



Journal of SciTech-ASEAN

ISSN 3088-2575 (ONLINE)

VOLUME 5 NUMBER 2 (JULY – DECEMBER 2025)

เจ้าของ	คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ	
บรรณาธิการ	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เตชภณ ทองเต็ม	คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ
กองบรรณาธิการ	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กนิษฐา อินธิจิต ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พัชรพรรณ สิทธิศาสตร์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริพร ยศแสน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิรนนท์ รัตสีวอ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กนกกาญจน์ จิรศิริเลิศ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทัย กาบบัว อาจารย์ ดร.ภาครุณี ชินพฤทธิวงศ์ นางอำพร ไกรกลาง	คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ
บรรณาธิการผู้ทรงคุณวุฒิ (Peer Reviewers)	รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยยุทธ มิงาม รองศาสตราจารย์ ดร.นิจิรา ทาตัน รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยยุทธ มิงาม รองศาสตราจารย์ ดร.พัชพล มุ่งลือ รองศาสตราจารย์ ดร.วรพจน์ ศิริรักษ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรจิต สอนสีคำ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศศิน จันทร์พวงทอง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริยดา สิทธิศาสตร์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เดือนเพ็ญ วงศ์สอน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เบญญา แสนมหายักษ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รุ่งสันทน์ ไกรกลาง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิรายุส วรรัตนโกคา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีรวัตร ลือสัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิทธิ กุหลาบทอง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.แววดาว ดาทอง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เขมนิจจารีย์ สาริพันธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล ดาแร่ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจษฎา โพนแก้ว ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สายัณห์ สืบผาง ผู้ช่วยศาสตราจารย์เจนศักดิ์ คชนิล ผู้ช่วยศาสตราจารย์โชคชัย ไตรยสุทธิ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์รัชิต เพ็งสีแสง อาจารย์ ดร.กิตติยา สุขหม อาจารย์ ดร.นิตยา ปิติวิทยากุล อาจารย์ ดร.กฤษดา หินเฒ่า อาจารย์ ดร.ณพธรณนัท ทองปาน อาจารย์ ดร.ธำรัช ดงสงคราม	มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา มหาวิทยาลัยพะเยา มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา มหาวิทยาลัยนครพนม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตจันทบุรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์ มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

อาจารย์ ดร.สำราญ วานนท์
ดร.สมภพ เจียรณัย

มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ
บริษัท โปรทีเรียล (ประเทศไทย) จำกัด
และห้องปฏิบัติการเพื่อประสิทธิภาพด้วย
ปัญญาประดิษฐ์ SMART
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

วัตถุประสงค์

เพื่อส่งเสริมให้คณาจารย์ นักวิจัย นักวิชาการ นิสิตนักศึกษา และผู้สนใจทั่วไปได้เผยแพร่ผลงานวิชาการและผลงานวิจัย ตลอดจนได้แลกเปลี่ยนความคิดเห็นทางวิชาการในสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยมุ่งเน้นในกลุ่มสาขาวิชาที่มีการเปิดสอนในคณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ ได้แก่ กลุ่มสาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีประยุกต์ ซึ่งประกอบด้วยสาขาเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์และดิจิทัล สาขาวิทยาการคอมพิวเตอร์ สาขาวิศวกรรมซอฟต์แวร์ สาขาวิศวกรรมโลจิสติกส์ สาขาเทคโนโลยีโยธาและสถาปัตยกรรม สาขาออกแบบผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม สาขาเทคโนโลยีการจัดการอุตสาหกรรม สาขาเทคโนโลยีการเกษตร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม และกลุ่มสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สุขภาพ ได้แก่ สาขาอาชีวอนามัยและความปลอดภัย สาขาสาธารณสุขชุมชน และสาขาวิทยาศาสตร์การกีฬา

ลิขสิทธิ์

กองบรรณาธิการวารสาร จะไม่รับพิจารณาบทความที่เป็นการละเมิดลิขสิทธิ์ ในกรณีที่มีการละเมิดลิขสิทธิ์ขึ้น ทางผู้เขียนเป็นผู้รับผิดชอบแต่เพียงฝ่ายเดียว

หมายเหตุ

วารสารราย 6 เดือน เผยแพร่ทุก ๆ กลางเดือนมิถุนายน และธันวาคม บทความที่ตีพิมพ์ในวารสารเป็นทัศนะ ลิขสิทธิ์ และความรับผิดชอบของผู้เขียนเจ้าของผลงาน

บทบรรณาธิการ

สวัสดีปีใหม่ 2569ที่กำลังจะก้าวเข้ามาถึง ในนามของกองบรรณาธิการวารสาร Journal of SciTech-ASEAN ขออัญเชิญให้ท่านผู้อ่าน นักวิจัย และผู้สนับสนุนวารสารทุกท่านประสบความสำเร็จในทุกด้าน วารสารฉบับนี้เป็นฉบับแรกภายหลังการปรับชื่อจาก วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ (Science and Technology Journal of Sisaket Rajabhat University) สู่ Journal of SciTech-ASEAN เพื่อเพิ่มความเป็นสากลและรองรับการตีพิมพ์ผลงานวิจัยคุณภาพสูงในระดับนานาชาติ บทความทุกเรื่องในฉบับนี้ได้ผ่านกระบวนการประเมินคุณภาพโดยผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกอย่างน้อย 3 ท่าน/บทความ ตามมาตรฐานของ ก.พ.อ. พ.ศ. 2564 เพื่อคงความโปร่งใส ความเข้มงวด และมาตรฐานทางวิชาการที่เหมาะสมกับการพัฒนาวารสารในระยะยาว ทั้งนี้ วารสารขอขอบคุณผู้เขียนที่ไว้วางใจส่งบทความ และผู้ทรงคุณวุฒิที่สละเวลาให้ข้อเสนอแนะเชิงสร้างสรรค์ต่อการพัฒนางานวิชาการของประเทศ

ในวารสารฉบับนี้ กองบรรณาธิการได้คัดเลือกบทความที่สะท้อนทิศทางการรู้ร่วมสมัยในหลายสาขา ทั้งด้านเทคโนโลยีเกษตร ระบบวิศวกรรมและการตัดสินใจเชิงอัจฉริยะ วิทยาการอาหาร นิเวศวิศวกรรม การจัดการขนส่งอย่างยั่งยืน รวมถึงงานวิจัยด้านปัญญาประดิษฐ์และภูมิศาสตร์เมือง ซึ่งทั้งหมดนี้สะท้อนความเชื่อมโยงระหว่างวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และการพัฒนาเชิงพื้นที่ในบริบทไทยและอาเซียน โดยวารสารของเราเปิดรับบทความตลอดทั้งปี โดยเผยแพร่ปีละ 2 ฉบับ ได้แก่ เดือนมกราคม–มิถุนายน และกรกฎาคม–ธันวาคม ผู้สนใจสามารถศึกษาคำแนะนำการเตรียมต้นฉบับได้ที่หน้าเว็บไซต์ของวารสารฯ หัวข้อคำแนะนำการเตรียมต้นฉบับใน <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/STJS/> ทั้งนี้เพื่อร่วมกันขับเคลื่อนงานวิจัยคุณภาพสู่สังคมวิชาการอย่างต่อเนื่อง



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เตชภณ ทองเดิม)

บรรณาธิการวารสาร

สารบัญ

	หน้า
การเสริมประสิทธิภาพปุ๋ยหมักและปุ๋ยมูลไส้เดือนด้วยจุลินทรีย์ตรึงไนโตรเจนเพื่อยกระดับ ศักยภาพการให้ธาตุอาหารพืช Bioaugmentation of Compost and Vermicompost with Nitrogen-Fixing Bacteria for Improved Plant Nutrient Supply ปัญญา ชัยรัตนพานิช ปิยะวดี สราภิรมย์ พงศธร กองแก้ว ชรินทร์นัฏ พรธนะ ทิพย์ธัญญา ศรีโยพล ศิริณ เรืองศิริ ทรงกลด พลพวง มัลลิกา อีระกุล จักรกฤษ ศรีละออ ทัย กาบบัว และทรงวิทย์ หงสประภาส	1-16
คุณสมบัติของผงโปรตีนจากรำข้าวที่สกัดด้วยเอนไซม์และการประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์วุ้น Characterization of Enzyme-Extracted Rice Bran Protein Powder and Its Application in Protein-Enriched Jelly ชนิษฐา ฉิมพาลี จินดารัตน์ ใจตรง สุจิรา ศรีดาชาติ และจิรนนต์ รัตสีโว	17-28
ระบบสนับสนุนการตัดสินใจบนมือถือสำหรับการปลูกข้าวในจังหวัดศรีสะเกษ A Mobile-Based Decision Support System for Rice Cultivation in Sisaket ภากรณ์ เหล่าพิสัย วัฒนกฤษณ์ ปัตไตร และกนิษฐา อินธิจิต	29-41
การประยุกต์ใช้กระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้นในการประเมินความเสี่ยงของขั้นตอน การติดตั้งระบบท่อส่งไอน้ำ Application of the Analytic Hierarchy Process (AHP) in Risk Assessment of Steam Pipeline Installation Procedures ยอดดา งามใหญ่ นันทน์ภัสร์ อินอิม เลิศเลขา ศรีรัตนะ และเสริย์ ตู่ประกาย	42-56
การประยุกต์ใช้ระบบนิเวศวิศวกรรมเพื่อส่งเสริมการจัดการแมลงศัตรูพืชในแปลงนาข้าวอัลฮัม Implementation of an Ecological Engineering System to Support Insect Pest Management in the Alham Rice Field วนิดา เพ็ชรลมูล ไสว บัวแก้ว กันตภณ มะหาหมัด และพงษ์ศักดิ์ มานสุริวงศ์	57-68
การจัดการขนส่งสีเขียวและแบบสลิในการเพิ่มประสิทธิภาพอย่างยั่งยืนของผู้ให้บริการขนส่ง ในระบบโซ่ความเย็นอุตสาหกรรมอาหารในประเทศไทย Lean and Green Transportation Management for Sustainable Efficiency Improvement of Transportation Service Providers in Thailand Food Cold Chain ธมนวรรณ เฟื่องประยูร และณัฐพัชร์ อาริรัชกุลกานต์	69-88

สารบัญ

	หน้า
การพัฒนานวัตกรรมดูแลผู้สูงอายุเพื่อหาเส้นทางกลับบ้านโดยใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์ Developing Innovative Elderly Care to Find Pathways Home Using Artificial Intelligence Techniques อรนุช พันโท รสลิน เพตะกร ภาณุวัฒน์ สุวรรณกุล และพิรุฬห์ แก้วฟุ้งรังสี	89-102
การศึกษาการขยายตัวของเมืองในพื้นที่ระเบียงเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก กรณีศึกษาอำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี A Study of Urban Expansion in the Eastern Economic Corridor Area: Case Study in Si Racha District, Chonburi Province สุภาพร มานะจิตประเสริฐ	103-119
ประสิทธิภาพของสมุนไพรหมุยอินเดียต่อคุณภาพน้ำเชื้อไก่พื้นเมืองไทย Effects of <i>Mucuna pruriens</i> on Sperm Quality in Thai Native Chickens ทิพย์สุดา บุญมาทัน นพรัตน์ ผกาเขต ญัฐวัฒน์ ต้นพล และดวงจันทร์ โพธิสาร	120-126
การใช้โพรไบโอติกเป็นอาหารเสริมในการเลี้ยงสัตว์น้ำ The Application of Postbiotics as Feed Additives in Aquaculture ฐปนขจร ปั่นแจ่ม และชนกันต์ จิตมนัส	127-140



การเสริมประสิทธิภาพปุ๋ยหมักและปุ๋ยมูลไส้เดือนด้วยจุลินทรีย์ตรึงไนโตรเจน

เพื่อยกระดับศักยภาพการให้ธาตุอาหารพืช

Bioaugmentation of Compost and Vermicompost with Nitrogen-Fixing Bacteria
for Improved Plant Nutrient Supplyปัญญา ชัยรัตนพานิช^{1,2} ปิยะวดี สราภิรมย์¹ พงศธร กองแก้ว¹ ชรินทร์นัฏ พรหมณะ³ ทิพย์ธัญญา ศรีโยพล³ ศิริณ เรืองศิริ³ทรงกลด พลพวก⁴ มัลลิกา ธีระกุล⁵ จักรกฤษ ศรีระอ้อ⁶ ทัย กาบบัว⁷ และ ทรงวิทย์ หงสประภาส^{1,8*}Panya Chairattanaphanich^{1,2}, Piyawadee Saraphirom¹, Pongsathorn Kongkaew¹, Charinrat Panna³,Thipthanya Sriyophon³, Sirin Ruangsiri³, Songklot Phonphuak⁴, Mullika Teerakun⁵,Chakkrit Sreela-or⁶, Thai Kabbua⁷ and Throngvid Hongsaprabhas^{1,8*}¹คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม²บริษัท กรีนเดลี ฟู้ดส์ จำกัด จังหวัดปทุมธานี³คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม⁴คณะวิทยาการจัดการ มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์ จังหวัดสุรินทร์⁵คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ จังหวัดกาฬสินธุ์⁶คณะเทคโนโลยีการเกษตรและอาหาร มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม จังหวัดพิษณุโลก⁷คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ จังหวัดศรีสะเกษ⁸บริษัท สหพันธ์ เซ็นจูรี จำกัด กรุงเทพมหานคร¹Faculty of Science and Technology, Rajabhat Maha Sarakham University, Maha Sarakham Province²Greendeli Foods Co., Ltd., Pathum Thani Province³Faculty of Education, Rajabhat Maha Sarakham University, Maha Sarakham Province⁴Faculty of Management Sciences, Surindra Rajabhat University, Surin Province⁵Faculty of Agricultural Technology, Kalasin University, Kalasin Province⁶Faculty of Food and Agricultural Technology, Pibulsongkram Rajabhat University, Phitsanulok Province⁷Faculty of Liberal Arts and Science, Sisaket Rajabhat University, Sisaket Province⁸Sahapan Century Co., Ltd., Bangkok

*Corresponding Author: throngvid.ho@rmu.ac.th

Received: February 20, 2025

Revised: June 08, 2025

Accepted: June 18, 2025

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อยกระดับคุณสมบัติของปุ๋ยหมักและเวอร์มิคอมโพสต์ให้เป็นปุ๋ยชีวภาพที่มีคุณภาพสูง โดยประเมินปุ๋ย 4 สูตร ได้แก่ (1) ปุ๋ยหมักจากเศษผักและผลไม้ผสมมูลสัตว์ หมักในถังหมักเป็นเวลา 42 วัน ก่อนทำให้แห้งและร่อน (2) ปุ๋ยมูลไส้เดือนย่อยสลายโดยไส้เดือนสายพันธุ์ *Eudrilus eugeniae* เป็นเวลา 10 วัน แล้วนำไปทำให้แห้งและร่อน (3) ปุ๋ยหมักสูตรที่ (1) เสริมด้วยแบคทีเรีย *Azotobacter vinelandii* ซึ่งมีความสามารถในการ ตรึงไนโตรเจน และ (4) ปุ๋ยมูลไส้เดือนสูตรที่ (2) เสริมด้วยแบคทีเรีย *A. vinelandii* ประสิทธิภาพของปุ๋ยทั้งหมดได้รับการประเมินโดยวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมี เปรียบเทียบมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของประเทศไทย (พ.ศ. 2548) พบว่าทุกสูตร มีคุณลักษณะตรงตามเกณฑ์มาตรฐาน ได้แก่ ขนาดเม็ดปุ๋ยไม่เกิน 5×5 มิลลิเมตร ความชื้นและสารระเหยต่ำกว่าร้อยละ 30 ปริมาณอินทรีย์วัตถุสูงกว่าร้อยละ 3.5 ปริมาณเศษหินต่ำกว่าร้อยละ 1 และปลอดจากสิ่งปนเปื้อน เช่น พลาสติก แก้ว โลหะ และวัสดุเคมี

ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อยู่ระหว่าง 8.00–8.55 และค่าการนำไฟฟ้า (EC) อยู่ในช่วง 1.97–2.55 dS/m ทั้งนี้วัสดุอินทรีย์ในทุกสูตรถูกย่อยสลายมากกว่าร้อยละ 90 แสดงถึงความสมบูรณ์ของกระบวนการผลิต ผลการเติมแบคทีเรีย *A. vinelandii* ซึ่งเป็นแบคทีเรียตรึงไนโตรเจน แสดงให้เห็นถึงการยกระดับคุณภาพของปุ๋ยอย่างชัดเจน โดยในปุ๋ยหมักพบว่าอินทรีย์วัตถุเพิ่มจากร้อยละ 17.33 เป็น 22.33 ขณะที่ในปุ๋ยมูลไส้เดือนเพิ่มจากร้อยละ 27.61 เป็น 28.66 ปริมาณไนโตรเจนในปุ๋ยหมักเพิ่มจากร้อยละ 0.87 เป็น 1.12 และในปุ๋ยมูลไส้เดือนเพิ่มจากร้อยละ 1.38 เป็น 1.43 ฟอสฟอรัสในปุ๋ยหมักเพิ่มจากร้อยละ 0.068 เป็น 0.108 และในปุ๋ยมูลไส้เดือนเพิ่มจากร้อยละ 0.188 เป็น 0.240 ส่วนโพแทสเซียมในปุ๋ยหมักเพิ่มจากร้อยละ 0.16 เป็น 0.21 และในปุ๋ยมูลไส้เดือนเพิ่มจากร้อยละ 1.39 เป็น 2.13 โดยสรุปการศึกษานี้แนะนำเสนอแนวทางที่มีศักยภาพในการยกระดับกระบวนการผลิตปุ๋ยหมัก ด้วยการใช้จุลินทรีย์ที่มีคุณสมบัติทางชีวภาพอย่าง *A. vinelandii* เพื่อเปลี่ยนของเหลือทิ้งทางชีวภาพให้เป็นปุ๋ยชีวภาพคุณภาพสูงที่อุดมด้วยธาตุอาหาร ส่งเสริมความยั่งยืนในภาคการเกษตรได้อย่างเป็นรูปธรรม

คำสำคัญ: การเสริมจุลินทรีย์, ปุ๋ยอินทรีย์, *Azotobacter vinelandii*, ปุ๋ยมูลไส้เดือน

Abstract

This study aimed to enhance the properties of compost and vermicompost by transforming them into biofertilizers. Four types of fertilizers were evaluated: (1) compost prepared from fruit and vegetable scraps mixed with manure, fermented in a rotating tumbler for 42 days, then dried and sieved; (2) vermicompost produced from fruit and vegetable scraps decomposed by *Eudrilus eugeniae* earthworms for 10 days, then dried and sieved; (3) compost from (1) supplemented with *Azotobacter vinelandii*, a nitrogen-fixing bacterium; and (4) vermicompost from (2) enriched with *A. vinelandii*. All fertilizers were assessed for maturity using both physical and chemical analyses, and their performance was compared to Thai organic fertilizer standards. All formulations contained granules smaller than 5x5 mm, moisture and volatile matter below 30%, and organic matter (OM) content above 3.5%. Rock and gravel content was under 1%, and all samples were free from contaminants such as plastic, glass, metals, and sharp materials. The pH ranged from 8.00 to 8.55, with electrical conductivity (EC) between 1.97 and 2.55 dS/m. More than 90% of the material was decomposed, and all fertilizer types exceeded the 2005 standards set by the Department of Agriculture. Bioaugmentation with nitrogen-fixing bacteria significantly improved nutrient composition. OM increased from 17.33% to 22.33% in compost, and from 27.61% to 28.66% in vermicompost. Nitrogen content increased from 0.87% to 1.12% in compost and from 1.38% to 1.43% in vermicompost. Phosphorus content increased from 0.068% to 0.108% in compost and from 0.188% to 0.240% in vermicompost. Potassium content increased from 0.16% to 0.21% in compost and from 1.39% to 2.13% in vermicompost. In conclusion, this study provides a valuable framework for improving composting efficiency and converting organic waste into high-quality biofertilizers. The findings highlight the potential of microbial enrichment in enhancing the quality and nutrient composition of compost for agricultural applications.

Keywords: Bioaugmentation, Organic fertilizer, *Azotobacter vinelandii*, Vermicompost

1. Introduction

The increasing global demand for sustainable agricultural practices has accelerated the development of organic fertilizers as environmentally friendly alternatives to synthetic chemicals. Compost and vermicompost, derived from biodegradable waste, are widely recognized for their ability to improve soil fertility, structure, and microbial diversity (Chen et al., 2020; Manzoor et al., 2024). However, the nutrient content and quality of these organic fertilizers can vary significantly depending on the type of raw materials and composting conditions (Yang et al., 2021; Chaudhary et al., 2023).

The food processing industry generates substantial amounts of fruit and vegetable waste that, if improperly managed, contribute to environmental pollution and greenhouse gas emissions (Wei et al., 2017; Genetu, 2024). Converting these organic residues into compost aligns with the principles of the circular economy by creating value-added products while reducing environmental impact (Petraglia et al., 2019; Sial et al., 2024). Among various composting techniques, vermicomposting using earthworms such as *Eudrilus eugeniae* offers advantages including faster decomposition and enhanced nutrient content in the final product (Kaur, 2020; Oyege & Balaji Bhaskar, 2023; Sharma & Garg, 2019).

To further enhance the agronomic value of compost, bioaugmentation using nitrogen-fixing bacteria such as *Azotobacter vinelandii* has been proposed. These microorganisms improve the availability of essential nutrients, stimulate plant growth, and increase the efficiency of compost as a biofertilizer. *Azotobacter* sp. is a nitrogen-fixing bacterium that plays an important role in the agricultural ecosystem. It can extract nitrogen from the air and convert it into a form that plants can use, reducing dependence on chemical fertilizers and increasing soil fertility. Therefore, using *Azotobacter* sp. in biofertilizers is a sustainable approach to increase crop yields. The properties of *Azotobacter* sp. in biofertilizers include nitrogen fixation from atmospheric nitrogen, production of plant growth promoters (PGPs) such as auxins, gibberellins, and cytokinins, enhancement of soil fertility by improving soil structure and promoting the growth of beneficial microorganisms, improving the absorption of nutrients such as phosphorus and potassium by plants, and producing extracellular polysaccharides (EPS), which help improve the physical properties of the soil. Therefore, using *Azotobacter* sp. in biofertilizers is an approach that promotes environmentally friendly agriculture and helps plants grow more robustly (Sumbul et al., 2020; O'Callaghan et al., 2022; Martín del Campo et al., 2022).

According to the Thai Organic Fertilizer Standards (TAS 2005; TIS 2731-2009), organic fertilizers must meet specific criteria: moisture and volatile matter must be below 30%, organic matter content should exceed 20% by dry weight, and the minimum required levels of total nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K) are 1.0%, 0.1%, and 0.5%, respectively. Additionally, fertilizers should be free from contaminants such as plastics, metals, and pathogenic microorganisms (Department of Agriculture, 2005; Thai Industrial Standards Institute, 2009).

Therefore, the objective of this study was to evaluate the effects of microbial enrichment using *A. vinelandii* on the physicochemical properties of compost and vermicompost produced from fruit and vegetable waste. The study aimed to compare the resulting biofertilizers with national organic fertilizer

standards in order to assess their potential for agricultural application.

2. Materials and methods

2.1 Preparation of compost and vermicompost from vegetable and fruit waste

2.1.1 Material preparation

Fruit and vegetable scraps were collected from local fresh markets in Maha Sarakham, Thailand. To reduce variability and ensure sample uniformity, the waste was limited to commonly available items such as cabbage, carrot, papaya peel, and banana peel. All materials were collected within 24 hours of discard, chopped into pieces (2–5 cm), and stored in sealed plastic containers at 4°C to prevent premature decomposition prior to composting.

Cattle manure was obtained from a small-scale organic dairy farm in the same area. Fresh manure was aged under shade for 7 days to reduce ammonia content and partially stabilize the material before mixing. It was stored under ambient conditions, protected from sunlight and rain, until use.

The initial composting mixture was prepared by blending fruit and vegetable scraps with cattle manure in a weight ratio of 2:1. The carbon-to-nitrogen (C/N) ratio of the mixture was calculated based on standard values for total carbon and nitrogen content of each material, as reported by Tiquia and Tam (2002). The calculated initial C/N ratio ranged between 25:1 and 30:1, which is considered optimal for aerobic composting (Lv et al., 2018). This range supports rapid microbial activity while minimizing nitrogen losses through volatilization.

2.1.2 Composting process

Composting was conducted in a 160-liter rotating compost bin, designed to enhance the efficiency of the composting process (Matheri et al., 2018). The composting process was prepared using the following steps: 1) chopping the prepared vegetable and fruit waste into small pieces to accelerate decomposition; 2) layering the materials in the bin, alternating between the vegetable and fruit processing waste, cattle manure, and dry leaves; 3) Spraying bio-extract or EM solution (effective microorganisms) evenly over each layer; 4) moistening the compost pile by spraying water, ensuring a moisture level of 50-60%; 5) Turning the compost by rotating the bin 3-5 times every 3-5 days to increase oxygen availability and accelerate decomposition; and 6) monitoring the compost for 30 days, checking temperature, pH and odor to track fermentation progress. The steps in preparing compost are shown in Figure 1.

2.1.3 Vermicomposting process

The vermicomposting process was conducted using a cement block worm bed for vermiculture. The bedding material was prepared by soaking cattle manure (4 parts) in water for one week. A mixture of fine rice bran (1 part), microbial solution (1 part), molasses (1 part), and water (3 parts) was then thoroughly combined and fermented for one week. After fermentation, 30 kg of the prepared mixture was added to the worm bed, and the moisture level was adjusted to 70-80%, following the method of Ferreira Ponciano Ferraz et al. (2020). Mature earthworms were selected and introduced into the rearing beds at a rate of 50 grams per bed or 1 kilogram per square meter of rearing area. The worms were fed 1

kilogram of organic waste, including Chinese cabbage leaves, cabbage leaves, and pineapple peels, every week. The rearing area was rotated once a week to facilitate decomposition, and water was applied twice per week to maintain adequate moisture, ensuring it remained damp but not overly wet. This process was maintained for two weeks. The collection of vermicast (worm castings) was performed by harvesting from the surface of the bedding material, where the castings appeared as dark brown, delicate, and crumbly granules. The vermicomposting was then air-dried in a shaded area for 3–5 days before being sieved using a screening tray to obtain a refined final product (Figure 2).



Figure 1. Steps in the composting process using a 160-liter rotating bin. (a) Preparation and layering of compost materials, including fruit and vegetable waste, cattle manure, and dry leaves. (b) Aerobic fermentation and regular rotation of the compost bin to enhance decomposition. (c) Final compost product after 42 days of fermentation.



Figure 2. Vermicomposting process using a cement-block worm bed. (a) Preparation of bedding material with fermented cattle manure and rice bran mixture. (b) Introduction of *E. eugeniae* earthworms and weekly feeding with vegetable waste. (c) Collection and refinement of vermicast after 10–14 days.

2.1.4 Moisture control and EM application

To enhance microbial activity and accelerate decomposition during composting, an effective microorganism (EM) solution was prepared at a concentration of 1 liter of EM per 10 liters of clean water. The solution was sprayed evenly onto each compost layer during the layering process. Moisture content of the composting mixture was carefully maintained within the optimal range of 50–60%, which is suitable for aerobic microbial activity. Moisture was monitored regularly and adjusted as needed by spraying water to ensure uniform moisture distribution throughout the composting material.

2.1.5 Microbial inoculation and application ratio

For microbial enrichment, *A. vinelandii* was cultured in nitrogen-free liquid medium at 37°C for 5 days and then diluted to an optical density (OD₆₀₀) of 1.0, corresponding to approximately 1.2×10^8 CFU/mL. A standardized volume of 100 mL of this bacterial suspension was applied per 1 kg of semi-dry compost or vermicompost. This inoculation rate, based on published protocols and preliminary trials, was selected to ensure effective microbial colonization. The suspension was evenly mixed into the matured compost or vermicompost to achieve uniform distribution.

2.1.6 Replication and experimental units

All treatments were performed in triplicate (n = 3) to allow for statistical analysis. Each replicate represented an independently prepared composting or vermicomposting unit, processed under identical environmental and procedural conditions. This design ensured the consistency and reliability of the experimental data across treatments. Consequently, a total of 12 independent experimental units (4 treatments × 3 replications) were prepared.

2.2 Preparation of nitrogen-fixing microorganisms

A. vinelandii was initially cultured on nitrogen-free agar medium at 37°C for 5 days. The bacterial cells were then transferred to a nitrogen-free liquid medium for suspension preparation. The cultivation was conducted in 500 mL conical flasks containing 250 mL of medium, incubated at 37°C for 5 days under controlled conditions (adapted from Saraphirom et al., 2024). The suspension of nitrogen-fixing bacteria was diluted in saline solution to be used as a bacterial inoculum for augmenting organic fertilizers used in this study (Figure 3).

2.3 Experimental design

The independent variable was the bioaugmentation of compost and vermicompost with *A. vinelandii* to improve nutrient content, organic matter composition, and fertilizer stability. The experiment was arranged in a Completely Randomized Design (CRD). Four types of organic fertilizers (Figure 3b) were examined: 1) compost, 2) vermicompost processed by *E. eugeniae*, 3) compost augmented with *A. vinelandii*, and 4) vermicompost augmented with *A. vinelandii*. The physical and chemical properties of these fertilizers were analyzed and compared with Thai organic fertilizer standards to evaluate their maturity and effectiveness.

2.4 Organic matter content and nutrient composition analysis

The analysis of pH, electrical conductivity (EC), organic matter percentage (%OM), and the concentrations of essential nutrients, including nitrogen, phosphorus, and potassium, was conducted using standard laboratory methods (adapted from Barney et al., 2020). Organic matter content was determined using the loss on ignition (LOI) method, in which dried samples were incinerated at 550°C for 4 hours, with %OM calculated based on weight loss. Nitrogen concentration was analyzed using the Kjeldahl method, where samples were digested with sulfuric acid (H₂SO₄) and a catalyst to convert organic nitrogen into ammonia (NH₃). The ammonia was then distilled and titrated to determine total nitrogen content. Phosphorus concentration was measured using spectrophotometry, applying Bray-1 extractant for low-pH samples and Olsen extractant for high-pH samples. The phosphorus content was quantified by measuring

light absorbance at 882 nm. Potassium concentration was determined using flame photometry, in which potassium was extracted from the sample using ammonium acetate (NH_4OAc) and analyzed by comparing readings with standard solutions.

2.5 Statistical analysis

All experimental data were analyzed using descriptive statistics and one-way analysis of variance (ANOVA) to determine the significance of differences among the four fertilizer treatments: T1 (compost), T2 (vermicompost), T3 (compost + *A. vinelandii*), and T4 (vermicompost + *A. vinelandii*). Data from each treatment were collected in triplicate ($n = 3$), and results were expressed as mean $\pm$ standard deviation (SD). When significant differences were detected ($p < 0.05$), Tukey's Honestly Significant Difference (HSD) post hoc test was performed to identify pairwise differences among treatment means. Statistical analyses were conducted using IBM SPSS Statistics (Version 26), and results were interpreted at a 95% confidence level.



Figure 3. The experimental design includes (a) the dilution of *A. vinelandii* cells, (b) 4 types of organic fertilizers used in this study.

3. Result

3.1 Composting temperature profile

The composting process exhibited a typical four-phase temperature pattern: mesophilic, thermophilic, cooling, and maturation. The highest temperature observed during the thermophilic phase was 50.33°C , which is within the optimal range for efficient organic matter decomposition and pathogen reduction. Over the 42-day composting period, temperature gradually decreased and stabilized near ambient levels, indicating completion of the composting cycle (Figure 4).

Although no formal statistical analysis was conducted to assess the significance of temperature changes across phases, the average temperature within each phase was calculated and expressed as mean $\pm$ standard deviation (SD) to illustrate variation and consistency in the data. The mesophilic phase (day 1–5) exhibited an average temperature of $30.5 \pm 2.5^\circ\text{C}$, increasing to $45.6 \pm 3.1^\circ\text{C}$ during the thermophilic phase (day 6–15). This was followed by a gradual decline during the cooling phase (days 16–30) with a mean of $35.0 \pm 1.8^\circ\text{C}$, and finally stabilization in the maturation phase (days 31–42) at $26.1 \pm 0.4^\circ\text{C}$. These

observations reflect microbial activity dynamics and thermal behavior throughout the composting process. However, caution should be exercised when interpreting phase differences, as the current study did not include statistical hypothesis testing to confirm significance between phases.

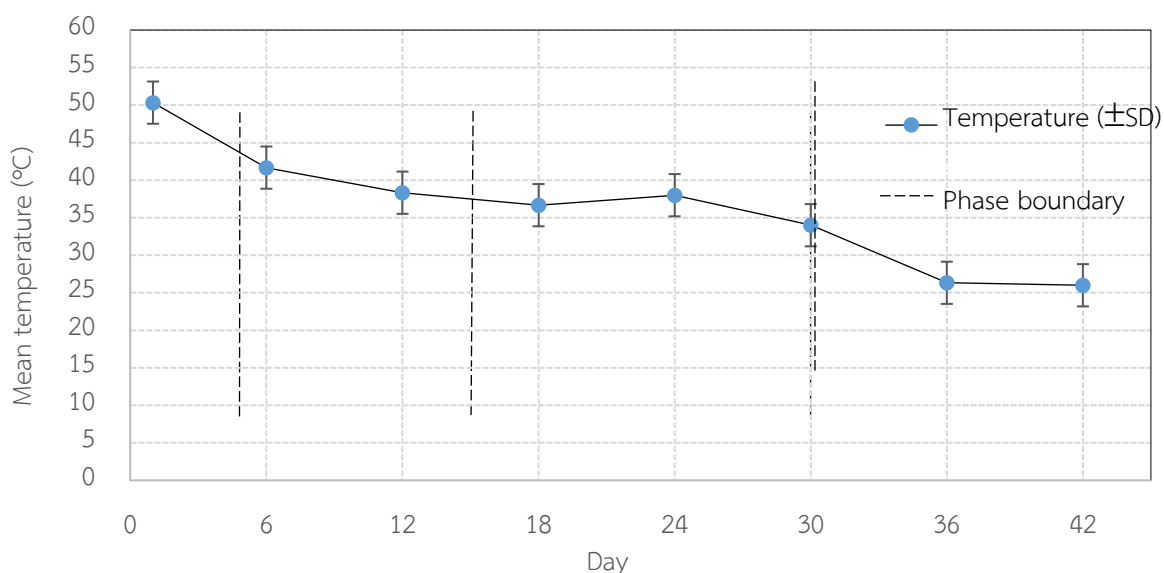


Figure 4. Mean compost temperature $\pm$ SD over 42 days ($n = 3$), showing mesophilic, thermophilic, cooling, and maturation phases. Vertical dashed lines represent phase boundaries.

3.2 Evaluation of physicochemical properties of organic fertilizers compared to standard values

3.2.1 pH measurement

The pH values of the organic fertilizers were determined using a pH meter. The results indicated that at the final stage of composting (42 days), the pH values ranged between 8.0 and 8.55, which falls within the acceptable range for organic fertilizers according to the Thai Agricultural Standard (TAS 2005), as shown in Table 1. During the composting process, the pH typically starts at approximately 5.5 and gradually increases to around 7.0–8.0 due to microbial activity and the decomposition of organic matter. Over time, as the process stabilizes, the pH may decline to approximately 6.0–7.0, which is considered an optimal range for balanced compost.

3.2.2 Electrical conductivity (EC) measurement

The electrical conductivity (EC) of four different fertilizer formulations compost, compost mixed with beneficial microorganisms, vermicompost, and vermicompost mixed with beneficial organisms was analyzed. The results, presented in Table 1, showed that EC values ranged from 1.97 to 2.55 dS/m, indicating that all formulations met the recommended EC threshold of ≤ 10 dS/m (TAS 2005). These values confirm that the electrical conductivity of the tested organic fertilizers is within the acceptable limits for safe agricultural application.

3.3 Evaluation of organic matter content and nutrient composition

The study evaluated the organic matter content and nutrient composition (nitrogen, phosphorus, and potassium) of different organic fertilizers, including compost and vermicompost with microbial supplementation. The results were compared against the Thai organic fertilizer standard (TIS 2731-2009) (Sukitprapanon et al., 2020) to determine their compliance and effectiveness as organic fertilizers. Organic matter content plays a crucial role in improving soil structure and fertility. Table 2 showed variations among different treatments. Compost had the lowest %OM, indicating a lower degree of decomposition. Vermicompost processed by *E. eugeniae* exhibited a significantly higher %OM, suggesting enhanced organic matter stabilization. Compost enriched with *A. vinelandii* contained $22.33 \pm 0.16\%$, indicating moderate improvement in organic matter content. Vermicompost supplemented with *A. vinelandii* had the highest %OM, demonstrating the combined benefits of vermicomposting and microbial enrichment.

Table 1. Evaluation of pH and electrical conductivity (EC) measurements of organic fertilizers compared to standard values

No.	Treatment	pH		EC	
		TAS 2005	Observed	TAS 2005	Observed
T1	Compost		8.50 ± 0.05		2.55 ± 0.05
T2	Vermicompost processed by <i>E. eugeniae</i>		8.40 ± 0.05		2.05 ± 0.04
T3	Compost enriched with <i>A. vinelandii</i>	5.50-8.50	8.00 ± 0.04	<10 dS/m	2.46 ± 0.04
T4	Vermicompost supplemented with <i>A. vinelandii</i>		8.00 ± 0.05		1.97 ± 0.05

According to the Thai organic fertilizer standard, organic fertilizers should contain at least 20% organic matter. Based on this criterion:

- 1) The compost alone did not meet the requirement.
- 2) The compost enriched with *A. vinelandii* marginally met the requirement.
- 3) Both vermicompost treatments exceeded the minimum %OM standard.

The total nutrient content in terms of nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K) was analyzed and compared to the Thai standard (Thammayod et al., 2025), which requires: 1) total nitrogen (N) $\geq 1.0\%$, 2) total phosphorus (P) $\geq 0.1\%$ and 3) total potassium (K) $\geq 0.5\%$. The experimental results showed that the nitrogen content (N) found in the compost (0.87%) was slightly lower than the standard. In comparison, all vermicompost formulas of earthworm compost had nitrogen content that met or exceeded the standard of 1.0%. The vermicompost supplemented with *A. vinelandii* was found to have the highest nitrogen content, while the phosphorus (P) content found in the compost did not meet the standard. Meanwhile, the compost supplemented with *A. vinelandii* and both vermicompost formulas exceeded the minimum phosphorus standard. The potassium (K) content found in the compost and the compost supplemented

with *A. vinelandii* were significantly lower than the standard. Only the vermicompost processed by *E. eugeniae* met the standard, while the vermicompost supplemented with *A. vinelandii* was slightly below the specified level.

One-way ANOVA showed a statistically significant difference in organic matter (%OM) content among the four treatments ($p < 0.05$). Post hoc analysis using Tukey's HSD test indicated that Treatment 3 (compost + *A. vinelandii*) had significantly higher %OM than Treatment 1 (control compost), while there was no significant difference between Treatment 2 (vermicompost) and Treatment 4 (vermicompost + *A. vinelandii*), suggesting that microbial enrichment had limited effect on vermicompost in terms of %OM.

Table 2. Evaluation of organic matter content and nutrient composition of organic fertilizers

No.	Treatment	%OM	Nutrient composition (%)*		
			Nitrogen (N)	Phosphorus (P)	Potassium (K)
T1	Compost	17.33 ^d ±0.2752	0.87 ^d ±0.0138	0.07 ^d ±0.0020	0.16 ^c ±0.0010
	Vermicompost				
T2	processed by <i>E. eugeniae</i>	27.61 ^b ±0.2101	1.38 ^b ±0.0105	0.19 ^b ±0.0030	1.391 ^a ±0.0418
T3	Compost enriched with <i>A. vinelandii</i>	22.33 ^c ±0.1589	1.12 ^c ±0.0079	0.11 ^c ±0.0045	0.14 ^d ±0.0032
	Vermicompost				
T4	supplemented with <i>A. vinelandii</i>	28.66 ^a ±0.1589	1.43 ^a ±0.0079	0.24 ^a ±0.0055	0.21 ^b ±0.0026

*Different superscript letters (a, b, c, d) within each column indicate significant differences between treatments at $p < 0.05$ according to Tukey's HSD test.

4. Discussion

4.1 Composting temperature

The composting process in this study followed the typical thermal stages—mesophilic, thermophilic, cooling, and maturation (Mahapatra et al., 2022). The peak temperature of 50.33°C falls within the effective range for pathogen reduction and organic matter degradation (Matheri, 2024). The rapid rise from 22–30°C to 50.33°C reflects mesophilic microbial metabolism (Mironov et al., 2023), while the subsequent thermophilic phase (down to 38.3°C) facilitated macromolecule breakdown, enhancing nutrient availability (Tiquia et al., 2002; Jiang et al., 2011). The gradual decline during cooling (36.6–34.0°C) and stabilization during maturation (26.3–26.0°C) indicate reduced thermophilic activity and compost readiness (Sharma et al., 2023; Matheri, 2024). These results confirm the effectiveness of composting, consistent with prior findings that emphasize the roles of microbial activity, oxygen, and moisture control (Ji et al., 2023). Process optimization should focus on maintaining adequate aeration and avoiding excess moisture, which can hinder microbial efficiency and lead to anaerobic conditions (Tran et al., 2024).

4.2 Physicochemical properties of organic fertilizers compared to standard values

4.2.1 pH

The pH values of the organic fertilizers ranged from 8.00 to 8.55, all within the acceptable range set by the Thai Agricultural Standard (TAS 2005). This aligns with known composting trends, where an initially acidic pH (5.50–6.00) gradually increases due to microbial degradation and ammonia release during the thermophilic stage (Ryue et al., 2020; Sharma et al., 2023). The slightly lower pH in *A. vinelandii*-enriched compost (8.00) compared to the non-enriched version (8.50) may result from nitrogen fixation and balanced organic acid production (Barney, 2020). Vermicompost formulations, with or without *A. vinelandii*, maintained stable pH values around 8.00–8.40, consistent with mature compost (Tran et al., 2024). These values fall within the optimal pH range (6.00–8.50) for nutrient availability and microbial function (Mironov et al., 2023), confirming the agricultural suitability of all compost types tested in this study.

4.2.2 Electrical conductivity (EC)

The electrical conductivity (EC) of the organic fertilizers ranged from 1.97 to 2.55 dS/m, well below the Thai standard limit of 10 dS/m (TAS 2005). EC reflects the concentration of soluble salts, which influences soil salinity and plant health (Gondek et al., 2020). All values observed in this study fall within the typical range for well-composted materials and pose no risk of salt toxicity (Younis et al., 2022). The highest EC (2.55 dS/m) was recorded in compost alone, likely due to elevated mineralization and ammonium levels. In contrast, the lowest EC (1.97 dS/m) in vermicompost with *A. vinelandii* suggests improved nutrient stabilization and reduced salt buildup from microbial activity (Zhang et al., 2024). These results align with recommendations indicating that EC values of 2.0–4.0 dS/m are ideal for compost use without inducing salinity stress (Suvendran et al., 2024). Therefore, all formulations in this study are confirmed as suitable for sustainable agricultural application.

4.3 Organic matter content and nutrient composition

Organic fertilizers are essential for improving soil fertility through the provision of organic matter (OM) and nutrients. According to the Thai Organic Fertilizer Standard (TAS 2005), a minimum of 20% organic matter (OM) is required. In this study:

- Compost alone fell below the standard, indicating a need for process optimization.
- Compost enriched with *A. vinelandii* slightly surpassed the threshold, likely due to microbial enhancement of OM stabilization rather than increased bulk content.
- Both vermicompost formulations exceeded the OM standard, consistent with findings that vermicomposting improves OM retention and nutrient availability (Sande et al., 2024).

The highest OM and nutrient levels were observed in vermicompost with *A. vinelandii*, confirming synergistic effects between earthworm activity and microbial inoculation. Earthworms and their microbiota enhance organic degradation while preserving stable compounds (Pereira et al., 2022), and contribute to the formation of humic substances that benefit soil structure and nutrient supply (Maffia et al., 2024). However, no significant difference in OM was found between vermicompost with and without *A. Vinelandii*, suggesting a performance ceiling in OM enhancement due to already optimal microbial activity.

The application of *A. vinelandii*—a nitrogen-fixing and phosphorus-solubilizing bacterium—also improved N and P contents (Mahmud et al., 2020; Panday et al., 2024). Still, the most consistent nutrient enhancement was from vermicompost-based treatments. These outcomes confirm that integrating microbial inoculants with vermicomposting can yield high-quality organic fertilizers suited for sustainable farming (Asadu et al., 2024; Dhayalan & Karuppasamy, 2021).

The broader use of microbial biofertilizers is supported by advances in microbiome engineering, which enable the development of resilient and efficient microbial consortia (Nadarajah & Abdul Rahman, 2023). Yet, field variability remains a challenge, necessitating robust formulations and diverse site trials (O’Callaghan et al., 2022). Continued research will be key to ensuring the reliability and scalability of these bio-based solutions.

4.4 Bioaugmentation of compost and vermicompost with *A. vinelandii* for enhanced nutrient content

Bioaugmentation of compost with beneficial microorganisms enhances nutrient content and bioavailability. Such biofertilizers—particularly those incorporating plant growth-promoting microorganisms (PGPMs)—increase essential nutrients (N, P, K), improve soil structure, enhance water retention, promote microbial diversity, and reduce reliance on chemical inputs. While compost, biochar, and PGPMs have individually shown agronomic benefits, their integrated use remains underutilized. Biochar, in particular, provides a stable, porous carrier that supports microbial viability (Bamdad et al., 2022). Organomineral fertilizers (OMFs) derived from organic-mineral blends also offer promise for circular agriculture, though adoption remains limited due to accessibility and market barriers (Bouhia et al., 2022).

In this study, compost and vermicompost enriched with *A. vinelandii* showed significantly increased total nitrogen and phosphorus, particularly in Treatment 3 (compost + *A. vinelandii*). The improvement in phosphorus likely results from phosphate-solubilizing activity via secretion of organic acids such as gluconic and 2-ketogluconic acids. Interestingly, potassium peaked in vermicompost alone (Treatment 2) but declined in Treatment 4 (vermicompost + *A. vinelandii*), possibly due to microbial antagonism or altered nutrient metabolism (Zhang et al., 2024).

The *A. vinelandii* strain, isolated from local agricultural soil, demonstrated strong growth in Burk’s medium and formed a mucilaginous biofilm—a trait of nitrogen-fixing and phosphate-solubilizing organisms. Although this bacterium is also known to produce IAA, ammonia, and siderophores, these traits were not assessed here. Nonetheless, the observed outcomes align with earlier studies: Matheri (2024) reported improved compost nutrient stability following microbial inoculation, and Chaudhary et al. (2023) found enhanced phosphorus and potassium availability when compost was co-applied with PGPR and biochar.

Despite promising nutrient enhancements, this study did not assess direct plant growth impacts. Thus, potential agronomic benefits are inferred from literature and known microbial functions. Future work should include greenhouse or field trials to evaluate crop performance, nutrient uptake, and the impacts on soil health. Additionally, ensuring microbial viability during storage and application will be vital for successful scaling and field implementation of these bioaugmented fertilizers.

5. Conclusions and recommendations

5.1 Conclusions

This study evaluated the quality of compost and vermicompost formulations enriched with *A. vinelandii*, focusing on organic matter and nutrient content in comparison with the Thai Organic Fertilizer Standard (TAS 2005). The key findings are as follows:

- Traditional compost alone did not meet the required 20% organic matter threshold.
- Compost enriched with *A. vinelandii* showed marginal improvement, indicating limited effectiveness of microbial inoculation when used alone.
- Both vermicompost formulations exceeded the organic matter standard and provided superior nutrient profiles, affirming the advantages of vermicomposting.

Additionally, all tested fertilizers met the standard pH and electrical conductivity (EC) ranges, confirming their suitability for agricultural use. These results support the use of microbial enrichment, particularly in combination with vermicomposting, as a promising strategy for producing high-quality organic fertilizers. However, further validation under field conditions and long-term application is necessary to ensure stability, scalability, and practical effectiveness.

5.2 Recommendations

5.2.1 Optimize composting strategies

Improve raw material selection, aeration, and microbial inoculation protocols to enhance organic matter retention and microbial activity.

5.2.2 Study long-term nutrient dynamics

Future research should focus on nutrient release patterns, microbial succession, and crop responses to evaluate agronomic performance.

5.2.3 Evaluate performance in diverse soils

Field trials across various soil types are necessary to evaluate the impact on soil health, nutrient cycling, and yield sustainability.

5.2.4 Assess commercial scalability

Given the success of vermicompost formulations, future work should analyze production cost, market potential, and distribution models to support adoption in sustainable agriculture.

6. References

- Asadu, CO., Ezema, CA., Ekwueme, BN., Onu, CE., Onoh, IM., Adejoh, T., & Emmanuel, UO. (2024). Enhanced efficiency fertilizers: Overview of production methods, materials used, nutrients release mechanisms, benefits and considerations. *Environmental Pollution and Management*, 1, 32-48.
- Bamdad, H., Papari, S., Lazarovits, G., & Berruti, F. (2022). Soil amendments for sustainable agriculture: Microbial organic fertilizers. *Soil Use and Management*, 38(1), 94-120.
- Barney, BM. (2020). Aerobic nitrogen-fixing bacteria for hydrogen and ammonium production: current state and perspectives. *Applied microbiology and biotechnology*, 104(4), 1383-1399.

- Bouhia, Y., Hafidi, M., Ouhdouch, Y., Boukhari, MEME., Mphatso, C., Zeroual, Y., & Lyamlouli, K. (2022). Conversion of waste into organo-mineral fertilizers: current technological trends and prospects. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 21(2), 425-446.
- Chaudhary, DK., Kim, J., Singh, R., Singh, SK., & Goel, R. (2023). Bioremediation of environmental wastes: The role of microorganisms. *Frontiers in Agronomy*, 5, 1183691.
- Chen, T., Zhang, S., & Yuan, Z. (2020). Adoption of solid organic waste composting products: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 272, 122712.
- Department of Agriculture. (2005). Organic fertilizer (TAS 9501-2005). Ministry of Agriculture and Cooperatives, Thailand.
- Dhayalan, V., & Karuppasamy, S. (2021). Plant growth promoting rhizobacteria in promoting sustainable agriculture. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 7(3), 1-18.
- Ferreira Ponciano Ferraz, P., Araújo e Silva Ferraz, G., Leso, L., Klopčič, M., Rossi, G., & Barbari, M. (2020). Evaluation of the physical properties of bedding materials for dairy cattle using fuzzy clustering analysis. *Animals*, 10(2), 351.
- Genetu, A. (2024). Composting Technology for Municipal Solid Waste Management and Production of Organic Fertilizer. *Adv Envi Waste Man Rec*, 7(2), 1-13.
- Gondek, M., Weindorf, DC., Thiel, C., & Kleinheinz, G. (2020). Soluble salts in compost and their effects on soil and plants: A review. *Compost Science & Utilization*, 28(2), 59-75.
- Ji, Z., Zhang, L., Liu, Y., Li, X., & Li, Z. (2023). Evaluation of composting parameters, technologies and maturity indexes for aerobic manure composting: A meta-analysis. *Science of The Total Environment*, 886, 163929.
- Jiang, T., Schuchardt, F., Li, G., Guo, R., & Luo, Y. (2011). Effect of C/N ratio, aeration rate and moisture content on ammonia and greenhouse gas emission during composting. *Journal of Environmental Sciences*, 23(10), 1754-1760.
- Kaur, T. (2020). Vermicomposting: An effective option for recycling organic wastes. In *Organic agriculture*. London: IntechOpen.
- Lv, B., Zhang, D., Cui, Y., & Yin, F. (2018). Effects of C/N ratio and earthworms on greenhouse gas emissions during vermicomposting of sewage sludge. *Bioresource technology*, 268, 408-414.
- Maffia, A., Marra, F., Canino, F., Battaglia, S., Mallamaci, C., Oliva, M., & Muscolo, A. (2024). Humic Substances from Waste-Based Fertilizers for Improved Soil Fertility. *Agronomy*, 14(11), 2657.
- Mahapatra, S., Ali, MH., & Samal, K. (2022). Assessment of compost maturity-stability indices and recent development of composting bin. *Energy Nexus*, 6, 100062.
- Mahmud, K., Makaju, S., Ibrahim, R., & Missaoui, A. (2020). Current progress in nitrogen fixing plants and microbiome research. *Plants*, 9(1), 97.
- Manzoor, A., Naveed, MS., Ali, RMA., Naseer, MA., Maqsood, UH., Saqib, M., & Farooq, M. (2024). Vermicompost: A potential organic fertilizer for sustainable vegetable cultivation. *Scientia Horticulturae*, 336, 113443.
- Martin del Campo, JS., Rigsbee, J., Bueno Batista, M., Mus, F., Rubio, LM., Einsle, O., & Dos Santos, PC. (2022). Overview of physiological, biochemical, and regulatory aspects of nitrogen fixation in *Azotobacter vinelandii*. *Critical Reviews in Biochemistry and Molecular Biology*, 57(5-6), 492-538.
- Matheri, AN., Mbohwa, C., Ntuli, F., Belaid, M., Seodigeng, T., Ngila, JC., & Njenga, CK. (2018). Waste to energy bio-digester selection and design model for the organic fraction of municipal solid waste. *Renewable and sustainable energy reviews*, 82, 1113-1121.
- Matheri, F. (2024). Physico-chemical and biological evolution of thermophilic compost as influenced by nitrogenous feedstock and duration [Online]. Retrieved November 1, 2024, from: <https://ir-library.ku.ac.ke/server/api/core/bitstreams/e3ab91e5-9181-4200-840c-07dac1304ac7/content>.
- Mironov, V., Moldon, I., Shchelushkina, A., Zhukov, V., & Zagustina, N. (2023). Bio-Drying of Municipal Wastewater Sludge: Effects of High Temperature, Low Moisture Content and Volatile Compounds on the Microbial Community. *Fermentation*, 9(6), 570.

- Muschler, RG. (2016). Agroforestry: essential for sustainable and climate-smart land use. *Tropical forestry handbook*, 2, 2013-2116.
- Nadarajah, K., & Abdul Rahman, NSN. (2023). The microbial connection to sustainable agriculture. *Plants*, 12(12), 2307.
- O'Callaghan, M., Ballard, RA., & Wright, D. (2022). Soil microbial inoculants for sustainable agriculture: Limitations and opportunities. *Soil Use and Management*, 38(3), 1340-1369.
- Oyege, I., & Balaji Bhaskar, MS. (2023). Effects of vermicompost on soil and plant health and promoting sustainable agriculture. *Soil Systems*, 7(4), 101.
- Panday, D., Bhusal, N., Das, S., & Ghalehgalabbahani, A. (2024). Rooted in nature: The rise, challenges, and potential of organic farming and fertilizers in agroecosystems. *Sustainability*, 16(4), 1530.
- Pereira, MMA., Moraes, LC., Mogollón, MCT., Borja, CJF., Duarte, M., Buttrós, VHT., & Dória, J. (2022). Cultivating biodiversity to harvest sustainability: Vermicomposting and inoculation of microorganisms for soil preservation and resilience. *Agronomy*, 13(1), 103.
- Petraglia, A., Cacciatori, C., Chelli, S., Fenu, G., Calderisi, G., Gargano, D., & Carbone, M. (2019). Litter decomposition: effects of temperature driven by soil moisture and vegetation type. *Plant and Soil*, 435, 187-200.
- Ryue, J., Lin, L., Kakar, FL., Elbeshbishy, E., Al-Mamun, A., & Dhar, BR. (2020). A critical review of conventional and emerging methods for improving process stability in thermophilic anaerobic digestion. *Energy for Sustainable development*, 54, 72-84.
- Sande, TJ., Tindwa, HJ., Alovise, AM. T., Shitindi, MJ., & Semoka, JM. (2024). Enhancing sustainable crop production through integrated nutrient management: a focus on vermicompost, bio-enriched rock phosphate, and inorganic fertilisers—a systematic review. *Frontiers in Agronomy*, 6, 1422876.
- Saraphirom, P., Namsena, P., Teerakun, M., Phonphuak, S., Chanprathak, A., Dakaew, S., & Phonphuak, N. (2024). Development of fired clay granules as eco-friendly substances for nitrogen-fixing bacterial cell. *GEOMATE Journal*, 27(120), 110-121.
- Sharma, K., & Garg, VK. (2019). Vermicomposting of waste: a zero-waste approach for waste management. In *Sustainable resource recovery and zero waste approaches* (pp. 133-164). New York: Elsevier.
- Sharma, P., Bano, A., Singh, SP., Srivastava, SK., Singh, SP., Iqbal, HM., & Varjani, S. (2023). Different stages of microbial community during the anaerobic digestion of food waste. *Journal of Food Science and Technology*, 60(8), 2079-2091.
- Sial, TA., Rajpar, I., Khan, MN., Ali, A., Shan, M., Rajput, AB., & Shah, PAN. (2024). Impact of Fruit and Vegetable Wastes on the Environment and Possible Management Strategies. In *Planet Earth: Scientific Proposals to Solve Urgent Issues* (pp. 307-330). Cham: Springer International Publishing.
- Sukitprapanon, TS., Jantamenchai, M., Tulaphitak, D., & Vityakon, P. (2020). Nutrient composition of diverse organic residues and their long-term effects on available nutrients in a tropical sandy soil. *Heliyon*, 6(11), e05601.
- Sumbul, A., Ansari, RA., Rizvi, R., & Mahmood, I. (2020). Azotobacter: A potential bio-fertilizer for soil and plant health management. *Saudi journal of biological sciences*, 27(12), 3634-3640.
- Suvendran, S., Johnson, D., Acevedo, M., Smithers, B., & Xu, P. (2024). Effect of Irrigation Water Quality and Soil Compost Treatment on Salinity Management to Improve Soil Health and Plant Yield. *Water*, 16(10), 1391.
- Thai Industrial Standards Institute. (2009). TIS 2731-2009: Organic fertilizer. Ministry of Industry, Thailand. (in Thai)
- Thammayod, A., Roschat, W., Leelatam, T., Phewphong, S., Maneerat, B., Leelatam, N., & Promarak, V. (2025). Development of High-Quality Organic Fertilizer from Biomass Waste and the Application of Biochar in Local Areas of Sakon Nakhon Province, Northeastern Thailand. *Trends in Sciences*, 22(2), 9105-9105.
- Tiquia, SM., & Tam, NF. (2002). Characterization and composting of poultry litter in forced-aeration piles. *Process Biochemistry*, 37(8), 869-880.
- Tran, HT., Binh, QA., Van Tung, T., Pham, DT., Hoang, HG., Nguyen, NSH., & Bolan, NS. (2024). A critical review on characterization, human health risk assessment and mitigation of malodorous gaseous emission during the composting process. *Environmental Pollution*, 124115.

- Wei, Y., Li, J., Shi, D., Liu, G., Zhao, Y., & Shimaoka, T. (2017). Environmental challenges impeding the composting of biodegradable municipal solid waste: A critical review. *Resources, Conservation and Recycling*, 122, 51-65.
- Yang, Z., Muhayodin, F., Larsen, OC., Miao, H., Xue, B., & Rotter, V. S. (2021). A review of composting process models of organic solid waste with a focus on the fates of C, N, P, and K. *Processes*, 9(3), 473.
- Younis, A., Ahsan, M., Akram, A., Lim, KB., Zulfiqar, F., & Tariq, U. (2022). Use of organic substrates in sustainable horticulture [Online]. Retrieved November 1, 2024, from: <https://www.cabdigitallibrary.org/doi/10.1079/9781789248098.0009>
- Zhang, G., Bai, J., Zhai, Y., Jia, J., Zhao, Q., Wang, W., & Hu, X. (2024). Microbial diversity and functions in saline soils: A review from a biogeochemical perspective. *Journal of advanced research*, 59, 129-140.

คุณสมบัติของผงโปรตีนจากรำข้าวที่สกัดด้วยเอนไซม์และการประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์วุ้น

Characterization of Enzyme-Extracted Rice Bran Protein Powder and
Its Application in Protein-Enriched Jellyชนิษฐา ฉิมพาลี¹ จินดาร์ตน์ จิตรอง¹ สุจิรา ศรีดาชาติ¹ และ จิรนนท์ รัตสีโว^{1*}Khanittha Chimpali¹, Jindarat Jaitrong¹, Suchira Sridachat¹ and Jiranan Ratseewo^{1*}¹คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ จังหวัดศรีสะเกษ¹Faculty of Liberal Arts and Science, Sisaket Rajabhat University, Sisaket Province

Corresponding Author: jiranan.r@gmail.com

Received: February 27, 2025

Revised: July 7, 2025

Accepted: July 9, 2025

บทคัดย่อ

รำข้าวเป็นส่วนเหลือทิ้งจากการผลิตข้าวแต่ยังอุดมไปด้วยคุณค่าทางโภชนาการ การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการสกัดโปรตีนจากรำข้าวด้วยเอนไซม์สำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์วุ้น รำข้าวจากข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 สกัดด้วยเอนไซม์เซลลูเลส (100 กรัม ต่อ 1 มิลลิลิตร) ใช้ระยะเวลาในการสกัดที่แตกต่างกัน คือ 8, 16 และ 24 ชั่วโมง อบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ประเมินคุณภาพทางกายภาพ เคมี ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ผลการศึกษาพบว่ารำและรำข้าวสกัดมีปริมาณน้ำอิสระ (a_w) อยู่ในช่วง 0.560-0.715 ความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 8.19-10.83 รำข้าวสดมีค่า L^* สูงที่สุด 56.13 ขณะที่รำข้าวสกัด 8 ชั่วโมง มีค่า a^* และ b^* สูงสุดคือ 9.97 และ 32.32 ตามลำดับ นอกจากนี้การสกัดที่ 8 ชั่วโมง ยังมีปริมาณโปรตีนและปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดสูงสุด 18.02 และ 236.45 mg GAE/g ดังนั้น เลือกสภาวะเหมาะสมที่ระยะเวลาสกัด 8 ชั่วโมง จากนั้นนำผงรำข้าวสกัดเสริมลงในวุ้นที่ปริมาณแตกต่างกัน 4 ระดับ คือ 0, 10, 20 และ 30 กรัม ผลการศึกษาพบว่าปริมาณโปรตีนและสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดสูงสุดพบในวุ้นที่เติมผงรำข้าวสกัด 30 กรัม (ร้อยละ 7.07 และ 148.85 mg GAE/g) รองลงมาคือสูตรที่เติม 20 กรัม (ร้อยละ 5.67 และ 106.32 mg GAE/g) คะแนนความชอบทางประสาทสัมผัสพบว่าค่าลักษณะปรากฏ สี กลิ่นรส เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมของวุ้นสูตรควบคุมที่ไม่มีการเติมผงโปรตีนมีคะแนนสูงสุด รองลงมาเป็นสูตรที่เติมผงโปรตีนจากรำข้าว 10 กรัม และ 20 กรัม ดังนั้นสูตรที่เหมาะสมคือวุ้นเสริมโปรตีนจากรำข้าว 20 กรัม สามารถพิจารณาเป็นผลิตภัณฑ์อาหารทางเลือกเสริมคุณค่าทางโภชนาการให้กับผู้บริโภคต่อไป

คำสำคัญ: รำข้าว, เอนไซม์, วุ้น, โปรตีน, สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด

Abstract

Rice bran is a by-product of rice production but remains rich in nutritional value. The objective of this research was to study the extraction of protein from rice bran using enzymes for application jelly products. Rice bran from Khao Dawk Mali 105 rice was extracted using cellulase enzyme (100 g: 1 ml). Samples were extracted for 8, 16, and 24 hours and dried at 60 °C. The extracted rice bran powder was analyzed for physical and chemical properties, and total phenolic content. The results showed that rice bran and extracted rice bran samples had water activity (a_w) and moisture content in the ranges of

0.569- 0.715 and 8.19-10.83%, respectively. The highest L^* (56.13) value was found in fresh rice bran, while the 8-hour extracted sample had the highest values of a^* and b^* (9.97 and 32.32 respectively). In addition, the 8-hour extracted sample had the highest protein content and total phenolic content of 18.02% and 236.45 mg GAE/g, respectively. Therefore, an extraction time at 8 hours was selected for jelly production. Four different levels of extracted rice bran powder were added to the jelly (0, 10, 20, and 30 g). The results showed that the highest protein and total phenolic contents were found in jelly supplemented with 30 g of rice bran powder, with values of 7.07% and 148.85 mg GAE/g, followed by jelly supplemented with 20 g (5.67% and 106.32 mg GAE/g). Sensory evaluation revealed that: color, odor, flavor, texture, and overall acceptability scores were highest for the control formula (0 g), followed by jelly supplemented with extracted rice bran as 10 g and 20 g of extracted rice bran. Therefore, the optimal formula for this study was rice bran protein supplement at 20 g. This formula could be considered a nutritionally enhanced food product for consumers.

Keywords: Rice bran, Enzyme, Jelly, Protein, Total phenolic content

1. บทนำ

รำข้าว (Rice bran) คือส่วนของเยื่อหุ้มเนื้อเมล็ดข้าวที่ถูกขัดสีออกจากเมล็ดข้าวในกระบวนการสีข้าว ประกอบด้วยชั้นเยื่อหุ้มเมล็ด และคัพภะ เป็นส่วนใหญ่ รำข้าวเป็นผลพลอยได้จากการสีข้าวหายาที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์จากข้าว อย่างไรก็ตามรำถูกขายเป็นอาหารสัตว์เป็นหลัก (Houston, 1972; Saunders, 1990) รำข้าวยังถือเป็นแหล่งของโปรตีนและใยอาหารที่ไม่ก่อให้เกิดอาการแพ้ (Abdul-Hamid & Luan, 2000) มีสารพฤกษเคมีที่มีผลดีต่อสุขภาพของมนุษย์ เช่น โทโคฟีรอล โทโคไตรอีนอล และแกมมา-โอไรซานอล สารฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ มีฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ (Butsat et al., 2010) รำข้าวและจมูกข้าวมีสารต้านอนุมูลอิสระที่เป็นประโยชน์ต่อร่างกายมนุษย์ ดังนั้นการสกัดสารออกฤทธิ์ชีวภาพที่เป็นสารสำคัญจากรำข้าวเพื่อนำไปใช้ประโยชน์เป็นอาหารเสริม หรือใช้ทางด้านการแพทย์จึงเป็นการช่วยเพิ่มมูลค่าแก่รำข้าว (Phaungseang & Rattanakon, 2021) มีคุณค่าทางอาหารสูง มีโปรตีน ร้อยละ 12-15 โปรตีนจากรำข้าวมีปริมาณไลซีนสูงกว่าโปรตีนในเมล็ดข้าวหรือโปรตีนจากรำธัญพืชอื่น ๆ (Kubota et al., 2010) โปรตีนถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิดซึ่งมีส่วนร่วมในการพัฒนาอาหารมูลค่าสูงหรือใช้เป็นส่วนผสมของอาหารเพื่อสุขภาพที่กำลังเป็นที่ต้องการสูงในปัจจุบัน โดยทำความเข้าใจคุณสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนสกัดจากรำข้าวสามารถนำไปใช้กับงานด้านอาหารได้กว้างขึ้น ด้วยการยอมรับของผู้บริโภคที่สูงขึ้น เช่น การเติมรำข้าวสกัดในขนมปังสามารถเพิ่มปริมาณโปรตีนและยังช่วยคงความนุ่มของเนื้อขนมปังในระหว่างการเก็บรักษา (Jiamyangyuen et al., 2005) การสกัดโปรตีนจากรำข้าวมีหลายวิธี ทั้งการใช้กรด เบส (Gadalkar et al., 2017) มีงานวิจัยที่ศึกษาการสกัดโปรตีนจากรำข้าวโดยใช้ตัวทำละลายเชิงยูเทกติก (Deep Eutectic Solvent; DES) ร่วมกับการวิเคราะห์โครงสร้างโปรตีนด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) และ SDS-PAGE พบว่าการใช้ DES ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดโปรตีน และสามารถระบุโครงสร้างโปรตีนกลุ่มอัลบูมินและโกลบูลินที่ได้จากรำข้าวอย่างชัดเจน (Ramlee et al., 2024) ในปัจจุบันมีการศึกษาการใช้วัตถุดิบที่มีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (Ratseewo et al., 2025) และใช้สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพมาประยุกต์ในอาหารเพื่อลดการใช้สารเคมี เกิดความปลอดภัยต่อผู้บริโภค เช่น การใช้สารออกฤทธิ์จากธรรมชาติ ทั้งเพื่อลดการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ในอาหารสด (Sittisart et al., 2024) รวมถึงการใช้เอนไซม์เพื่อลดการใช้สารเคมีในการสกัดรำข้าว เช่น อัลคาเลส ในกระบวนการเพปไทด์ไฮโดรไลเซต (Wachirasiri et al., 2021) อย่างไรก็ตามรำข้าวส่วนใหญ่ประกอบด้วยเซลลูโลสที่ห่อหุ้มสารอาหารไว้ภายในองค์ประกอบของรำข้าว ดังนั้นจาก

สมมุติฐานที่ว่าหากสามารถย่อยเซลลูโลสให้มีโมเลกุลเล็กลงอาจจะสามารถปลดปล่อยโปรตีนและสารสำคัญอื่น ๆ ในรำข้าวออกมาได้ ซึ่งข้อมูลการสกัดและคุณสมบัติเชิงหน้าที่ของสารสกัดโปรตีนจากรำข้าวที่ใช้เอนไซม์เซลลูเลสสกัดมีจำกัด ดังนั้นหากมีการศึกษาการสกัดและคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี ปริมาณโปรตีนของรำข้าวสกัดจะเป็นข้อมูลสำหรับการผลิตโปรตีนเข้มข้นจากรำข้าวไทยซึ่งไม่ใช่โปรตีนที่ผู้บริโภคบางกลุ่มมีการแพ้เหมือนโปรตีนจากถั่วเหลืองนม และข้าวสาลีและนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารของประเทศไทยได้ วุ้นเป็นขนมหวานที่ทำง่าย ราคาไม่แพง เนื่องจากเนื้อสัมผัสเคี้ยวง่าย วุ้นจึงสามารถรับประทานได้ทุกโอกาสและทุกวัย รวมถึงผู้สูงอายุหรือผู้ที่มีปัญหาระบบการเคี้ยว นอกจากนี้ยังสามารถดัดแปลงให้มีรสชาติแตกต่างกันได้หลายรสโดยใช้การแต่งกลิ่นรสและสีที่ต้องการ วุ้นทั่วไปมักมีองค์ประกอบหลักคือน้ำตาล จึงยังขาดคุณค่าทางโภชนาการด้านโปรตีน การเสริมโปรตีนจากรำข้าว ซึ่งเป็นวัตถุดิบธรรมชาติที่มีคุณค่าทางอาหารสูง จึงเป็นแนวทางหนึ่งในการประยุกต์ใช้โปรตีนจากรำข้าว และวุ้นให้เป็นผลิตภัณฑ์อาหารสุขภาพทางเลือกนอกจากด้านการแปรรูปอาหาร เช่น ด้านวิทยาศาสตร์การกีฬาและการส่งเสริมสุขภาพ เนื่องจากโปรตีนจากรำข้าวมีคุณค่าทางโภชนาการสูงและไม่ก่อให้เกิดอาการแพ้ จึงเหมาะสำหรับผู้รักสุขภาพ นักกีฬา หรือผู้ที่ต้องการเพิ่มปริมาณโปรตีนในอาหารเพื่อเสริมสร้างกล้ามเนื้อและฟื้นฟูจากการออกกำลังกาย การเสริมโปรตีนในผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น วุ้นเสริมโปรตีน จึงเป็นทางเลือกสำหรับทุกกลุ่มวัยที่ต้องการโปรตีนในรูปแบบที่ย่อยง่าย ดังนั้นการศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะการสกัดโปรตีนจากรำข้าวด้วยเอนไซม์ และวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ รวมถึงปริมาณสารประกอบฟีนอลิกของผงโปรตีน ตลอดจนประเมินการประยุกต์ใช้ผงโปรตีนดังกล่าวในผลิตภัณฑ์วุ้นเสริมโปรตีน เพิ่มมูลค่าของรำข้าวที่เป็นส่วนเหลือทิ้ง ได้ผลิตภัณฑ์ใหม่ที่มีคุณค่าทางโภชนาการให้แก่ผู้บริโภคต่อไป

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 วัตถุดิบและการเตรียมตัวอย่างผงโปรตีนรำข้าว

การผลิตผงโปรตีนรำข้าวด้วยเอนไซม์เซลลูเลส (cellulase) ที่สภาวะและอุณหภูมิต่าง ๆ โดยคัดเลือกรำข้าวจากข้าวหอมมะลิ กข105 (*Oryza sativa* L.) เป็นรำข้าวละเอียดไม่มีกลิ่นหืน นำรำข้าวละเอียด 500 กรัม มานึ่ง 15 นาที เติมน้ำเอนไซม์เซลลูเลสปริมาณ 5 มิลลิลิตร ความเข้มข้นอัตราส่วน 100:1 (กรัม:มิลลิลิตร) (Patindol et al., 2007) นำมาบ่มที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส โดยศึกษาเวลาในการสกัดต่างกัน คือ 8, 16 และ 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลานำไปกรองกากออกแล้วต้มให้ความร้อนที่ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที เพื่อหยุดการทำงานของเอนไซม์ นำมาเทใส่ถาดเกลี่ยให้เท่ากันอบในตู้อบลมร้อน (Hot air oven) เป็นเวลา 18 ชั่วโมง จนความชื้นสุดท้ายไม่เกินร้อยละ 5 จากนั้นนำผงไปปั่น ร่อนด้วยตะแกรง 60 เมช บรรจุลงในถุงอลูมิเนียมฟอยล์ เพื่อทำการศึกษาในขั้นตอนต่อไป

2.2 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมี

การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพนำผงโปรตีนจากรำข้าวที่ได้มาวิเคราะห์คุณภาพดังต่อไปนี้ การวิเคราะห์ค่าสี วัดค่าความสว่าง (L^*) สีแดง (a^*) และสีเหลือง (b^*) วัดด้วยเครื่อง MiniScan EZ manual version 1.2 การวัดค่าปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ด้วยเครื่องวิเคราะห์ Water Activity (a_w) วิเคราะห์ทั้งหมด 3 ซ้ำ การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี นำตัวอย่างมาวิเคราะห์ปริมาณความชื้น โดยดัดแปลงมาจากวิธีของ (A.O.A.C., 2000) ใช้เครื่องตู้อบลมร้อน Hot air oven โดยทำการวิเคราะห์ทั้งหมด 3 ซ้ำ อบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 72 ชั่วโมง การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนโดยวิธีเจลดาล์ (Kjeldahl method) ด้วยเครื่องวิเคราะห์โปรตีนเจลดาล์ (FLEXLAB) ตามวิธีมาตรฐาน AOAC (2000)

2.3 การศึกษาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด

ตัวอย่างผงโปรตีนจากรำข้าวนำมาสกัดด้วยสารละลายเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 80 อัตราส่วนตัวอย่างต่อสารละลาย 1:10 (น้ำหนักต่อปริมาตร) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง ครบเวลาแล้วนำไปกรอง เก็บส่วนใสนำไปปั่นเหวี่ยง

ด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงความเร็วสูงที่ความเร็วรอบ $1400 \times g$ เป็นเวลา 20 นาที ทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ เก็บรักษาตัวอย่างที่สกัดแล้วที่อุณหภูมิต่ำกว่า 10°C องศาเซลเซียส นำไปวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของผงโปรตีนจากรำข้าวและวุ้นเสริมโปรตีนจากรำข้าว การวัดปริมาณสารประกอบฟีนอลิกตามวิธี Folin-ciocalteu (Srisan et al, 2023) และอ่านค่าการดูดกลืนแสง ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) สารละลายตัวอย่าง 300 ไมโครลิตร ผสมกับ Folin-ciocalteu reagent ปริมาตร 2.25 ไมโครลิตร เขย่าให้เข้ากันทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง (ในที่มืด) 5 นาที เติมสารละลาย 0.35 M NaOH ปริมาตร 2.25 ไมโครลิตร เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง (ในที่มืด) 90 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 725 นาโนเมตร หาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดในตัวอย่าง โดยเปรียบเทียบค่าที่วัดได้กับกราฟมาตรฐานซึ่งเตรียมจากสารละลาย gallic acid ในหน่วยมิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อกรัมของสารตัวอย่างแห้ง (mg GAE/g DW)

นำผลการศึกษาที่ได้มาประกอบการพิจารณาเพื่อเลือกสภาวะการสกัดผงโปรตีนจากรำข้าวที่เหมาะสมในการนำไปผลิตวุ้นเสริมโปรตีนจากรำข้าวต่อไป

2.4 การผลิตวุ้นเสริมโปรตีนจากรำข้าว

ผสมน้ำเปล่ากับผงวุ้นและผงโปรตีนที่เสริมในระดับที่แตกต่างกัน ที่ 0, 10, 20 และ 30 กรัม นำน้ำเปล่า 250 กรัม ผสมกับวุ้น 15 กรัม คนให้เข้ากัน แล้วแช่ทิ้งไว้ 10 นาทีให้ผงวุ้นอมน้ำ จากนั้นนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70°C องศาเซลเซียส แล้วเติมน้ำตาล 40 กรัม คนให้ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน เติมน้ำโซร่าปรุงและแต่งกลิ่นอ่อน (เพื่อช่วยเพิ่มความหอมและกลบกลิ่นรำ) ปริมาณ 50 กรัม และ 2.5 กรัม ตามลำดับ เคี่ยวให้เข้ากันจนน้ำเดือดแล้วปิดไฟ เทวุ้นลงไปในแป้นพิมพ์ พักไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง 10 นาที นำตัวอย่างไปแช่ตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4°C องศาเซลเซียส เพื่อให้ตัวอย่างวุ้นแข็งตัวและวุ้นออกจากแป้นพิมพ์ แล้วนำมาตัดเป็นชิ้นแล้วบรรจุลงกล่องบรรจุภัณฑ์ที่ปิดสนิท นำผลิตภัณฑ์วุ้นเสริมโปรตีนจากรำข้าวที่ได้เตรียมทำการวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีกายภาพและสารประกอบฟีนอลิกด้วยวิธีเช่นเดียวกันกับผงโปรตีนจากรำข้าว

2.5 การทดสอบทางประสาทสัมผัส

ตัวอย่างวุ้นเสริมโปรตีนจากรำข้าวนำมาตรวจสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสโดยวิธีการทดสอบความชอบแบบ 9 ระดับ (9- Point hedonic scale) แบ่งระดับความชอบได้ดังนี้ 1 = ไม่ชอบมากที่สุด ถึง 9 = ชอบมากที่สุด โดยใช้ผู้ทดสอบชิมที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 50 คน ปัจจัยที่ทดสอบ ได้แก่ สี ความใส กลิ่น กลิ่นรส รสชาติ และความชอบโดยรวม (หนังสือรับรองจากคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์หรือสัตว์ทดลองของมหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ เลขที่ HE681017)

2.6 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีโดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) วิเคราะห์การทดสอบทางประสาทสัมผัสโดยวางแผนทดลองแบบสุ่มบล็อกสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design, RCBD) วิเคราะห์ความแปรปรวน เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

3. ผลการวิจัย

ผลการศึกษาคูณสมบัติทางกายภาพและเคมี การวิเคราะห์ค่า water activity (a_w) ความชื้น และค่าสีของรำสดและผงโปรตีนจากรำข้าวที่ผ่านการใช้เอนไซม์เซลลูเลสสกัดที่ระยะเวลาแตกต่างกันได้แก่ 8, 16 และ 24 ชั่วโมง แสดงดัง Table 1. ผลการวิเคราะห์ปริมาณค่า a_w ของรำข้าวและผงโปรตีนจากรำข้าวในการแปรรูปรำข้าวที่ใช้เวลาในการสกัดที่แตกต่างกันได้แก่ 8 16 และ 24 ชั่วโมง พบว่าค่า a_w อยู่ในช่วง 0.56-0.715 โดยค่า a_w ของรำข้าวมีค่าสูงสุดอยู่ในช่วง 0.715 รองลงมาคือ การสกัดรำข้าวที่ 8 ชั่วโมง อยู่ในช่วง 0.64 และค่า a_w ต่ำสุดคือการสกัดรำข้าวที่ 16 และ 24 ชั่วโมง อยู่ในช่วง 0.56 ซึ่งไม่

แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) จากการศึกษาพบว่าค่า a_w ค่อนข้างต่ำซึ่งยังคงอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานอาหารของผลิตภัณฑ์อาหารแห้ง (dehydrated food) ที่กำหนดไว้คือต้องมีค่า a_w ต่ำกว่า 0.6 เพื่อป้องกันและควบคุมจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเสื่อมเสียที่เกิดจาก รา ยีสต์ และแบคทีเรีย ความชื้นของตัวอย่างที่อยู่ในช่วงร้อยละ 8.19-10.83 โดยค่าความชื้นของผงโปรตีนจากรำข้าวสดมีค่าความชื้นต่ำที่สุด ร้อยละ 8.19 รองลงมาคือการสกัดรำข้าวที่ 8 ชั่วโมง มีค่าร้อยละ 8.98 และมีค่าความชื้นสูงที่สุดคือการสกัดรำข้าวที่ 24 ชั่วโมง มีค่าร้อยละ 10.83 ผลจากการศึกษาพบว่า ค่าความชื้นมีปริมาณค่อนข้างต่ำแต่ไม่เกินร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก (มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มพข.๑๓๖/๒๕๕๘) ผลการวิเคราะห์ค่าสีของรำสดและผงโปรตีนจากรำข้าวที่ใช้เวลาในการสกัดที่แตกต่างกัน พบว่าค่าสีมีค่าความสว่าง (L^*) ของรำสดและการสกัดรำข้าว มีค่าอยู่ในช่วง 27.95-56.13 ค่าความเป็นสีแดง (a^*) ของรำสดและผงโปรตีนจากรำข้าว อยู่ในช่วง 4.67-9.97 ค่าสีเหลือง (b^*) อยู่ในช่วง 8.65-32.32 ค่าความเป็นสีแดง (a^*) เพิ่มขึ้นเมื่อผ่านการสกัดด้วยเอนไซม์เซลลูเลสที่ใช้ระยะเวลาที่นาน 8-16 ชั่วโมง และลดลงเมื่อเพิ่มระยะเวลาสกัดเป็น 24 ชั่วโมง และค่าความเหลือง (b^*) เพิ่มขึ้นเมื่อผ่านการสกัดด้วยเอนไซม์เซลลูเลสที่ใช้ระยะเวลาที่นาน 8 ชั่วโมง ลดลงเมื่อเพิ่มระยะเวลาสกัดเป็น 16-24 ชั่วโมง

Table 1. Physical and chemical properties of rice bran and extracted rice bran

Samples	Water activity (a_w)	Moisture content (%)	Color		
			L^*	a^*	b^*
Rice bran	0.715±0.00 ^a	8.19±0.15 ^d	56.13±0.17 ^a	6.70±0.04 ^c	23.02±0.12 ^b
Extracted rice bran at 8 h	0.647±0.03 ^b	8.98±0.15 ^c	38.70±0.41 ^b	9.97±0.23 ^a	32.32±0.13 ^a
Extracted rice bran at 16 h	0.560±0.00 ^c	10.13±0.18 ^b	32.71±0.32 ^c	9.12±0.03 ^b	17.73±0.16 ^c
Extracted rice bran at 24 h	0.562±0.01 ^c	10.83±0.40 ^a	27.95±0.27 ^d	4.67±0.19 ^d	8.65±0.17 ^d

Note; Values are expressed as means ± standard deviation (n = 3). Means with different letters in the same column were significantly different at the level $p < 0.05$.

การวิเคราะห์ค่าโปรตีนของผงรำข้าวสกัด (Figure 1.) พบว่ามีปริมาณโปรตีนสูงที่สุดที่เวลาการสกัด 8 ชั่วโมง มีค่าร้อยละ 18.02±0.21 รองลงมาอันดับที่ 2 คือการสกัด 16 ชั่วโมง มีค่าร้อยละ 16.37±0.17 รองลงมาอันดับที่ 3 คือการสกัด 24 ชั่วโมง มีค่าร้อยละ 15.30±0.05 และมีต่ำสุดที่รำสด มีค่าร้อยละ 8.45±0.15 ตามลำดับ จากผลการศึกษาพบว่าปริมาณโปรตีนของรำที่ไม่ผ่านการสกัดมีปริมาณสูงขึ้นเมื่อผ่านการสกัดด้วยเอนไซม์เซลลูเลส

การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของผงโปรตีนจากรำข้าว การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของรำข้าวและผงโปรตีนจากรำข้าวที่ใช้ระยะเวลาการสกัดที่แตกต่างกัน ได้แก่ 8, 16 และ 24 ชั่วโมง (Figure 2.) พบว่าปริมาณมีค่าอยู่ในช่วง 117.78-236.45 mg GAE/g ผลการศึกษาพบว่าสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของการสกัดรำข้าว 8 ชั่วโมง มีค่าสูงที่สุด มีค่า 236.45±7.04 mg GAE/g ค่ารองลงมา คือรำสด มีค่า 127.93±1.88 mg GAE/g ขณะที่ค่าต่ำที่สุดคือการสกัดรำข้าว 24 ชั่วโมง มีค่า 95.00±1.22 mg GAE/g

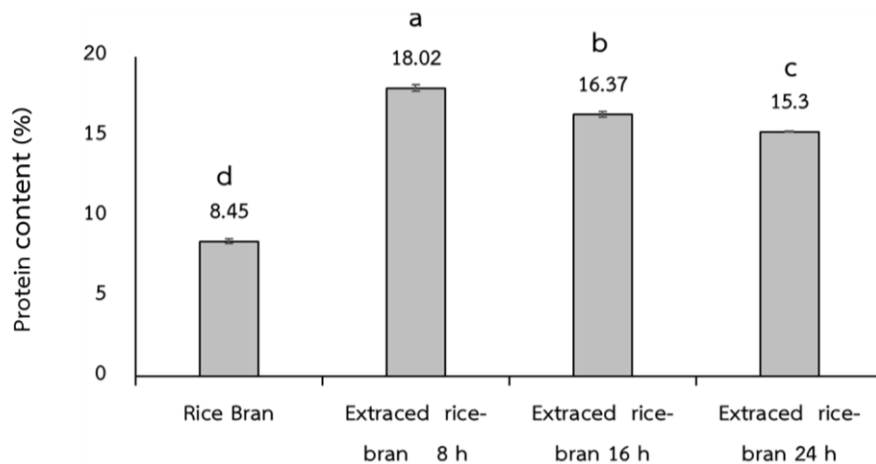


Figure 1. Protein content of rice bran and extracted rice bran

Means with different letters were significantly different at the level $p < 0.05$

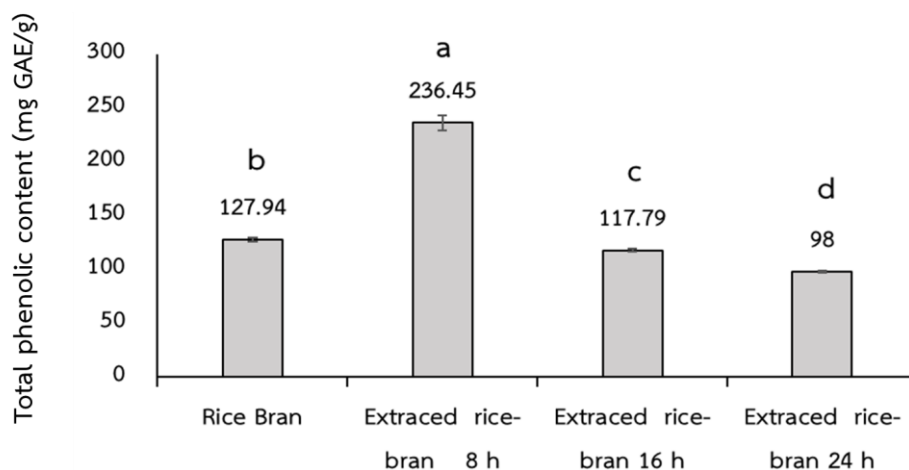


Figure 2. Total phenolic content of rice bran and extracted rice bran

Means with different letters were significantly different at the level $p < 0.05$

จากการพิจารณาผลการศึกษาเวลาการสกัดโปรตีนจากรำข้าวด้วยเอนไซม์เซลลูเลสที่ระยะต่างกัน 3 ระดับ คือ 8, 16 และ 24 ชั่วโมง สี ปริมาณโปรตีน ตลอดจนสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ดังนั้นจึงเลือกการสกัดที่เวลา 8 ชั่วโมง พบว่ามีปริมาณโปรตีนและสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดสูงที่สุด จึงนำมาเสริมในการผลิตวุ้นแล้วนำไปศึกษาสมบัติทางกายภาพ เคมี และสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดต่อไป

การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์วุ้นเสริมโปรตีนจากรำข้าว จากการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์วุ้นเสริมโปรตีนจากรำข้าวที่ระดับ 0, 10, 20 และ 30 กรัม คุณภาพทางกายภาพของผลิตภัณฑ์วุ้นเสริมโปรตีน Table 2. ผลการวิเคราะห์ปริมาณค่า a_w ของวุ้นที่เสริมผงโปรตีนจากรำข้าวผลการทดลองที่ระดับแตกต่างกัน ได้แก่ 0, 10, 20 และ 30 กรัม พบว่าค่า a_w มีค่าอยู่ในช่วง 0.96-0.99 มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) ค่าปริมาณน้ำอิสระมีผลต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ในอาหาร ซึ่งแบคทีเรียส่วนใหญ่จะไม่เจริญเติบโตที่ค่าปริมาณน้ำอิสระต่ำกว่า 0.90 และราส่วนใหญ่จะไม่เจริญเติบโตที่ค่าปริมาณน้ำอิสระต่ำกว่า 0.70 ซึ่งวุ้นจัดเป็นอาหารกึ่งแห้ง ควรมีค่าปริมาณน้ำอิสระ

0.60-0.85 ผลการวิเคราะห์ด้านกายภาพของผลิตภัณฑ์วุ้นเสริมโปรตีนจากรำข้าว พบว่ามีปริมาณน้ำอิสระ 0.96-0.99 ดังนั้นทำให้เกิดการเสื่อมเสียได้เร็วกว่าปกติเล็กน้อยเนื่องจากแบคทีเรียและราส่วนใหญ่เจริญเติบโตได้ดี

Table 2. Physical and chemical properties of jelly product supplemented with rice bran protein

Jelly product supplemented with rice bran protein	Water activity (a_w)	Moisture content (%)	Color		
			L*	a*	b*
0 g	0.990±0.00 ^a	64.38±0.57 ^a	37.19±0.19 ^a	22.14±0.10 ^a	7.90±0.09 ^d
10 g	0.961±0.01 ^b	63.64±1.24 ^a	32.82±0.26 ^c	16.09±0.02 ^b	11.25±0.10 ^c
20 g	0.964±0.01 ^b	59.54±0.96 ^b	35.66±0.12 ^b	15.85±0.08 ^c	14.65±0.08 ^a
30 g	0.967±0.01 ^{ab}	57.69±0.11 ^b	29.27±0.09 ^d	13.80±0.01 ^d	12.27±0.03 ^b

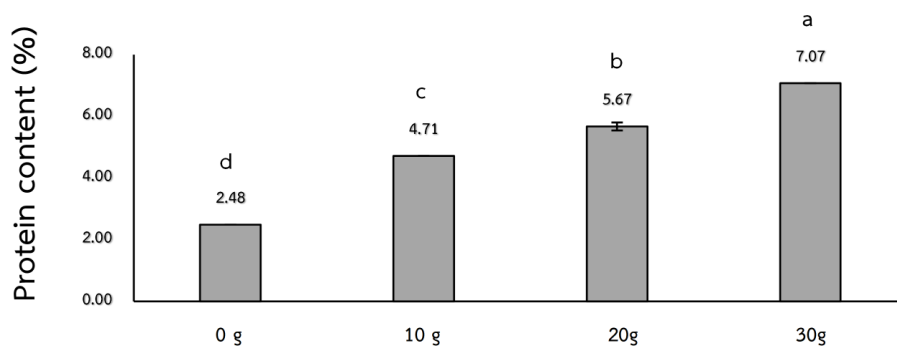
Note; Values are expressed as means ± standard deviation (n = 3). Means with different letters in the same column were significantly different at the level $p < 0.05$.

การศึกษาคุณภาพทางเคมีของผลิตภัณฑ์วุ้นเสริมโปรตีนจากรำข้าว แสดงดัง Table 2. ผลการทดลองวิเคราะห์ปริมาณความชื้น พบว่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ของแต่ระดับการเติมผงโปรตีนจากรำข้าวที่ 0, 10, 20 และ 30 กรัม ค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 57.69-64.38 มีค่าแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$) วุ้นเสริมโปรตีนจากรำข้าวที่มีความชื้นสูง คือมีความชื้นร้อยละ 10-20 แต่มีความชื้นไม่สูงมากนัก คุณภาพทางกายภาพของผลิตภัณฑ์วุ้นเสริมโปรตีนจากรำข้าวผลการทดลองที่ระดับ 0, 10, 20 และ 30 กรัม แสดงใน Table 2. จากการวิเคราะห์คุณสมบัติทางด้านกายภาพด้านสี พบว่าค่าความสว่าง (L^*) ของผลิตภัณฑ์วุ้นเสริมโปรตีนจากรำข้าว ตัวอย่างที่เติม 0 กรัม (ควบคุม) มีค่าความสว่างสูงที่สุดคือ 37.19 รองลงมาคือชุดการทดลองที่เติมผงโปรตีนจากรำข้าวที่ระดับ 20 กรัม 10 กรัม และ 30 กรัม มีค่า 35.66, 32.82 และ 29.27 ตามลำดับ ดังแสดงใน Table 2. เห็นได้ว่าผลิตภัณฑ์มีค่าสีแดง (a^*) มากกว่าค่าสีเหลือง (b^*) เนื่องจากการใช้น้ำอุนุ่นในการผลิตวุ้นเสริมโปรตีนจากรำข้าว จึงทำให้มีค่าสีแดงมากกว่าค่าสีเหลืองซึ่งผลิตภัณฑ์เป็นสีจากธรรมชาติ โดยไม่มีการเติมแต่งสีลงไป แนวโน้มการเติมผงโปรตีนจากรำข้าวลงไปมากขึ้นส่งผลให้ค่าสีแดง (a^*) เพิ่มขึ้น แต่ค่าสีเหลืองลดลง (b^*)

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของผลิตภัณฑ์วุ้นเสริมโปรตีนจากรำข้าว การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี ผลิตภัณฑ์วุ้นเสริมโปรตีนจากรำข้าว ที่ระดับ 0, 10, 20 และ 30 กรัม (Figure 3.) วิเคราะห์ปริมาณโปรตีนในผลิตภัณฑ์วุ้นเสริมโปรตีนจากรำข้าวพบว่าวุ้นเสริมโปรตีนจากรำข้าวสูตรควบคุมที่ไม่มีการเติมผงโปรตีน มีปริมาณโปรตีนร้อยละ 2.48 อาจได้จากผงวุ้นที่เป็นวัตถุดิบหลักในกระบวนการแปรรูปวุ้นเสริมโปรตีนจากรำข้าว สูตรที่มีการเติม 10, 20 และ 30 กรัม มีปริมาณโปรตีนร้อยละ 4.71±0.12, 5.67±0.23 และ 7.07±0.28 ตามลำดับ

การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของผลิตภัณฑ์วุ้นเสริมโปรตีนจากรำข้าว จากการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของผลิตภัณฑ์วุ้นเสริมโปรตีนจากรำข้าวที่เสริมระดับที่แตกต่างกัน ได้แก่ 0, 10, 20 และ 30 กรัม

จาก Figure 4. เห็นได้ว่าผลิตภัณฑ์วุ้นเสริมโปรตีนจากรำข้าวที่มีการเติมผงโปรตีนจากรำข้าวมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกที่มีค่าสูงที่สุด คือตัวอย่างที่มีการเติมผงโปรตีนที่ระดับ 30 กรัม มีค่าเท่ากับ 148.85±3.78 mg GAE/g และมีค่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกที่ลดลงที่ระดับการเสริม 20, 10 และ 0 กรัม มีค่าเท่ากับ 106.32±2.81 mg GAE/g, 83.19±4.20 mg GAE/g และ 51.89±3.84 mg GAE/g ตามลำดับ



Jelly supplemented with rice brane protein (gram)

Figure 3. Protein content of jelly supplemented with rice brane protein

Means with different letters were significantly different at the level $p < 0.05$

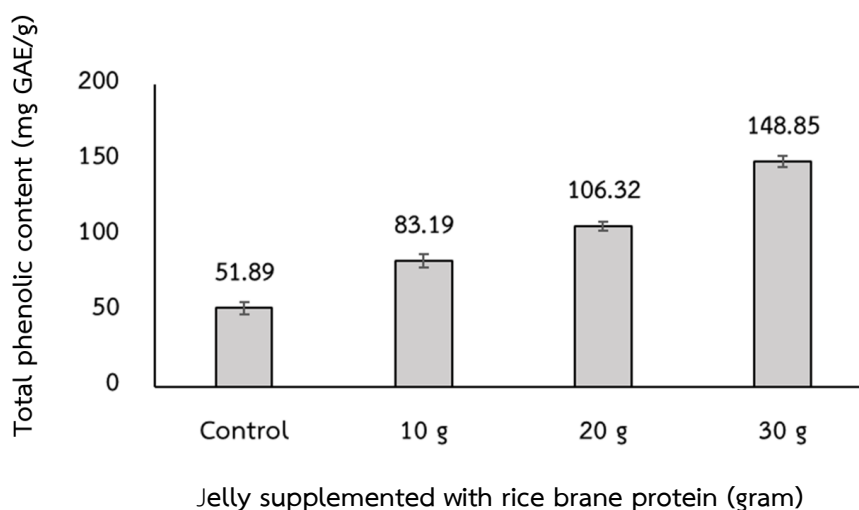


Figure 4. Total phenolic content of jelly supplemented with rice bran protein

Means with different letters were significantly different at the level $p < 0.05$.

ส่วนผลการศึกษาการทดสอบทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์วุ้นเสริมโปรตีนจากรำข้าว ทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัส แสดงดัง Table 3. โดยทดสอบความชอบด้วยวิธี 9-point hedonic scale โดยใช้จำนวนผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 50 คน กำหนดให้คะแนน 1 หมายถึง ไม่ชอบมากที่สุดไปจนถึงระดับคะแนน 9 หมายถึงชอบมากที่สุด โดยพิจารณาการให้คะแนนด้านลักษณะปรากฏ ด้านสี ด้านกลิ่น ด้านรสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม

Table 3. Sensory evaluation scores of jelly supplemented with rice bran protein

Jelly product supplemented with rice bran protein	Appearance	Color	Odor	Flavor	Texture	Overall acceptability
0 g	7.30±1.03 ^a	7.40±0.82 ^a	7.45±0.68 ^a	7.40±0.75 ^a	6.80±1.15 ^a	7.40±0.68 ^a
10 g	7.10±1.02 ^{ab}	6.90±0.85 ^b	6.75±0.96 ^b	6.30±1.52 ^b	6.40±1.35 ^{ab}	6.40±1.39 ^b
20 g	6.75±0.96 ^{bc}	6.60±0.94 ^{bc}	6.20±1.15 ^c	5.75±1.33 ^b	6.00±1.37 ^b	5.95±1.39 ^b
30 g	6.40±1.14 ^c	6.20±1.23 ^c	5.70±1.52 ^d	5.15±1.59 ^c	5.10±1.71 ^c	5.30±1.59 ^c

Note; Values are expressed as means ± standard deviation (n = 3). Means with different letters in the same column were significantly different at the level $p < 0.05$.

จากข้อมูลจะเห็นได้ว่า ผู้ทดสอบให้การยอมรับผลิตภัณฑ์ที่เติมผงโปรตีนจากรำข้าวในระดับควบคุม ไม่มีการเติมผงโปรตีนจากรำข้าว มีคะแนนความชอบมากที่สุดเนื่องจากเป็นสูตรทางการค้า เมื่อเทียบกับตัวผลิตภัณฑ์ที่มีการเติม 10 กรัม 20 กรัม 30 กรัม พบว่าสูตรที่มีการเติม 10 กรัม มีค่าคะแนนลักษณะปรากฏมากที่สุด มีค่าคะแนนเท่ากับ 7.10 รองลงมาคือตัวอย่างเสริม 20 กรัม มีค่าคะแนนเท่ากับ 6.75 และมีค่าต่ำที่สุดคือตัวอย่างเสริม 30 กรัม มีค่าคะแนนเท่ากับ 6.40 คะแนนด้านสีมีค่าสูงที่สุดในตัวอย่างควบคุม มีคะแนนเท่ากับ 7.40 รองลงมาคือตัวอย่างเสริม 10 กรัม และตัวอย่างเสริม 20 กรัม มีค่าคะแนนเท่ากับ 6.90 และ 6.60 และมีค่าต่ำที่สุดในตัวอย่างเสริม 30 กรัม มีค่าเท่ากับ 6.20 คะแนนด้านกลิ่นมีค่าสูงที่สุดในตัวอย่างควบคุมมีคะแนนเท่ากับ 7.45 รองลงมาคือตัวอย่างเสริม 10 กรัม มีคะแนนเท่ากับ 6.75 และมีค่าต่ำสุดในตัวอย่างเสริม 30 กรัม มีค่าคะแนนเท่ากับ 5.70 คะแนนด้านกลิ่นรสมีค่าสูงที่สุดในตัวอย่างควบคุมมีคะแนนเท่ากับ 7.40 รองลงมาคือตัวอย่างเสริม 10 กรัม และตัวอย่างเสริม 20 กรัม มีค่าคะแนนเท่ากับ 6.30 และ 5.75 และมีค่าต่ำสุดในตัวอย่างเสริม 30 กรัม มีค่าคะแนนเท่ากับ 5.15 คะแนนด้านเนื้อสัมผัสมีค่าสูงที่สุดในตัวอย่างควบคุมและตัวอย่างเสริม 10 กรัม มีค่าคะแนนเท่ากับ 6.80 และ 6.40 รองลงมาคือตัวอย่างเสริม 10 กรัม และตัวอย่างเสริม 20 กรัม มีค่าคะแนนเท่ากับ 6.40 และ 6.00 และมีค่าต่ำสุดในตัวอย่างเสริม 30 กรัม มีค่าคะแนนเท่ากับ 5.10 คะแนนด้านความชอบโดยรวมมีค่าสูงที่สุดในตัวอย่างควบคุม มีค่าคะแนนเท่ากับ 7.40 รองลงมาคือตัวอย่างเสริม 10 กรัม และตัวอย่างเสริม 20 กรัม มีค่าคะแนนเท่ากับ 6.40 และ 5.95 และค่าคะแนนต่ำสุดในตัวอย่างเสริม 30 กรัม มีค่าคะแนนเท่ากับ 5.30 พบว่าถ้ายิ่งเติมผงเสริมโปรตีนจากรำข้าวเพิ่มขึ้นทำให้ผู้ทดสอบทางประสาทสัมผัสชอบน้อยลง เนื่องจากในตัวสารสกัดโปรตีนจากรำข้าวมีกลิ่นของรำข้าวที่ชัดเจนเกินกว่าที่ผู้ทดสอบทางประสาทสัมผัสจะยอมรับได้

4. อภิปรายผลการวิจัย

จากการศึกษาพบว่าค่า a_w ค่อนข้างต่ำซึ่งยังคงอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานอาหารของผลิตภัณฑ์อาหารแห้ง (dehydrated food) ที่กำหนดไว้คือต้องมีค่า a_w ต่ำกว่า 0.6 เพื่อป้องกันและควบคุมจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเสื่อมเสียที่เกิดจาก รา ยีสต์ และแบคทีเรีย ความชื้นของตัวอย่างที่อยู่ในช่วงร้อยละ 8.19-10.83 โดยค่าความชื้นของผงโปรตีนจากรำข้าวสดมีค่าความชื้นต่ำที่สุด ร้อยละ 8.19 รองลงมาคือการสกัดรำข้าวที่ 8 ชั่วโมง มีค่าร้อยละ 8.98 และมีค่าความชื้นสูงที่สุดคือการสกัดรำข้าวที่ 24 ชั่วโมง มีค่าร้อยละ 10.83 ผลจากการศึกษาพบว่า ค่าความชื้นมีปริมาณค่อนข้างต่ำแต่ไม่เกินร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก (มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มพข.๑๓๖/๒๕๕๘) ผลการวิเคราะห์ค่าสีของรำสดและผงโปรตีนจากรำข้าวที่ใช้เวลาในการสกัดที่แตกต่างกัน พบว่าค่าสีมีความสว่าง (L^*) ของรำสดและการสกัดรำข้าว มีค่าอยู่ในช่วง 27.95-56.13 ค่าความเป็นสีแดง (a^*) ของรำสดและผงโปรตีนจากรำข้าว อยู่ในช่วง 4.67-9.97 ค่าสีเหลือง (b^*) อยู่ในช่วง 8.65-32.32 เมื่อผ่านการสกัดด้วยเอนไซม์เซลลูเลสที่ใช้ระยะเวลาที่นานขึ้นค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) ลดลง การสกัดรำข้าวด้วยเอนไซม์

เซลล์ูลีส ทำให้มีการเพิ่มขึ้นทั้ง ปริมาณโปรตีน และ สารประกอบฟีนอลิก ในผงโปรตีนจากรำข้าวอย่างมีนัยสำคัญ การเพิ่มขึ้นของปริมาณโปรตีนสามารถอธิบายได้จากกระบวนการ สลายโครงสร้างของเซลล์พืช โดยเอนไซม์เซลล์ูลีส ซึ่งมีหน้าที่ช่วยย่อยเซลล์ูลีสในผนังเซลล์ของรำข้าว การสกัดด้วยเอนไซม์เซลล์ูลีสช่วยให้โปรตีนในรำข้าวถูกสกัดออกมา จึงทำให้ปริมาณโปรตีนที่สกัดได้เพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาการสกัดที่เพิ่มขึ้น โดยการสกัดที่ 8 ชั่วโมง ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด โดยมีปริมาณโปรตีนสูงสุดที่ร้อยละ 18.02 ซึ่งเป็นผลที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับรำข้าวสดหรือการสกัดในระยะเวลาที่นานขึ้น (16 และ 24 ชั่วโมง) การเพิ่มปริมาณโปรตีนนี้ทำให้ผงโปรตีนจากรำข้าวมีคุณค่าทางโภชนาการที่สูงขึ้น ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในผลิตภัณฑ์อาหารเสริมที่ต้องการโปรตีนสูงได้ ในส่วนของสารประกอบฟีนอลิกซึ่งเป็นสารที่มีความสามารถในการเป็นสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพนั้นการแปรรูปสามารถส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสารฟีนอลิกในพืชได้ (Ratseewo et al., 2025) ผลการศึกษาพบว่า การสกัดด้วยเอนไซม์เซลล์ูลีสก็มีผลในการเพิ่มปริมาณสารฟีนอลิกในผงโปรตีนจากรำข้าวเช่นกัน โดยการสกัดที่ 8 ชั่วโมง ให้ ปริมาณสารฟีนอลิกสูงสุดที่ 236.45 mg GAE/g ซึ่งสูงกว่าการสกัดในระยะเวลาที่ยาวนานขึ้น (16 และ 24 ชั่วโมง) และรำข้าวสดที่มีปริมาณฟีนอลิก 127.93 mg GAE/g การใช้เอนไซม์เพื่อไฮโดรไลเซพาราข้าวสามารถใช้ได้ทั้งกลุ่มโปรตีนและอะไมเลส ซึ่งพบว่าสามารถทำให้รำข้าวที่สกัดได้มีกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระสูงขึ้น (Chaijaroen. et al., 2015) การเพิ่มขึ้นของสารฟีนอลิกอาจเกิดจากการที่เอนไซม์เซลล์ูลีสช่วยปลดปล่อยสารประกอบฟีนอลิกที่มีอยู่ในเซลล์ผนังของรำข้าว ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาการใช้เอนไซม์เซลล์ูลีสในการสกัดตัวอย่างแบล็คเคอร์แรนท์ พบว่าปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระทั้งกลุ่มฟีนอลิกและแอนโทไซยานินเพิ่มขึ้นหลังการสกัด เนื่องจากการทำลายผนังเซลล์พืชที่เป็นกลุ่มเซลล์ูลีสถูกทำลายและปลดปล่อยสารอื่น ๆ ออกมา (Kapasakalidis et al. 2009) โดยการสกัดใช้ความร้อนร่วมด้วย เมื่อเวลานานขึ้นอาจทำให้ปริมาณโปรตีนและปริมาณฟีนอลิกถูกทำลายจนเสียสภาพเมื่อเวลาสกัดนานขึ้น

เมื่อนำผงโปรตีนจากรำข้าวที่เหมาะสมในการสกัดที่ 8 ชั่วโมง มาเติมในผลิตภัณฑ์วัน พบว่าค่าปริมาณน้ำอิสระมีผลต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ในอาหาร ซึ่งแบคทีเรียส่วนใหญ่จะไม่เจริญเติบโตที่ค่าปริมาณน้ำอิสระต่ำกว่า 0.90 และราส่วนใหญ่จะไม่เจริญเติบโตที่ค่าปริมาณน้ำอิสระต่ำกว่า 0.70 ซึ่งวันจัดเป็นอาหารกึ่งแห้ง ควรมีค่าปริมาณน้ำอิสระ 0.60-0.85 ผลการวิเคราะห์ด้านกายภาพของผลิตภัณฑ์วันเสริมโปรตีนจากรำข้าว พบว่ามีปริมาณน้ำอิสระ 0.96-0.99 ดังนั้นทำให้เกิดการเสื่อมเสียได้เร็วกว่าปกติเล็กน้อย เนื่องจากแบคทีเรียและราส่วนใหญ่เจริญเติบโตได้ดี และเพื่อช่วยยืดอายุของผลิตภัณฑ์ ควรบรรจุผลิตภัณฑ์ในถุงอลูมิเนียมฟอยล์ (Keawsa-ard et al., 2020) วันเสริมโปรตีนจากรำข้าวที่มีความชื้นสูงคือมีความชื้นร้อยละ 10-20 แต่มีความสัมผัสสมดุลไม่สูงมากนัก ทั้งนี้เนื่องจากไฮโดรคอลลอยด์ที่ทำหน้าที่เป็นส่วนประกอบทำหน้าที่ยึดจับกับน้ำส่วนหนึ่งไว้ (Wirivutthikorn, 2000) ผลการศึกษาพบว่า การเสริมผงโปรตีนจากรำข้าว ลงในวันมีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และชีวภาพของผลิตภัณฑ์วันอย่างชัดเจน การเสริมผงโปรตีนจากรำข้าวในวันช่วยเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ โดยเฉพาะในแง่ของการเพิ่มปริมาณโปรตีนและสารฟีนอลิกในผลิตภัณฑ์วัน ซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์นี้เหมาะสมสำหรับกลุ่มผู้บริโภคที่ต้องการเสริมโปรตีน เช่น ผู้ที่ออกกำลังกายหรือผู้ที่ต้องการอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง การเสริมผงโปรตีนจากรำข้าวในวันทำให้ปริมาณโปรตีนในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นตามระดับการเติมผงโปรตีน โดยผลิตภัณฑ์ที่เสริมผงโปรตีนในระดับ 30 กรัม มีปริมาณโปรตีนสูงสุดที่ร้อยละ 7.07 ซึ่งสูงกว่าสูตรควบคุม (ไม่มีการเติมผงโปรตีน) ที่มีโปรตีนเพียงร้อยละ 2.48 การเพิ่มโปรตีนในผลิตภัณฑ์วันทำให้มีคุณค่าทางโภชนาการสูงขึ้น ซึ่งสามารถตอบสนองความต้องการโปรตีนในผู้บริโภค โดยเฉพาะในกลุ่มที่ต้องการโปรตีนเสริมเพื่อการเสริมสร้างกล้ามเนื้อ หรือการฟื้นฟูร่างกายจากการออกกำลังกาย การเสริมผงโปรตีนจากรำข้าวช่วยเพิ่มปริมาณสารฟีนอลิกในผลิตภัณฑ์วัน โดยสูตรที่เติมผงโปรตีนจากรำข้าว 30 กรัม มี ปริมาณสารฟีนอลิกสูงสุดที่ 148.85 mg GAE/g ซึ่งมากกว่าสูตรที่ไม่มีการเติมผงโปรตีนที่มีค่า 51.89 mg GAE/g การเพิ่มสารฟีนอลิกในผลิตภัณฑ์วันช่วยเสริมคุณสมบัติทางชีวภาพ โดยสารฟีนอลิกมีคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งช่วยลดความเสี่ยงจากโรคเรื้อรังและช่วยบำรุงสุขภาพโดยรวม ส่วนผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสพบว่า สูตรที่เติมผงโปรตีนจากรำข้าว 10 กรัม ได้รับคะแนนความชอบสูงสุดจากผู้ทดสอบเมื่อเทียบกับสูตรที่เติมผงโปรตีนที่ระดับ 20 กรัมและ 30 กรัม การเพิ่มผงโปรตีนมากขึ้นทำให้ผู้ทดสอบชอบน้อยลง ซึ่งอาจเนื่องมาจากกลิ่นและเนื้อสัมผัสของผงโปรตีนจากรำข้าว ทำให้ผลิตภัณฑ์มีรสชาติที่

ได้คะแนนการยอมรับจากผู้บริโภคน้อยกว่าสูตรควบคุม

5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ผลการศึกษาพบว่า สภาวะที่เหมาะสม สำหรับการแปรรูปรำข้าวเป็นผงโปรตีนจากรำข้าวคือ การสกัดที่เวลา 8 ชั่วโมง ซึ่งให้ปริมาณโปรตีนสูงสุดที่ร้อยละ 18.02 และปริมาณสารประกอบฟีนอลิกสูงสุดที่ 236.45 mg GAE/g จากการบ่มที่เวลา 8 ชั่วโมง ผลการทดลองยังแสดงว่า ผงโปรตีนจากรำข้าวที่เติมในผลิตภัณฑ์ช่วยเพิ่มโปรตีนและสารต้านอนุมูลอิสระ ผลการศึกษาพบว่าปริมาณโปรตีนและสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดสูงสุดพบในรุ่นที่เติมผงรำข้าวสกัด 30 กรัม (ร้อยละ 7.07 และ 148.85 mg GAE/g) รองลงมาคือสูตรที่เติม 20 กรัม (ร้อยละ 5.67 และ 106.32 mg GAE/g) สำหรับการผลิตวันเสริมโปรตีนจากรำข้าว พบว่าค่า water activity (a_w) ของรุ่นที่เสริมผงโปรตีนจากรำข้าวมีค่าระหว่าง 0.961-0.990 ซึ่งควรเก็บรักษาในอุณหภูมิต่ำเพื่อยืดอายุการเก็บรักษา ผลการทดสอบด้านสีและรสชาติพบว่า คะแนนความชอบทางประสาทสัมผัสพบว่าค่าลักษณะปรากฏ สี กลิ่นรส เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมของวันสูตรควบคุมที่ไม่มีการเติมผงโปรตีนมีคะแนนสูงสุด รองลงมาเป็นสูตรที่เติมผงโปรตีนจากรำข้าว 10 กรัม และ 20 กรัม ดังนั้นสูตรที่เหมาะสมคือวันเสริมโปรตีนจากรำข้าว 20 กรัม สามารถพิจารณาเป็นผลิตภัณฑ์อาหารทางเลือกเสริมคุณค่าทางโภชนาการให้กับผู้บริโภคต่อไป งานวิจัยนี้ช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับรำข้าว โดยการพัฒนาเป็นผงโปรตีนที่สามารถนำมาใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์วันที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง ซึ่งเหมาะสำหรับผู้ที่ต้องการเสริมโปรตีน เช่น กลุ่มคนออกกำลังกายหรือผู้ที่ต้องการอาหารเพื่อสุขภาพ นอกจากนี้ยังสามารถใช้ขยายตลาดในกลุ่มผู้บริโภคที่ให้ความสำคัญกับอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการ ผลิตภัณฑ์วันเสริมโปรตีนจากรำข้าวสามารถต่อยอดในเชิงพาณิชย์โดยการพัฒนาให้มีความหลากหลายในการใช้ประโยชน์ เช่น การพัฒนาผลิตภัณฑ์สุขภาพสำหรับกลุ่มคนออกกำลังกาย หรือผู้ที่ต้องการเสริมโปรตีนในอาหารประจำวัน อีกทั้งยังสามารถขยายตลาดไปยังกลุ่มผู้บริโภคที่มีความต้องการอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูงได้ต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบคุณสาขาเทคโนโลยีและนวัตกรรมอาหาร คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในด้านความรู้และด้านเครื่องมืออุปกรณ์ในการปฏิบัติกรวิจัยครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- Abdul-Hamid, A., & Luan, YS. (2000). Functional properties of dietary fibre prepared from defatted rice bran. Food chemistry, 68(1), 15-19.
- Association of Official Analytical Chemists. (2000). Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists (Vol. 11). The Association.
- Butsat S., Weerapreeyakul N. & Siriamornpun S. (2009). Changes in phenolic acids and antioxidant activity in Thai Rice husk at five growth stages during grain development. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 57(11), 4566–4571.
- Chaijaroen T. (2015) Functional and biological properties of enzymatic hydrolysate from defatted rice bran by using partial purified Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) Viscera extract. Dissertation. Songkla; Prince of Songkla University.
- Gadalkar, SM., Gogate, PR., & Rathod, VK. (2017). Recovery of proteins from rice mill industry waste (rice bran) using alkaline or NaCl-assisted alkaline extraction processes. Journal of Food Process Engineering, 40(3), e12430.
- Houston, DF. (1972). Rice bran and polish. Rice: Chemistry and Technology, 272-300.
- Jiamyangyuen, S., Srijesdaruk, V., & Harper, WJ. (2005). Extraction of rice bran protein concentrate and its application in bread. Extraction, 27(1), 56.

- Kubota, M., Saito, Y., Masumura, T., Kumagai, T., Watanabe, R., Fujimura, S., & Kadowaki, M. (2010). Improvement in the in vivo digestibility of rice protein by alkali extraction is due to structural changes in prolamin/protein body-I particle. *Bioscience, biotechnology, and biochemistry*, 74(3), 614-619.
- Kapasakalidis, PG., Rastall, RA., & Gordon, MH. (2009). Effect of a cellulase treatment on extraction of antioxidant phenols from black currant (*Ribes nigrum* L.) pomace. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(10), 4342-4351.
- Keawsa-ard, S., Chuanphonpanich, S. & Daducale, A. (2020). Development of Gummy Jelly from *Mesua ferrea* Linn. Flower Extract. *Thai Science and Technology Journal*, 28, 2185-2200. (in Thai)
- Patindol, J., Wang, L., & Wang, YJ. (2007). Cellulase-assisted extraction of oligosaccharides from defatted rice bran. *Journal of food science*, 72(9), C516-C521.
- Phaungseang, A. & Rattanakon, S. (2021). Extraction of Rice Bran Bioactive Compounds Using Hydrothermal Treatment with Ultrasonic-assisted Extraction [Online]. Retrieved November 15, 2024, from: <https://app.gs.kku.ac.th/gs/th/publicationfile/item/21th-ngrc-2020/BMO6/BMO6.pdf>. Accessed November 15, 2024. (in Thai)
- Ramlee, KAFK., Daud, NMN., Sarip, MSM., Bakar, ARA., & Zainudin, MAM. (2024). A Three Level Factorial Model for Maximising Protein Extraction from Rice Bran with Choline Chloride: Glycerol. *Journal of Advanced Research in Micro and Nano Engineering*, 19(1), 63-77.
- Ratseewo, J., Chumroenphat, T., Li, H., & Siriamornpun, S. (2025). Changes in chemical composition, volatile compound, and bioactive compounds retention in shallots (*Allium ascalonicum* L.) under different drying methods. *Food Chemistry: X*, 27, 102419.
- Saunders, RM. (1990). The properties of rice bran as a foodstuff. *Cereal Foods World*, 35(7), 634-636.
- Sittisart, P., Gasaluck, P., Dunkhunthod, B., Mahidsanan, T., Pinyo, J., Teethaisong, Y., & Sittisart, P. (2024). Mode of action of biosurfactant against *Listeria monocytogenes* and its cytotoxicity as an alternative for washing fresh Chinese kale. *Food Bioscience*, 61, 104583.
- Srisan, S., Subsri, P., Chimpali, K. & Ratseewo, J. 2023. Effect of Steaming Method on Chemical, Physical Properties and Total Phenolic Content of Lava Durian Sisaket Peel Powder. *Science and Technology Journal of Sisaket Rajabhat University*. 3(1), 68-76. (in Thai)
- Wachirasiri, K., Wanlapa, S., Meeploy, M., Sitthisomang, D. & Subkaree, Y. (2021). The Effects of Rice Bran and Alcalase Contents on Degree of Hydrolysis, Yield and Free Radical Scavenging Activities of Peptide Hydrolysates from Defatted Rice Bran. *KMUTT Research & Development Journal*, 44(3), 427-442. (in Thai)
- Wirivutthikorn, W. (2020). Appropriate Ratios of Gelatin on Pineapple Juice Gummy Production Supplemented with Gac Fruit. *Aril. King Mongkut's Agricultural Journal*, 38(3), 400 – 407. (in Thai)

ระบบสนับสนุนการตัดสินใจบนมือถือสำหรับการปลูกข้าวในจังหวัดศรีสะเกษ

A Mobile-Based Decision Support System for Rice Cultivation in Sisaket

ภาภรณ์ เหล่าพิลัย¹ วัฒนกฤษณ์ ปัตไตร² และ กนิษฐา อินธิจิต^{2*}Paporn Loaipilai¹, Wattanakit Pattri² and Kanitta Intichit^{2*}¹สาขาวิชาเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์และดิจิทัล คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ จังหวัดศรีสะเกษ²สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ จังหวัดศรีสะเกษ¹Department of Computer and Digital Technology, Faculty of Liberal Arts and Sciences,

Sisaket Rajabhat University, Sisaket Province

²Department of Computer Science, Faculty of Liberal Arts and Sciences,

Sisaket Rajabhat University, Sisaket Province

*Corresponding Author: k.intichit@sskru.ac.th

Received: April 1, 2025

Revised: July 1, 2025

Accepted: July 7, 2025

บทคัดย่อ

การปลูกข้าวยังคงเป็นองค์ประกอบสำคัญของเศรษฐกิจการเกษตรในประเทศไทย โดยเฉพาะในจังหวัดศรีสะเกษซึ่งมีข้อจำกัดด้านสิ่งแวดล้อม เช่น การพึ่งพาน้ำฝนและระบบชลประทานที่ไม่เพียงพอ แม้ว่าเทคโนโลยีการเกษตรจะพัฒนาอย่างต่อเนื่อง แต่เกษตรกรรายย่อยในพื้นที่ยังขาดเครื่องมือดิจิทัลที่สามารถให้ข้อมูลสนับสนุนการตัดสินใจที่เหมาะสมกับบริบทในท้องถิ่น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) ศึกษาวิธีการปลูกข้าวที่เหมาะสมในจังหวัดศรีสะเกษ (2) พัฒนาแอปพลิเคชันบนระบบปฏิบัติการ Android เพื่อสนับสนุนการปลูกข้าว และ (3) ประเมินความเหมาะสมของแอปพลิเคชันจากผู้เชี่ยวชาญและผู้ใช้งานจริง การวิจัยใช้ระเบียบวิธีแบบผสมผสาน โดยเริ่มจากการสัมภาษณ์เกษตรกรผู้มีส่วนเกี่ยวข้องเพื่อรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการปลูกข้าว พบรูปแบบการปลูกข้าวหลัก 2 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบการทำนาดำ จำนวน 18 ขั้นตอน และรูปแบบการทำนาหว่าน จำนวน 17 ขั้นตอน ซึ่งสะท้อนถึงลำดับขั้นตอนการเพาะปลูกที่สอดคล้องกับบริบทการใช้น้ำในพื้นที่ จากข้อมูลดังกล่าวได้พัฒนาแอปพลิเคชันที่ประกอบด้วย 5 โมดูลหลัก ได้แก่ (1) ระบบนำเข้าข้อมูลพื้นที่ (2) ระบบบันทึกข้อมูลเพาะปลูก (3) ระบบประมวลผลกิจกรรม (4) ระบบแสดงข้อมูลรายบุคคล และ (5) ระบบแจ้งเตือนกิจกรรม รวมถึงฟังก์ชันเสริม เช่น การสร้าง แก๊ส งบประมาณเพาะปลูก การแนะนำปุ๋ย แหล่งเมล็ดพันธุ์ การจัดการศัตรูพืช และการเรียกดูผลผลิตย้อนหลัง ผลการประเมินแอปพลิเคชันดำเนินการกับกลุ่มผู้เชี่ยวชาญด้านการเกษตรและเทคโนโลยีจำนวน 5 คน และเกษตรกรผู้ใช้งานจริง 35 คน โดยใช้แบบสอบถามมาตรฐาน วิเคราะห์ผลด้วยสถิติเชิงพรรณนา ผลการประเมินแสดงให้เห็นว่าแอปพลิเคชันมีความเหมาะสมอยู่ในระดับมาก โดยมีค่าเฉลี่ย 4.09 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.81 ผลการวิจัยชี้ว่าแอปพลิเคชันสามารถผสมผสานองค์ความรู้ท้องถิ่นเข้ากับเทคโนโลยีบนอุปกรณ์พกพาได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเป็นเครื่องมือที่ใช้งานง่าย เหมาะสำหรับสนับสนุนเกษตรกรรายย่อยในการตัดสินใจด้านการเพาะปลูก ซึ่งมีศักยภาพในการส่งเสริมผลผลิตและการพัฒนาเกษตรกรรมอย่างยั่งยืนในระดับพื้นที่

คำสำคัญ: แอปพลิเคชัน, เกษตรดิจิทัล, การปลูกข้าว, จังหวัดศรีสะเกษ, เทคโนโลยีเกษตรในบริบทท้องถิ่น

Abstract

Rice cultivation remains a crucial component of Thailand's agricultural economy, particularly in Sisaket Province, which faces environmental limitations such as dependence on rainwater and inadequate irrigation systems. Despite the continuous development of agricultural technology, local smallholder farmers in the region still lack digital tools that can provide information to support decisions appropriate for the local context. The objectives of this research were to (1) study appropriate rice cultivation methods in Sisaket Province, (2) develop an application on the Android operating system to support rice cultivation, and (3) evaluate the application's suitability based on assessments by experts and actual users. The research employed a mixed methodology, beginning with interviews of experienced farmers to collect information about the rice cultivation process. Two main rice cultivation patterns were identified: black rice farming with 18 steps and sowing farming with 17 patterns. These patterns reflect the sequence of cultivation steps that align with the context of water use in the area. Based on this data, an application was developed consisting of 5 main modules: (1) area data import system, (2) crop data recording system, (3) activity processing system, (4) individual data display system, and (5) activity notification system, as well as auxiliary functions such as creating, editing, and deleting cultivation plans, providing fertilizer recommendations, seed sources, pest management, and retrieving past yield data. The application evaluation was conducted with a group of 5 agricultural and technology experts and 35 farmers who actually used it, using a standard questionnaire analyzed with descriptive statistics. The evaluation results show that the application demonstrates very high suitability with a mean score of 4.09 and a standard deviation of 0.81. The results suggest that the application can effectively integrate local knowledge with mobile technology and is an easy-to-use tool suitable for supporting smallholder farmers in making cultivation decisions, which has the potential to promote productivity and sustainable agricultural development at the local level.

Keywords: Mobile application, Digital agriculture, Rice cultivation, Sisaket Province, Context-aware agricultural technology

1. บทนำ

ภาคการเกษตรของประเทศไทยยังคงมีบทบาทสำคัญต่อความมั่นคงทางอาหารของประเทศและการดำรงชีวิตของประชากรในเขตชนบท อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันภาคการเกษตรกำลังเผชิญกับการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างที่ส่งผลต่อความยั่งยืนในระยะยาว หนึ่งในประเด็นหลักคือจำนวนแรงงานภาคเกษตรที่ลดลงอย่างต่อเนื่อง ประกอบกับการเพิ่มขึ้นของอายุเฉลี่ยของเกษตรกร ตามข้อมูลของสำนักงานสถิติแห่งชาติ (National Statistical Office, 2023) สัดส่วนของแรงงานภาคเกษตรมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง ขณะที่อายุเฉลี่ยของเกษตรกรไทยยังคงเพิ่มขึ้น สถานการณ์นี้ส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตลดลง และอาจกระทบต่อความมั่นคงทางอาหารของประเทศในระยะยาว โดยเฉพาะการผลิตข้าวซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจหลักของไทย ปัญหาดังกล่าวเห็นได้ชัดในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เช่น จังหวัดศรีสะเกษ ซึ่งมีความแปรปรวนของสภาพอากาศ ระบบชลประทานที่จำกัด และลักษณะภูมิประเทศที่ซับซ้อน เพิ่มความยากลำบากในการจัดการแปลงเกษตร แนวทางการปลูกข้าวในจังหวัดศรีสะเกษมีความหลากหลาย เนื่องจากปัจจัยแวดล้อมเฉพาะถิ่นและประเพณีทางการเกษตร

ของชุมชน เกษตรกรใช้วิธีการเพาะปลูกที่หลากหลาย ขึ้นอยู่กับปัจจัยด้านแหล่งน้ำ ลักษณะภูมิประเทศ และฤดูกาลของแต่ละปี อย่างไรก็ตาม ความไม่แน่นอนของปริมาณฝนและปัญหาการขาดแคลนแรงงานที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดความจำเป็นในการพัฒนาเครื่องมือสนับสนุนการตัดสินใจที่สามารถตอบสนองต่อบริบทเฉพาะถิ่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ แม้ว่าความรู้พื้นบ้านยังคงมีคุณค่า แต่ก็มักไม่สามารถปรับใช้ในสถานการณ์ที่ต้องการความแม่นยำและการขยายผลในวงกว้างได้ ดังนั้น เทคโนโลยีควรถูกออกแบบให้เหมาะสมกับความซับซ้อนของระบบเกษตรในระดับพื้นที่

ภาคการเกษตรกำลังเปลี่ยนผ่านเข้าสู่ยุคดิจิทัล โดยมีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีล้ำสมัย เช่น ระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) ปัญญาประดิษฐ์ (AI) ระบบเซนเซอร์แบบเรียลไทม์ และแอปพลิเคชันบนมือถือ เทคโนโลยีเหล่านี้มีเป้าหมายเพื่อเพิ่มผลผลิต ลดต้นทุน และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (OECD, 2019; Asian Development Bank (ADB), 2025) ประเทศไทยได้ริเริ่มนโยบายสนับสนุนการเปลี่ยนผ่านสู่เกษตรดิจิทัล เช่น โครงการ Young Smart Farmer ที่มุ่งพัฒนาเกษตรกรรุ่นใหม่ให้มีความรู้ด้านเทคโนโลยีสารสนเทศและการจัดการฟาร์มอย่างมีประสิทธิภาพ (Department of Agricultural Extension, 2024) สิ่งเหล่านี้สะท้อนถึงการเปลี่ยนผ่านจากเกษตรแบบดั้งเดิมสู่ระบบเกษตรที่ขับเคลื่อนด้วยข้อมูล แม้จะมีความก้าวหน้าในระดับนโยบาย แต่การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีดิจิทัลในหมู่เกษตรกรรายย่อย โดยเฉพาะกลุ่มผู้ปลูกข้าว ยังคงมีข้อจำกัดอย่างชัดเจน จากการศึกษาของ Limpamont et al. (2024) พบว่าอุปสรรคหลัก ได้แก่ การขาดโครงสร้างพื้นฐานด้านดิจิทัล ระดับความรู้ทางเทคโนโลยีที่ยังอยู่ในระดับต่ำ และการขาดเนื้อหาหรือเครื่องมือที่สอดคล้องกับบริบทท้องถิ่น ข้อจำกัดเหล่านี้เด่นชัดเป็นพิเศษในพื้นที่ชนบท เช่น จังหวัดศรีสะเกษ ซึ่งเทคโนโลยีจะต้องเผชิญกับข้อจำกัดด้านวัฒนธรรม รายได้ต่ำ และการสนับสนุนจากภาครัฐที่จำกัด นอกจากนี้ เทคโนโลยีที่นำเข้าหรือออกแบบมาโดยไม่คำนึงถึงบริบทเฉพาะพื้นที่มักไม่สามารถตอบโจทย์ของเกษตรกรได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากข้อจำกัดดังกล่าว จึงมีความพยายามพัฒนาแอปพลิเคชันที่ตอบสนองความต้องการเฉพาะพื้นที่ ตัวอย่างที่สำคัญคือแอปพลิเคชัน SMART GHG สำหรับการผลิตข้าวในชุมชนไทย Cha-un et al. (2022) แสดงให้เห็นว่า แอปพลิเคชันนี้สามารถสนับสนุนการผลิตข้าวแบบลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยใช้ข้อมูลจริงในการติดตามและบริหารจัดการกระบวนการผลิต นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการวางแผนและสร้างการมีส่วนร่วมของเกษตรกรในระดับชุมชน ผลลัพธ์เหล่านี้สะท้อนถึงศักยภาพของเทคโนโลยีที่ออกแบบตามบริบทจริงในการส่งเสริมเกษตรกรรมที่ยั่งยืน

งานวิจัยต่าง ๆ ยังสนับสนุนความสำคัญของแอปพลิเคชันมือถือที่พัฒนาสำหรับบริบทท้องถิ่นโดยเฉพาะ Kerdsriserm et al. (2024) ประเมินความพึงพอใจของเกษตรกรในจังหวัดฉะเชิงเทราที่ใช้แอปพลิเคชันมือถือสำหรับวิเคราะห์ต้นทุน-ผลตอบแทนในการผลิตข้าว พบว่าแอปพลิเคชันมีความสามารถในการใช้งานจริง Kunlerd (2024) ศึกษาปัจจัยความสำเร็จของแอปพลิเคชันการเกษตรอัจฉริยะด้วยวิธี AHP และเน้นย้ำถึงความสำคัญของความเหมาะสมตามบริบทและฟังก์ชันทางเทคนิค ขณะที่ Suvittawat (2024) วิเคราะห์การรับรู้ของเกษตรกรต่อเทคโนโลยีโดรนในประเทศไทย พบว่าเนื้อหาเฉพาะท้องถิ่นและคุณค่าที่เกษตรกรรับรู้มีอิทธิพลอย่างมากต่อการยอมรับและการใช้งานงานวิจัยเหล่านี้ชี้ให้เห็นถึงความจำเป็นของการพัฒนาเครื่องมือดิจิทัลที่สอดคล้องกับวิถีการเกษตรท้องถิ่น ความคาดหวังของผู้ใช้ และบริบททางสังคม-เศรษฐกิจ

จากข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความจำเป็นเร่งด่วนในการพัฒนาเครื่องมือดิจิทัลที่สามารถผสมผสานองค์ความรู้ในพื้นที่เข้ากับเทคโนโลยีสมัยใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โซลูชันที่มีอยู่ในปัจจุบันยังขาดความเหมาะสมกับบริบทหรือไม่สามารถตอบโจทย์เกษตรกรรายย่อยได้อย่างเต็มที่ ยิ่งไปกว่านั้น ยังพบว่าไม่มีงานวิจัยที่มุ่งเน้นการพัฒนาแอปพลิเคชันมือถือซึ่งออกแบบโดยอิงจากรูปแบบการปลูกข้าวเฉพาะในระดับภูมิภาค ช่องว่างนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งในพื้นที่อย่างจังหวัดศรีสะเกษ ซึ่งมีข้อจำกัดด้านสิ่งแวดล้อมและแรงงาน ข้อมูลจากสำนักงานส่งเสริมเศรษฐกิจดิจิทัล (Digital Economy Promotion Agency, 2023) ระบุว่า มีเกษตรกรรายย่อยในประเทศไทยเพียงไม่ถึงร้อยละ 25 ที่ใช้แพลตฟอร์มดิจิทัลเป็นประจำเพื่อสนับสนุนการตัดสินใจด้านการเพาะปลูก แสดงให้เห็นถึงโอกาสในการพัฒนาอย่างเร่งด่วน ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายเพื่อ (1) ศึกษาวิธีการปลูกข้าวที่เหมาะสมในจังหวัดศรีสะเกษ (2) พัฒนาแอปพลิเคชันมือถือเพื่อสนับสนุนการปลูกข้าวผ่าน

ระบบปฏิบัติการ Android และ (3) ประเมินความเหมาะสมและความสามารถในการใช้งานของแอปพลิเคชันในบริบทของผู้ใช้งานจริง ทั้งจากมุมมองของผู้เชี่ยวชาญและเกษตรกรเป้าหมาย

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยประกอบด้วย 5 ขั้นตอน ดังนี้

2.1.1 ศึกษาวิธีการปลูกข้าวในพื้นที่จังหวัดศรีสะเกษ ความเป็นไปได้ในการพัฒนาระบบ และกำหนดปัญหาของระบบโดยได้ศึกษาเกี่ยวกับเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อให้ได้ถึงข้อมูลการปลูกข้าวที่เหมาะสม และกระบวนการพัฒนาแอปพลิเคชัน

2.1.2 วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาในขั้นที่ 1 และนำมาออกแบบองค์ประกอบของระบบดัง Figure 1.

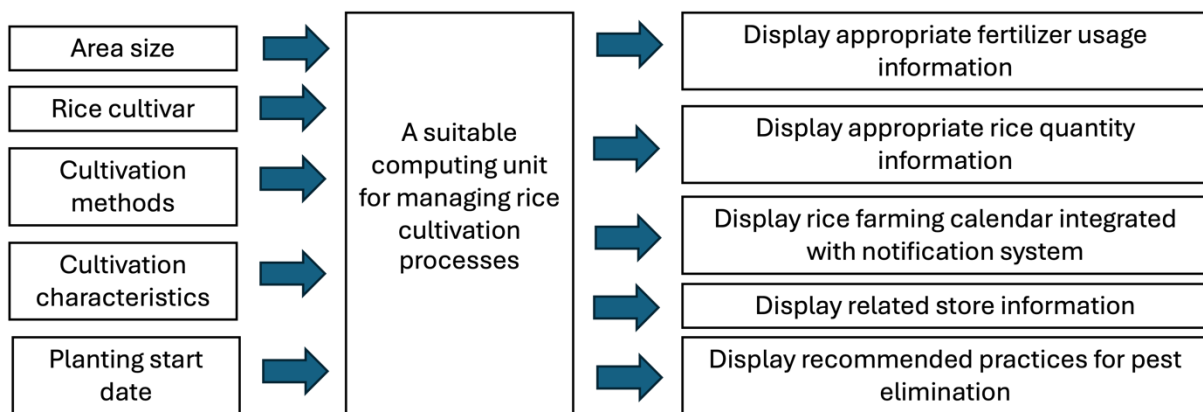


Figure 1. Components of the Rice Cultivation Advisory Application in Sisaket Province

2.1.3 ออกแบบระบบ โดยใช้ทฤษฎีการวิเคราะห์และออกแบบระบบเชิงวัตถุ ประกอบไปด้วยการออกแบบ Usecase Diagram, Activity Diagram, Sequence Diagram, Class Diagram และ User InterFace และออกแบบโครงสร้างของระบบ ดัง Figure 2.

2.1.4 พัฒนาแอปพลิเคชันแนะนำการปลูกข้าวในจังหวัดศรีสะเกษผ่านสมาร์ทโฟนบนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์

2.1.5 ทดลอง สรุป วิเคราะห์และจัดทำคู่มือการใช้งาน

2.2 เครื่องมือการวิจัย

2.2.1 แอปพลิเคชันแนะนำการปลูกข้าวในจังหวัดศรีสะเกษ

2.2.2 แบบประเมินความเหมาะสมแอปพลิเคชันแนะนำการปลูกข้าวในจังหวัดศรีสะเกษ

2.3 กลุ่มเป้าหมาย

2.3.1 ผู้เชี่ยวชาญจำนวน 5 คน คัดเลือกโดยใช้วิธีเฉพาะเจาะจง โดยเป็นเป็นผู้มีประสบการณ์เป็นระยะเวลาไม่น้อยกว่า 3 ปี ในด้านการให้คำปรึกษาเกี่ยวกับวิธีการปลูกข้าว

2.3.2 ผู้ใช้งานจำนวน 35 คน คัดเลือกโดยใช้วิธีเฉพาะเจาะจง โดยเป็นเกษตรกรในเขตจังหวัดศรีสะเกษ

2.4 สถิติที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยนำผลที่ได้เทียบกับเกณฑ์การประเมิน (Sincharu, 2009) ดังนี้

ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.51 – 5.00 หมายความว่า ระดับมากที่สุด
 ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.51 – 4.50 หมายความว่า ระดับมาก
 ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.51 – 3.50 หมายความว่า ระดับปานกลาง
 ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.51 – 2.50 หมายความว่า ระดับน้อย
 ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.00 – 1.50 หมายความว่า ระดับน้อยที่สุด

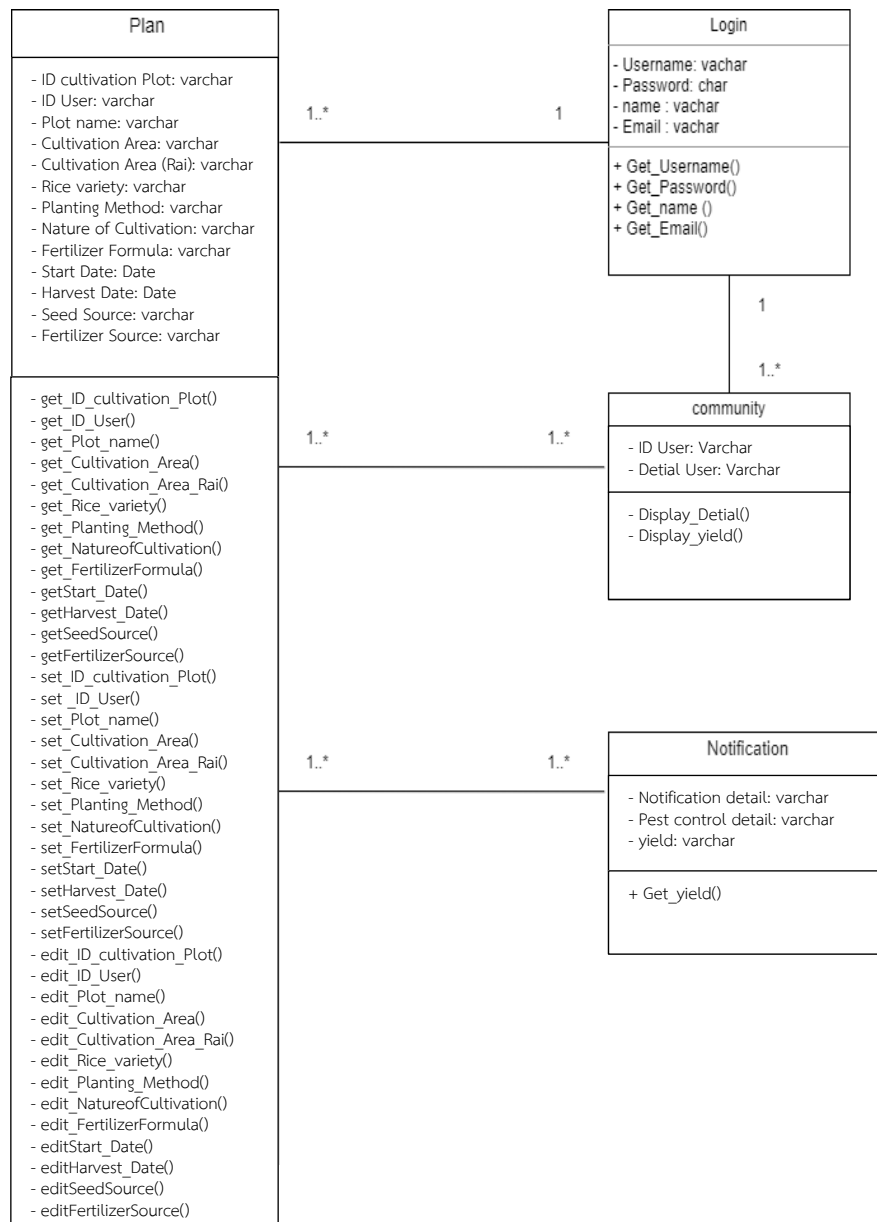


Figure 2. Class Diagram

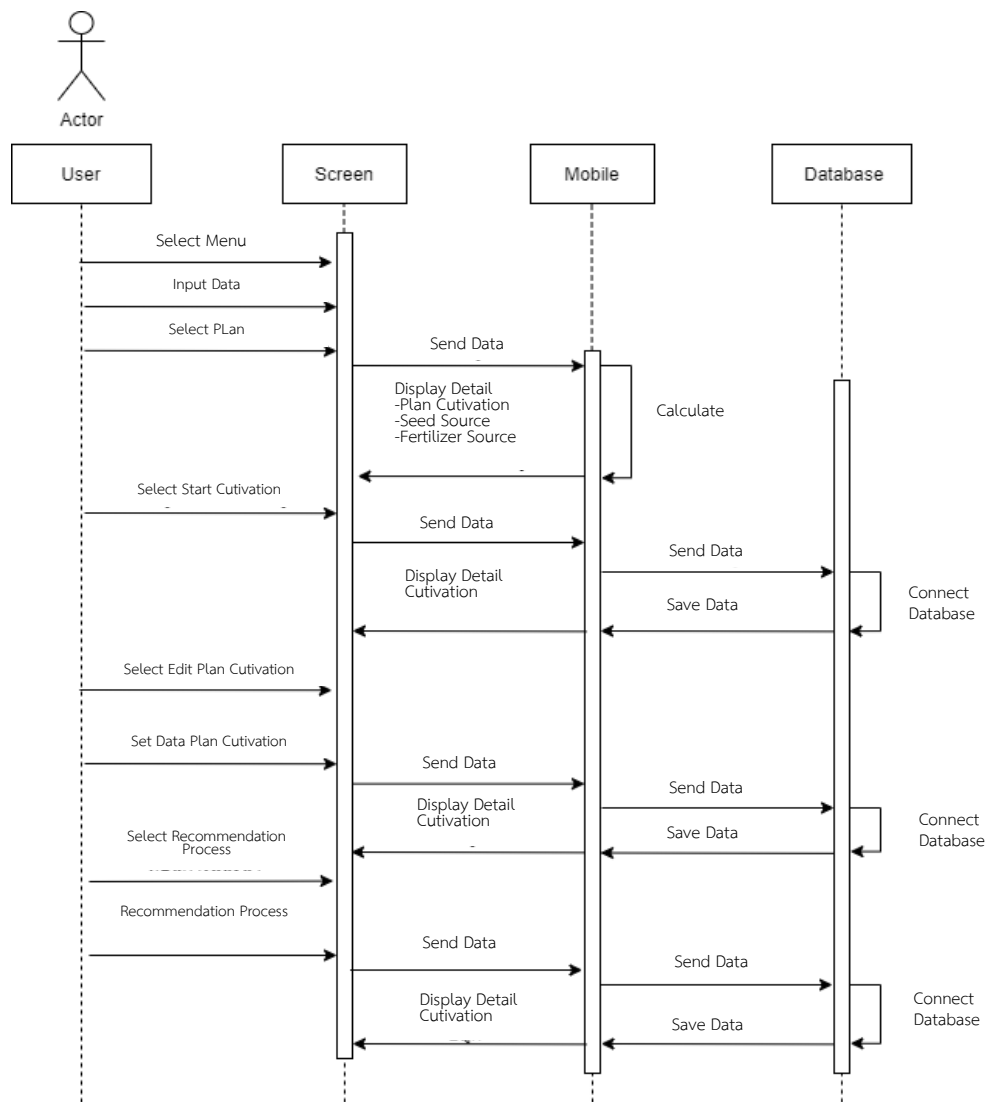


Figure 3. Sequence Diagram: Plan

3. ผลการวิจัย

3.1 ผลการศึกษาวิธีการปลูกข้าวที่เหมาะสมในจังหวัดศรีสะเกษ

การศึกษาวีธีการปลูกข้าวที่เหมาะสมใช้กระบวนการในการสัมภาษณ์ เพื่อสรุปวิธีการปลูกข้าวและนำไปประเมินความเหมาะสมโดยผู้เชี่ยวชาญ ผลการศึกษาพบว่า วิธีการปลูกข้าวนาดำและนาหว่าน จะมีรูปแบบวิธีการปลูกข้าวแตกต่างกัน โดยวิธีการปลูกข้าวลักษณะการทำนาดำมีทั้งหมด 18 ขั้นตอน ดัง Table.1 และวิธีการปลูกข้าวลักษณะการทำนาหว่าน 17 ขั้นตอน ดัง Table.2

Table 1. Overview of transplanting rice cultivation

Steps	Detail
1	Stubble Clearing – Start Preparing the Soil
2	Plant fresh manure crops – such as coconut beans and jute about 8 kg/rai and leave for 30 days.
3	1st plowing – to encourage weeds to germinate.
4	2nd ploughing and drying – 7 days
5	Picking and soaking rice seeds – soaking in water for 3 days
6	Dry the seeds – Dry the rice to germinate for 1 day.
7	Plow and plow the seedling plot – 5–10 cm of water is required in the plot.
8	Sow manure – Seedling and black rice plots
9	Sowing sprouted rice in the seedling plot – 50 g/m ²
10	Apply accelerated fertilizer 1 – 10 kg/rai 15 days after sowing seedlings .
11	Ploughing and raking of black rice fields
12	Rootstock and black cuttings – seedlings are 25 days old, 20 cm apart.
13	Apply fertilizer 2 – 1 day after black cutting, the rate is 20–25 kg/rai.
14	Check the water level – control the water 15–20 cm. 30 days after fertilizing .
15	3rd fertilization – accelerate the harvesting of 5–10 kg/rai 15 days after the rice is tillered .
16	Check the water level during pregnancy – maintain the water level for 20 days.
17	Milk phase – begins to enter the ripening phase.
18	Harvest – When the rice is fully cooked.

Table 2. Overview of broadcasting rice cultivation

Steps	Detail
1	Stubble Clearing – Start preparing the soil and removing rice stubble.
2	Plant fresh manure plants – such as coconut beans or jute about 8 kg/rai and leave for 30 days.
3	1st plowing – to stimulate weed germination, then dry the soil for 14 days.
4	2nd plough and dry the soil again – leave for another 7 days.
5	Seed sorting and soaking – soak in water for 3 days to allow the rice to start germinating.
6	Dry soaked seeds – Dry for 1 day to make rice germinate better.
7	Plough and plow prepare the paddy plot – provide 5–10 cm of water in the paddy to suit sowing.

Table 2. (Cont.)

Steps	Detail
8	Apply manure – in the case of organic farming
9	Rice sowing – Rice seeds at the rate of 30 kg/rai
10	Seedling cutting period – at the age of 15–20 days after sowing.
11	Accelerated fertilization of plants/leaves 1 time – 20–35 kg/rai 1 day after cutting the seedlings
12	Check the water level – control the water level 15–20 cm up to the tillering stage.
13	Accelerated fertilization 2nd – 5 –10 kg/rai during tillering
14	Check the water level during pregnancy – maintain the water level at 15–20 cm.
15	Release water from the rice field – about 7 days after the rice is pregnant.
16	Milk phase – Rice enters the ripening stage.
17	Harvest – 100–120 days after sowing, depending on the rice variety.

3.2 ผลการพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจบนมือถือสำหรับการปลูกข้าวในจังหวัดศรีสะเกษ

ระบบสนับสนุนการตัดสินใจบนมือถือสำหรับการปลูกข้าวในจังหวัดศรีสะเกษได้ใช้ กระบวนการวิเคราะห์และออกแบบระบบด้วย Waterfall Mode เป็นเครื่องมือในการออกแบบระบบ และผู้พัฒนาได้นำผลการออกแบบแอปพลิเคชันแนะนำการปลูกข้าวผ่านสมาร์ตโฟนบนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์มาพัฒนาระบบด้วยโปรแกรม Andriod studio โดยใช้ภาษา Kotlin ในการพัฒนา และใช้ Firebase ในการเก็บฐานข้อมูล ทำให้ระบบสนับสนุนการตัดสินใจบนมือถือสำหรับการปลูกข้าวในจังหวัดศรีสะเกษ สามารถจัดเก็บข้อมูล เพิ่มลบแก้ไข สร้างการแผนการเพาะปลูก แจ้งเตือนกิจกรรมเพาะปลูก แนะนำปุ๋ยและแหล่งปุ๋ย แนะนำแหล่งเมล็ดพันธุ์ แนะนำการกำจัดศัตรู เรียกดูผลผลิตของผู้ใช้งาน และแสดงแผนการเพาะปลูกของผู้ใช้งานในระบบได้ Figure 6.

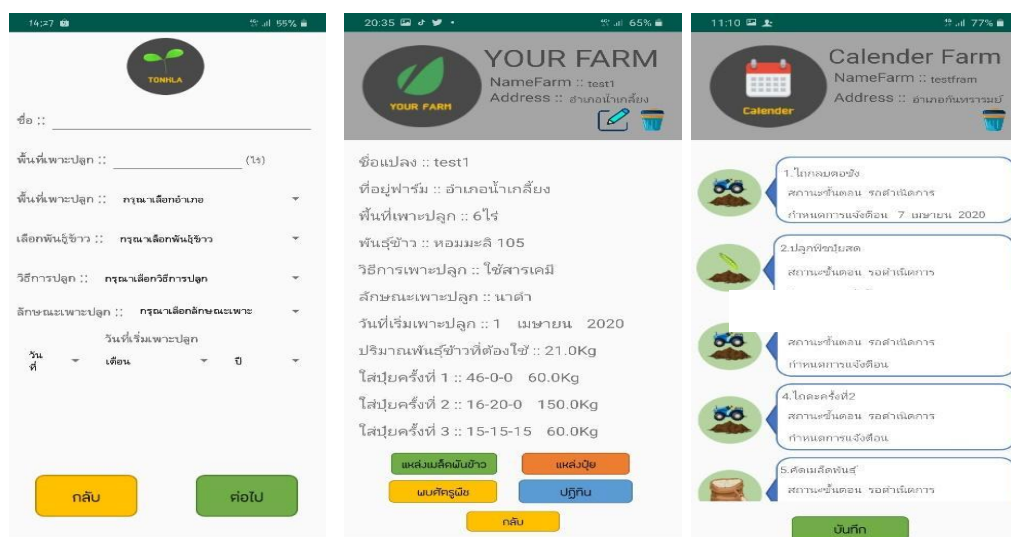


Figure 4. Rice Cultivation Advisory Application in Sisaket Province

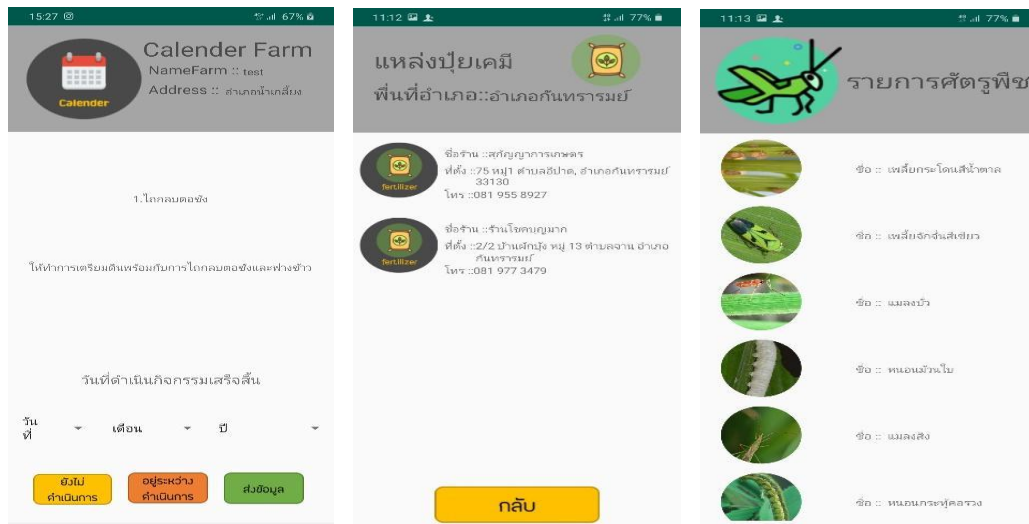


Figure 4. (Cont.)

3.3 ผลการประเมินความเหมาะสมของระบบสนับสนุนการตัดสินใจบนมือถือสำหรับการปลูกข้าวในจังหวัดศรีสะเกษ

ผู้วิจัยได้นำแอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้น ไปให้ผู้เชี่ยวชาญจำนวน 5 คน ประเมินความเหมาะสมจากนั้นนำผลมาวิเคราะห์ด้วยสถิติพื้นฐานเทียบกับเกณฑ์และสรุปผลดังนี้

Table 3. Results of the Evaluation of the Suitability of the Mobile Decision Support System for Rice Cultivation in Sisaket Province by Experts

Item	$\bar{X}$	S.D.	Level
1. System Functionality	4.32	0.75	Very appropriate
2. System Design	3.85	0.88	Very appropriate
3. Security of User Data	4.04	0.79	Very appropriate
Overall	4.09	0.81	Very appropriate

จาก Table 3. ผู้เชี่ยวชาญและผู้ใช้งานให้ความเห็นว่า ความเหมาะสมของระบบสนับสนุนการตัดสินใจบนมือถือสำหรับการปลูกข้าวในจังหวัดศรีสะเกษอยู่ในระดับมาก (ค่าเฉลี่ย 4.09 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.81) เมื่อพิจารณารายด้านพบว่า ด้านฟังก์ชันการทำงานของระบบอยู่ในระดับมาก (ค่าเฉลี่ย 4.32 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.75) ด้านการออกแบบระบบอยู่ในระดับมาก (ค่าเฉลี่ย 3.85 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.88) ด้านความปลอดภัยของข้อมูลผู้ใช้งานอยู่ในระดับมากที่สุด (ค่าเฉลี่ย 4.04 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.79)

ผู้วิจัยได้นำแอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้น ไปให้ผู้ใช้งานจำนวน 35 คน ประเมินความพึงพอใจจากนั้นนำผลมาวิเคราะห์ด้วยสถิติพื้นฐานเทียบกับเกณฑ์และสรุปผลดังนี้

Table 4. Results of the Satisfaction Assessment of the Mobile Decision Support System for Rice Cultivation in Sisaket Province by General Users

Item	$\bar{X}$	S.D.	Level
1. System Functionality	4.57	0.50	Very Good
2. System Design	4.57	0.50	Very Good
3. Security of User Data	4.60	0.50	Very Good
4. Responding to User Needs	4.39	0.64	Good
Overall	4.53	0.70	Very Good

จาก Table 4. ผู้ใช้งานมีความพึงพอใจระบบสนับสนุนการตัดสินใจบนมือถือสำหรับการปลูกข้าวในจังหวัดศรีสะเกษอยู่ในระดับมากที่สุด (ค่าเฉลี่ย 4.53 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.70) เมื่อพิจารณารายด้านพบว่า ด้านฟังก์ชันการทำงานของระบบอยู่ในระดับมากที่สุด (ค่าเฉลี่ย 4.57 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.50) ด้านการออกแบบระบบอยู่ในระดับมากที่สุด (ค่าเฉลี่ย 4.57 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.50) ด้านความปลอดภัยของข้อมูลผู้ใช้งานอยู่ในระดับมากที่สุด (ค่าเฉลี่ย 4.60 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.50) และ ด้านด้านการตรงตามความต้องการของผู้ใช้ระบบอยู่ในระดับมาก (ค่าเฉลี่ย 4.39 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.64)

4. อภิปรายผลการวิจัย

4.1 การศึกษาวิธีการปลูกข้าวที่เหมาะสมในพื้นที่จังหวัดศรีสะเกษ

พบว่ารูปแบบการปลูกข้าวในพื้นที่จังหวัดศรีสะเกษ สามารถแบ่งได้ 2 รูปแบบคือการปลูกแบบนาดำมีทั้งหมด 18 ขั้นตอน และการปลูกแบบนาหว่านมีทั้งหมด 17 ขั้นตอน เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะผู้พัฒนาได้ทำการสร้างแบบสอบถาม เพื่อนำไปสอบถามและสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญเป็นบุคคลที่ทำหน้าที่ให้ข้อมูลและคำแนะนำเกี่ยวกับวิธีการปลูกข้าวกับเกษตรกร และได้ประเมินความเหมาะสมของขั้นตอนการเพาะปลูกโดยผู้เชี่ยวชาญ สอดคล้องกับ เกคินี สือนิ (Sueni, 2022) ได้วิจัยเรื่องการประยุกต์ใช้แบบจำลองอ้างอิงการดำเนินงานโซ่อุปทาน (Supply Chain Operational Reference Model: SCOR Model) เพื่อลดต้นทุนโลจิสติกส์ในกระบวนการปลูกข้าวหอมมะลิ พันธุ์ 105 กรณีศึกษาเกษตรกรปลูกข้าวบ้านเชียง อำเภอยะรัง จังหวัดร้อยเอ็ด การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการลดต้นทุนโลจิสติกส์ในกระบวนการปลูกข้าวหอมมะลิ พันธุ์ 105 โดยการประยุกต์แบบจำลองอ้างอิงการดำเนินงานโซ่อุปทาน (SCOR Model) มาใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์กระบวนการพิจารณาต้นทุนตามโครงสร้าง วิธีการที่ใช้ในการวิจัยนี้ได้แก่ การใช้แบบสอบถาม เก็บรวบรวมข้อมูลโดยสัมภาษณ์ ผู้ให้ข้อมูลข่าวสารหลัก การสนทนากลุ่ม และการประชุมเชิงปฏิบัติการแบบมีส่วนร่วม ผลการศึกษาพบว่ากระบวนการปลูกข้าวหอมมะลิ พันธุ์ 105 ประกอบด้วย 4 กระบวนการคือ (1) การเตรียมดินการปลูก (2) การปลูก (3) การดูแลรักษา และ (4) การเก็บเกี่ยว โดยสามารถสรุปค่าใช้จ่าย กิจกรรมการเตรียมดิน มีต้นทุนเท่ากับ 10,779.48 บาทต่อไร่ คิดเป็นร้อยละ 18.65 กิจกรรมการปลูก มีต้นทุนเท่ากับ 18,477.52 บาทต่อไร่ คิดเป็นร้อยละ 31.97 กิจกรรมการดูแลรักษา มีต้นทุนเท่ากับ 18,629.90 บาทต่อไร่ คิดเป็นร้อยละ 32.24 และกิจกรรมการเก็บเกี่ยว มีต้นทุนเท่ากับ 9,902.00 บาทต่อไร่ คิดเป็น ร้อยละ 17.13 และสอดคล้องกับ อิศฎาพร ใจใหญ่ และสุกัลยา เชิญขวัญ (Jaiyai & Choenkwan, 2021) ได้วิจัยเรื่อง เกษตรกรส่วนใหญ่ปลูกข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 เนื่องจากเป็นพันธุ์ข้าวที่ศูนย์เมล็ดพันธุ์ข้าวขอนแก่นส่งเสริมให้ปลูก เป็นที่ต้องการของตลาดทำให้ขายได้ในราคาสูงและให้ผลผลิตต่อไร่สูง

4.2 ระบบสนับสนุนการตัดสินใจบนมือถือสำหรับการปลูกข้าวในจังหวัดศรีสะเกษ

ประกอบด้วย 5 องค์ประกอบหลัก ได้แก่ (1) ระบบนำเข้าข้อมูลพื้นที่ (2) ระบบบันทึกข้อมูลเพาะปลูก (3) ระบบประมวลผลกิจกรรม (4) ระบบแสดงข้อมูลรายบุคคล และ (5) ระบบแจ้งเตือนกิจกรรม ซึ่งสามารถจัดเก็บข้อมูล เพิ่มลบ แก้ไข สร้างแผนการเพาะปลูก แจ้งเตือนกิจกรรมเพาะปลูก แนะนำปุ๋ยและแหล่งปุ๋ย แนะนำแหล่งเมล็ดพันธุ์ แนะนำการกำจัดศัตรู เรียกว่าผลผลิตของผู้ใช้งาน แสดงแผนการเพาะปลูกของผู้ใช้งานในระบบได้ และใช้รูปแบบคำแนะนำโดยการเตือนได้ เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะผู้พัฒนาได้ดำเนินการศึกษาวิธีการปลูกข้าวที่เหมาะสมในจังหวัดศรีสะเกษนำมาวิเคราะห์และออกแบบระบบด้วย Waterfall Model และผู้พัฒนาใช้โปรแกรม Andriod studio โดยใช้ภาษา Kotlin ในการพัฒนา และใช้ Firebase ในการเก็บฐานข้อมูล สอดคล้องกับ นฤทธิธำ สุดสงวน และคณะ (Sudsanguan et al., 2022) ได้วิจัยเรื่อง การออกแบบระบบการจองเรือข้ามฟากพญา-เกาะล้าน บนอินเทอร์เน็ตด้วยวิธีเชิงโครงสร้าง มาใช้วิเคราะห์และออกแบบระบบ ผลการวิจัยพบว่า ระบบการจองเรือข้ามฟากพญา-เกาะล้านบนอินเทอร์เน็ตด้วยวิธีเชิงโครงสร้างสามารถจองเรือข้ามฟากและคุณภาพอยู่ในระดับมาก และสอดคล้องกับ Sampurna et al. (2025) ได้วิจัยเรื่องพัฒนาแอปพลิเคชันบนระบบ Android เพื่อช่วยในการระบุชนิดของปลา โดยใช้ภาษา Kotlin ผ่าน Android Studio เป็นแพลตฟอร์มการพัฒนา ผู้พัฒนาได้ทำการพัฒนาแอปพลิเคชันด้วยโปรแกรม Android studio โดยใช้ภาษา Kotlin ในการพัฒนาและใช้ Firebase ในการเก็บฐานข้อมูล ผลการวิจัยพบว่า แอปพลิเคชันสามารถระบุชนิดของปลาได้อย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยระบุชนิดปลาผ่านการถ่ายภาพ ใช้งานง่าย เหมาะสำหรับชุมชนประมง นักวิจัยหรือผู้ที่สนใจปลา สามารถถ่ายภาพปลาและใช้ระบบประมวลผลเพื่อช่วยระบุชนิดปลาอย่างรวดเร็ว

4.3 ผลประเมินความเหมาะสมของแอปพลิเคชันแนะนำการปลูกข้าวในจังหวัดศรีสะเกษ

มีความเหมาะสมอยู่ในระดับมากที่สุด เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะ ผู้วิจัยได้วิเคราะห์และออกแบบระบบด้วย Waterfall Model เป็นแนวทางการดำเนินงานประกอบด้วย 5 ขั้นตอน ได้แก่ การวางแผนการทำงาน การออกแบบ การพัฒนาระบบ การทดสอบระบบ และการนำไปใช้ ทำให้แอปพลิเคชันแนะนำการปลูกข้าวในจังหวัดศรีสะเกษผ่านสมาร์ทโฟนบนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ สามารถจัดเก็บข้อมูล เพิ่มลบแก้ไข สร้างแผนการเพาะปลูก แจ้งเตือนกิจกรรมเพาะปลูก แนะนำปุ๋ยและแหล่งปุ๋ย แนะนำแหล่งเมล็ดพันธุ์ แนะนำการกำจัดศัตรูพืช เรียกว่าผลผลิตของผู้ใช้งาน และแสดงแผนการเพาะปลูกของผู้ใช้งานในระบบได้ สอดคล้องกับ จิตราภรณ์ ธารพิทักษ์วงศ์ (Tarapitakwong, 2022) ได้วิจัยเรื่อง การพัฒนารูปแบบสารสนเทศที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มศักยภาพการท่องเที่ยวอย่างยั่งยืน อำเภอแม่วาง จังหวัดเชียงใหม่ โดยได้นำเอา Waterfall Model มาใช้วิเคราะห์และออกแบบระบบ ผลการวิจัยพบว่า การพัฒนารูปแบบสารสนเทศที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มศักยภาพการท่องเที่ยวอย่างยั่งยืน อำเภอแม่วางจังหวัดเชียงใหม่ โดยการมีส่วนร่วมของชุมชน สำหรับเผยแพร่ระบบสารสนเทศการท่องเที่ยวผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตให้นักท่องเที่ยวและประชาชนที่สนใจ ด้วยกระบวนการ SDL ให้ความเห็นว่าแอปพลิเคชันมีความเหมาะสมในระดับดี

5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

แอปพลิเคชันแนะนำการปลูกข้าวในจังหวัดศรีสะเกษ ได้ใช้กระบวนการวิเคราะห์และออกแบบระบบด้วย Waterfall Mode เป็นเครื่องมือในการออกแบบระบบ และผู้พัฒนาได้นำผลการออกแบบแอปพลิเคชันแนะนำการปลูกข้าวผ่านสมาร์ทโฟนบนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์มาพัฒนาระบบด้วยโปรแกรม Andriod studio โดยใช้ภาษา Kotlin ในการพัฒนา และใช้ Firebase ในการเก็บฐานข้อมูล ทำให้แอปพลิเคชันแนะนำการปลูกข้าวผ่านสมาร์ทโฟนบนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์สามารถจัดเก็บข้อมูล เพิ่มลบแก้ไข สร้างแผนการเพาะปลูก แจ้งเตือนกิจกรรมเพาะปลูก แนะนำปุ๋ยและแหล่งปุ๋ย แนะนำแหล่งเมล็ดพันธุ์ แนะนำการกำจัดศัตรู เรียกว่าผลผลิตของผู้ใช้งาน และแสดงแผนการเพาะปลูกของผู้ใช้งานในระบบได้โดยมีข้อเสนอแนะดังนี้

5.1 แอปพลิเคชันแนะนำการปลูกข้าวในจังหวัดศรีสะเกษผ่านสมาร์ทโฟน บนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ ใช้ Firebase ในการเก็บฐานข้อมูล ซึ่งการเก็บข้อมูลในรูปแบบ NoSQL จะจัดเก็บข้อมูลได้เพียง 50 เรคคอร์ดทำให้ไม่รองรับข้อมูลขนาดใหญ่ได้ ถ้าหากมีการปรับเปลี่ยนฐานข้อมูลไปใช้ในรูปแบบฐานข้อมูลเชิงสัมพันธ์เช่น DB2, ORACLE, MySQL จะทำให้ระบบจัดเก็บข้อมูลได้ไม่จำกัด

5.2 แอปพลิเคชันแนะนำการปลูกข้าวในจังหวัดศรีสะเกษผ่านสมาร์ทโฟนบนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ สามารถแนะนำและสร้างแผนเพาะปลูกข้าวเพียง 2 รูปแบบคือ นาดำและนาหว่าน ซึ่งไม่ครอบคลุมกับรูปแบบการทำนาในประเทศไทยที่มี 4 รูปแบบคือ การปลูกข้าวนาดำ การปลูกข้าวนาหว่าน การปลูกข้าวนาไร่ และการปลูกข้าวนาขั้นบันได จึงควรเพิ่มรูปแบบการปลูกข้าวให้ครบ เพื่อให้ผู้ใช้สามารถเลือกใช้ตามความต้องการ

6. เอกสารอ้างอิง

- Asian Development Bank (ADB). (2025). Harnessing Digital Technologies for Sustainable Agriculture and Food Security [Online]. Retrieved May 20, 2025, from <https://development.asia/summary/harnessing-digital-technologies-sustainable-agriculture-and-food-security>
- Cha-un, N., Towprayoon, S., Chidthaisong, A., Chaimanuskul, K., Maiyarach, S., Sangsuwan, P., & Kiatsomporn, P. (2022). SMART GHG Mobile Application: A new agricultural app for tracking GHG emissions and low-carbon rice production in Thailand's local communities. *Chemistry Proceedings*, 10(1), 78.
- Department of Agricultural Extension. (2024). Annual report on the Young Smart Farmer program. Ministry of Agriculture and Cooperatives, Thailand [Online]. Retrieved May 13, 2025, from <https://suphanburi.doae.go.th/province/wp-content/uploads/2025/04/DOAE-Annual-Report-2024.pdf>
- Digital Economy Promotion Agency. (2023). Thailand digital economy outlook 2023 [Online]. Retrieved June 29, 2025, from <https://gdcatalog.go.th/dataset/gdpublish-thailand-digital-outlook1-1/resource/e4aee737-fd71-473a-9de8-0bdb55d31d8c>
- Jaiyai, I. & Choenkwan, S. (2021). Decision making on planting local rice of farmers in Kud Chum district, Yasothon Province. *Khon Kaen Agricultural Journal*, 49(4), 1012-1024. (in Thai)
- Kerdsriserm, C., Suwanmaneepong, S., Llonas, C., & Athipanjapong, P. (2024). Assessment of farmers' acceptance, satisfaction, and utilization of mobile application for rice production cost and return in Chachoengsao Province, Thailand. *International Journal of Agricultural Technology*, 20(3), 1083–1096.
- Kunlerd, A. (2024). Analyzing success factors in developing mobile applications for smart farming using the Analytical Hierarchy Process (AHP). *International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications*, 13(1), 1–8.
- Limpamont, A., Kittipanya-ngam, P., Chindasombatcharoen, N., & Cavite, H. J. M. (2024). Towards agri-food industry sustainability: Addressing agricultural technology adoption challenges through innovation. *Business Strategy and the Environment*, 33(5), 1234–1245.
- National Statistical Office. (2023). The Labour force survey Whole Kingdom: Quarter 1. January – March 2023, Ministry of Digital Economy And Society Thailand [Online]. Retrieved June 10, 2025, from https://www.nso.go.th/nsoweb/storage/survey_detail/2023/20230921152315_97820.pdf
- OECD. (2019). Digital opportunities for better agricultural policies. Organisation for Economic Co-operation and Development [Online]. Retrieved June 20, 2025, from https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2019/09/digital-opportunities-for-better-agricultural-policies_2f2824f9/571a0812-en.pdf
- Sampurna, A., M., Alfani, Setiawan, A. & Kautsar, H., A., A. (2025). Development of an Android Application to Identify Fish Species Using Kotlin-based Android Studio. *Jurnal Teknik Komputer*, 11, 19-31.

- Sincharu, T. (2009). *Research and Statistical Data Analysis Using SPSS* (10th ed.). Bangkok: Business Research and Development Institute.
- Sudsanguan, N., Khunphueak, T., Treevihok, A. & Karnbunjong, W. The design of the Pattaya-koh lan ferry booking system on the internet in a structural methods. *Journal of science and technology, southeast bangkok college*, 2(3), 33-41 (in Thai)
- Sueni, K. (2022). The application of Supply Chain Operational Reference Model (SCOR Model) for logistics cost reduction the process of rice planting Jasmine rice strain 105 (Khao Dawk Mali 105): Case studies of rice farmers in Ban Kheng, Chiang Khwan District, Roi Et Province. *Panyapiwat Journal*, 14(1), 238-253. (in Thai)
- Suvittawat, A. (2024). Investigating farmers' perceptions of drone technology in Thailand: Exploring expectations, product quality, perceived value, and adoption in agriculture. *Agriculture*, 14(12), 2183.
- Tarapitakwong, J. (2022). The Development of Proper Information Format for Sustainable Tourism in Mae Wang District, Chiang Mai Province with the Participation of the Community Members. *Journal of Science and Technology Buriram Rajabhat University (Online)*, 7(1), 1–18. (in Thai)

การประยุกต์ใช้กระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้นในการประเมินความเสี่ยง
ของขั้นตอนการติดตั้งระบบท่อส่งไอน้ำ

Application of the Analytic Hierarchy Process (AHP) in Risk Assessment
of Steam Pipeline Installation Procedures

ยลดา งาใหญ่^{1*} นันทน์ภัสร์ อินยิม¹ เลิศเลขา ศรีรัตนะ¹ และ เสรีย์ ตูประกาย¹

Yonlada Ngayai^{1*}, Nannapasorn Inyim¹, Lerdlekha Sriratana¹ and Seree Tuprakay¹

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง กรุงเทพมหานคร

¹Faculty of Engineering, Ramkhamhaeng University, Bangkok

*Corresponding Author: 6614350002@rumail.ru.ac.th

Received: April 1, 2025

Revised: July 22, 2025

Accepted: August 4, 2025

บทคัดย่อ

กระบวนการติดตั้งระบบท่อส่งไอน้ำประกอบด้วยกิจกรรมหลากหลาย ซึ่งแต่ละกิจกรรมมีอันตรายแฝงและมีระดับความเสี่ยงต่อผู้ปฏิบัติงานแตกต่างกัน งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อประเมินความเสี่ยงของกระบวนการดังกล่าวอย่างเป็นระบบ เพื่อให้สามารถวางแผนควบคุมและป้องกันอุบัติเหตุได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยประยุกต์ใช้กระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้นเป็นกรอบในการตัดสินใจ เริ่มจากการศึกษาขั้นตอนการปฏิบัติงานและเอกสารอนุญาตทำงานของโครงการกรณีศึกษา เพื่อนำมาวิเคราะห์และจำแนกขั้นตอนหลักของกระบวนการติดตั้งระบบท่อส่งไอน้ำ พร้อมทั้งระบุอันตรายที่อาจเกิดขึ้น การประเมินความเสี่ยงมีเป้าหมายเพื่อค้นหาขั้นตอนการทำงานที่มีความเสี่ยงมากที่สุด โดยใช้เกณฑ์การตัดสินใจ 3 ด้าน ได้แก่ ความน่าจะเป็นของการเกิดอันตราย ความรุนแรงของอันตราย และค่าใช้จ่ายในการป้องกัน จากนั้นจึงจัดทำแบบสอบถามการประเมินความเสี่ยงแบบเปรียบเทียบเป็นคู่ เพื่อให้ผู้เชี่ยวชาญด้านการติดตั้งระบบท่อส่งไอน้ำจำนวน 5 ท่านทำการประเมินระดับความเสี่ยงภายใต้เกณฑ์แต่ละด้าน ผลการวิเคราะห์ข้อมูลแสดงให้เห็นว่า งานยกประกอบท่อบนพื้นที่สูงเป็นขั้นตอนที่มีความเสี่ยงสูงสุด โดยมีค่าถ่วงน้ำหนักรวมเท่ากับ 0.259 รองลงมาคือ การทดสอบแนวเชื่อมด้วยรังสี (0.143) การเชื่อมต่อ (0.129) การหุ้มฉนวนกันความร้อน (0.101) การบรรจุก๊าซไนโตรเจนเข้าท่อ (0.097) การยกประกอบท่อบนพื้นที่ราบ (0.095) การขนส่งท่อ (0.092) และการทดสอบแรงดันและทำความสะอาดท่อ (0.085) ผลจากการวิจัยนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการจัดลำดับความสำคัญของมาตรการควบคุมความเสี่ยงเพื่อเพิ่มระดับความปลอดภัยให้กับโครงการติดตั้งระบบท่อส่งไอน้ำในอนาคต

คำสำคัญ: การติดตั้งท่อส่งไอน้ำ, การประเมินความเสี่ยง, กระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น

Abstract

Steam pipeline installation processes consist of various activities, each with hidden dangers and different levels of risk to workers. This research aimed to systematically assess the risks of such processes to enable effective planning for accident control and prevention. The Analytic Hierarchy Process (AHP) was applied as a decision-making framework, starting with studying work procedures and work permit documents from case study projects to analyze and classify the main steps of the steam pipeline installation process

and identify potential hazards. The risk assessment aimed to find the work steps with the highest risk using three decision criteria: the probability of hazard occurrence, the severity of hazards, and the costs of prevention. A pairwise comparison risk assessment questionnaire was then prepared for five steam pipeline installation experts to evaluate the risk levels under each criterion. The data analysis results showed that elevated pipe lifting and assembly was the step with the highest risk, with a total weighted value of 0.259 followed by radiographic testing (0.143), pipe welding (0.129), thermal insulation (0.101), nitrogen gas filling into the pipeline (0.097), ground-level pipe lifting and assembly (0.095), pipe transportation (0.092), and pressure testing and pipe cleaning (0.085). The findings of this research can serve as a guideline for prioritizing risk control measures to increase safety for future steam pipeline installation projects.

Keywords: Steam pipeline installation, Risk assessment, Analytic hierarchy process

1. บทนำ

อุตสาหกรรมจำนวนมากพึ่งพาระบบไอน้ำในกระบวนการผลิต เนื่องจากไอน้ำเป็นพลังงานรูปแบบหนึ่งที่สามารถถ่ายเทพลังงานความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย เช่น ให้ความร้อน ขับเคลื่อนอุปกรณ์ ช่วยในการเคลื่อนที่ของก๊าซและของเหลว ใช้ในกระบวนการแยกสาร ทำความสะอาด เพิ่มความชื้นพร้อมกับให้ความร้อน รวมถึงการควบคุมหรือปรับระดับความชื้นในอากาศ ตัวอย่างการใช้ประโยชน์จากไอน้ำในอุตสาหกรรมหลักต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่มใช้ไอน้ำในกระบวนการต้ม อบแห้ง นึ่ง และฆ่าเชื้อ อุตสาหกรรมสิ่งทอใช้ไอน้ำในกระบวนการฟอก ย้อม และรีดผ้า อุตสาหกรรมเคมีและปิโตรเคมีใช้ไอน้ำเพื่อถ่ายเทความร้อนให้กับสารเคมี รวมถึงควบคุมอุณหภูมิภายในถังปฏิกรณ์ โรงไฟฟ้าพลังไอน้ำใช้ไอน้ำแรงดันสูงในการหมุนกังหันเพื่อขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นต้น ด้วยความสามารถของไอน้ำในการส่งถ่ายพลังงานและการนำไปใช้ในกระบวนการผลิตได้หลากหลายด้าน ทำให้ระบบไอน้ำกลายเป็นโครงสร้างพื้นฐานที่สำคัญของภาคการผลิตโดยเฉพาะอุตสาหกรรมที่ต้องการพลังงานความร้อนในปริมาณมากอย่างสม่ำเสมอ

โดยทั่วไป ระบบไอน้ำประกอบด้วยสามส่วนหลัก ได้แก่ (1) หม้อไอน้ำ (Boiler) ทำหน้าที่ผลิตไอน้ำที่มีอุณหภูมิและความดันตามที่กระบวนการผลิตต้องการ โดยใช้พลังงานจากแหล่งเชื้อเพลิงต่าง ๆ เพื่อให้ความร้อนแก่น้ำและเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำ (2) ระบบส่งจ่ายไอน้ำ (Steam Distribution System) ทำหน้าที่ลำเลียงไอน้ำจากหม้อไอน้ำไปยังจุดใช้งานต่าง ๆ ภายในโรงงาน และ (3) ระบบนำกลับไอน้ำควบแน่น (Condensate Return System) ทำหน้าที่รวบรวมน้ำร้อนที่ได้จากการควบแน่นไอน้ำหลังใช้งาน และส่งกลับเข้าสู่หม้อไอน้ำเพื่อนำมาใช้ใหม่ (Department of Alternative Energy Development and Efficiency, 2010) ซึ่งแต่ละส่วนล้วนมีบทบาทสำคัญทั้งในด้านประสิทธิภาพของการส่งผ่านพลังงาน ความร้อน และความปลอดภัยของระบบ หากองค์ประกอบใดมีข้อบกพร่องหรือติดตั้งไม่ถูกต้อง อาจส่งผลให้เกิดการสูญเสียพลังงาน การทำงานไม่ต่อเนื่อง หรือแม้แต่เกิดอุบัติเหตุที่รุนแรง ทั้งนี้ในภาพรวม กระบวนการก่อสร้างและติดตั้งระบบไอน้ำในโรงงานอุตสาหกรรมเป็นงานที่มีความซับซ้อน ประกอบด้วยหลายขั้นตอนที่เกี่ยวข้องกับแรงงาน วัสดุอุปกรณ์ เครื่องจักร และสภาพแวดล้อมการทำงาน ซึ่งมีอันตรายแฝงในทุกขั้นตอนของการดำเนินงาน ทั้งอันตรายทางกายภาพ ความร้อน แรงดัน สารเคมี รวมถึงความเสี่ยงด้านการทำงานในที่สูง การใช้เครื่องมือกล และเครื่องจักรกลหนัก ดังนั้น การวิเคราะห์อันตรายอย่างรอบด้าน การประเมินความเสี่ยง การวางแผนป้องกัน และกำหนดมาตรการควบคุมที่มีประสิทธิภาพ จึงเป็นสิ่งจำเป็นต่อความปลอดภัยในการทำงาน จากการสำรวจงานวิจัยก่อนหน้าพบว่างานส่วนใหญ่มุ่งเน้นการวิเคราะห์ความเสี่ยงในส่วนของหม้อไอน้ำ เนื่องจากเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานความร้อนโดยตรง และมีความเสี่ยงสูงที่จะก่อให้เกิดอุบัติเหตุร้ายแรงที่ส่งผล

กระทบในวงกว้าง นอกจากนี้ การติดตั้งและใช้งานหม้อไอน้ำยังอยู่ภายใต้การควบคุมของกฎหมายและมาตรฐานด้านความปลอดภัยหลายฉบับ ทำให้เกิดการวิจัยเพื่อรองรับและพัฒนามาตรฐานเหล่านั้นอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่การศึกษาความเสี่ยงในส่วนในระบบท่อส่งไอน้ำยังมีข้อมูลอยู่จำกัด ทั้งที่ระบบดังกล่าวเป็นองค์ประกอบสำคัญที่เชื่อมโยงการกระจายพลังงานความร้อนไปยังจุดต่าง ๆ และต้องทำงานภายใต้แรงดันและอุณหภูมิสูงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งหากขาดมาตรการควบคุมที่มีประสิทธิภาพก็อาจนำไปสู่เหตุการณ์ร้ายแรงที่ส่งผลกระทบทั้งต่อบุคลากร ทรัพย์สิน และการทำงานของระบบได้เช่นเดียวกับหม้อไอน้ำ การศึกษาความเสี่ยงในการติดตั้งระบบท่อจึงมีความสำคัญในการช่วยเติมเต็มองค์ความรู้ด้านความปลอดภัยในระบบไอน้ำอย่างเป็นองค์รวม ดังนั้น ในการดำเนินงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาความเสี่ยงด้านความปลอดภัยในการติดตั้งระบบท่อส่งไอน้ำเพื่อนำไปสู่แนวทางควบคุมความเสี่ยงที่เป็นระบบ และสามารถใช้เป็นฐานข้อมูลเพื่อพัฒนาคู่มือการปฏิบัติงานและมาตรฐานความปลอดภัยในอุตสาหกรรมให้มีความชัดเจนและครอบคลุมมากยิ่งขึ้น

กระบวนการติดตั้งท่อส่งไอน้ำประกอบด้วยขั้นตอนที่หลากหลาย ทั้งการจัดเตรียมอุปกรณ์และพื้นที่ก่อสร้าง การขนย้ายท่อและอุปกรณ์ การยกและติดตั้งท่อ การเชื่อมต่อท่อและอุปกรณ์ประกอบ การทดสอบแรงดัน การตรวจสอบการรั่วไหล และการปรับสภาพระบบก่อนใช้งาน ซึ่งแต่ละขั้นตอนต่างมีอันตรายแฝงอยู่หลายด้าน ทำให้แม้โครงการก่อสร้างต่าง ๆ จะมีการกำหนดมาตรการด้านความปลอดภัยอยู่แล้ว แต่ยังพบการเกิดอุบัติเหตุจากการทำงาน ดังเห็นได้จากข้อมูลอุบัติเหตุในงานติดตั้งท่อของบริษัทก่อสร้างกรณีศึกษา ในช่วงปี พ.ศ. 2562–2566 จำนวน 8 โครงการ มีอุบัติเหตุจากการทำงานถึงขนาดเจ็บเกิดขึ้นถึง 17 ครั้ง สะท้อนถึงความจำเป็นในการปรับปรุงมาตรการด้านความปลอดภัยให้มีประสิทธิภาพสูงยิ่งขึ้น ซึ่ง ผู้วิจัยมีกรอบแนวคิดในการนำเทคนิคการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น (Analytic Hierarchy Process: AHP) มาประยุกต์ใช้ในการประเมินความเสี่ยงของแต่ละขั้นตอนในการติดตั้งท่อส่งไอน้ำ เพื่อประโยชน์ในการจัดลำดับความสำคัญของมาตรการควบคุมความเสี่ยงและเสริมสร้างระดับความปลอดภัยให้กับโครงการติดตั้งระบบท่อส่งไอน้ำ

เทคนิค AHP เป็นหนึ่งในวิธีการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ (Multi-Criteria Decision Making: MCDM) ที่เหมาะสมสำหรับใช้ในงานวิเคราะห์ความเสี่ยงที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยหลายด้าน ผ่านกระบวนการเปรียบเทียบรายคู่ (Pairwise Comparison) และจัดโครงสร้างข้อมูลในรูปแบบลำดับชั้น (Hierarchy) ข้อดีของ AHP คือ ช่วยให้กระบวนการตัดสินใจมีความเป็นระบบ ตรวจสอบย้อนกลับได้ และรองรับทั้งข้อมูลเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ จึงเหมาะกับการประเมินที่ต้องอาศัยความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญ หรือการพิจารณาปัจจัยที่ไม่สามารถวัดได้โดยตรง การประยุกต์ใช้ AHP ในการประเมินความเสี่ยงสามารถช่วยสะท้อนมุมมองของผู้ประเมินได้อย่างครบถ้วน พร้อมทั้งเน้นให้เห็นปัจจัยที่มีความสำคัญสูงสุดในแต่ละประเด็นได้อย่างเป็นระบบ (Saravitra, 2016) เมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคการประเมินความเสี่ยงอื่น ๆ เช่น Expected Monetary Value (EMV), Fault Tree Analysis (FTA), Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) หรือ Layer of Protection Analysis (LOPA) (Ericson, 2015) พบว่าเทคนิคเหล่านี้แม้จะมีประโยชน์ในการวิเคราะห์เชิงสถิติและเหตุการณ์เฉพาะ แต่ยังมีข้อจำกัดในการจัดการกับข้อมูลเชิงคุณภาพ และไม่สามารถสะท้อนลำดับความสำคัญของปัจจัยที่หลากหลายได้อย่างครอบคลุมในคราวเดียว อีกทั้งยังมักตั้งอยู่บนสมมติฐานว่าความเสี่ยงสามารถประเมินได้จากข้อมูลที่เป็นตัวเลขหรือค่าความน่าจะเป็น ซึ่งไม่เหมาะกับงานที่มีข้อมูลจำกัด และต้องพึ่งพาดุลยพินิจของผู้เชี่ยวชาญ ในทางตรงกันข้าม AHP มีความยืดหยุ่นสูง สามารถผสานข้อมูลเชิงปริมาณและความคิดเห็นเชิงคุณภาพเข้าด้วยกัน ช่วยให้สามารถประเมินสถานการณ์ที่มีข้อมูลไม่ครบถ้วนได้อย่างมีเหตุผล อีกทั้งกระบวนการเปรียบเทียบเป็นคู่ยังช่วยลดอคติจากการประเมินแบบรวมยอด (Holistic) และตรวจสอบความสอดคล้อง (Consistency) ของการตัดสินใจได้

ที่ผ่านมา เทคนิค AHP ได้รับการนำไปประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในหลายสาขา ทั้งด้านการจัดสรรทรัพยากร การวางแผนกลยุทธ์ การคัดเลือกเทคโนโลยี และการประเมินโครงการด้านเศรษฐกิจ โดยส่วนใหญ่มุ่งเน้นไปที่การวิเคราะห์ความคุ้มค่า เช่น การใช้ทรัพยากรภายใต้ข้อจำกัดของงบประมาณ เวลา หรือข้อจำกัดด้านเทคโนโลยี โดยมีเป้าหมายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพหรือผลตอบแทนทางเศรษฐกิจ อย่างไรก็ตาม การประยุกต์ใช้ AHP ในบริบทของความปลอดภัยในการทำงาน โดยเฉพาะในภาคการก่อสร้างยังพบได้ไม่มากนัก งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการใช้จุดแข็งของ AHP ในการวิเคราะห์และจัดลำดับ

ความเสี่ยงของขั้นตอนต่าง ๆ ในกระบวนการติดตั้งระบบท่อส่งไอน้ำซึ่งเป็นงานที่มีอันตรายแฝงหลายประการ และยังมีช่องว่างของการศึกษาในเชิงระบบ การนำ AHP มาใช้จะช่วยทำให้สามารถจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยเสี่ยงได้อย่างมีเหตุผลบนพื้นฐานของเกณฑ์ที่ชัดเจน ลดอคติในการตัดสินใจ และช่วยให้สามารถออกแบบมาตรการควบคุมความเสี่ยงได้สอดคล้องกับบริบทจริงของงานก่อสร้าง ผู้วิจัยมุ่งหวังว่าผลการศึกษานี้จะช่วยทำให้ทราบถึงขั้นตอนการทำงานติดตั้งท่อส่งไอน้ำที่มีความเสี่ยงสูงสุด เพื่อให้สามารถกำหนดลำดับความสำคัญในการวางแผนควบคุมความเสี่ยงได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังสามารถประยุกต์เป็นแนวทางหรือแม่แบบในการประเมินความเสี่ยงด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสิ่งแวดล้อมในการทำงานสำหรับโครงการอื่น ๆ ในอนาคต โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อจัดลำดับความเสี่ยงของขั้นตอนการติดตั้งท่อส่งไอน้ำ โดยประยุกต์ใช้กระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น

2. วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยแบบผสมผสาน (Mixed Methods Research) โดยใช้การวิเคราะห์เชิงคุณภาพควบคู่กับการวิเคราะห์เชิงปริมาณ เพื่อประเมินและจัดลำดับความเสี่ยงของขั้นตอนต่าง ๆ ในกระบวนการติดตั้งระบบท่อส่งไอน้ำ มีรายละเอียดของการดำเนินการวิจัย มีดังนี้

2.1 การวิเคราะห์กิจกรรมและจำแนกขั้นตอนหลักในกระบวนการติดตั้งท่อส่งไอน้ำ

การวิเคราะห์กิจกรรมในกระบวนการติดตั้งท่อส่งไอน้ำอาศัยข้อมูลจากคู่มือปฏิบัติงานและเอกสารขออนุญาตทำงานของโครงการก่อสร้างระบบท่อส่งไอน้ำจำนวน 2 โครงการ ซึ่งมีขนาดของโครงการแตกต่างกันแบ่งตามมูลค่าของงาน คือโครงการที่มีมูลค่าเกิน 100 ล้านบาท และโครงการที่มีมูลค่าอยู่ในช่วง 50–100 ล้านบาท ข้อมูลสำคัญที่ศึกษาได้แก่ กิจกรรมย่อยต่าง ๆ ในกระบวนการติดตั้งท่อส่งไอน้ำ ลักษณะการปฏิบัติงาน วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือและเครื่องจักรที่ใช้ สภาพแวดล้อมของพื้นที่ปฏิบัติงาน อันตรายแฝง รวมถึงจุดที่ควรระวัง หรืออุบัติเหตุที่เคยเกิดขึ้น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อจำแนกขั้นตอนหลักของงานติดตั้งท่อส่งไอน้ำ โดยแบ่งตามลักษณะกิจกรรม อันตรายแฝง และลำดับขั้นตอนในการปฏิบัติงาน

2.2 การกำหนดโครงสร้างลำดับชั้นของการประเมินความเสี่ยงตามหลักการ AHP

โครงสร้างลำดับชั้น (Hierarchy Structure) ตามหลักการ AHP ประกอบด้วย 3 ลำดับชั้น คือ เป้าหมาย (Goal) เกณฑ์การตัดสินใจ (Criteria) และทางเลือก (Alternatives) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้กำหนดรายละเอียดของแต่ละลำดับชั้น ได้แก่

ลำดับชั้นที่ 1 เป้าหมาย (Goal) คือ การจัดลำดับความเสี่ยงของขั้นตอนการติดตั้งท่อส่งไอน้ำ

ลำดับชั้นที่ 2 เกณฑ์การตัดสินใจ (Criteria) คือ ปัจจัยที่ใช้ในการประเมินความเสี่ยงของแต่ละขั้นตอนในการติดตั้งท่อส่งไอน้ำ โดยเกณฑ์เหล่านี้จะถูกใช้เป็นกรอบการตัดสินใจในการเปรียบเทียบความเสี่ยงระหว่างขั้นตอนการติดตั้งทีละคู่ (Pairwise Comparison) เพื่อพิจารณาว่าขั้นตอนใดมีความเสี่ยงมากกว่าเมื่อประเมินภายใต้เกณฑ์เดียวกัน

เกณฑ์การประเมินความเสี่ยงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้จากการทบทวนเอกสารมาตรฐานและแนวปฏิบัติที่เกี่ยวข้องกับการประเมินความเสี่ยง ได้แก่ แนวทางของกรมสวัสดิการและคุ้มครองแรงงาน มาตรฐาน ISO 45001 และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อกำหนดเกณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับการเปรียบเทียบแบบเป็นคู่ในการประเมินความเสี่ยงในงานวิจัยนี้

ลำดับชั้นที่ 3 ทางเลือก (Alternatives) คือ ขั้นตอนหลักแต่ละขั้นในกระบวนการติดตั้งท่อส่งไอน้ำ ที่ต้องได้รับการประเมินและจัดลำดับความเสี่ยงภายใต้เกณฑ์ที่กำหนด

2.3 การจัดทำแบบสอบถามการเปรียบเทียบแบบเป็นคู่ และการประเมินความเสี่ยงโดยผู้เชี่ยวชาญ

แบบสอบถามการเปรียบเทียบแบบเป็นคู่เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการรวบรวมความคิดเห็นจากผู้เชี่ยวชาญ โดยมีโครงสร้างอ้างอิงตามโครงสร้างลำดับชั้นของการประเมินความเสี่ยงตามหลักการ AHP ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ได้แก่

- (1) การเปรียบเทียบรายคู่ในระดับเกณฑ์การตัดสินใจ (เกณฑ์ด้านความเสี่ยง)
- (2) การเปรียบเทียบรายคู่ในระดับทางเลือก (ขั้นตอนการทำงาน)

การเปรียบเทียบแต่ละคู่ดำเนินการโดยใช้ค่าตัวเลข 1–9 เพื่อแสดงระดับความสำคัญเชิงสัมพัทธ์ของปัจจัยทั้งสอง ตามมาตราส่วนที่พัฒนาโดย Saaty (2008) ตัวเลขแต่ละค่ามีคำอธิบายดังแสดงในตารางที่ 1 (Table 1.)

Table 1. Scales of relative importance according to Saaty for Pairwise Comparison

Intensity of Importance	Explanation
1	- Both factors contribute equally to the objective.
3	- One factor is moderately more important than the other.
5	- One factor is strongly more important than the other.
7	- One factor is very strongly more important than the other.
9	- One factor is of the highest importance compared to the other.
2, 4, 6, 8	- Intermediate levels of importance between the main scale values; when compromise is needed

Adapted from Saaty (2008)

จำนวนครั้งในการวินิจฉัยเปรียบเทียบเป็นคู่ คำนวณได้จากสมการที่ (1)

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

เมื่อ N = จำนวนครั้งในการวินิจฉัยเปรียบเทียบ

n = จำนวนปัจจัยที่ถูกนำมาเปรียบเทียบเป็นคู่ ๆ

การประเมินความเสี่ยงดำเนินการโดยใช้แบบสอบถามที่จัดทำขึ้น ส่งให้กับผู้เชี่ยวชาญด้านความปลอดภัยและการติดตั้งท่อส่งไอน้ำ จำนวน 5 ท่านจากโครงการกรณีศึกษา ซึ่งแต่ละท่านมีคุณสมบัติตามตารางที่ 2 (Table 2.) และทุกท่านต้องเคยผ่านการอบรมหรือมีความรู้ในการประเมินความเสี่ยง เข้าใจกระบวนการ AHP และดำเนินการประเมินได้อย่างถูกต้อง

Table 2. Expert Qualifications

Expert Group	Number of respondents	Qualifications
Safety Manager/ Professional Safety Office/ Technical Safety Officer	3	- Experienced in steam pipeline installation safety
Mechanical Engineer (Associate Level)	1	- Involved in design and technical aspects of steam pipeline systems
Mechanical Supervisor	1	- Directly supervises installation activities
Total	5	

2.4 การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยเทคนิค AHP เพื่อการจัดลำดับความเสี่ยงของขั้นตอนการติดตั้งท่อส่งไอน้ำ

การวิเคราะห์ข้อมูลตามหลักการของ AHP เป็นการนำค่าคะแนนจากการเปรียบเทียบเป็นคู่ที่รวบรวมได้จากแบบสอบถามมาวิเคราะห์เพื่อหาค่าน้ำหนักความสำคัญของแต่ละปัจจัย (เกณฑ์ความเสี่ยง และขั้นตอนการติดตั้ง) ที่นำมาเปรียบเทียบกัน พร้อมทั้งตรวจสอบค่าความสอดคล้อง (Consistency Ratio: CR) ของการตัดสินใจ ซึ่งต้องมีค่าไม่เกิน 0.1 เพื่อรับรองความสมเหตุสมผลของการประเมิน โดยมีขั้นตอนและสมการที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

(1) การสร้างเมทริกซ์ของการเปรียบเทียบเป็นคู่ (Pairwise Comparison Matrix)

จากข้อมูลการเปรียบเทียบเป็นคู่ ระหว่างเกณฑ์ความเสี่ยงทุกด้าน และระหว่างขั้นตอนการทำงานทุกขั้นตอน นำมาสร้างเมทริกซ์จัตุรัส (Square Matrix) A ขนาด $n \times n$ โดยมีสมาชิกใน A เป็นค่าตัวเลขของคะแนนประเมิน (Rating Score) จากการเปรียบเทียบเป็นคู่ซึ่งถูกปรับค่าให้เป็น 1 แล้ว ดังสมการ (2)

$$A = [a_{ij}] \quad (2)$$

โดยที่ $a_{ij} = 1$ เมื่อ $i = j$ และ $a_{ij} = 1/a_{ji}$ เมื่อ $i \neq j$

n = จำนวนปัจจัยที่ถูกนำมาเปรียบเทียบ

(2) การคำนวณเวกเตอร์น้ำหนัก (Weight Vector)

ใช้วิธีค่าลักษณะเฉพาะ (Eigenvalue Method) เพื่อคำนวณหาค่าน้ำหนักความสำคัญของแต่ละเกณฑ์ความเสี่ยง และแต่ละขั้นตอนการติดตั้งที่นำมาเปรียบเทียบกัน ดังรูปแบบสมการ (3)

$$Aw = \lambda_{\max} w \quad (3)$$

เมื่อ w คือ Eigenvector (เวกเตอร์น้ำหนักความสำคัญ)

$\lambda_{\max}$ คือ Eigenvalue ที่มีค่าสูงสุด

(3) การตรวจสอบความสอดคล้อง (Consistency Check)

- หาค่าดัชนีแสดงถึงความสอดคล้อง (Consistency Index, C.I.) จากสมการ (4)

$$C.I. = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{n - 1} \quad (4)$$

- หาค่าอัตราส่วนความสอดคล้องกันของเหตุผล (Consistency Ratio: C.R.) จากสมการ (5)

$$C.R. = C.I./R.I. \quad (5)$$

โดยที่ R.I. คือค่า Random Index ซึ่งมีค่าตามขนาดของเมทริกซ์ หรือจำนวนปัจจัยที่นำมาเปรียบเทียบ ซึ่งมีค่าดังในตารางที่ 3 (Table 3.)

Table 3. Random Index Values (R.I) Based on Matrix Size.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
R.I	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57

Saaty (1980)

อัตราส่วนความสอดคล้อง (Consistency Ratio: C.R.) เป็นตัวชี้วัดความสอดคล้องของการให้คะแนนเปรียบเทียบเป็นคู่ของผู้เชี่ยวชาญตามหลักการของวิธี AHP โดยใช้ในการตรวจสอบว่าการให้คะแนนมีความสอดคล้องในเชิงตรรกะเพียงพอหรือไม่ โดยทั่วไป หากค่า C.R. มีค่าไม่เกิน 0.1 จะถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ และสามารถให้ค่าคะแนนดังกล่าวไปคำนวณหาค่าน้ำหนักสัมพัทธ์เพื่อจัดลำดับความสำคัญของเกณฑ์หรือทางเลือกต่าง ๆ ได้อย่างเหมาะสม

(4) การหาค่าถ่วงน้ำหนักรวมของความเสี่ยง (Overall Weighted Risk) ของแต่ละขั้นตอนการติดตั้งท่อส่งไอน้ำ เมื่อได้ค่าน้ำหนักความสำคัญของแต่ละเกณฑ์ความเสี่ยง และแต่ละขั้นตอนการทำงาน นำมาคำนวณหาค่าถ่วงน้ำหนักรวม (Overall Weighted Risk: WRA) โดยใช้สมการ (6)

$$WRA_j = \sum (W_{pi} W_{cij}) \quad (6)$$

โดยที่ WRA_j = คะแนนถ่วงน้ำหนักรวม สำหรับขั้นตอนการติดตั้งท่อส่งไอน้ำ ลำดับที่ j

W_{pi} = ค่าน้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์ความเสี่ยงลำดับที่ i

W_{cij} = ค่าน้ำหนักความเสี่ยงของขั้นตอนการทำงานลำดับที่ j ภายใต้เกณฑ์ความเสี่ยงลำดับที่ i

2.5 การจัดลำดับความเสี่ยงของแต่ละขั้นตอนในกระบวนการติดตั้งท่อส่งไอน้ำ

ค่าคะแนนถ่วงน้ำหนักรวม (WSA) ที่ได้จากการคำนวณในขั้นตอนที่ 2.5 ถูกนำมาใช้ในการจัดลำดับความเสี่ยงของแต่ละขั้นตอนในกระบวนการติดตั้งท่อส่งไอน้ำ โดยพิจารณาจากลำดับของค่าคะแนนถ่วงน้ำหนักรวม ซึ่งขั้นตอนที่มีคะแนนถ่วงน้ำหนักรวมสูงสุดจะถูกจัดให้อยู่ในลำดับความเสี่ยงสูงสุด และลดหลั่นลงมาตามลำดับค่าคะแนนที่ต่ำลง เพื่อระบุขั้นตอนการทำงานที่ควรได้รับความสำคัญเป็นลำดับแรกในการควบคุมและป้องกันความเสี่ยง

3. ผลการวิจัย

3.1 การจำแนกขั้นตอนหลักของกระบวนการติดตั้งท่อส่งไอน้ำ

จากการศึกษาขั้นตอนการปฏิบัติงาน (SOP) และเอกสารขออนุญาตทำงาน (Work Permit) ของโครงการกรณีศึกษา โดยการวิเคราะห์ลักษณะของแต่ละกิจกรรมย่อยตามลำดับการปฏิบัติงานจริงในโครงการ และใช้เทคนิคการวิเคราะห์งานเพื่อความปลอดภัย (Job Safety Analysis: JSA) ในการระบุอันตรายที่อาจเกิดขึ้น พบว่า สามารถจำแนกขั้นตอนหลักในกระบวนการติดตั้งท่อส่งไอน้ำได้เป็น 8 ขั้นตอน ได้แก่

3.1.1 การขนส่งท่อไอน้ำ (Transportation of Steam Pipes) เป็นการขนส่งท่อจากโรงงานผลิตไปยังสถานที่ก่อสร้าง โดยใช้รถเทรลเลอร์ขนส่งท่อตามเส้นทางที่มีการวางแผนไว้เพื่อความปลอดภัยและไม่กระทบต่อผู้ใช้ทางสาธารณะ

3.1.2 การยกประกอบท่อในพื้นที่ราบ (Ground-Level Pipe Lifting and Assembly) โดยใช้เครนเคลื่อนที่ทำการยกท่อไอน้ำขึ้นวางบนจตุรองรับ (Pipe Support) ที่จัดเตรียมไว้บนระดับพื้นดิน จากนั้นใช้รอกหรือ Chain Block ช่วยจัดแนวท่อ (Line-Up) ให้ตรงตามแบบวิศวกรรม พร้อมตรวจสอบระดับ ความสูง และระยะห่างของจุดยึด เพื่อความมั่นคงก่อนการเชื่อม

3.1.3 การยกประกอบท่อบนพื้นที่สูง (Elevated Pipe Lifting and Assembly) โดยใช้เครนเคลื่อนที่ยกท่อขึ้นไปยังโครงสร้างนั่งร้านหรือ Pipe Rack ที่อยู่เหนือพื้นดิน จากนั้นใช้รอกเพื่อจัดแนวท่อให้ได้ตำแหน่งตามแบบ

3.1.4 การเชื่อมท่อ (Pipe Welding) ช่างเชื่อมจะทำการจัดแนว (Line-Up) และเชื่อมตามแนว จากนั้นใช้หินเจียรแต่งแนวรอยต่อให้เรียบ และตรวจสอบเบื้องต้นด้วยกระบวนการ PT (Penetrant Testing) ซึ่งเป็นการใช้สเปรย์ตรวจสอบรอยร้าวหรือรูพรุน

3.1.5 การทดสอบแนวเชื่อมด้วยรังสี (Radiographic Testing) โดยใช้รังสีแกมมา (Gamma Ray) ฉายผ่านแนวเชื่อมเพื่อตรวจสอบความสมบูรณ์ภายใน การดำเนินการมักทำในเวลากลางคืนเพื่อความปลอดภัย

3.1.6 การหุ้มฉนวนกันความร้อน (Thermal Insulation) ใช้วัสดุฉนวน (Rockwool) หุ้มรอบท่อไอน้ำ พร้อมทั้งตรวจสอบความต่อเนื่องของฉนวนและการยึดให้แน่นหนา เพื่อป้องกันการสูญเสียพลังงานและป้องกันผู้ปฏิบัติงานจากการสัมผัสผิวท่อที่มีอุณหภูมิสูง

3.1.7 การทดสอบแรงดันและทำความสะอาดท่อ (Pressure Testing and Cleaning) เป็นการเติมน้ำสะอาดเข้าในท่อแล้วอัดแรงดันถึง 150 บาร์ เพื่อทดสอบการรั่วซึม และใช้ไอน้ำแรงดันสูงเป่าไล่ตะกอนและสนิมที่อาจตกค้าง เพื่อให้ท่อสะอาดพร้อมใช้งาน การทดสอบทั้งสองต้องติดตั้งมาตรวัดความดัน (Pressure Gauge) วาล์วนิรภัย (Relief Valve) และใช้เครื่องมือวัดอย่างแม่นยำ

3.1.8 การบรรจุก๊าซไนโตรเจนเข้าในท่อ (Nitrogen Gas Filling into Pipeline) หลังจากทดสอบและทำความสะอาดเรียบร้อยแล้ว โดยการเติมก๊าซไนโตรเจนเข้าในท่อเพื่อป้องกันการเกิดสนิมภายในท่อก่อนการจ่ายไอน้ำจริง เป็นการรักษาสภาพภายในท่อให้อยู่ในสภาวะปลอดความชื้น (Inert Condition)

ขั้นตอนการทำงานทั้ง 8 ขั้นตอน มีอันตรายแฝงที่อาจส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน ดังแสดงใน Table 4. ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในแต่ละขั้นตอนมีลักษณะของอันตรายที่เฉพาะเจาะจง ตามลักษณะของกิจกรรมที่ดำเนินการในแต่ละขั้นตอน ทั้งนี้ การระบุอันตรายแฝงในแต่ละขั้นตอนจะช่วยให้สามารถวิเคราะห์ความเสี่ยงได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเป็นแนวทางสำคัญในการวางแผนควบคุมและป้องกันอุบัติเหตุในกระบวนการติดตั้งระบบท่อส่งไอน้ำอย่างเป็นระบบและครอบคลุมครอบคลุม

Table 4. Installation Work Steps and Associated Potential Hazards

Work Steps		Potential Hazards
1	Transportation of steam pipes	1.1 Hazard from road transportation accidents.
		1.2 Hazard from pipe falling and hitting the ground during transport.
		1.3 Hazard from steel pipe crushing worker's fingers.
		1.4 Hazard from improper use of lifting tools and equipment.
		1.5 Hazard from intoxicated driver.
2	Ground-level pipe lifting and assembly	2.1 Hazard from forklift tipping over.
		2.2 Hazard from broken or damaged hoist.
		2.3 Hazard from crane contacting 24 kV power lines, causing electric shock.
		2.4 Hazard from broken lifting sling.
		2.5 Hazard from pipe striking hands.
		2.6 Hazard from public vehicle rear-ending the crane during pipe lifting.
		2.7 Hazard from improper lifting posture or lifting excessive weight.
3	Elevated pipe lifting and assembly	3.1 Hazard of falling from height.
		3.2 Hazard from pipe sliding off scaffolding.
		3.3 Hazard from falling tools or materials.
4	Pipe welding	4.1 Hazard from welding arc light.
		4.2 Hazard from welding fumes and fine dust.
		4.3 Hazard from welding heat.
		4.4 Hazard of fire caused by sparks contacting flammable materials.
		4.5 Hazard of electric shock.
		4.6 Hazard from grinding wheel kickback causing hand injury.
5	Radiographic Testing (RT Test)	5.1 Hazard of damage to skin cells and tissue.
		5.2 Hazard from high radiation exposure, potentially fatal.
		5.3 Risk of cancer from prolonged exposure.
6	Thermal insulation	6.1 Hazard from insulation dust affecting the respiratory system.
		6.2 Hazard from skin irritation.
		6.3 Hazard from eye irritation.
		6.4 Hazard of finger cuts or pinching from utility knife or tools.
7	Pressure Testing and Cleaning	7.1 Hazard from pipe or flange explosion.
		7.2 Hazard from debris or residue ejected from inside the pipe.
		7.3 Hazard from wet and slippery floor surfaces.
8	Nitrogen Gas Filling into Pipeline	8.1 Hazard from explosion of valve or fittings.
		8.2 Hazard of frostbite from extremely cold gas exposure.

3.2 โครงสร้างลำดับชั้นของการประเมินความเสี่ยงตามหลักการ AHP

โครงสร้างลำดับชั้นของการประเมินความเสี่ยงตามหลักการ AHP เพื่อใช้ในการจัดลำดับความเสี่ยงของขั้นตอนการติดตั้งท่อส่งไอน้ำ มีลักษณะดังแสดงใน Figure 1.

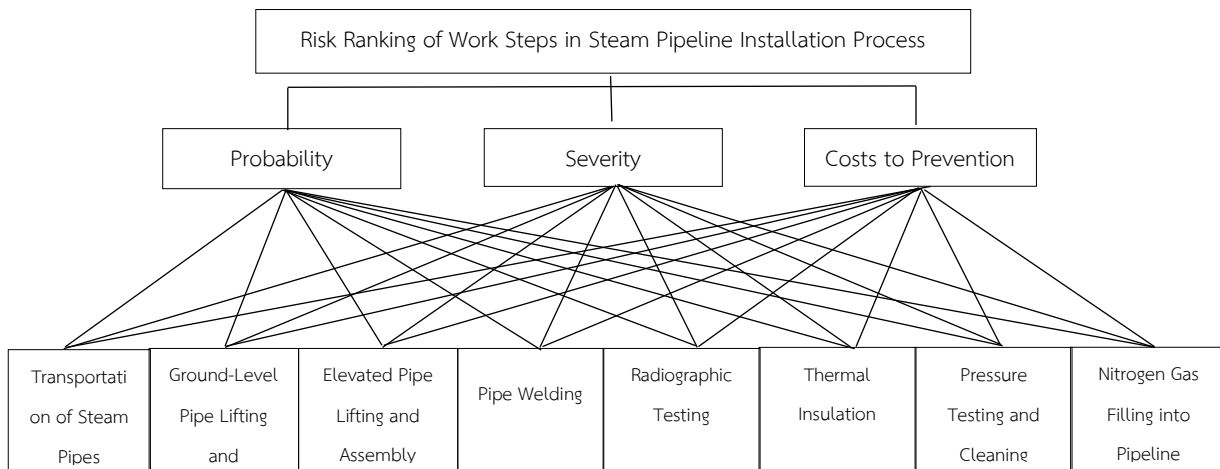


Figure 1. Hierarchical Diagram for Steam Pipeline Installation Steps

โครงสร้างลำดับชั้นใน Figure 1. ประกอบด้วย

ลำดับชั้นที่ 1: เป้าหมายหลักของการประเมิน (Goal) คือ การจัดลำดับความเสี่ยงของขั้นตอนการติดตั้งท่อส่งไอน้ำ

ลำดับชั้นที่ 2: เกณฑ์ในการประเมินความเสี่ยง (Criteria) ได้แก่ ปัจจัยที่ใช้ในการตัดสินใจเพื่อเปรียบเทียบความเสี่ยงแบบเป็นคู่ระหว่างแต่ละขั้นตอนในกระบวนการติดตั้งท่อส่งไอน้ำ จากการศึกษาทบทวนเอกสาร แนวทางปฏิบัติของหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ตลอดจนงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่ามีปัจจัยหลักที่มักใช้ในการพิจารณาความเสี่ยงอยู่ 3 ด้าน (Kanesan, 2021) ซึ่งผู้วิจัยได้นำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการประเมินความเสี่ยงในครั้งนี้ ได้แก่

ความน่าจะเป็นของการเกิดอันตราย (Probability) พิจารณาจากความถี่หรือความเป็นไปได้ที่อันตรายจะเกิดขึ้นจากขั้นตอนการทำงานนั้น

ความรุนแรง (Severity) พิจารณาจากระดับผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นต่อผู้ปฏิบัติงาน หากอันตรายนั้นเกิดขึ้นจริง

ค่าใช้จ่ายในการป้องกัน (Costs to prevention) พิจารณาจากทรัพยากรหรือต้นทุนที่จำเป็นในการดำเนินการมาตรการป้องกันหรือควบคุมความเสี่ยง เพื่อให้อันตรายที่อาจเกิดขึ้นจากขั้นตอนการทำงานนั้นอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

ลำดับชั้นที่ 3: ทางเลือก (Alternatives) คือ ขั้นตอนหลักในกระบวนการติดตั้งท่อส่งไอน้ำจำนวน 8 ขั้นตอน ได้แก่ (1) การขนส่งท่อ (2) การยกประกอบท่อในพื้นที่ราบ (3) การยกประกอบท่อบนพื้นที่สูง (4) การเชื่อมท่อ (5) การทดสอบแนวเชื่อมด้วยรังสี (6) การหุ้มฉนวนกันความร้อน (7) การทดสอบแรงดันและทำความสะอาดท่อ และ (8) การบรรจุก๊าซไนโตรเจนเข้าในท่อ

ตามโครงสร้างลำดับชั้นดังกล่าว การประเมินความเสี่ยงโดยการเปรียบเทียบเป็นคู่จึงแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ดังนี้

ส่วนที่ 1 เป็นการเปรียบเทียบความสำคัญของเกณฑ์การประเมินความเสี่ยงทั้ง 3 ด้าน ได้แก่ ความน่าจะเป็นของการเกิดอันตราย ความรุนแรงของอันตราย และค่าใช้จ่ายในการป้องกัน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าน้ำหนักของแต่ละเกณฑ์

ส่วนที่ 2 เป็นการประเมินความเสี่ยงของขั้นตอนการติดตั้งท่อส่งไอน้ำทั้ง 8 ขั้นตอน โดยการเปรียบเทียบความเสี่ยงของขั้นตอนต่าง ๆ ที่ระบุ เพื่อหาค่าน้ำหนักของแต่ละขั้นตอนภายใต้เกณฑ์ความเสี่ยงแต่ละด้าน

3.3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากการเปรียบเทียบรายคู่โดยผู้เชี่ยวชาญ ตามหลักการของ AHP

จากข้อมูลตัวเลखระดับความสำคัญซึ่งได้มาจากการประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญจำนวน 5 ท่าน ผ่านแบบสอบถามการเปรียบเทียบเป็นคู่ นำมาวิเคราะห์หาค่าน้ำหนักสัมพัทธ์ (Relative Weight) ตามหลักการ AHP พร้อมตรวจสอบค่าความสอดคล้องของการประเมิน (C.R.) มีผลการวิเคราะห์ดังนี้

3.3.1 ผลการวิเคราะห์ความสำคัญของเกณฑ์การประเมินความเสี่ยง

ผลการวิเคราะห์ความสำคัญของเกณฑ์การประเมินความเสี่ยง มีค่าน้ำหนักสัมพัทธ์ (Relative Weights) ของเกณฑ์แต่ละด้านดังแสดงใน Table 5.

Table 5. Relative Weights and Consistency Ratio (C.R.) of the Three Risk Assessment Criteria

Criteria	Expert 1	Expert 2	Expert 3	Expert 4	Expert 5	Average
Probability	0.142	0.210	0.163	0.159	0.210	0.177
Severity	0.428	0.240	0.297	0.251	0.548	0.353
Costs to Prevention	0.428	0.548	0.539	0.588	0.240	0.469
C.R.	0.000	0.016	0.008	0.046	0.016	

โดยภาพรวม ค่าน้ำหนักสัมพัทธ์ของเกณฑ์การประเมินความเสี่ยงทั้งสามด้าน พบว่า ผู้เชี่ยวชาญส่วนใหญ่ให้ค่าใช้จ่ายในการป้องกันอันตราย (Costs to Prevention) เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญสูงสุดในการประเมินความเสี่ยงของขั้นตอนการติดตั้งท่อส่งไอน้ำ โดยมีค่าน้ำหนักสัมพัทธ์เฉลี่ยเท่ากับ 0.469 รองลงมาคือ ความรุนแรงของอันตราย (Severity) เฉลี่ยเท่ากับ 0.353 และความน่าจะเป็นในการเกิดอันตราย (Probability) เฉลี่ยเท่ากับ 0.177

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาข้อมูลในรายบุคคล พบว่ามีผู้เชี่ยวชาญ 1 ท่านที่มีรูปแบบการให้ค่าน้ำหนักแตกต่างจากท่านอื่น โดยให้ค่าน้ำหนักสูงสุดกับความรุนแรงของอันตราย ขณะที่ให้ค่าน้ำหนักกับค่าใช้จ่ายในการป้องกันในระดับต่ำที่สุดจากความแตกต่างดังกล่าว ผู้วิจัยได้ดำเนินการสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญเพิ่มเติมเพื่อทำความเข้าใจมุมมองในการให้ค่าน้ำหนักพบว่า มุมมองของผู้เชี่ยวชาญต่อการประเมินความสำคัญของเกณฑ์ความเสี่ยงยังแตกต่างกันตามประสบการณ์และบทบาทหน้าที่ในการทำงาน กล่าวคือ ผู้เชี่ยวชาญที่ให้ความสำคัญกับค่าใช้จ่ายในการป้องกันอันตราย มักพิจารณาความคุ้มค่าของมาตรการควบคุมความเสี่ยงควบคู่กันไป โดยจากประสบการณ์พบว่าค่าใช้จ่ายที่สูงเกินไปอาจเป็นอุปสรรคต่อการดำเนินการมาตรการควบคุมที่มีประสิทธิภาพ และหากไม่สามารถควบคุมค่าใช้จ่ายได้อย่างเหมาะสม อาจส่งผลให้การจัดการความเสี่ยงขาดความยั่งยืนในระยะยาว ในทางกลับกัน ผู้เชี่ยวชาญที่ให้ความสำคัญกับความรุนแรงของอันตรายจะพิจารณาระดับความรุนแรงที่อาจเกิดขึ้นต่อชีวิตและสุขภาพของผู้ปฏิบัติงานเป็นปัจจัยสำคัญในการประเมินระดับความเสี่ยง ซึ่งควรใช้ในการกำหนดลำดับความสำคัญของมาตรการควบคุมความเสี่ยงก่อนปัจจัยด้านอื่น

ทั้งนี้ ผลการตรวจสอบอัตราส่วนความสอดคล้อง (Consistency Ratio: C.R.) ของผู้เชี่ยวชาญแต่ละท่าน พบว่ามีค่าไม่เกิน 0.1 (0.000–0.046) ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ตามหลักการ AHP สะท้อนว่าการให้คะแนนของผู้เชี่ยวชาญมีความสอดคล้องเพียงพอ จึงสามารถนำค่าคะแนนดังกล่าวไปคำนวณหาค่าน้ำหนักสัมพัทธ์เพื่อจัดลำดับความเสี่ยงของแต่ละขั้นตอนการทำงานได้อย่างเหมาะสม

3.3.2 ผลการวิเคราะห์ความเสี่ยงของขั้นตอนการทำงานภายใต้เกณฑ์การประเมินความเสี่ยงแต่ละด้าน

การวิเคราะห์ความเสี่ยงของขั้นตอนการทำงาน 8 ขั้นตอน ภายใต้เกณฑ์การประเมินความเสี่ยงแต่ละด้าน คือ ความน่าจะเป็น ความรุนแรง และค่าใช้จ่ายในการป้องกัน มีค่าน้ำหนักสัมพัทธ์ความเสี่ยง (Relative Risk Weight) ดังแสดงใน Table 6., 7. และ 8. ตามลำดับ

Table 6. Relative Risk Weights of Steam Pipeline Installation Steps under the Probability Criterion

Installation Steps	Expert 1	Expert 2	Expert 3	Expert 4	Expert 5	Average
Steam Pipeline Transportation	0.113	0.080	0.065	0.075	0.088	0.084
Ground-Level Pipe Lifting and Assembly	0.082	0.073	0.076	0.054	0.097	0.077
Elevated Pipe Lifting and Assembly	0.238	0.267	0.151	0.281	0.297	0.247
Pipe Welding	0.090	0.184	0.273	0.133	0.106	0.157
Radiographic Testing	0.147	0.100	0.092	0.109	0.193	0.128
Thermal Insulation	0.095	0.073	0.081	0.140	0.074	0.093
Pressure Testing and Cleaning	0.118	0.108	0.148	0.078	0.065	0.103
Nitrogen Gas Filling into Pipeline	0.113	0.111	0.112	0.126	0.076	0.108
C.R.	0.100	0.090	0.098	0.096	0.099	

Table 7. Relative Risk Weights of Steam Pipeline Installation Steps under the Severity Criterion.

Installation Steps	Expert 1	Expert 2	Expert 3	Expert 4	Expert 5	Average
Steam Pipeline Transportation	0.070	0.055	0.100	0.098	0.105	0.086
Ground-Level Pipe Lifting and Assembly	0.085	0.061	0.100	0.087	0.092	0.085
Elevated Pipe Lifting and Assembly	0.243	0.198	0.168	0.207	0.289	0.221
Pipe Welding	0.074	0.308	0.196	0.179	0.073	0.166
Radiographic Testing	0.118	0.118	0.143	0.127	0.163	0.134
Thermal Insulation	0.162	0.099	0.097	0.105	0.103	0.113
Pressure Testing and Cleaning	0.128	0.082	0.091	0.081	0.080	0.092
Nitrogen Gas Filling into Pipeline	0.116	0.075	0.101	0.112	0.091	0.099
C.R.	0.095	0.066	0.086	0.088	0.097	

Table 8. Relative Risk Weights of Steam Pipeline Installation Steps under the Costs of Prevention Criterion.

Installation Steps	Expert 1	Expert 2	Expert 3	Expert 4	Expert 5	Average
Steam Pipeline Transportation	0.070	0.105	0.117	0.095	0.104	0.098
Ground-Level Pipe Lifting and Assembly	0.118	0.092	0.089	0.066	0.067	0.086
Elevated Pipe Lifting and Assembly	0.289	0.289	0.308	0.286	0.287	0.292
Pipe Welding	0.168	0.073	0.074	0.069	0.067	0.090
Radiographic Testing	0.129	0.163	0.154	0.165	0.161	0.155
Thermal Insulation	0.078	0.103	0.101	0.077	0.106	0.093
Pressure Testing and Cleaning	0.056	0.080	0.063	0.149	0.113	0.092
Nitrogen Gas Filling into Pipeline	0.087	0.091	0.089	0.090	0.091	0.090
C.R.	0.098	0.097	0.094	0.081	0.100	

ผลการวิเคราะห์ค่าน้ำหนักสัมพัทธ์ของขั้นตอนการทำงานทั้ง 8 ขั้นตอน ภายใต้เกณฑ์การประเมินความเสี่ยงแต่ละด้าน แสดงให้เห็นรูปแบบที่สอดคล้องกันว่า ขั้นตอนการยกประกอบท่อบนพื้นที่สูง (Elevated Pipe Lifting and Assembly) มีค่าน้ำหนักสัมพัทธ์สูงที่สุดในเกณฑ์ทั้ง 3 ด้าน โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.247, 0.221 และ 0.292 สำหรับเกณฑ์ด้านความน่าจะเป็น ด้านความรุนแรง และด้านค่าใช้จ่ายในการป้องกัน ตามลำดับ ในขณะที่ขั้นตอนอื่น ๆ เช่น การทดสอบแนวเชื่อมด้วยรังสี (Radiographic Testing) และการเชื่อมท่อ (Pipe Welding) มีค่าน้ำหนักสัมพัทธ์ในระดับปานกลาง ส่วนขั้นตอนที่มีค่าน้ำหนักสัมพัทธ์ต่ำ ได้แก่ การทดสอบแรงดันและทำความสะอาดท่อ (Pressure Testing and Cleaning) และการขนส่งท่อ (Steam Pipeline Transportation)

ผลการตรวจสอบค่าอัตราส่วนความสอดคล้องของการประเมิน (C.R.) โดยผู้เชี่ยวชาญ พบว่ามีค่าไม่เกิน 0.1 ทุกกรณี แสดงถึงความสมเหตุสมผลของการให้คะแนนประเมินของผู้เชี่ยวชาญ

3.3.3 ผลการวิเคราะห์ค่าผลรวมถ่วงน้ำหนักความเสี่ยงของขั้นตอนต่าง ๆ ในกระบวนการติดตั้งท่อส่งไอน้ำ และการจัดลำดับความเสี่ยง

จากค่าน้ำหนักสัมพัทธ์ของเกณฑ์การประเมินความเสี่ยงทั้ง 3 ด้าน และค่าน้ำหนักสัมพัทธ์ของขั้นตอนการทำงานทั้ง 8 ขั้นตอน นำมาคำนวณหาผลรวมถ่วงน้ำหนักความเสี่ยง (Overall Weighted Risk) ของขั้นตอนการทำงาน มีผลวิเคราะห์ดังแสดงใน Table 9.

Table 9. Overall Weighted Risk of Steam Pipeline Installation Steps and Risk Ranking

Installation Steps	Overall Weighted Risk	Risk Ranking
Steam Pipeline Transportation	0.092	7
Ground-Level Pipe Lifting and	0.085	8
Assembly Elevated Pipe Lifting and	0.259	1
Assembly	0.129	3
Pipe Welding	0.143	2
Radiographic Testing	0.101	4
Thermal Insulation	0.095	6
Pressure Testing and Cleaning	0.097	5
Nitrogen Gas Filling into Pipeline		

ผลการวิเคราะห์ค่าผลรวมถ่วงน้ำหนักความเสี่ยงของขั้นตอนการติดตั้งท่อส่งไอน้ำทั้ง 8 ขั้นตอน พบว่าขั้นตอนการยกประกอบท่อบนพื้นที่สูงมีค่าผลรวมถ่วงน้ำหนักความเสี่ยงสูงที่สุด (0.259) รองลงมาคือขั้นตอนการตรวจสอบรอยเชื่อมด้วยรังสี (0.143) และขั้นตอนการเชื่อมท่อ (0.129) ตามลำดับ สำหรับขั้นตอนอื่น ๆ ได้แก่ การติดตั้งฉนวนกันความร้อน การเติมก๊าซไนโตรเจนเข้าท่อ การทดสอบแรงดันและทำความสะอาดท่อ การขนย้ายท่อ และการยกประกอบท่อบนพื้นที่ราบ พบว่ามีค่าผลรวมถ่วงน้ำหนักความเสี่ยงในระดับที่ต่ำกว่า

4. อภิปรายผลการวิจัย

ผลการประเมินความเสี่ยงโดยใช้กระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับขั้น พบว่าขั้นตอนการยกประกอบท่อบนพื้นที่สูงมีค่าผลรวมถ่วงน้ำหนักความเสี่ยงสูงที่สุด (0.259) รองลงมาคือขั้นตอนตรวจสอบรอยเชื่อมด้วยรังสี (0.143) และขั้นตอนการเชื่อมท่อ (0.129) ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นรูปแบบที่สอดคล้องกันในเกณฑ์การประเมินความเสี่ยงทั้งสามด้าน

ได้แก่ ความน่าจะเป็น ความรุนแรง และค่าใช้จ่ายในการป้องกัน โดยขั้นตอนการยกประกอบท่อน้ำที่สูงมีค่าน้ำหนักสัมพัทธ์สูงสุดในทั้งสามด้าน ซึ่งให้เห็นอย่างชัดเจนว่าขั้นตอนนี้มีความเสี่ยงสูงทั้งในด้านโอกาสเกิด ความรุนแรงของผลกระทบ และต้นทุนที่ต้องใช้ในการควบคุมอันตราย ความเสี่ยงที่สูงของขั้นตอนนี้สอดคล้องกับลักษณะงานที่ต้องทำงานบนที่สูง ซึ่งมีอันตรายสำคัญ ได้แก่ อันตรายจากการตกจากที่สูงของผู้ปฏิบัติงาน เช่น การตกจากนั่งร้าน บันได หรือโครงสร้างชั่วคราวระหว่างการปฏิบัติงาน ซึ่งอาจก่อให้เกิดการบาดเจ็บรุนแรงหรือเสียชีวิต อันตรายจากท่อเลื่อนหรือตกจากนั่งร้านหรืออุปกรณ์รองรับระหว่างการยกประกอบหรือการจัดวางชั่วคราว ซึ่งอาจทำให้ท่อหล่นลงมาก่อให้เกิดอุบัติเหตุหรือสร้างความเสียหายต่อทรัพย์สิน รวมถึงอันตรายจากการตกหล่นของเครื่องมือ อุปกรณ์ หรือวัสดุต่าง ๆ เช่น ประแจ อุปกรณ์เชื่อม หรือชิ้นส่วนโครงสร้าง ที่อาจตกลงมาโดนผู้ปฏิบัติงานด้านล่าง ส่งผลให้เกิดการบาดเจ็บได้เช่นกัน

การวิเคราะห์ผลการให้ค่าน้ำหนักเกณฑ์ความเสี่ยงของผู้เชี่ยวชาญพบว่า ผู้เชี่ยวชาญส่วนใหญ่ให้ความสำคัญกับค่าใช้จ่ายในการป้องกันอันตรายเป็นหลัก รองลงมาคือความรุนแรง และความน่าจะเป็น ซึ่งสะท้อนถึงมุมมองในการบริหารจัดการความเสี่ยงในงานติดตั้งท่อส่งไอน้ำที่ต้องคำนึงถึงความคุ้มค่าของมาตรการควบคุมควบคู่กับความรุนแรงของอันตราย เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการจัดการความเสี่ยงและความยั่งยืนในระยะยาว อย่างไรก็ตาม พบว่ามีผู้เชี่ยวชาญบางท่านที่ให้ความสำคัญกับความรุนแรงมากกว่าต้นทุน โดยเน้นการป้องกันอันตรายร้ายแรงต่อชีวิตและสุขภาพก่อน ซึ่งเป็นการแสดงถึงความแตกต่างในมุมมองตามบทบาทและประสบการณ์ในการทำงานของผู้เชี่ยวชาญแต่ละท่าน อย่างไรก็ตาม ผลการตรวจสอบอัตราส่วนความสอดคล้อง (Consistency Ratio: C.R.) ของผู้เชี่ยวชาญแต่ละท่าน พบว่า มีค่าไม่เกิน 0.1 ทุกกรณี แสดงถึงความสอดคล้องของการให้คะแนนประเมินในระดับที่ยอมรับได้ตามหลัก AHP ทำให้ผลการประเมินมีความน่าเชื่อถือ

ดังนั้น ในภาพรวมจึงกล่าวได้ว่าการใช้วิธี AHP ในการประเมินความเสี่ยงในงานวิจัยนี้ช่วยให้สามารถจัดลำดับความสำคัญของขั้นตอนการทำงานที่มีความเสี่ยงได้อย่างเป็นระบบ สามารถนำข้อมูลไปใช้ประกอบการวางแผนด้านความปลอดภัย การจัดสรรทรัพยากร และการกำหนดมาตรการควบคุมความเสี่ยงให้เหมาะสมกับบริบทของแต่ละโครงการได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้ประยุกต์ใช้วิธีการ AHP ในการประเมินและจัดลำดับความเสี่ยงของแต่ละขั้นตอนในกระบวนการติดตั้งท่อส่งไอน้ำ พบว่าขั้นตอนการยกประกอบท่อน้ำที่สูงเป็นขั้นตอนที่มีความเสี่ยงสูงสุด รองลงมาคือการตรวจสอบรอยเชื่อมด้วยรังสี และการเชื่อมต่อ ผลการศึกษายังแสดงให้เห็นว่าผู้เชี่ยวชาญให้ความสำคัญกับค่าใช้จ่ายในการป้องกันอันตรายเป็นหลัก รองลงมาคือความรุนแรงและความน่าจะเป็น โดยผลการประเมินทั้งหมดมีค่าความสอดคล้องในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ตามหลักการของ AHP แสดงให้เห็นว่าการใช้วิธี AHP มีความเหมาะสมและสามารถใช้จัดลำดับความสำคัญของความเสี่ยงในขั้นตอนการติดตั้งท่อส่งไอน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในเชิงปฏิบัติ ควรนำผลการจัดลำดับความเสี่ยงไปใช้ในการกำหนดมาตรการควบคุมความเสี่ยงในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการทำงาน โดยให้ความสำคัญกับการจัดสรรทรัพยากรด้านความปลอดภัยให้กับขั้นตอนการยกประกอบท่อน้ำที่สูงเป็นลำดับแรก เนื่องจากเป็นขั้นตอนที่มีระดับความเสี่ยงสูงสุดทั้งในด้านความน่าจะเป็น ความรุนแรง และค่าใช้จ่ายในการควบคุมอันตราย มาตรการควบคุมที่ควรนำมาใช้ ได้แก่ การใช้ระบบป้องกันการตกจากที่สูง (Fall Protection System) เพื่อป้องกันไม่ให้ผู้ปฏิบัติงานตกจากที่สูง หรือช่วยลดความรุนแรงของการบาดเจ็บหากเกิดการตกในระหว่างการทำงานบนที่สูง ตัวอย่างเช่น การติดตั้งราวกันตก ตาข่ายนิรภัย (Safety Net) การใช้สายรัดนิรภัยร่วมกับสายกันตกที่มีความยาวจำกัด หรือระบบกันตกแบบดูดซับแรง (Shock Absorbing System) ทั้งนี้ การใช้ท่อสำเร็จรูปเพื่อลดกิจกรรมการทำงาน

บนพื้นที่สูง จะช่วยลดระยะเวลาการทำงานในสภาพแวดล้อมที่มีความเสี่ยง อีกทั้งควรจัดให้มีการอบรมพนักงานให้มีความรู้ และทักษะในการทำงานบนที่สูงอย่างปลอดภัย เพื่อสร้างความตระหนักรู้ ลดความประมาท และป้องกันการเกิดอุบัติเหตุซ้ำ

5.2.2 ในเชิงนโยบายองค์กร องค์กรสามารถนำหลักการ AHP ไปพัฒนาเป็นเครื่องมือประเมินความเสี่ยงในงานติดตั้งระบบท่อหรืองานอื่นที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน เช่น งานติดตั้งระบบไฟฟ้า งานเดินท่ออุตสาหกรรม หรือโครงการก่อสร้างอาคารสูง เพื่อเสริมสร้างระบบการจัดการความเสี่ยงเชิงรุกอย่างยั่งยืน

5.2.3 ในเชิงการวิจัยต่อยอดแนะนำให้ศึกษาผลการประเมินความเสี่ยงเมื่อใช้กลุ่มผู้ประเมินที่มีประสบการณ์หรือบทบาทหน้าที่แตกต่างกัน เพื่อวิเคราะห์ผลของความแตกต่างระหว่างผู้ประเมินต่อผลการจัดลำดับความเสี่ยง นอกจากนี้ ควรพิจารณาเพิ่มตัวแปรด้านเกณฑ์การประเมินความเสี่ยงอื่น ๆ เช่น ความซับซ้อนทางเทคนิค หรือการจำแนกเกณฑ์ย่อยในด้านความรุนแรง เพื่อเพิ่มมิติและความครอบคลุมในการจัดลำดับความเสี่ยงให้เหมาะสมกับสภาพงานมากยิ่งขึ้น

5.2.4 ในเชิงวัฒนธรรมความปลอดภัย การใช้ผลการวิจัยนี้ร่วมกับการสื่อสารความเสี่ยงภายในองค์กรจะช่วยสร้างความตระหนักรู้ด้านความปลอดภัยในทุกระดับ และสนับสนุนให้เกิดวัฒนธรรมความปลอดภัยที่ยั่งยืนในองค์กร

6. เอกสารอ้างอิง

- Department of Alternative Energy Development and Efficiency. (2010). Industrial steam systems. In Manual for designated persons responsible for energy (Factory) (Part 3, Chapter 2). Bangkok: Ministry of Energy. (in Thai)
- Ericson, C. A. (2015). Hazard analysis techniques for system safety. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Muthusamy, K., David, J. S., Nair, S. D., & Ainarappan, N. (2021). OSH Hazards Risk Assessment Using AHP Technique–A Case study of an Electronics Manufacturing Company. In Proceedings of the Second Asia Pacific International Conference on Industrial Engineering and Operations Management (pp. 92-103).
- Saaty, T. L. (1980). The analytic hierarchy process mcgraw hill, New York. Agricultural Economics Review, 70(804), 10-21236.
- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. International journal of services sciences, 1(1), 83-98.
- Saravisutra, A. (2016). Multi-criteria decision making: Comparison between SAW, AHP, TOPSIS concept and methods. Princess of Naradhiwas University Journal, 8(2), 180-192.

การประยุกต์ใช้ระบบนิเวศวิศวกรรมเพื่อส่งเสริมการจัดการแมลงศัตรูพืชในแปลงนาข้าวอัลฮัม
Implementation of an Ecological Engineering System to Support Insect Pest Management
in the Alham Rice Field

วนิดา เพ็ชรลมูล^{1*} ไสว บัวแก้ว¹ กัณฑณ มะหามัด² และ พงษ์ศักดิ์ มานสุริวงศ์¹

Wanida Petlamul^{1*}, Sawai Boukaew¹, Kuntapon Mahamad² and Pongsak Mansuriwong¹

¹คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา จังหวัดสงขลา

²คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา จังหวัดสงขลา

¹Faculty of Agricultural Technology, Songkhla Rajabhat University, Songkhla Province

²Faculty of Industrial Technology, Songkhla Rajabhat University, Songkhla Province

*Corresponding Author: wanida.pe@sku.ac.th

Received: April 20, 2025

Revised: July 21, 2025

Accepted: July 23, 2025

บทคัดย่อ

ระบบนิเวศวิศวกรรมในนาข้าว เป็นการจัดสิ่งแวดล้อมให้เกิดความหลากหลายทางชีวภาพในระบบนิเวศเกษตรเพื่อลดการใช้สารเคมี งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลการใช้ระบบนิเวศวิศวกรรม กรณีศึกษาแปลงนาข้าวอัลฮัม โดยวางแผนการทดลองแบบ Randomized Complete Block Design (RCBD) ประกอบด้วย 4 ทรีตเมนต์ ๆ ละ 3 ซ้ำ ได้แก่ 1) ไม่ปลูกพืชบนคันนา (กลุ่มควบคุม) 2) ปลูกถั่วฝักยาวบนคันนา 3) ปลูกดาวเรืองบนคันนา และ 4) ปลูกถั่วฝักยาวร่วมกับดาวเรืองบนคันนา ดำเนินการสำรวจประชากรแมลงในแปลงนาข้าวอัลฮัม ก่อนและหลังการประยุกต์ใช้ระบบนิเวศวิศวกรรม จำแนกชนิดแมลง วิเคราะห์ค่าระดับความถี่ของการปรากฏ และค่าความหลากหลายทางชีวภาพ ผลการศึกษาพบว่าแมลงในอันดับ Orthoptera เป็นกลุ่มที่มีความชุกชุมสูงสุด คิดเป็นร้อยละ 22 ของประชากรทั้งหมด แมลงที่มีค่าระดับความถี่ของการปรากฏในกลุ่มที่พบบ่อย (ร้อยละ 71.00–79.06) พบปานกลาง (ร้อยละ 45.50–57.10) และพบน้อย (ร้อยละ 10.50–11.20) ซึ่งตลอดระยะเวลาเจริญเติบโตของข้าวพบการปรากฏของแมลงในทุกระยะการเจริญเติบโต โดยเฉพาะในช่วงระยะออกรวงถึงระยะสุกแก่ ซึ่งเป็นช่วงที่พบความหลากหลายชนิดและปริมาณของแมลงสูงที่สุด ผลการประเมินดัชนีความหลากหลายทางชีวภาพของแมลงหลังการประยุกต์ใช้ระบบนิเวศวิศวกรรม พบว่า ทรีตเมนต์ที่ 2–4 มีค่าแตกต่างจากชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยค่าเฉลี่ยของดัชนีความหลากหลายทางชีวภาพหลังการประยุกต์ใช้ระบบนิเวศวิศวกรรมเท่ากับ 1.0175 ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่าก่อนการประยุกต์ใช้ระบบนิเวศวิศวกรรม (0.4425) ถึง 2.3 เท่า ทั้งนี้แมลงที่พบทั้งหมด 21 ชนิด 20 วงศ์ และ 9 อันดับ นอกจากนี้ ระบบนิเวศวิศวกรรมยังช่วยลดปริมาณแมลงศัตรูข้าวลงได้โดยเฉลี่ย 1.7 เท่า

คำสำคัญ: ข้าวอัลฮัม, ความหลากหลายทางชีวภาพของแมลง, ระบบนิเวศวิศวกรรม

Abstract

Ecological engineering systems in rice fields involve organizing the environment to create biodiversity in agricultural ecosystems to reduce chemical use. Therefore, this research aimed to study the results of using ecological engineering systems with a case study of AlHam rice fields. The experimental design was a Randomized Complete Block Design (RCBD) with four treatments of three replications each:

(1) no planting on the ridge (control group), (2) planting long beans on the ridge, (3) planting marigolds on the ridge, and (4) planting long beans together with marigolds on the ridge. Insect population surveys were conducted in Alham rice fields before and after applying the ecological engineering system. Insect species were classified, and occurrence frequency levels and biodiversity values were analyzed. The study results showed that insects in the order Orthoptera were the most abundant group, accounting for 22% of the total population. Insects with occurrence frequency levels were categorized as frequently found (71.00%–79.06%), moderately found (45.50%–57.10%), and rarely found (10.50%–11.20%). Throughout the rice growth stages, insects appeared in all growth stages especially during the panicle emergence to maturity stages, which showed the highest species diversity and insect abundance. Results of evaluating the insect biodiversity index after applying the ecological engineering system showed that treatments 2–4 were significantly different from the control group ($p < 0.05$). The average biodiversity index after applying the ecological engineering system was 1.0175, which was 2.3 times higher than before applying the ecological engineering system (0.4425). In total, 21 insect species, 20 families, and 9 orders of insects were found. Furthermore, the ecological engineering system helped reduce rice pest population by an average of 1.7 times.

Keywords: Alham rice, Insect biodiversity, Ecological engineering

1. บทนำ

การใช้สารเคมีทางการเกษตรที่เพิ่มขึ้นเป็นสาเหตุสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ทำลายศัตรูธรรมชาติในระบบนิเวศ และส่งผลต่อการดื้อยาของแมลง (Sparks & Nauen, 2015) ระบบนิเวศวิศวกรรมเป็นแนวทางในการจัดการสิ่งแวดล้อมที่เอื้อต่อทั้งมนุษย์และระบบนิเวศ โดยมีรากฐานจากระบบเกษตรผสมผสานแบบดั้งเดิม การบริหารจัดการแหล่งที่อยู่อาศัย และการควบคุมศัตรูพืชโดยชีววิธีเพื่อการอนุรักษ์ธรรมชาติ (Gurr, 2009) สำหรับระบบนิเวศวิศวกรรมในนาข้าว นับว่ามีบทบาทสำคัญในการอนุรักษ์ความหลากหลายทางชีวภาพเพื่อการจัดการศัตรูพืชในนาข้าว (Gurr et al., 2016) ส่งเสริมความสมดุลทางนิเวศโดยการเพิ่มความหลากหลายของพืชบริเวณนาข้าว การผสมผสานพืชปลูกช่วยให้ระบบนิเวศทางการเกษตรได้รับการฟื้นฟู เพิ่มแหล่งที่อยู่อาศัย และเป็นแหล่งอาหารให้แมลงศัตรูธรรมชาติ หรือสัตว์อื่นที่เป็นศัตรูธรรมชาติของแมลงให้มีบทบาทมากขึ้นในการช่วยควบคุมศัตรูพืช จึงถือเป็นกลยุทธ์ของการจัดการความหลากหลายทางชีวภาพที่สามารถลดจำนวนประชากรแมลงศัตรูพืชได้โดยตรง (Yele et al., 2023; Horgan et al., 2024) ตัวอย่างเช่น การปลูกดอกไม้สีเหลืองและสีขาวตามขอบแปลงนาเป็นการสร้างแหล่งที่อยู่อาศัยและแหล่งอาหารให้กับศัตรูธรรมชาติ เกสร และน้ำหวาน จากพืชเหล่านี้มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเจริญ อายุขัย ความสามารถในการสืบพันธุ์ และพฤติกรรมของแมลงศัตรูธรรมชาติ ซึ่งท้ายที่สุดจะช่วยลดจำนวนประชากรของแมลงศัตรูพืชลงได้ (Wäckers et al., 2007; Chandrasekar et al., 2017; Horgan & Kudavidanage, 2020) โดยน้ำหวานจากดอกไม้เป็นแหล่งน้ำตาลที่มีประโยชน์ สามารถดึงดูดแมลงศัตรูธรรมชาติทั้งกลุ่มตัวห้ำ และตัวเบียนได้เป็นอย่างดี (Wäckers et al., 2007) สำหรับพืชที่เลือกปลูกเพื่อส่งเสริมการทำให้ระบบนิเวศวิศวกรรมควรเป็นพืชส่งเสริมการเจริญของแมลงศัตรูธรรมชาติ (Evans et al., 2011) ขณะเดียวกันควรมีประโยชน์เพิ่มเติมนอกเหนือจากการจัดการแมลงศัตรูพืช เช่น การเป็นพืชรองหรือการมีส่วนร่วมช่วยปรับปรุงบำรุงดิน (Settele et al., 2008; Gurr et al., 2011) กรณีศึกษาการปลูกพืชดอกในแปลงนาข้าวของจังหวัดพิษณุโลก พบว่าแปลงนาข้าวที่มีการปลูกพืชดอกกรว่มีจำนวนแมลงศัตรูธรรมชาติเฉลี่ย 4.05 ตัว/แปลง ซึ่งเป็นปริมาณที่สูงกว่าแปลงที่ไม่มีการปลูกพืชดอกกรว่

1.78 ตัวต่อแปลง (Chiengwattana et al., 2021) กรณีศึกษาการใช้ระบบนิเวศวิศวกรรมในแปลงนาข้าวหอมมะลิอินทรีย์ของจังหวัดพิษณุโลก พบว่าผลผลิตข้าวเฉลี่ยในแปลงนาที่ใช้ระบบนิเวศวิศวกรรม (731.76 ± 196.66 กิโลกรัมต่อไร่) มีค่าสูงกว่าแปลงนาที่ทำนาแบบดั้งเดิม (667.04 ± 91.65 กิโลกรัมต่อไร่) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) โดยมีค่าเฉลี่ยสูงขึ้นถึง 1.10 เท่า การประยุกต์ใช้ระบบนิเวศวิศวกรรมจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่ช่วยลดการพึ่งพาสารเคมีทางการเกษตร และมีแนวโน้มช่วยเพิ่มผลผลิตข้าวให้สูงขึ้น (Chalermsan, 2013) หากพิจารณาการทำนาข้าวในภาคใต้ของประเทศไทยที่มีการกระจายอยู่ในหลายจังหวัด พบว่าจังหวัดสตูลถือเป็นหนึ่งในพื้นที่สำคัญในการปลูกข้าว จากข้อมูล Satun Provincial Office of Agriculture and Cooperatives (2024) ระบุว่า ในปี พ.ศ. 2565 จังหวัดสตูลมีพื้นที่ปลูกข้าวประมาณ 14,422 ไร่ และเพิ่มขึ้นเป็น 14,658 ไร่ในปี พ.ศ. 2566 พื้นที่ดังกล่าวเป็นแหล่งปลูกข้าวพื้นเมืองหลากหลายสายพันธุ์ อาทิ ข้าวเล็บนก ข้าวเหนียว ข้าวบางแก้ว ข้าวหอมจันทร์ ข้าวหอมเหลือง ข้าวลูกแดง ข้าวขาวตายก ไชมัด ช่อมูก ดอนทราย ลูกเหลือง ข้าวแดง หมออรุณ รวงยาว สีรว และมัทแคนดู อย่างไรก็ตามแม้ปัจจุบันมีแนวโน้มการลดลงของการปลูกข้าวพื้นเมือง เนื่องจากเกษตรกรหันไปปลูกข้าวพันธุ์ส่งเสริมและพืชเศรษฐกิจอื่น ส่งผลให้การพัฒนาสายพันธุ์ข้าวพื้นเมืองลดลง เกิดปัญหาข้าวกลายพันธุ์และผลผลิตลดต่ำลง แต่ ข้าวอัลฮัมยังเป็นข้าวพื้นเมืองที่สำคัญ และได้รับความนิยมในการเพาะปลูก การศึกษาจึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการประยุกต์ใช้ระบบนิเวศวิศวกรรม ต่อการส่งเสริมการจัดการแมลงศัตรูพืชในแปลงนาข้าวอัลฮัม ตำบลควนโพธิ์ อำเภอเมือง จังหวัดสตูล ซึ่งระบบนิเวศวิศวกรรมช่วยเพิ่มความหลากหลายทางชีวภาพในนาข้าว ส่งเสริมการควบคุมแมลงศัตรูพืชโดยศัตรูธรรมชาติ ลดการพึ่งพาสารเคมีกำจัดศัตรูพืช และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม รวมทั้งยกระดับความปลอดภัยของผลผลิตข้าวต่อผู้บริโภค ทั้งนี้สามารถประยุกต์ใช้กับข้าวพันธุ์ส่งเสริมชนิดอื่นได้ต่อไป

2. วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ดำเนินการในแปลงนาข้าวอัลฮัม ซึ่งตั้งอยู่ในชุมชนพญาบังสา ตำบลควนโพธิ์ อำเภอเมือง จังหวัดสตูล การศึกษานี้ใช้วิธีวิจัยแบบผสมผสานที่ประกอบด้วยการวิจัยเชิงปริมาณจากการทดลอง และการวิจัยเชิงคุณภาพ โดยอาศัยการวิจัยแบบมีส่วนร่วม (Participatory Action Research; PAR) ซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ 1) การคัดเลือกพื้นที่ศึกษา และวางแผน Randomized Complete Block Design (RCBD) สำหรับทดสอบการประยุกต์ใช้ระบบนิเวศวิศวกรรม 2) การสำรวจประชากรแมลงบริเวณแปลงนาข้าวอัลฮัม ก่อนและหลังทดสอบการประยุกต์ใช้ระบบนิเวศวิศวกรรม และ 3) การประเมินความหลากหลายทางชีวภาพของแมลงบริเวณแปลงนาข้าวอัลฮัม

2.1 การคัดเลือกพื้นที่ศึกษา และวางแผนทดสอบการประยุกต์ใช้ระบบนิเวศวิศวกรรม

คัดเลือกพื้นที่แปลงนาข้าวอัลฮัมในชุมชนพญาบังสา ตำบลควนโพธิ์ อำเภอเมือง จังหวัดสตูล (ซึ่งเป็นพื้นที่ที่พบการปลูกข้าวอัลฮัมเป็นจำนวนมาก) สำหรับทดลองการประยุกต์ใช้ระบบนิเวศวิศวกรรม จากแปลงของเกษตรกรที่คัดเลือกด้วยวิธีการสุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง (purposive sampling) รายละเอียดได้แก่ 1) เกษตรกรที่เข้าร่วมการทดลองมีประสบการณ์การทำนาอย่างน้อย 5 ปี 2) เกษตรกรเป็นเจ้าของแปลงนาที่ใช้สำหรับทดลอง 3) เกษตรกรยินยอมมีส่วนร่วมตลอดกิจกรรมของการศึกษา ตั้งแต่การกำหนดรูปแบบการทำระบบนิเวศวิศวกรรม การร่วมตัดสินใจเลือกชนิดพืชปลูกร่วม การสำรวจความหลากหลายของแมลงในแปลงนา และการติดตามผล และ 4) ลักษณะของแปลงนาที่คัดเลือกมีขนาดเท่ากับ 5 ไร่

การออกแบบแผนการทดลองสำหรับทดสอบประสิทธิภาพการประยุกต์ใช้ระบบนิเวศวิศวกรรมกับแปลงนาที่คัดเลือกได้จำนวน 4 แปลง โดยวางแผนการทดลองแบบ RCBD จำนวน 4 ทรีตเมนต์ (ชนิดพืชปลูกร่วมบนคันนา ที่พิจารณาจากการมีส่วนร่วมของเกษตรกรเจ้าของแปลง) ได้แก่ 1) ไม่ปลูกพืชชนิดใดร่วมบนคันนาข้าวอัลฮัม (กลุ่มควบคุม) 2) ปลูกถั่วฝักยาวร่วมบนคันนาข้าวอัลฮัม 3) ปลูกดาวเรืองร่วมบนคันนาข้าวอัลฮัม และ 4) ปลูกถั่วฝักยาวและดาวเรืองร่วมบนคันนาข้าวอัลฮัม (Figure 1.) ทุกทรีตเมนต์ได้รับการจัดการเหมือนกันตามแนวทางเกษตรที่ดีที่เหมาะสม (GAP) โดยมีการขังน้ำในแปลงนา 5 เซนติเมตร ในระยะต้นกล้า และเพิ่มเป็น 10–15 เซนติเมตร ในระยะข้าวแตกกอถึงออกดอก ก่อนระบายน้ำออก

หลังข้าวออกดอก 15 วัน ใส่ปุ๋ยสองครั้ง ได้แก่ สูตร 16-20-0 อัตรา 25 กิโลกรัมต่อไร่ หลังข้าวออก 30 วัน และสูตร 46-0-0 อัตรา 10 กิโลกรัมต่อไร่ ก่อนข้าวออกดอก 30 วัน การควบคุมวัชพืชทำโดยปรับหน้าดินให้เรียบเพื่อลดระดับน้ำ (Krisanapong et al., 2014)

เตรียมพื้นที่โดยการไถตากดินบริเวณคันนาเป็นเวลา 1 สัปดาห์ ปรับคันนาให้มีขนาดความกว้าง 1.5x3 เมตร ต่อการปลูกพืช 1 ทริตเมนต์ ดำเนินการเช่นเดียวกันนี้ 4 ทริตเมนต์ ๆ ละ 3 ซ้ำ กรณีถั่วฝักยาวให้หยอดเมล็ดลงปลูกแบบยกร่องบนคันนาโดยตรง สำหรับการปลูกดาวเรืองใช้การย้ายกล้าดาวเรืองที่มีอายุ 15 วัน ลงปลูก โดยพืชทั้ง 2 ชนิด ให้ดำเนินการปลูกหลังจากปลูกข้าวแล้วเป็นเวลา 10 วัน ทั้งนี้เพื่อให้ช่วงระยะเวลาการเจริญเติบโต และให้ผลผลิตของถั่วฝักยาว และดาวเรืองตรงกับช่วงที่ข้าวอยู่ในระยะแตกกอ ตั้งท้อง และออกรวง



Figure 1. The selected area consists of 4 rice plots for testing ecological engineering systems, located in Phayabangsa community, Khuan Poh Subdistrict, Mueang District, Satun Province

2.2 การสำรวจประชากรแมลงบริเวณแปลงนาข้าวอัลฮัม ก่อนและหลังการประยุกต์ใช้ระบบนิเวศวิศวกรรม

สำรวจประชากรแมลงในแปลงนาข้าวอัลฮัม ก่อนดำเนินการประยุกต์ใช้ระบบนิเวศวิศวกรรม ได้แก่ แมลงศัตรูพืช และศัตรูธรรมชาติ โดยวิธีการใช้กับดักหลุมพราง (pitfall trap) แมลงหน้าดินที่มองเห็นด้วยตาเปล่า เก็บตัวอย่างใส่ในขวดแอลกอฮอล์ร้อยละ 70 และแมลงบริเวณรอบแปลงนาข้าวชนิดแมลงผสมเกสร สำหรับวิธีการใช้สวิงโฉบแบบเส้นทแยงมุมแต่ละวิธีการดำเนินการจำนวน 10 จุดต่อแปลงย่อย จำนวน 3 แปลงย่อย (ซ้ำ) ของแต่ละแปลงที่คัดเลือก ดำเนินการสำรวจในลักษณะเดียวกัน 1 ครั้งต่อสัปดาห์ (สัปดาห์เว้นสัปดาห์) เป็นระยะเวลา 8 ครั้ง ตามวิธีการสุ่มตัวอย่างของ IRRI (Ricehoppers, 2010) นำตัวอย่างแมลงที่รวบรวมได้มาจำแนกและวิเคราะห์ชนิดในห้องปฏิบัติการภายใต้กล้องจุลทรรศน์สเตอริโอ โดยใช้เอกสารประกอบการจัดจำแนก ได้แก่ Intawat (1994), Leksawat (2001) และ Tasen (2018) บันทึกผล

วิเคราะห์ความถี่ และลักษณะการแพร่กระจายแมลงระดับวงศ์ (Frequency of occurrence) ที่พบในพื้นที่ศึกษาวิจัย จากการแบ่งระดับการพบออกเป็น 3 ระดับ ได้แก่ ระดับการพบบ่อย (high frequency) พบปานกลาง (mediate frequency) และพบน้อย (low frequency) โดยการคำนวณจากสมการที่ (1) (Alegbejo et al., 2006)

$$\text{ความถี่ (ร้อยละ)} = \frac{\text{จำนวนครั้งที่พบวงศ์แมลงในแต่ละครั้งที่สำรวจ}}{\text{จำนวนครั้งที่สุ่มตัวอย่างทั้งหมด}} \times 100 \quad (1)$$

โดยระดับความถี่ที่ปรากฏได้แก่

พบบ่อย (high frequency) = ร้อยละ 70 ขึ้นไป

พบปานกลาง (mediate frequency) = ร้อยละ 40–69

พบน้อย (low frequency) = น้อยกว่าร้อยละ 40

2.3 การประเมินความหลากหลายทางชีวภาพของแมลงบริเวณแปลงนาข้าวอัลฮัม

การสำรวจความหลากหลายทางชีวภาพของแมลงศัตรูพืช และศัตรูธรรมชาติในนาข้าว เป็นการสำรวจชนิดและปริมาณของแมลงศัตรูพืช และศัตรูธรรมชาติที่พบ ในระยะการเจริญเติบโตของข้าวทั้ง 4 ระยะ คือ ระยะกล้า ระยะแตกกอ ระยะออกดอก และระยะสุกแก่ ทั้งนี้เพื่อให้ทราบความหลากหลายของประชากรแมลงศัตรูพืช และศัตรูธรรมชาติในแต่ละระยะการเจริญของข้าว ซึ่งวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการสุ่มประชากรสิ่งมีชีวิตดังกล่าวดำเนินการเช่นเดียวกับการสำรวจก่อนการประยุกต์ใช้ระบบนิเวศวิศวกรรม นำตัวอย่างแมลงที่สุ่มได้ไปจำแนกชนิด บันทึกจำนวน แล้วคำนวณค่าดัชนีความหลากหลายทางชีวภาพ (Diversity Index) หรือดัชนีความแตกต่างของแมลงศัตรูพืช และศัตรูธรรมชาติเพื่อประกอบการพิจารณาความหลากหลายของกลุ่มประชากรซึ่งนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยใช้สมการของ Shannon-Weaver Index: H' (Shannon and Weaver, 1949) ตามสมการที่ (2)

$$H' = \sum_{i=1}^s (P_i)(\ln P_i) \quad (2)$$

โดยที่ H' คือ ค่าดัชนีความหลากหลายทางชีวภาพ

P_i คือ สัดส่วนของจำนวนชนิดสิ่งมีชีวิตในกลุ่มบทบาททางนิเวศวิทยาต่อจำนวนชนิดของสิ่งมีชีวิตที่สุ่มได้ทั้งหมด

s คือ จำนวนชนิดของสิ่งมีชีวิตที่พบในจุดสำรวจนั้น

การคำนวณค่าความสม่ำเสมอของสิ่งมีชีวิต (Shannon Evenness, J') คำนวณได้ดังสมการที่ (3)

$$J' = \frac{H'}{\ln s} \quad (3)$$

โดยที่ H' คือ ค่าดัชนีความหลากหลายทางชีวภาพ

s คือ จำนวนชนิดของสิ่งมีชีวิตที่พบในจุดสำรวจนั้น

2.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยดัชนีความหลากหลายทางชีวภาพ และค่าความสม่ำเสมอของสิ่งมีชีวิต ที่แตกต่างระหว่างทรีตเมนต์ ด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05

3. ผลการวิจัย

3.1 ผลการสำรวจประชากรแมลงศัตรูพืช และศัตรูธรรมชาติบริเวณแปลงนาข้าวอัลฮัม ก่อนและหลังการประยุกต์ใช้ระบบนิเวศวิศวกรรม

ผลการสำรวจประชากรแมลงศัตรูพืช และศัตรูธรรมชาติบริเวณแปลงนาข้าวอัลฮัม ก่อนและหลังการประยุกต์ใช้ระบบนิเวศวิศวกรรม แสดงให้เห็นถึงองค์ประกอบและสัดส่วนของกลุ่มแมลงในระบบนิเวศนาข้าว ซึ่งจัดจำแนกตามระดับอนุกรมวิธาน ได้แก่ อันดับ (Order) และวงศ์ (Family) ดังแผนภูมิวงกลม (Figure 2.) จากผลการสำรวจพบว่า แมลงในอันดับ Orthoptera เป็นกลุ่มที่มีความชุกชุมสูงสุด คิดเป็นร้อยละ 22 ของประชากรทั้งหมด โดยประกอบด้วยวงศ์ Gryllidae (จิ้งหรีด) Tettigoniidae (ตั๊กแตนหนวดยาว) Acrididae (ตั๊กแตนหนวดสั้น) และ Tetrigidae (ตั๊กแตนแกระ) รองลงมาคืออันดับ Hymenoptera และ Diptera ซึ่งมีสัดส่วนเท่ากันที่ร้อยละ 17 โดยกลุ่ม Hymenoptera พบแมลงในวงศ์ Formicidae (มด), Bethyidae (แตนเบียน) และ Vespidae (ต่อ แตน) ขณะที่กลุ่ม Diptera ประกอบด้วยวงศ์ Tabanidae (เห็บ) Drosophilidae (แมลงหวี่) และ Muscidae (แมลงวัน) สำหรับกลุ่มแมลงในอันดับ Coleoptera และ Hemiptera และศัตรูธรรมชาติในอันดับ Araneae พบในสัดส่วนร้อยละ 11 เท่ากัน โดย Coleoptera ประกอบด้วยวงศ์ Staphylinidae (ด้วงก้นกระดก) และ Coccinellidae (ด้วงเต่า) Hemiptera พบแมลงในวงศ์ Alydidae (แมลงสิง) และศัตรูธรรมชาติในอันดับ Araneae (แมงมุม) ประกอบด้วยวงศ์ Oxyopidae (แมงมุมตาหกเหลี่ยม) และ Tetragnathidae (แมงมุมเขี้ยวยาว) ขณะที่อันดับ Odonata พบในสัดส่วนร้อยละ 6 ซึ่งประกอบด้วยวงศ์ Coenagrionidae (แมลงปอเข็ม) และอันดับ Blattodea ที่มีสัดส่วนน้อยที่สุดร้อยละ 5 คือแมลงในวงศ์ Blaberidae (แมลงสาบ)

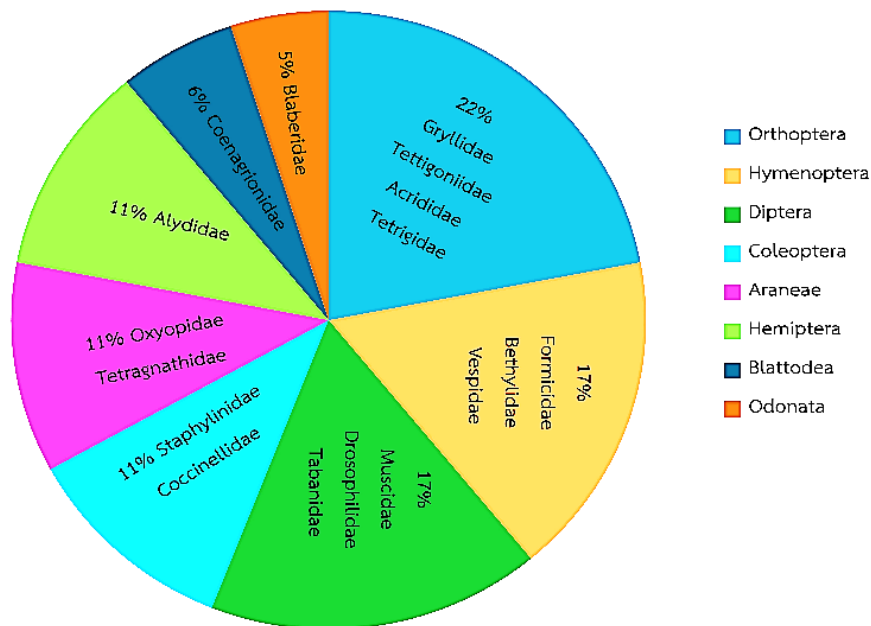


Figure 2. Relative abundance of arthropod families grouped by taxonomic orders in a rice ecosystem

ผลการศึกษาความถี่การปรากฏของแมลงในระดับวงศ์พบว่า แมลงที่ปรากฏพบจำนวน 18 วงศ์ มีความถี่ทั้ง 3 ระดับ คือ ระดับบ่อย (ร้อยละ 70 ขึ้นไป) ระดับปานกลาง (ร้อยละ 40–69) และระดับน้อย (น้อยกว่าร้อยละ 40) (Figure 3.)

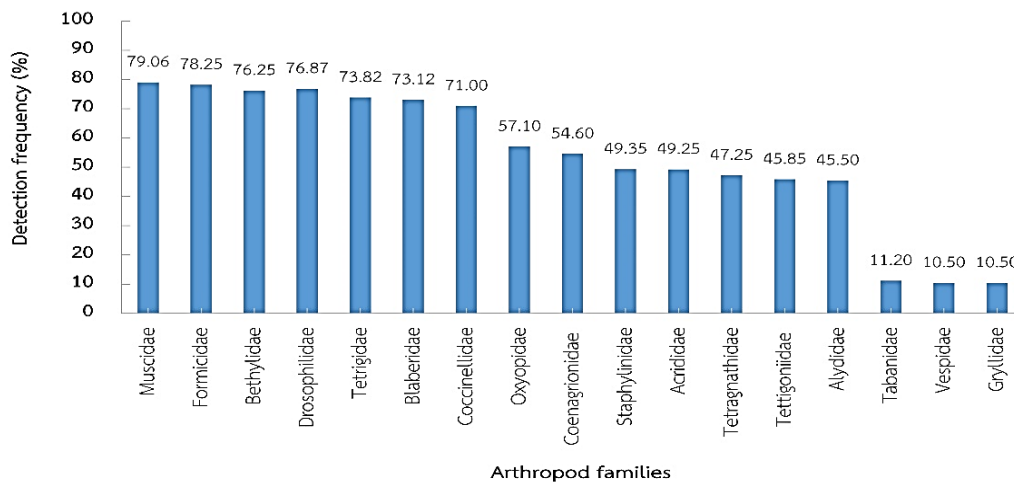


Figure 3. Detection frequency of arthropod families

จาก Figure 3. แมลงที่มีค่าการปรากฏตัวอยู่ในระดับพบบ่อยจำนวน 7 วงศ์ คือ Muscidae (ร้อยละ 79.06) Formicidae (ร้อยละ 78.25) Bethyidae (ร้อยละ 76.25) Drosophilidae (ร้อยละ 76.87) Tetrigidae (ร้อยละ 73.82), Blaberidae (ร้อยละ 73.12) และ Coccinellidae (ร้อยละ 71.00) พบระดับปานกลาง จำนวน 7 วงศ์ ประกอบด้วยแมลงจำนวน 5 วงศ์ ได้แก่ Coenagrionidae (ร้อยละ 54.60) Staphylinidae (ร้อยละ 49.35) Acrididae (ร้อยละ 49.25) Tettigoniidae (ร้อยละ 45.85) และ Alydidae (ร้อยละ 45.50) และศัตรูธรรมชาติชนิดแมงมุมจำนวน 2 วงศ์ ได้แก่ Oxyopidae (ร้อยละ 57.10) และ Tetragnathidae (ร้อยละ 47.25) ขณะที่แมลงที่มีค่าการปรากฏตัวอยู่ในระดับพบน้อยมีจำนวน 4 วงศ์ คือ Tabanidae (ร้อยละ 11.20), Vespidae (ร้อยละ 10.50) และ Gryllidae (ร้อยละ 10.50)

เมื่อนำข้อมูลข้างต้นมาวิเคราะห์ร่วมกับระยะเวลาการเจริญเติบโตของข้าวพบว่า ทุกระยะการเจริญเติบโตของข้าวพบแมลงตลอดระยะเวลาการเจริญเติบโต โดยเฉพาะในช่วงระยะออกรวง ซึ่งเป็นช่วงที่พบความหลากหลายชนิดและปริมาณของแมลงสูงที่สุด รองลงมาคือระยะสุกแก่ สำหรับระยะแตกกอ และระยะกล้า พบชนิดของแมลงในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน (Figure 4.)

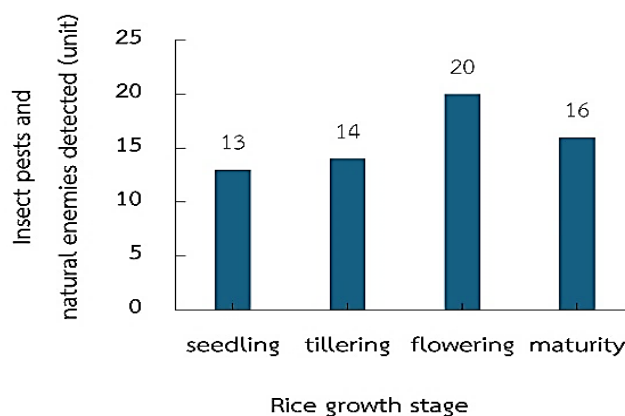


Figure 4. Insect pests and natural enemies detected during different rice growth stages

3.2 ผลการประเมินความหลากหลายทางชีวภาพของแมลงศัตรูพืช และศัตรูธรรมชาติในนาข้าวอัลฮัม

ผลการประเมินความหลากหลายทางชีวภาพของแมลงศัตรูพืช และศัตรูธรรมชาติในแปลงนาข้าวอัลฮัม พบว่า หลังการประยุกต์ใช้ระบบนิเวศวิศวกรรม พบแมลงศัตรูพืช และศัตรูธรรมชาติ รวมทั้งสิ้น 21 ชนิด 20 วงศ์ และ 9 อันดับ

ซึ่งมีปริมาณและชนิดที่มากกว่าก่อนการประยุกต์ใช้ระบบนิเวศวิศวกรรมอย่างชัดเจน โดยก่อนการประยุกต์ใช้พบแมลงศัตรูพืชเพียง 3 ชนิด 3 วงศ์ และ 3 อันดับ เมื่อพิจารณาร่วมกับค่าดัชนีความหลากหลายทางชีวภาพ (H') ในทรีตเมนต์ที่ 1–4 หลังการประยุกต์ใช้ระบบนิเวศวิศวกรรม พบว่า มีค่าในช่วง 0.513–1.305 หรือเฉลี่ยเท่ากับ 1.018 ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่าก่อนการประยุกต์ใช้ระบบนิเวศวิศวกรรมที่มีค่าในช่วง 0.395–0.515 หรือเฉลี่ย 0.443 โดยชนิดของแมลงศัตรูพืช และศัตรูธรรมชาติ ได้แก่ มดแดง *Oecophylla smaragdina* F ตั๊กแตนข้าว *Hieroglyphus banian* (Fabricius) แมงมุมตาหกลีเยม *Oxyopes javanus* Throll มดคันไฟ *Solenopsis saevissima wagneri* แมลงปอเข็ม *Ceragrion praetermissum* ตัวงักกระดก *Paederus fuscipes* ตัวเต่าสีส้ม *Micraspis discolor* ตัวเต่าลายหยัก *Menochilus sexmaculatus* ตัวเต่าลายจุด *Harmonia octomaculata* ตั๊กแตนกระแะ *Paratettix aztecus* ตั๊กแตนหนวดยาว *Conocephalus longipennis* แตนเบียน *Goniozus* sp. จิ้งโกร่ง *Brachytrupes portentosus* จิ้งหรีดทองดำ *Gryllus bimaculatus* เหลือบ *Tabanus fulvilinearis* แมลงวันบ้าน *Musca domestica* แมลงหวี่ *Drosophila melanogaster* แมงมุมเขียวยาว *Tetragnatha* sp. แตนกระดาก *Polistes stigma* (F.) แมลงสิง *Leptocoris acuta* (Thunberg) และ แมลงกลบ *Pycnoscelus indicus* (Table 1.)

จาก Table 1. พบว่าหลังการประยุกต์ใช้ระบบนิเวศวิศวกรรมมีจำนวน และชนิดของแมลงศัตรูพืช และศัตรูธรรมชาติ แตกต่างกันไปตามสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันในแต่ละทรีตเมนต์ แสดงให้เห็นว่าการปลูกพืชร่วมส่งผลให้ค่าดัชนีความหลากหลายทางชีวภาพ (H') เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งในทุกทรีตเมนต์ที่มีการปลูกพืชร่วม ได้แก่ ทรีตเมนต์ที่ 2 ($H' = 1.129$) ทรีตเมนต์ที่ 3 ($H' = 1.123$) และทรีตเมนต์ที่ 4 ($H' = 1.305$) มีค่าสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับทรีตเมนต์ที่ 1 ซึ่งเป็นกลุ่มควบคุมที่ไม่มีการปลูกพืชร่วม โดยพบค่าดัชนีความหลากหลายทางชีวภาพของแมลงต่ำที่สุด ($H' = 0.513$) โดยทรีตเมนต์ที่ 4 ($H' = 1.305$) มีค่าดัชนีความหลากหลายทางชีวภาพ (H') สูงกว่าทรีตเมนต์ที่ 2 และทรีตเมนต์ที่ 3 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ทั้งนี้เมื่อพิจารณาสิ่งมีชีวิตที่พบทั้งหมด แบ่งเป็น 3 กลุ่มใหญ่ ได้แก่ 1) แมลงศัตรูธรรมชาติ และศัตรูธรรมชาติอื่น ได้แก่ มดแดง (*O. smaragdina* F) แมงมุมตาหกลีเยม (*O. javanus* Throll) มดคันไฟ (*S. saevissima wagneri*) แมลงปอเข็ม (*C. praetermissum*) ตัวงักกระดก (*P. fuscipes*) ตัวเต่าสีส้ม (*M. discolor*) ตัวเต่าลายหยัก (*M. sexmaculatus*) ตัวเต่าลายจุด (*H. octomaculata*) แตนเบียน (*Goniozus* sp.) จิ้งโกร่ง (*B. portentosus*) จิ้งหรีดทองดำ (*G. bimaculatus*) เหลือบ (*T. fulvilinearis*) แมงมุมเขียวยาว (*Tetragnatha* sp.) และ แตนกระดาก (*P. stigma* (F.)) 2) แมลงศัตรูข้าว ได้แก่ ตั๊กแตนข้าว (*H. banian*) (Fabricius) ตั๊กแตนหนวดยาว (*C. longipennis*) ตั๊กแตนกระแะ (*P. aztecus*) และแมลงสิง (*L. acuta*) (Thunberg) และ 3) แมลงเคหะ/อื่น ๆ ได้แก่ แมลงวันบ้าน (*M. domestica*) แมลงหวี่ (*D. melanogaster*) และแมลงกลบ (*P. indicus*)

Table 1. Types of Insect pests and natural enemies surveyed before and after implementing the ecological engineering

Observation	Insects, pests and natural enemies	Pi-T1	Pi-T2	Pi-T3	Pi T4	p-value
Before implementing the ecological engineering	<i>Oecophylla smaragdina</i> F	0.188	0.167	0.250	0.271	0.062
	<i>Hieroglyphus banian</i> (Fabricius)	0.021	0.000	0.000	0.021	
	<i>Oxyopes javanus</i> Throll	0.000	0.021	0.042	0.021	
	<i>H'</i>	0.395	0.380	0.480	0.515	
	<i>J'</i>	0.570	0.548	0.691	0.469	
After implementing the ecological engineering	<i>Oecophylla smaragdina</i> F	0.020	0.044	0.039	0.049	0.020*
	<i>Solenopsis saevissima wagneri</i>	0.006	0.008	0.013	0.011	
	<i>Ceriagrion praetermissum</i>	0.003	0.015	0.009	0.017	
	<i>Paederus fuscipes</i>	0.000	0.008	0.004	0.010	
	<i>Micraspis discolor</i> Fabricius	0.003	0.025	0.022	0.029	
	<i>Menochilus sexmaculatus</i> Fabricius	0.004	0.022	0.020	0.030	
	<i>Harmonia octomaculata</i> Fabricius	0.002	0.025	0.022	0.025	
	<i>Hieroglyphus banian</i> (Fabricius)	0.004	0.008	0.012	0.011	
	<i>Paratettix aztecus</i>	0.006	0.017	0.009	0.020	
	<i>Conocephalus longipennis</i> (de Haan)	0.003	0.010	0.013	0.010	
	<i>Goniozus</i> sp.	0.004	0.013	0.012	0.012	
	<i>Brachytrupes portentosus</i> Licht	0.000	0.002	0.001	0.003	
	<i>Gryllus bimaculatus</i>	0.001	0.002	0.002	0.004	
	<i>Tabanus fulvilinearis</i> Philip	0.000	0.003	0.002	0.004	
	<i>Musca domestica</i>	0.007	0.008	0.010	0.012	
	<i>Drosophila melanogaster</i>	0.007	0.008	0.015	0.016	
	<i>Oxyopes javanus</i> Throll	0.001	0.012	0.015	0.011	
	<i>Tetragnatha</i> sp.	0.000	0.010	0.008	0.009	
	<i>Polistes stigma</i> (F.)	0.000	0.002	0.003	0.003	
	<i>Leptocorisa acuta</i> (Thunberg)	0.040	0.019	0.025	0.024	
	<i>Pycnoscelus indicus</i>	0.006	0.016	0.018	0.022	
	<i>H'</i>	0.513 ^c	1.129 ^b	1.123 ^b	1.305 ^a	
	<i>J'</i>	0.182 ^c	0.372 ^b	0.369 ^b	0.428 ^a	

Note: (T1) no planting on the ridge (control group), (T2) planting long beans on the ridge, (T3) planting marigolds on the ridge, and (T4) co-planting long beans and marigolds on the ridge. * Significant statistical differences were observed ($p < 0.05$). Different English letters indicate statistically significant differences at the 95% confidence level.

4. อภิปรายผลการวิจัย

จากผลการศึกษาระดับความถี่ที่ปรากฏของแมลงศัตรูพืช และศัตรูธรรมชาติในแปลงนาข้าว พบว่ากลุ่มที่พบบ่อย เช่น Coccinellidae และ Formicidae มีบทบาทในการควบคุมศัตรูพืช และการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุ กลุ่มที่พบปานกลาง ได้แก่ แมงมุมวงศ์ Oxyopidae และวงศ์ Tetragnathidae ซึ่งเป็นศัตรูธรรมชาติกลุ่มตัวห้ำ ช่วยควบคุมแมลงปากดูด เช่น เพลี้ยต่าง ๆ ในนาข้าว และหนอนกอข้าว เป็นต้น มีความสำคัญในห่วงโซ่อาหารในระบบนิเวศนาข้าว (Keswani, 2024) โดยเฉพาะแมงมุมเขียวยาว *Tetragnatha* sp. ในวงศ์ Tetragnathidae ที่มีค่าดัชนีความหลากหลายชนิดและความชุกชุมสูงที่สุดในระยะออกดอกเมื่อเปรียบเทียบกับระยะอื่น ๆ ของการเจริญของข้าว เนื่องจากระยะการเจริญเติบโตของข้าวที่แตกต่างกันส่งผลต่อโครงสร้างของต้นข้าวที่เหมาะสมต่อปริมาณเหยื่อของศัตรูธรรมชาติกลุ่มนี้ (Sakongmuang et al., 2020) สำหรับกลุ่มที่พบน้อย ได้แก่ Tabanidae และ Vespidae มีบทบาทในการช่วยผสมเกสร เป็นเหยื่อในห่วงโซ่อาหาร และบางชนิดเป็นศัตรูธรรมชาติของหนอน และเพลี้ย ซึ่งปริมาณที่พบน้อยสะท้อนถึงสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญของแมลงกลุ่มนี้ เมื่อพิจารณาพร้อมกับช่วงการเจริญเติบโตของข้าว พบว่าระยะออกรวงมีความหลากหลายของแมลงมากที่สุด รองลงมาคือระยะสุกแก่ ซึ่งสอดคล้องกับช่วงที่แหล่งอาหารและที่อยู่อาศัยเอื้อต่อแมลง ส่วนระยะแตกกอและกล้าพบบแมลงน้อยกว่า อาจเนื่องจากระบบนิเวศยังไม่ซับซ้อน

ก่อนการประยุกต์ใช้ระบบนิเวศวิศวกรรม ที่พบค่าดัชนีความหลากหลายทางชีวภาพ (H') ในช่วง 0.395 – 0.515 และค่าดัชนีความสม่ำเสมอของสิ่งมีชีวิต (J') ในช่วง 0.548 – 0.691 สะท้อนถึงความหลากหลายทางชีวภาพที่จำกัด และสิ่งมีชีวิตบางชนิดมีการกระจุกตัวมากกว่าชนิดอื่น (Magurran, 2004) อย่างไรก็ตาม ภายหลังการประยุกต์ใช้ระบบนิเวศวิศวกรรม เห็นได้ชัดว่าความหลากหลายทางชีวภาพเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในทุกทริตเมนต์ สะท้อนถึงการเพิ่มขึ้นของจำนวนชนิดและความสม่ำเสมอของประชากรแมลง (Zhang et al., 2020; Magurran, 2004) โดยพบแมลงตัวห้ำ เช่น ตัวเต่าสี่สี (*M. discolor*) ตัวเต่าลายจุด (*H. octomaculata*) และตัวเต่าลายหยัก (*M. sexmaculatus*) ที่มีบทบาทสำคัญในการควบคุมศัตรูพืชตามธรรมชาติ (Gurr et al., 2003; Srinivasan & Ganesan, 2002) แมงมุมตาหกลี้น (O. Javanus) แมงมุมเขียวยาว (*Tetragnatha* sp.) แตนกระดาก (*P. stigma*) และแมลงในวงศ์ Coccinellidae ซึ่งเป็นแมลงศัตรูธรรมชาติของแมลงสี *Leptocoris acuta* (Gurr et al., 2004) สอดคล้องกับค่าดัชนีความหลากหลายของแมลงสีที่สำรวจในทริตเมนต์ที่ 2 (0.019), 3 (0.025) และ 4 (0.024) น้อยกว่าชุดควบคุมในทริตเมนต์ที่ 1 (0.040) คิดเป็น 1.7 เท่า จึงนับได้ว่าการใช้ระบบนิเวศวิศวกรรมมีบทบาทในการลดปริมาณแมลงสีในนาข้าวได้

จากข้อมูลดังที่กล่าวมา ชี้ให้เห็นว่าการปลูกพืชร่วมสามารถเพิ่มความหลากหลายทางชีวภาพ ส่งเสริมให้เกิดการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตหลายชนิดในแปลงนาข้าวอย่างสมดุลมากขึ้น ซึ่งมีนัยสำคัญต่อการเพิ่มความหลากหลายทางชีวภาพในระบบนิเวศเกษตร แนวโน้มนี้อาจเกิดจากการที่การปลูกพืชร่วมบริเวณแปลงนา ซึ่งเป็นแหล่งที่อยู่อาศัยและแหล่งอาหารรองรับแมลงกินพืช แมลงผู้ล่า และแมงมุมที่มีบทบาทเป็นศัตรูธรรมชาติที่หลากหลายมากขึ้น มีบทบาทในการควบคุมศัตรูพืชหรือมีผลกระทบทางอ้อมต่อระบบนิเวศการผลิตข้าว (Heong et al., 1991) ในขณะเดียวกัน ความหลากหลายที่เพิ่มขึ้นนี้ไม่เพียงส่งผลต่อการกระจายตัวของสิ่งมีชีวิตที่สมดุลของระบบนิเวศ (Magurran, 2004) แต่ยังมีบทบาทในการควบคุมศัตรูพืชตามธรรมชาติ ลดการพึ่งพาสารเคมี และส่งเสริมการจัดการศัตรูพืชแบบยั่งยืน

5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การใช้ระบบนิเวศวิศวกรรมส่งเสริมให้เกิดความหลากหลายทางชีวภาพในระบบนิเวศแปลงนาให้มีความสมดุลมากขึ้น โครงสร้างระบบนิเวศมีการฟื้นตัวและมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น ซึ่งในกรณีศึกษานาข้าวอัลฮัม เห็นได้ชัดว่าหลังจากประยุกต์ใช้ระบบนิเวศวิศวกรรมแล้ว ค่าดัชนีความหลากหลายทางชีวภาพของแมลงมีค่าสูงขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดแมลงและช่วงการเติบโตของข้าว สามารถนำไปใช้วางแผนการจัดการศัตรูพืชเชิงนิเวศได้อย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืน

อย่างไรก็ตามควรมีการส่งเสริมการประยุกต์ใช้ระบบนิเวศวิศวกรรมในพื้นที่เกษตรอื่น ๆ โดยเฉพาะพื้นที่ที่ประสบปัญหาการระบาดของศัตรูพืช และการใช้สารเคมีสูง เพื่อเพิ่มความหลากหลายทางชีวภาพ และลดการพึ่งพาสารกำจัดศัตรูพืช และเพื่อให้เกิดผลในพื้นที่อย่างยั่งยืน ควรเน้นกระบวนการมีส่วนร่วมของเกษตรกรซึ่งเป็นหัวใจสำคัญของการพัฒนาภาคการเกษตรส่งผลให้เกิดความร่วมมือที่เข้มแข็ง มีการจัดกิจกรรมแลกเปลี่ยนความรู้ และสร้างความสัมพันธ์อันดีในชุมชน สะท้อนถึงมิติทางสังคมที่ส่งเสริมการใช้วิศวกรรมเชิงนิเวศอย่างยั่งยืน

6. เอกสารอ้างอิง

- Alegbejo, MD., Raji, BA., Abubakar, IU., & Banwo, OO. (2006). Rice yellow mottle virus disease: A new disease of rice in Zamfara, Nigeria. *International Rice Research Notes*, 31(39), 30–39.
- Chalermnan, Y. (2013). The application of eco-engineering approaches for managing rice pests in organic black jasmine rice production at Ban Thung Yai, Nikhom Phatthana Subdistrict, Bang Rakam District, Phitsanulok Province. *Journal of Community Development and Quality of Life*, 1(2), 63–70.
- Chandrasekar, K., Muthukrishnan, N., & Soundararajan, RP. (2017). Ecological engineering cropping methods for enhancing predator, *Cyrtorhinus lividipennis* (Reuter) and suppression of planthopper, *Nilaparvata lugens* (Stal) in rice-weeds as border cropping system. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 6(5), 2387-2391.
- Chiangwattana, N., Pattawatang, P., Kotcharerk, J., & Anawong, J. (2021). Ecological engineering on rice to develop sustainable means to reduce crop losses due to brown plant hopper outbreaks. Seminar of Upper and Lower Northern Rice Research Centers, February 14–16, 2021. Phrae: Nakorn Phrae Tower Hotel. (in Thai)
- Evans, EW., Comont, RF., & Rabitsch, W. (2011). Alien arthropod predators and parasitoids: interactions with the environment. *BioControl*, 56, 395-407.
- Gurr, GM. (2009). Prospects for ecological engineering for planthoppers and other arthropod pests in rice. *Planthoppers: New threats to the sustainability of intensive rice production systems in Asia*, 371-388.
- Gurr, GM., Liu, J., Read, DM., Catindig, JLA., Cheng, JA., Lan, LP., & Heong, K. L. (2011). Parasitoids of Asian rice planthopper (Hemiptera: Delphacidae) pests and prospects for enhancing biological control by ecological engineering. *Annals of Applied Biology*, 158(2), 149-176.
- Gurr, GM., Lu, Z., Zheng, X., Xu, H., Zhu, P., Chen, G., Yao, X., Cheng, J., Zhu, Z., Catindig, J. L., Villareal, S., Chien, HV., Cuong, LQ., Channoo, C., Chiangwattana, N., Lan, LP., Hai, LH., Chaiwong, J., Nicol, HI., Perovic, DJ., Wratten, SD., & Heong, KL. (2016). Multi-country evidence that crop diversification promotes ecological intensification of agriculture. *Nature Plants*, 2, 1-4.
- Gurr, GM., Wratten, SD., & Altieri, MA. (2004). *Ecological engineering for pest management*. Victoria: CSIRO Publishing.
- Gurr, GM., Wratten, SD., & Luna, JM. (2003). Multi-function agricultural biodiversity: pest management and other benefits. *Basic and Applied Ecology*, 4(2), 107–116.
- Heong, KL., Aquino, GB., & Barrion, AT. (1991). Arthropod community structure of rice ecosystems in the Philippines. *Bulletin of Entomological Research*, 81(4), 407–416.
- Horgan, FG., & Kudavidanage, EP. (2020). Use and avoidance of pesticides as responses by farmers to change impacts in rice ecosystems of southern Sri Lanka. *Environmental Management*, 65(6), 787-803.
- Horgan, FG., Ramal, AF., Villegas, JM., Jamoralin, A., Pasang, JMV., Hadi, BAR., Mundaca, EA., & Crisol-Martínez, E. (2024). Rice bund management by Filipino farmers and willingness to adopt ecological engineering for pest suppression. *Agriculture*, 14(8), 1-21.
- Intawat, B. (1994). *Laboratory manual of agricultural entomology*. Bangkok: Rung Wattana Printing House. (in Thai)
- Keswani, SV. (2024). Spider fauna abundance and natural pest controller in rice agroecosystem: A review. *The Rubrics Journal of Interdisciplinary Studies* 6(3), 554–560.

- Krisanapong, S., Amara, W., Sukanya, K., Sayomporn, P., Piyanuch, T., & Duangkamon, R. (2014). Cost reduction in rice production. Bangkok: Rice Department, Ministry of Agriculture and Cooperatives. (in Thai)
- Leksawat, P. (2001). External morphology and classification of insects. Chiang Mai: Department of Biology, Faculty of Science, Chiang Mai University. (in Thai)
- Magurran, AE. (2004). Measuring biological diversity. New Jersey: Blackwell Publishing.
- Ricehoppers. (2010). Sampling protocols for studying ecological engineering for rice pest suppression in irrigated tropical rice [Online]. Retrieved December 1, 2024, from <https://ricehopper.wordpress.com/wp-content/uploads/2009/11/revised-sampling-protocol-21dec.pdf>
- Saksongmuang, V., Miyashita, T., Maneerat, T., & Bumrungsri, S. (2020). Population dynamics and prey composition of *Tetragnatha* spiders (Araneae: Tetragnathidae) in semi-organic rice fields, Songkhla Province, southern Thailand. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 42(4), 725–733.
- Satun Provincial Office of Agriculture and Cooperatives. (2024). Satun Province Basic Information [Online]. Retrieved April 1, 2025, from <https://www.opsmoac.go.th/satun-dwl-files-461991791387> (in Thai)
- Settele, J., Biesmeijer, J., & Bommarco, R. (2008). Switch to ecological engineering would aid independence. *Nature*, 456(7222), 570–570.
- Shannon, CE., & Weaver, W. (1949). *The Mathematical Theory of Communication*. Illinois: University of Urbana.
- Sparks, TC., & Nauen, R. (2015). IRAC: Mode of action classification and insecticide resistance management. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 121, 122–128.
- Srinivasan, K., & Ganeshan, G. (2002). Role of *Menochilus sexmaculatus* in the biological control of rice pests. *Journal of Biological Control*, 16(1), 21–26.
- Tasen, W. (2018). Basic techniques in forest entomological survey and research. Bangkok: Faculty of Forestry, Kasetsart University. (in Thai)
- Wäckers, FL., Romeis, J., & van Rijn, P. (2007). Nectar and pollen feeding by insect herbivores and implications for multitrophic interactions. *Annual Review of Entomology*, 52(1), 301–323.
- Yele, Y., Chander, S., Suroshe, SS., Nebapure, S., Tenguri, P., & Sundaran, A. P. (2023). Ecological engineering in low land rice for brown plant hopper, *Nilaparvata lugens* (Stål) management. *PeerJ – the Journal of Life and Environmental Sciences*, 11, 1–21.
- Zhang, R., Yang, Y., Zhang, J., & Zhang, J. (2020). Application of Shannon–Wiener index to measure the diversity of insects in rice ecosystems. *Ecological Indicators*, 113, 106253.

การจัดการขนส่งสีเขียวและแบบสลับในการเพิ่มประสิทธิภาพอย่างยั่งยืนของผู้ให้บริการขนส่ง
ในระบบโซ่ความเย็นอุตสาหกรรมอาหารในประเทศไทย

Lean and Green Transportation Management for Sustainable Efficiency Improvement
of Transportation Service Providers in Thailand Food Cold Chain

ธมนวรรณ เฟื่องประยูร^{1*} และ ณัฐพัชร์ อารีรัชกุลกานต์¹

Tamonwan Fuangprayoon^{1*} and Natapat Areerakulkan¹

¹วิทยาลัยโลจิสติกส์และซัพพลายเชน มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา กรุงเทพมหานคร

¹College of Logistics and Supply Chain Management, Suan Sunandha Rajabhat University, Bangkok

*Corresponding Author: s64584923014@ssru.ac.th

Received: April 8, 2025

Revised: May 25, 2025

Accepted: July 30, 2025

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลกระทบของการขนส่งสีเขียวและการขนส่งแบบสลับต่อประสิทธิภาพการดำเนินงานอย่างยั่งยืนของผู้ให้บริการขนส่งสินค้าในระบบโซ่ความเย็นอาหารในประเทศไทย โดยใช้การวิจัยแบบผสมวิธี ประกอบด้วย การเก็บข้อมูลเชิงปริมาณจากผู้ให้บริการขนส่ง 408 ราย และข้อมูลเชิงคุณภาพจากผู้ให้ข้อมูลสำคัญ 12 ราย การวิเคราะห์ด้วยโมเดลสมการโครงสร้าง พบว่าการขนส่งสีเขียวและการขนส่งแบบสลับส่งผลในเชิงบวกต่อประสิทธิภาพการให้บริการขนส่งในระบบโซ่ความเย็นและผลการดำเนินงานอย่างยั่งยืนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 โมเดลที่พัฒนาขึ้นมีความสอดคล้องกับข้อมูลเชิงประจักษ์ ($\chi^2 = 119.077$, $df = 109$, $p = 0.240$, $\chi^2/df = 1.092$, $RMSEA = 0.015$, $GFI = 0.969$, $CFI = 0.997$) และสามารถอธิบายความแปรปรวนของความยั่งยืนได้ร้อยละ 74.2 การขนส่งสีเขียวซึ่งประกอบด้วย การลดการปล่อยก๊าซ การใช้น้ำมันที่ประหยัดพลังงาน และการประยุกต์เทคโนโลยีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ช่วยเสริมประสิทธิภาพการดำเนินงานและผลลัพธ์ด้านสิ่งแวดล้อม ขณะที่การขนส่งแบบสลับ ซึ่งเน้นการจัดความถี่ในการจัดส่ง การปรับปรุงเส้นทาง และความร่วมมือช่วยเพิ่มความคุ้มค่า การตอบสนอง และความน่าเชื่อถือของการให้บริการขนส่งสินค้า ผลการวิจัยชี้ให้เห็นถึงประโยชน์เชิงเสริมจากการบูรณาการทั้งสองแนวทาง โดยแนวทางสลับให้ผลลัพธ์ต่อประสิทธิภาพในระยะสั้น ขณะที่แนวทางสีเขียวสร้างผลลัพธ์เชิงสิ่งแวดล้อมในระยะยาว โมเดลนี้สามารถใช้เป็นกรอบเชิงกลยุทธ์เพื่อส่งเสริมระบบขนส่งอย่างยั่งยืนสำหรับภาคการขนส่งโซ่ความเย็นในประเทศไทย

คำสำคัญ: การขนส่งแบบสลับ, การขนส่งสีเขียว, ผู้ให้บริการขนส่งสินค้า, ผลการดำเนินงานอย่างยั่งยืน, ระบบโซ่ความเย็นอาหาร

Abstract

This study examines the impact of green and lean transportation on the sustainable performance of transport service providers in Thailand's food cold chain. Utilizing a mixed-methods research design, quantitative data were collected from 408 providers and complemented with qualitative insights from 12 key informants. The research investigates causal relationships among green transportation, lean transportation, efficiency of transport service in cold chain, and sustainable performance. Structural

Equation Modeling (SEM) results indicate that both green and lean transportation significantly influence transport efficiency and sustainability, with direct and indirect effects observed at the 0.05 significance level. The model demonstrated a strong fit ($\chi^2 = 119.077$, $df = 109$, $p = 0.240$, $\chi^2/df = 1.092$, $RMSEA = 0.015$, $GFI = 0.969$, $CFI = 0.997$), explaining 74.2% of the variance in sustainable performance. Green transportation practices such as emissions reduction, energy-efficient vehicles, and environmentally friendly technologies were found to enhance operational efficiency and environmental outcomes. Meanwhile, lean transportation through waste elimination, route optimization and cross-functional collaboration improved cost-effectiveness, service responsiveness, and delivery reliability. Efficiency of transport service was measured through indicators such as delivery reliability, traceability, energy savings, and service quality. Sustainable performance was assessed across economic (cost savings, profitability), environmental (carbon emissions, energy usage), and social (safety, quality assurance) dimensions. The empirical findings substantiate the synergistic benefits of integrating green and lean transportation, with lean practices exerting more immediate effects on operational efficiency, while green practices yield more pronounced long-term environmental advantages. The study offers a validated conceptual model with high practical relevance, serving as a strategic framework for logistics practitioners and policymakers to advance sustainable transportation systems within cold chain logistics in emerging economies such as Thailand.

Keywords: Lean transportation, Green transportation, Transportation service providers, Sustainable performance, Food cold chain

1. Introduction

The escalating emissions of carbon dioxide and other greenhouse gases (GHGs) have been widely recognized as primary drivers of global warming and climate change, leading to severe environmental disturbances worldwide (United Nations Thailand, 2022). Within the logistics sector, the food supply chain, especially temperature-controlled transportation, has emerged as a significant contributor to these emissions due to its high energy consumption in refrigeration, packaging, and vehicle operations (Leng et al., 2024). In Thailand, these concerns are particularly critical. The country's food cold chain industry is expanding rapidly in response to increasing demand for fresh and perishable products. However, substantial challenges remain. According to the Department of Internal Trade (2022), up to 30% of perishable goods are lost during transport due to delays, inadequate temperature monitoring, and substandard storage infrastructure. The Office of Trade Policy and Strategy (2022) also noted a 34.1% rise in logistics business registrations in 2021, yet many operators fail to adopt sustainable logistics practices or align with Sustainable Development Goals (SDGs). Moreover, Thailand's cold chain logistics infrastructure ranks 32nd globally (World Bank, 2023), indicating significant room for improvement in operational efficiency and sustainability integration.

To address these challenges, the adoption of green and lean transportation strategies has been increasingly recognized as a viable solution. Green transportation emphasizes emission reduction, clean

energy, and eco-innovation, while lean transportation targets waste minimization and process efficiency. These dual strategies can collectively enhance service quality, cost-effectiveness, and environmental responsibility, particularly in emerging economies like Thailand where logistical inefficiencies and environmental pressures co-exist. This study is theoretically grounded in the Resource-Based View (RBV) and the concept of Eco-Efficiency. The RBV explains how firms can leverage internal capabilities such as green and lean practices to achieve a sustainable competitive advantage. Eco-efficiency provides a framework for balancing economic performance with environmental outcomes through resource optimization.

Despite extensive research in advanced economies, two critical research gaps remain. First, there is limited empirical investigation of green-lean integration in emerging markets, including Thailand's food cold chain. Second, the measurement of eco-efficiency in transportation systems remains underdeveloped, with few models incorporating both environmental and service performance dimensions.

Against this backdrop, the present study aims to develop and empirically validate a SEM that explores the causal relationships among green transportation, lean transportation, efficiency of transport service, and sustainable performance in Thailand's food cold chain. The structure of the paper is as follows: literature review, research methodology, results, and discussion of the findings and implications. A gap analysis table is also introduced in the literature review to contextualize this study's unique contribution to theory and practice.

The subsequent section reviews theoretical and empirical literature related to green transportation, lean transportation, efficiency of transportation service in cold chain, and sustainable performance. Emphasis is placed on identifying research gaps and clarifying the unique context of the Thai food cold chain.

1.1 Green Transportation

Green transportation has emerged as a multidimensional strategy to enhance both environmental and operational performance in cold chain logistics, including the use of green energy (Chen et al., 2023; Zhao et al., 2023; Musolino et al., 2019), technological innovation (Calati et al., 2022; Behdani et al. 2019), route optimization (Li et al., 2019; Fang et al., 2022), and systematic transportation preparation (Khumalo et al., 2023; Jovanovic et al., 2020). These elements have been shown to reduce greenhouse gas emissions, lower operational costs, minimize product spoilage, and enhance delivery reliability. In particular, the adoption of environmentally friendly vehicles has been shown to significantly support the effectiveness of green transportation policies in reducing ecological footprints. (Rehman et al., 2023)

1.2 Lean Transportation

Lean transportation is recognized as a strategic approach to improve service efficiency, reduce costs, and enhance logistics quality by minimizing waste and optimizing transport processes. Core elements include collaboration, coordination, and efficient resource flow to lower overall transportation costs (Kurganov et al., 2021), along with integration, innovation, process flow, inventory control, and waste reduction (Lobo & Pinho, 2019). These are further supported by multimodal planning, staff collaboration, and transportation mode shifts (Colicchia et al., 2017). Improvements in road transport can be achieved

through goal-setting, technology adoption, effective resource management, and clear communication (Garza-Reyes et al., 2017). Lean principles have been shown to enhance operational quality (Kawa et al., 2019; Kuvvetli & Firuzan, 2019) and increase responsiveness to customer demands (Ponte et al., 2018), particularly when supported by standardized procedures and real-time technologies (Lobo & Pinho, 2019).

While Faheem et al. (2023) and Musolino et al. (2019) emphasize green innovation, renewable energy, and emission-reducing policies, Koson (2016) focus more on operational practices such as GPS monitoring, route planning, and minimizing fuel consumption. Similarly, lean transportation is explored in global contexts using Lean Six Sigma and value stream mapping (Kurganov et al., 2021), whereas Thai research often concentrates on waste reduction through staff participation and digital tools in SMEs.

1.3 Efficiency of transportation service in cold chain

Efficiency of transportation service in cold chain is essential for maintaining product quality, reducing energy use, and enhancing service delivery (Ma & Zhao, 2024). Key contributing factors include service level, reliability, quality control, management, traceability, and energy efficiency (Kumar, Tyagi & Sachdeva, 2023; Liao et al., 2023; Meng et al., 2023). Reliable service and freshness of perishable goods depend on timely delivery and accurate tracking (Qi et al., 2022; Samantha, Louise & Jonathan, 2022). Technologies such as real-time monitoring and traceability systems play a crucial role in minimizing risks and ensuring quality (Islam & Cullen, 2021; Óskarsdóttir & Oddsson, 2019). Effective management and energy-saving practices help reduce costs and environmental impacts while preserving product integrity (Chaitangjit & Ongkunaruk, 2019; Kumar, Tyagi & Sachdeva, 2023). Moreover, cold chain performance aligns with transportation efficiency factors such as speed, economy, safety, convenience, and punctuality (Bardi et al., 2006).

Despite substantial support for green and lean strategies, some studies have reported mixed outcomes. For example, Jovanovic et al. (2020) found that environmental constraints and lack of incentives limited green adoption in Canadian SMEs. Similarly, Iranmanesh et al. (2019) noted that lean initiatives without technological readiness may yield limited improvement. These contradictory findings suggest that context matters factors such as infrastructure, regulation, and firm capacity, may influence outcomes.

1.4 Sustainable performance

Sustainable performance in cold chain logistics is commonly evaluated through economic, social, and environmental dimensions (Leng et al., 2024). These pillars are central to sustainability frameworks in food and agricultural supply chains (Liao et al., 2023; Saulick et al., 2023). In cold chain logistics, practices such as emissions reduction, efficient packaging, and energy-saving technologies are linked to improved service and competitiveness (Bishara, 2006). Green and lean transportation strategies enhance sustainability by reducing carbon emissions, improving efficiency, and minimizing waste (Rodríguez et al., 2016).

Cold chain logistics abroad benefits from well-integrated infrastructure and standardized practices (Kumar et al., 2023), while Thailand faces challenges such as energy inefficiency, fragmented cold storage facilities, and inconsistent traceability systems (DITP, 2022). Sustainability performance in advanced economies is increasingly guided by the Triple Bottom Line (Cetinkaya et al., 2011). While in Thailand, the implementation of the Triple Bottom Line framework remains inconsistent, the Stock Exchange of Thailand

(SET) has attempted to promote transparency through its sustainability reporting guidelines. These guidelines encourage the preparation of annual sustainability reports that are consistent with the Global Reporting Initiative (GRI) framework (Arunee & Supakorn, 2017).

1.5 Relationship between green transportation, lean transportation, efficiency of transportation service in cold chain and sustainable Performance

The literature indicates that green transportation serves as a critical driver in improving the efficiency of cold chain logistics while simultaneously advancing sustainable performance outcomes. (Sun, Gu & Wu, 2022; Fang et al., 2022). Studies have shown that adopting green transportation can reduce environmental impacts while simultaneously improving economic and social performance across the cold chain (Trivellas et al., 2020; Qi et al., 2020). Similarly, lean transportation contributes to improved process efficiency, waste reduction, and cost savings, which positively affect both service quality and long-term sustainability (Kurganov et al., 2020; Al-Refaie et al., 2020). Lean transportation also strengthens performance through supply chain integration, employee involvement, and continuous improvement (Iranmanesh et al., 2019). In the cold chain context, lean transportation supports operational efficiency and risk mitigation while maintaining service responsiveness (Costa et al., 2020; Nedeliakova et al., 2020). Moreover, Lean Six Sigma approaches have demonstrated strong positive effects on economic, environmental, and social sustainability indicators (Barcia et al., 2022). The synergy between green and lean transportation enhances delivery reliability, reduces spoilage and emissions, and fosters sustainable business practices. (Aytekin et al., 2024; Ma & Zhao, 2024). Research further confirms that improved transportation efficiency in the cold chain, measured by factors such as service quality, reliability, and energy savings, directly contributes to sustainable performance across all three dimensions (Saulick et al., 2023; Zope et al., 2022; Leng et al., 2024).

Although many studies examine green or lean practices in isolation, few have explored their integrated effects within emerging economies, especially Thailand's cold chain sector, where current models of eco-efficiency often emphasize either economic or environmental aspects but lack holistic integration with logistics service efficiency. Hence, this study addresses the following gaps: 1) Limited empirical research on combined green-lean transportation strategies in Thai cold chain logistics 2) Insufficient modeling of eco-efficiency that incorporates service-level variables like reliability and traceability 3) Lack of standardized metrics linking logistics efficiency to sustainability performance.

Drawing from the RBV and eco-efficiency theory, this study proposes a conceptual model linking green transportation, lean transportation, efficiency of transportation service in cold chain, and sustainability performance. The hypotheses are derived from the literature review and are tested using SEM. The research model includes the following hypotheses: H1: Green transportation directly influences efficiency of transportation service in Thailand's food cold chain. H2: Lean transportation directly influences efficiency of transportation service in Thailand's food cold chain. H3: Green transportation directly influences sustainability performance of the transportation service providers in Thailand's food cold chain. H4: Lean transportation directly influences sustainability performance of the transportation service providers in Thailand's food cold chain. H5: Efficiency of transportation service in cold chain directly influences

sustainability performance of the transportation service providers in Thailand's food cold chain. H6: Green transportation indirectly influences sustainability performance of the transportation service providers in Thailand's food cold chain through efficiency of transportation service in cold chain. H7: Lean transportation indirectly influences sustainability performance of the transportation service providers in Thailand's food cold chain through efficiency of transportation service in cold chain.

Against this backdrop, the present study aims to develop and empirically test a SEM that examines the relationship between green transportation, lean transportation, and efficiency of transportation service in cold chain as predictors of sustainable performance among transportation service providers in Thailand's food cold chain. This research addresses the growing need for strategic and operational insights into how green and lean transportation can be effectively integrated to promote environmental, economic, and social sustainability in Thailand's food cold chain.

2. Methodology

Grounded in the theoretical frameworks of the Resource-Based View (RBV) and eco-efficiency theory, this study investigates the extent to which green and lean transportation practices influence the efficiency and sustainable performance of transport service providers operating within Thailand's food cold chain. To achieve this aim, a conceptual model was developed and empirically tested through a mixed-methods research design. The study is structured around three core research questions: 1) To what extent do green and lean transportation practices affect the efficiency and sustainable performance of cold chain logistics in Thailand? 2) What is the mediating role of efficiency of transportation service in cold chain in the relationship between green or lean transportation and sustainable performance? 3) What contextual insights can be drawn from qualitative interviews to enhance understanding of these relationships?

To address these questions, the study adopted a sequential mixed-methods approach that integrated both quantitative and qualitative components. The quantitative phase involved the development and testing of a structural model using SEM, while the qualitative phase was designed to supplement and enrich these findings through thematic content analysis.

The research was conducted between May and October 2024. Quantitative data were collected from July to September 2024 at the operational premises of cold chain food transport service providers using truck-based logistics across various regions of Thailand.

2.1 Quantitative Approach

A structured questionnaire was designed based on a comprehensive literature review, comprising three sections and employing a 5-point Likert scale (1 = Never or almost never, 2 = Rarely, 3 = Sometimes, 4 = Frequently, 5 = Always). The instrument was reviewed and validated by five subject-matter experts, with an Index of Item-Objective Congruence (IOC) of at least 0.70. Furthermore, a pilot study involving 30 transport firms yielded a Cronbach's alpha coefficient of 0.933, confirming the internal consistency of the instrument.

For the sampling process, the study population comprised 1,015 food cold chain transport service providers using truck-based logistics in Thailand (Department of Industrial Promotion, Ministry of Industry, 2020). A stratified random sampling strategy was employed based on company size, classified by registered capital (≥ 10 million THB for large enterprises and < 10 million THB for small ones), in accordance with the criteria of the Department of Business Development. Consequently, the final sample consisted of 408 firms, which exceeded Hair et al. (2010) recommendation of 10–20 respondents per variable for SEM analysis, based on 17 observed variables.

Data collection was conducted with appropriate ethical clearance and administrative approvals. An overall response rate exceeding 80% was achieved. Non-response bias was minimized through follow-up procedures and comparative analysis between early and late respondents. The data were analyzed using SPSS (George et al., 2019) for descriptive statistics, including skewness, kurtosis, and Pearson's correlation coefficients (George & Mallery, 2019). AMOS software was used for SEM analysis, employing the Maximum Likelihood Estimation (MLE) method to assess model fit using standard indices such as chi-square (χ^2), Root Mean Square Error of Approximation (RMSEA), Goodness-of-Fit Index (GFI), Adjusted Goodness-of-Fit Index (AGFI), Comparative Fit Index (CFI), and Root Mean Square Residual (RMR) (Hair et al., 2010; Kline, 2016).

2.2 Qualitative Approach

To deepen the understanding of the quantitative findings, qualitative data were collected from 12 key informants selected through purposive sampling, including representatives from logistics service providers, academic experts in logistics and supply chain management, and clients of cold chain food logistics services. Semi-structured interviews were conducted and audio-recorded with prior consent. Moreover, an interview guide comprising 15 questions was developed, derived from the significant variables identified in the SEM model. The interviews were transcribed and analyzed using a two-cycle coding process: initial open coding to identify emerging concepts, followed by axial coding to group these into overarching themes. To ensure analytical rigor, intercoder reliability was verified by an independent reviewer, and triangulation was employed to cross-validate findings across respondent groups.

Therefore, this mixed-methods design enabled a robust and holistic exploration of the relationships among green transportation, lean transportation, efficiency of transport services, and sustainable performance in Thailand's food cold chain.

3. Results

The quantitative analysis investigates the impact of green and lean transportation on the sustainable performance of transport service providers in Thailand's food cold chain. The findings comprise descriptive statistics, model fit evaluation and SEM, complemented by qualitative insights from industry experts to provide a comprehensive view of the key factors driving sustainable performance.

3.1 Quantitative research results

The empirical results were derived based on a research conceptual framework developed through the literature review. Descriptive statistics are presented for the observed variables, including measures of central tendency and relationships among constructs. Model fit indices are assessed to evaluate the adequacy of the measurement model. SEM results reveal the causal impacts of green transportation, lean transportation, and efficiency of transportation service in cold chain on sustainable performance. The revised structural model further delineates the enhanced causal relationships among these factors within the context of transportation service providers in Thailand's food cold chain.

Table 1 shows the descriptive analysis of the distribution of observed variable for each latent variable used in the research is shown. Descriptive statistics used were mean ($\bar{x}$), standard deviation (SD), skewness (Sk), kurtosis (Ku), and coefficient of variation (% CV). The criteria for evaluating normal distribution of data were skewness and kurtosis. The skewness must be between -3 and +3 and the kurtosis must be less than 10 (Kline, 2011).

The descriptive statistics reveal consistently high mean scores across all observed variables for Green Transportation (GT), Lean Transportation (LT), Efficiency of Transportation Service in Cold Chain (ET), and Sustainable Performance (SP), with most mean values above 3.80. This indicates a strong level of implementation of sustainable logistics practices among the participating cold chain transport firms. Sustainable Performance items (SP1–SP3), in particular, show the highest average ratings (up to 4.18), reflecting broad consensus on their significance. The relatively low standard deviations and coefficients of variation (generally under 20%) demonstrate a high degree of response consistency. Additionally, skewness and kurtosis values fall within the acceptable ranges (Skewness: -3 to +3; Kurtosis < 10), confirming normal distribution and the appropriateness of the data for further structural analysis (Kline, 2011). Most variables exhibit slight negative skewness, suggesting a general tendency toward favorable perceptions.

In Addition, the results revealed statistically significant differences in mean scores for Green Transportation and Efficiency of Transportation Service in Cold Chain. Specifically, large enterprises reported significantly higher levels of Green Transportation ($M = 4.05$, $SD = 0.67$) than small enterprises (Mean = 3.85, S.D. = 0.76), $t(406) = 2.96$, $p < 0.01$. Similarly, Efficiency of Transportation Service was rated higher among large firms (Mean = 4.14, S.D. = 0.70) than small firms (Mean = 3.98, S.D. = 0.73), $t(406) = 2.47$, $p < 0.05$.

Furthermore, correlation analysis of the 17 observed variables indicated that 136 pairs were statistically significant at the 0.05 level, with positive coefficients ranging from 0.368 to 0.829, indicating strong directional alignment among constructs. The Bartlett's Test of Sphericity ($\chi^2 = 8507.373$, $df = 136$, $p = 0.000$) confirmed that the correlation matrix significantly differs from the identity matrix. This finding, supported by a high Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) measure of sampling adequacy (0.940), affirms the suitability of the dataset for SEM. These findings provide a solid foundation for subsequent multivariate analysis and support the theoretical integration of green and lean transportation with efficiency of transportation service in cold chain and sustainable performance. Thereafter, the coefficient correlation analysis of observed variables is shown in Figure 1.

Table 1. Descriptive Analysis of Observed Variables

Variable	Mean	S.D.	Max	Min	% C.V.	Skewness	Kurtosis
Green Transportation (GT)							
GT1	3.95	0.70	5.00	1.67	17.72%	-0.33	-0.39
GT2	3.97	0.71	5.00	1.33	17.88%	-0.44	-0.37
GT3	3.95	0.73	5.00	1.00	18.48%	-0.42	-0.45
GT4	3.96	0.78	5.00	2.00	19.70%	-0.42	-0.24
Lean Transportation (LT)							
LT1	3.88	0.76	5.00	1.33	19.59%	-0.50	0.86
LT2	3.91	0.75	5.00	0.67	19.18%	-0.44	-0.12
LT3	3.81	0.80	5.00	1.00	21.00%	-0.43	-0.16
LT4	3.83	0.78	5.00	1.67	20.37%	-0.32	-0.54
Efficiency of Transportation Service in Cold Chain (ET)							
ET1	4.02	0.78	5.00	1.33	19.40%	-0.64	-0.09
ET2	4.04	0.77	5.00	1.33	19.06%	-0.67	0.03
ET3	4.05	0.69	5.00	1.00	17.04%	-0.66	0.38
ET4	4.06	0.68	5.00	2.00	16.75%	-0.45	-0.53
ET5	4.05	0.71	5.00	1.67	17.53%	-0.55	-0.23
ET6	4.05	0.69	5.00	0.67	17.04%	-0.61	0.46
Sustainability Performance (SP)							
SP1	4.13	0.78	5.00	1.00	18.89%	-0.76	0.11
SP2	4.16	0.76	5.00	1.75	18.27%	-0.72	-0.34
SP3	4.18	0.72	5.00	1.33	17.22%	-0.81	0.21

The correlation coefficient of the 17 observed variables of the measurement model indicated that correlation of 136 pairs of variables was statistically significant at the level of 0.05 with the values greater than zero. The correlation coefficient also showed positive relationships between the variables, which were in the same direction, with values ranging from 0.368 to 0.829. The Bartlett's Test of Sphericity showed the values of Chi-square = 8507.373, df = 136, and p -value = 0.000, indicating that the correlation matrix differs from the identity matrix at a statistical significance level of 0.05. This is consistent with the result of the Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) test which showed the value α of 0.940. This proves that the variables were highly correlated and suitable for use in the analysis of SEM. The coefficient correlation analysis of observed variables is shown in Figure 1.

Variable	Correlation Coefficient																
	LT1	LT2	LT3	LT4	GT1	GT2	GT3	GT4	ET1	ET2	ET3	ET4	ET5	ET6	SP1	SP2	SP3
LT1	1.000																
LT2	0.804**	1.000															
LT3	0.774**	0.789**	1.000														
LT4	0.696**	0.741**	0.767**	1.000													
GT1	0.775**	0.766**	0.778**	0.788**	1.000												
GT2	0.637**	0.669**	0.639**	0.614**	0.745**	1.000											
GT3	0.622**	0.673**	0.648**	0.716**	0.684**	0.705**	1.000										
GT4	0.521**	0.602**	0.576**	0.570**	0.612**	0.706**	0.702**	1.000									
ET1	0.680**	0.643**	0.719**	0.641**	0.653**	0.666**	0.644**	0.597**	1.000								
ET2	0.698**	0.667**	0.699**	0.641**	0.681**	0.637**	0.655**	0.573**	0.818**	1.000							
ET3	0.740**	0.700**	0.752**	0.705**	0.748**	0.726**	0.734**	0.652**	0.829**	0.902**	1.000						
ET4	0.657**	0.620**	0.679**	0.626**	0.646**	0.553**	0.609**	0.542**	0.654**	0.698**	0.816**	1.000					
ET5	0.584**	0.566**	0.636**	0.576**	0.567**	0.468**	0.550**	0.467**	0.586**	0.636**	0.730**	0.957**	1.000				
ET6	0.693**	0.635**	0.739**	0.616**	0.691**	0.570**	0.591**	0.520**	0.723**	0.726**	0.764**	0.739**	0.694**	1.000			
SP1	0.726**	0.777**	0.728**	0.702**	0.710**	0.634**	0.661**	0.632**	0.704**	0.659**	0.724**	0.668**	0.586**	0.697**	1.000		
SP2	0.579**	0.578**	0.643**	0.628**	0.549**	0.368**	0.486**	0.492**	0.527**	0.522**	0.551**	0.538**	0.496**	0.593**	0.662**	1.000	
SP3	0.500**	0.559**	0.597**	0.611**	0.644**	0.652**	0.582**	0.597**	0.536**	0.537**	0.609**	0.468**	0.371**	0.552**	0.543**	0.422**	1.000
$\bar{x}$	3.88	3.91	3.82	3.84	3.95	3.97	3.95	3.96	4.02	4.04	4.05	4.06	4.05	4.05	4.13	4.16	4.18
SD.	0.76	0.75	0.80	0.78	0.96	0.68	0.71	0.73	0.78	0.77	0.70	0.68	0.71	0.69	0.78	0.77	0.72
Bartlett's test of Sphericity: Chi-Square = 8507.373, df = 136, p-value = 0.000, KMO = 0.940																	

Remark: ** $p < 0.01$

Figure 1. Correlation Matrix, Mean, Standard Deviation of Observed Variables of the Measurement Model

From Figure 1, the correlation matrix reveals significant positive relationships among all latent variables ($p < 0.01$), indicating that the observed variables are directionally aligned and theoretically coherent. In particular, the correlation between lean transportation and efficiency of transportation service in cold chain is notably strong ($r = 0.684$), suggesting that efforts to streamline transportation processes, such as route optimization and waste reduction, are closely associated with improvements in service reliability, responsiveness, and overall transport quality. Although the correlations between green transportation and other variables are slightly lower, they are still statistically significant and meaningful (e.g., $r = 0.638$ with efficiency of transportation service in cold chain). This finding reflects the influence of environmentally responsible practices, such as emissions reduction and the use of energy-efficient technologies, on service outcomes. Furthermore, these interrelationships reinforce the structure of the conceptual model and confirm that both green and lean practices play a significant role in enhancing transport service efficiency as well as sustainable performance. The findings affirm the adequacy of the measurement model for SEM and highlight the practical synergy between lean and green approaches in advancing cold chain logistics in Thailand.

From Tables 2 and 3, the SEM analysis of causal relationships among green transportation management, lean transportation management, and efficiency of transportation service affecting sustainable performance of transportation service providers in Thailand's food cold chain indicated that the goodness of fit of the model was satisfactory. This is based on fit index assessment which showed Chi – Square = 119.077, $df = 109$, and $p\text{-value} = 0.240$. Moreover, χ^2 was greater than 0.05 at a statistical significance level of 0.05 and $\chi^2/df = 1.092$ which was less than 2. In addition, the other indices $RMSEA = 0.015$ and $RMR = 0.018$ had the values close to zero and $GFI = 0.969$, $AGFI = 0.957$, $CFI = 0.997$ had the values close to one. This proves that the SEM of causal relationships among green transportation management, lean

transportation management, and efficiency of transportation service affecting sustainable performance of transportation service providers in Thailand's food cold chain was valid. The analysis showed positive factor loadings for each variable greater than zero at a statistical significance level of 0.05. The variable with the highest factor loading was environmental performance at 0.853, while the variable with the lowest factor loading was Integrated Transportation at 0.592.

The confirmatory factor analysis (CFA) conducted for the four latent constructs, namely Green Transportation (GT), Lean Transportation (LT), Efficiency of Transportation Service in Cold Chain (ET), and Sustainability Performance (SP), demonstrated strong construct validity and model fit. All observed variables had standardized factor loadings (β) exceeding 0.60, which meets the threshold for convergent validity (Hair et al., 2010). The reliability and validity of each construct were further confirmed through composite reliability (CR) and average variance extracted (AVE) calculations. Specifically, all constructs had CR values greater than 0.70 and AVE values exceeding 0.50. For example, GT reported a CR of 0.872 and an AVE of 0.594; LT showed CR = 0.843 and AVE = 0.563; ET yielded CR = 0.917 and AVE = 0.649; and SP had CR = 0.899 and AVE = 0.742. These results confirm the internal consistency and convergent validity of the measurement model and support its use for subsequent structural equation modeling (SEM).

Table 2. Fit Index Analysis

Fit Index	Criteria of Acceptable Fit	Before Model Modification		After Model Modification	
		Value	Assessment of Fit	Value	Assessment of Fit
χ^2	$p > 0.05$	0.000	Not Acceptable	0.240	Acceptable
χ^2 / df	< 2.00	3.517	Not Acceptable	1.092	Acceptable
GFI	≥ 0.90	0.900	Acceptable	0.969	Acceptable
AGFI	≥ 0.90	0.864	Not Acceptable	0.957	Acceptable
CFI	≥ 0.90	0.923	Acceptable	0.997	Acceptable
RMSEA	< 0.05	0.076	Acceptable	0.015	Acceptable
RMR	< 0.05	0.023	Acceptable	0.018	Acceptable

Table 3. Results of SEM Analysis

Variable	b	β	S.E.	t (C.R.)	R ²	Factor Score
GT1	0.672	0.612	0.053	12.573***	0.375	0.089
GT2	0.896	0.817	0.055	16.172***	0.667	0.336
GT3	0.733	0.640	0.056	13.027***	0.410	0.105
GT4	1.000	0.845	<- ->	<- ->	0.714	0.376
LT1	0.755	0.648	0.058	13.097***	0.420	0.111
LT2	0.686	0.592	0.058	11.863***	0.350	0.067
LT3	1.009	0.823	0.062	16.397***	0.678	0.320
LT4	1.000	0.831	<- ->	<- ->	0.690	0.342
ET1	1.217	0.763	0.086	14.209***	0.582	0.114
ET2	0.206	0.772	0.084	14.438***	0.595	0.125
ET3	1.025	0.730	0.075	13.679***	0.533	0.119
ET4	1.031	0.743	0.074	13.857***	0.552	0.167
ET5	0.986	0.683	0.077	12.861***	0.467	0.078
ET6	1.000	0.713	<- ->	<- ->	0.508	0.144
SP1	1.000	0.838	<- ->	<- ->	0.703	0.356
SP2	0.883	0.755	0.053	16.775***	0.570	0.189
SP3	0.941	0.853	0.048	19.542***	0.727	0.298

Chi-Square (CMIN) = 119.077, df = 109, p-value = 0.240, RMSEA = 0.015, GFI = 0.969, AGFI = 0.957

Remark: β refers to factor loading, R² refers to coefficient of determination, $p < ***0.001$, the symbol <- -> refers to constrained parameters, therefore S.E. and t (C.R.) values are not reported.

Additionally, the coefficient of determination of the variables (R²) used to explain the covariance of the causal relationship model of green transportation management, lean transportation management, and efficiency of transportation service affecting sustainable performance of transportation service providers in Thailand's food cold chain had values ranging from 0.350 to 0.727. The R² of each variable is described as follows:

- Green Transportation (GT) which consisted of 4 observed variables had factor loadings ranging from 0.612 to 0.845, which were statistically significant at the level of 0.05. The observed variable with the highest factor loading was transport preparation (GT4) which had a factor loading of 0.845 and a higher covariance than other variables (R² = 0.714).
- Lean Transportation (LT) which consisted of 4 observed variables had factor loadings ranging from 0.592 to 0.831, which were statistically significant at the level of 0.05. The observed variable with the highest factor loading was collaboration (LT4) which had a factor loading of 0.831 and a higher covariance than other variables (R² = 0.690).
- Efficiency of Transportation Service in Cold Chain (ET) which consisted of 6 observed variables had factor loadings ranging from 0.638 and 0.772, which were statistically significant at the level of 0.05. The observed variable with the highest factor loading was reliability (ET2) which had a factor loading of 0.772 and a higher covariance than other variables (R² = 0.595).

- Sustainability Performance (SP) which consisted of 3 observable variables had factor loadings ranging from 0.755 to 0.853, which were statistically significant at the level of 0.05. The observed variable with the highest factor loading was environmental performance (SP3) which had a factor loading of 0.853 and a higher covariance than other variables ($R^2 = 0.727$).

From the SEM analysis of causal relationships among green transportation management, lean transportation management, and efficiency of transportation service affecting sustainable performance of transportation service providers in Thailand's food cold chain, it was found that the variance of the performance of transportation service providers in Thailand's food cold chain could be explained by all variables in the model at 83.90%. The factor loadings of all variables were greater than zero and positive at a statistical significance level of 0.05. The causal effect analysis of the variables is presented in Table 4.

Table 4. The Causal Effect Analysis of green transportation management, lean transportation management and efficiency of transportation service affecting sustainable performance of transportation service providers in Thailand food cold chain

Independent Variable	Effect	Dependent Variable	
		Efficiency of Transportation Service in Cold Chain (ET)	Sustainability Performance (SP)
R^2		0.839	0.742
Green Transportation (GT)	DE	0.307**	0.319**
	IE	-	0.093**
	TE	0.307**	0.412**
Lean Transportation (LT)	DE	0.399**	0.342**
	IE	-	0.121**
	TE	0.399**	0.463**
Efficiency of Transportation Service in Cold Chain (ET)	DE	-	0.303**
	IE	-	-
	TE	-	0.303**
Chi – Square = 119.077, df = 109, p -value = 0.240, χ^2/df = 1.092, RMSEA = 0.015, RMR = 0.018, GFI = 0.969, AGFI = 0.957, CFI = 0.997			

Remark: ** $p < 0.05$, the symbol (-) means that there is no path for parameter estimate according to the hypothesis.

From Table 4, the main findings are as follows:

- Green transportation had a direct effect on efficiency of transportation service in Thailand's food cold chain of 0.307 at a statistical significance level of 0.05. Hence, H1 was confirmed.
- Lean transportation had a direct effect on efficiency of transportation service in Thailand's food cold chain of 0.399 at a statistical significance level of 0.05. Thus, H2 was supported.

- Green transportation had a direct effect on sustainability performance of the transportation service providers in Thailand's food cold chain of 0.319 at a statistical significance level of 0.05. Therefore, H3 was accepted.
- Lean transportation had a direct effect on sustainability performance of the transportation service providers in Thailand's food cold chain of 0.342 at a statistical significance level of 0.05. As a result, H4 was affirmed.
- Efficiency of transportation service in cold chain had a direct effect on sustainability performance of the transportation service providers in Thailand's food cold chain of 0.303 at a statistical significance level of 0.05. Consequently, H5 was substantiated.
- Green transportation had an indirect effect on sustainability performance of the transportation service providers in Thailand's food cold chain through efficiency of transportation service in cold chain of 0.093 at a statistical significance level of 0.05. Accordingly, H6 was validated.
- Lean transportation had an indirect effect on sustainability performance of the transportation service providers in Thailand's food cold chain through efficiency of transportation service in cold chain of 0.121 at a statistical significance level of 0.05. Therefore, H7 was accepted.
- The results in Table 4 reveal that both green and lean transportation have a significant positive impact on the efficiency of transportation service in cold chain. However, Lean Transportation had a stronger direct effect on Efficiency ($\beta = 0.399$) than Green Transportation ($\beta = 0.307$), indicating that lean practices such as route planning and collaboration have a more immediate operational impact, whereas green practices offer longer-term environmental benefits.

Modified structural equation model is shown in Figure 2.

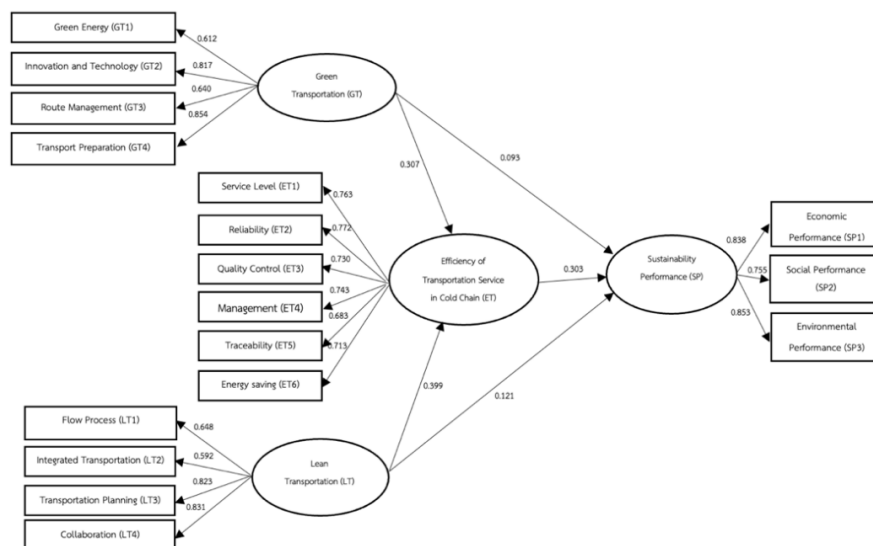


Figure 2. Modified Structural Equation Model of Causal Relationships among Lean Management, Green Transportation Management, and Efficiency of Transportation Service in Cold Chain on Sustainable Performance of Transportation Service Providers in Thailand's Food Cold Chain

3.2 Qualitative research results

The qualitative findings derived from in-depth interviews with key informants reinforce the quantitative results and provide a comprehensive understanding of the factors influencing sustainable performance of transport service providers in Thailand's food cold chain.

Green transportation was consistently perceived as a critical factor enhancing service efficiency and sustainable performance. Key informants emphasized the importance of preparation processes such as temperature-controlled packaging, quality control, and waste reduction. The integration of advanced technologies including GPS, AI-based route planning, temperature monitoring sensors, and Transport Management Systems (TMS) was highlighted as a means to improve accuracy, reduce emissions, and optimize operations. While green energy adoption (e.g., electric vehicles, solar power) was acknowledged for its long-term sustainability impact, cost and infrastructure limitations were noted as ongoing challenges.

Lean transportation was identified as having a direct and substantial impact on service efficiency by reducing waste, operational time, and costs. Informants stressed the importance of cross-functional collaboration, digital integration, and organizational learning. Lean practices contributed not only to economic performance but also to environmental sustainability by minimizing unnecessary transport trips and improving fuel efficiency through route optimization and recyclable packaging.

Efficiency of transportation service in cold chain was linked to sustainable performance in three dimensions: 1) economic (cost reduction, improved profitability), 2) social (worker safety, food quality), and 3) environmental (energy savings, emission reduction). Enhanced service reliability was found to increase customer trust and market competitiveness, while the use of digital tracking and real-time data improved transparency and traceability.

When comparing green and lean transportation, most participants agreed that lean practices had a greater immediate impact on operational efficiency, while green practices played a more prominent role in enhancing long-term environmental sustainability and corporate image. The optimal approach lies in the strategic integration of both paradigms.

Finally, beyond green and lean transportation, informants identified digital technology adoption, supply chain collaboration, and compliance with international standards (e.g., ISO 14001, HACCP, Q Cold Chain) as key enablers of both service efficiency and sustainable performance. These factors collectively strengthen competitive advantage and support long-term business resilience.

The qualitative findings provided substantial contextual confirmation of the statistical relationships identified through SEM. For example, the strong path coefficient from lean transportation to efficiency of transportation service ($\beta = 0.399$) was echoed in informant narratives emphasizing the importance of route optimization, reduction of delivery time, and collaborative logistics planning. One respondent noted, "We streamlined our routes and coordinated pickups, which cut delivery time by almost 30%." Similarly, the moderate but significant effect of green transportation ($\beta = 0.307$) was reinforced by multiple stakeholders who cited the impact of adopting fuel-efficient vehicles and cold-chain-compatible electric trucks. A logistics manager stated, "Switching to energy-efficient vehicles helped us reduce our costs and improve cold

retention.” These qualitative insights demonstrate alignment with the quantitative findings and affirm that both lean and green practices contribute meaningfully to improving service efficiency and sustainability. Notably, lean practices tend to yield more immediate operational benefits, while green practices may support longer-term environmental outcomes. This integration of quantitative and qualitative data reinforces the validity of the conceptual model and enriches its practical interpretation within Thailand’s food cold chain.

4. Discussion

The structural equation model (SEM) analysis confirmed that the proposed model, which comprises green transportation, lean transportation, and efficiency of transportation service in the cold chain as predictors of sustainable performance, demonstrated a good fit ($\chi^2 = 119.077$, $df = 109$, $p = 0.240$, $\chi^2/df = 1.092$, $RMSEA = 0.015$, $GFI = 0.969$, $CFI = 0.997$). This model explained 74.20% of the variance in sustainable performance among transportation service providers in Thailand’s food cold chain. Both green and lean transportation significantly influenced sustainable performance, either directly or indirectly. Notably, lean transportation had a stronger direct effect on both efficiency of transportation service in cold chain ($\beta = 0.399$) and sustainable performance ($\beta = 0.342$) than green transportation ($\beta = 0.307$ and $\beta = 0.319$, respectively).

This finding aligns with previous research conducted in advanced economies such as Germany and South Korea, where lean practices (e.g., route planning, cross-functional collaboration) have been shown to improve immediate operational efficiency and responsiveness (Kurganov et al., 2021; Costa et al., 2020). By contrast, green transportation’s relatively moderate impact reflects findings from China and Canada, where the adoption of environmentally friendly technologies yields longer-term sustainability outcomes but faces limitations due to high initial investment and regulatory gaps (Jovanovic et al., 2020; Rehman et al., 2023).

Comparatively, the Thailand’s food cold chain context presents unique infrastructural and regulatory challenges that influence these relationships. For instance, the fragmentation of cold storage facilities, high logistics costs, and inconsistent adoption of environmental regulations limit the effectiveness of green transportation. Moreover, while lean practices such as staff collaboration and route optimization are more readily applicable in Thai SMEs, green practices often require external investment and policy incentives to be fully effective. These findings suggest that the implementation of lean transportation is more accessible and impactful in Thailand’s current logistics landscape, whereas green transportation benefits are more contingent upon supportive infrastructure and policy alignment.

Additionally, subgroup analysis revealed that large enterprises implemented green and lean strategies more extensively than SMEs, likely due to superior resource availability, technological readiness, and greater pressure to align with international standards. This implies that company size and operational scale are important moderating factors in the effectiveness of sustainability interventions.

By triangulating these findings with qualitative data, this study reinforces the strategic value of integrating lean and green transportation in Thailand’s food cold chain. The differentiated impact and

feasibility of each approach highlight the need for tailored policy support and capacity-building efforts, especially for smaller logistics firms. The results contribute to the growing body of knowledge emphasizing contextual adaptability and cross-country comparison in sustainable logistics research.

5. Conclusion and Recommendations

Based on the findings of this study, the derived findings should be interpreted as strategic implications for enhancing sustainable performance within cold chain logistics. The validated structural equation model, comprising green transportation, lean transportation and efficiency of transportation service in cold chain as predictors of sustainable performance, demonstrated an excellent model fit and explained 74.20% of the variance in sustainable performance. Therefore, these findings should be viewed as evidence-based indicators that emphasize the significance of integrating environmentally responsible and efficiency-driven practices into cold chain operations.

The findings confirm that both green and lean transportation are critical drivers of transportation efficiency and that they have a direct and positive influence on the sustainable performance of transport service providers in Thailand's food cold chain. Consequently, the results of this study could serve as an empirical foundation for logistics managers, policymakers, and related industries to formulate evidence-based strategies that integrate environmental responsibility with operational excellence. Green transportation initiatives such as emissions reduction and energy-efficient practices, along with lean transportation such as route optimization, fuel efficiency improvement, and the elimination of non-value-adding transport activities can support the development of more resilient, adaptive, and sustainable cold chain transportation service.

This research provides a conceptual model and empirical evidence that may inform future studies and serve as a policy framework for enhancing transportation efficiency and achieving sustainability across economic, environmental, and social dimensions in Thailand's food cold chain. Lastly, the validated structural model presented in this study may provide a reference point for subsequent empirical research as well as model replication in other logistics-intensive sectors and diverse geographical contexts.

6. Acknowledgement

The authors gratefully acknowledge the transport service providers, logistics experts, and academic professionals who contributed valuable insights to this research. We give special thanks to the Thai Transportation and Logistics Association, the Department of Business Development, and the Ministry of Commerce Thailand for providing essential data. We also appreciate the institutional support from the College of Logistics and Supply Chain, Suan Sunandha Rajabhat University.

7. References

- Almouhanna, A., Quintero-Araujo, C. L., Panadero, J., Juan, A. A., Khosravi, B., & Ouelhadj, D. (2020). The location routing problem using electric vehicles with constrained distance. *Computers & Operations Research*, 115, 104864. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2019.104864>
- Al-Refaie, A., Al-Tahat, M., & Lepkova, N. (2020). Modelling relationships between agility, lean, resilient, green practices in cold supply chains using ISM approach. *Technological and Economic Development of Economy*, 26(4), 675–694. <https://doi.org/10.3846/tede.2020.12866>
- Arunee, T., & Supakorn, E. (2017). GRI standards: From reporting to sustainable business tools (in Thai). The Stock Exchange of Thailand.
- Aytekin, A., Korucuk, S., & Görçün, Ö. F. (2024). Determining the factors affecting transportation demand management and selecting the best strategy: A case study. *Transport Policy*, 146, 150–166. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2023.11.003>
- Barcia, K. F., Garcia-Castro, L., & Abad-Moran, J. (2022). Lean Six Sigma impact analysis on sustainability using partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM): A literature review. *Sustainability*, 14(5), 3051. <https://doi.org/10.3390/su14053051>
- Bardi, E. J., Coyle, J. J., & Novack, R. A. (2006). *Management of transportation* (7th ed.). Thomson/South-Western.
- Behdani, B., Fan, Y., & Bloemhof, J. M. (2019). Cool chain and temperature-controlled transport: An overview of concepts, challenges, and technologies. In A. Subramanian & B. Blokdik (Eds.), *Sustainable food supply chains*, 167–183. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813411-5.00012-0>
- Bishara, R. H. (2006). Cold chain management - an essential component of the global pharmaceutical supply chain. *American Pharmaceutical Review*. Retrieved January 4, 2024, from <http://www.americanpharmaceuticalreview.com>
- Bottani, E., Bigliardi, B., & Rinaldi, M. (2022). Development and proposal of a LARG (lean, agile, resilient, green) performance measurement system for a food supply chain. *IFAC-PapersOnLine*, 55(10), 2437–2444. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.10.074>
- Burawat, P. (2019). The relationships among transformational leadership, sustainable leadership, lean manufacturing and sustainability performance in Thai SMEs manufacturing industry. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 36, 1014–1036. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-09-2017-0178>
- Calati, M., Hooman, K., & Mancin, S. (2022). Thermal storage based on phase change materials (PCMs) for refrigerated transport and distribution applications along the cold chain: A review. *International Journal of Thermofluids*, 16, 100224. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2022.100224>
- Chaitangjit, P., & Ongkunaruk, P. (2019). The study of cold storage and temperature controlled transportation: A case study of a chain restaurant in Thailand. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(9), 1014–1019.
- Chen, Q., Qian, J., Yang, H., & Wu, W. (2022). Sustainable food cold chain logistics: From microenvironmental monitoring to global impact. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(5), 4189–4209. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13014>
- Chen, R., Xu, X., Chen, A., & Zhang, X. (2023). How to disseminate reliable waiting time in app-based transportation services considering attractiveness and credibility. *Transportmetrica A: Transport Science*, 19(3), 2077857. <https://doi.org/10.1080/23249935.2022.2077857>
- Chen, W., Zhang, D., Van Woensel, T., Xu, G., & Guo, J. (2023). Green vehicle routing using mixed fleets for cold chain distribution. *Expert Systems with Applications*, 233, 120979. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120979>
- Colicchia, C., Creazza, A., & Dallari, F. (2017). Lean and green supply chain management through intermodal transport: Insights from the fast-moving consumer goods industry. *Production Planning & Control*, 28(4), 321–339. <https://doi.org/10.1080/09537287.2017.1282642>

- Costa, L. B. M., Filho, M. G., Fredendall, L. D., & Ganga, G. M. D. (2020). The effect of Lean Six Sigma practices on food industry performance: Implications of the sector's experience and typical characteristics. *Food Control*, 112, 107110. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107110>
- Department of Industrial Promotion. (2020). Government policy in promoting cold chain management in the food industry. Bangkok: Department of Industrial Promotion, Ministry of Industry. (in Thai).
- Fang, C., Gu, X., Cheng, S., & Wu, D. (2022). Research on long-distance cold chain logistics route optimization considering transport vibration and refrigerant carbon emission. *Procedia Computer Science*, 214, 1262–1269. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.11.304>
- Garza-Reyes, J. A., Beltran Forero, J. S., Kumar, V., Villarreal, B., Cedillo-Campos, M. G., & Rocha-Lona, L. (2017). Improving road transport operations using lean thinking. *Procedia Manufacturing*, 11, 1900–1907. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.332>
- George, D., & Mallery, P. (2024). IBM SPSS statistics 29 step by step: A simple guide and reference. Routledge.
- Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., & Anderson, R. E. (2010). *Multivariate data analysis* (7th ed.). Pearson Education.
- Iranmanesh, M., Zailani, S., Hyun, S. S., Ali, M. H., & Kim, K. (2019). Impact of lean manufacturing practices on firms' sustainable performance: Lean culture as a moderator. *Sustainability*, 11(4), 1112. <https://doi.org/10.3390/su11041112>
- Islam, S., & Cullen, J. M. (2021). Food traceability: A generic theoretical framework. *Food Control*, 123, 107848. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107848>
- Islam, S., Manning, L., & Cullen, J. M. (2022). Selection criteria for planning cold food chain traceability technology enabling industry 4.0. *Procedia Computer Science*, 200, 1695-1704. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.370>
- Jovanovic, N., Zolfaghari, H., & Peszynski, K. (2020). To green or not to green trucking? Exploring the Canadian case. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 88, 102591. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102591>
- Khan, E. A., & Quaddus, M. (2015). Development and validation of scale for measuring sustainability factors of information microenterprises – A qualitative and quantitative approach. *Entrepreneurship Research Journal*, 5(4), 347–372.
- Khumalo, G., Goedhals-Gerber, L., Cronje, P., & Berry, T. (2023). Inefficiency in land-side cold-chain logistics: Solutions to improve the handling of citrus during preparation for cold-treatment protocols. *Social Sciences & Humanities Open*, 8(1), 100500. <https://doi.org/10.1016/j.ssaho.2023.100500>
- Kline, R. B. (2023). *Principles and practice of structural equation modeling*. Guilford publications.
- Koson, D. (2016). Innovation for green logistics (in Thai). *Journal of Technology Promotion*, 43(247), 6–9.
- Kumar, N., Tyagi, M., & Sachdeva, A. (2023). Visualization and analysis of key performance indicators for agricultural cold supply chain in Indian context using fuzzy DEMATEL approach. *Journal of Agribusiness in Developing and Emerging Economies*. <https://doi.org/10.1108/JADEE-10-2022-0223>
- Kurganov, V., Sai, V., Gryaznov, M., & Dorofeev, A. (2021). The emergence and development of lean thinking in transport services. *Transportation Research Procedia*, 54, 309–319. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.02.077>
- Leng, L., Wang, Z., Zhao, Y., & Zuo, Q. (2024). Formulation and heuristic method for urban cold-chain logistics systems with path flexibility – The case of China. *Expert Systems with Applications*, 244, 122926. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.122926>
- Li, Y., Lim, M. K., & Tseng, M.-L. (2019). A green vehicle routing model based on modified particle swarm optimization for cold chain logistics. *Industrial Management & Data Systems*, 119(3), 473–494. <https://doi.org/10.1108/IMDS-09-2018-0400>
- Liao, J., Tang, J., Vinelli, A., & Xie, R. (2023). A hybrid sustainability performance measurement approach for fresh food cold supply chains. *Journal of Cleaner Production*, 398, 136466. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136466>
- Lu, Q., Gi-Young, C., & Hyung-Ho, K. (2020). Analysis on logistics efficiency of china's agricultural products cold chain from the green perspective. *International Journal of Advanced Culture Technology*, 8(2), 192-203.
- Ma, K., & Zhao, L. (2024). The impact of new energy transportation means on China's food import. *Research in Transportation Economics*, 103, 101386. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2024.101386>

- Meng, T., Wang, Y., Fu, L., Wang, Y., Zhang, N., Wang, Z., & Yang, Q. (2023). Comparison of the environmental impact of typical packaging systems for food cold chain express based on life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 430, 139756. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139756>
- Musolino, G., Rindone, C., & Vitetta, A. (2019). Passengers and freight mobility with electric vehicles: A methodology to plan green transport and logistic services near port areas. *Transportation Research Procedia*, 37, 393–400. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.208>
- Nedeliakova, E., Hudakova, M., Masar, M., Lizbetinova, L., Stasiak-Betlejewska, R., & Šulko, P. (2020). Sustainability of railway undertaking services with lean philosophy in risk management—Case study. *Sustainability*, 12(13), 5298.
- Notteboom, T., & Rodrigue, J. P. (2016). *The Cold Chain and its Logistics*. Canadian: The Van Horne Institute, University of Calgary, 20014.
- Óskarsdóttir, K., & Oddsson, G. V. (2019). Towards a decision support framework for technologies used in cold supply chain traceability. *Journal of Food Engineering*, 240, 153–159. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.07.013>
- Pinho, T., & Lobo, M. (2019). Lean tools applied in transport and logistics services. *Revista Produção e Desenvolvimento*, 5. <https://doi.org/10.32358/rpd.2019.v5.411>
- Ponte, B., Costas, J., Puche, J., Pino, R., & De la Fuente, D. (2018). The value of lead time reduction and stabilization: A comparison between traditional and collaborative supply chains. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 111, 165–185. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2018.01.014>
- Qi, T., Ji, J., Zhang, X., Liu, L., Xu, X., Ma, K., & Gao, Y. (2022). Research progress of cold chain transport technology for storage fruits and vegetables. *Journal of Energy Storage*, 56, 105958. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105958>
- Rehman, F. U., Islam, M. M., & Miao, Q. (2023). Environmental sustainability via green transportation: A case of the top 10 energy transition nations. *Transport Policy*, 137, 32–44. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2023.04.013>
- Saulick, P., Bokhoree, C., & Bekaroo, G. (2023). Business sustainability performance: A systematic literature review on assessment approaches, tools and techniques. *Journal of Cleaner Production*, 408, 136837. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136837>
- Sun, W., Gu, X., & Wu, D. (2022). Research on the selection of green cold chain logistics service providers based on combined weighting-cloud model. *Procedia Computer Science*, 214, 1409–1416. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.11.324>
- Trade Policy and Strategy Office. (2022). *Thailand logistics pulse report (in Thai)*. Retrieved February 1, 2024, from https://uploads.tpso.go.th/tpso_logistics_infographic_january_2022.pdf
- Trivellas, P., Malindretos, G., & Reklitis, P. (2020). Implications of green logistics management on sustainable business and supply chain performance: Evidence from a survey in the Greek agri-food sector. *Sustainability*, 12(1), 1–29. <https://doi.org/10.3390/su122410515>
- United Nations Thailand. (2022). *Causes and effects of climate change (in Thai)*. Retrieved March 24, 2024, from <https://thailand.un.org/en/174652-causes-and-effects-climate-change>
- Zhao, C., Jia, R., & Dong, K. (2023). How does smart transportation technology promote green total factor productivity? The case of China. *Research in Transportation Economics*, 101, 101353. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2023.101353>
- Zope, R., Vasudevan, N., Arkatkar, S., & Joshi, G. (2022, April). Structural Equation Model for Sustainable Transport System Performance Enhancement. In *Proceedings of the Fifth International Conference of Transportation Research Group of India: 5th CTRG Volume 3* (pp. 121-133). Singapore: Springer Nature Singapore.

การพัฒนานวัตกรรมดูแลผู้สูงอายุเพื่อหาเส้นทางกลับบ้านโดยใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์

Developing Innovative Elderly Care to Find Pathways Home

Using Artificial Intelligence Techniques

อรนุช พันโท¹ รสลิน เพตะกร^{1*} ภาณุวัฒน์ สุวรรณกุล¹ และ ไพรุฬห์ แก้วฟุ้งรังษี¹

Oranuch Pantho,¹ Roselin Petagon,^{1*} Panuwat Suwannakul¹ and Piroon Kaewfoongrungsi¹

¹คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่

¹Faculty of Science and Technology, Chiang Mai Rajabhat University, Chiang Mai province

*Corresponding Author: roselin@cmru.ac.th

Received: March 17, 2025

Revised: June 18, 2025

Accepted: July 2, 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) พัฒนานวัตกรรมดูแลผู้สูงอายุเพื่อหาเส้นทางกลับบ้านโดยใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์ และ 2) ประเมินประสิทธิภาพและความพึงพอใจของนวัตกรรมที่พัฒนาขึ้น การพัฒนานวัตกรรมนี้แบ่งเป็น 2 ส่วนคือในส่วนหน้าบ้านใช้ Flutter เป็นเฟรมเวิร์กในการพัฒนา UI ส่วนหลังบ้านใช้ภาษาไพธอนในการประมวลผลข้อมูลและสร้าง API ติดต่อฐานข้อมูล MySQL การพัฒนามุ่งเน้นการใช้เทคโนโลยีสำหรับจัดเก็บข้อมูลผู้สูงอายุโดยใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์เพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการถ่ายภาพใบหน้าผ่านแอปพลิเคชัน เมื่อตรวจสอบผลวิเคราะห์ใบหน้าเพื่อใช้สำหรับค้นหาข้อมูลเพื่อช่วยในการนำทางผู้สูงอายุกลับบ้าน โดยใช้เทคนิค Principal Component Analysis (PCA) และ Support Vector Machine (SVM) ซึ่งเป็นอัลกอริทึม Machine Learning ที่มีประสิทธิภาพสูงในการจำแนกข้อมูลในรูปแบบของมิติได้สูง เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยได้แก่ แบบสอบถาม ระบบนวัตกรรมที่พัฒนาขึ้น วิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติพรรณนา ได้แก่ ค่าเฉลี่ย ร้อยละ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ผลการวิจัย พบว่า 1) ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถแสดงข้อมูลและตำแหน่งพิกัดบ้านของผู้สูงอายุ ผลการทดลองของการตรวจสอบใบหน้าสามารถแสดงผลความถูกต้องของใบหน้าที่ค่าเท่ากับร้อยละ 89 และ 2) ผลประเมินประสิทธิภาพจากผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 5 คน พบว่า ประสิทธิภาพของระบบอยู่ในระดับมาก ค่าเฉลี่ย 4.31 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.34 และผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้ของกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 33 คน โดยเลือกกลุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง มีระดับความพึงพอใจในระบบที่พัฒนาขึ้นอยู่ในระดับมาก ค่าเฉลี่ยรวม 4.36 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.45

คำสำคัญ: ระบบปัญญาประดิษฐ์, ผู้สูงอายุ, การค้นหาเส้นทางกลับบ้าน

Abstract

This research aims to 1) develop innovation for elderly care to find pathways home using artificial intelligence techniques, and 2) evaluate the effectiveness and satisfaction of the developed innovation. The innovation consists of two parts: the front-end uses Flutter as the framework for user interface development, and the back-end uses Python to process data and create APIs that connect to a MySQL database. The system focuses on storing elderly individuals' data and using artificial intelligence techniques to analyze and compare facial data captured through the mobile application. After analyzing the facial

verification results, the system searches for data to help guide elderly individuals back home. It uses Principal Component Analysis (PCA) and Support Vector Machine (SVM), which are machine learning algorithms known for their effectiveness in classifying high-dimensional data. The research instruments include a questionnaire and the developed innovation system. Data were analyzed using descriptive statistics: frequency, percentage, mean, and standard deviation. The results show that (1) the system displays personal information and home coordinates accurately, with a face recognition accuracy of 89%, and (2) the performance evaluation by five experts shows that the system performs at a high level (mean = 4.31, SD = 0.34). Additionally, the user satisfaction evaluation results from a purposive sample of 33 participants showed that the satisfaction level with the developed system was at a high level (mean = 4.36, SD = 0.45).

Keywords: Artificial Intelligence, Elderly, Finding Pathways Home

1. บทนำ

ปัจจุบันการแพทย์มีความก้าวหน้าอย่างมาก ส่งผลให้จำนวนของผู้สูงอายุที่มีอายุ 60 ปีขึ้นไปเพิ่มขึ้นมากไปด้วย ตามรายงานกรมกิจการผู้สูงอายุ (Department of Older Persons, 2024) สถิติในเดือนธันวาคม พ.ศ. 2566 ประเทศไทยมีประชากรตามหลักฐานการทะเบียนราษฎรของกระทรวงมหาดไทย จำนวน 65 ล้านคน ในจำนวนนี้มีประชากรผู้สูงอายุที่มีอายุ 60 ปีขึ้นไปมีจำนวน 13 ล้านคนหรือคิดเป็นร้อยละ 20 ของประชากรทั้งหมด ผู้สูงอายุในแต่ละภาคในภาคการณในอีก 20 ปีข้างหน้า ประชากรไทยจะลดลง เหลือเพียง 60 ล้านคน แต่ประชากรสูงอายุจะเพิ่มจาก 13 ล้านคนเป็น 19 ล้านคน และคาดการณ์ว่าภาวะสังคมผู้สูงอายุระดับสุดยอด (Super aged society) ในปี พ.ศ. 2578 การเพิ่มขึ้นของผู้สูงอายุจะมีปัญหาสุขภาพ ระบบต่าง ๆ ในร่างกายก็เสื่อมถอย มีผลกระทบต่อสมรรถนะร่างกายทุกสภาพ และภาวะเจ็บป่วยเรื้อรัง ส่งผลให้ระดับการช่วยเหลือตนเองลดลง (Jangpho, 2021) อาการหลงลืมก็จะเกิดขึ้นตามวัย จากสถิติของมูลนิธิกระจกเงา พบว่าในปี 2566 มีการแจ้งเหตุคนหายทั้งหมด 2,200 ราย ขณะที่สัดส่วนจำนวนของคนหายที่มีมากที่สุดคือ กลุ่มผู้สูงอายุ เป็นกลุ่มที่ลัดหลงหายไปจากบ้าน มักมีอาการหลงลืมหรือเป็นผู้ป่วยโรคสมองเสื่อม ทำให้การติดตามช่วยเหลือยิ่งเป็นไปได้ลำบาก (Thansettakij, 2024) ดังนั้นเมื่อประเทศเข้าสู่สังคมผู้สูงอายุ ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจะต้องได้รับการดูแลเป็นพิเศษ เพื่อให้เพิ่มคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้น

ปัจจุบันเทคโนโลยีสารสนเทศและคอมพิวเตอร์มีพัฒนาการอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างในกระบวนการดำเนินชีวิต การจัดการองค์กร และระบบสังคมโดยรวม โดยเฉพาะอย่างยิ่งการพัฒนาในด้านปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งในการประมวลผลข้อมูล การตัดสินใจ และการเรียนรู้ของระบบ ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้เพื่อแก้ปัญหาที่มีความซับซ้อนและเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ตัวอย่างการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสารสนเทศที่เริ่มเห็นผลในระดับปฏิบัติ เช่น การพัฒนาแอปพลิเคชันสำหรับติดตามรถรับส่งนักเรียนเพื่อเพิ่มความปลอดภัยและความมั่นใจให้กับผู้ปกครอง (Rungkaew & Takianram, 2023) หรือการพัฒนาบริหารจัดการวัตถุดิบสำหรับร้านเบเกอรี่ที่มุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพในการดำเนินงานและลดต้นทุน (Sahlaehrat et al., 2024) อย่างไรก็ตาม การแก้ปัญหาที่มีมิติซับซ้อนและไม่สามารถกำหนดคำตอบได้ล่วงหน้า จำเป็นต้องอาศัยความสามารถของ AI ซึ่งสามารถวิเคราะห์แบบจำลองที่มีความไม่แน่นอนสูง และประมวลผลข้อมูลจากหลายแหล่งพร้อมกัน AI ถือเป็นเทคโนโลยีที่หลอมรวมองค์ความรู้จากหลากหลายศาสตร์ อาทิ คณิตศาสตร์ สถิติ วิทยาการคอมพิวเตอร์ วิศวกรรม และจิตวิทยาเชิงพฤติกรรม โดยมีเป้าหมายเพื่อสร้างระบบที่สามารถเลียนแบบการรับรู้ การตัดสินใจ และการเรียนรู้ของมนุษย์ (Sittichanbuncha, 2021) การประยุกต์ใช้

งาน AI ได้แพร่หลายสู่บริบทชีวิตประจำวัน เช่น ระบบผู้ช่วยเสมือนจริง (Virtual Assistant) อย่าง Siri, Alexa และ Google Assistant ที่ใช้โมเดลภาษาเพื่อสนทนาและเข้าใจคำสั่งเสียง รวมถึงการใช้ Machine Learning ในระบบโซเชียลมีเดีย เช่น Facebook เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมผู้ใช้และแนะนำเนื้อหาอย่างแม่นยำ (Manuskiatti, 2022) ภาครัฐเองได้นำ AI ไปใช้ในการสกัดและจัดหมวดหมู่ความคิดเห็นของประชาชนต่อโครงการภาครัฐ ซึ่งเป็นแนวทางในการสนับสนุนการมีส่วนร่วมของพลเมืองในลักษณะข้อมูลขนาดใหญ่ (Sridam, 2022) ด้านการวิจัยเชิงลึกเกี่ยวกับพฤติกรรมมนุษย์ พบว่ามีการนำโมเดล Deep Learning เช่น Convolutional Neural Network (CNN) และ Long Short-Term Memory (LSTM) มาใช้ในการจำแนกอารมณ์จากเสียงพูดภาษาไทย ซึ่งสามารถต่อยอดไปสู่การสร้างระบบ AI ที่ตอบสนองต่อสภาวะอารมณ์ของผู้ใช้อย่างชาญฉลาด (Kanjawattana et al., 2022) นอกจากนี้ ยังมีการพัฒนา AI สำหรับการรู้จำใบหน้าด้วยเทคนิคหลากหลาย ได้แก่ Eigenface (PCA), Neural Network และ Self-Organizing Map (SOM) ซึ่งช่วยเพิ่มความแม่นยำในการยืนยันตัวตน โดยมีผลต่อความปลอดภัยและความเป็นส่วนตัวในยุคดิจิทัล (Kumeechailame, 2022) ขณะที่งานวิจัยของ Megges et al. (2017) ได้นำเสนอการใช้เทคโนโลยีต้นทุนต่ำ เช่น RFID และ Bluetooth ในการติดตามผู้ป่วยสมองเสื่อมซึ่งมีพฤติกรรมหลงเดินซึ่งเป็นปัญหาเชิงสังคมที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพชีวิตและความปลอดภัย โดยระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถแจ้งเตือนเมื่อผู้ป่วยออกนอกเขตพื้นที่ปลอดภัย ในการพัฒนาและประยุกต์ใช้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ในบริบทต่าง ๆ แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของ AI ในการรับมือกับปัญหาที่มีความซับซ้อนสูง ทั้งในด้านการจัดการข้อมูลขนาดใหญ่ การเข้าใจพฤติกรรมมนุษย์ และการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบงานที่ต้องการการตัดสินใจเชิงอัจฉริยะ อันเป็นปัจจัยสำคัญที่นำไปสู่การพัฒนาระบบสารสนเทศอัจฉริยะในอนาคต

จากที่กล่าวมา ทีมผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาและการพัฒนานวัตกรรมดูแลผู้สูงอายุเพื่อหาเส้นทางกลับบ้านโดยใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์ มีวัตถุประสงค์คือ 1) เพื่อพัฒนานวัตกรรมดูแลผู้สูงอายุเพื่อหาเส้นทางกลับบ้านโดยใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์ และ 2) เพื่อประเมินประสิทธิภาพและความพึงพอใจนวัตกรรมดูแลผู้สูงอายุเพื่อหาเส้นทางกลับบ้านโดยใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์ โดยสามารถจัดเก็บข้อมูลผู้สูงอายุลงในโปรแกรมจัดการฐานข้อมูล MySQL และใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์ในการวิเคราะห์เปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการถ่ายภาพใบหน้าผ่านแอปพลิเคชัน ซึ่งการรู้จำใบหน้าต้องมีการฝึกโมเดล (Training Model) ได้ใช้เทคนิค Principal Component Analysis (PCA) ช่วยลดจำนวนมิติของข้อมูลภาพที่มีความละเอียดสูงให้เหลือเพียงข้อมูลสำคัญที่จำเป็นต่อการรู้จำใบหน้า ทำให้ลดภาระในการประมวลผลและช่วยให้โมเดลทำงานได้เร็วขึ้น โดยไม่สูญเสียคุณลักษณะสำคัญมากนัก PCA ยังมีประโยชน์ในการลดผลกระทบจากความแปรปรวนของแสง มุมกล้อง หรือสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ที่อาจมีผลต่อการรู้จำใบหน้า จากนั้นข้อมูลที่ถูกลดมิติแล้วจะถูกส่งให้กับ Support Vector Machine (SVM) ซึ่งเป็นอัลกอริทึม Machine Learning ที่มีประสิทธิภาพสูงในการจำแนกข้อมูลในมิติสูง โดย SVM จะสร้างเส้นแบ่งหรือระนาบที่เหมาะสมที่สุดในการแยกแยะใบหน้าของแต่ละบุคคล โมเดลที่ฝึกแล้วสามารถนำมาใช้ในการทำนายใบหน้าในภาพใหม่ได้ทันทีโดยไม่ต้องฝึกใหม่ ทำให้สามารถใช้งานได้อย่างยืดหยุ่นและมีประสิทธิภาพ การตรวจจับใบหน้า (Face Detection) สำหรับการทดสอบและทำนาย (Test / Predict) ระบบจะใช้กระบวนการเดียวกันในการตรวจจับใบหน้าและสร้าง Embedding Vector จากนั้นจะนำเวกเตอร์ดังกล่าวส่งผ่าน PCA และ SVM เพื่อตรวจสอบว่าใบหน้าที่ปรากฏตรงกับผู้สูงอายุคนใด ช่วยให้สามารถระบุตัวตนของผู้สูงอายุได้อย่างแม่นยำและรวดเร็ว แล้วนำผลการค้นหาข้อมูลในฐานข้อมูลมาแสดงเพื่อช่วยในการนำทางผู้สูงอายุกลับบ้านได้ ซึ่งงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ และเป็นต้นแบบที่ดีสำหรับหน่วยงานอื่น ๆ ต่อไป

2. วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินงานวิจัยเรื่อง การพัฒนานวัตกรรมดูแลผู้สูงอายุเพื่อหาเส้นทางกลับบ้านโดยใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์ ในหัวข้อนี้ได้แบ่งรายละเอียด ได้แก่ กลุ่มเป้าหมาย การดำเนินการวิจัย เครื่องมือที่ใช้และการประเมินผลดังนี้

2.1 กลุ่มเป้าหมาย

กลุ่มตัวอย่างหรือกลุ่มเป้าหมายสำหรับศึกษาความพึงพอใจผู้ใช้นวัตกรรมที่ใช้ในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ ผู้วิจัยเลือกประชากรที่อาศัยอยู่ในตำบลทุ่งต้อม อำเภอสนป่าตอง จังหวัดเชียงใหม่ โดยใช้วิธีการแบบเจาะจง (Purposive Sampling) จำนวน 33 คน

2.2 การดำเนินการวิจัย

การดำเนินงานวิจัยนี้ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ได้แก่ การศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับนวัตกรรมดูแลผู้สูงอายุ การวิเคราะห์และออกแบบระบบนวัตกรรมดูแลผู้สูงอายุ เทคโนโลยีการตรวจจับใบหน้าโดยใช้การรู้จำใบหน้า และการพัฒนาระบบนวัตกรรมดูแลผู้สูงอายุ

2.2.1 การศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับนวัตกรรมดูแลผู้สูงอายุ เพื่อหาเส้นทางกลับบ้านโดยใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์ หลังจากศึกษาแล้วผู้วิจัยมีกรอบแนวคิดการทำงานดัง Figure 1.

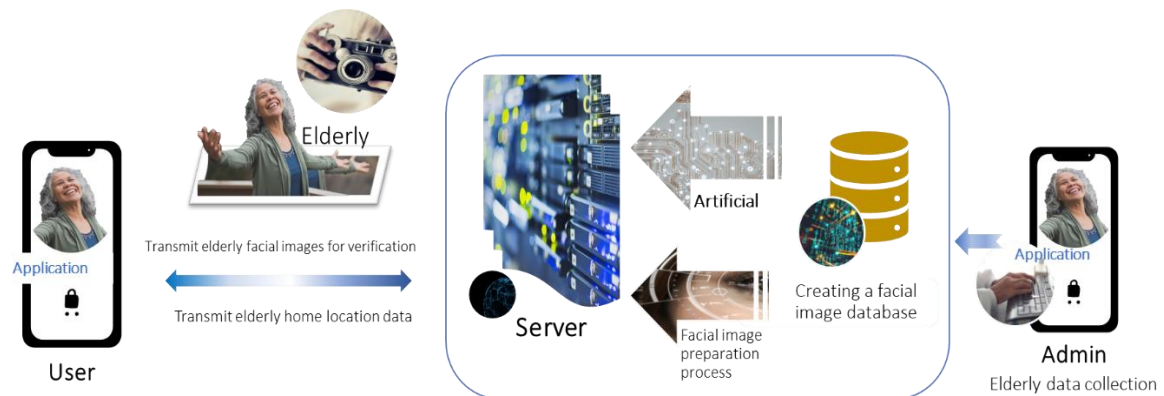


Figure 1. Conceptual Framework of the Study

กรอบแนวคิดการวิจัยจะมีการทำงานแบ่งเป็น 2 ส่วน ซึ่งผู้วิจัยจะต้องทำการดาวน์โหลดและติดตั้งแอปพลิเคชันในเครื่องสมาร์ทโฟน หรือแท็บเล็ตก่อน และแต่ละส่วนจะทำงานดังนี้ ส่วนที่ 1 ส่วนผู้ดูแลจะจัดเก็บข้อมูลพื้นฐาน รูปภาพใบหน้า และตำแหน่งที่ตั้งบ้านไว้ในฐานข้อมูล และส่วนที่ 2 ส่วนของผู้ใช้ที่ติดตั้งแอปพลิเคชันแล้วเมื่อพบผู้สูงอายุที่เกิดหลงทางจะสามารถถ่ายภาพใบหน้าเพื่อค้นหาข้อมูลของผู้สูงอายุ และระบบจะส่งตำแหน่งบ้านตามที่จัดเก็บไว้ในฐานข้อมูลมาให้กับผู้ใช้ เพื่อจะได้นำไปเป็นข้อมูลในการพาผู้สูงอายุกลับบ้านได้อย่างปลอดภัย

2.2.2 การวิเคราะห์และออกแบบระบบนวัตกรรมดูแลผู้สูงอายุ เพื่อหาเส้นทางกลับบ้านโดยใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์ Figure 2. แผนภาพ Use Case ซึ่งใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผู้ใช้ (Actors) และฟังก์ชันการทำงาน (Use Cases) ของระบบ โดยแผนภาพนี้แสดงการทำงานดังรายละเอียดดังนี้

1) Actors (ผู้ใช้ระบบ) ประกอบด้วย 2 ผู้ใช้ระบบคือ Admin (ผู้ดูแลระบบ) มีหน้าที่จัดการข้อมูลและตั้งค่าระบบและ User (ผู้ใช้งานทั่วไป) สามารถเพิ่มข้อมูลผู้สูงอายุ เช่น อัปโหลดภาพใบหน้า ข้อมูลตำแหน่งปัจจุบัน และข้อมูลอื่น ๆ ที่จำเป็นของผู้สูงอายุเพื่อนำไปใช้ในระบบ

2) Use Cases (ฟังก์ชันที่ระบบรองรับ) ประกอบด้วยรายละเอียดดังนี้

- สำหรับ Admin ประกอบด้วย 4 ฟังก์ชันดังนี้

ฟังก์ชัน Specify Current Location สำหรับการกำหนดตำแหน่งปัจจุบันผู้สูงอายุ

ฟังก์ชัน Register/Login เป็นการลงทะเบียนและเข้าสู่ระบบของผู้ดูแลระบบ

ฟังก์ชัน Manage Elder's Data เป็นจัดการข้อมูลของผู้สูงอายุ เช่น การเพิ่ม ลบข้อมูลผู้สูงอายุ เป็นต้น การเลือกภาพใบหน้าของผู้สูงอายุในการจดจำใบหน้าที่สามารถระบุบุคคลได้ต้องมีภาพใบหน้าผู้สูงอายุอย่างน้อย 2 ภาพขึ้นไปในการประเมินความเป็นไปได้ของการตรงกันของใบหน้าซึ่งระบบจะทำการแปลงข้อมูลการจดจำใบหน้าเป็นสตริงตัวเลขของแต่ละคนซึ่งมีลายใบหน้าไม่เหมือนกันเป็นชุดข้อมูลใบหน้าที่ได้เก็บไว้ในระบบไว้ก่อนโดยผู้ดูแลสามารถนำข้อมูลใบหน้าเข้าสู่ระบบเพื่อเป็นข้อมูลสำหรับจดจำใบหน้าผู้สูงอายุที่มีในระบบ ก่อนที่ให้ผู้ทั่วไปอัปโหลดภาพใบหน้าสำหรับตรวจสอบใบหน้าผู้สูงอายุว่าตรงกับข้อมูลผู้สูงอายุในชุดข้อมูลใบหน้าที่ได้เก็บไว้ก่อน แล้วแสดงข้อมูลเบื้องต้นผู้สูงอายุและตำแหน่งที่อยู่เพื่อพาผู้สูงอายุกลับบ้าน

ฟังก์ชัน Train/Test Face Recognition Model ฝึกและทดสอบโมเดลจดจำใบหน้าเพื่อระบุตัวตนผู้สูงอายุโดยภาพเป็นภาพเดี่ยวเท่านั้น

ฟังก์ชัน Agreement PDPA เป็นฟังก์ชันการยินยอมเกี่ยวข้องกับข้อตกลงและการปฏิบัติตามกฎหมายคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคล (PDPA)

- สำหรับ User ประกอบด้วย

ฟังก์ชัน Upload Elderly Face Image เป็นการอัปโหลดภาพของผู้สูงอายุเข้าสู่ระบบ

ฟังก์ชัน Train/Test Face Recognition Model เป็นกระบวนการสำคัญที่ทำให้ระบบสามารถรู้จำใบหน้าได้เพื่อเปรียบเทียบใบหน้ากับฐานข้อมูลที่มีอยู่

ฟังก์ชัน Display Elder's Data แสดงข้อมูลของผู้สูงอายุที่ตรวจพบใบหน้าตรงกับข้อมูลที่มีอยู่ในฐานข้อมูล

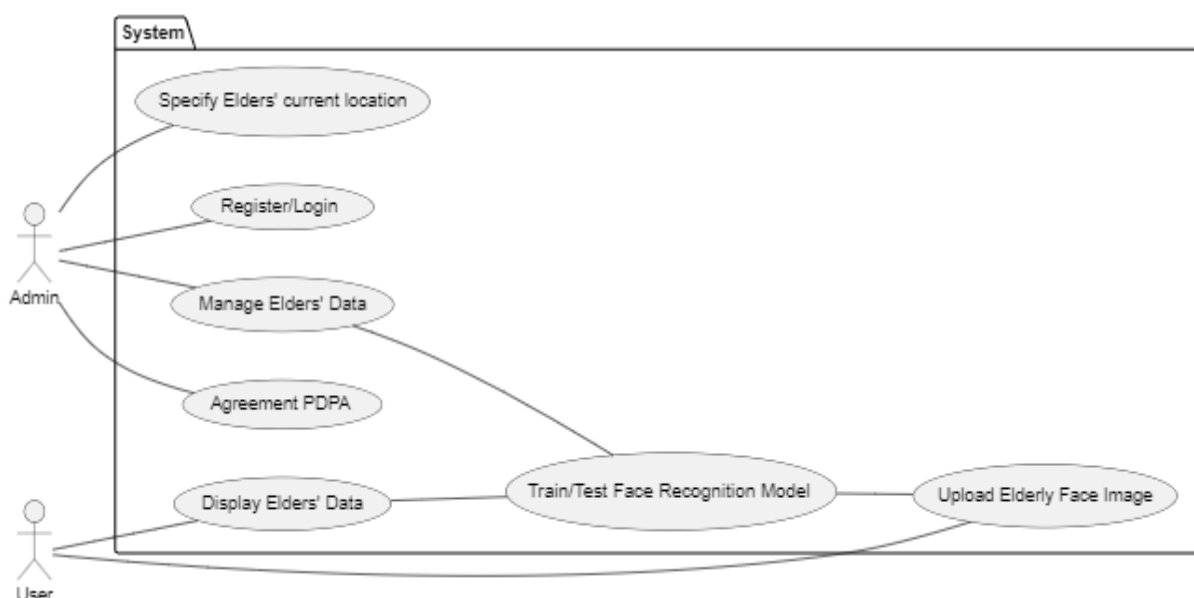


Figure 2. Use Case Diagram for the AI-based Elderly Care Innovation

2.2.3 เทคโนโลยีการตรวจจับใบหน้าโดยใช้การรู้จำใบหน้า (Face Recognition Technology) เป็นเทคโนโลยีที่ใช้สำหรับเรียนรู้และจดจำโครงสร้างใบหน้าของมนุษย์ โดยการนำข้อมูลใบหน้าที่จดจำหรือตรวจจับได้ส่งไปให้ระบบนำไปวิเคราะห์หรือประมวลผลเพื่อระบุและยืนยันอัตลักษณ์ของบุคคล การตรวจจับและจดจำใบหน้าผู้สูงอายุจากภาพที่อัปโหลดสามารถ "ระบุตัวตน" ผู้สูงอายุได้จากภาพใหม่ โดยมีขั้นตอนการทำงานของโมเดลดังต่อไปนี้

1) การเก็บรวบรวมข้อมูลรูปภาพเป็นช่วงการเก็บข้อมูลรูปภาพเป็นดาต้าเบส ภาพที่เก็บจะเป็นส่วนเฉพาะที่ทำการ Detect ได้เท่านั้น โดยมีส่วนเพิ่มข้อมูลภาพหลังบ้านแบบออนไลน์ โดยใช้ใบหน้าอาสาสมัครผู้สูงอายุจำนวน 10 คน แบ่งเป็นชายจำนวน 3 คน และหญิงจำนวน 7 คน เก็บเป็นไฟล์ภาพความละเอียด 62x47 พิกเซล จำนวน 2-5 ภาพ กล้องห่างจากใบหน้าอย่างน้อย 0.5-1 เมตร เพื่อใช้ในการรู้จำใบหน้า (Face Recognition) เมื่อ Admin หรือ User อัปโหลดภาพใบหน้าผู้สูงอายุ (FacelImage)

```
import face_recognition

image = face_recognition.load_image_file("elder1.jpg")

face_encodings = face_recognition.face_encodings(image)

# face_encodings[0] = vector ที่แทนใบหน้าคนนั้น (128 มิติ)
```

Figure 3. 128-dimensional face embedding vector

2) จัดเก็บข้อมูล (Training Dataset) ระบบจะเก็บ elder_id, embedding_vector (128 มิติ) image_path ข้อมูลนี้จะถูกใช้ในขั้นตอน Train Model ระบบจะใช้ face_recognition ตรวจจับใบหน้าในภาพแปลงภาพใบหน้าที่ตรวจจับได้เป็น Face Embedding Vector (128 มิติ) ดังใน Figure 3. ขั้นตอนวิธีการรู้จำใบหน้าด้วย Support Vector Machine (SVM) เป็นตัวจำแนกที่เหมาะสมสำหรับการรู้จำใบหน้า เนื่องจากสามารถทำงานได้ดีใน High-Dimensional Space สามารถใช้เป็นตัวจำแนก (Classifier) เพื่อแยกแยะใบหน้าของบุคคลต่าง ๆ โดยเรียนรู้จาก Encodings ที่ได้จากโมเดล Face Recognition Library พร้อมทั้งสามารถนำโมเดลที่ฝึกแล้วมาใช้ในการตรวจจับใบหน้าได้ทันที

3) การเทรนโมเดล (Train Model) ใช้ OpenCV (Open-source Computer Vision) เป็นไลบรารีฟังก์ชันการเขียนโปรแกรม (Library of Programming Functions) เพื่อให้สามารถแสดงผลด้วยคอมพิวเตอร์แบบเรียลไทม์ (Real-Time Computer Vision) การทำ Face Recognition model โดยใช้ Principal Component Analysis (PCA) สำหรับลดมิติข้อมูลที่เป็นรูปภาพในกรณีของภาพใบหน้า PCA จะช่วยแปลงภาพที่มีความละเอียดสูง (จำนวนพิกเซลมาก) ให้กลายเป็นข้อมูลที่มีมิติน้อยลง แต่ยังคงรักษาลักษณะสำคัญที่จำเป็นต่อการจดจำใบหน้าไว้ การลดมิตินี้ช่วยลดเวลาและทรัพยากรที่ใช้ในการประมวลผลได้อย่างมาก และใช้ Support Vector Machine (SVM) เป็นอัลกอริทึม Machine Learning ที่ใช้สำหรับการจำแนกประเภท (Classification) โดยการสร้างเส้นแบ่ง (Decision Boundary) ที่เหมาะสมที่สุดระหว่างคลาสต่าง ๆ ในกรณีนี้ SVM ใช้ในการจำแนกใบหน้าของแต่ละบุคคลตามข้อมูลที่ลดมิติแล้วจาก PCA Model ในการเทรนโมเดลต้องมีภาพจำนวน 10-20 ภาพต่อผู้สูงอายุหนึ่งคน กำหนดค่า THRESHOLE = 0.75 ลดมิติจาก 128 เหลือไม่เกิน 50 เพื่อให้ SVM มีประสิทธิภาพ และทำการปรับขนาดภาพให้เท่ากันก่อนทำการประมวลผล เนื่องจากใบหน้าผู้สูงอายุที่ใช้เทรนโมเดลได้จากการเก็บข้อมูลแบบเรียลไทม์ซึ่งถ้ามีภาพจำนวนมากต้องใช้ GPU หรือเวลาในการเทรนนานตามไปด้วยแต่ข้อดีของวิธีนี้คือสามารถเรียนรู้ลักษณะใบหน้าที่แตกต่างกัน เช่น มุมหันหน้า ท่าทาง และการเปลี่ยนแปลงของแสง

4) การตรวจจับใบหน้า (Face Detection) เพื่อทดสอบโมเดล (Test / Predict) เมื่อนำภาพใหม่เข้ามาในระบบจะตรวจจับใบหน้าให้ได้ Embedding Vector ส่งเข้า PCA และ SVM ให้ทำนายว่าเป็นผู้สูงอายุคนใด ผลลัพธ์ elder_id ของผู้สูงอายุที่ตรงกับใบหน้านั้น Figure 4.

```
new_encoding = face_recognition.face_encodings(new_image)[0]
new_encoding_pca = pca.transform([new_encoding])
prediction = svm.predict(new_encoding_pca)
```

Figure 4. Face recognition process for identifying a person from a new image

5) เก็บโมเดลหลังจากเทรนระบบแล้ว ระบบจะบันทึกไฟล์ PCA และ SVM model เพื่อให้สามารถโหลดมาใช้ตอน Predict ได้ภายหลัง Figure 5.

```
import joblib
joblib.dump(pca, 'pca_model.pkl')
joblib.dump(svm, 'svm_model.pkl')
```

Figure 5. The process of saving a trained model

2.2.4 การพัฒนาระบบนวัตกรรมดูแลผู้สูงอายุ เพื่อหาเส้นทางกลับบ้านโดยใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์ จะใช้ Flutter ซึ่งเป็นเฟรมเวิร์กในการพัฒนา UI ในส่วนหน้าบ้าน ส่วนหลังบ้านใช้ภาษาไพธอนในการประมวลผลข้อมูลและสร้าง API จัดเก็บข้อมูลด้วยโปรแกรมจัดการฐานข้อมูล MySQL และส่วนของการพัฒนาระบบเพื่อตรวจสอบข้อมูลผู้สูงอายุโดยใช้การรู้จำใบหน้าที่ Figure 6.

2.3 เครื่องมือที่ใช้และการประเมินผล

เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูล ได้แก่ แบบสอบถามความพึงพอใจผู้ใช้นวัตกรรมดูแลผู้สูงอายุ เพื่อหาเส้นทางกลับบ้านโดยใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์ และมีการวัดความพึงพอใจโดยการตอบแบบสอบถามความพึงพอใจแบบมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ โดยการมีการแบ่งระดับคุณภาพ ดังนี้

- 5 หมายถึง ความพึงพอใจระดับมากที่สุด
- 4 หมายถึง ความพึงพอใจระดับมาก
- 3 หมายถึง ความพึงพอใจระดับปานกลาง
- 2 หมายถึง ความพึงพอใจระดับน้อย
- 1 หมายถึง ความพึงพอใจระดับน้อยที่สุด

การแปรผลจากการตอบแบบประเมินความพึงพอใจ (Srisa-ard, 2017) สามารถแปรผลได้ ดังนี้

- 5.00 – 4.50 หมายถึง คุณภาพเหมาะสมมากที่สุด
- 4.49 – 3.50 หมายถึง คุณภาพเหมาะสมมาก
- 3.49 – 2.50 หมายถึง คุณภาพเหมาะสมปานกลาง

2.49 – 1.50 หมายถึง คุณภาพเหมาะสมน้อย

1.49 – 0.00 หมายถึง คุณภาพเหมาะสมน้อยที่สุด

รูปแบบการวัดและประเมินผล จะใช้แบบสอบถามเป็นเครื่องมือเก็บรวบรวมข้อมูล และ ประเมินผลด้วยสถิติพรรณนา ได้แก่ ความถี่ ร้อยละ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

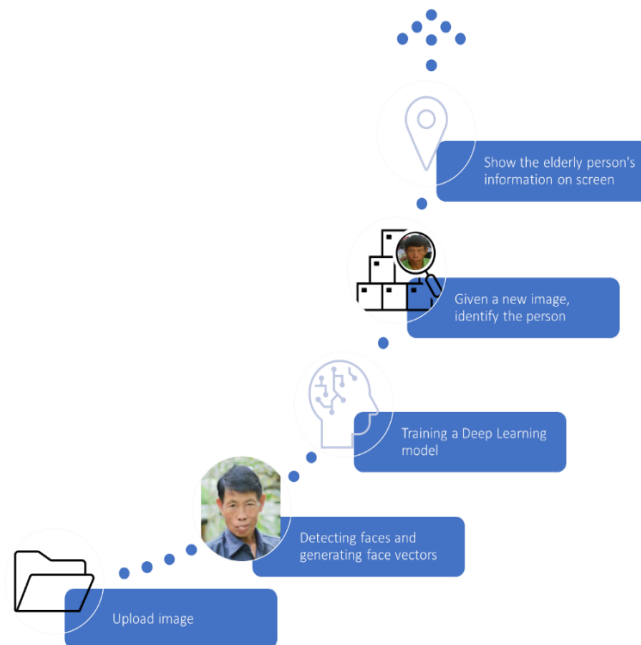


Figure 6. Workflow of AI-Based Innovations for Elderly Care

3. ผลการวิจัย

ผลการพัฒนานวัตกรรมดูแลผู้สูงอายุเพื่อหาเส้นทางกลับบ้านโดยใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์ เริ่มต้นจากผู้ใช้จะต้องทำการติดตั้งแอปพลิเคชันโดยการสแกนคิวอาร์โค้ดดัง Figure 7. และทำการดาวน์โหลดไฟล์นามสกุล .apk เพื่อติดตั้งแอปพลิเคชันในสมาร์ทโฟน

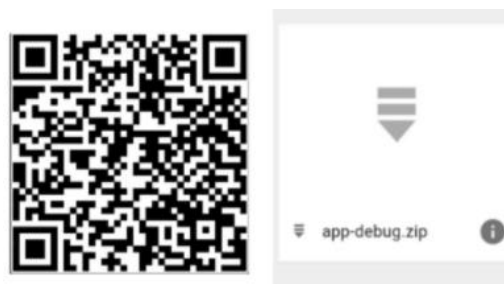


Figure 7. QR Code for Downloading and Installing the Application

หน้าจอแอปพลิเคชันสำหรับให้ผู้ดูแลระบบใช้ โดยผู้ดูแลระบบสามารถใส่ข้อมูลของผู้สูงอายุและจัดเก็บไว้ในฐานข้อมูล พร้อมจัดเก็บข้อมูล (Training Dataset) ซึ่งเป็นข้อมูลภาพผู้สูงอายุเพื่อจะใช้ face_recognition ตรวจจับใบหน้าในภาพแปลงภาพใบหน้าที่ตรวจจับได้เป็น Face Embedding Vector ต่อไป ดัง Figure 8. จะต้องมีการล็อกอินเข้าสู่ระบบด้วยอีเมล และรหัสผ่านให้ถูกต้อง จากนั้นการจัดเก็บข้อมูลของผู้สูงอายุจะมีหน้าข้อตกลงและนโยบายคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคล (PDPA) ให้ยอมรับก่อนที่จะบันทึกข้อมูลเสมอ

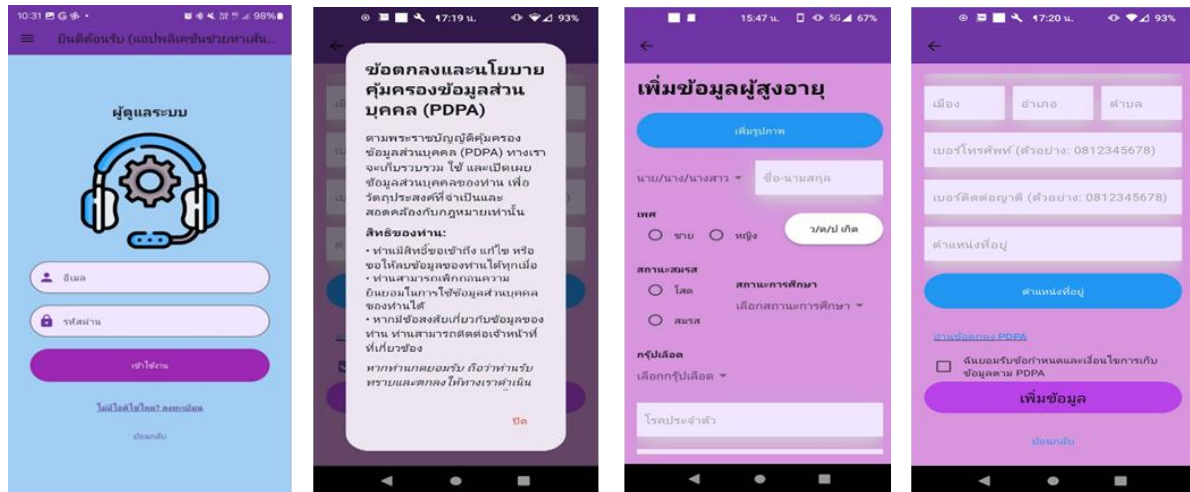


Figure 8. Administrator Dashboard Screens

ส่วนของผู้ใช้ทั่วไปจะสามารถทำการถ่ายภาพใบหน้าผู้สูงอายุ Figure 9. และดูข้อมูลเกี่ยวกับ ชื่อ-สกุล และตำแหน่งบ้านเพื่อเป็นเส้นทางกลับบ้านของผู้สูงอายุได้ดังภาพ

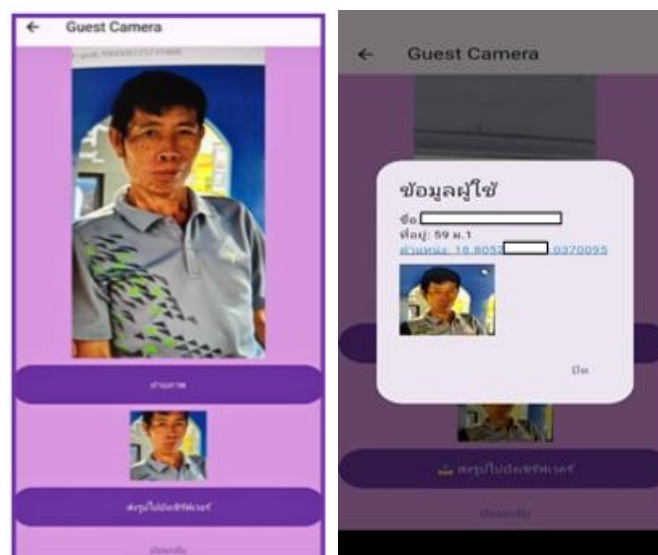


Figure 9. User Interface Screens for General Users

ผลของการทดลองนี้ได้ทำการทดสอบภาพที่มีระยะห่างจากตัวกล้องกับผู้ใช้งานระยะห่าง 45 เซนติเมตร จำนวน 10 คน ได้บันทึกค่าจำนวน 10 ครั้งลงในตารางเพื่อนำค่าที่ได้้นั้นมาคำนวณแล้วนำมาแสดงผลหาความถูกต้องของใบหน้า โดยภาพรวมผลลัพธ์ของการตรวจสอบใบหน้าสามารถแสดงผลความถูกต้องของใบหน้าที่มีค่าเท่ากับร้อยละ 89 แสดงดัง Table 1.

Table 1. Results of Facial Recognition Accuracy (N=10)

Person	Number of Attempts	Number Verified	Accuracy Percentage (%)
1	10	9	90
2	10	10	100
3	10	9	90
4	10	9	90
5	10	9	90
6	10	8	80
7	10	10	100
8	10	9	90
9	10	8	80
10	10	8	80
Overall		89	89

ผู้วิจัยได้นำระบบให้ผู้เชี่ยวชาญทางด้านคอมพิวเตอร์ จำนวน 5 คน ประเมินประสิทธิภาพของระบบที่พัฒนาขึ้นพบว่าโดยภาพรวมผู้เชี่ยวชาญเห็นว่าระบบมีประสิทธิภาพอยู่ในระดับมาก ค่าเฉลี่ย 4.31 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.34 แสดงดัง Table 2.

Table 2. Expert Evaluation of System Effectiveness (N=5)

Items	$\bar{X}$	S.D.	Interpretation
Functional Requirement Test	4.44	0.33	Good
Function Test	4.48	0.26	Good
Usability Test	4.51	0.12	Very Good
Performance Test	3.80	0.32	Good
Security Test	4.30	0.67	Good
Overall	4.31	0.34	Good

การนำผลงานวิจัยไปเผยแพร่ที่ตำบลทุ่งต้อม อำเภอสันป่าตอง จังหวัดเชียงใหม่ กลุ่มตัวอย่างจำนวน 33 คน แยกเป็นเพศชาย จำนวน 23 คน คิดเป็นร้อยละ 69.70 และเพศหญิงจำนวน 10 คน คิดเป็นร้อยละ 30.30 โดยการคัดเลือกแบบเจาะจง เพื่อประเมินความพึงพอใจ ผลการประเมินด้านเนื้อหาและการออกแบบ ซึ่งผลประเมินพบว่าผู้ใช้มีความพึงพอใจ ในส่วนของการรายงานเนื้อหาถูกต้องแม่นยำ และการออกแบบหน้าจอก็มีความเหมาะสม โดยมีค่าเฉลี่ย 4.48 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.51 รองลงมาได้แก่ เนื้อหาที่น่าสนใจตรงกับความต้องการ คะแนนเฉลี่ยเท่ากันคือ 4.45 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.56 ความครบถ้วนสมบูรณ์ น่าเชื่อถือของข้อมูล ค่าเฉลี่ย 4.42 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.56 และ

โดยรวมแล้วความพึงพอใจในด้านเนื้อหาและการออกแบบของผู้ใช้อยู่ในระดับมาก ค่าเฉลี่ยรวม 4.38 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.38 ดัง Table 3.

Table 3. The Level of satisfaction with content and design by User (N=33)

Items	$\bar{X}$	S.D.	Interpretation
1. The content presented meets the needs	4.34	0.68	Good
2. Completeness and reliability of data	4.34	0.64	Good
3. The Sufficiency of Presented Data for User Needs	4.20	0.63	Good
4. Accuracy of Content Reporting	4.43	0.56	Good
5. Appropriateness of Screen Design	4.48	0.51	Good
6. Visual Appeal and Screen Composition	4.36	0.49	Good
7. Clarity of Menus and Screen Components	4.33	0.48	Good
8. Font Size and Typography Appropriateness	4.33	0.48	Good
9. Appropriateness of Text Color	4.27	0.67	Good
Overall satisfaction	4.38	0.38	Good

ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้ระบบด้านการนำไปใช้ประโยชน์ ผู้ใช้เห็นว่าระบบใช้งานไม่ซับซ้อน ค่าเฉลี่ย 4.42 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.50 รองลงมาระบบสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ ค่าเฉลี่ย 4.39 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.61 การใช้มือถือการถ่ายภาพใบหน้าและแสดงผลได้รวดเร็ว ค่าเฉลี่ย 4.33 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.60 และระบบสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ค่าเฉลี่ย 4.33 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.60 ซึ่งภาพรวมทั้งหมดของระบบที่พัฒนาขึ้นผู้ใช้พึงพอใจอยู่ในระดับมาก ค่าเฉลี่ยรวม 4.36 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.51 ดังใน Table 4.

Table 4. The Level of satisfaction with system performance and utilization by User (N=33)

Items	$\bar{X}$	S.D.	Interpretation
1. Ease of Use and Simplicity	4.42	0.50	Good
2. Fast, Accurate, and Reliable Processing	4.18	0.73	Good
3. Seamless Mobile Facial Scanning and Quick Results	4.33	0.60	Good
4. System Accuracy and Efficiency	4.39	0.61	Good
5. Practical Usability and Real-World Application	4.33	0.60	Good
Overall satisfaction	4.33	0.51	Good

4. อภิปรายผลการวิจัย

การวิจัยเรื่อง การพัฒนานวัตกรรมดูแลผู้สูงอายุ เพื่อหาเส้นทางกลับบ้านโดยใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์มีผลการทดลองการตรวจสอบใบหน้าของระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถแสดงผลการตรวจจับใบหน้าถูกต้องมีค่าเท่ากับร้อยละ 89 เป็นระบบที่สามารถเพิ่มข้อมูลผู้สูงอายุเข้ามาจัดเก็บไว้ในระบบได้เรื่อย ๆ ทำให้มีฐานข้อมูลสำหรับจัดเก็บข้อมูลผู้สูงอายุที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ในอนาคต และยังอำนวยความสะดวกให้กับผู้ใช้ด้วยการถ่ายภาพใบหน้าผ่านเครื่องสมาร์ทโฟนหรือแท็บเล็ต เมื่อนำระบบไปทดลองใช้กับกลุ่มตัวอย่างพบว่า กลุ่มตัวอย่างมีความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก ทั้งนี้อาจ

เนื่องจากปัจจุบันมีการใช้สมาร์ทโฟนกันเป็นจำนวนมาก และการนำเอาเทคโนโลยีที่ทันสมัยเช่นปัญญาประดิษฐ์เข้ามาใช้ จึงทำให้ระบบที่พัฒนาขึ้นสะดวกและใช้งานได้ง่าย สอดคล้องกับงานวิจัยของณัฐพล คุ่มใหญ่โต และคณะ (Kumyaito et al., 2023) ได้วิจัยเรื่องแพลตฟอร์มปัญญาประดิษฐ์บนฐานความรู้เชิงความหมายเพื่อการแนะนำการดูแลรักษาโรคเรื้อรังของผู้สูงอายุ โดยแพลตฟอร์มปัญญาประดิษฐ์แบ่งเป็น 5 ส่วนได้แก่ ส่วนติดต่อผู้ใช้งานเพื่อเข้าค่าทางสุขภาพ อัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่องในการจำแนกอาการความผิดปกติของโรค ด้านการฝึกสอนจากชุดข้อมูลออนไลน์เกี่ยวกับโรคหัวใจ และโรคหลอดเลือดสมอง ฐานความรู้ออนโทโลยีจำนวน 33 โหนด แบ่งเป็น 4 ชั้นความรู้ ฐานกฎเชิงความหมายจำนวน 6 ส่วน และส่วนแสดงผลการจำแนกโรคด้วยแมชชีนเลิร์นนิงที่เชื่อมประสานการประมวลผลกับฐานความรู้เชิงความหมายที่ผ่านการสกัดจากแพทย์ผู้เชี่ยวชาญเพื่อสร้างคำแนะนำจากผลการทำนายที่เป็นอัตโนมัติจากข้อมูลภาวะสุขภาพที่ตรวจวัดจากเซนเซอร์ของอุปกรณ์ไอโอที อุปกรณ์การแพทย์ทั่วไปที่ส่งค่าแบบบลูทูธ ซึ่งการจำแนกผลลัพธ์ด้วยอัลกอริทึมต้นไม้ได้ค่าถูกต้องคิดเป็นร้อยละ 100 และการแนะนำข้อมูลการดูแลรักษาโรคด้วยฐานความรู้เชิงความหมายได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้อง ค่า F-measure เท่ากับร้อยละ 92.3 งานวิจัย ภาสกร แยมงาม และคณะ (Yaemngam, 2022) ได้ทำการวิจัยระบบปัญญาประดิษฐ์สำหรับทำนายสุขภาพทางจิตของผู้ที่ทำงานด้านเทคโนโลยีสารสนเทศ โดยศึกษาประสิทธิภาพการทำนายเทคนิคการถดถอยเชิงเส้นจากกลุ่มตัวอย่าง 1,146 ตัวอย่าง พบว่าอัลกอริทึมของปัญญาประดิษฐ์แบบ Random Forest มีประสิทธิภาพสูงสุดในการทำนายความเสี่ยงของการเกิดปัญหาสุขภาพทางจิต ด้วยร้อยละความแม่นยำเท่ากับ 90.85 และร้อยละความถูกต้อง 92.33 ร้อยละของความไวเท่ากับ 94.56 และ ร้อยละความจำเพาะเท่ากับ 90.00 ทำให้ค่าการทำนายได้สูงมาก นอกจากนี้บทความวิจัยของ ยุวเรศมศุทธิ์ สิทธิชาญบัญชา (Sittichanbuncha, 2021b) ได้กล่าวถึงปัญญาประดิษฐ์กับการใช้ประโยชน์ทางการแพทย์และเวชศาสตร์ฉุกเฉิน เนื่องจากปัญญาประดิษฐ์คือศาสตร์ที่รวบรวมองค์ความรู้ในหลายสาขาวิชา โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์มาพัฒนาให้เครื่องจักรหรือระบบคอมพิวเตอร์มีความชาญฉลาด สามารถคิด คำนวณ วิเคราะห์ เรียนรู้และตัดสินใจโดยใช้เหตุผลเสมือนมนุษย์ แต่ปัญญาประดิษฐ์สามารถทำในส่วนการประมวลผลการพยากรณ์และการทำงานซ้ำ ๆ ซึ่งเป็นข้อจำกัดของมนุษย์ และเมื่อผสมผสานทักษะของมนุษย์และปัญญาประดิษฐ์เข้าด้วยกันจะช่วยให้การทำงานได้ง่าย มีประสิทธิภาพขึ้นและดำรงชีวิตที่สะดวกขึ้น ซึ่งปัญญาประดิษฐ์จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการบริการทางการแพทย์ เช่น การทำนายระยะเวลาในการให้บริการ การวินิจฉัยโรค การติดตามอาการของผู้ป่วย การบริหารจัดการทรัพยากร ซึ่งช่วยเพิ่มความปลอดภัยและคุณภาพในการดูแลผู้ป่วย ถึงแม้จะมีประโยชน์อย่างมากแต่ก็มีประเด็นที่เสี่ยงที่ควรระมัดระวังหลายประการ เช่น การวินิจฉัยผิดพลาดคลาดเคลื่อน การรั่วไหลของข้อมูลผู้ป่วย การเปิดเผยความโปร่งใสของข้อมูลและประเด็นด้านจริยธรรมด้วย

5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การทำงานของระบบแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของผู้ใช้ทั่วไปและส่วนของผู้ดูแลระบบ จะใช้ Flutter ซึ่งเป็นเฟรมเวิร์กในการพัฒนา UI ในส่วนหน้าบ้าน ส่วนหลังบ้านใช้ภาษาไพธอนในการประมวลผลข้อมูลและสร้าง API และใช้ MySQL เป็นโปรแกรมจัดเก็บข้อมูล ในส่วนของผู้ใช้ทั่วไปสามารถค้นหาข้อมูลของผู้สูงอายุโดยวิธีการถ่ายภาพใบหน้าเพื่อค้นหาและระบบจะแจ้งข้อมูลดังกล่าวบนจอภาพ ทั้งนี้ผู้ใช้งานจะต้องทำการติดตั้งแอปพลิเคชันในเครื่องสมาร์ทโฟนก่อน สำหรับผู้ดูแลระบบ สามารถเพิ่ม ลบ ข้อมูลของผู้สูงอายุในระบบได้ โดยใช้เครื่องสมาร์ทโฟน แท็บเล็ต เมื่อได้นำระบบทดลองใช้งานโดยการตรวจจับใบหน้าผู้สูงอายุจำนวน 10 คน คนละ 10 รอบ หากระบบสามารถแสดงความแม่นยำไม่ต่ำกว่าร้อยละ 80 ถือว่าระบบมีความแม่นยำสามารถใช้งานได้ โดยพบว่าภาพรวมผลลัพธ์ของการตรวจสอบใบหน้าของระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถแสดงผลการตรวจจับใบหน้าถูกต้องมีค่าเท่ากับร้อยละ 89 สำหรับการรู้จำใบหน้า ข้อจำกัดระบบรู้จำใบหน้าด้วย PCA และ SVM ได้แก่การต้องใช้ภาพจำนวนมากต่อผู้สูงอายุหนึ่งคนเพื่อให้การฝึกโมเดลมีความแม่นยำสูง การเก็บข้อมูลแบบเรียลไทม์อาจเจอข้อจำกัดทั้งในด้านเวลา พื้นที่จัดเก็บ และคุณภาพของภาพ โดยเฉพาะถ้าสภาพแวดล้อมไม่เหมาะสม เช่น แสงน้อย

หรือใบหน้าหันไปในมุมที่ตรวจจับได้ยาก จะทำให้คุณภาพของ Embedding Vector ลดลง และเมื่อจำนวนข้อมูลเพิ่มมากขึ้น การฝึกโมเดลจะใช้เวลานานขึ้นตามลำดับ และอาจต้องพึ่งพา GPU เพื่อให้สามารถประมวลผลได้ทันเวลา ผู้เชี่ยวชาญประเมินประสิทธิภาพ พบว่าอยู่ในระดับมาก ค่าเฉลี่ย 4.31 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.34 และในส่วนของผู้ใช้ทั่วไป มีความพึงพอใจระบบที่พัฒนาขึ้นด้านเนื้อหาและการออกแบบอยู่ในระดับมาก ค่าเฉลี่ย 4.38 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.38 ด้านประสิทธิภาพของระบบและการนำไปใช้ประโยชน์มีความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก ค่าเฉลี่ย 4.33 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.51 โดยค่าเฉลี่ยรวมความพึงพอใจของระบบอยู่ที่ 4.36 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.45

ข้อเสนอแนะการวิจัยนี้สามารถประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์กับระบบงานอื่น ๆ ได้ เช่น การให้บริการในสถานที่ต่าง ๆ การนำข้อมูลดังกล่าวไปใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบระบบให้ความช่วยเหลือด้านต่าง ๆ ได้

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ที่ให้งบประมาณเพื่อสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund; FF) จัดสรรงบประมาณจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ปี พ.ศ. 2567 และชุมชนตำบลทุ่งต้อม อำเภอสันป่าตอง จังหวัดเชียงใหม่ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลและให้ความร่วมมือในการทำกิจกรรมต่าง ๆ ในครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- Department of Older Persons. (2024). Elderly statistics December 2023 [Online]. Retrieved December 30, 2024, from: https://www.dop.go.th/th/statistics_page?cat=1&id=2. (in Thai)
- Jangpho, S. (2021). Development of a Health Care Model for Elderly by Community Participation, Ban Pho Sub-district, Mueang District, Nakhon Ratchasima Province. *Journal of Health Research and Development, Nakhon Ratchasima Provincial Public Health Office*, 7(2), 165-183. (in Thai)
- Kanjanawattana, S., Jarat, A., & Praneetpholkrang, P. (2022). Classification of Human Emotion from Speech Recognition Using Deep Learning, *Science and Technology Journal of Sisaket Rajabhat University*, 2(2), 1-11.
- Kumeechailimage, P. (2022). Recognition Technology. *Royal Thai Naval Academy Journal of Science and Technology*, 5(1), 136-148. (in Thai)
- Kumyaito, N., Tamee, K. & Sittijuk, P. (2023). Artificial Intelligence Platform on Semantic Knowledge Base for Recommending Elderly with Chronic Diseases Care. *EAU Heritage Journal Science and Technology*, 17(2), 120-137. (in Thai)
- Manuskiatti, W. (2022). The Application of Artificial Intelligence in Medicine. *Journal of Ratthapirak*, 64(1), 63-73. (in Thai)
- Megges, M., Freiesleben, S.D., Jankowskia, N., Haasa, B., & Peters O. (2017). Technology for home dementia care: A prototypelocating system put to the test, *Translational Research Clinical Interventions*, 3(3), 332-338.
- Rungkaew, J., & Takianram, A. (2023). A Development of School Bus Tracking Application. *Science and Technology Journal of Sisaket Rajabhat University*, 3(2), 40-49. (in Thai)
- Sahlaehrat, M., Buttakhot, S., Thianmontri, S., Preechapanich, O., & Pankong, N. (2024). A Development of Raw Material Management System for the Bakery Store. *Science and Technology Journal of Sisaket Rajabhat University*, 4(2), 84-94. (in Thai)
- Sittichanbuncha, Y. (2021). Artificial intelligence (AI) and its application in medical and emergency medicine. *Journal of Emergency Medical Services of Thailand*, 1(1), 91-104. (in Thai)
- Sridam, I. (2022). Classification System for Comments and Suggestions of the People towards the Government Project with Artificial Intelligence Methods. *Journal of Science and Technology Mahasarakham University*, 41(3), 134-141. (in Thai)
- Srisa-ard, B. (2017). Basic Research. Suweeriyasan, Bangkok. (in Thai)

- Thansettakij. (2024). Lost (not) worried” with wristbands to help track lost seniors [Online]. Retrieved June 11, 2025, from: <https://www.thansettakij.com/health/wellbeing/593503>. (in Thai)
- Yaemngam, P., Thiraampon, N., & Euphanwiriyaikul, S. (2022). Artificial Intelligence System for Mental Health Prediction of Information Technology (IT) Workers. *ECTI Transaction on Application Research and Development*, 2(3), 39-48. (in Thai)

การศึกษาการขยายตัวของเมืองในพื้นที่ระเบียงเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก
กรณีศึกษาอำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี

A Study of Urban Expansion in the Eastern Economic Corridor Area:
Case Study in Si Racha District, Chonburi Province

สุภาพร มานะจิตประเสริฐ^{1*}

Supaporn Manajitprasert^{1*}

¹ภาควิชาภูมิศาสตร์ คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง กรุงเทพมหานคร

¹Department of Geography, Faculty of Education, Ramkhamhaeng University, Bangkok

*Corresponding Author: smanajitprasert@gmail.com

Received: April 9, 2025

Revised: July 3, 2025

Accepted: July 22, 2025

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินและศึกษารูปแบบการขยายตัวของเมืองในอำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี โดยวิเคราะห์ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 ระหว่าง ปี พ.ศ. 2559–2566 และใช้วิธีการจำแนกแบบก้ำกับลูแล เพื่อจำแนกประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดิน 5 ประเภท ได้แก่ พื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง พื้นที่เกษตรกรรม พื้นที่ป่าไม้ พื้นที่แหล่งน้ำ และพื้นที่เบ็ดเตล็ด การประเมินความแม่นยำของการจำแนกให้ค่าความถูกต้องโดยรวมอยู่ในระดับสูง (ร้อยละ 83.42–86.80) และค่าดัชนีแคปปา เท่ากับ 0.85 ผลการศึกษาพบว่า ในช่วงปี พ.ศ. 2559–2566 พื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้างเพิ่มขึ้นจาก 161.48 ตารางกิโลเมตร (ร้อยละ 26.53) เป็น 190.63 ตารางกิโลเมตร (ร้อยละ 31.11) ในขณะที่พื้นที่เกษตรกรรมและป่าไม้ลดลงอย่างต่อเนื่อง รูปแบบการขยายตัวของเมืองมี 2 ลักษณะ คือ การตั้งถิ่นฐานตามแนวเส้นทางคมนาคมหลัก ได้แก่ ถนนสุขุมวิท และทางหลวงพิเศษหมายเลข 7 และการตั้งถิ่นฐานแบบกระจุกในศูนย์กลางชุมชนหลัก 4 แห่ง คือ บริเวณเทศบาลเมืองศรีราชา บริเวณรอบกลุ่มอุตสาหกรรมปิโตรเลียม (ไทยออยล์) บริเวณรอบนิคมอุตสาหกรรมแหลมฉบังและท่าเรือพาณิชย์แหลมฉบัง และบริเวณรอบสวนอุตสาหกรรมเครือสหพัฒน์ ผลการคาดการณ์ในปี พ.ศ. 2570 โดยใช้แบบจำลอง CA-Markov แสดงให้เห็นว่าพื้นที่เมืองจะเพิ่มขึ้นเป็น 248.78 ตารางกิโลเมตร (ร้อยละ 40.60) โดยขยายตัวต่อเนื่องจากพื้นที่พัฒนาเดิมและพื้นที่ใกล้โครงสร้างพื้นฐานหลัก โดยความแม่นยำของแบบจำลองได้รับการประเมินโดยใช้ตารางความคลาดเคลื่อน (Error Matrix) เปรียบเทียบกับข้อมูลจริงในปี พ.ศ. 2566 ให้ค่าความถูกต้องโดยรวมร้อยละ 97.25 และค่าดัชนีแคปปาเท่ากับ 0.93 ผลการวิจัยนี้สามารถนำไปใช้สนับสนุนการวางแผนและการกำหนดนโยบายการพัฒนาเมืองในเขตระเบียงเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก เพื่อสร้างสมดุลระหว่างการพัฒนาเมืองและการอนุรักษ์พื้นที่เกษตรกรรมและป่าไม้อย่างยั่งยืนและสามารถประยุกต์ใช้กับพื้นที่ที่มีลักษณะการเติบโตทางอุตสาหกรรมอย่างรวดเร็วในบริบทใกล้เคียง

คำสำคัญ: การขยายตัวของเมือง, พื้นที่ระเบียงเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก, แบบจำลอง CA-Markov, อำเภอศรีราชา

Abstract

This research aims to analyze land use changes and study patterns of urban expansion in Si Racha District, Chonburi Province. Sentinel-2 satellite imagery from 2016 to 2023 was analyzed using supervised classification methods to classify land use into five types: urban and built-up areas, agricultural areas, forest areas, water bodies, and miscellaneous areas. Classification accuracy evaluation showed overall accuracy at a high level (83.42% to 86.80%) and a Kappa index of 0.85. The study results showed that during 2016–2023, urban and built-up areas increased from 161.48 km² (26.53%) to 190.63 km² (31.11%), while agricultural and forest areas continuously declined. Urban expansion patterns showed two characteristics: linear settlements along major transportation routes—namely Sukhumvit Road and Motorway No. 7—and clustered settlements in four main urban centers: Si Racha Municipal area, the area around the Petroleum Industrial Group (Thai Oil), Laem Chabang Industrial Estate and Commercial Port, and the Saha Group Industrial Park. Forecasting results for 2027 using the CA-Markov model indicated that urban areas would increase to 248.78 km² (40.60%), expanding continuously from existing developed areas and areas near major infrastructure. Model accuracy was evaluated using an error matrix compared to actual 2023 data, yielding an overall accuracy of 97.25% and a Kappa index of 0.93. The findings can support urban planning and policy development in the Eastern Economic Corridor (EEC) to promote balance between urban development and sustainable conservation of agricultural and forest areas and can be applied to other areas with similar rapid industrial growth characteristics.

Keywords: Urban expansion, Eastern Economic Corridor Area, CA-Markov model, Si Racha District

1. บทนำ

การขยายตัวของเมืองเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นทั่วโลก อันเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของประชากรและการขยายตัวทางเศรษฐกิจอย่างรวดเร็ว องค์การสหประชาชาติ (United Nations Population Fund, 2022) รายงานว่าในปี พ.ศ. 2566 โลกมีประชากรประมาณ 8.1 พันล้านคน และคาดว่าจะเพิ่มขึ้นเป็น 9.8 พันล้านคนภายในปี พ.ศ. 2593 โดยสัดส่วนประชากรในเขตเมืองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในประเทศกำลังพัฒนา (SDG Knowledge Hub, 2023; Prasartkul, 2024)

สำหรับประเทศไทย การขยายตัวของเมือง โดยเฉพาะเมืองขนาดใหญ่ที่มีลักษณะเป็นเมืองโตเดี่ยว (Primate City) เช่น กรุงเทพมหานคร และเมืองหลักในภูมิภาคต่าง ๆ ถือเป็นปัญหาที่มีความสำคัญ จังหวัดชลบุรีเป็นหนึ่งในพื้นที่ที่มีการขยายตัวของเมืองอย่างเด่นชัด เนื่องจากเป็นพื้นที่ยุทธศาสตร์สำคัญในโครงการระเบียงเศรษฐกิจภาคตะวันออก (Eastern Economic Corridor: EEC) ซึ่งมีบทบาทในการรองรับกิจกรรมทางเศรษฐกิจและการลงทุนอุตสาหกรรมเป้าหมายของประเทศตามนโยบายไทยแลนด์ 4.0 (Eastern Economic Corridor Office of Thailand, 2021) จังหวัดชลบุรีมีการเติบโตทางประชากรและเศรษฐกิจอย่างต่อเนื่อง โดยจำนวนประชากรเพิ่มขึ้นจาก 1,483,049 คนในปี พ.ศ. 2559 เป็น 1,618,066 คนในปี พ.ศ. 2566 หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 9.1 (Chonburi Provincial Statistical Office, 2024) ขณะที่ผลิตภัณฑ์มวลรวมจังหวัด (GPP) เพิ่มขึ้นจาก 897,452 ล้านบาทในปี พ.ศ. 2559 เป็น 1,173,449 ล้านบาทในปี พ.ศ. 2565 จากข้อมูลแผนพัฒนาจังหวัดชลบุรี (พ.ศ. 2566–2570) ฉบับบททวน พบว่าโครงสร้างเศรษฐกิจของจังหวัดพึ่งพาภาคอุตสาหกรรมเป็นหลัก (ร้อยละ 56.2 ของ GPP) รองลงมาคือภาคบริการ (ร้อยละ 41.8) ขณะที่ภาคเกษตรกรรมมีสัดส่วนเพียงร้อยละ 2

ของ GPP (Chonburi Provincial Office, 2024) โครงสร้างเศรษฐกิจดังกล่าวชี้ให้เห็นถึงบทบาทของภาคอุตสาหกรรมและบริการในฐานะกลไกหลักในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจของจังหวัด ทั้งนี้ จะเห็นได้ว่าการเติบโตทางเศรษฐกิจของจังหวัดชลบุรีมีความเชื่อมโยงอย่างใกล้ชิดกับโครงการ EEC โดยเฉพาะในพื้นที่อำเภอศรีราชา ซึ่งเป็นหนึ่งในพื้นที่สำคัญที่รองรับการพัฒนาอุตสาหกรรมภายใต้โครงการ EEC โดยมีนิคมอุตสาหกรรมขนาดใหญ่หลายแห่ง เช่น นิคมอุตสาหกรรมแหลมฉบัง นิคมอุตสาหกรรมเครือสหพัฒน์ และนิคมอุตสาหกรรมบึงทอง พื้นที่เหล่านี้เป็นศูนย์กลางการลงทุนและแหล่งจ้างงานสำคัญของจังหวัด อีกทั้งยังมีการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานและพื้นที่เมืองอย่างต่อเนื่อง (Eastern Economic Corridor Policy Committee, 2024)

งานวิจัยนี้ได้นำเทคโนโลยีภูมิสารสนเทศมาใช้ในการวิเคราะห์การขยายตัวของเมืองในอำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี โดยใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 ในปี พ.ศ. 2559, 2562 และ 2566 เพื่อจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดิน รวมถึงศึกษารูปแบบการขยายตัวของเมืองในแต่ละช่วงเวลา ทั้งนี้ การเลือกช่วงเวลาของภาพถ่ายดาวเทียมสะท้อนให้เห็นถึงเหตุการณ์สำคัญที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงพื้นที่เมือง ได้แก่ ปี พ.ศ. 2559 เป็นช่วงก่อนเริ่มขับเคลื่อนโครงการ EEC ปี พ.ศ. 2562 เป็นช่วงที่มีการลงทุนด้านโครงสร้างพื้นฐานขนาดใหญ่ เช่น การขยายท่าเรือแหลมฉบัง และโครงการรถไฟความเร็วสูงเชื่อมสามสนามบิน และปี พ.ศ. 2566 ซึ่งเป็นปีที่ดำเนินการวิจัยและเป็นช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์แนวโน้มการขยายตัวของพื้นที่เมือง นอกจากนี้ ยังได้ประยุกต์ใช้แบบจำลอง Cellular Automata-Markov (CA-Markov) เพื่อคาดการณ์แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินในอนาคต โดยแบบจำลองนี้มีศักยภาพในการแสดงการเปลี่ยนแปลงเชิงพื้นที่และเวลาได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ เพื่อนำไปสู่การคาดการณ์รูปแบบการขยายตัวของเมืองในปี พ.ศ. 2570 ซึ่งจะช่วยเสริมสร้างความเข้าใจในทิศทางการพัฒนาเมืองในระยะยาว โดยวัตถุประสงค์ของการวิจัย ได้แก่ 1) เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดิน และศึกษารูปแบบการขยายตัวของเมืองในอำเภอศรีราชา โดยใช้ข้อมูลจากภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 ในปี พ.ศ. 2559, 2562, 2566 และ 2) เพื่อคาดการณ์แนวโน้มการขยายตัวของเมืองในอำเภอศรีราชาในปี พ.ศ. 2570 โดยใช้แบบจำลอง CA-Markov

2. วิธีดำเนินงานวิจัย

2.1 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศ (Geoinformatics) ประกอบด้วย เทคโนโลยีการรับรู้จากระยะไกล (Remote Sensing: RS) ใช้ในการตรวจสอบและวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดินในเขตเมือง ข้อมูลจาก RS สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์รูปแบบการขยายตัวของเมืองและการประเมินแนวโน้มการเติบโตของชุมชนเมืองได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ ระบบนำทางด้วยดาวเทียม (Global Navigation Satellite System: GNSS) ใช้ในการระบุตำแหน่งบนพื้นผิวโลกเป็นไปอย่างแม่นยำ ซึ่งมีประโยชน์ในกระบวนการติดตามและประเมินผลกระทบจากการขยายตัวของเมือง นอกจากนี้ ยังใช้ในการจัดทำฐานข้อมูลตำแหน่งของโครงสร้างพื้นฐานสำคัญ เช่น ถนน สะพาน สถานที่สำคัญ และระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographic Information System: GIS) ใช้ในการจัดเก็บ วิเคราะห์ และแสดงผลข้อมูลเชิงพื้นที่ในรูปแบบที่สามารถนำไปใช้ในการตัดสินใจเชิงกลยุทธ์ เช่น การกำหนดพื้นที่ใช้ประโยชน์ที่ดิน การวางผังเมือง และการจัดการโครงสร้างพื้นฐานอย่างยั่งยืน (Tonsiri, et al, 2018; Teeravech et al., 2023)

แบบจำลอง CA-Markov เป็นการผสมผสานระหว่างแนวคิดการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ตามลำดับเวลา (Markov Chain) กับการเปลี่ยนแปลงเชิงพื้นที่ในบริบทของพื้นที่ใกล้เคียง (Cellular Automata หรือ CA) เพื่อสร้างการจำลองการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินในอนาคตอย่างแม่นยำและสมจริง (Tonsiri et al., 2018; Thirakunthomorn et al., 2020)

การประยุกต์ใช้แบบจำลอง CA-Markov ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในงานวิจัยทั้งในประเทศและต่างประเทศ ในประเทศไทย Thirakunthomorn et al. (2020) ใช้แบบจำลอง CA-Markov ในการตรวจสอบและคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินในระดับภูมิภาค แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของแบบจำลองในการระบุทิศทางการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ได้อย่างแม่นยำ Khunrattanasiri et al. (2024) ศึกษาการใช้แบบจำลอง CA-Markov ร่วมกับข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Landsat-8 เพื่อคาดการณ์พื้นที่ในเขตห้ามล่าสัตว์ป่าทะเลน้อย พบว่าแบบจำลองสามารถสะท้อนแนวโน้มการบุกรุกพื้นที่ธรรมชาติได้อย่างชัดเจน Tonsiri et al. (2018) ใช้แบบจำลองในการประเมินการเปลี่ยนแปลงพื้นที่เขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าเขาสอยดาว ช่วยสนับสนุนการกำหนดมาตรการอนุรักษ์พื้นที่สีเขียว ส่วน Teeravech et al. (2023) ติดตามการขยายเขตเมืองในจังหวัดจันทบุรีโดยใช้ภาพจาก Google Earth Engine ร่วมกับแบบจำลอง CA-Markov เพื่อประเมินแนวโน้มการเติบโตของเมืองในเชิงพื้นที่ สำหรับในต่างประเทศ การประยุกต์ใช้แบบจำลอง CA-Markov ได้รับการศึกษาในบริบทที่หลากหลาย Choudhury et al. (2024) ศึกษาการขยายตัวของเมืองกัมรับ รัฐอัสสัม ประเทศอินเดีย เพื่อวางแผนการจัดการพื้นที่สีเขียวและแหล่งน้ำในเขตเมือง Liu et al. (2023) ประยุกต์ใช้แบบจำลองในเมืองเฉิงตู ประเทศจีน เพื่อสร้างตัวชี้วัดเตือนภัยล่วงหน้า โดยผสมผสานกับการเรียนรู้ของเครื่อง Oliveira et al. (2022) ศึกษาเมืองฟอร์ตเลซา ประเทศบราซิล เพื่อวางแผนควบคุมการขยายตัวของเมืองแบบไร้ทิศทาง

แบบจำลอง CA-Markov ให้ผลแม่นยำในเชิงพื้นที่และเวลา แต่ก็มีข้อจำกัดสำคัญคือไม่สามารถรวมปัจจัยทางสังคม เศรษฐกิจ หรือโครงสร้างพื้นฐานเข้าในแบบจำลองได้โดยตรง ส่งผลต่อความแม่นยำในระยะยาว โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีความเปลี่ยนแปลงซับซ้อน ดังนั้น แบบจำลองอื่นๆ ที่นำมาใช้ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน ได้แก่ แบบจำลอง CLUE-S (Conversion of Land Use and its Effects at Small regional extent) ซึ่งสามารถรวมปัจจัยขับเคลื่อนทางเศรษฐกิจ สังคม และกายภาพ เช่น ความลาดชัน ระยะทางจากถนนหลัก และการเข้าถึงบริการสาธารณะ เข้าในการจำลองได้โดยตรง (Sun et al., 2022) นอกจากนี้ แบบจำลองเชิงประสาทเทียม (ANN) มีความสามารถในการเรียนรู้จากข้อมูลที่หลากหลาย และจัดการกับข้อมูลที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้ดี (Sarastika et al., 2024) รวมถึงแบบจำลอง Land Change Modeler (LCM) สามารถวิเคราะห์ตัวขับเคลื่อนและสร้างสมมติฐานเชิงนโยบายได้ (Zhao et al., 2023)

ในการศึกษานี้ ผู้วิจัยเลือกใช้แบบจำลอง CA-Markov เนื่องจากมีความเหมาะสมกับวัตถุประสงค์ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดินของอำเภอศรีราชา โดยเฉพาะการคาดการณ์แนวโน้มการขยายตัวของพื้นที่เมืองในระยะกลาง ซึ่งสอดคล้องกับข้อจำกัดของแบบจำลองที่ให้ผลลัพธ์แม่นยำในช่วงเวลาที่ไม่ยาวนานเกินไป สำหรับการประเมินความแม่นยำของผลการจำลอง ใช้ดัชนี Kappa ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ได้รับการยอมรับในการวัดความสอดคล้องระหว่างผลการจำแนกกับข้อมูลจริง โดยคำนึงถึงความถูกต้องที่อาจเกิดขึ้นโดยบังเอิญ (Foody, 2020) อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยตระหนักถึงข้อจำกัดของแบบจำลอง CA-Markov ที่ไม่สามารถรองรับปัจจัยด้านสังคมและเศรษฐกิจได้โดยตรง และเห็นว่าการบูรณาการข้อมูลด้านดังกล่าวในอนาคตจะช่วยเพิ่มความครอบคลุมและความแม่นยำของแบบจำลองให้ดียิ่งขึ้น

2.2 ขอบเขตพื้นที่ศึกษา

ขอบเขตพื้นที่ศึกษา ครอบคลุมอำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี ซึ่งตั้งอยู่ในเขตระบียงเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก โดยมีพิกัดทางภูมิศาสตร์ระหว่างละติจูดที่ 13 องศา 10 ลิปดาเหนือ และลองจิจูดที่ 100 องศา 55 ลิปดาตะวันออก รวมพื้นที่ทั้งหมด 612.76 ตารางกิโลเมตร ประกอบด้วย 8 ตำบล ได้แก่ ตำบลศรีราชา ตำบลสุรศักดิ์ ตำบลทุ่งสุขลา ตำบลบึง ตำบลหนองขาม ตำบลเขาคันทรง ตำบลบางพระ และตำบลบ่อวิน

2.3 เครื่องมือที่ใช้วิจัย

เครื่องมือที่ใช้วิจัย ได้แก่ ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 ปี พ.ศ. 2559, 2562 และ 2566 โปรแกรมระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ และแบบจำลอง CA-Markov

2.4 การเก็บรวบรวมข้อมูล

2.4.1 ข้อมูลปฐมภูมิ (Primary Data) ได้แก่ ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 จากเว็บไซต์ <https://earthexplorer.usgs.gov/> ของ USGS (2023) ปี พ.ศ. 2559, 2562 และ 2566 ซึ่งผ่านกระบวนการ Preprocessing โดยใช้ Sen2Cor Processor เพื่อทำ Atmospheric Correction และ Cloud Masking ข้อมูลที่มีเมฆบังหรือ Atmospheric Haze จะถูกตัดออก

2.4.2 ข้อมูลทุติยภูมิ (Secondary Data) ที่ได้จากการรวบรวมข้อมูลจากหน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ 1) ข้อมูลขอบเขตการปกครอง มาตราส่วน 1:50,000 จากกรมแผนที่ทหาร 2) ข้อมูลเส้นทางคมนาคม มาตราส่วน 1:50,000 จากกรมแผนที่ทหาร และ 3) ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน จากกรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ (Land Development Department, 2024b)

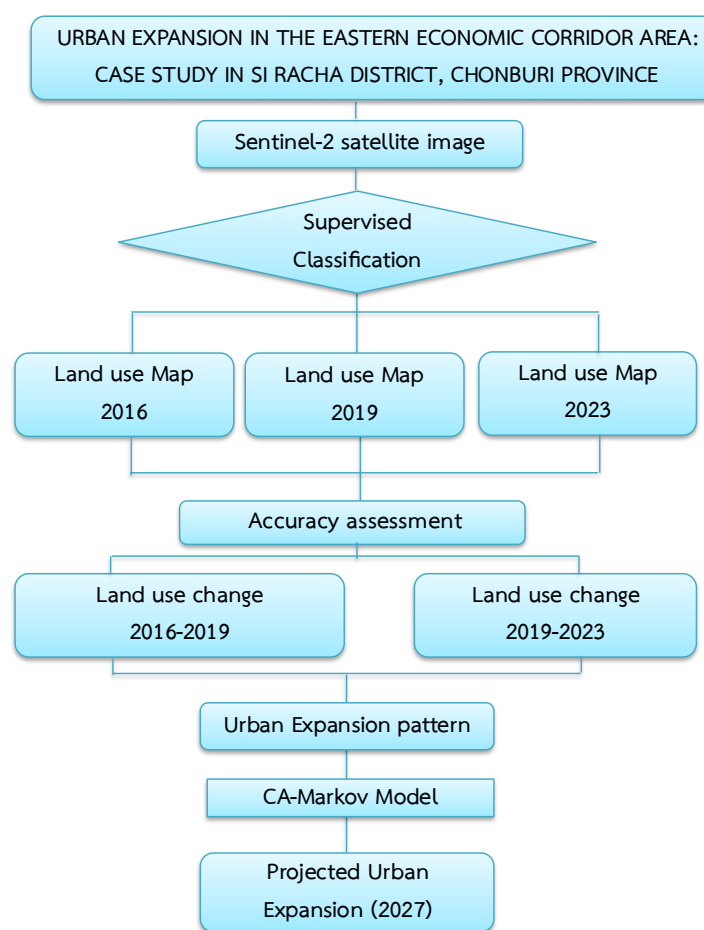


Figure 1. Conceptual Framework

2.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

2.5.1 การเตรียมข้อมูลก่อนการวิเคราะห์ข้อมูล ดำเนินการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเชิงเรขาคณิต (Geometric Correction) ของข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 ให้อยู่ในระบบพิกัด Universal Transverse Mercator (UTM) WGS84 โดยควบคุมค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (Root Mean Square Error: RMSE) ไม่เกิน 1 จุดภาพ (Pixel) ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ได้รับการยอมรับในงานวิจัยด้านภูมิสารสนเทศ (Liu et al., 2020; Xu et al., 2022)

2.5.2 การวิเคราะห์ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม ใช้เทคนิคการจำแนกแบบกำกับดูแล (Supervised Classification) ซึ่งอาศัยข้อมูลตัวอย่างพื้นที่ (Training Data) ในการระบุประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดิน โดยอ้างอิงคำจำกัดความจากกรมพัฒนาที่ดิน (Land Development Department, 2024a) จำแนกออกเป็น 5 ประเภท ได้แก่ 1) พื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง 2) พื้นที่เกษตรกรรม 3) พื้นที่ป่าไม้ 4) พื้นที่แหล่งน้ำ และ 5) พื้นที่เบ็ดเตล็ด ในขั้นตอนการเตรียมข้อมูลตัวอย่าง ได้ดำเนินการแปลและตีความประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดินด้วยสายตา (Visual Interpretation) จากภาพถ่ายดาวเทียมและภาพถ่ายอ้างอิง เช่น Google Earth โดยพิจารณาจากลักษณะเชิงพื้นที่ เช่น สี รูปร่าง รูปแบบ และความสัมพันธ์กับโครงสร้างพื้นฐาน ทั้งนี้ การวิเคราะห์ด้วยสายตาเป็นวิธีมาตรฐานหนึ่งในงานวิจัยด้านภูมิสารสนเทศที่ใช้ร่วมกับการวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Paheding et al. 2024; Lu et al. 2025; Adegun et al. 2023; Turan et al. 2023)

2.5.3 การประเมินค่าความถูกต้องของการจำแนก (Accuracy Assessment) ดำเนินการตรวจสอบความถูกต้องของผลการจำแนก โดยใช้จุดตัวอย่างจำนวน 250 จุดต่อปี โดยสุ่มจากแต่ละคลาสอย่างน้อย 50 จุด ด้วยวิธี Stratified Random Sampling เพื่อให้มั่นใจว่าทุกคลาสได้รับการตรวจสอบอย่างสมดุล โดยใช้ข้อมูลจริงจากภาพถ่าย Google Earth และผลการสำรวจภาคสนาม จากนั้นจัดทำตารางความคลาดเคลื่อน (Error Matrix) เพื่อคำนวณค่าทางสถิติ ได้แก่ ความถูกต้องโดยรวม (Overall Accuracy: OA) และดัชนีแคปปา (Kappa Index) ตามสมการที่ (1)

$$Kappa = \frac{(P_o - P_e)}{(1 - P_e)} \quad (1)$$

โดยที่ P_o คือ ความถูกต้องที่สังเกตได้จากการจำแนก (Observed Accuracy)

P_e คือ ความถูกต้องที่คาดหวังโดยบังเอิญ (Expected Accuracy)

การแปลผลค่าดัชนีแคปปา แบ่งออกเป็น 3 ระดับ ได้แก่ ค่ามากกว่า 0.80 แสดงว่า การจำแนกมีความถูกต้องในระดับสูง ค่า 0.40-0.80 แสดงว่าการจำแนกมีความถูกต้องในระดับปานกลาง และค่าน้อยกว่า 0.40 แสดงว่า การจำแนกมีความถูกต้องในระดับต่ำ (Foody, 2020)

2.5.4 การวิเคราะห์รูปแบบการขยายตัวของเมืองในอำเภอศรีราชา นำข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินใน 3 ช่วงเวลาเข้าสู่ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ในแต่ละประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดิน โดยใช้เทคนิค Cross Tabulation Analysis ซึ่งนำผลการจำแนกภาพในช่วงปี พ.ศ. 2559–2562 และ พ.ศ. 2562–2566 มาสร้าง Change Matrix เพื่อศึกษาทิศทางการเปลี่ยนแปลง เช่น พื้นที่เกษตรเปลี่ยนเป็นที่อยู่อาศัย เป็นต้น เพื่อระบุแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงในเชิงพื้นที่ ทั้งในเชิงปริมาณ (เช่น พื้นที่ที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง) และเชิงคุณภาพ (เช่น ลักษณะของการเปลี่ยนแปลงจากประเภทหนึ่งไปสู่อีกประเภทหนึ่ง)

2.5.5 การคาดการณ์การขยายตัวของเมือง ใช้แบบจำลอง CA-Markov โดยกำหนดพารามิเตอร์ Cell size เท่ากับ 10 เมตร ให้สอดคล้องกับความละเอียดของ Sentinel-2 และกำหนด Neighborhood rule ขนาด 3×3 เพื่อตรวจสอบอิทธิพลของการใช้ที่ดินรอบข้าง สร้าง Transition Probability Matrix จากข้อมูลปี พ.ศ. 2559 และ พ.ศ. 2566 เพื่อคาดการณ์แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ และใช้เทคนิค Transitional Area ในการระบุพื้นที่ที่มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลง โดยพิจารณาจากความเป็นไปได้จาก Transition Matrix และบริบทเชิงพื้นที่ของแผนที่ต้นฉบับ จากนั้นทำการตรวจสอบความถูกต้องของผลการคาดการณ์ โดยเปรียบเทียบกับข้อมูลจริงในปี พ.ศ. 2566 (Li et al., 2021; Zhang et al., 2022)

3. ผลการวิจัย

3.1 การจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดิน พ.ศ.2559-2566

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 ด้วยเทคนิคการจำแนกแบบกำกับดูแล โดยใช้ตัวอย่างจุดควบคุมจากภาคสนามและภาพจาก Google Earth จาก Table 1. แสดงให้เห็นว่า พื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้างเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยในปี พ.ศ. 2559 มีพื้นที่ 161.48 ตารางกิโลเมตร (ร้อยละ 26.35) ในปี พ.ศ. 2562 และ 2566 เพิ่มขึ้นเป็น 174.91 ตารางกิโลเมตร (ร้อยละ 28.54) และ 190.63 ตารางกิโลเมตร (ร้อยละ 31.11) โดยรวมแล้วพื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้างเพิ่มขึ้น 29.15 ตารางกิโลเมตร (ร้อยละ 75.52) พื้นที่เกษตรกรรมลดลงอย่างต่อเนื่อง จากในปี พ.ศ. 2559 มีพื้นที่ 146.76 ตารางกิโลเมตร (ร้อยละ 23.95) ลดลงเหลือ 140.88 ตารางกิโลเมตร (ร้อยละ 22.99) และ 132.27 ตารางกิโลเมตร (ร้อยละ 21.59) ในปี พ.ศ. 2562 และ 2566 โดยรวมพื้นที่เกษตรกรรมลดลง 14.49 ตารางกิโลเมตร (ร้อยละ 17.77) พื้นที่ป่าไม้ลดลงเช่นเดียวกัน ในปี พ.ศ. 2559 มีพื้นที่ 261.89 ตารางกิโลเมตร (ร้อยละ 42.74) ลดลงเป็น 252.18 ตารางกิโลเมตร (ร้อยละ 41.15) และ 236.57 ตารางกิโลเมตร (ร้อยละ 38.61) ในปี พ.ศ. 2562 และ 2566 รวมพื้นที่ป่าไม้ลดลง 25.32 ตารางกิโลเมตร (ร้อยละ 63.37) สำหรับพื้นที่แหล่งน้ำมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย โดยในปี พ.ศ. 2559 มีพื้นที่ 19.98 ตารางกิโลเมตร (ร้อยละ 3.26) เพิ่มขึ้นเป็น 20.44 ตารางกิโลเมตร (ร้อยละ 3.34) และ 21.28 ตารางกิโลเมตร (ร้อยละ 3.47) ในปี พ.ศ. 2562 และ 2566 ตามลำดับ ส่วนพื้นที่เบ็ดเตล็ดเพิ่มขึ้น โดยในปี พ.ศ. 2559 มีพื้นที่ 22.65 ตารางกิโลเมตร (ร้อยละ 3.70) เพิ่มขึ้นเป็น 24.35 ตารางกิโลเมตร (ร้อยละ 3.98) และ 32.01 ตารางกิโลเมตร (ร้อยละ 5.22) ในปี พ.ศ. 2562 และปี พ.ศ. 2566 ตามลำดับ ดังแสดงใน Table 1. และ Figure 2.

Table 1. Land Use and Land Cover Classification for the Years 2016, 2019 and 2023 and Change Analysis

Land Use/Land Cover Types	Area									
	2559		2562		2566		Changes (2016–2019)		Changes (2019–2023)	
	km ²	(%)	km ²	(%)	km ²	(%)	km ²	(%)	km ²	(%)
Urban and Built-up Areas	161.48	26.35	174.91	28.54	190.63	31.11	13.43	43.07	15.72	32.45
Agricultural Area	146.76	23.95	140.88	22.99	132.27	21.59	-5.88	-18.86	-8.61	-17.77
Forest Area	261.89	42.74	252.18	41.15	236.57	38.61	-9.71	-31.14	-15.61	-32.23
Water Area	19.98	3.26	20.44	3.34	21.28	3.47	0.46	1.48	0.84	1.73
Miscellaneous Area	22.65	3.70	24.35	3.98	32.01	5.22	1.70	5.45	7.66	5.82
Total	612.76	100.0	612.76	100.0	612.76	100.0	31.18	100.00	48.44	100.00

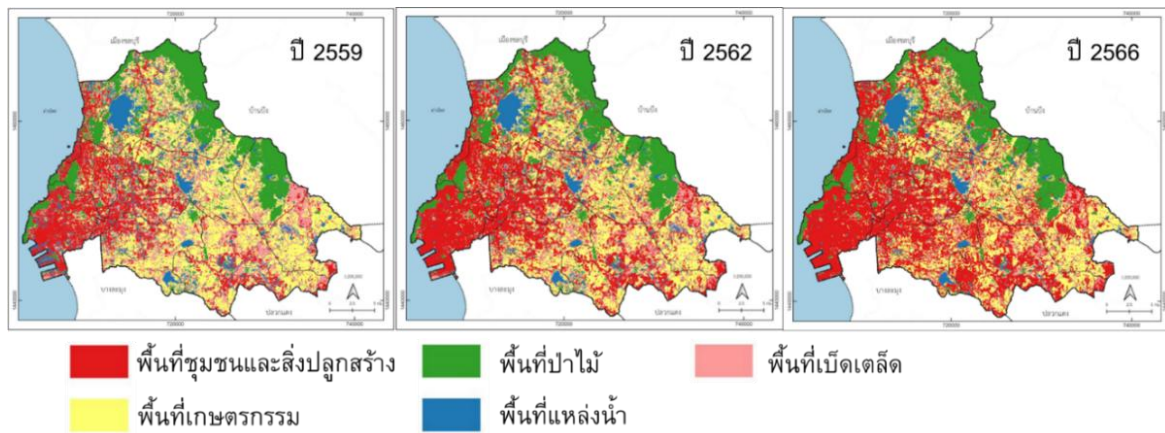


Figure 2. Land Use Maps during 2016-2023

3.2 ผลการประเมินความถูกต้องของการจำแนกประเภทการใช้ที่ดินและสิ่งปกคลุมดิน พ.ศ.2559-2566

การประเมินความถูกต้องของผลการจำแนกการใช้ที่ดินจากภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 ในปี พ.ศ. 2559, 2562 และ 2566 โดยใช้เทคนิค Error Matrix และการสุ่มตัวอย่างแบบมีชั้น (Stratified Random Sampling) จำนวนอย่างน้อย 50 จุดตรวจสอบต่อคลาสข้อมูล รวมทั้งสิ้น 250 จุดต่อปี โดยอ้างอิงค่าจริงจากภาพถ่ายออร์โธและภาพจาก Google Earth เพื่อเปรียบเทียบกับผลการจำแนก ซึ่งผลการประเมินความถูกต้องสามารถสรุปได้ดังนี้

ในปี พ.ศ. 2559 (Table 2.) ค่าความถูกต้องโดยรวม (OA) เท่ากับร้อยละ 86.80 และค่าดัชนีแคปปา เท่ากับ 0.85 ซึ่งอยู่ในระดับความถูกต้องสูง โดยคลาสที่มี Producer's Accuracy (PA) และ User's Accuracy (UA) สูงที่สุดคือ พื้นที่แหล่งน้ำ มีค่า PA และ UA เท่ากับร้อยละ 98.0 รองลงมาคือ พื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้างมีค่า UA เท่ากับร้อยละ 96.0 และ PA เท่ากับร้อยละ 94.12 ในปี พ.ศ. 2562 (Table 3.) ค่า OA ลดลงเล็กน้อยอยู่ที่ร้อยละ 83.42 และค่าดัชนีแคปปา เท่ากับ 0.85 โดยค่าความถูกต้องของแต่ละคลาสยังอยู่ในเกณฑ์ที่ดี โดยเฉพาะพื้นที่แหล่งน้ำมี PA เท่ากับร้อยละ 96.0 และ UA เท่ากับร้อยละ 96.0 ขณะที่คลาสพื้นที่เกษตรกรรม และพื้นที่ป่าไม้มีค่าความถูกต้องเฉลี่ยระหว่างร้อยละ 88.00–90.20 แสดงถึงความแม่นยำที่น่าเชื่อถือในการจำแนกภาพ สำหรับปี พ.ศ. 2566 (Table 4.) พบว่าค่า OA อยู่ที่ร้อยละ 86.45 และค่าดัชนีแคปปา เท่ากับ 0.85 แสดงให้เห็นถึงความแม่นยำในระดับสูงเช่นกัน โดยคลาสที่มีค่าความถูกต้องสูงที่สุดยังคงเป็นพื้นที่แหล่งน้ำ มี PA เท่ากับร้อยละ 100.0 และ UA เท่ากับร้อยละ 98.0 ส่วนคลาสอื่น ๆ เช่น พื้นที่เมืองและพื้นที่ป่าไม้ มีค่าความถูกต้องทั้ง UA และ PA สูงกว่าร้อยละ 90.0

จากผลการประเมินข้างต้น สามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองการจำแนกการใช้ที่ดินในทั้ง 3 ช่วงเวลามีความแม่นยำอยู่ในระดับสูง (OA มากกว่าร้อยละ 85 และ Kappa มากกว่า 0.80) ซึ่งเป็นเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้ตามมาตรฐานในงานด้านการแปลภาพถ่ายจากดาวเทียม และมีความเหมาะสมในการนำผลไปใช้วิเคราะห์เชิงพื้นที่เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงของการใช้ที่ดิน และการคาดการณ์การขยายตัวของเมือง

Table 2. Error Matrix for Land Use Classification (Year 2016)

Land Use Types	Ur	Agri	Fo	Wa	Mis	Total	User's Accuracy (%)
Ur	48	1	0	0	1	50	96.0
Agri	2	46	2	0	0	50	92.0
Fo	0	2	46	1	1	50	92.0
Wa	0	0	0	49	1	50	98.0
Mis	1	1	1	0	47	50	94.0
Total	51	50	49	50	50	250	
Producer's Accuracy (%)	94.12	92.0	93.88	98.0	94.0		
Overall Accuracy (OA) = 86.80%			Kappa Index =0.85			Accuracy Level: High	

Table 3. Error Matrix for Land Use Classification (Year 2019)

Land Use Types	Ur	Agri	Fo	Wa	Mis	Total	User's Accuracy (%)
Ur	46	2	1	0	1	50	92.0
Agri	3	44	3	0	0	50	88.0
Fo	1	3	44	1	1	50	88.0
Wa	0	0	1	48	1	50	96.0
Mis	1	1	1	1	46	50	92.0
Total	51	50	50	50	49	250	
Producer's Accuracy (%)	90.20	88.0	88.0	96.0	93.88		
Overall Accuracy (OA) = 83.42%			Kappa Index =0.85			Accuracy Level: High	

Table 4. Error Matrix for Land Use Classification (Year 2023)

Land Use Types	Ur	Agri	Fo	Wa	Mis	Total	User's Accuracy (%)
Ur	47	2	0	0	1	50	94.0
Agri	2	45	2	0	1	50	90.0
Fo	1	2	46	0	1	50	92.0
Wa	0	0	0	49	1	50	98.0
Mis	1	1	0	0	48	50	96.0
Total	51	50	48	49	52	250	
Producer's Accuracy (%)	92.16	90.0	95.83	100.0	92.31		
Overall Accuracy (OA) = 86.45%			Kappa Index =0.85			Accuracy Level: High	

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดินในอำเภอศรีราชา ระหว่างปี พ.ศ. 2559–2566 โดยใช้การวิเคราะห์แบบ Transition Matrix เพื่อตรวจสอบและติดตามการเปลี่ยนแปลงพื้นที่แต่ละประเภทตามช่วงเวลาต่างๆ พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญในหลายประเภทของพื้นที่

ผลการวิเคราะห์ในช่วงปี พ.ศ. 2559 ถึง พ.ศ. 2562 (Table 5.) พบว่า พื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้างมีขนาดเพิ่มขึ้นจาก 157.44 ตารางกิโลเมตร เป็น 174.91 ตารางกิโลเมตร โดยเปลี่ยนจากพื้นที่เกษตรกรรม (12.30 ตารางกิโลเมตร) และพื้นที่ป่าไม้ (4.00 ตารางกิโลเมตร) ซึ่งสะท้อนถึงกระบวนการขยายตัวของเมืองและการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานที่แผ่ขยายเข้าสู่พื้นที่โดยรอบ ส่วนพื้นที่ป่าไม้ลดลงจาก 261.89 ตารางกิโลเมตร เหลือ 252.18 ตารางกิโลเมตร โดยเปลี่ยนแปลงไปเป็นพื้นที่เกษตรกรรม (13.00 ตารางกิโลเมตร) และพื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง (4.00 ตารางกิโลเมตร) ขณะเดียวกัน พื้นที่เกษตรกรรมลดลงจาก 146.76 ตารางกิโลเมตร เหลือ 140.88 ตารางกิโลเมตร โดยเป็นพื้นที่ที่เปลี่ยนแปลงไปสู่ประเภทอื่นมากที่สุด โดยเฉพาะพื้นที่เมืองและพื้นที่เบ็ดเตล็ด (7.26 ตารางกิโลเมตร) พื้นที่เบ็ดเตล็ดมีขนาดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยมีการเปลี่ยนแปลงจากพื้นที่ป่าไม้ (4.00 ตารางกิโลเมตร) และพื้นที่เกษตรกรรม (4.93 ตารางกิโลเมตร) ส่วนพื้นที่น้ำยังคงมีขนาดค่อนข้างคงที่ โดยเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจาก 19.98 ตารางกิโลเมตร เป็น 20.44 ตารางกิโลเมตร

สำหรับช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2562 ถึง พ.ศ. 2566 (Table 6.) พบว่าการขยายตัวของพื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้างยังคงดำเนินต่อไป โดยเพิ่มขึ้นเป็น 190.63 ตารางกิโลเมตร โดยมาจากพื้นที่เกษตรกรรม (10.55 ตารางกิโลเมตร) พื้นที่ป่าไม้ (5.30 ตารางกิโลเมตร) และพื้นที่เบ็ดเตล็ด (4.48 ตารางกิโลเมตร) สะท้อนให้เห็นถึงกระบวนการพัฒนาเมืองที่รุกเข้าสู่พื้นที่ธรรมชาติและพื้นที่การเกษตรอย่างต่อเนื่อง ส่วนพื้นที่ป่าไม้ยังมีแนวโน้มลดลง มีพื้นที่ 236.57 ตารางกิโลเมตร โดยเปลี่ยนแปลงไปเป็นพื้นที่เบ็ดเตล็ด (11.48 ตารางกิโลเมตร) และพื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง (5.30 ตารางกิโลเมตร) ซึ่งอาจบ่งชี้ถึงการใช้ประโยชน์ที่ดินในรูปแบบที่ไม่สามารถจำแนกได้อย่างชัดเจน เช่น พื้นที่ก่อสร้างชั่วคราว พื้นที่รกร้าง หรือพื้นที่เปลี่ยนผ่าน ขณะที่พื้นที่เกษตรกรรมลดลงเหลือ 132.27 ตารางกิโลเมตร โดยเปลี่ยนไปเป็นพื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง (10.55 ตารางกิโลเมตร) และพื้นที่เบ็ดเตล็ด (9.23 ตารางกิโลเมตร) ส่วนพื้นที่น้ำเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเป็น 21.28 ตารางกิโลเมตร โดยมีการเปลี่ยนแปลงจากพื้นที่ป่าไม้และเบ็ดเตล็ด พื้นที่เบ็ดเตล็ดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัดจาก 22.65 ตารางกิโลเมตร ในปี พ.ศ. 2559 เป็น 32.01 ตารางกิโลเมตร ในปี พ.ศ. 2566 โดยเปลี่ยนจากพื้นที่ป่าไม้ เกษตรกรรม และพื้นที่เมือง ซึ่งสะท้อนถึงความหลากหลายของการใช้ที่ดินในพื้นที่เมือง

Table 5. Land Use Transition Matrix (2016 to 2019)

From\To	Area (km ²)					Total (2016)
	Ur	Agri	Fo	Wa	MS	
Urban and Built-up Areas (Ur)	157.44	1.50	1.30	0.45	0.79	161.48
Agricultural Area (Agri)	12.30	121.20	5.00	1.00	7.26	146.76
Forest Area (Fo)	4.00	13.00	240.00	0.89	4.00	261.89
Water Area (Wa)	0.50	0.25	0.20	18.50	0.53	19.98
Miscellaneous Area (Ms)	0.67	4.93	5.68	0.60	10.77	22.65
Total (2019)	174.91	140.88	252.18	20.44	24.35	612.76

Table 6. Land Use Transition Matrix (2019 to 2023)

From\To	Area (km ²)					Total (2019)
	Ur	Agri	Fo	Wa	MS	
Urban and Built-up Areas (Ur)	169.80	1.00	1.40	0.55	2.16	174.91
Agricultural Area (Agri)	10.55	116.00	4.00	1.10	9.23	140.88
Forest Area (Fo)	5.30	10.60	224.00	0.80	11.48	252.18
Water Area (Wa)	0.50	0.20	0.30	19.00	0.44	20.44
Miscellaneous Area (Ms)	4.48	4.47	6.87	0.83	15.36	32.01
Total (2023)	190.63	132.27	236.57	21.28	32.01	612.76

3.3 รูปแบบการขยายตัวของเมืองในอำเภอศรีราชา

การวิเคราะห์รูปแบบการขยายตัวของเมืองจากข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดิน เฉพาะพื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง 3 ช่วงเวลา พบว่า

3.3.1 ในปี พ.ศ. 2559 (พื้นที่สีแดง) รูปแบบการตั้งถิ่นฐานปรากฏใน 2 ลักษณะหลัก ได้แก่ การตั้งถิ่นฐานแบบแนวยาว (Linear Settlement) ตามแนวเส้นทางคมนาคมสายหลัก เช่น ถนนสุขุมวิท (ทางหลวงหมายเลข 3) ทางหลวงพิเศษหมายเลข 7 ทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 331 และ 3241 และการตั้งถิ่นฐานแบบกระจุก (Cluster Settlement) บริเวณศูนย์กลางชุมชนหลัก 4 แห่ง ประกอบด้วย เทศบาลเมืองศรีราชา พื้นที่รอบกลุ่มอุตสาหกรรมปิโตรเลียม (ไทยออยล์) นิคมอุตสาหกรรมและท่าเรือแหลมฉบัง และสวนอุตสาหกรรมเครือสหพัฒน์

3.3.2 ในปี พ.ศ. 2562 (พื้นที่สีส้ม) รูปแบบการตั้งถิ่นฐานยังคงลักษณะเดิมจากปี พ.ศ. 2559 ทั้งแบบแนวยาวและแบบกระจุก แต่มีพัฒนาการเพิ่มเติมในลักษณะเริ่มเกิดการกระจายตัวเข้าสู่พื้นที่ชั้นใน (Infill Development) คือการพัฒนาแทรกตัวในพื้นที่ว่างภายในเมือง ซึ่งเดิมยังไม่มีสิ่งปลูกสร้างหนาแน่น โดยเฉพาะในพื้นที่ที่ล้อมรอบด้วยโครงข่ายคมนาคม เช่น ตำบลสุรศักดิ์ ซึ่งเริ่มมีการพัฒนาโครงการหมู่บ้านจัดสรรอย่างต่อเนื่อง การเปลี่ยนแปลงนี้ไม่ได้หมายถึงการขยายตัวจากศูนย์กลางออกสู่ชายขอบเมืองแบบดั้งเดิมเท่านั้น แต่ยังหมายถึงการเติมเต็มพื้นที่ว่างภายใน ซึ่งเกิดขึ้นได้เมื่อเมืองมีโครงสร้างพื้นฐานรองรับ เช่น ถนน สาธารณูปโภค และการเข้าถึงระบบขนส่งที่ดี จึงกระตุ้นให้เกิดการพัฒนาในพื้นที่ที่เคยถูกละเลยมาก่อน

3.3.3 ในปี พ.ศ. 2566 (พื้นที่สีเขียว) รูปแบบการตั้งถิ่นฐานมีลักษณะการขยายตัวแบบผสมผสาน ได้แก่ การขยายตามแนวถนนสายหลัก (Linear Expansion) การขยายตัวแบบกลุ่มรอบศูนย์กลางเศรษฐกิจ (Cluster Expansion) และการแทรกตัวของพัฒนาใหม่ในพื้นที่ที่ถูกพัฒนาอยู่แล้ว (Infill) นอกจากนี้ยังพบการขยายตัวแบบไร้ทิศทาง (Urban Sprawl) โดยเฉพาะบริเวณชายขอบของอำเภอทางทิศใต้และตะวันออกเฉียงใต้ การเติบโตของภาคอุตสาหกรรมยังคงเป็นแรงผลักดันหลักของการขยายตัวของเมือง โดยเฉพาะในตำบลหนองขาม บ่อวิน บึง และตำบลเขาคันทรง มีการพัฒนาเมืองในลักษณะแนวตั้ง และแนวขอย่อยที่ชัดเจน พื้นที่สีเขียวใน Figure 3. แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้างแทนที่พื้นที่สีแดงและสีส้มเดิมในหลายบริเวณ ซึ่งสะท้อนถึงการพัฒนาเมืองที่เกิดขึ้นทั้งในพื้นที่ชั้นในและชั้นนอกอย่างต่อเนื่อง แม้ไม่สามารถระบุชนิดของที่อยู่อาศัยได้โดยตรงจากภาพถ่าย (เช่น หมู่บ้านจัดสรร คอนโดมิเนียม หรือหอพัก) แต่สามารถตีความได้ว่าเป็นการใช้ที่ดินเพื่อรองรับความต้องการที่อยู่อาศัยในเขตอุตสาหกรรมที่กำลังขยายตัว

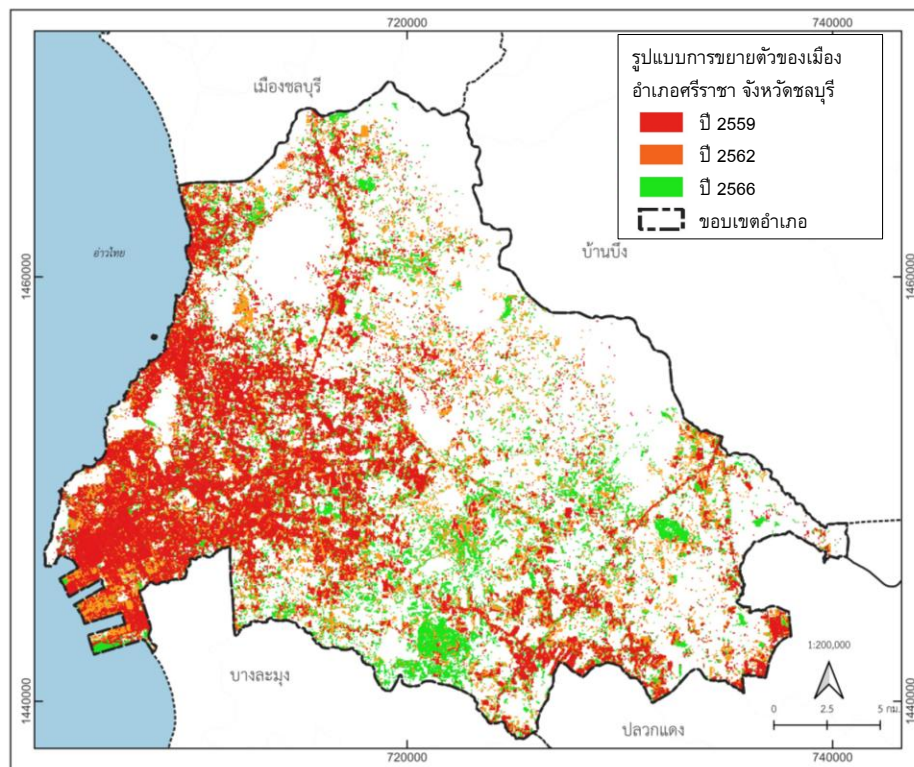


Figure 3. Patterns of Urban Expansion in Si Racha District During 2016–2023

3.4 การคาดการณ์แนวโน้มการขยายตัวของเมืองในอำเภอศรีราชาของแบบจำลอง CA-Markov ปี พ.ศ. 2570

3.4.1 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ในปี พ.ศ. 2566

การเปรียบเทียบผลการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดินในปี พ.ศ. 2566 ระหว่างการแปลภาพถ่ายดาวเทียมด้วยสายตา (Visual Interpretation) และผลจากแบบจำลอง CA-Markov แสดงให้เห็นว่าทั้งสองวิธีมีความสอดคล้องกันในระดับสูง โดยเฉพาะในพื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง ซึ่งมีพื้นที่ตามการแปลภาพถ่ายดาวเทียมเท่ากับ 190.63 ตารางกิโลเมตร (ร้อยละ 31.11) ขณะที่แบบจำลอง CA-Markov ให้ผลใกล้เคียงคือ 190.28 ตารางกิโลเมตร (ร้อยละ 31.05) คิดเป็นความแตกต่างเพียง 0.34 ตารางกิโลเมตร หรือร้อยละ 1.21 ผลการเปรียบเทียบพื้นที่ประเภทอื่น เช่น พื้นที่เกษตรกรรม ป่าไม้ แหล่งน้ำ และพื้นที่เบ็ดเตล็ด แสดงรายละเอียดใน Table 7. ซึ่งพบว่าพื้นที่ป่าไม้มีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับประเภทอื่นๆ นอกจากนี้ ยังได้มีการประเมินค่าความถูกต้องโดยรวมของทั้งสองวิธี (Table 8.) พบว่าการแปลภาพถ่ายดาวเทียมมีค่า OA เท่ากับร้อยละ 90.89 และค่า Kappa เท่ากับ 0.89 ขณะที่แบบจำลอง CA-Markov มีค่า OA เท่ากับร้อยละ 97.25 และค่า Kappa เท่ากับ 0.93 ซึ่งทั้งสองวิธีมีความถูกต้องสูงกว่าเกณฑ์ขั้นต่ำที่ยอมรับได้ในงานด้านการแปลภาพถ่ายจากดาวเทียม แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีประสิทธิภาพในการจำแนกประเภทการใช้ที่ดินที่ใกล้เคียงกับข้อมูลจริง

Table 7. Comparison of Land Use and Land Cover from the CA-Markov Model and Visual Interpretation in 2023

Land Use/Land Cover Types	Visual Interpretation		CA-Markov		Difference	
	Area (km ²)	(%)	Area (km ²)	(%)	Area (km ²)	(%)
Urban and Built-up Areas (Ur)	190.63	31.11	190.28	31.05	-0.34	-1.21
Agricultural Area (Agri)	132.27	21.59	130.32	21.27	-1.94	-6.87
Forest Area (Fo)	236.57	38.61	224.79	36.69	-11.78	-41.65
Water Area (Wa)	21.28	3.47	21.20	3.46	-0.08	-0.28
Miscellaneous Area (Ms)	32.01	5.22	46.16	7.53	14.15	50.00
Total	612.76	100.0	612.76	100.0		

* (+) indicates an increase in area, (-) indicates a decrease in area

Table 8. Accuracy Assessment of Visual Interpretation and CA-Markov Model

Method	Overall Accuracy (OA)	Kappa Index	Accuracy Level
Visual Interpretation	90.89%	0.89	High
CA-Markov Model	97.25%	0.93	High

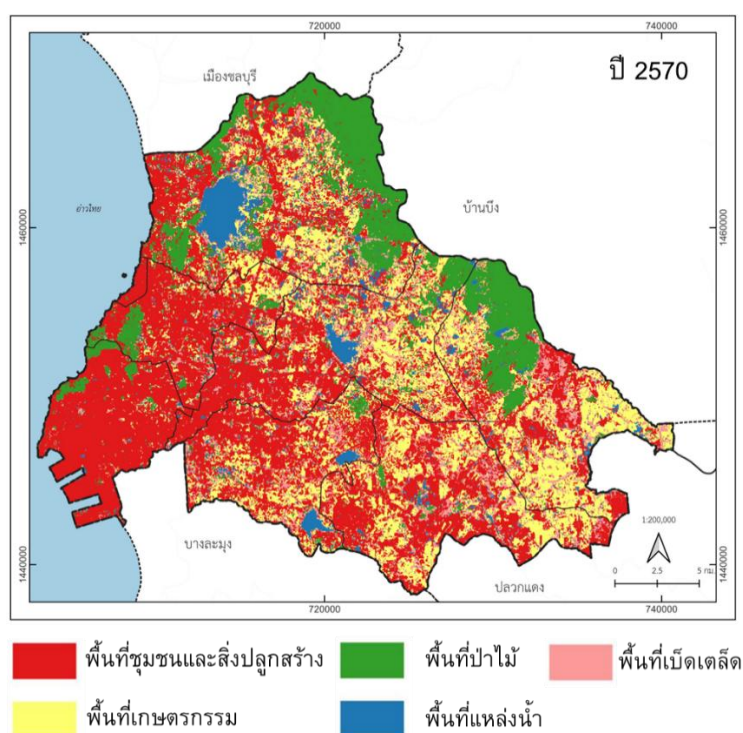
3.4.2 การคาดการณ์แนวโน้มการขยายตัวของเมืองโดยใช้แบบจำลอง CA-Markov ปี พ.ศ. 2570

ผลการคาดการณ์จากแบบจำลอง CA-Markov ปี พ.ศ. 2570 (Table 9.) พบว่า พื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 190.63 ตารางกิโลเมตร (ร้อยละ 31.11) เป็น 248.78 ตารางกิโลเมตร (ร้อยละ 40.60) คิดเป็นการเพิ่มขึ้น 58.15 ตารางกิโลเมตร หรือร้อยละ 39.81 สะท้อนถึงกระบวนการเพิ่มขึ้นของความเป็นเมือง ขณะเดียวกัน พื้นที่ป่าไม้มีแนวโน้มลดลงจาก 236.57 ตารางกิโลเมตร (ร้อยละ 38.61) เหลือเพียง 173.38 ตารางกิโลเมตร (ร้อยละ 28.30) คิดเป็นการลดลง 63.19 ตารางกิโลเมตร หรือร้อยละ 43.26 และพื้นที่เกษตรกรรมลดลงจาก 132.27 ตารางกิโลเมตร (ร้อยละ 21.59) เป็น 122.42 ตารางกิโลเมตร (ร้อยละ 19.98) หรือลดลง 9.85 ตารางกิโลเมตร (ร้อยละ 6.74) ส่วนพื้นที่แหล่งน้ำเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจาก 21.28 ตารางกิโลเมตร (ร้อยละ 3.47) เป็น 22.39 ตารางกิโลเมตร (ร้อยละ 3.65) หรือเพิ่มขึ้น 1.11 ตารางกิโลเมตร (ร้อยละ 0.76) และพื้นที่เบ็ดเตล็ดเพิ่มขึ้นจาก 32.01 ตารางกิโลเมตร (ร้อยละ 5.22) เป็น 45.78 ตารางกิโลเมตร (ร้อยละ 7.47) เพิ่มขึ้น 13.77 ตารางกิโลเมตร หรือร้อยละ 9.43 ซึ่งอาจรวมถึงพื้นที่เปลี่ยนผ่าน (transitional zones) ที่ยังไม่ได้กำหนดการใช้ที่ดินอย่างชัดเจน เช่น พื้นที่ก่อสร้างชั่วคราว พื้นที่รกร้าง ดัง Figure 4.

Table 9. Urban Expansion Forecast in Si Racha District for the Year 2027 Based on the CA-Markov Model

Land Use/Land Cover Types	Area					
	2023		2027		Changes	
	km ²	(%)	km ²	(%)	km ²	(%)
Urban and Built-up Areas (Ur)	190.63	31.11	248.78	40.6	58.15	39.81
Agricultural Area (Agri)	132.27	21.59	122.42	19.98	-9.85	-6.74
Forest Area (Fo)	236.57	38.61	173.38	28.30	-63.19	-43.26
Water Area (Wa)	21.28	3.47	22.39	3.65	1.11	0.76
Miscellaneous Area (Ms)	32.01	5.22	45.78	7.47	13.77	9.43
Total	612.76	100.0	612.76	100.00	146.07	100.00

* (+) indicates an increase in area, (-) indicates a decrease in area

**Figure 4.** Land Use Map and Urban Expansion Pattern for the Year 2027

4. อภิปรายผลการวิจัย

ผลการวิจัยพบว่า การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินระหว่างปี พ.ศ. 2559–2566 พบว่า พื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้างมีการขยายตัวต่อเนื่องจาก 161.48 ตารางกิโลเมตร เป็น 190.63 ตารางกิโลเมตร ซึ่งสะท้อนถึงกระบวนการเพิ่มขึ้นของความเป็นเมือง (urbanization) โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีโครงสร้างพื้นฐานรองรับ เช่น ทางหลวงหมายเลข 7 นิคมอุตสาหกรรม การเปลี่ยนแปลงลักษณะนี้สอดคล้องกับงานของ Thirakunthomorn et al. (2020) ที่พบว่าเมืองในจังหวัดนครราชสีมา มีการเติบโตอย่างรวดเร็วในพื้นที่ที่เชื่อมโยงกับโครงสร้างพื้นฐาน ขณะที่พื้นที่เกษตรกรรมและพื้นที่ป่าไม้มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยด้านการขยายตัวเมืองและการสูญเสียพื้นที่เกษตร พบว่ากรณีศึกษาพื้นที่เขตเศรษฐกิจพิเศษในเขตคามอนยี ประเทศวันดา ในช่วงปี 2023 มีการเปลี่ยนการใช้ประโยชน์ที่ดินประเภทพื้นที่เกษตรกรรมเป็นพื้นที่เมือง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตทางการเกษตรลดลงและเสี่ยงต่อความมั่นคงด้านอาหารในระยะยาว (Munyanenza et al.,

2023) และการศึกษาในเอธิโอเปียพบว่า การขยายตัวของเมืองในเขตเมืองใหญ่ มีผลกระทบต่อพื้นที่เพาะปลูกอย่างชัดเจน และจำเป็นต้องออกแบบเมืองแบบบูรณาการเพื่อรองรับการเติบโตอย่างยั่งยืน (Schaffert et al., 2025)

รูปแบบการขยายตัวของเมืองในการวิจัยนี้ มีลักษณะสำคัญ 2 ประการ ได้แก่ การตั้งถิ่นฐานแบบแนวยาวตามเส้นทางคมนาคมสายหลัก เช่น ทางหลวงหมายเลข 7 และถนนสุขุมวิท และการขยายตัวแบบกระจุกตัว บริเวณศูนย์กลางเศรษฐกิจ ได้แก่ เทศบาลเมืองศรีราชา พื้นที่รอบนิคมอุตสาหกรรมแหลมฉบัง กลุ่มอุตสาหกรรมปิโตรเลียม และสวนอุตสาหกรรมศรีสทพัฒน์ รูปแบบดังกล่าวสอดคล้องกับแนวคิดของ Hoyt (1939) ที่เสนอว่าเมืองมักขยายตัวตามแนวเส้นทางคมนาคมและเศรษฐกิจ (Sector Model) และยังตรงกับข้อค้นพบของ Teeravech et al. (2023) ที่ศึกษาการเติบโตของเมืองในจังหวัดจันทบุรี ซึ่งพบการกระจายตัวจากศูนย์กลางสู่ออกนอกในแนวที่เชื่อมกับโครงสร้างพื้นฐานหลัก

ผลการคาดการณ์ด้วยแบบจำลอง CA-Markov แสดงให้เห็นว่า ภายในปี พ.ศ. 2570 พื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้างจะเพิ่มขึ้นร้อยละ 40.60 จากปี พ.ศ. 2559 และเพิ่มขึ้นร้อยละ 39.81 จากปี พ.ศ. 2566 ซึ่งถือเป็นอัตราการขยายตัวที่สูง แสดงถึงการเติบโตต่อเนื่องจากพื้นที่พัฒนาเดิมและการรุกกล้าเข้าสู่พื้นที่ชนบท โดยเฉพาะในเขตทิศตะวันตกเฉียงเหนือของอำเภอศรีราชา เช่น ตำบลบึง และตำบลหนองขาม ซึ่งเป็นพื้นที่เกษตรกรรมเดิมที่กำลังเปลี่ยนแปลงเป็นพื้นที่อยู่อาศัยและอุตสาหกรรมเบา ในขณะเดียวกันยังพบว่าเมืองมีการขยายตัวเข้าสู่พื้นที่ชั้นในมากขึ้น โดยพื้นที่ชั้นใน หมายถึงศูนย์กลางเศรษฐกิจและเขตเมืองหลัก เช่น เทศบาลเมืองศรีราชาและพื้นที่ใกล้เคียงกับนิคมอุตสาหกรรมแหลมฉบัง ซึ่งมีความหนาแน่นของกิจกรรมเมืองและโครงสร้างพื้นฐานพร้อมรองรับการเติบโต ลักษณะการกระจายตัวของเมืองสอดคล้องกับแนวคิด Concentric Zone Model ของ Burgess (2015) ที่เสนอว่าการขยายตัวของเมืองมีลักษณะเป็นวงแหวน โดยมีศูนย์กลางที่หนาแน่นและขยายออกไปยังชานเมือง ซึ่งตรงกับลักษณะการขยายตัวของเมืองในพื้นที่ศึกษานี้ ทั้งการเติบโตแบบกระจุก (Clustered) และแบบกระจาย (Dispersed) ไปยังพื้นที่ชนบทโดยรอบ

รูปแบบการขยายตัวในพื้นที่ศึกษาสะท้อนความเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจจากนโยบายเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก (EEC) แต่การเติบโตในลักษณะการขยายตัวของเมืองแบบไร้ทิศทาง (urban sprawl) หากไม่มีการควบคุม อาจก่อให้เกิดผลกระทบหลายประการ ได้แก่ การสูญเสียพื้นที่เกษตรกรรมและป่าไม้ ความไม่สมดุลของระบบนิเวศ และการบริหารจัดการโครงสร้างพื้นฐาน ซึ่งสอดคล้องกับข้อเสนอแนะของงานวิจัยโดย Sun et al. (2022) ที่ระบุถึงความสำคัญของการวางแผนเมืองควบคู่กับการขยายตัวของเมือง จากข้อค้นพบดังกล่าว จึงควรมีการวางแผนการใช้ประโยชน์ที่ดินอย่างเป็นระบบ และบูรณาการนโยบายระดับท้องถิ่นและภูมิภาค เช่น การกำหนดขอบเขตการเติบโตของเมือง (Urban Growth Boundary) การพัฒนาแบบเติมเต็ม (Infill Development) และการคุ้มครองพื้นที่เกษตรกรรมและป่าไม้ผ่านมาตรการควบคุมการใช้ที่ดิน เพื่อให้เมืองศรีราชาเติบโตอย่างมีทิศทาง และยั่งยืนทั้งในมิติสิ่งแวดล้อม เศรษฐกิจ และคุณภาพชีวิตของประชาชนในระยะยาว

5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การศึกษาการขยายตัวของเมืองในพื้นที่ระยองเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก กรณีศึกษาอำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินและศึกษารูปแบบการขยายตัวของเมืองในอำเภอศรีราชา โดยใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 ระหว่างปี พ.ศ. 2559–2566 โดยจำแนกประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดินด้วยวิธีการจำแนกแบบกำกับดูแล อ้างอิงเกณฑ์การจำแนกของกรมพัฒนาที่ดิน (Land Development Department, 2024b) แบ่งเป็น 5 ประเภทหลัก ได้แก่ พื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง พื้นที่เกษตรกรรม พื้นที่ป่าไม้ พื้นที่แหล่งน้ำ และพื้นที่เบ็ดเตล็ด ผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 การจำแนกประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดิน (พ.ศ. 2559–2566) จากการวิเคราะห์ภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 พบว่า พื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง เพิ่มขึ้นจาก 161.48 ตารางกิโลเมตร เป็น 190.63 ตารางกิโลเมตร

เพิ่มขึ้น 29.15 ตารางกิโลเมตร หรือร้อยละ 75.52 พื้นที่เกษตรกรรม ลดลงจาก 146.76 ตารางกิโลเมตร เหลือ 132.27 ตารางกิโลเมตร ลดลง 14.49 ตารางกิโลเมตร หรือร้อยละ 17.77 พื้นที่ป่าไม้ ลดลงจาก 261.89 ตารางกิโลเมตร เหลือ 236.57 ตารางกิโลเมตร ลดลง 25.32 ตารางกิโลเมตร หรือร้อยละ 63.37 พื้นที่แหล่งน้ำและพื้นที่เบ็ดเตล็ด มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย โดยเฉพาะพื้นที่เบ็ดเตล็ดเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน

5.2 ความถูกต้องของการจำแนกประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดิน ค่าความถูกต้องโดยรวม (OA) อยู่ในเกณฑ์สูง (มากกว่าร้อยละ 85) และค่า Kappa เท่ากับ 0.85 คลาสที่มีความแม่นยำสูงสุดคือ พื้นที่แหล่งน้ำ (PA และ UA สูงถึงร้อยละ 98–100) แสดงว่าแบบจำลองถือว่ามีความน่าเชื่อถือ เหมาะสำหรับการติดตามการเปลี่ยนแปลงและวิเคราะห์แนวโน้มการใช้ที่ดิน

5.3 รูปแบบการขยายตัวของเมือง พบว่า ปี พ.ศ. 2559 มีลักษณะเป็นแนวยาวตามแนวคมนาคม และกระจุกในศูนย์กลางชุมชน ปี พ.ศ. 2562 เริ่มมีลักษณะการพัฒนาแทรกใน (Infill) และปี พ.ศ. 2566 แสดงถึงการกระจายตัวและเชื่อมต่อพื้นที่เมืองอย่างต่อเนื่อง (Expansion & Connection)

5.4 ข้อเสนอแนะจากการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

5.4.1 เพิ่มการใช้เทคนิคการจำแนกประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดินที่หลากหลาย เช่น การจำแนกแบบไม่กำกับ (Unsupervised Classification) การเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) หรือวิธีการจำแนกด้วยวัตถุ (Object-based Classification) เพื่อเปรียบเทียบระดับความถูกต้องและประสิทธิภาพของแต่ละวิธี และเลือกใช้วิธีที่เหมาะสมกับบริบทของพื้นที่ศึกษา

5.4.2 ควรนำแบบจำลองการคาดการณ์ประเภทอื่นๆ มาวิเคราะห์ร่วมกัน เพื่อเพิ่มความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของผลการวิจัย เช่น แบบจำลอง SLEUTH, Artificial Neural Network (ANN) หรือแบบจำลองเชิงเศรษฐมิติ เพื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลอง CA-Markov

5.5 ข้อเสนอแนะสำหรับการทำวิจัยในอนาคต

5.5.1 ขยายขอบเขตพื้นที่ศึกษาไปยังอำเภอ หรือจังหวัดใกล้เคียงในเขตระเบียงเศรษฐกิจภาคตะวันออก (EEC) เพื่อเปรียบเทียบรูปแบบการขยายตัวของเมือง และวิเคราะห์ความเชื่อมโยงเชิงพื้นที่ระหว่างเขตพัฒนาอุตสาหกรรมต่างๆ

5.5.2 บูรณาการข้อมูลจากหลายแหล่ง เช่น ข้อมูลภาพถ่ายจากโดรน (UAV) ข้อมูลจากการสำรวจภาคสนาม ข้อมูลเชิงสถิติด้านประชากรและเศรษฐกิจ เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการวิเคราะห์ และเชื่อมโยงปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน

5.5.3 ใช้แบบจำลองการคาดการณ์ที่มีความซับซ้อนมากขึ้น เช่น แบบจำลอง CLUE-S ซึ่งสามารถรวมปัจจัยขับเคลื่อนทางเศรษฐกิจ สังคม และกายภาพ เช่น ความลาดชัน ระยะทางจากถนนหลัก และการเข้าถึงบริการสาธารณะ เข้าในการจำลองได้โดยตรง (Sun et al., 2022) หรือแบบจำลองเชิงระบบพลวัต (System Dynamics), Agent-Based Model หรือการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) เพื่อตอบสนองความซับซ้อนของพฤติกรรมและการขยายตัวของเมืองในระยะยาว

6. เอกสารอ้างอิง

- Adegun, A. A., Kumar, D., & Singh, M. (2023). Review of deep learning methods for remote sensing satellite images classification: Experimental survey and comparative analysis. *Journal of Big Data*, 10(1), 108. <https://doi.org/10.1186/s40537-023-00772-x>
- Burgess, E. W. (2015). The growth of the city: an introduction to a research project. In *The city reader* (pp. 212–220). Routledge.
- Chonburi Provincial Office. (2024). Chonburi provincial development plan 2023–2027 (Revised edition 2025) [Online]. Retrieved February 15, 2025, from: <https://www.chonburi.go.th/ebook/detail/27> (in Thai)

- Chonburi Provincial Statistical Office. (2024). Chonburi province population statistics [Online]. Retrieved September 18, 2024, from: <https://chonburi.nso.go.th/reports-publications/provincial-statistics-report.html> (in Thai)
- Choudhury, U., Kanga, S., Singh, S. K., Kumar, A., Meraj, G., Kumar, P., & Singh, S. (2024). Projecting urban expansion by analyzing growth patterns and sustainable planning strategies—A case study of Kamrup Metropolitan, Assam, North-East India. *Earth*, 5(2), 169–194. <https://doi.org/10.3390/earth5020009>
- Eastern Economic Corridor Office of Thailand. (2021). Overview of the Eastern Economic Corridor (EEC) development project. [Online]. Retrieved September 18, 2024, from: <https://www.eeco.or.th/th/government-initiative> (in Thai)
- Eastern Economic Corridor Policy Committee. (2024). Infrastructure and utilities implementation plan for the Eastern Economic Corridor development area 2023–2027 [Online]. Retrieved September 18, 2024, from: <https://eeco.or.th/web-upload/filecenter/eecdevelopment-plan/plan.pdf> (in Thai)
- Foody, G. M. (2020). Explaining the unsuitability of the kappa statistic for assessing the accuracy of thematic maps obtained by remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 239, 111630. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111630>
- Hoyt, H. (1939). The structure and growth of residential neighborhoods in American cities. U.S. Federal Housing Administration.
- Khunrattanasiri, W., Klayjaroen, S., and Suksard, S. (2024). Using CA-Markov model and Landsat 8 imagery data for land use prediction in Thale Noi non-hunting area. *Thai Journal of Forestry*, 43(2), 37–50. (in Thai)
- Land Development Department. (2024a). DIN online [Online]. Retrieved August 6, 2024, from: <https://dinonline.ddd.go.th/> (in Thai)
- Land Development Department. (2024b). Land use map definition [Online]. Retrieved August 6, 2024, from: <https://webapp.ddd.go.th/lpd/LandUseconditions.php> (in Thai)
- Li, S., Zhang, Y., & Fang, S. (2021). Enhanced CA-Markov model for land-use simulation by incorporating neighborhood effect and terrain constraints. *Environmental Modelling & Software*, 142, 105073. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105073>
- Liu, R., Xu, Y., Xue, C., Xia, Z., Li, G., Gou, X., & Luo, S. (2023). Simulation of early warning indicators of urban expansion derived from machine learning. *Journal of Urban Planning and Development*, 149(1). <https://doi.org/10.1061/jupddm.upeng-4127>
- Liu, S., Chen, H., & Zhou, J. (2020). A review of geometric correction methods in high-resolution satellite imagery. *Remote Sensing*, 12(5), 800. <https://doi.org/10.3390/rs12050800>
- Lu, S., Guo, J., Zimmer-Dauphinee, J. R., Nieusma, J. M., Wang, X., Wernke, S. A., & Huo, Y. (2025). Vision foundation models in remote sensing: A survey. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*.
- Munyaneza, J. P., Rwema, P., Ndolimana, E., Nzayinambaho, J., Nsanzumukiza, M. V., & Barahira, A. (2023). The impact of urbanization expansion on agriculture land in Rwanda: Case study of Runda Sector, Kamonyi District. *American Journal of Environmental Protection*, 12(4), 85–91. <https://doi.org/10.11648/j.ajep.20231204.11>
- Oliveira, L. M. de, Silva, S. M. O. da, Souza Filho, F. A. de, Rufino, I. A. A., Brito, H. C. de, & Lopes, T. M. X. de M. (2022). Dynamic modeling of urban expansion using cellular automata: The case of Fortaleza-CE. *SciELO journals. Dataset*. [Online]. Retrieved December 21, 2024, from: <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.20039888>
- Paheding, S., Saleem, A., Siddiqui, M. F. H., Rawashdeh, N., Essa, A., & Reyes, A. A. (2024). Advancing horizons in remote sensing: a comprehensive survey of deep learning models and applications in image classification and beyond. *Neural Computing and Applications*, 36(27), 16727–16767.
- Prasartkul, P. (2024). On the occasion of World Population Day 2024. [Online]. Retrieved December 11, 2024, from: <https://www.theprachakorn.com/newsDetail.php?id=928> (in Thai)
- Sarastika, T., Saraswati, Y., Triyadi, R. A., & Susena, Y. (2024). Pemodelan prediksi konversi penggunaan lahan berbasis ANN-CA di wilayah peri-urban Kabupaten Sleman. *JTSL (Jurnal Tanah dan Sumberdaya Lahan)*, 11(1), Article 18. <https://doi.org/10.21776/ub.jtsl.2024.011.1.18>

- Schaffert, M., Sahinkaya, C., & Wolff, C. (2025). Visualizing urban sprawl to raise local awareness. *Frontiers in Environmental Science*, 13, 1456772. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2025.1456772>
- SDG Knowledge Hub. (2023). World population data sheet 2023 supports climate resilience [Online]. Retrieved December 11, 2024, from: <https://sdg.iisd.org/news/world-population-data-sheet-2023-supports-climate-resilience/>
- Sun, C., Bao, Y., Vandansambu, B., & Bao, Y. (2022). Simulation and prediction of land use/cover changes based on CLUE-S and CA-Markov models: A case study of a typical pastoral area in Mongolia. *Sustainability*, 14(23), 15707. <https://doi.org/10.3390/su142315707>
- Teeravech, K., Yarak, K., & Chanchaoen, T. (2023). Urban growth monitoring in Chanthaburi using remote sensing data on Google Earth Engine. *Journal of Information Science and Technology*, 13(2), 69–78. (in Thai)
- Thirakunthomorn, T., Prasomsap, W., & Phinyoyang, A. (2020). Land use/land cover change detection and prediction using CA-MARKOV model. *Proceedings of the 25th National Civil Engineering Conference*, 1–6. (in Thai)
- Tonsiri, S., Arunpraparut, W., & Khunrattanasiri, W. (2018). Application of CA-Markov model to predict land use changes in Khao Soi Dao Wildlife Sanctuary, Chanthaburi Province. *Thai Journal of Forestry*, 37(2), 138–150. (in Thai)
- Turan, D. E., Aptoula, E., Ertürk, A., & Taskin, G. (2023). Interpreting hyperspectral remote sensing image classification methods via explainable artificial intelligence. In *IGARSS 2023-2023 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp. 5950-5953). IEEE.
- United Nations Population Fund. (2022). World population trends [Online]. Retrieved March 20, 2024, from: <https://www.unfpa.org/world-population-trends#readmore-expand>
- USGS. (2023). Sentinel-2 satellite images [Online]. Retrieved December 15, 2023, from: <https://www.usgs.gov/search?keywords=Sentinel-2+satellite+images>
- Xu, Y., Wang, M., & Li, X. (2022). Assessment of geometric correction accuracy using RMSE criteria in satellite remote sensing. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 19(7), 1123–1127. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2022.3161234>
- Zhang, Q., Wang, J., & Liu, Y. (2022). Simulation of land use changes using improved CA-Markov model: Case study in rapidly urbanized area. *Sustainable Cities and Society*, 81, 103837. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103837>
- Zhao, M.-S., Gao, Y., Wang, T., & Wang, S. (2023). Multiscenario simulation and prediction of land use in Huaibei City based on CLUE-S and PLUS models. *Applied Sciences*, 13(12), 7142. <https://doi.org/10.3390/app13127142>

ประสิทธิภาพของสมุนไพรหมามุ่ยอินเดียต่อคุณภาพน้ำเชื้อไก่พื้นเมืองไทย
Effects of *Mucuna pruriens* on Sperm Quality in Thai Native Chickens

ทิพย์สุตา บุญมาทัน¹ นพรัตน์ ผกาเชิด¹ ณัฐวัฒน์ ตันพล^{1*} และ ดวงจันทร์ โพธิสาร²

Thipsuda Boonmatan¹, Nopparat Phakachoe¹, Nathawat Tanpol^{1*} and Duangchan Photisarn²

¹คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ จังหวัดกาฬสินธุ์

²คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ จังหวัดศรีสะเกษ

¹Faculty of Agricultural Technology, Kalasin University, Kalasin Province

²Faculty of Liberal Arts and Science, Sisaket Rajabhat University, Sisaket province

*Corresponding Author: Tanpol.Nathawat@gmail.com

Received: March 28, 2025

Revised: June 3, 2025

Accepted: June 4, 2025

บทคัดย่อ

การศึกษากลไกของการเสริมหมามุ่ยอินเดีย (*Mucuna pruriens*) ในอาหารต่อคุณภาพน้ำเชื้อไก่พื้นเมืองไทย โดยใช้ไก่พ่อพันธุ์เหลืองหางขาว จำนวน 48 ตัว อายุ 7 เดือนขึ้นไป แบ่งออกเป็น 4 กลุ่มทดลอง คือ เสริมหมามุ่ยอินเดียที่ระดับร้อยละ 0 (กลุ่มควบคุม) 0.1, 0.2 และ 0.3 ในอาหาร ให้กินวันละ 120 กรัมต่อตัว และมีน้ำสะอาดให้กินตลอดเวลาเป็นระยะเวลา 60 วัน จากการศึกษาพบว่าการเสริมหมามุ่ยอินเดียที่ระดับร้อยละ 0.1 ส่งผลให้ความเร็วในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าสูงสุด ($p < 0.05$) และการเสริมหมามุ่ยอินเดียที่ระดับร้อยละ 0.2 มีผลทำให้ความเข้มข้นของอสุจิสูงสุด ($p < 0.05$) แต่การเสริมหมามุ่ยอินเดียที่ระดับร้อยละ 0.3 มีผลทำให้คุณภาพน้ำเชื้อลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าการเสริมหมามุ่ยอินเดียทุกระดับที่ทำการศึกษาไม่มีผลต่ออัตราการผสมติดและอัตราการฟัก ($p > 0.05$) ดังนั้นการเสริมหมามุ่ยอินเดียสามารถนำมาใช้ในการเพิ่มคุณภาพน้ำเชื้อไก่พื้นเมืองไทยได้ที่ระดับร้อยละ 0.2

คำสำคัญ: หมามุ่ยอินเดีย, คุณภาพน้ำเชื้อ, ไก่พื้นเมืองไทย

Abstract

This study investigated the effects of *Mucuna pruriens* supplementation in feed on semen quality of Thai native chickens. Forty-eight Leung Hang Kao roosters, aged 7 months and over, were randomly divided into four experimental groups receiving: 0 (control), 0.1%, 0.2%, and 0.3% *Mucuna pruriens* supplementation. Each bird was fed 120 g of feed per day and provided with clean drinking water *ad libitum* for 60 days. The results showed that supplementation with 0.1% *Mucuna pruriens* significantly increased progressive motility to the highest level ($p < 0.05$), while 0.2% *Mucuna pruriens* supplementation resulted in the highest sperm concentration ($p < 0.05$). However, supplementation with 0.3% *Mucuna pruriens* resulted in reduced semen quality. Additionally, no significant differences were observed in fertility rate or hatchability rate among the groups ($p > 0.05$). Therefore, these findings suggest that dietary supplementation with *Mucuna pruriens* at 0.2% can be used to effectively improve sperm quality in Thai native chickens.

Keywords: *Mucuna pruriens*, Sperm quality, Thai native chicken

1. บทนำ

ปัจจุบันการเลี้ยงไก่พื้นเมืองไทยมีการศึกษาอย่างต่อเนื่อง โดยมุ่งเน้นการนำหลักวิชาการมาใช้เพื่อยกระดับประสิทธิภาพการเลี้ยงให้ดียิ่งขึ้น และมีการสนับสนุนให้มีการอนุรักษ์และใช้ประโยชน์จากไก่พื้นเมืองไทย เพื่อพัฒนาให้การเลี้ยงไก่พื้นเมืองเป็นอาชีพหลักของคนไทย โดยมีการนำเทคโนโลยีการผสมเทียมมาใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพและขยายพันธุ์ รวมถึงการพัฒนากระบวนการเก็บรักษาน้ำเชื้อไก่พื้นเมืองไทย ซึ่งคุณภาพน้ำเชื้อ ได้แก่ ปริมาตร ความเข้มข้น การเคลื่อนที่ และการมีชีวิตของตัวอสุจิ เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความสำเร็จในการผสมเทียมและการเก็บรักษาน้ำเชื้อ (Malik et al., 2013 & Mussa et al., 2023) จึงมีการศึกษาค้นคว้าปัจจัยต่าง ๆ ที่สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพหรือรักษาคุณภาพเชื้อไก่ให้เหมาะสมสำหรับการนำไปผสมพันธุ์ โดยเฉพาะพืชสมุนไพรที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเลี้ยงสัตว์ ลดการใช้สารเคมีที่ก่อให้เกิดการตกค้างและส่งผลเสียต่อผู้บริโภค และสมุนไพรบางชนิดช่วยเสริมสร้างการเจริญเติบโต สุขภาพ และกระตุ้นระบบสืบพันธุ์สัตว์ได้ (Hotea et al., 2022)

หมาม่วยอินเดีย (*Mucuna pruriens*) จัดอยู่ในกลุ่ม Fabaceae ซึ่งพบว่ามีสายพันธุ์มากกว่า 80 สายพันธุ์ สามารถพบได้ในบริเวณเขตร้อนและกึ่งเขตร้อน เช่น เอเชีย แอฟริกา และอเมริกา เป็นต้น (Kumar et al., 2024) หมาม่วยอินเดียเป็นสมุนไพรที่อุดมไปด้วยสารเลโวโดปา (levodopa) หรือแอลโดปา (L-dopa) ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของสารสื่อประสาทในสมองที่มีชื่อว่า โดปามีน (dopamine) มีความสำคัญต่อระบบสืบพันธุ์ (Wansawat, 2017) ที่ผ่านมามีการศึกษาการใช้หมาม่วยอินเดียในหนูขาว พบว่าสามารถเพิ่มความเข้มข้นของตัวอสุจิ การเคลื่อนที่ ปริมาตรของอสุจิ และมีผลทำให้ความผิดปกติของอสุจิลดลง (Abraham, 2011) มีการศึกษาการใช้หมาม่วยอินเดียในเพศชายที่มีปัญหาคุณภาพน้ำเชื้อต่ำ โดยให้กินหมาม่วยอินเดียบดผง 20 กรัมต่อวัน ผสมในน้ำนม และให้ดื่มเป็นระยะเวลา 3 เดือน พบว่ามีผลทำให้ปริมาตรน้ำเชื้อ ความเข้มข้นของตัวอสุจิ และการเคลื่อนที่ของตัวอสุจิดีขึ้น และจากการศึกษาของ Suklerd et al. (2022) ได้ศึกษาการเสริมหมาม่วยอินเดียในอาหารพ่อพันธุ์สุกรที่ระดับ 70 และ 140 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมของน้ำหนักตัว พบว่าสามารถเพิ่มความเข้มข้นของตัวอสุจิ และลดความผิดปกติของรูปร่างตัวอสุจิได้ แต่จากการรวบรวมเอกสารไม่พบการศึกษาการใช้หมาม่วยอินเดียในการเพิ่มประสิทธิภาพน้ำเชื้อสัตว์ปีก แม้ว่าในปัจจุบันการผสมเทียมในไก่พื้นเมืองจะได้รับความสนใจมากขึ้น แต่ปริมาณน้ำเชื้อที่น้อยในการหลังแต่ละครั้ง ยังเป็นข้อจำกัดในการนำมาใช้ในการผสมเทียม ตัวอย่างเช่น ไก่พื้นเมืองพันธุ์เหลืองหางขาว ก็มีปริมาณน้ำเชื้อน้อยต่อการหลังแต่ละครั้งอยู่ที่ 0.39 ± 0.04 มิลลิลิตร (Boonmatan et al., 2024) จากรายงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าหมาม่วยอินเดีย (*Mucuna pruriens*) มีคุณสมบัติในการส่งเสริมคุณภาพน้ำเชื้อในสัตว์หลากหลายชนิด เช่น หนูขาว มนุษย์ และสุกร แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของพืชสมุนไพรชนิดนี้ในการปรับปรุงสมรรถภาพทางสืบพันธุ์ในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของหมาม่วยอินเดียในการเพิ่มคุณภาพน้ำเชื้อของไก่พื้นเมืองไทย โดยมุ่งหวังที่จะสนับสนุนการนำสมุนไพรมาใช้ในการพัฒนาการผลิตสัตว์อย่างยั่งยืนและเกิดประโยชน์สูงสุด

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 สัตว์ทดลอง

การศึกษานี้ได้รับอนุญาตใช้สัตว์เพื่องานทางวิทยาศาสตร์ตามเอกสารอนุญาตเลขที่ KSU-AE-040 โดยใช้พ่อพันธุ์ไก่พื้นเมืองสายพันธุ์เหลืองหางขาวอายุประมาณ 7 เดือน ขึ้นไป จำนวน 48 ตัว เลี้ยงในโรงเรือนระบบเปิดบนกรงยกสูงขนาด (กว้างxยาวxสูง) 40x35x45 เซนติเมตร กรงละ 1 ตัว ให้กินอาหารสำเร็จรูปแบบผงที่มีระดับโปรตีนร้อยละ 14 ผสมกับสิ่งทดลองวันละ 120 กรัมต่อตัว และมีน้ำสะอาดให้กินตลอดเวลา ใช้แม่ไก่ไข่สายพันธุ์การค้ำ (CP Brown) จำนวน 96 ตัว ที่มีอัตราผลผลิตไข่ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 80 เลี้ยงในโรงเรือนระบบเปิดบนกรงยกสูงขนาด (กว้างxยาวxสูง) 40x35x45 เซนติเมตร กรงละ 2 ตัว ให้กินอาหารสำเร็จรูปแบบเม็ดที่มีระดับโปรตีนร้อยละ 17 วันละ 110 กรัมต่อตัว และมีน้ำสะอาดให้กินตลอดเวลา

2.2 การรีดน้ำเชื้อ

ทำการรีดน้ำเชื้อทั้งสัปดาห์ละ 1 ครั้ง ในระหว่างที่พ่อพันธุ์ไก่ทดลองได้รับอาหารทดลองตลอดระยะเวลา 60 วัน เพื่อเป็นการกระตุ้นให้เกิดการสร้างอสุจิ และหลังจากได้รับอาหารทดลองครบระยะเวลา 60 วัน ทำการรีดน้ำเชื้อเพื่อนำไปศึกษาผลของการเสริมหมามูยอินเดียในอาหารต่อคุณภาพน้ำเชื้อไก่พื้นเมืองไทย การรีดน้ำเชื้อไก่ใช้วิธีการนวดช่องท้อง (abdominal massage) ตามวิธีของ Quinn and Burrows (1936) โดยใช้ผู้รีดน้ำเชื้อจำนวน 2 คน คือ คนที่ 1 เป็นคนอุ้มไก่ กระชับพ่อไก่ไว้ที่เอวยื่นหางไก่ออกทางด้านหน้า หัวไก่อยู่ทางด้านหลังของคนอุ้ม ใช้มือรวบขาไก่ทั้ง 2 ข้างเข้าหากัน และใช้อีกมือหนึ่งลูบหลังพ่อไก่เบา ๆ ค่อย ๆ ลงน้ำหนักจากโคนปีกผ่านมาที่หลังไปที่หาง และใช้นิ้วหัวแม่มือกับนิ้วชี้บีบกระดุนบริเวณก้นพ่อไก่อย่างรวดเร็ว พ่อไก่จะแสดงปฏิกิริยากระดกหางขึ้นพร้อมดันอวัยวะเพศรูปร่างเป็นลอนคู่ปลายแหลมยื่นออกมาจากรูทวาร และผู้ปฏิบัติคนที่ 2 ใช้ภาชนะที่สะอาดรองรับน้ำเชื้อที่ไหลออกมา

2.3 แผนการทดลอง

การศึกษาประสิทธิภาพของสมุนไพรหมามูยอินเดียต่อคุณภาพน้ำเชื้อไก่พื้นเมืองไทย ใช้พ่อพันธุ์ไก่พื้นเมืองสายพันธุ์เหลืองหางขาวอายุประมาณ 7 เดือน ขึ้นไป จำนวน 48 ตัว โดยแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม ๆ ละ 3 ซ้ำ ๆ ละ 4 ตัว และใช้แม่ไก่ไข่สายพันธุ์การคำ (CP Brown) จำนวน 96 ตัว โดยแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม ๆ ละ 3 ซ้ำ ๆ ละ 8 ตัว โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design; CRD) ซึ่งมีกลุ่มทดลองที่ต้องการศึกษา จำนวน 4 กลุ่มทดลอง ดังนี้

กลุ่มทดลองที่ 1 ไม่เสริมหมามูยอินเดีย (กลุ่มควบคุม (Control))

กลุ่มทดลองที่ 2 เสริมเมล็ดหมามูยอินเดียบดผงในอาหารที่ระดับร้อยละ 0.1

กลุ่มทดลองที่ 3 เสริมเมล็ดหมามูยอินเดียบดผงในอาหารที่ระดับร้อยละ 0.2

กลุ่มทดลองที่ 4 เสริมเมล็ดหมามูยอินเดียบดผงในอาหารที่ระดับร้อยละ 0.3

2.4 การเตรียมสิ่งทดลอง

การศึกษาผลของการเสริมหมามูยอินเดียในอาหารต่อคุณภาพน้ำเชื้อไก่พื้นเมืองไทย ใช้เมล็ดหมามูยสายพันธุ์อินเดียสีดำ นำไปคั่วให้สุกแล้วนำเปลือกออก จากนั้นนำไปบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบดผ่านรูตะแกรงขนาด 1 มิลลิเมตร

2.5 การเก็บข้อมูล

2.5.1 การวัดปริมาตรน้ำเชื้อ โดยใช้กระบอกฉีดยาขนาด 1 มิลลิลิตร ดูดน้ำเชื้อที่รีดได้ในหลอด Eppendorf ขนาด 1.5 มิลลิลิตร และอ่านค่าที่สเกลระบุปริมาตรของกระบอกฉีดยา

2.5.2 การประเมินอัตราการเคลื่อนที่ (Motility) ความเร็วในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้า (Progressive) ความเร็วในการเคลื่อนที่เฉลี่ย (Average path velocity) ความเร็วในการเคลื่อนที่วิถีโค้ง (Curvilinear velocity) และความเร็วในการเคลื่อนที่วิถีตรง (Straight line velocity) ใช้โปรแกรม Image J ทำได้โดยการนำน้ำเชื้อเจือจางกับน้ำเกลือ (โซเดียมคลอไรด์ ร้อยละ 0.9) ในอัตราส่วน 1 : 100 (น้ำเชื้อ : น้ำเกลือ) และใช้ Micropipette ดูดตัวอย่าง 3 ไมโครลิตร โหลดลงบนสไลด์ Dual Slide Sperm Analysis ที่ปิดด้วย Cover Glass (Hamilton Thorne Biosciences, Beverly, MA, USA) สังเกตการเคลื่อนที่ของตัวอสุจิภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบ Compound microscope ยี่ห้อ Olympus รุ่น CX 43 ที่กำลังขยาย 10 เท่า ทำการอัดวิดีโอเป็นระยะเวลา 10 วินาที โดยใช้กล้องถ่ายวิดีโอยี่ห้อ Canon รุ่น EOS800D ซึ่งต่ออยู่กับกล้องจุลทรรศน์ จากนั้นนำภาพวิดีโอมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Image J โดยมีการกำหนดค่า Sperm tracker ดังนี้ Minimum sperm size (pixels): 3, Maximum sperm size (pixels): 70, Minimum track length (frames): 30, Maximum sperm velocity between frame (pixels): 20, Minimum VSL for motile (um/s): 4, Minimum VAP for motile (um/s): 5, Minimum VCL for motile (um/s): 5, Low VAP speed (um/s): 5, Maximum percentage of path with zero VAP: 1, Maximum percentage of path with low VAP: 25, Low VAP speed 2: 25, Low VCL speed (um/s): 35, High WOB (percent VAP/VCL): 80, High LIN (percent VSL/VAP): 80, High WOB two (percent VAP/VCL): 50, High LIN two (percent VSL/VAP): 60, Frame Rate (frames per second): 60, Microns per 1000

pixels: set scale, Print xy co-ordinate for all tracked sperm: 0, Print motion characteristics for all motile sperm: 0, Print median values for motion characteristics: 0 ดัดแปลงจาก Boonmatan (2013)

2.5.3 การประเมินความเข้มข้นของอสุจิ โดยใช้สไลด์สำหรับนับเม็ดโลหิต (Hemocytometer) ทำการเจือจางน้ำเชื้อในน้ำกลั่นที่อัตราส่วนน้ำเชื้อต่อน้ำกลั่น 1 : 1,000 เท่า และโหลดน้ำเชื้อที่เจือจางกับน้ำกลั่นลงบนสไลด์สำหรับนับเม็ดโลหิต โดยจะนับจำนวนอสุจิจากมุมบน-ล่าง ทั้ง 4 มุม และช่องตรงกลาง รวม 5 ช่อง ภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบ Compound microscope ที่กำลังขยาย 40 เท่า (Boonmatan, 2013) แล้วนำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยจำนวนอสุจิที่นับได้ต่อ 1 มิลลิลิตร ดังนี้

$$\begin{aligned} &\text{ความเข้มข้นของน้ำเชื้อ (จำนวนอสุจิ/มิลลิลิตร)} \\ &= (\text{จำนวนอสุจิที่นับได้ทั้ง 5 บริเวณ} \times 25 \times \text{อัตราการเจือจาง} \times 10^4)/5 \end{aligned} \quad (1)$$

2.5.4 การศึกษาอัตราการผสมติดและอัตราการฟัก ทำได้โดยการใช้วิธีการผสมเทียมให้กับแม่ไก่สายพันธุ์การคำจำนวน 96 ตัว จำนวน 1 ครั้ง โดยใช้กระบอกฉีดยาขนาด 1 มิลลิลิตร ฉีดน้ำเชื้อตัวอย่างปริมาตร 0.2 มิลลิลิตร และสอดกระบอกฉีดยาที่บรรจุน้ำเชื้อเข้าไปที่ท่อนำไข่ลึกประมาณ 1.5 นิ้ว และค่อย ๆ ฉีดน้ำเชื้อตัวอย่างอย่างนุ่มนวล เริ่มเก็บไข่ภายหลังจากการผสมเทียม 1 วัน เป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์ และนำไข่เข้าตู้ฟัก จากนั้นตรวจสอบการผสมติดโดยการส่องไข่ที่อายุฟัก 10 วัน และตรวจสอบอัตราการฟักที่อายุฟัก 21 วัน (Boonmatan, 2013) โดยใช้สูตรคำนวณอัตราการผสมติดและอัตราการฟัก ดังนี้

$$\text{อัตราการผสมติด} = (\text{จำนวนไข่ที่ผสมติด/จำนวนไข่ที่เข้าฟัก}) \times 100 \quad (2)$$

$$\text{อัตราการฟัก} = (\text{จำนวนลูกไก่ที่ฟักออก/จำนวนไข่ที่ผสมติด}) \times 100 \quad (3)$$

2.6 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ความแปรปรวนระหว่างทรีทเมนต์ (ANOVA) ตามแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (CRD) วิเคราะห์ความแตกต่างค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's new multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยใช้โปรแกรม SPSS version 27

3. ผลการวิจัย

3.1 ผลของการศึกษาประสิทธิภาพของของหมามูยอินเดียต่อคุณภาพน้ำเชื้อไก่พื้นเมืองไทย

จากการศึกษาผลของการเสริมหมามูยอินเดียในอาหารที่ระดับร้อยละ 0, 0.1, 0.2 และ 0.3 ต่อคุณภาพน้ำเชื้อไก่พื้นเมืองพันธุ์เหลืองหางขาว พบว่าการเสริมหมามูยอินเดียที่ระดับ 0.2 เปอร์เซ็นต์ มีผลทำให้ความเข้มข้นของตัวอสุจิสูงสุด ($p < 0.05$) และการเสริมหมามูยอินเดียที่ระดับร้อยละ 0.3 มีผลทำให้อัตราการเคลื่อนที่ต่ำที่สุด ($p < 0.05$) สำหรับการเสริมหมามูยอินเดียที่ระดับร้อยละ 0.1 และ 0.2 ให้ผลอัตราการเคลื่อนที่ไม่แตกต่างจากกลุ่มควบคุม ($p > 0.05$) นอกจากนี้พบว่าการเสริมหมามูยอินเดียที่ระดับร้อยละ 0.1 มีผลทำให้ความเร็วในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าสูงที่สุด ($p < 0.05$) และการเสริมหมามูยอินเดียที่ระดับร้อยละ 0.3 ให้ผลความเร็วในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าต่ำที่สุด ($p < 0.05$) และการเสริมหมามูยอินเดียทุกระดับที่ทำการศึกษาให้ผลความเร็วในการเคลื่อนที่เฉลี่ย ความเร็วในการเคลื่อนที่วิถีโค้ง และความเร็วในการเคลื่อนที่วิถีตรงสูงกว่ากลุ่มควบคุม ($p < 0.05$) แต่อย่างไรก็ตามการเสริมหมามูยอินเดียที่ระดับร้อยละ 0.1, 0.2 และ ไม่มีผลต่อปริมาตรน้ำเชื้อ ($p > 0.05$) (Table 1)

Table 1. Effects of *Mucuna pruriens* on sperm quality of Thai native chickens

Parameter	Control	<i>Mucuna pruriens</i> (%)			p-value
		0.1	0.2	0.3	
Volume (ml)	0.17±0.01	0.24±0.08	0.28±0.07	0.26±0.03	0.121
Concentration (x10 ⁹ Sperm/ml)	2.20±0.07 ^b	2.50±0.09 ^b	3.08±0.47 ^a	2.59±0.14 ^b	0.016
Motility (%)	85.93±5.71 ^a	81.69±6.45 ^a	80.87±5.63 ^a	60.11±17.88 ^b	0.001
Progressive (µm/sec)	3,286.47±505.63 ^b	4,837.10±1,110.68 ^a	3,543±60±246.68 ^b	2,261.96±298.28 ^c	<0.001
VAP (µm/sec)	93.73±14.55 ^c	178.31±30.22 ^a	156.96±12.93 ^{ab}	139.49±23.82 ^b	<0.001
VCL (µm/sec)	234.11±36.01 ^b	334.04±24.54 ^a	305.57±12.18 ^a	344.86±52.05 ^a	<0.001
VSL (µm/sec)	65.03±11.99 ^c	138.33±29.75 ^a	120.38±11.11 ^a	92.37±10.48 ^b	<0.001

^{a b c} Means within the same row with different superscripts are significantly different ($p < 0.05$).

VAP: Average path velocity

VCL: Curvilinear velocity

VSL: Straight line velocity

3.2 ผลของการศึกษาประสิทธิภาพของหมามุ่ยอินเดียต่ออัตราการผสมติดและอัตราการฟักของไก่พื้นเมืองไทย

จากการศึกษาผลของการเสริมหมามุ่ยอินเดียในอาหารที่ระดับร้อยละ 0, 0.1, 0.2 และ 0.3 ต่ออัตราการผสมติดและอัตราการฟักของไก่พื้นเมืองพันธุ์เหลืองหางขาว พบว่าการเสริมหมามุ่ยอินเดียในอาหารทุกระดับที่ทำการศึกษามีผลต่ออัตราการผสมติด และอัตราการฟักของไก่พื้นเมืองไทย ($p>0.05$) (Table 2)

Table 2. Effects of *Mucuna pruriens* on fertility rate and hatchability rate of Thai native chickens

Parameter	Control	<i>Mucuna pruriens</i> (%)			p-value
		0.1	0.2	0.3	
Fertility (%)	77.04±13.19	81.53±6.87	81.42±4.86	80.41±4.65	0.756
Hatchability (%)	85.60±5.68	84.48±5.33	83.41±6.32	87.19±4.45	0.674

4. อภิปรายผลการวิจัย

จากการศึกษาผลของการเสริมหมามุ่ยอินเดียในอาหารที่ระดับร้อยละ 0, 0.1, 0.2 และ 0.3 ต่อคุณภาพน้ำเชื้อไก่พื้นเมืองพันธุ์เหลืองหางขาว พบว่าการเสริมหมามุ่ยอินเดียที่ระดับร้อยละ 0.1 ให้ผลความเร็วในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าสูงที่สุด ($p<0.05$) และการเสริมหมามุ่ยอินเดียที่ระดับร้อยละ 0.2 มีผลทำให้ความเข้มข้นของอสุจิสูงที่สุด ($p<0.05$) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากหมามุ่ยอินเดียมีสารสำคัญคือ L-dopa ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการสร้างสารโดปามีน (dopamine) ไปกระตุ้นให้สมองส่วนไฮโปทาลามัสและสมองส่วนหน้ากระตุ้นการหลั่งฮอร์โมนโกรนาโดโทรปิน จากนั้นฮอร์โมนโกรนาโดโทรปินไปกระตุ้นให้ต่อมใต้สมองส่วนหน้าหลั่ง Follicle Stimulating Hormone (FSH) และ Luteinizing Hormone (LH) ให้สูงขึ้นเพื่อกระตุ้นให้เกิดกระบวนการสร้างอสุจิ (Adjat et al., 2023) จากผลการศึกษาสอดคล้องกับ Suklerd et al. (2022) พบว่าการเสริมหมามุ่ยอินเดียในอาหารที่ระดับ 140 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมของน้ำหนักรับประทาน สามารถเพิ่มความเข้มข้นของอสุจิฟอสสุกรได้นอกจากนี้ Suresh et al. (2009) พบว่าการเสริมหมามุ่ยอินเดียที่ระดับ 200 กรัมต่อกิโลกรัมของน้ำหนักรับประทานในหนูขาวเป็นระยะเวลา 60 วัน มีผลทำให้ความเข้มข้นของตัวอสุจิสูงกว่ากลุ่มควบคุม และยังสอดคล้องกับการศึกษาในมนุษย์ที่พบว่าการให้เพศชายที่มีภาวะมีบุตรยากกินหมามุ่ยอินเดียที่ระดับ 5 กรัมต่อวัน พร้อมกับบ่มเป็นระยะเวลา 3 เดือน มีผลทำให้ความ

เข้มข้นของอสุจิ และการเคลื่อนที่ของอสุจิตีขึ้น (Shukla et al., 2009) จากการศึกษาพบว่า การเสริมหมามูยอินเดียในระดับร้อยละ 0.3 มีผลทำให้คุณภาพน้ำเชื้อลดลง (ปริมาตรน้ำเชื้อ อัตราการเคลื่อนที่ ความเร็วในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้า ความเร็วในการเคลื่อนที่เฉลี่ย ความเร็วในการเคลื่อนที่วิถีโค้ง และความเร็วในการเคลื่อนที่วิถีตรง) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้หมามูยอินเดียในระดับที่สูงมีผลกระทบต่อคุณภาพน้ำเชื้อ อาจเป็นผลมาจากหมามูยอินเดียมีสารต้านอนุมูลอิสระที่ช่วยต้านอนุมูลอิสระ และมีผลต่อการสร้างฮอร์โมนเพื่อผลิตอสุจิ (Adjet et al., 2023) ซึ่งการเสริมหมามูยอินเดียในระดับสูงอาจมีผลทำให้เกิดความไม่สมดุลของกระบวนการผลิตสารต้านอนุมูลอิสระเพื่อกำจัดอนุมูลอิสระ และการหลั่งฮอร์โมนเพื่อสร้างอสุจิ จึงส่งผลให้คุณภาพน้ำเชื้อลดลง สอดคล้องกับการศึกษาของ Adjet et al. (2023) พบว่าการใช้หมามูยอินเดียที่ระดับสูง 2,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมในหนู มีผลทำให้อัตราการเคลื่อนที่ของอสุจิ และความเข้มข้นของตัวอสุจิลดลงต่ำกว่าการใช้หมามูยอินเดียที่ระดับต่ำ 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และระดับปานกลาง 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และจากการศึกษา ยังพบว่าการเสริมหมามูยอินเดียไม่มีผลต่ออัตราการผสมติดและอัตราการฟัก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหมามูยอินเดียไม่ได้มีผลกระทบต่อความสามารถในการผสมติดโดยตรง และกระบวนการฟักไข่มีปัจจัยของตัวฟักเป็นองค์ประกอบสำคัญที่มีผลต่ออัตราการฟักมากกว่าปัจจัยของน้ำเชื้อ จึงส่งผลให้การเสริมหมามูยอินเดียไม่ได้ส่งผลกระทบต่ออัตราการผสมติดและอัตราการฟัก

5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาผลของการเสริมหมามูยอินเดียในอาหารต่อคุณภาพน้ำเชื้อไก่พื้นเมืองพันธุ์เหลืองหางขาว พบว่าสามารถใช้หมามูยอินเดียในการปรับปรุงคุณภาพน้ำเชื้อไก่พื้นเมืองได้ที่ระดับร้อยละ 0.2 โดยมีผลทำให้ความเร็วในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้า และความเข้มข้นของตัวอสุจิเพิ่มสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามควรมีการศึกษาการใช้หมามูยอินเดียในระดับที่สูงขึ้น และระยะเวลาที่นานขึ้นเพื่อตรวจสอบผลกระทบสะสมต่อระบบสืบพันธุ์ของไก่ รวมถึงการศึกษาสารออกฤทธิ์ที่สำคัญในหมามูยอินเดียที่มีบทบาทต่อคุณภาพน้ำเชื้อไก่

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2567 มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ที่ให้ทุนสนับสนุนในการดำเนินงานวิจัย และขอขอบคุณสาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตสัตว์ คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่เลี้ยงสัตว์ทดลอง และห้องปฏิบัติการในการดำเนินงานวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- Abraham, J. (2011). Effect of *Mucuna pruriens* seeds on fertility of male abino rats *rattus norvegicus*. Journal of Pharmacy Research, 4(2), 33–36.
- Adjet, S., Dagadu, P., Amoah, B. Y., Hammond, G. N. A., Nortey, E., Kyeremeh, R. O., Orabueze, I. C., and Asare, G. A. (2023). Moderate doses of *Mucuna pruriens* seed powder is safe and improves sperm count and motility. Phytomedicine Plus, 3(3), 1–9.
- Boonmatan, T. (2013). Cold and frozen storage of native chicken “Leung Hang Kao” semen. Master dissertation. Suranaree University of Technology. (in Thai)
- Boonmatan, T., Phakachod, N., Pongjongmit, T., Tanpol, N., and Ponchunchoovong, S. (2024). Development of native chicken semen diluent for Thai native chicken breeds conservation and development. Prawarun Agricultural Journal, 21(2), 83–92. (in Thai)
- Hotea, I., Dragomirescu, M., Berbecea, A., and Radulov, I. (2022). Phytochemicals as alternatives to antibiotics in animal production (pp. 1–22). E-Publishing Inc.

- Kumar, N., Singh, S. K., Lal, R.K., and Dhawan, S. S. (2024). An insight into dietetic and nutraceutical properties of underutilized legume: *Mucuna pruriens* (L.) DC. *Journal of Food Composition and Analysis*, 1-9.
- Malik, A., Haron, A. W., Yusoff, H., Nesa, M., Bukar, M., and Kasim, A. (2013). Evaluation of the ejaculate quality of the red jungle fowl, domestic chicken, and bantam chicken in Malaysia. *Turkish Journal of Veterinary and Animal Sciences*, 37, 564-568.
- Mussa, N. J., Boonkum, W., and Chankitisakul, V. (2023). Semen quality traits of two Thai native chickens producing a high and a low of semen volumes. *Veterinary Sciences*, 10(73), 1-9.
- Quinn, J. P., and Burrows, W. H. (1936). Artificial Insemination in fowl. *Journal of Heredity*, 27, 31-37.
- Shukla, K. K., Mahdi, A. A., Ahmad, M. K., Shankhwar, S. N., Rajender, S., and Jaiswar, S. P. (2009). *Mucuna pruriens* improves male fertility by its action on the hypothalamus-pituitary-gonadal axis. *Fertility and Sterility*, 92(6), 1934-1940.
- Suklerd, S., Olanratmanee, E., Srijareon, S., and Kongthip, A. (2022). Effect of Mucona dietary supplementation on semen quality and testosterone level in boars. *RMUTSB Academic Journal*, 10(1), 98-107. (in Thai)
- Suresh, S., Prithiviraj, E., and Prakash, S. (2009). Dose- and time-dependent effects of ethanolic extract of *Mucuna pruriens* Linn. seed on sexual behaviour of normal male rats. *Journal of Ethnopharmacology*, 122(3), 497-501.
- Wansawat, S. (2017). Effects and underlying mechanisms of Thai and India *Mucuna pruriens* seed extracts on stimulation of neurite outgrowth. Master dissertation. Chulalongkorn University. (in Thai)

การใช้โพรไบโอติกเป็นอาหารเสริมในการเลี้ยงสัตว์น้ำ

The Application of Postbiotics as Feed Additives in Aquaculture

ฐปนขจร ปันแจ่ม¹ และ ชนกันต์ จิตมนัส^{1*}Thapanakhajorn punjam¹ and Chanagun Chitmanat^{1*}¹คณะเทคโนโลยีการประมงและทรัพยากรทางน้ำ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่¹Faculty of Fisheries Technology and Aquatic Resources, Maejo University, Chiangmai Province

*Corresponding Author: chanagun1@hotmail.com

Received: April 15, 2025

Revised: June 11, 2025

Accepted: June 13, 2025

บทคัดย่อ

โพรไบโอติก (Postbiotics) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากจุลินทรีย์โพรไบโอติก โดยประกอบด้วยเซลล์จุลินทรีย์ที่ตายแล้ว ส่วนประกอบของเซลล์แบคทีเรียและเมแทบอลิต์ต่าง ๆ ที่ผลิตขึ้นระหว่างกระบวนการเมตาบอลิซึม ซึ่งมีศักยภาพในการส่งเสริมสุขภาพและการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำ บทความฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอความก้าวหน้าทางวิชาการเกี่ยวกับโพรไบโอติก โดยครอบคลุมถึงวิธีการเตรียม องค์ประกอบทางชีวภาพ กิจกรรมทางชีวภาพ ตลอดจนประสิทธิภาพของโพรไบโอติกในฐานะสารเติมแต่งอาหารสัตว์น้ำ จากการศึกษาวิจัย พบว่าโพรไบโอติกสามารถส่งผลเชิงบวกต่ออัตราการเจริญเติบโต การตอบสนองทางภูมิคุ้มกัน สุขภาพของระบบทางเดินอาหารและความสามารถในการต้านทานโรคของสัตว์น้ำหลายชนิด อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดด้านความเข้าใจเกี่ยวกับกลไกการออกฤทธิ์ ปริมาณการใช้ที่เหมาะสมและความหลากหลายของผลิตภัณฑ์ในเชิงพาณิชย์ อันเป็นอุปสรรคต่อการประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรม ดังนั้นจึงเสนอแนะให้มีการวิจัยเชิงลึกเพิ่มเติม เพื่อพัฒนาสูตรโพรไบโอติกที่มีประสิทธิภาพสูง และศึกษาศักยภาพในการเสริมฤทธิ์ร่วมกับสารเติมแต่งอาหารชนิดอื่น ซึ่งจะมีส่วนสำคัญในการยกระดับประสิทธิภาพการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ลดการพึ่งพายาปฏิชีวนะ และส่งเสริมความยั่งยืนของอุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำในระยะยาว

คำสำคัญ : โพรไบโอติก, โพรไบโอติก, การเจริญเติบโต, ภูมิคุ้มกัน, การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

Abstract

Postbiotics are products derived from probiotic microorganisms, consisting of inactivated microbial cells, bacterial cell components, and various metabolites produced during microbial metabolism. These compounds exhibit potential in promoting the health and growth performance of aquatic animals. This article aims to present recent scientific advances in postbiotic research, encompassing preparation methods, bioactive components, biological activities, and the efficacy of postbiotics as feed additives in aquaculture. Current studies indicate that postbiotics can positively influence growth rates, immune responses, gut health, and disease resistance in various aquatic species. Nevertheless, limitations remain regarding the understanding of their mechanisms of action, optimal dosages, and the diversity of commercially available products, which hinder widespread industrial application. Therefore, further in-depth research is recommended to develop more effective postbiotic formulations and to study the potential for synergistic

effects with other feed additives. Such developments will play a crucial role in enhancing aquaculture efficiency, reducing antibiotic dependency, and promoting the long-term sustainability of the aquaculture industry.

Keywords: Postbiotics, probiotics, growth, immunity, aquaculture

1. บทนำ

การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมีบทบาทสำคัญในการตอบสนองความต้องการด้านอาหารโปรตีนคุณภาพสูงของประชากรโลกที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ภาคอุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมีการพัฒนาอย่างรวดเร็วทั้งในด้านเทคโนโลยีการผลิตและระบบการจัดการ เพื่อเพิ่มผลผลิตและประสิทธิภาพในการเลี้ยง ถึงแม้ว่าภาวะเศรษฐกิจโลกจะอยู่ในช่วงชะลอตัว แต่การส่งออกสินค้าประมงของไทยในปี 2567 ทำสถิติสูงสุดในรอบ 10 ปี ด้วยมูลค่ารวมกว่า 240,062 ล้านบาท เพิ่มขึ้นจากปี 2566 ที่มีมูลค่า 229,123 ล้านบาท (Prachachat, 2025) อย่างไรก็ตามการเพิ่มความหนาแน่นของการเพาะเลี้ยงเป็นปัจจัยหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับการเกิดโรค ซึ่งมีสาเหตุจากหลายปัจจัย ได้แก่ การนำเข้าสัตว์น้ำจากต่างถิ่น การเปลี่ยนแปลงสิ่งแวดล้อม และการเปิดเสรีทางการค้า (Ang et al., 2020) การสูญเสียจากโรคสัตว์น้ำสามารถส่งผลกระทบต่อรายได้ของเกษตรกรรายย่อยและห่วงโซ่อุปทานโดยรวม เกษตรกรจึงจำเป็นต้องใช้สารเคมี ยาปฏิชีวนะและวัคซีน (Assefa & Abunna, 2018) ซึ่งเป็นการเพิ่มต้นทุนการผลิต ขณะที่ในระดับสังคม ผู้บริโภคมีความกังวลเกี่ยวกับสารตกค้างในเนื้อสัตว์ ความปลอดภัยของผู้บริโภค และการเพิ่มขึ้นของเชื้อจุลินทรีย์ดื้อยา (Okocha et al., 2018) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาสารเติมแต่งอาหารจากธรรมชาติและผลิตภัณฑ์กระตุ้นภูมิคุ้มกันที่ปลอดภัย เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และมีประสิทธิภาพในการเพิ่มผลผลิต เพื่อสนับสนุนการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำอย่างยั่งยืน

จุลินทรีย์มีชีวิตที่มีประโยชน์หรือโพรไบโอติก (Probiotics) ได้รับความสนใจในฐานะสารเสริมอาหารที่ช่วยเสริมสุขภาพสัตว์น้ำและเพิ่มผลผลิต (Ringø et al., 2020; Wang et al., 2019a, 2019b) อย่างไรก็ตามข้อจำกัดด้านความคงตัว การจัดเก็บและความสามารถในการมีชีวิตรอดภายใต้สภาวะแวดล้อมที่แปรปรวน (Dianawati et al., 2016) ส่งผลให้เกิดการพัฒนาโอสไบโอติก (Postbiotics) ซึ่งหมายถึง สารชีวโมเลกุล เมตาโบไลต์ หรือชิ้นส่วนของเซลล์จุลินทรีย์ที่ผ่านการทำลายหรือยับยั้งการเจริญ แต่ยังคงคุณสมบัติทางชีวภาพที่ให้ประโยชน์ต่อสุขภาพของสิ่งมีชีวิต (Tsilingiri & Rescigno, 2013)

โอสไบโอติกมีข้อดีเหนือโพรไบโอติก เช่น ลดความเสี่ยงจากการติดเชื้อ การแพร่กระจายยีนดื้อยา (Salminen et al., 2021) เพิ่มเสถียรภาพและความปลอดภัย (Rad et al., 2020) ง่ายต่อการจัดเก็บและขนส่ง เพิ่มความทนทานต่อน้ำย่อยในกระเพาะอาหาร เอนไซม์ย่อยอาหารและน้ำดี ส่งผลให้ได้รับการยอมรับในภาคอาหารและการแพทย์ (Aguilar-Toalá et al., 2018) โอสไบโอติกมีบทบาทสำคัญต่อการตอบสนองทางภูมิคุ้มกันและจุลินทรีย์ในลำไส้ โดยช่วยเพิ่มการเจริญเติบโต ส่งเสริมการตอบสนองทางภูมิคุ้มกันของสัตว์น้ำ ทำให้มีความต้านทานโรคและความสามารถทนต่อสภาวะความเครียด (Sudhakaran et al., 2022) แม้ว่างานวิจัยที่ศึกษาการใช้โอสไบโอติกในสัตว์บก แต่การศึกษาผลกระทบของโอสไบโอติกในสัตว์น้ำยังคงเป็นเรื่องใหม่และมีข้อจำกัด โดยเฉพาะในส่วนของการประเมินผลกระทบในแง่ของการเจริญเติบโตและการปรับปรุงคุณภาพน้ำในระบบการเพาะเลี้ยง ดังนั้นบทความนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาผลกระทบของการใช้โอสไบโอติกในอาหารสัตว์น้ำด้วยคุณสมบัติดังกล่าว โอสไบโอติกจึงได้รับการพิจารณาว่าเป็นหนึ่งในเครื่องมือทางเลือกที่มีประสิทธิภาพสูงในการส่งเสริมสุขภาพและความยั่งยืนในระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ สามารถนำไปใช้ได้ทั้งในระบบการเลี้ยงแบบเปิดและปิด รวมถึงการเพาะเลี้ยงเชิงพาณิชย์และในฟาร์มขนาดเล็ก นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับแนวโน้มของการลดการใช้ยาปฏิชีวนะในอุตสาหกรรมสัตว์น้ำ ซึ่งถือเป็นทิศทางที่ได้รับการส่งเสริมในระดับนโยบายทั้งภายในประเทศและนานาชาติ แม้ว่าผลลัพธ์ของการใช้โอสไบโอติกมีแนวโน้มที่ดี แต่ยังจำเป็นต้องมีการศึกษาต่อไปเพื่อกำหนดขอบเขตของประโยชน์และส่งเสริมการยอมรับ

ในอุตสาหกรรมเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำอย่างแพร่หลายมากขึ้น นอกจากนี้ยังมีพรีไบโอติก (Prebiotics) ซึ่งเป็นสารอาหารที่ไม่สามารถย่อยได้ซึ่งทำหน้าที่เป็นอาหารของจุลินทรีย์ที่มีประโยชน์ในระบบทางเดินอาหาร บทความนี้ต้องการรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้พรีไบโอติกเป็นอาหารเสริมในการเลี้ยงสัตว์น้ำ เพื่อเป็นแนวทางในการลดการใช้ยาและสารเคมีในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

2. ส่วนประกอบหลักของพรีไบโอติก

พรีไบโอติกประกอบด้วยสารประกอบสามกลุ่มหลัก ได้แก่ 1) เซลล์จุลินทรีย์ที่ไม่ทำงาน 2) ส่วนประกอบของเซลล์แบคทีเรีย และ 3) เมตาบอไลต์จากจุลินทรีย์ จุลินทรีย์ที่เลือกสำหรับการผลิตพรีไบโอติกต้องเป็นจุลินทรีย์ที่ได้รับการยืนยันว่าปลอดภัยผ่านการประเมินความปลอดภัยที่เข้มงวด ซึ่งรวมถึงสายพันธุ์ของแบคทีเรียและเชื้อรา (Collado et al., 2019) แบคทีเรียสกุลหลักได้แก่ *Lactobacillus* spp. (เช่น *L. plantarum*, *L. fermentum*, *L. helveticus*, *L. casei*, *L. rhamnosus*, *L. brevis*, *L. xylosum*), *Bifidobacterium* spp. (เช่น *B. bifidum*, *B. animalis*), *Enterococcus* spp. (เช่น *E. faecalis*, *E. faecium*), *Bacillus* spp. (เช่น *B. coagulans*, *B. subtilis*) และ *Pseudomonas* spp. (เช่น *P. stutzeri*, *P. putida*) โดยพรีไบโอติกต้องไม่ใช่เชื้อก่อโรคที่ไม่ทำงาน ไวรัส หรือ สารเมตาบอไลต์ของจุลินทรีย์ที่เป็นอันตราย

2.1 เซลล์จุลินทรีย์ที่ไม่ทำงาน

การอบด้วยความร้อนเป็นวิธีหลักในการทำให้เซลล์พรีไบโอติกไม่ทำงาน โดยจุลินทรีย์ที่ไม่ทำงานยังคงความสมบูรณ์ของโครงสร้างองค์ประกอบพื้นฐานของพรีไบโอติก สิ่งสำคัญคือต้องแยกความแตกต่างระหว่างเซลล์พรีไบโอติกที่ไม่ทำงานกับวัคซีนที่ไม่ทำงาน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วได้มาจากจุลินทรีย์ก่อโรคและไม่ถือเป็นส่วนหนึ่งของหมวดหมู่พรีไบโอติก (Salminen et al., 2021)

2.2 ส่วนประกอบของเซลล์แบคทีเรีย

ส่วนประกอบของเซลล์แบคทีเรียประกอบด้วยพิลิ (pili) แฟลเจลลัม (flagella) เปปติโดไกลแคน (peptidoglycan, PGN) กรดไทโคอิก (teichoic acids, TA) และ cell surface proteins โดย PGN และ TA เป็นส่วนประกอบหลักของผนังเซลล์และองค์ประกอบสำคัญของพรีไบโอติก PGN เป็นโครงสร้างตาข่ายที่แข็งแรง ห่อหุ้มเซลล์แบคทีเรีย โครงสร้างพื้นฐานประกอบด้วยกรด N-acetylmuramic และ N-acetylglucosamine ที่เชื่อมกันด้วยพันธะ glycosidic β -1,4 โดยกรด N-acetylmuramic ยังเชื่อมกับเปปไทด์สั้นอีกด้วย เปปไทด์ที่อยู่ติดกันจะสร้างการเชื่อมขวางซึ่งในที่สุดจะก่อตัวเป็นโครงสร้างคล้ายตาข่ายทำให้ช่วยป้องกันการแตกของเซลล์จากแรงดันออสโมติก (Teame et al., 2020) PGN มีบทบาทสำคัญในการควบคุมภูมิคุ้มกัน (Dhar et al., 2018) TA (Teichoic acids) ประกอบด้วย lipoteichoic acid (LTA) และ wall teichoic acid (WTA) เป็นองค์ประกอบสำคัญของผนังเซลล์ของแบคทีเรียแกรมบวก และมีบทบาทในการกระตุ้นระบบภูมิคุ้มกันของสัตว์น้ำ LTA มีบทบาทสำคัญในการรักษาสมดุลของประจุบวกในผนังเซลล์ ป้องกันการอักเสบและจดจำตัวรับของเซลล์โฮสต์ WTA ช่วยรักษาเสถียรภาพของเซลล์ ควบคุมกลุ่มแบคทีเรียและการยึดเกาะ ส่งผลต่อความต้านทานเปปไทด์ต่อต้านจุลินทรีย์ ทั้ง LTA และ WTA สามารถเสริมการทำงานของเซลล์เม็ดเลือดขาวในการจับและทำลายเชื้อแบคทีเรีย

2.3 เมตาบอไลต์ของแบคทีเรีย

เมตาบอไลต์ของแบคทีเรียประกอบด้วยสารประกอบทางชีวภาพที่หลากหลายซึ่งสังเคราะห์โดยพรีไบโอติกในระหว่างการเจริญเติบโตและการแพร่พันธุ์ เมตาบอไลต์เหล่านี้ประกอบด้วยสารต่าง ๆ มากมายรวมทั้งวิตามินบี วิตามินเค กรดอะมิโนอะโรมาติก กรดไขมันสายสั้น (Short-chain fatty acids: SCFAs) ได้แก่ อะซิเตท (acetate) โพรพิโอเนต (propionate) และบิวทีเรต (butyrate) เป็นผลิตภัณฑ์เมตาบอลิซึมหลักที่ได้จากการหมักคาร์โบไฮเดรตโดยจุลินทรีย์ในลำไส้

ของสัตว์น้ำ กลูตาไรโอนที่ผลิตโดยแบคทีเรียกรดแลกติก เปปไทด์ต่อต้านจุลินทรีย์ที่จัดอยู่ในกลุ่ม แบคทีริโอซิน (bacteriocins) และดีเฟนซิน (defensins) กรดฟีนอลแลกติก กรดอะมิโน-ดี ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ สารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) ไฟโตเอสโตรเจน พาราเบน (parahydroxybenzoic acid) และสารโพลีเมอร์นอกเซลล์ (extracellular polysaccharide, EPS) เป็นต้น สารประกอบเหล่านี้เรียกอีกอย่างว่า ส่วนใสปราศจากเซลล์ (cell-free supernatants, CFS) (Ai et al., 2022; Dadi et al., 2022; Tao et al., 2023; Wang et al., 2021b; Yang et al., 2023)

แบคทีริโอซินเป็นกลุ่มของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่หลากหลายซึ่งรวมถึงโปรตีน เปปไทด์และรูปแบบสารตั้งต้น ซึ่งสังเคราะห์โดยจุลินทรีย์ต่าง ๆ ผ่านไรโบโซม (Zimina et al., 2020) โมเลกุลเหล่านี้มีลักษณะเฉพาะคือมีฤทธิ์ฆ่าเชื้อหรือยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย สายพันธุ์โปรไบโอติกภายในสกุลแลคโตบาซิลลัสและบาซิลลัส ถือเป็นสายพันธุ์ที่ผลิตแบคทีริโอซินที่ได้รับการศึกษามากที่สุด (Khochamit et al., 2015) แบคทีเรียแลคโตบาซิลลัสมีความสำคัญอย่างยิ่งเนื่องจากมีฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรียในวงกว้างและมีบทบาทในการปรับการตอบสนองของภูมิคุ้มกัน (Mokoena et al., 2021)

กรดอินทรีย์เป็นกลุ่มย่อยสำคัญของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพซึ่งทำหน้าที่ที่สำคัญต่อสุขภาพทางเดินอาหาร ซึ่งรวมถึงการลดค่า pH ในลำไส้และการยับยั้งการเจริญของเชื้อก่อโรค (Dittoe et al., 2018) ประโยชน์ของกรดไขมันสายสั้น (SCFAs) ต่อโฮสต์นั้นมีหลากหลายแง่มุมครอบคลุมถึงการควบคุมสมดุลของระบบภูมิคุ้มกัน โดยเฉพาะในการกระตุ้นการทำงานของระบบภูมิคุ้มกันแต่กำเนิด (innate immunity) และการควบคุมการอักเสบ (inflammation modulation) การแบ่งตัวของเซลล์แมโครฟาจ (macrophage) และเซลล์ T ควบคุม (Regulatory T cells, Treg) (Duan et al., 2023) SCFAs มีส่วนช่วยปรับสภาพแวดล้อมจุลภาคของลำไส้ เพิ่มการทำงานของผนังลำไส้และเสริมสร้างภูมิคุ้มกันของเยื่อเมือก (Ma et al., 2022) การเสริม sodium butyrate ในอาหารปลาสามารถส่งเสริมโครงสร้างทางจุลพยาธิวิทยาของลำไส้ โดยเฉพาะการเพิ่มความยาวและความหนาแน่นของ villi ซึ่งเป็นโครงสร้างหลักที่เพิ่มพื้นที่ผิวสำหรับการดูดซึมสารอาหาร การเพิ่มความหนาแน่นของ villi ยังสัมพันธ์กับการเพิ่มจำนวนของ goblet cells ซึ่งมีหน้าที่ผลิต mucin ทำให้เยื่อเมือกลำไส้มีความแข็งแรงมากขึ้น และป้องกันการเกาะของเชื้อโรค คุณสมบัติเหล่านี้มีความสำคัญต่อการรักษาสมดุลระหว่างการอักเสบของลำไส้ (Hou et al., 2023) สารโพลีเมอร์นอกเซลล์ (EPS) หลั่งออกมาจากจุลินทรีย์ที่หลากหลาย มีบทบาทในการปรับเปลี่ยนจุลินทรีย์ในลำไส้และมีคุณสมบัติต้านการอักเสบ ด้านอนุมูลอิสระและควบคุมภูมิคุ้มกัน (Sheppard & Howell, 2016)

3. การเตรียมโพลีไบโอติกในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

การทำให้โปรไบโอติกที่มีชีวิตเป็นโพลีไบโอติกมีหลายวิธี เช่น การใช้ความร้อน การฉายรังสีไอออนไนซ์ การฉายรังสียูวี การบำบัดด้วยแรงดันสูงและอัลตราโซนิก (Salminen et al., 2021) เทคโนโลยีที่แตกต่างกันจะส่งผลกระทบต่อองค์ประกอบและประสิทธิภาพของโพลีไบโอติกแตกต่างกัน โดยการทำให้ไม่ทำงานด้วยความร้อนเป็นวิธีที่ใช้บ่อยที่สุด

3.1 การทำให้เซลล์ไม่ทำงานด้วยความร้อน

การทำให้โปรไบโอติกไม่ทำงานด้วยความร้อนขึ้นอยู่กับความทนทานของจุลินทรีย์ การสัมผัสความร้อนจะทำลายความสมบูรณ์ของเยื่อหุ้มเซลล์โปรไบโอติก ส่งผลให้เกิดผลกระทบต่อการจับตัวกันของไรโบโซม การแตกของสายดีเอ็นเอ การยับยั้งเอนไซม์และการแข็งตัวของโปรตีน ควบคู่ไปกับการสูญเสียสารอาหารและไอออนที่สำคัญ (Cuevas-González et al., 2020) แบคทีเรียสายพันธุ์ต่างกันต้องการอุณหภูมิและระยะเวลาที่ต่างกัน โดยทั่วไปอุณหภูมิที่ใช้จะอยู่ระหว่าง 55°C ถึง 150°C Wang et al. (2021b) เตรียม *Lactococcus lactis* Z-2 โดยใช้ 100°C นาน 10 นาที ในขณะที่ Yang et al. (2023) ใช้การพาสเจอร์ไรซ์ที่ 70°C 30 นาที เตรียม *Akkermansia muciniphila*

3.2 การทำให้เซลล์ไม่ทำงานด้วยคลื่นอัลตราซาวนด์

การใช้คลื่นอัลตราซาวนด์ทำให้เกิดโพรงอากาศ ส่งผลให้เซลล์แตกและโครงสร้างถูกทำลาย (Bariya et al., 2023) กลไกหลักของการทำให้จุลินทรีย์ไม่ทำงาน ได้แก่ การแตกของผนังเซลล์ การรบกวนเยื่อหุ้มเซลล์ การสร้างความเสียหายของดี

เอ็นเอ (Xiao et al., 2019) Wang et al. (2023b) ใช้คลื่นเสียงความถี่สูง 350 วัตต์ 20 นาที เตรียมโพลีโบโอติกจากยีสต์แดง *Rhodotorula mucilaginosa* ในขณะที่ Tao et al. (2023) ผลิตโพลีโบโอติกจากเชื้อ *Bacillus subtilis* จากเครื่องรบกวนคลื่นเสียงความถี่สูง 450 วัตต์ เป็นเวลา 30 นาที เพื่อผลิตโพลีโบโอติก LCBS1 นอกจากนี้ ยังมีการทดลองผลิตโพลีโบโอติกจาก *Enterococcus faecalis* และ *Bacillus cereus* ด้วยเสียงความถี่สูง เพื่อใช้เป็นอาหารกุ้งขาว (Ai et al., 2022; Li et al., 2021)

3.3 การทำให้ไม่ทำงานด้วย UV

รังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV) มีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อ โดยทำให้ DNA เสื่อมสภาพและเกิด pyrimidine dimers ซึ่งขัดขวางกระบวนการถอดรหัส ส่งผลให้เซลล์ตาย (Desnous et al., 2010; Raeiszadeh & Taghipour, 2021; Bana's et al., 2020) UV ถูกนำมาใช้ในหลายด้าน เช่น การฆ่าเชื้อในน้ำและอากาศ (Singh et al., 2021) รังสี UV ทำให้เกิดความผิดปกติของการสร้างดีเอ็นเอ ส่งผลให้การถอดรหัสและการแปลรหัสถูกยับยั้ง ทำให้เกิดการกลายพันธุ์ และนำไปสู่การตายของเซลล์และโปรตีนเสื่อมสภาพ (Bana's et al., 2020)

4. การใช้โพลีโบโอติกในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

โพลีโบโอติกมีบทบาทสำคัญในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โดย Table 1 ได้สรุปรายละเอียดเกี่ยวกับสายพันธุ์โพลีโบโอติกที่ใช้ วิธีการเตรียม แหล่งที่มาของสายพันธุ์เหล่านี้ ชนิดของสัตว์น้ำที่ทดลองใช้ ปริมาณที่ใช้ วิธีการใช้ และหน้าที่หลักของสายพันธุ์เหล่านี้ มีการใช้โพลีโบโอติกในการเลี้ยงสัตว์น้ำในปริมาณที่แตกต่างกันทั้งในรูปแบบที่เป็นสารละลายและผง แต่ส่วนใหญ่จะใช้ผสมอาหารที่ความเข้มข้น 0.1 – 1.0 กรัม/กิโลกรัม หรือ 10 – 100 มิลลิลิตร/กิโลกรัม

4.1 การกระตุ้นภูมิคุ้มกัน

Rodriguez-Estrada et al. (2013) รายงานว่าโพลีโบโอติกมีบทบาทสำคัญในการป้องกันและรักษาโรคของสัตว์น้ำผ่านกลไกต่าง ๆ ดังนี้ (1) ยึดติดกับเซลล์เยื่อบุลำไส้เพื่อปรับการทำงานของภูมิคุ้มกันโดยตรง (2) ถูกส่งไปยังเซลล์ภูมิคุ้มกันโดยเซลล์บริเวณเยื่อผิว และ (3) ยึดเกาะกับเซลล์เดนไดรติก (dendritic) เพื่อเริ่มต้นปฏิกิริยาภูมิคุ้มกันที่กระตุ้นการตอบสนองของภูมิคุ้มกัน ผลการควบคุมภูมิคุ้มกันของโพลีโบโอติกอาจเกิดจากเปปไทด์ต่อต้านจุลินทรีย์ โปรตีนจากแบคทีเรีย polysaccharides, LTA กรดไขมันสายสั้นหรือการรวมกันของสิ่งเหล่านี้ ส่วนประกอบเหล่านี้สามารถปรับเปลี่ยนเซลล์ภูมิคุ้มกัน เช่น เซลล์เดนไดรติกและเซลล์เม็ดเลือดขาวกระตุ้นระบบภูมิคุ้มกัน

การปรับโครงสร้างของลำไส้ เยื่อเมือกและเซลล์เยื่อบุลำไส้ ซึ่งเป็นกลไกป้องกันสำคัญต่อการติดเชื้อ การเสริมโพลีโบโอติกช่วยเพิ่มความหนาของเยื่อเมือกและความยาวของไมโครวิลลี ลดความเสี่ยงต่อการติดเชื้อ (Dawood, 2021; Zhang et al., 2020) การผสมแบคทีเรียกรดแลคติกที่ฆ่าเชื้อด้วยความร้อน (เช่น *Lactobacillus farciminis* CNCM MA27/6R และ *L. rhamnosus* CNCM MA27/6B) ในอาหารปลากะพงขาว (*Dicentrarchus labrax*) สามารถปรับโครงสร้างของลำไส้ (Frou'el et al., 2007) การให้ *Lactobacillus paracasei* (06TCa22) ที่ทำให้ไม่ทำงานด้วยความร้อนกับปลาปักเป้าญี่ปุ่น (*Takifugu rubripes*) เป็นเวลาสามวัน พบว่าสามารถลดจำนวนเซลล์ *Vibrio harveyi* ที่มีชีวิตในเลือด ม้าม ตีระและไตเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม (Biswas et al., 2013)

Table 1. Biological responses of postbiotics in aquaculture

Postbiotic Strains	Type	Preparation method	Study Subject	Dosage	Application method	Administration route and duration	Effects of Postbiotic	References
<i>Lactobacillus plantarum</i>	Dead bacteria (DB)	DB: water bath (65°C, 30 min)	Shrimp (<i>Litopenaeus vannamei</i>)	10 mL/kg	Added to diets	Diet; 15 days	Effectively improved growth performance through the improvement of digestive enzyme activities and enterocyte height	(Zheng et al., 2018)
<i>Bacillus subtilis</i> LCBS1	Heat inactivated bacteria, HIB	HIB: heated by high-pressure steam sterilization pot at 121°C for 15 min	Bullfrog (<i>Lithobates catesbeianus</i>)	100 mL/kg	Added to diets	Diet; 56 days	Improved growth performance and immune responses of bullfrogs; ameliorated SM-induced enteritis in bullfrogs	(Tao et al., 2023)
<i>L. plantarum</i> product (ImmunoLP20)	Inactivated bacteria	Heat-killed	Black sea bream (<i>Acanthopagrus schlegelii</i>)	0.1 – 0.4 g/ kg	Added to diets	Diet; 8 weeks	Positive effects on growth, feed utilization, and serum health indicators	(Sagada et al., 2021)
Yeast, <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Inactivated bacteria	80 °C for 30 min	Nile Tilapia (<i>Oreochromis niloticus</i>)	1 g/kg	Added to diets	Diet; 8 weeks	Enriched intestinal Lactococcus spp. numbers and protected the host against infection by <i>A. hydrophila</i>	(Ran et al., 2015)
SWFC (cultured supernatant mixture of <i>Cetobacterium somerae</i> and <i>Lactococcus lactis</i>)	Metabolite	Centrifuge and filter	Zebrafish (<i>Danio rerio</i>)	0.3 g/kg	Added to diets	Diet; 6 weeks	Improved host metabolic disorders and immunity	(Li et al., 2023)
<i>Bacillus cereus</i> A4	Fermentation supernatant	FS: microfiltration	Juvenile shrimp (<i>Litopenaeus vannamei</i>)	10 mL/kg	Added to diets	Diet; 42 days	Improvements in growth, intestinal morphology, and digestive function	(Li et al., 2021)
<i>Lactobacillus casei</i> K17	Fermentation supernatant, FS	FS: 3000 xg for 10 min at 4°C	Largemouth bass (<i>Micropterus salmoides</i>)	100 mL/kg	Added to diets	Diet; 69 days	Improved growth performance, gut nutrient absorption capability, and nonspecific immunity	(Wang et al., 2021a, 2021b)

โพลีโบโอติกสามารถเพิ่มการตอบสนองของภูมิคุ้มกันทั้งแบบไม่จำเพาะและแบบจำเพาะในสัตว์น้ำ หลังจากปลา กะพงดำ (*Acanthopagrus schlegelii*) ได้รับอาหารเสริมโพลีโบโอติกจาก *L. plantarum* 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เป็นเวลา 8 สัปดาห์ พบว่าโปรตีนในซีรัมและกิจกรรมไลโซไซม์มีค่าสูงกว่าปลาในกลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ (Sagada et al., 2021) การให้อาหารโพลีโบโอติก *Pediococcus pentosaceus* PP4012 อย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 12 สัปดาห์ช่วยเพิ่มการทำงานของเซลล์จับกินสิ่งแปลกปลอมในกุ้ง (*L. vannamei*) (Ballantyne et al., 2023) การให้โพลีโบโอติก *B. subtilis* (HIB) ที่ทำให้ไม่ทำงานด้วยความร้อน 1.42 – 1.66 กรัมต่อกิโลกรัม แก่ปลาสาวย (*Pangasianodon hypophthalmus*) 60 วัน ช่วยปรับปรุงการทำงานของ lysozyme และ phagocytosis รวมถึงเพิ่มการทำงานของ SOD, CAT และ glutathione peroxidase (GPx) (Shawky et al., 2023) นอกจากนี้กบอเมริกันบูลฟร็อก (*Lithobates catesbeianus*) ที่ได้กินอาหารผสมโพลีโบโอติก *Bacillus subtilis* LCBS1 ที่ทำให้ไม่ทำงานด้วยความร้อน เป็นเวลา 56 วัน ส่งผลให้ระดับคอมพลีเมนต์ในซีรัมและกิจกรรมของ AKP เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (Tao et al., 2023)

ปลาลิ้นหมา (*P. olivaceus*) วัยอ่อนที่ได้รับอาหารที่มีโพลีโบโอติกจาก *Pseudalteromonas piscicida* 35 วัน พบว่า เอนไซม์ peroxidase (POD) และกิจกรรม lysozyme ในซีรัมเพิ่มขึ้น รวมถึงการแสดงออกของ IL-10 และ TNF- α ในม้ามที่เพิ่มขึ้น และการแสดงออกของ IL-1 β ในไตเพิ่มขึ้น (Wang et al., 2022) การให้ *Bacillus* sp. ที่ทำให้ไม่ทำงานด้วยความร้อนแก่ปลาลิ้นหมา (*Paralichthys olivaceus*) สามารถกระตุ้นการทำงานของไลโซไซม์ (lysozyme) และเอนไซม์ ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเตส (superoxide dismutase) ในซีรัม รวมถึงเพิ่มการแสดงออกของปัจจัยภูมิคุ้มกัน (TNF- α , IL-6 และ IL-1 β) ในตับ ไตและเหงือก จึงช่วยเพิ่มความต้านทานต่อเชื้อ *Streptococcus iniae* (Hasan et al., 2019)

ปลากระพงปากกว้าง (*Micropterus salmoides*) ที่ได้รับโพลีโบโอติกจาก *Lactobacillus casei* K17 69 วัน ระดับ lysozyme ในซีรัมและ SOD เพิ่มขึ้น 1.5 เท่าและ 1.2 เท่าตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม (Wang et al., 2021a, 2021b) การให้โพลีโบโอติกจาก *Pseudomonas aeruginosa* strain VSG2 8 สัปดาห์แก่ปลาไน (*C. carpio*) ส่งผลให้กิจกรรมของ lysozyme กิจกรรมของ AKP และกิจกรรมของเส้นทางการเสริมทางเลือกเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (Giri et al., 2020) ผลการวิจัยเหล่านี้เน้นย้ำถึงศักยภาพของโพลีโบโอติกในฐานะสารกระตุ้นภูมิคุ้มกันที่มีประสิทธิภาพในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ซึ่งช่วยเพิ่มความต้านทานโรคและสุขภาพโดยรวมในสัตว์น้ำหลากหลายชนิด

การเสริมด้วยโพลีโบโอติกจาก *L. plantarum* 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ช่วยเพิ่มการแสดงออกของ IgM และ C3 ใน *A. schlegelii* วัยอ่อนได้ (Sagada et al., 2022) การให้โพลีโบโอติกจาก *Psychrobacter* sp. SE6 ในปลากะรัง (*Epinephelus coioides*) เป็นเวลา 60 วัน ส่งผลให้การแสดงออกของ IgM และ Epinecidin-1 เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม (Sun et al., 2014) ปลาหมอสี (*Danio rerio*) ที่ได้รับโพลีโบโอติกจาก *L. plantarum* เป็นเวลา 5 สัปดาห์ พบว่ามีศักยภาพในการกระตุ้นการตอบสนองภูมิคุ้มกันแบบ Th1/ILC1 โดยมีเปอร์เซ็นต์เซลล์ CD8 $^{+}$ ที่สูงขึ้นและการแสดงออกของ ยีน IFN- γ ที่เพิ่มขึ้น (Rawling et al., 2023)

4.2 ประสิทธิภาพการเติบโต

โพลีโบโอติกช่วยเพิ่มการดูดซึมสารอาหารและพลังงาน ปรับปรุงสัณฐานวิทยาของลำไส้และรักษาสมดุลของจุลินทรีย์ในลำไส้ (Ai et al., 2022; Dawood et al., 2020) Tao et al. (2024) สรุปกลไกที่โพลีโบโอติกส่งเสริมการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำ โดยแบ่งได้เป็น 3 กระบวนการดังนี้

4.2.1 กระตุ้นความอยากอาหารและเพิ่มปริมาณสารอาหารที่สัตว์น้ำสามารถดูดซึมไปใช้ประโยชน์ได้ ทำให้สัตว์น้ำได้รับสารอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการมากขึ้นและส่งเสริมการเจริญเติบโต

4.2.2 กระตุ้นการยึดตัวของวิลลัสในลำไส้และการขยายพื้นที่ผิวในการดูดซึม ซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซึมสารอาหาร ช่วยให้เจริญเติบโตได้ดีขึ้น การให้ *Lactobacillus plantarum* (LP20) ที่ทำให้ไม่ทำงานด้วยความร้อน แก่ปลากะพงแดง (*Pagrus major*) ช่วยเพิ่มการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการกินอาหาร (Dawood et al., 2015)

4.2.3 รักษาสมดุลของระบบนิเวศจุลินทรีย์ โดยการปรับองค์ประกอบของจุลินทรีย์ในลำไส้ ความสมดุลนี้สามารถนำไปสู่การดูดซึมสารอาหารที่เพิ่มขึ้นและการใช้สารอาหารที่เพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการกระตุ้นการเจริญเติบโตของร่างกาย การทดลองให้อาหารที่มีโพลีโอบิติกจาก *L. plantarum* เป็นเวลา 56 วัน กับปลาเกะพงดำวัยอ่อน (*A. schlegelii*) ทำให้กิจกรรมของ trypsin ในลำไส้ดีขึ้น ประสิทธิภาพการเจริญเติบโตดีขึ้น อัตราแลกเนื้อลดลงจาก 1.36 ± 0.06 เหลือ 1.10 ± 0.05 (Sagada et al., 2022) โพลีโอบิติกทำให้ประสิทธิภาพการกินอาหารเพิ่มขึ้น พบได้ในกุ้งแม่น้ำตะวันออก (*Macrobrachium nipponense*) (Wang et al., 2023a, 2023b) กุ้งขาว (*L. vannamei*) (Ballantyne et al., 2023) และปลาสาวย (*Pangasianodon hypophthalmus*) (Shawky et al., 2023)

การใช้โพลีโอบิติกจาก *L. plantarum* (L-137) ได้รับการพิสูจน์แล้วว่าสามารถเพิ่มการแสดงออกของ mRNA ของ insulin-like growth factor-I (IGF-I) ซึ่งเป็นฮอร์โมนสำคัญที่ควบคุมกระบวนการเจริญเติบโตอย่างมาก (Hassaan et al., 2021) นอกจากนี้ยังพบว่าโพลีโอบิติกเหล่านี้สามารถกระตุ้นกิจกรรมของ lipase และ protease จึงช่วยเพิ่มการใช้ไขมันและโปรตีนในอาหารซึ่งทำหน้าที่เป็นสารตั้งต้นที่ให้พลังงานสำหรับการเจริญเติบโต การทดลองให้อาหารปลิงทะเล (*Apostichopus japonicus*) เป็นเวลา 60 วัน พบว่าอาหารเสริมที่มีโพลีโอบิติกจาก *L. plantarum* 0.05 กรัมต่อกิโลกรัม ช่วยเพิ่มกิจกรรมของ protease และ amylase ส่งผลให้ค่าของน้ำหนักตัวและอัตราการเจริญเติบโตเฉพาะเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม (Yang et al., 2016) หลังจากกักขังกุ้งกินโพลีโอบิติกจาก *L. plantarum* 3 มิลลิกรัม ต่ออาหาร 300 กรัม 15 วัน พบว่ากิจกรรมของเอนไซม์ย่อยอาหาร (amylase, lipase, pepsin) ในตับอ่อนและลำไส้เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม (Zheng et al., 2018)

4.3 ความสามารถในการปรับตัวต่อสิ่งแวดล้อม

การใช้โพลีโอบิติกผสมในอาหารของสัตว์น้ำสามารถลดความเครียดที่เกิดจากสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลง เช่น ความหนาแน่นของสัตว์น้ำสูง การขาดออกซิเจนและระดับความเค็มที่ลดลง ความผันผวนของอุณหภูมิ ความเค็ม หรือการสะสมของแอมโมเนีย จึงช่วยเพิ่มความสามารถในการฟื้นตัวและการปรับตัว (Abdel-Latif et al., 2022) การให้โพลีโอบิติกจาก *L. plantarum* (HK L-137) ผสมอาหารในปลานิล สามารถลดการหลั่งคอร์ติซอล (cortisol) ทำให้บรรเทาความเครียดที่เกิดจากการสัมผัสกับแอมโมเนียมคลอไรด์ (Van Nguyen et al., 2019) การเสริมด้วยโพลีโอบิติกจาก *L. plantarum* ความเข้มข้น 1 กรัมต่อกิโลกรัม ทำให้ปลาเกะพงแดง (*P. major*) ทนต่อความเครียดออกซิเดชันและสภาพความเค็มที่ลดลง (Dawood et al., 2016a) การให้โพลีโอบิติก *Pediococcus pentosaceus* ในปลา *P. major* ทำให้กิจกรรมเปอร์ออกซิเดส (Peroxidase) สูงขึ้นและมีความทนทานต่อความเค็มต่ำเพิ่มขึ้น (Dawood et al., 2016a, 2016b) การใช้โพลีโอบิติกช่วยเพิ่มการทำงานของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระ เช่น ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเตส (SOD) และกลูตาไทโอนเปอร์ออกซิเดส (GPx) ซึ่งช่วยลดความเสียหายจากความเครียดออกซิเดชันที่เกิดจากปัจจัยแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม นอกจากนี้โพลีโอบิติกยังสามารถกระตุ้นการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับภูมิคุ้มกัน เช่น อินเตอร์ลิวคิน-1 เบตา (IL-1 β) และโปรตีนฮีตช็อก 70 (HSP70) ซึ่งช่วยเพิ่มความสามารถของปลาต่อการตอบสนองต่อความเครียดและการติดเชื้อ (Sudhakaran et al., 2022)

4.4 ความต้านทานต่อเชื้อโรค

โพลีโอบิติกช่วยฟื้นฟูการทำงานของลำไส้โดยลดการอักเสบและกระตุ้นการผลิตเปปไทด์ต้านจุลินทรีย์ ซึ่งช่วยยับยั้งเชื้อก่อโรค (Hernandez-Granados & Franco-Robles, 2020) การศึกษาในสัตว์น้ำ เช่น ปลาม้าลาย ปลาไนและกุ้ง พบว่าการเสริมโพลีโอบิติกช่วยปรับสมดุลจุลินทรีย์และเพิ่มการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับระบบภูมิคุ้มกัน (Li et al., 2023; Yu et al., 2023; Wang et al., 2023b)

การให้โพลีโอบิติกที่ได้จาก *L. plantarum* ผสมอาหารกุ้งก้ามกรามสามารถเพิ่มอัตราการรอดหลังจากการติดเชื้อ *Aeromonas hydrophila* อย่างเห็นได้ชัด (Dash et al., 2015) การให้อาหารผสมโพลีโอบิติกจาก *Clostridium butyricum* CBG01 แก่กุ้งขาวสามารถเพิ่มความต้านทานต่อการติดเชื้อ *V. parahaemolyticus* (Luo et al., 2021) กุ้งขาว

ที่ได้รับอาหารผสมโพลีโอดีจาก *Bacillus cereus* A4 ช่วยลดอัตราการตาย หลังจากการทดสอบกับเชื้อ *V. parahaemolyticus* (Li et al., 2021) นอกจากนี้ปลาชนิดที่ได้รับอาหารผสมโพลีโอดีจากยีสต์ยังมีประสิทธิภาพในการป้องกันการติดเชื้อ *A. hydrophila* (Ran et al., 2015)

5. บทสรุป ความท้าทายและโอกาส

การประยุกต์ใช้โพลีโอดีในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการส่งเสริมการเจริญเติบโต เสริมสร้างภูมิคุ้มกันและเพิ่มอัตราการรอดของสัตว์น้ำ โดยไม่ก่อให้เกิดปัญหาการดื้อยาปฏิชีวนะหรือความเสี่ยงจากการใช้ จุลินทรีย์มีชีวิต นอกจากนี้โพลีโอดียังมีบทบาทในการเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยและดูดซึมสารอาหาร รวมถึงกระตุ้นกลไก การควบคุมการเจริญเติบโตภายในลำไส้ของสัตว์น้ำ อย่างไรก็ตามการนำโพลีโอดีไปใช้ในระดับอุตสาหกรรมยังคงเผชิญกับ ข้อจำกัดที่สำคัญ ซึ่งสามารถสรุปเป็นประเด็นหลักได้ดังนี้

1) องค์ประกอบและกลไกการออกฤทธิ์

การทำความเข้าใจองค์ประกอบทางชีวภาพและกลไกการออกฤทธิ์ของโพลีโอดีในระดับโมเลกุลเป็นพื้นฐาน สำคัญในการควบคุมคุณภาพและประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ งานวิจัยควรมุ่งเน้นการคัดกรองสารออกฤทธิ์หลัก การศึกษาเชิง ฟังก์ชันของสาร และการพัฒนาวิธีวิเคราะห์ที่เฉพาะเจาะจง

2) การกำหนดระดับการใช้ที่เหมาะสม

ความหลากหลายของสายพันธุ์จุลินทรีย์ แหล่งผลิต และชนิดของสัตว์น้ำ ทำให้การกำหนดปริมาณและความถี่ในการ ใช้ยังคงเป็นเรื่องท้าทาย การศึกษาที่เปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างขนาดโดส และการวิเคราะห์ต้นทุน-ผลตอบแทนในแต่ละ ระบบการเลี้ยงจึงมีความจำเป็น

3) การศึกษาภายใต้สภาวะการเลี้ยงจริง

ข้อมูลจำนวนมากในปัจจุบันยังอยู่ในระดับห้องปฏิบัติการหรือระบบกึ่งควบคุม การศึกษาภายใต้เงื่อนไขการเลี้ยงจริง โดยเฉพาะในด้านเศรษฐศาสตร์การผลิตและผลกระทบต่อคุณภาพน้ำ จะช่วยให้การใช้โพลีโอดีมีความเป็นไปได้ในเชิง พาณิชย์มากขึ้น

4) ความปลอดภัยและการยอมรับของผู้บริโภค

แม้โพลีโอดีจะมีความปลอดภัยสูงกว่าจุลินทรีย์มีชีวิต แต่ยังคงจำเป็นต้องมีการประเมินสารตกค้าง ความเป็นพิษ เฉียบพลันและเรื้อรัง ตลอดจนผลกระทบระยะยาวต่อผู้บริโภค เพื่อรองรับการขยายการใช้ในระดับตลาด

5) การพัฒนาและการบูรณาการกับเทคโนโลยีอื่น

ควรส่งเสริมการพัฒนาสูตรโพลีโอดีที่หลากหลาย ทั้งในแง่สายพันธุ์จุลินทรีย์ วิธีการผลิต และการผสมผสานกับ สารเสริมอื่น เช่น โปรไบโอติก แร่ธาตุ หรือสารต้านอนุมูลอิสระ เพื่อศึกษาปฏิสัมพันธ์ที่อาจเสริมฤทธิ์หรือเกิดผลขัดแย้งต่อกัน

แนวโน้มในอนาคตควรเน้นการพัฒนาโพลีโอดีเฉพาะกลุ่มที่เหมาะสมกับชนิดของสัตว์น้ำ เป้าหมายของการใช้ งาน (เช่น การกระตุ้นภูมิคุ้มกัน หรือการเร่งการเจริญเติบโต) และสภาพแวดล้อมของระบบการเลี้ยง นอกจากนี้การพัฒนา เทคโนโลยีการสกัด การทำแห้ง และการห่อหุ้มที่สามารถรักษาสถียรภาพของสารออกฤทธิ์ รวมถึงการบูรณาการกับ เทคโนโลยีชีวภาพและนาโนเทคโนโลยี จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งมอบสารออกฤทธิ์อย่างตรงเป้าหมาย การวิเคราะห์ ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และผลตอบแทนจากการลงทุน ถือเป็นหัวใจสำคัญในการสร้างแรงจูงใจให้เกษตรกรและผู้ผลิต ยอมรับและนำเทคโนโลยีโพลีโอดีไปใช้จริงในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำอย่างยั่งยืน

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนการวิจัย จากสำนักวิจัยและส่งเสริมวิชาการการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ งบประมาณแผ่นดิน ปีงบประมาณ 2568 โดยการสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

7. เอกสารอ้างอิง

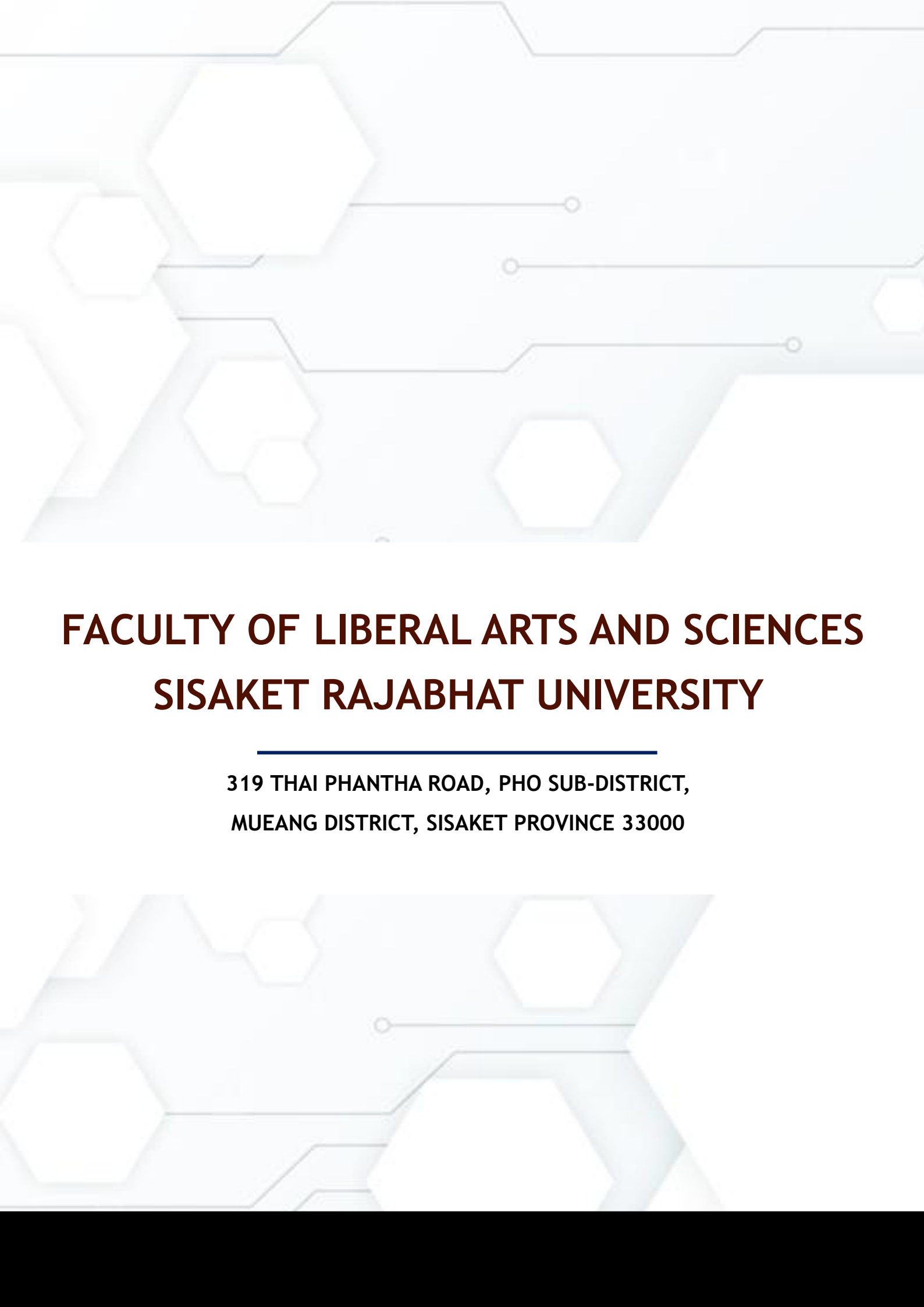
- Abdel-Latif, H.M.R., Yilmaz, E., Dawood, M.A.O., Ringø, E., Ahmadifar, E. & Yilmaz, S. (2022). Shrimp vibriosis and possible control measures using probiotics, postbiotics, prebiotics, and synbiotics: A review. *Aquaculture*, 551, 737951.
- Aguilar-Toalá, J.E., García-Varela, R., García, H.S., Mata-Haro, V., González-Córdova, A.F., Vallejo-Cordoba, B. & Hernández-Mendoza, A. (2018). Postbiotics: An evolving term within the functional foods field. *Trends in Food Science & Technology*, 75, 105-114.
- Ai, Y., Cai, X., Liu, L., Li, J., Long, H., Ren, W., Huang, A.Y., Zhang, X. & Xie, Z.Y. (2022). Effects of different dietary preparations of *Enterococcus faecalis* F7 on the growth and intestinal microbiota of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *Aquaculture Research*, 53(8), 3238-3247.
- Ang, Q. Y., Alexander, M., Newman, J. C., Tian, Y., Cai, J., Upadhyay, V., Turnbaugh, J. A., Verdin, E., Hall, K. D., Leibel, R. L., Ravussin, E., Rosenbaum, M., Patterson, A. D., & Turnbaugh, P. J. (2020). Ketogenic Diets Alter the Gut Microbiome Resulting in Decreased Intestinal Th17 Cells. *Cell*, 181(6), 1263–1275.e16.
- Assefa, A., & Abunna, F. (2018). Maintenance of Fish Health in Aquaculture: Review of Epidemiological Approaches for Prevention and Control of Infectious Disease of Fish. *Veterinary medicine international*, 2018, 5432497.
- Ballantye, R, Lee, J.W., Wang, S.T., Lin, J.S., Tseng, D.Y., Liao, Y.C., Chang, H.T., Lee, T.Y., & Liu, C.H. (2023). Dietary administration of a postbiotic, heat-killed *Pediococcus pentosaceus* PP4012 enhances growth performance, immune response and modulates intestinal microbiota of white shrimp, *Penaeus vannamei*. *Fish & Shellfish Immunology*, 139, 108882.
- Banaś, A.K., Zgłobicki, P., Kowalska, E., Bażant, A., Dziga, D., & Strzałka, W. (2020) All you need is light. Photorepair of uv-induced pyrimidine dimers. *Genes*, 4(11), 1304.
- Bariya, A. R., Rathod, N. B., Patel, A. S., Nayak, J. K. B., Ranveer, R. C., Hashem, A., Abd Allah, E. F., Ozogul, F., Jambrak, A. R., & Rocha, J. M. (2023). Recent developments in ultrasound approach for preservation of animal origin foods. *Ultrasonics sonochemistry*, 101, 106676.
- Biswas, G., Korenaga, H., Nagamine, R., Kawahara, S., Takeda, S., Kikuchi, Y., Dashnyam, B., Yoshida, T., Kono, T., & Sakai, T. (2013). Elevated cytokine responses to *Vibrio harveyi* infection in the Japanese pufferfish (*Takifugu rubripes*) treated with *Lactobacillus paracasei* spp. paracasei (06TCa22) isolated from the Mongolian dairy product. *Fish & Shellfish Immunology*, 35(3), 756-765.
- Collado, M.C., Vinderola, G., & Salminen, S. (2019). Postbiotics: facts and open questions. A position paper on the need for a consensus definition. *Beneficial microbes*, 10(7), 711–719.
- Cuevas-González, P. F., Liceaga, A. M., & Aguilar-Toalá, J. E. (2020). Postbiotics and paraprobiotics: From concepts to applications. *Food research international* (Ottawa, Ont.), 136, 109502.
- Dadi, N.C.T., Yatip, P., Krataitong, K., Unagul, P., Suetrong, S., Preedanon, S., Klayuban, A., Sangtuan, T., Sakayaroj, J., & Soowannayan, J. (2022). Culture medium from a marine endophytic fungus protects shrimp against acute hepatopancreatic necrosis disease (AHPND). *Aquaculture*, 737528.
- Dash, G., Raman, R. P., Pani Prasad, K., Makesh, M., Pradeep, M. A., & Sen, S. (2015). Evaluation of paraprobiotic applicability of *Lactobacillus plantarum* in improving the immune response and disease protection in giant freshwater prawn, *Macrobrachium rosenbergii* (de Man, 1879). *Fish & shellfish immunology*, 43(1), 167–174.

- Dawood, M. A., Koshio, S., Ishikawa, M., Yokoyama, S., El Basuini, M. F., Hossain, M. S., Nhu, T. H., Dossou, S., & Moss, A. S. (2016b). Effects of dietary supplementation of *Lactobacillus rhamnosus* or/and *Lactococcus lactis* on the growth, gut microbiota and immune responses of red sea bream, *Pagrus major*. *Fish & shellfish immunology*, 49, 275–285.
- Dawood, M.A.O. (2021) Nutritional immunity of fish intestines: important insights for sustainable aquaculture. *Reviews in Aquaculture*, 13(1), 642–663.
- Dawood, M.A.O., Koshio, S., Ishikawa, M., & Yokoyama, S. (2016a). Immune responses and stress resistance in red sea bream, *Pagrus major*, after oral administration of heat-killed *Lactobacillus plantarum* and vitamin C. *Fish & Shellfish Immunology*, 54, 266-275.
- Dawood, M.A.O., Koshio, S., Ishikawa, M., & Yokoyama, S. (2015). Interaction effects of dietary supplementation of heat-killed *Lactobacillus plantarum* and β -glucan on growth performance, digestibility and immune response of juvenile red sea bream, *Pagrus major*. *Fish & Shellfish Immunology*, 45(1), 33-42.
- Dawood, M.A.O., Magouz, F.I., Salem, M.F.I., Elbially, Z.I., & Abdel-Daim, H.A. (2020). Synergetic effects of *Lactobacillus plantarum* and β -glucan on digestive enzyme activity, intestinal morphology, growth, fatty acid, and glucose-related gene expression of genetically improved farmed Tilapia. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*, 12(2):389-399.
- Desnous, C., Guillaume, D., & Clivio, P. (2010). Spore photoproduct: a key to bacterial eternal life. *Chemical reviews*, 110(3), 1213–1232.
- Dhar, S., Kumari, H., Balasubramanian, D., & Mathee, K. (2018). Cell-wall recycling and synthesis in *Escherichia coli* and *Pseudomonas aeruginosa* - their role in the development of resistance. *Journal of medical microbiology*, 67(1), 1–21.
- Dianawati, D., Mishra, V., & Shah, N. P. (2016). Viability, Acid and Bile Tolerance of Spray Dried Probiotic Bacteria and Some Commercial Probiotic Supplement Products Kept at Room Temperature. *Journal of food science*, 81(6), M1472–M1479.
- Dittoe, D. K., Ricke, S. C., & Kiess, A. S. (2018). Organic Acids and Potential for Modifying the Avian Gastrointestinal Tract and Reducing Pathogens and Disease. *Frontiers in veterinary science*, 5, 216.
- Duan, H., Wang, L., Huangfu, M., & Li, H. (2023). The impact of microbiota-derived short-chain fatty acids on macrophage activities in disease: Mechanisms and therapeutic potentials. *Biomedicine & pharmacotherapy = Biomedecine & pharmacotherapie*, 165, 115276.
- Giri, S. S., Jun, J. W., Yun, S., Kim, H. J., Kim, S. G., Kim, S. W., Woo, K. J., Han, S. J., Oh, W. T., Kwon, J., Sukumaran, V., & Park, S. C. (2020). Effects of dietary heat-killed *Pseudomonas aeruginosa* strain VSG2 on immune functions, antioxidant efficacy, and disease resistance in *Cyprinus carpio*. *Aquaculture*, 514, 734489.
- Hasan, M. T., Jang, W. J., Lee, B. J., Kim, K. W., Hur, S. W., Lim, S. G., Bai, S. C., & Kong, I. S. (2019). Heat-killed *Bacillus* sp. SJ-10 probiotic acts as a growth and humoral innate immunity response enhancer in olive flounder (*Paralichthys olivaceus*). *Fish & shellfish immunology*, 88, 424–431.
- Hassaan, M.S., Mohammady, E.Y., Soaudy, M.R., Elashry, M.A., Moustafa, M.M.A., Wassel, M.A., El-Garhy, H.A.S., El-Haroun, E.R., & Elsaied, H.E. (2021). Synergistic effects of *Bacillus pumilus* and exogenous protease on Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) growth, gut microbes, immune response and gene expression fed plant protein diet. *Animal Feed Science and Technology*, 275, 114892.
- Hernández-Granados, M. J., & Franco-Robles, E. (2020). Postbiotics in human health: Possible new functional ingredients?. *Food research international (Ottawa, Ont.)*, 137, 109660.
- Hou, D., Li, M., Li, P., Chen, B., Huang, W., Guo, H., Cao, J., & Zhao, H. (2023). Effects of sodium butyrate on growth performance, antioxidant status, inflammatory response and resistance to hypoxic stress in juvenile largemouth bass (*Micropterus salmoides*). *Frontiers in immunology*, 14, 1265963.
- Khochamit, N., Siripornadulsil, S., Sukon, P., & Siripornadulsil, W. (2015). Antibacterial activity and genotypic-phenotypic characteristics of bacteriocin-producing *Bacillus subtilis* KKU213: potential as a probiotic strain. *Microbiological Research*, 170, 36-50.

- Li, H., Fan, S., Gao, Y., Cai, Y., Chu, Z., & Wang, L. (2021). Evaluation of modulatory properties of *Bacillus cereus* isolated from the gut of *Litopenaeus vannamei* on growth, intestinal morphology, digestive enzyme activities, immune responses and disease resistance of *Litopenaeus vannamei*. *Aquaculture Research*, 52(3), 1299-1310.
- Li, S., Yang, H., Jin, Y., Hao, Q., Liu, S., Ding, Q., Yao, Y., Yang, Y., Ran, C., Wu, C., Li, S., Cheng, K., Hu, J., Liu, H., Zhang, Z., & Zhou, Z. (2023). Dietary cultured supernatant mixture of *Cetobacterium somerae* and *Lactococcus lactis* improved liver and gut health, and gut microbiota homeostasis of zebrafish fed with high-fat diet. *Fish & Shellfish Immunology*, 142, 109139.
- Luo, K., Tian, X., Wang, B., Wei, C., Wang, L., Zhang, S., Liu, Y., Li, T., & Dong, S. (2021). Evaluation of paraprobiotic applicability of *Clostridium butyricum* CBG01 in improving the growth performance, immune responses and disease resistance in Pacific white shrimp, *Penaeus vannamei*. *Aquaculture*, 544, 737041.
- Ma, J., Piao, X., Mahfuz, S., Long, S., & Wang, J. (2021). The interaction among gut microbes, the intestinal barrier and short chain fatty acids. *Animal nutrition (Zhongguo xu mu shou yi xue hui)*, 9, 159–174.
- Mokoena, M. P., Omatola, C. A., & Olaniran, A. O. (2021). Applications of Lactic Acid Bacteria and Their Bacteriocins against Food Spoilage Microorganisms and Foodborne Pathogens. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 26(22), 7055.
- Okocha, R. C., Olatoye, I. O., & Adediji, O. B. (2018). Food safety impacts of antimicrobial use and their residues in aquaculture. *Public health reviews*, 39, 21.
- Prachachat. (2023). Thailand Breaks 10-Year Record for Fishery Exports, Earning 240 Billion Baht in Revenue [Online]. Retrieved May 31, 2025, from: <https://www.prachachat.net/economy/news-1743956>. (in Thai)
- Rad, A.H., Aghebati Maleki, L., Samadi Kafil, H., Fathi Zavoshti, H., & Abbasi, A. (2020). Postbiotics as novel health-promoting ingredients in functional foods. *Health promotion perspectives*, 10(1), 3–4.
- Raeiszadeh, M. & Taghipour, F. (2021). Inactivation of microorganisms by newly emerged microplasma UV lamps. *Chemical Engineering Journal*, 413, 127490.
- Ran, C., Huang, L., Liu, Z., Xu, L., Yang, Y., Tacon, P., Auclair, E., & Zhou, Z. (2015). A Comparison of the Beneficial Effects of Live and Heat-Inactivated Baker's Yeast on Nile Tilapia: Suggestions on the Role and Function of the Secretory Metabolites Released from the Yeast. *PloS one*, 10(12), e0145448.
- Rawling, M., Schiavone, M., Mugnier, A., Leclercq, E., Merrifield, D., Foey, A., & Apper, E. (2023). Modulation of Zebrafish (*Danio rerio*) Intestinal Mucosal Barrier Function Fed Different Postbiotics and a Probiotic from *Lactobacilli*. *Microorganisms*, 11(12), 2900.
- Ringø, E., Van Doan, H., Lee, S. H., Soltani, M., Hoseinifar, S. H., Harikrishnan, R., & Song, S. K. (2020). Probiotics, lactic acid bacteria and bacilli: interesting supplementation for aquaculture. *Journal of applied microbiology*, 129(1), 116–136.
- Rodriguez-Estrada, U., Satoh, S., Haga, S., Fushimi, H., Sweetman, J. (2013). Effects of Inactivated *Enterococcus faecalis* and Mannan Oligosaccharide and Their Combination on Growth, Immunity, and Disease Protection in Rainbow Trout. *North American Journal of Aquaculture*, 75(3), 416–428.
- Sagada, G., Gray, N., Wang, L., Xu, B., Zheng, L., Zhong, Z., Ullah, S., Tegomo, A.F., & Shao, O. (2021). Effect of dietary inactivated *Lactobacillus plantarum* on growth performance, antioxidative capacity, and intestinal integrity of black sea bream (*Acanthopagrus schlegelii*) fingerlings. *Aquaculture*, 535, 736370.
- Sagada, G., Wang, L., Xu, B., Tegomo, F.A., Chen, K., Zheng, L., Sun, Y., Liu, Y., Yang, Y., Ullah, S., Shao, Q. (2022). Synergistic Effect of Dietary Inactivated *Lactobacillus plantarum* and Berberine Supplementation on Growth Performance, Antioxidant Capacity, and Immune Function of Juvenile Black Sea Bream (*Acanthopagrus schlegelii*). *Aquaculture Nutrition*, 2022, 053724.
- Salminen, S., Collado, M. C., Endo, A., Hill, C., Lebeer, S., Quigley, E. M. M., Sanders, M. E., Shamir, R., Swann, J. R., Szajewska, H., & Vinderola, G. (2021). The International Scientific Association of Probiotics and Prebiotics (ISAPP) consensus statement on the definition and scope of postbiotics. *Nature reviews. Gastroenterology & hepatology*, 18(9), 649–667.

- Shawky, A. Abd El-Razek, I. El-Halawany, R. & Zaineldin, A. (2023). Dietary effect of heat-inactivated *Bacillus subtilis* on the growth performance, blood biochemistry, immunity, and antioxidative response of striped catfish (*Pangasianodon hypophthalmus*). *Aquaculture*, 575, 739751.
- Sheppard, D. C., & Howell, P. L. (2016). Biofilm Exopolysaccharides of Pathogenic Fungi: Lessons from Bacteria. *The Journal of biological chemistry*, 291(24), 12529–12537.
- Singh, H., Bhardwaj, S.K., Khatri, M., Kim, K.H., & Bhardwaj, N. (2021). UVC radiation for food safety: An emerging technology for the microbial disinfection of food products. *Chemical Engineering Journal*, 417, 128084.
- Sudhakaran, G., Guru, A, Muthu, H.D., & Murugan, R. (2022). Molecular properties of postbiotics and their role in controlling aquaculture diseases. *Aquaculture Research*, 53(9), 1 - 17.
- Sun, Y.Z., Xia, H.Q., Yang, H.L., Wang, Y.L., & Zou, W.C. (2014). TLR2 signaling may play a key role in the probiotic modulation of intestinal microbiota in grouper *Epinephelus coioides*. *Aquaculture*, 430, 50-56.
- Tao, B., Zhang, C., Li, X., Li, X., Lu, K., Song, K., & Wang, L. (2023). Postbiotics of *Bacillus subtilis* LCBS1 have beneficial effects on bullfrogs (*Lithobates catesbeianus*). *Aquaculture*, 574, 739699.
- Tao, L.T., Lu H., Xiong J., Zhang L., Sun W.W., & Shan X.F. (2024). The application and potential of postbiotics as sustainable feed additives in aquaculture, *Aquaculture*, 592, 741237.
- Teame, T., Wang, A, Xie, M., Zhang, Z., Yang, Y, Ding, Q., Gao, C., Olsen, R.E., Ran, C., & Zhou Z. (2020). Paraprobiotics and Postbiotics of Probiotic Lactobacilli, Their Positive Effects on the Host and Action Mechanisms: A Review. *Frontiers in Nutrition*, 7, 570344.
- Tsilingiri, K., & Rescigno, M. (2013). Postbiotics: what else?. *Beneficial microbes*, 4(1), 101–107.
- Van Nguyen, N., Onoda, S., Van Khanh, T., Duy Hai, P., Trung, N.T., Hoang, L., Koshio, S. (2019). Evaluation of dietary Heat-killed *Lactobacillus plantarum* strain L-137 supplementation on growth performance, immunity and stress resistance of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture*, 498, 371-379.
- Wang, A., Ran, C., Wang, Y., Zhang, Z., Ding, Q., Yang, Y., Olsen, R. E., Ringø, E., Bindelle, J., & Zhou, Z. (2019a). Use of probiotics in aquaculture of China-a review of the past decade. *Fish & shellfish immunology*, 86, 734–755.
- Wang, B., Liu, Y., Luo, K., Zhang, S., Wei, C., Wang, L., Qiu, Y, & Tian, X. (2023a). ‘Biotic’ potential of the red yeast *Rhodotorula mucilaginosa* strain JM-01 on the growth, shell pigmentation, and immune defense attributes of the shrimp, *Penaeus vannamei*. *Aquaculture*, 572, 739543.
- Wang, F., Ghonimy, A., Wang, X., Zhang, Y., Zhu, N. (2022). Heat-killed *Pseudoalteromonas piscicida* 2515 decreased bacterial dose and improved immune resistance against *Vibrio anguillarum* in juvenile olive flounder (*Paralichthys olivaceus*). *Aquaculture Research*, 53(13), 4724-4739.
- Wang, J., Li, S., Jian, Y., Song, J., Zheng, J., Zhou, D., Kong, Y., Limbu, S.M., Ye, J., & Ding, Z. (2023b). Dietary postbiotics supplementation improves growth, survival rate, antioxidant capacity, non-specific immunity and gut health of juvenile oriental river prawn (*Macrobrachium nipponense*). *Aquaculture Reports*, 33, 101771.
- Wang, J., Zhu, Z., Li, R., Wang, X., Leng, X., & Chen, L. (2021a). Impact of supplementary *Lactobacillus casei* K17 on growth and gut health of largemouth bass *Micropterus salmoides*. *Aquaculture Reports*, 20, 100734.
- Wang, J., Feng, J., Liu, S., Cai, Z., Song, D., Yang, L., Nie, G. (2021 b). The probiotic properties of different preparations using *Lactococcus lactis* Z-2 on intestinal tract, blood and hepatopancreas in *Cyprinus carpio*. *Aquaculture*, 543, 736911.
- Wang, K., Cao, G., Zhang, H., Li, Q., & Yang, C., (2019b). Effects of *Clostridium butyricum* and *Enterococcus faecalis* on growth performance, immune function, intestinal morphology, volatile fatty acids, and intestinal flora in a piglet model. *Food & function*, 10(12), 7844–7854.
- Xiao, R., Liu, K., Bai, L., Minakata, D., Seo, Y., Göktas, R.K, Dionysiou, D.D., Tang, C.J., Wei, Z., & Spinney, R. (2019). Inactivation of pathogenic microorganisms by sulfate radical: Present and future. *Chemical Engineering Journal*, 371, 222-232.

- Yang, G., Jiang, A., Cai, H., You, F., Wu, S., Zhang, Y., Zhang, X., Shen, Y., Chang, X., Huc, W., Li, K., & Meng, X. (2023). Supplementation with *Akkermansia muciniphila* improved glucose metabolism disorder in common carp (*Cyprinus carpio* L.). *Aquaculture*, 572, 739465.
- Yang, H., Han, Y., Ren, T., Jiang, Z., Wang, F., & Zhang, Y. (2016). Effects of dietary heat-killed *Lactobacillus plantarum* L-137 (HK L-137) on the growth performance, digestive enzymes and selected non-specific immune responses in sea cucumber, *Apostichopus japonicus* Selenka. *Aquaculture Research*, 47(9), 2814-2824.
- Yu, Z., Hao, Q., Liu, S.B., Zhang, Q.S., Chen, X.Y., Li, S.H., Ran, C., Yang, Y.L., Teame, T., Zhang, Z., & Zhou, Z.G. (2023). The positive effects of postbiotic (SWF concentration®) supplemented diet on skin mucus, liver, gut health, the structure and function of gut microbiota of common carp (*Cyprinus carpio*) fed with high-fat diet. *Fish & Shellfish Immunology*, 135, 108681.
- Zheng, X., Duan, Y., Dong, H., & Zhang, J. (2018). Effects of Dietary *Lactobacillus plantarum* on Growth Performance, Digestive Enzymes and Gut Morphology of *Litopenaeus vannamei*. *Probiotics and antimicrobial proteins*, 10(3), 504–510.
- Zimina, M., Babich, O., Prosekov, A., Sukhikh, S., Ivanova, S., Shevchenko, M., & Noskova, S. (2020). Overview of Global Trends in Classification, Methods of Preparation and Application of Bacteriocins. *Antibiotics*, 9(9), 553.



FACULTY OF LIBERAL ARTS AND SCIENCES SISAKET RAJABHAT UNIVERSITY

**319 THAI PHANTHA ROAD, PHO SUB-DISTRICT,
MUEANG DISTRICT, SISAKET PROVINCE 33000**