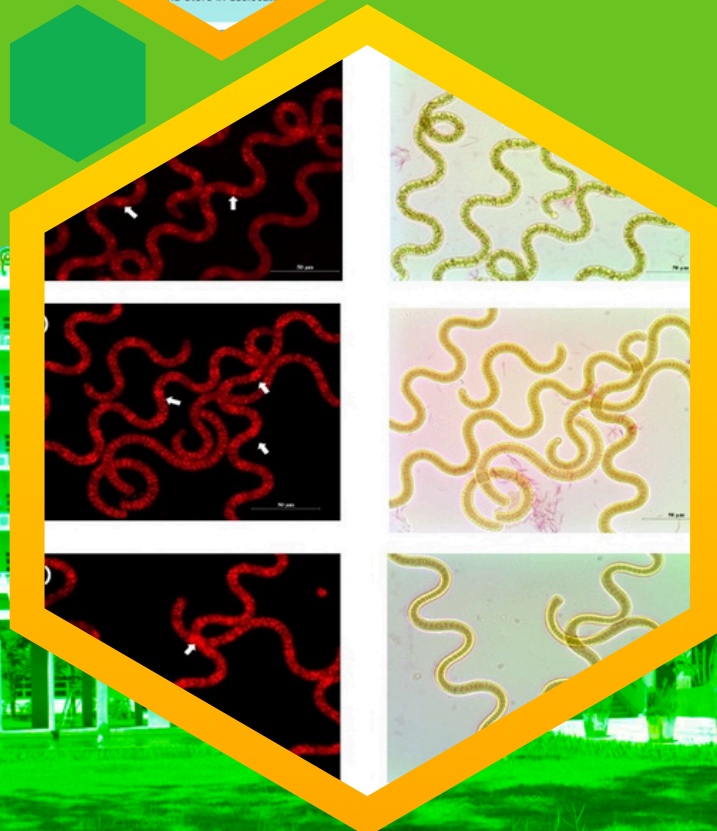
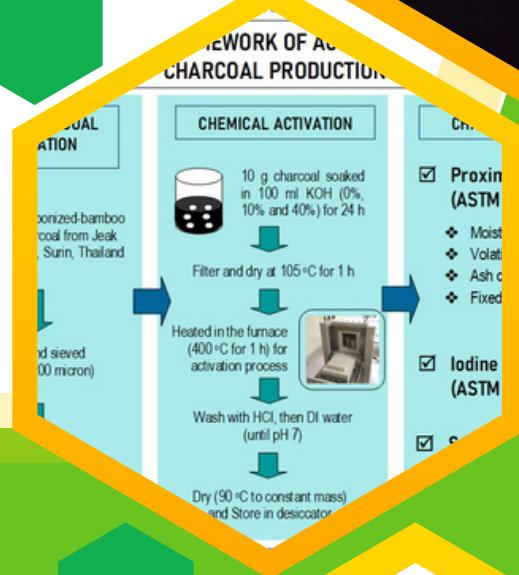
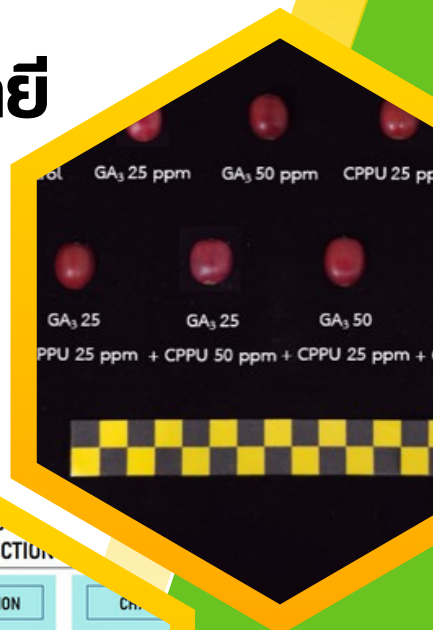
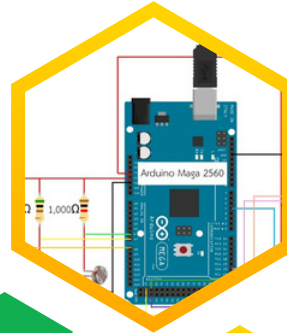




Volume 7

No.2 May - August 2026



ISSN 3057-0174 (Print)
ISSN 3057-0182 (Online)





คำนำ

วารสารวิจัยเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.อีสาน เป็นวารสารที่จัดทำขึ้นเพื่อตีพิมพ์บทความที่เป็นประโยชน์ต่อวงการวิชาการและบุคคลทั่วไป โดยมีสาขาย่อย 3 สาขา ได้แก่ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เกษตรศาสตร์ และวิศวกรรมศาสตร์ โดยวารสารฉบับนี้ได้เผยแพร่ผลงานที่มีเนื้อหาทางด้านวิชาการ การสร้างองค์ความรู้ การบูรณาการ และข้อมูลอันเป็นประโยชน์จากคณาจารย์ นักศึกษา และผู้เชี่ยวชาญในสาขาวิชาต่าง ๆ เพื่อจะนำไปสู่การยกระดับคุณภาพชีวิต รวมทั้งก่อให้เกิดประโยชน์ทางด้านวิชาการแก่ผู้ที่สนใจทั่วไป โดยมีบทความ 11 เรื่อง ที่มีเนื้อหาหลากหลาย ได้แก่ 1) สารประกอบฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ทั้งหมดและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดอะโวคาโด (*Persea americana* Mill.) ที่ปลูกในอำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์ 2) ผลของ GA₃ และ CPPU ต่อการพัฒนาคุณภาพผลกาแฟอาราบิก้า 3) ฤทธิ์การต้านออกซิเดชันของผงใบอ่อนข้าวหอมมะลิเพื่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์คุกกี้เพื่อสุขภาพ 4) การผลิต การตลาด และแนวทางการส่งเสริมแพะเนื้อ อำเภอหนองกี่ จังหวัดบุรีรัมย์ 5) การออกแบบและการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมตู้อบฆ่าเชื้อแบคทีเรียแผงโซลาร์สำหรับเลี้ยงจิ้งหรีด 6) การใช้ตัวต้านทานแบบปรับค่าตามแสงประยุกต์เป็นไพราโนมิเตอร์ต้นทุนต่ำ 7) การบำบัดแอมโมเนียจากน้ำเสียฟาร์มโคนมด้วยกระบวนการทางชีวภาพเพื่อผลิตชีวมวลไฟโคไซยานินและพอลิไฮดรอกซีบิวทิเรตจากไซยาโนแบคทีเรีย *Arthrospira platensis* 8) ผลของการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากถ่านไม้ไผ่ 9) การพัฒนาระบบติดตามและประเมินการเจริญเติบโตของต้นหม่อนด้วยเทคโนโลยีรีโมทเซนซิง 10) การผลิตสารสีจากเชื้อรา *Monascus* sp. ด้วยกระบวนการหมักแบบอาหารแข็งโดยใช้วัสดุเหลือทิ้งจากทุเรียน 11) การพัฒนาระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะในแปลงปลูกหม่อนไล่ร้อนด้วยคอมพิวเตอร์แบบฝังตัว

โดยบทความได้ผ่านการพิจารณา และการกลั่นกรอง จากผู้ทรงคุณวุฒิทั้งภายในและภายนอกมหาวิทยาลัย กองบรรณาธิการขอขอบคุณนักวิจัยทุกท่านที่ได้ส่งบทความเข้ามาขอรับการตีพิมพ์ในวารสาร และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าบทความในวารสารฉบับนี้จะก่อให้เกิดประโยชน์ทางวิชาการของประเทศไทยต่อไป

กองบรรณาธิการ
วารสารเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.อีสาน



วารสารเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.อีสาน
Agriculture & Technology RMUTI Journal

วัตถุประสงค์ เพื่อเผยแพร่ความรู้และผลงานวิชาการทางด้านการเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี รวมทั้งเป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนความคิดเห็นทางวิชาการเชิงสร้างสรรค์ เพื่อส่งเสริมอาจารย์ นักวิชาการ นักวิจัย นักศึกษา และผู้ที่เกี่ยวข้องให้มีส่วนร่วมในการถ่ายทอดองค์ความรู้ เทคโนโลยีหรือนวัตกรรมแก่สังคม

เจ้าของ/สำนักงานวารสาร คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี 145 หมู่ 15 ต.นอกเมือง อ.เมืองสุรินทร์ จ.สุรินทร์ 32000
โทร. 044-153093 โทรสาร. 044-153093
E-mail: atj.rmuti@gmail.com
Website: <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/atj/index>

ที่ปรึกษาบรรณาธิการ	รศ.ดร.สำเนาวั	เสาวกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วข.สุรินทร์
หัวหน้ากองบรรณาธิการ	อ.ทรงยศ	กิตติชนม์ธวัช	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วข.สุรินทร์
บรรณาธิการ	ผศ.ดร.วุฒิชัย	สิทธิวงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วข.สุรินทร์
รองบรรณาธิการ	ดร.พงศ์ภัทร	เกียรติประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วข.สุรินทร์
ผู้ช่วยบรรณาธิการ	ดร.ปวีณา	สาตีทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วข.สุรินทร์
	ดร.อัญวิณ์	ไชยวิชระกัมพล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วข.สุรินทร์

กองบรรณาธิการผู้ทรงคุณวุฒิ

ศ.ดร.ธเนศ	เสถียรนาม	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศ.ดร.ปิยะดา	ธีระกุลพิศุทธิ์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น (เกษียณอายุ)
ศ.ดร.เมธา	วรรณพัฒน์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น (เกษียณอายุ)
ศ.ดร.สนั่น	จอกลอย	มหาวิทยาลัยขอนแก่น (เกษียณอายุ)
ศ.ดร.สิงหนาท	พวงจันทร์แดง	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศ.ดร.อนันต์	พลธานี	มหาวิทยาลัยขอนแก่น (เกษียณอายุ)
ศ.ดร.อลงกลด	แทนอมทอง	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศ.ดร.อุทัยรัตน์	ณ นคร	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ศ.ดร.สุขสันต์	ห่อพิบูลสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ศ.ดร.สุวัจน์	อัญรส	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ศ.ดร.ทวนทอง	จุฑาเกตุ	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
พล.อ.ต.ศ.ดร.สรภักข	ศรีเกษม	โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช (เกษียณอายุ)

กองบรรณาธิการ

ศ.ดร.กุลเชษฐ์	เพียรทอง	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ศ.ดร.สุรพล	แสนสุข	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รศ.ดร.พนัธวัช	สัมพันธ์พานิช	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รศ.ดร.สุพรรณ	สุดสนธิ์	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
รศ.ดร.ธนัชฐา	ทรรพนันท์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.บุญเสถียร	บุญสูง	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.อรพินท์	จินตสถาพร	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.ปรเมศ	บรรเทิง	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร.รัชพล	สันติวรกร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร.สิริภัทร	เชี่ยวชาญวัฒนา	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร.วิศิษฐ์พร	สุขสมบัติ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รศ.ดร.กริช	สมกันธา	มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี
รศ.ดร.วีระเวทย์	อุทไธ	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
รศ.ดร.บรรจง	บุญชม	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.บัณฑิต	ยวงสร้อย	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร.พัชริน	สงศรี	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร.ภาณุพล	หงษ์ภักดี	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผศ.ดร.อังคณา	บุญยิด	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผศ.ดร.สุจินต์	จิระชีวะนันท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.อรอนงค์	ภูสีฤทธิ์	มหาวิทยาลัยราชภัฏร้อยเอ็ด
ผศ.ดร.เอื้อมพร	จันทร์สองดวง	มหาวิทยาลัยราชภัฏร้อยเอ็ด
ผศ.ดร.พัชรินทร์	อาตมียะนันท์	มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล
ผศ.ดร.วิระพันธ์	สีหานาม	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
รศ.ดร.รัตนจิรา	รัตนประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วข.สุรินทร์
ผศ.ดร.ศุภลักษณ์	เกตุดากแดด	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วข.สุรินทร์
ผศ.ดร.น.สพ.สุทธิศล	ปิยะเดชสุนทร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วข.สุรินทร์
ผศ.ดร.ปรัชญา	บำรุงกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วข.สุรินทร์
ผศ.ดร.วิภาสทธิ์	หิรัญรัตน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วข.สุรินทร์
ผศ.ดร.ลัดดาวัลย์	คำมะปะนา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วข.สุรินทร์
ผศ.ดร.นิตยา	ภูงาม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วข.สุรินทร์
ดร.เรวัฒน์	เติมกล้า	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วข.สุรินทร์
ดร.สุทธิชาน์	นิลฤทธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วข.สุรินทร์
ดร.สุริยา	อุดด้วง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วข.สุรินทร์
ดร.วรรณิษฐ์	เมืองมาหล้า	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วข.สุรินทร์

กำหนดออกวารสาร

พิมพ์เผยแพร่ราย 4 เดือน

- ฉบับที่ 1 ประจำปี มกราคม – เมษายน
- ฉบับที่ 2 ประจำปี พฤษภาคม – สิงหาคม
- ฉบับที่ 3 ประจำปี กันยายน – ธันวาคม

พิมพ์ที่

คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์

ต้นฉบับที่ได้รับการตีพิมพ์ถือเป็นลิขสิทธิ์ของวารสารเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยีและบทความในวารสารเป็นแนวคิดของผู้แต่งมิใช่เป็นแนวคิดของคณะกรรมการจัดทำวารสาร และมิใช่เป็นความรับผิดชอบของคณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ
ปีที่ 7 ฉบับที่ 2

รศ.ดร.วีระเวทย์ อุทโธ
รศ.ดร.เพ็ญ ฝาใต้
ผศ.ดร.พรรณวิภา แพงศรี
ผศ.ดร.อรสุรางค์ โสภิพันธ์
ผศ.ดร.สุนิดา เมืองโคตร
ผศ.ดร.เทียมมะณี รัตนวีระพันธ์
ผศ.ดร.วิไลพร อินสุวรรณ
ผศ.ดร.อรลดา เจือจันทร์
ผศ.ดร.ลัดดาวัลย์ คำมะปะนา
ผศ.ดร.ปิยะวัฒน์ ศรีธรรม
ผศ.ดร.กนกกานต์ ลายสนธิ์
ผศ.ดร.ชนะดล สุภาพงษ์
ผศ.ดร.ภาคภูมิ จันทศรี
ผศ.ดร.สุจินต์ จิระชีวะนันท์
ผศ.ดร.ณัฐวุฒิ ศรีวิบูลย์
ผศ.สุรสิทธิ์ พอค้า
ผศ.ดร.เอกรินทร์ สารีพัว
ผศ.ดร.ชญานนธ์ แสงมณี
ผศ.ประทีป ตุ่มทอง
ผศ.นราศักดิ์ วงษ์วาสน์
ดร.วาริรัตน์ แสนมานิช
ดร.จิระวัลย์ โคตรศักดิ์
ดร.ธนภูมิ บุญมี
ดร.ชัชวาลย์ แสงฤทธิ์

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี
มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์
มหาวิทยาลัยบูรพา
มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วข.สุรินทร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วข.สุรินทร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วข.สุรินทร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วข.สุรินทร์
มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี
มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี
มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วข.สุรินทร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วข.สุรินทร์
มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยนครพนม

บทบรรณาธิการ



คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

วิทยาเขตสุรินทร์

วารสารเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มทร.อีสาน (Agriculture & Technology RMUTI Journal) เป็นวารสารทางวิชาการด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่มีผู้ทรงคุณวุฒิ (Peer review) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่ความรู้และผลงานวิชาการทางด้านเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี รวมทั้งเป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนความคิดเห็นทางวิชาการเชิงสร้างสรรค์ เพื่อส่งเสริมอาจารย์ นักวิชาการ นักวิจัย นักศึกษา และผู้ที่เกี่ยวข้องให้มีส่วนร่วมในการถ่ายทอดองค์ความรู้ เทคโนโลยี หรือนวัตกรรมแก่สังคม ทำการเผยแพร่ในรูปแบบวารสารอิเล็กทรอนิกส์ฐานข้อมูลระบบออนไลน์ และรูปเล่ม จำนวน 3 ฉบับต่อปี ในทุก ๆ 4 เดือน โดยฉบับที่ 1 ระหว่างเดือนมกราคม-เมษายน ฉบับที่ 2 ระหว่างเดือนพฤษภาคม-สิงหาคม และฉบับที่ 3 ระหว่างเดือน กันยายน-ธันวาคม เปิดรับบทความที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ เกษตรศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ให้เป็นไปตามรูปแบบของวารสาร

คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี ได้เห็นความสำคัญของการพัฒนาและส่งเสริมผลงานวิจัยเพื่อเผยแพร่เชิงบูรณาการให้มีคุณภาพ เกิดประโยชน์อย่างแท้จริง สำหรับฉบับนี้ มีบทความวิจัยด้วยกัน 11 เรื่อง ประกอบด้วยสาขาเกษตรศาสตร์ 2 เรื่อง สาขาวิศวกรรมศาสตร์ 2 เรื่อง สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 7 เรื่อง โดยวารสารเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี (Agriculture and Technology RMUTI Journal) เป็นวารสารที่มีคุณภาพและมีชื่อในศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (Thai-Journal Citation Index Centre; TC11)

กองบรรณาธิการขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ให้ข้อเสนอแนะสำหรับในแต่ละบทความวิจัย ขอขอบคุณผู้เขียนทุกท่านที่ได้ส่งบทความอันเป็นประโยชน์ เผยแพร่สู่สาธารณะเพื่อพัฒนางานวิจัยของชาติต่อไป

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วุฒิชัย สิทธิวงษ์
บรรณาธิการ



- | | |
|---|----|
| สารประกอบฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ทั้งหมด และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ
ของสารสกัดอะโวคาโด (<i>Persea americana</i> Mill.) ที่ปลูกในอำเภอเขาค้อ
จังหวัดเพชรบูรณ์
Total phenolics, flavonoids contents and antioxidation of
avocado extract (<i>Persea americana</i> Mill.) cultivated in Khao Kho District,
Phetchabun Province
สิริพร กวาชุนทด พวงผกา แก้วกรม และ สุรางค์รัตน์ พันแสง | 1 |
| ผลของ GA ₃ และ CPPU ต่อการพัฒนาคุณภาพผลกาแฟอาราบิก้า
Effects of GA ₃ and CPPU on the quality development of Arabica coffee fruits
อำพล สอนสระเกษ ราเชนทร์ ไคร์ครวญ การิน ศรีลาภะมาศ และนพพร บุญปลอด | 13 |
| ฤทธิ์การต้านออกซิเดชันของผงใบอ่อนข้าวหอมมะลิเพื่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์คุกกี้เพื่อสุขภาพ
Antioxidant activity of young jasmine rice leaf powder
for the development of healthy cookies
ธนัฐนันท์ ชะยาสินธุ์ และฐานิดา ศรีหาวงค์ | 24 |
| การผลิต การตลาด และแนวทางการส่งเสริมแพะเนื้อ อำเภอหนองกี่ จังหวัดบุรีรัมย์
Production, marketing and guidelines for extension of meat goat in Nongki District,
Buriram Province
ศิวาลัยกร โพนยะพันธ์ และสุกัลยา เชิญขวัญ | 34 |

การออกแบบและการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมตู้อบฆ่าเชื้อแบคทีเรีย
แผงไข่สำหรับเลี้ยงจิ้งหรีด 48

Design and engineering economic evaluation of bacterial disinfection chamber
for egg trays in cricket rearing

ชนิษฐา ชัยบรรดิษฐ์ วาริ ศรีสอน สาวิตรี ประภากร พิรณัฐ อันสุรีย์
ทยาวิรุ หนูบุญ ญัฐพงษ์ ประภากร จาริณี จงปลื้มปิติ เฉลิมพล เยื้องกลาง
และจิระวัลย์ โคตรศักดิ์

การใช้ตัวต้านทานแบบปรับค่าตามแสงประยุกต์เป็นไพราโนมิเตอร์ต้นทุนต่ำ 61

Development of a low-cost pyranometer using a Light-Dependent Resistor (LDR)

เนติธร วรรณสังข์ เทวรัตน์ ตรีอำนาจรรค กระวี ตรีอำนาจรรค และวสวัตดี ทิ้งบริรักษ์

การบำบัดแอมโมเนียจากน้ำเสียฟาร์มโคนมด้วยกระบวนการทางชีวภาพเพื่อผลิตชีวมวล 71

ไฟโคไซยานินและพอลิไฮดรอกซีบิวทิเรตจากไซยาโนแบคทีเรีย *Arthrospira platensis*

Ammonia bioremediation from dairy farm wastewater for biomass, phycocyanin and
polyhydroxybutyrate production by cyanobacterium *Arthrospira platensis*

ฉันทชนก ดวงศรี ชลธิชา รัตนมณี อีร์พงษ์ ใจชาญสุขกิจ และอุเทน พรหมอริยะ

ผลของการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์
ที่ได้จากถ่านไม้ไผ่ 83

Effect of potassium hydroxide (KOH) activation on the properties of activated
carbon derived from bamboo charcoal

จุฑาพล จำปาแถม ลำพูน เหลลาราช เพิ่มยศ วงษ์บัวงาม สุรสิงห์ อารยางค์กูร
และรพีพล อินสุพรรณ

- | | |
|--|-----|
| การพัฒนาระบบติดตามและประเมินการเจริญเติบโตของต้นหม่อนด้วยเทคโนโลยีรีโมทเซนซิง | 96 |
| Development of a monitoring and evaluation system for the growth of mulberry trees with remote sensing technology | |
| อัษฎา วรรณกายนต์ นิคม ลนขุนทด อภิชัย ไพรสินธุ์ มานะชัย จันทอก และวีระนันต์ วิบูลย์อรรถ | |
| | |
| การผลิตสารสีจากเชื้อรา <i>Monascus</i> sp. ด้วยกระบวนการหมักแบบอาหารแข็งโดยใช้วัสดุเหลือทิ้งจากทุเรียน | 111 |
| Production of pigments from <i>Monascus</i> sp. through solid-state fermentation using durian waste materials | |
| พิริยาภรณ์ อันอวม้งาม พัทธา นิธิโรจน์ภักดี ปฐมาภรณ์ ทิลารักษ์ พรพนิต ศศิวัฒน์ชุตikul อโนชา กิริยากิจ รัตนพล มงคลรัตนาลิทธิ์ และอมรรัตน์ สุวรรณโพธิ์ศรี | |
| | |
| การพัฒนาระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะในแปลงปลูกหม่อนไล่รุ่นด้วยคอมพิวเตอร์แบบฝังตัว | 125 |
| The development of a smart farm control system for sequential mulberry cultivation using embedded computer technology | |
| นิคม ลนขุนทด มานะชัย จันทอก และอัษฎา วรรณกายนต์ | |

Received: May 14, 2025; Revised: August 26, 2025; Accepted: March 17, 2026

สารประกอบฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ทั้งหมด และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดอะโวคาโด
(*Persea americana* Mill.) ที่ปลูกในอำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์
Total phenolics, flavonoids contents and antioxidation of avocado extract
(*Persea americana* Mill.) cultivated in Khao Kho District,
Phetchabun Province

สิริพร กวงขุนทด¹ พวงผกา แก้วกรม¹ และ สุรางค์รัตน์ พันแสง^{1*}
Siriporn Kuangkunthod¹, Puangpaka Kaewkrom¹ and Surangrat Punsang^{1*}

¹คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ จังหวัดเพชรบูรณ์

¹Faculty of Science and Technology Phetchabun Rajabhat University, Phetchabun Province

*Corresponding Author E-mail Address : spunsang137@gmail.com

บทคัดย่อ

อะโวคาโด (*Persea americana* Mill.) เป็นไม้ผลที่อยู่ในวงศ์ (Family) Lauraceae ซึ่งมีพืชที่อยู่ในวงศ์เดียวกัน เช่น ต้นการบูร (*Cinnamomum camphora*) และต้นอบเชย (*Cinnamomum zeylanicum*) พืชในวงศ์นี้ตรวจพบสารพฤกษเคมีสูง สามารถนำมาใช้ประโยชน์ทางยาได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์หาสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ฟลาโวนอยด์ทั้งหมด และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดหยาบจากเปลือกผล (Peel; P) และเมล็ด (Seed; S) ของอะโวคาโด โดยเตรียมสารสกัดด้วยตัวทำละลายเอทานอล 50 เปอร์เซ็นต์ในอัตราส่วน 1:10 (w/v) ด้วยวิธีการแช่หมัก (Maceration) ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 7 วัน ผลการศึกษาพบว่า สารสกัดหยาบเปลือกผล และเมล็ดของอะโวคาโดมีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด เท่ากับ 109.82 ± 2.73 และ 59.65 ± 0.39 มิลลิกรัมของกรดแกลลิกต่อกรัมของสารสกัดตามลำดับ ปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด เท่ากับ 120.90 ± 5.66 และ 60.18 ± 1.55 มิลลิกรัมของแคทีชินต่อกรัมของสารสกัดตามลำดับ ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระวัดจากค่า IC_{50} เท่ากับ 415.24 ± 16.38 ในสารสกัดเปลือกผล และ 710.30 ± 7.55 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตรในสารสกัดเมล็ด ตามลำดับ ดังนั้นการใช้เปลือกผลและเมล็ดอะโวคาโดเป็นแหล่งของสารต้านอนุมูลอิสระที่สำคัญ เนื่องจากมีองค์ประกอบของสารประกอบฟีนอลิกหลายชนิด เช่น ฟลาโวนอล ฟลาโวนอล-3-ไกลโคไซด์ ฟลาโวนอน ฟลาโวนอล และแทนนินทั้งชนิดควบแน่น และแทนนินที่สามารถไฮโดรไลซ์ได้ สารเหล่านี้มีบทบาทในการต้านอนุมูลอิสระ ช่วยลดความเสี่ยงของโรคเรื้อรัง และมีศักยภาพในการพัฒนาให้เป็นผลิตภัณฑ์อาหารเสริมหรือสกัดเป็นผลิตภัณฑ์เสริมความงามและอาหารในระดับอุตสาหกรรมได้ในอนาคต

คำสำคัญ: อะโวคาโด พฤกษเคมี ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์

Abstract

Avocado (*Persea americana* Mill.) is a fruit-bearing plant belonging to the family Lauraceae, which also includes species such as camphor (*Cinnamomum camphora*) and cinnamon (*Cinnamomum zeylanicum*). This family is known for its high content of phytochemicals, which can be utilized for medicinal purposes. Therefore, the objective of this study was to evaluate total phenolic content, total flavonoid content, and

the antioxidant activity of crude extracts obtained from the peel (P) and seed (S) of avocado. The extracts were prepared using 50% ethanol as a solvent at a ratio of 1:10 (w/v) through maceration at room temperature for 7 days. The results revealed that the total phenolic contents of the peel and seed extracts were 109.82 ± 2.73 and 59.65 ± 0.39 mg gallic acid equivalents per gram of extract, respectively, while the total flavonoid contents were 120.90 ± 5.66 and 60.18 ± 1.55 mg catechin equivalents per gram of extract, respectively. Antioxidant activity, as measured by IC_{50} values, was found to be 415.24 ± 16.38 and 710.30 ± 7.55 $\mu\text{g/mL}$ for the peel and seed extracts, respectively. Therefore, the use of avocado peel and seed serves as a significant source of antioxidants due to their diverse composition of phenolic compounds such as flavanone, flavonol-3-glycoside, flavanone, flavonol, and both condensed and hydrolysable tannins. These compounds play a role in antioxidant activity, helping to reduce the risk of various chronic diseases, and may potentially be developed into dietary supplements or extracts for use in the cosmetic and food industries in the future.

Keywords: Avocado, Phytochemical, Free radical scavenging, Phenolics, Flavonoids

บทนำ

พืชสมุนไพรที่มีสรรพคุณทางยาและไม่ก่อให้เกิดผลข้างเคียงมากเกินไป โดยทั่วไปมักจะถูกแปรรูปด้วยการนำมาต้มหรือชงกับน้ำ อะโวคาโด (*Persea americana* Mill.) เป็นพืชวงศ์ Lauraceae ที่เติบโตในเขตร้อนและเขตร้อนชื้น เป็นพืชทางเภสัชที่สำคัญชนิดหนึ่งที่ใช้เป็นยาแผนโบราณสำหรับรักษาโรคปากนกกระจอก นิ้วในทางเดินปัสสาวะ ความดันโลหิตสูง ผิวแห้ง ปวดฟัน บวมเนื่องจากการอักเสบ และโรคเบาหวาน (Yasir et al., 2010) อะโวคาโดสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลายส่วน เช่น ผล ใบ เปลือก และเมล็ด ในอดีตชาวบ้านใช้เมล็ดอะโวคาโดเป็นยาแผนโบราณ โดยการทำน้ำมันให้แห้ง บด และขี้ผึ้ง มีฤทธิ์ต้านเบาหวาน (Asmorowati & Lindawati, 2019) และช่วยลดระดับน้ำตาลในเลือดของหนู (Jiwintarum et al., 2018) ประโยชน์อีกประการหนึ่งของเมล็ดอะโวคาโด คือ เป็นยาแก้ท้องผูก ลดการอักเสบ และเสริมสร้างระบบภูมิคุ้มกัน (Kopon et al., 2020) งานวิจัยเกี่ยวกับฤทธิ์ทางชีวภาพของเปลือกและเมล็ดอะโวคาโดยังอยู่ในช่วงเริ่มต้น ปัจจุบันเปลือกและเมล็ดเป็นทรัพยากรที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์อย่างเต็มที่และเป็นปัญหาของเหลือทิ้งสำหรับผู้แปรรูปอะโวคาโด (Dabas et al., 2013) เปลือกและเมล็ดอะโวคาโดมักถูกทิ้งหลังจากกินเนื้อผลอะโวคาโด อย่างไรก็ตาม มีงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าเมล็ดอะโวคาโดเป็นแหล่งของสารอาหาร เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน และแร่ธาตุบางชนิด เช่น แคลเซียม ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม และแมกนีเซียม (Nwaogu et al., 2008) ส่วนเปลือกผลเป็นแหล่งสารต้านอนุมูลอิสระจากธรรมชาติที่ใหญ่ที่สุดในผลของอะโวคาโด (Rahman et al., 2022) และเปลือกอะโวคาโดยังมีสารประกอบที่มีหมู่ไฮดรอกซี ซึ่งทำหน้าที่ต้านอนุมูลอิสระได้ การเกิดอนุมูลอิสระ (Free radical) ซึ่งก็คือ โมเลกุลที่ไม่เสถียรและไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่มีผลต่อการทำลายโมเลกุลอื่น ๆ ต่อเนื่องกันไปเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ อนุมูลอิสระจึงเป็นสารพิษต่อเซลล์ร่างกาย โดยจะทำลายดีเอ็นเอ เยื่อหุ้มเซลล์ และส่วนอื่น ๆ อนุมูลอิสระจึงเป็นสาเหตุทำให้เกิดโรคภัยต่าง ๆ เช่น โรคหัวใจ โรคเมเร็ง และโรคความดันโลหิตสูง ฯลฯ การเกิดอนุมูลอิสระเกิดขึ้นได้ตลอดเวลาในร่างกาย จากการหายใจ จากกระบวนการเผาผลาญ เรียกว่าปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) จากความเครียด หรือจากสิ่งแวดล้อม ดังนั้นร่างกายจึงต้องสร้างระบบแอนติออกซิแดนท์เพื่อป้องกันการโดนทำลายจากอนุมูลอิสระเหล่านั้น สารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) เป็นสารที่ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้อนุมูลอิสระก่อตัวขึ้น โดยทำการยับยั้งปฏิกิริยาลูกโซ่ของอนุมูลอิสระ และหยุดการก่อตัวใหม่ของอนุมูลอิสระ ช่วยซ่อมแซมความเสียหายที่เกิดจากตัวอนุมูลอิสระที่ไปทำลายเซลล์ต่าง ๆ ในร่างกาย รวมทั้งกำจัดและแทนที่โมเลกุลที่ถูกทำลาย ดังนั้นสารต้านอนุมูลอิสระจึงสามารถลดความเสี่ยงจากการเกิดโรคต่าง ๆ สารต้านอนุมูลอิสระที่มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดอนุมูลอิสระและเป็นที่ยอมรับกันทั่วไป คือ วิตามิน อี (Tocopherol) กรดฟีนอลิก (Phenolic acid) และฟลาโวนอยด์ (Flavonoids) ทำให้มีนักวิจัยสนใจที่จะศึกษาสารต้านอนุมูลอิสระในผลไม้ ซึ่งเป็นแหล่งอุดมไปด้วยสารต้านอนุมูลอิสระ ที่มีบทบาทสำคัญในการช่วยป้องกัน และชะลอการเกิดโรคภัยไข้เจ็บต่าง ๆ (Sies et al., 1992) สารต้านอนุมูลอิสระกลุ่มที่พบในพืชที่สำคัญ คือ สารประกอบฟีนอลิก ซึ่งเป็นสารที่เป็นวงแหวนอะโรมาติก และมีหมู่ไฮดรอกซิลอย่างน้อย 1 หมู่ รวมไปถึงอนุพันธ์ของ

สารประกอบฟีนอลซึ่งมีการแทนที่ด้วยหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ เช่น ฟลาโวนอยด์ ลิกนิน กรดซินนามิก และโคเอนไซม์คิว สารประกอบฟีนอลพบได้ในธรรมชาตินี้มีอยู่มากมายหลายชนิด กลุ่มที่ใหญ่ที่สุด คือ สารประกอบฟลาโวนอยด์ สารประกอบฟีนอลที่พบในพืชมักจะรวมอยู่ในโมเลกุลของน้ำตาลในรูปของสารประกอบไกลโคไซด์ น้ำตาลที่พบมากที่สุดเป็นโมเลกุลของสารประกอบฟีนอล ได้แก่ น้ำตาลกลูโคส และอาจมีการรวมตัวกันระหว่างสารประกอบฟีนอลด้วยกันเอง หรือจะเป็นสารประกอบฟีนอลกับสารประกอบอื่น ๆ เช่น กรดอินทรีย์ รวมอยู่ในโมเลกุลของโปรตีน แอลคาลอยด์ และเทอร์ปีนอยด์ เป็นต้น (Moeiklang & Ruangviriyachai, 2014) ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าสารฟลาโวนอยด์และฟีนอลิกเป็นสารประกอบที่มีบทบาทสำคัญในการเผาผลาญของร่างกาย โดยทำหน้าที่เป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่สามารถสร้างพันธะกับอนุมูลอิสระ การมีอนุมูลอิสระในร่างกายสามารถขัดขวางการเผาผลาญและทำลายเซลล์ที่ก่อให้เกิดโรคได้ การป้องกันสามารถทำได้โดยการบริโภคอาหารที่มีสารต้านอนุมูลอิสระสูง ซึ่งสามารถจับกับอนุมูลอิสระได้ การวิจัยนี้ได้พิจารณาถึงประโยชน์และสารประกอบที่มีอยู่ในเปลือกและเมล็ดของอะโวคาโด ซึ่งอาจส่งผลต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดและฟลาโวนอยด์ทั้งหมดของสารสกัดเอทานอลที่ระดับความเข้มข้น 50 เปอร์เซ็นต์ ของเปลือกและเมล็ดของอะโวคาโด โดยใช้วิธีการสกัดแบบแช่

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

1. การเตรียมตัวอย่างก่อนสกัด

งานวิจัยนี้ใช้วัสดุเหลือทิ้งอะโวคาโด 2 รูปแบบ ได้แก่ เปลือกและเมล็ด (Figure 1) เก็บมาจากอำเภอลำทะเมนชัย จังหวัดเพชรบูรณ์ ในช่วงเดือนพฤษภาคม-สิงหาคม พ.ศ. 2567

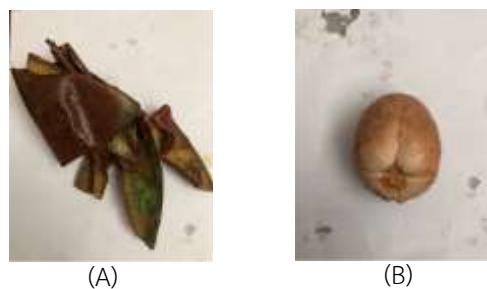


Figure 1 Two types of avocado waste materials (A) Peel (B) Seed

นำเปลือกและเมล็ดสดล้างให้สะอาด อบในตู้อบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ บดและนำมาร้อนผ่านตะแกรงร่อนขนาด 1 มิลลิเมตร ชั่งน้ำหนักตัวอย่างแห้ง 50 กรัม สกัดด้วยเอทานอลความเข้มข้น 50 เปอร์เซ็นต์ จำนวน 500 มิลลิลิตร ด้วยวิธีการแช่หมัก (Maceration) ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 สัปดาห์ โดยมีการเขย่าเป็นครั้งคราว กรองด้วยกระดาษกรอง (Whatman) เบอร์ 1 นำสารสกัด ที่ได้มาระเหยตัวทำละลายด้วยเครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุน (Rotary evaporator) ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จะได้สารสกัดหยาบด้วยเอทานอล (Ethanolic crude extract) นำมาทำให้แห้งอีกครั้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Lyophilization) ยี่ห้อ LSI รุ่น Lyo Lab 5LT ประเทศสหรัฐอเมริกา นำสารสกัดหยาบที่ได้มาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งตวงวัด 4 ตำแหน่ง บันทึกน้ำหนักของสารสกัดหยาบ (Figure 2)



Figure 2 Characteristics of the crude ethanol extract of avocado (A) Peel (B) Seed

2. การตรวจวิเคราะห์หาปริมาณของสารประกอบฟีนอลิก (Total phenolic compounds)

การเตรียมสารละลายมาตรฐานกรดแกลลิก (Gallic acid) โดยนำแกลลิกมาชั่งจำนวน 50 มิลลิกรัม ละลายด้วยเอทานอล แล้วปรับปริมาตรให้ครบ 50 มิลลิลิตร จะได้สารละลายมาตรฐานแกลลิก ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร

การวิเคราะห์หาปริมาณสารฟีนอลิกรวม (Total phenolic content) โดยวิธี Folin-ciocalteu's ดัดแปลงจากงานวิจัยของ Kupina et al. (2018) และ Sansenya et al. (2021) สร้างกราฟมาตรฐานโดยเตรียมสารละลายมาตรฐานกรดแกลลิก (Gallic acid; GA) ที่ความเข้มข้น 200, 150, 100, 70, 50, 30 และ 10 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร เติมสารละลาย Folin-ciocalteu's ปริมาตร 5 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารมาตรฐานแต่ละความเข้มข้น ปริมาตร 1 มิลลิลิตร เติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ปริมาตร 4 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ในความมืด ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 15 นาที นำสารละลายมาตรฐานแต่ละความเข้มข้นไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS) ที่ความยาวคลื่น 765 นาโนเมตร จากนั้นนำมาสร้างกราฟมาตรฐาน ส่วนการวิเคราะห์ปริมาณฟีนอลิกในตัวอย่าง เตรียมทำนองเดียวกันกับสารมาตรฐาน แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืน นำค่าการดูดกลืนที่วัดได้ไปเทียบกับกราฟมาตรฐาน

3. การตรวจหาปริมาณฟลาโวนอยด์รวม ด้วยวิธี Aluminum chloride method (Total flavonoid content)

เตรียมสารละลายมาตรฐานแคทีชิน (Catechin) โดยแคทีชินมาชั่งจำนวน 50 มิลลิกรัม ละลายด้วย เอทานอลแล้วปรับปริมาตรให้ครบ 50 มิลลิลิตร จะได้สารละลายมาตรฐานแคทีชินความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

การวิเคราะห์หาปริมาณฟลาโวนอยด์รวม (Total flavonoid content) โดยวิธี Aluminum chloride ดัดแปลงจากงานวิจัยของ Kongdin et al. (2023) เติมสารละลายมาตรฐาน ปริมาตร 0.6 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 2.4 มิลลิลิตร เติมโซเดียมไนไตรท์ (NaNO_2) ปริมาตร 0.3 มิลลิลิตร เติมสารละลายอะลูมิเนียมคลอไรด์ (AlCl_3) ปริมาตร 0.3 มิลลิลิตร เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ปริมาตร 1 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 1.4 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ในความมืด ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 15 นาที และวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 415 นาโนเมตร โดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS) จากนั้นนำมาสร้างกราฟมาตรฐาน ส่วนการวิเคราะห์ปริมาณฟลาโวนอยด์ในตัวอย่าง โดยเตรียมทำนองเดียวกันกับสารละลายมาตรฐาน แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืน นำค่าการดูดกลืนที่วัดได้ไปเทียบกับกราฟมาตรฐาน

4. การตรวจวิเคราะห์ฤทธิ์ต่อต้านอนุมูลอิสระ DPPH (DPPH radical scavenging activity)

เตรียมสารละลายมาตรฐานโทรลอกซ์ (Trolox) โดยนำโทรลอกซ์มาชั่ง จำนวน 50 มิลลิกรัม ละลายด้วยเอทานอลแล้วปรับปริมาตรให้ครบ 50 มิลลิลิตร จะได้สารละลายมาตรฐานโทรลอกซ์ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

การวิเคราะห์ปริมาณฤทธิ์การยับยั้งอนุมูลอิสระ DPPH ดัดแปลงจากงานวิจัยของ Sansenya et al. (2021) โดยใช้โทรลอกซ์ (Trolox) เป็นสารละลายมาตรฐาน เติมสารมาตรฐานหรือตัวอย่าง ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร เติมสารละลายดีพีพีเอช (DPPH) ความเข้มข้น 200 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 4.5 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ในความมืด ที่อุณหภูมิห้อง และวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร โดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS) นำค่าการดูดกลืนที่วัดได้ (A) คำนวณเปอร์เซ็นต์

การออกฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน หรือเปอร์เซ็นต์ในการกำจัดอนุมูลอิสระ (%Radical scavenging activity) ดัง Eq.1 จากนั้นนำค่าที่คำนวณได้มาสร้างกราฟมาตรฐาน จากนั้นนำค่าที่ได้มาเทียบกับกราฟมาตรฐาน

$$\% \text{ radical scavenging activity} = \left(\frac{A_{\text{control}} - A_{\text{sample}}}{A_{\text{control}}} \right) \times 100 \quad (\text{Eq.1})$$

A_{control} คือ ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย DPPH

A_{sample} คือ ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายตัวอย่างหรือสารละลายมาตรฐาน

5. การตรวจสอบชนิดสารต้านอนุมูลอิสระเบื้องต้น

5.1 การตรวจสอบสารฟลาโวนอยด์

ทำการบดสารสกัด 3 กรัมกับปิโตรเลียม 15 มิลลิลิตร บดซ้ำจนไม่มีสีออกมา กรองและเก็บเพื่อนำไปทดสอบต่อไป การทดสอบปฏิกิริยากับไซยานิดินส์ หรือชิโนดาเทสต์ (Shinoda test) นำสารตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง ใส่กรดแอมโมเนียม 3-4 ชั้น หยดกรด HCl เข้มข้น 10 หยด สังเกตสีส้มถึงสีแดง

การทดสอบของฟิว (Pew test) นำสารสกัด 1 มิลลิลิตรลงในหลอดทดลอง เติมน้ำสังกะสี 0.5 กรัมและ 2N HCl 2 หยด เขย่า 1 นาที เติมกรด HCl เข้มข้น 10 หยด สังเกตสีแดงเข้ม ภายใน 2-5 นาที หากเกิดสีแดงเข้ม แสดงว่ามีฟลาโวนอน (Flavanonol) หรือ ฟลาโวนอล-3-ไกลโคไซด์ (Flavonol-3-Glycoside) ถ้าให้สีจาง แสดงว่ามีฟลาโวน (Flavanone) และฟลาโวนอล (Flavonol)

5.2 การตรวจสอบสารประกอบฟีนอลิกและแทนนิน

ละลายสารสกัด 125 มิลลิกรัม ด้วยน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร กรอง และเติม 10% NaCl 1 มิลลิลิตร กรองและเก็บเพื่อนำไปทดสอบ โดยแบ่งสารสกัดใส่หลอดทดลอง หลอดละ 2 มิลลิลิตร จำนวน 8 หลอด หลอดที่ 1 เป็นหลอดควบคุม (Control) หลอดที่ 2 เติมน้ำกลั่น 2-3 หยด (เกิดตะกอนขุ่นขาว) หลอดที่ 3 เติมน้ำกลั่น 2-3 หยด (เกิดตะกอนขุ่นขาว) หลอดที่ 4 เติมน้ำกลั่น 2-3 หยด (สีน้ำเงินเขียว) หลอดที่ 5 เติมน้ำกลั่น 2-3 หยด (ตะกอนเบาอ่อน) หลอดที่ 6 เติมน้ำกลั่น 2-3 หยด ตามด้วย 10% HCl 6 หยด นำไปต้มใน Water bath 1-2 นาที (ตะกอนสีแดง) หลอดที่ 7 ถ่ายสารสกัดลงใน Evaporating dish ระเหยจนแห้งในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath) เติมน้ำกลั่น 1 มิลลิลิตรและกรด HCl เข้มข้น 1 หยด (สีแดง) หลอดที่ 8 เติมน้ำกลั่น 1 มิลลิลิตร (ตะกอนสีเหลืองน้ำเงินเทา)

ผลการวิจัย

1. การตรวจวิเคราะห์หาปริมาณของสารประกอบฟีนอลิก (Total phenolic compounds)

สารสกัดหยาบเปลือกผล และเมล็ดของอะโวคาโดมีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด เทียบกับกราฟมาตรฐานของกรดแกลลิก (Figure 3) ($y=0.0099x+0.0789$, $R^2=0.9981$) เท่ากับ 109.82 ± 2.73 และ 59.65 ± 0.39 มิลลิกรัมของกรดแกลลิกต่อกรัมของสารสกัดตามลำดับ ดังแสดงใน Table 1

Table 1 The phenolic compound content of avocado

Replication	Peel (mg GAE/g extract)	Seed (mg GAE/g extract)
1	109.25	59.27
2	107.41	59.64
3	112.79	60.05
X $\pm$ SD	109.82 $\pm$ 2.73	59.65 $\pm$ 0.39

2. การตรวจหาปริมาณฟลาโวนอยด์รวม ด้วยวิธี Aluminum chloride method (Total flavonoid content)

สารสกัดหยาบเปลือกผล และเมล็ดของอะโวคาโดมีปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด เทียบกับกราฟมาตรฐานของ แคทีชิน (Figure 4) ($y=0.0024x-0.0039$, $R^2=0.9981$) เท่ากับ 120.90 และ 60.18 มิลลิกรัมของแคทีชินต่อกรัมของสารสกัดตามลำดับ ดังแสดงใน Table 2

Table 2 Total flavonoid content of avocado

Replication	Peel (mg CE/g extract)	Seed (mg CE/g extract)
1	114.63	58.74
2	122.42	61.82
3	125.65	59.98
$\bar{X} \pm SD$	120.90 ± 5.66	60.18 ± 1.55

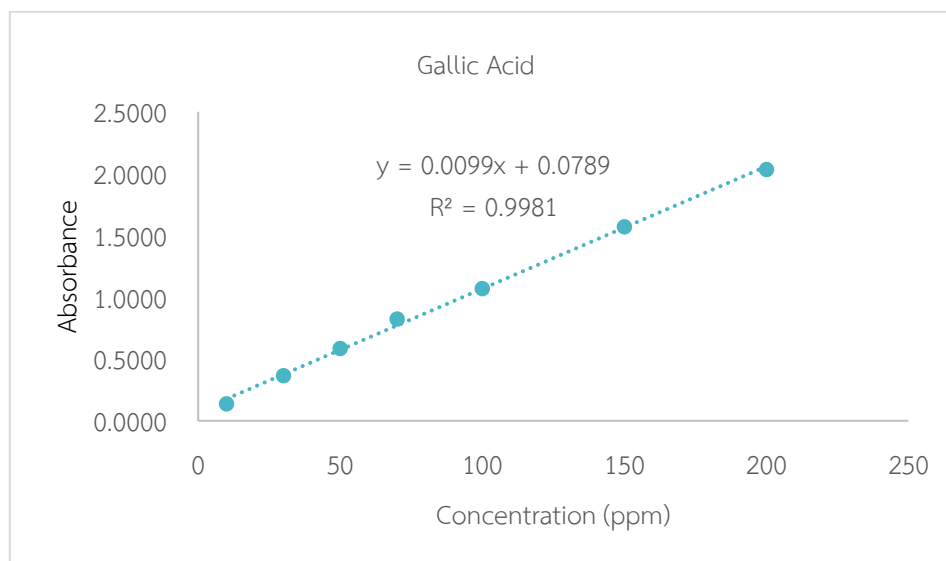


Figure 3 Standard Curve of Gallic Acid

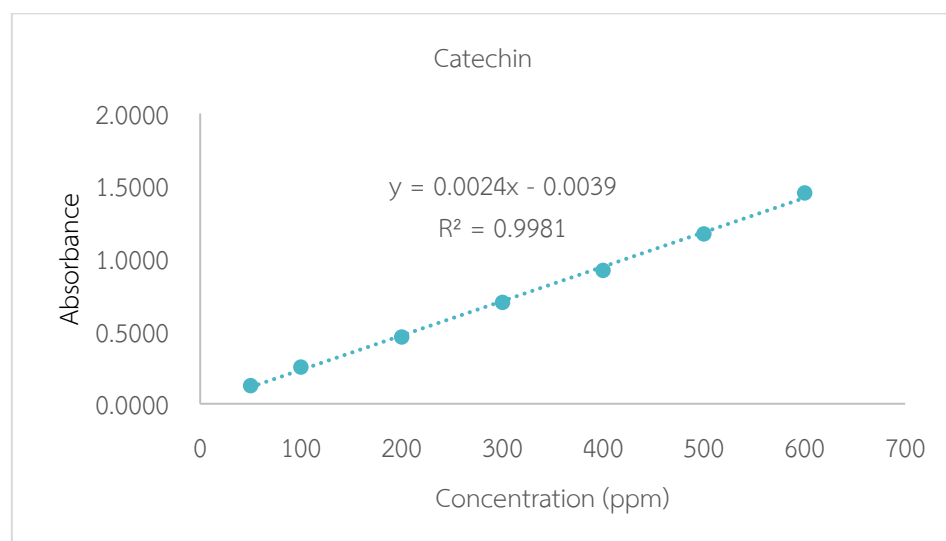


Figure 4 Standard Curve of Catechin

3. การตรวจวิเคราะห์ฤทธิ์ต่อต้านอนุมูลอิสระ DPPH (DPPH radical scavenging activity)

ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าสารสกัดหยาบจากส่วนของเปลือกผล และเมล็ดของอะโวคาโดสามารถต่อต้านอนุมูลอิสระ DPPH ได้ โดยฤทธิ์ต่อต้านอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้นเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับความเข้มข้นของสารสกัดที่เพิ่มขึ้น ฤทธิ์ต่อต้านอนุมูลอิสระ DPPH ของสารสกัดมีค่าค่อนข้างต่ำ เมื่อเทียบกับสารมาตรฐานโทร็อกซ์ ซึ่งมีค่า IC_{50} เท่ากับ 28.84 ± 0.13 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร สารสกัดหยาบเปลือกผล และเมล็ดของอะโวคาโด มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระโดยมีค่า IC_{50} เท่ากับ 415.24 ± 16.38 และ 710.30 ± 7.55 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ ดังแสดงใน Table 3 โดยแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ของการยับยั้งอนุมูลอิสระของ DPPH และการทำงานของสารต้านอนุมูลอิสระของสารสกัด (Figure 5 และ 6)

Table 3 The DPPH antioxidant activity of avocado

Sample	Concentration ($\mu\text{g/ml}$)	Absorbance	% free radical inhibition.	IC_{50} ($\mu\text{g/ml}$)
Peel	152	0.7018	36.56 ± 0.09	415.24 ± 16.38
	356	0.5950	46.21 ± 0.10	
	762	0.3421	69.08 ± 4.14	
	1016	0.2121	80.83 ± 0.52	
	control	1.1062		
Seed	155	0.8758	20.56 ± 0.07	710.30 ± 7.55
	363	0.7266	34.09 ± 0.13	
	777	0.4951	55.09 ± 0.23	
	1036	0.3889	64.72 ± 0.76	
	control	1.1025		
Trolox	10	0.7207	33.78 ± 0.16	28.84 ± 0.13
	20	0.6208	42.96 ± 0.09	
	30	0.5464	49.79 ± 0.13	
	40	0.4321	60.29 ± 0.06	
	50	0.3408	68.68 ± 0.07	
	60	0.2735	74.86 ± 0.08	
	70	0.1224	88.75 ± 0.32	
	control	1.0882		

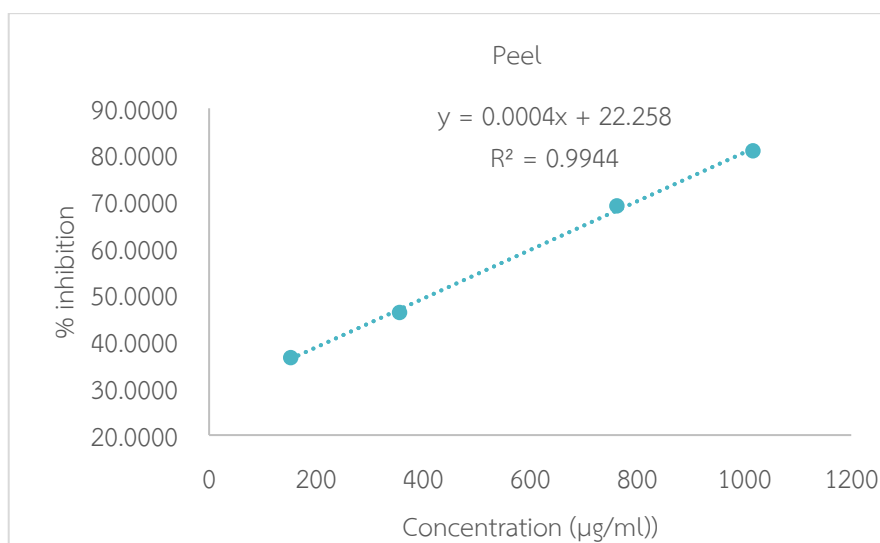


Figure 5 Percentage of DPPH radical inhibition from avocado peel extract

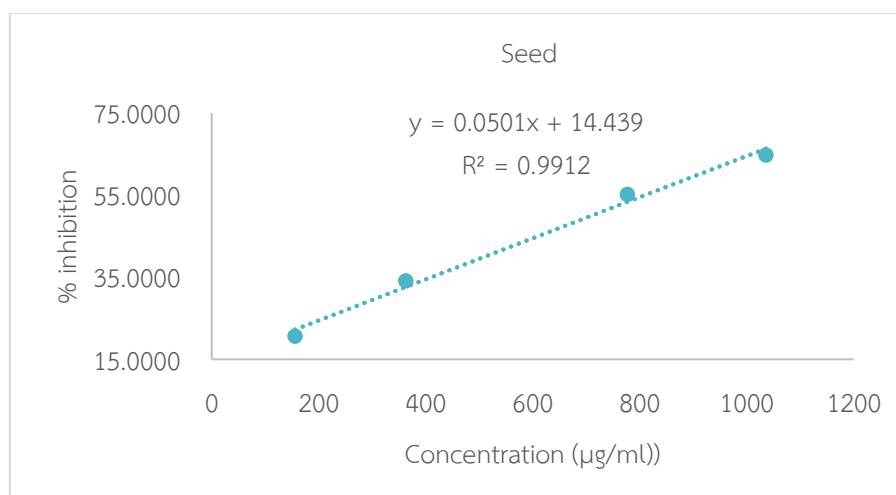


Figure 6 Percentage of DPPH radical inhibition from avocado seed extract

4. การตรวจสอบสารต้านอนุมูลอิสระเบื้องต้น

จากผลการทดลองใน Table 4 แสดงให้เห็นว่าส่วนของเปลือกอะโวคาโดให้ผลทดสอบเป็นสีแดงเข้มกับชินดาเทสต์ ซึ่งเป็นการทดสอบหาเบนโซไพโรน นิวเคลียส (Benzopyrone nucleus) ที่พบในโครงสร้าง และการทดสอบของฟิว ซึ่งเป็นการทดสอบหาฟลาโวนอล (Flavanonol) จากผลการทดลองแสดงว่าเปลือกของอะโวคาโดมีสารฟลาโวนอล หรือ ฟลาโวนอล-3-ไกลโคไซด์ (Flavonol-3-glycoside) ในขณะที่ส่วนของเมล็ด ให้ผลการทดสอบเป็นสีส้มเมื่อทำการทดสอบด้วย วิธีชินดาเทสต์ และให้ผลการทดสอบเป็นสีแดงจาง ๆ กับการทดสอบด้วยวิธีของฟิว แสดงให้เห็นว่าส่วนของเมล็ดนั้นมีสารฟลาโวน (Flavanone) และฟลาโวนอล (Flavonol) เมื่อทดสอบหาสารประกอบฟีนอลิกและแทนนิน พบว่า ผลการทดสอบให้ผลเป็นบวก (+) กับทุกการทดสอบและให้ผลเป็นสีน้ำเงินอมเขียวเมื่อทดสอบกับสารเฟอร์ริกคลอไรด์ (Figure 7) จึงสรุปได้ว่าชั้นส่วนของเปลือกและเมล็ดของอะโวคาโดมีสารประกอบแทนนินทั้ง 2 ประเภท คือ แทนนินชนิดควบแน่น (Condensed tannin) และแทนนินที่สามารถไฮโดรไลซ์ได้ (Hydrolysable tannin)

Table 4 Preliminary testing for antioxidants

Preliminary testing for antioxidants.	Peel	Seed
Flavonoid		
1. Shinoda test	Red	Orange
2. Pew test	Red	Faded red
Phenolic and Tannin		
1. Control	-	-
2. Gelatin solution	+	+
3. Gelatin salt solution	+	+
4. 1% Ferric chloride	+	+
5. Bromine water	+	+
6. Formalin-HCl test	+	+
7. Vanillin-HCl test	+	+
8. Lime-water	+	+

Note: (-) Not apparent or cannot be concluded, (+) Appears

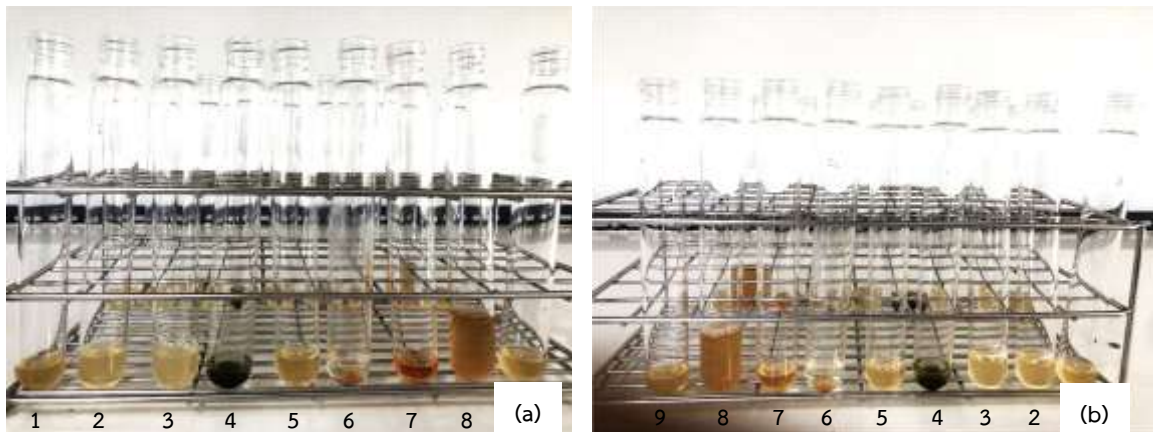


Figure 7 Preliminary testing for antioxidants (a) Peel (b) Seed

การอภิปรายผล

จากการศึกษาพบว่า สารสกัดหยาบเปลือกผล (P) ของอะโวคาโดที่สกัดด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ 50% มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ โดยมีค่า IC_{50} เท่ากับ 415.24 ± 16.38 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ตามที่ Molyneux (2004) กล่าวว่า ระดับความแรงของสารต้านอนุมูลอิสระ แบ่งออกเป็น 4 ระดับ ได้แก่ แรงมาก ($IC_{50} < 50$ $\mu\text{g/ml}$) แรง (IC_{50} : 50-100 $\mu\text{g/ml}$) ปานกลาง (IC_{50} : 101-150 $\mu\text{g/ml}$) และอ่อน ($IC_{50} > 150$ $\mu\text{g/ml}$) แสดงว่าสารสกัดหยาบเปลือกผล (P) ของอะโวคาโดที่สกัดด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ 50% อยู่ในระดับอ่อน เมื่อเทียบกับของ Rahman et al. (2022) พบว่า เปลือกผลอะโวคาโดที่สกัดด้วย เมทานอลมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ IC_{50} เท่ากับ 185.891 ± 1.598 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร และงานวิจัยของ Kamaraj et al. (2020) เผยให้เห็นถึงฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดเปลือกอะโวคาโดในน้ำ มีค่า IC_{50} สูงถึง 71.96 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ซึ่งอาจมีผลมาจากสารสกัดที่ใช้ เช่นเดียวกับสารสกัดหยาบเมล็ด (S) ของอะโวคาโด มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระโดยมีค่า IC_{50} เท่ากับ 710.30 ± 7.55 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร อยู่ในระดับอ่อน เมื่อเทียบกับของ Munthe et al. (2023) ใช้ตัวทำละลายเป็นเอทานอลร้อยละ 70 ค่า IC_{50} 77.298 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร และ Sirichaiekawat (2022) ศึกษาสารสกัดออกฤทธิ์ทางชีวภาพของเมล็ดอะโวคาโดพันธุ์พื้นเมือง โดยใช้ตัวทำละลายเป็นเอทานอลที่ความเข้มข้น 60 เปอร์เซ็นต์ ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ IC_{50} สูงถึง 53 ± 0.001 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของสารสกัดมีผลต่อปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ สารพฤกษเคมีเป็นสารที่มีประโยชน์พบได้ในส่วนต่าง ๆ ของพืช สารพฤกษเคมีสามารถทำหน้าที่เป็นสารยับยั้งและโคแฟกเตอร์ในปฏิกิริยาของเอนไซม์ สามารถกำจัดสารพิษที่เป็นอันตราย เช่น อนุมูลอิสระเพิ่มการเผาผลาญสารอาหารในร่างกาย มีการศึกษามากมายที่แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างสารพฤกษเคมีและบทบาทสำคัญในการยับยั้งและซ่อมแซมการอักเสบ โรคเบาหวาน โรคหัวใจ มะเร็ง เนื้องอก และโรคเกี่ยวกับการเผาผลาญในเซลล์สัตว์ กลไกของสารพฤกษเคมีในการต่อต้านมะเร็ง ได้แก่ การยับยั้งการอักเสบและการแบ่งเซลล์ หรือการกระตุ้นให้เกิดอะพอพโทซิส (Apoptosis) สารพฤกษเคมี ประกอบด้วย โพลีฟีนอลเชิงซ้อน ซึ่งเป็นสารประกอบทางชีวภาพที่มีการสร้างวงแหวนอะโรมาติกของสารไฮดรอกซิล ซึ่งทำให้มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ในสารสกัดเปลือกอะโวคาโด ตรวจพบสารพฤกษเคมี เช่น แอลคาลอยด์ ฟลาโวนอยด์ ซาโปนิน แทนนิน และเทอร์ปีนอยด์ (Waiwong et al. 2025) การตรวจพบซาโปนินในสารสกัดเอทานอลจากเปลือกอะโวคาโด แตกต่างจากการศึกษาของ Kamaraj et al. (2020) ในสารสกัดน้ำจากเปลือกอะโวคาโด แสดงให้เห็นว่าไม่พบส่วนประกอบของซาโปนิน สันนิษฐานว่าเกิดจากอิทธิพลของสารสกัดที่ใช้ (Lee et al., 2007) สารประกอบฟีนอลทั้งหมด เกี่ยวข้องอย่างมากกับฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ มีการศึกษาหลายชิ้นที่แสดงให้เห็นว่าสารประกอบฟีนอลทั้งหมดในปริมาณสูงมีส่วนทำให้ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระมีประสิทธิภาพมากขึ้น (Zhang et al., 2015) นอกจากนี้ Zhang et al. (2015) ยังแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์เชิงบวกระหว่างฟีนอลทั้งหมดและฟลาโวนอยด์ต่อกิจกรรมต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งวัดโดยการยับยั้งอนุมูลอิสระ DPPH สารพฤกษเคมีที่ตรวจพบอีกชนิด คือ แทนนิน ซึ่งประกอบด้วย วงแหวนฟีนอลจำนวนมาก สารนี้ประกอบด้วย แทนนินชนิดควบแน่น และแทนนินที่สามารถไฮโดรไลซ์ได้ แอลคาลอยด์มีส่วนช่วยเป็นสารต้านอนุมูลอิสระเนื่องจากมีกลุ่มไฮดรอกซิล (Hydroxyl)

เมทอกซิล (Methoxy) เมทิลีน (Methylene) และเมทิล (Methyl) (Dalimunthe et al., 2018) และอัลคาลอยด์มีส่วนช่วยในการต้านอนุมูลอิสระมากกว่าฟีนอล โดยวัดจากความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล ศึกษาในการต้านอนุมูลอิสระในการลดเปอร์ออกไซด์และความสามารถในการยับยั้งการเกิดลิพิดเปอร์ออกซิเดชัน (Lipid peroxidation) (Dalimunthe et al., 2018) จากการตรวจสอบสารต้านอนุมูลอิสระเบื้องต้นพบว่าทั้งส่วนของเปลือกและเมล็ดมีฟลาโวนอยด์และแทนนินสอดคล้องกับรายงานของ Osuntokun et al. (2017) และ Danilo et al. (2022) พบน้ำตาลรีดิวซ์ ซาโปนิน ฟลาโวนอยด์แทนนิน สเตียรอยด์ และไตรเทอร์พีนอยด์ พร้อมกันนั้นการสกัดด้วยน้ำจะให้ปริมาณ ฟลาโวนอยด์ที่สูงกว่าสกัดด้วยไฮโดรแอลกอฮอล์ นอกจากนี้ยังมีรายงานสารฟลักซ์เคมีที่พบในเมล็ดอะโวคาโด ได้แก่ ฟลาโวนอยด์ แทนนิน ซาโปนิน ฟีนอลิก (Oluwaniyi et al., 2017) จากรายงานที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่า สารฟลักซ์เคมีในส่วนประกอบของพืชมีทั้งที่เหมือนกันและแตกต่างกัน ขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ เช่น อายุ ชิ้นส่วน และสภาพแวดล้อม แม้กระทั่งสารที่ใช้ในกระบวนการสกัด ในการวิจัยนี้ใช้สารละลายเอทานอล 50% เป็นตัวทำละลายจึงสามารถดึงดูดสารประกอบที่มีขี้และไม่ขี้ต่าง ๆ เช่น อัลคาลอยด์ ฟลาโวนอยด์ ซาโปนิน แทนนิน และสเตียรอยด์ที่มีอยู่ในอะโวคาโดได้

บทสรุป

สารสกัดหยาบเปลือกผล และเมล็ดของอะโวคาโดมีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด เท่ากับ 109.82 ± 2.73 และ 59.65 ± 0.39 มิลลิกรัมของกรดแกลลิกต่อกรัมของสารสกัด ปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด เท่ากับ 120.90 ± 5.66 และ 60.18 ± 1.55 มิลลิกรัมของแคทีชินต่อกรัมของสารสกัด มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระโดยมีค่า IC_{50} เท่ากับ 415.24 ± 16.38 และ 710.30 ± 7.55 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ ดังนั้นการใช้เปลือกอะโวคาโด ซึ่งเป็นของเสียจากกระบวนการผลิต แสดงให้เห็นถึงศักยภาพสำหรับการนำไปแปรรูป เนื่องจากได้รับการยืนยันแล้วว่าเป็นแหล่งของฟลักซ์เคมีที่มีส่วนสร้างสารต้านอนุมูลอิสระ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ ที่อนุเคราะห์ประสานงานวิจัยจนแล้วเสร็จผลงานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนงบประมาณด้านวิจัย วิทยาศาสตร์และนวัตกรรม Fundamental Fund ของมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ ปีงบประมาณ พ.ศ. 2567 ขอขอบคุณเกษตรกรปลูกอะโวคาโดทุกท่านที่ ตำบลเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์ที่อนุเคราะห์ผลผลิตอะโวคาโดในการวิจัย และขอบคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- Asmorowati, H. & Lindawati, N. Y. (2019). Penetapan kadar flavonoid total alpukat (*Persea americana* Mill.) dengan metode spektrofotometri. *Jurnal Ilmiah Farmasi*. 15(2), 51-63. <https://doi.org/10.20885/jif.vol15.iss2.art1>
- Dabas, D., Shegog, R. M., Ziegler, G. R. & Lambert, J. D. (2013). Avocado (*Persea americana*) seed as a source of bioactive phytochemicals. *Current pharmaceutical design*. 19, 6133-6140. <https://doi.org/10.2174/1381612811319340007>
- Dalimunthe, A., Hasibuan, P. A. Z., Silalahi, J., Sinaga, S. F. & Satria, D. (2018). Antioxidant activity of alkaloid compounds from *Litsea cubeba* Lour. *Oriental Journal of Chemistry*. 34(2), 1149-1152. <https://doi.org/10.13005/ojc/340270>
- Danilo, G. N. P., Sousa, J. das V., Silva, M. C., Matos, A. F., Santos, H. L. C. dos, Pereira, G. L., Rocha, E. B. da, Alves, R. S., Bastos, L. de O., Pires, L. de O., Castro, R. N., Borba, H. R. & Lima, V. M. de L. (2022). *Persea americana* Mill.: Evaluation of cytogenotoxicity and phytochemical prospection of leaf extracts. *Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences*. 58. <http://dx.doi.org/10.1590/s2175-97902022e19261>

- Jiwintarum, Y., Eliza, I., Tatontos, E. Y., & Rohmi, R. (2018). Tea Bag Biji Alpukat (*Persea americana* Mill.) terhadap Kadar Gula Darah Tikus Putih (*Rattus norvegicus*). *Quality Jurnal Kesehatan*. 11(2), 56-62. <http://dx.doi.org/10.36082/qjk.v11i2.66>
- Kamaraj, M., Kumar, V. D. R., Nithya, T. G. & Danya, U. (2020). Assessment of antioxidant, antibacterial activity and phytoactive compounds of aqueous extracts of avocado fruit peel from Ethiopia. *International Journal of Peptide Research and Therapeutics*. 26, 1549-1557. <https://doi.org/10.1007/s10989-019-09965-6>
- Kongdin, M., Chumanee, S., & Sansenya, S. (2023). Gamma irradiation promotes the growth rate of Thai pigmented rice as well as inducing the accumulation of bioactive compounds and carbohydrate hydrolyzing enzymes inhibitors (α -Glucosidase and α -Amylase) under salt conditions. *Preventive Nutrition and Food Science*. 28(4), 463-470. <https://doi.org/10.3746/pnf.2023.28.4.463>
- Kopon, A. M., Baunsele, A. B. & Boelan, E. G. (2020). Skrinng senyawa metabolit sekunder ekstrak metanol Biji alpukat (*Persea americana* Mill.) Asal Pulau Timor. *Akta Kimia Indonesia*. 5(1), 43. <http://dx.doi.org/10.12962/j25493736.v5i1.6709>
- Kupina, S., Fields, C., Roman, M. C., & Brunelle, S. L. (2018). Determination of total phenolic content using the Folin-C Assay: Single-Laboratory Validation, First Action 2017.13. *Journal of AOAC International*. 101(5), 1466-1472. <https://doi.org/10.5740/jaoacint.18-0031>
- Lee, Y. L., Yen, M. T. & Mau, J. L. (2007). Antioxidant properties of various extracts from *Hypsizygus marmoreus*. *Food Chem.*104(1), 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.10.063>
- Moeiklang, N. & Ruangviriyachai, C. (2014). Determination of phenolic compound and antioxidant potential in fruit beverages. *KKU Research Journal (Graduate Studies)*. 14(4), 69-79. (In Thai)
- Molyneux, P. (2004). The use of the stable radical diphenylpicrylhydrazyl (DPPH) for estimating antioxidant activity. *Songklanakarinn Journal of Science and Technology*. 26(2), 211-219.
- Munthe, S. W. N., Riskianto, R. Juvi, D. & Novia, J. (2023). Antioxidant, total phenolic and total flavonoid of 70% ethanol extract of avocado seeds (*Persea americana* Mill.). *Pharmacognosy Journal*. 15(4), 599-605.
- Nwaogu, L., Onyeze, G. & Nwabueze, R. (2008). Degradation of diesel oil in a polluted soil using *Bacillus subtilis*. *African Journal of Biotechnology*. 7(12), 1939-1943. <http://dx.doi.org/10.5897/AJB07.889>
- Oluwaniyi, O. O., Nwosu, F. O. & Okoye, C. M. (2017). Comparative study of the constituents of the fruits pulps and seeds of *Canarium ovatum*, *Persea americana* and *Dacryodes edulis*. *Jordan Journal of Chemistry*. 13(2), 113-125.
- Osuntokun, O.T., Ogunlade, A.O. & Modupe, A.O. (2017). Efficacy of essential oils from *Persea americana* stem bark and seed extracts. *Journal of Applied Microbiology and Biochemistry*. 2(2), 1-6. <http://doi: 10.21767/2576-1412.100012>
- Rahman, N., Mulyani, S., Abdullah, R. & Bohari, B. (2022). Antioxidant properties of the methanolic extract of avocado fruit peel (*Persea americana* Mill.) from Indonesia. *Journal of Advanced Pharmaceutical Technology & Research*. 13(3), 166-170. http://doi: 10.4103/japtr.japtr_22_22
- Sanchez-Martin, V., Plaza-Calonge, M. D. C., Soriano-Lerma, A., Gonzalez, M., Linde-Rodriguez, A. & Perez-Carrasco, V. (2022). Gallic acid: A natural phenolic compound exerting antitumoral activities in colorectal cancer via interaction with G-Quadruplexes. *Cancers*. 14(11), 2648. <http://dx.doi.org/10.3390/cancers14112648>

- Sansenya, S., Payaka, A., Wannasut, W., Hua, Y., & Chumanee, S. (2021). Biological activity of rice extract and the inhibition potential of rice extract, rice volatile compounds and their combination against α -glucosidase, α -amylase and tyrosinase. *International Journal of Food Science & Technology*. 56(4), 1865-1876. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14816>
- Sies, H., Stahl, W. & Sundquist, A. (1992). Antioxidant functions of vitamins, vitamin E and C, beta-carotene and other carotenoids. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 368, 7-19.
- Sirichaiekawat, M. (2022, Feb 2). *Total Phenolics and Flavonoids Contents Antioxidation and Antityrosinase Activities of Local Avocado Cultivar Seed*. <https://postgrads.mfu.ac.th/wp-content/uploads/2022/12/6251701280.pdf> (In Thai)
- Supriningrum, R., Nurhasnawati, H. & Faisah, S. (2020). Penetapan kadar fenolik total ekstrak etanol daun serunai (*Chromolaena odorata* L.) dengan metode spektrofotometri UV-Vis. *Al Ulum Jurnal Sains Dan Teknologi*. 5(2), 54. <http://dx.doi.org/10.31602/ajst.v5i2.2802>
- Waiwong, N., Kuangkunthod, S, Kaewkrom, P. & Punsang, S. (2025, March 7). *Preliminary phytochemical screening test of avocado* [Conference presentation]. PCRUSCI CONFERENCE 2025, Phetchabun Rajabhat University. Phetchabun. 720-728. (In Thai)
- Yasir, M., Das, S. & Kharya, M. D. (2010). The phytochemical and pharmacological profile of *Persea americana* Mill. *Pharmacognosy Reviews*. 4(7), 77-84. <http://dx.doi.org/10.4>
- Zhang, Y. J., Gan, R. Y., Li, S., Zhou, Y., Li, A. N., Xu, D. P. & Li, H. B. (2015). Antioxidant phytochemicals for the prevention and treatment of chronic diseases. *Molecules*. 20(12), 21138-56. <https://doi.org/10.3390/molecules201219753>

Received: June 3, 2025; Revised: September 18, 2025; Accepted: March 17, 2026

ผลของ GA₃ และ CPPU ต่อการพัฒนาคุณภาพผลกาแฟอาราบิก้า**Effects of GA₃ and CPPU on the quality development of Arabica coffee fruits****อำพล สอนสระเกษ^{1*} ราเชนทร์ ไคร์ครวญ¹ การ์ิน ศรีลาภะมาศ¹ และนพพร บุญปลอด¹****Ampol Sornsaket^{1*}, Rachane Kraikruan¹, Garin Srilapamas¹ and Nopporn boonplod¹**¹คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่¹Faculty of Agricultural Production, Maejo University, Chiang Mai Province^{*}Corresponding Author E-mail Address : ampol_ssk@mju.ac.th**บทคัดย่อ**

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลของสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช GA₃ (Gibberellic acid) และ CPPU (N-(2-Chloro-4-pyridyl)-N'-phenylurea) ต่อการพัฒนาคุณภาพของผลกาแฟอาราบิก้า โดยทดลองในพื้นที่ ตำบลเทพเสด็จ อำเภอดอยสะเก็ด จังหวัดเชียงใหม่ วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design; CRD) จำนวน 9 กรรมวิธี โดยพ่นสาร GA₃ และ CPPU ทั้งเดี่ยวและร่วมกัน ที่ความเข้มข้น 25 และ 50 ppm จำนวน 1 ครั้งในระยะ 6 สัปดาห์หลังดอกบาน และเปรียบเทียบกับชุดควบคุม บันทึกข้อมูลได้แก่ ขนาดผลสด (ความกว้างและความยาว) น้ำหนักผลสด ความหนาและน้ำหนักเนื้อ-เปลือก ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (Total Soluble Solids; TSS) รวมถึงลักษณะเมล็ด (ความกว้าง ความยาว ความหนา และน้ำหนักเมล็ด) ผลการทดลอง พบว่า การพ่น GA₃ ความเข้มข้น 50 ppm ร่วมกับ CPPU ความเข้มข้น 25 ppm มีแนวโน้มให้ผลที่ดีในด้านขนาดผล โดยมีค่าเฉลี่ยความกว้างผล 14.91 mm ความยาวผล 16.44 mm และความยาวเมล็ด 12.54 mm ขณะที่การพ่น GA₃ ความเข้มข้น 25 ppm ร่วมกับ CPPU ความเข้มข้น 50 ppm มีแนวโน้มให้น้ำหนักผลสดเฉลี่ยสูงสุดที่ 2.46 g ส่วนการพ่น CPPU ความเข้มข้น 50 ppm มีแนวโน้มให้สัดส่วนน้ำหนักเนื้อต่อผลอยู่ที่ 79.81% และการพ่น GA₃ ความเข้มข้น 25 ppm ร่วมกับ CPPU ความเข้มข้น 25 ppm มีแนวโน้มเพิ่มปริมาณ TSS สูงสุดที่ 25.30 °Brix โดยผลการทดลองส่วนใหญ่ไม่มีความแตกต่างทางสถิติกับชุดควบคุม แสดงให้เห็นว่าการใช้ GA₃ และ CPPU อาจช่วยเสริมการพัฒนาลักษณะสัณฐานและคุณภาพของผลกาแฟอาราบิก้าได้บางส่วน

คำสำคัญ: กาแฟอาราบิก้า สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช ขนาดผล**Abstract**

This study aimed to evaluate the effects of plant growth regulators GA₃ (Gibberellic acid) and CPPU (N-(2-Chloro-4-pyridyl)-N'-phenylurea) on the quality development of Arabica coffee fruits. The experiment was conducted in Thepsadej Subdistrict, Doi Saket District, Chiang Mai Province, using a Completely Randomized Design (CRD) with 9 treatments. GA₃ and CPPU were applied individually and in combination at concentrations of 25 and 50 ppm, sprayed once at six weeks after anthesis, and compared with a control. Data recorded were fresh fruit size, fresh fruit weight, pericarp thickness and weight, total soluble solids (TSS), and seed characteristics including width, length, thickness, and weight. The results showed that GA₃ at 50 ppm combined with CPPU at 25 ppm tended to improve fruit size, with an average fruit width of 14.91 mm, fruit length of 16.44 mm, and seed length of 12.54 mm. GA₃ at 25 ppm combined with CPPU at 50 ppm had a tendency to increase the average fresh fruit weight to 2.46 g. The CPPU at 50 ppm had a tendency to increase the average percentage of flesh weight to 79.81%. The GA₃ at 25 ppm combined with CPPU at 25 ppm had a tendency to increase the average TSS to 25.30 °Brix. The results of the experiment mostly did not differ significantly from the control, indicating that the use of GA₃ and CPPU may partially help improve the morphological and quality characteristics of Arabica coffee fruits.

ppm produced the highest average fresh fruit weight of 2.46 g, while CPPU at 50 ppm resulted in the highest pulp-to-fruit ratio of 79.81 %. GA_3 at 25 ppm combined with CPPU at 25 ppm gave the highest TSS at 25.30 °Brix. Since most traits were not statistically different from the control, the findings suggest that GA_3 and CPPU may enhance certain morphological and quality attributes of Arabica coffee fruits.

Keywords: Arabica coffee, Plant growth regulators, Fruit size

บทนำ

ประเทศไทยเป็นหนึ่งในประเทศเขตร้อนที่มีความเหมาะสมต่อการเพาะปลูกกาแฟ โดยเฉพาะในพื้นที่สูงของภาคเหนือและบางพื้นที่ในภาคใต้ที่มีสภาพภูมิอากาศเย็นจัดและมีความชื้นเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของกาแฟสายพันธุ์อาราบิก้า (*Coffea arabica* L.) การส่งเสริมการปลูกกาแฟในพื้นที่เหล่านี้นอกจากมีเป้าหมายเพื่อส่งเสริมอาชีพและรายได้ของเกษตรกรแล้ว ยังเป็นกลไกสำคัญในการแก้ไขปัญหาการปลูกพืชผิดกฎหมายและช่วยอนุรักษ์ป่าไม้ตามแนวพระราชดำริของพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวภูมิพลอดุลยเดช รัชกาลที่ 9 (Phisadej, 2008) ปัจจุบันอุตสาหกรรมกาแฟของไทยมีแนวโน้มการเติบโตต่อเนื่อง แต่ปริมาณผลผลิตที่ได้ยังไม่เพียงพอต่อความต้องการของตลาดภายในประเทศ โดยในปี พ.ศ. 2566 ประเทศไทยมีผลผลิตกาแฟเพียง 16,575 ตัน จากพื้นที่ปลูกที่ให้ผลผลิตประมาณ 204,211 ไร่ (Office of Agricultural Economics, 2024) ซึ่งสะท้อนถึงความจำเป็นในการเพิ่มผลผลิตอย่างมีคุณภาพเพื่อรองรับความต้องการบริโภคในประเทศ

การพัฒนาคุณภาพผลผลิตของกาแฟอาราบิก้าต้องอาศัยองค์ความรู้ด้านสรีรวิทยาพืช การจัดการด้านธาตุอาหารพืช และปัจจัยสิ่งแวดล้อม รวมถึงเทคนิคการใช้สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช (Plant Growth Regulators; PGRs) เพื่อควบคุมการพัฒนาของผลและคุณภาพหลังการเก็บเกี่ยว Krisana et al. (2019) รายงานว่า ผลกาแฟที่ปลูกในประเทศไทยยังมีความผันแปรสูงในด้านลักษณะทางกายภาพ เช่น น้ำหนัก ความยาว และความหนาของผล เช่น เมล็ดกาแฟขนาด 1 ต้องมีขนาดเมล็ดมากกว่าหรือเท่ากับ 7.14 มิลลิเมตร เป็นต้น (Horticultural Research Institute, Department of Agriculture, 2019) ซึ่งอาจมีผลต่อคุณภาพเมล็ดกาแฟที่แปรรูปในภายหลัง อีกทั้งสภาพภูมิอากาศที่แปรปรวนในปัจจุบันส่งผลกระทบต่อการออกดอกและการเจริญเติบโตของพืชอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพัฒนาแนวทางการเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและปรับปรุงคุณภาพของผลผลิตให้เหมาะสมกับความต้องการของตลาดในประเทศและต่างประเทศ

ทั้งนี้ งานวิจัยของ Rattaphon et al. (2010) ได้ศึกษาผลของพันธุ์ Marroo Seedless ที่ได้รับการฉีดพ่นสาร GA_3 ความเข้มข้น 25 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า การใช้ GA_3 ที่ความเข้มข้นสูงสามารถเพิ่มขนาดผลได้อย่างชัดเจน แม้จะทำให้ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (TSS) ลดลง และปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (Titratable Acidity; TA) สูงขึ้นเมื่อเทียบกับผลที่ไม่ได้รับการพ่นสาร และ Kulkarni et al. (2017) รายงานว่าการใช้ CPPU ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่งผลให้มะม่วงมีความยาวผลเพิ่มขึ้น 10.56 เซนติเมตร และมีน้ำหนักเฉลี่ย 328.73 g ซึ่งมากกว่าการไม่ใช้สาร การศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชในการปรับปรุงลักษณะทางกายภาพและคุณภาพของผลผลิต ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ในกาแฟอาราบิก้าได้เช่นกัน จากเหตุผลทั้งหมดนี้ จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ที่มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของชนิดและความเข้มข้นของสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชต่อการพัฒนาผลและคุณภาพของผลกาแฟอาราบิก้าในประเทศไทย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและคุณภาพของผลผลิตให้ตรงกับความต้องการของตลาดในปัจจุบัน

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

1. พืชที่ใช้ในการศึกษา

ต้นกาแฟอาราบิก้าที่มีความสม่ำเสมอ อายุ 10 ปี ระยะปลูก 2x2 เมตร ณ สวนกาแฟ ณ.เทพเสด็จ ตำบลเทพเสด็จ อำเภอดอยสะเก็ด จังหวัดเชียงใหม่

2. แผนการทดลอง

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (CRD) มี 9 กรรมวิธี ๆ ละ 3 ซ้ำ ๆ ละ 3 ต้น ๆ 5 กิ่ง โดยการฉีดพ่น GA₃ ความเข้มข้น 25 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร การพ่น CPPU ความเข้มข้น 25 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และทั้ง 2 ชนิดร่วมกัน บนกิ่งที่ติดผลในช่วงสัปดาห์ที่ 6 หลังดอกบาน (ระยะที่ผลกาแพ้งไม่มีเมล็ด มีลักษณะของผลคล้ายหัวไม้ขีด สีเขียวมันวาว) โดยเทียบระยะการพัฒนาดอกตาม Sanz-Urbe et al. (2008) จำนวน 1 ครั้ง ในช่วง 8:00-10:00 น. ช่วงเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2567 ได้กรรมวิธีดังนี้

- กรรมวิธีที่ 1 ชุดควบคุม (Control)
- กรรมวิธีที่ 2 พ่น GA₃ ความเข้มข้น 25 ppm
- กรรมวิธีที่ 3 พ่น GA₃ ความเข้มข้น 50 ppm
- กรรมวิธีที่ 4 พ่น CPPU ความเข้มข้น 25 ppm
- กรรมวิธีที่ 5 พ่น CPPU ความเข้มข้น 50 ppm
- กรรมวิธีที่ 6 พ่น GA₃ ความเข้มข้น 25 ppm ร่วมกับ พ่น CPPU ความเข้มข้น 25 ppm
- กรรมวิธีที่ 7 พ่น GA₃ ความเข้มข้น 25 ppm ร่วมกับ พ่น CPPU ความเข้มข้น 50 ppm
- กรรมวิธีที่ 8 พ่น GA₃ ความเข้มข้น 50 ppm ร่วมกับ พ่น CPPU ความเข้มข้น 25 ppm
- กรรมวิธีที่ 9 พ่น GA₃ ความเข้มข้น 50 ppm ร่วมกับ พ่น CPPU ความเข้มข้น 50 ppm

3. การบันทึกข้อมูล

สุ่มกิ่งกาแพที่มีขนาดความยาวเท่ากันในแต่ละต้นจำนวนต้นละ 5 กิ่ง จากนั้นทำการคัดเลือกผลผลิตให้มีจำนวนผลเท่ากันคือ 50 ผลต่อกิ่ง โดยคัดผลที่มีการเข้าทำลายของโรคและแมลงทิ้ง เมื่อได้จำนวนตามที่ต้องการจะดำเนินการพ่นสารความคุมการเจริญเติบโตของพืชตามกรรมวิธีที่กำหนดทั่วทั้งผลในกิ่งที่เลือกไว้ จากนั้นจะศึกษาคุณภาพผลหลังการพ่นสาร โดยผลกาแพที่จะเก็บเกี่ยวจะเป็นผลที่มีการเปลี่ยนสีผลเป็นสีแดง 100% ทำการบันทึกข้อมูลซ้ำละ 50 ผล โดยแต่ละผลจะมีจำนวนเมล็ด 2 เมล็ด รายละเอียด ดังนี้

- 3.1 นำผลกาแพที่ได้หลังการเก็บเกี่ยวมาชั่งน้ำหนักผล โดยชั่งหลังเก็บเกี่ยวภายใน 24 ชั่วโมง ทำการวัดสีเปลือกผลผลิตด้วยเครื่องวัดสี (CR-20, Konica Minolta, Japan) มีค่าเป็น L*, a* และ b*
- 3.2 วัดปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ ด้วยเครื่องวัดปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (PAL-1, Atago, Japan) มีหน่วยเป็น °Brix
- 3.3 น้ำหนักเมล็ด และน้ำหนักเปลือก โดยชั่งหลังการปอกเปลือก ชัดเยื่อหุ้มเมล็ด ด้วยวิธีแบบเปียก และการตากแห้ง ในระยะเวลา 2 วันหลังเก็บเกี่ยวผลผลิต โดยใช้เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Mettler toledo รุ่น PL3002 มีหน่วยเป็น g
- 3.4 ความกว้างผล ความยาวผล ความหนาเปลือก ความกว้างเมล็ด ความยาวเมล็ด และความหนาเมล็ด ใช้เวอร์เนีย-คาร์ลิปเปอร์ดิจิตอลยี่ห้อ INSIZE รุ่น 1108-150 มีหน่วยเป็น mm
- 3.5 การคำนวณเปอร์เซ็นต์เนื้อและเมล็ด โดยชั่งน้ำหนักผล และน้ำหนักเมล็ด ใช้เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ ทศนิยม 2 ตำแหน่ง แล้วนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์เนื้อและเมล็ด (Eq.1, Eq.2) ดังนี้

$$\% \text{ เนื้อ} = (\text{น้ำหนักเนื้อ} \times 100) / \text{น้ำหนักผล} \quad (\text{Eq.1})$$

$$\% \text{ เมล็ด} = (\text{น้ำหนักเมล็ด (g)} \times 100) / \text{น้ำหนักผล} \quad (\text{Eq.2})$$

4. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบ CRD และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยที่ได้ของแต่ละสิ่งทดลองโดยวิธี Duncan's new Multiple Range Test (DMRT) วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ด้วยโปรแกรมสถิติสำเร็จรูป

ผลการวิจัย

ความกว้างผล

ผลของ GA₃ และ CPPU ต่อความกว้างผลหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิต พบว่า การพ่น GA₃ ความเข้มข้น 50 ppm ร่วมกับ CPPU ความเข้มข้น 25 ppm มีค่าเฉลี่ยความกว้างสูงถึง 14.91 mm ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติกับการพ่น GA₃ ความเข้มข้น 25 ppm, GA₃ ความเข้มข้น 50 ppm, CPPU ความเข้มข้น 50 ppm, GA₃ ความเข้มข้น 25 ppm ร่วมกับ CPPU ความเข้มข้น 50 ppm และ ชุดควบคุม ที่มีความกว้างเฉลี่ย 14.05, 13.93, 13.65, 13.60 และ 13.43 mm ตามลำดับ แต่มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่งกับการพ่นวิธีอื่น ๆ (Table 1, Figure 1a)

ความยาวผล

ผลของ GA₃ และ CPPU ต่อความยาวผลหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิต พบว่า การพ่น GA₃ ความเข้มข้น 50 ppm ร่วมกับ CPPU ความเข้มข้น 25 ppm มีค่าเฉลี่ยความยาวผลอยู่ที่ 16.44 mm ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติกับการพ่น GA₃ ความเข้มข้น 25 ppm, GA₃ ความเข้มข้น 50 ppm, CPPU ความเข้มข้น 50 ppm, GA₃ ความเข้มข้น 25 ppm ร่วมกับ CPPU ความเข้มข้น 50 ppm และ ชุดควบคุม ที่มีความยาวผลเฉลี่ย 14.67, 15.44, 15.37, 15.03, 15.31, 15.41 และ 15.02 mm ตามลำดับ แต่มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่งกับการพ่นวิธีอื่น ๆ (Table 1, Figure 1a)

น้ำหนักผลสด

การพ่น GA₃ ความเข้มข้น 25 ppm ร่วมกับ CPPU ความเข้มข้น 50 ppm พบว่า มีค่าเฉลี่ยน้ำหนักผลสดสูงถึง 2.46 g ซึ่งไม่มีความแตกต่างทางสถิติกับการพ่น GA₃ ความเข้มข้น 50 ppm, CPPU ความเข้มข้น 50 ppm, GA₃ ความเข้มข้น 25 ppm ร่วมกับ CPPU ความเข้มข้น 25 ppm และ GA₃ ความเข้มข้น 50 ppm ร่วมกับ CPPU ความเข้มข้น 25 ppm ที่มีน้ำหนักเฉลี่ย 1.98, 2.43, 2.17 และ 2.02 g ตามลำดับ แต่มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่งกับการพ่นวิธีอื่น ๆ (Table 1)

Table 1 Postharvest fruit quality of Arabica coffee including fruit width, length, fresh weight, pericarp thickness, and pericarp weight

Treatment	Fruit width (mm) ^{1/}	Fruit length (mm) ^{1/}	Fruit weight (g) ^{1/}	Pericarp thickness (mm) ^{1/}	Pericarp weight (g) ^{1/}
1) Control (Untreated)	13.43 ab	15.02 ab	1.65 c	0.87 a	0.23 c
2) GA ₃ 25 ppm	13.65 ab	14.67 ab	1.66 c	0.77 ab	0.25 c
3) GA ₃ 50 ppm	13.60 ab	15.44 ab	1.98 abc	0.83 ab	0.30 c
4) CPPU 25 ppm	12.58 b	14.45 b	1.87 bc	0.77 ab	0.26 c
5) CPPU 50 ppm	12.95 b	15.37 ab	2.43 a	0.76 ab	0.45 a
6) GA ₃ 25+CPPU 25 ppm	14.05 ab	15.03 ab	2.17 ab	0.72 ab	0.33 bc
7) GA ₃ 25+CPPU 50 ppm	13.93 ab	15.31 ab	2.46 a	0.78 ab	0.41 ab
8) GA ₃ 50+CPPU 25 ppm	14.91 a	16.44 a	2.02 abc	0.72 ab	0.34 bc
9) GA ₃ 50+CPPU 50 ppm	12.79 b	15.41 ab	2.34 ab	0.67 b	0.43 ab
F-test	**	**	**	*	**
C.V. (%)	4.88	3.87	9.29	10.87	12.46

Note: * = significant difference at $p \leq 0.05$, ** = significant difference at $p \leq 0.01$, ^{1/} = Means followed by the same letter within each column are not significantly different according to DMRT.

ความหนาเนื้อและเปลือก

ชุดควบคุมมีค่าเฉลี่ยความหนาเนื้อและเปลือกผลสูงถึง 0.87 mm ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติกับการพ่น GA₃ ความเข้มข้น 50 ppm, GA₃ ความเข้มข้น 25 ppm ร่วมกับ CPPU ความเข้มข้น 50 ppm, GA₃ ความเข้มข้น 25 ppm, CPPU ความเข้มข้น 25 ppm, CPPU ความเข้มข้น 50 ppm, GA₃ ความเข้มข้น 25 ppm ร่วมกับ CPPU ความเข้มข้น 25 ppm, GA₃ ความเข้มข้น 50 ppm ร่วมกับ CPPU ความเข้มข้น 25 ppm ที่มีค่าเฉลี่ยความหนาเนื้อและเปลือกผลอยู่ที่ 0.83, 0.78, 0.77, 0.77, 0.76, 0.72 และ 0.72 mm ตามลำดับ แต่มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญกับการพ่น GA₃ ความเข้มข้น 50 ppm ร่วมกับ CPPU ความเข้มข้น 50 ppm ที่มีค่าเฉลี่ยความหนาเนื้อและเปลือกผลเพียง 0.67 mm (Table 1)

น้ำหนักเนื้อและเปลือก

การพ่น CPPU ความเข้มข้น 50 ppm มีค่าเฉลี่ยน้ำหนักเนื้อและเปลือกมากสูงถึง 0.45 g ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติกับการพ่น GA₃ ความเข้มข้น 25 ppm ร่วมกับ CPPU ความเข้มข้น 50 ppm และ GA₃ ความเข้มข้น 50 ppm ร่วมกับ CPPU ความเข้มข้น 50 ppm ที่มีค่าเฉลี่ยน้ำหนักเนื้อและเปลือกที่ 0.41 และ 0.43 g ตามลำดับ แต่มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญกับกรรมวิธีอื่น ๆ (Table 1)

สีเปลือกผลสด

หลังการเก็บเกี่ยวผลกาแพที่มีการเปลี่ยนสีเป็นสีแดง 100% พบว่า ค่าเฉลี่ยความสว่างของสี (L*) การพ่น GA₃ ความเข้มข้น 25 ppm มีค่าเฉลี่ยค่าความสว่าง (L*) ที่ 37.94 ซึ่งมีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่งยวดกับทุกกรรมวิธี ส่วนค่าเฉลี่ยค่าความเป็นสีแดง (a*) การพ่น GA₃ ความเข้มข้น 50 ppm มีค่าเฉลี่ยค่าความเป็นสีแดงมากถึง 26.74 ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติกับการพ่น CPPU ความเข้มข้น 25 ppm, GA₃ ความเข้มข้น 50 ppm ร่วมกับ CPPU ความเข้มข้น 25 ppm, GA₃ ความเข้มข้น 50 ppm ร่วมกับ CPPU ความเข้มข้น 50 ppm และ ชุดควบคุม ที่มีค่าเฉลี่ยค่าความเป็นสีแดง 23.46, 24.14, 25.29 และ 24.08 ตามลำดับ แต่มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่งยวดกับกรรมวิธีอื่น ๆ และค่าเฉลี่ยค่าความเป็นสีเหลือง (b*) การพ่น GA₃ ความเข้มข้น 50 ppm ร่วมกับ CPPU ความเข้มข้น 50 ppm มีค่าเฉลี่ย ค่าความเป็นสีเหลืองมากถึง 13.82 ซึ่งมีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่งยวดกับทุกกรรมวิธี (Table 2)

ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (Total Soluble Solids; TSS)

หลังจากการพ่นสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชตามกรรมวิธีต่าง ๆ ผลการทดลองหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิต พบว่า การพ่น GA₃ ความเข้มข้น 25 ppm ร่วมกับ CPPU ความเข้มข้น 25 ppm มีค่าเฉลี่ย TSS อยู่ที่ 25.30 °Brix ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติกับการพ่น GA₃ ความเข้มข้น 25 ppm ร่วมกับ CPPU ความเข้มข้น 50 ppm, GA₃ ความเข้มข้น 25 ppm, ชุดควบคุม, GA₃ ความเข้มข้น 50 ppm, CPPU ความเข้มข้น 25 ppm, GA₃ ความเข้มข้น 50 ppm ร่วมกับ CPPU ความเข้มข้น 50 ppm และ CPPU ความเข้มข้น 50 ppm โดยค่าเฉลี่ย TSS อยู่ที่ 24.37, 23.24, 22.69, 21.74, 20.90, 19.75 และ 19.58 °Brix ตามลำดับ แต่มีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญกับการพ่น GA₃ ความเข้มข้น 50 ppm ร่วมกับ CPPU ความเข้มข้น 25 ppm ที่มีค่าเฉลี่ย TSS เพียง 16.86 °Brix (Table 2)

ความกว้างของเมล็ด

การพ่น GA₃ ความเข้มข้น 25 ppm ร่วมกับ CPPU ความเข้มข้น 50 ppm มีค่าเฉลี่ยความกว้างเมล็ดแห้งอยู่ที่ 8.95 mm ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติกับการพ่น GA₃ ความเข้มข้น 25 ppm ร่วมกับ CPPU ความเข้มข้น 25 ppm, GA₃ ความเข้มข้น 50 ppm, CPPU ความเข้มข้น 25 ppm, GA₃ ความเข้มข้น 50 ppm ร่วมกับ CPPU ความเข้มข้น 25 ppm, GA₃ ความเข้มข้น 25 ppm, CPPU ความเข้มข้น 50 ppm และ GA₃ ความเข้มข้น 50 ร่วมกับ CPPU ความเข้มข้น 50 ppm ที่มีค่าเฉลี่ยความกว้างเมล็ดอยู่ที่ 8.74, 8.70, 8.46, 8.32, 8.31, 8.31 และ 8.22 mm ตามลำดับ แต่มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญกับชุดควบคุม ที่มีค่าเฉลี่ยความกว้างเมล็ดเพียง 8.05 mm (Table 3, Figure 1b)

Table 2 Peel color and total soluble solids (TSS) of Arabica coffee fruit

Treatment	Peel color ^{1/}			TSS (°Brix) ^{1/}
	L*	a*	b*	
1) Control (Untreated)	29.74 b	24.08 ab	09.45 b	22.69 ab
2) GA ₃ 25 ppm	37.94 a	22.76 b	08.79 b	23.24 ab
3) GA ₃ 50 ppm	30.98 b	26.74 a	10.35 b	21.74 ab
4) CPPU 25 ppm	30.11 b	23.46 ab	09.13 b	20.90 ab
5) CPPU 50 ppm	28.57 b	22.79 b	08.87 b	19.58 ab
6) GA ₃ 25+CPPU 25 ppm	29.62 b	21.87 b	08.5 b	25.30 a
7) GA ₃ 25+CPPU 50 ppm	28.97 b	22.38 b	09.18 b	24.37 a
8) GA ₃ 50+CPPU 25 ppm	30.10 b	24.14 ab	10.61 b	16.86 b
9) GA ₃ 50+CPPU 50 ppm	29.43 b	25.29 ab	13.82 a	19.75 ab
F-test	**	**	**	*
C.V. (%)	5.19	6.29	12.38	16.56

Note: * = significant difference at $p \leq 0.05$, ** = significant difference at $p \leq 0.01$, ^{1/} = Means followed by the same letter within each column are not significantly different according to DMRT.

ความยาวของเมล็ด

การพ่น GA₃ ความเข้มข้น 50 ppm ร่วมกับ CPPU ความเข้มข้น 25 ppm มีค่าเฉลี่ยความยาวเมล็ดมากถึง 12.54 mm ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติกับการพ่น GA₃ ความเข้มข้น 50 ppm, CPPU ความเข้มข้น 50 ppm, GA₃ ความเข้มข้น 25 ppm ร่วมกับ CPPU ความเข้มข้น 50 ppm, CPPU ความเข้มข้น 25 ppm, GA₃ ความเข้มข้น 25 ppm ร่วมกับ CPPU ความเข้มข้น 25 ppm, GA₃ ความเข้มข้น 50 ppm ร่วมกับ CPPU ความเข้มข้น 50 ppm และ ชุดควบคุม ที่มีค่าเฉลี่ยความยาวเมล็ดอยู่ที่ 12.30, 12.12, 11.98, 11.95, 11.91, 11.90 และ 11.64 mm ตามลำดับ แต่มีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญกับการพ่น GA₃ ความเข้มข้น 25 ppm ที่มีค่าเฉลี่ยความยาวเมล็ดอยู่ที่ 11.54 mm (Table 3, Figure 1b)

น้ำหนักของเมล็ด

การพ่น GA₃ และ CPPU ทุกกรรมวิธีไม่มีผลต่อน้ำหนักของเมล็ดแห้งหลังการเก็บเกี่ยว โดยมีค่าเฉลี่ยน้ำหนักเมล็ดแห้งหลังการเก็บเกี่ยวอยู่ระหว่าง 0.23-0.31 g (Table 3)

ความหนาของเมล็ด

การพ่น GA₃ ความเข้มข้น 25 ppm ร่วมกับ CPPU ความเข้มข้น 25 ppm มีค่าเฉลี่ยความหนาเมล็ดแห้งสูงถึง 5.61 mm ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติกับการพ่น GA₃ ความเข้มข้น 25 ppm ร่วมกับ CPPU ความเข้มข้น 50 ppm, CPPU ความเข้มข้น 50 ppm, GA₃ ความเข้มข้น 50 ppm ร่วมกับ CPPU ความเข้มข้น 25 ppm, GA₃ ความเข้มข้น 50 ppm, CPPU ความเข้มข้น 25 ppm, และ GA₃ ความเข้มข้น 50 ppm ร่วมกับ CPPU ความเข้มข้น 50 ppm ที่มีค่าเฉลี่ยความหนาเมล็ดแห้งที่ 5.59, 5.44, 5.44, 5.38, 5.33 และ 5.33 mm ตามลำดับ แต่มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญกับการพ่น GA₃ ความเข้มข้น 25 ppm และ ชุดควบคุม ที่มีค่าเฉลี่ยความหนาเมล็ดอยู่ที่ 5.07 และ 5.00 mm ตามลำดับ (Table 3)

ร้อยละของน้ำหนักเนื้อ และน้ำหนักเมล็ดต่อผล

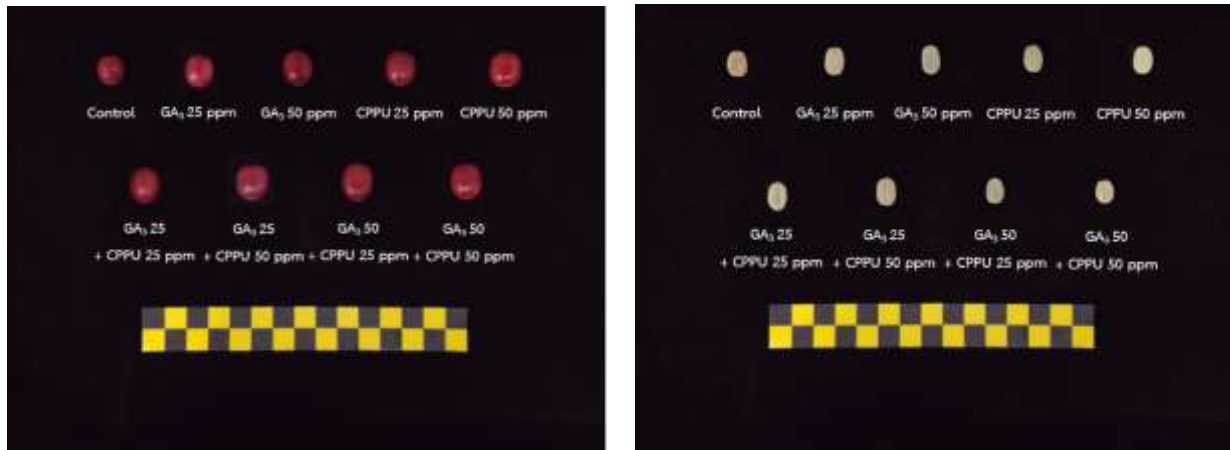
ผลของสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชต่อร้อยละของน้ำหนักเนื้อ และน้ำหนักเมล็ดต่อผล พบว่า การพ่น CPPU ความเข้มข้น 50 ppm มีค่าเฉลี่ยร้อยละน้ำหนักเนื้อสูงถึง 79.81 ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติกับการพ่น GA₃ ความเข้มข้น 25 ppm, GA₃ ความเข้มข้น 50 ppm, GA₃ ความเข้มข้น 25 ppm ร่วมกับ CPPU ความเข้มข้น 25 ppm, GA₃ ความเข้มข้น 25 ppm ร่วมกับ CPPU ความเข้มข้น 50 ppm, GA₃ ความเข้มข้น 50 ppm ร่วมกับ CPPU ความเข้มข้น 25 ppm, GA₃ ความเข้มข้น 50 ppm ร่วมกับ CPPU ความเข้มข้น 50 ppm และ ชุดควบคุม ที่มีค่าเฉลี่ยร้อยละน้ำหนักเนื้ออยู่ที่ 74.96, 75.31,

76.13, 77.82, 77.07, 78.90 และ 74.52 ตามลำดับ แต่มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่งกับการพ่น CPPU ความเข้มข้น 25 ppm ที่มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 74.11 ส่วนค่าเฉลี่ยร้อยละของน้ำหนักเมล็ด พบว่า การพ่น CPPU ความเข้มข้น 25 ppm มีค่าเฉลี่ยร้อยละน้ำหนักเมล็ดสูงถึง 25.89 ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติกับการพ่น GA₃ ความเข้มข้น 25 ppm, GA₃ ความเข้มข้น 50 ppm, GA₃ ความเข้มข้น 25 ppm ร่วมกับ CPPU ความเข้มข้น 25 ppm, GA₃ ความเข้มข้น 25 ppm ร่วมกับ CPPU ความเข้มข้น 50 ppm, GA₃ ความเข้มข้น 50 ppm ร่วมกับ CPPU ความเข้มข้น 25 ppm, GA₃ ความเข้มข้น 50 ppm ร่วมกับ CPPU ความเข้มข้น 50 ppm และ ชุดควบคุม ที่มีค่าเฉลี่ยร้อยละน้ำหนักเมล็ดที่ 25.04, 24.69, 23.87, 22.18, 22.93, 21.10 และ 25.48 แต่มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่งกับการพ่น CPPU ความเข้มข้น 50 ppm ที่มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 20.19 (Table 3)

Table 3 Postharvest seed quality of Arabica coffee including seed width, length, weight, thickness, and pulp-to-seed ratio

Treatment	Seed width (mm) ^{1/}	Seed length (mm) ^{1/}	Seed weight (g)	Seed thickness (mm) ^{1/}	Pulp (%) ^{1/}	Seed (%) ^{1/}
1) Control (Untreated)	8.05 b	11.64 ab	0.23	5.00 b	74.52 ab	25.48 ab
2) GA ₃ 25 ppm	8.31 ab	11.54 b	0.24	5.07 b	74.96 ab	25.04 ab
3) GA ₃ 50 ppm	8.70 ab	12.30 ab	0.29	5.38 ab	75.31 ab	24.69 ab
4) CPPU 25 ppm	8.46 ab	11.95 ab	0.30	5.33 ab	74.11 b	25.89 a
5) CPPU 50 ppm	8.31 ab	12.12 ab	0.30	5.44 ab	79.81 a	20.19 b
6) GA ₃ 25+CPPU 25 ppm	8.74 ab	11.91 ab	0.31	5.61 a	76.13 ab	23.87 ab
7) GA ₃ 25+CPPU 50 ppm	8.95 a	11.98 ab	0.30	5.59 a	77.82 ab	22.18 ab
8) GA ₃ 50+CPPU 25 ppm	8.32 ab	12.54 a	0.29	5.44 ab	77.07 ab	22.93 ab
9) GA ₃ 50+CPPU 50 ppm	8.22 ab	11.90 ab	0.27	5.33 ab	78.90 ab	21.10 ab
F-test	*	*	ns	*	**	**
C.V. (%)	5.34	4.19	17.58	4.76	2.60	8.46

Note: ns = not significantly different, * = significant difference at $p \leq 0.05$, ** = significant difference at $p \leq 0.01$, ^{1/} = Means followed by the same letter within each column are not significantly different according to DMRT.



(a) Fresh fruit characteristics

(b) Dried seed characteristics

Figure 1 Characteristics of (a) fresh coffee fruits and (b) dried seeds after harvest

การอภิปรายผล

จากผลการทดลอง พบว่า การใช้สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชชนิด GA_3 และ CPPU มีผลต่อการเพิ่มขนาดของผลกาแฟอาราบิก้าในด้านความกว้าง ความยาว น้ำหนักผล และความหนาเนื้ออย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะกรรมวิธีที่ใช้ GA_3 ความเข้มข้น 50 ppm ร่วมกับ CPPU ความเข้มข้น 25 ppm มีแนวโน้มให้ผลที่ดีในทางสถิติหลายลักษณะของผลกาแฟ แต่ส่วนใหญ่ให้ผลไม่แตกต่างจากชุดควบคุม อาจเนื่องมาจากการพัฒนาของผลไม่ได้มีองค์ประกอบเพียงการใช้สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชเท่านั้นแต่ยังคงมีองค์ประกอบอื่นร่วมด้วย จากผลการทดลอง พบว่า การใช้สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชชนิด GA_3 และ CPPU สามารถส่งผลต่อการเพิ่มขนาดผลกาแฟอาราบิก้า ทั้งในด้านความกว้าง ความยาว น้ำหนักผล และความหนาเนื้อได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะการใช้ GA_3 ความเข้มข้น 50 ppm ร่วมกับ CPPU ความเข้มข้น 25 ppm ซึ่งมีแนวโน้มให้ผลลัพธ์ที่ดีต่อสถิติหลายลักษณะของผลกาแฟ แสดงให้เห็นถึงบทบาทของสารทั้งสองในการกระตุ้นการแบ่งเซลล์และการขยายตัวของเซลล์ (Cell division และ Cell elongation) อันเป็นกระบวนการพื้นฐานที่ทำให้ผลมีขนาดใหญ่ขึ้น แต่ผลการทดลองส่วนใหญ่กลับไม่แตกต่างจากชุดควบคุมมากนัก สาเหตุอาจมาจากการพัฒนาของผลกาแฟไม่ได้ขึ้นอยู่กับการใช้สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชเพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยร่วมอื่น ๆ โดยเฉพาะธาตุอาหารพืช ผลการทดลองดังกล่าวมีความสอดคล้องกับงานวิจัยในไม้ผลอื่น ๆ ที่มีการตอบสนองต่อสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชคล้ายคลึงกัน เช่น งานของ Han & Lee (2004) รายงานว่า การใช้ GA_3 และ CPPU ในองุ่นพันธุ์ 'Kyoho' สามารถเพิ่มน้ำหนักผลและขนาดเบอร์รี่ได้อย่างชัดเจน ขณะที่ Wankam et al. (2021) พบว่า การพ่น GA_3 ร่วมกับ CPPU ช่วยเพิ่มขนาดและน้ำหนักของผลองุ่นพันธุ์ไวท์มัสคาฟ ข้อมูลเหล่านี้ชี้ให้เห็นว่า การตอบสนองของผลกาแฟต่อ GA_3 และ CPPU มีความสอดคล้องกับไม้ผลอื่น ๆ ในแง่การกระตุ้นการแบ่งและการขยายตัวของเซลล์ ซึ่งส่งผลให้ผลมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีคุณภาพที่ดีขึ้น โดยหากศึกษาผลของการใช้สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชจะสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chang & Lin (2006) ซึ่ง พบว่า การใช้ GA_3 สามารถเพิ่มความกว้างและขนาดของผลลิ้นจี่ได้อย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งการทดลองของ Phasan et al. (2015) และ Kulkarni et al. (2017) ก็แสดงให้เห็นว่า CPPU มีผลกระตุ้นการขยายขนาดผลในมะม่วงและองุ่นได้เช่นกัน ซึ่งชี้ให้เห็นว่า CPPU มีประสิทธิภาพในการส่งเสริมการแบ่งเซลล์และการขยายขนาดของผลไม้ได้ดีในหลากหลายชนิดพืช การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักผลในกรรมวิธีที่ใช้ GA_3 ความเข้มข้น 25 ppm ร่วมกับ CPPU ความเข้มข้น 50 ppm ให้ค่าเฉลี่ยน้ำหนักผลสดถึง 2.46 g จึงกล่าวได้ว่าสารทั้งสองทำงานส่งเสริมกันอย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะเมื่อพิจารณาร่วมกับความหนาเนื้อและเปลือกที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีผลต่อคุณภาพของเมล็ดและความเหมาะสมในการแปรรูป แม้ว่าผลการทดลองโดยรวมจะมีแนวโน้มที่ดีขึ้น แต่อาจต้องพิจารณาปัจจัยแวดล้อมอื่น ๆ ที่อาจส่งผลต่อประสิทธิภาพของสาร เช่น สภาพอากาศ ซึ่งอาจต้องมีการศึกษาการทดลองเพิ่มเติมในปีถัดไป ผลการทดลองในครั้งนี้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการใช้สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชกลุ่มจิบเบอเรลลิน (GA) และไซโทไคนิน (CPPU) ต่อการเพิ่มขนาดของผลกาแฟอาราบิก้า โดยเฉพาะกรรมวิธีที่ใช้ GA_3 ความเข้มข้น 50 ppm ร่วมกับ CPPU ความเข้มข้น 25 ppm ซึ่งให้ค่าเฉลี่ยความกว้าง ความยาว และ

น้ำหนักของผลกาแฟมากที่สุดจากการบันทึกข้อมูลหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิต โดยสาร GA_3 มีบทบาทหลักในการส่งเสริมกระบวนการ Cell elongation ผ่านการสังเคราะห์เอนไซม์ที่ย่อยผนังเซลล์ เช่น Expansin และ Cellulase ทำให้ผนังเซลล์มีความยืดหยุ่นมากขึ้น และสามารถดูดน้ำเข้าสู่เซลล์ได้ดีขึ้น ส่งผลให้ขนาดของเซลล์และส่วนของต้นพืชขยายตัวอย่างรวดเร็ว (Matsukura et al., 1998) ขณะเดียวกัน CPPU ซึ่งเป็นไซโทไคนินสังเคราะห์จะกระตุ้นให้เกิด Cell division โดยเฉพาะในเนื้อเยื่อที่กำลังแบ่งตัว เช่น ผลอ่อน หรือ ตายอด (Christensen & Peacock, 1988) เมื่อใช้สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชร่วมกัน ทั้ง GA_3 และ CPPU จึงกระตุ้นให้ผลกาแฟมีการแบ่งตัวของเซลล์เพิ่มขึ้นหรือสร้างจำนวนเซลล์เพิ่มขึ้น และในขณะเดียวกันก็ทำให้เซลล์ขยายขนาดส่งผลให้ผลใหญ่ขึ้น ซึ่งทำให้ผลผลิตที่ได้มีขนาดที่ใหญ่กว่ากรรมวิธีควบคุมและกรรมวิธีอื่นที่ใช้สารเพียงชนิดเดียว ผลที่ได้สอดคล้องกับแนวคิดของ Taiz et al. (2015) ที่ระบุว่า การเพิ่มคุณภาพของผลที่ชัดเจนที่สุดในเชิงกายภาพเกิดจากการทำงานร่วมกันของการแบ่งตัวและการยืดตัวของเซลล์ในระยะขยายผล และสอดคล้องกับ Wang et al. (2009) ที่ระบุว่า ไซโทไคนินสามารถชะลอการเสื่อมสภาพของผลไม้ได้โดยช่วยลดการผลิเอทิลีนและรักษาระดับคลอโรฟิลล์ รวมถึงกิจกรรมของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์โปรตีนและการเผาผลาญพลังงาน ซึ่งส่งผลให้ผลไม้สามารถสะสมสารอาหาร เช่น คาร์โบไฮเดรต กรดอะมิโน และโปรตีน ได้มากขึ้น ส่งผลให้เมื่อใช้ไซโทไคนินจึงช่วยให้ผลไม้มีขนาดใหญ่ขึ้น มีปริมาณสารอาหารสะสมสูงขึ้น และมีคุณภาพโดยรวมที่ดีขึ้น ทั้งในด้านปริมาณและคุณภาพผลผลิต (Aremu et al., 2020) ในด้านความเข้มข้นของสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชที่เหมาะสม จากการทดลองแสดงให้เห็นว่า GA_3 ความเข้มข้น 25 และ 50 ppm มีความเหมาะสมในการกระตุ้นการเติบโตของผลกาแฟอาราบิก้า นอกจากนี้ผลการทดลองในครั้งนี้ยังสอดคล้องกับงานของ Wankam et al. (2021) ที่ศึกษาการพ่น GA_3 ร่วมกับ CPPU ในองุ่นพันธุ์ไวท์ทะเลกา โดยพบว่า กลุ่มที่พ่นสารส่งผลให้ผลผลิตใหญ่ขึ้นและมีย่านกว้างมากกว่ากรรมวิธีที่ไม่พ่นสาร นอกจากนี้ Thakur et al. (2017) ยังรายงานว่า GA_3 สามารถเพิ่มน้ำหนักผลสตรอเบอร์รี่ได้กว่า 56% แสดงถึงแนวโน้มที่สอดคล้องกันระหว่างพืชหลายชนิดว่า การใช้สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชเหล่านี้มีแนวโน้มเพิ่มคุณภาพของผลผลิตโดยเฉพาะในด้าน “ขนาดของผล” นอกจากนี้ยังมีการจัดการในแปลงทดลองโดยการให้น้ำ ให้ปุ๋ยซึ่งเป็นปัจจัยที่ควบคุมอยู่แล้วที่เพียงพอต่อการพัฒนาของผลรวมด้วย

บทสรุป

การศึกษากาแฟใช้สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช GA_3 และ CPPU ในกาแฟอาราบิก้า พบว่า การพ่น GA_3 ความเข้มข้น 50 ppm ร่วมกับ CPPU ความเข้มข้น 25 ppm มีแนวโน้มเพิ่มขนาดผล โดยมีค่าเฉลี่ยความกว้างผล 14.91 mm ความยาวผล 16.44 mm และความยาวเมล็ด 12.54 mm ขณะที่การพ่น GA_3 ความเข้มข้น 25 ppm ร่วมกับ CPPU ความเข้มข้น 50 ppm มีแนวโน้มให้น้ำหนักผลสดเฉลี่ยสูงสุด 2.46 g ส่วนการพ่น CPPU ความเข้มข้น 50 ppm มีแนวโน้มเพิ่มสัดส่วนน้ำหนักเนื้อต่อผลถึง 79.81% และการพ่น GA_3 ความเข้มข้น 25 ppm ร่วมกับ CPPU ความเข้มข้น 25 ppm มีแนวโน้มให้ค่าปริมาณ TSS สูงสุด 25.30 °Brix อย่างไรก็ตาม ผลการทดลองหลายด้าน พบว่า ไม่มีความแตกต่างทางสถิติกับชุดควบคุม สะท้อนว่าการใช้ GA_3 และ CPPU มีศักยภาพในการปรับปรุงคุณภาพของผลกาแฟอาราบิก้าในด้านขนาดและคุณภาพบางประการ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สำนักวิจัยและส่งเสริมวิชาการการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่สนับสนุนทุนวิจัยโครงการนักวิจัยรุ่นใหม่ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2567 ขอขอบคุณ สวนกาแฟ ณ.เทพเสด็จ ตำบลเทพเสด็จ อำเภอดอยสะเก็ด จังหวัดเชียงใหม่ ในการอนุเคราะห์ต้นกาแฟสำหรับการทดลอง และ สาขาวิชาพืชสวน(ไม้ผล) คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่อนุเคราะห์อุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการสำหรับดำเนินการเก็บข้อมูลในครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- Aremu, O., Fawole, O. A., Makunga, N. P., Masondo, N. A., Moyo, M., Buthelezi, N. M., & Doležal, K. (2020). Applications of cytokinins in horticultural fruit crops: Trends and future prospects. *Biomolecules*, 10(9), 1222. <https://doi.org/10.3390/biom10091222>
- Chang, J. C., & Lin, T. S. (2006). GA₃ increases fruit weight in 'Yu Her Pau' litchi. *Scientia Horticulturae*, 108(4), 442–443. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2006.02.009>
- Christensen, P., & Peacock, W. L. (1988, February). *Manure as a vineyard fertilizer*. University of California Cooperative Extension. <https://ucanr.edu/sites/default/files/2011-03/78506.pdf>
- Han, D. H., & Lee, C. H. (2004). The effects of GA₃, CPPU and ABA applications on the quality of Kyoho (*Vitis Vinifera* L. × *Labrusca* L.) grape. *Acta Horticulturae*, 653, 219–222. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.653.27>
- Horticultural Research Institute, Department of Agriculture. (2019). Arabica coffee production management handbook. Department of Agriculture. <https://pubhtml5.com/iytc/xnwz/basic/> (In Thai)
- Krisana, T., Witchaphat, S., Juthamas, A., Netnapa, I., Sathira, H., Kriangsak, S., Somkiat, K., & Thiranon, P. (2019). Size quality of Arabica coffee beans grown under different forest conditions in the Royal Project area, Ban Khun Tae, Doi Kaew Subdistrict, Chom Thong District, Chiang Mai Province. In D. Marod (Ed.), *Proceedings of the 8th Thailand Forest Ecology Research Network Conference: Ecology for National Development* (pp. 38–44). Faculty of Science, Khon Kaen University. (In Thai).
- Kulkarni, S., Patil, S., & Magar, S. (2017). Effect of plant growth regulators on yield and quality of mango (*Mangifera indica* L.) cv. Keshu. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 6(5), 2309–2313. <https://www.phytojournal.com/archives/2017/vol6issue5/PartAH/6-5-225-660.pdf>
- Matsukura, C., Itoh, S. I., Nemoto, K., Tanimoto, E., & Yamaguchi, J. (1998). Promotion of leaf sheath growth by gibberellic acid in a dwarf mutant of rice. *Planta*, 205(2), 145–152. <https://link.springer.com/article/10.1007/s004250050306>
- Office of Agricultural Economics. (2024, March 29). Table of coffee production details. <https://www.oae.go.th/view/1/ตารางแสดงรายละเอียดกาแฟ/TH-TH> (In Thai)
- Phasan, S., Phimnipa, P., Thanakorn, B., & Kalyani, S. (2015). Influences of GA₃ and CPPU on fruit size and quality in Pattavia pineapple. *Agricultural Science Journal*, 46(Suppl. 3), 161–164. <http://www.crdc.kmutt.ac.th/Data%202015/CRDC9/data/161-164.pdf> (In Thai)
- Phisadej, R. (2008). *His Majesty the King and the Royal Project* (2nd Ed.). Allied Printers. (In Thai)
- Rattaphon, C., Surasak, N., & Wasinee, S. (2010). Response of 'Marroo Seedless' grape fruits to GA₃ spraying. *Agricultural Science Journal*, 41(Suppl. 3/1), 421–424. <https://kukr.lib.ku.ac.th/covid19/Detail/info/35462> (In Thai)
- Sanz-Urbe, J. R., Ramos-Giraldo, P. J., & Oliveros-Tascon, C. E. (2008). Algorithm to identify maturation stages of coffee fruits. In *Advances in Electrical and Electronics Engineering-IAENG Special Edition of the World Congress on Engineering and Computer Science 2008* (pp. 167–174). IEEE. <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1109/WCECS.2008.28>
- Taiz, L., Zeiger, E., Moller, I. M., & Murphy, A. (2015). *Plant Physiology and Development* (6th Ed.). Sinauer Associates.
- Thakur, Y., Chandel, J. S., & Verma, P. (2017). Effect of plant growth regulators on growth, yield, and fruit quality of strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch.) under protected conditions. *Journal of Applied and Natural Science*, 9(3), 1676–1681. <https://doi.org/10.31018/jans.v9i3.1420>

- Wang, Y. L., Wang, C. R., Wang, R., Yang, S. L. & Liu, X. L. (2009). Effects of cytokinin growth regulators on senescence of harvested broccoli (*Brassica oleracea* L. var. *italica*) floret. *Acta Horticulturae Sinica*, 36(11), 1619-1626. <https://worldveg.tind.io/record/37718/>
- Wankam, S., Thaipong, K., Havananda, T. & Saradhuldhath, P. (2021). Use of GA₃ and CPPU on berry enlargement of White Malaga table grape. *Agricultural Science Journal*, 52(Suppl. 1), 105-108. <https://crdc.kmutt.ac.th/data2021/journal-crdc13/105-108.pdf> (In Thai)

Received: September 4, 2024; Revised: September 18, 2025; Accepted: March 17, 2026

ฤทธิ์การต้านออกซิเดชันของผงใบอ่อนข้าวหอมมะลิเพื่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์คุกกี้เพื่อสุขภาพ Antioxidant activity of young jasmine rice leaf powder for the development of healthy cookies

ธนิตนันท์ ชะยาสินธุ์¹ และฐานิดา ศรีหาวงศ์^{1*}
Thanitnan Chayasin¹ and Thanida Srihawong^{1*}

¹คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม

¹Faculty of Agricultural Technology, Rajabhat Maha Sarakham University, Maha Sarakham Province

*Corresponding Author E-mail Address : thanidasrihawong@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินฤทธิ์การต้านออกซิเดชันของผงใบอ่อนข้าวหอมมะลิที่ผ่านกระบวนการผลิต 3 รูปแบบ ได้แก่ ชาคั่ว ชาคั่วหมัก และชาคั่วดำ และศึกษาความเป็นไปได้ในการนำผงชาคั่วไปใช้เป็นส่วนผสมในการพัฒนาผลิตภัณฑ์คุกกี้เพื่อสุขภาพ โดยทำการวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านออกซิเดชันด้วยวิธี DPPH และ FRAP รวมถึงปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวม (TPC) และฟลาโวนอยด์รวม (TFC) จากนั้นจึงนำผงชาคั่วที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันไปใช้ในการผลิตคุกกี้ และประเมินการยอมรับทางประสาทสัมผัสของผู้บริโภค ผลการวิเคราะห์พบว่า ผงชาคั่วมีฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระสูงสุดเมื่อพิจารณาจากค่า FRAP (3.40 ± 0.08 mg Fe/DW) ซึ่งสูงกว่าผงชาคั่วหมักและผงชาคั่วดำอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) และมีฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระตามวิธี DPPH (19.98 ± 0.69 mg TE/DW) สูงกว่าผงชาคั่วดำอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แม้ว่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวม (15.96 ± 0.37 mg GAE/DW) และฟลาโวนอยด์รวม (104.22 ± 0.26 mg RE/DW) ในผงชาคั่วจะน้อยกว่าผงชาคั่วหมักและผงชาคั่วดำก็ตาม อย่างไรก็ตาม การที่ผงชาคั่วมีค่า FRAP สูงที่สุด บ่งชี้ว่าผงชาคั่วอาจมีสารออกฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระชนิดอื่นที่มีประสิทธิภาพในการให้อิเล็กตรอนสูงกว่าผงชาคั่วหมักและผงชาคั่วดำ ซึ่งเป็นกลไกสำคัญในการยับยั้งการเกิดอนุมูลอิสระ นอกจากนี้ ค่า DPPH ที่สูงกว่าผงชาคั่วยังส่งเสริมฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของผงชาคั่วอีกด้วย ส่วนผลการประเมินทางประสาทสัมผัสของคุกกี้ที่ผลิตโดยใช้ผงชาคั่วทดแทนแป้งสาลี พบว่า ผู้บริโภคให้การยอมรับผลิตภัณฑ์ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของผงใบอ่อนข้าวหอมมะลิ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในรูปแบบของผงชาคั่ว ในการเป็นส่วนผสมที่มีคุณค่าทางโภชนาการและเป็นแหล่งของสารต้านอนุมูลอิสระสำหรับพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร

คำสำคัญ: ใบอ่อนข้าวหอมมะลิ ฤทธิ์การต้านออกซิเดชัน สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ คุกกี้ ผงชาคั่ว

Abstract

This research aimed to evaluate the antioxidant activity of young jasmine rice leaf powder processed through three different methods: roasting, fermentation, and black tea processing. The study also explored the feasibility of using this powder as an ingredient in the development of healthy cookies. Antioxidant activity was assessed using the DPPH and FRAP assays, along with the determination of total phenolic content (TPC) and total flavonoid content (TFC). Subsequently, different concentrations of the tea powders were used to produce cookies, and consumer acceptance of the resulting products was evaluated. The

results showed that roasted tea powder exhibited the highest antioxidant activity as measured by the FRAP assay (3.40 ± 0.08 mg Fe/DW), which was significantly greater than that of fermented tea powder and black tea powder ($p \leq 0.05$). The DPPH assay also revealed that roasted tea powder had significantly higher antioxidant activity than black tea powder (19.98 ± 0.69 mg TE/DW; $p \leq 0.05$). Although roasted tea powder had lower total phenolic content (15.96 ± 0.37 mg GAE/DW) and total flavonoid content (104.22 ± 0.26 mg RE/DW) compared to black tea powder and fermented tea powder, its superior FRAP value indicates that it may contain other antioxidant compounds with higher electron-donating capacity, a critical mechanism for inhibiting free radical formation. The higher DPPH value of roasted tea powder also supports its antioxidant potential. Sensory evaluation of cookies produced by substituting wheat flour with roasted tea powder showed consumer acceptance of the products. This demonstrates the potential of young jasmine rice leaf tea powder, particularly in its roasted form, as a valuable nutritional ingredient and a source of antioxidants for the development of food innovations, such as healthy cookies.

Keyword: Young jasmine rice leaf, Antioxidant activity, Bioactive compounds, Cookies, Tea powder

บทนำ

ในยุคปัจจุบัน ผู้บริโภคทั่วโลก รวมถึงในประเทศไทย มีความตื่นตัวและใส่ใจในเรื่องสุขภาพมากขึ้น (Department of Health, 2019) แนวโน้มนี้ผลักดันให้เกิดความต้องการอาหารและเครื่องดื่มที่ดีต่อสุขภาพ (Healthy food) เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยอาหารเพื่อสุขภาพหมายถึงอาหารที่ให้คุณค่าทางโภชนาการสูง มีปริมาณไขมัน น้ำตาล และโซเดียมต่ำ และ/หรือมีส่วนประกอบของสารอาหารหรือสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (Bioactive compounds) ที่มีประโยชน์ต่อร่างกาย เช่น สารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidants) โยใยอาหาร (Dietary fiber) และวิตามิน (Anderson & Butcher, 2006; World Health Organization, 2020) ความต้องการอาหารเพื่อสุขภาพที่เพิ่มขึ้นนี้ นำไปสู่การเติบโตของตลาดผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพ ซึ่งรวมถึงขนมขบเคี้ยว (Snack foods) ด้วย ผู้บริโภคให้ความสำคัญในการเลือกรับประทานขนมขบเคี้ยวที่ไม่เพียงแต่ให้อร่อยเท่านั้น แต่ยังดีต่อสุขภาพและมีคุณค่าทางโภชนาการเพิ่มขึ้น ตัวอย่างเช่น คุกกี้ (Cookies) เป็นหนึ่งในขนมขบเคี้ยวที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย แต่คุกกี้ทั่วไปมักมีปริมาณน้ำตาลและไขมันสูง ซึ่งอาจส่งผลเสียต่อสุขภาพหากบริโภคในปริมาณมาก (Lustig, 2010; Khiamkeerati, 2012)

ดังนั้นการพัฒนาคูกกี้เพื่อสุขภาพจึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจในการตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคในปัจจุบัน ใบอ่อนข้าวหอมมะลิเป็นวัตถุดิบทางการเกษตรที่มีศักยภาพในการนำมาพัฒนาเป็นอาหารเพื่อสุขภาพ เนื่องจากมีรายงานว่ามีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพหลายชนิดที่มีประโยชน์ต่อร่างกายมนุษย์ (Jang et al., 2016; Sriboonlue, 2017; Siriamornpun, 2018) สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพเหล่านี้ ได้แก่ สารประกอบฟีนอลิก (Phenolic compounds) และฟลาโวนอยด์ (Flavonoids) ซึ่งเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่สำคัญ (Arts & Hollman, 2005; Pandey & Rizvi, 2009) อนุมูลอิสระเป็นโมเลกุลที่ไม่เสถียรที่สามารถทำลายเซลล์ในร่างกาย และมีส่วนเกี่ยวข้องกับการเกิดโรคเรื้อรังต่าง ๆ เช่น โรคหัวใจ และหลอดเลือด และโรคเมตาบอลิซึม (Lobo et al., 2010; Phaniendra et al., 2015) ดังนั้นการบริโภคอาหารที่มีสารต้านอนุมูลอิสระสูงสามารถช่วยลดความเสี่ยงของการเกิดโรคเหล่านี้ได้ นอกจากนี้ใบอ่อนข้าวหอมมะลิเป็นแหล่งของสารต้านอนุมูลอิสระแล้ว มีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาประโยชน์และศักยภาพของใบอ่อนข้าวหอมมะลิในการนำมาประยุกต์ใช้ในอาหารเพื่อสุขภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านคุณสมบัติทางโภชนาการและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ซึ่งรายงานว่ามีสารสกัดจากใบอ่อนข้าวหอมมะลิอาจมีฤทธิ์ต้านการอักเสบและช่วยลดระดับไขมันในเลือดได้ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการป้องกันโรคไม่ติดต่อเรื้อรัง (Non-Communicable Diseases, NCDs) เช่น เบาหวานและความดันโลหิตสูง และสารบางชนิดในใบอ่อนข้าวหอมมะลิอาจช่วยเสริมสร้างระบบภูมิคุ้มกันของร่างกาย ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการป้องกันโรคติดเชื้อต่าง ๆ ซึ่งในปัจจุบันได้มีการนำใบอ่อนข้าวหอมมะลิมาเป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์อาหารต่าง ๆ เช่น เครื่องดื่มเพื่อสุขภาพ ขนมขบเคี้ยว หรือแม้แต่ส่วนผสมในเบเกอรี่ (Khiamkeerati, 2012) เพื่อเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการและคุณสมบัติเชิงฟังก์ชัน ตัวอย่างเช่น การนำมาผลิตเป็นชาใบอ่อนข้าวหอมมะลิที่มีรสชาติเป็นเอกลักษณ์และอุดมไปด้วยสารต้านอนุมูลอิสระ (Siriamornpun, 2018)

อย่างไรก็ตาม ปริมาณและชนิดของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในใบอ่อนข้าวหอมมะลิอาจแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น สายพันธุ์ของข้าว และกระบวนการแปรรูป (Viriachitra, 2005; Lhaorjpinyo et al., 2014; Ismail, 2016) กระบวนการแปรรูปที่แตกต่างกัน เช่น การคั่ว (Roasting) การหมัก (Fermentation) และการทำเป็นชา (Tea processing) อาจส่งผลต่อปริมาณและคุณสมบัติของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในใบอ่อนข้าวหอมมะลิ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การคั่ว เป็นกระบวนการที่ใช้ความร้อน ซึ่งอาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารประกอบบางชนิด และส่งผลต่อฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ (Nicoli et al., 2000; Vallianou et al., 2021)

จากข้อมูลงานวิจัยดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของกระบวนการผลิตที่แตกต่างกันต่อฤทธิ์การต้านออกซิเดชันและปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในผงใบอ่อนข้าวหอมมะลิ และศึกษาความเป็นไปได้ในการนำผงใบอ่อนข้าวหอมมะลิไปใช้ในการพัฒนาคุกกี้เพื่อสุขภาพ ซึ่งผลการศึกษาที่ได้จะเป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญสำหรับการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูงและตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคในปัจจุบันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

การเตรียมผงชาใบอ่อนข้าวหอมมะลิ

ใบอ่อนข้าวหอมมะลิได้จากการนำเมล็ดข้าวหอมมะลิ สายพันธุ์ 105 มาปลูกในพื้นที่ ตำบลแซ อำเภอกุสุมาลย์ จังหวัดศรีสะเกษ จนมีระยะเวลา 14 วัน และตัดใบขนาดยาวประมาณ 10-12 เซนติเมตร นำมาหั่นเป็นท่อนสั้นขนาด 4-5 เซนติเมตร และนำมาผลิตเป็นผงชาชนิดต่าง ๆ ดังนี้ 1. ชาคั่ว คือ ใบอ่อนข้าวหอมมะลิหั่นเป็นท่อนขนาด 2 นิ้ว นำมาคั่วด้วยเครื่องคั่ว (รุ่น ZBC-8, Grain roaster, China) โดยไฟอ่อนอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที 2. ชาหมัก คือ ใบอ่อนข้าวหอมมะลิ นำมาหั่นเป็นท่อน ขนาด 2 นิ้ว แล้วทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้อง 1 วัน แล้วนำมาคั่วด้วยไฟอ่อน อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที และ 3. ชาดำ คือ ใบอ่อนข้าวหอมมะลิสายพันธุ์ที่มีลักษณะลำต้นและใบสีดำเข้ม หั่นเป็นท่อนขนาด 2 นิ้ว นำมาคั่ว โดยใช้ไฟอ่อน ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที จากนั้นนำชาใบอ่อนข้าวหอมมะลิทั้งหมดมาบดด้วยเครื่องบดแบบละเอียด (รุ่น PE-ECO-2500, Powder grinder SGE, Taiwan) และร่อนด้วยตะแกรงร่อน ขนาด 100 Mesh (Wanyo et al., 2011) และนำไปทดสอบฤทธิ์การต้านออกซิเดชันของผงใบอ่อนข้าวหอมมะลิทางห้องปฏิบัติการต่อไป

การเตรียมตัวอย่างสารสกัด

การสกัดตัวอย่างผงชาใบอ่อนข้าวหอมมะลิได้ดัดแปลงจากวิธีการของ Wanyo et al. (2011) โดยนำตัวอย่างผงชาใบอ่อนข้าวหอมมะลิ ผงชาคั่ว ผงชาดำ และผงชาหมัก ปริมาณ 10 กรัม ผสมกับเอทานอล ความเข้มข้น 80 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร บ่มด้วยเครื่องบ่มเขย่า (LSI-1005R, LabTech, Korea) ความเร็ว 250 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง (Eppendorf 5810R, Germany) ที่ 10,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที กรองอีกครั้งโดยใช้กระดาษกรอง Whatman No. 1 หลังจากนั้นทำการระเหยเอทานอลออกโดยการนำตัวอย่างที่ได้ไปอบด้วยเครื่องอบลมร้อน (Binder, Germany) ที่ 42 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน และเก็บสารสกัดหยาบที่ได้ไว้ -20 องศาเซลเซียส (Panasonic, Thailand) สำหรับการวิเคราะห์ต่อไป

การตรวจวิเคราะห์กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl)

วิเคราะห์กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH ดัดแปลงจากวิธีการของ Zhang et al. (2016) ปีเปตสาร 2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) radical ที่มีความเข้มข้น 0.2 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายเมทานอล 100 มิลลิลิตร เตรียมสารสกัดหยาบ (20 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) ปริมาตร 20 ไมโครลิตร ลงใน 96-Well microplate เติมสารละลาย DPPH 180 ไมโครลิตร บ่มสารผสมที่อุณหภูมิห้องในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที ตัวอย่างควบคุม คือ DPPH 180 ไมโครลิตร จากนั้นนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ 517 นาโนเมตร โดยใช้เครื่อง Microplate reader spectrophotometer (VICTOR® Nivo™, PerkinElmer, Waltham, Massachusetts, USA) โดยทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ค่าที่ได้จะถูกแสดงในหน่วยของมิลลิกรัม Trolox equivalent antioxidant capacity ต่อกรัมน้ำหนักแห้ง (mg TEAC/g DW)

การตรวจวิเคราะห์กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี Ferric Reducing Ability Power (FRAP) Assay

วิเคราะห์กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี FRAP ดัดแปลงจากวิธีการของ Wei et al. (2011) เตรียมสารละลาย FRAP reagent โดยผสม Acetate buffer (pH 3.6) ความเข้มข้น 300 มิลลิโมลาร์ กับสารละลาย 2, 4, 6-Tris (2-pyridyl)-1, 3, 5-Triazine (TPTZ) ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ และ Ferric chloride solution ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) 20 มิลลิโมลาร์ ให้เข้ากัน สารละลายทั้ง 3 ชนิด ในอัตราส่วน 10:1:1 เก็บโดยปราศจากแสง และเตรียมสารสกัดหยาบ (20 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) ปริมาตร 20 ไมโครลิตร ผสมกับ FRAP reagent ปริมาตร 180 ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากัน นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 593 นาโนเมตร โดยใช้เครื่อง Microplate reader spectrophotometer (VICTOR® Nivo™, PerkinElmer, Waltham, Massachusetts, USA) โดยทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง เปรียบเทียบกับสารละลายมาตรฐาน Ferrous sulfate คำนวณค่ากิจกรรมการต้านออกซิเดชัน FRAP ในหน่วยมิลลิกรัม Fe (II) ต่อกรัมน้ำหนักแห้ง (mg Fe(II) /g DW) โดยใช้กราฟมาตรฐานของสาร FeSO_4

การตรวจวิเคราะห์หาปริมาณสารฟลาโวนอยด์ทั้งหมด (Total flavonoids)

ดัดแปลงจากวิธีการของ Tian et al. (2016) โดยเตรียมสารสกัดหยาบ (20 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) โดยบีบปริมาณ 20 ไมโครลิตร ผสมกับน้ำกลั่น ปริมาตร 60 ไมโครลิตร ลงในเพลต 96 หลุม เติมสารละลายโซเดียมไนเตรต (NaNO_3) ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 10 ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากันตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 6 นาที จากนั้นเติมสารละลายอลูมิเนียมคลอไรด์ ($\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 10 ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากันแล้วตั้งทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยา 5 นาที จากนั้นเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 100 ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากันทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร โดยใช้เครื่อง Microplate reader spectrophotometer (VICTOR® Nivo™, PerkinElmer, Waltham, Massachusetts, USA) โดยทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง คำนวณหาปริมาณสารฟลาโวนอยด์ทั้งหมดจากกราฟมาตรฐานของสารมาตรฐานรูติน (Rutin) และรายงานผลในหน่วยมิลลิกรัมรูตินต่อกรัมน้ำหนักแห้ง (mg RE/g DW)

การตรวจวิเคราะห์หาปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมด (Total phenolic)

ดัดแปลงจากวิธีการของ Radošević et al. (2017) และ Thomas et al. (2018) โดยเตรียมสารสกัดหยาบ (20 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) โดยบีบปริมาณ 20 ไมโครลิตร ลงในเพลต 96 หลุม ผสมกับสารละลายฟอลิน-ไซโอแคลเทอ (Folin ciocalteu) ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 100 ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากันทิ้งไว้ 1 นาที จากนั้นเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) ความเข้มข้น 7.5 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 80 ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากันตั้งทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 90 นาที ในที่มืด หลังจากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 750 นาโนเมตร โดยใช้เครื่อง Microplate reader spectrophotometer (VICTOR® Nivo™, PerkinElmer, Waltham, Massachusetts, USA) โดยทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง คำนวณหาปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดจากกราฟมาตรฐานของกรดแกลลิก (Gallic acid) และรายงานผลในหน่วยมิลลิกรัมกรดแกลลิกต่อกรัมน้ำหนักแห้ง (mg GAE/g DW)

การผลิตสุตรคูกี้ใบอ่อนข้าวหอมมะลิเพื่อสุขภาพ

การทดลองนี้ใช้สูตรคูกี้เนย (Luangsakul & Nuankhakul, 2017) มาเป็นสูตรตั้งต้นในการผลิตคูกี้ข้าวใบอ่อนข้าวหอมมะลิ แล้วศึกษาปริมาณผงข้าวใบอ่อนข้าวหอมมะลิที่ใช้ทดแทนแป้งสาลี สำหรับชุดการทดลอง 3 ชุด มีรายละเอียดดังนี้ ชุดการทดลองที่ 1 ไม่มีการทดแทนแป้งสาลีด้วยผงข้าวใบอ่อนข้าวหอมมะลิ (สูตรควบคุม) ชุดการทดลองที่ 2 ทดแทนแป้งสาลีด้วยผงข้าวใบอ่อนข้าวหอมมะลิ 10 กรัม ปริมาณ ร้อยละ 1.52 ของน้ำหนักสูตรคูกี้ และ ชุดการทดลองที่ 3 ทดแทนแป้งสาลีด้วยผงข้าวใบอ่อนข้าวหอมมะลิ 15 กรัม ปริมาณ ร้อยละ 2.28 ของน้ำหนักสูตรคูกี้ โดยผลิตคูกี้ข้าวใบอ่อนข้าวหอมมะลิตามส่วนผสมดัง Table 1

จากนั้นนำผลิตภัณฑ์คูกี้ข้าวใบอ่อนข้าวหอมมะลิทั้ง 3 ตัวอย่าง มาศึกษาการยอมรับของผู้บริโภคด้านประสาทสัมผัสต่อผลิตภัณฑ์คูกี้ข้าวใบอ่อนข้าวหอมมะลิ โดยนำคูกี้ทั้ง 3 ตัวอย่าง ที่พัฒนาขึ้นมาประเมินผลผู้ทดสอบชิมที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 50 คน ซึ่งมีช่วงอายุ 18-60 ปี ได้ทำการประเมินโดยใช้แบบสอบถาม 9-Point hedonic scale (1=ไม่ชอบมากที่สุด 2=ไม่ชอบมาก 3=ไม่ชอบปานกลาง 4=ไม่ชอบเล็กน้อย 5=เฉย ๆ 6=ชอบเล็กน้อย 7=ชอบปานกลาง

8=ชอบมาก และ 9=ชอบมากที่สุด) (Chamber & Wolf, 1996) การเตรียมตัวอย่างคุกกี้แต่ละชิ้นทำโดยบรรจุลงในถุงพลาสติกปิดสนิทและติดรหัสตัวเลข 3 หลักที่ได้จากการสุ่ม จากนั้นจึงเสิร์ฟพร้อมน้ำสำหรับล้างปากให้ผู้ทดสอบผู้ทดสอบได้ชิมและประเมินคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม สำหรับการพัฒนาคูกกี้ใบอ่อนข้าวหอมมะลิในงานวิจัยนี้ ได้ใช้สูตรพื้นฐานคุกกี้เนย แล้วแทนที่แป้งสาลีด้วยผงชาคั่วในสัดส่วนปริมาณ ร้อยละ 0, 1.52 และ 2.28 ตามลำดับ

Table 1 Ingredient formulations for cookies with partial substitution of wheat flour by young jasmine rice leaf tea powder

Ingredients	Formulation 1 (Control formula)	Formulation 2 (1.52%)	Formulation 3 (2.28%)
Young jasmine rice leaf tea (g)	0	10	15
Wheat flour (g)	330	320	315
Butter (g)	200	200	200
Evaporated milk (g)	12	12	12
Icing sugar (g)	100	100	100
Vanilla extract (g)	8	8	8
Salt (g)	5	5	5
Baking powder (g)	3	3	3

การวิเคราะห์ทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบ Complete Randomized Design (CRD) สำหรับการวิเคราะห์ทางเคมีและฤทธิ์การต้านออกซิเดชันของผงใบอ่อนข้าวหอมมะลิ และวางแผนการทดลองแบบ Randomized Completely Block Design (RCBD) สำหรับทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคโดยกำหนดให้บล็อกของการวิเคราะห์ คือผู้ทดสอบข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะนำมาวิเคราะห์ทางสถิติสำเร็จรูป (Statistical package for the social science for windows version 25; SPSS) ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของข้อมูลด้วย One-way ANOVA และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี DMRT (Duncan's new Multiple Range Test) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

ผลการวิจัย

ผลการวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ

จากผลการวิเคราะห์ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (TPC) และปริมาณสารฟลาโวนอยด์ทั้งหมด (TFC) ของชาใบอ่อนข้าวหอมมะลิทั้ง 3 ชนิด พบว่า ชาใบอ่อนข้าวหอมมะลิที่ผ่านกระบวนการคั่วและหมักมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระสูงกว่าผงชาดำอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (Table 2) อย่างไรก็ตาม ปริมาณ TPC โดยรวมในชาคั่วมีปริมาณน้อยกว่าชาดำและชาหมักอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ส่วนปริมาณ TFC ในชาหมักมีค่าสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (Table 2) เมื่อเปรียบเทียบกับชาดำและชาคั่ว ในการศึกษาพบค่า FRAP ซึ่งเป็นดัชนีชี้วัดความสามารถของสารต้านอนุมูลอิสระในการรีดิวซ์สารประกอบและประเมินความสามารถในการให้อิเล็กตรอน เพื่อยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยตรง มีค่าสูงที่สุดในผงชาคั่ว ซึ่งบ่งชี้ว่าผงชาคั่วมีศักยภาพในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่มีประสิทธิภาพสูงในการยับยั้งกลไกการเกิดอนุมูลอิสระ และอาจช่วยป้องกันความเสียหายของเซลล์และลดความเสี่ยงของโรคเรื้อรัง แม้ว่าผงชาคั่วจะมีค่า DPPH ซึ่งเป็นดัชนีชี้วัดความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระ DPPH สูงกว่าผงชาดำเพียงเล็กน้อย แต่ผลการวิเคราะห์นี้สนับสนุนศักยภาพในการต้านอนุมูลอิสระของผงชาคั่ว ดังนั้นผู้วิจัยจึงพิจารณาเลือกใช้ผงชาคั่วในการพัฒนาคูกกี้ เนื่องจากมีค่า FRAP สูงสุด ซึ่งบ่งชี้ถึงความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระที่มีประสิทธิภาพ

Table 2 Antioxidant activity and bioactive compound contents of tea extract samples

Young jasmine rice leaf tea powder	Bioactive compounds			
	DPPH (mg TE/g DW)	FRAP (mg Fe (II)/g DW)	TPC (mg GAE/g DW)	TFC (mg RE/g DW)
Roasted tea	19.98±0.69 ^a	3.40±0.08 ^a	15.96±0.37 ^b	104.22±0.26 ^c
Fermented tea	16.16±0.88 ^b	3.22±0.10 ^b	17.65±0.61 ^a	105.43±0.26 ^b
Black tea	19.42±0.79 ^a	3.27±0.03 ^{ab}	18.39±0.25 ^a	109.30±0.36 ^a

Note: Different lowercase letters (a, b, c) within the same column indicate a statistically significant difference ($p \leq 0.05$). Roasted tea powder: Young jasmine rice leaves cut into 4-5 cm pieces, then roasted over low heat. Fermented tea powder: Young jasmine rice leaves cut into 4-5 cm pieces, left at room temperature for 1 day, then roasted over low heat. Black tea powder: Young jasmine rice leaves from a cultivar with some black stems and leaves, cut into 4-5 cm pieces, then roasted over low heat.

ผลการศึกษาการยอมรับของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์คุกกี้ชาใบอ่อนข้าวหอมมะลิ

จากผลการทดสอบข้างต้น พบว่า ผงชาคั่วจะมีค่า DPPH ซึ่งเป็นดัชนีชี้วัดความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระ DPPH สูงกว่าผงชาดำเพียงเล็กน้อย แต่ผงชาคั่วมีค่า FRAP สูงสุด ซึ่งบ่งชี้ถึงความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระที่มีประสิทธิภาพ ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ผงชาคั่วมาทดแทนแป้งสาลีในการพัฒนาคุกกี้ โดยจากการศึกษาการยอมรับของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์คุกกี้ชาใบอ่อนข้าวหอมมะลิที่มีการทดแทนแป้งสาลีด้วยผงชาใบอ่อนข้าวหอมมะลิในปริมาณแตกต่างกัน (Table 3) พบว่า ผู้ทดสอบให้การยอมรับด้านกลิ่นและเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์คุกกี้ชาใบอ่อนข้าวหอมมะลิทั้ง 3 สูตรไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) โดยให้คะแนนความชอบอยู่ในระดับชอบปานกลาง ด้านรสชาติ สูตรที่มีการทดแทนแป้งสาลีด้วยผงชาใบอ่อนข้าวหอมมะลิปริมาณร้อยละ 0 (สูตรควบคุม) และ ร้อยละ 2.28 ได้รับคะแนนความชอบมากกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรที่มีการทดแทนแป้งสาลีด้วยผงชาใบอ่อนข้าวหอมมะลิ ปริมาณ ร้อยละ 1.52 ($p \leq 0.05$) ส่วนคุณลักษณะด้านลักษณะปรากฏ สีและความชอบโดยรวมของสูตรที่มีการทดแทนแป้งสาลีด้วยผงชาใบอ่อนข้าวหอมมะลิปริมาณ ร้อยละ 0 (สูตรควบคุม) และ ร้อยละ 1.52 ได้รับคะแนนความชอบมากกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรที่มีการทดแทนแป้งสาลีด้วยผงชาใบอ่อนข้าวหอมมะลิ ปริมาณ ร้อยละ 2.28 ($p \leq 0.05$) ดังนั้น เมื่อพิจารณาจากคะแนนความชอบโดยรวมของผู้ทดสอบให้คะแนนความชอบในสูตรที่มีการทดแทนแป้งสาลีด้วยผงชาใบอ่อนข้าวหอมมะลิปริมาณ ร้อยละ 0 (สูตรควบคุม) และ ร้อยละ 1.52 ไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงคุณประโยชน์จากชาใบอ่อนข้าวหอมมะลิ และวัตถุประสงค์เพื่อต้องการผลิตภัณฑ์คุกกี้ชาใบอ่อนข้าวหอมมะลิเพื่อสุขภาพ การผลิตคุกกี้โดยทดแทนแป้งสาลีด้วยผงชาใบอ่อนข้าวหอมมะลิ ปริมาณ ร้อยละ 1.52 จึงเป็นสูตรที่ดีที่สุด

Table 3 Consumer acceptance of young jasmine rice leaf tea cookies with wheat flour substituted by young jasmine rice leaf tea powder

Characteristics	Young jasmine rice leaf tea cookies samples		
	0% (Control formula)	1.52%	2.28%
Appearance	7.53±1.04 ^a	7.53±0.97 ^a	7.17±1.15 ^b
Color	7.77±0.94 ^a	7.43±1.17 ^{ab}	7.23±1.36 ^b
Aroma ^{ns}	7.60±1.19	7.37±1.13	7.70±1.12
Taste	8.23±0.68 ^a	7.73±1.08 ^b	7.83±0.99 ^{ab}
Texture ^{ns}	7.80±1.00	7.80±1.10	7.80±1.03
Overall liking	8.13±0.82 ^a	7.83±0.95 ^{ab}	7.73±0.98 ^b

Note: Different lowercase letters (a, b) within the same horizontal row indicate a statistically significant difference ($p \leq 0.05$).

"ns" denotes no statistically significant difference ($p > 0.05$).

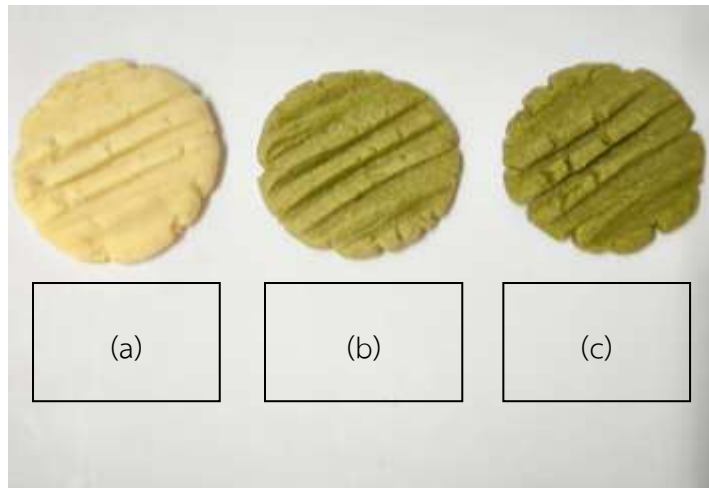


Figure 1 Young jasmine rice leaf tea cookies with wheat flour replaced by young jasmine rice leaf powder: (a) 0% (Control formula), (b) 1.52% and (c) 2.28%

การอภิปรายผล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินฤทธิ์การต้านออกซิเดชันของผงใบอ่อนข้าวหอมมะลิที่ผ่านกระบวนการผลิต 3 รูปแบบ และศึกษาความเป็นไปได้ในการนำผงดังกล่าวไปพัฒนาผลิตภัณฑ์คุกกี้เพื่อสุขภาพ ผลการศึกษาได้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างกระบวนการผลิต ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ รวมถึงการยอมรับทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์คุกกี้ จากการประเมินฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระและปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในผงใบอ่อนข้าวหอมมะลิที่ผ่านกระบวนการผลิตแตกต่างกัน พบว่า ผงชาคั่วแสดงฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระสูงสุด เมื่อพิจารณาจากค่า FRAP ซึ่งเป็นดัชนีบ่งชี้ความสามารถในการรีดิวซ์สารประกอบเฟอร์ริกไอออนให้เป็นเฟอร์รัสไอออน ซึ่งสะท้อนถึงศักยภาพในการให้อิเล็กตรอน (Electron) เพื่อยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Lobo et al., 2010) ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Del Castillo et al. (2002) และ Manzocco et al. (2016) รายงานว่ากระบวนการคั่ว (Roasting) สามารถเพิ่มฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในผลิตภัณฑ์ เช่น กาแฟและโกโก้ โดยเป็นกลไกสำคัญจากการเกิดปฏิกิริยา Maillard ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ซับซ้อนระหว่างหมู่คาร์บอนิลของน้ำตาลกับหมู่อะมิโนอิสระของโปรตีนหรือกรดอะมิโนภายใต้สภาวะความร้อนสูง ก่อให้เกิดสารประกอบใหม่หลายชนิดที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ เช่น เมลานอยดินส์ (Melanoidins) ซึ่งเป็นสารประกอบสีน้ำตาลเข้มที่มีโครงสร้างซับซ้อนและมีคุณสมบัติในการยับยั้งอนุมูลอิสระที่มีประสิทธิภาพ (Van Boekel, 2001) นอกจากนี้ ค่า DPPH ที่สูงกว่าผงชาคั่วยังส่งเสริมประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระของผงชาคั่วอีกด้วย วิธีการ DPPH เป็นอีกวิธีที่นิยมใช้ในการวัดความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ โดยประเมินความสามารถของสารประกอบในการลดอนุมูลอิสระ DPPH ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวม (TPC) และฟลาโวนอยด์รวม (TFC) แม้จะมีความสำคัญ แต่ก็ไม่ใช่ว่าปัจจัยเดียวที่กำหนดฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระโดยรวมของผลิตภัณฑ์ ซึ่งผลการวิเคราะห์ พบว่า ปริมาณ TPC และ TFC ในผงชาคั่วมีปริมาณน้อยกว่าผงชาดำและผงชาหมักอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ความขัดแย้งระหว่างปริมาณสารประกอบฟีนอลรวมและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่วัดได้ด้วย FRAP ในผงชาคั่ว อาจอธิบายได้ว่ากลไกการออกฤทธิ์ของสารต้านอนุมูลอิสระไม่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณของ TPC และ TFC เพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับชนิด โครงสร้างทางเคมี ความสามารถในการละลาย และการทำงานร่วมกัน (Synergistic effect) ของสารประกอบอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นหรือถูกปลดปล่อยในระหว่างกระบวนการแปรรูป (Chu et al., 2002; Wong et al., 2006) นอกจากนี้ กระบวนการคั่วอาจทำให้สารประกอบฟีนอลบางชนิดเสื่อมสลายไปพร้อมกับการสร้างสารออกฤทธิ์ใหม่ขึ้นมาทดแทน เช่น เมลานอยดินส์ (Melanoidins) หรือมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่ส่งผลต่อการจับกับอนุมูลอิสระ (Nicoli et al., 2000) สำหรับผงชาหมักที่แสดงปริมาณ TPC และ TFC สูงที่สุดนั้น อาจเป็นผลมาจากการที่กระบวนการหมักภายใต้การควบคุมสภาวะที่เหมาะสม สามารถช่วยสลายโครงสร้างผนังเซลล์พืช ทำให้สารประกอบฟีนอลที่ถูกกักเก็บอยู่ภายในสามารถสกัดออกมาได้มากขึ้น หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงทาง

ชีวภาพที่สร้างสารประกอบฟีนอลใหม่ขึ้นมา (Wanyo et al., 2011) ดังนั้นจากผลการวิจัยจึงเลือกใช้ผงชาคั่วในการพัฒนาคุกกี้ เนื่องจากมีค่า FRAP สูงสุด ซึ่งบ่งชี้ถึงความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระที่มีประสิทธิภาพ

ในการศึกษาการยอมรับของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์คุกกี้ที่ผสมผงใบอ่อนข้าวหอมมะลิ พบว่า การใช้ผงชาคั่วทดแทนแป้งสาลีในสัดส่วน ร้อยละ 1.52 เป็นสูตรที่เหมาะสมที่สุดเมื่อพิจารณาจากผลการประเมินทางประสาทสัมผัสและคุณสมบัติทางสุขภาพ ผู้บริโภคยังคงให้การยอมรับผลิตภัณฑ์ในระดับปานกลาง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของผงใบอ่อนข้าวหอมมะลิในการเป็นส่วนผสมเชิงหน้าที่ (Functional ingredient) ที่สามารถเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการและสารต้านอนุมูลอิสระให้กับผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ที่เป็นที่นิยม (Khamkeerati, 2012) การใช้ผงใบอ่อนข้าวหอมมะลิไม่เพียงแต่เพิ่มคุณค่าทางโภชนาการด้วยสารประกอบฟีนอล ฟลาโวนอยด์ (Goufo & Trindade, 2014) และ GABA (Ito et al., 2005) แต่ยังอาจช่วยเพิ่มลักษณะทางประสาทสัมผัสเฉพาะตัวให้กับผลิตภัณฑ์ด้วยกลิ่นหอมเฉพาะตัวของข้าว (Luangsakul & Nuankhakul, 2017) ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มของผู้บริโภคที่หันมาใส่ใจสุขภาพและมองหาอาหารเพื่อสุขภาพมากขึ้น (Global Wellness Institute, 2018)

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้มีข้อจำกัดบางประการที่ควรนำมาพิจารณา ประการแรก การศึกษาฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพดำเนินการในหลอดทดลอง (In vitro) ซึ่งอาจไม่สามารถสะท้อนถึงประสิทธิภาพที่แท้จริงในระบบชีวภาพที่ซับซ้อนของมนุษย์ได้อย่างสมบูรณ์ (Kroeger et al., 2012) ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมในระดับเซลล์ (In vitro cell culture) หรือในสัตว์ทดลอง (In vivo animal models) เพื่อประเมินผลกระทบทางชีวภาพและกลไกการออกฤทธิ์ของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในผงใบอ่อนข้าวหอมมะลิที่มีต่อสุขภาพโดยตรง ประการที่สอง การศึกษาการยอมรับของผู้บริโภคดำเนินการกับกลุ่มตัวอย่างจำกัด ซึ่งอาจส่งผลต่อความสามารถในการสรุปผลสำหรับประชากรกลุ่มใหญ่ได้ (Chamber & Wolf, 1996) การขยายขนาดและเพิ่มความหลากหลายของกลุ่มตัวอย่างในการทดสอบทางประสาทสัมผัสจะช่วยให้ได้ผลลัพธ์ที่เป็นตัวแทนและสามารถนำไปใช้ในการวางแผนการตลาดและการพัฒนาผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์ได้ดียิ่งขึ้น สำหรับงานวิจัยในอนาคต ควรเน้นการวิเคราะห์เชิงลึกเพื่อระบุและหาปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพเฉพาะตัวในผงใบอ่อนข้าวหอมมะลิที่ผ่านกระบวนการผลิตแต่ละรูปแบบด้วยเทคนิคขั้นสูง เช่น HPLC-MS เพื่อให้ได้ข้อมูลที่แม่นยำเกี่ยวกับสารประกอบฟีนอล ฟลาโวนอยด์ และสารประกอบอื่น ๆ ที่มีส่วนในฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (Tian et al., 2016; Thomas et al., 2018) นอกจากนี้ ควรมีการศึกษาความคงตัวของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพเหล่านี้ในระหว่างกระบวนการผลิตคุกกี้ และการเก็บรักษา เพื่อให้มั่นใจว่าผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปยังคงรักษาคุณสมบัติเชิงหน้าที่ไว้ได้ดี (Zhang et al., 2016) การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีกายภาพ (Physicochemical properties) ของคุกกี้ที่เสริมด้วยผงใบอ่อนข้าวหอมมะลิกับคุกกี้เชิงการค้าตามท้องตลาด เช่น สี เนื้อสัมผัส ความชื้น และปริมาณใยอาหาร จะเป็นข้อมูลสำคัญในการประเมินศักยภาพทางการตลาดและการพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้ตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคอย่างครบวงจร การศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลของผงชาใบอ่อนข้าวหอมมะลิที่มีต่ออายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์คุกกี้นั้นในด้านความปลอดภัยทางจุลชีววิทยาและคุณภาพทางประสาทสัมผัสก็เป็นปัจจัยที่มีความจำเป็นในการพัฒนาและควบคุมคุณภาพเพื่อให้ผลิตภัณฑ์สามารถวางจำหน่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย

บทสรุป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาและประเมินฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของผงใบอ่อนข้าวหอมมะลิในสามรูปแบบที่แตกต่างกัน ผลการศึกษาพบว่า ผงชาคั่วแสดงประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญ แม้ว่าปริมาณสารประกอบฟีนอลและฟลาโวนอยด์ในรูปแบบนี้จะต่ำกว่ารูปแบบอื่น ๆ ก็ตาม ความโดดเด่นของฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในผงชาคั่วนี้อธิบายได้ด้วยกระบวนการคั่ว ซึ่งกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยา Maillard และนำไปสู่การสร้างสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สำคัญ เช่น เมลานอยดินส์ (Melanoidins) จากผลการทดลองงานวิจัยได้ต่อยอดสู่การพัฒนาคุกกี้สุขภาพ โดยใช้ผงชาคั่วจากใบอ่อนข้าวหอมมะลิในปริมาณ ร้อยละ 1.52 ทดแทนแป้งสาลี ผลการทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคแสดงให้เห็นถึงการยอมรับในระดับมาก บ่งชี้ถึงศักยภาพอันโดดเด่นของผงใบอ่อนข้าวหอมมะลิในการเป็นส่วนผสมเชิงหน้าที่ (Functional ingredient) ที่ไม่เพียงแต่เพิ่มคุณค่าทางโภชนาการและสารต้านอนุมูลอิสระให้กับผลิตภัณฑ์อาหารเท่านั้น แต่ยังมอบกลิ่นหอมเฉพาะตัวของข้าวหอมมะลิ ซึ่งเป็นที่ต้องการของผู้บริโภคที่ใส่ใจสุขภาพและมองหาทางเลือกอาหารที่มีประโยชน์ งานวิจัยนี้จึงเน้นถึงบทบาทของผงใบอ่อนข้าวหอมมะลิในการตอบรับเทรนด์สุขภาพและโภชนาการในปัจจุบัน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ได้สนับสนุนทุนอุดหนุนวิจัย จากงบประมาณเงินรายได้ (บกศ.) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2566

เอกสารอ้างอิง

- Anderson, J. W., & Butcher, L. M. (2006). A comprehensive review of the safety and efficacy of GRAS vegetable fiber ingredients. *Journal of the American College of Nutrition*, 25(6), 518-544.
- Arts, I. C., & Hollman, P. C. (2005). Polyphenols and disease risk in epidemiologic studies. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 81(2), 317S-325S.
- Chamber, IV. E., & Wolf, M. B. (1996). *Sensory testing methods*. ASTM International.
- Chu, Y. F., Sun, J., Wu, X., & Liu, R. H. (2002). Antioxidant and antiproliferative activities of common vegetables. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(23), 6910-6916.
- Department of Health. (2019). *NCDs situation report 2019*. Ministry of Public Health. (In Thai)
- Goufo, P., & Trindade, H. (2014). Rice antioxidants: Phenolic acids, flavonoids, anthocyanins, proanthocyanidins, tocopherols and phytic acid. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 54(6), 634-659.
- Ismail, A. (2016). *Rice bran and rice bran oil*. AOCS Press.
- Ito, Y., Hayakawa, T., Ozawa, K., Kimura, M., & Kasai, T. (2005). Concentration of γ -aminobutyric acid (GABA) in rice grains and milled rice. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(16), 6085-6089.
- Jang, H. H., Kim, J. Y., Lee, S. H., & Lee, M. S. (2016). Beneficial effects of rice bran extract on metabolic syndrome in high-fat diet-induced obese mice. *Biological and Pharmaceutical Bulletin*, 39(6), 996-1002.
- Khiamkeerati, S. (2012). The effect of bakery product consumption on health. *Journal of Nutrition*, 47(1), 1-10. (In Thai)
- Kroeger, N., Carstens, M. E., & Letmathe, P. (2012). In vitro and in vivo methods to evaluate the antioxidant potential of phytochemicals. *Food Chemistry*, 135(3), 1027-1034.
- Lhaorjipinyo, T., Sae-Koo, T., Chueawongngarm, P., & Arekul, W. (2014). Effects of cultivar and duration on phytochemical content and antioxidant activity in various rice seedlings. In *The 3rd National Rice Conference*. Miracle Grand Convention Hotel. (In Thai)
- Lobo, V., Patil, A., Phatak, A., & Chandra, N. (2010). Free radicals, antioxidants and functional foods: Role in human health. *Pharmacognosy Reviews*, 4(8), 118-126.
- Luangsakul, N., & Nuankhakul, S. (2017). *Cookie bible bakery* (4th ed.). Amarin cuisine amarin printing and publishing. (In Thai)
- Lustig, R. H. (2010). Fructose 2.0: Metabolic, genetic, and societal implications of fructose excess. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 91(6), 1395-1396.
- Manzocco, L., Laghi, L., & Nicoli, M. C. (2016). Influence of roasting degree on the antioxidant activity of coffee brews. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 64(16), 3144-3149.
- Nicoli, M. C., Manzocco, L., & Lerici, C. R. (2000). Antioxidant properties of coffee brews as influenced by processing. *Food Science and Technology*, 33(7), 519-524.
- Pandey, K. B., & Rizvi, S. I. (2009). Plant polyphenols as dietary antioxidants in human health and disease. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2(5), 270-278.

- Phaniendra, A., Jestadi, D. B., & Perraju, G. A. (2015). Free radicals: Properties, sources, targets, and their implication in various diseases. *Indian Journal of Clinical Biochemistry*, 30(1), 11-26.
- Radosevic, K., Srcek, V. G., Bubalo, M. C., Rimac Brncic, S., Takacs, K., & Redovnikovic, I. R. (2017). Assessment of glucosinolates, antioxidative and antiproliferative activity of broccoli and collard extracts. *Journal of Food Composition and Analysis*, 61, 59-66.
<https://doi.org/10.1016/j.jfca.2017.02.001>
- Siriamornpun, S. (2018). Beverage from Hom Mali young rice leaves, raw material from local wisdom. *Research Community*, 23(138), 6-9. (In Thai)
- Sriboonlue, S. (2017). *Study on chemical composition and biological activities of rice leaves*. (Master's thesis, Chiang Mai University). (In Thai)
- Thomas, M., Badr, A., Desjardins, Y., Gosselin, A., & Angers, P. (2018). Characterization of industrial broccoli discards (*Brassica oleracea* var. *italica*) for their glucosinolate, polyphenol and flavonoid contents using UPLC MS/MS and spectrophotometric methods. *Food Chemistry*, 245, 1204-1211.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.11.021>
- Tian, M., Xu, X., Liu, Y., Xie, L., & Pan, S. (2016). Effect of Se treatment on glucosinolate metabolism and health-promoting compounds in the broccoli sprouts of three cultivars. *Food Chemistry*, 190, 374-380. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.05.098>
- Del Castillo, M.D., Ames, J.M., Gordon, M.H. (2002). The effect of roasting on the antioxidant capacity of coffee brew. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(13), 3698-3703.
<https://doi.org/10.1590/S0101-20612005000200035>
- Van Boekel, M. A. J. S. (2001). Kinetic aspects of the Maillard reaction. *Food Chemistry*, 68(3), 223-239.
- Viriyachitra, P. (2005). *Rice: Science and technology*. O.S. Printing House. (In Thai)
- Wanyo, P., Siriamornpun, S., & Meeso, N. (2011). Improvement of quality and antioxidant properties of dried mulberry leaves with combined far-infrared radiation and air convection in Thai tea process. *Food and Bioproducts Processing*, 89(1), 22-30.
- Wei, L. S., Wee, W., Siong, J. Y. F., & Syamsumir, D. F. (2011). Characterization of anticancer, antimicrobial, antioxidant properties and chemical compositions of *Peperomia pellucida* leaf extract. *Acta Medica Iranica*, 49(10), 670-674.
- Wong, C. C., Li, H. B., Cheng, K. W., & Chen, F. (2006). A systematic survey of antioxidant activity of 30 Chinese medical plants using the ferric reducing antioxidant power assay. *Food Chemistry*, 97, 705-711.
- World Health Organization. (2020). *Diet, nutrition and prevention of chronic diseases: Report of a joint WHO/FAO expert consultation*.
- Zhang, L., Tu, Z. C., Yuan, T., Wang, H., Xie, X., & Fu, Z. F. (2016). Antioxidants and α -glucosidase inhibitors from *Ipomoea batatas* leaves identified by bioassay-guided approach and structure-activity relationships. *Food Chemistry*, 208, 61-67. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.03.079>

Received: May 27, 2025; Revised: September 26, 2025; Accepted: March 17, 2026

การผลิต การตลาด และแนวทางการส่งเสริมแพะเนื้อ อำเภอหนองกี่ จังหวัดบุรีรัมย์
Production, marketing and guidelines for extension of meat goat
in Nongki District, Buriram Province

ศิวาลัยกร โพนยะพันธ์¹ และสุกัลยา เชิญขวัญ^{1*}
Siwalaikon Phonyapanh¹ and Sukanlaya Choenkwan^{1*}

¹คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น

¹Faculty of Agriculture, Khon Kaen University, Khon Kaen Province

*Corresponding Author E-mail Address : sukanl@kku.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาข้อมูลพื้นฐานของเกษตรกรผู้เลี้ยงแพะเนื้อ พร้อมทั้งอธิบายกระบวนการผลิตและการตลาด และเสนอแนวทางการส่งเสริมและพัฒนาการผลิตและการตลาดแพะเนื้อให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น เก็บรวบรวมข้อมูลโดยใช้แบบสัมภาษณ์แบบมีโครงสร้างกับเกษตรกรผู้เลี้ยงแพะเนื้ออำเภอหนองกี่ จังหวัดบุรีรัมย์ จำนวน 53 ราย และผู้รวบรวมแพะเนื้อจำนวน 2 คน และจัดเวทีประชุมกลุ่มตัวแทนเกษตรกร 25 ราย ผลการศึกษาพบว่า เกษตรกรส่วนใหญ่เป็นเพศชาย (ร้อยละ 62.26) อายุเฉลี่ย 52.32 ปี การศึกษาระดับประถมศึกษา อาชีพหลักคือเกษตรกร มีประสบการณ์เลี้ยงแพะเนื้อเฉลี่ย 3.36 ปี รายได้รวมเฉลี่ย 147,098.11 บาทต่อปี โดยเป็นรายได้จากแพะเนื้อ 33,826.42 บาท การเลี้ยงส่วนใหญ่เป็นแบบขังคอก (ร้อยละ 81.13) ใช้อาหารทั้งหยาบและสำเร็จรูป แหล่งความรู้หลักมาจากเพื่อนบ้านและสื่อโซเชียล และทุกคนให้วัคซีนและยาป้องกันโรคอย่างเหมาะสม รูปแบบการจำหน่ายแพะแบ่งออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่ ลูกแพะเพื่อทำพันธุ์หรือเป็นแพะขุน แพะขุนเล็ก แพะขุนใหญ่ โดยแพะขุนจะมีการซื้อขายแบบตกลงราคาตามน้ำหนักกับพ่อค้าคนกลาง และแพะปลดมักจะเน้นไปที่ตลาดที่ต้องการเนื้อแพะในราคาประหยัด แนวทางการส่งเสริมประกอบด้วย 1) การพัฒนาการผลิตและควบคุมคุณภาพ 2) การขยายช่องทางการตลาด 3) การเสริมสร้างความรู้และทักษะเกษตรกร และ 4) การรวมกลุ่มและพัฒนาสถาบันเกษตรกร

คำสำคัญ: แพะเนื้อ แนวทางการส่งเสริมแพะเนื้อ จังหวัดบุรีรัมย์

Abstract

This study aimed to examine the socio-economic characteristics of meat goat farmers, describe production and marketing practices, and propose strategies to enhance production and marketing efficiency in Nong Ki District, Buriram Province. Data were collected through structured interviews with 53 farmers and two traders, as well as a focus group with 25 farmer representatives. The findings showed that most farmers were male (62.26%), with an average age of 52.32 years. Most had attained a primary school education and agriculture was their main occupation. They had an average of 3.36 years of goat farming experience and an annual household income of 147,098.11 THB, of which 33,826.42 THB came from goat production. Pen-based rearing (81.13%) was predominant, with feed consisting of both roughage and concentrates.

Knowledge was mainly acquired from neighbors and social media, and all farmers practiced proper vaccination and disease prevention. Meat goat marketing including kids for breeding or fattening, small and large fattened goats, and culled goats were typically sold to middlemen based on weight-negotiated prices. Development strategies recommended were improving production and quality control, expanding market channels, enhancing farmers' knowledge and skills, and promoting group formation and institutional strengthening.

Keywords: Meat goat, Meat goat promoting, Buriram

บทนำ

ในปัจจุบัน แพะถือเป็นสัตว์เคี้ยวเอื้องเศรษฐกิจที่มีความสำคัญต่อเกษตรกร เนื่องจากแพะสามารถเลี้ยงและดูแลง่าย ปรับตัวเข้ากับสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย และมีต้นทุนการเลี้ยงต่ำ นอกจากนี้ เนื้อแพะยังเป็นแหล่งโปรตีนที่มีคุณค่าทางอาหารสูงและธาตุเหล็กได้เทียบเท่ากับเนื้อสัตว์อื่น ๆ ทำให้มีความต้องการจากประเทศที่กำลังพัฒนาและประเทศที่พัฒนาแล้วเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในกลุ่มประเทศอาเซียน ประเทศไทยจัดเป็นอันดับที่ 6 ในการเลี้ยงแพะเนื่องจากทั้งสิ้น 10 ประเทศ โดยมีแนวโน้มการบริโภคแพะเนื้อเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง (Department of Livestock Development, 2022) ตลาดแพะเนื้อของประเทศไทยมีทั้งการส่งออกและการบริโภคภายในประเทศ โดยในแต่ละปีมีการส่งออกประมาณ 150,000-180,000 ตัว ซึ่งตลาดส่งออกที่สำคัญ ได้แก่ ประเทศมาเลเซีย ลาว และเวียดนาม ขณะเดียวกัน การบริโภคภายในประเทศอยู่ที่ประมาณ 80,000-100,000 ตัวต่อปี สำหรับราคาจำหน่ายแพะเนื้อพบว่า แพะเพศผู้มีราคาประมาณ 120-130 บาทต่อกิโลกรัม ส่วนแพะเพศเมียมีราคาประมาณ 80-100 บาทต่อกิโลกรัม (Office of Agricultural Economics Region 12, 2022)

การเลี้ยงแพะในประเทศไทยโดยทั่วไปเกษตรกรจะเลี้ยงแพะเป็นอาชีพรองร่วมกับกิจกรรมทางการเกษตรอื่น ๆ เช่น การทำสวน ทำไร่ ทำนา และการประมง เนื่องจากแพะต้องการพื้นที่การเลี้ยงน้อยและสามารถให้ผลผลิตได้ทั้งเนื้อ นม หนัง และขน ถือเป็นข้อได้เปรียบที่สำคัญเมื่อเทียบกับการเลี้ยงสัตว์ชนิดอื่น (Hongsapak, 2013) ประเทศไทยเลี้ยงแพะเนื้ออยู่ทุกภูมิภาค แบ่งเป็นเขตปศุสัตว์ จำนวน 9 เขต โดยมีแพะทั้งหมด จำนวน 1,244,210 ตัว จากครัวเรือนเกษตรกรผู้เลี้ยงแพะเนื้อ 83,493 ครัวเรือน ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีการเลี้ยงแพะเนื้อทั้งหมด 241,344 ตัว จากครัวเรือนเกษตรกร 10,733 ครัวเรือน โดยจังหวัดที่มีการเลี้ยงแพะมากที่สุดคือจังหวัดนครราชสีมา อย่างไรก็ตามจำนวนแพะเนื้อในปัจจุบันยังนับว่ามีจำนวนน้อยเนื่องจากมีแนวโน้มความต้องการบริโภคแพะเนื้อมากขึ้น ส่งผลให้ตลาดการค้าแพะเนื้อไม่เพียงพอต่อความต้องการ (Department of Livestock Development, 2021)

จังหวัดบุรีรัมย์ อำเภอหนองกี่เป็นพื้นที่ที่มีการเลี้ยงแพะเนื้อสูงที่สุด มีแพะเนื้อจำนวน 14,343 ตัว จากครัวเรือนเกษตรกร 815 ราย การเลี้ยงแพะเนื้อในพื้นที่ที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจครัวเรือน แต่ยังคงมีปัญหาด้านการจัดการ การคัดเลือกพ่อพันธุ์ แม่พันธุ์ การรักษาสุขอนามัย และการตลาด ซึ่งส่งผลให้เกษตรกรขาดอำนาจในการต่อรองราคาและถูกผู้รับซื้อหรือพ่อค้าคนกลางเอาเปรียบ จากปัญหาดังกล่าวชี้ให้เห็นถึงความจำเป็นในการยกระดับระบบการผลิตและการตลาดของแพะเนื้อให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น การนำแนวคิดการจัดการห่วงโซ่อุปทาน มาประยุกต์ใช้ จึงเป็นแนวทางที่เหมาะสมเพื่อแก้ไขปัญหาซึ่งการจัดการห่วงโซ่อุปทานคือ กระบวนการวางแผน การนำไปปฏิบัติ และการควบคุมกิจกรรมทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับกระแสสินค้าและบริการ ตั้งแต่การจัดการวัตถุดิบไปจนถึงการส่งมอบสินค้าถึงมือผู้บริโภคคนสุดท้าย รวมถึงข้อมูลที่เกี่ยวข้องในทุกขั้นตอนดังนั้นการจัดการห่วงโซ่อุปทานที่มีประสิทธิภาพจึงเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อสร้างความสัมพันธ์ที่ดีระหว่างผู้จัดหาวัตถุดิบ ผู้ผลิต ผู้จำหน่าย และลูกค้า ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต ลดต้นทุน และเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขัน

ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษาสภาพการผลิตและการตลาดแพะเนื้อ รวมถึงเสนอแนวทางการส่งเสริมและพัฒนาการผลิตและการตลาดแพะเนื้อในพื้นที่อำเภอหนองกี่ จังหวัดบุรีรัมย์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในระบบการผลิตและการตลาดแพะเนื้อให้ตอบสนองต่อความต้องการของตลาดที่เพิ่มขึ้นและเสริมสร้างความสามารถในการแข่งขันของเกษตรกรรายย่อยที่ครอบคลุมและเหมาะสมกับสภาพปัจจุบันของพื้นที่ศึกษา ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อเกษตรกร หน่วยงานที่เกี่ยวข้อง และเป็นแนวทางในการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมในอนาคต และสามารถนำไปปรับใช้ในพื้นที่อื่นต่อไป

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง ได้แก่ 1) เกษตรกรผู้เลี้ยงแพะเนื้อในรอบการเลี้ยงปี พ.ศ. 2565 ในเขตอำเภอหนองกี่ จังหวัดบุรีรัมย์ จำนวน 53 ราย 2) ผู้รวบรวมแพะเนื้อทั้งในและนอกพื้นที่ อำเภอหนองกี่ ที่มีประสบการณ์จำหน่ายแพะเนื้อไม่น้อยกว่า 1 ปี จำนวน 2 คน และ 3) ตัวแทนเกษตรกรผู้เลี้ยงแพะเนื้อจำนวน 25 ราย

เครื่องมือที่ใช้ในการรวบรวมข้อมูลเกษตรกรผู้เลี้ยงแพะเนื้อ ได้แก่ แบบสัมภาษณ์แบบมีโครงสร้าง มีลักษณะคำถามเป็นแบบปลายปิดและปลายเปิดประกอบด้วย 4 ส่วน ดังนี้ ส่วนที่ 1 ข้อมูลพื้นฐานเกษตรกร ส่วนที่ 2 ระบบการผลิตและจำหน่ายแพะเนื้อ ส่วนที่ 3 ปัญหาที่พบในการเลี้ยงแพะเนื้อการรับมือกับปัญหา และความต้องการการส่งเสริมการเลี้ยงแพะเนื้อ และส่วนที่ 4 แนวทางการส่งเสริมและพัฒนาการเลี้ยงแพะเนื้อ และรวบรวมข้อมูลโดยการจัดเวทีประชุมกลุ่มตัวแทนเกษตรกรผู้เลี้ยงแพะเนื้อจำนวน 25 ราย

เครื่องมือที่ใช้ในการรวบรวมข้อมูลผู้รวบรวมแพะเนื้อที่ 1 และผู้รวบรวมแพะเนื้อที่ 2 ได้แก่ แบบสัมภาษณ์แบบมีโครงสร้าง มีลักษณะคำถามเป็นแบบปลายเปิด ประกอบด้วย 3 ส่วน ดังนี้ ส่วนที่ 1 ข้อมูลพื้นฐานผู้ให้ข้อมูล ส่วนที่ 2 การรับซื้อ จำหน่าย อุปสรรคที่พบและการรับมือกับปัญหา ส่วนที่ 3 แนวทางการส่งเสริมและพัฒนาการแพะเนื้อ

การวิเคราะห์ข้อมูลแบ่งออกตามประเด็นข้อมูล ดังนี้ 1) การศึกษาข้อมูลพื้นฐานของเกษตรกรผู้เลี้ยงแพะเนื้อ วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้สถิติเชิงพรรณนา (Descriptive statistics) นำเสนอข้อมูลในลักษณะการบรรยายหรือพรรณนา 2) ระบบการผลิตและจำหน่ายแพะเนื้อ วิเคราะห์ข้อมูลโดยนำมาเรียบเรียงหาความเชื่อมโยงและความสัมพันธ์ และนำเสนอในลักษณะการบรรยายหรือพรรณนา 3) ปัญหาที่พบในการเลี้ยงแพะเนื้อการรับมือกับปัญหา และความต้องการการส่งเสริมการเลี้ยงแพะเนื้อ วิเคราะห์ข้อมูลโดยนำมาเรียบเรียงหาความเชื่อมโยงและความสัมพันธ์ และนำเสนอในลักษณะการบรรยายหรือพรรณนา 4) แนวทางการส่งเสริมและพัฒนาการเลี้ยงแพะเนื้อ การวิเคราะห์สภาพแวดล้อมและศักยภาพ (SWOT Analysis) วิเคราะห์ข้อมูลโดยนำมาเรียบเรียงหาความเชื่อมโยงและความสัมพันธ์ และนำเสนอในลักษณะการบรรยายหรือพรรณนา พร้อมทั้งการนำเสนอแนวทางการส่งเสริมและพัฒนาการเลี้ยงแพะเนื้อต่อไป

ผลการวิจัย และการอภิปรายผล

1. ข้อมูลพื้นฐานของเกษตรกรผู้เลี้ยงแพะเนื้อ อำเภอหนองกี่ จังหวัดบุรีรัมย์

เกษตรกรส่วนใหญ่เป็นเพศชาย (ร้อยละ 62.26) มีอายุเฉลี่ย 52.32 ปี จัดว่าเป็นกลุ่มเกษตรกรสูงวัยซึ่งอาจเป็นอุปสรรคต่อการพัฒนาอาชีพและการเข้าถึงเทคโนโลยีใหม่ ๆ และส่วนใหญ่จบการศึกษาระดับประถมศึกษา (ร้อยละ 43.40) อาชีพหลักคือเกษตรกร (ร้อยละ 50.94) มีรายได้ทั้งหมดเฉลี่ย 147,098.11 บาทต่อปี การเลี้ยงแพะจึงเป็นเพียงอาชีพเสริมที่สร้างรายได้เฉลี่ย 33,826.42 บาทต่อปี คิดเป็นสัดส่วนประมาณหนึ่งในสามของรายได้รวมทั้งหมดของครัวเรือน และเกษตรกรส่วนใหญ่ (ร้อยละ 81.13) ต้องพึ่งพาการกู้ยืมเงินจากธนาคารเพื่อการเกษตรและสหกรณ์การเกษตร (ธ.ก.ส.) เพื่อใช้เป็นเงินทุนหมุนเวียนในการทำเลี้ยงแพะนอกจากนี้ เกษตรกรทั้งหมดในพื้นที่เป็นรายย่อยและ ไม่มีการรวมกลุ่มหรือจดทะเบียนกลุ่มผู้เลี้ยงแพะอย่างเป็นทางการ ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลให้ ขาดอำนาจต่อรองในการซื้อปัจจัยการผลิตและการจำหน่ายผลผลิต และยังขาดการเข้าถึงการสนับสนุนจากภาครัฐอย่างเป็นระบบ ทำให้ไม่สามารถยกระดับการผลิตและการตลาดให้มีประสิทธิภาพได้อย่างยั่งยืน

2. วิธีการเลี้ยง ดูแล และการจัดการด้านสุขภาพ

2.1 รูปแบบการเลี้ยง

เกษตรกรในอำเภอหนองกี่ จังหวัดบุรีรัมย์ ส่วนใหญ่มีประสบการณ์การเลี้ยงแพะเนื้อเฉลี่ย 3.36 ปี จำนวนแพะเฉลี่ยต่อครัวเรือนประมาณ 26 ตัว ขนาดพื้นที่เลี้ยงที่น้อยกว่า 1 ไร่ (ร้อยละ 100) และการพึ่งพาแรงงานครัวเรือน 1-2 คนเป็นหลัก (ร้อยละ 67.92) เกษตรกรนิยมใช้ลูกผสมพันธุ์บอร์ (ร้อยละ 100) โดยเลือกใช้พ่อพันธุ์เพียง 1 ตัวต่อฟาร์ม (ร้อยละ 92.45) อาหารสัตว์มาจากวัตถุดิบท้องถิ่น เช่น กระถินและหญ้าเนเปีย โดยใช้อาหารข้นหรือสำเร็จรูปในสัดส่วนน้อยเพื่อลดต้นทุนการผลิต โรงเรือนส่วนใหญ่อยู่ใกล้บ้านหรือในเขตชุมชน (ร้อยละ 52.83) เนื่องจากข้อจำกัดด้านที่ดินและทุนทรัพย์ของเกษตรกร

ผลการศึกษาสะท้อนว่าเกษตรกรส่วนใหญ่ยังมีประสบการณ์การเลี้ยงแพะในระยะเวลาไม่ยาวนานนัก ซึ่งสอดคล้องกับ Inbun & Wilalai (2021) ที่ศึกษาพบว่า เกษตรกรผู้เลี้ยงแพะในอำเภอสรรพยา จังหวัดชัยนาท ส่วนใหญ่มีประสบการณ์น้อยกว่า 5 ปี การที่เกษตรกรยังใหม่ต่ออาชีพนี้บ่งชี้ถึงศักยภาพในการขยายตัวของอาชีพ แต่ขณะเดียวกันก็อาจเผชิญข้อจำกัดด้านความรู้และทักษะในการจัดการฟาร์มอย่างมีประสิทธิภาพ ในด้านการขยายพันธุ์ การที่เกษตรกรเลือกใช้พ่อพันธุ์เพียง 1 ตัว สอดคล้องกับข้อเสนอแนะของ (Wattanachan et al., 2021) ที่ระบุว่าพ่อพันธุ์ 1 ตัว สามารถผสมกับแม่พันธุ์ได้ประมาณ 25-30 ตัวต่อรอบ รูปแบบการเลี้ยงแบบขังคอกยังสอดคล้องกับ Manwicha et al. (2018) ที่ชี้ว่าการเลี้ยงแบบขังคอกโดยมีอาหารหยาบเพียงพอส่งผลให้แพะเจริญเติบโตได้ดีกว่าการเลี้ยงแบบปล่อยแปลง ทั้งนี้ ที่ตั้งโรงเรือนในพื้นที่ศึกษาซึ่งมักตั้งอยู่ใกล้บ้านหรือในเขตชุมชนอาจขัดแย้งบางส่วนกับแนวทางการปฏิบัติทางการเกษตรที่ดี Good Agricultural Practices (GAP) ที่ว่าโรงเรือนควรตั้งอยู่ห่างจากชุมชน ปลอดภัยจากปัญหาน้ำท่วม และมีเส้นทางคมนาคมสะดวก เพื่อสนับสนุนระบบการเลี้ยงที่ได้มาตรฐานและยั่งยืน

2.2 การดูแลสุขภาพ

เกษตรกรใช้ยารักษาโรคและเวชภัณฑ์ แม้มีต้นทุนสูงขึ้น แหล่งน้ำที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นน้ำประปาและบ่อบาดาล (ร้อยละ 84.91) ซึ่งจัดเป็นแหล่งน้ำสะอาดและเพียงพอต่อความต้องการของแพะ

อย่างไรก็ตามแม้เกษตรกรตระหนักถึงการใช้อย่างและแหล่งน้ำสะอาด แต่การพึ่งพาพ่อพันธุ์เพียงตัวเดียวอาจส่งผลกระทบต่อความหลากหลายทางพันธุกรรม จำเป็นต้องมีระบบสนับสนุน เช่น การแลกเปลี่ยนพ่อพันธุ์ในชุมชน เพื่อคงไว้ซึ่งประสิทธิภาพและคุณภาพของพันธุ์ ในด้านการจัดการน้ำ ผลการศึกษายืนยันความสำคัญของการใช้น้ำสะอาด ซึ่งสอดคล้องกับ Pontong et al. (2025) ที่เน้นว่าความเพียงพอและความสะอาดของน้ำมีผลโดยตรงต่อสุขภาพ การเจริญเติบโต และประสิทธิภาพการผลิตแพะ

2.3 การเข้าถึงข้อมูลและความรู้

เกษตรกรส่วนใหญ่ยังใหม่ต่อการเลี้ยงแพะ จึงอาจมีข้อจำกัดด้านความรู้และทักษะในการจัดการฟาร์ม การฝึกอบรมหรือการสนับสนุนองค์ความรู้ส่วนใหญ่ได้เครือข่ายเกษตรกร (ร้อยละ 77.36) และสื่อโซเชียล การจัดการฟาร์มยังคงเป็นไปตามภูมิปัญญาท้องถิ่นมากกว่ามาตรฐานเชิงอุตสาหกรรม

ผลการศึกษาสอดคล้องกับรายงานในพื้นที่ภาคใต้ตอนบนที่ระบุว่า เกษตรกรส่วนใหญ่ยังมีประสบการณ์การเลี้ยงแพะในระดับต่ำ และระบบฟาร์มยังคงพึ่งพาทรัพยากรในครัวเรือนเป็นหลัก (Department of Livestock Development Region 8, 2020) ขณะเดียวกัน การศึกษาที่จังหวัดนครปฐมสะท้อนถึงความจำเป็นในการสนับสนุนด้านการฝึกอบรมและการจัดการฟาร์มเพิ่มเติม ซึ่งยืนยันข้อจำกัดด้านความรู้และทักษะของเกษตรกรผู้เลี้ยงแพะรายใหม่ (Supat & Pusanisa, 2021) นอกจากนี้ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการยกระดับมาตรฐานฟาร์ม เช่น Good Farm Management (GFM) และ Good Agricultural Practices (GAP) พบว่า เกษตรกรจำนวนมากยังคงพึ่งพาการใช้วัตถุดิบท้องถิ่นและการเรียนรู้แบบเพื่อนช่วยเพื่อน ซึ่งเหมาะสมกับบริบทที่มีข้อจำกัดด้านต้นทุน แต่ยังไม่สอดคล้องกับมาตรฐานการผลิตเชิงอุตสาหกรรมอย่างเต็มรูปแบบ (Sorabut et al., 2021; Tongkaemkaew, 2023)

3. กระบวนการเลี้ยงแพะเนื้ออำเภอหนองกี่ จังหวัดบุรีรัมย์

Figure 1 แสดงวงจรชีวิตของแพะเนื้อเริ่มต้นตั้งแต่ระยะลูกแพะ ซึ่งอยู่ในช่วงอายุ 0-3 เดือน ช่วงแรก (0-1 เดือน) ลูกแพะจะกินนมแม่เป็นหลัก ต่อมาเมื่ออายุได้ 2-3 เดือน จะเริ่มหัดกินอาหารหยาบควบคู่กับนมแม่ เมื่อเข้าสู่เดือนที่ 3 เกษตรกรจะทำการแยกลูกแพะออกจากแม่ เพื่อเข้าสู่ระยะหย่านม และเข้าสู่การเลี้ยงแบบแพะขุนเล็ก (อายุ 3-5 เดือน) โดยในช่วงนี้จะมีการให้อาหารใบกระถินวันละ 2 ครั้ง คือในช่วงเช้า (เวลา 09.00-10.00 น.) และช่วงเย็น (เวลา 16.00-17.00 น.) พร้อมทั้งมีการถ่ายพยาธิด้วยวิธีฉีดยาหรือการกรอกยา เมื่อแพะมีอายุครบ 6 เดือน ขึ้นไป จะถูกจัดอยู่ในกลุ่มแพะขุนใหญ่ (อายุ 6 เดือน ถึง 4 ปี) โดยจะได้รับการดูแลสุขภาพอย่างต่อเนื่อง ทั้งการถ่ายพยาธิ การฉีดวัคซีน และการบำรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเติบโต แพะขุนใหญ่บางส่วนจะถูกคัดเลือกเป็นพ่อพันธุ์หรือแม่พันธุ์ตามสมรรถภาพร่างกาย ซึ่งพ่อพันธุ์แพะเนื้อ แม่พันธุ์แพะเนื้อ มีอายุสูงสุด 14 ปี เป็นช่วงอายุที่มีความเหมาะสมในการขยายพันธุ์แพะเนื้อ

สอดคล้องกับ (Wattanachan et al., 2021) ที่ว่า การคัดแพะเป็นพ่อพันธุ์แพะควรมีอายุอยู่ในช่วง 1 ถึง 5 ปี ไม่ใช่พ่อพันธุ์ที่อายุน้อยหรืออายุมากเกินไป โดยที่พ่อพันธุ์มีน้ำหนักประมาณ 40-60 กิโลกรัม มีลักษณะภายนอก คือ ลำคอมีขนขึ้น

```

graph TD
    subgraph Feeding_Regimes [Feeding Regimes]
        A[0-1 month: Milk feeding]
        B[Grass feeding (Morning & Afternoon)  
3 months Deworming/Vaccination]
        C[Grass feeding (Morning & Afternoon)  
1 year Deworming/Vaccination-Tonics]
    end

    A --> D[Kid goat  
(0-3 months)]
    B --> E[Small fattening goat  
(3-5 months)]
    C --> F[Large fattening goat  
(6 months - 4 years)]

    D --> E
    E --> F
    F --> G[Sold  
100]

    D --> H[Separate the doe and kid from the flock.]
    H --> I[Postpartum goat]
    I --> J[Goats have a gestation period of about 150 days.]
    J --> K[Sire  
(1-4 years)]
    J --> L[Dam  
(1-4 years)]

    K --> M[Healthy and sound]
    L --> M
    M --> N[Leucaena, Napier, Concentrate (2 meals)  
Dewormed pre-breeding/  
Vaccinated/Supplemented]
    N --> O[Culled goat  
Over 4 years old / Incurable illness]
    O --> P[Sold  
50]

    E --> Q[Sold  
100]
  
```

The flowchart illustrates the production cycle of goats, starting from birth and feeding regimes. It details the stages of growth (Kid goat, Small fattening goat, Large fattening goat) and the management practices involved, including separation of the doe and kid, gestation, and breeding. The cycle concludes with the sale of goats or their culling due to age or illness.

4. การจำหน่ายแพะเนื้อ

1) ลูกแพะ การจำหน่ายลูกแพะมุ่งเน้นไปที่ตลาดการเลี้ยงทำพันธุ์หรือนำไปเลี้ยงต่อเพื่อเพิ่มน้ำหนัก ก่อนที่จะนำไปจำหน่ายเป็นแพะพันธุ์หรือแพะขุน โดยรูปแบบการจำหน่ายลูกแพะของเกษตรกรแบ่งเป็น 2 ช่องทางหลัก คือ พ่อค้าในพื้นที่และนอกพื้นที่ โดยลูกแพะอายุ 1 เดือน จะถูกซื้อไปเลี้ยงต่อจนถึงอายุ 3 เดือน หากตรงตามสายพันธุ์ แข็งแรง ไม่มีประวัติการติดโรคติดต่อต้องห้าม (โรค布鲁เซลเลซิส) จะจำหน่ายเป็นแพะพันธุ์ ส่วนลูกแพะที่ลักษณะไม่ตรงตามสายพันธุ์จะถูกจำหน่ายในลักษณะของ แพะเนื้อ แหล่งจำหน่ายแพะเนื้อของผู้รับซื้อนอกพื้นที่มี 3 แหล่ง คือ ส่งออกโดยตรงไปยังประเทศกัมพูชา โดยต้องผ่านการกักโรคที่ด่านกักกันสัตว์เป็นเวลา 21 วัน ก่อนส่งออก และอีก 2 แหล่ง คือ ตลาดชายแดนอำเภออรัญประเทศและตลาดชายแดนอำเภอโคกสูง ซึ่งมีแหล่งจำหน่ายเดียวกันคือ จำหน่ายต่อไปยังอำเภอบ่อทอง จังหวัดชลบุรี และประเทศกัมพูชา (Figure 2)

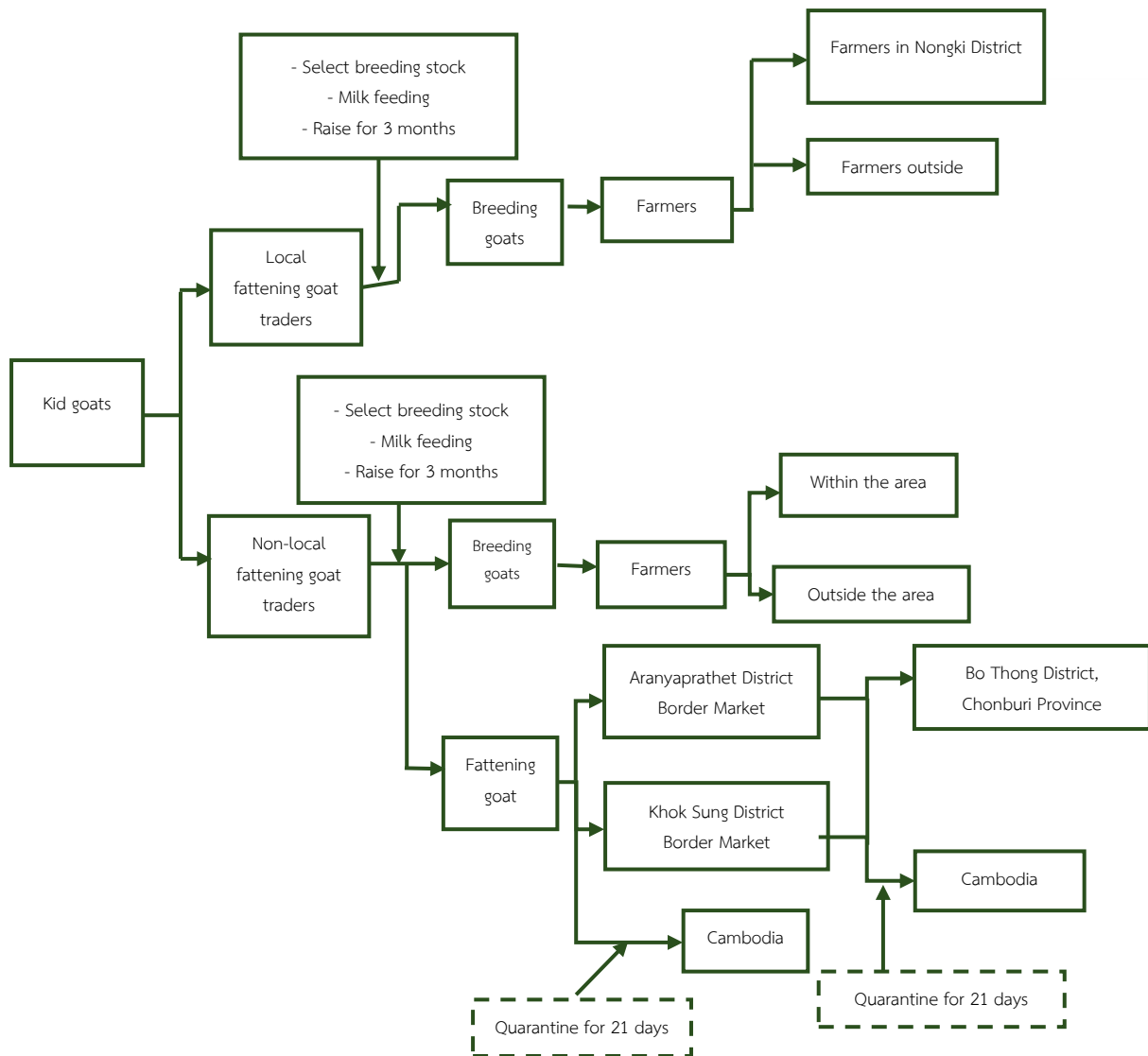


Figure 2 Kid goat sales pattern, Nongki District, Buriram Province

2) แพะขุนเล็ก การจำหน่ายแพะขุนเล็กมุ่งเน้นไปยังตลาดที่เลี้ยงแพะต่อ โดยเกษตรกรจะจำหน่ายแพะขุนเล็กเมื่อมีจำนวนในคอกมากเกินไป เกิดปัญหาด้านพื้นที่และแรงงานดูแล ซึ่งแพะที่จำหน่ายต้องมีอายุ 3-5 เดือน น้ำหนักไม่น้อยกว่า 15 กิโลกรัม และไม่มีประวัติโรคต้องห้าม (布鲁เซลโลซิส) การจำหน่ายมีทั้งแบบขายรายตัวและซังกิโล ซึ่งก่อนการซื้อขายแพะทุกตัวต้องผ่านการตรวจโรคปากเท้าเปื่อยก่อน การจำหน่ายแพะแบ่งเป็น 2 กลุ่มหลัก คือ พ่อค้าในพื้นที่ ซึ่งนำไปขายต่อให้เกษตรกรในและนอกอำเภอหนองกี่ และพ่อค้านอกพื้นที่ซึ่งมี 3 แหล่ง คือ ส่งออกโดยตรงไปยังประเทศกัมพูชาโดยต้องผ่านการกักโรคที่ด่านกักกันสัตว์เป็นเวลา 21 วัน ก่อนส่งออก และอีก 2 แหล่ง คือ ตลาดขายแดนอำเภออรัญประเทศและตลาดขายแดนอำเภอโคกสูง ซึ่งมีแหล่งจำหน่ายเดียวกันคือ จำหน่ายต่อไปยังอำเภอบ่อทอง จังหวัดชลบุรี และประเทศกัมพูชา (Figure 3)

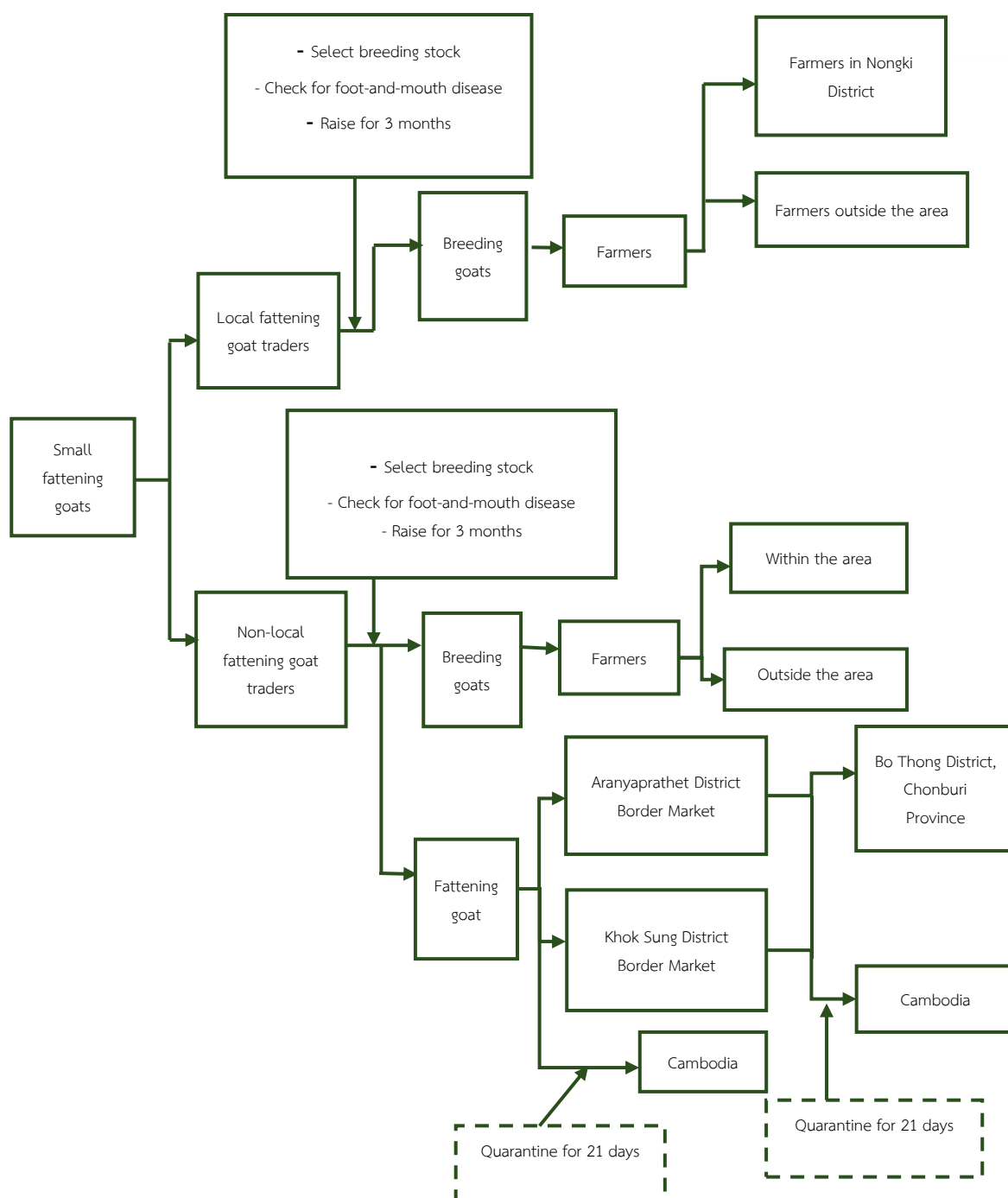


Figure 3 Small meat goat sales pattern, Nongki District, Buriram Province

3) แพะขุนใหญ่ การจำหน่ายแพะขุนใหญ่มักจำหน่ายให้ตลาดค้าส่ง พ่อพันธุ์ แม่พันธุ์ ตลาดแพะเนื้อ แพะขุนใหญ่เป็นแพะที่ได้รับการเลี้ยงดูเป็นอย่างดี เพื่อให้มีน้ำหนักและขนาดที่เหมาะสม การเลี้ยงแพะขุนใหญ่จะใช้ระยะเวลานาน และมีการให้อาหารที่มีคุณภาพดี เพื่อให้ได้การจำหน่ายแพะขุนใหญ่นั่นตลาดค้าส่ง พ่อพันธุ์ แม่พันธุ์ และตลาดเนื้อแพะ โดยแพะต้องได้รับการเลี้ยงดูอย่างดี มีน้ำหนักไม่ต่ำกว่า 50 กิโลกรัม และไม่มีโรคติดต่อ แพะขุนใหญ่มักถูกจำหน่ายให้กับตลาดที่ต้องการเนื้อแพะในปริมาณมาก เช่น ตลาดค้าส่งแพะเนื้อ ตลาดที่มีการบริโภคเนื้อแพะในเทศกาลหรือพิธีกรรมทางศาสนา การจำหน่ายแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ พ่อค้าในพื้นที่และนอกพื้นที่ โดยมีการตรวจตรวจสอบสุขภาพก่อนซื้อ และแยกแพะตามวัตถุประสงค์ แพะพันธุ์จะมีน้ำหนัก 25-40 กิโลกรัม ใช้สำหรับผสมพันธุ์ ส่วนแพะเนื้อจะขุนจนหนัก 40-60 กิโลกรัม

ก่อนส่งไปขายในตลาดขายแดน ตลาดบริโภคในจังหวัดต่าง ๆ และส่งออกประเทศกัมพูชา โดยต้องผ่านการกักโรค 21 วัน เพื่อควบคุมโรคติดต่อ (Figure 4)

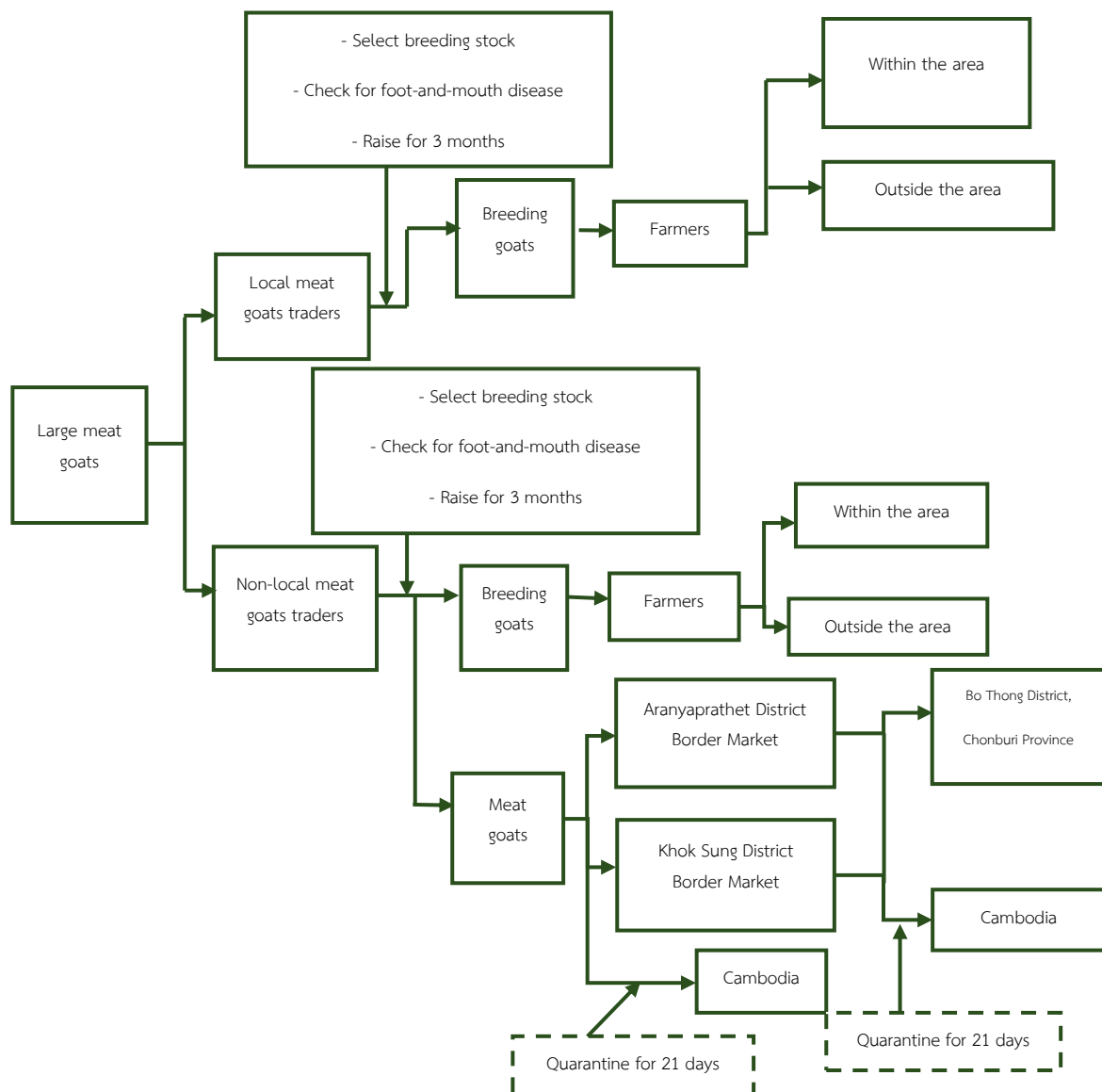


Figure 4 Large meat goat sales pattern, Nongki District, Buriram Province

4) แพะปลด การจำหน่ายแพะปลดมักจะเน้นไปที่ตลาดที่ต้องการเนื้อแพะในราคาประหยัด หรือการใช้ในพิธีกรรมทางศาสนา โดยรูปแบบการจำหน่ายแพะปลดของเกษตรกร มีการจำหน่ายเพียงรูปแบบเดียวคือจำหน่ายให้พ่อค้าแพะเนื้อนอกพื้นที่ (Figure 5)

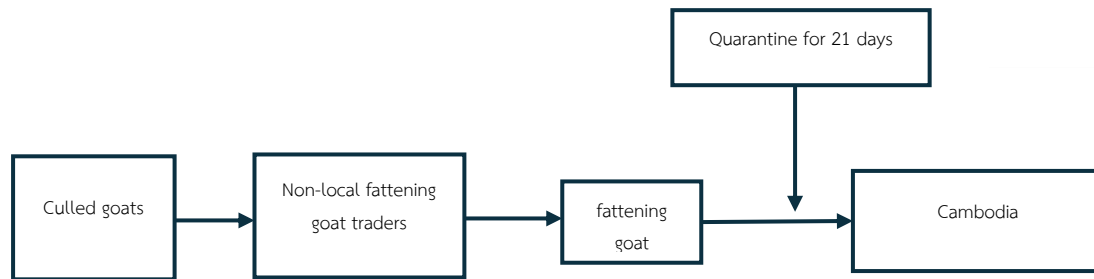


Figure 5 Cull goat sales pattern, Nongki District, Buriram Province

ระบบการจำหน่ายแพะเนื้อในอำเภอหนองกี่ จังหวัดบุรีรัมย์ ประกอบด้วยผู้รวบรวมแพะเนื้อหลัก 2 กลุ่ม โดยผู้รวบรวมแพะเนื้อที่ 1 แบ่งเป็นพ่อค้าในพื้นที่จำนวน 1 ราย มีประสบการณ์ 6 ปี รายได้ในปี พ.ศ. 2565 จำนวน 714,740 บาท รับซื้อแพะเนื้อจากเกษตรกรผ่านการโทรศัพท์หรือเข้าพบโดยตรงที่ฟาร์ม และตกลงราคาตามน้ำหนักตัวและลักษณะภายนอก ก่อนจำหน่ายให้เกษตรกรทั้งในและนอกพื้นที่ รวมถึงพ่อค้านอกพื้นที่ ส่วนพ่อค้านอกพื้นที่มีจำนวน 1 ราย มีประสบการณ์ 5 ปี รายได้ในปี พ.ศ. 2565 จำนวน 1,987,085 บาท ใช้วิธีรับซื้อแบบเดียวกันและจำหน่ายให้เกษตรกรทั้งในและนอกพื้นที่ รวมถึงผู้รวบรวมแพะเนื้อที่ 2 ซึ่งเป็นอีกรายหนึ่งที่มีประสบการณ์ 8 ปี รายได้ในปี พ.ศ. 2565 จำนวน 1,848,594 บาท โดยรับซื้อผ่านการติดต่อกับพ่อค้านอกพื้นที่ และมีฟาร์มของตนเองไว้พักแพะที่รับซื้อเข้ามา เพื่อเฝ้าระวังอาการบาดเจ็บจากการขนส่งและโรคระบาด โดยช่องทางการจำหน่ายของผู้รวบรวมรายนี้คือส่งให้เกษตรกรในอำเภอบ่อทอง จังหวัดชลบุรี และส่งออกไปยังประเทศกัมพูชา

เมื่อพิจารณามูลค่าและผลตอบแทนของการจำหน่ายแพะเนื้อแต่ละประเภท พบว่า ลูกแพะ มีความเสี่ยงด้านราคาสูง เนื่องจากราคาซื้อขายขึ้นอยู่กับคุณภาพ สายพันธุ์ และสุขภาพสัตว์ อีกทั้งการซื้อขายในลักษณะเหมารายตัวช่วงอายุ 1-3 เดือน ส่งผลให้กำไรต่อหัวมีความผันผวนสูง ในทางตรงกันข้าม การเลี้ยงต่อจนถึงระยะ แพะขุนเล็ก หรือ แพะขุนใหญ่ ทำให้สามารถจำหน่ายโดยใช้เกณฑ์น้ำหนัก (บาท/กิโลกรัม) ซึ่งเชื่อมโยงกับราคาตลาดที่มีเสถียรมากกว่า หลักฐานจากงานวิจัยในภาคใต้ รายงานว่า ราคาจำหน่ายเนื้อแพะในระดับผู้ผลิตและค้าปลีกเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 186.79-225.18 บาทต่อกิโลกรัม และราคาที่ขายให้กับภัตตาคารเฉลี่ยประมาณ 214.21 บาทต่อกิโลกรัม (Khwanmanee & Lahteh, 2020) แสดงให้เห็นว่าการยกระดับน้ำหนักและคุณภาพของแพะสามารถเพิ่มโอกาสในการขดเชยต้นทุนการผลิตและสร้างกำไรได้มากขึ้น นอกจากนี้ การศึกษาของ Sorabut et al. (2021) ที่ดำเนินการในจังหวัดสตูล โดยเก็บข้อมูลจากเกษตรกรจำนวน 5 ครัวเรือนซึ่งใช้ระบบฟาร์มแบบผสม (การเลี้ยงแพะร่วมกับกิจกรรมเกษตรอื่น) เพื่อนำมาประเมินความยืดหยุ่นทางเศรษฐกิจเมื่อเผชิญกับความเสียหายนอก ผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองเชิงสถานการณ์ (Simulation modeling) พบว่า กำไรขั้นต้นรวม (Gross margin) ของฟาร์มแพะในปี พ.ศ. 2561 อยู่ระหว่าง 49,002-306,313 บาทต่อปี ขึ้นอยู่กับโครงสร้างระบบฟาร์มและการจัดการที่แตกต่างกัน โดยสัดส่วนกำไรขั้นต้นจากกิจกรรมแพะเพียงอย่างเดียวคิดเป็น ร้อยละ 2.27-30.51 ของกำไรขั้นต้นรวม นอกจากนี้ ฟาร์มที่มีการจัดการด้านโภชนาการและสุขภาพสัตว์ที่มีประสิทธิภาพสามารถสร้างรายได้สุทธิที่สูงกว่าเกษตรกรรายอื่นอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้ การจำลองสถานการณ์เมื่อราคาจำหน่ายแพะลดลงร้อยละ 20 ระหว่างปี พ.ศ. 2564-2570 พบว่า ระบบฟาร์มแบบผสมสามารถช่วยกระจายความเสี่ยงทางรายได้ และลดการพึ่งพิงรายได้จากแพะเพียงอย่างเดียว อันสะท้อนถึงความสำคัญของการบูรณาการกิจกรรมทางการเกษตรหลายประเภทในครัวเรือนเพื่อเพิ่มเสถียรภาพทางเศรษฐกิจของเกษตรกรรายย่อย งานวิจัยจำลองระบบฟาร์มแพะ-พืชผสมในสตูล 5 แปลง พบว่า มูลค่ากำไรขั้นต้นรวมของฟาร์ม (Gross margin) ปี พ.ศ. 2561 อยู่ในช่วง ประมาณ 49,002-306,313 บาท/ปี สะท้อนความแตกต่างด้านโครงสร้างกิจกรรมและการจัดการของแต่ละฟาร์มอย่างชัดเจน สัดส่วนมูลค่า/กำไรจากกิจกรรม “แพะ” ต่อทั้งฟาร์ม แตกต่างสูงมาก โดยกำไรขั้นต้นจากแพะ อยู่ที่ ประมาณ 4,247-27,490 บาท/ปี คิดเป็นร้อยละ 2.09-30.51 ของกำไรขั้นต้นรวม ขึ้นกับจำนวนแพะ น้ำหนัก/ผลผลิต และการจัดการ (โภชนาการ-วงจรผสมพันธุ์) ของแต่ละแปลง

5. ปัญหาในการเลี้ยงแพะเนื้อ การรับมือกับปัญหา การวิเคราะห์สถานการณ์การผลิต และแนวทางการส่งเสริมการเลี้ยงแพะเนื้อของเกษตรกร อำเภอหนองกี่ จังหวัดบุรีรัมย์

1) ปัญหาในการเลี้ยงแพะเนื้อ การรับมือกับปัญหา

แม้การเลี้ยงแพะเนื้อจะช่วยสร้างรายได้ให้กับเกษตรกร แต่เกษตรกรยังคงเผชิญกับปัญหาหลายด้าน ทั้งด้านการผลิต การจัดการพื้นที่ โรคระบาด และการตลาด ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการเลี้ยงแพะเนื้อ เกษตรกรได้พยายามปรับตัว และรับมือกับปัญหาเหล่านี้ด้วยตนเอง แต่ยังมีความต้องการการสนับสนุนจากภาครัฐและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องเพื่อพัฒนาการเลี้ยงแพะเนื้อให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น และมีรายได้เพิ่มขึ้น รายละเอียดแสดงดังนี้ (Table 1)

Table 1 Problem in meat goat farming, coping strategies, and support needs for promotion and development

Identified problem	Coping mechanisms	Support requirements
● Production: Rising input costs, particularly the high prices of breeding bucks and does.	● Breeding and investment: Farmers generally retain their own breeding stock, select animals from their herds or neighboring farms, and rely on loans from the Bank for Agriculture and Agricultural Cooperatives (BAAC) or village funds to support investment.	● Breeding and knowledge support: Government provision of breeding stock, farmer training, and study visits.
● Disease prevention and control: Frequent outbreaks of foot-and-mouth disease, brucellosis, bloating, and diarrhea.	● Disease prevention and control: Measures include regular disinfection, pest control, isolation of infected goats, separate feeding and watering systems, and cleaning of hands and equipment after handling sick animals. In cases of brucellosis, infected goats are separated and reported to the district livestock office.	● Animal health services: Coordination with livestock officers for vaccination and disinfection.

Identified problem	Coping mechanisms	Support requirements
Marketing and distribution: Price suppression by traders, absence of reference prices, and limited market access.	Marketing strategies: farmers may delay goat sales, extend the meat period until market prices improve, or reclassify goats for sale as breeding stock to increase income potential.	Market development: registration of buyers and sale points, establishment of local markets, and promotion of export markets in border trade zones.
Disease prevention and control: Frequent outbreaks of foot-and-mouth disease, brucellosis, bloating, and diarrhea.	Disease prevention and control: Measures include regular disinfection, pest control, isolation of infected goats, separate feeding and watering systems, and cleaning of hands and equipment after handling sick animals. In cases of brucellosis, infected goats are separated and reported to the district livestock office.	Animal health services: Coordination with livestock officers for vaccination and disinfection.

2) การวิเคราะห์สถานการณ์ การผลิตและการตลาดแพะเนื้ออำเภอนองกี่

เพื่อให้เกิดการพัฒนาในระบบการเลี้ยงแพะเนื้อของเกษตรกร ได้มีการจัดเวทีแลกเปลี่ยนกับเกษตรกร เพื่อร่วมกันวิเคราะห์สถานการณ์ของระบบการผลิตและการตลาดแพะเนื้อ พบว่า เกษตรกรผู้เลี้ยงแพะเนื้อในพื้นที่มีประสบการณ์และความชำนาญในการเลี้ยงเป็นอย่างดี การเลี้ยงแพะเนื้อใช้แรงงานครัวเรือนเป็นหลัก มีเจ้าหน้าที่ปศุสัตว์อำเภอจัดกิจกรรมอบรมและพัฒนาเกษตรกรเป็นประจำ เพื่อให้ความรู้และเทคนิคการเลี้ยงที่ทันสมัยและมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม การเลี้ยงแพะเนื้อยังมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น การระบาดของโรค ต้นทุนการผลิตสูงราคามีความผันผวนตามปัจจัยต่าง ๆ แต่ตลาดแพะเนื้อมีความต้องการสูงเช่นกัน ซึ่งถือเป็นโอกาสให้เกษตรกรสามารถสร้างรายได้เพิ่มขึ้นได้ นอกจากนี้ นโยบายระดับจังหวัดยังสนับสนุนงบประมาณเพื่อส่งเสริมการเลี้ยงแพะ ช่วยเพิ่มศักยภาพการผลิตและสร้างรายได้ที่ยั่งยืนแก่เกษตรกรจากการใช้เครื่องมือการวิเคราะห์ SWOT เพื่อหา จุดแข็ง จุดอ่อน โอกาส และอุปสรรค ได้ผลดังนี้ (Table 2)

Table 2 SWOT Analysis of the meat goat production and marketing system in Nongki District, Buriram Province

(S: Strength)	(W: Weakness)
● Farmers have substantial experience and expertise in raising meat goats. ● Goat production systems mainly depend on family labor → helps reduce labor costs. ● Use of family labor also allows efficient and flexible household-level farm management. ● District livestock officers provide annual training programs. ● Training focuses on modern and efficient goat-raising techniques to support farmers.	● Agricultural labor is decreasing, and most farmers are elderly → limits production expansion and ability to perform physically demanding work. ● Farmers face financial constraints and insufficient working capital → restricts investment in farm improvements, input purchases, and scaling operations. ● Weak or underdeveloped farmer organizations → reduces bargaining power and control over sale timing. ● As a result, farm-gate prices often do not reflect actual production costs.
(O: Opportunities)	(T: Threat)
● High market demand for meat goats → strong income opportunities for farmers. ● Availability of low-cost local feed (natural grasses, Leucaena) in Nong Ki District. ● Reduced feed costs lower overall production expenses. ● Access to cheap feed provides a competitive advantage in goat farming.	● Foot-and-mouth disease outbreaks → major health issues and production losses. ● Lack of pricing mechanisms and strong bargaining groups → farmers vulnerable to middlemen. ● Purchase prices often below true production costs. ● Reduced profitability undermines long-term sustainability.

3) แนวทางการส่งเสริมและพัฒนากิจการเลี้ยงแพะเนื้อ ของเกษตรกรอำเภอนองกี่ จังหวัดบุรีรัมย์

จากการวิเคราะห์สถานการณ์ ปัญหา การรับมือ และความต้องการของเกษตรกร ตลอดจนการระดมความคิดเห็นผ่านการวิเคราะห์ SWOT ของระบบการผลิตและการตลาดแพะเนื้อในอำเภอนองกี่ จังหวัดบุรีรัมย์ นำไปสู่การกำหนดแนวทางการส่งเสริมและพัฒนา ที่สอดคล้องกับบริบทชุมชน ทิศทางตลาด และความต้องการของเกษตรกร เพื่อยกระดับคุณภาพการผลิต เพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขัน จำนวน 4 แนวทาง ดังนี้

แนวทางที่ 1 การพัฒนาการผลิตและควบคุมคุณภาพ

เน้นการคัดเลือกและปรับปรุงพันธุ์เพื่อยกระดับคุณภาพแพะเนื้อ สร้างความเชื่อมั่นแก่ตลาด และเพิ่มช่องทางการจำหน่าย รวมทั้งพัฒนาผลิตภัณฑ์รองจากแพะ (นมแพะ ขนแพะ ปุยจากมูลแพะ หนังแพะ) เพื่อเพิ่มมูลค่า สอดคล้องกับจุดแข็งด้านประสบการณ์ของเกษตรกรและโอกาสจากความต้องการตลาดสูง

แนวทางที่ 2 การขยายช่องทางการตลาด

ประชาสัมพันธ์และสร้างเครือข่ายตลาดใหม่ โดยเฉพาะตลาดชายแดนและสื่อดิจิทัล ควบคู่กับการกำหนดช่วงเวลาการขายเพื่อเพิ่มอำนาจต่อรองราคา และลดความเสี่ยงจากการพึ่งพาพ่อค้าคนกลาง ซึ่งตอบโจทย์โอกาสด้านการเข้าถึงตลาด แต่ลดผลกระทบจากภัยคุกคามด้านราคาที่ไม่เป็นธรรม

แนวทางที่ 3 การเสริมสร้างความรู้และทักษะเกษตรกร

จัดอบรมและศึกษาดูงานเพื่อเพิ่มทักษะด้านการจัดการฟาร์มและการควบคุมโรค ลดค่าใช้จ่ายการรักษา และเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตในระยะยาว สอดคล้องกับจุดอ่อนด้านข้อจำกัดความรู้ และตอบสนองต่อภัยคุกคามจากการระบาดของโรค

แนวทางที่ 4 การรวมกลุ่มและพัฒนาสถาบันเกษตรกร

สนับสนุนการรวมกลุ่มผู้เลี้ยงแพะเพื่อเสริมอำนาจต่อรอง เข้าถึงแหล่งทุน และร่วมกันกำหนดราคากลางอย่างเป็นธรรม ซึ่งช่วยลดจุดอ่อนด้านองค์กรเกษตรกรที่ยังไม่เข้มแข็ง และเพิ่มความสามารถในการแข่งขันอย่างยั่งยืน

บทสรุป

การศึกษารังนี้ชี้ให้เห็นว่า เกษตรกรผู้เลี้ยงแพะเนื้อในอำเภอหนองกี่ จังหวัดบุรีรัมย์ ส่วนใหญ่เป็นเกษตรกรรายย่อยที่ใช้แรงงานครัวเรือนเป็นหลัก มีประสบการณ์การเลี้ยงไม่ยาวนานนัก และยังคงเผชิญข้อจำกัดด้านเงินทุนหมุนเวียน การจัดการฟาร์ม และการเข้าถึงความรู้จากภาครัฐ แม้จะได้รับการสนับสนุนบางส่วนจากเจ้าหน้าที่ปศุสัตว์ แต่ช่องว่างในการยกระดับมาตรฐานฟาร์มยังคงมีอยู่ ขณะที่ด้านการตลาด เกษตรกรส่วนใหญ่จำหน่ายผ่านพ่อค้าคนกลางและขาดอำนาจต่อรอง ส่งผลให้ราคาที่ได้รับไม่สอดคล้องกับต้นทุนการผลิต อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษายังสะท้อนโอกาสสำคัญจากความต้องการบริโภคแพะเนื้อที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ประกอบกับการมีวัตถุดิบอาหารสัตว์ท้องถิ่นที่ต้นทุนต่ำ ซึ่งเอื้อต่อการเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขัน หากมีการส่งเสริมที่เหมาะสม ทั้งในด้านการพัฒนาสายพันธุ์และคุณภาพผลผลิต การสร้างเครือข่ายการตลาด การจัดอบรมเพื่อเสริมสร้างศักยภาพเกษตรกร และการรวมกลุ่มเพื่อเพิ่มอำนาจการต่อรอง ก็จะช่วยยกระดับการผลิตและการตลาดแพะเนื้อให้มีความเข้มแข็งและยั่งยืนมากขึ้น ดังนั้น แนวทางการส่งเสริมที่มุ่งเน้นการพัฒนาคุณภาพ การขยายตลาด การเสริมสร้างทักษะ และการรวมกลุ่มเกษตรกร จึงเป็นปัจจัยสำคัญที่จะนำไปสู่การยกระดับรายได้ครัวเรือน สร้างความมั่นคงทางเศรษฐกิจ และสนับสนุนการพัฒนาอาชีพการเลี้ยงแพะเนื้อในพื้นที่อย่างยั่งยืน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ กรมส่งเสริมการเกษตร ที่เปิดโอกาสให้ผู้วิจัยได้ศึกษาเรียนรู้เพิ่มเติมใน สาขาส่งเสริมการเกษตร คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ภายใต้การร่วมมือทางวิชาการ ว่าด้วยการพัฒนาวิชาการ ด้านการเรียนการสอน การวิจัย และเพื่อน ๆ ร่วมรุ่น MOU รุ่นที่ 1 กรมส่งเสริมการเกษตร ที่ให้การสนับสนุนตลอดมา และเกษตรกรผู้เลี้ยงแพะเนื้อ อำเภอหนองกี่ จังหวัดบุรีรัมย์ ที่ให้ความร่วมมือในการให้ข้อมูลการวิจัยจนสำเร็จลุล่วง

เอกสารอ้างอิง

- Department of Livestock Development Region 8. (2020). *Goat farming situation and challenges in the network of Surat Thani Animal Breeding and Research Center*. Department of Livestock Development.
- Department of Livestock Development. (2021). *Number of livestock farmers and livestock in 2021*. Department of Livestock Development. <https://opendata.nesdc.go.th>

- Department of Livestock Development. (2022). *Strategic Plan of the Department of Livestock Development 2018–2022*. Department of Livestock Development.
<https://pvlocnt.dld.go.th/webnew/images/stories/strategy/2563/plan6165-p1-153.pdf>
- Hongsapak, T. (2013). Goat farming in Thailand. *Kasetsart Livestock Journal*, 40(157), 63–66.
- Inbun, S., & Wilalai, C. (2021). Study on production and marketing conditions of meat goats in Sapphaya District, Chai Nat Province. *Journal of Agriculture and Society*, 10(2), 45–60.
- Khwanmanee, N., & Lahteh, K. (2020). *Development of Marketing Strategies for Meat Goats in Songkhla Province*. *Recent Science and Technology*, 12(1), 160–170.
- Manwicha, A., Suwamsiri, S., Sinlapaman, P., Mahaphrom, P., & Yoklian, J. (2018). *Production performance of Black Bengal goats (royally bestowed animals) under Thailand's hot and humid climate*. Department of Livestock Development.
<https://royal.dld.go.th/webnew/images/Rachan/011/black-Bnggal-Goat.pdf>
- Office of Agricultural Economics Region 12. (2022). *Production and marketing of young goats in Lower Northern Region 2*. Department of Livestock Development.
<https://pvlo-uta.dld.go.th/webnew/images/stories/12-goat-2565.pdf>
- Pontong, N., Damrongwatthana, J., Khaenamkaew, D., Dechachai, U., Phrakru Nitidhamabondit (Kongkhawai, S.), Phrakrupalad Sarote (U.), Phramaha Charoonsak Chooyong, Phramaha wiset Mangkhang, Phrakruphromkhetkhanarak (Ruangrod, C.), Panthanon, S., Banlikitkul, N., & Kanchanaphommaphat, T. (2025). Pae Plai Khlong: Career promotion guidelines for small-scale goat farmers - A case study of Ban Plai Khlong Community, Moo 6, Chian Khao Subdistrict, Chaloem Phra Kiat District, Nakhon Si Thammarat Province. *Journal of Social Science Development*, 8(1), 16–28. (In Thai)
- Sorabut, T., Jongrungrot, V., & Chanjula, P. (2021). Simulation modeling of raising meat goat farming system: Case study of farms in Satun Province. *PSAKU International Journal of Interdisciplinary Research*, 10(1), 1–11.
<https://so05.tci-thaijo.org/index.php/PSAKUIJIR/article/download/248071/169706/>
- Supat, I., & Pusanisa, K. (2021). *Meat goat production in Nakhon Pathom province*. Office of Provincial Livestock, Department of Livestock Development.
- Tongkaemkaew, U. (2023). Assessment of meat goat farming under GFM and GAP standards based on the concept of self-reliance. *Journal of Community Development and Life Quality*, 11(2), 152–164. (In Thai)
- Wattanachan, C., Prueksa, N., & Malikrua, P. (2021). *Goat Farming Manual for Farmers* [Manual]. Faculty of Natural Resources, Prince of Songkla University.
<https://pmua.or.th/wp-content/uploads/2022/12/คู่มือการเลี้ยงแพะฉบับเกษตรกร.pdf>

Received: August 15, 2025; Revised: September 30, 2025; Accepted: March 17, 2026

การออกแบบและการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมตู้อบฆ่าเชื้อแบคทีเรีย แผงไข่สำหรับเลี้ยงจิ้งหรีด

Design and engineering economic evaluation of bacterial disinfection chamber for egg trays in cricket rearing

ชนิษฐา ชัยบรรดิษฐ์¹ วารีย์ ศรีสอน^{1*} สาวิตรี ประภาการ¹ พิรณัฐ อันสุรีย์¹ ทยาวิร หนูบุญ¹
ณัฐพงษ์ ประภาการ¹ จาริณี จงปลื้มปิติ¹ เฉลิมพล เยื้องกลาง² และจิระวัลย์ โคตรศักดิ์²
Khanittha Chaibandit¹, Waree Srison^{1*}, Sawitree Prapakarn¹, Peeranat Ansuree¹,
Thayawee Nuboon¹, Natthapong Prapakarn¹, Jarinee Jongpluempiti¹,
Chalermpon Yuangklang² and Jiravan Khotsakdee²

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จังหวัดนครราชสีมา

¹Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima Province

²คณะนวัตกรรมและเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จังหวัดนครราชสีมา

²Faculty of Agricultural Innovative and Technology, Rajamangala University of Technology Isan, Nakhon Ratchasima Province

*Corresponding Author E-mail Address : waree.sr@rmuti.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการออกแบบและประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมของตู้อบฆ่าเชื้อแบคทีเรียแผงไข่สำหรับเลี้ยงจิ้งหรีด โดยตู้อบฆ่าเชื้อแบคทีเรียเป็นระบบการทำงานร่วมกันของลมร้อนและแสงยูวีซี ประกอบด้วยห้องอบ ชุดเพลทหมุนสำหรับวางแผงไข่ ชุดควบคุมอุณหภูมิและพัดลม ชุดไฟยูวีซี ชุดควบคุมอุณหภูมิและเวลาในการอบ ทดสอบอบแผงไข่ที่อุณหภูมิ 3 ระดับ ได้แก่ 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการอบ 5 นาที พบว่า เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบแผงไข่เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ความสามารถในการทำงานมีแนวโน้มลดลง แต่มีผลทำให้การใช้พลังงานไฟฟ้าของตู้อบฆ่าเชื้อแบคทีเรียแผงไข่สำหรับเลี้ยงจิ้งหรีด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อใช้อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และเวลาในการอบ 5 นาที สามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียชนิด *Escherichia coli* และ Coliform bacteria ที่ปนเปื้อนได้ มีความสามารถในการทำงาน 100 แผงต่อชั่วโมง และมีการใช้พลังงานไฟฟ้า 0.45 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม เมื่อลงทุนสร้างตู้อบฆ่าเชื้อแบคทีเรียแผงไข่สำหรับเลี้ยงจิ้งหรีดราคา 65,000 บาท ทำงานปีละ 300 วัน วันละ 8 ชั่วโมง และคิดราคาขายแผงไข่ 1.5 บาทต่อแผง พบว่า จุดคุ้มทุน เท่ากับ 9,750 แผงต่อปี และมีระยะเวลาคืนทุน เท่ากับ 123 วัน แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ในระดับสูง สำหรับการเลี้ยงจิ้งหรีดขนาดเล็กถึงขนาดกลาง ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่า ตู้อบฆ่าเชื้อแบคทีเรียไม่เพียงแต่ช่วยยกระดับสุขอนามัยในการนำแผงไข่มาไข่เท่านั้น แต่ยังให้ผลตอบแทนจากการลงทุนที่รวดเร็ว ทำให้เป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับการเพาะเลี้ยงจิ้งหรีดอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: ตู้อบฆ่าเชื้อ จิ้งหรีด แผงไข่

Abstract

This research aimed to study the design and engineering economic evaluation of bacterial disinfection chamber for egg trays in cricket rearing. The sterilization cabinet was operated using a combination of hot air and UVC light. It consisted of a heating chamber, a rotating shaft assembly for accommodating egg trays, a heating coil integrated with a fan system, a UVC light unit, and a temperature and time controller. The egg trays were subjected to bacterial disinfection at 3 different temperatures including 40, 50 and 60 °C with a constant heating duration of 5 minutes. From the experiments, it was found that when the temperature used for disinfection of egg trays increased, the capacity of the bacterial disinfection chamber tended to decrease, while the electric power consumption of the bacterial disinfection chamber tended to increase. The optimum temperature and time for disinfecting bacteria on egg trays is 60 °C at 5 min, the bacterial disinfection chamber could eliminate *Escherichia coli* and coliform bacteria contaminating the egg trays with the capacity of 100 trays/h and the electric power consumption of 0.45 kWh. The results of the engineering economic analysis revealed that an investment of 65,000 THB in the construction of a bacterial disinfection chamber for egg trays used in cricket rearing, which was operated 300 days per year at 8 hours per day, with a selling price of 1.5 THB per tray, resulted in a break-even point of 9,750 trays per year. The payback period was calculated to be 123 days, indicating a high economic feasibility for small- to medium-scale cricket farming operations. These findings suggest that the proposed disinfection chamber not only enhances hygienic conditions of reused egg trays but also offers a rapid return on investment, making it a viable option for sustainable insect farming practices.

Keywords: Disinfection chamber, Cricket, Egg tray

บทนำ

จังหวัดได้รับการยอมรับในฐานะสัตว์เศรษฐกิจตัวใหม่ที่มีบทบาทสำคัญในการกระตุ้นเศรษฐกิจของไทยและสร้างรายได้ให้แก่เกษตรกร ผลิตภัณฑ์จากจังหวัดที่ได้รับความนิยมในตลาดโลกประกอบด้วยแมลงสดและผลิตภัณฑ์แปรรูปต่าง ๆ เช่น แมลงผง โปรตีนบาร์ และเครื่องดื่มโปรตีน องค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ (FAO) ได้ส่งเสริมให้ประชากรทั่วโลกบริโภคจังหวัดเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากจังหวัดเป็นแหล่งโปรตีนทางเลือกที่มีราคาประหยัดและหาได้ง่ายในท้องถิ่น (Khaosod online, 2020) องค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ (FAO) คาดการณ์ว่าประชากรโลกจะเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 9,000 ล้านคน ภายในปี พ.ศ. 2593 ซึ่งอาจส่งผลให้ความต้องการอาหารทั้งสำหรับมนุษย์และสัตว์เลี้ยงเพิ่มสูงขึ้น และก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อการขาดแคลนอาหารในอนาคต (Henry et al., 2018; MGR online, 2021) ประเทศไทยซึ่งมีศักยภาพและความชำนาญในการเพาะเลี้ยงจังหวัดเชิงพาณิชย์ จึงต้องเร่งสร้างความเชื่อมั่นแก่ผู้บริโภคในด้านความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์จังหวัด (National Bureau of Agricultural Commodity and Food Standards, 2019) รัฐบาลไทยได้ให้การสนับสนุนและส่งเสริมการเลี้ยงจังหวัดในฐานะแมลงเศรษฐกิจ เพื่อยกระดับและพัฒนาให้จังหวัดเป็นสินค้าทางการเกษตรที่สำคัญของประเทศ (Bureau of Livestock Standards and Certification, 2021) จังหวัดจัดเป็นแมลงที่สามารถบริโภคได้ และมีคุณค่าทางโภชนาการสูง โดยในปริมาณเนื้อจังหวัดสด 100 กรัม ประกอบด้วยโปรตีน 12.9 กรัม ไขมัน 5.5 กรัม แคลเซียม 75.8 มิลลิกรัม และธาตุเหล็ก 9.5 มิลลิกรัม (Phesatcha & Wanapat, 2016) ซึ่งชี้ให้เห็นถึงศักยภาพของจังหวัดในการเป็นแหล่งโปรตีนทางเลือกใหม่สำหรับประชากรโลก (Van Huis et al., 2015)

เกษตรกรผู้เลี้ยงจังหวัดในเขตจังหวัดนครราชสีมามีการทำความสะอาดแผงไข่ (Figure 1) โดยการตากแดด 1-2 วัน ซึ่งมีข้อดีคือไม่สิ้นเปลืองพลังงาน แต่ข้อเสียคือใช้ระยะเวลานาน สิ้นเปลืองพื้นที่ในการตากแผงไข่ และเสี่ยงต่อการติดเชื้อโรคอื่น ๆ เพิ่มจากการตากแผงไข่บนพื้น รวมทั้งอาจจะมีมดหรือแมลงศัตรูจังหวัดไข่ทิ้งไว้ และเจริญเติบโตไปพร้อมกับจังหวัดซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อผลผลิตของจังหวัด (Biodiversity-Based Economy Development Office, 2017) การอบแผงไข่

ด้วยไอน้ำแบบสมุนไพร เป็นอีกวิธีการในการทำความสะอาดแผงไข่สำหรับเลี้ยงจิ้งหรีด ข้อดีคือใช้ระยะเวลาที่สั้นกว่าการตากแดด สมุนไพรต่าง ๆ จะช่วยไล่แมลงและมีกลิ่นหอม ข้อเสียต้องนำแผงไข่มาตากแดดอีกครั้ง เพื่อไล่ความชื้นจากการอบและสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงในการต้มน้ำให้เดือดจนกลายเป็นไอน้ำ (Robertson, 2013; Pitinun Farm, 2018; T-rada Farm, 2020) การอบแผงไข่สำหรับเลี้ยงจิ้งหรีดโดยใช้ลมร้อน ซึ่งอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 60-70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2-3 ชั่วโมง ข้อดีคือเมื่ออบเสร็จแล้วสามารถนำไปใช้งานได้เลยโดยไม่ต้องตากไล่ความชื้น ข้อเสียคือเปลืองพลังงานไฟฟ้า (Biodiversity-Based Economy Development Office, 2017) โดยทั่วไปการใช้ไอน้ำจะมีประสิทธิภาพการทำลายจุลินทรีย์ได้ดีกว่าความร้อนแห้ง ซึ่งประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อจะขึ้นอยู่กับเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ (Phumkhachorn et al., 2023) จากการพัฒนานวัตกรรมเครื่องฆ่าเชื้อโรคด้วยแสงยูวีแบบเคลื่อนที่ของ Nunun et al. (2020) ได้ทำการออกแบบเครื่องต้นแบบโดยใช้หลอดยูวี 6 โวลต์ ขนาด 21 เซนติเมตร จำนวน 2 หลอด พบว่า สามารถใช้งานได้จริง และสามารถฆ่าเชื้อโรคได้ในทางทฤษฎี แต่ควรมีการประเมินประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคในสถานการณ์จริง โดยแสงยูวีที่สังเคราะห์ได้นำมาใช้สำหรับฆ่าเชื้ออย่างแพร่หลายทั้งในโรงพยาบาล สำนักงาน เครื่องบิน และโรงงานต่าง ๆ แต่องค์กรอนามัยโลกได้แนะนำว่าแสงยูวีซีไม่เหมาะสำหรับการฆ่าเชื้อในห้องและอุปกรณ์ต่าง ๆ เท่านั้น ไม่เหมาะสำหรับการฆ่าเชื้อในคนและสัตว์เลี้ยง เพราะการสัมผัสแสงยูวีซีโดยตรงเพียงไม่กี่วินาทีจะทำให้แสบตา ผิวหนังไหม้และส่งผลต่อการเป็นโรคมะเร็งผิวหนัง (Wonpaisan, 2020; Phumkhachorn et al., 2023)

อุปกรณ์ที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงประกอบด้วย บ่อเพาะเลี้ยง ตาข่ายพลาสติก วัสดุสำหรับหลบซ่อน (นิยมใช้แผงไข่) ภาชนะสำหรับวางไข่ รวมถึงอุปกรณ์ให้อาหารและน้ำ การรักษาความสะอาดของอุปกรณ์เพาะเลี้ยงถือเป็นปัจจัยสำคัญ เนื่องจากการปนเปื้อนของเชื้อโรค และการระบาดของศัตรูจิ้งหรีดส่งผลกระทบต่ออัตราการรอดตาย และปริมาณผลผลิต โรคที่พบได้บ่อย เช่น โรคแคระแกร็น โรคไข่น้ำ โรคติดเชื้ออีริโคไวรัส และโรคติดเชื้อในระบบทางเดินอาหาร มักมีสาเหตุมาจากความไม่สะอาดของบ่อเลี้ยงและแผงไข่ ซึ่งเป็นที่อยู่อาศัยและวัสดุหลบซ่อนของจิ้งหรีด (Soithongdee & Nilapornkul, 2019) โดยจากข้อมูลพบว่า การเพาะเลี้ยงจิ้งหรีดหนึ่งบ่อที่มีปริมาตร 2.016 ลูกบาศก์เมตร ต้องใช้แผงไข่มากถึง 410 แผง (Nakornriab, 2015) ซึ่งการทำความสะอาดแผงไข่สำหรับการเลี้ยงจิ้งหรีดยังคงใช้วิธีการแบบดั้งเดิม เช่น การตากแดด การอบด้วยไอน้ำ และการอบด้วยลมร้อน ซึ่งยังมีข้อจำกัดในเรื่องประสิทธิภาพ เวลา และค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน ส่งผลกระทบต่อศักยภาพในการผลิตและความยั่งยืนของการเลี้ยงจิ้งหรีด เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว การวิจัยในครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมของตู้อบฆ่าเชื้อแบคทีเรียแผงไข่สำหรับเลี้ยงจิ้งหรีด ซึ่งเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ นอกจากจะช่วยให้เพิ่มประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อแล้ว ยังสามารถลดเวลาและพื้นที่ในการทำงานได้อีกด้วย นอกจากนี้การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์วิศวกรรมของตู้อบฆ่าเชื้อแบคทีเรียมีความสำคัญเพื่อประเมินความคุ้มค่าทางการลงทุน และผลตอบแทนทางเศรษฐกิจ โดยศึกษาต้นทุนการผลิต ต้นทุนการดำเนินงาน และจุดคุ้มทุน เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจนำเทคโนโลยีนี้ไปใช้ในเชิงพาณิชย์อย่างมีประสิทธิภาพ



Figure 1 Egg tray drying for cricket farming by farmers in Nakhon Ratchasima Province

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

1. การออกแบบและพัฒนาตู้อบฆ่าเชื้อแบคทีเรียผงไข่สำหรับเลี้ยงจิ้งหรีด

แนวทางการออกแบบและพัฒนาตู้อบฆ่าเชื้อแบคทีเรียผงไข่สำหรับเลี้ยงจิ้งหรีด แสดงใน Figure 2 โดยในขั้นตอนได้มุ่งเน้นการพัฒนาระบบหลักสำหรับการอบฆ่าเชื้อแบคทีเรียด้วยการผสมระหว่างลมร้อนและแสงยูวีซี เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการลดระยะเวลาและค่าใช้จ่าย รวมทั้งช่วยลดภาระแรงงาน ตู้อบถูกออกแบบให้มีระดับความสูงที่เหมาะสมกับการใช้งาน สะดวกสบาย พร้อมทั้งสามารถเคลื่อนย้ายได้ง่าย ระบบมีหลักการทำงานและส่วนประกอบที่สำคัญดังต่อไปนี้

1.1 ห้องอบ มีขนาดของโครงสร้างของตู้อบฆ่าเชื้อแบคทีเรีย กว้าง 100 เซนติเมตร ยาว 100 เซนติเมตร และสูง 180 เซนติเมตร และขนาดห้องอบ กว้าง 80 เซนติเมตร ยาว 90 เซนติเมตร และสูง 160 เซนติเมตร รวมทั้งมีประตูตู้อบ (หมายเลข 1) สำหรับเป็นช่องทางนำผงไข่เข้าและออกจากตู้อบ โดยมีการหุ้มตัวตู้อบด้วยแผ่นสังกะสีและฉนวนกันความร้อน พร้อมทั้งสามารถเคลื่อนย้ายได้ง่ายเนื่องจากมีล้อ (หมายเลข 6)

1.2 ชุดเพลทหมุนสำหรับวางผงไข่ ประกอบด้วย เพลทสำหรับวางผงไข่ (หมายเลข 4) มีแผ่นวางผงไข่เป็นเหล็กเส้นขนาด 30 เซนติเมตร เชื่อมติดกับเพลทเป็นคู่ติดกันสี่ทิศทางแบบกากบาท โดยแต่ละทิศทางมีเหล็กเส้นอยู่ 10 คู่ สามารถวางผงไข่ได้ 5 แผง พูลเลย์ (หมายเลข 2) ทำหน้าที่ส่งกำลัง และมอเตอร์ (หมายเลข 3) เป็นมอเตอร์ DC 24 โวลต์ 350 วัตต์ ใช้เป็นต้นกำลังในการหมุนเพลท ซึ่งสามารถปรับความเร็วรอบได้

1.3 ชุดขดลวดความร้อนและพัดลม ประกอบด้วย ขดลวดความร้อน (หมายเลข 9) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน ใช้ขดลวดความร้อน 220 โวลต์ 1,000 วัตต์ มี 2 ตัว และพัดลม (หมายเลข 8) เป็นพัดลมแกน (Axial fan) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร มี 2 ตัว ติดตั้งไว้ด้านหลังของขดลวดความร้อน เพื่อเป่ากระจายความร้อนภายในตู้อบ

1.4 ชุดไฟยูวีซี หลอดไฟยูวีซี (หมายเลข 7) เป็นหลอดนีออน มีความยาวคลื่นประมาณ 254 นาโนเมตร ให้ความเข้มของแสงยูวีซี 57.6 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร มีทั้งหมด 2 หลอด ติดตั้งไว้ด้านข้างภายในของตู้ ข้างละ 1 หลอด

1.5 ชุดควบคุมอุณหภูมิและเวลาในการอบ (หมายเลข 5) ประกอบด้วย เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ แบบ RTD (Resistance Temperature Detector) เป็นเซนเซอร์ที่มีความแม่นยำสูง ($\pm 0.1-0.5$ องศาเซลเซียส) และมีเสถียรภาพในการวัดอุณหภูมิต่อเนื่องในช่วงอุณหภูมิประมาณ -200 ถึง 850 องศาเซลเซียส ซึ่งครอบคลุมช่วงการทำงานของตู้อบฆ่าเชื้อแบคทีเรียทั่วไปที่ 40-80 องศาเซลเซียส หรือสูงกว่า (Bunratchoo et al., 2021) ซึ่งเมื่ออุณหภูมิสูงถึงค่าที่ตั้งไว้ระบบจะตัดการทำงานของชุดขดลวดความร้อนและพัดลม และสำหรับไทม์เมอร์ ใช้แบบดิจิตอลหรือแบบแสดงผลด้วยตัวเลขและหน้าปัดเป็นแบบ LCD ซึ่งเป็นไทม์เมอร์ที่ครอบคลุมการทำงานที่หลากหลาย เพราะทำงานได้หลายโหมด หลายแบบ และยังสามารถต่อสายเกท หรือรีเลย์เพื่อกำหนดการทำงานได้ (Kobkam, 2022)

Figure 3 แสดงตัวอย่างการต่อวงจรของตู้อบฆ่าเชื้อแบคทีเรียผงไข่สำหรับเลี้ยงจิ้งหรีด ดังนี้ เซอร์กิตเบรกเกอร์ (หมายเลข 1) สวิตช์เปิด-ปิดการทำงานของตู้อบ (หมายเลข 2) ไฟแสดงสถานะการทำงานของตู้อบ (หมายเลข 3) สวิตช์เปิด-ปิดการทำงานของไทม์เมอร์ (หมายเลข 4) ไทม์เมอร์ (หมายเลข 5) ตัวส่งสัญญาณเตือนหมดเวลา (หมายเลข 6) สวิตช์เปิด-ปิดการทำงานของหลอดไฟยูวีซี (หมายเลข 7) ไฟแสดงสถานะการทำงานของหลอดไฟยูวีซี (หมายเลข 8) หลอดไฟยูวีซี (หมายเลข 9) สวิตช์เปิด-ปิดการทำงานของมอเตอร์ (หมายเลข 10) ไฟแสดงสถานะการทำงานของมอเตอร์ (หมายเลข 11) อินเวอร์เตอร์ควบคุมความเร็วของมอเตอร์ (หมายเลข 12) สวิตช์ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ (หมายเลข 13) มอเตอร์ (หมายเลข 14) เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ (หมายเลข 15) จอตั้งค่าและแสดงผลอุณหภูมิ (หมายเลข 16) ไฟแสดงสถานะการทำงานของชุดควบคุมอุณหภูมิ (หมายเลข 17) ชุดควบคุมการทำงานของขดลวดความร้อน (หมายเลข 18) ขดลวดความร้อน (หมายเลข 19) โดยพัดลมจะทำงานพร้อมกับขดลวดความร้อน

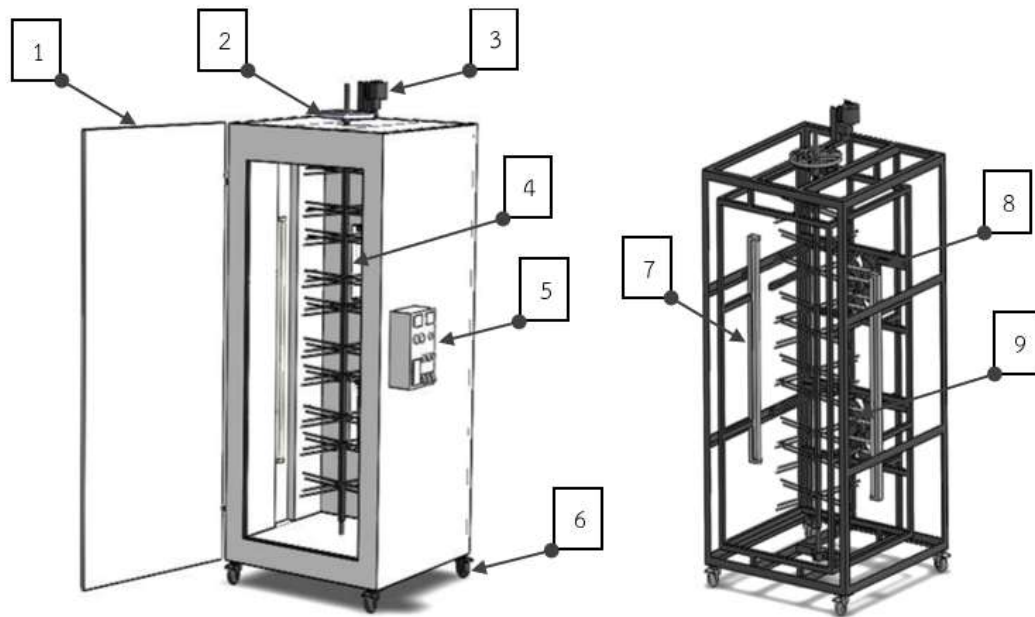


Figure 2 Components of disinfection chamber for egg trays in cricket rearing

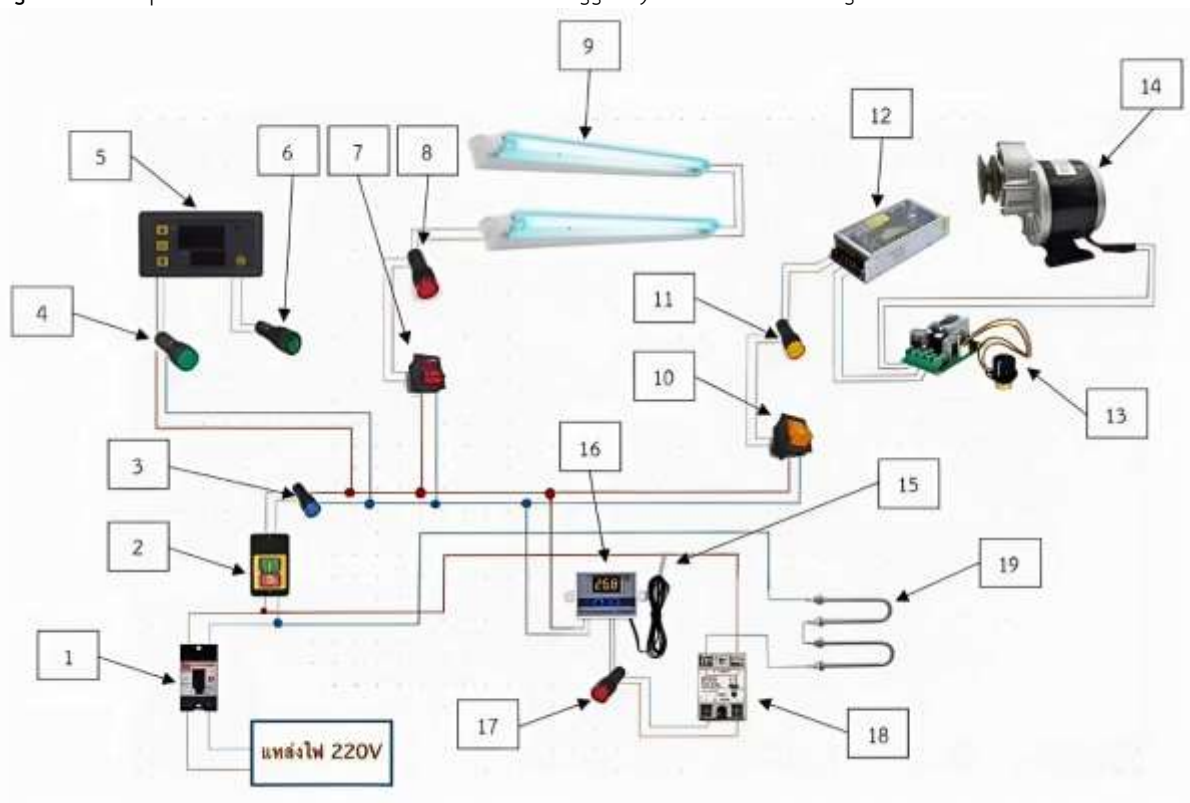


Figure 3 Disinfection chamber control circuit connection

การสร้างตู้ฆ่าเชื้อแบคทีเรียแสงสำหรับเลี้ยงจิ้งหรีด (Figure 4) มีส่วนประกอบหลัก คือ ห้องอบ ชุดเพลทหมุนสำหรับวางแผงไข่ ชุดลดอุณหภูมิและพัดลม ชุดไฟยูวีซี และชุดควบคุมอุณหภูมิและเวลาในการอบ โดยด้านในของตู้มีขนาดห้องอบ กว้าง 80 เซนติเมตร ยาว 90 เซนติเมตร และสูง 160 เซนติเมตร มีการติดตั้งชุดเพลทหมุนสำหรับวางแผงไข่ ชุดลดอุณหภูมิและพัดลม และชุดไฟยูวีซี ดังแสดงใน Figure 4 (A) และด้านนอกของตู้ทำการติดตั้งชุดควบคุมอุณหภูมิและเวลาในการอบ ดังแสดงใน Figure 4 (B) มีขนาดกว้าง 100 เซนติเมตร ยาว 100 เซนติเมตร และสูง

180 เซนติเมตร ก่อนอบฆ่าเชื้อแบคทีเรียให้ทำการอุ่นตู้อบก่อนอบทุกครั้ง โดยการเปิดการทำงานตู้อบ แล้วตั้งอุณหภูมิที่ต้องการอบจากจอตั้งค่าและแสดงผลอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิถึงค่าที่ตั้งไว้ ระบบจะปิดการทำงานของขดลวดความร้อนและพัดลม พร้อมกับส่งสัญญาณเตือน จากนั้นเปิดตู้อบแล้วนำแผงไข่ใส่เข้าไปที่ชุดเพลลาหมุนสำหรับวางแผงไข่ เมื่อใส่ครบแล้วทำการปิดตู้อบ แล้วตั้งค่าอุณหภูมิและเวลาที่ต้องการอบ เปิดการทำงานของหลอดไฟยูวีซี พร้อมกับตั้งค่าการหมุนของชุดเพลลาหมุนสำหรับวางแผงไข่ตามต้องการ (แนะนำที่ 8 รอบต่อนาที ซึ่งเป็นความเร็วรอบที่ต่ำที่สุด) เมื่อครบเวลาที่ตั้งไว้ ระบบจะปิดการทำงานของขดลวดความร้อนและพัดลมอัตโนมัติ พร้อมกับส่งสัญญาณเตือนด้วยไฟและเสียง จากนั้นให้ทำการปิดสวิทช์การทำงานของหลอดไฟยูวีซี และชุดเพลลาหมุนสำหรับวางแผงไข่ ก่อนเปิดตู้อบ และนำแผงไข่ไปใช้งานต่อไป



(A) Interior of the disinfection chamber

(B) Exterior of the disinfection chamber

Figure 4 Bacterial disinfection chamber for egg trays in cricket rearing

2. การทดสอบสมรรถนะการทำงานของตู้อบฆ่าเชื้อแบคทีเรียแผงไข่สำหรับเลี้ยงจิ้งหรีด

การทดสอบสมรรถนะการทำงานของตู้อบฆ่าเชื้อแบคทีเรียแผงไข่สำหรับเลี้ยงจิ้งหรีด มีรายละเอียดดังนี้

2.1 วัสดุและอุปกรณ์

- 1) ตู้อบฆ่าเชื้อแบคทีเรียแผงไข่สำหรับเลี้ยงจิ้งหรีด
- 2) แผงไข่สำหรับเลี้ยงจิ้งหรีด จากฟาร์มจิ้งหรีด ต้นไม้พอเพียงฟาร์ม อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา

(Figure 5) ซึ่งผ่านการเลี้ยงจิ้งหรีดแล้ว 1 รุ่น

**Figure 5** Egg trays for cricket rearing from Tonmai Porpiang Farm

3) เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบระบบไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ คือ Clamp meter เป็นอุปกรณ์วัดทางไฟฟ้าที่สามารถตรวจวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวนำได้โดยอาศัยหลักการวัดสนามแม่เหล็กโดยรอบตัวนำไฟฟ้า โดยไม่จำเป็นต้องตัดวงจรหรือหยุดการทำงานของอุปกรณ์

4) ถังมือยาง และถุงซิปล็อคสำหรับใส่ตัวอย่างผงไข่หลังอบ

5) ชุดทดสอบจุลชีวินวิทยา “Compact Dry EC” ใช้ในการตรวจวิเคราะห์การปนเปื้อนของเชื้อ *Escherichia coli* และกลุ่มแบคทีเรียโคลิฟอร์ม (Coliform) ดัง Figure 6 ซึ่งผ่านการรับรองมาตรฐานจาก AOAC (No. 110402), MicroVal (No. MV0806-004LR สำหรับ Coliform และ No. MV0806-005LR สำหรับ *E. coli*) และ NordVal (No. 036) โดยดำเนินการตามขั้นตอนที่บริษัทผู้ผลิต (B Smart Science, Thailand) กำหนด ใช้ในการตรวจวิเคราะห์การปนเปื้อนของเชื้อ *E. coli* และกลุ่มแบคทีเรียโคลิฟอร์ม (Coliform)



Figure 6 Compact Dry EC plates for *E. coli* and coliform detection

2.2 ปัจจัยในการทดสอบ

1) ตัวแปรต้น คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการอบฆ่าเชื้อแบคทีเรีย 3 ระดับ ได้แก่ 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส

2) ตัวแปรควบคุม ประกอบด้วย เวลาในการอบ 5 นาที ความเข้มของแสงยูวีซี 57.6 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เมื่อต้องการใช้เวลาในการฆ่าเชื้อไม่เกิน 5 นาที ได้จากการคำนวณขนาดความเข้มของรังสียูวีซีด้วยสมการของ Thaniya (2020) ความเร็วของลมร้อน 1 เมตรต่อวินาที เป็นความเร็วลมร้อนที่นิยมใช้ในการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร (Hany et al., 2023) ความเร็วรอบของเพลลาที่ใช้วางผงไข่ 8 รอบต่อนาที เป็นความเร็วรอบต่ำที่สุดในการหมุนของชุดเพลลาหมุนสำหรับวางผงไข่ และจำนวนผงไข่ที่อบใช้ 20 แผง เป็นการออกแบบให้สามารถบรรจุผงไข่ได้สูงสุดตามความเหมาะสมในการใช้งาน

2.3 ค่าชี้ผล

1) ความสามารถในการทำงาน (ผงต่อชั่วโมง) คือ C เป็นอัตราส่วนของจำนวนผงไข่ที่อบ (ผง) คือ N กับเวลาที่ใช้ในการอบทั้งหมด ประกอบด้วยเวลาในการอุ่นเครื่อง และเวลาในการอบฆ่าเชื้อ (ชั่วโมง) คือ t ดังสมการ Eq.1

$$C = \frac{N}{t} \quad (\text{Eq.1})$$

2) พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) คือ P เป็นผลคูณของกำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์) คือ W กับเวลาที่ใช้ในการอบทั้งหมด ประกอบด้วยเวลาในการอุ่นเครื่อง และเวลาในการอบฆ่าเชื้อ (ชั่วโมง) คือ t ดังสมการ Eq.2

$$P = Wt \quad (\text{Eq.2})$$

3) การตรวจนับปริมาณเชื้อแบคทีเรียชนิด *E. coli* และ Coliform bacteria ในตัวอย่างดำเนินการโดยใช้ชุดทดสอบ Compact Dry EC (Test Kit Microbial “Compact Dry EC” for *E. coli* and Coliform) ซึ่งรายงานผลในหน่วย Colony Forming Unit per milliliter (CFU/mL) หน่วยดังกล่าวใช้แสดงจำนวนจุลินทรีย์ที่มีชีวิตซึ่งสามารถเจริญบนผิวหน้าของอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดแข็ง และสร้างกลุ่มโคโลนี (Colony) ที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า โดยโคโลนีหนึ่งกลุ่มเกิดจากการแบ่งตัวของจุลินทรีย์ที่มีต้นกำเนิดจากเซลล์เดียว การตรวจนับใช้หลักการของ Standard plate count ซึ่งเป็นวิธีมาตรฐานสำหรับการประเมินจำนวนจุลินทรีย์ที่มีชีวิตทั้งหมด (Total viable count) ทั้งนี้ ค่ามาตรฐานการปนเปื้อนไม่นิยมให้เกิน 2.2 CFU/mL เพื่อคงคุณภาพและความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์ (Chiappa et al., 2021)

2.4 วิธีการวิจัย

- 1) ทำการสุ่มเก็บตัวอย่างแผงไข่ก่อนกระบวนการอบ เพื่อใช้ในการตรวจวิเคราะห์การปนเปื้อนของเชื้อแบคทีเรียโดยใช้ชุดทดสอบเชื้อแบคทีเรียชนิด *E. coli* และ Coliform bacteria ด้วยวิธี Compact Dry TC Test Kit
- 2) ทำการอุ่นตู้อบฆ่าเชื้อแบคทีเรียแผงไข่สำหรับเลี้ยงจิ้งหรีดให้ได้อุณหภูมิตามแผนการทดสอบ โดยจับเวลาและบันทึกผลในการอุ่นตู้อบฆ่าเชื้อแบคทีเรียทุกครั้งก่อนอบในครั้งต่อไป
- 3) เตรียมแผงไข่สำหรับการทดสอบครั้งละ 20 แผง นำเข้าตู้อบฆ่าเชื้อแบคทีเรีย ตามที่แสดงดัง Figure 7 ปรับตั้งเวลาอบ 5 นาที เมื่อครบเวลาที่ตั้งไว้ หลอดไฟยูวีจะดับ ขดลวดความร้อนและพัดลมหยุดทำงาน พร้อมมีสัญญาณเสียงจากตู้อบแจ้งเตือนสิ้นสุดการทำงาน



Figure 7 The process to load egg trays into the disinfection chamber

- 4) ทำการทดสอบจนครบตามแผนการทดลองที่วางไว้ แล้วทำการสุ่มแผงไข่หลังอบไว้สำหรับการตรวจนับปริมาณเชื้อแบคทีเรียชนิด *E. coli* และ Coliform bacteria โดยใช้ชุดทดสอบ Compact Dry EC (Test Kit Microbial “Compact Dry EC” for *E. coli* and Coliform)
- 5) วางแผนการทดสอบแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design: CRD) จำนวน 3 ซ้ำ และนำข้อมูลความสามารถในการทำงาน และพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ของตู้อบฆ่าเชื้อแบคทีเรียแผงไข่สำหรับเลี้ยงจิ้งหรีด มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance; ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในแต่ละทรีทเมนต์โดยวิธี Duncan’s new Multiple Range Test (DMRT) ที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรมสถิติ SPSS สำเร็จรูป

3. การประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมของตู้อบฆ่าเชื้อแบคทีเรียแผงไข่สำหรับเลี้ยงจิ้งหรีด

เป็นการประเมินค่าใช้จ่ายในการใช้งานตู้อบฆ่าเชื้อแบคทีเรียแผงไข่สำหรับเลี้ยงจิ้งหรีด เพื่อใช้เป็นข้อมูลในวิเคราะห์และตัดสินใจในการลงทุน โดยใช้จุดคุ้มทุนและระยะเวลาคืนทุน ซึ่งสามารถหาค่าได้ดังนี้

3.1 ค่าใช้จ่ายคงที่ คือค่าใช้จ่ายที่ไม่แปรไปตามปริมาณการผลิต ซึ่งค่าใช้จ่ายคงที่ที่ใช้ในการวิเคราะห์ประกอบด้วย ค่าเสื่อมราคา ดังสมการ Eq. 3 และค่าดอกเบี้ย ดังสมการ Eq. 4

$$\text{ค่าเสื่อมราคา (บาทต่อปี)} = \frac{\text{ราคาแรกซื้อ} - \text{ราคาเมื่อหมดอายุ}}{\text{อายุการใช้งาน}} \quad (\text{Eq.3})$$

$$\text{ค่าดอกเบี้ย (บาทต่อปี)} = \left(\frac{\text{ราคาแรกซื้อ} + \text{ราคาเมื่อหมดอายุ}}{2} \right) \times \text{อัตราดอกเบี้ย} \quad (\text{Eq.4})$$

3.2 ค่าใช้จ่ายแปรผัน คือค่าใช้จ่ายที่แปรไปตามปริมาณการผลิต ประกอบด้วย ค่าไฟฟ้า และค่าแรงงาน

3.3 จุดคุ้มทุน เป็นจุดที่รายจ่ายและรายรับมีค่าเท่ากัน สามารถหาจากสมการ Eq. 5

$$\text{จุดคุ้มทุน (แผงต่อปี)} = \frac{\text{ค่าใช้จ่ายคงที่}}{\text{ราคาขายต่อแผง} - \text{ค่าใช้จ่ายแปรผันต่อแผง}} \quad (\text{Eq.5})$$

3.4 ระยะเวลาคืนทุน คือระยะเวลาที่นำตู้อบมาซื้อแบคทีเรียผงใช้สำหรับเลี้ยงจึงหรีดมาใช้งานแล้วเริ่มมีรายรับที่มากกว่าค่าใช้จ่ายหรือเป็นกำไร สามารถหาจากสมการ Eq. 6

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน (ปี)} = \frac{\text{ราคาตู้อบผงใช้}}{\text{กำไร}} \quad (\text{Eq.6})$$

ผลการวิจัย และการอภิปรายผล

1. ผลการทดสอบสมรรถนะการทำงานของตู้อบฆ่าเชื้อแบคทีเรียผงใช้สำหรับเลี้ยงจึงหรีด

จากการทดลองอบผงใช้สำหรับเลี้ยงจึงหรีด ที่อุณหภูมิ 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส พบว่า อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการอุ่นตู้อบ 3.5 นาที อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการอุ่นตู้อบ 5 นาที และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการอุ่นตู้อบ 7 นาที และใช้เวลาอบ 5 นาที ทุกระดับอุณหภูมิการทดลอง โดยอุณหภูมิที่แตกต่างกันมีผลต่อความสามารถในการทำงาน พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ และจำนวนเชื้อแบคทีเรีย ดังแสดงใน Table 1 ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ความแปรปรวนของอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อความสามารถในการทำงาน และพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ของตู้อบฆ่าเชื้อแบคทีเรียผงใช้สำหรับเลี้ยงจึงหรีด พบว่า อุณหภูมิมีผลต่อความสามารถในการทำงาน และพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เมื่อใช้อุณหภูมิในการอบเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ความสามารถในการทำงานของตู้อบฆ่าเชื้อแบคทีเรียผงใช้สำหรับเลี้ยงจึงหรีดมีแนวโน้มลดลง เนื่องด้วยเมื่ออุณหภูมิในการอบเพิ่มขึ้น ทำให้มีระยะเวลาในการอุ่นตู้อบเพิ่มขึ้นด้วย เวลาที่ใช้ในการอุ่นตู้อบนับเป็นเวลาที่ใช้ในการทำงานด้วย ดังนั้นจึงทำให้ความสามารถในการทำงานมีค่าต่างกันในแต่ละอุณหภูมิ และพบว่าจำนวนเชื้อแบคทีเรียชนิด *E. coli* และ Coliform bacteria มีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิในการอบเพิ่มขึ้น แต่ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยมีรายละเอียดดังนี้

อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส มีความสามารถในการทำงานเฉลี่ย 141 แผงต่อชั่วโมง มีค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้เฉลี่ย 0.23 กิโลวัตต์ชั่วโมง และจำนวนเชื้อแบคทีเรียชนิด *E. coli* และ Coliform bacteria มีค่าเฉลี่ย 1,600 CFU/mL และ 5,500 CFU/mL ตามลำดับ

อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มีความสามารถในการทำงานเฉลี่ย 120 แผงต่อชั่วโมง มีค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้เฉลี่ย 0.32 กิโลวัตต์ชั่วโมง และจำนวนเชื้อแบคทีเรียชนิด *E. coli* และ Coliform bacteria มีค่าเฉลี่ย 500 CFU/mL และ 1,500 CFU/mL ตามลำดับ

อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีความสามารถในการทำงานเฉลี่ย 100 แผงต่อชั่วโมง มีค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้เฉลี่ย 0.45 กิโลวัตต์ชั่วโมง และไม่พบเชื้อแบคทีเรียชนิด *E. coli* และ Coliform bacteria

จากข้างต้นจะเห็นได้ว่า การอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีความสามารถในการทำงาน 100 แผงต่อชั่วโมง ซึ่งมีความใกล้เคียงกันกับการอบแห้งใช้ด้วยตู้อบไอน้ำของ T-rada Farm (2020) โดยใช้เวลาในการอบใกล้เคียงกัน คือ 5-10 นาที แต่ใช้อุณหภูมิในการอบ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการใช้อุณหภูมิในการอบที่สูงกว่าตู้อบฆ่าเชื้อแบคทีเรียแห้งใช้สำหรับเลี้ยงจิ้งหรีด และงานวิจัยการอบแห้งด้วยลมร้อนแบบพาความร้อน พบว่า อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีความเหมาะสมในการอบแห้งมากที่สุดเนื่องจากมีเวลาในการอบแห้งน้อยที่สุด (Hany et al., 2023)

สำหรับค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ของตู้อบฆ่าเชื้อแบคทีเรียแห้งใช้สำหรับเลี้ยงจิ้งหรีด พบว่า เมื่ออุณหภูมิในการอบเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้นั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tasao and Saikaew (2014) ได้ทำการศึกษาการใช้พลังงานในกระบวนการอบแห้งสาลีพินก้าน ซึ่งเสนอแนะมาตรการการประหยัดพลังงานสำหรับการอบแห้งไว้ว่า การลดอุณหภูมิและเวลาในการอบแห้งส่งผลทำให้พลังงานไฟฟ้าลดลงไปด้วย

การอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส สามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียชนิด *E. coli* และ Coliform bacteria ที่ก่อโรคที่เกิดจากการปนเปื้อนในแผงไข่ได้ โดยจำนวนเชื้อแบคทีเรียชนิด *E. coli* และ Coliform bacteria ก่อนอบมีค่ามากกว่า 30,000 CFU/mL ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Phumkhachorn et al. (2023) ซึ่งทดสอบความสามารถของตู้อบฆ่าเชื้อด้วยแสงยูวี พบว่า การอบด้วยแสงยูวีเป็นเวลา 30 วินาที สามารถยับยั้ง Coliphage ทุกความเข้มข้นที่ใช้ในการศึกษานี้ได้อย่างสมบูรณ์ และงานวิจัยเครื่องฆ่าเชื้อแบคทีเรียด้วยรังสียูวีซีที่เน้นประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อ แบคทีเรียและการใช้งานที่ปลอดภัยสามารถกำจัดเชื้อแบคทีเรียโคลิฟอร์มและเอสเชอริเชียโคไลได้อย่างมีประสิทธิภาพ ลดจำนวนเชื้อจนไม่หลงเหลือ (0 CFU/mL) ภายในเวลา 60 นาที (Chatngoen et al., 2024)

Table 1 Effects of temperature on capacity, electric power consumption and bacterial count

Temperature (°C)	Capacity (trays/h)	Electric power consumption (Kw-h)	Bacterial count	
			<i>E. coli</i> (CFU/mL)	Coliform bacteria (CFU/mL)
40	141±4.99 ^a	0.23±0.004 ^c	1,600	5,500
50	120±6.02 ^b	0.32±0.07 ^b	500	1,500
60	100±8.40 ^c	0.45±0.12 ^a	0	0

Note: Values in each column followed by the same capital letter are not significantly different at the 95% confidence level by DMRT

2. ผลการประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมของตู้อบฆ่าเชื้อแบคทีเรียแห้งใช้สำหรับเลี้ยงจิ้งหรีด

จากผลการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม โดยคิดที่ราคาตู้อบฆ่าเชื้อแบคทีเรียแห้งใช้สำหรับเลี้ยงจิ้งหรีด 65,000 บาท ได้รับการประเมินจากผู้ผลิตเครื่องจักรกลเกษตร (Table 2) อายุการใช้งาน 10 ปี โดยการประเมินอัตราดอกเบี้ยต่อปี 12 เปอร์เซ็นต์ ใช้ผู้ควบคุมเครื่อง 1 คน (ค่าแรงงาน 352 บาทต่อวัน) ความสามารถในการทำงาน 100 แผงต่อชั่วโมง อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า 0.45 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง อัตราค่าไฟฟ้าประเภทที่อยู่อาศัย เท่ากับ 4.4217 บาทต่อหน่วย และทำงานวันละ 8 ชั่วโมง ปีละ 300 วัน จะได้ค่าใช้จ่ายคงที่รวมของตู้อบฆ่าเชื้อแบคทีเรียแห้งใช้สำหรับเลี้ยงจิ้งหรีด 10,140 บาท และมีค่าใช้จ่ายแปรผันรวม 110,376 บาทต่อปี โดยกำหนดราคาขายแผงไข่ เท่ากับ 1.5 บาทต่อแผง จะได้จุดคุ้มทุนของตู้อบฆ่าเชื้อแบคทีเรียแห้งใช้สำหรับเลี้ยงจิ้งหรีด เท่ากับ 9,750 แผงต่อปี และระยะเวลาคืนทุน เท่ากับ 4.08 เดือน หรือ 122.4 วัน (ประมาณ 123 วัน) ซึ่งใช้หลักการประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมคล้ายกันกับ Kongkaew et al. (2021) ทำการประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมของเครื่องกะเทาะเปลือกถั่วลิสง โดยเมื่อใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นต้นกำลัง

Table 2 Fabrication cost of disinfection chamber for egg trays in cricket rearing

Item	Cost (Baht)
1. Materials	
1.1 Main frame	20,000
1.2 Other devices	15,000
2. Fabrication by skilled labor	30,000
Total	65,000

บทสรุป

การออกแบบและพัฒนาตู้อบฆ่าเชื้อแบคทีเรียแผงไข่สำหรับเลี้ยงจิ้งหรีด มีส่วนประกอบหลัก คือ ห้องอบ ชุดเพลลาหมุน สำหรับวางแผงไข่ ชุดควบคุมอุณหภูมิและพัดลม ชุดไฟยูวีซี และชุดควบคุมอุณหภูมิและเวลาในการอบ โดยใช้ไฟฟ้าเป็นหลักในการทำงานของตู้อบ เมื่อตั้งอุณหภูมิตู้อบฆ่าเชื้อแบคทีเรียแผงไข่สำหรับเลี้ยงจิ้งหรีดที่ 60 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการอุ่นตู้อบ 7 นาที และอบเป็นเวลา 5 นาที มีความเหมาะสมในการทำงานของตู้อบฆ่าเชื้อแบคทีเรียแผงไข่สำหรับเลี้ยงจิ้งหรีดมากที่สุด เนื่องจากสามารถทำลายเชื้อแบคทีเรียชนิด *E. coli* และ Coliform bacteria ได้ และมีความสามารถการทำงานเฉลี่ย 100 แผงต่อชั่วโมง มีค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้เฉลี่ย 0.45 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง

การประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมของตู้อบฆ่าเชื้อแบคทีเรียแผงไข่สำหรับเลี้ยงจิ้งหรีด พบว่า เมื่อใช้ตู้อบฆ่าเชื้อแบคทีเรียแผงไข่สำหรับเลี้ยงจิ้งหรีด ราคา 65,000 บาท โดยทำงานวันละ 8 ชั่วโมง ปีละ 300 วัน จะได้ค่าใช้จ่ายคงที่รวมของตู้อบฆ่าเชื้อแบคทีเรียแผงไข่สำหรับเลี้ยงจิ้งหรีด 10,140 บาท และมีค่าใช้จ่ายแปรผันรวม 110,376 บาทต่อปี โดยกำหนดราคาขายแผงไข่ เท่ากับ 1.5 บาทต่อแผง จะได้จุดคุ้มทุนของตู้อบฆ่าเชื้อแบคทีเรียแผงไข่สำหรับเลี้ยงจิ้งหรีด เท่ากับ 9,750 แผงต่อปี และระยะเวลาคืนทุน เท่ากับ 123 วัน แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ในระดับสูง สำหรับการเลี้ยงจิ้งหรีดขนาดเล็กถึงขนาดกลาง ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่า ตู้อบฆ่าเชื้อแบคทีเรียไม่เพียงแต่ช่วยยกระดับสุขอนามัยในการนำแผงไข่มาใช้ซ้ำเท่านั้น แต่ยังให้ผลตอบแทนจากการลงทุนที่รวดเร็ว ทำให้เป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับการเพาะเลี้ยงจิ้งหรีดอย่างยั่งยืน อย่างไรก็ตามควรมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงการยอมรับได้ของเกษตรกรผู้เลี้ยงจิ้งหรีดที่มีต่อการใช้งานตู้อบฆ่าเชื้อแบคทีเรียแผงไข่สำหรับเลี้ยงจิ้งหรีด ด้วยการเปรียบเทียบกับกรอบแผงไข่สำหรับเลี้ยงจิ้งหรีดด้วยการอื่น

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่อง ตู้อบแผงไข่สำหรับเลี้ยงจิ้งหรีดด้วยรังสียูวีร่วมกับลมร้อน ตามสัญญาเลขที่ FF66-P2-012 ได้รับทุนสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม และขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา ที่สนับสนุน สถานที่ และเครื่องมือทดสอบในการทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- Biodiversity-Based Economy Development Office. (2017). *Manual for rearing insects as food for humans and animals in standard farms* (2nd ed.). Biodiversity-Based Economy Development Office (Public Organization). (In Thai)
- Bunratchoo, S., Promthong, S., & Maseng, H. (2022). The Development of Temperature Monitoring System for Freezer. *Council of University Administrative Staff of Thailand Journal*, 11(2), 93-102. (In Thai)
- Bureau of Livestock Standards and Certification. (2017, December 4). *Good Agricultural Practices for Cricket Farms*. https://certify.dld.go.th/index.php?option=com_content&view=article&id=597:15-kar-ptibati-thangkar-kestr-thi-di-sahrab-farm-cinghrid&catid=215&Itemid=497&lang=th. (In Thai)

- Chatngoen, K., Pakdeekaew, T., Wangwun, T., Thongsom, R., Sriwirote, B., & Sripakarach P. (2024). Bacteria Sterilizer with UV-C. *Journal of Science and Technology Thonburi University*, 8(2), 47-59. (In Thai)
- Chiappa, F., Frascella, B., Vigezzi, G. P., Moro, M., Diamanti, L., Gentile, L., Lago, P., Clementi, N., Signorelli, C., Mancini, N., & Odone, A. (2021). The efficacy of ultraviolet light-emitting technology against coronaviruses: A systematic review. *Journal of Hospital Infection*, 114, 63-78.
- Hany, S. E. M., Hesham, A. F., Reham, M. K., & Alshaer, W. G. (2023). Convective hot air drying of grapes: drying kinetics, mathematical modeling, energy, thermal analysis. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 148, 6893–6908
- Henry, R.C., Engström, K., Olin, S., Alexander, Arneth, P.A., Rounsevell, & M.D.A. (2018). Food supply and bioenergy production within the global cropland planetary boundary. *PLoS One*, 13(3), 1-17.
- Khaosod online. (2020, May 21). *The department of agricultural extension announced the success of cricket processing, generating income for farmers*. https://www.khaosod.co.th/monitor-news/news_4171438#google_vignette. (In Thai)
- Kobkam, C. (2022). *UV control system working with time and motion sensors for disinfection* [Unpublished doctoral dissertation]. Naresuan University. (In Thai)
- Kongkaew, S., Thongsroy, B., & Pholpo, K. (2021). Development and efficiency assessment of groundnut sheller machine. *Thai Society of Agricultural Engineering Journal*, 27(1), 32-41. (In Thai)
- MGR online. (2021, March 27). *The first step toward making Thailand the “World Insect Hub” - pushing crickets into the 30-billion-baht market*. <https://mgronline.com/daily/detail/9640000028837>. (In Thai)
- Nakornriab, M. 2015. *Establishing a prototype standard for proper management of cricket farms according to hygiene principles to produce quality products for the Nong Makha cricket farming community enterprise* [Unpublished manuscript]. Agricultural Research Development Agency (Public Organization). (In Thai)
- National Bureau of Agricultural Commodity and Food Standards. (2019). *Raising standards for cricket farms to enter the United Nations European Union in 2018*. <https://e-book.acfs.go.th/backend/uploads/PDF/5b68e6a07145e7056c3d53017003f6ff.pdf>. (In Thai)
- Nunun, W., Muhammad A. S., & Detchana, A. (2020). *Community with participation in innovation development of mobile UV- Sterilizer, safe and low cost* [Unpublished manuscript]. Faculty of Humanities and Social Sciences, Thaksin University. (In Thai)
- Phesatcha, K., & Wanapat, M. (2016). Tropical legume supplementation influences microbial protein synthesis and rumen ecology. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 101(3), 552-562.
- Phumkhachorn, P., Onwong, J., Kitsawang, P., & Rattanachakunsopon, P. (2023). Antiviral efficiency of ultraviolet sterilization chamber developed by Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University. *Journal of Science and Technology, Ubon Ratchathani University*, 25(3), 45-52. (In Thai)
- Pitinun Farm. (2018, August 13). *Egg tray drying for insect elimination and sterilization to clean egg trays*. <https://youtu.be/jo5lnViFOjo>. (In Thai)
- Robertson, G. L. (2013). *Food packaging: principles and practice*. CRC press.
- Soithongdee, N. & Nilapornkul, N. (2019). Cost and return of commercial cricket farming. *MBA-KKU Journal*, 12(1), 165-186. (In Thai)

- T-rada Farm. (2020, November 1). *Cleaning and disinfecting egg trays for insect rearing*.
<https://www.facebook.com/TradaCricketFarm/posts/155618699460553/>. (In Thai)
- Tasao, N., & Saikaew, C. (2014, March 28). Energy consumption in the drying process of cotton buds. In *Elevating the Future of Education: Integrating Innovation, Artificial Intelligence, and Human Wisdom for Sustainable Local Development* [Symposium]. the 15th Graduate Research Conferences. Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand. (In Thai)
- Thaniya, K. (2020, June 16). *Guidelines for using “UV lamps” to inactivate COVID-19*. National Institute of Metrology, Ministry of Higher Education, Science, Research and Innovation.
<https://www.nimt.or.th/main/?p=31767> (In Thai)
- Van Huis, A., Dicke, M. & van Loon, J. J. A. (2015). Insects to feed the world. *Journal of Insects as Food and Feed*, 1, 3-5.
- Wonpaisan, P. (2020, March 27). *Sterilization using UVC radiation*. <https://pharmacy.mahidol.ac.th/th/nowledge>. (In Thai)

Received: August 17, 2025; Revised: October 6, 2025; Accepted: March 17, 2026

การใช้ตัวต้านทานแบบปรับค่าตามแสงประยุกต์เป็นไพราโนมิเตอร์ต้นทุนต่ำ Development of a low-cost pyranometer using a Light-Dependent Resistor (LDR)

เนติธร วรคสังข์¹ เทวรัตน์ ตริอำนาจ¹ กระวี ตริอำนาจ^{1*} และวสวัตดี ทังบริรักษ์¹
Netitorn Waksang¹, Tawarat Treeamnuk¹, Krawee Treeamnuk^{1*}
and Wasawat Thingborirak¹

¹สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

¹Engineering Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima Province

*Corresponding Author E-mail Address : krawee@sut.ac.th

บทคัดย่อ

ไพราโนมิเตอร์เป็นอุปกรณ์สำคัญที่ใช้วัดความเข้มของการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย เช่น งานด้านอุตุนิยมวิทยา งานด้านพลังงาน งานระบบอาคารและงานด้านการเกษตร เป็นต้น แต่ด้วยราคาอุปกรณ์ที่ค่อนข้างสูงจึงเป็นอุปสรรคให้การจัดหาใช้งาน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาไพราโนมิเตอร์ต้นทุนต่ำจากการประยุกต์ใช้ตัวต้านทานแบบปรับค่าตามแสง (Light-Dependent Resistor, LDR) โดยนำ LDR 3 ตัวแต่ละตัวมาต่ออนุกรมกับตัวต้านทานค่า 100, 500 และ 1,000 โอห์ม และเก็บข้อมูลความต่างศักย์ที่ได้ด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 ทดสอบเปรียบเทียบผลกับไพราโนมิเตอร์ KIPP&ZONEN รุ่น CMP3 ซึ่งใช้เป็นไพราโนมิเตอร์อ้างอิงโดยเก็บข้อมูลจำนวน 4,296 ข้อมูล ผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการถดถอยพหุคูณเชิงเส้น (Multiple linear regression) ในการสร้างสมการถดถอยและทดสอบสมการนั้น พบว่า สมการระหว่างความต่างศักย์ของตัวต้านทาน 100, 500 และ 1,000 โอห์ม และลอการิทึมธรรมชาติของความเข้มของการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ ในวันที่ค่าความเข้มแสงสูงสุด ต่ำสุดและเฉลี่ยมีค่าเป็น 1,131.5, 123.5 และ 672 วัตต์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ มีค่า R^2 เท่ากับ 0.979 และ RMSE_p เท่ากับ 54.913 ซึ่งความคลาดเคลื่อนนี้มีค่าค่อนข้างน้อยและสามารถนำอุปกรณ์ที่พัฒนานี้ไปใช้ประโยชน์ได้

คำสำคัญ: สมการถดถอย พลังงานแสงอาทิตย์ ไพราโนมิเตอร์ต้นทุนต่ำ ไมโครคอนโทรลเลอร์

Abstract

A pyranometer is an essential device used to measure the intensity of solar radiation. It has a wide range of applications, including meteorology, energy, building systems, and agriculture. However, the high cost of this equipment is a major barrier to its use. This research aims to develop a low-cost pyranometer by using a Light-Dependent Resistor (LDR). Three LDRs were connected in series with a resistor of 100, 500, and 1,000 ohms. The voltage data was collected using an Arduino Mega 2560 microcontroller board. The results were then compared with a KIPP & ZONEN CMP3 pyranometer, which served as the reference device. A total of 4,296 data points were collected. The data was analyzed using Multiple Linear Regression to create and

test a regression equation. The results showed that the equation between the voltage of 100, 500, and 1,000 ohm resistors and the natural logarithm of the solar radiation intensity on a day with a maximum, minimum, and average light intensity of 1,131.5, 123.5, and 672 watts per square meter, respectively, has an R^2 value of 0.979 and RMSEP of 54.913. This error was relatively small, indicating that the developed device can be a useful tool.

Keywords: Regression modeling, Solar energy, Low-cost pyranometer, Microcontroller

บทนำ

ไพราโนมิเตอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความเข้มข้นของการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ ที่ออกแบบมาเพื่อวัดความเข้มของรังสีดวงอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ประมาณ 0.3 μm ถึงประมาณ 3-4 μm (International Organization for Standardization, 2018) โดยไพราโนมิเตอร์สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลายแบบ ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานทางด้านอุตสาหกรรมการนำไปติดตั้งคู่กับแผงโซลาร์เซลล์เพื่อวัดค่าความเข้มข้นของการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ที่แผงโซลาร์เซลล์ได้รับเพื่อนำไปคำนวณค่าประสิทธิภาพของการผลิตไฟฟ้า เนื่องจากยิ่งความเข้มข้นของการแผ่รังสีสูง ยิ่งผลิตไฟฟ้าได้มาก (Moreno-Garcia et al., 2016) และทางด้านเกษตรกรรมนำไปติดตั้งในโรงเรือนเพื่อวัดค่าความเข้มข้นของการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์เพื่อนำค่าไปใช้ในการควบคุมสภาพอากาศภายในโรงเรือนให้มีความแม่นยำ (Chen et al., 2022) เนื่องจากค่าความเข้มข้นของการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์เป็นปัจจัยหลักที่ทำให้อุณหภูมิภายในโรงเรือนสูงขึ้น (Khajornsak Simek, 2019) แม้ไพราโนมิเตอร์จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้กับงานหลายประเภท แต่ไพราโนมิเตอร์นั้นมีราคาค่อนข้างสูง ทำให้มีนักวิจัยหลายท่านสนใจพัฒนาไพราโนมิเตอร์แบบต้นทุนต่ำขึ้น โดยไพราโนมิเตอร์แบบต้นทุนต่ำนั้นจะแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ ไพราโนมิเตอร์เชิงอุณหภูมิ (Thermal pyranometer) และ ไพราโนมิเตอร์เชิงแสง (Optical pyranometer) (Avallo et al., 2018) ทั้ง 2 แบบจะใช้เซนเซอร์ที่สามารถรับรู้ถึงพฤติกรรมของดวงอาทิตย์เช่น เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ, โฟโตไดโอด (Photodiode) หรือ ตัวต้านทานแบบปรับค่าตามแสง (Light-Dependent Resistor, LDR) และใช้ค่าที่วัดได้นำไปคำนวณหาความเข้มของรังสีดวงอาทิตย์ในทางอ้อมแทน (Avallo et al., 2018) ได้พัฒนาไพราโนมิเตอร์เชิงอุณหภูมิต้นทุนต่ำโดยใช้เซนเซอร์วัดอุณหภูมิแบบอนาล็อกตรวจวัด 2 จุด จุดที่ 1 ติดตั้งไว้บนวัสดุสีดำในที่ที่โดนแสงอาทิตย์และใช้วัสดุโปร่งแสงครอบเซนเซอร์ไว้ไม่ให้มีการไหลผ่านของอากาศเพื่อให้ได้รับอิทธิพลของการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์อย่างเต็มที่ จุดที่ 2 ติดตั้งไว้ที่ไม่โดนแสงอาทิตย์แต่จะอยู่ใกล้กับจุดที่ 1 เพื่อวัดอุณหภูมิของสถานะแวดล้อม โดยทั้ง 2 จุดนี้จะอยู่ภายในกล่องที่ทำจากไนลอนเบส (Nylon base) และจะสอบเทียบกับไพราโนมิเตอร์อ้างอิง โดยเก็บค่าความต่างศักย์ที่วัดได้ของทั้ง 2 จุดมาหาผลต่างระหว่างจุดที่โดนแสงแดดและไม่โดนแสงแดด เพื่อนำไปสร้างสมการถดถอยโดยใช้การถดถอยเชิงเส้น (Linear regression) ในการทำไพราโนมิเตอร์เชิงอุณหภูมิต้นทุนต่ำนี้ก็สามารถใช้งานเซนเซอร์วัดอุณหภูมิแบบดิจิทัลได้เช่นกัน (Pansanato et al., 2018) การพัฒนาไพราโนมิเตอร์เชิงแสงต้นทุนต่ำ de Barros et al. (2018) ได้นำเสนอการใช้ LDR 3 ตัว แต่ละตัวต่ออนุกรมกับตัวต้านทานค่าคงที่ 100, 500 และ 1,000 โอห์ม เพื่อบันทึกค่าความต่างศักย์ตกรวมตัวต้านทานค่าคงที่ที่เกิดขึ้น เมื่อ LDR ได้รับแสงในเวลาต่าง ๆ กัน และทำการเปรียบเทียบค่าจากไพราโนมิเตอร์อ้างอิงกับค่าทำนายจากการถดถอยเชิงพหุนาม (Polynomial regression) นอกจากนี้ Osinowo et al. (2019) ยังได้ทดสอบใช้ โฟโตไดโอด (Photodiode) ในการทำไพราโนมิเตอร์เชิงแสงต้นทุนต่ำอีกด้วย แต่ พบว่า ต้องเพิ่มตัวขยายสัญญาณ เนื่องจากสัญญาณที่โฟโตไดโอดส่งออกมาเมื่อรับแสงนั้นมีขนาดเล็กจนตรวจวัดได้ยาก (Ronilaya et al., 2022) และ Linani et al. (2021) ได้รายงานถึงการใช้งานโซลาร์เซลล์ขนาดเล็กร่วมกับเซนเซอร์วัดอุณหภูมิในการวัดความเข้มแสง ทดสอบเปรียบเทียบกับไพราโนมิเตอร์อ้างอิงเพื่อสร้างสมการถดถอยด้วยโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural networks) โดยใช้กระแสและแรงดันของโซลาร์เซลล์ขนาดเล็กที่ได้นำมาคำนวณเป็นความเข้มของรังสีดวงอาทิตย์ที่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิของโซลาร์เซลล์ขนาดเล็กเพื่อเพิ่มความแม่นยำให้สูงขึ้น

จากการทบทวนวรรณกรรมจากข้างต้น จะเห็นได้ว่าหากจะพัฒนาไพราโนมิเตอร์ต้นทุนต่ำที่ใช้งานได้ง่ายและไม่มีปัญหาเรื่องอุณหภูมิบนตัวเซนเซอร์ การใช้ LDR เป็นเซนเซอร์ที่รับรู้ความเข้มของรังสีดวงอาทิตย์เป็นแนวทางที่มีความเป็นไปได้สูงและน่าสนใจ เนื่องจากมีราคาต่ำกว่าเซนเซอร์ประเภทอื่น ๆ ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้จึงต้องการพัฒนาไพราโนมิเตอร์ต้นทุนต่ำจาก LDR และสร้างสมการทำนายด้วยวิธีการถดถอยพหุคูณเชิงเส้น (Multiple linear

regression) โดยจะทำการเปรียบเทียบผลกับไพราโนมิเตอร์ KIPP&ZONEN รุ่น CMP3 ผลสรุปที่ได้จากงานวิจัยนี้จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการออกแบบไพราโนมิเตอร์ราคาต่ำเพื่อใช้งานได้อย่างเหมาะสมต่อไป

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

วัสดุ อุปกรณ์

วงจรไพราโนมิเตอร์ต้นทุนต่ำประกอบไปด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 และ ตัวต้านทาน LDR ขนาด 12 มิลลิเมตร ต่ออนุกรมกับตัวต้านทานแบบค่าคงที่ขนาด 100, 500 และ 1,000 โอห์ม เป็นระบบเพื่อใช้เพื่อตรวจวัดความเข้มข้นของรังสีจากดวงอาทิตย์ LDR ทั้ง 3 ตัวจะช่วยให้ระดับความละเอียดตามช่วงความเข้มแสงอาทิตย์ตกกระทบที่แตกต่างกันได้ นอกจากนี้ยังติดตั้ง Micro SD card module ใช้เพื่อบันทึกข้อมูลที่ตรวจวัดได้ และ DS3231 module ใช้เพื่อบอกเวลาในขณะที่บันทึกข้อมูลด้วย อุปกรณ์ทั้งหมดแสดงดัง Figure 1

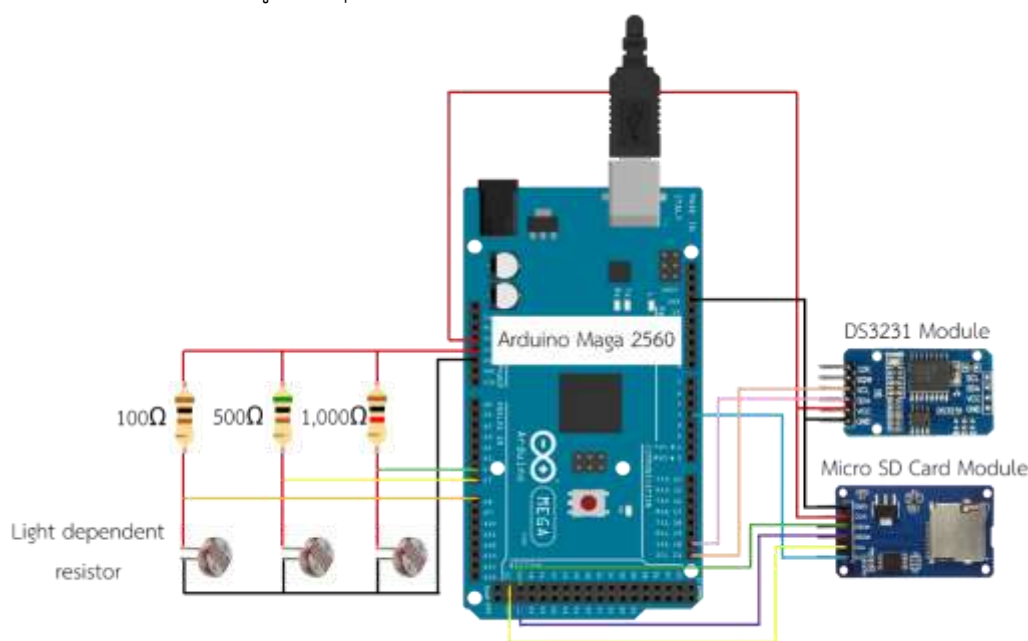


Figure 1 Circuit of the low-cost pyranometer.

วิธีการทดลอง

การเก็บข้อมูล

สถานที่ที่ใช้ในการเก็บข้อมูลคือ อาคารเครื่องมือ 4 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ประเทศไทย (14.8701° N, 102.0184° E) การเก็บข้อมูลจะทำการวางไพราโนมิเตอร์อ้างอิงและไพราโนมิเตอร์ต้นทุนต่ำที่สร้างขึ้นให้อยู่ในระนาบเดียวกันและบริเวณเดียวกันตาม Figure 2 ไพราโนมิเตอร์อ้างอิงยี่ห้อ KIPP&ZONEN รุ่น CMP3 (Figure 2(B)) การเก็บค่าจะทำการเก็บค่าความต่างศักย์ที่ได้จาก LDR ทั้ง 3 ตัวที่แต่ละตัวต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน 100, 500 และ 1,000 โอห์ม จากไพราโนมิเตอร์ต้นทุนต่ำ (Figure 2(B)) และเก็บค่าความเข้มข้นของการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์จากไพราโนมิเตอร์อ้างอิงไปพร้อมกัน เก็บข้อมูลตั้งแต่เวลา 10.00-14.00 น. ทุก 10 วินาที ทั้งหมด 4 วัน ระยะเวลาในการเก็บข้อมูลรวมประมาณ 12 ชั่วโมง ได้ข้อมูลทั้งสิ้น 4,296 ข้อมูล เพื่อนำไปใช้ในการสร้างสมการถดถอย และเก็บข้อมูลอีก 1 วัน ตั้งแต่ 9.30-14.47 น. เพื่อใช้ในการทดสอบสมการถดถอย โดยข้อมูลนี้มีจำนวน 863 ข้อมูล ทำให้มีข้อมูลทั้งหมด 5,159 ข้อมูล โดยใช้ในการสร้างสมการถดถอย จำนวน 4,296 ข้อมูล ซึ่งคิดเป็น 83% ของข้อมูลทั้งหมด และ ใช้ในการทดสอบสมการถดถอย จำนวน 863 ข้อมูล ซึ่งคิดเป็น 17% ของข้อมูลทั้งหมด

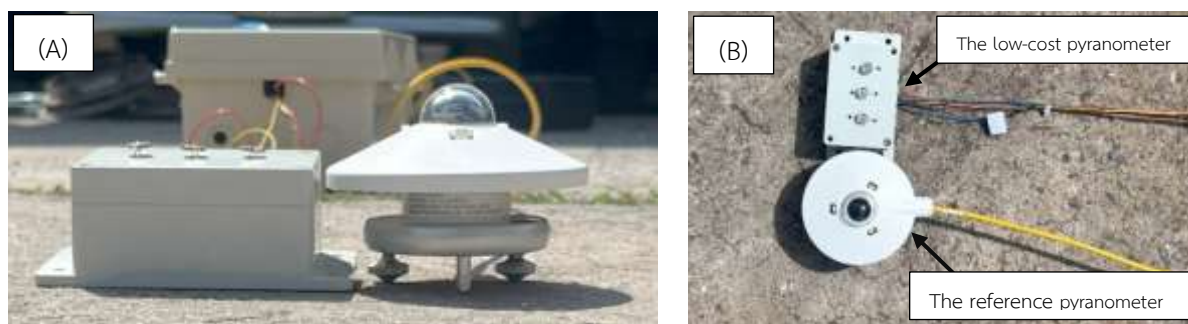


Figure 2 Collection of Intensity of solar radiation data at the front view (A) and top view (B).

สมการถดถอย

กำหนดตัวแปรที่ได้จากการทดลองตาม Table 1

Table 1 Definition of variables.

Variable	Description
V1	Voltage (volts) across LDR in series with 1,000 ohm resistor.
V2	Voltage (volts) across LDR in series with 500 ohm resistor.
V3	Voltage (volts) across LDR in series with 100 ohm resistor.
G	Intensity of solar radiation (W/m ²)

ใช้โปรแกรม IBM SPSS Statistics 25 ในการสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่าง ความต่างศักย์ V1, V2 และ V3 กับความเข้มของการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ G ใช้วิธีการคัดเลือกตัวแปรในสมการถดถอยแบบ Enter และ Stepwise โดยวิธี Enter เป็นวิธีที่ใช้ตัวแปรต้นทุกตัวที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามในการสร้างสมการถดถอยโดยไม่ตัดตัวแปรใดออก และวิธี Stepwise เป็นวิธีที่คัดเลือกเฉพาะตัวแปรที่ให้ค่าความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญเท่านั้น (Chaioek et al., 2017) และใช้ค่า R, R² ค่า RMSE_c (Root Mean Square Error of Calibration) ดังสมการ Eq.1 ในการหาสมการถดถอยที่ทำนายได้ดีที่สุดซึ่งค่า R บ่งบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตามและค่า R² บ่งบอกความสามารถของสมการถดถอยในการอธิบายค่าตัวแปรตาม และค่า RMSE_c บ่งบอกถึงค่าคลาดเคลื่อนจากการทำนายของสมการถดถอยโดยข้อมูลที่ทำนายนั้นเป็นข้อมูลที่ใช้สร้างสมการถดถอยขึ้นเอง

สมการ Eq.1 ถูกใช้ในการคำนวณค่า RMSE_c (Root Mean Square Error of Calibration) ของทั้งการทำนายข้อมูลที่ใช้สร้างสมการตัวเอง RMSE_c และการทำนายข้อมูลนอกช่วงที่ใช้สร้างสมการ RMSE_p (Root Mean Square Error of Prediction) โดยการแบ่งข้อมูลเป็นสองกลุ่ม คือข้อมูลสำหรับสร้างสมการทำนาย และข้อมูลสำหรับทดสอบการทำนาย ในสัดส่วน 83%:17% โดยใช้ข้อมูลชุด 83% นี้ในการสร้างสมการทำนายและนำค่าที่คำนวณได้จากสมการทำนายไปเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ใช้สร้างสมการเองและคำนวณเป็นค่า RMSE_c ตามสมการ Eq.1 จากนั้นนำค่าที่คำนวณได้จากสมการทำนายไปเปรียบเทียบกับข้อมูลชุด 17% ซึ่งไม่ได้ใช้สร้างสมการเพื่อคำนวณค่า RMSE_p ตามสมการ Eq.1 อีกครั้งเพื่อใช้ประเมินหาสมการถดถอยที่ทำนายได้ดีที่สุดซึ่งค่า RMSE_p บ่งบอกถึงค่าคลาดเคลื่อนจากการทำนายของสมการถดถอยโดยข้อมูลที่ทำนายนั้นเป็นข้อมูลที่ไม่ได้ใช้ในการสร้างสมการถดถอย

$$RMSE_{c,p} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (\text{Eq.1})$$

เมื่อ y_i คือ ค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูล, $\hat{y}_i$ คือ ค่าที่คำนวณได้จากสมการถดถอย, n คือ จำนวนของข้อมูลทั้งหมด (Bruce & Bruce, 2017)

นอกจากนี้ผลการทำนายจะถูกระบุด้วยค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (Relative error) ตามสมการ Eq.2

$$Relative\ Error = \frac{(y_i - \hat{y}_i)}{y_i} \times 100 \quad (Eq.2)$$

โดย Relative error เป็นค่าการคำนวณเปรียบเทียบระหว่างค่าที่คำนวณและค่าจริง คำนี้นับบอกถึงความแม่นยำของสมการที่สร้าง

ผลการวิจัย

ผลการทำงานของเครื่องไพราโนมิเตอร์ต้นทุนต่ำที่สร้างขึ้น

จากการวัดค่าและบันทึกข้อมูลทั้ง 4 วันที่ทำการทดสอบ เครื่องไพราโนมิเตอร์ต้นทุนต่ำที่สร้างขึ้นสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่พบปัญหาในการเก็บและบันทึกข้อมูล เมื่อนำข้อมูลที่บันทึกได้มาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ของตัวต้านทานแต่ละตัว และความเข้มข้นของการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ดัง Figure 3 พบว่า ข้อมูลของ V1 และ V2 มีค่าที่ใกล้เคียงกันสูงและกลุ่มของข้อมูลอยู่ค่อนข้างชิดกันมาก ขณะที่ข้อมูลของ V3 มีค่าที่แตกต่างจาก V1 และ V2 อย่างชัดเจน และข้อมูลจากการทดลองนี้มีการกระจายตัวมากกว่าผลการทดลองของ de Barros et al. (2018) ซึ่งนำเสนอการวิเคราะห์ข้อมูลแบบถดถอยเชิงพหุนาม (Polynomial regression) ความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้อาจเป็นเพราะความแปรปรวนของสภาพอากาศเนื่องจากทดสอบในเขตอากาศที่แตกต่างกัน ในงานวิจัยนี้จึงนำเสนอวิธีการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณเชิงเส้น (Multiple linear regression) ในการสร้างสมการและอธิบายความสัมพันธ์แทนวิธีการถดถอยเชิงพหุนาม

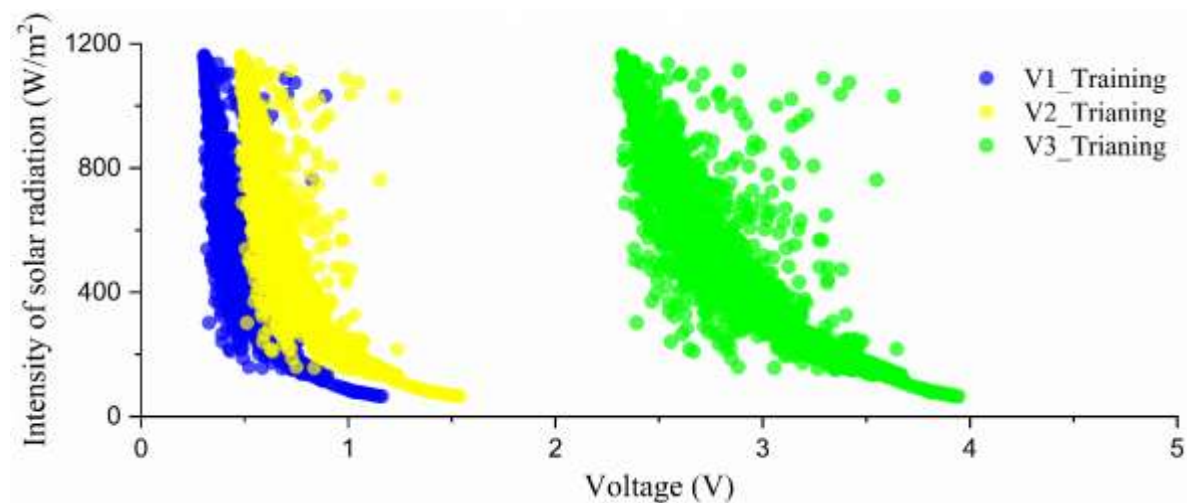


Figure 3 The relationship between V1, V2, and V3 and intensity of solar radiation. In this graph, V1_Training, V2_Training, and V3_Training denote the voltages (Volts) across the 1,000 Ohm, 500 Ohm, and 100 Ohm resistors used for developing the regression model.

สมการถดถอยพหุคูณเชิงเส้น (Multiple Linear Regression)

เมื่อวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณเชิงเส้น (Multiple linear regression) คัดเลือกตัวแปรด้วยวิธีการ Enter เพื่อสร้างสมการ ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V1, V2 และ V3 และความเข้มข้นของการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ G พบว่า สมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V1, V2 และ V3 และลอการิทึมธรรมชาติของความเข้มข้นของการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ (ln G) และสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ลอการิทึมธรรมชาติของ V1, V2 และ V3 (ln V1, ln V2 และ ln V3) และลอการิทึมธรรมชาติของความเข้มข้นของการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ (ln G) ทั้งคู่มีค่า R, R² ที่สูง และมีค่า RMSE_c ต่ำใกล้เคียงกัน (Table 2) เมื่อนำสมการทั้งสองไปคำนวณค่าเปรียบเทียบกับไพราโนมิเตอร์อ้างอิง พบว่า มีความสัมพันธ์ดัง Figure 4

และเมื่อวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณเชิงเส้น (Multiple linear regression) คัดเลือกตัวแปรด้วยวิธีการ Stepwise เพื่อสร้างสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V1, V2 และ V3 และ ความเข้มข้นของการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ G พบว่า สมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln V2$ และ $\ln G$ มีค่า R, R^2 ที่สูงและ RMSE_c ที่ต่ำ (Table 2) จึงนำสมการนี้ไปทดสอบ เพื่อเลือกใช้สมการที่ดีที่สุด โดยหากนำ Model 3 ไปสร้างกราฟเทียบกับไพราโนมิเตอร์อ้างอิงจะเป็นไปตาม Figure 5

Table 2 R, R^2 , and RMSE_c from the multiple linear regression model with respect to intensity of solar radiation (G)

Name	Selection method	Selected variables	Dependent variable	R	R^2	RMSE _c
Model 1	Enter	V1, V2 and V3	$\ln G$	0.967	0.935	91.409
Model 2	Enter	$\ln V1$, $\ln V2$ and $\ln V3$	$\ln G$	0.969	0.938	88.026
Model 3	Stepwise	$\ln V2$	$\ln G$	0.969	0.938	88.027

Table 3 Coefficient and constant of regression model

Name	Dependent variable	Constant	Coefficient					
			V1	V2	V3	$\ln V1$	$\ln V2$	$\ln V3$
Model 1	$\ln G$	10.895	-0.804	0.873	-1.766	-	-	-
Model 2	$\ln G$	4.500	-	-	-	0.083	-2.789	0.672
Model 3	$\ln G$	5.285	-	-	-	-	-2.362	-

Table 3 แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของตัวแปรต้นแต่ละตัวที่มีต่อตัวแปรตามของแต่ละ Model ซึ่งสังเกตได้จากขนาดของสัมประสิทธิ์ (Coefficient) ของแต่ละตัวแปร หากมีค่ามากย่อมหมายถึงอิทธิพลของตัวแปรนั้นต่อสมการทำนายจะมีค่ามากด้วยเช่นกัน โดยที่ Model 1 ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตามมากที่สุดคือ V3 และ Model 2 และ 3 ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตามมากที่สุดคือ $\ln V2$

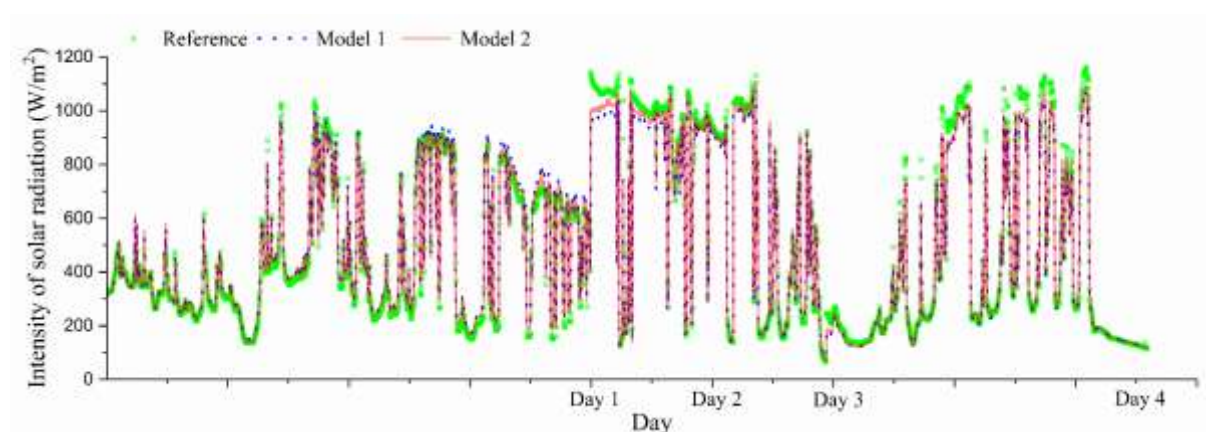


Figure 4 The graphs of Model 1, Model 2 and the reference pyranometer.

จาก Figure 4 ทำให้เห็นว่า Model 2 มีค่าทำนายที่ใกล้เคียงกับไพราโนมิเตอร์อ้างอิงมากกว่า Model 1 ซึ่งสัมพันธ์กับ RMSE_c ที่ต่ำกว่า โดยในช่วงความเข้มข้นของการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ที่สูง Model 2 ให้ค่าทำนายที่มีใกล้เคียงกับค่าอ้างอิงมากกว่า Model 1 และในช่วงความเข้มข้นของการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ที่ต่ำ Model ทั้ง 2 มีค่าใกล้เคียงกับไพราโนมิเตอร์อ้างอิงเท่า ๆ กัน

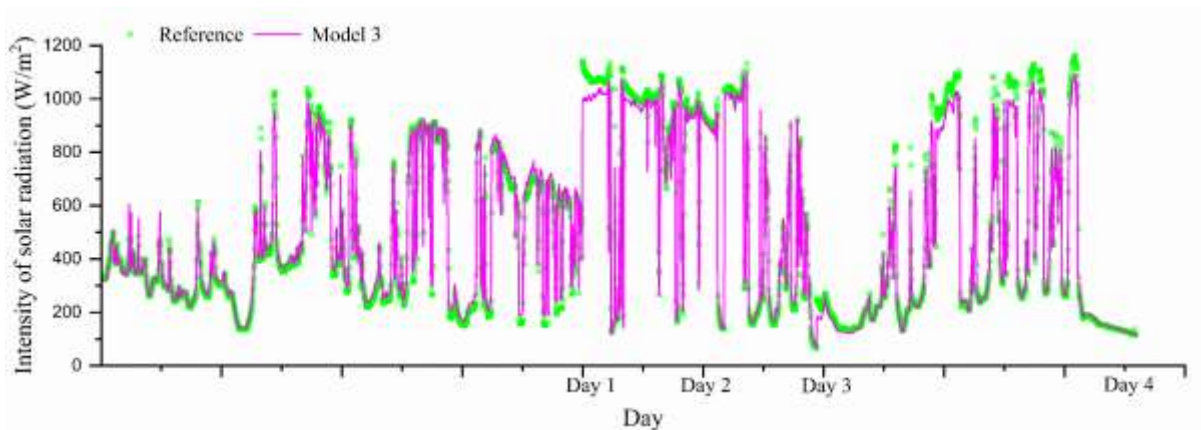


Figure 5 The graphs of Model 3 and the reference pyranometer.

จาก Figure 5 พบว่า Model 3 ทำนายค่าในช่วงความเข้มข้นของการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ที่สูงและต่ำใกล้เคียงกับค่าอ้างอิง โดยจะมีบางช่วงในความเข้มข้นของการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ที่สูง ค่าจากการทำนายของ Model 3 มีค่าน้อยกว่าค่าอ้างอิง ซึ่งค่าจากการทำนายของ Model 1 และ Model 2 ก็มีลักษณะเดียวกัน อาจเกิดจากจำนวนข้อมูลในช่วงความเข้มข้นของการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ที่สูงมีน้อยไป ทำให้ผลการทำนายทั้ง 3 Model มีความคลาดเคลื่อนในลักษณะเดียวกัน

ผลการทำนายด้วยสมการถดถอยพหุคูณที่สร้างขึ้น

ใช้ข้อมูลจำนวน 863 ข้อมูลในการทดสอบซึ่งคิดเป็น 17% ของข้อมูลทั้งหมด โดยข้อมูลชุดนี้ไม่ได้ใช้ในการสร้างสมการถดถอยเป็นข้อมูลที่เก็บมาเพื่อใช้ในการทดสอบ ข้อมูลชุดนี้มีลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลเป็นดัง Figure 6 ซึ่งจะเห็นว่าข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบมีค่าอยู่ระหว่างข้อมูลที่ใช้ในการสร้างสมการถดถอยและลักษณะการกระจายมีความใกล้เคียงกัน และค่าที่ทำนายได้จากแต่ละ Model ถูกนำเสนอเปรียบเทียบกันดัง Table 4

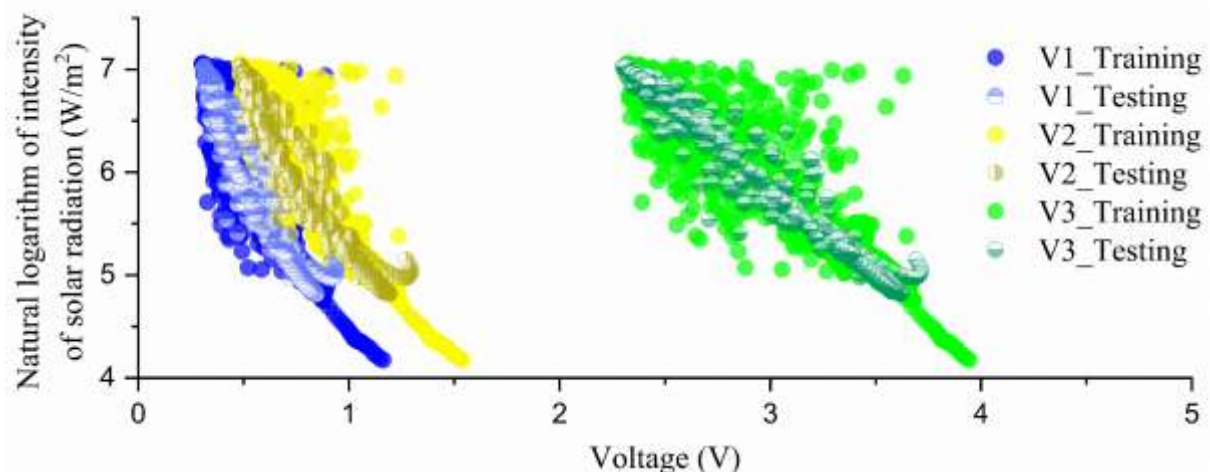


Figure 6 The relationship between V1, V2, and V3 and the natural logarithm of intensity of solar radiation.

In this graph, V1_Training, V2_Training, and V3_Training denote the voltages (volts) across the 1,000 Ohm, 500 Ohm, and 100 Ohm resistors used for developing the regression model, while V1_Testing, V2_Testing, and V3_Testing denote the voltages (volts) across the 1,000 Ohm, 500 Ohm, and 100 Ohm resistors used for testing.

Table 4 R² and RMSE_p from the multiple linear regression model with respect to intensity of solar radiation (G)

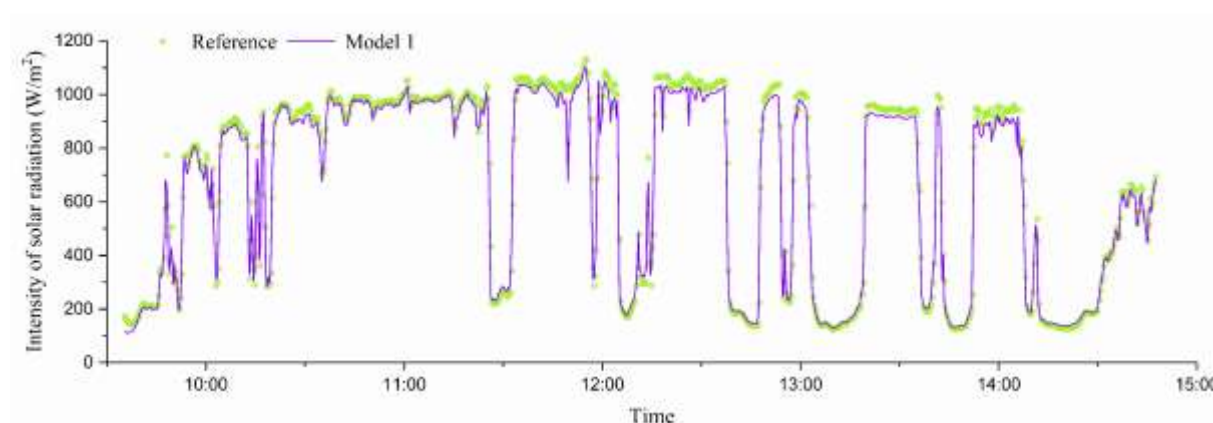
Name	Selection method	Selected variables	Dependent variable	R ²	RMSE _p
Model 1	Enter	V1, V2 and V3	ln G	0.979	54.913
Model 2	Enter	ln V1, ln V2 and ln V3	ln G	0.974	66.848
Model 3	Stepwise	ln V2	ln G	0.976	61.957

จาก Table 4 พบว่า Model 1 มีค่า RMSE_p ต่ำที่สุดหากเทียบกับ Model 2 และ Model 3 ถึงแม้ว่า ผลการทำนายของ Model 2 และ Model 3 จะทำนายได้ดีกับข้อมูลที่ใช้สร้างสมการถดถอย แต่เมื่อนำมาทดสอบกับข้อมูลที่ไม่ได้ใช้ในการสร้างสมการถดถอยแล้ว พบว่า ให้ผลการทำนายต่ำกว่า ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสัดส่วนการแบ่งข้อมูลทดสอบสมการอาจมีค่าน้อยเกินไป (ข้อมูลทดสอบสมการเป็นสัดส่วน 17% ของข้อมูลทั้งหมด) จึงทำให้เกิดจากการโอเวอร์ฟิตติ้งระหว่างสมการถดถอยของ Model 2 และ Model 3 กับ ข้อมูลที่ใช้สร้างสมการถดถอย อย่างไรก็ตามผลต่างการทำนายใน Table 4 มีค่าน้อยมาก และสำหรับงานวิจัยนี้ได้ตัดสินใจเลือกใช้ Model 1 โดยมีรูปสมการดังสมการ Eq.3 ดังนี้

$$\ln G = 10.895 - 0.804V1 + 0.873V2 - 1.766V3 \quad (\text{Eq.3})$$

โดย ln G คือ ลอการิทึมธรรมชาติของความเข้มข้นของการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์, V1 คือความต่างศักย์ (โวลต์) ของตัวต้านทาน 1,000 โอห์ม, V2 คือความต่างศักย์ (โวลต์) ของตัวต้านทาน 500 โอห์ม, V3 คือความต่างศักย์ (โวลต์) ของตัวต้านทาน 100 โอห์ม

ผลของการคำนวณของ Model 1 เทียบกับผลการวัดจากไพราโนมิเตอร์อ้างอิงจะเป็นดัง Figure 7 และ Relative error ซึ่งคำนวณจากสมการ Eq.2 โดยผลการคำนวณของแต่ละช่วงเวลาเป็นดังใน Figure 8 โดยช่วงที่ Relative error ต่ำสุดคือ เวลา 11.05 น. มีค่า 0.054% และช่วงที่ Relative error สูงสุดคือเวลา 13.52 น. มีค่า 121.013% โดยมีค่าเฉลี่ยของ Relative error ช่วงเช้า 9.30-12.00 น. (จำนวน 402 ข้อมูล) คือ 5.754% ค่าเฉลี่ยของ Relative error ช่วงบ่าย 12.00-14.47 น. (จำนวน 461 ข้อมูล) คือ 7.568% และค่าเฉลี่ยของ Relative error ตลอดทั้งวันคือ 6.732%

**Figure 7** The relationship between intensity of solar radiation and time

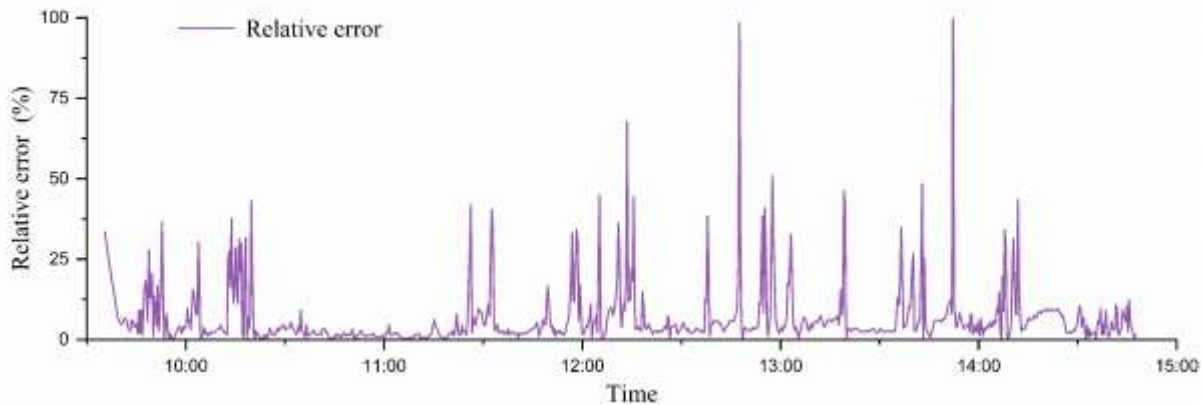


Figure 8 The relationship between relative errors and time

การอภิปรายผล

จาก Figure 8 จะเห็นถึงช่วงที่ Relative error สูงสุดอยู่ช่วงบ่ายโดยช่วงที่สูงที่สุดคือช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์จาก 200 วัตต์ต่อตารางเมตร เพิ่มขึ้นเป็น 800 วัตต์ต่อตารางเมตร ภายในไม่กี่วินาทีซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน และเห็นถึงช่วงที่ Relative error ต่ำสุดอยู่ในช่วงเช้าซึ่งเป็นช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ต่ำ ทำให้ทราบว่าหากมีการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันของความเข้มข้นของการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์จะทำให้เกิด Relative error มาก สาเหตุที่เป็นเช่นนั้นเพราะความไวในการเปลี่ยนแปลงของไพราโนมิเตอร์อ้างอิงและไพราโนมิเตอร์ต้นทุนต่ำไม่เท่ากัน โดยหากอ้างอิงจากข้อมูลจำเพาะทางเทคนิคของไพราโนมิเตอร์ทั้ง 2 แล้ว ไพราโนมิเตอร์อ้างอิงจะมีเวลาตอบสนองไม่เกิน 20 วินาที (Kipp & Zonen, 2025) ซึ่งช้ากว่าการเวลาตอบสนองของ LDR ที่ใช้ในการทำไพราโนมิเตอร์ต้นทุนต่ำที่มีการเวลาตอบสนองไม่เกิน 30 มิลลิวินาที (ACDC Shop, 2025)

บทสรุป

จากการใช้ LDR จำนวน 3 ตัว เก็บข้อมูล V1, V2 และ V3 ซึ่งเป็นความต่างศักย์ของตัวต้านทาน 1,000, 500 และ 100 โอห์ม ตามลำดับ และความเข้มข้นของการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ G จำนวน 4,296 ข้อมูล การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ด้วยวิธีการถดถอยพหุคูณเชิงเส้น (Multiple linear regression) พบว่า สามารถสร้างสมการถดถอยระหว่าง V1, V2 และ V3 กับค่าลอการิทึมธรรมชาติของความเข้มข้นของการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ได้ โดยมีรูปแบบการเป็นดังสมการ Eq.3 ผลการทดสอบสมการด้วยข้อมูลชุดที่ใช้สร้าง พบว่า มีค่า R , R^2 , $RMSE_C$ เท่ากับ 0.967, 0.935 และ 91.409 ตามลำดับ และเมื่อนำสมการไปทดสอบกับข้อมูลชุดที่ไม่ได้ใช้สร้างสมการ พบว่า มีค่า R^2 เท่ากับ 0.979 $RMSE_P$ เท่ากับ 54.913 และมีค่าเฉลี่ยของ Relative error เท่ากับ 6.732% จะเห็นได้ว่าไพราโนมิเตอร์ต้นทุนต่ำที่สร้างขึ้นนี้มีความแม่นยำเพียงพอที่นำไปประยุกต์ใช้กับงานที่มีความละเอียดน้อย โดยมีความคุ้มค่ากับต้นทุนและเทคนิคที่ประยุกต์ใช้

เอกสารอ้างอิง

- ACDC Shop. (2025). *LDR sensor datasheet*. ACDC Shop. <https://www.acdcshop.gr/content/02-LDR1.pdf>
- Avallone, E., Mioralli, P. C., Scaloni, V. L., Padilha, A., & Oliveira, S. D. R. (2018). Thermal pyranometer using the open hardware Arduino platform. *International Journal of Thermodynamics*, 21(1), 1–5. <https://doi.org/10.5541/ijot.5000209000>
- Bruce, P., & Bruce, A. (2017). *Practical statistics for data scientists*. O'Reilly Media.

- Chaioek, R., Chookakorn, P., & Chanthophas, W. (2017). Variable selection methods in multiple linear regression analysis [Paper presentation]. In *Seminar on Applied Statistics for Solving Economic and Social Problems*. Khon Kaen University. (In Thai)
- Chen, W. H., Mattson, N. S., & You, F. (2022). Intelligent control and energy optimization in controlled environment agriculture via nonlinear model predictive control of semi-closed greenhouse. *Applied Energy*, 320, 119334. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119334>
- de Barros, R. C., Callegari, J. M. S., do Carmo Mendonça, D., Amorim, W. C. S., Silva, M. P., & Pereira, H. A. (2018). Low-cost solar irradiance meter using LDR sensors. In *2018 13th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)* (pp. 72-79). IEEE.
- International Organization for Standardization. (2018). *ISO 9060:2018: Solar energy-Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation*. ISO. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9060:en>
- Khajornsak, S. (2019). *Reduction of heat from solar energy for misting greenhouse* [Master's thesis]. Suranaree University of Technology. <http://sutir.sut.ac.th:8080/jspui/handle/123456789/8744>. (In Thai)
- Kipp & Zonen. (2025). *Datasheet CMP3 & SMP3 pyranometers*. Kipp & Zonen. <https://www.kippzonen.com/Download/1067/Datasheet-CMP3-SMP3-pyranometers-EN>
- Linani, M., Mokhtari, B., & Cheknane, A. (2021). Design of low-cost pyranometer sensors based on artificial neural network for an electric vehicle. In *2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA)* (pp. 990-994). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SUMMA53307.2021.9632031>
- Moreno-Garcia, I. M., Palacios-García, E. J., Santiago, I., Pallares-López, V., & Moreno-Munoz, A. (2016). Performance monitoring of a solar photovoltaic power plant using an advanced real-time system. In *2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)* (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/EEEIC.2016.7555473>
- Osinowo, M. O., Willoughby, A. A., Ewetumo, T., & Kolawole, L. B. (2019). Development of a low-cost pyrometer using locally sourced materials. *International Journal for Scientific Research & Development*, 7(5), 133-136.
- Pansanato, C., Gonçalves, G. B., Ito, M. C., Scalón, V. L., Avallone, E., & Garcia, R. P. (2018). Low-cost thermal pyranometer using Dallas DS18B20 sensor and Arduino. In *17th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering (ENCIT 2018)*. ABCM. <https://abcm.org.br/proceedings/view/CIT18/0603>
- Ronilaya, F., Ramadhani, P. F., Hidayat, M. N., Wibowo, S., Eryk, I. H., & Pratama, S. S. V. P. (2022). A development of a low-cost solar irradiance meter using mini solar cells. In *2022 International Conference on Informatics, Electrical and Electronics (ICIEE)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICIEE55596.2022.10010326>

Received: June 7, 2025; Revised: October 14, 2025; Accepted: April 22, 2026

การบำบัดแอมโมเนียจากน้ำเสียฟาร์มโคนมด้วยกระบวนการทางชีวภาพเพื่อผลิตชีวมวล
ไฟโคไซยานินและพอลิไฮดรอกซีบิวทิเรตจากไซยาโนแบคทีเรีย *Arthrospira platensis*
Ammonia bioremediation from dairy farm wastewater for biomass,
phycocyanin and polyhydroxybutyrate production by cyanobacterium
Arthrospira platensis

ฉันทชนก ดวงศรี^{1*}, ชลธิชา รัตนมณี¹, ธีรพงษ์ ใจชาญสุขกิจ¹ และอุเทน พรหมจริยะ²
Chanchanok Duangsri^{1*}, Chonticha Rattanamanee¹, Teerapong Jaichansukkit¹
and Authen Promariya²

¹คณะเทคโนโลยีการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

¹Faculty of Agricultural Technology and Agro-Industry, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi,
Phra Nakhon Si Ayutthaya Province

²คณะเทคนิคการสัตวแพทย์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จังหวัดกรุงเทพฯ

²Faculty of Veterinary Technology, Kasetsart University, Bangkok

*Corresponding Author E-mail Address : chanchanok.d@rmutsb.ac.th

บทคัดย่อ

อุตสาหกรรมฟาร์มโคนมได้รับความนิยมอย่างมากในธุรกิจปศุสัตว์ อย่างไรก็ตาม น้ำเสียจากฟาร์มโคนมมีความเข้มข้นของแอมโมเนียในระดับสูงส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยงานวิจัยนี้มีความสนใจการบำบัดแอมโมเนียด้วยวิธีชีวภาพโดยใช้ *Arthrospira platensis* ซึ่งเป็นไซยาโนแบคทีเรียที่ต้องการแหล่งไนโตรเจนเพื่อการเจริญเติบโตได้และสามารถสะสมสารชีวภาพหลายชนิด เช่น ไฟโคไซยานินและพอลิไฮดรอกซีบิวทิเรต (พีเอชบี) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการบำบัดแอมโมเนียในน้ำเสียจากฟาร์มโคนม (Dairy Farm Wastewater; DFW) โดยใช้แอมโมเนียเป็นแหล่งไนโตรเจนและประเมินผลของการใช้แอมโมเนียต่อการผลิตชีวมวล ปริมาณไฟโคไซยานินและพีเอชบี ใน *A. platensis* การทดลองประกอบด้วยกลุ่มควบคุมที่ใช้อาหารสูตรมาตรฐาน Zarrouk และกลุ่มทดลองที่ใช้อาหารสูตรมาตรฐาน Zarrouk ผสมกับน้ำเสียฟาร์มโคนมในอัตราส่วน 25%, 50%, 75% และ 100% โดยใช้แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ ภายใต้สภาวะ 25%DFW พบการลดลงของปริมาณแอมโมเนียในโตรเจนทั้งหมดเท่ากับ $99.65\% (0.098 \pm 0.0033 \text{ mg/ml}) (p < 0.001)$ ปริมาณชีวมวลเท่ากับ $1.41 \pm 0.26 \text{ mg/ml}$ และปริมาณไฟโคไซยานินเท่ากับ $0.104 \pm 0.008 \text{ mg/ml}$ นอกจากนี้พบการสะสมของแกรนูลพีเอชบีในสภาวะ 25%DFW and 50%DFW เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมปศุสัตว์

คำสำคัญ: น้ำเสียจากฟาร์มโคนม การบำบัดแอมโมเนียทางชีวภาพ *Arthrospira platensis* ไฟโคไซยานิน
พอลิไฮดรอกซีบิวทิเรต

Abstract

The dairy farming industry is widely popular in the livestock business. However, wastewater from dairy farms contains high concentrations of ammonia, which negatively affects the environment. This research focused on the ammonia bioremediation using *Arthrospira platensis*, a cyanobacterium that requires nitrogen sources for growth. *A. platensis* can accumulate various bioproducts such as phycocyanin and polyhydroxybutyrate (PHB). Therefore, the aim of this research is to investigate the potential of *A. platensis* for ammonia bioremediation from dairy farm wastewater (DFW) by utilizing ammonia as a nitrogen source, and to evaluate its effects on biomass, phycocyanin, and PHB production. The experiment consisted of control groups (Zarrouk medium) and Zarrouk medium supplemented with dairy farm wastewater at 25%, 50%, 75%, and 100%, arranged in a completely randomized design (CRD). The results showed that total ammonia nitrogen of 25%DFW condition was reduced by 99.65% (0.098 ± 0.0033 mg/ml) ($p < 0.001$). The biomass production was 1.41 ± 0.26 mg/ml, and phycocyanin content was 0.104 ± 0.008 mg/ml. Moreover, PHB granules were accumulated under 25% DFW and 50% DFW conditions, indicating potential applications in the livestock industry.

Keywords: Dairy farm wastewater, Ammonia Bioremediation, *Arthrospira platensis*, Phycocyanin
Polyhydroxybutyrate

บทนำ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมฟาร์มโคนมได้รับความนิยมเป็นอย่างสูง มีรายงานการเลี้ยงโคนมทั่วโลกสูงถึง 56,000 ล้านตัวต่อปี อาจเพิ่มขึ้นในทุกปีจนถึงปี 2050 (López-Sánchez et al., 2022) จึงมีแนวโน้มที่จะเกิดน้ำเสียจากฟาร์มปศุสัตว์เพิ่มสูงขึ้น โดยมีรายงานว่า อุตสาหกรรมฟาร์มโคนมมีปริมาณน้ำเสียถึง 4-11 ล้านตันต่อปี (Ahmad et al., 2019) โดยน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟาร์มโคนมมีค่า pH ประมาณ 6.05-7.19 มีแอมโมเนียมไนโตรเจน ($\text{NH}_4\text{-N}$), ไนเตรทไนโตรเจน ($\text{NO}_3\text{-N}$) ฟอสเฟต ($\text{PO}_4\text{-P}$) และโลหะเจือปน ได้แก่ โซเดียม (Na: 121-165 ppm) เหล็ก (Fe: 0.02-0.03 ppm) ทองแดง (Cu: 0.004-0.007 ppm) และสังกะสี (Zn: 0.001-0.003 ppm) (Hena et al., 2018) แต่อย่างไรก็ตามการมีองค์ประกอบเหล่านี้ในปริมาณสูงจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะแอมโมเนีย (Ammonia) มีรายงานจากการศึกษาก่อนหน้านี้ พบว่า น้ำเสียจากฟาร์มโคนมมีความเข้มข้นของแอมโมเนียสูงมากสุด 936 mg/L ในกรณีที่มีมูลสัตว์ถูกปล่อยมาจากคอกโดยตรงยังไม่ผ่านกระบวนการย่อย (Sapkota et al., 2024) จึงส่งผลกระทบต่อคุณภาพของแหล่งน้ำจืด ทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมอย่างรุนแรง เช่น การเปลี่ยนแปลงของค่า pH การลดลงของออกซิเจนในน้ำ และการเกิดยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) เมื่อแอมโมเนียอยู่ในระดับที่สูงกว่า 1.9 mg/L สามารถเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ (Ashour et al., 2021)

การบำบัดแอมโมเนียมีหลายวิธีทั้งกระบวนการทางเคมี ทางกายภาพ และทางชีวภาพ (Bioremediation) โดยงานวิจัยนี้มีความสนใจการบำบัดแอมโมเนียด้วยวิธีชีวภาพเนื่องจากมีราคาถูกและมีต้นทุนต่ำ เมื่อเทียบกับวิธีการบำบัดทางเคมีและกายภาพ การบำบัดทางชีวภาพเป็นกระบวนการที่ใช้จุลินทรีย์หรือสิ่งมีชีวิตที่สามารถดูดซับและเปลี่ยนแปลงแอมโมเนียให้กลายเป็นสารอาหารเพื่อใช้ในการเจริญเติบโตได้ (Sharma, 2020)

ไซยาโนแบคทีเรีย *Arthrospira platensis* (*A. platensis*) เป็นทางเลือกหนึ่งที่มีความสนใจ เนื่องจาก *A. platensis* ต้องการแหล่งไนโตรเจนและฟอสเฟตในการเจริญเติบโตผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสง (Maza et al., 2017) มีความสามารถในการเจริญในสภาวะที่เป็นด่าง (pH 9-11) แหล่งไนโตรเจนที่นิยมใช้เลี้ยง *A. platensis* ได้แก่ โซเดียมไนเตรต ซึ่งส่งผลให้ต้นทุนการเพาะเลี้ยง *A. platensis* มีต้นทุนที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นการศึกษาแหล่งไนโตรเจนที่มาจากของเสียเป็นทางเลือกในการลดต้นทุนการเพาะเลี้ยง *A. platensis* ได้ (Rodrigues et al., 2010) โดยในน้ำเสียจากฟาร์มโคนมสามารถใช้เป็นแหล่งไนโตรเจนสำหรับ *A. platensis* และเป็นการบำบัดแอมโมเนียในน้ำเสีย

A. platensis อุดมไปด้วยสารชีวภาพที่มีคุณค่าหลายชนิดและมีปริมาณโปรตีนสูงถึงร้อยละ 70 ของมวลน้ำหนักแห้งทั้งหมด ซึ่งโปรตีนที่สะสมใน *A. platensis* เป็นกลุ่มไฟโคบิลิโปรตีน (Phycobiliprotein) เช่น ไฟโคไซยานิน (Phycocyanin) โดยไฟโคไซยานินเป็นรงควัตถุหลักที่พบใน *A. platensis* มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ด้านการอักเสบและด้านแบคทีเรีย ทำให้ไฟโคไซยานินถูกใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง ยา รวมไปถึงอุตสาหกรรมอาหารสัตว์และคน (Fernández-Rojas et al., 2014; Fernandes et al., 2023) นอกจากนี้ยังคาดว่ามูลค่าทางการตลาดของไฟโคไซยานินคาดว่าจะสูงถึง 279.6 ล้านดอลลาร์ภายในปี ค.ศ. 2030 (Chaiklahan et al., 2018) นอกจากนี้ในสภาวะเครียดหรือขาดสารอาหาร *A. platensis* สามารถสะสมพลาสติคชีวภาพชนิดพอลิไฮดรอกซีบิวทิเรต (พีเอชบี) โดยจุดเด่นของพีเอชบีสามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพและมีคุณสมบัติเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อสัตว์และคน (Duangsri et al., 2020) ในปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้พีเอชบีในอุปกรณ์ทางการแพทย์เพื่อฟื้นฟูเนื้อเยื่อ เช่น โคมะเย็บแผล ผ้าปิดแผล แผ่นแปะหัวใจ และหลอดเลือด (Pulingam et al., 2022) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการบำบัดแอมโมเนียจากน้ำเสียฟาร์มโคนมและประเมินการใช้แอมโมเนียต่อการผลิตชีวมวล ปริมาณไฟโคไซยานิน และการสะสมพลาสติคชีวภาพชนิดพอลิไฮดรอกซีบิวทิเรตใน *A. platensis*

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

1. การเพาะเลี้ยง *Arthrospira platensis* IFRPD1182

ทำการเพาะเลี้ยง *A. platensis* IFRPD1182 ในอาหารสูตรมาตรฐาน Zarrouk (Control) และอาหารสูตรมาตรฐาน Zarrouk รวมกับน้ำเสียจากฟาร์มวัวนม (Dairy Farm Wastewater; DFW) ซึ่งเป็นน้ำเสียจากบ่อรวมจากฟาร์มแห่งหนึ่งในจังหวัดลพบุรี กรองด้วยแผงตอนเนตขนาด 25 ไมครอน ความเข้มข้นสุดท้าย 25% (25%DFW), 50% (50%DFW), 75% (75%DFW) และ 100%DFW โดยมี Optical density (OD_{730}) เริ่มต้นที่ 0.1 และเพาะเลี้ยงเป็นระยะเวลา 8 วัน ภายใต้ความเข้มแสงขาวที่ $40 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ อุณหภูมิห้อง $30 \pm 2^\circ\text{C}$ เขย่าที่ความเร็ว 120 rpm และทำการเก็บเซลล์วันที่ 0, 2, 4, 6, และ 8 จากนั้นนำไปวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป

2. การศึกษาปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจน (Total ammonia nitrogen, TAN) และค่า pH

ทำการเพาะเลี้ยง *A. platensis* ด้วยอาหารสูตรมาตรฐาน Zarrouk ผสมกับน้ำเสียจากฟาร์มวัวนมที่ผ่านการฆ่าเชื้อ การทดลองนี้ถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ 1) กลุ่มที่ไม่ใช้เลี้ยงเซลล์ *A. platensis* 2) กลุ่มที่ใช้เลี้ยงเซลล์ โดยมี Optical density (OD_{730}) เริ่มต้นที่ 0.1 และเพาะเลี้ยงเป็นระยะเวลา 4 วัน ภายใต้ความเข้มแสงขาวที่ $40 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ อุณหภูมิห้อง $30 \pm 2^\circ\text{C}$ เขย่าที่ความเร็ว 120 rpm และทำการเก็บตัวอย่างวันที่ 0, 1, 2, 3, และ 4 โดยการปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 12,000 rpm เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นดูดส่วนใสเพื่อวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนียด้วยวิธี Salicylate method โดยใช้แอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) สร้างกราฟมาตรฐานเพื่อวัดปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจน ($R^2=0.999$) และวัดปริมาณแอมโมเนียตามวิธีของ Bower and Holm-Hansen (1980) และวัดค่า pH ด้วยเครื่อง pH meter (Mettler Toledo S220 Seven Compact)

3. การศึกษาปริมาณชีวมวล

นำเซลล์ปริมาตร 3 ml จากชุดการทดลอง 25%DFW, 50%DFW, 75%DFW และ 100%DFW กรองด้วยชุดกรองแก้วแบบสุญญากาศ (Set Funnel Filtration) และใช้กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 4 ในการกรองเซลล์จากนั้นเชื่อมต่อกับปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump) เพื่อสร้างแรงดันในการกรองและนำกระดาษกรองที่มีเซลล์อยู่ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง นำมาชั่งน้ำหนักและคำนวณหาปริมาณชีวมวล (Freire Balseca et al., 2024)

$$\text{Biomass concentration (mg/ml)} = \frac{\text{mass of membrane with biomass(mg)} - \text{membrane mass(mg)}}{\text{culture medium volume(ml)}} \quad (\text{Eq. 1})$$

4. การศึกษาปริมาณไฟโคไซยานิน

นำเซลล์แห้งที่ผ่านกระบวนการศึกษาปริมาณชีวมวลทำการสกัดด้วยฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (Phosphate buffer) ปริมาณ 1 ml จากนั้นปั่นเหวี่ยงที่ 15,000 g เป็นเวลา 5 นาที นำส่วนใสมาวัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ที่ความยาวคลื่น 615 และ 652 nm จากนั้นคำนวณตามสมการของ Bellver Catalá et al. (2024) ซึ่งตัวแปรในสมการถูกกำหนดไว้ดังนี้ ค่า OD_{615} และ OD_{652} คือ ค่าการดูดกลืนแสงของสารสกัดที่ความยาวคลื่น 615 และ 652 nm

ค่า 0.474 คือ correction coefficient

ค่า 5.34 คือ ค่าคงที่ที่ได้จาก specific extinction coefficients ของ C-phyocyanin ใช้แปลงค่าการดูดกลืนแสงเป็นความเข้มข้น (mg/mL)

$$\text{Phycocyanin} \left(\frac{\text{mg}}{\text{ml}} \right) = [OD_{615} - (0.474 \times OD_{652})] / 5.34 \quad (\text{Eq. 2})$$

5. การศึกษาการสะสมฟิโอฟิเคอซานในเซลล์ของ *A. platensis*

เก็บเซลล์ของ *A. platensis* ในสภาวะที่ทำการทดลองปริมาตร 100 μL แยกของเหลวใสส่วนบนปริมาตร 80 μL ออกจากส่วนล่างซึ่งเป็นตะกอนที่มีปริมาตร 20 μL นำส่วนล่างที่ได้มาผสมกับสารละลายไนเรด (Nile Red) และบ่มเป็นเวลา 10 นาที นำไปส่องกล้องจุลทรรศน์ฟลูออเรสเซนซ์ (ZEISS, USA) ที่ความยาวคลื่น 559 nm (Duangsri et al., 2020)

6. การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลสำหรับลักษณะที่ศึกษา ได้แก่ ปริมาณชีวมวลและปริมาณโปรตีนไฟโคไซยานินถูกนำมาวิเคราะห์หาค่าความแปรปรวน (Analysis of variance) ตามแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design; CRD) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างทรีทเมนต์ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ข้อมูลการศึกษาปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนและค่า pH ถูกนำมาวิเคราะห์หาค่าความแปรปรวน (Analysis of variance) เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างทรีทเมนต์ด้วยวิธี T-test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ

ผลการวิจัย และการอภิปรายผล

1. การศึกษาปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจน (Total ammonia nitrogen; TAN) และค่า pH

ผลการศึกษาการเลี้ยง *A. platensis* ในน้ำเสียจากฟาร์มวัวนม 25%(25%DFW) มีแนวโน้มที่มีการสะสมปริมาณชีวมวล ($p < 0.1303$) และปริมาณไฟโคไซยานิน ($p < 0.0034$) มากกว่ากลุ่ม 50%DFW (Figure 3 & 4) ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงเลือกศึกษาการบำบัดแอมโมเนียในสภาวะ 25%DFW ดัง Figure 1 โดยแบ่งกลุ่มการทดลองเป็น 2 กลุ่มแรก กลุ่มแรกไม่มีเซลล์ *A. platensis* (25%DFW without cell) และกลุ่มสองมีเซลล์ *A. platensis* (25%DFW with cell) โดยปริมาณแอมโมเนียเริ่มต้นเท่ากับ 28 ± 0.10 mg/L พบว่า ในวันเริ่มต้นทั้งสองกลุ่มการทดลองมีปริมาณแอมโมเนียที่ลดลงโดยมีนัยสำคัญทางสถิติ ในสภาวะที่เลี้ยง *A. platensis* มีปริมาณแอมโมเนียปริมาณแตกต่างกันกับกลุ่มที่ไม่มีเซลล์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติตั้งแต่วันที่ 2 พบปริมาณแอมโมเนียอยู่ที่ 0.26 ± 0.026 mg/L และ 10.53 ± 0.069 mg/L ตามลำดับ แสดงดัง Figure 1 นอกจากนี้ พบว่า วันที่ 4 ของกลุ่มที่มีเซลล์ มีปริมาณแอมโมเนียคือ 0.098 ± 0.0033 mg/L คิดเป็น 99.65% ในขณะที่กลุ่มที่ไม่มีเซลล์มีปริมาณแอมโมเนียคือ 6.68 ± 0.091 mg/L ($p < 0.001$) แสดงดัง Figure 1 ซึ่งสอดคล้องกับการรายงานของ Olguin et al. (2003) พบว่า *A. platensis* อัตราการกำจัดแอมโมเนีย ($\text{NH}_4\text{-N}$) จากน้ำเสียจากฟาร์มหมู อยู่ในช่วง 84-96% โดยที่ค่า pH ของการทดลองเริ่มต้นที่ 9.13 ± 0.01 ในสองกลุ่มการทดลอง พบว่า ทั้งสองกลุ่มการทดลองมีค่า pH เพิ่มขึ้นตั้งแต่วันแรกทั้งสองกลุ่มการทดลอง ในกลุ่มที่มีเซลล์เกิดกระบวนการชีวเคมีของเซลล์ *A. platensis* จึงทำให้ค่า pH ที่สูงขึ้น (Diaconu et al., 2023) ส่วนกลุ่มที่ไม่มีเซลล์มีค่า pH เพิ่มขึ้นเช่นกัน เพราะการเปลี่ยนแปลงระบบสมดุลของคาร์บอเนต (Carbonate equilibrium system) (Alava et al., 1997) เนื่องจากอาหาร Zarrouk มีโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) สูงถึง 16.8 g/L และอยู่ภายใต้การให้แสงและการเขย่าส่งผลให้ pH เพิ่มขึ้น ส่วนในวันที่ 2 ของการทดลอง พบว่า กลุ่มที่มีเซลล์มีค่า pH อยู่ที่ 9.64 ± 0.01 ในขณะที่กลุ่มที่ไม่มีเซลล์มีค่า pH อยู่ที่ 9.52 ± 0.01 ($p < 0.001$) และค่า pH มีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในวันที่ 4 พบว่า กลุ่มที่มีเซลล์มีค่า pH อยู่ที่ 9.93 ± 0.157 และกลุ่มที่ไม่มีเซลล์มีค่า pH อยู่ที่ 9.78 ± 0.078 ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ในสภาวะที่มีเซลล์พบการลดลงของปริมาณแอมโมเนียตั้งแต่วันแรกจนถึงวันที่ 4 ขณะที่ค่า pH มีค่าเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับการรายงานของ Metin & Altinba (2024) ซึ่งค่า pH สูงกว่า 9 แอมโมเนียเปลี่ยนเป็นแอมโมเนีย (Ammonia stripping) ส่งผลให้ทั้ง 2 กลุ่มการทดลอง มีปริมาณแอมโมเนียลดลงจากวันแรก แต่กลุ่มการทดลองที่มีเซลล์ปริมาณแอมโมเนียรวมลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.001$)

เมื่อเทียบกับสภาวะที่ไม่มีเซลล์ ซึ่งสอดคล้องกับการรายงานของ Carvalho et al. (2004) พบว่า *A. platensis* จะเจริญเติบโตได้ดีที่สุดในช่วงค่า pH ประมาณ 9-10 (Alkalophilic organism) ภายใต้สภาวะนี้ แอมโมเนียจะเข้าสู่เซลล์โดยวิธีแพร่ผ่าน (Diffusion) และถูกดูดซึมเข้าไปโดยตรงไม่ต้องใช้พลังงานและเซลล์สามารถนำแอมโมเนียเข้าไปใช้ในกระบวนการเมตาบอลิซึมไนโตรเจน (Nitrogen metabolism) ทำให้ *A. platensis* ใช้แอมโมเนียในการสะสมชีวมวลและไฟโคไซยานิน

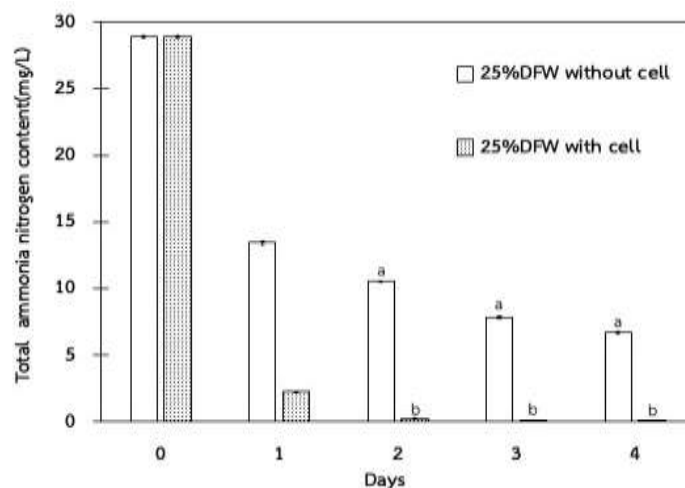


Figure 1 Total ammonia nitrogen content in 25% dairy farm wastewater (25%DFW) with *Arthrospira platensis* IFRPD1182 (25%DFW with cells) and without *A. platensis* (25%DFW without cells) (n=3). *Different letters (a and b) indicate statistically significant differences ($p < 0.05$).

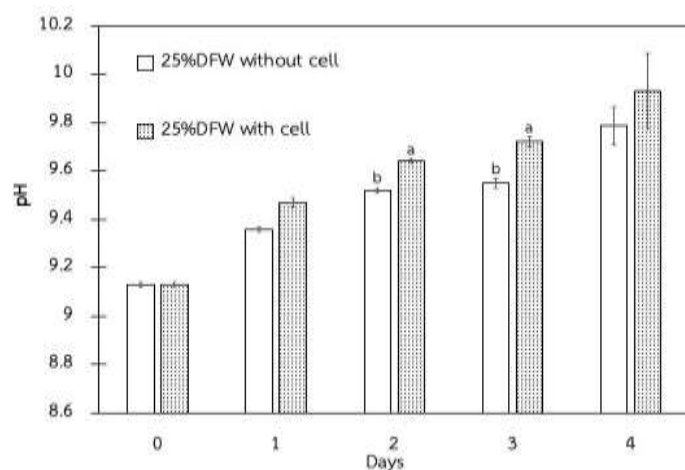


Figure 2 pH of 25% dairy farm wastewater (25%DFW) with *Arthrospira platensis* IFRPD1182 (25%DFW with cells) and without *A. platensis* (25%DFW without cells) (n=3). *Different letters (a and b) indicate statistically significant differences ($p < 0.05$).

2. การศึกษาปริมาณชีวมวลและปริมาณไฟโคไซยานินของ *A. platensis*

จากการศึกษาการเลี้ยง *A. platensis* ในสภาวะ 25%DFW, 50%DFW, 75%DFW, 100%DFW และสภาวะควบคุม (Control) พบว่า 75%DFW และ 100%DFW มีปริมาณชีวมวลและปริมาณไฟโคไซยานินลดลงตั้งแต่วันที่ 1 เนื่องจากในสภาวะ 75%DFW และ 100%DFW มีค่า pH 7.12-8.00 ซึ่งไม่เอื้อต่อการเจริญเติบโตของ *A. platensis* ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Ismaiel et al. (2016) พบว่า การเจริญเติบโตของ *A. platensis* ลดลงอย่างมีนัยสำคัญในสภาวะที่ค่า pH ต่ำกว่า 8.5

นอกจากนี้อาจเป็นไปได้ว่าในสภาวะ 75%DFW และ 100%DFW มีสารอาหารไม่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตและการสะสมไฟโคไซยานิน เนื่องจากการทดลองมีปริมาณแอมโมเนียรวมที่สูงถึง $84-115 \pm 0.059$ mg/l อาจส่งผลกระทบต่อปริมาณชีวมวลและปริมาณไฟโคไซยานินที่ลดลง สอดคล้องกับการศึกษาของ Markou et al. (2014) พบว่า ช่วงค่า pH 8-10 และแอมโมเนียเข้มข้น 100 mg-N/L มีผลกระทบจำกัดต่อการเจริญเติบโต แอมโมเนียอยู่ในรูปแอมโมเนียอิสระ (Free Ammonia; FA) สามารถยับยั้งการสังเคราะห์แสง (Chen et al., 2022) โดยการศึกษาก่อนหน้านี้พบว่า แอมโมเนียอิสระปริมาณ 44.44 mg/L ทำให้การเจริญเติบโตของ *A. platensis* ลดลงเนื่องจากแอมโมเนียอิสระสามารถแพร่ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ได้ง่ายและแอมโมเนียอิสระสามารถรบกวนกระบวนการเผาผลาญพลังงาน (Autotrophic metabolism) (Collos & Harrison, 2014; Metin & Altinba, 2024) ปริมาณชีวมวลของ *A. platensis* ที่เพาะเลี้ยงในสภาวะ 25%DFW และ 50%DFW เป็นระยะเวลา 0, 2, 4, 6 และ 8 วัน พบว่า ปริมาณชีวมวลมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นจากวันที่ 0 ถึงวันที่ 6 ของทั้ง 2 กลุ่มการทดลอง โดยปริมาณชีวมวลของ *A. platensis* ที่เพาะเลี้ยงในสภาวะ 25%DFW และ 50%DFW มีค่าสูงสุดวันที่ 6 เท่ากับ 1.41 ± 0.26 mg/ml และ 1.15 ± 0.20 mg/ml ตามลำดับ ในขณะที่เซลล์ถูกเลี้ยงสภาวะควบคุมมีปริมาณชีวมวล 1.24 ± 0.11 mg/ml แต่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.1303$) แสดงดัง Figure 3 แต่ในทางกลับกันในวันที่ 8 พบว่า สภาวะควบคุมมีปริมาณชีวมวลเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง (1.76 ± 0.27 mg/ml) แต่ในสภาวะ 25%DFW และ 50%DFW มีปริมาณชีวมวลของ *A. platensis* ที่ลดลง เท่ากับ 1.36 ± 0.15 mg/ml และ 1.07 ± 0.23 mg/ml ตามลำดับ ซึ่งปริมาณชีวมวลของเซลล์ที่เลี้ยงในสภาวะควบคุมมีปริมาณชีวมวลสูงกว่า *A. platensis* ที่เพาะเลี้ยงในสภาวะ 25%DFW และ 50%DFW อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Figure 3)

ปริมาณไฟโคไซยานินของ *A. platensis* ที่เพาะเลี้ยงในสภาวะ 25%DFW และ 50%DFW เป็นระยะเวลา 0, 2, 4, 6 และ 8 วัน พบว่า ปริมาณชีวมวลมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นจากวันที่ 0 ถึงวันที่ 6 โดยปริมาณไฟโคไซยานินของ *A. platensis* ที่เพาะเลี้ยงในสภาวะ 25%DFW มีค่าสูงสุดวันที่ 6 เท่ากับ 0.104 ± 0.008 mg/ml มีปริมาณมากกว่ากลุ่มควบคุมที่มีปริมาณไฟโคไซยานินเท่ากับ 0.103 ± 0.013 mg/ml แต่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ในทางกลับกันในสภาวะ 50%DFW มีปริมาณไฟโคไซยานิน 0.085 ± 0.005 mg/ml ซึ่งมีปริมาณน้อยกว่าสภาวะควบคุมและสภาวะ 25%DFW ($p < 0.0034$) แสดงดัง Figure 4 แต่ในทางกลับกันในวันที่ 8 พบว่า กลุ่มควบคุม มีปริมาณปริมาณไฟโคไซยานินเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง (0.147 ± 0.013 mg/ml) แตกต่างจากเซลล์ที่ถูกเลี้ยงในสภาวะ 25%DFW (0.10 ± 0.011 mg/ml) และ 50%DFW (0.077 ± 0.015 mg/ml) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงดัง Figure 4

ในสภาวะ 25%DFW มีการสะสมชีวมวลและไฟโคไซยานินที่สูง เนื่องจากสภาวะในการเลี้ยงมีค่า pH ที่เอื้อต่อการเจริญของ *A. platensis* ทำให้เกิดการสะสมชีวมวลและไฟโคไซยานิน รวมถึงมีปริมาณแหล่งไนโตรเจนเป็นธาตุสำคัญในการสร้างโปรตีน หากได้รับไนโตรเจนเพียงพอจะช่วยเพิ่มการสังเคราะห์ชีวมวลและไฟโคไซยานิน แต่ในทางกลับกันในวันที่ 8 *A. platensis* ที่เพาะเลี้ยงในสภาวะ 25%DFW และ 50%DFW มีการสะสมชีวมวลและไฟโคไซยานินที่ลดลง อาจเป็นไปได้ว่าแหล่งไนโตรเจนในสภาวะ 25%DFW และ 50%DFW อาจลดลงส่งต่อปริมาณชีวมวลและไฟโคไซยานินเมื่อเทียบกับในสภาวะควบคุม ซึ่งปริมาณของแอมโมเนียในสภาวะ 25%DFW มีปริมาณลดลงตั้งแต่วันที่ 4 (Figure 1) ซึ่งเซลล์ในสภาวะดังกล่าวมีการสะสมชีวมวลและไฟโคไซยานิน อาจเป็นผลมาจากการทำงานของกระบวนการ GS-GOGAT สังเคราะห์กรดอะมิโนขึ้นมา ส่งผลให้สภาวะที่ขาดแหล่งไนโตรเจนยังมีการสะสมไฟโคไซยานินและชีวมวลได้ (Yutthanasirikul et al., 2024)

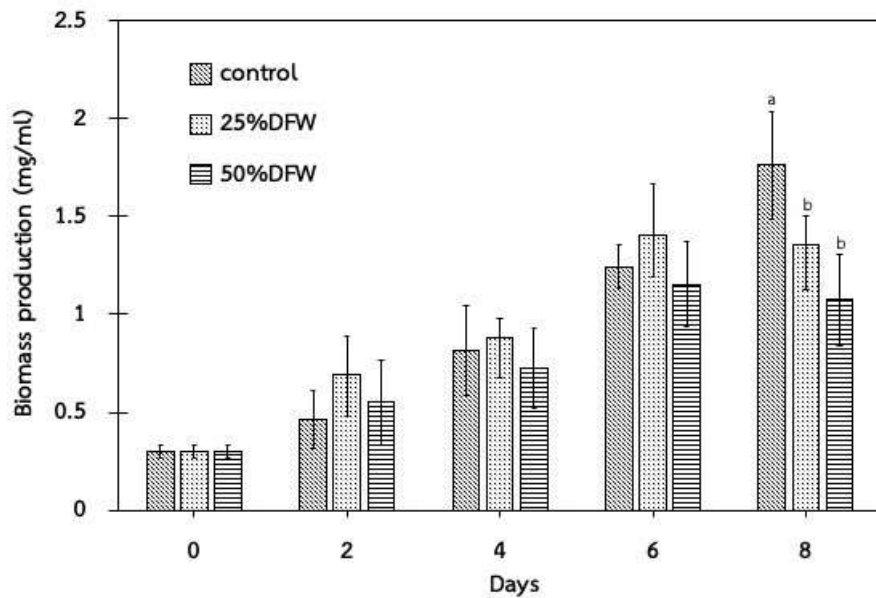


Figure 3 Biomass production of *A. platensis* IFRPD1182 cultured in media with different concentrations of dairy farm wastewater including Zarrouk medium (control), 25% dairy farm wastewater (25%DFW), and 50% dairy farm wastewater (50%DFW), respectively (n=3). *Different letters (a and b) indicate statistically significant differences ($p < 0.05$).

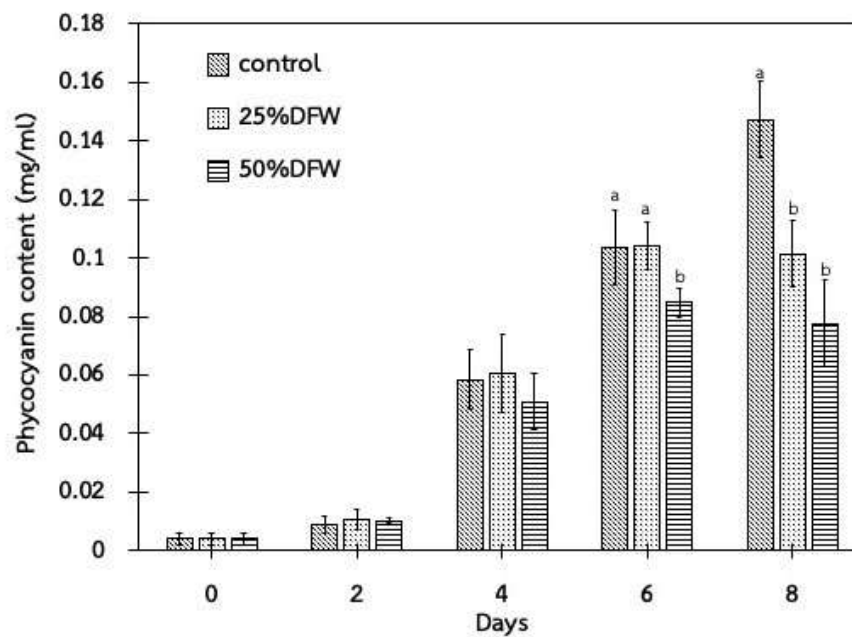


Figure 4 Phycocyanin content of *A. platensis* IFRPD1182 cultured in media with different concentrations of dairy farm wastewater including Zarrouk medium (control), 25% dairy farm wastewater (25%DFW), and 50% dairy farm wastewater (50%DFW), respectively (n=3). *Different letters (a and b) indicate statistically significant differences ($p < 0.05$).

3. การศึกษาการสะสมฟิโอฟิเคินคุณภาพโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ฟลูออเรสเซนซ์

จากการศึกษาการสะสมฟิโอฟิเคินคุณภาพโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ฟลูออเรสเซนซ์ พบว่า ตั้งแต่วันที่ 2 ในสภาวะควบคุม สภาวะ 25%DFW และ 50%DFW เริ่มพบการสะสมฟิโอฟิเคินโดยจะพบลักษณะเป็นเม็ดกลมสีส้มสว่างหรือแกรนูลของฟิโอฟิเคิน แกรนูลสีส้มสว่างของฟิโอฟิเคินเกิดจากสี Nile red ซึ่งมีคุณสมบัติเป็น Fluorophores ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการย้อมฟิโอฟิเคิน (Cao et al., 2022) โดยการศึกษาก่อนหน้านี้ได้ศึกษาการคัดกรองแบคทีเรียที่สะสมฟิโอฟิเคินโดยการย้อมสี Nile red และสามารถใช้เป็นวิธีทดสอบเบื้องต้นสำหรับการสะสมฟิโอฟิเคินในแบคทีเรีย (Elain et al., 2015) โดยโมเลกุล Nile red จะจับกับฟิโอฟิเคินซึ่งมีคุณสมบัติเป็น Hydrophobic ถูกสะสมในไฮโดรโฟบิกของเซลล์ และเมื่อนำไปส่องกล้องจุลทรรศน์ฟลูออเรสเซนซ์มีลักษณะเป็นเม็ดกลมหรือแกรนูลสีส้มสว่าง (Gorenflo et al., 1999) จากนั้นได้ทำการเก็บเซลล์จนถึงวันที่ 8 พบว่า การสะสมฟิโอฟิเคินในสภาวะ 25%DFW และ 50%DFW มีปริมาณแกรนูลฟิโอฟิเคินมากกว่าสภาวะควบคุม แสดงดัง Figure 5 ซึ่งลักษณะการสะสมฟิโอฟิเคินมีแนวโน้มที่แตกต่างจากปริมาณชีวมวลและปริมาณไฟโคไซยานิน ซึ่งไฟโคไซยานินเป็น Phycobiliprotein ที่สำคัญในระบบสังเคราะห์แสง (Citi et al., 2024) เมื่อเซลล์อยู่ในสภาวะสารอาหารจำกัดหรือขาดแหล่งไนโตรเจน เซลล์จะหยุดการแบ่งตัว Phycobiliprotein เกิดการสลายเพื่อเป็นแหล่งไนโตรเจนจึงส่งผลให้ปริมาณไฟโคไซยานินและปริมาณชีวมวลลดลง รวมถึงเกิดกระบวนการคลอโรซิส (Chlorosis) (Richaud et al., 2001) การย่อย Phycobiliprotein ในเซลล์ส่งผลให้เกิดโครงสร้างคาร์บอนและสามารถเข้าสู่กระบวนการสังเคราะห์ฟิโอฟิเคิน สอดคล้องกับการรายงานของ Duangsri et al. (2020) พบว่า ในสภาวะที่ขาดไนโตรเจนมีปริมาณชีวมวลลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่ *A. platensis* สามารถสะสม PHB สูงสุดถึง $19.2 \pm 0.5\%$ ของน้ำหนักแห้งภายใต้สภาวะขาดไนโตรเจนและเติมโซเดียมอะซิเตต 0.50% (w/v)

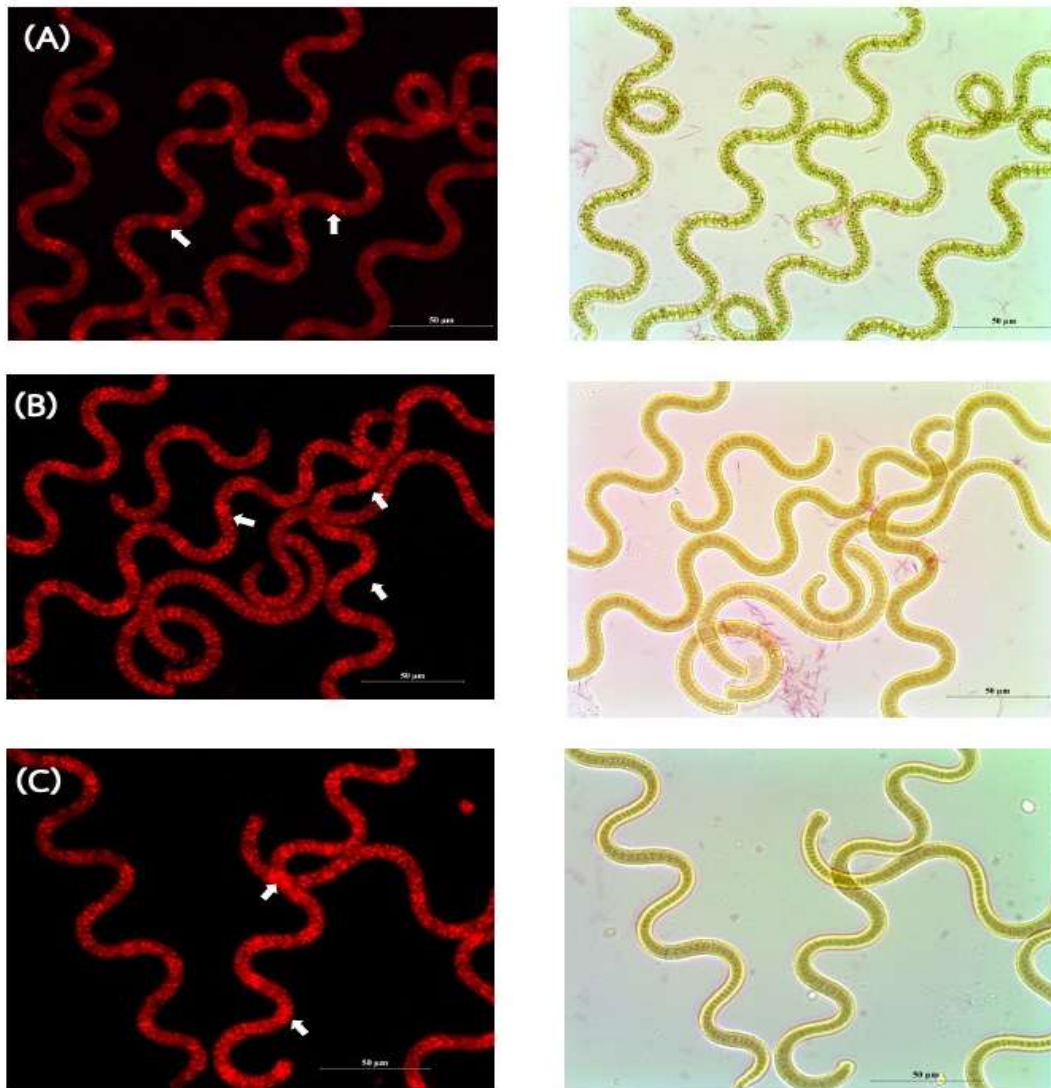


Figure 5 PHB accumulation in *A. platensis* IFRPD1182 was examined under (A) control, (B) 25%DFW, and (C) 50%DFW conditions. Samples stained with Nile red were observed using bright-field microscopy (right) and fluorescence microscopy (left). Bright orange PHB granules are highlighted by white arrows.

บทสรุป

ไซยาโนแบคทีเรีย *A. platensis* มีศักยภาพในการบำบัดแอมโมเนียจากน้ำเสียฟาร์มโคนมและใช้แอมโมเนียเป็นแหล่งไนโตรเจน โดยสภาวะ 25%DFW และ 50%DFW มีค่า pH ที่เหมาะสมและมีสารอาหารเพียงพอต่อการเจริญเติบโตของ *A. platensis* เพื่อผลิตชีวมวล ไพโคไซยานิน และพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรต อย่างไรก็ตาม ในอนาคตควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการขยายขนาดการเลี้ยง (Scale-up) เพื่อประยุกต์ใช้ในการผลิตสารสำคัญจาก *A. platensis* ระดับอุตสาหกรรม เนื่องจากมีปัจจัยสำคัญหลายประการ เช่น ความเข้มของแสง ค่า pH และอุณหภูมิ ที่ส่งผลต่อปริมาณการผลิตชีวมวล ไพโคไซยานินและพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรต

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.วุฒินันท์ รักษาจิตร จากคณะเทคนิคการสัตวแพทย์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์เป็นอย่างสูง ที่ให้คำแนะนำและสนับสนุนตลอดระยะเวลาของการทำวิจัยในครั้งนี้ ความเอื้อเฟื้อและคำแนะนำของท่านเป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่งที่ทำให้งานวิจัยดำเนินไปอย่างสำเร็จลุล่วง

เอกสารอ้างอิง

- Ahmad, A., Bhat, S., & Gujar, T. P. (2019). Treatment and utilization of dairy industrial waste: A review. *Journal of Cleaner Production*, 234, 1052-1068.
- Alava, D. D., Mello, P. C. D., & Wagener, K. (1997). The relevance of the CO₂ partial pressure of sodium bicarbonate solutions for the mass cultivation of the microalga *Spirulina*. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 8, 447-450.
- Ashour, M., Alprol, A. E., Heneash, A. M., Saleh, H., Abualnaja, K. M., Alhashmialameer, D. & Mansour, A. T. (2021). Ammonia bioremediation from aquaculture wastewater effluents using *Arthrospira platensis* NIOF17/003: Impact of biodiesel residue and potential of ammonia-loaded biomass as rotifer feed. *Materials*. 14(18): 5460
- Bellver Catalá, M., Altamira Algarra, B., García Serrano, J., Ferrer Martí, I., & González Flo, E. (2024). Enhancing pigment production with cyanobacteria-rich microbiomes: Effect of light quality and exposure time. *Algal Research*, 83, Article 103726.
- Bower, C. E., & Holm-Hansen, T. (1980). A salicylate-hypochlorite method for determining ammonia in seawater. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 37(5), 794-798.
- Cao, J. S., Xu, R. Z., Luo, J. Y., Feng, Q., & Fang, F. (2022). Rapid quantification of intracellular polyhydroxyalkanoates via fluorescence techniques: A critical review. *Bioresource Technology*, 350, 126906.
- Carvalho, J. C. M., Francisco, F. R., Almeida, K. A., Sato, S., & Converti, A. (2004). Cultivation of *Arthrospira (Spirulina) platensis* (Cyanophyceae) by fed-batch addition of ammonium chloride at exponentially increasing feeding rates. *Journal of Phycology*, 40(3), 589-597.
- Chaiklahan, R., Chirasuwan, N., Loha, V., Tia, S., & Bunnag, B. (2018). Stepwise extraction of high-value chemicals from *Arthrospira (Spirulina)* and an economic feasibility study. *Biotechnology Reports*, 20, e00280.
- Chen, Z., Qiu, S., Li, M., Zhou, D., & Ge, S. (2022). Instant inhibition and subsequent self-adaptation of *Chlorella* sp. toward free ammonia shock in wastewater: Physiological and genetic responses. *Environmental Science & Technology*, 56(13), 9641-9650.
- Citi, V., Torre, S., Flori, L., Usai, L., Aktay, N., Dunford, N. T., Lutz, G. A., & Nieri, P. (2024). Nutraceutical features of the phycobiliprotein C-phycocyanin: Evidence from *Arthrospira platensis (Spirulina)*. *Nutrients*, 16(11), 1752.
- Collos, Y., & Harrison, P. J. (2014). Acclimation and toxicity of high ammonium concentrations to unicellular algae. *Marine Pollution Bulletin*, 80(1-2), 8-23.
- Diaconu, M., Soreanu, G., Balan, C. D., Buciscanu, I. I., Maier, V., & Cretescu, I. (2023). Study of *Spirulina platensis (Arthrospira)* development under the heavy metals influence, as a potential promoter of wastewater remediation. *Water*, 15(22), 3962.

- Duangstri, C., Mudtham, N. A., Incharoensakdi, A., & Raksajit, W. (2020). Enhanced polyhydroxybutyrate (PHB) accumulation in heterotrophically grown *Arthrospira platensis* under nitrogen deprivation. *Journal of Applied Phycology*, 32, 3645-3654.
- Elain, A., Le Fellic, M., Corre, Y. M., Le Grand, A., Le Tilly, V., Audic, J. L., & Bruzard, S. (2015). Rapid and qualitative fluorescence-based method for the assessment of PHA production in marine bacteria during batch culture. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 31, 1555-1563.
- Fernandes, R., Campos, J., Serra, M., Fidalgo, J., Almeida, H., Casas, A., Toubarro, D., & Barros, A. I. R. N. A. (2023). Exploring the benefits of phycocyanin: From *Spirulina* cultivation to its widespread applications. *Pharmaceuticals*, 16(4), 592.
- Fernández-Rojas, B., Hernández-Juárez, J., & Pedraza-Chaverri, J. (2014). Nutraceutical properties of phycocyanin. *Journal of functional foods*, 11, 375-392.
- Freire Balseca, D. A., Castro Reyes, K. S., & Maldonado Rodríguez, M. E. (2024). Optimization of an alternative culture medium for phycocyanin production from *Arthrospira platensis* under laboratory conditions. *Microorganisms*, 12(2), 363.
- Gorenflo, V., Steinbüchel, A., Marose, S., Rieseberg, M., & Scheper, T. (1999). Quantification of bacterial polyhydroxyalkanoic acids by Nile red staining. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 51, 765-772.
- Hena, S., Znad, H., Heong, K. T., & Judd, S. (2018). Dairy farm wastewater treatment and lipid accumulation by *Arthrospira platensis*. *Water Research*, 128, 267-277.
- Ismail, M. M. S., El-Ayouty, Y. M., & Piercey-Normore, M. E. (2016). Role of pH on antioxidants production by *Spirulina* (*Arthrospira platensis*). *Brazilian Journal of Microbiology*, 47, 298-304.
- Langenfeld, N. J., Kusuma, P., Wallentine, T., Criddle, C. S., Seefeldt, L. C., & Bugbee, B. (2021). Optimizing nitrogen fixation and recycling for food production in regenerative life support systems. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 8, 699688.
- López-Sánchez, A., Silva-Gálvez, A. L., Aguilar-Juárez, Ó., Senés-Guerrero, C., Orozco-Nunnally, D. A., Carrillo-Nieves, D., & Gradilla-Hernández, M. S. (2022). Microalgae-based livestock wastewater treatment (MbWT) as a circular bioeconomy approach: Enhancement of biomass productivity, pollutant removal and high-value compound production. *Journal of Environmental Management*, 308, 114612.
- Markou, G., Vandamme, D., & Muylaert, K. (2014). Ammonia inhibition on *Arthrospira platensis* in relation to the initial biomass density and pH. *Bioresource Technology*, 166, 259-265.
- Maza, L. R., Guevara, J. M., Gómez, B., Vega, B. A., Cortez, R., & Licet, B. (2017). Producción de pigmentos procedentes de *Arthrospira maxima* cultivada en fotobiorreactores. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 19(1), 108-114.
- Metin, U., & Altinbas, M. (2024). Evaluating ammonia toxicity and growth kinetics of four different microalgae species. *Microorganisms*, 12(8), 1542.
- Olguín, E. J., Galicia, S., Mercado, G., & Pérez, T. (2003). Annual productivity of *Spirulina* (*Arthrospira*) and nutrient removal in a pig wastewater recycling process under tropical conditions. *Journal of Applied Phycology*, 15(2-3), 249-257.
- Pulingam, T., Appaturi, J. N., Parumasivam, T., Ahmad, A., & Sudesh, K. (2022). Biomedical applications of polyhydroxyalkanoate in tissue engineering. *Polymers*, 14(11), 2141.
- Richaud, C., Zabulon, G., Joder, A., & Thomas, J. C. (2001). Nitrogen or sulfur starvation differentially affects phycobilisome degradation and expression of the *nblA* gene in *Synechocystis* strain PCC 6803. *Journal of Bacteriology*, 183(10), 2989-2994.

- Rodrigues, M. S., Ferreira, L. S., Converti, A., Sato, S., & Carvalho, J. C. M. D. (2010). Fed-batch cultivation of *Arthrospira (Spirulina) platensis*: Potassium nitrate and ammonium chloride as simultaneous nitrogen sources. *Bioresource Technology*, 101(12), 4491-4498.
- Sapkota, S., Reza, A., & Chen, L. (2024). Optimization of ammonia nitrogen removal and recovery from raw liquid dairy manure using vacuum thermal stripping and acid absorption process: A modeling approach using response surface methodology. *Nitrogen*, 5(2), 409-425.
- Sharma, I. (2020). Bioremediation techniques for polluted environment: concept, advantages, limitations, and prospects. In *Trace metals in the environment-new approaches and recent advances*. IntechOpen. London, 221-236.
- Yutthanasirikul, R., Kurdrid, P., Saree, S., Senachak, J., Saelee, M., & Hongsthong, A. (2024). Increasing activity of the GS-GOGAT cycle highlights the compensation of N-assimilation in the absence of nitrogen and its metabolic effects in cyanobacteria. *Algal Research*, 79, 103490.

Received: September 16, 2025; Revised: October 22, 2025; Accepted: March 17, 2026

ผลของการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์ ที่ได้จากถ่านไม้ไผ่

Effect of potassium hydroxide (KOH) activation on the properties of activated carbon derived from bamboo charcoal

จุฑาพล จำปาแถม^{1*} ลำพูน เหลลราช¹ เพ็ญยศ วงษ์บัวงาม¹ สุรสิงห์ อารยางค์กูร²
และรพีพล อินสุพรรณ³
Jutapol Jumpatam^{1*}, Lumpoon Laorach¹, Peomyot Wongbua-Ngam¹,
Surasing Arayangkun² and Rapeepol Insupan³

¹คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์ จังหวัดสุรินทร์

¹Faculty of Science and Technology, Surindra Rajabhat University, Surin Province

²คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์ จังหวัดสุรินทร์

²Faculty of Industrial Technology, Surindra Rajabhat University, Surin Province

³โรงเรียนอุดมพัฒนศึกษา สำนักงานเขตพื้นที่มัธยมศึกษา นครพนม จังหวัดนครพนม

³Udompattanasuksa School, The Secondary Educational Service Area Office, Nakhon Phanom Province

*Corresponding Author E-mail Address : jutapol.j@sru.ac.th

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติของถ่านไม้ไผ่ด้วยการกระตุ้นทางกายภาพและทางเคมีของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) โดยใช้ความเข้มข้นของตัวกระตุ้นที่ระดับ 0% 10% และ 40% ถ่านไม้ไผ่ที่ใช้ได้จากการกระบวนการคาร์บอนเซชัน (Carbonization) และผ่านการกระตุ้นทางเคมีด้วย KOH จากนั้นนำไปวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ปริมาณความชื้น สารระเหย แก๊ส คาร์บอนคงตัว ความสามารถในการดูดซับไอโอดีน และพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเทคนิค BET ผลการทดลองพบว่า ความเข้มข้นของ KOH ที่เพิ่มขึ้นมีผลโดยตรงต่อคุณสมบัติของถ่าน โดยค่าคาร์บอนคงตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่ค่าความชื้น สารระเหย และปริมาณแก๊สลดลง โดยเฉพาะที่ความเข้มข้น 40% ให้ค่าคาร์บอนคงตัวสูงสุดที่ 68.88% และมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ 124 m²/g พร้อมค่าการดูดซับไอโอดีน 253 mg/g แสดงให้เห็นถึงการพัฒนาโครงสร้างรูพรุนและสมบัติการดูดซับที่ดีขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของตัวกระตุ้น การกระตุ้นทางเคมีด้วย KOH สามารถปรับปรุงคุณสมบัติของถ่านไม้ไผ่ได้ดี และชี้ให้เห็นถึงศักยภาพของไม้ไผ่ในฐานะวัตถุดิบชีวมวลที่เหมาะสมสำหรับการพัฒนาเป็นถ่านกัมมันต์ เพื่อประยุกต์ใช้ในงานด้านสิ่งแวดล้อมและวัสดุพลังงานต่อไป

คำสำคัญ: ถ่านไม้ไผ่ การกระตุ้นทางกายภาพและทางเคมี โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ พื้นที่ผิวจำเพาะ การดูดซับไอโอดีน

Abstract

The objective of this research was the improvement of the properties of bamboo charcoal through physical and chemical activation with potassium hydroxide (KOH). Bamboo charcoal, obtained from a carbonization process, was subsequently activated with KOH at concentrations of 0%, 10%, and 40%. The products were then analyzed for physical properties, including moisture content, volatile matter, ash, fixed carbon, iodine adsorption capacity, and specific surface area using the BET technique. From the results, it was found that the properties of the charcoal were directly influenced by the concentration of KOH. With higher level of KOH, a continuous increase in fixed carbon was observed, while the values for moisture, volatile matter, and ash content were decreased. Specifically, at a concentration of 40%, the highest fixed carbon content of 68.88%, a specific surface area of 124 m²/g, and an iodine adsorption value of 253 mg/g were obtained. This indicates that a more porous structure and improved adsorption properties were developed as the activator concentration was increased. It was shown that the properties of bamboo charcoal can be significantly improved by chemical activation with potassium hydroxide, and the potential of bamboo as a suitable biomass raw material for development into activated carbon for further application in environmental and energy material fields is highlighted.

Keywords: Bamboo charcoal, Physical and chemical activation, Potassium hydroxide, Specific surface area, Iodine adsorption

บทนำ

ปัจจุบัน ถ่านกัมมันต์ (Activated charcoal) เป็นวัสดุที่มีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งที่ใช้ในกระบวนการดูดซับสารปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม และมีการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมหลายสาขาอย่างกว้างขวาง ได้แก่ การบำบัดน้ำเสีย การฟอกอากาศ อุตสาหกรรมอาหาร ตลอดจนการผลิตแบตเตอรี่พลังงานสูง (Heidarinejad, 2020) เนื่องจากสมบัติทางโครงสร้างที่มีความพรุนสูงและพื้นที่ผิวจำเพาะมาก ซึ่งเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับมลพิษอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม วัตถุดิบหลักที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์มักเป็นถ่านหินและกะลามะพร้าว ซึ่งมีต้นทุนการผลิตสูงและอาจก่อให้เกิดข้อกังวลด้านสิ่งแวดล้อม ด้วยเหตุนี้ จึงมีความสนใจเพิ่มขึ้นในการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อผลิตถ่านกัมมันต์จากแหล่งชีวมวลที่ยั่งยืนมากกว่า เช่น ไม้ ซึ่งเป็นพืชที่เจริญเติบโตเร็ว มีปริมาณคาร์บอนสูง ทำให้มีศักยภาพต่อการสังเคราะห์เป็นถ่านกัมมันต์คุณภาพสูงได้ (Zhang et al., 2022)

การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากวัสดุชีวมวลสามารถทำได้หลายกระบวนการ โดยทั่วไปจำแนกออกเป็น การกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation), การกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation) และ การกระตุ้นแบบผสมผสาน (Hybrid activation) โดยแต่ละวิธีปรับเปลี่ยนสมบัติของถ่านกัมมันต์ในลักษณะที่แตกต่างกัน ในการกระตุ้นทางกายภาพ จะใช้ก๊าซออกซิไดซ์ เช่น ไอน้ำหรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ภายใต้อุณหภูมิสูงเพื่อทำให้เกิดรูพรุน (Heidarinejad, 2020) ในขณะที่การกระตุ้นทางเคมีอาศัยตัวกระตุ้น เช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ซิงค์คลอไรด์ (ZnCl₂) หรือกรดฟอสฟอริก (H₃PO₄) (Ngernyen & Kamwilaisak 2013; Youme, 2015; Phothitontimongkol, 2017; Heidarinejad, 2020) เพื่อส่งเสริมการก่อตัวของรูพรุนและเพิ่มพื้นที่ผิว ส่วนวิธีแบบผสมผสานเป็นการรวมข้อดีของทั้งสองแนวทาง เช่น การใช้ตัวกลางของก๊าซร่วมกับสารกระตุ้นเคมี เพื่อยกระดับสมรรถนะการดูดซับและปรับแต่งโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุให้จำเพาะต่อการใช้งาน (Zhao et al., 2021) KOH ถือเป็นตัวกระตุ้นที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถเพิ่มผลผลิตถ่านกัมมันต์ได้โดยการยับยั้งการเกิดน้ำมันดินและเถ้า พร้อมทั้งกระตุ้นการเกิดรูพรุนระดับรูพรุนขนาดเล็ก (Micropore) และรูพรุนขนาดกลาง (Mesopore) ซึ่งช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวให้มากขึ้น (Wang et al., 2017; Heidarinejad et al., 2020; Ipeh & Hanim, 2020; Zhang et al., 2022) อย่างไรก็ตาม ถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วย KOH มักให้ผลผลิตสูงและมีการกระจายตัวของรูพรุนที่เล็ก ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่เหมาะสมอย่างยิ่งต่อการบำบัดน้ำเสีย นอกจากนี้ จากหลายงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็น

ว่า ชนิดและความเข้มข้นของตัวกระตุ้นเป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดสมบัติของถ่านกัมมันต์ เช่น พื้นที่ผิวจำเพาะ (วิเคราะห์ด้วยเทคนิค Brunauer–Emmett–Teller (BET)) การกระจายขนาดรูพรุนและปริมาตรรูพรุนรวม (วิเคราะห์ด้วยไอโซเทอมก๊าซ) และความสามารถในการดูดซับไอโอดีน (Qin et al., 2014; Kibona et al., 2020) นอกจากการศึกษาสมบัติทางกายภาพของถ่านแล้ว เมื่อพิจารณาวัสดุชีวมวลที่สามารถนำมาใช้ผลิตถ่านได้ พบว่าไม้ไผ่เป็นวัสดุชีวมวลที่น่าสนใจ ซึ่งนอกจากจะมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบสูงแล้ว ไม้ไผ่ยังเป็นทรัพยากรท้องถิ่นที่มีความอุดมสมบูรณ์ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย การนำมาใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์จึงไม่เพียงช่วยเพิ่มมูลค่าเศรษฐกิจให้กับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร แต่ยังสอดคล้องกับเป้าหมายการพัฒนาชุมชนอย่างยั่งยืน งานวิจัยสังเคราะห์ล่าสุดยังชี้ให้เห็นว่าปริมาณลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose) และเถ้าแร่ธาตุในไม้มีผลต่อการเกิดรูพรุนเมื่อถูกกระตุ้นโดย KOH และพบว่า โครงสร้างรูพรุนที่เกิดขึ้นเป็นแบบรูพรุนขนาดเล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 2 nm (Micropore) และรูพรุนขนาดกลางที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วง 2-50 nm (Mesopore) ซึ่งเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้ในงานด้านการดูดซับ (Zhang et al., 2022)

เมื่อพิจารณาถึงบริบทการใช้งาน ถ่านกัมมันต์มีศักยภาพสูงในระบบบำบัดน้ำเสีย การกำจัดโลหะหนัก สารอินทรีย์ระเหยง่าย และสารปนเปื้อนในระดับความเข้มข้นต่ำ (Micropollutants) เนื่องจากสามารถปรับปรุงสมบัติของรูพรุนและเคมีพื้นผิวให้เหมาะสมกับสารเป้าหมายได้ จากแบบจำลองสมการดูดซับ (เช่น Langmuir, Freundlich) และจลนศาสตร์การดูดซับ (Adsorption kinetics) พบว่าการกระตุ้นด้วย KOH เพื่อให้ได้โครงสร้างรูพรุนขนาดเล็ก (Micropore) เหมาะกับการดูดซับสารโมเลกุลเล็ก และสามารถปรับปรุงกลุ่มฟังก์ชันออกซิเจนหรือไนโตรเจนบนพื้นผิวเพื่อเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวเฉพาะทิศทางได้ หรือการกระตุ้นด้วย H_3PO_4 หรือวิธีผสมผสานเพื่อให้ได้โครงสร้างเมโครพอร์ที่เหมาะสมกับการดูดซับสารโมเลกุลขนาดใหญ่หรือคอลลอยด์ จะเพิ่มประสิทธิภาพการแพร่ภายในและการเข้าถึงบริเวณดูดซับมากขึ้น ซึ่งปัจจุบันชี้ให้เห็นว่า องค์ประกอบลิกโนเซลลูโลสและเถ้าแร่ธาตุของไม้ไผ่มีบทบาทสำคัญต่อพัฒนาการของโครงสร้างรูพรุนภายใต้การกระตุ้นทางเคมี ก่อให้เกิดโครงสร้างระดับรูพรุนขนาดเล็ก (Micropore) และรูพรุนขนาดกลาง (Mesopore) ซึ่งช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวให้มากขึ้นที่เหมาะสมต่อการดูดซับ ส่งผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะและสมรรถนะการดูดซับเพิ่มขึ้น (Heidarinejad, 2020; Zhang et al., 2022) ในมิติทางเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม การผลิตถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ถือเป็นแนวทางเชิงนโยบายที่มีความชัดเจน เนื่องจากไม้ไผ่เป็นทรัพยากรหมุนเวียนที่โตเร็ว หาได้ง่ายในท้องถิ่น จึงช่วยลดต้นทุนการขนส่งและการปลดปล่อยคาร์บอนตลอดวัฏจักรชีวิต ในมิติของอุตสาหกรรมชุมชน สามารถสร้างงาน กระจายรายได้และยกระดับเศรษฐกิจฐานรากได้อย่างยั่งยืน กล่าวได้ว่าถ่านประสิทธิภาพสูงจากไม้ไผ่เป็นทางเลือกที่บูรณาการ “สมรรถนะทางวัสดุ” เข้ากับ “ความยั่งยืน” ได้เป็นอย่างดี

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยมีวัตถุประสงค์หลักในการพัฒนาสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านไม้ไผ่ชุมชน โดยทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของตัวกระตุ้น KOH ต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีของถ่านกัมมันต์ ได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า พื้นที่ผิวจำเพาะ และค่าการดูดซับไอโอดีน เพื่อประเมินประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากกระบวนการดังกล่าว ผลการศึกษาจะทำให้ทราบถึงสถานะที่ดีที่สุดในการผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านไม้ไผ่ให้มีคุณภาพสูง เป็นทางเลือกที่ยั่งยืนสำหรับการใช้งานในอุตสาหกรรมหลากหลายสาขา พร้อมทั้งเพิ่มมูลค่าให้กับทรัพยากรชีวมวลในท้องถิ่น

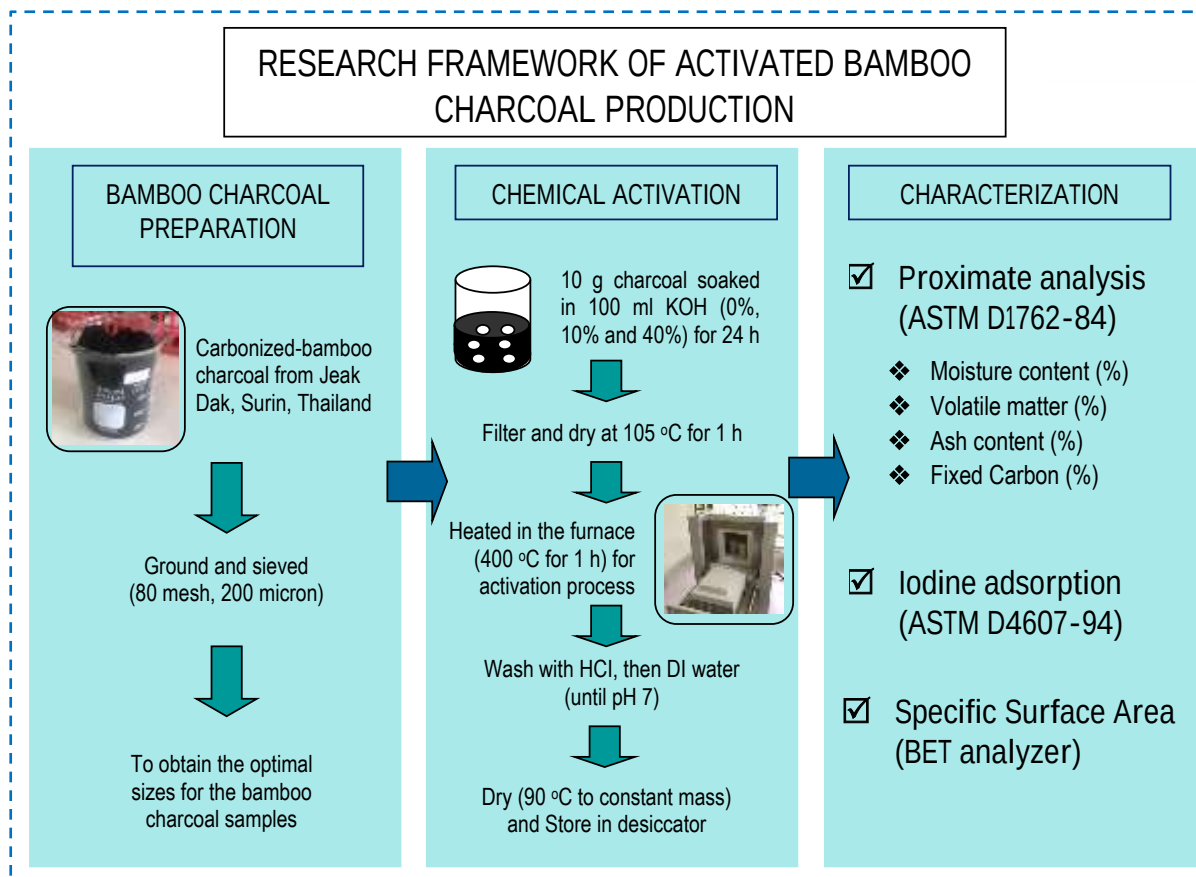


Figure 1 Research framework of activated bamboo charcoal production

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการปรับปรุงสมบัติของถ่านไม้ให้มีสมบัติเป็นถ่านกัมมันต์มากขึ้น โดยใช้กระบวนการกระตุ้นทางเคมีด้วยสาร KOH ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน โดยขั้นตอนการดำเนินการวิจัยแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ การเตรียมวัตถุดิบ การกระตุ้นทางเคมี และการศึกษาองค์ประกอบแบบประมาณและสมบัติทางกายภาพของถ่านที่เตรียมได้ ซึ่งสามารถสรุปแผนผังกรอบการวิจัยและกระบวนการการเตรียมถ่านไม้ไฟที่กระตุ้นทางเคมีได้ดัง Figure 1 โดยรายละเอียดแต่ละขั้นตอน มีดังนี้

1. การเตรียมวัตถุดิบ

วัตถุดิบที่ใช้ในการวิจัยนี้คือ ถ่านไม้ไผ่กิมซุง หรือ ไผ่ตงลิ้มแล้ง ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) แล้ว จากศูนย์เทคโนโลยีและธุรกิจใหม่ชุมชน อำเภอพนมดงรัก จังหวัดสุรินทร์ โดยคัดเลือกจากถ่านที่เผาได้สมบูรณ์ตามเกณฑ์ได้แก่ มีสีดำทั่วทั้งก้อน ผิวมันและแหลมคมเมื่อหัก จากนั้นจึงนำถ่านไม้ไผ่บดให้ละเอียดเป็นผงและร่อนผ่านตะแกรง (ขนาด 80 mesh) ให้ได้ขนาดที่ใกล้เคียงกัน (ไม่เกิน 200 μm)

2. การกระตุ้นทางเคมี

นำถ่านไม้ไผ่ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันปริมาณ 10 g แช่ในสารละลาย KOH ที่ความเข้มข้นต่างกัน 3 ความเข้มข้น ได้แก่ 0% 10% และ 40% w/v ปริมาตร 100 mL (อัตราส่วน KOH:ถ่าน เท่ากับ 0:1 1:1 และ 4:1 ตามลำดับ) ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 h จากนั้นนำมารองและอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 1 h นำตัวอย่างถ่านที่ได้ไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 1 h ภายใต้สภาวะในอากาศ (Chandra et al., 2009) ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 0.1 M แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นจนถ่านที่เตรียมได้แต่ละเงื่อนไขมีค่า pH เท่ากับ 7 และ

อบให้แห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 90°C จนมวลมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง แล้วนำไปเก็บไว้ในโถดูดความชื้น เพื่อศึกษาองค์ประกอบแบบประมาณและกายภาพต่อไป

3. การศึกษาองค์ประกอบแบบประมาณ

ถ่านที่ผ่านการกระตุ้นแล้วจะถูกนำไปศึกษาองค์ประกอบแบบประมาณ ได้แก่ ปริมาณความชื้น สารระเหย เถ้า และคาร์บอนคงตัว ตามมาตรฐาน American Society for Testing and Materials (ASTM) D1762-84

3.1 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น (%Moisture)

ในการวิเคราะห์ปริมาณความชื้นของถ่านไม้ไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพ เริ่มต้นด้วยการอุ่นเตาอบให้มีอุณหภูมิ 150°C นำครุชีเบลพร้อมฝาปิดที่สะอาด อบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 30 min แล้วนำออกมาทำให้เย็นในโถดูดความชื้นเป็นเวลา 15 min ก่อนนำไปชั่งน้ำหนักและบันทึกค่าน้ำหนักเป็น W_1 (ทำซ้ำจนได้ผลต่างของน้ำหนักที่ชั่งทั้งสองครั้งติดต่อกันไม่เกิน 1-3 mg) จากนั้นใส่ตัวอย่างถ่านลงในครุชีเบลประมาณ 1 g ชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของตัวอย่างและบันทึกเป็น W หลังจากนั้นจึงนำครุชีเบลที่บรรจุตัวอย่างแล้วไปอบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 2-3 h เพื่อระเหยความชื้นออกให้หมด แล้วจึงนำออกมาทำให้เย็นในโถดูดความชื้นเป็นเวลา 20 min และชั่งน้ำหนักอีกครั้งเพื่อบันทึกเป็นค่าน้ำหนักหลังอบ W_2 จากนั้นจึงคำนวณหาปริมาณความชื้นเป็นร้อยละ (M) โดยใช้สมการ (Eq.1)

$$M = \frac{(W_1 - W_2)}{W} \times 100 \quad (\text{Eq.1})$$

โดยที่ M คือ ร้อยละของปริมาณความชื้น, W_1 คือ น้ำหนักของครุชีเบลพร้อมฝาและตัวอย่างก่อนอบ (กรัม), W_2 คือ น้ำหนักของครุชีเบลพร้อมฝาและตัวอย่างหลังอบ (g) และ W คือ น้ำหนักของตัวอย่าง (g) ซึ่งค่าที่ได้จะสะท้อนปริมาณความชื้นในตัวอย่างถ่านที่เตรียมได้

3.2 การวิเคราะห์ปริมาณสารระเหย (%Volatile Matter)

เริ่มต้นด้วยการเผาถ่านด้วยกระบี่พร้อมฝาปิดในเตาเผาที่อุณหภูมิ 950°C เป็นเวลา 3 h เพื่อให้ถ่านสะอาดปราศจากสารปนเปื้อน จากนั้นนำถ่านที่เผาแล้วไปตั้งทิ้งไว้ในโถดูดความชื้นจนมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง แล้วจึงใส่ถ่านตัวอย่างที่อบไล่ความชื้นแล้วลงในถ่านที่เตรียมไว้ประมาณ 1 g ปิดฝาให้สนิท ก่อนนำไปเผาอีกครั้งที่อุณหภูมิ 950°C เป็นเวลา 7 min เมื่อครบกำหนดเวลาให้นำถ่านด้วยกระบี่พร้อมฝาปิดออกจากเตาเผาทันทีและวางไว้ในสภาพบรรยากาศปกติประมาณ 20 min จากนั้นนำไปตั้งทิ้งไว้ในโถดูดความชื้นอีกครั้งจนกระทั่งอุณหภูมิลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้อง แล้วจึงทำการชั่งน้ำหนักและบันทึกค่าน้ำหนักของสารหลังการเผา หากน้ำหนักยังไม่คงที่ให้นำตัวอย่างกลับไปเผาซ้ำในเงื่อนไขเดิมจนกระทั่งน้ำหนักคงที่ แล้วจึงนำค่าที่ได้ไปคำนวณปริมาณสารระเหยโดยใช้สมการ (Eq.2)

$$V = \frac{(W_1 - W_2)}{W} \times 100 \quad (\text{Eq.2})$$

โดยที่ V คือ ร้อยละของปริมาณสารระเหย, W_1 คือ น้ำหนักของครุชีเบลพร้อมฝาและตัวอย่างก่อนเผา (g), W_2 คือ น้ำหนักของครุชีเบลพร้อมฝาและตัวอย่างหลังเผา (g) และ W คือ น้ำหนักของตัวอย่าง (g) ค่านี้สะท้อนถึงปริมาณองค์ประกอบที่ระเหยได้ภายในถ่าน และเป็นดัชนีหนึ่งในการประเมินคุณภาพของถ่าน

3.3 การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า (%Ash)

เริ่มจากการเผาถ่านด้วยกระบี่พร้อมฝาปิดในเตาเผาที่อุณหภูมิ 650°C เป็นเวลา 3 h เพื่อให้ถ่านสะอาดและปราศจากสารตกค้าง จากนั้นนำถ่านออกมาตั้งทิ้งไว้ในโถดูดความชื้นจนกระทั่งอุณหภูมิของถ่านลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้อง แล้วจึงใส่ถ่านตัวอย่างลงในถ่านที่เตรียมไว้ในปริมาณประมาณ 1 g โดยปิดฝาขณะทำการเผา และนำถ่านที่บรรจุตัวอย่างไปเผาต่อที่อุณหภูมิ 650°C จนกว่าน้ำหนักของตัวอย่างจะคงที่ ซึ่งแสดงว่าสารอินทรีย์ในถ่านได้สลายตัวหมด เหลือเพียงส่วนที่เป็นสารอนินทรีย์หรือเถ้า จากนั้นจึงนำตัวอย่างที่เผาแล้วไปตั้งทิ้งไว้ในโถดูดความชื้นจนมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้องอีกครั้ง แล้วจึงชั่งน้ำหนัก และใช้ค่าดังกล่าวคำนวณปริมาณเถ้าของถ่านตามสมการ (Eq.3)

$$A = \frac{W_2}{W_1} \times 100 \quad (\text{Eq.3})$$

โดยที่ A คือ ร้อยละของปริมาณสารระเหย, W_1 คือ น้ำหนักของครุชิลพร้อมฝาและตัวอย่างก่อนเผา (g), W_2 คือ น้ำหนักของครุชิลพร้อมฝาและตัวอย่างหลังเผา (g) โดยค่าที่ได้จะสะท้อนถึงปริมาณของสิ่งเจือปนที่ไม่สามารถสลายได้ด้วยความร้อน และเป็นตัวบ่งชี้คุณภาพของถ่านในด้านความบริสุทธิ์

3.4 ปริมาณคาร์บอนคงตัว (%Fixed carbon)

สำหรับการคำนวณปริมาณคาร์บอนคงตัว หาได้จากผลต่างระหว่างปริมาณเท่ากับปริมาณสารระเหยได้ ตามสมการ (Eq.4)

$$\text{ร้อยละปริมาณคาร์บอนคงตัว} = 100 - (\text{ร้อยละของถ่าน-ร้อยละของสารระเหยได้}) \quad (\text{Eq.4})$$

4. การวิเคราะห์การดูดซับไอโอดีน

การวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D4607-94 โดยอบตัวอย่างถ่านที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 3 h จากนั้นปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งถ่านประมาณ 1 g ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 mL เติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 5% ปริมาตร 10 mL แล้วต้มให้เดือดประมาณ 30 s เพื่อขจัดสิ่งเจือปน เมื่อถ่านแห้งสนิทแล้ว ให้เติมสารละลายไอโอดีน ความเข้มข้น 0.10 N ปริมาตร 100 mL ปิดฝาแล้วเขย่าแรง ๆ ประมาณ 30 s จากนั้นกรองด้วยกระดาษกรอง โดยทิ้งสารละลายในช่วงแรก จนกระทั่งกระดาษกรองอิ่มตัวด้วยสารละลาย จึงรองรับสารละลายด้วยขวดรูปชมพู่ นำสารละลายที่ผ่านการกรองปริมาตร 50 mL มาวัดปริมาณไอโอดีนที่เหลือโดยใช้วิธีไทเทรตกับสารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟต ความเข้มข้น 0.10 N เติมน้ำแบ่ง 2-3 หยด จนได้สารละลายสีน้ำเงิน ไทเทรตจนได้สารละลายใสไม่มีสีบันทึกปริมาตรโซเดียมไฮโอซัลเฟตที่ใช้ จากนั้นคำนวณหาการดูดซับไอโอดีนนมเบอร์ (Iodine number) โดยใช้สมการ (Eq.5) ซึ่งแสดงค่าความสามารถในการดูดซับของถ่าน

$$X/M (\text{mg/g}) = \frac{A - (DF \times B \times S)}{M} \quad (\text{Eq.5})$$

โดยที่ $A = 12693N_2$ (N_2 คือ ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน ในหน่วย N), $B = 126.93N_1$ (N_1 คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟต ในหน่วย N), S คือ ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟต (mL), M คือ น้ำหนักถ่าน (g) และ DF คือ ค่าแฟกเตอร์การเจือจาง (Dilution factor) หาได้จากสมการ (Eq.6)

$$DF = \frac{\text{ปริมาตรไอโอดีนเริ่มต้น} - \text{ปริมาตรกรดไฮโดรคลอริก}}{\text{ปริมาตรไอโอดีนที่เหลือ}} \quad (\text{Eq.6})$$

5. การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ

วิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ด้วยเครื่อง Surface area and pore size analyzer (BET) ศูนย์วิจัยวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดยใช้เทคนิคการดูดซับทางกายภาพ (Physisorption) และเทคนิคการดูดซับทางเคมี (Chemisorption) ด้วยหลักการวัดปริมาตรของแก๊สในสภาวะสูญญากาศ ณ ความดันคงที่ (Vacuum volumetric technique)

6. วิธีการวิเคราะห์ค่าทางสถิติของข้อมูล

การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate analysis) ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D1762-84 ซึ่งประกอบด้วย การหาปริมาณความชื้น สารระเหย เถ้า และคาร์บอนคงตัว โดยทำการทดลองซ้ำอย่างละ 3 ครั้ง จากนั้นนำค่าที่ได้จากผลการทดลองมาคำนวณหาค่าเฉลี่ย (Mean; $\bar{x}$) และ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation; SD) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์เชิงสถิติต่อไป

6.1 การหาค่าเฉลี่ย โดยใช้สูตร (Eq.7)

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{N} \quad (\text{Eq.7})$$

โดยที่ $\bar{x}$ คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูล x_i คือ ค่าที่ได้จากการทดลองแต่ละครั้ง และ N คือ จำนวนครั้งที่ทำการทดลอง

6.2 การหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยใช้สูตร (Eq.8)

$$SD = \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{N} - \bar{x}^2} \quad (\text{Eq.8})$$

โดยที่ SD คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน $\bar{x}$ คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูล x_i คือ ค่าที่ได้จากการทดลองแต่ละครั้ง และ N คือ จำนวนครั้งที่ทำการทดลอง

ผลการวิจัย และอภิปรายผล

1. ผลการศึกษาองค์ประกอบแบบประมาณ

จากผลการทดลองแสดงใน Table 1 ซึ่งได้จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพของถ่านไม้ไผ่ที่ผ่านการกระตุ้นด้วย KOH ที่ความเข้มข้นต่างกัน ตามมาตรฐาน ASTM D1762-84 เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ พบว่า ความเข้มข้นของตัวกระตุ้นมีผลต่อองค์ประกอบแบบประมาณของถ่านอย่างมีนัยสำคัญ ผลการวิเคราะห์สรุปได้ดัง Figure 2

Table 1 Results of proximate analysis

KOH concentration (%w/v)	Moisture content (%)	Volatile matter (%)	Ash content (%)	Fixed carbon (%)
0	5.85±0.083	29.93±0.193	11.92±0.189	52.29±0.060
10	5.61±0.033	24.70±0.261	11.45±0.104	58.24±0.219
40	3.74±0.040	19.59±0.368	7.79±0.149	68.88±0.254

จากผลการทดลองที่ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D1762-84 เพื่อศึกษาสมบัติของถ่านไม้ไผ่ที่ผ่านการปรับสภาพด้วย KOH ที่ความเข้มข้นต่างกัน พบว่า ความเข้มข้นของตัวกระตุ้นมีผลต่อองค์ประกอบแบบประมาณของถ่านอย่างชัดเจน โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของตัวกระตุ้นจาก 10% เป็น 40% จะส่งผลให้ปริมาณความชื้นและสารระเหยลดลงอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่ปริมาณคาร์บอนคงตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งสะท้อนว่าถ่านที่ได้มีความเสถียรและบริสุทธิ์มากขึ้น เช่น ปริมาณความชื้นลดลงจาก 5.85% ในถ่านที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ เหลือเพียง 3.74% ที่ความเข้มข้น 40% ของ KOH ขณะที่ปริมาณสารระเหยลดลงจาก 29.93% เหลือ 19.59% และปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้นจาก 52.29% เป็น 68.88% ตามลำดับ ส่วนปริมาณเถ้าซึ่งสะท้อนสิ่งเจือปนที่ไม่ใช่คาร์บอน ก็มีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงคุณภาพของถ่านโดยการกระตุ้นด้วย KOH ที่ความเข้มข้น 40% สามารถเพิ่มความบริสุทธิ์และคุณภาพของถ่านไม้ไผ่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ผลการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่า การใช้ KOH เป็นตัวกระตุ้นมีประสิทธิภาพในการปรับปรุงคุณภาพของถ่านกัมมันต์ โดยเฉพาะเมื่อใช้อัตราส่วนที่เหมาะสมกับสถานะอุณหภูมิที่เหมาะสม การปรับปรุงดังกล่าวสอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Ponken et al. (2023) ที่ระบุว่าความเข้มข้นของ KOH มีผลต่อการเพิ่มรพูนและพื้นที่ผิวภายในของถ่าน ส่งผลโดยตรงต่อสมบัติการดูดซับของถ่านกัมมันต์ ซึ่งค่าปริมาณสารระเหยและเถ้าเป็นตัวบ่งชี้ความสามารถในการดูดซับของถ่านที่เตรียมได้ นอกจากนี้ Phohtitontimongkol (2017) ยังพบว่าการใช้ KOH และตัวกระตุ้นอื่น ๆ มีผลโดยตรงต่อการเพิ่มค่าการดูดซับไอโอดีนและปริมาณคาร์บอนคงตัวซึ่งเป็นลักษณะสำคัญของถ่านกัมมันต์คุณภาพสูง ยิ่งไปกว่านั้น งานวิจัยของ Rujira (2013) และ

Sangkaew et al. (2011) ยืนยันว่าไฟเป็นวัตถุดิบที่เหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ เมื่อได้รับการปรับสภาพอย่างเหมาะสม สามารถยกระดับทั้งสมรรถนะและมูลค่าเชิงเศรษฐกิจได้อย่างมีนัยสำคัญ ข้อค้นพบเหล่านี้ระบุชัดเจนว่า การควบคุมความเข้มข้นของตัวกระตุ้นเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อสมบัติของถ่านชาร์ และองค์ความรู้ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างกว้างขวางในการพัฒนาถ่านกัมมันต์สำหรับการใช้งานในภาคอุตสาหกรรมหลากหลายประเภท

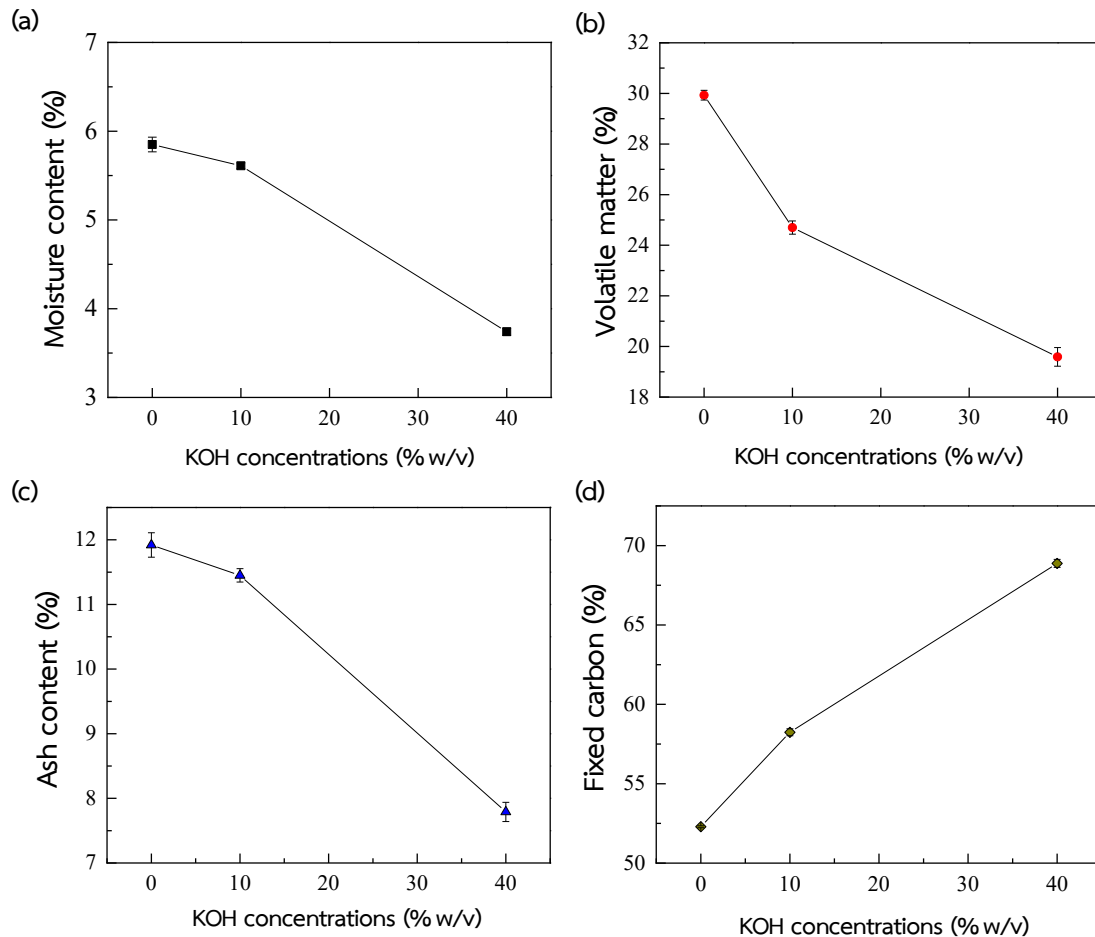


Figure 2 (a) Moisture content, (b) Volatile matter, (c) Ash content, and (d) Fixed carbon content of bamboo charcoal activated with different concentrations of KOH

2. การวิเคราะห์การดูดซับไอโอดีนและพื้นที่ผิวจำเพาะ

ผลการทดลองของค่าการดูดซับไอโอดีนและพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ที่กระตุ้นด้วย KOH ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ดังแสดงใน Figure 3 แสดงให้เห็นว่าเมื่อความเข้มข้นของตัวกระตุ้น KOH เพิ่มขึ้น ถ่านที่ได้จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะและความสามารถในการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้น โดยพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นจาก $16 \text{ m}^2/\text{g}$ เป็น $124 \text{ m}^2/\text{g}$ และค่าการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้นจาก 128 mg/g เป็น 253 mg/g เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ KOH จาก 10% เป็น 40% ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าการเพิ่มความเข้มข้นของ KOH ทำให้เกิดโครงสร้างรูพรุนเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่รายงานว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วย KOH มีค่าการดูดซับไอโอดีนและพื้นที่ผิวสูงกว่าวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ (Spencer et al., 2024a)

แนวโน้มของผลการศึกษาค่าการดูดซับไอโอดีนและพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ที่ถูกกระตุ้นด้วย KOH ดังกล่าวสอดคล้องอย่างยิ่งกับรายงานวิจัยของกลุ่ม Spencer et al. (2024a) ซึ่งยืนยันว่าการกระตุ้นทางเคมีด้วย KOH ให้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวและค่าการดูดซับไอโอดีนสูงกว่าวิธีการทางกายภาพ (Spencer et al., 2024a) ขณะเดียวกัน การศึกษาการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากถ่านหินได้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์เชิงบวกระหว่างพื้นที่ผิวจำเพาะกับค่าการดูดซับไอโอดีน โดยตัวอย่างที่กระตุ้นทางเคมีให้ค่าการดูดซับไอโอดีน

ได้สูงถึง 900 mg/g (Spencer et al., 2024b) แม้ว่าถ่านไม้ไผ่ที่ผ่านกระตุ้นด้วย KOH ในงานวิจัยนี้จะมีพื้นที่ผิวและค่าการดูดซับไอโอดีนต่ำกว่าบางงานวิจัยก่อนหน้านี้ แต่พื้นที่ผิวและค่าการดูดซับไอโอดีนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับการใช้วัสดุตั้งต้นชนิดอื่น ๆ ความแตกต่างของสมบัติที่ได้อาจมีสาเหตุมาจากอุณหภูมิการกระตุ้น อัตราส่วนของ KOH ที่ใช้ หรือพันธุ์ของไม้ไผ่ ซึ่งยืนยันว่า KOH เป็นตัวกระตุ้นที่มีประสิทธิภาพ และการควบคุมความเข้มข้นของ KOH เป็นกุญแจสำคัญในการผลิตถ่านกัมมันต์คุณภาพสูงสำหรับการใช้งานด้านสิ่งแวดล้อมและพลังงาน (Spencer et al., 2024b; Gao et al., 2025)

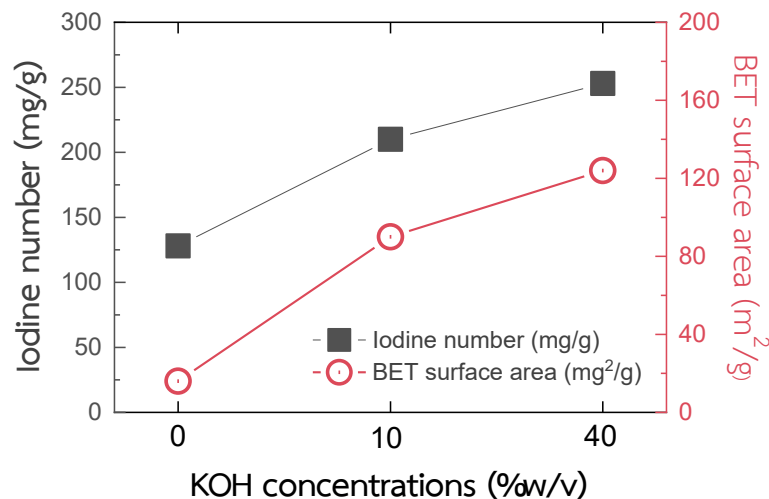


Figure 3 Iodine number and specific surface area of bamboo charcoal activated with different concentrations of KOH

Table 2 แสดงให้เห็นว่า พื้นที่ผิวจำเพาะแบบ BET ของถ่านกัมมันต์ถูกกำกับโดยปัจจัยหลักสองประการ ได้แก่ (1) ชนิดของตัวกระตุ้น และ (2) องค์ประกอบภายในของวัสดุตั้งต้น ตัวกระตุ้นที่มีสมบัติเป็นเบส เช่น KOH และ ZnCl_2 โดยทั่วไปให้ค่าพื้นที่ผิวสูงกว่าตัวกระตุ้นที่มีสมบัติเป็นกรด เช่น H_2SO_4 เนื่องจากมีความสามารถในการกัดกร่อนที่ช่วยทำให้เกิดรูพรุนขนาดเล็ก (Micropore) และขยายให้เป็นรูพรุนขนาดกลาง (Mesopore) ในขณะที่การกระตุ้นด้วยกรดจะเป็นการช่วยให้เกิดการเชื่อมขวางของโครงข่าย (Cross-linking) และการเกิดน้ำมันดิน (Tar) ที่อุดตันการเกิดรูพรุน ดังตัวอย่างพื้นที่ผิวจำเพาะที่ต่ำมากของดอกปาล์ม ($\approx 9.57 \text{ m}^2/\text{g}$) เมื่อใช้ H_2SO_4 เป็นตัวกระตุ้น (Ioannidou & Zabaniotou, 2007) นอกจากนี้ ชนิดของวัสดุตั้งต้นยังส่งผลต่อพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านอย่างชัดเจน เนื่องจากอัตราส่วนลิกนิน-เซลลูโลส และปริมาณเถ้าและแร่ธาตุมีผลต่อการกำจัดองค์ประกอบที่ระเหยได้ (Devolatilization) และการเกิดโครงสร้างรูพรุน เช่น การกระตุ้นถ่านจากเมล็ดลันจี้ด้วย KOH จะได้ถ่านที่มีพื้นที่ผิวสูงกว่าถ่านจากก้านพริกถึงประมาณ $11 \text{ m}^2/\text{g}$ แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุตั้งต้นเป็นตัวแปรสำคัญต่อสมบัติของถ่านที่กระตุ้นด้วย KOH (Gao et al., 2025) สำหรับถ่านไม้ไผ่ที่เตรียมด้วยสารกระตุ้น KOH ในงานวิจัยนี้มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ $124 \text{ m}^2/\text{g}$ ซึ่งต่ำกว่างานวิจัยของ Ponken et al. (2023) และ Liu et al. (2010) ที่รายงานค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ 1,257 และ $1,432 \text{ m}^2/\text{g}$ ตามลำดับ ความแตกต่างดังกล่าวอาจเกิดจากเงื่อนไขการกระตุ้นและอุณหภูมิการเผาที่แตกต่างกัน ส่งผลต่อการพัฒนาโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ อย่างไรก็ตาม การศึกษาอัตราส่วนระหว่างตัวกระตุ้นและถ่านพบว่า ช่วงอัตราส่วน 1:1 ถึง 4:1 เป็นช่วงที่ทำให้ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวจำเพาะแบบ BET สูงที่สุด เช่น ที่อัตราส่วน NaOH:ถ่าน เท่ากับ 3:1 (Youme, 2015) KOH:ถ่าน เท่ากับ 3:1 (Ponken et al., 2023) และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของตัวกระตุ้นเป็นอัตราส่วน 4:1 พบว่า พื้นที่ผิวจำเพาะแบบ BET ของถ่านมีค่าลดลงเนื่องจากปริมาณตัวกระตุ้นที่มากเกินไปอาจไปทำลายผนังของรูพรุนขนาดเล็กทำให้เกิดเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ขึ้นและส่งผลต่อการลดลงของพื้นที่ผิวจำเพาะแบบ BET (Yang et al., 2017) ปัจจัยอื่นที่สำคัญที่มีผลต่อสมบัติของถ่าน ได้แก่ อัตราส่วนของ KOH:ถ่าน อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น และการกำจัดเถ้าก่อนและหลังการกระตุ้น ล้วนส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพโดยเฉพาะการเกิดโครงสร้างรูพรุนขนาดเล็ก (Micropore) และขนาดกลาง (Mesopore) (Ponken et al., 2023; Spencer et al., 2024b)

สำหรับผลการทดลองในครั้งนี้ ถ่านไม้ไผ่ที่ผ่านการกระตุ้นด้วย KOH ที่ความเข้มข้น 40% ให้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงถึง 124 m²/g ซึ่งสูงกว่าวัสดุชีวมวลหลายชนิดดังแสดงใน Table 2 เมื่อพิจารณาถ่านที่ผ่านกระตุ้นด้วย KOH พบว่า ถ่านไม้ไผ่มีพื้นที่ผิวสูงกว่าถ่านจากเปลือกถั่วลิสง (Peanut shell) กากกาแฟ (Coffee husk) และเมล็ดลิ้นจี่ (Lychee seed) นอกจากนี้ยังพบว่า ถ่านไม้ไผ่มีพื้นที่ผิวสูงกว่าถ่านจากดอกปาล์ม (Palm flower) ที่ใช้ H₂SO₄ เป็นตัวกระตุ้น สำหรับถ่านที่มีพื้นที่ผิวสูงกว่าถ่านไม้ไผ่ส่วนใหญ่จะเป็นถ่านที่กระตุ้นด้วยตัวกระตุ้นอื่น เช่น H₂SO₄ ZnCl₂ NaOH และ H₃PO₄ อย่างไรก็ตาม พื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านไม้ไผ่ที่สังเคราะห์ได้นี้มีความเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ในงานกำจัดสีย้อมหรือการดูดซับก๊าซหรือไอระเหยบางชนิดที่จำเพาะกับโครงสร้างรูพรุนระดับขนาดกลาง (Mesopore) (Hameed et al., 2007)

Table 2 Comparative specific surface area of chemically activated biomass-based charcoal

Biomass precursor	Activating agent	BET surface area (m ² /g)	Reference
Peanut shell	KOH	89	Foo & Hameed (2012)
Coffee husk	KOH	28	Ngernyen & Kamwilaisak (2013)
Lychee seed	KOH	119	Ngernyen & Kamwilaisak (2013)
Peanut shell	KOH	1523	Boroojerdi et al. (2025)
Lychee seed	KOH	1854	Gao et al. (2025)
Peanut shell	H ₃ PO ₄	56.8	Boroojerdi et al. (2025)
Palm flower	H ₂ SO ₄	9.57	Ioannidou & Zabaniotou (2007)
Lychee seed	H ₃ PO ₄	345	Ngernyen & Kamwilaisak (2013)
Lychee seed	H ₂ SO ₄	358	Ngernyen & Kamwilaisak (2013)
Lychee seed	ZnCl ₂	106	Ngernyen & Kamwilaisak (2013)
Chili stem	ZnCl ₂	876	Phromphithak et al. (2023)
Bamboo	NaOH	1215	Youme et al. (2015)
Bamboo	H ₃ PO ₄	1432	Liu et al. (2010)
Bamboo	KOH	1257	Ponken et al. (2023)
Bamboo (this study)	KOH	124	This study

จากการเปรียบเทียบพื้นที่ผิวจำเพาะของแต่ละวัตถุดิบ ดัง Table 2 บ่งชี้ว่า การเพิ่มประสิทธิภาพของการกระตุ้นสามารถยกระดับการสร้างรูพรุนในถ่านไม้ไผ่ได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะการปรับอัตราส่วนระหว่างตัวกระตุ้นกับถ่านชาร์ควบคู่กับความเข้มข้นของตัวกระตุ้น ตลอดจนการศึกษาอุณหภูมิและเวลาในการเผากระตุ้นส่งผลให้เกิดรูพรุนขนาดเล็ก (Micropore) ก่อนแล้วค่อย ๆ ขยายเป็นรูพรุนขนาดกลาง (Mesopore) นอกจากนี้ การกำจัดเถ้าและซิลิกาด้วยกรดอ่อนออกจากไม้ไผ่ก่อนการกระตุ้นจะช่วยลดผลการขัดขวางต่อการทำปฏิกิริยา เช่นเดียวกับกระบวนการปรับสภาพหลังการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ ระยะสั้นด้วย CO₂ หรือไอน้ำซึ่งสามารถขยายรูพรุนขนาดเล็กได้อย่างมากได้โดยไม่ก่อให้เกิดการสูญเสียมวลจากการเผาไหม้มากเกินไป ขณะเดียวกัน การชะล้างหลังการกระตุ้นมีความจำเป็นเพื่อกำจัดสารอนินทรีย์ตกค้าง (เช่น K₂CO₃) อาจส่งผลต่อการสร้างโครงสร้างรูพรุนภายในได้ ภายใต้การปรับเปลี่ยนตัวแปรดังกล่าว ไม้ไผ่มีแนวโน้มที่จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงขึ้น และการกระจายขนาดรูพรุนที่ปรับเปลี่ยนได้ ซึ่งเอื้อให้ถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่เป็นวัตถุดิบตั้งต้นที่คุ้มค่าและยั่งยืนสำหรับงานบำบัดน้ำ การกรองอากาศ และเทคโนโลยีการดูดซับที่เกี่ยวข้อง ทั้งนี้ แม้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่ได้ในงานนี้จะต่ำกว่าวัตถุดิบบางชนิด แต่ข้อได้เปรียบด้านการเติบโตเร็ว ความอุดมสมบูรณ์ในท้องถิ่น และต้นทุนการผลิตต่ำของไม้ไผ่ยังทำให้เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในระดับชุมชน ซึ่งให้ความสำคัญกับความยั่งยืนและความพร้อมของทรัพยากร (Zhang et al., 2022)

อย่างไรก็ตาม จากการเปรียบเทียบผลการทดลองกับข้อมูลมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 900-2547) ซึ่งกำหนดให้ถ่านกัมมันต์ต้องมีการดูดซับไอโอดีนไม่น้อยกว่า 600 mg/g และมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่า 1,000 m²/g พบว่า

ถ่านไม้ไผ่ที่ผ่านการกระตุ้นด้วย KOH ความเข้มข้น 40% ในงานวิจัยนี้ ยังไม่สามารถผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐาน มอก. ได้ โดยมีค่าการดูดซับไอโอดีนสูงสุดเพียง 253 mg/g และพื้นที่ผิวจำเพาะอยู่ที่ 124 m²/g แม้จะสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุชีวมวลชนิดอื่นใน Table 2 แต่ยังคงถือว่าอยู่ในระดับต่ำเมื่อเทียบกับเกณฑ์อุตสาหกรรม ทั้งนี้ แสดงให้เห็นว่าการกระตุ้นเพียงขั้นตอนเดียวอาจยังไม่เพียงพอ และมีความจำเป็นต้องพัฒนาเงื่อนไขเพิ่มเติม เช่น การเพิ่มอุณหภูมิการเผา ระยะเวลาในการกระตุ้น หรือการใช้กระบวนการกระตุ้นแบบสองขั้น (Dual activation) เพื่อให้ได้คุณสมบัติเชิงโครงสร้างที่เหมาะสมและตรงตามมาตรฐานถ่านกัมมันต์ในระดับอุตสาหกรรมต่อไป ข้อเท็จจริงนี้บ่งชี้ว่า การกระตุ้นทางเคมีแบบขั้นตอนเดียว อาจไม่เพียงพอในการสร้างรูพรุนที่ต้องการสำหรับถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่คุณภาพอุตสาหกรรม จึงมีความจำเป็นต้องปรับเหมาะกระบวนการเพิ่มเติม เช่น การเพิ่มอุณหภูมิการกระตุ้น การยืดระยะเวลาคงอุณหภูมิ หรือการประยุกต์ กระบวนการกระตุ้นสองขั้น (เช่น กระตุ้นด้วยวิธีเคมี และต่อเนื่องด้วยวิธีทางกายภาพด้วย CO₂ หรือ ไอน้ำ) เพื่อสร้างรูพรุนขนาดเล็ก-กลาง (Micro-Mesopore) ให้เด่นชัดยิ่งขึ้นสอดคล้องกับมาตรฐานอุตสาหกรรม

บทสรุป

จากการศึกษาผลของความเข้มข้นของตัวกระตุ้น KOH ต่อสมบัติทางกายภาพของถ่านไม้ไผ่ พบว่า ความเข้มข้นของตัวกระตุ้นมีอิทธิพลต่อคุณภาพของถ่านอย่างชัดเจนในหลายมิติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านความบริสุทธิ์และโครงสร้างที่เหมาะสมต่อการดูดซับ ซึ่งเป็นคุณลักษณะสำคัญของถ่านกัมมันต์ที่มีประสิทธิภาพ ถ่านที่ผ่านการกระตุ้นด้วย KOH ความเข้มข้น 40% ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในเชิงสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ มีปริมาณความชื้นต่ำที่สุด (3.74%) ปริมาณสารระเหยลดลงเหลือ 19.59% ปริมาณเถ้าลดลงเหลือ 7.79% และปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้นถึง 68.88% เมื่อเทียบกับถ่านที่ไม่ผ่านการกระตุ้น (52.29%) แสดงให้เห็นว่า KOH มีบทบาทในการขจัดองค์ประกอบที่ไม่ต้องการและเสริมโครงสร้างคาร์บอนให้มีความเสถียรมากขึ้น นอกจากนี้ ถ่านไม้ไผ่ที่ผ่านการกระตุ้นยังมีคุณสมบัติที่เหมาะสมในด้านการดูดซับ โดยค่าการดูดซับไอโอดีนเพิ่มขึ้นจาก 128 mg/g (ในถ่านที่ไม่ผ่านการกระตุ้น) เป็น 253 mg/g และพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นจาก 16 m²/g เป็น 124 m²/g สะท้อนถึงการสร้างโครงสร้างรูพรุนขนาดเล็ก (Micropore) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่เอื้อต่อการดูดซับสารเคมีในระดับโมเลกุลได้ดี เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลจากถ่านชีวมวลชนิดอื่นที่กระตุ้นด้วยสารเคมีประเภทต่าง ๆ ถ่านไม้ไผ่ที่ผ่านการกระตุ้นด้วย KOH ให้ผลลัพธ์ในระดับที่น่าพึงพอใจ แต่ยังมีข้อจำกัดบางประการในด้านความสามารถในการพัฒนาพื้นที่ผิว หากใช้กระบวนการกระตุ้นเพียงขั้นตอนเดียว โดยคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย (มอก. 900-2547) ซึ่งกำหนดให้ค่าการดูดซับไอโอดีนไม่ต่ำกว่า 600 mg/g และพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่า 1,000 m²/g ดังนั้น จึงควรปรับปรุงกระบวนการกระตุ้นเพิ่มเติม โดยเน้นการปรับเหมาะ อุณหภูมิการกระตุ้น, อัตราส่วนสารเคมีต่อถ่านชาร์ (Impregnation ratio) และพิจารณาใช้ กระบวนการกระตุ้นแบบสองขั้น (Dual activation) เพื่อสร้างรูพรุนให้มีลักษณะเข้าใกล้มาตรฐานระดับอุตสาหกรรมยิ่งขึ้น

ในภาพรวมจะเห็นได้ว่าไม้ไผ่มีศักยภาพสูงในฐานะวัตถุดิบชีวมวลสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์ เพื่อการวิจัยในอนาคต ควรดำเนินการวิเคราะห์เชิงโครงสร้างของวัสดุอย่างลึกซึ้ง เพื่อทำความเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนกับสมรรถนะการดูดซับโดยใช้เทคนิคขั้นสูง ได้แก่ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) การวิเคราะห์ BET (เพื่อประเมินโครงสร้างรูพรุน) และ สเปกโทรสโกปีอินฟราเรดแบบฟูเรียร์ (Fourier transform infrared spectroscopy; FTIR) นอกจากนั้นควรเปรียบเทียบตัวกระตุ้นชนิดอื่น เช่น ZnCl₂ หรือ H₃PO₄ เพื่อประเมินประสิทธิภาพสัมพัทธ์ รวมถึงบูรณาการถึงการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อสนับสนุนการพัฒนาถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ที่ยั่งยืนสำหรับการใช้งานระดับชุมชนและอุตสาหกรรมต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ศูนย์เทคโนโลยีและธุรกิจไม้มุมชน บ้านจิกแดก ตำบลจิกแดก อำเภอพนมดงรัก จังหวัดสุรินทร์ ที่กรุณาจัดหาถ่านไม้ไผ่ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนในเซชันแล้ว สำหรับใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญที่เอื้อให้การศึกษาครั้งนี้สามารถดำเนินไปได้อย่างสมบูรณ์ นอกจากนี้ ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัย

ราชภัฏสุรินทร์ สำหรับการสนับสนุนด้านสถานที่ อุปกรณ์ และทรัพยากรที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินงานวิจัย รวมถึงการเอื้อเพื่อข้อมูลทางวิชาการตลอดกระบวนการศึกษา

เอกสารอ้างอิง

- ASTM International. (1984). *Standard test method for chemical analysis of wood charcoal* (ASTM D1762-84). ASTM International.
- ASTM International. (1994). *Standard test method for determination of iodine number of activated carbon* (ASTM D4607-94). ASTM International.
- Boroojerdi, S. H., Mohammadi, M. M., & Bahadoran, F. (2025). Facile, low-cost, and environment-friendly method for preparing peanut shell-based activated carbon: Application to dichloromethane removal. *RSC Advances*, 15, 27311. <https://doi.org/10.1039/D5RA02731J>
- Chandra, T. C., Mirna, M. M., Sunarso, J., Sudaryanto, Y., & Ismadji, S. (2009). Activated carbon from durian shell: Preparation and characterization. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 40(4), 457-462. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2009.01.002>
- Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2012). A review of recent development in the preparation of activated carbon from agricultural by-products. *Journal of Hazardous Materials*, 175(1-3), 502-509. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.10.017>
- Gao, J., Wang, H., Liu, X., Zhang, Z., Fan, Z., & Suo, Y. (2025). Regulating CO₂ adsorption performance of lychee seed-based porous carbon materials: Insights into oxygen groups and pore structure. *Environmental Research*, 284, 122245. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.122245>
- Hameed, B. H., Din, A. T. M., & Ahmad, A. L. (2007). Adsorption of methylene blue onto bamboo-based activated carbon: Kinetics and equilibrium studies. *Journal of Hazardous Materials*, 141(3), 819-825. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.07.049>
- Heidarinejad, Z., Dehghani, M. H., Heidari, M., Javedan, G., Ali, I., & Sillanpää, M. (2020). Methods for preparation and activation of activated carbon: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 18(2), 393-415. <https://doi.org/10.1007/s10311-019-00955-0>
- Ioannidou, O., & Zabaniotou, A. (2007). Agricultural residues as precursors for activated carbon production- A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(9), 1966-2005. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.03.013>
- Ipeh, M., & Hanim, M. (2020). Effects of KOH concentration and activation temperature on the textural characteristics of activated carbon produced from bamboo. *Materials Today: Proceedings*, 31, 211-216. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.292>
- Kibona, J. J., Shim, J., Byun, C. H., & Kim, C. K. (2020). Preparation and characterization of activated carbon from bamboo by chemical activation with KOH. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, 48(4), 487-498. <https://doi.org/10.5658/WOOD.2020.48.4.487>
- Liu, Q. S., Zheng, T., Wang, P., & Guo, L. (2010). Preparation and characterization of activated carbon from bamboo by microwave-induced phosphoric acid activation. *Industrial Crops and Products*, 31(2), 233-238. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2009.10.011>
- Ngernven, Y., & Kamwilaisak, K. (2013). Activated carbon from Thailand's biomass: A review literature. *KKU Engineering Journal*, 40(2), 267-283. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/easr/article/view/19107>. (In Thai)

- Phothitontimongkol, T. (2017). Activated carbon from agricultural residues by chemical activation for the application of pollutant removal in water. *Journal of Research Unit on Science, Technology and Environment for Learning*, 8(1), 196-214. (In Thai)
- Ponken, T., Phumuen, P., Phosopa, N., Tagsin, P., Ponhan, W., Phakkhawan, A., & Klangtakai, P. (2023). Activated carbon synthesized from bamboo shoots for supercapacitor application. *Creative Science*, 15(1), 247051. (In Thai)
- Qin, C., Chen, Y., & Gao, J. (2014). Manufacture and characterization of activated carbon from marigold straw (*Tagetes erecta* L.) by H_3PO_4 chemical activation. *Materials Letters*, 135, 123-126. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.06.077>
- Rujira, J. (2013). Preparation of activated carbon from bamboo by chemical activation. *Journal of Science and Technology, Ubon Ratchathani University*, 15(3), 25-31. (In Thai)
- Sangkaew, S., Porka, T., & Puangsin, B. (2011). Physical properties of activated carbon produced from bamboo. *KKU Research Journal*, 16(6), 665-673. (In Thai)
- Spencer, W., Ibane, D., Singh, P., & Nikoloski, A. N. (2024a). Effect of surface area, particle size, and acid washing on the quality of activated carbon derived from lower rank coal by KOH activation. *Sustainability*, 16(14), 5876. <https://doi.org/10.3390/su16145876>
- Spencer, W., Senanayake, G., Altarawneh, M., Ibane, D., & Nikoloski, A. N. (2024b). Review of the effects of coal properties and activation parameters on activated carbon production and quality. *Minerals Engineering*, 212, 108712. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2024.108712>
- Thai Industrial Standards Institute. (2004). *Activated carbon* (TIS 900-2547). Thai Industrial Standards Institute, Ministry of Industry, Thailand. (In Thai)
- Wang, L., Guo, Y., Wang, Y., Zhang, H., Liu, Z., & Zhang, J. (2017). The effect of KOH activation on the pore structure and electrochemical performance of bamboo-based activated carbons for supercapacitors. *Journal of the Electrochemical Society*, 164(6), A1089-A1096. <https://doi.org/10.1149/2.0521706jes>
- Yang, H. M., Zhang, D. H., Chen, Y., Ran, M. J., & Gu, J. C. (2017). Study on the application of KOH to produce activated carbon to realize the utilization of distiller's grains. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 69(1), 012051. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/69/1/012051>
- Youme, P. (2015). Preparation of activated carbons with high surface area from wood charcoal powder by dry chemical activation. *KKU Science Journal*, 43(4), 788-798. (In Thai)
- Zhang, Y., Ma, C., Liu, F., Xu, Y., & Chen, W. (2022). A review on the preparation of bamboo-based activated carbon. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 7(3), 163-176. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2022.02.005>
- Zhao, B., Zhang, J., Wang, C., Li, F., & Li, Y. (2021). A review of preparation of biomass-based activated carbon and their application in antibiotic-contaminated water treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5), 106095. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106095>

Received: July 17, 2025; Revised: October 27, 2025; Accepted: March 17, 2026

การพัฒนาระบบติดตามและประเมินการเจริญเติบโตของต้นหม่อนด้วยเทคโนโลยีรีโมทเซนซิง Development of a monitoring and evaluation system for the growth of mulberry trees with remote sensing technology

อัษฎา วรรณกายนต์¹ นิคม ลนขุนทด¹ อภิชัย ไพรสสินธุ์¹ มานะชัย จันทอก¹ และวีระนันต์ วิบูลย์อรรถ^{1*}
Asada Wannakayont¹, Nikom Lonkuntosh¹, Apichai Praisin¹, Manachai Chantok¹
and Weeranun Viboonaut^{1*}

¹คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์ จังหวัดสุรินทร์

¹Faculty of Industrial Technology Surindra Rajabhat University, Surin Province

*Corresponding Author E-mail Address : weeranunviboonaut@srur.ac.th

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยและพัฒนา มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบ และทดสอบประสิทธิภาพระบบติดตาม และประเมินการเจริญเติบโตของต้นหม่อนด้วยเทคโนโลยีรีโมทเซนซิง เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ ระบบติดตามและประเมินการเจริญเติบโตของต้นหม่อนด้วยเทคโนโลยีรีโมทเซนซิง และตารางการทดสอบประสิทธิภาพระบบ ผู้วิจัยได้ดำเนินการพัฒนาระบบโดยใช้แนวคิดวงจรการพัฒนาระบบ จากนั้นนำระบบที่พัฒนาขึ้นไปทดสอบประสิทธิภาพ ทั้ง 3 ด้าน ได้แก่ ด้านความสามารถของระบบ ด้านการใช้งาน และด้านความถูกต้องและการทำงานของระบบ จากนั้นนำผลที่ได้มาทำการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติพื้นฐาน ได้แก่ ค่าร้อยละ และค่าเฉลี่ย ผลการวิจัยพบว่า ผลการพัฒนาระบบได้ระบบซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในการติดตามและประเมินการเจริญเติบโตของต้นหม่อนที่สามารถนำมาใช้ในการบริหารจัดการแปลงหม่อนของเกษตรกร โดยใช้การวิเคราะห์ภาพถ่ายจากการสำรวจระยะไกล ช่วยประมวลผลข้อมูลและให้คำแนะนำเกี่ยวกับการพยากรณ์ผลผลิตวางแผนการให้น้ำ และสร้างแผนที่แปลงหม่อน ทำให้การจัดการแปลงเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ เกษตรกรสามารถลดการลงพื้นที่สำรวจแปลงโดยตรง ช่วยประหยัดทั้งเวลาและทรัพยากร และผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบพบว่า ระบบแสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพเป็นที่น่าพอใจ โดยระบบมีประสิทธิภาพในทุกด้านที่ประเมิน ทั้งด้านความสามารถของระบบ (93.33%) ด้านการใช้งาน (90%) และด้านความถูกต้องในการทำงาน (90%) โดยมีค่าเฉลี่ยภาพรวมถึง 90.11%

คำสำคัญ: ระบบติดตามและประเมิน ต้นหม่อน การเจริญเติบโตต้นหม่อน รีโมทเซนซิง การสำรวจระยะไกล

Abstract

This research represents a research and development study designed to achieve two primary objectives: developing a system and testing the performance of a mulberry tree growth monitoring and assessment system utilizing remote sensing technology. The research instruments employed included 1) a mulberry tree growth monitoring and assessment system based on remote sensing technology and 2) a system performance testing framework. The researchers implemented the system development process using the systems development life cycle approach, subsequently conducting comprehensive performance testing across three critical dimensions: system capability, usability, and system accuracy and functionality. The resulting data underwent statistical analysis using fundamental statistical measures,

specifically percentage values and means. The research findings revealed two significant outcomes. First, regarding system development results, the study successfully produced a technology-enabled system for monitoring and assessing mulberry tree growth that demonstrates practical applicability for farmer mulberry plantation management. The system employs remote sensing image analysis to process data and provide recommendations concerning yield forecasting, irrigation planning, and mulberry plantation mapping, thereby enabling efficient plantation management practices. Farmers can substantially reduce direct field survey requirements, resulting in considerable time and resource savings. Second, concerning system performance testing results, the system demonstrated satisfactory performance outcomes across all evaluated dimensions. The system achieved high efficiency ratings in system capability (93.33%), usability (90%), and operational accuracy (90%), with an overall average performance rating of 90.11%.

Keywords: Monitoring and assessment system, Mulberry tree, Mulberry growth, Remote sensing, Remote survey

บทนำ

จังหวัดสุรินทร์ตั้งอยู่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย มีลักษณะเด่นทางด้านความหลากหลายทางชาติพันธุ์ ประกอบด้วย 3 กลุ่มหลัก ได้แก่ ชาวไทยหรือกวย ชาวเขมร และชาวลาว ซึ่งอยู่ร่วมกันอย่างกลมกลืน โดยประชากรส่วนใหญ่ถึงร้อยละ 93 อาศัยอยู่ในเขตชนบท สภาพภูมิประเทศประกอบด้วยที่ราบ ที่ราบสูง และป่าโปร่ง มีแหล่งน้ำธรรมชาติหลายสายไหลผ่าน ส่งผลให้เป็นพื้นที่ที่เหมาะสมสำหรับการประมงและการเพาะปลูกข้าวหอมมะลิ ด้านการประกอบอาชีพ ประชากรส่วนใหญ่ประกอบอาชีพภาคเกษตรกรรมเป็นหลัก โดยมีกิจกรรมทางการเกษตรที่สำคัญ ได้แก่ การทำนา การทำสวนยางพารา การเพาะปลูกพืชไร่ และการเลี้ยงไหม (Osatjesada, 2014) จังหวัดสุรินทร์ได้กำหนดวิสัยทัศน์การพัฒนาไว้ว่า "เกษตรอินทรีย์เป็นเลิศเปิดประตูสู่สากล" โดยมีการวางยุทธศาสตร์การพัฒนา 5 ด้าน ประกอบด้วย การพัฒนาเกษตรอินทรีย์ การเพิ่มศักยภาพการแข่งขันด้านเศรษฐกิจ การบริหารจัดการทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน การพัฒนาสังคม และการพัฒนาความมั่นคงชายแดน ในส่วนของยุทธศาสตร์การเพิ่มศักยภาพ การแข่งขันด้านเศรษฐกิจ ได้มีการกำหนดกลยุทธ์สำคัญในการพัฒนาหม่อนไหม คือ "การส่งเสริมการผลิตสินค้าผ้าไหม สินค้าชุมชน และสินค้าท้องถิ่นให้มีคุณภาพและมาตรฐานตรงกับความต้องการของตลาด ด้วยกระบวนการเครือข่ายองค์ความรู้" (Cheuangam, 2011) ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงความมุ่งมั่นในการพัฒนาอุตสาหกรรมหม่อนไหมให้เป็นจุดแข็งทางเศรษฐกิจของจังหวัด

การปลูกหม่อนและเลี้ยงไหมเป็นภูมิปัญญาดั้งเดิมที่มีความสำคัญต่อสังคมและวัฒนธรรมไทยมาอย่างยาวนาน โดยมีการสั่งสมและถ่ายทอดองค์ความรู้จากรุ่นสู่รุ่น จนพัฒนาเป็นเอกลักษณ์ทางวัฒนธรรมที่โดดเด่นผ่านผลิตภัณฑ์ "ผ้าไหมไทย" ซึ่งได้รับการยอมรับและมีชื่อเสียงในระดับนานาชาติ (Department of sericulture, 2022) กระบวนการผลิตไหมมีความซับซ้อนและต้องอาศัยความประณีต เนื่องจากการผสมผสานระหว่างการเพาะปลูกพืชและการเลี้ยงสัตว์ โดยเกษตรกรต้องปลูกหม่อนเพื่อผลิตใบสำหรับเป็นอาหารของตัวไหม จากนั้นจึงนำรังไหมที่ได้ไปแปรรูปเป็นเส้นไหมสำหรับทอผ้า ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่สร้างมูลค่าทางเศรษฐกิจ (Department of sericulture, 2018) ในบริบทของจังหวัดสุรินทร์ การปลูกหม่อนเลี้ยงไหมถือเป็นภูมิปัญญาท้องถิ่นที่สืบทอดมาหลายชั่วอายุคน โดยมีการผสมผสานเข้ากับวิถีชีวิตเกษตรกรรมดั้งเดิม กล่าวคือนอกเหนือจากการทำนาซึ่งเป็นอาชีพหลัก สตรีในครัวเรือนจะใช้เวลาว่างในการปลูกหม่อนเลี้ยงไหมเพื่อสร้างรายได้เสริมให้แก่ครอบครัว (Agricultural technology, 2022) ด้วยความสำคัญของไหมหม่อนที่เป็นปัจจัยหลักในการผลิตไหม การพัฒนาคุณภาพและผลผลิตของไหมจึงมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการจัดการสวนหม่อนอย่างมีประสิทธิภาพ

การพัฒนาเทคโนโลยีในปัจจุบันได้มีบทบาทสำคัญในภาคการเกษตร โดยเฉพาะเทคโนโลยีภูมิสารสนเทศและการสำรวจระยะไกล (Remote sensing) ที่ช่วยในการเก็บรวบรวม วิเคราะห์ และแสดงผลข้อมูลเชิงพื้นที่ ส่งผลให้การตัดสินใจในการวางแผนจัดการทรัพยากรเกษตร มีความแม่นยำและสอดคล้องกับสภาพพื้นที่มากขึ้น (Inkoet et al., 2018) จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องในประเทศพบว่า มีการใช้เทคโนโลยีการสำรวจระยะไกล โดยใช้ข้อมูลจากดาวเทียมในการติดตามการเปลี่ยนแปลงพื้นที่และการประเมินความเสี่ยงภัยแล้งในประเทศไทย มีการศึกษาที่น่าสนใจหลายงานวิจัย Pakas et al. (2023)

ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ในอุทยานแห่งชาติศรีลานนา จังหวัดเชียงใหม่ พบว่าพื้นที่ป่าลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยในปี พ.ศ. 2564-2565 มีการลดลงน้อยที่สุดที่ 153 ไร่ ในขณะที่ Thirakultomorn et al. (2021) ได้สำรวจพื้นที่ปลูกมันสำปะหลัง ในจังหวัดนครราชสีมา พบการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยระหว่างปี 2558 และ 2563 โดยมีพื้นที่เพิ่มขึ้นจาก 155,944.69 ไร่ เป็น 156,438.00 ไร่ ในด้านการประเมินพื้นที่เสี่ยงภัยแล้ง Peainlert et al. (2018) ได้ศึกษาพื้นที่ลุ่มน้ำเชิงญ จังหวัดขอนแก่น พบว่า พื้นที่ส่วนใหญ่ประมาณร้อยละ 39.90 อยู่ในระดับเสี่ยงภัยมากที่สุด สอดคล้องกับการศึกษาของ Nojjaiyasin et al. (2023) ที่พบว่า จังหวัดจันทบุรีประสบภาวะแล้งรุนแรงในฤดูร้อน โดยเฉพาะในปี 2558 ที่ภาวะแล้งครอบคลุมเกือบทั้งจังหวัด งานวิจัยทั้งหมดนี้ใช้เทคนิคการจำแนกแบบกำกับดูแลและข้อมูลจากดาวเทียม Landsat เป็นหลัก โดยมีความแม่นยำในการวิเคราะห์สูง ตั้งแต่ร้อยละ 80 ขึ้นไป แสดงให้เห็นว่าการใช้เทคโนโลยีการสำรวจระยะไกล สามารถใช้เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการติดตามการเปลี่ยนแปลงพื้นที่และประเมินความเสี่ยงภัยแล้ง สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวางแผนจัดการพื้นที่และทรัพยากรน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ และจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องในต่างประเทศพบว่า Blaschke (2010) ได้นำเสนอแนวคิดการวิเคราะห์ภาพเชิงวัตถุที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการจำแนกวัตถุจากภาพถ่ายทางอากาศและภาพถ่ายจากดาวเทียม โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีความซับซ้อนของพืชพรรณ การใช้เทคนิคนี้ช่วยลดข้อจำกัดของการวิเคราะห์แบบรายจุดภาพ (Pixel-based) และแบบดั้งเดิมในด้านการติดตามการเจริญเติบโตของพืช Nielsen et al. (2022) ได้พัฒนาระบบวิเคราะห์การเติบโตของพืชโดยใช้ภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle; UAV) สร้างแบบจำลอง 3 มิติของทรงพุ่มพบว่า สามารถประเมินมวลชีวภาพและพื้นที่ปกคลุมได้แม่นยำ สอดคล้องกับงานของ Neupane et al. (2019) ที่พัฒนาระบบบริการประมวลผลภาพ UAV แบบเปิดเผยแพร่สำหรับติดตามสุขภาพพืช นอกจากนี้ Zhang et al. (2019) ได้ทำการวิเคราะห์บรรณมิติของวารสาร Remote sensing พบว่า งานวิจัยด้านการสำรวจระยะไกลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีใหม่ ๆ เช่น Machine learning และ Deep learning ในการวิเคราะห์ข้อมูล ในการพัฒนาเหล่านี้แสดงให้เห็นว่าเทคโนโลยีการสำรวจระยะไกลได้ก้าวหน้าไปมากจากเดิมที่เน้นการสำรวจในภาพรวมมาสู่การวิเคราะห์เชิงลึกระดับพืชรายชนิด โดยใช้เทคโนโลยีและวิธีการวิเคราะห์ที่ซับซ้อนมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ยังมีประเด็นท้าทายสำคัญคือ อุปกรณ์เหล่านี้มีราคาสูง ซึ่งนำไปสู่ความท้าทายในการพัฒนา เครื่องมือที่สามารถวิเคราะห์ภาพ RGB ได้ เพื่อประหยัดต้นทุน ให้เทคโนโลยีขั้นสูงเหล่านี้เข้าถึงได้ง่ายขึ้นและนำไปประยุกต์ใช้ได้ในวงกว้าง โดยเฉพาะในพื้นที่เกษตรกรรมดั้งเดิมอย่างจังหวัดสุรินทร์ รวมถึงการบูรณาการข้อมูลจากหลายแหล่งเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการติดตามและประเมินพืชทางด้านการเกษตร

จากความก้าวหน้าอย่างรวดเร็วของเทคโนโลยีรีโมทเซนซิง (Remote sensing) และความสำคัญของการปลูกหม่อนเลี้ยงไหมต่อวิถีชีวิตและเศรษฐกิจของเกษตรกรไทย โดยเฉพาะในจังหวัดสุรินทร์ที่การปลูกหม่อนเลี้ยงไหมเป็นภูมิปัญญาที่สืบทอดกันมา ผู้วิจัยจึงเล็งเห็นถึงโอกาสสำคัญในการนำเทคโนโลยีนี้มาประยุกต์ใช้เพื่อพัฒนาระบบติดตามและประเมินการเจริญเติบโตของต้นหม่อนโดยเฉพาะ งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการประมวลผลภาพ RGB จากโดรนหรือภาพถ่ายดาวเทียมคำนวณค่าดัชนีความแตกต่างของพืชพรรณแบบนอร์มัลไลซ์ (Normalized Difference Vegetation Index ; NDVI) แบบเรียลไทม์ เพื่อติดตามการเจริญเติบโตของต้นหม่อนอย่างใกล้ชิด โดยมีเป้าหมายหลักคือการเพิ่มผลผลิตและคุณภาพของไหมหม่อน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการเลี้ยงไหมและการผลิตผ้าไหมที่มีคุณภาพ การพัฒนาระบบดังกล่าวจะอาศัยการบูรณาการข้อมูลจากหลายแหล่ง ไม่ว่าจะเป็นข้อมูลภาพถ่ายระยะไกลจากโดรนหรือดาวเทียมควบคู่ไปกับข้อมูลการเจริญเติบโตจริงของพืช เพื่อสร้างระบบติดตามที่มีประสิทธิภาพและแม่นยำ ระบบนี้จะช่วยให้เกษตรกรสามารถ วางแผนการผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเหมาะสมกับสภาพพื้นที่ของตนเอง ซึ่งจะนำไปสู่การเพิ่มรายได้และเสริมสร้างความมั่นคงทางเศรษฐกิจให้กับครัวเรือนเกษตรกรผู้ปลูกหม่อนเลี้ยงไหมในจังหวัดสุรินทร์ต่อไป

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

การพัฒนาระบบติดตามและประเมินการเจริญเติบโตของต้นหม่อนด้วยเทคโนโลยีรีโมทเซนซิง มีวัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย ดังนี้

1. ระบบติดตามและประเมินการเจริญเติบโตของต้นหม่อน ด้วยเทคโนโลยีรีโมทเซนซิง
2. ตารางทดสอบประสิทธิภาพระบบติดตามและประเมินการเจริญเติบโตของต้นหม่อนด้วยเทคโนโลยีรีโมทเซนซิง

การสร้างเครื่องมือ

1. การพัฒนาระบบติดตามและประเมินการเจริญเติบโตของต้นหม่อน ด้วยเทคโนโลยีรีโมทเซนซิง

ผู้วิจัยได้นำแนวคิดวงจรการพัฒนากระบวน (System Development Life Cycle; SDLC) มาใช้ในการพัฒนาระบบ ดังนี้ (Eamsirivodh, 2017)

1.1 การวางแผนโครงการ (Project planning)

เริ่มจากสิ่งที่ศึกษาข้อมูลและวิเคราะห์ปัญหาที่เกษตรกรผู้ปลูกหม่อนเลี้ยงไหมกำลังประสบอยู่ โดยพบว่า ใบหม่อนซึ่งเป็นอาหารหลักของตัวหนอนไหม พบปัญหาการขาดแคลนใบหม่อนหรือมีใบหม่อนไม่เพียงพอทำให้ส่งผลกระทบต่อผลผลิตไหมทั้งระบบ ตั้งแต่การเจริญเติบโตของตัวหนอนไหม คุณภาพรังไหม จนถึงคุณภาพเส้นไหมและรายได้ของเกษตรกร การศึกษาความเป็นไปได้ของโครงการวิจัย การพัฒนาระบบติดตามและประเมิน การเจริญเติบโตของต้นหม่อน ด้วยเทคโนโลยีรีโมทเซนซิง แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ เมื่อพิจารณาทางด้านเทคนิคพบว่า เทคโนโลยีรีโมทเซนซิงหรือการสำรวจข้อมูลระยะไกล เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการติดตามการเจริญเติบโตของพืช สามารถเก็บข้อมูลได้อย่างต่อเนื่อง และครอบคลุมพื้นที่ โดยใช้เวลาและแรงงานน้อยกว่าการสำรวจแบบดั้งเดิม ระบบนี้จะช่วยเกษตรกรในการติดตามและประเมินการเจริญเติบโตของต้นหม่อน รวมถึงให้คำแนะนำในการดูแล และคำแนะนำในการวางแผนการปลูกต้นหม่อน ทำให้เกษตรกรสามารถวางแผนการปลูก การดูแลรักษา และการเก็บเกี่ยวผลผลิต ซึ่งจะช่วยให้การจัดการทรัพยากรเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ใช้ระยะเวลาในการพัฒนาระบบอยู่ในกรอบเวลาที่กำหนด สามารถดำเนินการวิจัยให้แล้วเสร็จและเริ่มใช้งานได้ทันตามแผนการวิจัย ไม่กระทบต่อการอบการผลผลิตของเกษตรกร

1.2 การวิเคราะห์ (Analysis)

เริ่มจากการศึกษาผู้ใช้งานระบบซึ่งประกอบด้วยเกษตรกรผู้ปลูกหม่อน มีการเก็บรวบรวมความต้องการดำเนินการผ่านการพูดคุย การสังเกตการณ์กระบวนการทำงานในปัจจุบัน และการศึกษาเอกสารที่เกี่ยวข้องทั้งด้านการเกษตรและเทคโนโลยีการเกษตร เพื่อให้เข้าใจถึงวิธีการทำงาน ปัญหา และความต้องการ จึงทำให้ทราบกระบวนการทำงาน ปัญหา และแนวทางในการแก้ไข จากการวิเคราะห์วิธีการทำงาน ปัญหา และความต้องการของเกษตรกรผู้ปลูกหม่อนเลี้ยงไหม พบว่าในปัจจุบันเกษตรกรติดตามการเจริญเติบโตของต้นหม่อนด้วยการเดินสำรวจแปลงด้วยตนเอง โดยสังเกตลักษณะของใบ ความสูงต้น การแตกยอดใหม่ และประเมินผลผลิตโดยการคาดคะเนจากประสบการณ์ ซึ่งพบปัญหาหลายอย่าง เช่น การสำรวจทำได้ไม่ทั่วถึง ซึ่งแปลงมีขนาดใหญ่ หรือมีหลายแปลง ใช้เวลาในการสำรวจนาน ข้อมูลที่ได้ไม่ถูกต้องทำให้การคาดการณ์ผลผลิตมีความคลาดเคลื่อน และไม่สามารถวางแผนการจัดการแปลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยระบบที่จะพัฒนาขึ้นประกอบด้วยคุณสมบัติดังนี้

1.2.1 คำนวณค่า Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) แบบเรียลไทม์จากภาพ Red, Green และ Blue (RGB) ระบบต้องสามารถรับภาพ RGB จากผู้ใช้แล้วประมวลผลเพื่อคำนวณค่า NDVI ได้โดยอัตโนมัติในเวลาอันสั้น เพื่ออำนวยความสะดวกในการติดตามสุขภาพพืชอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในสภาพแวดล้อมที่ไม่สามารถใช้เครื่องมือวัดดินสเปกตรัมแบบเชิงพาณิชย์ได้

1.2.2 จำแนกระดับสุขภาพพืช 5 ระดับ พร้อมคำแนะนำเชิงปฏิบัติ ระบบต้องสามารถวิเคราะห์ค่าความเขียวจาก NDVI แล้วจัดประเภทสุขภาพพืชออกเป็น 5 ระดับ ได้แก่ เยี่ยม (Excellent, NDVI > 0.7) ดี (Good, NDVI = 0.5-0.7) ปานกลาง (Moderate, NDVI = 0.3-0.5) แย่ (Poor, NDVI = 0.1-0.3) และแย่มาก (Very poor, NDVI < 0.1) พร้อมให้คำแนะนำที่เหมาะสมกับแต่ละระดับตามหลักการจัดการแปลงหม่อนที่เป็นมาตรฐาน

1.2.3 บันทึกผลการวิเคราะห์และภาพต้นฉบับในฐานข้อมูล ระบบต้องสามารถจัดเก็บข้อมูลผลการวิเคราะห์ไว้ในฐานข้อมูล SQLite โดยมีการเชื่อมโยงกับภาพต้นฉบับ เพื่อให้สามารถนำมาเปรียบเทียบแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของพืชในแต่ละช่วงเวลาได้อย่างเป็นระบบ และรองรับการวิเคราะห์ข้อมูลเวลาแบบอนุกรม (Time series analysis)

1.2.4 การสร้างรายงานและการแสดงผลข้อมูล ระบบต้องสามารถสร้าง NDVI heatmap เพื่อแสดงการกระจายตัวของความเขียวในภาพ และสร้างกราฟแนวโน้มของค่า NDVI เมื่อเวลาผ่านไป เพื่อช่วยให้ผู้ใช้เข้าใจการเปลี่ยนแปลงของสุขภาพพืชได้อย่างชัดเจน

1.3 การออกแบบระบบ (System design)

เพื่อให้การพัฒนาเครื่องมือสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และรองรับการใช้งานจริงทั้งในเชิงเทคนิคและประสบการณ์ผู้ใช้ ระบบจึงได้ถูกออกแบบโดยใช้หลักการแยกส่วนการทำงาน (Modular design) และการออกแบบที่เน้นผู้ใช้เป็นศูนย์กลาง (User-centered design) โดยมีองค์ประกอบสำคัญดังนี้

1.3.1 สถาปัตยกรรมระบบ (System architecture) ระบบประกอบด้วย 4 องค์ประกอบหลัก ได้แก่ ส่วนประมวลผล (Backend), ส่วนแสดงผล (Frontend), ระบบฐานข้อมูล (Database) และระบบจัดการไฟล์ (File management system) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1) ส่วนประมวลผล (Backend) ส่วนประมวลผลได้รับการพัฒนาด้วยภาษา Python บนเฟรมเวิร์ค Flask ซึ่งเป็นเฟรมเวิร์คที่มีความเบาและยืดหยุ่นในการพัฒนา เหมาะสำหรับการสร้างเว็บแอปพลิเคชันที่ต้องการประสิทธิภาพในการประมวลผลภาพ ระบบทำหน้าที่เป็นเซิร์ฟเวอร์หลักในการรับไฟล์ภาพจากผู้ใช้งาน ประมวลผลภาพด้วยไลบรารี OpenCV และ Pillow เพื่อคำนวณค่า NDVI และส่งผลลัพธ์กลับไปยังส่วนแสดงผล ระบบได้รับการออกแบบตามหลักการ RESTful API เพื่อให้มีความยืดหยุ่นในการเชื่อมต่อกับระบบอื่น และสะดวกในการขยายฟังก์ชันการทำงานในอนาคต การใช้ RESTful API ช่วยให้ระบบสามารถรองรับการพัฒนาแอปพลิเคชันมือถือหรือการผสมผสานกับระบบภายนอกได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังมีการจัดการข้อผิดพลาด (Error handling) และการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลนำเข้า (Input validation) เพื่อรักษาความเสถียรของระบบ

2) ส่วนแสดงผล (Frontend interface) ส่วนแสดงผลได้รับการพัฒนาโดยใช้เทคโนโลยีเว็บมาตรฐาน ประกอบด้วย HTML5 สำหรับโครงสร้างหน้าเว็บ CSS ผ่านเฟรมเวิร์ค Tailwind CSS เพื่อการจัดรูปแบบที่ทันสมัยและตอบสนองต่ออุปกรณ์ และ Javascript รวมถึงไลบรารี Chart.js สำหรับการแสดงกราฟและการประมวลผลข้อมูลฝั่งผู้ใช้ อินเทอร์เฟซได้รับการออกแบบให้มีความใช้งานง่าย (User-friendly) และตอบสนองต่ออุปกรณ์ที่หลากหลาย (Responsive design) เพื่อรองรับการใช้งานผ่านมือถือ แท็บเล็ต และคอมพิวเตอร์

3) ระบบฐานข้อมูล (Database management) ระบบใช้ SQLite เป็นระบบจัดการฐานข้อมูลหลัก เนื่องจากมีความเหมาะสมสำหรับแอปพลิเคชันขนาดกลางที่ไม่ต้องการความซับซ้อนในการติดตั้งและบำรุงรักษา ฐานข้อมูลจัดเก็บผลการวิเคราะห์ NDVI อย่างเป็นระบบ โดยบันทึกข้อมูลที่สำคัญหลายประเภท ข้อมูลที่จัดเก็บประกอบด้วยค่าทางสถิติของ NDVI ได้แก่ ค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เวลาที่ทำการวิเคราะห์ ชื่อไฟล์ภาพต้นฉบับ สถานะสุขภาพพืชที่ประเมินได้ คำแนะนำเชิงเกษตรที่เหมาะสม และข้อมูล Metadata ของภาพ เช่น ขนาดภาพ ความละเอียด และพารามิเตอร์การถ่ายภาพ โครงสร้างฐานข้อมูลได้รับการออกแบบให้รองรับการค้นหาและการสร้างรายงานอย่างมีประสิทธิภาพ

4) ระบบจัดการไฟล์ (File management system) ระบบจัดการไฟล์รับผิดชอบการจัดเก็บ จัดการ และรักษาความปลอดภัยของไฟล์ภาพที่ผู้ใช้อัปโหลดเข้าระบบ ระบบมีความสามารถในการตรวจสอบประเภทไฟล์และขนาดไฟล์เพื่อป้องกันการอัปโหลดไฟล์ที่ไม่เหมาะสม การสร้าง Thumbnail เพื่อแสดงตัวอย่างภาพอย่างรวดเร็ว และการบีบอัดภาพเพื่อประหยัดพื้นที่จัดเก็บโดยไม่สูญเสียคุณภาพที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์

1.3.2 โมเดลข้อมูล (Data model)

ในการพัฒนาระบบติดตามและประเมินการเจริญเติบโตของต้นหม่อนด้วยการวิเคราะห์ค่า NDVI ระบบได้ออกแบบโครงสร้างข้อมูลเพื่อรองรับการจัดเก็บทั้งข้อมูลเชิงตัวเลขและข้อมูลภาพ โดยมีองค์ประกอบหลัก 2 ส่วน ได้แก่ ฐานข้อมูลเชิงสัมพันธ์ (Relational database) และโครงสร้างการจัดการไฟล์ (File management structure) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1) ฐานข้อมูล SQLite ระบบเลือกใช้ฐานข้อมูล SQLite ซึ่งเป็นระบบจัดการฐานข้อมูลแบบเบา (Lightweight) ที่สามารถฝังตัวอยู่ในแอปพลิเคชันและไม่ต้องใช้เซิร์ฟเวอร์ฐานข้อมูลแยกต่างหาก โดยมีตารางหลักคือ analyses ซึ่งใช้ในการจัดเก็บผลการวิเคราะห์ค่าดัชนีความแตกต่างเชิงปกติของพืช (NDVI) แต่ละรายการที่ผู้ใช้อัปโหลดเข้ามา โครงสร้างของตาราง analyses ประกอบด้วยฟิลด์สำคัญ ดัง Table 1

2) โครงสร้างการจัดการไฟล์ นอกเหนือจากการจัดเก็บข้อมูลในรูปแบบตาราง ระบบยังมีการจัดการไฟล์ภาพต้นฉบับที่ผู้ใช้อัปโหลดเข้ามา โดยใช้โฟลเดอร์ uploads สำหรับจัดเก็บไฟล์ทั้งหมดอย่างเป็นระบบ ภาพแต่ละภาพจะถูกเก็บไว้พร้อมกับการตั้งชื่อและพารามิเตอร์ที่สามารถเชื่อมโยงกับข้อมูลในฐานข้อมูลผ่านฟิลด์ filename และ image_path เพื่อให้สามารถเข้าถึงไฟล์ย้อนหลังได้โดยง่าย

Table 1 Data storage for Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) analysis results

Field Name	Description
mean_ndvi	Average NDVI value obtained from image processing
max_ndvi	Maximum NDVI value within the image
min_ndvi	Minimum NDVI value within the image
health_status	Plant health level, classified into 5 levels (e.g., very poor – very good)
recommendations	Recommendations for plant care based on the analyzed health level
timestamp	Date and time of analysis
filename	Original image filename uploaded to the system
image_path	Path of the original image file on the system

1.3.3 ขั้นตอนการคำนวณ NDVI

ระบบใช้สูตรคำนวณค่า NDVI ซึ่งเป็นดัชนีที่นิยมใช้ในการประเมินความสมบูรณ์ของพืชพรรณและการสังเคราะห์แสง โดยทั่วไป NDVI จะคำนวณจากภาพถ่ายดาวเทียมหรือกล้องที่สามารถจับภาพในย่านแสงใกล้อินฟราเรด (Near Infrared; NIR) และแสงสีแดง (Red) อย่างไรก็ตาม ในการวิจัยนี้ระบบได้นำเทคนิค NDVI แบบ RGB-based มาประยุกต์ใช้ซึ่งเหมาะสำหรับกล้องทั่วไป (เช่น กล้องโทรศัพท์มือถือหรือโดรนทั่วไป) โดยอาศัยค่าความเข้มของพิกเซลในช่องสีเขียว (Green) และสีแดง (Red) แทนการคำนวณดำเนินการตาม Eq.1 ต่อไปนี้

$$NDVI = \frac{G - R}{G + R + \epsilon} \quad (\text{Eq.1})$$

โดยที่

G คือ ค่าเฉลี่ยของพิกเซลในช่องสีเขียวของภาพ

R คือ ค่าเฉลี่ยของพิกเซลในช่องสีแดงของภาพ

ϵ คือ ค่าคงที่เล็กน้อยที่ใช้เพื่อหลีกเลี่ยงการหารด้วยศูนย์

ค่าของ NDVI จะอยู่ในช่วงตั้งแต่ -1 ถึง 1 โดยมีความหมายดังนี้

- ค่าที่ใกล้ 1 แสดงถึงพื้นที่ที่มีพืชพรรณหนาแน่น เขียวขุ่ม และมีสุขภาพดี
- ค่าที่ใกล้ 0 อาจหมายถึงพื้นที่ที่มีพืชปกคลุมน้อย หรือมีพืชที่อยู่ในภาวะเครียด
- ค่าติดลบ โดยทั่วไปจะหมายถึงพื้นที่ที่ไม่มีพืชพรรณ เช่น น้ำ ถนน หรืออาคาร

ขั้นตอนนี้ถือเป็นหัวใจสำคัญของระบบ เนื่องจากเป็นตัวชี้วัดหลักในการวิเคราะห์สุขภาพพืชก่อนนำผลลัพธ์ไปใช้ในขั้นตอนจำแนกสถานะสุขภาพ (Health classification) และให้ข้อเสนอแนะในการดูแลพืชต่อไป

1.3.4 ขั้นตอนการทำงานของระบบ

ระบบที่พัฒนาขึ้นนี้เป็นกระบวนการแบบครบวงจร สำหรับการวิเคราะห์สุขภาพของพืชพรรณจากภาพถ่ายดาวเทียมหรือภาพถ่ายทางอากาศในรูปแบบ RGB โดยอาศัยหลักการเปรียบเทียบการสะท้อนแสงของพืชในช่วงความถี่ที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะช่วงของแสงสีเขียว (Green) และแสงสีแดง (Red) ซึ่งสัมพันธ์โดยตรงกับการสังเคราะห์แสงและระดับความเขียวของพืช

1) การได้มาซึ่งภาพ (Image acquisition) ระบบเปิดให้ผู้ใช้สามารถนำเข้าภาพ RGB ได้หลายช่องทาง ได้แก่ การอัปโหลดไฟล์จากเครื่อง การลากและวาง (Drag-and-drop) เมื่อผู้ใช้นำเข้าภาพ ระบบจะทำการจัดเก็บภาพดังกล่าวไว้บนโพลเดอร์ uploads พร้อมข้อมูลกำกับ เช่น ชื่อไฟล์และเวลาที่อัปโหลด เพื่อใช้ในการประมวลผลและอ้างอิงย้อนกลับ

2) การประมวลผลเบื้องต้น (Image preprocessing) ระบบจะทำการตรวจสอบคุณภาพของภาพ เช่น ความละเอียดและความชัดเจน จากนั้นดำเนินการปรับขนาดให้เหมาะสมกับการประมวลผล ลดสัญญาณรบกวน (Noise

reduction) ปรับความคมชัด (Enhancement) ภาพต้นฉบับที่ผ่านการตรวจสอบแล้วจะถูกจัดเก็บในฐานข้อมูลและระบบไฟล์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป

3) การคำนวณค่า NDVI (NDVI calculation) ระบบทำการคำนวณค่า NDVI ในลักษณะ Pixel-wise โดยใช้ค่าเฉลี่ยของช่องสีเขียวและสีแดงจากภาพ RGB ตามสมการ NDVI ที่ระบุในหัวข้อก่อนหน้า ผลลัพธ์ที่ได้จะประกอบด้วยค่าทางสถิติเชิงพื้นที่ เช่น ค่าเฉลี่ย (Mean) ค่าสูงสุด (Max) ค่าต่ำสุด (Min) แผนที่ความหนาแน่นของ NDVI (NDVI heatmap) เพื่อแสดงภาพรวมของสภาพพืชในพื้นที่

4) การจำแนกระดับสุขภาพ (Health classification) จากผลลัพธ์ของ NDVI ระบบจะทำการวิเคราะห์และจำแนกระดับสุขภาพของพืชออกเป็น 5 ระดับพร้อมกับการให้ข้อเสนอแนะในการดูแลพืชที่เหมาะสมกับแต่ละระดับสุขภาพโดยอัตโนมัติ ดัง Table 2

Table 2 Classification of plant health levels according to NDVI values

Plant Health Level	NDVI Range	Additional Description
Very Good Health	0.70 – 1.00	Plants have very good photosynthesis, high greenness, healthy plants
Good Health	0.50 – 0.69	Plants are healthy, photosynthesis at an appropriate level
Moderate	0.30 – 0.49	Plants have fair vigor, may show early signs of stress
Early Stress	0.10 – 0.29	Plants show signs of stress, decreasing greenness, further inspection recommended
Poor Health	-1.00 – 0.09	Plants lack greenness or no vegetation present, possibly bare land/built-up area

1.3.5 การจัดเก็บข้อมูล (Data storage)

ข้อมูลทั้งหมดที่ได้จากกระบวนการวิเคราะห์ภาพและคำนวณค่าดัชนีความแตกต่างเชิงปกติของพืช (NDVI) จะถูกจัดเก็บไว้อย่างเป็นระบบ โดยแบ่งการจัดเก็บออกเป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่

1) ฐานข้อมูลเชิงสัมพันธ์ (Relational database - SQLite) ใช้ฐานข้อมูล SQLite สำหรับจัดเก็บข้อมูลเชิงตัวเลขและข้อมูลประกอบการวิเคราะห์ ต่อไปนี้คือตัวอย่างตารางที่แสดงโครงสร้างข้อมูลในฐานข้อมูล SQLite สำหรับการจัดเก็บผลการวิเคราะห์ NDVI ฐานข้อมูล SQLite ประกอบด้วยฟิลด์หลัก 6 ฟิลด์ ดัง Table 3

Table 3 Database structure

No.	Field Name (Field)	Description	Data Type
1	analysis_id	Analysis reference number (Primary Key)	INTEGER AUTOINCREMENT)
2	timestamp	Date and time of analysis	TEXT (ISO 8601 Format)
3	image_filename	Original image filename	TEXT
4	average_ndvi	Calculated average NDVI value	REAL
5	health_classification	Plant health level, e.g., “Good Health”, “Moderate”, “Early Stress”	TEXT
6	recommendation	Recommendation, e.g., “Plants have very good photosynthesis, high greenness, healthy plants”	TEXT

ข้อมูลเหล่านี้จะถูกจัดเก็บไว้ในตารางชื่อ analyses ซึ่งมีโครงสร้างตารางที่ออกแบบมาอย่างเหมาะสม เพื่อสนับสนุนการเข้าถึงข้อมูลย้อนหลัง การสืบค้นตามช่วงเวลา หรือวิเคราะห์แนวโน้มการเจริญเติบโตของพืชในระยะยาว

2) ระบบจัดการไฟล์ (File management system)

ใช้สำหรับจัดเก็บข้อมูลประเภทไฟล์ภาพซึ่งรวมถึงภาพต้นฉบับ (Raw image) ที่ผู้ใช้ส่งเข้ามาวิเคราะห์ และภาพแสดงผล NDVI (NDVI visualization image) ที่แสดงผลลัพธ์หลังการวิเคราะห์ไฟล์ทั้งหมดจะถูกจัดเก็บโดยมีโครงสร้างโฟลเดอร์ที่ชัดเจน แยกตามวันที่หรือรหัสของผู้ใช้งาน เพื่อให้สะดวกต่อการจัดการและเรียกดูย้อนหลังในภายหลัง

1.3.6 การแสดงผลลัพธ์ (Result presentation)

ระบบมีการออกแบบให้มีอินเทอร์เฟซ (Interface) สำหรับแสดงผลการวิเคราะห์ในรูปแบบที่เข้าใจง่าย โดยเน้นความชัดเจนและการนำไปใช้ประโยชน์ได้จริง โดยผลลัพธ์ที่แสดงมีดังนี้

1) ค่าทางสถิติของ NDVI

ค่า NDVI เฉลี่ย (Average NDVI) แสดงค่าความเขียวโดยรวมของภาพ เพื่อตีความสุขภาพของพืชในพื้นที่ทั้งหมด ค่า NDVI สูงสุด (Max NDVI) แสดงจุดที่พืชมีสุขภาพดีที่สุดในภาพ ค่า NDVI ต่ำสุด (Min NDVI) แสดงจุดที่พืชมีความเสี่ยงหรือสุขภาพแย่ที่สุดในภาพ ค่าทั้งสามนี้จะช่วยให้ผู้ใช้สามารถประเมินระดับความสม่ำเสมอของพืชในพื้นที่เป้าหมายได้อย่างรวดเร็ว

2) แผนภาพความหนาแน่น NDVI (NDVI heatmap)

ระบบจะแสดงภาพ Heatmap ของ NDVI ซึ่งมีการใช้เฉดสีแทนค่าต่าง ๆ ของ NDVI สีเขียบบ่งบอกถึงพืชที่มีสุขภาพดี สีเหลือง/ส้มบ่งบอกถึงพืชที่เริ่มอ่อนแอ สีแดงบ่งบอกถึงพื้นที่ที่พืชอาจมีปัญหา Heatmap นี้จะช่วยให้ผู้ใช้สามารถระบุตำแหน่งของพืชที่มีปัญหาได้อย่างแม่นยำ

3) กราฟแสดงความเปลี่ยนแปลงของ NDVI ตามช่วงเวลา

ระบบรองรับการแสดงผลในรูปแบบกราฟเส้น (Line chart) เพื่อเปรียบเทียบค่าความเปลี่ยนแปลงของ NDVI ของแต่ละภาพในช่วงเวลาต่าง ๆ ช่วยให้ผู้ใช้เห็นแนวโน้ม (Trend) การเจริญเติบโต สามารถตรวจสอบผลกระทบของการให้น้ำ/ปุ๋ย หรือเหตุการณ์ภายนอก (เช่น ภัยแล้ง)

4) ข้อเสนอแนะด้านการดูแลพืช

ระบบจะแสดงคำแนะนำในรูปแบบข้อความธรรมดา (Plain text) ที่เข้าใจง่าย เช่น “พืชมีการสังเคราะห์แสงดีมาก ความเขียวสูง พืชสมบูรณ์”, “พืชเริ่มมีอาการเครียด ความเขียวลดลง ควรมีการตรวจสอบเพิ่มเติม” ดังข้อมูลใน Table 2 การจำแนกระดับสุขภาพของพืชตามค่า NDVI

1.3.7 การสร้างรายงาน (Report generation)

ระบบสามารถสร้างรายงานผลการวิเคราะห์ได้ในเวลาที่กำหนด เช่น รายงานประจำวันรายสัปดาห์หรือรายเดือน พร้อมสามารถส่งออกข้อมูลในรูปแบบ CSV หรือ PDF เพื่อนำไปใช้ในงานด้านวิจัยหรือการบริหารจัดการพื้นที่เพาะปลูก

1.4 การนำไปใช้ (Implementation)

การนำระบบติดตามและประเมินการเจริญเติบโตของต้นหม่อนด้วยเทคโนโลยีรีโมทเซนซิงไปใช้งานจริงในพื้นที่เกษตรกรรม เป็นขั้นตอนที่ต้องมีการเตรียมการที่ดีและการประสานงานระหว่างวิจัยและเกษตรกรที่ปลูกหม่อนเลี้ยงไหม โดยขั้นตอนการนำไปใช้ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ดังนี้

1.4.1 การเตรียมความพร้อมด้านอุปกรณ์และระบบ

การนำระบบไปใช้งานจริง จำเป็นต้องจัดเตรียมโทรศัพท์มือถือสำหรับควบคุมโดรนที่มีความเสถียรในการเชื่อมต่อ และมีแบตเตอรี่ที่เพียงพอสำหรับการใช้งานภาคสนาม นอกจากนี้ยังต้องมีโดรนที่ติดตั้งกล้องความละเอียดสูงที่สามารถจับภาพ RGB ที่มีคุณภาพเพียงพอสำหรับการคำนวณค่า NDVI พร้อมด้วยแบตเตอรี่สำรองและการ์ดหน่วยความจำที่มีความจุเพียงพอสำหรับการถ่ายภาพหลายรอบ อุปกรณ์เชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตแบบไร้สาย (Router wireless) สำหรับการส่งข้อมูลภาพเข้าสู่ระบบเพื่อนำไปวิเคราะห์ โดยเฉพาะในพื้นที่ ที่อาจมีสัญญาณโทรศัพท์มือถือไม่เสถียร

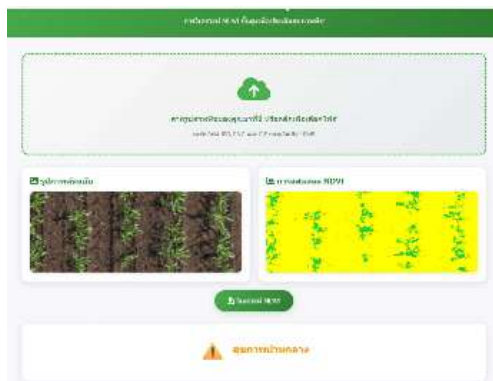
1.4.2 การทดสอบระบบ

เริ่มจากการทำการบินโดรนเพื่อถ่ายภาพแปลงหม่อนที่ต้องการทดสอบ ในขั้นตอนนี้จำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความสูงในการบิน มุมการถ่ายภาพ และสภาพแสงที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ภาพที่มีคุณภาพสำหรับการวิเคราะห์ โดยกำหนดขอบเขตที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการถ่ายภาพเพื่อการวิเคราะห์ NDVI ดังนี้

- 1) ความสูงในการบิน (Flight altitude) ควรตั้งค่าความสูงในการบินให้อยู่ในช่วง 30-60 เมตร เพื่อให้ได้ภาพที่มีความละเอียดสูง (High Ground Sampling Distance; GSD) เพียงพอต่อการแยกแยะพืชแต่ละต้นหรือแถวปลูก
- 2) มุมการถ่ายภาพ (Camera angle) ควรถ่ายภาพในมุมแนวตั้ง (Nadir) หรือ 90 องศา โดยที่กล้องตั้งฉากกับพื้นดิน เพื่อลดความบิดเบือนทางเรขาคณิตของภาพ (Geometric distortion) และลดผลกระทบจากมุมมองภาพ (View angle effect)



(A) Home page



(B) Data processing



(C) Evaluation results

Figure 1 Mulberry growth monitoring and assessment system with remote sensing technology development

3) สภาพแสงที่เหมาะสม (Suitable lighting conditions) ควรทำการบินถ่ายภาพใน ช่วงเวลาที่แสงอาทิตย์มีความเข้มคงที่ (10:00 น. – 14:00 น.) และเป็นวันที่มีท้องฟ้าโปร่งหรือมีเมฆน้อยที่สุด เพื่อลดปัญหาเงาและการเปลี่ยนแปลงของแสงที่อาจส่งผลต่อความแม่นยำของการคำนวณค่า NDVI

เมื่อได้ภาพถ่ายแปลงหม่อนที่อยู่ในขอบเขตที่เหมาะสมแล้ว จะทำการอัปโหลดภาพเข้าสู่ระบบเพื่อให้ระบบทำการประมวลผลภาพถ่ายอัตโนมัติ โดยระบบจะวิเคราะห์การเจริญเติบโตของต้นหม่อนผ่านการคำนวณค่า NDVI และจำแนกระดับสุขภาพพืชตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้ 5 ระดับ นอกจากนี้ระบบยังสามารถพยากรณ์ผลผลิต วางแผนการให้น้ำ และสร้างแผนที่แปลงหม่อน เพื่อช่วยให้เกษตรกรสามารถบริหารจัดการแปลงหม่อนได้อย่างแม่นยำและรวดเร็ว Figure 1 แสดงหน้าจอการทำงานหลักของระบบเว็บแอปพลิเคชันสำหรับติดตามและประเมินการเจริญเติบโตของต้นหม่อน

1.4.3 การจัดทำเอกสารคู่มือการใช้งานสำหรับผู้ใช้

คู่มือจะอธิบายขั้นตอนการใช้งาน ในการอัปโหลดภาพถ่ายเข้าสู่ระบบ การตรวจสอบคุณภาพของภาพ ก่อนการอัปโหลด และการจัดการไฟล์ภาพในระบบ คู่มือจะครอบคลุมการใช้ระบบวิเคราะห์ข้อมูล รวมถึงการใช้ประโยชน์จากคำแนะนำเชิงปฏิบัติที่ระบบให้ไว้สำหรับแต่ละระดับสุขภาพ นอกจากนี้ยังรวมถึงการเรียกดูรายงานและการใช้ประโยชน์จากกราฟพยากรณ์ผลผลิต เพื่อการวางแผนการจัดการปลูกในระยะยาว โดย Figure 2 แสดงการใช้งานระบบติดตามและประเมินการเจริญเติบโตของต้นหม่อนผ่านอุปกรณ์เคลื่อนที่

1.5 การบำรุงรักษา (Maintenance)

การบำรุงรักษาจะมุ่งเน้นไปที่การแก้ไขข้อบกพร่องของระบบที่พบระหว่างการใช้งานจริง โดยผ่านการติดตามวิเคราะห์ และปรับปรุงระบบ ปัญหาที่พบบ่อยในระหว่างการใช้งานจริงได้แก่ ความคลาดเคลื่อนในการประมวลผลภาพจากโดรนในสภาพแสงที่แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของการคำนวณค่า NDVI โดยเฉพาะในช่วงเวลาที่มีแสงแดดจัดหรือมีเมฆบดบัง การแก้ไขปัญหานี้ต้องอาศัยการปรับปรุงอัลกอริทึมการประมวลผลภาพและการเพิ่มขั้นตอนการปรับแต่งภาพให้เหมาะสมกับสภาพแสงต่าง ๆ การคำนวณพื้นที่ที่ไม่แม่นยำในบางกรณีเป็นอีกปัญหาที่ได้รับการแก้ไข ซึ่งอาจเกิดจากความผิดพลาดในการประมาณความสูงของการบินโดรนหรือการบิดเบี้ยวของภาพ การแก้ไขต้องทำการสอบเทียบระบบอย่างสม่ำเสมอและการปรับปรุงวิธีการคำนวณพื้นที่ให้มีความแม่นยำมากขึ้น



Figure 2 Utilization of mulberry growth monitoring and assessment system with remote sensing technology via mobile devices

2. การสร้างตารางทดสอบประสิทธิภาพระบบติดตามและประเมินการเจริญเติบโตของต้นหม่อน ด้วยเทคโนโลยีรีโมทเซนซิง

การสร้างตารางการทดสอบประสิทธิภาพระบบติดตามและประเมินการเจริญเติบโตของต้นหม่อน ด้วยเทคโนโลยีรีโมทเซนซิง มีขั้นตอนในการสร้างตามลำดับต่อไปนี้

2.1 ศึกษาเอกสาร ตำรา งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง ทดสอบ การหาประสิทธิภาพเครื่องมือวิจัยต่าง ๆ ในการติดตามการเจริญเติบโตพืช การสำรวจระยะไกล เป็นต้น เพื่อนำมาเป็นกรอบแนวคิดในการสร้างและกำหนดหัวข้อการทดสอบประสิทธิภาพระบบติดตามและประเมินการเจริญเติบโตของต้นหม่อน ด้วยเทคโนโลยีรีโมทเซนซิง

2.2 สร้างตารางการทดสอบประสิทธิภาพระบบติดตามและประเมินการเจริญเติบโตของต้นหม่อนด้วยเทคโนโลยีรีโมทเซนซิง สามารถอธิบายวิธีการทดสอบได้โดยแบ่งเป็น 3 ด้าน ได้แก่ ด้านความสามารถของระบบ ด้านการใช้งาน และด้านความถูกต้องและการทำงานของระบบ

โดยการทดสอบแต่ละรายการจะดำเนินการ 10 ครั้ง เพื่อประเมินความเสถียรและความน่าเชื่อถือของระบบ และต้องผ่านเกณฑ์อย่างน้อย 8 ใน 10 ครั้งจึงจะถือว่าผ่านการทดสอบ โดยเกณฑ์การประเมินแบ่งเป็น "ผ่าน" เมื่อระบบทำงานได้ตามที่คาดหวัง และ "ไม่ผ่าน" เมื่อระบบทำงานไม่เป็นไปตามที่คาดหวัง

2.3 นำตารางการทดสอบประสิทธิภาพระบบติดตามและประเมินการเจริญเติบโตของต้นหม่อนด้วยเทคโนโลยีรีโมทเซนซิง เสนอต่อที่ปรึกษางานวิจัยพิจารณาความเหมาะสมในการทดสอบ และรับฟังข้อเสนอแนะจากที่ปรึกษางานวิจัยเพื่อนำกลับมาปรับปรุงแก้ไข

2.4 นำตารางการทดสอบประสิทธิภาพระบบติดตามและประเมินการเจริญเติบโตของต้นหม่อนด้วยเทคโนโลยีรีโมทเซนซิง กลับมาปรับปรุงแก้ไข ตามคำแนะนำของที่ปรึกษางานวิจัย

2.5 นำตารางการทดสอบประสิทธิภาพระบบติดตามและประเมินการเจริญเติบโตของต้นหม่อนด้วยเทคโนโลยีรีโมทเซนซิงไปทดสอบประสิทธิภาพระบบต่อไป

วิธีการวิจัย

การทดสอบประสิทธิภาพระบบติดตามและประเมินการเจริญเติบโตของต้นหม่อนด้วยเทคโนโลยีรีโมทเซนซิงโดยแบ่งเป็น 3 ด้าน ดังนี้

1. ด้านความสามารถของระบบ

1.1 ทดสอบการใช้งานระบบ โดยการจำลองสถานการณ์ที่เกษตรกรหลายรายเข้าใช้งานระบบในเวลาเดียวกัน เพื่อประเมินความเสถียรและความสามารถในการจัดการข้อมูลของผู้ใช้แต่ละรายโดยไม่เกิดการปะปนหรือความล่าช้า

1.2 ทดสอบการประมวลผลข้อมูล จะใช้ภาพถ่ายที่มีความหลากหลายในสภาพแสง รวมถึงภาพที่มีเงาหรือสภาพแวดล้อมต่าง ๆ เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของการคำนวณค่าดัชนีสุขภาพพืช

1.3 ทดสอบการจัดเก็บข้อมูล จะประเมินประสิทธิภาพของฐานข้อมูลในการบันทึกผลการวิเคราะห์และการรักษาความสมบูรณ์ของข้อมูล

2. ด้านการใช้งาน

2.1 ทดสอบการเข้าสู่ระบบหรือการเข้าใช้งานระบบ จะดำเนินการบนแพลตฟอร์มที่หลากหลายทั้งคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์มือถือ เพื่อให้สอดคล้องกับอุปกรณ์ที่เกษตรกรใช้งานจริง ที่ระบบต้องปรับตัวได้กับข้อจำกัดของแต่ละอุปกรณ์

2.2 ทดสอบการใช้งานเมนูต่าง ๆ จะประเมินความสะดวกและความเข้าใจง่ายของอินเทอร์เฟซ โดยวัดเวลาที่ผู้ใช้ใช้ในการค้นหาฟังก์ชันและความถูกต้องในการดำเนินการ

2.3 ทดสอบการนำเข้าข้อมูลภาพถ่ายเข้าสู่ระบบ จะครอบคลุมไฟล์ภาพจากแหล่งต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นโดรน หรือสมาร์ทโฟน รวมถึงการตรวจสอบความเร็วในการอัปโหลดที่เหมาะสม

3. ด้านความถูกต้องและการทำงานของระบบ

3.1 ทดสอบการประมวลผลภาพ จะใช้ชุดภาพมาตรฐานเป็นข้อมูลอ้างอิง เพื่อประเมินความแม่นยำของอัลกอริทึมระบบต้องแยกแยะพื้นที่พืชจากพื้นหลังได้อย่างถูกต้อง เช่น วัชพืชปะปนและการเปลี่ยนแปลงของแสง

3.2 ทดสอบการประมวลผลการเจริญเติบโต จะใช้ชุดข้อมูลที่บันทึกต่อเนื่องจากพื้นที่เดียวกันเพื่อประเมินความสามารถในการวิเคราะห์แนวโน้มการเจริญเติบโต และการให้คำแนะนำที่เหมาะสม

3.3 ทดสอบการรายงานผลที่ระบบสร้างขึ้น จะตรวจสอบการรายงาน รวมถึงการนำเสนอข้อมูลที่เข้าใจง่าย การทดสอบแต่ละรายการจะดำเนินการ จำนวน 10 ครั้ง เพื่อประเมินความเสถียรและความน่าเชื่อถือของระบบ โดยเกณฑ์การประเมินแบ่งเป็น "ผ่าน" เมื่อระบบทำงานได้ตามที่คาดหวัง และ "ไม่ผ่าน" เมื่อระบบทำงานไม่เป็นไปตามที่คาดหวัง จากนั้นบันทึกผลการทดลองลงในตารางทดสอบประสิทธิภาพระบบ และผู้วิจัยนำผลที่ได้จากการทดสอบประสิทธิภาพระบบติดตามและประเมินการเจริญเติบโตของต้นหม่อน ด้วยเทคโนโลยีรีโมทเซนซิง มาทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ผลการวิจัย

1. ผลการพัฒนาระบบติดตามและประเมินการเจริญเติบโตของต้นหม่อนด้วยเทคโนโลยีรีโมทเซนซิงได้ดำเนินการพัฒนาระบบตามแนวคิดวงจรพัฒนาระบบ (SDLC) ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้เทคโนโลยีการประมวลผลภาพ RGB จากโดรนหรือภาพถ่ายดาวเทียม เพื่อคำนวณค่า NDVI แบบเรียลไทม์ ระบบได้รับการออกแบบด้วยสถาปัตยกรรมแบบไมโครเซอร์วิสประกอบด้วย ส่วนประมวลผลด้วยภาษา Python บนเฟรมเวิร์ก Flask ส่วนแสดงผลที่ตอบสนองต่ออุปกรณ์ที่หลากหลาย ฐานข้อมูล SQLite และระบบจัดการไฟล์ ระบบสามารถจำแนกระดับสุขภาพพืชออกเป็น 5 ระดับพร้อมให้คำแนะนำเชิงปฏิบัติ บันทึกข้อมูลการวิเคราะห์อย่างเป็นระบบ และสร้างรายงานในรูปแบบ NDVI Heatmap และกราฟแนวโน้มผลลัพธ์ที่ได้คือ ระบบที่ช่วยให้เกษตรกรสามารถติดตามการเจริญเติบโตของต้นหม่อนได้อย่างต่อเนื่อง โดยไม่ต้องเข้าไปสำรวจในแปลงด้วยตนเอง ซึ่งทำให้ประหยัดเวลาและทรัพยากร ระบบยังช่วยในการพยากรณ์ผลผลิต วางแผนการให้น้ำ และสร้างแผนที่แปลงหม่อน ทำให้การจัดการแปลงเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

2. ผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบ

Table 4 System performance test results: System capability aspect

Test Item	Test Results (Trial No.)										Total	Percentage	Result
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
1. System Capability Aspect													
1.1 System Usage Support	✓	✓	✓	✓	x	✓	✓	✓	✓	✓	9	90	Pass
1.2 Data Processing	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x	✓	✓	✓	9	90	Pass
1.3 Data Storage	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	10	100	Pass
Overall Average											9.33	93.33	Pass

จาก Table 4 ผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบติดตามและประเมินการเจริญเติบโตของต้นหม่อนด้วยเทคโนโลยีรีโมทเซนซึ่งด้านความสามารถของระบบพบว่า ในภาพรวมมีร้อยละเฉลี่ยรวมเท่ากับ 93.33 สรุปผลผ่านการทดสอบ เมื่อพิจารณาเป็นรายข้อพบว่า การรองรับการใช้งานระบบ คิดเป็นร้อยละ 90 ผ่านการทดสอบ เช่นเดียวกับการประมวลผลข้อมูล คิดเป็นร้อยละ 90 ผ่านการทดสอบ และการจัดเก็บข้อมูล สามารถจัดเก็บข้อมูลได้ โดยคิดเป็น ร้อยละ 100 ผ่านการทดสอบ

ในขณะที่ การรองรับการใช้งานระบบและการประมวลผลข้อมูล สามารถทำงานได้สำเร็จที่ร้อยละ 90 โดยพบความผิดพลาดอย่างละ 1 ครั้ง ซึ่งข้อผิดพลาดในการรองรับการใช้งานในครั้งที่ 5 เกิดจากปัญหาด้านความเข้ากันได้ของเบราว์เซอร์ (Browser compatibility) ที่ผู้ทดสอบใช้ในขณะนั้น ซึ่งเป็นปัจจัยภายนอกที่ทำให้ระบบแสดงผลหรือตอบสนองไม่สมบูรณ์ชั่วคราว และความผิดพลาดในการประมวลผลข้อมูลในครั้งที่ 7 เกิดจากคุณภาพของภาพถ่ายที่นำเข้าไปไม่ได้อยู่ในขอบเขตที่เหมาะสมตามที่กำหนด (เช่น ภาพมืดหรือมีเงามากเกินไป) ส่งผลให้กระบวนการคำนวณค่า NDVI ไม่สามารถดำเนินการได้อย่างถูกต้องสมบูรณ์

Table 5 System performance test results: Usability aspect

Test Item	Test Results (Trial No.)										Total	Percentage	Result
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
2. Usability Aspect													
2.1 System Login	✓	✓	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	9	90	Pass
2.2 Menu Navigation	✓	✓	✓	✓	✓	x	✓	✓	✓	✓	9	90	Pass
2.3 Importing Photo Data into the System	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x	✓	✓	9	90	Pass
Overall Average											9	90	Pass

จาก Table 5 พบว่า ผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบติดตามและประเมินการเจริญเติบโตของต้นหม่อนด้วยเทคโนโลยีรีโมทเซนซึ่ง ด้านการใช้งานพบว่า ในภาพรวมมีร้อยละเฉลี่ยรวมเท่ากับ 90 สรุปผลผ่านการทดสอบ เมื่อพิจารณาเป็นรายข้อพบว่า การเข้าสู่ระบบ คิดเป็นร้อยละ 90 ผ่านการทดสอบ เช่นเดียวกับการใช้งานเมนูต่างๆ คิดเป็นร้อยละ 90 ผ่านการทดสอบ และการนำเข้าข้อมูลภาพถ่ายเข้าสู่ระบบ สามารถนำเข้าข้อมูลภาพถ่ายเข้าสู่ระบบได้ โดยคิดเป็น ร้อยละ 90 ผ่านการทดสอบ

โดยรายการการเข้าสู่ระบบ พบความผิดพลาดในครั้งที่ 3 เกิดจากปัญหาของเซิร์ฟเวอร์ฐานข้อมูลในช่วงเวลานั้นที่ไม่สามารถตรวจสอบข้อมูลผู้ใช้ได้ทันที ทำให้การยืนยันตัวตนล้มเหลวชั่วคราว ส่วนการใช้งานเมนูต่าง ๆ พบความผิดพลาดในครั้งที่ 6 เกิดจากความผิดพลาดในการนำทาง (Navigation error) หรือ Script error ของหน้าเว็บเมื่อมีการเรียกใช้เมนูย่อยบางรายการ ทำให้ระบบไม่ตอบสนองชั่วคราว และการนำเข้าข้อมูลภาพถ่ายเข้าสู่ระบบ พบความผิดพลาดในครั้งที่ 8 เนื่องมาจากข้อจำกัดในการรองรับขนาดไฟล์ภาพถ่ายที่มีขนาดใหญ่เกินกว่าที่ระบบกำหนดไว้ ทำให้การอัปโหลดไฟล์ล้มเหลว

Table 6 System performance test results: Accuracy and operational functionality aspect

Test Item	Test Results (Trial No.)										Total	Percentage	Result
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
3. Accuracy and System Operation Aspect													
3.1 Image Processing	✓	✓	✓	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	9	90	Pass
3.2 Growth Processing	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x	✓	9	90	Pass
3.3 Result Reporting	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x	9	90	Pass
Overall Average											9	90	Pass

จาก Table 6 ผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบติดตามและประเมินการเจริญเติบโตของต้นหม่อนด้วยเทคโนโลยีรีโมทเซนซิง ด้านความถูกต้องและการทำงานของระบบพบว่า ในภาพรวมมีร้อยละเฉลี่ยรวมเท่ากับ 90 สรุปผลผ่านการทดสอบเมื่อพิจารณาเป็นรายข้อพบว่า การประมวลผลภาพ การประมวลผลการเจริญเติบโต และการรายงานผล สามารถทำงานได้สำเร็จที่ร้อยละ 90 เท่ากันทั้งหมด โดยพบความผิดพลาดอย่างละ 1 ครั้ง

ความผิดพลาดในการประมวลผลภาพในครั้งที่ 4 เกิดจากภาพถ่ายที่นำเข้ามามีปัจจัยรบกวนสูง (เช่น ความเปรียบต่างของแสงและเงาสูงผิดปกติ) ทำให้โมเดลไม่สามารถแยกแยะพิกเซลของพืชพรรณออกจากสิ่งรบกวนได้อย่างถูกต้อง ในขณะที่ความผิดพลาดในการประมวลผลการเจริญเติบโตในครั้งที่ 9 เกิดจากระบบไม่สามารถดึงข้อมูลประวัติการเจริญเติบโตเพื่อเปรียบเทียบจากฐานข้อมูลได้ทั้งหมดที่ ซึ่งส่งผลต่อการจำแนกระดับสุขภาพพืช และความผิดพลาดในการรายงานผลในครั้งที่ 10 เกิดจากข้อผิดพลาดในการสร้างรูปแบบไฟล์รายงาน (Report generation failure) ซึ่งอาจเกิดจากการที่ข้อมูลที่ประมวลผลออกมาไม่สมบูรณ์บางส่วน ทำให้ระบบไม่สามารถจัดทำรายงานผลลัพธ์ฉบับสมบูรณ์ได้

การอภิปรายผล

จากการศึกษาวิจัยเรื่องการพัฒนากระบวนการติดตามและประเมินการเจริญเติบโตของต้นหม่อนด้วยเทคโนโลยีรีโมทเซนซิง ที่คณะผู้วิจัยพัฒนาขึ้น สามารถอภิปรายผลการวิจัย ได้ดังนี้

1. การพัฒนาและการทดสอบประสิทธิภาพระบบติดตามและประเมินการเจริญเติบโตของต้นหม่อน ด้วยเทคโนโลยีรีโมทเซนซิง

การพัฒนากระบวนการติดตามและประเมินการเจริญเติบโตของต้นหม่อนด้วยเทคโนโลยีรีโมทเซนซิงได้ดำเนินการตามแนวคิดวงจรการพัฒนาระบบ (System Development Life Cycle; SDLC) อย่างเป็นระบบ ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดของ Eamsirivodh (2017) ที่กล่าวว่า การพัฒนาระบบสารสนเทศที่มีประสิทธิภาพต้องดำเนินการตามขั้นตอนอย่างเป็นระบบ ประสิทธิภาพของระบบติดตามและประเมินการเจริญเติบโตของต้นหม่อนด้วยเทคโนโลยีรีโมทเซนซิงที่พัฒนาขึ้น มีผลการทดสอบในระดับดีมากทั้งด้านความสามารถของระบบ (ร้อยละ 93.33) ด้านการใช้งาน (ร้อยละ 90) และด้านความถูกต้องของระบบ (ร้อยละ 90) โดยมีค่าเฉลี่ยรวมสูงถึงร้อยละ 90.11 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chaleejunghan et al. (2021) ที่ศึกษาเรื่องการสำรวจระยะไกลด้วยดาวเทียมเพื่อติดตามการเจริญเติบโตของต้นยางพาราและพยากรณ์ผลผลิตน้ำยางพารา ซึ่งพบว่า การใช้ดัชนีพืชพรรณมีความสัมพันธ์ระดับปานกลางถึงระดับสูงกับการให้ผลผลิตโดยเฉพาะค่าดัชนี NDVI และค่าการสะท้อนช่วงคลื่น NIR สามารถพยากรณ์ผลผลิตยางพาราได้ โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.77 ซึ่งแสดงถึงความแม่นยำในระดับสูง ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะเทคโนโลยีรีโมทเซนซิงมีข้อได้เปรียบในการเก็บข้อมูลได้อย่างต่อเนื่องและครอบคลุมพื้นที่ขนาดใหญ่ ดังที่ Komontien (2012) กล่าวว่า การติดตามตรวจสอบด้วยเทคโนโลยีนี้จะมีประสิทธิภาพมากขึ้นเมื่อมีการใช้ข้อมูลการสำรวจระยะไกลแบบหลายช่วงคลื่น และการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยเทคนิคที่เหมาะสมจะช่วยเพิ่มความเที่ยงตรงและประหยัดงบประมาณในการติดตามการเจริญเติบโตของพืช อีกทั้งเทคโนโลยีรีโมทเซนซิงยังสามารถตรวจวัดคุณลักษณะเฉพาะของพืชได้อย่างแม่นยำ ผ่านการวิเคราะห์ค่าการสะท้อนของคลื่นแสงในช่วงต่าง ๆ ตามที่ Mapuru et al. (2023) ได้อธิบายว่า ข้อมูลเชิงคลื่นสามารถใช้ในการติดตามสุขภาพและความมีชีวิตของต้นไม้ โดยการใช้อัลกอริทึมการเรียนรู้ที่หลากหลาย นอกจากนี้ Thirakultomorn et al. (2021) ยังได้แสดงให้เห็นว่า การจำแนกข้อมูลพื้นที่ปลูกพืชจากภาพถ่ายดาวเทียมสามารถทำได้ด้วย

ความแม่นยำสูง โดยมีค่า Kappa coefficient มากกว่าร้อยละ 80 และการที่ระบบได้รับการออกแบบให้ใช้งานง่ายผ่านเว็บแอปพลิเคชันที่สามารถใช้งานได้บนโทรศัพท์มือถือ ทำให้เกษตรกรสามารถเข้าถึงข้อมูลได้สะดวก สอดคล้องกับแนวคิดของ Mapuru et al. (2023) ที่ระบุว่า การเพิ่มขึ้นของการใช้ข้อมูลดาวเทียมฟรีและแพลตฟอร์มการประมวลผลเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยให้ผู้ใช้งานที่มีทรัพยากรจำกัด สามารถใช้ประโยชน์จากเทคโนโลยีรีโมทเซนซิงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

บทสรุป

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบติดตามและประเมินการเจริญเติบโตของต้นหม่อนด้วยเทคโนโลยีรีโมทเซนซิงเพื่อแก้ไขปัญหาการขาดแคลนใบหม่อนที่ส่งผลกระทบต่อการผลิตไหม โดยใช้วิธีการวิจัยและพัฒนาผ่านการสร้างระบบวิเคราะห์ภาพถ่ายจากโดรนและดาวเทียม ที่สามารถคำนวณค่าดัชนีความแตกต่างเชิงปกติของพืชและจำแนกระดับสุขภาพพืชออกเป็น 5 ระดับ ระบบที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนประมวลผลด้วยภาษา Python และเฟรมเวิร์ก Flask ส่วนแสดงผลที่ออกแบบให้ใช้งานง่ายบนอุปกรณ์หลากหลาย และระบบฐานข้อมูล SQLite สำหรับจัดเก็บข้อมูลการวิเคราะห์ ผลการทดสอบประสิทธิภาพใน 3 ด้าน แสดงให้เห็นว่าระบบผ่านเกณฑ์การประเมินที่กำหนดไว้ งานวิจัยนี้แสดงถึงศักยภาพของเทคโนโลยีรีโมทเซนซิงในการสนับสนุนการตัดสินใจของเกษตรกรผู้ปลูกหม่อนโดยให้ข้อมูลที่แม่นยำ สำหรับการจัดการแปลงเพาะปลูกอย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับงานวิจัยในอนาคตควรพัฒนาระบบให้รองรับการวิเคราะห์พืชเศรษฐกิจชนิดอื่นและบูรณาการเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการพยากรณ์ นอกจากนี้การจัดตั้งศูนย์เรียนรู้เกษตรกรอัจฉริยะในระดับชุมชนจะช่วยสนับสนุนการใช้งานอย่างยั่งยืน รวมถึงการศึกษาประยุกต์ใช้ในพื้นที่เกษตรขนาดใหญ่และพัฒนาหลักสูตรการถ่ายทอดเทคโนโลยีที่เหมาะสมกับเกษตรกรในแต่ละภูมิภาค

กิตติกรรมประกาศ

ขอแสดงความขอบคุณการสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ประจำปีงบประมาณ 2567 ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนวิจัย และขอขอบคุณเกษตรกรในพื้นที่ตำบลโคกสะอาด อำเภอปราสาท จังหวัดสุรินทร์ ที่ได้กรุณาให้ความร่วมมือในการพัฒนาและข้อมูลที่สำคัญ อันเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาระบบในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- Agricultural technology. (2022). *Surin woman grows mulberry and raises silkworms as supplementary income: "Fight and get rich"*. Retrieved September 7, 2022, from https://www.technologychaoban.com/bullet-news-today/article_111489. (In Thai)
- Blaschke, T. (2010). Object based image analysis for remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65(1), 2-16.
- Chaleejunghan, N., Rattanapichai, W., Sajjaphan, K., Nouvellon, Y., & Kasemsap, P. (2021). Satellite remote sensing for growth monitoring and yield predicting of para-rubber: a case study in the area of Thoen district, Lampang province. *Khon Kaen Agriculture Journal*, 50(4), 1068-1082. (In Thai)
- Cheuangam, P. (2011). *Surin Province accelerates rehabilitation of mulberry and silkworm cultivation careers*. Retrieved September 8, 2022, from <https://www.gotoknow.org/posts/426689>. (In Thai)
- Department of Sericulture (2018). *Techniques for sustainable industrial mulberry and silkworm cultivation*. Bangkok: Ministry of Agriculture and Cooperatives. (In Thai)
- Department of Sericulture. (2022). *Publication: Thai silk conservation villages*. Retrieved September 7, 2022, from <https://qsds.go.th/wp-content/uploads/2017/2015-06-18-02.PosterSilk.jpg>. (In Thai)

- Eamsirivodh, O. (2017). *System analysis and design*. Bangkok: SE-Education. (In Thai)
- Inkoet, S., Onsi, N., Khwanthong, N., Klomphong, N., & Khankhachon, T. (2018). Remote Sensing Applications for Change Detection in The Andaman Sea Coastal Region, Sikao District, Trang Province. *Wichcha Journal, Nakhon Si Thammarat Rajabhat University*, 37(Special Issues), 84-98. (In Thai)
- Komontien, P. (2012). Detection of saline soil using remote sensing data. *KKU Science Journal*, 40(3), 772-789. (In Thai)
- Mapuru, M. J., Xulu, S., & Gebreslasie, M. (2023). Remote sensing applications in monitoring poplars: A review. *Forests*, 14, 2301.
- Neupane, B., Horanont, T., Hung, N. D., Suebvong, S., & Mahattanawutakorn, T. (2019). An open-source UAV image processing web service for crop health monitoring. In *2019 8th International Congress on Advanced Applied Informatics (IIAI-AAI)* (pp. 11-16).
- Nielsen, K. M. E., Duddu, H. S. N., Bett, K. E., & Shirliff, S. J. (2022). UAV image-based crop growth analysis of 3D-reconstructed crop canopies. *Plants*, 11(20), 2691.
- Noijaiyasin, L., Naudom, T., Phonmatre, S., & Nanuam, J. (2023). An application of remote sensing data to assess water shortage areas in Chanthaburi Province. *Burapha Science Journal*, 28(3), 1803-1817. (In Thai)
- Osatjesada, P. (2014). *History of Surin: Local learning resources, Surin city gallery* (1st ed.). Surin: Surin Provincial Office. (In Thai)
- Pakas, A., Chuaybumrung, P., & Jankarnvanich, S. (2023). A study of change in forest area during 2013-2022 in the Sri Lanna national park, Chiang Mai Province. *Thai Journal of Forestry*, 42(2), 50-62. (In Thai)
- Peainlert, S., Thongdeenok, P., & Kaewjampa, N. (2018). Drought risk area assessment using remotely sensed data and meteorological data in Chern Sub-watershed. *KKU Research Journal (Graduate Study)*, 18(3), 67-83. (In Thai)
- Thirakultomorn, T., Prasomsap, W., Tonnok, K., & Thokhamnam, S. (2021). Remote sensing techniques for surveying and monitoring changes in cassava planting areas. In *the 26th National Convention on Civil Engineering*, June 23-25, 2021 (pp. SGI-14-1-SGI-14-6). (In Thai)
- Zhang, Y., Thenkabail, P. S., & Wang, P. (2019). A bibliometric profile of the remote sensing open access journal published by MDPI between 2009 and 2018. *Remote Sensing*, 11(1), 91. doi:10.3390/rs11010091

Received: June 17, 2025; Revised: September 19, 2025; Accepted: March 17, 2026

การผลิตสารสีจากเชื้อรา *Monascus* sp. ด้วยกระบวนการหมักแบบอาหารแข็ง
โดยใช้วัสดุเหลือทิ้งจากทุเรียน

Production of pigments from *Monascus* sp. through solid-state fermentation
using durian waste materials

ปิริยาภรณ์ อันอามังงาม¹ พัชรา นิธิโรจน์ภักดี¹ ปฐมาภรณ์ ทิลารักษ์¹ พรพนิต ศศิวัฒน์ชุติกุล¹
อโนชา กิริยากิจ¹ รัตนพล มงคลรัตนาลิทธิ์² และอมรรัตน์ สุวรรณโพธิ์ศรี^{1*}

Piriyaporn Anartngam¹, Patchara Nithirojpakdee¹, Patamaporn Tilarux¹,
Pronpanit Sasivatchutikool¹, Anocha Kiriyaakit¹, Rattanaphol Mongkhorrattanasit²
and Amornrat Suwanposri^{1*}

¹คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี

¹Faculty of Agro-industrial Technology, Rajamangala University of Technology Tawan-ok, Chanthaburi campus, Chanthaburi Province

²คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอและออกแบบแฟชั่น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร กรุงเทพมหานคร

²Faculty of Industrial Textiles and Fashion Design, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Bangkok

*Corresponding Author E-mail Address : amornrat_su@rmutto.ac.th

บทคัดย่อ

เปลือกทุเรียนเป็นของเหลือทิ้งจากการแปรรูปและการบริโภคซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นทุกปี งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการนำเปลือกทุเรียนเหลือทิ้งมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตสารสีด้วยกระบวนการหมักของเชื้อรา *Monascus* sp. โดยในขั้นตอนแรกศึกษาสายพันธุ์ของเชื้อรา *M. purpureus* และสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตสารสีโดยใช้เปลือกทุเรียนสายพันธุ์หมอนทองเป็นวัตถุดิบ พบว่า สายพันธุ์ที่เหมาะสมคือ *M. purpureus* TISTR 3615 จากสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตสารสีคือ การใช้กลูโคส เป็นแหล่งคาร์บอน และมีความเข้มข้นของแหล่งคาร์บอน คือ ร้อยละ 2.0 จากนั้นเปรียบเทียบการผลิตสารสีในสภาวะที่เหมาะสมโดยใช้เปลือกทุเรียนจำนวน 4 สายพันธุ์ ได้แก่ สายพันธุ์ก้านยาว กระจุดม หมอนทอง และนกหยิบ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าสารสีที่ใช้เปลือกทุเรียนสายพันธุ์หมอนทองเป็นวัตถุดิบนั้นให้ปริมาณสารสีเหลือง (7.54 ± 0.02 AU/g) และสีแดง (1.91 ± 0.03 AU/g) สูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยสีที่ปรากฏนั้นมีลักษณะเป็นสีน้ำตาลอมชมพู รวมถึงละลายได้ดีในน้ำ มีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด ($2,129.63 \mu\text{g GAE/g}$) และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH (ร้อยละ 76.32 ± 0.70) สูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) นอกจากนี้ยังมีฤทธิ์ยับยั้งจุลินทรีย์ก่อโรค ได้แก่ *Bacillus cereus*, *Staphylococcus aureus*, *Micrococcus* sp. และ *Escherichia coli*

คำสำคัญ: โมนาสคัส เปลือกทุเรียน สารสี ของเหลือทิ้ง

Abstract

Durian peels are a waste product from processing and consumption, which tends to increase every year. The aim of this research was to study the utilization of waste durian peels as raw materials for pigment production by the fermentation of *Monascus* sp. Initially, the optimal fungal strain of *M. purpureus* and conditions of pigment production using peels of Monthong cultivar were examined. It was found that the optimal fungal strain was *M. purpureus* TISTR 3615 from the optimal condition for pigment production was the used of glucose as carbon source, and the concentration of carbon source was 2.0%. Then, pigment production under optimal conditions using peels from four durian cultivars including Kanyao, Kradum, Monthong, and Nokyip were compared. The results showed that pigment using peels of Monthong cultivar gave the highest statistically significant ($p \leq 0.05$) amount of yellow (7.54 ± 0.02 AU/g) and red pigments (1.91 ± 0.03 AU/g). The color appearance of pigment exhibited a pinkish-brown color, was highly water-soluble, and showed the highest statistically significant ($p \leq 0.05$) total phenolic content ($2,129.63 \mu\text{g GAE/g}$) and antioxidant DPPH scavenging activity ($76.32 \pm 0.70\%$). It also had an antimicrobial activity against pathogenic microorganisms, including *Bacillus cereus*, *Staphylococcus aureus*, *Micrococcus* sp. and *Escherichia coli*.

Keywords: *Monascus*, Durian peel, Pigment, Waste

บทนำ

แหล่งของสารสีที่ใช้ในปัจจุบันมาจาก 2 แหล่ง ได้แก่ สีสังเคราะห์และสีจากธรรมชาติ โดยสีสังเคราะห์จะได้รับความนิยมมากกว่า เนื่องจากมีเฉดสีที่หลากหลาย ให้สีที่มีความสม่ำเสมอในกระบวนการผลิต มีความคงทน สะดวก ใช้งานง่ายและราคาถูก แต่อย่างไรก็ตามการใช้สีสังเคราะห์นั้นมีความเสี่ยงต่อสุขภาพของมนุษย์ ซึ่งสีสังเคราะห์บางชนิดเป็นสารเคมีอันตรายที่อาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพของผู้ใช้ เช่น อาจก่อให้เกิดอาการแพ้ เป็นสาเหตุก่อให้เกิดโรคมะเร็ง ก่อให้เกิดความผิดปกติและเกิดพิษแก่ทารกในครรภ์ (Abdel-Raheem et al., 2021) นอกจากนี้ในกระบวนการผลิตสารสีสังเคราะห์ เกิดผลพลอยได้ที่ไม่พึงประสงค์และของเสียอันตรายซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Bakthavachalu et al., 2020) และจากที่ประชาชนมีการใช้สารสีมากขึ้นรวมถึงมีการรณรงค์ให้ช่วยกันรักษาสีโลกและสิ่งแวดล้อม ทำให้มีการส่งเสริมสีที่มาจากธรรมชาติมากขึ้นเนื่องจากมีความปลอดภัยทั้งต่อผู้ผลิตและผู้บริโภค รวมถึงเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม แหล่งของสารสีจากธรรมชาติจะพบในพืช สัตว์ และจุลินทรีย์ โดยสารสีจากพืชสามารถสกัดได้จาก ใบ หรือลำต้น สำหรับสารสีจากสัตว์จะได้มาจากสารที่สัตว์ขับออกมาหรือจากตัวของสัตว์เอง อย่างไรก็ตามกระบวนการผลิตสารสีจากพืชและสัตว์นั้นมีต้นทุนสูง ให้ผลผลิตต่ำและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Meléndez-Martínez et al., 2022) ดังนั้นสารสีจากจุลินทรีย์จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากเจริญเติบโตได้เร็วและสร้างสารสีในเวลาอันสั้น ง่ายต่อการขยายกระบวนการผลิตและเก็บเกี่ยว รวมถึงไม่ขึ้นอยู่กับความแปรปรวนของธรรมชาติและพบว่าสารสีจากเชื้อราได้รับความนิยมมากกว่าสารสีจากสาหร่ายและแบคทีเรีย เนื่องจากผลิตสารสีได้ดีกว่า มีอัตราการเจริญเติบโตของเส้นใยสูง สามารถควบคุมสภาวะในการเจริญเติบโตเพื่อให้ได้สีที่ต้องการและใช้ในการผลิตสารสีในปริมาณมากในกระบวนการผลิตขนาดใหญ่ (Rapoport et al., 2021)

Monascus purpureus เป็นหนึ่งในเชื้อราที่ผลิตสารสีในกลุ่มสีส้มแดงซึ่งประกอบด้วย 3 สีหลัก ได้แก่ สีเหลือง (Monascine และ Ankaflavine) สีส้ม (Rubropunctatine และ Monascorubrine) และสีแดง (Rubropunctamine และ Monascorubramine) (Gong et al., 2023) สารสีที่ผลิตจากเชื้อรานี้นี้ มีความคงตัวที่อุณหภูมิสูง ค่าความเป็นกรด-ด่างปานกลาง (2-10) และมีสีเข้ม นอกจากนี้ยังมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ฤทธิ์ยับยั้งจุลินทรีย์ ลดไขมัน ต้านโรคอ้วนและต้านการอักเสบ (Kim & Ku, 2018) จากคุณสมบัติข้างต้นส่งผลให้มีการนำสารสีที่ผลิตโดยเชื้อรา *M. purpureus* ใช้เป็นวัตถุเจือปนในอาหาร สัมผัสอาหาร สารเพิ่มความข้นหรือสารทดแทนไนโตรเจนในอาหารหลายชนิด ได้แก่ เต้าหู้ยี้ ไส้กรอก ชูริมิ ไวน์แดง และซอส (Cui et al., 2025) รวมถึงนำไปใช้ในอุตสาหกรรมนม เครื่องสำอางและสิ่งทอ (Wu et al., 2024) โดยทั่วไป

การผลิตสารสีจากเชื้อรา *Monascus* sp. นิยมเพาะเลี้ยงเชื้อราบนข้าวหรือธัญพืช แต่ในปัจจุบันได้มีการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรหลายชนิด เช่น เมล็ดทุเรียน รำข้าวสาลี ชานอ้อย ชังข้าวโพด และเปลือกข้าว (El-Sayed et al., 2022) มาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตสารสีจากเชื้อราเพื่อลดต้นทุนในการผลิตและช่วยลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

ทุเรียน (*Durio zibethinus* Murray) เป็นหนึ่งในไม้ผลเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทยและเป็นราชาแห่งผลไม้ (King of fruit) มีปริมาณการบริโภคสูงทั้งในรูปของผลสดและแปรรูป โดยส่วนของเนื้อทุเรียนที่สามารถรับประทานได้คิดเป็นร้อยละ 10-30 และมีส่วนเหลือทิ้งสูงถึงร้อยละ 65-80 เช่น เปลือกร้อยละ 50-60 และเมล็ดร้อยละ 10-20 (Purnomo et al., 2016) จากแนวโน้มความต้องการบริโภคทุเรียนที่เพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ ทำให้มีส่วนของเปลือกทุเรียนเหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในโรงงานอุตสาหกรรมที่ผลิตทุเรียนแปรรูปจะมีปริมาณของเหลือทิ้งจากทุเรียนสูงถึง 1,000 ตันต่อปี วิธีการในการกำจัดส่วนใหญ่จะนำไปถมที่หรือเผาซึ่งก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมในเรื่องของกลิ่น คิวน์ และแมลงรบกวน มีส่วนน้อยที่นำไปใช้ในการผลิตปุ๋ยหรืออาหารสัตว์ ในเปลือกทุเรียนประกอบด้วย เถ้าร้อยละ 4.84 เซมิเซลลูโลสร้อยละ 13.09 และลิกนินร้อยละ 15.45 (Brown, 1997) มีรายงานว่าเปลือกทุเรียนที่นำไปย่อยด้วยกรดซัลฟิวริกสามารถนำไปเพาะเลี้ยงแบคทีเรียเพื่อผลิตแบคทีเรียเซลลูโลสและเพาะเลี้ยงเชื้อยีสต์เพื่อผลิตไบโอดีเซลได้ (Luo et al., 2017; Siwina & Leesing, 2021) แสดงให้เห็นว่าเปลือกทุเรียนนั้นสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการเพาะเลี้ยงจุลินทรีย์เพื่อผลิตสารสีได้ ซึ่งงานวิจัยที่นำเปลือกทุเรียนมาใช้ในกระบวนการหมักของเชื้อรา *Monascus* sp. เพื่อผลิตสารสีนั้นน้อย

ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจนำเปลือกทุเรียนสายพันธุ์ต่าง ๆ จำนวน 4 สายพันธุ์ ได้แก่ หมอนทอง ก้านยาว กระดุม และนกหยิบ ซึ่งเป็นของเหลือทิ้งจากการแปรรูปในโรงงานอุตสาหกรรมและผู้ขายปลีกทุเรียนรายย่อยมาใช้เป็นวัตถุดิบในการเพาะเลี้ยงเชื้อรา *Monascus* sp. เพื่อผลิตสารสีและศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ ของสารสีที่ผลิตได้ ดังนั้น วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ค่าสี ความสามารถในการละลาย ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด และฤทธิ์ยับยั้งจุลินทรีย์ก่อโรค เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในอนาคตและเป็นแนวทางในการลดการใช้สารสีสังเคราะห์ รวมถึงเป็นการช่วยลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและเพิ่มแนวทางในการนำเปลือกทุเรียนซึ่งเป็นของเหลือทิ้งไปใช้ประโยชน์อย่างสูงสุด

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

1. เชื้อจุลินทรีย์และการเตรียมวัตถุดิบ

การศึกษานี้ใช้เชื้อรา *Monascus purpureus* TISTR 3615 และ TISTR 3630 จากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย เพาะเลี้ยงบนอาหารแข็ง Potato dextrose agar (PDA) (Himedia, India) บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส นาน 10 วัน จากนั้นตัดส่วนปลายของเส้นใยนำไปใส่ในอาหารวุ้นเยิง PDA บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 วัน เพื่อใช้เป็นกล้าเชื้อ

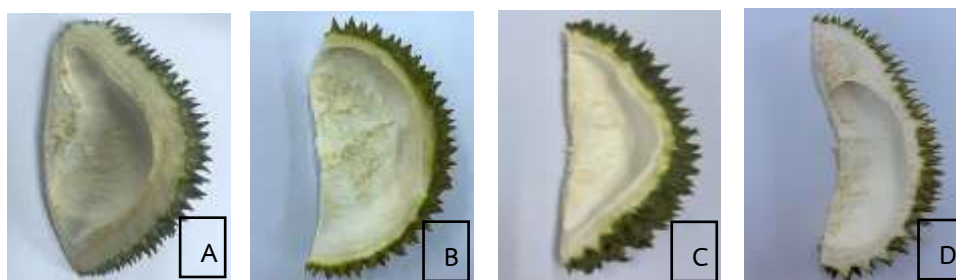


Figure 1 Peels of different durian cultivars (A) Kanyao (B) Kradum (C) Monthong and (D) Nokyip

นำเปลือกทุเรียนสายพันธุ์หมอนทอง ก้านยาว กระดุม และนกหยิบ (Figure 1) ซึ่งเป็นของเหลือทิ้งจากการแปรรูปที่ได้จากบริษัทจินทบุรี โกลบอล ฟู้ดส์ จำกัด จังหวัดจันทบุรี และผู้ขายปลีกทุเรียนรายย่อยในจังหวัดจันทบุรี ที่เก็บรวบรวมได้ในช่วงเดือนมีนาคม-มิถุนายน พ.ศ. 2567 มาล้างให้สะอาด จากนั้นหั่นเปลือกทุเรียนให้มีขนาด 0.5×2.0 เซนติเมตร นำไปอบที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส นาน 1 คืน เก็บรักษาในถุงซิปล็อคที่ภายในบรรจุซิลิกาเจลเพื่อดูดความชื้น แล้วนำไปวิเคราะห์

องค์ประกอบทางเคมี (Proximate analysis) (AOAC International, 2000) ส่วนกากน้ำตาล ยีห้อเอ็ม โมลาส ของบริษัท น้ำตาลมิตรผล จำกัด และน้ำอามิ อามิหรือกากผุงูรส ซื้อมาจากร้านค้าปลีกในจังหวัดฉะเชิงเทรา

2. ศึกษาสายพันธุ์เชื้อราที่เหมาะสมต่อการผลิตสารสีด้วยกระบวนการหมักบนเปลือกทุเรียนเหลือทิ้งจากการแปรรูปเป็นวัตถุดิบ

ศึกษาสายพันธุ์เชื้อรา ได้แก่ *M. purpureus* (สายพันธุ์ TISTR 3615 และ TISTR 3630) และสภาวะที่เหมาะสมในผลิตสารสีของเชื้อรา *Monascus* sp. บนเปลือกทุเรียนสายพันธุ์หมอนทอง โดยศึกษา 2 ปัจจัย ได้แก่ ชนิดของแหล่งคาร์บอน (กลูโคส กากน้ำตาลและน้ำอามิ อามิ) และปริมาณของแหล่งคาร์บอน (ร้อยละ 0, 2, 4 และ 6) โดยศึกษาแบบทีละปัจจัย (One factor at a time) ทำการผลิตสารสีโดยซึ่งเปลือกทุเรียนปริมาณ 100 กรัม ใส่ในขวดเพาะเลี้ยงขนาด 16 ออนซ์ จากนั้นแปรผันปัจจัยต่าง ๆ นำไปฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที เติมห้าเชื้อสารแขวนลอยสปอร์เชื้อรา *M. purpureus* TISTR 3615 หรือ 3630 ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 1×10^6 สปอร์ต่อมิลลิลิตร และนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส นาน 12 วัน นำสารสีที่ได้ไปฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที แล้วอบที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส นาน 1 คืน บดให้เป็นผงละเอียดร่อนผ่านตะแกรงขนาด 80 เมช จากนั้นนำไปวิเคราะห์ปริมาณสารสี

3. ศึกษาการผลิตสารสีจากกระบวนการหมักของเชื้อราโดยใช้เปลือกทุเรียนสายพันธุ์ต่าง ๆ เป็นวัตถุดิบ

ซึ่งเปลือกทุเรียนสายพันธุ์ต่าง ๆ ปริมาณ 100 กรัม ใส่ในขวดเพาะเลี้ยงขนาด 16 ออนซ์ นำไปเพาะเลี้ยงในสภาวะที่เหมาะสมซึ่งได้จากการศึกษาในข้อที่ 2 จากนั้นนำไปฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที เติมห้าเชื้อสารแขวนลอยสปอร์เชื้อราสายพันธุ์ที่เหมาะสมที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 1×10^6 สปอร์ต่อมิลลิลิตร และนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส นาน 12 วัน นำสารสีที่ได้ไปฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที แล้วอบที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส นาน 1 คืน บดให้เป็นผงละเอียดร่อนผ่านตะแกรงขนาด 80 เมช จากนั้นนำไปวิเคราะห์ปริมาณสารสี

4. การวิเคราะห์ปริมาณสารสีที่ผลิตได้

ทำการวิเคราะห์ปริมาณสารสีตามวิธีการของ Babitha et al. (2007) โดยการนำผงของสารสีที่ผลิตได้ปริมาณ 1 กรัม เติมน้ำเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 95 ปริมาตร 5 มิลลิลิตร นำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที นาน 1 ชั่วโมง กรองด้วยกระดาษกรอง Whatman No.1 นำสารที่กรองได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 412 (สีเหลือง) และ 500 (สีแดง) นาโนเมตร ตามลำดับ ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Lambda 365, Perkin Elmer, USA) รายงานผลปริมาณสารสีที่เชื้อผลิตได้ในหน่วย ค่าการดูดกลืนแสง (AU) ต่อกรัมน้ำหนักแห้ง เปรียบเทียบปริมาณสารสีที่ผลิตได้ในแต่ละชุดการทดลองเพื่อคัดเลือกสภาวะที่เหมาะสมที่ให้ปริมาณสารสีสูงสุด สำหรับใช้ในการศึกษาขั้นต่อไป

5. การวิเคราะห์คุณสมบัติของสารสี

- วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ปริมาณความชื้น ไขมัน โปรตีน เส้นใย คาร์โบไฮเดรต และเถ้า (AOAC International, 2000)

- ตรวจวัดค่าสีของสารสีที่ผลิตได้ตามระบบ CIE (L^* , a^* , b^*) วัดค่าความสว่าง (L^* -value) ค่าเป็นสีแดง-เขียว (a^* -value) ค่าเป็นสีเหลือง-น้ำเงิน (b^* -value) ด้วยเครื่องวัดสี (รุ่น Chroma Meter CR-400, Konica Minolta, Japan)

- การวัดความสามารถในการละลาย ตามวิธีการที่ดัดแปลงจาก Boonruang (2002) โดยซึ่งสารสี 1 กรัม เติมน้ำ ทำละลายชนิดต่าง ๆ ได้แก่ น้ำ เอทานอล และเมทานอล ปริมาตร 5 มิลลิลิตร นำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที นาน 1 ชั่วโมง กรองตะกอนออกด้วยกระดาษกรอง จากนั้นวัดปริมาณตะกอนที่ได้ หากมีตะกอนเหลือน้อยแสดงว่าละลายได้ดี

- การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ด้วยวิธี 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) scavenging capacity ทดสอบตามวิธีการที่ดัดแปลงจาก Shimada et al. (1992) โดยดูดสารสกัดของสารสีจากเชื้อรา ปริมาตร 100 ไมโครลิตร จากนั้นเติมสารละลาย DPPH ความเข้มข้น 2.0 mM ปริมาตร 2.9 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ในที่มืดนาน 30 นาที และนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 515 นาโนเมตร จากนั้นคำนวณหาร้อยละในการต้านอนุมูล DPPH (%DPPH radical scavenging)

- การวิเคราะห์ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดด้วยวิธี Folin-Ciocalteu ตามวิธีการที่ดัดแปลงจาก Wong et al. (2006) ปิเปตสารสกัดของสารสีจากเชื้อราตามตัวอย่างละ 50 ไมโครลิตร เติมสารละลาย Folin-Ciocalteu reagent ปริมาตร 2.0 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน เติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้นร้อยละ 7 ปริมาตร 2.0 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำกลั่นปริมาตร 2.0 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันเก็บในที่มืดนาน 1 ชั่วโมง แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 765 นาโนเมตร นำค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ไปเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานกรดแกลลิกและรายงานผลปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดในรูปของไมโครกรัมสมมูลกับกรดแกลลิกต่อกรัมของสารสกัด ($\mu\text{gGAE/g extract}$)

- การทดสอบฤทธิ์ยับยั้งจุลินทรีย์โดยใช้ Agar disc diffusion method ตามวิธีการของ Suwanposri et al. (2025a) แบคทีเรียที่ใช้ในการทดสอบ ได้แก่ แบคทีเรียแกรมบวก ประกอบด้วย *Bacillus subtilis*, *Micrococcus* sp. และ *Staphylococcus aureus* และแบคทีเรียแกรมลบ *Escherichia coli* โดยทำการเพาะเลี้ยงแบคทีเรียทั้งสี่สายพันธุ์ในอาหาร Nutrient agar (Himedia, India) บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส นาน 48 ชั่วโมง นำเชื้อแบคทีเรียตัวอย่างมาเจือจางด้วยน้ำกลั่นปลอดเชื้อ ให้ได้ค่าการดูดกลืนแสงเท่ากับ 0.2 ที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร จากนั้นใส่เชื้อแบคทีเรียที่เจือจางแล้วลงบนอาหารทดสอบ โดยใช้เทคนิค spread plate นำแผ่น disc ที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้วมาวางบนผิวหน้าของอาหารเลี้ยงเชื้อและหยดสารสกัดของสารสีจากเชื้อราที่ผ่านการเจือจางด้วยตัวทำละลายปริมาตร 15 ไมโครลิตร ลงบนแผ่น disc นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ตรวจสอบฤทธิ์การยับยั้งแบคทีเรียของสารสกัดจากการเกิดวงใส (Inhibition zone)

6. การวิเคราะห์ค่าทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely randomized design; CRD) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ผลการทดลองที่ได้แสดงในรูปของค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มทดลองโดยใช้ สถิติ One-way ANOVA และวิเคราะห์ความแตกต่างของชุดข้อมูลด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่าง 2 กลุ่มที่เป็นอิสระกัน (Independent-Samples *t*-test) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ผลการวิจัย

1. ผลการศึกษาสายพันธุ์เชื้อราและสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตสารสีของเชื้อราเมื่อใช้เปลือกทุเรียนเหลือทิ้งจากการแปรรูปเป็นวัตถุดิบ

เมื่อทำการเพาะเลี้ยงเชื้อรา *M. purpureus* สายพันธุ์ TISTR 3615 และ 3630 บนอาหารเปลือกทุเรียน หลังหมักนาน 12 วัน พบว่าสายพันธุ์ TISTR 3615 สามารถผลิตสารสีเหลืองและสีแดงได้ในปริมาณที่สูงกว่าสายพันธุ์ TISTR 3630 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) (Figure 2A) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้สายพันธุ์ TISTR 3615 ในการศึกษาขั้นต่อไป แหล่งคาร์บอนที่ให้ปริมาณสารสีเหลืองสูง คือ กลูโคส ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) กับชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมแหล่งคาร์บอน รองลงมาคือ กากน้ำตาล และน้ำอามิ อามิ ตามลำดับ โดยแหล่งคาร์บอนที่ให้ปริมาณสารสีแดงสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คือ กลูโคส รองลงมาคือ ชุดควบคุม กากน้ำตาล และน้ำอามิ อามิ ตามลำดับ (Figure 2B) แสดงให้เห็นว่ากลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอนที่เหมาะสมในการผลิตสารสี ดังนั้นจึงเลือกกลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอนในการทดลองขั้นต่อไป ปริมาณแหล่งคาร์บอนที่ให้สีเหลืองสูงสุดคือ กลูโคสความเข้มข้นร้อยละ 6 ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) กับปริมาณสารสีที่ได้จากการใช้กลูโคสความเข้มข้นร้อยละ 2 และ 4 ตามลำดับ ส่วนในชุดควบคุมจะให้ปริมาณสารสีเหลืองน้อยที่สุด ในขณะที่การใช้กลูโคสความเข้มข้นร้อยละ 2 ให้ปริมาณสารสีแดงสูงสุด ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) กับการใช้กลูโคสความเข้มข้นร้อยละ 4 และ 6 ตามลำดับ ส่วนในชุดควบคุมจะให้ปริมาณสารสีแดงน้อยที่สุด (Figure 2C) เมื่อพิจารณาจากต้นทุนการผลิต ดังนั้นจึงเลือกใช้กลูโคสความเข้มข้นร้อยละ 2 ในการผลิตสารสี

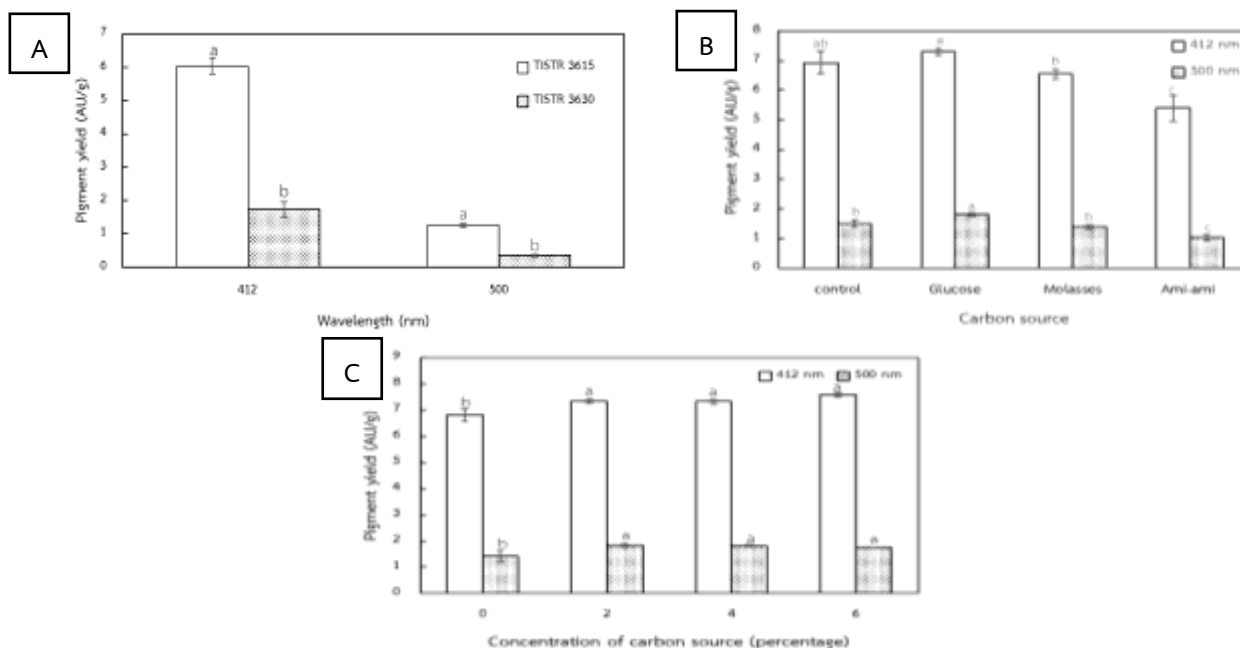


Figure 2 Pigment yield by using difference (A) strains (B) type of carbon sources and (C) concentration of carbon sources. Means with different letters are significantly different ($p \leq 0.05$)

โดยสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตสารสีโดยใช้เปลือกทุเรียนสายพันธุ์หมอนทอง คือ การใช้เชื้อรา *M. purpureus* TISTR 3615 และใช้กลูโคสความเข้มข้นร้อยละ 2 เป็นแหล่งคาร์บอน โดยจะให้ปริมาณสารสีเหลืองและสีแดงเท่ากับ 7.34 ± 0.09 และ 1.84 ± 0.07 AU/กรัม ตามลำดับ

2. ผลการศึกษาการผลิตสารสีจากกระบวนการหมักของเชื้อราโดยใช้เปลือกทุเรียนสายพันธุ์ต่าง ๆ เป็นวัตถุดิบ

- ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

โดยเปลือกทุเรียนน้ำหนักสด 1 กิโลกรัม ได้แก่ สายพันธุ์ก้านยาว กระดุม หมอนทอง และนกกหยิบจะให้เปลือกทุเรียนที่มีน้ำหนักแห้งแตกต่างกันเท่ากับ 189.85, 141.29, 500.00 และ 173.91 กรัม ตามลำดับ เมื่อนำไปผลิตสารสี พบว่า ทุกสายพันธุ์ให้ผลได้ของสารสีร้อยละ 99.0 องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกทุเรียนและสารสีที่ผลิตได้จากเปลือกทุเรียนสายพันธุ์ก้านยาว (PK) กระดุม (PKR) หมอนทอง (PM) และนกกหยิบ (PN) แสดงใน Table 1 พบว่า สารสีที่ผลิตได้จากเปลือกทุเรียนทุกสายพันธุ์มีปริมาณโปรตีนและไขมันเพิ่มขึ้น โดยสารสี PM มีปริมาณโปรตีนสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) และสารสี PKR มีปริมาณไขมันสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) รองลงมาคือ สารสี PM, PN และ PK ตามลำดับ เมื่อนำเปลือกทุเรียนทั้ง 4 สายพันธุ์ มาใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการหมักของเชื้อรา *M. purpureus* TISTR 3615 ในสภาวะที่เหมาะสม ผลการศึกษามีดังนี้

Table 1 Chemical composition of different dried durian peels and pigments by the fermentation of *M. purpureus* TISTR 3615

Component (%)	Kanyao (PK)		Kradum (PKR)		Monthong (PM)		Nokyip (PN)	
	Peel	Pigment	Peel	Pigment	Peel	Pigment	Peel	Pigment
Carbohydrate	87.24±0.14 ^c	75.68±0.19 ^c	88.94±0.17 ^a	73.32±0.03 ^d	81.35±0.01 ^d	77.56±0.02 ^b	88.15±0.11 ^b	80.66±0.08 ^a
Protein	1.10±0.09 ^b	1.12±0.04 ^c	0.78±0.05 ^c	1.39±0.03 ^b	6.62±0.02 ^a	9.30±0.15 ^a	0.80±0.09 ^c	0.97±0.05 ^c
Lipid	0.32±0.02 ^b	0.73±0.02 ^c	0.32±0.01 ^b	1.46±0.02 ^a	0.68±0.02 ^a	0.96±0.03 ^b	0.65±0.04 ^a	0.73±0.02 ^c
Moisture	4.67±0.02 ^c	10.52±0.11 ^b	6.62±0.02 ^a	12.08±0.04 ^a	6.32±0.04 ^b	6.12±0.02 ^d	4.82±0.21 ^c	10.30±0.05 ^c
Crude fiber	26.04±0.35 ^a	23.04±0.30 ^b	17.46±0.04 ^d	22.40±0.17 ^c	22.75±0.03 ^b	27.73±0.08 ^a	18.42±0.48 ^c	23.34±0.25 ^b
Ash	6.67±0.07 ^a	11.95±0.14 ^a	3.33±0.10 ^d	11.74±0.02 ^b	5.03±0.03	6.06±0.25 ^d	5.57±0.20 ^b	7.34±0.03 ^c

Notes: ^{a-d} values with different superscript letters within the same row are significantly different ($p \leq 0.05$).

Each value in the table is presented as mean±SD

- ผลของค่าสี

ผงสารสีที่ได้จากการหมักของสายพันธุ์ TISTR 3615 บนเปลือกทุเรียนสายพันธุ์ต่าง ๆ (Figure 3) พบว่า สารสีที่ผลิตได้นั้นมีแนวโน้มค่อนข้างไปทางสีแดงออกน้ำตาล ผงสารสี PKR จะมีสีค่อนข้างน้ำตาลเข้มมากที่สุด รองลงมาคือ PN และ PK ส่วนสารสี PM นั้น จะมีสีน้ำตาลอมชมพู (Table 2)

Table 2 L*, a* and b* values of pigment powder by the fermentation of *M. purpureus* TISTR 3615 on different durian peel cultivars

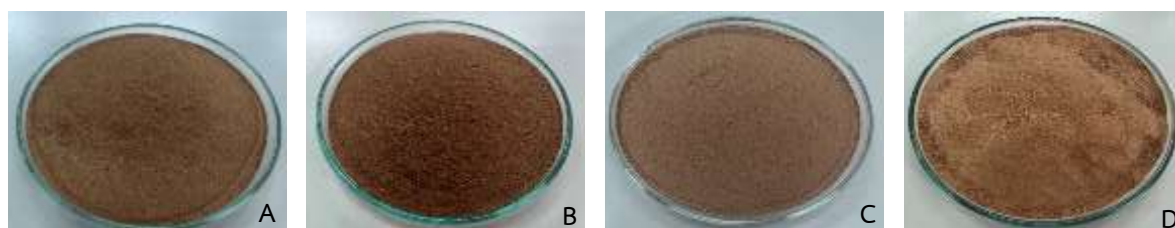
Pigment powder	L*	a*	b*
PK	23.85±0.27 ^a	13.90±0.09 ^c	36.73±0.63 ^b
PKR	17.80±0.18 ^c	13.94±0.09 ^c	29.26±0.17 ^c
PM	23.73±0.11 ^a	14.43±0.31 ^b	31.43±0.15 ^c
PN	20.97±0.62 ^b	15.38±0.51 ^a	39.41±2.32 ^a

Notes: ^{a-c} values with different superscript letters within the same column are significantly different ($p \leq 0.05$).

Each value in the table is presented as mean±SD

- ผลของปริมาณสารสี

เปลือกทุเรียนสายพันธุ์หมอนทองให้ปริมาณสารสีเหลือง (7.26 ± 0.15 AU/g) และสารสีแดง (1.60 ± 0.067 AU/g) สูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) รองลงมา ได้แก่ สายพันธุ์นกหยิบ กระดุมและก้านยาว ตามลำดับ (Figure 4)

**Figure 3** Pigment powder by the fermentation of *M. purpureus* TISTR 3615 on different durian peel cultivars including (A) Kanyao; (B) Kradum; (C) Monthong; and (D) Nokyip

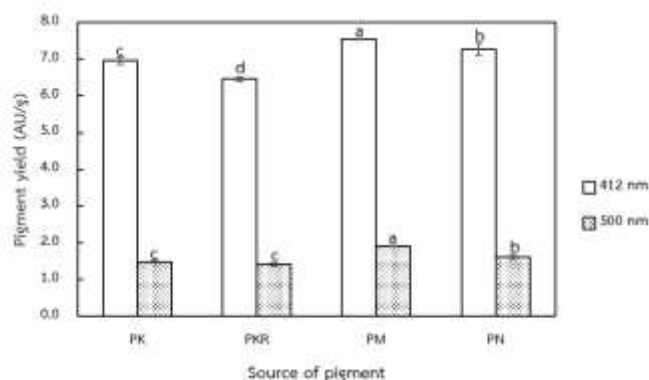


Figure 4 Pigment yield by the fermentation of *M. purpureus* TISTR 3615 on different durian peel cultivars.

Different letters within the same wavelength of pigment indicate significant differences among sources of pigment ($p \leq 0.05$).

- ผลของความสามารถในการละลาย

การละลายน้ำ พบว่า สารสี PM สามารถละลายในน้ำได้ดีที่สุด ส่วนสารสี PK, PKR และ PN มีความสามารถในการละลายในน้ำไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) โดยมีปริมาณตะกอนที่เหลืออยู่เท่ากับ 0.75 ± 0.01 , 0.95 ± 0.03 , 0.98 ± 0.03 และ 0.98 ± 0.03 กรัม ตามลำดับ การละลายในเอทานอล พบว่า สารสี PM สามารถละลายในเอทานอลได้ดีที่สุด รองลงมา ได้แก่ สารสี PN, PK และ PKR ตามลำดับ โดยมีปริมาณตะกอนที่เหลืออยู่เท่ากับ 0.89 ± 0.01 , 0.90 ± 0.00 , 0.92 ± 0.02 และ 0.91 ± 0.01 กรัม ตามลำดับ ส่วนการละลายในเมทานอลนั้น พบว่า สารสี PM สามารถละลายในเมทานอลได้ดีที่สุด รองลงมา ได้แก่ สารสี PKR, PN และ PK ตามลำดับ โดยมีปริมาณตะกอนที่เหลืออยู่เท่ากับ 0.94 ± 0.01 , 1.06 ± 0.01 , 1.08 ± 0.01 และ 1.10 ± 0.01 กรัม ตามลำดับ (Figure 5)

- ผลของปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH

สารสีที่ผลิตได้จากการหมักของเปลือกทุเรียนทุกสายพันธุ์ที่นำมาทดสอบ ตรวจพบสารประกอบฟีนอลิกและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH พบว่า สารสี PM มีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) รองลงมา ได้แก่ สารสี PN, PK และ PKR ตามลำดับ (Figure 6) โดยมีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดเท่ากับ $2,129.63 \pm 33.95$, $1,422.22 \pm 19.25$, $1,407.41 \pm 23.13$ และ 722.22 ± 11.11 $\mu\text{g GAE/g}$ ตามลำดับ นอกจากนี้ยัง พบว่า สารสี PM มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH สูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) รองลงมาได้แก่ สารสี PN, PK และ PKR ตามลำดับ โดยมีร้อยละของการยับยั้งอนุมูลอิสระ DPPH เท่ากับ 76.32 ± 0.70 , 73.72 ± 0.79 , 70.17 ± 0.84 และ 57.42 ± 1.74 ตามลำดับ ซึ่งเทียบเท่ากับ 93.47 ± 0.85 , 90.28 ± 0.97 , 85.93 ± 1.02 และ 70.32 ± 2.13 $\mu\text{g ascorbic acid/g}$ ตามลำดับ

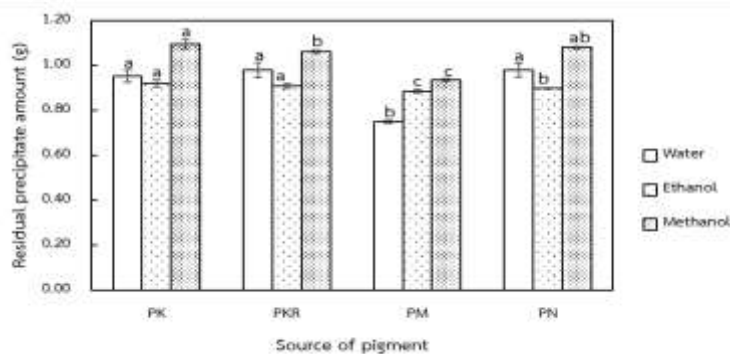


Figure 5 The solubility of pigments produced by the fermentation of *M. purpureus* TISTR 3615 on different cultivars durian peels in various solvents. Different letters within the same solvent indicate significant differences among sources of pigment ($p < 0.05$).

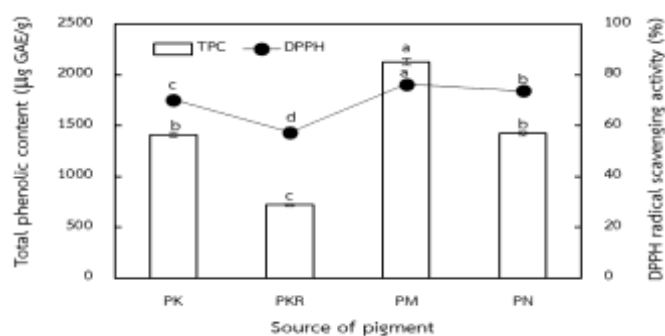


Figure 6 Total phenolic content and antioxidant activity detected in the pigments produced by the fermentation of *M. purpureus* TISTR 3615 on different cultivars durian peels. Different letters between sources of pigment indicate significant differences among treatments ($p < 0.05$).

-ฤทธิ์ยับยั้งจุลินทรีย์

ทำการคัดเลือกสารสีที่มีคุณสมบัติที่ดีที่สุด เพื่อนำไปวิเคราะห์ฤทธิ์ในการยับยั้งจุลินทรีย์ก่อโรค โดยจากผลการศึกษาพบว่า สารสี PM นั้นมีคุณสมบัติที่ดีกว่าสารสีตัวอื่น ๆ ได้แก่ มีโทนสีที่ออกน้ำตาลชมพู มีปริมาณสารสีเหลืองและแดงสูงที่สุด ละลายในน้ำได้ดีที่สุด นอกจากนี้ยังมีปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ยับยั้งอนุมูลอิสระสูงสุด ผลการทดสอบฤทธิ์ยับยั้งจุลินทรีย์ก่อโรคของสารสกัดจากสารสี PM พบว่า สารสีมีฤทธิ์ในการยับยั้ง *B. cereus*, *S. aureus*, *Micrococcus* sp. และ *E. coli* โดยสามารถยับยั้ง *B. cereus* ได้สูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) รองลงมา ได้แก่ *S. aureus*, *Micrococcus* sp. และ *E. coli* ตามลำดับ (Table 3)

Table 3 Antimicrobial activity of PM pigment

Pigment source	Inhibitory zone (mm) (Mean±SD)			
	<i>B. cereus</i>	<i>S. aureus</i>	<i>Micrococcus</i> sp.	<i>E. coli</i>
PM	3.83±0.29 ^a	2.33±0.58 ^b	2.00±0.50 ^b	1.83±0.29 ^b

Notes: Values with different superscript letters within the same row are significantly different ($p < 0.05$).

Each value in the table is presented as mean±SD.

การอภิปรายผล

Monascus sp. เป็นเชื้อราที่เมื่อเจริญในช่วงแรกจะสร้างเส้นใยสีขาวจากนั้นเมื่ออายุมากขึ้นเส้นใยจะเปลี่ยนจากสีขาวเป็นสีแดง เนื่องจากเชื้อราชนิดนี้มีความสามารถในการผลิตสารสีในกลุ่มสีส้มแดงได้ โดยวัตถุดิบที่นิยมใช้ในการเพาะเลี้ยงเชื้อรา *Monascus* sp. คือข้าวหรือธัญพืช แต่ในปัจจุบันเพื่อให้ต้นทุนในการผลิตสารสีลดลงจึงได้มีการนำวัตถุดิบเหลือทิ้งหรือของเสียมาใช้ทดแทน โดยการศึกษาในครั้งนี้ได้นำเปลือกทุเรียนซึ่งเป็นของเหลือทิ้งที่เกิดหลังจากการบริโภคหรือการแปรรูปทุเรียนมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตสารสีของเชื้อรา พบว่า การใช้เปลือกทุเรียนเพียงอย่างเดียวโดยที่ยังไม่เติมแหล่งคาร์บอนใด ๆ *M. purpureus* TISTR 3615 และ 3630 ก็สามารถเจริญและผลิตสารสีได้ โดยผลิตสารสีเหลือง 6.02 ± 0.24 และ 1.74 ± 0.23 AU/กรัม ตามลำดับ และผลิตสารสีแดง 1.25 ± 0.06 และ 0.35 ± 0.04 AU/กรัม ตามลำดับ อาจเป็นผลเนื่องมาจากเชื้อรา *Monascus* sp. นั้นสามารถผลิตเอนไซม์อะไมเลส เซลลูเลส ไซลาเนส และเบต้ากลูโคซิเดส (Chen et al., 2020; Louhasakul et al., 2023) ซึ่งทำหน้าที่ในการย่อยคาร์โบไฮเดรตในเปลือกทุเรียนให้กลายเป็นโอลิโกแซ็กคาไรด์หรือโมโนแซ็กคาไรด์ที่เชื้อราสามารถนำไปใช้ในการเจริญและผลิตสารสีได้ สอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้านี้ที่มีการนำของเหลือทิ้งจากการเกษตรมาใช้เป็นวัตถุดิบ ของ El-Sayed et al. (2022) ใช้เปลือกมันฝรั่ง ข้าวสาลี ชั่งข้าวโพด เปลือกข้าวสาลี และเปลือกข้าว และเติมน้ำกลั่นเพื่อปรับความชื้น เติมเชื้อรา *M. ruber* SRZ112 จากนั้นหมักนาน 6 วัน พบว่า เชื้อราสามารถใช้วัตถุดิบทั้งทางการเกษตรเหล่านี้เป็นวัตถุดิบในการผลิตสารสีได้ โดยให้ปริมาณสารสีแดงเท่ากับ 10.65 ± 0.02 , 6.89 ± 0.76 , 2.45 ± 0.52 , 6.89 ± 0.76 และ 3.98 ± 0.21 AU/กรัม ตามลำดับ

ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญและการผลิตสารสีของเชื้อรา *M. purpureus* ได้แก่ อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่างของอาหารเลี้ยงเชื้อ ระยะเวลาในการหมัก แหล่งคาร์บอน แหล่งไนโตรเจน สายพันธุ์ของเชื้อรา และสารอาหารต่าง ๆ (He et al., 2021) โดยการศึกษาในครั้งนี้ได้ทำการศึกษา สายพันธุ์ของเชื้อรา ชนิดของแหล่งคาร์บอน และปริมาณของแหล่งคาร์บอน โดยพบว่า *M. purpureus* TISTR 3615 นั้นให้ปริมาณสารสีเหลืองและสีแดงสูงกว่าสายพันธุ์ TISTR 3630 อาจเป็นผลเนื่องมาจากความสามารถในการใช้วัตถุดิบที่แตกต่างกัน และสภาวะที่ใช้อาจเหมาะสมกับสายพันธุ์ TISTR 3615 มากกว่า ส่งผลให้สามารถผลิตสารสีได้ดีกว่า สำหรับชนิดของแหล่งคาร์บอนที่เหมาะสมนั้น คือ กลูโคส เนื่องจากกลูโคสเป็นโมโนแซ็กคาไรด์ที่เชื้อราสามารถนำไปใช้ได้โดยไม่ต้องมีการย่อยก่อน De Carvalho et al. (2014) รายงานว่าการเติมแหล่งคาร์บอนบางชนิด ได้แก่ กลูโคส ฟรักโทส มอลโทส แลคโตส และกาแลคโตส นอกจากจะช่วยให้เพิ่มผลผลิตของสารสีและชีวมวลแล้ว การเติมแหล่งคาร์บอนที่เหมาะสมยังช่วยให้เชื้อราสามารถผลิตสารเมแทบอไลต์ทุติยภูมิได้สูงอีกด้วย Abdel-Raheem et al. (2021) ใช้ของเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตมันฝรั่งทอดเป็นวัตถุดิบในการผลิตสารสีของเชื้อรา *M. ruber* Went AUMC 5705 พบว่าการเติมแหล่งคาร์บอนปริมาณ 50 กรัมต่อลิตร สามารถช่วยเพิ่มอัตราการเจริญของเชื้อรา การผลิตสารสี การผลิตชีวมวล และเอทานอล โดยปริมาณของแหล่งคาร์บอนที่เหมาะสม คือ ร้อยละ 2 หากมีปริมาณกลูโคสสูงขึ้นอาจส่งผลในเชิงลบต่อการเจริญและการผลิตสารสีของเชื้อราได้ ซึ่ง Wong et al. (1981) รายงานว่าการใช้ปริมาณกลูโคสสูงจะช่วยให้เชื้อรามีการสร้างเส้นใยได้ดี แต่จะมีผลเสียต่อกระบวนการหมัก โดยจะส่งผลให้อาหารที่ใช้ในการหมักมีความเป็นกรดสูงทำให้ได้ผลผลิตของสารสีลดลง นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของปริมาณกลูโคสยังส่งผลให้อัตราการเจริญจำเพาะลดลงเนื่องจากการเกิดออสโมติก (Kim et al., 1997) โดยความดันออสโมติกเพิ่มขึ้นเนื่องจากความเข้มข้นของกลูโคสสูงขึ้นและลดปริมาณของน้ำที่ใช้ในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ลง ผลผลิตของสารสีแดงที่ผลิตได้ในสภาวะที่เหมาะสมมีปริมาณ 1.84 ± 0.07 AU/กรัม ซึ่งมีค่าสูงกว่า Nimnoi and Lumyong (2011) รายงานว่าการใช้กากเนื้อมะพร้าวเหลือทิ้งเป็นอาหารเลี้ยงเชื้อของ *M. purpureus* นั้นผลิตสารสีแดงได้ในระดับต่ำมีค่าเท่ากับ 0.59 AU/กรัม แต่มีค่าต่ำกว่ารายงานของ Abdel-Raheem et al. (2022) ที่ผลิตสารสีด้วยกระบวนการหมักของ *M. purpureus* (Went NRRL 1992) บนผงเศษมันฝรั่งทอดผลิตสารสีได้ 19.86 AU/มิลลิลิตร เช่นเดียวกับ Khacharat et al. (2022) ผลิตสารสีจาก *M. purpureus* TISTR 3003 ที่หมักบนเปลือกกล้วยหอมทองดิบที่แก่จัด นาน 24 วัน ผลิตสารสีแดงได้ 348.20 ± 9.21 Unit/กรัม และของ Asghari et al. (2021) ที่ใช้น้ำเชื่อมจากอินทผลัมลูกร่วงความเข้มข้นร้อยละ 55 ในการผลิตสารสีของ *M. purpureus* พบว่า ผลิตสารสีแดงได้สูงสุดเท่ากับ 5.10 AU/กรัม การที่ผลของปริมาณสารสีที่ผลิตได้มีความแตกต่างกัน อาจเนื่องมาจากความแตกต่างของสายพันธุ์ของเชื้อรา วัตถุดิบที่ใช้ รวมถึงสภาวะที่ใช้ในการหมัก โดยปริมาณสารสีที่ผลิตได้จากการหมักของเชื้อราบนเปลือกทุเรียนในครั้งนี้มีค่าค่อนข้างต่ำ ดังนั้นหากต้องการให้มีปริมาณผลผลิตของสารสีเพิ่มขึ้น อาจต้องศึกษาปัจจัยอื่น ๆ เพิ่มเติม ได้แก่ ความเข้มข้นของหัวเชื้อ ชนิดของแหล่งไนโตรเจน อุณหภูมิที่ใช้หมัก ค่าความเป็นกรด-ด่าง ของอาหารเลี้ยงเชื้อ ระยะเวลาในการหมัก และการเติมสารเสริม

เมื่อพิจารณาจากปริมาณสารสีที่ผลิตได้ การผลิตสารสีโดยใช้เปลือกทุเรียนสายพันธุ์หมอนทองนั้นมีความเหมาะสมมากที่สุด เนื่องจากสามารถผลิตสารสีเหลืองและสีแดงได้ในปริมาณสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) รวมถึงสารสีที่ผลิตได้ยังมีปริมาณโปรตีนและไขมันสูง เมื่อทำการศึกษาค้นสมบัติของสารสีที่ผลิตได้จากเปลือกทุเรียนทุกสายพันธุ์ พบว่า สามารถละลายได้ในตัวทำละลายทุกชนิดที่นำมาทดสอบ โดยสารสี PM นั้นสามารถละลายในตัวทำละลายทุกชนิดได้ดีที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับสารสี PK, PKR และ PN ซึ่งการที่สารสีทุกชนิดที่ผลิตได้ละลายได้ในน้ำนั้นเป็นคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้เป็นสีผสมอาหารหรือสีย้อมผ้าทดแทนการใช้สารสีสังเคราะห์

ส่วนปริมาณฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH ของสารสีที่ผลิตได้อยู่ในช่วง 722.22 ± 11.11 ถึง $2,129.63 \pm 33.95 \mu\text{g GAE/g}$ และร้อยละ 57.42 ± 1.74 ถึง 76.32 ± 0.70 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าแตกต่างจากงานวิจัยของ Suwanposri et al. (2025b) ผลิตสารสีจากการหมักของ *M. purpureus* TISTR 3090 บนข้าวแม่พญาทองคำ หมักนาน 10 วัน ตรวจพบปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH เท่ากับ $29.14 \pm 9.74 \mu\text{g GAE/g}$ และร้อยละ 42.77 ± 4.46 ตามลำดับ เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Chen et al. (2021) นำกระดุกปลาไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตสารสีของเชื้อรา *M. purpureus* BCRC 31499 หมักนาน 3 และ 6 วัน พบว่า มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH เท่ากับร้อยละ 26-81 และ 23-75 ตามลำดับ และแตกต่างจาก Lin et al. (2019) ผลิตสารสีโดยเชื้อรา *M. purpureus* Went (BCRC 31615) บนข้าว พบว่า เมื่อสกัดสารสีด้วยน้ำและเอทานอลตรวจพบปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดเท่ากับ 10.91 ± 0.16 และ $11.42 \pm 0.24 \mu\text{g GAE/g}$ รวมถึงมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH เท่ากับร้อยละ 9.09 ± 0.12 และ 4.65 ± 0.26 ตามลำดับ ผลของปริมาณสารฟีนอลิกและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่แตกต่างกัน เนื่องจากความเข้มข้นของตัวอย่างที่ใช้ วิธีการในการสกัด ชนิดของตัวอย่าง ชนิดของตัวทำละลาย และระยะเวลาในการสกัด

สารสี PM ที่ผลิตได้มีฤทธิ์ในการยับยั้งแบคทีเรียก่อโรคทั้งแกรมบวกและแกรมลบ แต่สามารถยับยั้งแบคทีเรียแกรมบวกได้ดีกว่า เนื่องจากความแตกต่างของโครงสร้างผนังเซลล์ ในแบคทีเรียแกรมลบมีเยื่อหุ้มชั้นนอก (Outer membrane) ที่ประกอบด้วยสารลิพอโพลีแซ็กคาไรด์ซึ่งทำหน้าที่ในการเป็นตัวกั้นการซึมผ่านของสารได้ดี โดยโครงสร้างนี้ไม่พบในแบคทีเรียแกรมบวก สารต่าง ๆ จึงซึมผ่านเข้าสู่เยื่อหุ้มเซลล์ของแบคทีเรียแกรมบวกได้ง่ายกว่าแบคทีเรียแกรมลบ (Shan et al., 2007) ส่งผลให้แบคทีเรียแกรมบวกมีความไวสารสี PM มากกว่าแบคทีเรียแกรมลบ มีการศึกษาในงานวิจัยที่เสนอว่า กลไกการออกฤทธิ์อาจเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาระหว่างสารสีของ *Monascus* กับเอนไซม์ในสปอร์ที่งอกแล้วและเซลล์ปกติ ซึ่งส่งผลให้การใช้อัตุเหล็กลดลงและมีผลต่อความสามารถในการซึมผ่านของเยื่อหุ้มเซลล์ ซึ่งอาจทำให้การลำเลียงสารอาหารออกซิเจน และสารเมแทบอไลต์ลดลง (Kim et al., 2006; Xu, 2011) ซึ่งสอดคล้องกับ Teiba et al. (2025) พบว่า สารสกัดจากสารสีของเชื้อรา *M. purpureus* ATCC 16436 สามารถยับยั้ง *E. coli* ได้ โดยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีฤทธิ์ต้านจุลินทรีย์ที่ตรวจพบ ได้แก่ Aspidospermidin-17-ol, 1-acetyl-16-methoxy, Octanoic acid และ Hexadecanoic acid methyl ester และรายงานของ Moradi & Mortazavi (2024) พบว่า สารสกัดสารสีของ *M. purpureus* PTCC 5303 ที่เพาะเลี้ยงบนกากตะกอนเหลือทิ้งจากการผลิตนมมีฤทธิ์ในการยับยั้ง *S. aureus* และ *E. coli* รวมถึงรายงานของ Srianta et al. (2024) พบว่า สารสกัดจากสารสีของเชื้อรา *M. purpureus* M9 ที่เพาะเลี้ยงบนหญ้าหวานมีฤทธิ์ในการยับยั้ง *S. aureus* และ *E. coli* โดย Abd Razak et al. (2015) รายงานว่ากรดฟีนอลิกที่พบในสารสกัดของสารสีจากเชื้อรา *Monascus* ที่เพาะเลี้ยงบนรำข้าว คือ p-coumaric, Ferulic, Sinapic, Vanillic, Caffeic และ Syringic acid ซึ่งสารเหล่านี้มีคุณสมบัติในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ (Liu et al., 2020) นอกจากนี้ยังมีหลายงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของสารสีแดง ส้ม และเหลืองของสารสีจากเชื้อรา *Monascus* ได้แก่ Gökmen et al. (2021) พบว่า สารสีแดงของเชื้อรา *Monascus* มีค่า MIC 128 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร และ >128 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร ที่สามารถยับยั้ง *S. aureus* และ *E. coli* ตามลำดับ มีค่าที่ต่ำกว่าการใช้สารสีแดงทางการค้าซึ่งมีค่า MIC 256 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร และ >256 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร ในการยับยั้ง *S. aureus* และ *E. coli* ตามลำดับ Feng et al. (2019) พบว่า สารสีส้มความเข้มข้น 1-10 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร มีฤทธิ์ในการยับยั้งแบคทีเรีย *S. aureus* โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของบริเวณยับยั้งอยู่ในช่วง 5-34 มิลลิเมตร โดยสารสีส้มจะทำให้เซลล์ของ *S. aureus* หดตัวและเกิดความเสียหายที่เยื่อหุ้มเซลล์ ส่งผลให้เกิดการรั่วไหลของโปรตีนจากเซลล์แบคทีเรีย ขณะเดียวกัน อนุพันธ์กรดอะมิโนของสารสีจาก *Monascus* จะสามารถแสดงออกได้นั้นขึ้นอยู่กับความไม่ชอบน้ำของสารสีและปริมาณของสารสีที่ยึดเกาะบนผิวเซลล์ โดยยิ่งสารสีมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำมาก การยึดเกาะก็จะมากขึ้นซึ่งนำไปสู่การจำกัดการดูดซับออกซิเจน (Kim et al., 2006)

บทสรุป

เปลือกทุเรียนสายพันธุ์ก้านยาว กระดุม หมอนทอง และนกกหยิบ สามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตสารสีด้วยกระบวนการหมักของเชื้อรา *M. purpureus* TISTR 3615 และในสภาวะที่เหมาะสม มีกลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน และปริมาณความเข้มข้นของแหล่งคาร์บอนร้อยละ 2 ได้ ซึ่งสารสีที่ได้จากการหมักของเชื้อราบนเปลือกทุเรียนสายพันธุ์ต่าง ๆ นั้นมีปริมาณของโปรตีนและไขมันเพิ่มสูงขึ้น โดยพบว่า เปลือกทุเรียนสายพันธุ์หมอนทองเป็นวัตถุดิบที่ให้สารสีที่มีคุณสมบัติที่ดีที่สุด สารสี PM ที่ผลิตได้มีสีน้ำตาลอมชมพู มีความสามารถในการละลายน้ำ เอทานอล และเมทานอลได้ดีที่สุด มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เปลือกทุเรียนสายพันธุ์อื่น ๆ เป็นวัตถุดิบ รวมถึงสารสี PM ที่ผลิตได้ยังมีฤทธิ์ในการยับยั้งจุลินทรีย์ก่อโรค จากคุณสมบัติของสารสีที่ได้สามารถใช้เป็นข้อมูลในการพัฒนากระบวนการผลิตสารสีธรรมชาติจากของเหลือทิ้งสำหรับใช้เป็นสารให้สีในอาหาร สีย้อมผ้า หรือสารเร่งสีในอาหารสัตว์ เช่น กุ้ง สัตว์สวยงาม และไก่ไข่ เพื่อทดแทนการใช้สังเคราะห์ได้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) สำหรับงบประมาณสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2567 ผ่านทางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตพืชและภูมิทัศน์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ในด้านเครื่องมือ อุปกรณ์ และสถานที่ในการปฏิบัติการวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- Abd Razak, D. L., Abd Rashid, N. Y., Jamaluddin, A., Sharifudin, S. A., & Long, K. (2015). Enhancement of phenolic acid content and antioxidant activity of rice bran fermented with *Rhizopus oligosporus* and *Monascus purpureus*. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 4(1), 33-38.
- Abdel-Raheem, H. E. F., Hassan, S. H. A., & Ali, M. M. A. (2021). Production and application of natural food pigments by *Monascus ruber* using potato chips manufacturing wastes. *Bulletin of Pharmaceutical Sciences Assiut University*, 44(2), 551-563.
- Abdel-Raheem, H. E., Alrumman, S. A., Gadow, S. I., El-Sayed, M. H., Hikal, D. M., Hesham, A. E. L., & Ali, M. M. (2022). Optimization of *Monascus purpureus* for natural food pigments production on potato wastes and their application in ice lolly. *Frontiers in Microbiology*, 13, 862080.
- AOAC International. (2000). *Official methods of analysis* (17th ed.). AOAC International.
- Asghari, M., Jahadi, M., Hesam, F., & Ghasemi-Sepiro, N. (2021). Optimization of *Monascus* pigment production on date waste substrates using solid state fermentation. *Applied Food Biotechnology*, 8(3), 247-254.
- Babitha, S., Soccol, C. R., & Pandey, A. (2007). Solid state fermentation for the production of *Monascus* pigments from jackfruit seed. *Bioresource Technology*, 98, 1554-1560.
- Bakthavachalu, P., Kannan, S. M., & Qoronfleh, M. W. (2020). Food color and autism: a meta-analysis. In M. M. Essa & M. W. Qoronfleh (Eds.), *Personalized Food Intervention and Therapy for Autism Spectrum Disorder Management* (pp. 481-504). Springer International Publishing.
- Boonrueang, S. (2002). Dye quality evaluation. *TTIS Textile Digest*, 10(104), 44-45.
- Brown, M. J. (1997). *Durio - A Bibliographic Review*. MacGill University.

- Chen, G., Liu, Y., Zeng, J., Tian, X., Bei, Q., & Wu, Z. (2020). Enhancing three phenolic fractions of oats (*Avena sativa* L.) and their antioxidant activities by solid-state fermentation with *Monascus anka* and *Bacillus subtilis*. *Journal of Cereal Science*, 93, 102940.
- Chen, Y. T., Hsieh, S. L., Gao, W. S., Yin, L. J., Dong, C. D., Chen, C. W., Singhanian, R. R., Hsieh, S., & Chen, S. J., (2021). Evaluation of chemical compositions, antioxidant capacity and intracellular antioxidant action in fish bone fermented with *Monascus purpureus*. *Molecules*, 26(17), 5288.
- Cui, J., Bai, G., Fu, Y., Zhai, X., Jing, L., Liu, Y., Yuan, D., & Wang, C. (2025). Production of smoked sausage using *Monascus* pigments-calcium carbonate colorant lake with nisin as a nitrite substitute. *Foods*, 14(3), 477.
- De Carvalho, J. C., Cardoso, L. C., Ghiggi, V., Woiciechowski, A. L., de Souza Vandenberghe, L. P., & Soccol, C. R. (2014). Microbial pigments. In S. K. Brar, G. S. Dhillon & C. R. Soccol (Eds.), *Biotransformation of waste biomass into high value biochemicals* (pp. 73-97). Springer.
- El-Sayed, E. S. R., Gach, J., Olejniczak, T., & Boratyński, F. (2022). A new endophyte *Monascus ruber* SRZ112 as an efficient production platform of natural pigments using agro-industrial wastes. *Scientific Reports*, 12(1), 12611.
- Feng, L. H., Li, Y. Q., Sun, G. J., & Zhao, X. Z. (2019). Antibacterial effect of orange *Monascus* pigment against *Staphylococcus aureus*. *Acta Alimentaria*, 48(2), 169-176.
- Gökmen, G. G., Şilbir, M. S., Göksungur, Y., & Kışla, D. (2021). Antimicrobial activity of red pigments derived from *Monascus purpureus*: a comparison to industrial red pigments. *JSFA reports*, 1(1), 5-10.
- Gong, P., Shi, R., Liu, Y., Luo, Q., Wang, C., & Chen, W. (2023). Recent advances in *monascus* pigments produced by *Monascus purpureus*: Biosynthesis, fermentation, function, and application. *Lwt*, 185, 115162.
- He, J., Jia, M., Li, W., Deng, J., Ren, J., Luo, F., Bai, J., & Liu, J. (2021). Toward improvements for enhancement the productivity and color value of *Monascus* pigments: a critical review with recent updates. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(10), 1-15.
- Khacharat, L., Mahakarnchanakul, W., Sukatta, U., Sae-tan, S., Rugthaworn, P., Klinsukhon, K., & Sakayaroj, S. (2022). Effect of banana peels and phenolic compounds on pigments and citrinin production by *Monascus purpureus*. *Agriculture and Natural Resources*, 56(1), 203-214.
- Kim, C., Jung, H., Kim, Y. O., & Shin, C. S. (2006). Antimicrobial activities of amino acid derivatives of *monascus* pigments. *FEMS Microbiology Letters*, 264(1), 117-124.
- Kim, D., & Ku, S. (2018). Beneficial effects of *Monascus* sp. KCCM 10093 pigments and derivatives: A mini review. *Molecules*, 23(1), 98.
- Kim, S. Y., Lee, K. H., Kim, J. H., & Oh, D. K. (1997). Erythritol production by controlling osmotic pressure in *Trigonopsis variabilis*. *Biotechnology Letters*, 19, 727-729.
- Lin, C. S., Hur, H. F., & Lin, C. C. (2019). Antioxidant properties and antibacterial activity of fermented *Monascus purpureus* extracts. *MOJ Food Processing & Technology*, 7(2), 49-54.
- Liu, J., Du, C., Beaman, H. T., & Monroe, M. B. B. (2020). Characterization of phenolic acid antimicrobial and antioxidant structure-property relationships. *Pharmaceutics*, 12(5), 419.
- Louhasakul, Y., Wado, H., Lateh, R., & Cheirsilp, B. (2023). Solid-state fermentation of Saba banana peel for pigment production by *Monascus purpureus*. *Brazilian Journal of Microbiology*, 54(1), 93-102.
- Luo, M. T., Zhao, C., Huang, C., Chen, X. F., Huang, Q. L., Qi, G. X., Tian, L. L., Xiong, L., Li, H. L., & Chen, X. D. (2017). Efficient using durian shell hydrolysate as low-cost substrate for bacterial cellulose production by *Gluconacetobacter xylinus*. *Indian Journal of Microbiology*, 57, 393-399.

- Meléndez-Martínez, A. J., Mandić, A. I., Bantis, F., Böhm, V., Borge, G. I. A., Brnčić, M., Bysted, A., Cano, M. P., Dias, M. G., Elgersma, A., & Fikselová, M. (2022). A comprehensive review on carotenoids in foods and feeds: Status quo, applications, patents, and research needs. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(8), 1999-2049.
- Moradi, S., & Mortazavi, S. A. (2024). Evaluation of *Monascus purpureus* fermentation in dairy sludge-based medium for enhanced production of vibrant red pigment with minimal citrinin content. *PloS one*, 19(12), e0315006.
- Nimnoi, P., & Lumyong, S. (2011). Improving solid-state fermentation of *Monascus purpureus* on agricultural products for pigment production. *Food and Bioprocess Technology*, 4, 1384-1390.
- Purnomo, A., Yudiantoro, Y. A. W., Putro, J. N., Nugraha, A. T., Irawaty, W., & Ismadji, S. (2016). Subcritical water hydrolysis of durian seeds waste for bioethanol production. *International Journal of Industrial Chemistry*, 7, 29-37.
- Rapoport, A., Guzhova, I., Bernetti, L., Buzzini, P., Kieliszek, M., & Kot, A. M. (2021). Carotenoids and some other pigments from fungi and yeasts. *Metabolites*, 11(2), 92.
- Shan, B., Cai, Y. Z., Brooks, J. D., & Corke, H. (2007). The in vitro antibacterial activity of dietary spice and medicinal herb extracts. *International Journal of Food Microbiology*, 117(1), 112-119.
- Shimada, K., Fujikawa, K., Yahara, K., & Nakamura, T. (1992). Antioxidative properties of xanthans on the autoxidation of soybean oil in cyclodextrin emulsion. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 40, 945-948.
- Siwina, S., & Leesing, R. (2021). Bioconversion of durian (*Durio zibethinus* Murr.) peel hydrolysate into biodiesel by newly isolated oleaginous yeast *Rhodotorula mucilaginosa* KKUSY14. *Renewable Energy*, 163, 237-245.
- Srianta, I., Sutedja, A. M., & Nugerahani, I. (2024). Antibacterial activity of *Monascus*-fermented sorghum extracts against *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli*. *Food Research*, 8(4), 284-290.
- Suwanposri, A., Khamphinit, W., Sonthichai, P., Maliyam, R., Charoensook, K., & Boonna, S. (2025a). Production of herbal kombucha with agarwood (*Aquilaria crassna* Pierre ex Lec.) leaves and its biological properties. *International Journal of Agricultural Technology*, 21(3), 1177-1196.
- Suwanposri, A., Charoensuk, K., Kongroi, K., Wetchagool, N., Wetchagool, W., & Thipsrirach, S. (2025b). Effect of supplementing red pigment from *Monascus* sp. fermented native black rice (Maepayathong Dum Rice) on production performance and egg quality in laying hens. *International Journal of Agricultural Technology*, 21(3), 1197-1210.
- Teiba, I. I., Mamdouh, I., Yousef, M. I., Hussein, A., & El-Bilawy, E. H. (2025). Antimicrobial activity of *Monascus purpureus*-derived red pigments against *Salmonella typhimurium*, *Escherichia coli*, and *Enterococcus faecalis*. *AMB Express*, 15(1), 6.
- Wong, H. C., Lin, Y. C., & Koehler, P. E. (1981). Regulation of growth and pigmentation of *Monascus purpureus* by carbon and nitrogen concentrations. *Mycologia*, 73, 649-654.
- Wong, S. P., Leong, L. P., & Koh, J. H. W. (2006). Antioxidant activities of aqueous extracts of selected plants. *Food chemistry*, 99(4), 775-783.
- Wu, L., Wang, Y., Zheng, Q., Wu, J., Zhang, H., Fu, R., & Ren, Y. (2024). Color and functionality construction of cellulose towels with biological *Monascus* pigment based on a nano-suspension system. *International Journal of Biological Macromolecules*, 282, 137351.
- Xu, W. J. (2011). Study on the liquid fermentation to produce *Monascus* pigment with corn starch and antibacterial. *Advanced Materials Research*, 183, 1336-1340.

Received: July 21, 2025; Revised: October 29, 2025; Accepted: March 17, 2026

การพัฒนาระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะในแปลงปลูกหม่อนไต้หวัน ด้วยคอมพิวเตอร์แบบฝังตัว

The development of a smart farm control system for sequential mulberry cultivation using embedded computer technology

นิคม ลนขุนทด¹ มานะชัย จันทอก¹ และอัษฎา วรรณกายนต์^{1*}Nikom lonkuntosh¹, Manachai Chantok¹ and Asada Wannakayont^{1*}¹คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์ จังหวัดสุรินทร์¹Faculty of Industrial Technology Surindra Rajabhat University, Surin Province^{*}Corresponding Author E-mail Address : asada2518@hotmail.com

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะในแปลงปลูกหม่อนไต้หวันด้วยคอมพิวเตอร์แบบฝังตัว ประเมินประสิทธิภาพระบบ และถ่ายทอดเทคโนโลยีให้แก่เกษตรกร ระบบที่พัฒนาขึ้น ประกอบด้วย 3 รูปแบบการควบคุม ได้แก่ การควบคุมด้วยตนเอง การควบคุมผ่านแอปพลิเคชันมือถือที่เชื่อมต่อกับกล้องวงจรปิด และการควบคุมอัตโนมัติด้วย Arduino พร้อมเซนเซอร์วัดความชื้นในดิน การดำเนินการวิจัยใช้วิธีการวิจัยและพัฒนา โดยทดสอบประสิทธิภาพระบบทั้ง 3 รูปแบบ และถ่ายทอดเทคโนโลยีให้กับเกษตรกรจำนวน 40 คน ในตำบลโคกสะอาด อำเภอปราสาท จังหวัดสุรินทร์ ผ่านการบรรยาย การสาธิต และการทดลองใช้งาน ผลการวิจัยพบว่า ระบบสามารถจัดการแปลงปลูกหม่อนได้สูงสุด 4 แปลงพร้อมกัน โดยมีประสิทธิภาพการทำงานของระบบการควบคุมด้วยตนเอง 100% การควบคุมผ่านแอปพลิเคชัน 97% และการควบคุมอัตโนมัติ 96% ระบบสามารถประหยัดการใช้น้ำได้ 25% เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการดั้งเดิม เกษตรกรมีความพึงพอใจในระดับดีด้วย ค่าเฉลี่ย 4.17 ผลการวิจัยแสดงศักยภาพของเทคโนโลยี Internet of things ในการเพิ่มประสิทธิภาพการเพาะปลูกและพัฒนา ศักยภาพเกษตรกรได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: ฟาร์มอัจฉริยะ คอมพิวเตอร์แบบฝังตัว การปลูกหม่อนไต้หวัน การถ่ายทอดเทคโนโลยี เกษตรกรรมสมัยใหม่

Abstract

This research aimed to develop a smart farm control system for sequential mulberry cultivation using embedded computer technology, evaluate the system performance, and transfer the technology to farmers. The developed system comprises three control modes: manual control, mobile application control integrated with closed-circuit television monitoring, and automatic control using Arduino with soil moisture sensors. The research employed a research and development methodology, testing the performance of all three system modes and transferring the technology to 40 farmers in Khok Sa-at Sub-district, Prasat District, Surin Province through lectures, demonstrations, and hands-on trials. The research findings revealed that the system could manage up to four mulberry plots simultaneously, with operational efficiency of 100% for manual control, 97% for mobile application control, and 96% for automatic control. The system

achieved 25% water conservation compared to traditional irrigation methods. Farmers expressed high satisfaction levels with a mean score of 4.17. The research demonstrates the significant potential of Internet of things technology in enhancing cultivation efficiency and developing farmer capabilities effectively.

Keywords: Smart farm, Embedded computer, Mulberry cultivation, Technology transfer, Modern agriculture

บทนำ

การเกษตรกรรมในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของไทยถือเป็นอาชีพหลักของประชากรส่วนใหญ่ โดยเฉพาะการปลูกหม่อนเลี้ยงไหม ซึ่งเป็นกิจกรรมเสริมรายได้นอกเหนือจากการทำนาตามฤดูกาล จังหวัดสุรินทร์ถือเป็นตัวอย่างที่ดีของความเจริญรุ่งเรืองทางด้านผ้าไหมที่สืบทอดมาอย่างต่อเนื่อง โดยมีเกษตรกรมากถึง 10,198 ราย และพื้นที่ปลูกหม่อนรวม 5,619 ไร่ สามารถผลิตเส้นไหมได้ถึง 5,524 กิโลกรัมต่อปี (Khajonrit et al., 2021) ปัจจัยสำคัญในการผลิตไหมคุณภาพสูงขึ้นอยู่กับสวนหม่อนถึงร้อยละ 80 ขณะที่ร้อยละ 20 เป็นเทคนิคการเลี้ยงไหมและสภาพแวดล้อม ใบหม่อนเป็นอาหารเพียงอย่างเดียวของหนอนไหม จึงจำเป็นต้องปลูกหม่อนให้ได้ใบมากที่สุด การเลือกพื้นที่ปลูกต้องพิจารณาถึงสภาพแวดล้อมโดยรอบ โดยเฉพาะการหลีกเลี่ยงบริเวณใกล้แปลงยาสูบหรือสวนที่มีการใช้สารเคมีเป็นจำนวนมาก เนื่องจากสารปนเปื้อน (Contaminant) อาจปลิวมาเกาะบนใบหม่อนและเป็นอันตรายต่อหนอนไหม (Sitthipong, 2015) การเลี้ยงไหมไล่รุ่น (Sequential silk cultivation) จึงเป็นวิธีการที่ช่วยให้เกษตรกรสามารถผลิตเส้นไหมได้ตลอดทั้งปี เกษตรกรสามารถเลี้ยงไหมได้มากกว่าเมื่อเทียบกับการเลี้ยงไหมปกติที่ได้เพียง 10-12 รุ่นต่อปี อย่างไรก็ตาม การเลี้ยงไหมไล่รุ่นเพื่อให้ได้ผลผลิตตลอดปียังคงเผชิญกับปัญหาทางด้านการจัดการแปลงปลูกที่ได้แก่ ปัญหาการบริหารจัดการน้ำและการดูแลต้นหม่อนหลายแปลงพร้อมกัน ซึ่งต้องใช้แรงงานและความใส่ใจอย่างมาก การตัดแต่งกิ่งหม่อนหลังจากเลี้ยงไหมในแต่ละรุ่นต้องทำอย่างทันที พร้อมการใส่ปุ๋ยและการให้น้ำอย่างเพียงพอ รวมถึงการปราบวัชพืช เพื่อให้ต้นหม่อนสามารถแตกใบใหม่ได้อย่างรวดเร็วสำหรับรุ่นถัดไป

การปลูกหม่อนเพื่อเลี้ยงไหมแบบไล่รุ่นต้องเผชิญกับปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณผลผลิต ทั้งด้านการจัดการความชื้นในดิน และอุณหภูมิที่เหมาะสม รวมถึงการบริหารจัดการแรงงานที่ไม่เพียงพอ โดยเฉพาะในช่วงที่ต้องดูแลแปลงหม่อนหลายแปลงพร้อมกัน อีกทั้งการจัดการปัจจัยการผลิตที่ไม่เหมาะสม ทั้งการให้ปุ๋ยที่ส่งผลต่อคุณภาพใบหม่อน และการจัดการน้ำที่ขาดประสิทธิภาพ ซึ่งส่วนใหญ่อาศัยการสังเกตด้วยตาเปล่าและประสบการณ์ ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนและไม่ทันต่อความต้องการของพืช โดยเฉพาะในช่วงฤดูแล้งที่ขาดแคลนน้ำหรือช่วงที่มีฝนตกชุกเกินไป ส่งผลให้เกิดโรคในต้นหม่อนและผลผลิตใบหม่อนมีคุณภาพลดลงทั้งปี ทำให้การวางแผนการเลี้ยงไหมเป็นไปอย่างยากลำบาก

งานวิจัยด้านเทคโนโลยีเกษตรอัจฉริยะ (Smart agriculture) ที่ใช้อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of things; IoT) และคอมพิวเตอร์แบบฝังตัว (Embedded computer) ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในการประยุกต์ใช้กับพืชเศรษฐกิจหลากหลายชนิด โดยงานวิจัยของ Kanya et al. (2022) รายงานประสิทธิภาพของระบบควบคุมเกษตรอัจฉริยะที่ร้อยละ 100 แสดงให้เห็นถึงศักยภาพที่สูงของเทคโนโลยีดังกล่าว ในทำนองเดียวกัน การศึกษาของ Sathapuwit et al. (2021) พบว่า เทคโนโลยีดิจิทัล (Digital technology) สามารถเพิ่มผลผลิตได้จาก 4 เป็น 6 ตันต่อไร่ พร้อมทั้งสามารถคืนทุนได้ภายใน 0.6 ปี ซึ่งแสดงให้เห็นถึงผลตอบแทนทางเศรษฐกิจที่น่าสนใจ นอกจากนี้ งานวิจัย Jantasri et al. (2022) ในระบบการเกษตรอัจฉริยะ (Smart farming) สำหรับมะระขึ้นกอินทรีย์แสดงผลกระทบทางเศรษฐกิจที่ดี โดยสามารถเพิ่มรายได้ให้เกษตรกรมากกว่า 3 เท่า แม้จะมีต้นทุนการติดตั้งระบบในช่วงเริ่มต้นในระดับสูง อย่างไรก็ตาม งานวิจัยส่วนใหญ่ที่ได้ทำการศึกษานี้ มุ่งเน้นการพัฒนากระบวนการแบบควบคุมในรูปแบบเดียว การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการพัฒนาระบบควบคุมที่หลากหลายรูปแบบสำหรับแปลงปลูกหม่อนไล่รุ่นเป็นการเฉพาะ ซึ่งจะช่วยเติมเต็มช่องว่างทางวิชาการในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีกับการเกษตรในการจัดการแปลงปลูกหม่อนแบบไล่รุ่น ในบริบทของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและแนวโน้มการลดต้นทุนการผลิต การเกษตรของไทยจำเป็นต้องปรับตัวเข้าสู่การทำเกษตรสมัยใหม่หรือเกษตรอัจฉริยะที่เน้นการสร้างผลผลิตทางการเกษตรแบบมีคุณภาพด้วยการปรับปรุงกระบวนการผลิต โดยอาศัยเทคโนโลยีเกษตรอัจฉริยะ ระบบเกษตรอัจฉริยะจึงได้ถูกนำมาใช้เพื่อลดการใช้ปุ๋ยและน้ำ ควบคุมปัจจัยในการทำการเกษตรให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ช่วยให้เกษตรกรสามารถเพาะปลูกพืชได้ทุกฤดูกาล ควบคุมการให้น้ำและปุ๋ยได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมทั้งสามารถวางแผนการผลิตได้อย่างแม่นยำและได้ผลผลิตตามเป้าหมาย (Pattama, 2020)

จากความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการนำเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งมาประยุกต์ใช้ในการปลูกหม่อนเพื่อเลี้ยงไหม เพื่อเป็นการทำการเกษตรแบบสมัยใหม่ที่สอดคล้องกับนโยบายไทยแลนด์ 4.0 (Thailand 4.0) ซึ่งถือเป็นจุดเริ่มต้นของแนวคิดเกษตรกรอัจฉริยะ (Smart farmer) การพัฒนาระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะด้วยคอมพิวเตอร์แบบฝังตัวสำหรับแปลงปลูกหม่อนไถ่รุ่นจะช่วยแก้ไขปัญหการขาดแคลนแรงงาน ลดความผิดพลาดในการจัดการ และเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้ทรัพยากร ระบบดังกล่าวจะสามารถควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการปลูกหม่อนได้อย่างแม่นยำ ช่วยให้เกษตรกรสามารถวางแผนการผลิตได้อย่างเป็นระบบและได้รับประโยชน์สูงสุดจากการลงทุน สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการปลูกหม่อนเลี้ยงไหมในวงกว้าง ส่งเสริมการพัฒนาอาชีพเสริมของเกษตรกรในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และสนับสนุนการอนุรักษ์ภูมิปัญญาด้านผ้าไหมไทยให้คงอยู่และเจริญเติบโตอย่างยั่งยืนในยุคดิจิทัล ต่อไป

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือ

การวิจัยนี้มีวัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือ ที่ใช้ในการวิจัย ดังนี้

1. ระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะในแปลงปลูกหม่อนไถ่รุ่นด้วยคอมพิวเตอร์แบบฝังตัว
2. ตารางหาประสิทธิภาพระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะในแปลงปลูกหม่อนไถ่รุ่นด้วยคอมพิวเตอร์แบบฝังตัว
3. แบบประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานที่มีต่อระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะในแปลงปลูกหม่อนไถ่รุ่นด้วยคอมพิวเตอร์แบบฝังตัว

การพัฒนาระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะในแปลงปลูกหม่อนไถ่รุ่นด้วยคอมพิวเตอร์แบบฝังตัว

ผู้วิจัยได้นำแนวคิดกระบวนการเทคโนโลยีมาใช้ในการพัฒนาระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะในแปลงปลูกหม่อนไถ่รุ่นด้วยคอมพิวเตอร์แบบฝังตัว ดังนี้ (Design and Technology Department, Institute for the Promotion of Teaching Science and Technology [IPST], 2022)

1. ปัญหาและความต้องการ

จุดเริ่มต้นของงานวิจัยเกิดจากการมองเห็นอุปสรรคของเกษตรกรผู้เลี้ยงไหม ที่ต้องเผชิญกับความยากลำบากในการจัดการน้ำให้มีประสิทธิภาพ ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพของใบหม่อนที่เป็นอาหารหลักของไหม นอกจากนี้ยังมีปัญหาเรื่องการวางแผนปลูกหม่อนแบบไถ่รุ่นเพื่อให้มีผลผลิตหมุนเวียนตลอดปี และวิกฤตการขาดแคลนแรงงาน ผู้วิจัยจึงมุ่งเน้นไปที่ความต้องการระบบอัจฉริยะที่สามารถควบคุมปัจจัยแวดล้อมได้โดยอัตโนมัติ จัดการแปลงปลูกได้คราวละหลายแปลง และมีระบบแจ้งเตือนที่ใช้งานง่าย เพื่อยกระดับการเกษตรไทย ตามนโยบาย Thailand 4.0

2. รวบรวมข้อมูล

ผู้วิจัยได้ดำเนินการสืบค้นและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยี IoT ในเกษตร นอกจากนี้ยังมีการนำคู่มือและแนวทางปฏิบัติจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับหม่อนไหมมาปรับใช้ ควบคู่ไปกับการลงพื้นที่เก็บข้อมูลจริงจากเกษตรกร และศึกษาข้อมูลทางเทคนิคของอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์จากผู้ผลิต เพื่อให้การออกแบบระบบตอบโจทย์การใช้งานในภาคสนามมากที่สุด

3. เลือกรีวิววิธีการ

ผู้วิจัยได้ตัดสินใจเลือกใช้เทคโนโลยี IoT ร่วมกับระบบควบคุมอัตโนมัติ ซึ่งถือเป็นวิธีการที่เหมาะสม ในการติดตามและควบคุมปัจจัยสิ่งแวดล้อมแบบเรียลไทม์ โดยเน้นการติดตั้งเซ็นเซอร์ตรวจวัดความชื้นในดิน อุณหภูมิ และความชื้นในอากาศ เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์แบบฝังตัวเพื่อประมวลผลและสั่งการระบบรดน้ำอัตโนมัติ

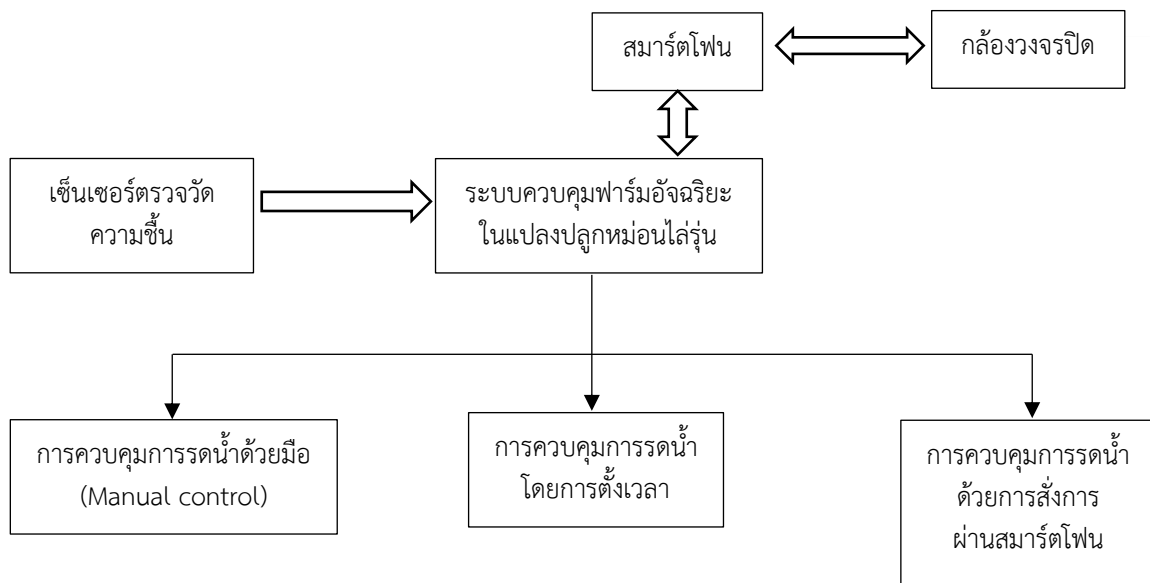


Figure 1 Structural diagram and connectivity of smart farm control system in age-graded mulberry plantation using embedded computer technology

4. ออกแบบและปฏิบัติการ

ผู้วิจัยได้ออกแบบระบบที่เชื่อมโยงกันระหว่างเซ็นเซอร์ หน่วยประมวลผลกลาง และระบบวาล์วน้ำอัตโนมัติ โดยครอบคลุมทั้งการเตรียมอุปกรณ์ การติดตั้งในพื้นที่จริง และการพัฒนาซอฟต์แวร์เพื่อควบคุมการทำงาน จนได้เป็นระบบฟาร์มอัจฉริยะที่สมบูรณ์ ซึ่งสามารถดูแลแปลงปลูกหม่อนได้สูงสุดถึง 4 แปลง พร้อมกัน ช่วยให้เกษตรกรลดภาระด้านแรงงาน เพิ่มประสิทธิภาพในการใช้ทรัพยากรทั้งน้ำและปุ๋ย และที่ช่วยปรับปรุงคุณภาพของใบหม่อนให้ดีขึ้น

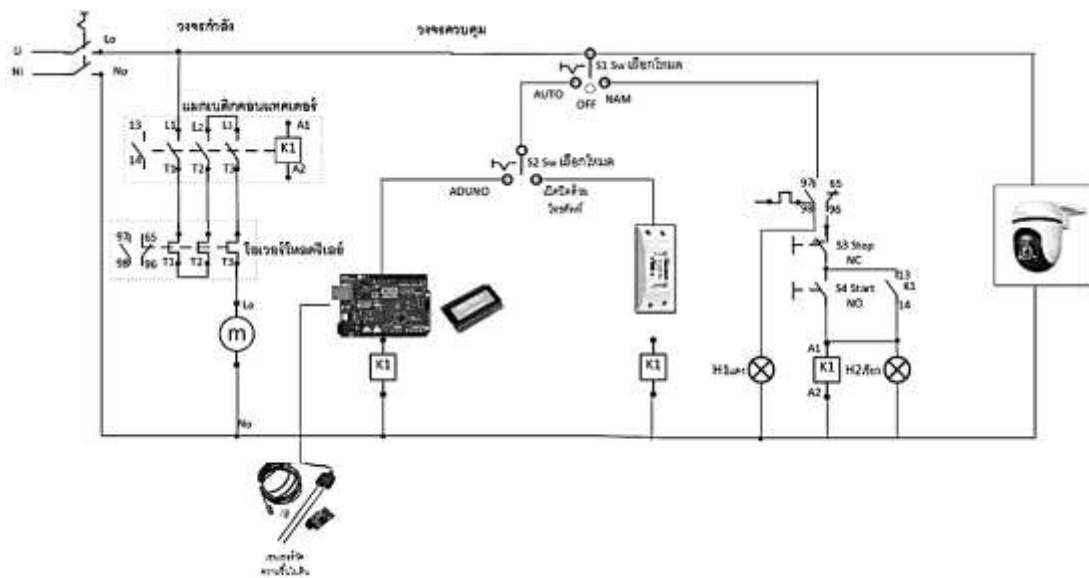


Figure 2 Control circuit for smart farm management system in age-graded mulberry plantation using embedded computer technology

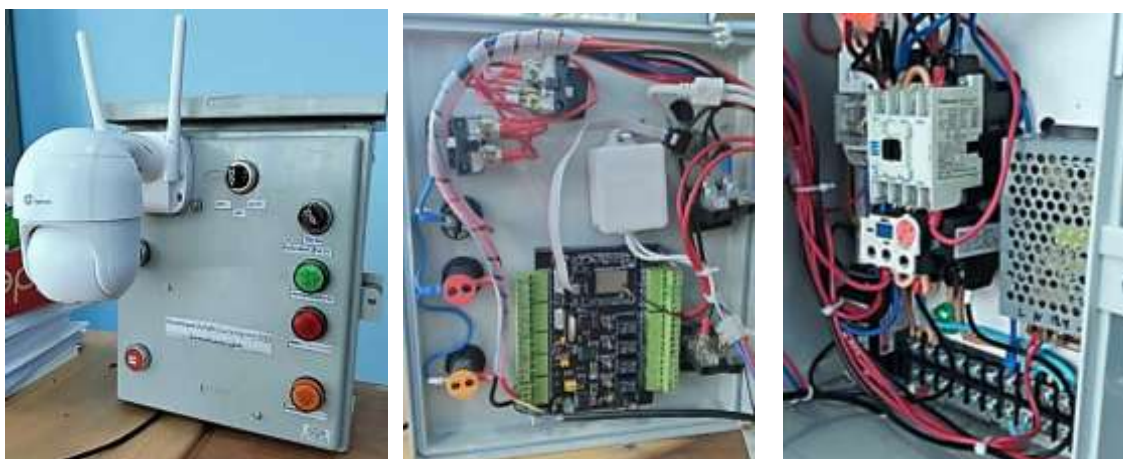


Figure 3 Smart farm control system in age-graded mulberry plantation using embedded computer technology

จาก Figure 1-3 พบว่า ระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะสำหรับแปลงปลูกหม่อน ใช้บอร์ด Arduino Uno เป็นหน่วยประมวลผลกลาง รองรับการจัดการสูงสุด 4 แปลงพร้อมกัน โดยติดตั้งเซนเซอร์วัดความชื้นที่ระดับความลึก 10 เซนติเมตร กำหนดค่ามาตรฐานที่ 17% ตามภูมิปัญญาเกษตรกร ระบบทำงานได้ 3 โหมด คือ Manual (สวิตช์), Auto (ประมวลผลตามค่าเซนเซอร์) และ Mobile App (ส่งการทางไกลพร้อมกล้อง CCTV) ด้านความปลอดภัยประกอบด้วยเซอร์กิตเบรกเกอร์ ระบบป้องกันโอเวอร์โวลต์ และไฟแสดงสถานะ (เขียว: พร้อมใช้งาน, แดง: บั้มทำงาน, เหลือง: แจ้งเตือน) จุดเด่นคือการบันทึกข้อมูลลง SD Card การตรวจสอบค่าซ้ำเพื่อป้องกันข้อผิดพลาด และระบบแจ้งเตือนแบบเรียลไทม์ที่ออกแบบมาให้เกษตรกรใช้งานง่าย จุดเด่นของระบบที่แตกต่างจากงานอื่น ๆ คือการออกแบบที่เรียบง่าย ใช้งานง่ายสำหรับเกษตรกรที่ไม่คุ้นเคยกับเทคโนโลยี สามารถปรับเปลี่ยนค่าควบคุมได้ตามระยะการเจริญเติบโตของต้นหม่อน มีระบบตรวจสอบความผิดพลาดโดยวัดค่าซ้ำก่อนตัดสินใจให้น้ำ มีระบบบันทึกข้อมูลสำหรับวิเคราะห์แนวโน้มในระยะยาว และมีระบบแจ้งเตือนทั้งที่ตัวเครื่องและผ่านแอปพลิเคชัน ซึ่งช่วยให้เกษตรกรสามารถจัดการแปลงหม่อนได้รูุ้่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ ลดแรงงานในการดูแล และผลิตใบหม่อนได้สม่ำเสมอ

5. การทดสอบระบบ

ระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะในแปลงปลูกหม่อนได้ดำเนินการทดสอบผ่านบอร์ด Arduino ที่เชื่อมต่อกับเซนเซอร์วัดความชื้นในดิน เพื่อควบคุมปั้มน้ำอัตโนมัติตามค่ามาตรฐานความชื้น 17% กระบวนการทำงานเริ่มต้นจากการเลือกโหมดอัตโนมัติผ่านสวิตช์ S1 เซนเซอร์จะทำการตรวจวัดความชื้นในดินอย่างต่อเนื่องและส่งข้อมูลดิจิทัลไปยัง Arduino เมื่อค่าความชื้นต่ำกว่าค่าที่กำหนด ระบบจะส่งสัญญาณผ่าน Relay DC 12V ไปยังแมกเนติกคอนแทคเตอร์ K1 เพื่อเปิดปั้มน้ำ M และแสดงสถานะผ่านหลอดไฟ H1 การทดสอบระบบ ทดสอบเป็นระยะเวลา 30 วัน โดยสามารถลดการใช้น้ำได้ประมาณ 25% เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการรดน้ำแบบดั้งเดิม ระบบสามารถรักษาระดับความชื้นในดินให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของต้นหม่อนได้

6. การปรับปรุงแก้ไข

การเชื่อมต่อระหว่างส่วนประกอบต่าง ๆ มีความเสถียรและระบบแจ้งเตือนทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้ อย่างไรก็ตาม การทดสอบพบข้อบกพร่องที่ต้องได้รับการปรับปรุงแก้ไข ดังนี้

6.1 ความล่าช้าในการตอบสนองของระบบ ซึ่งเกิดจากข้อจำกัดในการประมวลผลข้อมูลแบบเรียลไทม์ของบอร์ด Arduino เมื่อระบบทำงานในโหมดการอ่านค่าเซนเซอร์แบบต่อเนื่อง การประมวลผลข้อมูลและการควบคุมการทำงานของปั้มน้ำต้องใช้เวลาในการตัดสินใจซึ่งส่งผลให้เกิดความล่าช้าในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดินที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว การแก้ไขปัญหาเริ่มต้นจากการปรับปรุงอัลกอริทึมการประมวลผลข้อมูลจากเซนเซอร์ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ลดขั้นตอนการประมวลผลที่ไม่จำเป็นและปรับปรุงโค้ดโปรแกรมให้มีความทำงานที่เรียบง่ายและรวดเร็วมากขึ้น ใช้เทคนิคการจัดการหน่วยความจำและการประมวลผลแบบขนานซึ่งจะช่วยลดเวลาในการตอบสนองของระบบ รวมถึงการเพิ่มความถี่ในการอ่านค่าจากเซนเซอร์ให้เป็นแบบเรียลไทม์มากขึ้น ซึ่งจะช่วยให้ระบบสามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงความชื้นในดิน

ได้อย่างต่อเนื่อง และการกำหนดช่วงเวลาในการอ่านค่าให้สั้นลงจะทำให้ระบบสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วได้ดีขึ้น

6.2 การรบกวนสัญญาณไฟฟ้า ที่เกิดจากการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าในบริเวณใกล้เคียง เช่น มอเตอร์ปั๊มน้ำ แมกเนติกคอนแทคเตอร์ และอุปกรณ์ควบคุมไฟฟ้าอื่น สัญญาณรบกวนเหล่านี้ส่งผลต่อความแม่นยำในการอ่านค่าจากเซนเซอร์วัดความชื้นในดิน ทำให้ระบบได้รับข้อมูลที่ไม่ถูกต้องและอาจนำไปสู่การควบคุมการให้น้ำที่ไม่เหมาะสม การแก้ไขปัญหาเริ่มต้นจากการจัดวางตำแหน่งเซนเซอร์และอุปกรณ์ควบคุมให้ห่างจากแหล่งสัญญาณรบกวน โดยวางตำแหน่งอุปกรณ์ให้มีระยะห่างที่เหมาะสมจากมอเตอร์ปั๊มน้ำ แมกเนติกคอนแทคเตอร์ และอุปกรณ์ไฟฟ้าขนาดใหญ่อื่น รวมถึงการใช้วัสดุป้องกันหรือฉนวนเพิ่มเติม เพิ่มวงจรกราวด์ และเปลี่ยนสายสัญญาณมาเป็นสายสัญญาณแบบ Shielded cable ซึ่งจะช่วยป้องกันการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า และลดสัญญาณรบกวน

7. ประเมินผล

การประเมินผลระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะฯ ดำเนินการโดยการนำระบบที่พัฒนาขึ้นไปทดสอบการแก้ปัญหาเฉพาะที่กำหนดไว้ในเบื้องต้น ผลการประเมินแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถแก้ไขปัญหาหลักได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะการลดความต้องการแรงงานในการตรวจสอบและควบคุมการให้น้ำในแปลงปลูกหม่อน การประหยัดการใช้น้ำได้ร้อยละ 25 เมื่อเทียบกับวิธีการดั้งเดิม และความสามารถในการรักษาระดับความชื้นในดินให้เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของต้นหม่อนอย่างสม่ำเสมอ



Figure 4 Installation of smart farm control system on a mulberry farm



Figure 5 Development process of smart farm control system in age-graded mulberry plantation using embedded computer technology

การสร้างตารางหาประสิทธิภาพ และแบบประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานที่มีต่อระบบ

1. ศึกษาข้อมูลเชิงลึกด้านเทคโนโลยี IoT ระบบสมองกลฝังตัว และการจัดการฟาร์มอัจฉริยะ (เช่น การรดน้ำหม่อนและการสำรวจระยะไกล) เพื่อนำมาวางกรอบแนวคิดและกำหนดหัวข้อการทดสอบ จากนั้นจึงจัดทำ "ตารางทดสอบประสิทธิภาพ" และนำเสนอต่อที่ปรึกษางานวิจัยเพื่อตรวจสอบความเหมาะสมและปรับปรุงตามคำแนะนำก่อนนำไปใช้งานจริง

2. ศึกษาวิธีการประเมินผลการถ่ายทอดเทคโนโลยี เพื่อร่างแบบประเมินให้ตรงตามวัตถุประสงค์ โดยผ่านขั้นตอนสำคัญดังนี้

2.1 นำฉบับร่างเสนอที่ปรึกษาเพื่อปรับปรุงเนื้อหาและประเด็นคำถาม

2.2 ให้ผู้เชี่ยวชาญ 5 ท่าน ตรวจสอบความเที่ยงตรงเชิงเนื้อหาด้วยค่า IOC (Index of Consistency)

2.3 ได้แบบประเมินฉบับสมบูรณ์รวม 16 ข้อ แบ่งเป็น 3 ด้าน คือ ด้านการถ่ายทอดเทคโนโลยี, ด้านความรู้ความเข้าใจ และด้านการนำไปใช้ โดยใช้เกณฑ์วัดผลแบบ Likert scale 5 ระดับ

วิธีการวิจัย

ผู้วิจัยได้ดำเนินการหาประสิทธิภาพระบบ ถ่ายทอดเทคโนโลยี และประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานที่มีต่อระบบ ดังนี้

1. การทดสอบการควบคุมด้วยตนเอง (Manual control) เป็นการทดสอบพื้นฐานเพื่อเช็คระบบไฟฟ้าและกลไกการทำงาน โดยเริ่มจากการเปิดเบรกเกอร์และปรับสวิตช์ไปที่โหมด MAN เพื่อทดลองกดปุ่ม Start/Stop ตรวจสอบการทำงานของแมกเนติกคอนแทคเตอร์และไฟสัญญาณ (สีเขียว/แดง) นอกจากนี้ยังมีการทดสอบระบบความปลอดภัยโดยการจำลองสถานการณ์ไฟเกิน (Overload) เพื่อยืนยันว่าระบบสามารถตัดการทำงานอัตโนมัติและรีเซ็ตกลับมาทำงานปกติได้

2. การทดสอบผ่านแอปพลิเคชันมือถือและกล้องวงจรปิด เป็นการทดสอบระบบสั่งการระยะไกล โดยปรับสวิตช์ไปที่โหมด AUTO และเลือกสั่งการผ่านโทรศัพท์ ผู้วิจัยจะทำการกดสั่ง "เปิด-ปิด" ระบบผ่านแอปพลิเคชัน แล้วสังเกตผลการทำงานจริงผ่านกล้องวงจรปิด ควบคู่ไปกับไฟสัญญาณสีแดง เพื่อยืนยันว่าระบบสามารถตอบสนองต่อคำสั่งผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตได้อย่างถูกต้อง

3. การหาค่าความชื้นที่เหมาะสมและการตั้งค่าระบบอัตโนมัติ ขั้นตอนนี้นำประสบการณ์จากเกษตรกรผู้ปลูกหม่อนในพื้นที่มาสานกับหลักวิชาการ โดยการเตรียมตัวอย่างดิน 10 ระดับความชื้น เพื่อหาจุดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับ

การเจริญเติบโต ผลสรุปพบว่า ช่วงความชื้น 12-17% เป็นค่าที่ดีที่สุด ผู้วิจัยจึงนำค่านี้ไปเขียนโปรแกรมควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยกำหนดให้ปั้มน้ำทำงานเมื่อความชื้น 17% และหยุดทำงานทันทีเมื่อความชื้นสูงเกินกว่า 17%

4. การทดสอบการทำงานอัตโนมัติด้วยเซนเซอร์และบอร์ด Arduino เป็นการทดสอบความแม่นยำของระบบเซนเซอร์โดยเชื่อมต่อบอร์ด Arduino เข้ากับคอมพิวเตอร์เพื่อดูค่าผ่าน Serial monitor จากนั้นนำเซนเซอร์วัดความชื้นไปทดสอบกับดินตัวอย่างในแต่ละระดับ (โดยเฉพาะระดับที่แห้งสุดและเปียกสุด) สังเกตการตัด-ต่อของปั้มน้ำผ่านแอปพลิเคชันและกล้องวงจรปิด โดยบันทึกผลการทดสอบต่อเนื่องแล้วละ 5 นาที เพื่อยืนยันความเสถียรของระบบ

5. การถ่ายทอดเทคโนโลยีระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะฯ และประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานที่มีต่อระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะฯ มีขั้นตอน ดังนี้

5.1 การเตรียมความพร้อมและประสานงาน

ประสานงานกับผู้นำชุมชนเพื่อกำหนดกลุ่มเป้าหมาย นัดหมายวัน เวลา และสถานที่ให้ชัดเจน จากนั้นผู้วิจัยจะดำเนินการด้านเอกสารโดยออก หนังสือราชการอย่างเป็นทางการ จากคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์ เพื่อเชิญกลุ่มเป้าหมายเข้าร่วมกิจกรรมตามกำหนดการที่วางไว้

5.2 การถ่ายทอดเทคโนโลยีและสาธิตการใช้งาน

จัดเตรียมสถานที่และสื่อการสอน เช่น แผ่นพับและสื่อนำเสนอ (Power point) ให้พร้อม ขั้นตอนการถ่ายทอดจะเริ่มจากการอธิบายวัตถุประสงค์และกระบวนการพัฒนาระบบ ตามด้วยการ สาธิตวิธีการใช้งานจริง และเปิดโอกาสให้กลุ่มเป้าหมายได้ ทดลองใช้งานระบบ (Hands-on) เพื่อให้เกิดความเข้าใจและทักษะในการปฏิบัติ

5.3 การประเมินผลและการวิเคราะห์ข้อมูล

แจกแบบประเมินความพึงพอใจพร้อมชี้แจงวิธีการตอบอย่างละเอียดเพื่อให้ได้ข้อมูลที่แม่นยำ เมื่อกลุ่มเป้าหมายตอบแบบประเมินเรียบร้อยแล้ว ผู้วิจัยจะรวบรวมข้อมูลทั้งหมดมา วิเคราะห์ทางสถิติ เพื่อสรุปภาพรวมความพึงพอใจ

ผลการวิจัย

1. ผลการพัฒนาระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะฯ

ผลการพัฒนาระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะฯ สำเร็จตามที่กำหนดไว้ โดยระบบที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วย 3 รูปแบบในการควบคุม ได้แก่ การควบคุมด้วยตนเองสำหรับการปฏิบัติการแบบดั้งเดิม การควบคุมผ่านแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือที่เชื่อมต่อกับระบบกล้องวงจรปิดเพื่อการติดตามระยะไกล และการควบคุมอัตโนมัติด้วยคอมพิวเตอร์แบบฝังตัว Arduino ที่มีเซนเซอร์วัดความชื้นในดิน ระบบได้รับการออกแบบให้สามารถจัดการแปลงปลูกหม่อนได้สูงสุด 4 แปลงพร้อมกัน โดยใช้หลักการทำงานแบบเรียลไทม์ในการตรวจวัดความชื้นและควบคุมการให้น้ำตามค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ที่ 17% การพัฒนาระบบใช้แนวคิดกระบวนการเทคโนโลยีตั้งแต่การกำหนดปัญหาและความต้องการ การรวบรวมข้อมูล การเลือกวิธีการ การออกแบบและปฏิบัติการ การทดสอบ และการประเมินผล ซึ่งทำให้ได้ระบบที่มีความสมบูรณ์และตอบสนองความต้องการของเกษตรกรในการลดแรงงาน เพิ่มประสิทธิภาพการใช้น้ำ และปรับปรุงคุณภาพการผลิตใบหม่อนสำหรับการเลี้ยงไหม

2. ผลการหาประสิทธิภาพระบบ

Table 1 Efficiency of smart farm control system in soil moisture management

Soil moisture range (%)	Soil condition	System response	Efficiency (%)	Effect on mulberry growth
0-11	Dry	Turn on water pump	100	Inappropriate (Small leaves, slow growth)
12-17	Appropriate	Maintain status	100	Most optimal (Healthy leaves, good shooting)
18-25	Moist	Turn off water pump	100	Starting to be inappropriate (Risk of fungal disease)
>25	Moist	Turn off water pump	100	Inappropriate (Easy disease outbreak)
Average			100	

จาก Table 1 สามารถแบ่งระดับความชื้นในดินออกเป็น 4 ช่วง พร้อมอธิบายผล ได้ดังนี้

1. ช่วงความชื้น 0-11% เป็นสภาพดินที่แห้งเกินไป เมื่อระบบตรวจพบค่าความชื้นในช่วงนี้จะสั่งเปิดปั๊มน้ำทันที ด้วยความแม่นยำ 100% สภาพดินในช่วงนี้ไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของต้นหม่อน โดยจะส่งผลให้ใบมีขนาดเล็กและการเติบโตช้า

2. ช่วงความชื้น 12-17% เป็นช่วงความชื้นที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการปลูกหม่อน ระบบจะคงสถานะการทำงานปัจจุบัน (ไม่เปิดหรือปิดปั๊มน้ำเพิ่มเติม) ด้วยความแม่นยำ 100% ในช่วงความชื้นนี้ต้นหม่อนจะมีการเจริญเติบโตที่ดีที่สุด ใบมีความสมบูรณ์ และมีการแตกยอดที่ดี

3. ช่วงความชื้น 18-25% เป็นสภาพดินที่เริ่มชื้นมากเกินไป ระบบจะสั่งปิดปั๊มน้ำ ด้วยความแม่นยำ 100% สภาพดินในช่วงนี้เริ่มไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของต้นหม่อน และมีความเสี่ยงต่อการเกิดโรคราที่เพิ่มขึ้น

4. ช่วงความชื้นมากกว่า 25% เป็นสภาพดินที่แฉะเกินไป ระบบจะสั่งปิดปั๊มน้ำ ด้วยความแม่นยำ 100% สภาพดินในช่วงนี้ไม่เหมาะสมอย่างยิ่งต่อการปลูกหม่อน เนื่องจากเพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิดโรคราและรากเน่า

ผลการทดสอบระบบในสภาพการใช้งานจริงพบว่า ค่าความชื้น 12-17% เป็นจุดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการตั้งค่าระบบควบคุมอัตโนมัติ สามารถทำงานถูกต้อง คิดเป็นร้อยละความถูกต้อง ร้อยละ 100

Table 2 Summary of efficiency evaluation results for the smart farm control system in age-graded mulberry plantation using embedded computer technology via mobile application and CCTV observation through mobile applications

No.	Equipment operation items	Number of correct operations	Average	S.D	Percentage of accuracy
1	Signal level (Mbps)	29	0.97	0.18	96.67
2	Video signal from CCTV	30	1.00	0.00	100.00
3	Magnetic contactor	29	0.96	0.18	96.67
4	Overload relay	29	0.96	0.18	96.67
5	Irrigation system control	29	0.96	0.18	96.67
Overall efficiency of the system		29.14	0.97	0.16	97.15

จาก Table 2 พบว่า ประสิทธิภาพของระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะในแปลงปลูกหม่อนไต้หวันด้วยคอมพิวเตอร์แบบฝังตัว โดยการควบคุม ด้วยแอปพลิเคชันผ่านโทรศัพท์มือถือและสังเกตการทำงานด้วยกล้องวงจรปิดผ่านแอปพลิเคชันบน โทรศัพท์มือถือ โดยการทดลองตามขั้นตอนที่กำหนดไว้จำนวน 30 ครั้ง แล้วบันทึกผลการทดลองลงในตารางผลการ สรุปผลการทดลองจากจำนวน 30 ครั้ง ระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะในแปลงปลูกหม่อนไต้หวันด้วยคอมพิวเตอร์แบบฝังตัว มีประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ เฉลี่ย 29.14 คิดเป็นร้อยละความถูกต้อง ร้อยละ 97.15 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.16

Table 3 Summary of operational performance of the smart farm control system in age-graded mulberry plantation using embedded computer technology and CCTV monitoring via mobile application

No.	Start			Stop			Working status	Moisture level that triggers system operation
	M	T	EC	M	T	EC		
Total	262.41	1250.69	4.01	856.36	1150.47	11.08	Percentage of Accuracy 96	Glass 4
Max	5.90	26.47	0.15	17.26	24.95	0.29		(47 times)
Min	4.90	24.12	0.02	17.05	22.43	0.01		
Average	5.25	25.01	0.08	17.13	23.01	0.22		Glass 5
S.D	0.21	0.82	0.02	0.06	0.58	0.05		(3 times)

จาก Table 3 พบว่า ประสิทธิภาพของผลการทำงานของระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะฯ และสังเกตการทำงานด้วย กล้องวงจรปิดผ่านแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือในห้องทดลอง โดยการทดลองตามขั้นตอนที่กำหนดไว้ จำนวน 50 ครั้ง แล้วบันทึกผลลงในตาราง ผลการทดลอง พบว่า ความชื้นที่ระบบควบคุมให้ปั้มน้ำทำงานเฉลี่ย 17.13 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 0.06 คิดเป็นร้อยละความถูกต้องของระบบ ร้อยละ 96

Table 4 System efficiency comparison

Control type	Efficiency	Advantages	Limitations
Manual control	100%	Highest accuracy, immediate control	Requires labor at the field
Mobile control	97%	Remote control, monitoring system included	Depends on signal quality
Automatic control	96%	Operates automatically, saves labor	Sensor calibration required
Average	98%		

จาก Table 4 แสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะที่พัฒนาขึ้น มีการออกแบบที่ครอบคลุมความต้องการ ของเกษตรกรในระดับที่แตกต่างกันผ่าน 3 รูปแบบการควบคุมหลัก ระบบนี้สามารถจัดการแปลงปลูกหม่อนได้สูงสุด 4 แปลง พร้อมกัน และแสดงถึงประสิทธิภาพเฉลี่ยที่ดีในระดับ 98% การควบคุมด้วยตนเองให้ประสิทธิภาพสูงสุดที่ 100% พร้อมความ แม่นยำและการตอบสนองที่รวดเร็ว แต่ต้องการแรงงานในการปฏิบัติงานที่แปลงปลูก การควบคุมผ่านแอปพลิเคชัน บนโทรศัพท์มือถือมีประสิทธิภาพที่ 97% ซึ่งให้ความสะดวกในการควบคุมระยะไกลและมีระบบติดตามผ่านกล้องวงจรปิด ในขณะที่การควบคุมอัตโนมัติแสดงถึงประสิทธิภาพที่ 96% และช่วยประหยัดแรงงานได้อย่างมีนัยสำคัญ

3. ผลการถ่ายทอดเทคโนโลยี และประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานที่มีต่อระบบ

การดำเนินการถ่ายทอดเทคโนโลยี ให้กับเกษตรกรจำนวน 40 คน ในตำบลโคกสะอาด อำเภอปราสาท จังหวัดสุรินทร์ บรรลุผลสำเร็จตามเป้าหมายที่วางไว้ เกษตรกรกลุ่มเป้าหมายได้รับความรู้เกี่ยวกับหลักการทำงานของระบบควบคุมอัตโนมัติที่ สามารถจัดการน้ำอย่างมีประสิทธิภาพ ผลประโยชน์ที่เกิดขึ้นครอบคลุมการลดค่าใช้จ่ายแรงงานในการตรวจสอบแปลงและ

การประหยัดน้ำ นอกจากนี้ เกษตรกรยังเข้าใจวิธีการใช้เทคโนโลยีสมัยใหม่ในงานเกษตรกรรม ความรู้ดังกล่าวช่วยพัฒนาศักยภาพและเตรียมความพร้อมให้เกษตรกรปรับตัวเข้าสู่แนวทางเกษตรอัจฉริยะ

Table 5 User satisfaction assessment results for the smart farm control system in age-graded mulberry plantation using embedded computer technology: overview by category

No.	Aspect	Average	S.D	Remark
1	Satisfaction with technology transfer	4.07	0.63	Good
2	Knowledge and understanding	4.07	0.63	Good
3	Application of knowledge	4.36	0.48	Good
Overall average		4.17	0.58	Good

จาก Table 5 พบว่า ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานที่มีต่อระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะในแปลงปลูกหม่อนไล่รุ่นด้วยคอมพิวเตอร์แบบฝังตัว ในภาพรวม อยู่ในระดับดี โดยค่าเฉลี่ยรวม 4.17 คะแนนสะท้อนให้เห็นถึงการตอบรับที่ดีจากเกษตรกรต่อการถ่ายทอดเทคโนโลยีในครั้งนี้ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ 0.58 แสดงให้เห็นถึงความคิดเห็นที่ไม่กระจายตัวมากนัก หมายความว่าเกษตรกรส่วนใหญ่มีความเห็นในทิศทางเดียวกันเกี่ยวกับประโยชน์และความเหมาะสมของเทคโนโลยีที่ถูกนำมาถ่ายทอดในครั้งนี้

เมื่อวิเคราะห์เป็นรายด้านแสดงให้เห็นถึงจุดแข็งและโอกาสในการพัฒนางานวิจัยต่อไป ด้านความพึงพอใจในการถ่ายทอดเทคโนโลยีและด้านความรู้ความเข้าใจ มีค่าเฉลี่ยเท่ากันที่ 4.07 คะแนน โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.63 ซึ่งอยู่ในระดับดี ผลลัพธ์นี้แสดงให้เห็นว่าเกษตรกรมีความพึงพอใจต่อกระบวนการถ่ายทอดและสามารถเข้าใจเนื้อหาที่นำเสนอได้อย่างเหมาะสม ด้านการนำความรู้ไปใช้ประยุกต์มีคะแนนสูงสุดที่ 4.36 คะแนน ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 0.48 ผลลัพธ์นี้แสดงให้เห็นว่าเกษตรกรไม่เพียงแต่เข้าใจเทคโนโลยีที่ถูกถ่ายทอดเท่านั้น แต่ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการปฏิบัติงานจริง ความสอดคล้องของความคิดเห็นในด้านนี้ที่สูงกว่าด้านอื่นสะท้อนให้เห็นถึงความเหมาะสมและประโยชน์ที่เป็นรูปธรรมของเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้น ผลการประเมินทั้งหมดแสดงถึงความสำเร็จของการถ่ายทอดเทคโนโลยีและศักยภาพในการขยายผลไปยังพื้นที่และกลุ่มเกษตรกรอื่นในอนาคต

การอภิปรายผล

การพัฒนาระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะในแปลงปลูกหม่อนไล่รุ่นด้วยคอมพิวเตอร์แบบฝังตัวที่ประกอบด้วยการออกแบบระบบควบคุม 3 รูปแบบ ได้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่อยู่ในระดับที่น่าพอใจ โดยผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการควบคุมระบบด้วยตนเองมีความถูกต้อง 100% การควบคุมผ่านแอปพลิเคชันมีความถูกต้องร้อยละ 97% และการควบคุมอัตโนมัติด้วยคอมพิวเตอร์แบบฝังตัวมีความถูกต้อง 96% ผลการศึกษาดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kanya et al. (2022) ที่ได้พัฒนาระบบเกษตรอัจฉริยะด้วยเทคโนโลยี IoT โดยใช้ Blynk application ร่วมกับ NodeMCU ซึ่งพบว่า ประสิทธิภาพการทำงานในภาพรวมสามารถควบคุมการทำงานของเซนเซอร์ได้ 100% สอดคล้องกับงานวิจัยของ Bopimai et al. (2020) ที่พัฒนาระบบเทคโนโลยีอัจฉริยะเกษตรอินทรีย์ก็แสดงประสิทธิภาพในการควบคุมการทำงานของเซนเซอร์ได้ในระดับเดียวกันคือ 100% สอดคล้องกับการศึกษาของ Busabong et al. (2020) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับระบบปลูกผักไฮโดรโปนิคส์ด้วยสมองกลฝังตัวผ่าน NETPIE ได้แสดงให้เห็นว่าการใช้งานระบบในส่วนของผู้เชี่ยวชาญและเกษตรกรไฮโดรโปนิคส์มีค่าเฉลี่ย 4.32 อยู่ในเกณฑ์ระดับมาก นอกจากนี้ ระบบดังกล่าวยังสามารถช่วยประหยัดน้ำได้ประมาณ 25% ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Sukanan et al. (2021) ที่พัฒนาโรงเรือนปลูกพืชและระบบตรวจวัดด้วย IoT ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพและความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างสภาพแวดล้อมภายนอกและภายในโรงเรือน การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีดิจิทัลในภาคเกษตรได้แสดงให้เห็นถึงผลประโยชน์ที่เป็นรูปธรรมในด้านการเพิ่มผลผลิต ดังที่ปรากฏในงานวิจัยของ Sathapuwit et al. (2021) ที่ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการเกษตรได้ด้วยเทคโนโลยีดิจิทัล พบว่า สามารถเพิ่มผลผลิตจาก 4 ต้นเป็น 6 ต้นต่อไร่ต่อปีโดยใช้เวลาต้นทุนเพียง 0.6 ปี การศึกษาของ Jantasri et al. (2022) ได้ศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการผลิตมะระขึ้น

อินทรีย์ระบบ Smart farming ก็แสดงผลลัพธ์ที่น่าประทับใจ โดยสามารถเพิ่มผลผลิตจาก 7,000 กิโลกรัม เป็น 10,452.66 กิโลกรัม และสร้างรายได้ให้กับเกษตรกรมากกว่า 3 เท่า

ความสำเร็จของระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะที่พัฒนาขึ้นนี้ เกิดจากการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี IoT ร่วมกับคอมพิวเตอร์แบบฝังตัว ซึ่งช่วยให้การควบคุมและตรวจสอบสภาพแวดล้อมในแปลงปลูกเป็นไปอย่างแม่นยำและต่อเนื่อง สอดคล้องกับแนวคิดเกษตรอัจฉริยะ (Smart agriculture) ที่เป็นการนำเทคโนโลยีและนวัตกรรมสมัยใหม่เข้ามาปรับใช้กับภาคการเกษตร เพื่อยกระดับประสิทธิภาพการผลิต ลดต้นทุน และเพิ่มคุณภาพผลผลิตอย่างยั่งยืน โดยอาศัยองค์ความรู้ทางด้านเทคโนโลยีสารสนเทศ เช่น เซอร์ ระบบ IoT รวมถึงการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อช่วยให้เกษตรกรสามารถติดตาม ตรวจสอบ และควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ในการเพาะปลูกได้อย่างแม่นยำ (Agricultural Research Development Agency, 2022) นอกจากนี้ การออกแบบระบบให้มีความยืดหยุ่นและการควบคุมระยะไกลได้สร้างความยืดหยุ่นในการทำงานทำให้เกษตรกรมีทางเลือกในการใช้งานตามความสะดวกและความเชี่ยวชาญของแต่ละบุคคล ซึ่งช่วยลดความเสี่ยงจากสภาพอากาศที่แปรปรวนและแก้ปัญหาขาดแคลนแรงงานในภาคการเกษตร ระบบการควบคุมอัตโนมัติที่มีการตั้งค่าความชื้นในดินที่ 17% ตามประสบการณ์ของเกษตรกรในพื้นที่ได้ช่วยให้การจัดการน้ำเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ โดยการใช้ข้อมูลและเทคโนโลยีดิจิทัลในการตัดสินใจเพื่อการจัดการที่เหมาะสม ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มผลผลิตและลดต้นทุนการผลิตในระยะยาว

การถ่ายทอดเทคโนโลยีในงานวิจัยครั้งนี้ มีความพึงพอใจในระดับดี (ค่าเฉลี่ย 4.47) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Suksawang et al. (2023) ที่ศึกษาการถ่ายทอดเทคโนโลยีการเกษตรในการเพาะเห็ดด้วยโรงเรือนเพาะเห็ดด้วยการผสมผสานเทคโนโลยี ซึ่งพบว่า ความพึงพอใจในการถ่ายทอดเทคโนโลยีการเกษตรในภาพรวมอยู่ในระดับมากที่สุด มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.61 และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Phitakittisakuntaworn et al. (2023) ที่ศึกษาการถ่ายทอดเทคโนโลยีระบบกำหนดตำแหน่งยานพาหนะแบบอัตโนมัติ ซึ่งพบว่า มีระดับความพึงพอใจในภาพรวมอยู่ในระดับมากที่สุด มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.54 ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะการถ่ายทอดเทคโนโลยีที่ใช้วิธีการแบบมีส่วนร่วม โดยเน้นการบรรยายให้ความรู้ การสาธิต และการให้ลงมือปฏิบัติจริง ช่วยให้ผู้เข้าร่วม และเกษตรกรเข้าใจและสามารถนำไปใช้งานได้อย่างเป็นรูปธรรม สอดคล้องกับแนวทางการถ่ายทอดเทคโนโลยีการเกษตรที่ยึดหลักการเรียนรู้ผ่านการลงมือปฏิบัติ (Learning by doing) ควบคู่กับการส่งเสริมการมีส่วนร่วมของเกษตรกรเป้าหมาย และสอดคล้องกับหลักการของงานส่งเสริมการเกษตรที่มุ่งเน้นให้เกษตรกรมีส่วนร่วมในการวิเคราะห์ปัญหา และพัฒนาทักษะผ่านการทดลองและการเรียนรู้จากประสบการณ์ตรงในบริบทของตนเอง (Department of agricultural extension, ministry of agriculture and cooperatives, 2022) นอกจากนี้ การพัฒนาระบบให้มีความเรียบง่ายในการใช้งานและเหมาะสมกับระดับความรู้ทางด้านเทคโนโลยีของผู้ใช้และเกษตรกรในพื้นที่ก็เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเข้าถึงและการยอมรับเทคโนโลยีการเกษตรได้อย่างมีประสิทธิภาพ

บทสรุป

การวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะสำหรับแปลงปลูกหม่อนไถ่รุ่นด้วยเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์แบบฝังตัว เพื่อตอบสนองต่อปัญหาการขาดแคลนแรงงานและการจัดการน้ำที่ไม่มีประสิทธิภาพในภาคการเกษตร ระบบที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยเซนเซอร์วัดความชื้นดิน บอร์ด Arduino และระบบควบคุมปั้มน้ำอัตโนมัติ ซึ่งสามารถจัดการแปลงปลูกพร้อมกันได้สูงสุด 4 แปลง ผ่าน 3 รูปแบบการควบคุมที่แตกต่างกัน ได้แก่ การควบคุมด้วยตนเอง, การควบคุมผ่านแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือที่เชื่อมต่อกับกล้องวงจรปิด และการควบคุมอัตโนมัติ ผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบแสดงให้เห็นว่า การควบคุมด้วยตนเองมีความถูกต้องสูงสุดที่ร้อยละ 100 การควบคุมผ่านแอปพลิเคชันมีประสิทธิภาพที่ร้อยละ 97.15 และการควบคุมอัตโนมัติมีความถูกต้องที่ร้อยละ 96 ระบบสามารถประหยัดการใช้น้ำได้ร้อยละ 25 เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการดั้งเดิม ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพในการจัดการทรัพยากรอย่างยั่งยืน และการถ่ายทอดเทคโนโลยีให้กับเกษตรกรจำนวน 40 คนในตำบลโคกสะอาด อำเภอปราสาท จังหวัดสุรินทร์ ประสบความสำเร็จด้วยระดับความพึงพอใจเฉลี่ยที่ 4.17 จากคะแนนเต็ม 5 ซึ่งสะท้อนถึงการยอมรับและความเข้าใจของเกษตรกรต่อเทคโนโลยีใหม่ สำหรับข้อเสนอแนะในการพัฒนา การวิจัยแนะนำให้มีการพัฒนาหลักสูตรการถ่ายทอดเทคโนโลยีและจัดตั้งศูนย์เรียนรู้เกษตรอัจฉริยะในระดับหมู่บ้าน ตำบล และจังหวัด เพื่อสร้างความยั่งยืนในการใช้เทคโนโลยี การวิจัยในอนาคตควรมุ่งเน้นการปรับปรุงระบบให้รองรับพืชเศรษฐกิจหลากหลายชนิด การบูรณาการปัญญาประดิษฐ์เพื่อเพิ่มความสามารถในการทำนายสภาพแวดล้อม และ

การศึกษาการประยุกต์ใช้ในการเกษตรขนาดใหญ่ เพื่อขยายผลประโยชน์ของเทคโนโลยีนี้ให้กว้างขวางและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอแสดงความขอบคุณการสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2567 ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนวิจัย และขอขอบคุณเกษตรกรในพื้นที่ตำบลโคกสะอาด อำเภอปราสาท จังหวัดสุรินทร์ ที่ได้กรุณาให้ความร่วมมือในการถ่ายทอดองค์ความรู้และข้อมูลสำคัญ อันเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- Agricultural Research Development Agency. (2022). *Smart agriculture: Transforming farming with technology and innovation*. <https://www.arda.or.th/detail/6195>
- Bopimai, U., Lonkuntod, N., Wannakayont, A., & Sitthichantasen, T. (2020). Smart technology systems for organic agriculture. *Journal of MCU Nakhondhat*, 7(11), 63-78.
- Busabong, S., Josungnoen, W., & Josungnoen, W. (2020). Development of a hydroponic vegetable growing system with embedded systems via NETPIE. *Journal of Science and Technology Buriram Rajabhat University*, 4(1), 61-72.
- Department of Agricultural Extension, Ministry of Agriculture and Cooperatives. (2022). *Operating manual for agricultural extension officers: Agricultural technology transfer* (1st ed.). Agricultural Cooperative Federation of Thailand Printing House.
- Design and Technology Department, Institute for the Promotion of Teaching Science and Technology [IPST]. (2022). *Technology process*. http://designtechnology.ipst.ac.th/?page_id=1094
- Jantasri, R., Monatrakul, W., Pharanat, S., & Jantasri, C. (2022). Production efficiency of organic bitter melon in smart farming systems in Maha Sarakham Province, Thailand. *Prawarun Agricultural Journal*, 19(2), 51-58.
- Kanya, P., Seeman, T., Jiamko, K., Seekamsaen, P., Chaisongkram, P., Klaimanee, P., & Bopimai, U. (2022). Development of smart agricultural systems. *Journal of Industrial Technology Surindra Rajabhat University*, 7(1), 35-45.
- Khajonrit, S., Panin, O., & Yodsurang, P. (2021). Environment and development of lifestyle changes in textile handicraft communities, Surin Province. *Academic Journal of Southern Vocational Institute*, 1, 6(1), 89-96.
- Phitakkittisakuntaworn, K., Lonkuntod, N., Sitthichantasen, T., & Wannakayont, A. (2023). Technology transfer and utilization of automatic vehicle positioning systems for tracking goods transportation by trucks. *Journal of MCU Ubon Review*, 8(3), 545-554.
- Pattama, N. (2020). *Development of smart agriculture systems in Thailand*. The Secretariat of the Senate.
- Sathapuwit, S., Rakkan, S., Klankwamdee, A., & Sriwichian, P. (2021). Enhancing bamboo farming efficiency with digital technology: A case study of Kim Sung bamboo farming. *Journal of Science and Technology RMUTSB*, 5(2), 123-131.
- Sitthipong, R. (2015). Knowledge management of mulberry and silkworm farmers in Hin Dat Sub-district, Pang Sila Thong District, Kamphaeng Phet Province. *Journal of Humanities and Social Sciences*, 21(3), 100-106.

- Sukanan, B., Pusayanont, M., Khamhan, T., Pisurat, N., & Chawthai, A. (2021). Development of plant growing houses and measurement systems for plant growing houses using IoT. *Academic Journal of Engineering Ubon Ratchathani University*, 14(3), 132-143.
- Suksawang, W., Dumnil, S., Lonkuntod, N., Worasri, S., Sittichantasen, T., Praisin, A., & Wannakayont, A. (2023). Agricultural technology transfer in mushroom cultivation with mushroom houses using integrated technology. *Journal of Buddhist Science MCU Ubon Ratchathani*, 5(3), 475-484.

ATRJ



วารสารเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี
มทร.อีสาน



<https://li01.tci-thaijo.org/index.php/atj>

คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์