ผล 1,057,574 ไร่ ผลผลิต 1,476,174 ตัน และผลผลิตต่อไร่ 1,396 กิโลกรัม เพิ่มขึ้นจาก 978,799 ไร่ ผลผลิต 1,335,728 ตัน และผลผลิตต่อไร่ 1,365 กิโลกรัม [2] จึงทำให้มีความต้องการต้นกล้าทุเรียนเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากปัจจุบันเกษตรกรภายในประเทศมีความสนใจในการมาปลูกทุเรียนเป็นจำนวนมากขึ้นส่งผลให้จำเป็นต้องมีการผลิตต้นกล้าทุเรียนให้มีปริมาณและคุณภาพตรงตามความต้องการของตลาดทุเรียน ปัญหาในการปลูกทุเรียน คือ การเกิดโรคการเข้าทำลายของเชื้อรา ก่อให้เกิดความเสียหายต่อต้นทุเรียนเป็นอย่างมาก โรคที่พบคือ โรคแอนแทรคโนส เชื้อราเข้าทำลายต้นทุเรียนตลอดช่วงการปลูกทำให้ต้นทุเรียนมีอาการทรุดโทรมและตาย ส่งผลกระทบทั้งปริมาณและคุณภาพของทุเรียน [3] จากการแยกเชื้อรา *Colletotrichum gloeosporioides* สาเหตุโรคแอนแทรคโนสของสตอเบอร์รี่จังหวัดเชียงใหม่ เมื่อนำมาประเมินความต้านทานต่อสารป้องกันกำจัดเชื้อรา คาร์เบนดาซิมพบเชื้อราสายพันธุ์ที่ต้านทานต่อสารป้องกันกำจัดเชื้อรา คาร์เบนดาซิม [4] ทำการศึกษาค้นคว้าสารเคมีชนิดอื่น ที่มีกลไกการออกฤทธิ์ที่แตกต่าง เพื่อลดการดื้อต่อสารเคมีป้องกันกำจัด ในการทดลองครั้งนี้ใช้สารเคมีกลุ่ม quinone outside inhibitors เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการป้องกันกำจัดสารเคมีกลุ่มนี้มีกลไกการออกฤทธิ์ยับยั้งกระบวนการหายใจระดับเซลล์ โดยสารเคมีที่นำมาศึกษา คือ สารเคมีป้องกันกำจัด fluazinam (FRAC code 29) มีกระบวนการสลายโมเลกุลของสารอาหารภายในเซลล์ ที่เกิดจากขบวนการ ไกลโคลิซิส (glycolysis) ไพรูเวทออกซิเดชัน (pyruvate oxidation) วัฏจักรเครบส์ (Krebs cycle) เกิดกระบวนการยับยั้งการถ่ายทอดอิเล็กตรอน (electron transport chain) และการขนส่งอิเล็กตรอนให้แก่ตัวรับอิเล็กตรอนที่แทรกอยู่ในเยื่อหุ้มชั้นในของไมโทคอนเดรีย (mitochondria) ของเชื้อรา [5] เพื่อเป็นทางเลือกให้แก่เกษตรกรชาวสวนนำมาใช้ทดแทนหรือสลับกลุ่มสารเคมีป้องกันกำจัดโรคที่ต่างกลไกเพื่อลดการดื้อต่อสารเคมีของเชื้อราสาเหตุโรค มีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) เพื่อแยก จัดจำแนกตามลักษณะสัณฐานวิทยา (2) ทดสอบความสามารถในการก่อโรค (3) เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของการเคมีป้องกันกำจัดเชื้อรา fluazinam ในสภาพห้องปฏิบัติการ

2. วิธีการศึกษา

2.1 เก็บรวบรวม แยกเชื้อรา และศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเชื้อรา *Colletotrichum* spp.

เก็บตัวอย่างต้นทุเรียนที่แสดงอาการแอนแทรคโนสที่ใบ ทำการแยกเชื้อรา ด้วยวิธี Tissue transplanting technique ตัดชิ้นส่วนของพืชที่เกิดการเข้าทำลายของเชื้อราสาเหตุโรค ให้มีขนาด 0.5 × 0.5 เซนติเมตร ฆ่าเชื้อบริเวณพื้นผิวโดยแช่ sodium hypochlorite (Clorox 10%) ประมาณ 3-5 นาที ล้างด้วยน้ำกลั่นนึ่งฆ่าเชื้อ ประมาณ 3-5 นาที ซับกระดาษทิชชูที่ผ่านการนึ่งฆ่าเชื้อให้แห้ง แล้วนำชิ้นส่วนพืชไปวางบนอาหาร water agar (WA) เมื่อสังเกตเห็นเส้นใยของเชื้อราที่เจริญออกมา ใช้ cork borer ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 เซนติเมตร ที่ลนไฟฆ่าเชื้อแล้ว ตัดบริเวณปลายเส้นใยที่เจริญออกมา แล้ววางบนอาหาร potato dextrose agar (PDA) จากนั้นบ่มที่อุณหภูมิห้องทำการแยกเชื้อราบริสุทธิ์ด้วยวิธี single spore isolation ดัดแปลงวิธีจาก Ho and Ko, 1997 [6] โดยเลี้ยงเชื้อบนอาหารเลี้ยงเชื้อ เชื้อเส้นใยบริเวณที่มีสปอร์ของเชื้อราจากจานเพาะเชื้อที่มีการเกิดของสปอร์แล้ว แยกสปอร์ออกจากเส้นใย โดยนำเส้นใยที่มีสปอร์ของเชื้อราใส่ลงใน microtube ที่เติมน้ำกลั่นปริมาณ 1 มิลลิลิตรจากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่อง vortex เพื่อแยก conidia ของเชื้อรา และนำ conidial suspension เทลงบนจานเพาะเชื้อที่มีอาหาร WA นำมาเลี้ยงไว้อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปตรวจสอบภายใต้กล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 10X และจุดหรือวาดวงกลมตรงที่มีสปอร์ด้านล่างของจานเพาะเชื้อจากนั้นใช้มีดปลายแหลม หรือ cork borer ตัดย้ายลงบนจานเพาะเชื้อที่มีอาหารเลี้ยงเชื้อหลังจากนั้นนำมาเลี้ยงไว้ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 5-7 วัน และทำการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาภายใต้กล้องจุลทรรศน์

2.2 ทดสอบความสามารถในการก่อโรคของเชื้อรา *Colletotrichum* spp. บนใบทุเรียน

นำเชื้อรา *Colletotrichum* spp. ที่แยกได้เลี้ยงบนอาหาร PDA ที่ อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปทุเรียนที่ไม่เป็นโรค มาทดสอบด้วยวิธี detached leaf โดยดัดแปลงจาก Suksiri et al. [7] มาทำความสะอาดฆ่าเชื้อบริเวณพื้นผิวโดยแช่ 10% Clorox ประมาณ

5 นาที และล้างด้วยน้ำกลั่นที่ผ่านการนึ่งฆ่าเชื้อ ประมาณ 2-3 นาที ซับกระดาษทิชชูที่ผ่านการนึ่งฆ่าเชื้อให้แห้ง จากนั้นนำเข็มที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้วมาเจาะบนใบทุเรียน 6 แผล ใช้ cork borer ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 เซนติเมตร ที่ลนไฟฆ่าเชื้อแล้ว ตัดชิ้นส่วนเชื้อราที่แยกได้ จากการเลี้ยงบนอาหาร PDA นำไปปลูกเชื้อบนใบทุเรียน และให้ความชื้นโดยนำกระดาษทิชชูที่ผ่านการนึ่งฆ่าเชื้อ โดยชุบน้ำกลั่นนึ่งฆ่าเชื้อให้ชุ่ม จากนั้นพันขั้วใบทุเรียน แล้วนำไปใส่กล่องพลาสติก ให้ความชื้นด้วยการนำน้ำกลั่นนึ่งฆ่าเชื้อเทลงในกล่อง ปริมาณ 500 มิลลิตร โดยวางตระแกรงลวดไว้ในกล่องเพื่อไม่ให้ใบติดกันกล่อง จากนั้นปิดฝา เพื่อทำการบ่มเชื้อไว้ที่อุณหภูมิห้องและ สังเกตการณ์เกิดโรค

2.3 ประเมินประสิทธิภาพของสารเคมีป้องกันกำจัดเชื้อรา fluazinam ในสภาพห้องปฏิบัติการ

นำเชื้อรา *Colletotrichum* spp. ที่แยกได้ เลี้ยงบนอาหาร PDA ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 7 วัน ทดสอบกับสารป้องกันกำจัดเชื้อรา fluazinam (50% a.i.) ผสมกับอาหาร PDA ที่มีระดับความเข้มข้น 1, 10 และ 100 พีพีเอ็ม และชุดควบคุม ใช้ cork borer ขนาด 0.5 มิลลิเมตร ตัดบริเวณปลายของเส้นใยบริเวณขอบและย้ายชิ้นส่วนเชื้อลงบนอาหาร PDA บ่มไว้ที่อุณหภูมิห้องจนชุดควบคุมเชื้อเจริญเติบโตจนเต็มจานอาหารเลี้ยงเชื้อ วางแผนการทดลองแบบ 2 x 4 in completely randomize design (CRD) จำนวน 4 ซ้ำ วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโคโลนีเชื้อรา เพื่อดำเนินการเปอร์เซ็นต์ยับยั้งการเจริญเติบโตทางเส้นใยของเชื้อรา ใช้สูตร

$$\text{Percentage Inhibition of Mycelial Growth (PIMC)} = \frac{R1 - R2}{R1} \times 100$$

โดยกำหนดให้

R1 = เส้นผ่าศูนย์กลางโคโลนีของเชื้อราบนอาหารเลี้ยงเชื้อชุดควบคุม

R2 = เส้นผ่าศูนย์กลางโคโลนีของเชื้อราบนอาหารเลี้ยงเชื้อชุดทดลอง

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 แยกและเก็บรวบรวมเชื้อรา *Colletotrichum* spp. สาเหตุโรคทุเรียน

จากการเก็บตัวอย่างโรคแอนแทรคโนสบนใบทุเรียน จากแปลงเพาะกล้าทุเรียน ภายในพื้นที่ตำบลตากแดด อำเภอเมือง จังหวัดชุมพร ที่คาดว่าเกิดจากเชื้อรา *Colletotrichum* spp. บนใบทุเรียนเชื้อราชนิดนี้ เมื่อเข้าทำลายจะแสดงลักษณะอาการออกที่ใบอ่อนจะเริ่มมีอาการหงิกงอ จะมีการเกิดจุดสีเทาบนใบทุเรียนที่เชื้อเข้าทำลาย จะเริ่มเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเข้ม เนื้อเยื่อกลางแผลแห้งกรอบเป็นสีน้ำตาลเทา มีความสอดคล้องกับรายงานของ รุ่งทิพย์และพิสุทธิ [8-9] ซึ่งผลที่ใบมีอาการเป็นจุดดวงสีน้ำตาลแดงเรียงซ้อนกันหลายชั้น ตรงกลางมีจุดสีเทาปนน้ำตาล แผลมักเกิดที่ขอบหรือปลายใบ รูปร่างไม่แน่นอน ขอบนอกเป็นสีเหลือง (Figure 1) มีลมและฝนช่วยแพร่กระจายโรคได้



Figure 1 Symptoms of anthracnose on durian leaves.

ทำการแยกเชื้อราได้จำนวน 4 ไอโซเลต CMC1-1, CMC1-2, CMC1-3 และ CMC1-4 ทำการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา มีลักษณะโคโลนีมีเส้นใยสีขาวปนเทา (Figure 2 a) เส้นใยมีลักษณะใส ไม่มีสี (Figure 2 b) โคนิเดียมีลักษณะรีคล้ายรูปไข่ ปลายมน (Figure 2 c) ซึ่งไอโซเลต CMC1-1 มี conidia ความกว้าง x ความยาว เฉลี่ยเท่ากับ $8 \pm 1 \times 3.8 \pm 0.44 \mu\text{m}$ CMC1-2 มี conidia ความกว้าง x ความยาว เฉลี่ยเท่ากับ $10.4 \pm 1.81 \times 4.2 \pm 0.44 \mu\text{m}$ CMC1-3 มี conidia ความกว้าง x ความยาว เฉลี่ยเท่ากับ $10.2 \pm 0.44 \times 4.4 \pm 0.54 \mu\text{m}$ และ CMC1-4 มี conidia ความกว้าง x ความยาว เฉลี่ยเท่ากับ $9.6 \pm 0.89 \times 3.4 \pm 0.54 \mu\text{m}$ (Figure 2 C) จัดจำแนกเป็นเชื้อรา *Colletotrichum* sp. ตรงตามรายงานของ สันทนา และคณะ [10] ที่ได้ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเชื้อรา *Colletotrichum* sp. สาเหตุโรค ซึ่งมีลักษณะโคโลนีมีสีขาว ลักษณะฟู โคนิเดีย มีรูปร่างไข่ จนถึงทรงกระบอก ปลายมน ขนาดประมาณ $2.5\text{-}3.5 \times 4.0\text{-}8.0$ ไมโครเมตร เส้นใยใส ไม่มีสี มีความกว้าง ประมาณ $3.0 - 4.0$ ไมโครเมตร

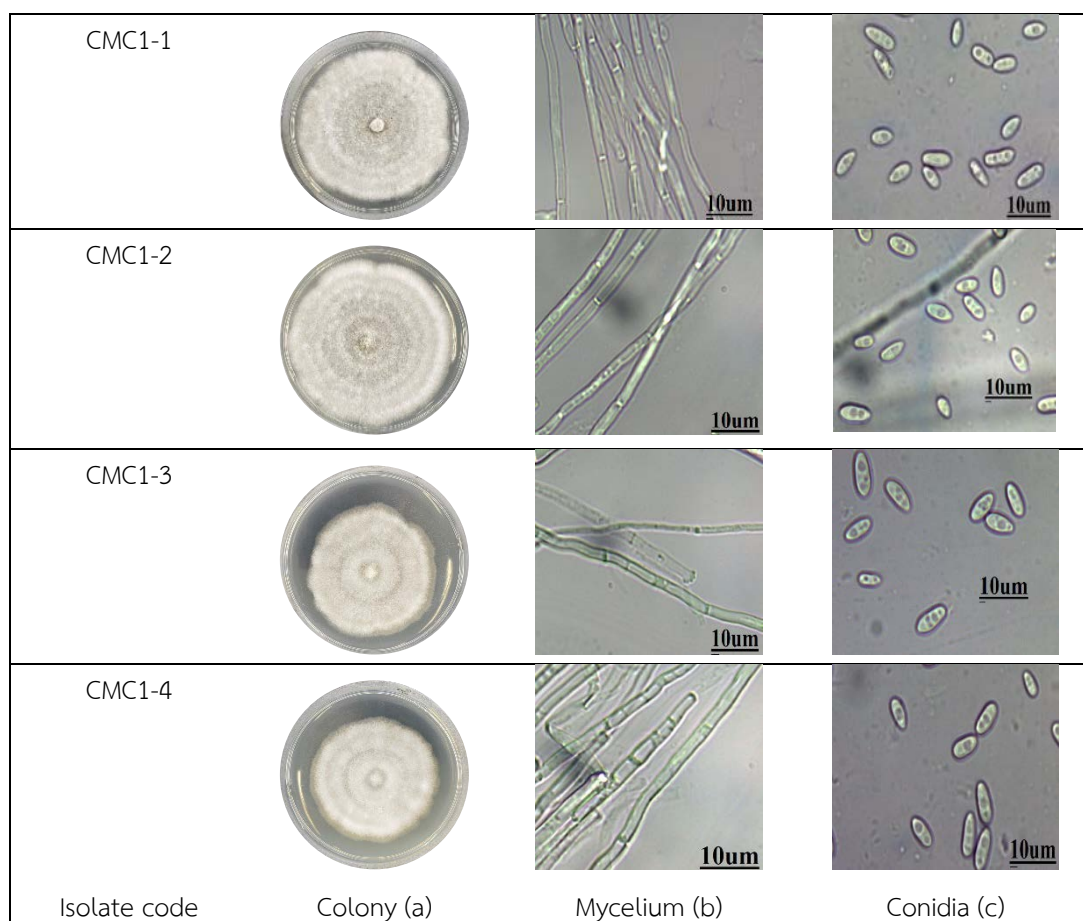


Figure 2 Morphological of *Colletotrichum* sp. (4 isolates:) colony (a), mycelium (b), and conidia (c).

3.2 ทดสอบความสามารถในการก่อโรคนบนใบทุเรียน

จากการทดสอบความสามารถในการก่อโรคของเชื้อรา *Colletotrichum* spp. จำนวน 4 ไอโซเลต (CMC1-1, CMC1-2, CMC1-3 และ CMC1-4) เป็นเวลา 7 วัน พบว่าทุกไอโซเลตสามารถก่อให้เกิดโรคแอนแทรคโนสบนใบทุเรียน มีลักษณะอาการที่บริเวณทำการปลูกเชื้อลงที่ใบ เป็นรอยไหม้แห้งเป็นวงสีเหลืองน้ำตาลอ่อน มีลักษณะคล้ายวงรี เรียงซ้อนกัน และ แพร่กระจายออกเป็นวงกว้าง จนเต็มใบในที่สุด (Figure 3)

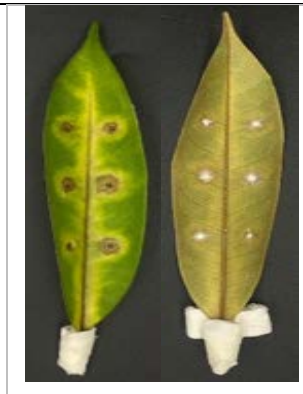


Figure 3 Symptoms on durian leaves after inoculated by *Colletotrichum* spp. for 7 days.

3.3 ประสิทธิภาพของสารเคมีป้องกันกำจัดเชื้อรา fluazinam ในสภาพห้องปฏิบัติการ

จากการศึกษาประสิทธิภาพของสาร fluazinam ที่ระดับความเข้มข้น 0, 1, 10, 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ต่อการเจริญเติบโตของเชื้อรา *Colletotrichum* spp. ไอโซเลทที่ CMC1-1, CMC1-2, CMC1-3 และ CMC1-4 พบว่าระดับความเข้มข้นของสารมีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญต่อการเจริญเติบโตทางเส้นใย กล่าวคือสาร fluazinam ที่ระดับความเข้มข้น 100 พีพีเอ็ม สามารถควบคุมการเจริญเติบโตของเชื้อราได้ดีที่สุดทั้ง 4 ไอโซเลท คือ 78.99 – 90.73 เปอร์เซ็นต์ จากผลการทดลองข้างต้นไม่สอดคล้องกับรายงานของ Meng *et al.* [11] และ Li *et al.* [12] ที่พบว่าสารเคมีป้องกันกำจัด fluazinam มีระดับความเข้มข้น 0.5 พีพีเอ็ม สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อรา *C. nymphaeae* สาเหตุโรคผลเน่าของแอปเปิ้ล และ 0.1–0.5 พีพีเอ็ม ยับยั้งเชื้อรา *C. gloeosporioides* สาเหตุโรคแอนแทรคโนบนผลและใบของวอลนัทได้ดี ตามลำดับ

Table 1 Inhibitory effects of fluazinam at 1, 10, 100 ppm on mycelial growth of 4 isolates of *Colletotrichum* spp for 4 days.

Concentration (พีพีเอ็ม)	Colony diameter (mm.)				Percent of inhibition (%) *			
	CMC1-1	CMC1-2	CMC1-3	CMC1-4	CMC1-1	CMC1-2	CMC1-3	CMC1-4
control	16.32 ^A	16.54 ^A	17.66 ^A	16.66 ^A	-	-	-	-
1	11.53 ^B	10.74 ^B	10.75 ^B	9.74 ^B	42.31	50.21	54.54	59.35
10	9.16 ^C	9.28 ^C	10.83 ^B	8.98 ^B	63.19	62.86	53.93	65.82
100	1.04 ^D	7.11 ^D	7.66 ^C	6.72 ^C	90.73	81.69	78.92	85.25
	**	**	**	**				
CV. (%)	6.19	4.83	8.36	5.00				

Values expressed are means with 4 replications. The different letters are significantly different as determined by least significant difference test at $p < 0.01$

4. สรุป

จากการเก็บตัวอย่างโรคแอนแทรคโนบนต้นกล้วยเรียน แยกได้เชื้อรา *Colletotrichum* spp. จำนวน 4 ไอโซเลท คือ CMC1-1, CMC1-2, CMC1-3 และ CMC1-4 ทุกไอโซเลทก่อให้เกิดโรคบนทุเรียน 100 เปอร์เซ็นต์ และพบว่าสารเคมีป้องกันกำจัดเชื้อ fluazinam ที่ระดับความเข้มข้น 100 พีพีเอ็ม สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตทางเส้นใยของเชื้อรา *Colletotrichum* spp. ได้ดีที่สุดทุกไอโซเลท คือ 78.99 – 90.73 เปอร์เซ็นต์

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาพืชสวน ภาควิชาเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] สุกานดา สารน้อย และแวรวี ลาภเก็น. 2564. ภูมิศาสตร์การตลาด กับอุตสาหกรรมเศรษฐกิจสร้างสรรค์ “ทุเรียนนนทบุรี”. วารสารบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม ปีที่ 16 ฉบับที่ 1.
- [2] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2566. สถิติการเกษตรของประเทศไทย ปี ๒๕๖๕. (ระบบออนไลน์). แหล่งข้อมูล: <http://www.oae.go.th/assets/portals/1/ebookcategory>. (2 มกราคม 2567).
- [3] สำนักงานวิจัยเศรษฐกิจการเกษตร. 2566. สถิติการเกษตรของประเทศไทย ปี 2563. [ระบบออนไลน์]. แหล่งข้อมูล: <https://www.oae.go.th/assets/portals/1/files/journal/2564/>. (6 พฤษภาคม 2564).
- [4] วุฒิ ใจปิน และ สรัญยา ณ ลำปาง. 2557. “ผลของเชื้อแอคติโนไมซีจากดินต่อการเจริญของเชื้อรา *Colletotrichum gloeosporioides* สาเหตุโรคแอนแทรคโนสของสตอเบอรี่ที่ต้านทานต่อคาเบนดาซิม. ” วารสารเกษตร. 30(1): 1-10
- [5] ธิดา เดชชวบ. 2559. สารเคมีที่ใช้ในการป้องกันกำจัดโรคพืช. กรุงเทพฯ: เอเชีย ดิจิตอล การพิมพ์.
- [6] Wong, C., H., and Wen., H., K., 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
- [7] Suksiri, S., Laipasu, P., Soyong, K., and Poeaim, S. 2018. Isolation and Identification of *Phytophthora* sp. and *Pythium* sp. from Durian Orchard in Chumphon Province, Thailand. Int. J. Agric. Technol. 14: 389-402.
- [8] รุ่งทิพย์ สังข์เผือก. 2557. “การศึกษาชนิดเชื้อราสาเหตุของโรคแอนแทรคโนสในส้มสายสุ่น”. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์ มหาบัณฑิต สาขาวิชาพืชศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. นครราชสีมา. 127 หน้า.
- [9] พิสุทธิ เอกอานวย. 2563. โรคและแมลงศัตรูพืชที่สำคัญ. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพฯ. 1008 หน้า.
- [10] สันทนา ขวัญมณี, สุทิน พรหมพงษ์, อัจฉรา เพิ่ม และเสาวนิตย์ ขอบบุญ. 2559. การเป็นปฏิปักษ์ของเชื้อราจากมูลสัตว์ต่อเชื้อรา *Colletotrichum* sp. สาเหตุโรคแอนแทรคโนสในพริก. โปรแกรมวิชาชีววิทยาและชีววิทยาประยุกต์คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา. 44(2): 307-317.
- [11] Rulyu, M., Jhulia, G and Guido, S, 2023. Reduced sensitivity to fluazinam and tebuconazole in *Colletotrichum nymphaeae* from apple and investigation of target gene sequences. Tropical Plant Pathology. 1-7.
- [12] Fuxin, L, Jiawen, C, Qian, C, Ziyi, L, Junyuan, S, Yitong, Y, Hanxing, Z and Yang, B, 2023. Identification, Pathogenicity, and Sensitivity to Fungicide of *Colletotrichum* Species That Causes Walnut Anthracnose in Beijing. Beijing University of Agriculture. China. 1-15.

ชนิดและร้อยละการปกคลุมของสัตว์ทะเลหน้าดินเกาะติดบริเวณแนวปะการังเทียมเกาะจระเข้ จังหวัดชุมพร Species composition and percentage of coverage of sessile benthic fauna on artificial reef at Jarakhae Island, Chumphon province

นฤตล อินทรโยธา^{1,*} และ มณฑล แก่นมณี¹
Narudon Intarayota^{1,*} and Monthon Ganmanee¹

¹หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิตการประมง คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

¹Program in Fisheries Science, Faculty of Agricultural Technology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520 Thailand

*Corresponding author: Narudon Intarayota, e-mail address: 62604058@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงชนิดและร้อยละการปกคลุมของสัตว์ทะเลหน้าดินเกาะติดบนโครงสร้างปะการังเทียมแบบคอนกรีต บริเวณเกาะจระเข้ จังหวัดชุมพร พิกัด Lat. 10.548714 Long. 99.366381 ทำการเก็บข้อมูลทุก 3 เดือน ระหว่างเดือนสิงหาคม พ.ศ.2564 ถึง เดือน กรกฎาคม พ.ศ.2565 ด้วยวิธี photo quadrat ขนาด 25x25 เซนติเมตร โดยการดำน้ำแบบใช้ถังอัดอากาศ (SCUBA Diving) และแต่ละครั้งทำการบันทึกภาพสิ่งมีชีวิตบนโครงสร้างปะการังเทียมด้านบน ด้านข้าง และด้านล่างในตำแหน่งเดิมทั้งหมด 20 โครงสร้าง นำภาพที่ได้มาตรวจสอบชนิดและร้อยละการปกคลุมโดยใช้โปรแกรม Coral Point Count with Excel extensions (CPCe) ผลการศึกษาพบสัตว์เกาะติดทั้งหมด 5 ไฟลัม 7 ชนิดประกอบด้วย ไฟลัม Porifera 1 ชนิด คือ ฟองน้ำเคลือบสีแดง (*Monanchora unguiculata*) ไฟลัม Cnidaria 2 ชนิดคือโคโลนีขนาดเล็กของปะการังแข็งชนิด *Porites* sp. และ *Pavona decussata* ไฟลัม Annelida 1 ชนิดคือ หนอนท่อ (tube worm) ไฟลัม Arthropoda 1 ชนิด คือเพรียงหิน (*Amphibalanus amphitrite*) ไฟลัม Mollusca 2 ชนิด คือหอยนางรม (*Ostrea* sp.) และหอยนางรมหนาม (*Spondylus* sp.) ร้อยละการปกคลุมสัตว์เกาะติดด้านข้างและด้านบนของโครงสร้างปะการังเทียมเฉลี่ย 75.80 ± 4.82 และ 65.06 ± 6.09 ตามลำดับซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) กับด้านล่างซึ่งมีร้อยละการปกคลุมเฉลี่ย 24.45 ± 13.43 โดยฟองน้ำเคลือบสีแดง (*M. unguiculata*) เป็นสัตว์เกาะติดชนิดเด่น ด้านบนของโครงสร้างโดยมีร้อยละการปกคลุมในแต่ละครั้งของการสำรวจระหว่าง 25.25 ถึง 48.15 รองลงมาคือหอยนางรม (*Ostrea* sp.) ซึ่งมีร้อยละการปกคลุมในแต่ละครั้งของการสำรวจระหว่าง 15.30 ถึง 17.95 ส่วนด้านข้างมีร้อยละการปกคลุมของเพรียงหินสูงที่สุดซึ่งอยู่ระหว่าง 32.50 ถึง 41.05 รองลงมาคือฟองน้ำเคลือบสีแดงซึ่งมีร้อยละการปกคลุมระหว่าง 21.55 ถึง 40.55 ในขณะที่ด้านล่างของโครงสร้างมีร้อยละการปกคลุมของสัตว์เกาะติดรวมต่ำลงจาก 42.2 ในการสำรวจครั้งที่สองเหลือเพียงร้อยละ 8.2 ในการสำรวจครั้งสุดท้ายเนื่องจากมีตะกอนทับถมอย่างหนาแน่นบริเวณด้านล่างของโครงสร้างปะการังเทียม

คำสำคัญ: ชนิด, ร้อยละการปกคลุม, สัตว์เกาะติด, ปะการังเทียม, เกาะจระเข้

Abstract

This study examined changes in species and percentage cover of sessile macrofauna on concrete artificial reefs deployed around Jarakhae Island, Chumphon Province, over a period of one year. Data were collected every three months from August 2021 to July 2022 using the photo quadrat method during SCUBA diving sessions. Images of sessile macrofauna on the top, sides, and bottom of all 20 structures were recorded at each session. The images were analyzed to determine the type and percentage coverage using the Coral Point Count with Excel extensions (CPCe) software. The study identified a total of 5 phylum and 7 species including one species of Porifera (*Monanchora unguiculata*), two species of Cnidaria (*Porites* sp. and *Pavona decussata*), one species of Annelida (tube worm), one species of Arthropoda (*Amphibalanus amphitrite*), and two species of Mollusca (*Ostrea* sp. and *Spondylus* sp.). The percentage cover of sessile macrofauna on the

sides and tops of the artificial reef structures averaged 75.80 ± 4.82 and 65.06 ± 6.09 , respectively, which was statistically significantly different ($p < 0.01$) from the bottom surfaces, where the average coverage was only 24.45 ± 13.43 . The dominant species on the top was the red encrusting sponge (*M. unguiculata*), with cover percentages ranging from 25.25 to 48.15 during the surveys, followed by the oyster (*Ostrea sp.*) with coverage of 15.30 to 17.95. The barnacle (*A. amphitrite*) had the highest cover percentage on the sides, ranging from 32.50 to 41.05, followed by the red encrusting sponge, ranging from 21.55 to 40.55. The bottom cover percentages decreased significantly over time due to heavy sedimentation, dropping from 42.2 in the second survey to just 8.2 in the final survey.

Keywords: Species, percentage of coverage, sessile benthic fauna, Artificial Reefs, Jarakhae Island

1. บทนำ

ทะเลเป็นแหล่งผลิตอาหารที่ใหญ่ที่สุด มีการจับสัตว์น้ำขึ้นมาใช้ประโยชน์ด้วยวิธีการต่าง ๆ [1] ปะการังเทียมจึงถูกจัดสร้างขึ้นเพื่อเป็นเครื่องมือในการอนุรักษ์สัตว์น้ำ ทำหน้าที่เป็นแหล่งอาศัยของสัตว์ทะเล [2] ปะการังเทียมช่วยลดปัญหาที่เกิดขึ้นกับแนวปะการังได้ทั้งการฟื้นฟูแนวปะการัง การเป็นแหล่งที่อยู่อาศัยของสัตว์น้ำ ซึ่งสามารถกลายเป็นแหล่งทำการประมงได้เช่นกัน [3]

ปะการังเทียม เกิดขึ้นครั้งแรกในปี พ.ศ. 2338 ที่ประเทศญี่ปุ่น โดยชาวประมงได้ทดลองสร้างโครงไม้ขนาดใหญ่และน้ำหนักไม่เล็กลงมาผูกติดไว้ ถ่วงน้ำหนักด้วยถ่วงทรายพบว่าปริมาณสัตว์น้ำที่จับได้จากบริเวณรอบๆ โครงไม้มีปริมาณมากกว่าในบริเวณที่มีเรืออับปาง จึงทำให้มีการสร้างโครงสร้างเหล่านี้ในทะเลมากขึ้น ในประเทศสหรัฐอเมริกาได้มีการริเริ่มในปี ค.ศ 1800 โดยใช้ถังไม้บรรจุด้วยคอนกรีต และนำวัสดุต่าง ๆ มาประกอบกันเป็นปะการังเทียมขึ้น แล้วทำไปวางบริเวณชายฝั่ง พบว่าสามารถเพิ่มผลผลิตสัตว์น้ำได้มากขึ้น [4]

ปะการังเทียมที่ถูกจัดวางบนพื้นท้องทะเลเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวและความซับซ้อนของพื้นที่เป็นการเปิดโอกาสให้ตัวอ่อนของสัตว์เกาะติดลงเกาะบนพื้นที่ยาวมากยิ่งขึ้นการลงเกาะของตัวอ่อนบนพื้นผิวปะการังเทียมนั้นเป็นกระบวนการที่เรียกว่า การเปลี่ยนแปลงแทนที่ทางนิเวศวิทยา ซึ่งกระบวนการเปลี่ยนแปลงแทนที่นี้จะประสบความสำเร็จหรือไม่ขึ้นอยู่กับปัจจัยกายภาพและชีวภาพของพื้นที่นั้น ๆ [5] จากผลการศึกษาพบว่ากระบวนการเปลี่ยนแปลงแทนที่บนพื้นผิวปะการังเทียมขึ้นอยู่กับปัจจัยกายภาพหลายปัจจัย เช่น กระแสน้ำ ตะกอน [6] ตำแหน่งที่จัดวางปะการังเทียม รวมถึงรูปแบบและทิศทางของพื้นผิวซึ่งมีความสัมพันธ์กับปริมาณตะกอนบนพื้นวัสดุ เช่น ปะการังเทียมเพื่อเพิ่มพื้นที่ยึดเกาะจะมีพื้นที่หน้าตัดแบบราบ ปะการังเทียมเพื่อเป็นแหล่งอาศัยของปลาจะมีโครงสร้างค่อนข้างซับซ้อน และปะการังเทียมเพื่อการท่องเที่ยวจะมีลักษณะและรูปแบบที่ดึงดูดนักท่องเที่ยว เป็นต้น [7] สารอาหารในมวลน้ำ รูปแบบพื้นผิววัสดุที่สร้างปะการังเทียม สำหรับปัจจัยทางชีวภาพนั้นมีอิทธิพลต่อกระบวนการเปลี่ยนแปลงแทนที่บนพื้นผิวปะการังเทียมเล็กน้อย ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลคือ ศักยภาพการผลิตและปริมาณของตัวอ่อนรวมถึงความสามารถในการลงเกาะพื้นผิวของตัวอ่อน และการครูดกินของสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ [7]

ปัจจัยที่มีผลต่อการเข้ามาอาศัยของสิ่งมีชีวิตเกาะติด ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการอยู่รอดของตัวอ่อนและปริมาณการลงเกาะของตัวอ่อนในธรรมชาติมีหลายประการ ได้แก่ ปริมาณตัวอ่อน กระแสน้ำ พื้นผิวการลงเกาะ และการแก่งแย่งพื้นที่การลงเกาะ รวมถึงผู้ล่าในแนวปะการังเช่น ปลา *Pomacentrus moluccensis*, *Abudefduf whitleyi* and *Caesio cunning* ที่บริโภคไข่ปะการัง [8],[9] คราบน้ำมันรวมถึงสารเร่งการสลายตัวของคราบน้ำมันโดยมีผลไปยังการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (metamorphosis) ของตัวอ่อนปะการัง เมื่อตัวอ่อนพร้อมที่จะลงเกาะ ความสำเร็จในการลงเกาะ (recruitment) ของตัวอ่อนขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ได้แก่ พิกัดภูมิศาสตร์ ในการศึกษาการลงเกาะของปะการังที่เกรทแบร์ริเออร์รีฟ ประเทศออสเตรเลีย พบว่าตัวอ่อนปะการังที่เกิดจากการปฏิสนธิภายในโคโลนีแม่บริเวณละติจูดต่ำพบการลงเกาะได้มากกว่าบริเวณละติจูดสูง แต่ตัวอ่อนปะการัง

ที่เกิดจากการปฏิสนธิภายนอกโคโคไนแม์ มีการลงเกาะมากทางด้านเหนือหรือบริเวณละติจูดสูงและมีปริมาณการลงเกาะก่อนๆ ลดลงในละติจูดต่ำลง [10] พื้นที่ว่างหรือการแก่งแย่งพื้นที่ของสาหร่ายเป็นปัจจัยอีกอย่างที่สำคัญในการลงเกาะของตัวอ่อนปะการัง พื้นผิวในการลงเกาะสำหรับปะการังในทะเลเป็นปัจจัยจำกัด ดังนั้นในบางช่วงเวลาที่สาหร่ายมีการเติบโตขยายพื้นที่ที่มากจะไม่พบ การลงเกาะของปะการังหรือพบลงเกาะของปะการังน้อย [11],[12],[13] ปรากฏการณ์ปะการังฟอกขาวเป็นอีกปัจจัยที่ทำให้ ปะการังที่พึ่งลงเกาะมีอัตราการตายสูง โดยพบว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิน้ำทะเลมากในช่วงเวลาสั้นหรืออุณหภูมิ น้ำ สูงขึ้น ปริมาณสาหร่ายซูแซนเทลลีในเนื้อเยื่อจะลดลงจนปะการังไม่สามารถอยู่ได้เนื่องจากไม่เกิดการสังเคราะห์แสงจากสาหร่ายซึ่งเป็น แหล่งพลังงานหลักของปะการัง นอกจากนั้นปริมาณตะกอนที่สูงขึ้นยังมีส่วนทำให้การลงเกาะของตัวอ่อนน้อยลง เนื่องจากตัวอ่อนไม่สามารถยึดติดกับพื้นผิวที่มีตะกอนสูงได้ หรือมีอัตราการตายหลังการลงเกาะสูง เพราะตะกอนไปบดบังแสงทำให้ประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงลดลง [14],[15]

สัตว์เกาะติดบนปะการังเทียม มีความสำคัญต่อระบบนิเวศหลายประการ ความซุกซมและมวลชีวภาพของสัตว์หน้าดินจึงเป็นดัชนีบอกความอุดมสมบูรณ์ ของแหล่งน้ำได้ สัตว์หน้าดินมีบทบาทสำคัญต่อการหมุนเวียนของสารอาหารที่สะสมอยู่ในตะกอน ดินกลับสู่ผิวน้ำ สัตว์หน้าดิน แบ่งย่อยเป็น 3 กลุ่ม คือกลุ่มที่ขุดรู (Burrower) หรือฝังตัวอยู่ตามพื้นทะเล เช่น ดอกไม้ทะเลบาง ชนิด ไส้เดือนทะเล หอย และปูบางชนิด กลุ่มเกาะนิ่งอยู่กับที่ (Sessile) บางครั้งอาจเกาะติดจนเคลื่อนย้ายไม่ได้เลย เช่น ฟองน้ำ ปะการัง กัลปังหา เปรียงหิน และหอยบางชนิด และกลุ่มคืบคลานหน้าดิน (Demersal) ซึ่งบางครั้งอาจมีการฝังตัวหรือขุดรูอาศัย ชั่วขณะตามพื้นทะเล เช่น กุ้ง กั้ง ปู เอกโคโคไนเดิร์ม [16] พื้นผิวแหล่งอาศัยสัตว์ทะเลมีลักษณะแข็ง จึงเหมาะสมต่อการยึดเกาะ ของ สัตว์เกาะติด โดยพื้นผิวที่เป็น คอนกรีต จะเหมาะสมต่อการยึดเกาะกว่าวัสดุแบบอื่น ชนิดของสัตว์เกาะติดที่พบ มักจะคล้าย ๆ กัน ได้แก่ ไบรโอซัว ไส้เดือนทะเลชนิดสร้างท่อ หอยสองฝา เปรียงหิน เปรียงหัวหอม กัลปังหา และฟองน้ำ เป็นต้น นอกจากนี้ ยังพบ ปะการัง และสาหร่ายทะเลด้วย ในปี 2521 สุทธิชัย และคณะ (2521) ได้ทำการติดตามผลการสร้าง แหล่งอาศัยสัตว์ทะเลที่เกาะสี ชัง เป็นเวลา 8 เดือน พบว่าในช่วงสัปดาห์ที่ 2 - 3 มีสาหร่ายมาเกาะ เมื่อ 1 เดือน ผ่านไปพบเพรียงและหอยนางรม ในเดือนที่ 2 พบฟองน้ำ ในเดือนที่ 4 พบไบรโอซัว และพบไฮดรอยด์และเพรียงหัวหอม ในเดือนที่ 8 นอกจากนี้ยังพบสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง ชนิดอื่น ๆ ด้วย สำรวจสิ่งมีชีวิตที่ เกาะติดบนวัสดุที่ใช้จัดสร้างแหล่งอาศัยสัตว์ทะเลที่จังหวัดระยอง ในปี 2531 โดยเก็บตัวอย่างในเชิงปริมาณ พบว่าส่วนใหญ่สัตว์หน้าดินขนาดใหญ่ที่อยู่ภายในแหล่งอาศัยสัตว์ทะเลมีความหนาแน่นมากกว่าบริเวณ ภายนอกแหล่ง อาศัยสัตว์ทะเล ส่วนนิพนธ์ และคณะ (2537) พบว่ามีสัตว์ 7 ไฟลัม ที่อาศัยอยู่บนโครงสร้างของ แหล่งอาศัยสัตว์ทะเลจังหวัด ระยอง ซึ่งได้แก่ Porifera, Coelenterata, Annelida, Echinodermata, Mollusca, Arthropoda and Chordata นอกจากนี้ยัง พบสาหร่ายและไบรโอซัวด้วย อีกทั้ง ธานินทร์ แลคณะ (2541) ได้การศึกษาถึงการเกิดขึ้นของสิ่งมีชีวิตบนแหล่งอาศัยสัตว์ทะเลใน บริเวณอ่าวเพ จังหวัดระยอง พบว่านอกจาก แพลงก์ตอนแล้ว บนแหล่งอาศัยสัตว์ทะเลยังพบ หอยฝาเดียว และหอยสองฝา 61 สกุล จำนวน 200 ชนิด และพบ สัตว์น้ำอื่นอีก 17 กลุ่ม จำนวน 63 ชนิด ได้แก่ สัตว์ทะเลพวก ฟองน้ำ ดอกไม้ทะเล หนอนทะเล กุ้งชนิดต่าง ๆ เม่นทะเล ลิ้นทะเล ทากทะเล ดาวทะเล แดงกวางทะเล เปรียงชนิดต่าง ๆ และปลา นอกจากนี้ยังพบสาหร่ายทะเล จำนวน 14 ชนิด ซึ่งส่วนใหญ่เป็นสาหร่ายวันสีแดง สีน้ำตาล และสาหร่ายหูหนู ยูพเรศ และคณะ (2542) ได้ทำการศึกษา เพอร์โฟ ตอน (สิ่งมีชีวิตซึ่งเกาะกับวัตถุใต้น้ำ) บริเวณแหล่งอาศัยสัตว์ทะเล บริเวณอ่าวศรีราชา จังหวัดชลบุรี เป็นระยะเวลา 1 ปี พบสัตว์ที่ อาศัยบริเวณแหล่งอาศัยสัตว์ทะเล จำนวน 19 กลุ่ม จาก 8 ไฟลัม ได้แก่ ฟองน้ำ ปะการังแข็ง ไฮดรอยด์ ปะการังอ่อน กัลปังหา ดอกไม้ทะเล ไบรโอซัว หนอนท่อ หอยฝาเดียว หอยสองฝา เปรียงหิน ไอโซพอด แอมฟิพอด กุ้ง ปู ปลิงทะเล เม่นทะเล ดาวประา และเพรียงหัวหอม มาโนช และคณะ (2546) ทำการติดตามผลการจัดสร้างแหล่งอาศัยสัตว์ทะเล ในโครงการฟื้นฟูทรัพยากรชายฝั่ง ทะเล จังหวัดปัตตานีและนราธิวาสอันเนื่องมาจากพระราชดำริ ซึ่งจัดสร้างด้วยตู้รถไฟ แท่งคอนกรีต และท่อคอนกรีต จำนวน 10 แห่ง หลังการจัดวางไปแล้วประมาณ 2 เดือน โดยเก็บตัวอย่างดิน มาร่อนด้วยตะแกรงสามชั้น เก็บรักษาสภาพตัวอย่างสัตว์หน้าดิน ด้วยฟอร์มาลิน 10 % เพื่อนำไปจำแนกชนิดภายใต้ กล้องจุลทรรศน์ พบสัตว์หน้าดินขนาดใหญ่ 7 ไฟลัม ได้แก่ Platyhelminthes, Annelida, Mollusca, Arthropoda, Echinodermata, Brachiopoda Chordata การเปลี่ยนแปลงชนิดของสัตว์เกาะติดในแต่ละ ช่วงเวลาจากการศึกษาผลของเวลาและระดับความลึกต่อชนิดสัตว์เกาะติด บนเรือหลวงสัตกูด เกาะเต่า จังหวัดสุราษฎร์ธานี ของ

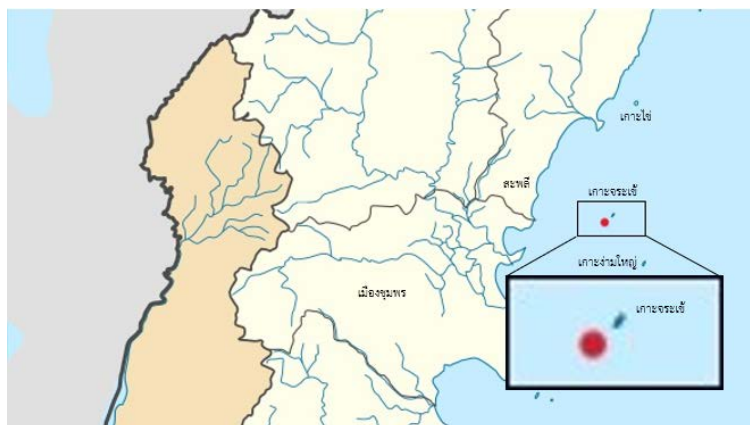
พิสดาร และคณะ (2557) กล่าวว่า หลังจากการวางเรือ 3 เดือน พบหอยนางรมเพียงชนิดเดียว หลังจากวางเรือ 9 เดือน พบ 2 ชนิด คือหอยนางรมและปะการังดำ หลังจากวางเรือ 21 เดือน พบ 3 ชนิด คือปะการังดอกเห็ดเล็ก ปะการังดำ และแส้ทะเล วางเรือ 24 เดือน พบ 5 ชนิด คือ ฟองน้ำ ปะการังดอกเห็ดเล็ก ปะการังสมองร่องสั้น ปะการังใบหิน ปะการังดำ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงชนิดและปริมาณของสัตว์เกาะติด บริเวณปะการังเทียม เกาะจระเข้ ตำบลสะพลี อำเภอบะพือ จังหวัดชุมพร เนื่องจากเกาะจระเข้ยังไม่ไกลจากชายฝั่งเป็นแหล่งท่องเที่ยวและแหล่งทำการประมง ซึ่งจัดวางโดยกรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่งในเดือน กรกฎาคม 2562 โดยวัสดุที่ใช้เป็นวัสดุที่ออกแบบมาโดยเฉพาะรูปทรงแท่งคอนกรีต เพื่อนำข้อมูลที่ได้ มาประกอบการพิจารณาถึงประสิทธิภาพของปะการังเทียมแบบแท่งคอนกรีต ซึ่งวางมาแล้วเป็นระยะเวลา 1 ปี ในแง่ของชนิดและร้อยละการปกคลุมของสัตว์เกาะติด ผลที่ได้จากการศึกษายังมีส่วนช่วยเสริมสร้างความรู้ความเข้าใจด้านนิเวศวิทยาของสัตว์ทะเลที่อาศัยในแหล่งปะการังเทียม

2. วิธีการศึกษา

2.1 สถานที่และเวลาการเก็บตัวอย่าง

พื้นที่เก็บข้อมูลคือแนวปะการังเทียมใกล้เกาะจระเข้ พิกัดละติจูดที่ 10.548714 องศาเหนือ ลองจิจูด 99.366381 องศาตะวันออก มีความลึก 11 เมตร ขนาดพื้นที่ 180 ตารางเมตร ต.สะพลี อ.ปะทิว จ.ชุมพร (ภาพที่ 1) โดยเก็บข้อมูลทุกๆ 3 เดือน เป็นระยะเวลา 1 ปี



ภาพที่ 1 พื้นที่ทำการศึกษาคความหลากหลายชนิดของสัตว์เกาะติดบนปะการังเทียม และแนวปะการังเทียมใกล้หินกองทางจระเข้ ต.สะพลี อ. ปะทิว จังหวัดชุมพร

2.2 การวางตำแหน่งจุดสำรวจ

ปะการังเทียมโครงสร้างสี่เหลี่ยมมุมมนเป็นชุด ๆ ละ 4 แท่ง (ภาพที่ 2) มีขนาดชุดละ กว้าง x ยาว x สูง ชุดละ 3 x 3 x 1.5 เมตร โดยจุดเก็บตัวอย่าง อยู่บริเวณตรงกลางของด้านบน ส่วนตรงกลางของความสูง และบนคานด้านล่าง ซึ่งมีทั้งหมด 20 ชุด รวม 60 จุดเก็บตัวอย่าง โดยแต่ละจุดเก็บตัวอย่างจะทำสัญลักษณ์เพื่อให้สามารถเก็บข้อมูลครั้งต่อไปที่จุดเดิม โดยปะการังเทียมทั้ง 20 ชุดถูกวางแบบสุ่ม โดยแต่ละชุดมีระยะห่าง ไม่เท่ากัน



ภาพที่ 2 รูปแบบปะการังเทียมที่ทำการสำรวจ และจุดเก็บข้อมูลบนปะการังเทียม

2.3 การเก็บข้อมูล

ดำเนินการโดยใช้กรอบสี่เหลี่ยมจัตุรัส (quadrat) ทำด้วยอลูมิเนียม ขนาด 25x25 เซนติเมตร วางบนกึ่งกลางด้านบน ด้านข้าง และคานด้านล่างของปะการังเทียม บันทึกภาพใน quadrat ด้วยกล้องถ่ายภาพใต้น้ำ ซึ่งการบันทึกภาพจะต้องให้มีระยะห่างระหว่างกล้องกับพื้นผิวประมาณ 20-25 เซนติเมตร จะได้ด้านบนของปะการังเทียม 20 จุด ตรงกลางของความสูง 20 จุด และบนคานด้านล่าง 20 จุด สรุป ปะการังเทียมมีทั้งหมด 20 ชุด จุดสำรวจ 60 จุด

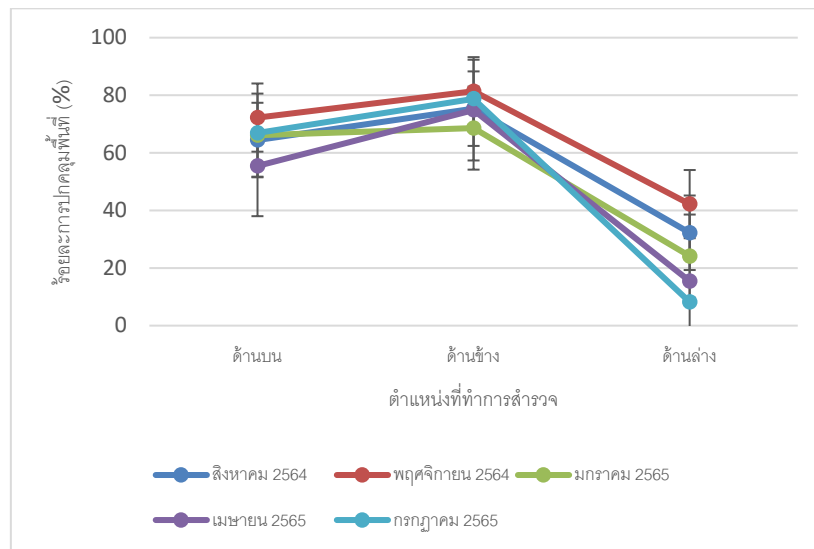
2.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ปกคลุมพื้นที่ของสิ่งมีชีวิตเกาะติดบนโครงสร้างของปะการังเทียมทำโดยการจำแนกชนิดสัตว์หน้าดินโดยเปรียบเทียบกับรูปภาพและลักษณะ เพื่อแยกออกเป็นไฟล์ม จนถึง Specie นำภาพถ่ายมาจัดกลุ่มใหม่เป็นระบบก่อนที่จะนำมาแยกชนิดของสิ่งมีชีวิตเกาะติดประเภทต่างๆ [22] ซึ่งการวิเคราะห์ข้อมูลความหลากหลายของสัตว์หน้าดินบนปะการังเทียมจะทำการวิเคราะห์ภาพ รวมทั้งสิ้น 60 ภาพ โดยใช้โปรแกรม Coral Point Count with Excel extensions (CPCe) รุ่น (version) 4.1 [23]

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

จากการเก็บข้อมูลชนิดและอัตราการปกคลุมพื้นที่ของสัตว์เกาะติดบนปะการังเทียมบริเวณเกาะจะระระหว่างเดือน สิงหาคม พ.ศ.2564 ถึง เดือน กรกฎาคม พ.ศ.2565 ซึ่งเก็บข้อมูลทุก ๆ 3 เดือน เป็นระยะเวลา 1 ปี พบสัตว์เกาะติดทั้งหมด 5 ไฟล์ม 7 ชนิดประกอบด้วย ไฟล์ม Porifera 1 ชนิดคือ ฟองน้ำเคลือบสีแดง (*Monanchora unguiculata*) ไฟล์ม Cnidaria 2 ชนิดคือโคโลนีขนาดเล็กของปะการังแข็งชนิด *Porites* sp. และ *Pavona decussata* ไฟล์ม Annelida 1 ชนิดคือ หนอนท่อ (tube worm) ไฟล์ม Arthropoda 1 ชนิด คือเพรียงหิน (*Amphibalanus amphitrite*) ไฟล์ม Mollusca 2 ชนิด คือหอยนางรม (*Ostrea* sp.) และหอยนางรมหนาม (*Spondylus* sp.) ซึ่งใกล้เคียงกับการศึกษาผลของเวลา และระดับความลึกต่อชนิดสัตว์เกาะติด บนเรือหลวงสัตกุด เกาะเต่า จังหวัดสุราษฎร์ธานี ของพิสตาร์, (2557) ที่พบสัตว์เกาะติดทั้งหมด 8 ชนิด มี หอยนางรม (*Ostrea* sp.) ฟองน้ำ (*Zygomysca*) *parishii*) และปะการัง (*Porites* sp.) [24] ที่พบคล้ายกัน และตรงกับการศึกษาจำนวนภาพที่น้อยที่สุดในการประเมินพื้นที่ปกคลุมของสิ่งมีชีวิตชนิดเกาะติด บนเรือจมมัดโพน จังหวัดชลบุรี ที่พบสัตว์เกาะติด 4 กลุ่มหลัก ได้แก่ กลุ่มเพรียงหิน (ร้อยละ 47.68) กลุ่มหอยสองฝา (ร้อยละ 23.28) กลุ่มฟองน้ำ (ร้อยละ 10.14) และพื้นผิวอื่นๆ (ร้อยละ 21.90) [25]

เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลด้วย โปรแกรม Coral Point Count with Excel extensions (CPCe) พบว่าร้อยละการปกคลุมสัตว์เกาะติดด้านข้างและด้านบนของโครงสร้างปะการังเทียมเฉลี่ย 75.80 ± 4.82 และ 65.06 ± 6.09 ตามลำดับซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) กับด้านล่างซึ่งมีร้อยละการปกคลุมเฉลี่ย 24.45 ± 13.43 (ภาพที่ 2)

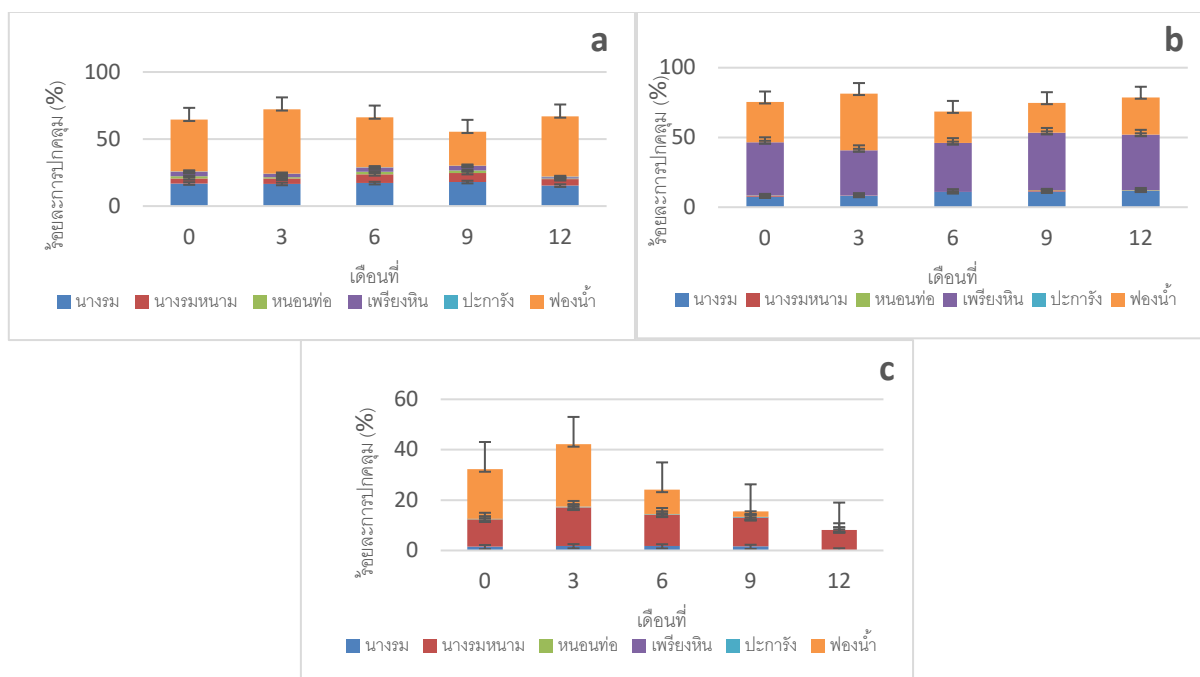


ภาพที่ 3 ร้อยละการปกคลุมพื้นที่ (%) ของสัตว์เกาะติดของทุกด้านในการสำรวจทั้ง 5 ครั้ง

ในเดือนสิงหาคม 2564 ที่ทำการสำรวจ มีหอยนางรม (*Ostrea* sp.) พบได้มากที่สุดที่จุดสำรวจที่ 2 (16.67%) หอยนางรมหนาม (*Spondylus* sp.) พบมากที่สุดที่จุดสำรวจที่ 13 (8.67%) หนอนท่อ (tube worm) พบมากที่สุดที่จุดสำรวจที่ 13 (3.67%) เพรียงหิน (*Amphibalanus amphitrite*) พบมากที่สุดที่จุดสำรวจที่ 11 (33.37%) ปะการัง (*Porites* sp.) พบได้มากที่สุดที่จุดสำรวจที่ 1 (3.33%) ฟองน้ำเคลือบสีแดง (*Monanchora unguiculata*) พบมากที่สุดที่จุดสำรวจที่ 14 (70.33%) จุดสำรวจที่พบสัตว์เกาะติดจำนวนน้อยที่สุดคือจุดสำรวจที่ 2 (พบพื้นผิวของปะการังเทียม 62 %) เมื่อเวลาผ่านไปในเดือนพฤศจิกายน 2564 สัตว์เกาะติดที่ทำการสำรวจมีการเปลี่ยนแปลง คือ มีหอยนางรม (*Ostrea* sp.) พบได้มากที่สุดที่จุดสำรวจที่ 6 (17.33%) โดยเพิ่มขึ้นจากเดือนสิงหาคม 2564 5.66% หอยนางรมหนาม (*Spondylus* sp.) พบมากที่สุดที่จุดสำรวจที่ 8 (15.33%) เพิ่มขึ้น 2.33% หนอนท่อ (tube worm) พบมากที่สุดที่จุดสำรวจที่ 13 (1.67%) ลดลงจากเดือนสิงหาคม 2564 2% เพรียงหิน (*Amphibalanus amphitrite*) พบมากที่สุดที่จุดสำรวจที่ 11 (33.37%) ลดลง 7% ปะการัง (*Porites* sp.) พบได้มากที่สุดที่จุดสำรวจที่ 13 (0.67%) เพิ่มขึ้น 0.34% ฟองน้ำเคลือบสีแดง (*Monanchora unguiculata*) พบมากที่สุดที่จุดสำรวจที่ 18 (74.33%) เพิ่มขึ้น 34.66% จุดสำรวจที่พบสัตว์เกาะติดจำนวนน้อยที่สุดคือจุดสำรวจที่ 2 (พบพื้นผิวของปะการังเทียม 53 %) ลดลง 9% หลังจากผ่านไปในเดือนมกราคม 2565 สัตว์เกาะติดที่ทำการสำรวจมีการเปลี่ยนแปลง คือ มีหอยนางรม (*Ostrea* sp.) พบได้มากที่สุดที่จุดสำรวจที่ 5 (21.67%) โดยเพิ่มขึ้น 14% หอยนางรมหนาม (*Spondylus* sp.) พบมากที่สุดที่จุดสำรวจที่ 16 (23%) เพิ่มขึ้น 10.67% หนอนท่อ (tube worm) พบมากที่สุดที่จุดสำรวจที่ 9 (27.44%) เพิ่มขึ้น 27.44% เพรียงหิน (*Amphibalanus amphitrite*) พบมากที่สุดที่จุดสำรวจที่ 11 (35.33%) เพิ่มขึ้น 8.66% ปะการัง (*Porites* sp.) พบได้มากที่สุดที่จุดสำรวจที่ 16 (0.67%) เพิ่มขึ้น 0.67% ฟองน้ำเคลือบสีแดง (*Monanchora unguiculata*) พบมากที่สุดที่จุดสำรวจที่ 14 (50.33%) ลดลง 17.67% จุดสำรวจที่พบสัตว์เกาะติดจำนวนน้อยที่สุดคือจุดสำรวจที่ 19 (พบพื้นผิวของปะการังเทียม 57.3 %) เพิ่มขึ้น 34.06% เมื่อเวลาผ่านไปเดือนเมษายน 2565 สัตว์เกาะติดที่ทำการสำรวจมีการเปลี่ยนแปลง คือ มีหอยนางรม (*Ostrea* sp.) พบได้มากที่สุดที่จุดสำรวจที่ 14 (20.33%) โดยเพิ่มขึ้น 6.33% หอยนางรมหนาม (*Spondylus* sp.) พบมากที่สุดที่จุดสำรวจที่ 8 (13%) ลดลง 2% หนอนท่อ (tube worm) พบมากที่สุดที่จุดสำรวจที่ 9 (27.44%) ลดลงจากเดือนสิงหาคม 2564 2% เพรียงหิน (*Amphibalanus amphitrite*) พบมากที่สุดที่จุดสำรวจที่ 4 (33.33%) ลดลง 4.33% ปะการัง (*Porites* sp.) พบได้มากที่สุดที่จุดสำรวจที่ 13 (1.67%) จำนวนคงที่ ฟองน้ำเคลือบสีแดง (*Monanchora unguiculata*) พบมากที่สุดที่จุดสำรวจที่ 18 (61%) เพิ่มขึ้น 30.51% จุดสำรวจที่พบสัตว์เกาะติดจำนวนน้อยที่สุดคือจุดสำรวจที่ 18 พบพื้นผิวของปะการังเทียม 65.67 %) เพิ่ม 10.66% เมื่อเวลาผ่านไปเดือนกรกฎาคม 2565 สัตว์เกาะติดที่ทำการสำรวจมีการเปลี่ยนแปลง

คือ มีหอยนางรม (*Ostrea* sp.) พบได้มากที่สุดที่จุดสำรวจที่ 2 (24.33%) โดยเพิ่มขึ้นจากเดือนสิงหาคม 2564 6.66% หอยนางรมหนาม (*Spondylus* sp.) พบมากที่สุดที่จุดสำรวจที่ 8 (9.67%) ลดลง 3.33% หอนนท์ (*Palaeoconchus angulatus*) พบมากที่สุดที่จุดสำรวจที่ 2 (1%) จำนวนที่เพรียงหิน (*Amphibalanus amphitrite*) พบมากที่สุดที่จุดสำรวจที่ 3 (33.33%) เพิ่มขึ้น 7% ปะการัง (*Porites* sp.) พบได้มากที่สุดที่จุดสำรวจที่ 13 (2.33%) เพิ่มขึ้น 0.66% ฟองน้ำเคลือบสีแดง (*Monanchora unguiculata*) พบมากที่สุดที่จุดสำรวจที่ 18 (50.67%) ลดลง 10.33% จุดสำรวจที่พบสัตว์เกาะติดจำนวนน้อยที่สุดคือจุดสำรวจที่ 2 (พบพื้นผิวของปะการังเทียม 67 %) ลดลง 2.33%

ในด้านเวลา สัตว์กลุ่มแรกที่เข้ามาลงเกาะก่อน คือ นางรม (*Ostrea* sp.) และหอยนางรมหนาม (*Spondylus* sp.) เนื่องจากหลังการจัดวางบนพื้นท้องทะเลมีสัตว์เกาะติดจำพวกแรกที่เข้าครอบครองพื้นที่ว่างหรือบนพื้นผิวซีเมนต์คือ กลุ่มหอยสองฝา [6] ซึ่งต่อมาเป็น เพรียงหิน (*Amphibalanus amphitrite*) ที่เข้ามาลงเกาะเนื่องจากเป็นสัตว์เกาะติดที่มีระยะตัวอ่อนสั้นทำให้ลงเกาะได้อย่างรวดเร็ว[24] และเมื่อเวลาผ่านไปสัตว์เกาะติดชนิดอื่นๆเริ่มเข้ามาปกคลุม ซึ่งสัตว์เกาะติดชนิดเด่นคือ ฟองน้ำเคลือบสีแดง (*Monanchora unguiculata*) ซึ่งจะปกคลุมทับไปบนตัว หอยนางรม (*Ostrea* sp.) ทำให้มีพื้นที่ปกคลุมมากที่สุด[6] (ภาพที่ 3)



ภาพที่ 4 แสดงร้อยละการปกคลุมพื้นที่ (%) ของสัตว์เกาะติดด้านบน (a) ด้านข้าง (b) และด้านล่าง (c) ในแต่ละเดือน

ผลจากตำแหน่งการสำรวจ ความแตกต่างของชนิดสัตว์เกาะติดในแต่ละตำแหน่ง ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น กระแสน้ำที่ช่วยในการพัดพาตัวอ่อนให้เกิดการ ลงเกาะ ปริมาณตะกอน แสง ความสามารถในการลงเกาะของตัวอ่อน เป็นต้น [26] ซึ่งด้านบนของโครงสร้างปะการังเทียม พบหอยนางรม (*Ostrea* sp.) เป็นสัตว์ชนิดเด่น เนื่องจากด้านบนของปะการังเทียมเป็นแนวระนาบซึ่งทำให้หอยนางรม (*Ostrea* sp.) ที่มีระยะตัวอ่อนสั้นได้ลงเกาะและเจริญเติบโตได้รวดเร็ว[27] สอดคล้องกับการศึกษาของวันเฉลิม (2561) บนเรือหลวงสัตกูด เกาะเต่า จังหวัดสุราษฎร์ธานี ที่พบสัตว์เกาะติดในกลุ่ม Mollusca 1 ชนิด คือ หอยนางรม (*Ostrea* sp.) พบที่ความลึก 18 เมตร ซึ่งเป็นดาซฟ้าของเรือที่มีลักษณะระนาบคล้ายกับส่วนด้านบนของจุดสำรวจ [28] (ภาพที่ 3)

ด้านข้างของโครงสร้างปะการังเทียม พบเพรียงหิน (*Amphibalanus amphitrite*) เป็นสัตว์ชนิดเด่น เนื่องจากเป็นบริเวณที่สัมผัสกับกระแสน้ำโดยตรงทำให้เพรียงหิน (*A. amphitrite*) ที่ตัวอ่อนลอยมากับกระแสน้ำลง

เกาะได้มากที่สุด [7] ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาสัตว์เกาะติดจากเรือจม พระทอง ที่พบสัตว์เกาะติด ได้แก่ เพรียงหัวหอม เพรียงหิน ฟองน้ำ และหอยสองฝาเป็น จำนวนมาก [29] เนื่องจาก เพรียงหัวหอม ฟองน้ำ และ ไบรโอซัว เป็นสิ่งมีชีวิตกลุ่มแรกที่เข้ามายึดเกาะบนพื้นผิวของเรือ (Primary settlement) และเจริญเติบโตบนพื้นผิวเรือได้อย่างรวดเร็ว [6],[31] เมื่อเวลาผ่านไป สิ่งมีชีวิตที่ยึดเกาะเป็นกลุ่มแรก อาจจะกลายเป็นที่ยึดเกาะของสิ่งมีชีวิตพวกที่ยึดเกาะเป็นอันดับสอง (Secondary settlement) ได้แก่ เพรียงหิน และ หอยสองฝา [32] (ภาพที่ 3)

ส่วนด้านล่างของโครงสร้างปะการังเทียม พบหอยนางรมหนาม (*Spondylus* sp.) เป็นสัตว์ชนิดเด่น ซึ่งบริเวณนี้มีตะกอนทับถมอยู่เป็นจำนวนมากเป็นบริเวณบริเวณที่มีการตกตะกอนในปริมาณมากสามารถทำให้สัตว์เกาะติดที่โดนตะกอนทับ จึงทำให้ไม่มีสัตว์เกาะติดชนิดอื่นเจริญเติบโตได้ [33] (ภาพที่ 3)

4. สรุป

การศึกษา ชนิดและอัตราการปกคลุมพื้นที่ของสัตว์เกาะติดบนปะการังเทียมบริเวณเกาะจะแซ่ จำนวน 5 ครั้ง ทั้ง 3 ด้านของปะการังเทียม พบสัตว์เกาะติดทั้งหมด 7 ชนิด จาก 5 ไฟลัม ชนิดประกอบด้วย ไฟลัม Porifera 1 ชนิด ไฟลัม Cnidaria 2 ชนิด ไฟลัม Annelida 1 ชนิด ไฟลัม Arthropoda 1 ชนิด และไฟลัม Mollusca 2 ชนิด เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลด้วย โปรแกรม Coral Point Count with Excel extensions (CPCe) พบว่าร้อยละการปกคลุมสัตว์เกาะติด ด้านข้างและด้านบนของโครงสร้างปะการังเทียม มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) กับด้านล่าง ในด้านเวลา สัตว์กลุ่มแรกที่เข้ามาลงเกาะก่อน คือ กลุ่มหอยสองฝา ซึ่งต่อมาเป็น เพรียงหิน (*Amphibalanus amphitrite*) ที่เข้ามาลงเกาะเนื่องจากเป็นสัตว์เกาะติดที่มีระยะตัวอ่อนสั้นทำให้ลงเกาะได้อย่างรวดเร็ว และเมื่อเวลาผ่านไปสัตว์เกาะติดชนิดอื่นๆเริ่มเข้ามาปกคลุม ซึ่งสัตว์เกาะติดชนิดเด่นคือ ฟองน้ำเคลือบสีแดง (*Monanchora unguiculata*) ซึ่งจะปกคลุมทับไปบนตัว หอยนางรม (*Ostrea* sp.) ทำให้มีพื้นที่ปกคลุมมากที่สุด ในด้านของตำแหน่งการสำรวจขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างเช่นด้านบนของปะการังเทียม มีความสมดุลของปัจจัยไม่ว่าจะเป็น กระแสน้ำ แสง และตะกอน ทำให้มีความหลากหลายของสัตว์เกาะติดมากที่สุด ส่วนด้านข้าง เป็นด้านที่พื้นผิวดังฉากกับพื้นทะเล และโดนกระแสน้ำพัดผ่านตลอดเวลา ทำให้มีจำนวนสัตว์เกาะติดที่ใช้วิธีการกรอกกินมากขึ้น แต่ความหลากหลายของชนิดน้อย ส่วนด้านล่างของปะการังเทียมอยู่ติดพื้น ลักษณะแบนราบทำให้ตะกอนสะสมเป็นจำนวนมากจึงพบสัตว์เกาะติดชนิดน้อยที่สุดและ ความหลากหลายของชนิดน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบผล การศึกษานี้กับรายงานการศึกษาสัตว์เกาะติดในแหล่งปะการังเทียมอื่นๆในอ่าวไทยพบว่าไม่แตกต่างกันมากนัก โดยปัจจัยที่มีผลต่อการกำหนดโครงสร้างชุมชนของสัตว์เกาะติดในปะการังเทียมประกอบด้วยปัจจัยแวดล้อมทั้งกายภาพและชีวภาพ รวมถึงผลกระทบจากกิจกรรมของมนุษย์

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณนางสาวลลิตา ปัจฉิม นักวิชาการประมงชำนาญการ ศูนย์วิจัยทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่งอ่าวไทยฝั่งตะวันออก ที่ให้คำปรึกษาในการจำแนก ชนิดของปะการัง ขอขอบคุณ บริษัท Chaokoh Diving Chumphon ที่สนับสนุนการอัดอากาศสำหรับดำน้ำเก็บข้อมูล

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Scheffer, M., Carpenter, S. and Young B. de. 2005. Cascading effects of over fishing marine systems. *TRENDS in Ecology and Evolution*, 20(11). pp. 579-581.
- [2] กนกพรรณ เทือกเถาว์ และ วิทยา ศรีมโนภาส. 2534. โครงการจัดสร้างแหล่งอาศัยสัตว์ทะเล. *วารสารการประมง* 44(65). หน้า 527 – 537
- [3] Sherman, R. L., Gilliam, D. S., & Spieler, R. E. 2002. Artificial reef design: void space, complexity, and attractants. *ICES Journal of Marine Science*, 59(suppl): S196-S200.
- [4] สุนันทา นิลเพชร. 2550. “อุทยา” การอนุรักษ์ฟื้นฟูสัตว์น้ำบ้านบ่ออิฐ. เข้าถึงได้จาก : http://www.thaigo.org/story/news_61144.htm เข้าถึงเมื่อวันที่ 14 มิถุนายน 2554.

- [5] Connell, J.H. and Slatyer, R.O. (1977) Mechanisms of Succession in Natural Communities and Their Role in Community Stability, Organization. *The American Naturalist*, 111, 1119-1143.
- [6] Perkol-Finkel, S., Benayahu, Y. (2004). Community structure of stony and soft corals on vertical unplanned artificial reefs in Eilat (Red Sea): Comparison to natural reefs. *Coral reefs* (in press).
- [7] Baynes, K. 1989. "Kant on Property Rights and the Social Contract." *The Monist*, 72(3) 433-453.
- [8] Westneat MW, Resing JM (1988) Predation on coral spawn by planktivorous fish. *Coral Reefs* 7: 89-92
- [9] Pratchett MS, Gust G, Goby G, Klanten SO (2001) Consumption of coral propagules represents a significant trophic link between corals and reef fish. *Coral Reefs* 20(1):13-17
- [10] Hughes, S.M., Harrison, M.A., & Gallup, G. G. (2002). The sound of symmetry: Voice as a marker of developmental instability. *Evolution and Human Behavior*, 23(3), 173-180.
- [11] Tanner, J.E. 1995. competition between scleractinian corals and macroalgae: an experimental investigation of coral growth, survival and reproduction. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 190, 151-168
- [12] Mccook, L.J. 2001. competition between corals and algal turfs along a gradient of terrestrial influence in the nearshore central Great barrier Reef. *Coral Reefs* 19, 419-425.
- [13] Meko, S., Kawasaki, K., Sakai, K., Takasu, F. & Shigesada, N. 2000. Morphological plasticity in the coral *Porites lilliputiana* and its adaptive significance. *Bulletin of Marine Science* 66, 225-239.
- [14] Hodgson G (1990) Sediment and the settlement of larvae of the reef coral *Pocillopora damicornis*. *Coral Reefs* 9:41-4
- [15] Babcock R, Davies P (1991) Effects of sedimentation on settlement of *Acropora millepora*. *Coral Reefs* 9:205-208
- [16] ชำรงศรี ประกอบบุญ. 2543. การสร้างแหล่งอาหารในทะเลด้วยแหล่งอาศัยสัตว์ทะเล. กรมประมง, กรุงเทพมหานคร.
- [17] สุทธิชัย เตมียาณิษฐ์, ธรรมบุญ วิจารณ์บุญานนท์, กัลยา วัฒนากร และสุชนา วิเศษสังข์. 2521. สิ่งมีชีวิตที่ดำรงชีพแบบเกาะติดบริเวณอ่าวไม่จังหวัดชลบุรี. ในรายงานผลงานวิจัยเล่มที่ 5 พ.ศ. 2533. คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร. 304-312 หน้า.
- [18] นิพนธ์ พงศ์สุวรรณ และ อุกกฤต สดภูมินทร์. 2537. ติดตามตรวจสอบสภาพการเปลี่ยนแปลงของแนวปะการังเกาะภูเก็ตและบริเวณใกล้เคียง. ใน: รายงานโครงการจัดการทรัพยากรและสิ่งแวดล้อมชายฝั่งทะเลจังหวัดภูเก็ต บริเวณหาดป่าตอง กระรน กะตะ. ภูเก็ต: สถาบันวิจัยชีววิทยาและประมงทะเล. (อัครา).
- [19] ธาณินทร์ สิงห์ไกรวรรณ, วิภาณุ อังศรีสว่าง, เสาวนีย์สิงห์ไกรวรรณ และสมนึก กบิลรัมย์. 2541. โครงการ การศึกษาการสร้างแหล่งสาหร่ายบนแหล่งอาศัยสัตว์ทะเลเพื่อพัฒนาการเพาะเลี้ยงหอยเป่าฮาลิอัส *Halotis asianina Linnaeus* ในสภาพธรรมชาติเพื่อพัฒนาไปสู่การส่งเสริมการเลี้ยงในเชิงพาณิชย์. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย. 179 หน้า.
- [20] ยุพเรศ ทัดตะวร. 2542. ชนิด ปริมาณ และการเปลี่ยนแปลงแทนที่ของเพอร์ไฟต์ตอนที่อาศัยบนแหล่งอาศัยสัตว์ทะเล บริเวณอ่าวศรีราชา จังหวัดชลบุรี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร. 80 หน้า.
- [21] มาโนช รุ่งราตรี, อำนาจ ศิริเพชร, หัสพงศ์ สมชนะกิจ, นพรัตน์ เรืองปฏิกรณ์, วราภรณ์ เดชบุญ, สมชาย วิบูลย์พันธ์, ณรงค์ศักดิ์ คงชัย, ธนศ ศรีถักกล, นิรัช สอนแก้ว, อติรัตน์ คงชัย, สมเกียรติ อินทร์ชู, อุทิศโชติ ธรรมโม, ทรงฤทธิ์ โชติธรรมโม, ยุทธนา ราษฎร์ และสุภาพร ชุมภูวรรณ. 2546. รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการวิจัยผลการจัดสร้างแหล่งอาศัยสัตว์ทะเล ปี 2545 ในโครงการฟื้นฟูทรัพยากรชายฝั่งทะเล จังหวัดปัตตานีและนราธิวาสอันเนื่องมาจากพระราชดำริ. สำนักวิจัยและพัฒนาประมงทะเล, กรมประมง, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 71 หน้า.

- [22] Kevin, E. Kohler, Shaun, M. Gill. 2006. Coral Point Count with Excel extensions (CPCe): A Visual Basic program for the determination of coral and substrate coverage using random point count methodology. *Computers & Geosciences* 32 (2006) 1259–1269.
- [23] ศักดิ์อนันต์ ปลาทอง. 2557. ผลการศึกษาติดตามการเปลี่ยนแปลงของสิ่งมีชีวิตบริเวณปะการังเทียม จังหวัดประจวบคีรีขันธ์. เอกสารเผยแพร่สำนักอนุรักษ์ทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง. กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง. กรุงเทพมหานคร. 85 หน้า
- [24] พิสตาร์ รุ่งเรืองทองทวี, ธรณ์ อารังนาวาสวัสดิ์, และวิภูษิต มั่นทะจิตร. 2557. ผลของเวลาและระดับความลึกต่อชนิดสัตว์เกาะติด บนเรือหลวงสัตกูด เกาะเต่า จังหวัดสุราษฎร์ธานี. วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย 6(1) : 1-11
- [25] วุฒิพงศ์ ตั้งธีรวานิชย์, สุชาย วรชนะนันท์, และภาสิณี วรชนะนันท์, 2559. การศึกษาจำนวนภาพที่น้อยที่สุดในการประเมินพื้นที่ปกคลุมของสิ่งมีชีวิตชนิดเกาะติด บนเรือจมมดโพน จังหวัดชลบุรี. ใน: การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 54 วันที่ 2-5 กุมภาพันธ์ 2558. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพมหานคร. หน้า 816-822.
- [26] Toledo, M. I., Torres, P., Diaz, C., Zamora, V., Lopez, J., & Olivares, G. (2020). Ecological succession of benthic organisms on niche-type artificial reefs. *Ecological Processes*, 9, 38.
- [27] Pratchett, M.S., Wilson, S.K., Graham, N.A.J., Munday, P.M., Jones, G.P. & Polunin, N.V.C. 2007. Multi-scale temporal effects of climate-induced coral bleaching on motile reef organisms. In *Coral bleaching: patterns and processes, causes and consequences*, M. van Oppen & J.M. Lough (eds). New York: Springer, in press.
- [28] Glasby, C.J. (1999). The Namanereidinae (Polychaeta: Nereididae). Part 1. Taxonomy and phylogeny. *Records of the Australian Museum, Supplement.* 25: 1-129
- [29] วันเฉลิม สายชล, ธรณ์ อารังนาวาสวัสดิ์, และวิภูษิต มั่นทะจิตร. 2561 การศึกษาชนิดของสัตว์เกาะติด ตามปัจจัยด้านความลึกและแสง บนเรือหลวงสัตกูด เกาะเต่า จังหวัดสุราษฎร์ธานี. ใน: การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 56 วันที่ 6-9 กุมภาพันธ์ 2561. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพมหานคร. หน้า 675-682.
- [30] กรมทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2558. การศึกษาติดตามการเปลี่ยนแปลงของสิ่งมีชีวิตและระบบนิเวศ ในบริเวณปะการังเทียมแหล่งท่องเที่ยวด้านน้ำจังหวัดพังงา. สำนักอนุรักษ์ทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- [31] Pongsuwan, N., Chansang, H. and Satapoomin, U. 1993. Colonization of fouling communities and associated fauna on artificial reef at Ranong Province, Thailand. *The Seminar on Fisheries 1993*. Phuket Marine Biological Center, Department of Fisheries. pp. 217-228.
- [32] Ponti, M., Abbiati, M. and Ceccherelli, V.U. 2002. Drilling platforms as artificial reefs: distribution of macrobenthic assemblages of the “Paguro” wreck (northern Adriatic Sea). *ICES Journal of Marine Science* 59 : S316–S323.
- [33] Marshall, S. M., and Orr, A. P., 1931. Sedimentation on Low Isles Reef and its relation to coral growth. *Scientific Report of the Great Barrier Reef Expedition*, 1, 94–133.

การคัดเลือกสายพันธุ์ถั่วฝักยาวโดยการวิเคราะห์แบบหลายลักษณะ Selection of Superior Yardlong Bean Lines Through Multi-Trait Analysis

ปราโมทย์ พรสุริยา* อภิสิต ชิตวานิจ วชิราภรณ์ เรือนแป้น และ ณัฐญา เรือนแป้น
Pramote Pornsuriya*, Apisit Chitwanij, Wachiraporn Ruanpan and Nathaya Ruanpan

สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตพืช คณะเกษตรศาสตร์และทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี, 20110
Department of Plant Production Technology, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Rajamangala University of Technology Tawan-ok,
Bangpra, Sriracha, Chonburi, Thailand, 20110

*Corresponding Author: Pramote Pornsuriya, e-mail address: pramote_po@rmutto.ac.th

บทคัดย่อ

การทดลองมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินและคัดเลือกสายพันธุ์ถั่วฝักยาวที่ให้ผลผลิตสูงและลักษณะทางพืชสวนที่ดีโดยการวิเคราะห์แบบหลายลักษณะด้วยวิธีการวิเคราะห์ไบพลอตของจีโนไทป์ x ผลผลิต x ลักษณะ (GYT biplot analysis) วางแผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ จำนวน 25 จีโนไทป์ และ 3 ซ้ำ ผลการทดลอง พบว่า อายุดอกแรกบาน ค่าความเขียวของใบ ความยาวฝัก ความกว้างฝัก จำนวนเมล็ดต่อฝัก และผลผลิตต่อต้นของทั้ง 25 จีโนไทป์ ไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบ (principal component analysis) ของ GYT พบว่า องค์ประกอบที่ 1 และ 2 (PC1 และ PC2) มีสัดส่วนของความแปรปรวนรวมกัน 97.1 เปอร์เซ็นต์ ของความแปรปรวนขององค์ประกอบทั้งหมด 6 องค์ประกอบ สายพันธุ์ที่ควรพิจารณาคัดเลือกไว้ได้แก่สายพันธุ์ G19, G7, G9, G2, G17, G22, G1, G25, G6 และ G12 ตามลำดับ เนื่องจากมีความดีเด่นของผลผลิตร่วมกับลักษณะอายุดอกแรกบาน, ค่าความเขียวของใบ, ความยาวฝัก, ความกว้างฝัก, น้ำหนักฝัก และจำนวนเมล็ดต่อฝัก โดยให้ค่า GYT scores ของทุกลักษณะเป็นค่าบวกและมีค่าผลรวมของ GYT scores สูงตามลำดับ

คำสำคัญ: ผลผลิต, ลักษณะทางพืชสวน, ไบพลอต, ถั่วฝักยาว

Abstract

The purpose of this study was to evaluate and select yardlong bean lines that exhibit superior yields and favorable horticultural traits using multi-trait analysis, specifically the Genotype x Yield x Trait (GYT) biplot method. Twenty-five yardlong bean genotypes were subjected to a randomized complete block design (RCBD) with three replications. Analysis of variance indicated no significant differences ($p > 0.05$) among genotypes for days to first anthesis, leaf greenness, pod length, pod width, pod weight, number of seeds per pod, and yield per plant. The principal component analysis of the GYT biplot revealed that the first two components (PC1 and PC2) collectively explained 97.1% of the total variance across the six components analyzed. Lines G19, G7, G9, G2, G17, G22, G1, G25, G6, and G12, respectively, emerged as top candidates for selection due to their exceptional yield performance concomitant with favorable traits encompassing days to first anthesis, leaf greenness, pod length, pod width, and number of seeds per pod. Notably, these selected lines consistently exhibited positive GYT scores across all traits and achieved high cumulative GYT scores.

Keywords: Yield, Horticultural traits, Biplot, Yardlong bean

1. บทนำ

งานวิจัยทางการปรับปรุงพันธุ์พืชส่วนใหญ่มีการศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลแบบหลายตัวแปรหรือหลายลักษณะพร้อมๆ กัน และนำผลของการศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลดังกล่าวมาใช้ในการตัดสินใจเพื่อคัดเลือกจีโนไทป์ที่ดี อย่างไรก็ตาม การจำแนกจีโนไทป์ที่มีลักษณะที่ต้องการหลายๆ ลักษณะรวมอยู่ในจีโนไทป์เดียวกันจัดว่าเป็นงานที่ท้าทายสำหรับนักปรับปรุงพันธุ์พืช โดยมีวิธีการคัดเลือกด้วยการใช้ดัชนีการคัดเลือกแบบเชิงเส้นตรง (linear selection indexes) หลายๆ รูปแบบ [1] การใช้ดัชนีการเลือกจีโนไทป์เชิงเส้นตรงที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือดัชนีการคัดเลือกของ Smith-Hazel (SH index) [2-4] โดยนักปรับปรุงพันธุ์ต้องคำนวณเมทริกซ์ของความแปรปรวนร่วมของจีโนไทป์และฟีโนไทป์รวมถึงเวกเตอร์ของค่าถ่วงน้ำหนักทางเศรษฐกิจ เพื่อที่จะคำนวณค่าดัชนีการคัดเลือกที่จะให้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างจีโนไทป์และฟีโนไทป์ให้มากที่สุด อย่างไรก็ตาม การใช้ SH index ในการคัดเลือกมีข้อเสียที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ คือ การมีความสัมพันธ์กันเองของหลายๆ ลักษณะ (multicollinearity) ซึ่งส่งผลทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของดัชนีการคัดเลือกที่เอนเอียงและส่งผลต่อไปยังการประมาณค่าความก้าวหน้าในการคัดเลือก นอกจากนี้ ปัญหา multicollinearity แล้ว ยังมีความยุ่งยากในการประเมินค่าถ่วงน้ำหนักความสำคัญทางเศรษฐกิจของแต่ละลักษณะอีกด้วย [2] ดังนั้น แม้ว่า SH index จะถูกนำมาใช้ในการเลือกหลายลักษณะพร้อมๆ กัน แต่ในทางด้านการปรับปรุงพันธุ์พืชแล้วการใช้วิธีการนี้ยังมีความสนใจใช้กันไม่มากนัก เนื่องจากข้อยุ่งยากดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น [5] นอกจากนี้แล้วอาจจะมีผลกระทบจากความสัมพันธ์ในทางลบระหว่างลักษณะอื่นๆ ที่ต้องการกับผลผลิตซึ่งเป็นลักษณะที่สำคัญที่ใช้ในการคัดเลือก [6] ดังนั้นเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว Yan & Frégeau-Reid [7] จึงเสนอการวิเคราะห์สถิติแบบหลายตัวแปร (multivariate analysis) ด้วยวิธีการวิเคราะห์ผลรวมของ จีโนไทป์ x ผลผลิต x ลักษณะ (GYT biplot) เพื่อนำมาใช้ในการคัดเลือกสายพันธุ์พืชที่ให้ผลผลิตสูงรวมกับการมีลักษณะที่สำคัญอื่นๆ ที่ดีได้ และยังสามารถจัดกลุ่มและจัดลำดับของจีโนไทป์ตามความดีเด่นของผลผลิตร่วมกับลักษณะอื่นๆ ที่สำคัญ โดยแสดงผลลัพธ์ออกมาให้เห็นเป็นกราฟไบพลอตเพื่อการคัดเลือกได้ [7]

ถั่วฝักยาว (*Vigna unguiculata* subsp. *sesquipedalis* (L.) Verdc.) เป็นพืชผักกินผลที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจชนิดหนึ่งที่สามารถปลูกได้ทุกฤดูกาลและทั่วทุกภาคของประเทศไทย จากรายงานข้อมูลการผลิตพืชรายจังหวัดของประเทศไทยในปีเพาะปลูก พ.ศ. 2565 มีพื้นที่ปลูกถั่วฝักยาวทั่วประเทศประมาณ 54,707 ไร่ [8] ถั่วฝักยาวเป็นพืชผักที่มีคุณค่าทางอาหารสูง ได้แก่ ไทอามีน ไรโบฟลาวิน แคลเซียม ฟอสฟอรัส โซเดียม โพแทสเซียม แมกนีเซียม เหล็ก และเป็นแหล่งของวิตามินเอและซี [9] ในการปรับปรุงพันธุ์ถั่วฝักยาวซึ่งเป็นพืชผสมตัวเอง การคัดเลือกให้ได้สายพันธุ์ใหม่จากพันธุ์เดิมนั้นมักไม่ค่อยได้ผล เนื่องจากพืชผสมตัวเองจะมียีนแต่ละตำแหน่งอยู่ในสภาพยีนคู่แฝด (homozygous) อยู่เสมอ โดยที่หากยีนตำแหน่งเป็นยีนคู่แฝดอยู่แล้ว ก็ยังคงสภาพยีนคู่แฝดดังกล่าวนั้นต่อไปจึงไม่มีความแปรปรวนของลักษณะให้คัดเลือก [10] ดังนั้นการผสมข้ามระหว่างพันธุ์หรือสายพันธุ์จึงเป็นการสร้างความแปรปรวนให้เกิดขึ้นแล้วจึงทำการคัดเลือกสายพันธุ์ที่ดีต่อไป งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบและคัดเลือกสายพันธุ์ถั่วฝักยาวโดยใช้วิธีการวิเคราะห์แบบหลายตัวแปร [7] ซึ่งเป็นการคัดเลือกพร้อมกันที่หลายลักษณะด้วยวิธีการวิเคราะห์ผลรวมของ จีโนไทป์ x ผลผลิต x ลักษณะ (GYT biplot) เพื่อการใช้ประโยชน์ในโปรแกรมปรับปรุงพันธุ์ถั่วฝักยาวต่อไป

2. วิธีการศึกษา

วางแผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ จำนวน 3 ซ้ำ โดยมี 25 ทรีตเมนต์ ได้แก่ สายพันธุ์และพันธุ์ถั่วฝักยาวจากแหล่งพันธุ์กรรมต่างๆ ได้แก่ สายพันธุ์ที่คัดเลือกจากการผสมข้ามพันธุ์ [11] พันธุ์การค้า และสายพันธุ์ท้องถิ่น จำนวนทั้งหมด 25 จีโนไทป์ ทำการทดลองที่สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตพืช คณะเกษตรศาสตร์และทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ตั้งแต่ตุลาคม-ธันวาคม 2564 โดยมีแปลงย่อย (หน่วยทดลอง) ขนาด 1 เมตร x 3 เมตร (กว้าง x ยาว) ปลูกแบบระบบแถวคู่ และใช้พลาสติกคลุมแปลงปลูก ระยะต้น 50 เซนติเมตร และระยะแถว 70 เซนติเมตร จำนวน 2 ต้นต่อหลุม ระยะระหว่างแปลงย่อย 50 เซนติเมตร การปฏิบัติดูแลรักษาตามวิธีการมาตรฐาน [12] บันทึกข้อมูล ได้แก่ ค่าความเขียวของใบ วัดด้วย SPAD-502 chlorophyll meter (Minolta Camera Co., Ltd., Japan) ที่อายุ 49 และ 56 วันหลังปลูก อายุดอกแรกบาน ความยาวฝัก ความกว้างฝัก น้ำหนักฝัก จำนวนเมล็ดต่อฝัก (เฉลี่ยจาก 10 ฝัก/แปลงย่อย) และผลผลิตฝักสดต่อต้น (เฉลี่ยจากจำนวนต้นต่อแปลงย่อย) โดยเก็บเกี่ยวฝักสดวันเว้นวัน ระยะเวลาเก็บเกี่ยว 4 สัปดาห์ นำข้อมูลมาวิเคราะห์ความแปรปรวนตามแผนการทดลองที่กำหนด และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของทรีตเมนต์ด้วยวิธี Duncan's new multiple range test (DMRT) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป STAR version 2.0.1 [13] การวิเคราะห์ข้อมูลแบบหลายตัวแปรของผลผลิตและลักษณะเพื่อใช้ในการคัดเลือกโดยวิธีการ GYT biplot [7] โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป PBTtools version 1.4 [14] และการคำนวณค่า GYT scores เพื่อการเรียงลำดับความดีเด่นของจีโนไทป์โดยการนำเมตริกส์ขององค์ประกอบที่ 1 และ 2 (PC1 and PC2) ของจีโนไทป์ (G) มาคูณกับเมตริกส์ขององค์ประกอบที่ 1 และ 2 (PC1 and PC2) ของผลผลิต x ลักษณะ (YT) [15]

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 การเปรียบเทียบลักษณะทางพืชสวนและผลผลิต

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในการเปรียบเทียบลักษณะทางพืชสวนและผลผลิตของถั่วฝักยาว 25 จีโนไทป์ พบว่า ค่าความเชี้ยวของใบ อายุดอกแรกบาน ความยาวฝัก ความกว้างฝัก น้ำหนักต่อฝัก จำนวนเมล็ดต่อฝัก และผลผลิตต่อต้น ไม่มีความแตกต่างกันระหว่างจีโนไทป์ ($p > 0.05$) (Table 1) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสายพันธุ์ส่วนใหญ่ที่นำมาทดสอบเป็นสายพันธุ์จากคู่ผสมเดียวกันที่ผ่านการทดสอบผลผลิตมาแล้ว 8-10 ชั่วโมง ดังนั้น ในการคัดเลือกจึงจำเป็นต้องใช้วิธีการวิเคราะห์ทางสถิติแบบหลายตัวแปรที่ซับซ้อนขึ้นเพื่อใช้ในการจำแนกจีโนไทป์ที่มีการแสดงออกที่ดีของผลผลิตร่วมกับลักษณะทางพืชสวนอื่น ๆ ที่ต้องการคัดเลือก เช่น การคัดเลือกโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ GYT biplot [7]

Table 1 Mean comparison for the horticultural traits and yield per plant of 25-yardlong bean genotype.

No.	Genotype	Horticultural traits and yield						
		DA	LG	PL	PW	PWE	SP	YP
G1	No.33P	38.33	57.17	61.23	0.62	24.59	17.20	785
G2	BP2	37.83	59.43	63.27	0.60	26.07	19.00	830
G3	P10T26	41.00	50.83	55.47	0.63	23.89	17.97	604
G4	BP1	38.17	58.33	58.10	0.58	21.45	17.77	761
G5	No.37G	38.33	56.62	60.40	0.57	23.36	18.47	633
G6	No.30P	38.33	57.55	58.60	0.62	26.53	18.20	750
G7	LxBP1	38.50	65.53	62.67	0.58	25.21	19.23	852
G8	BPP	38.50	52.42	58.10	0.62	24.16	18.20	708
G9	ChiaS	38.83	67.25	65.23	0.59	25.46	19.30	838
G10	No.33G	39.33	60.43	56.23	0.63	23.57	18.70	688
G11	P4T8	39.00	52.37	55.87	0.58	22.07	17.90	615
G12	Nigro	40.67	53.65	58.47	0.58	22.07	18.60	792
G13	Suwan	40.83	47.28	49.07	0.69	24.65	17.87	507
G14	No.19G	39.00	61.83	56.80	0.62	23.95	19.30	704
G15	No.3P	40.00	55.03	60.70	0.62	25.47	17.37	553
G16	No.40P	39.00	51.48	60.73	0.58	24.26	19.20	721
G17	No.22G	37.83	47.10	62.23	0.65	27.10	18.47	816
G18	No.32P	40.17	49.13	57.80	0.59	23.06	18.73	575
G19	No.25G	38.17	44.30	63.07	0.64	25.32	18.00	933
G20	No.18G	38.00	62.73	56.40	0.61	23.02	18.93	584
G21	No.10P	38.50	53.10	63.30	0.64	26.87	18.70	667
G22	No.23G	39.17	53.15	57.90	0.61	23.47	18.10	819
G23	No.38P	38.00	55.32	51.30	0.63	22.65	18.27	748
G24	No.20G	38.33	49.55	61.60	0.63	26.37	18.20	572
G25	Nawa3	39.00	54.40	64.70	0.61	25.99	18.40	741
F-test		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV (%)		3.84	20.92	9.74	6.29	12.67	6.27	21.41

ns = non-significant.

Where, DA= Days to first anthesis, LG= Leaf greenness (SPAD unit), PL= Pod length (cm), PW= Pod width (cm), PWE= Pod weight (g), SP= No. of seeds/pod, YP= Yield/plant (g)

3.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบ (principal component analysis) ของ GYT และค่า GYT scores

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของ GYT ประกอบด้วย 6 องค์ประกอบ (PC1 – PC6) โดยที่ PC1 และ PC2 มีสัดส่วนของความแปรปรวนรวมกันเป็น 97.1 เปอร์เซ็นต์ (91.5 และ 5.6 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ) ของความแปรปรวนขององค์ประกอบทั้งหมด โดยที่องค์ประกอบที่ 1 มีนัยสำคัญ ($p < 0.01$) ในขณะที่องค์ประกอบที่ 2 ถึง 6 ไม่มีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) โดยทั่วไปแล้วการนำองค์ประกอบที่ 1 และ 2 มาเสนอจะให้ข้อมูลผลการทดลองที่ดี เนื่องจากมีสัดส่วนของความแปรปรวนรวมกันสูง [16] เมื่อนำเมตริกส์ของ PC1 และ PC2 ของจีโนไทป์ (G) มาคูณกับเมตริกส์ของ PC1 และ PC2 ของผลผลิต x ลักษณะ (YT) ทำให้ได้ค่า GYT scores (Table 2) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงคุณสมบัติของจีโนไทป์ (inner product property) [15] ที่มีผลผลิตร่วมกับลักษณะต่างๆ ที่ดีหากมีค่าเป็นบวก โดยใน Table 2 เป็นการเรียงลำดับจีโนไทป์ตามค่าผลรวมของ GYT scores ของทุกลักษณะจากมากไปน้อย โดยจะเห็นว่าสายพันธุ์ No.25G (G19) ซึ่งอยู่ในลำดับที่ 1 มีค่า GYT scores ของผลผลิตกับอายุดอกแรกบาน ความยาวฝัก ความกว้างฝัก น้ำหนักฝัก และจำนวนเมล็ดต่อฝัก มากกว่าทุกจีโนไทป์ และมีค่าผลรวมของ GYT scores มากที่สุด (6.37) ดังนั้น ในการคัดเลือกจีโนไทป์จากผลรวมของผลผลิตกับลักษณะ จีโนไทป์ในลำดับที่ 1 – 10 (Table 2) จึงถูกพิจารณาว่ามีความเหมาะสมเนื่องจากให้ค่า GYT scores ของทุกลักษณะเป็นค่าบวก และมีค่าผลรวมของ GYT scores สูง คือ 1.43 (ลำดับที่ 10) ถึง 6.37 (ลำดับที่ 1)

Table 2 Ranking of yardlong bean genotypes based on GYT scores from highest to lowest.

Rank	Code	Genotype	GYT scores						Total
			YP/DA	YP*LG	YP*PL	YP*PW	YP*PWE	YP*SP	
1	G19	No.25G	1.24	0.19	1.22	1.28	1.39	1.05	6.37
2	G7	LxBP1	0.91	1.46	0.89	0.68	0.65	1.06	5.64
3	G9	ChiaS	0.90	1.38	0.88	0.69	0.67	1.04	5.56
4	G2	BP2	0.79	0.77	0.77	0.68	0.71	0.81	4.53
5	G17	No.22G	0.72	-0.07	0.71	0.78	0.86	0.57	3.57
6	G22	No.23G	0.51	0.36	0.50	0.47	0.50	0.49	2.83
7	G1	No.33P	0.38	0.34	0.37	0.34	0.35	0.38	2.17
8	G25	Nawa3	0.35	0.13	0.34	0.35	0.38	0.31	1.86
9	G6	No.30P	0.29	0.24	0.28	0.26	0.27	0.29	1.64
10	G12	Nigro	0.23	0.36	0.23	0.18	0.17	0.27	1.43
11	G4	BP1	0.09	0.43	0.09	0.01	-0.01	0.17	0.78
12	G16	No.40P	0.12	-0.08	0.12	0.15	0.17	0.08	0.55
13	G8	BPP	0.10	-0.14	0.10	0.13	0.16	0.05	0.40
14	G23	No.38P	0.06	0.11	0.06	0.04	0.04	0.07	0.38
15	G14	No.19G	-0.04	0.35	-0.04	-0.11	-0.15	0.04	0.04
16	G21	No.10P	-0.08	-0.39	-0.08	-0.01	0.01	-0.15	-0.70
17	G10	No.33G	-0.17	0.19	-0.17	-0.22	-0.26	-0.10	-0.73
18	G5	No.37G	-0.56	-0.20	-0.55	-0.56	-0.60	-0.50	-2.97
19	G11	P4T8	-0.69	-0.54	-0.67	-0.62	-0.65	-0.67	-3.84
20	G3	P10T26	-0.66	-0.73	-0.65	-0.56	-0.57	-0.70	-3.87
21	G20	No.18G	-0.74	-0.31	-0.73	-0.72	-0.78	-0.67	-3.95
22	G24	No.20G	-0.69	-1.04	-0.67	-0.53	-0.52	-0.79	-4.24
23	G18	No.32P	-0.88	-0.79	-0.86	-0.78	-0.81	-0.89	-5.02
24	G15	No.3P	-0.96	-0.75	-0.94	-0.87	-0.91	-0.94	-5.38
25	G13	Suwan	-1.22	-1.25	-1.19	-1.05	-1.07	-1.26	-7.05

Where, DA= Days to first anthesis, LG= Leaf greenness (SPAD unit), PL= Pod length (cm), PW= Pod width (cm), PWE= Pod weight (g), SP= No. of seeds/pod, YP= Yield/plant (g)

3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของ ผลผลิต x ลักษณะ (Y*T combination)

จากกราฟไบพลอทใน Figure 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของ ผลผลิต x ลักษณะ พิจารณาจากเส้นเวกเตอร์ของผลรวมของผลผลิตกับลักษณะทั้ง 6 เส้น หากมุมระหว่างเส้นเวกเตอร์ดังกล่าวเป็นมุมแหลมแสดงว่ามีความสัมพันธ์ในทางบวกกันสูง ถ้าเป็นมุมป้านแสดงว่ามีความสัมพันธ์ในทางบวกกันน้อย และหากตั้งฉากกันแสดงว่าไม่มีความสัมพันธ์กัน [17] ดังนั้นผลรวมของผลผลิตกับอายุดอกแรกบาน (E1) ผลผลิตกับค่าความเขียวของใบ (E2) ผลผลิตกับความยาวฝัก (E3) ผลผลิตกับความกว้างฝัก (E4) ผลผลิตกับน้ำหนักฝัก (E5) และผลผลิตกับจำนวนเมล็ดต่อฝัก (E6) มีความสัมพันธ์กันสูง เนื่องจากมีเส้นเวกเตอร์ที่ทำมุมแหลมกัน (Figure 1) ซึ่งลักษณะฝักได้แก่ ความยาวฝัก ความกว้างฝัก น้ำหนักฝักและจำนวนเมล็ดต่อฝักส่งอิทธิพลในทางบวกโดยตรงต่อผลผลิตของถั่วฝักยาว [18-20]

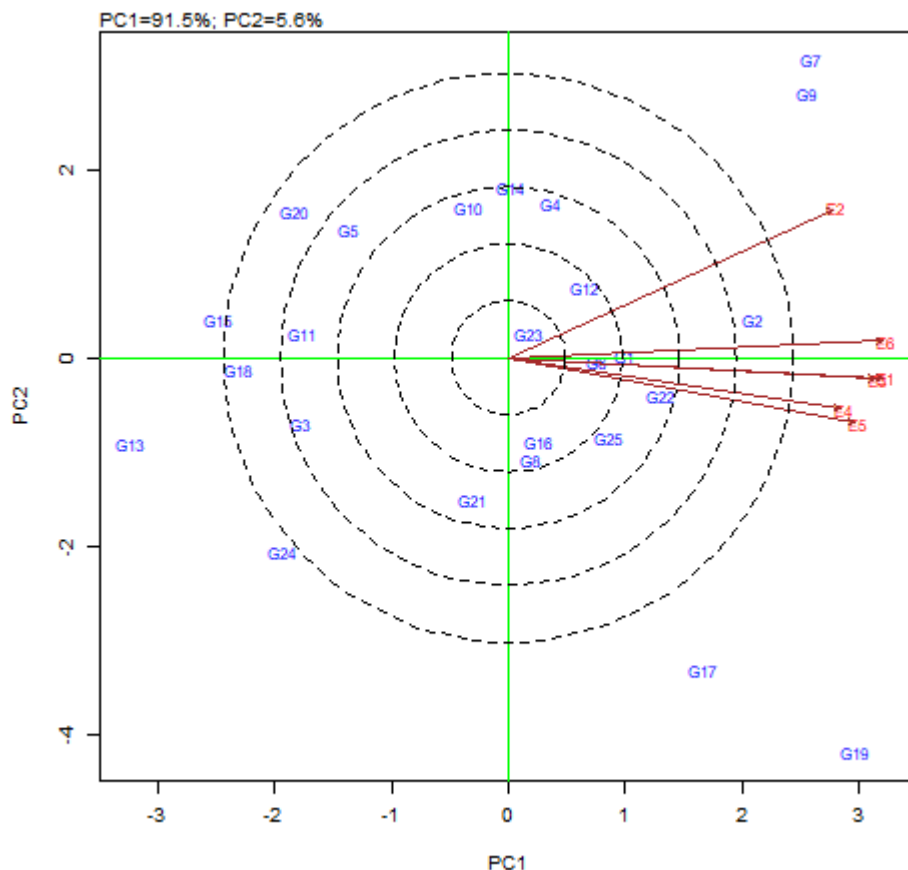


Figure 1 Vector representation of the genotype x yield x trait (GYT) biplot for the 25 yardlong bean genotypes. Coding for yield and trait combinations: E1 = YP/DA, E2 = YP*LG, E3 = YP*PL, E4 = YP*PW, E5 = YP*PWE, E6 = YP*SP; Coding for genotype was presented in Table 1. Where, DA= Days to first anthesis, LG= Leaf greenness (SPAD unit), PL= Pod length (cm), PW= Pod width (cm), PWE= Pod weight (g), SP= No. of seeds/pod, YP= Yield/plant (g).

3.4 การจัดอันดับตามความดีเด่นของจีโนไทป์เพื่อการคัดเลือกด้วย GYT biplot

เมื่อพิจารณาจาก Figure 2 กราฟเส้นแกนนอนที่มีหัวลูกศรด้านขวามือด้านเดียว คือ เส้น average tester axis (ATA) โดยหัวลูกศรชี้ไปยังค่าที่เพิ่มมากขึ้นของค่าเฉลี่ยของผลรวมของผลผลิตกับลักษณะของจีโนไทป์ โดยมีเส้นกราฟแกนแนวตั้งที่มีหัวลูกศรทั้ง 2 ด้าน แบ่งจีโนไทป์ออกเป็น 2 ส่วน กลุ่มจีโนไทป์ที่อยู่ด้านขวามือของเส้นแกนตั้งเป็นจีโนไทป์ที่มีการแสดงออกของผลรวมระหว่างผลผลิตกับลักษณะต่าง ๆ ได้ดีเหนือค่าเฉลี่ย ได้แก่ ส่วนกลุ่มจีโนไทป์ที่เหลือที่อยู่ด้านซ้ายมือของเส้นแกนตั้งก็จะมีค่าต่ำกว่าค่าเฉลี่ยของจีโนไทป์ทั้งหมด [7] ดังนั้น เมื่อพิจารณาจาก Figure 2 ร่วมกับค่า GYT scores (Table 2) แล้ว จีโนไทป์ลำดับที่ 1-10 ที่ควรพิจารณาคัดเลือกไว้ใช้ประโยชน์ในโปรแกรมปรับปรุงพันธุ์ต่อไป คือ G19, G7, G9, G2, G17, G22, G1, G25, G6 และ G12 ตามลำดับ เนื่องจากมีความดีเด่นของผลผลิตร่วมกับลักษณะอายุดอกแรกบาน, ค่าความเขียวของใบ, ความยาวฝัก, ความ

กว้างฝัก, น้ำหนักฝัก และจำนวนเมล็ดต่อฝัก อย่างไรก็ตามผลจากการทดลองนี้เป็นการประเมินในสภาพแวดล้อมเดียว ซึ่งการประเมินสายพันธุ์เพื่อให้ได้ผลที่แม่นยำจึงควรทำการประเมินในหลาย ๆ สภาพแวดล้อม [21]

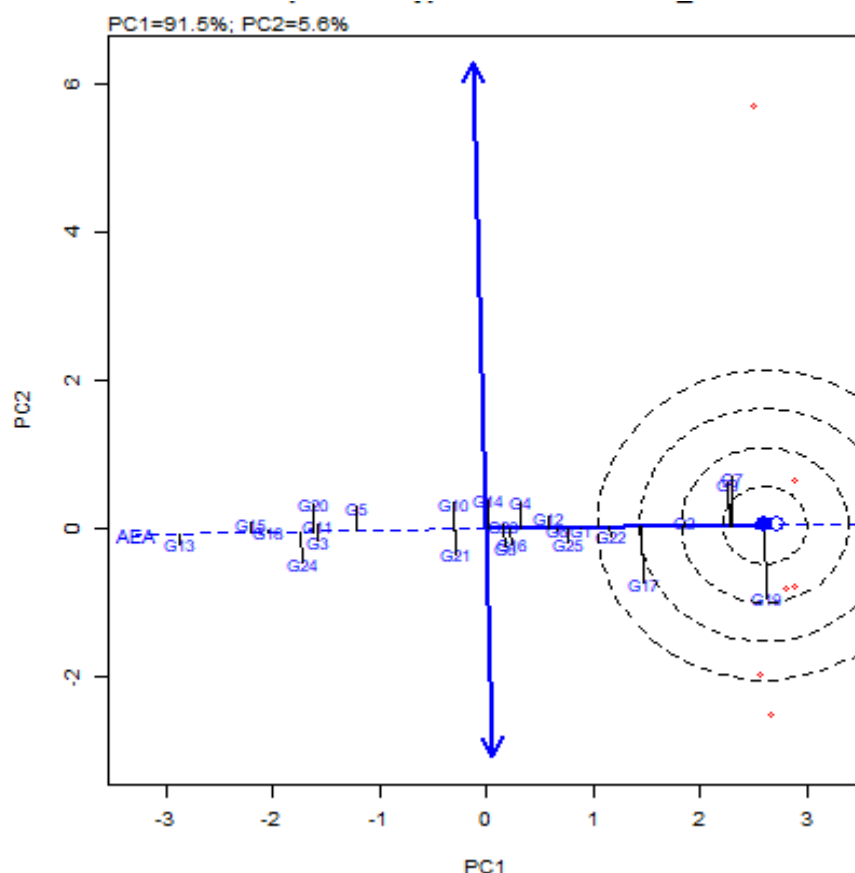


Figure 2 Average tester coordinate (ATC) view of the genotype $\times$ yield $\times$ trait biplot for ranking the 25 yardlong bean genotypes based on overall superiority, strengths, and weaknesses.

Coding for yield and trait combinations: E1 = YP/DA, E2 = YP*LG, E3 = YP*PL, E4 = YP*PW, E5 = YP*PWE, E6 = YP*SP; Coding for genotype was presented in Table 1.

Where, DA= Days to first anthesis, LG= Leaf greenness (SPAD unit), PL= Pod length (cm), PW= Pod width (cm), PWE= Pod weight (g), SP= No. of seeds/pod, YP= Yield/plant (g).

4. สรุป

การประเมินผลผลิตและลักษณะทางพืชสวนของสายพันธุ์ถั่วฝักยาว 25 จีโนไทป์ เพื่อคัดเลือกสายพันธุ์ที่ให้ผลผลิตสูงและมีลักษณะทางพืชสวนที่ต้องการ พบว่า สายพันธุ์ถั่วฝักยาว 10 จีโนไทป์ ได้แก่ G19, G7, G9, G2, G17, G22, G1, G25, G6 และ G12 ควรพิจารณาคัดเลือกไว้ ตามลำดับค่าผลรวมของ GYT scores จากมากไปน้อย โดยจีโนไทป์เหล่านี้มีค่า GYT scores ที่เป็นค่าบวกในทุกลักษณะ

5. กิตติกรรมประกาศ

การทดลองนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยประจำปีงบประมาณ 2564 คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ในการสนับสนุนทุนในการวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Céron-Rojas, J. J. and Crossa, J. 2018. Linear selection indices in modern plant breeding. Springer Nature, Cham, Switzerland.

- [2] Bizari, E. H., Val, B. H. P., Pereira, E. d. M., Mauro, A. O. D., and Uneda-Trevisoli, S. H. 2017. Selection indices for agronomic traits in segregating populations of soybean. *Revista Ciencia Agronomica* 48: 110-117.
- [3] Jahufer, M. Z. Z. and Casler, M. D. 2015. Application of the smith-hazel selection index for improving biomass yield and quality of switchgrass. *Crop Science* 55: 1212-1222.
- [4] Burdon, R. D. and Li, Y. 2019. Genotype-environment interaction involving site differences in expression of genetic variation along with genotypic rank changes: simulations of economic significance. *Tree Genetics & Genomes* 15: 1-10.
- [5] Bhering, L. L., Laviola, B. G., Salgado, C. C., Sanchez, C. F. B., Rosado, T. B., and Alves, A. A. 2012. Genetic gains in physic nut using selection indexes. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira* 47: 402-408.
- [6] Branković-Radojčić, D. V., Babić, V., Filipović, M., Srdić, J., Girek, Z., Zivanović, T. and Radojčić, A. 2018. Evaluation of maize grain yield and yield stability by AMMI analysis. *Genetika*, 50(3), 1067-1080.
- [7] Yan, W., and Fréreau-Reid, J. 2018. Genotype by yield*trait (GYT) biplot: A novel approach for genotype selection based on multiple traits. *Sci. Rep.* 8: 1-10.
- [8] กรมส่งเสริมการเกษตร. 2567. ระบบสารสนเทศการผลิตทางด้านเกษตร. เข้าถึงได้จาก : เว็บไซต์ <https://production.doe.go.th/site/login>. (เข้าถึงเมื่อ 31 มกราคม 2567).
- [9] National Research Council. 2006. *Lost Crops of Africa, Vol. II: Vegetables*. The National Academies Press, Washington, D.C.
- [10] Poehlman, J.M. and D.A. Sleper. 1995. *Breeding Field Crops*. 4th edn. Iowa State University Press, Ames.
- [11] Pornsuriya, P., Pornsuriya, P. and Chittawanij, A. 2019. Augmented analysis for yield and pod characteristics of yardlong bean (*Vigna unguiculata* (L.) Walp. spp. *sesquipedalis* Verdc.) lines. *IJAT* 15(6): 975-984.
- [12] กรมส่งเสริมการเกษตร. 2551. คู่มือนักวิชาการส่งเสริมการเกษตร ถั่วฝักยาว. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. เข้าถึงได้จาก : เว็บไซต์ http://www.agriman.doe.go.th/home/t.n/t.n1/5vegetable_Requirement/08_long%20bean.pdf. (เข้าถึงเมื่อ 27 มีนาคม 2565).
- [13] International Rice Research Institute. 2014a. *Statistical Tool for Agricultural Research User's Manual*. Biometrics and Breeding Informatics, Plant Breeding, Genetics and Biotechnology Division. International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines.
- [14] International Rice Research Institute. 2014b. *Plant Breeding Tools User's Manual*. Biometrics and Breeding Informatics, Plant Breeding, Genetics and Biotechnology Division. International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines.
- [15] ชูศักดิ์ จอมพุก. 2559. วิเคราะห์ทางพันธุศาสตร์ปริมาณในการปรับปรุงพันธุ์พืช. นีโอดีจิตอล, กรุงเทพฯ.
- [16] Gauch, H.G. and Zobel, R.W. 1996. AMMI analysis of yield trials. pp. 85-122. In Kang, M.S. and H.G. Gauch (eds.). *Genotype by environment interaction*. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
- [17] Yan, W. and Tinker, N. A. 2006. Biplot analysis of multi-environment trial data: Principles and applications. *Canadian journal of plant science* 86(3): 623-645.
- [18] Ullah, M. Z., Hasan, M. J., Rahman, A. H. M. A., and Saki, A. I. 2011. Genetic variability, character association and path analysis in yard long bean. *SAARC J. Agric.* 9(2): 9-16.
- [19] Rambabu, E., Reddy, K. R., Kamala, V., Saidaiah, P., and Pandravada, S. R. 2016. Correlation and Path Analysis for Quality, Yield and Yield Components in Yardlong Bean (*Vigna Unguiculata* (L.) Walp. ssp. *sesquipedalis* Verdc.). *Environment and Ecology* 34(4): 1655-1661.
- [20] Nanda, M., Rathod, V., Chavan, M.L., Gasti, V.D. and Nandimath, S.T. 2022. Correlation and path analysis study in Yardlong bean genotypes. *J. Pharm. Innov.* 11(3): 2344-2347.
- [21] Singh, P. and Narayanan, S.S. 2013. *Biometrical Techniques in Plant Breeding*. 5th edn. Kalyani Publishers, New Delhi.

ความเข้มข้นของการให้โซเดียมซีลีเนตฉีดพ่นทางใบต่อผลผลิต สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ
และการสะสมซีลีเนียมในผักปลังขาว BA019 ที่ปลูกในชุดดินกำแพงแสน
The concentration of sodium selenate by foliar application on yield, bioactive compounds
and selenium accumulation in green Ceylon spinach BA019
grown in Kamphaeng Saen series

ณัฐพร วันสา¹, พรไพรินทร์ รุ่งเจริญทอง², หทัยรัตน์ โชคทวีพานิชย์³, เยาวรัตน์ ศรีสกุลแก้ว⁴,
สุรพงษ์ ดำรงกิตติกุล⁵, อัครชัย โสมกุล⁵, วิทยา เศรษฐวิทยา⁵ และ ศุภชัย อัมภา^{1*}

Nuttaporn Wansa¹, Pornpairin Rungcharoenthong², Hathairat Chokthaweepanich³, Yaowarat Wongsrisakulkaew⁴,
Surapong Dumrongkittikule⁵, Akarachai Somkul⁵, Wittaya Sastawittaya⁵ and Suphachai Amkha^{1*}

¹ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม

²ภาควิชาวิทยาศาสตร์และนวัตกรรมชีวภาพ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม

³วิทยาลัยบูรณาการศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ

⁴คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี

⁵ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม

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

²Department of Science and Bioinnovation, Faculty of Liberal Arts and Science, Kasetsart University, KamphaengSaen Campus, NakhonPathom

³School of Integrated Science, Kasetsart University, Bangkok

⁴Faculty of Agricultural Technology, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, PathumThani

⁵Department of Horticulture, Faculty of Agriculture at KamphaengSaen, Kasetsart University, KamphaengSaen Campus, NakhonPathom

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

บทคัดย่อ

ซีลีเนียมเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับมนุษย์ และมีบทบาทต่อการสร้างสารฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ดังนั้นการเสริมซีลีเนียมในพืชผักเป็นทางเลือกให้ผู้บริโภค จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเข้มข้นของการให้โซเดียมซีลีเนตฉีดพ่นทางใบต่อผลผลิต สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และการสะสมซีลีเนียมในผักปลังขาว BA019 ที่ปลูกในชุดดินกำแพงแสน วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ภายในบล็อก จำนวน 6 ซ้ำ และ 4 กรรมวิธี คือ การฉีดพ่นสารละลายโซเดียมซีลีเนตทางใบที่ความเข้มข้น 0, 30, 60 และ 90 มิลลิกรัมต่อลิตร ในปริมาณ 20 มิลลิลิตรต่อต้น ที่อายุผักปลังขาว 15 วันหลังย้ายกล้า และทำการเก็บข้อมูลที่อายุผักปลังขาว 15 วันหลังฉีดพ่น ได้แก่ ปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมด ปริมาณแคโรทีนอยด์ สารประกอบฟีนอล สารฟลาโวนอยด์ ฤทธิ์สารต้านอนุมูลอิสระ(DDPH) และการสะสมซีลีเนียมในผักปลังขาว ผลการทดลองพบว่า การให้โซเดียมซีลีเนตฉีดพ่นทางใบให้ผลผลิตของผักปลังขาวไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ แต่ให้ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพมีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยความเข้มข้นของโซเดียมซีลีเนตเพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดลดลง ขณะที่ปริมาณสารฟลาโวนอยด์ แคโรทีนอยด์ สารประกอบฟีนอล ฤทธิ์สารต้านอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้น และการสะสมซีลีเนียมในผักปลังขาวเพิ่มขึ้น ดังนั้นการเพิ่มการสะสมซีลีเนียมในผักปลังขาวควรฉีดพ่นโซเดียมซีลีเนตทางใบที่ระดับความเข้มข้น 60 มิลลิกรัมต่อลิตร

คำสำคัญ: ผักปลัง, สารพฤกษเคมี, ดินกำแพงแสน, ซีลีเนียม, ผลผลิต

Abstract

Selenium is an essential nutrient for humans, including antioxidant activity enhancement. Therefore, enriching selenium in plants is an alternative food for consumers. The objective of this study was to determine the effects of foliar application on sodium selenate concentration in yield, bioactive compounds and selenium accumulation in green Ceylon spinach BA019 grown in the Kamphaeng Saen series. The experiment was a

randomized complete block design (RCBD) with 6 replicates and 4 treatments. Sodium selenite foliar was applied at 0, 30, 60, and 90 mg/L concentrations for 20 ml/plant at 15 days after transplant. Data were collected after foliar spraying for 15 days, including yield, total chlorophyll content, carotenoid, phenolic compounds, flavonoids, antioxidant capacity and selenium accumulation in green Ceylon spinach. The results found that sodium selenate at different concentrations was not significantly different from green Ceylon spinach yield. The sodium selenate at different concentrations was significantly different on bioactive compounds. The increase in sodium selenate concentration decreased the total chlorophyll content. Meanwhile, the flavonoids, carotenoids, phenolic compounds, antioxidant activity and selenium accumulation increased in green Ceylon spinach. Then, the enhancement of selenium content in green Ceylon spinach should be sprayed of sodium selenium at 60 mg/l concentration.

Keywords: Ceylon spinach, phytochemicals, Kamphaeng Saen soil, selenium, yield

1. บทนำ

ผักปลัง หรือ Malabar spinach, Indian spinach, และ Ceylon spinach จัดอยู่ในวงศ์ Basellaceae ผักปลังมี 2 ชนิด คือ ผักปลังขาว/เขียว และผักปลังแดง ขึ้นอยู่กับลักษณะใบและสีของลำต้น [1] ผักปลังเป็นพืชที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง เนื่องจากเป็นแหล่งของแร่ธาตุ โปรตีน น้ำมัน คาร์โบไฮเดรต เส้นใย แคโรทีนอยด์ กรดอินทรีย์ และวิตามิน เป็นต้น เมล็ดผักปลังสามารถนำมาสกัดเป็นน้ำมันจากพืชได้ [2] รวมทั้งมีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ เช่น สารประกอบฟีนอล แคโรทีนอยด์ และฟลาโวนอยด์ เป็นต้น ซึ่งเป็นสารฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ มีฤทธิ์ยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ และฤทธิ์ต้านการอักเสบ (anti-inflammatory) อีกทั้งสารเมือกจากใบสามารถนำมาใช้รักษาโรคหวัด และเป็นยาระบายสำหรับเด็ก สตรีมีครรภ์ และผู้ป่วยโรคทางเดินปัสสาวะ

ซีลีเนียมเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อมนุษย์และสัตว์ด้านกระบวนการเมแทบอลิซึม การรักษาสมดุลในร่างกาย และกระตุ้นการทำงานของระบบภูมิคุ้มกัน รวมทั้งยับยั้งสารอนุมูลอิสระสาเหตุของการเกิดโรคหัวใจและหลอดเลือดได้ นอกจากนี้ยังมีผลต่อเมแทบอลิซึมของฮอร์โมนไทรอยด์ ฮอร์โมนเพศ และอินซูลิน [3] การขาดซีลีเนียมเป็นสาเหตุของปัญหาสุขภาพในมนุษย์ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการเกิดของโรคที่ไม่ได้เกิดจากเชื้อสาเหตุของการก่อโรค เช่น อัลไซเมอร์ ภูมิแพ้ และภาวะแทรกซ้อนที่เกิดจากเบาหวาน รวมถึงการก่อตัวและการเพิ่มจำนวนของเซลล์มะเร็ง [4] เช่นเดียวกับ [5] รายงานปริมาณซีลีเนียมในเลือดของผู้สูงอายุลดลงตามอายุที่เพิ่มขึ้น และมีผลต่อการทำงานของระบบประสาทและสมองผิดปกติในผู้สูงอายุ สอดคล้องกับงานวิจัย [6] พบว่าปริมาณซีลีเนียมในเลือดต่ำอาจส่งผลให้เกิดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคกระดูกพรุน โรคหัวใจและหลอดเลือด 2-3 เท่า และงานวิจัย [7] พบว่าการขาดซีลีเนียมในเพศหญิงอาจทำให้เกิดโรคหัวใจล้มเหลวเรื้อรังได้ เช่นเดียวกับ [8] รายงานว่าภาวะซีลีเนียมกับแมกนีเซียมในเลือดต่ำลง เป็นสาเหตุให้เกิดโรคเบาหวานร่วมกับภาวะอ้วนลงพุง (metabolic syndrome) ในผู้สูงอายุ [9] รายงานว่าซีลีเนียมเป็นธาตุที่มีความสำคัญต่อกระบวนการเมแทบอลิซึมและการรักษาสมดุลในร่างกาย ซึ่งซีลีเนียมเป็นตัวยับยั้งสารอนุมูลอิสระสาเหตุของการเกิดโรคหัวใจและหลอดเลือดได้ จึงสนใจที่จะศึกษาการให้โซเดียมซีลีเนตชนิดผงทางใบต่อสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และการสะสมซีลีเนียมในผักปลังขาว ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการทดลองนี้คือศึกษาหาปริมาณความเข้มข้นของการให้โซเดียมซีลีเนตชนิดผงทางใบต่อผลผลิต สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และการสะสมซีลีเนียมในผักปลังขาวที่ปลูกในชุดดินกำแพงแสน

2. วิธีการศึกษา

เพาะเมล็ดปลูกผักปลังขาว BA019 ของศูนย์วิจัยและพัฒนาพืชผักเขตร้อน ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตร กำแพงแสน ที่แปลงวิจัยภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร กำแพงแสน เตรียมแปลงปลูกขนาดกว้าง 1 เมตร ยาว 4 เมตร และระยะห่างระหว่างแปลงย่อย 0.5 เมตร จำนวน 16 แปลง ในชุดดินกำแพงแสน เป็นดินลิก เนื้อดินเป็นดินร่วนปนทราย และปฏิกริยาดินเป็นด่าง

เล็กน้อย ดังแสดงสมบัติของดินบางประการใน Table 1 หลังจากนั้นย้ายกล้าผักปลังขาวอายุ 30 วันหลังเพาะเมล็ด ลงปลูกในแต่แปลงย่อย โดยปลูกแบบแถวคู่ ระยะห่างระหว่างแถว 0.75 เมตร ระยะห่างระหว่างต้น 1 เมตร แล้วคลุมฟางรดน้ำให้ชุ่มด้วยระบบน้ำหยด ส่วนการจัดการปุ๋ยนั้น ดำเนินการใส่ปุ๋ยเคมีสูตร 15-15-15 อัตรา 25 กิโลกรัม/ไร่ จำนวน 2 ครั้ง เมื่อผักปลังขาวอายุ 7 และ 21 วันหลังย้ายกล้า

Table 1 Some soil properties 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	-

การทดลองนี้วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ภายในบล็อก (randomized complete block design; RCBD) จำนวน 4 ซ้ำ และ 4 กรรมวิธี ได้แก่ ดำรับที่ 1 การไม่ให้โซเดียมซัลเฟตเติมดินพ่นทางใบ (0 มิลลิกรัม/ลิตร) ดำรับที่ 2 การให้โซเดียมซัลเฟตเติมดินพ่นทางใบความเข้มข้น 30 มิลลิกรัม/ลิตร การให้โซเดียมซัลเฟตเติมดินพ่นทางใบความเข้มข้น 60 มิลลิกรัม/ลิตร และการให้โซเดียมซัลเฟตเติมดินพ่นทางใบความเข้มข้น 90 มิลลิกรัม/ลิตร โดยกำหนดให้ดินพ่นโซเดียมซัลเฟตเติมทางใบในปริมาณ 20 มิลลิกรัม/ต้น เมื่ออายุผักปลังขาวอายุ 30 วันหลังกล้า หลังจากนั้นดำเนินการเก็บผลผลิตผักปลังขาว แล้วนำตัวอย่างพืชไปวิเคราะห์หาปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และการสะสมซัลเฟตในผักปลังขาวที่อายุ 40 วันหลังย้ายปลูก

การเก็บข้อมูล ดำเนินการเก็บยอดผักปลังขาว ความยาวของยอด 45-60 เซนติเมตร โดยสุ่มเก็บจำนวน 4 ต้น/แปลงย่อย แล้วนำจำนวนยอดทั้งหมดไปซึ่งหาน้ำหนักสดต่อต้น หลังจากนั้นแบ่งตัวอย่างยอดผักปลังขาวเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 นำตัวอย่างสดของยอดผักปลังขาววิเคราะห์หาปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ได้แก่ ปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมด [10] ปริมาณแคโรทีนอยด์ [11] สารประกอบฟีนอล [12] สารฟลาโวนอยด์ [13] ฤทธิ์สารต้านอนุมูลอิสระ (DDPH) [14] และกลุ่มที่ 2 นำตัวอย่างสดของยอดผักปลังขาวอบให้แห้งด้วย Hot air oven ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปซึ่งน้ำหนักแห้ง แล้วปั่นให้ละเอียดเป็นผง เพื่อวิเคราะห์หาความเข้มข้นของซัลเฟตในเนื้อเยื่อพืช [15] แล้วนำไปคำนวณหาปริมาณการสะสมซัลเฟตทั้งหมดในยอดผักปลังขาว

การวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยโปรแกรม IBM SPSS statistics 26 เพื่อหาค่า F-test และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วย Duncan's Multiple Range Test (DMRT)

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

จากผลของการให้โซเดียมซัลเฟตเติมดินพ่นทางใบต่อผลผลิต สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และการสะสมซัลเฟตในผักปลังขาวที่ปลูกในชุดดินกำแพงแสนนั้น พบว่า

1. ผลผลิตของยอดผักปลังขาว

การให้โซเดียมซัลเฟตเติมดินพ่นทางใบที่ความเข้มข้นแตกต่างกันไม่ส่งผลให้น้ำหนักผลผลิตสดของยอดผักปลังขาวแตกต่างกันทางสถิติ (Table 2) อย่างไรก็ตามการให้โซเดียมซัลเฟตเติมดินพ่นทางใบในอัตราความเข้มข้นที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลกระทบต่อการสร้างผลผลิตสดของยอดผักปลังขาว เพราะเห็นได้ว่าน้ำหนักผลผลิตสดของยอดผักปลังขาวมีแนวโน้มลดลงตามระดับความเข้มข้นของโซเดียมซัลเฟตที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับรายงานการให้ซัลเฟตมากเกินไปหรือความเข้มข้นสูงส่งผลยับยั้งการเติบโตของพืช [16] ทั้งนี้เพราะการให้ซัลเฟตในความเข้มข้นสูง สามารถลดอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง ด้วยการทำลายคลอโรพลาสต์ และขัดขวาง

การทำงานของกรดอะมิโนที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ เช่น เมทไทโอนีน และซีสเทอีน [17] จึงส่งผลให้การเติบโตของพืชลดลง แต่อย่างไรก็ตามผลของซีลีเนียมต่อการเติบโตของพืชยังขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของซีลีเนียมและชนิดของพืชด้วย

Table 2 Sodium selenate by foliar application on young shoot fresh weight of green ceylon spinach

Sodium selenate application	Young shoot fresh weight (kg/plant)
0 mg/L	1.10
30 mg/L	0.90
60 mg/L	0.82
90 mg/L	0.82
F-test	ns
CV (%)	14.94

ns = non-significantly different at 95% by DMRT method

2. สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ

2.1 ปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมด

การให้โซเดียมซีลีเนตฉีดพ่นทางใบที่ความเข้มข้นแตกต่างกันส่งผลให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดในส่วนของยอดผักปลังขาวแตกต่างกันทางสถิติ (Table 3) โดยการไม่ให้โซเดียมซีลีเนตฉีดพ่นทางใบ (ความเข้มข้น 0 มิลลิกรัม/ลิตร) ให้ยอดผักปลังขาวมีปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดในมากที่สุด (5.56 มิลลิกรัม/100 กรัม น้ำหนักสด) และมากกว่าการให้โซเดียมซีลีเนตฉีดพ่นทางใบที่ความเข้มข้น 30 และ 60 มิลลิกรัม/ลิตร คือ 4.65 และ 4.37 มิลลิกรัม/100 กรัม น้ำหนักสด ตามลำดับ ขณะที่การให้โซเดียมซีลีเนตฉีดพ่นทางใบที่ความเข้มข้น 90 มิลลิกรัม/ลิตร ส่งผลให้ยอดผักปลังขาวมีปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดน้อยที่สุด (3.97 มิลลิกรัม/100 กรัม น้ำหนักสด) แสดงให้เห็นว่าการให้โซเดียมซีลีเนตฉีดพ่นทางใบในอัตราความเข้มข้นที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดในส่วนของยอดของผักปลังขาวลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ให้โซเดียมซีลีเนตฉีดพ่นทางใบ ซึ่งสอดคล้องกับรายงาน การให้ซีลีเนียมในรูปโซเดียมซีลีเนตและโซเดียมซีลีโนท์กับผักกาดขาวดองห่อเต้า พบว่า การให้โซเดียมซีลีเนตและโซเดียมซีลีโนท์ที่ความเข้มข้นต่ำ ทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อให้ความเข้มข้นของโซเดียมซีลีเนตและโซเดียมซีลีโนท์ที่สูงขึ้น คือ 15-30 มิลลิกรัม/ลิตร ทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดลดลง [18] ทั้งนี้อาจเป็นไปได้จากซีลีเนียมที่พืชดูดซึมเข้าไปสะสมในพืชไปมีผลทำให้การเคลื่อนย้ายของกัมมะถันในพืชลดลง และเข้าไปแทนที่กัมมะถันในกรดอะมิโน เช่น selenomethionine รวมทั้งเมื่อกัมมะถันลดลงส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของไนโตรเจนลดลง จึงทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ในผักปลังขาวลดลง [19]

2.2 ปริมาณแคโรทีนอยด์

การให้โซเดียมซีลีเนตฉีดพ่นทางใบที่ความเข้มข้นแตกต่างกันส่งผลให้ปริมาณแคโรทีนอยด์ในส่วนของยอดผักปลังขาวแตกต่างกันทางสถิติ (Table 3) โดยการให้โซเดียมซีลีเนตฉีดพ่นทางใบที่ความเข้มข้น 90 มิลลิกรัม/ลิตร ส่งผลให้ยอดผักปลังขาวมีปริมาณแคโรทีนอยด์มาก (0.415 มิลลิกรัม/100 กรัม น้ำหนักสด) แต่ไม่แตกต่างกันกับการให้โซเดียมซีลีเนตฉีดพ่นทางใบที่ความเข้มข้น 60 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งมีปริมาณแคโรทีนอยด์ในส่วนของยอดของผักปลังขาวเท่ากับ 0.340 มิลลิกรัม/100 กรัม น้ำหนักสด ขณะที่การให้โซเดียมซีลีเนตฉีดพ่นทางใบที่ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัม/ลิตร และการไม่ให้โซเดียมซีลีเนตฉีดพ่นทางใบให้ยอดผักปลังขาวมีปริมาณแคโรทีนอยด์ไม่แตกต่างกันทางสถิติ และมีปริมาณแคโรทีนอยด์ในส่วนของยอดของผักปลังขาวเท่ากับ 0.267 และ 0.218 มิลลิกรัม/100 กรัม น้ำหนักสด ตามลำดับ ดังนั้นการให้โซเดียมซีลีเนตฉีดพ่นทางใบในอัตราความเข้มข้นที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ในส่วนของยอดของผักปลังขาวมีปริมาณแคโรทีนอยด์เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ให้โซเดียมซีลีเนตฉีดพ่นทางใบ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาการให้ซีลีเนียมในสารละลายธาตุอาหารพืชที่ความเข้มข้น 5 10 และ 20 μ M ในผักกาดหอม (*Valerianella locusta* L. Laterr.) พบว่าการให้ซีลีเนียมส่งผลให้ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ได้แก่ สารประกอบฟีนอล แคโรทีนอยด์ วิตามินซี และฤทธิ์สารต้านอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้น [20]

Table 3 Sodium selenate by foliar application on total chlorophyll and carotenoid content in young shoot of green ceylon spinach

Sodium selenate application	Total chlorophyll content (mg/100g FW)	Carotenoid content (mg/100g FW)
0 mg/L	5.56a	0.218d
30 mg/L	4.65b	0.267c
60 mg/L	4.37b	0.340b
90 mg/L	3.97bc	0.415a
F-test	**	**
CV (%)	8.88	13.21

** = significantly different at 99% by DMRT method

2.3 สารประกอบฟีนอล

การให้โซเดียมซีลีเนตฉีดพ่นทางใบที่ความเข้มข้นแตกต่างกันส่งผลให้ปริมาณสารประกอบฟีนอลในส่วนยอดผักปลังขาวแตกต่างกันทางสถิติ (Table 4) โดยการให้โซเดียมซีลีเนตฉีดพ่นทางใบที่ความเข้มข้น 90 มิลลิกรัม/ลิตร ส่งผลให้ยอดผักปลังขาวมีปริมาณสารประกอบฟีนอลมากที่สุด (62.96 มิลลิกรัม GAE/กรัม น้ำหนักสด) รองลงมาคือการให้โซเดียมซีลีเนตฉีดพ่นทางใบที่ความเข้มข้น 60 และ 30 มิลลิกรัม/ลิตร ให้ยอดผักปลังขาวมีปริมาณสารประกอบฟีนอลเท่ากับ 38.27 และ 35.48 มิลลิกรัม GAE/กรัม น้ำหนักสด ตามลำดับ ขณะที่การไม่ให้โซเดียมซีลีเนตฉีดพ่นทางใบส่งผลให้ยอดผักปลังขาวมีปริมาณสารประกอบฟีนอลน้อยที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับการให้ซีลีเนียมรูปโซเดียมซีลีเนต และโซเดียมซีลีไนท์ในผักกาดฮ่องเต้ พบว่าความเข้มข้นของโซเดียมซีลีเนต และโซเดียมซีลีไนท์ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีปริมาณสารประกอบฟีนอลเพิ่มขึ้นในผักกาดฮ่องเต้ [18]

2.4 สารฟลาโวนอยด์

การให้โซเดียมซีลีเนตฉีดพ่นทางใบที่ความเข้มข้นแตกต่างกันส่งผลให้ปริมาณฟลาโวนอยด์ในส่วนยอดผักปลังขาวแตกต่างกันทางสถิติ (Table 4) โดยการให้โซเดียมซีลีเนตฉีดพ่นทางใบส่งผลให้ยอดผักปลังขาวมีปริมาณสารฟลาโวนอยด์มากกว่าการไม่ให้โซเดียมซีลีเนตฉีดพ่นทางใบ ซึ่งสอดคล้องกับการให้โซเดียมซีลีเนตสามารถเพิ่มปริมาณสารประกอบฟีนอลและสารฟลาโวนอยด์ได้ในพืช Iranian Borage (*Echium amoenum*) โดยการให้โซเดียมซีลีเนต 8 มิลลิกรัม/ลิตร เพิ่มปริมาณสารประกอบฟีนอลและสารฟลาโวนอยด์ทั้งหมดอย่างมีนัยสำคัญ [16] สาเหตุที่ทำให้ปริมาณฟีนอลและฟลาโวนอยด์เพิ่มขึ้น เนื่องจากบทบาทของสารชนิดนี้ไปเพิ่มการทำงานของ phenylalanine ammonia lyase (PAL) ซึ่งเป็นเอนไซม์สำคัญในการสังเคราะห์สารประกอบฟีนอลและฟลาโวนอยด์ในพืช [21] อย่างไรก็ตามก็ตามการให้โซเดียมซีลีเนียมฉีดพ่นทางใบที่ระดับความเข้มข้นที่ต่างกัน คือ 30 60 และ 90 มิลลิกรัม/ลิตร ส่งผลให้ในส่วนยอดของผักปลังขาวมีปริมาณสารฟลาโวนอยด์ไม่แตกต่างกัน

Table 4 Sodium selenate by foliar application on phenol compound and flavonoid content in young shoot of green ceylon spinach

Sodium selenate application	Phenol compound (mg GAE/g FW)	Flavonoid content (mg QE/g FW)
0 mg/L	20.01c	0.08b
30 mg/L	35.48b	0.11a
60 mg/L	38.27b	0.12a
90 mg/L	42.96a	0.15a
F-test	**	**
CV (%)	14.36	2.76

** = significantly different at 99% by DMRT method

2.5 ฤทธิ์สารต้านอนุมูลอิสระ

การให้โซเดียมซีลีเนตฉีดพ่นทางใบที่ความเข้มข้นแตกต่างกันส่งผลให้ค่ากิจกรรมฤทธิ์สารต้านอนุมูลอิสระ (DPPH) ของผักปลังขาวแตกต่างกันทางสถิติ ซึ่งแสดงค่าเป็นร้อยละ (%) ของกิจกรรมฤทธิ์สารต้านอนุมูลอิสระ และมีค่าอยู่ในช่วง 75.69% - 81.63% (Table 5) โดยการให้โซเดียมซีลีเนตฉีดพ่นทางใบที่ความเข้มข้น 90 มิลลิกรัม/ลิตร ส่งผลให้ยอดผักปลังขาวมีค่ากิจกรรมฤทธิ์สารต้านอนุมูลอิสระสูง (81.63%) รองลงมาคือ การให้โซเดียมซีลีเนตฉีดพ่นทางใบในผักปลังขาวที่ความเข้มข้น 60 และ 30 มิลลิกรัม/ลิตร ให้ค่ากิจกรรมฤทธิ์สารต้านอนุมูลอิสระเท่ากับ 80.08% และ 75.69% ตามลำดับ ขณะที่การไม่ให้โซเดียมซีลีเนตฉีดพ่นทางใบในผักปลังให้ค่ากิจกรรมฤทธิ์สารต้านอนุมูลอิสระต่ำที่สุด (72.86%) แต่ไม่แตกต่างกันกับการให้โซเดียมซีลีเนตฉีดพ่นทางใบในผักปลังขาวที่ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัม/ลิตร ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการให้โซเดียมซีลีเนตฉีดพ่นทางใบในอัตราความเข้มข้นที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ในส่วนยอดของผักปลังขาวมีค่ากิจกรรมฤทธิ์สารต้านอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ การไม่ให้โซเดียมซีลีเนตฉีดพ่นทางใบ ทั้งนี้เพราะผักปลังขาวได้รับโซเดียมซีลีเนตในความเข้มข้นที่สูง หรือพืชเผชิญกับความเครียดจากโลหะ จากสภาพแวดล้อม หรือปัจจัยภายนอกต่างๆ ที่ไม่เหมาะสม ส่งผลให้พืชผลิตออกซิเจนที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา (reactive oxygen species, ROS) เป็นสารกลุ่มอนุมูลอิสระ ซึ่ง ROS ที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เป็นพิษ และสร้างความเสียหายให้แก่พืช ดังนั้นพืชจึงสร้างสารต้านอนุมูลอิสระ เช่น สารประกอบฟีนอล ฟลาโวนอยด์ แคโรทีนอยด์ และสารต้านอนุมูลอิสระต่างๆ เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้น หากมีปริมาณของสารอนุมูลอิสระที่มากเกินไป [22] เช่นเดียวกันกับการให้โซเดียมซีลีเนตด้วยวิธีการให้ทางใบนั้น โซเดียมซีลีเนตที่มีความเข้มข้นสูง ทำให้ปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และมาลอนไดแอลดีไฮด์ (MDA) สูงขึ้น และเป็นสารกลุ่มอนุมูลอิสระ [23] ดังนั้นเมื่อพืชเผชิญสภาวะเครียดจากสิ่งแวดล้อมหรือปัจจัยทางกายที่ไม่เหมาะสม ส่งผลให้พืชผลิตสารกลุ่มอนุมูลอิสระที่มากขึ้น เป็นพิษและสร้างความเสียหายให้แก่พืช พืชจึงต้องสร้างสารต้านอนุมูลอิสระ เช่น สารประกอบฟีนอล และสารต้านอนุมูลอิสระต่างๆ เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นหากมีปริมาณของสารอนุมูลอิสระที่มากเกินไป ซึ่งสารประกอบฟีนอล และฟลาโวนอยด์จัดเป็นสารที่มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระได้ และเมื่อเปรียบเทียบกับค่ากิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระของผักปลังขาวที่ได้รับความเข้มข้นของโซเดียมซีลีเนตที่แตกต่างกัน พบว่าผักปลังขาวที่ได้รับโซเดียมซีลีเนตฉีดพ่นทางใบที่ความเข้มข้น 90 มิลลิกรัม/ลิตร ให้ค่ากิจกรรมฤทธิ์สารต้านอนุมูลอิสระสูงที่สุด ซึ่งสอดคล้องกันกับปริมาณสารประกอบฟีนอล และปริสารฟลาโวนอยด์ที่มีค่าสูงที่สุด เมื่อผักปลังขาวที่ได้รับโซเดียมซีลีเนตฉีดพ่นทางใบที่ความเข้มข้น 90 มิลลิกรัม/ลิตร (Table 5)

3. การสะสมซีลีเนียมในยอดผักปลังขาว

การให้โซเดียมซีลีเนตฉีดพ่นทางใบที่ความเข้มข้นแตกต่างกันส่งผลให้ค่ากิจกรรมฤทธิ์สารต้านอนุมูลอิสระ (DPPH) ของผักปลังขาวแตกต่างกันทางสถิติ (Table 5) โดยการให้โซเดียมซีลีเนตฉีดพ่นทางใบที่ความเข้มข้น 90 มิลลิกรัม/ลิตร ส่งผลให้ยอดผักปลังขาวมีปริมาณการสะสมซีลีเนียมมากที่สุด (7.87 ไมโครกรัม/กรัมน้ำหนักแห้ง) รองลงมาคือ การให้โซเดียมซีลีเนตฉีดพ่นทางใบที่ความเข้มข้น 60 และ 30 มิลลิกรัม/ลิตร ให้ยอดผักปลังขาวมีปริมาณการสะสมซีลีเนียมเท่ากับ 5.43 และ 3.43 ไมโครกรัม/กรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ขณะที่การไม่ให้โซเดียมซีลีเนตฉีดพ่นทางใบส่งผลให้ยอดผักปลังขาวมีปริมาณการสะสมซีลีเนียมน้อยที่สุด ดังนั้นการให้โซเดียมซีลีเนตฉีดพ่นทางใบในอัตราความเข้มข้นที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ในส่วนยอดของผักปลังขาวมีปริมาณการสะสมซีลีเนียมเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ การไม่ให้โซเดียมซีลีเนตฉีดพ่นทางใบ ซึ่งสอดคล้องกับรายงานการศึกษาการให้โซเดียมซีลีเนตที่ความเข้มข้น 0 5 10 15 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตรในผักกาดหอม พบว่า การให้โซเดียมซีลีเนตที่ระดับความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่งผลให้ผักกาดหอมมีปริมาณการสะสมซีลีเนียมสูงที่สุด [24] ซีลีเนียมจัดเป็นธาตุที่สำคัญต่อมนุษย์ ซึ่งมีบทบาทต่อกระบวนการต่างๆ ในร่างกาย กระตุ้นภูมิคุ้มกัน ป้องกันการเกิดโรค และส่งผลต่อระบบประสาทของมนุษย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งผู้สูงอายุ จะพบปริมาณของซีลีเนียมในร่างกายต่ำเมื่อมีอายุสูงขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุของโรคต่างๆ เช่น โรคอัลไซเมอร์ โรคเบาหวาน และภาวะแทรกซ้อนที่เกิดจากโรคเบาหวาน เป็นต้น ดังนั้นผู้สูงอายุควรได้รับซีลีเนียมปริมาณ 55 ไมโครกรัม/วัน [25] จากผลการทดลองปริมาณการสะสมซีลีเนียมในยอดผักปลังขาวจากการฉีดพ่นโซเดียมซีลีเนตทางใบนั้น แสดงให้เห็นว่าการให้โซเดียมซีลีเนตฉีดพ่นทางใบที่ความเข้มข้น 60 มิลลิกรัม/ลิตร ให้ปริมาณการสะสมซีลีเนียม 5.43 ไมโครกรัม/กรัมน้ำหนักแห้ง (หรือ 54.3 ไมโครกรัม/ 10 กรัมน้ำหนักแห้ง) ดังแสดงใน table 5 ดังนั้นการบริโภคผักปลังขาวปริมาณ 10 กรัมน้ำหนักแห้ง/วัน (หรือรูปผงแห้ง) ก็จะได้รับปริมาณซีลีเนียมที่เพียงพอหรือใกล้เคียงกับปริมาณความต้องการของร่างกายที่ 55 ไมโครกรัม/วัน

Table 5 Sodium selenate by foliar application on DPPH radical scavenging activity and selenium accumulation in young shoot of green ceylon spinach

Sodium selenate application	DPPH radical scavenging activity (%)	Selenium accumulation (µg/g DW)
0 mg/L	72.86c	1.43d
30 mg/L	75.69b	3.43c
60 mg/L	80.08a	5.43b
90 mg/L	81.63a	7.87a
F-test	**	**
CV (%)	2.32	12.54

** = significantly different at 95% by DMRT method

4. สรุป

การให้โซเดียมซีลีเนตกับผักปลังด้วยวิธีฉีดพ่นทางใบส่งผลให้ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพมีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยความเข้มข้นของโซเดียมซีลีเนตที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดลดลง แต่ปริมาณสารฟลาโวนอยด์ แครโทีนอยด์ สารประกอบฟีนอล ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ และการสะสมซีลีเนียมเพิ่มขึ้น ดังนั้นหากต้องการเพิ่มการสะสมซีลีเนียมในผักปลังขาว ควรฉีดพ่นโซเดียมซีลีเนตทางใบที่ระดับความเข้มข้น 60 มิลลิกรัมต่อลิตร

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และสำนักงานวิจัยการเกษตร (สวก.) ที่สนับสนุนงบประมาณ ดำเนินการวิจัย โครงการความหลากหลายทางพันธุกรรมของผักปลังสำหรับการเพิ่มซีลีเนียม สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารฟังก์ชันประเภทบิสกิตเพื่อสุขภาพ ภายใต้แผนงานวิจัย เรื่อง “การพัฒนาศักยภาพบุคลากรวิจัยเพื่อยกระดับความสามารถในการแข่งขันภาคอุตสาหกรรมเกษตร” (Talent Mobility-SISKU)

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Khare CP. 2007. Indian Medicinal Plants: An Illustrated Dictionary. Springer-Velag Berlin/Heidelber. Springer Science+ Business Media, LLC., New York. USA
- [2] Yang, RY., Lin, S., and Kuo, G. 2008. Content and distribution of flavonoids among 91 edible plant species. Asian Pacific J. Clinical Nut. 17: 275-279.
- [3] White, PJ. and Brown, PH. 2010. Plant nutrition for sustainable development and global health. Annals of Botany. 105: 1073-1080.
- [4] Fairweather-Tait SJ, Bao Y, Broadley MR, Collings R, Ford D, Hesketh JE, and Hurst R. 2011. Selenium in human health and disease. Antioxid Redox Signal. 14: 1337-1383.
- [5] Akbaraly, TN, Hininger-Favier I, Carrière I, Arnaud J, Gourlet V, Roussel AM, and Berr C. 2007. Plasma selenium over time and cognitive decline in the elderly. Epidemiology. 18: 52-58.
- [6] Foster, LH. and Sumer, S. 1997. Selenium in health and disease: A review. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 37: 211-228.
- [7] Razavi, M., Jamilian, M., Kashan, ZF., Heidar, Z., Mohseni, M., Ghandi, Y., Bagherian, T. and Asemi Z. 2016. Selenium Supplementation and the Effects on Reproductive Outcomes, Biomarkers of Inflammation, and Oxidative Stress in Women with Polycystic Ovary Syndrome. Horm. Metab. Res. 48: 185-190.

- [8] ถวัลย์ ฤกษ์งาม, อรชума ล่อใจ, สุดาวดี คงขำ และดวงเนตร พิพัฒน์สถิตพงศ์. 2562. การศึกษาระดับทองแดง แมกนีเซียม ซีลีเนียม และสังกะสีในผู้สูงอายุชาวไทยที่มีภาวะเมแทบอลิกซินโดรมและระดับน้ำตาลในเลือดสูง. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 27. 1088-1098.
- [9] Rayman, MP. 2000. The importance of selenium to human health. The Lancet 356: 233-241.
- [10] Arnon, DI. 1949. Copper enzymes in isolated chloroplasts polyphenol oxidase in *Beta vulgaris*. Plant Physiol. 24: 1-15.
- [11] Barnes, JD., 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.
- [12] Singleton, VL., Orthofer, R., and Lamuela-Raventos, RM. 1999. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteu reagent. Methods Enzymol. 299: 152-178.
- [13] Tunna, TS., Zaidul, ISM., Ahmed, QU., 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.
- [14] Brand-Williams, W., Cuvelier, ME., and Berset, C. 1995. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. Food Science and Technology. 28: 25-30.
- [15] 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.
- [16] Kalaei, MHR., Abdossi, V., and Danaee, E. 2022. Evaluation of foliar application of selenium and flowering stages on selected properties of Iranian Borage as a medicinal plant. Sci Rep. 12: 12568.
- [17] Wang, YD., Wang, X. and Wong, YS. 2012. Proteomics analysis reveals multiple regulatory mechanisms in response to selenium in rice. Proteomics. 75: 1849-1866.
- [18] กุสุมา อินทร์เขียว, อินทรา ชุตแก้ว และพรไพรินทร์ รุ่งเจริญทอง. 2563. ผลของซีลีเนียมและซีลีเนตต่อการเจริญเติบโต ปริมาณรงควัตถุ และสารพฤกษเคมีของกวางตุ้งฮ่องเต้ในระบบไฮโดรโปนิกส์. เกษตร. 48(พิเศษ 1). 37-42.
- [19] Meyer, J., Moulis, JM., Gaillard, J. and Lutz, M. 1992. Replacement of Sulfur by Selenium in Iron—Sulfur Proteins. Advances in Inorganic Chemistry. 38: 73-115.
- [20] Skrypnik, L., Styran, T., Savina, T. and Golubkina, N. 2021. Effect of Selenium Application and Growth Stage at Harvest on Hydrophilic and Lipophilic Antioxidants in Lamb's Lettuce (*Valerianella locusta* L. Laterr.). Plants (Basel). 10: 2733.
- [21] Habibi, G., Ghorbanzade, P. and Abedini, M. 2016. Effects of selenium application on physiological parameters of *Melissa officinalis* L. plants. Int. J. Med. Plant Res. 4: 698-715.
- [22] ยงยุทธ โอสสถภา. 2558. ธาตุอาหารพืช (ฉบับปรับปรุงใหม่). พิมพ์ครั้งที่ 4. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- [23] Lara, TS., Lessa, JHDL., Lima, JHD., Souza, KR., Corguinha, APB., Martins, FAD., Lopes, G. and Guilherme, LRG. 2019. Selenium biofortification of wheat grain via foliar application and its effect on plant metabolism. Journal of Food Composition and Analysis. 81: 10-18.
- [24] กฤตยา บุญรัตน์ประพันธ์, พรไพรินทร์ รุ่งเจริญทอง และศุภชัย อำคา. 2563. การใช้ซีลีเนียมซีลีเนตต่อการเจริญเติบโต และคุณภาพผลผลิตในผักกาดหอม. เกษตร. 48(พิเศษ 1). 1241-1246.
- [25] Rayman, MP. 2012. Selenium and human health. Lancet. 379: 1256-1268.

การสอบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตของเมล็ดถั่วแดงหลวงด้วยแบบจำลองดีอีเอ็ม Calibration of Static Friction Coefficient of Kidney Bean Seeds with DEM model

ปรีดา ปรากฏมาก
Preeda Prakotmak

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University, Kamphaeng Saen campus, Nakhon Pathom

*Corresponding author: Preeda Prakotmak, e-mail address: fengpdpr@ku.ac.th

บทคัดย่อ

ความแม่นยำของการจำลองวิธีองค์ประกอบไม่ต่อเนื่อง (DEM) มีความไวต่อค่าความหนาแน่นรวม ขนาดและรูปร่างของอนุภาค ตลอดจนพารามิเตอร์อันตรกิริยาระหว่างอนุภาค เช่น สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอวิธีการสอบเทียบและการหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตระหว่างเมล็ดพืชกับพื้นผิวโลหะ (Coefficient of static friction particle-wall, μ_{p-w}) เพื่อนำไปใช้กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เมล็ดถั่วแดงถูกเลือกเป็นวัสดุทดสอบเพื่อตรวจสอบค่า μ_{p-w} โดยอิงจากการทดสอบการเลื่อนไถลบนระนาบเอียง ผลการทดลองและการจำลอง DEM ถูกนำมาใช้ในการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตระหว่างเมล็ดถั่วแดงและพื้นผิวเครื่องจักร เช่น แผ่นเหล็ก สแตนเลส และอลูมิเนียม ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตของถั่วแดงที่ได้จากงานนี้สามารถช่วยปรับปรุงการออกแบบพฤติกรรมกรรมการสัมผัสระหว่างการไหลของอนุภาคและชิ้นส่วนเครื่องจักรได้

คำสำคัญ: การสอบเทียบ, ดีอีเอ็ม, สัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต, ถั่วแดง

Abstract

The accuracy of the discrete element method (DEM) simulation is sensitive to the bulk density value, particle size and shape as well as interaction parameters between particles, such as coefficient of friction. The objective of this study is to present a method for calibrating and determining the static friction coefficient between grain and metal wall for use in mathematical models. Kidney beans were selected as the test material to investigate the static friction coefficient based on the sliding test on an inclined plane. Both experimental and DEM simulation results were used to estimate the coefficients of static friction between kidney beans and on machine surfaces such as sheet iron, stainless steel, and aluminum. The coefficients of static friction of kidney beans obtained from this work could help enhance the design the contact behavior between particle flow and machine parts.

Keywords: Calibration, DEM, Static friction coefficient, Kidney beans

1. บทนำ

ในอุตสาหกรรมเกษตรที่เกี่ยวข้องกับวัสดุที่เป็นมวลกอง (Bulk Material) จากการศึกษาพบว่าเกือบ 60% ของกำลังการผลิตถูกนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ ในขณะที่ส่วนที่เหลือมากถึง 40% สูญเปล่าเนื่องจากปัญหาการจัดการการขนถ่ายวัสดุ [1] ดังนั้นความเข้าใจที่ดีเกี่ยวกับกลศาสตร์ของวัสดุที่เป็นเมล็ดหลังการเก็บเกี่ยวจึงเป็นสิ่งสำคัญ อย่างไรก็ตามความรู้เกี่ยวกับพฤติกรรมของอนุภาคที่เป็นเม็ดเล็ก (Granule) เช่น วิธีการไหล ความเร็ว และแรง ที่ได้รับการใช้วิธีการทดลองนั้นมีข้อจำกัด

นอกจากนี้วิธีการทดลองยังใช้เวลาและค่าใช้จ่ายสูง ในทางตรงกันข้ามเทคนิคการจำลองเชิงตัวเลขที่ก้าวหน้า เช่น วิธีองค์ประกอบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Element Method, DEM) ได้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการวิเคราะห์อันตรกิริยาต่างๆ ของวัสดุเม็ดเล็ก เช่น การเสียดสี การแตกหัก การกระจัด ความเร็ว แรงบิด การถ่ายเทความร้อน ฯลฯ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตหรือขนถ่ายวัสดุ แบบจำลอง DEM ดังกล่าวอาศัยกฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 2 ของนิวตัน (Newton's second law of motion) ร่วมกับแบบจำลองการสัมผัสกันของอนุภาค มาทำนายอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคกับอนุภาค และอนุภาคกับผิววัสดุ โดยอนุภาคแต่ละอันจะเคลื่อนที่แบบอิสระต่อกัน

แม้ว่าแบบจำลอง DEM จะได้รับการพัฒนามาตั้งแต่ ค.ศ. 1970 [2] แต่เมื่อไม่นานมานี้ นักวิจัยและวิศวกรสามารถสร้างแบบจำลอง DEM ที่มีขนาดใหญ่และมีความซับซ้อนเพียงพอที่จะนำไปใช้ได้จริง ทำให้เกิดความนิยมอย่างรวดเร็วในการนำแบบจำลอง DEM [3] มาใช้ในการคำนวณด้านวิศวกรรมการขนถ่ายวัสดุ การศึกษาจำนวนมากได้แสดงให้เห็นถึงประโยชน์ของ DEM ในการสร้างแบบจำลองพฤติกรรมของของแข็งจำนวนมากในระบบที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรม เช่น ฟลูอิดเบต ไชโล เครื่องผสม การผลิตยา เครื่องอบแห้ง การขนส่งวัสดุ และเก็บเกี่ยวผลผลิตทางการเกษตร อย่างไรก็ตามสมบัติของวัสดุมีอิทธิพลต่อผลลัพธ์ของการจำลอง DEM ยกตัวอย่างเช่น รูปร่างวัสดุ ความหนาแน่น สัมประสิทธิ์การคืบตัว สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ฯลฯ โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต (μ_s) มีความสำคัญในการสร้างแบบจำลอง DEM สำหรับการขนถ่ายวัสดุ เนื่องจากผิวของวัสดุจะสัมผัสกับเครื่องจักร หากใช้ค่าที่ไม่ถูกต้องตามสมบัติที่แท้จริงของวัสดุที่อาจเกิดปัญหาในการคำนวณ เช่น เมื่อวัสดุสัมผัสกับเครื่องจักรอาจเกิดการลื่นไถลจนไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ หรือหากมีความเสียดทานสูงวัสดุจะเสียดสีกับเครื่องจักรจนเกิดความเสียหาย ผลการจำลองผิดพลาดไม่น่าเชื่อถือ ในการออกแบบเครื่องจักรสำหรับขนส่ง การเก็บเกี่ยว และการจัดเก็บ จำเป็นต้องทราบความสัมพันธ์ของ μ_s ระหว่าง วัสดุ-วัสดุ และวัสดุ-ผนังเครื่องจักร เพื่อเป็นข้อมูลในการกำหนดผิวสัมผัสที่ต้องการให้วัสดุเคลื่อนที่ตามความต้องการ สมบัติเหล่านี้ต้องอาศัยการทดลองและลองผิดลองถูก (Trial and error) และจำเป็นต้องสอบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อให้มั่นใจในการสร้างแบบจำลอง DEM ต่อไป

บทความนี้สนใจวิธีการสอบเทียบ (Calibration) และการหาค่า μ_s ของพืชเศรษฐกิจในประเทศไทย เมล็ดถั่วแดง (Kidney Bean) ได้ถูกเลือกเป็นพืชสอบเทียบระหว่างผลการทดลองและผลการจำลอง DEM เนื่องจากเมล็ดถั่วแดงยังมีข้อมูล μ_s เพื่อนำไปใช้กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างจำกัด จากการสืบค้นงานวิจัยพบว่างานวิจัยที่ทำการสอบเทียบค่า μ_s ระหว่างผลการทดลองการไหลบนพื้นเอียงกับแบบจำลอง DEM สำหรับวัสดุของพืชตระกูลถั่วกับพื้นผิวต่างกัน เช่น ระหว่างเมล็ดถั่วเหลือง-ดิน $\mu_s=0.6$ [4] ถั่วแดง-ดิน $\mu_s=0.5$ [4] ถั่วเหลือง-อะคริลิก $\mu_s=0.3$ [1] ถั่วเหลือง-เหล็ก $\mu_s=0.57$ [5] ถั่วเหลือง-ยาง $\mu_s=0.67$ [5] ถั่วเหลือง-ไม้ $\mu_s=0.61$ [5] เป็นต้น แต่ข้อมูล μ_s ระหว่างเมล็ดถั่วแดงกับผิวเครื่องจักรยังมีข้อมูลการวิจัยน้อย งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอวิธีการสอบเทียบการหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตระหว่างเมล็ดถั่วแดงและพื้นผิวเครื่องจักร โดยศึกษาในผิวโลหะ 3 ชนิด ได้แก่ เหล็ก สแตนเลส และอลูมิเนียม รวมทั้งเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการจำลอง DEM

2. วิธีการศึกษา

เมล็ดถั่วแดงหลวงสายพันธุ์ *Phasecolus vulgaris* L. จัดอยู่ในวงศ์ Fabaceae หรือ Leguminosae นำมาจากซูเปอร์มาเก็ตสินค้าการเกษตร ภายใต้เงื่อนไขที่ทำการทดสอบถั่วแดงมีความชื้นเฉลี่ย 12.265 %d.b. (AOAC 945.15) [6] เพื่อความแม่นยำของการสร้างแบบจำลอง DEM งานวิจัยนี้ได้ทดลองหาความชื้น ขนาดทางกายภาพ น้ำหนัก ความหนาแน่นรวม และการกระจายขนาดของเมล็ดถั่วแดง เนื่องจากสมบัติเหล่านี้มีอิทธิพลต่อการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตโดยขั้นตอนการทดลองดังหัวข้อต่อไปนี้

2.1 ลักษณะกายภาพและการกระจายขนาด

สุ่มเลือกเมล็ดถั่วแดงจำนวน 100 เมล็ด จากปริมาณน้ำหนัก 2 kg ดังแสดงใน Figure 1a มาทำการวัดขนาดลักษณะทางกายภาพ ความยาว ความกว้าง และความหนา ด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ความละเอียด ± 0.01 แสดงใน Figure 1b โดยรายงานผลเป็นค่าเฉลี่ย และนำข้อมูลมาแจกแจงความถี่แบบจัดกลุ่มขนาดของเมล็ดถั่วแดงโดยแบ่งออกเป็น 4 อันตรภาคชั้น ในช่วง 6-9 mm



Figure 1 (a) Kidney bean seeds, quantity 2 kg (b) Measuring the physical characteristics of kidney bean grains

2.2 ความหนาแน่นรวม

ส้อมเมล็ดถั่วแดงนำมาบรรจุแบบตักอิสระลงในภาชนะที่ทราบปริมาตรให้เต็มพอดี ซึ่งน้ำหนักรวมวัสดุและภาชนะดังแสดงใน Figure 2 แล้วนำมาลบน้ำหนักของภาชนะจะทราบน้ำหนักเมล็ดถั่วแดง จากนั้นคำนวณความหนาแน่นปรากฏตามสมการที่ (1)

$$\rho_b = \frac{M_{filled}}{V_{filled}} \quad (1)$$

เมื่อ ρ_b คือความหนาแน่นรวม (kg/m^3) M_{filled} คือมวลวัสดุที่เติมลงในภาชนะ (kg) และ V_{filled} คือปริมาตรของภาชนะ (m^3)



Figure 2 Experiment on the bulk density of kidney bean grains.

2.3 การทดลองหาสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต

เครื่องทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตระหว่างเมล็ดถั่วแดงและพื้นโลหะ ได้ถูกออกแบบและสร้างขึ้นที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล กำแพงแสน ดังแสดงใน Figure 3 การทำงานเริ่มต้นจากควบคุมให้มอเตอร์หมุนสกรูถอยหลัง กลไกปรับมุมเอียงจะลดความชันลงเรื่อย ๆ จนชนานกับพื้น ลิมิทสวิตช์จะสั่งให้มอเตอร์หยุดหมุนที่ตำแหน่งเครื่องอ่านมุมมีค่า $\alpha = 0^\circ$ จากนั้นติดตั้งแผ่นโลหะที่ต้องการวัดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตโดยยึดสกรูกับฐานกลไก นำแผ่นพลาสติกแข็งใสม้วนเป็นวงแหวน (Ring) เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 m ความสูง 0.03 m วางบนแผ่นโลหะนำเมล็ดถั่วแดงบรรจุในภาชนะวงแหวนดังกล่าวแล้วกดเมล็ดให้เรียงตัวอย่างอิสระจนเต็มภาชนะ

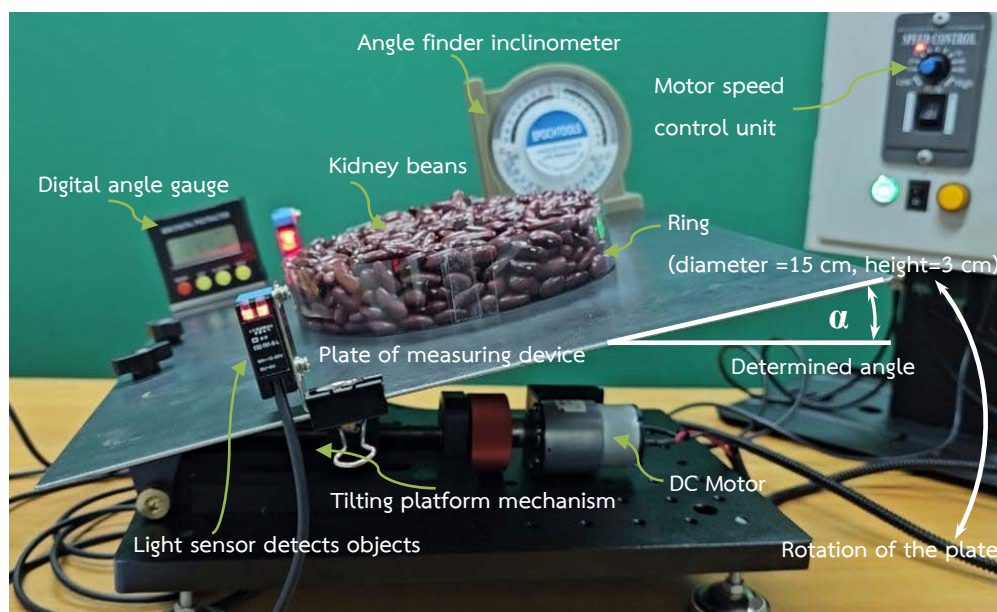


Figure 3 Equipment for measuring coefficient of static friction by inclined plane method.

หลังจากนั้นติดตั้งเซ็นเซอร์แสงรุ่น E3Z-T61-G-D/L ชนิดวงจร NPN ความไวในการทำงาน 1 ms ที่ขอบทั้งสองด้านของแผ่นโลหะโดยให้ลำแสงที่สะท้อนระหว่างเซ็นเซอร์อยู่ที่ขอบของวงแหวนพอดี ทำการยึดฐานเครื่องวัดมุมเอียงแบบดิจิทัลและแบบอนาล็อกบนแผ่นโลหะเพื่อเปรียบเทียบและช่วยยืนยันค่ามุมที่สอดคล้องกัน โดยค่าเริ่มต้นมีค่ามุมเท่ากับศูนย์องศา จากนั้นปรับระดับสัญญาณ PWM ให้มอเตอร์หมุนสกรูเดินหน้ากลไกจะปรับมุมเอียงของแผ่นโลหะเพิ่มขึ้นในอัตรา 2 degree/s แผ่นโลหะจะมีมุมเอียงเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนเอาชนะแรงเสียดทานสถิตของเมล็ดถั่วแดงที่สัมผัสกับพื้นโลหะทำให้วงแหวนเกิดการไถลลงตามแรงโน้มถ่วง ทันทีที่วงแหวนตัดผ่านลำแสงของเซ็นเซอร์มอเตอร์จะหยุดหมุนทำการบันทึกค่า α แล้วเริ่มตั้งค่าการทดลองซ้ำ โดยบรรจุเมล็ดถั่วใหม่และเปลี่ยนตำแหน่งการวางวงแหวนบนแผ่นโลหะอย่างน้อย 25 ตำแหน่งทั่วแผ่นโลหะ นำค่า α ที่ได้มาเฉลี่ยและคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตตามสมการที่ (2)

$$\mu_s = \tan(\alpha) \quad (2)$$

เมื่อ μ_s คือสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต และ α คือมุมเอียงของแผ่นโลหะที่ทำเมล็ดถั่วแดงเริ่มเคลื่อนที่แบบไถล ในงานวิจัยนี้ได้ทดสอบสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตกับพื้นโลหะขนาด 0.3x0.3 m² ได้แก่ แผ่นสแตนเลส เหล็ก และอลูมิเนียม ดังแสดงใน Figure 4

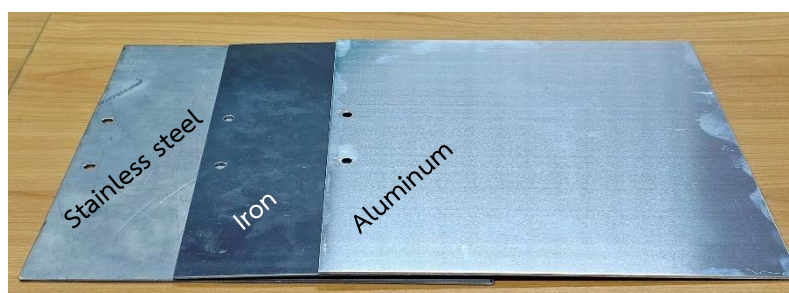


Figure 4 The metal plates used in this research.

2.4 การจำลองด้วยวิธีองค์ประกอบแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete element method, DEM)

แบบจำลอง DEM คือวิธีเชิงตัวเลขชนิดหนึ่งนิยมใช้จำลองอิทธิพลของวัสดุที่มีปริมาณมากโดยเฉพาะวัสดุที่เป็นเม็ดโดยอาศัยกฎข้อที่สองของนิวตัน (Newton's second law of motion) ดังสมการ

$$m_i \frac{d^2 x_i}{dt^2} = F_i + m_i g \quad (3)$$

เมื่อ m_i คือมวลของเม็ดวัสดุ F_i และ $m_i g$ คือแรงภายนอกและแรงเนื่องจากความโน้มถ่วง ตามลำดับ เทอม $\frac{d^2 x_i}{dt^2}$ แสดงความเร่งของเม็ดวัสดุ การเคลื่อนที่แบบหมุนของเม็ดวัสดุสามารถอธิบายตามสมการที่ (4)

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = M_i \quad (4)$$

เมื่อ ω_i คือความเร็วเชิงมุมในระบบพิกัดอนุภาค M_i คือแรงบิดในระบบพิกัดความเฉื่อย และ I_i คือเทนเซอร์ความเฉื่อยของอนุภาค ในงานวิจัยนี้สร้างแบบจำลองด้วยชุดคำสั่ง Material Calibration ในซอฟต์แวร์ Ansys Rocky 2023 R2 [7] โดยปรับปรุงกรณีศึกษาให้สอดคล้องกับการทดลอง ทำการประมวลผลด้วยจีพียู Nvidia Titan V หน่วยความจำแบบ HBM2 จำนวน 12 GB ร่วมกับซีพียู Intel® Xeon® Gold 5115 แรม 16 GB โดยจำลองด้วยเงื่อนไขพารามิเตอร์ที่แสดงใน Table 1

Table 1 Summary of DEM parameters in this study

Parameter	Notation	Value and description	Unit
Contact model	-	Normal force: Hysteretic linear spring	-
	-	Tangential force: Linear spring coulomb	-
	-	limit	-
	-	Rolling resistance model: Type C- Linear	-
	-	spring rolling limit	-
Gravity	g	Cohesion: none	m/s^2
		9.81	
Particle shape model	-	Sphero-Polygon	-
		Vertical aspect ratio: 1.8	
		Horizontal aspect ratio: 0.85	
		Number of corners: 3	
Particle sieve size	-	9 (100)	mm
		8 (98)	(Cumulative, %)
		7 (50)	
		6 (20)	
Bulk density	ρ_b	806.09	kg/m^3

Young's modulus of particle [4]	E_p	4.535e7	N/m ²
Poisson's ratio of particles [4]	ν_p	0.4	-
Young's modulus of wall	E_w	70, 190, 204	GPa
Poisson's ratio of wall	ν_w	0.3	-
Coefficient of static friction particle-particle	μ_{p-p}	0.3	-
Coefficient of static friction particle-wall	μ_{p-w}	Values calculated from experiments	-
Coefficient of restitution particle-particle	e_{p-p}	0.1	-
Coefficient of restitution particle-wall	e_{p-w}	0.3	-
Ring size	-	Diameter: 0.15, Height: 0.03	m
Time step	Δt	2.5e-06	s
Simulation time	t	15	s
Inclined plane angle rate	α_r	2	degree/s

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 ขนาดทางกายภาพและความหนาแน่นรวม

Figure 5a แสดงเมล็ดถั่วแดงที่ใช้ในการศึกษานี้ ขนาดเฉลี่ยของถั่วแดงมีความยาว (L) 16.32 กว้าง (W) 8.15 และหนา (T) 7.61 mm ในการจำลองหาสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตจะสมมติเมล็ดถั่วแดงเท่ากับขนาดเฉลี่ยดังกล่าว จากนั้นกำหนดการกระจายแบบขนาดตระแกรง (Sieve size) ลงในแบบจำลอง DEM ดังแสดงใน Figure 5b กล่าวคือขนาดของเมล็ดถั่วแดงที่สามารถร่อนผ่านตะแกรงทดสอบที่ละชั้นที่มีขนาดระหว่าง 6-9 mm ซึ่งแสดงการแจกแจงความถี่ของขนาดเมล็ดถั่วแดงในหัวข้อที่ 3.2

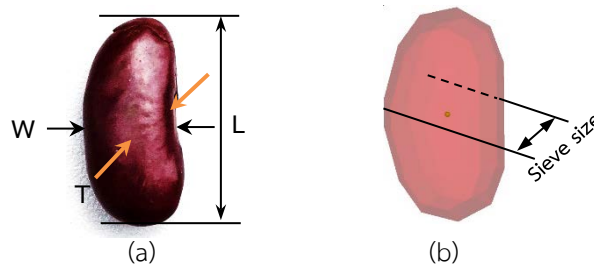


Figure 5 (a) Real kidney bean and (b) Kidney bean particle used in DEM simulations

3.2 การกระจายขนาดของเมล็ดถั่วแดง

ในการจำลองในหัวข้อที่ 3.3 ได้บรรจุเมล็ดถั่วแดงลงในวงแหวนจนเต็มซึ่งต้องมีจำนวน 1,345 เมล็ด Figure 6 แสดงการแจกแจงความถี่แบบจัดกลุ่มขนาดของเมล็ดถั่วแดงที่ใช้ในการจำลองโดยแบ่งออกเป็น 4 อันตรภาคชั้น ในช่วง 6-9 mm ตามลักษณะขนาดตระแกรง (Sieve size) ที่ทำการวัดขนาดจากการทดลองที่ 2.1 จำนวนความถี่ของขนาดเมล็ดถั่วแดงจะอยู่ในช่วง 6-8 mm จำนวน 1,331 เมล็ด และมีขนาด 8-9 mm จำนวน 14 เมล็ดเท่านั้น ถั่วแดงจำนวน 1,345 เมล็ดที่มีขนาดดังแสดงใน Figure 6 และแสดงร้อยละความถี่สะสม (Cumulative) สำหรับกำหนดค่าในซอฟต์แวร์ Ansys Rocky การจำลองดังแสดงใน Table 1 โดยเมล็ดถั่วแดงที่สร้างในแบบจำลองจะถูกสุ่มลำดับการบรรจุลงในวงแหวนเพื่อทำการจำลองการไหลบนผิวโลหะทำให้การจำลองแต่ละครั้งจะมีตำแหน่งสุ่มในวงแหวนไม่เหมือนเดิม

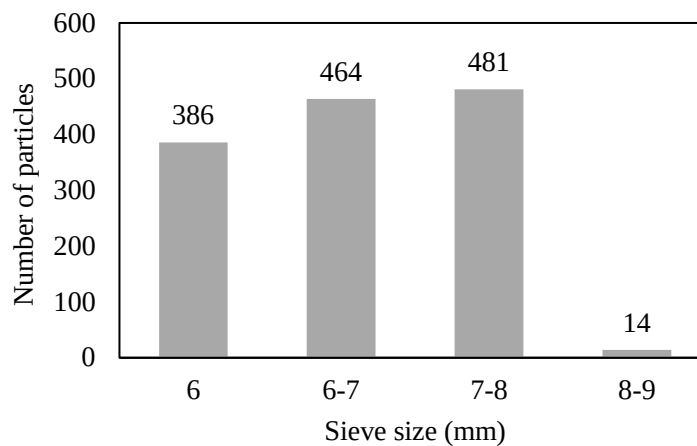


Figure 6 Kidney beans sieve size distribution used in DEM simulations.

3.3 การสอบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต

งานวิจัยนี้ได้สร้างแบบจำลอง DEM ของการเลื่อนไถลของเมล็ดถั่วแดงเพื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตตามเงื่อนไขการทดลองในหัวข้อที่ 2.3 ใช้ขนาดเมล็ดถั่วแดงตามหัวข้อที่ 3.1 และ 3.2 การสร้างแบบจำลองเริ่มจากการวาดแผ่นพื้นโลหะขนาด $0.3 \times 0.3 \text{ m}^2$ หนา 2 mm และวงแหวนทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 mm สูง 30 mm ด้วยซอฟต์แวร์ FreeCAD บันทึกไฟล์เป็นนามสกุล .STL นำเข้าสู่ซอฟต์แวร์ Ansys Rocky ทำการกำหนดพารามิเตอร์ในแบบจำลองที่สร้างขึ้นตาม Table 1 โดยกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตระหว่างถั่วแดงกับผนังโลหะ (μ_{p-w}) ที่ได้มาจากการทดลองในหัวข้อที่ 2.3 ในสถานะเริ่มต้นของการจำลองจะตั้งค่าให้แผ่นโลหะอยู่ในแนวราบแล้วบรรจุเมล็ดถั่วแดงจำนวน 1,345 เมล็ด ซึ่งจำนวนดังกล่าวเติมเต็มปริมาตรของวงแหวนพอดีและสอดคล้องกับการทดลองในหัวข้อ 2.3 จากนั้นกำหนดให้แผ่นโลหะเพิ่มมุมเอียงด้วยอัตรา 2 degree/s ดังแสดงใน Figure 7 ทำการจำลองให้ครอบคลุมระยะเวลาในเหตุการณ์การเลื่อนไถลในทุกกรณีศึกษาซึ่งกำหนดค่าที่ 15 s แล้วใช้เรียกใช้สคริปต์ Python เพื่ออ่านค่าพลังงานความเค้นเฉือน (Watt) ที่กระทำระหว่างเมล็ดถั่วแดงในวงแหวนกับพื้นโลหะ สคริปต์ Python จะรายงานมุมที่วงแหวนเริ่มเคลื่อนที่โดยการพิจารณาพลังงานความเค้นเฉือนที่เริ่มมีความชันเพิ่มขึ้นดังแสดงใน Figure 7 จากนั้นนำค่ามุมที่คำนวณได้แทนค่าในสมการที่ (2) ทำการจำลองซ้ำโดยสุ่มการวางเมล็ดตัวของเมล็ดถั่วแดงในวงแหวนใหม่และทำซ้ำในขั้นตอนที่กล่าวมา ดำเนินการเปลี่ยนสมบัติของโลหะใหม่ในกรณีที่พื้นโลหะต่างชนิดกัน

Figure 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานความเค้นเฉือน และเวลาในการเคลื่อนที่แบบไถลของวงแหวนที่บรรจุถั่วแดงกับผนังพื้นเหล็ก สเกลสีน้ำเงินถึงแดงแสดงความเร็วในการเคลื่อนที่ของเมล็ดถั่วแดงในช่วง 0-0.2 m/s ที่เวลาต่ำกว่า 7 s แม้ว่าพื้นเหล็กจะเอียงไปหลายองศาเมล็ดถั่วแดงยังไม่เคลื่อนที่แสดงด้วยสีน้ำเงิน เนื่องจากไม่สามารถเอาชนะแรงเสียดทานสถิตระหว่างพื้นและเมล็ดถั่วแดงได้ทำให้พลังงานความเค้นเฉือนมีค่าเกือบเท่ากับศูนย์ เมื่อแผ่นเหล็กเอียงจนมีมุมค่าหนึ่งที่เวลา 8 s เมล็ดถั่วแดงเริ่มไถลแทนด้วยสเกลสีฟ้า ณ มุมเอียงนี้จะถูกนำไปคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตระหว่างถั่วแดงกับแผ่นเหล็ก เมื่อแผ่นเหล็กเอียงเพิ่มขึ้น ที่เวลา 8.6 s ความเร็วในการไถลจะเพิ่มขึ้นแสดงเมล็ดถั่วในสเกลสีเหลือง ที่เวลา 9.0 s ก่อนที่วงแหวนจะเคลื่อนที่พ้นจากแผ่นเหล็กความเร็วการไถลและพลังงานความเค้นเฉือนจะมีค่าสูงสุด หลังจากนั้นพลังงานความเค้นเฉือนจะลดลงจนมีค่าเท่ากับศูนย์เนื่องจากเมล็ดถั่วเคลื่อนที่ผ่านแผ่นเหล็กไปแล้วไม่เกิดการสัมผัสกันอีกต่อไป

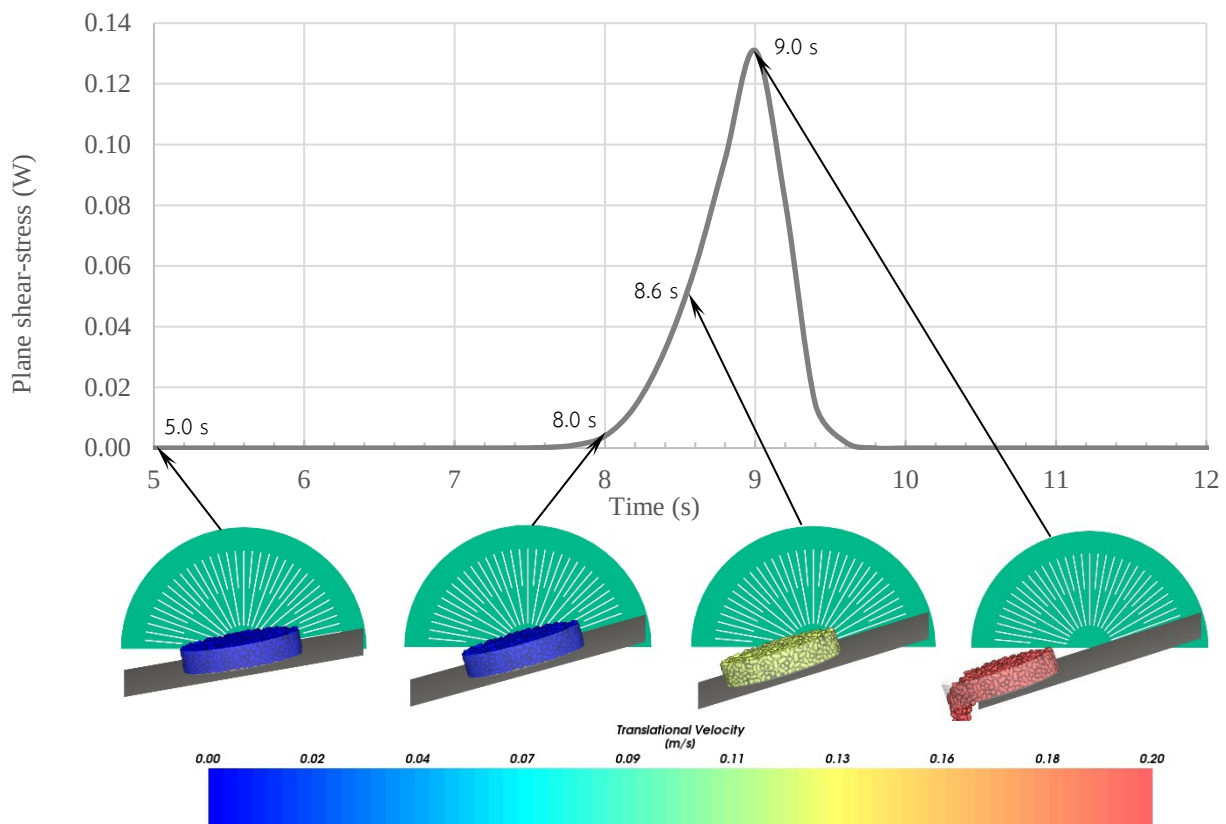


Figure 7 Plane shear-stress versus time during inclined plane test of iron sheet.

Figure 8 เปรียบเทียบพลังงานความเค้นเฉือนในระหว่างการไถของถั่วแดงบนพื้นผิวโลหะ 3 ชนิด ได้แก่ อลูมิเนียม เหล็กแผ่น และสแตนเลส พบว่าพลังงานความเค้นเฉือนบนพื้นสแตนเลสมีค่าสูงสุด รองลงมาคือพื้นเหล็กและอลูมิเนียม ตามลำดับ ระยะเวลาที่พลังงานความเค้นเฉือนเริ่มมีความชันหรือเวลาที่เริ่มวงแหวนเริ่มไถ ได้แก่เวลา 9.2, 8.0 และ 7.2 s ตามลำดับ โดยคำสั่งสคริปต์ Python ได้รายงานค่ามุมที่เวลาดังกล่าวเท่ากับ 18.4, 16.0 และ 14.4° ตามลำดับ เมื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตจะมีค่าเท่ากับ 0.33, 0.28 และ 0.25 สำหรับพื้นสแตนเลส เหล็กและอลูมิเนียม ตามลำดับ เนื่องจากข้อมูลงานวิจัยที่รายงานค่า μ_{p-w} ระหว่างเมล็ดถั่วแดงกับผิวโลหะยังคงมีอย่างจำกัด เมื่อนำเปรียบเทียบกับเมล็ดถั่วแดงสายพันธุ์ใกล้เคียงกันพบว่า มีค่า μ_s กับพื้นผิวเหล็กเท่ากับ 0.323 [8] ที่ความชัน 11.61 % d.b. ถั่วแดงสายพันธุ์ Uyole-96 มีค่าเฉลี่ย μ_s กับพื้นผิวอะลูมิเนียม เหล็กและสแตนเลสเท่ากับ 0.35, 0.34 และ 0.31 ตามลำดับ [9] ที่ความชัน 17.15 % d.b. เมื่อเทียบกับงานวิจัยนี้จากข้อมูลใน Table 2 เมล็ดถั่วแดงที่ทำการทดลองมีความชันเฉลี่ย 12.265 % d.b. พบว่าค่าที่ได้ยังมีความแตกต่างกันเนื่องจากเป็นถั่วแดงต่างสายพันธุ์และระดับความชันที่ใช้ในการทดลองไม่เท่ากัน นอกจากนี้อาจมีสาเหตุมาจากการใช้พื้นผิวโลหะที่มีเกรดวัสดุต่างกัน โดยค่า μ_s ที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าต่ำกว่าจากงานวิจัยอื่น

อย่างไรก็ตามงานวิจัยอื่น [8], [9] ที่นำมาใช้เปรียบเทียบนี้ทีมผู้ทดลองใช้วิธีการสังเกตการจุดเริ่มไถด้วยสายตาตนเอง และกลไกการปรับมุมเอียงของพื้นผิวโลหะใช้แบบควบคุมด้วยมือ ซึ่งงานวิจัยนี้ทราบถึงข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นจึงได้พัฒนาเครื่องมือที่ใช้เซ็นเซอร์แสงในการตรวจจับการไถของวัสดุเพื่อควบคุมการทำงานของกลไกการปรับพื้นเอียงที่มีความแม่นยำกว่าดัง Figure 3 นอกจากนี้ยังนำค่า μ_s ไปสอบเทียบกับแบบจำลอง DEM ซึ่งให้ผลสอดคล้องกันดังแสดงใน Table 2 Table 2 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตระหว่างค่าที่มาจากการทดลอง และค่าที่คำนวณมาจากแบบจำลอง DEM พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันโดยมีความผิดพลาดสัมพัทธ์เท่ากับ 3.125, 0.000 และ 4.167% สำหรับพื้นสแตนเลส เหล็กและอลูมิเนียม ตามลำดับ พื้นอลูมิเนียมมีความคลาดเคลื่อนจากการทดลองสูงสุดอาจเป็นผลมาจากผิวมีความลื่นกว่า วัสดุไถได้ง่าย อาจต้องเพิ่มจำนวนการทดลองหรือเปรียบเทียบกับผิวอลูมิเนียมที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว

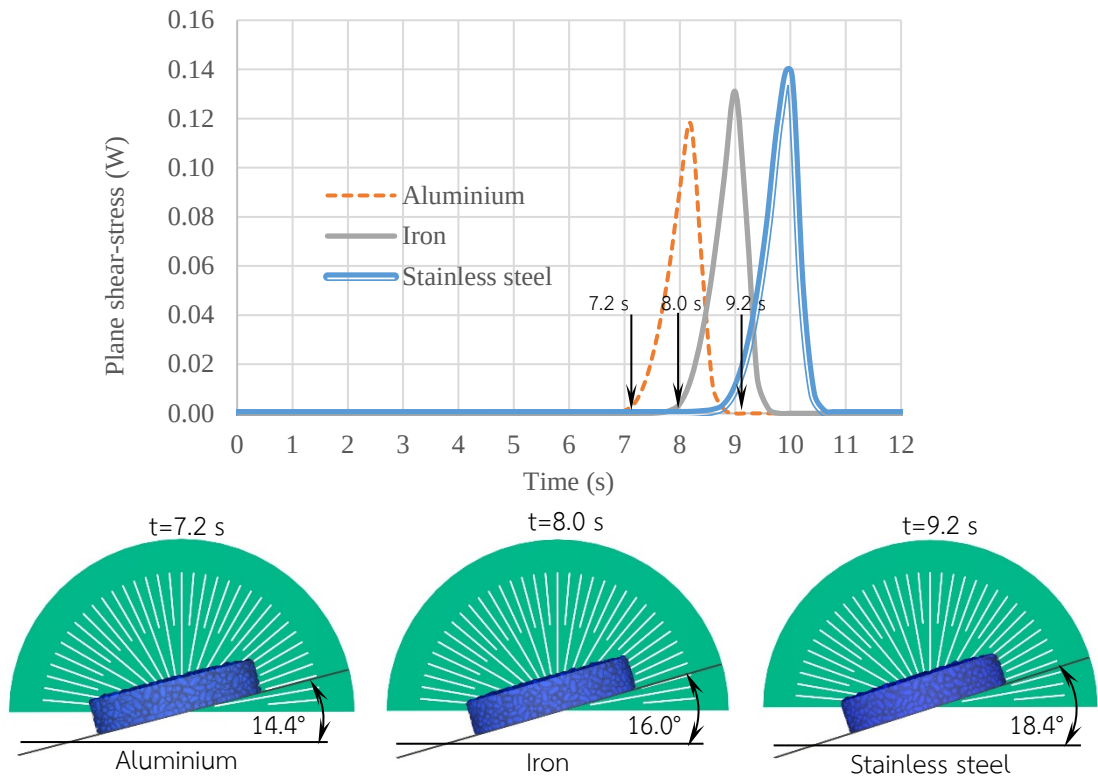


Figure 8 Plane shear-stress versus time during inclined plane test of aluminum, iron and stainless-steel sheets.

Table 2 Summary results of calibrated coefficient of static friction.

Material	Experiment	DEM model	Abs. relative error (%)
Aluminum	0.24±0.012	0.25±0.000	4.167
Iron	0.28±0.006	0.28±0.000	0.000
Stainless steel	0.32±0.009	0.33±0.000	3.125

3.4 ตัวอย่างการนำไปใช้ประโยชน์

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตที่มีต่อมุมทรงตัวหรือมุมก่อกอง กล่าวคือมุมที่กองวัสดุทำกับพื้นราบซึ่งเป็นมุมชันสูงสุดที่กองวัสดุคงอยู่ได้โดยไม่ไหลพังหรือเคลื่อนที่ลงมา ในงานวิจัยนี้คำนวณมุมก่อกอง (Angle of repose, AOR) ของเมล็ดถั่วแดงด้วยแบบจำลอง DEM แสดงดัง Figure 9 ด้วยการสร้างแบบจำลองบรรจุเมล็ดถั่วแดงลงในท่อทรงกระบอกปลายเปิดทั้งสองด้านที่ตั้งอยู่บนพื้นผิวโลหะจนเต็มท่อ โดยท่อนี้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.08 m ยาว 0.2 m จากนั้นกำหนดให้ท่อนี้เคลื่อนที่ขึ้นในแนวตั้งด้วยความเร็ว 0.1 m/s ทำให้ถั่วแดงไหลตามแรงโน้มถ่วงออกจากท่อแล้วทับถมกันจนเป็นกอง (Pile)

หลังจากจำลองดังแสดงใน Figure 9 ทำเรียกใช้สคริปต์ Python อ่านค่า AOR สามารถแสดงผลการจำลองดัง Figure 10 มุมก่อกองของเมล็ดถั่วแดงบนพื้นผิวที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตต่างกัน ($\mu_{\text{kidney beans-wall}}$) พบว่ามุมก่อกองของเมล็ดถั่วแดงมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตที่เพิ่ม เนื่องจากมีแรงต้านทานต่อการไหลของเมล็ดที่สัมผัสพื้นสูงกว่า เมื่อกำหนดค่า $\mu_{\text{kidney beans-wall}} = 0.2$ เมล็ดถั่วแดงที่ด้านล่างของกองไม่สามารถยึดเกาะกับพื้นได้ดีทำให้เลื่อนไหลส่งผลให้ไม่สามารถรักษาความสูงของกองเมล็ดได้ จากผลการจำลองนี้ทำให้ทราบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตมีอิทธิพลต่อผลลัพธ์การจำลองอย่างมาก

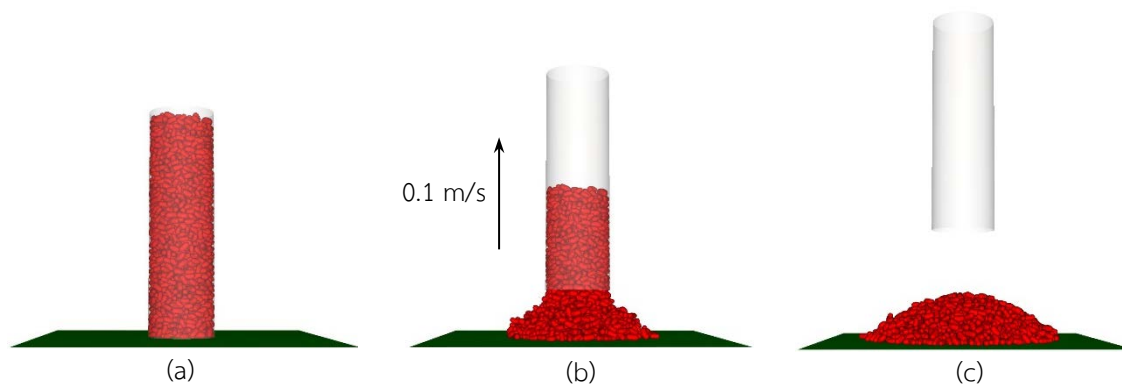


Figure 9 Scheme of the simulation of AOR test: (a) settling under gravity (b) rising cylinder (c) resting pile

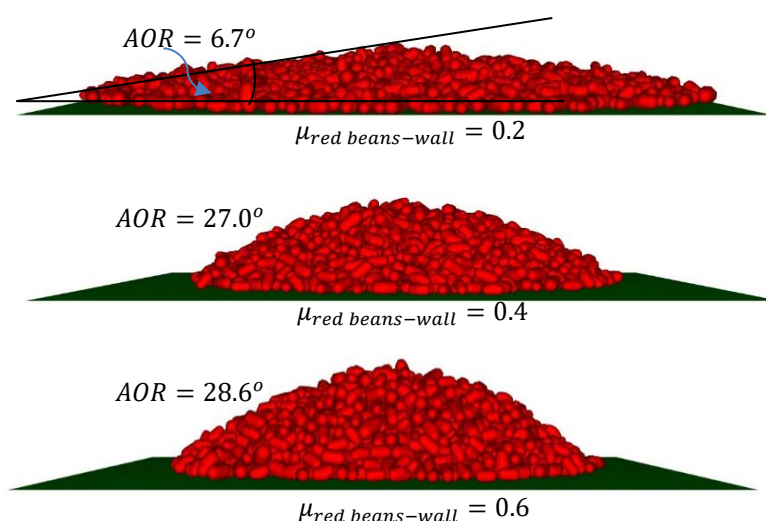


Figure 10 shows the influence of the static friction coefficient ($\mu_{red\ beans-wall}$) on the pile of kidney beans.

4. สรุป

แบบจำลองวิธีองค์ประกอบไม่ต่อเนื่อง (DEM) ที่สร้างขึ้นสามารถสอบเทียบการทดลองเส้นไคเลนระนาบเอียงและทำนายค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตระหว่างเมล็ดถั่วแดงและพื้นโลหะ 3 ชนิด ได้ค่อนข้างแม่นยำ โดยพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตของเมล็ดถั่วแดงกับพื้นผิวสแตนเลส เหล็กแผ่น และอลูมิเนียม มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.33, 0.28 และ 0.25 ตามลำดับ วิธีการสอบเทียบสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตระหว่างวัสดุกับพื้นผิวของเครื่องจักรที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ สามารถนำไปใช้กับวัสดุหรือเมล็ดพืชชนิดอื่นๆ ที่สัมผัสกับผิวโลหะหลากหลายชนิดด้วยการเปลี่ยนพารามิเตอร์เพื่อสร้างแบบจำลองให้สอดคล้องกับสมบัติวัสดุนั้น ๆ แบบจำลองนี้จะช่วยตรวจสอบความถูกต้องของการทดลอง หรือนำไปใช้ทำนายพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของวัสดุเมื่อสัมผัสกับพื้นผิวต่างๆ ช่วยออกแบบเครื่องจักรที่ใช้ขนถ่ายวัสดุหลังการเก็บเกี่ยว ลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการทดลอง

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] B. M. Ghodki, M. Patel, R. Namdeo, and G. Carpenter, "Calibration of discrete element model parameters: soybeans," *Comput Part Mech*, vol. 6, no. 1, pp. 3–10, Jan. 2019, doi: 10.1007/s40571-018-0194-7.
- [2] P. A. Cundall and D. L. St, "A discrete numerical model for granular assemblies," 1979.
- [3] H. P. Zhu, Z. Y. Zhou, R. Y. Yang, and A. B. Yu, "Discrete particle simulation of particulate systems: Theoretical developments," *Chem Eng Sci*, vol. 62, no. 13, pp. 3378–3396, Jul. 2007, doi: 10.1016/j.ces.2006.12.089.
- [4] T. Xu, H. Fu, J. Yu, C. Li, J. Wang, and R. Zhang, "Determination of Ellipsoidal Seed–Soil Interaction Parameters for DEM Simulation," *Agriculture*, vol. 14, no. 3, p. 376, Feb. 2024, doi: 10.3390/agriculture14030376.
- [5] T. X. Nguyen *et al.*, "Characterization of soybeans and calibration of their DEM input parameters," *Particulate Science and Technology*, vol. 39, no. 5, pp. 530–548, 2021, doi: 10.1080/02726351.2020.1775739.
- [6] K. E. Ileleji, A. A. Garcia, A. R. P. Kingsly, and C. L. Clementson, "Comparison of Standard Moisture Loss-on-Drying Methods for the Determination of Moisture Content of Corn Distillers Dried Grains with Solubles," 2010. [Online]. Available: <https://academic.oup.com/jaoac/article/93/3/825/5655637>
- [7] ESSS-Rocky, "Rocky-Dem Technical Manual." ESSS, Rio de Janeiro, Brazi, pp. 3–11, 2018.
- [8] J. H. Chung, L. R. Verma, and M. Asae, "Determination of Friction Coefficients of Beans and Peanuts," 1989.
- [9] A. A. S. Palilo, B. A. Majaja, and B. Kichonge, "Physical and Mechanical Properties of Selected Common Beans (*Phaseolus vulgaris* L.) Cultivated in Tanzania," *Journal of Engineering (United Kingdom)*, vol. 2018, 2018, doi: 10.1155/2018/8134975.

การอบแห้งจิ้งหรีดด้วยเครื่องสเปาท์ฟลูอิดเบดร่วมกับไมโครเวฟ Cricket Drying by Spout Fluid Bed with Microwave

กิตติ สถาพรประสาธน์^{1*} และ กฤษณ์ อภิญญาวิศิษฐ์²
Kitti Sathapornprasath^{1*} and Krit Apinyavisit²

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ นครนายก
²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร กรุงเทพฯ

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University, Nakorn-Nayok

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Bangkok

*Corresponding author: Kitti Sathapornprasath, e-mail address: kitti@g.swu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งจิ้งหรีดด้วยเทคนิคสเปาท์ฟลูอิดเบดร่วมกับไมโครเวฟ โดยใช้จิ้งหรีดแช่แข็งที่อุณหภูมิ -10°C ก่อนการอบแห้งต้องนำจิ้งหรีดที่แช่แข็งมาวางให้น้ำแข็งละลายจนกว่าจะถึงอุณหภูมิแวดล้อม จากนั้นนำจิ้งหรีดที่มีความชื้นเฉลี่ยเริ่มต้นประมาณ $135 \pm 5\%$ d.b. มาอบแห้งในเครื่องอบแห้งสเปาท์ฟลูอิดเบดร่วมกับไมโครเวฟที่อุณหภูมิ 65°C , 75°C และ 85°C ความเร็วลมสเปาท์เด็ดเบด 14 m/s และ 18 m/s ความเร็วลมฟลูอิดไดซ์เบด 12 m/s ความสูงเบด 10 cm และไมโครเวฟ 800 W อบจนกระทั่งความชื้นสุดท้ายเหลือประมาณ 5.0 % d.b. จากผลการทดลองสรุปได้ว่าที่อุณหภูมิ 85°C ความเร็วลมสเปาท์เด็ดเบด 18 m/s ความเร็วลมฟลูอิดไดซ์เบด 12 m/s ความสูงเบด 10 cm และไมโครเวฟ 800 W โดยใช้เวลาและค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) น้อยที่สุด ส่วนการอบแห้งแบบสเปาท์ฟลูอิดเบดร่วมกับไมโครเวฟสามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งและลดความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) ได้สูงสุด เท่ากับ 27.3 % และ 27.2 % ตามลำดับ

สำหรับการประเมินคุณภาพทางเคมีกายภาพและการยอมรับทางประสาทสัมผัส พบว่า สภาวะการอบแห้งที่มีความเร็วลม 18 m/s อุณหภูมิ 75°C และใช้ไมโครเวฟกำลัง 800 W จะได้จิ้งหรีดอบแห้งที่มีคุณภาพดีที่สุด คือ มีความสว่าง (L^*) ปริมาณน้ำอิสระและความชื้นต่ำ

คำสำคัญ: จิ้งหรีด, สเปาท์เด็ดเบด, ฟลูอิดไดซ์เบด, ไมโครเวฟ

Abstract

This study aims to explore the effects of various factors of combined spouted fluidized bed with microwave technique on drying of crickets. Frozen crickets stored at -10°C were thawed at ambient temperature before experiments. Crickets with average initial moisture content of $135 \pm 5\%$ d.b. were dried in spouted fluidized bed with microwave dryer at temperature of 65, 75 and 85°C , spouted-bed air speed of 14 and 18 m/s. Fluidized bed air speed of 12 m/s, bed height of 10 cm and microwave power of 800 W were used in this study. Crickets were dried until the moisture content remained at 5.0% d.b. Drying at 85°C , spouted-bed air speed of 18 m/s, fluidized bed air speed of 12 m/s, bed height of 10 cm and microwave power of 800W was the most efficient operating condition in terms of time and specific energy consumption (SEC). Drying using combined spouted fluidized bed with microwave technique reduced drying time and SEC by 27.3 % and 27.2 %, respectively.

The dried crickets were evaluated for their physicochemical and sensory properties. The results showed that crickets dried at 75°C , spouted-bed air speed of 18 m/s with microwave power of 800 W had high lightness (L^*) and brittleness values, and low a_w and moisture content.

Keywords: Cricket, Spouted bed, Fluidized bed, Microwave

1. บทนำ

ปัจจุบันมีประชากรโลกราว 2,000 ล้านคนที่บริโภคแมลงเป็นประจำ ผู้คนต่างให้ความสนใจรับประทานแมลงเป็นอาหารกันมากขึ้น เนื่องจากเป็นแหล่งโปรตีนทางเลือกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าการทำฟาร์มปศุสัตว์ ทั้งยังอุดมไปด้วยไขมันชนิดดี วิตามิน และแร่ธาตุ องค์การอาหารและเกษตรแห่งชาติ (Food and Agriculture Organization : FAO) จึงได้วางแผนส่งเสริมให้ใช้แมลงเป็นอาหารสำหรับมนุษย์ เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการเพิ่มความมั่นคงทางด้านอาหาร [1-2] จิ้งหรีดคือหนึ่งในแมลงที่นับว่าเป็นสุดยอดอาหารที่มีโปรตีนสูงกว่าเนื้อวัวและเนื้อหมู ประกอบด้วยกรดอะมิโนจำเป็น 9 ชนิด ย่อยง่ายกว่าเนื้อสัตว์ การแปรรูปจิ้งหรีดด้วยการทอด หากมีการบริโภคเป็นจำนวนมากอาจมีผลต่อสุขภาพของผู้บริโภคได้ ดังนั้นการอบแห้งจิ้งหรีดได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยนำเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดและสเปาต์เต็ดเบดให้ทำงานร่วมกันและเมื่อนำเทคนิคไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้ด้วย จะช่วยลดระยะเวลาในการอบแห้งได้

กิตติ สถาพรประสารณ์ และ โพธิ์ทอง ปราณีตพลกรัง [3] ได้วิจัยเกี่ยวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบเจ็ตสเปาต์เต็ดเบด เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้ง ได้แก่ อุณหภูมิอบแห้ง ที่มีต่อจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของสมการอบแห้งแบบเอมพิริคัลที่เหมาะสม หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมที่สุดในการหาแนวโน้มของความชื้นที่จะเกิดขึ้นของข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบเจ็ตสเปาต์เต็ดเบด ซึ่งสามารถลดค่าใช้จ่ายและเวลาในการทดลองได้ โดยจะใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 70, 80 และ 90 °C ความสูงเบดของข้าวเปลือก 200 mm ความเร็วของอากาศในท่อทางเข้าหอบแห้ง 10 m/s เพื่อลดความชื้นของข้าวเปลือกจากความชื้นเริ่มต้น 30-35% (d.b.) จนเหลือความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 12% (d.b.) จากการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิการอบแห้งที่สูงขึ้นจะส่งผลทำให้อัตราการอบแห้งสูงขึ้น

นิตยา จันกา และคณะ [4] ได้วิจัยเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ความร้อนแฝงของการควบแน่น สำหรับการลดการก่อกวนของกรดไขมันอิสระในข้าวกล้อง โดยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดด้วยอากาศร้อนขึ้น เพื่อลดกลิ่นเหม็นหืนของข้าวกล้องที่มีสาเหตุจากการแยกสลายลิพิดด้วยน้ำในรำข้าวกลายเป็นกรดไขมันอิสระโดยเอนไซม์ลิเพสในระหว่างการเก็บรักษา โดยนำข้าวเปลือกไปอบที่อุณหภูมิ 150 °C ความเร็วของอากาศ 3 m/s และความสูงเบด 10 cm อบเป็นเวลา 72 ชั่วโมง จนกระทั่งความชื้นลดลงถึงระดับหนึ่งแล้วนำไปเก็บไว้ในห้องปรับอากาศจากนั้นเป่าลมด้วยอากาศแวดล้อม พบว่าความชื้นของข้าวเปลือกลดลงเหลือ 13-15 % และลดการก่อกวนของไขมันอิสระได้ถึง 50.8 % เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องอบแห้งด้วยวิธีการตากแดดที่เมื่อระยะเวลาผ่านไประยะหนึ่งจะเห็นว่าค่าปริมาณกรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและมีแนวโน้มว่าจะเพิ่มขึ้นตามเวลาเก็บรักษา ซึ่งจากผลการทดลองจะพบการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงอย่างรวดเร็วและการลดเปอร์เซ็นต์ความชื้นให้น้อยที่สุดจะช่วยยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ลิเพสที่ทำให้เกิดกลิ่นเหม็นหืนได้

อาทิตย์ เพียรงาม และคณะ [5] ได้วิจัยเกี่ยวกับการลดความชื้นในอากาศด้วยเทคนิคสเปาต์เต็ดเบด เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการลดความชื้นในอากาศด้วยเทคนิคแบบสเปาต์เต็ดเบด โดยใช้เครื่องลดความชื้นอากาศ เพราะเครื่องลดความชื้นอากาศแบบสเปาต์เต็ดเบดมีอัตราการดูดซับความชื้นอากาศสูง และอัตราการการฟื้นฟูสภาพสารดูดความชื้นสูง โดยแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนดูดซับความชื้นแบบควานคัมเมอร์ ประกอบด้วย ความหนาของส่วนดูดซับความชื้น 3, 6 และ 9 cm. และส่วนฟื้นฟูสภาพสารดูดซับความชื้นแบบสเปาต์เต็ดเบด ประกอบด้วย อุณหภูมิของอากาศ 60, 70 และ 80 °C และความเร็วของอากาศ 18, 20 และ 22 m/s พบว่าที่ความหนาส่วนดูดซับความชื้น 6 cm. อุณหภูมิของอากาศฟื้นฟู 60 °C และความเร็วอากาศของส่วนฟื้นฟู 20 m/s ทำให้เครื่องลดความชื้นในอากาศแบบสเปาต์เต็ดเบด สามารถลดความชื้นในอากาศได้มีประสิทธิภาพที่สุดจากเริ่มต้น 80-85 % RH ลงเหลือ 15-20 %RH

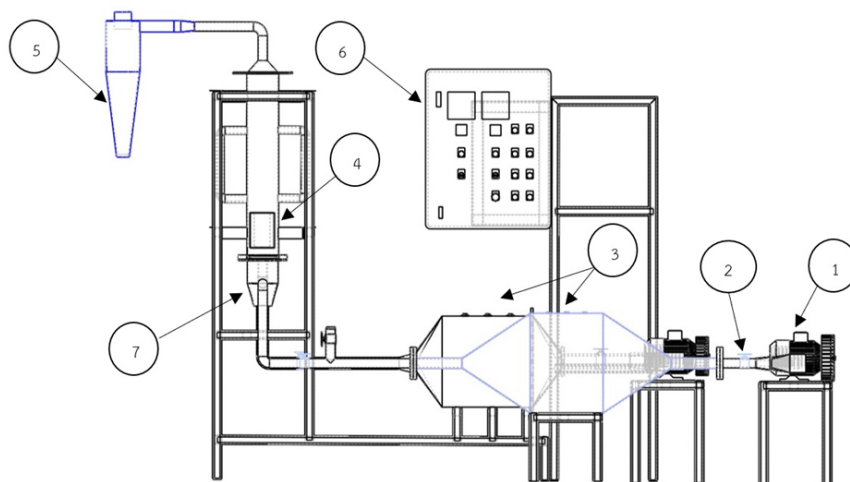
กิตติ สถาพรประสารณ์ และ โพธิ์ทอง ปราณีตพลกรัง [6] ได้ศึกษาวิจัยเพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมที่สุดในการทำนายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของจิ้งหรีดด้วยเครื่องอบแห้งแบบสเปาต์เต็ดฟลูอิดเบด ซึ่งมีเงื่อนไขการอบแห้งดังนี้ อุณหภูมิอบแห้ง 3 ระดับ (65, 75 และ 85 °C) ความเร็วลมสเปาต์ 2 ระดับ (14 และ 16 m/s) ความเร็วฟลูอิดไดซ์คงที่เท่ากับ 12 m/s และความสูงเบดเท่ากับ 10 cm พิจารณาแบบจำลองที่เหมาะสมด้วยค่าทางสถิติได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์ การตัดสินใจ (R^2) และค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ผลการศึกษาพบว่า แบบจำลอง ของ Logarithmic สามารถทำนายคุณลักษณะการอบแห้งของจิ้งหรีดได้เหมาะสมที่สุด เพราะค่า R^2 มีค่าสูงสุด และ RMSE มีค่าต่ำที่สุด ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของจิ้งหรีดมีค่าอยู่ระหว่าง 7.63×10^{-8} - 11.4×10^{-8} m²/s และค่าพลังงานกระตุ้นมีค่าเท่ากับ 17.98 kJ/mol. และ 18.16 kJ/mol. ที่ความเร็วลมสเปาต์ 14 m/s และ 16 m/s ตามลำดับ

สำหรับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ 1. เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งเทคนิคสเปาท์ฟลูอิดเบตทำงานร่วมกับไมโครเวฟ 2. เพื่อศึกษาผลของสภาวะการอบแห้งที่มีต่อคุณภาพของจิ้งหรีดอบแห้งให้ได้คุณภาพตรงกับความต้องการของผู้บริโภค โดยมีขอบเขตของศึกษาปัจจัยของการอบแห้งได้แก่ อุณหภูมิ ความเร็วลม กำลังไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟ และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) และทดสอบคุณสมบัติทางเคมีกายภาพ ได้แก่ ค่าสี ปริมาณน้ำอิสระ ความชื้น

2. วิธีการศึกษา

เริ่มการศึกษาโดยการออกแบบเครื่องอบแห้งสเปาท์ฟลูอิดเบตร่วมกับไมโครเวฟ หลังจากนั้นได้ทำการทดลองหาเงื่อนไขในการอบแห้งจิ้งหรีดด้วยเทคนิคสเปาท์ฟลูอิดเบต โดยทดลองในการจลนพลศาสตร์การอบแห้ง คุณภาพของจิ้งหรีดอบแห้ง และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้ง เพื่อหาผลกระทบของอุณหภูมิ ความเร็วลม และความสูงของเบต ที่มีผลต่อการอบแห้งและคุณภาพของจิ้งหรีดอบแห้ง เมื่อได้เงื่อนไขที่เหมาะสมของการอบแห้งสเปาท์ฟลูอิดเบตแล้ว นำเงื่อนไขที่เหมาะสมไปทดลองร่วมกับไมโครเวฟและศึกษาผลของไมโครเวฟต่อไป

กระบวนการอบแห้งเริ่มเมื่อลมร้อนที่มีอุณหภูมิ 65 °C, 75 °C และ 85 °C ถูกเป่าเข้าไปในเตาอบผ่านตะแกรงรองจิ้งหรีดจนถึงบริเวณที่เป็นทรงกรวยที่บรรจุจิ้งหรีดอยู่ จากนั้นจิ้งหรีดถูกเป่าขึ้นไปในอากาศ การลอยตัวของจิ้งหรีดนั้นจะลอยขึ้นไปเป็นลำของลมซึ่งเท่ากับขนาดของท่อลมก่อนถึงทรงกรวยมีขนาด 3.81 เซนติเมตรหรือ 1 ½ นิ้ว เรียกว่า ลำสเปาท์ เมื่อจิ้งหรีดที่ลอยขึ้นไปจนไม่สามารถลอยต่อขึ้นไปได้ด้วยอัตราการไหลของลมที่ แล้วจะตกลงมาในลักษณะของน้ำพุ ที่บริเวณข้างเตาอบและจะถูกเป่าขึ้นไปใหม่หมุนเวียนกันเช่นนี้เรื่อยๆ มวลของจิ้งหรีดที่เปลี่ยนแปลงระหว่างการอบแห้งจะถูกวัดอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 1 เครื่องอบแห้งจิ้งหรีดสเปาท์ฟลูอิดเบตร่วมกับไมโครเวฟ

เครื่องอบแห้งสเปาท์ฟลูอิดเบตร่วมกับไมโครเวฟ ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ดังนี้ 1.พัดลมแรงดันสูง (High-pressure fan) ขนาดมอเตอร์ 2.60 kW ซึ่งทำหน้าที่ป้อนอากาศเข้าสู่ระบบ 2.บอลวาล์ว (Ball valve) ซึ่งทำหน้าที่ปรับความเร็วของอากาศที่เข้าสู่ระบบให้ได้ค่าที่เหมาะสมโดยความเร็วของอากาศจะถูกวัดด้วย rotating vane anemometer 3.ชุดทำความร้อนด้วยไฟฟ้า (Electric heater) ขนาด 12 kW ซึ่งทำหน้าที่เพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศที่ใช้เป็นตัวกลางในการอบแห้ง 4. หอบอบแห้ง (Drying column) ซึ่งทำจากเหล็กสแตนเลส (Stainless steel) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 135 mm และสูง 800 mm อากาศร้อนที่ผ่านชุดทำความร้อนจะไหลเข้าหอบอบแห้งที่ด้านล่างผ่านช่องทางเข้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 70 mm ซึ่งเชื่อมต่อกับหอบอบแห้งด้วยกรวยสแตนเลส หอบอบแห้งติดตั้งไมโครเวฟขนาด 800 W 5.ไซโคลนดักฝุ่น (Cyclone collector) ซึ่งทำหน้าที่แยกผลิตภัณฑ์ออกจากอากาศร้อน 6.ชุดควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller) แบบ PID ยี่ห้อ PNC รุ่น REX-C100 ซึ่งมีความแม่นยำการควบคุม $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ชุดควบคุมนี้จะทำงานโดยอาศัยอุณหภูมิของอากาศที่เข้าหอบอบแห้งเป็นตัวควบคุมการทำงานของชุดทำความร้อน 7.ไมโครเวฟ (Microwave) ให้ความร้อนกับอาหารโดยการแผ่คลื่นย่านความถี่ไมโครเวฟ โดยแมกนีตรอนเป็นส่วนประกอบหลัก ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นคลื่นไมโครเวฟ

2.1 การทดลองและการเก็บข้อมูล

การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเน้นไปที่จลนพลศาสตร์การอบแห้งและการถ่ายเทความร้อนของจิ้งหรีดรวมไปถึงความสิ้นเปลืองพลังงานที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งที่เงื่อนไขการทดลองต่างๆ ส่วนที่สองเน้นไปที่คุณภาพทางกายภาพบางอย่างของจิ้งหรีดที่ได้จากการอบแห้ง การทดลองอบแห้งเบื้องต้นเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมทดลองที่อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าหออบแห้ง 3 ระดับ กล่าวคือ 65 °C, 75 °C และ 85 °C ในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง ความเร็วลมสเปาต์เต็ดเบด 3 ระดับคือ 12, 14, 18 m/s ความเร็วลมฟลูอิดไดซ์ 12 m/s และความสูงของเบด 5 และ 10 cm รวบรวมทั้งหมด 18 เงื่อนไข เมื่อได้เงื่อนไขที่เหมาะสมของการอบแห้งสเปาต์ฟลูอิดเบดแล้ว นำเงื่อนไขที่เหมาะสมไปทดลองร่วมกับไมโครเวฟและศึกษาผลของไมโครเวฟต่อไป โดยเงื่อนไขที่เหมาะสมเพื่อการศึกษาต่อ คือ อบแห้งที่อุณหภูมิ 65 °C, 75 °C และ 85 °C ความเร็วลมฟลูอิดไดซ์ 12 m/s ความเร็วลมสเปาต์เต็ดเบด 14 m/s และ 18 m/s คลื่นไมโครเวฟ 800 W ปริมาณจิ้งหรีดที่ใช้ในการทดลองละครึ่งประมาณ 1 kg มวลของจิ้งหรีดถูกวัดอย่างต่อเนื่องวัดทุกๆ 3 และ 6 นาที ขึ้นอยู่กับรูปแบบการอบแห้ง โดยแต่ละเงื่อนไขการอบแห้งจะทำการทดลอง 3 ครั้ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย

อัตราส่วนความชื้น

$$MR = \left(\frac{M_t - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} \right) \quad (1)$$

โดยที่ M_t คือ ความชื้นของจิ้งหรีดที่เวลาใดๆ (g)

M_0 คือ ความชื้นเริ่มต้นของจิ้งหรีด (g)

M_{eq} คือ ความชื้นสมดุลของจิ้งหรีด (g)

โดยค่าความชื้นสมดุลมีค่าน้อยมากเนื่องจากอบแห้งที่อุณหภูมิสูงและใช้ไมโครเวฟ ดังนั้นสามารถแทนค่า M_{eq} เท่ากับ 0 ในสมการที่ (1) ได้

การหาความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ SEC

$$SEC = \frac{E_{blower1} + E_{blower2} + E_{heater1} + E_{heater2} + E_{microwave}}{m_{water}} \quad (2)$$

$E_{blower1}$ คือ พลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่พัดลมฟลูอิดไดซ์เบด (kWh)

$E_{blower2}$ คือ พลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่พัดลมสเปาต์เต็ดเบด (kWh)

$E_{heater1}$ คือ พลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่ชุดทำความร้อนฟลูอิดไดซ์เบด (kWh)

$E_{heater2}$ คือ พลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่ชุดทำความร้อนสเปาต์เต็ดเบด (kWh)

$E_{microwave}$ คือ พลังไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่ชุดไมโครเวฟ (kWh)

m_{water} คือ ปริมาณน้ำ (ความชื้น) ที่ระเหยออกจากการทดลอง (kg_{water})

โดยพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งหาได้จากมิเตอร์ไฟฟ้า (kilowatt-hour meter) ยี่ห้อ Mitsubishi Electronic Meter รุ่น SX1-A35N

2.2 การเตรียมตัวอย่างและหาความชื้นของจิ้งหรีด

จิ้งหรีดสายพันธุ์ทองดำที่นำมาจากฟาร์มจะถูกแช่แข็งที่อุณหภูมิ -10 °C ก่อนการอบแห้งจะต้องนำจิ้งหรีดที่แช่แข็งมาวางให้น้ำแข็งละลายจนมีอุณหภูมิเท่ากับสิ่งแวดล้อมประมาณ 4-5 ชั่วโมง จิ้งหรีดมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 135±5% d.b. โดยจิ้งหรีดส่วนหนึ่งจะนำไปหาความชื้นที่อุณหภูมิ 103 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง เพื่อหามวลแห้งของการหาความชื้นเริ่มต้น

2.3 การศึกษาสภาวะที่ส่งผลต่อคุณภาพของจิ้งหรีดที่ผ่านการอบแห้ง

ศึกษาปัจจัยการทำแห้งที่มีผลต่อคุณภาพของจิ้งหรีด ได้แก่ ความเร็วลม อุณหภูมิ และกำลังไมโครเวฟ โดยประเมินคุณภาพของจิ้งหรีดอบกรอบ ดังนี้

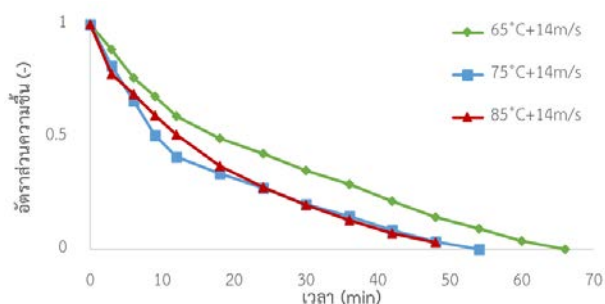
คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของจิ้งหรีดอบกรอบ ได้แก่ ค่าสี (L^* , a^* และ b^*) โดยใช้เครื่องวัดสี (ColorFlex EZ, Hunter Associates Laboratory, Inc., Reston, VA) ปริมาณน้ำอิสระ (water activity) โดยใช้เครื่องวัดปริมาณน้ำอิสระ (LabMaster-aw CH 8853, Novasina, Lachen, Switzerland) และ ความชื้น โดยใช้ตู้อบลมร้อนอุณหภูมิ 103 °C [7]

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

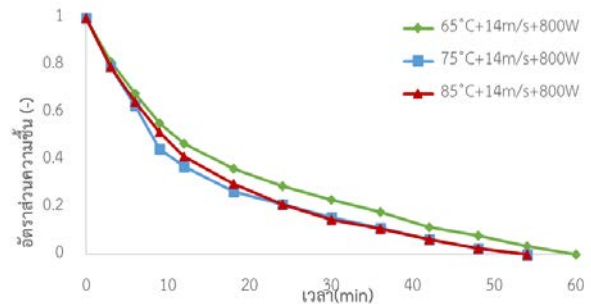
งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของ อุณหภูมิลมร้อน 65 °C, 75 °C และ 85 °C ความเร็วลมฟลูอิดไดซ์ 12 m/s ความเร็วลมสเปาต์เต็ดเบต 14 m/s และ 18 m/s ร่วมกับคลื่นไมโครเวฟ 800 W ในการอบแห้งจิ้งหรีดด้วยอบแห้งแบบสเปาต์ฟลูอิดเบตร่วมกับไมโครเวฟ ที่มีผลต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงานในการอบแห้ง คุณภาพของจิ้งหรีดอบแห้ง ซึ่งได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

3.1 วิเคราะห์จลนพลศาสตร์การอบแห้ง

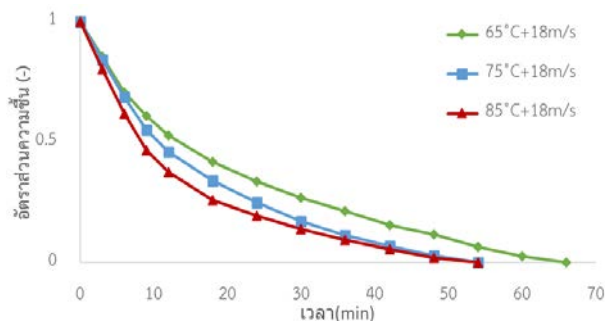
ในการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ ต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งของจิ้งหรีดด้วยเครื่องอบแห้งแบบสเปาต์ฟลูอิดเบต พบว่า การอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิที่ 85 °C ทำให้ความชื้นของจิ้งหรีดลดลงเร็วกว่าอุณหภูมิมอบแห้งที่ 65 °C ทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งที่น้อยกว่าในทุกเงื่อนไขการทดลองทั้งอบแห้งร่วมกับไมโครเวฟและไม่ร่วมกับไมโครเวฟ ดังแสดงในรูปที่ 2 ถึง 5 เนื่องจากการอบแห้งด้วยอุณหภูมิที่สูงทำให้การถ่ายเทความร้อนจากลมร้อนสู่ผิวตัวสัตว์มีค่ามาก ซึ่งส่งผลให้อัตราการถ่ายเทมวล (ความชื้น) มีค่ามากขึ้นด้วย จากงานวิจัยนี้เงื่อนไขอุณหภูมิลมร้อน 85 °C ความเร็วลมสเปาต์เต็ดเบต 18 m/s ความเร็วลมฟลูอิดไดซ์เบต 12 ร่วมกับไมโครเวฟ 800 W มีเวลาในการอบแห้งน้อยที่สุด ใช้เวลาในการอบแห้ง 42 นาที



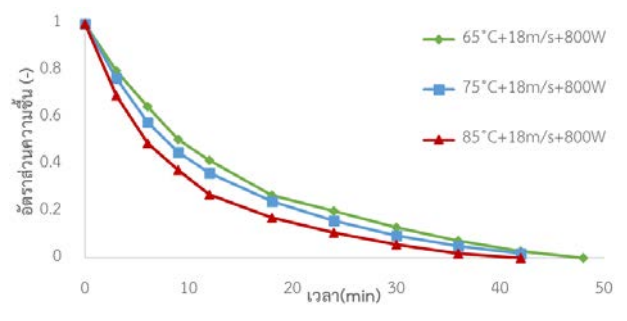
รูปที่ 2 อัตราส่วนความชื้นและเวลาที่ความเร็วลม 14 m/s



รูปที่ 3 อัตราส่วนความชื้นและเวลาที่ความเร็วลม 14 m/s + 800W



รูปที่ 4 อัตราส่วนความชื้นและเวลาที่ความเร็วลม 18 m/s

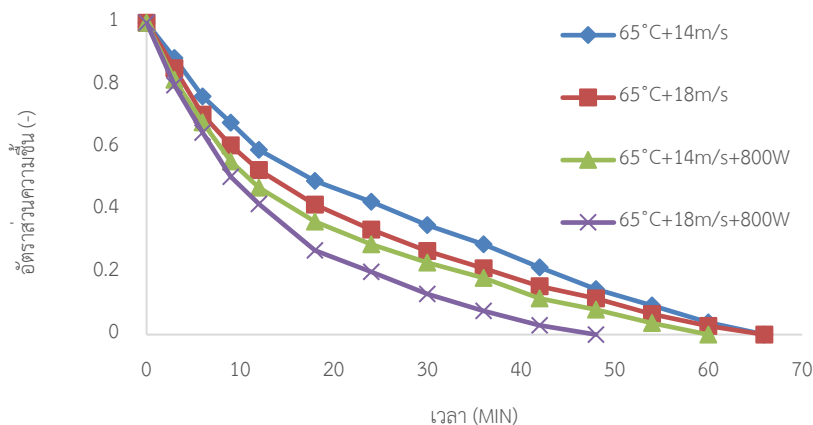


รูปที่ 5 อัตราส่วนความชื้นและเวลาที่ความเร็วลม 18 m/s + 800W

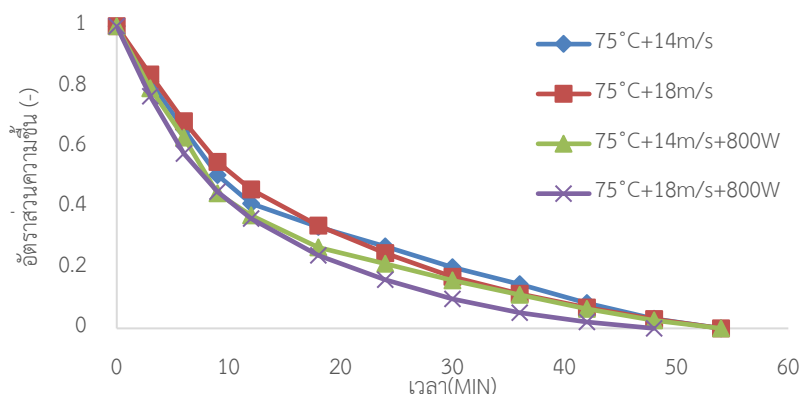
ในการศึกษาผลกระทบของความเร็วลมสเปาต์เต็ดเบต ต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งของจิ้งหรีดด้วยเครื่องอบแห้งแบบสเปาต์ฟลูอิดเบต พบว่า ความเร็วลมสเปาต์เต็ดเบตที่ 18 m/s ทำให้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่าความเร็วลมสเปาต์เต็ดเบตที่

14 m/s ทุกอุณหภูมิในการอบแห้งทั้งในเงื่อนไขอบแห้งร่วมกับไมโครเวฟและไม่ร่วมกับไมโครเวฟ ดังแสดงในรูปที่ 6-8 เนื่องจากความเร็วในการอบแห้งที่สูงจะส่งผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนและอัตราการถ่ายเทมวลมากกว่าที่ระดับความเร็วลมต่ำ จึงส่งผลทำให้ความชื้นในวัสดุลดลงอย่างรวดเร็ว

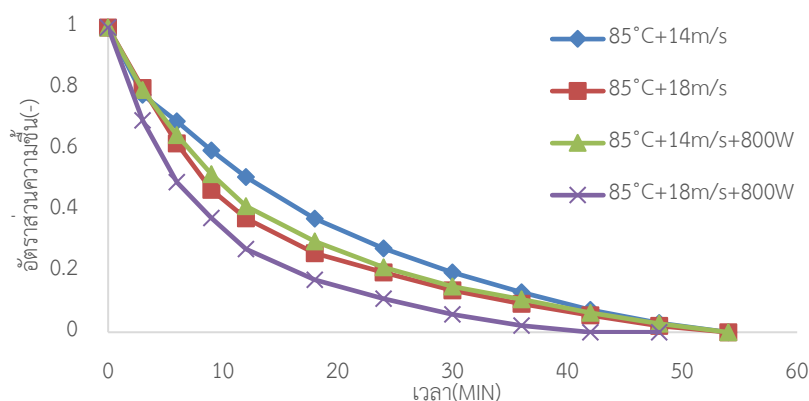
ส่วนการศึกษาผลกระทบของไมโครเวฟต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งของจิ้งหรีดด้วยเครื่องอบแห้งแบบสเปาท์ฟลูอิตเบต พบว่า อัตราส่วนความชื้นในการอบแห้งแบบสเปาท์ฟลูอิตเบตร่วมกับไมโครเวฟลดลงเร็วกว่าเงื่อนไขที่ไม่ร่วมกับไมโครเวฟ และสามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งได้สูงสุด 27.3 % เมื่อเปรียบเทียบกับเงื่อนไขที่ไม่ร่วมกับไมโครเวฟที่อุณหภูมิและความเร็วลมสเปาท์เด็คเดียวกัน เนื่องจากความชื้นในจิ้งหรีดสามารถดูดซับพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟได้มาก โดยเฉพาะช่วงเริ่มต้นของการอบแห้งเนื่องจากจิ้งหรีดยังมีความชื้นสูง อาจทำให้อุณหภูมิของจิ้งหรีดสูงขึ้นส่งผลทำให้เพิ่มอัตราการระเหยของความชื้นซึ่งเป็นผลมาจากอัตราการถ่ายเทมวลและอัตราการอบแห้งที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้อิทธิพลของไมโครเวฟจะมีผลมาต่อระยะเวลาในการอบแห้งที่เงื่อนไขความลมสเปาท์เด็ค 18 m/s เมื่อเทียบกับความเร็วลมสเปาท์เด็ค 14 m/s ที่อุณหภูมิเดียวกัน อาจเป็นผลเนื่องมาจากเมื่อความชื้นที่อยู่ภายในจิ้งหรีดแพร่มาถึงผิวของจิ้งหรีดเนื่องจากอิทธิพลของไมโครเวฟ ความเร็วลมสเปาท์เด็คที่สูงกว่าสามารถนำความชื้นที่ผิวของจิ้งหรีดได้ดีกว่าเนื่องจากมีอัตราการถ่ายเทความร้อนและอัตราการถ่ายเทมวลมากกว่าที่ระดับความเร็วลมต่ำ ทำให้อัตราส่วนความชื้นลดลงอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 6 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบของอัตราส่วนความชื้นเทียบกับเวลาที่อุณหภูมิ 65 °C ในเงื่อนไขต่างๆ



รูปที่ 7 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบของอัตราส่วนความชื้นเทียบกับเวลาที่อุณหภูมิ 75 °C ในเงื่อนไขต่างๆ



รูปที่ 8 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบของอัตราส่วนความชื้นเทียบกับเวลาที่อุณหภูมิ 85 °C ในเงื่อนไขต่างๆ

3.2 วิเคราะห์ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ในการศึกษาผลกระทบของไมโครเวฟต่อค่า SEC พบว่า การอบแห้งแบบสเปาท์ฟลูอิดเบดร่วมกับไมโครเวฟสามารถลดค่า SEC ได้สูงสุด 27.2 % เมื่อเปรียบเทียบกับ การอบแห้งแบบสเปาท์ฟลูอิดเบดเพียงอย่างเดียว เนื่องจากอิทธิพลของไมโครเวฟส่งต่อการลดระยะเวลาในการอบแห้งซึ่งมีประสิทธิภาพในการลดความชื้นที่อยู่ภายในวัสดุ

ตารางที่ 1 ความสิ้นเปลืองพลังงานของสภาวะในการอบแห้งต่างๆ

สภาวะ ที่	ความเร็ว ลมสเปาท์ เต็ดเบด (m/s)	อุณหภูมิ (°C)	กำลัง ไมโครเวฟ (W)	เวลาใน การ อบแห้ง (min)	น้ำ ระเหย (kg)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kWh)			SEC (kWh/kg น้ำระเหย)
						ชุดทำ ความ ร้อน	พัดลม แรงดันสูง	ไมโครเวฟ	
1	14	65	ไม่มี	66	0.54	19.80	4.84	0.00	45.62
2		75		54	0.56	16.20	3.96	0.00	36.00
3		85		54	0.57	16.20	3.96	0.00	35.36
4	18	65		66	0.58	19.80	4.84	0.00	42.48
5		75		54	0.60	16.20	3.96	0.00	33.60
6		85		54	0.64	16.20	3.96	0.00	31.50
7	14	65	800	60	0.58	18.00	4.40	0.80	40.00
8		75		54	0.59	16.20	3.96	0.72	35.38
9		85		54	0.61	16.20	3.96	0.72	34.22
10		65		48	0.60	14.40	3.52	0.64	30.93
11		75		48	0.64	14.40	3.52	0.64	29.00
12		85		42	0.67	12.60	3.08	0.56	25.37

ในการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและความเร็วลมสเปาที่เต็ดเบตต่อความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) พบว่า การเพิ่มของอุณหภูมิและความเร็วลมสเปาที่เต็ดเบตในการอบแห้งที่สูงขึ้นจะส่งผลทำให้ค่า SEC มีค่าน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับที่เงื่อนไขเดียวกัน ดังแสดงในตารางที่ 1 เนื่องจากระยะเวลาในการอบแห้งที่น้อยกว่าส่งผลทำให้การใช้พลังงานในการอบแห้งต่ำกว่า ซึ่งเงื่อนไขการอบแห้งสภาวะที่ 12 ความเร็วลมสเปาที่เต็ดเบต 18 m/s อุณหภูมิ 85 °C ร่วมกับไมโครเวฟ มีค่า SEC น้อยที่สุด คือ 25.37 kWh/kg_{น้ำระเหย}

3.3 การศึกษาสภาวะที่ส่งผลต่อคุณภาพของจิ้งหรีดที่ผ่านการอบแห้ง

การทดสอบคุณภาพด้านสีของจิ้งหรีดอบกรอบที่อบแห้งโดยไม่ใช้ไมโครเวฟ (สภาวะที่ 1-6) และใช้ไมโครเวฟ (สภาวะที่ 7-12) (ตารางที่ 2) พบว่า ความเร็วลมและอุณหภูมิไม่มีผลต่อค่า L^* ค่า a^* และค่า b^* ($p>0.05$) ยกเว้นสภาวะที่ 6-7 ที่มีความเร็วลม 18 m/s จิ้งหรีดที่อบแห้งอุณหภูมิ 75 และ 85 °C มีค่า L^* มากกว่าที่อุณหภูมิ 65°C ($p\leq 0.05$) ซึ่งอาจเกิดเนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิ 65 °C ต้องใช้เวลาในการอบนานกว่าจึงทำให้จิ้งหรีดมีสีคล้ำกว่า และเมื่อเปรียบเทียบค่า L^* ของจิ้งหรีดอบกรอบที่อบแห้งโดยใช้และไม่ใช้ไมโครเวฟที่แต่ละความเร็วลมและอุณหภูมิ พบว่า จิ้งหรีดที่อบแห้งโดยไม่ใช้ไมโครเวฟมีสีคล้ำกว่าเนื่องจากต้องใช้เวลาในการอบนานกว่า ($p\leq 0.05$) ยกเว้นสภาวะที่ 6 และ 7 จิ้งหรีดมีค่า L^* ไม่แตกต่างจากสภาวะที่ 11 และ 12 ตามลำดับ ($p>0.05$) ค่า a^* และ b^* ของจิ้งหรีดที่อบแห้งโดยไม่ใช้ไมโครเวฟมีความเป็นสีแดงและสีเหลืองน้อยกว่า ($p\leq 0.05$) หรือไม่แตกต่างจากจิ้งหรีดที่อบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟ ($p>0.05$)

การวิเคราะห์ปริมาณน้ำอิสระของจิ้งหรีดอบกรอบที่อบแห้งโดยใช้และไม่ใช้ไมโครเวฟ (ตารางที่ 2) พบว่า ปริมาณน้ำอิสระมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้ความเร็วลมและอุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้น ($p>0.05$) จิ้งหรีดอบกรอบที่อบแห้งแบบไม่ใช้ไมโครเวฟ (สภาวะที่ 1-6) มีปริมาณน้ำอิสระมากกว่า 0.636 แสดงให้เห็นว่าสภาวะทำแห้งดังกล่าวไม่เหมาะสมในการผลิตจิ้งหรีดอบกรอบเนื่องจากอาหารแห้งควรมีปริมาณน้ำอิสระต่ำกว่า 0.6 ซึ่งเป็นสภาวะที่จุลินทรีย์ทุกชนิดจะหยุดการเจริญเติบโตได้ [8] ค่าความชื้นของจิ้งหรีดอบกรอบที่อบแห้งโดยใช้ไมโครเวฟมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้ความเร็วลมและอุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้น ($p>0.05$)

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของจิ้งหรีดอบกรอบ (ค่าสี ปริมาณน้ำอิสระ และความชื้น)

สภาวะที่	ความเร็วลม สเปาท์เตดเบด (m/s)	อุณหภูมิ (°C)	กำลังไมโครเวฟ (W)	ค่าสี			ปริมาณน้ำอิสระ	ความชื้น (%w/w)
				L*	a*	b*		
1	14	65	ไม่มี	12.86 ^c ± 2.26	2.90 ^b ± 0.27	3.26 ^{ab} ± 0.65	0.841 ^a ± 0.052	n.m.
2		75		13.06 ^c ± 1.48	2.62 ^b ± 0.54	2.82 ^{ab} ± 0.73	0.822 ^{ab} ± 0.043	n.m.
3		85		12.41 ^c ± 1.29	2.85 ^b ± 0.53	3.01 ^{ab} ± 0.44	0.780 ^b ± 0.044	n.m.
4	18	65		13.17 ^c ± 1.48	2.47 ^b ± 0.54	2.53 ^b ± 0.45	0.795 ^{ab} ± 0.033	n.m.
5		75		16.58 ^{ab} ± 2.50	2.66 ^b ± 0.39	3.02 ^{ab} ± 0.43	0.680 ^c ± 0.039	n.m.
6		85		14.75 ^b ± 2.28	2.60 ^b ± 0.32	2.47 ^b ± 0.62	0.636 ^c ± 0.038	n.m.
7	14	65	800	18.18 ^a ± 3.03	3.42 ^a ± 0.37	3.27 ^{ab} ± 0.47	0.635 ^c ± 0.024	11.04 ^a ± 1.20
8		75		18.02 ^a ± 1.87	3.32 ^a ± 0.60	3.34 ^{ab} ± 0.55	0.553 ^d ± 0.026	7.91 ^b ± 1.14
9		85		16.92 ^{ab} ± 1.80	3.11 ^{ab} ± 0.45	3.61 ^a ± 0.64	0.514 ^{de} ± 0.037	6.66 ^c ± 1.27
10	18	65		18.31 ^a ± 2.00	3.66 ^a ± 0.44	3.98 ^a ± 0.63	0.533 ^d ± 0.030	6.74 ^c ± 0.80
11		75		18.44 ^a ± 1.99	3.07 ^{ab} ± 0.52	3.85 ^a ± 0.70	0.455 ^e ± 0.033	4.69 ^d ± 0.75
12		85		15.45 ^b ± 2.01	2.73 ^b ± 0.61	3.60 ^a ± 0.85	0.389 ^f ± 0.034	3.28 ^e ± 0.56

^{a-b} ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรแตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

n.m. หมายถึง ไม่วิเคราะห์เนื่องจากตัวอย่างมีปริมาณน้ำอิสระ > 0.6

4. สรุป

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาลดความชื้นจิ้งหรีดด้วยเครื่องอบแห้งสเปาท์ฟลูอิดเบดร่วมกับไมโครเวฟ ซึ่งมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ได้แก่ อิทธิพลของอุณหภูมิ ความเร็วลมร้อน ไมโครเวฟ ต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้ง ความสิ้นเปลืองพลังงาน และคุณภาพของจิ้งหรีด จากผลการทดลองพบว่า การเพิ่มของอุณหภูมิและความเร็วลมสเปาท์เต็ดเบดทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยลง ในการศึกษาอิทธิพลของไมโครเวฟพบว่า การอบแห้งแบบสเปาท์ฟลูอิดเบดร่วมกับไมโครเวฟในการอบแห้งจิ้งหรีดสามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งสูงสุด 27.3 % เมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งแบบสเปาท์ฟลูอิดเบดเพียงอย่างเดียวที่อุณหภูมิและความเร็วลมสเปาท์เต็ดเบดเดียวกัน เมื่อพิจารณาความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) พบว่า การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและความเร็วลมสเปาท์เต็ดเบดสามารถลด SEC ได้ นอกจากนี้การอบแห้งแบบสเปาท์ฟลูอิดเบดร่วมกับไมโครเวฟในการอบแห้งจิ้งหรีดสามารถลดการใช้พลังงานได้สูงสุด 27.2 % เมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งแบบสเปาท์ฟลูอิดเบดเพียงอย่างเดียวที่อุณหภูมิและความเร็วลมสเปาท์เต็ดเบดเดียวกัน ส่วนการศึกษาปัจจัยการทำแห้งที่มีผลต่อคุณภาพของจิ้งหรีดโดยประเมินคุณภาพทางเคมีกายภาพ พบว่า สภาวะการอบแห้งที่มีความเร็วลม 18 m/s อุณหภูมิ 75 °C และใช้ไมโครเวฟกำลัง 800 W จะได้จิ้งหรีดอบกรอบที่มีคุณภาพดีที่สุด คือ มีค่าความสว่าง (L^*) ปริมาณน้ำอิสระและความชื้นที่เหมาะสม

5. กิตติกรรมประกาศ

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) ภายใต้แผนงานวิจัย การพัฒนาผลิตภัณฑ์จิ้งหรีดอบกรอบด้วยเทคนิคสเปาท์ฟลูอิดเบดร่วมกับไมโครเวฟและการพัฒนาบรรจุภัณฑ์เพื่อยืดอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Wongsiri, S., Tapa, R., & Wongvilas, S. 2012. Edible insect to be use as food during natural diasters. The Journal of the Royal Institute of Thailand. 37(1), 125-139.
- [2] Soithongdee, N., & Nilapornkul, N. 2019. Cost and return of commercial cricket farming. Journal of College of Graduate Studies in Management, KKU. 12(1), 165-186.
- [3] กิตติ สถาพรประสาธน์ และโพธิ์ทอง ปราณิตพลกรัง. 2560. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบเจ็ตสเปาท์เต็ดเบด. วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 34. หน้า 22-29.
- [4] นิตยา จันทา, เฉลิมชัย วงษ์อารี และชัยวัฒน์ รัตนมีชัยสกุล. 2561. การประยุกต์ใช้ความร้อนแฝงของการควบแน่นสำหรับการลดการก่อตัวของกรดไขมันอิสระในข้าวกล้องโดยเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดด้วยอากาศร้อนชื้น. วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ ปีที่ 2 หน้า 67-80.
- [5] อาทิตย เพียรงาม, นเรศ มีโส และ ศิริธร ศิริอมรพรรณ. 2562. การลดความชื้นในอากาศด้วยเทคนิคสเปาท์เต็ดเบด. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 33. 2-5 กรกฎาคม 2562 จังหวัดอุดรธานี.
- [6] กิตติ สถาพรประสาธน์ และ โพธิ์ทอง ปราณิตพลกรัง. 2565. แบบจำลองของการอบแห้งจิ้งหรีดด้วยเครื่องอบแห้งแบบสเปาท์ฟลูอิดเบด. วารสาร มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (ปีที่ 14 ฉบับที่ 28 ประจำเดือนกรกฎาคมถึงธันวาคม) หน้า 1-14.
- [7] AOAC. 2000. Official Methods of Analysis, 17 th Ed., Association of Official Analytical Chemists, Gaithersburg, Maryland.
- [8] นิธิยา รัตนพานนท์. 2551. เคมีอาหาร (พิมพ์ครั้งที่ 3). กรุงเทพมหานคร: โอเดียนสโตร์.

เครื่องประจุแบตเตอรี่ด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ The Solar-Powered Battery Charger

พีรวิชญ์ แก้วรักษ์¹ และ ปุณยภัทร ภูมิภาค^{2,*}
Peerawith keawruk¹ and Punyaphat Phumiphak^{2,*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร
²ภาควิชาวิศวกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ชุมพร

¹Department of Electrical Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok
²Department of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Prince of Chumphon Campus, Chumphon
*Corresponding author: Punyaphat Phumiphak, e-mail address: punyaphat.ph@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอเครื่องประจุแบตเตอรี่ด้วยพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ การควบคุมการทำงานด้วยวิธีการประจุแบตเตอรี่ที่ปรับปรุง ร่วมกับบัคคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งวิธีการชาร์จแบตเตอรี่ที่นำเสนอเป็นการพัฒนา โดยการปรับปรุงวิธีการติดตามตำแหน่งกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้านขาออก ร่วมกับวิธีประจุแบตเตอรี่แบบกระแสคงที่ และวิธีประจุแบตเตอรี่แบบแรงดันคงที่ ดังนั้นบัคคอนเวอร์เตอร์ทำหน้าที่ประจุแบตเตอรี่ ทำงานด้วยความถี่การสวิตช์เท่ากับ 20kHz ซึ่งสามารถควบคุมการทำงานด้วยวิธีการรบกวนและสังเกต เพื่อค้นหาจุดที่จ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบไฟฟ้าโซลาร์เซลล์โดยพิจารณาจากแรงดันประจุและกระแสประจุ แต่เครื่องประจุแบตเตอรี่จะมีการจำกัดระดับแรงดันและกระแสที่ใช้ประจุ เมื่อนำมาใช้กับแบตเตอรี่แบบตะกั่วกรด 12V 45Ah มีค่าประมาณ 14.7V และ 4.5A ตามลำดับ จากผลการทดสอบ พบว่าเครื่องชาร์จแบตเตอรี่ที่นำเสนอ สามารถทำงานตามเงื่อนไขที่กำหนดได้ เพื่อสามารถประจุแบตเตอรี่ได้อย่างปลอดภัย

คำสำคัญ: บัคคอนเวอร์เตอร์ วิธีการรบกวนและสังเกต ค้นหาจุดที่จ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด ประจุแบบกระแสคงที่ ประจุแบบแรงดันคงที่

Abstract

This paper presents a solar-powered battery charger using photovoltaic panels that is controlled by a modifier battery charging technique through a buck converter. The presented battery charging method is developed by improving of maximum power point tracking method via output parameters, the bulk charging method, and the absorption charging method. The buck converter operated to put electricity into the battery, operating on a switching frequency of 20kHz, can be controlled by perturb and observe method tracking the maximum power point of the photovoltaic system via charging voltage and charging current, But both voltage and current of battery charger for 12V 45Ah lead-acid battery are maintained at approximately 14.7 V and about 4.5 A respectively. Finally, the results show the conditional operation that the battery charger operates for safe battery charging.

Keywords: buck converter, perturb and observe method, maximum power point tracking, bulk charging, absorption charging

1. บทนำ

ในปัจจุบันระบบรถที่ขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้า มีการนำมาใช้งานเพิ่มขึ้น เพราะข้อดีของรถพลังงานไฟฟ้าที่เหนือกว่าเครื่องยนต์สันดาปภายใน คือการลดการใช้มลพิษทางอากาศ แต่การเก็บพลังงานไฟฟ้าเพื่อนำมาใช้ขับเคลื่อนยังเป็นจุดด้อย สำหรับระบบเก็บพลังงานไฟฟ้าส่วนใหญ่ใช้แบตเตอรี่ โดยจะต้องมีประจุไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่ ดังนั้นถ้าสามารถหาแหล่งพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ประจุแบตเตอรี่แบบประหยัด หรือไม่เสียค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ประจุ ทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ คือการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ เหมาะสำหรับประเทศไทยซึ่งตั้งอยู่ในเขตโซนร้อน ซึ่งได้รับพลังงานแสงอาทิตย์มากกว่า และยังมีแสงอาทิตย์อยู่ตลอดทั้งปี ซึ่งเป็นผลดีต่อประเทศไทยที่จะเริ่มนำระบบพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้

ระบบพลังงานแสงอาทิตย์จะต้องมีอุปกรณ์รับแสงแล้วนำมาผลิตเป็นกระแสไฟฟ้าได้ นั่นคือแผงเซลล์แสงอาทิตย์ แสงอาทิตย์ แต่เนื่องจากปริมาณแสงอาทิตย์จะขึ้นอยู่กับสภาพสิ่งแวดล้อม ทำให้ปริมาณแสงมีค่าไม่คงที่ ดังนั้นบทความนี้ จึง

นำเสนอเครื่องประจุแบตเตอรี่ด้วยพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการควบคุมด้วยหลักการ MPPT (maximum power point tracking) ที่อ้างอิงจากข้อมูลทางด้านขาออก (output parameters) ร่วมกับวิธีการประจุแบตเตอรี่แบบกระแสไฟฟ้าคงที่ (bulk charging) และวิธีการประจุแบตเตอรี่แบบแรงดันไฟฟ้าคงที่ (absorption charging) เพื่อควบคุมให้แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าสำหรับประจุ ไม่ให้ค่าสูงเกินเงื่อนไขสำหรับการประจุแบตเตอรี่

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เครื่องประจุแบตเตอรี่ด้วยพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่นำเสนอในบทความนี้ ใช้แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง รายละเอียดดังนี้

2.1 วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์

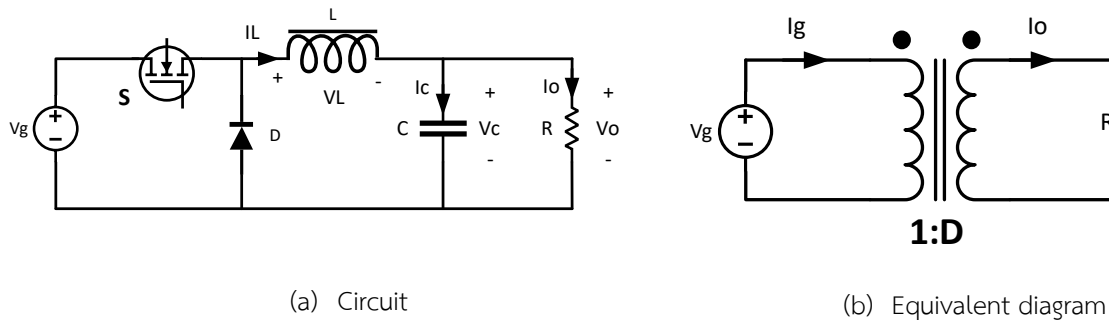


Figure 1 Buck DC-to-DC converter circuit

วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ (Buck Converter) [1] เป็นวงจรที่ทำหน้าที่ลดทอนแรงดันไฟฟ้า แสดงดัง Figure 1 (a) หลักการทำงานจะควบคุมให้อุปกรณ์สวิตช์ (switching device : S) “ON” หรือช่วงนำกระแส และ “OFF” หรือหยุดนำกระแส เป็นจังหวะตามความถี่สวิตช์ (switching frequency : f_s) โดยควบคุมระยะเวลาในการ “ON” ของอุปกรณ์สวิตช์ เมื่อเทียบกับคาบเวลา (periodic : T) หรือเรียกว่า ดิวตี้ไซเคิล (duty cycle : D) เมื่อพิจารณาในกรณีสถานะคงตัว (steady state) ในกรณีที่ทำงานในสถานะกระแสต่อเนื่อง (continuous current mode : CCM) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันด้านขาออก (output voltage : V_o) และแรงดันด้านขาเข้า (input voltage : V_g) แสดงดังสมการที่ (1) ซึ่งทำหน้าที่เปรียบเสมือนเป็นหม้อแปลงไฟฟ้ากระแสตรง แสดงดัง Figure 1 (b)

$$V_o = DV_g \quad (1)$$

และพิจารณาด้วยวิธีการแบบ State Space Averaging (SSA) [2] เพื่อหาฟังก์ชันถ่ายโอน (transfer function) เมื่อกำหนดให้ R เป็นภาระไฟฟ้า

เมื่ออุปกรณ์สวิตช์ (S) ช่วงนำกระแส

$$L \frac{di_L}{dt} = V_g - V_o \quad (2)$$

$$\frac{dV_o}{dt} = \frac{i_L}{C} - \frac{V_o}{RC} \quad (3)$$

เมื่ออุปกรณ์สวิตช์ (S) หยุดนำกระแส

$$L \frac{di_L}{dt} = V_o \quad (4)$$

$$\frac{dV_o}{dt} = \frac{V_o}{RC} - \frac{i_L}{C} \quad (5)$$

จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างแรงดันด้านขาเข้า และดิวิตไซเคิล แสดงดังสมการที่ (6)

$$\frac{V_o}{D} = \frac{k_1 s + k_2}{s^2 + k_3 s + k_4} \quad (6)$$

เมื่อค่า k_1 , k_2 , k_3 และ k_4 ได้จากพารามิเตอร์ของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์

2.2 ระบบค้นหาจุดที่จ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด

ระบบค้นหาจุดที่จ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด (maximum power point tracking) [2-6] เป็นวิธีการสำหรับควบคุมให้แหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้า สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดให้กับภาระไฟฟ้า โดยทั่วไปจะใช้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (solar cell panels) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังลม (wind generator) หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก (thermo-electric generator) เป็นต้น ระบบค้นหาจุดที่จ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดในบทความนี้ใช้วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ควบคุมการส่งพลังงานไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปยังภาระไฟฟ้า แสดงดัง Figure 2 (a) และแสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ (7)

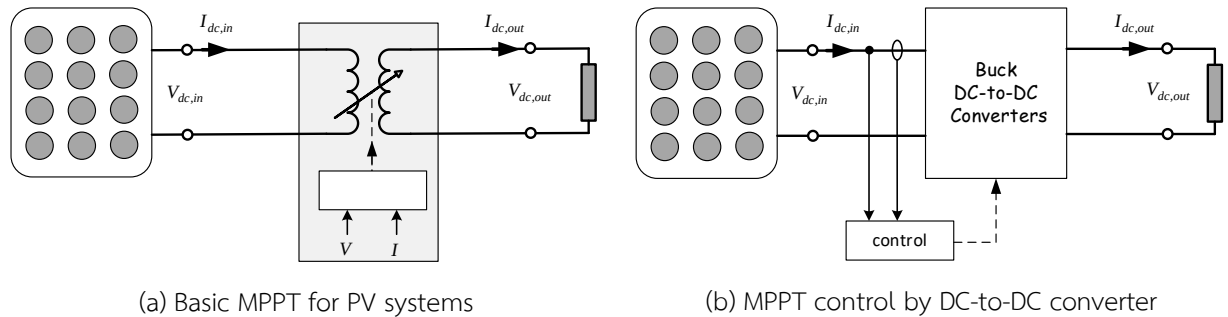


Figure 2 MPPT system by buck DC-to-DC converter for PV systems

$$\begin{bmatrix} V_{dc,out} \\ I_{dc,out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D & 0 \\ 0 & 1/D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{dc,in} \\ I_{dc,in} \end{bmatrix} \quad (7)$$

เมื่อกำหนดให้ $V_{dc,in}$ และ $I_{dc,in}$ แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ตามลำดับ ส่วน $V_{dc,out}$ และ $I_{dc,out}$ เป็นแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับภาระไฟฟ้า ตามลำดับ

โดยทั่วไป การค้นหาจุดที่จ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยวิธีการแบบรบกวนและสังเกต (perturb and observe) จะใช้ข้อมูลที่ได้จากการวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ แสดงดัง Figure 2 (b) โดยวิธีดังกล่าวจะทำการวัดที่ค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ แล้วคำนวณกำลังไฟฟ้าที่ออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จากนั้นทำการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าของ เซลล์แสงอาทิตย์ในคาบเวลาปัจจุบันกับคาบเวลาก่อน โดยถ้าอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้ามีค่าเป็นบวก ระบบจะปรับทิศทางของแรงดัน(เพิ่มหรือลดแรงดัน) ตามทิศทางเดิม และถ้าอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้ามีค่าเป็นลบ ระบบจะปรับทิศทางของแรงดันตรงกันข้ามกับทิศทางเดิม เพื่อเข้าหาจุดจ่ายกำลังสูงสุด จากนั้นก็ทำตามขั้นตอนซ้ำๆ แสดงขั้นตอนดัง Figure 3

แต่เมื่อนำระบบดังกล่าว มาพัฒนาเครื่องประจุแบตเตอรี่แบบตะกั่วกรดด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ประจุแบตเตอรี่ ในสภาวะที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด อาจจะทำให้แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ประจุแบตเตอรี่ มีค่าสูงเกินกว่าที่กำหนด ส่งผลต่ออายุการใช้งานของแบตเตอรี่ ดังนั้นในบทความนี้ ได้นำเสนอวิธีการประจุแบตเตอรี่ร่วมกับการค้นหาจุดที่จ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด ที่เหมาะสมกับแบตเตอรี่

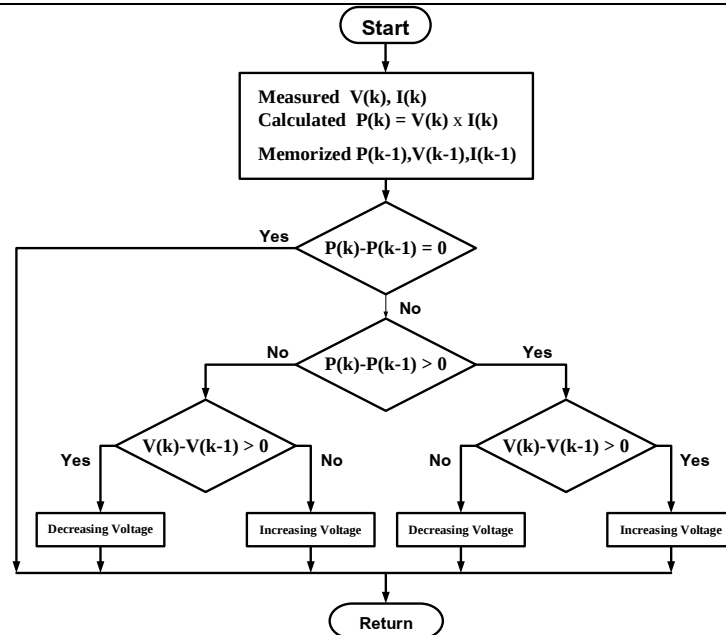


Figure 3 Flowchart of the perturb and observe method

3. เครื่องประจุแบตเตอรี่ด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ที่นำเสนอ

3.1 วิธีการประจุแบตเตอรี่ที่นำเสนอ

การค้นหาค่าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยข้อมูลทางด้านนอก โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับภาระไฟฟ้า โดยใช้วิธีการแบบรบกวนและสังเกต ร่วมกับวิธีการประจุแบตเตอรี่แบบกระแสไฟฟ้าคงที่ [7] และวิธีการประจุแบตเตอรี่แบบแรงดันไฟฟ้าคงที่ [7] แล้วควบคุมตัวดีไอซีเคิล (D) ของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ โดยการแสดงขั้นตอนการทำงานของวิธีการที่นำเสนอตั้ง Figure 4

หลักการทํางานวิธีการที่นำเสนอ เมื่อระบบเริ่มทํางาน จะวัดแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับภาระไฟฟ้า แล้วคำนวณกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับภาระไฟฟ้า จาก Figure 5 (a) เป็นการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าทางด้านออกที่คาบเวลาจุดที่ 2 กับคาบเวลาจุดที่ 1 พบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้ามามีค่าเป็นบวก และแรงดันไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น ระบบปรับดีไอซีเคิล (D) เพิ่มขึ้น ทำให้เลื่อนมาอยู่ตำแหน่งจุดที่ 3 ส่งผลทำให้แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามลำดับ แสดงดัง Figure 5 (b) และ Figure 5 (c) จากนั้นตรวจสอบว่า แรงดันไฟฟ้า หรือกระแสไฟฟ้าที่ใช้ประจุแบตเตอรี่ยังอยู่ในขอบเขต ก็ทำการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่ตำแหน่งจุดที่ 3 กับตำแหน่งจุดที่ 2 พบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้ามามีค่าเป็นบวก และแรงดันไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น ระบบปรับดีไอซีเคิลเพิ่มขึ้น ทำให้เลื่อนมาอยู่ตำแหน่งจุดที่ 4 ทำให้แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามลำดับ ถ้าตรวจสอบพบว่าแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าที่ใช้ประจุแบตเตอรี่เกินขอบเขต ระบบจะปรับลดดีไอซีเคิล ส่งผลทำให้เลื่อนตำแหน่งการใช้งานมาอยู่จุดที่ 5 ทำให้แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าลดลง ตามลำดับ แต่ค่าของแรงดันไฟฟ้า หรือค่าของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ประจุแบตเตอรี่ยังอยู่ในขอบเขต เพื่อยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ จากนั้นระบบจะเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่ตำแหน่งจุดที่ 5 กับตำแหน่งจุดที่ 4 พบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้ามามีค่าเป็นลบ และแรงดันไฟฟ้ามีค่าลดลง ระบบปรับเพิ่มดีไอซีเคิล จะการทำงานแบบวนซ้ำ จนกว่าประจุแบตเตอรี่เต็ม

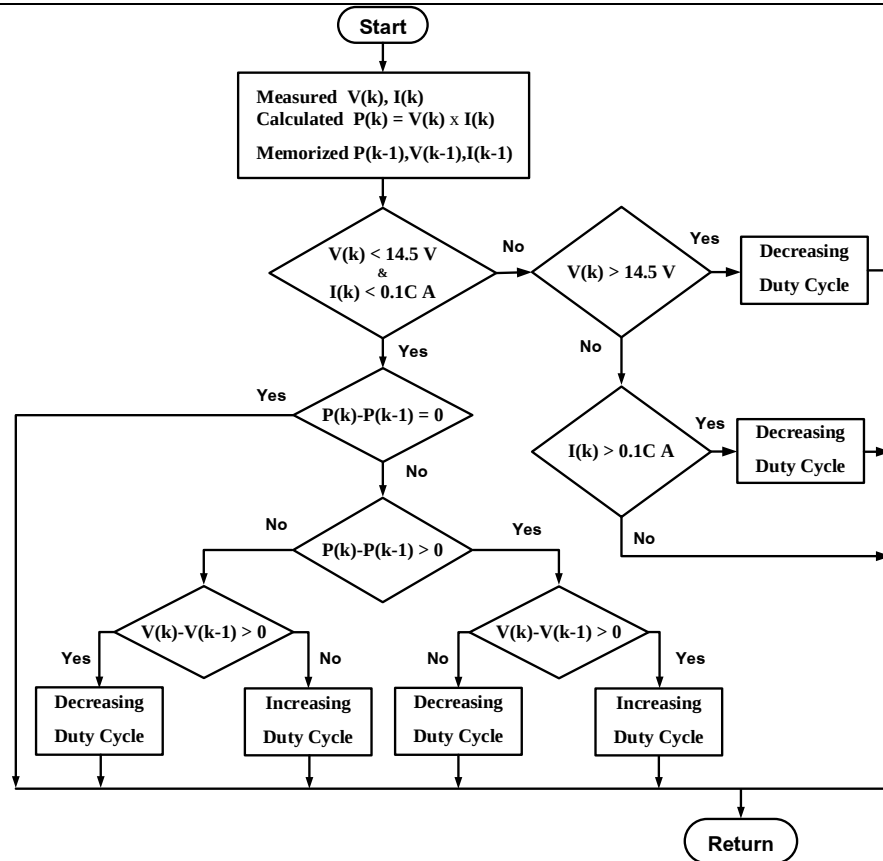


Figure 4 Simplified block diagram of the proposed method

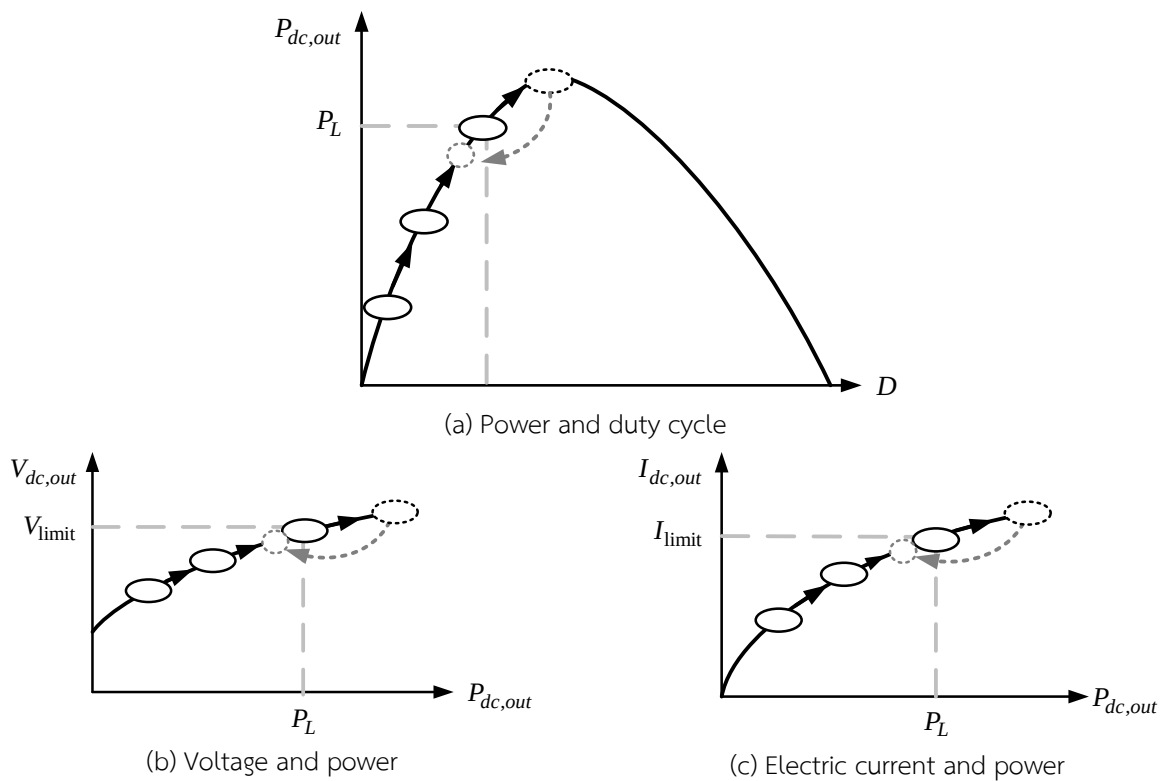


Figure 5 The operational procedure of the proposed methodology

3.2 ออกแบบเครื่องประจุแบตเตอรี่ด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

เครื่องประจุแบตเตอรี่แบบตะกั่ว-กรดที่ใช้พลังงานที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยมีรายละเอียดของเครื่องประจุแบตเตอรี่ ดังนี้

- ใช้กับแบตเตอรี่แบบตะกั่ว-กรด
- การทำงานแบบประจุแบตเตอรี่แบบกระแสไฟฟ้าคงที่ (bulk charging) กระแสไฟฟ้าที่ประจุสูงสุด 9 A
- การทำงานแบบประจุแบตเตอรี่แบบแรงดันไฟฟ้าคงที่ (absorption charging) แรงดันไฟฟ้าสูงสุด 14.5 V
- วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ ทำงานที่ความถี่ 20 kHz

การออกแบบวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์

$$\text{หาค่าดีวีซีเคิล (D) จากสมการที่ (1)} \quad D = \frac{12 \text{ V}}{18.2 \text{ V}} = 0.66 \text{ หรือ } 66\%$$

ทำงานในสภาวะกระแสต่อเนื่อง การออกแบบตัวเหนี่ยวนำ จากสมการที่ (8)

$$L = \frac{V_o(1-D)T}{\Delta I} \quad (8)$$

และการออกแบบตัวเก็บประจุ จากสมการที่ (9)

$$C = \frac{\Delta I_L}{8\Delta V_o f} \quad (9)$$

จะได้ $L = 453.33 \mu\text{H}$ และ $C = 281.25 \mu\text{F}$ เลือกใช้ $C = 300 \mu\text{F}$

อุปกรณ์สวิตช์ ใช้ที่มีพิกัดกระแสอย่างน้อย 2 เท่า ของกระแสประจุสูงสุด ดังนั้นเลือกใช้ MOSFET IRF540N พิกัดแรงดันไฟฟ้า เท่ากับ 110 V และกระแสไฟฟ้า เท่ากับ 33 A และใช้ไดโอดแบบ ultrafast-recovery

ขนาดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยกำหนดให้ประสิทธิภาพของวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์เท่ากับ 80% และค่าเฉลี่ยของความเข้ม

$$\text{รังสีดวงอาทิตย์ (solar irradiation) เท่ากับ } 800 \text{ วัตต์ต่อตารางเมตร จะได้ } P_{PV} = \frac{(14.7 \text{ V})(9 \text{ A})}{(0.8)(0.8)} = 206.72 \text{ W}$$

ดังนั้น ในบทความนี้เลือกใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดพิกัด 120 W จำนวน 2 แผง พิกัดรวมเท่ากับ 240 W

ดังนั้นจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างแรงดันด้านขาออกและดีวีซีเคิล หรือ Control-to-output จากสมการที่ (6)

$$\frac{V_o}{D} = \frac{2048s + 1.365 \times 10^8}{s^2 + 1335s + 7.223 \times 10^6}$$

เปลี่ยนเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนแบบไม่ต่อเนื่องทางเวลา เพราะควบคุมด้วยชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ จะได้

$$\frac{V_o}{D} = \frac{0.2654z + 0.06421}{z^2 - 1.918z + 0.9354}$$

4. ผลการทดลอง

การทดสอบเครื่องประจุแบตเตอรี่ที่นำเสนอ โดยแบ่งการทดสอบเป็น 2 ส่วน

4.1 การทดสอบระบบค้นหาจุดที่จ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด

การทดสอบเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่ได้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ระหว่างระบบที่ใช้หลักการ MPPT ที่นำเสนอ และระบบที่ไม่ได้ติดตั้ง MPPT โดยทำการทดสอบพร้อมกัน ทั้งสองระบบ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ พิกัด 120 W ค่าแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด เท่ากับ 18.2 V และ 6.59 A ตามลำดับ สำหรับภาระไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบเป็นความต้านทานคงที่ 2.8 ohm บันทึกข้อมูลด้วยมิเตอร์กำลังไฟฟ้าสามเฟส กำหนดอัตราการเก็บข้อมูล เท่ากับ 0.1 Hz วงจรการทดสอบแสดงดัง Figure 6

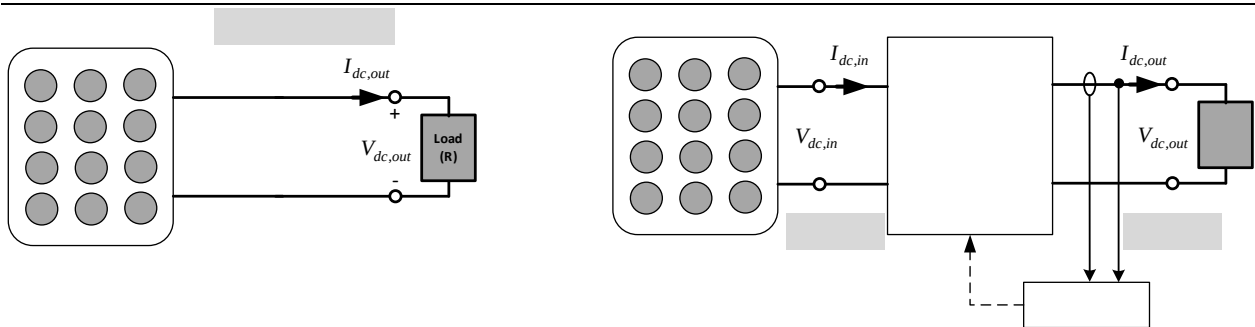


Figure 6 Testing circuit for systems with and without maximum power point tracking

Table 1 The data obtained from the test

Time	Electrical Power (W)		
	without MPPT	MPPT	
		Point A	Point B
11:20:00	56.008	70.391	61.409
12:20:00	13.462	17.046	14.826
13:20:00	67.131	81.708	71.360
14:20:00	53.048	66.467	58.220
15:20:00	28.610	37.635	32.988
16:20:00	11.931	16.149	14.410

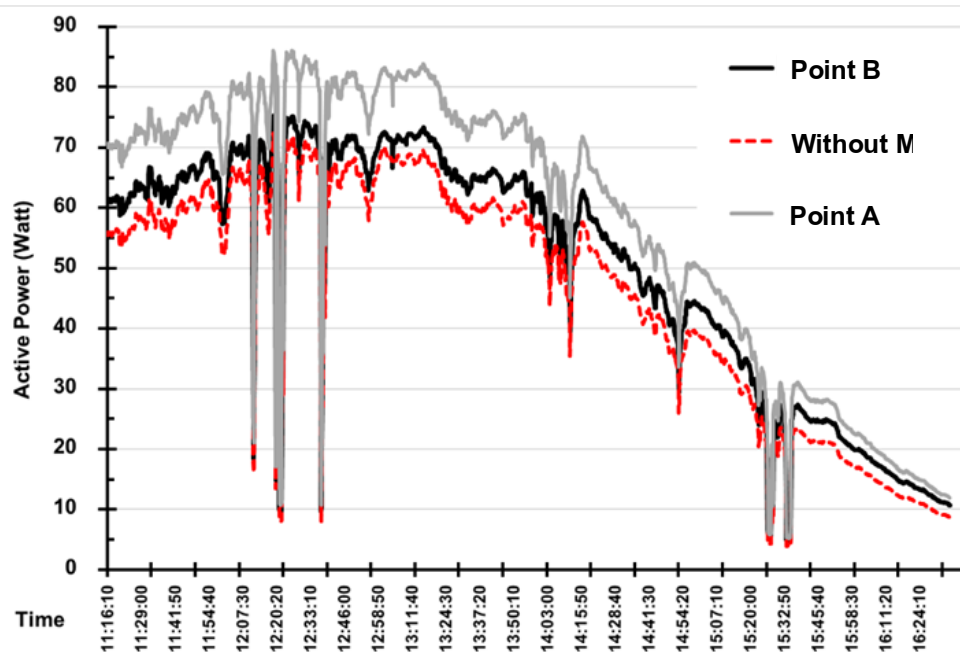


Figure 7 The relationship between power and time obtained from the test

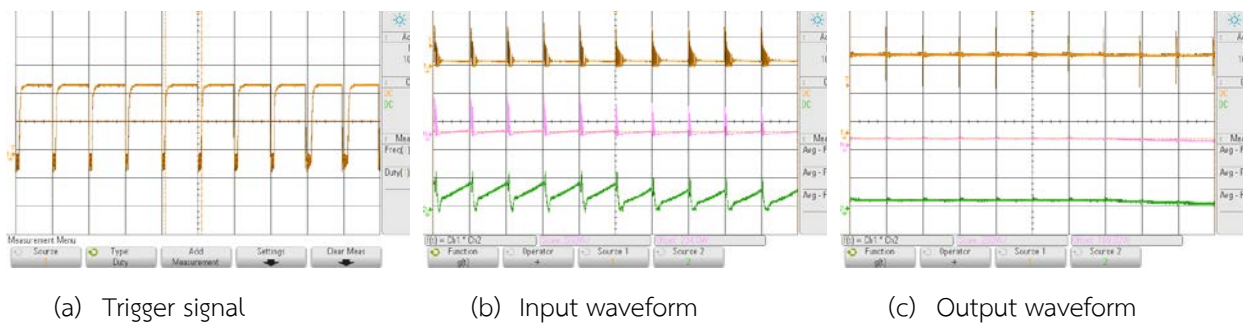


Figure 8 MPPT buck DC-to-DC converter using the proposed method

จากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบดัง Table 1 แสดงให้เห็นว่า ระบบที่ติดตั้ง MPPT (ตำแหน่ง MPPT1) สามารถทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายกำลังไฟฟ้าได้มากกว่าระบบที่ไม่ติดตั้ง MPPT (ตำแหน่ง without MPPT) เช่น ที่เวลา 13:20 น. ระบบที่ติดตั้ง MPPT เท่ากับ 81.708 W ส่วนระบบที่ไม่ติดตั้ง MPPT เท่ากับ 67.131 W แต่ถ้าเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้ภาระไฟฟ้า พบว่าระบบที่ติดตั้ง MPPT (ตำแหน่ง MPPT2) จ่ายให้กับภาระไฟฟ้า เท่ากับ 71.360 W ซึ่งมากกว่าระบบที่ไม่ติดตั้ง MPPT และเมื่อนำข้อมูลทั้งหมดมาแสดงให้รูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้ากับเวลาแสดงดัง Figure 7 พบว่า กำลังไฟฟ้าของระบบที่ติดตั้ง MPPT ทั้งสองตำแหน่ง (ตำแหน่ง Point A และ Point B) มีค่าสูงกว่าระบบที่ไม่ติดตั้ง MPPT ทุกช่วงเวลา

การทำงานของวงจรที่ติดตั้ง MPPT โดยการวัดสัญญาณที่ตำแหน่งวงจรขับเคลื่อนดัง Figure 8 (a) พบว่าในระหว่างที่ระบบที่ติดตั้ง MPPT ทำงาน นั้นสัญญาณขับอุปกรณ์สวิชทำงานที่ duty cycle เท่ากับ 90% ทำให้วงจรมีประสิทธิภาพสูง ส่วนแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้านำเข้าและด้านขาออกแสดงดัง Figure 8 (b) และ Figure 8 (c) ตามลำดับ

4.2 การทดสอบประจุแบตเตอรี่

การทดสอบเครื่องประจุแบตเตอรี่แบบตะกั่ว-กรดด้วยพลังงานที่ได้จากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยวิธีการที่นำเสนอ (วิธีการแบบรบกวนและสังเกต ร่วมกับวิธีการประจุแบตเตอรี่แบบกระแสไฟฟ้าคงที่ และวิธีการประจุแบตเตอรี่แบบแรงดันไฟฟ้าคงที่) โดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ พิกัด 120 W ค่าแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด เท่ากับ 18.2 V และ 6.59 A ตามลำดับ จำนวน 2 แผงต่อขนาน สำหรับแบตเตอรี่ที่ใช้ในการทดสอบมีขนาด 45 Ah 12 V ส่วนการวัดและบันทึกข้อมูลด้วยมิเตอร์กำลังไฟฟ้าสามเฟส กำหนดอัตราการเก็บข้อมูล เท่ากับ 0.1 Hz โดยรูปแบบการวัดเป็นดังนี้ channels 1 วัดข้อมูลที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV) และ channels 3 วัดข้อมูลที่แบตเตอรี่ (Battery) ตามวงจรการทดสอบแสดงดัง Figure 9

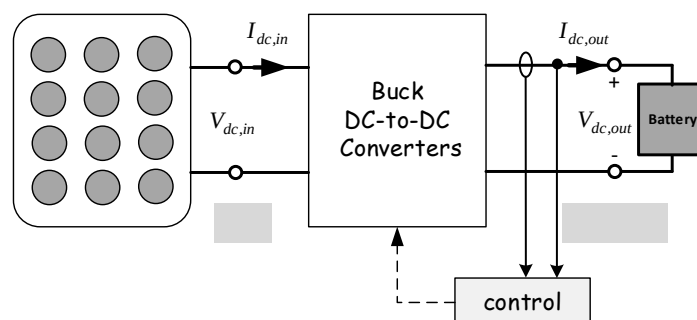


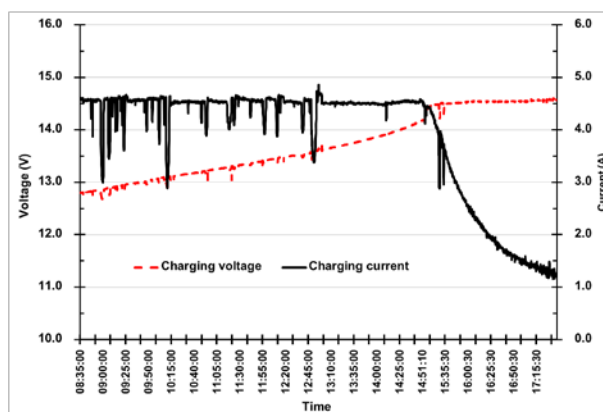
Figure 9 The presented battery charger circuit

จากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบแสดงดัง Table 2 เป็นตัวอย่างข้อมูลการวัดที่ได้จากการประจุแบตเตอรี่ครั้งที่ 1 โดยแสดงข้อมูลที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับวงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ (ตำแหน่ง PV) และข้อมูลที่วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่ (ตำแหน่ง Battery) เพื่อใช้ประจุ โดยทำงานอยู่ในโหมดแบบกระแสไฟฟ้าคงที่ เช่น ที่เวลา 10:00 น. พบว่าปริมาณไฟฟ้า

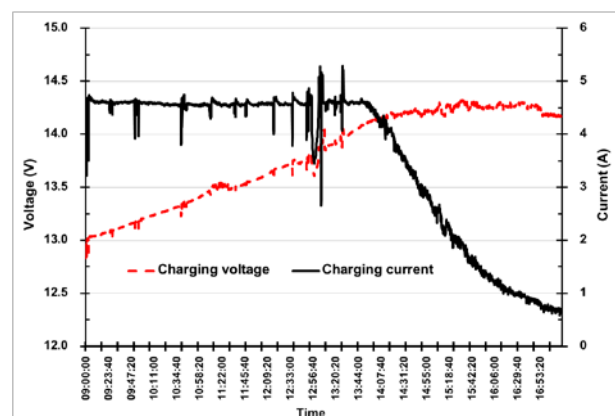
ที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ เท่ากับ 18.87 V 4.21 A และ 75.42 W ส่วนปริมาณไฟฟ้าที่ประจุแบตเตอรี่ เท่ากับ 13.07 V 4.59 A และ 59.97 W มีประสิทธิภาพเท่ากับ 79.52 % สำหรับการประจุแบบแรงดันไฟฟ้าคงที่ เช่น ที่เวลา 17:00 น. พบว่าปริมาณไฟฟ้าที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ เท่ากับ 19.18 V 2.28 A และ 41.80 W ส่วนปริมาณไฟฟ้าที่ประจุแบตเตอรี่ เท่ากับ 14.53 V 2.55 A และ 37.07 W มีประสิทธิภาพเท่ากับ 88.69 % ซึ่งแสดงข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า กับกระแสไฟฟ้าที่ใช้ประจุเทียบกับเวลาทำงานแบบกระแสไฟฟ้าคงที่ตั้งแต่ช่วง 08:35 น. ถึง 15:20 น. และทำงานแบบแรงดันไฟฟ้าคงที่ตั้งแต่ช่วง 15:20 น. ถึง 17:37 น. ตามลำดับ แสดงดัง Figure 10 (a) และได้ทำการทดสอบการประจุแบตเตอรี่ครั้งที่ 2 แสดงการทำงานแบบกระแสไฟฟ้าคงที่ตั้งแต่ช่วง 09:00 น. ถึง 14:00 น. และทำงานแบบแรงดันไฟฟ้าคงที่ตั้งแต่ช่วง 14:00 น. ถึง 17:15 น. แสดงดัง Figure 10 (b)

Table 2 The experimental results of battery charging

Time	PV			Battery			Efficiency (%)
	Input Voltage (V)	Input Current (A)	Input Power (W)	Output Voltage (V)	Output Current (A)	Output Power (W)	
9:00:00	14.34	2.97	41.33	12.68	3.02	38.33	92.74
9:30:00	18.85	4.19	74.86	12.97	4.57	59.27	79.18
10:00:00	18.87	4.21	75.42	13.07	4.59	59.97	79.52
11:00:00	18.99	4.19	75.56	13.24	4.55	60.28	79.77
12:00:00	19.34	4.24	77.86	13.42	4.61	61.84	79.42
13:00:00	15.44	4.42	67.50	13.51	4.46	60.21	89.20
14:00:00	19.00	4.21	76.26	13.71	4.53	62.07	81.39
15:00:00	18.72	4.23	75.67	13.86	4.50	62.43	82.51
16:00:00	18.64	4.01	71.62	14.20	4.25	60.41	84.35
17:00:00	19.18	2.28	41.80	14.53	2.55	37.07	88.69
17:37:00	15.57	1.20	18.36	14.56	1.23	17.91	97.60



(a) Test results: Trial 1



(b) Test results: Trial 2

Figure 10 The graph of the relationship between charging voltage and charging current of the presented battery charger

4. สรุป

วิธีการประจุแบตเตอรี่ที่ได้ปรับปรุงใหม่ โดยนำวิธีค้นหาจุดที่จ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด (MPPT) ที่อ้างอิงจากข้อมูลด้านขาออก ร่วมกับวิธีการประจุแบตเตอรี่แบบกระแสไฟฟ้าคงที่ และวิธีการประจุแบตเตอรี่แบบแรงดันไฟฟ้าคงที่ โดยใช้บัคคอนเวอร์เตอร์ ทำหน้าที่ประจุแบตเตอรี่ ทำงานที่ความถี่ 20 kHz โดยในสภาวะปกติจะทำงานเป็นการประจุแบบกระแสไฟฟ้าคงที่ และ การประจุแบบแรงดันคงที่ แต่ถ้าเมื่อไหร่ที่ความเข้มแสงอาทิตย์ลดลงตัวระบบจะเปลี่ยนการทำงานไปใช้ MPPT เพื่อให้ได้กำลังไฟฟ้าด้านขาออกมากที่สุด ทำให้สามารถประจุแบตเตอรี่ตามเงื่อนไข คือแรงดันไฟฟ้าไม่เกิน 14.7 V และ กระแสไฟฟ้าประมาณ 4.5 A ทำสามารถประจุแบตเตอรี่ได้อย่างปลอดภัย

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Erickson, R.W., and Maksimovic, D. 2001. Fundamentals of power electronics, 2nd edition, Kluwer Academic Publisher.
- [2] Farzin Asadi and Jerry Hudgins 2018. Robust Control of Dc-dc Converters: The Kharitonov's Theorem Approach With Matlab Codes, Morgan & Claypool.
- [3] Valderrama-Blavi, H., Alonso, C., Martinez-Salamero, L., Singer, S., Estibals, B., and Maixe-Altes, J. 2002. AC-LFR concept applied to modular photovoltaic power conversion chains, IEE Proc. Electr. Power Appl., 149, (6), pp. 441–448.
- [4] Muhida, R., Minwon, P., Dakkak, M., Matsuura, K., Tsuyoshi, A., and Michira, M. 2003. A maximum power point tracking for photovoltaic-SPE system using a maximum current controller, Solar Energy Mater. Solar Cells, 75, (3-4), pp. 697–706.
- [5] Case, M.J., Joubert, M.J., and Harrison, T.A. 2002. A novel photovoltaic array maximum power point tracker. EPE-PEMC 2002, Dubrovnik, Croatia.
- [6] Veerachary, M., Senjyu, T., and Uezato, K. 2003. Maximum power point tracking of coupled inductor interleaved boost converter supplied PV system, IEE Proc. Electr. Power Appl., 150, (1), pp. 71–80.
- [7] Thomas Reddy. 2010. Linden's Handbook of Batteries, 4th edition, McGraw-Hill Education.

วิธีการใหม่สำหรับประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส An Innovative Approach for Estimating the Field Efficiency of Three-Phase Induction Motors

พีรวิญญ์ แก้วรักษ์¹ และ ปุณยภัทร ภูมิภาค^{2*}
Peerawith keawruk¹ and Punyaphat Phumiphak^{2*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร

²ภาควิชาวิศวกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ชุมพร

¹Department of Electrical Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok

²Department of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Prince of Chumphon Campus, Chumphon

*Corresponding author: Punyaphat Phumiphak, e-mail address: punyaphat.ph@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการใหม่สำหรับประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสขณะใช้งาน โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังทางกล กระแสไฟฟ้าอินพุต ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า และความเร็ว ซึ่งพัฒนามาจากวงจรสมมูลมอเตอร์เหนี่ยวนำ วิธีการที่นำเสนอจะใช้เพียงข้อมูลทางไฟฟ้าและความเร็วที่วัดได้ สามารถประเมินภาระทางกลและประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ตั้งแต่ภาระทางกลประมาณ 25 % จนถึงพิกัดของมอเตอร์ จากผลการทดสอบมอเตอร์ขนาด 2.2 และ 3.7 กิโลวัตต์ พบว่ามีความคลาดเคลื่อนประมาณ 5 – 7 % ดังนั้นวิธีการที่นำเสนอมีความแม่นยำกว่าวิธีการใช้ค่ากระแสไฟฟ้าและวิธีการวัดค่าสลลิป

คำสำคัญ: การประเมินประสิทธิภาพขณะใช้งาน วงจรสมมูล วิธีการวัดค่ากระแส วิธีการวัดค่าสลลิป ตรวจสอบพลังงาน

Abstract

The paper introduces an innovative technique for estimating the field efficiency of three-phase induction motors. This method leverages the relationship between mechanical power, input current, power factor, and motor speed based on motor equivalent circuits. It relies solely on on-site measurement data (electrical data and speed) and is capable of estimating both motor mechanical power and motor field efficiency under loads ranging from 25% to rated power. The validity of this method has been confirmed through testing with low-voltage motors (2.2 and 3.7 kW), with results indicating that the estimated motor field efficiency achieves an accuracy within a margin of error of 5-7%. Consequently, this proposed approach demonstrates superior accuracy in estimating field efficiency compared to current methods and slip-based techniques.

Keywords: field efficiency estimation method, equivalent circuit, current method, slip method, energy audit

1. บทนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสเป็นมอเตอร์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายตั้งแต่อุตสาหกรรมขนาดเล็กจนถึงอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ เช่น การใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นต้นกำลังให้กับระบบปั๊มน้ำ บัลลม ระบบทำน้ำเย็น ระบบลิฟท์ และระบบต่างๆ เป็นต้น ดังนั้นมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสจึงเป็นอุปกรณ์ที่มีสัดส่วนการใช้พลังงานไฟฟ้าสูง ซึ่งถ้าสามารถใช้งานมอเตอร์เหนี่ยวนำซักระยะทางกลที่ 70% – 100% ของพิกัด มอเตอร์จะมีประสิทธิภาพสูง แต่ถ้ามอเตอร์ซักระยะทางกลน้อยกว่า 40% ของพิกัด พบว่ามอเตอร์จะมีประสิทธิภาพต่ำ [1-2]

สำหรับโรงงานอุตสาหกรรมหรือสถานประกอบการที่มีมอเตอร์เหนี่ยวนำอยู่แล้ว ควรจะต้องมีการตรวจสอบว่ามอเตอร์ที่ใช้งานอยู่มีประสิทธิภาพเท่าไร เพื่อจะได้วางแผนว่าควรมีการลงทุนเปลี่ยนใหม่หรือไม่ และมีระยะเวลาในการคืนทุนเท่าไร ซึ่งการที่จะทราบว่าประสิทธิภาพมอเตอร์มีค่าเท่าไรนั้นจะต้องวัดกำลังทางกล ในทางปฏิบัติเป็นขั้นตอนที่ยุ่งยากและมีค่าใช้จ่ายสูงมาก ดังนั้นจึงมีวิธีการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ในขณะใช้งาน สำหรับวิธีการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

ได้รับความสนใจและได้มีการพัฒนาวิธีการหาประสิทธิภาพของมอเตอร์ซึ่งมีมากกว่า 20 วิธี [3-9] โดยแต่ละวิธีการจะมีความสอดคล้องระหว่างความแม่นยำกับระดับความยุ่งยากในการใช้งานดังนี้ คือ วิธีการใด ที่มีความแม่นยำสูง ก็จะมีขั้นตอนที่ยุ่งยากและซับซ้อนมาก ส่วนวิธีการใดที่มีความแม่นยำต่ำ ก็จะมีขั้นตอนที่ไม่ยุ่งยากและซับซ้อนน้อยแสดงดัง Figure 1 ซึ่งเป็นแรงจูงใจให้นักวิจัยหรือวิศวกร ได้พยายามปรับปรุงหรือพัฒนาหาวิธีการประเมินประสิทธิภาพที่มีขั้นตอนหรือกระบวนการที่มีความยุ่งยากน้อยค่าใช้จ่ายในการดำเนินการที่ต่ำ แต่มีความแม่นยำสูง [4, 8-9] เนื่องจากค่าประสิทธิภาพที่แม่นยำจะส่งผลต่อการตัดสินใจในการลงทุนเกี่ยวกับมอเตอร์ หรือระยะเวลาในการคืนทุนที่ถูกต้อง [10]

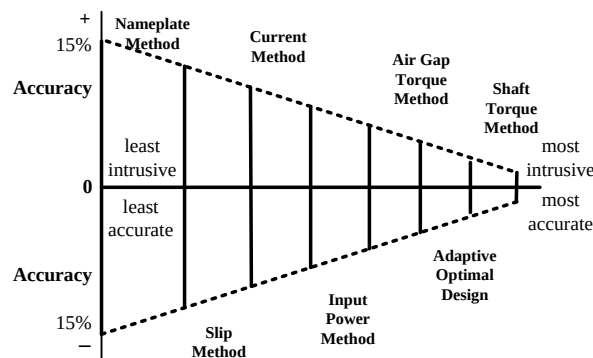


Figure 1 The method to determine the efficiency of induction motor

สำหรับวิธีการสำหรับการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์ขณะที่ใช้งานที่นิยม สำหรับการตรวจสอบพลังงาน (energy audit) มีด้วยกันหลายวิธีได้แก่ วิธีการวัดกำลังทางด้านเข้า(input power method) วิธีการวัดค่าสลิป (slip method) และวิธีการวัดค่ากระแส (current method) ซึ่งแต่ละวิธีสามารถประมาณค่าประสิทธิภาพมอเตอร์ที่ภาระทางกลมากกว่า 50% ของพิกัด โดยมีความคลาดเคลื่อนจากการประเมินประสิทธิภาพอยู่ประมาณ 5% – 10% ที่สภาวะแรงดันไฟฟ้าสมดุล แต่ถ้ามอเตอร์ขับภาระทางกลน้อยกว่า 50% ของพิกัด วิธีดังกล่าวจะมีความคลาดเคลื่อนมากกว่า 10% ซึ่งจะส่งผลต่อการลงทุนเปลี่ยนใหม่ และมีระยะเวลาในการคืนทุนไม่ตรงกับความเป็นจริง [10]

ดังนั้นบทความนี้จะนำเสนอวิธีการใหม่สำหรับการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในขณะใช้งานอย่างง่าย ซึ่งเป็นวิธีการหรือขบวนการเก็บข้อมูลไม่ยุ่งยากซับซ้อน และนำไปใช้ได้จริงในทางปฏิบัติ โดยต้องการให้มีความคลาดเคลื่อนจากการประเมินเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการวัดค่าแรงบิดทางกลโดยตรง ประมาณ 5% – 7% ที่สภาวะแรงดันไฟฟ้าสมดุล ที่ช่วงภาระทางกลตั้งแต่ประมาณ 25% จนถึงพิกัดของมอเตอร์ เนื่องจากเป็นช่วงที่มีการใช้งานมากที่สุด ซึ่งจะใช้ข้อมูลที่สามารถวัดได้จากการใช้งานของมอเตอร์ ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และความเร็วรอบ โดยสามารถนำมาใช้งานทางด้านการบริหารด้านพลังงานหรือการตัดสินใจในการลงทุนเกี่ยวกับมอเตอร์ได้

2. การประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส

การประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสมีด้วยกันหลายวิธี แต่ในงานวิจัยนี้จะเน้นที่วิธีการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำในขณะใช้งาน แต่ยังเป็นวิธีการที่มีความคลาดเคลื่อนสูง และช่วงในการประเมินจะอยู่ที่ 60% จนถึงพิกัด ได้แก่ วิธีการใช้ค่ากระแสไฟฟ้า วิธีการวัดค่าสลิป และวิธีการกำลังไฟฟ้าอินพุต (input power method) ซึ่งวิธีทั้งสาม จะทำการประเมินกำลังทางกล ($P_{\text{Output(Estimated)}}$) และวัดกำลังไฟฟ้าอินพุต ($P_{\text{input(Measured)}}$) และคำนวณหาประสิทธิภาพ (η) ของมอเตอร์เหนี่ยวนำตามสมการที่ (1)

$$\eta = \frac{P_{\text{Output(Estimated)}}}{P_{\text{input(Measured)}}} \quad (1)$$

2.1 วิธีการใช้ค่ากระแสไฟฟ้า

วิธีการใช้ค่ากระแส (CM) เป็นการเปรียบเทียบหาอัตราส่วนระหว่างกระแสไฟฟ้าในขณะใช้งานมอเตอร์ กับกระแสไฟฟ้าที่พิกัดที่ได้จากป้ายพิกัด

2.2 วิธีการวัดค่าสลิป

หลักการของวิธีการวัดค่าสลิป (SM) เป็นการเปรียบเทียบอัตราส่วนของค่าสลิปในขณะใช้งาน กับสลิปที่พิกัดของมอเตอร์ที่ได้จากป้ายพิกัด [6-8]

2.3 วิธีการกำลังไฟฟ้าอินพุท

หลักการของวิธีการกำลังไฟฟ้าอินพุท (IPM) เป็นการเปรียบเทียบอัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุทที่วัดกับกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุทที่พิกัด สำหรับวิธีการนี้อาจจะไม่เหมาะในการหาประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เนื่องจากค่าประสิทธิภาพที่ได้จะมีค่าคงที่ โดยส่วนใหญ่แล้วจะนิยมใช้ในการประมาณการะทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

3. วิธีการประเมินประสิทธิภาพที่น่าเสนอ

วิธีการใหม่สำหรับประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่นำเสนอ (PM) มีวัตถุประสงค์เพื่อลดความผิดพลาดให้น้อยลง และสามารถประเมินประสิทธิภาพได้ตั้งแต่ประมาณ 25% จนถึงพิกัดของมอเตอร์ เนื่องจากเป็นช่วงที่มีใช้งานเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นการที่จะประเมินหาประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้นั้นจะต้องทราบถึงความสัมพันธ์ขององค์ประกอบต่าง ๆ กับประสิทธิภาพของมอเตอร์หรือกำลังทางด้านเอาต์พุท ซึ่งในงานวิจัยนี้จะพัฒนาวิธีการใหม่สำหรับการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสอย่างง่าย โดยพัฒนามาจากวงจรสมมูล [4-8] เพื่อหาความสัมพันธ์ขององค์ประกอบต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของมอเตอร์แสดงดัง Figure 2 โดยกำหนดให้อิมพีแดนซ์ทางด้านสเตเตอร์ (Z_1) อิมพีแดนซ์ทางด้านโรเตอร์ (Z_{21}) และ อิมพีแดนซ์ของกระตุ่นสนามแม่เหล็กกับผลของความสูญเสียของแกนเหล็ก (Z_{cm}) และความต้านทานทางด้านโรเตอร์ (R_2) มีค่าคงที่ ส่วนค่าสลิป (s) จะขึ้นอยู่กับภาระทางกล และเพื่อให้วิธีการที่นำเสนอใช้งานได้ง่าย ดังนั้นในการพัฒนาวิธีการใหม่สำหรับการประเมินประสิทธิภาพอย่างง่ายของมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยจะพิจารณาในขณะที่มอเตอร์ทำงานใกล้พิกัด เพื่อลดผลกระทบเนื่องจากกำลังความสูญเสียทางกล (mechanical loss) และกำลังสูญเสียเนื่องจากโหลดแฝง (stray load loss) สำหรับกำลังด้านเอาต์พุทหรือกำลังทางกลหาได้จากสมการที่ (2)

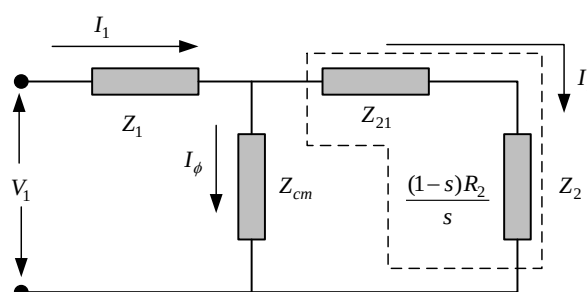


Figure 2 Simplified equivalent circuit of induction motor

$$\begin{aligned}
 P_{output} &= 3I_2^2 \frac{(1-s)R_2}{s} \\
 &= 3(I_1 - I_\phi)^2 \frac{(1-s)R_2}{s}
 \end{aligned} \quad (2)$$

เมื่อกำหนดให้ I_2 เป็นกระแสไฟฟ้าทางด้านโรเตอร์ I_ϕ เป็นกระแสไฟฟ้ากระตุ้น และ I_1 เป็นกระแสไฟฟ้าทางด้านอินพุต ถ้ามอเตอร์เหนี่ยวนำทำงานที่พิกัด จะได้กำลังด้านเอาต์พุต หรือกำลังทางกลแสดงดังสมการ

$$\begin{aligned}
 P_{output, full} &= 3I_{2, full}^2 \frac{(1-s_{full})R_2}{s_{full}} \\
 &= 3(I_{1, full} - I_\phi)^2 \frac{(1-s_{full})R_2}{s_{full}}
 \end{aligned} \quad (3)$$

จากสมการที่ (2) และสมการที่ (3) พบว่ากำลังทางด้านเอาต์พุตขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้าทางด้านอินพุตกับสลิปของมอเตอร์ โดย จะได้ความสัมพันธ์ของกำลังทางด้านเอาต์พุตใหม่แสดงดังสมการที่ (4)

$$P_{output} = \left[\frac{(I_1 - I_\phi)^2 \frac{(1-s)}{s}}{(I_{1, full} - I_\phi)^2 \frac{(1-s_{full})}{s_{full}}} \right] P_{output, full} \quad (4)$$

เนื่องจากกระแสไฟฟ้ากระตุ้น มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับกระแสไฟฟ้าทางด้านอินพุต และเมื่อพิจารณาอัตราส่วนของเทอม $(1-s)/s$ กับ $(1-s_{full})/s_{full}$ ในขณะที่ยังมอเตอร์ทำงานใกล้พิกัด จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{\frac{(1-s)}{s}}{\frac{(1-s_{full})}{s_{full}}} \approx \frac{N_{syn} - N_{fl(Nameplate)}}{N_{syn} - N_{r(Measured)}} \quad (5)$$

ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ใหม่ ดังนี้

$$\frac{P_{output}}{P_{output, full}} = \left[\left(\frac{I_1}{I_{1, full}} \right)^2 \left(\frac{N_{syn} - N_{fl(Nameplate)}}{N_{syn} - N_{r(Measured)}} \right) \right] \quad (6)$$

พิจารณาทางด้านอินพุต สามารถหากระแสไฟฟ้าทางด้านอินพุต

$$I_1 = \left[\frac{V_1}{\frac{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_{cm} + Z_2 Z_{cm}}{Z_2 + Z_{cm}}} \right] \quad (7)$$

และตัวประกอบกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุต

$$PF_1 = \frac{\operatorname{Re} \left(\frac{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_{cm} + Z_2 Z_{cm}}{Z_2 + Z_{cm}} \right)}{\left| \frac{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_{cm} + Z_2 Z_{cm}}{Z_2 + Z_{cm}} \right|} \quad (8)$$

จากสมการที่ (7) และสมการที่ (8) จะพบว่าเมื่อภาระทางกลเพิ่มขึ้น กระแสไฟฟ้าทางด้านอินพุตจะมีค่าเพิ่มขึ้น และตัวประกอบกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อมอเตอร์รับภาระทางกลเพิ่มขึ้น

$$P_{input} = 3V_1 I_1 (PF_1) \quad (9)$$

สำหรับกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุตที่พิกัด

$$P_{input, full} = 3V_1 I_{1, full} (PF_{1, full}) \quad (10)$$

จากสมการที่ (9) และสมการที่ (10) จะได้อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุต

$$\frac{P_{input}}{P_{input, full}} = \frac{I_1 (PF_1)}{I_{1, full} (PF_{1, full})} \quad (11)$$

และเมื่อพิจารณาอัตราส่วนกำลังทางด้านเอาต์พุตตามสมการที่ (6) พบว่าจะมีค่าเท่ากับอัตราส่วนกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุต

$$\frac{P_{input}}{P_{input, full}} \approx \frac{P_{output}}{P_{output, full}} \quad (12)$$

และจะได้

$$\left(\frac{I_1}{I_{1, full}} \right)^2 \left(\frac{N_{syn} - N_{\beta(Nameplate)}}{N_{syn} - N_{r(Measured)}} \right) \approx \frac{I_1 (PF_1)}{I_{1, full} (PF_{1, full})} \quad (13)$$

จากนั้นจัดรูปแบบความสัมพันธ์ใหม่

$$\frac{I_1}{I_{1, full}} \approx \sqrt{\left(\frac{I_1 (PF_1)}{I_{1, full} (PF_{1, full})} \right) \left(\frac{N_{syn} - N_{r(Measured)}}{N_{syn} - N_{\beta(Nameplate)}} \right)} \quad (14)$$

เมื่อพิจารณาในกรณีที่มอเตอร์เหนี่ยวนำรับภาระทางกลที่พิกัด จะพบว่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่วัดได้ จะมีค่าเท่ากับตัวประกอบกำลังที่พิกัดที่ได้จากป้ายข้อมูล จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\frac{P_{input}}{P_{input, full}} \approx \frac{I_1}{I_{1, full}} \quad (15)$$

จากสมการที่ (12) และสมการที่ (15) จะได้ความสัมพันธ์ใหม่

$$\frac{P_{output}}{P_{output, full}} \approx \frac{I_1}{I_{1, full}} \quad (16)$$

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ตามสมการที่ (14) และสมการที่ (16) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังทางด้านเอาต์พุตกับกำลังทางด้านเอาต์พุตที่พิกัด

$$\frac{P_{output}}{P_{output, full}} = \sqrt{\left(\frac{I_1 (PF_1)}{I_{1, full} (PF_{1, full})} \right) \left(\frac{N_{syn} - N_{r(Measured)}}{N_{syn} - N_{\beta(Nameplate)}} \right)} \quad (17)$$

ดังนั้นงานวิจัยนี้ ได้นำเสนอวิธีการใหม่ในการประมาณประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำในขณะใช้งาน สามารถคำนวณกำลังทางกล และประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ได้จากสมการที่ (18) และสมการที่ (1) ตามลำดับ

$$P_{output} = \sqrt{\frac{I_{1(Measured)}(PF_{1(Measured)})}{I_{1(Nameplate)}(PF_{1(Nameplate)})} \cdot \frac{N_{syn} - N_r(Measured)}{N_{syn} - N_r(Nameplate)}} \cdot [P_{rated(Nameplate)}] \quad (18)$$

4. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

การทดสอบมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส 2 พิกัด เพื่อยืนยันว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์ได้ ข้อมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำแสดงดังตารางที่ 1 โดยที่มอเตอร์ขนาด 3.7 kW เป็นมอเตอร์ที่มีอายุการใช้งานมาประมาณ 7 ปี (มอเตอร์เก่า) ส่วนมอเตอร์ขนาด 2.2 kW เป็นมอเตอร์ที่มีอายุการใช้งานมาประมาณ 2 ปี (มอเตอร์ใหม่) กำหนดให้แรงดันแต่ละเฟสให้อยู่ในเงื่อนไขแรงดันไฟฟ้าสมดุล และทำการทดสอบตั้งแต่ภาระทางกลประมาณ 25% จนถึงพิกัดของมอเตอร์โดยวัดแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าอินพุตสามเฟส ด้วยเครื่องวัดกำลังไฟฟ้า วัดความเร็วรอบ และกำลังทางกล ด้วยเครื่องวัดแรงบิด (torque meter)

Table 1 The information of the three-phase induction motor used for testing

kW	V	A	rpm	PF	Hz
2.2	220/380	9.5/5.5	940	0.75	50
3.7	220/380	13.7/7.9	1420	0.82	50

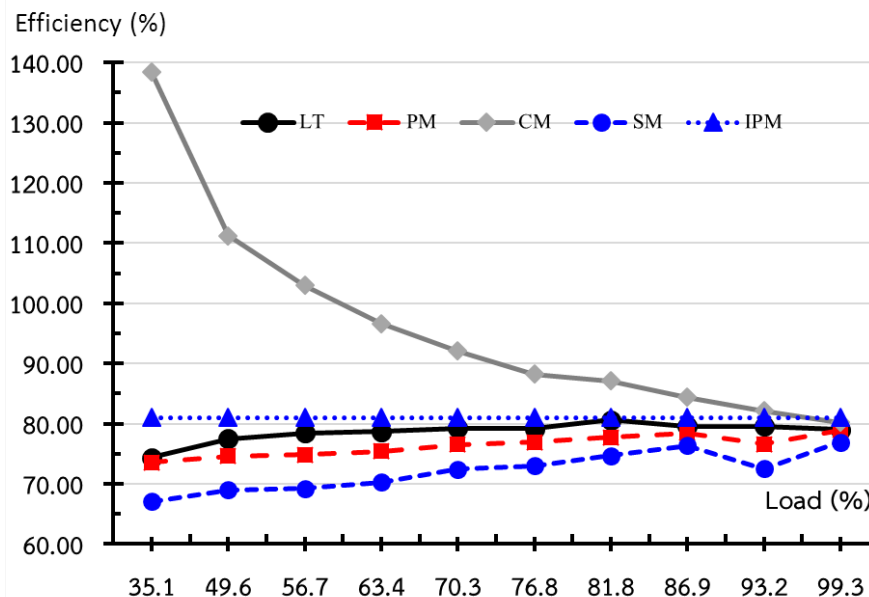


Figure 3 Comparison of the efficiency estimation of a 2.2 kW induction motor using different methods

จากนั้นทำการประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส โดยใช้ข้อมูลแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าอินพุตสามเฟส และความเร็วรอบที่วัดได้ และนำมาใช้กับวิธีการที่นำเสนอ (PM) วิธีการใช้ค่ากระแสไฟฟ้า (CM) วิธีการวัดค่าสลิป (SM) และวิธีการกำลังไฟฟ้าอินพุต (IPM) ทำการเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ได้จากการทดสอบ (LT) จาก Figure 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพที่ได้จากการประเมินด้วยวิธีการต่างๆ กับการทดสอบภาระทางกลของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสพิกัด 2.2 kW พบว่าที่ภาระทางกลตั้งแต่ประมาณ 25% จนถึงประมาณ 60% พิกัด ประสิทธิภาพที่ได้จากการประเมินด้วย

วิธีการใช้ค่ากระแสไฟฟ้ามีความผิดพลาดสูงมาก (มากกว่า 10%) ส่วนวิธีการวัดค่าสลิปมีความผิดพลาดอยู่ในช่วง 7% ถึง 10% เช่นเดียวกันกับวิธีการกำลังไฟฟ้าอินพุต แต่ที่ภาระตั้งแต่ 65% พิกัดขึ้นไป วิธีการใช้ค่ากระแสไฟฟ้ากับวิธีการวัดค่าสลิป มีความผิดพลาดประมาณ 5% ถึง 7% สำหรับวิธีการที่นำเสนอ และวิธีการกำลังไฟฟ้าอินพุต ที่ภาระประมาณ 25% จนถึงพิกัดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ มีความผิดพลาดประมาณ 5% แสดงข้อมูลความคลาดเคลื่อนดัง Table 2

Table 2 Data on the discrepancies in efficiency estimation of a 2.2 kW three-phase induction motor using various methods

Load	Absolute Error (%)			
	PM	CM	SM	IPM
35.12	0.75	-64.06	7.31	-6.67
49.60	2.88	-33.73	8.50	-3.51
56.65	3.64	-24.50	9.22	-2.56
63.41	3.21	-17.97	8.37	-2.37
70.25	2.76	-12.78	6.87	-1.73
76.83	2.29	-9.06	6.18	-1.84
81.83	2.88	-6.52	5.91	-0.44
86.92	1.13	-4.79	3.28	-1.42
93.22	2.95	-2.60	7.02	-1.46
99.27	0.04	-1.25	2.07	-2.05

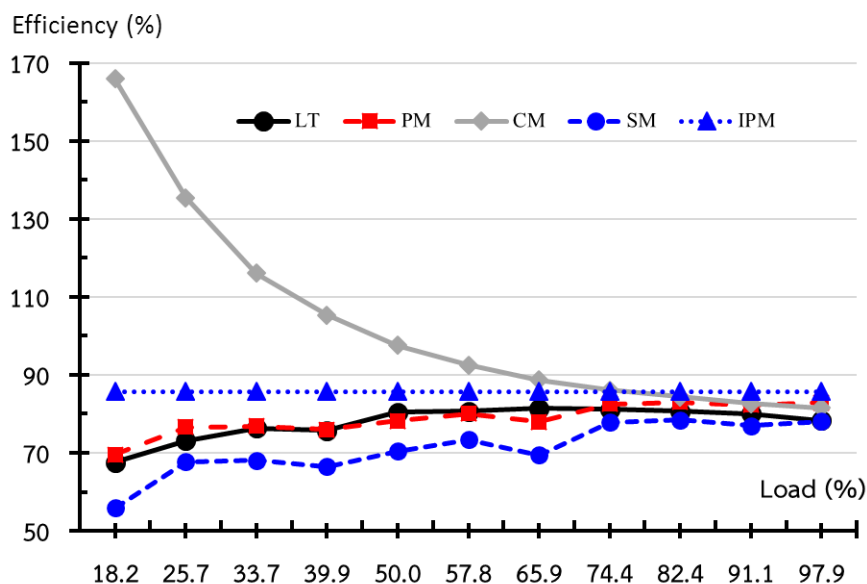


Figure 4 Comparison of the efficiency estimation of a 3.7 kW induction motor using different methods

สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสพิกัด 3.7 kW ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพที่ได้จากการประเมินด้วยวิธีการต่างๆ กับภาระทางกลแสดงดัง Figure 4 และข้อมูลความคลาดเคลื่อนของแต่ละวิธีเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบแสดงดัง Table 3 พบว่าผลที่ได้มีค่าสอดคล้องกับกรณีมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสพิกัด 2.2 kW ที่ภาระทางกลตั้งแต่ประมาณ 25% จนถึงประมาณ 60% พิกัด ประสิทธิภาพที่ได้จากการประเมินด้วยวิธีการใช้ค่ากระแสไฟฟ้ามีความผิดพลาดสูงมาก (มากกว่า 10%) ส่วนวิธีการวัดค่าสลิปมีความผิดพลาดอยู่ในช่วง 6% ถึง 12% แต่ที่ภาระทางกลตั้งแต่ 65% พิกัดขึ้นไป แต่ละวิธีจะมีความผิดพลาด

ประมาณ 7% สำหรับวิธีการที่นำเสนอที่ภาระทางกลประมาณ 25% จนถึงพิกัดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ มีความผิดพลาดประมาณ 5%

Table 3 Data on the discrepancies in efficiency estimation of a 3.7 kW three-phase induction motor using various methods

Load	Absolute Error (%)			
	PM	CM	SM	IPM
18.15	-2.04	-98.36	11.69	-18.2
25.65	-3.51	-62.28	5.39	-12.62
33.68	-0.50	-39.70	8.29	-9.34
39.86	-0.25	-29.59	9.21	-10.03
49.97	2.13	-17.22	9.96	-5.36
57.78	0.58	-11.82	7.32	-5.09
65.92	3.47	-7.26	11.91	-4.37
74.41	-1.35	-4.90	3.41	-4.52
82.38	-2.28	-3.67	2.29	-5.04
91.14	-2.12	-2.60	3.16	-5.64
97.92	-4.48	-3.12	0.30	-7.39

วิธีการใหม่สำหรับประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำในขณะใช้งานอย่างง่ายที่นำเสนอ พบว่าสามารถที่จะประเมินประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำในขณะที่ภาระทางกลตั้งแต่ 25 % จนถึงพิกัดมอเตอร์โดยมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 5% ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการตรวจสอบทดแทนวิธีการดั้งเดิมได้ เนื่องจากสามารถใช้งานได้กับมอเตอร์ใหม่ (มอเตอร์ 2.2 kW) มอเตอร์ที่มีอายุการใช้งานนานหรือมอเตอร์เก่า (มอเตอร์ 3.7 kW) มอเตอร์ที่มีการพันขดลวดใหม่ โดยที่ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าวิธีการดั้งเดิม ทำให้ข้อมูลที่ได้น่าเชื่อถือมากขึ้น ซึ่งค่าประสิทธิภาพที่ประเมินได้นี้จะมีผลอย่างมากต่อการตัดสินใจเกี่ยวกับการบริหารด้านพลังงานหรือการตัดสินใจลงทุน ส่วนวิธีการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์ด้วยกำลังไฟฟ้าอินพุตจะเป็นวิธีที่คล้ายกับวิธีการใช้ข้อมูลจาก پایฟักัด ซึ่งประสิทธิภาพที่คำนวณได้จะมีค่าคงที่ ตั้งแต่ภาระทางกล 25% ของพิกัดจนถึงพิกัดของมอเตอร์ ดังนั้นจึงไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำในขณะใช้งาน เนื่องจากมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้งานอยู่นั้นไม่ใช่มอเตอร์ใหม่

5. สรุป

วิธีการใหม่สำหรับการประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสในขณะใช้งานอย่างง่ายที่สภาวะแรงดันไฟฟ้าสมดุล เป็นวิธีการหรือขบวนการเก็บข้อมูลที่ง่ายไม่ยุ่งยากซับซ้อน และนำไปใช้ได้จริงในทางปฏิบัติ โดยใช้ข้อมูลที่สามารถวัดได้ในขณะใช้งานของมอเตอร์ ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และความเร็วรอบ โดยสามารถที่จะประเมินภาระทางกลและประเมินประสิทธิภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ตั้งแต่ภาระทางกลประมาณ 25% จนถึงที่พิกัดของมอเตอร์ โดยมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 5% - 7% เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าวิธีการใช้ค่ากระแสไฟฟ้าและวิธีการวัดค่าสลิป เนื่องจากนั้นยังสามารถนำมาใช้งานทางด้านการบริหารด้านพลังงาน หรือการตัดสินใจลงทุนได้ ดังนั้นวิธีการที่นำเสนอสามารถใช้งานทดแทนวิธีการใช้ค่ากระแสไฟฟ้าและวิธีการวัดค่าสลิปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Edson da Costa Bortoni, 2009. Are my motors oversized?, Energy Conversion and Management, vol. 50, pp. 2282–2287.
- [2] The energy savings network, 1997. DETERMINING ELECTRIC MOTOR LOAD AND EFFICIENCY a Program of the U.S. Department of Energy.
- [3] B. Lu, T. G. Habetler, and R. G. Harley. 2004. A survey of available methods for evaluating in-service motor efficiency. Georgia Inst. Technol., Atlanta, GA, EATON WSN Res. Rep., Oct.
- [4] C. Chat-uthai, P. Phumiphak. 2013. Low-Intrusive Approach for Parameters Estimation of Induction Motor Using Adaptive Optimal Design Algorithm Based on On-Site Measurements. International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.), vol. 8, no. 4, July - August, pp. 1162-1169.
- [5] Motors and Generators, 2003. NEMA MG1-2003 Standard.
- [6] R.L. Nailen. 1994. Finding true power output isn't easy. Electr. App., Feb.
- [7] B.S. Guru and H.R. Hiziroglu. 2001. Electric Machinery and Transformers. Third Edition, Oxford Univ. Press.
- [8] J. R. Holmquist, J. A. Rooks, and M. E. Richter. 2004. Practical approach for determining motor efficiency in the field using calculated and measured values. IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 40, no. 1, Jan./Feb., pp.242-248
- [9] A. Wallance, A. Von Jouanne, E. Wiedenbrug, E. Matheson, and J. Douglass. 2001. A laboratory assessment of in-service and non-intrusive motor efficiency testing methods. Electric power Compon. Syst., vol. 29, no. 6, Jun., pp. 517-529.
- [10] T. Phumiphak and C. Chat-uthai, 2004. An Economical Method for Induction Motor Field Efficiency Estimation for Use in On-site Energy Audit and Management, Proceedings of International Conference on Power System Technology, PowerCon 2004, vol. 1, Singapore, pp. 1–5, Nov.

การประยุกต์ใช้เครื่องหมุนเหวี่ยงแบบจานร่วมกับเครื่องล้างไบโอดีเซล
ด้วยไบโอชาร์ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล
APPLICATION OF DISC CENTRIFUGE COMBINED WITH BIODIESEL WASHING MACHINE
WITH BIOCHAR IN BIODIESEL PRODUCTION

สุรศักดิ์ ฟองหิรัญศิริ¹, ธัชพล จุ่งเจริญ^{1,*}, อรสา ชูละเอียด² และ วารุณี ลิ้มมัน¹
Surasak Fonghirsiri¹, Thatchapol Chungcharoen^{1,*}, Orasa Choola-aid² and Warunee Limmun¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ชุมพร

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

*Corresponding author: Thatchapol Chungcharoen, e-mail address: thatchapol.ch@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้สนใจที่จะประยุกต์ใช้เครื่องหมุนเหวี่ยงแบบจานร่วมกับเครื่องล้างไบโอดีเซลด้วยไบโอชาร์ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งวิธีดังกล่าวจะช่วยลดปริมาณไบโอชาร์ที่ใช้ในกระบวนการล้างเพื่อให้คุณสมบัติของไบโอดีเซลผ่านเกณฑ์มาตรฐาน งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้เครื่องหมุนเหวี่ยงแบบจานในการแยกไบโอดีเซลออกจากกลีเซอรอลร่วมกับการล้างไบโอดีเซลด้วยเครื่องล้างไบโอดีเซลด้วยไบโอชาร์ (Centrifuge machine combined with Biochar washing method; CB) โดยจะเปรียบเทียบกับวิธีการแยกไบโอดีเซลด้วยแรงโน้มถ่วงร่วมกับการล้างด้วยน้ำ (Gravitational settling combined with water washing method; GW) และการแยกไบโอดีเซลด้วยแรงโน้มถ่วงร่วมกับการล้างด้วยเครื่องล้างไบโอดีเซลด้วยไบโอชาร์ (Gravitational settling combined with biochar washing method; GB) จากการทดลองพบว่ากระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธี CB สามารถลดสิ่งปนเปื้อนในไบโอดีเซลได้ โดยร้อยละผลผลิตของไบโอดีเซลมีค่าไม่แตกต่างกับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธี GB แต่ยังคงมีค่าสูงกว่ากระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธี GW โดยร้อยละผลผลิตของไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการผลิตด้วยวิธี CB มีค่า 90.24 นอกจากนี้กระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธี CB สามารถกำจัดความเป็นกรด ปริมาณน้ำ เมทานอล และกลีเซอรอลในไบโอดีเซลได้สูงกว่ากระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธี GB โดยร้อยละการกำจัดความเป็นกรด ปริมาณน้ำ เมทานอล และกลีเซอรอลที่ผ่านกระบวนการผลิตด้วยวิธี CB มีค่า 63.88 79.49 99.70 85.19 ตามลำดับ ส่งผลให้ความหนืด และความหนาแน่นมีค่าลดลง โดยกระบวนการดังกล่าวจะทำให้คุณสมบัติของไบโอดีเซลผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ASTM 6751 and EN 14214

คำสำคัญ: ไบโอดีเซล, ไบโอชาร์, เครื่องหมุนเหวี่ยงแบบจาน, เครื่องล้างไบโอดีเซล

Abstract

This research focused on the application of a disc centrifuge combined with a biodiesel washing machine with biochar in biodiesel production. This method can reduce the amount of biochar used in the washing process to meet biodiesel standards. Therefore, the research aimed to improve the biodiesel production process by using a centrifuge machine combined with the biochar washing method (CB) and comparing two methods: gravitational settling combined with water washing (GW) and gravitational settling combined with biochar washing (GB). The results indicated that the CB method could reduce contaminants in biodiesel. The biodiesel yield did not differ from the GB method but remained higher than the GW method, with a yield of 90.24%. Furthermore, the CB method was more effective in removing acidity, water content, methanol, and glycerol in biodiesel compared to the GB method, with removal percentages of 63.88%, 79.49%, 99.70%, and 85.19% respectively. Consequently, the viscosity and density of biodiesel decreased. This method provides biodiesel properties meet the ASTM 6751 and EN 14214 biodiesel standards.

Keywords: Biodiesel, Biochar, Disc centrifuge machine, Biodiesel washing machine

1. บทนำ

ไบโอดีเซล (Biodiesel) เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงทางเลือกชนิดหนึ่งที่ได้จากการนำน้ำมันพืช ไขมันสัตว์ หรือน้ำมันจากครัวเรือนที่ใช้แล้ว มาทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์เกิดเป็น แอลคิลเอสเทอร์ (ไบโอดีเซล) และกลีเซอรอล [1] ซึ่งเรียกปฏิกิริยานี้ว่า ทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ซึ่งน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้จากการทำปฏิกิริยามีสิ่งปนเปื้อนตกค้างอยู่ ได้แก่ กลีเซอรอล แม้ว่าจะผ่านขั้นตอนการแยกกลีเซอรอลออกจากน้ำมันไบโอดีเซลแล้วก็ตามโดยองค์ประกอบในกลีเซอรอล จะประกอบด้วยกลีเซอรอลร้อยละ 58-82% เอทานอล หรือเมทานอลร้อยละ 1-2% น้ำร้อยละ 10-12% โซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 6-8% และกรดไขมันอิสระที่ไม่ถูกทำปฏิกิริยา และยังคงเหลืออยู่ 1-2% [2] สิ่งปนเปื้อนดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อเครื่องยนต์เกิดความเสียหาย เช่น ใส่กรองอุดตัน เกิดควันดำ เป็นต้น [3] ดังนั้นกระบวนการผลิตไบโอดีเซลและการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์จึงเป็นสิ่งสำคัญ

ปัจจุบันกระบวนการผลิตไบโอดีเซลเริ่มจากการนำน้ำมันน้ำมันพืช ไขมันสัตว์ หรือน้ำมันจากครัวเรือนที่ใช้แล้วมาผ่านปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน หลังจากทำปฏิกิริยาเสร็จจะได้ไบโอดีเซลกับกลีเซอรอล ซึ่งจะถูกพักทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงเพื่อให้ไบโอดีเซลแยกชั้นกับกลีเซอรอลโดยใช้หลักการของแรงโน้มถ่วง [4] เมื่อแยกกลีเซอรอลออกจากไบโอดีเซลแล้วไบโอดีเซลที่ได้จะถูกนำมาผ่านกระบวนการล้างด้วยน้ำเพื่อกำจัดกลีเซอรอลที่ยังตกค้างอยู่ในไบโอดีเซลรวมถึงสิ่งปนเปื้อนอื่นๆ [5] จากนั้นไบโอดีเซลที่ได้จะถูกนำมาผ่านกระบวนการลดความชื้นก่อนนำไปใช้ไบโอดีเซลไปใช้งาน [6] อย่างไรก็ตามกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธีการดังกล่าวจะต้องใช้น้ำค่อนข้างเยอะ ทำการล้างหลายครั้งจึงเกิดการสูญเสียน้ำมันไบโอดีเซลไปกับน้ำล้าง [7] นอกจากนี้ที่ผ่านกระบวนการล้างยังมีสิ่งปนเปื้อนปะปนอยู่ หากนำไปทิ้งโดยไม่ผ่านกระบวนการจัดการที่ดีจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม [8] ด้วยเหตุผลนี้จึงได้มีการพัฒนากระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยการนำเครื่องล้างไบโอดีเซลด้วยไบโอชาร์มาใช้ในกระบวนการล้าง ซึ่งเป็นกระบวนการล้างแบบแห้ง โดยตัวเครื่องสามารถเพิ่มความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซลได้ และไม่ทำให้เกิดน้ำเสียเหมือนกับกระบวนการล้างแบบเปียก อีกทั้งไบโอดีเซลที่ได้ไม่จำเป็นต้องกำจัดความชื้นหลังกระบวนการล้าง แต่ข้อเสียของกระบวนการดังกล่าว คือ จำเป็นต้องใช้ปริมาณไบโอชาร์จำนวนมากเพื่อให้คุณสมบัติของไบโอดีเซลผ่านเกณฑ์มาตรฐาน [9] ในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะลดปริมาณไบโอชาร์ในกระบวนการล้างให้น้อยลง

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดปริมาณไบโอชาร์ที่ใช้ในกระบวนการล้างด้วยการนำเทคนิคการหมุนเหวี่ยงแบบจานมาใช้ในกระบวนการแยกไบโอดีเซลออกจากกลีเซอรอลรวมกับการล้างด้วยเครื่องล้างไบโอดีเซลด้วยไบโอชาร์ (Centrifuge machine combined with Biochar washing method; CB) โดยจะเปรียบเทียบกับคุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ได้กับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธีการแยกไบโอดีเซลออกจากกลีเซอรอลโดยใช้แรงโน้มถ่วงรวมกับการล้างด้วยเครื่องล้างไบโอดีเซลด้วยไบโอชาร์ (Gravitational settling combined with biochar washing method; GB) และการแยกไบโอดีเซลออกจากกลีเซอรอลโดยใช้แรงโน้มถ่วงรวมกับการล้างด้วยน้ำ (Gravitational settling combined with water washing method; GW)

2. วิธีการศึกษา

2.1 การเตรียมน้ำมันไบโอดีเซล

การผลิตไบโอดีเซลใช้อัตราส่วนโมลของเมทานอลต่อโมลของน้ำมันปาล์มที่ 9:1 โดยนำมาผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของเมทานอล อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลา 45 นาที หลังจากทำปฏิกิริยาเสร็จสารละลายที่ได้เข้าสู่กระบวนการแยกไบโอดีเซลออกจากกลีเซอรอลและการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์

2.2 สมบัติของไบโอชาร์

ไบโอชาร์ที่ใช้ในกระบวนการล้างผลิตจากไม้ไผ่ (Bamboo Biochar) ซึ่งมีคุณสมบัติในการดูดซับสิ่งปนเปื้อนสูง โดยคุณสมบัติของไบโอชาร์ แสดงดัง Table 1

Table 1 The details of the commercial biochar used in the experiment

Items	Bamboo Biochar
Fixed Carbon (%)	86
Moisture Content (%)	5.3
Ash (%)	4.3
Volatile Matter (%)	4.40
pH	8-10
Particle Size (mm)	2-3
Iodine Number (mg/g)	1,000

2.3 การแยกไบโอดีเซลออกจากกลีเซอรอลและการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์

2.3.1 การแยกไบโอดีเซลด้วยแรงโน้มถ่วงร่วมกับการล้างด้วยน้ำ (Gravitational settling combined with water washing method; GW)

สารละลายที่ได้หลังทำปฏิกิริยาถูกพักทิ้งไว้ในกรวยแยกสารเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้ไบโอดีเซลแยกชั้นกับกลีเซอรอล โดยใช้แรงโน้มถ่วง เมื่อครบเวลากลีเซอรอลถูกปล่อยออก จากนั้นไบโอดีเซลที่ได้ถูกล้างด้วยน้ำ โดยอัตราส่วนไบโอดีเซลต่อน้ำที่ใช้คือ 1:2 ทำการล้างซ้ำ 3 ครั้ง หลังล้างเสร็จจึงต้มไบโอดีเซลเพื่อลดความชื้นที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที [6] โดยทุกการทดลองจะทำซ้ำ 3 ครั้ง ซึ่งขั้นตอนการทดลองแสดงดัง Figure 1

2.3.2 การแยกไบโอดีเซลด้วยแรงโน้มถ่วงร่วมกับการล้างด้วยเครื่องล้างไบโอดีเซลด้วยไบโอชาร์ (Gravitational settling combined with biochar washing method; GB)

สารละลายที่ได้หลังทำปฏิกิริยาถูกพักทิ้งไว้ในกรวยแยกสารเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไบโอดีเซลที่ได้ใส่ลงในเครื่องล้างไบโอดีเซลด้วยไบโอชาร์ เมื่ออุณหภูมิไบโอดีเซลถึง 30 องศาเซลเซียส ใส่ไบโอชาร์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของไบโอดีเซล ทำการกวนผสมโดยใช้จำนวนใบพัด 5 ใบพัด มุมของใบพัด 60 องศา ระยะเวลาในการกวนผสม 30 นาที โดยใช้ความเร็วรอบอยู่ที่ 200 รอบต่อนาที เมื่อกวนผสมเสร็จจึงปิดมอเตอร์กวนผสมแล้วเปิด Solinoid valve และเปิดปั๊มสุญญากาศ ไบโอดีเซลที่ได้ไหลเข้าสู่กระบวนการกรอง โดยใช้ระยะเวลากรอง 45 นาที [9]

2.3.3 การแยกไบโอดีเซลด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงแบบจานร่วมกับการล้างด้วยเครื่องล้างไบโอดีเซลด้วยไบโอชาร์ (Centrifuge machine combined with biochar washing method; CB)

นำสารละลายหลังทำปฏิกิริยาใส่ลงในเครื่องหมุนเหวี่ยงแบบจาน เมื่ออุณหภูมิสารละลายถึง 60 องศาเซลเซียส ทำการเหวี่ยงแยกโดยใช้ความเร็วรอบ 2,100 รอบต่อนาที ใช้อัตราการไหลของปั๊มดูดสารละลายที่ 200 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อสารละลายถูกปล่อยเข้าสู่เครื่องหมุนเหวี่ยงจนหมด จับเวลาอีก 50 วินาที หลังจากนั้นจะปิดมอเตอร์เพื่อหยุดเครื่อง นำไบโอดีเซลที่ได้เข้าสู่เครื่องล้างไบโอดีเซลด้วยไบโอชาร์ โดยใช้ปริมาณไบโอชาร์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของไบโอดีเซล ตามวิธีการล้างที่ระบุไว้ในหัวข้อ 2.3.2

2.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอดีเซล

น้ำมันไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการล้างด้วยเครื่องต้นแบบของเครื่องล้างไบโอดีเซลด้วยไบโอชาร์ จะถูกวัดคุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซล ได้แก่ ความหนาแน่น ความหนืด ความเป็นกรด ปริมาณน้ำ ปริมาณเมทานอล และปริมาณกลีเซอรอล เพื่อยืนยันความสามารถในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนของเครื่องต้นแบบของเครื่องล้างไบโอดีเซลด้วยไบโอชาร์ อีกทั้งยังตรวจสอบร้อยละผลผลิตของไบโอดีเซลหลังกระบวนการล้างอีกด้วย โดยความหนาแน่นวัดตามมาตรฐาน ASTM D 1298 [10] โดยใช้เครื่อง Hydrometer ความหนืดวัดตามมาตรฐาน ASTM D 445 [11] ความเป็นกรดวัดตามมาตรฐาน ASTM D 664 [12] โดยใช้เครื่องเครื่อง 916 Ti-Touch with magnetic stirrer ปริมาณน้ำวัดตามมาตรฐาน EN ISO 12937 [13] โดยใช้เครื่อง 703 Ti Stand with stirrer and pump ปริมาณเมทานอล และปริมาณกลีเซอรอลวัดตามมาตรฐาน EN 14110 [14] และ EN 14105 [15] ตามลำดับ โดยใช้เครื่องเครื่อง gas chromatography with flame ionization detection (GC-FID; 6850, Hewlett Packard, USA)

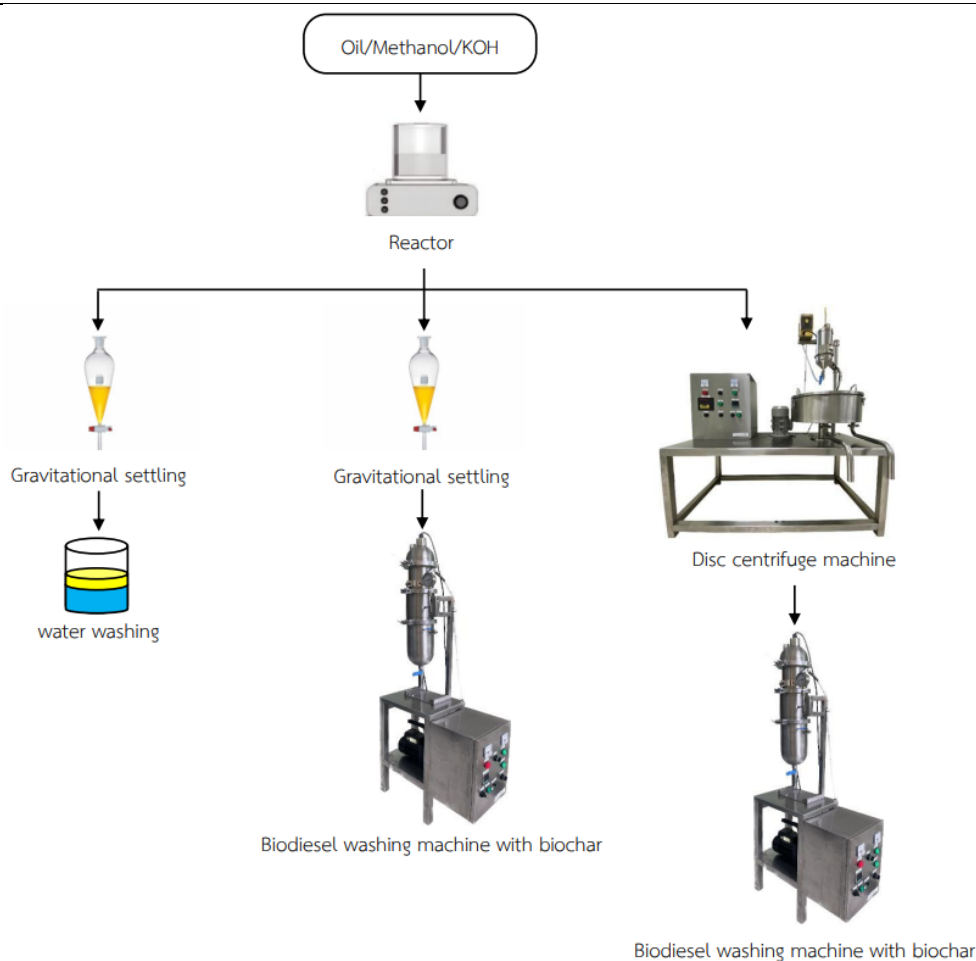
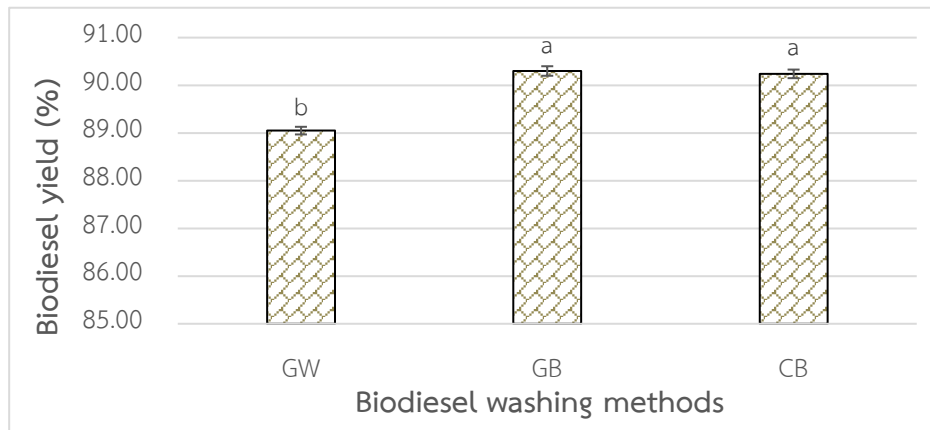


Figure 1 The process of producing biodiesel using various methods

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 ร้อยละผลผลิตของไบโอดีเซล

Figure 2 แสดงร้อยละผลผลิตของไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการผลิตด้วยวิธีต่างๆ จากการทดลองพบว่ากระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธีต่างๆ ส่งผลกระทบต่อร้อยละผลผลิตของไบโอดีเซลอย่างมีนัยสำคัญ โดยร้อยละผลผลิตของไบโอดีเซลหลังผ่านกระบวนการผลิตด้วยวิธี GW มีค่า 89.05 เมื่อนำไบโอดีเซลมาผ่านกระบวนการผลิตด้วยวิธี CB พบว่าร้อยละผลผลิตของไบโอดีเซลสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธี CB ไม่ใช้น้ำในกระบวนการล้าง ส่งผลให้ไบโอดีเซลบางส่วนไม่สูญเสียไปกับน้ำล้าง [7] อีกทั้งไม่ทำให้เกิดการออกซิเดชันกับน้ำหรือเกิดการจับตัวเป็นอิมัลชันหรือสบู่ [16] นอกจากนี้ยังพบว่าร้อยละผลผลิตของไบโอดีเซลหลังผ่านกระบวนการผลิตด้วยวิธี CB มีค่าไม่ต่างกับ GB กล่าวคือการใช้เครื่องมือเหวี่ยงแบบจานในกระบวนการแยกไบโอดีเซลออกจากกลีเซอรอลไม่ส่งผลกระทบต่อร้อยละผลผลิตของไบโอดีเซล โดยร้อยละผลผลิตของไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการผลิตด้วยวิธี CB มีค่า 90.24



Mean with different letters indicate significant differences ($p < 0.05$)

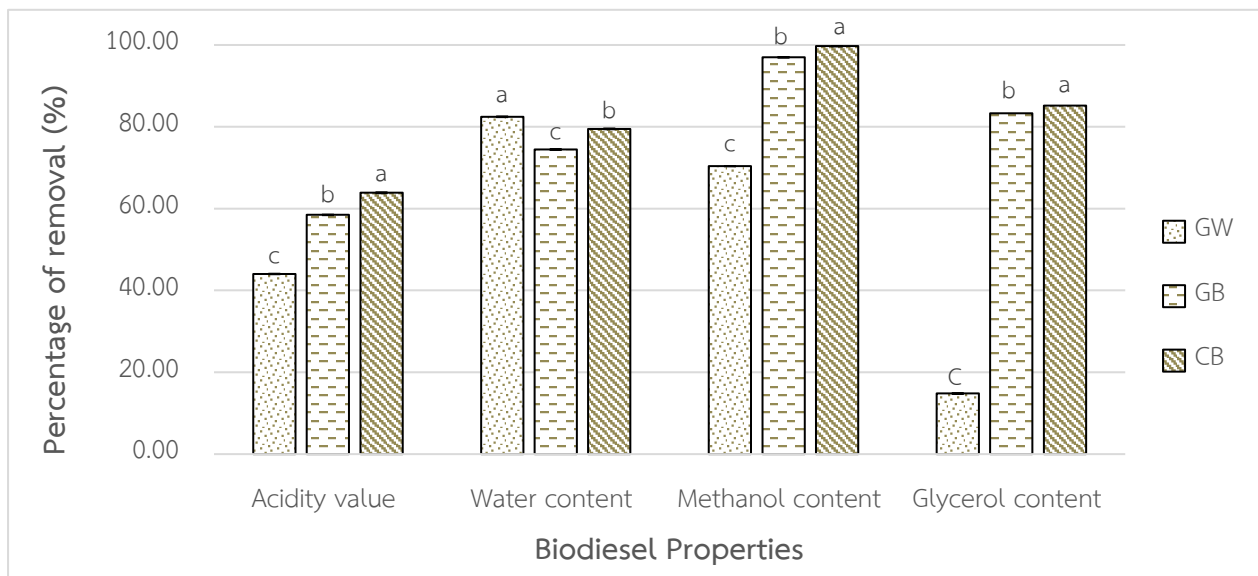
Remark: GW = Gravitational settling combined with water washing method; GB = Gravitational settling combined with biochar washing method; CB = Centrifuge machine combined with biochar washing method

Figure 2 The biodiesel yield after the production process using various methods

3.2 คุณสมบัติของไบโอดีเซล

3.2.1 ร้อยละการกำจัดความเป็นกรด ปริมาณน้ำ เมทานอล และกลีเซอรอลในไบโอดีเซล

Figure 3 แสดงร้อยละการกำจัดความเป็นกรด ปริมาณน้ำ เมทานอล และกลีเซอรอลในไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการผลิตด้วยวิธีต่างๆ จากการทดลองพบว่า ค่าความเป็นกรด ปริมาณน้ำ เมทานอล และกลีเซอรอลของน้ำมันไบโอดีเซลก่อนผ่านกระบวนการล้างมีค่า 0.0896 ± 0.0002 mg KOH/g, 1248.65 ± 1.95 ppm, 6.62% wt. และ 0.27% wt. ตามลำดับ เมื่อนำไบโอดีเซลมาผ่านกระบวนการผลิตด้วยวิธี CB พบว่าสามารถกำจัดค่าความเป็นกรด เมทานอล และกลีเซอรอลได้สูงกว่ากระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธี GW เนื่องจากไบโอชาร์มีความสามารถในการดูดซับสารปนเปื้อน ส่งผลให้โมเลกุลของสารปนเปื้อนในไบโอดีเซลถูกดูดซับออกไปได้มากขึ้น [17-19] ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sandouqa et al. [17] ที่ได้ทำการศึกษาการผลิตถ่านไบโอชาร์จากมะกอกเพื่อตรวจสอบการดูดซับสิ่งปนเปื้อนในไบโอดีเซล ผลการทดลองพบว่าไบโอชาร์จากมะกอกสามารถลดความเป็นกรดและกลีเซอรอลในไบโอดีเซลได้อย่างมีนัยสำคัญ และงานวิจัยของ Banga et al. [20] ได้ทำการตรวจสอบปริมาณน้ำ และเมทานอลในไบโอดีเซลโดยดูดซับด้วยถ่านไบโอชาร์ที่ผลิตจากเปลือกกล้วยและเห็ด พบว่าปริมาณน้ำ และเมทานอลในไบโอดีเซลที่ผ่านการดูดซับด้วยไบโอชาร์มีค่าลดลง อย่างไรก็ตามกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธี CB สามารถลดปริมาณน้ำในไบโอดีเซลได้น้อยกว่ากระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธี GW ทั้งนี้เป็นผลมาจากการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธี GW ต้องผ่านกระบวนการต้มลดความชื้นก่อนใช้งาน [6] นอกจากนี้กระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธี CB สามารถกำจัดค่าความเป็นกรด ปริมาณน้ำ เมทานอล และกลีเซอรอลได้สูงกว่ากระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธี GB อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการแยกไบโอดีเซลด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงแบบจานสามารถแยกความแตกต่างของความหนาแน่นระหว่างไบโอดีเซลและสิ่งเจือปนอื่นๆ ได้ ส่งผลให้สามารถแยกไบโอดีเซลและสิ่งเจือปนออกจากกันได้ดีขึ้น [21-23] ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Suseno et al. [24] ที่ได้ตรวจสอบคุณภาพน้ำมันปลาสดหลังการนำไปทำให้บริสุทธิ์ด้วยการหมุนเหวี่ยง จากการทดลองพบว่าการทำให้บริสุทธิ์ด้วยการหมุนเหวี่ยงสามารถปรับปรุงความใสและคุณภาพของน้ำมันปลาได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้เครื่องหมุนเหวี่ยงแบบจานร่วมกับเครื่องล้างไบโอดีเซลด้วยไบโอชาร์ สามารถลดปริมาณไบโอชาร์ในกระบวนการล้างจากร้อยละ 20 เป็นร้อยละ 5 เพื่อให้คุณสมบัติของไบโอดีเซลอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานได้ โดยค่าความเป็นกรดต้องไม่สูงกว่า 0.50 mg KOH/g [25] ค่าปริมาณน้ำต้องไม่สูงกว่า 500 ppm [25] ปริมาณเมทานอลต้องต่ำกว่า 0.20 % wt. [25] และปริมาณกลีเซอรอลต้องต่ำกว่า 0.25 % wt. [25]



Mean with different letters indicate significant differences ($p < 0.05$) in the same properties according to the method of Duncan's multiples ranges.

Remark: GW = Gravitational settling combined with water washing method; GB = Gravitational settling combined with biochar washing method; CB = Centrifuge machine combined with biochar washing method

Figure 3 Removal percentage of acidity value water content methanol content and glycerol content after the production process using various methods

3.2.2 ความหนืด และความหนาแน่นในไบโอดีเซล

Table 2 แสดงค่าความหนืด และค่าความหนาแน่นของไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการผลิตด้วยวิธีต่างๆ จากการทดลองพบว่า ค่าความหนืด และค่าความหนาแน่นของไบโอดีเซลก่อนผ่านกระบวนการล้างมีค่า 4.992 ± 0.001 cSt และ 910.75 ± 0.20 kg/m³ ตามลำดับ เมื่อนำไบโอดีเซลมาผ่านกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธี CB พบว่า ค่าความหนืด และค่าความหนาแน่นมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เป็นผลมาจากไบโอชาร์ได้ทำการดูดซับสารปนเปื้อนในน้ำมันไบโอดีเซลตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นในหัวข้อที่ 3.2.1 ซึ่งการลดลงของค่าความหนืด และค่าความหนาแน่นสอดคล้องกับร้อยละการกำจัดความเป็นกรด ปริมาณน้ำ เมทานอล และกลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้น [24] ดังแสดงใน Figure 3 นอกจากนี้การลดลงของค่าความหนืด และค่าความหนาแน่น ยังเกิดจากการนำกระบวนการแยกไบโอดีเซลด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงแบบจานมาใช้ร่วมกับการล้างด้วยเครื่องล้างไบโอดีเซลด้วยไบโอชาร์ ตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นในหัวข้อที่ 3.2.1 จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่ากระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธี CB สามารถลดค่าความหนาแน่น และความหนืดในไบโอดีเซลให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน โดยค่าความหนืดต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 3.5 cSt และไม่สูงกว่า 5.0 cSt [26] และค่าความหนาแน่นต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 860 kg/m³ และไม่สูงกว่า 900 kg/m³ [25]

Table 2 Viscosity and density values after the production process using various methods

Biodiesel washing methods	Viscosity (cSt)	Density (kg/m ³)
RM	4.992 ± 0.001^a	910.75 ± 0.20^a
GW	4.208 ± 0.001^b	878.92 ± 0.03^b
GB	4.097 ± 0.001^c	870.88 ± 0.04^c
CB	3.998 ± 0.002^d	865.93 ± 0.07^d

Mean with different letters indicates significant differences ($p < 0.05$) in the same properties according to the method of Duncan's multiples ranges.

Remark: GW = Gravitational settling combined with water washing method; GB = Gravitational settling combined with biochar washing method; CB = Centrifuge machine combined with biochar washing method

4. สรุป

การปรับปรุงกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยการนำเทคนิคการหมุนเหวี่ยงแบบจานมาใช้ในกระบวนการแยกไบโอดีเซลออกจากกลีเซอรอลแทนการแยกด้วยหลักการของแรงโน้มถ่วงร่วมกับการล้างไบโอดีเซลด้วยเครื่องล้างไบโอดีเซลด้วยไบโอชาร์ (Centrifuge machine combined with Biochar washing method; CB) สามารถช่วยเพิ่มความบริสุทธิ์ให้กับน้ำมันไบโอดีเซลได้ โดยร้อยละผลผลิตของไบโอดีเซลมีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธี GW อย่างไรก็ตามร้อยละผลผลิตของไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการผลิตด้วยวิธี CB มีค่าไม่ต่างกับ GB นอกจากนี้ร้อยละการกำจัดความเป็นกรด ปริมาณน้ำ เมทานอล และกลีเซอรอลที่ผ่านกระบวนการผลิตด้วยวิธี CB มีค่าสูงกว่ากระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธี GB และ GW ยกเว้นร้อยละการกำจัดปริมาณน้ำที่กระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธี GW มีค่าสูงกว่า ส่งผลให้ค่าความหนืด และความหนาแน่นใน ไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการผลิตด้วยวิธี CB มีค่าลดลง นอกจากนี้การนำเครื่องหมุนเหวี่ยงแบบจานมาใช้ร่วมกับเครื่องล้างไบโอดีเซลด้วยไบโอชาร์ สามารถลดปริมาณไบโอชาร์ในกระบวนการล้างจากร้อยละ 20 เป็นร้อยละ 5 ส่งผลให้คุณสมบัติของ ไบโอดีเซลอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และกองทุนวิจัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้โอกาสการทำวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Ahmia, A.C., Danane, F., Bessah, R. and Boumesbah, I. 2014. Raw material for biodiesel production. Valorization of used edible oil. *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 17N°2(2014): 335-343.
- [2] Cvengros, J. and Povazanec, F. 1996. Production and treatment of repeseed oil methyl ester as alternative fuels for diesel engines. *Bioresource Technology*. 55(2): 145-150
- [3] Suthisripok, T. and Semsamran, P. 2018. The impact of biodiesel B100 on a small agricultural diesel engine. *Tribology International*. 128 (2018) 397-409.
- [4] วลัยพัชร์ ใจเรือน, รัตนชัย ไพรินทร์ และ แก้วกันยา สุตประเสริฐ. 2560. การผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันจากไขมันไก่. *วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ปีที่ 5 ฉบับที่ 1* : 41-49
- [5] Stojković, I.J., Stamenković O.S., Povrenović, D.S. and Veljković, V.B. 2014. Purification technologies for Crude biodiesel obtained by alkali-catalyzed transesterification. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32(2014): 1-15.
- [6] อนันท์ย สุธิระประเสริฐ, กำพล ประทีปชัยกูร และ ชีระยุทธ หลีจิตร. 2551. ปริมาณการใช้น้ำในการทำมาสะอาด ไบโอดีเซลในแบบบะโดยการสเปรย์น้ำร่วมกับการผสมด้วยฟองอากาศ. *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22*(2551)
- [7] Jaber, R., Shirazi, M.M.A., Toufaily, J., Hamieh, A.T., Nouredin, A., Ghanavati, H., Ghaffari, A., Zenouzi, A., Karout, A., Ismail, A.F. and Tabatabaei, M. 2015. Biodiesel wash-water reuse using microfiltration: toward zero-discharge strategy for cleaner and economized biodiesel production. *Biofuel Research Journal*. 5: 148-151.
- [8] Siles, J.A., Gutiérrez, M.C., Martín, M.A. and Martín, A. 2011. Physical-chemical and Biomethanization treatments of wastewater from biodiesel manufacturing. *Bioresource Technology*. 102: 6348-6351.

- [9] เกียรติกิจ ชูเดชา, พันธุ์พิษ สุขแก้ว, พิมพ์ธีรา สังฆะโต, ภาณุพงศ์ นาคบำรุง. 2565. การหาสภาวะที่เหมาะสมในการล้างไบโอดีเซลโดยเครื่องล้างไบโอดีเซลด้วยถ่านไบโอชาร์. ปรินิพนยานิพนธิวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังวิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
- [10] ASTM D 1298 – 12b. 2017. Standard Test Method for Density, Relative Density, or API Gravity of Crude Petroleum and Liquid Petroleum Products by Hydrometer Method. ASTM International, An American National Standard.
- [11] ASTM D 445 - 17a. 2017. Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity). ASTM International, British Standard 2000: Part 71: Section 1: 1996.
- [12] ASTM D 664 - 181. 2019. Standard Test Method for Acid Number of Petroleum Products by Potentiometric Titration. ASTM International, British Standard 4457.
- [13] ISO 12937. 2000. Petroleum products — Determination of water — Coulometric Karl Fischer titration method. INTERNATIONAL STANDARD, ISO 12937:2000(E)
- [14] EN 14110. 2019. Fat and oil derivatives - Fatty Acid Methyl Esters - Determination of methanol content. EUROPEAN STANDARD NORME EUROPÉENNE EUROPÄISCHE NORM, EN 14110:2019 (E)
- [15] EN 14105. 2019. Fat and oil derivatives - Fatty Acid Methyl Esters (FAME) - Determination of free and total glycerol and mono-, di-, triglyceride contents. EUROPEAN STANDARD NORME EUROPÉENNE EUROPÄISCHE NORM, prEN 14105:2019 (E)
- [16] Postae, N., Fonseca, J.M., Bergamasco, R. and Silva, C.D. 2022. Impact of biodiesel production on wastewater generation. Eng Sanit Ambient. 235-244
- [17] Sandouqa, A., Al-Shannag, M. and Al-Hamamre, Z. 2020. Biodiesel purification using biomass-based adsorbent manufactured from delignified olive cake residues. Renewable Energy. 151(2020): 103-117.
- [18] Putra, S.Y., Julianto, T.S., Hartono, P., Puspitasaria, R.D. and Kurniawan, A. 2014. Pre-treatment of used-cooking oil as feedstocks of biodiesel production by using activated carbon and clay minerals. International Journal of Renewable Energy Development. 3(1): 33-35.
- [19] Alnaief, M., Sandouqa, A., Altarawneh, I., Al-Shannag, M., Alkasrawi, M. and Al-hamamre, Z. 2021. Adsorption Characteristics and Potential of Olive Cake Alkali Residues for Biodiesel Purification. Energies.14: 16.
- [20] Banga, S., Varshney, P.K. and Kumar, N. 2015. Purification of Jatropha curcas based biodiesel by dry washing, using banana peel and mushroom powder as natural adsorbents. Biofuels, 2015
- [21] Knothe, G., Krah, J., & Van Gerpen, J. 2005. The biodiesel handbook. Elsevier. AOCS PRESS. United States of America.
- [22] Chungcharoen, T., Netjaibun, K., Pratabkong, T., Suwannasam, P., & Limmun, W. 2017. Effects of inner angle of bowl, flow rate and speed on the efficiency of glycerol separation from the raw biodiesel using cylindrical bowl centrifuge. Energy Procedia. 138: 405-410.
- [23] เฉษฐากร ชูเพ็ญ, บริพัตร เริ่มสุข, วรุตติร พันธ์คง, วราชัย จอมพงษ์. 2565. การปรับปรุงเครื่องหมุนเหวี่ยงแบบจานสำหรับการแยกไบโอดีเซลออกจากกลีเซอรอล. ปรินิพนยานิพนธิวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังวิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
- [24] Suseno, S. H., & Jacob, A. M. 2014. Purification of Sardinella sp., oil: Centrifugation and bentonite adsorbent. Advance Journal of Food Science and Technology. 6(1): 60-67.

-
- [25] Ambata, I., Srivastava, V. and Sillanpää, M. 2018. Recent advancement in biodiesel production methodologie using various feedstock: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 90: 356–369.
- [26] Yunusa, N.N. and Mamoon, A. 2021. Purification and Characterization of Jatropha Biodiesel as a Fuel for Diesel Engines. *International Journal of Biotech Trends and Technology*, 11(2): 38-45.

การทำนายค่าความชื้นของใบกล้วยไม้สกุลหวายพันธุ์ขาวสนานด้วยเทคนิคภาพไฮเปอร์สเปกตรัลอินฟราเรดย่านใกล้

Prediction of Moisture Content of Fresh *Dendrobium* Khao Sanan Orchid Leaves using Near Infrared-Hyperspectral Imaging Techniques

พชรพร เชียงเงิน¹ พชร สืบทรงวง¹ ชุตินา กาบแก้ว² และ สิรินาถ น้อยพิทักษ์^{1*}
Pacharaphon Chiangngoen¹, Pachara Subsueng¹, Chutima Kapkaeo², Sirinad Noypitak^{1*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม
²สาขาวิชาสมุนไพรและกัญชาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา กรุงเทพมหานคร

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

²Program in Herbal and Cannabis Science, Faculty of Science of Technology, Bansomdejchaopraya Rajabhat University, Bangkok.

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการประยุกต์ใช้เทคนิคภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัลอินฟราเรดย่านใกล้ (Near infrared-hyperspectral imaging; NIR-HSI) เพื่อประเมินความชื้นของใบกล้วยไม้สกุลหวายพันธุ์ขาวสนาน และแสดงแผนภาพการทำนายการกระจายของความชื้น ในช่วงความยาวคลื่น 900-1700 nm รูปแบบการวัดแบบสะท้อนกลับ (Reflectance mode) โดยนำข้อมูลการดูดกลืนแสงของใบกล้วยไม้สกุลหวายพันธุ์ขาวสนานจำนวน 80 ตัวอย่าง มาสร้างสมการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้น ด้วยวิธี Partial least squares regression (PLSR) ผลการวิจัยพบว่า การนำค่าการดูดกลืนแสงมาปรับแต่งทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธี Standard Normal Variate (SNV) ร่วมกับ Second derivative ให้ผลทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นได้ดีที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของการพิสูจน์แบบไขว้ (Coefficient of determination for cross-validation; R_{cv}^2) เท่ากับ 0.98 ค่าความคลาดเคลื่อนในการทดสอบสมการของการพิสูจน์แบบไขว้ (Root mean square error of cross validation; RMSECV) เท่ากับ 3.29%wb เทคนิคภาพไฮเปอร์สเปกตรัลอินฟราเรดย่านใกล้สามารถแสดงผลการทำนายในลักษณะการกระจายตัวของค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของใบกล้วยไม้สดได้ชัดเจนทั่วพื้นที่ผิวหน้าตัดด้วยความรวดเร็ว รวมถึงความอุดมสมบูรณ์ การเจริญเติบโต การขาดน้ำของต้นกล้วยไม้ โดยวิธีแบบไม่ทำลายตัวอย่าง อย่างไรก็ตามควรมีการพัฒนาสมการทำนายให้มีความแม่นยำมากขึ้น โดยการเพิ่มจำนวนตัวอย่างที่มีช่วงของข้อมูลความชื้นที่ครอบคลุมเก็บตัวอย่างจากพันธุ์ที่หลากหลาย เพื่อการทำนายตัวอย่างที่ครอบคลุมในอนาคต

คำสำคัญ: ใบกล้วยไม้สด, ไฮเปอร์สเปกตรัลอินฟราเรดย่านใกล้, การทำนาย, ความชื้น

Abstract

This research aimed to study the application of near Infrared-hyperspectral imaging (NIR-HSI) to evaluate the moisture content of fresh *Dendrobium* Khao Sanan orchid leaves and showed a prediction diagram the distribution of moisture content in a wavelength range 900-1700 nm of reflectance mode. The sample of 80 fresh orchid leaves were built the percentage moisture content model by partial least squares regression (PLSR) method. The results revealed that the absorbance data which were pretreated using standard normal variate (SNV) combined with second derivative obtained the highest coefficient of determination of cross validation (R_{cv}^2) was 0.98 and the root mean square error of cross validation (RMSECV) was 3.29%wb. In addition, the near infrared-hyperspectral imaging technique was able to display the prediction results in diagram of the distribution of moisture percentage of fresh orchid leaves clearly and quickly over the entire surface area with including

abundance growth or drought in orchid plant by non-destructive method. However, prediction equations should be developed to be more accurate by increasing the number of samples with a comprehensive range of moisture data and sample from a wide variety to cover the prediction of future examples.

Keywords: Fresh orchid leaves, Hyperspectral imaging techniques, Prediction, Moisture content

1. บทนำ

ประเทศไทยเป็นแหล่งผลิตกล้วยไม้ (Orchid) ที่สำคัญของเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เนื่องจากมีสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมแก่การเพาะปลูก เมื่อพิจารณามูลค่าการส่งออก ในปี 2566 พบว่าประเทศไทยมีมูลค่าการส่งออกกล้วยไม้ 1,700 ล้านบาท ประเทศคู่ค้าที่สำคัญได้แก่ เวียดนาม สหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่น จีน และอินเดีย โดยมีพันธุ์ที่ส่งออกหลัก ได้แก่ สกุลหวาย (*Dendrobium*) สกุลมอคคาร่า (*Mokara*) และ สกุลออนซิเดียม (*Oncidium*) และมีช่วงผลผลิตสูงในช่วงเดือนมิถุนายน-ตุลาคมนิยมปลูกบริเวณพื้นที่ จังหวัดนครปฐม สมุทรสาคร ราชบุรี กาญจนบุรี กรุงเทพฯ และปริมณฑล [1]

ในช่วง 10 ปีที่ผ่านมาสภาพอากาศมีความแปรปรวนค่อนข้างเร็ว ส่งผลกระทบต่อการผลิตกล้วยไม้อย่างกว้างขวาง ในช่วงฤดูร้อนการผลิตกล้วยไม้ของไทย ประสบปัญหาวิกฤตภัยแล้งและน้ำทะเลหนุนสูงที่ปากแม่น้ำ เนื่องจากพื้นที่เพาะปลูกส่วนใหญ่เป็นพื้นที่ราบลุ่มต่ำ เกิดการปะปนของน้ำจืดและน้ำเค็ม หรือเรียกว่าน้ำกร่อย ทำให้น้ำทะเลปะปนลงในแหล่งน้ำที่ใช้รดกล้วยไม้ จนสร้างความเสียหายให้กับชาวสวนกล้วยไม้อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ โดยการใช้ น้ำที่มีค่าความเค็มหรือค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity; EC) สูงเกินกว่า 750 ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร มารดต้นกล้วยไม้ ส่งผลให้รากกล้วยไม้เริ่มไหม้ ใบมีสีเหลือง เริ่มเหี่ยว และไม่เจริญเติบโต เกษตรกรจึงงดการให้น้ำ ด้วยเหตุนี้ทำให้เกิดปัญหาทั้งในด้านของคุณภาพการผลิตกล้วยไม้ที่ไปสัมพันธ์กับการให้ผลผลิตและคุณภาพการส่งออกกล้วยไม้ [2] ดังนั้นเทคนิคการวัดที่รวดเร็วควรถูกนำมาประยุกต์ใช้ตรวจสอบความชื้นในใบกล้วยไม้ซึ่งจะนำไปสู่พัฒนาในการตรวจสอบความสมบูรณ์ของต้นกล้วยไม้ในอนาคต

เทคนิคการถ่ายภาพไฮเปอร์สเปกตรัล (Hyperspectral imaging; HSI) เป็นเทคนิคการตรวจสอบคุณภาพแบบไม่ทำลายตัวอย่าง และวัดได้รวดเร็ว เทคนิคภาพถ่ายแบบ HSI เป็นวิธีการถ่ายภาพร่วมกับเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ ซึ่งจากการถ่ายภาพ HSI จะทำให้ได้ข้อมูลภาพถ่าย และข้อมูลเชิงสเปกตรัมในเวลาเดียวกัน วิธีการสร้างสมการจะมีลักษณะที่คล้ายกับเทคนิค NIRS แต่เทคนิค HSI จะต้องมีขั้นตอนในการสกัดเส้นสเปกตรัมจากภาพถ่ายเชิงสเปกตรัมด้วยซอฟต์แวร์ที่เหมาะสม ซึ่งการสกัดข้อมูลสเปกตรัมจากตำแหน่งของภาพถ่ายในตำแหน่งที่สนใจ หรือองค์ประกอบที่ต้องการศึกษา ทำให้ได้สเปกตรัมเฉลี่ยตลอดช่วงความยาวคลื่นของการถ่ายภาพ จากนั้นจึงนำข้อมูลสเปกตรัมที่ได้มาหาความสัมพันธ์กับค่าที่ได้จากวิธีมาตรฐานด้วยวิธีเคมีเมตริกซ์ (Chemometrics) จากการวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามีการวิจัยที่ประยุกต์ใช้เทคนิค HSI ในการประเมินค่าความชื้นในผลผลิตเกษตร เช่น สามารถนำเทคนิค HSI มาใช้ในการประเมินค่าความชื้นของใบชาโดยให้ค่า R_p^2 เท่ากับ 0.94 และ RMSEP เท่ากับ 0.03 [3] และ Liu et al. [4] ได้ทำการศึกษาการตรวจจับความชื้นของใบผักกาดก้านขาวให้ค่า R_p^2 เท่ากับ 0.96 และ RMSEP เท่ากับ 0.01 การประเมินปริมาณความชื้นในถั่วลิสง โดยให้ค่า R_p^2 เท่ากับ 0.91 และ RMSEP เท่ากับ 0.06% [5] การทำนายปริมาณสีและความชื้นของถั่วเหลืองในระหว่างการอบแห้ง โดยให้ค่า R_p^2 เท่ากับ 0.84 และ RMSEP เท่ากับ 1.14% [6] การตรวจจับการปนเปื้อนของแบคทีเรียบนผักโขม ให้ค่าความถูกต้องในการจำแนกที่ดีที่สุดเท่ากับ 100% [7] และ [8] ได้ทำการศึกษาความชื้นและปริมาณไขมันทั้งหมดในเมล็ดกาแฟดิบด้วยวิธี PLSR พบว่าค่า R_{cv}^2 เท่ากับ 0.96, RMSECV เท่ากับ 1.99% และ R_{cv}^2 เท่ากับ 0.89, RMSECV เท่ากับ 0.99% dmb ตามลำดับ เห็นได้ว่าเทคนิค HSI เป็นเทคนิคที่สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพ

เนื่องจากวิธีการดั้งเดิมในการหาค่าความชื้นในกล้วยไม้มันั้น ใช้การหาจากวิธีการมาตรฐาน ASABE [9] โดยการอบตัวอย่างด้วยลมร้อนซึ่งต้องใช้เวลาในการหาค่า เทคนิค HSI จึงเป็นวิธีการที่น่าสนใจที่ช่วยตรวจสอบค่าความชื้นได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างสมการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้น และแสดงแผนภาพการกระจายตัวของค่าความชื้นในใบกล้วยไม้ และทำให้ทราบถึงการกระจายตัวของความชื้นในแต่ละพื้นที่ของใบกล้วยไม้สด รวมถึงความอุดมสมบูรณ์ การเจริญเติบโต การเกิดโรคและการขาดน้ำของใบกล้วยไม้สดโดยไม่ทำลายตัวอย่าง

2. วิธีการศึกษา

2.1 การเตรียมตัวอย่างใบกล้วยไม้สด

เตรียมตัวอย่างใบกล้วยไม้สดสกุลหวาย (*Dendrobium*) พันธุ์ขาวสนาน จากสวนในอำเภอสามพราณ จังหวัดนครปฐม จำนวน 80 ใบ ซึ่งสุ่มให้มีอายุใบอ่อนแก่และการให้น้ำที่แตกต่างกัน ใบที่มีสีเขียวจำนวน 40 ใบ ใบที่มีสีเหลืองถึงน้ำตาลจำนวน 15 ใบ ใบสีเขียวที่ลดการให้น้ำจำนวน 10 วัน 15 ใบ ใบสีเขียวที่ลดการให้น้ำ 30 วัน จำนวน 10 ใบ เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง 25 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ดังแสดงใน Figure 1 (a) ก่อนนำไปทดสอบ วัดด้วยวิธี NIR-HSI ทำการตัดตัวอย่างใบกล้วยไม้สดสำหรับการสร้างสมการสอบเทียบการทำนาย (Calibration model) ให้มีขนาดกว้าง 4 cm โดยทำการตัดบริเวณกลางใบดังแสดงใน Figure 1 (b) เพื่อลดการโค้งงอของใบซึ่งจะนำไปสู่การกระเจิงแสงในขณะสแกนด้วยเครื่อง (Hyperspectral imaging)

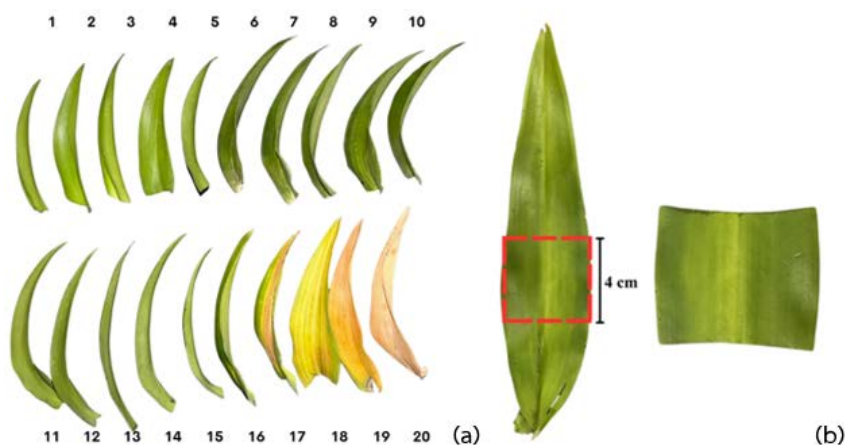


Figure 1 Preparation of (a) fresh orchid leaf samples and (b) cutting to reduce leaf bending.

2.2 การวัดภาพไฮเปอร์สเปกตรัลอินฟราเรดย่านใกล้

นำตัวอย่างใบกล้วยไม้สดมาสแกนด้วยเครื่อง Hyperspectral imaging (N17E, SPECIM Spectral Imaging Ltd., Oulu, Finland) มีช่วงความยาวคลื่น 900-1700 nm ความละเอียด 3.51 nm พร้อมด้วยชุดหลอดไฟทั้งสแตนด์ฮาลोजেনขนาด 20 W (DECOSTAR, Carrollton, GA, US) ทำมุม 45 องศากับตัวอย่างที่ด้านหัว และด้านท้ายของถาดเลื่อนจำนวนด้านละ 3 หลอด ตัวอย่างถูกวางบนถาด ด้วยความเร็วในการเคลื่อนที่ 9 mm/s ความสูงระหว่างกล้องถ่ายภาพ CCD (Xeva 992, Xenics Infrared Solution Ltd., Oulu, Finland) กับตัวอย่างเท่ากับ 20 cm ด้วยรูปแบบการวัดแบบสะท้อนกลับ (Reflectance mode) ดังแสดงใน Figure 2 นำข้อมูลความเข้มแสงของแต่ละตัวอย่างที่มีลักษณะเป็น 3 มิติ ประกอบด้วยแกน x ขนาด 320 pixel และแกน y ขนาดบันทึกตามความยาวของวัตถุที่เคลื่อนที่ผ่านกล้องถ่ายภาพ โดยในแต่ละพิกเซลจะมีข้อมูลสเปกตรัมบรรจุอยู่ 1 เส้น มีจำนวนการเก็บข้อมูลการสะท้อนแสง 256 ค่า เรียกว่า Hypercube

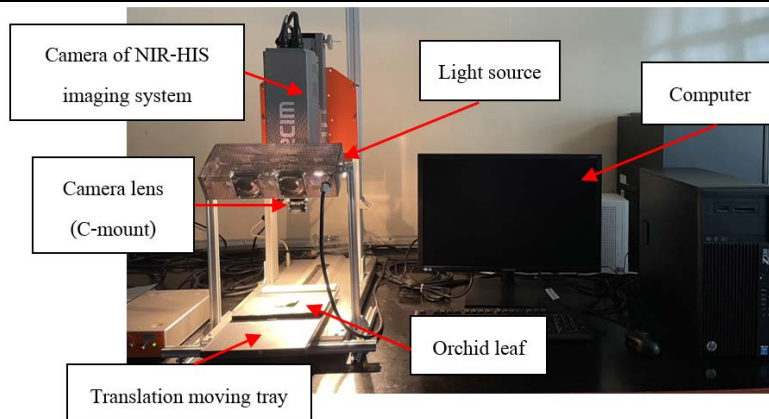


Figure 2 Measurement of absorbance using near infrared hyperspectral Imaging (NIR-HSI)

2.3 การทดสอบหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของใบกล้วยไม้สดด้วยการอบแห้งด้วยวิธีมาตรฐาน ASABE

นำใบกล้วยไม้สดมาหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้น (Moisture content; MC) ด้วยการอบแห้งด้วยวิธีมาตรฐาน ASABE (2006) [9] โดยตัดใบกล้วยไม้สดเป็นชิ้นสี่เหลี่ยม ขนาด 4 cm ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ทำการวัดค่าการดูดกลืนแสง ตัดใบกล้วยไม้สดเป็นชิ้นสี่เหลี่ยมเล็กๆ และนำไปชั่งน้ำหนักก่อนอบทันทีด้วยเครื่องชั่งดิจิตอล ความละเอียด 4 ตำแหน่ง (Sartorius QUINTIX224-1S, Sartorius Lab Instruments GmbH & Co. Goettingen, Germany) จากนั้นนำเข้าตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 103 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงจนน้ำหนักหลังอบไม่เปลี่ยนแปลง นำตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้งเข้าตู้ดูดความชื้น (desiccator) ชั่งน้ำหนักหลังอบ และหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานเปียก ดังสมการที่ 1

คำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นมาตรฐานเปียก

$$M_w = \left(\frac{W_w - W_d}{W_w} \right) \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ M_w = ความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet basis) (%)
 W_w = น้ำหนักของตัวอย่างใบกล้วยไม้สดก่อนอบ (g)
 W_d = น้ำหนักของตัวอย่างใบกล้วยไม้สดหลังอบ (g)

2.4 การวิเคราะห์สร้างสมการทำนาย

2.4.1 ตรวจสอบความผิดปกติของข้อมูลค่าอ้างอิง

นำข้อมูลค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้น ซึ่งเป็นค่าอ้างอิงมาตรวจสอบข้อมูลที่ผิดปกติ (Outlier) โดยพิจารณาจากค่ามาตรฐาน (Standard score; Z) ถ้าหากค่า Z ของตัวอย่างใดมีค่ามากกว่า 3 หรือน้อยกว่า -3 ถือว่าตัวอย่งนั้นเป็นข้อมูลที่ผิดปกติ [10] ก่อนที่จะมีการสร้างสมการสอบเทียบมาตรฐาน (Calibration model)

2.4.2 ตรวจสอบความผิดปกติของข้อมูลสเปกตรัม

นำข้อมูลสเปกตรามาตรวจสอบความผิดปกติของข้อมูล โดยตรวจสอบความผิดปกติของเส้นสเปกตรัมด้วยสายตา ก่อน และตรวจสอบด้วยการวิเคราะห์ด้วยวิธี Principal component analysis (PCA) ด้วยโปรแกรม The Unscrambler 9.8 (Camo, USA) ถึงข้อมูลสเปกตรัมที่ผิดปกติจากกลุ่มข้อมูลทั้งหมด ซึ่งไม่พบข้อมูลผิดปกติ

2.4.3 การวิเคราะห์ข้อมูลและสร้างสมการ

นำข้อมูล Hypercube มาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Evince (Prediktera, Umeå, SWEDEN) เริ่มจากการตัดข้อมูลเฉพาะส่วนที่เป็นใบกล้วยไม้สดในตำแหน่งที่ต้องการ (Region of interest: ROIs) และตัดส่วนพื้นหลัง (Background) แล้วทำการเฉลี่ย

ข้อมูลทุกพิกเซลในตำแหน่งนั้นมาเฉลี่ยเป็นเส้นสเปกตรัม และนำข้อมูลภาพสเปกตรัมที่เป็นเฉพาะส่วนที่เป็นตัวอย่าง มาเฉลี่ยเป็น 1 สเปกตรัมต่อ 1 ตัวอย่าง ดังแสดงใน Figure 3 (a) นำภาพ HSI แปลงเป็นภาพค่าการสะท้อนแสงสัมพัทธ์ (Relative reflectance; R) โดยคำนวณดังสมการที่ 2 และนำค่าที่ได้คำนวณดังสมการที่ 3 แปลงเป็นค่าการดูดกลืน (Absorbance) [11]

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

เมื่อ R = ค่าการสะท้อนแสงสัมพัทธ์ที่ความยาวคลื่น λ
 I_S = ค่าความเข้มแสงของตัวอย่างที่ความยาวคลื่น λ
 I_D = ค่าความเข้มแสงของแหล่งอ้างอิงสีดำที่ความยาวคลื่น λ
 I_W = ค่าความเข้มแสงของแหล่งอ้างอิงสีขาวที่ความยาวคลื่น λ

การคำนวณเปลี่ยนค่าการสะท้อนแสงสัมพัทธ์ (Relative reflectance) เป็นค่าการดูดกลืน (Absorbance)

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

เมื่อ A = ค่าการดูดกลืน (Absorbance)
 R = ค่าการสะท้อนแสงสัมพัทธ์ (Relative reflectance)

จากนั้นนำข้อมูลทั้งหมดมาทำการปรับแต่งทางคณิตศาสตร์ ด้วยวิธี Smoothing, First derivative, Second derivative, Multiplicative scatter correction (MSC), Standard normal variate (SNV) โดยใช้โปรแกรม The Unscrambler เพื่อลดอิทธิพลการกระเจิงแสงที่ส่งผลกระทบต่อข้อมูล จากนั้นนำข้อมูลสเปกตรามาสร้างสมการทำนาย (calibration set) ค่าความชื้น จำนวน 80 ตัวอย่าง ด้วยวิธี Partial least squares regression (PLSR) แบบ leave one out full cross validation ด้วยโปรแกรม The Unscrambler 9.8 (Camo, USA) โดยมีการกำหนดตัวแปรต้นเป็นค่าการดูดกลืนแสง และตัวแปรตามเป็นค่าความชื้น พิจารณาสมการการทำนายที่ดีที่สุดจากค่าทางสถิติ คือค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของการสร้างสมการ (R_c^2) ที่มีค่าสูงสุด ค่าความคลาดเคลื่อนในการสร้างสมการ (RMSEC) ที่มีค่าต่ำสุด ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของการทดสอบสมการการพิสูจน์แบบไขว้ (R_{cv}^2) ที่มีค่าสูงสุด ค่าความคลาดเคลื่อนของการทดสอบสมการการพิสูจน์แบบไขว้ (RMSECV) ที่มีค่าต่ำสุด

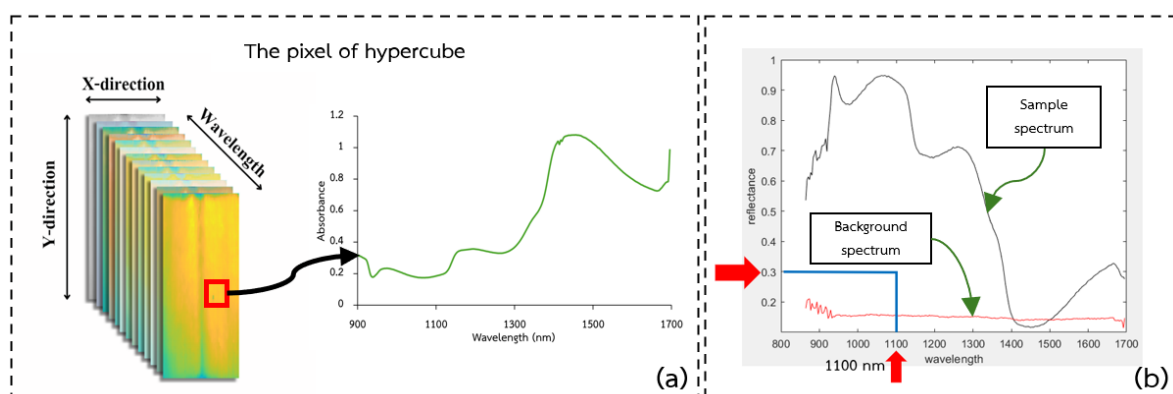


Figure 3 The spectrum of (a) The pixel was selected to be sample spectrum and setting (b) threshold for separation sample part and background part.

2.5 การแสดงแผนภาพการทำนาย (Prediction diagram)

เริ่มจากการพล็อตสเปกตรัม ณ ตำแหน่งที่เป็นตัวอย่างสำหรับแยกภาพในส่วนที่เป็นบริเวณตัวอย่าง (Sample part) และตำแหน่งที่เป็นพื้นหลังภาพ (Background) พิจารณากำหนดค่า Threshold สำหรับการแยกข้อมูลตัวอย่างและข้อมูลพื้นหลังซึ่งกำหนด Threshold ที่เหมาะสมเท่ากับ 0.3 ที่ความยาวคลื่น เท่ากับ 1100 nm ดังแสดงใน Figure 3 (b) แล้วทำการเฉลี่ยค่าสเปกตรัมเฉพาะส่วนที่เป็นตัวอย่างที่ต้องการ นำทุกตัวอย่างมาหาความสัมพันธ์ของการดูดกลืนแสงแต่ละความยาวคลื่นกับค่าอ้างอิง (ค่าความชื้น) แล้วเลือกตำแหน่งความยาวคลื่นที่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) สูงสุด [12] มาแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและค่าความชื้นด้วยสมการถดถอยอย่างง่าย (Simple linear regression) เมื่อต้องการแสดงแผนภาพการทำนายในตัวอย่างที่สนใจจึงนำค่าความชัน (Slope) ของสมการถดถอยที่ได้มานำมาคูณกับข้อมูลในแต่ละพิกเซลของความยาวคลื่นที่ถูกเลือกไว้บวกด้วยค่าจุดตัดแกนตั้ง (Intercept) ทำให้ได้ค่าการทำนายในแต่ละพิกเซลของภาพ และแสดงข้อมูลของการกระจายตัวของค่าที่ทำนายด้วยแถบสี (Color bar) แบบ JET ได้เป็นค่าระดับสีน้ำเงินถึงสีแดง [13] เพื่อใช้แสดงแผนภาพความชื้นน้อยถึงมากขึ้นมากของใบกล้วยไม้สดนั้นๆ ดังแสดงใน Figure 4 โดยใช้โปรแกรม MATLAB R2023a (MathWork; Co US) ในการประมวลผล

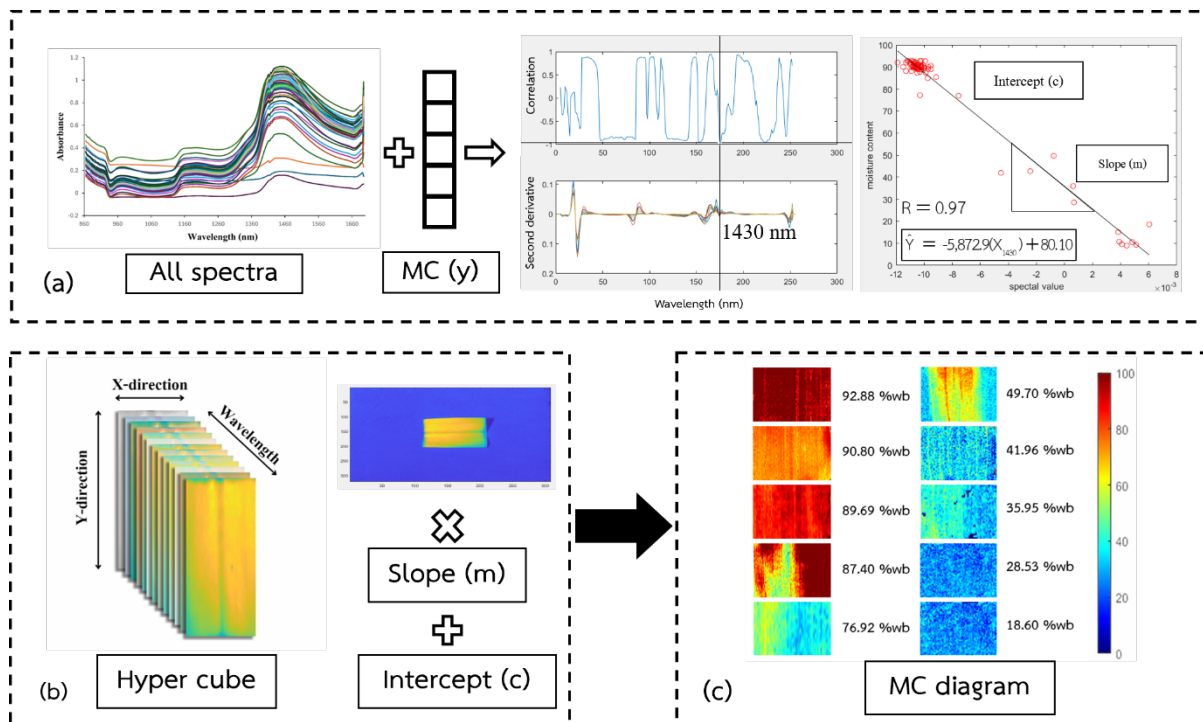


Figure 4 The process of displaying a distribution diagram of moisture content of orchid leaves.

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 การวิเคราะห์ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของใบกล้วยไม้สด

จากการตรวจสอบความผิดปกติ (outliers) ของค่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่ได้จากเครื่อง NIR hyperspectral-imaging ของใบกล้วยไม้สดจำนวน 80 ตัวอย่าง ไม่พบความผิดปกติของเส้นสเปกตรัม เมื่อตรวจสอบค่าอ้างอิงพบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของใบกล้วยไม้สดจากการพิจารณาค่ามาตรฐาน (Z-score) กลุ่มที่ใช้สร้างสมการการทำนาย ไม่พบความผิดปกติของข้อมูล และในการวิเคราะห์การสร้างสมการเพื่อทำนายเปอร์เซ็นต์ความชื้นของใบกล้วยไม้สด ดังแสดงใน Table 1

Table 1 Statistical data on the moisture content of fresh orchid leaves for analysis using the Partial least squares regression (PLSR)

Parameter	No.	Min	Max	Mean	SD
Moisture content (%wb)	80	8.93	92.88	79.87	24.66

3.2 สเปกตรารการดูดกลืนแสงของใบกล้วยไม้สด

สเปกตรารการดูดกลืนแสงของใบกล้วยไม้สดจากเครื่อง Hyperspectra imaging ดังแสดงใน Figure 5 (a) เมื่อนำค่าการดูดกลืนแสงมาปรับแต่งด้วยวิธี Second derivative ทำให้เกิดพีคเด่น และลดอิทธิพลการกระเจิงแสง ดังแสดงใน Figure 5 (b) พบตำแหน่งพีคการดูดกลืนแสงที่เด่นชัดที่ตำแหน่งของพันธะ O-H ของพิกนน้ำที่ความยาวคลื่น 970 nm, 1407nm, 1450 nm และพันธะ C-H ที่ความยาวคลื่น 1157 nm [14]

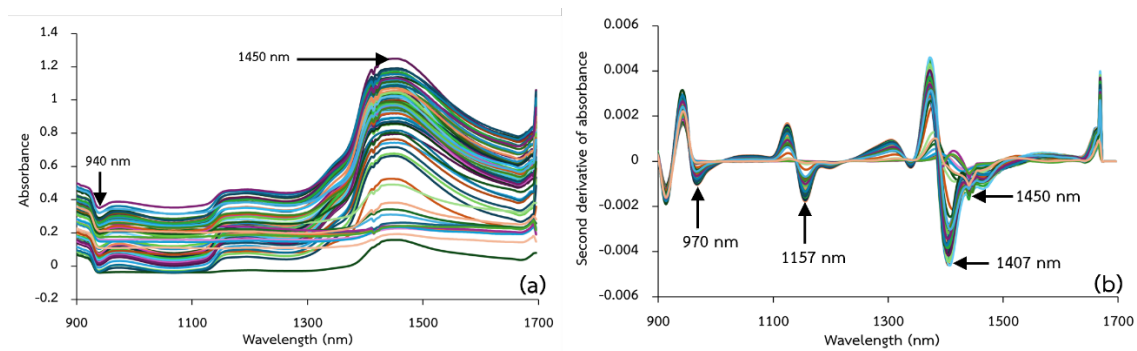


Figure 5 Absorbance spectra of (a) fresh orchid leaves and (b) spectra adjusted using SNV and Second derivative methods

3.3 ผลการสร้างสมการทำนายค่าความชื้นของใบกล้วยไม้สด

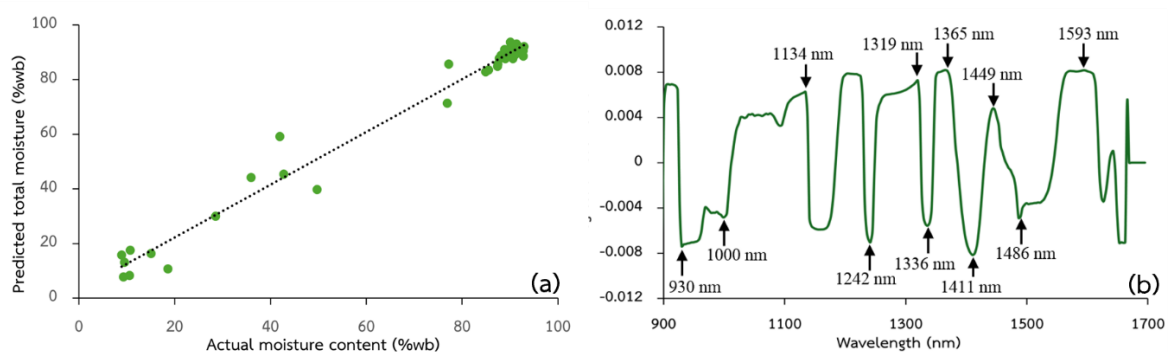
การสร้างสมการทำนายค่าความชื้น ซึ่งนำข้อมูลสเปกตรารในช่วงความยาวคลื่น 900-1700 nm ใบกล้วยไม้สดทั้งหมดมาปรับแต่งด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ พบว่าการปรับแต่งด้วยวิธี SNV ร่วมกับวิธี Second derivative แบบ Savitzky Golay จำนวน 19 จุด ดังแสดงใน (Table 2) ให้ผลการสร้างสมการทำนายที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทุกสมการมีค่า R_c^2 เท่ากับ 0.99 และค่า RMSEC เท่ากับ 2.85%wb และมีค่า R_{cv}^2 เท่ากับ 0.98 และค่า RMSECV เท่ากับ 3.29%wb ดังแสดงใน figure 6 (a) ซึ่งแสดงว่าสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอนาคต อย่างไรก็ดีตามควมมีการเพิ่มตัวอย่างใบกล้วยไม้ที่มีช่วงความชื้น 20-80%wb เพื่อให้สมการการทำนายค่าความชื้นของใบไม้สดมีความแม่นยำเพิ่มมากขึ้น [3]

เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression coefficient) ดังแสดงใน figure 6 (b) สเปกตรารที่ผ่านการปรับแต่งด้วยวิธี SNV ร่วมกับวิธี Second derivative แบบ derivative แบบ Savitzky Golay จำนวน 19 จุด พบว่า ความยาวคลื่นที่ 930 nm เป็นการสั่นของ C-H third overtone ของ oil [14] ความยาวคลื่นที่ 1000 nm เป็นการสั่นของ C-H second overtone ของ ArOH [14] ความยาวคลื่นที่ 1134 nm เป็นการสั่นของ C-H second overtone ของ aromatic [14] ความยาวคลื่นที่ 1242 nm เป็นการสั่นของ C-H second overtone ของ CH [14] ความยาวคลื่นที่ 1365 nm เป็นการสั่นของ C-H second overtone ของ CH_3 [14] ความยาวคลื่น 1411 nm เป็นการสั่นของ O-H first overtone ของ ROH [14] ความยาวคลื่น 1449 nm เป็นการสั่นของ O-H second overtone ของ H_2O [14] ในส่วนของพิกที่มีสัมประสิทธิ์การถดถอยที่สูงที่สุดความยาวคลื่นที่ 1319 nm, 1336 nm และ 1593 nm อาจเกิดจากองค์ประกอบอื่นที่อยู่ภายในใบกล้วยไม้สด

Table 2 Results of creating an equation for prediction the moisture content in fresh orchid leaves using the PLSR method from the NIR hyperspectral imaging.

pretreatment	LV	R_c^2	RMSEC (%wb)	R_{cv}^2	RMSECV (%wb)
absorbance	8	0.98	3.58	0.96	4.81
smoothing	8	0.98	3.79	0.96	4.85
1 st derivative	5	0.98	3.84	0.97	4.60
2 nd derivative	6	0.98	3.68	0.97	4.61
MSC	3	0.92	6.99	0.87	8.92
SNV	4	0.99	2.81	0.97	3.61
SNV+2 nd derivative	2	0.99	2.85	0.98	3.29

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

**Figure 6** Graph of (a) prediction results for moisture content in cross validation and (b) regression coefficient for prediction moisture content in fresh orchid leaves using the PLSR method.

3.4 ผลการสร้างแผนภาพการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของใบกล้วยไม้สด

จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงทุกความยาวคลื่นและค่าความชื้น พบว่ามีค่าความสัมพันธ์สูงสุดกับค่าความชื้น R เท่ากับ 0.97 ที่ความยาวคลื่น 1430 nm แสดงดังสมการที่ 4 การสร้างแผนภาพ (mapping) ค่าความชื้นของข้อมูลตัวอย่างใบกล้วยไม้สดที่ปรับแต่งสเปกตรัมแบบ Second derivative ซึ่งสมการทำนายค่าความชื้นถูกนำไปใช้กับแต่ละ pixel ใน hypercube เพื่อสร้างแผนภาพการกระจายตัวของค่าความชื้นของตัวอย่างใบกล้วยไม้สด ในช่วง 18.60%wb - 92.88 %wb สามารถเปรียบเทียบค่าความชื้นจากระดับความเข้มสีน้ำเงินแสดงค่าต่ำสุด (0%wb) ถึงระดับสีแดงแสดงค่าสูงสุด (100%wb) ดังแสดงใน Figure 7 ซึ่งเห็นถึงการกระจายตัวของค่าความชื้นบนใบกล้วยไม้สดได้เช่นเดียวกับ Liu et al. [4] ที่แสดงแผนภาพค่าความชื้นของใบผักกาดก้านขาว ช่วง 0.79-0.93 %DW

$$\hat{Y} = -5,872.9(X_{1430}) + 80.10 \quad (4)$$

เมื่อ y = ค่าความชื้นที่ทำนายได้
 X_{1430} = ค่าการดูดกลืนแสงของความยาวคลื่นที่มีความสัมพันธ์สูงสุดกับค่าความชื้นจริง

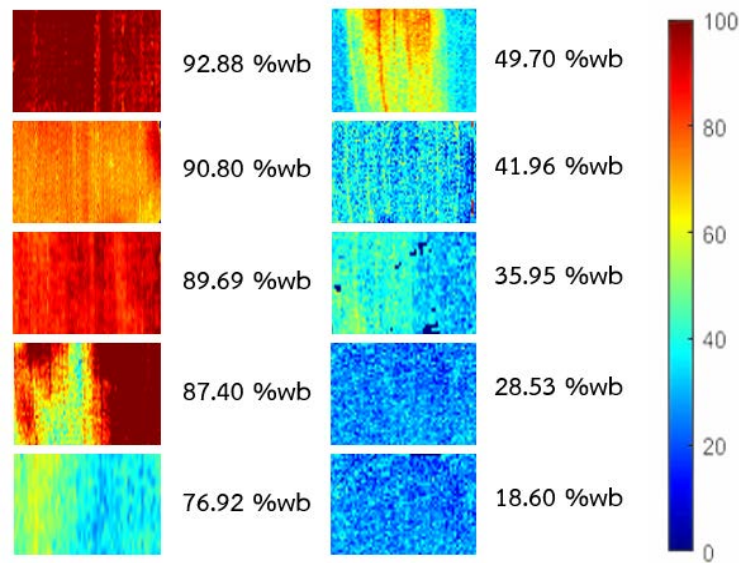


Figure 7 Moisture content diagram of fresh orchid leaf.

4. สรุป

จากการวิจัยนี้พบว่า ข้อมูล Near infrared-hyperspectral imaging (NIR-HIS) สามารถนำมาใช้สร้างสมการทำนายค่าความชื้นของใบกล้วยไม้สด จากการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นด้วยวิธี PLSR ให้ค่าความถูกต้องในการสร้างสมการที่ดีที่สุด R_c^2 เท่ากับ 0.99 และค่า RMSEC เท่ากับ 2.85%wb ผลการทดสอบสมการที่ดีที่สุด R_{cv}^2 เท่ากับ 0.98 และค่า RMSECV เท่ากับ 3.29%wb และเทคนิคไฮเปอร์สเปกตรัลอินฟราเรดย่านใกล้ยังสามารถแสดงภาพผลการทำนายในลักษณะการกระจายตัวของค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของใบกล้วยไม้สดได้ทั่วพื้นที่ผิวหน้าตัดได้อย่างรวดเร็ว โดยไม่ต้องทำลายตัวอย่าง ในอนาคตควรมีการปรับปรุงสมการการทำนายด้วยการเพิ่มจำนวนตัวอย่างใบกล้วยไม้สดให้ข้อมูลความชื้นที่ครอบคลุมมากขึ้น เพื่อทำนายตัวอย่างในอนาคตได้อย่างแม่นยำ

5.กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ที่สนับสนุนทุนการศึกษา และคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ที่กรุณาสับสนุนงบประมาณวิจัยในครั้งนี้

6.เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักส่งเสริมการค้าสินค้าเกษตรและอุตสาหกรรม. 2566. สีนค้ำกล้วยไม้. เข้าถึงได้จาก : เว็บไซต์ https://oldweb.ditp.go.th/contents_attach/1001315/1001315.pdf (เข้าถึงเมื่อ 2 เมษายน 2566).
- [2] สำนักงานส่งเสริมและจัดการสินค้าเกษตร. 2559. การดูแลรักษากล้วยไม้ในสภาวะฝนแล้งและน้ำทะเลหนุน. เข้าถึงได้จาก : เว็บไซต์ http://www.agriman.doae.go.th/home/news2/JOB/343_59-003.pdf (เข้าถึงเมื่อ 3 เมษายน 2566).
- [3] Wei, Y., Wu, F., Xu, J., Sha, J., Zhao, Z., He, Y., & Li, X. 2019. Visual detection of the moisture content of tea leaves with hyperspectral imaging technology. J. Food Eng. 248: 89-96.
- [4] Liu, Y., Zhou, X., Sun, J., Li, B., & Ji, J. 2024. A Method for Non-destructive Detection of Moisture Content in Oilseed Rape Leaves Using Hyperspectral Imaging Technology. J. Nondestruct. Eval. 43(2): 32.
- [5] Jin, H., Li, L., & Cheng, J. 2015. Rapid and non-destructive determination of moisture content of peanut kernels using hyperspectral imaging technique. Food Anal. methods. 8: 2524-2532.

-
- [6] Huang, M., Wang, Q., Zhang, M., & Zhu, Q. 2014. Prediction of color and moisture content for vegetable soybean during drying using hyperspectral imaging technology. *J. Food Eng.* 128: 24-30.
- [7] Everard, D., Kim, S., & Lee, H. 2014. A comparison of hyperspectral reflectance and fluorescence imaging techniques for detection of contaminants on spinach leaves. *J. Food Eng.* 143: 139-145.
- [8] Caporaso, N., Whitworth, M., B, Grebby, S., & Fisk, D. 2018. Rapid prediction of single green coffee bean moisture and lipid content by hyperspectral imaging. *J. Food Eng.* 227: 18-29.
- [9] Joseph, St. Ml. 2008. 2-moisture measurement-forages. ASABE Standards. American Society of Agricultural and Biological Engineers. Glendale, USA.
- [10] Meier K.J, Brudney J.L, Bohte J. 2014. Applied Statistics for Public and Nonprofit Administration. 8th edn. Wadsworth, USA.
- [11] Wu, D., Sun, D. W. 2013. Advanced applications of hyperspectral imaging technology for food quality and safety analysis and assessment: A review-Part I: Fundamentals. *IFSET.* 19: 1-14.
- [12] Ma T, Morita G, Inagaki T, Tsuchikawa S. 2022. Moisture transport dynamics in wood during drying studied by long-wave near-infrared hyperspectral imaging. *Cellulose.* 29: 133-145.
- [13] ฉันทพร โส๊ะอัน. 2566. การทำนายคุณภาพของไม้ยางพาราแปรรูปด้วยเทคนิคภาพไฮเปอร์สเปกตรัลอินฟราเรดย่านใกล้. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร.
- [14] Osborne B.G, Fearn T, Hindle P.H. 1993. Practical NIR spectroscopy with application in food and beverage analysis. Longman Scientific and Technical, Harlow.

ผลกระทบของการปะทะของไหลต่อการถ่ายเทความร้อนเดือดบนแผ่นเหล็กรีดร้อน

Effect of Liquid Jet Impingement on Boiling Heat Transfer on Hot-Rolled Steel Plate

วิสิทธิ์ เอกวานิช¹, ศักรินทร์ ชิงกุลพิทักษ์¹, กันตภณ สารทวย^{1*}, และ ปัญญา แดงวิลัยอุค¹Visit Eakvanich¹, Sakkarin Chingulpitak¹, Kantaphon Saratuay^{1*}, and Panya Dangwilaiuk¹¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ชุมพร¹Department of Mechanical Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Prince of Chumphon Campus, Chumphon

*Corresponding author: Kantaphon Saratuay, e-mail address:ssamasak@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาพฤติกรรมการลดอุณหภูมิบนแผ่นเหล็กรีดร้อน อ้างอิงจากในขบวนการผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดม้วน โดยเจาะจงที่สถานีลดอุณหภูมิบนแผ่นเหล็กด้วยการปล่อยน้ำตามแรงโน้มถ่วงเป็นลำของไหลมาสัมผัสแผ่นเหล็กรีดร้อนโดยตรงที่อุณหภูมิ 860-900 องศาเซลเซียส เพื่อลดอุณหภูมิของแผ่นเหล็กรีดร้อนลงที่ 500-550 องศาเซลเซียส ลำของไหลที่ปล่อยมาปะทะกับแผ่นเหล็กนั้นจะมีน้ำปกคลุมบนผิวเหล็กรีดร้อนส่งผลกับอัตราการลดอุณหภูมิได้ต่ำลง การแก้ไขปรับแต่งระบบแบบไม่ตรงกับสาเหตุทำให้เกิดความสูญเสียทรัพยากรและพลังงานโดยไม่จำเป็น งานวิจัยนี้นำปัญหาน้ำปกคลุมด้านบนแผ่นเหล็กรีดร้อนมาดูผลกระทบของอัตราการลดอุณหภูมิและอัตราการเกิดไอน้ำเดือดบนแผ่นเหล็กรีดร้อน ด้วยน้ำที่ปกคลุมผิวด้านบน เท่ากับ 0, 5 และ 10 มิลลิเมตร มีความสัมพันธ์กับลำของไหลปล่อยมาปะทะที่อัตราการไหล 9 และ 13 ลิตรต่อนาที และความสูงของหัวฉีดที่ 300 และ 500 มิลลิเมตรตามลำดับ วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแผ่นเหล็กรีดร้อนในตำแหน่งแนวรัศมี 5 ตำแหน่งโดย R_0 เป็นจุดกึ่งกลางของไหลปะทะ ส่วนระยะที่ $R_1=15$, $R_2=30$, $R_3=50$, $R_4=70$ มิลลิเมตรตามลำดับ พบว่าน้ำที่ปกคลุมบนผิวแผ่นเหล็กรีดร้อนและความเร็วของไหลปะทะที่ 4.17 เมตรต่อวินาที มีความสัมพันธ์เป็นนัยสำคัญในอัตราเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และอัตราเกิดบริเวณพื้นผิวสัมผัสของไหล, บริเวณพื้นผิวสัมผัสของไหลเปลี่ยนสถานะ, และลดการเกิดบริเวณพื้นผิวไม่สัมผัสของไหลเป็นไอน้ำเดือดปกคลุมบนแผ่นเหล็กรีดร้อนขัดขวางการลดอุณหภูมิน้อยลง ซึ่งผลจากงานวิจัยสามารถนำไปเป็นแนวทางการปรับปรุงสถานีลดอุณหภูมิของโรงงานผลิตเหล็กรีดร้อนชนิดม้วนให้มีความเหมาะสม รวมไปถึงการลดความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าของระบบหมุนเวียนน้ำ และปริมาณสารเคมีในการบำบัดน้ำกลับมาใช้งานใหม่ จึงคาดว่าจะประโยชน์ให้แก่โรงงานอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อนและอุตสาหกรรมอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง

คำสำคัญ: ของไหลปะทะ, ไอน้ำเดือด, บริเวณพื้นผิวสัมผัสของไหล, บริเวณพื้นผิวสัมผัสของไหลเปลี่ยนสถานะ, บริเวณพื้นผิวไม่สัมผัสของไหล

Abstract

This research investigates the cooling behavior of hot-rolled steel plates in a gravity of water jet impingement for cooling station on a hot-rolled strip mill in Thailand. Water jets impinge on the hot steel plates, which have an initial temperature of 860-900 °C, to reduce their temperature to 500-550 °C. The formation of a water film on the surface of the steel plate can hinder the liquid impinging jet as results the cooling rate decreases. Inefficient adjusted the system without understanding the root cause can lead to unnecessary waste of resources and energy. This study focuses on analyzed the impact of water film thickness 0, 5, and 10 mm on the temperature and boiling rate of the water film on the steel plates, water flow rates of 9 and 13 Lit/minute and nozzle heights of 300 and 500 mm. Investigated the temperature decrease in steel plate with liquid jet impacted by R_0 the center of liquid jet impinging, $R_1 = 15$ mm, $R_2 = 30$ mm, $R_3 = 50$ mm, and $R_4 = 70$ mm. The results showed that the water film thickness and the liquid impinging velocity 4.17 m/s have a significant effect on the cooling rate, wetted region, wetting front region, and dry region where vaporization occurs, were impediments to hindered cooling decline. This research result can be prototype to improve the cooling rate of hot-rolled steel plates in cooling stations, reducing energy consumption and water treatment costs. This research is expected to benefit hot-rolled steel mills and related industries

Keywords: liquid jet impingement; film boiling; wetted region, wetting front region, dry region

1. บทนำ

บริษัทสหวิริยาสตีลอินดัสตรี จำกัด มหาชน เป็นบริษัทผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดม้วน มีกำลังการผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดม้วน และกำลังการผลิตเหล็กรีดร้อนประเภทลึงผิวและเคลือบน้ำมัน 4 ล้านตันต่อปี โดยขบวนการผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดม้วนจะรับวัสดุจากต่างประเทศเป็นหลักแท่งแบน (Slab) ขนาดความกว้าง 1,550 มิลลิเมตร ความยาว 11,000 มิลลิเมตร หนา 250 มิลลิเมตร ให้ความร้อนในเตาที่ 1200-1250 องศาเซลเซียส รีดลดขนาดเหล็กแท่งแบนด้วยแท่นรีดลดความหนาแบบหยาบ (Roughing Mill) และแท่นรีดลดขนาดแบบละเอียด (Finishing Mill) จนเป็นเหล็กแผ่นบางมีความหนาช่วง 1-19 มิลลิเมตร หลังรีดลดความหนามีอุณหภูมิช่วง 850-900 องศาเซลเซียส ถูกส่งผ่านไปยังสถานีลดอุณหภูมิด้วยน้ำ (Cooling station) เป็นลำของไหลออกจากท่อกลมปล่อยลงด้วยแรงโน้มถ่วงสัมผัสกับแผ่นเหล็กเพื่อลดอุณหภูมิลงที่ 500-580 องศาเซลเซียส เป็นการปรับปรุงคุณภาพเชิงกลของแผ่นเหล็กตามพารามิเตอร์ของการผลิต แผ่นเหล็กรีดร้อนจะถูกม้วนเก็บเป็นเหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดม้วน เพื่อเตรียมการจัดส่งให้กับลูกค้าแสดงใน Figure 1 (ก) ช่วงแผ่นเหล็กอยู่ในสถานีลดอุณหภูมิ (cooling station) ด้วยลำของไหลจะปล่อยมาสัมผัสกับเหล็กแผ่นบาง ปริมาณน้ำที่ใช้ลดอุณหภูมิจะควบคุมการเปิด-ปิด ร่วมกับเซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิหลังจากผ่านสถานีลดอุณหภูมิ และนำค่าที่ตรวจวัดเข้าระบบควบคุมป้อนกลับ (Feedback control system) เพื่อ เปิด ปิด ปริมาณน้ำตลอดช่วงที่แผ่นเหล็กผ่านสถานีลดอุณหภูมิให้ได้อุณหภูมิตามพารามิเตอร์ที่ต้องการ แผ่นเหล็กรีดร้อนที่มีความหนามากกว่า 6 มิลลิเมตรขึ้นไปมีความต้องการอัตราการลดอุณหภูมิสูงจะใช้ปริมาณน้ำลงมากคลุมบนผิวแผ่นเหล็กรีดร้อนจำนวนมากแสดงใน Figure 1 (ข) สังเกตเห็นบริเวณบนผิวเหล็กร้อนมีแนวสีดำบางส่วนไม่สม่ำเสมอ และยังพบว่าการตรวจวัดอุณหภูมิหลังสถานีลดอุณหภูมิไม่ได้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด ต้องสั่งเปิดน้ำเพิ่มมากขึ้น และในบางกรณีใช้ปริมาณน้ำมากเกินไปกว่าสถานีลดอุณหภูมิปล่อยน้ำออกมาได้ยังไม่เพียงพอต่อความต้องการในการลดอุณหภูมิ ส่งผลต้องลดความเร็วการผลิตเกิดการสูญเสียโอกาสการผลิต ข้อสังเกตพฤติกรรมน้ำที่ปกคลุมบนผิวแผ่นรีดร้อนนั้นเป็นการขัดขวางลำของไหลปล่อยลงมาปะทะกับแผ่นเหล็กรีดร้อน ผู้จัดทำจึงนำพฤติกรรมช่วงดังกล่าวมาทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่ปกคลุมบนผิวกับการลดอุณหภูมิของแผ่นเหล็กรีดร้อนด้วยลำของไหลที่มีการปะทะในเงื่อนไขต่างกันเพื่อหาแนวทางที่เหมาะสมในและนำไปใช้เป็นต้นแบบในการปรับปรุง

ในการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องลักษณะของน้ำขณะปล่อยลงเป็นลักษณะลำของไหลยาวตามความสูงของหัวฉีดมาสัมผัสกับแผ่นเหล็กร้อนและกระจายเป็นวงกลมตามแนวรัศมีคลุมผิวแผ่นเหล็กร้อน แบ่งเป็น 5 ลักษณะแสดงใน Figure 2 (ก) ลักษณะลำของไหลสัมผัสกับแผ่นเหล็กร้อนในบริเวณแรก (I) เป็นบริเวณพื้นผิวแผ่นเหล็กร้อนสัมผัสด้วยแรงปะทะจากของลำของไหลโดยตรงเกิดการพาความร้อนแบบบังคับสถานะเดียว (single phase force convection) ช่วงที่สอง (II) แนวรัศมีเกิดการถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อนของแผ่นเหล็กร้อนด้วยการเกิดไอน้ำเดือดขึ้นอย่างรวดเร็วลอยตัวออกและมีของไหลใหม่เข้ามาแทนที่เรียกว่า การเดือดที่มีจุลภาคและการเดือดที่เปลี่ยนสถานะ (Nucleate / Transition boiling) ทำให้การอัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มสูงขึ้นจนถึงค่าสูงสุด ช่วงที่ 3, 4 (III, IV) เป็นบริเวณที่เริ่มน้ำปกคลุมบนชั้นของไอน้ำเดือด (Film Boiling) จะขัดขวางน้ำเข้าไปสัมผัสพื้นผิวแผ่นเหล็กร้อนทำให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำลง ส่วนที่ 5 (V) เป็นการระบายความร้อนของแผ่นเหล็กด้วยอากาศส่วนใหญ่เนื่องจากน้ำได้ระเหยไปทั้งหมด ในส่วนนี้จะใกล้เคียงกับการพาความร้อนร่วมกับการแผ่ความร้อนสู่อากาศ [1] การทดลองการเย็นตัวของแผ่นเหล็กรีดร้อนที่อุณหภูมิ 900°C ด้วยน้ำไหลแบบราบเรียบปะทะกับแผ่นเหล็ก ผลการวัดอุณหภูมิของชิ้นงานพบว่าช่วงแรกจะเกิดชั้นของไอน้ำเดือดคลุมผิวขัดขวางน้ำที่จะเข้าสัมผัสกับผิวเหล็กโดยหลังจากเวลาผ่านไป 0.38 วินาที ลำของไหลจะสามารถเข้าถึงผิวของแผ่นเหล็กรีดร้อนได้ ด้วยการสังเกตจากสีแผ่นเหล็กที่แตกต่างกัน ในบริเวณลำของไหลสัมผัสกับผิวแผ่นเหล็กมีอุณหภูมิที่ต่ำลง และค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนบริเวณลำของไหลปะทะมีการเปลี่ยนแปลงตามความสัมพันธ์ของอัตราการไหลกับอุณหภูมิของน้ำที่ใช้ในเงื่อนไขการทดลอง [2-3] การศึกษาเปรียบเทียบการใช้น้ำลดอุณหภูมิและสารทำความเย็น 7 ชนิดนำมาใช้ในการระบายความร้อนของแผ่นเหล็กอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส พิจารณาเงื่อนไขความสูงของหัวฉีดและอัตราการไหลพบว่าอัตราการลดอุณหภูมิแปรผันตรงต่ออัตราการไหลและความสูงของหัวฉีด แต่ในเงื่อนไขที่มีอัตราการไหลมากเกินไปไม่เกิดผลดีต่อการลดอุณหภูมิของแผ่นเหล็ก [4] ศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในแนวรัศมีของแผ่นเหล็กร้อนจากการสัมผัสของไหลใช้กล้องถ่ายภาพ บันทึกอัตราการขยายขนาดบริเวณพื้นผิวสัมผัสของไหลและเก็บผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ของแผ่นเหล็กร้อน

อุณหภูมิ 600, 750 และ 900 องศาเซลเซียส โดยผลของการบันทึกภาพ รัศมีจากการสัมผัสของไหลจะอัตราเพิ่มขนาดข้างเมื่อเงื่อนไขของอุณหภูมิแผ่นเหล็กสูงขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะสูงขึ้นตามเงื่อนไขที่อุณหภูมิแผ่นเหล็กสูงขึ้น เช่นเดียวกับค่าการถ่ายเทความร้อนที่สูงขึ้น ผลลัพธ์ของโครงการเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบที่ระบายความร้อนให้กับอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง [5] ในการทดลองระบบระบายความร้อนรูปแบบลำของไหลต่างกัน โดยแบบแรกเป็นท่อกลมและแบบที่สองเป็นแบบท่อแบนสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีการปรับอัตราการไหลและอุณหภูมิของน้ำ ในทดลองเพื่อหาแนวทางพัฒนาการระบายความร้อนของทั้ง 2 รูปแบบโดยใช้โมเดลการคำนวณจากงานวิจัยอื่นเข้ามาทำนายผลลัพธ์ [6] งานวิจัยหาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนด้วยการใช้ 2 หัวฉีด และ 7 หัวฉีดจัดวางเป็นหกเหลี่ยมตามอัตราส่วนระยะห่างแนวรัศมีต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ เท่ากับ 4, 6, 8, และ 10 ผลการทดลองระยะของหัวฉีดที่มีลำของไหลระยะไกลจากกันจะมีน้ำมาปกคลุมส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนนั้นลดน้อยเมื่อเทียบกับหัวฉีดที่มีลำของไหลที่มีระยะใกล้กัน [7-8] การศึกษาทดลองค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบนแผ่นเหล็กร้อนระหว่างลดอุณหภูมิด้วยแรงดันน้ำ อุณหภูมิพื้นผิวมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างการระบายความร้อนด้วยการปะทะด้วยแรงดันน้ำ โดยอุณหภูมิที่ลดลงมีผลเป็นนัยสำคัญต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้น [9] ลักษณะของลำของไหลสัมผัสกับผิวเหล็กร้อนได้อธิบายไว้เป็น 3 ลักษณะ โดยลักษณะแรกเป็นบริเวณพื้นผิวสัมผัสของไหล (Wetted region) จะมีลักษณะพื้นผิวสีดำเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าพื้นที่อื่น ลักษณะที่ 2 บริเวณพื้นผิวสัมผัสของไหลเปลี่ยนสถานะ (Wetting front region) คือพื้นที่การเกิดไอน้ำเดือดขึ้นอย่างรวดเร็ว ลอยตัวออกหรืออยู่ส่วนเป็นการเดือดที่มีจุลภาคและการเดือดที่เปลี่ยนสถานะ (Nucleate และ Transition boiling) ลักษณะจะคล้ายกับวงแหวนสีเทาเมื่ออัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด และลักษณะสุดท้ายคือบริเวณพื้นผิวไม่สัมผัสของไหล (Dry region) เป็นพื้นที่เกิดไอน้ำเดือดกระจายตัวบนผิวเหล็กร้อนดังแสดงใน Figure 2 (ข) [10-12]

หากพิจารณาสถานีลดอุณหภูมิของเหล็กที่ร้อนและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง วิทยานิพนธ์เรื่องนี้มีจุดมุ่งหมายศึกษาหาปัจจัยที่สำคัญต่อผลกระทบการลดอุณหภูมิของแผ่นเหล็กร้อนบนเงื่อนไขน้ำปกคลุมบนผิวแผ่นเหล็กที่ 0, 5 และ 10 มิลลิเมตร กับอัตราการไหลที่ 9, 13 ลิตรต่อวินาที ที่ความสูงของหัวฉีด 300 และ 500 มิลลิเมตร ตามลำดับ นำเสนอเงื่อนไขที่ดีที่สุดเพื่อนำไปใช้เป็นต้นแบบในการปรับปรุงสถานีลดอุณหภูมิของโรงงานผลิตแผ่นเหล็กที่ร้อนได้อย่างคุ้มค่า

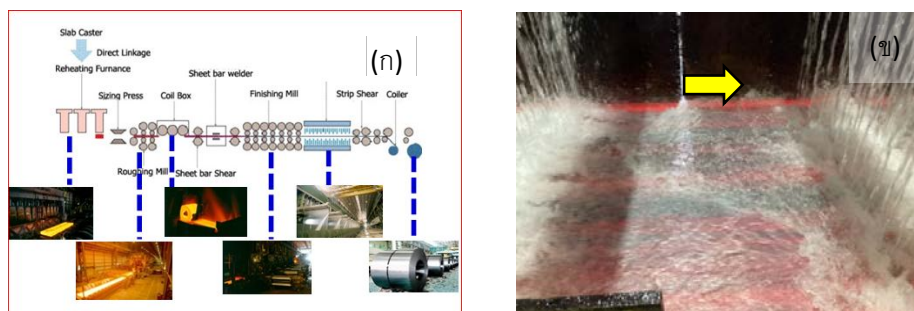


Figure 1 (ก) กระบวนการผลิตเหล็กที่ร้อนชนิดม้วน (ข) สถานีลดอุณหภูมิบนแผ่นเหล็กที่ร้อนที่มีน้ำปกคลุมบนผิว

2. วิธีการศึกษา

2.1 จัดเตรียมอุปกรณ์และวัสดุการทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองได้ออกแบบตามที่แสดงใน Figure 3 (ก) เป็นระบบจ่ายน้ำแบบท่อโค้งขึ้นด้านบนเพื่อให้ น้ำไหลลงเป็นลำของไหลแบบราบเรียบใช้ท่อร่วมขนาด 5 นิ้ว ร่วมกับหัวฉีดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 10 มิลลิเมตร ตามหมายเลข (1) มีถังเก็บน้ำขนาด 180 ลิตรสูงจากพื้น 3 เมตร มีอุปกรณ์เติมน้ำรักษาระดับ หมายเลข (2) น้ำที่อยู่ภายในถังมีการควบคุมอุณหภูมิ 36 ± 1 องศาเซลเซียส ด้วยฮีตเตอร์ขนาด 2.5 กิโลวัตต์พร้อมระบบหมุนเวียนน้ำภายในถังเก็บหมายเลข (3) โดยมีอุปกรณ์ควบคุมฮีตเตอร์หมายเลข (4) และตรวจวัดอุณหภูมิในถังใช้เทอร์โมคัปเปิลหมายเลข (5)

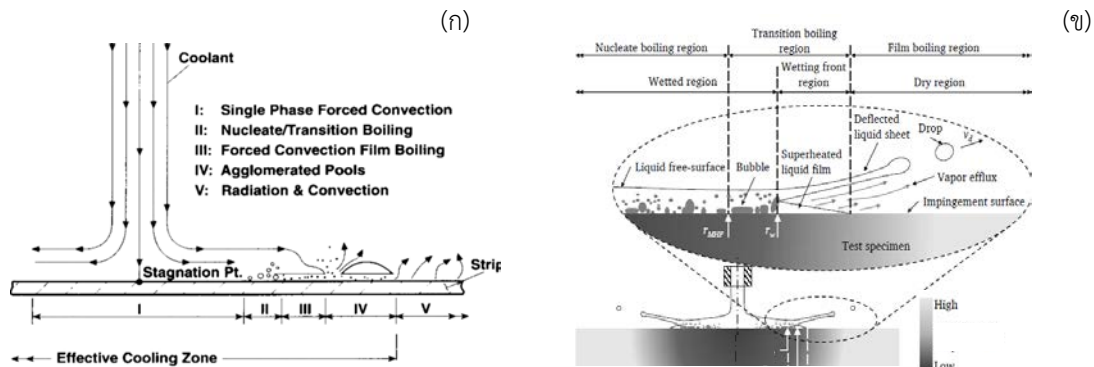


Figure 2 (ก) ลำของไหลปะทะบนแผ่นเหล็กร้อนทั้ง 5 ลักษณะ [1] (ข) ลักษณะบริเวณพื้นผิวสัมผัสของไหล, บริเวณพื้นผิวสัมผัสของไหลเปลี่ยนสถานะ และ บริเวณพื้นผิวไม่สัมผัสของไหล [12]

อัตราการไหลจะอ่านค่าจากมาตรวัดหมายเลข (8) โตะสำหรับวางแผ่นเหล็กร้อนในช่วงการทดสอบโดยด้านล่างจะมีฉนวนความร้อน ASTM C155 เพื่อลดการถ่ายเทความร้อนออกด้านล่างตามหมายเลข (9, 10) ใช้กล้องบันทึกวิดีโอความละเอียด 1920x1080 พิกเซล 60 เฟรมต่อวินาที บันทึกตลอดช่วงเวลาทดลองตามหมายเลข (11) การวัดอุณหภูมิใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K วัสดุ Silicone 0.18/8 นิ้ว Inconel600 มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 3 มิลลิเมตร หมายเลข (12) แสดงใน Figure 4(ก) ใช้ร่วมกับตัวบันทึกข้อมูล GRAPHTEC GL220 ด้วยอัตราบันทึกข้อมูล 100 มิลลิวินาที หมายเลข (13) นำมาวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์หมายเลข (14) แสดงรูปอุปกรณ์ทดลองจริงใน Figure 3 (ข) ชิ้นงานสำหรับการทดลองมีขนาด 150x200x8 มิลลิเมตร เป็นวัสดุสแตนเลสสตีล 304 ทดแทนเหล็กกล้าคาร์บอน เพื่อหลีกเลี่ยงออกซิเดชันกับอากาศที่อุณหภูมิสูงที่จะเป็นอุปสรรคในการปะทะของลำของไหลในการทดสอบ [5-10] ปรับผิวเรียบและเจาะรูด้านล่างขึ้นทดสอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 มิลลิเมตรด้วยเครื่องกัดเอนกประสงค์ ACCUTEC model 2500U ความลึกของรูเจาะให้เหลือความหนาจากผิวด้านบนของขึ้นทดสอบ 1 มิลลิเมตร กำหนดเป็นตำแหน่งแทนอุณหภูมิที่ใกล้เคียงที่ผิวแผ่นเหล็ก ทั้งหมด 5 รู มีระยะห่างไปในแนวรัศมีโดยตำแหน่งที่ 1 นับเป็น R_0 เท่ากับจุดศูนย์กลางของลำของไหลปะทะกับชิ้นงาน ตำแหน่งที่ 2, 3, 4, 5 กำหนดระยะจากจุดศูนย์กลางเป็น $R_1=15$, $R_2=30$, $R_3=50$, $R_4=70$ มิลลิเมตรตามลำดับแสดงใน Figure 4 (ข) ผิวด้านบนขัดให้มีความเรียบผิวเท่ากับ 0.2-0.3 ไมครอน (Ra) ตามมาตรฐาน ISO1997 วัดด้วยเครื่องมือ Mitutoyo SJ-210 ตาม Figure 4 (ค) การให้ความร้อนแผ่นเหล็กจากเตาอบ Nabertherm GmbH model P300 ขนาด 15 กิโลวัตต์ ปรับตั้งอุณหภูมิ 1100 องศา

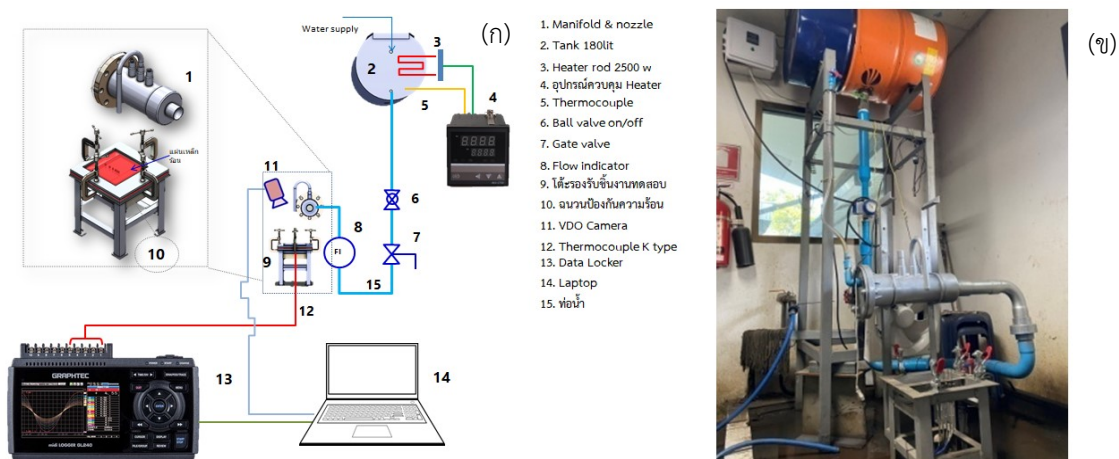


Figure 3 (ก) แผนภาพแสดงอุปกรณ์สำหรับการทดลอง (ข) แสดงของอุปกรณ์ทดลองขนาดจริง

2.2 เงื่อนไขการทดลอง

การทดลองลดอุณหภูมิของแผ่นเหล็กร้อนมีเงื่อนไขหลักโดยอุณหภูมิแผ่นเหล็กที่ 860 ± 15 องศาเซลเซียส อุณหภูมิน้ำสำหรับการทดลอง 36 ± 1 องศาเซลเซียส และตัวแปลที่ปรับเปลี่ยนดังนี้ ความสูงระดับหัวฉีด 300 มิลลิเมตร (H300) และ 500 มิลลิเมตร (H500) อัตราการไหลของน้ำที่ 9 ลิตรต่อนาที (F9) และ 13 ลิตรต่อนาที (F13) คำนวนความเร็วของไหลปะทะแผ่นเหล็กโดยใช้สูตร $V_j = \sqrt{V_n^2 + 2gH}$ [3] น้ำปกคลุมบนผิวแผ่นเหล็กกำหนดเป็น 3 ระดับโดยแผ่นเหล็กเรียบไม่มีขอบกั้นน้ำกำหนดเป็น E0 ชิ้นงานมีขอบความสูงจำลองเป็นความสูงน้ำปกคลุมบนผิว 5 มิลลิเมตร และ 10 มิลลิเมตร กำหนดเป็น E5 และ E10 ตามลำดับ แสดง Table 1 นำไปทดสอบเงื่อนไขลักษณะการไหลก่อนทดลองจริงแสดงภาพลักษณะการไหลเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของตำแหน่งของไหลปะทะ แสดงใน Figure 5

Table 1 ตารางเงื่อนไขการทดลองผลกระทบของการปะทะของไหลบนแผ่นเหล็กที่ร้อน

Sample	Name	Nozzle height (mm)	Flow rate (Lit/min)	Water covered (mm)	V_n (m/s)	V_j (m/s)
1	Sp01 H300 F9 E0	300	9	0	1.91	3.09
2	Sp02 H300 F9 E5	300	9	5	1.91	3.09
3	Sp03 H300 F9 E10	300	9	10	1.91	3.09
4	Sp04 H500 F9 E0	500	9	0	1.91	3.67
5	Sp05 H500 F9 E5	500	9	5	1.91	3.67
6	Sp06 H500 F9 E10	500	9	10	1.91	3.67
7	Sp07 H300 F13 E0	300	13	0	2.76	3.67
8	Sp08 H300 F13 E5	300	13	5	2.76	3.67
9	Sp09 H300 F13 E10	300	13	10	2.76	3.67
10	Sp10 H500 F13 E0	500	13	0	2.76	4.17
11	Sp11 H500 F13 E5	500	13	5	2.76	4.17
12	Sp12 H500 F13 E10	500	13	10	2.76	4.17

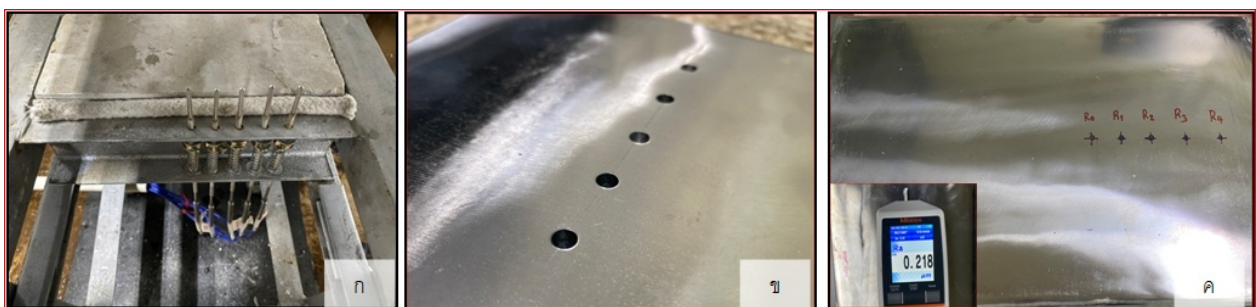


Figure 4 (ก) ตำแหน่งติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ทั้ง 5 ตำแหน่ง (ข) ตำแหน่งการเจาะรูที่ขึ้นทดสอบ (ค) ค่าความเรียบผิวชิ้นงาน

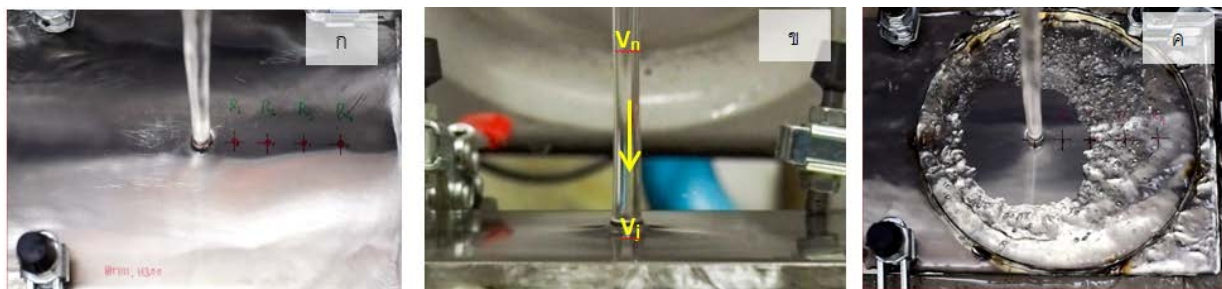


Figure 5 (ก) ทดสอบตำแหน่งของลำของไหลบนแผ่นเหล็กเรียบ (ข) ลักษณะของลำของไหลปะทะกับชิ้นทดสอบ (ค) ทดสอบลำของไหลปะทะบนแผ่นเรียบที่มีน้ำปกคลุม 10 มิลลิเมตร

2.3 ขั้นตอนการทดลอง

ปรับตั้งอุณหภูมิเตาอบที่ 1100 องศาเซลเซียส เมื่อได้อุณหภูมิที่กำหนดนำแผ่นเหล็กสำหรับการทดลองเข้าเตาอบใช้เวลาอบ 30 นาที ต่อมานำแผ่นเหล็กร้อนออกจากเตาอบไปติดตั้งที่อุปกรณ์ทดสอบอ่านค่าอุณหภูมิ ที่ Data Logger Graphtec รุ่น GL220 และ กล้องตรวจวัดความร้อน ให้อยู่ช่วง 860 ± 15 องศาเซลเซียส ตามที่แสดงใน Figure 6 (ก) เปิดวาล์วน้ำให้ลำของไหลตกลงปะทะกับแผ่นเหล็กร้อนที่แสดงใน Figure 6 (ข) เทอร์โมคัปเปิลที่ติดตั้งจะเก็บค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจนถึง 500 องศาเซลเซียส นำค่าอุณหภูมิที่เก็บได้ไปวิเคราะห์ในแต่ละเงื่อนไข

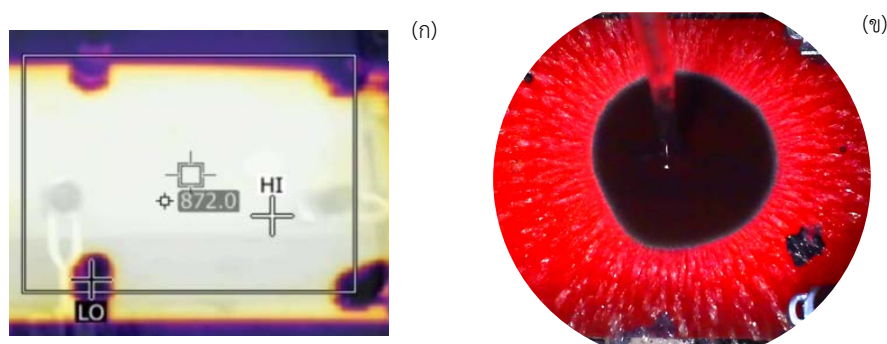


Figure 6 (ก) รูปแสดงอุณหภูมิจากกล้องตรวจวัดความร้อน (ข) แผ่นเหล็กร้อนหลังจากปะทะกับลำของไหล

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

ทำการทดลองครบทั้ง 12 เงื่อนไขตาม Table 1 แล้ว หาค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและวิเคราะห์อัตราการลดอุณหภูมิในสถานะของน้ำปกคลุมบนผิวเหล็กร้อนและอัตราการเปลี่ยนแปลงของบริเวณพื้นผิวสัมผัสของไหล (wetted region) บริเวณพื้นผิวสัมผัสของไหลเปลี่ยนสถานะ (Wetting front region) และบริเวณพื้นผิวไม่สัมผัสของไหล (Dry region) ด้วยการวิเคราะห์จากการบันทึกภาพสังเกตการเกิดไอน้ำเดือดในบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนแปลง

3.1 ผลการลดอุณหภูมิบนแผ่นเหล็กร้อนปะทะลำของไหล

3.1.1 การลดอุณหภูมิในแนวรัศมี

ผลการทดลองของแผ่นเหล็กร้อนในแต่ละตำแหน่งแนวรัศมีในเงื่อนไข Sp01 เมื่อมีลำของไหลปะทะบนแผ่นเหล็กร้อนที่ตำแหน่ง R_0 จากการสังเกตช่วงเวลาเริ่มต้น 0.032 - 0.10 วินาที ของไหลจะปะทะฟิล์มไอน้ำเดือดบนผิวแผ่นเหล็กสังเกตเห็นได้มีลักษณะเป็นจุดสีเทา [2] หลังจากนั้นจะเปลี่ยนทิศทางการไหลเป็นแนวระนาบตามผิวแผ่นเหล็กสังเกตผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตำแหน่ง R_0 จะลดลง และตำแหน่ง R_1 ถึง R_4 ลดอุณหภูมิตามลำดับที่แสดงใน Figure 7 (ก) เช่นเดียวกับการขยายบริเวณพื้นผิวสัมผัสของไหล (wetted region) จุดศูนย์กลางขนาดโตขึ้นในทิศทางการไหลตามระยะเวลาที่เปลี่ยนไป แสดงใน Figure 7 (ข)

ในเงื่อนไข Sp03 มีน้ำปกคลุมผิว 10 มิลลิเมตร เมื่อเวลาผ่านไป 1.0 วินาที การลดอุณหภูมิในตำแหน่งที่ R_2 , R_3 และ R_4 ใช้เวลานานขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการไหลเดียวกันตาม Figure 8 (ก) ในเงื่อนไข Sp12 มีน้ำปกคลุมผิว 10 มิลลิเมตร เพิ่มความสูงของหัวฉีด 500 มิลลิเมตร และอัตราการไหล 13 ลิตรต่อวินาที การลดอุณหภูมิช่วงแรกตำแหน่ง R_0 , R_1 , R_2 , และ R_3 ใกล้เคียงกันกับเงื่อนไข Sp01 และในตำแหน่ง R_4 มีแนวโน้มการลดอุณหภูมียังคงช้ากว่าเมื่อเทียบกับ Sp01 แสดงใน Figure 8 (ข)

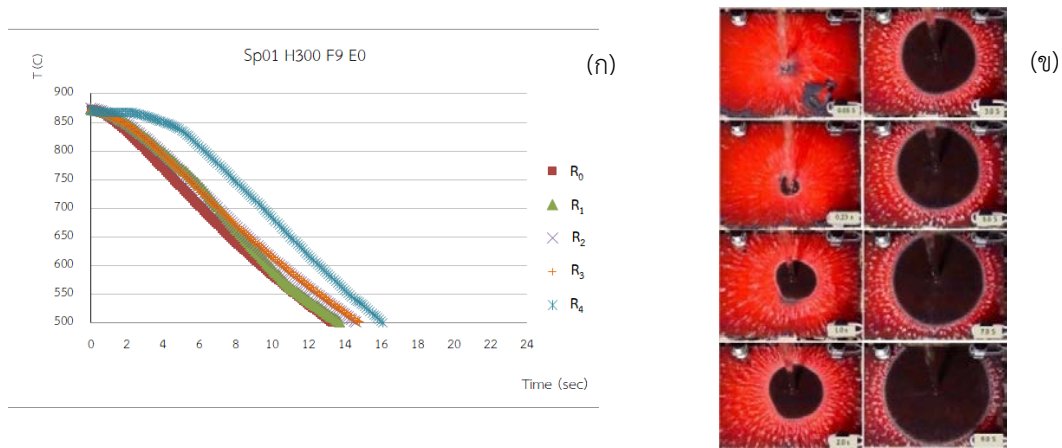


Figure 7 (ก) กราฟแสดงอุณหภูมิในการทดลองเงื่อนไข SP01 H300 F9 E0 (ข) แสดงภาพลำของไหลปะทะชั้นทดลองตามระยะเวลาที่เปลี่ยนแปลง

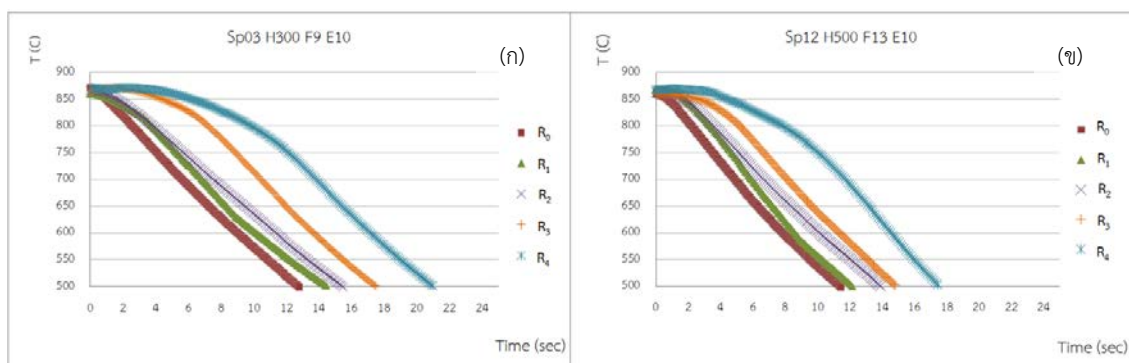


Figure 8 (ก) กราฟแสดงอุณหภูมิในการทดลองเงื่อนไข SP03- H300 F9 E10 (ข) กราฟแสดงอุณหภูมิในการทดลองเงื่อนไข SP12- H500 F13 E10

3.1.2 ผลอัตราการลดอุณหภูมิ

ความสูงระหว่างหัวฉีดกับผิวของแผ่นเหล็กมีระยะมากขึ้นเป็นการเพิ่มพลังงานศักย์ส่งผลให้ความเร็วลำของไหลปะทะเพิ่มขึ้นตามระยะความสูงของหัวฉีดที่เปลี่ยนแปลง มีความสัมพันธ์อย่างเป็นนัยสำคัญต่ออัตราการลดอุณหภูมิ ซึ่งในเงื่อนไขการทดลองที่ไม่มีน้ำปกคลุมบนผิวแผ่นเหล็กרון เงื่อนไขที่ Sp10 จะมีอัตราการลดอุณหภูมิที่ต่ำสุดต่อมาที่เงื่อนไข Sp04, Sp07 และเงื่อนไข Sp01 ตามลำดับ แสดงใน Figure 9 (ก) จากนั้นได้นำข้อมูลในเงื่อนไขความสูงของหัวฉีด 300 มิลลิเมตร และอัตราการไหลเดียวกันที่ 9 ลิตรต่อวินาที แสดงถึงความเร็วของไหลปะทะเท่ากันที่ 3.09 เมตรต่อวินาที นำมาเปรียบเทียบกับเงื่อนไขระดับน้ำปกคลุมบนแผ่นเหล็กרוןที่ 5 และ 10 มิลลิเมตร ส่งผลกระทบกับอัตราการลดอุณหภูมิต่ำลงในเงื่อนไข Sp02 และ Sp03 Figure 9 (ข) การทดลองเพิ่มอัตราการไหลที่ 13 ลิตรต่อวินาที ในความสูงของหัวฉีดเท่าเดิม 300 มิลลิเมตร ความเร็วของไหลปะทะเพิ่ม 3.67 เมตรต่อวินาที ในเงื่อนไขที่มีน้ำปกคลุม 5 และ 10 มิลลิเมตร ยังส่งผลกระทบบ้านอัตราการลดอุณหภูมิล็กน้อยในเงื่อนไข Sp08 และ Sp09 แสดงใน Figure 10 (ก) การทดลองเพิ่มความสูงหัวฉีดเท่ากับ 500 มิลลิเมตร และอัตราการไหล 13 ลิตรต่อวินาที ความเร็วของไหลปะทะเพิ่มเป็น 4.17 เมตรต่อวินาที ที่เงื่อนไข Sp10, Sp11 และ Sp12 น้ำปกคลุมบนผิวแผ่นเหล็กרוןที่ 5 และ 10 มิลลิเมตรส่งผลกระทบน้อยกับทั้ง 3 เงื่อนไขนี้ แสดงใน Figure 10 (ข)

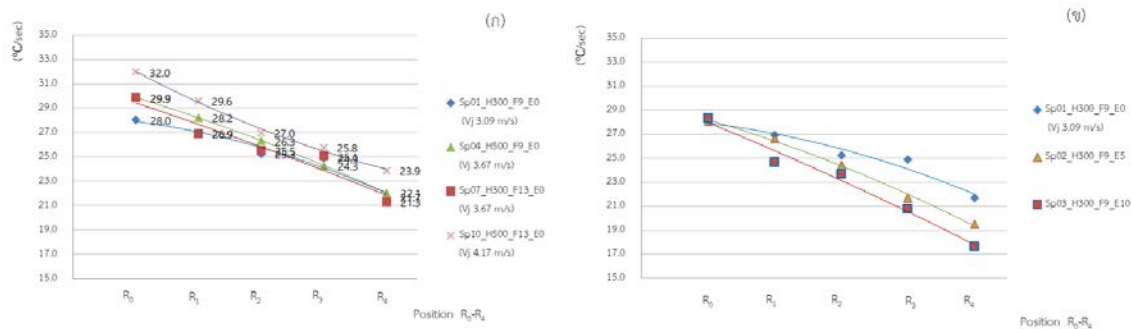


Figure 9 (n) กราฟแสดงอัตราการอุณหภูมิเทียบกับตำแหน่งในแนวนอน R₀-R₄ ของไหลปะทะต่างกันบนแผ่นเหล็กร้อนไม่มีน้ำปกคลุมผิว (ข) แสดงอัตราการอุณหภูมิระดับความสูงหัวฉีด 300 มิลลิเมตร อัตราการไหล 9 ลิตรต่อวินาที

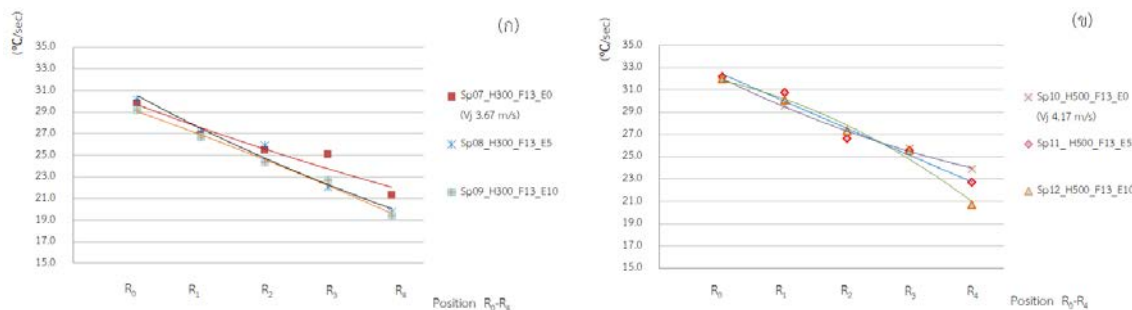


Figure 10 (n) แสดงอัตราการอุณหภูมิระดับความสูงหัวฉีด 300 มิลลิเมตร อัตราการไหล 13 ลิตรต่อวินาที (ข) แสดงอัตราการอุณหภูมิระดับความสูงหัวฉีด 500 มิลลิเมตร อัตราการไหล 13 ลิตรต่อวินาที

3.2 ผลอัตราการเกิดบริเวณพื้นผิวสัมผัสของไหล, บริเวณพื้นผิวสัมผัสของไหลเปลี่ยนสถานะ และบริเวณพื้นผิวไม่สัมผัสของไหล (Wetted region, Wetting front region, Dry region)

ผลการทดลองนี้นำเสนอการตรวจวัดขนาดของบริเวณพื้นผิวสัมผัสของไหล, บริเวณพื้นผิวสัมผัสของไหลเปลี่ยนสถานะ, และบริเวณพื้นผิวไม่สัมผัสของไหล [10-12] ด้วยการบันทึกภาพช่วงการทดลองพิจารณาอัตราขยายขนาดเทียบกับระยะเวลา เริ่มต้นจากของไหลปะทะสัมผัสผิวแผ่นเหล็กร้อนจนถึงตำแหน่งแนวนอน R₄ โดยผลการทดลองเงื่อนไข Sp01, Sp04, Sp07 และ Sp10 จะใช้เวลาการขยายขนาดไม่เกิน 10 วินาที กลุ่มที่ 2 เงื่อนไขที่ Sp05, Sp08 Sp11 และ Sp12 ใช้เวลาช่วง 10-13 วินาที และกลุ่มสุดท้ายเงื่อนไข Sp02, Sp03, Sp06 และ Sp09 ใช้เวลามากกว่า 14 วินาที แสดงใน Figure 11 (ก) การบันทึกภาพแสดงผลอัตราการเกิดบริเวณพื้นผิวสัมผัสของไหล และบริเวณพื้นผิวสัมผัสของไหลเปลี่ยนสถานะ จะผกผันกับบริเวณพื้นผิวไม่สัมผัสของไหลที่เล็กลงตามระยะเวลาที่เปลี่ยน ทั้งนี้ถ้าบริเวณพื้นผิวไม่สัมผัสของไหลเกิดขึ้นยาวนานจะแสดงว่าอัตราการเกิดไอน้ำเดือดบนผิวแผ่นเหล็กร้อนเกิดขึ้นยาวนานเช่นเดียวกัน ตามที่แสดงตัวอย่างใน Figure 11 (ข) และข้อมูลสรุปความสัมพันธ์ความเร็วลำของไหล อัตราการลดอุณหภูมิ และอัตราการเกิดบริเวณพื้นผิวสัมผัสของไหลเปลี่ยนสถานะจากการทดลองทั้ง 12 เงื่อนไข แสดงใน Figure 12

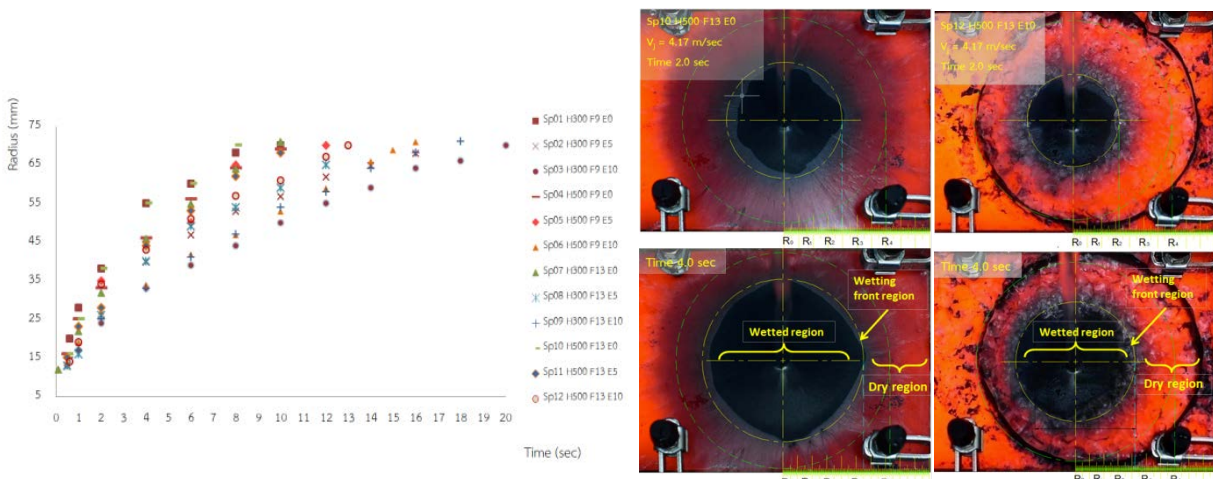


Figure 11 (ก) กราฟแสดงบริเวณพื้นผิวสัมผัสของไหลเปลี่ยนสถานะ (wetting front region) เทียบกับระยะเวลา (ข) แสดงลักษณะการเกิดบริเวณพื้นผิวของไหลทั้ง 3 ในเงื่อนไขต่างกันช่วงเวลาที่ 2 วินาทีและ 4 วินาที

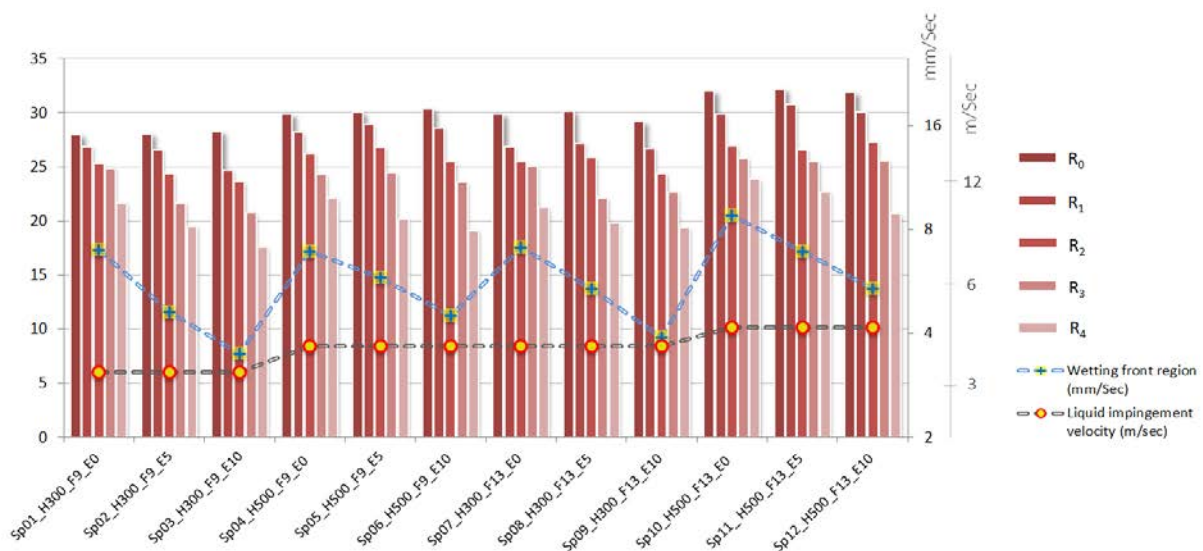


Figure 12 ความสัมพันธ์ของความเร็วลำของไหลกับอัตราการลดอุณหภูมิและอัตราการเกิด wetting front region แผ่นเหล็กร้อน

4. สรุป

ปัจจัยที่มีผลอย่างเป็นนัยสำคัญต่อการลดอุณหภูมิแผ่นเหล็กร้อนคือการขัดขวางลำของไหลเกิดจากน้ำที่ปกคลุมและฟิล์มไอน้ำเดือดที่พื้นผิวแผ่นเหล็กร้อนในบริเวณพื้นผิวสัมผัสของไหล สรุปได้ 3 ส่วนดังนี้

- ในความเร็วปะทะจากลำของไหลที่ 4.17 เมตรต่อวินาที สามารถทะลุผ่านชั้นน้ำที่ปกคลุมและชั้นฟิล์มไอน้ำเดือดบนผิวแนวระนาบได้ดีจากค่าอัตราการลดอุณหภูมิที่สูง

- ในความเร็วปะทะจากลำของไหลเดียวกันที่ 3.67 เมตรต่อวินาที ที่เงื่อนไขระดับความสูงหัวฉีด 500 มิลลิเมตร อัตราการไหล 9 ลิตรต่อวินาที มีแนวโน้มอัตราการลดอุณหภูมิต่ำกว่า 3% เทียบกับเงื่อนไขที่มีความเร็วปะทะเท่ากันที่อัตราการไหล 13 ลิตรต่อวินาที ซึ่งการที่เพิ่มอัตราการไหลจะเสมือนการเพิ่มปริมาณน้ำที่ปกคลุมทำให้เกิดฟิล์มไอน้ำเดือดที่พื้นผิวส่งผลให้อัตราการลดอุณหภูมิได้น้อยลง และถ้านำมาคิดในด้านความคุ้มค่าการใช้อัตราการไหลที่มากขึ้นจะมีความสิ้นเปลืองด้านต่างๆที่มากขึ้นเช่นกัน

- ในความเร็วปะทะจากลำของไหล 3.09 เมตรต่อวินาที เป็นเงื่อนไขที่ไม่เหมาะสมในปัจจัยของน้ำปกคลุมและฟิล์มไอน้ำเดือดที่เกิดบนผิวแผ่นเหล็กร้อน ส่งผลต่อการขัดขวางอัตราการลดอุณหภูมิอย่างชัดเจน

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัทสหวิริยาสีลอินดัสตรี จำกัด (มหาชน) จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์สนับสนุนอุปกรณ์การดำเนินงาน สถานที่ห้องปฏิบัติการรอบขอบทางความร้อนและ คุณชัยชาญ ดึงกระโทก วิศวกรเชี่ยวชาญอาวุโส เจ้าหน้าที่ดูแลห้องปฏิบัติการในการจัดทำงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ปัญญา แดงวิไลลักษณ์ ที่ให้ความช่วยเหลือ สนับสนุนให้คำชี้แนะแก้ไขปัญหาจนในที่สุดทำงานวิจัยนี้ได้สำเร็จ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Leocadio, H. (2018). Interfaces and heat transfer in jet impingement on a high temperature surface. Eindhoven University of Technology Library ISBN: 978-90-386-4656-5
- [2] H. Leocadio,1 C. W. M. van der Geld,2 and J. C. Passos3 2018. Rewetting and boiling in jet impingement on high temperature steel surface *R & D Center, Usiminas Steel, Ipatinga, Brazil AIP Publishing*. PHYSICS OF FLUIDS 30, 122102 (2018)
- [3] Hormando Leocadio 2020 Experimental Investigation of the Water Jet Cooling of a Hot Steel Plate. Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST) ISSN: 2458-9403 Vol. 7
- [4] Ishita Sarkara, Samarshi Chakrabortya, Avinash Ashoka, Iman Senguptaa, Surjya K. Palb, Sudipto Chakrabortya 2018. Comparative study on different additives with a jet array on cooling of a hot steel surface. Applied Thermal Engineering 137 (2018) 154–163
- [5] Hormando Leocadio., Júlio César Passos 2021 Experimental investigation of heat transfer characteristics during water jet impingement cooling of a high-temperature steel surface Federal University of Santa Catarina, Florianopolis, Brazil.
- [6] Amir Hossein Nobari , Vladan Prodanovic, Matthias Militzer 2016 Heat transfer of a stationary steel plate during water jet impingement cooling International Journal of Heat and Mass Transfer 101 (2016) 1138–1150
- [7] Sang Gun Lee, Massoud Kaviani, Jungho Lee 2018. Quench subcooled-jet impingement boiling: Two interacting-jet enhancement International Journal of Heat and Mass Transfer 126 (2018) 1302–1314
- [8] Sang Gun Lee, Massoud Kaviani, Jungho Lee, 2019. Quench subcooled-jet impingement boiling: Staggered-array jets enhancement. International Journal of Heat and Mass Transfer 136 (2019) 888–898
- [9] Hemu Wang, Wei Yu, Qingwu Cai 2012. Experimental study of heat transfer coefficient on hot steel plate during water jet impingement cooling. Journal of Materials Processing Technology 212 (2012) 1825– 1831
- [10] Sang Gun Lee a, Massoud Kaviani b, Charn-Jung Kim a, Jungho Lee 2017 Quasi-steady front in quench subcooled-jet impingement boiling: Experiment and analysis International Journal of Heat and Mass Transfer 113 (2017) 622–634
- [11] YUNUS A. CENGEL. And AFSHIN J. GHAJAR 2015 HEAT AND MASS TRANSFER: FUNDAMENTALS & APPLICATIONS, FIFTH EDITION McGraw-Hill
- [12] Prof. Dr.-Ing. Peter Stephan, Prof. Dr.-Ing. Cameron Tropea, Prof. Dr.-Ing. Karl-Hermann Tacke 2012 Experimental Study of Water Jet Impingement Cooling of Hot Steel Plates. Technical University of Darmstadt

ระบบการแจ้งเตือนการใช้งานและทำนายรายจ่ายสำหรับค่าน้ำและค่าไฟฟ้าในหนึ่งครอบครัว User Alert System and Expense Forecasting system for Household Water and Electricity Consumption

ธีรพันธุ์ กุลนันทกาญจน¹ ธนวิญญ์ อนวงศ์พิณิจ² และ บุญยชนะ ภูระหงษ์^{2,*}
Teeraphat Kullanankanjana¹, Thanavit Anuwongpinit², Boonchana Purahong^{2,*}

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จังหวัดกรุงเทพมหานคร

²ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จังหวัดกรุงเทพมหานคร

¹Department of Electrical and Computer Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand.

²Department of Computer Engineering, School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand.

*Corresponding author: Boonchana Purahong, e-mail address: boonchana.pu@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

ทรัพยากรน้ำและไฟฟ้านั้นเป็นสิ่งที่จำเป็นต้องการดำรงชีวิตของมนุษย์ ทั้งใช้ในการอุปโภคบริโภคภายในครัวเรือนจนถึงระดับการใช้งานในอุตสาหกรรมเพื่อใช้ขับเคลื่อนเศรษฐกิจของประเทศ การใช้งานทรัพยากรน้ำและไฟฟ้าให้เกิดประโยชน์สูงสุดจึงเป็นเรื่องสำคัญอย่างยิ่ง หากเกิดพฤติกรรมการใช้งานที่ผิดปกติ อาจทำให้เกิดการสูญเสียทั้งทรัพยากรและค่าใช้จ่ายที่ตามมาได้ ซึ่งในปัจจุบันแม้ว่าจะมีการรายงานผลค่าไฟฟ้าและค่าน้ำผ่านแอปพลิเคชันต่างๆแล้ว แต่ก็ยังไม่สามารถยับยั้งการเกิดได้อย่างทันทั่วทั้งที่ หรือหากทราบว่าค่าน้ำและค่าไฟฟ้ามีความผิดปกติจริง แต่ก็มีอาจทราบได้ว่าเกิดจากอุปกรณ์ใดในครัวเรือน ทำให้ต้องมีการตรวจสอบอย่างละเอียดซึ่งอาจจะใช้เวลาเพิ่มขึ้น

เพื่อเฝ้าระวัง ตรวจสอบ และลดการเกิดเหตุการณ์ผิดปกติที่นำไปสู่การสูญเสียของทรัพยากรไฟฟ้าและน้ำที่เกิดขึ้นจากพฤติกรรมที่ใช้งานผิดปกติจากทั้งการใช้งานและการชำรุดของอุปกรณ์ บทความนี้จะนำเสนอการออกแบบระบบซึ่งมีความสามารถในการวัดปริมาณการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าและประปาผ่านเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายซึ่งมีการควบคุมและติดต่อสื่อสารกับแพลตฟอร์ม IoT ที่สามารถควบคุมการทำงานและเข้าถึงข้อมูลของแต่ละอุปกรณ์ที่วัดได้ และนำข้อมูลที่วัดได้มาคำนวณหาค่าไฟฟ้าและน้ำในแต่ละเดือนและใช้สำหรับการตรวจสอบความผิดปกติที่อาจเกิดขึ้นทั้งจากการใช้งานของผู้ใช้งานหรือเกิดขึ้นจากการชำรุดของอุปกรณ์ที่ใช้งานได้ โดยความแม่นยำเฉลี่ยในการทำนายค่าน้ำนั้นอยู่ที่ 98% ในขณะที่ความแม่นยำเฉลี่ยในการทำนายค่าไฟนั้นอยู่ที่ 97% และมีความแม่นยำในการตรวจจับความผิดปกติต่างๆอยู่ที่ 94% สำหรับอุปกรณ์ประปาและ 91% สำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้า ซึ่งจากระบบที่ได้นำเสนอไปนั้นจะช่วยทำให้ผู้ใช้สามารถติดตามการใช้งานของแต่ละอุปกรณ์ได้อย่างละเอียดมากขึ้นสามารถวางแผนค่าใช้จ่ายในแต่ละเดือนได้ล่วงหน้า สามารถเฝ้าระวังหรือสามารถยับยั้งการเกิดความผิดปกติต่างๆ อันจะทำให้เกิดการสิ้นเปลืองทรัพยากรน้ำ ไฟฟ้าและช่วยลดค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการสูญเสียโดยไม่จำเป็นได้อย่างทันทั่วทั้งที่

คำสำคัญ: ระบบติดตามและแจ้งเตือน, การคาดการณ์ค่าชำระ, การตรวจหาความผิดปกติ, IoT, Raspberry Pi

Abstract

Water and electricity are essential resources for human survival, from household consumption to industrial applications that drive a nation's economy. Efficient utilization of these resources is paramount. Irregular usage patterns can lead to resource loss and increased expenses. While current applications provide water and electricity usage reports through mobile apps, they lack real-time monitoring and device-level identification of anomalies. This paper presents a system that measures water and electricity consumption using a wireless sensor network, communicates with an IoT platform, and analyzes data to detect abnormal usage patterns. The system achieves an average prediction accuracy of 98% for water consumption, 97% for electricity consumption, and 94% and 91% for anomaly detection in water and electrical appliances, respectively. The proposed system enables users to monitor individual device usage, plan monthly expenses, detect anomalies, and prevent resource waste and unnecessary costs.

Keywords: monitoring system, prediction, abnormally detection, IoT, Raspberry Pi

1. บทนำ

การดำรงชีวิตอยู่ของมนุษย์ชาติในยุคปัจจุบันนั้นล้วนแล้วแต่จำเป็นต้องพึ่งพาทั้งการใช้งานการประปาและการไฟฟ้าเพื่อดำเนินชีวิตและกิจวัตรประจำวันทั้งสิ้นและในทุกปีค่าบริการประปาและไฟฟ้านั้นมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นอันเนื่องมาจากต้นทุนการผลิตที่เพิ่มสูงขึ้น การใช้น้ำและไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่งในปัจจุบัน อย่างไรก็ตามในปัจจุบันนั้นมีการนำเสนอการออกแบบระบบในการเฝ้าติดตามการใช้งานทั้งในส่วนของผู้บริโภคประปาและอุปกรณ์ไฟฟ้าออกมามากมาย ยกตัวอย่างเช่น บทความที่ [1] และ [2] ที่นำเสนอถึงระบบในการวัดค่าพลังงานและทำนายค่าไฟฟ้าโดยบทความที่ [1] นำเสนอการวัดและทำนายค่าไฟฟ้าจากการต่อเซนเซอร์เข้ากับเบรกเกอร์เซอร์กิตหลักของที่พักอาศัย และทำการส่งค่าที่อ่านได้ผ่านโปรโตคอล REST API ไปยังคอมพิวเตอร์ซึ่งทำหน้าที่แสดงผล เก็บข้อมูล และแจ้งเตือนการผลการทำนายค่าไฟ ในขณะที่บทความที่ [2] และ [3] นำเสนอการวัดและทำนายค่าไฟฟ้าจากการต่อเซนเซอร์ PZEM-004T เข้ากับอุปกรณ์ที่ทำการวัดทำการส่งค่าที่อ่านได้ผ่านการสื่อสารแบบอนุกรมซึ่งทำการต่อระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino UNO กับบอร์ดคอมพิวเตอร์เดี่ยว Raspberry Pi4 ซึ่งทำหน้าที่เป็นส่วนแสดงค่าและประมวลผลการทำนายค่าไฟ บทความที่ [4] แสดงถึงการออกแบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย สำหรับใช้ในการเก็บค่าที่วัดได้จากเซนเซอร์แล้วทำการส่งข้อมูลไปยังส่วนประมวลผล โดยแบ่งเซนเซอร์ที่ทำการวัดเป็นส่วน ส่วนบทความที่ [6] นั้นจะนำเสนอในส่วนของการวัดปริมาณการใช้น้ำด้วยเซนเซอร์วัดการไหลของน้ำซึ่งใช้ร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ ATMEGA328 ในการอ่านค่าและใช้โมดูลการเชื่อมต่อสัญญาณWi-Fi ในการส่งข้อมูลที่วัดได้ไปยัง อินเทอร์เน็ต ผ่าน Wi-Fi เกตเวย์ และประมวลผลหาค่าน้ำและตรวจสอบความผิดปกติผ่านการประมวลผลบนคลาวด์

จากบทความที่ได้อ้างอิงไปนั้นพบว่าแต่ละบทความต่างเสนอวิธีการเก็บข้อมูลจากอุปกรณ์ที่ต้องการวัด ทำนายค่าชำระบางบทความนั้นไม่ได้รวมถึงการตรวจสอบหาความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบเดียวกัน และในทุกบทความที่นำมาอ้างอิงนั้นจะนำเสนอการวัดค่าไฟฟ้าหรือค่าน้ำอย่างใดอย่างหนึ่งเท่านั้น บทความนี้จึงนำเสนอระบบที่สามารถวัดปริมาณการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าและน้ำได้ในระบบเดียว สามารถนำข้อมูลที่วัดได้มาทำนายหาค่าชำระและแจ้งเตือนพฤติกรรมการใช้งานที่ผิดปกติได้ ใน 1 ระบบ

2. การออกแบบระบบ

ในการที่จะสามารถทำนายและตรวจจับความผิดปกติของการใช้งานได้ จะต้องมีอุปกรณ์สำหรับการวัดค่าปริมาณการใช้งานทั้งน้ำและไฟฟ้า โดยจะต้องสามารถเก็บค่าที่ผ่านการวัดปริมาณการใช้งานของแต่ละอุปกรณ์ไว้และสามารถควบคุมอุปกรณ์นั้นผ่านอินเทอร์เน็ต ข้อมูลที่เก็บไว้จะถูกนำมาใช้ประมวลผลเพื่อใช้ในการทำนายและวิเคราะห์ความผิดปกติที่เกิดขึ้น โดยในรูปที่ 1 แสดงถึงโครงสร้างการออกแบบระบบ ซึ่งแสดงถึงภาพรวมการออกแบบโครงสร้างของระบบเป็นส่วนต่างๆ ซึ่งจะมีการแบ่งออกเป็น 4 ส่วนหลัก ได้แก่ เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย แพลตฟอร์ม IoT แพลตฟอร์มระบบหลัก บริการการแจ้งเตือน

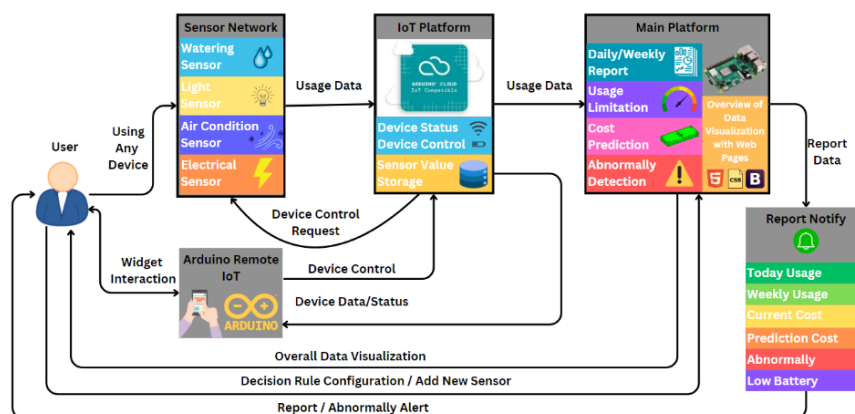


Fig. 1 Overall System Design

2.1 เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย

เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายนั้นทำหน้าที่ในการวัดปริมาณการใช้งานโดยจะแบ่งการวัดออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่ น้ำ ไฟฟ้า เครื่องปรับอากาศ และแสงสว่าง โดยในรูปที่ 2 จะแสดงถึงการอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย ซึ่งจะใช้บอร์ด ESP32 Development Kit v1 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์หลักในการประมวลผลการอ่านค่าของเซนเซอร์แต่ละตัว และทำหน้าที่ติดต่อสื่อสารกับแพลตฟอร์ม IoT อย่าง Arduino Cloud IoT เพื่อสามารถควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ที่บอร์ดทำการเชื่อมต่ออยู่ผ่านแพลตฟอร์มทั้งบนหน้าเว็บและแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์ได้ โดยเซนเซอร์ที่นำมาใช้ในการวัดการใช้งานน้ำนั้นคือเซนเซอร์วัดการไหลของน้ำ เซนเซอร์ที่นำมาใช้วัดการใช้งานไฟฟ้าคือเซนเซอร์ PZEM-004T สำหรับเซนเซอร์วัดแสงสว่างนั้นจะใช้โมดูลตัวต้านทานปรับค่าตามแสงสว่างเพื่อทำการวัดระดับความต้านทานซึ่งเปลี่ยนไปตามความสว่างของอุปกรณ์ที่ทำการวัด และในการวัดปริมาณการใช้งานเครื่องปรับอากาศนั้นจะมีการใช้งานโมดูลรับ-ส่งสัญญาณอินฟราเรด เพื่อทำการควบคุมการเปิด-ปิด และทำการจับเวลาการใช้งาน นอกจากนี้เพื่อป้องกันปัญหาที่เกิดจากการขาดการเชื่อมต่อของเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ในแต่ละอุปกรณ์ที่ทำการวัดนั้นจะมีการเก็บข้อมูลใน SD Card

2.2 Arduino Cloud IoT

แพลตฟอร์ม IoT คือซอฟต์แวร์ซึ่งออกแบบมาเพื่อให้อุปกรณ์ IoT ต่างๆสามารถเชื่อมต่อเข้ามาส่งข้อมูล การจัดเก็บข้อมูล เพื่อนำไปใช้ประมวลผล จัดการอุปกรณ์ต่างๆ โดยแพลตฟอร์ม Arduino Cloud IoT มีความนิยมอย่างมากในการนำมาใช้งานกับไมโครคอนโทรลเลอร์ เนื่องจากใช้งานได้ง่าย มีความเสถียร มีการจัดเก็บข้อมูลที่สามารถเก็บได้นานและมีแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือที่ทำให้สามารถดูข้อมูลในแต่ละอุปกรณ์ได้ตลอดเวลา โดยในบทความฉบับนี้จะใช้ Arduino Cloud IoT ในการทำหน้าที่เป็นแพลตฟอร์ม IoT ซึ่งจะใช้ในการเป็นฐานข้อมูลสำหรับจัดเก็บค่าที่วัดได้จากอุปกรณ์วัดปริมาณการใช้งานค่าไฟฟ้าและประปาต่างๆ และฐานข้อมูลนี้ก็จะถูกดึงข้อมูลไปยังแพลตฟอร์มระบบหลัก นอกจากนี้ยังใช้สำหรับการจัดการอุปกรณ์ที่เข้ามาทำการติดต่อสื่อสาร ตรวจสอบสถานะการเชื่อมต่อ และอัปเดตเฟิร์มแวร์ในระยะไกลได้อีกด้วย โดยในรูปที่ 2 แสดงถึงการใช้งาน Arduino Cloud IoT ในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายแต่ละตัว

2.3 โพรโตคอลการส่งข้อมูลเอ็มคิวทีที

ในการส่งข้อมูลจากเซนเซอร์ในแต่ละอุปกรณ์ไปยัง Arduino Cloud IoT จะใช้โปรโตคอลในการส่งข้อมูลแบบ MQTT ซึ่งย่อมาจาก Message Queue Telemetry Transport เป็นโปรโตคอลสำหรับเชื่อมต่อและส่งข้อมูลระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ไปยังอีกเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีน้ำหนักในการส่งที่เบา ใช้ปริมาณของแบนด์วิธที่ต่ำ ทำงานง่าย เหมาะสำหรับการใช้งานกับอุปกรณ์ที่มีพลังงานที่ต่ำอย่างไมโครคอนโทรลเลอร์ โดย MQTT ใช้สถาปัตยกรรมแบบ เผยแพร่ข้อมูล(Publish)และรับสมัครข้อมูล(Subscribe) โดยอุปกรณ์ที่จะทำการส่งข้อมูลนั้นจะถูกเรียกว่าผู้เผยแพร่(Publisher) ซึ่งจะทำหน้าที่ในการส่งข้อมูลไปยังเซิร์ฟเวอร์ผู้ให้บริการ MQTT หรือที่เรียกกันว่า Broker โดยข้อมูลที่ส่งไปจะต้องทำการระบุหัวข้อ (Topic) เพื่อให้ผู้รับสมัครข้อมูล(Subscriber) ซึ่งทำการรับสมัครข้อมูลอยู่ในหัวข้อเดียวกัน ได้รับข้อมูลที่เหมือนกัน ในรูปที่ 2 แสดงถึงเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายที่ใช้การส่งข้อมูล MQTT ไปยัง Arduino Cloud

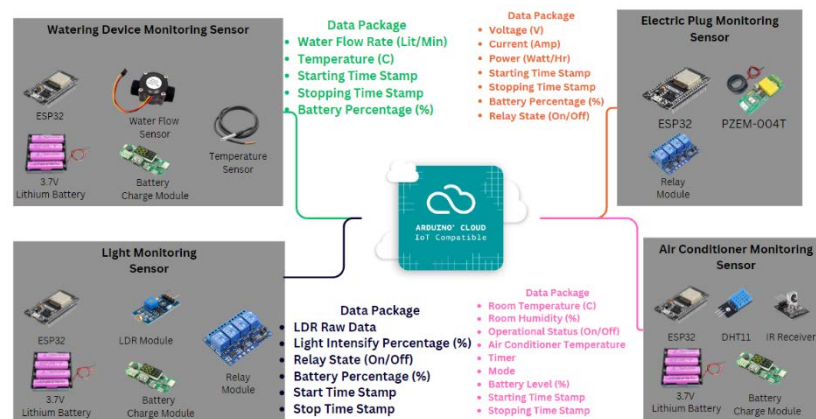
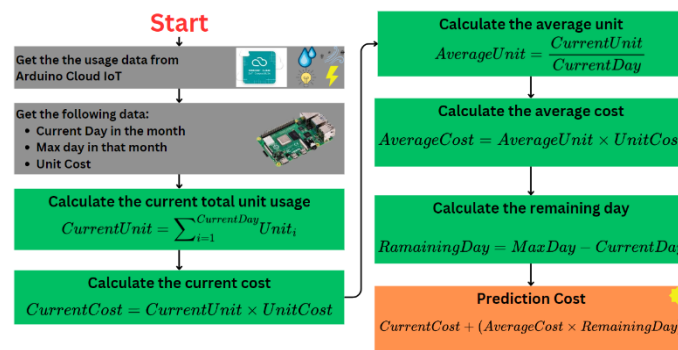


Fig. 2 Wireless Sensor Network

2.4 แพลตฟอร์มระบบหลัก

เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ในการนำข้อมูลที่จัดเก็บไว้บน Arduino Cloud IoT มาประมวลผลเพื่อใช้ในการคำนวณค่าหน่วยที่ใช้ งาน ทำนาค่าใช้จ่ายและตรวจจับความผิดปกติ นอกจากนี้ยังทำหน้าที่ในการกำหนดค่าต่างๆ เช่น กำหนดเพดานค่าใช้จ่ายในแต่ละเดือน กำหนดช่วงเวลาการใช้งานของแต่ละอุปกรณ์และการพักอาศัย กำหนดวันชำระค่าน้ำและค่าไฟฟ้า กำหนดอัตราค่าชำระ ซึ่งจะทำงานอยู่บนบอร์ด Raspberry Pi 4 คอมพิวเตอร์ขนาดเล็กกระทัดรัด สามารถประมวลผลกราฟิกและข้อมูลต่างๆ ได้ดี โดยในรูปที่ 3 และ 4 แสดงถึงวิธีการทำนาค่าน้ำและค่าไฟฟ้า โดยในการทำนาค่าน้ำและค่าไฟฟ้านั้นจะมีรายละเอียดที่แตกต่างกันคือ ค่าน้ำนั้นสามารถทำนาค่าน้ำได้เลย จากการนำค่าน้ำที่คำนวณจากหน่วยสะสมจากวันแรกถึงปัจจุบันมารวมกับผลคูณระหว่างค่าน้ำเฉลี่ยซึ่งเฉลี่ยมาจากผลรวมของหน่วยน้ำสะสมตั้งแต่วันแรกจนถึงปัจจุบัน กับจำนวนวันที่เหลือในเดือนนั้น แต่ในการทำนาค่าไฟฟ้านั้นจะต้องทำนาค่าหน่วยที่ใช้ งานแล้วค่อยทำนาค่าชำระแยกเป็นอีกหนึ่งขั้นตอนนั่นเอง เนื่องจากการคิดค่าชำระของไฟฟ้านั้น



จะมีการคิดในส่วนของค่าไฟฟ้าฐาน ค่าบริการ และค่าภาษีมูลค่าเพิ่มแยกขึ้นมา

Fig. 3 Water Cost Prediction Flowchart

Fig. 4 Electrical Cost Prediction Flowchart

2.5 ส่วนของตรวจสอบความผิดปกติ

ในส่วนนี้ทำงานอยู่บนแพลตฟอร์มระบบหลัก ทำหน้าที่ในการตรวจสอบความผิดปกติของการใช้งานอุปกรณ์หรือความผิดปกติของอุปกรณ์ที่ทำการวัดทั้งอุปกรณ์วัดน้ำและไฟฟ้า โดยใช้เกณฑ์การประมวลผลล่วงหน้าซึ่งเป็นตัวกำหนดกฎการจำแนกความผิดปกติออกเป็นชนิดต่างๆ ในส่วนนี้จะทำงานทุกครั้งที่ได้รับข้อมูลจากแพลตฟอร์ม IoT อย่าง Arduino Cloud IoT โดยในรูปที่ 5 แสดงถึงขั้นตอนต่างๆเมื่อตรวจพบความผิดปกติที่เกิดขึ้น โดยจะมีการแจ้งเตือนไปยังผู้ใช้งาน และให้ผู้ใช้งานยืนยันการเกิดความผิดปกติ เพื่อลดการเกิดการแจ้งเตือนที่ผิดพลาด (False Alarm)

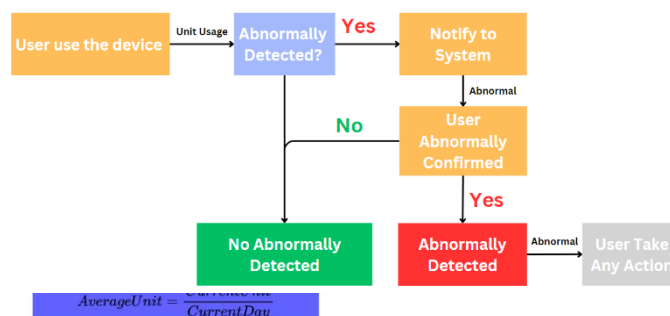


Fig 5 Anomalies Detection Process

2.6 บริการการแจ้งเตือนผู้ใช้งาน LINE Notify

LINE Notify คือบริการแจ้งเตือนจากแอป LINE ช่วยให้สามารถรับการแจ้งเตือนและอัปเดตจากเว็บไซต์ต่างๆ ผ่านแชท LINE ได้โดยตรง โดยเชื่อมต่อกับเว็บไซต์หรืออุปกรณ์ต่าง และเมื่อมีการแจ้งเตือนก็จะส่งข้อความผ่านบัญชี LINE ทำให้สามารถเห็นการแจ้งเตือนได้ทันที เหมาะสำหรับการติดตามข้อมูลจากหลายแหล่ง เช่น แจ้งเตือนจากเครื่องมือจัดการงาน แจ้งเตือนจากโซเชียลมีเดีย หรือแจ้งเตือนจากอุปกรณ์ IoT ในรูปที่ 6 แสดงการแจ้งเตือนข้อมูลสรุปรายวันผ่าน LINE Notify

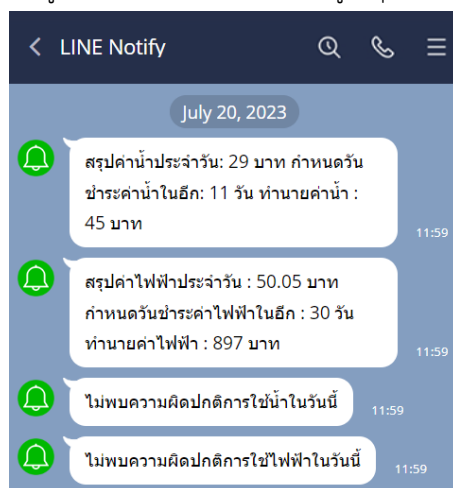


Fig. 6 Daily Report with LINE Notify

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 การเก็บข้อมูลจากเซนเซอร์

ในการทดสอบการให้ส่งข้อมูลระหว่างเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายไปยังแพลตฟอร์ม Arduino Cloud IoT โดยตั้งค่าให้มีการส่งข้อมูลในทุกๆ 1 นาที โดยมีระยะเวลาการทดสอบตั้งแต่ เวลา 00:00:00 น. ของวันที่ 1 กรกฎาคม ถึง เวลา 23:59:59 ของวันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2567 รวมทั้งสิ้น 184 วัน หากระบบมีการทำงานอย่างสมบูรณ์นั้นควรจะต้องมีข้อมูลที่ถูกส่งไปยัง Arduino Cloud IoT ทั้งสิ้น 265,920 รายการ หลังการทดสอบแพลตฟอร์ม Arduino Cloud IoT นั้นมีการเก็บข้อมูลการขาดการเชื่อมต่อระหว่างแพลตฟอร์มกับอุปกรณ์เป็นจำนวนทั้งสิ้น 13,296 รายการ ทำให้ข้อมูลที่มีอยู่ 95% หรือมีข้อมูลสูญหายคิดเป็น 5% โดยในตารางที่ 1 จะแสดงถึงจำนวนข้อมูลที่ขาดการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ในเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย

Table 1 Amount of Wireless Sensor Network Disconnection Data from Arduino Cloud IoT

Device	Amount of loss data
Watering Device Monitoring Sensor	5,983
Electric Plug Monitoring Sensor	665
Light Monitoring Sensor	3,324
Air Conditioner	3,324
Total	13,296

หากดูผลจากตารางที่ 1 จะพบว่าอุปกรณ์ที่มีอัตราการสูญเสียข้อมูลสูงที่สุดคืออุปกรณ์วัดปริมาณการใช้น้ำ หลังการตรวจสอบหาสาเหตุแล้วพบว่าสาเหตุการขาดการติดต่อกับแพลตฟอร์ม Arduino Cloud IoT นั้นมาจากกระดับของแบตเตอรี่ที่ลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากการกินพลังงานของอุปกรณ์วัดทำให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ขาดพลังงานในการส่งข้อมูลที่ติดต่อกับแพลตฟอร์ม Arduino Cloud IoT แต่ยังสามารถอ่านค่าเซนเซอร์และบันทึกลงในหน่วยความจำได้ตามปกติ ส่วนอุปกรณ์ที่มีอัตราสูญเสียข้อมูลน้อยที่สุดคืออุปกรณ์ที่วัดปริมาณใช้งานไฟฟ้าในเต้าเสียบ เนื่องจากไม่ได้ใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายพลังงาน

3.2 ความแม่นยำในการทำนายค่าน้ำ

ในการทดสอบการทำนายค่าน้ำนั้นจะเป็นกระบวนการที่เริ่มในเวลา 23:59 ของทุกวัน โดยขั้นตอนจะเป็นไปตามรูปที่ 3 ซึ่งเป็นนำค่าชำระสะสมจากวันแรกจนถึงปัจจุบันมารวมกับ ค่าชำระเฉลี่ยจากหน่วยที่ใช้สะสมจนถึงวันสุดท้ายของการนับ ด้วยวิธีการนี้ผลลัพธ์จะมีความแม่นยำสูงสุดอยู่ที่ 97% ดังที่แสดงอยู่ในรูปที่ 7 และ 8 โดยสาเหตุที่ส่งผลต่อความแม่นยำเช่น บางเซนเซอร์นั้นได้รับการปรับเทียบค่ามาอย่างแม่นยำแล้ว แต่ด้วยมีการปรับเปลี่ยนอุปกรณ์ หรือแรงดันในท่อมีการเปลี่ยนแปลงทำให้ปริมาณการไหลนั้นมีการคลาดเคลื่อนไปจากเดิม

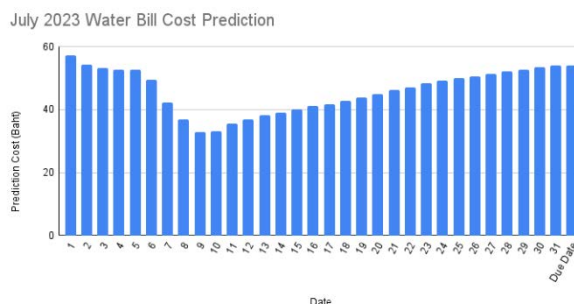


Fig. 7 Water Bill Cost Prediction

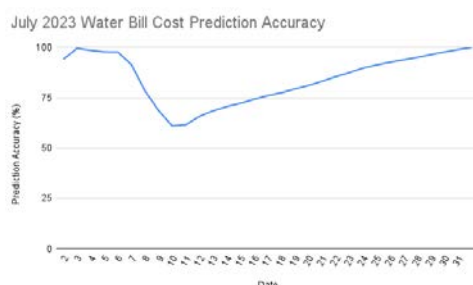


Fig. 8 Water Bill Cost Prediction Accuracy

3.4 ความแม่นยำในการทำนายค่าไฟฟ้า

ในการทดสอบการทำนายค่าไฟฟ้านั้นจะเป็นกระบวนการที่เริ่มในเวลา 23:59 ของทุกวันเริ่ม โดยขั้นตอนจะเป็นไปตามรูปที่ 4 ซึ่งเป็นนำค่าหน่วยที่ใช้งานสะสมมารวมกับ ค่าเฉลี่ยของหน่วยใช้งานสะสมของจำนวนวันที่เหลือในเดือนนั้นๆ จากนั้นจึงคำนวณและทำนายค่าใช้ชำระไฟฟ้า โดยอ้างอิงจากการคำนวณค่าไฟฟ้าจาก [8]และ[9] ซึ่งเป็นวิธีการคำนวณที่ทางการไฟฟ้านครหลวง หน่วยงานที่ทำหน้ารับผิดชอบการให้บริการไฟฟ้าในพื้นที่ที่ทำการทดลอง ด้วยวิธีการนี้ผลลัพธ์จะมีความแม่นยำสูงสุดอยู่ที่ 98% ดังที่แสดงอยู่ในรูปที่ 9 และ 10 โดยสาเหตุที่ส่งผลต่อความแม่นยำในการทำนายค่าน้ำนั้นมีหลายประการ เช่น ในการคำนวณเพื่อทำนายค่าชำระนั้นไม่ได้คำนวณในส่วนของค่าส่วนลดที่ประกาศโดยนโยบายของรัฐบาลโดยอัตโนมัติ เนื่องจากการทดลองบางเดือนนั้นมีส่วนลดและบางเดือนไม่มีส่วนลดจากทางรัฐบาล ทำให้ผลลัพธ์ของค่าที่ทำนายในแต่ละวันนั้นเกิดความคลาดเคลื่อน โดยสามารถแก้ไขปัญหานี้ได้ผ่านการกำหนดค่าส่วนลดเป็นตัวแปรเพิ่มในโปรแกรมการคำนวณค่าไฟฟ้า

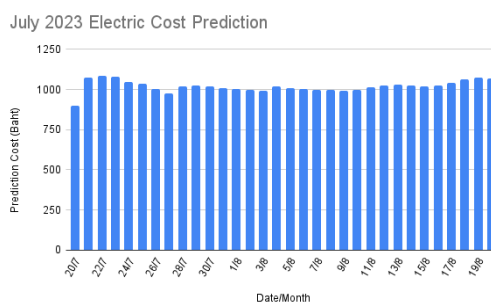


Fig. 9 Electric Bill Cost Prediction

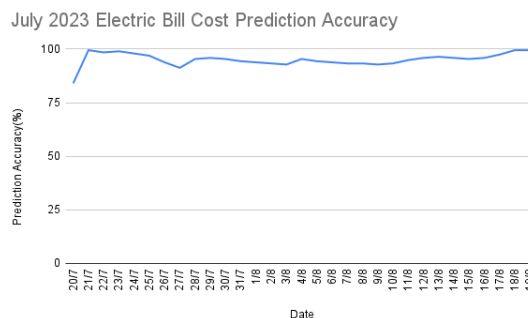


Fig. 10 Electric Bill Cost Prediction Accuracy

3.5 การจำแนกความผิดปกติของอุปกรณ์ประปา

ในการจำแนกความผิดปกติของอุปกรณ์ประปานั้นจะใช้ข้อมูลจาก Arduino Cloud IoT ในการจำแนกความผิดปกติ โดยจำนวนข้อมูลที่ใช้จำแนกความผิดปกติของอุปกรณ์ประปานั้น คือข้อมูลอัตราการไหลของน้ำ ระยะเวลาเริ่มและสิ้นสุดการใช้งาน นับตั้งแต่วันที่ 1 กรกฎาคม ถึงเวลา 23.59 ของวันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2566 รวมทั้งสิ้น 126,312 รายการ โดยตารางที่ 2 แสดงถึงข้อมูลความผิดปกติที่ยืนยันแล้วจากผู้ใช้งาน

Table 2 Amount of Confirmed Water Device Abnormality Detection

Data Type	Amount
Abnormality Detection Confirmed	17,810
False Detection Confirmed	1,137

โดยความผิดปกติของทั้งหมดคิดเป็น 15% ของข้อมูลการใช้งานน้ำทั้งหมด โดยประเภทความผิดปกตินั้นจะมีการยืนยันโดยผู้ใช้งาน เพื่อให้ทราบว่าเป็นความผิดปกติที่เกิดขึ้นจริงเพื่อลดจำนวนความผิดพลาดของการตรวจจับ คิดเป็น 6% ของข้อมูลความผิดปกติทั้งหมด ซึ่งทำให้การตรวจจับผิดปกติมีความแม่นยำที่ 94% โดยตารางที่ 3 แสดงถึงจำนวนการเกิดความผิดปกติของอุปกรณ์ประปา

Table 3 Amount of Water Device Abnormality Detection (By Item)

Monitoring Device	Over Usage	Off-Hours Use	Flow Rate Error	Leak
Basin Faucet (Toilet)	1,012	1,087	483	0
Bidet Spray	2,873	544	459	0
Flush Toilet	0	1,250	71	0
Shower	3,122	1,413	1,976	8
Basin Faucet (Kitchen)	1,022	1,141	464	0
Balcony faucet	391	0	494	0

จากผลในตารางที่ 2 พบว่าประเภทความผิดปกติสูงที่สุดคือความผิดปกติที่เกิดจากใช้งานเกินกว่าระยะเวลาที่กำหนดไว้ โดยอุปกรณ์ที่มีลักษณะการใช้งานเกินกว่าระยะเวลาที่กำหนดไว้มากที่สุดคือ ฝักบัวในห้องน้ำ คิดเป็น 37% จากความผิดปกติทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการใช้งานเกินระยะเวลาที่กำหนด จากการทดลองหาสาเหตุพบว่าระหว่างการใช้อุปกรณ์นั้น หากเกิดความผิดปกติเกิดขึ้นผู้ใช้งานจะไม่สามารถยืนยันความผิดปกติผ่านโทรศัพท์มือถือหรือคอมพิวเตอร์ได้ทันที ทำให้กว่าจะยืนยันความผิดปกติได้ ความผิดปกติก็เกิดขึ้นเสียแล้ว โดยวิธีการลดความผิดปกติในลักษณะนี้จึงต้องให้การยืนยันผ่านอุปกรณ์ที่อยู่ตรงหน้าของ

ผู้ใช้งานหรือมีการส่งสัญญาณเตือนเช่น การแจ้งเตือนด้วยเสียง Buzzer สัญญาณไฟ LED หรือข้อความบนหน้าจอแสดงผล เพื่อให้ผู้ใช้งานทราบถึงความผิดปกติที่กำลังจะเกิดขึ้น และสามารถหลีกเลี่ยงพฤติกรรมที่ก่อให้เกิดการใช้งานเกินระยะเวลาได้

นอกจากนี้ยังพบว่ามียูสอุปกรณ์ชนิดเดียวเท่านั้นที่เกิดการรั่วไหลนั้นคือ ฝักบัวอาบน้ำ โดยสังเกตจากความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ดังกล่าว พบกว่าทุกความผิดปกตินั้นมีค่าสูงกว่าอุปกรณ์อื่นๆทุกด้าน จากการตรวจสอบพบว่า การรั่วไหลเกิดจากความเสียหายของฝักบัว ซึ่งเกิดการการตกกระแทกระหว่างใช้งานหรือใช้งานเสร็จแล้ว จึงมีรอยแตกบริเวณข้อต่อของฝักบัว และทำให้เกิดการรั่วไหลของน้ำขึ้น โดยสังเกตได้จากจำนวนรายการความผิดพลาดของอัตราการไหลของอุปกรณ์ที่มีปริมาณที่สูง อีกทั้งมีการใช้งานเกินกว่าระยะเวลาที่กำหนดและมีการใช้งานนอกเหนือจากเวลาที่กำหนด ซึ่งเป็นลักษณะของการเกิดน้ำรั่ว

3.6 การจำแนกความผิดปกติของอุปกรณ์ไฟฟ้า

ในการจำแนกความผิดปกติของอุปกรณ์ไฟฟ้านั้นจะใช้ข้อมูลจาก Arduino Cloud IoT ในการจำแนกความผิดปกติ โดยจำนวนข้อมูลที่ใช้จำแนกความผิดปกติของอุปกรณ์ประปานั้น คือข้อมูลอัตราการไหลของน้ำ ระยะเวลาเริ่มและสิ้นสุดการใช้งาน นับตั้งแต่วเวลา 00.00 น. ของวันที่ 1 กรกฎาคม ถึงเวลา 23.59 ของวันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2566 รวมทั้งสิ้น 126,312 รายการ โดยตารางที่ 4 แสดงถึงข้อมูลความผิดปกติที่ตรวจจับได้ทั้งหมด ข้อมูลความผิดปกติที่ยืนยันแล้วจากผู้ใช้งาน

Table 4 Amount of Confirmed Electric Device Abnormality Detection

Data Type	Amount
All Abnormality Detection	29,052
Abnormality Detection Confirmed by Admin	26,437
False Detection	2,615

โดยความผิดปกติของทั้งหมดคิดเป็น 23% ของข้อมูลการใช้งานไฟฟ้าทั้งหมด โดยประเภทความผิดปกตินั้นจะมีการยืนยันโดยผู้ใช้งาน เพื่อให้ทราบว่าเป็นความผิดปกติที่เกิดขึ้นจริงเพื่อลดจำนวนความผิดพลาดของการตรวจจับ คิดเป็น 9% ของข้อมูลความผิดปกติทั้งหมด ซึ่งทำให้การตรวจจับผิดปกติมีความแม่นยำที่ 91% โดยตารางที่ 5 แสดงถึงจำนวนการเกิดความผิดปกติของแต่ละอุปกรณ์ไฟฟ้า

Table 5 Amount of Electric Device Abnormality Detection (By Item)

Monitoring Device	Over Usage	Off-Hours Use	Blackout
Fan	428	1428	13
Refrigerator	0	0	90
Computer	5,710	1,784	16
Router	0	0	85
Plug A	1,570	595	7
Plug B	1,142	357	7
Air Conditioner (Living Room)	2,427	1,784	11
Air Conditioner (Bedroom)	1,428	1,190	11
Light (Bedroom)	286	1,309	8
Light (Living Room)	714	1,190	16
Light (Bathroom)	428	1,428	0
Light (Kitchen)	143	833	0

ผลจากตารางที่ 5 แสดงให้เห็นถึงข้อมูลความผิดปกติของการใช้งานไฟฟ้าโดยคอมพิวเตอร์มีอัตราการใช้งานเกินระยะเวลาที่กำหนดสูงสุดคิดเป็น 40% ของความผิดปกติของการใช้งานเกินระยะเวลาที่กำหนด และนอกจากนี้ยังมียอดการใช้งานนอกช่วงระยะเวลาที่กำหนดสูงโดยคิดเป็น 15% ของความผิดปกติของการใช้งานนอกช่วงระยะเวลาที่กำหนด จากการตรวจสอบพบว่าสาเหตุเกิดจาก มีผู้ใช้งานที่ไม่ได้ลงทะเบียนเข้ามาใช้งานอุปกรณ์และพฤติกรรมการใช้งานของผู้ใช้งานที่อยู่นอกเหนือกับที่ตั้งค่าไว้ ทำให้ค่าความผิดปกติมีค่าสูงขึ้น โดยสามารถลดการเกิดความผิดปกติได้ด้วยการลงทะเบียนผู้ใช้งานและทำการตั้งค่าการปรับระยะเวลาการใช้งานใหม่ ให้สอดคล้องกับพฤติกรรมในแต่ละวัน

4. สรุป

จากการนำเสนอระบบที่ใช้สำหรับเก็บค่าการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าและน้ำทำให้ได้ทราบถึงพฤติกรรมการใช้งานอุปกรณ์น้ำและไฟฟ้าแต่ละอุปกรณ์ต่างๆ สามารถนำมาใช้ทำนายหาค่าน้ำและไฟฟ้า โดยมีความแม่นยำในการทำนายคิดเป็น 97% สำหรับการทำนายค่าน้ำ และ 98% สำหรับการทำนายค่าไฟฟ้า ซึ่งจะช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถเตรียมความพร้อมและวางแผนการเงินได้ล่วงหน้า นอกจากนี้ในระบบยังสามารถรายงานความผิดปกติที่เกิดขึ้นในการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าและน้ำได้ โดยมีความแม่นยำในการทำนายอยู่ที่ 94% สำหรับการจำแนกความผิดปกติของอุปกรณ์ประปา และ 91% สำหรับความผิดปกติของอุปกรณ์ไฟฟ้า ทำให้ผู้ใช้งานมีการปรับเปลี่ยนพฤติกรรมการใช้งานที่ไม่เหมาะสม โดยทำการแจ้งเตือนและทำการควบคุมการใช้งานได้ หากเกิดความผิดปกติจริง หรือใช้ข้อมูลดังกล่าวในการตรวจหาการชำรุดของอุปกรณ์ที่เก็บข้อมูลได้ ดังที่ได้นำเสนอในบทความนี้ ในการใช้ข้อมูลการใช้งานผิดปกติในการหาการชำรุดของฝักบัวและได้ทำการแก้ไข ซ่อมแซม เพื่อป้องกันการสูญเสียของทรัพยากร

สำหรับการต่อยอดและพัฒนาต่อในบทความนี้มีความเห็นว่า ในส่วนของการประมวลผล การทำนาย และการตรวจจับความผิดปกติของค่าน้ำและไฟฟ้านั้น สามารถย้ายจากการประมวลผลบนบอร์ด Raspberry Pi ไปยังแพลตฟอร์มหรือบริการคลาวด์ต่างๆ ที่ทำงานอยู่บนอินเทอร์เน็ต เพื่อที่จะได้สามารถแก้ไขปัญหาทั้งกรณีการติดตั้ง ดูแลรักษาอุปกรณ์ และการแก้ไขปัญหาความพร้อมทำงานของอุปกรณ์ในระยะยาว โดยบทความนี้เล็งเห็นความสำคัญของการติดตั้งดูแลรักษา เพื่อความง่ายต่อการใช้งานในระดับครัวเรือนและการใช้งานในระดับอุตสาหกรรม

5. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้ได้รับการสนับสนุนจากสถาบันพัฒนาทักษะดิจิทัล เทคโนโลยีและการสร้างนวัตกรรมการไอเมคในด้านของการสนับสนุนอุปกรณ์สำหรับการทดลอง เซนเซอร์ และใบอนุญาตการเข้าใช้งานแพลตฟอร์ม Arduino Cloud IoT

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Charnon Chupong, Boonyang Plangklang, Electricity Bill Forecasting Application by Home Energy Monitoring System, 5th International Electrical Engineering Congress, Pattaya, Thailand, 8-10 March 2017. pp.1-4.
- [2] Syafii, A. Luthfi and Y. A. Rozzi, "Design of Raspberry Pi Web-based Energy Monitoring System for Residential Electricity Consumption," 2020 International Conference on Information Technology Systems and Innovation (ICITSI), Bandung, Indonesia, 2020, p. 192-196.
- [3] T. Shahzad Gill et al., "IoT Based Smart Power Quality Monitoring and Electricity Theft Detection System," 2021 16th International Conference on Emerging Technologies (ICET), Islamabad, Pakistan, 2021, pp. 1-4.
- [4] Ivan Roy S. Evangelista, Bayesian Wingbeat Frequency Classification and Monitoring of Flying Insects Using Wireless Sensor Networks, TENCON 2018 - 2018 IEEE Region 10 Conference.
- [5] N. Kalubi and S. Sajal, "Cloud Computing: Arduino Cloud IoT Integration with REST API," 2022 IEEE International Conference on Electro Information Technology (eIT), Mankato, MN, USA, 2022, pp. 473-476.

-
- [6] Shubham Milind Phal, Girish Rao Salanke N S, Dr. Shobha G, Prapulla S B, Intelligent Meters for Urban Domestic Water Consumption, 2019 IEEE International Conference on Cloud Computing in Emerging Markets (CCEM).
- [7] A. I. Satriananda, L. Kamelia, M. R. Efendi and A. Kusnawan, "The Prototype of Smart Power Meter at Home Based on Internet of Things," 2021 7th International Conference on Wireless and Telematics (ICWT), Bandung, Indonesia, 2021, pp. 1-3.
- [8] การไฟฟ้านครหลวง. 2566.อัตราค่าไฟฟ้าประเภทต่างๆ, อัตราค่าไฟฟ้าประเภทที่ 1 บ้านอยู่อาศัย, เข้าถึงได้จาก : เว็บไซต์ <https://www.mea.or.th/our-services/tariff-calculation/other> (เข้าถึงเมื่อ 22 กันยายน 2566).
- [9] การไฟฟ้านครหลวง. 2566. บริการออนไลน์, คำนวณค่าไฟฟ้าการไฟฟ้านครหลวง(กฟน.), เข้าถึงได้จาก: เว็บไซต์ <https://www.mea.or.th/our-services/mea-service/e-service/electric-monthly-calculate> (เข้าถึงเมื่อ 22 กันยายน 2566).

สภาวะที่เหมาะสมในการล้างไบโอดีเซลโดยเครื่องล้างไบโอดีเซลด้วยถ่านไบโอชาร์

THE APPROPRIATE CONDITION FOR BIODIESEL WASHING MACHINE WITH BIOCHAR

อัมรินทร์ กลิ่นหอม¹, ธัชพล ชุงเจริญ^{1,*}, อรสา ชูละเอียด², สิทธิพร ทองภูเบศร์² และวารุณี ลิ้มมัน¹Ammarin Klinhom¹, Thatchapol Chungcharoen^{1,*}, Orasa Choolaaied², Sittiporn Tongpubes² and Warunee Limmun¹¹ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร²งานบริการห้องปฏิบัติการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร¹Engineering Department, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Prince of Chumphon Campus, Chumphon²Laboratory service, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Prince of Chumphon Campus, Chumphon

*Corresponding author: Thatchapol Chungcharoen, e-mail address: thatchapol.ch@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

ไบโอชาร์เป็นตัวดูดซับที่มีความสามารถในการดูดซับที่สูง สามารถดูดซับสิ่งปนเปื้อนในไบโอดีเซลได้ ซึ่งช่วยเพิ่มคุณสมบัติในไบโอดีเซล ส่งผลให้มีคุณสมบัติที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน นอกจากนี้ยังสามารถใช้ทดแทนการล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำ ซึ่งเป็นวิธีการทั่วไปได้ และช่วยลดการเกิดน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำ ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการล้างไบโอดีเซลด้วยเครื่องล้างไบโอดีเซลด้วยถ่านไบโอชาร์ โดยเงื่อนไขในการทดลองได้แก่ ความเร็วรอบในการกวนผสมที่ 200 250 และ 300 รอบต่อนาที และปริมาณไบโอชาร์ในการล้าง 5 10 และ 15 %wt จากการทดลองพบว่าการเพิ่มความเร็วรอบในการกวนผสมระหว่างไบโอดีเซลกับไบโอชาร์ และการเพิ่มปริมาณไบโอชาร์ส่งผลให้ร้อยละผลผลิตของไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการล้างด้วยเครื่องล้างไบโอดีเซลด้วยไบโอชาร์มีค่าลดลงอยู่ในช่วง 87.05%–91.15% นอกจากนี้การเพิ่มความเร็วยรอบการกวนผสมและปริมาณของถ่านไบโอชาร์ยังส่งผลให้คุณสมบัติของไบโอดีเซลได้แก่ ปริมาณน้ำ ค่าความหนืด ค่าความหนาแน่น และค่าความเป็นกรดมีค่าลดลง ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมในการล้างไบโอดีเซลโดยใช้เครื่องล้างไบโอดีเซลด้วยไบโอชาร์ คือ ความเร็วรอบในการกวนผสม 300 รอบต่อนาที และปริมาณถ่านไบโอชาร์ที่ 15 %wt โดยที่เงื่อนไขดังกล่าวจะทำให้ค่าคุณสมบัติของไบโอดีเซล (ปริมาณน้ำ ค่าความหนืด ค่าความหนาแน่น และค่าความเป็นกรด) ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน นอกจากนี้ปริมาณกลีเซอรอลในไบโอดีเซลให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานด้วย อย่างไรก็ตามปริมาณเมทานอลที่ได้ยังมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานมาตรฐาน

คำสำคัญ : ไบโอดีเซล, การล้างไบโอดีเซลแบบแห้ง, ไบโอชาร์, สมบัติไบโอดีเซล

Abstract

Biochar is an adsorbent with a high adsorption capacity. It can absorb contaminants in biodiesel, leading to increase the purity of biodiesel and resulting in accordance with biodiesel standards. Moreover, biochar can be used in place of biodiesel washing with water which is the conventional method and help to reduce the wastewater that occurs from the biodiesel washing process with water method. Therefore, the objective of research is to find the appropriate condition for biodiesel washing by using the biodiesel washing machine with biochar. The conditions which were used in experiment were the mixing speeds of 200, 250 and 300 rpm and the biochar contents of 5, 10 and 15% wt. The experiment showed that increases of mixing speed (between biodiesel and biochar) and biochar content provided the decrease of yield percentage of biodiesel which was washed by using biodiesel washing machine with biochar. It was decreased in the range from 87.05% to 91.15%. Moreover, the increases of mixing speed and biochar content also provided the decrease of properties of biodiesel such as water content, viscosity value, density value and acidity value. The appropriate conditions for washing biodiesel using a biodiesel washing machine with biochar were the mixing speed of 300 rpm and 15 % wt. These conditions provided the properties of biodiesel (water content, viscosity value, density value and acidity value) within the biodiesel standards. Moreover, the glycerol content in biodiesel was also within the standard range. However, the methanol content in biodiesel is still higher than the standard.

Keywords: Biodiesel, Dry washing, Biochar, Biodiesel properties.

1. บทนำ

ในปัจจุบันไบโอดีเซล (Biodiesel) ได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้น ไบโอดีเซลเป็นพลังงานที่สามารถผลิตมาจากทรัพยากรหมุนเวียน เช่น น้ำมันพืช ไขมันจากสัตว์ ไขมันที่สกัดมาจากสาหร่าย หรือน้ำมันปรุงอาหารเหลือทิ้ง ซึ่งไบโอดีเซลนับเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกที่มีคุณสมบัติการเผาไหม้ของเครื่องยนต์เหมือนกับน้ำมันดีเซลสามารถที่จะนำมาใช้ทดแทนน้ำมันดีเซลได้ [1] อีกทั้งยังพบว่าปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปล่อยออกมาจากระบบการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันไบโอดีเซลมีปริมาณน้อยกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้ น้ำมันดีเซล [2] ในปัจจุบันในประเทศไทยมีปริมาณการใช้น้ำมันไบโอดีเซลเพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ดังนั้นขั้นตอนในการผลิตและการเพิ่มประสิทธิภาพน้ำมันไบโอดีเซลจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมากเพื่อช่วยลดต้นทุนในการผลิต ช่วยลดระยะเวลาในการผลิต และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของน้ำมันไบโอดีเซลให้เพิ่มมากยิ่งขึ้น

ขั้นตอนในการเพิ่มความบริสุทธิ์น้ำมันไบโอดีเซลให้มีคุณสมบัติที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานมีขั้นตอนหลักอยู่ 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการแยกไบโอดีเซลออกจากกลีเซอรอล และขั้นตอนการล้างไบโอดีเซล โดยขั้นตอนการแยกไบโอดีเซลออกจากกลีเซอรอล จะใช้วิธีการแยกโดยใช้แรงโน้มถ่วงในการแยกชั้นไบโอดีเซลออกจากกลีเซอรอล และขั้นตอนการล้างไบโอดีเซลมีวิธีการล้างหลากหลายวิธี เช่น การล้างด้วยน้ำซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายในการล้างไบโอดีเซลแต่จะทำให้เกิดน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการล้าง [3] น้ำเสียที่เกิดขึ้นทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม มีความยุ่งยากในการกำจัดและยังใช้ต้นทุนในการกำจัดที่สูง นอกจากนี้ยังมีวิธีการใช้ตัวดูดซับในการช่วยดูดซับสิ่งปนเปื้อนในไบโอดีเซลเพื่อเพิ่มความบริสุทธิ์ให้กับไบโอดีเซล [4] ซึ่งถ่านไบโอชาร์มีคุณสมบัติที่สามารถดูดซับสิ่งปนเปื้อนได้ดี เนื่องจากถ่านไบโอชาร์มีพื้นที่ผิวสัมผัสที่สูง มีปริมาณรูพรุนที่เยอะ จึงทำให้ถ่านไบโอชาร์มีความสามารถในการดูดซับสิ่งปนเปื้อนได้ดี และถ่านไบโอชาร์ที่ผ่านกระบวนการดูดซับสิ่งปนเปื้อนในไบโอดีเซลยังสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ ด้วยกระบวนการฟื้นฟูถ่านไบโอชาร์ก่อนจะนำมาทำการดูดซับสิ่งปนเปื้อนในไบโอดีเซล [5] โดยสารละลายที่นิยมนำมาฟื้นฟูประสิทธิภาพของถ่านไบโอชาร์ คือ สารละลายเมทานอล (Methanol) และอะซิโตน (Acetone) เป็นต้น เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับของถ่านไบโอชาร์หลังผ่านการล้างไบโอดีเซลให้สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ เป็นการลดต้นทุนในการผลิตไบโอชาร์ขึ้นมาใหม่ และเป็นการเพิ่มจำนวนครั้งในการใช้ถ่านไบโอชาร์ในการล้างไบโอดีเซลด้วย ถ่านไบโอชาร์จึงเป็นวัสดุที่เหมาะสมในการนำมาใช้ในกระบวนการดูดซับสิ่งปนเปื้อนในไบโอดีเซลเพื่อให้ไบโอดีเซลมีความบริสุทธิ์ที่มากยิ่งขึ้น โดยการล้างไบโอดีเซลด้วยถ่านไบโอชาร์ยังมีขั้นตอนที่ยุ่งยากในการล้างไบโอดีเซล เนื่องจากมีปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซล เช่น ปริมาณถ่านไบโอชาร์ที่ใช้การล้าง ความเร็วรอบที่ใช้ในการกวนผสม ซึ่งปัจจัยดังกล่าวส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของ ความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการล้างด้วยถ่านไบโอชาร์

งานวิจัยในครั้งนี้จึงสนใจที่จะทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของเครื่องล้างไบโอดีเซลด้วยถ่านไบโอชาร์ โดยปัจจัยที่ศึกษาผลกระทบต่อประสิทธิภาพของเครื่องล้างไบโอดีเซลด้วยถ่านไบโอชาร์ประกอบไปด้วย ความเร็วรอบที่ใช้ในการกวนผสม และปริมาณของถ่านไบโอชาร์ เพื่อหาสภาวะเงื่อนไขที่เหมาะสมในการล้างไบโอดีเซลเพื่อลดต้นทุนในการผลิตและให้ได้ไบโอดีเซลที่มีความบริสุทธิ์สูงมีคุณสมบัติที่เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน

2. วิธีการศึกษา

2.1 ถ่านไบโอชาร์

ถ่านไบโอชาร์ที่นำมาดูดซับสิ่งปนเปื้อนในไบโอดีเซลจะใช้ไบโอชาร์เชิงพาณิชย์ผลิตมาจากไม้ไผ่ (Bamboo) ยี่ห้อนันตัน ไบโอชาร์รูปแบบเกล็ดมีขนาด 2-3 mm



Fig. 1 Biochar produced from bamboo

Table 1 The detail of the commercial activated carbon used in the experiment

Items	Bamboo
Fixed Carbon (%)	86
Moisture Content (%)	5.3
Ash (%)	4.3
Volatile Matter (%)	4.40
pH	8-10
Particle Size (mm)	2-3
Iodine Number (mg/g)	1,000

2.2 การเตรียมไบโอดีเซลตั้งต้น

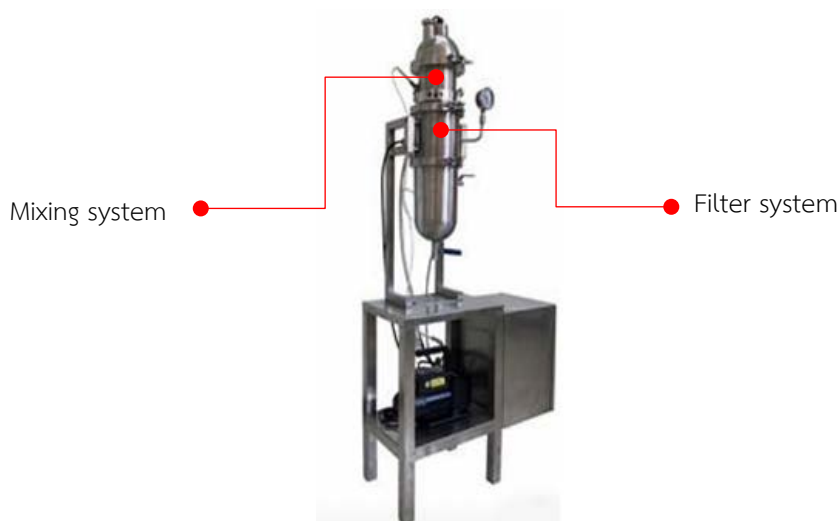
เตรียมไบโอดีเซลในการทดลองโดยการนำโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ทำการละลายกับเมทานอล หลังจากนั้นนำสารละลายที่ได้มาทำการผสมกับน้ำมันปาล์มที่มีอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส โดยอัตราส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่ 9:1 โดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรตัวเร่งปฏิกิริยา ใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน 45 นาที แยกไบโอดีเซลกับกลีเซอรอลด้วยการใช้แรงโน้มถ่วงเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2.3 เครื่องล้างไบโอดีเซลด้วยถ่านไบโอชาร์

ในขั้นตอนการล้างไบโอดีเซลจะใช้วิธีการล้างแบบแห้งโดยใช้เครื่องล้างไบโอดีเซลด้วยไบโอชาร์ในการเพิ่มคุณภาพของไบโอดีเซลให้ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน โดยเครื่องล้างไบโอดีเซลด้วยถ่านไบโอชาร์จะแบ่งระบบการทำงานเป็น 2 ส่วน แสดงดัง Fig. 2

ส่วนที่ 1 คือ ส่วนชุดกวนผสมไบโอดีเซลกับไบโอชาร์เข้าด้วยกัน โดยใช้ใบพัดในการกวนผสมเพื่อช่วยในการเพิ่มความสามารถในดูดซับสิ่งปนเปื้อนของถ่านไบโอชาร์ในการทำมาสะอาดไบโอดีเซลให้มีความบริสุทธิ์เพิ่มมากขึ้น

ส่วนที่ 2 คือ ส่วนชุดกรองถ่านไบโอชาร์ออกจากไบโอดีเซลโดยจะทำการกรองไบโอชาร์ด้วยตะแกรงเหล็กและกระดาษกรองเส้นผ่านศูนย์กลาง 90 mm ขนาดรูกรอง 2-4 μm ทำการปล่อยไบโอดีเซลลงสู่ถังเก็บซึ่งอยู่ด้านล่างของชุดกรองเป็นขั้นตอนในแยกถ่านไบโอชาร์ที่ช่วยในการปรับคุณสมบัติของไบโอดีเซลให้ผ่านตามมาตรฐาน โดยการใช้ปั๊มสุญญากาศใช้การช่วยลดระยะเวลาในการกรอง

**Fig. 2** Biodiesel washing machine with biochar

โดยขั้นตอนในการล้างมีดังนี้

- นำน้ำมันไบโอดีเซลจำนวน 1 ลิตร ใส่ในถังล้างผสม
- เปิดเครื่องผสมตั้งความเร็วรอบของใบพัด โดยความเร็วรอบที่ใช้คือ 200 250 และ 300 รอบต่อนาที และตั้งอุณหภูมิฮีตเตอร์ โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองคือ 60 องศาเซลเซียส
- เมื่ออุณหภูมิของน้ำมันถึง 60 องศาเซลเซียส เติมน้ำมันไบโอซาร์ที่เตรียมไว้ โดยปริมาณน้ำมันที่เตรียมไว้ คือ 5 10 และ 15 %wt ใส่ในถังล้างผสมพร้อมจับเวลา 30 นาที
- เมื่อครบเวลา 30 นาที ทำการกดปิดมอเตอร์ผสม จากนั้นเปิด solenoid valve เพื่อให้ไขมันไหลลงสู่ตัวกรอง โดยในตัวกรองจะมีตะแกรงกรองและแผ่นกรองแยกไขมันไบโอดีเซลกับน้ำมันไบโอซาร์ออกจากกัน
- เปิดปั๊มสุญญากาศเป็นเวลา 45 นาที
- น้ำมันที่ได้จะไหลลงถึงเก็บ

2.4 การล้างไบโอดีเซลโดยการใช้น้ำ

น้ำมันไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการล้างด้วยน้ำจะถูกใช้เปรียบเทียบกับน้ำมันไบโอดีเซลที่ผ่านการล้างโดยใช้เครื่องล้างไบโอดีเซลด้วยถ่านไบโอซาร์ โดยจะนำน้ำมันไบโอดีเซลที่ผ่านการแยกกลีเซอรอลออกไปแล้ว มาล้างด้วยน้ำจำนวน 3 ครั้ง โดยใช้อัตราส่วนไบโอดีเซลต่อน้ำที่ใช้ในกระบวนการล้าง คือ 1:2 หลังจากแยกน้ำที่ใช้ในการล้างออก น้ำมันไบโอดีเซลที่ได้จะถูกนำไปต้มเพื่อลดความชื้นที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 15 นาที

2.5 การตรวจวัดร้อยละผลผลิตน้ำมันไบโอดีเซล

การตรวจสอบค่าร้อยละผลผลิตของไบโอดีเซล (%Yield) นำไบโอดีเซลที่ได้จากการล้างด้วยเครื่องล้างไบโอดีเซลด้วยไบโอซาร์มาคำนวณหาปริมาณร้อยละผลผลิต ดังสมการที่ 2.1

$$\text{Yield} = \frac{w_{bc}}{w_b} \times 100 \quad 2.1$$

โดยที่ Yield คือ ค่าร้อยละผลผลิต

w_{bc} คือ ปริมาณไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการล้างด้วยถ่านไบโอซาร์ (ml)

w_b คือ ปริมาณไบโอดีเซลตั้งต้น (ml)

2.6 การตรวจสอบคุณสมบัติไบโอดีเซล

คุณสมบัติที่ใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงสมบัติของไบโอดีเซลมีค่าผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน คือ ค่าความหนืด ค่าปริมาณน้ำในไบโอดีเซล ค่าความหนาแน่น ค่าความเป็นกรด ปริมาณเมทานอล ปริมาณกลีเซอรอลในน้ำมันไบโอดีเซล

การตรวจสอบค่าความหนืด

การตรวจสอบค่าความหนืดไบโอดีเซลที่ได้จากการล้างด้วยถ่านไบโอซาร์ ทำการให้อุณหภูมิที่ 40 °C โดยใช้ Viscometer ขนาด 50 ml เพื่อใช้ในการวัดหาความหนืดให้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D 445 ทำการดูดไบโอดีเซล 7 ml ขึ้นเหนือขีดเส้นของ Viscometer ปล่อยให้ไบโอดีเซลไหลลงด้านล่างทำการเริ่มจับเวลา เมื่อไบโอดีเซลถึงขีดขอบด้านล่างให้หยุดจับเวลา และทำการคำนวณหาความหนืด ดังสมการที่ 2.2

$$V = Ct \quad 2.2$$

โดยที่ V คือ ค่าความหนืดไบโอดีเซล

C คือ ค่าคงที่มีค่า 0.004 (ml²/s²)

t คือ ระยะเวลา (s)

การตรวจสอบค่าปริมาณน้ำในไบโอดีเซล

การตรวจสอบค่าปริมาณน้ำในไบโอดีเซลที่ได้จากการล้างด้วยถ่านไบโอชาร์ ทำการใช้อิไตเตรทของคาร์ลฟิชเชอร์ (Kar Fischer titration) ใช้มาตรฐาน EN ISO 12937 โดยใช้ Syringe ดูดไบโอดีเซลปริมาตร 3 ml แล้วนำไปซึ่ง จากนั้นนำ Syringe ที่มีไบโอดีเซลฉีดเข้าไปในเครื่อง Karl Fischer Coulometer รุ่น 831 KFC ยี่ห้อ Metrohm นำกลับมาซึ่ง โดยน้ำหนัก การฉีดไบโอดีเซล 0.10-0.19 กรัม บ่อนค่าปริมาณไบโอดีเซลที่ฉีดเข้าเครื่อง Karl Fischer Coulometer

การตรวจสอบค่าความหนาแน่น

การตรวจสอบค่าความหนาแน่นไบโอดีเซลที่ได้จากการล้างด้วยถ่านไบโอชาร์ ตามมาตรฐาน ASTM D 1298 ทำการวัด ที่อุณหภูมิของไบโอดีเซลที่ 15 °C เพื่อวัดค่าคุณสมบัติไบโอดีเซลทำการคำนวณหาค่าความหนาแน่น ดังสมการที่ 2.3

$$\rho = \frac{m}{v} \quad 2.3$$

โดยที่ ρ คือ ค่าความหนาแน่นไบโอดีเซล (kg/m³)

m คือ น้ำหนักของไบโอดีเซล (kg)

v คือ ปริมาตร (m³)

การตรวจสอบค่าความเป็นกรด

การตรวจสอบค่าความเป็นกรดในไบโอดีเซลที่ได้จากการล้างด้วยถ่านไบโอชาร์ โดยใช้เครื่องไทเทรตชัน Metrohm รุ่น 916 Ti-Touch ในการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดตามมาตรฐาน ASTM D664 โดยทำการเตรียม Titrant 0.1 MKOH ที่ปริมาตร 250 ml ใช้ Iso Propyl Alcohol (IPA) 250 ml ทำการละลายกับ Potassium Hydroxide (KOH) ในปริมาตร 1.40275 g Solvent ที่ปริมาตร 1 l จะต้องใช้ Toluene 500 ml ทำการละลายกับ Iso- Propyl Alcohol (IPA) ปริมาตร 495 ml และทำละลายกับ Deionized water (DI) ที่ปริมาตร 5 ml ซึ่งน้ำหนักไบโอดีเซลตัวอย่าง 10-11 g ทำละลายกับ Solvent 60 ml นำไปทดสอบด้วยเครื่องไทเทรตชัน รุ่น 916-Ti Touch โดยใช้ 0.1 M KOH in IPA

การตรวจสอบปริมาณกลีเซอรอลและปริมาณเมทานอล

การตรวจสอบปริมาณกลีเซอรอลและปริมาณเมทานอลในไบโอดีเซลที่ได้จากการล้างด้วยถ่านไบโอชาร์ การวิเคราะห์ ปริมาณเมทานอลในไบโอดีเซลใช้เทคนิค ออโต้ เฮดสเปซ แก๊สโครมาโทกราฟี (Auto headspace gas chromatography) โดยใช้ เครื่อง Gas Chromatograph-Flame Ionization Detector (GC-FID), Hewlett Packard, 6890, USA วิเคราะห์ตามมาตรฐาน EN 14105

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 ร้อยละผลผลิตของไบโอดีเซล

Fig. 3 แสดงค่าร้อยละผลผลิตของไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการล้างโดยเครื่องล้างไบโอดีเซลด้วยถ่านไบโอชาร์ที่เงื่อนไข ต่างๆจากผลการทดลองพบว่า ความเร็วรอบในการกวนผสม และปริมาณของถ่านไบโอชาร์ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อค่าร้อยละผลผลิต ของไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการล้างโดยเครื่องล้างไบโอดีเซลด้วยถ่านไบโอชาร์ลดน้อยลง เนื่องด้วยถ่านไบโอชาร์มีพื้นที่ผิวที่สูง และความสามารถในการดูดซับสิ่งปนเปื้อนที่สูง ทำให้ถ่านไบโอชาร์เกิดกระบวนการดูดซับสิ่งปนเปื้อนในไบโอดีเซลเพื่อทำให้ ไบโอดีเซลมีความบริสุทธิ์ที่มากขึ้น มีสิ่งปนเปื้อนที่ถูกดูดซับอยู่ในไบโอชาร์ทำให้ปริมาณไบโอดีเซลลดน้อยลง

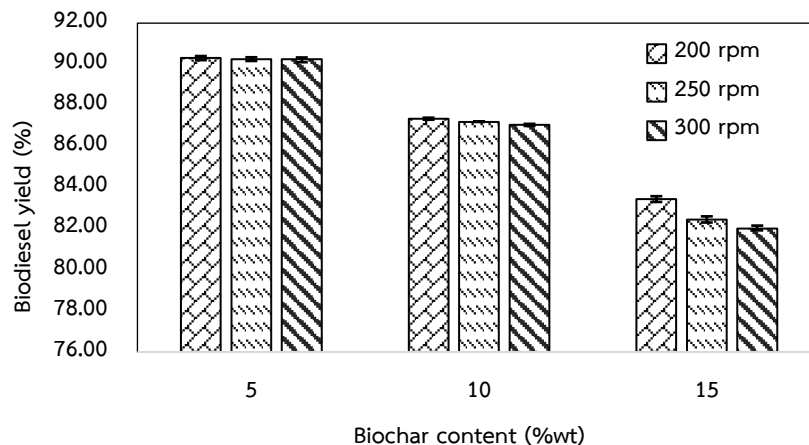


Fig. 3 The yield percentage of biodiesel using a biodiesel washing machine with biochar under various conditions

เมื่อพิจารณาปริมาณถ่านไบโอชาร์ที่ 5 10 และ 15 %wt พบว่าค่าร้อยละผลผลิตของไบโอดีเซลที่ค่าที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อความเร็วรอบในการกวนผสมเพิ่มขึ้นจาก 200 เป็น 250 และ 300 rpm ตามลำดับ (Figure 2) พบว่าค่าร้อยละผลผลิตของไบโอดีเซลที่ค่าที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน โดยความเร็วรอบในการกวนผสมที่เพิ่มสูงขึ้นมีผลต่อการสัมผัสกันของโมเลกุลของสารที่เพิ่มมากยิ่งขึ้น โดยโมเลกุลของสารปนเปื้อนที่ผสมอยู่ในไบโอดีเซลเกิดการสัมผัสกับพื้นที่ผิวของไบโอชาร์ได้มากยิ่งขึ้นและเกิดการดูดซับสิ่งปนเปื้อนเข้าไปในถ่านไบโอชาร์เมื่อเพิ่มความเร็วรอบในการกวนผสมที่สูงขึ้น และปริมาณของถ่านไบโอชาร์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าร้อยละผลผลิตของไบโอดีเซลลดลง เนื่องจากอัตราปริมาณของถ่านไบโอชาร์ที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับ (Adsorption) เพิ่มขึ้นทำให้ถ่านไบโอชาร์สามารถดูดซับสารปนเปื้อนในไบโอดีเซลได้ดียิ่งขึ้น [6] และปริมาณของถ่านไบโอชาร์ที่เพิ่มขึ้นยังเพิ่มความสามารถในการดูดซึม (Absorption) เกิดการแทรกซึมของไบโอดีเซลเข้าไปยังรูพรุนของไบโอชาร์มากขึ้น [7] การเพิ่มความเร็วรอบในการกวนผสมและปริมาณไบโอชาร์ที่เพิ่มขึ้นเป็นการเพิ่มความสามารถในการดูดซับส่งผลให้ค่าร้อยละผลผลิตของไบโอดีเซลมีค่าที่ลดลง

3.2 ความหนืดและปริมาณน้ำในไบโอดีเซล

Fig. 4 และ Fig. 5 แสดงค่าความหนืดและค่าปริมาณน้ำในไบโอดีเซลตามลำดับ โดยค่าความหนืดและปริมาณน้ำที่ผ่านกระบวนการล้างด้วยเครื่องล้างไบโอดีเซลด้วยถ่านไบโอชาร์ที่เงื่อนไขต่างๆ ซึ่งค่าความหนืดและค่าปริมาณน้ำของไบโอดีเซลก่อนนำมาผ่านกระบวนการล้างมีค่าที่มากกว่าเกณฑ์มาตรฐานอยู่ที่ 4.992 ± 0.002 cSt และ 1248.65 ± 1.95 ppm ตามลำดับ และเมื่อนำไบโอดีเซลนำมาผ่านกระบวนการล้างโดยเครื่องล้างไบโอดีเซลด้วยถ่านไบโอชาร์ พบว่าค่าความหนืดและค่าปริมาณน้ำในไบโอดีเซลมีค่าที่ลดน้อยลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากกระบวนการล้างไบโอดีเซลด้วยถ่านไบโอชาร์นั้นถ่านไบโอชาร์ได้มีการดูดซับโมเลกุลของสารปนเปื้อนในน้ำมันไบโอดีเซล โดยผลการทดลองสอดคล้องกับ งานวิจัยของ Manique et al. [8] ซึ่งได้ศึกษาเกี่ยวกับวิธีการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์โดยใช้เถ้าแกลบมาเป็นตัวดูดซับสิ่งปนเปื้อนในไบโอดีเซล และเมื่อนำไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการล้างโดยใช้เถ้าแกลบมาเป็นตัวดูดซับในการล้างไบโอดีเซล โดยในการวัดคุณภาพของไบโอดีเซลพบว่ามีความหนืดและค่าปริมาณน้ำที่ลดน้อยลง ซึ่งจากผลการทดลองยังพบว่าปริมาณของถ่านไบโอชาร์และความเร็วรอบในการกวนผสมที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อค่าความหนืดและปริมาณน้ำที่ลดน้อยลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยถ่านไบโอชาร์เกิดกระจายตัวได้ดีขึ้นเนื่องจากความเร็วรอบในการกวนผสมที่เพิ่มขึ้นซึ่งทำให้เกิดการสัมผัสกันของถ่านไบโอชาร์และไบโอดีเซลที่เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน ทำให้การดูดซับสารปนเปื้อนมีประสิทธิภาพมากขึ้น [6]

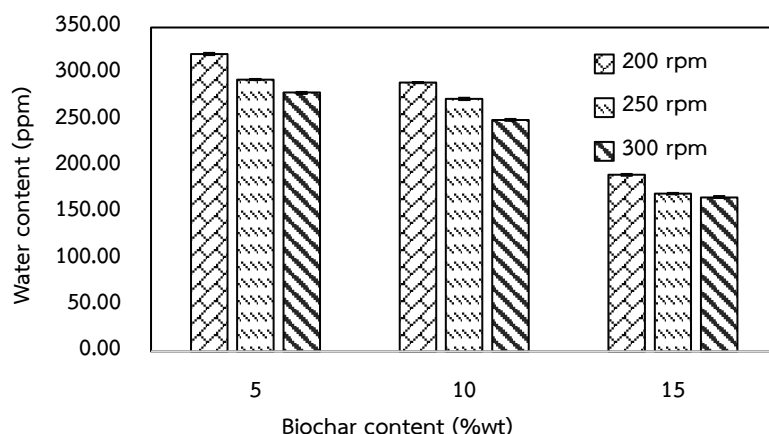


Fig. 4 The water content in biodiesel after washing process by a biodiesel washing machine with biochar

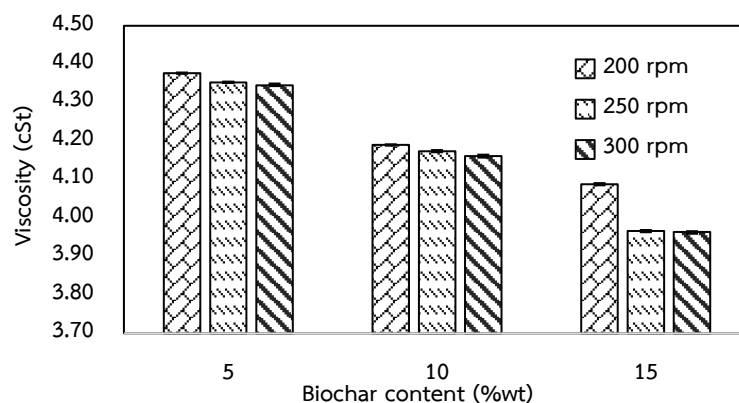


Fig. 5 The viscosity content in biodiesel after washing process by a biodiesel washing machine with biochar

และในขนาดเดียวกันเมื่อปริมาณของถ่านไบโอชาร์ที่เพิ่มขึ้นเป็นการเพิ่มปริมาณของตัวดูดซับ [7] และยังเป็นเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสของถ่านไบโอชาร์ จึงส่งผลให้เกิดการดูดซับและดูดซึม ระหว่างถ่านไบโอชาร์และน้ำมันไบโอดีเซลเพิ่มมากขึ้น [6] จากผลการทดลองพบว่ากระบวนการล้างไบโอดีเซลโดยเครื่องล้างไบโอดีเซลด้วยถ่านไบโอชาร์มีความสามารถในการช่วยให้ค่าความหนืดและค่าปริมาณน้ำในไบโอดีเซลมีค่าที่ลดน้อยลงอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน โดยค่าความหนืดของไบโอดีเซลจะต้องมีค่าที่ไม่น้อยกว่า 3.5 cSt และจะต้องมีค่าที่ไม่มากกว่า 5.0 cSt ในส่วนของค่าปริมาณน้ำจะต้องมีค่าที่ไม่สูงกว่า 500 ppm [9]

3.3 ความหนาแน่นและค่าความเป็นกรดในไบโอดีเซล

Fig. 6 และ Fig. 7 แสดงค่าความหนาแน่นและค่าความเป็นกรดตามลำดับของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการล้าง โดยเครื่องล้างไบโอดีเซลด้วยถ่านไบโอชาร์ที่เงื่อนไขต่างๆ ซึ่งไบโอดีเซลก่อนผ่านกระบวนการล้างมีค่าความหนาแน่นของไบโอดีเซลอยู่ที่ $910.93 \pm 0.002 \text{ kg/m}^3$ และค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลอยู่ที่ $0.0674 \pm 1.95 \text{ mg KOH/g}$ ตามลำดับ เมื่อนำไบโอดีเซลมาผ่านกระบวนการล้างโดยเครื่องล้างไบโอดีเซลด้วยถ่านไบโอชาร์พบว่าค่าความหนืดและค่าความเป็นกรดลดลงอย่างมีนัยสำคัญเป็นผลมาจากถ่านไบโอชาร์ได้ทำการดูดซับสารปนเปื้อนในน้ำมันไบโอดีเซล ซึ่งค่าที่ลดลงของค่าความหนาแน่น และค่าความเป็นกรดเมื่อความเร็รรอบในการกวนผสมเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Berrios et al. [10] ที่ได้ทำการศึกษาการดูดซับสิ่งปนเปื้อนต่างๆ ในไบโอดีเซลออกจากน้ำมันปรุงอาหารที่ผ่านการใช้แล้วที่ความเร็รรอบต่างๆ เมื่อทำการตรวจสอบไบโอดีเซลเพื่อวัด

คุณสมบัติค่าความหนืดและค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซล พบว่าเมื่อความเร็วรอบในการกวนผสมเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ไบโอดีเซล มีค่าความหนาแน่น และค่าความเป็นกรดลดลง

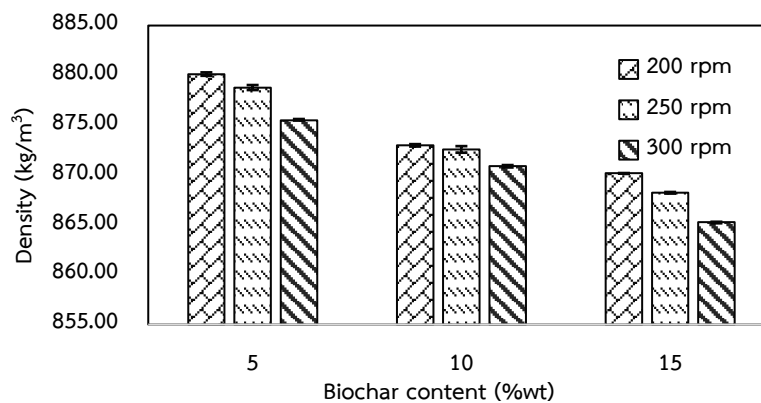


Fig. 6 The density content in biodiesel after washing process by a biodiesel washing machine with biochar

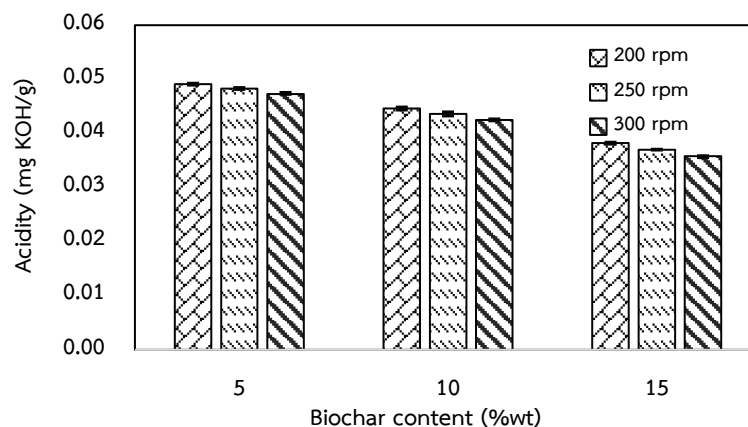


Fig. 7 The acidity content in biodiesel after washing process by a biodiesel washing machine with biochar

เมื่อนำไบโอดีเซลที่ผ่านการล้างด้วยถ่านไบโอชาร์มาตรวจวัดคุณสมบัติค่าความหนืดและค่าความเป็นกรด พบว่าเมื่อความเร็วรอบในการกวนผสมเพิ่มขึ้นส่งผลให้ไบโอดีเซลมีค่าความหนาแน่น และค่าความเป็นกรดที่ลดน้อยลง และการใช้ปริมาณของตัวดูดซับที่แตกต่างกัน พบว่าคุณสมบัติของค่าความหนาแน่นและค่าความเป็นกรดที่ลดน้อยลงเช่นกันเมื่อใช้ปริมาณของตัวดูดซับที่เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่ากระบวนการล้างไบโอดีเซลโดยใช้เครื่องล้างไบโอดีเซลด้วยถ่านไบโอชาร์ สามารถช่วยลดค่าความหนาแน่นและค่าความเป็นกรดในไบโอดีเซลให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานได้ โดยค่าความหนาแน่นของไบโอดีเซลจะต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 860 kg/m³ และไม่สูงกว่า 900 kg/m³ และค่าความเป็นกรดต้องไม่สูงกว่า 0.50 mg KOH/g [11] ซึ่งมีค่าความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 865.28±0.12 ถึง 880.13±0.17 kg/m³ และค่าความเป็นกรดอยู่ระหว่าง 0.0358±0.0003 ถึง 0.0491±0.0002 mg KOH/g

3.4 ปริมาณเมทานอล และปริมาณกลีเซอรอลในน้ำมันไบโอดีเซล

ในการการตรวจวัดปริมาณค่าเมทานอลและปริมาณค่ากลีเซอรอลในน้ำมันไบโอดีเซลหลังจากผ่านกระบวนการล้างโดยเครื่องล้างไบโอดีเซลด้วยถ่านไบโอชาร์ จะเลือกใช้เงื่อนไขที่ดีที่สุดในการตรวจวัดคือ ปริมาณไบโอชาร์ 15%wt ที่ความเร็วรอบในการกวนผสมที่ 300 รอบ โดยแทนค่าด้วย B15S300 เนื่องจากเงื่อนไขนี้ให้คุณสมบัติของไบโอดีเซลมีค่าผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานที่ดีที่สุด โดยน้ำมันไบโอดีเซลตั้งต้นก่อนผ่านกระบวนการล้างด้วยตัวดูดซับแทนค่าด้วย Raw biodiesel ซึ่งมีปริมาณของเมทานอลใน

น้ำมันไบโอดีเซลอยู่ที่ 6.62 %wt และปริมาณของกลีเซอรอลอยู่ที่ 0.27 %wt หลังจากผ่านกระบวนการล้างโดยเครื่องล้างไบโอดีเซลด้วยถ่านไบโอชาร์ พบว่าปริมาณ ของกลีเซอรอลมีค่าที่ลดน้อยลงเป็น 0.05 %wt โดยปริมาณกลีเซอรอลนี้มีค่าที่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน โดยค่าตามเกณฑ์มาตรฐานคือ ปริมาณกลีเซอรอลจะต้องมีค่าที่ไม่เกิน 0.25 %wt ส่วนปริมาณของเมทานอลตามเกณฑ์มาตรฐานจะต้องมีค่าที่ไม่สูงกว่า 0.20 %wt ในส่วนปริมาณของเมทานอลที่ได้มีค่าที่ลดน้อยลงเป็น 0.39 %wt ซึ่งปริมาณของเมทานอลยังมีค่าที่ยังไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน [9]

Table 2 Methanol and Glycerol content in biodiesel after washing process by a biodiesel washing machine with biochar

Sample	Methanol (% wt.)	Glycerol (% wt.)
Raw biodiesel	6.62±0.04	0.27±0.00
B15S300	0.39±0.00	0.05±0.00

3.5 การล้างไบโอดีเซลโดยเครื่องล้างไบโอดีเซลด้วยถ่านไบโอชาร์เปรียบเทียบกับวิธีการล้างไบโอดีเซลด้วยการใช้น้ำ

ในการการเปรียบเทียบน้ำมันไบโอดีเซลที่ผ่านการล้างด้วยเครื่องล้างไบโอดีเซลด้วยถ่านไบโอชาร์กับการล้างไบโอดีเซลด้วยการใช้น้ำ จะพบว่าร้อยละผลผลิตของไบโอดีเซลที่ได้จากการล้างด้วยเครื่องล้างไบโอดีเซลด้วยถ่านไบโอชาร์จะมีค่าร้อยละผลผลิตใกล้เคียงกับวิธีการล้างไบโอดีเซลด้วยการใช้น้ำ และสามารถให้ค่าร้อยละผลผลิตของไบโอดีเซล (90.25%) ที่สูงกว่าวิธีการล้างไบโอดีเซลด้วยการใช้น้ำ (89.05%) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณถ่านไบโอชาร์และความเร็วรอบในการกวนผสม ในส่วนของคุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซล พบว่าการล้างด้วยเครื่องล้างไบโอดีเซลด้วยถ่านไบโอชาร์กับการล้างไบโอดีเซลด้วยการใช้น้ำ สามารถให้คุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซลผ่านเกณฑ์มาตรฐาน โดยคุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซลได้จากการล้างด้วยเครื่องล้างไบโอดีเซลจะขึ้นอยู่กับปริมาณถ่านไบโอชาร์และความเร็วรอบในการกวนผสมเช่นกัน

Table 3 The comparison of biodiesel characteristics between biodiesel washing method with biochar and biodiesel washing with water.

Test description	Biochar washing method	Water washing method
Biodiesel yield (%)	82.00 – 90.25	89.05
Water content (ppm)	166.33 – 321.38	219.1
Viscosity (cSt)	3.964 - 4.377	4.208
Density (kg/m ³)	865.28 – 880.13	878.92
Acidity (mg KOH/g)	0.0358 - 0.0491	0.0502

และเมื่อทำการเปรียบเทียบ ปริมาณกลีเซอรอล และปริมาณเมทานอล ของไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการล้างไบโอดีเซลด้วยถ่านไบโอชาร์ที่เงื่อนไขที่ดีที่สุด (ปริมาณของถ่านไบโอชาร์ 15 %wt และความเร็วรอบในการกวนผสม 300 รอบต่อนาที) กับการล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำ พบว่าปริมาณกลีเซอรอล และปริมาณเมทานอล ของไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการล้างไบโอดีเซลด้วยถ่านไบโอชาร์มีค่าความบริสุทธิ์ที่ดีกว่าไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการล้างด้วยน้ำ โดยค่าปริมาณกลีเซอรอลของไบโอดีเซลที่ผ่านการล้างด้วยถ่านไบโอชาร์ และไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการล้างด้วยน้ำคือ 0.05 %wt และ 0.23 %wt ตามลำดับ ซึ่งมีค่าที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานกำหนด ในส่วนปริมาณของเมทานอลของไบโอดีเซลที่ผ่านการล้างด้วยถ่านไบโอชาร์ และไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการล้างด้วยน้ำคือ 0.39 %wt และ 1.96 %wt ตามลำดับ โดยปริมาณเมทานอลที่ได้จากการล้างทั้งสองวิธีมีปริมาณของเมทานอลที่ยังไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานกำหนด

4. สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของ ความเร็วรอบในการกวนผสม และปริมาณของถ่านไบโอชาร์ต่อคุณสมบัติของ น้ำมันไบโอดีเซล และยังหาสภาวะที่เหมาะสมในการล้างไบโอดีเซลโดยเครื่องล้างไบโอดีเซลด้วยถ่านไบโอชาร์ ความเร็วรอบในการกวนผสม และปริมาณของถ่านไบโอชาร์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ร้อยละผลผลิตของไบโอดีเซลลดลง โดยร้อยละผลผลิตของไบโอดีเซล มีค่าอยู่ในช่วง 82.00 – 90.25% และส่งผลให้สมบัติของไบโอดีเซล ได้แก่ ปริมาณน้ำ ความหนืด ความหนาแน่น ความเป็นกรด มีค่าลดลง โดยสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการล้างไบโอดีเซลโดยเครื่องล้างไบโอดีเซลด้วยถ่านไบโอชาร์ ได้แก่ ปริมาณของถ่านไบโอชาร์ 15 %wt และความเร็วรอบในการกวนผสม 300 รอบต่อนาที สภาวะดังกล่าวจะส่งผลให้ไบโอดีเซลมีสมบัติต่างๆ ได้แก่ ปริมาณน้ำ ความหนืด ความหนาแน่น ความเป็นกรด และค่ากลีเซอรอลผ่านเกณฑ์มาตรฐาน แต่ค่าปริมาณเมทานอลยังมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ที่ได้สนับสนุนเงินทุนการวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Ramos, M., Dias, A.P.S., Puna, J.F., Gomes, J. and Bordado, J.C. 2019. Biodiesel production processes and sustainable raw materials. *Energies* 2019 (12): 4408
- [2] วัชรพล ปุณขันธ์, ประพันธ์ สันติวารการ, สมนึก อีระกุลพิศุทธิ์, และ ชนกนันท์ สุขกำเนิด. 2549. ผลกระทบของน้ำมันไบโอดีเซลต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซล. *วิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยขอนแก่น ปีที่ 33 ฉบับที่ 3*: 193-208
- [3] Feizollahnejad, M., Ghobadian, B., Zenouzi, A., and Motevali, A. 2013. Comparison of Mist Circulation Biodiesel Water Washing with Traditional Methods. *International Journal of Renewable Energy Technology Research*, Vol.2: 249-257
- [4] Manuale, D.L., Greco, E., Clementz, A., Torres, G.C., Vera, C.R., and Yori, J.C. 2014. Biodiesel purification in one single stage using silica as adsorbent. *Chemical Engineering Journal*, Vol.26: 372-379
- [5] Buasri, A., Chaikut, N., Loryuenyong, V., Rodklum, C., Chaikwan T, Kumphan, N., Jadee, K., Klinklom, P., and Wittayarounayut, W. 2012. Transesterification of waste frying oil for synthesizing biodiesel by KOH supported on coconut shell activated carbon in packed bed reactor. *ScienceAsia*, Vol.38: 283-288
- [6] วิไลวรรณ แผงสุภา. 2011. การทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกมังคุด. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโท). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, คณะวิทยาศาสตร์, สาขาเคมีเทคนิค.
- [7] สโรชา เพ็งศรี และ สมใจ เพ็งปรีชา. 2012.การกำจัดกลีเซอรินออกจากไบโอดีเซลที่เตรียมจากน้ำมันประกอบอาหารที่ใช้แล้ว โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน.
- [8] Manique, M.C., Faccini, C.S., Onorevoli, B., Benvenuti, E.V., and Caramao, E.B. 2012. Rice husk ash as an adsorbent for purifying biodiesel from waste frying oil. *Fuel*, Vol.92: 56-61
- [9] กรมธุรกิจพลังงาน. 2563. กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมัน: 1-4
- [10] Berrios, M., Martin, M.A., Chica, A.F., and Martin, A. 2011. Purification of biodiesel from used cooking oils. *Applied Energy*, Vol.88: 3625-3631
- [11] Gisela, M. and Margarita, S. 2011. Biodiesel – quality, emissions and by-products. In-Tech, Rijeka: Croatia

การประเมินโมเดลการเรียนรู้เชิงลึกสำหรับการตรวจจับและจำแนกความเสียหายของตู้คอนเทนเนอร์ Deep Learning Models Evaluation for Container Damage Detection and Classification

ธีรศักดิ์ อชชสวัสดิ์^{1,*} รัชณี กุลยานนท์²
Theerasak Uchchasawad^{1,*}, Rutchanee Gullaynoon²

¹สาขาวิศวกรรมหุ่นยนต์และระบบอัจฉริยะเชิงคำนวณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
²ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

¹Engineering Program in Robotics and Computational Intelligence Systems, Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang Bangkok

²Department of Control Engineering, Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang Bangkok

*Corresponding author: Theerasak Uchchasawad, e-mail address: 62601269@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการประเมินประสิทธิภาพของโมเดลการเรียนรู้เชิงลึกสำหรับการตรวจจับและจำแนกความเสียหายของตู้ขนส่งสินค้า (คอนเทนเนอร์) โดยใช้ทฤษฎีการตรวจจับวัตถุที่มีพื้นฐานจากโมเดลการเรียนรู้เชิงลึก ได้แก่ YOLOv8, Faster R-CNN และ EfficientDet โดยการวิจัยนี้ใช้ข้อมูลภาพจากกล้อง CCTV ที่ติดตั้งไว้ที่ช่องทางเข้า-ออกของรถหัวลาก ที่ท่าเรือแห่งหนึ่ง ซึ่งถูกนำมาแบ่งเป็นข้อมูลสำหรับเรียนรู้ ตรวจสอบและทดสอบ โดยในการวิจัยจะวัดประสิทธิภาพการตรวจจับความเสียหายและการจำแนกประเภทความเสียหาย 3 ประเภท ได้แก่ เป็นสนิม บิดเบี้ยว และ บุบ ซึ่งผลวิจัยพบว่า YOLOv8 มีค่าเฉลี่ยของค่าเฉลี่ยความแม่นยำที่ $IoU > 50$ (mAP50) สูงที่สุดโดยมีค่าเป็น 0.838 อีกทั้งยังมีผลการวัดประสิทธิภาพการจำแนกประเภทความเสียหาย ด้วยค่า F1-Score สูงที่สุดในทุกประเภทความเสียหาย โดยมีค่า F1-Score ของแต่ละประเภทเป็นดังนี้ เป็นสนิม 0.90, บิดเบี้ยว 0.89 และ บุบ 0.84 ดังนั้น YOLOv8 จึงมีประสิทธิภาพสูงที่สุด จากโมเดลที่เลือกมาประเมินในการตรวจจับและจำแนกประเภทความเสียหายของตู้ขนส่งสินค้า

คำสำคัญ: การตรวจจับความเสียหาย, การจำแนกความเสียหาย, โมเดลการเรียนรู้เชิงลึก, ตู้คอนเทนเนอร์, ท่าเรือ

Abstract

This study proposes evaluation of three deep learning model-based object detection algorithms: YOLOv8, Faster R-CNN, and EfficientDet for container damage detection and classification. The study uses image data from CCTV cameras installed at the entrance and exit of a truck lane at a container port which the image data is divided into training set, validation set and testing sets for research. The research evaluates the performance of damage detection and damage classification for 3 classes: Rust, Bend, and Dent. The experimental results demonstrated that YOLOv8 outperformed Faster R-CNN and EfficientNet with Mean average precision at $IoU > 0.5$: mAP50 recorded at 0.838. Furthermore, YOLOv8 demonstrates superior capability in damage classification, evidenced by its highest F1-Score for all classes: Rust (0.90), Bend (0.89) and Dents (0.84). Therefore, YOLOv8 emerges as the most effective model among those evaluated models for container damage detection and classification.

Keywords: Damage detection, Damage classification, Deep Learning Model, Container, Port

1. บทนำ

ในอุตสาหกรรมการขนส่งทางเรือ การขนส่งโดยตู้คอนเทนเนอร์ เป็นวิธีที่ใช้ทั่วไปในการขนส่งสินค้าทางเรือ ในการรับตู้คอนเทนเนอร์เข้าท่าเรือหรือส่งตู้คอนเทนเนอร์ออกจากท่าเรือ ปัจจุบันท่าเรือสมัยใหม่ได้นำระบบคอนเทนเนอร์เกทอัตโนมัติ มาทำรายการรับส่งตู้คอนเทนเนอร์ผ่านเข้าออกเกตโดยอัตโนมัติ จากข้อมูลบนตู้คอนเทนเนอร์ที่อ่านได้จากการประมวลผลภาพและการรู้จำอักขระด้วยแสง แทนการทำรายการโดยพนักงาน อย่างไรก็ตามกระบวนการตรวจสอบความเสียหายของตู้คอนเทนเนอร์เป็นขั้นตอนหนึ่งที่จะช่วยให้มั่นใจได้ว่าตู้คอนเทนเนอร์และสินค้าที่ขนส่งไปยังปลายทางจะไม่ได้รับความเสียหายระหว่างทาง ปัจจุบันกระบวนการตรวจสอบนี้ทำโดยพนักงานซึ่งอาจใช้เวลาและอาจจะไม่ถี่ถ้วน เนื่องจากการตรวจสอบด้วยตามนุษย์อาจพลาดรายละเอียดของความเสียหายบางจุดได้ หากความเสียหายไม่ถูกตรวจพบจนกระทั่งสินค้าถึงมือผู้รับลำดับถัดไป จะส่งผลกระทบต่อความน่าเชื่อถือของการให้บริการลดลงและอาจนำไปสู่การเรียกร้องค่าเสียหายได้ อีกทั้งยังมีค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับพนักงานในการตรวจสอบตู้คอนเทนเนอร์ด้วย ในบทความฉบับนี้จึงนำเสนอการตรวจจับและจำแนกความเสียหายของตู้คอนเทนเนอร์จากภาพกล้องวงจรปิด ทำให้กระบวนการตรวจสอบความเสียหายของตู้คอนเทนเนอร์มีความรวดเร็ว แม่นยำ และช่วยลดต้นทุนเกี่ยวกับพนักงานในการดำเนินงานได้ โดยประยุกต์ใช้ทฤษฎีการตรวจจับวัตถุที่มีพื้นฐานจากโมเดลการเรียนรู้เชิงลึก[1] ได้แก่ YOLOv8, Faster R-CNN และ EfficientDet ซึ่งเป็นเน็ตเวิร์คเฟรมเวิร์คที่มีประสิทธิภาพในการตรวจจับวัตถุ มาทดลองใช้การตรวจจับและจำแนกความเสียหายของตู้คอนเทนเนอร์ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพ สำหรับพิจารณานำไปพัฒนาต่อให้สามารถใช้งานร่วมกับระบบคอนเทนเนอร์เกทอัตโนมัติ เพื่อตรวจจับและจำแนกความเสียหายของตู้คอนเทนเนอร์โดยอัตโนมัติได้

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โมเดลการตรวจจับวัตถุและการสกัดคุณลักษณะ (Object detection model and feature extraction)

งานวิจัยโดย Liu และทีม [2] เสนอสถาปัตยกรรม SSD ในปี 2016 เพื่อการตรวจจับวัตถุที่เร็วขึ้นที่มีค่าความแม่นยำเฉลี่ยสูง SSD หรือ Single Shot MultiBox Detector ถูกใช้สำหรับการตรวจจับวัตถุ โดยประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ได้แก่ 1) การสกัดคุณสมบัติ (Feature Extraction) ส่วนนี้ทำหน้าที่ดึงคุณสมบัติที่สำคัญของวัตถุออกมาจากภาพ ซึ่งมักจะใช้ โครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน (CNN) และ 2) การฟิลเตอร์คอนโวลูชันสำหรับการตรวจจับวัตถุ (Convolution filters for object detection) ส่วนนี้ทำหน้าที่ระบุตำแหน่งและประเภทของวัตถุในภาพ โดยใช้ฟิลเตอร์คอนโวลูชันเพื่อสร้างกรอบ (Bounding box) ล้อมรอบวัตถุที่ตรวจจับ

เพื่อคำนวณความคลาดเคลื่อนระหว่างกรอบแท้จริง (ground truth box) กับกรอบที่คาดการณ์ (predicted box) งานวิจัยใช้ฟังก์ชันการสูญเสียตำแหน่ง (localization loss) ซึ่งรวมกับฟังก์ชันการสูญเสียอื่น ๆ เพื่อสร้างฟังก์ชันการสูญเสียทั้งหมดที่ใช้สำหรับปรับแต่งโมเดล ดังสมการ(1)

$$(1) \quad L(x, c, l, g) = \frac{1}{N} (L_{conf}(x, c) + \alpha L_{loc}(x, l, g))$$

โดยที่ x คือข้อมูลอินพุต (input data) เช่น ภาพ, c คือคาดการณ์คลาสหรือประเภทของวัตถุ (class predictions), l คือคาดการณ์ตำแหน่งกรอบที่ล้อมรอบวัตถุ (localization predictions), g คือข้อมูลจริง (ground truth) ที่ประกอบด้วยคลาสและตำแหน่งกรอบของวัตถุจริง, N คือจำนวนกรอบที่โมเดลทำนายได้ถูกต้องตรงกับกรอบวัตถุที่แท้จริง และ α คือน้ำหนักสำหรับฟังก์ชันการสูญเสียตำแหน่ง ส่วนที่เป็น L_{loc} คือ Localization Loss ซึ่งคำนวณจากความแตกต่างระหว่างกรอบที่ถูกต้องทำนายและกรอบของ Ground Truth สำหรับจับคู่ผลลัพธ์ที่เป็นบวก (positive matches) ส่วนของ L_{conf} คือ Confidence Loss ซึ่งคำนวณจากการสูญเสียในการจำแนกประเภท (classification loss) สำหรับการจับคู่ผลลัพธ์ที่เป็นบวก โดยฟังก์ชัน Softmax

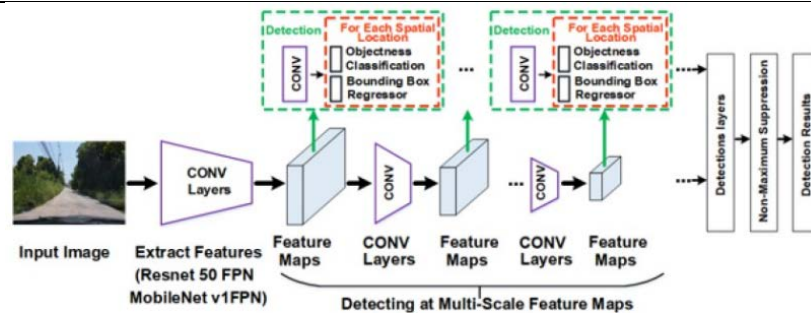


Figure 1 SSD Model Architecture

2.2 YOLOv8

YOLOv8 [3] เป็นโมเดลการเรียนรู้เชิงลึกสำหรับการตรวจจับวัตถุที่พัฒนาโดย Ultralytics โมเดลนี้ได้รับการออกแบบมาให้มีความเร็วและแม่นยำสูง YOLOv8 ใช้โครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมคอนโวลูชัน (CNN) แบบสถาปัตยกรรม Cross-Stage Partial (CSP) ร่วมกับโครงสร้าง Path Aggregation Network (PANet) โมเดลเรียนรู้ฟีเจอร์ที่ดีขึ้นโดยใช้ทรัพยากรการคำนวณน้อยลง และตรวจจับวัตถุขนาดเล็กได้แม่นยำขึ้น

YOLOv8 ใช้ฟังก์ชันการสูญเสียแบบ GIOU (Generalized Intersection over Union) ซึ่งเป็นการปรับปรุงฟังก์ชันการสูญเสีย IOU (Intersection over Union) แบบดั้งเดิม ดังสมการ (2)

$$(2) \quad GIOU = IOU - (A - B) / IOU + \epsilon$$

โดยที่ A คือ พื้นที่ของกรอบที่คาดการณ์, B คือ พื้นที่ของกรอบวัตถุที่แท้จริง และ ϵ คือค่า epsilon เล็กๆ เพื่อป้องกันการหารด้วยศูนย์

2.3 Faster R-CNN

Faster R-CNN (Region-based Convolutional Neural Network with Faster Proposals) เป็นโมเดลการเรียนรู้เชิงลึกสำหรับการตรวจจับวัตถุ (Object detection) ที่พัฒนาโดย Ren et al. ในปี 2015 [4]

โดยสถาปัตยกรรมของ Faster R-CNN จะประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ได้แก่ 1) Region Proposal Network (RPN) โครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมคอนโวลูชัน (CNN) เพื่อสร้างกรอบคร่าวๆ (Region Proposals) ของวัตถุที่อาจเป็นไปได้ในภาพ และ 2) Fast R-CNN: ใช้ CNN และ Fully-connected layer เพื่อจำแนกประเภทของวัตถุในแต่ละ Region Proposal และปรับแต่งกรอบให้แม่นยำขึ้น

ฟังก์ชันการสูญเสียของ Faster R-CNN ใช้ฟังก์ชันการสูญเสียแบบ Multi-task ซึ่งรวมฟังก์ชันการสูญเสีย 2 ประเภท ได้แก่ 1) ฟังก์ชันการสูญเสียสำหรับการจำแนกประเภท (Classification loss) คำนวณความผิดพลาดระหว่างประเภทของวัตถุที่แท้จริงกับที่คาดการณ์ และ 2) ฟังก์ชันการสูญเสียสำหรับตำแหน่ง (Localization loss) คำนวณความคลาดเคลื่อนระหว่างกรอบของวัตถุที่แท้จริง (Ground truth box) กับกรอบที่คาดการณ์ ดังสมการ (3)

$$(3) \quad L = L_{cls} + \lambda * L_{reg}$$

โดยที่ L_{cls} คือ ฟังก์ชันการสูญเสียสำหรับการจำแนกประเภท, L_{reg} คือ ฟังก์ชันการสูญเสียตำแหน่ง และ λ คือค่า hyperparameter ที่ควบคุมความสำคัญของ L_{reg}

2.4 EfficientDet

EfficientDet (Efficient Detection) [5] เป็นโมเดลการเรียนรู้เชิงลึกสำหรับการตรวจจับวัตถุ (Object detection) พัฒนาโดย Google AI ใช้โครงสร้าง CNN แบบ EfficientNet ที่ช่วยให้โมเดลเรียนรู้ฟีเจอร์ได้ดีขึ้นโดยใช้ทรัพยากรการคำนวณน้อยลง ร่วมกับโครงสร้าง Feature Pyramid Network (FPN) ช่วยรวมฟีเจอร์จากหลายระดับความละเอียดเข้าด้วยกัน ซึ่งช่วยให้โมเดลตรวจจับวัตถุขนาดเล็กได้แม่นยำขึ้น สมการของฟังก์ชันการสูญเสียของ EfficientDet จะใช้แบบ Multi-task ดังสมการ (3)

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 การออกแบบการทดลอง

การดำเนินการทดลองเพื่อวัดผลประสิทธิภาพของโมเดลสำหรับตรวจจับและจำแนกประเภทความเสียหายของตู้คอนเทนเนอร์ ดังรายละเอียดและลำดับขั้นตอนตามที่แสดงใน Figure 2 เริ่มจากการรวบรวมเก็บรูปภาพความเสียหายของตู้คอนเทนเนอร์จากกล้อง CCTV ของรถหัวลากที่ผ่านเข้า-ออกท่าเรือเพื่อใช้เป็นชุดข้อมูล (Dataset) สำหรับทำการทดลอง โดยแยกประเภทความเสียหายดังตาราง Table 1 Container damage categories, ทำการกำกับข้อมูล (Annotation) ให้กับรูปภาพได้แก่พิกัดและประเภทความเสียหาย, การแบ่งชุดข้อมูลสำหรับเรียนรู้ (Training set), ตรวจสอบ (validation set), และวัดผล (Test set) พร้อมทำการปรับสภาพของชุดข้อมูล ได้แก่ การปรับขนาดภาพ, การแปลงค่าสเกลสีให้เป็นค่าบรรทัดฐาน (Normalization) ให้เหมาะสมต่อการเรียนรู้ของโมเดล, ฝึกฝนโมเดลที่เลือกด้วยชุดข้อมูลเดียวกัน ดังตารางที่ Table 2 Model training parameters, และประเมินประสิทธิภาพของโมเดลที่เลือกด้วยชุดข้อมูลสำหรับวัดผล วิเคราะห์ผลลัพธ์และปรับปรุงโมเดล

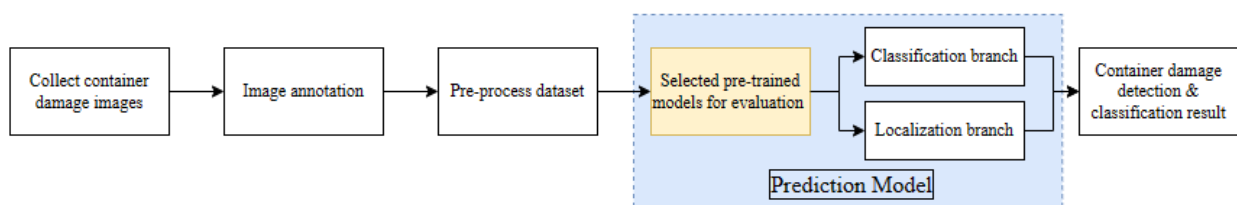
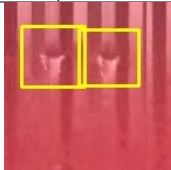


Figure 2 Experimental steps

3.2 การเตรียมชุดข้อมูลการเรียนรู้

ประเภทความเสียหายของตู้คอนเทนเนอร์จะถูกกำหนดออกเป็น 3 ประเภทด้วยกันได้แก่ เป็นสนิม(Rust), บิดเบี้ยว (Bend) และ บุบ(Dent) โดยจะนำรูปภาพความเสียหายของตู้คอนเทนเนอร์ที่ได้จากภาพกล้อง CCTV ตามประเภทความเสียหายมาเพื่อประเมินผลโมเดลที่เลือก ภาพข้อมูลตัวอย่างใน Table 1 Container damage categories

Table 1 Container damage categories

ประเภทความเสียหาย (Class)	บุบ (Dent)	เป็นสนิม (Rust)	บิดเบี้ยว (Bend)
ตัวอย่าง 1			
ตัวอย่าง 2			

ภาพความเสียหายทั้งหมดจะถูกทำการกำกับข้อมูล (Annotation) โดยการอัปโหลดไปยัง Roboflow ซึ่งเฟรมเวิร์คสำหรับผู้พัฒนา computer vision ที่สามารถทำการกำกับข้อมูลโดยกำหนดพิกัดและประเภทความเสียหายในรูปภาพเพื่อสร้างเป็นชุดข้อมูล (Dataset) และนำออกมาใช้สำหรับฝึกฝนโมเดลได้ ทำการเพิ่มขนาดและความหลากหลายของชุดข้อมูล (Data augmentation) โดยการสุ่มกลับภาพ (Flip), สุ่มหมุนภาพ (Rotate), ปรับขนาดภาพเป็น 800x800, และการแปลงค่าสเกลเฉดสีให้เป็นค่าบรรทัดฐาน (Normalization) โดยการหารด้วย 255 เพื่อให้เหมาะสมต่อการฝึกฝนโมเดล ชุดข้อมูลทั้งหมดจะถูกแบ่งออกเป็นชุดข้อมูลสำหรับเรียนรู้ (Training set), ตรวจสอบ (Validation set), และวัดผล (Test set) ในอัตราส่วน 70:20:10

3.3 การประมวลผลการทดลอง

ทำการฝึกฝนโมเดลเพื่อตรวจจับและจำแนกความเสียหายของตู้คอนเทนเนอร์ ทั้ง 3 โมเดลที่เลือกมา ด้วยค่าพารามิเตอร์ดัง Table 2

Table 2 Model training parameters

	YOLOv8	Faster R-CNN	Efficientdet
การฝึกฝนโมเดล	บน Google Colab โดยใช้การ์ดจอแบบ L4 GPU		
การตั้งค่าพารามิเตอร์	Optimizer: Adam	Optimizer: SGD	Optimizer: Adam
สำหรับฝึกฝนโมเดล	Learning Rate: 0.001	Learning Rate: 0.001	Learning Rate: 0.0005
	Momentum: 0.9	Momentum: 0.9	Momentum: 0.9
	Epochs: 100	Epochs: 100	Epochs: 100
	Reduce LR Factor: 0.1	Reduce LR Factor: 0.05	Reduce LR Factor: 0.1
	Batch size: 8	Batch size: 8	Batch size: 8

3.4 การประเมินผลการทดลอง

ในการวิจัยนี้ เพื่อประเมินโมเดลโดยใช้ Intersection Over Union (IoU), ค่าเฉลี่ยความแม่นยำ (AP) หรือค่าเฉลี่ยของค่าเฉลี่ยความแม่นยำ (mAP)

1) ค่าไอโอยู (Intersection Over Union) ใช้ประเมินความแม่นยำในการตรวจจับวัตถุ โดยการวัดพื้นที่ที่ซ้อนทับกันระหว่างกรอบแท้จริง (Ground truth box) กับกรอบที่คาดการณ์ (Predicted box) โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0 (ไม่ซ้อนทับกัน) ถึง 1 (ซ้อนทับกันสนิท) ดังสมการ (4)

$$(4) \text{IoU} = \frac{\text{Area of Overlap}}{\text{Area of Union}}$$


2) ค่าเฉลี่ยความแม่นยำ (Average precision: AP) เป็นค่าที่ใช้วัดประสิทธิภาพของการตรวจจับวัตถุ โดยพิจารณาจากความแม่นยำ (Precision) ซึ่งได้มาจากการคำนวณพื้นที่ใต้กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Recall (อัตราส่วนของวัตถุที่ตรวจจับได้ถูกต้อง) กับ ค่า IoU เป็นค่าความทับซ้อนระหว่างกรอบแท้จริง (ground truth box) กับกรอบที่คาดการณ์ (predicted box) ดังสมการ (5)

$$(5) AP = \sum_{i=1}^{n-1} (r_{i+1} - r_i) \text{Pinterp}(r_{i+1})$$

เมื่อ r คือ ค่า Recall เป็นค่าอัตราส่วนของวัตถุที่โมเดลตรวจจับได้ถูกต้อง, Pinterp คือการกำหนดค่าใหม่ให้ค่าความแม่นยำ ซึ่งค่าสูงสุดของค่าความแม่นยำจะเท่ากับ ค่าสูงสุดของอัตราส่วนของวัตถุที่โมเดลตรวจจับได้ในแต่ละระดับ โดยที่ i เป็นตัวแปรที่ใช้ในการวนลูปเพื่อคำนวณผลรวมของค่า precision ที่ระดับ recall ต่างๆ โดยที่ $i = 1$ หมายถึง ค่าแรกในการคำนวณผลรวม $i = n - 1$ หมายถึง ค่าสุดท้ายในการคำนวณผลรวม ส่วน n คือจำนวนระดับ recall ทั้งหมด

โดยค่าความแม่นยำ (Precision) คือการวัดประสิทธิภาพของการตรวจจับวัตถุ โดยดูจากอัตราส่วนของจำนวนวัตถุที่ตรวจจับได้ถูกต้อง (TP) จากจำนวนวัตถุที่ถูกตรวจจับได้ทั้งหมด (TP + FP) ดังสมการ (6)

$$(6) \text{Precision} = \frac{TP}{TP+FP}$$

ค่าความระลึก (Recall) คือการวัดประสิทธิภาพของการตรวจจับวัตถุ โดยดูจากอัตราส่วนของจำนวนวัตถุที่ตรวจจับได้ถูกต้อง (TP) จากวัตถุที่ถูกต้องทั้งหมด (TP+FN) ดังสมการ (7)

$$(7) \text{Recall} = \frac{TP}{TP+FN}$$

เมื่อ TP: True positive, FP: False positive, FN: False Negative

3) ค่าเฉลี่ยของค่าเฉลี่ยความแม่นยำ (Mean average precision: mAP) เป็นค่าที่ใช้วัดประสิทธิภาพของโมเดลการจำแนกวัตถุ โดยเฉพาะโมเดลที่ใช้สำหรับงานตรวจจับวัตถุ โดยจะนำค่าเฉลี่ยความแม่นยำ (Average precision: AP) ของทุกคลาสมาทำการหาค่าเฉลี่ย ดังสมการ (8)

$$(8) \quad mAP = \frac{\sum_{i=1}^K AP_i}{K}$$

เมื่อ K คือ จำนวนคลาสทั้งหมด, AP_i คือ ค่าเฉลี่ยความแม่นยำของคลาสที่ i

4) การวัดประสิทธิภาพโมเดลการจำแนกประเภท

ค่าความถูกต้อง (Accuracy) คือการวัดสัดส่วนตัวอย่างที่โมเดลจำแนกได้ถูกต้องทั้งหมด ไม่เหมาะกับโมเดลที่มีคลาสจำนวนมาก สามารถคำนวณได้ดังสมการ (9)

$$(9) \quad Accuracy = \frac{(TP+TN)}{(TP+TN+FP+FN)}$$

F1-Score คือการวัดประสิทธิภาพการจำแนกประเภท โดยคำนวณจากค่าเฉลี่ยฮาร์โมนิกของ ความแม่นยำ (Precision) และ ค่าความระลึก (Recall) สามารถคำนวณได้ดังสมการ (10)

$$(10) \quad F1 - Score = \frac{2 * (Precision * Recall)}{(Precision + Recall)}$$

3.5 ผลการประเมิน

ผลการจำแนกประเภทความเสียหายของตู้คอนเทนเนอร์ ของแต่ละประเภทความเสียหายได้แก่ เป็นสนิม (Rust), บิดเบี้ยว (Bend) และ บุบ (Dent) สามารถแสดงได้โดยตาราง Confusion Matrix ดัง Table 3 ซึ่งจะแสดงผลการทดลองด้วยชุดข้อมูลสำหรับทดสอบ (Test set) แยกตามประเภทความเสียหายของแต่ละโมเดล โดยแกนแนวนอนแสดงประเภทความเสียหายที่โมเดลคาดการณ์ และแกนแนวตั้งแสดงประเภทความเสียหายจากข้อมูลจริง ซึ่งสามารถใช้วิเคราะห์ได้ว่าโมเดลใดมีประสิทธิภาพในการจำแนกประเภทความเสียหายได้ดีที่สุด

Table 3 Confusion matrix for classification evaluation

		YOLOv8				Faster R-CNN				EfficientDet			
		ค่าที่แท้จริง (True)											
		เป็นสนิม (Rust)	บิดเบี้ยว (Bend)	บุบ (Dent)	ฉากหลัง (Background)	เป็นสนิม (Rust)	บิดเบี้ยว (Bend)	บุบ (Dent)	ฉากหลัง (Background)	เป็นสนิม (Rust)	บิดเบี้ยว (Bend)	บุบ (Dent)	ฉากหลัง (Background)
การคาดการณ์ (Predicted)	เป็นสนิม (Rust)	397	0	8	13	245	1	3	82	293	0	4	47
	บิดเบี้ยว (Bend)	0	93	0	0	0	51	5	23	0	58	0	14
	บุบ (Dent)	1	0	146	5	28	6	72	66	14	3	101	84
	ฉากหลัง (Background)	69	24	43	0	194	59	117	0	160	56	92	0
Accuracy		0.87	0.96	0.92	0.82	0.54	0.80	0.62	0.40	0.67	0.86	0.70	0.50
Precision		0.95	1.00	0.96		0.74	0.65	0.42		0.85	0.81	0.50	
Recall		0.85	0.79	0.74		0.52	0.44	0.37		0.63	0.50	0.51	
F1-score		0.90	0.89	0.84		0.61	0.52	0.39		0.72	0.61	0.51	

จากตาราง Confusion Matrix ที่แสดงผลการจำแนกความเสียหายแยกตามประเภทของแต่ละโมเดล สามารถวิเคราะห์ประสิทธิภาพของแต่ละโมเดลออกมาได้ โดยค่า Precision, Recall และ F1-score โดยโมเดล YOLOv8 มีค่า F1-score ของแต่ละประเภทความเสียหายเป็น สนิม (Rust) 0.90, บิดเบี้ยว (Bend) 0.89 และ บุบ (Dent) 0.84, โมเดล EfficientDet มีค่า F1-score ของแต่ละประเภทความเสียหายเป็น สนิม (Rust) 0.72, บิดเบี้ยว (Bend) 0.61 และ บุบ (Dent) 0.51, และ โมเดล Faster R-CNN มีค่า F1-score ของแต่ละประเภทความเสียหายเป็น เป็นสนิม (Rust) 0.61, บิดเบี้ยว (Bend) 0.52 และ บุบ (Dent) 0.39

โดยพบว่าโมเดลที่ดีที่สุดคือ YOLOv8 ซึ่งมีผลการจำแนกความเสียหายทั้ง 3 ประเภทอยู่ในระดับดี โดยมีประสิทธิภาพในการจำแนกความเสียหายประเภท เป็นสนิม (Rust) ที่ให้ผล True Positive สูง เนื่องจากในชุดข้อมูลมีคลาสที่เป็นสนิม (Rust) ในสัดส่วนที่มากกว่าความเสียหายประเภทอื่นๆ ดังรูปตัวอย่างการตรวจจับและจำแนกความเสียหายด้วย YOLOv8 ใน Figure 4 ถัดมาเป็น บิดเบี้ยว (Bend) และบุบ (Dent) ตามลำดับ แต่ยังพบผลการจำแนกประเภทผิดเป็นพื้นหลัง(Background) อยู่หลายรายการ



Figure 4 Sample container damage detection and classification by YOLOv8

ส่วนระยะเวลาฝึกฝนที่ใช้บ่งชี้ประสิทธิภาพของโมเดล และ การประเมินความแม่นยำการตรวจจับความเสียหายโดยรวม ซึ่งประเมินด้วย ค่าเฉลี่ยของค่าเฉลี่ยความแม่นยำ (Mean average precision: mAP) ซึ่งเปรียบเทียบผลเปรียบเทียบจากทั้ง 3 โมเดล ดังแสดง Table 4

Table 4 Model evaluation by training time and mAP

โมเดล	YOLOv8	Faster R-CNN	EfficientDet
ระยะเวลาฝึกฝน(ชั่วโมง)	0.969	1.9	1.1
ค่าเฉลี่ยของค่าเฉลี่ยความแม่นยำ (mAP, IoU>0.5)	0.838	0.342	0.514

โดยผลการประเมินประสิทธิภาพของโมเดลด้วยระยะเวลาฝึกฝนโมเดล (Training Time) พบว่า YOLOv8 ใช้เวลาน้อยที่สุด โดยใช้เวลาไป 0.969 ชั่วโมง ในขณะที่ EfficientDet ใช้เวลา 1.1 ชั่วโมง และ Faster R-CNN ใช้เวลา 1.9 ชั่วโมง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโมเดล YOLOv8 มีความซับซ้อนน้อยกว่า และสามารถเรียนรู้โดยมีประสิทธิภาพมากกว่า

ส่วนการประเมินความแม่นยำการตรวจจับความเสียหายโดยรวม ด้วยค่าเฉลี่ยความแม่นยำ (mean Average Precision - mAP) ที่ IoU > 0.5 : mAP50 YOLOv8 มีค่าสูงที่สุดเป็น 0.838, EfficientDet มีค่า 0.514 ในขณะที่ Faster R-CNN มีค่าต่ำมากเพียง 0.342 โดยทั่วไปแล้ว ค่า mAP ที่สูงกว่า 0.5 ถือว่ามีประสิทธิภาพดี ดังนั้นจากผลการทดลอง YOLOv8 จึงมีประสิทธิภาพในการตรวจจับและจำแนกประเภทความเสียหายดีที่สุด จากโมเดลที่เลือกมาประเมินในการตรวจจับและจำแนกประเภทความเสียหายตู้ขนส่งสินค้า

4. สรุป

จากผลการประเมิน 3 โมเดลการเรียนรู้เชิงลึก ได้แก่ YOLOv8, Faster R-CNN, EfficientDet ที่นำมาใช้ในการตรวจจับและจำแนกความเสียหายของตู้คอนเทนเนอร์ พบว่า

การวัดผลการประเมินประสิทธิภาพการจำแนกประเภทความเสียหาย ด้วยค่า F1-Score พบว่า โมเดล YOLOv8 สามารถจำแนกความเสียหายได้ดีที่สุด โดยมีค่า F1-score ของแต่ละประเภทความเสียหายดังนี้ เป็นสนิม (Rust) 0.90, บิดเบี้ยว (Bend) 0.89 และ บุบ (Dent) 0.84 โดยพบการจำแนกความเสียหายประเภท เป็นสนิม (Rust) ค่อนข้างสูง เนื่องจากมีข้อมูลที่ใช้ฝึกฝนและทดสอบ ประเภทความเสียหาย เป็นสนิม (Rust) ในสัดส่วนค่อนข้างสูง ในขณะที่ประเภทความเสียหายอื่นๆมีความแม่นยำที่ต่ำกว่า สาเหตุอาจเกิดจากจำนวนข้อมูลแต่ละประเภทความเสียหายที่ใช้ในการฝึกฝนไม่สมดุลกัน (imbalance)

ส่วนการประเมินประสิทธิภาพโมเดลการตรวจจับความเสียหายด้วยค่าเฉลี่ยของค่าเฉลี่ยความแม่นยำ (Mean average precision: mAP) พบว่า YOLOv8 มีค่าสูงที่สุดคือ 0.838 ในขณะที่ Faster R-CNN มีค่าอยู่ที่ 0.342 และ EfficientDet มีค่าอยู่ที่ 0.514 แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่ดีของ YOLOv8 ในการประยุกต์ใช้กับปัญหาการตรวจจับความเสียหายของตู้คอนเทนเนอร์ในงานวิจัยนี้ อย่างไรก็ตาม ยังมีส่วนที่ต้องปรับปรุงในเรื่องของการจำแนกประเภทความเสียหายบุบหรือการคัดแยกคลาสต่างๆ ออกจากพื้นหลัง ซึ่งจากตาราง Confusion Matrix ดัง Table 3 ทุกโมเดลยังมีปัญหาในจุดนี้ค่อนข้างมาก การศึกษาเพิ่มเติมเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในส่วนนี้ อาจทำให้ค่า mAP โดยรวมดีขึ้นไปอีก

ดังนั้นการเลือกใช้โมเดลการเรียนรู้เชิงลึก YOLOv8 จึงมีความเหมาะสมที่สุดจากโมเดลทั้ง 3 ที่เลือกมาเปรียบเทียบเนื่องจากโมเดลนี้ไม่เพียงแต่มีประสิทธิภาพสูงในการตรวจจับและจำแนกความเสียหายที่เกิดขึ้นกับตู้คอนเทนเนอร์เท่านั้น แต่ยังมีความสามารถในการประมวลผลได้รวดเร็ว ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับการใช้งานในสภาพแวดล้อมจริงที่ต้องการความรวดเร็วและความแม่นยำที่จะสามารถนำไปพัฒนาการตรวจจับและจำแนกความเสียหายของตู้คอนเทนเนอร์เพื่อใช้งานร่วมกับระบบคอนเทนเนอร์เกออดโนมิตต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมหุ่นยนต์และระบบอัจฉริยะเชิงคำนวณ คณะอาจารย์ ที่ชี้แนะให้คำปรึกษาในการทำวิจัยในครั้งนี้ด้วยครับ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Zhong-Qiu Zhao, Peng Zheng, Shou-Tao Xu, and Xindong Wu 2019. Object Detection with Deep Learning: A Review., IEEE TRANSACTIONS ON NEURAL NETWORKS AND LEARNING SYSTEMS, VOL. 30, NO. 11, NOVEMBER 2019, pp.3212-3232
- [2] T. Y. Lin, P. Goyal, R. Girshick, K. He, and P. Dollar 2017, Focal loss for dense object detection, In Proceedings of the IEEE international conference on computer vision, pp.2980-2988, 2017.
- [3] Gleen Jocher, YOLOv8 by Ultralytics, 2024, [Online]. Available: <https://docs.ultralytics.com/models/yolov8/>
- [4] S. Ren et al., Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks., In: Proceeding of NIPS, 2015, pp. 91–99.
- [5] Mingxing Tan Ruoming Pang Quoc V. Le, EfficientDet: Scalable and Efficient Object Detection., In: arXiv:1911.09070v7 [cs.CV] 27 Jul 2020

การผลิตถ่านชีวภาพแม่เหล็กจากขี้เลื่อยไม้ยางพาราสำหรับการกำจัดตะกั่ว The production of magnetic biochar from rubber wood sawdust for lead removal

ธาวิน พินทอง¹, ธัชพล จุ่งเจริญ^{1,*}, อรสา ชูละเอียด², นพดล เกตุพิมล² และ วารุณี ลิมม้น¹
Thawin Pinthong¹, Thatchapol Chungcharoen^{1,*}, Orasa Choolaaied², Nopadol Katpimol² and Warunee Limmun¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

²งานบริการห้องปฏิบัติการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

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

²Laboratory service, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Prince of Chumphon Campus, Chumphon

*Corresponding author: Thatchapol Chungcharoen, e-mail address: thatchapol.ch@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิไพโรไลซิส และขั้นตอนการผลิตถ่านชีวภาพแม่เหล็กจากขี้เลื่อยไม้ยางพารา ที่ส่งผลต่อร้อยละผลผลิต ค่า pH หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว และประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่ว โดยใช้อุณหภูมิไพโรไลซิส 600 และ 800°C เป็นเวลา 1h ที่อัตราการไหลไนโตรเจน 200 mL/min และอัตราการให้ความร้อนที่ 5 °C/min และใช้ขั้นตอนการผลิตแบบ 1 และ 2 ขั้นตอน โดยการผลิตแบบ 1 ขั้นตอน คือการนำชีวมวลมากระตุ้นและไพโรไลซิสเป็นถ่านชีวภาพแม่เหล็ก และการผลิตแบบ 2 ขั้นตอน คือการนำชีวมวลไปไพโรไลซิสเป็นถ่านชีวภาพ แล้วนำไปกระตุ้นและไพโรไลซิสอีกครั้งเป็นถ่านชีวภาพแม่เหล็ก โดยดัดแปลงให้มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กด้วยเฟอร์ริกคลอไรด์ จากการศึกษาพบว่าทุกเงื่อนไขการผลิตมีการปรากฏหมู่ฟังก์ชันที่ประกอบด้วยออกซิเจน ซึ่งเป็นกลุ่มที่มีความสามารถในการจับกับไอออนของตะกั่ว และพบว่าเมื่ออุณหภูมิไพโรไลซิสเพิ่มขึ้น ร้อยละผลผลิตจะลดลง แต่ค่า pH และประสิทธิภาพในการดูดซับสารตะกั่วเพิ่มขึ้น และยังพบว่าขั้นตอนการผลิตแบบ 2 ขั้นตอน ส่งผลให้ร้อยละผลผลิตลดลง แต่สำหรับค่า pH และประสิทธิภาพในการดูดซับสารตะกั่ว พบว่าที่อุณหภูมิ 600°C การผลิตแบบ 1 ขั้นตอน ส่งผลให้ค่า pH และประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วเพิ่มขึ้น และที่อุณหภูมิ 800°C การผลิตแบบ 2 ขั้นตอน ส่งผลให้ ค่า pH และประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วเพิ่มขึ้น โดยประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วจะสูงสุดที่ 33.35±7.79%

คำสำคัญ: ถ่านชีวภาพแม่เหล็ก, ขี้เลื่อยไม้ยางพารา, การดูดซับตะกั่ว

Abstract

The purpose of this research is to study the effect of pyrolysis temperature and production steps on the yield percentage, pH value, functional groups on the surface, and lead adsorption efficiency of magnetic biochar produced from rubber wood sawdust. The study uses pyrolysis temperatures of 600°C and 800°C for 1 h at a nitrogen flow rate of 200 mL/min and a heating rate of 5 °C/min, and employs both 1-step and 2-step production processes. The 1-step production process involves activating biomass and pyrolysis it into magnetic biochar. and 2-step production, namely taking biomass to pyrolysis into biochar. Then it is activated and pyrolyzed again into magnetic biochar. It was modified to have magnetic properties with ferric chloride. From the study it was found that All production conditions showed the presence of functional groups containing oxygen. Which is a group that has the ability to bind to lead ions. It was also found that when the pyrolysis temperature increases, the percentage yield and distribution of iron oxide decrease, but the pH value and lead adsorption efficiency increase. It was also found that the 2-step production process resulted in a decrease in the percentage of yield and distribution of iron oxide, but for the pH value and lead adsorption efficiency, It was found that at 600°C, one-step production resulted in an increase in pH and lead adsorption efficiency. And at a temperature of 800°C, the two-step production process results in an increase in pH and lead adsorption efficiency. The efficiency in absorbing lead is highest at 33.35±7.79%.

Keywords: magnetic biochar, rubber wood sawdust, lead absorption

1. บทนำ

โลหะหนักเป็นหนึ่งในสาเหตุสำคัญในการก่อให้เกิดปัญหาน้ำเสีย โดยเฉพาะสารตะกั่ว (Pb(II)) ทั้งนี้เนื่องจากตะกั่วมีความเป็นพิษสูง และเป็นหนึ่งในโลหะหนักที่พบมากที่สุดที่ใช้น้อยอย่างแพร่หลายในกิจกรรมทางอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การชุบโลหะ การกลั่นน้ำมัน การผลิตแบตเตอรี่ การทำเหมืองแร่ แก้วเซรามิก และอื่นๆ ซึ่งอุตสาหกรรมเหล่านี้มีการปล่อยน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนและตกค้างของตะกั่วออกสู่สิ่งแวดล้อม ก่อให้เกิดปัญหาน้ำเสียและเป็นภัยคุกคามต่อสุขภาพของมนุษย์ ส่งผลให้ร่างกายของมนุษย์และสิ่งมีชีวิตเกิดความผิดปกติร้ายแรงจากการทำลายระบบต่างๆ ภายใน [1] ทั้งนี้ได้มีการกำหนดระดับ Pb(II) ที่อนุญาตในน้ำดื่ม โดยองค์การอนามัยโลก (WHO) สหภาพยุโรป (EU) สำนักงานคุ้มครองสิ่งแวดล้อมของสหรัฐอเมริกา (USEPA) และแนวทางปฏิบัติสำหรับคุณภาพน้ำดื่มของแคนาดา คือ 0.01, 0.01, 0.015 และ 0.01 mg/L ตามลำดับ [2, 3] ระดับความเข้มข้นนี้ถือเป็นเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับได้ ดังนั้นการกำจัดตะกั่วให้อยู่ภายใต้เกณฑ์มาตรฐานจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในด้านความปลอดภัยต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม ซึ่งวิธีการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียมีหลากหลายวิธี เช่น การตกตะกอน การจับตัวเป็นก้อน การแลกเปลี่ยนไอออน และการแยกเมมเบรน แต่วิธีการเหล่านี้ยังมีข้อจำกัดด้านการใช้งานที่ยุ่งยาก และต้นทุนที่สูง [4] การดูดซับจากวัสดุเหลือทิ้งจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากต้นทุนการผลิตที่ต่ำ วัสดุเหลือทิ้งได้หลายครั้ง และสามารถเลือกจำเพาะโดยกลุ่มฟังก์ชันของวัสดุดูดซับที่ต้องการ [5]

ไบโอชาร์หรือถ่านชีวภาพถือเป็นวัสดุดูดซับที่มีประสิทธิภาพ ประกอบด้วยคาร์บอนเป็นหลัก มีความพรุน และพื้นที่ผิวสูง ซึ่งผลิตจากวัสดุชีวภาพภายใต้การเผาไหม้ด้วยความร้อนที่สภาวะออกซิเจนจำกัด [6] การดูดซับเป็นกลไกหลักของถ่านชีวภาพเพื่อกำจัดโลหะหนักและสารมลพิษอินทรีย์ [7] โดยวัสดุชีวภาพสำหรับการผลิตถ่านชีวภาพนั้นมีหลากหลาย และขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ความเป็นวัสดุชีวภาพที่มีความน่าสนใจ จากการที่ไม่สามารถแปรรูปเป็นไม้แปรรูป ไม้ซุง แผ่นใยไม้อัด พาร์ติเคิลบอร์ด และอื่นๆ ได้ ในขณะที่เดียวกันก็ก่อให้เกิดขยะโดยเฉพาะขี้เลื่อย และเนื่องจากขี้เลื่อยประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลักโนเซลลูโลสที่สูง ได้แก่ เซลลูโลส 63.69 wt% เฮมิเซลลูโลส 12.52 wt% และลิกนิน 16.71 wt% อีกทั้งยังมีปริมาณคาร์บอนที่สูงและปริมาณธาตุที่ต่ำ คือ 45.15 wt% และ 1.53 wt% ตามลำดับ [8] ซึ่งเป็นคุณสมบัติตั้งต้นที่เหมาะสมต่อการผลิตถ่านชีวภาพ Shaaban et al. [9] 2013 ได้ศึกษาการนำขี้เลื่อยไม้ยางพารามาผลิตถ่านชีวภาพ พบว่าถ่านชีวภาพที่ได้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับเป็นวัสดุดูดซับที่ดี ทั้งนี้ยังมีการนำถ่านชีวภาพมาพัฒนาให้มีคุณสมบัติของแม่เหล็ก เรียกว่าถ่านชีวภาพแม่เหล็ก เพื่อเพิ่มคุณสมบัติในการแยกออกจากสารละลายได้ง่ายและรวดเร็วด้วยคุณสมบัติทางแม่เหล็ก และยังไม่มีการศึกษาการทำถ่านชีวภาพแม่เหล็กจากขี้เลื่อยไม้ยางพารา

โลหะทรานซิชัน หรือเหล็กออกไซด์ ถูกนำมาใช้ในถ่านชีวภาพเพื่อสร้างถ่านชีวภาพแม่เหล็ก เป็นการปรับปรุงสภาพให้ถ่านชีวภาพอยู่ในสภาพคล้ายแม่เหล็ก ซึ่งถ่านชีวภาพแม่เหล็กจะมีความสามารถในการแยกออกจากตัวกลางได้ง่ายและรวดเร็วด้วยคุณสมบัติของแม่เหล็ก การใช้แม่เหล็กในถ่านชีวภาพยังมีประโยชน์ในการปรับปรุงคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของถ่านชีวภาพให้เหมาะสำหรับการกำจัดสารมลพิษต่างๆ ออกจากสารละลายที่เป็นน้ำ เช่น มลพิษอินทรีย์ น้ำที่ปนเปื้อนจากนิเวศเสีย รวมถึงไปถึงโลหะหนักต่างๆ [10] อีกทั้งยังสามารถกำจัดตะกั่วออกจากน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ [11] ทั้งนี้ประสิทธิภาพในการดูดซับของถ่านชีวภาพแม่เหล็กมีความสัมพันธ์โดยตรงกับเงื่อนไขการผลิต เช่น ขั้นตอนการผลิต และอุณหภูมิโพโรไลซิส นอกจากนี้ ขั้นตอนการผลิต และอุณหภูมิโพโรไลซิส ยังเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อคุณลักษณะต่างๆ ของถ่านชีวภาพแม่เหล็กเช่น ร้อยละผลผลิต ค่า pH และหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านชีวภาพแม่เหล็ก ในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาผลกระทบของเงื่อนไขต่างๆ ได้แก่ ขั้นตอนการผลิต ถ่านชีวภาพแม่เหล็ก และอุณหภูมิที่แตกต่างกันในการผ่านกระบวนการโพโรไลซิส ที่ส่งผลต่อร้อยละผลผลิต ค่า pH หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว และประสิทธิภาพในการดูดซับสารตะกั่ว

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุตั้งต้น

ขี้เลื่อยไม้ยางพาราสายพันธุ์ RRIM 600 จากพื้นที่ในจังหวัดชุมพร โดยมีความชื้นเริ่มต้นอยู่ที่ 26.67% (d.b.) มีขนาดของขี้เลื่อยไม่ต่ำกว่า 425 μm และสารเคมีที่ใช้สำหรับดัดแปลงให้มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กคือ เพอร์ริคคลอไรด์ ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) เนื่องจากเป็นสารเคมีที่มีต้นทุนต่ำ และมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย

2.2 การผลิตถ่านชีวภาพแม่เหล็ก

เตรียมชีวมวลโดยการนำขี้เลื่อยไม้ยางพารามาร้อนผ่านตะแกรงร่อนขนาด 425 ไมครอน [12] เพื่อให้มีขนาดที่เหมาะสมต่อการใช้งาน แล้วนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จนมีน้ำหนักคงที่ จากนั้นนำขี้เลื่อยไปผ่านกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพแม่เหล็กแบบ 1 ขั้นตอนและ 2 ขั้นตอน และใช้อุณหภูมิไพโรไลซิส 600°C และ 800°C [13, 14] เนื่องจากเป็นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการผลิตถ่านชีวภาพ โดยมีเงื่อนไขการทดลองทั้งหมด 4 เงื่อนไข โดยทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

สำหรับการเตรียมถ่านชีวภาพแม่เหล็กแบบ 1 ขั้นตอน นำขี้เลื่อยไม้ยางพารามากระตุ้นด้วยเหล็กออกไซด์เพื่อเพิ่มคุณสมบัติของแม่เหล็ก โดยการนำสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ที่ความเข้มข้น 0.6 M ไปกวนผสมให้เข้ากันและให้ความร้อนบนเครื่องกวนสารละลายพร้อมให้ความร้อน ให้ได้อุณหภูมิ 80 °C จากนั้นชั่งขี้เลื่อยไม้ยางพาราปริมาณ 10 g ใส่ลงในสารละลาย และกวนผสมต่อเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิคงที่ 80 °C เมื่อครบเวลา นำมาตัวอย่างมาพักไว้ให้เย็น จากนั้นกรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศเพื่อแยกชีวมวลที่ผ่านการกระตุ้นออกจากสารละลาย แล้วนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาบดด้วยเครื่องบด แล้วไปผ่านกระบวนการไพโรไลซิสเพื่อเปลี่ยนชีวมวลเป็นถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่อุณหภูมิ 600 หรือ 800 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อัตราการไหลไนโตรเจน 200 mL/min และอัตราการให้ความร้อนที่ 5 °C/min เมื่อครบเวลานำตัวอย่างไปล้างด้วยน้ำกลั่นเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อน จากนั้นกรองด้วยชุดกรองสุญญากาศ ทำซ้ำ 3 ครั้งหรือจนกว่าน้ำที่ผ่านการกรองจะใส แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาใส่ถุงซิปล็อคแล้วเก็บไว้ในโถดูดความชื้น [15, 16]

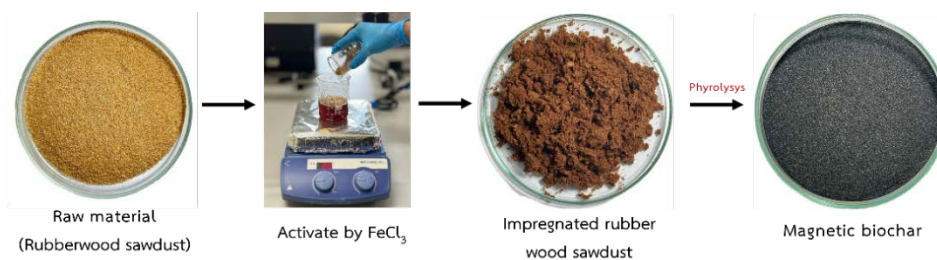


Figure 1 One-step production of magnetic biochar

สำหรับการเตรียมถ่านชีวภาพแม่เหล็กแบบ 2 ขั้นตอน นำขี้เลื่อยไม้ยางพาราไปผ่านกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 600 หรือ 800 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อัตราการไหลไนโตรเจน 200 mL/min และอัตราการให้ความร้อนที่ 5 °C/min เพื่อเปลี่ยนชีวมวลเป็นถ่านชีวภาพ เมื่อครบเวลานำตัวอย่างที่ได้มาล้างด้วยน้ำกลั่น กรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศแล้วนำไปอบไล่ความชื้น จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการกระตุ้นเพื่อเพิ่มคุณสมบัติของแม่เหล็ก โดยการนำสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ที่ความเข้มข้น 0.6 M ไปกวนผสมให้เข้ากันและให้ความร้อนบนเครื่องกวนสารละลายพร้อมให้ความร้อน ให้ได้อุณหภูมิ 80 °C จากนั้นชั่งถ่านชีวภาพปริมาณ 10 g ใส่ลงในสารละลาย และกวนผสมต่อเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิคงที่ 80 °C เมื่อครบเวลานำตัวอย่างมาพักไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำมารองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศเพื่อแยกถ่านชีวภาพจากสารละลาย แล้วนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาบดด้วยเครื่องบด แล้วไปผ่านกระบวนการไพโรไลซิสเพื่อเปลี่ยนถ่านชีวภาพเป็นถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่เงื่อนไขเดิม เมื่อครบเวลานำตัวอย่างไปล้างด้วยน้ำกลั่นเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อน จากนั้นกรองด้วยชุดกรองสุญญากาศ ทำซ้ำ 3 ครั้งหรือจนกว่าน้ำที่ผ่านการกรองจะใส แล้วนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลานำมาใส่ถุงซิปล็อคเก็บไว้ในโถดูดความชื้น [15, 16]

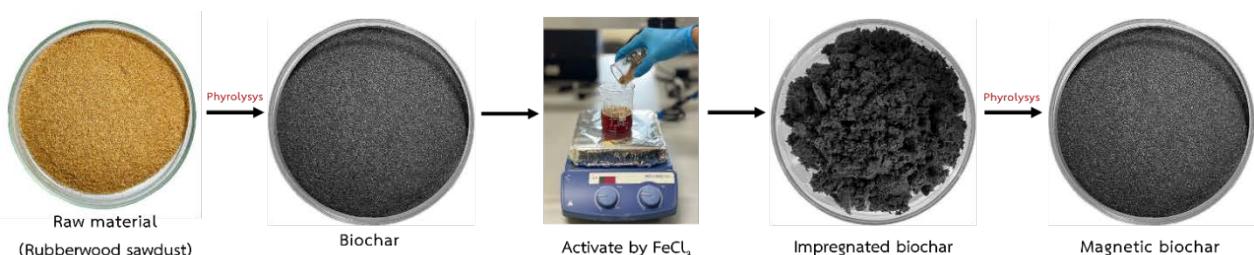


Figure 2 Two-step production of magnetic biochar

2.3 กระบวนการดูดซับตะกั่ว

ชั่งน้ำหนักถ่านชีวภาพแม่เหล็กทั้ง 4 ตัวอย่าง ตัวอย่างละ 0.02 g ต่อสารละลายตะกั่ว (Pb(II)) ที่ความเข้มข้น 30 mg/L ปริมาตร 20 mL นำตัวอย่างที่เตรียมไว้ทั้งหมดใส่ในเครื่องเขย่าสารที่ความเร็วรอบ 200 rpm ที่อุณหภูมิ 30 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดกระบวนการดูดซับ จากนั้นนำมากรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศเพื่อแยกถ่านชีวภาพแม่เหล็กออกจากสารละลาย โดยใช้กระดาษกรองชนิด Nylon membrane filters ขนาดรูพรุน 0.2 ไมครอน [16] โดยทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

2.4 ร้อยละผลผลิต (Yield, %)

การศึกษาร้อยละผลผลิตของถ่านชีวภาพแม่เหล็กช่วยให้สามารถวางแผนการผลิตและจัดการทรัพยากรในกระบวนการผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพเพื่อลดต้นทุนและเพิ่มกำไรในการผลิตถ่านชีวภาพแม่เหล็ก โดยสามารถสามารถคำนวณร้อยละผลผลิตของถ่านชีวภาพแม่เหล็กได้จากสมการที่ (1)

$$\text{Yield (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักของถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ได้ (g)}}{\text{น้ำหนักชีวมวล (g)}} \times 100\% \quad (1)$$

2.5 ค่า pH ของถ่านชีวภาพแม่เหล็ก

ค่า pH ส่งผลกระทบต่อประจุพื้นผิวของถ่านชีวภาพแม่เหล็ก ซึ่งค่า pH ที่เพิ่มขึ้นอาจส่งผลให้ถ่านชีวภาพมีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักเพิ่มขึ้นตามไปด้วย [17] โดยสามารถวัดค่า pH ของถ่านชีวภาพแม่เหล็กได้จากการเตรียมถ่านแม่เหล็ก 1 ส่วนต่อน้ำกลั่น 20 ส่วน (มวลต่อปริมาตร) แล้วกลั่นผสม 1 ชั่วโมง เมื่อครบเวลานำไปปั่นเหวี่ยง 5 นาที เพื่อให้ตกตะกอน จากนั้นวัดค่า pH ด้วยเครื่องวัด pH ยี่ห้อ HORIBA รุ่น pH-22

2.6 หมู่ฟังก์ชัน (FTIR)

หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านชีวภาพแม่เหล็กมีบทบาทสำคัญในการกำหนดคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของถ่านชีวภาพแม่เหล็ก ช่วยให้เข้าใจถึงคุณสมบัติและประสิทธิภาพของถ่านชีวภาพในการประยุกต์ใช้ต่างๆ สามารถวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านชีวภาพแม่เหล็กด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Spectrum GX

2.7 ประสิทธิภาพในการดูดซับสารตะกั่ว

การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับเป็นขั้นตอนสำคัญในการผลิตถ่านชีวภาพแม่เหล็กเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพและประสิทธิภาพในการใช้งานสูงสุดที่เป็นไปได้ ประสิทธิภาพในการดูดซับสารตะกั่วสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$\text{ประสิทธิภาพการดูดซับ (\%)} = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100\% \quad (2)$$

โดยที่ C_0 คือความเข้มข้นของสารตะกั่วเริ่มต้น (mg/L), C_e คือความเข้มข้นของสารตะกั่วหลังดูดซับ (mg/L)

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

จากการเตรียมถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ขั้นตอนการผลิตที่แตกต่างกันคือ 1 และ 2 ขั้นตอน และอุณหภูมิไพโรไลซิสที่แตกต่างกันคือ 600 และ 800 °C กำหนดให้ xMBy แทนสัญลักษณ์ของตัวอย่างถ่านชีวภาพแม่เหล็ก โดยที่ x คือขั้นตอนการผลิต และ y คืออุณหภูมิไพโรไลซิส เช่น 1MB600 แทนถ่านชีวภาพแม่เหล็กแบบ 1 ขั้นตอนที่อุณหภูมิ 600 °C

3.1 ร้อยละผลผลิต (Yield)

พิจารณาผลผลิตของถ่านชีวภาพแม่เหล็กจากขี้เลื่อยไม้ยางพาราเพื่อให้เกิดความคุ้มค่าสำหรับการนำไปใช้ในงาน โดยวิเคราะห์ความแตกต่างของปริมาณผลผลิตในแต่ละเงื่อนไขที่แตกต่างกัน ได้แก่ อุณหภูมิไพโรไลซิส และขั้นตอนการผลิต โดย Figure 1 แสดงร้อยละผลผลิตของถ่านชีวภาพแม่เหล็กจากขี้เลื่อยไม้ยางพาราที่เงื่อนไขต่างๆ จากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิไพโรไลซิสส่งผลกระทบต่อร้อยละผลผลิตของถ่านชีวภาพแม่เหล็กอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือ ร้อยละผลผลิตมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิไพโรไลซิสเพิ่มขึ้นจาก 600 เป็น 800 °C ทั้งนี้ เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งและก๊าซ อันเนื่องมาจากการสลายตัวด้วยความร้อนของส่วนประกอบลิกโนเซลลูโลส ซึ่งที่อุณหภูมิไพโรไลซิสสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดการสลายตัวที่เพิ่มขึ้น ทำให้มีผลผลิตที่ลดลง [18] นอกจากนี้ ยังพบว่าถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ผลิตแบบ 1 ขั้นตอนมีร้อยละผลผลิตที่มากกว่าแบบ 2 ขั้นตอน อาจเนื่องมาจากการผลิตแบบ 2 ขั้นตอน จะมีการไพโรไลซิสซ้ำ ทำให้การสลายตัวด้วยความร้อนของส่วนประกอบลิกโนเซลลูโลสเกิดขึ้นซ้ำ ส่งผลให้มีค่าร้อยละผลผลิตของถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่น้อยกว่าแบบ 1 ขั้นตอน

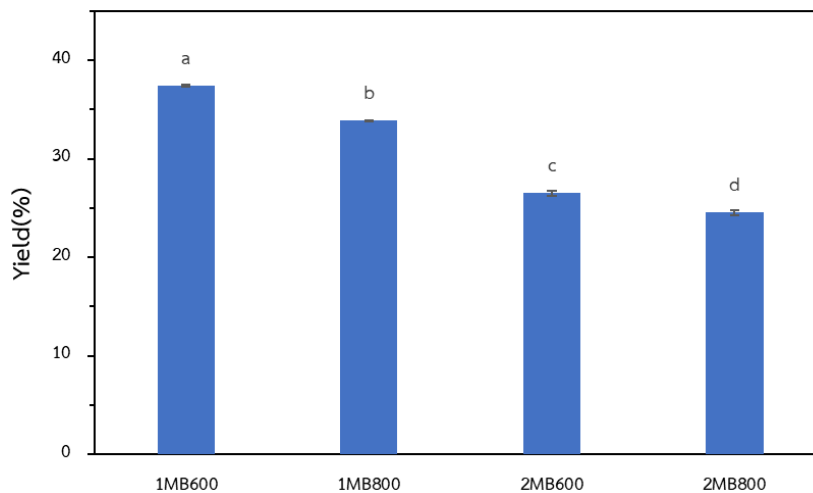


Figure 3 Magnetic biochar yield at different temperatures and production steps

3.2 ค่า pH ของถ่านชีวภาพแม่เหล็ก

วิเคราะห์ผลกระทบของอุณหภูมิไพโรไลซิส และขั้นตอนการผลิต ที่ส่งผลต่อค่า pH ของถ่านชีวภาพแม่เหล็ก โดย Figure 2 แสดงค่า pH ของถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่เงื่อนไขต่างๆ จากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิไพโรไลซิสส่งผลกระทบต่อค่า pH ของถ่านชีวภาพแม่เหล็กอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิไพโรไลซิสเพิ่มขึ้นจาก 600 เป็น 800 °C ส่งผลให้ค่า pH เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ อาจเป็นผลมาจากเมื่ออุณหภูมิไพโรไลซิสสูงขึ้น ความร้อนที่สูงขึ้นจะทำลายโครงสร้างของแร่ธาตุในถ่านชีวภาพแม่เหล็ก ส่งผลให้แร่ธาตุเหล่านั้นแตกตัว ปล่อยแคตไอออนฐาน (Base cations) และกระตุ้นให้คาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศทำปฏิกิริยากับแคตไอออนฐาน เกิดเป็นคาร์บอเนต (Carbonates) และด่างอนินทรีย์ (Inorganic alkalis) ทำให้ pH ของถ่านชีวภาพแม่เหล็กเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ยังพบว่าที่อุณหภูมิ 600°C ที่การผลิตแบบ 1 ขั้นตอนมีค่า pH ที่มากกว่าแบบ 2 ขั้นตอน ทั้งนี้ อาจเป็นผลมาจากการผลิตแบบ 2 ขั้นตอนทำให้เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสสลายตัว ส่งผลให้เกิดกรดอินทรีย์ (Organic acids) และสารฟีนอลิก (Phenolic substances) ที่ทำให้ค่า pH ของผลิตภัณฑ์ลดลง แต่ที่อุณหภูมิ 800°C ที่การผลิตแบบ 2 ขั้นตอน มี pH ที่น้อยกว่าแบบ 1 ขั้นตอน ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากการผลิตแบบ 2 ขั้นตอนจะเกิดการไพโรไลซิสซ้ำทำให้เกิดทำลายโครงสร้างของแร่ธาตุซ้ำ ส่งผลให้แร่ธาตุเหล่านั้นแตกตัว เกิดเป็นคาร์บอเนต และด่างอนินทรีย์มากขึ้น ทำให้ pH ของถ่านชีวภาพแม่เหล็กแบบ 2 ขั้นตอนเพิ่มขึ้น [19]

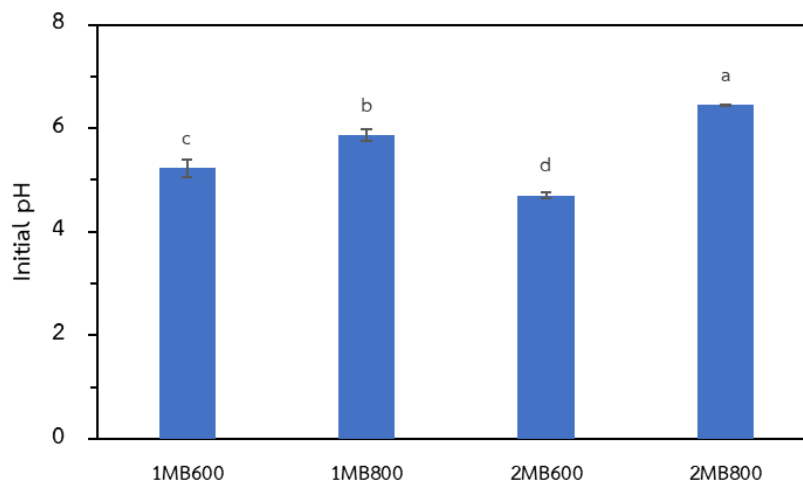


Figure 4 pH value of magnetic biochar

3.3 หมูฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านชีวภาพแม่เหล็ก

จากการวิเคราะห์สเปกตรัม FT-IR เพื่อวิเคราะห์หมูฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านชีวภาพแม่เหล็ก โดยสเปกตรัม FT-IR ของถ่านชีวภาพแม่เหล็กแสดงดัง Figure 3 จากผลการทดลองพบว่าการปรากฏจุดพีคที่คล้ายคลึงกัน ได้แก่ พีค 3700-3850 cm^{-1} แสดงการสั่นสะเทือนแบบยืดและโค้งงอของกลุ่ม -OH [20] พีค 3420-3450 cm^{-1} แสดงการสั่นสะเทือนของการยืดของกลุ่ม O-H ซึ่งทำหน้าที่จับอนุมูลออกซิเจนในสารละลายกับถ่านชีวภาพ พีค 2750-2950 cm^{-1} แสดงการสั่นสะเทือนแบบยืดของ C-H แบบสมมาตรและไม่สมมาตรของกรดอะลิฟาติก และกลุ่มคาร์บอกซิลิกที่ไม่มีประจุ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิไฟโรไลซิสเพิ่มขึ้น บ่งชี้ว่าโครงสร้างอะโรมาติกได้รับการปรับปรุง [21-23] พีค 2349 cm^{-1} แสดงการสั่นสะเทือนแบบยืดออกของ $\text{C}\equiv\text{C}$ ซึ่งแสดงถึงการยืดออกของ CO_2 [20, 24] พีค 1580 cm^{-1} แสดงการสั่นสะเทือนแบบยืดออกของ C=O โดยมีการสั่นสะเทือนของกลุ่มคาร์บอกซิลิก [23] พีค 1033 cm^{-1} แสดงการสั่นสะเทือนแบบยืดออกของพันธะ C-O ของกลุ่มแอลกอฮอล์และกรดคาร์บอกซิลิก ซึ่งเป็นกลุ่มของเซลลูโลสที่ได้รับออกซิเจน [21, 25] พีค 943-679 cm^{-1} แสดงการสั่นสะเทือนแบบโค้งงอของพันธะ C-H [22] และพีค 537 cm^{-1} แสดงถึง Fe-O บ่งบอกถึงการมีอยู่ของอนุภาค Fe อยู่บนพื้นผิวของถ่านชีวภาพแม่เหล็ก อีกทั้งยังพบว่าเมื่ออุณหภูมิไฟโรไลซิสเพิ่มขึ้น ความเข้มของการสั่นสะเทือนแบบยืดออกของ พันธะ C-O, C=O และหมูไฮดรอกซิล (C-H) ลดลง อาจเกิดจากการคายน้ำและเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน (Decarboxylation) ในระหว่างการไฟโรไลซิส หรือเกิดจากการแตกตัวของหมูฟังก์ชันที่อุณหภูมิสูงจึงทำให้ความเข้มของการสั่นสะเทือนลดลง [26] และการผลิตแบบ 1 ขั้นตอนส่งผลให้ความเข้มของการสั่นสะเทือนของ Fe-O มากกว่าแบบ 2 ขั้นตอน อาจเป็นผลมาจากการผลิตแบบ 1 ขั้นตอน ทำให้เหล็ก Fe กระจายตัวบนผิวและภายในโครงสร้างถ่านชีวภาพได้ดีกว่าการผลิตแบบ 2 ขั้นตอน ซึ่งการมีอยู่ของ Fe ที่มากเกินไปอาจส่งผลต่อการยับยั้งการดูดซับได้

การมีอยู่ของหมูคาร์บอกซิล ไฮดรอกซิล เมทอกซี และฟีนอลิก โดยเฉพาะหมูฟังก์ชันที่ประกอบด้วยออกซิเจน (C=O, C-O, O-H, -OH) เป็นกลุ่มที่มีความสามารถในการจับกับไอออนของโลหะได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในกระบวนการกำจัดโลหะหนัก ช่วยเพิ่มพื้นที่ในการดูดซับมากขึ้น และในเวลาเดียวกันก็มีการเพิ่มพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนในขณะที่มีการออกซิเดชันเกิดขึ้น [20, 27]

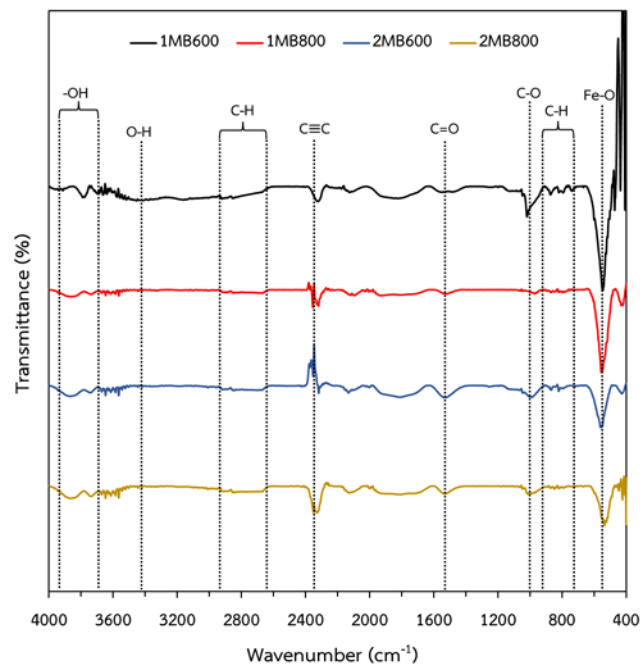


Figure 5 FT-IR spectra of magnetic biochar (1MB600, 1MB800, 2MB600, 2MB800)

3.4 ประสิทธิภาพในการดูดซับสารตะกั่ว

ประสิทธิภาพในการดูดซับสารตะกั่วของถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่เงื่อนไขต่างๆแสดงดัง Figure 4 จากผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิไพโรไลซิสส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสารตะกั่วอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือ ถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 800 °C ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสารตะกั่วสูงกว่าที่อุณหภูมิ 600°C ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาณรูพรุนของถ่านชีวภาพแม่เหล็กจะมีการเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิการไพโรไลซิส [28] นอกจากนี้ยังพบว่าที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 600°C ที่การผลิตแบบ 2 ขั้นตอน มีประสิทธิภาพในการดูดซับที่น้อยกว่าแบบ 1 ขั้นตอน ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการผลิตแบบ 2 ขั้นตอนทำให้การเกาะตัวของรูพรุนขนาดเล็กที่อยู่ใกล้เคียงนำไปสู่การทำลายโครงสร้างรูพรุนและพื้นที่ผิว ทำให้พื้นที่ผิวดูดซับลดลง หรืออาจเกิดมาจากรูพรุนในถ่านชีวภาพแม่เหล็กอาจถูกปิดกั้น เนื่องจากการทำให้อ่อนตัวลง และการทำให้เป็นคาร์บอนมากเกินไปของการผลิตแบบ 2 ขั้นตอน ซึ่งนำไปสู่การลดพื้นที่ผิว [29] แต่ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 800°C ที่การผลิตแบบ 2 ขั้นตอนมีประสิทธิภาพในการดูดซับที่ดีกว่าแบบ 1 ขั้นตอน เนื่องจากในแบบ 2 ขั้นตอนจะมีการสลายตัวของลิกโนเซลลูโลสที่สูงกว่าแบบ 1 ขั้นตอน ซึ่งส่งผลให้ถ่านชีวภาพแม่เหล็กมีความพรุนที่สูง และพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสูงขึ้น [18, 30]

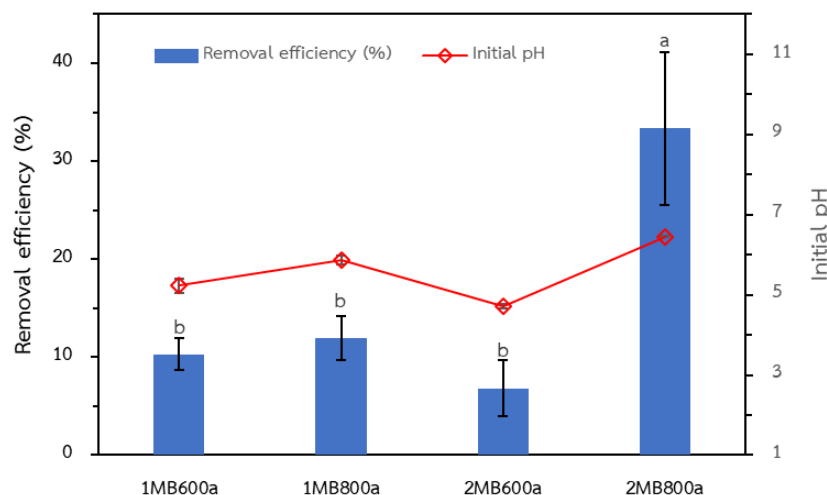


Figure 6 Lead removal efficiency and initial pH of magnetic biochar

4. สรุป

จากการศึกษาการผลิตถ่านชีวภาพแม่เหล็กจากขี้เลื่อยไม้ยางพารา โดยผ่านการกระตุ้นด้วยเฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl_3) พบว่า ถ่านชีวภาพแม่เหล็กทุกเงื่อนไขมีการปรากฏหมู่ฟังก์ชันที่คล้ายคลึงกัน ได้แก่ หมู่คาร์บอกซิล ไฮดรอกซิล เมทอกซี และฟีนอลิก หรือหมู่ฟังก์ชันที่ประกอบด้วยออกซิเจน ($\text{C}=\text{O}$, $\text{C}-\text{O}$, $\text{O}-\text{H}$, $-\text{OH}$) บนพื้นผิวของถ่านชีวภาพแม่เหล็ก ซึ่งเป็นกลุ่มฟังก์ชันที่มีความสามารถในการจับกับไอออนของโลหะ จึงมีส่วนช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับได้ อีกทั้งยังพบว่าอุณหภูมิไพโรไลซิส และขั้นตอนการผลิต ส่งผลต่อร้อยละผลผลิต ค่า pH และประสิทธิภาพในการดูดซับสารตะกั่วอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือ การเพิ่มอุณหภูมิไพโรไลซิสจาก 600°C เป็น 800°C ส่งผลให้ร้อยละผลผลิตลดลง ค่า pH เพิ่มขึ้น และยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับสารตะกั่วได้ นอกจากนี้ยังพบว่าที่ขั้นตอนการผลิตแบบ 2 ขั้นตอน ส่งผลให้ร้อยละผลผลิตลดลง สำหรับค่า pH และประสิทธิภาพในการดูดซับสารตะกั่ว พบว่าที่อุณหภูมิ 600°C การผลิตแบบ 1 ขั้นตอน ส่งผลให้ค่า pH และประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วสูงกว่าแบบ 2 ขั้นตอน แต่ที่อุณหภูมิ 800°C การผลิตแบบ 2 ขั้นตอน กลับส่งผลให้ ค่า pH และประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วสูงกว่าแบบ 1 ขั้นตอน อย่างไรก็ตาม ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 800°C ที่การผลิตแบบ 2 ขั้นตอน ยังคงส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับสารตะกั่วสูงสุดที่ $33.35 \pm 7.79\%$

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ที่สนับสนุนงบประมาณในการทำวิจัย จนสามารถดำเนินการจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Fu Z, Xi S. 2020. The effects of heavy metals on human metabolism. *Toxicology Mechanisms and Methods*. 30(3): 167-176.
- [2] M.R. Awual, M. Hasan, A. 2014. Shadat, Functionalized novel mesoporous adsorbent for selective lead(II) ions monitoring and removal from wastewater, *Sensor Actuat B: Chem*. 203: 854–863.
- [3] World Health Organization. 2017. Guidelines for drinking-water quality, fourth edition, incorporating the first addendum. Geneva: World Health Organization.
- [4] Chowdhury IR, Chowdhury S, Mazumder MAJ, Al-Ahmed A. 2022. Removal of lead ions (Pb^{2+}) from water and wastewater: a review on the low-cost adsorbents. *Appl Water Sci*. 12(8): 185.
- [5] G. Bhanjana, N. Dilbaghi, K.H. Kim, S. Kumar. 2017. Low temperature synthesis of copper oxide nanoflowers for lead removal using sonochemical route, *J. Mol. Liq*. 244: 506–511.
- [6] Lehmann, J., 2009. Biochar for environmental management: an introduction. *Bio- char Environ. Manage. Sci. Technol*. 25, 15801-15811.
- [7] Weber, K. and P. Quicker, 2018. Properties of biochar. *Fuel* 217: 240-261.
- [8] Kongto P, Palamanit A, Chaiprapat S, et al. 2023. Physicochemical changes and energy properties of torrefied rubberwood biomass produced by different scale moving bed reactors. *Renewable Energy*. 219: 119542.
- [9] Shaaban A, Se SM, Mitan NMM, Dimin MF. 2013. Characterization of biochar derived from rubber wood sawdust through slow pyrolysis on surface porosities and functional groups. *Procedia Engineering*. 68: 365-371.
- [10] Yi Y, Huang Z, Lu B, et al. 2020. Magnetic biochar for environmental remediation: A review. *Bioresource Tec hnology*. 298: 122468.
- [11] Zhao Y, Zhang R, Liu H, et al. Green preparation of magnetic biochar for the effective accumulation of $\text{Pb}(\text{II})$: Performance and mechanism. *Chemical Engineering Journal*. 2019;375:122011.

- [12] Kumar U, Vibhute B, Parikh S. 2021. Experimental study of adsorption efficiency of methylene blue dye by using banana leaf biochar as an adsorbent. *J Phys: Conf Ser.* 1979(1): 012003.
- [13] Ghani WAWAK, Mohd A, da Silva G, et al. 2013. Biochar production from waste rubber-wood-sawdust and its potential use in C sequestration: Chemical and physical characterization. *Industrial Crops and Products.* 44: 18-24.
- [14] Khan ZH, Gao M, Qiu W, Islam MdS, Song Z. 2020. Mechanisms for cadmium adsorption by magnetic biochar composites in an aqueous solution. *Chemosphere.* 246: 125701.
- [15] Feng Z, Yuan R, Wang F, Chen Z, Zhou B, Chen H. 2021. Preparation of magnetic biochar and its application in catalytic degradation of organic pollutants: A review. *Science of The Total Environment.* 765: 142673.
- [16] ธนภัทร รักเนียม, พศิน ม่วงไหมทอง, วิศิษฐ์ มณีศรี, อรวรรณ ผิวผา. 2565. การศึกษาการดูดซับแคดเมียมโดยใช้ถ่านชีวภาพแม่เหล็กที่ได้จากเปลือกกล้วยเล็บมือนาง. *ปริญญานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร, จังหวัดชุมพร.*
- [17] ญาณสินีสุมา, นิตยัตตะยา ผาสุกพันธุ์ และ น้ำฝน เอกตาแสง. 2564. ประสิทธิภาพของถ่านชีวภาพจากมูลช้างในการดูดซับไอออนของเหล็ก (III). *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา.* 26(2): 1204-1221.
- [18] Ghani WAWAK, Mohd A, da Silva G, et al. 2013. Biochar production from waste rubber-wood-sawdust and its potential use in C sequestration: Chemical and physical characterization. *Industrial Crops and Products.* 44: 18-24.
- [19] Tomczyk A, Sokołowska Z, Boguta P. 2020. Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Rev Environ Sci Biotechnol.* 19(1): 191-215.
- [20] Shan R, Shi Y, Gu J, Wang Y, Yuan H. 2020. Single and competitive adsorption affinity of heavy metals toward peanut shell-derived biochar and its mechanisms in aqueous systems. *Chinese Journal of Chemical Engineering.* 28(5): 1375-1383.
- [21] Zhao M, Dai Y, Zhang M, et al. 2020. Mechanisms of Pb and/or Zn adsorption by different biochars: Biochar characteristics, stability, and binding energies. *Science of The Total Environment.* 717: 136894.
- [22] Saleh S, Kamarudin KB, Ghani WAWAK, Kheang LS. 2016. Removal of organic contaminant from aqueous solution using magnetic biochar. *Procedia Engineering.* 148: 228-235.
- [23] Saeed AAH, Harun NY, Sufian S, et al. 2021. Pristine and magnetic kenaf fiber biochar for cd²⁺ adsorption from aqueous solution. *IJERPH.* 18(15): 7949.
- [24] Yap MW, Mubarak NM, Sahu JN, Abdullah EC. 2017. Microwave induced synthesis of magnetic biochar from agricultural biomass for removal of lead and cadmium from wastewater. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry.* 45: 287-295.
- [25] Wang J, Sun C, Huang QX, Chi Y, Yan JH. 2021. Adsorption and thermal degradation of microplastics from aqueous solutions by Mg/Zn modified magnetic biochars. *Journal of Hazardous Materials.* 419: 126486.
- [26] Wang W, Bai J, Lu Q, et al. Pyrolysis temperature and feedstock alter the functional groups and carbon sequestration potential of *Phragmites australis* - and *Spartina alterniflora* -derived biochars. *GCB Bioenergy.* 2021;13(3):493-506.
- [27] Fan Q, Sun J, Chu L, et al. 2018. Effects of chemical oxidation on surface oxygen-containing functional groups and adsorption behavior of biochar. *Chemosphere.* 207: 33-40.
- [28] Thines, K.R., Abdullah, E.C., Mubarak, N.M., et al. 2017. In-situ polymerization of magnetic biochar-polypyrrole composite: a novel application in supercapacitor. *Biomass Bioenergy.* 98: 95-111.
- [29] Thines KR, Abdullah EC, Mubarak NM. 2017. Effect of process parameters for production of microporous magnetic biochar derived from agriculture waste biomass. *Microporous and Mesoporous Materials.* 253: 29-39.
- [30] Yi Y, Huang Z, Lu B, et al. 2020. Magnetic biochar for environmental remediation: A review. *Bioresource Technology.* 298: 122468.

การศึกษาการฟื้นฟูผ่านชีวภาพจากเปลือกสละที่ผ่านการดูดซับเมทิลีนบลู A Study on Regeneration of Biochar from Salak Peels Used for Methylene Blue Adsorption

อัฐ แจ่มกมล¹, ธัชพล จักรเจริญ^{1,*}, อรสา ชูละเอียด² และ วารุณี ลิ้มมัน¹

Aud Jamkamon¹, Thatchapol Chungcharoen^{1,*}, Orasa Choolaaied² and Warunee Limmun¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

²งานบริการห้องปฏิบัติการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

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

² Laboratory service, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Prince of Chumphon Campus, Chumphon

*Corresponding author: Thatchapol Chungcharoen e-mail address: thatchapol.ch@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการฟื้นฟูผ่านชีวภาพจากเปลือกสละที่ได้มาจากการเผาด้วยกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่ผ่านการดูดซับเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 10 mg/L เพื่อทำให้อ่านชีวภาพสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ สำหรับการดูดซับเมทิลีนบลูด้วยวิธีการทางเคมี โดยใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) กรดเอทิลีนไดเอมีนเตตระอะซิติก (EDTA-2Na) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เพื่อลดต้นทุนในการผลิตอ่านชีวภาพขึ้นใหม่ ดังนั้นการศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของสารละลายข้างต้น ที่ความเข้มข้น 0.1 M ต่อความสามารถในการฟื้นฟูผ่านชีวภาพที่ผลิตจากเปลือกสละที่ผ่านการดูดซับเมทิลีนบลู จากการศึกษาพบว่าค่าประสิทธิภาพการดูดซับเมทิลีนบลู และค่าความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูของอ่านชีวภาพจากเปลือกสละ มีค่าเท่ากับ 50.13 ± 1.67 % และ 5.17 ± 0.17 mg/g ตามลำดับ โดยที่สารละลายที่นำมาฟื้นฟูอ่านชีวภาพได้ดีที่สุด คือ สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เมื่อเปรียบเทียบกับสารละลายอื่นๆ โดยมีประสิทธิภาพในการคายเมทิลีนบลู 19.75 ± 1.99 % และประสิทธิภาพในการคายเมทิลีนบลูหลังฟื้นฟู 5 รอบเท่ากับ 97.21 ± 5.56 % นอกจากนี้หลังจากการฟื้นฟูอ่านชีวภาพด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับเมทิลีนบลู และค่าความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูทั้ง 5 รอบมีค่าลดลง แม้ว่าประสิทธิภาพการคายจะสูงขึ้น ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) นั้นไม่เหมาะสมสำหรับการฟื้นฟูผ่านชีวภาพจากเปลือกสละที่ผ่านการดูดซับผ่านการดูดซับเมทิลีนบลู

คำสำคัญ: เปลือกสละ อ่านชีวภาพ ดูดซับเมทิลีนบลู การฟื้นฟู

Abstract

The purpose of this research investigated the process of recovering biochar from salak peels obtained by pyrolysis at a temperature of 500 °C for 1 hour. Lean Blue at a concentration of 10 mg/L. That had absorbed methylene blue to make the biochar reusable for further methylene blue adsorption by using chemical methods. Thus, the chemical methods that were utilized for recovery using solutions consisting of hydrochloric acid (HCl), ethylenediaminetetraacetic acid, disodium salt (EDTA-2Na), and sodium hydroxide (NaOH). As a result, these methods were chosen to reduce production costs and to study their effects on the regenerative ability of biochar. Therefore, the objective of this research was to study the effects of hydrochloric acid (HCl) solution, ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA-2Na) solution, and sodium hydroxide (NaOH) solution at a concentration of 0.1 M. It was found that the biochar derived from salak peels exhibited a methylene blue adsorption efficiency of 50.13 ± 1.67 % and an adsorption capacity of 5.17 ± 0.17 mg/g. It can be proved that the best solution for restoring biochar is hydrochloric acid (HCl) solution when compared to ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA-2Na) and sodium hydroxide (NaOH) solutions. Additionally, after five regeneration cycles, hydrochloric acid (HCl) increased desorption efficiency from 19.75 ± 1.99 % to 97.21 ± 5.56 %, although it was initially the most effective solution. Moreover, after regeneration of biochar with hydrochloric acid solution. It was found that the efficiency of adsorption of methylene blue and the value of the adsorption capacity of methylene blue in all 5 cycles decreased even though the desorption efficiency increased. Consequently, it can be concluded that HCl is

unsuitable for the recovery of biochar from salak peels for repeated methylene blue adsorption, as the efficiency significantly decreases with subsequent cycles.

Keywords: Salak peels, Biochar, Methylene Blue, adsorption, Regeneration

1. บทนำ

ขยะเหลือทิ้งทางการเกษตรถือเป็นปัญหาใหญ่ที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมาอย่างยาวนาน เนื่องจากกระบวนการกำจัดขยะก่อให้เกิดมลพิษ [1] ซึ่งขยะเหลือทิ้งทางการเกษตรนั้นมีหลากหลายประเภท โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เปลือกสละที่เกิดจากการแปรรูปสละ จึงทำให้มีขยะเหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก จึงทำให้เกิดกลิ่นเน่าเหม็น เป็นแหล่งที่อยู่อาศัยของสัตว์พาหะนำโรค ก่อให้เกิดโรคแก่ผู้พักอาศัยในบริเวณใกล้เคียงสูง [2] ดังนั้นจึงควรมีวิธีจัดการกับขยะที่เกิดจากเปลือกสละให้ถูกวิธี และเป็นการเพิ่มมูลค่าของเปลือกสละไปในเวลาเดียวกัน และเป็นที่ทราบกันดีว่าภายในเปลือกสละนั้นมีปริมาณเซลลูโลส และลิกนินสูง [3] ซึ่งเป็นผลดีต่อการนำไปผลิตถ่านชีวภาพ (Biochar) เนื่องจากในวัสดุที่นำมาผลิตเป็นถ่านชีวภาพมีปริมาณเซลลูโลส และลิกนินสูง จะทำให้ถ่านชีวภาพนั้นมีพื้นที่ผิวสัมผัส ปริมาณรูพรุน และขนาดรูพรุนที่สูงซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ดีสำหรับถ่านชีวภาพ

ถ่านชีวภาพเป็นวัสดุที่อุดมด้วยคาร์บอนได้จากการเผาไหม้ในสภาพที่ไม่มีออกซิเจนในกระบวนการที่มีการควบคุมสภาวะการเผาที่อุณหภูมิสูง ซึ่งเรียกกระบวนการเผาไหม้ดังกล่าวว่า กระบวนการไพโรไลซิส [4] ถ่านชีวภาพสามารถผลิตได้จากวัตถุดิบตั้งต้นหลายชนิดไม่ว่าจะเป็น ของเสียจากการเกษตร และชีวมวลอื่น ๆ อีกทั้งถ่านชีวภาพยังมีความสามารถในการดูดซับมลพิษทางน้ำ เช่น ดูดซับสารเจือปนจากครัวเรือนและ โรงงานอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ่านชีวภาพมีความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูซึ่งเมทิลีนบลูเป็นสีย้อมในกลุ่มโทอะซีน ส่งผลกระทบทำให้มีระดับของสารเฮโรโธนิในร่างกายสูง อาจทำให้เกิดอาการ เช่น กระสับกระส่าย หลอน มีไข้ หัวใจเต้นเร็ว มีปฏิกิริยาตอบสนองไวกว่าปกติ คลื่นไส้ อาเจียน ท้องเสีย เสียการทรงตัว และมีภาวะโลหิตจาง [5,6] ดังนั้นจึงควรมีการดูดซับเมทิลีนบลูเพื่อลดปัจจัยที่ทำให้เกิดอาการข้างต้น แต่อย่างไรก็ตามถ่านชีวภาพนั้นยังมีข้อจำกัดด้านจำนวนครั้งในการใช้งาน ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาในส่วนของคุณสมบัติในการผลิต [7] ดังนั้นจึงควรมีการฟื้นฟูถ่านชีวภาพเพื่อที่จะทำให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่และมีประสิทธิภาพในการดูดซับเมทิลีนบลูใกล้เคียงกับครั้งก่อนหน้า อีกทั้งยังสามารถลดต้นทุนที่ใช้ในการผลิตถ่านชีวภาพขึ้นมาใหม่ได้เช่นกัน

การฟื้นฟู (Regeneration) ถ่านชีวภาพที่ผ่านการดูดซับเมทิลีนบลู คือการกำจัดสารเมทิลีนบลูที่อยู่ในถ่านชีวภาพที่ผ่านการดูดซับ ซึ่งการฟื้นฟูถ่านชีวภาพนั้นมีหลากหลายวิธีเช่น การฟื้นฟูด้วยน้ำ การฟื้นฟูด้วยวิธี และวิธีการฟื้นฟูที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือ การฟื้นฟูด้วยสารเคมี โดยใช้สารละลาย [8] เช่น สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) กรดเอทิลีนไดเอมีนเตตระอะซิติก (EDTA-2Na) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นต้น มาทำการฟื้นฟูถ่านชีวภาพที่ผ่านการดูดซับเมทิลีนบลู เพื่อลดต้นทุนในการผลิตถ่านชีวภาพขึ้นใหม่ และยังสามารถเพิ่มจำนวนครั้งในการดูดซับเมทิลีนบลูได้อีกด้วย ทั้งนี้ความสามารถในการฟื้นฟูขึ้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย โดยเฉพาะอย่างยิ่งชนิดของสารที่ถูกดูดซับ และชนิดของสารละลายที่นำมาทำการฟื้นฟู [9] อีกทั้งมีการวิจัยที่พบว่า สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) สารละลายกรดเอทิลีนไดเอมีนเตตระอะซิติก (EDTA-2Na) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) มีความสามารถทำการฟื้นฟูถ่านชีวภาพที่ผลิตจากกะลามะพร้าวและผักตบชวาที่ผ่านการดูดซับเมทิลีนบลูได้ [10-11] ดังนั้นการศึกษาในครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาผลกระทบของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) สารละลายกรดเอทิลีนไดเอมีนเตตระอะซิติก (EDTA-2Na) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ใช้ในการฟื้นฟู ต่อความสามารถในการดูดซับสารเมทิลีนบลู ของถ่านชีวภาพจากเปลือกสละ

2. วิธีการศึกษา

2.1 เปลือกสละ

เปลือกสละ ได้จากสละอินโด (Salak) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ที่เรียกว่า Salacca Magnifica J.P.Mogea. มีความชื้นเริ่มต้นอยู่ที่ 77.2 ถึง 87.2 % ซึ่งเป็นขยะเหลือทิ้ง จากสถานที่โดยรอบสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

2.2 วิธีการทดลอง

กระบวนการผลิตถ่านชีวภาพจากเปลือกสละ

ทำการล้างเปลือกสละให้สะอาด อบไล่ความชื้นด้วยเตาอบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จนน้ำหนักคงที่ นำเปลือกสละที่ผ่านการอบไล่ความชื้นแล้วทำการบด และร่อนด้วยตะแกรงร่อนขนาด 425 micron [12] นำผงเปลือกสละ

ปริมาณ 20 g ใส่ลงในถ้วยเผา เผาตัวอย่างด้วยเตาไฟโรลชีส เผาที่อุณหภูมิ 500 °C ที่อัตราการให้ความร้อนที่ 5 °C/min อัตราการไหลของไนโตรเจน 200 ml/min เป็นเวลา 1 ชั่วโมง [13] หลังจากนั้นทำการนำตัวอย่างออกจากเตาเผา และเก็บในโถดูดความชื้น

กระบวนการดูดซับเมทิลินบลู

เตรียมสารละลายเมทิลินบลู ($C_{16}H_{18}ClN_3S$) ที่ความเข้มข้น 10 mg/L นำถ่านชีวภาพที่ผลิตจากเปลือกสละปริมาณ 0.02 g ใส่ลงในหลอดทดลองขนาด 50 ml ปิดเตาสารละลายเมทิลินบลูปริมาตร 20 ml ใส่ลงในหลอดทดลองพร้อมปิดฝา นำหลอดทดลองไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 rpm ที่อุณหภูมิ 30 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง [13] ทำการแยกถ่านชีวภาพออกจากสารละลายเมทิลินบลูด้วยกระดาษกรอง และทำการเก็บตัวอย่างสารละลายเพื่อทำการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของเมทิลินบลูด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer แบรินต์ Jasco รุ่น V-750

กระบวนการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของเมทิลินบลูด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer

เตรียมสารละลายเมทิลินบลูที่ความเข้มข้น 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 2, 4, 6, 8 และ 10 mg/L นำสารละลายเมทิลินบลูที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ทำการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer ในช่วงพารามิเตอร์ 620 nm [13] บันทึกผลการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสง นำค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่าง ๆ มาสร้างกราฟมาตรฐาน โดยที่ค่าที่นำมาสร้างกราฟมาตรฐาน ในช่วงความเข้มข้น 0.6 ถึง 10 mg/L

กระบวนการฟื้นฟูถ่านชีวภาพที่ผ่านดูดซับเมทิลินบลู

เตรียมสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) สารละลายกรดเอทิลีนไดอามีนเตตระอะซิติก (EDTA-2Na) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้น 0.1 M สำหรับถ่านชีวภาพที่ผ่านการดูดซับเมทิลินบลู นำถ่านชีวภาพที่ผ่านการดูดซับเมทิลินบลู ปริมาณ 0.02 g ใส่ลงในหลอดทดลองขนาด 50 ml ปิดเตาสารละลายทั้ง 3 ชนิดที่ได้เตรียมไว้ข้างต้น ปริมาตร 20 ml ใส่ลงในหลอดทดลองพร้อมปิดฝา นำหลอดทดลองไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า ที่ความเร็วรอบ 200 rpm ที่อุณหภูมิ 30 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง [14] ทำการแยกถ่านชีวภาพออกจากสารละลายด้วยกระดาษกรอง นำสารละลายที่ผ่านการกรองใส่ขวดพลาสติก เพื่อนำไปวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของเมทิลินบลูด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer ถ่านชีวภาพที่ผ่านกระบวนการฟื้นฟูมาล้างด้วยน้ำกลั่นจนค่า pH เป็นกลาง แล้วมาทำการอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำสารละลายที่มีค่าประสิทธิภาพในการคายเมทิลินบลูสูงที่สุด มาทำการฟื้นฟูถ่านชีวภาพเป็นจำนวน 5 รอบ เพื่อเป็นการตรวจสอบความเสถียรของกระบวนการฟื้นฟู ซึ่งการทำซ้ำการฟื้นฟูหลายครั้งทำให้ทราบว่ากระบวนการฟื้นฟูมีความเสถียรและสม่ำเสมอ [15]

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 การวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของเมทิลินบลู

จากการการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเมทิลินบลู ที่ความเข้มข้น 0 ถึง 10 mg/L ทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 620 nm พบว่าค่าการดูดกลืนแสงมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับความเข้มข้นของสารละลายเมทิลินบลู โดยที่สอดคล้องเข้ากับสมการเส้นตรง $y = 0.1059x - 0.0283$ และมีค่าสัมประสิทธิ์สหพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.9995 ซึ่งบ่งบอกว่าความสัมพันธ์มีความแม่นยำสูง โดยกราฟมาตรฐานสร้างขึ้นจากค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้น 0.6 ถึง 10 mg/L ซึ่งมีการแสดงใน Figure 1 และสาเหตุที่สร้างกราฟมาตรฐานจากค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้น 0.6 ถึง 10 mg/L เนื่องจากการกำหนดช่วงของกราฟมาตรฐาน เพื่อให้ครอบคลุมความเข้มข้นของสารตัวอย่าง ที่จะส่งผลต่อค่าความถูกต้องของผลลัพธ์ และความไวของการวิเคราะห์

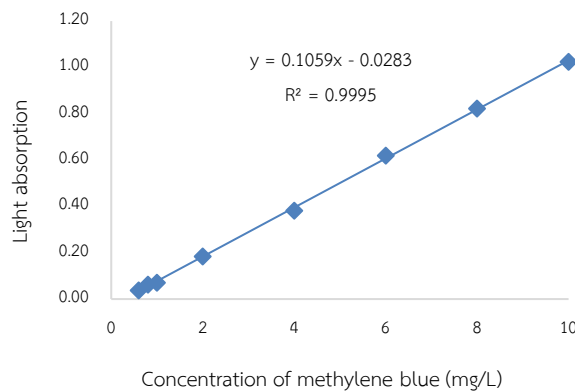


Figure 1 The relationship between light absorption and concentration of methylene blue solution, ranging from 0.6 to 10 mg/L.

3.2 การเปรียบเทียบความสามารถในการฟื้นฟูของสารละลายต่อความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู

จากการนำถ่านชีวภาพจากเปลือกสละมาผ่านการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลู ทำให้ทราบถึงค่าประสิทธิภาพการดูดซับเมทิลีนบลู และค่าความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านชีวภาพเท่ากับ 50.13 ± 1.67 % และ 5.17 ± 0.17 mg/g ตามลำดับ หลังจากนั้นทำการฟื้นฟูด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) สารละลายกรดเอทิลีนไดอามีนเตตระอะซิติก (EDTA-2Na) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้น 0.1 M ทำให้ทราบถึงค่าประสิทธิภาพในการคายเมทิลีนบลูของสารละลายทั้งสามชนิด เท่ากับ 22.29, 16.38 และ 15.52 % ตามลำดับ ซึ่งแสดงใน Table 1 การที่สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) มีความสามารถในการคายเมทิลีนบลูได้สูงที่สุดเนื่องจากสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เป็นกรดแก่ที่สามารถแตกตัวโปรตอน (H⁺) ออกมาได้จำนวนมาก โปรตอนเหล่านี้จะทำหน้าที่ดึงดูดโมเลกุลของเมทิลีนบลูที่จับอยู่บนผิวถ่านชีวภาพให้ออกมา ทำให้ถ่านชีวภาพกลับมามีพื้นที่ผิวสำหรับการดูดซับใหม่ อีกทั้งโมเลกุลของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) มีขนาดเล็กเพียง 0.181 nm ทำให้สามารถแทรกซึมเข้าไปยังรูพรุนของถ่านชีวภาพได้ง่าย จึงสามารถดึงดูดโมเลกุลของเมทิลีนบลูที่อยู่ภายในรูพรุนออกมาได้ดี [10] เมื่อเปรียบเทียบกับสารละลายกรดเอทิลีนไดอามีนเตตระอะซิติก (EDTA-2Na) เป็นสารเคมีที่มีประสิทธิภาพในการจับกับโลหะหนัก แต่ประสิทธิภาพในการจับกับเมทิลีนบลูนั้นค่อนข้างต่ำ เนื่องจากสารละลายกรดเอทิลีนไดอามีนเตตระอะซิติก (EDTA-2Na) มีขนาดโมเลกุลใหญ่ ทำให้ไม่สามารถแทรกซึมเข้าไปยังรูพรุนของถ่านชีวภาพได้ดีเท่าสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) และในส่วนของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นเบสแก่ที่สามารถแตกตัวไฮดรอกไซด์ (OH⁻) ออกมาได้จำนวนมาก ไฮดรอกไซด์เหล่านี้สามารถดึงดูดโมเลกุลของเมทิลีนบลูที่จับอยู่บนผิวถ่านชีวภาพให้ออกมาได้ แต่ประสิทธิภาพนั้นต่ำ เนื่องจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ไม่สามารถแตกตัวโปรตอนออกมาได้เหมือนสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) [10-14] จากค่าความสามารถในการคายเมทิลีนบลูทำให้สามารถเลือกสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) มาทำการศึกษาเนื่องจากมีค่าประสิทธิภาพในการคายเมทิลีนบลูสูงที่สุด โดยที่ค่าประสิทธิภาพการดูดซับเมทิลีนบลูสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) ค่าความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2) และค่าประสิทธิภาพในการคายเมทิลีนบลูสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3)

$$\text{ประสิทธิภาพการดูดซับเมทิลีนบลู (\%)} = \frac{C_0 - C}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{ความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู (mg/g)} = \frac{(C_0 - C) \times V_{\text{sol}}}{M_{\text{abs}}} \times 10 \quad (2)$$

$$\text{ค่าประสิทธิภาพในการคายเมทิลีนบลู (\%)} = \frac{C_R}{C_0 - C} \times 100 \quad (3)$$

โดยที่ C_0 คือ ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูก่อนดูดซับ (mg/L)

C คือ ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูหลังดูดซับ (mg/L)

C_R คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ในการฟื้นฟูหลังการฟื้นฟู (mg/L)

V_{Sol} คือ ปริมาตรของสารละลายเมทิลีนบลู (L)
 M_{abs} คือ มวลของถ่านชีวภาพ (g)

Table 1 The methylene blue desorption capacity of hydrochloric acid (HCl), ethylenediaminetetraacetic acid disodium salt (EDTA-2Na), and sodium hydroxide (NaOH) solutions.

Solution	Desorption efficiency (%)
HCL	22.29±2.13
EDTA-2Na	16.38±0.50
NaOH	15.52±1.10

3.3 การศึกษาความสามารถในการฟื้นฟูของสารละลายสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCL)

จากการนำถ่านชีวภาพจากเปลือกสละ มาทำการฟื้นฟูเป็นจำนวน 5 รอบ โดยนำถ่านชีวภาพจากเปลือกสละ ที่ผ่านการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูแล้วมาฟื้นฟูด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCL) ที่ความเข้มข้น 0.1 M ซึ่งผลการทดลองจะแสดงใน Figure 2 พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดเมทิลีนบลูของถ่านชีวภาพจากเปลือกสละลดลงอย่างต่อเนื่องหลังจากการดูดซับเมทิลีนบลู โดยที่ประสิทธิภาพในการกำจัดเมทิลีนบลูในครั้งแรกนั้นมีค่าเท่ากับ 51.69 ± 1.60 % และลดลงอย่างต่อเนื่องจึงทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดเมทิลีนบลูในครั้งสุดท้ายนั้นมีค่าเท่ากับ 10.05 ± 2.03 % เนื่องจากการฟื้นฟูด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCL) นั้นไม่สามารถคายสารละลายเมทิลีนบลูออกมาได้หมดจึงทำให้พื้นที่ ที่ใช้ในการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูมีการลดลงอย่างต่อเนื่อง อีกทั้งค่าประสิทธิภาพในการคายเมทิลีนบลูในครั้งแรกเท่ากับ 19.75 ± 1.99 % และเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเนื่องจากมีการตกค้างของสารละลายเมทิลีนบลูจากครั้งก่อนหน้าที่ไม่สามารถกำจัดออกได้หมด จึงทำให้ค่าประสิทธิภาพในการคายเมทิลีนบลูในครั้งสุดท้ายเท่ากับ 97.21 ± 5.56 %

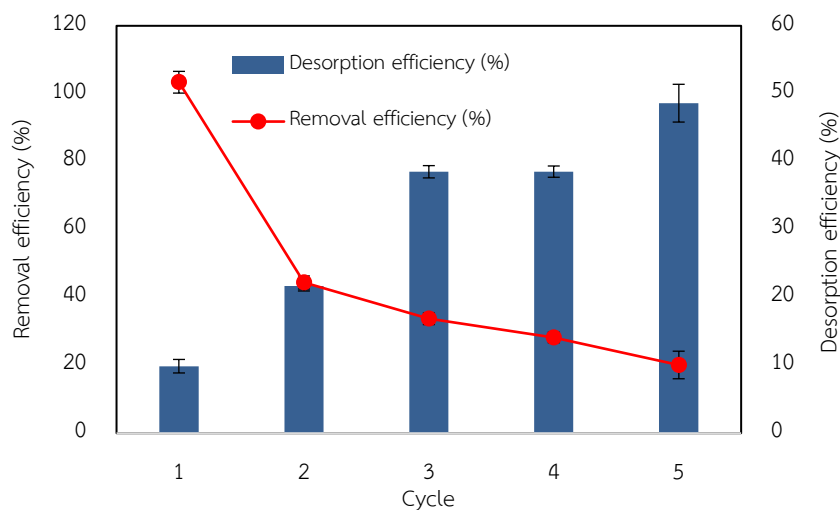


Figure 2 The Removal efficiency of methylene blue and the desorption efficiency of methylene blue by biochar from salak peels.

4. สรุป

การศึกษากลยุทธ์ของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCL) สารละลายกรดเอทิลีนไดอามีนเตตระอะซิติก (EDTA-2Na) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ใช้ในการฟื้นฟูต่อความสามารถดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านชีวภาพจากเปลือกสละ พบว่าค่าประสิทธิภาพการดูดซับเมทิลีนบลู และค่าความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านชีวภาพในครั้งแรกเท่ากับ 50.13 ± 1.67 % และ 5.17 ± 0.17 mg/g ตามลำดับ โดยที่สารละลายที่นำมาฟื้นฟูถ่านชีวภาพได้ดีที่สุด คือ สารละลายกรด

ไฮโดรคลอริก (HCl) เมื่อเปรียบเทียบกับสารละลายสารละลายกรดเอทิลีนไดอามีนเตตระอะซิติก (EDTA-2Na) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพในการคายเมทิลีนบลูของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ในครั้งแรกเท่ากับ 19.75 ± 1.99 % และประสิทธิภาพในการคายเมทิลีนบลูในครั้งสุดท้ายเท่ากับ 97.21 ± 5.56 % ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) นั้นไม่เหมาะสมสำหรับการฟื้นฟูผ่านชีวภาพจากเปลือกสละที่ผ่านการดูดซับผ่านการดูดซับเมทิลีนบลู เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการคายเมทิลีนบลูที่ต่ำ จึงทำให้มีค่าประสิทธิภาพการดูดซับเมทิลีนบลู และค่าความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูในรอบถัดไปนั้นลดลง และเพื่อเพิ่มค่าประสิทธิภาพการดูดซับเมทิลีนบลู ค่าความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลู และค่าประสิทธิภาพในการคายเมทิลีนบลู จึงควรมีการพัฒนาผ่านชีวภาพจากเปลือกสละให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้น ปรับเปลี่ยนสภาวะการดูดซับ เช่น pH ของสารละลาย อุณหภูมิ และความเข้มข้นของเมทิลีนบลู รวมถึงความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ในการฟื้นฟูอีกด้วย

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ที่ได้สนับสนุนเงินทุนในการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Urban Creature. 2021. สตาร์ทอัปเปลี่ยนขยะเกษตรเป็นเชื้อเพลิง ลดการเกิดควีน เพิ่มรายได้ให้เกษตรกร. เข้าถึงได้จาก : เว็บไซต์ <https://urbancreature.co/agricultural-waste-to-fuel/> (เข้าถึงเมื่อ 21 กุมภาพันธ์ 2567).
- [2] ณรงค์ สิ้นไธรงค์. 2562. “การแปรรูปขยะอินทรีย์ (เปลือกไม้) เป็นกระดาษและพลาสติกชีวภาพ (Bioplastic).” รายงานการศึกษาค้นคว้าส่วนบุคคล สถาบันพัฒนาข้าราชการกรุงเทพมหานคร.
- [3] Luthfi Hakim, Ragil Widyorini, Widyanto Dwi Nugroho, and Tibertius Agus Prayitno. 2019. Chemical, and Mechanical Properties of Fibrovascular Bundles of Salacca (Snake Fruit) Frond.
- [4] ธนศิษฐ์ วงศ์ศิริอานวย. 2562. การผลิตถ่านชีวภาพ และแนวทางการใช้ประโยชน์. เข้าถึงได้จาก : เว็บไซต์ <https://erp.mju.ac.th/articleDetail.aspx?qid=1072> (เข้าถึงเมื่อ 3 มีนาคม 2567)
- [5] Truong, Q.-M., Ho, P.-N.-T., Nguyen, T.-B., Chen, W.-H., Bui, X.-T., Kumar Patel, A., Rani Singhanian, R., Chen, C.-W., and Dong, C.-D. 2022. Magnetic biochar derived from macroalgal Sargassum hemiphyllum for highly efficient adsorption of Cu(II) : Influencing factors and reusability. Bioresource Technology, 361: p. 127732.
- [6] New World Encyclopedia. 2022. Methylene Blue. เข้าถึงได้จาก : เว็บไซต์ https://www.newworldencyclopedia.org/entry/Methylene_blue (เข้าถึงเมื่อ 5 มีนาคม 2567)
- [7] Sadamanti Sireeshaa, Samyuktha S. Kollurua, Shreya Agarwal a, I. Sreedhar and Samir Ramdas Kale. 2021. Heavy metal removal from wastewater using nanomaterials-process and engineering aspects. 150: 323-355.
- [8] Yingjie Dai, Naixin Zhang, Chuanming Xing, Qingxia Cui and Qiya Sun. 2019. The adsorption, regeneration, and engineering applications of biochar for removal organic pollutants. Volume 223, pp. 12-27.
- [9] กรมควบคุมมลพิษ มูลนิธิสิ่งแวดล้อมไทย. 2563. คู่มือการฟื้นฟูคุณภาพสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรธรรมชาติที่ได้รับความเสียหายจากการปนเปื้อนของมลพิษในดินหรือน้ำใต้ดิน. เข้าถึงได้จาก : เว็บไซต์ https://www.pcd.go.th/wp-content/uploads/2020/06/pcdnew-2020-06-10_07-02-33_493909.pdf (เข้าถึงเมื่อ 5 มีนาคม 2567).
- [10] ชาญชัย คหาปนะ และณภัทร โพธิ์วัน. 2563. การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเมทิลีน บลู โดยใช้วัสดุดูดซับที่เตรียมจากผักตบชวา. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. 15(2). 58-70.
- [11] ปิยนุช ใจแก้ว, ชาญชัย คหาปนะ และณภัทร โพธิ์วัน. 2565. ประสิทธิภาพของผักตบชวาต่อการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตปลา. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา. 10. 52-61

- [12] เจนจิรา ภูริรักษ์พิติกร, กิตติยา ปลื้มใจ, วรินดา เฟื่องขุนซ และแหลมทอง ชื่นชม. 2565. การเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเมทิลีน บลู ในน้ำด้วยถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนเมโซพอร์จากเหง้ามันสำปะหลังที่เตรียมด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันแบบหม้อเดียว. วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ, 11(11). 45–56.
- [13] ธราเทพ คำไทย และพรชนก คำจันทร์. 2565. การเปรียบเทียบคุณสมบัติในกระบวนการโฟโตไลซิสที่ส่งผลต่อสมบัติของไบโอชาร์สำหรับการดูดซับเมทิลีน บลู. ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์, ชุมพร. หน้า 11-64.
- [14] Huifang Wu, Ruoya Chen, Haixia Du, Jia Zhang, Lumeng Shi, Yu Qin, Lingzhi Yue and Junping Wang. 2018. Synthesis of activated carbon from peanut shell as dye adsorbents for wastewater treatment. Nanjing Tech University, China. 0(0):1-15.
- [15] Mohammad Khosravani, Mohsen Dehghani Ghanatghestani, Farid Moeinpour b and Hossein Parvaresh. 2024. Efficient lead removal from aqueous solutions using a new sulfonated covalent organic framework: Synthesis, characterization, and adsorption performance. Chemistry. Sci. 17: 1-12.
- [16] Patrick Y. Kpai, Jaco Nel, Nils Haneklaus, Evans M. N. Chirwa and Hendrik G. Brink. 2023. Comparative Screening Study on the Adsorption of Aqueous Pb(II) Using Different Metabolically Inhibited Bacterial Cultures from Industry. Chemical Engineering, University of Pretoria, South Africa. 15(24): 4259.
- [17] Kritsana. 2011. ขนาดโมเลกุลของกรดไฮโดรคลอริก. เข้าถึงได้จาก : เว็บไซต์ <https://kritsana2536118.blogspot.com/2011/02/50-iodine-53-i-odes-httpth.html> (เข้าถึงเมื่อ 11 มีนาคม 2567)
- [18] K.Y. Foo and B.H. Hameed. 2009. Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. Chemical Engineering Journal. 156(1): 2-10.
- [19] V.S. Mane, S.S. Pawar, A.P. Mungse and S.S. Bankar. 2009. Removal of Methylene Blue from Aqueous Solution by Adsorption onto Activated Carbon Developed from Groundnut Shell. Journal of Hazardous Materials. 163(1): 395-404.
- [20] N.S. Kannan and M.M. Sundaram. 2005. Adsorption of Methylene Blue onto Activated Carbon Prepared from Agricultural Waste. Journal of Chemical Technology and Biotechnology. 80(12): 1393-1401.
- [21] A.A. Khan, A.R. Khan, S.A. Bokhari, and M.A. Khan. 2009. Adsorption of Methylene Blue onto Activated Carbon Derived from Cassia fistula L. Fruit Shells. Journal of Colloid and Interface Science. 335(1): 236-243.
- [22] T.W. Tee, T.T. Teng and S.T. Ong. 2009. Removal of Methylene Blue by Adsorption onto Cocoa (Theobroma cacao) Husk Ash. Journal of Hazardous Materials. 163(1): 385-391.

อิทธิพลของความเค้นแรงดึงที่ส่งผลต่อความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อน The Influence of Tensile Stress Affects the Ability of Corrosion Resistance

อุดมศักดิ์ สว่างวงศ์¹ และ ณัฐนันท์ มูลสระดู^{1,*}
Udomsak Sawangwong¹ and Nutthanun Moolsradoo^{1,*}

¹สาขาวิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ

¹Department of Production Technology Education, Faculty of Industrial Education and Technology,
King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok

*Corresponding author: Nutthanun Moolsradoo, e-mail address: nutthanun.moo@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของความเค้นแรงดึงที่ส่งผลต่อความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อน วัสดุชิ้นงาน Titanium Alloys (Ti-6Al-4V, Gr5) ถูกดึงด้วยความเค้นแรงดึงที่ 350 MPa, 550 MPa และ 750 MPa จากนั้นชิ้นงานจะถูกนำไปทดสอบความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนด้วยเทคนิค Potentiodynamic Polarization ในสารละลาย NaCl (0.05 M) และ Hank's Balanced Salt Solution (HBSS) โดยควบคุมค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่าง -3 ถึง 3 V ที่ Scan rate 10 mV/s โดย Reference electrode (RE) เป็น Ag/AgCl, Counter electrode (CE) เป็นแผ่นแพลทินัม (Platinum sheet) และ Working electrode (WE) เป็นชิ้นงานทดสอบ จากผลการทดลองพบว่าวัสดุ Ti-6Al-4V ที่ถูกกระทำด้วยความเค้นแรงดึง 350 MPa มีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) เท่ากับ -0.471 V (NaCl) และ -0.446 V (HBSS) และชิ้นงานที่ผ่านการดึงด้วยแรง 550 MPa และ 750 MPa มีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเท่ากับ -0.666 V (NaCl) และ -0.503 V (HBSS), -0.701 V (NaCl) และ -0.603 V (HBSS) ตามลำดับ เมื่อเพิ่มความเค้นแรงดึงมากขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนลดลง เนื่องจากวัสดุเกิดการยืดตัวจนผิวเกิดความเสียหาย

คำสำคัญ: ไทเทเนียมอัลลอยด์, การกัดกร่อน, ความเค้นแรงดึง

Abstract

This research investigated the influence of tensile stress on corrosion resistance. The specimens used were titanium alloys (Ti-6Al-4V, Grade 5). Tensile tests were conducted at stress levels of 350 MPa, 550 MPa, and 750 MPa sequentially. Following the tensile testing, the specimens were subjected to potentiodynamic polarization testing in NaCl (0.05 M) and Hank's Balanced Salt Solution (HBSS), controlling the potential between -3 to 3 V at a scanning rate of 10 mV/s. The reference electrode (RE) was Ag/AgCl, the counter electrode (CE) was a platinum sheet, and the working electrode (WE) was the specimen. The study found that Ti-6Al-4V specimens subjected to 350 MPa tensile stress had corrosion potential (E_{corr}) values of -0.471 V (NaCl) and -0.446 V (HBSS), which were higher than those of specimens subjected to 550 MPa and 750 MPa tensile stress. The E_{corr} values for the 550 MPa stress group were -0.666 V (NaCl) and -0.503 V (HBSS), and for the 750 MPa stress group, the values were -0.701 V (NaCl) and -0.603 V (HBSS). Specimens subjected to increased tensile stress exhibited decreased corrosion potential, likely due to surface failure caused by the tension.

Keywords: titanium alloys, corrosion, tensile stress

1. บทนำ

ในปัจจุบันวัสดุไทเทเนียม (Ti-6Al-4V, Gr5) สามารถนำมาประยุกต์ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมชีวภาพ เช่น การใช้เป็นขดลวดขยายหลอดเลือด (Vascular Stents), ข้อเทียม (Artificial Joints), เข่าเทียม (Artificial knees) และแผ่นกระดูก (Bone Plates) [1-2] อย่างไรก็ตามเมื่อวัสดุดังกล่าวเข้าสู่ร่างกายในระยะเวลานาน การสัมผัสกับเนื้อเยื่อต่างๆภายในร่างกาย ส่งผลให้เกิดสภาวะการกัดกร่อน (Corrosion) หรือการเสื่อมสภาพของตัววัสดุทางชีวภาพในระยะยาวได้ นอกจากนั้นเมื่อผู้ป่วยมีการขยับร่างกายจนส่งผลให้อุปกรณ์ดังกล่าวเกิดการยืดหดตัวตามร่างกาย จะส่งผลให้วัสดุเกิดการกัดกร่อนได้เร็วยิ่งขึ้น ซึ่งวัสดุดังกล่าว

ไม่ควรได้รับผลกระทบจากการกัดกร่อนของร่างกายร่างกาย โดยที่โลหะผสมหรือวัสดุทางชีวภาพนั้นต้องมีความเข้ากันได้กับร่างกายมนุษย์ [3-4]

งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาอิทธิพลของความเค้นแรงดึง 3 ระดับ ที่ส่งผลต่อความสามารถในการต้านการกัดกร่อนของไทเทเนียมอัลลอยด์ (Ti-6Al-4V, Gr5) ด้วยเทคนิคโพเทนชิโอดนามิก โพลาริเซชัน (Potentiodynamic Polarization) ในสารละลาย NaCl (0.05 M) และ Hank's Balanced Salt Solution (HBSS)

2. วิธีการศึกษา

ในงานวิจัยนี้ใช้ชิ้นงาน ไทเทเนียมอัลลอยด์ (Ti-6Al-4V,Gr5) ที่ถูกตัดเป็นขนาดตามมาตรฐานการทดสอบแรงดึง ASTM E8/E8M – 13a Subsize Specimen [5] แสดงใน รูปที่ 1 และ รูปที่ 2 และส่วนผสมทางเคมีและสมบัติทางกลของ Ti-Al-4V [6] แสดงใน ตารางที่ 1 และ ตารางที่ 2

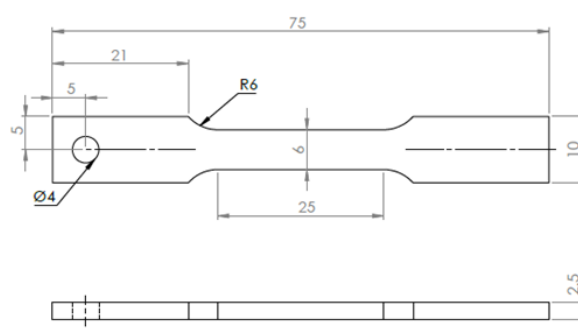


Figure 1 Subsize Specimen according to ASTM E8/E8M – 13a (1).



Figure 2 Subsize Specimen according to ASTM E8/E8M – 13a (2).

ตารางที่ 1 Nominal chemical composition of Ti 6Al 4V (wt. %) [6].

Element	%	Element	%
C	< 0.08	Ti	Balance
Al	5.5 - 6.75	H	< 0.05
Fe	< 0.4	N	< 0.04
V	3.5 - 4.5	O	< 0.2

ตารางที่ 2 Thermal and mechanical properties of Ti 6Al 4V [6].

Thermal Properties	
Thermal conductivity (W/m.K)	7.3
Specific heat capacity (J/kg °C)	580 at 25 °C
Mechanical properties	
Density (kg/ mm ³)	4428
Hardness (HRC)	36
Modulus of elasticity (GPa)	110
Yield strength (MPa)	825
Melting Temperature (K)	1933

ชิ้นงานจะถูกทำความสะอาดด้วยเครื่อง Ultrasonic Cleaner โดยใช้สารเมทานอล (Methanol, CH₃OH) จากนั้นนำไปดัดด้วยเครื่อง Universal Tensile Tester ที่ระดับความเค้นแรงดึงเท่ากับ 350 MPa, 550 MPa และ 750 MPa ชิ้นงานจะถูกนำไปทดสอบความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนด้วยเทคนิค Potentiodynamic Polarization ในสารละลาย NaCl (0.05 M) และ Hank's Balanced Salt Solution (HBSS) [7-8] โดยค่าศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ -3 V ถึง 3 V และ Scan rate เท่ากับ 10 mV/s ทั้งนี้ Reference electrode (RE) คือ Ag/AgCl และ Counter electrode (CE) คือ Platinum sheet และ Working electrode (WE) เป็นชิ้นงานที่ต้องการทดสอบ ทั้งนี้ความยาวของชิ้นงานหลังการดัด ณ บริเวณที่ทำการทดสอบเท่ากับ 2 cm ในการทดลองนี้ ได้ทำการทดสอบเงื่อนไข 3 ครั้ง เพื่อเปรียบเทียบผลและรายงานเป็นค่าเฉลี่ย

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 ความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนในสารละลาย NaCl (0.05 M) และ Hank's Balanced Salt Solution (HBSS)

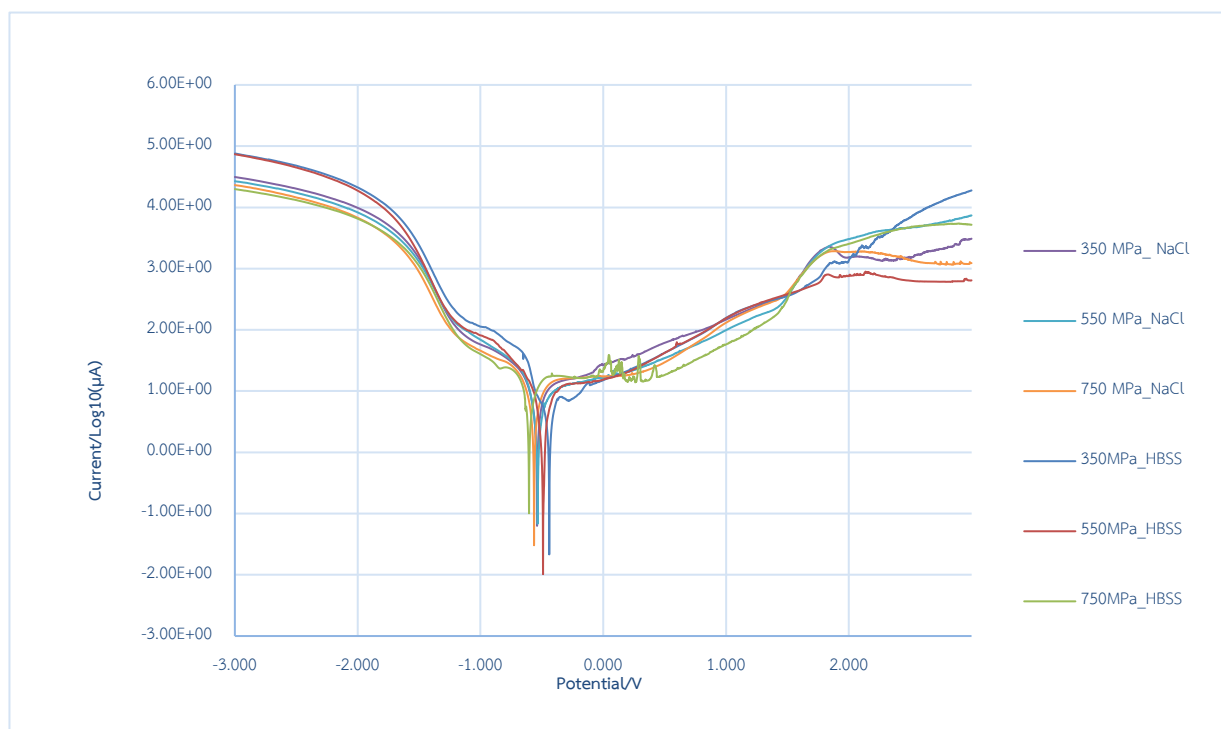


Figure 3 Potentiodynamic polarization curves of NaCl (0.05 M) and Hank's Balanced Salt Solution (HBSS).

ตารางที่ 3 Corrosion resistance of NaCl (0.05 M) and Hank's Balanced Salt Solution (HBSS).

Ti-6Al-4V	NaCl (0.05 M)		HBSS	
	E_{corr} (V)	I_{corr} (A/cm ²)	E_{corr} (V)	I_{corr} (A/cm ²)
350 MPa	-0.471	1.476	-0.446	1.175
550 MPa	-0.665	1.572	-0.503	1.289
750 MPa	-0.701	2.728	-0.603	1.584

ตารางที่ 4 Corrosion current density (I_{corr}) of NaCl (0.05 M) and Hank's Balanced Salt Solution (HBSS) in relation to changing surface area.

Ti-6Al-4V	Surface area (cm ²)	NaCl (0.05 M)	HBSS
		I_{corr} (A/cm ²)	I_{corr} (A/cm ²)
350 MPa	1.20 (2 cm x 0.60 cm)	1.230	0.979
550 MPa	1.19 (2 cm x 0.598 cm)	1.321	1.083
750 MPa	1.18 (2 cm x 0.594 cm)	2.311	1.342

จาก รูปที่ 3 และ ตารางที่ 3 แสดงความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนของวัสดุในสารละลาย NaCl (0.05 M) และ Hank's Balanced Salt Solution (HBSS) จากการทดลองพบว่าการทดสอบในสารละลาย HBSS มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (E_{corr}) ที่สูง และค่าความหนาแน่นของกระแส (I_{corr}) ที่ต่ำกว่า NaCl โดยมีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (E_{corr}) อยู่ในช่วงระหว่าง -0.446 V ถึง -0.603 V และค่าความหนาแน่นของกระแส (I_{corr}) อยู่ในช่วงระหว่าง 1.175 A/cm² ถึง 1.584 A/cm² ซึ่งค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูง และค่า

ความหนาแน่นของกระแสที่ต่ำ แสดงถึงสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนที่ดี ทั้งนี้เนื่องจากสภาวะความเป็นกรดของสารละลาย NaCl ที่เข้าไปทำปฏิกิริยาให้เกิดการกัดกร่อนบนชิ้นงานได้มากกว่า นอกจากนั้นพบว่าทดสอบในทุกสารละลาย เมื่อเพิ่มความเค้นแรงดึงมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าน้อยลง และค่าความหนาแน่นของกระแสที่มากขึ้น หมายถึงความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนลดลง เนื่องจากการหลุดออกของอิเล็กตรอนจากวัสดุเมื่อเกิดการยึดตัวจนผิวเกิดความเสียหายนั่นเอง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sh Chen. และคณะ [9] ได้ทำการศึกษาความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนของฟิล์มเคลือบ Ti-O ที่ถูกเคลือบลงบนชิ้นงาน CoCrMo Alloy โดยชิ้นงานทดสอบจะถูกดึงเป็นระยะ 10%, 20% และ 30% ของ Gauge range และนำไปทดสอบความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อน พบว่าเมื่อออกแรงดึงมากขึ้นการกัดกร่อนเพิ่มขึ้นเนื่องจากการทำลายผิวฟิล์มที่เกิดจากกระบวนการสึกหรอ นอกจากนั้นพบว่าค่าความหนาแน่นของกระแส (I_{corr}) ต่อพื้นที่ของชิ้นงานดัง ตารางที่ 4 พบว่าที่ระดับความเค้นแรงดึง 350 MPa และ 550 MPa มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าขนาดของชิ้นงานที่เปลี่ยนไปเนื่องจากความเค้นแรงดึงเพิ่มมากขึ้น ไม่ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นของกระแส เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ในขณะที่ระดับความเค้นแรงดึง 750 MPa มีค่าแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเกิดจากขนาดของชิ้นงานที่เล็กลงจากการถูกดึงที่ระดับความเค้นสูงที่สุดนั่นเอง อย่างไรก็ตามสามารถพิจารณาความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนจากค่าของความต่างศักย์ไฟฟ้า (E_{corr}) ซึ่งไม่มีอิทธิพลจากขนาดของชิ้นงานที่เปลี่ยนไป

4. สรุป

จากผลการทดลองความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนในสารละลาย NaCl (0.05 M) และ Hank's Balanced Salt Solution (HBSS) พบว่าวัสดุ Ti-6Al-4V ที่ถูกกระทำด้วยแรงดึง 350 MPa มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (E_{corr}) เท่ากับ -0.471 V (NaCl) และ -0.446 V (HBSS) มากกว่าชิ้นงานที่ผ่านการดึงด้วยแรง 550 MPa และ 750 MPa ที่มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า เท่ากับ -0.666 V (NaCl) และ -0.503 V (HBSS), -0.701 V (NaCl) และ -0.603 V (HBSS) ตามลำดับ สรุปได้ว่าชิ้นงานที่ถูกแรงดึงเพิ่มขึ้นในแต่ละช่วงนั้นมีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (E_{corr}) ลดลง ยิ่งค่าความต่างศักย์ไฟฟาลดลงทำให้ชิ้นงานนั้นถูกกัดกร่อนได้มากขึ้น

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Braic V, Braic M, Balaceanu M, Vladescu A, Zoita C N, Titorencu I and Jinga V.2011. Surf. Coat. Technol. 206. pp.604.
- [2] Liu X, Chu P K and Ding C 2004 Mater. Sci. Eng. 47. pp. 49–121.
- [3] K. Prasad, O. Bazaka, M. Chua, M. Rochford, L. Fedrick, J. Spoor, R. Symes, M. Tieppo, C. Collins, A. Cao, D. Markwell, K. Ken, Ostrikov, K. Bazaka. 2017. Metallic biomaterials: current challenges and opportunities. Materials 10. pp. 884.
- [4] N. Eliaz. 2019. Corrosion of metallic biomaterials: a review. Materials 12. pp. 407.
- [5] ASTM F2129-19a. 2019. Standard Test Method for Conducting Cyclic Potentiodynamic Polarization Measurements to Determine the Corrosion Susceptibility of Small Implant Devices. ASTM International. West Conshohocken, PA, USA.
- [6] Salman Pervaiz, Amir Rashid, Ibrahim Deiab, Cornel Mihai Nicolescu. 2014. Experimental and Numerical Investigation of Ti6Al4V Alloy machinability using TiAlN Coated Tools, Proceedings of NAMRI/SME, Vol. 42. pp. 2
- [7] Datta S., Das, M., Balla V.K., Bodhak S., Murugesan V. Mechanical. 2018. wear corrosion and biological properties of arc deposited titanium nitride coatings. Surf. Coat. Technol. 344. pp. 214–222.
- [8] Choubey A., Basu B., Balasubramaniam R. 2004. Tribological behavior of Ti-based alloys in simulated body fluid solution at fretting contacts. Mater. Sci. Eng. 379. pp. 234–239.
- [9] Sh. Chen, B.H. Wu, D. Xie, F. Jiang, J. Liu, H.L. Sun, Shengfa Zhu, B. Bai, Y.X. Leng, N. Huang, H. Sun. 2014. The adhesion and corrosion resistance of Ti-O films on CoCrMo alloy fabricated by high power pulsed magnetron sputtering (HPPMS). Surface & Coatings Technology. pp. 10-20.

การศึกษาสมบัติของฟิล์มเทอร์โมพลาสติกจากสตาร์ชข้าวสังข์หยด Study on Thermoplastic Film Properties from Sangyod Rice Starch

เพชรลดา จิระวรรณ¹ กรณนก อุบลชลเขต¹ และ เสาวณีย์ สิงห์สร้อย^{1,*}
Patladda Jerawon¹, Kornkanok Ubolchollakhat¹, and Saowanee Singsothai^{1,*}

¹หลักสูตรวิศวกรรมยางและพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง จังหวัดพัทลุง

¹Rubber and Polymer Engineering Program, Faculty of Engineering, Thaksin University, Phatthalung

*Corresponding author: Saowanee Singsothai, e-mail address: saowanee.s@tsu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการเตรียมฟิล์มเทอร์โมพลาสติกจากสตาร์ชข้าวสังข์หยด โดยการนำสตาร์ชข้าวสังข์หยดมาจาก 2 แหล่ง มาใช้ ซึ่งได้แก่ แป้งข้าวสังข์หยดจากท้องตลาดทั่วไปที่เตรียมจากการโม่แห้ง (Commercial) และสตาร์ชข้าวสังข์หยดที่เตรียมได้จากการโม่เปียก (Hand Made) ไปเตรียมเป็นเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชด้วยการนำกลีเซอรอล (Glycerol; GL) และเจลาติน (Gelatin; GE) มาเป็นสารพลาสติกไซเซอร์ที่ช่วยผสมในสัดส่วนร้อยละ 45:15 30:30 และ 15:45 ตามลำดับ จากนั้นนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลานาน 30 min เพื่อทำให้สตาร์ชเกิดการเจล (Gelatinization) สุดท้ายจึงนำไปหล่อขึ้นรูปเป็นฟิล์มบางและอบแห้ง เมื่อได้ฟิล์มตัวอย่างจึงนำไปศึกษาลักษณะทางกายภาพและทดสอบสมบัติต่างๆ เช่น ความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) การยืด (Elongation) ความสามารถในการละลายน้ำ (Solubility) ความสามารถในการพองตัว (Swelling) และความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพโดยการฝังกลบในดิน (Biodegradability Test by Landfill) ซึ่งพบว่าสตาร์ชข้าวสังข์หยดสามารถใช้เป็นวัตถุดิบในการที่เตรียมแผ่นฟิล์มเทอร์โมพลาสติกได้ทั้งที่ผ่านการโม่แห้งและโม่เปียก และสารพลาสติกไซเซอร์สามารถช่วยให้การขึ้นรูปแผ่นฟิล์มได้ง่ายขึ้น โดยแผ่นฟิล์มที่ได้จากการใช้ส่วนผสมระหว่างเจลาตินกับกลีเซอรอลในสัดส่วนร้อยละ 30:30 ให้สมบัติโดยรวมดีที่สุดและมีโอกาสพัฒนาต่อไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุสำหรับบรรจุอาหารได้ในอนาคต

คำสำคัญ: ข้าวสังข์หยด ฟิล์ม เจลาติน กลีเซอรอล พลาสติกชีวภาพ

Abstract

This research studies the feasibility of preparing thermoplastic starch films from Sangyod rice by using 2 sources, which are the Sangyod rice flour from the general market prepared from dry milling (Commercial) and the Sangyod rice starch prepared from wet milling (Hand-made) to prepare thermoplastic starch by using glycerol (Glycerol; GL) and gelatin (Gelatin; GE) as plasticizers that help mix in percentage proportions 45:15, 30:30, and 15:45, respectively. Then it was heated at 80 °C for 30 min to make the gelatinization, and finally, it was molded into a thin film and dried. When the samples were obtained, they were studied for their physical characteristics and tested for various properties such as tensile strength, elongation, solubility in water, swelling ability, and ability to be biodegradable by landfilling in the soil. So, they found that the Sangyod rice starch can be used as a raw material for preparing thermoplastic film, both dry-milled and wet-milled. Plasticizers can help make the film easier to form. The film using a mixture of gelatin and glycerol in the proportion of 30:30 has the best overall properties and an opportunity for further development and application as a material for food packaging.

Keywords: Sangyod Rice, Film, Gelatin, Glycerol, Biodegradable Polymer

1. บทนำ

ในปัจจุบันนี้มีการนำพอลิเมอร์มาใช้งานในชีวิตประจำวันในด้านต่างๆ มากมาย เช่น บรรจุภัณฑ์ การแพทย์ อุตสาหกรรม ยานยนต์ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น เมื่อพิจารณาในด้านบรรจุภัณฑ์ที่มีแนวโน้มการใช้งานเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยพอลิเมอร์ที่ใช้กันอยู่ในทั่วไปนั้นล้วนผลิตมาจากปิโตรเคมี ซึ่งต้องใช้เวลานานในการย่อยสลายตามธรรมชาติ ปัญหาที่ตามมาคือ ปริมาณขยะที่มาจากพอลิเมอร์ที่มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมตามมา ดังนั้นพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable Polymer) จึงได้รับความสนใจมากขึ้น พอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพสามารถแบ่งตามวัตถุดิบได้ 2 ประเภท คือ พอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ผลิตจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี (Petroleum based Biodegradable Polymer) และพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ผลิตจากวัตถุดิบมวลชีวภาพ (Bio based Biodegradable Polymers) ซึ่งกำลังเป็นที่นิยม เนื่องจากพอลิเมอร์เหล่านี้มีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์จากปิโตรเคมี

พอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพที่มีการใช้งานมากในปัจจุบัน คือ พอลิแลคติกแอซิด (Poly(Lactic Acid); PLA) พอลิแลคติกแอซิดจัดอยู่ในกลุ่มพอลิเอสเทอร์ ซึ่งได้มาจากกรดแลคติก (Lactic Acid) ที่สังเคราะห์ได้จากผลผลิตทางการเกษตรที่มีแป้งและน้ำตาล เช่น ข้าวโพด ข้าวสาลี มันสำปะหลัง เป็นต้น โดยทำจากการย่อยแบ่งให้เป็นน้ำตาลและหมักด้วยจุลินทรีย์เกิดเป็นกรดแลคติก แล้วนำมาผ่านกระบวนการทางเคมีได้เป็นแลกไทด์ (Lactide) ที่มีโครงสร้างเป็นวงแหวน จากนั้นเมื่อผ่านกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) จะเปลี่ยนเป็นพอลิแลคติกแอซิด สมบัติของพอลิแลคติกแอซิดมีความใกล้เคียงกับพอลิเมอร์บางประเภทที่นิยมใช้ในทางการค้า นั่นคือ สามารถขึ้นรูปได้ง่าย มีความปลอดภัยกับการใช้งานที่ต้องสัมผัสอาหาร และได้รับความนิยมอย่างมากในอุตสาหกรรมอาหารและยา แต่ด้วยราคาที่สูงและมีความประจักษ์เป็นข้อจำกัดในการนำมาใช้งาน แนวทางหนึ่งจึงหันมาสนใจในแป้ง (Starch) ที่เป็นหนึ่งในพลาสติกชีวภาพที่มีเสถียรภาพในการใช้งานเป็นบรรจุภัณฑ์ได้ ดังงานวิจัยของ มณฑา กาญจน และคณะ (2561) ที่ศึกษาการผลิตเม็ดเทอร์โมพลาสติกสตาเรช (TPS) จากข้าวกลุ่มพันธุ์ข้าวเหนียว (ภข 6 และสันป่าตอง 1) และกลุ่มพันธุ์ข้าวที่มีปริมาณอมิโลสต่ำ (ข้าวดอกมะลิ 105 และปทุมธานี 1) โดยใช้กลีเซอรอลช่วยในการขึ้นรูป และนำไปทดลองใช้เป็นวัสดุผสมร่วมกับพอลิแลคติกแอซิด/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (TPS/PLA/PBS) ด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูป พบว่า การเติมกลีเซอรอลช่วยให้วัสดุผสมมีการไหลดีขึ้น และผลการทดสอบแรงดึงแสดงให้เห็นว่าวัสดุผสม TPS/PLA/PBS ที่เตรียมโดยใช้ข้าวในกลุ่มข้าวเหนียวมีความแข็งแรงสูงที่สุด รองลงมาเป็นกลุ่มพันธุ์ข้าวที่มีปริมาณอมิโลสต่ำ และปานกลาง และต่ำที่สุดในกลุ่มพันธุ์ข้าวที่มีปริมาณอมิโลสสูง เนื่องจากกลุ่มพันธุ์ข้าวที่มีปริมาณอมิโลสสูงจำเป็นต้องใช้พลาสติกไซเซอร์ (กลีเซอรอล) ในกระบวนการผลิตสูง ส่งผลให้ปฏิสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบของวัสดุผสมลดลง [1] งานวิจัยของ นันทยา และเรณูภรณ์ (2562) ศึกษาสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาเรชจากแป้งข้าวเจ้า แป้งข้าวเหนียว และแป้งผสมอัตราส่วน 1:1 ที่เตรียมโดยการหมัก และใช้กลีเซอรอลช่วยในการขึ้นรูป พบว่า แป้งแต่ละชนิดมีปริมาณอะไมโลสและอะไมโลเพคตินที่แตกต่างกัน ทำให้ค่าความหนาแน่นของเทอร์โมพลาสติกสตาเรชจากแป้งข้าวทั้ง 3 ชนิดมีค่าไม่แตกต่างกันอยู่ในช่วง 1.3583-1.3665 g/cm³ ค่าดัชนีการไหลของเทอร์โมพลาสติกสตาเรชจากแป้งข้าวเหนียวมีค่าสูงสุด รองมาเป็นเทอร์โมพลาสติกสตาเรชจากแป้งผสมและแป้งข้าวเจ้า ตามลำดับ และค่าความต้านทานแรงดึงและค่าความทนแรงดึงสูงสุดของเทอร์โมพลาสติกสตาเรชจากแป้งข้าวเจ้ามีค่าสูงกว่าของเทอร์โมพลาสติกสตาเรชจากแป้งผสมและแป้งข้าวเจ้าตามลำดับ [2] งานวิจัยของ ภาวิณี และบรรณรัตน์ (2562) ศึกษาการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาเรชจากแป้งมันสำปะหลัง 2 สายพันธุ์ เพื่อผลิตเป็นถุงเพาะชำพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยใช้กลีเซอรอลเป็นสารพลาสติกไซเซอร์ที่ร้อยละ 0 20 30 และ 40 โดยน้ำหนักของแป้ง พบว่าแป้งมันสำปะหลังทั้ง 2 สายพันธุ์ สามารถใช้ขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ดี ฟิล์มที่ได้มีค่าความหนาอยู่ระหว่าง 0.20 - 0.30 mm มีค่าการละลายน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น ค่าต้านทานแรงดึงและค่าต้านทานแรงเฉือนของฟิล์มแป้งสำปะหลังทั้ง 2 สายพันธุ์ เพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของกลีเซอรอลลดลง และผลทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังในดินพบว่า ฟิล์มสามารถย่อยสลายได้ร้อยละ 55 - 58 ในระยะเวลา 2 สัปดาห์ โดยแผ่นฟิล์มจะย่อยสลายได้เร็วขึ้นตามปริมาณกลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้น [3] งานวิจัยของ กมลทิพย์ และคณะ (2565) ศึกษาการเตรียมฟิล์มย่อยสลายได้จากเปลือกทุเรียน โดยใช้กลีเซอรอล 3 6 และ 9 กรัม เป็นสารพลาสติกไซเซอร์ จากการศึกษาพบว่า แผ่นฟิล์มที่ได้มีความหนาอยู่ในช่วง 0.14 - 0.17 mm ค่าความสว่างอยู่ระหว่าง 72.3 - 76.8 ปริมาณความชื้น 8.74 - 11.24 % อัตราการซึมผ่านไอน้ำและการละลายน้ำเพิ่มขึ้นตามปริมาณกลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้น สำหรับการทดสอบสมบัติเชิงกล ค่าความต้านทานแรงดึงขาดจะลดลง และค่าการยืดตัวของฟิล์มจะเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณกลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้น [4] งานวิจัยของ รัตนฐาภัทร และคณะ (2565) ศึกษาการเตรียมฟิล์มจากเจลาตินและแป้งมันมือเสือเพื่อประยุกต์ใช้เป็นเปลือกแคปซูลชนิดแข็ง โดยใช้เจลาติน/แป้งมันมือเสือผสมกัน และหล่อขึ้น

รูปฟิล์มในอัตราส่วนต่างๆ 100:0 90:10 80:20 70:30 60:40 และ 50:50 ร้อยละโดยน้ำหนัก (% w/w) โดยมีกลีเซอรอลร้อยละ 5 ของพอลิเมอร์ผสมทั้งหมดทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ จากผลการทดสอบฟิล์มพอลิเมอร์ผสมพบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่แสดงถึงสมบัติที่ดีที่สุด ทั้งความต้านทานน้ำ (ความสามารถในการละลายน้ำที่ลดลง) ความโปร่งใส และสมบัติเชิงกล คืออัตราส่วน 70:30 ซึ่งมีค่าการทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นมากกว่า 470 % เมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นฟิล์มในอัตราส่วนที่ไม่ได้เติมแบริ่งมันมือเสือ [5]

จากงานวิจัยทั้งหมดข้างต้น ทำให้คณะผู้วิจัยเห็นความสำคัญของพอลิเมอร์ชีวภาพที่ได้มาจากแป้ง และด้วยจังหวัดพัทลุงมีพันธุ์ข้าวขึ้นชื่อประจำจังหวัด นั่นคือ ข้าวสังข์หยด ซึ่งมีปริมาณอะไมโลสต่ำทำให้ยากต่อการขึ้นรูปเป็นฟิล์มบาง จึงทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการขึ้นรูปและสมบัติของฟิล์มบริโกลได้จากข้าวสังข์หยด โดยการนำกลีเซอรอล (Glycerol; GL) และเจลาติน (Gelatin; GE) มาใช้เป็นพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) เพื่อช่วยให้ฟิล์มสามารถขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น และมีสมบัติต่างๆ ที่ดีขึ้น ทั้งนี้หวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาค้นคว้าและพัฒนาฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตรักชจากข้าวสังข์หยด เพื่อต่อยอดไปใช้งานจริงได้ในอนาคต

2. ขั้นตอนการทดลอง

การทดลองจะแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.1 การเตรียมสตรักชจากข้าวสังข์หยด

เริ่มจากการนำเมล็ดข้าวสังข์หยด ปริมาณ 1 kg มาแช่น้ำเป็นเวลานาน 24 hr จากนั้นไม่ด้วยเครื่องบดไม่ จะได้ฟลาวข้าวออกมา จากนั้นทิ้งให้ตกตะกอน เป็นเวลา 24 hr แล้วนำตะกอนที่ได้ไปอบให้แห้ง นำฟลาวข้าวที่อบแห้งแล้วมาบดให้ได้เป็นผงละเอียด และเก็บผงฟลาวข้าวที่ได้ในโถดูดความชื้น เพื่อเตรียมนำไปใช้ในการเตรียมฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตรักช

2.2 การเตรียมฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตรักชจากข้าวสังข์หยด

สตรักชข้าวสังข์หยดที่นำมาใช้มาจาก 2 แหล่ง คือ แป้งข้าวสังข์หยดในท้องตลาดที่ผ่านการโม่แห้ง (Com) และจากฟลาวข้าวที่ได้จากการโม่เปียก (Hm) โดยเริ่มการเตรียมฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตรักชจากข้าวสังข์หยดจากการชั่งน้ำหนักสตรักชข้าวมาประมาณ 5 g ผสมกับน้ำกลั่นประมาณ 100 g กวนด้วยเครื่องกวนสารละลายที่ความเร็ว 600 rpm ร่วมกับการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลานาน 30 min จากนั้นวางทิ้งไว้ 5 min แล้วจึงเติมเจลาติน (GE) และกลีเซอรอล (GL) ในสัดส่วนร้อยละ 45:15 30:30 และ 15:45 โดยน้ำหนักของสตรักชข้าวสังข์หยดตามลำดับ เพื่อให้ทำหน้าที่เป็นสารพลาสติกไซเซอร์ กวนผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน แล้วนำไปเทหล่อขึ้นรูปเป็นฟิล์มในแม่พิมพ์กระจก อบให้แห้ง และลอกแผ่นฟิล์มออกจากแม่พิมพ์ เก็บในโถดูดความชื้น พร้อมนำไปศึกษาลักษณะพื้นผิวและทดสอบสมบัติต่างๆ ต่อไป

2.3 การศึกษาลักษณะพื้นผิวและสมบัติต่างๆ ของฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตรักช

การศึกษาลักษณะพื้นผิวและสมบัติต่างๆ ของฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตรักช ประกอบด้วย

2.3.1 การศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง โดยนำแผ่นฟิล์มที่มีขนาดความกว้างเท่ากับ 15 mm และความยาวเท่ากับ 100 mm มาส่องดูลักษณะพื้นผิว จำนวน 5 จุด/แผ่น ทำซ้ำจำนวน 3 แผ่น ต่อ 1 ชุดตัวอย่าง

2.3.2 การวัดความหนาของแผ่นฟิล์ม (Thickness) ตัวอย่างฟิล์มถูกนำมาวัดความหนาด้วยเครื่องวัดความหนาระดับไมโครเมตร (Mitutoyo, Japan) โดยวัดความหนาจากแผ่นฟิล์มที่มีขนาดความกว้างเท่ากับ 15 mm และความยาวเท่ากับ 100 mm จำนวน 5 จุด/แผ่น ทำซ้ำจำนวน 3 แผ่น ต่อ 1 ชุดตัวอย่าง

2.3.3 ความสามารถในการละลายน้ำของแผ่นฟิล์ม (Film Solubility) ดำเนินการตามวิธีของ Oh, et al. (2004) โดยเตรียมตัวอย่างแผ่นฟิล์มให้มีขนาด 2x2 cm นำมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 °C นาน 3 hr และชั่งน้ำหนัก (W_1) จากนั้นนำไปละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 100 ml พร้อมกวนด้วยเครื่องกวนสารละลาย เป็นเวลา 1 hr และกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 4 (ที่ชั่งน้ำหนักแล้ว; a_1) จากนั้นนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 °C นาน 25 min และทำให้เย็นในโถดูดความชื้น 1 คืน ชั่งน้ำหนักของกระดาษกรอง (a_2) ทดลองตัวอย่างละ 2 ซ้ำ และคำนวณเปอร์เซ็นต์การละลายน้ำของฟิล์ม ดังสมการที่ (1)

$$\% \text{ Film Solubility} = (W_1 - (a_2 - a_1) / W_1) \times 100$$

สมการที่ (1)

2.3.4 ความสามารถในการพองตัวของแผ่นฟิล์ม (Swelling Property) ตรวจสอบตามวิธีของมาตรฐาน ASTM D570 โดยนำตัวอย่างฟิล์มมาตัดให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีขนาดความกว้างเท่ากับ 1 in และความยาวเท่ากับ 1 in แล้วอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 1 hr เพื่อกำจัดความชื้นที่อยู่ในตัวอย่างฟิล์ม ทั้งให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก (W_0) จุ่มฟิล์มลงในน้ำกลั่นปริมาตร 20 ml เป็นเวลา 2 hr จากนั้นนำตัวอย่างฟิล์มขึ้นจากน้ำ ชบน้ำออก แล้วนำตัวอย่างที่ชบน้ำออกแล้วไปชั่งน้ำหนัก (W_1) ทดลองตัวอย่างละ 3 ซ้ำ และคำนวณเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของฟิล์ม ดังสมการที่ (2)

$$\% \text{ Swelling} = ((W_0 - W_1) / W_1) \times 100 \quad \text{สมการที่ (2)}$$

2.3.5 การทดสอบการย่อยสลายได้ทางชีวภาพโดยการฝังกลบในดิน (Biodegradability Test by Landfill) ตัดแปลงการทดสอบมาจากมาตรฐาน ASTM 5338 โดยเตรียมชิ้นตัวอย่างขนาดกว้าง 5 cm และยาว 5 cm นำชิ้นตัวอย่างไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 3 hr ชั่งน้ำหนักชิ้นตัวอย่าง (A) แล้วนำไปฝังให้ลึกจากผิวดิน ประมาณ 25 - 30 cm กลบด้วยดิน จากนั้นรดน้ำแบบพ่นฝอยให้แก่ดินจนชุ่ม วันละ 1 ครั้ง ติดตามการย่อยสลายทางชีวภาพตามระยะเวลา 30 วัน โดยการนำชิ้นตัวอย่างขึ้นมาทำความสะอาด และชั่งน้ำหนักชิ้นตัวอย่าง (B) เพื่อคำนวณหาเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญเสียไป ดังสมการที่ (3)

$$\% \text{การย่อยสลายของฟิล์ม} = ((A - B) / A) \times 100 \quad \text{สมการที่ (3)}$$

2.3.6 การต้านทานต่อแรงดึง (Tensile Strength; TS) และการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at Break; %E) ของแผ่นฟิล์ม ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D822 - 97 ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine; UTM) โดยตัดชิ้นตัวอย่างของฟิล์มขนาดตามที่มาตรฐานกำหนด นำมายึดปลายทั้ง 2 ข้างเข้ากับหัวหนีบ และตั้งระยะห่างระหว่างหัวหนีบเริ่มต้นเท่ากับ 40 mm ตั้งค่าความเร็วของหัวจับ (Cross - head) เท่ากับ 50 mm/min ตัวอย่างละ 3 ชิ้น จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณค่าการต้านทานต่อแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาด ดังสมการที่ (4) และ (5)

$$TS = F_{\max} / A \quad \text{สมการที่ (4)}$$

$$\%E = (L / L_0) \times 100 \quad \text{สมการที่ (5)}$$

โดยที่

$F_{\max}$ = ค่าแรงสูงสุดที่ทำให้ฟิล์มขาด (N)

A = ความหนา x ความกว้างของฟิล์ม (mm^2)

L_0 = ความยาวเริ่มต้นของฟิล์ม (mm)

L = ระยะทางที่ฟิล์มยืดออก (mm)

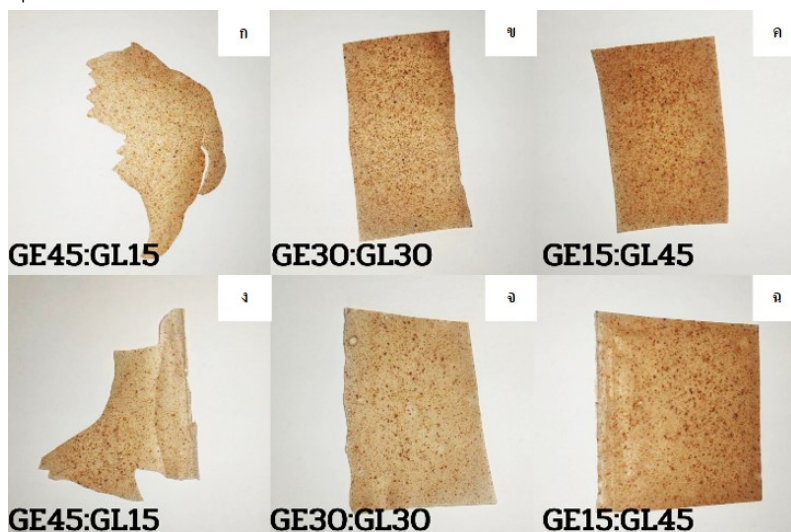
3. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

ผลการทดลองและการอภิปรายผลแสดงตามลำดับการศึกษา ดังต่อไปนี้

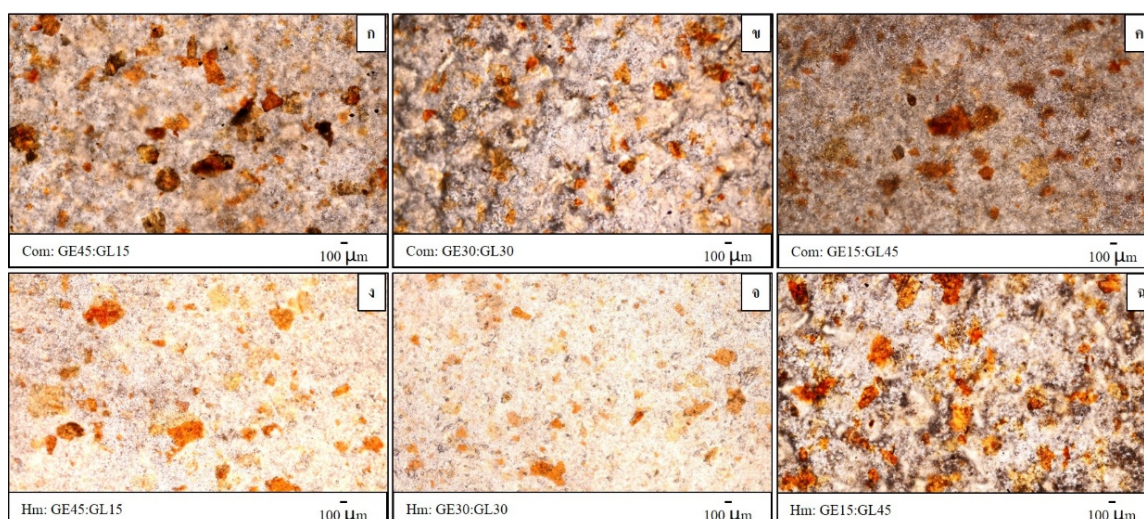
3.1 ผลการศึกษาการใช้พลาสติกชีวเซอร์ที่ผสมระหว่างเจลาติน (GE) กับกลีเซอรอล (GL)

จากการใช้พลาสติกชีวเซอร์ที่ผสมกันระหว่างเจลาติน (GE) กับกลีเซอรอล (GL) ในสัดส่วน 45:15 30:30 และ 15:45 ได้แผ่นฟิล์มดังรูปที่ 1 ซึ่งทำให้เห็นว่า แผ่นฟิล์มที่ใช้สตาร์ชจากการโม่แห้งตามท้องตลาด (Com) และสตาร์ชจากการโม่เปียก (Hm) มีผิวสัมผัสที่ขรุขระคล้ายๆ กัน แต่แผ่นฟิล์มที่ใช้สตาร์ชจากการโม่แห้งตามท้องตลาดมีความขรุขระที่สม่ำเสมอกว่าสตาร์ชจากการโม่เปียก เมื่อสัมผัสด้วยมือเปล่าและทดลองบิดงอเบื้องต้นพบว่า แผ่นฟิล์มที่ใช้พลาสติกชีวเซอร์ผสมสัดส่วนร้อยละ 45:15 มีความเปราะบางและแตกหักง่าย แต่แผ่นฟิล์มที่ใช้พลาสติกชีวเซอร์ผสมสัดส่วน 15:45 และ 30:30 มีความเหนียวและแตกหักยากขึ้น

ตามลำดับ ดังนั้นผลการศึกษาก็จะเป็นไปตามสมมติฐานที่ตั้งไว้ข้างจริง จึงทำการเตรียมแผ่นฟิล์มซ้ำอีกครั้ง เพื่อนำตัวอย่างแผ่นฟิล์มที่ได้ไปทดสอบสมบัติต่างๆ ต่อในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 1 ลักษณะของแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้จาก (ก - ค) สตาร์ชจากการไม่แห้งตามท้องตลาด (Com) และ (ง - ฉ) สตาร์ชที่ได้จากการไม่เปียก (Hm)

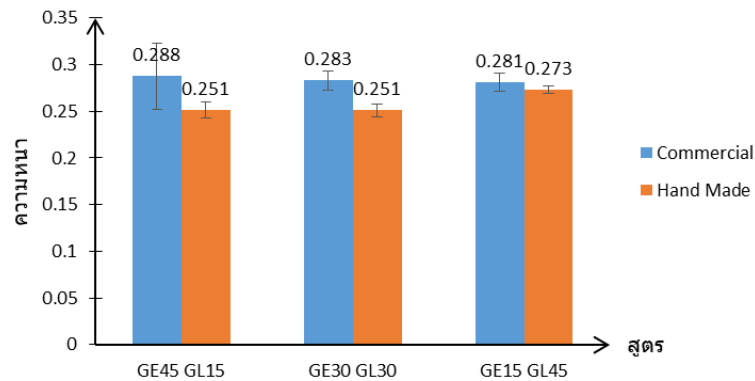


รูปที่ 2 ลักษณะพื้นผิวของแผ่นฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่เตรียมได้จาก (ก - ค) สตาร์ชจากการไม่แห้งตามท้องตลาด (Com) และ (ง - ฉ) สตาร์ชที่ได้จากการไม่เปียก (Hm)

เมื่อนำแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้อีกครั้งไปศึกษาความเข้ากันได้บนพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่กำลังขยาย 10 เท่า พบว่า สตาร์ชข้าวบนพื้นผิวของแผ่นฟิล์มมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอและมีความเป็นเนื้อเดียวกันดีในทุกๆ เงื่อนไข นอกจากนี้ ทำให้ทราบว่าเนื้อของแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้จากสตาร์ชจากการไม่เปียก (Hm) มีความโปร่งแสงมากกว่าแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้จากสตาร์ชจากการไม่แห้งตามท้องตลาด (Com) ดังรูปที่ 2

3.2 ผลการศึกษาความหนาของแผ่นฟิล์ม (Thickness)

จากผลการวัดค่าความหนาของแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้จากสตาร์ชจากการไม่แห้งตามท้องตลาด (Com) และสตาร์ชจากการไม่เปียก (Hm) พร้อมกับการใช้พลาสติกไซเซอร์ผสมกันระหว่างเจลาติน (GE) กับกลีเซอรอล (GL) ในสัดส่วนร้อยละ 45:15 30:30 และ 15:45 พบว่า แผ่นฟิล์มในทุกๆ เงื่อนไขมีความหนาแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ แต่ทำให้ทราบว่าแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้จากสตาร์ชจากการไม่แห้งตามท้องตลาด (Com) จะให้ความหนาที่มากกว่าแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้จากสตาร์ชจากการไม่เปียก (Hm) เล็กน้อย ดังแผนภูมิแท่งรูปที่ 3



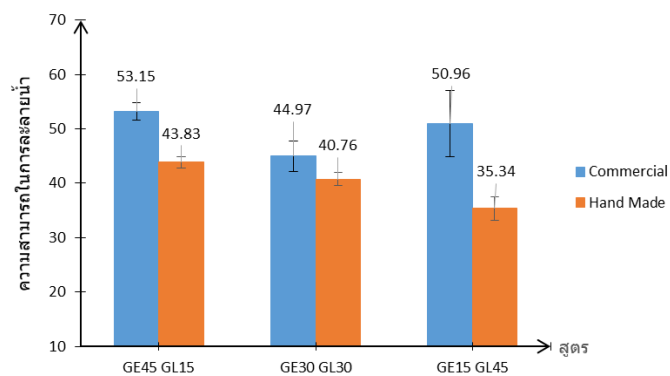
รูปที่ 3 แผนภูมิแท่งแสดงค่าความหนาของแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้จากสตาร์ชจากการไม่แห้งตามท้องตลาด (Com) และสตาร์ชจากการไม่เปียก (Hm) พร้อมกับการใช้พลาสติกไซเซอร์ผสมกันระหว่างเจลาติน (GE) กับกลีเซอรอล (GL) ในสัดส่วนร้อยละ 45:15 30:30 และ 15:45 ตามลำดับ

3.3 ผลการศึกษาความสามารถในการละลายน้ำของแผ่นฟิล์ม (Swelling Property)

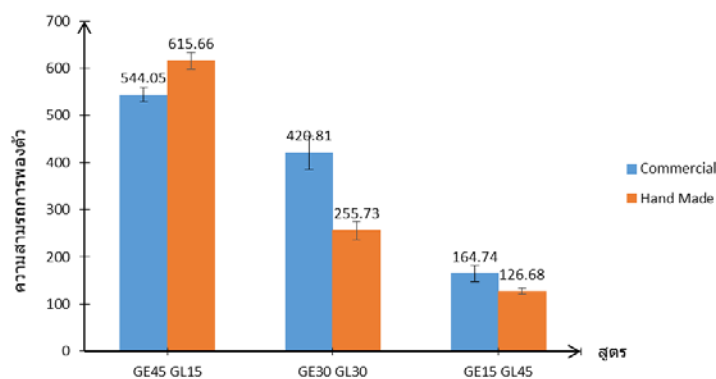
ความสามารถในการละลายน้ำ แสดงถึงความสามารถในการต้านทานน้ำของแผ่นฟิล์ม ซึ่งมีอิทธิพลต่อการนำแผ่นฟิล์มไปประยุกต์ใช้งานในห่อหุ้มหรือเก็บรักษาอาหาร จึงนำแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้ไปทดสอบความสามารถในการละลายน้ำ และจากการผลทดสอบดังกราฟแท่งในรูปที่ 4 พบว่า แผ่นฟิล์มที่เตรียมได้จากสตาร์ชจากการไม่แห้งตามท้องตลาด (Com) ละลายน้ำได้มากกว่าแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้จากสตาร์ชจากการไม่เปียก (Hm) เนื่องจากสตาร์ชที่ได้จากการไม่แห้งจะละลายน้ำได้มากกว่าสตาร์ชที่ได้จากการไม่เปียก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ศันสนีย์ และคณะ (2562) [6] และเมื่อเปรียบเทียบผลการใช้พลาสติกไซเซอร์ผสมกันระหว่างเจลาติน (GE) กับกลีเซอรอล (GEL) พบว่า แผ่นฟิล์มที่ใช้พลาสติกไซเซอร์ผสมในสัดส่วนร้อยละ 15:45 ละลายน้ำได้น้อยที่สุดเนื่องจากกลีเซอรอล (GE) ละลายน้ำได้น้อยกว่าเจลาติน (GL) ดังนั้นเมื่อใช้เจลาตินในสัดส่วนที่มากกว่ากลีเซอรอลจะส่งผลให้ค่าความสามารถละลายน้ำรวมเพิ่มขึ้น ดังงานวิจัยที่นำเจลาตินไปผลิตเป็นแคปซูลยาในทางการแพทย์ [7]

3.4 ผลการศึกษาความสามารถในการพองตัวของแผ่นฟิล์ม (Swelling Property)

ความสามารถในการพองตัวของแผ่นฟิล์มบ่งบอกถึงความสามารถในการเก็บรักษาคุณภาพของอาหารในระหว่างการบรรจุเพื่อนำส่งถึงมือลูกค้า จึงนำแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้ไปทดสอบความสามารถในการพองตัวในน้ำ และจากการผลทดสอบดังรูปที่ 5 พบว่า แผ่นฟิล์มที่เตรียมได้จากการใช้สตาร์ชข้าวทั้งสองแหล่งมีแนวโน้มการพองตัวลดลง เมื่อใช้พลาสติกไซเซอร์ผสมที่มีสัดส่วนกลีเซอรอล (GL) ลดลง เนื่องจากกลีเซอรอล (GL) มีความสามารถในการดูดซึมน้ำน้อยกว่าเจลาติน (GE) ดังนั้นเมื่อใช้กลีเซอรอล (GL) ในสัดส่วนที่ลดลง จึงส่งผลให้ค่าความสามารถในการพองตัวของแผ่นฟิล์มลดลงตามไปด้วย ทั้งนี้เนื่องจากสตาร์ชข้าวมีโครงสร้างของหมู่ไฮดรอกซิลที่ไวต่อน้ำอยู่แล้ว ทำให้เมื่อมีการทำปฏิกิริยาร่วมกับพลาสติกไซเซอร์ที่มีความไวต่อน้ำอย่างเจลาตินจะทำให้ไวต่อการพองตัวไปด้วยดังผลจากงานวิจัยของ Terri A. Stortz และ Alejandro G. Marangoni (2011) [8]



รูปที่ 4 แผนภูมิแท่งแสดงค่าความสามารถในการละลายน้ำของแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้จากสสารจากการโม่แห้งตามท้องตลาด (Com) และสสารจากการโม่เปียก (Hm) พร้อมกับการใช้พลาสติกไฮดรอกซีผสมระหว่างเจลาติน (GE) กับกลีเซอรอล (GL) ในสัดส่วนร้อยละ 45:15 30:30 และ 15:45 ตามลำดับ



รูปที่ 5 แผนภูมิแท่งแสดงค่าความสามารถในการป้องกันตัวของแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้จากสสารจากการโม่แห้งตามท้องตลาด (Com) และสสารจากการโม่เปียก (Hm) พร้อมกับการใช้พลาสติกไฮดรอกซีผสมระหว่างเจลาติน (GE) กับกลีเซอรอล (GL) ในสัดส่วนร้อยละ 45:15 30:30 และ 15:45 ตามลำดับ

3.5 ผลการศึกษาความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพโดยการฝังกลบในดิน (Biodegradability Test by Landfill)

ด้วยความสามารถพิเศษของไบโอพลาสติกจึงทำการทดสอบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพโดยการฝังกลบของแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้ เมื่อเวลาผ่านไป 30 วัน (ตารางที่ 1) พบว่า แผ่นฟิล์มที่เตรียมได้จากสสารจากการโม่แห้งตามท้องตลาด (Com) มีความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพดีกว่าแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้จากสสารจากการโม่เปียก (Hm) เนื่องจากสสารข้าวที่ได้จากการโม่เปียกมีปริมาณน้ำภายในมากกว่าสสารข้าวที่ได้จากการโม่แห้ง จึงดูดซับความชื้นจากดินได้น้อยกว่า ทำให้เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพได้น้อยกว่าไปด้วย และเมื่อเปรียบเทียบกับจากการใช้พลาสติกไฮดรอกซีผสมระหว่างเจลาติน (GE) และกลีเซอรอล (GL) พบว่า เมื่อใช้เจลาติน (GE) ในสัดส่วนลดลง ทำให้ความสามารถในการย่อยสลายเพิ่มสูงขึ้นถึงร้อยละ 70-80 ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากสสารข้าวเป็นโมเลกุลชีวภาพจึงย่อยสลายได้ง่าย รวมทั้งพลาสติกไฮดรอกซีที่นำมาใช้เป็นโมเลกุลที่ชอบน้ำจึงสามารถดูดความชื้นได้ง่ายอีกด้วย และประกอบกับจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในดินจึงช่วยให้แผ่นฟิล์มย่อยสลายได้ดียิ่งขึ้นนั่นเอง [9]

3.6 ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile Strength; TS) และการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at Break; %E) ของแผ่นฟิล์ม

โดยทั่วไปค่าความต้านทานแรงดึงของแผ่นฟิล์มมีผลต่อความเค้นตึงจาก (Normal Stress) ของแผ่นฟิล์มในระหว่างการนำไปใช้งาน การขนส่ง และการจัดเก็บอาหาร และค่าการยืดตัว ณ จุดขาด ของฟิล์มเกี่ยวข้องกับความยืดหยุ่นของฟิล์มสำหรับบรรจุอาหาร จึงมีการนำแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D822-97 และได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 4.2 พบว่า แผ่นฟิล์มที่เตรียมได้จากสสารจากการโม่เปียก (Hm) มีความต้านทานต่อแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาด สูงกว่าแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้จากสสารจากการโม่แห้งตามท้องตลาด (Com) และเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้จากการใช้พลาสติกไฮดรอกซีผสม

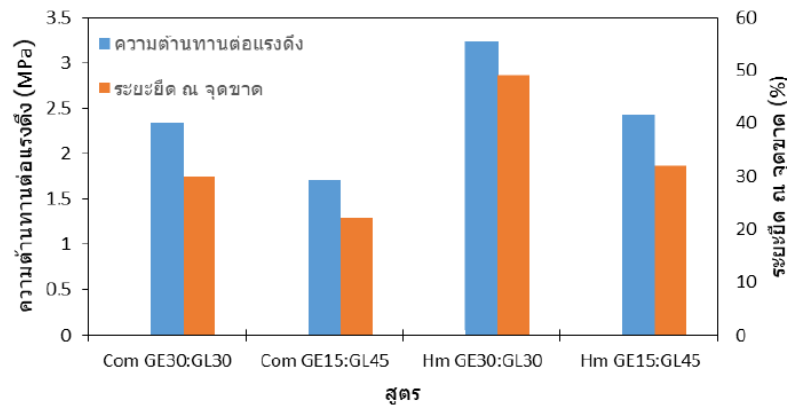
ระหว่างเจลลาติน (GE) และกลีเซอรอล (GL) ในสัดส่วนร้อยละ 30:30 และ 15:45 พบว่า แผ่นฟิล์มที่เตรียมได้จากการใช้พลาสติกไซเซอร์ผสมระหว่างเจลลาติน (GE) และกลีเซอรอล (GL) ในสัดส่วนร้อยละ 30:30 ให้ค่าความต้านทานแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาดสูงกว่าที่ใช้สัดส่วนร้อยละ 15:45 เนื่องจากโมเลกุลของกลีเซอรอลที่เข้าไปแทรกสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ช่วยลดแรงดึงระหว่างโมเลกุล เกิดการเพิ่มปริมาตรอิสระ และทำให้การเคลื่อนตัวของสายโซ่ของพอลิเมอร์เกิดขึ้นได้น้อยลง จึงส่งผลให้ความแข็งแรงของแผ่นฟิล์มลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ วรรณา ชันรัชย์ (2555) [10] และ ภาวินี เทียมดี และกวีนา สุขสำราญ (2063) [11]

4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาทั้งหมดพบว่า สตาร์ชที่เตรียมได้จากการไม่แห้งและไม่เปียกสามารถนำมาเตรียมเป็นแผ่นฟิล์มเทอร์โมพลาสติกได้ และการเติมพลาสติกไซเซอร์สามารถช่วยให้เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มได้ง่ายขึ้น โดยแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้จากสตาร์ชจากการไม่แห้งตามท้องตลาด (Com) และใช้พลาสติกไซเซอร์ผสมกันระหว่างกลีเซอรอล (GL) และเจลลาติน (GE) ในสัดส่วนร้อยละ 30:30 ให้สมบัติทั้งทางกายภาพและเชิงกลดีที่สุด และหากได้รับการพัฒนาเพิ่มเติมในส่วนของความแข็งแรงดึงและความยืดหยุ่น แผ่นฟิล์มเทอร์โมพลาสติกที่ได้จากสตาร์ชข้าวสังข์หยดจะมีโอกาสพัฒนาไปใช้เป็นวัสดุสำหรับบรรจุอาหารได้ในอนาคต

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบความสามารถในการย่อยสลายของแผ่นฟิล์มแป้งข้าวสังข์หยด

ตัวอย่าง	ลักษณะทางกายภาพ		ร้อยละ ของ การย่อยสลายได้
	ก่อนการย่อยสลาย	หลังการย่อยสลาย	
Com GE45:GL15			56.91
Com GE30:GL30			66.88
Com GE15:GL45			81.73
Hm GE45:GL15			68.04
Hm GE30:GL30			71.14
Hm GE15:GL45			74.65



รูปที่ 6 แผนภูมิแท่งแสดงค่าความต้านทานต่อแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดของแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้จากสตาร์ชจากการไม่แห้งตามห้องตลาด (Com) และสตาร์ชจากการไม่เปียก (Hm) พร้อมกับการใช้พลาสติกไซเซอรส์ผสมระหว่างเจลาติน (GE) กับกลีเซอรอล (GL) ในสัดส่วนร้อยละ 45:15 30:30 และ 15:45 ตามลำดับ



รูปที่ 7 ผลการทดลองใช้งานเบื้องต้นของแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้จากสตาร์ชจากการไม่แห้งตามห้องตลาด (Com) และพลาสติกไซเซอรส์ผสมระหว่างกลีเซอรอล (GL) และเจลาติน (GE) ในสัดส่วนร้อยละ 30:30

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนโครงการวิจัยจาก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] มณฑกาญจน์ บุญเพิ่มผล, วิไลลักษณ์ สุขปรการ, สุนันท์ ท้วมมา และอุมพร ชนะสิทธิ์. 2561. ผลของพันธุ์ข้าวและองค์ประกอบต่อวัสดุผสมฐานเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช. วารสารวิชาการข้าว. 9(2). 85-99.
- [2] นันทยา เก่งเขตรกิจ และเรจินรณณ์ ไม้พวง. 2562. สมบัติทางกายภาพและเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวที่เตรียมโดยการไม่แห้ง. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร. 50(1). 442-448.
- [3] ภาวิณี เทียมดี และบวรรัตน์ บั้งสูลง. 2562. การประยุกต์ใช้แป้งมันสำปะหลัง 2 สายพันธุ์ เพื่อผลิตถุงเพาะชำพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ. วารสารวิจัยราชภัฏพระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 14(2). 62-75.
- [4] กมลทิพย์ คำมูล, ดวงฤทัย ขาดศิริ, ศศิธร แก้วมาลา, อาภาภรณ์ จอมหล้าพิรติกุล, ประสิทธิ์ โสภา และประยูร จอมหล้าพิรติกุล. 2565. ฟิล์มย่อยสลายได้จากเปลือกทุเรียน. ใน: การประชุมวิชาการระดับชาติ ด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม ครั้งที่ 4 ประจำปี 2565 “วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สร้างสรรค์นวัตกรรมเพื่อชุมชน” 8 เมษายน 2565. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย, เลย. หน้า 203-211.

-
- [5] รัตน์ฐาภัทร บุญเกิด, จนิตรา ปลอดทองจันทร์, สุภัสสร นวลหอม และพิมภนิจภา กันหาตง. 2565. การเตรียมฟิล์มจากเจลาตินและแป้งมันมือเสือเพื่อประยุกต์ใช้เป็นเปลือกแคปซูลชนิดแข็ง. วารสาร Science, Technology, and Social Sciences Procedia. 4. 1-8.
- [6] ศันสนีย์ อุดมระติ และพัชรี้ ตั้งตระกูล. 2562. ผลของวิธีการไม่ต่อสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของแป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 และการนำไปประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์ปลอดกลูเตน. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 27(2). 311-325.
- [7] ศูนย์วิทยาศาสตร์ฮาลาล. 2563. การใช้ประโยชน์จากเจลาตินในเภสัชภัณฑ์และผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์. เข้าถึงได้จาก : เว็บไซต์ <https://www.halalscience-pn.org> (เข้าถึงเมื่อ 5 มีนาคม 2565).
- [8] Terri A., S. and Alejandro G., M. 2011. Heat resistant chocolate. Trends Food Sci. Technol. 22(5): 201-214.
- [9] Mehran, B., Mehdi, J., Yahya, H. and Alireza, A. 2015. Biodegradability and mechanical properties of reinforced starch nanocomposites using cellulose nanofibers. Carbohydr. Polym. 132: 1-8.
- [10] วรณา ชันธชัย. 2555. การพัฒนาฟิล์มและสารเคลือบรับประทานได้จากแป้งข้าวเจ้ามาประยุกต์ใช้ในทอพีผลไม้. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะเทคโนโลยีการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ, กรุงเทพมหานคร.
- [11] ภาวิณี เทียมดี และกวิณา สุขสำราญ. 2563. การพัฒนาฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งมันแกวเพื่อประยุกต์ใช้เป็นถ่วงเพาะชำ. วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร. 14(1). 1-14.

การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ด้วยกระบวนการชีวสังเคราะห์โดยใช้สารสกัดจากใบชะมวง
และฤทธิ์ต้านเชื้อรา *Phytophthora palmivora*
Biosynthesis of silver nanoparticles using *Garcinia cowa* leaf extract
and their antifungal activity against *Phytophthora palmivora*

อรสา ชูละเอียด¹ พรประพา คงตระกูล² และ อุษา สุขชา^{3,*}
Orasa Choolaaied¹, Pornprapa Kongtragoul² and Usa Sukkha^{3,*}

¹งานบริการห้องปฏิบัติการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ชุมพร
²ภาควิชาเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ชุมพร
³ภาควิชาพื้นฐานทั่วไป สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ชุมพร

¹Laboratory service, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Prince of Chumphon Campus, Chumphon
²Department of Agricultural Technology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Prince of Chumphon Campus, Chumphon
³Department of General Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Prince of Chumphon Campus, Chumphon
*Corresponding author: Usa Sukkha, e-mail address: usa.suk@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ด้วยกระบวนการชีวสังเคราะห์โดยใช้สารสกัดจากใบชะมวง ทำการศึกษาการเกิดของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ โครงสร้างผลึก สัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ ด้วยเทคนิคการดูดกลืนแสงช่วงยูวี-วิสิเบิล (UV-Vis spectroscopy; UV-Vis) เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction; XRD) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิล์มอีมิสชัน (Field emission scanning electron microscopy; FE-SEM) ผลจากการวิเคราะห์ทดสอบด้วยเทคนิคการดูดกลืนแสงช่วงยูวี-วิสิเบิล และเทคนิค XRD พบว่าสามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ได้ทุกอุณหภูมิ (อุณหภูมิห้อง 50°C และ 70°C) และพบว่าอุณหภูมิมีผลต่อการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นส่งผลให้ขนาดอนุภาคนาโนซิลเวอร์มีขนาดใหญ่ขึ้นและเกิดการเกาะรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน จากภาพถ่าย FE-SEM พบว่าอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นที่อุณหภูมิห้องมีลักษณะอนุภาคค่อนข้างกลม มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร 22.39±5.17 nm นอกจากนี้ยังทำการศึกษาลักษณะการต้านเชื้อรา *Phytophthora palmivora* ของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งพบว่าอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่ความเข้มข้น 500 mg/L มีเปอร์เซ็นต์การยับยั้งที่ดีที่สุดคือ 93.19% รองลงมาคือที่ความเข้มข้น 100 และ 10 mg/L มีเปอร์เซ็นต์การยับยั้งที่ 36.41 และ 10.70% ตามลำดับ

คำสำคัญ: อนุภาคนาโนซิลเวอร์, ชีวสังเคราะห์, ใบชะมวง, เชื้อรา *P. palmivora*

Abstract

This work aims to synthesize silver nanoparticles under different temperatures by biosynthesis using *Garcinia cowa* leaf extract. The formation, crystal structure and morphology of obtained silver nanoparticles were studied using UV-Vis spectroscopy, X-ray diffraction (XRD) and Field emission scanning electron microscopy (FE-SEM) techniques. The UV-Vis and XRD results indicated that the silver nanoparticles were synthesized at all temperature (room temperature, 50°C and 70°C). The synthesis of silver nanoparticles was affected by temperature. The particle size and aggregation of silver nanoparticles increased when the temperature increased. FE-SEM image showed that silver nanoparticles synthesized at room temperature were in spherical shape and a nano-sized range; 22.39±5.17 nm. Moreover, the antifungal activity of the silver nanoparticles synthesized at room temperature was assessed on *Phytophthora palmivora*. It was found that the 500 mg/L of silver nanoparticles showed the highest mycelial growth inhibition at 93.19%. Meanwhile, the 100 and 10 mg/L of silver nanoparticles exhibited the mycelial growth inhibition at 36.41 and 10.70%, respectively.

Keywords: Silver nanoparticle, Biosynthesis, *Garcinia cowa*, *P. palmivora*

1. บทนำ

ปัจจุบันนาโนเทคโนโลยีเป็นคำที่คุ้นเคยและเป็นสิ่งที่เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของมนุษย์เราเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการนำเอาอนุภาคนาโน (ขนาด 1-100 นาโนเมตร) มาประยุกต์ใช้กับหลากหลายผลิตภัณฑ์ที่มีวางขายตามท้องตลาด เช่น ผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางที่มีการเติมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) ลงในเครื่องสำอางเพื่อป้องกันแสงแดดและรังสียูวี [1] หรือจะเป็นผลิตภัณฑ์เครื่องนุ่งห่มที่มีการผสมอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ ลงไปในเส้นใยผ้า ส่งผลให้ผ้าสามารถทำความสะอาดตัวเองได้ ยับยั้งเชื้อแบคทีเรียและป้องกันรังสียูวีได้ [2] หรือแม้แต่ในงานวิจัยเองก็มีการศึกษาการใช้อนุภาคนาโนซิลเวอร์ในทางการแพทย์เช่นเดียวกัน เนื่องจากอนุภาคนาโนซิลเวอร์มีสมบัติในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียที่ดีจึงมีการศึกษาการใช้อนุภาคนาโนซิลเวอร์มาช่วยในการป้องกันฟันผุ [3] หรือมีการนำมาใช้ในอุปกรณ์ฆ่าตัด [4-6] ตลอดจนงานวิจัยทางด้านการเกษตรก็เริ่มมีการนำอนุภาคนาโนต่างๆ มาใช้เพื่อช่วยป้องกันการเกิดโรคพืช ตัวอย่างเช่น การใช้อนุภาคนาโนซิลเวอร์ในการยับยั้งเชื้อราทำลายไม้ เชื้อราก่อโรคกิ่งแห้งในต้นทุเรียน อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคต่าง ๆ ในพืชตระกูลถั่ว อนุภาคนาโนคอปเปอร์ยังยับยั้งเชื้อราก่อโรคใบร่วงในพืช [7-10] โดยเฉพาะอย่างยิ่งอนุภาคนาโนซิลเวอร์ได้รับความสนใจจากกลุ่มนักวิจัยเป็นอย่างมาก เนื่องจากอนุภาคนาโนซิลเวอร์มีสมบัติการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคในคนและโรคพืชที่ดี [7, 11] ดังนั้นการประยุกต์ใช้อนุภาคนาโนทางด้านการเกษตรเพื่อช่วยยับยั้งการเกิดโรคพืชจึงเป็นสิ่งที่ เป็นประโยชน์ต่อประเทศไทยเป็นอย่างมากเนื่องจากประชากรส่วนใหญ่ประกอบอาชีพเกษตรกรรม สินค้าส่งออกหลักของประเทศล้วนแล้วแต่เป็นสินค้าทางการเกษตรทั้งสิ้น แต่อย่างไรก็ตามราคาของผลิตภัณฑ์ที่มีนาโนเทคโนโลยีเข้ามาเกี่ยวข้องจะมีราคาที่สูง ทำให้กลุ่มผู้บริโภคที่มีกำลังจ่ายซื้อผลิตภัณฑ์เหล่านั้นที่สามารถเข้าถึงนาโนเทคโนโลยีได้ ดังนั้นหากปัญหาการเข้าถึงนาโนเทคโนโลยีที่เกิดจากต้นทุนการผลิตที่สูงหมดไป หรือเกษตรกรสามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนได้เอง ก็จะทำให้เกษตรกรสามารถเพิ่มผลผลิตทางการเกษตรด้วยการกำจัดโรคพืชโดยใช้นาโนเทคโนโลยีได้ สามารถลดปริมาณการใช้สารเคมีในการกำจัดโรคพืชอันจะก่อให้เกิดผลเสียต่อสุขภาพของเกษตรกรและสิ่งแวดล้อมอีกด้วย กลุ่มนักวิจัยจึงสนใจทำการศึกษาศาสตร์สังเคราะห์อนุภาคนาโนด้วยกระบวนการชีวสังเคราะห์ ซึ่งกระบวนการชีวสังเคราะห์เป็นกระบวนการที่ใช้สารพฤกษเคมี (Phytochemical) จากพืชมาเป็นตัวรีดิวซ์ไอออนของโลหะให้เปลี่ยนไปเป็นอนุภาคนาโน ซึ่งการสังเคราะห์อนุภาคนาโนด้วยเทคนิคนี้ มีขั้นตอนการสังเคราะห์ที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ราคาถูก [12-16] และมีความเป็นไปได้ที่เกษตรกรจะสามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์เพื่อกำจัดโรคพืชใช้ได้เอง

ในงานวิจัยนี้นักวิจัยจะทำการศึกษาศาสตร์เตรียมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ด้วยกระบวนการชีวสังเคราะห์โดยสารสกัดจากใบชะมวง ซึ่งจากการทบทวนวรรณกรรม ยังไม่พบนักวิจัยกลุ่มอื่นใช้สารสกัดจากใบชะมวงในการเตรียมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ด้วยกระบวนการชีวสังเคราะห์ และใบชะมวงเป็นพืชที่มีอยู่ในท้องถิ่นภาคใต้ของประเทศ หากมีการนำมาใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ได้ก็จะเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับพืชในท้องถิ่นได้ ในงานวิจัยจะศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ โดยทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่อุณหภูมิต่างกันคือ ที่อุณหภูมิห้อง 50°C และ 70°C เพื่อหาอุณหภูมิที่ดีที่สุดในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ และอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่สังเคราะห์ได้ในสภาวะที่ดีที่สุดจะถูกนำมาศึกษาสมบัติการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อรา *P. palmivora* ซึ่งเป็นเชื้อราสาเหตุโรคผลเน่า รากเน่า และโคนเน่าในทุเรียนอันเป็นพืชเศรษฐกิจของจังหวัดชุมพรอีกด้วย

2. วิธีการศึกษา

2.1 การเตรียมสารสกัดจากใบชะมวง

ขั้นตอนการเตรียมสารสกัดจากใบชะมวงดัดแปลงกระบวนการมาจากงานวิจัยก่อนหน้า [8] โดยใบชะมวงจากพื้นที่จังหวัดชุมพร ถูกเก็บและนำมาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำเพื่อกำจัดฝุ่นและสิ่งสกปรก จากนั้นนำไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำใบชะมวงอบแห้งที่ได้ไปทำการปั่นด้วยเครื่องปั่นเพื่อเป็นการลดขนาด จากนั้นนำผงละเอียดใบชะมวงไปสกัดโดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย โดยอัตราส่วนผงละเอียดใบชะมวง 50 g ต่อน้ำกลั่น 500 mL ที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำการแยกกากตะกอนออกจากสารสกัดด้วยการกรองโดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 1 เก็บสารสกัดที่ได้ไว้ในตู้เย็น 4°C เพื่อใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ในขั้นตอนต่อไป

2.2 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์

ขั้นตอนการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ด้วยกระบวนการชีวสังเคราะห์ที่ใช้สารสกัดจากใบชะมวงเริ่มต้นด้วยการผสมสารสกัดจากใบชะมวงปริมาตร 15 mL ลงในสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต (AgNO_3) เข้มข้น 0.1 M ปริมาตร 30 mL พร้อมปั่นกวนสารละลายผสมตลอดเวลา จากนั้นทำการปรับค่า pH ของสารละลายผสมให้เป็นกลางโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 1 M และสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้น 1 M ทำการปั่นกวนสารละลายผสมต่อเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และเพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ ขั้นตอนการปั่นกวนสารละลายผสมเป็นเวลา 2 ชั่วโมงนั้นจะทำที่อุณหภูมิห้อง (มีค่าโดยประมาณ 30°C) 50°C และ 70°C

2.3 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์อนุภาคนาโนซิลเวอร์

การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์เบื้องต้นเพื่อยืนยันว่าซิลเวอร์ไอออน (Ag^+) ถูกรีดิวซ์ไปเป็นอนุภาคนาโนซิลเวอร์ (Ag^0) อยู่ในรูปของสารแขวนลอย ทำโดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วง 300-700 nm ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล (UV-Vis spectrophotometer, ยี่ห้อ Thermo scientific รุ่น Evolution 201) เตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ทดสอบโดยการเจือจางสารแขวนลอย 100 เท่าด้วยน้ำกลั่น สำหรับการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของอนุภาคของแข็งที่ได้ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction; XRD ยี่ห้อ Bruker รุ่น D2 Phaser) และตรวจสอบสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมมิงชัน (Field emission scanning electron microscope; FE-SEM ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-7800F) เตรียมตัวอย่างโดยนำสารแขวนลอยที่ได้มาปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 10,000 รอบ/นาที เป็นเวลา 20 นาที เพื่อเก็บตะกอน จากนั้นล้างตะกอนที่ได้ด้วยน้ำกลั่น 3 รอบ แล้วนำตะกอนที่ได้ไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำตะกอนอบแห้งที่ได้มาบดด้วยโม่รบกวนเพื่อให้ละเอียดก่อนนำไปวิเคราะห์ทดสอบ

2.4 ทดสอบฤทธิ์ด้านการเจริญเติบโตของเชื้อรา *Phytophthora palmivora*

ในขั้นตอนนี้จะใช้ผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นจากก่อนหน้านี้ เพื่อคัดเลือกอุณหภูมิมาใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนเพื่อศึกษาฤทธิ์ต้านเชื้อรา *P. palmivora* ซึ่งงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้อนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นที่อุณหภูมิห้องในการศึกษาฤทธิ์ต้านเชื้อรา *P. palmivora* โดยเริ่มจากการเลี้ยงเชื้อรา *P. palmivora* บนอาหารเลี้ยงเชื้อ V8 agar ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน จากนั้นเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ V8 agar สำหรับชุด Control และสำหรับชุดที่ผสมกับสารแขวนลอยของอนุภาคนาโนซิลเวอร์โดยให้ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิลเวอร์มีความเข้มข้น 10 mg/L 100 mg/L และ 500 mg/L จากนั้นใช้ Cork borer ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ตัดบริเวณขอบโคโลนีของเชื้อรา *P. palmivora* แล้วนำไปเลี้ยงบนอาหารชุดควบคุมและชุดที่ผสมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ไว้ที่ความเข้มข้นต่างๆ จากนั้นนำไปบ่มไว้ที่อุณหภูมิห้อง ทำการทดลองความเข้มข้นละ 4 ซ้ำ บันทึกผลการทดลองโดยการถ่ายภาพและวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโคโลนีเชื้อรา แล้วนำไปคำนวณหาร้อยละการยับยั้งการเจริญเติบโตของเส้นใยเปรียบเทียบกับชุดควบคุม โดยใช้สูตร

$$\text{Mycelial inhibition (\%)} = [(C - T)/C] \times 100$$

เมื่อ C คือเส้นผ่าศูนย์กลางโคโลนีของเชื้อราบนอาหารเลี้ยงเชื้อชุดควบคุม

T คือเส้นผ่าศูนย์กลางโคโลนีของเชื้อราบนอาหารเลี้ยงเชื้อชุดทดลอง

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 ผลการศึกษาการเตรียมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ด้วยกระบวนการชีวสังเคราะห์

จากการสังเกตกระบวนการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์โดยใช้สารละลาย AgNO_3 เข้มข้น 0.1 M และสารสกัดจากใบชะมวง หลังจากปรับค่า pH จนเป็นกลางและปั่นจนครบเวลา 2 ชั่วโมงที่อุณหภูมิต่างๆ (อุณหภูมิห้อง 50°C และ 70°C) พบว่าการสังเคราะห์ในทุกอุณหภูมิสารละลายผสมจะมีตะกอนเกิดขึ้นอยู่ในรูปของสารแขวนลอย และสีของสารละลายผสมจะมีการเปลี่ยนแปลงจากสีเหลืองไปเป็นสีน้ำตาลเข้มและเปลี่ยนไปจนถึงสีดำเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น จากการเปลี่ยนแปลงที่พบนี้มีความเป็นไปได้ว่าซิลเวอร์ไอออน (Ag^+) ถูกรีดิวซ์เปลี่ยนไปเป็นอนุภาคนาโนซิลเวอร์ (Ag^0) แขนวลอยอยู่ในสารละลายผสม [8]

ในงานวิจัยนี้ใช้เทคนิคการดูดกลืนแสงช่วงยูวี-วิสิเบิล สำหรับการทดสอบเบื้องต้นเพื่อยืนยันว่าสารแขวนลอยที่เกิดขึ้นคืออนุภาคนาโนซิลเวอร์ โดยสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์จะปรากฏพีกในช่วงความยาวคลื่น 390 – 500 nm [17-19] ซึ่งพีกดังกล่าวเกิดจากปรากฏการณ์คลื่นผิวพลาสมอนเรโซแนนซ์ (Surface plasmon resonance; SPR) สเปกตรัมการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 300-700 nm ของสารละลาย AgNO_3 สารสกัดจากใบชะมวง (Extract) และสารแขวนลอยของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นที่อุณหภูมิต่าง ๆ แสดงไว้ใน Figure 1 พิจารณาสเปกตรัมการดูดกลืนแสงช่วงยูวี-วิสิเบิลของสารละลาย AgNO_3 และสารสกัดจากใบชะมวง พบว่าไม่ปรากฏพีกในสเปกตรัมการดูดกลืนแสงช่วงวิสิเบิล (400-700 nm) ทั้งในสารละลาย AgNO_3 และสารสกัดจากใบชะมวง ส่วนสเปกตรัมการดูดกลืนแสงช่วงยูวี (300-400 nm) ปรากฏพีกขึ้นเฉพาะในสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารสกัดจากใบชะมวง สำหรับผลการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่เตรียมได้ที่อุณหภูมิห้อง (Room temp, $\sim -30^\circ\text{C}$) แสดงพีกการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นเท่ากับ 410.8 nm ซึ่งสอดคล้องกับพีก SPR ของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการชีวสังเคราะห์ในงานวิจัยที่ผ่านมา [8, 17-19] จึงเป็นการพิสูจน์ในเบื้องต้นว่าสามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ได้ที่อุณหภูมิห้องด้วยกระบวนการชีวสังเคราะห์โดยใช้สารสกัดจากใบชะมวง เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์เพิ่มสูงขึ้นเป็น 50°C พบว่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสงยูวี-วิสิเบิลของสารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ปรากฏพีก SPR ของอนุภาคนาโนซิลเวอร์เช่นเดียวกัน ที่ตำแหน่งความยาวคลื่นเท่ากับ 431.8 nm เมื่อเปรียบเทียบตำแหน่งพีก SPR ของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิห้องกับอุณหภูมิ 50°C พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นตำแหน่งของพีก SPR จะมีค่าความยาวคลื่นเพิ่มมากขึ้น (Red shift) ซึ่งการเลื่อนตำแหน่งพีกไปที่ความยาวคลื่นมากขึ้น บ่งบอกถึงขนาดของอนุภาคนาโนซิลเวอร์จะมีขนาดใหญ่ขึ้น [8] อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิการสังเคราะห์เพิ่มขึ้นจนถึง 70°C กลับพบว่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสงยูวี-วิสิเบิลของสารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ไม่แสดงพีก SPR ของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ แต่กลับปรากฏพีกในตำแหน่งความยาวคลื่น 640 nm ซึ่งมีรายงานการวิจัยว่าการเกาะรวมตัวกันเป็นกลุ่ม (Aggregation) ของอนุภาคนาโนซิลเวอร์จะส่งผลให้ปรากฏพีกในช่วงความยาวคลื่นที่สูงขึ้น $\sim 500\text{-}700\text{ nm}$ [20-22] ดังนั้นการปรากฏพีกที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 640 nm ในสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์น่าจะเกิดจากการเกาะรวมตัวกันเป็นกลุ่มของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ นอกจากการปรากฏพีก SPR และพีกที่เกิดจากการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคแล้ว สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารแขวนลอยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นที่อุณหภูมิ 50°C และ 70°C ยังปรากฏพีกในช่วงยูวีอีกด้วย ซึ่งน่าจะเป็นพีกที่เกิดจากสารสกัดจากใบชะมวง [8]

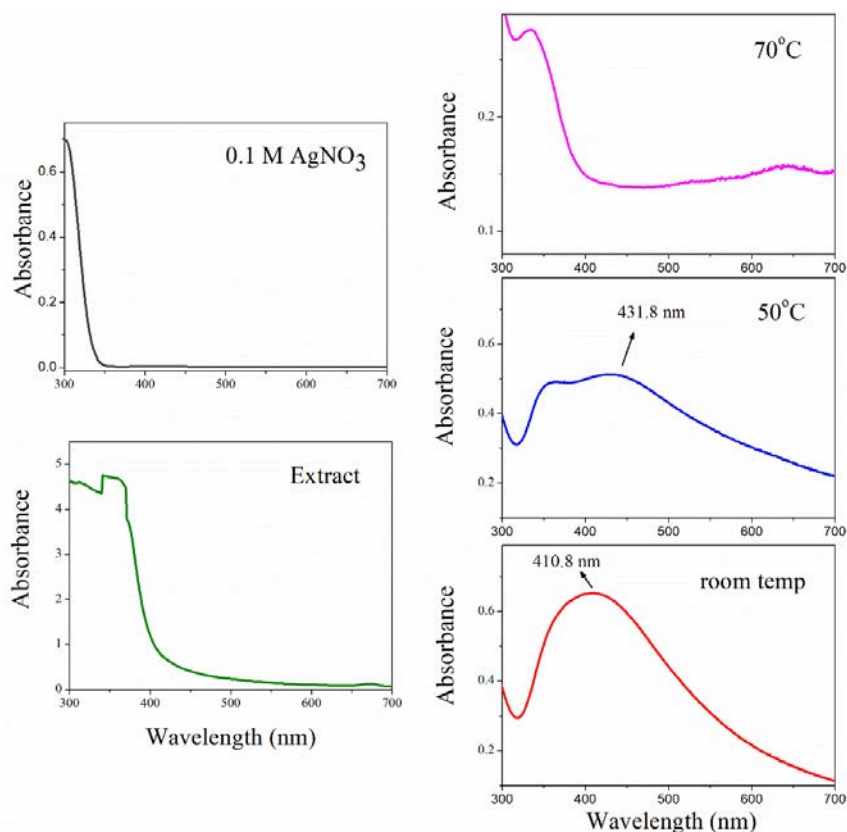


Figure 1 UV-visible spectra of 0.1 M AgNO₃ solution, extract and silver nanoparticles suspensions synthesized at room temperature, 50°C and 70°C.

การวิเคราะห์ทดสอบผงอนุภาคของแข็งในสารแขวนลอยที่สังเคราะห์ได้ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เป็นการทดสอบเพื่อยืนยันว่าอนุภาคของแข็งที่เกิดขึ้นคือโลหะเงิน โดยรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผงอนุภาคของแข็งที่สังเคราะห์ขึ้นที่อุณหภูมิต่าง ๆ แสดงไว้ใน Figure 2 พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของอนุภาคของแข็งที่ได้จากการสังเคราะห์ในทุกอุณหภูมิแสดงพีคที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 38.4° 43.7° 64.8° และ 77.7° ซึ่งสอดคล้องกับไฟล์มาตรฐาน JCPDS หมายเลข 04-0783 โดยไฟล์มาตรฐานดังกล่าวเป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผลึกโลหะเงินที่มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ Face centered cubic (fcc) และพีคที่ปรากฏเกิดจากการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในระนาบ (111) (200) (220) และ (311) ตามลำดับ [8] ดังนั้นจึงยืนยันได้ว่า การสังเคราะห์อนุภาคของโลหะเงินด้วยกระบวนการชีวสังเคราะห์โดยใช้สารสกัดจากใบชะมวงสามารถสังเคราะห์ได้ทุกอุณหภูมิที่ทำการศึกษา โดยซิลเวอร์ไอออน (Ag⁺) เกิดปฏิกิริยารีดักชันแล้วเปลี่ยนไปเป็นอนุภาคโลหะเงิน (Ag⁰) นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าพีคของอนุภาคโลหะเงินที่ได้จากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่ำมีลักษณะพีคกว้างกว่าพีคของอนุภาคโลหะเงินที่ได้จากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 50°C และ 70°C ซึ่งผงผลึกที่มีขนาดเล็กอยู่ในระดับนาโนเมตรจะมีลักษณะพีคที่กว้าง ในขณะที่ผลึกขนาดใหญ่จะมีลักษณะพีคที่แคบ [23] ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ว่าอนุภาคของโลหะเงินที่สังเคราะห์ขึ้นที่อุณหภูมิต่ำจะมีขนาดเล็กกว่าที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 50°C และ 70°C และผลที่พบจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้ยังสอดคล้องข้อมูลที่ได้จากการทดสอบการดูดกลืนแสงช่วงยูวี-วิสิเบิล ที่พบว่าตำแหน่งของพีค SPR ของอนุภาคโลหะเงินที่ได้จากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่ำมีความยาวคลื่นน้อยที่สุดคือ 410.8 nm ซึ่งบ่งบอกถึงขนาดที่เล็กที่สุด เมื่อเทียบกับขนาดอนุภาคที่ได้จากการเตรียมที่อุณหภูมิ 50°C และ 70°C

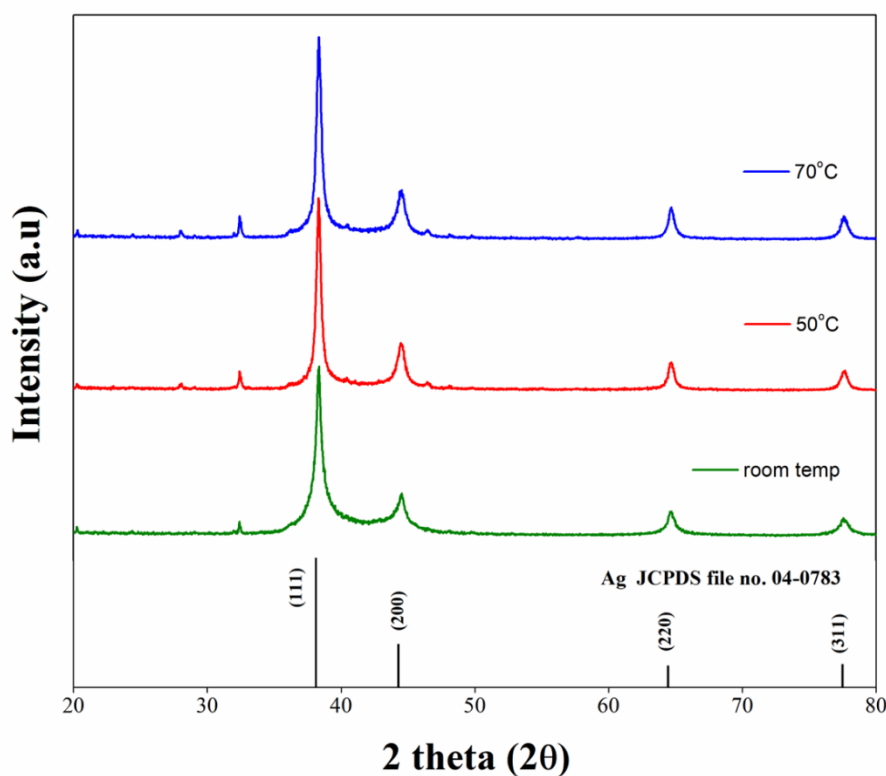


Figure 2 The XRD patterns of silver nanoparticles obtained from biosynthesis at various reaction temperatures.

จากข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ทดสอบด้วยเทคนิคการดูดกลืนแสงช่วงยูวี-วิสิเบิล และเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ยืนยันได้ว่าการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ด้วยกระบวนการชีวสังเคราะห์ที่ใช้สารสกัดจากใบชะมวง ที่อุณหภูมิห้อง ในสภาวะเป็นกลาง และเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง เป็นสภาวะการสังเคราะห์ที่เหมาะสมที่สุดในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ให้มีขนาดอนุภาคเล็กที่สุดโดยไม่เกิดการเกาะรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ดังนั้นในการศึกษาพื้นฐานวิทยาและการทดสอบฤทธิ์ต้านการเจริญเติบโตเชื้อรา *P. palmivora* ของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่สังเคราะห์ได้ จะเลือกศึกษาเฉพาะอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิห้องเท่านั้น การศึกษาขนาดและรูปร่างของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่สังเคราะห์ขึ้น ทำได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชันที่กำลังขยาย 80,000 เท่า แสดงภาพถ่ายที่ได้ดัง Figure 3 พบว่าอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่สังเคราะห์ได้ส่วนใหญ่มีลักษณะค่อนข้างกลม ขนาดของอนุภาคใกล้เคียงกันอยู่ในระดับนาโนเมตร โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 22.39 ± 5.17 nm

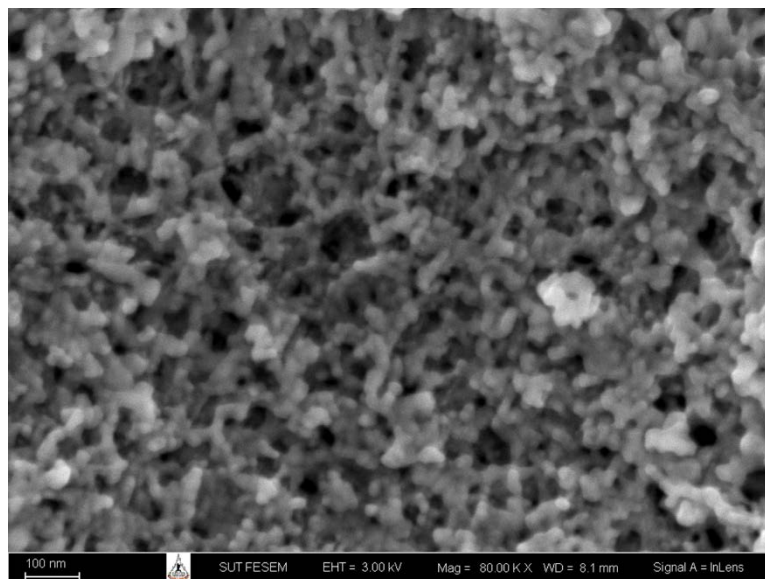


Figure 3 FE-SEM image of silver nanoparticles synthesized at room temperature.

3.2 ผลการทดสอบฤทธิ์ด้านการเจริญเติบโตของเชื้อรา *Phytophthora palmivora*

จากการทดสอบประสิทธิภาพของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิห้องด้วยกระบวนการชีวสังเคราะห์โดยใช้สารสกัดจากใบชะมวง ในการควบคุมการเจริญเติบโตเส้นใยของเชื้อรา *P. palmivora* บนอาหารเลี้ยงเชื้อ V8 agar โดยศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่ความเข้มข้น 10 mg/L 100 mg/L และ 500 mg/L ผลการยับยั้งการเจริญเติบโตทางเส้นใยของเชื้อราแสดงได้ดัง Figure 4 พบว่าที่ความเข้มข้น 500 mg/L สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตทางเส้นใยของเชื้อรา *P. palmivora* ได้ดีที่สุด โดยมีเปอร์เซ็นต์การยับยั้งที่ 93.19% รองลงมาที่ความเข้มข้น 100 และ 10 mg/L มีเปอร์เซ็นต์การยับยั้งที่ 36.41 และ 10.70% ตามลำดับ ซึ่งผลการวิจัยในครั้งนี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้าของกลุ่มผู้วิจัยที่ได้ศึกษาผลของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ต่อการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อรา *Fusarium* sp. พบว่าอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการชีวสังเคราะห์สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อรา *Fusarium* sp. ได้ และผลการยับยั้งจะขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ด้วย [8]

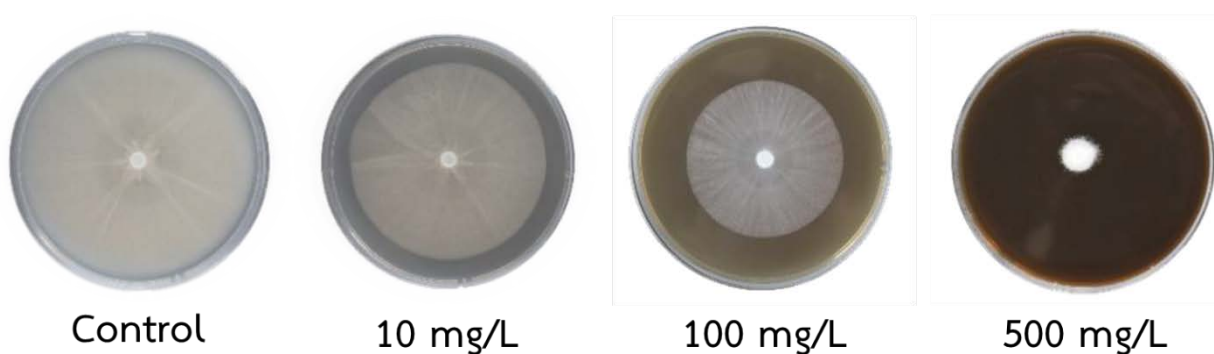


Figure 4 Effect of silver nanoparticles suspension on the mycelium growth of *P. palmivora*.

4. สรุป

จากการศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ด้วยกระบวนการชีวสังเคราะห์โดยใช้สารสกัดจากใบชะมวงในสภาวะเป็นกลางและเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิการสังเคราะห์ต่าง ๆ พบว่าการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่อุณหภูมิห้อง เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลเวอร์ด้วยกระบวนการดังกล่าว โดยอนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่ได้มีลักษณะค่อนข้างกลม อนุภาคมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 22.39 ± 5.17 nm อนุภาคที่ได้ไม่เกิดการเกาะรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน และที่ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนซิลเวอร์ 500 mg/L มีฤทธิ์ต้านการเจริญเติบโตทางเส้นใยของเชื้อรา *P. palmivora* ได้ถึง 93.19%

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังวิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่อุปกรณ์ และเครื่องมือในการทำวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Smijs, T. G. and Pave, S. 2011. Titanium dioxide and zinc oxide nanoparticles in sunscreens: focus on their safety and effectiveness. *Nanotechnol Sci Appl*. 4: 95-112.
- [2] Montazer, M. and Seifollahzadeh, S. 2011. Enhanced self-cleaning, antibacterial and UV protection properties of nano TiO₂ treated textile through enzymatic pretreatment. *Photochemistry and Photobiology*. 87: 877-883.
- [3] Targino, A., Flores, M., Santos, V., Pessoa, H., Galembeck, A. and Rosenblatt, A. 2014. Antimicrobial activity of silver nanoparticles in treating dental caries. *RFO, Passo Fundo*. 18(3): 312-315.
- [4] Riaz, M., Mutreja, V., Sareen, S., Ahmad, B., Faheem, M., Zahid N., Jabbour, G. and Park, J. 2021. Exceptional antibacterial and cytotoxic potency of monodisperse greener AgNPs prepared under optimized pH and temperature. *Scientific Reports*. 11: 2866.
- [5] Venkatesham, M., Ayodhya, D., Madhusudhan, A., Kumari, A.S., Veerabhadram, G. and Mangatayaru, K.G. 2014. Novel Green Synthesis of Silver Nanoparticles Using Gum Karaya: Characterization, Antimicrobial and Catalytic Activity Studies. *Journal of Cluster Science*. 25: 409-422.
- [6] Ziabka, M., Menaszek, E., Tarasiuk, J. and Wronski, S. 2018. Biocompatible Nanocomposite Implant with Silver Nanoparticles for Otology—In Vivo Evaluation. *Nanomaterials*. 8(10): 764, 1-18.
- [7] Narayanan, K.B. and Park, H.H., Eur. 2014. Antifungal activity of silver nanoparticles synthesized using turnip leaf extract (*Brassica rapa* L.) against wood rotting pathogens. *European Journal of Plant Pathology*. 140: 185-192.
- [8] Sukkha, U., Khejonrak, A., Kamonpha, P., Ruangvittayanon, A., Pakdeepromma, S. and Kongtragoul, P. 2023. Biosynthesis of Silver Nanoparticles Using *Garcinia cowa* Aqueous Leaf Extract and Their Antifungal Activity Against Durian Dieback Pathogen. *Chiang Mai J. Sci*. 50(5): 1-14.
- [9] Siddiqui, Z. A., Khan, A., Khan, M. R. and Abd-Allah, E. F. 2018. Effects of Zinc Oxide Nanoparticles (ZnO NPs) and some Plant Pathogens on the Growth and Nodulation of Lentil (*Lens culinaris* Medik.). *Acta Phytopathologica et Entomologica Hungarica*. 53 (2): 195-212.

-
- [10] Banik, S. and Pérez-de-Luque, A. 2017. *In vitro* effects of copper nanoparticles on plant pathogens, beneficial microbes and crop plants. Spanish Journal of Agricultural Research. 15(2): e1005, 1-15.
- [11] Nomiya, K., Yoshizawa, A., Tsukagoshi, K., Kasuga, N.C., Hirakawa, S. and Watanabe, J. 2004. Synthesis and structural characterization of silver(I), aluminium(III) and cobalt(II) complexes with 4 -isopropyltropolone (hinokitiol) showing noteworthy biological activities. Action of silver(I)-oxygen bonding complexes on the antimicrobial activities. Journal of Inorganic Biochemistry. 98(1): 46-60.
- [12] Tanase, C., Berta, L., Coman, N.A., Roşca, I., Man A., Toma, F., et al. 2019. Investigation of In Vitro Antioxidant and Antibacterial Potential of Silver Nanoparticles Obtained by Biosynthesis Using Beech Bark Extract. Antioxidants. 8(10): 459. DOI 10.3390/antiox8100459.
- [13] Chandraker, S.K., Lal, M., Ghosh, M.K., Tiwari, V., Ghorai, T.K. and Shukla, R. 2020. Green synthesis of copper nanoparticles using leaf extract of *Ageratum houstonianum* Mill. and study of their photocatalytic and antibacterial activities. Nano Express. 1: 010033. DOI 10.1088/2632-959X/ab8e99.
- [14] Khanh, T.V., Linh, N.T.T., Trinh, P.H., Phung, H.K., Tung, N.T. and Trung, T.T. 2022. Synthesis of Ecofriendly Silver Nanoparticles Using *Coccinia grandis* (L.) Voigt Extract: Experimental and Theoretical Studies Chiang Mai J.Sci. 49(5): 1324-1331.
- [15] Rasool, A., Kiran, S., Rehman, F.U. and Abra,r S. 2021. Plant-Mediated Biosynthesis of Zinc Oxide Nanoparticles for Remediation of Acid Blue A Dye. Chiang Mai J. Sci. 48(6): 1620-1633.
- [16] Rohaeti, E. and Rakhmawati, A. 2018. Application of Silver Nanoparticles Synthesized by Using *Ipomoea batatas* L. Waste to Improve Antibacterial Properties and Hydrophobicity of Polyester ClothsChiang Mai J. Sci. 45(7): 2715-2729.
- [17] Narayanan, K.B. and Park, H.H. 2014. Antifungal activity of silver nanoparticles synthesized using turnip leaf extract (*Brassica rapa* L.) against wood rotting pathogens. European Journal of Plant Pathology. 140: 185-192.
- [18] Yu, C., Tang, J., Liu, X., Ren, X., Zhen, M. and Wang, L. 2019. Green Biosynthesis of silver nanoparticles using *Eriobotrya japonica* (Thunb.) leaf extract for reductive catalysis. Materials. 12 (1): 189, 1-12.
- [19] Ashraf, J.M., Ansari, M.A., Khan, H.M., Alzohairy, M.A. and Choi, I. 2016, Green synthesis of silver nanoparticles and characterization of their inhibitory effects on AGEs formation using biophysical Techniques. Scientific Reports. 6: 20414, 1-10.
- [20] Venkatesham, M., Ayodhya, D., Madhusudhan, A., Kumari, A.S., Veerabhadram, G. and Mangatayaru, K.G. 2014. A Novel Green Synthesis of Silver Nanoparticles Using Gum Karaya: Characterization, Antimicrobial and Catalytic Activity Studies. Journal of Cluster Science. 25: 409-422.
- [21] Dong, F., Valsami-Jones, E. and Kreft, J. 2016. New, rapid method to measure dissolved silver concentration in silver nanoparticle suspensions by aggregation combined with centrifugation. Journal of Nanoparticle Research. 18: 259, 1-12.
- [22] Petryayeva, E. and Krull, U.J. 2011. Localized surface plasmon resonance: Nanostructures, bioassays and biosensing—A review. Analytica Chimica Acta. 706(1): 8-24.
- [23] Holder, C.F. and Schaak, R.E. 2019. Tutorial on powder X-ray diffraction for characterizing nanoscale materials. ACS Nano. 13(7): 7359-7365.
-

การเปรียบเทียบวิธีการใส่ค่าสูญหาย ในการวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติก เมื่อตัวแปรตามมีการสูญหาย แบบนอนอิกนอร์เรเบิล

A comparison of the imputation methods for nonignorable missing response variable in logistic regression analysis

อภิชาติ ฉัตรเรืองเลิศ^{1,*} และ อนูปา สมบูรณ์สวัสดิ์¹

Apichat Chadruanglerd^{1,*} and Anupap Somboonsavatdee¹

¹ภาควิชาสถิติ คณะพาณิชยศาสตร์และการบัญชี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร

¹Department of Statistics, Chulalongkorn Business School, Chulalongkorn University, Bangkok

*Corresponding author: Apichat Chadruanglerd, e-mail address: 6480504026@student.chula.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบวิธีการใส่ค่าสูญหาย ในการวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติก เมื่อตัวแปรตามมีการสูญหายแบบนอนอิกนอร์เรเบิล วิธีการที่ใช้ศึกษา คือ วิธี Complete Case Analysis (CC) วิธี Mode Imputation (MODE) วิธี Expectation Maximization Algorithm (EM) วิธี Multiple Imputation (MI) วิธี Hard Cutoff Augmentation (HARDCUT) วิธี Parceling Augmentation (PARCELING) และวิธี Fuzzy Augmentation (FUZZY) งานวิจัยนี้ใช้การจำลองข้อมูลในการศึกษาตามขนาดของตัวอย่าง ร้อยละของการสูญหายของข้อมูล และระดับของการสูญหายแบบนอนอิกนอร์เรเบิล การจำลองข้อมูลในแต่ละสถานการณ์จะกระทำ 5,000 รอบ โดยมีเกณฑ์ที่ใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการใส่ค่าสูญหาย ได้แก่ ค่าเฉลี่ยของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (Average Mean Squared Error: AMSE) ของค่าประมาณความน่าจะเป็นของการเกิดเหตุการณ์ที่สนใจ ($P(Y = 1)$) และค่าประสิทธิภาพสัมพัทธ์ (Relative Efficiency: RE) จากผลการทดลองสรุปได้ว่า ค่า AMSE จะลดลงเมื่อขนาดของตัวอย่างใหญ่ขึ้น และจะมีค่ามากขึ้นเมื่อร้อยละของการสูญหายของข้อมูลเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาผลของระดับของการสูญหายแบบนอนอิกนอร์เรเบิลต่อค่า AMSE พบว่ามีเพียง AMSE ของวิธี MODE เท่านั้นที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อระดับของการสูญหายแบบนอนอิกนอร์เรเบิลเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาค่า RE โดยเปรียบเทียบ AMSE ของวิธี CC กับวิธีการใส่ค่าสูญหายวิธีอื่นพบว่า วิธี EM และวิธี FUZZY ให้ค่า AMSE เท่ากับ AMSE ของวิธี CC ในขณะที่ AMSE ของวิธีอื่น ๆ มีค่าน้อยกว่า AMSE ของวิธี CC

คำสำคัญ: การวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติก, การสูญหายแบบนอนอิกนอร์เรเบิล, วิธีการใส่ค่าสูญหาย

Abstract

The objective of this research is to compare the imputation methods for nonignorable missing response variable in logistic regression analysis with three independent variables. The imputation methods used in this research are Complete Case Analysis (CC), Mode Imputation (MODE), Expectation Maximization (EM), Multiple Imputation (MI), Hard Cutoff Augmentation (HARDCUT), Parceling Augmentation and Fuzzy Augmentation (FUZZY). This research simulates the data based on the sample size, percentage of missingness, and the level of nonignorable. Each scenario is performed in 5,000 iterations. The comparison of imputation methods uses the Average Mean Squared Error (AMSE) and Relative Efficiency (RE). The findings indicate that AMSE will decrease with a larger sample size and increase with a higher percentage of missingness. The increase in the level of nonignorable affects the increase of the AMSE of the MODE method. The AMSE of the MODE method tends to increase with a higher level of nonignorable. Moreover, when considering RE calculated by comparing the AMSE of the CC method with the AMSE of other methods. The finding indicates that the AMSE of the EM and FUZZY methods are equivalent to the AMSE of the CC method while the AMSE of other methods are less than the AMSE of the CC method.

Keywords: Logistic regression analysis, Nonignorable missing data, Imputation methods

1. บทนำ

การวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติก (Logistic regression analysis) เป็นการวิเคราะห์การถดถอยรูปแบบหนึ่งที่วิเคราะห์ความสัมพันธ์ ระหว่างตัวแปรอิสระ และตัวแปรตาม โดยที่ตัวแปรตามเป็นตัวแปรเชิงคุณภาพ (Categorical variable) ตัวแบบการถดถอยโลจิสติกสามารถนำไปทำนายความน่าจะเป็นของการเกิดเหตุการณ์ที่สนใจ (Outcome of interest)

การวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติก แบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ตามจำนวนของผลลัพธ์ที่เป็นไปได้ในตัวแปรตาม รูปแบบแรก คือ การวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติกแบบ 2 กลุ่ม (Binary logistic regression analysis) และรูปแบบที่สอง คือ การวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติกแบบหลายกลุ่ม (Multinomial logistic regression analysis)

การวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติกแบบ 2 กลุ่ม เป็นที่นิยมแพร่หลายในงานการศึกษา สังคมศาสตร์ การแพทย์ รวมถึงด้านธุรกิจการเงิน และอื่น ๆ โดยที่ตัวแปรตามจะถูกทำนายออกมาเป็นเหตุการณ์ที่สนใจ และเหตุการณ์ที่ไม่ใช่เหตุการณ์ที่สนใจ เช่น การจำแนกลูกค้าที่ดี และลูกค้าที่ไม่ดี การจำแนกผู้ป่วยที่เป็นโรค และไม่เป็นโรค

ในการวิเคราะห์ข้อมูล หรือการสร้างแบบจำลอง จะสามารถทำได้เมื่อข้อมูลมีความสมบูรณ์ (Complete data) กล่าวคือ ไม่มีข้อมูลสูญหาย (Missing data) แต่ในสถานการณ์จริงการเก็บข้อมูล อาจไม่สมบูรณ์จนนำไปสู่การเกิดข้อมูลสูญหาย โดยข้อมูลสูญหายเป็นหนึ่งในปัญหาที่พบได้ทั่วไปในการวิเคราะห์ข้อมูล และอาจทำให้การวิเคราะห์ หรือการสร้างแบบจำลองมีความเอนเอียง หรือ นำไปสู่การสรุปผลการวิเคราะห์ที่ผิดพลาดได้

กรอบคิดในการจำแนกกลไกการสูญหาย (Missingness mechanisms) ถูกแบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ กลไกการสูญหายที่เกิดขึ้นอย่างสุ่มโดยสมบูรณ์ (Missing completely at random: MCAR), กลไกการสูญหายที่เกิดขึ้นอย่างสุ่ม (Missing at random: MAR), และกลไกการสูญหายที่ไม่ได้เกิดขึ้นอย่างสุ่ม (Missing not at random: MNAR) โดยที่ MNAR สามารถเรียกอีกชื่อหนึ่งได้ว่ากลไกการสูญหายแบบนอนอิกนอร์เรเบิล (Nonignorable missingness) ได้เช่นกัน กล่าวคือ เป็นกลไกการสูญหายที่ความน่าจะเป็นของการสูญหายของตัวแปร นั้นขึ้นอยู่กับค่าของค่าที่สูญหายไปนั่นเอง หรืออาจจะขึ้นอยู่กับตัวแปรอื่นที่ไม่ได้อยู่ในชุดข้อมูลร่วมด้วย เช่น ผู้ตอบแบบสอบถามที่มีรายได้มาก อาจมีความน่าจะเป็นที่จะไม่บอกรายได้ของตน มากกว่าผู้ที่มีรายได้ต่ำกว่า [1]

การสูญหายของข้อมูลเป็นปัญหาที่พบได้ทั่วไป และปัญหาบางอย่างสามารถมองเป็นปัญหาการสูญหายของข้อมูลได้เช่นกัน เช่น ในการให้เครดิตกับลูกค้า เจ้าหนี้จะวิเคราะห์คุณสมบัติต่าง ๆ ของลูกค้า และจัดทำใบคะแนนเครดิต (Credit scorecard) เพื่อพิจารณาว่าคะแนนของลูกค้าผ่านเกณฑ์หรือไม่ เจ้าหนี้จะพยายามปรับปรุงการตัดสินใจด้วยการใช้ตัวแบบคะแนนเครดิต (Credit scoring model) ซึ่งเป็นตัวแบบที่จะวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่เป็นสถานะการผิวนัดชำระหนี้ กับตัวแปรที่เป็นคุณสมบัติของลูกค้าเพื่อทำนายว่าลูกค้าคนใดจะผิด หรือไม่ผิวนัดชำระ โดยประเภทของตัวแบบที่นิยมใช้ก็คือตัวแบบการถดถอยโลจิสติก ปัญหาที่เกิดขึ้น คือ ตัวแบบคะแนนเครดิตจะถูกสร้างจากข้อมูลของผู้ที่ได้รับเครดิตเท่านั้นซึ่งเปรียบได้ว่าตัวแบบคะแนนเครดิต คือ การวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ตัวแบบการถดถอยโลจิสติกที่มีตัวอย่างที่เป็นข้อมูลสูญหายนั่นเอง ซึ่งตัวอย่างกลุ่มนี้จะไม่สามารถเป็นตัวแทนที่ครอบคลุมกลุ่มตัวอย่างที่จะมีในอนาคตได้ กล่าวคือ กลุ่มตัวอย่างนี้มีความเอนเอียงของตัวอย่าง (Sample bias) [2]

ความเอนเอียงของตัวอย่างเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นเมื่อมีการปรับปรุงตัวแบบคะแนนเครดิตโดยใช้ข้อมูลเฉพาะผู้ที่ได้รับเครดิตเท่านั้น เมื่อนำตัวแบบใหม่นี้ไปใช้กับ ผู้ขอสินเชื่อทั้งหมด จะพบว่าอาจมีผู้ที่เคยผ่านเกณฑ์การให้เครดิตบางส่วนเมื่อตัดสินใจด้วยตัวแบบเดิมจะไม่ผ่านเกณฑ์เมื่อตัดสินใจด้วยตัวแบบใหม่ ในทำนองเดียวกันกับผู้ที่ไม่ผ่านเกณฑ์การให้เครดิต บางส่วนเมื่อตัดสินใจด้วยตัวแบบเดิมจะผ่านเกณฑ์เมื่อตัดสินใจด้วยตัวแบบใหม่ กล่าวคือ เกิดชุดข้อมูลที่สลับกัน (Swap set) ระหว่างการตัดสินใจด้วยตัวแบบเดิมกับตัวแบบใหม่ ผลที่ตามมาจากการเกิดชุดข้อมูลที่สลับกัน คือ ตัวแบบใหม่จะแสดงความเอนเอียงที่มีต่อผู้ที่ผ่านเกณฑ์การให้เครดิตนั่นเอง กล่าวคือ ตัวแบบใหม่มีแนวโน้มที่จะมองผู้ที่ไม่เหมาะสมในการได้รับเครดิตในแง่ที่มากขึ้น [3]

วิธี Reject inference เป็นเทคนิคที่เป็นกรณีพิเศษของวิธีการใส่ค่าสูญหายที่นำมาใช้จัดการกับความเอนเอียงของตัวอย่าง โดยการอนุมานสถานะการเป็นลูกค้าที่ดีหรือไม่ดีจากกลุ่มตัวอย่างที่เป็นผู้ที่ถูกปฏิเสธการให้เครดิต เพื่อให้สามารถปรับปรุงตัวแบบคะแนนเครดิต และปรับปรุงการตัดสินใจให้ดีขึ้นเนื่องจากเมื่อรวมข้อมูลของผู้ที่ได้รับเครดิต ร่วมกับข้อมูลที่ได้จากการทำวิธี Reject inference จะได้กลุ่มตัวอย่างที่เป็นตัวแทนที่ครอบคลุมกลุ่มตัวอย่างในอนาคตได้ดีขึ้น ตัวอย่างเทคนิคที่นิยมใช้ในวิธี Reject inference เช่น วิธี Hard Cutoff Method (Simple Augmentation) วิธี Parceling Augmentation และวิธี Fuzzy Augmentation [4]

ภัทธิดา นิลภัทรนัทร ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบการใส่ค่าสูญหายวิธีต่าง ๆ ในการวิเคราะห์ การถดถอยโลจิสติกแบบ 2 กลุ่ม และมีตัวแปรอิสระ 3 ตัว โดยที่การศึกษานี้จะศึกษาการวิเคราะห์ การถดถอยโลจิสติกที่มีการสูญหายของตัวแปรอิสระแบบนอนอินกอร์เรเบิล และต้องเป็นการสูญหาย ของตัวแปรอิสระที่ละตัวแปรเท่านั้น วิธีการใส่ค่าสูญหายที่ใช้ในการศึกษานี้ ได้แก่ วิธี Mean Imputation (MEAN) วิธี Median Imputation (MED) วิธี K-Nearest Neighbor (KNN) และวิธี Multiple Imputation (MI) ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษามาจากการจำลองข้อมูลตัวแปรสุ่มแจกแจงปกติ มาตรฐาน มีขนาดของตัวอย่าง ได้แก่ 70 100 และ 200 ตัวแปรอิสระมีร้อยละของการสูญหายของ ข้อมูลโดยเฉลี่ยร้อยละ 10 20 และ 30 รวมถึงมีระดับการสูญหายแบบนอนอินกอร์เรเบิลระดับต่ำ ปานกลาง และสูง ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรอิสระคือ 0.5 1 และ 1.5 ตามลำดับ การจำลองจัดทำทั้งหมด 5,000 ครั้ง เพื่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยในกรณีต่าง ๆ แล้วจึงนำมาเปรียบเทียบวิธีการประมาณค่าสูญหายด้วยค่าเฉลี่ยของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (Average mean square error: AMSE) [5]

ในงานวิจัยข้างต้นได้ศึกษาวิธีการใส่ค่าสูญหายที่เกิดขึ้นในตัวแปรอิสระแบบนอนอินกอร์เรเบิลในการวิเคราะห์ การถดถอยโลจิสติกเท่านั้น แต่ในบางสถานการณ์การสูญหายอาจเกิดขึ้นในตัวแปรตามแบบนอนอินกอร์เรเบิลได้ ดังนั้นงานวิจัยขั้นนี้จึงต้องการศึกษา และเปรียบเทียบวิธีการใส่ค่าสูญหายในการวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติกแบบ 2 กลุ่ม กรณีที่ตัวแปรอิสระ 3 ตัว และตัวแปรอิสระเป็นข้อมูลเชิงปริมาณ การสูญหายเกิดขึ้นในตัวแปรตามแบบนอนอินกอร์เรเบิล

2. วิธีการศึกษา

2.1 การสร้างชุดข้อมูล

การทดลองแต่ละสถานการณ์จะทำการจำลอง 5,000 รอบ โดยการจำลองชุดข้อมูลจะเริ่มจากการสร้างตัวแปรอิสระ (X) ที่มีการแจกแจงแบบปกติมาตรฐาน โดยที่ตัวแปรอิสระทั้ง 3 ตัวไม่มีสหสัมพันธ์กัน ตามขนาดของชุดข้อมูล ($n = 100, 150, 200$) ซึ่งเป็นข้อมูลที่มีขนาดเล็ก และมีขนาดที่เพียงพอที่จะไม่เกิดปัญหา perfect separation จากนั้นสร้างชุดข้อมูลที่มีรูปแบบความสัมพันธ์ตามตัวแบบการถดถอยโลจิสติก โดยกำหนดให้สัมประสิทธิ์การถดถอย (β) มีค่า $\beta_0 = 0, \beta_1 = 0.5, \beta_2 = 1.0$ และ $\beta_3 = 1.5$ ตามลำดับ จากนั้นสร้างตัวแบบความสัมพันธ์ได้ดังนี้ $\ln\left(\frac{\pi(X)}{1-\pi(X)}\right) = \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \beta_3 x_{i3}$ โดยที่ $i = 1, 2, 3, \dots, n$ แล้วจึงสร้างตัวแปรตาม (Y) ที่มีการแจกแจงแบบเบอร์นูลลีที่ความน่าจะเป็นเท่ากับ $\pi(X)$

2.2 การสุ่มข้อมูลให้ตัวแปรตามมีการสูญหายแบบนอนอินกอร์เรเบิล

ในงานวิจัยนี้จะสุ่มให้การสูญหายของข้อมูลเกิดขึ้นในตัวแปรตาม (Y) เท่านั้น และเป็นการสูญหายแบบนอนอินกอร์เรเบิล ที่ขึ้นอยู่กับขนาดของความน่าจะเป็นที่จะเกิดเหตุการณ์ที่สนใจเท่านั้น ($P(Y = 1)$) โดยจะแบ่งขนาดของความน่าจะเป็นออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงต้น ช่วงกลาง และช่วงปลาย การสูญหายในแต่ละช่วงจะมีสัดส่วนที่เท่ากันหรือไม่ ขึ้นอยู่กับระดับของการสูญหายแบบนอนอินกอร์เรเบิลซึ่งมี 3 ระดับ คือ การสูญหายแบบอินกอร์เรเบิล การสูญหายแบบนอนอินกอร์เรเบิลระดับปานกลาง และการสูญหายแบบนอนอินกอร์เรเบิลระดับสูง

การแบ่งขนาดของความน่าจะเป็น ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 3 ช่วง จะเริ่มจากการกำหนดการแจกแจงค่าโลจิตที่แท้จริงซึ่งคำนวณได้จากผลรวมเชิงเส้นระหว่างตัวแปรอิสระกับค่าพารามิเตอร์ของตัวแปรอิสระนั้นก่อน การแจกแจงนี้มีการแจกแจงแบบปกติมาตรฐานที่มีค่าเฉลี่ย (μ_{logit}) เท่ากับ 0 และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ_{logit}) เท่ากับ $\sqrt{0.5^2 + 1^2 + 1.5^2}$ แล้วจึงคำนวณค่าโลจิตที่จะแบ่งการแจกแจงค่าโลจิตที่แท้จริงออกเป็น 3 ส่วนที่เท่ากัน ได้แก่ ค่าจุดตัดล่างซึ่งมีค่าเท่ากับ $\mu_{logit} + Z_1 \sigma_{logit}$ และค่าจุดตัดบนซึ่งมีค่าเท่ากับ $\mu_{logit} + Z_2 \sigma_{logit}$ ตามลำดับแล้วจึงแปลงค่าโลจิตทั้ง 2 ค่านี้เป็นความน่าจะเป็นด้วยฟังก์ชันซิกมอยด์ (sigmoid function) ค่าความน่าจะเป็นที่อยู่ในช่วงต้น คือ ค่าความน่าจะเป็นที่มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าความน่าจะเป็นของจุดตัดล่าง ค่าความน่าจะเป็นที่อยู่ในช่วงกลาง คือ ค่าความน่าจะเป็นที่มีค่ามากกว่าค่าความน่าจะเป็นของจุดตัดล่าง แต่มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าความน่าจะเป็นของจุดตัดบน ค่าความน่าจะเป็นที่อยู่ในช่วงปลาย คือ ค่าความน่าจะเป็นที่มีค่ามากกว่าค่าความน่าจะเป็นของจุดตัดบน

หลังจากที่แบ่งค่าความน่าจะเป็นออกเป็น 3 ช่วงแล้ว การสุ่มการสูญหายของตัวแปรตามในแต่ละช่วงจะมีส่วนที่เท่ากันหรือไม่ขึ้นอยู่กับระดับของการสูญหายแบบนอนอิกรนอร์เรเบิล โดยที่ถ้าระดับของการสูญหายแบบนอนอิกรนอร์เรเบิลเป็นระดับอิกรนอร์เรเบิล (ignorable) สัดส่วนของการสูญหายของตัวแปรตามในช่วงต้น ช่วงกลาง และช่วงปลาย จะมีสัดส่วนที่เท่ากันทั้ง 3 ช่วง ถ้าระดับของการสูญหายแบบนอนอิกรนอร์เรเบิลเป็นระดับปานกลาง สัดส่วนของการสูญหายของตัวแปรตามแต่ละช่วงจะมีสัดส่วนเท่ากับ 0.8 : 1.0 : 1.2 และถ้าระดับของการสูญหายแบบนอนอิกรนอร์เรเบิลเป็นระดับสูง สัดส่วนของการสูญหายของตัวแปรตามในแต่ละช่วงจะมีสัดส่วนเท่ากับ 0.4 : 1.0 : 1.6

2.3 การใช้วิธีการใส่ค่าสูญหาย

ในงานวิจัยนี้ จะใช้วิธีการใส่ค่าสูญหายที่สนใจทั้งหมด 7 วิธี ได้แก่ Complete Case Analysis (CC) วิธี Mode Imputation (MODE) วิธี Expectation Maximization Algorithm (EM) วิธี Multiple Imputation (MI) วิธี Hard Cutoff Augmentation (HARDCUT) วิธี Parceling Augmentation (PARCELING) และวิธี Fuzzy Augmentation (FUZZY) จากนั้นให้ประมาณค่าพารามิเตอร์ แล้วคำนวณความน่าจะเป็นที่จะเกิดเหตุการณ์ที่สนใจ ($P(Y = 1)$) ของทั้งชุดข้อมูลนั้นโดยใช้ค่าประมาณพารามิเตอร์ที่ได้วิธีการใส่ค่าสูญหายแต่ละวิธี เปรียบเทียบ และการทำงานของวิธีการใส่ค่าสูญหายมีดังนี้

วิธี Complete Case Analysis (CC) หรือ Listwise Deletion จะตัดทุกหน่วยตัวอย่างที่มีค่าสูญหายเกิดขึ้นออกไปจากชุดข้อมูล กล่าวคือ วิธีนี้จะทำการวิเคราะห์เฉพาะข้อมูลที่มีค่าของตัวแปรอิสระกับค่าของตัวแปรตามครบถ้วนทุกหน่วยตัวอย่างเท่านั้น

วิธี Mode Imputation (MODE) เป็นวิธีการใส่ค่าสูญหายที่จะประมาณค่าสูญหายทุกตัวให้มีค่าที่เท่ากัน คือ ค่าที่เป็นฐานนิยมของตัวแปรที่เกิดการสูญหายนั้น กล่าวคือ หากข้อมูลสูญหายเกิดขึ้นเฉพาะในตัวแปรตามของการวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติก ค่าประมาณที่จะใช้แทนค่าสูญหายที่เป็นไปได้ จะเป็น 0 หรือ 1 ขึ้นกับว่าค่าที่มีความถี่มากที่สุด หรือค่าที่เป็นฐานนิยมคือค่าใด

วิธี Expectation Maximization Algorithm (EM) เป็นวิธีการทำซ้ำในการประมาณค่าความน่าจะเป็นสูงสุด (maximum likelihood estimation) ในปัญหาที่เกี่ยวกับชุดข้อมูลที่ไม่สมบูรณ์ การทำงานของวิธี EM มีดังนี้ 1) ใส่ค่าสูญหายโดยใช้ค่าประมาณที่ได้จากพารามิเตอร์ที่ประมาณจากชุดข้อมูลที่ทราบค่า (observed data) 2) เมื่อได้ชุดข้อมูลสมบูรณ์จากขั้นตอนก่อนหน้า ให้ประมาณค่าพารามิเตอร์อีกครั้ง 3) ให้ถือว่าค่าประมาณพารามิเตอร์ที่ได้จากขั้นตอนก่อนหน้าถูกต้อง แล้วใส่ค่าสูญหายโดยประมาณจากค่าประมาณพารามิเตอร์นี้ 4) ประมาณค่าพารามิเตอร์โดยใช้ชุดข้อมูลสมบูรณ์ที่ได้จากขั้นตอนที่ 3) แล้วทำซ้ำขั้นตอนที่ 3) และ 4) ไปเรื่อยๆ การทำซ้ำจะให้ค่าประมาณพารามิเตอร์ที่ลู่เข้าหาค่าใดค่าหนึ่ง [1,6]

วิธี Multiple Imputation (MI) ถูกเสนอโดย Donald B. Rubin เพื่อใส่ค่าสูญหายโดยการประมาณค่าสูญหายและสร้างชุดข้อมูลสมบูรณ์ขึ้นมาหลาย ๆ ชุด เพื่อให้ครอบคลุม และคำนึงถึงความไม่แน่นอนของค่าที่สูญหายไป จำนวนชุดข้อมูลที่จะทำซ้ำ (m) ควรจะมีจำนวนชุดมาก ๆ แต่อาจจะไม่คุ้มค่างบประมาณ และเวลาที่ใช้ในการประมวลผล จึงแนะนำว่าเพื่อความสะดวกควรเริ่มต้นจากการใช้ $m = 5$ แต่ถ้าการคำนวณ และทรัพยากรของผู้ใช้เพียงพออาจจะตั้งค่า m ให้เท่ากับสัดส่วนของค่าสูญหายในชุดข้อมูล เช่น สัดส่วนของการสูญหายคิดเป็นร้อยละ 20 ของขนาดชุดข้อมูล ให้ใช้ $m = 20$ นอกจากนี้ยังเสริมว่าข้อสรุปสำคัญอาจจะไม่ได้เปลี่ยนแปลงมากนัก อันเป็นผลมาจากการเพิ่ม m ให้มากกว่า 5 [7-8] ในงานวิจัยนี้วิธี MI สรุปลักษณะได้ ดังนี้ 1) ประมาณค่าสูญหายด้วย Bayesian logistic regression imputation ในชุดข้อมูล m ชุด 2) ประมาณค่าพารามิเตอร์ของชุดข้อมูลสมบูรณ์จำนวน m ชุดนั้น 3) นำค่าประมาณพารามิเตอร์ที่ได้จากขั้นตอนก่อนหน้ามาหาค่าเฉลี่ย [7]

วิธี Hard Cutoff (HARDCUT) เป็นวิธี Reject inference ที่จะสร้างตัวแบบความน่าจะเป็นของการผิมนัดชำระหนี้ของลูกหนี้จากชุดข้อมูลของผู้ที่ได้รับเครดิต (Accepts) ในที่นี้ คือ ชุดข้อมูลที่ทราบค่า แล้วจึงนำตัวแบบนี้ไปใช้คำนวณความน่าจะเป็นของการผิมนัดชำระหนี้ในชุดข้อมูลของผู้ที่ถูกปฏิเสธการให้เครดิต (Rejects) ในที่นี้ คือ ชุดข้อมูลที่มีค่าสูญหาย การอนุมานว่าผู้ที่ถูกปฏิเสธการให้เครดิตคนใดจะเป็นลูกหนี้ที่ผิมนัดชำระหนี้ทำได้โดยการเปรียบเทียบความน่าจะเป็นในการผิมนัดชำระหนี้ของลูกหนี้คนนั้นกับเกณฑ์ที่กำหนด เช่น ความน่าจะเป็นของการผิมนัดชำระหนี้เป็น 0.43 และความน่าจะเป็นที่ใช้เป็นเกณฑ์ตัดสินมีค่า 0.50 จะอนุมานว่าลูกหนี้รายนี้เป็นลูกหนี้ที่ดี [4]

วิธี Parceling Augmentation (PARCELING) เป็นวิธี Reject inference ที่คล้ายกับวิธี Hard Cutoff แต่ความแตกต่างของทั้งสองวิธี คือ หลังจากอนุมานความน่าจะเป็นของการผิมนัดชำระหนี้ในชุดข้อมูลของผู้ที่ถูกปฏิเสธการให้เครดิตแล้ว วิธี Parceling Augmentation จะแบ่งความน่าจะเป็นของการผิมนัดชำระหนี้ออกเป็นหลาย ๆ ช่วง จากนั้นจึงคำนวณอัตราคาดหวัง

ของการเป็นลูกหนี้ที่ไม่ดี (Expected bad rate) ซึ่งหมายถึง สัดส่วนของลูกหนี้ที่ไม่ดีภายในช่วงของความน่าจะเป็นในการผิดนัดชำระหนี้ช่วงเดียวกันในชุดข้อมูลของผู้ที่ได้รับเครดิต จากนั้นจึงอนุมานสถานะการเป็นลูกหนี้ที่ไม่ดีในชุดข้อมูลของผู้ที่ถูกปฏิเสธการให้เครดิตในสัดส่วนเดียวกันกับอัตราคาดหวังของการเป็นลูกหนี้ที่ไม่ดี [4]

วิธี Fuzzy Augmentation (FA) เป็นวิธี Reject inference วิธีหนึ่งที่มีขั้นตอนการทำงานดังนี้ 1) สร้างตัวแบบความน่าจะเป็นของการผิดนัดชำระหนี้โดยใช้ชุดข้อมูลของผู้ที่ได้รับเครดิต 2) คำนวณความน่าจะเป็นของการผิดนัดชำระหนี้ และค่าความน่าจะเป็นของการไม่ผิดนัดชำระหนี้ในชุดข้อมูลของผู้ที่ถูกปฏิเสธการให้เครดิต 3) ทำซ้ำชุดข้อมูลของผู้ที่ถูกปฏิเสธการให้เครดิต จากนั้นจึงอนุมานว่าลูกหนี้คนใดจะผิดนัดชำระหนี้ด้วยความน่าจะเป็นของการผิดนัดชำระหนี้จากขั้นตอนก่อนหน้า 4) รวมชุดข้อมูลของผู้ที่ได้รับเครดิตกับชุดข้อมูลในขั้นตอนก่อนหน้า 5) ประมวลผลพารามิเตอร์อีกครั้ง โดยใช้ชุดข้อมูลในขั้นตอนก่อนหน้า และถ่วงน้ำหนัก สำหรับข้อมูลของผู้ที่ได้รับเครดิตให้ถ่วงน้ำหนักเท่ากับ 1 ส่วนผู้ที่อนุมานว่าเป็นลูกหนี้ที่ดี และลูกหนี้ที่ไม่ดีในชุดข้อมูลของผู้ที่ถูกปฏิเสธการให้เครดิต จะถ่วงน้ำหนักเท่ากับค่าความน่าจะเป็นของการไม่ผิดนัดชำระหนี้ และความน่าจะเป็นของการผิดนัดชำระหนี้ ตามลำดับ [4]

2.4 การวัดประสิทธิภาพของวิธีการใส่ค่าสูญหาย

การวัดประสิทธิภาพของวิธีการใส่ค่าสูญหายในงานวิจัยนี้มีทั้งหมด 2 วิธี ได้แก่ ค่าเฉลี่ยของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (Average Mean Squared Error: AMSE) และค่าประสิทธิภาพสัมพัทธ์ (Relative Efficiency: RE)

ค่า MSE คำนวณได้จากการหาค่าเฉลี่ยของกำลังสองของความแตกต่างระหว่างความน่าจะเป็นของตัวอย่างนั้น กับความน่าจะเป็นที่ประมาณจากค่าประมาณพารามิเตอร์ที่ได้จากวิธีการใส่ค่าสูญหาย โดยที่ MSE_r คือ ค่า MSE ของวิธีการใส่ค่าสูญหาย r n คือ ขนาดของตัวอย่าง p_i คือ ความน่าจะเป็นของตัวอย่าง $\hat{p}_i$ คือค่าประมาณความน่าจะเป็นที่ได้จากวิธีการใส่ค่าสูญหายวิธี แสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$MSE_r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{p}_i - p_i)^2$$

ค่า AMSE คำนวณได้จากการหาค่าเฉลี่ยของ MSE_r ทั้ง 5,000 รอบ แสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$AMSE_r = \frac{1}{5,000} \sum_j^{5,000} MSE_{r,j}$$

ค่า RE คำนวณได้จากการเปรียบเทียบ AMSE ของวิธี CC เทียบกับ AMSE ของวิธีอื่น ๆ แสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$RE(AMSE_r) = \frac{AMSE_{CC}}{AMSE_r}$$

วิธีการใส่ค่าสูญหายที่มีประสิทธิภาพมากกว่า คือ วิธีที่ให้ค่า AMSE ต่ำที่สุด และเพื่อเปรียบเทียบวิธีการใส่ค่าสูญหายให้ชัดเจนมากขึ้นในแต่ละสถานการณ์จึงใช้ค่า RE โดยที่ถ้าค่า RE มากกว่า 1 แสดงว่าวิธีการใส่ค่าสูญหายวิธีนั้นมีประสิทธิภาพมากกว่าวิธี CC

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบวิธีการใส่ค่าสูญหาย ในการวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติกแบบ 2 กลุ่มกรณีที่มีตัวแปรอิสระ 3 ตัว และตัวแปรอิสระเป็นข้อมูลเชิงปริมาณ การสูญหายเกิดขึ้นในตัวแปรตามแบบนอนอนิกนอร์เรเบิล วิธีการที่ใช้ศึกษา คือวิธี Complete Case Analysis (CC) วิธี Mode Imputation (MODE) วิธี Expectation Maximization Algorithm (EM) วิธี Multiple Imputation (MI) วิธี Hard Cutoff Augmentation (HARDCUT) วิธี Parceling Augmentation (PARCELING) และวิธี Fuzzy Augmentation (FUZZY) งานวิจัยนี้ใช้การจำลองข้อมูลในการศึกษา โดยจำลองสถานการณ์จำนวน 27 สถานการณ์ ตามขนาดของตัวอย่าง ร้อยละของการสูญหายของข้อมูล และระดับของการสูญหายแบบนอนอนิกนอร์เรเบิล โดยที่ขนาดของข้อมูลตัวอย่าง 3 ขนาด คือ 100 150 และ 200 มีร้อยละของการสูญหายของข้อมูลในตัวแปรตาม ร้อยละ 10

20 และ 30 การสูญหายแบบนอนอินอร์เรเบิลแบ่งออกเป็น 3 ระดับ คือ การสูญหายแบบอินอร์เรเบิล การสูญหายแบบนอนอินอร์เรเบิลระดับปานกลาง และการสูญหายแบบนอนอินอร์เรเบิลระดับสูง การทดลองจะเริ่มต้นจากการจำลองข้อมูลแต่ละสถานการณ์ 5,000 รอบ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการใส่ค่าสูญหายด้วยค่าเฉลี่ยของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (Average Mean Squared Error: AMSE) ของค่าประมาณความน่าจะเป็นของการเกิดเหตุการณ์ที่สนใจ ($P(Y = 1)$) ที่ได้จากวิธีการใส่ค่าสูญหาย และค่าประสิทธิภาพสัมพัทธ์ (relative efficiency: RE) ผลการทดลองแสดงดังนี้

3.1 Average Mean Squared Error (AMSE)

ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่า AMSE ของค่าประมาณความน่าจะเป็นของการที่สนใจที่ได้จากวิธีการใส่ค่าสูญหาย ได้แก่ ขนาดของข้อมูลตัวอย่าง ร้อยละของการสูญหายของข้อมูล และระดับของการสูญหายแบบนอนอินอร์เรเบิล จากตารางที่ 1 พบว่าเมื่อขนาดของข้อมูลตัวอย่างมีขนาดเพิ่มขึ้น ค่า AMSE ของวิธีการใส่ค่าสูญหายจะลดลง นอกจากนี้ เมื่อร้อยละของการสูญหายเพิ่มขึ้น ค่า AMSE ของวิธีการใส่ค่าสูญหายจะเพิ่มขึ้นด้วย แต่ระดับของการสูญหายแบบนอนอินอร์เรเบิลส่งผลของต่อค่าของ AMSE ไกล่เคียงกันทั้งสามระดับ ยกเว้น AMSE ของวิธี MODE เท่านั้นที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระดับของการสูญหายแบบนอนอินอร์เรเบิลเพิ่มขึ้น ผลการทดลองในตารางนี้ยังแสดงให้เห็นว่าวิธีการใส่ค่าสูญหายที่ให้ค่า AMSE ต่ำที่สุดในทุกกรณีที่ทดลอง และมีค่า AMSE ที่เท่ากันด้วย ได้แก่ วิธี CC วิธี EM และวิธี FUZZY

Table 1 Average Mean Squared Error of Imputation methods

sample size (n)	percent of missing	level of nonignorable	AMSE						
			CC	MODE	MI	EM	HARDCUT	PARCELING	FUZZY
100	10	ignorable	0.005727	0.006254	0.005775	0.005727	0.006432	0.006207	0.005727
		moderate	0.005795	0.006369	0.005819	0.005795	0.006523	0.006324	0.005795
		high	0.005783	0.007416	0.005837	0.005783	0.006513	0.006280	0.005783
	20	ignorable	0.006568	0.009453	0.006614	0.006568	0.008488	0.007534	0.006568
		moderate	0.006512	0.010186	0.006537	0.006512	0.008446	0.007467	0.006512
		high	0.006645	0.015205	0.006679	0.006645	0.008613	0.007675	0.006645
	30	ignorable	0.007446	0.014392	0.007479	0.007446	0.011193	0.008841	0.007446
		moderate	0.007610	0.016799	0.007644	0.007610	0.011352	0.008994	0.007610
		high	0.007507	0.029445	0.007548	0.007507	0.011195	0.009111	0.007507
150	10	ignorable	0.003858	0.004602	0.003874	0.003858	0.004401	0.004209	0.003858
		moderate	0.003790	0.004708	0.003813	0.003790	0.004330	0.004087	0.003790
		high	0.003860	0.005808	0.003879	0.003860	0.004378	0.004190	0.003860
	20	ignorable	0.004304	0.007816	0.004333	0.004304	0.005893	0.004987	0.004304
		moderate	0.004254	0.008745	0.004276	0.004254	0.005797	0.004976	0.004254
		high	0.004381	0.013912	0.004406	0.004381	0.005964	0.005131	0.004381
	30	ignorable	0.004953	0.012950	0.004966	0.004953	0.008085	0.006004	0.004953
		moderate	0.004926	0.015140	0.004946	0.004926	0.008134	0.005961	0.004926
		high	0.004987	0.029187	0.005006	0.004987	0.008175	0.006050	0.004987
200	10	ignorable	0.002832	0.003723	0.002845	0.002832	0.003268	0.003103	0.002832
		moderate	0.002819	0.003846	0.002829	0.002819	0.003264	0.003068	0.002819
		high	0.002860	0.004984	0.002878	0.002860	0.003319	0.003129	0.002860
	20	ignorable	0.003134	0.007000	0.003145	0.003134	0.004480	0.003686	0.003134
		moderate	0.003171	0.007923	0.003185	0.003171	0.004560	0.003728	0.003171
		high	0.003137	0.013784	0.003152	0.003137	0.004512	0.003682	0.003137
	30	ignorable	0.003718	0.012148	0.003736	0.003718	0.006597	0.004511	0.003718
		moderate	0.003656	0.014694	0.003674	0.003656	0.006546	0.004466	0.003656
		high	0.003677	0.029098	0.003697	0.003677	0.006572	0.004474	0.003677

3.2 Relative Efficiency (RE)

เพื่อการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการประมาณค่าความน่าจะเป็นของการเกิดเหตุการณ์ที่สนใจที่ได้จากวิธีการใส่ค่าสูญหายในกรณีต่าง ๆ งานวิจัยนี้จึงใช้ค่า RE เพื่อเปรียบเทียบค่า AMSE ของวิธี CC กับวิธีการใส่ค่าสูญหายวิธีอื่น ๆ การประเมินผลการทดลองด้วยค่า RE จะกระทำโดยที่ เมื่อค่า RE มากกว่า 1 แสดงว่าวิธีการใส่ค่าสูญหายนั้นมีค่า AMSE ที่น้อยกว่า AMSE ของวิธี CC กล่าวคือวิธีการใส่ค่าสูญหายนั้นมีประสิทธิภาพดีกว่าวิธี CC จากตารางที่ 2 พบว่าเมื่อเปรียบเทียบสถานการณ์เดียวกัน RE ของวิธี CC วิธี EM และวิธี FUZZY มีค่าเท่ากับ 1 วิธีการใส่ค่าสูญหายวิธีอื่น ๆ มีค่า RE น้อยกว่า 1 กล่าวคือมีประสิทธิภาพในการประมาณค่าความน่าจะเป็นของการเกิดเหตุการณ์ที่สนใจที่ต่ำกว่าของวิธี CC

Table 2 Relative Efficiency of imputation methods

sample size (n)	percent of missing	level of nonignorable	RE(AMSE)						
			CC	MODE	MI	EM	HARDCUT	PARCELING	FUZZY
100	10	ignorable	1.0000	0.9156	0.9916	1.0000	0.8904	0.9225	1.0000
		moderate	1.0000	0.9098	0.9958	1.0000	0.8883	0.9164	1.0000
		high	1.0000	0.7799	0.9908	1.0000	0.8880	0.9209	1.0000
	20	ignorable	1.0000	0.6948	0.9930	1.0000	0.7738	0.8717	1.0000
		moderate	1.0000	0.6393	0.9962	1.0000	0.7710	0.8722	1.0000
		high	1.0000	0.4370	0.9950	1.0000	0.7716	0.8658	1.0000
	30	ignorable	1.0000	0.5173	0.9955	1.0000	0.6652	0.8421	1.0000
		moderate	1.0000	0.4530	0.9956	1.0000	0.6704	0.8461	1.0000
		high	1.0000	0.2549	0.9945	1.0000	0.6705	0.8239	1.0000
150	10	ignorable	1.0000	0.8384	0.9959	1.0000	0.8766	0.9166	1.0000
		moderate	1.0000	0.8051	0.9941	1.0000	0.8754	0.9274	1.0000
		high	1.0000	0.6646	0.9949	1.0000	0.8816	0.9212	1.0000
	20	ignorable	1.0000	0.5507	0.9935	1.0000	0.7304	0.8632	1.0000
		moderate	1.0000	0.4865	0.9950	1.0000	0.7338	0.8550	1.0000
		high	1.0000	0.3149	0.9945	1.0000	0.7347	0.8539	1.0000
	30	ignorable	1.0000	0.3825	0.9974	1.0000	0.6127	0.8249	1.0000
		moderate	1.0000	0.3254	0.9960	1.0000	0.6057	0.8264	1.0000
		high	1.0000	0.1709	0.9963	1.0000	0.6100	0.8243	1.0000
200	10	ignorable	1.0000	0.7606	0.9953	1.0000	0.8664	0.9125	1.0000
		moderate	1.0000	0.7330	0.9966	1.0000	0.8636	0.9189	1.0000
		high	1.0000	0.5739	0.9939	1.0000	0.8617	0.9141	1.0000
	20	ignorable	1.0000	0.4477	0.9964	1.0000	0.6996	0.8503	1.0000
		moderate	1.0000	0.4002	0.9956	1.0000	0.6953	0.8505	1.0000
		high	1.0000	0.2276	0.9951	1.0000	0.6952	0.8520	1.0000
	30	ignorable	1.0000	0.3061	0.9951	1.0000	0.5636	0.8241	1.0000
		moderate	1.0000	0.2488	0.9950	1.0000	0.5585	0.8186	1.0000
		high	1.0000	0.1264	0.9945	1.0000	0.5594	0.8219	1.0000

4. สรุป

จากผลการทดลอง สรุปได้ว่า ค่า AMSE ของวิธีใส่ค่าสูญหายจะลดลงเมื่อขนาดของตัวอย่างใหญ่ขึ้น และจะมีค่ามากขึ้นเมื่อร้อยละของการสูญหายของข้อมูลเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาผลของระดับของการสูญหายแบบนอนอิงนอร์เรเบิลต่อค่า AMSE พบว่าเมื่อระดับของการสูญหายแบบนอนอิงนอร์เรเบิลเพิ่มขึ้น มีเพียง AMSE ของวิธี MODE เท่านั้นที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาค่า RE โดยเปรียบเทียบ AMSE ของวิธี CC กับวิธีการใส่ค่าสูญหายวิธีอื่น พบว่า วิธี EM และวิธี FUZZY ให้ค่า AMSE เท่ากับ AMSE ของวิธี CC ในขณะที่ AMSE ของวิธีอื่น ๆ มีค่าน้อยกว่า AMSE ของวิธี CC กล่าวคือวิธีการใส่ค่าสูญหายในงานวิจัยนี้มีประสิทธิภาพดีที่สุดได้เทียบเท่ากับวิธี CC เท่านั้น ดังนั้น วิธีการใส่ค่าสูญหายที่ดีที่สุดมีทั้งหมด 3 วิธี วิธี CC วิธี EM และวิธี FUZZY โดยที่ทั้ง 3 วิธีนี้มีประสิทธิภาพที่เท่ากัน

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยความเอาใจใส่ของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุภาพ สมบูรณ์สวัสดิ์ ที่ปรึกษางานวิจัย ที่ได้ให้คำแนะนำ และความเข้าใจถึงความสำคัญของความรู้ที่เกี่ยวกับงานวิจัย ตลอดจนคอยชี้แนะให้บทวนความคิด ข้อบกพร่องต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาในการทำงานวิจัยขึ้นนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Little R.J.A, and Rubin D.A. 1987. Statistical Analysis with Missing Data. John Wiley & Sons.
- [2] Feelders, A.J. 2001. An Overview of Model Based Reject Inference for Credit Scoring.
- [3] Finlay, S. 2012. Credit Scoring, Response Modeling, and Insurance Rating: A practical guide to forecasting consumer behavior second edition. Palgrave Macmillan.
- [4] Siddiqi, Naeem. 2006. Credit Risk Scorecards Developing and Implementing Intelligent Credit Scoring. John Wiley & Sons.
- [5] ภัทธิดา นิลภัทรฉัตร. 2559. การเปรียบเทียบวิธีการประมาณค่าสูญหายแบบนอนอินนอร์เรเบิล ในการวิเคราะห์การถดถอยแบบโลจิสติก. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร.
- [6] Borman, S. 2006. The Expectation Maximization Algorithm a Short tutorial.
- [7] Van Buuren, S. 2018. Flexible Imputation of Missing Data second edition. Chapman & Hall/CRC.
- [8] White, I.R., Royston, P., and Wood, A. M. 2011. Multiple imputation using chained equations: Issues and guidance for practice. Statistics in medicine, 30(4), 377-399.

แบบจำลองเภสัชจลนศาสตร์เชิงสรีรวิทยาในการคาดการณ์เภสัชจลนศาสตร์
บริเวณอวัยวะเป้าหมายของสารเจนิสตินและเมแทบอลิต์ในหนูPhysiologically based pharmacokinetic modeling to simulate tissue-specific
pharmacokinetics of genistein and its metabolites in rats for targeted treatmentอาชัยวิชัย สุภูมิตรกฤษณะ¹ ธิตินันท์ กุลศิริรัตน์² ตุลยา โพธารส² นวพร อาดำ³ อาณัฐชัย ม้ายอุเทศ^{4,5} น้ำฝน อัครกิจกุลโรจน์⁶
และ พัชรวิทย์ รักษ์ทอง^{3,7,*}Archanwit Supamitkitsana¹, Thitianan Kulsirirat², Tulaya Potaros², Nawaporn Adum³, Arnatchai Maiuthed^{4,5}, Namfon Assawakitkulroj⁶
and Pattarawit Rukthong^{3,7,*}¹คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ จังหวัดนครนายก นครนายก²สาขาวิชาชีวเภสัชศาสตร์ คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ จังหวัดนครนายก นครนายก³ศูนย์เพื่อความเป็นเลิศทางวิจัยด้านนวัตกรรมพืชและสมุนไพร สถาบันยุทธศาสตร์ทางปัญญาและวิจัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ จังหวัดกรุงเทพมหานคร กรุงเทพมหานคร⁴ภาควิชาเภสัชวิทยา คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล จังหวัดกรุงเทพมหานคร กรุงเทพมหานคร⁵ศูนย์ชีวเภสัชศาสตร์เพื่อสุขภาพวัยชรา คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล จังหวัดกรุงเทพมหานคร กรุงเทพมหานคร⁶กรมการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศและสิ่งแวดล้อม จังหวัดกรุงเทพมหานคร กรุงเทพมหานคร⁷สาขาวิชาเทคโนโลยีเภสัชกรรม มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ จังหวัดนครนายก นครนายก¹Faculty of pharmacy, Srinakharinwirot University, Nakhonnayok²Department of Biopharmacy, Faculty of Pharmacy, Srinakharinwirot University, Nakhonnayok³Center for Excellence in Plant and Herbal Innovation Research, Strategic Wisdom and Research Institute, Bangkok⁴Department of Pharmacology, Faculty of Pharmacy, Mahidol University, Bangkok⁵Centre of Biopharmaceutical Science for Healthy Ageing, Faculty of Pharmacy, Mahidol University, Bangkok⁶Department of Climate Change and Environment, Bangkok⁷Department of Pharmaceutical Technology, Faculty of Pharmacy, Srinakharinwirot University, Nakhonnayok

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

บทคัดย่อ

เจนิสตินเป็นสารพฤกษเคมีมักพบในผลิตภัณฑ์ที่มีถั่วเหลืองเป็นส่วนประกอบ และพบในเถาวัลย์เปรียงซึ่งเป็นสมุนไพรในบัญชียาหลักแห่งชาติของประเทศไทย จากการศึกษาก่อนหน้านี้ยังไม่ทราบปริมาณที่เหมาะสมของเจนิสตินในการรักษาโรคมะเร็งลำไส้เล็ก ดังนั้นเภสัชจลนศาสตร์จึงมีความสำคัญในการอธิบายการสะสมของเจนิสตินและเมแทบอลิต์ในพลาสมาและอวัยวะเป้าหมาย การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองเภสัชจลนศาสตร์เชิงสรีรวิทยาของสารเจนิสตินและเมแทบอลิต์ในหนูทดลอง เพื่อคาดการณ์ความเข้มข้นต่อเวลา แบบจำลองประกอบด้วย 9 อวัยวะ (ปอด, สมอ, หัวใจ, ไต, ตับ, กระเพาะอาหาร, ลำไส้เล็ก, ลำไส้ใหญ่ และอวัยวะที่มีเลือดไปเลี้ยงน้อย) การเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการทดลองและจากการคาดการณ์โดยใช้แบบจำลอง พบว่าพื้นที่ใต้กราฟ (AUC) และความเข้มข้นสูงสุด (C_{max}) ของสารเจนิสตินและเมแทบอลิต์ในพลาสมา มีค่าแตกต่างกันไม่เกิน 2 เท่า และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ของความเข้มข้นต่อเวลาที่อวัยวะเป้าหมายอยู่ในช่วง 0.008 ถึง 0.98 โดยมี 7 อวัยวะที่มีค่ามากกว่า 0.6 นอกจากนี้การขับออกทางปัสสาวะและอุจจาระมีค่า R^2 เท่ากับ 0.84 และ 0.98 ตามลำดับ ดังนั้นสรุปได้ว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นมีประสิทธิภาพในการคาดการณ์ความเข้มข้นต่อเวลาในพลาสมาและอวัยวะเป้าหมายส่วนใหญ่ได้ รวมถึงยังสามารถคาดการณ์การขับออกของเจนิสตินและเมแทบอลิต์ อย่างไรก็ตามยังคงต้องการการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าเพื่อพัฒนาแบบจำลองให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

คำสำคัญ: แบบจำลองเภสัชจลนศาสตร์เชิงสรีรวิทยา, เจนิสติน, มะเร็ง, การคำนวณทางคอมพิวเตอร์

Abstract

Genistein is a phytochemical found primarily in soybean products and also in *Derris scandens*, a Thai traditional herb. Previous studies haven't investigated the appropriate dose for inhibiting cancer. Understanding the pharmacokinetic of genistein and its metabolites is crucial for explaining their accumulation in plasma and target tissues. This study aimed to develop the physiologically based pharmacokinetic (PBPK) model for genistein and its metabolites in rats to predict concentration-time profiles in plasma and target tissues. The PBPK model

included eight compartments (lung, brain, heart, kidney, liver, stomach, small intestine, large intestine, and slowly perfused organ). The model's performance was evaluated by comparing observed data with simulation data in plasma and tissues. The plasma pharmacokinetic profile of genistein and its metabolites, including area under the curve (AUC) and maximum concentration (C_{max}), was within 2-fold, and the concentration-time profile in target tissues showed good agreement with a determination coefficient (R^2) ranging from 0.008 to 0.98. Seven organs had R^2 values greater than 0.6, indicating satisfactory model performance. The excretions of genistein in urine and feces also showed good agreement between observed and simulated data, with R^2 values of 0.84 and 0.98, respectively. In conclusion, the developed PBPK model can predict both the plasma concentration-time profile and the accumulation of genistein in most organs. However, further studies are needed to refine the unknown value parameters and complete the model.

Keywords: Physiologically based pharmacokinetic modeling, Genistein, Cancer, *In silico* study

1. บทนำ

ในปี ค.ศ. 2020 The internal Agency for research on cancer ระบุว่า ประชากรมากกว่า 19 ล้านคนทั่วโลกถูกวินิจฉัยว่าเป็นโรคมะเร็งและอัตราการเสียชีวิตสูงถึง 9.9 ล้านคน [1] ในปัจจุบันยาเคมีบำบัดในการรักษาโรคมะเร็งยังคงให้ผลการรักษาที่ไม่แน่นอนรวมถึงยังมีผลข้างเคียงที่รุนแรง [2] มีค่าใช้จ่ายสูงรวมถึงเสียเวลาในการเดินทางเพื่อมาเข้ารับการรักษาที่โรงพยาบาล ดังนั้นการค้นหายาหรือยาในการรักษาโรคมะเร็งจึงมีความจำเป็นเพื่อใช้แทนหรือใช้ควบคู่ไปกับยาเคมีบำบัด เพื่อลดอาการไม่พึงประสงค์จากการใช้ยาเคมีบำบัด ลดค่าใช้จ่ายในการรักษา และเพิ่มโอกาสในการเข้าถึงยาในการรักษามะเร็งของผู้ป่วย

สารเจนิสตินเป็นสารในกลุ่ม Isoflavones มักพบในถั่วเหลืองอีกทั้งยังพบในเถาวัลย์เปรียง (*Derris scandens*) ซึ่งเป็นสมุนไพรในบัญชียาหลักแห่งชาติของประเทศไทย [3] โดยเจนิสตินที่พบทั่วไปในธรรมชาติจะอยู่ในรูป Glycoside แต่หลังจากการรับประทานเจนิสตินจะถูก Hydrolysis อย่างรวดเร็วได้เป็นเจนิสตินในรูป Aglycone ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีฤทธิ์ทางเภสัชวิทยา [4]

เจนิสตินถูกดูดซึมที่บริเวณลำไส้เล็กและลำไส้ใหญ่ และจะถูกเปลี่ยนแปลงที่ลำไส้เล็กและตับเป็นสารเมแทบอลิต์ โดยเมแทบอลิต์ 2 ชนิดที่พบมากที่สุดคือ Genistein-7-glucuronide (G-7-G) และ Genistein-4'-sulfate (G-4'-S) ตามลำดับ และหลังจากผ่านเข้าสู่ตับ พบว่ามีเฉพาะ G-7-G ที่ถูกกำจัดออกผ่านทางเดินน้ำดีเข้าสู่ลำไส้เล็กอีกครั้งเรียกกระบวนการนี้ว่า Enterohepatic circulation ทำให้พบ Double peak ของความเข้มข้นของ Genistein ในพลาสมา และเจนิสตินจะถูกกำจัดออกจากร่างกายผ่านทางปัสสาวะ และอุจจาระ [4,5]

การศึกษาของ Spagnuolo C และคณะ [6] พบว่าสารเจนิสตินมีความสามารถในการยับยั้งเซลล์มะเร็งหลายชนิดในหลอดทดลอง และสัตว์ทดลอง เช่น มะเร็งตับ มะเร็งกระเพาะอาหาร มะเร็งปอด มะเร็งลำไส้ใหญ่และทวารหนัก และมะเร็งเต้านม ผ่านกลไกหลัก คือ การยับยั้งกระบวนการแบ่งเซลล์ และการเหนี่ยวนำกระบวนการตายของเซลล์อย่างเป็นระบบ แต่ยังคงไม่มีการศึกษาที่ระบุปริมาณหรือขนาดยาที่เหมาะสมในการรักษาโรคมะเร็งต่าง ๆ ดังกล่าว ดังนั้นเภสัชจลนศาสตร์จึงมีความจำเป็นในการอธิบายกระบวนการดูดซึม (Absorption), การกระจายยา (Distribution), การสร้างหรือสลาย (Metabolism) และการขับออก (Excretion) ที่เกิดขึ้นในร่างกายหลังได้รับสารเจนิสตินเพื่อศึกษาปริมาณของเจนิสตินในพลาสมาและอวัยวะเป้าหมาย

แบบจำลองเภสัชจลนศาสตร์เชิงสรีรวิทยา (Physiologically based pharmacokinetic model : PBPK model) เป็นการทำจำลองสรีรวิทยาของสิ่งมีชีวิตโดยใช้ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ในการคำนวณสมการทางคณิตศาสตร์โดยใช้ข้อมูลเกี่ยวกับเภสัชจลนศาสตร์และสรีรวิทยาของสิ่งมีชีวิตเพื่อคาดการณ์ความเข้มข้นของยาต่อเวลาในเลือด และในอวัยวะเป้าหมาย [7] ซึ่งทำให้สามารถคาดการณ์ขนาดยาที่เหมาะสมสำหรับการใช้ Genistein ในการรักษาโรคมะเร็ง เพื่อให้มีความเข้มข้นของ Genistein บริเวณอวัยวะเป้าหมายที่เป็นโรคมะเร็งสูงกว่าค่า 50% Inhibitory concentration (IC_{50}) จากการศึกษาในหลอดทดลอง

วัตถุประสงค์ของการศึกษาเพื่อพัฒนาแบบจำลองเภสัชจลนศาสตร์เชิงสรีรวิทยาของสารเจนิสตินและเมแทบอลิต์ในการคาดการณ์ความเข้มข้นต่อเวลาของสารเจนิสตินและเมแทบอลิต์ในพลาสมาและอวัยวะเป้าหมาย 8 อวัยวะ ประกอบด้วย ปอด, สมอง, หัวใจ, ไต, ตับ, กระเพาะอาหาร, ลำไส้เล็ก และลำไส้ใหญ่

2. วิธีการศึกษา

2.1 รูปแบบการศึกษา

การศึกษานี้เป็นการศึกษาเชิงทดลอง (Experimental study) โดยสร้างแบบจำลองผ่านซอฟต์แวร์ Berkeley Madonna version 10.6.1 พัฒนาโดย Robert Macey และ George Oster มหาวิทยาลัย University of California at Berkeley

2.2 โครงสร้างของแบบจำลองเภสัชจลนศาสตร์เชิงสรีรวิทยาในหนูทดลอง

แบบจำลองในการศึกษานี้เป็นแบบจำลองเภสัชจลนศาสตร์เชิงสรีรวิทยาแบบย่อเนื่องจากการรวมอวัยวะโดยมีการรวมอวัยวะที่เลือดไปเลี้ยงน้อยเข้าไว้ด้วยกัน แบบจำลองประกอบด้วย 9 อวัยวะ ได้แก่ ปอด, สมอง, หัวใจ, ไต, ตับ, กระเพาะอาหาร, ลำไส้เล็ก, ลำไส้ใหญ่ และอวัยวะที่มีเลือดไปเลี้ยงน้อย สำหรับเจนิสทินและเมแทบอลิต์ 2 ชนิดประกอบด้วย Genistein-7-glucuronide และ Genistein-4'-sulfate โดยใช้ทฤษฎีจลนศาสตร์ของการจำกัดอัตราการซึมผ่าน (Perfusion rate-limited kinetics) ในการอธิบายการกระจายของยาในแต่ละอวัยวะเนื่องจากเจนิสทินเป็นสารที่มีขนาดเล็กและละลายได้ดีในไขมัน

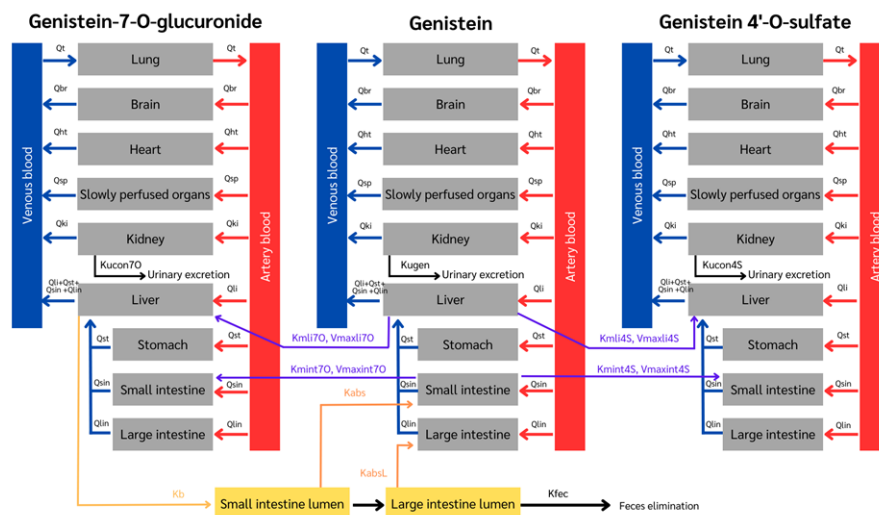


Figure 1 Model structure of genistein and its metabolites (G-7-G, G-4'-S).

2.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลอง

2.3.1 พารามิเตอร์ทางสรีรวิทยา

พารามิเตอร์ทางสรีรวิทยาสำหรับการประยุกต์ใช้ในแบบจำลองเภสัชจลนศาสตร์เชิงสรีรวิทยาของสิ่งมีชีวิตรวบรวมจากการศึกษาของ Brown RP และคณะ [8] และปริมาณเลือดที่ไปเลี้ยงบริเวณทางเดินอาหารรวบรวมจากการศึกษาของ Delp MD และคณะ [9] ดัง Table 1

Table 1 Physiological parameters of rats

Organs	Weight fraction (W)	Specific gravity (D)	Volume fraction (V)	Blood flow fraction (Q)
Brain	0.57	1.030	0.55	2.00
Heart	0.33	1.030	0.32	4.90
Kidney	0.73	1.050	0.70	14.10
Liver	3.66	1.000	3.66	2.40
Lung	0.50	1.045	0.48	2.10
Stomach	0.46	1.048	0.44	1.62
Small intestine	1.40	1.041	1.34	8.35
Large intestine	0.84	1.040	0.81	5.12
Slowly perfused organs	-	-	84.35 ^a	59.40 ^a
Artery	1.85	-	1.85	100.00
Vein	5.50	-	5.50	100.00

^a Calculated from $100 - \sum V/Q_{organs}$

2.3.2 พารามิเตอร์ทางเคมีกายภาพ

พารามิเตอร์ทางเคมีกายภาพของสารเจนิสทินและเมแทบอลิต์ (G-7-G และ G-4'-S) ได้จากการคาดการณ์ผ่านซอฟต์แวร์ ADMET predictor™ version 11 พัฒนาโดยบริษัท Simulations plus และค่าสัมประสิทธิ์การกระจายระหว่างความเข้มข้นของสารในเลือดและในอวัยวะ (Tissue-to-plasma partition coefficient) ได้จากการคำนวณจากการศึกษาของ Poulin P และคณะ [10] ดัง Table 2

Table 2 Physiochemical parameters of genistein, G-7-G and G-4'-S

Parameters	Genistein	G-7-G	G-4'-S
Fraction unbound (fu) ^a	6 %	13 %	9 %
Partition coefficient (Log P) ^a	2.42	0.38	0.29
Distribution coefficient (Log D) ^a	1.81	-1.58	0.10
Tissue to plasma partition coefficients^b			
Brain to plasma (Pbr)	5.76	0.56	1.05
Heart to plasma (Pht)	2.03	0.49	0.62
Kidney to plasma (Pki)	2.35	0.49	0.66
Liver to plasma (Pli)	2.53	0.46	0.64
Lung to plasma (Plu)	2.88	0.51	0.72
Stomach to plasma (Pst)	3.57	0.49	0.78
Small intestine to plasma (Psin)	3.57	0.49	0.78
Large intestine to plasma (Plin)	3.57	0.49	0.78
Slowly perfused organs to plasma (Psp)	2.09	0.44	0.59

^a Data from ADMET predictor software^b Data from calculated by syntax from Pouline et al. [10]

2.3.3 พารามิเตอร์ทางชีวเคมี

ได้พารามิเตอร์ซึ่งเกี่ยวข้องกับกระบวนการเมแทบอลิซึมของเจนิสตินและสารเมแทบอลิต์รวบรวมจากการศึกษาของ Islam MA และคณะ [11] และพารามิเตอร์ทางชีวเคมีที่ไม่ทราบค่าได้จากการประมาณโดยใช้ซอฟต์แวร์ Berkeley Madonna พารามิเตอร์ทางเคมีกายภาพที่ใช้ในแบบจำลองดัง Table 3

Table 3 Physiochemical parameters of genistein, G-7-G and G-4'-S

Parameters	Value
Absorption^a	
Small intestine absorption rate constant (Kabs)	0.949 hr ⁻¹
Large intestine absorption rate constant (Kabl)	0.025 hr ⁻¹
Transfer rate constant from small intestine to large intestine (Kgi)	7.24 hr ⁻¹
Metabolism	
Small intestine	
Maximum velocity of glucuronidation genistein to G-7-G (VmaxinG7G)	2.8 µmol/L
Michaelis-Menten constant of glucuronidation genistein to G-7-G (KminG7G)	32.21 µmol/h
Maximum velocity of sulfation genistein to G-4'-G (VmaxinG4S)	35.44 µmol/L
Michaelis-Menten constant of sulfation genistein to G-4'-G (KminG4S)	0.09 µmol/h
Liver	
Maximum velocity of glucuronidation genistein to G-7-G (VmaxliG7G)	51.6 µmol/L
Michaelis-Menten constant of glucuronidation genistein to G-7-G (Kmlig7G)	480.46 µmol/h
Maximum velocity of sulfation genistein to G-4'-G (VmaxliG4S)	33.04 µmol/L
Michaelis-Menten constant of sulfation genistein to G-4'-G (Kmlig4S)	12.25 µmol/h
Excretion^a	
Biliary excretion rate constant of G-7-G (Kb)	0.92 hr ⁻¹
Feces excretion rate constant of genistein (Kfec)	0.01686 hr ⁻¹
Urinary excretion rate constant of genistein (KuG)	0.00229 hr ⁻¹
Urinary excretion rate constant of G-7-G (KuG7G)	1.41 hr ⁻¹
Urinary excretion rate constant of G-4'-S (KuG4S)	0.11 hr ⁻¹

^a Optimized data using Berkeley Madonna software by fitting with data from Coldham et al. [12]

2.4 สมการที่ใช้ในแบบจำลอง

สมการที่ 1-2 แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารเจนิสตินและเมแทบอลิต์ที่ปอด

$$\frac{dA_{i,lu}}{dt} = Qt * (C_{i,v} - \frac{C_{i,lu}}{P_{i,lu}}) \quad (1)$$

$$Qt = 14.1 * BW^{0.75} \quad (2)$$

$A_{i,lu}$ หมายถึง ปริมาณของสาร i ในปอด (µmol)

Q_t หมายถึง ปริมาณเลือดที่ไหลออกจากหัวใจ (L/hr)

$C_{i,v}$ หมายถึง ความเข้มข้นของสาร i ในหลอดเลือดดำ (µg/L)

$C_{i,lu}$ หมายถึง ความเข้มข้นของสาร i ในปอด (µg/L)

$P_{i,lu}$ หมายถึง สัมประสิทธิ์การกระจายของสาร i ระหว่างเลือดและปอด

BW หมายถึง น้ำหนักตัวของหนูทดลอง (kg)

สมการที่ 3 แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงของสารเจนิสตินและเมแทบอลิต์ที่สมอง, หัวใจ, กระเพาะอาหาร และอวัยวะที่มีเลือดไปเลี้ยงน้อย

$$\frac{dA_{i,j}}{dt} = Q_j * (C_{i,af} - \frac{C_{i,j}}{P_{i,j}}) \quad (3)$$

$A_{i,j}$ หมายถึง ปริมาณของสาร i ในอวัยวะ j (μmol)

Q_j หมายถึง ปริมาณเลือดที่ไปเลี้ยงอวัยวะ j (L/hr)

$C_{i,af}$ หมายถึง ความเข้มข้นของสาร i ในรูปอิสระในหลอดเลือดแดง ($\mu\text{g/L}$)

$C_{i,j}$ หมายถึง ปริมาณของสาร i ที่อวัยวะ j ($\mu\text{g/L}$)

$P_{i,j}$ หมายถึง สัมประสิทธิ์การกระจายของสาร i ระหว่างเลือดและอวัยวะ j

สมการที่ 4-7 แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงของสารเจนิสตินและเมแทบอลิต์ที่ลำไส้เล็ก

$$\frac{dA_{gen,sin}}{dt} = Q_{sin} * (C_{gen,af} - \frac{C_{gen,sin}}{P_{gen,sin}}) + (K_{abs} * A_{gen,sin}) - Intmet7G - Intmet4S \quad (4)$$

$$intmet7G = \frac{V_{maxsin7G} * C_{gen,sin}}{K_{msin7G} + C_{gen,sin}} \quad (5)$$

$$intmet4S = \frac{V_{maxsin4S} * C_{gen,sin}}{K_{msin4S} + C_{gen,sin}} \quad (6)$$

$$\frac{dA_{m,sin}}{dt} = Q_{sin} * (C_{m,af} - \frac{C_{m,sin}}{P_{m,sin}}) + Intmet7G/4S \quad (7)$$

$A_{gen,sin}$ หมายถึง ปริมาณของสาร genistein ในลำไส้เล็ก (μmol)

Q_{sin} หมายถึง ปริมาณเลือดที่ไปเลี้ยงลำไส้เล็ก (L/hr)

$C_{gen,af}$ หมายถึง ความเข้มข้นของสาร genistein ในรูปอิสระในหลอดเลือดแดง ($\mu\text{g/L}$)

$C_{gen,sin}$ หมายถึง ความเข้มข้นของ genistein ในลำไส้เล็ก ($\mu\text{mol/L}$)

$P_{gen,sin}$ หมายถึง สัมประสิทธิ์การกระจายของสาร genistein ระหว่างเลือดและลำไส้เล็ก

K_{abs} หมายถึง ค่าคงที่การดูดซึมของสาร genistein บริเวณลำไส้เล็ก (hr^{-1})

$Intmet7G/4S$ หมายถึง genistein ที่เปลี่ยนแปลงเป็น G-7-G หรือ G-4'-S ที่ลำไส้เล็ก ($\mu\text{mol/hr}$)

$V_{maxsin7G/4S}$ หมายถึง ความเร็วสูงสุดในการทำงานของเอนไซม์ที่ลำไส้เล็กในการเปลี่ยน

genistein เป็น G-7-G และ G-4'-S ($\mu\text{mol/hr}$)

$K_{msin7G/4S}$ หมายถึง ค่าคงที่ Michaelis-Menten การทำงานของเอนไซม์ที่ลำไส้เล็กในการเปลี่ยน genistein เป็น G-7-G และ G-4'-S ($\mu\text{mol/L}$)

$A_{m,sin}$ หมายถึง ปริมาณของสารเมแทบอลิต์ m ในลำไส้เล็ก (μmol)

$C_{m,af}$ หมายถึง ความเข้มข้นของสารเมแทบอลิต์ m ในรูปอิสระในหลอดเลือดแดง ($\mu\text{mol/L}$)

$C_{m,j}$ หมายถึง ปริมาณของสารเมแทบอลิต์ m ที่อวัยวะ j ($\mu\text{mol/L}$)

$P_{m,j}$ หมายถึง สัมประสิทธิ์การกระจายของสารเมแทบอลิต์ m ระหว่างเลือดและอวัยวะ j

สมการที่ 8-9 แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงของสารเจนิสตินและเมแทบอลิต์ที่ลำไส้ใหญ่

$$\frac{dA_{gen,lin}}{dt} = Q_{lin} * (C_{gen,af} - \frac{C_{gen,lin}}{P_{gen,lin}}) + (K_{abl} * A_{gen,lin}) \quad (8)$$

$$\frac{dA_{m,lin}}{dt} = Q_{lin} * (C_{m,af} - \frac{C_{m,lin}}{P_{m,lin}}) \quad (9)$$

$A_{gen,lin}$ หมายถึง ปริมาณของสาร genistein ในลำไส้ใหญ่ (μmol)

Q_{lin} หมายถึง ปริมาณเลือดที่ไปเลี้ยงลำไส้ใหญ่ (L/hr)

$C_{gen,lin}$ หมายถึง ความเข้มข้นของ genistein ในลำไส้ใหญ่ ($\mu\text{mol/L}$)

$P_{gen,lin}$ หมายถึง สัมประสิทธิ์การกระจายของสาร genistein ระหว่างเลือดและลำไส้ใหญ่

K_{abl} หมายถึง ค่าคงที่การดูดซึมของสาร genistein บริเวณลำไส้ใหญ่ (hr^{-1})

$A_{m,lin}$ หมายถึง ปริมาณของสารเมแทบอลิต์ m ในลำไส้ใหญ่ (μmol)

$C_{m,af}$ หมายถึง ความเข้มข้นของสารเมแทบอลิต์ m ในรูปอิสระในหลอดเลือดแดง ($\mu\text{mol/L}$)

$C_{m,lin}$ หมายถึง ปริมาณของสารเมแทบอลิต์ m ที่ลำไส้ใหญ่ ($\mu\text{mol/L}$)

$P_{m,lin}$ หมายถึง สัมประสิทธิ์การกระจายของสารเมแทบอลิต์ m ระหว่างเลือดและลำไส้ใหญ่

สมการที่ 10-14 แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงของสารเจนิสตินและเมแทบอลิต์ที่ตับ

$$\frac{dA_{gen,li}}{dt} = (Q_{li} * C_{gen,af}) + \left(Q_{st} * \frac{C_{gen,st}}{P_{gen,st}} \right) + \left(Q_{sin} * \frac{C_{gen,sin}}{P_{gen,sin}} \right) + \left(Q_{lin} * \frac{C_{gen,lin}}{P_{gen,lin}} \right) - \left((Q_{li} + Q_{st} + Q_{sin} + Q_{lin}) * \frac{C_{gen,li}}{P_{gen,li}} \right) - Limet7G - Limet4S \quad (10)$$

$$Limet7G = \frac{V_{maxli7G} * C_{gen,li}}{K_{mli7G} + C_{gen,li}} \quad (11)$$

$$Limet4S = \frac{V_{maxli4S} * C_{gen,li}}{K_{mli4S} + C_{gen,li}} \quad (12)$$

$$\frac{dA_{m,li}}{dt} = (Q_{li} * C_{m,af}) + \left(Q_{st} * \frac{C_{m,st}}{P_{m,st}} \right) + \left(Q_{sin} * \frac{C_{m,sin}}{P_{m,sin}} \right) + \left(Q_{lin} * \frac{C_{m,lin}}{P_{m,lin}} \right) - \left((Q_{li} + Q_{st} + Q_{sin} + Q_{lin}) * \frac{C_{m,li}}{P_{m,li}} \right) + Limet7G/4S - Bilemet \quad (13)$$

$$Bilemet = K_b * A_{7G,li} \quad (14)$$

$A_{gen,li}$ หมายถึง ปริมาณของสาร genistein ตับ (μmol)

Q_{li} หมายถึง ปริมาณเลือดที่ไปเลี้ยงตับ (L/hr)

Q_{st} หมายถึง ปริมาณเลือดที่ไปเลี้ยงกระเพาะอาหาร (L/hr)

$C_{gen,st}$ หมายถึง ความเข้มข้นของ genistein ในกระเพาะอาหาร ($\mu\text{mol/L}$)

$P_{gen,st}$ หมายถึง สัมประสิทธิ์การกระจายของสาร genistein ระหว่างเลือดและกระเพาะอาหาร

$C_{gen,li}$ หมายถึง ความเข้มข้นของ genistein ในตับ ($\mu\text{mol/L}$)

$P_{gen,li}$ หมายถึง สัมประสิทธิ์การกระจายของสาร genistein ระหว่างเลือดและตับ

$Limet7G/4S$ หมายถึง genistein ที่เปลี่ยนแปลงเป็น G-7-G หรือ G-4'-S ที่ตับ ($\mu\text{mol/hr}$)

$V_{maxli7G/4S}$ หมายถึง ความเร็วสูงสุดในการทำงานของเอนไซม์ที่ตับในการเปลี่ยน genistein เป็น G-7-G และ G-4'-S ($\mu\text{mol/hr}$)

$K_{mli7G/4S}$ หมายถึง ค่าคงที่ Michaelis-Menten การทำงานของเอนไซม์ที่ตับในการเปลี่ยน genistein เป็น G-7-G และ G-4'-S ($\mu\text{mol/L}$)

$A_{m,li}$ หมายถึง ปริมาณของสารเมแทบอลิต์ m ที่ตับ (μmol)

$C_{m,st}$ หมายถึง ปริมาณของสารเมแทบอลิต์ m ที่กระเพาะอาหาร ($\mu\text{mol/L}$)

$P_{m,st}$ หมายถึง สัมประสิทธิ์การกระจายของสารเมแทบอลิต์ m ระหว่างเลือดและกระเพาะอาหาร

$C_{m,li}$ หมายถึง ปริมาณของสารเมแทบอลิต์ m ที่ตับ ($\mu\text{mol/L}$)

$P_{m,li}$ หมายถึง สัมประสิทธิ์การกระจายของสารเมแทบอลิต์ m ระหว่างเลือดและตับ

$Bilemet$ หมายถึง G-7-G ที่ถูกกำจัดผ่านทางเดินน้ำดี ($\mu\text{mol/hr}$)

K_b หมายถึง ค่าคงที่การกำจัด G-7-G ผ่านทางเดินน้ำดี (hr^{-1})

$A_{7G,li}$ หมายถึง ปริมาณ G-7-G ในตับ (μmol)

สมการที่ 15 แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงของสารเจนิสตินและเมแทบอลิต์ที่ไต

$$\frac{dA_{i,ki}}{dt} = Q_{ki} * \left(C_{i,af} - \frac{C_{i,ki}}{P_{i,ki}} \right) - (K_{ui} * A_{i,ki}) \quad (15)$$

$A_{i,ki}$ หมายถึง ปริมาณของสาร i ที่ไต (μmol)

Q_{ki} หมายถึง ปริมาณเลือดที่ไปเลี้ยงไต (L/hr)

$C_{i,ki}$ หมายถึง ปริมาณของสาร i ที่ไต ($\mu\text{mol/L}$)

$P_{i,ki}$ หมายถึง สัมประสิทธิ์การกระจายของสาร i ระหว่างเลือดและไต

K_{ui} หมายถึง อัตราการกำจัดสาร i ผ่านทางปัสสาวะ (hr^{-1})

สมการที่ 16 แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงของสารที่บริเวณลูเมนของลำไส้เล็ก

$$\frac{dA_{gen, sinlu}}{dt} = Bilemet - (Kabs * A_{gen, sinlu}) - (Kgi * A_{gen, sinlu}) \quad (16)$$

$A_{gen, sinlu}$ หมายถึง ปริมาณของสาร genistein ที่ลูเมนของลำไส้เล็ก (μmol)

$Kabs$ หมายถึง อัตราการดูดซึมสาร genistein บริเวณลูเมนของลำไส้เล็ก (hr^{-1})

Kgi หมายถึง อัตราการเคลื่อนที่ของ genistein จากลำไส้เล็กสู่ลำไส้ใหญ่ (hr^{-1})

สมการที่ 17-18 แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงของสารที่บริเวณลูเมนของลำไส้ใหญ่

$$\frac{dA_{gen, linlu}}{dt} = (Kgi * A_{gen, linlu}) - fecmet \quad (17)$$

$$fecmet = Kfec * A_{linlu} \quad (18)$$

$A_{gen, linlu}$ หมายถึง ปริมาณของสาร genistein ที่ลูเมนของลำไส้ใหญ่ (μmol)

$Fecmet$ หมายถึง genistein ที่ถูกกำจัดทางอุจจาระ ($\mu\text{mol/hr}$)

$Kfec$ หมายถึง ค่าคงที่กำจัดสาร genistein ทางอุจจาระ (hr^{-1})

สมการที่ 19-21 แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงของสารที่บริเวณหลอดเลือดดำ

$$\frac{dA_{i, at}}{dt} = Qt * \left(\frac{C_{i, lu}}{P_{i, lu}} - C_{i, at} \right) \quad (19)$$

$$C_{i, af} = f_{i, u} * C_{i, at} \quad (20)$$

$$C_{i, ab} = C_{i, at} - C_{i, af} \quad (21)$$

$C_{i, at}$ หมายถึง ความเข้มข้นทั้งหมดของสาร i ในหลอดเลือดแดง ($\mu\text{g/L}$)

$C_{i, af}$ หมายถึง ความเข้มข้นของสาร i อิสระในหลอดเลือดแดง ($\mu\text{g/L}$)

$f_{i, u}$ หมายถึง ร้อยละของสาร i อิสระในหลอดเลือดแดง (%)

$C_{i, ab}$ หมายถึง ความเข้มข้นของสาร i ที่จับกับโปรตีนในหลอดเลือดแดง ($\mu\text{g/L}$)

สมการที่ 22 แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงของสารที่บริเวณหลอดเลือดดำ

$$\frac{dA_{i, v}}{dt} = \left((Qki * \frac{C_{i, ki}}{P_{i, ki}} + Qbr * \frac{C_{i, br}}{P_{i, br}} + Qht * \frac{C_{i, ht}}{P_{i, ht}} + \right. \\ \left. ((Qli + Qst + Qsint + Qlint) * \frac{C_{i, li}}{P_{i, li}}) + Qsp * \frac{C_{i, sp}}{P_{i, sp}} \right) + (C_{gen, ab} * Qt) - (Qt * C_{i, v}) \quad (22)$$

$A_{i, v}$ หมายถึง ปริมาณทั้งหมดของสาร i ในหลอดเลือดดำ (μmol)

2.5 การศึกษาที่นำมาใช้เปรียบเทียบในการสร้างแบบจำลอง

การศึกษาที่นำมาใช้ประมาณค่าพารามิเตอร์ไม่ทราบค่าในการสร้างแบบจำลอง คือการศึกษาของ Coldham และคณะ [12] ทำการศึกษาเภสัชจลนศาสตร์ของสารเจนิสทินในหนูทดลอง โดยหนูทดลองที่ใช้ในการศึกษามีน้ำหนักตัวอยู่ในช่วง 250-300 g ได้รับ Genistein ขนาด 4 mg/kg ทางการรับประทาน จากนั้นวัดระดับของสาร Genistein ที่ติดสารถามันตรังสีตามรอย C^{14} ที่เวลาต่าง ๆ บริเวณพลาสมา, อวัยวะต่าง ๆ และรวมถึงวัดร้อยละปริมาณที่ถูกขับออกทางปัสสาวะและอุจจาระต่อขนาดที่ได้รับ และรวบรวมข้อมูลจากกราฟในการศึกษาผ่านซอฟต์แวร์ digitize version 2.5.9 พัฒนาโดยบริษัท Bormisof

2.6 สถิติที่ใช้ในการประเมินแบบจำลอง

การประเมินแบบจำลองเภสัชจลนศาสตร์เชิงสรีรวิทยาในการศึกษานี้ประกอบด้วย การประเมินตามแนวทางของ World Health Organization (WHO) [13] โดยใช้ 2-fold metrics system โดยระบุไว้ว่าค่าพารามิเตอร์ทางเภสัชจลนศาสตร์ได้แก่ AUC , C_{max} และ T_{max} จากคาดการณ์โดยแบบจำลองควรมีค่าแตกต่างจากการศึกษาที่นำมาเปรียบเทียบไม่เกิน 2 เท่า และการประเมินโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ตามการประเมินของ Ozil PK และคณะ [14,15] ซึ่งได้ระบุว่าค่า R^2 สำหรับการศึกษาทางวิทยาศาสตร์ควรมีค่ามากกว่า 0.6

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 การคาดการณ์พารามิเตอร์ทางเภสัชจลนศาสตร์

ค่าพารามิเตอร์ทางเภสัชจลนศาสตร์ของสารเจนิสตินและเมแทบอลิต์ทั้ง 3 ค่าประกอบด้วย AUC, C_{max} , T_{max} ซึ่งได้จากการคาดการณ์โดยใช้แบบจำลองเท่ากับ 14024.69, 2466.23 $\mu\text{g/L}$ และ 0.2762 hr ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองพบว่ามีค่าเป็น 1.009, 1.096 และ 1.810 เท่าตามลำดับ ดัง Table 4

Table 4 Pharmacokinetic parameters predicted by PBPK model

Parameters	Simulated data	Experimental data ^[12]	Fold	% prediction error
AUC	14024.69	14147.00	1.009	0.86
C_{max} ($\mu\text{g/L}$)	2466.23	2250.00	1.096	9.61
T_{max} (hr)	0.2762	0.5000	1.810	44.76

จากการเปรียบเทียบผลการศึกษาพารามิเตอร์ทางเภสัชจลนศาสตร์ทั้ง 3 ค่าประกอบด้วย AUC, C_{max} , T_{max} ที่ได้จากการคาดการณ์โดยแบบจำลองมีค่าแตกต่างจากค่าที่ได้จากการทดลองจากการศึกษาของ Coldham และคณะ [12] ไม่เกิน 2 เท่าตามแนวทางการประเมินแบบจำลองของ WHO กล่าวคือผลจากการคาดการณ์ความเข้มข้นของพลาสมาต่อเวลาของสารเจนิสตินและเมแทบอลิต์โดยแบบจำลองที่สร้างขึ้นมีความแม่นยำ

3.2 การคาดการณ์ความเข้มข้นต่อเวลาของสารเจนิสตินและเมแทบอลิต์

ผลการใช้แบบจำลองเภสัชจลนศาสตร์เชิงสรีรวิทยาในการคาดการณ์ความเข้มข้นต่อเวลาของสารเจนิสตินและเมแทบอลิต์ที่พลาสมาและอวัยวะเป้าหมาย 8 อวัยวะ ประกอบด้วย สมอง, ปอด, กระเพาะอาหาร, ลำไส้เล็ก, ลำไส้ใหญ่, หัวใจ, ไต และตับ รวมถึงคาดการณ์ร้อยละการขับออกของเจนิสตินและเมแทบอลิต์ต่อขนาดที่ได้รับทางปัสสาวะและอุจจาระ ค่า R^2 เท่ากับ 0.94, 0.93, 0.73, 0.98, 0.94, 0.008, 0.67, 0.90, 0.62, 0.98 และ 0.84 ตามลำดับ แสดงดัง Figure 2

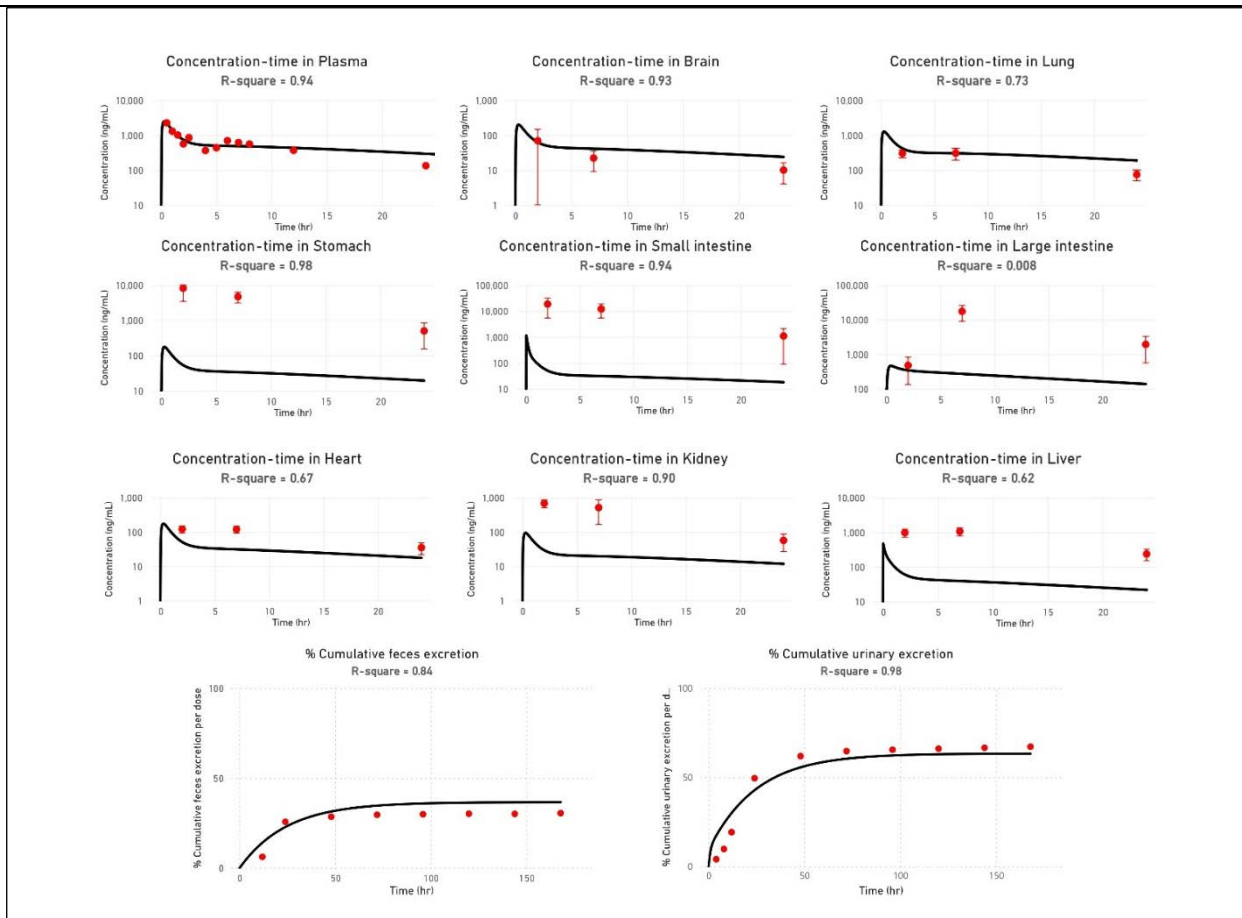


Figure 2 Concentration-time profile of genistein and its metabolites in plasma and target tissue
red dot is observed data and black line is simulated data.

ผลการศึกษาพบว่าความเข้มข้นต่อเวลาของพลาสมาและ 7 อวัยวะประกอบด้วย สมอ ปอด กระเพาะ ลำไส้เล็ก หัวใจ ตับ และไต รวมถึงร้อยละการขับออกทางปัสสาวะและอุจจาระ มีค่า R^2 สูงกว่า 0.6 ซึ่งสอดคล้องกับการประเมินของ Ozil PK และคณะ [12,13] ส่วนบริเวณลำไส้ใหญ่พบว่ามีค่า R^2 เท่ากับ 0.008 ซึ่งไม่สอดคล้องกับการประเมินของ Ozil PK และคณะ [12,13] สาเหตุที่อาจทำให้ค่าข้อมูลที่ได้จากจำลองโดยใช้แบบจำลองไม่สอดคล้องกับข้อมูลจากการศึกษาของ Coldham และคณะ [10] อาจเกิดได้จาก 3 ปัจจัย 1) พารามิเตอร์ไม่ทราบค่าในแบบจำลอง ในแบบจำลองมีพารามิเตอร์ไม่ทราบค่าทั้งหมด 8 พารามิเตอร์ โดย 2 พารามิเตอร์มีความเกี่ยวข้องกับระดับความเข้มข้นต่อเวลาบริเวณลำไส้ใหญ่โดยตรง คือ อัตราการดูดซึมของสาร เจริญเติบโตบริเวณลำไส้ใหญ่ และอัตราการเคลื่อนที่ของสารเจริญเติบโตจากบริเวณลำไส้เล็กสู่บริเวณลำไส้ใหญ่ 2) การรวบรวมข้อมูลจากการศึกษา ในการรวบรวมข้อมูลจากแผนภาพใช้ซอฟต์แวร์ digitizelt version 2.5.9 ซึ่งอาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้ และ 3) การศึกษาที่นำมาเปรียบเทียบ เนื่องจากการศึกษาของ Coldham และคณะ [10] มีจำนวนหนูทดลองเพียง 8 ตัว ไม่มีการรายงาน น้ำหนักเฉลี่ยของหนูทดลอง ในการทดลองซึ่งมีผลต่อปริมาณของ Genistein ที่ได้รับ นอกจากนี้ผลการวัดระดับของสารกัมมันตรังสีตามรอย C^{14} ที่อวัยวะต่าง ๆ ยังมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) สูง และไม่มีผลการศึกษายกย่องตัวของหนูแสดงในการศึกษา อาจส่งผลทำให้เมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากแบบจำลองบริเวณลำไส้ใหญ่มีความคลาดเคลื่อน

4. สรุป

แบบจำลองเภสัชจลนศาสตร์เชิงสรีรวิทยาที่สร้างขึ้นสามารถคาดการณ์ความเข้มข้นต่อเวลาของสารเจริญเติบโตและเมแทบอลิไตในพลาสมาและ 7 อวัยวะของหนูทดลองได้ ซึ่งจะทำให้สามารถคาดการณ์ขนาดยาที่เหมาะสมที่จะทำให้มีระดับยาที่อวัยวะเป้าหมายสูงกว่า IC_{50} ในการยับยั้งเซลล์มะเร็งที่อวัยวะเป้าหมายได้ ข้อจำกัดของแบบจำลองนี้คือไม่สามารถคาดการณ์ความเข้มข้น

ต่อเวลาบริเวณลำไส้ใหญ่ได้ เนื่องจากปัจจัยทั้ง 3 ข้อที่กล่าวในผลการศึกษาและการวิจารณ์ ดังนั้นยังคงต้องการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าเพื่อพัฒนาแบบจำลองให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้นต่อไปในอนาคต และหากมีอวัยวะเป้าหมายที่ต้องการศึกษาชัดเจน การลดจำนวนอวัยวะที่ไม่ใช่อวัยวะเป้าหมายในแบบจำลองจะสามารถลดพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าซึ่งจะทำให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้การศึกษานี้สามารถนำไปต่อยอดในการสร้างแบบจำลองในมนุษย์โดยการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับผู้ป่วยแต่ละรายซึ่งจะทำให้สามารถประยุกต์ใช้แบบจำลองในการติดตามความเข้มข้นของเจนิสทินและเมแทบอลิต์ได้ในผู้ป่วยแต่ละรายได้ และยังสามารถนำแบบจำลองนี้ไปประยุกต์ใช้ในการสร้างแบบจำลองเภสัชจลนศาสตร์เชิงสรีรวิทยาแบบผสมผสานร่วมกับแบบจำลองเภสัชพลศาสตร์ (Physiologically based pharmacokinetic/pharmacodynamic model) ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารกับประสิทธิภาพการทำงานของสาร เช่น การประยุกต์ใช้แบบจำลองเภสัชจลนศาสตร์เชิงสรีรวิทยาร่วมกับแบบจำลองการเจริญเติบโตหรือหดตัวของเซลล์มะเร็ง (Tumor growth model)

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒสำหรับการสนับสนุนงานวิจัยนี้สำเร็จสมบูรณ์และขอขอบคุณทุนในการวิจัยจากศูนย์เพื่อความเป็นเลิศทางวิจัยด้านนวัตกรรมพืชและสมุนไพร (CEPHIR)

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] International Agency for research on cancer. 2020. Global cancer observatory. เข้าถึงได้จากเว็บไซต์ : <https://gco.iarc.fr/today>. (เข้าถึงเมื่อวันที่ 10 เมษายน 2567).
- [2] ฐิติมา เรียบกระโทก, พาชิตชนัด ศิริพานิช. 2564. การเปรียบเทียบอัตราการรอดชีพของผู้ป่วยมะเร็งเต้านมหลังได้รับการรักษาด้วยวิธีเคมีบำบัดร่วมกับวิธีอื่น ๆ. วารสารสถิติประยุกต์และเทคโนโลยีสารสนเทศ. 6(2). 36-48.
- [3] บัญชีหลักแห่งชาติด้านสมุนไพร พ.ศ. 2566. 2566. ราชกิจจานุเบกษา. 140(130). 39.
- [4] Yang, Z., Kulkarni, L., Zhu, W. and Hu, M. 2012. Bioavailability and Pharmacokinetics of Genistein: Mechanistic Studies on its ADME. Anticancer Agent Med Chem. 12(10). 1264-1280.
- [5] Steensma, A. 2006. Bioavailability of genistein and its glycoside genistin. Ph.D. Thesis, Wageningen University, Wageningen.
- [6] Spagnulo, C., Russo, G.L., Orhan, I.K., Habtemariam, S., Daglia, M., Sureda, A. and et al. 2015. Genistein and cancer: Current status, Challenges and Future directions. Adv Nutr. 6. 408-419.
- [7] Sae-heng, T., Karbwang, J. and Nabangchang, K. 2018. Applications of Physiologically Based Pharmacokinetic (PBPK) Modeling in Discovery and Development of Cancer Chemotherapeutic Drugs. Thai J Pharmacol. 40. 56-59.
- [8] Brown, R.P., Delp, M.D., Lindstedt, S.L., Rhomberg, L.R. and Beliles, R.P. 1997. Physiological parameter values for physiologically based pharmacokinetic models. Toxicol Ind Health. 13. 407-484.
- [9] Delp, M.D., Manning, R.O., Brucker, J.V. and Armstrong, R.B. 1991. Distribution of cardiac output during diurnal changes of activity in rats. AJP journal. 261. 1487-1493.
- [10] Poulin, P. and Theil, F.P. 2002. Prediction of pharmacokinetics Prior to In vivo studies. J. Pharm. Sci. 91(1). 129-156
- [11] Islam, M.A., Punt, A., Spennkink, B., Murk, A.J., Leeuw, F.X.R.V. and Rietjens, I.M.C.M. 2013. Conversion of major soy isoflavone glucosides and aglycones in in vitro intestinal models. Mol. Nutr. Food Res. 58. 503-515.
- [12] Coldham, N.G. and Sauer, M.J. 2000. Pharmacokinetics of [14C] Genistein in the Rat: Gender-Related Differences, Potential Mechanisms of Biological Action, and Implications for Human Health. Toxicol Appl Pharmacol. 164. 206-215.

-
- [13] World Health Organization. 2010. Characterization and application of physiologically based pharmacokinetic models in risk assessment. World Health Organization, Geneva, Geneva.
- [14] Ozili, P.K. 2016. What is the acceptable r-squared value?. เข้าถึงได้จากเว็บไซต์: <https://www.researchgate.net/post/what-is-the-acceptable-rsquared-value/57cfcb0d3d7f4be2fb47f515/citation>. (เข้าถึงเมื่อวันที่ 16 เมษายน 2567)
- [15] Ozili, P.K. 2023. The acceptance R-square in Empirical Modelling for social science research. SSRN Electronic Journal. 1-9.

ผลของอัตราส่วนคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและแคลเซียมคลอไรด์ต่อสมบัติของไฮโดรเจล
สำหรับการสังเคราะห์วัสดุเชิงประกอบไฮโดรเจลผสมถ่านชีวภาพ
Effects of carboxymethyl cellulose to calcium chloride ratio on hydrogel properties
for the synthesis of hydrogel–biochar composite materials

เนธิศดา คำเขียว¹ มุจลินทร์ ผลจันทร์^{1,*} สุรศักดิ์ กุญมาลี² ธวัชณ์ สร้อยทอง³ และ เนตรพร ด้วงสง³
Nethisada Khamkhiew¹, Mujalin Pholchan^{1,*}, Surasak Kuimalee², Tawat Soitong³ and Nettraporn Doungsong³

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่

²สาขาวิชานวัตกรรมเคมีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่

³สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่

¹Department of Environmental Technology, Maejo University, Chiang Mai

²Department of Industrial Chemistry Innovation, Maejo University, Chiang Mai

³Department of Materials Innovation, Maejo University, Chiang Mai

*Corresponding author: Mujalin Pholchan, E-mail address: mujalin@mju.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะพัฒนาประสิทธิภาพของถ่านชีวภาพในแง่ของการดูดซับน้ำเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ทางการเกษตรในสภาพภูมิอากาศปัจจุบันที่มีความแปรปรวนด้วยการสังเคราะห์วัสดุเชิงประกอบไฮโดรเจลผสมถ่านชีวภาพ (Hydrogel–biochar composite, HBC) โดยศึกษาผลของอัตราส่วนคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC) และแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) ต่อสมบัติของไฮโดรเจล (Hydrogel, HDG) สำหรับการสังเคราะห์ HBC พบว่า HDG9/2 มีปริมาณความเป็นเจลสูงที่สุดถึง 79% และมีความสามารถในการดูดซับน้ำได้ดีที่สุดที่ 30 นาที เมื่อเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง พบว่า HDG7/2 มีความสามารถในการดูดซับน้ำและบวมตัวได้ดีที่สุดถึง 1,303% นอกจากนี้ พบว่าปริมาณความเป็นเจลของ HDG สูงขึ้นตามความเข้มข้นของ CMC แต่ลดลงเมื่อความเข้มข้นของ CaCl_2 สูงขึ้น เมื่อ HDG มีปริมาณความเป็นเจลสูง โครงร่างตาข่ายมีความหนาแน่นสูง ทำให้น้ำแทรกผ่านเข้าไปยังช่องว่างภายใน HDG ได้ยาก เป็นผลให้บวมตัวและดูดซับน้ำได้ต่ำ สูตร HDG ที่เหมาะสำหรับสังเคราะห์ HBC คือ HDG7/2 และ HDG9/2 เนื่องจากมีปริมาณความเป็นเจลสูง บวมตัวและคงตัวได้ดีหลังการทดสอบ เมื่อนำไปสังเคราะห์ HBC ที่ปริมาณถ่านชีวภาพ (Biochar, BC) แตกต่างกัน พบว่า HBC ที่มี BC 1% และ 5% (w/v) วัสดุสามารถคงตัวได้ดีและไม่ละลายน้ำ มีความสามารถในการบวมตัวและดูดซับน้ำได้ดี กล่าวได้ว่า ผลของอัตราส่วนระหว่าง CMC และ CaCl_2 ต่อสมบัติของ HDG ในงานวิจัยนี้สามารถใช้เพื่อหาสถานะที่ดีที่สุดในการสังเคราะห์ HBC สำหรับประยุกต์ใช้งานด้านการเกษตรได้ต่อไป

คำสำคัญ: คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส, แคลเซียมคลอไรด์, วัสดุเชิงประกอบ, ไฮโดรเจล, ถ่านชีวภาพ

Abstract

This research aims to improve the performance of biochar in terms of water absorption for agricultural applications in the current climate variability by synthesizing hydrogel-biochar composite materials (HBC). The effect of carboxymethyl cellulose (CMC) to calcium chloride (CaCl_2) ratio on hydrogel (HDG) properties for HBC synthesis was studied. The results showed that the HDG9/2 had the highest gel content of 79% and the highest water content at 30 minutes. After swelling for 1 hour, HDG7/2 had the highest water content and swelling degree of 1,303%. Moreover, the gel content of HDG increased with increasing CMC concentration but decreased with increasing CaCl_2 concentration. For the high gel content of HDG, the cross-linked network was dense, resulting in the difficulty of water penetrating the HDG network. As a result, the HDG could swell with low water absorption. In this study, the most suitable HDG for synthesizing HBC were HDG7/2 and HDG9/2 due to their

high gel content, good swelling, and durability in water after testing. For synthesizing HBC with various contents of BC, the results showed that HBC with BC 1% and 5% (w/v) were durable and water insoluble with high swelling degree and good water absorption. Consequently, the effect of CMC to CaCl_2 ratio on HDG properties was investigated in this study to optimize the synthesis condition of HBC for further agricultural applications.

Keywords: Carboxymethyl cellulose, Calcium chloride, Composite materials, Hydrogel, Biochar

1. บทนำ

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา การประยุกต์ใช้ถ่านชีวภาพ (Biochar) ในการปรับปรุงคุณภาพของดินเป็นที่สนใจอย่างมากของเกษตรกรและนักวิจัยหลาย ๆ ประเทศ ไม่ว่าจะเป็นการนำถ่านชีวภาพไปใช้เพียงอย่างเดียว [1-3] การใช้ถ่านชีวภาพร่วมกับวัสดุปรับปรุงดินอื่น ๆ หรือการเคลือบผสมถ่านชีวภาพด้วยวัสดุต่างๆ [4] เนื่องจากถ่านชีวภาพที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) จะมีรูพรุนมาก (Pore volume) มีพื้นที่ผิวสูง (Surface area) และมีปริมาณคาร์บอนสูง [5] จึงมีสมบัติในการอุ้มน้ำได้ดี [6,7] สามารถเก็บกักและปลดปล่อยธาตุอาหารในดินได้ดี เป็นแหล่งที่อยู่ของจุลินทรีย์ในดิน สามารถลดค่าความเป็นกรดของดินได้ สามารถดูดซับโลหะหนักในดิน [8-10] นอกจากนี้ยังสามารถพัฒนาต่อยอดเพื่อการกักเก็บคาร์บอน และลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ [11,12] ส่งผลให้นักวิจัยหลายท่านนอกจากการประยุกต์ใช้ถ่านชีวภาพ ยังมีการพัฒนาต่อยอดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานของถ่านชีวภาพให้มากยิ่งขึ้น การศึกษาครั้งนี้ให้ความสนใจในการพัฒนาประสิทธิภาพของถ่านชีวภาพในแง่ของการดูดซับน้ำเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ทางการเกษตรในสภาพภูมิอากาศปัจจุบันที่มีความแปรปรวนฝนตกทั้งช่วงไม่สม่ำเสมอได้ด้วยการสังเคราะห์วัสดุเชิงประกอบหรือวัสดุคอมโพสิตไฮโดรเจลผสมถ่านชีวภาพ (Hydrogel-biochar composite materials) เนื่องจากไฮโดรเจล (Hydrogel) เป็นพอลิเมอร์ชอบน้ำที่มีโครงสร้างโมเลกุลแบบโครงข่ายตาข่าย 3 มิติ (Cross-linking networks) ทำให้สามารถดูดซับน้ำไว้ในโครงข่ายได้มากโดยไม่ละลายน้ำ จะบวมตัวเมื่อดูดซับน้ำไว้ในโครงข่ายและจะหดตัวเมื่อน้ำซึมออกจากโครงข่าย ซึ่งสามารถสังเคราะห์ไฮโดรเจลด้วยการเชื่อมขวางทางเคมี (Chemical crosslinking) และการเชื่อมขวางทางกายภาพ (Physical crosslinking) [13] โดยใช้พอลิเมอร์ธรรมชาติหรือพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่เป็นพอลิเมอร์ชนิดชอบน้ำ (Hydrophilic) และสารเชื่อมขวาง (Crosslinker) ปัจจุบันไฮโดรเจลมักถูกนำไปใช้เป็นวัสดุดูดซับสาร เป็นฟิล์มหรือสารเคลือบสำหรับควบคุมการปลดปล่อยสารทั้งทางการแพทย์ [14,15] และทางการเกษตร [16,17] หากนำสมบัติเด่นของถ่านชีวภาพและไฮโดรเจลมาใช้ร่วมกัน คาดว่าเมื่อนำไปใช้ประโยชน์ทางการเกษตรวัสดุจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนั้น วัสดุอาจจะสามารถควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหาร ช่วยปรับปรุงคุณภาพดิน ลดปริมาณการใช้น้ำ และลดปริมาณปุ๋ยที่ไหลลงได้ ทำให้สามารถลดต้นทุนในการทำเกษตรกรรมตามไปด้วย รวมไปถึงสามารถลดผลกระทบจากการใช้ทรัพยากรน้ำที่มีอยู่จำกัดและลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากภาคเกษตรได้

งานวิจัยนี้จึงต้องการนำคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Carboxymethyl cellulose, CMC) หรือโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Sodium carboxymethylcellulose, NaCMC) ที่เป็นพอลิเมอร์ชนิดชอบน้ำ (Hydrophilic) [18,19] ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของเซลลูโลสจัดอยู่ในกลุ่มพอลิเมอร์ชีวภาพที่ไม่เป็นพิษ สามารถย่อยสลายได้ นำมาสังเคราะห์ไฮโดรเจลด้วยวิธีการเชื่อมขวางทางกายภาพ (Physical crosslinking) โดยใช้แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride, CaCl_2) ทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมขวาง โดยไอออนบวก (Ca^{2+}) ของ CaCl_2 จะทำหน้าที่เชื่อมขวางโครงข่ายของ CMC ($\text{Cellulose-CH}_2\text{COO}^-$) เกิดเป็นไฮโดรเจลที่มีโครงข่ายร่างตาข่าย อย่างไรก็ตาม หากความเข้มข้นของ CMC สูง อาจส่งผลให้มีปริมาณความเป็นเจลสูง เนื่องจากโมเลกุลของ CMC อัดแน่นใกล้ชิดกันมากขึ้นจึงมีโอกาที่จะเกิดการเชื่อมขวางมากยิ่งขึ้น แต่หากความเข้มข้นของ CMC สูงเกินไป อาจทำให้ไอออนบวก (Ca^{2+}) แทรกผ่านโมเลกุลของ CMC ได้ยาก และสารเชื่อมขวางไม่เพียงพอสำหรับเชื่อมขวาง เป็นผลให้ปริมาณความเป็นเจลลดลงได้ หากเพิ่มความเข้มข้นของ CaCl_2 จะเพิ่มความสามารถในการเชื่อมขวางได้ แต่หากความเข้มข้นสูงเกินไปค่าความแรงไอออนก็จะสูงขึ้นอาจทำให้เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ แล้วเกิดการเชื่อมขวางได้น้อย ส่งผลให้ปริมาณความเป็นเจลลดลงได้ ซึ่งจะส่งผลต่อการบวมตัวและการดูดซับน้ำของไฮโดรเจล [18-20] มีหลายงานวิจัยที่สามารถสังเคราะห์ไฮโดรเจลด้วย CMC และ CaCl_2 ได้สำเร็จ เช่น งานวิจัยของ Nan และคณะ ที่ศึกษาการเตรียมและการบวมตัวของ CMC hydrogel สำหรับเป็นตัวดูดซับยิ่งยวด (Superabsorbent) โดยศึกษาอัตราส่วนของ %CMC (w/v) และ % CaCl_2 (w/v) ที่ความเข้มข้นต่างๆ รวมถึงระยะเวลาและอุณหภูมิในการสังเคราะห์ พบว่า CMC 7% (w/v) และ CaCl_2 2% (w/v) มีปริมาณความเป็นเจลและการบวมตัวที่ดีที่สุด โดยระยะเวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดในการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวาง คือ ตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง [18] และงานวิจัย

ของ Mohamood และคณะ ที่ศึกษาการสังเคราะห์ CMC hydrogel จากทะลายปาล์มเปล่า (Oil palm empty fruit bunch, OPEFB) เหลือทิ้ง โดยใช้ CaCl_2 เป็นสารเชื่อมขวาง พบว่า CMC ที่ได้จาก OPEFB อัตราส่วน 20% (w/v) และ CaCl_2 1% (w/v) มีปริมาณความเป็นเจลและการบวมตัวดีที่สุด โดยระยะเวลา 24 ชั่วโมง และอุณหภูมิห้องเหมาะสมที่สุดในการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวาง [19] เนื่องจากอัตราส่วนของส่วนผสมนั้นมีผลต่อสมบัติของไฮโดรเจล งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาผลของอัตราส่วน CMC และ CaCl_2 ต่อสมบัติของไฮโดรเจล เพื่อหาสภาวะที่ดีที่สุดสำหรับการสังเคราะห์ HBC

2. วิธีการศึกษา

การศึกษาในครั้งนี้ใช้ CMC (Carboxymethyl cellulose, CMC) เกรดความหนืดต่ำ (Low viscosity, 0.7 Carboxymethyl groups per anhydroglucose unit) น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย (Average Mw.) 90,000 g/mol จากบริษัท Sigma-Aldrich ใช้ CaCl_2 (Calcium chloride dihydrate, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) เกรดวิเคราะห์ (Analytical reagent grade, AR grade) ความบริสุทธิ์ 99.0-105.0% น้ำหนักโมเลกุล 147.01 g/mol จากบริษัท RCI Labscan และใช้ผงถ่านชีวภาพจากฟางข้าว (Rice straw biochar, BC) ที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 การศึกษาผลของอัตราส่วน CMC และ CaCl_2 ต่อสมบัติของไฮโดรเจล (HDG) เพื่อเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์วัสดุเชิงประกอบไฮโดรเจลผสมถ่านชีวภาพ (HBC) และส่วนที่ 2 การศึกษาผลของอัตราส่วน HDG และ BC ต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบไฮโดรเจลผสมถ่านชีวภาพ (HBC)

2.1 การศึกษาผลของอัตราส่วน CMC และ CaCl_2 ต่อสมบัติของไฮโดรเจล (HDG)

เตรียมสารละลาย CaCl_2 ในน้ำกลั่นที่ความเข้มข้น 2% 4% และ 6% (w/v) นำไปผสมกับ CMC ที่อัตราส่วน 7% และ 9% (w/v) ตาม Table 1 โดยทำการละลายผง CMC ในสารละลาย CaCl_2 ที่อุณหภูมิห้องจนเป็นเนื้อเดียวกัน ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง เพื่อเริ่มปฏิกิริยาการเชื่อมขวาง จากนั้นชั่งตัวอย่างลงในจานเพาะเชื้อ 40 กรัม แล้วอบตัวอย่างให้แห้งที่อุณหภูมิ 60°C [4-6] จะได้ HDG ทั้งหมด 6 สูตร ได้แก่ HDG7/2, HDG7/4, HDG7/6, HDG9/2, HDG9/4 และ HDG9/6 นำ HDG ไปศึกษาสมบัติ ได้แก่ ลักษณะที่ปรากฏทางกายภาพ ปริมาณความเป็นเจล (gel content) การบวมตัว (swelling degree) และความสามารถในการดูดซับน้ำ (water content) เพื่อเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ HBC

Table 1 Mixing ratios for the synthesis of hydrogels (HDG)

Samples HDG	Mixing ratio		Component	
	CMC concentration (%w/v)	CaCl_2 concentration (%w/v)	CMC (g)	CaCl_2 solution (ml)
HDG7/2	7	2	28	400
HDG7/4	7	4	28	400
HDG7/6	7	6	28	400
HDG9/2	9	2	36	400
HDG9/4	9	4	36	400
HDG9/6	9	6	36	400

2.2 การศึกษาผลของอัตราส่วน HDG และ BC ต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบไฮโดรเจลผสมถ่านชีวภาพ (HBC)

นำ HDG สูตรที่เหมาะสมทั้งหมด 2 สูตร จากข้อ 2.1 นั่นคือ HDG7/2 และ HDG9/2 มาผสมกับ BC ที่ความเข้มข้น 1% 5% และ 10% (w/v) จะได้ HBC ทั้งหมด 6 สูตร ได้แก่ HBC7/2-1, HBC7/2-5, HBC7/2-10, HBC9/2-1, HBC9/2-5 และ HBC9/2-10 ตามลำดับ โดยทำการละลายผง CMC ในสารละลาย CaCl_2 จนเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วเติม BC แต่ละความเข้มข้นลงไปจนผสมต่อที่อุณหภูมิห้องจน BC กระจายตัวทั่ว HDG ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง เพื่อเริ่มปฏิกิริยาการเชื่อมขวาง จากนั้นชั่งตัวอย่างลงในจานเพาะเชื้อ 40 กรัม แล้วอบตัวอย่างให้แห้งที่อุณหภูมิ 60°C นำ HBC ไปศึกษาสมบัติ ได้แก่ ลักษณะที่ปรากฏทางกายภาพ ทดสอบสมบัติเชิงกล ปริมาณความเป็นเจล (Gel content) การบวมตัว (Swelling degree) และความสามารถในการดูดซับน้ำ (Water content)

2.3 การศึกษาสมบัติของไฮโดรเจล (HDG) และวัสดุเชิงประกอบไฮโดรเจลผสมถ่านชีวภาพ (HBC)

2.3.1 การศึกษาลักษณะที่ปรากฏทางกายภาพ

นำ HDG และ HBC ศึกษาลักษณะที่ปรากฏทางกายภาพ ได้แก่ ลักษณะสี ความหนืด ความแข็ง/เปราะ ความยืดหยุ่น ลักษณะพื้นผิวที่มองเห็นด้วยตาเปล่า นำ HDG 2 สูตร สำหรับสังเคราะห์ HBC และนำ HBC 6 สูตร ไปศึกษาลักษณะพื้นผิวภายใต้กล้องจุลทรรศน์สามมิติแบบใช้แสงเลเซอร์ ยี่ห้อ Olympus LEXT™ OLS5100 (เลนส์วัตถุ 10X และ 20X, กำลังขยาย 1X)

2.3.2 การศึกษาปริมาณความเป็นเจล (Gel content)

นำ HDG และ HBC หลังการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C ไปชั่งน้ำหนักตัวอย่างแห้งก่อนแช่ และบันทึกผล จากนั้นแช่ตัวอย่างในน้ำกลั่นเป็นเวลา 72 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้องโดยทำการเปลี่ยนน้ำกลั่นทุก 24 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างเปียกหลังแช่ไปอบให้แห้งอีกครั้งที่อุณหภูมิ 60°C และบันทึกน้ำหนักตัวอย่างแห้งหลังแช่ [13,21] คำนวณหาปริมาณความเป็นเจลได้ดังสมการที่ (1)

$$\text{Gel content (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้งหลังแช่}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้งก่อนแช่}} \times 100 \quad (1)$$

2.3.3 การศึกษาการบวมตัว (Swelling degree)

นำ HDG และ HBC หลังการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C ไปชั่งน้ำหนักตัวอย่างแห้งก่อนบวมตัว และบันทึกผล จากนั้นแช่ไฮโดรเจลในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 72 ชั่วโมง แล้วนำตัวอย่างเปียกหลังบวมตัวไปชั่งน้ำหนัก และบันทึกผล [13,21] คำนวณหาการบวมตัวได้จากสมการที่ (2)

$$\text{Swelling degree (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างเปียกหลังบวมตัว} - \text{น้ำหนักตัวอย่างแห้งก่อนบวมตัว}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้งก่อนบวมตัว}} \times 100 \quad (2)$$

2.3.4 การศึกษาความสามารถในการดูดซับน้ำ (water content)

นำ HDG และ HBC หลังการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C ไปชั่งน้ำหนักตัวอย่างแห้งก่อนดูด และบันทึกผล จากนั้นแช่ตัวอย่างในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 72 ชั่วโมง โดยในช่วง 30 นาทีแรก ที่ 5 15 และ 30 นาที ทำการชั่งน้ำหนักตัวอย่างเปียกหลังดูดซับ และบันทึกผล หลังจากนั้นชั่งน้ำหนักตัวอย่างเปียกหลังดูดซับที่ 1 24 48 และ 72 ชั่วโมง [13,21] คำนวณหาความสามารถในการดูดซับน้ำได้จากสมการที่ (3)

$$\text{Water content (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักไฮโดรเจลเปียกหลังดูดซับ} - \text{น้ำหนักไฮโดรเจลแห้งก่อนดูดซับ}}{\text{น้ำหนักไฮโดรเจลแห้งก่อนดูดซับ}} \times 100 \quad (3)$$

2.3.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล

นำ HDG 2 สูตร สำหรับสังเคราะห์ HBC และนำ HBC 6 สูตร โดยเตรียมตัวอย่างขนาดกว้าง 15 มิลลิเมตร ยาว 70 มิลลิเมตร หนา 0.8-1.0 มิลลิเมตร สำหรับนำไปทดสอบแรงดึง (tensile testing) ด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal testing machine, UTM) ยี่ห้อ Zwick/Roell รุ่น Z050

2.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

บันทึกข้อมูลผลการทดลองเป็นค่า Mean±SD และวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Microsoft Excel และ IBM SPSS Statistics (Statistical package for the social sciences) ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 การศึกษาผลของอัตราส่วน CMC และ CaCl₂ ต่อสมบัติของไฮโดรเจล (HDG)

3.1.1 ลักษณะที่ปรากฏทางกายภาพของไฮโดรเจล (HDG)

HDG ที่สังเคราะห์โดยใช้ CMC 7% (w/v) จะใช้เวลาในการกวนผสมจนเป็นเนื้อเดียวกันประมาณ 3-4 ชั่วโมง ส่วน HDG ที่ใช้ CMC 9% (w/v) จะใช้เวลาในการกวนผสมจนเป็นเนื้อเดียวกันประมาณ 5-6 ชั่วโมง ซึ่งระยะเวลาในการกวนผสมจะใช้เวลามากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของ CMC และสารละลาย CaCl₂ สูงขึ้น ลักษณะสารละลายตัวอย่าง HDG ก่อนนำไปอบให้แห้ง

มีลักษณะเป็นของเหลวหนืด สีใสขุ่นเล็กน้อย พื้นผิวเรียบและมันวาว โดย HDG ที่ใช้ CMC 9% (w/v) จะมีความหนืดมากกว่า 7% (w/v) หลังนำไปอบให้แห้ง (3-5 วัน) ตัวอย่าง HDG มีลักษณะเป็นของแข็ง สีขาวขุ่นอมเหลืองเล็กน้อย มีความเหนียวแต่ไม่ยืด พื้นผิวค่อนข้างเรียบด้านไม่มันวาว ซึ่ง HDG7/2, HDG7/4 และ HDG7/6 สามารถแกะตัวอย่างออกจากจานเพาะเชื้อได้ยาก ส่วน HDG9/2, HDG9/4 และ HDG9/6 สามารถแกะตัวอย่างออกจากจานเพาะเชื้อได้ง่าย ลักษณะที่ปรากฏทางกายภาพของ HDG แสดงดัง Figure 1

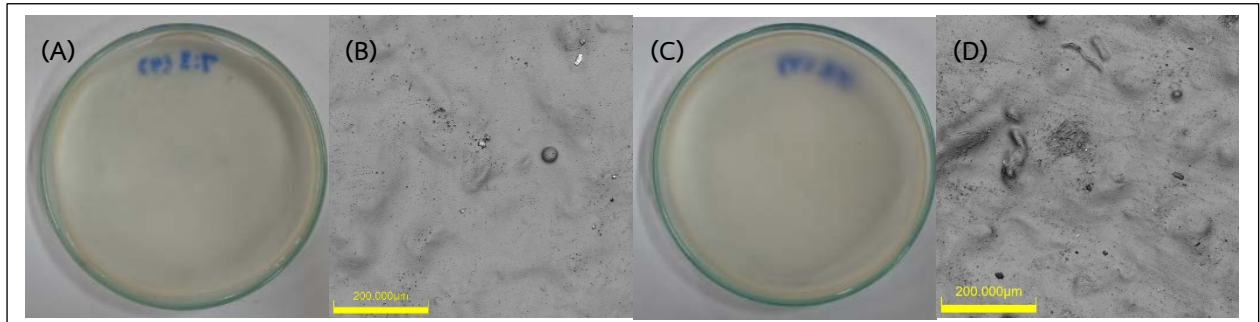


Figure 1 Photographs of (A) HDG7/2 and (C) HDG9/2, and 3D measuring laser microscope images of (B) HDG7/2 and (D) HDG9/2.

3.1.2 ปริมาณความเป็นเจลของไฮโดรเจล (HDG)

จาก Table 2 พบว่า HDG9/2 มีปริมาณความเป็นเจลสูงที่สุดถึง 79.28% รองลงมาเป็น HDG9/4 เท่ากับ 74.83%, HDG9/6 เท่ากับ 72.31%, HDG7/2 เท่ากับ 67.75%, HDG7/4 เท่ากับ 62.89% และ HDG7/6 เท่ากับ 62.84% น้อยลงตามลำดับ จากผลการทดลอง พบว่า HDG ที่มีอัตราส่วน CMC 9% จะมีปริมาณความเป็นเจลสูงกว่า HDG ที่มีอัตราส่วน CMC 7% นั่นคือ ปริมาณความเป็นเจลของ HDG สูงขึ้นตามความเข้มข้นของ CMC ที่สูงขึ้น เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของ CMC สูงขึ้น หมู่ฟังก์ชัน COO^- ก็เพิ่มมากขึ้น ทำให้ Ca^{2+} สามารถเข้าเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุล CMC ได้มากขึ้น มีเพียง HDG ที่มีความเข้มข้นของ CaCl_2 2% (w/v) คือ HDG9/2 และ HDG7/2 เท่านั้น ที่เมื่อนำตัวอย่างแช่น้ำกลั่น แล้วมีลักษณะเป็นของเหลวหนืด ไม่คงตัวแต่ไม่ละลายรวมกับน้ำ (ไม่สูญเสียความเป็นเจล) แต่ HDG ที่ความเข้มข้นของ CaCl_2 เพิ่มขึ้นจาก 2% (w/v) เป็น 4% และ 6% (w/v) พบว่า HDG หลังแช่น้ำกลั่นเพื่อทำการทดสอบมีลักษณะเหลวไม่คงตัวและละลายรวมกับน้ำ (สูญเสียความเป็นเจล) นั้นแสดงว่า HDG ที่มีความเข้มข้นของ CaCl_2 สูง โครงร่างตาข่ายจะมีความแข็งแรงต่ำ จึงทำให้เกิดการสูญเสียความเป็นเจลได้ง่าย ซึ่งอาจเป็นผลมาจากค่าความแรงไอออน (Ion strength) ที่สูงขึ้นทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างไอออน (Electrostatic interaction) ของ CMC และ Ca^{2+} อ่อนลง จึงทำให้เกิดการสูญเสียความเป็นเจลได้ง่าย [18-20]

หลังการทดสอบปริมาณความเป็นเจลแล้ว ได้ทำการแช่ตัวอย่าง HDG ที่ทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 1 เดือน พบว่ามีเพียง HDG9/2 และ HDG7/2 เท่านั้นที่ไม่มีการเจริญของจุลินทรีย์ทั้งราและแบคทีเรีย ส่วนสูตรอื่น ๆ พบเส้นใยราและโคโลนีของแบคทีเรียบริเวณพื้นผิวไฮโดรเจล เนื่องจาก CMC เป็นพอลิเมอร์อนุพันธ์ของเซลลูโลสซึ่งสามารถเป็นแหล่งอาหารของจุลินทรีย์ได้ ทำให้พอลิเมอร์ส่วนเกินที่ไม่ได้รับการเชื่อมขวางจะถูกชะล้างออกจากโครงสร้างไฮโดรเจล เมื่อพอลิเมอร์ส่วนเกินเหล่านั้นสัมผัสกับอากาศทำให้จุลินทรีย์สามารถใช้เป็นแหล่งอาหารและเจริญบนพื้นผิวไฮโดรเจลได้ นอกจากนี้ ในระหว่างปฏิกิริยาการสร้างโครงร่างตาข่าย (Cross-linking) Na^+ ของ CMC สามารถทำปฏิกิริยากับ Cl^- ของ CaCl_2 แล้วเกิดเป็น NaCl ดังนั้นหากเกิดปฏิกิริยาเกิดได้ดี จะส่งผลให้ความเข้มข้นของ NaCl ในตัวอย่างเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งส่งผลต่อการเจริญของจุลินทรีย์ นั่นคือ เมื่อปริมาณความเป็นเจลสูงขึ้น จึงส่งผลให้จุลินทรีย์สามารถเจริญเติบโตบนตัวอย่างได้น้อยหรือไม่สามารถเจริญได้ [22,23] โดยคาดว่าสูตร HDG9/2 และ HDG7/2 สามารถเกิดการเชื่อมขวางมากเพียงพอที่จะทำให้โครงร่างตาข่ายของไฮโดรเจลแข็งแรง เหลือพอลิเมอร์ส่วนเกินจากการสังเคราะห์น้อยหรือไม่เพียงพอที่จะเป็นแหล่งอาหารให้จุลินทรีย์เจริญได้ ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับปริมาณความเป็นเจลที่ HDG9/2 และ HDG7/2 มีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่เตรียมจาก CMC ความเข้มข้น 9% และ 7% (w/v) ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ต้องมีการศึกษาเพื่อยืนยันความสอดคล้องระหว่างปริมาณความเป็นเจล ปริมาณ CMC คงเหลือจากการทำปฏิกิริยา หรือปริมาณ NaCl ที่เกิดขึ้น ต่อการการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์เพิ่มเติม

3.1.3 การบวมตัวของไฮโดรเจล (HDG)

จาก Table 2 พบว่า HDG7/2 มีความสามารถในการบวมตัวสูงที่สุดถึง 1302.55% รองลงมาเป็น HDG9/2 เท่ากับ 1214.95%, HDG7/4 เท่ากับ 884.91%, HDG9/4 เท่ากับ 861.84%, HDG9/6 เท่ากับ 758.82% และ HDG7/6 เท่ากับ 600.88% ลดลงตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่า HDG ที่มีอัตราส่วน CMC 9% (w/v) จะมีการบวมตัวน้อยกว่า HDG ที่มีอัตราส่วน CMC 7% (w/v) ซึ่งสวนทางกับปริมาณความเป็นเจล นั้นแสดงว่า ตัวอย่าง HDG ที่มีปริมาณความเป็นเจลสูงจะบวมตัวได้น้อยกว่า HDG ที่มีปริมาณความเป็นเจลต่ำ เนื่องจากตัวอย่างที่มีปริมาณความเป็นเจลสูงจะมีความหนาแน่นของโครงร่างตาข่าย (Crosslink density) สูงกว่าตัวอย่างที่มีปริมาณความเป็นเจลต่ำ ทำให้น้ำสามารถแทรกผ่านเข้าไปยังช่องว่างภายใน HDG ได้ยาก เป็นผลให้เกิดการบวมตัวต่ำ ในทางกลับกันเมื่อปริมาณความเป็นเจลต่ำ โครงร่างตาข่ายจะมีความหนาแน่นต่ำ ทำให้น้ำสามารถแทรกผ่านช่องว่างภายใน HDG ได้ง่าย และถูกดูดซับไว้ภายในโครงร่างของ HDG ได้มาก ความสามารถในการบวมตัวและความสามารถในการดูดซับน้ำของ HDG จึงสูงขึ้นสวนทางกับปริมาณความเป็นเจลที่ลดลง [18-20]

Table 2 Gel content and swelling degree of HDG

Samples HDG	Mixing ratio (CMC:CaCl ₂) (%w/v)	Gel content (%)	Swelling degree (%)
HDG7/2	7:2	67.75±1.82	1302.55±108.71
HDG7/4	7:4	62.89±6.06	884.91±69.48
HDG7/6	7:6	62.84±7.85	600.88±29.66
HDG9/2	9:2	79.28±4.49	1214.95±25.06
HDG9/4	9:4	74.83±3.07	861.84±73.85
HDG9/6	9:6	72.31±1.83	758.82±5.83

3.1.4 ความสามารถในการดูดซับน้ำของไฮโดรเจล (HDG)

จาก Table 3 และ Figure 2 พบว่า ที่เวลาทดสอบ 5 นาที และ 15 นาทีแรก HDG9/2 มีความสามารถในการดูดซับน้ำได้มากที่สุดถึง 220.71% และ 309.17% ตามลำดับ รองลงมาเป็น HDG7/2 178.50% และ 300.17% ตามลำดับ และเมื่อทดสอบในช่วงเวลาผ่านไป ตั้งแต่ 30 นาที ไปจนถึง 48 ชั่วโมง พบว่า HDG7/2 และ HDG9/2 มีความสามารถในการดูดซับน้ำค่อนข้างใกล้เคียงกัน ยกเว้นที่เวลา 72 ชั่วโมง HDG7/2 มีความสามารถในการดูดซับน้ำสูงที่สุด เท่ากับ 1,262.84% รองลงมาเป็น HDG9/2, HDG7/4, HDG9/4, HDG9/6 และ HDG7/6 ลดลงตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าเมื่อพิจารณาความสามารถในการดูดซับน้ำตามระยะเวลาทดสอบทั้งหมด 72 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของ CaCl₂ ที่แตกต่างกัน ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลอย่างมีนัยสำคัญ โดย HDG ที่มีความเข้มข้น CaCl₂ 2% (w/v) จะมีความสามารถในการดูดซับน้ำได้มากที่สุด รองลงมาเป็นความเข้มข้น CaCl₂ 4% และ 6% (w/v) ตามลำดับ นั่นคือความสามารถในการดูดซับน้ำให้ผลสอดคล้องกับผลการบวมตัวของไฮโดรเจล [18-20]

ดังนั้นสูตร HDG ที่ผู้วิจัยเลือกสำหรับสังเคราะห์วัสดุเชิงประกอบไฮโดรเจลผสมถ่านชีวภาพ (HBC) 2 สูตร คือ สูตร HDG9/2 และ HDG7/2 เนื่องจากเป็นสูตรที่สามารถบวมตัวได้ดีดูดซับน้ำได้มาก และปริมาณความเป็นเจลสูง ทำให้คงตัวดี

Table 3 Water content of HDG as a function of time

Samples HDG	Water content (%)						
	5 min	15 min	30 min	1 h	24 h	48 h	72 h
HDG7/2	178.50±33.50	300.16±21.01	374.71±14.91	444.79±11.67	927.14±2.34	1077.30±47.54	1262.84±70.90
HDG7/4	173.37±5.66	248.15±3.63	299.05±7.97	346.38±10.06	634.11±16.68	737.81±18.88	820.69±38.06
HDG7/6	81.81±14.61	136.08±31.12	163.67±23.59	195.06±20.27	409.11±26.83	519.33±42.25	525.05±59.00
HDG9/2	220.71±6.54	309.17±20.91	373.24±19.51	435.23±26.35	856.17±5.88	1059.48±50.22	1110.97±22.37
HDG9/4	142.71±20.04	206.39±15.53	246.92±15.74	284.46±14.80	585.22±10.85	720.01±31.15	812.69±25.77
HDG9/6	117.00±12.88	170.82±17.65	187.33±12.44	215.12±15.03	449.19±21.99	541.32±19.25	598.40±25.67

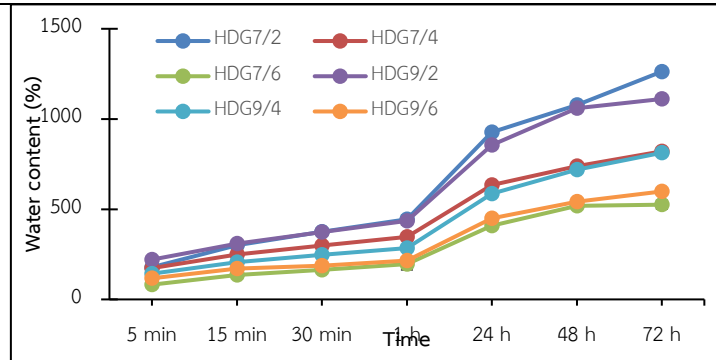


Figure 2 Effect of mixing ratio (CMC and CaCl_2 concentration) on water content of hydrogels as a function of time.

3.2 การศึกษาผลของอัตราส่วน HDG และ BC ต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบไฮโดรเจลผสมถ่านชีวภาพ (HBC)

3.2.1 ลักษณะที่ปรากฏทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบไฮโดรเจลผสมถ่านชีวภาพ (HBC)

พบว่า HBC ที่มีอัตราส่วน BC 1% (w/v) ก่อนนำไปอบแห้ง ตัวอย่างมีลักษณะเป็นของเหลวหนืด ยังคงสังเกตเห็นส่วนที่เป็น HDG สีใสปรากฏอยู่เล็กน้อย และเห็นการกระจายตัวของ BC ที่มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีดำได้ชัดเจน พื้นผิวมันวาว หลังอบแห้งพบว่าพื้นผิวมีความขรุขระเล็กน้อยและมีความมันวาวมากกว่า HBC ที่ใช้ BC 5% และ 10% (w/v) ตามลำดับ ตัวอย่างก่อนการนำไปอบพบว่า HBC ที่มีความเข้มข้นของ BC สูงขึ้น จะสังเกตเห็น HDG ที่มีสีใสได้ยากยิ่งขึ้น และมีความหนาแน่นของ BC สูงขึ้น หลังนำไปอบแห้งพื้นผิว HBC มีความขรุขระเพิ่มมากขึ้นและมีความมันวาวลดลง ตัวอย่างมีลักษณะแข็งเปราะ ไม่ยืดหยุ่น หักได้ง่ายมากขึ้น และแกะตัวอย่างออกจากจานเพาะเชื้อได้ยากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของ BC สูงขึ้น ลักษณะที่ปรากฏทางกายภาพของ HBC แสดงดัง Figure 3

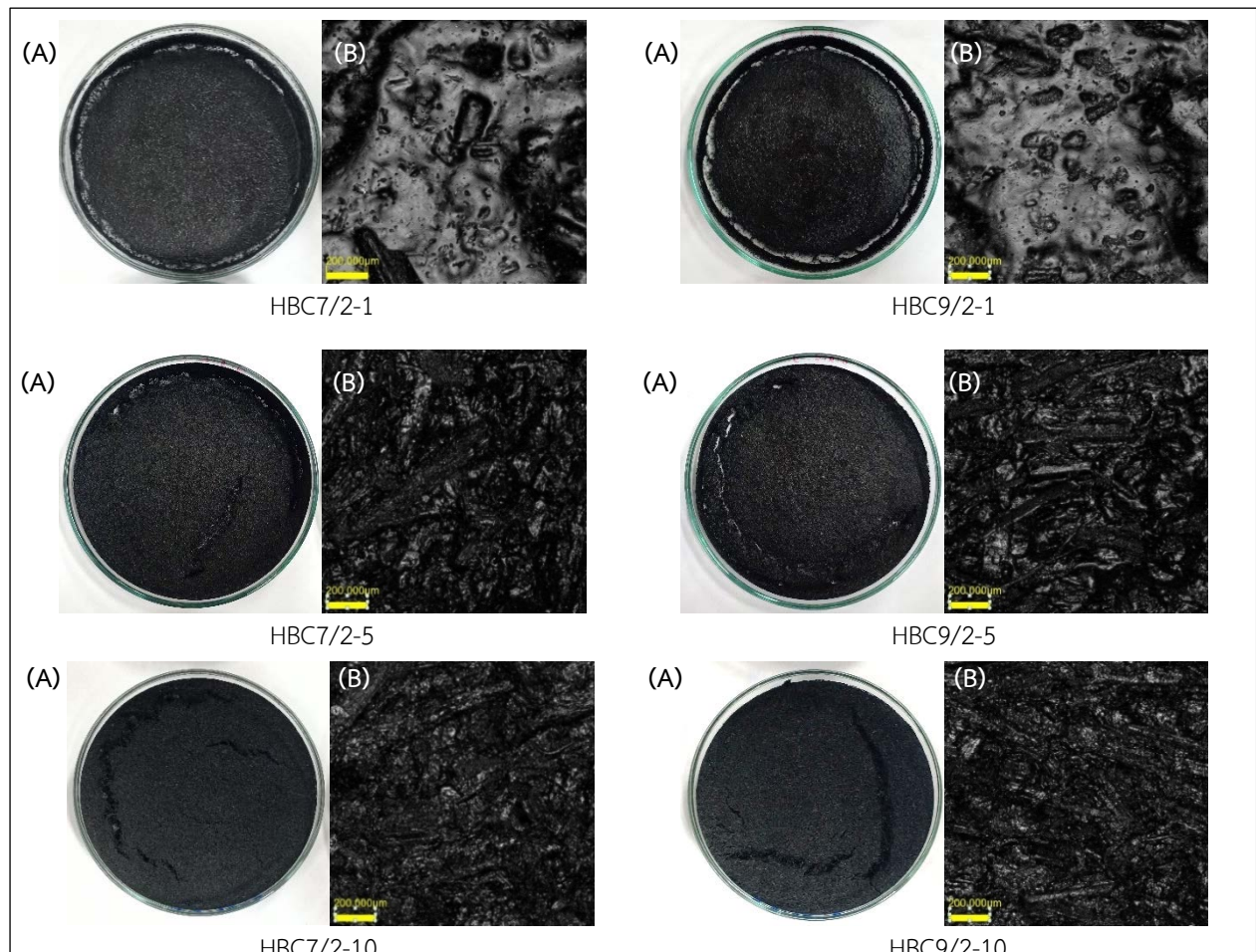


Figure 3 Images of HBC (A) Photographs and (B) 3D measuring laser microscope.

3.2.2 ปริมาณความเป็นเจลของวัสดุเชิงประกอบไฮโดรเจลผสมถ่านชีวภาพ (HBC)

จาก Table 4 พบว่า HBC9/2-1 มีปริมาณความเป็นเจลมากที่สุดถึง 96.94% รองลงมาเป็น HBC9/2-5 เท่ากับ 93.37%, HBD7/2-5 เท่ากับ 91.72%, HBC9/2-10 เท่ากับ 91.60%, HBC7/2-10 เท่ากับ 91.09% และ HBC7/2-1 เท่ากับ 75.89% ลดลงตามลำดับ ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่า ปริมาณของ BC ส่งผลต่อปริมาณความเป็นเจลไม่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม เมื่อทำการทดสอบแช่น้ำกลั่นพบว่า HBC ที่มีอัตราส่วนของ BC 10% (w/v) จะมี BC หลุดออกจากตัวอย่างในปริมาณมากและไฮโดรเจลไม่สามารถคงรูปอยู่ได้ ส่วน HBC ที่มี BC 1% และ 5% (w/v) ยังที่ไม่สูญเสียความเป็นเจลสามารถคงรูปอยู่ได้ โดย HBC ที่มี BC 5% (w/v) มีลักษณะความเป็นเจลมากกว่าที่มี BC 1% (w/v)

3.2.3 การบวมตัวของวัสดุเชิงประกอบไฮโดรเจลผสมถ่านชีวภาพ (HBC)

จาก Table 4 พบว่า HBC7/2-1 มีความสามารถในการบวมตัวได้มากที่สุดถึง 692.37% รองลงมาเป็น HBC9/2-1 เท่ากับ 651.56%, HBD7/2-5 เท่ากับ 634.26%, HBC9/2-5 เท่ากับ 577.23%, HBC7/2-10 เท่ากับ 489.21% และ HBC9/2-10 เท่ากับ 434.93% ลดลงตามลำดับ แสดงว่า HBC ที่มีปริมาณของ BC สูงขึ้น ความสามารถในการบวมตัวจะลดลง ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่า ความเข้มข้นของ CMC ไม่มีผลต่อความสามารถในการบวมตัว ส่วน HBC ที่มี BC 1% และ 5% (w/v) ให้ผลต่อความสามารถในการบวมตัวไม่แตกต่างกัน แต่บวมตัวได้ดีกว่า HBC ที่มี BC 10% (w/v)

Table 4 Gel content and swelling degree of HBC

Samples HBC	Mixing ratio (CMC:CaCl ₂ :BC) (%w/v)	Gel content (%)	Swelling degree (%)
HBC7/2-1	7:2:1	75.89±3.04	692.37±131.17
HBC7/2-5	7:2:5	91.72±3.64	634.26±12.36
HBC7/2-10	7:2:10	91.09±0.34	489.21±12.19
HBC9/2-1	9:2:1	96.94±1.65	651.56±33.41
HBC9/2-5	9:2:5	93.37±0.13	577.23±35.24
HBC9/2-10	9:2:10	91.60±0.13	434.93±5.49

3.2.4 ความสามารถในการดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบไฮโดรเจลผสมถ่านชีวภาพ (HBC)

จาก Table 5 และ Figure 4 พบว่า HBC ที่มี BC 10% มีความสามารถในการดูดซับน้ำเฉลี่ยสูงที่สุด รองลงมาเป็น HBC ที่มี BC 5% และ 1% (w/v) ลดลงตามลำดับ ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่า ความสามารถในการดูดซับน้ำของ HBC7/2-10 และ HBC9/2-10 มีค่าใกล้เคียงกัน และ HBC9/2-10 และ HBC9/2-5 มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วน HBC7/2-5, HBC9/2-1 และ HBC7/2-1 มีค่าแตกต่างกัน โดยมีค่าน้อยลงตามลำดับ เมื่อพิจารณาตามช่วงเวลาทดสอบ พบว่า HBC ที่มี BC สูง จะสามารถดูดซับน้ำได้ดีกว่า HBC ที่มี BC ต่ำ สามารถกล่าวได้ว่า สมบัติของถ่านชีวภาพที่มีรูพรุนสูงและความสามารถในการดูดซับน้ำได้ดีเมื่อนำมาสังเคราะห์เป็น HBC ช่วยส่งเสริมความสามารถในการดูดซับน้ำของ HBC ให้ดีขึ้น

Table 5 Water content of HBC as a function of time

Samples	Water content (%)							
	HBC	5 min	15 min	30 min	1 h	24 h	48 h	72 h
HBC7/2-1		19.40±6.76	27.06±10.64	29.92±11.54	32.10±12.58	42.91±17.96	49.08±19.70	53.75±27.67
HBC7/2-5		34.12±2.95	44.08±6.41	47.65±6.02	50.68±6.48	74.00±7.62	74.00±4.05	98.12±4.79
HBC7/2-10		52.83±1.07	60.33±1.51	63.08±1.67	65.58±1.90	91.97±1.70	111.17±1.60	128.20±6.29
HBC9/2-1		25.59±4.03	37.08±6.67	41.24±6.26	43.40±5.82	57.19±7.77	62.74±12.60	68.67±14.94
HBC9/2-5		36.50±8.19	47.67±4.86	52.19±4.90	55.68±5.54	85.94±27.26	103.70±7.71	120.03±11.50
HBC9/2-10		53.26±5.38	61.89±5.41	64.01±6.21	66.08±6.47	87.33±8.33	101.25±13.27	115.88±14.29

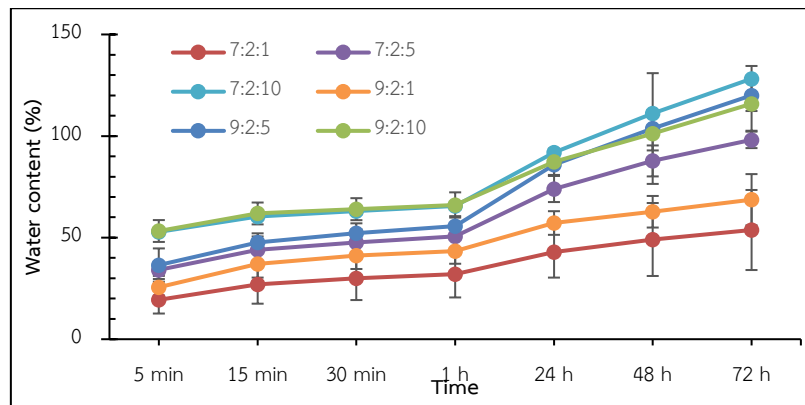


Figure 4 Effect of mixing ratio (CMC, CaCl_2 and BC concentration) on water content of hydrogel-biochar composite materials as a function of time.

3.2.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล

มีเพียงตัวอย่าง HDG 2 สูตร คือ HDG7/2 และ HDG9/2 และ HBC 2 สูตร คือ HBC7/2-1 และ HBC9/2-1 รวมทั้งหมด 4 สูตร เท่านั้นที่สามารถนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลภายใต้แรงดึง (Tensile testing) เนื่องจากสูตรอื่นๆ มีความแข็งแรงหักได้ง่ายทำให้ไม่สามารถนำไปทดสอบแรงดึงได้ จากผลการทดสอบแรงดึง (Tensile testing) ทั้งหมด 4 สูตร คือ HDG7/2, HDG9/2, HBC7/2-1 และ HBC9/2-1 (Table 6) พบว่า สูตร HDG และ HBC ที่เตรียมจาก CMC 9% (w/v) มีความทนแรงดึง (Tensile strength) และค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (%Elongation at break) สูงกว่าที่เตรียมจาก CMC 7% (w/v) โดย HDG9/2 และ HBC9/2-1 มีความทนแรงดึงเท่ากับ 27.40 MPa และ 17.65 MPa ตามลำดับ ในขณะที่ HDG7/2 และ HBC7/2-1 มีค่าเท่ากับ 20.07 MPa และ 14.35 MPa ตามลำดับ และสำหรับค่าการยืดตัว ณ จุดขาด HDG9/2 และ HBC9/2-1 มีค่าเท่ากับ 1.84% และ 1.79% ตามลำดับ ในขณะที่ HDG7/2 และ HBC7/2-1 มีค่าเท่ากับ 1.33% และ 1.26% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า HDG และ HBC ที่เตรียมจาก CMC 9% (w/v) มีความแข็งแรงและยืดตัวได้ดีกว่าที่เตรียมจาก CMC 7% (w/v) ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณความเป็นเจล ซึ่งบ่งชี้ถึงความสามารถในการคงรูปของเจล นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง HDG และ HBC พบว่าการเติม BC ทำให้ไฮโดรเจลมีความแข็งแรงและยืดตัวได้น้อยลง คาดว่าเป็นผลมาจาก BC ที่เข้าไปแทรกระหว่างโครงร่างตาข่ายของไฮโดรเจลและทั้งสองเฟสเข้ากันไม่ได้ดีพอ ทำให้มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันต่ำ ความแข็งแรงและการยืดตัวจึงลดลง

Table 6 Mechanical properties of HDG and HBC

Samples	Mixing ratio (CMC:CaCl ₂ :BC) (%w/v)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
HDG7/2	7:2:0	20.07±2.82	1.33±0.28
HDG9/2	9:2:0	27.40±1.98	1.84±0.17
HBC7/2-1	7:2:1	14.35±3.28	1.26±0.34
HBC9/2-1	9:2:1	17.65±3.07	1.79±0.33

4. สรุป

จากการศึกษาผลของอัตราส่วนคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและแคลเซียมคลอไรด์ต่อสมบัติของไฮโดรเจล สำหรับการสังเคราะห์วัสดุเชิงประกอบไฮโดรเจลผสมถ่านชีวภาพ พบว่า สูตรไฮโดรเจลที่เหมาะสมสำหรับนำไปสังเคราะห์วัสดุเชิงประกอบไฮโดรเจลผสมถ่านชีวภาพ คือ HDG7/2 ที่มีอัตราส่วนของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 7% (w/v) ต่อแคลเซียมคลอไรด์ 2% (w/v) และ HDG9/2 ที่มีอัตราส่วนของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 9% (w/v) ต่อแคลเซียมคลอไรด์ 2% (w/v) เนื่องจากทั้ง 2 สูตร มีปริมาณความเป็นเจลสูง บวมตัวได้ดี ไม่สูญเสียความเป็นเจลและไม่ละลายน้ำหลังการทดสอบความเป็นเจล เมื่อนำไปสังเคราะห์วัสดุเชิง

ประกอบไฮโดรเจลผสมถ่านชีวภาพ พบว่า ที่อัตราส่วนถ่านชีวภาพ 1% และ 5% (w/v) วัสดุไม่สูญเสียความเป็นเจลและไม่ละลายน้ำหลังการทดสอบความเป็นเจล บวมตัวได้ดี และมีความสามารถในการดูดซับน้ำได้ดี จากการวิจัยนี้ผลของอัตราส่วนคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและแคลเซียมคลอไรด์สามารถนำไปสังเคราะห์วัสดุเชิงประกอบไฮโดรเจลผสมถ่านชีวภาพได้ แต่ทั้งนี้เพื่อการนำไปใช้ประโยชน์ทางการเกษตรผู้วิจัยจำเป็นต้องมีการศึกษาสมบัติอื่น ๆ ของไฮโดรเจลและวัสดุเชิงประกอบไฮโดรเจลผสมถ่านชีวภาพเพิ่มเติม เช่น จำนวนครั้งและระยะเวลาที่วัสดุจะสูญเสียสภาพความเป็นเจล ระยะเวลาในการย่อยสลายทางชีวภาพในดิน การทดสอบความสามารถในการปลดปล่อยธาตุอาหาร การทดสอบปลูกพืช ซึ่งผู้วิจัยวางแผนจะทำการศึกษาค้นต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยบัณฑิตศึกษาด้านการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตรจากสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) ประจำปีงบประมาณ 2565 และทุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา “ทุนก้นกู่” ประจำปีการศึกษา 2563 จากสำนักบริหารและพัฒนาวิชาการมหาวิทยาลัยแม่โจ้ ขอขอบคุณสาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี อุตสาหกรรม สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ และสาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ สำหรับการอนุเคราะห์วัสดุอุปกรณ์ เครื่องมือวิทยาศาสตร์ และห้องปฏิบัติการในการศึกษาวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Selvarajh, G., Ch'ng, H. Y., Zain, N. M., Sannasi, P., and Azmin, S. N. H. M. 2020. Improving soil nitrogen availability and rice growth performance on a tropical acid soil via mixture of rice husk and rice straw biochars. *Applied Sciences*, 11(1), 108.
- [2] Zheng, Y., Han, X., Li, Y., Yang, J., Li, N., and An, N. 2019. Effects of biochar and straw application on the physicochemical and biological properties of paddy soils in Northeast China. *Scientific Reports*, 9(1), 16531.
- [3] ขวัญภา ใจหมั่น. 2021. ผลของการใช้ถ่านชีวภาพเป็นวัสดุปรับปรุงดินและลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกภายใต้ระบบการปลูกข้าว (Doctoral dissertation, Maejo University)
- [4] Chalatchaliao, T., Chumsang, C., and Sangmanee, P. 2022. ผลของการใช้ถ่านชีวภาพเป็นส่วนผสมในดินปลูกต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของผักกาดขาว 3 ชนิด ที่ปลูกในกระบะ. *Journal of Energy and Environment Technology of Graduate School Siam Technology College*, 9(1), 46-55.
- [5] กรรณก โกศล, ศศิธร ศรีอ่อน, พรณพรัตน์ จำปาแพง และสายันต์ แสงสุวรรณ. 2023. ไบโอชาร์ (วัสดุคั่วหัตถ์): การสังเคราะห์ฟลูออรีนเอกซิกซ์และศักยภาพการประยุกต์ใช้งาน. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี*, 25(1), 89-104.
- [6] พินิจภณ ปิยะ และอนัญญา โพธิ์ประดิษฐ์. 2018. การพัฒนาและฟื้นฟูดินทรายในเขตเงาฝนด้วยถ่านชีวภาพ. *วารสารวิจัยและพัฒนาโดยลงกรณีในพระบรมราชูปถัมภ์ สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 13(2), 21-32.
- [7] สมชาย บุตรนันท์ และปัทมา วิทยากร. 2561. มหัตถรรพ์ถ่านชีวภาพกับผลกระทบสองขั้ว. *แก่นเกษตร* 46(6), 1167-1176.
- [8] สิริภัทร ประเสริฐสุข. 2020. การประยุกต์ใช้ถ่านชีวภาพในการปลูกข้าวในพื้นที่เกษตรกรรมดินเค็ม. *Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD)*. 3708.
- [9] สายชล สุขญาณกิจ, สิริวรรณ สมิตธิอาภรณ์, ธนภัทร ปลื้มพวง และธนวรรณ พาณิชพัฒน์. (2020). ผลของถ่านชีวภาพร่วมกับการจัดการปุ๋ยต่อผลผลิตและความเข้มข้นธาตุอาหารในถั่วฝักยาวไร้คาง. *Thai Science and Technology Journal*, 28(3), 443-454.
- [10] Si, L., Xie, Y., Ma, Q., and Wu, L. 2018. The short-term effects of rice straw biochar, nitrogen and phosphorus fertilizer on rice yield and soil properties in a cold waterlogged paddy field. *Sustainability*, 10(2), 537.
- [11] Bashir, S., Hussain, Q., Zhu, J., Fu, Q., Houben, D., and Hu, H. 2020. Efficiency of KOH-modified rice straw-derived biochar for reducing cadmium mobility, bioaccessibility and bioavailability risk index in red soil. *Pedosphere*, 30(6), 874-882.

- [12] นิชาภัทร ลิทธิวรรณ, ชุชาติ สันธทรัพย์ และฟ้าโพลิน ไชยวรรณ. 2020. ผลของการใช้ถ่านชีวภาพต่อสมบัติและการกักเก็บคาร์บอนในดินบนพื้นที่สูงอำเภอปางมะผ้า จังหวัดแม่ฮ่องสอน. วารสารเกษตร, 36(1), 69-78.
- [13] วารุณี ตานันต์ และสายันต์ แสงสุวรรณ. 2014. พอลิเมอร์ดูดซับน้ำได้มาก: การสังเคราะห์การวิเคราะห์และการประยุกต์ใช้. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 16(2), 63-81.
- [14] พันธิตรา ยาแก้ว. 2021. ฟิสิกส์ของพอลิเมอร์ของสโคบีเซลลูโลส/ไฮโดรไลซ์คอลลาเจนเคลือบด้วยไคโตซานสำหรับประยุกต์เป็นแผ่นปิดแผล. Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD). 5291.
- [15] สวรรักษ์ จันทระพิทักษ์ และสุกัญญา วิชชุกิจ. 2020. จลนศาสตร์การปลดปล่อยของวิตามินบี2 จากเม็ดเจลอัลจินตร่วมกับเวียโปรตีนหรือแซนแทนกัม. Srinakharinwirot University Engineering Journal, 15(1), 73-85.
- [16] Boonprasith, P., Chuachun, T., Rattanathamwat, N., and Chunseethong, P. 2022. การเตรียมและวิเคราะห์คุณสมบัติของไฮโดรเจลที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์. Advanced Science Journal, 22(1), 28-45.
- [17] รุ่งระวี ศิริบุญนาม และสุปราณี แก้วภิรมย์. 2019. ผลของกลูตาไรต์ไฮโดรเจลและแป้งมันสำปะหลังต่อสมบัติและการปลดปล่อยฟอสฟอรัสของปุ๋ยไคโตซานไฮโดรเจล. Wichcha Journal Nakhon Si Thammarat Rajabhat University, 38(2), 42-56.
- [18] Nan, N. F. C., Zainuddin, N., and Ahmad, M. B. 2019. Preparation and swelling study of CMC hydrogel as potential superabsorbent. Pertanika Journal of Science and Technology, 27(1), 489-498.
- [19] Mohamood, N. F. A. Z. T., Halim, A. H. A., and Zainuddin, N. 2021. Carboxymethyl cellulose hydrogel from biomass waste of oil palm empty fruit bunch using calcium chloride as crosslinking agent. Polymers, 13(23), 4056.
- [20] Pinpru, N. and Woramongkolchai, S. 2020. Crosslinking effects on alginate/carboxymethyl cellulose packaging film properties. Chiang Mai Journal of Science, 47(4), 712-722.
- [21] รัตน์ฐาภัทร บุญเกิด, ศศิธร อินทร์นอก, รุ่งลาวัลย์ สมสุนันท์ และโรเบิร์ต มอลลอย. 2563. การเตรียมแผ่นไฮโดรเจลสังเคราะห์พอลิ (ไฮเดียม 2-อะคริลามิโด-2-เมทิลโพรเพนซัลโฟเนต) บรรจุสารสกัดจากใบเครือหมาน้อย. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. 43(3), 297-310.
- [22] ขานนท์ ขำตา, สรณภูมิ ศักดิ์ศรี และพิเชษฐ์ กุมภาว. 2564. ศึกษาอิทธิพลของ sodium chloride ที่เติมในอาหารเลี้ยงเชื้อ buffered peptone water และอุณหภูมิในการบ่มต่อ background flora และความไวในการตรวจพบ *Salmonella* spp. ในเนื้อไก่ดิบ. วารสารอิเล็กทรอนิกส์ สำนักตรวจสอบคุณภาพสินค้าปศุสัตว์ ISSN 1906-0815, 1.
- [23] พิชราภรณ์ นาคเทวัญ และวลัยพร มัชพาน. 2562. การคัดเลือกและการระบุชนิดของเชื้อราที่ผลิตเอนไซม์เซลลูเลสจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร. วารสารแก่นเกษตร, 47(1), 1613-1618.

ผลของ Citral ต่อการเจริญและการก่อตัวของไบโอฟิล์มของเชื้อกลุ่ม Oral Streptococci Effect of citral on growth and biofilm formation of oral streptococci

เกษมชาติ พรหมสอน¹ พิมพิกา กาญจนคำเกิง² และ กานต์ วงศาริยะ^{1,*}
Kasemchart Promsorn¹, Pimpikar Kanchanadumkerng², and Karn Wongsariya^{1,*}

¹ภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จังหวัดกรุงเทพมหานคร

²ภาควิชาอาหารเคมี คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล จังหวัดกรุงเทพมหานคร

¹Department of Biology, School of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok

²Department of Food Chemistry, Faculty of Pharmacy, Mahidol University, Bangkok

*Corresponding author: Kasemchart Promsorn, e-mail address: Kasemchart.ps@gmail.com

บทคัดย่อ

ปัญหาสุขภาพช่องปากจัดเป็นหนึ่งในปัญหาสุขภาพที่สำคัญที่ส่งผลกระทบต่อการใช้ชีวิตของประชาชนส่วนใหญ่ ซึ่งในปัจจุบันมีการให้ความสนใจในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ดูแลสุขภาพช่องปากจากสารธรรมชาติมากขึ้นเพื่อทดแทนการใช้สารเคมีหรือยาปฏิชีวนะที่ใช้อยู่ โดยวัตถุประสงค์ของการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้เพื่อศึกษาผลของ Citral ซึ่งเป็นสารออกฤทธิ์ที่เป็นสารองค์ประกอบหลักในน้ำมันหอมระเหยจากตะไคร้ต่อการเจริญและการก่อตัวของไบโอฟิล์มของเชื้อในกลุ่ม Oral streptococci 2 สายพันธุ์ได้แก่ *Streptococcus sobrinus* ATCC 33402 และ *Streptococcus mutans* ATCC 25175 ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่เป็นสาเหตุหลักของการเกิดคราบพลัค (Dental plaque) อันนำไปสู่การเกิดโรคปริทันต์ ซึ่งผลจากการทดสอบฤทธิ์ด้านการเจริญของเชื้อแบคทีเรียด้วยวิธี Broth dilution assay พบว่าความเข้มข้นที่ 0.03125% v/v และ 0.0625% v/v เป็นความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อ *S. sobrinus* และ *S. mutans* ได้ตามลำดับ ในขณะที่ความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถฆ่าเชื้อทดสอบทั้ง 2 สายพันธุ์ได้คือ 0.0625% v/v และยังพบว่า Citral ที่ความเข้มข้น 0.0625% v/v และ 0.125% v/v สามารถยับยั้งการก่อตัวของไบโอฟิล์มจากเชื้อ *S. sobrinus* และ *S. mutans* ได้ร้อยละ 96.48 และ 99.43 ตามลำดับ โดยผลจากการศึกษาค้นคว้านี้เป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับความเป็นพิษต่อเซลล์ และการศึกษาในสัตว์ทดลองต่อไป

คำสำคัญ: แบคทีเรียก่อโรคในช่องปาก, Citral, ไบโอฟิล์ม, ฤทธิ์ด้านการเจริญของแบคทีเรีย

Abstract

Oral diseases are considered as one of the important health problems that affect most people. At present, there is an increase in the development of oral health care products from natural substances to replace the chemicals or antibiotics currently in use. The purposes of this experiment are to study on the effects of citral, the major active compound of essential oil of lemongrass, on growth and biofilm formation of 2 strains of oral streptococci, *Streptococcus sobrinus* ATCC 33402 and *Streptococcus mutans* ATCC 25175 Both strains are the major cause of dental plaque development which is the primary causative factor of periodontal diseases. From the result of the broth dilution assay, the lowest concentrations that could inhibit the growth of *S. sobrinus* and *S. mutans* were 0.03125% v/v and 0.0625% v/v, respectively. While, the minimum bactericidal concentration for killing both oral streptococci was 0.0625 %v/v. Moreover, citral at concentrations of 0.0625% v/v and 0.125% v/v showed antibiofilm formation activity for *S. sobrinus* and *S. mutans* with 96.48% and 99.43% inhibition, respectively. The results from this study were used as an important information for further studies, including the cytotoxicity test and *in vivo* study.

Keywords: Oral pathogenic bacteria, Citral, Biofilm, Antibacterial activity

1. บทนำ

ช่องปากถือเป็นระบบนิเวศที่มีความหลากหลายของแบคทีเรีย โดยสภาวะในช่องปากของแต่ละบุคคลมีความเกี่ยวข้องกับกลุ่มของแบคทีเรียที่อาศัยอยู่ในช่องปาก ซึ่งพบว่าในช่องปากประกอบด้วยแบคทีเรียมากกว่า 700 สายพันธุ์ [1] โดยแบคทีเรียประจำถิ่นในช่องปากมีความสำคัญต่อการช่วยป้องกันการเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์ก่อโรคในช่องปาก แต่อย่างไรก็ตามแบคทีเรียเหล่านี้สามารถช่วยโอกาสก่อโรคได้ถ้าเกิดการเสียสมดุลของจุลินทรีย์ในช่องปาก [2] โรคในช่องปากที่มีสาเหตุหลักมาจากการติดเชื้อแบคทีเรียที่พบได้บ่อย ได้แก่ โรคฟันผุ โรคเหงือกอักเสบ และโรคปริทันต์ [1] ปัจจัยที่เป็นตัวการสำคัญที่นำไปสู่การเกิดโรคในช่องปากข้างต้น คือ การเพิ่มจำนวนที่มากขึ้นของเชื้อในกลุ่ม *Streptococcus* spp. ซึ่งเชื้อในกลุ่มนี้มีความสามารถในการสร้างไบโอฟิล์ม (Dental plaque) ยึดเกาะบริเวณผิวฟัน และคอฟัน ทำให้เกิดระบบนิเวศที่เหมาะสมที่เอื้อต่อการเจริญของแบคทีเรียก่อโรคชนิดอื่นภายในไบโอฟิล์ม จนนำไปสู่การเกิดโรคฟันผุ และโรคปริทันต์ [1,3]

จากข้อมูลขององค์การอนามัยโลก (WHO) มีการรายงานเกี่ยวกับปัญหาสุขภาพในช่องปากของคนทั่วโลก (พ.ศ. 2565) โดยมีการประมาณการว่าปัญหาสุขภาพในช่องปากส่งผลกระทบต่อผู้คนเกือบ 3.5 พันล้านคนทั่วโลก โดย 3 ใน 4 คนที่ได้รับผลกระทบมักเป็นผู้ที่อาศัยอยู่ในประเทศที่มีรายได้ปานกลาง โดยมีประชากรทั่วโลกประมาณ 2 พันล้านคน ที่ประสบปัญหาโรคฟันผุในฟันแท้ และยังมีเด็กอีก 514 ล้านคน ที่ต้องประสบปัญหาจากโรคฟันผุในฟันน้ำนม ซึ่งล้วนแล้วแต่เกิดจากการก่อตัวของไบโอฟิล์มในช่องปาก [4] จากการสำรวจสุขภาพช่องปากระดับประเทศของประเทศไทยครั้งที่ 8 โดยสำนักทันตสาธารณสุข กรมอนามัย พบว่าโรคฟันผุมักเกิดกับเด็กในกลุ่มอายุ 5 ปี เนื่องจากเด็กในกลุ่มอายุ 5 ปีมีการซุกซอนของโรคฟันผุสูงกว่าร้อยละ 75 รองลงมาเป็นเด็กในกลุ่มอายุ 15 และ 12 ปี โดยมีการซุกซอนของโรคฟันผุสูงถึงร้อยละ 62.7 และ 52 ตามลำดับ ส่วนในกลุ่มผู้ที่มีอายุในช่วง 35-44 ปี จะพบปัญหาหลัก คือ การสูญเสียฟัน โดยพบว่าการสูญเสียฟันโดยเฉลี่ย 3.6 ซี่/คน สภาวะเหงือกอักเสบ ร้อยละ 62.4 และมีร่องลึกปริทันต์ร้อยละ 25.9 มีรากฟันผุถึงร้อยละ 57.1 และมีฟันสึกร้อยละ 49.7 และในกลุ่มผู้ที่มีอายุในช่วง 60-74 ปี และ 80-85 ปี ซึ่งในกลุ่มนี้จะพบปัญหาหลัก คือการสูญเสียฟันแท้ โดยมีร้อยละการสูญเสียฟันแท้ร้อยละ 56.1 และ 22.4 ตามลำดับ และยังพบปัญหาฟันผุที่สัมพันธ์กับเหงือก ร้อยละ 16.5 โรคปริทันต์อักเสบที่มีการทำลายของเนื้อเยื่อและกระดูกรองรับรากฟัน ร้อยละ 36.3 โดยร้อยละ 12.2 เป็นโรคปริทันต์อักเสบที่อยู่ในระดับรุนแรงมาก [5] โดยวิธีที่มีประสิทธิภาพในการป้องกัน และกำจัดไบโอฟิล์ม คือการกำจัดด้วยเครื่องมือทันตกรรม หรือผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการดูแลสุขภาพช่องปาก เช่น ยาสีฟัน น้ำยาบ้วนปาก โดยผลิตภัณฑ์เหล่านี้มักประกอบด้วยไตรโคลซาน ฟลูออไรด์ เซทิลไพริดีนียมคลอไรด์ และคลอเฮกซิดีนกลูโคเนต ซึ่งอาจทำให้เกิดผลข้างเคียง เช่น สารเคลือบเปลี่ยนสีเคลือบฟัน และการเปลี่ยนแปลงรสชาติ ผลิตภัณฑ์สุขอนามัยช่องปากที่มีฟลูออไรด์มีข้อห้ามสำหรับเด็กเนื่องจากมีความเสี่ยงที่จะมีการกลืนสารฟลูออไรด์มากเกินไป การได้รับฟลูออไรด์ที่สูงในระหว่างการพัฒนาของร่างกายสามารถนำไปสู่โรคฟันผุได้ [6]

ด้วยเหตุนี้ในปัจจุบันได้มีผู้คนจำนวนหันมาเลือกใช้ผลิตภัณฑ์ดูแลสุขภาพช่องปากที่เป็นผลิตภัณฑ์ทางธรรมชาติหรือมีส่วนประกอบจากสารสกัดจากธรรมชาติมากขึ้น เพื่อลดผลข้างเคียงจากการใช้สารเคมีหรือสารฆ่าเชื้อในผลิตภัณฑ์ดูแลสุขภาพช่องปากแบบดั้งเดิม โดยสารสกัดจากธรรมชาติกลุ่มที่ได้รับความนิยมในการนำมาเป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์ดูแลสุขภาพช่องปากคือน้ำมันหอมระเหย เนื่องจากน้ำมันหอมระเหยมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ต้านการอักเสบ และฤทธิ์ด้านการเจริญของเชื้อแบคทีเรียก่อโรค ยกตัวอย่างเช่น น้ำมันหอมระเหยจากสารสกัดพืชเป็นสารต้านจุลชีพที่มีประสิทธิภาพซึ่งมีการใช้กันอย่างแพร่หลายในกลุ่มยาแพทย์แผนโบราณในฐานะยาต้านจุลชีพ เช่น น้ำมันหอมระเหยจากพลู และออริกาโน ที่จัดอยู่ในกลุ่มของ Phenols ซึ่งมีคุณสมบัติในการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย กระตุ้นระบบประสาท และภูมิคุ้มกันของร่างกายโดยน้ำมันหอมระเหยจากพลูมี Eugenol เป็นสารประกอบหลักที่มีฤทธิ์เป็นยาชาอ่อนๆ และฆ่าเชื้อได้ดี ส่วนน้ำมันหอมระเหยออริกาโนมีสารประกอบหลัก 2 ชนิดคือ Carvacrol และ Thymol เป็นหลัก อีกทั้งยังมีน้ำมันหอมระเหยในกลุ่ม Esters ที่มีคุณสมบัติระงับประสาท ลดความเครียด ลดอาการเกร็งของกล้ามเนื้อ ลดการอักเสบ และต้านเชื้อรา ได้แก่ สาร Linalyl acetate, Bomyl acetate และ Eugenyl acetate [7] ซึ่งในการทดลองครั้งนี้มุ่งเน้นการศึกษาผลกระทบของ Citral ซึ่งถูกจัดอยู่ในกลุ่ม Monoterpenes ถือเป็นน้ำมันหอมระเหยที่มีขนาดเล็กที่สุดที่มีสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนของ Citral ที่มีความสามารถทำลายความสมบูรณ์ของเซลล์โดยการยับยั้งกระบวนการหายใจในเซลล์ของจุลินทรีย์ และแทรกผ่านเยื่อเซลล์ทำให้เกิดการสะสมที่เยื่อหุ้มเซลล์รบกวนโครงสร้าง และทำให้ช่องว่าง ทำให้สารภายนอกสามารถผ่านเข้าออกเซลล์ทำให้ช่องว่างมีขนาดใหญ่ขึ้น และทำให้เซลล์แตกในที่สุด [8] ซึ่งถือเป็นสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพหลักที่พบได้ในน้ำมันตะไคร้ที่ส่งผลต่อการเจริญ และความสามารถในการสร้างไบโอฟิล์มของเชื้อในกลุ่ม Oral streptococci ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้เป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการศึกษาย่อยอดสำหรับการพัฒนาผลิตภัณฑ์ดูแลสุขภาพช่องปากจาก Citral ต่อไป

รวมถึงเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับตะไคร้ซึ่งเป็นพืชที่เพาะปลูกได้ง่ายในทั่วทุกภูมิภาคของประเทศไทย สำหรับการวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของ Citral ต่อการเจริญของเชื้อแบคทีเรียก่อโรคในช่องปากในกลุ่ม Oral streptococci และความสามารถในการสร้างไบโอฟิล์มของเชื้อในกลุ่ม Oral streptococci

2. วิธีการศึกษา

2.1 การทดสอบฤทธิ์ต้านของ Citral ต่อการเจริญของเชื้อ Oral streptococci

เลี้ยงเชื้อ *Streptococcus sobrinus* ATCC 33402 และเชื้อ *Streptococcus mutans* ATCC 25175 บนอาหาร Brain Heart Infusion (BHI) agar บ่มที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เตรียมเชื้อตั้งต้นโดยการแกะเชื้อจากอาหารแข็งมา 2-3 โคโลนี ลงอาหาร BHI broth นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 18 ชั่วโมง ถ่ายเชื้อปริมาตร 200 ไมโครลิตร ลงในอาหาร BHI broth ปริมาตร 5 มิลลิลิตร บ่มต่อที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งเชื้อมีความขุ่นเท่ากับ 0.2 ที่ค่าการดูดกลืนแสง 600 นาโนเมตร (OD_{600})

ทดสอบฤทธิ์ต้านการเจริญของเชื้อ Oral streptococci ด้วยวิธี Broth microdilution assay โดยละลาย Citral ในสารละลายผสม Tween 80 และ Ethanol เข้มข้น 4% v/v ให้ได้ความเข้มข้นสุดท้ายของสารละลาย Citral เท่ากับ 2% v/v หลังจากนั้นเจือจางสารละลาย Citral ใน 96 well-plate ด้วยวิธี 2-fold serial dilution ให้ได้ความเข้มข้นของสารละลายสุดท้ายที่ 1% 0.5% 0.25% 0.125% 0.0625% 0.03125% และ 0.015625% ตามลำดับ เติมน้ำเชื้อทดสอบลงในแต่ละหลุมโดยกำหนดความเข้มข้นสุดท้ายของเชื้อในแต่ละหลุมเท่ากับ 1×10^6 CFU/mL บ่มที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 18 ชั่วโมง บันทึกค่า Minimum inhibition concentration (MIC) ซึ่งเป็นค่าความเข้มข้นที่ต่ำที่สุดที่ไม่พบการเจริญของเชื้อ หลังจากนั้นถ่ายสารละลายจากหลุมที่ไม่พบการเจริญปริมาตร 20 ไมโครลิตร หยดลงบนผิวหน้าอาหารแข็ง BHI บ่มที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 18 ชั่วโมง บันทึกค่า Minimum bactericidal concentration (MBC) ซึ่งเป็นค่าความเข้มข้นที่ต่ำที่สุดที่สามารถฆ่าเชื้อได้ [7]

2.2 การทดสอบความสามารถในการลดการก่อตัวของไบโอฟิล์ม

เจือจางสารละลาย Citral โดยใช้วิธีเช่นเดียวกันกับวิธีการเจือจางในข้อ 2.1 โดยใช้อาหารเหลว BHI ที่มีน้ำตาลซูโครส เข้มข้นร้อยละ 2% w/v เป็นองค์ประกอบ เติมน้ำเชื้อทดสอบลงในแต่ละหลุมโดยกำหนดให้ความเข้มข้นสุดท้ายของเชื้อในแต่ละหลุมเท่ากับ 1×10^6 CFU/mL บ่มที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาที่กำหนดทำการดูดส่วนใสและเซลล์แขวนลอยออก ล้างไบโอฟิล์มด้วยสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (Phosphate Buffered Saline: PBS pH 7.2) 3 ครั้ง เพื่อชะเซลล์แขวนลอยที่ยังหลงเหลืออยู่ออก ทิ้งให้แห้งเป็นเวลา 30 นาที เติมน้ำเชื้อทดสอบเจือจาง 99% v/v ปริมาตร 200 ไมโครลิตรทิ้งไว้ 15 นาที เพื่อตรึงไบโอฟิล์ม เติมน้ำเกลือคริสตัลไวเลตความเข้มข้น 0.01% v/v ปริมาตร 200 ไมโครลิตรลงในแต่ละหลุมทิ้งไว้เป็นเวลา 15 นาที เมื่อครบกำหนดดูดสีส่วนเกินทิ้ง เติมน้ำกลั่นปริมาตร 200 ไมโครลิตรลงในหลุม เพื่อล้างสีส่วนเกินออก ทำซ้ำ 3 ครั้ง ทิ้งให้แห้งเป็นเวลา 30 นาที เติมน้ำเกลือคริสตัลไวเลตความเข้มข้น 95% v/v ปริมาตร 200 ไมโครลิตร เพื่อชะสีของคริสตัลไวเลต นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 550 นาโนเมตร บันทึกค่าที่วัดได้และคำนวณร้อยละการยับยั้งการก่อตัวของไบโอฟิล์มเทียบกับชุดควบคุมเชิงบวกที่ไม่มีการเติมสารละลาย Citral และชุดควบคุมเชิงลบที่ไม่มีการเติมเชื้อลงในหลุม คำนวณตามสูตรคำนวณที่อธิบายไว้ด้านล่าง [9]

$$= \frac{(\text{ค่าการดูดกลืนแสงของชุดควบคุมเชิงบวก} - \text{ค่าการดูดกลืนแสงของเชื้อที่มีการเติมสารละลาย Citral}) \times 100}{\text{ค่าการดูดกลืนแสงของชุดควบคุมเชิงบวก}}$$

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 การทดสอบฤทธิ์ต้านการเจริญของเชื้อ Oral streptococci

จากการทดสอบหาความเข้มข้นของสารในระดับต่ำสุดที่สามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อได้ (Minimum Inhibitory Concentration : MIC) และความเข้มข้นของสารในระดับต่ำสุดที่สามารถฆ่าเชื้อได้ (Minimum Bactericidal Concentration : MBC) ของสารละลาย Citral พบว่าสารละลาย Citral ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.03125 และ 0.0625 ถือเป็นความเข้มข้นระดับต่ำสุด

ที่สามารถยับยั้งการเจริญ (MIC) ของเชื้อ *S. sobrinus* และ *S. mutans* ได้ตามลำดับ และจากการทดสอบเพื่อหาความเข้มข้นของสารละลาย Citral ในระดับต่ำสุดที่สามารถฆ่าเชื้อได้ (MBC) พบว่าสารละลาย Citral ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.0625 ถือเป็นความเข้มข้นระดับต่ำสุดที่สามารถฆ่าเชื้อ *S. sobrinus* และ *S. mutans* ได้ดัง Table 1

Table 1 MICs and MBCs of Citral against the growth of oral streptococci

	<i>Streptococcus sobrinus</i>		<i>Streptococcus mutans</i>	
	MIC	MBC	MIC	MBC
Citral(%)	0.03125	0.0625	0.0625	0.0625

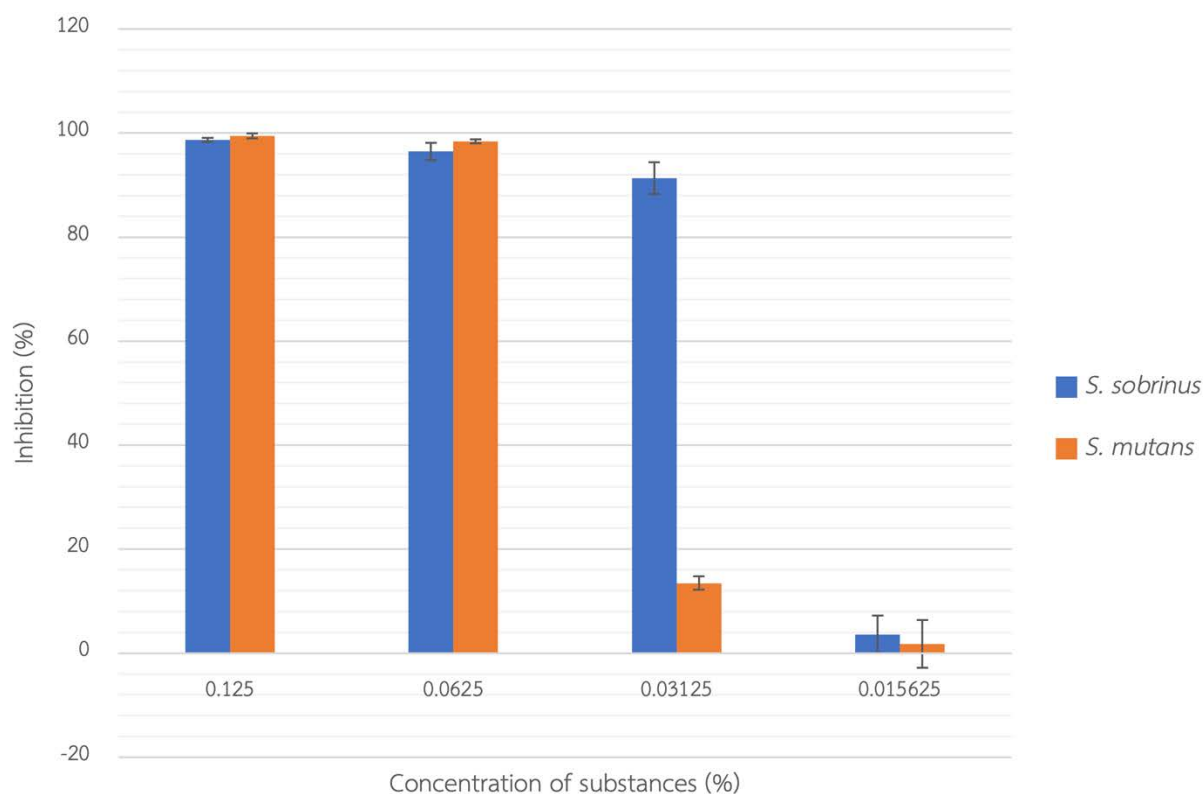
จากผลการทดลองข้างต้นจะเห็นได้ว่าเชื้อทั้งสองชนิดมีการตอบสนองต่อความเข้มข้นของสารที่แตกต่างกัน และเชื้อที่ต่างกันให้ผลตอบสนองต่อความเข้มข้นของ Citral ที่ต่างกัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของนันทิยา จ้อยชะรัต และคณะที่ได้ทำการศึกษาปริมาณสาร Lupinifolin ฤทธิ์ยับยั้งเอนไซม์แอลฟาไกลูโคซิเดส และฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรียในช่องปากของพืชสมุนไพรที่มีชื่อท้องถิ่นว่าชะเอม มีความสามารถในการยับยั้งเชื้อ *Streptococcus mutans* ATCC 25175 และ *Streptococcus sobrinus* ATCC 33478 ผลการวิจัยในครั้งนี้พบว่าสาร Lupinifolin ที่แยกได้จากการสารสกัดของ *D. reticulata* ที่สกัดด้วยเฮกเซนแสดงฤทธิ์ยับยั้ง *S. mutans* ได้ในระดับดีมาก โดยมีค่า MIC เท่ากับ 0.39 µg/mL เมื่อเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน Chlorhexidine ซึ่งแสดงฤทธิ์ยับยั้ง *S. mutans* โดยมีค่า MIC เท่ากับ 0.39 µg/mL อย่างไรก็ตามสาร Lupinifolin ไม่มีฤทธิ์ยับยั้งเชื้อ *S. sobrinus* ที่ความเข้มข้นสูงสุดในการทดสอบเท่ากับ 100 µg/mL เมื่อเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน Chlorhexidine ซึ่งแสดงฤทธิ์ยับยั้ง *S. sobrinus* โดยมีค่า MIC เท่ากับ 0.39 µg/mL และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nuntana Aroonrerk และ Sunit Suksamrarn ที่ทำการศึกษาฤทธิ์ต้านมะเร็งของ Garcinone B จาก *Garcinia mangostana* พบว่า Garcinone B มีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *Streptococcus mutans* *Streptococcus sobrinus* *Lactobacillus acidophilus* *Lactocaseibacillus casei* and โดยมีฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรียที่อาจก่อให้เกิดมะเร็งอยู่ที่ MIC 0.25–0.5 µg/ml อีกทั้ง Garcinone B มีฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรีย *S. mutans* และ *Lactobacillus* ได้ดี โดยมีค่า MIC เท่ากับ 0.25 µg/ml และ 0.5 µg/ml ตามลำดับ และจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าความเข้มข้นของสารละลาย Citral ที่ต่ำที่สุดที่สามารถฆ่าเชื้อมีร้อยละที่เท่ากันของเชื้อทั้งสองสายพันธุ์ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sirinthip Klaophimai และคณะซึ่งทำการศึกษาคุณสมบัติในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียและต่อต้านฟิล์มที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพต่อ *Streptococcus mutans* และ *Streptococcus sobrinus* ของ Rhinacanthin-C ที่แยกได้จาก *Rhinacanthus nasutus* พบว่าค่าความเข้มข้นในการยับยั้งขั้นต่ำ (MIC) และความเข้มข้นในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียขั้นต่ำ (MBC) สำหรับ *S. mutans* คือ 4 และ 8 µM ตามลำดับ สำหรับเชื้อ *S. sobrinus* คือ 2 และ 4 µM ตามลำดับ และงานวิจัยของ R.N.A. Raja Mazlan และคณะได้ศึกษาฤทธิ์ต้านจุลชีพของสารสกัดกระชาย [*Boesenbergia rotunda* (L.) Mansf. A.] ต่อต้านเชื้อ *Streptococcus mutans* และเชื้อ *Streptococcus sobrinus* ซึ่งพบว่าค่า MBC อยู่ที่ 313 µg/ml (*S. mutans*) และ 625 µg/ml (*S. sobrinus*) จากที่ได้กล่าวมาจะเห็นได้ว่าความสามารถในการฆ่าเชื้อทั้งสองสายพันธุ์จะขึ้นอยู่กับชนิดของสารและการตอบสนองของเชื้อต่อสารชนิดนั้นที่ใช้ในการทดสอบจึงไม่ได้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารเสมอไป

3.2 การทดสอบความสามารถในการลดการก่อตัวของไบโอฟิล์ม

จากการทดสอบความสามารถในการลดการก่อตัวของไบโอฟิล์มที่ 1/2xMIC MIC และ 2xMIC พบว่าที่ความเข้มข้นที่ 2xMIC มีความสามารถในการยับยั้งไบโอฟิล์มของเชื้อ *S. sobrinus* และ *S. mutans* ดีที่สุด โดยมีร้อยละการยับยั้งการเกิดไบโอฟิล์มอยู่ที่ร้อยละ 96.48 และ 99.43 ตามลำดับ ดังแสดงใน Table 2 และ Figure 1

Table 2 The percentage of antibiofilm formation activity of Citral

Absorbent 550 nm at Growth		Concentration (%)	Absorbent 550 nm		Inhibition (%)	
<i>S. sobrinus</i>	<i>S. mutans</i>		<i>S. sobrinus</i>	<i>S. mutans</i>	<i>S. sobrinus</i>	<i>S. mutans</i>
1.1070	1.2283	0.125	0.0142	0.0070	98.717254	99.430107
		0.0625	0.0390	0.0198	96.476965	98.388016
		0.03125	0.0962	1.0630	91.309846	13.457624
		0.015625	1.0670	1.2282	3.6133695	1.7992347

**Figure 1** Shows the percentage inhibition of *S. sobrinus* and *S. mutans* in Citral solution.

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าที่ความเข้มข้นร้อยละของสารละลาย Citral ที่ 2xMIC ของเชื้อแต่ละชนิดเพียงพอต่อการยับยั้งการเกิดไบโอฟิล์มถึงร้อยละ 95 เมื่อเทียบกับการเจริญของเชื้อที่ไม่ได้รับการเติมสารละลาย Citral จึงสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sirinthip Klaophimai และคณะซึ่งทำการศึกษาคุณสมบัติในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียและต่อต้านการเกิดฟิล์มที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพของเชื้อ *Streptococcus mutans* และ *Streptococcus sobrinus* ของ Rhinacanthin-C ที่แยกได้จาก *Rhinacanthus nasutus* ซึ่งพบว่าค่าความเข้มข้นในการยับยั้งขั้นต่ำ (MIC) และความเข้มข้นในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียขั้นต่ำ (MBC) สำหรับ *S. mutans* คือ 4 และ 8 μM ตามลำดับ และ MIC และ MBC สำหรับ *S. sobrinus* คือ 2 และ 4 μM ตามลำดับ ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการยับยั้งต่อการก่อตัวของไบโอฟิล์ม และการลดลงของปริมาณของแบคทีเรียที่อาศัยอยู่ในไบโอฟิล์มที่สร้างขึ้น

4. สรุป

จากการศึกษาทดสอบฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อ *Streptococcus sobrinus* ATCC 33402 และ *Streptococcus mutans* ATCC 25175 ในช่องปากของสาร Citral สามารถสรุปได้ว่าสารละลาย Citral มีความสามารถในการยับยั้งเชื้อ *S. sobrinus* และเชื้อ *S. mutans* อยู่ที่ร้อยละ 0.03125 และ 0.0625 ตามลำดับ และความเข้มข้นของสารละลาย Citral ที่มีความสามารถในการฆ่าเชื้อทั้งสองชนิดอยู่ที่ร้อยละ 0.0625 สำหรับเชื้อทั้งสองชนิด สำหรับความสามารถในการลดการเกิดไบโอฟิล์มที่ดีที่สุดอยู่ที่ 2xMIC โดยมีร้อยละการยับยั้งของเชื้อทั้งสองชนิดอยู่ที่ 96.48 และ 99.43 ตามลำดับ

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่อง “ผลของ Citral ต่อการเจริญและการก่อตัวของไบโอฟิล์มของเชื้อกลุ่ม Oral Streptococci” ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยความรู้ความเข้าใจจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ผศ.ดร.กานต์ วงศาริยะ ที่ได้เสียสละเวลาอันมีค่าในการให้คำปรึกษา ให้ความรู้อันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้ รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านใน ภาควิชาชีววิทยาประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำ และแนวทางการทำวิจัยในครั้งนี้ ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดาที่ให้อาชีพ สติปัญญา ความสามารถ ความอดทน ขอขอบใจพี่ๆ เพื่อนๆ ทุกคนที่คอยให้กำลังใจและความช่วยเหลือทุกอย่างด้วยดีเสมอมา งานวิจัยฉบับนี้ขอมอบไว้ให้หวนนึกถึงให้แด่บิดาที่ล่วงลับไปแล้ว มารดา พี่สาว ตลอดจนผู้ที่คอยสนับสนุนให้ความช่วยเหลือ หากบกพร่องประการใดผู้วิจัยขออภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Carolina Muñoz-González, Carolina Cueva, M. Ángeles Pozo-Bayón, M. Victoria Moreno-Arribas. 2015. Ability of human oral microbiota to produce wine odorant aglycones from odourless grape glycosidic aroma precursors. ScienceDirect. Food Chemistry 187 (2015) 112–119.
- [2] Marisa Alves Nogueira Diaz, Isabela de Oliveira Carvalho and Gaspar Diaz. 2015. Herbal Dentifrices for Children:Emerging Trends in Oral Health Sciences and Dentistry. 128-150.
- [3] Kuo-Chou Chiu, Yin-Hwa Shih, Tong-Hong Wang, Wan-Chen Lan, Po-Jung Li, Hong-Syu Jhuang, Shih-Min Hsia, Yen-Wen Shen, Michael Yuan-Chien Chen and Tzong-Ming Shieh. In vitro antimicrobial and antiproliferation potential of honokiol and magnolol against oral pathogens and macrophage. ScienceDirect. the Formosan Medical Association (2021) 120, 827-837.
- [4] World Health Organization. 2021. Oral health. Accessible from : <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/oral-health> (Accessed 15 May 2022).
- [5] สำนักทันตสาธารณสุข กรมอนามัย. 2560. รายงานผลการสำรวจสภาวะสุขภาพช่องปากแห่งชาติ ครั้งที่ 8 ประเทศไทยพ.ศ. 2560. เข้าถึงได้จาก: https://dental.anamai.moph.go.th/web-upload/migrated/files/dental2/n2423_3e9aed89eb9e4e3978640d0a60b44be6_survey8th_2nd.pdf (เข้าถึงเมื่อวันที่ 15 พฤษภาคม 2566).
- [6] Isabela de Oliveira Carvalho, Gislaire Aparecida Purgato, Mayra Soares Piccolo, Virginia Ramos Pizzio, Rafael Ribeiro Coelho, Gaspar Diaz-Muñoz and Marisa Alves Nogueira Diaz. In vitro anticariogenic and antibiofilm activities of toothpastes formulated with essential oils. ScienceDirect. Archives of Oral Biology 117 (2020) 104834.

-
- [7] R.N.A. Raja Mazlan, M.P.M. Zakaria and Y. Rukayadi. 2016. Antimicrobial Activity of Fingerroot [*Boesenbergia rotunda* (L.) Mansf. A.] Extract against *Streptococcus mutans* and *Streptococcus sobrinus*. JOURNAL OF PURE AND APPLIED MICROBIOLOGY. Vol. 10(3), p. 1755-1761.
- [8] Mohammad Moghaddam, Mohammad Reza Alymanesh, Leila Mehdizadeh, Hossein Mirzaei and Abdollah Ghasemi Pirbalouti. 2014. Chemical composition and antibacterial activity of essential oil of *Ocimum ciliatum*, as a new source of methyl chavicol, against ten phytopathogens. Industrial Crops and Products 59 (2014) 144–148.
- [9] Karn Wongsariya, Phanida Phanthong, Nuntavan Bunyapraphatsara, Vimol Srisukh, and Mullika Traidej Chomnawang. 2014. Synergistic interaction and mode of action of *Citrus hystrix* essential oil against bacteria causing periodontal diseases. Informa Healthcare USA. Pharmaceutical Biology. Pharm Biol, 2014; 52(3): 273–280.
- [10] นันทิยา จ้อยชะรัต ชลทิต สนธิเมือง สุรศักดิ์ ลิ้มสุวรรณ. 2558. ปริมาณสารลูปินิโพลินฤทธิ์ยับยั้งเอนไซม์แอลฟาไกลูโคซิเดส และฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรียในช่องปากของพืชสมุนไพรไทยที่มีชื่อท้องถิ่นว่าชะเอม : *Albizia myriophylla*, *Derris reticulata* และ *Myriopterion extensum*. โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากเงินรายได้มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ประจำปีงบประมาณ 2558 รหัสโครงการ TTM5808945. คณะการแพทย์แผนไทย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลานครินทร์.
- [11] Nuntana Aroonrerk, Sunit Suksamrarn. Anticariogenic Activity of Garcinone B from *Garcinia mangostana*. 2021. SWU Dent J. Vol.14 No.2 2021.
- [12] Sirinthip Klaophimai, Phisit Pouyfung, Arthit Klaophimai and Kongthawat Chairatvit. 2023. Bactericidal and anti-biofilm properties against *Streptococcus mutans* and *Streptococcus sobrinus* of rhinacanthin-C isolated from *Rhinacanthus nasutus*. Songklanakarin J. Sci. Technol.45 (5), 591–598.
- [13] รัตน์ญากรณ์ หาชัย. 2558. ผลการเสริมน้ำมันหอมระเหยต่อประสิทธิภาพการผลิตของโคนม. ภาควิชาสัตวศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, อุบลราชธานี.

การวิเคราะห์คุณภาพและการประเมินการยอมรับทางประสาทสัมผัสของตัวอย่างไวน์ลำไยที่มีกรรมวิธีการผลิตแตกต่างกัน

Quality analysis and sensory evaluation acceptance of different longan wine production method samples

ธนารักษ์ ม่อมละมุล¹ ธมลวรรณ วาเลลา¹ ภัททิรา พงษ์นาคินทร์¹ และ วันวิสาข์ ทวีชื่นสกุล^{1,*}

Thanarak Momlamool¹, Thamonwan Walao¹, Pattira Pongnakin¹ and Wanvisa Taweechuensakul^{1,*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

¹ School of Agricultural Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima

*Corresponding author: Wanvisa Taweechuensakul, e-mail address: 155011@office365.sut.ac.th

บทคัดย่อ

ปัจจุบันประเทศไทยมีการแปรรูปลำไยเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าต่ำจำนวนมาก จึงต้องการแปรรูปผลผลิตลำไยให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูงขึ้น งานวิจัยนี้ดำเนินการศึกษาถึงผลการดำเนินธุรกิจทางการตลาดไวน์ พบว่าไวน์เป็นเครื่องดื่มที่จำเป็นในการบอกถึงฐานะของตน ผลิตภัณฑ์ไวน์ต้องมีคุณภาพและกระบวนการผลิตที่ดี สามารถเข้าถึงได้สะดวก ควรมีพนักงานคอยให้ข้อมูล ราคาต้องเหมาะสมกับคุณภาพและรสชาติเป็นสิ่งสำคัญ และดำเนินการศึกษาผลของกระบวนการผลิตไวน์ลำไยต่อสมบัติทางเคมี ทางกายภาพ และการทดสอบประสาทสัมผัสเชิงพรรณนาของไวน์ลำไย 3 ตัวอย่าง คือ ตัวอย่างที่ 1 ใช้ลำไยสดหมักที่อุณหภูมิห้อง ตัวอย่างที่ 2 ใช้ลำไยสดและตัวอย่างที่ 3 ใช้ลำไยอบแห้งหมักในตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ทำการหมักไวน์เป็นระยะเวลา 7 วัน จากนั้นทำการบ่มไวน์ลำไยต่ออีก 7 วัน จากการศึกษาระบวนการผลิตไวน์ลำไยเมื่อสิ้นสุดการหมัก พบว่าค่า pH เท่ากับ 3.64 ± 0.03 , 4.48 ± 0.03 และ 4.17 ± 0.03 ระดับความหวานมีค่าเท่ากับ 8.50 ± 0.1 , 7.30 ± 0.06 และ 10.20 ± 0.026 องศาบริกซ์ ปริมาณแอลกอฮอล์มีค่าเท่ากับ 15.30 ± 0.29 , 14.90 ± 0.1 และ 10.70 ± 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ตามลำดับ การวิเคราะห์ค่าสีพบว่า ค่า L^* , a^* , b^* มีค่าอยู่ระหว่าง 80.77-88.80, -2.11-0.672, 17.40-34.01 ตามลำดับ การทดสอบทางประสาทสัมผัสเชิงพรรณนาพบว่า คะแนนเฉลี่ยความชอบโดยรวม (จากระบบ 20 คะแนน) ของตัวอย่างที่ 2 มีค่าคะแนนมากที่สุด คือ 12 ± 4.93 รองลงมาคือตัวอย่างที่ 1 และตัวอย่างที่ 3 มีค่าคะแนนเท่ากับ 10.18 ± 4.43 และ 10.05 ± 5.18 ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามการยอมรับคุณภาพการทดสอบทางประสาทสัมผัสในด้านความใส สี กลิ่น รสชาติ และความชอบโดยรวมของทุกตัวอย่างไวน์ลำไยวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$)

คำสำคัญ: ไวน์ลำไย, การตลาดไวน์, กระบวนการผลิตไวน์ลำไย, ปริมาณแอลกอฮอล์, การทดสอบทางประสาทสัมผัส

Abstract

Currently, Thailand processes a large amount of longan processed into low-value products. Therefore, there is a need to transform longan products into higher value products. This research studies the results of marketing activities for longan wine. It was found that wine is a beverage that is necessary to show one's status. Wine products must be of good quality and have a good production process. It should be easily accessible, there should be staff to provide information, and the price should be appropriate for the quality. Taste is also an important factor. The study also investigates the effect of the longan wine production process on the chemical, physical and sensory properties of three longan wine samples: Sample 1 used fresh longan fermented at room temperature, Sample 2 used fresh longan, and Sample 3 used dried longan fermented in a 25°C controlled incubator. The wine was fermented for 7 days and then aged for another 7 days. The study of the longan wine production process at the end of fermentation found that the pH was 3.64 ± 0.03 , 4.48 ± 0.03 and 4.17 ± 0.03 , respectively. The sweetness was 8.50 ± 0.1 , 7.30 ± 0.06 and 10.20 ± 0.026 °Brix, respectively. The alcohol content was 15.30 ± 0.29 , 14.90 ± 0.1 and 10.70 ± 0.5 percent by volume, respectively. Color analysis found that L^* , a^* , b^* values were between 80.77-88.80, -2.11-0.672, 17.40-34.01, respectively. Descriptive sensory test found that sample 2 had the highest overall acceptance (20-point-wine) of 12 ± 4.93 , followed by sample 1 with 10.18 ± 4.43 and sample 3 with 10.05 ± 5.18 .

However, statistical analysis of the acceptance of sensory quality in terms of clarity, color, aroma, taste, and overall acceptance of all longan wine samples showed insignificant difference at the 95% confidence level ($p < 0.05$).

Keywords: Longan wine, Wine marketing, Wine longan production process, Alcohol content, Sensory properties

1. บทนำ

ลำไยเป็นพืชไม้ผลที่ออกผลตามฤดูกาลในประเทศไทย มีการพยากรณ์ดัชนีผลผลิตปี 2567 เพิ่มขึ้นจากปี 2566 ร้อยละ 6.95 [1] โดยลำไยในบางปีมีผลผลิตล้นตลาดซึ่งส่วนมากมักขายในรูปแบบเป็นผลสด ผลอบแห้ง ลำไย พันธุ์อีดอเป็นหนึ่งในลำไยกะโหลก มีลักษณะผลปานกลาง เนื้อหนา เม็ดเล็ก ซึ่งเป็นพันธุ์ที่นิยมปลูกในปัจจุบันส่งผลให้กลายเป็นผลไม้เศรษฐกิจของประเทศไทย โดยลำไยมีสรรพคุณ เช่น ลำไยเป็นผลไม้ที่ให้พลังงานสูงมาก เนื่องจากมีน้ำตาลหรือคาร์โบไฮเดรตในปริมาณมาก ลำไยมีวิตามินซีที่มีส่วนช่วยการบำรุงผิวและเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ ลำไยช่วยให้หลับสบายและช่วยในการเจริญอาหาร ลำไยใช้รับประทานสดเป็นผลไม้ในยามว่าง ส่วนน้ำลำไยยังช่วยเพิ่มความสดชื่นให้แก่ร่างกาย [2]

ไวน์เป็นมากกว่าแค่เพียงเครื่องดื่มชนิดหนึ่ง แต่ถือว่าเป็นสัญลักษณ์ที่แสดงออกถึงความสำเร็จทางสถานะทางสังคม เครื่องเสริมฐานะทางสังคม และตัวบ่งชี้ความสุขรอบคอบในการใช้ชีวิต ทำให้คนรุ่นใหม่หันมานิยมบริโภคไวน์มากยิ่งขึ้น ซึ่งถือเป็นอัตราการเติบโตที่ก้าวกระโดดอย่างรวดเร็ว และมีมูลค่าเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย การศึกษากลยุทธ์ทางการตลาด เป็นการศึกษาที่ถือเอาความต้องการของผู้บริโภคเป็นหลัก เพื่อให้ทราบถึงปัจจัยในด้านต่างๆ อีกทั้งยังเป็นการค้นหาปัญหาในการดำเนินงาน ให้ตรงกับความต้องการของผู้บริโภค ช่วยให้เกิดการพัฒนาธุรกิจไวน์ในประเทศไทยให้ดียิ่งขึ้นต่อไป [3]

ไวน์เป็นเครื่องดื่มที่มีแอลกอฮอล์ผลิตขึ้นจากผลไม้ชนิดต่างๆ ซึ่งเกิดจากการหมักน้ำผลไม้ให้เป็นแอลกอฮอล์ และเชื่อมกันมานานว่าการดื่มไวน์เป็นประจำก่อนรับประทานอาหารจะช่วยป้องกันโรคมะเร็ง รวมทั้งชะลอความชราลงได้ เนื่องจากมีสารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidants) และมีจำนวนฟีนอลิก (Phenolic compounds) อยู่หลายชนิด [4, 5] นอกจากนี้ ยังมีประโยชน์ลดความเสี่ยงต่อการเกิดมะเร็งทวารหนัก มะเร็งลำไส้ใหญ่ มะเร็งเต้านม ปัจจุบันมีการผลิตไวน์กันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะไวน์ผลไม้ ซึ่งการเรียกชื่อไวน์จะเรียกตามชื่อผลไม้ที่ใช้ในการผลิตไวน์ชนิดนั้น ๆ ผลไม้ที่เหมาะสมสำหรับทำไวน์ควรมีรสหวานอมเปรี้ยว มีสี กลิ่น และรสชาติดี หรือมีรสฝาดเล็กน้อย ในกระบวนการผลิตไวน์ต้องมีการปรับสภาพให้เหมาะสมต่อการหมักไวน์ ทั้งความเป็นกรดและสารอาหารให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของยีสต์เพื่อใช้ในการผลิตแอลกอฮอล์ ผลไม้ที่นิยมมาทำไวน์และได้ผลดี ได้แก่ หม่อน กระท้อน มะม่วง มะยม มะขามเปียก กระเจี๊ยบแดง มะขามป้อม และสับปะรด เป็นต้น [6, 7]

การประเมินทางประสาทสัมผัส (Sensory evaluation) นับว่ามีบทบาทสำคัญมากในงานทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีทางอุตสาหกรรมเกษตรโดยเฉพาะในด้านอาหาร เพราะเป็นเครื่องมือที่แสดงออกโดยทางอ้อมได้ชัดเจน เช่น รสชาติ กลิ่น สี และลักษณะเนื้อสัมผัส เมื่อมีการบริโภคอาหาร ความรู้สึกที่ซับซ้อนที่เกิดเนื่องจากการทดสอบทางประสาทสัมผัสนี้ อาจจะทำให้การประเมิน โดยใช้ผู้ทดสอบชิมจำนวนมากหรือจำนวนน้อย ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการประเมินนั้นๆ การประเมินทางประสาทสัมผัสนี้อาจจะกระทำในลักษณะที่เป็นแบบแผนโดยใช้ผู้ทดสอบชิมที่ผ่านการฝึกฝนมาแล้วหรือบางที่อาจจะใช้ผู้ทดสอบชิมที่ไม่ผ่านการฝึกฝนมาแล้วก็ได้ เมื่อมีการใช้ผู้ทดสอบชิมในการวัดคุณภาพของผลิตภัณฑ์ สิ่งที่จะต้องคำนึงอย่างมาก คือการที่ต้องควบคุมวิธีการทดสอบ และสภาพของผลิตภัณฑ์ที่จะทำการทดสอบ เพื่อลดความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดจากปัจจัยทางจิตวิทยา [8, 9]

จากที่กล่าวมาข้างต้นพบว่าลำไยมีสารสำคัญหลายชนิดที่มีสรรพคุณในด้านการแพทย์และฤทธิ์ทางเภสัชวิทยา อีกทั้งยังมีการนำลำไยมาทำการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้หลากหลาย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์คือ การศึกษาถึงผลการดำเนินธุรกิจทางการตลาดเพื่อใช้เป็นแนวทางในการทำไวน์ลำไย การวิเคราะห์คุณภาพ สมบัติทางเคมีและกายภาพ และการประเมินการยอมรับทางประสาทสัมผัสของตัวอย่างไวน์ลำไยที่มีกรรมวิธีการผลิตแตกต่างกัน

2. วิธีการศึกษา

2.1 การศึกษาผลการดำเนินธุรกิจทางการตลาดไวน์

การวิเคราะห์พฤติกรรมผู้บริโภค เป็นการค้นหาพฤติกรรมและการซื้อของผู้บริโภค เพื่อให้ทราบถึงลักษณะความต้องการของ

ผู้บริโภค โดยการตั้งคำถาม และคำตอบที่ได้จะช่วยให้การตลาดสามารถจัดทำกลยุทธ์ทางการตลาดที่สามารถตอบสนองความพึงพอใจของผู้บริโภคได้อย่างเหมาะสม [10] โดยนำมาวิเคราะห์ด้วย SWOT Analysis คำถามที่ใช้เพื่อค้นหาลักษณะพฤติกรรมผู้บริโภค คือ 6Ws และ 1H ซึ่งประกอบไปด้วย Who, What, Why, When, Where และ How เพื่อหาคำตอบ 7 ประการหรือ 7Os ซึ่งประกอบไปด้วย ลักษณะกลุ่มเป้าหมาย (Occupants) สิ่งที่มีผู้บริโภคต้องการซื้อ (Objects) วัตถุประสงค์ในการซื้อ (Objectives) ผู้มีอิทธิพลต่อการซื้อ (Organizations) โอกาสในการซื้อ (Occasions) ช่องทางหรือแหล่งในการซื้อ (Outlets) และขั้นตอนในการตัดสินใจซื้อ (Operations) และนำมาออกแบบแผนธุรกิจเพื่อให้ทราบถึงจุดแข็งและจุดอ่อนของผลิตภัณฑ์ไวน์น้ำโย เพื่อเป็นแนวทางในการวางแผนกลยุทธ์ทางการตลาด

2.2 การเตรียมวัตถุดิบและอุปกรณ์ที่ใช้ในการหมักไวน์ลำไย

วัตถุดิบประกอบไปด้วย ลำไยสดและลำไยแห้งพันธุ์อู๊ดจ๊าดจำนวน 3 และ 0.05 กิโลกรัม ตามลำดับ อุปกรณ์ได้แก่ขวดโหลแก้วสำหรับหมักไวน์ขนาด 3 ลิตร จำนวน 3 ใบ พร้อมฝาใส่แอร์ล็อก (Air Lock) ยีสต์ผงหมักไวน์สำเร็จรูปพันธุ์ *Saccharomyces cerevisiae* ยี่ห้อ LALVIN EC 1118 ประเทศเดนมาร์ก ตู้ควบคุมอุณหภูมิ (Incubator) ยี่ห้อ Memmert รุ่น DE-91107 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water Bath) ยี่ห้อ Memmert รุ่น WNB Series น้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์จำนวน 5 กิโลกรัม และน้ำยาล้างทำความสะอาด Starsan จำนวน 0.014 กิโลกรัม

2.3 กระบวนการผลิตไวน์ลำไย

2.3.1 การเตรียมหัวเชื้อยีสต์ ในการเตรียมหัวเชื้อเริ่มต้น (Starter) โดยทำการเติมเชื้อยีสต์ผง EC-1118 ในน้ำลำไย ร้อยละ 0.006 โดยการทำเลี้ยงเชื้อยีสต์ผงที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 25-30 นาที จนเกิดฟอง แล้วจึงเติมลงไปในน้ำหมักไวน์ลำไยที่เตรียมไว้ [5]

2.3.2 การหมักไวน์ลำไย แบ่งออกเป็น 3 ตัวอย่าง ตัวอย่างที่ 1 อัตราส่วนลำไยสดต่อน้ำ 1:3 ตัวอย่างที่ 2 อัตราส่วนลำไยสดต่อน้ำ 3:5 และตัวอย่างที่ 3 อัตราส่วนลำไยแห้งต่อน้ำ 1:20 จากนั้นทำการปรับปริมาณความหวานให้ได้ 22-23° Brix [5] ใช้วิธีทำลายจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนด้วยการต้มให้เดือด ทิ้งไว้ให้เย็นก่อนเทน้ำลำไยลงในขวดโหลขนาด 3 ลิตร จากนั้นเติมหัวเชื้อยีสต์เริ่มต้นที่เตรียมไว้ก่อนแล้วลงในน้ำลำไย โดยตัวอย่างที่ 1 ทำการหมัก ณ อุณหภูมิห้อง 27-28 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity, RH) 55 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 7 วัน ตัวอย่างที่ 2 และตัวอย่างที่ 3 ทำการหมักในตู้ควบคุมอุณหภูมิ (Incubator) ตั้งไว้ที่ 25 องศาเซลเซียส [12] เป็นเวลา 7 วัน จากนั้นทำการบ่มไวน์ลำไยต่ออีกเป็นเวลา 7 วัน เพื่อให้ได้ไวน์ลำไยที่ใสและเป็นการควบคุมรสชาติให้กลมกล่อมขึ้น โดยทุกตัวอย่างถูกบ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ 15 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ (RH) 55 เปอร์เซ็นต์ ทำการสุ่มตัวอย่างเพื่อศึกษาสมบัติทางเคมีและกายภาพ แล้วนำไปทดสอบทางประสาทสัมผัส (Sensory)

2.4 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและทางกายภาพ

การวิเคราะห์ทางเคมี การวัดค่า pH ของไวน์ลำไย ก่อนหมักและหลังหมัก โดยใช้เครื่อง pH meter ยี่ห้อ Amtast รุ่น AMT620 และการวัดปริมาณแอลกอฮอล์ของไวน์ลำไยหลังหมัก โดยใช้เครื่องมือวัดแอลกอฮอล์ Vinometer ทำการทดสอบตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

การวิเคราะห์ทางกายภาพ การวัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด ด้วยเครื่องมือวัดการหักเหของแสง (Refractometer) ขนาด 0-32 องศาบริกซ์ และการวัดค่าสี (Color) ศึกษาคุณภาพสีของไวน์ลำไย ด้วยเครื่องวัดสี (Color Quest® XE, Hunter Associates Laboratory, Inc., VA, USA) นำตัวอย่างใส่ Optical Cells นำไปวิเคราะห์ค่าสีในระบบ CIE Lab scale (L^* , a^* and b^*) เพื่อใช้เป็นดัชนีในการวิเคราะห์คุณภาพของไวน์ โดย L^* หมายถึงความสว่าง (lightness) จากค่า $+L^*$ แสดงถึงสีขาว จนถึง $-L^*$ แสดงถึงสีดำ a^* หมายถึงค่าสีเขียว ($-a^*$) ไปจนถึงค่าสีแดง ($+a^*$) ส่วน b^* หมายถึงค่าสีน้ำเงิน ($-b^*$) ไปจนถึงค่าสีเหลือง ($+b^*$) โดยทำการทดสอบตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

2.5 การทดสอบทางประสาทสัมผัส

เมื่อสิ้นสุดการหมักจะทำการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านความใส สี กลิ่น และรสชาติโดยรวมของผลิตภัณฑ์ไวน์ลำไย ทั้ง 3 ตัวอย่าง โดยใช้วิธีการทดสอบเชิงพรรณนา ระบบ 20 คะแนน (20-Point-Wine) ตาม [11] แบ่งออกเป็นความใส สี กลิ่น รสชาติ โดยความใส ใช้ช่วงคะแนน 0 (ไม่ใส) – 2 (ใสเป็นประกายมองเห็นทะลุแก้ว) สี ใช้ช่วงคะแนน 0 (สีขาวซีด/สีแดงจืด) – 2 (สีตามสายพันธุ์) กลิ่น ใช้ช่วงคะแนน 0 (กลิ่นผิดปกติ/ไม่พึงประสงค์) – 4 (กลิ่นหอมชวนดม/ประทับใจมาก) รสชาติ ใช้ช่วงคะแนน 0 (สีผิดปกติ/ความเปรี้ยว ผาด ขม หวานเกินควร) – 12 (เข้มข้นและประทับใจอย่างยิ่ง) รวม 20 คะแนน ซึ่งใช้ผู้ทดสอบชิม จำนวน 20 คน

ที่ไม่ผ่านการฝึกฝน และอายุไม่ต่ำกว่า 20 ปีบริบูรณ์ที่สามารถรับประทานเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ได้ตามพระราชบัญญัติควบคุมเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ พ.ศ.2551 โดยให้คะแนนตามการพรรณนาของผู้ทดสอบชิม

2.6 การวิเคราะห์ทางสถิติ

การวิเคราะห์ทางสถิติถูกนำมาวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$) โดยใช้โปรแกรม IBM SPSS Statistics V29.0 เพื่อศึกษาสมบัติทางเคมี ทางกายภาพ และการทดสอบทางประสาทสัมผัสได้

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 ผลการศึกษาผลการดำเนินธุรกิจทางการตลาดไวน์

ผลการวิเคราะห์จำนวนและร้อยละของข้อมูลส่วนบุคคลของผู้ตอบแบบสอบถาม พบว่าผู้กรอกแบบสอบถามส่วนใหญ่เป็นเพศหญิง มีพฤติกรรมในการซื้อผลิตภัณฑ์ไวน์ปริมาณ 500 มิลลิลิตร คือซื้อตามที่บุคคลอ้างอิงแนะนำ ซื้อเพื่อเป็นของขวัญในการเข้าร่วมงานมงคลต่าง ๆ และยังมีความคิดเห็นว่าการดื่มไวน์สามารถบ่งบอกถึงรสนิยม ภาพพจน์ได้ และสามารถช่วยลดความเครียดจากการทำงานได้อีกด้วย นอกจากนี้สถานที่จัดจำหน่ายควรเป็นสถานที่ที่เดินทางได้สะดวก รวมถึงราคาของผลิตภัณฑ์ พบว่าผู้กรอกแบบสอบถามต้องการใช้จ่ายผลิตภัณฑ์ไวน์ในราคา 450 บาทขึ้นไปหรือเป็นราคาที่มีความสอดคล้องกับคุณภาพนั่นเอง ดัง Table 1

Table 1 Show the factors of mean, standard deviation, and the level of importance of the marketing mix

Factors	$\bar{x}$	S.D.	Rating
1. Attitude			
Wine is an essential drink.	2.5	1.23	Fair
Drinking wine in moderation every day helps maintain health.	3.52	1.11	Good
How you drink wine can reveal your taste and image.	3.70	1.15	Good
Drinking wine can help reduce work stress.	3.70	1.09	Good
Wine is a drink that expresses your status.	3.36	1.18	Fair
total	3.36	1.15	Fair
2. Buyer Environment			
You purchase wine as recommended by a reference.	2.86	1.21	Fair
You buy wine as a gift for attending various auspicious events.	3.04	1.41	Fair
The people around you influence your wine purchases.	2.93	1.28	Fair
Consumer income influences wine purchases.	3.68	1.12	Good
total	3.13	1.26	Fair
3. Product			
Taste of wine	4.09	1.14	Good
The beauty of the bottle	3.89	1.04	Good
Year of manufacture	4.02	1.15	Good
Reputation of wine	4.14	0.93	Good
Place of production	3.81	1.13	Good
total	3.99	1.08	Good

4. Distribution location			
Store location	3.41	1.13	Fair
Shop's reputation	3.66	0.99	Good
Convenience of traveling	3.66	1.22	Good
Modernity of the store	3.59	1.29	Good
total	3.58	1.16	Good
5. Service quality			
There are employees providing knowledge about wine.	4.02	1.13	Good
Products are recommended to buyers.	4	1.28	Good
Tasting products before buying	4.23	1.09	Good
Having good human relations with customers	4.18	1.67	Good
Total	4.11	1.29	Good
		Number	
Factors		(people)	percentage
		(n=44)	
6. Product price you want to pay			
150 – 300 baht	11	25	
301 – 450 baht	12	27.3	
450 – 600 baht	10	22.7	
600 up	11	25	
total	44	100	

จากสถานการณ์ตลาดไวน์ในปัจจุบัน พบว่า ตลาดยังมีความต้องการสินค้าที่มีส่วนผสมจากวัตถุดิบจากธรรมชาติเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จึงทำให้สามารถขยายสินค้าเข้าสู่ตลาดได้ โดยสามารถวิเคราะห์ความสามารถในการแข่งขันของธุรกิจผ่าน SWOT Analysis ได้ดังนี้

การประเมินสภาพแวดล้อมภายใน **จุดแข็ง (Strengths)** คือ ผลิตภัณฑ์ไวน์ลำไยเป็นสินค้ารูปแบบแปลกใหม่และแตกต่างจากไวน์ทั่วไปโดยมีลำไยเป็นส่วนผสม ใช้ส่วนผสมในการผลิตที่มีคุณภาพ ตั้งราคาสินค้าที่สามารถให้ผู้บริโภคเข้าถึงผลิตภัณฑ์ได้ง่าย ทั้งนักศึกษา วัยทำงาน หรือผู้สูงอายุ ที่ต้องการดื่มไวน์เพื่อรักษาสุขภาพ ส่วน**จุดอ่อน (Weaknesses)** ของผลิตภัณฑ์ คือ เนื่องจากการใช้วัตถุดิบที่มีคุณภาพ ต้องใช้เวลาในการหมัก ต้นทุนการผลิตค่อนข้างสูง ยังมีช่องทางจำหน่ายน้อยและยังไม่ค่อยเป็นที่รู้จักมากนัก จากการประเมินสภาพแวดล้อมภายนอก **โอกาส (Opportunity)** คือ คนไทยเริ่มมีการบริโภคไวน์มากขึ้นเพราะมองว่าการดื่มไวน์สามารถเพิ่มอัตลักษณ์ให้ตนเองได้ และผลิตภัณฑ์ไวน์ลำไยยังใช้ผลไม้นี้ในประเทศไทยเป็นส่วนผสม ซึ่งมีความแปลกใหม่และสร้างความโดดเด่นให้กับแบรนด์ได้มากขึ้นอีกด้วย ส่วน**อุปสรรค (Threats)** คือ คู่แข่งทางการตลาดในธุรกิจเดียวกันมีการแข่งขันที่สูง แล้วยังมีกฎหมายและข้อบังคับประเทศไทย ในเรื่องของการควบคุมกำลังผลิต การขออนุญาตผลิตสุราที่มีความซับซ้อน รวมถึงกฎหมายควบคุมการโฆษณาเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ อัตราภาษีไวน์-สุราพื้นบ้านกรมสรรพสามิต ทำให้ไม่สามารถทำการโฆษณาสินค้าส่งผลต่อการรับรู้ของผู้บริโภค และการเข้าถึงสินค้าได้ไม่มากเท่าที่ควร

3.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของไวน์ลำไย

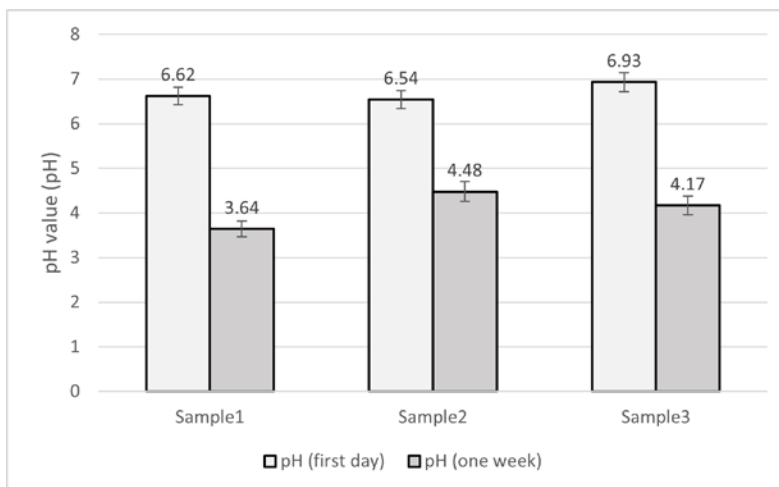


Figure 1 shows the pH value of sample 1, 2 and 3, respectively, on the first day and one week.

จาก Figure 1 แสดงวันแรกของการหมักไวน์ทำการวัดค่า pH ของตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 ได้ 6.62 ± 0.02 , 6.54 ± 0.06 และ 6.93 ± 0.05 ตามลำดับ พบว่าเมื่อหมักไวน์ลำไยครบ 7 วัน ค่า pH ที่วัดได้ของแต่ละตัวอย่าง มีค่าลดลงเป็น 3.64 ± 0.03 , 4.48 ± 0.03 และ 4.17 ± 0.03 ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในช่วงที่มีนัยวิสัย [8] สนับสนุน กล่าวคือค่าความเป็นกรด-ด่างของไวน์ลำไยที่ได้หลังจากหมักแล้ว มีค่าความเป็นกรดอยู่

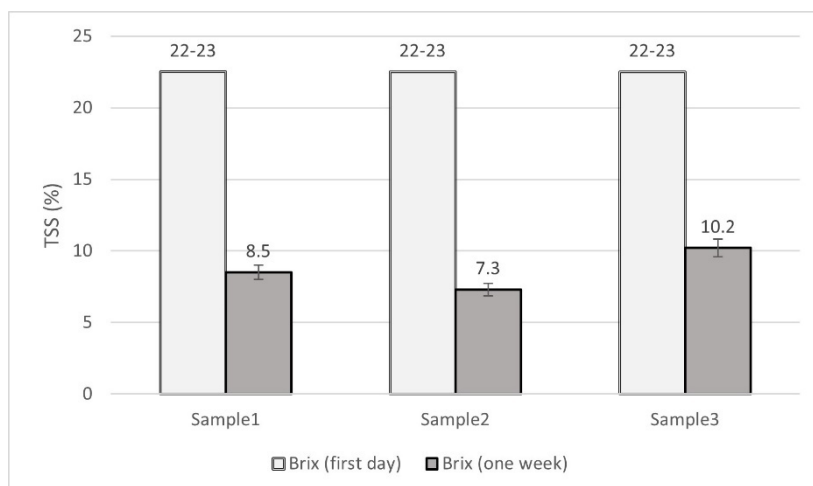


Figure 2 shows the total soluble solids (TSS, %) of sample 1, 2 and 3, respectively, on the first day and one week.

จาก Figure 2 ทุกตัวอย่าง (Sample 1, Sample 2 and Sample 3) ได้ทำการปรับค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้โดยวัดเป็นความหวานของน้ำลำไยที่ใช้ในการหมักเป็น 22-23 องศาบริกซ์ เพื่อให้ได้สภาวะเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของยีสต์ และปริมาณความหวานที่ได้ของแต่ละตัวอย่างหลังการหมักมีความหวานลดลงเป็นระดับความหวานมีค่าเท่ากับ 8.50 ± 0.1 , 7.30 ± 0.06 และ 10.20 ± 0.026 องศาบริกซ์ แสดงว่ายีสต์ที่ใส่ลงไปได้เจริญเติบโตโดยเปลี่ยนปริมาณน้ำตาลเป็นแอลกอฮอล์กับคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาเพื่อทำการหมักน้ำลำไยให้กลายเป็นไวน์ลำไย เมื่อมีปริมาณแอลกอฮอล์ได้ประมาณ 15% โดยปริมาตร ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไวน์ มอก. ไวน์ 2089-2544 ที่ระบุไวน์ผลไม้ ที่ทำมาจากวัตถุดิบกลุ่มผลไม้ผ่านกรรมวิธี

การผลิตไวน์ผลไม้ มีแรงแอลกอฮอล์ไม่เกิน 15% จึงทำการหยุดการเจริญเติบโตของยีสต์ ด้วยอย่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 65 องศาเซลเซียส 30 นาที ซึ่งผลของการหมักเป็นไปตาม [6, 8, 11]

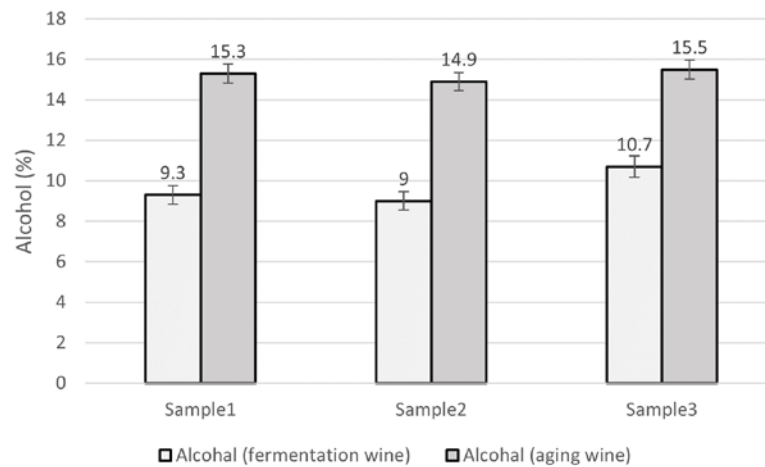


Figure 3 shows the alcohol content (%) of sample 1, 2 and 3, respectively, of the fermentation and aging longan wine.

จาก Figure 3 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของปริมาณแอลกอฮอล์ที่ได้จากการหมักและการบ่มไวน์ลำไย ของตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ พบว่ามีค่าปริมาณแอลกอฮอล์หลังหมักไป 7 วัน มีค่า 9.3 ± 0.30 , 9.0 ± 0.25 และ 10.7 ± 0.54 หลังหมักครบ 7 วัน ได้ทำการบ่มต่อเพื่อให้ไวน์ที่มีคุณภาพใสไม่มีตะกอน วัดค่าปริมาณแอลกอฮอล์ได้ $15.3\% \pm 0.29$, $14.9\% \pm 0.01$ และ $15.5\% \pm 0.50$ ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้เป็นไปตาม [5, 6, 11 และ 12] ที่ว่า เมื่อทำการบ่มไวน์เป็นระยะเวลาหนึ่งจึงทำให้ได้ไวน์ที่มีความใส เนื่องจากเชื้อยีสต์ที่หยุดแล้วได้ตกตะกอนลงไปที่ก้นขวดและทำการกรองตะกอนออกจึงทำให้ไวน์ลำไยที่ได้มีคุณภาพที่ใสขึ้น และแนวโน้มในการผลิตปริมาณแอลกอฮอล์ที่ได้มีความสัมพันธ์กับค่าปริมาณความหวาน ยิ่งปริมาณความหวานลดลงเท่าไรเกิดจากเชื้อยีสต์เจริญเติบโตได้ดี จึงผลิตปริมาณแอลกอฮอล์ได้มาก ทั้งนี้ไม่ควรให้เชื้อยีสต์ผลิตปริมาณแอลกอฮอล์ได้มากกว่า 15% ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไวน์ มอก. ไวน์ 2089-2544

การวิเคราะห์ค่าสีของผลิตภัณฑ์ไวน์ลำไย ดัง Table 1 โดยเปรียบเทียบค่าความสว่าง L^* (Lightness) มีค่าอยู่ระหว่าง 80.77-88.80 ค่า a^* ค่าความเป็นสีแดง (Redness) มีค่าอยู่ระหว่าง -2.11-0.67 และค่า b^* ค่าความเป็นสีเหลือง (Yellowness) มีค่าอยู่ระหว่าง 17.40-34.01 ตามลำดับ จากผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าค่า L^* a^* และ b^* ของทั้ง 3 ตัวอย่าง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่นร้อยละ ($p > 0.05$) ทั้งนี้เนื่องมาจากลักษณะทางด้านสีของวัตถุดิบที่นำมาทำไวน์คือลำไยสด ลำไยแห้ง และอุณหภูมิใช้ในการหมักไวน์ที่ส่งผลต่อความแตกต่างของทุกค่าสีซึ่งทำให้ไวน์ลำไยไม่มีความสะอาด ใส และมีสีที่เหมาะสมกับชนิดและอายุของไวน์ เป็นไปตามการศึกษาของ [6, 8 และ 11]

Table 1 Physicochemical properties of longan wine

Sample	Color analysis (Mean $\pm$ S.D.)		
	L^*	a^*	b^*
1	80.77 ± 1.04^a	0.67 ± 0.15^a	23.42 ± 0.22^a
2	88.15 ± 0.06^b	-2.11 ± 0.03^b	17.40 ± 0.02^b
3	88.80 ± 0.13^b	-1.85 ± 0.14^c	34.01 ± 0.03^c

Note: Different superscripts in each column denoted significantly different at the 95% confidence level ($p < 0.05$).

3.3 ผลวิเคราะห์ทางประสาทสัมผัส

ผลการวิเคราะห์ทางประสาทสัมผัสด้านความใส ด้านสี ด้านกลิ่น และด้านรสชาติของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์ไวน์ลำไยทั้ง 3 ตัวอย่าง โดยใช้ระบบ 20 คะแนน (20-Point-Wine) ดัง Table 2 พบว่า การทดสอบประสาทสัมผัสด้านความใส ด้านสี ด้านกลิ่น และรสชาติของไวน์ลำไยทั้งสามตัวอย่าง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ซึ่งการทดสอบด้านความใส ต่อผลิตภัณฑ์ไวน์ลำไยตัวอย่างที่ 1 ตัวอย่างที่ 2 และตัวอย่างที่ 3 มีคะแนนเท่ากับ 1.20 ± 0.62 , 1.50 ± 0.61 และ 1.15 ± 0.75 ตามลำดับ ซึ่งคะแนนความใสของผลิตภัณฑ์ไวน์ลำไยสุตรที่ 3 มีค่าน้อยที่สุด เกิดจากเนื้อลำไยถูกนำไปผ่านกรรมวิธีให้ความร้อน อบแห้ง จึงส่งผลให้ไวน์ลำไยมีสีตามธรรมชาติของเนื้อลำไยอบแห้ง จึงทำให้ผลิตภัณฑ์ไวน์ลำไยตัวอย่างที่ 3 มีความใส่น้อยที่สุดจากทั้งสามตัวอย่าง การทดสอบด้านสีต่อผลิตภัณฑ์ไวน์ลำไยตัวอย่างที่ 1 ตัวอย่างที่ 2 และตัวอย่างที่ 3 มีคะแนนเท่ากับ 1.05 ± 0.69 , 0.70 ± 0.86 และ 1.40 ± 0.60 ตามลำดับ การที่ผลิตภัณฑ์ไวน์ลำไยตัวอย่างที่ 3 ได้คะแนนในด้านสีสูงที่สุด เกิดจากการที่ลำไยอบแห้งมีสีเหลืองเข้ม ทำให้เมื่อนำมาผลิตไวน์ลำไยจึงมีสีสันทสวยงามเป็นที่พึงพอใจของผู้ทำการทดสอบประสาทสัมผัส การทดสอบด้านกลิ่นตัวอย่างที่ 1 ตัวอย่างที่ 2 และตัวอย่างที่ 3 มีค่าคะแนนเท่ากับ 2.05 ± 1.15 , 2.30 ± 1.13 และ 2.00 ± 1.25 ตามลำดับ และด้านรสชาติโดยรวมตัวอย่างที่ 1 ตัวอย่างที่ 2 และตัวอย่างที่ 3 มีค่าคะแนนเท่ากับ 6.45 ± 3.19 , 7.05 ± 3.85 และ 4.85 ± 4.43 ตามลำดับ ส่วนการที่รสชาติของผลิตภัณฑ์ไวน์ลำไยตัวอย่างที่ 2 มีค่าสูงที่สุด เกิดจากการที่ไวน์มีรสชาติกลมกล่อม ตามธรรมชาติของวัตถุดิบที่ใช้ทำ ทำให้ผู้ทดสอบมีความพึงพอใจที่สุด

Table 2 Sensory properties of wine in 3 samples

Example	Description analysis (Mean $\pm$ S.D.)				Overall acceptance, ns
	Clarity, ns	Color, ns	Smell, ns	Taste, ns	
1	1.20 ± 0.62	1.05 ± 0.69	2.05 ± 1.15	6.45 ± 3.19	10.18 ± 4.43
2	1.50 ± 0.61	0.70 ± 0.86	2.30 ± 1.13	7.05 ± 3.85	12.00 ± 4.93
3	1.15 ± 0.75	1.40 ± 0.60	2.00 ± 1.25	4.85 ± 4.43	10.05 ± 5.18

Note: ns letters in each columns denote insignificantly different at the 95% confidence level ($p > 0.05$).

4. สรุป

จากการศึกษาผลการดำเนินธุรกิจทางการตลาดไวน์ เพื่อนำมาหาทิศทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ พบว่า ผู้บริโภคแบบสอบถามมีความเห็นว่าผลิตภัณฑ์ไวน์เป็นเครื่องดื่มที่จำเป็นในการบอกถึงฐานะของตน โดยผลิตภัณฑ์ไวน์ต้องมีคุณภาพและกระบวนการผลิตที่ดี สามารถเข้าถึงร้านขายผลิตภัณฑ์ไวน์ได้สะดวก ควรมีพนักงานที่คอยให้ข้อมูลเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์ไวน์ ราคาต้องเหมาะสมกับคุณภาพ ซึ่งมีความสอดคล้องในด้านของราคาและด้านผลิตภัณฑ์ ผู้บริโภคจะให้ความสำคัญเกี่ยวกับราคาที่ต้องไม่สูงจนเกินไปเมื่อเปรียบเทียบกับคุณภาพ และรสชาติเป็นสิ่งสำคัญที่สุดในด้านผลิตภัณฑ์ จนนำไปสู่กระบวนการหมักของไวน์ลำไย โดยแบ่งสูตรการหมักเป็น 3 ตัวอย่าง คือ ตัวอย่างที่ 1 ใช้ลำไยสดหมักที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 7 วัน ตัวอย่างที่ 2 ใช้ลำไยสด และตัวอย่างที่ 3 ลำไยอบแห้ง หมักในตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 7 วัน ตามลำดับ โดยใช้เชื้อยีสต์ผงสำเร็จรูป EC-1118 แล้วทำการเก็บตัวอย่างเพื่อทำการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและทางกายภาพ ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ โดยทำการวัดเป็นปริมาณความหวาน ปริมาณแอลกอฮอล์ และการวิเคราะห์ค่าสี โดยในวันสุดท้ายของการหมักไวน์ลำไยมี ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อยู่ในช่วง 3.64 ถึง 4.4 ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมในการป้องกันการเสื่อมเสียของไวน์ และมีผลต่อคุณภาพและรสชาติของไวน์ลำไย ปริมาณความหวานของไวน์ลำไยวัดได้เท่ากับ 7.30 ถึง 10.20 องศาบริกซ์ แสดงว่ายีสต์ที่ใส่ลงไปได้เจริญเติบโตโดยเปลี่ยนปริมาณน้ำตาลเป็นแอลกอฮอล์กับคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาเพื่อทำการหมักน้ำลำไยให้กลายเป็นไวน์ลำไย เมื่อมีปริมาณแอลกอฮอล์ได้ประมาณ 15% โดยปริมาตร จึงทำการหยุดเชื้อยีสต์ การวิเคราะห์ปริมาณแอลกอฮอล์ พบว่ามีค่าเท่ากับ 14.90 ถึง 15.50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร แสดงว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้คือไวน์ลำไยและเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไวน์ มอก. ไวน์ 2089-2544 การวิเคราะห์ค่าสีเมื่อสิ้นสุดการหมักพบว่า ค่าความสว่าง L* (Lightness) มีค่าอยู่ระหว่าง 80.77-88.80 แสดงให้เห็นว่าไวน์ลำไยที่ได้มีความใส การทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านความใส สี

กลิ่น และรสชาติโดยรวมทั้ง 3 ตัวอย่าง พบว่าผลิตภัณฑ์ไวน์ลำไยตัวอย่างที่ 2 มีคะแนนมากกว่าตัวอย่างที่ 1 และ 3 ในด้านความใส กลิ่น และรสชาติ ส่วนผลิตภัณฑ์ไวน์ลำไยตัวอย่างที่ 3 มีคะแนนมากกว่าตัวอย่างที่ 1 และ 2 ในด้านสี โดยผู้ทำการทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสในด้านความใส สี กลิ่น รสชาติ และความชอบโดยรวม ให้คะแนนตัวอย่างที่สองมากที่สุด

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้ความช่วยเหลือในส่วนของห้องปฏิบัติการและฟาร์มมหาวิทยาลัยเพื่อใช้ในการทำการทดลอง และขอขอบคุณนายจรเดช ลาบุตร ในการให้ความช่วยเหลือในการจัดเตรียมอุปกรณ์ พร้อมเป็นหนึ่งในผู้ทดสอบชิมไวน์ที่ผ่านการอบรมเรียบร้อยแล้ว

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] คณะกรรมการพัฒนาคุณภาพข้อมูลปริมาณการผลิตสินค้าเกษตร. 2567. ผลพยากรณ์ปริมาณการผลิตไม้ยืนต้นและไม้ผล ปี 2567 (ลำไย). สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. เข้าถึงได้จาก : เว็บไซต์ <https://www.oae.go.th/assets/portals/1/fileups/forecastdata/files/forecast/region/table2.pdf> (เข้าถึงเมื่อ 26 มีนาคม 2567).
- [2] สำนักส่งเสริมและฝึกอบรม. 2567. การปลูกลำไย. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. เข้าถึงได้จาก : เว็บไซต์ https://eto.ku.ac.th/neweto/e-book/plant/tree_fruit/puklamyai.pdf (เข้าถึงเมื่อ 10 พฤษภาคม 2567).
- [3] อนุชิต แสงอ่อน และเอก ชุณหะวัณ. 2557. แนวทางการสร้างกลยุทธ์ทางการตลาดเพื่อสร้างความพึงพอใจให้กับผู้บริโภคที่ดื่มไวน์ในร้านไวน์บาร์ แอนด์ เรสโตเรอร์องก์ในกรุงเทพมหานคร มหาวิทยาลัยนานาชาติแสตมฟอร์ด. ม.ป.ท.
- [4] ญัฐกาญจน์ นายมอญ. 2562. ไวน์และสุขภาพ. วารสารวิทยาศาสตร์สุขภาพสัตว์และเทคโนโลยี. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 3. 24-30.
- [5] ประภาพันธุ์ ศิริจันทร์แสง, เพ็ญภา ตาซุชาติ และวอรรดา ตอธรรมย์. 2564. การศึกษาคุณสมบัติทางเคมีประสาทสัมผัส และการต้านอนุมูลอิสระของสาโทข้าวเจ้า. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. 26. 1067-1079.
- [6] อำพรณ ชัยกุลเสรีวัฒน์ และปิยมาศ วงษ์ประยูร. 2548. การวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ไวน์มะม่วง. วารสารเทคโนโลยีการอาหาร. มหาวิทยาลัยสยาม. 2. 28-35.
- [7] ศูนย์หม่อนไหมเฉลิมพระเกียรติสมเด็จพระนางเจ้าสิริกิติ์ พระบรมราชินีนาถ เลย. 2567. ไวน์น้ำลูกหม่อน คือสุดยอดไวน์ไทย (เกร็ดความรู้). กรมหม่อนไหม. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. เข้าถึงได้จาก : เว็บไซต์ <https://qsds.go.th/newqssclei/#> (เข้าถึงเมื่อ 10 พฤษภาคม 2567).
- [8] สุภาภรณ์ เหลืองไพบูลย์ศรี และโกเมศ สัตยาวิธ. 2567. การตรวจสอบคุณภาพทางกายภาพและประสาทสัมผัสของไวน์ผลไม้. ชุดโครงการวิจัยและพัฒนาระบบและรับรองมาตรฐานสินค้าพืช. กรมวิชาการเกษตร. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- [9] ไพโรจน์ วิริยจารี. 2561. การประเมินทางประสาทสัมผัส (Sensory Evaluation). พิมพ์ครั้งที่ 2. ศูนย์บริหารงานวิจัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.
- [10] Kotler, P. and Armstrong, G. 2014. Principles of marketing. 15th edn. Boston, Pearson, Education. c2014.
- [11] วิบูลย์ เจริญสง่างวงศ์ และศรีเวียง ทิพนานนท์. 2558. การพัฒนาผลิตภัณฑ์ไวน์ข้าวสีทองด้วยแอลกอฮอล์. วารสารแก่นเกษตร. 43. 613-622.
- [12] นุจรี สอนสะอาด, สุภาพร รักษ์ และวิลาวัลย์ เกสร. 2563. สภาวะที่เหมาะสมในการหมักไวน์ลำไยด้วยใช้กลั่นแบบเบตริงเซลล์. วารสารเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี. 1. 49-61.

การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของดินถล่มโดยใช้การเรียนรู้ของเครื่องในจังหวัดภูเก็ต Analysis of Landslide Susceptibility Using Machine Learning in Phuket

พันแสง พงษ์วังทอง¹ และ พิพัทธ์ เรืองแสง^{1,*}
Pansang Pangwangthong¹ and Pipat Reungsang^{1,*}

¹สาขาวิชาภูมิสารสนเทศศาสตร์ วิทยาลัยการคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น

¹Geo-informatics program, College of Computing, Khon Kaen University, Khon Kaen Province

*Corresponding author: Pipat Reungsang, e-mail address: reungsang@kku.ac.th

บทคัดย่อ

เทคโนโลยีการเรียนรู้ด้วยเครื่องได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของดินถล่มอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการวิเคราะห์พื้นที่อ่อนไหวของดินถล่มของแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่อง 3 ประเภท ได้แก่ แบบจำลองซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (SVM), แบบจำลองป่าสุ่ม (RF) และแบบจำลองวิธีการเพื่อนบ้านใกล้ที่สุด (KNN) และ (2) เพื่อจัดทำแผนที่พื้นที่อ่อนไหวของดินถล่มในจังหวัดภูเก็ต โดยฐานข้อมูลดินถล่มในพื้นที่จังหวัดภูเก็ตจำนวน 220 จุด ประกอบด้วยข้อมูล 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มข้อมูลการฝึกอบรม 176 จุด (70%) และกลุ่มข้อมูลการตรวจสอบความถูกต้อง 44 จุด (30%) ร่วมกับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อดินถล่มทั้งหมด 13 ปัจจัย มาทำการสร้างแบบจำลองแสดงความอ่อนไหวของดินถล่ม จากนั้นทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองทั้ง 3 ประเภท โดยวัดประสิทธิภาพด้วยพื้นที่ใต้กราฟ (Area Under an ROC Curve : AUCs) ผลการศึกษาพบว่า แบบจำลอง RF มีค่าความแม่นยำมากที่สุดโดยมีค่า AUC อยู่ที่ 0.99025 มีพื้นที่มีโอกาสเกิดดินถล่มเท่ากับ 214.67 ตารางกิโลเมตร แบบจำลอง SVM มีค่า AUC อยู่ที่ 0.98440 มีพื้นที่มีโอกาสเกิดดินถล่มเท่ากับ 300.86 ตารางกิโลเมตร และแบบจำลองที่มีค่าความแม่นยำ น้อยที่สุดคือแบบจำลอง KNN มีค่า AUC อยู่ที่ 0.97661 และมีพื้นที่มีโอกาสเกิดดินถล่มเท่ากับ 228 ตารางกิโลเมตร ซึ่งสรุปได้ว่าแบบจำลอง RF เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด และสามารถนำมาจัดทำแผนที่แสดงความอ่อนไหวของดินถล่มเพื่อใช้ในการวางแผนรับมือกับดินถล่มในพื้นที่จังหวัดภูเก็ตได้

คำสำคัญ: การเรียนรู้ด้วยเครื่อง, แบบจำลองซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน, แบบจำลองป่าสุ่ม, แบบจำลองวิธีการเพื่อนบ้านใกล้ที่สุด

Abstract

Machine learning technology has been widely applied in landslide susceptibility analysis nowadays. The objectives of this research were (1) to compare the performance of three machine learning models: Support Vector Machine (SVM), Random Forest (RF), and K-Nearest Neighbor (KNN) in analyzing landslide susceptible areas, and (2) to produce a landslide susceptibility map for Phuket province. The landslide database in Phuket province consists of 220 data points, comprising a training dataset of 176 points (70%) and a validation dataset of 44 points (30%), along with 13 landslide influencing factors were used to construct landslide susceptibility models. The performance of the three models was then compared using the Area Under the ROC Curve (AUC) metric. The results showed that the RF model had the highest accuracy with an AUC of 0.99025, indicating a landslide susceptible area of 214.67 square kilometers. The SVM model had an AUC of 0.98440 with a landslide susceptible area of 300.86 square kilometers. The KNN model had the lowest accuracy with an AUC of 0.97661 and a landslide susceptible area of 228 square kilometers. In summary, the RF model proved to be the most efficient and can be used to produce a landslide susceptibility map for disaster planning in Phuket province.

Keywords: Machine learning, Support Vector Machine, Random Forest, K-Nearest Neighbors

1. บทนำ

ดินถล่มเป็นภัยทางธรรมชาติที่เกิดจากการเคลื่อนตัวของมวลดิน ด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกซึ่งมีน้ำเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยน้ำจะเข้าไปแทรกแทรกช่องว่างในดินทำให้มวลดินสามารถเคลื่อนที่จากที่สูงลงสู่ที่ต่ำกว่าได้ โดยทั่วไปพบในบริเวณพื้นที่ที่เป็นภูเขา หลังฝนตกหนักเป็นเวลานาน ทำให้เกิดความเสียหาย ไม่ว่าจะเป็นบ้านเรือน เส้นทางคมนาคม หรือทำให้เกิดการบาดเจ็บและเสียชีวิต [1] ดินถล่มเป็นภัยธรรมชาติที่ป้องกันได้ยาก หน่วยงานที่เกี่ยวข้องต้องเสี่ยงงบประมาณในการป้องกัน ฝักระวัง และเยียวยาผู้ที่ได้รับผลกระทบจากการเกิดดินถล่มเป็นจำนวนมาก ดังนั้น การทราบถึงบริเวณที่มีโอกาสเกิดดินถล่มล่วงหน้าสามารถลดความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินได้

จังหวัดภูเก็ตจัดเป็นเกาะที่มีขนาดใหญ่ที่สุดของประเทศไทย มีจำนวนประชากร 418,785 คน [2] ตั้งอยู่ทางทิศตะวันตกของภาคใต้ในทะเลอันดามัน มีรายได้จากการท่องเที่ยวในปี 2664 ประมาณ 21,320.1 ล้านบาท [3] ภูเก็ตมีลักษณะเป็นหมู่เกาะพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นภูเขาถึงร้อยละ 70 ของพื้นที่ทั้งหมด ประมาณร้อยละ 30 เป็นพื้นที่ราบ มีลักษณะภูมิอากาศแบบเขตร้อนชื้น อยู่ในเขตอิทธิพลของลมมรสุม ตะวันตกเฉียงใต้และลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ มีอากาศร้อนชื้นตลอดปี [4] ทำให้ได้รับผลกระทบจากน้ำท่วมและดินถล่มอยู่บ่อยครั้งส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินเป็นจำนวนมาก ลักษณะของพื้นที่อ่อนไหวต่อดินถล่ม มักอยู่ตามลาดเชิงเขา หรือบริเวณที่ลุ่มที่ติดต่อกับภูเขาสูงที่มีการพังทลายของดินสูง หรือสภาพพื้นที่ต้นน้ำที่มีการทำลายป่าไม้สูง ในบางพื้นที่อาจเป็นบริเวณภูเขาหรือผาที่มีหินผุพังง่าย [5] ทำให้เข้าถึงพื้นที่ได้ยากลำบาก การนำเทคโนโลยีสารสนเทศภูมิศาสตร์และการรับรู้ระยะไกลมาประยุกต์ใช้ในการสำรวจพื้นที่ดินถล่ม นอกจากจะสามารถทำได้ครอบคลุมทุกพื้นที่แล้ว ยังประหยัดเวลาและลดต้นทุนในการสำรวจได้

ปัจจุบันการเรียนรู้ด้วยเครื่องหลายประเภทได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ความอ่อนไหวดินถล่มไม่ว่าจะเป็น Random Forest, Support Vector Machine, Convolutional Neural Network, Artificial Neural Network, Decision Trees หรือ Boosting เป็นต้น [6][7][8][9] แต่ในประเทศไทยการนำเทคโนโลยีการเรียนรู้ด้วยเครื่องมาประยุกต์ใช้กับการหาพื้นที่อ่อนไหวต่อดินถล่มยังไม่เป็นที่แพร่หลายมากนัก

ดังนั้นเพื่อให้สามารถนำการเรียนรู้ของเครื่องมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์พื้นที่อ่อนไหวของดินถล่มในจังหวัดภูเก็ตได้อย่างเหมาะสม ถูกต้องแม่นยำและมีความน่าเชื่อถือ การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการวิเคราะห์พื้นที่อ่อนไหวของดินถล่มของแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่อง 3 ประเภท ได้แก่ Support Vector Machine (SVM) [10] , Random Forest (RF) [11] , และ K-Nearest Neighbors (KNN) [12] จึงควรมีการตรวจสอบ ก่อนนำไปจัดทำแผนที่แสดงความอ่อนไหวของดินถล่มในจังหวัดภูเก็ตเพื่อใช้ในการวางแผนป้องกันและบรรเทาผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อไป

2. วิธีการศึกษา

การศึกษานี้มุ่งเน้นในการประยุกต์ใช้การเรียนรู้ของเครื่องในการวิเคราะห์พื้นที่อ่อนไหวดินถล่ม โดยใช้แบบจำลอง 3 ประเภท ได้แก่ Support Vector Machine (SVM), Random Forest (RF) และ K-Nearest Neighbors (KNN) ซึ่งมีขอบเขตจังหวัดภูเก็ตเป็นพื้นที่ศึกษา โดยครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 543 ตารางกิโลเมตร

2.1 ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย

ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 และข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Landsat 5 และ Landsat 8 เพื่อทดแทนข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 ที่ไม่มีข้อมูล โดยใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมในปี 2532, 2540, 2548, 2556 และ 2564 ครอบคลุมพื้นที่จังหวัดภูเก็ต ชั้นข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน ปี 2561 ชั้นข้อมูลระดับความสูง ชั้นข้อมูลเส้นทางคมนาคม ปี 2558 และชั้นข้อมูลเส้นทางน้ำ ปี 2562 ฐานข้อมูลดินถล่มและปริมาณน้ำฝนรายปี ช่วงปี 2536–2562 แผนที่ธรณีวิทยาจังหวัดภูเก็ต ปี 2550 และข้อมูลเหตุการณ์ธรณีพิบัติภัยและจุดปลอดภัยชั่วคราวจากแผ่นดินถล่ม ปี 2564

2.2 การเตรียมข้อมูล 13 ปัจจัย

2.2.1 **ชั้นข้อมูล Normalized Difference Vegetation Index: NDVI หรือ ดัชนีความแตกต่างพืชพรรณ** ดาวเทียมภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Landsat 5 และ Landsat 8 ครอบคลุมพื้นที่จังหวัดภูเก็ต จากนั้นทำการปรับแก้เชิงคลื่น เพื่อลดความไม่ชัดเจนของภาพ แล้วทำการต่อภาพ (mosaic) ตัดภาพ (clip) ให้อยู่ในพื้นที่ศึกษา ทำการหาค่า NDVI ในปี 2532, 2540, 2548, 2556 และ 2564 โดยใช้สมการ [13] (1)

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED} \quad (1)$$

โดยที่ NIR คือ ช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ และ RED คือ ช่วงคลื่นแสงสีแดง จากนั้นทำการหาค่าเฉลี่ยของ NDVI ของในช่วง 5 ปี

2.2.2 **ชั้นข้อมูลปริมาณน้ำฝน** ใช้ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายปีของจังหวัดภูเก็ต จังหวัดพังงาและจังหวัดกระบี่ช่วงปี 2536–2562 ทำการประมาณค่าเชิงพื้นที่ (Interpolation) ด้วยวิธี Inverse Distance Weighted (IDW) จากสมการ [14] (2)

$$Z = \sum_{i=1}^n \frac{1}{(d_i)^p} Z_i / \sum_{i=1}^n \frac{1}{(d_i)^p} \quad (2)$$

โดยที่ Z คือค่าโดยประมาณของจุดทำนาย Z_i คือค่าที่วัดได้สำหรับจุดตัวอย่าง d_i คือระยะห่างแบบยูคลิดระหว่างจุดตัวอย่างและจุดทำนาย p คือพารามิเตอร์กำลัง และ n แทนจำนวนจุดตัวอย่าง

2.2.3 **ชั้นข้อมูลระดับความสูง** แกะไขข้อมูลระดับความสูงไม่ให้มี No data และทำการปรับแก้ระบบพิกัดภูมิศาสตร์เป็น UTM WGS84 Zone 47

2.2.4 **ชั้นข้อมูลทิศทางการลาดชัน** นำระดับความสูงที่ปรับแก้ระบบพิกัดภูมิศาสตร์แล้ว มาสร้างทิศทางการลาดชัน จากสมการ [15] (3)

$$\varphi(x, y) = \arctan \left(\frac{f_y}{f_x} \right) \quad (3)$$

โดยที่ f_y คือ พื้นผิวในแนวแกน y และ f_x คือพื้นผิวในแนวแกน x

2.2.5 **ชั้นข้อมูลความโค้งของแผนผัง** นำระดับความสูงที่ปรับแก้ระบบพิกัดภูมิศาสตร์แล้วมาทำการสร้างความโค้งของแผนผัง จากสมการ [15] (4)

$$K_p = -S^{-2}(f_x^2 f_{xx} + 2f_x f_y f_{xy} + f_y^2 f_{yy}) \quad (4)$$

โดยที่ S คือ ความชันของพื้นผิว f_x, f_y คือ อนุพันธ์บางส่วนของฟังก์ชันความสูงของพื้นผิวต่อ x และ y ตามลำดับ f_{xx}, f_{yy} คือ อนุพันธ์บางส่วนเชิงอันดับสองของฟังก์ชันความสูงของพื้นผิวต่อ x และ y ตามลำดับ และ f_{xy} คือ อนุพันธ์ผสมของฟังก์ชันความสูงของพื้นผิวต่อ x และ y

2.2.6 **ข้อมูลความโค้งของโปรไฟล์** นำระดับความสูงที่ปรับแก้ระบบพิกัดภูมิศาสตร์แล้วมาทำการสร้างความโค้งของโปรไฟล์ จากสมการ [15] (5)

$$K_t = \frac{f_x^2 f_{xx} + 2f_x f_y f_{xy} + f_y^2 f_{yy}}{-S^2 \sqrt{1+S^2}} \quad (5)$$

โดยที่ S คือ ความชันของพื้นผิว f_x, f_y คือ อนุพันธ์บางส่วนของฟังก์ชันความสูงของพื้นผิวต่อ x และ y ตามลำดับ f_{xx}, f_{yy} คือ อนุพันธ์บางส่วนเชิงอันดับสองของฟังก์ชันความสูงของพื้นผิวต่อ x และ y ตามลำดับ และ f_{xy} คือ อนุพันธ์ผสมของฟังก์ชันความสูงของพื้นผิวต่อ x และ y

2.2.7 **ชั้นข้อมูลความลาดชัน** สร้างโดยนำระดับความสูงที่ได้ทำการปรับแก้แล้วมาทำการสร้างมาสร้างเป็นความลาดชัน

2.2.8 **ชั้นข้อมูล Topographic Wetness Index: TWI หรือ ดัชนีความชื้นที่สัมพันธ์กับสภาพภูมิประเทศ** ใช้เพื่อวัดปริมาณการควบคุมภูมิประเทศในกระบวนการอุทกวิทยา โดยที่ TWI หาได้จากสมการ [16] (6)

$$TWI = \ln \left(\frac{A}{\tan B} \right) \quad (6)$$

โดยที่ A คือ พื้นที่เก็บกักน้ำจำเพาะ และ B คือ ความลาดชัน

2.2.9 **ชั้นข้อมูล Stream Power Index: SPI หรือ ดัชนีกำลังของกระแสน้ำ** ใช้เพื่ออธิบายการพังทลายพื้นผิวของกระแสน้ำที่อาจเกิดขึ้น ณ จุดที่กำหนดของพื้นผิวภูมิประเทศ เมื่อพื้นที่กักเก็บน้ำและความลาดชันเพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำที่เกิดจากพื้นที่บนทางลาดเอียงและความเร็วของการไหลของน้ำเพิ่มขึ้นหาได้จากสมการ [17] (7)

$$SPI = \ln(CA \times \tan G) \quad (7)$$

โดยที่ CA คือ พื้นที่เก็บน้ำ และ G คือ ความลาดชัน

2.2.10 **ชั้นข้อมูลชั้นหิน** ทำการแปลงไฟล์จากข้อมูลเวกเตอร์ (Vector) เป็นข้อมูล แรสเตอร์ (Raster) จากนั้นทำการปรับแก้ระบบพิกัดภูมิศาสตร์เป็น UTM WGS84 Zone 47

2.2.11 **ชั้นข้อมูลระยะห่างจากเส้นทางคมนาคม** โดยกำหนดระยะกันชนเป็น 7 ระยะ ได้แก่ 0-200, 200-400, 400-600, 600-800, 800-1000, 1000-1200 และ >1200 เมตร จากนั้นทำการแปลงไฟล์จากข้อมูลเวกเตอร์ (Vector) เป็นข้อมูล แรสเตอร์ (Raster) และปรับแก้ระบบพิกัดภูมิศาสตร์เป็น UTM WGS84 Zone 47

2.2.12 **ชั้นข้อมูลระยะห่างจากเส้นทางน้ำ** โดยกำหนดระยะกันชนเป็น 6 ระยะ ได้แก่ 0-200, 200-400, 400-600, 600-800, 800-1000 และ >1000 เมตร จากนั้นทำการแปลงไฟล์จากข้อมูลเวกเตอร์ (Vector) เป็นข้อมูล แรสเตอร์ (Raster) และปรับแก้ระบบพิกัดภูมิศาสตร์เป็น UTM WGS84 Zone 47

2.2.13 **ชั้นข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน** ทำการแปลงไฟล์จากข้อมูลเวกเตอร์ (Vector) เป็นข้อมูล แรสเตอร์ (Raster) จากนั้นทำการปรับแก้ระบบพิกัดภูมิศาสตร์เป็น UTM WGS84 Zone 47

2.3 เตรียมข้อมูลสำหรับการฝึกอบรม

2.3.1 ข้อมูลดินถล่ม รวบรวมรายงานข้อมูลดินถล่มของจังหวัดภูเก็ตจากฐานข้อมูลดินถล่มรวม จำนวน 220 จุด ประกอบด้วยตำแหน่งที่เกิดดินถล่มจำนวน 176 จุด และตำแหน่งที่ไม่เกิดดินถล่มจำนวน 44 จุด

2.3.2 หลังจากเตรียมข้อมูลของปัจจัยต่างๆ 13 ปัจจัยแล้ว ทำการสร้างชุดข้อมูลแรสเตอร์ (Raster) ชุดเดียวจากหลายปัจจัย (Composite Bands) จากนั้นทำแยกค่าพิกเซล (pixel) ที่ตำแหน่งที่ระบุในคลาสคุณลักษณะจุดจากชุดข้อมูลแรสเตอร์ (Extract Multi Values to Points) และบันทึกค่าลงในตารางแอตทริบิวต์ของตำแหน่งฐานข้อมูลดินถล่ม ทำการสร้างแบบจำลองประเภทต่างๆ ด้วย Jupyter Notebook โดยใช้ภาษา Python จากนั้น ทำการสุ่มแบ่งฐานข้อมูลดินถล่มออกเป็น 2 กลุ่มแบ่งเป็นชุดข้อมูลการฝึกอบรม 70% และชุดข้อมูลการตรวจสอบความถูกต้อง 30%

2.4 การสร้างแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่อง

การสร้างแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่อง 3 ประเภท ได้แก่

2.4.1 แบบจำลอง Support Vector Machine (SVM) หรือ แบบจำลองซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน

Support Vector Machines เป็นเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องชนิดหนึ่ง โดยจัดอยู่ในประเภท Supervised Learning ซึ่งถูกพัฒนาโดย Vapnik ในปี 1995 ซึ่ง Support Vector Machines เป็นที่นิยมนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางเพราะมีความแม่นยำในการทำนายสูงเมื่อเทียบกับ Logistic Regression และยังทำนายผลได้เร็วกว่า Naïve Bayes Classification หลักการทำงานของ Support Vector Machines คือจะนำข้อมูลตัวอย่างมาพล็อตจุดข้อมูล จากนั้นจะลากเส้นตรงแบ่งจุดข้อมูล

ที่เรียกว่า Hyperplane เพื่อแบ่งข้อมูลออกเป็นกลุ่มหรือคลาส โดย ซึ่ง Support Vector Machines จะพยายามหาเส้น Hyperplane ที่ดีที่สุด เมื่อเราพิจารณาข้อมูลที่ประกอบด้วยข้อมูล 2 กลุ่ม โดยสามารถกำหนด kernel ได้ ดังนี้ Linear SVM กำหนดค่า kernel เป็น “linear” ใช้เมื่อข้อมูลสามารถแยกเชิงเส้นได้ Polynomial กำหนดค่า kernel เป็น “poly” แสดงถึงความคล้ายคลึงกันของเวกเตอร์ในชุดการฝึกของข้อมูลในพื้นที่คุณลักษณะเหนือพหุนามของตัวแปรดั้งเดิมที่ใช้ในเคอร์เนล Radial Basis Function กำหนดค่า kernel เป็น “rbf” เป็นเคอร์เนลเอนกประสงค์ ใช้เมื่อไม่มีความรู้มาก่อนเกี่ยวกับข้อมูล ซึ่งถ้าเราไม่กำหนด ค่า kernel แล้วจะมีค่าเป็น rbf โดยอัตโนมัติ [18] โดยการศึกษาที่กำหนด parameter ให้ kernel มีค่าเท่ากับ ‘rbf’ [19]

2.4.2 แบบจำลอง Random Forest (RF) หรือ แบบจำลองป่าสุ่ม

หลักการของ Random Forest คือ สร้างแบบจำลองจาก Decision Tree หลายๆ แบบจำลองย่อยๆ โดยแต่ละแบบจำลองจะได้รับ data set ไม่เหมือนกัน ซึ่งเป็น subset ของ Dataset ทั้งหมด ขณะทำการ prediction ก็ให้แต่ละ Decision Tree ทำ prediction ของใครของมัน และคำนวณผลการ prediction ด้วยการ vote output ที่ ถูกเลือกโดย Decision Tree มากที่สุด กรณี classification [20] โดยที่หลักการการทำงานของ Random forest คือกำหนดค่าคลาสตามสัดส่วนของค่าแต่ละคลาสที่โหนดปลายสุด [21] โดยการศึกษาที่กำหนด parameter ของ Random Forest (RF) ให้ n_estimators มีค่าเท่ากับ 128, criterion มีค่าเท่ากับ 'entropy', max_depth มีค่าเท่ากับ 16, min_samples_split มีค่าเท่ากับ 2, min_samples_leaf มีค่าเท่ากับ 4, class_weight มีค่าเท่ากับ 'balanced', bootstrap มีค่าเท่ากับ 'true', random_state มีค่าเท่ากับ 32, oob_score มีค่าเท่ากับ 'true' และ n_jobs มีค่าเท่ากับ -1 [22]

2.4.3 แบบจำลอง K-Nearest Neighbors (KNN) หรือ แบบจำลองวิธีการเพื่อนบ้านใกล้ที่สุด

K-nearest Neighbors เป็นอัลกอริทึมหนึ่งของการเรียนรู้ของเครื่องจัดอยู่ในประเภท Supervised Learning ซึ่งพัฒนาขึ้นครั้งแรกโดย Fix และ Hodges ในปี 1951 อัลกอริทึมนี้จะใช้ข้อมูลของ Dataset ทั้งหมดโดยไม่แตกข้อมูลออกเป็น Training data และ Testing data [18] หลักการของวิธีการ K-nearest Neighbors จะจำแนกประเภทข้อมูลโดยขึ้นกับข้อมูลที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงที่สุด k ตัว ซึ่งเป็นวิธีการจัดกลุ่มให้กับค่าสังเกตค่าใหม่ที่ใกล้กับชุดข้อมูลเรียนรู้โดยกำหนดให้ชุดข้อมูลเรียนรู้ การกำหนดค่า k จะส่งผลอย่างมากต่อความถูกต้องของการจัดการกลุ่มข้อมูล โดยการศึกษาที่กำหนด parameter ของ K-Nearest Neighbors (KNN) โดย ให้ค่า k เท่ากับ 9 [6]

2.5 การประเมินความถูกต้องของแบบจำลอง

ความถูกต้องของแบบจำลองถูกวัดประสิทธิภาพโดยพื้นที่ใต้กราฟ (Area Under an ROC Curve : AUCs) [23] ซึ่งหาได้จากกราฟ Receiver Operating Characteristic Curve: ROC curve ซึ่งเป็นตัวชี้วัดบอกความสามารถในการแยกแยะของแบบจำลอง โดยที่แกน x คืออัตรา False Positive Rate: FPR ทำนายผิดว่าเป็น Positive (5) และแกน y คือ True Positive Rate: TPR ทำนายความถูกต้องว่าเป็น Positive (6) ณ จุดหรือค่าเกณฑ์การตัดสินใจ (Threshold)

$$FPR = \frac{FP}{TN+FP} \quad (5)$$

$$TPR = \frac{TP}{TP+FN} \quad (6)$$

โดยที่ TP (True Positive) คือ จำนวนข้อมูลเชิงบวกที่จำแนกประเภทได้ถูกต้อง

FN (False Negative) คือ จำนวนข้อมูลเชิงบวกที่ถูกจำแนกประเภทผิดเป็นข้อมูลเชิงลบ

FP (False Positives) คือ จำนวน ข้อมูลเชิงลบที่ถูกจำแนกประเภทผิดเป็นข้อมูลเชิงบวก

TN (True Negatives) คือ จำนวนข้อมูล เชิงลบที่ถูกจำแนกประเภทได้ถูกต้อง

จากนั้นทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องทั้ง 3 ประเภท โดยดูจากค่า Area Under the Curve: AUC ซึ่งใช้เป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพของแบบจำลองจากนั้นจัดทำแผนท่อนไหวของดินถล่มจากแบบจำลองแต่ละประเภท

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 การวิเคราะห์พื้นที่อ่อนไหวของดินถล่มในจังหวัดภูเก็ต

ผลการวิเคราะห์พื้นที่อ่อนไหวของดินถล่มในจังหวัดภูเก็ต (Figure 1) พบว่าการวิเคราะห์หาพื้นที่ที่มีความอ่อนไหวต่อดินถล่ม โดยใช้แบบจำลอง SVM มีพื้นที่ที่มีโอกาสเกิดดินถล่มเท่ากับ 300.86 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 54.85 ของพื้นที่ทั้งหมด พื้นที่ไม่เกิดดินถล่มมีพื้นที่เท่ากับ 247.68 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 45.15 ของพื้นที่ทั้งหมด แบบจำลอง RF มีพื้นที่ที่มีพื้นที่มีโอกาสเกิดดินถล่มเท่ากับ 214.67 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 39.13 ของพื้นที่ทั้งหมด พื้นที่ไม่เกิดดินถล่มมีพื้นที่เท่ากับ 333.87 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 60.87 ของพื้นที่ทั้งหมด และแบบจำลอง KNN มีพื้นที่ที่มีโอกาสเกิดดินถล่มเท่ากับ 228 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 41.56 ของพื้นที่ทั้งหมด พื้นที่ไม่เกิดดินถล่มมีพื้นที่เท่ากับ 320.54 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 58.44 ของพื้นที่ทั้งหมด ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์พื้นที่ที่มีโอกาสเกิดถล่มของแบบจำลอง SVM มีค่าใกล้เคียงกับกับแผนที่พื้นที่อ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่ม จังหวัดภูเก็ต ของกรมทรัพยากรธรณี [24] ซึ่งพื้นที่ที่มีความอ่อนไหวของดินถล่ม มีพื้นที่เท่ากับ 285.12 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 51.98 ของพื้นที่ทั้งหมด และพื้นที่ไม่เกิดดินถล่มมีพื้นที่เท่ากับ 263.42 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 48.02 ของพื้นที่ทั้งหมด

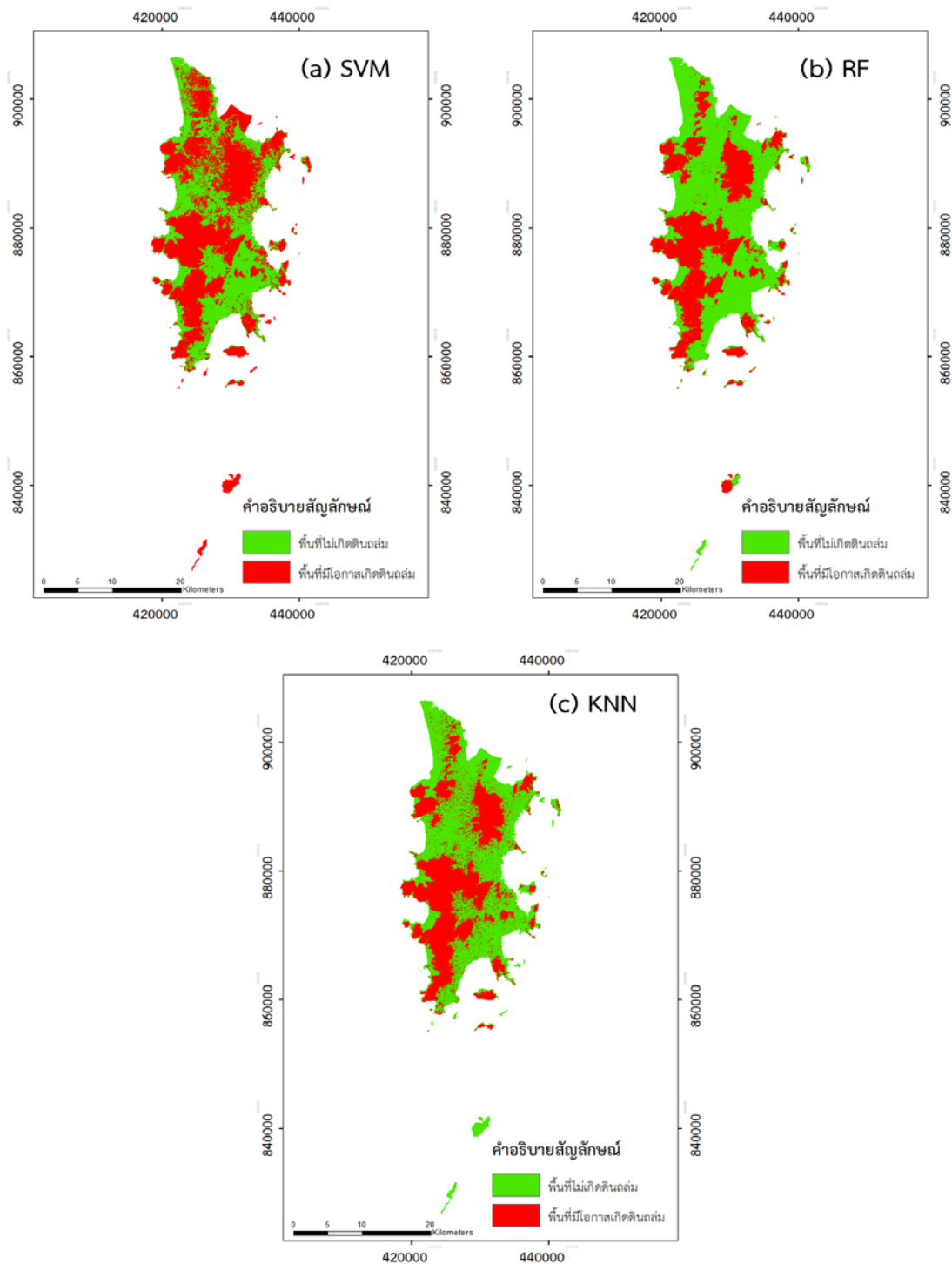


Figure 1 Landslide susceptibility maps developed using different algorithms: a) SVM, b) RF and c) KNN.

3.2 การประเมินความถูกต้องของแบบจำลอง

การประเมินความถูกต้องของแบบจำลองแต่ละชนิด (Figure 2) พบว่าแบบจำลอง RF มีค่า AUC เท่ากับ 0.99025 มีค่า Accuracy เท่ากับ 0.97 ค่า Precision เท่ากับ 0.97 และค่า Recall เท่ากับ 0.97 แบบจำลอง SVM มีค่า AUC เท่ากับ 0.98440 มีค่า Accuracy เท่ากับ 0.97 ค่า Precision เท่ากับ 0.97 และค่า Recall เท่ากับ 0.97 แบบจำลอง KNN มีค่า AUC เท่ากับ

0.97661 มีค่า Accuracy เท่ากับ 0.95 ค่า Precision เท่ากับ 0.98 และค่า Recall เท่ากับ 0.96 ผลการประเมินความถูกต้องของแบบจำลอง RF ค่าความแม่นยำมากที่สุดซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Abraham [6] และ Youssef and Pourghasemi [9]

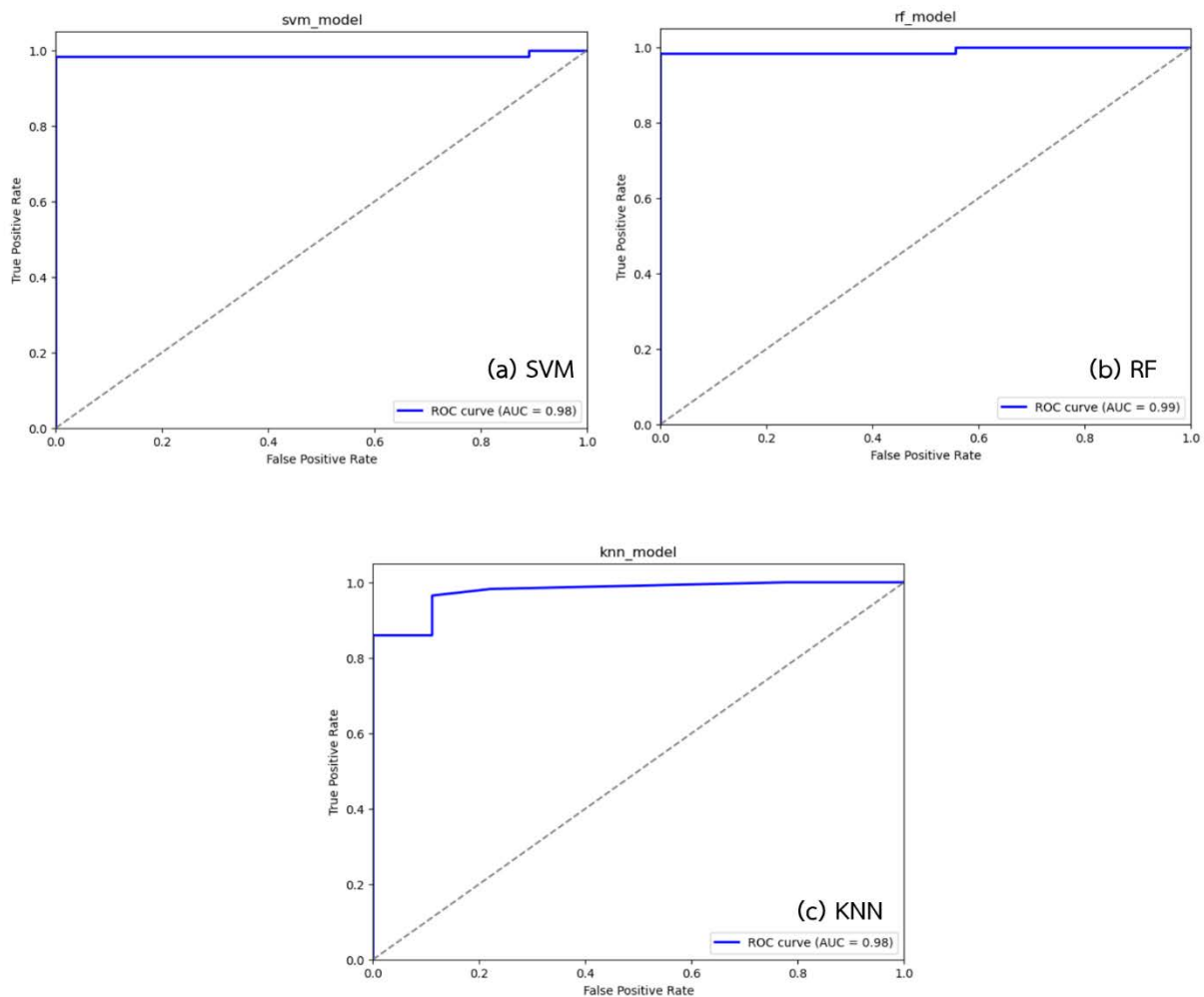


Figure 2 ROC curves using different ML algorithms: a) SVM, b) RF and c) KNN.

4. สรุป

การศึกษางานวิจัยครั้งนี้เป็นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการเรียนรู้ด้วยเครื่องมาใช้ในการวิเคราะห์พื้นที่อ่อนไหวของดินถล่มในพื้นที่จังหวัดภูเก็ต โดยใช้ข้อมูลจากรายงานข้อมูลดินถล่มของจังหวัดภูเก็ตจากฐานข้อมูลดินถล่ม จำนวน 220 จุด โดยทำการฝึกอบรมด้วยตำแหน่งที่เกิดดินถล่มจำนวน 176 จุด และตำแหน่งที่ไม่เกิดดินถล่มจำนวน 44 จุด และปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้อง 13 ปัจจัยในการวิเคราะห์

ผลการศึกษาในการวิเคราะห์พื้นที่อ่อนไหวของดินถล่มของแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องพบว่าแบบจำลอง RF มีค่าความแม่นยำมากที่สุดโดยมีค่า AUC อยู่ที่ 0.99025 มีพื้นที่มีโอกาสเกิดดินถล่มเท่ากับ 214.67 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 39.13 ของพื้นที่ทั้งหมด พื้นที่ที่ไม่เกิดดินถล่มมีพื้นที่เท่ากับ 333.87 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 60.87 ของพื้นที่ทั้งหมด รองลงมาเป็นแบบจำลอง SVM โดยมีค่า AUC อยู่ที่ 0.98440 มีพื้นที่มีโอกาสเกิดดินถล่มเท่ากับ 300.86 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 54.85 ของพื้นที่ทั้งหมด พื้นที่ที่ไม่เกิดดินถล่มมีพื้นที่เท่ากับ 247.68 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 45.15 ของพื้นที่ทั้งหมด และแบบจำลองที่มีค่าความแม่นยำน้อยที่สุดคือแบบจำลอง KNN โดยจะมีค่า AUC อยู่ที่ 0.97661 มีพื้นที่มีโอกาสเกิดดินถล่มเท่ากับ 228 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 41.56 ของพื้นที่ทั้งหมด พื้นที่ที่ไม่เกิดดินถล่มมีพื้นที่เท่ากับ 320.54 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 58.44 ของพื้นที่ทั้งหมด

ผลจากการศึกษาครั้งนี้สามารถนำวิธีการวิเคราะห์มาประยุกต์ใช้ในการวางแผนการป้องกันภัยจากดินถล่มในจังหวัดภูเก็ตได้ นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาการวิเคราะห์ดินถล่มในพื้นที่อื่นของประเทศไทยได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณวิทยาลัยการคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือและงบประมาณในการเข้าร่วมประชุมในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Thaiger. 2018. Torrential rain dog's west coast of Phuket this morning. Thaiger. Retrieved March 20, 2021, from <https://thethaiger.com/news/phuket/torrential-rain-dogs-west-coast-of-phuket-this-morning>
- [2] สำนักงานสถิติแห่งชาติ. 2564. สถิติประชากรศาสตร์ ประชากรและเคหะ. เข้าถึงได้จาก : เว็บไซต์ <http://statbbi.nso.go.th/staticreport/page/sector/th/01.aspx> (เข้าถึงเมื่อ 20 มีนาคม 2564).
- [3] กระทรวงการท่องเที่ยวและกีฬา. 2564. สถิติด้านการท่องเที่ยว ปี 2564. เข้าถึงได้จาก : เว็บไซต์ <https://www.mots.go.th/allcont.php?cid=630&filename=> (เข้าถึงเมื่อ 20 มีนาคม 2564).
- [4] สำนักงานจังหวัดภูเก็ต. 2557. ข้อมูลจังหวัดภูเก็ต เพื่อสนับสนุนการตรวจราชการของนายกรัฐมนตรีและผู้บริหารกระทรวงมหาดไทย. เข้าถึงได้จาก : เว็บไซต์ <https://www.phuket.go.th/webpk/contents.php?str=infopk> (เข้าถึงเมื่อ 25 ตุลาคม 2564).
- [5] กรมทรัพยากรธรณี. 2559. ดินถล่มคืออะไร. เข้าถึงได้จาก : เว็บไซต์ http://www.dmr.go.th/ewt_news.php?nid=99799 (เข้าถึงเมื่อ 20 มีนาคม 2564).
- [6] Abraham, M.T., Satyam, N., Jain, P., Pradhan, B., and Alamri, A. 2021. Effect of spatial resolution and data splitting on landslide susceptibility mapping using different machine learning algorithms. *Geomatics, Natural Hazards, and Risk*. 12(1): 3381-3408.
- [7] Al-Najjar, H.A.H., and Pradhan, B. 2021. Spatial landslide susceptibility assessment using machine learning techniques assisted by additional data created with generative adversarial networks. *Geoscience Frontiers*. 12(2): 625-637.
- [8] Wang, H., Zhang, L., Yin, K., Luo, H., and Li, J. 2021. Landslide identification using machine learning. *Geoscience Frontiers*. 12(1): 351-364.
- [9] Youssef, A.M., and Pourghasemi, H.R. 2021. Landslide susceptibility mapping using machine learning algorithms and comparison of their performance at Abha Basin, Asir Region, Saudi Arabia. *Geoscience Frontiers*. 12(2): 639-655.
- [10] Boser, B., Guyon, I., Vapnik, V. 1992. Support Vector Machines. *Encyclopedia of Algorithms*. 928-932.
- [11] Breiman, L. 2001. Random Forests. *Machine Learning*. 45: 5-32.
- [12] Cover, T., and Hart, P. 1967. Nearest neighbor pattern classification. *IEEE Transactions on Information Theory*. 13(1): 21-27.
- [13] Huang, S., Tang, L., Hupy, P.H., Wang, Y. and Shao, G. 2021. A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*. 32: 1-6.
- [14] Li, Z., Wang, K., Ma, H., and Wu, Y. 2018. An Adjusted Inverse Distance Weighted Spatial Interpolation Method. *Advances in Computer Science Research*, 65: 128-132.

-
- [15] Peckham D.S. 2011. Profile, Plan and Streamline Curvature: A Simple Derivation and Applications. In: Geomorphometry 2011, University of Colorado, Colorado. pp. 27-30.
- [16] Beven, K. J. and Kirkby, M. J. 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. Hydrological Sciences Bulletin. 24: 43–69.
- [17] Florinsky, I.V. 2016. Stream power index. DIGITAL TERRAIN ANALYSIS IN SOIL SCIENCE AND GEOLOGY. 2: 486.
- [18] อรพิน ประวัตินิธิกุล. 2564. Python สำหรับงาน Data Science Data Visualization และ Machine Learning. โปรวิชั่น, กรุงเทพมหานคร.
- [19] Zhou, S., and Fang, L. 2015. Support vector machine modeling of earthquake-induced landslides susceptibility in central part of Sichuan province, China. Geoenvironmental Disasters. 2(2): 1-12.
- [20] วิชญ์พงศ์ ดรุณธรรม. 2561. เจาะลึก Random Forest !!!— Part 2 of “รู้จัก Decision Tree, Random Forest, และ XGBoost!!!”. เข้าถึงได้จาก : เว็บไซต์ <https://medium.com/@witchapongdaroontham/> (เข้าถึงเมื่อ 20 มีนาคม 2564).
- [21] Jain, V., Sharma, J., Singhal, K., and Phophalia, A. 2019. Exponentially Weighted Random Forest. International Conference on Pattern Recognition and Machine Intelligence. 11941 1-9.
- [22] Karakas, G., Can, R., Kocaman, S., Nefeslioglu, H. A., and Gokceoglu, C. 2020. LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY MAPPING WITH RANDOM FOREST MODEL FORORDU, TURKEY. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 43: 1229–1236.
- [23] Fawcett, T. 2005. An introduction to ROC analysis. Pattern Recognition Letters. 27(8): 861-874.
- [24] กรมทรัพยากรธรณี. 2564. แผนที่พื้นที่อ่อนไหวต่อการเกิดดินถล่มในประเทศไทย. เข้าถึงได้จาก : เว็บไซต์ <https://www.dmr.go.th> (เข้าถึงเมื่อ 22 มีนาคม 2564).

การออกแบบและพัฒนาโดรนเกษตรสำหรับการปลูกป่า Design and Development of Agricultural Drone for Reforestation

ศธา วาทกิจ^{1,*}, ภาดา อุตพันธุ์¹, วารุณี พลจันทร์¹, ศศิวิมล ดาวโรสง¹ และ ชลธร โพธิ์แก้ว²

Khatha Wathakit^{1,*}, Phaladon Auttapan¹, Warunee Phonchanthuek¹, Sasiwimon Dawthaisong¹ and Chonlathon Pokaew²

¹สาขาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา
²ศูนย์อนุรักษ์พันธุกรรมพืชอันเนื่องมาจากพระราชดำริ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี ตำบลคลองไผ่ อำเภอสีคิ้ว จังหวัดนครราชสีมา

¹School of Agricultural Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhonratchasima

²Plant Genetic Conservation Project Under the Royal Initiative of Her Royal Highness Princess Maha Chakri Sirindhorn, Klongpai, Nakhonratchasima

*Corresponding author: Khatha Wathakit, e-mail address: vkata@gsut.ac.th

บทคัดย่อ

การปลูกต้นไม้เพื่อฟื้นฟูสภาพป่าจำเป็นต้องใช้ทั้งแรงงานคน ระยะเวลาและงบประมาณเป็นจำนวนมาก อีกทั้งยังมีปัญหาอัตราการงอกที่ต่ำเมื่อปลูกโดยใช้วิธีการหว่านเมล็ดรวมไปถึงอุปสรรคในการเข้าถึงบางพื้นที่ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาโดรนเกษตรสำหรับการปลูกต้นไม้ อุปกรณ์ประกอบด้วย 1) โดรนเกษตรซึ่งติดตั้งชุดกลไกการปล่อยแคปซูลกล้าไม้ การทำงานของกลไกอาศัยเซอร์โวมอเตอร์เพื่อควบคุมการปล่อยแคปซูลกล้าไม้จากท่อบรรจุโดยใช้สัญญาณของกล่องควบคุมซึ่งส่งงานจากระยะไกล 2) แคปซูลสำหรับบรรจุกล้าไม้ทำจากดินเหนียวผสมกับวัสดุธรรมชาติ ได้แก่ แกลบ ขุยมะพร้าว กาบกล้วยสับ และนำมาบ่มขึ้นรูป โดยแคปซูลต้นอ่อนที่ใช้ส่วนผสมจากกาบกล้วยสับจะเกิดการย่อยสลายหมดภายในระยะเวลา 12 วันเมื่อได้รับความชื้นในสภาวะอิมมัว ภายในแคปซูลประกอบไปด้วยส่วนผสมของวัสดุปลูกและต้นอ่อนกล้าไม้ที่ได้รับการกระตุ้นการงอก จากการทดสอบการรับแรงกระแทกพบว่าแคปซูลกล้าไม้จะเกิดความเสียหายเมื่อถูกกระแทกด้วยมวลลูกตุ้มซึ่งเทียบเท่ากับพลังงานของการปล่อยให้ตกอย่างอิสระลงบนพื้นแข็งจากความสูง 11.2 เมตร การกำหนดเส้นทางการบินของโดรนอาศัยการนำเข้าไฟล์ข้อมูลพิกัดตำแหน่งที่สร้างจากโปรแกรมแผนที่ 3 มิติ เมื่อกำหนดพิกัดจุดปล่อยแคปซูลกล้าไม้จำนวน 5 จุด ที่ระดับความสูง 8 เมตรเหนือพื้นดิน โดยมีเส้นทางการบินรวมระยะทางประมาณ 400 เมตร พบว่าโดรนสามารถปล่อยแคปซูลกล้าไม้โดยมีความคลาดเคลื่อนจากตำแหน่งที่ระบุเฉลี่ยเท่ากับ 2.5 เมตร ซึ่งเป็นผลมาจากค่าความคลื่อนของสัญญาณระบบระบุพิกัดตำแหน่งด้วยดาวเทียม

คำสำคัญ: โดรนเกษตร, การปลูกป่า, วัสดุปลูก

Abstract

Planting trees for reforestation requires significant human labor, time, and a budget. Additionally, there are issues with low germination rates when using seed sowing methods and difficulties accessing certain areas. This research aims to design and develop agricultural drones for planting tree saplings. The device includes: 1) A drone equipped with mechanisms for releasing sapling capsules, controlled remotely via a control box using servo motors for releasing the tree sapling from capsule tube; 2) Capsules made of clay mixed with natural materials ie. husk, coconut coir etc.. A capsules made of clay mixed with shelf of banana tree, can be fully biodegrade within 12 days in saturated moist conditions, containing a mixture of planting material and germinated saplings. The tests revealed that the sapling capsules were damaged when subjected to impact tests using a pendulum mass, which simulated the energy equivalent to a free fall onto a hard surface from a height of 11.2 meters. The drone's flight path is determined by importing data from a 3D mapping program. When setting coordinates for releasing 5 tree sapling capsules at a height of 8 meters above the ground with a total flight path distance of 400 meters. It can release sapling capsules with an average deviation of 2.5 meters which is a result of the deviation in the satellite-based global positioning system signal.

Keywords: Agricultural drone, Reforestation, Growing media

1. บทนำ

การลดลงของพื้นที่ป่าไม้ในประเทศไทยเป็นปัญหาที่ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางและถือเป็นหนึ่งในปัจจัยหลักที่มีผลกระทบต่อความสมดุลของระบบนิเวศ จากข้อมูลรายงานของกรมป่าไม้และองค์การสหประชาชาติแสดงให้เห็นว่า ประเทศไทยมีพื้นที่ป่าไม้ครอบคลุมกว่าร้อยละ 53 ของประเทศในช่วงต้นศตวรรษที่ 20 แต่ในปัจจุบันพื้นที่ป่าไม้ของไทยคงเหลือเพียงร้อยละ 31.6 เท่านั้น [1,2] การลดลงอย่างรวดเร็วนี้สะท้อนให้เห็นถึงการขาดการจัดการที่ยั่งยืนและการบุกรุกพื้นที่ป่าอย่างต่อเนื่อง ปัญหาการลดลงของพื้นที่ป่าไม้ในประเทศไทยนี้ไม่เพียงแต่กระทบต่อความหลากหลายทางชีวภาพ แต่ยังรวมถึงผลกระทบต่อวิถีชีวิตของชุมชนที่พึ่งพาทรัพยากรจากป่า รวมทั้งส่งผลกระทบต่อระบบน้ำและสภาพอากาศของโลก โดยปัจจัยหลักที่ทำให้พื้นที่ป่าไม้ลดลง ได้แก่ การเพิ่มขึ้นของพื้นที่การเกษตร และการขยายพื้นที่ชุมชนเมือง [3]

การปลูกต้นไม้เพื่อฟื้นฟูสภาพป่า (Reforestation) ถือเป็นกระบวนการที่ต้องอาศัยปัจจัยต่างๆ อาทิเช่น แรงงานซึ่งต้องมีจำนวนที่เพียงพอและมีความเชี่ยวชาญในการปลูกและดูแลรักษาต้นไม้ รวมไปถึงระยะเวลาเนื่องจากการปลูกต้นไม้เพื่อฟื้นฟูสภาพป่าเป็นกระบวนการที่ต้องใช้เวลานานตั้งแต่การเตรียมพื้นที่จนถึงการให้ต้นไม้เติบโตจนเข้าสู่ระบบนิเวศอย่างสมบูรณ์ [4,5] อีกทั้งการปลูกต้นไม้เพื่อฟื้นฟูสภาพป่ายังต้องใช้งบประมาณจำนวนมากเพื่อรองรับค่าใช้จ่ายทั้งด้านวัสดุ แรงงาน ตลอดจนการบำรุงรักษาป่าที่ฟื้นฟูใหม่อย่างต่อเนื่อง [6] อย่างไรก็ตามปัญหาที่พบส่วนใหญ่ในการปลูกป่าได้แก่ อัตราการงอกหรืออัตราการอยู่รอดของต้นไม้ซึ่งขึ้นอยู่กับวิธีการปลูก การเลือกชนิดพันธุ์และการวางแผนดูแลอย่างเหมาะสมเพื่อให้ต้นไม้เติบโตได้ดีในสภาพแวดล้อมใหม่ [7] การจัดการปัจจัยเหล่านี้อย่างมีประสิทธิภาพจะช่วยส่งเสริมให้การฟื้นฟูป่าเกิดผลลัพธ์ที่ดีต่อระบบนิเวศ ซึ่งจะเป็นกุญแจสำคัญในการฟื้นฟูป่าไม้ได้อย่างยั่งยืนและมีประสิทธิภาพ

ปัจจุบันเทคโนโลยีโดรนมีบทบาทสำคัญในการช่วยฟื้นฟูสภาพป่า โดรนสามารถใช้หว่านเมล็ดพันธุ์ได้เป็นบริเวณกว้างอย่างรวดเร็วช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและขนาดพื้นที่ของโครงการการปลูกป่า ภาพถ่ายทางอากาศจากโดรนสามารถนำไปใช้ทำแผนที่เพื่อตรวจสอบสภาพภูมิประเทศ การบริหารจัดการและวางแผนการปลูกป่า หรือนำไปใช้ตรวจสอบสัดส่วนค่าดัชนีพืชพรรณ (Vegetation Index) ของพืชที่ปกคลุมพื้นที่โดยประยุกต์ใช้เซนเซอร์วัดค่าการสะท้อนช่วงความยาวคลื่นร่วมกับกล้องถ่ายภาพที่ติดตั้งอยู่กับโดรน [8] นอกจากนี้โดรนยังสามารถใช้บรรทุกน้ำหรือสารวัสดุชีวภาพ เช่น สารอาหารหรือสารควบคุมศัตรูพืชสำหรับบินเข้าไปฉีดพ่นซึ่งจะช่วยลดข้อจำกัดการเข้าถึงพื้นที่เพื่อบำรุงรักษาป่าที่ฟื้นฟูใหม่ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีโดรนจึงมีส่วนช่วยเร่งกระบวนการฟื้นฟูและสนับสนุนการรักษาความยั่งยืนของพื้นที่ป่าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีโดรนเพื่อนำมาแก้ปัญหาและอุปสรรคของการปลูกต้นไม้และฟื้นฟูสภาพป่า โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาโดรนเกษตรสำหรับใช้ในการปลูกต้นไม้ ผลของงานวิจัยสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นข้อมูลเชิงปฏิบัติเพื่อนำไปใช้ในการวางแผนช่วยฟื้นฟูสภาพพื้นที่ระบบนิเวศป่าไม้ การจัดการป่าไม้ และรักษาพื้นที่ป่าไม้ในประเทศไทยให้เกิดความยั่งยืนได้ต่อไป

2. วิธีการศึกษา

หลักการการปลูกป่าจำเป็นต้องพิจารณาถึงความสมดุลของระบบนิเวศและความหลากหลายทางชีวภาพรวมไปถึงการพิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อโอกาสและอัตราการอยู่รอดของต้นไม้ที่ปลูก ในงานวิจัยนี้จึงได้กำหนดรูปแบบและกรอบแนวความคิดวิธีการปลูกต้นไม้เพื่อฟื้นฟูสภาพป่าโดยนำเมล็ดพันธุ์มาเพาะขยายในแคปซูลลักษณะคล้ายกระถางขนาดเล็กซึ่งทำจากวัสดุย่อยสลายได้ตามธรรมชาติร่วมกับวัสดุปลูกและสารอาหารเพื่อกระตุ้นการงอกของเมล็ด เมื่อพืชเริ่มมีใบเลี้ยงงอกขึ้นมาแล้วจึงนำแคปซูลมาจัดเรียงลงในทอบรรจุซึ่งติดตั้งอยู่กับโครงสร้างของโดรนโดยบรรจุแคปซูลตามชนิดและจำนวนของต้นไม้ที่ต้องการนำไปปลูก ในขั้นตอนของการปลูกเมื่อโดรนบินไปถึงยังตำแหน่งเป้าหมายที่กำหนด กลไกจะปล่อยแคปซูลต้นไม้ให้ตกลงลงอย่างอิสระ โดยการทำงานของกลไกจะปล่อยแคปซูลต้นไม้ครั้งละ 1 ต้น วิธีการดังกล่าวจะช่วยเพิ่มอัตราการอยู่รอดของต้นไม้ที่ปลูกรวมถึงสามารถกำหนดความหลากหลายของชนิดพันธุ์ไม้ที่ต้องการปลูกได้มากกว่าการปลูกโดยวิธีหว่านเมล็ด ระบบควบคุมการปล่อยต้นไม้จะไม่ใช้สัญญาณมาจากกล้องควบคุมการบินของโดรนเกษตรซึ่งส่งงานได้จากนักบินผ่านตัวควบคุมระยะไกลเพื่อสั่งการทำงานของกลไกเมื่อโดรนบินไปถึงยังตำแหน่งเป้าหมายที่กำหนด ขั้นตอนของวิธีการศึกษาวิจัยประกอบด้วย 1) การทดสอบสมบัติ ทางกายภาพและทางกลของส่วนผสมสำหรับขึ้นรูปแคปซูลต้นไม้ 2) การออกแบบชุดกลไกการปล่อยแคปซูลต้นไม้ 3) การสร้างแผนที่เส้นทางการบิน และ 4) การทดสอบการทำงานภาคสนาม

2.1 การทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางกลของส่วนผสมสำหรับขึ้นรูปแคปซูลต้นอ่อนกล้าไม้

จากแนวความคิดของวิธีการปลูกต้นไม้โดยใช้ต้นอ่อนที่เพาะจากจากเมล็ดพันธุ์บรรจุในแคปซูลซึ่งทำจากวัสดุย่อยสลายได้ตามธรรมชาติเพื่อนำไปปลูกฟื้นฟูสภาพป่า ในขั้นตอนการศึกษาวิจัยนี้จึงกำหนดชนิดและส่วนผสมของวัสดุสำหรับการขึ้นรูป โดยใช้ส่วนผสมของวัสดุต่างๆ จำนวน 3 ชนิดๆ ละ 3 ตัวอย่าง ในอัตราส่วน 1:1:1 ได้แก่ 1) ดินเหนียว:แกลบ:น้ำ 2) ดินเหนียว:ขุยมะพร้าว:น้ำ และ 3) ดินเหนียว:กากกล้วยสับ:น้ำ แคปซูลต้นอ่อนกล้าไม้ใช้วิธีการขึ้นรูปโดยเครื่องปั๊มที่ออกแบบและพัฒนาขึ้นโดยใช้ชิ้นส่วนแม่พิมพ์ทำจากวัสดุพลาสติกประเภท PA (Polyamide) ด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ดังแสดงใน Figure 1 แคปซูลต้นอ่อนกล้าไม้ที่ขึ้นรูปแล้วจะถูกนำไปอบด้วยอุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ ทางกายภาพและทางกลได้แก่ ความหนาแน่นรวม (Bulk density) ระยะเวลาในการย่อยสลายเมื่อได้รับความชื้นในสภาวะอิมมัว การทดสอบการรับแรงกระแทกจากการเหวี่ยงของลูกตุ้ม (Pendulum impact test) เพื่อหาชนิดของวัสดุที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ทดสอบในภาคสนามต่อไป

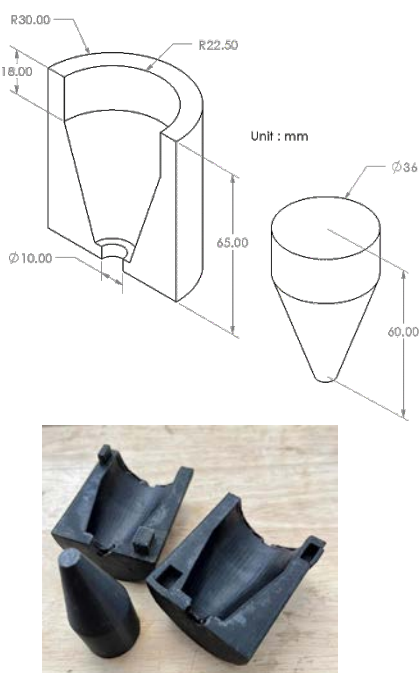


Figure 1 Plant seedling capsule and seedling capsule forming machine.

2.2 การออกแบบชุดกลไกการปล่อยแคปซูลต้นอ่อนกล้าไม้

โดรนเกษตรที่นำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้มีลักษณะและมิติดังแสดงใน Figure 2 โดยมีรายละเอียดและคุณสมบัติเฉพาะต่างๆ ดังแสดงใน Table 1 จากรูปแบบวิธีการปลูกกล้าไม้ที่ใช้โดรนบินไปยังพื้นที่และปล่อยแคปซูลต้นอ่อนกล้าไม้ให้ตกลงอย่างอิสระ ในขั้นตอนการศึกษาวิจัยนี้จึงได้กำหนดแนวความคิดการออกแบบชุดกลไกการปล่อยแคปซูลกล้าไม้สำหรับติดตั้งเข้ากับโดรนเกษตร ดังแสดงใน Figure 3 กลไกจะปล่อยแคปซูลต้นอ่อนกล้าไม้ครั้งละ 1 ต้นตามจังหวะการทำงานของกลไก แขนของกลไกจะทำหน้าที่เปิด-ปิดฝาห่อบรรจุโดยจะปล่อยแคปซูลต้นอ่อนที่เรียงอยู่ชั้นล่างสุดให้ตกลงอย่างอิสระและกั้นแคปซูลที่เรียงอยู่ในลำดับถัดขึ้นไปไม่ให้ตกลงสู่พื้น จากการวิเคราะห์และจำลองการเคลื่อนที่ของกลไกที่ออกแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อให้อุปกรณ์ปล่อยแคปซูลต้นอ่อนครั้งละ 1 ต้น พบว่าระยะขจัดเชิงมุมของกลไกชุดปล่อยแคปซูลต้นอ่อนมีค่าเท่ากับ 52.5 องศาจากตำแหน่งเริ่มต้นการทำงาน ระบบควบคุมเพื่อสั่งการทำงานของชุดกลไกในการปล่อยต้นอ่อนกล้าไม้จะใช้สัญญาณมาจากกล่องควบคุมการบินของโดรนเกษตรซึ่งสั่งงานได้จากนักบินผ่านตัวควบคุมระยะไกลเมื่อโดรนบินไปถึงยังตำแหน่งเป้าหมายที่กำหนด

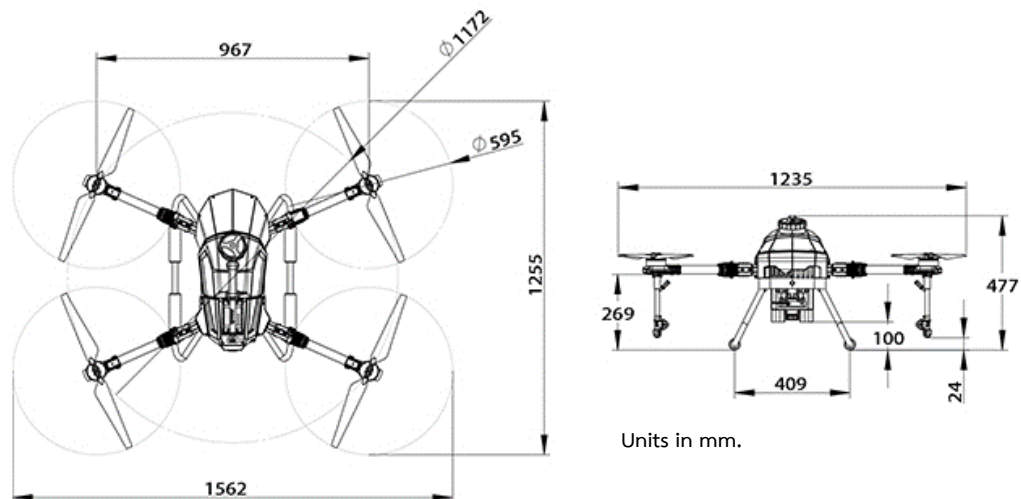


Figure 2 Agricultural drone (Courtesy of Easy (2018) Co.,Ltd.)

Table 1 Specifications of agricultural drone

Components	Specifications
Model / Frame weight	EFT G06 Drone Frame / Frame weight: 4.8kg
Battery	44.4V 8000mAh / Weight: 2.2kg
Tank capacity	6 Litre Water Tank
Flight controller	K3A Pro
GPS accuracy (Hover)	Horizon: $\pm 2\text{m}$ / Vertical: $\pm 0.8\text{m}$
Maximum speed	6m/s
Flight Time (Approx.)	17 min (No load) / 8.5 min (Full load)

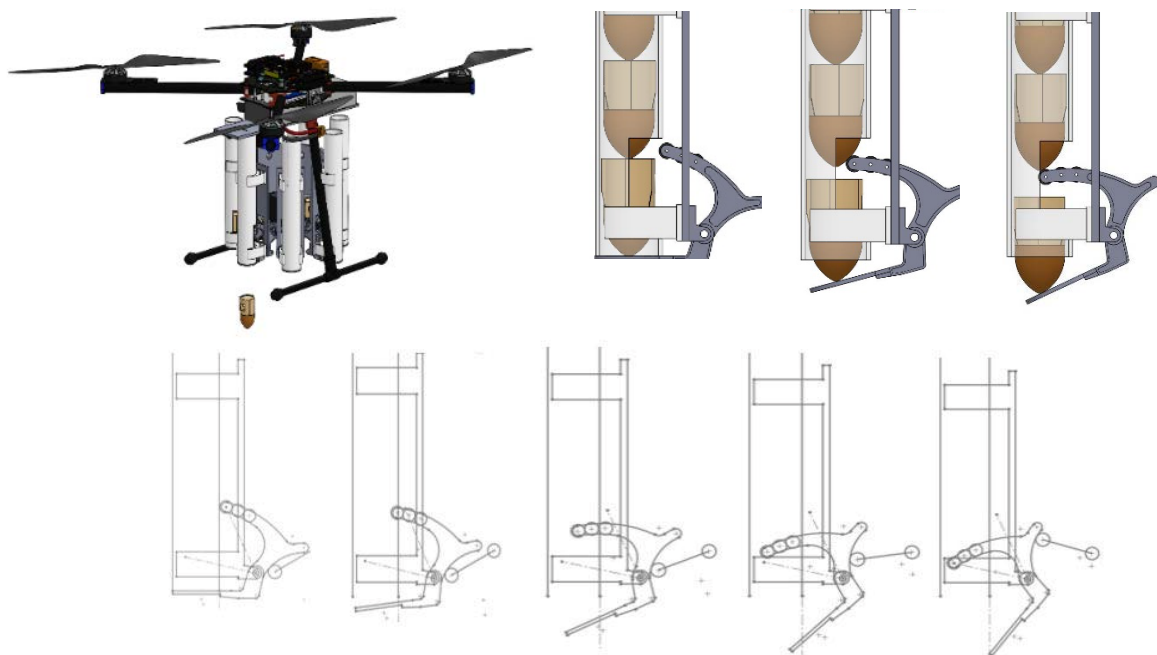


Figure 3 Concept of planting tree saplings mechanisms.

2.3 การสร้างแผนที่เส้นทางการบิน

การปลูกต้นไม้เพื่อฟื้นฟูสภาพป่าจำเป็นต้องทำการสำรวจพื้นที่ สภาพนิเวศวิทยาและข้อมูลชนิดพรรณไม้ที่เหมาะสมก่อน นำพันธุ์ไม้ไปปลูกในพื้นที่ การสร้างแผนที่เส้นทางการบินประยุกต์ใช้โปรแกรมแผนที่ 3 มิติ Google Earth โดยกำหนดตำแหน่งที่จะปลูกกล้าไม้ในแต่ละจุดซึ่งได้มาจากข้อมูลพิกัดในระหว่างการทำสำรวจพื้นที่ ข้อมูลพิกัดดังกล่าวจะถูกนำไปสร้างเส้นทางการบินโดยการลากเส้นตรงที่ต่อเชื่อมกันระหว่างจุดพิกัด (Polyline) และบันทึกข้อมูลไฟล์ในรูปแบบ *.kml (Keyhole markup language) เพื่อนำเข้าในแอปพลิเคชันควบคุมการบินของโดรนสำหรับใช้กำหนดเส้นทางการบินในการทดสอบต่อไป

2.4 การทดสอบการทำงานภาคสนาม

การทดสอบการทำงานในภาคสนามใช้พื้นที่ภายในศูนย์อนุรักษ์พันธุ์กรรมพืชอันเนื่องมาจากพระราชดำริฯ ตำบลคลองไผ่ อำเภอสัตหีบ จังหวัดนครราชสีมา เมล็ดพืชที่ใช้ทดสอบจะถูกนำมาเพาะลงในแคปซูลกล้าไม้ซึ่งบรรจุส่วนผสมของวัสดุปลูกและสารกระตุ้นการงอก เมื่อเมล็ดมีใบเลี้ยงงอกขึ้นมาแล้วจึงนำแคปซูลต้นอ่อนมาจัดเรียงลงในท่อบรรจุซึ่งติดตั้งอยู่กับโดรนเพื่อนำไปทดสอบในภาคสนามโดยไม่ได้มีน้ำบรรจุอยู่ในถังฉีดพ่นน้ำยา การควบคุมการปล่อยแคปซูลกล้าไม้ใช้วิธีสั่งงานจากระยะไกลโดยสังเกตจากตำแหน่งของโดรนในแอปพลิเคชันสำหรับควบคุมการบิน ผลการทดสอบประเมินจากค่าความเคลือบของตำแหน่งแคปซูลกล้าไม้ที่ตกลงพื้นเทียบกับตำแหน่งพิกัดอ้างอิงที่กำหนด

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 สมบัติทางกายภาพ-ทางกลของแคปซูลต้นอ่อนกล้าไม้

Figure 4 แสดงลักษณะของแคปซูลต้นอ่อนกล้าไม้ที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องปั๊มและลักษณะของแคปซูลภายหลังการอบ ค่าเฉลี่ยความชื้นและความหนาแน่นของส่วนผสมสำหรับขึ้นรูปแคปซูลต้นอ่อนกล้าไม้ทั้ง 3 ชนิด แสดงใน Figure 5 จากกราฟจะเห็นว่าแคปซูลต้นที่ใช้ส่วนผสมจากกาบกล้วยสับ (Sheaf of banana tree) จะมีความชื้นและค่าความหนาแน่นรวมสูงที่สุด รองลงมาได้แก่ แกลบ (Husk) และขุยมะพร้าว (Coconut coir) ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากสมบัติที่แตกต่างกันของวัสดุแต่ละชนิด เช่น ความสามารถในการดูดซับน้ำและความต้านทานการอัดตัวเมื่อนำไปขึ้นรูป

ระยะเวลาในการย่อยสลายทดสอบโดยการรดน้ำแคปซูลต้นอ่อนกล้าไม้ให้เปียกชุ่มในทุกช่วงเช้า-เย็น เพื่อให้แคปซูลได้รับความชื้นในสภาวะอิมมิด จากข้อมูลจะเห็นว่าแคปซูลต้นอ่อนที่ใช้ส่วนผสมจากกาบกล้วยสับจะใช้ระยะเวลาเฉลี่ยในการย่อยสลายมากที่สุดที่ระยะเวลา 12 วัน รองลงมา ได้แก่ แกลบและขุยมะพร้าว ที่ระยะเวลา 5 และ 4 วัน ตามลำดับ อย่างไรก็ตามผลการทดสอบการรับแรงกระแทกด้วยมวลลูกตุ้ม (Figure 6) พบว่า แคปซูลต้นอ่อนที่ใช้ส่วนผสมจากขุยมะพร้าวมีค่าความต้านทานในการรับแรงกระแทกซึ่งเทียบเท่ากับพลังงานของการปล่อยให้ตกอย่างอิสระลงบนพื้นแข็งจากความสูงมากที่สุดที่ระดับความสูงเฉลี่ย 11.2 เมตร รองลงมา ได้แก่ กาบกล้วยสับและแกลบ ที่ระดับความสูงเฉลี่ย 10.0 และ 10.6 เมตร ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากโครงสร้างของวัสดุผสมแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน ข้อมูลผลการทดสอบระยะเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการย่อยสลายและความต้านทานในการรับแรงกระแทกของส่วนผสมสำหรับขึ้นรูปแคปซูลต้นอ่อนกล้าไม้ทั้ง 3 ชนิด แสดงใน Figure 7



Figure 4 Forming capsules from different mixture.

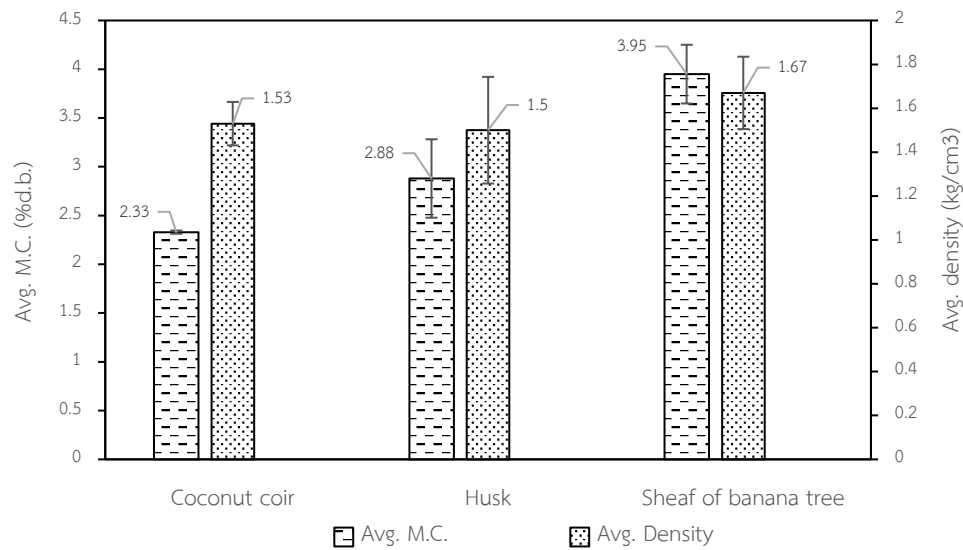


Figure 5 Moisture content and density of the forming capsules.

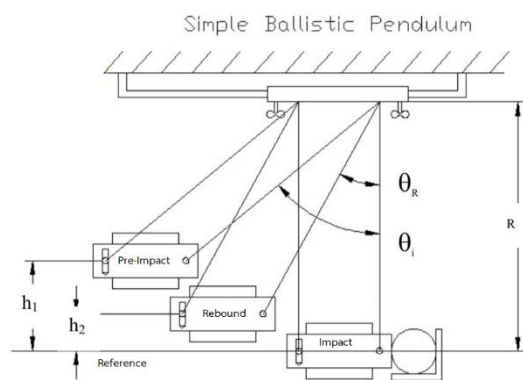


Figure 6 Pendulum impact test.

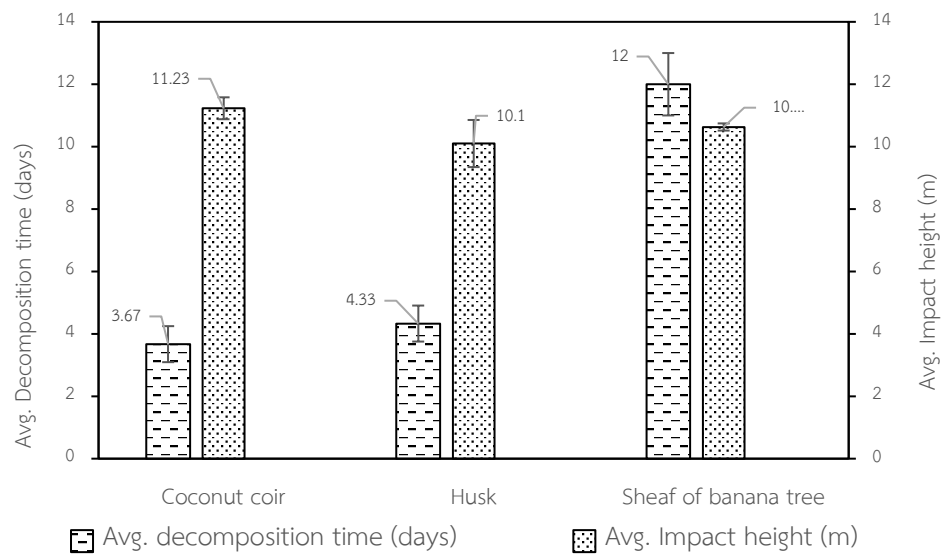


Figure 7 Average decomposition time and impact height of the forming capsules.

3.2 ชุดกลไกการปล่อยแคปซูลต้นอ่อนกล้าไม้

ต้นแบบชุดกลไกการปล่อยแคปซูลกล้าไม้สำหรับติดตั้งเข้ากับโดรนเกษตรแสดงใน Figure 8 กลไกการทำงานประกอบด้วยเซอร์โวมอเตอร์สำหรับขับเคลื่อนชุดกลไกการปล่อยแคปซูลกล้าไม้จากท่อบรรจุ ขึ้นงานต้นแบบถูกสร้างขึ้นจากเครื่องพิมพ์ 3 มิติและนำมาประกอบเพื่อทดสอบการทำงานของกลไก เมื่อกำหนดจังหวะช่วงการทำงานของกลไกชุดปล่อยครั้งละ 2 วินาที และบรรจุแคปซูลต้นอ่อนครั้งละ 5 แคปซูล กลไกสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องตามที่ได้ออกแบบไว้ โดยขณะที่แคปซูลไหลออกจากชุดปล่อยมีการเหวี่ยงออกจากแนวกึ่งกลางของท่อปล่อยเล็กน้อย ในการบินทดสอบการปล่อยแคปซูลกล้าไม้เซอร์โวมอเตอร์ใช้สัญญาณจากขาเอาต์พุต PWM (Pulse Width Modulation) และแรงดันไฟเลี้ยงจากกล่องควบคุมการบินของโดรนเพื่อควบคุมการทำงานของกลไก โดยปรับตั้งสวิทช์บนรีโมทควบคุมสำหรับสั่งการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์และชุดกลไก

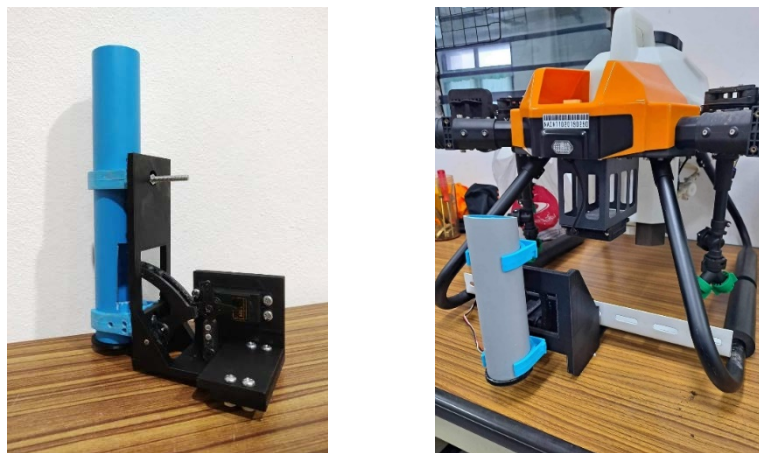


Figure 8 Prototype of agricultural drone with mechanisms for planting tree saplings

3.3 ข้อมูลแผนที่เส้นทางการบิน

ในการทดสอบกำหนดพิกัดตำแหน่งจุดปล่อยแคปซูลกล้าไม้จำนวน 5 จุด ที่ระดับความสูง 8 เมตรเหนือพื้นดิน เส้นทางการบินสำหรับทดสอบภาคสนามภายในพื้นที่ศูนย์อนุรักษ์พันธุ์กรรมพืชอันเนื่องมาจากพระราชดำริฯ อพ.สธ. คลองไผ่ ดังแสดงใน Figure 9 ระยะเส้นทางการบินรวม 400 เมตร (แต่ละจุดห่างกันประมาณ 100 เมตร) ภาพถ่ายแผนที่ดาวเทียมที่แสดงในโปรแกรมแผนที่ 3 มิติและแอปพลิเคชันสำหรับควบคุมการบินของโดรน มีลักษณะที่แตกต่างกันในบางจุด เนื่องจากข้อมูลของแผนที่ในแอปพลิเคชันสำหรับควบคุมการบินไม่ได้ถูกปรับปรุงให้เป็นข้อมูลล่าสุด



Figure 9 Flight path in 3D mapping program and drone's application.

3.4 ผลการทดสอบภาคสนาม

ในการทดสอบใช้เมล็ดจากต้นประดู่ป่า (*Pterocarpus macrocarpus* Kurz.) โดยแช่ทิ้งไว้ในน้ำและนำไปเพาะลงในแคปซูลกล้าไม้ซึ่งใช้ส่วนผสมจากกากกล้วยสับบรรจุวัสดุปลูกและสารกระตุ้นการงอก การเพาะเมล็ดต้นกล้าอ่อนใช้เวลาในการงอกประมาณ 13 วัน โดยมีความสูงของลำต้นรวมใบเลี้ยงประมาณ 2 - 5 เซนติเมตร นำแคปซูลกล้าไม้เรียงลงในท่อบรรจุจำนวน 5 แคปซูล ในการทดสอบภาคสนามเมื่อบังคับโดรนบินไปถึงตำแหน่งเป้าหมายและกดสวิทช์บนรีโมทควบคุมเพื่อสั่งการทำงานของกลไก พบว่าแคปซูลกล้าไม้ตกลงสู่พื้นดินโดยไม่เกิดความเสียหาย Figure 10 แสดงลักษณะของแคปซูลต้นอ่อนกล้าไม้

จากผลการทดสอบพบว่าตำแหน่งของแคปซูลกล้าไม้มีความคลาดเคลื่อนจากพิกัดตำแหน่งที่ระบุ ดังแสดงใน Table 2 ซึ่งสาเหตุเนื่องจากโดรนเกษตรที่ใช้ในการบินทดสอบติดตั้งกล้องส่งสัญญาณภาพแบบมุมมองบุคคลที่ 1 (First person view, FPV) ซึ่งไม่สามารถปรับมุมมองภาพให้เป็นแบบแผนที่ตั้งฉาก (Ortho map) ได้ ส่งผลให้นักบินไม่สามารถมองเห็นตำแหน่งที่ถูกต้องเมื่อใกล้ถึงเป้าหมายต้องอาศัยการสังเกตจากตำแหน่งของโดรนบนแผนที่ที่แสดงในแอปพลิเคชันสำหรับควบคุมการบิน นอกจากนั้นค่าความคลาดเคลื่อนยังเป็นผลมาจากความแม่นยำระบบระบุพิกัดตำแหน่งของโดรนซึ่งสามารถปรับแก้ได้โดยการติดตั้งสถานีรับสัญญาณเสริม (Base station) และปรับโหมดไปใช้ระบบระบุพิกัดตำแหน่งแบบจลน์ (Real-time kinematic positioning, RTK) เพื่อให้พิกัดตำแหน่งของโดรนมีความแม่นยำสูงขึ้น



Figure 10 Plant seedling capsule of *Pterocarpus macrocarpus* Kurz..

Table 2 Positional deviation of plant seedling capsules compared to the specified coordinates.

Experiment	Average deviation (m)
1	2.65
2	2.32
3	2.46
4	2.75
5	2.20

4. สรุป

โดรนเกษตรสำหรับใช้ในการปลูกต้นอ่อนกล้าไม้ถูกออกแบบและพัฒนาขึ้นเพื่อนำมาแก้ปัญหาและอุปสรรคของการปลูกต้นไม้และฟื้นฟูสภาพป่า อุปกรณ์ประกอบด้วยชุดกลไกการปล่อยแคปซูลกล้าไม้ และแคปซูลกล้าไม้ซึ่งใช้ส่วนผสมจากกากกล้วยสับบรรจุวัสดุปลูกและสารกระตุ้นการงอก เมื่อกำหนดพิกัดจุดปล่อยแคปซูลกล้าไม้จำนวน 5 จุด ที่ระดับความสูง 8 เมตรเหนือพื้นดิน โดยมีเส้นทางการบินรวมระยะทางประมาณ 400 เมตร โดรนสามารถปล่อยแคปซูลกล้าไม้ได้ใกล้เคียงกับพิกัดตำแหน่งที่กำหนดโดยต้นกล้าไม้ไม่เกิดความเสียหาย ตำแหน่งของแคปซูลกล้าไม้มีความคลาดเคลื่อนจากพิกัดตำแหน่งที่ระบุเฉลี่ยเท่ากับ 2.5 เมตร ซึ่งเป็นผลมาจากความแม่นยำระบบระบุพิกัดตำแหน่งของโดรน

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ บริษัท อีซี(2018) จำกัด สำหรับการสนับสนุนโครงที่ใช้ในการทดสอบ รวมไปถึงข้อมูลและทรัพยากรต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการดำเนินงานวิจัย ขอขอบคุณเทคโนโลยีสุรนารี ร่วมกับสำนักงานปลัดกระทรวงอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ที่สนับสนุนงบประมาณในโครงการ “การออกแบบพัฒนาโลกและแคปซูลบรรจุเมล็ดพันธุ์สำหรับโครงปลูกพืช” ภายใต้โครงการส่งเสริมให้บุคลากรวิจัยในสถาบันอุดมศึกษาไปปฏิบัติงานเพื่อแก้ไขปัญหาและเพิ่มขีดความสามารถในการผลิตให้กับภาคอุตสาหกรรม (Talent Mobility) ของสถาบันอุดมศึกษาประจำปีงบประมาณ 2566 ขอขอบคุณศูนย์อนุรักษ์พันธุ์กรรมพืชอันเนื่องมาจากพระราชดำริฯ ตำบลคลองไผ่ อำเภอสี่คิ้ว จังหวัดนครราชสีมา สำหรับการสนับสนุนเมล็ดพันธุ์พืช วัสดุปลูกและพื้นที่ในการทดสอบภาคสนาม

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมป่าไม้. 2564. รายงานประจำปีพื้นที่ป่าในประเทศไทย. กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย: กรมป่าไม้.
- [2] United Nations Food and Agriculture Organization (UNFAO). 2020. Global Forest Resources Assessment 2020. Rome, Italy: FAO.
- [3] ชนวน รัตนวรหะ. 2540. เกษตรกรรมเชิงระบบความสำคัญของความหลากหลายทางชีวภาพในระบบเกษตร กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- [4] Holl, K. D., and Aide, T. M., 2011. When and where to actively restore ecosystems? Journal of Applied Ecology.
- [5] Sayer, J. A., et al. 2016. Challenges of forest restoration. Restoration Ecology.
- [6] Bayrak, M. M., 2018. Funding and budget in forest restoration. Forests.
- [7] Manuel R. Guariguataa and Ostertag R., 2001. Neotropical secondary forest succession: Changes in structural and functional characteristics. Forest Ecology and Management 148:185-206.
- [8] Sagan V., et al. 2019 UAV-Based High Resolution Thermal Imaging for Vegetation Monitoring, and Plant Phenotyping Using ICI 8640 P, FLIR Vue Pro R 640, and thermoMap Cameras. Remote Sens., 11(3), 330.

ภาคโปสเตอร์

ผลการใช้สารจิบเบอเรลลินต่อการเก็บเกี่ยวด้วยเครื่องเกี่ยวนาเพื่อผลิตเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองหลังนาจังหวัดน่าน Effects of Gibberellin Application to Harvested by Combine Harvester for Soybean Seed Production after Rice Crop, Nan Province

กณทิมา ทองศรี^{1,*}, ภัสสร วัฒนกุลภาคิน², ศุภลักษณ์ สัตยสมิตสถิต¹, ธนัชชาติ ทรัพย์จี¹ และ นิภาพร พรพรรณรา¹

Kantima Thongsri^{1,*}, Papassorn Wattanakulpakin², Supalak Sattayasamitsathit¹

Thanutchart Supjee¹ and Nipaporn Pannara¹

¹ศูนย์วิจัยและพัฒนาเมล็ดพันธุ์พืชพิษณุโลก ตำบลวังทอง อำเภอวังทอง จังหวัดพิษณุโลก

²ศูนย์วิจัยและพัฒนาเมล็ดพันธุ์พืชเชียงใหม่ ตำบลหนองหาร อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่

¹Phitsanulok Seed Research and Development Center, Wang Thong, Wang Thong, Phitsanulok Province

²Chiang Mai Seed Research and Development Center, Nong Han, San Sai, Chiang Mai Province

*Corresponding author: Kantima Thongsri, e-mail address: kantima_3816@hotmail.com

บทคัดย่อ

การผลิตเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองหลังนาพบปัญหาต้นทุนในการเก็บเกี่ยวสูง ถ้าเก็บเกี่ยวด้วยเครื่องเกี่ยวนาทดแทนการใช้แรงงานจะมีการสูญเสียผลผลิตระหว่างเก็บเกี่ยว ซึ่งการใช้กรดจิบเบอเรลลิน (Gibberellic acid, GA₃) สามารถส่งเสริมระยะต้นกล้าทำให้ข้อแรกยืดยาว และระยะสีบพันธุ์ทำให้ต้นยืดยาว ติดเมล็ดมากขึ้น และสามารถเก็บเกี่ยวได้หมด การศึกษาในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินวิธีการใช้สาร GA₃ ต่อการเจริญเติบโต ผลผลิต องค์ประกอบผลผลิต และคุณภาพเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองพันธุ์ กว. เชียงใหม่ 60 ในแปลงทดสอบเกษตรกรบ้านเขื่อนแก้ว ตำบลถืมตอง อำเภอเมืองน่าน จังหวัดน่าน สำหรับผลิตเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองหลังนา ปี 2565/2566 ผลการทดลองพบว่า การคลุกเมล็ดด้วยสาร GA₃ 50 ppm ก่อนปลูก (GA₃ 20% ST อัตรา 2.25 มิลลิกรัมต่อน้ำ 75 มิลลิลิตร ต่อเมล็ด 15 กิโลกรัม) มีผลทำให้ความงอกในไร่ ความสูงของต้นกล้าที่อายุ 15 วันหลังงอก และความสูงของข้อแรกสูงกว่าการไม่คลุกสาร และการพ่นสาร GA₃ 100 ppm (GA₃ 20% ST อัตรา 1.25 กรัมต่อน้ำ 20 ลิตร) ที่ระยะถั่วเหลืองเริ่มออกดอก มีผลทำให้ความสูงต้น จำนวนข้อต่อต้น น้ำหนักแห้งต้น จำนวนฝักต่อต้น น้ำหนักฝักแห้ง จำนวนเมล็ดต่อฝัก และผลผลิตเมล็ดพันธุ์สูงกว่าการไม่พ่นสาร เปอร์เซ็นต์การสูญเสียระหว่างการเก็บเกี่ยวด้วยมือและเครื่องเกี่ยวนาดลดลง แต่คุณภาพเมล็ดพันธุ์ทั้งความชื้น ความงอก ความแข็งแรง โดยวิธีการเร่งอายุ และการแตกร้าวของเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองไม่แตกต่างกัน ซึ่งได้มาตรฐานเมล็ดพันธุ์ขั้นพันธุ์ขยายของกรมวิชาการเกษตร

คำสำคัญ: ถั่วเหลือง, กรดจิบเบอเรลลิน, เครื่องเกี่ยวนา, คุณภาพเมล็ดพันธุ์

Abstract

Soybean seed production after the rice crop faces challenges due to the high costs associated with harvesting soybeans. When harvested using a combine harvester instead of manual labor, there is a loss of yield during harvesting. The application of gibberellic acid (GA₃) promotes the growth of the first nodes and elongation in the seedling stage, as well as seed setting and complete harvesting during the reproductive stage. The objective of this study was to determine the effects of GA₃ application on the growth, yield, yield component, and quality of cv. DOA Chiang Mai 60 soybean seeds in a farmer's seed production field after rice in the dry season of 2022/2023 in Khuean Kao Village, Thum Tong, Mueang Nan, Nan Province. The results showed that GA₃-seed dressing at 50 ppm (GA₃ 20% ST at a rate of 2.25 mg per 75 ml of water per 15 kg of seed) resulted in higher field emergence, plant height, and first node height compared to non-applied GA₃. Moreover, GA₃ at 100 ppm (GA₃ 20% ST, 1.25 g per 20 L of water) as a foliar application during the initial flowering stage (R1) had plant height, number of nodes per plant, stem dry weight, number of pods per plant, pod dry weight, number of seed per pod and seed yield higher than non-applied GA₃. The percentage of losses during harvesting by hand and using a combine harvester decreased. However, there were no differences in seed moisture, germination, vigor as assessed by accelerated aging test, and seed cracking of soybean seeds compared to the registered seed standards of the Department of Agriculture.

Keywords: Soybean, Gibberellic acid, Combine harvester, Seed quality

1. บทนำ

เกษตรกรในประเทศไทยประกอบอาชีพทำนาเป็นหลัก มีพื้นที่นาทั้งหมด 68.48 ล้านไร่ เป็นพื้นที่ปลูกข้าวนาปรัง 11.34 ล้านไร่ คิดเป็นร้อยละ 20.57 ของพื้นที่การเกษตรทั้งหมด [1] แต่ด้วยการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศส่งผลกระทบต่อภาคการเกษตร โดยเฉพาะช่วงฤดูแล้งหลังนาเกิดปัญหาล้างน้ำไม่เพียงพอต่อการเจริญเติบโต ส่งผลให้คุณภาพและผลผลิตพืชลดลง ดังนั้นกระทรวงเกษตรและสหกรณ์จึงมีนโยบายส่งเสริมให้เกษตรกรหันมาปลูกพืชใช้น้ำน้อยเพื่อเพิ่มรายได้ให้แก่เกษตรกร โดยเฉพาะการปลูกถั่วเหลืองสลับกับการทำนาเนื่องจากเป็นพืชอายุสั้นและใช้น้ำน้อย สามารถปลูกหลังนาโดยอาศัยความชื้นในดินที่เหลืออยู่หลังการเก็บเกี่ยวข้าว [2] แต่ศักยภาพการผลิตถั่วเหลืองได้น้อยกว่าความต้องการใช้ภายในประเทศ ซึ่งคาดการณ์ในปี 2566/2567 จะได้ผลผลิตถั่วเหลืองเพียง 22,252 ตัน คิดเป็นร้อยละ 0.63 ของความต้องการใช้ภายในประเทศ [3] แต่การผลิตถั่วเหลืองในปัจจุบันประสบปัญหาเมล็ดพันธุ์ไม่เพียงพอ ปัจจัยการผลิตราคาสูง และเกิดการระบาดของศัตรูพืชเป็นสาเหตุที่ทำให้พื้นที่ปลูกและผลผลิตเมล็ดพันธุ์ลดลง [4] รวมถึงปัญหาแรงงานในการเก็บเกี่ยวถั่วเหลืองทำให้เกษตรกรหันมาใช้เครื่องเกี่ยวนวดเก็บเกี่ยวผลผลิต แต่ก็พบปัญหาการใช้เครื่องเกี่ยวนวดในการเก็บเกี่ยวถั่วเหลืองเกิดการสูญเสียขณะเก็บเกี่ยวซึ่งปกติต้นถั่วเหลืองพันธุ์ กวก. เชียงใหม่ 60 มีความสูงของข้อแรกถึงผิวดินประมาณ 7.33 เซนติเมตร [5] เมื่อหัวเกี่ยวของเครื่องเกี่ยวนวดตัดต้นถั่วสูงเกินไปทำให้ฝักถั่วบริเวณข้อแรกของต้นไม่สามารถเก็บเกี่ยวได้หมด ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเครื่องเกี่ยวนวดของสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ปี 2560 [6] หัวเกี่ยวต้องมีความสูงของการตัดเมื่อปรับใบมีดอยู่ในตำแหน่งการตัดต่ำสุดเฉลี่ยไม่มากกว่า 10 เซนติเมตร และเมื่อปรับใบมีดอยู่ในตำแหน่งการตัดสูงสุด ความสูงการตัดเฉลี่ยไม่น้อยกว่า 30 เซนติเมตร แต่ในการปฏิบัติงานของการใช้เครื่องเกี่ยวนวดจะตัดต้นถั่วสูงในเวลาอันรวดเร็ว ส่งผลให้มีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองหลังการเก็บเกี่ยวร้อยละ 15.4 [7] ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาเทคโนโลยีเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและลดการสูญเสียผลผลิต ซึ่งในปัจจุบันมีการใช้สารควบคุมการเจริญเติบโตที่จะส่งเสริมระยะแรกของการเจริญเติบโตทำให้ข้อแรกยืดยาว และการเจริญเติบโตระยะสืบพันธุ์ ทำให้ต้นยืดยาว ติดเมล็ดมากขึ้น และสามารถเก็บเกี่ยวได้หมด สารจิบเบอเรลลิน หรือ กรดจิบเบอเรลลิน (Gibberellic acid, GA_3) ที่สามารถกระตุ้นการเจริญเติบโตและผลผลิต เพิ่มความยืดหยุ่นของผนังเซลล์ทำให้เซลล์มีรูปร่างยืดยาวขึ้นได้ทั้งยอดและราก กระตุ้นการเจริญของรากแรกเกิด ส่งเสริมการงอกและความแข็งแรงของเมล็ด [8-9] เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลือง การศึกษาที่ผ่านมา [10] มีการคลุกเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองพันธุ์ กวก. เชียงใหม่ 60 ด้วยสาร GA_3 50 หรือ 100 ppm ก่อนปลูกสามารถส่งเสริมความแข็งแรงของเมล็ดพันธุ์ และสามารถเพิ่มความยาวต้นได้ร้อยละ 33 ของความยาวต้นที่ไม่ได้คลุกสารในช่วงฤดูแล้งหลังนา [5] และการพ่นสาร GA_3 100 ppm มีผลต่อการเพิ่มความสูงของต้น จำนวนกิ่ง จำนวนใบ พื้นที่ใบต่อต้น จำนวนดอก จำนวนฝัก จำนวนเมล็ดต่อต้น ผลผลิตเมล็ดต่อต้น และน้ำหนักเมล็ด 100 เมล็ด [11] นอกจากนี้ การคลุกเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองด้วยสาร GA_3 50 ppm ร่วมกับสาร EBL 0.25 ppm ก่อนปลูก ตามด้วยการพ่นสาร GA_3 100 ppm ที่ระยะออกดอก (R1) ทำให้ผลผลิตเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองเพิ่มขึ้น [12]

เพื่อนำผลงานวิจัยนี้ไปขยายผลให้เกษตรกรใช้ได้อย่างเหมาะสมกับสภาพพื้นที่ ต้องมีการวิจัยพัฒนาและทดสอบเทคโนโลยีร่วมกับเกษตรกรในแปลงก่อนเป็นคำแนะนำ เพื่อให้เทคโนโลยีเป็นที่ยอมรับและนำไปใช้ปฏิบัติได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น การศึกษาในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินวิธีการใช้สารสารจิบเบอเรลลิน ชนิด GA_3 ต่อการเจริญเติบโต ผลผลิต และคุณภาพเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองพันธุ์ กวก. เชียงใหม่ 60 ในแปลงทดสอบผลิตเมล็ดพันธุ์ของเกษตรกรที่เก็บเกี่ยวเครื่องเกี่ยวนวดพื้นที่หลังนาจังหวัดน่าน ที่จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและลดการสูญเสียผลผลิตเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลือง พัฒนาการผลิตเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองภายในชุมชนและขยายผลสู่ชุมชนใกล้เคียงได้ต่อไป

2. วิธีการศึกษา

2.1 คัดเลือกพื้นที่แปลงผลิตเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองหลังนา

เลือกพื้นที่เป้าหมายที่มีการตั้งกลุ่มเกษตรกรผู้ผลิตเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองและมีศักยภาพในการผลิตเมล็ดพันธุ์ เพื่อเป็นตัวแทนร่วมทดสอบการใช้สารสารจิบเบอเรลลิน ชนิด GA_3 ในแปลงผลิตเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองหลังนา คัดเลือกเกษตรกรจากกลุ่มเกษตรกรผู้ปลูกถั่วเหลืองบ้านเขื่อนแก้ว ตำบลถ้ำทอง อำเภอเมืองน่าน จังหวัดน่าน วิเคราะห์พื้นที่กำหนดเป้าหมาย การผลิตและการกระจายเมล็ดพันธุ์ ดำเนินงานร่วมกันกับเกษตรกรโดยนำเทคโนโลยีการผลิตเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลือง การใช้สาร GA_3 ตามคำแนะนำมาทดสอบเปรียบเทียบกับวิธีการของเกษตรกร

2.2 การทดสอบการใช้สาร GA₃ ในแปลงผลิตเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองหลังนา

ดำเนินการทดสอบการปลูกเมล็ดพันธุ์และพันธุ์สาร GA₃ ในแปลงผลิตเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองหลังนา พื้นที่บ้านเขื่อนแก้ว ตำบลถ้ำทอง อำเภอน่าน จังหวัดน่าน ช่วงเดือนธันวาคม 2565 ถึงเดือนเมษายน 2566 เกษตรกรจำนวน 10 ราย ๆ ละ 2 ไร่ มี 2 กรรมวิธี ได้แก่ (1) กรรมวิธีเกษตรกร เป็นการไม่คลุกสารและพันธุ์สาร GA₃ (2) กรรมวิธีทดสอบ เป็นการปลูกเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองด้วยสาร GA₃ 50 ppm ก่อนปลูก และพันธุ์สาร GA₃ 100 ppm ที่ระยะถั่วเหลืองเริ่มออกดอก (R1) หรือประมาณ 35 วัน หลังปลูก วัดพิถีแปลง (GPS) ระบุตำแหน่งดาวเทียมของแปลงทดสอบของเกษตรกร ไถเตรียมดินปลูกถั่วเหลืองรายละ 2 ไร่ ในกรรมวิธีเกษตรกรและกรรมวิธีทดสอบแปลงละ 1 ไร่ ปลูกถั่วเหลืองพันธุ์ กวก. เชียงใหม่ 60 ‘DOA CM60’ ทั้ง 2 กรรมวิธี โดยเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองด้วยปุ๋ยชีวภาพไรโซเบียมของกลุ่มวิจัยจุลินทรีย์ดิน สำนักวิจัยพัฒนาปัจจัยการผลิตทางการเกษตร กรมวิชาการเกษตร อัตรา 200 กรัมต่อเมล็ด 15 กิโลกรัมต่อไร่ ระยะปลูก 50x20 เซนติเมตร จำนวน 5 เมล็ดต่อหลุม และให้น้ำหลังปลูกเสร็จ ให้เกษตรกรดำเนินการปฏิบัติดูแลรักษาแปลงผลิตเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองทั้ง 2 แปลงเช่นเดียวกัน ตามคำแนะนำของกรมวิชาการเกษตร (กรมวิชาการเกษตร, 2547) โดยพันธุ์สารอะลาคลอร์ 48% W/V EC อัตรา 100 มิลลิกรัมต่อน้ำ 20 ลิตร เพื่อกำจัดวัชพืชก่อนงอก และพันธุ์สารไตรอะโซฟอส 40% W/V EC อัตรา 50 มิลลิกรัมต่อน้ำ 20 ลิตร เมื่อถั่วเหลืองอายุ 7 และ 14 วันหลังปลูก ป้องกันกำจัด หนอนแมลงวันเจาะลำต้นถั่ว เมื่อถั่วเหลืองอายุ 20 วัน ใส่ปุ๋ยเคมี 12-24-12 อัตรา 25 กิโลกรัมต่อไร่ กรณีแปลงทดสอบในกรรมวิธีทดสอบพื้นที่ 1 ไร่ ปลูกเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองด้วยสาร GA₃ 50 ppm โดยเตรียมจากสาร GA₃ 20% ST อัตรา 2.25 มิลลิกรัมต่อน้ำ 75 มิลลิกรัม ต่อเมล็ด 15 กิโลกรัม ร่วมกับปุ๋ยชีวภาพไรโซเบียมถั่วเหลืองก่อนปลูก และพันธุ์สาร GA₃ 100 ppm โดยเตรียมจากสาร GA₃ 20% ST อัตรา 1.25 กรัมต่อน้ำ 20 ลิตร หรือสาร GA₃ 20% ST อัตรา 5 กรัมต่อไร่ เมื่อระยะถั่วเหลืองเริ่มออกดอก (R1) เปรียบเทียบกับการไม่คลุกสารและไม่พันธุ์สารเป็นกรรมวิธีเกษตรกร

เมื่อครบ 15 วันหลังปลูก ในแต่ละกรรมวิธีเก็บข้อมูลความงอกในไร่ (field emergence) สุ่มตรวจนับต้นงอก 20 หลุม จำนวน 4 ซ้ำ ประเมินความงอกในไร่โดยตรวจนับเมื่อเมล็ดงอกที่พบไฮโปโคทิลและใบเลี้ยงกางเหนือผิวดินและวัดความสูงของต้นกล้า เมื่อถั่วเหลืองสุกแก่ในระยะเก็บเกี่ยวลักษณะฝักถั่วเหลืองเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล 95% (R8) สุ่มเก็บตัวอย่างต้นถั่วเหลือง 10 ต้น จำนวน 4 ซ้ำ บันทึกข้อมูลการเจริญเติบโตและองค์ประกอบผลผลิต ได้แก่ ความสูง จำนวนข้อต่อต้น จำนวนกิ่งต่อต้น น้ำหนักแห้งต้น ความยาวฝัก จำนวนฝักต่อต้น น้ำหนักแห้งฝัก และจำนวนเมล็ดต่อฝัก และดำเนินการเก็บเกี่ยวถั่วเหลืองด้วยมือโดยสุ่มเกี่ยวต้นถั่วเหลืองในพื้นที่เก็บเกี่ยว 4x6 ตารางเมตร จำนวน 4 ซ้ำ และเก็บเกี่ยวด้วยเครื่องเกี่ยววอด DC-70G Plus Cabin ของบริษัทสยามคูโบต้าคอร์ปอเรชั่น จำกัด โดยใช้ความเร็วขับเคลื่อนที่เหมาะสมระยะทาง 20 เมตร จำนวน 4 ซ้ำ พร้อมสุ่มเก็บเมล็ดและฝักถั่วเหลืองที่ยืนต้นและหลุดร่วงในพื้นที่เก็บเกี่ยว ขนาดพื้นที่ 2 ตารางเมตร จำนวน 10 จุดต่อซ้ำ เพื่อหาเปอร์เซ็นต์สูญเสียระหว่างการเก็บเกี่ยวทั้ง 2 วิธี ซึ่งน้ำหนักผลผลิตเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองของแต่ละกรรมวิธี และสุ่มเก็บตัวอย่างเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองแต่ละกรรมวิธี นำมาตรวจสอบคุณภาพเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลือง ตามวิธีการของ ISTA [13] ดังนี้

2.2.1 ความชื้นเมล็ดพันธุ์ (seed moisture content) นำเมล็ดถั่วเหลืองไปบดหยาบและชั่งน้ำหนักตัวอย่างละ 4.5±0.5 กรัม จำนวน 4 ซ้ำ อบที่อุณหภูมิ 103±2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 17±1 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักเมล็ดแห้งหลังอบ และคำนวณความชื้นเมล็ดพันธุ์จากสูตร

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความชื้น} = \frac{(\text{น้ำหนักสดของเมล็ดพันธุ์} - \text{น้ำหนักแห้งของเมล็ดพันธุ์})}{\text{น้ำหนักสดของเมล็ดพันธุ์}} \times 100$$

2.2.2 ความงอกมาตรฐาน (standard germination, SG) เพาะเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองด้วยทราย (sand method) ตัวอย่างละ 100 เมล็ดต่อซ้ำ จำนวน 4 ซ้ำ และเก็บไว้ในห้องเพาะความงอกอุณหภูมิ 20-30 องศาเซลเซียส ประเมินความงอกที่ 5 และ 8 วันหลังเพาะความงอก

2.2.3 ความแข็งแรงของเมล็ดพันธุ์ ทดสอบความแข็งแรงของเมล็ดพันธุ์โดยวิธีการเร่งอายุ (accelerated aging test, AA Test) โดยนำเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองตัวอย่างละ 100 เมล็ด จำนวน 4 ซ้ำ บ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 41 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง นำเมล็ดถั่วเหลืองที่ผ่านการเร่งอายุเพาะความงอกมาตรฐาน และประเมินความงอกตามวิธีการที่ 2.2.2

2.2.4 การแตกร้าวของเมล็ดพันธุ์ โดยวิธีอินดอกซิล อะซิเตด (indoxyl acetate test) นำเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองตัวอย่างละ 100 เมล็ด จำนวน 4 ซ้ำ แช่สารละลายอินดอกซิล อะซิเตด 0.1% เป็นเวลา 10 วินาที และผึ่งให้แห้งเป็นเวลา 5 นาที ใส่ตัวอย่างเมล็ดในกล่องพลาสติกที่มีสารซับแอมโมเนียให้ชุ่มและปิดฝาให้สนิท แอมโมเนียจะทำปฏิกิริยากับอินดอกซิล อะซิเตดที่เข้าไปสู่รอยแตกร้าวของเมล็ดพันธุ์ รอยแตกร้าวจะปรากฏสีน้ำเงินเขียวหรือน้ำเงินม่วง บันทึกจำนวนเมล็ดที่ติดสี

2.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

เปรียบเทียบความแตกต่างของกรรมวิธีทดสอบและกรรมวิธีเกษตรกรด้วย Paired Samples t-test เปรียบเทียบวิเคราะห์ข้อมูลการเจริญเติบโต องค์ประกอบผลผลิต ผลผลิตเมล็ดพันธุ์ และคุณภาพเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลือง ด้วยโปรแกรม Data Analysis ของ Microsoft® Excel® for Microsoft 365 MSO [14]

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 พื้นที่แปลงผลิตเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองหลังนา

คัดเลือกกลุ่มเกษตรกรผู้ผลิตเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองบ้านเขื่อนแก้ว ตำบลถืมตอง อำเภอมืองน่าน จังหวัดน่าน (18°47'0.8232"N, 100°41' 49.9848"E) เป็นกลุ่มเกษตรกรที่มีศักยภาพและความพร้อมในการผลิตเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลือง มีพื้นที่หลังนาปลูกถั่วเหลืองมากกว่า 300 ไร่ ผลการวิเคราะห์พื้นที่และประเด็นปัญหาของเกษตรกรสรุปได้ว่า เกษตรกรมีความต้องการเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองคุณภาพดีแต่ยังขาดเมล็ดพันธุ์ที่จะนำไปปลูกและขยายพันธุ์ ช่วงเก็บเกี่ยวเกษตรกรได้ใช้เครื่องเกี่ยวขนาด DC-70G Plus Cabin ของบริษัทสยามคูโบต้าคอร์ปอเรชั่น จำกัด ซึ่งการปฏิบัติงานของผู้รับจ้างใช้เครื่องเกี่ยวขนาดตัดต้นถั่วสูงในเวลาอันรวดเร็ว โดยมีความสูงของหัวเกี่ยวในการตัดต้นถั่วเหลืองเฉลี่ย 12.87 เซนติเมตร ส่งผลให้มีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองหลังการเก็บเกี่ยวมากกว่าร้อยละ 15 (Figure 1) ดังนั้น จำเป็นต้องศึกษา วิจัยและพัฒนาศักยภาพการผลิตเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองของเกษตรกรให้ได้ผลผลิตและคุณภาพดีที่เก็บเกี่ยวเครื่องเกี่ยวขนาด โดยทดสอบการใช้สาร GA₃ ในแปลงผลิตเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองหลังนา และมีเกษตรกรเข้าร่วมทำแปลงทดสอบจำนวน 10 ราย (Table 1)

Table 1 Farmer's name and GPS coordinates of 'DOA CM60' soybean with GA₃ application in seed production field trial after rice, dry season 2022/2023, Khuean Kaeo Village, Thum Tong, Mueang Nan, Nan Province.

Code No.	Farmer's name	GPS coordinates			Planting date
		Zone	X	Y	
T1	Mr. Banyat Prasatsida	47Q	672147	1810044	2 December 2022
T2	Mr. Wao Koksri	47Q	672393	1810015	14 December 2022
T3	Mr. Thanayot Songrat	47Q	669769	1810014	14 December 2022
T4	Mr. Phonsawan Prasatsida	47Q	672253	1810122	6 December 2022
T5	Mrs. Wisuda Yodmuak	47Q	672524	1809655	6 December 2022
T6	Mr. Yuttakarn Tunkok	47Q	672139	1809659	6 December 2022
T7	Mr. Mai Salee	47Q	672095	1809617	6 December 2022
T8	Mrs. Wanpen Kraikaew	47Q	672067	1810135	14 December 2022
T9	Ms. Manasawee Phumpaichit	47Q	672759	1809108	6 December 2022
T10	Ms. Sudarat Sarathong	47Q	672944	1808964	6 December 2022



Figure 1 Characteristics of stems and pods of 'DOA CM60' soybean losses during harvested by a combine harvester of farmer field after rice, dry season 2022/2023, Khuean Kaeo Village, Thum Tong, Mueang Nan, Nan Province.

3.2 การทดสอบการใช้สาร GA₃ ในแปลงผลิตเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองหลังนา

แปลงทดสอบการใช้สาร GA₃ ต่อการเก็บเกี่ยวด้วยเครื่องเกี่ยวนาในแปลงผลิตเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลือง พันธุ์ กวก. เชียงใหม่ 60 พื้นที่กลุ่มเกษตรกรผู้ปลูกถั่วเหลืองบ้านเขื่อนแก้ว ตำบลถ้ำทอง อำเภอเมือง จังหวัดน่าน พื้นที่หลังนาในช่วงฤดูแล้ง ปี 2565/2566 มีเกษตรกรเข้าร่วมทำแปลงทดสอบ จำนวน 10 ราย

3.2.1 ความงอกในไร่และการเจริญเติบโตระยะต้นกล้าภายหลังการใช้สาร GA₃ ในแปลงทดสอบการผลิตเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองของเกษตรกร 10 ราย ผลการทดลองพบว่า การคลุกเมล็ดถั่วเหลืองด้วยสาร GA₃ ความเข้มข้น 50 ppm ก่อนปลูก ส่งผลให้ความงอกในไร่ที่ 15 วันหลังปลูก เฉลี่ย 84.67 เปอร์เซ็นต์ ความสูงของต้นกล้าที่ 15 วันหลังปลูก เฉลี่ย 16.58 เซนติเมตร และความสูงของข้อแรกเฉลี่ย 6.77 เซนติเมตร สูงกว่าการไม่คลุกสาร GA₃ มีความแตกต่างกันทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีเกษตรกร (Table 2)

3.2.2 การเจริญเติบโตและองค์ประกอบผลผลิต เมื่อมีการพ่นสาร GA₃ ความเข้มข้น 100 ppm ในถั่วเหลืองระยะเริ่มออกดอก (R1) ส่งผลให้การเจริญเติบโตทางด้านความสูงต้นเฉลี่ย 51.25 เซนติเมตร จำนวนข้อต่อต้นเฉลี่ย 8.66 ข้อ และน้ำหนักต้นแห้งเฉลี่ย 2.29 กรัม สูงกว่าการไม่พ่นสาร GA₃ มีความแตกต่างกันทางสถิติ ส่วนองค์ประกอบผลผลิต ได้แก่ จำนวนฝักต่อต้นเฉลี่ย 13.74 ฝัก น้ำหนักฝักแห้งเฉลี่ย 6.22 กรัม และจำนวนเมล็ดต่อฝัก 2.88 เมล็ด สูงกว่าการไม่พ่นสาร GA₃ มีความแตกต่างกันทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีเกษตรกร และการพ่นสาร GA₃ ไม่มีผลทำให้จำนวนกิ่งต่อต้นและความยาวฝัก มีความแตกต่างกันทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีเกษตรกร (Table 3 และ 4)

3.2.3 ผลผลิตเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลือง ภายหลังการเก็บเกี่ยวถั่วเหลืองในแปลงทดสอบการใช้สาร GA₃ ในแปลงผลิตเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองของเกษตรกร 10 ราย ผลการทดลองพบว่า การพ่นสาร GA₃ ความเข้มข้น 100 ppm ในถั่วเหลืองระยะเริ่มออกดอก (R1) และเก็บเกี่ยวด้วยเครื่องเกี่ยวนาและการเก็บเกี่ยวด้วยมือ ไม่มีผลทำให้เปอร์เซ็นต์การสูญเสียระหว่างกระบวนการเก็บเกี่ยวมีความแตกต่างกันทางสถิติกับการไม่พ่นสารหรือวิธีเกษตรกร แต่ส่งผลให้ผลผลิตเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองสูงกว่าการไม่พ่นสารเฉลี่ย 288.3 และ 293.0 กิโลกรัมต่อไร่ ตามลำดับ มีความแตกต่างกันทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีเกษตรกร (Table 5)

การคลุกเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองด้วยสารจิบเบอเรลลิน GA₃ ความเข้มข้น 50 ppm สามารถส่งเสริมการงอกและความแข็งแรงของเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลือง และกระตุ้นการเจริญเติบโตในระยะแรกของต้นกล้า และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตเพิ่มผลผลิตเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองโดยการพ่นสาร GA₃ 100 ppm ที่ระยะเริ่มติดดอก (R1) และเก็บเกี่ยวด้วยมือหรือเก็บเกี่ยวด้วยเครื่องเกี่ยวนา เป็นวิธีการแนะนำให้เกษตรกรผู้ผลิตเมล็ดพันธุ์นำไปใช้ในแปลงผลิตเมล็ดพันธุ์ต่อไป ซึ่งการใช้สาร GA₃ มีผลต่อการกระตุ้นความงอก โดยเพิ่มกิจกรรมของเอนไซม์ α -amylase และ β -amylase เพื่อย่อยแป้งให้เปลี่ยนเป็นน้ำตาลใช้ในกระบวนการเมแทบอลิซึมหรือเอนไซม์ proteases และ β -glucanases ช่วยย่อยโปรตีนให้เป็นกรดอะมิโนเพื่อใช้ในกระบวนการเจริญเติบโตของเอ็มบริโอ [15] และชักนำให้เซลล์พืชยืดยาวทางลำต้น ทำให้เมล็ดที่เริ่มงอกมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น [16] สอดคล้องกับ [17] ได้ใช้สาร GA₃ 0.10 mM คลุกเมล็ดถั่วเหลืองมีผลให้ความงอกมาตรฐาน ความงอกในไร่ และการเจริญเติบโตของต้นกล้า

การพ่นสาร GA₃ สามารถกระตุ้นการเจริญเติบโต เพิ่มความยืดหยุ่นของผนังเซลล์ ทำให้เซลล์มีรูปร่างยืดยาวทางลำต้นและความสูงของพืช และเพิ่มปริมาณผลผลิต [18] อีกทั้งเพิ่มกิจกรรมของเอนไซม์ proteases, glyoxysomal และ chlorophyll catabolism ทำให้ปริมาณโปรตีน RNA และคลอโรฟิลล์เพิ่มขึ้น สะท้อนการขยายตัวของพืชโดยการยับยั้งการสลายตัวของคลอโรฟิลล์ เกิดการสะสมน้ำหนักรากของพืช [19] ในถั่วเหลือง [20] รายงานว่า GA₃ มีผลต่อการสังเคราะห์แสงควบคุมกิจกรรม Ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase oxygenase และเป็นหนึ่งในสัญญาณในการควบคุมกิจกรรม sucrose phosphate synthase ของการสังเคราะห์แป้งและน้ำตาล ทำให้ผลผลิตเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับ [11] ศึกษาการพ่นสาร GA₃ 100 ppm ในถั่วเหลืองที่อายุ 42 วันหลังปลูก หรือที่ระยะเริ่มออกดอก (R1) ช่วยส่งเสริมความสูงของต้น เพิ่มผลผลิตเมล็ดต่อต้น และน้ำหนัก 100 เมล็ด

3.2.4 คุณภาพเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองภายหลังการปรับปรุงสภาพเมล็ดพันธุ์ที่มีการคลุกและพ่นสาร GA₃ ผลการทดลองพบว่า ถั่วเหลืองที่มีการคลุกและพ่นสาร GA₃ และเก็บเกี่ยวด้วยเครื่องเกี่ยวนวด มีความชื้นเมล็ดพันธุ์เฉลี่ย 10.25 เปอร์เซ็นต์ และคุณภาพเมล็ดพันธุ์ด้านความงอกเฉลี่ย 91.90 เปอร์เซ็นต์ มีความแตกต่างกันทางสถิติกับการไม่พ่นสารเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีเกษตรกร แต่ความแข็งแรงโดยวิธีเร่งอายุและการแตกตัวของเมล็ดพันธุ์ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติทั้งที่มีการใช้สารและไม่ใช้สาร GA₃ ส่วนการเก็บเกี่ยวด้วยมือ ไม่มีผลทำให้คุณภาพเมล็ดพันธุ์ด้านความชื้น ความงอก ความแข็งแรงโดยวิธีเร่งอายุ และการแตกตัวของเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองมีความแตกต่างกันทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีเกษตรกร (Table 6)

การคลุกเมล็ดและพ่นสารจิบเบอเรลลิน GA₃ ไม่ส่งผลกระทบต่อความงอกและความแข็งแรงของเมล็ด เช่นเดียวกับ [5] ที่ศึกษาการคลุกเมล็ดและพ่นสาร GA₃ ในถั่วเหลืองพันธุ์ กวก. เชียงใหม่ 60 และพันธุ์ กวก. เชียงใหม่ 7 ซึ่งกรรมวิธีทดสอบและวิธีเกษตรกรคุณภาพเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองตรงตามมาตรฐานขั้นพันธุ์ขยายของกรมวิชาการเกษตร [21] ภายหลังการทำการทดลอง ทดสอบ สมาชิกในกลุ่มเกษตรกรกลุ่มเกษตรกรผู้ปลูกถั่วเหลืองบ้านเขื่อนแก้ว ตำบลถ้ำทอง อำเภอเมือง จังหวัดน่าน มีความพึงพอใจต่อการใช้ในการคลุกเมล็ดด้วยสาร GA₃ ความเข้มข้น 50 ppm และการพ่นสาร GA₃ ความเข้มข้น 100 ppm ในการผลิตเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองพันธุ์ กวก. เชียงใหม่ 60 ได้ผลผลิตเมล็ดพันธุ์สูงกว่าการไม่พ่นสารซึ่งเป็นวิธีเดิมที่เกษตรกรไม่ได้ปฏิบัติทั้งการเก็บเกี่ยวด้วยมือหรือเก็บเกี่ยวด้วยเครื่องเกี่ยวนวด เกษตรกรยอมรับคุณภาพเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองที่ตรงตามมาตรฐานขั้นพันธุ์ขยายของกรมวิชาการเกษตร (ความงอก $\geq 75\%$)

4. สรุป

ผลการใช้สารจิบเบอเรลลินที่เหมาะสมต่อการเก็บเกี่ยวด้วยเครื่องเกี่ยวนวดเพื่อผลิตเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองพันธุ์ กวก. เชียงใหม่ 60 สรุปผลการทดลองได้ดังนี้

4.1 แปลงทดสอบการผลิตเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองพันธุ์ กวก. เชียงใหม่ 60 ช่วงฤดูแล้งหลังนาปี 2565/2566 การคลุกเมล็ดด้วยสารจิบเบอเรลลิน GA₃ ความเข้มข้น 50 ppm ก่อนปลูก มีผลทำให้ความงอกในไร่ ความสูงของต้นกล้าที่อายุ 15 วันหลังงอก และความสูงของข้อแรกสูงกว่าการไม่คลุกสาร และการพ่นสารจิบเบอเรลลิน GA₃ ความเข้มข้น 100 ppm ในถั่วเหลือง ที่ระยะเริ่มออกดอก มีผลทำให้ความสูงต้น จำนวนข้อต่อต้น น้ำหนักแห้งต้น จำนวนฝักต่อต้น น้ำหนักฝักแห้ง และจำนวนเมล็ดต่อฝักสูงกว่าการไม่พ่นสารซึ่งเป็นกรรมวิธีของเกษตรกร

4.2. การพ่นสารจิบเบอเรลลิน GA₃ ความเข้มข้น 100 ppm ในถั่วเหลืองที่ระยะเริ่มออกดอก ส่งผลให้ผลผลิตเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองสูงกว่าการไม่พ่นสารในช่วงฤดูแล้งหลังนา

4.3 การการคลุกเมล็ดและพ่นสารจิบเบอเรลลิน GA₃ และเก็บเกี่ยวด้วยมือหรือเก็บเกี่ยวด้วยเครื่องเกี่ยวนวดมีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียระหว่างการเก็บเกี่ยวน้อยกว่าการไม่พ่นสาร ส่วนคุณภาพเมล็ดพันธุ์ทางด้านความชื้น ความงอก ความแข็งแรงโดยวิธีเร่งอายุ และการแตกตัวของเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองไม่แตกต่างกัน ซึ่งถั่วเหลืองมีคุณภาพเมล็ดพันธุ์ผ่านตามมาตรฐานขั้นพันธุ์ขยายของกรมวิชาการเกษตร (ความงอก $\geq 75\%$)

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยและพัฒนาเมล็ดพันธุ์พืชพิษณุโลก จังหวัดพิษณุโลก หน่วยงานภายใต้กองวิจัยพัฒนาเมล็ดพันธุ์พืช กรมวิชาการเกษตร สนับสนุนเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองพันธุ์ กวก. เชียงใหม่ 60 มาใช้ในการทดลอง และ ร.ต.จริต วุฒิสวัสดิ์ ประธานกลุ่มเกษตรกรผู้ปลูกถั่วเหลืองบ้านเขื่อนแก้ว ตำบลถ้ำทอง อำเภอเมือง จังหวัดน่าน ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์และสถานที่ในการดำเนินการทำงานวิจัยครั้งนี้

Table 2 Field emergence and plant growths of ‘DOA CM60’ soybean with GA₃ seed dressing in seed production field trial after rice, dry season 2022/2023, Khuean Kao Village, Thum Tong, Mueang, Nan Province.

Farmer	Field emergence		Plant height		The first node height	
	(%)		(cm)		(cm)	
	Non-applied	Applied	Non-applied	Applied	Non-applied	Applied
T1	61.67	68.17	13.90	17.40	6.00	8.00
T2	78.00	98.17	14.30	16.70	6.40	6.80
T3	62.83	79.67	15.90	17.40	6.20	6.60
T4	82.33	90.17	12.30	14.70	6.20	6.60
T5	68.83	83.00	14.00	16.10	6.20	6.20
T6	83.50	80.83	12.10	14.90	5.80	8.00
T7	76.17	83.67	13.50	15.40	5.40	6.40
T8	87.67	80.83	14.60	17.30	6.20	6.80
T9	68.67	85.50	14.80	18.20	6.00	6.20
T10	63.83	96.67	15.50	17.70	6.40	6.13
Mean	73.35	84.67	14.09	16.58	6.08	6.77
S.D.	88.69	76.40	1.51	1.53	0.09	0.48
t		3.12		12.50		2.69
df		9.00		9.00		9.00
sig		0.01**		0.00**		0.01**

S.D. = standard deviation, t = test statistic, df = degrees of freedom, sig = P(T <= t) one-tail ** = significant at P ≤ 0.01

Table 3 Plant growths of ‘DOA CM60’ soybean with GA₃ foliar application in seed production field trial after rice, dry season 2022/2023, Khuean Kao Village, Thum Tong, Mueang, Nan Province.

Farmer	Plant height		Number of		Number of		Dry weights of		Pod length	
	(cm)		nodes/plant		branches/plant		stem (g)		(cm)	
	Non-applied	Applied	Non-applied	Applied	Non-applied	Applied	Non-applied	Applied	Non-applied	Applied
T1	27.68	60.78	8.28	10.23	1.38	1.55	1.38	2.34	4.95	4.04
T2	38.38	54.03	7.68	9.18	1.69	1.79	1.47	2.33	3.79	4.00
T3	26.45	47.25	6.33	7.95	1.38	2.06	0.75	1.79	3.39	3.75
T4	42.93	53.50	5.65	7.40	1.00	1.85	1.04	1.63	3.85	3.91
T5	34.88	50.73	7.43	8.23	1.32	2.26	2.02	1.93	3.73	3.58
T6	54.79	42.78	8.53	7.90	2.02	1.17	2.11	2.34	3.79	3.84
T7	35.15	34.75	6.78	7.53	0.00	2.11	0.90	1.47	3.54	3.71
T8	48.50	59.15	9.93	11.18	1.44	1.92	3.62	4.87	4.00	4.08
T9	38.30	56.15	8.00	8.90	2.04	1.84	1.49	2.28	3.80	3.91
T10	31.20	53.43	7.05	8.15	2.18	2.19	1.46	1.93	3.63	3.68
Mean	37.82	51.25	7.56	8.66	1.44	1.87	1.62	2.29	3.85	3.85
S.D.	80.04	61.67	1.48	1.50	0.40	0.11	0.68	0.92	0.18	0.03
t		3.40		4.75		1.71		5.30		0.03
df		9.00		9.00		9.00		9.00		9.00
sig		0.00**		0.00**		0.06 ^{ns}		0.00**		0.49 ^{ns}

S.D. = standard deviation, t = test statistic, df = degrees of freedom, sig = P(T <= t) one-tail, ns = not significant, ** = significant at P ≤ 0.01

Table 4 Yield components of ‘DOA CM60’ soybean with GA₃ foliar application in seed production field trial after rice, dry season 2022/2023, Khuean Kao Village, Thum Tong, Mueang, Nan Province.

Farmer	Number of pods/plant		Dry weights of pod (g)		Number of seeds/pod	
	Non-applied	Applied	Non-applied	Applied	Non-applied	Applied
T1	7.38	12.23	3.09	5.24	2.95	2.85
T2	13.20	14.85	5.89	7.21	2.83	3.63
T3	6.18	10.40	2.02	4.33	2.33	2.70
T4	8.05	13.55	3.02	6.14	2.70	2.90
T5	11.40	9.25	4.58	3.62	2.70	2.58
T6	14.85	11.18	7.01	5.33	2.79	2.85
T7	6.00	14.44	2.23	6.04	2.48	2.71
T8	17.30	21.78	8.23	10.31	2.88	3.03
T9	14.75	15.55	6.39	7.61	2.80	2.90
T10	14.13	14.15	5.70	6.41	2.63	2.68
Mean	11.32	13.74	4.81	6.22	2.71	2.88
S.D.	16.94	12.22	4.63	3.54	0.04	0.09
t		2.04		2.61		2.08
df		9.00		9.00		9.00
sig		0.04**		0.01**		0.03**

S.D. = standard deviation, t = test statistic, df = degrees of freedom, sig = P(T ≤ t) one-tail, ** = significant at P ≤ 0.01

Table 5 Yield loss and seed yield of ‘DOA CM60’ soybean with GA₃ foliar application in seed production field trial after rice, dry season 2022/2023, Khuean Kao Village, Thum Tong, Mueang, Nan Province.

Farmer	Harvested by a combine harvester				Harvested by hand			
	Yield loss during harvesting (%)		Seed yield (kg/rai)		Yield loss during harvesting (%)		Seed yield (kg/rai)	
	Non-applied	Applied	Non-applied	Applied	Non-applied	Applied	Non-applied	Applied
T1	42.66	33.88	252.5	268.3	2.57	1.95	264.5	271.5
T2	59.15	32.88	319.7	367.7	3.79	1.69	324.5	379.5
T3	22.45	55.66	204.0	233.0	3.03	2.49	175.0	220.5
T4	59.83	44.09	180.0	206.2	5.03	4.13	185.0	210.5
T5	22.54	39.32	175.7	229.1	1.80	1.32	211.5	235.5
T6	82.99	32.81	172.8	320.0	5.16	1.84	143.5	331.0
T7	76.60	44.06	187.2	238.3	2.04	1.31	186.5	236.5
T8	62.77	50.65	264.0	276.0	2.83	3.94	268.8	287.0
T9	54.88	36.41	301.9	384.0	1.63	5.36	331.0	371.5
T10	39.22	29.36	350.9	360.0	1.96	2.80	341.0	386.0
Mean	52.31	39.91	240.9	288.3	2.98	2.68	243.1	293.0
S.D.	421.43	73.12	4,393.2	4,217.4	1.66	1.87	5,243.4	4,755.2
t		1.66		3.59		0.50		3.10
df		9.00		9.00		9.00		9.00
sig		0.07 ^{ns}		0.00**		0.31 ^{ns}		0.01**

S.D. = standard deviation, t = test statistic, df = degrees of freedom, sig = P(T ≤ t) one-tail ns = not significant, ** = significant at P ≤ 0.01

Table 6 Seed quality of 'DOA CM60' soybean with GA₃ seed dressing and foliar application in seed production field trial after rice, dry season 2022/2023, Khuean Kao Village, Thum Tong, Mueang Nan, Nan Province.

Farmer	Seed moisture content (%)		Seed germination (%)		Seed vigor by AA (%)		Cracked seed (%)	
	Non-applied	Applied	Non-applied	Applied	Non-applied	Applied	Non-applied	Applied
<i>Harvested by a combine harvester</i>								
T1	8.28	8.34	92.75	91.50	63.75	77.00	4.50	11.00
T2	9.73	10.39	95.00	97.75	78.25	69.75	15.00	16.00
T3	8.30	8.25	87.50	91.75	67.25	57.50	5.00	3.50
T4	12.69	13.98	81.50	82.00	72.25	65.00	10.50	9.00
T5	9.98	10.28	93.00	96.50	73.50	96.50	10.50	7.00
T6	8.28	8.34	92.75	91.50	63.75	77.00	4.50	11.00
T7	9.73	10.39	95.00	97.75	78.25	69.75	15.00	16.00
T8	8.30	8.25	87.50	91.75	67.25	57.50	5.00	3.50
T9	12.69	13.98	81.50	82.00	72.25	65.00	10.50	9.00
T10	9.98	10.28	93.00	96.50	73.50	96.50	10.50	7.00
Mean	9.80	10.25	89.95	91.90	71.00	73.15	9.10	9.30
S.D.	2.87	4.80	26.68	34.13	28.22	196.21	17.04	19.29
t		2.76		2.88		0.48		0.17
df		9.00		9.00		9.00		9.00
sig		0.01**		0.01**		0.32 ^{ns}		0.43 ^{ns}
<i>Harvested by hand</i>								
T1	8.65	9.28	91.00	93.00	80.50	91.75	1.00	1.50
T2	9.70	10.39	92.50	92.00	90.50	88.25	1.00	2.50
T3	9.42	8.04	95.50	93.50	87.00	87.75	0.50	1.00
T4	8.36	8.35	88.25	88.25	82.00	82.25	6.50	0.50
T5	8.84	8.93	90.00	94.25	78.00	83.75	0.50	2.00
T6	8.22	8.23	73.25	83.50	80.00	75.50	1.00	1.00
T7	8.22	8.23	73.25	83.50	80.00	75.50	1.00	1.00
T8	9.04	9.37	97.00	95.00	61.00	83.75	6.00	0.00
T9	10.03	9.69	92.50	92.00	94.00	90.25	0.00	1.00
T10	9.79	9.74	92.50	93.50	87.00	90.50	0.00	0.50
Mean	9.03	9.03	88.58	90.85	82.00	84.93	1.75	1.10
S.D.	0.46	0.63	71.43	18.32	81.50	34.74	5.79	0.54
t		0.01		1.57		1.08		0.72
df		9.00		9.00		9.00		9.00
sig		0.50 ^{ns}		0.08 ^{ns}		0.15 ^{ns}		0.25 ^{ns}

S.D. = standard deviation, t = test statistic, df = degrees of freedom, sig = P(T ≤ t) one-tail ns = not significant, ** = significant at P ≤ 0.01

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Agri-Mag. 2024. การบริหารจัดการเชิงรุก 1. ข้อมูลพื้นฐาน: การใช้ที่ดิน. เข้าถึงได้จาก : เว็บไซต์ [http:// https://agri-map-online.moac.go.th/](http://https://agri-map-online.moac.go.th/) (เข้าถึงเมื่อ 23 มีนาคม 2567).
- [2] พรพรรณ สุทธิชัย. 2558. สถานการณ์และภาพรวมงานวิจัยและพัฒนาด้านการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ. ใน: การประชุมวิชาการ ประจำปี 2558 สถาบันวิจัยพืชไร่และพืชทดแทนพลังงาน 13 - 15 กรกฎาคม 2558. โรงแรมอิมพีเรียล ภูเก็ต รีสอร์ท จังหวัดเพชรบูรณ์. หน้า 87-91.
- [3] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2566. สถานการณ์สินค้าเกษตรที่สำคัญและแนวโน้ม ปี 2566. เข้าถึงได้จาก : เว็บไซต์ <https://www.opsmoac.go.th/chiangrai-dwl-files-442991791980>. (เข้าถึงเมื่อ 1 ธันวาคม 2565).
- [4] กองวิจัยพัฒนาเมล็ดพันธุ์พืช. 2565. คู่มือการผลิตเมล็ดพันธุ์ ถั่วเหลือง ถั่วเหลืองฝักสด ถั่วเขียว และถั่วลิสง. เข้าถึงได้จาก : เว็บไซต์ <https://www.doa.go.th/seed/wp-content/uploads/2022/05/คู่มือการผลิตเมล็ดพันธุ์พืชตระกูลถั่ว.pdf>. (เข้าถึงเมื่อ 23 มีนาคม 2567).
- [5] Thongsri, K. 2021. Effects of brassinosteroids and gibberellin on seed quality and yield of soybean under different temperatures. Ph.D. Thesis, Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom.
- [6] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2560. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเครื่องเกี่ยวนวดข้าว. เข้าถึงได้จาก : เว็บไซต์ https://www.tisi.go.th/data/standard/pdf_files/tis/a1428-2560.pdf. (เข้าถึงเมื่อ 19 ธันวาคม 2566).
- [7] กันทิมา ทองศรี, นริลักษณ์ วรรณสาย, นิภาภรณ์ พรรณรา และสนอง บัวเกตุ. 2558. การศึกษาช่วงอายุเก็บเกี่ยวและวิธีการเก็บเกี่ยวที่มีผลต่อผลผลิตและคุณภาพเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลือง. ใน: การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 53. 3 - 6 กุมภาพันธ์ 2558. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน, กรุงเทพฯ. หน้า 218-225.
- [8] Tanimoto, E. 2005. Regulation of root growth by plant hormones: Roles for auxin and gibberellin. Crit. Rev. Plant Sci. 24(4): 249-265.
- [9] Bidadi, H., Yamaguchi, S., Asahina, M. and Satoh, S. 2010. Effects of shoot-applied gibberellin/gibberellin-biosynthesis inhibitors on root growth and expression of gibberellin biosynthesis genes in *Arabidopsis thaliana*. Plant Root 4: 4-11.
- [10] กันทิมา ทองศรี, จุฑามาศ ร่มแก้ว, จวงจันทร์ ดวงพัตรา และกนกวรรณ เทียงธรรม. 2562. ผลของสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชต่อคุณภาพเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่ำ. ใน: การประชุมทางวิชาการเมล็ดพันธุ์พืชแห่งชาติ ครั้งที่ 16. 18 - 21 มิถุนายน 2562. สมาคมเมล็ดพันธุ์แห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ. หน้า 85-98.
- [11] Sarkar, P.K., Haque, M.S. and Karim, M.A. 2002. Effects of GA₃ and IAA and their frequency of application on morphology, yield contributing characters and yield of soybean. J. Agr. Sci. 1(3): 119-122.
- [12] กันทิมา ทองศรี, จวงจันทร์ ดวงพัตรา, กนกวรรณ เทียงธรรม และจุฑามาศ ร่มแก้ว. 2564. ผลของสารจิบเบอเรลลินและบราสซิโนสเตรอยด์ต่อการสร้างโปรโซเปียมการเจริญเติบโต และผลผลิตเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองสายพันธุ์ก้าวหน้าปลูกในฤดูแล้งหลังนา. วารสารแก่นเกษตร. 49(6): 1424-1435.
- [13] ISTA. 2023. International Rules for Seed Testing. International Seed Testing Association. Bassesdorf, Switzerland.
- [14] สุวรรณสา ยารวมญาติ. 2565. การวิเคราะห์สถิติเบื้องต้น ด้วย excel, ภาควิชาเศรษฐศาสตร์เกษตรและทรัพยากร คณะเศรษฐศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. Accessible from: website <https://www.eatecon.com/wp-content/uploads/2022/04/Training-Excel-on-9-10-APR-2022.pdf>. (Accessed when 10 April 2022).
- [15] Yamaguchi, S. 2008. Gibberellin metabolism and its regulation. Annu. Rev. Plant Biol. 59: 225-251.
- [16] Gupta, R. and Chakrabarty, S.K. 2013. Gibberellic acid in plant: Still a mystery unresolved. Plant Signal. Behav. 8(9): e25504.
- [17] Wang, Q., Feng Z. and Smith, D.L. 1996. Application of GA₃ and kinetin to improve corn and soybean seedling emergence at low temperature. Environ. Exp. Bot. 36(4): 377-383.

-
- [18] Eiichi, T. 2005. Regulation of root growth by plant hormones roles for auxin and gibberellin. Crit. Rev. Plant Sci. 24(4): 249-265.
- [19] Zhang, F., Pan, B., and Smith, D.L. 1997. Application of gibberellic acid to the surface of soybean seed (*Glycine max* (L.) Merr.) and symbiotic nodulation, plant development, final grain and protein yield under short season conditions. Plant and Soil. 188: 329-335.
- [20] Yuan, L., and Xu, D.Q. 2001. Stimulation effect of gibberellic acid short-term treatment on the photosynthesis related to the increase in rubisco content in broad bean and soybean. Photosynth. Res. 68(1): 39-47.
- [21] สถาบันวิจัยพืชไร่ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2537. เมล็ดพันธุ์พืชไร่. โรงพิมพ์คุรุสภาลาดพร้าว, กรุงเทพฯ.

การศึกษาเชิงเปรียบเทียบรูปแบบการวัดสเปกตรัมเนียร์อินฟราเรดที่มีต่อสมรรถนะของแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องสำหรับการประเมินความเสถียรเชิงกลในน้ำยางข้น

A comparative study of near-infrared spectral measurement modes on machine learning model performance for evaluating the mechanical stability time in concentrated rubber latex

พิสิษฐ์ สุทธิ¹, กิตติศักดิ์ เพ็ชรพันธ์^{1,*}, ชิน ฮอค ลิม²
Pisit Suttho¹, Kittisak Phetpan¹, Chin Hock Lim²

¹ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร 86160
²ฝ่ายวิจัยและพัฒนา บริษัท ไทยรับเบอร์ลาเท็กซ์กรุ๊ป จำกัด (มหาชน) ชลบุรี 20190

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

²Department of Research and Development, Thai Rubber Latex Group Public Company Limited, Chonburi 20190

*Corresponding author: Kittisak Phetpan, e-mail address: kittisak.ph@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรด (NIR) สเปกโทรสโกปีร่วมกับการสร้างแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องเพื่อทำนายค่าความเสถียรเชิงกล (MST) ในน้ำยางข้น โดยงานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาเชิงเปรียบเทียบผลของรูปแบบการวัดสเปกตรัมเนียร์อินฟราเรดในโหมดสะท้อนกลับและโหมดส่องผ่านแบบสะท้อนกลับที่มีต่อสมรรถนะของแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่อง อัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่องจำนวน 2 ชนิด คือ วิธีการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วนแบบเชิงเส้น (Linear-PLSR) และวิธีการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วนแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Polynomial-PLSR) ถูกประยุกต์ใช้ในการสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลสเปกตรัม NIR กับค่า MST ผ่านการจัดการข้อมูลสเปกตรัมเบื้องต้น (Spectral preprocessing) จำนวน 5 วิธี คือ Standard normal variate (SNV) Savitzky golay first derivative (SGD1) Savitzky golay second derivative (SGD2) Standard normal variant ร่วมกับ Savitzky golay first derivative (SNV+SGD1) และ Standard normal variant ร่วมกับ Savitzky golay second derivative (SNV+SGD2) ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพในการทำนายดีที่สุดคือแบบจำลองที่สร้างจากข้อมูลสเปกตรัม NIR ซึ่งวัดในโหมดส่องผ่านแบบสะท้อนกลับ (Transflection) และผ่านการจัดการเบื้องต้นด้วยวิธี SGD1 โดยใช้อัลกอริทึม Linear-PLSR แบบจำลองมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และค่ารากที่สองของความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยสำหรับการสร้างแบบจำลอง (RMSECV) และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (r^2) และค่ารากที่สองของความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยสำหรับการทำนาย (RMSEP) เท่ากับ 0.76 และ 81.04 วินาที และ 0.79 และ 76.22 วินาที ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการวัดสเปกตรัมเนียร์อินฟราเรดในโหมดสะท้อนกลับและโหมดส่องผ่านแบบสะท้อนกลับ พบว่าแบบจำลองมีสมรรถนะในการทำนายไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

คำสำคัญ: เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี, การเรียนรู้ของเครื่อง, ความเสถียรเชิงกล, น้ำยางข้น

Abstract

This research applies near-infrared (NIR) spectroscopy techniques combined with machine learning to predict the mechanical stability time (MST) in concentrated rubber latex. The study proposed a comparative investigation of the results obtained from different measurement modes of NIR spectroscopy, namely reflectance and transflection modes, concerning their impact on the performance of the machine learning models. Two machine learning algorithms, namely Partial Least Squares Regression (PLSR) with linear and polynomial terms, are employed to establish relationships between NIR spectral data and MST values. Spectral preprocessing is conducted using five methods: Standard Normal Variate (SNV), Standard Normal Variate with the Savitzky-Golay first derivative (SGD1), Standard Normal Variate with the Savitzky-Golay second derivative (SGD2), and combinations of SNV with SGD1 and SGD2. The study finds that the most effective predictive model is generated from NIR spectral data measured in transflection mode and preprocessed using the SGD1 method.

The Linear-PLSR algorithm is utilized. The model exhibits coefficients of determination (R^2) and root mean square errors of cross-validation (RMSECV) and prediction (RMSEP) of 0.76 and 81.04 seconds, and 0.79 and 76.22 seconds, respectively. However, statistical analysis reveals no significant difference in prediction performance between reflectance and transfection modes of NIR spectroscopy at a 95% confidence level.

Keywords: Near-infrared spectroscopy, Machine learning, Mechanical stability time, Concentrated rubber latex

1. บทนำ

ยางพารา (*Hevea brasiliensis*) เป็นวัตถุดิบที่มีความต้องการในหลายอุตสาหกรรมทั่วโลก ใช้ผลิตในหลายอุตสาหกรรม คือ อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ถุงมือยาง เครื่องมือทางการแพทย์ ลูกโป่ง ยางยานยนต์ ยางขอบประตู ยางรัดของ เป็นต้น ปัจจุบันวัตถุดิบหลักอย่างยางพารามีการผลิตและส่งออกหลายประเภท เช่น ยางแผ่น ยางแผ่นรมควัน ยางเครพ ยางสังเคราะห์ ยางสีกม ยางรีเครม ยางแท่ง ยางผสม และน้ำยางข้น [1] ซึ่งหนึ่งในวัตถุดิบที่สำคัญอย่างมากในอุตสาหกรรมการผลิตด้วยวิธีการขึ้นรูปคือ น้ำยางข้น (Concentrated rubber latex) ในปี 2023 ประเทศไทยมีการผลิตน้ำยางข้นมากกว่า 1 ล้านตัน และส่งออกมากกว่าร้อยละ 50 จากปริมาณน้ำยางข้นที่ผลิตได้ทั้งหมด ส่วนที่เหลือนำมาใช้สำหรับอุตสาหกรรมต่างๆภายในประเทศ [2]

น้ำยางข้น (Concentrated rubber latex) ถูกผลิตมาจากน้ำยางสดธรรมชาติ (Field rubber latex) ที่มีโครงสร้างโมเลกุล cis-1,4 poly-isoprene โดยวิธีการปั่นแยกเนื้อ (Centrifuge method) ทำให้ปริมาณเนื้อยางมีความเข้มข้นขึ้นเพื่อให้ง่ายต่อการขนส่ง และมีการเติมสารเคมี (Preservative) เพื่อให้มีการเก็บรักษาที่ยาวนานมากขึ้น [3] มีการกำหนดมาตรฐานของคุณสมบัติต่างๆ ในน้ำยางข้นเพื่อให้ไปตามหลักมาตรฐานสากลอย่าง ISO 2004-1997 หรือ มอก. 980-2552 คือ ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solids content, TSC) ปริมาณเนื้อยางแห้ง (Dry rubber content, DRC) ปริมาณของแข็งที่ไม่ใช่ยาง (Non-rubber content, NRC) ความเป็นด่าง (Alkalinity) ความเสถียรเชิงกล (Mechanical stability time, MST) จำนวนกรดไขมันระเหยได้ (Volatile fatty acid number, VFA No.) จำนวนโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide number, KOH No.) ปริมาณตะกอน (Sludge content) ปริมาณก้อนยางจับตัว (Coagulum content) และปริมาณแมกนีเซียม (Magnesium content) [4]

ความเสถียรเชิงกล (Mechanical stability time, MST) คือ ระยะเวลาความสามารถในการคงสภาพเป็นของเหลวของน้ำยางเมื่อแรงกระทำ เช่น การปั่น การกวน เป็นต้น [5] โดยมีหน่วยเป็นวินาที (Second) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการบ่งชี้ความเสถียรของน้ำยาง โดยมาตรฐาน ISO 2004:2017 (E) กำหนดมาตรฐานของค่า MST คือ 650 วินาที ดังนั้นในกรณีที่ค่า MST ในน้ำยางน้อยเกินไปส่งผลต่อการสูญเสียความเสถียรของน้ำยางได้ง่าย ทำให้อนุภาคยางเกิดการจับตัวเป็นเม็ดเล็กๆได้ง่าย ส่งผลต่อชิ้นงานโดยตรง และหากค่า MST ในน้ำยางมากเกินไปส่งผลให้น้ำยางไม่เกิดการจับตัวเป็นเม็ดและเกิดฟองอากาศ ทำให้ผลิตภัณฑ์มีรูปร่างเกิดความเสียหายได้ ปัจจุบันพารามิเตอร์ MST ถูกวัดด้วยวิธีมาตรฐาน ISO 35:2004 (E) [6] ซึ่งเป็นวิธีที่ยอมรับในระดับสากลว่ามีความแม่นยำ และได้มาตรฐาน

อย่างไรก็ตามวิธีการทดสอบดังกล่าวพบว่า ต้องอาศัยความชำนาญของผู้ปฏิบัติงานเป็นอย่างมาก ราคาเครื่องที่ทดสอบที่ได้มาตรฐานมีราคาสูง การทดสอบที่ทำลายตัวอย่าง การเติมสารเคมีในการทดสอบ และรวมไปถึงการใช้เวลาในการทดสอบที่นาน (ขึ้นอยู่กับค่า MST ในการทดสอบแต่ละครั้ง) เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Near infrared spectroscopy technique: NIRS) เป็นเทคนิคที่น่าสนใจ เนื่องจากเป็นที่ยอมรับและยอมรับในหลายๆแขนงในปัจจุบัน เช่น ด้านการแพทย์ ด้านเกษตรกรรม ด้านการผลิอาหารและยา ด้านการผลิตสิ่งทอ ด้านปิโตรเลียม เป็นต้น [7] โดยความสามารถของคลื่นแสงอินฟราเรดย่านใกล้คือ การวัดองค์ประกอบทางเคมีที่มีการจับคู่ของโมเลกุลไฮโดรเจนเช่น C-H, O-H, N-H เป็นต้น จากการศึกษาวิจัย [8] พบว่าเมื่อเวลาผ่านไปเกิดการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ MST ในน้ำยางเพิ่มขึ้น เมื่ออายุการเก็บรักษา 4 ถึง 5 สัปดาห์ เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณลิพิด (Lipid) ชนิด ฟอสโฟลิพิด (Phospholipid) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดไขมัน (Fatty acid) กระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ของโปรตีนที่ส่งผลให้ค่า MST ในน้ำยางเพิ่มขึ้น [9] จากการศึกษาวิจัยพบว่า องค์ประกอบโครงสร้างทางเคมีของโมเลกุลดังกล่าวมีความเกี่ยวข้องกับอะตอม C, O, และ H จึงมีความเป็นไปได้สำหรับการประยุกต์ใช้เทคนิค NIRS เพื่อวัดค่า MST ในน้ำยางข้น และจากการศึกษาในงานวิจัยพบที่ยังไม่มีการใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรด

สำหรับการวัดค่า MST ในน้ำยางข้น แต่มีการประยุกต์ใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรดในการวัดพารามิเตอร์ต่างๆในน้ำยางข้นและยังให้สมรรถนะของแบบจำลองอยู่ในระดับสูงอีกด้วย เช่น ปริมาณของแข็งทั้งหมด [10-11], ปริมาณความเป็นยางทั้งหมด [10-11], ปริมาณความชื้น [12], ปริมาณค่าความหนืด [13], และปริมาณกรดไขมันระเหยง่าย [14] เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม จากการศึกษางานวิจัยพบว่ารูปแบบการวัดในตัวอย่างของเทคนิค NIRS ที่แตกต่างกันส่งผลต่อประสิทธิภาพในการทำนายที่แตกต่างกันด้วย ดังนั้นการเลือกใช้เครื่องมือและรูปแบบการวัดให้ตรงกับพารามิเตอร์ที่ต้องการแล้ว เทคนิค NIRS เป็นเทคนิคที่น่าสนใจในการวัดพารามิเตอร์ค่าความเสถียรเชิงกลในน้ำยางข้น แต่อย่างไรก็ตาม เทคนิค NIRS ก็มีข้อเสียในเรื่องของการแสดงค่าการดูดกลืนคลื่นแสงในรูปแบบสเปกตรัมที่มีตัวแปรจำนวนมาก (Multivariate) ดังนั้นเพื่อให้มีการวิเคราะห์ข้อมูลได้ง่าย แม่นยำ รวดเร็วและลดความผิดพลาด จึงต้องอาศัยการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine learning) เข้ามาบทบาทในการวิเคราะห์ข้อมูล ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์คือ การใช้เทคนิค NIRS ร่วมกับการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine learning) เพื่อทำนายพารามิเตอร์ค่าความเสถียรเชิงกลในน้ำยางข้น โดยใช้การจัดการสเปกตรัมเบื้องต้น (Spectral preprocessing) ที่แตกต่างกัน

2. วิธีการศึกษา

2.1 การเตรียมตัวอย่าง

ตัวอย่างน้ำยางข้นทั้งหมดที่ใช้ในการวิจัยนี้ถูกสุ่มและเตรียมที่ ฝ่ายวิจัยและพัฒนา บริษัท ไทยรับเบอร์ลาเทคส์กรุ๊ป จำกัด (มหาชน) อำเภอหนองใหญ่ จังหวัดชลบุรี ทั้งหมด 15 ตัวอย่าง โดยแต่ละตัวอย่างใช้ปริมาณตัวอย่างละ 2000 มิลลิลิตร และถูกเติมสารรักษาสภาพน้ำยางแอมโมเนียที่ความเข้มข้น 0.7% โดยมวล (ชนิดแอมโมเนียสูง) และแอมโมเนียมลอเรตที่ความเข้มข้น 0.032% โดยมวล ตัวอย่างทั้งหมดถูกทดสอบและเก็บรักษาจำนวน 6 ครั้ง ตลอดระยะเวลา 6 สัปดาห์ (0, 1, 2, 3, 4, และ 6 สัปดาห์)

2.2 การวัดสเปกตรัมเนียร์อินฟราเรด (NIR spectral measurement)

ตัวอย่างน้ำยางข้นถูกสแกนและเก็บสัญญาณสเปกตรัมด้วยเครื่องเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (NIR Quest 512, OceanOption, USA) ในช่วงความยาวคลื่น 900–1700 nm จำนวน 6 ครั้ง ตลอดอายุการเก็บรักษา 6 สัปดาห์ โดยการใช้รูปแบบการวัด 2 รูปแบบคือ รูปแบบการวัดแบบสะท้อนกลับ (Reflection) และรูปแบบการวัดส่องผ่านแบบสะท้อนกลับ (Transflection) และจุ่มหัวโพรบที่ระยะความลึกครึ่งหนึ่งของปริมาณน้ำยางที่มีอยู่ในภาชนะ เนื่องจากหากระยะการวัดใกล้กับภาชนะที่ใส่น้ำยางเกินไปทำให้เส้นสเปกตรัมที่ได้เกิดการดูดกลืนคลื่นแสงวัสดุของภาชนะด้วยและมีแสงบางส่วนทะลุผ่านภาชนะอาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้

2.3 การทดสอบความเสถียรเชิงกลด้วยวิธีมาตรฐาน (MST standard measurement)

ตัวอย่างน้ำยางข้นทุกตัวอย่างถูกทดสอบปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solid content: TSC) ตามมาตรฐาน ISO 124:1997 [15] และความเป็นด่าง (Alkalinity content) ตามมาตรฐาน ISO 125:2020 [16] ก่อนการทดสอบ MST ในน้ำยางข้นด้วยวิธีมาตรฐาน ISO 35:2004 (E) [6] การทดสอบ MST ในน้ำยางข้น ต้องทดสอบภายใน 24 ชั่วโมง ภายหลังเปิดภาชนะที่บรรจุและทำการทดสอบ 2 ชั่วโมง โดยความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบซ้ำต้องไม่เกิน 5%

2.4 การวิเคราะห์ข้อมูลและการสร้างแบบจำลอง (Data analysis and modeling)

ข้อมูลสเปกตรัมดิบ (Raw NIR spectra) ถูกจัดการข้อมูลสเปกตรัมเบื้องต้นด้วยวิธีทั้งหมด 5 วิธีคือ Standard normal variate (SNV), Savitzky Golay (window size 7 points) first derivative (SGD1), Savitzky Golay (window size 7 points) second derivative (SGD2), SNV ร่วมกับ SGD1 (SNV+SGD1), และ SNV ร่วมกับ SGD2 (SNV+SGD2) มีรายละเอียดดังนี้ Standard normal variate (SNV) คือการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นที่ได้รับผลกระทบจากการกระเจิงแสงซึ่งทำได้โดยการลบค่าการดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่นนั้นๆด้วยค่าเฉลี่ยทั้งสเปกตรัมและหารด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เทคนิค Savitzky golay first derivative เป็นการแปลงข้อมูลสเปกตรัมเพื่อลดสัญญาณรบกวน (Noise) ในข้อมูลสเปกตรัม โดยการกำหนดจำนวนช่วงค่าการดูดกลืนคลื่นแสง (window size) แล้วทำการสร้างสมการพหุนาม (Polynomial) จากนั้นใช้การคำนวณด้วยอนุพันธ์ โดยเทคนิค Savitzky golay first derivative และ Savitzky golay second derivative มีขั้นตอนที่คล้ายกันต่างกันที่การใช้อนุพันธ์ลำดับที่ 1 และ 2 ในการแก้สมการพหุนาม ซึ่งวิธีนี้ช่วยลดสัญญาณรบกวนและแก้ปัญหาการซ้อนทับกันของสัญญาณ

เมื่อข้อมูลสเปกตรัมผ่านการจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นแล้ว ข้อมูลถูกแบ่งออกเป็น 2 ชุด คือ ชุดเรียนรู้ (Calibration set) และชุดทดสอบ (Test set) ในอัตราส่วน 80:20 ชุดเรียนรู้ถูกนำมาสร้างแบบจำลองโดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (Partial least square regression: PLSR) แบบเชิงเส้น (Linear-PLSR) และไม่เป็นเชิงเส้น (Polynomial-PLSR) โปรแกรม Python (version Python 3.9.13) และทดสอบด้วยชุดทดสอบ

ในการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธี PLSR เป็นเทคนิคทางสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้น (Independent variables) และตัวแปรตาม (Dependent variables) เพื่อสร้างความสัมพันธ์แล้วสร้างตัวแปรใหม่เรียกว่า ตัวแปรแฝง (Latent variable or PLS factor) จากนั้นนำตัวแปรแฝงที่ได้มาสร้างสมการการถดถอย ซึ่งจำนวนตัวแปรแฝงที่สร้างใหม่มีจำนวนน้อยกว่าหรือเท่ากับตัวแปรต้นเสมอ และตัวแปรแฝงลำดับแรกๆก็มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามมากที่สุดเสมอ ซึ่งความแตกต่างระหว่างแบบเชิงเส้น (Linear-PLSR) และไม่เป็นเชิงเส้น (Polynomial-PLSR) คือ แบบจำลองแบบเชิงเส้นจะใช้สมการการประมาณค่าของสมการเชิงเส้นและหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้น (ตัวแปรแฝง) และตัวแปรตามถูกตั้งขึ้นในรูปสมการเชิงเส้น แต่แบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นจะใช้รูปสมการเชิงพหุนามเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้น (ตัวแปรแฝง) กับตัวแปรตามและประมาณค่าในตัวแปรตาม

แบบจำลองที่ถูกสร้างด้วย PLSR ทั้งแบบ Linear-PLSR และ Polynomial-PLSR ถูกวัดสมรรถนะของแบบจำลองด้วยค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error: RMSE) ที่ต่ำที่สุด โดย RMSE เป็นการหาค่าความคลาดเคลื่อนของค่าที่ทำนายจากแบบจำลองเมื่อเทียบกับค่าจริงที่วัดได้จากวิธีมาตรฐานในแต่ละชุดข้อมูล สำหรับชุดเรียนรู้ใช้ร่วมกับการสอบเทียบแบบไขว้ (Full cross-validation) คือ RMSECV (Root mean square error of cross-validation) และสำหรับชุดทดสอบคือ RMSEP (Root mean square error of prediction)

การสอบเทียบแบบไขว้ (Full cross-validation) คือ การนำชุดข้อมูล 1 ชุดในชุดเรียนรู้ออก แล้วนำชุดข้อมูลที่เหลือมาสร้างแบบจำลอง จากนั้นทดสอบด้วยชุดข้อมูลที่แยกไว้แล้วหาค่า RMSECV จากนั้นเปลี่ยนสลับในการแยกชุดข้อมูลไว้ทดสอบจนครบทั้งชุดข้อมูลของชุดเรียนรู้ เทคนิคนี้ช่วยหลีกเลี่ยงการเกิด Overfitting ของแบบจำลองในชุดเรียนรู้ คือ แบบจำลองมีสมรรถนะในการทำนายในชุดเรียนรู้ที่สูง แต่มีสมรรถนะในการทำนายในชุดข้อมูลทดสอบหรือชุดข้อมูลที่ไม่จัก (Unknown data) ที่ต่ำ

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination: R^2) คือค่าแสดงสัดส่วนของความแปรปรวนในข้อมูลตัวแปรต้น ที่สามารถอธิบายความแปรปรวนในข้อมูลตัวแปรตาม ซึ่งมีค่า 0 ถึง 1 สำหรับงานวิจัยนี้ ค่า R^2 ถูกใช้ในชุดเรียนรู้ และ r^2 ถูกใช้ในชุดทดสอบ โดยการเปรียบเทียบสมรรถนะของแบบจำลองของงานวิจัยเลือกโดยการที่ค่า r^2 ในชุดทดสอบสูงที่สุด ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของชุดทดสอบหรือชุดทำนาย (RMSEP) ที่ต่ำที่สุด รวมไปถึงจำนวนตัวแปรแฝงของการวิเคราะห์การถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดบางส่วน (PLS factor) ที่จำนวนน้อยน้อยที่สุด

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 สถิติของพารามิเตอร์ความเสถียรเชิงกล (MST)

จากการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงเนียร์อินฟราเรดและทดสอบค่า MST ในน้ำยางชันด้วยวิธีมาตรฐาน ISO 35:2004 (E) ทั้งหมด 90 ชุดข้อมูล (15 ตัวอย่าง $\times$ 6 ช่วงอายุการเก็บรักษา) ข้อมูลถูกแบ่งเป็น 2 กลุ่ม ด้วยอัตราส่วนร้อยละ 80:20 จากชุดข้อมูลทั้งหมด โดยกลุ่มที่ 1 ชุดสอบเทียบจำนวน 72 ชุดข้อมูล มีค่าสูงสุด ต่ำสุด ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 635.00 80.00 376.04 และ 167.72 วินาที ตามลำดับ กลุ่มที่ 2 ชุดทดสอบจำนวน 18 ชุดข้อมูล มีค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน คือ 565.00 80.00 385.00 และ 169.21 วินาที ตามลำดับ พบว่าข้อมูลสถิติค่า MST ทั้งชุดเรียนรู้และชุดทดสอบไม่ได้มีความแตกต่างกัน และค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดของค่า MST ของชุดข้อมูลทดสอบอยู่ในช่วงของค่าต่ำสุดและสูงสุดของชุดเรียนรู้ ดังแสดงใน Table 1

Table 1 Statistics of MST from reference measurement

Data types	N	Max (s)	Min (s)	Mean (s)	SD (s)
Calibration set	72	635.00	80.00	376.04	167.72
Test set	18	565.00	80.00	385.00	169.21

Note: N is number of observations; Max is maximum; Min is minimum; Mean is average; and SD is standard deviation; s is second (MST unit of measurement).

3.2 สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงเนียร์อินฟราเรด

สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในน้ำยางชั้นที่ได้จากการใช้เทคนิคเนียร์อินฟราเรด (NIR) สเปกโทรสโกปีที่มีความยาวคลื่น 900 ถึง 1700 นาโนเมตรด้วยรูปแบบการวัดแบบสะท้อนกลับ (Reflection) (Figure 1) และสเปกตรัมที่ใช้รูปแบบการวัดส่องผ่านแบบสะท้อนกลับ (Transflection) (Figure 2) พบว่า ใน Figure 1 มีการดูดกลืนคลื่นแสงที่เกี่ยวข้องกับโมเลกุลน้ำอย่างชัดเจนที่มีความยาวคลื่น 970 และ 1450 นาโนเมตร เนื่องจากในน้ำยางมีน้ำเป็นองค์ประกอบหลัก [17] อีกทั้งที่มีความยาวคลื่น 1150 ถึง 1210 มีความเกี่ยวข้องโมเลกุลยาง [10] และ Figure 2 มีการดูดกลืนคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่น 970 1150 และ 1400 ถึง 1500 นาโนเมตร ซึ่งเหมือนกันกับรูปแบบการวัดแบบสะท้อนกลับ และจากการเปรียบเทียบลักษณะเส้นสเปกตรัมที่ได้จากรูปแบบการวัดที่แตกต่างกันมีลักษณะเส้นสเปกตรัมที่เกิดจากอิทธิพลการยกตัว (Base line shift) ที่เหมือนกันแต่เส้นสเปกตรัมที่ได้จากรูปแบบการวัดส่องผ่านแบบสะท้อนกลับเกิดการกระเจิงแสง (Scattering light) ที่มากกว่า

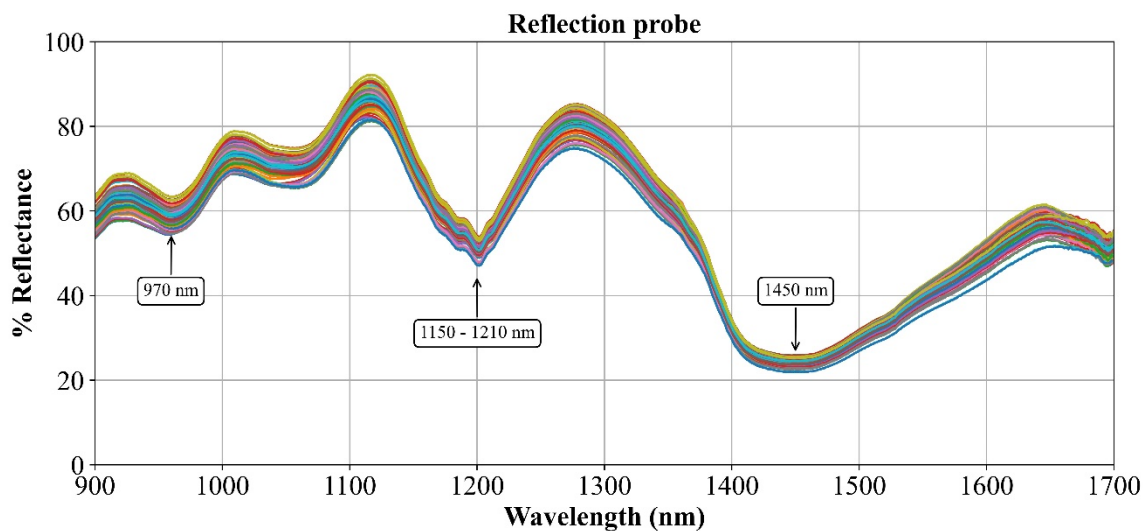


Figure 1. Raw spectra of reflection mode by near-infrared spectroscopy.

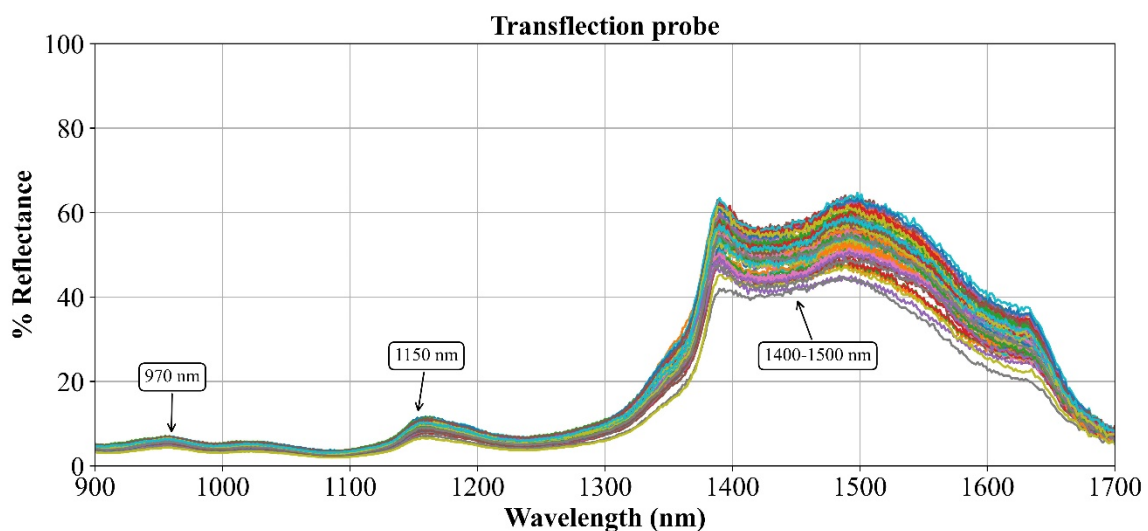


Figure 2. Raw spectra of transflection mode by near-infrared spectroscopy.

3.3 ผลการสร้างแบบจำลองและเปรียบเทียบสมรรถนะของแบบจำลอง

สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในน้ำยางชั้นที่ได้จากรูปแบบการวัดทั้งสองรูป ถูกจัดการข้อมูลสเปกตรัมเบื้องต้นด้วย 5 วิธี และจับคู่กับค่า MST ที่ได้จากการวัดด้วยวิธีมาตรฐานแล้วแบ่งออกเป็น 2 ชุดข้อมูล คือชุดเรียนรู้เพื่อสร้างแบบจำลองและชุดทดสอบสำหรับทดสอบแบบจำลองในแต่ละเงื่อนไข (Linear-PLSR และ Polynomial-PLSR) เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของแบบจำลองที่มีสมรรถนะที่ดีที่สุดด้วยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสำหรับการสร้างแบบจำลอง (R^2) ค่ารากที่สองของความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยสำหรับการสร้างแบบจำลอง (RMSECV) ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสำหรับการทำนาย (r^2) และค่ารากที่สองของความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยสำหรับการทำนาย (RMSEP) ผลลัพธ์การสร้างแบบจำลองในแต่ละเงื่อนไขถูกแสดงใน Table 2 ซึ่งแสดงสมรรถนะของแบบจำลองที่ดีที่สุดของแต่ละเงื่อนไข พบว่ารูปแบบการวัดที่ให้ประสิทธิภาพในการทำนายที่ดีที่สุดคือ รูปแบบการวัดส่องผ่านแบบสะท้อนกลับ เมื่อใช้การจัดการสเปกตรัมเบื้องต้นแบบ SGD1 และใช้อัลกอริทึมในการวิเคราะห์แบบ Linear-PLSR โดยใช้จำนวนตัวแปรแฝง (LVs) ที่ 3 ตัวแปร พบว่าค่า R^2 , RMSECV, r^2 , RMSEP, เท่ากับ 0.76, 81.04 วินาที, 0.79, และ 76.22 วินาที, ตามลำดับ ในส่วนของสมรรถนะของแบบจำลองของรูปแบบการวัดแบบสะท้อนกลับที่ดีที่สุดให้สมรรถนะในการทำนายที่น้อยกว่าแบบจำลองของรูปแบบการวัดส่องผ่านแบบสะท้อนกลับ ผ่านการจัดการข้อมูลสเปกตรัมเบื้องต้น SNV+SGD1 ใช้อัลกอริทึมในการวิเคราะห์ผลอย่าง Linear-PLSR โดยใช้ตัวแปรแฝงที่มากกว่ารูปแบบการวัดส่องผ่านแบบสะท้อนกลับที่ 4 ตัวแปร พบว่าค่า R^2 , RMSECV, r^2 , RMSEP, เท่ากับ 0.77, 80.43 วินาที, 0.76, และ 80.51 วินาที, ตามลำดับ

Table 2 Performance comparison between the best results for each condition

Measurement mode	Algorithm	Pretreatment	LVs	Calibration dataset		Validation dataset	
				R^2	RMSECV	r^2	RMSEP
Reflection	Linear-PLSR	SNV+SGD2	4	0.77	80.43	0.76	80.51
	Polynomial-PLSR	SNV+SGD2	4	0.74	85.42	0.75	82.43
Transflection	Linear-PLSR	SGD1	3	0.76	81.04	0.79	76.22
	Polynomial-PLSR	SGD1	3	0.76	81.01	0.78	77.40

Note: LVs is latent variables

จากการเปรียบเทียบสมรรถนะของแบบจำลองใน Table 2 พบว่าเงื่อนไขที่ดีที่สุดของแต่ละรูปแบบการวัดมีความใกล้เคียงกัน งานวิจัยนี้จึงได้มีการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยแบบ Paired Samples T-Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยมีสมมติฐานคือ H_0 : $MST_{จริง} = MST_{ทำนาย}$ และ H_1 : $MST_{จริง} \neq MST_{ทำนาย}$ ซึ่งแบ่งกลุ่มสำหรับการทดสอบออกเป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 ทดสอบระหว่าง $MST_{จริง}$ กับ $MST_{ทำนาย}$ ของรูปแบบการวัดส่องผ่านแบบสะท้อนกลับ (Transflection) กลุ่มที่ 2 ทดสอบระหว่าง $MST_{จริง}$ กับ $MST_{ทำนาย}$ ของรูปแบบการวัดแบบสะท้อนกลับ (Reflection) และกลุ่มที่ 3 ทดสอบระหว่าง $MST_{ทำนาย}$ ของรูปแบบการวัดส่องผ่านแบบสะท้อนกลับ กับ $MST_{ทำนาย}$ ของรูปแบบการวัดแบบสะท้อนกลับ พบว่าค่า p-value มากกว่า 0.05 ทุกกลุ่ม ดังนั้นจึงยอมรับสมมติฐานหลักทั้ง 3 กลุ่ม นั้นแสดงให้เห็นว่า เทคนิคเนียร์อินฟราเรด (NIR) สเปกโทรสโกปีที่วัดด้วยรูปแบบการวัดทั้ง 2 รูปแบบเมื่อนำมาสร้างแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องเพื่อทำนายค่าความเสถียรเชิงกล (MST) ในน้ำยางชั้นมีค่า MST ที่ได้จากการทำนายไม่แตกต่างจากค่าจริงที่วัดได้ด้วยวิธีมาตรฐาน อีกทั้งรูปแบบการวัดทั้ง 2 มีสมรรถนะของแบบจำลองในการทำนายค่า MST ในน้ำยางชั้นไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่นทางสถิติ 95%

จากการเปรียบเทียบสมรรถนะของแบบจำลองทั้งสองรูปแบบการวัดใน Table 2 โดยเปรียบเทียบระหว่างเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นของแต่ละรูปแบบการวัด พบว่าพฤติกรรมความสัมพันธ์ของข้อมูลสเปกตรัมที่ได้จาก NIRS ที่ใช้รูปแบบการวัดที่แตกต่างกันกับค่า MST ที่ได้จากการวัดด้วยวิธีมาตรฐานมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น เนื่องจากแบบจำลองส่วนใหญ่ที่ใช้ Linear-PLSR มีประสิทธิภาพในการทำนายที่มากกว่า และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของการทำนายที่น้อยกว่าแบบจำลองที่ใช้ Polynomial-PLSR อีกด้วย

เงื่อนไขที่ดีที่สุดของรูปแบบการวัดแบบสะท้อนกลับ ซึ่งเกิดจากการจัดการข้อมูลเบื้องต้นโดย SNV+SGD2 ของรูปแบบการวัดแบบสะท้อนกลับ ดังแสดงใน Figure 3 พบว่า เกิดพิคเด่นที่ความยาวคลื่น 970, 1150 ถึง 1210, 1360 nm บ่งชี้เป็นนัยได้ว่าโมเลกุลโปรตีนที่ความยาวคลื่น 970 nm (C-H stretching 3rd overtone, protein) [17] ที่ความยาวคลื่น 1150 ถึง 1210 เกิดพิคเด่นที่เกี่ยวกับโมเลกุลในน้ำยางชั้น ที่มีโครงสร้าง CH₂ และ CH₃ ซึ่งมีการสั่นสะเทือนของพันธะเคมีแบบ C-H 2nd overtone [17,10] และที่ความยาวคลื่น 1360 nm เกิดการเปลี่ยนโมเลกุลในน้ำยางชั้นที่เกี่ยวข้องกับ CH₃ ซึ่งมีการสั่นสะเทือนของพันธะเคมี

C-H combination [18] และพบว่าพิกัดที่ความยาวคลื่น 1150 ถึง 1210 nm สอดคล้องกับ Figure 4 แสดง Regression coefficient ของ Linear-PLSR ในขณะเดียวกันที่ความยาวคลื่น 1450 nm อีกทั้งมีอิทธิพลของโมเลกุลน้ำในน้ำยางชั้นซึ่งมีการสั่นสะเทือนของพันธะเคมี O-H stretch 1st overtone [18]

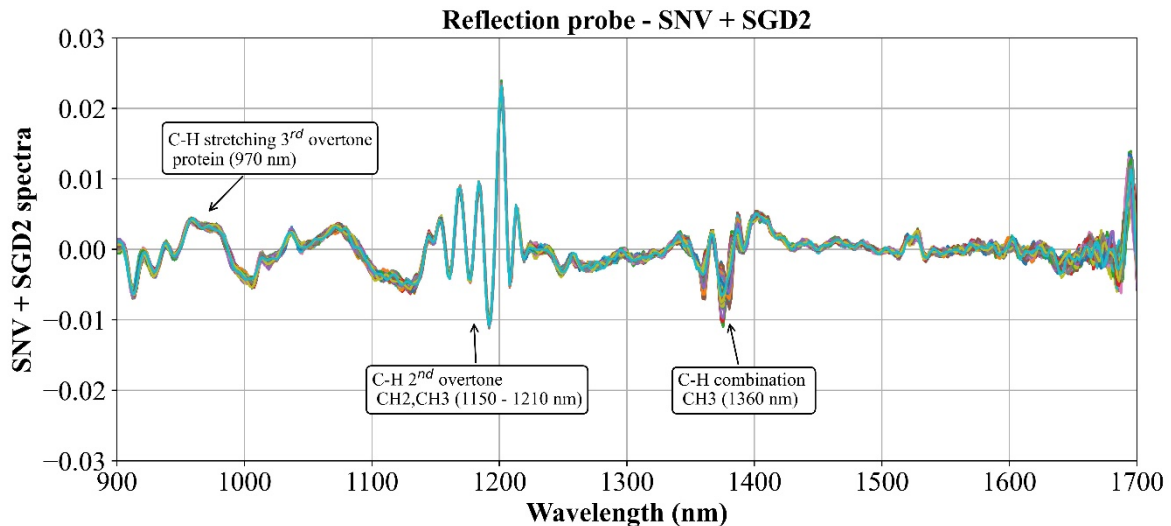


Figure 3. SNV+SGD2 spectra preprocessing from Reflection mode.

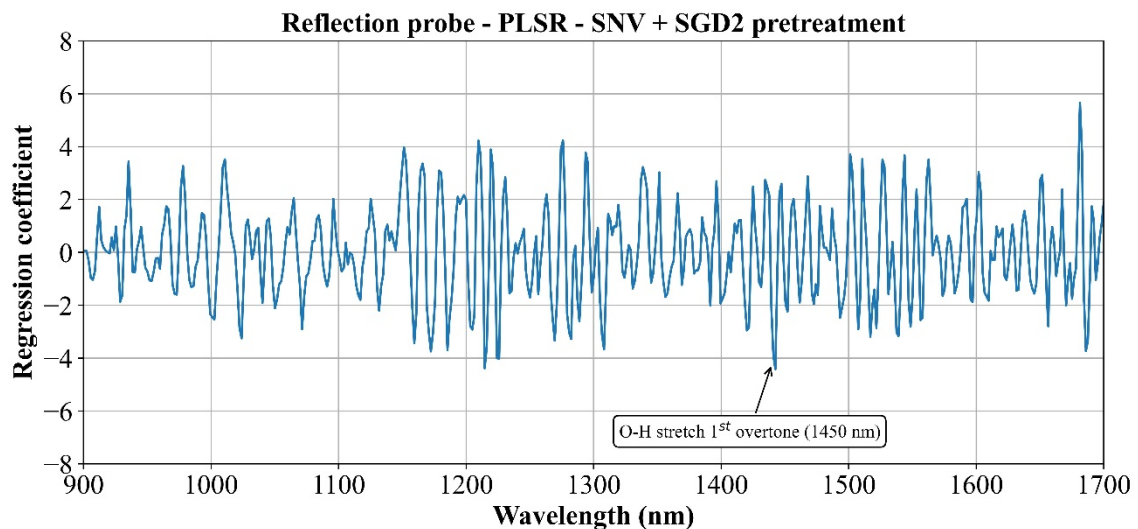


Figure 4. Regression coefficient of Reflection mode.

เงื่อนไขที่ดีที่สุดของรูปแบบการวัดส่องผ่านแบบสะท้อนกลับเกิดจากการจัดการข้อมูลสเปกตรัมเบื้องต้นด้วยเทคนิค SGD1 ดังแสดงใน Figure 5 พบว่าเกิดพิกัดที่ความยาวคลื่น 1360 ถึง 1400 nm เกี่ยวข้องกับโมเลกุลที่มีโครงสร้าง CH3 ที่ความยาวคลื่น 1360 nm และ CH2 ที่ความยาวคลื่น 1390 nm เกิดการสั่นสะเทือนของพันธะเคมีแบบ C-H combination และความยาวคลื่น 1150 nm และ 1650 nm สอดคล้องกับ Figure 6 แสดง Regression coefficient ของ Linear-PLSR ที่ความยาวคลื่น 1150 ถึง 1200, 1510 และ 1650 nm มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงความเสถียรเชิงกลในน้ำยางชั้นดังนี้ ที่ความยาวคลื่น 1150 ถึง 1200 nm เกี่ยวข้องกับโมเลกุลในน้ำยางชั้น ที่มีโครงสร้าง CH2 และ CH3 ซึ่งมีการสั่นสะเทือนของพันธะเคมีแบบ C-H 2nd overtone [17,10] ที่ความยาวคลื่น 1510 nm เกี่ยวข้องกับโมเลกุลโปรตีนที่มีโครงสร้าง N-H เกิดการสั่นสะเทือนของพันธะเคมีแบบ N-H stretch 1st overtone และที่ความยาวคลื่น 1650 nm เกี่ยวข้องกับโมเลกุลในน้ำยางชั้น C-H เกิดการสั่นสะเทือนของพันธะเคมีแบบ C-H stretch 1st overtone [18]

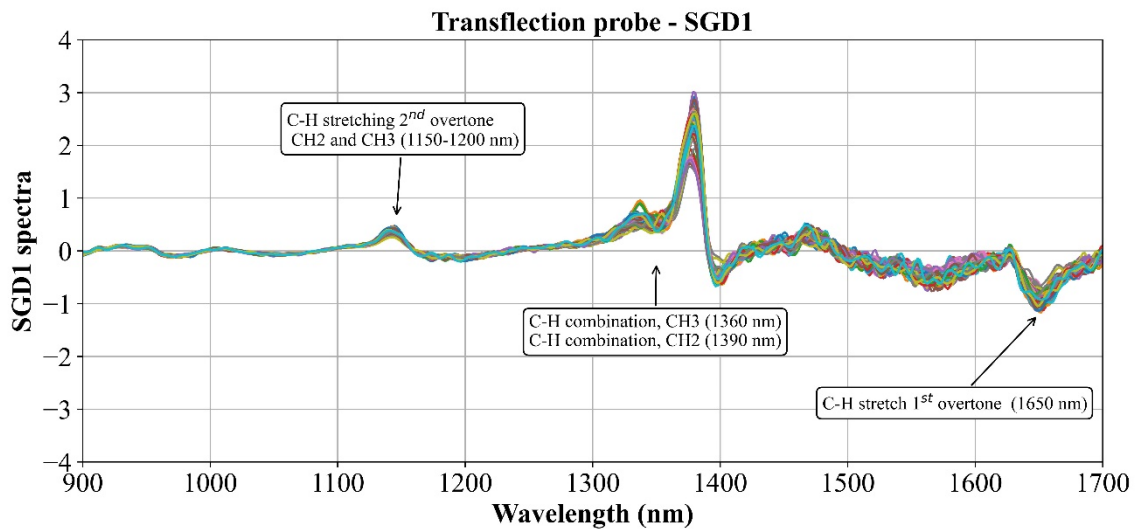


Figure 5. SGD1 spectra from Transfection.

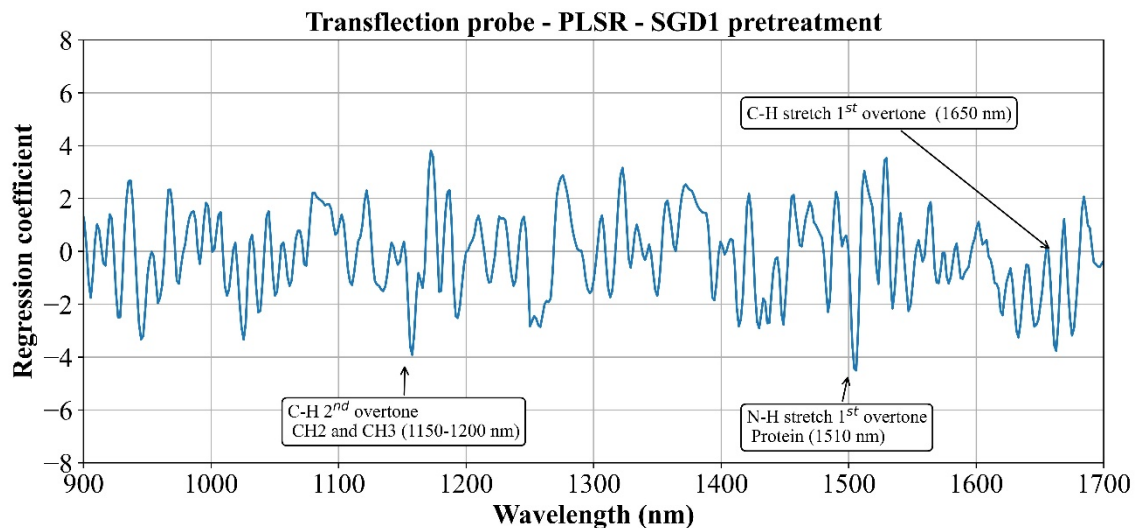


Figure 6. Regression coefficient of Reflection mode.

แผนภูมิจุดแบบกระจายระหว่างค่าจริงและค่าทำนายของแบบจำลอง Linear-PLSR โดยการจัดการข้อมูลสเปกตรัมเบื้องต้นด้วยเทคนิค SGD1 ของรูปแบบการวัดส่องผ่านแบบสะท้อนกลับ ดังแสดงใน Figure 7 ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสำหรับการทำนาย (R^2) เท่ากับ 0.76 มีค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของการสร้างแบบจำลองแบบ Full-cross validation (RMSECV) ที่ 81.04 วินาที ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสำหรับการทำนาย (r^2) เท่ากับ 0.79 และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของการทำนาย (RMSEP) เท่ากับ 76.22 วินาที ซึ่งพบว่าเป็นแบบจำลองที่ให้ประสิทธิภาพในการทำนายสูงที่สุด และจากการเปรียบเทียบค่า r^2 เท่ากับ 0.79 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองอยู่ในระดับ 0.66-0.81 ในระดับยอมรับได้สำหรับกระบวนการประยุกต์ในการการคัดเลือก (แบ่งกลุ่ม) และประมาณค่าอย่างหยาบๆ [19] แต่อย่างไรก็ตาม พฤติกรรมของของแผนภูมิจุดแบบกระจายมีความหนาแน่นที่สูงของช่วงค่า MST ของค่าจริงอยู่ในช่วงระหว่าง 350 ถึง 580 วินาที ดังนั้นหากต้องทดลองในอนาคตเกี่ยวกับการวัดค่า MST ในน้ำยางข้น จึงจำเป็นต้องคำนึงถึงความสม่ำเสมอของค่า MST อีกด้วย

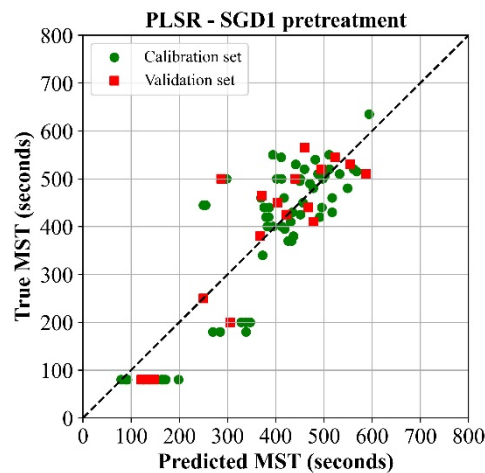


Figure 7. Scatter plot of best performance model between MST ture value and MST predicted value.

4. สรุป

จากการศึกษางานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า เทคนิคเนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเป็นเทคนิคที่มีศักยภาพเพียงพอในการทำงานร่วมกับการเรียนรู้ของเครื่องในการวัดค่าความเสถียรเชิงกลในน้ำยางชั้นซึ่งอยู่ในระดับการคัดเลือก (แบ่งกลุ่ม) และประมาณค่าอย่างหยาบๆ โดยมีสมรรถนะในการทำนายค่า MST สูงถึง 79% และจากการศึกษาเชิงเปรียบเทียบรูปแบบการวัดสเปกตรัมเนียร์อินฟราเรดในโหมดสะท้อนกลับและส่องผ่านแบบสะท้อนกลับ พบว่ารูปแบบการวัดส่องผ่านแบบสะท้อนกลับมีสมรรถนะในการทำนายของแบบจำลองสูงกว่ารูปแบบการวัดแบบสะท้อนกลับ แต่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แต่อย่างไรก็ตามการพัฒนาแบบจำลองในอนาคตต้องคำนึงถึงความถี่ของค่า MST ในแต่ละช่วง น้ำยางชั้นชนิดอื่น หรือน้ำยางประเภทอื่น เพื่อให้แบบจำลองมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น อีกทั้งการใช้เทคนิคการเลือกช่วงคลื่นที่จำเป็น (Wavelength selection) ในการวัดค่า MST ในน้ำยางชั้นเพื่อลดต้นทุนของเครื่องมือให้มีต้นทุนที่ต่ำลง

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณฝ่ายวิจัยและพัฒนา บริษัท ไทยรับเบอร์ลาเท็กซ์กรุ๊ป จำกัด (มหาชน) อำเภอนองใหญ่ จังหวัดชลบุรีเป็นอย่างยิ่ง สำหรับการสนับสนุนตัวอย่างน้ำยางชั้น ครุภัณฑ์ สารเคมี รวมไปถึงสถานที่ในการทำวิจัยตลอดจนความช่วยเหลือในการทำวิจัย และขอบคุณห้องปฏิบัติการ Bio-sensing and Control Engineering Laboratory สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ที่สนับสนุนเครื่องมือเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์และอุปกรณ์อื่นๆ รวมไปถึงสถานที่สำหรับการทำวิจัยและวิเคราะห์ผล

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] การยางแห่งประเทศไทย. 2567. อุตาสาหกรรมยางและผลิตภัณฑ์ยาง. เข้าถึงได้จากเว็บไซต์: <https://www.raot.co.th/main.php?filename=index> (เข้าถึงเมื่อ 1 เมษายน 2567).
- [2] สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. รายงานสถิติอุตสาหกรรม-น้ำยางชั้น. 2566. เข้าถึงได้จากเว็บไซต์: <https://i.index.oie.go.th/industrialStatisticsReport.aspx#> (เข้าถึงเมื่อวันที่ 1 เมษายน 2567).
- [3] Claramma, N. and N. Mathew, 1997. Studies on prevulcanization of rubber latex with special reference to influence of storage and after treatments on properties of films. Ph.D. Thesis, Cochin University of Science and Technology.

-
- [4] The International Organization for Standardization. 2017. Natural rubber latex concentrate—Centrifuged or creamed, ammonia preserved types — Specifications(ISO 2004). 6th edn. Geneva, Switzerland.
- [5] Lai, W. K., Phoon, Z. H., Chew, K. H., Kam, M. G., and Ping, Y. C. 2016. Image multi-thresholding to characterise the mechanical stability of rubber latex concentrate. In proceeding of the 2016 International Conference on Digital Image Computing: Techniques and Applications (DICTA). IEEE. pp. 1-8.
- [6] The International Organization for Standardization. 2004. Natural rubber latex concentrate — Determination of mechanical stability (ISO 35:2004 (E)). 5th edn. Geneva, Switzerland.
- [7] Manley, M. and Baeten, V. 2018. Spectroscopic technique: Near infrared (NIR) spectroscopy. in Modern techniques for food authentication. Elsevier.
- [8] Kumarn, S., Churinthorn, N., Nimpai boon, A., Sriring, M., Ho, C. C., Takahara, A., and Sakdapipanich, J. 2018. Investigating the mechanistic and structural role of lipid hydrolysis in the stabilization of ammonia-preserved Hevea rubber latex. *Langmuir*. 34(43). 12730-12738.
- [9] Payungwong, N., Sakdapipanich, J., Wu, J., and Ho, C. C. 2023. The Interplay of Protein Hydrolysis and Ammonia in the Stability of Hevea Rubber Latex during Storage. *Polymers*. 15(24). 4636.
- [10] Sirisomboon, P., Deeprommit, M., Suchaiboonsiri, W., and Lertsri, W. 2013. Shortwave near infrared spectroscopy for determination of dry rubber content and total solids content of Para rubber (*Hevea brasiliensis*) latex. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*. 21(4). 269-279.
- [11] Maraphum, K., Wanjantuk, P., Hanpinitsak, P., Paisarnsrisomsuk, S., Lim, C. H., and Posom, J. 2022. Fast determination of total solids content (TSC) and dry rubber content (DRC) of para rubber latex using near-infrared spectroscopy. *Industrial Crops and Product*. 187. 115507.
- [12] Narongwongwattana, S., Rittiron, R., and Hock, L. C. 2015. Rapid determination of alkalinity (ammonia content) in Para rubber latex using portable and Fourier transform-near infrared spectrometers. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*. 23(3). 181-188.
- [13] Sirisomboon, P., Chowbankrang, R., and Williams, P. 2012. Evaluation of apparent viscosity of Para rubber latex by diffuse reflection near-infrared spectroscopy. *Applied Spectroscopy*. 66(5). 595-599.
- [14] Narongwongwattana, S., Rittiron, R., and Lim, C. H. 2015. The rapid determination of volatile fatty acid number in para rubber latex using fourier transform-near infrared spectroscopy based on quantification and discrimination model. *Journal of Innovative Optical Health Sciences*. 8(05). 1550042.
- [15] The International Organization for Standardization. 1997. Latex, rubber - Determination of total solids content (ISO 124:1997 (E)). 4th edn. Geneva, Switzerland.
- [16] The International Organization for Standardization. 1997. Natural rubber latex concentrate —Determination of alkalinity (ISO 125:2020 (E)). 7th edn. Geneva, Switzerland.
- [17] Osborne, B.G., T. Fearn, and P.H. Hindle, 1993. Practical NIR spectroscopy with applications in food and beverage analysis. Longman scientific and technical.
- [18] Burns, D.A. and E.W. Ciurczak, 2007. Handbook of near-infrared analysis. CRC press.
- [19] Williams, P., M. Manley, and J. Antoniszyn, 2019. Near infrared technology: getting the best out of light. African Sun Media.
-

การคัดแยกราเอนโดไฟท์จากพืชกระท่อม (*Mitragyna speciosa*) ในเขตจังหวัดฉะเชิงเทรา Isolation of endophytic fungi from *Mitragyna speciosa* in Chachoengsao province

กฤษณะ บุญมี¹ เกวลิน ปูเงิน¹ และ ณัฐวุฒิ รุ่งจินดามัย^{1,*}
Kritsana Boonme¹, Kelvalin Poongern¹, and Nattawut Rungjindamai^{1,*}

¹ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร

¹Department of Biology, School of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok

*Corresponding author: Nattawut Rungjindamai, e-mail address: nattawut.ru@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

ในการวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อแยกเชื้อราเอนโดไฟท์จากพืชกระท่อม (*Mitragyna speciosa*) โดยเก็บตัวอย่าง 3 ประเภทได้แก่ ราก ใบ และก้าน ของพืชกระท่อม จากพื้นที่ปลูกทั้งสิ้น 7 แหล่ง ซึ่งตั้งอยู่ในตำบลบางโรง อำเภอคลองเขื่อน จังหวัดฉะเชิงเทรา เมื่อนำมาแยกเชื้อราเอนโดไฟท์ด้วยวิธีการฆ่าเชื้อผิวภายนอกด้วยเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 95 และโซเดียมไฮโปคลอไรท์ความเข้มข้นร้อยละ 5 และเพาะเลี้ยงบนอาหาร Potato Dextrose Agar (PDA) ที่ผสมยาปฏิชีวนะ Kanamycin ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการศึกษาพบว่าสามารถแยกราเอนโดไฟท์ได้จำนวนทั้งหมด 347 ไอโซเลท เมื่อพิจารณาถึงชิ้นส่วนของพืชที่นำมาแยก พบว่าสามารถแยกเชื้อจากใบได้จำนวนสูงที่สุด 170 ไอโซเลท และได้จากกิ่งและราก จำนวน 95 และ 82 ไอโซเลท ตามลำดับ การศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าพืชกระท่อมเป็นแหล่งที่มีความหลากหลายของราเอนโดไฟท์เป็นจำนวนมาก

คำสำคัญ: กระท่อม, ความหลากหลายทางชีวภาพ, สมุนไพร, ราเอนโดไฟท์

Abstract

The objective of this study was to isolate endophytic fungi from *Mitragyna speciosa*. Three plant parts including roots, leaves and stems of *M. speciosa* were collected from 7 locations in Chachoengsao province. Endophytic fungi were isolated using a surface sterilization method using 95% ethanol and 5% sodium hypochlorite on potato dextrose agar (PDA) amended with antibiotics. The results showed that a total of 347 isolates of endophytes were recovered from the samples. Considering different plant parts, the highest number of endophytes (170 isolates) were isolated from leaves while 95 and 82 isolates were recorded from stems and roots. This indicates that *M. speciosa* harbors a huge diversity of endophytes. Therefore, these endophytes were randomly selected based on their different morphotypes. A total of 92 isolates were chosen for further studies on their bioactivity.

Keywords: *Mitragyna speciosa*, Biodiversity, Herbal plants, Endophytic fungi

1. บทนำ

ราเอนโดไฟท์ เป็นเชื้อราที่อาศัยอยู่ภายในต้นพืช โดยราเอนโดไฟท์แทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างเนื้อเยื่อต่าง ๆ ของพืช โดยพบได้ทุกส่วนของพืช เช่น ใบ ลำต้น ราก ดอก และผล โดยมีความสัมพันธ์กับพืชแบบพึ่งพาอาศัยซึ่งกันและกัน (Symbiotic relationship) [1] ซึ่งราเอนโดไฟท์จะไม่ก่อให้เกิดความเสียหายหรืออาการของโรคใด ๆ ให้กับพืช อีกทั้งช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตโดยการช่วยดูดซึมแร่ธาตุ ซึ่งราเอนโดไฟท์หลายชนิดอาจสร้างสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (Bioactive compound) โดยในปัจจุบันมีรายงานการวิจัยจำนวนมากในการศึกษาสารดังกล่าวว่าเป็นสารที่มีคุณสมบัติด้านต่าง ๆ เช่น การต้านเชื้อแบคทีเรีย (Antibacterial) การฆ่าแมลง (Insecticidal) และการต้านเชื้อรา (Antifungal) และการต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) [2]

พืชกระท่อม (ชื่อวิทยาศาสตร์ *Mitragyna speciosa* (Korth.) Havil. เป็นพืชสมุนไพรในวงศ์ Rubiaceae มีถิ่นกำเนิด และสามารถพบได้ทั่วไปในกลุ่มประเทศเขตร้อน เช่น ไทย มาเลเซีย เมียนมา และฟิลิปปินส์ เป็นต้น [3] โดยลักษณะทั่วไปของพืชกระท่อม คือ เป็นไม้ยืนต้น ใบมีลักษณะคล้ายใบกาแฟ มีการเจริญในพื้นที่ชุ่มชื้น เป็นพืชสมุนไพรที่มีคุณสมบัติในการกระตุ้นร่างกายให้รู้สึกกระปรี้กระเปร่า เพิ่มพลังงานทำให้สามารถทำงานได้เป็นระยะเวลานานขึ้น โดยสารที่สำคัญในพืชกระท่อม คือ ไมทรากินิน (Mitraginine) ซึ่งเป็นสารในกลุ่มของแอลคาลอยด์ มีผลออกฤทธิ์โดยจะไปกดในประสาทส่วนกลาง [4]

กระท่อมเคยถูกบรรจุให้อยู่ในกลุ่มของสารเสพติดให้โทษประเภทที่ 5 จึงทำให้มีข้อจำกัดในการนำมาศึกษาวิจัยเพื่อประโยชน์ในด้านการแพทย์ ทำให้มีองค์ความรู้เกี่ยวกับกระท่อมในวงจำกัด จนเมื่อเดือนสิงหาคม 2564 กระท่อมได้รับการปลดออกจากการเป็นสารเสพติดให้โทษจึงทำให้บุคคลทั่วไปสามารถทำการเพาะปลูก บริโภค และทำการจำหน่ายได้ทั่วไป ในการบริโภคกระท่อมสามารถบริโภคได้ในทั้งรูปแบบ ใบสด ผงแห้ง ยางท่อม หรือแม้กระทั่งน้ำต้มใบ ทางคณะผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการศึกษาถึงราเอนโดไฟท์ในพืชกระท่อม ซึ่งมีจุดประสงค์เพื่อคัดแยก และสำรวจความหลากหลายของราเอนโดไฟท์ เพื่อใช้เป็นองค์ความรู้พื้นฐานในการศึกษาต่อยอดด้านอื่น ๆ ต่อไปในอนาคต

2. วิธีการศึกษา

2.1 การเก็บตัวอย่างพืชกระท่อม

เก็บตัวอย่างราก ใบ และก้านที่มีลักษณะสมบูรณ์ไม่เป็นโรคจากต้นพืชกระท่อมจากแหล่งที่มาที่ต่างกัน 7 แหล่ง เลือกพืชกระท่อมที่มีอายุประมาณ 2 ปี ความสูงประมาณ 2–4 เมตร (Figure 1) ตัวอย่างที่ทำการเก็บมาจากตำบลบางโรง อำเภอลำลูกเกด จังหวัดฉะเชิงเทรา เก็บในเดือนตุลาคม–พฤศจิกายน 2565 เก็บตัวอย่างในถุงพลาสติกที่สะอาดมิดชิด ทำการติดฉลากระบุรายละเอียดและทำบรรจุลงในกล่องที่มีอุณหภูมิเย็นก่อนนำมาคัดแยกเชื้อราเอนโดไฟท์ที่ห้องปฏิบัติการภายใน 48 ชั่วโมง [2] พืชกระท่อมที่เก็บต้องมีลักษณะสมบูรณ์ ไม่มีรอยฉีกขาดจากศัตรูพืช ก้านมีลักษณะสมบูรณ์ มีสีเขียวแก่และสีน้ำตาลอ่อน ก้านไม่อ่อนและไม่แก่เกินไป ไม่มีอาการของโรคพืชใด ๆ ปรากฏ และส่วนราก เลือกรากที่มีลักษณะสมบูรณ์ ไม่มีร่องรอยจากการถูกกัดแทะ



Figure 1 A mature tree of *M. speciosa* (left), leaves and stems (top right) and roots (bottom right).

2.2 การแยกราเอนโดไฟท์จากพืชกระท่อม

ล้างพื้นผิวของตัวอย่างพืชกระท่อมด้วยน้ำประปานาน 5 นาที เพื่อกำจัดคราบสกปรกที่อาจติดอยู่บริเวณพื้นผิวของตัวอย่าง ทิ้งเอาไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องนาน 30 นาที หลังจากนั้นตัดตัวอย่างด้วยกรรไกรที่ผ่านการฆ่าเชื้อ โดยให้มีขนาดต่าง ๆ คือ ส่วนใบ 1x1 ตารางเซนติเมตร ส่วนรากและก้านความยาว 1 เซนติเมตร จำนวนอย่างละ 10 ชิ้น แล้วฆ่าเชื้อบนผิวของตัวอย่าง (Surface sterilization) [5] โดยแช่ในสารละลายเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 95 นาน 1 นาที ตามด้วยสารละลายโซเดียมไฮเปอร์คลอไรต์ความเข้มข้นร้อยละ 5 นาน 5 นาที และทำการแช่ด้วยสารละลายเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 95 นาน 30 วินาที และทำการล้างด้วยน้ำกลั่นปลอดเชื้อนาน 1 นาทีอีก 2 ครั้ง ซับของเหลวบนผิวหน้าตัวอย่างให้แห้งหมดด้วยกระดาษทิชชูที่ผ่านการฆ่าเชื้อ

นำตัวอย่างจำนวน 5 ชิ้นวางลงในอาหาร Potato Dextrose Agar (PDA) ที่มีการเติมยา Kanamycin ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร นำจานตัวอย่างไปบ่มที่ 25°C สังเกตการเจริญของราเอนโดไฟท์จากชิ้นตัวอย่างพืช โดยตรวจผลทุกวัน เมื่อพบการเจริญของราเอนโดไฟท์ จึงทำการถ่ายเชื้อด้วยวิธี Hyphal tip method โดยเขี่ยเส้นใยบริเวณขอบโคโลนีแล้วนำไปวางบนอาหาร PDA จานใหม่ที่ไม่มีสารเติมยาปฏิชีวนะ จนได้เชื้อบริสุทธิ์ โดยทำการแยกเชื้อนาน 7 วัน โดยนับตั้งแต่วันแรกที่ราเอนโดไฟท์งอกมาจากตัวอย่างพืช ทำการเก็บรักษาราเอนโดไฟท์ได้บนอาหาร PDA slant แล้วเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4°C เพื่อรอนำไปศึกษาในขั้นตอนต่อไป

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 จำนวนราเอนโดไฟท์จากพืชกระท่อม

จากการเก็บตัวอย่างทั้งสิ้น 7 แหล่ง เมื่อนำมาแยกราเอนโดไฟท์จากพืชกระท่อม พบว่าราเอนโดไฟท์เจริญจากตัวอย่างพืชทั้ง 3 ประเภท ได้แก่ ใบ กิ่งและราก (Figure 2) สามารถพบราเอนโดไฟท์ได้จากทุกแหล่งโดยที่แหล่งที่ 1 ได้จำนวนราเอนโดไฟท์น้อยที่สุดคือ 25 ไอโซเลท ในขณะที่ แหล่งที่ 6 ได้จำนวนราเอนโดไฟท์มากที่สุดคือ 64 ไอโซเลท ในขณะที่แหล่งอื่น ๆ พบราเอนโดไฟท์อยู่ในช่วง ประมาณ 30-50 ไอโซเลทต่อแหล่ง เมื่อพิจารณาถึงแต่ละส่วนของพืชที่นำมาแยกราเอนโดไฟท์ พบว่าราเอนโดไฟท์ที่ออกมาจากส่วนใบมากที่สุดจำนวน 170 ไอโซเลท ในขณะที่ราเอนโดไฟท์จากกิ่งและรากมีจำนวนใกล้เคียงกันคือ 95 และ 82 ไอโซเลท ตามลำดับ (Table 1)

จากงานวิจัยของสินทวี [5] ที่แยกราเอนโดไฟท์จากใบของพืชกระท่อม จากจังหวัดปทุมธานี ออยุธยา และสุราษฎร์ธานี จำนวน 20 ใบต่อจังหวัด พบว่าแยกราเอนโดไฟท์จำนวน 39 ไอโซเลท คิดเป็นค่าเฉลี่ย 13 ไอโซเลทต่อแหล่ง งานวิจัยครั้งนี้แยกเอนโดไฟท์จากใบ ได้ 170 ไอโซเลท จากทั้งสิ้น 7 แหล่ง คิดเป็นค่าเฉลี่ย 24 ไอโซเลทต่อแหล่ง ซึ่งมีจำนวนและความหลากหลายมากกว่า นอกจากนี้ในการศึกษานี้ยังได้เพิ่มองค์ความรู้คือการเก็บตัวอย่างราเอนโดไฟท์จากกิ่งและราก ซึ่งก็พบว่ากิ่งและรากก็มีราเอนโดไฟท์อาศัยอยู่เป็นจำนวนมากเช่นกัน ดังนั้นในการศึกษาและคัดแยกราเอนโดไฟท์ควรแยกจากหลาย ๆ ส่วนของพืช เช่น ใบ กิ่ง ดอก ผล เป็นต้น เนื่องจากจะช่วยส่งเสริมให้ได้ราเอนโดไฟท์ที่มีความหลากหลายมากขึ้นด้วย



Figure 2 Isolation of endophytic fungi leaves (left), stems (middle) and roots (right) from *M. speciosa*.

Table 1 Number of endophytes isolated from *M. speciosa* collected from Chachoengsao province

Site	GPS Location	Date	Total isolates/Selected isolates			Total
			Leaves	Stems	Roots	
Site 1	13°49'55.3"N 101°08'14.1"E	10 Oct 2022	11/4	7/3	7/1	25/8
Site 2	13°49'50.4"N 101°08'18.3"E	10 Oct 2022	18/4	10/5	11/2	39/11
Site 3	13°49'48.5"N 101°07'48.1"E	24 Oct 2022	30/8	14/1	15/1	59/10
Site 4	13°49'08.3"N 101°08'17.4"E	24 Oct 2022	26/10	14/2	10/3	50/15
Site 5	13°49'51.0"N 101°09'31.5"E	24 Oct 2022	32/14	14/2	12/1	58/18
Site 6	13°49'52.6"N 101°08'27.6"E	27 Nov 2022	23/5	22/1	19/7	64/14
Site 7	13°50'52.0"N 101°08'47.6"E	27 Nov 2022	30/6	14/7	8/5	52/18
Net			170/51	95/21	82/20	347/92

3.2 ลักษณะโคโลนีของราเอนโดไฟท์จากพืชกระท่อม

ราเอนโดไฟท์ที่แยกได้จากพืชกระท่อม มีลักษณะของโคโลนีที่แตกต่างเป็นอย่างมาก (Figure 3) ซึ่งราเอนโดไฟท์ที่แยกได้มีทั้งประเภทที่เจริญเติบโตช้า (ระยะเวลา 14-21 วัน เจริญจนเต็มจานเลี้ยงเชื้อ) ไปจนถึงเจริญเติบโตเร็ว (ระยะเวลา 3-7 วัน เจริญจนเต็มจานเลี้ยงเชื้อ) ลักษณะของเส้นใยเชื้อราเอนโดไฟท์มีสี (Pigment) ที่หลากหลาย และมีลักษณะผิวหน้าของโคโลนีตั้งแต่ราบเรียบบนผิวหน้า นุ่มฟูคล้ายกำมะหยี่ ไปจนถึงฟูคล้ายก้อนสำลี ในการศึกษาครั้งนี้ จึงได้ทำการคัดเลือกโคโลนีของราเอนโดไฟท์ที่มีลักษณะโคโลนีแตกต่างกันไป โดยเลือกแบบสุ่ม เพื่อนำไปศึกษาต่อยอดทางฤทธิ์ทางชีวภาพต่อไปในอนาคต

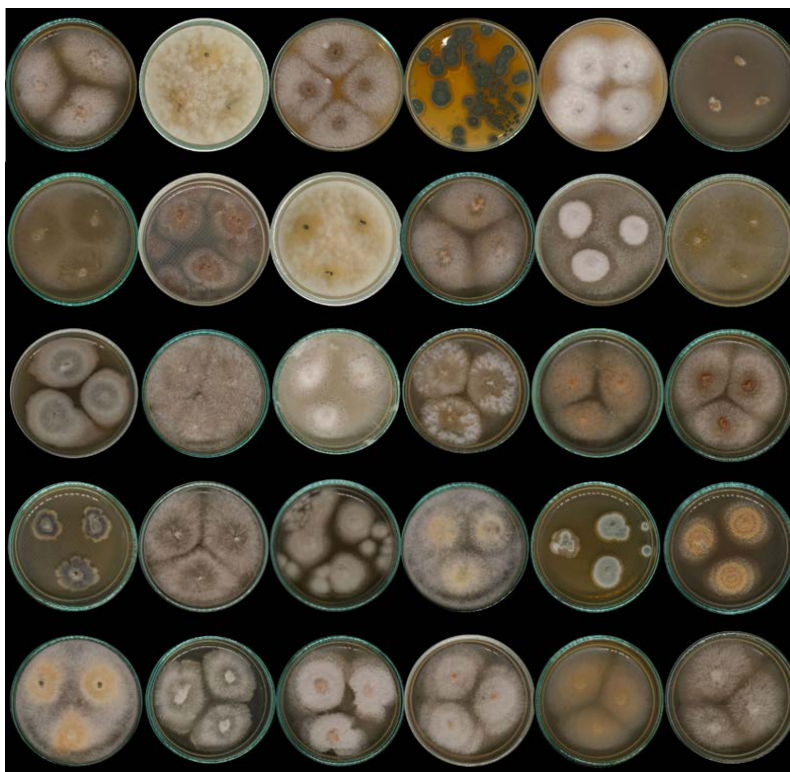


Figure 3 Representative isolates of endophytic fungi isolated in this study.

4. สรุป

พืชกระท่อมถือเป็นพืชสมุนไพรที่เป็นแหล่งที่เหมาะสมต่อการศึกษาราเอนโดไฟท์ เนื่องจากสามารถแยกเชื้อราเอนโดไฟท์ได้จำนวนมาก ถึง 347 ไอโซเลท และนอกจากนี้ยังพบว่าราเอนโดไฟท์ที่แยกได้มีความหลากหลายเป็นอย่างยิ่ง โดยจากตัวอย่างพืช 3 ประเภทได้แก่ ใบ ก้าน และลำต้น พบว่าใบเป็นแหล่งที่พบราเอนโดไฟท์มากที่สุด

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Petrini, O. 1991. Fungal Endophytes of Tree Leaves. Springer, New York, New York.
- [2] Phongpaichit, S., Nikom, J. Rungjindamai, N., Sakayaroj, J. Hutadilok-Towatana, N. Rukachaisiriul, V. and Kirtikara, K. 2007. Biological activities of extracts from endophytic fungi isolated from *Garcinia* plants. FEMS Immunology and Medical Microbiology. 51(3): 517-525.
- [3] Maruyama, T., Kawamura, M., Kikura-Hanajiri, R., Takayama, H. and Goda, Y. 2009. The botanical origin of kratom (*Mitragyna speciosa*; Rubiaceae) available as abused drugs in the Japanese markets. Journal of Natural Medicines. 63(3): 340-344.
- [4] Karunakaran, T. Ngew, K. Z., Zailan, A. A. D., Jong, V. Y. M. and Bakar, M. H. A. 2022. The chemical and pharmacological properties of mitragynine and its diastereomers: An insight review. Frontier in Pharmacology. 13: 805986.
- [5] สีนทวิ สิงห์วงศ์วัฒน์. 2004. สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากราเอนโดไฟท์ที่แยกจากกระท่อม *Mitragyna speciosa* Korth. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร.

การเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟเพื่อใช้ในการดูดซับเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) The preparation of activated carbon from spent coffee grounds for Fe^{2+} adsorption

อรสา ชูละเอียด¹, กัญญ์ชลา กิรติรวี^{2,*} และ พรประพา คงตระกูล³
Orasa Choolaaied¹, Kanchalar Keeratirawee^{2,*}, and Pornprapa Kongtragoul³

¹งานบริการห้องปฏิบัติการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ชุมพร

²ภาควิชาพื้นฐานทั่วไป สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ชุมพร

³ภาควิชาเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร ชุมพร

¹Laboratory Service, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Prince of Chumphon Campus, Chumphon

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

³Department of Agricultural Technology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Prince of Chumphon Campus, Chumphon

*Corresponding author: Kanchalar Keeratirawee, e-mail address: kanchalar.ke@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟเพื่อใช้ในการดูดซับเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) โดยกากกาแฟที่ใช้นำมาจากร้านขายเครื่องดื่มกาแฟในอำเภอปะทิว จังหวัดชุมพร ประเทศไทย กากกาแฟที่ใช้ในการทดลองแบ่งเป็น 3 ชนิด คือ กากกาแฟที่ไม่ผ่านการเผา (C-NC) กากกาแฟที่ผ่านการเผาภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนที่ 300 องศาเซลเซียส (C-C300) และกากกาแฟที่ผ่านการเผาภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนที่ 600 องศาเซลเซียส (C-C600) กากกาแฟทุกชนิดถูกนำมากระตุ้นด้วยกรดไนตริกที่มีความเข้มข้น 5 โมลาร์ ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จะได้เป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการทดลองคือ C-NC-N5 (กากกาแฟที่ไม่ผ่านการเผาและกระตุ้นด้วยกรดไนตริกที่มีความเข้มข้น 5 โมลาร์) C-C300-N5 (กากกาแฟที่ผ่านการเผาที่ 300 องศาเซลเซียสและกระตุ้นด้วยกรดไนตริกที่มีความเข้มข้น 5 โมลาร์) และ C-C600-N5 (กากกาแฟที่ผ่านการเผาที่ 600 องศาเซลเซียสและกระตุ้นด้วยกรดไนตริกที่มีความเข้มข้น 5 โมลาร์) การศึกษาประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ในการดูดซับเฟอร์รัสไอออนด้วยระบบแบตช์ (Batch system) พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์เพื่อใช้ในการดูดซับเฟอร์รัสไอออนคือการเผากากกาแฟที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส และกระตุ้นด้วยกรดไนตริกที่มีความเข้มข้น 5 โมลาร์ ความจุในการดูดซับไอออนของเฟอร์รัสไอออนของถ่านกัมมันต์และประสิทธิภาพของการดูดซับเฟอร์รัสไอออนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้คือ 2.83×10^{-3} มิลลิกรัมต่อกรัม และ 16.22% ตามลำดับ

คำสำคัญ: ถ่านกัมมันต์, กากกาแฟ, Fe^{2+} , กรดไนตริก, การกระตุ้น

Abstract

A spent coffee-based activated carbon for ferrous ion (Fe^{2+}) adsorption was investigated. The spent coffee was derived from a local coffee shop in Pathio, Chumphon, Thailand. Three types of coffee materials were prepared, designated as a non-carbonized (C-NC), carbonized at 300 °C (C-C300) in atmospheric air, and carbonized at 600 °C (C-C600) in atmospheric air. The C-NC, C-C300, and C-C600 materials were chemically activated with 5M HNO_3 at room temperature, resulting in the following designations: C-NC-N5 (non-carbonized spent coffee activated with 5M HNO_3), C-C300-N5 (carbonized spent coffee at 300 °C activated with 5M HNO_3), and C-C600-N5 (carbonized spent coffee at 600 °C activated with 5M HNO_3). The study of the performance of activated carbon prepared for Fe^{2+} adsorption was carried out under batch system, the suitable condition for preparing the activated carbon was the carbonized spent coffee at 600 °C activated with 5M HNO_3 . The adsorption capacity and the adsorption efficiency were found to be 2.83×10^{-3} mg/g of activated carbon and 16.22%, respectively.

Keywords: Activated carbon, Spent coffee ground, Fe^{2+} , Nitric acid, Activation

1. บทนำ

เหล็ก (Fe) เป็นธาตุที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช โดยเหล็กเป็นหนึ่งในธาตุที่เป็นองค์ประกอบของโปรตีนที่มีบทบาทสำคัญในกระบวนการสังเคราะห์แสงและกระบวนการหายใจของพืช ปริมาณของธาตุเหล็กที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชคือ 10^{-9} ถึง 10^{-4} โมลาร์ [1, 2] พืชได้รับธาตุเหล็กโดยการดูดซึมผ่านรากที่อยู่ในดินไปยังลำต้นทั้งในรูปเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) และเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) แต่อย่างไรก็ตามหากพืชได้รับปริมาณธาตุเหล็กในปริมาณมากเกินไปจะทำให้เกิดอาการเป็นพิษของธาตุเหล็ก (Iron toxicity) ซึ่งจะส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืช โดยทำให้พืชเจริญเติบโตช้าลงหรือทำให้เนื้อเยื่อของเซลล์พืชถูกทำลาย ทำให้ใบของพืชเกิดการเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลและทำให้พืชตายได้ในที่สุด [3-6] สาเหตุส่วนใหญ่ของการเกิดอาการเป็นพิษของธาตุเหล็กในพืชคือการที่ดินมีความเป็นด่างมากเกินไป หรือเกิดจากการที่มีปริมาณสารอินทรีย์ในดินปริมาณมากเกินไป นอกจากนี้สาเหตุหลักของการปนเปื้อนของเหล็กในดินยังเกิดจากแหล่งน้ำที่ใช้เพื่อการเกษตรกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งแหล่งน้ำตามธรรมชาติ เช่น น้ำบาดาลหรือน้ำที่มาจากแหล่งน้ำชลประทานก็เป็นสาเหตุของการเพิ่มขึ้นของเหล็กในดินได้เช่นกัน อาการเป็นพิษของธาตุเหล็กนี้เป็นปัญหาที่เกิดขึ้นในภาคเกษตรกรรมทั่วโลก โดยเฉพาะอย่างยิ่งประเทศในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ สหรัฐอเมริกา ออสเตรเลีย บราซิลและแอฟริกา [7-9] ดังนั้นเพื่อลดการสูญเสียทางภาคเกษตรกรรม การควบคุมไม่ให้มีปริมาณเหล็กเพิ่มขึ้นในดินจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก

วิธีการที่ใช้ในการควบคุมไม่ให้มีปริมาณเหล็กในแหล่งน้ำสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การเติมอากาศ (Aeration) การเติมคลอรีน (Chlorination) การเติมโอโซน (Ozonation) ลงไปในแหล่งน้ำ หรือวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่ข้อเสียคือมีกระบวนการที่ยุ่งยากและต้องใช้เงินลงทุนมาก [10] วิธีการดูดซับ (Adsorption method) โดยใช้ตัวดูดซับก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้ในการขจัดไอออนของเหล็กในน้ำที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ตัวดูดซับที่ใช้มีทั้งตัวดูดซับที่จำหน่ายในท้องตลาด เช่น ถ่านกัมมันต์ (Commercial activated carbon) หรือถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากวัสดุเหลือใช้จากธรรมชาติ วิธีการใช้ตัวดูดซับเป็นวิธีการที่ง่ายและมีต้นทุนที่ต่ำเมื่อเทียบกับวิธีการต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้น ตัวอย่างการเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุที่ได้จากธรรมชาติหรือวัสดุอินทรีย์ที่เหลือทิ้งจากธรรมชาติ เช่น Bhanvase และคณะ [11] ได้เตรียมถ่านกัมมันต์จากก้านของต้นผักกระรอง (Lantana Camara) และจากเปลือกถั่วเหลือง (Soya hull) เพื่อใช้ในการดูดซับ Fe^{2+} และ Cu^{2+} ในน้ำโดยใช้กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) เป็นตัวกระตุ้น ในงานวิจัยของ Beenakumari และคณะ [12] ได้ทำการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวเพื่อใช้ในการดูดซับ Fe^{2+} โดยกระบวนการดูดซับจะเกิดผ่านกลไกการเกิดออกซิเดชันบนพื้นผิว ซึ่งผู้วิจัยพบว่าขีดจำกัดของการตรวจวัด (Limit of Detection) มีค่าเท่ากับ 0.3 ppm จากงานวิจัยของ Ramutshatsha-Makhwedzha และคณะ [13] ได้ทำการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเปลือกผลส้มและเปลือกมะนาวโดยใช้กรดฟอสฟอริกเป็นตัวกระตุ้นเพื่อใช้ในการดูดซับ Cd^{2+} Pb^{2+} และ Fe^{2+} จากแหล่งน้ำที่มีสภาพเป็นกรด พบว่าความจุในการดูดซับ (Adsorbent capacity) ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมเพื่อดูดซับ Cd^{2+} Pb^{2+} และ Fe^{2+} ได้มีค่าเท่ากับ 60 50.2 และ 35 mg/g ตามลำดับ จากงานวิจัยที่อ้างอิงข้างต้นพบว่าการเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุจากธรรมชาติสามารถนำมาใช้ในการแก้ไขปัญหาปริมาณเหล็กที่มีปริมาณมากในแหล่งน้ำได้ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟที่เหลือทิ้งในร้านขายเครื่องดื่มกาแฟเพื่อใช้เป็นตัวดูดซับ Fe^{2+} โดยใช้กรดไนตริกเป็นตัวกระตุ้น ซึ่งการเตรียมถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีนี้ยังไม่มีการวิจัยก่อนหน้าได้ศึกษามาก่อน และการใช้กรดไนตริกเป็นสารกระตุ้นในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุธรรมชาติที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบจะทำให้พื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีหมู่คาร์บอกซิล (-COOH) หรือมีหมู่ฟีนอลที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) อยู่ในโครงสร้างมากขึ้น ซึ่งมีส่วนทำให้เกิดการดูดซับสารเฟอร์รัสไอออนได้มากขึ้น ทั้งนี้วิธีการนี้เป็นวิธีการเตรียมถ่านกัมมันต์ที่ง่ายและราคาถูกเนื่องจากใช้วัสดุเหลือทิ้งจากธรรมชาติให้เกิดประโยชน์เพื่อนำมาหมุนเวียนใช้ในการบำบัดธรรมชาติอีกครั้ง

2. สารเคมีและวิธีการศึกษา

2.1 สารเคมี

กรดไนตริกเข้มข้น 5 โมลาร์เตรียมโดยการเจือจางกรดไนตริกเข้มข้น 69% (w/w) ในน้ำปราศจากไอออน โดยการเปิดกรดไนตริกเข้มข้น 69% (w/w) ปริมาตร 224 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตรที่มีน้ำปราศจากไอออนอยู่เล็กน้อย จากนั้นทำการปรับปริมาตรจนถึงขีดบอกปริมาตร โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.01 โมลาร์ เตรียมโดยการชั่งโซเดียม

ไฮดรอกไซด์ 0.4 กรัม ด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ละลายในน้ำปราศจากไอออน เทลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร จากนั้นทำการปรับปริมาตรจนถึงขีดบอกปริมาตร กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.01 โมลาร์ เตรียมโดยเจือจางกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 37% (w/w) ในน้ำปราศจากไอออน โดยการปิเปตกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 37% (w/w) ปริมาตร 0.83 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตรที่มีน้ำปราศจากไอออนอยู่เล็กน้อย จากนั้นทำการปรับปริมาตรจนถึงขีดบอกปริมาตร สารละลายมาตรฐานเหล็กความเข้มข้น 2 4 6 8 10 ppm เตรียมโดยการเจือจางจากสารละลายมาตรฐานเหล็ก 1000 ppm จากบริษัท Merck ประเทศเยอรมนี ฟีนอล์ฟทาลีนอินดิเคเตอร์ 0.1% เตรียมโดยการชั่งฟีนอล์ฟทาลีน 0.1 กรัม ละลายในสารละลายเอทานอล 100 มิลลิลิตร สารเคมีที่ใช้ในการทดลองทั้งหมดเป็นสารเคมีเกรดวิเคราะห์

2.2 การเตรียมถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการทดลองเตรียมได้โดยนำกากกาแฟที่เหลือทิ้งจากการชงกาแฟมาทำการอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อไล่ความชื้นที่อยู่ในกากกาแฟ กากกาแฟหลังจากการอบจะถูกแบ่งเป็นตัวอย่างกากกาแฟที่ไม่ผ่านการเผา และตัวอย่างกากกาแฟที่เผาที่อุณหภูมิ 300 และ 600 องศาเซลเซียส การเผากากกาแฟทำได้โดยการชั่งกากกาแฟที่ผ่านการอบแล้ว 10 กรัม ใส่ลงในถ้วยครุชีเบล ปิดฝาและเผาเป็นเวลา 3 ชั่วโมงภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน กากกาแฟทั้ง 3 ชนิดที่เตรียมได้จะถูกเรียกว่าตัวดูดซับ (Adsorbent) และจะถูกนำมากระตุ้นด้วยกรดไนตริกความเข้มข้น 5 โมลาร์ โดยการแช่ตัวดูดซับในกรดไนตริกเป็นเวลา 3 ชั่วโมง (อัตราส่วนตัวดูดซับ 1 กรัมต่อปริมาตรกรดไนตริก 10 มิลลิลิตร) หลังจากนั้นทำการกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 และล้างตัวดูดซับที่เตรียมได้ด้วยน้ำปราศจากไอออนเพื่อล้างกรดไนตริกจนน้ำล้างสุดท้ายเป็นกลาง ทดสอบโดยใช้ Universal pH indicator จากนั้นนำตัวดูดซับที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อไล่ความชื้น ตัวดูดซับที่เตรียมได้จะถูกเก็บในภาชนะที่ไม่มีอากาศผ่านได้และเก็บในโถดูดความชื้นเพื่อเตรียมใช้ในการทดลองในขั้นตอนต่อไป [14]

2.3 การทดสอบการดูดซับเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+})

การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับเฟอร์รัสไอออนด้วยตัวดูดซับภายใต้ระบบแบบแบตช์ (Batch system) โดยการชั่งตัวดูดซับน้ำหนัก 100 มิลลิกรัมลงในขวดรูปชมพูนขนาด 125 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลายเฟอร์รัสไอออน 4 ppm ปริมาตร 4 มิลลิลิตรลงไป เขย่าด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 1 3 5 7 9 11 13 และ 15 นาที จากนั้นทำการกรองตัวดูดซับออก และนำสารละลายที่ได้ไปทำการวัดปริมาณเฟอร์รัสไอออนที่เหลือโดยใช้เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic absorption spectrometer)

2.4 การทดสอบความเป็นกรดบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์

การทดสอบความเป็นกรดบนพื้นผิวของตัวดูดซับทำได้โดยวิธีการไทเทรตด้วยวิธีของ Boehm [15-17] โดยวิธีนี้สามารถคำนวณหาความเข้มข้นของหมู่ฟังก์ชันกรดที่อยู่บนพื้นผิวของตัวอย่างคาร์บอนได้ ซึ่งทำได้โดยชั่งตัวดูดซับปริมาณ 50 มิลลิกรัมลงในหลอดทดลองพลาสติกขนาด 10 มิลลิลิตร เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.01 โมลาร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ลงไป ปิดฝาหลอดทดลองและเขย่าด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 เพื่อแยกตัวดูดซับออก นำสารละลายที่ได้หลังจากการกรองมาไทเทรตกับสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.01 โมลาร์ โดยใช้ฟีนอล์ฟทาลีนเป็นอินดิเคเตอร์

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

3.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อผลผลิตร้อยละของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้

ตัวดูดซับที่ได้หลังจากการเผาที่อุณหภูมิ 300 และ 600 องศาเซลเซียส แสดงดัง Figure 1 จากการทดลองการเตรียมตัวดูดซับจากกากกาแฟโดยเมื่อนำกากกาแฟมาเผาที่อุณหภูมิ 300 และ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมงภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนพบว่าผลผลิตร้อยละของกากกาแฟที่เผาที่อุณหภูมิ 300 คือ 53% และไม่มีขี้เถ้าเกิดขึ้นหลังจากการเผา ส่วนผลผลิตร้อยละของกาก

กาแฟที่ผ่านการเผาที่ 600 องศาเซลเซียส คือ 20% และมีซีเถ้าเกิดขึ้นหลังจากการเผา 0.43% ดังแสดงใน Table 1 ทั้งนี้เนื่องจากเกิดจากการสลายตัวของกลุ่มของสารประกอบอินทรีย์ที่ระเหยเป็นไอ (Volatile organic compounds หรือ VOCs) ที่อยู่ในกาแฟ โดยปริมาณของ VOCs จะสูญหายไปเป็นปริมาณที่มากขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิในการเผาที่สูงขึ้น และจะทำให้เกิดซีเถ้าขึ้นหลังจากการเผา เนื่องจากการเผากากกาแฟภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน โดยการคำนวณผลผลิตร้อยละของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ ปริมาณซีเถ้าที่เกิดขึ้นจะทำการคำนวณน้ำหนักที่ได้หลังการเผาเทียบกับน้ำหนักกากกาแฟก่อนการเผา และปริมาณซีเถ้าที่เกิดขึ้นจะถูกแยกออกหลังจากการเผาด้วยการเทออกจากถ้วยครูชีเบิ้ลโดยตรง เนื่องจากซีเถ้าที่มีน้ำหนักเบาจะเกาะอยู่บนผิวหน้าของถ่านกัมมันต์ที่จับตัวเป็นก้อนอยู่ภายในถ้วยครูชีเบิ้ล ดังแสดงใน Figure 1 ด้านขวา ทำให้สามารถแยกซีเถ้าออกจากถ่านกัมมันต์ได้ง่ายโดยไม่สูญเสียถ่านกัมมันต์ไปกับซีเถ้าในขณะเทออก ทั้งนี้ซีเถ้าที่เกิดขึ้นจะเกิดขึ้นได้โดยปกติในการเผาที่ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน หากการเผาในระบบที่ไม่มีออกซิเจนจะไม่ทำให้เกิดซีเถ้าขึ้นระหว่างการเผาและสามารถใช้อุณหภูมิในการเผาที่สูงขึ้นได้เพื่อให้ถ่านกัมมันต์มีความเป็นรูพรุนเพิ่มมากขึ้น แต่ทั้งนี้วิธีการนี้เป็นวิธีการที่ซับซ้อน มีความยุ่งยากและมีราคาแพง

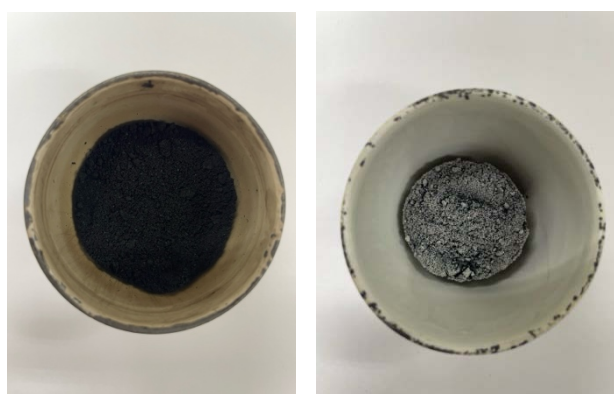


Figure 1 Carbonized coffee ground at 300 °C (Left) and 600 °C (Right).

Table 1 Percent yield and percent ash of C-NC C-C300 and C-C600

Adsorbent	Yield (%)*	Ash (%)*
C-NC	-	-
C-C300	52.76 ± 2.47	0.00
C-C600	20.71 ± 0.43	0.43 ± 0.09

*Mean ± S.D. (n=3)

3.2 ผลการกระตุ้นด้วยกรดไนตริก

การทดลองดังแสดงใน Table 2 เป็นเป็นปริมาณกรดบนพื้นผิวของตัวดูดซับที่เตรียมได้โดยวิธีการทดสอบหาปริมาณกรดบนพื้นผิวด้วยวิธีการของ Boehm โดยการเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรดบนพื้นผิวกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เติมลงไป มากเกินไป และปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหลือจากการเกิดปฏิกิริยาจะถูกนำมาไทเทรตกับกรดไฮโดรคลอริก ซึ่งปริมาณกรดและเบสที่สมมูลกันจะเป็นตัวบ่งชี้ปริมาณกรดบนพื้นผิวของคาร์บอน จากการทดลองพบว่าพื้นผิวของตัวดูดซับที่ผ่านการกระตุ้นด้วยกรดไนตริกมีความเป็นกรดเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับไม่มีการกระตุ้นด้วยกรดไนตริก โดยปริมาณของกรดบนพื้นผิวของ C-NC-N5 และ C-C600-N5 จะมีปริมาณใกล้เคียงกันอาจเนื่องมาจากปริมาณของกรดบนพื้นผิวของ C-NC-N5 ในตัวอย่างกากกาแฟมีปริมาณของหมู่ฟีนอลที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติอยู่แล้ว [18] เมื่อถูกกระตุ้นด้วยกรดไนตริกจึงทำให้มีปริมาณของหมู่ฟีนอลเพิ่มมากขึ้น และเมื่อทดสอบหาปริมาณกรดบนพื้นผิวของ C-NC-N5 วิธีการของ Boehm ทำให้ได้ปริมาณกรดบนพื้นผิวที่มากกว่าปกติ ซึ่งเมื่อเทียบกับ C-C600-N5 ที่ผ่านการเผาที่ 600 องศาเซลเซียส จนทำให้โครงสร้างของตัวดูดซับมีความเป็นคาร์บอนมากกว่า ปริมาณกรดบนพื้นผิวของ C-C600-N5 จึงเกิดจากการกระตุ้นด้วยกรดไนตริกทั้งหมด ส่วนปริมาณกรดบนพื้นผิวของ C-C300-N5 มีน้อย

ที่สุด แต่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญจาก C-C600-N5 อาจเนื่องมาจาก 2 ปัจจัยคือหมู่ฟีนอลที่ยังเหลืออยู่ในโครงสร้างของ C-C300-N5 บางส่วนและเกิดจากการกระตุ้นด้วยกรดไนตริก ซึ่งปริมาณกรดบนพื้นผิวของ C-C300 จะมีปริมาณสูงกว่า C-NC และ C-C600 สาเหตุอาจเนื่องมาจากตัวดูดซับที่นำมาทดสอบมีปริมาณเพียง 50 มิลลิกรัม จึงอาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการทดลองได้

Table 2 Total acidic group on raw spent coffee ground and activated carbon surface

Adsorbent	Total acidic group (mmol/g)*
C-NC	1.32 ± 0.71
C-NC-N5	4.24 ± 0.46
C-C300	1.79 ± 0.15
C-C300-N5	2.99 ± 0.21
C-C600	1.14 ± 0.17
C-C600-N5	4.92 ± 0.15

*Mean ± S.D. (n=3)

3.3 การทดสอบการดูดซับเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+})

การทดสอบประสิทธิภาพในการดูดซับเฟอร์รัสไอออนแสดงดัง Figure 2 จากผลการทดลองพบว่าอัตราการดูดซับเฟอร์รัสไอออนของ C-C600-N5 มีค่าสูงที่สุด โดยมีอัตราการดูดซับคือ 16.22% รองลงมาคือ C-C300-N5 คือ 7.65% และ N-NC-N5 มีอัตราการดูดซับน้อยที่สุดคือ 3.82% เนื่องจากตัวดูดซับที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงกว่ามีอัตราการสลายตัวของ VOCs มากกว่าจนทำให้ลักษณะโครงสร้างของตัวดูดซับที่ได้มีรูพรุนและมีความเป็นคาร์บอนมากกว่า เมื่อถูกกระตุ้นด้วยกรดไนตริกจะทำให้เกิดการออกซิไดซ์ (Oxidization) บนพื้นผิวของตัวดูดซับและทำให้เกิดสารประกอบที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ (Oxygenated compounds) เช่น หมู่ฟีนอล (Phenolic group) ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) อยู่ในโครงสร้าง หรือหมู่คาร์บอกซิล (-COOH) จะทำให้พื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่มีความเป็นรูพรุนมากขึ้น มีพื้นที่ผิวมากขึ้น [19-21] ส่งผลให้โอกาสในการเกิดการดูดซับของเฟอร์รัสไอออนบน C-C600-N5 มีมากกว่า C-C300-N5 และ N-NC-N5 อัตราการดูดซับของตัวดูดซับสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 1 [22]

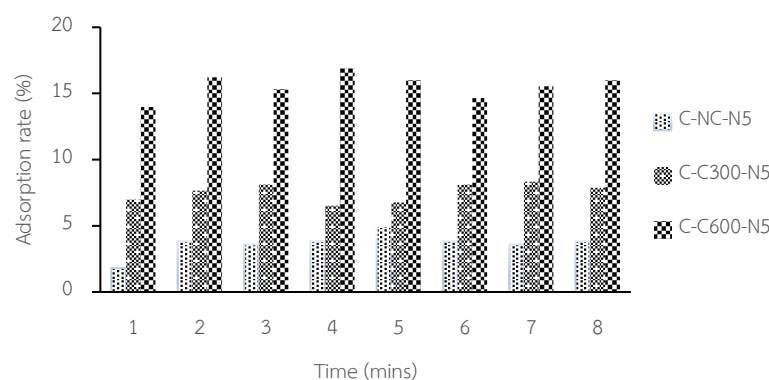


Figure 2 Adsorption rate of $4 \text{ mgL}^{-1} \text{ Fe}^{2+}$ on C-NC-N5 C-C300-N5 and C-C600-N5.

แต่อย่างไรก็ตามเมื่อทำการทดสอบการดูดซับที่เวลาต่าง ๆ ตั้งแต่ 1-15 นาที พบว่าอัตราการดูดซับของตัวดูดซับที่เตรียมได้ทุกชนิดไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในแต่ละช่วงเวลา อาจเกิดจากการใช้ความเข้มข้นของกรดไนตริกที่ใช้กระตุ้นตัวดูดซับน้อยเกินไป หรือใช้เวลาในการกระตุ้นตัวดูดซับน้อยเกินไป จึงอาจทำให้การเกิดรูพรุนขึ้นน้อย ซึ่งส่งผลให้อัตราการดูดซับเฟอร์รัส

ไอออนเกิดขึ้นได้น้อย ดังนั้นการทดลองในส่วนนี้จะต้องทำการศึกษาการเตรียมตัวดูดซับโดยการศึกษาระดับที่ความเข้มข้นมากขึ้น หรือใช้เวลาในการกระตุ้นเพิ่มมากขึ้น และเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มเติมต่อไป

$$R_c = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

เมื่อ R_c คืออัตราการดูดซับ (%) C_0 คือความเข้มข้นเริ่มต้น (mgL^{-1}) และ C_e คือความเข้มข้นที่สมดุล (mgL^{-1})

จากผลการทดลองดังแสดงใน Figure 3 พบว่าความจุในการดูดซับเฟอร์รัสไอออนของ C-C600-N5 มีค่ามากที่สุด รองลงมาคือ C-C300-N5 และ C-NC-N5 มีความจุในการดูดซับน้อยที่สุด เนื่องจาก C-C600-N5 ปริมาณ VOCs ถูกเผาไหม้ออกไปมากที่สุด ซึ่งทำให้โครงสร้างของตัวดูดซับที่ได้มีรูพรุนมากที่สุดเมื่อเทียบกับ C-C300-N5 ที่ยังคงมีปริมาณ VOCs ที่ยังถูกเผาไหม้ได้ไม่หมดหลงเหลืออยู่ในโครงสร้างของตัวดูดซับ ส่วนกากกาแฟที่ไม่ได้ผ่านการเผาจะยังมีปริมาณ VOCs ในโครงสร้าง จึงทำให้ภายในโครงสร้างไม่มีรูพรุนจึงทำให้มีความจุในการดูดซับเฟอร์รัสไอออนน้อยที่สุด และถึงแม้ว่า C-C600-N5 จะมีความจุในการดูดซับเฟอร์รัสไอออนสูงที่สุด แต่อย่างไรก็ตามความจุในการดูดซับก็ยังมีค่าน้อยมากเพียง 2.83×10^{-3} มิลลิกรัมต่อกรัมของตัวดูดซับ นอกจากนี้ยังมีการเพิ่มขึ้นหรือลดลงในบางช่วงเวลาของการทดลองของตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปริมาณตัวดูดซับที่นำมาใช้ในการทดสอบมีปริมาณน้อยเกินไปเมื่อเทียบกับปริมาณของสารละลายเฟอร์รัสไอออนที่นำมาศึกษาจึงทำให้การวัดความจุของการดูดซับบนตัวดูดซับได้ค่าน้อย มีค่าผกผันและไม่คงที่เมื่อถึงจุดสมดุลของการดูดซับ หรือการใช้ความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออนที่น้อย และใช้เวลาในการกระตุ้นน้อย จึงทำให้ตัวดูดซับที่ได้มีพื้นที่ผิวน้อย ดังนั้นจึงแนะนำให้มีการเพิ่มปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ในการดูดซับให้ได้สัดส่วนที่เหมาะสมกับปริมาณและความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์รัสไอออนในการศึกษาการเตรียมตัวดูดซับเฟอร์รัสไอออนเพิ่มเติม และศึกษาการเพิ่มความเข้มข้นของกรดไนตริกและศึกษาการเพิ่มเวลากระตุ้นให้มากขึ้นต่อไป ความจุในการดูดซับของตัวดูดซับสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2 [22]

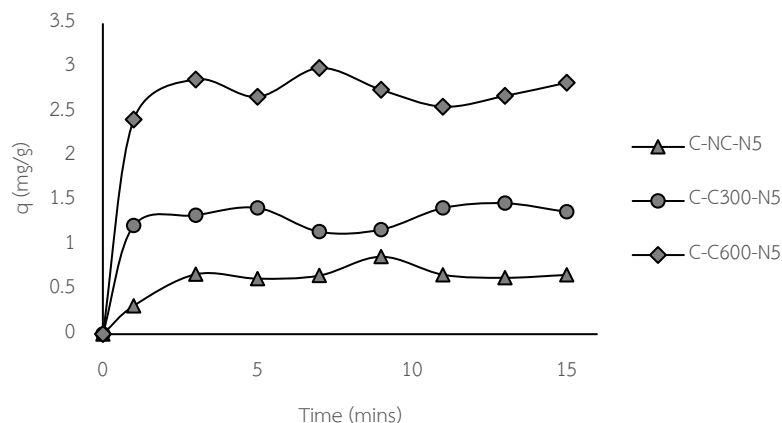


Figure 3 Adsorption capacity of C-NC-N5 C-C300-N5 and C-C600-N5.

$$q_e = \frac{C_0 - C_e}{m} \times V \quad (2)$$

เมื่อ q_e คือความจุในการดูดซับ (mg/g) C_0 คือความเข้มข้นเริ่มต้น (mgL^{-1}) C_e คือความเข้มข้นที่สมดุล (mgL^{-1}) m คือน้ำหนักของตัวดูดซับ (mg) และ V คือปริมาตรของ Fe^{2+} (L)

4. สรุป

จากผลการทดลองการเตรียมตัวดูดซับถ่านกัมมันต์จากกากกาแฟเพื่อใช้ในการดูดซับเฟอร์รัสไอออนพบว่ากากกาแฟสามารถนำมาใช้เตรียมเป็นตัวดูดซับได้ แต่ประสิทธิภาพในการดูดซับเฟอร์รัสไอออนยังไม่ดีมากนัก ในงานวิจัยนี้จึงต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของการศึกษาเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น ความเข้มข้นของสารที่ใช้กระตุ้น รวมถึงศึกษาสารที่ใช้ในการกระตุ้นชนิดต่างๆ และนำผลมาเปรียบเทียบกัน และปรับสภาวะให้เหมาะสมมากขึ้นเพื่อให้ถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มมากขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร และห้องปฏิบัติการวิจัยโรคพืชที่ช่วยเหลือจัดหาอุปกรณ์สำหรับใช้ในงานวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Harish V., Aslam S., Chouhan S., Pratap Y., and Lalotra S. 2023. Iron toxicity in plants: A Review. International Journal of Environment and Climate Change. 13:1894-900.
- [2] Kim S., Guerinot M. Kim. and , S.A. & Guerinot, M.L. 2007. Mining iron: iron uptake and transport in plants. FEBS Lett. 581, 2273-2280. FEBS letters. 581:2273-80.
- [3] Ishimaru Y., Suzuki M., Tsukamoto T., Suzuki K., Nakazono M., and Kobayashi T. 2006. Rice plants take up iron as an Fe³⁺-phytosiderophore and as Fe²⁺. The Plant Journal. 45:335-46.
- [4] Krohling CA., Eutrópio FJ., Bertolazi AA., Dobbss LB., Campostrini E., Dias T., and Ramos AC. 2016. Ecophysiology of iron homeostasis in plants. Soil Science and Plant Nutrition. 62:39-47.
- [5] Ellis RH. 1981. The quantification of ageing and survival in orthodox seeds. Seed Science and Technology. 9:373-409.
- [6] Ahmed SF., Ullah H., Aung MZ., Tisarum R., Cha-Um S., and Datta A. 2023. Iron Toxicity Tolerance of Rice Genotypes in Relation to Growth, Yield and Physiochemical Characters. Rice Science. 30:321-34.
- [7] Harish V., Aslam S., Chouhan S., Pratap Y., and Lalotra S. 2023. Iron toxicity in plants: A Review. International Journal of Environment and Climate Change. 13:1894-900.
- [8] Zhai Y., Cao X., Xia X., Wang B., Teng Y., and Li X. 2021. Elevated Fe and Mn Concentrations in Groundwater in the Songnen Plain, Northeast China, and the Factors and Mechanisms Involved. Agronomy. 11:2392.
- [9] Ahmad I., Malik S., Saeed S., Rehman A-u., and Munir T. 2022. Phytoremediating a Wastewater-Irrigated Soil Contaminated with Toxic Metals: Comparing the Efficacies of Different Crops. Soil Systems. 6:77.
- [10] Chaturvedi S., and Dave PN. 2012. Removal of iron for safe drinking water. Desalination. 303:1-11.
- [11] Bhanvase B., Kadu A., and Sonawane S. 2017. Removal of Cu²⁺ and Fe²⁺ using Activated Carbon Derived From Lantana Camara Stem and Soya Hull and Its Comparison with Commercial Activated Carbon. 61-75.
- [12] Beenakumari K. 2009. Removal of iron from water using modified coconut shell charcoal as adsorbent. Current World Environment. 4:321-6.

-
- [13] Ramutshatsha-Makhwedzha D., Mbaya T., Mavhungu A., Mavhunga ML., and Mbaya R. 2023. Adsorptive removal of Cd^{2+} , Pb^{2+} , and Fe^{2+} from acid mine drainage using a mixture of waste orange and lemon activated carbon (WOLAC): equilibrium study. *Journal of the Iranian Chemical Society*. 20:1119-33.
- [14] Yin CY., Aroua MK., and Daud WMAW. 2007. Review of modifications of activated carbon for enhancing contaminant uptakes from aqueous solutions. *Separation and Purification Technology*. 52:403-15.
- [15] Moreno-castilla C., Carrasco-marín F., Maldonado-hódar FJ., and Rivera-utrilla J. 1998. Effects of non-oxidant and oxidant acid treatments on the surface properties of an activated carbon with very low ash content. *Carbon*. 36:145-51.
- [16] Schönherr J., Buchheim JR., Scholz P., and Adelhelm P. 2018. Boehm Titration Revisited (Part I): Practical Aspects for Achieving a High Precision in Quantifying Oxygen-Containing Surface Groups on Carbon Materials. *C*. 4:21.
- [17] Kim YS., and Park C. 2016. Titration Method for the Identification of Surface Functional Groups. 273-86.
- [18] Solomakou N., Loukri A., Tsafrakidou P., Michaelidou A-M., Mourtzinis I., and Goula AM. 2022. Recovery of phenolic compounds from spent coffee grounds through optimized extraction processes. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*. 25:100592.
- [19] Figueiredo JL., Pereira MFR., Freitas MMA., and Órfão JJM. 1999. Modification of the surface chemistry of activated carbons. *Carbon*. 37:1379-89.
- [20] Jaramillo J., Álvarez PM., and Gómez-Serrano V. 2010. Preparation and ozone-surface modification of activated carbon. Thermal stability of oxygen surface groups. *Applied Surface Science*. 256:5232-6.
- [21] Paredes-Doig A., Pinedo-Flores A., Aylas-Orejón J., Obregón-Valencia D., and Sun Kou M. 2020. The interaction of metallic ions onto activated carbon surface using computational chemistry software. *Adsorption Science & Technology*. 38:191-204.
- [22] Zhao J., Yu L, Zhou F., Ma H, Yang K., and Wu G. 2021. Synthesis and characterization of activated carbon from sugar beet residue for the adsorption of hexavalent chromium in aqueous solutions. *RSC Advances*. 11:8025-32.

การประยุกต์ใช้เครื่องหมายโมเลกุล EST-SSRs
สำหรับการทำโปรไฟล์พันธุกรรมในบางจีโนไทป์ของสตรอเบอร์รี่
The application of EST-SSRs molecular markers
for genetic profiling in some strawberry genotypes

ปรียา พวงสำลี หวังสมนึก^{1,*} อาภาพร ไชยสัตย์¹ และ พงศ์ปณต หวังสมนึก²
Preeya Puangsomlee Wangsomnuk^{1,*}, Ar-paporn Chaiyasat¹, and Pongpanot Wangsomnuk²

¹สาขาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40002

²สาขาวิทยาการข้อมูลและนวัตกรรมซอฟต์แวร์คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.เมืองวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี 34190

¹Department of Biology, Faculty of Science, Khon Kaen University, Muang District, Khon Kaen Province, 40002

²Department of Data Science and Software Innovation, Faculty of Science, Ubon Ratchathani University, Warin Chamrap District, Ubon Ratchathani Province, 34190

*Corresponding author: Preeya Puangsomlee Wangsomnuk, e-mail address: preeyaku04@gmail.com

บทคัดย่อ

สตรอว์เบอร์รี่ (*Fragaria* spp.) เป็นหนึ่งในผลไม้ที่ได้รับความนิยมสูงทั่วโลก โดยมีประโยชน์ทั้งต่อสุขภาพมนุษย์และด้านเศรษฐกิจ งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาเครื่องหมายโมเลกุล EST-SSR จากฐานข้อมูล Genbank เพื่อวิเคราะห์ความแตกต่างทางพันธุกรรมของสตรอว์เบอร์รี่ *Fragaria x ananassa* จำนวน 13 จีโนไทป์ ด้วยการสืบค้นพบ ESTs ทั้งหมด 59,101 ESTs จาก *F. x ananassa* คิดเป็น 19.59% และ *F. vesca* คิดเป็น 81.17% เมื่อระบุตำแหน่ง SSR ส่วนใหญ่เป็นไดนิวคลีโอไทด์ตามมาด้วย ไตรนิวคลีโอไทด์ คิดเป็นร้อยละ 79.55 และ 18.43 กับ 68.98 และ 29.55 ใน *F. x ananassa* และ *F. vesca* ตามลำดับ โดยไดนิวคลีโอไทด์และไตรนิวคลีโอไทด์มีจำนวนซ้ำ 6 ซ้ำมากที่สุด ได้คัดเลือกไพรเมอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงจำนวน 6 คู่จาก 40 คู่ เมื่อทดสอบไพรเมอร์เหล่านี้กับจีโนไทป์ต่าง ๆ พบว่า มีจำนวนอัลลีลที่หลากหลาย และค่า Polymorphic Information Content (PIC) ระหว่าง 0.3775-0.4067 ซึ่งเห็นถึงความสามารถในการแยกแยะจีโนไทป์ต่าง ๆ ได้ การคำนวณค่าความแตกต่างทางพันธุกรรมระหว่างจีโนไทป์สตรอว์เบอร์รี่จาก 41 อัลลีล พบว่า พันธุ์สวีตเชอร์แลนด์มีค่าเฉลี่ยความแตกต่างทางพันธุกรรมมากที่สุด (0.5495) โดยค่าเฉลี่ยความแตกต่างทางพันธุกรรมของทุกจีโนไทป์เท่ากับ 0.3240 จีโนไทป์ที่มีความแตกต่างทางพันธุกรรมระหว่างกันมากที่สุด (0.5784) ได้แก่ พันธุ์เบลเยียมไวท์กับสวีตเชอร์แลนด์ ในขณะที่พันธุ์นาเข้าหรือคัดเลือกเพื่อปลูกในประเทศไทย ได้แก่ พระราชทาน 72 กับพระราชทาน 88 มีพันธุกรรมเหมือนกันมากที่สุด เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ทางพันธุกรรมของสตรอว์เบอร์รี่ด้วยวิธี UPGMA โดยใช้ค่าความเหมือนทางพันธุกรรมและสร้างแผนภาพแสดงความสัมพันธ์ทางพันธุกรรมของสตรอว์เบอร์รี่ทั้ง 13 จีโนไทป์ สามารถจัดเป็น 3 กลุ่ม ผลการวิจัยนี้นำไปใช้เพื่อเลือกคู่ผสมที่มีความแตกต่างทางพันธุกรรมสูงให้ได้ลักษณะดีเด่นยิ่งขึ้น มีพันธุ์ที่หลากหลายมากขึ้น เป็นตัวเลือกให้แก่เกษตรกรและผู้บริโภคตลอดจนการขยายตลาดให้มีขนาดใหญ่ซึ่งมีความสำคัญทั้งในด้านการบริโภคและเศรษฐกิจในอนาคต

คำสำคัญ: *Fragaria x ananassa*, เครื่องหมายโมเลกุล EST-SSR, ความแตกต่างทางพันธุกรรม การอนุรักษ์, การปรับปรุงพันธุ์

Abstract

Strawberries (*Fragaria* spp.) are among the most popular fruits worldwide, beneficial both for human health and economically. This research focuses on developing EST-SSR molecular markers from the Genbank database to analyze the genetic diversity of thirteen *Fragaria x ananassa* genotypes. By identifying a total of 59,101 ESTs from *F. x ananassa*, accounting for 19.59%, and *F. vesca*, making up 81.17%, it was found that the majority of SSRs were dinucleotides, followed by trinucleotides, representing 79.55% and 18.43% in *F. x ananassa* and 68.98% and 29.55% in *F. vesca*, respectively. Dinucleotides and trinucleotides with six repeats were the most common. Six highly effective primer pairs were selected from 40 pairs tested. These primers, when tested with thirteen genotypes, revealed a diverse number of alleles and a Polymorphic Information

Content (PIC) value ranging between 0.3775 and 0.4067, indicating their capability to discriminate between different genotypes. The calculation of genetic dissimilarity between strawberry genotypes from 41 alleles showed that the Swiss variety has the highest average genetic divergence (0.5495), with the average genetic divergence of all genotypes being 0.3240. The genotypes with the highest genetic dissimilarity (0.5784) were the Belgian White and Swiss. While the varieties introduced or selected for cultivation in Thailand, such as Praratchatan 72 and Praratchatan 88, which have a genetic background from Japan, exhibit the most genetic similarity. The genetic relationships of strawberries were analyzed using the UPGMA method based on genetic similarity, and a dendrogram depicting the genetic relationships of all 13 genotypes was created, categorizing them into three groups. This research could be used for conservation and for selecting breeding lines with high genetic diversity to enhance distinctive traits, increase variety availability, and provide more options for farmers and consumers. Additionally, it could contribute to expanding markets, which is important for both consumption and economic aspects in the future.

Keywords: *Fragaria x ananassa*, EST-SSR molecular markers, Genetic differentiation, Conservation, Breeding

1. บทนำ

สตรอว์เบอร์รี (*Fragaria* spp.) เป็นหนึ่งในพืชที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในโลก เนื่องจากผลมีวิตามินซี โปแตสเซียม กรดโฟลิก และไฟเบอร์ อุดมไปด้วยฟลาโวนอยด์ที่ช่วยลดความเสี่ยงของโรคหลอดเลือดและโรคหัวใจ และมีสารต้านอนุมูลอิสระที่ช่วยยับยั้งการเกิดมะเร็ง [1] มีการนำผลไปใช้ในผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ไวน์ พาย เค้ก และเบเกอรี่ จนถึงปัจจุบันได้มีรายงานชนิดของสตรอว์เบอร์รีทั้งหมด 23 สปีชีส์ มีระดับพลอยดีต่าง ๆ ตั้งแต่ดีพลอยดีถึงเดกะพลอยดี [2] สตรอว์เบอร์รีที่มีความสำคัญในการเพาะปลูกเชิงพาณิชย์ ได้แก่ *Fragaria x ananassa* (Weston) Duchesne ex Rozier เป็นพืชล้มลุกอายุหลายปีอยู่ในวงศ์ Rosaceae มีจำนวนโครโมโซมแบบออกโทพลอยด์ ($2n = 8x = 56$) เกิดจากการผสมข้ามตามธรรมชาติระหว่าง *F. chiloensis* และ *F. virginiana* ซึ่งมีโครโมโซมแบบออกโทพลอยด์ [3] มีประมาณ 80 ประเทศทั่วโลกที่ปลูกสตรอว์เบอร์รี [4] คิดเป็นมูลค่า 19 พันล้านดอลลาร์สหรัฐในปี 2022 และคาดว่าจะมีมูลค่าถึง 32 พันล้านดอลลาร์สหรัฐในปี 2031 [5]

การขยายพันธุ์ของสตรอว์เบอร์รีมีหลายวิธี เช่น การใช้เมล็ดพันธุ์ การเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ และการใช้ส่วนขยายพันธุ์จากลำต้น สำหรับประเทศไทยมีการปลูกสตรอว์เบอร์รีมีการปลูกสตรอว์เบอร์รีเพื่อทดแทนการปลูกฝิ่นในภาคเหนือภายใต้การสนับสนุนของกระทรวงเกษตรของสหรัฐอเมริกา (USDA) และมูลนิธิโครงการหลวง ตั้งแต่นั้นมาสตรอว์เบอร์รีก็กลายเป็นพืชที่ทำกำไรได้มากสำหรับเกษตรกร ในอดีตจังหวัดเชียงใหม่และจังหวัดเชียงรายเป็นพื้นที่ปลูกที่สำคัญ ในปัจจุบันพื้นที่การปลูกได้ขยายไปยังจังหวัดอื่น ๆ เช่น เพชรบูรณ์ เลย ขอนแก่น ชัยภูมิ และนครราชสีมา อย่างไรก็ตามยังไม่ชัดเจนว่า มีความหลากหลายทางพันธุกรรมเพียงใดในสายพันธุ์สตรอว์เบอร์รีที่ปลูกในไทย พันธุ์หรือสายพันธุ์สตรอว์เบอร์รีที่ได้รับการตั้งชื่อแตกต่างกันอาจจะเป็นพันธุ์หรือสายพันธุ์เดียวกันหรือมีความคล้ายคลึงกันทางพันธุกรรมอย่างมาก การระบุความแตกต่างในสตรอว์เบอร์รีอาจใช้ลักษณะทางสัณฐานวิทยา [6] แต่ลักษณะเหล่านี้สามารถเปลี่ยนแปลงได้จากผลกระทบของสิ่งแวดล้อม

การวิเคราะห์ลักษณะทางพันธุกรรมเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อเข้าใจความหลากหลายของเชื้อพันธุกรรม การนำลายพิมพ์ดีเอ็นเอไปใช้กับพืชอย่างมีประสิทธิภาพเพื่อพัฒนาโปรไฟล์พันธุกรรมได้กลายเป็นเครื่องมือสำคัญในหลากหลายสาขาของการวิจัยประชากรพืช เช่น การศึกษากระบวนการผสมพันธุ์ (การสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศเทียบกับการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศในพืชสำหรับสปีชีส์ที่สามารถสร้างโคลนได้เอง การประมาณอัตราการผสมตัวเอง การวิเคราะห์บิดาและมารดา) ความเกี่ยวข้องทางพันธุกรรมระหว่างหรือภายในสปีชีส์และประชากร การประเมินการไหลของยีน เป็นต้น [7]

Simple Sequence Repeat (SSR) หรือไมโครแซทเทลไลท์เป็นลำดับเบสแบบง่ายที่จัดเรียงต่อเนื่องกันด้วยจำนวนซ้ำของโมโนนิวคลีโอไทด์ ไดนิวคลีโอไทด์ ไตรนิวคลีโอไทด์ เตตระนิวคลีโอไทด์ เพนตานิวคลีโอไทด์ และเฮกซานิวคลีโอไทด์ [8] ซึ่งมีอยู่อย่างมากมาย มีความหลากหลายในรูปแบบทางพันธุกรรมและกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในทุกจีโนมของสิ่งมีชีวิต [9] รวมถึงในยีนที่เป็นรหัสโปรตีนและ ESTs [10] การสร้าง cDNA หรือ EST ขึ้นโดยใช้เอนไซม์ Reverse transcriptase เพื่อเปลี่ยน mRNA ให้เป็น DNA เป็นการเพิ่มความเสถียรของ mRNA [11] SSR เป็นเครื่องหมายที่เฉพาะตำแหน่งทางพันธุกรรม มีการถ่ายทอดทางพันธุกรรมแบบข่มร่วม (Co-dominant inheritance) [12] สามารถระบุและแยกแยะต้นที่เป็นสายพันธุ์แท้ (Homozygote) และต้นที่เป็น

สายพันธุ์ทาง (Heterozygote) ได้ เป็นเครื่องหมายที่สามารถถ่ายโอนไปยังสปีชีส์ที่เกี่ยวข้องได้สูงซึ่งเป็นคุณลักษณะของเครื่องหมายที่มีข้อได้เปรียบสำคัญสำหรับการทำแผนที่พันธุกรรมของพืช การศึกษาพันธุกรรมประชากรอย่างมีประสิทธิภาพ และการศึกษาวิวัฒนาการ [13] SSR ที่ได้จาก EST มีความเชื่อมโยงกับการแสดงออกของยีนที่แตกต่างกันมากกว่า SSR ที่มาจากลำดับเบสในส่วนของจีโนมที่ไม่ใช่ยีน [14]

แม้จะมีความเป็นไปได้ว่ามนุษย์ได้รับประทานสตรอว์เบอร์รี่มาตั้งแต่หลายพันปีก่อน แต่การเพาะปลูกสตรอว์เบอร์รี่ป่านั้นเชื่อกันว่าเริ่มขึ้นเพียงไม่กี่ศตวรรษมานี้เอง [15] เครื่องหมาย SSR จำนวนมากได้ถูกพัฒนาขึ้นจากชนิดต่าง ๆ ในสกุล *Fragaria* แต่ส่วนมากมักพัฒนาจาก *F. vesca* ซึ่งได้รับการเสนอให้เป็นโมเดลวิจัยสำหรับวงศ์ Rosaceae เป็นชนิดที่มีโครโมโซมเพียงสองชุด (Diploid) มีจีโนมขนาดเล็กซึ่งได้รับการจัดลำดับเบสอย่างเต็มรูปแบบ เป็นหนึ่งในบรรพบุรุษของ *F. x ananassa* [3] มีความเหมือนกันของลำดับเบสในจีโนมอย่างมากกับ *F. x ananassa* ผลไม้ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ ถึงแม้จะมีไพรเมอร์จำเพาะกับเครื่องหมาย SSR มากกว่า 4,000 เครื่องหมาย [16] (จากข้อมูลลำดับเบสในจีโนมตั้งแต่การจัดลำดับจีโนมของ *F. vesca* [17] และจากห้องสมุด cDNAs [16] แต่ไพรเมอร์ที่นำมาใช้จริงอย่างมีประสิทธิภาพมีจำนวนไม่มากเทียบกับจำนวน ESTs ทั้งหมดของแต่ละงานวิจัยที่ได้ออกมา ตัวอย่างเช่น จากห้องสมุด cDNAs ของต้นกล้า *F. vesca* ที่เลี้ยงในหลอดทดลองภายใต้สภาวะเครียดเนื่องจากอุณหภูมิสูง แสง และความเค็ม พบ 41,430 ESTs ที่มีลำดับเบสที่ไม่ซ้ำกันจำนวน 11,836 ESTs โดยประกอบด้วย ลำดับนิวคลีโอไทด์ที่ทับซ้อนกัน 4,433 contigs และ 7,403 singletons ซึ่งมีเพียง 19 คู่ของไพรเมอร์จาก EST-SSR ดังกล่าวที่ [18] นำมาใช้เพื่อวิเคราะห์พันธุกรรมประชากรของ *F. vesca* จำนวน 289 จีโนไทป์จากทั่วโลกโดยใช้ร่วมกับเครื่องหมาย EST-SSR ที่พัฒนามาจาก *F. x ananassa* และ *F. vesca* จำนวน 7 คู่ ซึ่งค่า PIC 0.084 0.068 0.003 0.149 0.007 0.027 0.011 ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.050 ในขณะที่ค่า PIC EST-SSR ของโลกัส FVES0109 จาก *F. vesca* มีค่า 0.780 และโลกัส FVES0109 มีค่าต่ำสุด 0.007 [19] ถึงแม้จะรายงานข้อมูล SSR ของพืชในสกุล *Fragaria* ในรายงานหลายฉบับ แต่ไพรเมอร์ที่มีประสิทธิภาพในการแยกความต่างทางพันธุกรรมของสตรอว์เบอร์รี่ยังคงคิดเป็นสัดส่วนที่น้อยหากเทียบกับปริมาณของ SSR ที่มีรายงานจากจีโนมและยีนของ *F. x ananassa*

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องหมาย EST-SSR จากยีนที่มีการแสดงออก (Expressed sequence tag) ของสตรอว์เบอร์รี่จากฐานข้อมูล Genbank เพื่อคัดเลือกเครื่องหมายโมเลกุลที่ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพและนำมาใช้วิเคราะห์ความต่างทางพันธุกรรมของสตรอว์เบอร์รี่ *F. x ananassa* ได้

2. วิธีการศึกษา

2.1 Development of EST-SSR primers

สืบค้น EST จากฐานข้อมูล NCBI ณ วันที่ 26 ตุลาคม พ.ศ. 2017 พบว่ามีข้อมูล ESTs ของสตรอว์เบอร์รี่ชนิด *F. x ananassa*, *F. chiloensis* และ *F. vesca* จากนั้นส่งออกผลลัพธ์ที่ได้จากการสืบค้นโดยใช้ Windows Secure Copy (WinSCP) (<http://winscp.net/eng/download.php>) เพื่อการโอนย้ายไฟล์ผ่านอินเทอร์เน็ตระหว่างคอมพิวเตอร์ ทำการเชื่อมต่อไปยังเซิร์ฟเวอร์ของมหาวิทยาลัยขอนแก่นโดยใช้โปรโตคอลเครือข่าย SSH ใช้งาน PuTTY (<http://www.putty.org/>) บนระบบ Windows แล้วใช้ CAP3 (<http://seq.cs.iastate.edu/cap3.html>) ลดความซับซ้อนของลำดับเบสของ ESTs แล้วประกอบลำดับเบสเข้าด้วยกันเป็น Contigs และ Singletons โดยการใช้คำสั่ง Perl บนระบบปฏิบัติการ Linux ระบุตำแหน่ง SSR โดยใช้สคริปต์ Perl (SSRIT) สำหรับไดนิวคลีโอไทด์ ไตรนิวคลีโอไทด์ เตตรานิวคลีโอไทด์ และเพนตานุคลีโอไทด์ เฮกซานิวคลีโอไทด์ ตามลำดับ จากนั้นใช้ WinSCP และ PuTTY เพื่อโอนตำแหน่ง SSR ที่ระบุได้ไปยังไฟล์ Excel เพื่อการออกแบบไพรเมอร์ที่มีความยาว 18-22 เบสเพอร์ มีสัดส่วนของ GC ประมาณ 39-50% และอุณหภูมิแอนนिलลิงอยู่ระหว่าง 55-65°C โดยใช้เว็บไซต์ Primer3plus (www.bioinformatics.nl/cgi-bin/primer3plus) และ BioPHP (www.biophp.org/) ในการออกแบบ โดยคาดว่าผลผลิตที่ได้จากการใช้ไพรเมอร์จะมีความยาวอยู่ระหว่าง 110-160 bp

2.2 การสกัดดีเอ็นเอจากสตรอว์เบอร์รี่และการตรวจคุณภาพของดีเอ็นเอ

สกัดดีเอ็นเอจากสตรอว์เบอร์รี่ *F. x ananassa* 13 จีโนไทป์ทั้งพันธุ์จากต่างประเทศและพันธุ์นำเข้าหรือคัดเลือกเพื่อปลูกในประเทศไทย ได้แก่ (1) พระราชทาน 80 (2) พระราชทาน 329 (3) โชกุน (4) โทคุน (5) สวิตเซอร์แลนด์ (6) อเมริกาจัมโบ้ (7) อเมริกา (8) เบลเยี่ยมไวท์ (9) เบลเยี่ยมฟิงค์ (10) การะเกด (11) พระราชทาน 72 (12) พระราชทาน 88 (13) พระราชทาน 90 จากไร่เอกเกศา ตาบลห้วยยาง อำเภอกอนสาร จังหวัดชัยภูมิ นำมาปลูกที่สาขาวิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยขอนแก่น สกัดดีเอ็นเอจากใบสดอย่างน้อยสองตัวอย่างของสตรอว์เบอร์รี่ทุกจีโนไทป์ตามโปรโตคอลของ [20] แล้วเก็บไว้ที่อุณหภูมิ -20°C วิเคราะห์ความเข้มข้นและคุณภาพของดีเอ็นเอที่สกัดได้โดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ NanodropTM (Thermo Scientific) ที่ความยาวคลื่น 260 นาโนเมตร (OD260) และ 280 นาโนเมตร (OD280)

2.3 การเพิ่มปริมาณดีเอ็นเอของสตรอว์เบอร์รี่ด้วยไพรเมอร์ EST-SSR

เพิ่มปริมาณดีเอ็นเอของสตรอว์เบอร์รี่จำนวน 13 จีโนไทป์ ด้วยไพรเมอร์ EST-SSR ที่จำนวน 40 คู่ที่สุ่มเลือกมาจากการออกแบบใน 2.1 โดยต้องไม่ซ้ำกับที่เคยมีรายงานไว้แล้ว ในปฏิกิริยาพีซีอาร์ (PCR) ที่มีปริมาตร 10 ไมโครลิตร ประกอบด้วย ดีเอ็นเอปริมาณ 100 ng ในปริมาตร 2 µl น้ำปราศจากไอออนและปลอดเชื้อ 3.92 ไมโครลิตร บัฟเฟอร์ (Vivantis®) ความเข้มข้น 10X 1 ไมโครลิตร dNTP ความเข้มข้น 2.0 มิลลิโมลาร์ 1 ไมโครลิตร ไพรเมอร์ 2 ชนิด แต่ละชนิดมีความเข้มข้น 2.0 ไมโครโมลาร์ ปริมาตร 1 ไมโครลิตร และ Taq DNA polymerase (Vivantis®) ปริมาณ 0.4 หน่วย ปริมาตร 0.08 µl ปฏิกิริยาพีซีอาร์ ประกอบด้วย: ขั้นตอนแรกที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 3 นาที ขั้นตอนที่ 2 จำนวน 40 รอบ อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 3 วินาที Annealing step (63 หรือ 61°C) เป็นเวลา 40 วินาที และ 72°C เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นอุณหภูมิ 72°C เป็นเวลา 5 นาทีโดยใช้ SureCycler 8800 ThermalCycler (Agilent Technologies®) ผลผลิตที่ได้ถูกแยกตามขนาดดีเอ็นเอโดยเปรียบเทียบกับ 100 bp DNA ladder plus (Vivantis®) ผ่านอะกาโรสเจล อิเล็กโตรโฟรีซิส 100 โวลต์เป็นเวลา 50 นาทีบนเจลอะกาโรสความเข้มข้น 3% ในบัฟเฟอร์ 0.5X TBE ที่ย้อมด้วยเอทิลเบรมโบรไมด์ บันทึกภาพโดยใช้ Gel Documentation (Uvitec®Cambridge)

2.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ขนาดเครื่องหมาย EST-SSR โดยใช้ซอฟต์แวร์ Uviband (Uvitec® Cambridge) บันทึกเป็น 1 และ 0 ตามการปรากฏหรือไม่ปรากฏของเครื่องหมายโมเลกุลแต่ละโลกัส วิเคราะห์ประสิทธิภาพของไพรเมอร์ EST-SSR จากค่า Polymorphic Content (PIC) และค่า Discriminating Power (D) ผ่านเว็บไซต์ <https://irscope.shinyapps.io/iMEC/> [21] หาค่าความต่างทางพันธุกรรมระหว่างจีโนไทป์สตรอว์เบอร์รี่โดยคำนวณจาก 1-ค่าสัมประสิทธิ์ความคล้ายคลึงของ Dice [22]) โดยใช้ซอฟต์แวร์ DARwin (version 6.0.9) [23] สร้างแผนภูมิความสัมพันธ์ (dendrogram) จากค่าสัมประสิทธิ์ความเหมือนด้วยวิธี UPGMA (Unweighted pair group method with arithmetic average) โดยใช้ซอฟต์แวร์ NTSYS-pc 2.1 [24]

3. ผลการศึกษาและการวิจารณ์

จากการสืบค้น EST จากฐานข้อมูล NCBI ณ วันที่ 26 ตุลาคม พ.ศ. 2017 พบข้อมูล ESTs ของสตรอว์เบอร์รี่ชนิด *F. x ananassa*, *F. vesca* และ *F. chiloensis* รวมทั้งหมด 59,101 ESTs (Table 1) โดยมาจาก *F. x ananassa* คิดเป็น 19.59% และ *F. vesca* มากที่สุดโดยคิดเป็น 81.17% สอดคล้องกับความยากง่ายในการวิจัยเนื่องจากความซับซ้อนเนื่องจากจำนวนชุดโครโมโซม และการเป็นพืชมะเดลินในการวิจัย [3] ยีนเดี่ยวของ *F. x ananassa* และ *F. vesca* มีจำนวนยีนที่มี SSR คิดเป็น 396 และ 1154 ยีน คิดเป็นร้อยละ 3.60 และ 2.41 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า ESTs ที่นำมาวิจัยมีลำดับเบสซ้ำในปริมาณที่ต่างกันของพืชสองชนิดนี้เมื่อใช้พารามิเตอร์ในการค้นหาเดียวกัน โดยกำหนดให้ต้องมีจำนวนซ้ำของ SSR ทุกแบบตั้งแต่ 5 ซ้ำขึ้นไป SSR ส่วนใหญ่เป็นไดนิวคลีโอไทด์ตามมาด้วยไตรนิวคลีโอไทด์ (Table 2) คิดเป็นร้อยละ 79.55 และ 18.43 กับ 68.98 และ 29.55 ใน *F. x ananassa* และ *F. vesca* ตามลำดับ (Figure 1) ทั้งไดนิวคลีโอไทด์และไตรนิวคลีโอไทด์มีจำนวนซ้ำ 6 ซ้ำมากที่สุด (Table 3) ผลการวิจัยนี้ต่างจาก [25] ที่พบยีนเดี่ยวจำนวน 1304 ยีนจาก ESTs ของ *F. x ananassa* ซึ่งมี SSR แบบไตรนิวคลีโอไทด์มากที่สุด (36.8%) ไดนิวคลีโอไทด์ (32.7%) และเตตรานิวคลีโอไทด์ (27.9%) เนื่องจากแหล่งที่มาของ ESTs และการใช้พารามิเตอร์ในการค้นหา SSR ที่แตกต่างจากงานวิจัยนี้ เช่นเดียวกับ [16] ซึ่งได้รายงานเกี่ยวกับ EST ของ *F. vesca* และ *F. x ananassa* จำนวน 45,739 และ 6,117 ตามลำดับ และใช้พารามิเตอร์ในการค้นหาลำดับเบสซ้ำแบบไดนิวคลีโอไทด์ (NN) ไตรนิวคลีโอไทด์ (NNN) และเตตรานิวคลีโอไทด์ (NNNN) ที่มีความยาวกว่า 14 bp

Table 1 Number of ESTs and SSRs of *F. x ananassa*, *F. vesca* and *F. chiloensis*

	<i>F. x ananassa</i>	<i>F. vesca</i>	<i>F. chiloensis</i>	Total number
Total ESTs	10988	47975	138	59,101
Contig	122	564	0	686
Singleton	274	590	3	867
Number of seq. examined	396	1154	3	1,553
Number of Primer designed	236	72	3	311

Table 2 Types and Quantities of SSRs in *F. x ananassa* and *F. vesca* ESTs

SSR type	Number of SSR			Total number	%
	<i>F. x ananassa</i>	<i>F. vesca</i>	<i>F. chiloensis</i>		
Dinucleotide	315	796	0	1,111	71.54
Trinucleotide	73	341	3	417	26.85
Tetranucleotide	3	16	0	19	1.22
Pentanucleotide	5	1	0	6	0.39
Total	396	1154	3	1553	100

Table 3 Types and numbers of SSR repeats in ESTs from *F. x ananassa* and *F. vesca*

Type	Repeat							Repeat range	Total number	%
	5	6	7	8	9	10	>10			
<i>F. x ananassa</i>										
Dinucleotide	0	90	57	38	31	14	85	6 - 42	315	79.55
Trinucleotide	0	41	12	4	5	4	7	6 - 14	73	18.43
Tetranucleotide	3	0	0	0	0	0	0	5	3	0.76
Pentanucleotide	5	0	0	0	0	0	0	6	5	1.26
<i>F. vesca</i>										
Dinucleotide	0	239	141	90	73	43	210	6-65	796	68.98
Trinucleotide	0	171	91	39	19	6	15	6-15	341	29.55
Tetranucleotide	12	3	1	0	1	0	0	5-9	16	1.39
Pentanucleotide	1	0	0	0	0	0	0	5	1	0.08

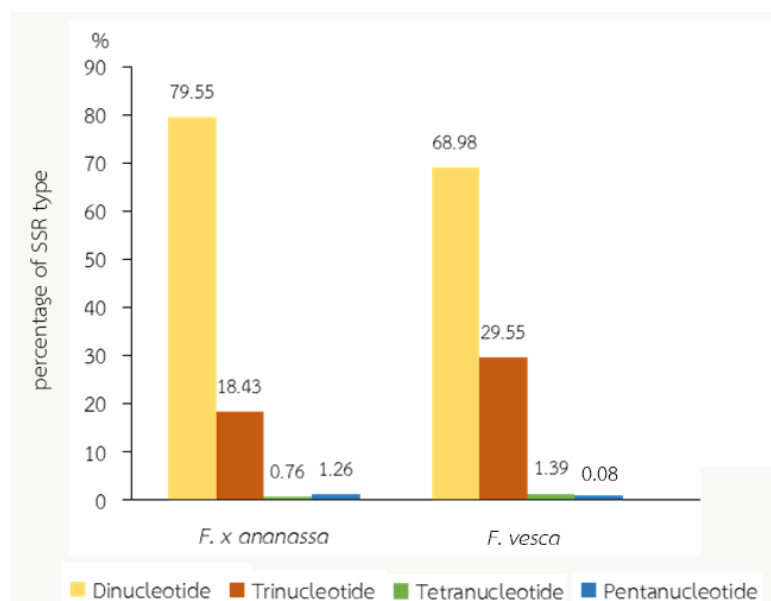


Figure 1 The types of SSR motifs detected in the *F. x ananassa* and *F. vesca* ESTs.

การพัฒนาเครื่องหมาย EST-SSR และการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของไพรเมอร์

จากการทดสอบไพรเมอร์ 40 คู่ ที่สุ่มเลือกมาจากยีนของ *F. x ananassa* และ *F. vesca* กับสตรอร์เบอร์รี่ 13 จีโนไทป์ ได้แก่ พระราชทาน 80 พระราชทาน 329 ไชยกุล โทคุน สวิตเซอร์แลนด์ อเมริกาจัมโบ้ อเมริกา เบลเยี่ยมไวท์ เบลเยี่ยมฟิงค์ การะเกด พระราชทาน 72 พระราชทาน 88 และพระราชทาน 90 จากการวิเคราะห์แถบดีเอ็นเอที่ได้จากปฏิกิริยาพีซีอาร์ด้วย อะการโรสเจลอิเล็กโตรโฟรีซิส ได้เลือกเครื่องหมาย EST-SSR มา 6 โลกัส (Figure 2) ที่พบว่า ให้ผลผลิตที่ชัดเจน ทำซ้ำได้โดยผลจากการทำซ้ำ 2 ครั้งในทุกปฏิกิริยาพีซีอาร์ แสดงให้เห็นความแตกต่างของขนาดดีเอ็นเอระหว่างจีโนไทป์ แถบดีเอ็นเอมีขนาดใกล้เคียงตามที่คาดไว้จากการออกแบบไพรเมอร์ใน EST และมีจำนวนอัลลีลที่พบในสตรอร์เบอร์รี่ทั้ง 13 จีโนไทป์มากเป็นอันดับต้น ๆ จากไพรเมอร์ 6 คู่ของ EST ที่คัดเลือกมาและนำผลไปวิเคราะห์ประสิทธิภาพของไพรเมอร์นั้น ทั้ง 6 โลกัสนี้มีลำดับเบสซ้ำแบบไตร นิวคลีโอไทด์ที่มีลำดับเบสประกอบด้วย ACC GAA CTT CCG GAG และ TTC (Table 4) โลกัส GT640192 และ GT640216 มาจาก *F. vesca* และโลกัส Gi285809264 Gi260659042 Gi260657508 และ Gi226451943 มาจาก *F. x ananassa*

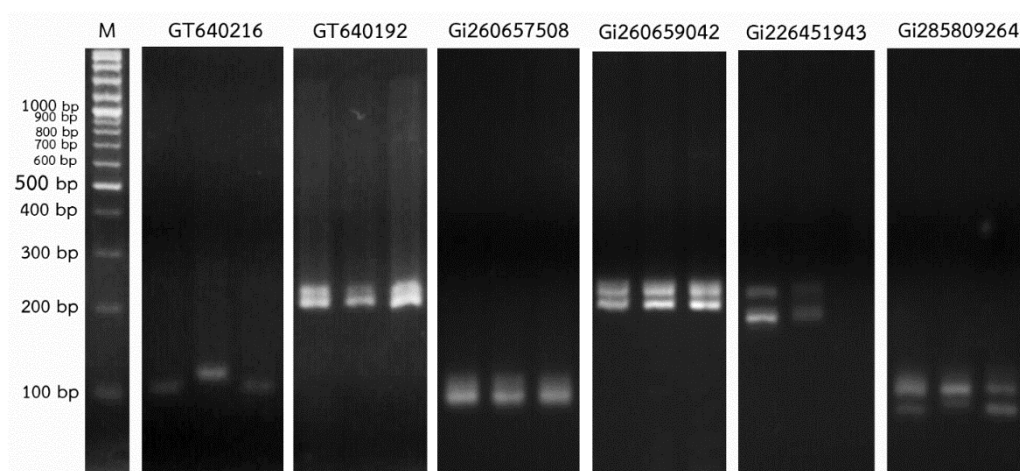


Figure 2 Electrophoresis gel image of PCR products from 6 EST-SSR markers, where the left side represents the Paratchatan 80 variety, the center represents the White Belgium variety, and the right side represents the Garaget variety.

Table 4 Characteristics of Selected EST-SSR Primers in this study

Primer Name	SSR	Forward primer (5'-3')	Reverse Primer (5'-3')	A	PIC	D
GT640192	(ACC)6	CTGTCTATTCTGTCATTGCTC	CCTCCCAGTGTCAGTATTTT	5	0.3775	0.6250
GT640216	(GAA)6	ATGAGGGGGTTTGAGAATTT	ATGAGGGGGTTTGAGAATTT	10	0.4067	0.9206
Gi285809264	(CTT)6	ACCATCTTTGGCTTAACCTTG	AAATGGTGTTACCCACCTTA	6	0.3988	0.9081
Gi260659042	(CCG)7	AGCAACAAAGATAACTTCGAC	GTTAATGCTCTCAAGGATAAGC	6	0.3686	0.8132
Gi260657508	(GAG)6	AAGGAGAAGGAGAAGAAAGAG	TTAAGGAGTTTTTGCAGGTG	7	0.3953	0.5382
Gi226451943	(TTC)6	TTAATCCGTCAGTTGGGAA	AATCTTCTCCAACCATTGCA	7	0.3887	0.8864

A, Number of Alleles; PIC, polymorphic content; D, Discriminating power.

ค่า PIC ของทั้ง 6 โลกัส มีค่าตั้งแต่ 0.3686 ถึง 0.4067 (Table 4) ค่า PIC สามารถสะท้อนระดับความหลากหลายทางพันธุกรรมได้ [26] โดยค่า PIC ถูกจัดกลุ่มเป็นประเภทที่มีความหลากหลายสูง ($PIC > 0.5$) ปานกลาง ($0.5 > PIC > 0.25$) และต่ำ ($PIC < 0.25$) เมื่อพิจารณาค่า PIC ของทุกโลกัสในงานวิจัยนี้ตามทฤษฎีของ [26] แสดงให้เห็นว่า ไพรเมอร์ EST-SSR ที่พัฒนาขึ้นมีความสามารถในการระบุความแตกต่างทางพันธุกรรมของสตรอว์เบอร์รี่จำนวน 13 จีโนไทป์ได้ในระดับปานกลาง นอกจากนี้ค่า D ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการแยกแต่ละจีโนไทป์ก็มีค่าตั้งแต่ 0.5382 ถึง 0.9206 สอดคล้องกับค่า PIC ของแต่ละไพรเมอร์ ทั้งนี้ทุกปฏิกิริยาพีซีอาร์ได้มีการทำซ้ำ 2 ครั้ง โดยใช้อุณหภูมิใน Annealing step ที่ 61°C ส่งผลให้มีความคงที่ของผลผลิตแอมป์ลิคอนที่ทำได้ค่า PIC และ D เท่ากันทุกซ้ำ โดยโลกัส GT640216 และ Gi260659042 มีค่า PIC และ D สูงที่สุดและต่ำที่สุดตามลำดับ Lim et al. [27] รายงานผลการใช้ไพรเมอร์จำนวน 16 คู่ จาก [16, 28, 29] ศึกษาความหลากหลายทางพันธุกรรมของ *F. x ananassa* และ *F. vesca* ทั้งหมด 160 ตัวอย่างจากธนาคารพันธุกรรมของเกาหลีและจีโนไทป์ที่สร้างขึ้นใหม่หรือเก็บรวบรวมเพิ่มจำนวน 130 และ 30 ตามลำดับ โดย [29] ได้พัฒนาเครื่องหมาย SSR จากจีโนมของ *F. vesca* พบ SSR จำนวน 927 โลกัส ที่มีลำดับเบสซ้ำ 4 ถึง 20 bp อย่างน้อย 5 ซ้ำ ได้ออกแบบไพรเมอร์ 45 คู่สำหรับ SSR จำนวน 29 โลกัส แต่เครื่องหมายที่มีความหลากหลายสูงและทำซ้ำได้มีเพียง 8 โลกัส

ความต่างทางพันธุกรรมจากเครื่องหมาย EST-SSRs และการวิเคราะห์กลุ่มจีโนไทป์สตรอว์เบอร์รี่

จากการคำนวณค่าความต่างทางพันธุกรรมระหว่างจีโนไทป์สตรอว์เบอร์รี่จาก 41 อัลลีล ค่าเฉลี่ยความต่างทางพันธุกรรมเรียงจากมากที่สุดไปน้อยที่สุดได้แก่ 0.5495, 0.3837, 0.3353, 0.3112, 0.3106, 0.3103, 0.3037, 0.2980, 0.2856, 0.2853, 0.2845, 0.2786, 0.2752 เรียงตามลำดับจีโนไทป์ดังนี้ สวิตเซอร์แลนด์ เบลเยียมฟังก์ การะเกด พระราชทาน 329 เบลเยียมไวท์อเมริกา พระราชทาน 90 โตคุน พระราชทาน 80 พระราชทาน 88 พระราชทาน 72 โชกุน และอเมริกาจัมโบ้ โดยมีค่าเฉลี่ยความต่างทางพันธุกรรมเท่ากับ 0.3240 จีโนไทป์ที่มีความต่างทางพันธุกรรมมากที่สุด (0.5784) ได้แก่ พันธุ์เบลเยียมไวท์กับสวิตเซอร์แลนด์ ในขณะที่พันธุ์ที่พัฒนาขึ้นในประเทศไทย ได้แก่ พระราชทาน 72 กับพระราชทาน 88 มีพันธุกรรมเหมือนกันมากที่สุด (Table 5)

Table 5 Dissimilarity Matrix for 13 *F. x ananassa* Genotypes

Genotype	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0.0000											
2	0.2261	0.0000										
3	0.1545	0.2564	0.0000									
4	0.2417	0.2456	0.1967	0.0000								
5	0.5635	0.5351	0.5622	0.5077	0.0000							
6	0.2321	0.2444	0.2033	0.2340	0.5313	0.0000						
7	0.2664	0.2442	0.2876	0.2863	0.5326	0.2232	0.0000					
8	0.3043	0.2385	0.2393	0.2456	0.5784	0.2089	0.2535	0.0000				
9	0.4044	0.3803	0.3537	0.3632	0.5556	0.3091	0.3585	0.3239	0.0000			
10	0.2814	0.3699	0.2426	0.3275	0.5591	0.2743	0.3303	0.2968	0.3645	0.0000		
11	0.2531	0.3275	0.2735	0.2971	0.5408	0.2712	0.3070	0.3362	0.4018	0.3217	0.0000	
12	0.2531	0.3275	0.2735	0.3054	0.5510	0.2712	0.3070	0.3362	0.4018	0.3217	0.0083	0.0000
13	0.2469	0.3392	0.3004	0.3249	0.5773	0.2991	0.3274	0.3656	0.3874	0.3333	0.0756	0.0672

(1) Praratchatan 80 (2) Praratchatan 329 (3) Shogun (4) Toukun (5) Switzerland (6) America jumbo (7) America (8) Belgium white (9) Belgium pink (10) Garaget (11) Praratchatan 72 (12) Praratchatan 88 (13) Praratchatan 90

เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ทางพันธุกรรมของสตอร์เบอร์ด้วยวิธี UPGMA โดยใช้ค่าความเหมือนทางพันธุกรรมและสร้างแผนภาพแสดงความสัมพันธ์ทางพันธุกรรมของสตอร์เบอร์ทั้ง 13 จีโนไทป์ สามารถจัดเป็น 3 กลุ่ม โดยกลุ่มที่ 1 มี 1 พันธุ์ ได้แก่ สวิตเซอร์แลนด์ กลุ่มที่ 2 ประกอบด้วยพันธุ์โชกุน โตคุน และเบลเยียมไวท์ ส่วนกลุ่มที่ 3 มี 2 กลุ่มย่อย กลุ่มย่อยที่หนึ่งประกอบด้วยพันธุ์พระราชทาน 80 พระราชทาน 72 พระราชทาน 88 พระราชทาน 90 และการะเกด กลุ่มย่อยที่สองประกอบด้วยพันธุ์พระราชทาน 329 อเมริกาจัมโบ้ อเมริกา เบลเยียมพังก์ (Figure 3) จากการจัดกลุ่มพบว่า พันธุ์พระราชทาน 329 ซึ่งอธิบดีกรมส่งเสริมการเกษตรได้นำเข้ามาจากประเทศอิสราเอลในปี 2544 มีฐานพันธุกรรมต่างจากสตอร์เบอร์ที่มีการนำเข้ามาจากประเทศญี่ปุ่นหรือนำเมล็ดพันธุ์ลูกผสมจากประเทศญี่ปุ่นมาปลูกและคัดเลือกในประเทศไทย เช่น พระราชทาน 72 พระราชทาน 80 หรือพันธุ์พระราชทาน 88 ซึ่งเป็นสายพันธุ์ลูกผสมระหว่างพันธุ์พระราชทาน 80 กับพันธุ์พระราชทาน 60 ที่พัฒนาขึ้นในประเทศไทย สำหรับพันธุ์พระราชทาน 80 นั้น พระบาทสมเด็จพระปรมินทรมหาภูมิพลอดุลยเดช ในหลวงรัชกาลที่ 9 พระราชทาน เมื่อปี พ.ศ. 2550 เป็นสตอร์เบอร์ที่มีลักษณะเด่นที่ให้ผลตก ผลใหญ่ รูปทรงคล้ายหยดน้ำและรูปหัวใจ เนื้อผลแน่นสีแดง ผิวสวย เมื่อสุกมีกลิ่นหอมและฉ่ำน้ำ รสชาติหวานเหมาะกับการบริโภคสด เป็นพันธุ์ที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในปัจจุบัน สำหรับพันธุ์พระราชทาน 329 นั้นนิยมปลูกเพื่อบริโภคและการแปรรูปเป็นพันธุ์ที่เมื่อผลสุกแก่เต็มที่สามารถเก็บไว้ได้นาน จึงสะดวกในการขนส่งมาก [30, 31, 32]

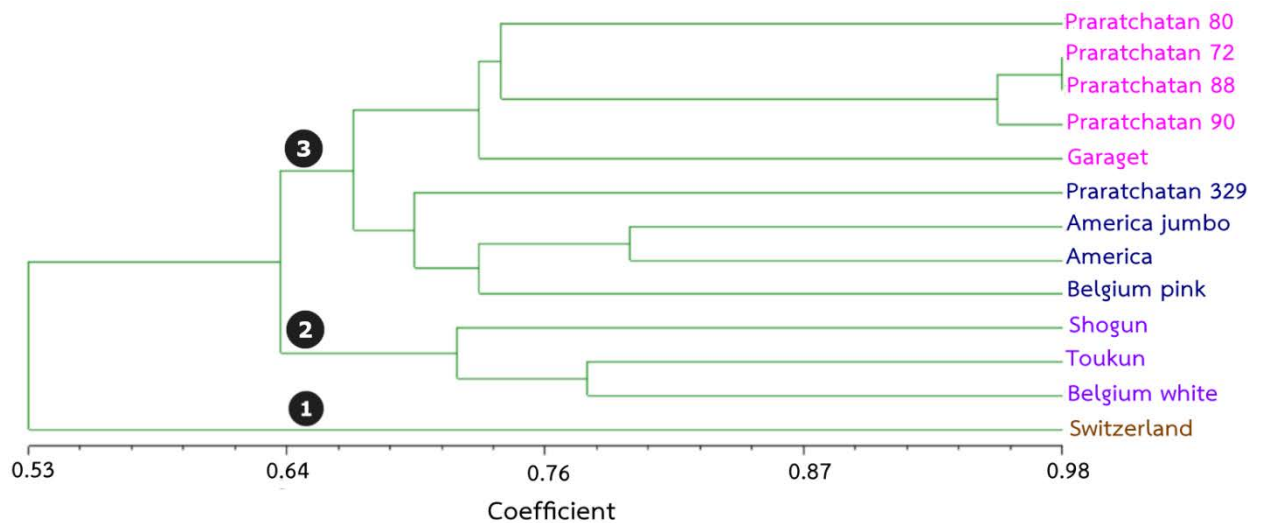


Figure 3 UPGMA dendrogram illustrating the genetic relationship among 13 *F. x ananassa* genotypes based on a similarity coefficient calculated from 41 EST-SSR alleles.

การใช้เครื่องหมาย EST-SSR ช่วยให้ทราบข้อมูลในระดับโมเลกุลซึ่งไม่ได้รับผลกระทบจากการปลูกสตรว์เบอร์รี่ในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน รวมถึงช่วยตรวจสอบจีโนไทป์ในแหล่งเชื้อพันธุกรรมที่อาจมีการตั้งชื่อใหม่ เป็นกระบวนการที่สำคัญในการจัดการทรัพยากรพันธุกรรมและรักษาความเข้มข้นของข้อมูลพันธุกรรมในฐานข้อมูลต่าง ๆ วิธีการนี้ช่วยให้สามารถระบุและแยกแยะจีโนไทป์ที่ซ้ำซ้อนกัน ซึ่งอาจถูกจดทะเบียนภายใต้ชื่อต่าง ๆ ในแหล่งข้อมูลหลายแห่ง ด้วยการติดตามลักษณะของจีโนไทป์และการจัดการข้อมูลพันธุกรรมอย่างมีประสิทธิภาพพร้อมกับความคงของผล รูปทรง ขนาด ความแน่นและความหวานของเนื้อ กลิ่น และความเงาที่ผิวผล ตลอดจนการทนต่อการขนส่ง

4. สรุป

งานวิจัยนี้ได้แยกความแตกต่างทางพันธุกรรมของสตรว์เบอร์รี่ในสปีชีส์ *F. x ananassa* จำนวน 13 จีโนไทป์ด้วยเครื่องหมายโมเลกุล EST-SSRs จำนวน 6 โลกัสที่พัฒนาจากความแตกต่างของจำนวนซ้ำแบบไดเรกต์โอไทป์ใน ESTs ของ *F. vesca* และ *F. x ananassa* จากฐานข้อมูล NCBI ไพร์เมอร์ทั้ง 6 คู่มิค่า PIC ระดับปานกลางซึ่งสามารถแยกพันธุสตรว์เบอร์รี่ที่นำเข้าและที่คัดเลือกเพื่อปลูกในประเทศไทยได้ โดยพันธุ์พระราชทานที่มีฐานพันธุกรรมจากประเทศญี่ปุ่นค่อนข้างมีความใกล้ชิดทางพันธุกรรมกัน จึงควรสร้างลูกผสมกับพันธุ์จากต่างประเทศที่มีความต่างทางพันธุกรรมสูง เช่น สวิตเซอร์แลนด์ ซึ่งมีค่าเฉลี่ยความต่างทางพันธุกรรมมากที่สุดกับทุกพันธุ์ที่นำมาศึกษา นี้ เพื่อนำมาซึ่งสตรว์เบอร์รี่ *F. x ananassa* ที่มีลักษณะดีเด่นยิ่งขึ้น เป็นตัวเลือกให้แก่เกษตรกรและผู้บริโภคตลอดจนการตลาดที่มีขนาดใหญ่ การมีพันธุ์ที่หลากหลายจำนวนมากมีความสำคัญทั้งในด้านการบริโภคและเศรษฐกิจในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณไร่เอกกะตาล ตำบลห้วยยาง อำเภอคอนสาร จังหวัดชัยภูมิ ที่อนุเคราะห์แหล่งพันธุกรรมสตรว์เบอร์รี่ในงานวิจัยนี้ และผู้ทรงคุณวุฒิที่ให้ข้อเสนอแนะเพื่อปรับปรุงและแก้ไขบทความวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] WebMD. (2024). Health Benefits of Strawberries. Retrieved April 21, 2024, from <https://www.webmd.com/diet/health-benefits-strawberry>
- [2] Nathewet, P., Hummer, K. E., Yanagi, T., Iwatsubo, Y., & Sone, K. (2010). Karyotype Analysis in Octoploid and Decaploid Wild Strawberries in *Fragaria* (Rosaceae). *Cytologia*, 75(3): 277-288. <https://doi.org/10.1508/cytologia.75.277>
- [3] Whitaker, V. M., Knapp, S. J., Hardigan, M. A., Edger, P. P., Slovin, J. P., Bassil, N. V., Hytönen, T., Mackenzie, K. K., Lee, S., Jung, S., Main, D., Barbey, C. R., & Verma, S. (2020). A roadmap for research in octoploid strawberry. *Hortic Res.*, 7: 33. <https://doi.org/10.1038/s41438-020-0252-1>
- [4] FAO. (n.d.). Countries by commodity. Accessed from: Website http://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries_by_commodity (Accessed on May 5, 2024).
- [5] Business Research Insights. (2024). Fresh strawberry market size - Forecast till 2031. Accessed from: Website <https://www.businessresearchinsights.com/market-reports/fresh-strawberry-market-109872> (Accessed on May 5, 2024).
- [6] Höfer, M., Drewes-Alvarez, R., Scheewe, P., & Olbricht, K. (2012). Morphological evaluation of 108 strawberry genotypes and consequences for the use of descriptors. *Journal of Berry Research*, 2(4): 191–206.
- [7] Saumitou-Laprade, P., Piquot, Y., Raspé, O., Bernard, J., & Vrieling, K. (1999). Plant DNA Fingerprinting and Profiling. In J.T. Epplen & T. Lubjuhn (Eds.), *DNA Profiling and DNA Fingerprinting. Methods and Tools in Biosciences and Medicine*. Birkhäuser, Basel. https://doi.org/10.1007/978-3-0348-7582-0_2
- [8] Koelling, J., Coles, M. C., Matthews, P. D., & Schwekendiek, A. (2012). Development of new microsatellite markers (SSRs) for *Humulus lupulus*. *Mol. Breed.*, 30: 479–484.
- [9] Kalia, R. K., Rai, M. K., Kalia, S., Singh, R., & Dhawan, A. K. (2011). Microsatellite markers: an overview of the recent progress in plants. *Euphytica*, 177: 309–334.
- [10] Yan, Z., Wu, F., Luo, K. et al. (2017). Cross-species transferability of EST-SSR markers developed from the transcriptome of *Melilotus* and their application to population genetics research. *Sci Rep*, 7: 17959. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-18049-8>
- [11] Huang, X., Yang, L., Jin, Y., & Lin, J. (2017). Generation, Annotation, and Analysis of a Large-Scale Expressed Sequence Tag Library from *Arabidopsis pumila* to Explore Salt-Responsive Genes. *Front. Plant Sci.*, 8: 955.
- [12] Amiteye, S. (2021). Basic concepts and methodologies of DNA marker systems in plant molecular breeding. *Heliyon*, 7(10):e08093. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08093>.
- [13] Kumar, S. P. J., Susmita, C., & Agarwal, D. K. (2021). Assessment of genetic purity in rice using polymorphic SSR markers and its economic analysis with grow-out-test. *Food Anal. Meth.*, 14: 856–864.
- [14] Bushakra, J. M., Lewers, K. S., & Staton, M. E. (2015). Developing expressed sequence tag libraries and the discovery of simple sequence repeat markers for two species of raspberry (*Rubus* L.). *BMC Plant Biol.*, 15: 258.
- [15] Liston, A., Cronn, R., & Ashman, T. L. (2014). *Fragaria*: a genus with deep historical roots and ripe for evolutionary and ecological insights. *Am. J. Bot.*, 101(10): 1686-99. <https://doi.org/10.3732/ajb.1400140>
- [16] Isobe, S. N., Hirakawa, H., Sato, S., Maeda, F., Ishikawa, M., Mori, T., Yamamoto, Y., Shirasawa, K., Kimura, M., & Fukami, M. (2013). Construction of an integrated high density simple sequence repeat linkage map in cultivated strawberry (*Fragaria × ananassa*) and its applicability. *DNA Res.*, 20(1): 79-92.
- [17] Shulaev, V., Sargent, D. J., Crowhurst, R. N., Mockler, T. C., Folkerts, O., Delcher, A. L., et al. (2010). The genome of woodland strawberry (*Fragaria vesca*). *Nat. Genet.*, December 26;43(2): 109–16. <https://doi.org/10.1038/ng.740>

- [18] Hilmarsson, H. S., Hytönen, T., Isobe, S., Göransson, M., Toivainen, T., & Hallsson, J. H. (2017). Population genetic analysis of a global collection of *Fragaria vesca* using microsatellite markers. PLoS One, August 30;12(8):e0183384. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0183384>
- [19] Rivarola, M., Chan, A. P., Liebke, D. E., Melake-Berhan, A., Quan, H., Cheung, F., et al. (2011). Abiotic Stress-Related Expressed Sequence Tags from the Diploid Strawberry *Fragaria vesca* f. *semperflorens*. Plant Genome, March 1;4(1): 12–23.
- [20] Wangsomnuk, P. P., Rittithum, W., & Ruttawat, B. (2014). Comparative analysis of DNA extracted from mature leaves of rubber tree and application for amplification. Int. J. Bioflux Soc., 6(1): 45-57.
- [21] Amiryousefi, A., Hyvönen, J., & Poccai, P. (2018). iMEC: Online Marker Efficiency Calculator. Appl Plant Sci., June 24;6(6):e01159. <https://doi.org/10.1002/aps3.1159>
- [22] Dice, L. R. (1945). Measures of the amount of ecologic association between species. Ecology, 26: 297-302.
- [23] Perrier, X., & Jacquemoud-Collet, J. P. (2006). DARwin Software. Retrieved April 13, 2024, from <http://darwin.cirad.fr/darwin>
- [24] Rohlf, F.J. (2000) NTSYS-pc: Numerical Taxonomy and Multivariate Analysis System, Version 2.2. Exeter Software. Setauket, New York.
- [25] Folta, K. M., Staton, M., Stewart, P. J., et al. (2005). Expressed sequence tags (ESTs) and simple sequence repeat (SSR) markers from octoploid strawberry (*Fragaria × ananassa*). BMC Plant Biol., 5:12. <https://doi.org/10.1186/1471-2229-5-12>
- [27] Lim, S., Lee, J., Lee, H. J., Park, K.-H., Kim, D.-S., Min, S. R., Jang, W. S., Kim, T. I., & Kim, H. (2016). The genetic diversity among strawberry breeding resources based on SSRs. J. Agric. Sustain., 12(3): 123-134. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2016-0046>
- [26] Botstein, D., White, R. L., Skolnick, M., & Davis, R. W. (1980). Construction of a Genetic-Linkage Map in Man Using Restriction Fragment Length Polymorphisms. Am. J. Hum. Genet., 32: 314–331.
- [28] Chambers, A., Carle, S., Njuguna, W., Chamala, S., Bassil, N., Whitaker, V. M., Barbazuk, W. B., & Folta, K. M. (2013). A genome-enabled, high-throughput, and multiplexed fingerprinting platform for strawberry (*Fragaria L.*). Molecular Breeding, 31: 615-629.
- [29] Govan, C., Simpson, D., Johnson, A., Tobutt, K., & Sargent, D. (2008). A reliable multiplexed microsatellite set for genotyping *Fragaria* and its use in a survey of 60 *F. × ananassa* cultivars. Mol. Breed., 22: 649-661.
- [30] เทคโนโลยีชาวบ้าน. (2560). สายพันธุ์สตรอเบอร์รี่ ที่นิยมปลูกเชิงการค้า. เข้าถึงได้จาก : เว็บไซต์ https://www.technologychaoban.com/bullet-news-today/article_17066 (เข้าถึงเมื่อ 6 พฤษภาคม 2567).
- [31] White Crane. (2023). 10 พันธุ์สตรอว์เบอร์รี่พระราชทาน. เข้าถึงได้จาก : เว็บไซต์ <https://www.whitecranev88.com/research/%E0%B8%9E%E0%B8%B7%E0%B8%8A/105/> (เข้าถึงเมื่อ 6 พฤษภาคม 2567).
- [32] ณรงค์ชัย พิพัฒน์ธนวศ์ (2560). งานวิจัยสตรอว์เบอร์รี่โครงการหลวง กับมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. เข้าถึงได้จาก : เว็บไซต์ <https://www3.rdi.ku.ac.th/?p=40028> (เข้าถึงเมื่อ 6 พฤษภาคม 2567).

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่หลากหลายเพื่อทำนายการสกัดสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของกะหล่ำปลีแดง ด้วยเอทานอล

The various computer programs to predict total phenolic content extraction of red cabbage by ethanol

นิตยา จันกา¹ และ ชัยวัฒน์ รัตนมีชัยสกุล^{2*}

Nittaya Junka¹ and Chaiwat Rattanamechaiskul^{2*}

¹สาขาเทคโนโลยีการผลิตพืช คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม จังหวัดนครปฐม 73000

²ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร 86160

¹Division of Crop Production Technology, Faculty of Science and Technology, Nakhon Pathom Rajabhat University, Nakhon Pathom, 73000

²Department of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Prince of Chumphon Campus, Chumphon, 86160

*Corresponding author: Chaiwat Rattanamechaiskul, e-mail address: chaiwat.ra@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

กะหล่ำปลีแดงเป็นหนึ่งในพืชที่มีสารต้านอนุมูลอิสระสูงโดยมาจากสีของใบที่ประกอบด้วยสารฟีนอลิกจำนวนมาก กะหล่ำปลีแดงจึงมีศักยภาพที่จะนำมาสกัดในฐานะเป็นสารตั้งต้นสำหรับอุตสาหกรรมอาหารเสริม การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อทำนายการสกัดสารฟีนอลิกทั้งหมดคือวัตถุประสงค์ของการศึกษาในงานวิจัยนี้ กะหล่ำปลีแดงถูกสกัดในขอบเขตของความเข้มข้นเอทานอล 50 ถึง 95 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้ระยะเวลาการสกัด 2 ถึง 18 ชั่วโมง โปรแกรมคอมพิวเตอร์ถูกพัฒนาบนพื้นฐานของทฤษฎีสมการปฏิกิริยาทางเคมีและพื้นผิวตอบสนองเพื่อหาโปรแกรมที่เหมาะสมที่สุด สัมประสิทธิ์การตัดสินใจและ Root mean Square Error (RMSE) ถูกใช้ในการประเมินความเหมาะสมของโปรแกรม ผลการศึกษพบว่า โปรแกรมคอมพิวเตอร์บนพื้นฐานของทฤษฎีพื้นผิวตอบสนองแบบสมการกำลังสองเป็นโปรแกรมที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการทำนายความเข้มข้นของเอทานอลและระยะเวลาในการสกัด เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงสุดและมีค่า RMSE ต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับโปรแกรมอื่นๆ

คำสำคัญ: โปรแกรมคอมพิวเตอร์, สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด, กะหล่ำปลีแดง

Abstract

Red cabbage is one of many plants that high antioxidant activity because its leaves are colorful and have a large quantity of total phenolic content. It has potential to extract as reactant in an industrial for supplementary food. The develop computer programming to predict total phenolic content extraction of red cabbage by ethanol was the objective of this study. The red cabbage was extracted in the range of ethanol concentration of 50 – 95% and extraction time of 2 – 18 hr. The computer programs were developed base on the theory of chemical reaction and respond surface methodology. To find the appropriate program, it was evaluated by coefficient of determination (R^2) and root mean square error. The results revealed that the computer program base on the theory of respond surface methodology by second degree equation was appropriate program. It had the highest R^2 and the lowest RMSE values compared with the other programs

Keywords: computer programs, total phenolic content, red cabbage

1. บทนำ

กะหล่ำปลีแดงมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Brassica oleraceae* var. *rubra* ใบของกะหล่ำปลีแดงนั้นอาจมีสีแดงหรือสีม่วง กะหล่ำปลีแดงเป็นพืชที่มีใยอาหารสูง มีคุณค่าทางโภชนาการหลากหลายชนิด นอกจากนี้ยังมีสารแอนโทไซยานิน ซึ่งเป็นหนึ่งในกลุ่มสารฟีนอลิกทั้งหมด ทำให้มีสารต้านอนุมูลอิสระมากกว่ากะหล่ำปลีธรรมดา กะหล่ำปลีแดงจึงจัดได้ว่าเป็นอาหารเพื่อสุขภาพ [1-5]

ปัจจุบัน ผู้บริโภคมีแนวโน้มนิยมบริโภคอาหารเพื่อสุขภาพเพิ่มมากขึ้น กะหล่ำปลีแดงจึงได้รับความนิยมในการบริโภคเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตาม ด้วยวิถีชีวิตในปัจจุบันที่เร่งรีบ อาจทำให้การบริโภคกะหล่ำปลีแดงสดนั้นมีความยุ่งยาก การใช้กะหล่ำปลีแดงเป็นวัตถุดิบในการสกัดเป็นสารตั้งต้นของสารต้านอนุมูลอิสระในอุตสาหกรรมอาหารเสริมจึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือก เนื่องจาก ใบของกะหล่ำปลีแดงนั้นมีศักยภาพทั้งในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ สำหรับกระบวนการสกัดสารต้านอนุมูลอิสระนั้น นิยมใช้เอทานอลในการสกัด นอกจากนี้สภาวะของการสกัดนั้นค่อนข้างมีความซับซ้อน เนื่องจากเกี่ยวพันถึงความเข้มข้นของเอทานอลและระยะเวลาในการสกัด [6-7] จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ยังไม่มีรายงานการประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์มาช่วยในการทำนายปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดภายหลังจากการสกัดที่สภาวะต่าง ๆ

งานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของทฤษฎีสมการปฏิกิริยาทางเคมีและพื้นผิวตอบสนอง เพื่อประยุกต์ใช้ในการทำนายสภาวะที่เหมาะสมของการสกัดสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของกะหล่ำปลีแดง

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 วัสดุและวิธีการสกัด

กะหล่ำปลีแดงที่ใช้เป็นของมูลนิธิโครงการหลวง (Royal Project Foundation) กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย การสกัดสารฟีนอลิกทั้งหมดใช้วิธีการของ Swain and Hillis (1959) [8] โดยสภาวะการสกัดมีขอบเขตของความเข้มข้นของเอทานอล 50 ถึง 95 เปอร์เซ็นต์และระยะเวลาการสกัด 2 ถึง 18 ชั่วโมง ภายหลังจากการสกัดสารฟีนอลิกทั้งหมดถูกรายงานในหน่วย mg/100 g fresh weight

2.2 ทฤษฎีพื้นฐาน

โปรแกรมคอมพิวเตอร์เขียนด้วยโปรแกรม Matlab และ Phthon ซึ่งถูกพัฒนามาบนพื้นฐานของทฤษฎีสมการปฏิกิริยาทางเคมีและสมการพื้นผิวตอบสนอง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

สมการปฏิกิริยาทางเคมี [9]

สมการปฏิกิริยาทางเคมีอันดับศูนย์ (Zero order rate reaction)

$$\frac{d[TPC]}{dt} = k \quad (1)$$

$$TPC(t) = TPC_i + kt \quad (2)$$

สมการปฏิกิริยาทางเคมีอันดับหนึ่ง (First order rate reaction)

$$\frac{d[TPC]}{dt} = k[TPC] \quad (3)$$

$$TPC(t) = TPC_i * \exp(kt) \quad (4)$$

สมการปฏิกิริยาทางเคมีอันดับสอง (Second Zero order rate reaction)

$$\frac{d[TPC]}{dt} = k[TPC]^2 \quad (5)$$

$$TPC(t) = \frac{1}{(1/TPC_i) - (kt)} \quad (6)$$

เมื่อ k = ค่าปฏิกิริยาทางเคมี (hr^{-1})

t = ระยะเวลาการสกัด (hr)

TPC = สารฟีนอลิกทั้งหมด (mg/100 g fresh weight)

TPC_i = สารฟีนอลิกทั้งหมดเริ่มต้น (mg/100 g fresh weight)

สมการพหุคูณตอบสอง [10]

สมการพหุคูณตอบสองอันดับหนึ่ง

$$TPC = f(Ethanol, Time) \quad (7)$$

$$TPC = \beta_0 + \beta_1 Ethanol + \beta_2 Time \quad (8)$$

สมการพหุคูณตอบสองอันดับสอง

$$TPC = f(Ethanol, Time) \quad (9)$$

$$TPC = \beta_0 + \beta_1 Ethanol + \beta_2 Time + \beta_3 Ethanol^2 + \beta_4 Time^2 + \beta_5 Ethanol * Time \quad (10)$$

เมื่อ $Ethanol$ = ความเข้มข้นของเอทานอล (%) $Time$ = ระยะเวลาการสกัด (hr) β = ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการพหุคูณตอบสอง

3. ผลการศึกษาและการอภิปรายผล

ตารางที่ 1 แสดงค่าปฏิกิริยาทางเคมีและค่าสัมประสิทธิ์ของสมการพหุคูณตอบสองที่ได้จากโปรแกรมเพื่อใช้ในการทำนายปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมด ค่า k แสดงถึง ค่าปฏิกิริยาทางเคมีของสมการปฏิกิริยาทางเคมีอันดับศูนย์ (สมการที่ 2) สมการปฏิกิริยาทางเคมีอันดับหนึ่ง (สมการที่ 4) สมการปฏิกิริยาทางเคมีอันดับสอง 2 (สมการที่ 6) นอกจากนี้ตารางที่ 1 ยังแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของสมการพหุคูณตอบสองที่ใช้ในการคำนวณปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดของสมการที่ 8 และสมการที่ 10

ภายหลังจากการนำค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ ในตารางที่ 1 ทำนายค่าปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดจะได้ผลการเปรียบเทียบระหว่างปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดจากการทดลองเปรียบเทียบกับปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดจากการทำนายดังตารางที่ 2 นอกจากนี้ตารางยังแสดงค่าปริมาณสารฟีนอลิกเริ่มต้นของกะหล่ำปลีแดงซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.8 mg/100 g fresh weight จากผลการเปรียบเทียบพบว่า การทำนายปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์บนพื้นฐานของทฤษฎีพหุคูณตอบสองแบบสมการกำลังสอง (สมการที่ 10) เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ทำนายปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดได้สอดคล้องมากที่สุด เนื่องจากสมการที่ใช้ในการทำนายนอกจากที่มีเทอมของตัวแปรต้นกำลังหนึ่งแล้วยังมีเทอมของตัวแปรต้นกำลังสองและเทอมของตัวแปรต้นที่ปฏิสัมพันธ์ (interaction) กันระหว่างความเข้มข้นของเอทานอลและระยะเวลาในการสกัด [10] ผลดังกล่าวทำให้มีค่า R^2 สูงที่สุดที่ 0.7292 และค่า RMSE ต่ำที่สุดที่ 40 mg/100 g fresh weight ดังแสดงในตารางที่ 3

Table 1 Coefficient of chemical reaction equations and RSM equations

Coefficient	Chemical reaction equations			RSM equations	
	Zero	First	Second	First	Second
$k_{@50\%ethanol}$	12.5800	0.2337	0.0195	-	-
$k_{@70\%ethanol}$	13.1700	0.2362	0.0196	-	-
$k_{@95\%ethanol}$	12.8600	0.2348	0.0195	-	-
β_0	-	-	-	83.4127	-31.3503
β_1	-	-	-	0.0664	2.5809
β_2	-	-	-	6.7704	33.6211
β_3	-	-	-	-	-0.0177
β_4	-	-	-	-	0.0369
β_5	-	-	-	-	-1.6560

Table 2 Comparison of experimental TPC and predicted TPC at different extraction conditions

Ethanol concentration (%)	Extraction time (hr)	TPC (mg / 100g sample)	TPC predicted by chemical reaction			TPC predicted by RSM	
			Zero	First	Second	First	Second
50	2	168.3	28.0	4.5	3.1	100.3	117.7
	8	177.4	103.4	18.2	5.0	140.9	231.1
	18	180.8	229.2	188.0	178.5	208.6	155.2
70	2	177.8	29.1	4.5	3.1	101.6	128.3
	8	185.1	108.2	18.5	5.0	142.2	246.1
	18	189.1	239.9	196.6	190.7	209.9	177.6
95	2	174.0	28.5	4.5	3.1	103.3	121.5
	8	181.6	105.7	18.3	5.0	143.9	244.9
	18	184.3	234.3	191.7	184.4	211.6	185.6
Initial TPC		2.8					

Table 3 R² and RMSE of validated TPC

R ² / RMSE	TPC predicted by chemical reaction			TPC predicted by RSM	
	Zero	First	Second	First	Second
R ²	-	-	-	0.6896	0.7292
RMSE	85.4	117.5	122.6	42.8	40.0

4. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในขอบเขตงานวิจัยนี้ การนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาช่วยในการทำนายปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดภายหลังจากการสกัดที่สภาวะต่าง ๆ นั้นมีความเป็นไปได้ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่อยู่บนพื้นฐานของทฤษฎีสมการพื้นผิวตอบสนองแบบกำลังสองนั้นเหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการทำนายปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของกะหล่ำปลีแดงภายหลังจากการสกัดด้วยความเข้มข้นของเอทานอลและระยะเวลาต่าง ๆ โปรแกรมดังกล่าวมีค่า R² สูงที่สุดที่ 0.7292 และค่า RMSE ต่ำที่สุดที่ 40 mg/100 g fresh weight

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Mizgier, P., Kucharska, Z. A., Sokół-Łe, A., Kolniak-Ostek, J., Kidon, M. and Fecka, I. 2016. Characterization of phenolic compounds and antioxidant and anti-inflammatory properties of red cabbage and purple carrot extracts. *J. Funct. Food.* 21: 133-146.
- [2] Tan, S., Lan, X., Chen, S., Zhong, X. and Li, W. 2023. Physical character, total polyphenols, anthocyanin profile and antioxidant activity of red cabbage as affected by five processing methods. *Food Res. Int.* 169: 112929.
- [3] Guan, Y., Ji, Y., Yang, X., Pang, L., Cheng, J., Lu, X., Zheng, J., Yin, L. and Hu, W. 2023. Antioxidant activity and microbial safety of fresh-cut red cabbage stored in different packaging films. *LWT.* 175: 114478.
- [4] Murador, C. D., Mercadante, Z. A. and Rosso, V. 2016. Cooking techniques improve the levels of bioactive compounds and antioxidant activity in kale and red cabbage. *Food Chem.* 196: 1101-1107.
- [5] Wiczowski, W., Szawara-Nowak, D. and Romaszko, J. 2016. The impact of red cabbage fermentation on bioavailability of anthocyanins and antioxidant capacity of human plasma. *Food Chem.* 190: 730-740.
- [6] Ghareaghajlou, N., Hallaj-Nezhadi, S. and Ghasempour, Z. 2021. Red cabbage anthocyanins: Stability, extraction, biological activities and applications in food systems. *Food Chem.* 365: 130482.
- [7] Chandrasekhar, J., Madhusudhan, C. M. and Raghavarao, S. M. S. K. 2012. Extraction of anthocyanins from red cabbage and purification using adsorption. *Food Bioprod. Process.* 90: 615-623.
- [8] Swain, T. and Hillis, W. E. 1959. The phenolic constituents of *Prunus domestica* I- the quantitative analysis of phenolic constituents. *J. Sci. Food Agr.* 10: 63-68.

-
- [9] Junka, N., Rattanamechaikul, C., Prachayawarakorn, S. and Soponronnarit, S. 2018. Drying guideline to control colour quality of para rubber sheet by computation method. Biosyst Eng. 176: 151-161.
- [10] Myers, R., Montgomery, D. and Anderson-Cook, C. 2009. Response Surface Methodology: Process and product optimization using designed experiments; John Wiley & Sons Inc, New Jersey, USA, 219–265.



Sponsor