วารสารวิจัยและพัฒนา
วไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์
สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

VRU Research and Development Journal Science and Technology
ISSN 3027-7353 (Online)
ปีที่ 20 ฉบับที่ 2 (เดือนพฤษภาคม - เดือนสิงหาคม 2568)

วารสารวิจัยและพัฒนา วไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ ISSN: 3027-7353 (Online)
สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปีที่ 20 ฉบับที่ 2 (เดือนพฤษภาคม– สิงหาคม 2568)

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเป็นสื่อกลางในการเผยแพร่ผลงานบทความวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ได้แก่ อาหาร วิทยาศาสตร์การแพทย์และสุขภาพ วิทยาศาสตร์ธรรมชาติ เกษตรศาสตร์ วิทยาศาสตร์ประยุกต์ วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม วิศวกรรมศาสตร์สาขาอื่นๆ และเทคโนโลยีสารสนเทศ สู่นักวิจัย นักวิชาการและผู้สนใจทั่วไป
2. เพื่อเผยแพร่ผลงานบทความวิจัย เพื่อการพัฒนาพื้นที่ในระดับจังหวัด กลุ่มจังหวัด ตำบล หมู่บ้าน หรือชุมชน แก่นักวิจัย นักวิชาการและบุคคลทั่วไป ได้เสนองานผลงานวิจัยสู่สาธารณะ
3. เพื่อส่งเสริมความร่วมมือในการแลกเปลี่ยนความคิดเห็น ความรู้ทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ได้แก่ อาหาร วิทยาศาสตร์การแพทย์และสุขภาพ วิทยาศาสตร์ธรรมชาติ เกษตรศาสตร์ วิทยาศาสตร์ประยุกต์ วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม วิศวกรรมศาสตร์สาขาอื่นๆ และเทคโนโลยีสารสนเทศ รวมไปถึงประสบการณ์ในการวิจัยระหว่างสถาบัน

เจ้าของ
สถาบันวิจัยและพัฒนา
มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์
ในพระบรมราชูปถัมภ์

กำหนดออกเผยแพร่
ปีละ 3 ฉบับ
ฉบับที่ 1 (มกราคม – เมษายน)
ฉบับที่ 2 (พฤษภาคม – สิงหาคม)
ฉบับที่ 3 (กันยายน – ธันวาคม)

ติดต่อสอบถามรายละเอียดได้ที่
สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์
เลขที่ 1 หมู่ 20 ถนนพหลโยธิน กม.48 ปณจ.ประตูน้ำพระอินทร์
ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี รหัสไปรษณีย์ 13180
โทรศัพท์ 0 2909 3036
E-mail: rdi_journalsci@vru.ac.th
Website: https://so06.tci-thaijo.org/index.php/vrurdistjournal/

วารสารวิจัยและพัฒนา วไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์
สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
VRU Research and Development Journal
Science and Technology

บทบรรณาธิการ

วารสารวิจัยและพัฒนา วไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จัดทำขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นสื่อกลางในการเผยแพร่ผลงานบทความวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สู่นักวิจัยและผู้สนใจทั่วไป และเพื่อส่งเสริมความร่วมมือในการแลกเปลี่ยนความคิดเห็น ความรู้ทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และประสบการณ์ในการวิจัยระหว่างสถาบัน ซึ่งได้รับการประเมินคุณภาพวารสารวิชาการจากศูนย์อ้างอิงดัชนีวารสารไทย (TCI) โดยถูกจัดให้เป็น วารสารกลุ่มที่ 1 สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มีกำหนดออกเผยแพร่ ปีละ 3 ฉบับ คือ ฉบับที่ 1 (เดือนมกราคม – เดือนเมษายน) ฉบับที่ 2 (เดือนพฤษภาคม – เดือนสิงหาคม) ฉบับที่ 3 (เดือนกันยายน – เดือนธันวาคม) สำหรับนักวิจัยที่มีความประสงค์จะส่งต้นฉบับเพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารวิจัยและพัฒนาฯ สามารถส่งบทความวิจัยดังกล่าวมายังกองบรรณาธิการได้โดยตรง ทั้งนี้บทความวิจัยที่เสนอขอตีพิมพ์จะต้องไม่เคยหรือได้อยู่ในระหว่างขอเสนอลงตีพิมพ์ในวารสารฉบับอื่นมาก่อน ซึ่งบทความวิจัยดังกล่าวจะต้องได้รับการอ่านและประเมินคุณภาพพร้อมได้รับความเห็นชอบให้ตีพิมพ์เผยแพร่จากผู้ทรงคุณวุฒิ (Peer Review) ในสาขาวิชานั้น ๆ ที่มาจากหลากหลายสถาบัน ของวารสารวิจัยและพัฒนาฯ จำนวน 3 ท่านก่อนลงตีพิมพ์ โดยผู้ทรงคุณวุฒิไม่ทราบชื่อผู้นิพนธ์ และผู้นิพนธ์ไม่ทราบชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ (Double-blinded Review) บทความวิจัยที่ได้รับการพิจารณาตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิจัยและพัฒนาฯ ถือเป็นกรรมสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ ห้ามนำข้อความทั้งหมดหรือบางส่วนไปพิมพ์ซ้ำ เว้นแต่จะได้รับอนุญาตจากมหาวิทยาลัยเป็นลายลักษณ์อักษรหรือมีการอ้างอิงอย่างถูกต้องชัดเจน โดยเนื้อหาต้นฉบับที่ปรากฏในวารสารวิจัยและพัฒนาฯ เป็นความรับผิดชอบของผู้นิพนธ์บทความวิจัยเอง ทั้งนี้ไม่รวมความผิดพลาดอันเกิดจากเทคนิคการพิมพ์

ปัจจุบันวารสารวิจัยและพัฒนาฯ ปีที่ 20 ฉบับที่ 2 เดือนพฤษภาคม – เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2568 ฉบับนี้ ได้รวบรวมบทความวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จำนวน 20 เรื่อง เผยแพร่ผ่าน 2 ช่องทาง ได้แก่ เว็บไซต์ http://rd.vru.ac.th และเว็บไซต์ https://so06.tci-thaijo.org/index.php/vrurdistjournal/

สุดท้ายนี้ ทางกองบรรณาธิการ ขอขอบพระคุณทุกท่านที่ให้การสนับสนุนและส่งผลงานบทความวิจัยเข้าร่วมลงตีพิมพ์ในวารสารวิจัยและพัฒนาฯ อย่างดีตลอดมา

อาจารย์ ดร.ศิริวรรณ พลเศษ
บรรณาธิการ วารสารวิจัยและพัฒนา วไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์
สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

สารบัญ

สารบัญ (ต่อ)

ผลของการใช้โปรตีนสกัดจากถั่วลันเตา ถั่วแระ ถั่วปากอ้าต่อคุณลักษณะทางกายภาพและคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ไส้กรอกจากขนุนอ่อน

พิมชนก รุ่งไหรัญ[1] ปาริสุทธิ์ เฉลิมชัยวัฒน์[2] สุจิตตา เรืองรัศมี[3*]

Received : February 21,2025
Revised : May 21, 2025
Accepted : May 31, 2025

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและประเมินคุณลักษณะทางกายภาพ เคมี และคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อนที่เสริมโปรตีนไอโซเลต (Protein Isolate) ที่สกัดจากถั่วลันเตา (Green Pea Protein Isolate: GPPI) ถั่วแระ (Pigeon Pea Protein Isolate: PPI) และถั่วปากอ้า (Fava Bean Protein Isolate: FBPI) โดยเน้นการปรับปรุงเนื้อสัมผัสและคุณค่าทางโภชนาการให้ใกล้เคียงกับไส้กรอกเนื้อสัตว์ จากการทดลองพบว่า ขนุนอ่อนมีศักยภาพในการต้านอนุมูลอิสระสูงเทียบเท่ากับกรดแอสคอร์บิก 193.56 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม และมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิก 3.76 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งแสดงถึงคุณสมบัติทางโภชนาการที่ดี ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพพบว่า ไส้กรอกที่เสริมโปรตีนจากถั่วแระมีค่าความสว่าง (L^*) สูงสุด 53.11 และมีค่าความแข็ง (Hardness) และความเหนียว (Chewiness) ที่เหมาะสม ส่วนไส้กรอกแพลนต์เบสที่เสริมโปรตีนจากถั่วปากอ้ามีความชื้นสูงสุด ($p<0.05$) ร้อยละ 69.02 และมีเนื้อสัมผัสที่แน่นและยืดหยุ่นดี ในขณะที่ไส้กรอกแพลนต์เบสที่เสริมโปรตีนจากถั่วลันเตามีความชื้นและโปรตีนปานกลาง แต่มีเนื้อสัมผัสที่เบาและเคี้ยวง่ายกว่า จากการทดสอบการยอมรับของผู้บริโภค พบว่าไส้กรอกแพลนต์เบสที่เสริมโปรตีนจากถั่วลันเตาได้รับคะแนนความชอบโดยรวมสูงสุดในด้านรสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมไม่แตกต่างจากสูตรควบคุม ($p\geq0.05$) ในขณะที่ไส้กรอกแพลนต์เบสที่เสริมโปรตีนจากถั่วปากอ้า ได้รับคะแนนสูงในด้านกลิ่น ($p<0.05$) แต่อาจต้องปรับปรุงด้านลักษณะปรากฏและสี สำหรับไส้กรอกแพลนต์เบสที่ผลิตจากโปรตีนถั่วแระมีค่าคะแนนการยอมรับทางด้านประสาทสัมผัสอยู่ในระดับพอใจเล็กน้อย ดังนั้นโปรตีนสกัดจากถั่วลันเตามีศักยภาพสูงในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อน เนื่องจากให้เนื้อสัมผัสที่เหมาะสมและมีคุณค่าทางโภชนาการสูง การศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการใช้โปรตีนจากพืชเพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารทางเลือกที่มีคุณภาพและเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค

คำสำคัญ: ขนุนอ่อน โปรตีนไอโซเลต สารต้านอนุมูลอิสระ ไส้กรอกแพลนต์เบส

[1] *นิสิตหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาคหกรรมศาสตร์ คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ อีเมล: pimchanok.rung@ku.th*
[2] *รองศาสตราจารย์ ดร. ภาควิชาคหกรรมศาสตร์ คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ อีเมล: fagrpsch@ku.ac.th*
[3] *ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภาควิชาคหกรรมศาสตร์ คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ อีเมล: agrstrm@ku.ac.th*
** ผู้นิพนธ์หลัก อีเมล: agrstrm@ku.ac.th*

EFFECTS OF GREEN PEA, PIGEON BEAN, AND FAVA BEAN PROTEIN ISOLATES ON THE PHYSICAL CHARACTERISTICS AND NUTRITIONAL VALUE OF JACKFRUIT SAUSAGE PRODUCTS

Pimchanok Runghairun[1] Parisut Chalermchaiwat[2] Sujitta Raungrusmee[3*]

Abstract

This study was aimed to develop and evaluate the physical and chemical properties as well as nutritional value of plant-based sausage products made from young jackfruit, supplemented with protein isolates extracted from green peas (Green Pea Protein Isolate: GPPI), and pigeon peas (Pigeon Pea Protein Isolate: PPI), and fava beans (Fava Bean Protein Isolate: FBPI). The primary focus was on improving texture and nutritional value to be similar to meat sausages. The experimental results were indicated that young jackfruit exhibits high antioxidant potential, comparable to 193.56 milligram of ascorbic acid per 100 grams and contains a total phenolic content of 3.76 milligram per gram/gram, highlighting its nutritional benefits. The analysis of physical properties were revealed that plant-based sausages supplemented with pigeon pea protein exhibited the highest lightness (L^*) value of 53.11 and had appropriate hardness and chewiness. The plant-based sausages supplemented with fava bean protein had the highest moisture content ($p<0.05$) at 69.02%, with a firm and elastic texture. Meanwhile, the plant-based sausages supplemented with green pea protein demonstrated moderate moisture and protein content but had a lighter and more easily chewable texture. Consumer acceptance testing was indicated that the plant-based sausages supplemented with green pea protein received the highest overall acceptability scores for taste, texture, and overall preference, with no significant difference from the control formulation ($p\geq0.05$). In contrast, the plant-based sausages with fava bean protein supplementation were highly scored for aroma ($p<0.05$) but requiring improvements in appearance and color. The plant-based sausages supplemented with pigeon pea protein isolated received sensory acceptance scores at a slightly satisfactory level. Therefore, green pea protein isolate showed strong potential for the development of plant-based sausages that were made from young jackfruit, as it provided an optimal texture and high nutritional value. The current study has been highlighted the feasibility of utilizing plant-based proteins in the development of high-quality, consumer-accepted alternative food products.

Keywords: Young jackfruit, Protein isolate, Antioxidant, Plant-based sausage

---

[1] *Student, Master of Science Program in Home Economics, Kasetsart University, e-mail: pimchanok.rung@ku.th*

[2] *Associate Professor, Department of Home Economics, Kasetsart University, e-mail: fagrpsch@ku.ac.th*

[3] *Assistant Professor, Department of Home Economics, Kasetsart University, e-mail: agrstrm@ku.ac.th*

** Corresponding author, e-mail: agrstrm@ku.ac.th*

บทนำ

ปัจจุบันความต้องการอาหารทางเลือกที่ไม่ใช่เนื้อสัตว์เพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยเฉพาะอุตสาหกรรมอาหารทางเลือกจากพืชหรืออาหารแพลนต์เบส (Plant-based food) ซึ่งคาดว่าจะเติบโตในอัตราสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยมีมูลค่าตลาดทั่วโลกประมาณ 52.42 ล้านดอลลาร์สหรัฐในปีคริสต์ศักราช 2025 และคาดว่าตลาดจะเติบโตอีกร้อยละ 7.45 ต่อปี (Statista, 2025) ซึ่งส่งผลให้เกิดการค้นหาผลิตภัณฑ์ทางเลือกที่ยั่งยืน มีคุณค่าทางโภชนาการ และน่ารับประทานมากขึ้น (Boukid, 2021; Baune et al., 2022) เนื่องจากผู้บริโภคเริ่มตระหนักถึงผลกระทบของปศุสัตว์ต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม และต้องการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผลิตภาคปศุสัตว์มีสัดส่วนถึง 1 ใน 4 ของปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปล่อยออกมา (Menegat et al., 2022) นอกจากนี้ไส้กรอกแบบดั้งเดิมที่ทำจากเนื้อแดงมักมีความเสี่ยงต่อสุขภาพ เนื่องจากมีปริมาณไขมันอิ่มตัวและโซเดียมสูง ซึ่งเกี่ยวข้องกับโรคหัวใจและโรคเรื้อรังอื่น ๆ องค์การวิจัยมะเร็งนานาชาติได้จัดให้เนื้อแดงนั้นเป็นอาหารที่อาจก่อให้เกิดมะเร็งในมนุษย์ โดยเฉพาะมะเร็งลำไส้ใหญ่ถึงร้อยละ 18 หากบริโภคเนื้อแดงแปรรูปเพียง 50 กรัมต่อวัน (Boada et al., 2016) ด้วยเหตุนี้ ไส้กรอกจากพืชหรือไส้กรอกแพลนต์เบส (Plant-based sausage) จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ โดยมีเป้าหมายที่จะเลียนแบบเนื้อสัมผัส รสชาติ และคุณค่าทางโภชนาการของเนื้อสัตว์ พร้อมลดความเสี่ยงด้านสุขภาพและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Ettinger et al., 2022) โดยในปัจจุบันมีการเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการด้วยโปรตีนไอโซเลตจากพืช (Plant protein isolates) เนื่องด้วยโปรตีนไอโซเลตจากพืชมีความสามารถในการสร้างเจล การอุ้มน้ำ และการเกิดอิมัลชันที่แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลต่อเนื้อสัมผัสและคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์อาหาร (Ma et al., 2022)

ขนุนอ่อน (*Artocarpus heterophyllus*) กำลังได้รับความนิยมในฐานะวัตถุดิบจากพืชที่สามารถใช้ทดแทนเนื้อสัตว์ได้ เนื่องจากมีเนื้อสัมผัสเป็นเส้นใยคล้ายเนื้อสัตว์เมื่อนำไปปรุงสุก (Khan et al, 2023) นอกจากนี้ ขนุนอ่อนยังมีเส้นใยอาหารสูง ไขมันต่ำ และมีเนื้อสัมผัสคล้ายเนื้อสัตว์โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการผลิตมาก อย่างไรก็ตาม ขนุนอ่อนมีโปรตีนในปริมาณต่ำ ซึ่งอาจไม่เพียงพอต่อความต้องการของผู้บริโภคที่มองหาอาหารจากพืชที่มีโปรตีนสูง ด้วยเหตุนี้ โปรตีนสกัดจากถั่วแบบเข้มข้นซึ่งเป็นแหล่งโปรตีนจากพืชที่มีโปรตีนสูง จึงถูกนำมาใช้ร่วมกับขนุนอ่อนเพื่อให้ได้คุณค่าทางโภชนาการที่สมดุลและมีคุณสมบัติทางประสาทสัมผัสที่ดีของ Wijegunawardhana et al. (2021) มีการศึกษาที่ชี้ให้เห็นว่าเจลอิมัลชันที่ทำจากวัตถุดิบจากพืช เช่น โปรตีนถั่วลันเตา สามารถทดแทนไขมันสัตว์และคอลลาเจนในสูตรไส้กรอกได้อย่างประสบความสำเร็จ ซึ่งช่วยเพิ่มเนื้อสัมผัสและความสามารถในการกักเก็บน้ำ (Corrêa et al., 2023) อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ผ่านมาเน้นการใช้โปรตีนพืชเพียงชนิดเดียว หรือใช้กระบวนการแปรรูปที่ใช้ความร้อนสูง เช่น การอัดรีด (Extrusion) ในการผลิตไส้กรอกจากพืช

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ได้เลือกใช้ โปรตีนไอโซเลตจากถั่ว 3 ชนิดที่สามารถเพาะปลูกได้ในประเทศไทยที่มีมีคุณสมบัติที่ดีในการช่วยการผลิตไส้กรอกแพลนต์เบสและสามารถเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการให้แก่ผลิตภัณฑ์ได้ โดยถั่วทั้งสามชนิดได้แก่ ถั่วลันเตา (GPPI; Green Pea Protein Isolate) ถั่วแระ (PPI ; Pigeon Pea Protein Isolate) และ ถั่วปากอ้า (FBPI; Fava Bean Protein Isolate) ร่วมกับขนุนอ่อน ซึ่งเป็นวัตถุดิบพื้นถิ่นที่มีเส้นใย

และความชุ่มชื้นสูง เพื่อพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ไส้กรอกแพลนต์เบสที่มีทั้งคุณภาพด้านโภชนาการและความยอมรับทางประสาทสัมผัส

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระในขนุนอ่อน
2. เพื่อศึกษาสูตรที่เหมาะสมในการทำไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อน
3. เพื่อศึกษาผลของการใช้โปรตีนสกัดจากถั่วลันเตา ถั่วแระ ถั่วปากอ้าต่อคุณลักษณะทางกายภาพ และ คุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อน

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมตัวอย่างขนุนอ่อน

การเตรียมตัวอย่างขนุนอ่อน ดัดแปลงจากวิธีของ Wijegunawardhana et al. (2021) โดยนำขนุนอ่อนที่ได้มาจากตลาดสี่มุมเมืองมาปอกเปลือกแล้วล้างน้ำไหลผ่าน สะเด็ดน้ำ หั่นเป็นชิ้นแยกเมล็ดออก จากนั้นต้มในน้ำร้อน 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที กรองเอาน้ำออก แช่ในอ่างน้ำแข็งอุณหภูมิ 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นสะเด็ดน้ำ บรรจุในถุงอะลูมิเนียมแบบสุญญากาศและนำไปแช่ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสเพื่อเก็บไว้ใช้ในขั้นตอนต่อไป

2. การวิเคราะห์สมบัติการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH (2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl)

นำขนุนอ่อนไปอบแห้งด้วยเครื่องอบลมร้อน (Binder รุ่น FD 115, Germany) ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงหรือจนกว่าจะแห้ง แล้วบดให้ละเอียด ชั่งตัวอย่างขนุนอ่อนอบแห้งป่นที่ 2 กรัม แล้วเติมเมทานอลปริมาตร 20 มิลลิลิตร แล้ววางบนเครื่องกวนสารละลาย (IKA รุ่น C-MAG HS7, Germany) ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที จึงนำสารละลายตัวอย่างไปเข้าเครื่องปั่นเหวี่ยงสาร (Beckman Coulter รุ่น Allegra X-15R Centrifuge, USA) ที่ 3,300 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 10 นาทีที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เทส่วนใสลงในขวดรูปชมพู่ที่กรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 สกัดซ้ำด้วยขั้นตอนเดิมอีกครั้ง ปรับปริมาตรสุดท้ายให้ได้ 50 มิลลิลิตรด้วยเมทานอล จากนั้นศึกษาสมบัติการการต้านอนุมูลอิสระ DPPH โดยดัดแปลงจากวิริยา พรมกอง และสุทิน พรหมโชติ (2555) โดยใช้กรดแอสคอร์บิก (Ascorbic acid) เป็นสารมาตรฐานที่ความเข้มข้น 0.0, 0.5, 1.2, 2.4, 4.8 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร นำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ 515 นาโนเมตร จดบันทึกเพื่อสร้างกราฟ-มาตรฐาน แล้วนำสารตัวอย่างที่เป็นสารสกัดจากขนุนอ่อนมา 4 มิลลิลิตร เติม DPPH ที่ความเข้มข้น 0.2 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 2 มิลลิลิตร แล้วนำไปใส่เครื่องเขย่าสาร (Labnet รุ่น Vortex mixer, USA) จากนั้นเก็บในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที จึงนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ 515 นาโนเมตรด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (GE รุ่น GeneQuant 1300 Spectrophotometer, UK) แล้วคำนวณหาความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ รายงานผลเป็นค่าความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดต่อมิลลิกรัมสมบูรณ์ของกรดแอสคอร์บิกโดยเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของกรดแอสคอร์บิก

3. การวิเคราะห์ปริมาณฟีนอลิกรวมด้วยวิธี Folin-Ciocalteau reagent

การตรวจวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก (Total phenolic compounds) ด้วยวิธี Folin-Ciocalteau method ดัดแปลงจาก ธนากรณ์ ดำสุด และคณะ (2560) โดยการปิเปตสารสกัดจากขนุนอ่อนมา 0.5 มิลลิลิตรแล้วเติมสารละลาย Folin-Ciocalteau reagent ปริมาตร 2.5 มิลลิลิตร จึงนำไปใส่เครื่องเขย่าสารตั้งทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 3 นาที เติมสารละลายความเข้มข้นร้อยละ 7.5 ของ Na_2CO_3 ปริมาตร 2 มิลลิลิตร แล้วนำไปใส่เครื่องเขย่าสารอีกครั้ง จากนั้นเก็บในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที จึงนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 760 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ คำนวณปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดจากกราฟมาตรฐานกรดแกลลิกในหน่วยมิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลิค (GAE) ต่อกรัม

4. การผลิตโปรตีนไอโซเลตจากถั่วทั้ง 3 ชนิด

การผลิตโปรตีนไอโซเลตดัดแปลงจาก Ettoumi et al., 2015 โดยการนำถั่วลันเตาจากห้างวิลล่ามาร์เกต กรุงเทพฯ ถั่วปากอ้าจากฟาร์มในเชียงใหม่ และถั่วแระจากตลาดสี่มุมเมือง ปทุมธานี มาล้างทำความสะอาด พักให้แห้ง แล้วอบให้ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ด้วยเครื่องอบลมร้อน จากนั้นบดด้วยเครื่องบดละเอียด (Panasonic รุ่น MX-AC300, Thailand) ร่อนโดยใช้ตะแกรงขนาด 60 เมซ พอได้แป้งถั่วแล้วนำไปเก็บใส่ถุงสุญญากาศที่ (-4) องศาเซลเซียสเพื่อนำไปใช้ต่อในขั้นตอนถัดไป ซึ่งวิธีนี้ดัดแปลงจาก (Barac et al., 2015) จากนั้นนำแป้งถั่วผสมกับน้ำกลั่นที่อัตราส่วน 1:15 ปรับ pH ให้เป็น 9.0 โดยใช้โซเดียม-ไฮดรอกไซด์ 1 โมลาร์ โดยน้ำหนักต่อปริมาตร (%weight per volume; %w/v) ปั่นกวนด้วยเครื่องกวนสารละลายนาน 30 นาทีที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงที่ 1,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาทีด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงสาร เทสารละลายส่วนใสลงในบีกเกอร์และนำไปปรับ pH ให้เป็น 4.5 โดยใช้กรดไฮโดรคลอริก 1 โมลาร์ จะได้สารละลายแขวนลอยสีขาวนวล นำไปเหวี่ยงแยกอีกครั้งที่ 1,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นจนใส ปรับ pH ให้เป็นกลาง ทำให้แห้งด้วยตู้อบลมร้อน (Hot air oven) ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วบดจนละเอียดด้วยตะแกรง 60 เมซ ได้เป็นโปรตีนไอโซเลต บรรจุในถุงฟอยล์แบบสุญญากาศ นำไปเก็บที่ความเย็น (-4) องศาเซลเซียส เพื่อใช้ในการทดลองต่อไป

5. การศึกษาสูตรที่เหมาะสมในการทำไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อน

5.1 การเตรียมไส้กรอกแพลนต์เบส ทำการผลิตไส้กรอกแพลนต์เบสตามสูตรมาตรฐาน 3 สูตร ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยผลิตตามกรรมวิธีการผลิตดังนี้ ปั่นขนุนอ่อนในโถปั่นโดยใช้ความเร็วสูงนาน 5 นาทีแล้วใส่มะเขือเทศบดตามด้วยซอยโปรตีนไอโซเลตและแป้งชนิดอื่น ๆ ในโถปั่น ปั่นต่ออีก 20 นาที เติมน้ำมันพืชบดสับนาน 10 นาที ตามด้วยน้ำแข็ง เติมสารปรุงแต่งกลิ่นรส บดสับต่อให้เข้ากัน บรรจุในไส้พลาสติกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 22 มิลลิเมตร ผูกเป็นท่อนยาว ท่อนละ 12 เซนติเมตร นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95 องศา-เซลเซียส นาน 30 นาที ทำให้เย็นในอุณหภูมิห้อง เก็บผลิตภัณฑ์ใส่ถุงฟอยล์แบบสุญญากาศแล้วนำไปแช่ที่ความเย็น 4 องศาเซลเซียสเพื่อนำไว้ใช้ในขั้นตอนต่อไป

ตารางที่ 1 แสดงส่วนผสมของไส้กรอกแพลนต์เบสสูตรมาตรฐานเสริมขนุนอ่อน 3 สูตร

ส่วนผสม (กรัม)	สูตร 1	สูตร 2	สูตร 3
ขนุนอ่อนต้มสุก	500	500	500
มะเขือเทศบด		8	
เกลือ	7	13	0.2
น้ำตาลทราย	9	4	
กระเทียมผง	9	4	0.8
พริกไทยดำ	5.5	3	
พริกป่น		1.5	0.05
แป้งข้าวเจ้า		17.5	5
เกล็ดขนมปังป่น		17.5	
แป้งข้าวโพด	20	8.7	
น้ำแข็ง	120	4.3	
น้ำมันพืช	68.5	13	6
โปรตีนไอโซเลตจากถั่วเหลือง	60	191	8
กลิ่นควัน	0.5	4.5	
สีปาปริก้า	1	3.5	7.5
แป้งวีตกลูเตน	27		20
สารสกัดจากยีสต์			0.75
ผงปรุงรสเห็ด			0.7
ผงพะโล้	0.5		0.05
ลูกจันทน์ป่น	0.5		
กลิ่นรสเนื้อ	0.35		

หมายเหตุ สูตรที่ 1 ดัดแปลงจาก จิราภรณ์ (2544) สูตรที่ 2 ดัดแปลงจาก Wijegunawardhana et al. (2021) และสูตรที่ 3 ดัดแปลงจาก Paranagama et al. (2022)

5.2 การศึกษาผลของการเพิ่มขนุนอ่อนในไส้กรอกแพลนต์เบสต่อคุณลักษณะทางกายภาพ

1) วิเคราะห์องค์ประกอบทางกายภาพของไส้กรอกแพลนต์เบสเสริมขนุนอ่อน วิเคราะห์ค่าสีโดยใช้เครื่อง Color reader (Hunter lab รุ่น Colorflex EZ 45-0(LAV), USA) ซึ่งวัดในระบบ CIE Lab (*L*, a*, b**) ค่า *L** แสดงถึง ความสว่าง *a** แสดงถึงสีแดง (+*a**) หรือสีเขียว (-*a**) และ *b** แสดงถึงสีเหลือง (+*b**) หรือสีน้ำเงิน (-*b**) วิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

2) วิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส โดยวัดค่าความแข็ง ความยึดติด ความยืดหยุ่น ความยึดเกาะ ความเหนียวเป็นยาง ความเหนียว ด้วยเครื่องมือวัดเนื้อสัมผัส (Texture analyzer) (Charpa Techcenter รุ่น TA.XT PLUS, UK) โดยการใช้หัวทดสอบ compression platens p100 และกำหนด Pre-test speed 1 มิลลิเมตรต่อวินาที, Test speed 1 มิลลิเมตรต่อวินาที, Post-test speed 1 มิลลิเมตรต่อวินาที, Distance 8 มิลลิเมตร แต่ละตัวอย่างวัด 10 ซ้ำ บันทึกค่า Hardness, Adhesiveness, Springiness, Cohesiveness, Gumminess และ Chewiness

3) ทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัสของไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อน ศึกษาการยอมรับทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อนเพื่อหาสูตรที่ได้รับการยอมรับจากทั้งหมด 3 สูตร ด้วยวิธีการให้คะแนนความชอบแบบ 9 ระดับ (9-Point hedonic scale) ช่วงคะแนนความชอบ 1-9 (1 = ไม่ชอบมากที่สุด, 9 = ชอบมากที่สุด) ซึ่งใช้ผู้ทดสอบชิมที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 50 คน โดยชิมตัวอย่างไส้กรอก 30 กรัม (กว้าง 2.5 เซนติเมตร ยาว 5 เซนติเมตร) จำนวน 3 ชิ้น ระหว่างการชิมตัวอย่างให้ดื่มน้ำก่อนชิมตัวอย่าง และใช้แบบสอบถามเป็นเครื่องมือในการทดสอบ โดยแบบสอบถามจะถามเกี่ยวกับความชอบในด้าน ลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม

6. การพัฒนาผลิตภัณฑ์ไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อนเสริมโปรตีนไอโซเลตจากถั่ว

6.1 ศึกษาผลของการเติมโปรตีนไอโซเลตจากถั่วในไส้กรอกแพลนต์เบสต่อคุณลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์

ไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อนที่ได้รับการคัดเลือกจากสูตรมาตรฐาน จะถูกนำมาศึกษาการเติมโปรตีนไอโซเลตทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ ถั่วลันเตา (GPPI; Green Pea Protein Isolate) ถั่วแระ (PPI ; Pigeon Pea Protein Isolate) และ ถั่วปากอ้า (FBPI; Fava Bean Protein Isolate) ที่ร้อยละ 30 (Wijegunawardhana et al., 2021) โดยมีสูตรที่ไม่ได้ใส่โปรตีนไอโซเลตจากถั่วทั้ง 3 ชนิดเป็นสูตรควบคุม

1) วิเคราะห์หาค่าสี โดยใช้เครื่อง Color reader ยี่ห้อ Hunter lab (Colorflex EZ 45-0 ; LAV)) ซึ่งวัดในระบบ CIE Lab (*L*, a*, b**) วิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

2) วิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส ด้วยเครื่องมือวัดเนื้อสัมผัส (Texture analyzer) ยี่ห้อ Charpa Techcenter รุ่น TA.XT PLUS โดยการใช้หัวทดสอบ Compression platens p100 และกำหนดสภาวะในการวัดคือ Pre-test speed 1 มิลลิเมตรต่อวินาที, Test speed 1 มิลลิเมตรต่อวินาที, Post test speed 1 มิลลิเมตรต่อวินาที, Distance 8 มิลลิเมตร แต่ละตัวอย่างวัด 10 ซ้ำ บันทึกค่า Hardness, Adhesiveness, Springiness, Cohesiveness, Gumminess และ Chewiness

6.2 ศึกษาผลของการเติมโปรตีนไอโซเลตจากถั่วในไส้กรอกแพลนต์เบสต่อคุณลักษณะทางเคมีของผลิตภัณฑ์ ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (Proximate composition) ได้แก่ ปริมาณความชื้น เถ้า โปรตีน ไขมัน ใยอาหาร และคาร์โบไฮเดรต ตามวิธีของ Association of Official Analytical Chemists AOAC (2010)

6.3 ทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคต่อไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อนเสริมโปรตีนไอโซเลตจากถั่ว ทดสอบลักษณะทางประสาทสัมผัส โดยวิธี 9-Point hedonic scale ด้วยผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 50 คน ทดสอบคุณภาพด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม

7. การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

วิเคราะห์ข้อมูลและเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพ เคมี และเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ภายใต้แผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) ส่วนการทดสอบทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ของไส้กรอกแพลนต์เบสใช้การวางแผนการทดลองแบบ Randomized Complete Block Design (RCBD) วิเคราะห์ผลการทดลองโดยหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลและความแปรปรวน

(Analysis of variance, ANOVA) และวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยแบบ Tukey's multiple comparison test ที่ระดับความเชื่อมั่นทางสถิติร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ SPSS (SPSS 25.0, SPSS Inc., Chicago, IL, USA)

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

สมบัติการต้านอนุมูลอิสระของขนุนอ่อนทดสอบด้วยวิธี DPPH ซึ่งเป็นการทดสอบความสามารถในการให้ไฮโดรเจนอะตอมของสารต้านอนุมูลอิสระแก่อนุมูลของ DPPH พบว่าสารสกัดจากขนุนอ่อนมีค่าความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระเทียบเท่ากับกรดแอสคอร์บิก (Ascorbic acid equivalent) ที่ 193.56 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมแอสคอร์บิก โดยส่วนใหญ่แล้วสารต้านอนุมูลอิสระจะอยู่ในรูปของสารประกอบฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ วิตามินซี ซึ่งจะทำงานร่วมกันหลายชนิดจึงจะมีประสิทธิภาพสูง เมื่อนำขนุนอ่อนไปทดสอบปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวมด้วยวิธี Folin-Ciocalteau reagent พบว่ามีค่า 3.76 มิลลิกรัมต่อกรัมกรดแกลลิก โดยงานวิจัยของ ธนากรณ์ ดำสุด และคณะ (2560) รายงานว่าสารสกัดจากขนุนอ่อนที่มีองค์ประกอบฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์เพื่อเป็นกลไกป้องกันพืชจากความเสียหายภายในที่เกิดจากกระบวนการสังเคราะห์แสงและสภาวะแวดล้อมเนื่องจากในระยะอ่อนของผลไม้ที่จะมีการแบ่งเซลล์อย่างรวดเร็ว ซึ่งต้องใช้สารต้านอนุมูลอิสระในการลด Oxidative stress โดยจากปริมาณนั้นบ่งชี้ว่าขนุนอ่อนมีสารประกอบฟีนอลิกในระดับปานกลางเมื่อเทียบกับผลไม้ดิบชนิดอื่น

จากการศึกษาผลของการเพิ่มขนุนอ่อนในไส้กรอกแพลนต์เบสสูตรมาตรฐานต่อคุณลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางสีพบว่า ค่าความสว่าง (*L**) ค่าสีแดง (*a**) และค่าสีเหลือง (*b**) ของไส้กรอกแพลนต์เบสสูตรมาตรฐานผสมขนุนอ่อนทั้ง 3 ตัวอย่าง ดังแสดงตารางที่ 2 โดยค่า *L** บ่งบอกถึง ความสว่าง (lightness) มี ค่าตั้งแต่ 0-100 โดย 0 คือ สีดำ และ 100 คือ สีขาว ค่า *a** มีค่าสีเขียว (-*a**) จนถึง สีแดง (+a*) ค่า *b** หมายถึงสีน้ำเงิน (-*b**) จนถึงสีเหลือง (+*b**) จากผลการทดลองพบว่า สูตรที่ 1 มีค่าความสว่าง ค่าสีแดง และค่าสีเหลืองสูงที่สุด ซึ่งบ่งบอกถึงสีที่อ่อนและมีความสดใสกว่าเมื่อเทียบกับสูตรอื่น ๆ ไส้กรอกแพลนต์เบสสูตรมาตรฐานที่ 2 มีค่าความสว่างต่ำที่สุดและค่าสีแดงต่ำที่สุดเนื่องจากมีส่วนผสมของโปรตีนไอโซเลตจากถั่วเหลืองซึ่งเมื่อโดนความร้อนจะส่งผลทำให้เกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) ทำให้สีเข้มขึ้น (Kutzli et al., 2021) ไส้กรอกแพลนต์เบสเสริมขนุนอ่อนสูตรมาตรฐาน สูตรที่ 3 มีค่าความสว่างและค่าสีแดงรองลงมาจากสูตร 1 แต่มีค่าสีเหลืองเท่ากับสูตร 1 ทำให้สีของไส้กรอกแพลนต์เบสเสริมขนุนอ่อนสูตรมาตรฐานสูตร 3 ใกล้เคียงกับสูตร 1 มากที่สุด

ตารางที่ 2 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางสีของไส้กรอกแพลนต์เบสเสริมขนุนอ่อนสูตรมาตรฐาน

สูตรที่	*L**	*a**	*b**
1	39.02±0.13^{a}	8.73±0.12^{a}	17.26±0.04^{a}
2	35.13±0.07^{c}	4.68±0.03^{c}	16.53±0.07^{b}
3	38.74±0.08^{b}	7.91±0.04^{b}	17.26±0.05^{a}

หมายเหตุ $^{a-c}$ หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่มีตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ทางสถิติ ($p<0.05$)

ผลการวิเคราะห์ค่าเนื้อสัมผัสของไส้กรอกแพลนต์เบสเสริมขนุนอ่อนสูตรมาตรฐานทั้ง 3 ตัวอย่างแสดงดังตารางที่ 3 โดยไส้กรอกแพลนต์เบสเสริมขนุนอ่อนสูตร 1 มีค่า Springiness และค่า Cohesiveness สูงที่สุด คือ 0.38 วินาทีต่อวินาที และ 0.34 กรัมวินาทีต่อกรัมวินาที ตามลำดับ ส่งผลให้สามารถคืนรูปได้ดี โครงสร้างเหนียวแน่น เนื่องจากสูตรนี้มีการใช้แป้งข้าวโพดจึงสามารถเพิ่มความยืดหยุ่นได้ เนื่องจากแป้งข้าวโพดช่วยเสริมความเหนียวของโครงสร้างโดยการกักเก็บน้ำในเนื้อสัมผัส ส่วนไส้กรอกแพลนต์เบสเสริมขนุนอ่อนสูตรมาตรฐานสูตรที่ 2 มีค่า Hardness ที่ 2065.64 กรัม คือมีเนื้อสัมผัสแน่นและแข็งที่สุด มีค่า Gumminess ที่ 521.76 ซึ่งสัมพันธ์กับค่า Hardness ที่สูงอีกทั้งยังมีค่า Chewiness สูงสุดอยู่ที่ 159.12 ซึ่งต้องใช้แรงเคี้ยวมากที่สุดเพราะเป็นสูตรที่มีโปรตีนไอโซเลตจากถั่วเหลืองในปริมาณสูง เนื่องจากโปรตีนไอโซเลตมีคุณสมบัติในการสร้างเจลที่แข็งแรงระหว่างการปรุง ช่วยเพิ่มความแข็งให้กับผลิตภัณฑ์ ส่วนไส้กรอกแพลนต์เบสเสริมขนุนอ่อนสูตรมาตรฐานสูตรที่ 3 มีค่าความแข็ง ความเหนียวเป็นยางและความเหนียวต่ำกว่าทั้ง 3 สูตร ส่วนค่าความยืดหยุ่นและค่าความยืดเกาะมีน้อยกว่าไส้กรอกแพลนต์เบสเสริมขนุนอ่อนสูตรที่ 1 ทำให้โครงสร้างไม่แน่นมาก เนื่องจากมีส่วนผสมที่เป็นแป้งและโปรตีนไอโซเลตน้อยแต่ยังคงรูปร่างได้เนื่องจากโปรตีนในแป้งวีตกลูเตน ส่วนค่า Adhesiveness ของผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 สูตรไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p \geq 0.05$)

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์โครงร่างลักษณะเนื้อสัมผัสของไส้กรอกแพลนต์เบสเสริมขนุนอ่อนสูตรมาตรฐาน

ค่าที่วัด	สูตรที่ 1	สูตรที่ 2	สูตรที่ 3
Hardness (กรัม)	660.19±33.30^{b}	2065.64±134.54^{a}	412.53±26.22^{c}
Adhesiveness ^{ns} (กรัมต่อวินาที)	-2.95±2.82	-3.31±3.16	-3.56±2.49
Springiness (วินาทีต่อวินาที)	0.38±0.01^{a}	0.30±0.01^{c}	0.35±0.01^{b}
Cohesiveness (กรัมวินาทีต่อกรัมวินาที)	0.34±0.04^{a}	0.25±0.01^{c}	0.31±0.03^{b}
Gumminess	226.40±22.43^{b}	521.76±52.04^{a}	128.49±12.83^{c}
Chewiness	86.64±9.59^{b}	159.12±16.81^{a}	45.70±4.85^{c}

หมายเหตุ $^{a-c}$หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่มีตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวนอน มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ทางสถิติ ($p<0.05$)

^{ns}หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแนวนอนที่มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$)

ผลการทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัสของไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อนสูตรมาตรฐาน พบว่าสูตรที่ 2 ได้รับคะแนนสูงสุดในระดับชอบปานกลางในด้านลักษณะปรากฏที่ 7.54 ด้านสีที่ 7.16 ด้านรสชาติที่ 7.56 ด้านเนื้อสัมผัสที่ 7.82 และความชอบโดยรวมที่ 7.00 โดยไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อนสูตรมาตรฐาน สูตร 2 นี้ได้รับคะแนนสูงสุดในทุกด้าน ยกเว้นด้านกลิ่น และไส้กรอกสูตรนี้เป็นสูตรที่ผู้บริโภคชื่นชอบมากที่สุด ส่วนไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อนสูตรมาตรฐานสูตรที่ 1 มีคะแนนลักษณะปรากฏที่ 6.8 และรสชาติ 7.28 ซึ่งมีค่าคะแนนการยอมรับรองลงมา แต่ได้คะแนนกลิ่นที่ต่ำที่สุด ซึ่งอาจเกิดจากระหว่างกระบวนการให้ความร้อน แป้งวีทกลูเตนอาจเกิด Maillard reaction ทำให้เกิดกลิ่นไหม้เพิ่มเติม ซึ่งอาจเป็นกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ ที่สอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้าของ Li et al. (2024) เรื่องส่วนผสมของแป้งวีทกลูเตนทำให้เกิดกลิ่นคล้ายกลิ่นไหม้ ดังนั้นควรพิจารณาปรับปรุงเรื่องกลิ่นและเนื้อสัมผัสเพื่อเพิ่มความพึงพอใจ ส่วน

ไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อนสูตรมาตรฐาน สูตรที่ 3 แม้จะมีกลิ่นที่ได้รับการยอมรับสูงสุดที่ 7.72 แต่คะแนนในด้านลักษณะปรากฏ รสชาติ และเนื้อสัมผัสต่ำ ซึ่งสืบเนื่องจากการใช้น้ำมันและโปรตีนในปริมาณต่ำ ทำให้โครงสร้างไม่แน่น เนื้อสัมผัสเละ โดยจากการศึกษาของ Dekkers et al. (2018) เกี่ยวกับโครงสร้างของเนื้อสัตว์เทียม ว่าต้องมีการใช้ของเหลวในปริมาณที่เหมาะสม จึงจะเกิดความพึงพอใจทางประสาทสัมผัส ส่งผลให้คะแนนความชอบโดยรวมต่ำที่สุด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 4 ดังนั้นในงานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยได้คัดเลือกไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อนสูตรมาตรฐาน สูตรที่ 2 เป็นสูตรที่จะนำไปพัฒนาในขั้นตอนต่อไป

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคที่มีต่อไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อนสูตรมาตรฐาน

สูตรที่	ลักษณะปรากฏ	สี	กลิ่น	รสชาติ	เนื้อสัมผัส	ความชอบโดยรวม
1	6.80±0.49^{b}	5.80±0.53^{c}	4.56±0.45^{c}	7.28±0.49^{b}	4.60±0.49^{b}	5.38±0.49^{b}
2	7.54±0.50^{a}	7.16±0.46^{a}	6.22±0.50^{b}	7.56±0.50^{a}	7.82±0.38^{a}	7.00±0.49^{a}
3	5.24±0.43^{c}	6.02±0.47^{b}	7.72±0.49^{a}	4.52±0.54^{c}	4.28±0.45^{c}	5.00±0.45^{c}

หมายเหตุ $^{a-c}$หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่มีตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ทางสถิติ ($p<0.05$)

ในการทดลองขั้นต่อมาศึกษาผลของการเติมโปรตีนไอโซเลตจากถั่วในไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อนเพื่อสุขภาพที่สกัดจากถั่วลันเตา (Green Pea Protein Isolate: GPPI) ถั่วแระ (Pigeon Pea Protein Isolate: PPI) และถั่วปากอ้า (Fava Bean Protein Isolate: FBPI) เปรียบเทียบกับไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อนสูตรมาตรฐานที่ได้รับการยอมรับทางประสาทสัมผัส (ตัวอย่างควบคุม) ต่อค่าสี (L^*, a^*, b^*) และการยอมรับทางประสาทสัมผัส จากการวิเคราะห์ค่าความสว่างของตัวอย่างไส้กรอกที่ได้พบว่าไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อนที่เสริมด้วยโปรตีนไอโซเลตจากถั่วแระมีค่าความสว่างสูงที่สุด ขณะที่โปรตีนไอโซเลตจากถั่วลันเตา และ สูตรควบคุมไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\geq0.05$) โดยไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อนที่เสริมด้วยโปรตีนไอโซเลตจากถั่วปากอ้านั้นมีความสว่างน้อยที่สุด ส่วนค่าความเป็นสีแดงและค่าความเป็นสีเหลืองของตัวอย่างไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อนทุกชนิดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) เมื่อพิจารณาแล้ว สูตรควบคุมมีค่าสีแดงเด่นชัดที่สุดเนื่องจากให้สีคล้ายไส้กรอกเนื้อสัตว์ แต่ความสว่างและสีเหลืองอยู่ในระดับต่ำเมื่อเทียบกับไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อนที่เสริมด้วยโปรตีนไอโซเลตจากถั่วแระ ส่วนไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อนที่ผลิตด้วยโปรตีนไอโซเลตจากถั่วลันเตามีค่าความสว่างและสีเหลืองระดับปานกลาง แต่สีแดงน้อยที่สุดแสดงถึงลักษณะสีที่ดูจางกว่า ผลิตภัณฑ์ไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อนที่เสริมด้วยโปรตีนไอโซเลตจากถั่วปากอ้า มีความสว่างต่ำที่สุด และสีแดงกับสีเหลืองต่ำที่สุด แสดงถึงสีที่เข้ม ผลิตภัณฑ์ไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อนที่เสริมด้วยโปรตีนไอโซเลตจากถั่วแระมีความสว่าง สีเหลืองที่เด่นชัด และสีแดงในระดับปานกลาง ทำให้ผลิตภัณฑ์มีสีที่โดดเด่นและสว่างเนื่องจากโปรตีนถั่วแระ มีสีเหลืองจากสารประกอบฟีนอลิกตามธรรมชาติ ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่า *L**, *a**, *b** ของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อนสูตรควบคุม และสูตรที่เสริมด้วยโปรตีนไอโซเลตจากถั่วชนิดต่าง ๆ

ตัวอย่าง	*L**	*a**	*b**
Control	38.95±0.41[b]	14.56±0.27[a]	9.73±0.32[c]
GPPI	38.51±0.42[b]	2.14±0.06[d]	20.45±0.04[b]
FBPI	35.40±0.28[c]	3.13±0.10[c]	10.11±0.11[c]
PPI	53.11±0.25[a]	8.46±0.01[b]	28.06±0.54[a]

หมายเหตุ สูตรควบคุม (Control), ผลิตภัณฑ์ไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อนที่เสริมด้วยโปรตีนไอโซเลตจากถั่วลันเตา (Green Pea Protein Isolate: GPPI) ถั่วปากอ้า (Fava Bean Protein Isolate: FBPI) และ ถั่วแระ (Pigeon Pea Protein Isolate: PPI)

[a-d] หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่มีตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ทางสถิติ ($p<0.05$)

ผลของการเติมโปรตีนไอโซเลตจากถั่วในไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อนต่อคุณลักษณะทางเคมีของผลิตภัณฑ์ จากการทดลองพบว่า สูตรมาตรฐานมีความชื้นต่ำที่สุด คือร้อยละ 63.54 มีโปรตีนอยู่ที่ร้อยละ 12.38 แต่มีไขมันสูงที่สุดร้อยละ 8.00 ซึ่งในไส้กรอกแพลนต์เบสปริมาณไขมันมีผลต่อการกักเก็บน้ำ ทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่แห้งและมีความยืดหยุ่นมากขึ้น ส่วนเยื่อใยและเถ้ามีค่าปานกลางร้อยละ 2.04 และ 3.01 ตามลำดับ มีคาร์โบไฮเดรตต่ำที่ร้อยละ 11.02 ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์สูตรควบคุมมีเนื้อสัมผัสชุ่มฉ่ำจากไขมัน แต่มีความชื้นและโปรตีนต่ำกว่าสูตรที่เติมโปรตีนไอโซเลต ส่วนผลิตภัณฑ์ไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อนที่เสริมด้วยโปรตีนไอโซเลตจากถั่วลันเตามีความชื้นมากกว่าสูตรควบคุม คือร้อยละ 68.03 พบค่าโปรตีนอยู่ที่ร้อยละ 12.73 มีไขมันอยู่ที่ร้อยละ 1.27 ส่วนเยื่อใยและเถ้าใกล้เคียงกับสูตรควบคุมที่ร้อยละ 2.01 และ 3.01 ตามลำดับ มีคาร์โบไฮเดรตสูงขึ้นเล็กน้อยร้อยละ 12.94 สำหรับผลิตภัณฑ์ไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อนที่เสริมด้วยโปรตีนไอโซเลตจากถั่วปากอ้ามีความชื้นสูงสุดที่ร้อยละ 69.02 ซึ่งบ่งบอกว่าเนื้อสัมผัสมีความชุ่มชื้นมากที่สุด ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่มีความชุ่มชื้นสูงนั้นได้รับคะแนนยอมรับจากผู้บริโภคสูงกว่าผลิตภัณฑ์ที่แห้ง ส่วนโปรตีนและไขมันต่ำกว่าตัวอย่างอื่นคือร้อยละ 10.40 และ 0.64 ตามลำดับ มีเยื่อใย เถ้า และคาร์โบไฮเดรตสูงที่สุดที่ร้อยละ 2.80, 3.07 และ14.05 ตามลำดับ สำหรับผลิตภัณฑ์ไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อนที่เสริมด้วยโปรตีนไอโซเลตจากถั่วแระ พบว่ามีความชื้นอยู่ที่ร้อยละ 68.32 โปรตีนมีค่าสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) คือร้อยละ 15.15 ซึ่งเป็นส่วนสำคัญของที่ทำการผลิตไส้กรอกแพลนต์เบสได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่วนไขมันอยู่ที่ร้อยละ 1.34 มีเยื่อใยอยู่ที่ร้อยละ 2.05 มีเถ้าและคาร์โบไฮเดรตต่ำที่สุดคือ ร้อยละ 2.53 และ 10.60 เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่เหลือ โดยพบว่า ผลิตภัณฑ์ไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อนที่เสริมด้วยโปรตีนไอโซเลตจากถั่วลันเตา และผลิตภัณฑ์ไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อนที่เสริมด้วยโปรตีนไอโซเลตจากถั่วปากอ้ามีผลทำให้ผลิตภัณฑ์มีความชื้นเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับสูตรควบคุม ซึ่งสะท้อนถึงความสามารถในการกักเก็บน้ำของโปรตีนเหล่านี้ โดยไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อนที่เสริมด้วยโปรตีนไอโซเลตจากถั่วลันเตามีปริมาณโปรตีนสูงสุด เนื่องจากความแตกต่างของปริมาณโปรตีนไอโซเลตจากถั่วแต่ละชนิดเกิดจากชนิดของโปรตีนหลัก เช่น Albumin และ Globulin ซึ่งมีสมบัติทางโครงสร้างและการละลายแตกต่างกัน โดยถั่วลันเตามี Albumin สูง ละลายน้ำได้ง่ายทำให้สามารถสกัดโปรตีนได้มากกว่า ส่งผลให้โปรตีนไอโซเลตจากถั่วแระมีค่ามากที่สุด สอดคล้องกับรายงานของ

Fernández Sosa et al., (2021) ที่ว่า Globulin มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำกว่า และเกิดการ Aggregation ที่รวมตัวเป็นกลุ่มได้ง่ายเมื่อให้ความร้อนหรือเปลี่ยน pH ซึ่งส่งผลต่อปริมาณโปรตีนสุดท้ายที่สามารถเก็บได้หลังการสกัดและเมื่อเปรียบเทียบคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ไส้กรอกแพลนต์เบสที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้กับไส้กรอกจากเนื้อสัตว์ที่จำหน่ายในท้องตลาด พบว่าไส้กรอกแพลนต์เบสมีข้อดีหลายประการในด้านสุขภาพ โดยเฉพาะในเรื่องของ ปริมาณไขมันที่ลดลง และ ปริมาณใยอาหารที่เพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลดีต่อระบบทางเดินอาหารและลดความเสี่ยงของโรคมะเร็งลำไส้และโรคหัวใจ จากข้อมูลของ Song et al., (2016) และ Bohrer (2019) ไส้กรอกจากเนื้อสัตว์ทั่วไปมักมีไขมันอยู่ในช่วงร้อยละ 20–30 และมีโปรตีนประมาณร้อยละ 12–16 โดยที่ไม่มีใยอาหารเลย ทำให้ผู้บริโภคเสี่ยงต่อการเกิดโรคเรื้อรังชนิดไม่ติดต่อ (กลุ่มโรค NCDs) ในขณะที่ผลิตภัณฑ์จากงานวิจัยนี้มีไขมันต่ำกว่าอย่างชัดเจน ดังรายงานในตารางที่ 6 จึงทำให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่ดีต่อสุขภาพ

ตารางที่ 6 ผลของการเติมโปรตีนไอโซเลตจากถั่วในไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อนต่อคุณลักษณะทางเคมีของผลิตภัณฑ์

ตัวอย่าง	ความชื้น (ร้อยละ)	โปรตีน (ร้อยละ)	ไขมัน (ร้อยละ)	เยื่อใย (ร้อยละ)	เถ้า (ร้อยละ)	คาร์โบไฮเดรต (ร้อยละ)
Control	63.54±0.14^{c}	12.38±0.10^{c}	8.00±0.04^{a}	2.04±0.01^{b}	3.01±0.04^{a}	11.02±0.15^{c}
GPPI	68.03±0.12^{b}	12.73±0.02^{b}	1.27±0.01^{b}	2.01±0.07^{b}	3.01±0.04^{a}	12.94±0.04^{b}
FBPI	69.02±0.25^{a}	10.40±0.07^{d}	0.64±0.10^{c}	2.8±0.01^{a}	3.07±0.04^{a}	14.05±0.21^{a}
PPI	68.32±0.08^{b}	15.15±0.09^{a}	1.34±0.08^{b}	2.05±0.04^{b}	2.53±0.02^{b}	10.60±0.02^{c}

หมายเหตุ สูตรควบคุม (Control), ผลิตภัณฑ์ไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อนที่เสริมด้วยโปรตีนไอโซเลตจากถั่วลันเตา (Green Pea Protein Isolate: GPPI) ถั่วปากอ้า (Fava Bean Protein Isolate: FBPI) และ ถั่วแระ (Pigeon Pea Protein Isolate: PPI)

$^{a-d}$หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่มีตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ทางสถิติ ($p<0.05$)

ผลการวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสของไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อนสูตรเสริมโปรตีนไอโซเลตจากถั่ว พบว่า ตัวอย่างควบคุม และ ไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อนที่เสริมด้วยโปรตีนไอโซเลตจากถั่วลันเตา ถั่วแระ และถั่วปากอ้า มีค่า Hardness เท่ากับ 2367.32, 697.99, 1016.50 และ 970.51 กรัม ตามลำดับ มีค่า Adhesiveness ที่ -25.58, -1.04, -2.00 และ -3.09 กรัมต่อวินาที ตามลำดับ มีค่า Springiness เท่ากับ 0.76, 0.29 , 0.32 และ 0.29 วินาทีต่อวินาที ตามลำดับ ส่วนค่า Cohesiveness คือ 0.59, 0.28, 0.30, 0.26 (กรัมวินาที/กรัมวินาที) ตามลำดับ ค่า Gumminess คือ 1406.33, 198.10, 303.73 และ 254.97 ตามลำดับ สุดท้ายค่า Chewiness เท่ากับ 1079.87, 58.03, 98.22, 75.79 ตามลำดับ ซึ่งตัวอย่างไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อนสูตรเสริมโปรตีนไอโซเลตจากถั่วปากอ้ามีค่ารองมาจากไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อนสูตรควบคุมในทุกด้านมาเป็นอันดับสอง ยกเว้นค่า Adhesiveness โดยผลของไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อนสูตรเสริมโปรตีนไอโซเลตจากถั่วปากอ้านั้นสอดคล้องกับ งานวิจัยของ ธัญญาภรณ์ ศิริเลิศ และคณะ (2566) ได้ศึกษาการสกัดและสมบัติทางเคมีกายภาพของโปรตีนพืชในการประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์เลียนแบบเนื้อสัตว์ พบว่าโปรตีน

จากพืช มีความสามารถในการสร้างเจลและการกักเก็บน้ำมันที่ดี ซึ่งส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีเนื้อสัมผัสที่แน่นและเหนียว อีกทั้งยังเชื่อมโยงกับการวัดค่าการเกิดเจลของโปรตีนถั่วปากอ้าได้ผลดีที่สุดจึงกล่าวได้ว่าค่าการเกิดเจลสอดคล้องกับค่า Hardness Springiness และ Cohesiveness ที่สูงที่สุดในกลุ่มตัวอย่าง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ส่วนตัวอย่างไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อนสูตรเสริมโปรตีนไอโซเลตจากถั่วแระมีค่าอยู่ระดับปานกลางในทุกด้าน และไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อนสูตรเสริมโปรตีนไอโซเลตจากถั่วลันเตาที่ค่าต่ำสุดเกือบทุกด้าน ซึ่ง ความแตกต่างด้านความแข็งอาจเกิดจากโครงสร้างของโปรตีนไอโซเลตและความสามารถในการสร้างเจลที่แตกต่างกัน โปรตีนจากถั่วปากอ้าและโปรตีนจากถั่วแระ มีความสามารถในการยึดติดที่ดีกว่าโปรตีนจากถั่วลันเตา ทำให้เนื้อสัมผัสแน่นขึ้น ส่วนด้าน Adhesiveness โปรตีนไอโซเลตอาจดูดซับน้ำและลดปริมาณไขมันที่กระจายในเนื้อไส้กรอก ส่งผลให้การยึดติดลดลง ด้าน Springiness ความยืดหยุ่นของตัว Control อาจเกิดจากการใช้แป้งและเกล็ดขนมปังที่ช่วยสร้างโครงสร้างแบบที่สามารถยืดหยุ่นได้ ในขณะที่โปรตีนไอโซเลตในสูตรอื่นอาจมีการสร้างโครงสร้างที่มีลักษณะแน่นแต่นุ่ม ไม่แข็ง ในด้าน Gumminess ของสูตรควบคุมที่มีค่าสูงมาจากการใช้แป้งและไขมันที่สูง สำหรับค่า Chewiness ของสูตรควบคุมมาจากการใช้ไขมันและแป้งที่ช่วยสร้างความแน่นของโครงสร้าง ในขณะที่ไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อนสูตรเสริมโปรตีนไอโซเลตจากถั่วลันเตามีลักษณะเจล อ่อนนุ่มที่สัมพันธ์กับค่า Springiness ที่ต่ำ และ ค่า Cohesiveness ที่ต่ำ ซึ่งแสดงถึงเจลที่สามารถสลายได้ง่ายเมื่อเคี้ยว ทำให้เหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการเนื้อสัมผัสนุ่ม ดังรายงานในตารางที่ 7

ผลการทดสอบความชอบและการยอมรับของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์ไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อนเสริมโปรตีนไอโซเลตจากถั่วปรากฏในตารางที่ 8 ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสพบว่าผู้ทดสอบชิมให้คะแนนความชอบของผลิตภัณฑ์ในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัสและความชอบโดยรวม ได้ผลดังนี้ สูตรควบคุมมีค่าคะแนนด้านลักษณะปรากฏคือ 7.32 สี 8.22 และเนื้อสัมผัสที่ 7.62 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อนที่เสริมด้วยโปรตีนไอโซเลตจากถั่วลันเตานั้น ได้รับความชอบโดยรวมสูงสุดคือ 7.20 เนื่องจากมีคะแนนด้าน รสชาติ กลิ่น และเนื้อสัมผัสในระดับที่สูง ส่วนผลิตภัณฑ์ไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อนที่เสริมด้วยโปรตีนไอโซเลตจากถั่วปากอ้ามีคะแนนด้านกลิ่นและรสชาติมากกว่าตัวอย่างอื่น แต่ควรปรับปรุงในลักษณะปรากฏและสี สำหรับผลิตภัณฑ์ผลิตภัณฑ์ไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อนที่เสริมด้วยโปรตีนไอโซเลตจากถั่วแระ มีคะแนนลักษณะปรากฏ กลิ่น และรสชาติที่ไม่แตกต่างจากสูตรควบคุม ($p\geq0.05$) ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า ไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อนที่เติมโปรตีนไอโซเลตจากถั่วลันเตาได้รับคะแนนความชอบโดยรวมสูงสุดจากผู้บริโภค ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Kyriakopoulou et al. (2019) ที่ระบุว่าโปรตีนถั่วลันเตานั้นมีศักยภาพสูงในการพัฒนาผลิตภัณฑ์เลียนแบบเนื้อสัตว์ เนื่องจากมีสมบัติเชิงหน้าที่ดี นอกจากนี้ Dekkers et al. (2018) รายงานว่าโปรตีนพืชสามารถนำมาสร้างโครงสร้างเจลที่เลียนแบบลักษณะของผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ หากร่วมกับการควบคุมปัจจัยด้านความชื้นและวัตถุดิบเสริม ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองนี้ที่พบว่าการเติมโปรตีนพืชในสัดส่วนที่เหมาะสมร่วมกับขนุนอ่อน ซึ่งมีเส้นใยและความชุ่มชื้นสูง ช่วยส่งเสริมโครงสร้างเจลและทำให้เนื้อสัมผัสเป็นที่ยอมรับมากขึ้น

ตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์โครงร่างลักษณะเนื้อสัมผัสของไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อนเสริมโปรตีนไอโซเลตจากถั่วชนิดต่าง ๆ

ค่าที่วัด	Control	GPPI	FBPI	PPI
Hardness (กรัม)	2367.32±185.94^{a}	697.99±41.94^{c}	1016.50±78.96^{b}	970.51±57.86^{b}
Adhesiveness (กรัมวินาที)	-25.58±10.88^{b}	-1.04±1.16^{a}	-2.00±1.59^{a}	-3.09±1.64^{a}
Springiness (วินาที.วินาที)	0.76±0.02^{a}	0.29±0.01^{c}	0.32±0.01^{b}	0.29±0.01^{c}
Cohesiveness (กรัมวินาที/กรัมวินาที)	0.59±0.01^{a}	0.28±0.03^{bc}	0.30±0.03^{b}	0.26±0.02^{c}
Gumminess	1406.33±105.35^{a}	198.10±11.65^{c}	303.73±19.17^{b}	254.97±14.93^{bc}
Chewiness	1079.87±89.47^{a}	58.03±5.86^{b}	98.22±5.72^{b}	75.79±5.49^{b}

หมายเหตุ สูตรควบคุม (Control), ผลิตภัณฑ์ไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อนที่เสริมด้วยโปรตีนไอโซเลตจากถั่วลันเตา (Green Pea Protein Isolate: GPPI) ถั่วปากอ้า (Fava Bean Protein Isolate: FBPI) และ ถั่วแระ (Pigeon Pea Protein Isolate: PPI)

$^{a-d}$หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่มีตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวนอน มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ทางสถิติ (p<0.05)

ตารางที่ 8 ผลการทดสอบความชอบและการยอมรับของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์ไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อนเสริมโปรตีนไอโซเลตจากถั่ว

ตัวอย่าง	ลักษณะปรากฏ	สี	กลิ่น	รสชาติ	เนื้อสัมผัส	ความชอบโดยรวม
Control	7.32±0.47^{a}	8.22±0.50^{a}	6.30±0.46^{c}	6.64±0.56^{b}	7.62±0.49^{a}	6.96±0.49^{a}
GPPI	6.22±0.50^{b}	7.06±0.42^{b}	6.90±0.54^{b}	7.42±0.49^{a}	7.52±0.50^{ab}	7.20±0.49^{a}
FBPI	6.08±0.44^{b}	6.52±0.50^{c}	7.28±0.52^{a}	7.26±0.44^{a}	7.30±0.46^{b}	6.20±0.49^{b}
PPI	6.10±0.46^{b}	6.28±0.45^{c}	6.08±0.48^{c}	6.56±0.50^{b}	6.42±0.49^{c}	5.54±0.54^{b}

หมายเหตุ สูตรควบคุม (Control), ผลิตภัณฑ์ไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อนที่เสริมด้วยโปรตีนไอโซเลตจากถั่วลันเตา (Green Pea Protein Isolate: GPPI) ถั่วปากอ้า (Fava Bean Protein Isolate: FBPI) และ ถั่วแระ (Pigeon Pea Protein Isolate: PPI)

$^{a-d}$หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่มีตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ทางสถิติ (p<0.05)

ในส่วนของการใช้โปรตีนพืช เช่น โปรตีนจากถั่วลันเตา ถั่วปากอ้า และ ถั่วแระยังช่วยลดการบริโภคไขมันอิ่มตัว และคอเลสเตอรอล ซึ่งต่างจากผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ที่มีระดับคอเลสเตอรอลสูง โดย Micha et al. (2017) รายงานว่าการบริโภคเนื้อสัตว์แปรรูปมีความสัมพันธ์กับความเสี่ยงที่เพิ่มขึ้นของโรคหัวใจและหลอดเลือด ในขณะที่การทดแทนด้วยแหล่งโปรตีนจากพืชมีแนวโน้มช่วยลดความเสี่ยงดังกล่าวได้ ผลิตภัณฑ์ไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อนและโปรตีนพืชในงานวิจัยนี้ไม่เพียงแต่มีลักษณะทางประสาทสัมผัสที่ยอมรับได้ แต่ยังแสดงศักยภาพในฐานะผลิตภัณฑ์อาหารที่ส่งเสริมสุขภาพ ซึ่งเหมาะสำหรับผู้บริโภคที่ต้องการลดเนื้อสัตว์ และผู้ที่สนใจอาหารทางเลือกที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง

สรุป

จากการศึกษาและผลิตไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อนที่เสริมโปรตีนไอโซเลตจากถั่ว 3 ชนิด พบว่าผลิตภัณฑ์ไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อนที่เสริมด้วยโปรตีนไอโซเลตจากถั่วลันเตา ได้รับคะแนนความชอบโดยรวมสูงสุดในด้านรสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมไม่แตกต่างจากสูตรควบคุม ในขณะที่

ไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อนที่เสริมโปรตีนจากถั่วปากอ้าได้รับคะแนนสูงในด้านกลิ่น และมีคุณสมบัติในการเกิดเจลได้ดี สำหรับไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อนที่ผลิตจากโปรตีนถั่วแระมีค่าคะแนนการยอมรับทางด้านประสาทสัมผัสอยู่ในระดับพอใจเล็กน้อย แต่มีค่าโปรตีนสูงที่สุดเมื่อเทียบกับโปรตีนไอโซเลตชนิดอื่นอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ดังนั้นสรุปได้ว่าโปรตีนสกัดจากถั่วลันเตามีศักยภาพสูงในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ไส้กรอกแพลนต์เบสจากขนุนอ่อนเนื่องจากให้เนื้อสัมผัสที่เหมาะสม มีความสามารถในการเกิดและคงตัวของอิมัลชันดี และมีคุณค่าทางโภชนาการ ในขณะที่การใช้ขนุนอ่อนเป็นองค์ประกอบหลักนั้นยังมีปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระอยู่ด้วย การศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการใช้โปรตีนจากพืชเพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารทางเลือกที่มีคุณภาพและเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค

ข้อเสนอแนะ

แนวทางการศึกษาต่อไปอาจศึกษาผลของการเติมสารประเภทไฮโดรคอลลอยด์เพื่อปรับปรุงลักษณะเนื้อสัมผัส หรือศึกษาอุณหภูมิและระยะเวลาเก็บรักษาเพื่อสามารถต่อยอดไปสู่การพัฒนาเชิงพาณิชย์ต่อไป

จริยธรรมการวิจัยในมนุษย์

การจัดทำงานวิจัยนี้ได้รับรองจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เลขที่ COE No. COE66/081 จากคณะกรรมการดำเนินงานด้านวิทยาศาสตร์สุขภาพ ฝ่ายมาตรฐานการวิจัยและศูนย์สัตว์ทดลอง สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ซึ่งได้พิจารณาโครงการวิจัยเรื่อง ผลของการใช้โปรตีนสกัดจากถั่วลันเตา ถั่วแระ ถั่วปากอ้า ต่อคุณลักษณะทางกายภาพ และ คุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ไส้กรอกจากขนุนอ่อน (Effects of Green Pea, Pigeon Bean, and Fava Bean Protein Isolates on the Physical Characteristics and Nutritional Value of Jackfruit Sausage Products) เป็นที่เรียบร้อย

เอกสารอ้างอิง

จิราภรณ์ ตันติพงศ์อาภา. (2544). **การพัฒนาผลิตภัณฑ์ไส้กรอกมังสวิรัติเสริมปลายข้าวหอมมะลิ**. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต คณะเกษตร, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ธนากรณ์ ดำสุด, ฐิติกรณ์ จันทร์วุ่น, นมล ศรีเมฆ, และสุธรรม ส่งแสง. (2560). ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ และฤทธิ์ยับยั้งแอลฟากลูโคซิเดสของส่วนสกัดขนุนอ่อน. **วารสารวิทยาศาสตร์ มข.**, 45(3), 543–550.

ธัญญาภรณ์ ศิริเลิศ, มัทวัน ศรีอินทร์คำ, และณัฏฐิกา ศิลาลาย. (2566). ศึกษาวิธีการสกัดและสมบัติทางเคมีกายภาพของโปรตีนพืชในการประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์เลียนแบบเนื้อสัตว์. **วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา**, 28(3), 1424-1435.

วิริยา พรมกอง, และสุทิน พรหมโชติ. (2555). **การศึกษาสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารเหล่านั้นในขนุนไทย**. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.).

AOAC. (2010). **Official Methods of Analysis of Official Analytical Chemists**. 18th ed. Association of Official Analytical Chemists, Washington DC, USA.

Barac, M. B., Pešić, M., Stanojevic, S., & Kostić, A. Ž. (2015). Techno-Functional Properties of Pea (*Pisum Sativum*) Protein Isolates: A review. **Acta Periodica Technologica**, 46(46), 1-18.

Baune, M.-C., Terjung, N., Tulbek, M., & Boukid, F. (2022). Textured Vegetable Proteins (TVP): Future Foods Standing on Their Merits as Meat Alternatives. **Future Foods***, 6,* 100181.

Boada, L. D., Henríquez-Hernández, L. A., & Luzardo, O. P. (2016). The Impact of Red and Processed Meat Consumption on Cancer and Other Health Outcomes: Epidemiological Evidences. **Food and Chemical Toxicology**, 92, 236–244.

Bohrer, B. M. (2019). An Investigation of The Formulation and Nutritional Composition of Modern Meat Analogue Products. **Food Science and Human Wellness**, 8(4), 320–329.

Boukid, F. (2021). Plant-Based Meat Analogues: From Niche to Mainstream. **European Food Research and Technology**, 247, 297–308.

Corrêa, P. F., da Silva, C. F., Ferreira, J. P., & Campos Guerra, J. M. (2023). Vegetable-Based Frankfurter Sausage Production by Different Emulsion Gels and Assessment of Physical-Chemical, Microbiological and Nutritional Properties. **Food Chemistry Advances**, 3, 100354.

Dekkers, B. L., Boom, R. M., & van der Goot, A. J. (2018). Structuring Processes for Meat Analogues. **Trends in Food Science & Technology**, 81, 25–36.

Ettoumi, L., Boudries, H., Mohamed, C., & Romero, A. (2015). Pea, Chickpea and Lentil Protein Isolates: Physicochemical Characterization and Emulsifying Properties. **Food Biophysics**, 11(1), 43–51.

Ettinger, L., Falkeisen, A., Knowles, S., Gorman, M., Barker, S., Moss, R., & McSweeney, M. B. (2022). Consumer Perception and Acceptability of Plant-Based Alternatives to Chicken. **Foods**, 11(15), 2271.

Fernández Sosa, E. I., Chaves, M. G., Quiroga, A., & Avanza, M. V. (2021). Comparative Study of Structural and Physicochemical Properties of Pigeon Pea (*Cajanus Cajan* L.) Protein Isolates and Its Major Protein Fractions. **Plant Foods for Human Nutrition**, 76(1), 1–9.

Hetti Hewage, A., Olatunde, O., Nimalaratne, C., Malalgoda, M., Aluko, R., & Bandara, N. (2022). Novel Extraction Technologies for Developing Plant Protein Ingredients with Improved Functionality. **Trends in Food Science & Technology**, 129, 186–198.

Jimenez-Colmenero, F., Salcedo-Sandoval, L., Bou, R., Cofrades, S., Herrero, A. M., & Ruiz-Capillas, C. (2015). Novel Applications of Oil-Structuring Methods as a Strategy to Improve the Fat Content of Meat Products. **Trends in Food Science & Technology**, 44(2), 177–188.

Khan, M. A., Hossain, M., Qadeer, Z., Tanweer, S., Ahmad, B., & Waseem, M. (2023). **Jackfruit (*Artocarpus Heterophyllus*): An Overview of Nutritional and Functional Food Properties**. In: Ismail, T., Akhtar, S., Lazarte, C.E. (eds), Neglected Plant Foods of South Asia (pp. 411-451). Springer Nature Publishing.

Kutzli, I., Weiss, J., & Gibis, M. (2021). Glycation of Plant Proteins Via Maillard Reaction: Reaction Chemistry, Techno Functional Properties, and Potential Food Application. **Foods**, 10(2), 376.

Kyriakopoulou, K., Dekkers, B., & Van der Goot, A. J. (2019). Chapter 6 – Plant-Based Meat Analogues. **Sustainable Meat Production and Processing**, 2019, 103–126.

Li, J., Chen, Y., Hua, X., Yin, L., Zang, J., Yu, W., & Zhang, T. (2024). Soy Protein Isolate with Higher Solubility and Improved Gel Properties When Co-Assembled with Walnut Protein. **International Journal of Food Science & Technology**, 59(7), 5057–5065.

Ma, K. K., Greis, M., Lu, J., Nolden, A. A., McClements, D. J., & Kinchla, A. J. (2022). Functional Performance of Plant Proteins. **Foods**, 11(4), 594.

Menegat, S., Ledo, A., & Tirado, R. (2022). Greenhouse Gas Emissions from Global Production and Use of Nitrogen Synthetic Fertilisers in Agriculture. **Scientific Reports**, 12, 14490.

Micha, R., Peñalvo, J. L., Cudhea, F., Imamura, F., Rehm, C. D., & Mozaffarian, D. (2017). Association Between Dietary Factors and Mortality from Heart Disease, Stroke, and Type 2 Diabetes in The United States. **JAMA**, 317(9), 912–924.

Paranagama, I., Wickramasinghe, I., Some ndrika, D., & Benaragama, K. P. (2022). Development of a Vegan Sausage with Young Green Jackfruit, Oyster Mushroom, and Coconut Flour as an Environmentally Friendly Product with Cleaner Production Approach. **Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences**, 11(4), e4029.

Ren, Y., Huang, L., Zhang, Y., Zhao, D., Cao, J., & Liu, X. (2022). Application of Emulsion Gels as Fat Substitutes in Meat Products. **Foods**, 11(13), 1950.

Song, M., Fung, T. T., Hu, F. B., Willett, W. C., Longo, V. D., Chan, A. T., & Giovannucci, E. L. (2016). Association of Animal and Plant Protein Intake with All-Cause and Cause-Specific Mortality. **JAMA Internal Medicine**, 176(10), 1453–1463.

Statista. (2025). **Meat Substitutes – Thailand**. Retrieved from https://www.statista.com/outlook/cmo/food/meat/meat-substitutes/thailand

Wijegunawardhana, D. T., Madushani, E. D. A. & Gamage, S. D. C. (2021). Development of Immune-Boosting Vegan Sausage Utilizing Baby Jackfruit (*Artocarpus Heterophyllus*) by Replacing Carcinogenic Curing Salts with Natural Pigment Source. **Journal of Research Technology and Engineering**, 2(1), 1-11.

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่าง FP-Growth และ Apriori ในการวิเคราะห์รูปแบบการซื้อสินค้าในร้านกาแฟ

กัญณัฏฐ์ สุริยันต์[1*]

Received : February 6, 2025
Revised : June 18, 2025
Accepted : June 21, 2025

บทคัดย่อ

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่าง FP-Growth และ Apriori ในการวิเคราะห์รูปแบบการซื้อสินค้าในร้านกาแฟ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากฎความสัมพันธ์ (Association Rules) และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม Apriori และ FP-Growth ในการวิเคราะห์ธุรกรรมการซื้อสินค้าของผู้บริโภคในร้านกาแฟ โดยใช้ข้อมูลธุรกรรมจากเว็บไซต์ Kaggle จำนวน 1,000 รายการ ผ่านกระบวนการเหมืองข้อมูลด้วยภาษา Python และไลบรารี mlxtend ผลการวิจัยพบว่า ทั้งสองอัลกอริทึมสามารถสร้างกฎความสัมพันธ์ที่มีค่า Confidence สูง เช่น กฎ (Latte) ⟶ (Croissant) มีค่า Confidence 85% อย่างไรก็ตาม FP-Growth มีประสิทธิภาพสูงกว่า Apriori โดยใช้เวลาในการประมวลผล 0.01 วินาที และหน่วยความจำ 30.34 KB ขณะที่ Apriori ใช้เวลา 0.00 วินาที และหน่วยความจำ 30.33 KB ซึ่งเหมาะกับชุดข้อมูลขนาดเล็ก ทั้งนี้ FP-Growth มีข้อได้เปรียบในด้านโครงสร้างข้อมูลแบบ FP-Tree ที่สามารถลดการสแกนข้อมูลซ้ำจึงเหมาะสมกับข้อมูลขนาดใหญ่และซับซ้อนมากกว่า

คำสำคัญ: กฎความสัมพันธ์ การวิเคราะห์ตะกร้าสินค้า เหมืองข้อมูล อัลกอริทึม Apriori อัลกอริทึม FP-Growth

[1] *อาจารย์ประจำหลักสูตรบริหารธุรกิจบัณฑิต สาขาวิชาธุรกิจดิจิทัล คณะดิจิทัล วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม อีเมล: kunyanuts@siamtechno.ac.th*

** ผู้นิพนธ์หลัก อีเมล: kunyanuts@siamtechno.ac.th*

COMPARING THE PERFORMANCE BETWEEN FP-GROWTH AND APRIORI ALGORITHMS FOR ANALYZING SHOPPING PATTERNS IN A COFFEE SHOP

Kanyanut Suriyan[1*]

Abstract

The current study, namely Comparison of FP-Growth and Apriori Algorithms for Analyzing Shopping Patterns in a Coffee Shop, was aimed to investigate association rules and compare the performance of the Apriori and FP-Growth algorithms in analyzing customer purchase transactions in a coffee shop. The dataset, consisting of 1,000 transactions, was obtained from the Kaggle website then analyzed using data mining techniques with the Python programming language and the mlxtend library. The research results were revealed that both algorithms could generate association rules with high confidence values. For example, the rule (Latte) ⟶ (Croissant) achieved a confidence of 85%. However, FP-Growth algorithms demonstrated the better performance than Apriori's, spending 0.01 seconds of processing time and using 30.34 KB of memory. On the other hand, Apriori algorithms spending 0.00 seconds and using 30.33 KB. Although Apriori algorithms are suitable for small datasets, FP-Growth offers a structural advantage through its use of the FP-Tree, which reduces redundant data scans. FP-Growth algorithms are more suitable for large and complex datasets.

Keywords: Association Rules, Market Basket Analysis, Data Mining, Apriori Algorithm, FP-Growth Algorithm

[1] *Lecturer of Digital Business Program in Digital Faculty, Siam Technology College, e-mail: kunyanuts@siamtechno.ac.th*

** Corresponding author, e-mail: kunyanuts@siamtechno.ac.th*

บทนำ

ในสภาพแวดล้อมทางธุรกิจที่มีการแข่งขันสูง ผู้ประกอบการจำเป็นต้องพัฒนากลยุทธ์ และปรับปรุงการดำเนินงานอย่างต่อเนื่อง เพื่อรักษาความได้เปรียบในตลาด หนึ่งในแนวทางสำคัญ คือการใช้ข้อมูลธุรกรรม (Transaction Data) ซึ่งเป็นแหล่งข้อมูลที่สะท้อนพฤติกรรมของผู้บริโภค และสามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพด้านการขาย และการตลาด (Sun et al., 2024) เทคนิคเหมืองข้อมูล (Data Mining) เป็นกระบวนการที่ช่วยให้สามารถค้นหาสารสนเทศที่ซ่อนอยู่ในข้อมูลขนาดใหญ่ เพื่อนำไปใช้ในการตัดสินใจ เช่น การวิเคราะห์แนวโน้ม การคาดการณ์ หรือการจัดกลุ่มลูกค้า หนึ่งในเทคนิคที่สำคัญในการวิเคราะห์ข้อมูลลูกค้า คือ การวิเคราะห์ตะกร้าสินค้า (Market Basket Analysis) ซึ่งช่วยค้นหาความสัมพันธ์ระหว่างสินค้าที่ลูกค้ามักซื้อร่วมกัน โดยข้อมูลที่ได้สามารถนำไปใช้ในการวางแผนโปรโมชั่น การจัดเรียงสินค้า หรือการกำหนดราคาที่เหมาะสม (Istrat & Lalic, 2017; Chusna et al., 2021) การขาดการประยุกต์ใช้อัลกอริทึม FP-Growth และ Apriori กับข้อมูลธุรกรรมจริงของธุรกิจร้านกาแฟในประเทศไทย โดยเฉพาะการเปรียบเทียบด้านประสิทธิภาพเชิงเทคนิค ได้แก่เวลาในการประมวลผล การใช้หน่วยความจำ และคุณภาพของกฎที่ได้ เช่นค่า Confidence และ Lift ซึ่งมีความสำคัญต่อการใช้งานจริงของผู้ประกอบการ อัลกอริทึมที่นิยมใช้ในกระบวนการนี้ ได้แก่ Apriori และ FP-Growth โดย Apriori ทำงานโดยสร้าง Candidate Itemsets และสแกนฐานข้อมูลซ้ำหลายครั้ง ซึ่งอาจใช้ทรัพยากรจำนวนมากหากข้อมูลมีขนาดใหญ่ (Mustakim et al., 2018) ขณะที่ FP-Growth ใช้โครงสร้าง Frequent Pattern Tree (FP-Tree) เพื่อลดจำนวนครั้งในการสแกนข้อมูล ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพโดยเฉพาะกับฐานข้อมูลขนาดใหญ่ (Hunyadi, 2011) จากเหตุผลข้างต้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม Apriori และ FP-Growth ในการวิเคราะห์รูปแบบการซื้อสินค้าของลูกค้า โดยมุ่งหวังให้นำผลที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับกลยุทธ์ธุรกิจค้าปลีกได้อย่างมีประสิทธิภาพ

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษากฎความสัมพันธ์ (Association Rules) ของอัลกอริทึม Apriori, และ FP-Growth
2. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม Apriori และ FP-Growth โดยมีตัวแปรในการประเมิน Processing Time Memory Usage Iterations

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้ใช้กระบวนการแสดงผลโดยอ้างอิงจากชุดข้อมูล (Dataset) ซึ่งได้มาจากเว็บไซต์ Kaggle.com โดยเป็นข้อมูลธุรกรรมจากร้านขายกาแฟ และดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้

1. เริ่มต้นโดยการนำชุดข้อมูลจากเว็บไซต์ Kaggle.com ที่เกี่ยวข้องกับธุรกรรมการซื้อกาแฟและสินค้าเสริม โดยชุดข้อมูลมีจำนวนทั้งสิ้น 1,000 ธุรกรรม โดยแต่ละแถวในชุดข้อมูลแสดงถึงธุรกรรมเดียวที่ลูกค้าทำการซื้อสินค้าจากร้านกาแฟ

2. การเตรียมข้อมูล (Data Preprocessing) ก่อนการนำชุดข้อมูลไปวิเคราะห์ ผู้วิจัยได้ดำเนินการทำความสะอาดข้อมูล (Data Cleaning) โดยมีขั้นตอนดังนี้

2.1 การจัดการค่าที่สูญหาย (Missing Values) ตรวจสอบรายการที่ไม่มีข้อมูลสินค้า แล้วลบรายการที่มีช่องว่างหรือไม่มีรายการสินค้าใดเลยออกจากชุดข้อมูล

2.2 การจัดการข้อมูลผิดปกติ (Outliers) พิจารณาความถี่ในการซื้อของสินค้าที่เกิดน้อยมาก เช่น ปรากฏในไม่ถึง 1% ของธุรกรรมทั้งหมด แล้วตัดออกจากชุดวิเคราะห์เพื่อป้องกันการรบกวนค่าความสัมพันธ์

2.3 การปรับโครงสร้างข้อมูล แปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบ Itemsets โดยให้แต่ละ Transaction แสดงรายการสินค้าที่ซื้อ เพื่อให้เหมาะสมกับการประมวลผลโดยอัลกอริทึม Apriori และ FP-Growth

3. เกณฑ์การประเมินประสิทธิภาพของอัลกอริทึม งานวิจัยนี้ใช้เกณฑ์มาตรฐาน 3 ตัวเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม ได้แก่

3.1 ค่า Support ใช้เกณฑ์ขั้นต่ำที่ 0.05 หมายถึงรูปแบบรายการต้องปรากฏอย่างน้อย 5% ของธุรกรรมทั้งหมด จึงจะถือว่า “เกิดบ่อย”

3.2 ค่า Confidence ตั้งเกณฑ์ขั้นต่ำที่ 0.6 เพื่อให้มั่นใจว่าความสัมพันธ์ที่พบมีความน่าเชื่อถือพอสมควร

3.3 ค่า Lift ใช้เพื่อประเมินว่าความสัมพันธ์ที่พบมีความสัมพันธ์เชิงบวก (ค่า > 1) หรือเป็นเพียงความบังเอิญ (ค่า ≈ 1)

เหตุผลในการตั้งค่าเกณฑ์เหล่านี้เพื่อให้ได้กฎความสัมพันธ์ที่มีความน่าเชื่อถือ ปริมาณไม่มากเกินไป และสามารถนำไปใช้งานในเชิงกลยุทธ์ได้จริง โดยอิงตามแนวทางในงานวิจัยของ Mustakim et al. (2018) และ Chusna et al. (2021)

ตารางที่ 1 แสดงจำนวน Attribute ของการหากฎความสัมพันธ์

Attribute name	Type	ความหมาย
TransactionID	Integer	รหัสธุรกรรมที่แสดงถึงการซื้อขายแต่ละครั้ง
Spring	Boolean	ฤดูใบไม้ผลิ ระบุว่าธุรกรรมเกิดในฤดูใบไม้ผลิหรือไม่
Summer	Boolean	ฤดูร้อน ระบุว่าธุรกรรมเกิดในฤดูร้อนหรือไม่
Fall	Boolean	ฤดูใบไม้ร่วง ระบุว่าธุรกรรมเกิดในฤดูใบไม้ร่วงหรือไม่

ตารางที่ 1 แสดงจำนวน Attribute ของการหากฎความสัมพันธ์ (ต่อ)

Attribute name	Type	ความหมาย
Winter	Boolean	ฤดูหนาว ระบุว่าธุรกรรมเกิดในฤดูหนาวหรือไม่
Latte	Boolean	ลูกค้าซื้อเมนู Latte หรือไม่
Hazelnut Latte	Boolean	ลูกค้าซื้อเมนู Hazelnut Latte หรือไม่
Vanilla Latte	Boolean	ลูกค้าซื้อเมนู Vanilla Latte หรือไม่
Creamy Aren Latte	Boolean	ลูกค้าซื้อเมนู Creamy Aren Latte หรือไม่
Caramel Latte	Boolean	ลูกค้าซื้อเมนู Caramel Latte หรือไม่
Matcha Latte	Boolean	ลูกค้าซื้อเมนู Matcha Latte หรือไม่
Cappuccino	Boolean	ลูกค้าซื้อเมนู Cappuccino หรือไม่
Caramel Macchiato	Boolean	ลูกค้าซื้อเมนู Caramel Macchiato หรือไม่
Americano	Boolean	ลูกค้าซื้อเมนู Americano หรือไม่
Matcha Bun	Boolean	ลูกค้าซื้อขนม Matcha Bun หรือไม่
Cheese Toast	Boolean	ลูกค้าซื้อเมนู Cheese Toast หรือไม่
Chocolate Toast	Boolean	ลูกค้าซื้อเมนู Chocolate Toast หรือไม่
Butter Toast	Boolean	ลูกค้าซื้อเมนู Butter Toast หรือไม่
Cookies	Boolean	ลูกค้าซื้อเมนู Cookies หรือไม่
Croissant	Boolean	ลูกค้าซื้อเมนู Croissant หรือไม่
Egg Salad Toast	Boolean	ลูกค้าซื้อเมนู Egg Salad Toast หรือไม่
Fries	Boolean	ลูกค้าซื้อเมนู Fries หรือไม่
Crispy Chicken Nuggets	Boolean	ลูกค้าซื้อเมนู Crispy Chicken Nuggets หรือไม่

จากตารางที่ 1 ตารางแสดงจำนวน attribute ของการทำธุรกรรมของลูกค้าร้านกาแฟประกอบด้วย attribute name ประเภทข้อมูล (Type) Integer ใช้สำหรับรหัสธุรกรรม Boolean ใช้สำหรับแสดงว่าลูกค้าซื้อสินค้านั้นหรือไม่ (0 = ไม่ซื้อ, 1 = ซื้อ) การใช้งาน สามารถใช้ Attribute เหล่านี้ในการวิเคราะห์ Association Rules เพื่อดูว่าลูกค้ามักซื้อสินค้าร่วมกันอย่างไร เช่น ลูกค้าที่ซื้อ Latte มักจะซื้อ Croissant ด้วยหรือไม่

4. การสร้างกฎความสัมพันธ์ (Association Rules) มีขั้นตอนดังนี้

4.1 การกำหนด Frequent Itemsets

1. ใช้อัลกอริทึม Apriori และ FP-Growth เพื่อตรวจหาชุดรายการที่เกิดบ่อย (Frequent Itemsets) จากข้อมูลธุรกรรม

เช่น เมนูเครื่องดื่มและอาหารที่ลูกค้าสั่งซื้อในแต่ละธุรกรรม ตัวอย่างชุดข้อมูลที่เกิดขึ้นบ่อย

["Latte", "Croissant"] ["Cappuccino", "Brownie"]

2. การคำนวณกฎความสัมพันธ์ (Association Rules) ใช้ไลบรารี mlxtend เพื่อสร้างกฎความสัมพันธ์จาก Frequent Itemsets ที่ได้มากฎ ถ้าลูกค้าซื้อ "Latte" มีโอกาส 70% ที่จะซื้อ "Croissant" ด้วย

5. การประเมินผล (Evaluation)

5.1 ประสิทธิภาพการทำงาน (Performance) วัดประสิทธิภาพของอัลกอริทึม Apriori และ FP-Growth ในการค้นหาชุดรายการที่เกิดบ่อย (Frequent Itemsets) และสร้างกฎความสัมพันธ์ (Association Rules) ใช้ตัวชี้วัด เช่น จำนวน Iterations หรือ Processing Steps ที่ใช้ในแต่ละอัลกอริทึม การประยุกต์ในร้านกาแฟตรวจสอบว่าการวิเคราะห์พฤติกรรมการซื้อในแต่ละฤดูกาล เช่น การจับคู่ระหว่าง "Latte" และ "Croissant" สามารถทำได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำเพียงใด

5.2 การใช้หน่วยความจำ (Memory Usage) ตรวจสอบการใช้ทรัพยากรหน่วยความจำขณะประมวลผลอัลกอริทึม วัดปริมาณหน่วยความจำที่ใช้สำหรับการจัดเก็บ Candidate Itemsets และ Frequent Itemsets การประยุกต์ในร้านกาแฟ เปรียบเทียบว่าอัลกอริทึม Apriori หรือ FP-Growth ใช้หน่วยความจำอย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าในการประมวลผลข้อมูล เช่น เมนูที่ลูกค้าสั่งในแต่ละฤดูกาล

5.3 เวลาในการประมวลผล (Processing Time) วัดระยะเวลาที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูลธุรกรรมทั้งหมดจนได้ผลลัพธ์ที่ต้องการ ใช้ตัวชี้วัด เช่น Total Execution Time หรือ Time per Iteration ประเมินว่าอัลกอริทึมใดเหมาะสำหรับการประมวลผลข้อมูลขนาดใหญ่ เช่น รายการซื้อที่มีทั้ง "Latte," "Cappuccino," และ "Muffin" ในช่วงเวลาต่าง ๆ

6. สิ้นสุดกระบวนการ (End) สรุปผลการวิจัยและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมทั้งสาม เพื่อระบุอัลกอริทึมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการวิเคราะห์ธุรกรรมการซื้อสินค้าในร้านขายกาแฟ

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในขั้นตอนนี้ ผู้วิจัยได้ดำเนินการสร้างแบบจำลองข้อมูลด้วยเทคนิคเหมืองข้อมูลโดยใช้วิธีการหากฎความสัมพันธ์ (Association Rules) ด้วยอัลกอริทึม FP-Growth และ Apriori สำหรับเครื่องมือที่ใช้ในการ

วิเคราะห์ข้อมูลครั้งนี้ ประกอบด้วยโปรแกรม Microsoft Excel สำหรับการจัดการและตรวจสอบข้อมูลเบื้องต้น, Google Colab สำหรับการประมวลผลข้อมูล และ Python ร่วมกับไลบรารี mlxtend สำหรับการสร้าง Frequent Itemsets และ Association Rules โดยมีเป้าหมายเพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่ครอบคลุมและมีประสิทธิภาพสูงสุดในการค้นหาความสัมพันธ์ระหว่างสินค้าต่าง ๆ สามารถอธิบายกฎความสัมพันธ์ของอัลกอริทึม Apriori, และ FP-Growthได้จากตารางต่อไปนี้

1. ศึกษากฎความสัมพันธ์ (Association Rules) ของอัลกอริทึม Apriori, และ FP-Growth ได้ผลการศึกษาในตารางที่ 2 และตารางที่ 3

ตารางที่ 2 กฎความสัมพันธ์ระหว่างรายการสินค้าที่ลูกค้ามักซื้อร่วมกัน โดยใช้อัลกอริทึม Apriori

Antecedents รายการสินค้าที่เกิดขึ้นก่อน	Consequents รายการสินค้าที่เกิดขึ้นตามมา	Support ความถี่ที่ Antecedents และ Consequents ปรากฏร่วมกันในข้อมูล	Confidence ความน่าจะเป็นที่ลูกค้าจะซื้อ Consequents เมื่อซื้อ Antecedents แล้ว	Lift ความแข็งแรงของความสัมพันธ์ (> 1 คือสัมพันธ์กันมากกว่าความบังเอิญ)	Leverage ความแตกต่างระหว่างความถี่จริงกับความถี่ที่คาดว่าจะเกิด	Conviction ตัวชี้วัดความน่าเชื่อถือของกฎ (ยิ่งมากยิ่งสัมพันธ์แน่น)
(Spring_0)	(Latte_0)	0.460	0.868	1.007	0.003140	1.044857
(Spring_0)	(Hazelnut Latte_0)	0.439	0.828	1.002	0.000690	1.007582
(Spring_0)	(Vanilla Latte_0)	0.447	0.843	0.991	-0.004030	0.951446
(Spring_0)	(Creamy Aren Latte_0)	0.452	0.853	1.020	0.008920	1.114359
(Spring_0)	(Caramel Latte_0)	0.435	0.821	0.975	-0.011260	0.881474
(Butter Toast_0, Americano_0, Chocolate Toast_0)	(Egg Salad Toast_0, Latte_0, Cappuccino_0)	0.301	0.622	1.047	0.013504	1.073792
(Butter Toast_0, Chocolate Toast_0, Cappuccino_0)	(Americano_0, Egg Salad Toast_0, Latte_0)	0.301	0.613	1.034	0.009837	1.051774

ตารางที่ 2 กฎความสัมพันธ์ระหว่างรายการสินค้าที่ลูกค้ามักซื้อร่วมกัน โดยใช้อัลกอริทึม Apriori (ต่อ)

Antecedents รายการสินค้าที่เกิดขึ้นก่อน	Consequents รายการสินค้าที่เกิดขึ้นตามมา	Support ความถี่ที่ Antecedents และ Consequents ปรากฏร่วมกันในข้อมูล	Confidence ความน่าจะเป็นที่ลูกค้าจะซื้อ Consequents เมื่อซื้อ Antecedents แล้ว	Lift ความแข็งแรงของความสัมพันธ์ (> 1 คือสัมพันธ์กันมากกว่าความบังเอิญ)	Leverage ความแตกต่างระหว่างความถี่จริงกับความถี่ที่คาดว่าจะเกิด	Conviction ตัวชี้วัดความน่าเชื่อถือของกฎ (ยิ่งมากยิ่งสัมพันธ์แน่น)
(Americano_0, Chocolate Toast_0, Latte_0, Cappuccino_0)	(Butter Toast_0, Egg Salad Toast_0, Matcha Latte_0)	0.301	0.609	1.047	0.013492	1.069907
(Americano_0, Chocolate Toast_0, Latte_0, Matcha Bun_0)	(Butter Toast_0, Egg Salad Toast_0, Cappuccino_0)	0.301	0.602	1.031	0.009000	1.045226
(Americano_0, Chocolate Toast_0, Cappuccino_0, ...)	(Butter Toast_0, Egg Salad Toast_0, Latte_0)	0.301	0.622	1.025	0.007212	1.039410

จากตารางที่ 2 สรุปผลการวิเคราะห์กฎความสัมพันธ์ (Association Rules) ระหว่างสินค้าต่าง ๆ โดยเฉพาะรายการสินค้าที่ลูกค้ามักซื้อร่วมกัน โดยใช้ อัลกอริทึม Apriori ดังนี้

1. ความสัมพันธ์ระหว่างฤดูใบไม้ผลิ (Spring_0) กับเครื่องดื่มต่าง ๆ

1.1 เมื่อลูกค้าเข้าร้านในช่วงฤดูใบไม้ผลิ มักจะซื้อเครื่องดื่มประเภทลาเต้ เช่น ลาเต้ (Latte), เฮเซลนัทลาเต้, วานิลลาลาเต้, ครีมมี่อาเรนลาเต้, คาราเมลลาเต้ ยกตัวอย่างเช่น

(Spring_0) ⟶ (Latte_0) มีค่า ความน่าจะเป็น = 86.8% แปลว่าลูกค้า 100 คนที่มาซื้อของในฤดูนี้ จะมีประมาณ 87 คนที่ซื้อลาเต้ด้วย

1.2 ความสัมพันธ์ส่วนใหญ่ในกลุ่มนี้มีค่า Lift ใกล้ 1 ซึ่งหมายถึงพฤติกรรมการซื้อที่ "พบบ่อย" แต่ไม่ใช่ความสัมพันธ์ที่แข็งแรงมากนัก

2. กลุ่มขนมปังและกาแฟ ที่มักซื้อเป็นชุด

2.1 ลูกค้าที่ซื้อ ขนมปังเนย (Butter Toast), ช็อกโกแลตโทสต์, อเมริกาโน่ มักจะซื้อร่วมกับลาเต้, คาปูชิโน่ และไข่บนขนมปัง (Egg Salad Toast) ยกตัวอย่าง กฎความสัมพันธ์

(Butter Toast, Americano, Chocolate Toast) ⟶ (Egg Salad Toast, Latte, Cappuccino) มีค่า Confidence = 62.2% และ Lift = 1.047 แปลว่าชุดเมนูนี้มีโอกาสสูงที่จะถูกซื้อร่วมกันจริง ไม่ใช่แค่ความบังเอิญ

ตารางที่ 3 กฎความสัมพันธ์ระหว่างรายการสินค้าที่ลูกค้ามักซื้อร่วมกัน โดยใช้อัลกอริทึม FP-Growth

Antecedents รายการสินค้าที่เกิดขึ้นก่อน	Consequents รายการสินค้าที่เกิดขึ้นตามมา	Support ความถี่ที่ Antecedents และ Consequents ปรากฏร่วมกันในข้อมูล	Confidence ความน่าจะเป็นที่ลูกค้าจะซื้อ Consequents เมื่อซื้อ Antecedents แล้ว	Lift ความแข็งแรงของความสัมพันธ์ (> 1 คือสัมพันธ์กันมากกว่าความบังเอิญ)	Leverage ความแตกต่างระหว่างความถี่จริงกับความถี่ที่คาดว่าจะเกิด	Conviction ตัวชี้วัดความน่าเชื่อถือของกฎ (ยิ่งมากยิ่งสัมพันธ์แน่น)
(Butter Toast_0)	(Latte_0)	0.726	0.861	0.999	-0.000666	0.994308
(Latte_0)	(Butter Toast_0)	0.726	0.842	0.999	-0.000666	0.995103
(Butter Toast_0)	(Vanilla Latte_0)	0.711	0.843	0.991	-0.006393	0.951568
(Vanilla Latte_0)	(Butter Toast_0)	0.711	0.835	0.991	-0.006393	0.954336
(Butter Toast_0, Vanilla Latte_0)	(Latte_0)	0.607	0.854	0.990	-0.005882	0.943442
(Vanilla Latte_0, Latte_0, Fall_1)	(Matcha Bun_0)	0.322	0.856	1.023	0.007288	1.134963
(Matcha Bun_0, Fall_1)	(Vanilla Latte_0, Latte_0)	0.322	0.747	1.026	0.008232	1.075523
(Latte_0, Fall_1)	(Matcha Bun_0, Vanilla Latte_0)	0.322	0.744	1.056	0.017168	1.154667
(Vanilla Latte_0, Fall_1)	(Matcha Bun_0, Latte_0)	0.322	0.740	1.021	0.006625	1.058628
(Fall_1)	(Matcha Bun_0, Latte_0, Vanilla Latte_0)	0.322	0.645	1.065	0.019606	1.110768

จากตารางที่ 3 สรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้านพฤติกรรมการซื้อสินค้าที่มักเกิดขึ้นร่วมกันของลูกค้าของกฎความสัมพันธ์ Association Rules (FP-Growth)

1. ขนมปังเนยกับลาเต้

1.1 ลูกค้ามักซื้อ ขนมปังเนย (Butter Toast) คู่กับ ลาเต้ (Latte) เป็นประจำ

1.2 พบว่ามากกว่า 72% ของลูกค้าซื้อสองรายการนี้พร้อมกัน

1.3 โอกาสที่จะซื้อทั้งสองอย่างคู่กันอยู่ที่ประมาณ 84–86%

2. ขนมปังเนยกับวานิลลาลาเต้ (Vanilla Latte)

2.1 ลูกค้ามีแนวโน้มซื้อขนมปังเนยคู่กับวานิลลาลาเต้เช่นกัน

2.2 ซื้อพร้อมกันในกว่า 71% ของกรณี และมีโอกาสเกิดเกิน 83%

3. ความสัมพันธ์กับฤดูใบไม้ร่วง (Fall_1)

3.1 ในฤดูใบไม้ร่วง ลูกค้ามักซื้อเมนูพิเศษ เช่น มัทฉะบัน (Matcha Bun) ร่วมกับลาเต้ และวานิลลาลาเต้ เช่น เมื่อมีฤดูใบไม้ร่วง รวมกับเครื่องดื่ม ⟶ ลูกค้ามีโอกาสซื้อมัทฉะบันสูงถึง 85.6%

จากการวิเคราะห์ พบว่าความสัมพันธ์นี้ “แข็งแรง” กว่าคู่ทั่วไป (ค่าที่เรียกว่า Lift > 1 หมายถึงสัมพันธ์กันจริง ไม่ใช่แค่บังเอิญ)

4. ซื้อสลับกันหลายทาง ซื้ออะไรก่อนได้ ลูกค้าอาจเริ่มจากลาเต้ หรือวานิลลาลาเต้ หรือมัทฉะบันก่อน แล้วค่อยซื้ออีกอย่างตาม ยกตัวอย่างกฎความสัมพันธ์

กฎ	Support	Confidence
Latte ⟶ Butter Toast	0.726	0.842
Butter Toast ⟶ Latte	0.726	0.861

โดยพิจารณาจาก ค่า Support (ความถี่ของการซื้อร่วม) และ Confidence (ความน่าจะเป็นของการซื้ออีกสินค้าตามมา) ที่ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าลูกค้ามีความชอบที่ “ยืดหยุ่น” ในการเลือกสินค้าแต่ยังอยู่ในกลุ่มเมนูเดียวกัน

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลธุรกรรมของลูกค้าด้วยอัลกอริทึม Apriori และ FP-Growth พบรูปแบบการซื้อสินค้าที่เกิดร่วมกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในเชิงธุรกิจร้านกาแฟได้ดังนี้

1. จัดชุดเมนูส่งเสริมการขาย (Combo Set) จากความสัมพันธ์ระหว่างเครื่องดื่มและขนม เช่น ลาเต้กับขนมปังเนย หรือมัทฉะบันกับลาเต้ในฤดูใบไม้ร่วง สามารถจัดชุดเมนูยอดนิยมเพื่อเพิ่มยอดขายเฉลี่ยต่อใบเสร็จ (Cross-selling)

2. ออกแบบโปรโมชั่นตามฤดูกาล ตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่าในฤดูใบไม้ผลิ ลูกค้านิยมเครื่องดื่มรสหวาน (เช่น วานิลลาลาเต้, ครีมมี่ลาเต้) สามารถออกเมนูพิเศษประจำฤดู(Seasonal Menu) เช่น “Spring Latte Set”

3. จัดวางสินค้าภายในร้าน สินค้าที่มักถูกซื้อร่วมกันควรวางใกล้กันเพื่อกระตุ้นการซื้อ เช่น วางขนมปังใกล้จุดสั่งลาเต้

4. ปรับกลยุทธ์การแนะนำสินค้า (Recommendation) นำกฎที่ได้มาใช้ในระบบแนะนำสินค้าอัตโนมัติ (เช่น บนแอปหรือจอ POS) หากลูกค้าสั่งลาเต้ ระบบสามารถแนะนำขนมที่ซื้อร่วมกันบ่อย

5. วางแผนสต็อกสินค้าอย่างมีประสิทธิภาพ รู้ว่าลูกค้าชอบซื้อสินค้าคู่กัน ทำให้สามารถประมาณการสต็อกได้แม่นยำขึ้น เช่น เมื่อมีการสั่งลาเต้เพิ่มควรเตรียมขนมปังเนยไว้มากขึ้นด้วย

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างผลลัพธ์ของ Association Rules (Apriori) และ Association Rules (FP-Growth)

คุณสมบัติ	Apriori อัลกอริทึม	FP-Growth อัลกอริทึม
จำนวนกฎที่สร้างขึ้น	578,180 กฎ	578,180 กฎ
กระบวนการสร้างกฎ	ใช้การสร้าง Candidate และสแกนฐานข้อมูลซ้ำๆ	ใช้โครงสร้าง FP-Tree เพื่อลดจำนวนการสแกนฐานข้อมูล
จำนวนครั้งที่สแกนฐานข้อมูล	หลายครั้ง	เพียง 2 ครั้ง
การใช้หน่วยความจำ	ใช้หน่วยความจำสูงสำหรับ Candidate Sets	ใช้หน่วยความจำลดลงเนื่องจาก FP-Tree
ประสิทธิภาพ	ใช้เวลามากกว่าในฐานข้อมูลขนาดใหญ่	ประมวลผลได้เร็วกว่าในฐานข้อมูลขนาดใหญ่
ความซับซ้อน	มีความซับซ้อนสูง เนื่องจากต้องสร้างและกรอง Candidate	ความซับซ้อนน้อยกว่าเพราะใช้ FP-Tree
ตัวอย่าง Confidence	Confidence สูงสุด ~ 86.7%	Confidence สูงสุด ~ 86.7%
ตัวอย่าง Lift	สูงสุด ~ 1.056	สูงสุด ~ 1.064
การใช้งานเหมาะสม	เหมาะสำหรับชุดข้อมูลขนาดเล็กถึงปานกลาง	เหมาะสำหรับชุดข้อมูลขนาดใหญ่

จากตารางที่ 4 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบคุณสมบัติของอัลกอริทึม Apriori และ FP-Growth พบว่าทั้งสองอัลกอริทึมจะสามารถสร้างกฎความสัมพันธ์ได้ในจำนวนที่เท่ากัน คือ 578,180 กฎ แต่กระบวนการทำงานและประสิทธิภาพของทั้งสองต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ อัลกอริทึม Apriori อาศัยการสร้างชุดข้อมูลที่

เรียกว่า Candidate Itemsets และต้องสแกนฐานข้อมูลซ้ำหลายครั้งเพื่อกรองหาชุดรายการที่เกิดบ่อย ซึ่งทำให้มีความซับซ้อนในการประมวลผล และใช้ทรัพยากรหน่วยความจำมาก โดยเฉพาะเมื่อทำงานกับฐานข้อมูลขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตาม Apriori เหมาะสมกับชุดข้อมูลขนาดเล็กถึงปานกลาง เนื่องจากสามารถให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำและกระบวนการทำงานเข้าใจง่ายในเชิงพื้นฐาน ในทางตรงกันข้าม อัลกอริทึม FP-Growth ใช้โครงสร้างข้อมูลแบบ FP-Tree เพื่อลดจำนวนครั้งในการสแกนฐานข้อมูล ซึ่งส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการประมวลผลที่ดีกว่า FP-Growth สามารถประมวลผลได้โดยใช้การสแกนฐานข้อมูลเพียง 2 ครั้ง และไม่ต้องสร้าง Candidate Itemsets จึงช่วยลดการใช้หน่วยความจำและลดความซับซ้อนของกระบวนการได้อย่างมาก ทำให้เหมาะสำหรับการใช้งานกับฐานข้อมูลขนาดใหญ่ที่มีรายการข้อมูลจำนวนมากและซับซ้อน

สำหรับค่าตัวชี้วัดทางเทคนิค เช่น ค่า Confidence สูงสุดของทั้งสองอัลกอริทึมอยู่ในระดับเดียวกันที่ประมาณ 86.7% แสดงถึงความแม่นยำของกฎความสัมพันธ์ที่สร้างขึ้น ส่วนค่า Lift สูงสุดของ FP-Growth อยู่ที่ประมาณ 1.064 ซึ่งสูงกว่า Apriori เล็กน้อย (ประมาณ 1.056) แสดงให้เห็นว่า FP-Growth มีความสามารถในการระบุความสัมพันธ์เชิงบวกได้ชัดเจนกว่าเล็กน้อย โดยสรุป อัลกอริทึม FP-Growth มีความได้เปรียบในด้านประสิทธิภาพ ความเร็ว และความเหมาะสมสำหรับการใช้งานในบริบทของข้อมูลขนาดใหญ่ ขณะที่ Apriori ยังคงเหมาะสำหรับสถานการณ์ที่ต้องการความเข้าใจง่ายและข้อมูลไม่ซับซ้อนมากนัก

2. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม Apriori และ FP-Growth ในการวิเคราะห์ธุรกรรมการซื้อสินค้าของผู้บริโภคในร้านกาแฟ

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่าง Apriori **และ** FP-Growth

เกณฑ์การเปรียบเทียบ	Apriori	FP-Growth
Processing Time	0.00 วินาที	0.01 วินาที
Iterations	4	4
Memory Usage	30.33 KB	30.34 KB

จากตารางที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบเชิงประสิทธิภาพของอัลกอริทึม Apriori และ FP-Growth โดยพิจารณาจาก 3 เกณฑ์หลัก ได้แก่ เวลาในการประมวลผล (Processing Time), จำนวนรอบการทำงาน (Iterations) และการใช้หน่วยความจำ (Memory Usage) ผลการวิเคราะห์พบว่า ทั้งสองอัลกอริทึมใช้จำนวนรอบการประมวลผลเท่ากัน คือ 4 รอบ และมีการใช้หน่วยความจำที่ใกล้เคียงกันมาก โดย Apriori ใช้ 30.33 KB ขณะที่ FP-Growth ใช้ 30.34 KB ซึ่งแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ในส่วนของเวลาในการประมวลผล Apriori ใช้เวลา 0.00 วินาที ส่วน FP-Growth ใช้เวลา 0.01 วินาที ซึ่งอาจสะท้อนว่าในกรณีของชุดข้อมูลขนาด

เล็ก Apriori สามารถประมวลผลได้รวดเร็วกว่าเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม ความแตกต่างนี้ถือว่าเล็กน้อยมาก และอาจไม่มีนัยสำคัญในเชิงประสิทธิภาพโดยรวม เมื่อพิจารณาโดยภาพรวม ผลการเปรียบเทียบจากตารางนี้แสดงว่าทั้งสองอัลกอริทึมมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันเมื่อใช้กับข้อมูลขนาดเล็ก แต่ในเชิงทฤษฎีและการศึกษาก่อนหน้า FP-Growth มักจะมีข้อได้เปรียบในด้านความเร็วและการจัดการทรัพยากรเมื่อใช้กับฐานข้อมูลขนาดใหญ่

สรุป

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ศึกษากฎความสัมพันธ์ (Association Rules) ที่เกิดขึ้นจากข้อมูลธุรกรรมของลูกค้าในร้านกาแฟ และ2) เปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม Apriori และ FP-Growth ในการประมวลผลข้อมูลดังกล่าว โดยใช้ข้อมูลธุรกรรมจริงจำนวน 1,000 รายการจากเว็บไซต์ Kaggle ผ่านการวิเคราะห์ด้วยภาษา Python และไลบรารี mlxtend

ผลการวิเคราะห์ตามวัตถุประสงค์ข้อที่ 1 พบว่าลูกค้ามีพฤติกรรมการซื้อสินค้าที่มีความสัมพันธ์กันชัดเจน เช่น การซื้อ “ลาเต้” ร่วมกับ “ขนมปังเนย” และการซื้อ “มัทฉะบัน” ร่วมกับ “วานิลลาลาเต้” โดยกฎบางรายการมีค่า Confidence สูงกว่า 85% และค่า Conviction มากกว่า 1 เช่น 1.11 ซึ่งบ่งชี้ถึงความน่าเชื่อถือของรูปแบบการซื้อร่วมที่สามารถคาดการณ์ได้

สำหรับวัตถุประสงค์ข้อที่2 เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพ พบว่าอัลกอริทึม Apriori ใช้เวลา 0.00 วินาที และหน่วยความจำ 30.33 KB ส่วน FP-Growth ใช้เวลา 0.01 วินาที และหน่วยความจำ 30.34 KB แม้ค่าจะแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย แต่ในเชิงโครงสร้าง FP-Growth ใช้แนวทาง FP-Tree ซึ่งสามารถลดจำนวนการสแกนข้อมูล ทำให้เหมาะสมกับชุดข้อมูลขนาดใหญ่หรือซับซ้อนมากกว่า

ผลการวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้จริงในธุรกิจร้านกาแฟเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการขาย เช่น การออกแบบชุดโปรโมชั่นเมนูยอดนิยม เช่น ลาเต้ + ขนมปัง, การจัดวางสินค้าให้ตอบโจทย์พฤติกรรมการซื้อร่วม หรือการสร้างระบบแนะนำเมนูอัตโนมัติบนแอปพลิเคชัน เพื่อเพิ่มยอดขายและความพึงพอใจของลูกค้า

ข้อเสนอแนะ

1. ข้อเสนอในการนำผลการวิจัยไปใช้ ผลการวิเคราะห์กฎความสัมพันธ์ด้วยอัลกอริทึม Apriori และ FP-Growth สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในธุรกิจค้าปลีกหรือร้านกาแฟได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในด้านต่อไปนี้

1.1 การออกแบบโปรโมชั่นหรือชุดเมนูส่งเสริมการขาย โดยใช้ข้อมูลการซื้อร่วมของสินค้าช่วยกำหนดรูปแบบชุดเมนูที่ลูกค้ามีแนวโน้มซื้อพร้อมกัน

1.2 การวางผังร้าน (Product Placement) เพื่อให้สินค้าที่มักถูกซื้อร่วมกันอยู่ใกล้กัน เพิ่มโอกาสในการซื้อซ้ำ

1.3 การพัฒนาแอปพลิเคชันหรือระบบแนะนำสินค้าอัตโนมัติ (Recommendation System) เพื่อแนะนำเมนูเพิ่มเติมให้กับลูกค้าแบบเรียลไทม์

1.4 การวางแผนการจัดสต็อกสินค้าให้มีความแม่นยำยิ่งขึ้น โดยใช้รูปแบบการซื้อซ้ำเป็นตัวช่วยในการคาดการณ์ความต้องการสินค้าแต่ละชนิด

2. ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป เพื่อให้ผลการวิจัยมีความสมบูรณ์และสามารถประยุกต์ใช้ได้หลากหลายมากยิ่งขึ้น ควรพิจารณาข้อเสนอแนะดังต่อไปนี้

2.1 การปรับแต่งพารามิเตอร์ในการวิเคราะห์ ควรทดลองปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ เช่นค่า Support และ Confidence ขั้นต่ำ เพื่อศึกษาว่า สามารถส่งผลต่อจำนวน และคุณภาพของกฎความสัมพันธ์อย่างไร และเพื่อหาเกณฑ์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับข้อมูลธุรกรรมในบริบทของร้านกาแฟ

2.2 การเพิ่มขนาดฐานข้อมูล ควรนำข้อมูลธุรกรรมจากหลายช่วงเวลาหรือจากร้านค้าหลายสาขามาวิเคราะห์ร่วมกัน เพื่อทดสอบความเสถียรของกฎ และประเมินว่าวิธีการวิเคราะห์ยังคงมีประสิทธิภาพในกรณีที่ข้อมูลมีความหลากหลายหรือซับซ้อนมากขึ้น

2.3 การเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมอื่น ๆ แนะนำให้เปรียบเทียบ FP-Growth และ Apriori กับอัลกอริทึมอื่น เช่น ECLAT หรืออัลกอริทึมที่ใช้ deep learning เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนและมีหลายมิติ เพื่อให้เห็นภาพรวมของประสิทธิภาพและความเหมาะสมในแต่ละกรณี

2.4 การพัฒนาเป็นระบบแนะนำสินค้า (Recommendation System) สามารถต่อยอดผลการวิเคราะห์ไปสู่การพัฒนาโมเดลแนะนำเมนูอัตโนมัติ (Menu Recommendation) เพื่อประยุกต์ใช้จริงในร้านกาแฟ โดยเชื่อมต่อกับระบบ POS หรือแอปพลิเคชันสั่งอาหาร

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณหน่วยงานสาขาวิชาธุรกิจดิจิทัล คณะดิจิทัล วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม ที่ให้การสนับสนุนเวลา และสถานที่สำหรับทำงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

Chusna, N. L., Herwanto, & Sari, I. P. (2021). Application of data mining for product purchase pattern analysis with frequent pattern growth (FP-Growth) algorithm on sales transaction data. **Journal of Science, Technology, and Engineering**, 1(1), 1–6.

Hunyadi, D. (2011). **Performance comparison of Apriori and FP-Growth algorithms in generating association rules**. Proceedings of the European Computing Conference, 376–381.

Istrat, V., & Lalić, N. (2017). Association rules as a decision making model in the textile industry. **Fibres & Textiles in Eastern Europe**, 25, 4(124), 8-14.

Mustakim, M., & Team. (2018). Market basket analysis using Apriori and FP-Growth for analysis consumer expenditure patterns at Berkah Mart in Pekanbaru Riau. **Journal of Physics: Conference Series**, 1114(1), 012131, 1-9.

Sun, X., Ngueilbaye, A., Luo, K., Cai, Y., Wu, D., & Huang, J. Z. (2024). A scalable and flexible basket analysis system for big transaction data in Spark. **Information Processing and Management**, 61(2), 103577, 1-22.

ARTHROPOD COMMUNITIES IN THREE DIFFERENT AGRICULTURAL PRODUCTION SYSTEMS IN WANG NAM KHIAO, NAKHON RATCHASIMA PROVINCE, THAILAND

Komain Booncher[1] Benyaporn Sornsa[2] Sasitorn Hasin[3*]

Received : April 24, 2025
Revised : June 25, 2025
Accepted : June 26, 2025

Abstract

Agricultural management has a significant influence on a large proportion of arthropod species, negatively impacting the community structure of arthropods, as reported in modern intensive agriculture. Our research aims to explore differences in arthropod species diversity and abundance between agricultural areas and their surrounding environments under three different agricultural practices and to investigate the relationships between arthropod diversity and local impact factors such as climate and agricultural practices. Arthropod diversity and abundance were sampled using pitfall trapping in three types of agricultural areas and their adjacent zones. In total, 99 morphospecies were identified within the study area. Greater richness values were recorded for the organic farming system (OM) compared to good agricultural practice (GAP) and conventional agricultural sites (CH). The number of species was higher in the inside zones than in the outside zones across all study sites. Significantly higher species richness in the inside zones compared to outside zones was observed at the OH and GAP ($P<0.05$), whereas no significant difference was found at the CH ($P>0.05$). Additionally, in the OM and GAP areas, but not in the CH, these differences suggest that the field edges of agricultural practices can play an important role in maintaining biodiversity in agroecosystems, and this role is related to edge-of-field practices in agriculture.

Keywords: Agroecosystem, Agricultural practice, Agricultural fauna, Biodiversity

---

[1] *Assistance Professor, Faculty of Agriculture and Life Sciences, Chandrakasem Rajabhat University, e-mail: komain_b@hotmail.com*

[2] *Researcher, Research and Development Institute, Valaya Alongkorn Rajabhat University under the Royal Patronage, e-mail: benyaporn.sorn@vru.ac.th*

[3] *Assistance Professor, College of Innovative Management, Valaya Alongkorn Rajabhat University under the Royal Patronage, e-mail: sasitorn.ha@vru.ac.th*

** Corresponding author, e-mail : sasitorn.ha@vru.ac.th*

Introduction

Arthropod species are one of the main components of the agricultural fauna. They have high diversity and abundance, and perform various important ecosystem services in agrarian ecosystems such as pollination, nutrient recycling, changing soil structures, and natural enemy and bioindicator species in habitat change (McLaughlin and Mineau, 1995; Eggleton et al., 2002; Luke et al., 2014; Muvengwi et al., 2017). For example, the abundance and species composition of arthropods change under agricultural management (Brussaard et al., 1997; Rubiana et al., 2015) and agrarian intensification, which results in changes in the physical and chemical properties of the soil (Batary et al., 2012). Previous research has shown that arthropod species such as ground beetles, rove beetles, and ants were highly tolerant of a wide range of environmental conditions from agricultural practices (Büchs, 2003; Luke et al., 2014; Martin et al., 2020) and field margins (Helenius and Bäckman, 2004; Werling and Gratton, 2008; Gallé et al., 2020). The diversity and abundance of arthropods varied in response to environmental stress or other factors. Thus, various groups of soil insects are currently used as a standard in assessing the ecological risks to soil in agricultural production systems (McLaughlin and Mineau, 1995; Büchs, 2003). Over the past by a few centuries, some land that once hosted Thailand's native forests has been changed to agricultural use through human activities such as logging, clearing for agriculture, and natural disasters.

Therefore, a significant part of Thailand's natural agriculture is found in rural landscapes. Through optimizing farm diversification, the agricultural sector has a major type of land management practice such as land under temporary crops (double-cropped areas are counted once), temporary meadows for mowing or pasture, land under market or kitchen gardens, land temporarily fallow and land abandoned as a result of shifting cultivation after land reclaimed by forest reclamation policy of Thailand. However, there is a clear need to provide easily available guidance based on existing knowledge, best practice and publications inform that a sustainable resource in an agriculture area for increasing economic viability coupled with improving the sustainability of agroecosystem in the medium to long term based on the sustainable development goals (World Wildlife Fund, 2021), which is can be easily understood and rapidly translated into actions by practitioners and stakeholders. Agroecosystems play an

important role in integrating biodiversity into various agricultural areas. The sustainability of the regional agroecological economic platform aims to strengthen the link between the business sector and the conservation of agrobiodiversity. This includes the development of best-practice guidance on the main risks, responsibilities, and opportunities for farmers related to nature and biodiversity conservation (World Wildlife Fund, 2021).

Objectives

1. Study on communities in three different agricultural production systems
2. Relationships among arthropod biodiversity assemblages and environmental factors in agricultural areas

Materials and methods

The study area

This study was conducted in an agricultural area located in the Thai Samakkee subdistrict, Wang Nam Khiao district, Nakhon Ratchasima Province, Northeastern Thailand (14.343°N, 101.897°W). The average elevation is 500 metres above mean sea level. The mean annual temperature ranges from 10°C (Min) to 42°C (Max). The average relative humidity is 30.20 ± 10.1 SE %. Vegetation and land management data were used to identify three agricultural areas: a conventional agricultural site (CH), a good agricultural practice site (GAP), and an organic farming system site (OM). A conventional agricultural site (CH) was used for growing chilli with year-round high-level pesticide and fertilizer application, and modern tractor ploughing with three harvests per year. Good agricultural practice (GAP) involves cultivating crops by considering their economic viability, food safety, quality controls, year-round low-level pesticide application, compost, and liquid fertilizer (e.g., manure) for the agricultural area. The organic farming system (OM) is a method for growing crops without the use of pesticides, fertilizers, and growth hormones. Major vegetables grown at the OM and GAP include Green Oak, Red Oak, Cos lettuce, Butterhead lettuce, Iceberg lettuce, red leaf lettuce, cucumber, and pumpkin. Land use activities at the OM and GAP were traditional ploughing (farmers work the land with a weeding tool) with three harvests per year: November 2016 to October 2017

Arthropod sampling

Agricultural sample plots (ca. 1 ha) were randomly selected from each agricultural area to assess arthropods and environmental factors. Each sample plot was divided into two areas: the inside crop area (IA) and the field edges (OA). Three transects measuring 10 m in length were set up at each sample zone. Arthropods were sampled by using pitfall traps. At each sample zone, pitfall traps were buried in the soil along the transect line at every 2 m, with 5 traps per transect line and 15 traps per sampling zone (i.e., the IA and OA), and in total 30 traps per agricultural sample plot. Pitfall traps were set up on the day before data collection. Arthropod specimens were preserved in 80% alcohol and labelled for identification. Collections were performed six times based on the seasons, with three times in the dry season from November 2016 to April 2017 and three times in the wet season from June 2016 to October 2017. In addition, a total of 540 pitfall traps were set up in this study.

Environmental factors

After collecting arthropod data, three points of air temperature and relative humidity above the soil surface were measured at each sample zone. Air temperatures and relative humidity were measured at 20 cm above the soil surface using a Temperature Data Logger and Digital Thermometer (SK-L200 Series).

Identification of Arthropods

Collections of ground-dwelling arthropods were sorted, and two taxonomic levels (i.e., arthropod orders and families) were classified. Ground-dwelling arthropod orders were identified using a systematic keys (Aoki et al., 2014) and taxonomic expertise on these groups. Ants were identified by using a reference of the insect collection at the Department of National Parks, Wildlife and Plant Conservation (DNP). All ant individuals were sorted into species and morphospecies in each trap, and other arthropods were identified at the family level. The data on the number of individuals for each ant species or arthropod family were counted for analysis.

Data analysis

The total number of GDA species determines the species richness. We calculated and analysed the frequency of occurrence (F) of each GDA family in each study area separately by using the presence or absence of GDA. Abundance was considered the number of individual workers captured in the pitfall traps. Shannon diversity (H´) and Evenness (*E*) were used to evaluate the species diversity indices and dominance of arthropod assemblages in each agricultural area. The H´ and *E* were calculated using the PAST (Paleontological Statistics) program version 3.0

Comparisons of the richness, the H´ and *E* between the different agricultural areas, and the test for differences in data between the seasons were evaluated using univariate ANOVA. Pairwise comparisons (LSD post-hoc tests) were conducted when the differences were considered significant at $P < 0.05$, with the study areas and seasons serving as explanatory variables. The data's normality and homoscedasticity were confirmed before the analyses were performed using Shapiro-Wilk and Levene's tests. All data were transformed to reduce heteroscedasticity for the analysis. All univariate statistical analyses were performed using SPSS version. 20.0.0 for Windows (SPSS Inc., Chicago, IL, USA).

The relationships among arthropod biodiversity assemblages, soil environmental factors, and agricultural practices were examined using principal component analysis (PCA). These analyses were done with the PC-ORD program v. 5

Results and discussion

Arthropod diversity and occurrence

99 morphospecies were found, distributed in 8 orders among 17 families (Appendix Table 1). Ants (59 species) showed the most diversity occurring in agricultural areas, followed by beetles (16 species) and spiders (10 species). Greater richness values (± SE) were recorded for the organic farming system (OM) with 59 ± 4.5 SD than for the good agricultural practice (GAP) (44 ± 5.9 SD) and the conventional agricultural site (CH; 35 ± 9.3 SD). Univariate ANOVA revealed there were no significant differences in arthropod richness among the farming areas in the wet season (65 ± 5.1 SD) or in the dry season (15 ± 4.5 SD).

Species diversity indices (H´) differed slightly among the three agricultural areas. The average of the H´ value was somewhat higher in the GAP with 3.02 ± 0.32 SD, followed by the OM (2.76 ± 0.52 SD) and the CH (2.62 ± 0.69 SD), but the difference was not significant (*P*>0.05). The average of evenness (*E*) was high in the OM (0.52 ± 0.03 SD) and the GAP (0.48 ± 0.08 SD), followed by the CH (0.39 ± 0.15 SD). Significant differences between the wet and dry seasons were not detected for the H´ and the *E*.

The frequency of occurrence was higher for Formicidae (ants) in the range of 60% to 97% (Appendix Table 1). In the CH, larger values were found at the outside zone for Araneae (spiders) with a 26% frequency of occurrence, followed by ants with a 90% frequency. In the GAP, larger values were observed in the outside zone for ants, with a 97% frequency of occurrence. In the OM, larger values were found at the outside zone for, ants (78%) and Tridactylidae (22%)

Difference in diversity between the inside zone and the outside zone.

In the inside zone, the average number of arthropod species in the OM (37 ± 8.4 SD) and the GAP (29 ± 7.4 SD) and the CH (26 ± 4.4 SD) with a statistically significant difference (*P* > 0.05). In the outside zone, the average number of arthropod species in the OM (58 ± 8.3 SD) was significantly higher than the number of arthropod species in the GAP (43 ± 5.9 SD) and CH (31 ± 6.6 SD), with a statistically significant difference (*P* < 0.05). Interestingly, important differences between the inside and outside zones were found in the OM and GAP (*P* < 0.05), but not in the CM.

The average number of arthropod species varied by season and interaction among the agricultural sampling areas. In the OM, for the average number of arthropod species in the inside zone (34.5 ± 0.6 SD), the significance was higher than the outside zone (24.3 ± 1.8 SD) in the dry season (P < 0.05; Figure 1A). No statistically significant difference between the inside and outside zones was detected for the CH and GAP (*P*> 0.05). The difference of species was effect by season. The the average number of arthropod species in the inside zone (39.3 ± 0.5 SD) the significance was higher than the outside zone (29.3 ± 1.6 SD) for the CH in the wet season (*P* < 0.05; Figure 1B). Meanwhile, for the average number of arthropod species in the inside zone

(28.1 ± 1.5 SD) the significance was lower than the outside zone (37.1 ± 2.0 SD) for the GAP in the dry season ($P < 0.05$).

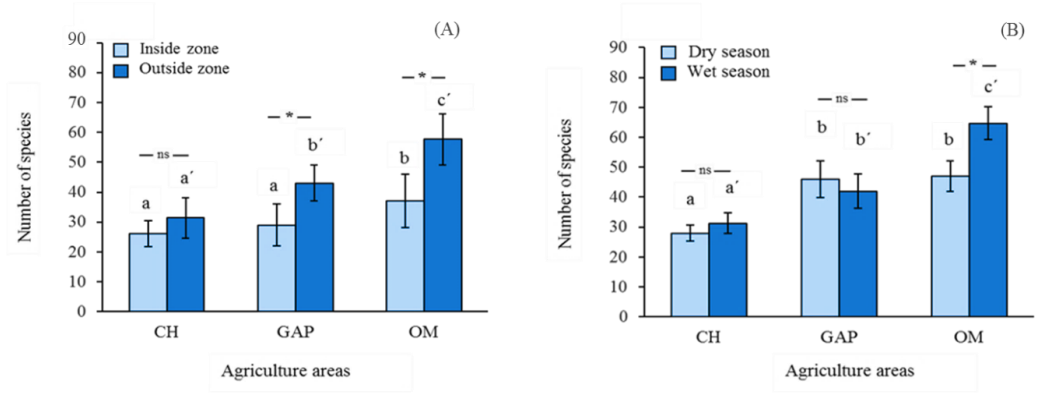


Figure 1 : Difference in average (± SD) of the number of species between (A) inside crop areas and field edges and (B) dry season and wet season for each agricultural sampling area. The significant values are indicated with an asterisk for * = $P < 0.05$. Different lower-case letters indicate significant differences in sampling between the inside and outside zones. Differences in the average (± SD) number of species between the inside and outside zones for each sampling plot were indicated by ($P < 0.05$).

Variation of air temperature and relative humidity above the soil surface.

The average air temperature was a higher value in the CH (34.9± 2.3 SD) and the GAP (34.5± 2.1 SD) than the OM (32.1± 2.1 SD), with no statistically significant difference ($P > 0.05$). The average relative humidity above the soil surface was a higher value in the CH (51.2±3.8 SD) and the OM (51.0±2.7 SD) than the GAP (47.8±4.9 SD), with no statistically significant difference ($P > 0.05$). The average air temperature above the soil surface did not vary by season (Figure 2a; $P > 0.05$) and agricultural sampling area (Figure 2B; $P > 0.05$). In contrast, a significant difference between inside and outside areas was detected for relative humidity at GAP both in wet and dry season (Figure 2C; P < 0.05), and the CH and OM in wet season (Figure 2D; $P < 0.05$).

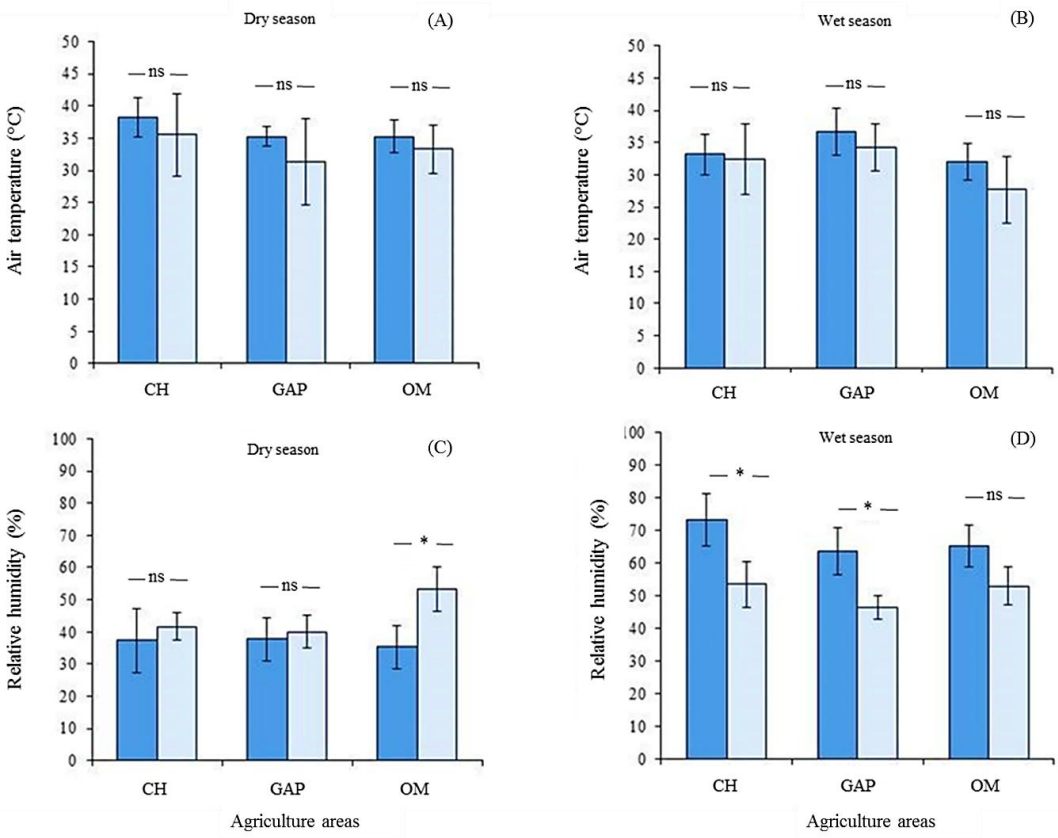


Figure 2 Difference in average (±SD) of air temperature between inside crop areas (blue) and field edges (light blue) for (A) dry season and (B) wet season, and relative humidity at above ground between inside crop areas (blue) and field edges (light blue) for (C) dry season and (D) wet season each agricultural area. The significant values are indicated with an asterisk for * = $P < 0.05$.

Relationships among arthropod biodiversity assemblages and environmental factors in agricultural areas. The canonical correspondence analysis (PCA) results showed that the arthropods could be divided into two groups (Figure 3). The first group was three ant species whose increasing presence was related to increasing soil moisture, including *Carebara affinis*, *Carebara diversa* and *Monomorium* sp.1. The second group was three ant species whose increasing presence was related to increasing air temperature, including *Meranoplus bicolor*, *Monomorium floricola* and *Trichomyrmex destructor*.

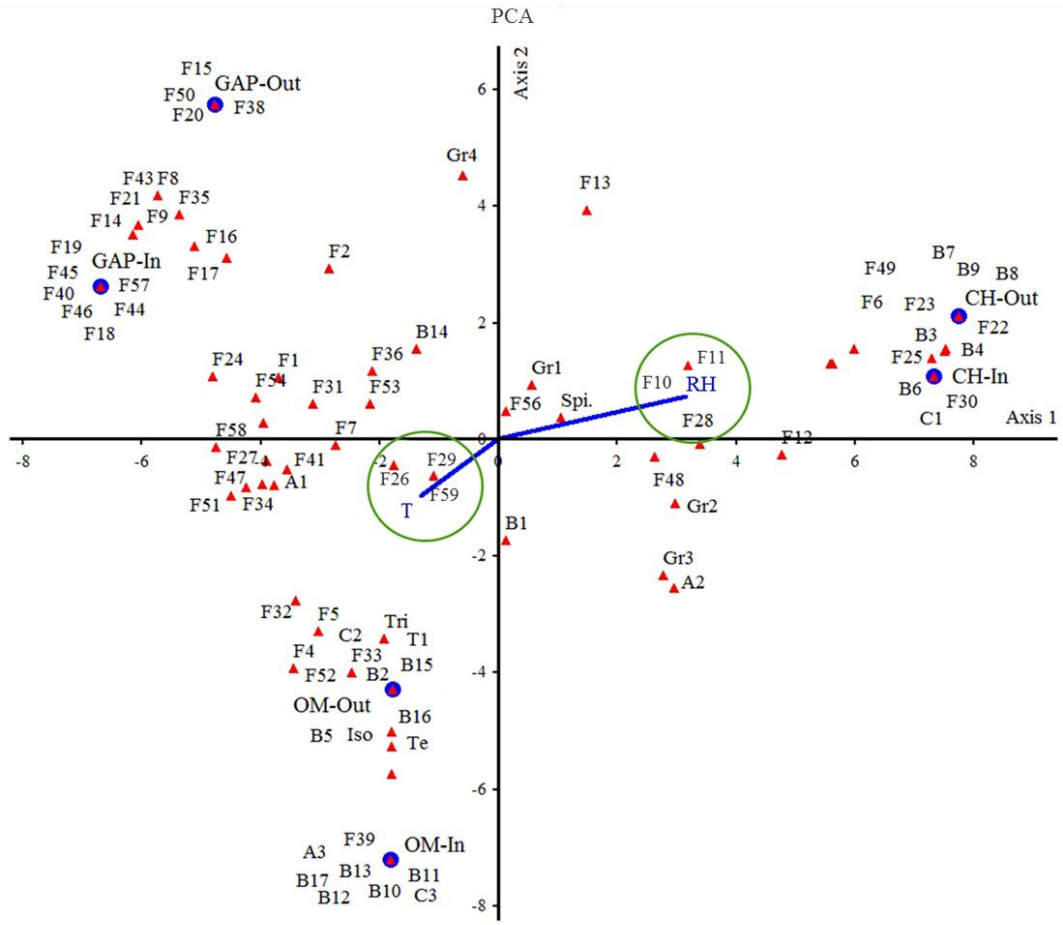


Figure 3 Principal correspondence analysis (PCA) of the arthropods in each study area. The lines show the direction and strength of the relationships among the environment factors— air temperature (T), relative humidity (RH)— and are plotted with respect to the structure of the arthropod assemblages in each study area — organic farming system (OM), good agricultural practice (GAP), conventional agricultural sites (CH)—, and abbreviations are shown in Appendix Table 1.

Discussions

Sample zones and agricultural sampling areas varied in the average number of arthropod species, and interactions among agricultural sampling areas were detected. Larger values of arthropod diversity were found in the OM plots compared with the GAP and CH. Two possible reasons can be explained. First, arthropod communities respond to often stress or disturbance in agricultural sampling areas and zones of ecotone in agroecosystems, resulting in

a high abundance and assemblage in outside zones, where the land is covered byvegetation. (i.e. greases, three, shrub) In a whole year at any particular site. Another possible reason, a difference in arthropod diversity, might be caused by agricultural practices, particularly the pesticide application behaviour (ELN-FAB, 2012; Hasin and Booncher, 2020). In the GAP and CH, agriculturists perceived arthropods as insect pests of agricultural crops; hence, they applied various insecticide controls to pest insects and weeds (i.e. homes and shelters). While the OM did not use insecticides on their farm, their pest control technique is handpicking insects or hand-pulling weeds.

Results revealed that ant species were found in specific habitat areas, such as *Recurvidris recurvispinosa* (Forel, 1890), *Pseudolasius* sp.1, *Dorylus orientalis* and *Gnamptogenys bicolor* (Emery, 1889). Typically, these ant species are specialised predators of termites and centipedes (Cerdá and Dejean, 2011), which are found only in the OM. These results reveal that food webs in soil might be a limiting factor for ant species in particular. Additionally, the characteristics of habitats and land utilisation may benefit from a reduction in shade and an increase in bare soil surfaces, which may favour unimpeded ant colony dispersion and foraging areas. Interestingly, a positive relationship was found between the abundance of ant species and the result. Three ant species— *Carebara affinis*, *Carebara diversa* and *Monomorium* sp.1 — whose increasing presence was related to increasing soil moisture, and the three ant species—*Meranoplus bicolor*, *Monomorium floricola* and *Trichomyrmex destructor*—were linked to increasing air temperature. These results reveled that ant composition often differ from each other in their responses to the same stress of climate such that species richness and abundance of ant possible can be good bioindicator for detected the impact of air temperature and relative humidity change in agroecosystems (Peck et al., 1998; Tiede et al., 2017).

According to the significant effect of agriculture practices on arthropod species, species diversity indices and evenness were not detected in the study areas. The presence of field edges around agricultural regions of the OM and GAP had a significant effect, which was not found in the CH. This study revealed that arthropod diversity had detrimental effects on vegetation cover in agricultural areas (Pribadi et al., 2011; Junior et al., 2014; Ackerman et al., 2009), field margins (Gallé et al., 2020), and farmland heterogeneity (Martin et al., 2020).

Conclusions

In summary, research results were developed to address two issues. First, according to human land use changes from forest to agricultural use, there was obvious damage to native insect biodiversity, especially soil insects, in the native vegetation and vegetation remnants of Nakhon Ratchasima province. Second, arthropod diversity served as a bioindicator category for land utilization by humans. All of the results could be used as research information to support the study of evaluation of the diversity and abundance of arthropods (e.g., frequency of occurrence for each area) when arthropods were used as bioindicators to assess the condition of soil ecosystems (Folgarait, 1998; Pribadi et al., 2011; Ackerman et al., 2009).

Recommendation

This study is a pilot research investigation of the interaction between habitat characteristics and arthropod diversity. These research results demonstrated that the field borders of agricultural practice can play an important role in maintaining biodiversity in an agroecosystem (Helenius and Bäckman, 2004; Ma et al., 2013; Werling and Gratton, 2008; Martin et al., 2020; Gallé et al., 2020), and those roles can be related to agricultural practice in an agroecosystem. However, understanding which species are good bioindicators in agroecosystems, and how the impacts of future environmental changes on arthropod communities could provide more ecological interaction data. Thus, two interesting topics for future studies in agricultural areas would be explored: (1) the relationship between arthropod community composition and agricultural system management practices in particular dimensions of functional groups of arthropods such as feeding behaviour, nutrient fixation ability, digestion types, nest construction type, and building materials (Ackerman et al., 2009), and (2) the diversity of arthropod species affected by the combination of factors, soil environment variables, and climate change.

Acknowledgements

This study was supported in part by the Office of the Higher Education Commission (grant number: 2555A12762008 for phase I and 2556 A 12702024 for phase II)

References

Aoki, T., O'Donnell, K., & Geiser, D.M. (2014). Systematics of Key Phytopathogenic Fusarium Species: Current Status and Future Challenges. **Journal of General Plant Pathology**, 80, 189-201.

Ackerman, I. L., Constantino, R., Gauch, H. G., Lehmann, J., Riha, S.J., & Fernandes, E.C.M. (2009). Termite (Insecta: Isoptera) Species Composition in a Primary Rain Forest and Agroforests in Central Amazonia. **Biotropica**, 41(2), 226–233. DOI:10.1111/j.1744-7429.2008.00479.x

Batary, P., Holzschuha, A., Orcic, K.M., Samud, F., & Tscharntkea, T. (2012). Responses of plant, insect and spider biodiversity to local and landscape scale management intensity in cereal crops and grasslands. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, 146(1), 130–136. DOI:10.1016/j.agee.2011.10.018

Brussaard, L., Behan-Pelletier, V. M., Bignell, D.E., Bignell, V. K., Didden, W. A. M., Folgarait, P. J., Fragoso, C., Frekman, D. W., Gupta, V. V. S. R., & Hattori, T. (1997). Biodiversity and ecosystem functioning in soil. **Ambio**, 26(8), 563–570.

Büchs, W. (2003). Biotic indicators for biodiversity and sustainable agriculture: introduction and background. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, 98(1-3), 1–16. DOI:10.1016/S0167-8809(03)00068-9

Cerdá, X., & Dejean, A. (2011). Predation by ants on arthropods and other animals. **Predation in the Hymenoptera: An Evolutionary Perspective**, 39–78.

Eggleton, P., Bignell, D.E., Hauser, S., Dibog, L., Norgrove, L., & Madong, B. (2002). Termite diversity across an anthropogenic disturbance gradient in the humid forest zone of West Africa. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, 90(2), 189–202. DOI:10.1016/S0167-8809(01)00206-7

Junior, A. B. V., Souza, V. B., Reis, Y.T., & Marques-Costa, A.P. (2014). Termite assemblages in dry tropical forests of Northeastern Brazil: Are termites bioindicators of environmental disturbances?. **Sociobiology**, 61(3), 324–331. DOI:10.13102/sociobiology.v61i3.324-331

Folgarait, P.J. (1998). Ant biodiversity and its relationship to ecosystem functioning: A review. **Biodiversity and Conservation**, 7, 1221–1244. DOI:10.1023/A:1008891901953

Gallé, R., Geppert, C., Földesi, R., Tscharntke, T., & Batáry, P. (2020). Arthropod functional traits shaped by landscape-scale field size, local agri-environment schemes and edge effects. **Basic and Applied Ecology**, 48, 102–111. DOI:10.1016/j.baae.2020.09.006

Hasin, S. & Booncher, K. (2020). Change in Ground- dwelling Arthropod Communities in Agroecosystems in Wang Nam Khiao, Nakhon Ratchasima province,Thailand. **Agriculture and Natural Resources**, 54(2), 139–149. DOI: 10.34044/j.anres.2020.54.2.04

Helenius, J., & Bäckman, J. P. (2004). **Functional Diversity in Agricultural Field Margins**. Copenhagen. Denmark: Nordic Council of Ministers.

Luke, S. H., Fayle, T. M., Eggleton, P., Turner, E.C., & Davies., R. G. (2014). Functional structure of ant and termite assemblages in old growth forest, logged forest and oil palm plantation in Malaysian Borneo. **Biodiversity and Conservation**, 23, 2817–2832. DOI:10.1007/s10531-014-0750-2

Ma, M., Hietala, R., Kuussaari, M., & Helenius, J. (2013). Impacts of edge density of field patches on plant species richness and community turnover among margin habitats in agricultural landscapes. **Ecological Indicators**, 31, 25-34. DOI:10.1016/j.ecolind.2012.07. 012

Martin, A.E., Collins, S. J., Crowe, S., Girard, J., Naujokaitis-Lewis, L., Smith, A.C., Lindsay, K., Mitchell, S., & Fahrig, L. (2020). Effects of farmland heterogeneity on biodiversity are similar to-or even larger than-the effects of farming practices. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, 288,106698. DOI:10.1016/j.agee.2019.106698

McLaughlin, A., & Mineau, P. (1995). The impact of agricultural practices on biodiversity. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, 55(3), 201–212. DOI:10.1016/0167-8809(95)00609-V

Muvengwi, J., Mbiba, M., Ndagurwa, H. G. T., Nyamadzawo, G., & Nhokovedzo, P. (2017). Termite diversity along a land use intensification gradient in a semi-arid savanna. **Journal of Insect Conservation**, 21, 801–812. DOI:10.1007/s10841-017-0019-7

Peck, S. L., Mcquaid, B., & Campbell, C. L. (1998). Using Ant Species (Hymenoptera: Formicidae) as a Biological Indicator of Agroecosystem Condition. **Environmental Entomology**, 27(5), 1102–1110. DOI:10.1093/ee/27.5.1102

Pribadi, T., Raffiudin, R., & Saktiharahap, I. (2011). Termites community as environmental bioindicators in highlands: a case study in eastern slopes of Mount Slamet, **Biodiversitas**, 12(4), 235–240. DOI:10.13057/biodiv/d120409

Rubiana, R., Rizali, A., Denmead, L.H., Alamsari, W., Hidayat, P., Pudjianto, P., Hindayana, D., Clough, Y., & Tscharntke, T. (2015). Agricultural land use alters species composition but not species richness of ant communities. **Asian myrmecology**, 7, 73-85. DOI:10.20362/am.007008

Tiede, Y., Schlautmann, J., Donoso, D. A., Wallis, C. I. B., Bendix, J., Brandl, R., & Farwig, N. (2017). Ants as indicators of environmental change and ecosystem processes. **Ecological Indicators**, 83, 527-537. DOI:10.1016/j.ecolind.2017.01.029

Werling, B. P., & Gratton, C. (2008). Influence of field margins and landscape context on ground beetle diversity in Wisconsin (USA) potato fields. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, 128(1-2), 104–108. DOI:10.1016/j.agee.2008.05.007

World Wildlife Fund. (2021). **Farming with Biodiversity**. Towards nature-positive production at scale. World Wildlife Fund International. Gland, Switzerland.

Appendix Table 1 List of Class/Order/ Family of arthropod collected by pit fall trap, and it frequency of occurrence (FO) in agriculture araes (N=540), and the FO in two sampling zones– inside areas (IA: N=90) and outside areas (OA: N=90) – for each agriculture sampling plot including a conventional agricultural site (CH), good agricultural practice (GAP) and organic farming system (OM)

Class/Order/ Family/Species	Abrr.	FO (%) in agriculture sampling plot					
		CH		GAP		OM	
		IA	OA	IA	OA	IA	OA
Arachnida							
Araneae; Oxyopidae (3 sp.), Salticidae (7sp.); Spider	A1	7	51	22	18	24	11
Pseudoscorpions (5 sp.); False scorpion	A2	0	0	4	4	4	4
Chilopoda							
Lithobiomorpha; Lithobiidae (2 sp.) ; Stone centipedes	C1	2	0	0	0	0	0
Scutigeromorpha; Scutigeridae (*Scutigera* sp.1) ; House centipedes	C2	0	0	0	0	2	2
Diplopoda							
Spirostreptida; Harpagophoridae (1 sp.): Millipede	D1	13	20	0	13	20	24
Insecta							
Coleoptera (16 sp.); Beetle							
Anthicidae (*Notoxus* sp.1)	B1	0	0	0	0	0	2
Bostrichidae; Bostrichidae sp.1	B4	0	0	0	0	2	2
Carabidae							
Brachinus sp.1	B5	2	0	0	0	0	0
Amblytelus sp.1	B6	0	2	0	0	0	0
Attelabidae (*Apoderus* sp.1)	B7	0	2	0	0	0	0
Curculionidae (*Alcidodes* sp.1)	B8	0	2	0	0	0	0
Scarabaeidae							
Anomala sp.1	B9	0	0	0	0	2	0
Anomala sp.2	B10	0	0	0	0	2	0
Holotrichia sp.1	B11	0	0	0	0	2	0
Holotrichia sp.2	B12	0	0	0	0	2	0
Staphylinidae							
Callicerus sp.1	B13	0	2	2	0	2	2
Carpelimus sp.1	B14	0	0	0	0	0	2
Carpelimus sp.2	B15	0	0	0	0	0	2
Paederus dermatitis	B16	0	0	0	0	2	0
Tachyporus o sp.1	B2	2	0	0	0	0	0
Tachyporus o sp.2	B3	0	2	0	0	0	0

Appendix Table 1 List of Class/Order/ Family of arthropod collected by pit fall trap, and it frequency of occurrence (FO) in agriculture araes (N=540), and the FO in two sampling zones– inside areas (IA: N=90) and outside areas (OA: N=90) – for each agriculture sampling plot including a conventional agricultural site (CH), good agricultural practice (GAP) and organic farming system (OM) (Cont.)

Class/Order/ Family/Species	Abrr.	FO (%) in agriculture sampling plot					
		CH		GAP		OM	
		IA	OA	IA	OA	IA	OA
Hymenoptera; Formicidae (59 sp.); Ant							
Anoplolepis gracilipes Smith, 1857	F1	2	0	20	69	16	42
Camponotus rufoglaucus (Jerdon, 1851)	F2	0	2	2	9	2	0
Camponotus sp.1	F3	7	4	7	2	0	0
Camponotus sp.2	F4	0	0	4	0	4	0
Camponotus sp.3	F5	0	0	2	0	2	4
Cardiocondyla emeryi Forel, 1881	F6	27	36	2	4	2	4
Cardiocondyla nuda Mayr, 1866	F7	13	0	27	33	27	36
Cerapachys sp.1	F8	0	0	2	0	2	0
Cerapachys sp.2	F9	0	0	2	0	2	0
Carebara affinis (Jerdon, 1851)	F10	2	0	20	13	11	20
Carebara diversa (Jerdon, 1851)	F11	36	31	9	13	7	7
Carebara sp.1	F12	0	0	4	2	9	2
Oligomyrmex sp.2	F13	0	0	2	2	2	2
Diacamma rugosum LeGuillou, 1842	F14	11	16	0	2	0	2
Diacamma sp.1	F15	0	2	0	0	0	0
Diacamma vagans Smith, 1860	F16	24	20	0	2	0	16
Dolichoderus thoracicus (Smith, 1860)	F17	0	2	0	2	0	0
Dorylus orientalis Westwood, 1835	F18	0	0	11	4	0	0
Gnamptogenys bicolor Emery,1889	F19	0	0	0	4	0	0
Hypoponera sp.1	F20	0	0	7	2	7	2
Hypoponera sp.2	F21	0	0	2	0	7	2
Hypoponera sp.3	F22	0	0	2	0	0	0
Hypoponera sp.4	F23	0	0	2	0	0	0
Hypoponera sp.5	F24	0	0	0	2	0	0
Leptogenys diminuta Smith, 1857	F25	0	0	4	2	0	0
Meranoplus bicolor (Guerin- Meneville, 1844)	F26	83	67	0	0	0	0
Meranoplus sp.1	F27	0	0	0	0	0	2
Monomorium sp.1	F28	0	0	18	11	7	4
Monomorium floricola (Jerdon, 1851)	F29	38	36	0	0	2	0
Monomorium pharaonis (Linnaeus 1758)	F30	0	0	11	16	7	13

Appendix Table 1 List of Class/Order/ Family of arthropod collected by pit fall trap, and it frequency of occurrence (FO) in agriculture araes (N=540), and the FO in two sampling zones– inside areas (IA: N=90) and outside areas (OA: N=90) – for each agriculture sampling plot including a conventional agricultural site (CH), good agricultural practice (GAP) and organic farming system (OM) (Cont.)

Class/Order/ Family/Species	Abrr.	FO (%) in agriculture sampling plot					
		CH		GAP		OM	
		IA	OA	IA	OA	IA	OA
Monomorium sechellense (Emery, 1894)	F31	0	0	13	16	13	11
Nylanderia sp.1	F32	4	7	2	0	2	2
Nylanderia sp.2	F33	0	0	0	0	0	2
Nylanderia sp.3	F34	2	0	0	0	0	0
Odontoponera denticulata Smith, 1858	F35	11	16	67	138	44	107
Pachycondyla leeuwenhoeki Forel, 1886	F36	0	0	18	11	13	13
Pachycondyla luteipes (Mayr, 1862)	F37	0	0	29	38	13	22
Paratrechina longicornis Latreille, 1807	F38	4	9	9	36	9	20
Pheidole sp.1	F39	4	2	0	2	0	2
Pheidole sp.2	F40	0	0	0	2	0	0
Pheidole parva Mayr, 1865	F41	0	0	0	0	16	0
Pheidole plagiaria Smith, 1860	F42	0	0	31	0	0	0
Polyrhachis proxima Roger, 1863	F43	0	0	7	7	0	0
Ponera sp.1	F44	0	0	9	0	0	0
Pseudolasius sp.1	F45	0	0	11	0	0	0
Recurvidris recurvispinosa (Forel, 1890)	F46	0	0	7	0	0	0
Smitristruma sp.1	F47	0	0	2	0	0	2
Solenopsis geminata Fabricius, 1804	F48	58	53	0	31	36	40
Tapinoma melanocephalum Fabricius, 1793	F49	44	36	18	18	22	33
Technomyrmex butteli Forel, 1913	F50	0	0	0	7	0	0
Technomyrmex kraepelini Forel, 1905	F51	0	0	13	2	9	2
Tetramorium bicarinatum (Nylander, 1846)	F52	0	0	0	0	0	2
Tetramorium lanuginosum Mayr, 1870	F53	4	0	20	9	13	4
Tetramorium polymorphum Yamane & Jaitrong, 2011	F54	0	0	7	11	4	7
Tetramorium smithi Mayr, 1879	F55	27	24	40	20	42	20
Tetramorium walshi (Forel, 1890)	F56	20	24	16	22	13	20
Tetraponera attenuata Smith, 1877	F57	0	0	0	4	0	0
Tetraponera nigra (Jerdon, 1851)	F58	0	0	7	2	4	0
Trichomyrmex destructor (Jerdon, 1851)	F59	38	36	0	0	2	0
Isoptera; Termitidae (Odontotermes feae); Termites	T1	0	0	0	0	0	7

Appendix Table 1 List of Class/Order/ Family of arthropod collected by pit fall trap, and it frequency of occurrence (FO) in agriculture araes (N=540), and the FO in two sampling zones– inside areas (IA: N=90) and outside areas (OA: N=90) – for each agriculture sampling plot including a conventional agricultural site (CH), good agricultural practice (GAP) and organic farming system (OM) (Cont.)

Class/Order/ Family/Species	Abrr.	FO (%) in agriculture sampling plot					
		CH		GAP		OM	
		IA	OA	IA	OA	IA	OA
Orthptera (6 sp.); Grasshoppers, Katydids & Crickets							
Gryllidae							
Acheta domesticus (Linnaeus, 1758)	Gr1	16	13	20	18	9	9
Gryllus sp.1	Gr2	0	2	0	0	0	2
Gryllus sp.2	Gr3	4	0	0	0	2	2
Gryllus sp.3	Gr4	0	2	0	0	4	0
Tetrigidae (1 sp.)	Te	2	2	7	7	22	44
Tridactylidae (Tridactylus sp.)	Tri	0	0	0	0	7	20

STREAMFLOW SIMULATION BASED ON LAND USE/COVER CHANGE USING INTEGRATED GOOGLE EARTH ENGINE AND SWAT+ IN AN AGRICULTURE-DOMINATED BASIN, NORTHEAST THAILAND

Isared Kakarndee[1] Pattara Rirugchart[2*] Nuantip Chaladlert[3] Pongsak Jindasee[4]

Received : March 18,2025
Revised : June 11, 2025
Accepted : June 30, 2025

Abstract

Streamflow is a fundamental component of the hydrological cycle, and land use/land cover (LULC) significantly influences runoff processes. This study investigates the impacts of Land Use and Land Cover Change (LUCC) on streamflow in the Upper Songkhram River Basin (USRB), Northeast Thailand using Google Earth Engine (GEE) and the SWAT+ hydrological model. GEE facilitated high accuracy LULC classification (overall accuracy: 83-91%, Kappa coefficient: 0.76-0.85), revealing a marked increase in para rubber plantations and built-up areas, and a decrease in paddy fields and forests between 2003 and 2023. The calibrated and validated SWAT+ model (NSE: 0.86/0.79, R^2: 0.91/0.89, PBIAS: -24.5%/-36.7%) simulated the streamflow changes associated with LUCC. Results indicate a substantial increase in wet season streamflow, particularly in August (28.9 m^3/s) and September (25.6 m^3/s), primarily due to the decline of paddy fields and their water retention capacity. This study emphasizes the link between land use and hydrology, showcasing the combined utility of GEE and SWAT+ for assessing LUCC impacts. These findings offer valuable insights for sustainable water resource management and land use planning in Thailand and comparable regions worldwide.

Keywords: Google Earth Engine, LULC change, Northeast Thailand, Streamflow, SWAT+

[1] *Department of Farm Mechanics, Faculty of Agriculture, Kasetsart University, e-mail: isared.k@ku.th*
[2] *Department of Geography, Faculty of Social Sciences, Srinakharinwirot University, e-mail: pattara.rirugchart@g.swu.ac.th*
[3] *Hydro – Informatics Institute, e-mail: nuantip@hii.or.th*
[4] *Hydro – Informatics Institute, e-mail: pongsak@hii.or.th.*
** Corresponding author, e-mail : pattara.rirugchart@g.swu.ac.th*

Introduction

Land Use and Land Cover Change (LUCC) significantly alters Earth hydrological cycle, affecting precipitation, infiltration, evapotranspiration, and runoff (Petchprayoon et al., 2010; Yong et al., 2012). The consequences include increased flooding, soil erosion, and reduced groundwater availability (Zope et al., 2014). Understanding the link between LUCC and hydrology is crucial for proactive water resource management (Näschen et al., 2019; Guo et al., 2020). Extensive research underscores these LUCC-induced hydrological impacts. Deforestation can increase river discharge and modify seasonal water flows (Luo et al., 2016), while rapid land-use changes in Asia threaten water resources (Peng et al., 2023). Thailand exemplifies how LUCC interacts with localized factors like topography and climate to affect hydrology (Kim et al., 2005; Petchprayoon et al., 2010).

However, the key drivers of LUCC influencing the hydrological cycle at the watershed scale have yet to be systematically analyzed, particularly in the region-specific context of Thailand. This limitation hinders the availability of accurate and up-to-date data to support spatially explicit water resource management. A critical water management challenge is to evaluate which specific land-use changes most significantly affect streamflow regimes over the long term. Such information is essential for planning flood prevention, soil and water conservation, and sustainable groundwater resource management.

Satellite imagery has revolutionized Earth surface observations, particularly in geographically inaccessible regions and areas lacking comprehensive ground-based surveys (Hansen et al., 2013; Gorelick et al., 2017). The European Space Agency's Sentinel-2 satellite system provides high-resolution multispectral imagery that has proven instrumental for land use and land cover (LULC) analysis, demonstrating classification accuracy exceeding 81% through the implementation of advanced machine learning algorithms (Ninad, 2024). A methodological transition from pixel-based to object-based classification approaches has significantly enhanced LULC precision, facilitating both change detection and resource management initiatives (Ara et al., 2023). Contemporary remote sensing technologies, including microwave and hyperspectral imaging systems, have further augmented data acquisition capabilities and spatial resolution, enabling effective mapping under challenging environmental conditions (Mbinya Manetu et al., 2023). Moreover, recent advancements in geomatics techniques have substantially improved satellite image resolution for precise surveying applications (Kadhum et al., 2023), thereby supporting evidence-based sustainable land management practices (Lozano and Regan, 2018).

In the context of Thailand, where field data and spatial survey resources are limited in certain regions, remote sensing technology offers a high potential to monitor LUCC and support evidence-based natural resource planning.

Accurately analyzing LUCC necessitates cutting-edge tools like remote sensing and GIS (Huang et al., 2017). Google Earth Engine (GEE) offers free satellite imagery and cloud-based processing, streamlining LUCC assessments (Gorelick et al., 2017). GEE facilitates large-scale LUCC analysis, aids hydrological modeling, and supports the integration of land cover data into models like SWAT for water resource impact assessment (Abbaspour et al., 2015; Gorelick et al., 2017; Younes et al., 2023). SWAT, a well-established hydrological model, and its enhanced version SWAT+ (Bieger et al., 2017; Kakarndee & Kositsakulchai, 2020), allow for refined simulations (Gassman et al., 2007; Zhang et al., 2022).

Nevertheless, previous studies have typically applied GEE and SWAT independently, despite the considerable advantages of these platforms. The combined effect between GEE and SWAT+ enables efficient satellite data processing through GEE's cloud infrastructure, directly linking high-resolution spatial data with SWAT+'s advanced hydrological modeling capabilities. This integration enhances spatial-temporal resolution, facilitates multi-year analyses, and allows scenario-based assessments reflecting Thailand's complex watershed conditions. This gap in current knowledge highlights the need for comprehensive application of integrated GEE-SWAT+ frameworks for watershed-scale studies in Thailand.

This research aims to use GEE to identify LUCC drivers and model potential hydrological outcomes using SWAT+. It will investigate the impact of specific land-use changes (e.g., deforestation, agricultural expansion) on streamflow patterns. The primary research questions are: 1) Which land-use changes significantly influence hydrological responses within the study watershed? 2) How accurately can the combined use of GEE and SWAT+ predict hydrological impacts at the watershed scale? 3) What sustainable water management strategies can be formulated based on modeled outcomes under various future land-use scenarios?

The study outcomes propose to provide data-driven water management guidelines, including zoning for conservation, land-use regulation, and watershed restoration strategies to maintain water security within the study area. Furthermore, the developed framework and tools will be adaptable for application in other watersheds exhibiting similar geographic and LUCC characteristics.

Materials and methods

Study area

The Upper Songkhram River Basin (USRB), located in Northeast Thailand, encompasses an area of approximately 3,300 km² (Figure 1). Situated between 16°54′ – 18°23′ latitude and 103°10′ – 104°29′ longitude, the basin drains into the Mekong River. Its elevation ranges from 135 to 675 meters above mean sea level (masl) (Muangthong & Shrestha, 2015). Originating in

the Western Phu Phan Mountains, the USRB flows through five provinces: Udon Thani, Sakon Nakhon, Nong Khai, and Bueng Kan. In recent decades, extensive deforestation and the widespread conversion of paddy fields into para rubber plantations have significantly altered the basin's hydrodynamics. Paddy fields, which previously functioned as natural flood buffers, have been replaced by less permeable or water-retentive land uses, exacerbating flood risks during the monsoon season (Chotpantarat & Boonkaewwan, 2018).

Data

This study uses freely available satellite images from Google Earth Engine (GEE) to map changes in land use and land cover (LULC). Imagery from three Landsat satellites Landsat 7 ETM+ (2003), Landsat 8 (OLI TIRS) (2013), and the newest Landsat 9 OLI 2 (2023) were analyzed. The process of accessing these large datasets was greatly simplified by the cloud computing platform within GEE. Additionally, data from Open Street Map and DMSP OLS were incorporated to strengthen our analysis. To set up a SWAT+ model for this study, data was gathered from various sources. A 90-meter resolution digital elevation model (DEM), downloaded from www.earthdata.nasa.gov/data/instruments/srtm, was used to define watershed boundaries, drainage patterns, slopes, and landscape units with streams and rivers.

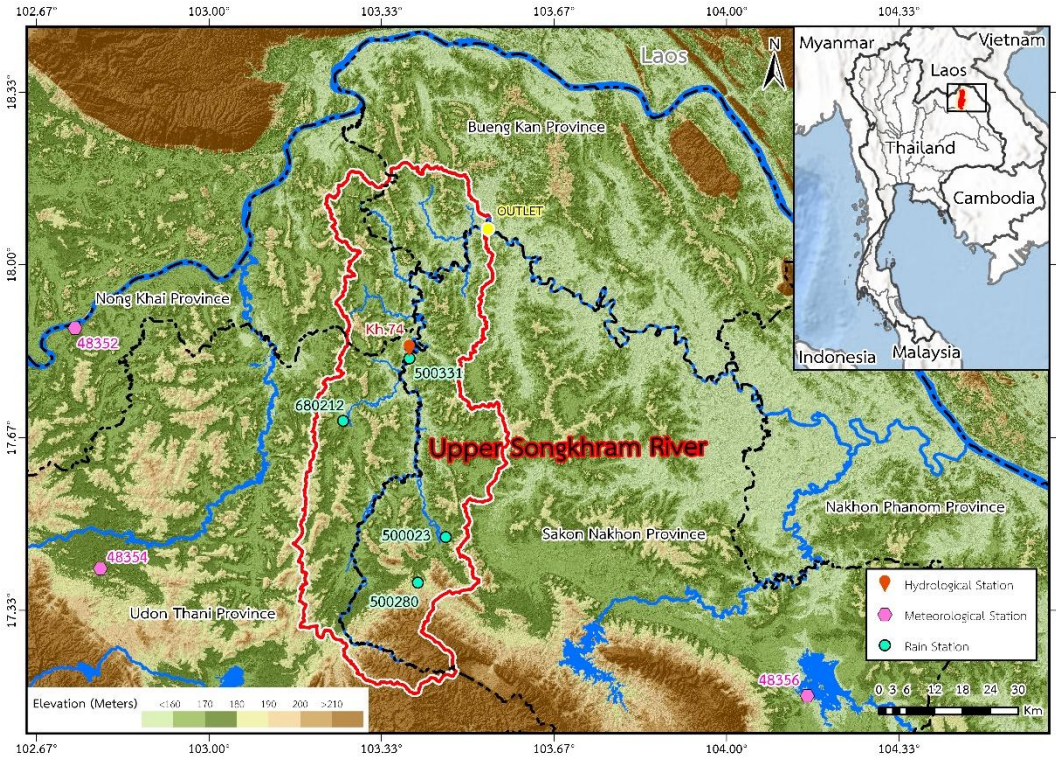


Figure 1 The Upper Songkhram River Basin (URSB)

Land use and soil maps, along with soil properties provided by the Land Development Department (LDD), were utilized to create hydrological response units (HRUs). Daily climate data (humidity, temperature, sunshine, and wind speed) was obtained from Nong Khai (48352) and Udon Thani (48354) stations (Figure 1) of the Thai Meteorological Department (TMD) to simulate streamflow within the watershed for the period of 2014 to 2022. Finally, observed flow measurements from the Kh.74 station, recorded by the Royal Irrigation Department (RID) over the same period, were employed to calibrate and validate the model accuracy.

Google Earth Engine

Google Earth Engine (GEE) (Figure 2), a cloud-based geospatial analysis platform launched by Google in 2010, has significantly evolved to become a powerful tool for Earth observation and geospatial analysis (Gorelick et al., 2017). It provides access to a vast archive of satellite imagery and analytical tools, revolutionizing research by enabling large-scale environmental monitoring and planetary analysis (Velastegui-Montoya et al., 2023). Initially designed for remote sensing applications, GEE has expanded its capabilities to support land cover classification (Hansen et al., 2013), deforestation monitoring (Tyukavina et al., 2018), and hydrological modeling (Tamiminia et al., 2020; Alzurqani et al., 2024). The integration of machine learning and big data analytics has further enhanced its role in climate change studies (Amani et al., 2020) and precision agriculture (Shelestov et al., 2017). GEE offers a web interface for scripting, data exploration, and programmatic access via Python and JavaScript libraries (Gorelick et al., 2017). Recent advancements have focused on improving computational efficiency and accessibility, making it an indispensable resource for researchers and policymakers worldwide (Mutanga & Kumar, 2019). In this study, a GEE script was developed to perform remote sensing analysis by importing a watershed boundary (SBasin) as a FeatureCollection and extracting its geometry for spatial filtering. The script defines a time range (January to December 2023) and selects Sentinel-2 bands relevant for bands B2, B3, B4, B8, B11, and B12 relevant for vegetation and land analysis. It loads the Sentinel-2 surface reflectance image collection, filters it by date and study area, and excludes images with more than 10% cloud cover. A median composite image is then generated to reduce noise caused by clouds and temporal variability. Subsequently, the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) is calculated using the near-infrared (B8) and red (B4) bands to assess vegetation health. Finally, the map is centered on the watershed and the NDVI result is displayed as a visual layer for interpretation.

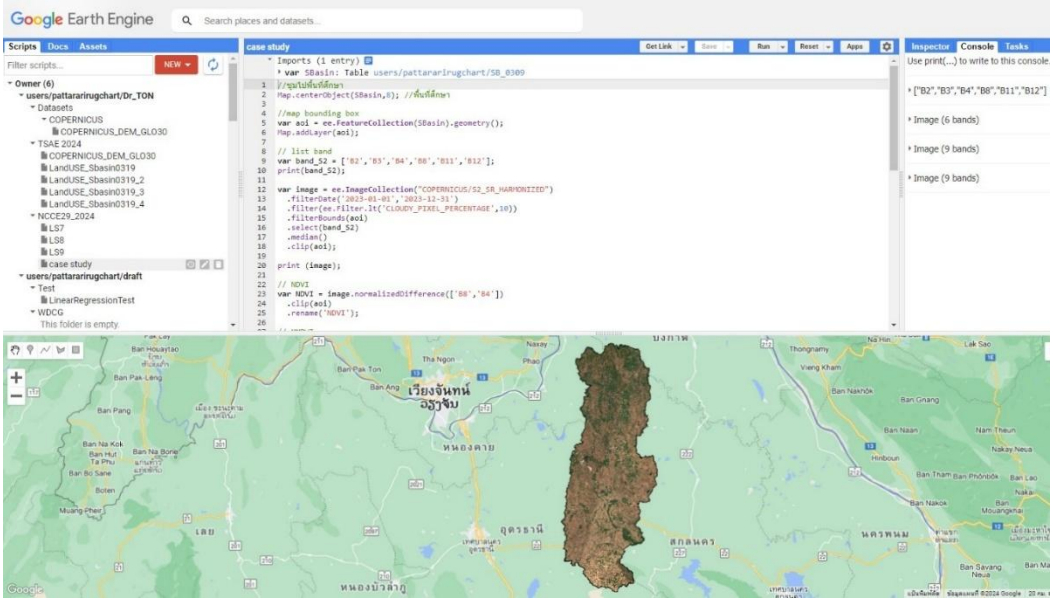


Figure 2 Google Earth Engine Platform Interface

Soil & Water Assessment Tool Plus

The Soil & Water Assessment Tool Plus (SWAT+) advances watershed modeling by refining stream and topography mapping beyond its predecessor, SWAT (Bieger et al., 2017; Her & Jeong, 2018). This freely available tool (https://swat.tamu.edu/software/plus/) simulates surface and groundwater dynamics, facilitating the assessment of environmental impacts related to land use, agriculture, and climate change (Williams et al., 2010; Gassman et al., 2014).

Originally developed in the early 1990s as an extension of previous USDA models, the Soil & Water Assessment Tool (SWAT) simulates the impacts of land management on water, sediment, and agricultural chemical yields in large watersheds (Arnold et al., 2007). Over time, SWAT has been widely used and enhanced with better hydrological, soil, and climate modeling capabilities. To address the need for improved spatial representation and modular flexibility, SWAT+ was introduced as an upgraded version. It allows for more detailed representation of landscape units, flexible connectivity between hydrological features, and improved management simulations (Bieger et al., 2017). SWAT+ enhances the original model by incorporating refined spatial discretization, enabling more precise analysis of hydrological processes and human interventions on water resources (Kakarndee & Kositsakulchai, 2020; Wu et al., 2020; Čerkasova et al., 2023). Recent studies have leveraged SWAT+ for more detailed watershed-scale modeling, integrating advanced remote sensing and machine learning

techniques to improve prediction accuracy and decision-making in water resource management (Woo et al., 2019; Qi et al., 2024).

The complexity of the model structure requires new users to spend a significant amount of time learning and understanding the system. Additionally, SWAT+ relies on high-resolution input data, which may be difficult to obtain in certain regions, especially in developing countries. Moreover, the processes of model calibration and validation remain time-consuming and resource intensive. Although SWAT+ features a modular architecture, its integration with external tools such as GIS or land use change models still demands technical expertise and domain-specific knowledge.

Model performance evaluation

Model performance was evaluated using three statistical criteria: Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) (Eq. 1) to assess the agreement between simulations and observations, the Coefficient of Determination (R^2) (Eq. 2) to measure the strength of the linear relationship, and Percent Bias (PBIAS) (Eq. 3) to quantify systematic bias. All performance indicators achieved statistically significant values during calibration and validation, meeting the established criteria outlined by Abbaspour et al. (2007).

$$NSE = 1 - \left(\sum_{i=1}^{n} (\mathrm{O}_i - P_i)^2 \Big/ \sum_{i=1}^{n} (\mathrm{O}_i - \overline{O}_i)^2 \right) \qquad (1)$$

$$r^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n} \left[(\mathrm{O}_i - \overline{O}_i)(\mathrm{P}_i - \overline{P}_i) \right]}{\left[\sum_{i=1}^{n} (\mathrm{O}_i - \overline{O}_i)^2 \right]^{0.5} \left[\sum_{i=1}^{n} (\mathrm{P}_i - \overline{P}_i)^2 \right]^{0.5}} \right]^2 \qquad (2)$$

$$PBIAS = \left(\sum_{i=1}^{n} O_i - \sum_{i=1}^{n} P_i \Big/ \sum_{i=1}^{n} O_i \right) \times 100 \qquad (3)$$

where Q is the observed flow, $\overline{Q}$ is the mean of the observed flow, P is the simulated flow, $\overline{P}$ is the mean of the simulated flow, and all unit data is in m^3/s.

Methodology

For this study, a three-step approach (Figure 3) is used to process the impact of land-use and land-cover (LULC) change on streamflow in the USRB. The analysis employs the SWAT+ model and LULC maps generated by GEE.

First, Landsat imagery (2003, 2013, 2023) from Google Earth Engine (GEE) is classified using supervised machine learning (e.g., Random Forest) to generate LULC maps (Sain, 1996; Breiman, 2001). Training data, including field observations and secondary data from the Land Development Department (LDD), ensures accuracy, which is then assessed using the Kappa coefficient (Congalton, 1991). Classification accuracy is evaluated based on error values from the Error Matrix, alongside overall accuracy (Wafdan, 2021). Both metrics should ideally fall between 85-95% (Anderson et al., 1976). The error matrix (or confusion matrix) is a table that compares predicted classes with actual classes, showing how well a classification model performs. The Kappa coefficient (**K**) measures the level of agreement between the predicted and actual classifications, adjusting for chance agreement. It is calculated using the formula **K** = (Po – Pe) / (1 – Pe), where Po is the observed agreement (proportion of correctly classified cases) and Pe is the expected agreement by chance based on row and column totals in the matrix.

Second, the SWAT+ model setup incorporates DEM, LULC, soil maps, and daily climate data (2014–2023). The observed streamflow data is used for model calibration (2014–2017) and validation (2018–2021). The model setup begins with watershed delineation using the DEM, followed by the definition of Hydrologic Response Units (HRUs) based on the combination of land use, soil type, and slope class. Initial parameter values are assigned based on literature and default SWAT+ databases. For model calibration and validation, the SWAT+ Toolbox (Chawanda, 2022), a free software tool (https://celray.github.io/SWATPlusToolbox/3.0.3/), is utilized for sensitivity analysis and parameter optimization specifically for SWAT+. The performance of the model during calibration (2014–2017) and validation (2018–2021) is assessed using performance indices such as NSE, R^2, and PBIAS. These metrics ensure agreement between simulated and observed streamflow, following the criteria suggested by (Abbaspour et al., 2007).

Finally, the streamflow was simulated using different LULC maps derived from GEE for the years 2003, 2013, and 2023, utilizing the climate dataset from 2014 to 2018. The comparisons were made separately for the dry period (November–April) and the wet period (May–October). This approach enables an analysis of streamflow changes and the impact of LULC alterations on hydrological responses. The calibration of the SWAT+ model focused on key parameters identified through sensitivity analysis. The Curve Number for moisture condition II (CN2) was adjusted within a relative range of -0.15 to -0.05, while the baseflow alpha factor (ALPHA_BF) was calibrated between 0.1 and 0.4 days. Groundwater delay time (GW_DELAY) varied from 15 to 60 days, and the threshold depth of water in the shallow aquifer for return flow (GWQMN)

ranged from 100 to 500 mm. Soil-related parameters such as saturated hydraulic conductivity (SOL_K) and available water capacity (SOL_AWC) were also optimized, with SOL_K ranging from 2 to 50 mm/hr depending on the HRU, and SOL_AWC from 0.10 to 0.25 based on soil type.

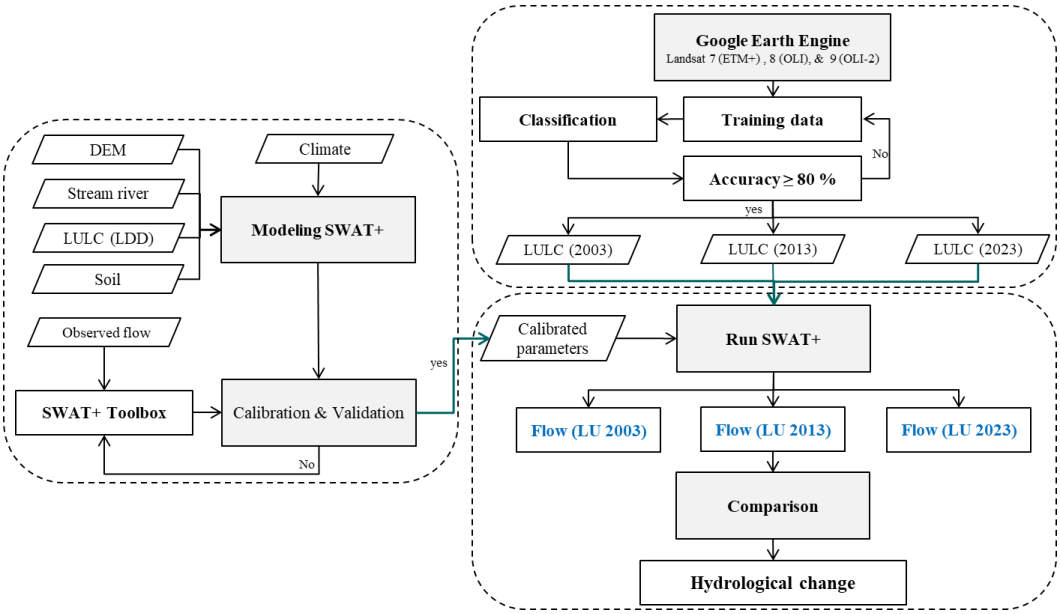


Figure 3 Flowchart of the Research Methodology

Results and discussion

LUILC classification and accuracy assessment

The USRB LULC classification identifies seven land use types: paddy fields, agricultural land, sugarcane, para rubber, forests, built-up areas, and water (as shown in Table 1 and Figure 4). LULC classifications for 2003, 2013, and 2023 (Figure 4) demonstrated high accuracy levels. In 2003, overall accuracy was 88.18% (Kappa coefficient: 0.81), improving to 91.02% (Kappa: 0.85) in 2013. The 2023 classification had an overall accuracy of 83.56% (Kappa: 0.76), indicating a robust methodology for mapping LULC patterns within the study area.

Table 1 presents the LULC changes within the USRB from 2003 to 2023. It reveals a decrease of 464.31 km² in paddy fields, while agricultural land increased by 358.98 km². The sugarcane plantations decreased, whereas para rubber plantations expanded by 886.59 km², the largest increase among the LULC types. Forest areas decreased by 129.51 km², while built-up areas expanded by 74.57 km², the second-largest increase, following the growth of water resource, which increased by 25.32 km².

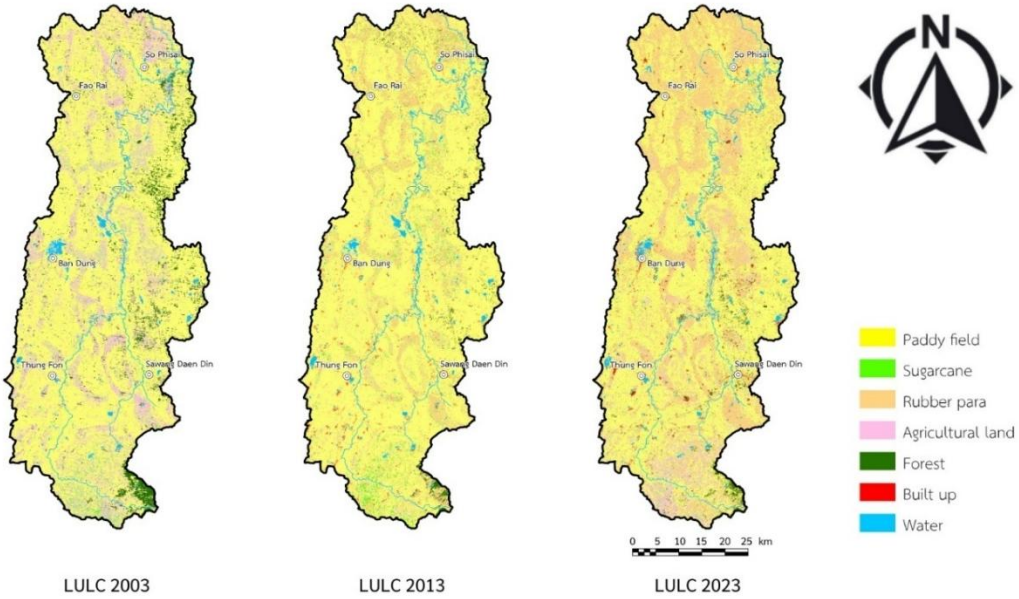


Figure 4 Land Use and Land Cover (LULC) maps for the years 2003, 2013, and 2023

Table 1 LULC classification of land use for the years 2003, 2013, and 2023

LULC types	Area (km²)		
	LULC 2003	LULC 2013	LULC 2023
1. Paddy field	2,397.3	2,533.7	1,932.9
2. Agriculture	544.7	85.7	185.7
3. Sugarcane	83.7	87.1	50.1
4. Para rubber	0.4	396.9	886.9
5. Forest	210.1	66.1	80.6
6. Built up	10.3	61.6	84.8
7. Water	41.3	56.8	66.6

The analysis of four agricultural sector types (paddy fields, agricultural land, sugarcane, and para rubber) reveals significant changes in land use patterns over time. In 2003, rubber plantations covered only a small area due to their limited popularity, with most of the land being dedicated to other agricultural sectors. However, by 2013, rubber plantations experienced rapid expansion, reaching nearly 400 km². In contrast, other agricultural sectors saw considerable

declines during this period. This trend continued into the subsequent decade, up to 2023, with rubber plantations further increasing to 886.98 km² (Table 1). As a result, rubber plantations have become the second largest land use/land cover (LULC) type, after paddy fields.

Overall, there appears to be a significant shift in LULC in the area between 2003 and 2023. The most notable changes include the large increase in para rubber plantation and built-up areas, and the decrease in paddy fields and forest.

Model calibration and validation

The SWAT+ model for the USRB was calibrated and validated using observed flow data of the Kh.74 hydrological station (Figure 1) and the SWAT+ toolbox (Chawanda et al., 2020). The parameters for the paddy field-dominated basin in Thailand were adjusted in accordance with the recommendations of Kakarndee and Kositsakulchai (2020); (Kakarndee & Kositsakulchai, 2021). The most sensitive parameters identified were CN2, SOL_AWC, FLO_MIN, REVAP_MIN, and SOL_BD. The recommended range for the initial SCS runoff curve number (CN2) under moisture condition II varies from 60 to 85, depending on land use types; for example, paddy fields typically range between 70 and 80, while agricultural lands or rubber plantations range between 65 and 75. The available water capacity of the soil layer (SOL_AWC) is generally set between 0.10 and 0.25 mm H_2O/mm soil, with higher values for clay soils and lower values for sandy soils. The water table depth required for return flow (FLO_MIN) is suggested to range from 500 to 1,500 mm, representing typical shallow aquifer conditions in the region. For the water table depth necessary for revap to occur (REVAP_MIN), a value between 50 and 500 mm is suitable to simulate moisture exchange between the saturated and unsaturated zones. Lastly, the bulk density of the soil (SOL_BD) is commonly set between 1.2 and 1.7 g/cm³, depending on soil type, with lighter soils having lower values and denser clay soils having higher values.

Figure 5 shows the model calibration and validation results. The observed flow is represented by the black line, while the simulated flow is shown by the red dashed line. Calibration utilized monthly flow data from 2014 to 2017 and achieved good performance metrics: Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) = 0.86, coefficient of determination (R^2) = 0.91, and percent bias (PBIAS) = -24.5%. Validation employed data from 2018 to 2021 and yielded results of NSE = 0.79, R^2 = 0.89, and PBIAS = -36.7%. The high negative PBIAS values in both periods indicate a consistent overestimation of streamflow by the model. This may be attributed to underestimated evapotranspiration or oversimplified groundwater processes, leading to excessive baseflow simulation. To address this, the integration of high-resolution or site-specific climate data, as well as the use of observed evapotranspiration and soil moisture data, is

recommended to improve model reliability. Following the criteria established by Gupta et al. (1999) and Abbaspour et al. (2007) (NSE > 0.75, R^2 > 0.80, and PBIAS < ±25%), the model performance can be classified as good. Consequently, the SWAT+ model demonstrates suitability for further applications within the USRB.

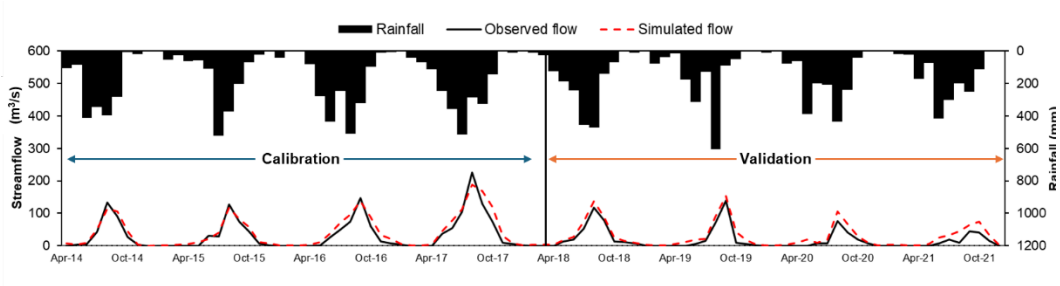


Figure 5 Calibration (2014–2017) and validation (2018–2021) of monthly streamflow

Impacts of LULC change on streamflow

Figure 6 presents the monthly streamflow simulated by SWAT+ for three land-use and land-cover (LULC) periods: LULC 2003 (blue line), LULC 2013 (green line), and LULC 2023 (red line). Wet (May-October) and dry (November-April) period simulations were analyzed separately using the same 5-year baseline dataset (2014-2018). In Table 2 and Figure 6, streamflow patterns in the USRB exhibit minimal change during the dry season (Nov-Apr). In contrast, the wet season (May-Oct) shows a significant increase in streamflow, particularly during flood months (August and September). This variability is exemplified by the high precipitation events observed in 2017.

The analysis used a consistent five-year dataset from 2014 to 2018, focusing on differences in streamflow between wet periods (May to October) and dry periods (November to April). In all three LULC periods, the highest streamflow occurred in August, with values of 131.3 m^3/s, 124.7 m^3/s, and 153.6 m^3/s, respectively, as shown in Table 2.

Table 3 shows the changes in streamflow, with negative values (-) indicating a decrease and positive values (+) indicating an increase, measured in cubic meters per second (m^3/s). Comparing the first decade (2003 to 2013), there was a slight overall decrease in streamflow. The most significant decreases in streamflow occurred in August and September, with a drop of 6.6 m^3/s in August and 5.8 m^3/s in September, as showed in Table 3. This reduction is likely attributed to a slight increase in rice cultivation during these months, which would have resulted in higher water consumption, thus contributing to the overall decline in streamflow levels.

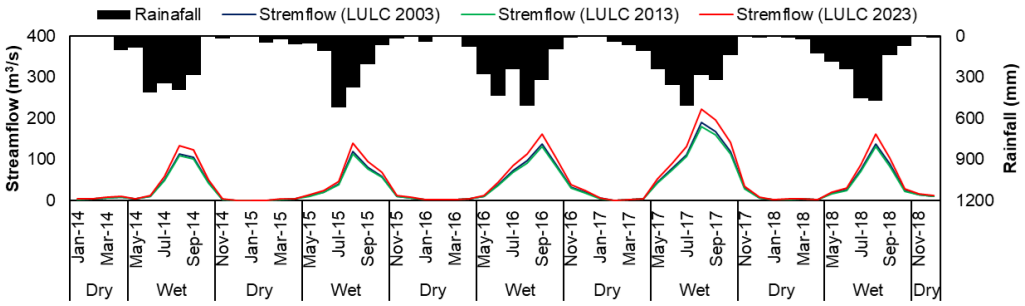


Figure 6 Comparison of monthly streamflow across different LULC periods: 2003, 2013, and 2023

Table 2 Monthly streamflow for three LULC periods during the dry (Oct-Nov) and wet (May-Oct) periods

Period	Month	Streamflow (m³/s)		
		LULC 2003	LULC 2013	LULC 2023
Dry	Jan	2.7	2.5	3.1
	Feb	2.4	2.2	2.8
	Mar	3.5	3.3	4.1
	Apr	4.9	4.7	5.8
Wet	May	17.8	16.9	20.8
	Jun	34.8	33.1	40.7
	Jul	70.1	66.6	82.0
	Aug	131.3	124.7	153.6
	Sep	116.5	110.7	136.3
	Oct	67.1	63.7	78.5
Dry	Nov	18.4	17.4	21.5
	Dec	9.0	8.6	10.6

Table 3 Changes in streamflow for three time periods during the dry (Oct-Nov) and wet (May-Oct) periods

Period	Month	Change of streamflow (m^3/s)		
		10 yrs (2003-13)	10 yrs (2013-23)	20 yrs (2003-23)
Dry	Jan	-0.1	+0.5	+0.6
	Feb	-0.1	+0.4	+0.5
Wet	Mar	-0.2	+0.6	+0.8
	Apr	-0.2	+0.8	+1.1
	May	-0.9	+3.0	++3.9
	Jun	-1.7	+5.9	+7.7
	Jul	-3.5	+11.9	+15.4
	Aug	-6.6	+22.3	+28.9
	Sep	-5.8	+19.8	+25.6
	Oct	-3.4	+11.4	+14.8
Dry	Nov	-0.9	+3.1	+4.0
	Dec	-0.5	+1.5	+2.0

Over the past decade (2013–2023), streamflow has shown a notable increase, largely attributed to the reduction of paddy fields resulting from the widespread conversion of agricultural land into para rubber plantations over the past two decades. Traditionally, paddy fields played a crucial role in regulating water flow by serving as natural reservoirs during the rainy season, helping to store excess water and mitigate flooding. However, the decline of these fields has led to significant changes in the region's hydrological condition, especially during periods of heavy rainfall. This transformation is evident in the heightened streamflow rates observed in recent years. Looking at the entire 20-year period (2003–2023), the most significant increase in streamflow during the rainy season occurred in August, with a rise of 28.9 m^3/s, followed by September, which saw an increase of 25.6 m^3/s, as detailed in Table 3. Table 3 further shows a significant increase in wet-season streamflow from 2013–2023 compared to 2003–2013, particularly between May and October. For instance, streamflow in August rose from -6.6 m^3/s to +22.3 m^3/s, marking an increase of 28.9 m^3/s over 20 years.

While changes in the dry season are minimal, the sharp rise in wet-season streamflow aligns with research on Land Use and Land Cover (LULC) changes. Studies suggest that urbanization and deforestation increase surface runoff and reduce infiltration, as observed in agricultural areas in Thailand (Chotpantarat & Boonkaewwan, 2018). In contrast, large-scale

reforestation efforts, such as those in China's Loess Plateau (Zhou et al., 2013), have been shown to reduce surface runoff, differing from this study's findings. In this study area, the decline of paddy fields, which traditionally functioned as natural retention areas, along with the widespread expansion of para rubber plantations, has reduced the watershed's ability to retain and delay runoff. This has contributed to higher and more rapid streamflow during the rainy season. These trends indicate that LULC changes—likely due to agricultural expansion, urbanization, or deforestation—have driven the increase in wet-season streamflow, highlighting the significant impact of land cover changes on seasonal hydrological patterns.

Conclusions

This research successfully utilized Google Earth Engine (GEE) and SWAT+ modeling to examine the effects of land-use and land-cover change (LUCC) on streamflow in the Upper Songkhram River Basin (USRB), Northeast Thailand. GEE cloud-based platform enabled efficient and accurate LUCC classification (Overall Accuracy: 83-91%, Kappa coefficient: 0.76-0.85). This demonstrates its potential for similar land cover monitoring applications. The study revealed substantial LUCC in the USRB between 2003 and 2023, specifically the expansion of para rubber plantations and built-up areas, besides a decline in paddy fields and forests. he SWAT+ model demonstrated good performance (NSE during calibration/validation: 0.86/0.79, R^2: 0.91/0.89, PBIAS: -24.5%/-36.7%) provides confidence in the simulations used to analyze the impact of LUCC on streamflow. Main parameters adjusted during calibration included Curve Number (CN2), baseflow alpha factor (ALPHA_BF), groundwater delay time (GW_DELAY), and soil hydraulic properties (SOL_K, SOL_AWC), which were optimized based on sensitivity analysis. Calibration results indicated that the model adequately captured streamflow variability. Overall, the observed LUCC patterns within the USRB, especially the conversion of forests and paddy fields, directly contributed to altered streamflow dynamics. It is important to note that users of GEE and SWAT+ should possess adequate expertise to ensure greater accuracy and reliability of the results.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the research funding provided by the Department of Farm Mechanics and the Faculty of Agriculture at Kasetsart University, Bangkok, Thailand. This support was essential to the successful completion of this research

References

Abbaspour, K. C., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S., Srinivasan, R., Yang, H., & Kløve, B. (2015). A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. **Journal of Hydrology**, 524, 733-752.

Abbaspour, K. C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., Zobrist, J., & Srinivasan, R. (2007). Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. **Journal of Hydrology**, 333(2-4), 413-430.

Alzurqani, S. A., Zurqani, H. A., White, D., Bridges, K., & Jackson, S. (2024). Google Earth Engine application for mapping and monitoring drought patterns and trends: A case study in Arkansas, USA. **Ecological Indicators**, 168, 112759.

Amani, M., Ghorbanian, A., Ahmadi, S. A., Kakooei, M., Moghimi, A., Mirmazloumi, S. M., Moghaddam, S. H. A., Mahdavi, S., Ghahremanloo, M., Parsian, S., Wu, Q., & Brisco, B. (2020). Google Earth Engine Cloud Computing Platform for Remote Sensing Big Data Applications: A Comprehensive Review. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, 13, 5326-5350.

Anderson, J. R., Hardy, E. E., Roach, J. T., & Witmer, R. E. (1976). A land use and land cover classification system for use with remote sensor data. **In Professional Paper**.

Ara, Z., Jha, R., & Quaff, A. R. (2023). **Critical Appraisal of Satellite Data for Land Use/Land Cover Classification and Change Detection: A Review**. Geospatial and Soft Computing Techniques, Singapore.

Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (2007). Large Area Hydrologic Modeling and Assessment Part I: Model Development1. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, 34(1), 73-89.

Bieger, K., Arnold, J. G., Rathjens, H., White, M. J., Bosch, D. D., Allen, P. M., Volk, M., & Srinivasan, R. (2017). Introduction to SWAT+, a completely restructured version of the soil and water assessment tool. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, 53(1), 115-130.

Breiman, L. (2001). Random Forests. **Machine Learning**, 45(1), 5-32.

Čerkasova, N., White, M., Arnold, J., Bieger, K., Allen, P., Gao, J., Gambone, M., Meki, M., Kiniry, J., & Gassman, P. W. (2023). Field scale SWAT+ modeling of corn and soybean yields for the contiguous United States: National Agroecosystem Model Development. **Agricultural Systems**, 210.

Chawanda, C. (2022). *SWAT+ Toolbox (0.7.6)*. Zenodo. Retrieved from https://zenodo.org/records/6331716

Chawanda, C. J., Arnold, J., Thiery, W., & van Griensven, A. (2020). Mass balance calibration and reservoir representations for large-scale hydrological impact studies using SWAT+. **Climatic change**, 163(3), 1307-1327.

Chotpantarat, S., & Boonkaewwan, S. (2018). Impacts of land-use changes on watershed discharge and water quality in a large intensive agricultural area in Thailand. **Hydrological Sciences Journal**, 63(9), 1386-1407.

Congalton, R. G. (1991). A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. **Remote Sensing of Environment**, 37(1), 35-46.

Gassman, P. W., Reyes, M. R., Green, C. H., & Arnold, J. G. (2007). The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions. **Transactions of the ASABE**, 50(4), 1211-1250.

Gassman, P. W., Sadeghi, A. M., & Srinivasan, R. (2014). Applications of the SWAT Model Special Section: Overview and Insights. **Journal of Environmental Quality**, 43(1), 1-8.

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote Sensing of Environment**, 202, 18-27.

Guo, Y., Fang, G., Xu, Y. P., Tian, X., & Xie, J. (2020). Identifying how future climate and land use/cover changes impact streamflow in Xinanjiang Basin, East China. **Science of The Total Environment**, 710, 136275.

Gupta, H. V., Sorooshian, S., & Yapo, P. O. (1999). Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models: Comparison with Multilevel Expert Calibration. **Journal of Hydrologic Engineering**, 4(2), 135-143.

Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S. V., Goetz, S. J., Loveland, T. R., Kommareddy, A., Egorov, A., Chini, L., Justice, C. O., & Townshend, J. R. (2013). High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. **Science**, 342(6160), 850-853.

Her, Y., & Jeong, J. (2018). SWAT+ versus SWAT2012: Comparison of Sub-Daily Urban Runoff Simulations. **Transactions of the ASABE**, 61(4), 1287-1295.

Huang, H., Chen, Y., Clinton, N., Wang, J., Wang, X., Liu, C., Gong, P., Yang, J., Bai, Y., Zheng, Y., & Zhu, Z. (2017). Mapping major land cover dynamics in Beijing using all Landsat images in Google Earth Engine. **Remote Sensing of Environment**, 202, 166-176.

Kadhum, Z. M., Jasim, B. S., & Al-Saedi, A. S. J. (2023). Improving the spectral and spatial resolution of satellite image using geomatics techniques. **AIP Conference Proceedings**, 2776(1), 040011.

Kakarndee, I., & Kositsakulchai, E. (2020). **Comparison between SWAT and SWAT+ for simulating streamflow in a paddy-field-dominated basin, northeast Thailand**. The 13th Thai Society of Agricultural Engineering International Conference (TSAE 2020), 187, 1-9.

Kakarndee, I., & Kositsakulchai, E. (2021). Impact of Climate Change on Water Balance in Lam Siao Basin Using SWAT+ Model. **Thai Socity of Agricultural Engineering Journal**, 29(2), 1-11.

Kim, W., Kanae, S., Agata, Y., & Oki, T. (2005). Simulation of potential impacts of land use/cover changes on surface water fluxes in the Chaophraya river basin, Thailand. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, 110(D8), 1-10.

Lozano, P. J. J., & Regan, A. (2018). **Land surface satellite remote sensing gap analysis**. Sixth International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2018).

Luo, K., Tao, F., Moiwo, J. P., & Xiao, D. (2016). Attribution of hydrological change in Heihe River Basin to climate and land use change in the past three decades. **Scientific Reports**, 6, 33704.

Mbinya Manetu, W., Momanyi Mironga, J., & Haywood Ondiko, J. (2023). Remote Sensing for Land Resources: A Review on Satellites, Data Availability and Applications. **American Journal of Remote Sensing**, 10(2), 39-49.

Muangthong, S., & Shrestha, S. (2015). Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: case study of the Nampong River and Songkhram River, Thailand. **Environmental monitoring and assessment**, 187(9), 1-12.

Mutanga, O., & Kumar, L. (2019). Google Earth Engine Applications. **Remote Sensing**, 11(5).

Näschen, K., Diekkrüger, B., Evers, M., Höllermann, B., Steinbach, S., & Thonfeld, F. (2019). The Impact of Land Use/Land Cover Change (LULCC) on Water Resources in a Tropical Catchment in Tanzania under Different Climate Change Scenarios. **Sustainability**, 11(24), 1-11.

Ninad, M. (2024). A Complete Study of Remote Sensing- Sentinel-2 Satellite Data for Land Use / Land Cover (LULC) Analysis. **Panamerican Mathematical Journal**, 35(1s), 231-249.

Peng, J., Liu, T., Chen, J., Li, Z., Ling, Y., De Wulf, A., & De Maeyer, P. (2023). The conflicts of agricultural water supply and demand under climate change in a typical arid land watershed of Central Asia. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, 47, 1-16.

Petchprayoon, P., Blanken, P. D., Ekkawatpanit, C., & Hussein, K. (2010). Hydrological impacts of land use/land cover change in a large river basin in central–northern Thailand. **International Journal of Climatology**, 30(13), 1917-1930.

Qi, Y., Zhang, X., & Yin, Q. (2024). Assessing water resource vulnerability based on remote sensing data-enhanced SWAT+ and High-Resolution precipitation data. **Ecological Indicators**, 169.

Sain, S. R. (1996). The Nature of Statistical Learning Theory. **Technometrics**, 38(4), 409-409.

Shelestov, A., Lavreniuk, M., Kussul, N., Novikov, A., & Skakun, S. (2017). Exploring Google Earth Engine Platform for Big Data Processing: Classification of Multi-Temporal Satellite Imagery for Crop Mapping. **Frontiers in Earth Science**, 5(17).

Tamiminia, H., Salehi, B., Mahdianpari, M., Quackenbush, L., Adeli, S., & Brisco, B. (2020). Google Earth Engine for geo-big data applications: A meta-analysis and systematic review. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, 164, 152-170.

Tyukavina, A., Hansen, M. C., Potapov, P., Parker, D., Okpa, C., Stehman, S. V., Kommareddy, I., & Turubanova, S. (2018). Congo Basin forest loss dominated by increasing smallholder clearing. **Sci Adv**, 4(11), 1-12.

Velastegui-Montoya, A., Montalván-Burbano, N., Carrión-Mero, P., Rivera-Torres, H., Sadeck, L., & Adami, M. (2023). Google Earth Engine: A Global Analysis and Future Trends. **Remote Sensing**, 15(14), 1-30.

Wafdan, L. (2021). **Accuracy Assessment of Land Use/Land Cover Classification Data from Sentinel-2 & ASTER Imagery Interpretation using Unsupervised Classification Algorithm**. Proceeding International Conference on Science and Engineering. (Vol. 4, pp. 229–234). Yogyakarta, Indonesia.

Williams, J. R., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Gassman, P. W., & Green, C. H. (2010). History of model development at Temple, Texas. **Hydrological Sciences Journal**, 53(5), 948-960.

Woo, S. Y., Jung, C. G., Lee, J. W., & Kim, S. J. (2019). Evaluation of Watershed Scale Aquatic Ecosystem Health by SWAT Modeling and Random Forest Technique. **Sustainability**, 11(12).

Wu, J., Yen, H., Arnold, J. G., Yang, Y. C. E., Cai, X., White, M. J., Santhi, C., Miao, C., & Srinivasan, R. (2020). Development of reservoir operation functions in SWAT+ for national environmental assessments. **Journal of Hydrology**, 583. 124556.

Yong, B., Jiang, S., Yuan, F., Liu, X., Singh, V. P., Ren, L., & Yang, X. (2012). Impacts of land use and land cover changes on evapotranspiration and runoff at Shalamulun River watershed, China. **Hydrology Research**, 43(1-2), 23-37.

Younes, A., Ahmad, A., Hanjag, A. D., & Nair, A. M. (2023). Understanding Dynamics of Land Use & Land Cover Change Using GIS & Change Detection Techniques in Tartous, Syria. **European Journal of Geography**, 14(3), 20-41.

Zhang, L., Jiang, Y., Yang, M., Wang, H., Dong, N., Wang, H., Liu, X., Chen, L., & Liu, K. (2022). Quantifying the Impacts of Land Use and Cover Change (LUCC) and Climate Change on Discharge and Sediment Load in the Hunhe River Basin, Liaoning Province, Northeast China. **Water**, 14(5), 1-14.

Zhou, F., Xu, Y., Chen, Y., Xu, C. Y., Gao, Y., & Du, J. (2013). Hydrological response to urbanization at different spatio-temporal scales simulated by coupling of CLUE-S and the SWAT model in the Yangtze River Delta region. **J ournal of Hydrology**, 485(3), 113-125.

Zope, P. E., Eldho, T. I., & Jothiprakash, V. (2014). Impacts of urbanization on flooding of a coastal urban catchment: a case study of Mumbai City, India. **Natural Hazards**, 75(1), 887-908.

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพแบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึก ประเภทโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน สำหรับการจำแนกรูปภาพเหง้าพืชในวงศ์ขิง

อนัญญา พรมโคตร[1*] รัตนา อินทเกตุ[2] สุไพลิน พิชัย[3]

Received : November 21, 2024
Revised : July 3, 2025
Accepted : July 16, 2025

บทคัดย่อ

พืชสมุนไพรเป็นส่วนหนึ่งของการแพทย์แผนโบราณ มีการใช้รักษาโรค และเสริมสร้างสุขภาพมาหลายศตวรรษ แม้ว่าในปัจจุบัน ปัจจุบันพืชสมุนไพรยังคงมีบทบาทสำคัญ และมีการใช้อย่างแพร่หลาย ความท้าทายหนึ่งที่สำคัญ คือการจำแนกชนิดพืชสมุนไพร เนื่องจากพืชสมุนไพรบางชนิดมีลักษณะทางกายภาพคล้ายคลึงกันมาก อาจเกิดความผิดพลาดในกระบวนการจำแนกชนิดสมุนไพรได้ อาจส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่แปรรูปจากพืชสมุนไพร ไม่มีสรรพคุณที่ต้องการ และอาจเป็นอันตรายต่อสุขภาพต่อผู้ใช้งาน การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึก ประเภทโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน 4 วิธี ได้แก่วิธี ResNet-50 วิธี VGG-19 วิธี DenseNet201 และ วิธี InceptionV3 สำหรับการจำแนกรูปภาพเหง้าสมุนไพร ในวงศ์ขิง 4 ชนิด เพื่อปรับแต่งพารามิเตอร์ให้มีความเหมาะสม และ ประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง ผู้วิจัยรวบรวมข้อมูลรูปภาพสมุนไพรจำนวน 2,111 รูปภาพ และเผยแพร่สาธารณะ ในการทดลองจำแนกชนิดพืชสมุนไพร ผู้วิจัยประยุกต์ใช้วิธี Augmentation เพื่อเพิ่มความหลากหลายให้กับชุดข้อมูลฝึกสอน หลังจากนั้น นำข้อมูลเข้าสู่กระบวนการฝึกสอน ในแบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึก และปรับแต่งพารามิเตอร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของแบบจำลอง ผลการทดลองปรากฏว่าวิธี DenseNet201 ที่มีจำนวนรอบการฝึก 200 รอบ มีความแม่นยำสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองอื่น ๆ ที่ศึกษา ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับสมุนไพร ซึ่งจะช่วยยกระดับมาตรฐานผลิตภัณฑ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: การจำแนกรูปภาพ การจำแนกสมุนไพร การประมวลผลภาพ การเรียนรู้เชิงลึก ขมิ้นชัน ขมิ้นอ้อย โครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน ไพล ว่านนางคำ

---

[1] สาขาวิชาแพทย์แผนไทย คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร อีเมล: ananya.ch@rmuti.ac.th

[2] สาขาวิชาแพทย์แผนไทย คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร อีเมล: rattana.in@rmuti.ac.th

[3] สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย อีเมล: supailin.pic@lru.ac.th

** ผู้นิพนธ์หลัก อีเมล: ananya.ch@rmuti.ac.th*

PERFORMANCE COMPARISON OF CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK-BASED DEEP LEARNING MODELS FOR RHIZOME IMAGE CLASSIFICATION IN THE *ZINGIBERACEAE* FAMILY

A-Nanya Promkot[1*] Rattana Intaket[2] Supailin Pichai[3]

Abstract

Herbal plants have been an essential part of traditional medicine for centuries. They have been used to treat various ailments and promote overall health. Despite significant advances in modern medicine, herbal plants have played a crucial role and been extensively employed across numerous sectors. A major challenge in their application is the accurate identification and classification of species, as herbs within the same family often exhibit remarkably similar physical characteristics. Such similarities can cause misclassification, leading to ineffective products or potential health risks. This study evaluated and compared four convolutional neural network models including ResNet-50, VGG-19, DenseNet201, and InceptionV3 for classifying rhizome images of four species in the Zingiberaceae family: Turmeric, Zedoary, Plai, and Wild turmeric. This aimed to properly adjust their parameter and evaluated their efficiency of model. The researchers collected and publicly released a dataset of 2,111 images then applied data augmentation to increase training diversity. After that, hyperparameter tuning was performed to optimize model performance. Experimental results were demonstrated that DenseNet201 with 200 training epochs, outperformed the other models, achieving the highest classification accuracy. These findings were suggested that the proposed model has been highly suitable for practical use in herbal industries, aiding species identification, product standardization, and quality control.

Keywords: Image classification, Herbal classification, Image processing, Deep learning, Turmeric, Zedoary, Convolution neural network, Plai, Wild turmeric

---

[1] *Department of Thai traditional medicine in The Faculty of Natural Resources, Rajamangala University of Technology Isan Sakonnakhon Campus, e-mail: ananya.ch@rmuti.ac.th*

[2] *Department of Thai traditional medicine in The Faculty of Natural Resources, Rajamangala University of Technology Isan Sakonnakhon Campus, e-mail: rattana.in@rmuti.ac.th*

[3] *Computer science, The Faculty of Science and Technology, LoeiRajabhat University, e-mail: supailin.pic@lru.ac.th*

** Corresponding author, e-mail : ananya.ch@rmuti.ac.th*

บทนำ

การใช้พืชสมุนไพรและผลิตภัณฑ์สมุนไพร มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงหลายปีที่ผ่านมา มีรายงานที่ระบุว่า สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในพืช เช่น โพลีฟีนอลส์ เทอร์พีนอยด์ และอัลคาลอยด์ เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประโยชน์ต่อสุขภาพ พืชสมุนไพรแต่ละชนิด มีสรรพคุณและข้อจำกัดการใช้งานที่แตกต่างกัน (Sellami et al., 2018) พืชสมุนไพรบางชนิดมีลักษณะทางพฤกษศาสตร์ที่ใกล้เคียงกันมาก จนยากที่จะจำแนกชนิดพืชสมุนไพรด้วยตาเปล่าได้อย่างถูกต้อง ต้องอาศัยความรู้ความชำนาญ และประสบการณ์ ของผู้เชี่ยวชาญด้านพฤกษศาสตร์ หรือหมอพื้นบ้าน (Zhu et al., 2018) จนในบางครั้ง เกิดความสับสน และ มีข้อถกเถียงในการระบุชนิดของพืชสมุนไพร หากจำแนกชนิดของพืชสมุนไพรไม่ถูกต้อง ผลิตภัณฑ์ที่แปรรูปจากสมุนไพร หรือตำรับยา จะไม่สามารถรักษาโรคได้ และอาจส่งผลอันตรายต่อร่างกาย เนื่องจากใช้สมุนไพรผิดชนิด หรือไม่ตรงกับอาการของโรค ดังนั้น การระบุชนิดพืชสมุนไพรจึงเป็นกระบวนการหนึ่งที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง ส่งผลกระทบต่ออุตสาหกรรมยาสมุนไพร และประชาชนผู้ใช้งานทั่วไป พืชที่อยู่ในวงศ์ขิง (*Zingiberaceae*) เป็นหนึ่งในพืชสมุนไพรที่ใช้งานอย่างแพร่หลาย มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant activity) ฤทธิ์ต้านการอักเสบ (Anti-inflammatory activity) และ ฤทธิ์ยับยั้งการเจริญเติบโตของเซลล์เนื้องอก (Tumor cell growth inhibitory activity) (Liu et al., 2013) ซึ่งในโลกมีประมาณ 1,300 ชนิด กระจายตัวอยู่ทั่วไปในเขตร้อน โดยเฉพาะในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (Soumya et al., 2023) ตัวอย่างพืชอยู่ในวงศ์ขิง ที่มีความนิยมนำมาใช้ในปัจจุบัน ได้แก่ ขมิ้นชัน (Turmeric) ขมิ้นอ้อย (Zedoary) ไพล (Plai) และว่านนางคำ (Wild turmeric) โดยขมิ้นชัน และขมิ้นอ้อย เป็นพืชในสกุล *Curcuma* การจำแนกพืช 4 ชนิดด้วยการจำแนกชนิดสมุนไพรดังกล่าว ด้วยตาเปล่าหรือการดมกลิ่นเป็นสิ่งที่ทำได้ยาก เนื่องจากพืชเหล่านี้มีลักษณะทางกายภาพคล้ายคลึงกัน ทั้งสีของเหง้า กลิ่น และเนื้อสัมผัส ต้องอาศัยความรู้และความเชี่ยวชาญเป็นพิเศษเฉพาะบุคคล

ด้วยความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีสารสนเทศ ในปัจจุบัน เทคโนโลยีการประมวลผลข้อมูลขนาดใหญ่ ได้เข้ามามีบทบาทในงานด้านวิทยาศาสตร์สุขภาพมากมาย ได้แก่ ระบบสนับสนุนการวินิจฉัยโรค (Wang et al., 2020) (Ragab et al., 2023) (Zhong et al., 2024) ระบบแนะนำโภชนาการและการดูแลสุขภาพ (Kaur et al., 2023) (Smith et al., 2022) เทคโนโลยีเหล่านี้ ช่วยสนับสนุนประสิทธิภาพ ในการให้บริการด้านสาธารณสุข ส่งผลกระทบโดยตรงต่อประชาชน การประยุกต์เทคโนโลยีการประมวลผลข้อมูลขนาดใหญ่ สำหรับการจำแนกพืชสมุนไพร เป็นสิ่งที่มีความสำคัญในเชิงเศรษฐกิจ สังคม และสุขภาพ การจำแนกพืชสมุนไพรด้วยวิธีการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine learning) จะช่วยลดความเสี่ยง ในการผลิตสมุนไพรที่ผิดชนิด ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตสมุนไพรคุณภาพ สำหรับอุตสาหกรรมยาสมุนไพร และการใช้งานในชุมชน นอกจากนี้ ยังส่งเสริมให้ประชาชนทั่วไป สามารถใช้พืชสมุนไพรในการดูแลสุขภาพของตนเองเบื้องต้น ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการรักษาพยาบาล และ สนับสนุนความยั่งยืน ในการใช้สมุนไพรในชีวิตประจำวัน ปัจจุบัน มีงานวิจัยมากมาย ที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาแบบจำลองจำแนกรูปภาพพืชสมุนไพร และผลผลิตทางการเกษตร ในช่วงต้น การวิจัยเกี่ยวกับการจำแนกรูปภาพ ผู้วิจัยใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องแบบดั้งเดิม (traditional machine learning) ได้แก่ วิธี Random forest วิธี Support vector Machine และวิธี โครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น (Multi-layer Perceptron) มีงานวิจัยที่ผ่านมา (Aakif & Khan, 2015) ได้ทดลองจำแนกรูปภาพใบพืชที่มีรูปร่างแบบต่าง ๆ จำนวน 14 ชนิด เน้นการวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างภายนอกของใบพืช เช่น สัดส่วน ความกลม ความยาว ความกว้าง ขอบใบ และ โครงสร้างรูปทรง โดยใช้คุณลักษณะทางสัณฐานวิทยา (morphological features) คุณลักษณะเชิงนิยามรูปทรง (shape-defining

feature) และตัวบ่งชี้ฟูเรียร์ (Fourier descriptors) ช่วยให้สามารถจำแนกใบพืช ที่มีรูปร่างแตกต่างกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม วิธีนี้ยังมีข้อจำกัด ในการจำแนกใบพืชที่มีรูปร่างใกล้เคียงกัน แต่แตกต่างกันในแง่มุมอื่น เช่น สีของใบ ลวดลาย หรือพื้นผิวของใบ เนื่องจากไม่ได้พิจารณาคุณสมบัติเหล่านี้ในการประมวลผลภาพ เป็นต้น อย่างไรก็ตามความต้องการจำแนกรูปภาพพืช ที่มีลักษณะรูปร่างคล้ายกันแต่ต่างกันที่สีหรือผิว ยังมีความจำเป็น ซึ่งสามารถแก้ไขด้วยแบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึก มีความสามารถในการเรียนรู้ฟีเจอร์จากรูปภาพได้อย่างครบถ้วน ทั้งรูปร่าง สี และพื้นผิวโดยไม่ต้องออกแบบฟีเจอร์ด้วยมือ เหมาะสำหรับจำแนกรูปภาพที่มีความซับซ้อน และ ความคล้ายคลึงสูง ดังนั้น งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาแบบจำลอง สำหรับจำแนกรูปภาพพืชต่างๆ จึงนิยมประยุกต์วิธีการเรียนรู้เชิงลึก ในการแก้ไขปัญหา ดังปรากฏในงานของ Zhao et al. (2022) เป็นงานวิจัยที่ใช้เทคโนโลยีประมวลผลภาพ สำหรับจำแนกรูปภาพใบพืชที่มีอาการโรคพืชด้วยวิธี DoubleGAN และงานของ Liu et al. (2020), Cap et al. (2022), Alshammari et al. (2024), Wang et al. (2021), และ Promkot (2024) มีลักษณะคล้ายกัน Tan et al. (2021) ได้รวบรวมรูปภาพทั้งสิ้น 4,067 รูปภาพ ด้วยกล้องดิจิทัล นำข้อมูลรูปภาพ มาทดสอบด้วยวิธี Random forest และ วิธี Support vector machine จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จะเห็นได้ว่า งานวิจัยก่อนหน้าได้แสดงผลการทดลองที่น่าพอใจ แต่อย่างไรก็ตามด้วยความหลากหลายของพืชสมุนไพร การรวบรวมข้อมูลรูปภาพสมุนไพร และการปรับปรุงแบบจำลองให้มีความถูกต้องแม่นยำ สอดคล้องกับลักษณะพืชสมุนไพรแต่ละชนิดยังคงเป็นสิ่งที่มีความท้าทาย

ในปัจจุบัน การจำแนกพืชสมุนไพร ด้วยแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่อง หรือแบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึก ยังคงมีข้อจำกัดด้านชุดข้อมูลสาธารณะที่สามารถนำมาใช้ในการทดลอง เพื่อรองรับการพัฒนางานวิจัยในสาขานี้ งานวิจัยนี้จึงศึกษาและออกแบบวิธีการที่เหมาะสมสำหรับการจำแนกรูปภาพเหง้าสมุนไพร โดยประยุกต์ใช้แบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึก 4 วิธี คือ 1) ResNet-50 2) VGG-19 3) DenseNet201 และ 4) InceptionV3 เนื่องจากเป็นวิธีที่ได้รับการพิสูจน์แล้วว่า มีประสิทธิภาพในการจำแนกรูปภาพ ใช้วิธี Hyperparameter เพื่อหาค่าที่ดีที่สุดของแต่ละแบบจำลอง ทั้งนี้ได้รวบรวมชุดข้อมูลรูปภาพเหง้าพืชสมุนไพร 4 ชนิด ได้แก่ ขมิ้นชัน ขมิ้นอ้อย ไพล และว่านนางคำ โดยเก็บตัวอย่างจากร้านจำหน่ายพืชสมุนไพร นำมาฝานเป็นชิ้น และถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิทัลสมาร์ตโฟน ข้อมูลรูปภาพเหง้าสมุนไพรดังกล่าวได้รับการเผยแพร่เพื่อให้เป็นทรัพยากรแก่คณาจารย์ นักวิจัย และผู้สนใจสำหรับการศึกษาและการพัฒนาแบบจำลองการจำแนกในงานประมวลผลภาพต่อไป

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษา และ เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึก ประเภทโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน 4 วิธี ได้แก่ วิธี ResNet-50 วิธี VGG-19 วิธี DenseNet201 และวิธี InceptionV3 สำหรับการจำแนกรูปภาพเหง้าสมุนไพรในวงศ์ขิง 4 ชนิด

2. เพื่อปรับแต่งพารามิเตอร์ของแบบจำลองให้มีความเหมาะสม และ ประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง สำหรับใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้น ในการนำไปใช้ในกระบวนการจำแนกสมุนไพร

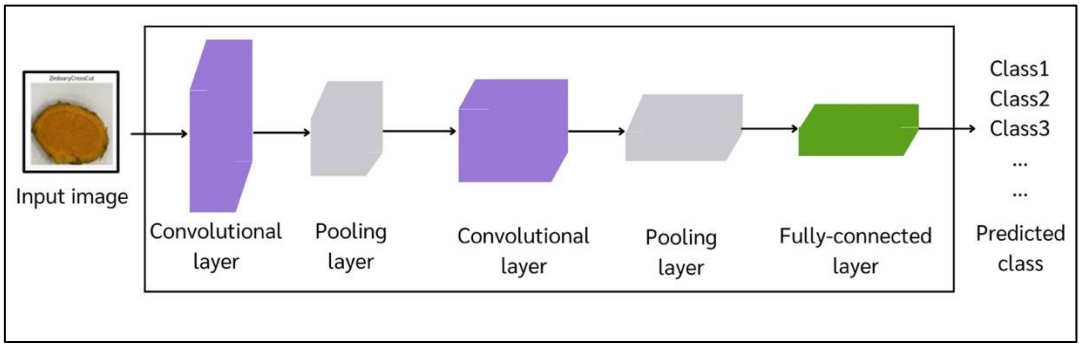
วิธีดำเนินการวิจัย

1. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

หลักการและทฤษฎีของวิธีการเรียนรู้ของเครื่องที่ใช้แบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึกในการวิเคราะห์และจดจำลักษณะภาพเพื่อการจำแนกรูปภาพโดยอัตโนมัติ มีรายละเอียดดังนี้

1.1 โครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน (Convolutional Neural Networks: CNN)

โครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน (Convolutional Neural Networks: CNN) (Pacal et al., 2024) หรือวิธี CNN ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในการประมวลผลภาพ เนื่องจากมีโครงสร้างที่ซับซ้อนและสามารถสกัดคุณลักษณะ (Feature extraction) จากภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในภาพที่ 1 แสดงโครงสร้างการทำงานของวิธี CNN ที่ประกอบด้วยเลเยอร์หลายชั้นที่ทำงานร่วมกัน ได้แก่ 1) เลเยอร์คอนโวลูชัน (Convolutional layers) ซึ่งใช้ฟิลเตอร์ในการสกัดคุณลักษณะจากภาพ 2) เลเยอร์รวมข้อมูล (Pooling layers) เพื่อลดขนาดของข้อมูลให้เหมาะสม และ 3) เลเยอร์เชื่อมต่อแบบเต็ม (Fully connected layers) ที่ใช้สำหรับการจำแนกภาพตามกลุ่มเป้าหมาย



ภาพที่ 1 โครงสร้างการทำงานของวิธี CNN (Pacal et al., 2024)

1.1.1 เลเยอร์คอนโวลูชัน ทำหน้าที่สกัดคุณลักษณะที่สำคัญจากข้อมูลภาพที่นำเข้า โดยใช้ฟิลเตอร์หรือเคอร์เนลที่เลื่อนผ่านภาพเพื่อดึงข้อมูล เช่น ขอบ สี รูปทรง และลวดลายต่าง ๆ ฟิลเตอร์เหล่านี้ประกอบด้วยค่าน้ำหนัก (w) และอคติ (b) ที่สามารถปรับให้เหมาะสมได้ระหว่างการฝึกโมเดล พร้อมทั้งมีฟังก์ชันกระตุ้น (f) เพื่อช่วยในการคำนวณผลลัพธ์

เมื่อข้อมูลนำเข้า X ประกอบด้วย ฟิลเตอร์เท่ากับ k ในเลเยอร์คอนโวลูชัน ผลลัพธ์จากเลเยอร์คอนโวลูชัน สามารถคำนวณได้ดังสมการ (Pacal et al., 2024) ต่อไปนี้

$$y_i = \sum f(x_i * w_j + b_i), j = 1,2, \dots, k \quad (1)$$

1.1.2 เลเยอร์รวมข้อมูล มีหน้าที่ลดขนาดของข้อมูลคุณลักษณะที่ได้จากเลเยอร์คอนโวลูชัน เพื่อลดจำนวนพารามิเตอร์และการคำนวณในเครือข่ายประสาทเทียม โดยยังคงรักษาคุณลักษณะที่สำคัญไว้ ในปัจจุบัน วิธีที่นิยมใช้มากที่สุดคือการรวมค่าสูงสุด (Max Pooling) และการรวมค่าเฉลี่ย (Average Pooling) สมการที่ (2) ได้อธิบายกระบวนการรวมค่าเฉลี่ย โดยสมมติว่าขนาดของหน้าต่างเท่ากับ $p \times p$

ซึ่งค่า $x_{i,j}$ หมายถึงค่าการกระตุ้น (activation value) ณ ตำแหน่ง (i, j) และ N หมายถึงจำนวนรายการทั้งหมดใน S

$$z = \frac{1}{N} + \sum_{(i,j)\in S}^{\infty} x_{i,j}, i, j = 1,2, \dots, p \quad (2)$$

1.1.3 เลเยอร์เชื่อมต่อแบบเต็ม (Fully Connected Layer) ทำหน้าที่แปลงแผนที่คุณลักษณะ (feature maps) ที่สกัดได้จากเลเยอร์ก่อนหน้าให้เป็นเวกเตอร์แบบหนึ่งมิติ ซึ่งเหมาะสำหรับการจำแนกหรือทำนายผลลัพธ์ โดยแต่ละโหนดในเลเยอร์นี้จะคำนวณข้อมูลนำเข้าด้วยกระบวนการเชิงเส้น จากนั้นใช้ฟังก์ชันกระตุ้น (activation function) เพื่อสร้างค่าผลลัพธ์สุดท้าย เลเยอร์เชื่อมต่อแบบเต็ม ช่วยให้เครือข่ายประสาทเทียมสามารถเรียนรู้รูปแบบที่ซับซ้อน และใช้ในการตัดสินใจขั้นสุดท้ายได้อย่างแม่นยำ โดยมีการปรับน้ำหนัก และค่าอคติในระหว่างการฝึกโมเดล เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด สมการ (3) อธิบายวิธีการคำนวณของเลเยอร์เชื่อมต่อแบบเต็ม โดยที่ γ และ Z แทนเวกเตอร์ผลลัพธ์ และคุณลักษณะนำเข้า W หมายถึงน้ำหนัก และ b หมายถึง ค่าอคติของเลเยอร์เชื่อมต่อแบบเต็ม

$$\gamma = \sum_i f(wz + b) \quad (3)$$

แม้ว่าวิธี CNN เป็นโมเดลเครือข่ายประสาทเทียม ที่มีประสิทธิภาพสูงในการประมวลผลภาพ อย่างไรก็ตาม CNN ก็มีข้อจำกัดบางประการ เช่น ปัญหาการหายไปของค่าความชัน เมื่อโครงข่ายมีความลึกมาก ส่งผลประสิทธิภาพในการจำแนกรูปภาพ นอกจากนี้ยังต้องการพารามิเตอร์จำนวนมาก ส่งผลให้การฝึกแบบจำลองใช้ทรัพยากรสูง วิธี CNN ยังมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของมุมมองในภาพ และมีข้อจำกัดในการจับความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ที่อยู่ไกลกันในภาพ ดังนั้นจึงมีการพัฒนาวิธีการต่าง ๆ เช่น วิธี ResNet-50 วิธี VGG-19 วิธี DenseNet201 และ วิธี InceptionV3 เพื่อแก้ไขปัญหาที่ได้กล่าวมาข้างต้นนี้ และเพิ่มประสิทธิภาพในการประมวลผลภาพ แบบจำลองเหล่านี้เป็นแบบจำลองที่ผ่านการฝึกสอนล่วงหน้า (Pretrained models) ซึ่งได้รับการฝึกด้วยข้อมูลขนาดใหญ่ เช่น ImageNet ทำให้สามารถถ่ายโอนความรู้ไปยังแบบจำลองใหม่ได้ กระบวนการนี้ช่วยลดความต้องการข้อมูลจำนวนมากในแบบจำลองใหม่ และทำให้การฝึกสอนมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น (Espinoza et al., 2024)

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่างานวิจัยด้านการประมวลผลภาพด้วยวิธีการเรียนรู้เชิงลึกเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย สำหรับงานวิจัยที่ใช้วิธีการเรียนรู้เชิงลึกสำหรับงานจำแนกรูปภาพพืชสมุนไพร มีรายละเอียดดังนี้

มีงานวิจัยที่รวบรวมข้อมูลรูปภาพสมุนไพรตามวัตถุประสงค์ของแต่ละงาน ดังปรากฏ Ji et al. (2024) ได้รวบรวมรูปภาพสมุนไพรจีน 10 ชนิด จำนวน 15,719 รูปภาพ ผู้วิจัยได้ใช้วิธี AGC มาใช้ในกระบวนการเตรียมข้อมูล และนำมาเปรียบเทียบกับ CLAHE หลังจากนั้นนำมาเรียนรู้ด้วยวิธี GoogLeNet, วิธี ResNet-18 และ วิธี MobileNetV2 ผู้วิจัยสรุปว่าการนำวิธี AGC มาใช้ จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการจำแนกรูปภาพ Wang et al. (2021) ได้ทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกรูปภาพสมุนไพรจีน ที่หั่นเป็นชิ้นส่วนขนาดเล็กชนิดแห้ง ด้วยแบบจำลอง AlexNet, VGGNet, และ ResNet ร่วมกับ Fine-tuning ข้อมูลรูปภาพที่นำมาใช้ในการทดสอบเท่ากับ 72,026 รูปภาพ แบ่งเป็น 7 ชนิด แบ่งข้อมูล สำหรับฝึกสอนข้อมูล ข้อมูลสำหรับการตรวจสอบ และ ข้อมูลสำหรับการทดสอบเท่ากับ 70% 15% และ 15% ผู้วิจัยทดลอง Fine-tuning the

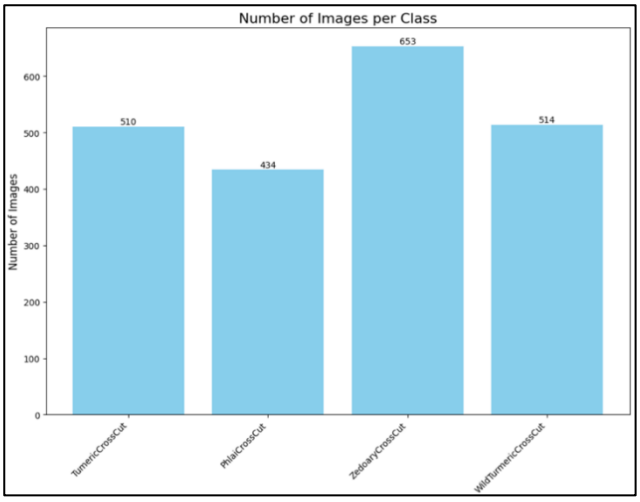
pre-trained model จะกระทั่งค่า epoch เท่ากับ 200 ผลการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ด้วยข้อมูลรูปภาพจำนวน 10,806 รูปภาพ ผู้วิจัยรายงานว่า แบบจำลอง ResNet based on transfer learning แสดงประสิทธิภาพสูงสุด มีค่าความถูกต้องเท่ากับ 98.17% Tan et al. (2021) รวบรวมรูปภาพสมุนไพรจีน 8 ชนิด โดยใช้กล้องดิจิทัลสมาร์ตโฟน จำนวนรูปภาพที่รวบรวมได้เท่ากับ 4,067 รูปภาพ ได้แก่ 1) Gingko 2) Ginseng 3) Barley 4) Ficus Carica 5) Jujube 6) Longan 7) Lotus Seed และ 8) Lycium ปรับรูปภาพให้มีขนาดเท่ากับ 64 x 64 พิกเซล หลังจากนั้นปรับรูปภาพให้อยู่ในรูปแบบ Grayscale เพื่อนำข้อมูลเข้าสู่แบบจำลองเพื่อฝึกสอนด้วยวิธี CNN ผู้วิจัยเปรียบเทียบวิธี CNN กับวิธี Random forest และวิธี Support vector machine ในการทดลองได้แบ่งข้อมูลออกเป็น 64% สำหรับฝึกสอน 16% สำหรับการตรวจสอบ และ 20% สำหรับการทดสอบ ผลการทดสอบประสิทธิภาพ การจำแนกชนิดสมุนไพรจีน วิธี CNN มีประสิทธิภาพสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับวิธี Random forest และวิธี Support vector machine โดย Chen et al. (2023) ได้จำแนกสายพันธุ์สมุนไพรจีน Fritillaria cirrhosa จำนวน 3 สายพันธุ์ ประกอบด้วย สายพันธุ์ Songbei สายพันธุ์ Qingbei และสายพันธุ์ Lubei ด้วยวิธี ResNet34 ที่ปรับปรุงโดยการเพิ่มเลเยอร์เชื่อมต่อแบบเต็ม ขึ้นมาในตำแหน่งที่อยู่ก่อนตัวจำแนกประเภท Softmax เพื่อปรับปรุงความสามารถ ในการเรียนรู้ของแบบจำลอง ข้อมูลที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วยรูปภาพสมุนไพรจีน จำนวน 3,915 รูปภาพ มีขนาด 224 × 224 พิกเซล โดยสุ่มเลือกรูปภาพประเภทละ 160 รูปภาพ ผู้วิจัยแสดงผลการเปรียบเทียบแบบจำลอง 3 วิธี ได้แก่วิธี ResNet18 วิธี Alexnet และ วิธี VGG16 ภายใต้สภาพแวดล้อมการประมวลผลเดียวกัน พบว่ามีค่าความถูกต้องสูงสุดที่ 92.3% สูงกว่า วิธี ResNet18 วิธี Alexnet และ วิธี VGG16 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพ และความเหมาะสมของวิธีที่นำเสนอ ยังมีงานที่ลักษณะคล้ายกัน ดังปรากฏ Angkoso et al. (2023), Sharrab et al. (2023), Mookdarsanit and Mookdarsanit (2022), Panmuang and Rodmorn (2023), และ Islam et al. (2024) จากรายละเอียดการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา แสดงให้เห็นว่าผู้วิจัยต่างพยายามปรับปรุงประสิทธิภาพการจำแนกรูปภาพด้วยวิธีการเรียนรู้เชิงลึก แต่อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดเกี่ยวกับชุดข้อมูลที่นำมาใช้ในกระบวนการฝึกสอน ดังนั้น จึงมีงานวิจัยที่ได้รวบรวมข้อมูลรูปภาพสมุนไพร และเผยแพร่ เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ ในการพัฒนางานด้านประมวลผลภาพ ตัวอย่างเช่น Sharma et al. (2024) ทดลองจำแนกรูปภาพ ด้วยแบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึก วิธี VGG19 วิธี InceptionV3 วิธี LeNet และ วิธี Resnet50 รูปภาพที่นำมาทดลองเป็นรูปภาพใบพืชจำนวน 1835 รูปภาพ จำนวน 30 ชนิด เป็นรูปภาพสาธารณะ (https://data.mendeley.com/datasets/nnytj2v3n5/1) ผลการทดลอง วิธี VGG-19 แสดงประสิทธิภาพสูงสุดมีค่าความถูกต้องเท่ากับ 99.85% Islam et al. (2023) ได้รวบรวมรูปภาพใบพืชสมุนไพรที่ใช้ในประเทศบังคลาเทศ และเผยแพร่ข้อมูลรูปภาพสมุนไพร โดยในเบื้องต้น รวบรวมข้อมูลรูปภาพได้จำนวน 2,029 รูปภาพ หลังจากนั้นนำมากเข้าสู่กระบวนการ Augmentation จึงมีรูปภาพจำนวนทั้งสิ้น 38,606 รูปภาพ นำข้อมูลรูปภาพดังกล่าวมาทดลองจำแนกข้อมูลด้วยแบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึก วิธี DenseNet201 และ วิธี InceptionResNetV2 ผลการทดลองแสดงค่าความถูกต้องเท่ากับ 80.69% และ 90.09% Borkatulla et al. (2023) ได้รวบรวมรูปภาพใบพืชสมุนไพรที่ใช้ในประเทศบังคลาเทศ โดยใช้กล้องดิจิทัลสมาร์ตโฟน จำนวน 10 สายพันธุ์ สายพันธุ์ละ 500 รูปภาพ ทั้งนี้ผู้วิจัยได้ทดลองรูปภาพที่รวบรวมได้มาทดลองประมวลผลรูปภาพด้วยแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่อง ด้วยวิธี ImageNet pre-trained ResNet50 วิธี DenseNet201 วิธี VGG16 และ วิธี InceptionV3 ในงานวิจัยของ Sarma et al. (2023) ได้รวบรวมข้อมูลรูปภาพใบพืชสมุนไพรในรัฐอัสสัม ประเทศอินเดีย เผยแพร่ Mendeley platform นำรูปภาพเข้าสู่กระบวนการ Segmentation ด้วยวิธี U-net และในงานวิจัยของ Tian et al. (2024) ได้รวบรวมรูปภาพ

สมุนไพรจีน และ เผยแพร่เพื่อใช้สำหรับงานด้านการประมวลผลภาพ ประกอบด้วย 2 ชุดข้อมูล คือ 1) รูปภาพสมุนไพรจีน 20 ชนิด จำนวน 3,384 รูปภาพ โดยรูปภาพดังกล่าว ได้รับการอธิบายโดยผู้ช่วยชาญด้านการแพทย์แผนจีน 2) รวบรวมรูปภาพสมุนไพรจีน 400 รูปภาพ ด้วยกล้องสมาร์ตโฟน ผู้วิจัยได้ทดลองนำรูปภาพมาทดลองจำแนกข้อมูลรูปภาพด้วยแบบจำลอง 8 วิธี ได้แก่ วิธี VGG ResNet วิธี InceptionV3 วิธี ShuffleNetV2 วิธี SqueezeNet วิธี MobileNetV2 และวิธี MobileNetV3 ผลการทดลองพบว่าแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องที่นำมาทดลอง มีความถูกต้องสูงกว่า 90% โดยวิธี MobileNetV3 มีค่าความถูกต้องสูงสุด มีค่าเท่ากับ 97.10%

3. ออกแบบการทดลอง

3.1 ข้อมูลที่ใช้ในการทดลอง

1) ข้อมูลภาพถ่ายรูปภาพสมุนไพรวงศ์ขิงจำนวน 4 ชนิด ได้แก่ ขมิ้นชัน ขมิ้นอ้อย ไพล และว่านนางคำ จำนวน 2,111 รูปภาพ เผยแพร่ข้อมูลบนเว็บไซต์ Mendeley data สามารถเข้าถึงชุดข้อมูลได้จากลิงค์ https://data.mendeley.com/datasets/87nrnvwzkj/1



ภาพที่ 2 กราฟแสดงข้อมูลจำนวนรูปภาพสมุนไพรจำแนกตามประเภท

2) เครื่องมือวัดและประเมินผล (Evaluation Metrics)

งานวิจัยนี้ได้กำหนดเครื่องมือที่ใช้ในการวัดและประเมินผล ดังนี้

ค่าความถูกต้อง (Accuracy) สำหรับทดสอบประสิทธิภาพในการจำแนกข้อมูลได้ถูกต้อง มีค่าสูงสุดเท่ากับ 100% ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{Accuracy} = \left(\frac{\text{TP+TN}}{\text{TP+TN+FP+FN}}\right) \times 100 \tag{4}$$

ค่าความแม่นยำ (Precision)

$$\text{Precision} = \frac{\text{TP}}{\text{TP+FP}} \tag{5}$$

ค่าความครบถ้วน (Recall)

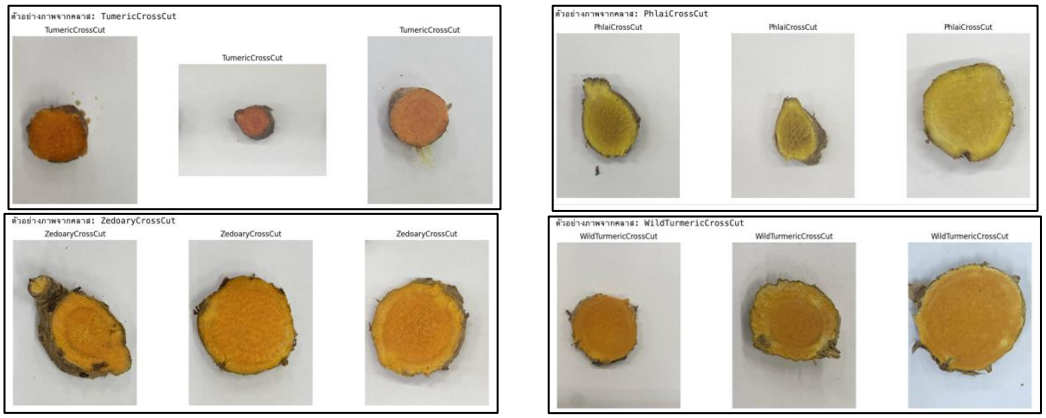
$$\text{Recall} = \frac{\text{TP}}{\text{TP+FN}} \tag{6}$$

ค่าประสิทธิภาพโดยรวม (F-measure)

$$\text{F} - \text{measure} = \frac{2\times\text{Precision} \times\text{Recall}}{\text{Precision+Recall}} \tag{7}$$

3.2 การเตรียมชุดข้อมูล

1) รวบรวมข้อมูลรูปภาพพืชสมุนไพร จำนวน 4 ชนิด ประกอบด้วย ขมิ้นชัน ขมิ้นอ้อย ไพล และ ว่านนางคำ โดยสมุนไพรที่ได้รับคัดเลือกคือสุมไพรที่มีอายุพร้อมเก็บเกี่ยว ถ่ายรูปภาพเหง้าสมุนไพรที่ผ่าเห็นเนื้อด้านในด้วยกล้องสมาร์ตโฟน กำหนดสถานที่ถ่ายภาพอยู่ภายในอาคาร ตัวอย่างภาพถ่ายรูปภาพสมุนไพรดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ตัวอย่างภาพถ่ายรูปภาพสมุนไพรที่ใช้งานการทดลอง

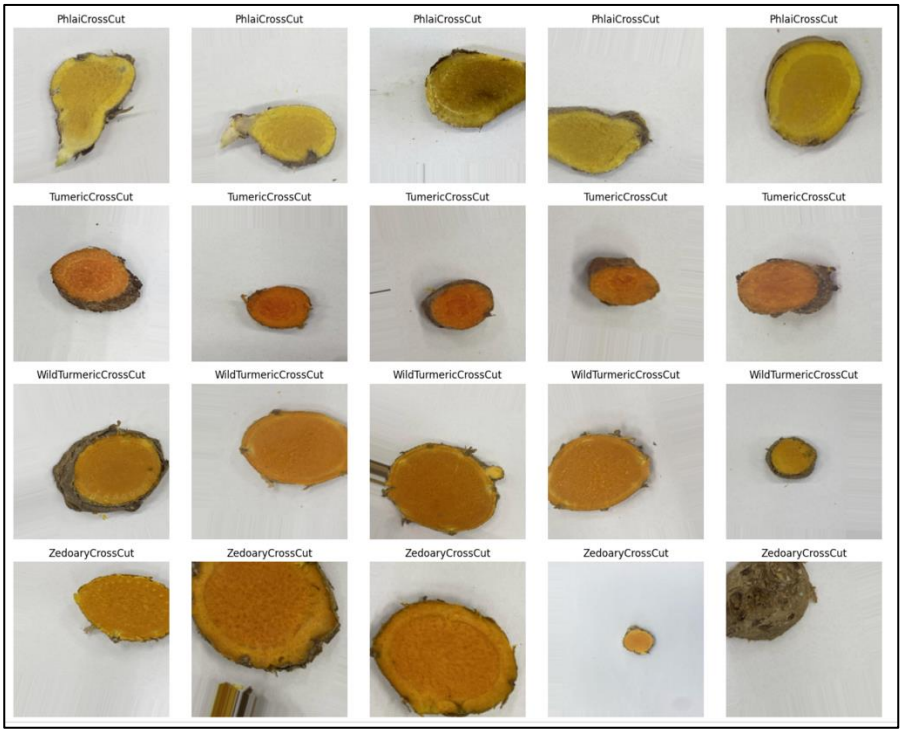
2) รูปภาพที่รวบรวมได้มีจำนวน 2,111 รูปภาพ จัดกลุ่มไฟล์รูปภาพจำแนกตามประเภทของสมุนไพร รูปภาพที่ได้จากกล้องสมาร์ตโฟน เป็นไฟล์นามสกุล HEIC ผู้วิจัยแปลงไฟล์รูปภาพเป็นไฟล์นามสกุล JPG เนื่องจากในการทดลองนี้ ผู้วิจัยใช้ไลบรารี Pillow (หรือ PIL) สำหรับการประมวลผลภาพซึ่งไม่รองรับไฟล์ HEIC โดยตรง ดังนั้น จึงจำเป็นต้องแปลงไฟล์จาก HEIC เป็น JPG แม้ว่าการแปลงไฟล์จาก HEIC เป็น JPG อาจทำให้คุณภาพของรูปภาพลดลงเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตาม งานวิจัยของ Zhao et al. (2023) ได้มีการแปลงไฟล์จาก HEIC เป็น JPG สำหรับการฝึกสอน และการประเมินผล แบบจำลองการจำแนกรูปภาพ โดยไม่ได้รายงานถึงผลกระทบที่สำคัญ ต่อประสิทธิภาพการทำงานของแบบจำลอง

3) รูปภาพที่ได้จากกล้องสมาร์ตโฟน มีขนาดใหญ่ ดังแสดงในภาพที่ 4 เพื่อลดการใช้ทรัพยากรและความรวดเร็วในการประมวลผล ผู้วิจัยจึงปรับขนาดรูปภาพให้มีขนาดเท่ากับ 224x224 พิกเซล

```
Class 'TumericCrossCut': Image sizes - {(4032, 3024), (3024, 4032)}
Class 'PhlaiCrossCut': Image sizes - {(4032, 3024), (3024, 4032)}
Class 'ZedoaryCrossCut': Image sizes - {(4032, 3024), (3024, 4032)}
Class 'WildTurmericCrossCut': Image sizes - {(4032, 3024), (3024, 4032)}
```

ภาพที่ 4 ขนาดรูปภาพที่รวบรวมโดยใช้กล้องดิจิทัลสมาร์ตโฟน

4) สร้างข้อมูลใหม่จากข้อมูลที่มีอยู่ เพื่อเพิ่มความหลากหลายให้กับชุดข้อมูลฝึกสอน โดยการสร้างภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยจากต้นฉบับ ซึ่งช่วยให้แบบจำลองสามารถเรียนรู้ได้ดีขึ้น และลดโอกาสการเกิด Overfitting ด้วยการใช้เทคนิค Data augmentation ตัวอย่างผลลัพธ์เทคนิค Data augmentation ดังแสดงในรูปภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ผลลัพธ์การใช้เทคนิค Augmentation

3.2 ดำเนินการทดลองจำแนกข้อมูลรูปภาพสมุนไพร

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพื่อศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึก ประเภทโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน 4 วิธี ได้แก่ วิธี ResNet-50 วิธี VGG-19 วิธี DenseNet201 และ วิธี InceptionV3 สำหรับการจำแนกรูปภาพเหง้าสมุนไพร ในวงศ์ขิง 4 ชนิด และ เพื่อปรับแต่งพารามิเตอร์ของแบบจำลองให้มีความเหมาะสม และ ประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองสำหรับใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้น ในการนำไปใช้ในกระบวนการจำแนกสมุนไพร หลังจากขั้นตอนการเตรียมชุดข้อมูล

ให้พร้อมสำหรับนำเข้าสู่แบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึก และทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกรูปภาพแล้ว ผู้วิจัยดำเนินการดังนี้

1) แบ่งข้อมูลออกเป็น 70% สำหรับการฝึกสอน 20% สำหรับ การตรวจสอบ และ 10% สำหรับการทดสอบ

2) หลังจากเตรียมข้อมูลเรียบร้อยแล้วในขั้นตอนนี้จะเป็นการทดลองจำแนกข้อมูลด้วยวิธีการเรียนรู้เชิงลึก 4 วิธี คือ 1) วิธี ResNet-50 2) วิธี VGG-19 3) วิธี DenseNet201 และ 4) วิธี InceptionV3 ซึ่ง เป็นสถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน ที่ได้รับการออกแบบเพื่อรองรับงานจำแนกรูปภาพ มีการพัฒนาเพื่อลดข้อจำกัด ที่พบในโครงข่ายเชิงลึกแบบดั้งเดิม เช่น ปัญหาการสูญเสียความชันของกราดีเอนต์ (vanishing gradients) หรือ ความซับซ้อนในการคำนวณที่สูง รายละเอียดโครงสร้างของแบบจำลองสามารถอ่านเพิ่มเติมได้ในงานของ Yao et al. (2022) มีรายละเอียดแบบจำลองที่ทดลองในงานวิจัยมีดังนี้

วิธี VGG-19 มีโครงสร้าง โครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน แบบลึกที่ประกอบด้วย 19 ชั้น โดยใช้ เลเยอร์คอนโวลูชัน ขนาด 3×3 ที่เรียงซ้อนกันหลายชั้น ตามด้วย เลเยอร์รวมข้อมูล และ เลเยอร์เชื่อมต่อแบบเต็ม โครงสร้างดังกล่าวช่วยให้แบบจำลองสามารถเรียนรู้คุณลักษณะ (features) เชิงลึกที่ซับซ้อน ข้อจำกัดของแบบจำลองนี้ คือ มีจำนวนพารามิเตอร์สูง ส่งผลให้มีความซับซ้อนในการคำนวณ สูงตามไปด้วย

วิธี ResNet-50 นำเสนอแนวคิด Residual Learning ซึ่งอาศัย shortcut connections เพื่อลดปัญหาการสูญเสียความชันของกราดีเอนต์ (vanishing gradients) ที่เกิดขึ้นในโครงข่ายที่ลึก โครงสร้างของแบบจำลอง ประกอบด้วย 50 ชั้น โดยแบ่งออกเป็น residual blocks ซึ่งช่วยให้การส่งผ่านข้อมูลทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้การเรียนรู้คุณลักษณะเป็นไปอย่างราบรื่นแม้ในโครงข่ายที่มีความลึกมาก

วิธี DenseNet201 ใช้แนวคิด Dense Connections โดยให้แต่ละเลเยอร์ เชื่อมโยงกับทุกเลเยอร์ก่อนหน้าโดยตรง ผ่านกลไก feature reuse ซึ่งช่วยลดจำนวนพารามิเตอร์ที่จำเป็นในการเรียนรู้ ส่งผลให้แบบจำลองมีประสิทธิภาพในการใช้ข้อมูลและช่วยลดการสูญเสียข้อมูลระหว่างเลเยอร์ แบบจำลองนี้ประกอบด้วย 201 ชั้น ซึ่งช่วยปรับปรุงการไหลของข้อมูลในโครงข่ายได้ดียิ่งขึ้น

วิธี InceptionV3 ใช้โครงสร้าง โมดูล Inception (Inception Modules) ซึ่งออกแบบให้ใช้ เลเยอร์คอนโวลูชัน หลายขนาดภายในเลเยอร์เดียวกัน เพื่อจับคุณลักษณะจาก receptive fields ที่แตกต่างกัน ทำให้สามารถเรียนรู้ลักษณะเฉพาะของภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ โครงสร้างนี้ช่วยลดจำนวนพารามิเตอร์ที่ต้องใช้ ขณะเดียวกันยังสามารถรักษาประสิทธิภาพในการประมวลผลภาพได้ดี

3) ใช้วิธี Hyperparameter เพื่อหาค่าที่ดีที่สุดของแต่ละแบบจำลอง กำหนดค่าพารามิเตอร์ในการทดลอง รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 1

วิธี Hyperparameter ในกระบวนการเรียนรู้เชิงลึก ประกอบด้วยวิธีการที่หลากหลาย เช่น การค้นหาแบบกริด (Grid Search) (Liashchynskyi & Liashchynskyi, 2019) การค้นหาสุ่ม (Random Search) (Andradóttir, 2015) การลดค่าเกรเดียนท์ (Gradient Descent-Based Optimization) (Ruder, 2016) และวิธีการแบบเบย์เซียน (Bayesian Optimization) (Falkner et al., 2018) อย่างไรก็ตาม ในกรณีของแบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึกขนาดใหญ่ พื้นที่ของค่าพารามิเตอร์เชิงไฮเปอร์ (hyperparameter space) มักมีขอบเขตที่กว้างและมีความซับซ้อนสูง ส่งผลให้วิธีการข้างต้น มีข้อจำกัดในด้านประสิทธิภาพและความแม่นยำ

การค้นหาแบบกริด (Liashchynskyi & Liashchynskyi, 2019) เป็นวิธีที่ทำการประเมินค่าพารามิเตอร์ทุกค่า ภายในช่วงที่กำหนด ซึ่งแม้จะสามารถระบุค่าที่เหมาะสมได้อย่างชัดเจน แต่ต้องใช้ทรัพยากรด้านเวลา และการประมวลผลสูง ขณะที่การค้นหาสุ่ม (Andradóttir, 2015) เป็นวิธีที่ช่วยลดจำนวนการทดลองได้ โดยอาศัยการสุ่มค่าพารามิเตอร์จากช่วงที่กำหนด อย่างไรก็ตาม วิธีการดังกล่าว มีข้อจำกัดด้านประสิทธิภาพ ในการประมวลผลแบบขนาน การลดค่าเกรเดียนท์ (Ruder, 2016) อาศัยสมมติฐานว่าฟังก์ชันเป้าหมาย ต้องมีลักษณะเป็นคอนเวกซ์ (convex function) เพื่อให้แน่ใจว่า กระบวนการจะลู่เข้าสู่ค่าที่ดีที่สุด (optimum) ได้สำเร็จ แต่ในทางปฏิบัติ ฟังก์ชันที่เกี่ยวข้องกับการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม มักมีลักษณะที่ไม่แน่นอน และ ซับซ้อนสูง สำหรับวิธีการแบบเบย์เซียน (Falkner et al., 2018) จำเป็นต้องเลือกใช้แบบจำลองตัวแทน (surrogate model) ที่เหมาะสม ซึ่งอาจไม่สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพในทุกกรณีของปัญหา

ภายใต้บริบทของงานวิจัยฉบับนี้ การเลือกใช้การค้นหาสุ่ม จึงเป็นแนวทางที่เหมาะสม เนื่องจากสามารถสร้างสมดุลระหว่างความเร็ว ความเรียบง่าย และประสิทธิภาพในการใช้งานจริง เมื่อเปรียบเทียบกับการค้นหาแบบกริด อีกทั้งยังแสดงประสิทธิภาพที่ดี ในกรณีที่พารามิเตอร์บางตัวมีอิทธิพลต่อผลลัพธ์ของแบบจำลอง มากกว่าพารามิเตอร์ตัวอื่น (hyperparameter sensitivity) นอกจากนี้ การค้นหาสุ่ม มีความยืดหยุ่นในการกำหนดช่วงของค่าพารามิเตอร์ และสามารถดำเนินการทดลองจำนวนมากได้ภายในเวลาอันจำกัด ซึ่งช่วยเพิ่มโอกาสในการค้นหาค่าที่เหมาะสม ในสภาพแวดล้อมที่มีข้อจำกัดด้านทรัพยากร (Andradóttir, 2015)

ตารางที่ 1 รายละเอียดการกำหนดค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึก

ขั้นตอน	รายละเอียดการตั้งค่า
การตั้งค่าเริ่มต้น	seed_value = 123
Data augmentation	- ข้อมูลฝึกสอน: rotation_range=20, width_shift_range=0.2, height_shift_range=0.2, shear_range=0.2, zoom_range=0.2, horizontal_flip=True, fill_mode='nearest' - ข้อมูลตรวจสอบ และ ข้อมูลทดสอบ: rescale=1/255
โครงสร้างแบบจำลอง (Architecture)	- ชั้น Flatten - Dense (ปรับจำนวนโหนดด้วย hyperparameter tuning, ฟังก์ชันกระตุ้น relu) - ชั้นสุดท้าย Dense + softmax สำหรับการจำแนกหลายคลาส
การปรับแต่ง Hyperparameter	- การค้นหา: dense_units = [128, 256], learning_rate = [1e-2, 1e-3, 1e-4] - จำนวนครั้งการทดสอบ = 5, จำนวนรอบฝึก = 10
การฝึกสอนและประมวลผล	- epochs = 100 และ 200 - ประเมินแบบจำลองด้วย Test Loss และ Test Accuracy - แสดง Confusion Matrix แสดง metrics: accuracy, precision, recall, f1-score

การปรับแต่งพารามิเตอร์ เป็นกระบวนการที่สำคัญในการพัฒนาแบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึก เพื่อให้ได้แบบจำลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุด งานวิจัยนี้ ได้ปรับแต่งพารามิเตอร์หลัก 2 พารามิเตอร์ คือ จำนวนโหนดในชั้น Dense (dense_units) และ อัตราการเรียนรู้ (learning_rate) ผ่านกระบวนการ Hyperparameter Tuning จาก ตารางที่ 1 การกำหนดจำนวนโหนดในชั้น Dense ที่ 128 และ 256 เป็นการเลือกค่าเพื่อทดสอบประสิทธิภาพ โดยค่า 128 เป็นค่ามาตรฐานที่มักใช้กับแบบจำลองที่ไม่ซับซ้อน เหมาะสำหรับชุดข้อมูลขนาดกลางและช่วยป้องกันการเกิด Overfitting ส่วนค่า 256 จะช่วยให้แบบจำลองสามารถจับรายละเอียดของข้อมูลได้มากขึ้น ซึ่งอาจเพิ่มความสามารถในการจำแนกได้ดีขึ้น สำหรับอัตราการเรียนรู้ที่ 1e-2 1e-3 และ 1e-4 ครอบคลุมช่วงความเร็วในการเรียนรู้จากสูงไปต่ำ เพื่อศึกษาผลกระทบของการปรับน้ำหนักในแต่ละขั้นตอน การใช้ค่าที่แตกต่างกันนี้จะช่วยเลือกอัตราการเรียนรู้ที่เหมาะสมที่สุดและปรับปรุงประสิทธิภาพของโมเดล

4) ทดลองจำแนกข้อมูลด้วยวิธีการเรียนรู้ของเครื่องดั้งเดิม 2 วิธี คือ 1) วิธี Random forest และ 2) วิธี Support vector machine

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ได้รวบรวมข้อมูลรูปภาพสมุนไพร 4 ชนิด ได้แก่ ขมิ้นชัน ขมิ้นอ้อย ไพล และว่านนางคำ ด้วยกล้องสมาร์ตโฟนในสภาพแวดล้อมที่ควบคุม จำนวน 2,111 รูปภาพและนำเข้าประมวลผลในแบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึก 6 วิธี ผลการดำเนินการทดลองดังแสดงในตารางที่ 2 ผลลัพธ์ที่ได้จากแต่ละวิธีมีความแตกต่างกันดังนี้

วิธี ResNet-50 ในการฝึกฝน จำนวนรอบการฝึก 100 รอบ มีค่าความถูกต้อง เท่ากับ 0.81 และค่าประสิทธิภาพโดยรวม เท่ากับ 0.81 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถจำแนกรูปภาพได้ดี มีค่าความสูญเสียเท่ากับ 0.46 และเมื่อเพิ่มจำนวนรอบการฝึกเป็น 200 รอบ ค่าความถูกต้อง และ ค่าประสิทธิภาพโดยรวมเพิ่มขึ้นเป็น 0.98 และ 0.98 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า แบบจำลองสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพได้ดีขึ้นเมื่อมีการฝึกฝนมากขึ้น

วิธี VGG-19 ในการฝึกฝน จำนวนรอบการฝึก 100 มีค่าความถูกต้อง เท่ากับ 0.99 และ ค่าประสิทธิภาพโดยรวม เท่ากับ 0.99 ซึ่งเป็นค่าที่สูงมาก แสดงว่าแบบจำลอง มีความสามารถในการจำแนกรูปภาพได้แม่นยำ และครบถ้วน และเมื่อเพิ่มจำนวนรอบการฝึกเป็น 200 รอบ ค่าความสูญเสีย เพิ่มขึ้นเล็กน้อย มีค่า 0.11 มีค่าความถูกต้อง และ ค่าประสิทธิภาพโดยรวม ยังคงอยู่ในระดับที่สูงที่ 0.98

วิธี DenseNet201 แสดงผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในทุกๆ ด้าน ในการฝึกฝน จำนวนรอบการฝึก 100 รอบ มีค่าความถูกต้อง เท่ากับ 0.99 และ ค่าประสิทธิภาพโดยรวม เท่ากับ 0.99 โดยมีค่าความสูญเสียต่ำที่สุดเท่ากับ 0.03 เมื่อเพิ่มจำนวนรอบการฝึกเป็น 200 รอบ ค่าความถูกต้อง และ ค่าประสิทธิภาพโดยรวมเพิ่มขึ้นเป็น 1.00 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการจำแนกรูปภาพที่สูงที่สุด

วิธี InceptionV3 ในการฝึกฝน จำนวนรอบการฝึก100 รอบ มีค่าความถูกต้อง เท่ากับ 0.99 และ ค่าประสิทธิภาพโดยรวม เท่ากับ 0.99 ซึ่งแสดงถึงผลลัพธ์ที่ดีมาก เมื่อเพิ่มจำนวนรอบการฝึกเป็น 200 รอบ ค่าความถูกต้อง และ ค่าประสิทธิภาพโดยรวม ลดลงเหลือ 0.95 และ 0.95 ตามลำดับ ซึ่งอาจเป็นผลจากการฝึกฝนมากเกินไปหรือเกิดการ overfitting กับข้อมูลบางประเภท

ในการทดสอบด้วยวิธี Random forest ได้ค่าความถูกต้อง ที่ 0.87 และ ค่าประสิทธิภาพโดยรวมที่ 0.87 ซึ่งแสดงถึงความสามารถ ในการจำแนกรูปภาพในระดับปานกลาง โดยมีความแม่นยำและความครบถ้วนที่ต่ำกว่าโมเดลการเรียนรู้เชิงลึก

วิธี Support vector machine มีค่าความถูกต้อง ที่ 0.92 และ ค่าประสิทธิภาพโดยรวม ที่ 0.92 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีประสิทธิภาพดีกว่า วิธี Random forest แต่ยังคงต่ำกว่าโมเดลการเรียนรู้เชิงลึก

ตารางที่ 2 ตารางแสดงผลการทดลองจำแนกรูปภาพสมุนไพร

รายชื่อแบบจำลอง	**รอบการฝึกฝน (Epoch)**	**ค่าความสูญเสีย (Test loss)**	**ค่าความถูกต้อง (Test Accuracy)**	**ค่าความแม่นยำ Precision**	**ค่าความครบถ้วน Recall**	**ค่าประสิทธิภาพโดยรวม F-measure**
ResNet-50	100	0.46	0.81	0.84	0.81	0.81
	200	0.09	0.98	0.98	0.98	0.98
VGG-19	100	0.06	0.99	0.99	0.99	0.99
	200	0.11	0.98	0.98	0.98	0.98
DenseNet201	100	0.03	0.99	0.99	0.99	0.99
	200	**0.01**	**1.0**	**1.00**	**1.00**	**1.00**
InceptionV3	100	0.02	0.99	0.99	0.99	0.99
	200	0.09	0.95	0.96	0.95	0.95
RF			0.87	0.88	0.87	0.87
SVM				0.92	0.92	0.92

จากตารางที่ 2 จากผลการทดลองพบว่าการจำแนกรูปภาพสมุนไพรโดยใช้แบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึก เช่น วิธี VGG-19 วิธี DenseNet201 และ วิธี InceptionV3 แสดงผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพและความแม่นยำสูงกว่าวิธีการเรียนรู้ของเครื่องดั้งเดิม ได้แก่ วิธี Random forest และ วิธี Support vector machine

สำหรับผลการจำแนกภาพโดยใช้แบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึก พบว่าวิธี DenseNet201 ที่มีจำนวนรอบการฝึก 200 รอบ แสดงค่าความถูกต้อง สูงสุดที่ 1.00 พร้อมค่าความแม่นยำ ค่าความครบถ้วน และ ค่าประสิทธิภาพโดยรวม ที่ระดับ 1.0 การที่จำนวนรอบการฝึก 200 รอบมีประสิทธิภาพสูงกว่าการฝึกด้วย 100 รอบ อาจเกิดจาก แบบจำลองมีเวลาเพียงพอ ในการเรียนรู้รูปแบบของข้อมูล ได้ดีขึ้นในรอบการฝึกที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพของแบบจำลอง อยู่ในระดับสูงขึ้น การที่วิธี DenseNet201 มีผลลัพธ์ที่ดีที่สุด อาจเนื่องมาจากการออกแบบ ที่เน้นการเชื่อมโยงระหว่างเลเยอร์อย่างหนาแน่น (dense connections) ซึ่งช่วยให้แบบจำลอง สามารถเรียนรู้คุณลักษณะที่สำคัญ ได้ดีขึ้นจากข้อมูลรูปภาพ วิธี DenseNet201 ทุกๆ เลเยอร์จะรับข้อมูลจากทุกๆ เลเยอร์ก่อนหน้า ซึ่งทำให้ข้อมูลที่สำคัญ ถูกนำไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ลดปัญหาการสูญเสียข้อมูล และช่วยให้แบบจำลอง สามารถจับความสัมพันธ์ ระหว่างลักษณะของข้อมูลได้ลึกซึ้งยิ่งขึ้น นอกจากนี้ DenseNet201 ยังมีจำนวนพารามิเตอร์ที่น้อยกว่าบางแบบจำลอง เช่น ResNet-50 ซึ่งทำให้แบบจำลอง สามารถฝึกฝนได้เร็ว และมีความยืดหยุ่นมากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับ

ผลการทดลองของ Borkatulla et al. (2023) ที่ได้รายงาน ผลการทดสอบจำแนกข้อมูลรูปภาพสมุนไพรในประเทศบังคลาเทศ วิธี DenseNet201 แสดงผลลัพธ์ที่ดีที่สุด มีค่าความถูกต้องเท่ากับ 0.97 ส่วนวิธี VGG-19 และ วิธี InceptionV3 มีผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าความถูกต้องเท่ากับ 0.98 ถึง 0.99 เมื่อรอบการฝึกอยู่ที่ 200 รอบ แสดงถึงความเหมาะสมของแบบจำลองทั้ง 3 วิธี ในการจำแนกรูปภาพสมุนไพรในลักษณะนี้ ในขณะที่ วิธี ResNet-50 แสดงความถูกต้องลดลงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับวิธี DenseNet201 และ วิธี VGG-19 อย่างไรก็ตาม วิธี ResNet-50 ก็ยังคงแสดงผลลัพธ์ที่สูงถึง 0.98 เมื่อรอบการฝึกอยู่ที่ 200 รอบ

ผลการจำแนกโดยใช้วิธีการเรียนรู้ของเครื่องดั้งเดิม วิธี Random forest และวิธี Support vector machine มีค่าความถูกต้องที่ต่ำกว่าแบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึก โดย วิธี Random forest มีค่าความถูกต้องเท่ากับ 0.87 และ Support vector machine มีค่าความแม่นยำ ค่าความครบถ้วน และค่าประสิทธิภาพโดยรวม ประมาณ 0.92 แม้ว่าผลลัพธ์เหล่านี้จะมีความน่าพอใจ แต่ประสิทธิภาพยังคงต่ำกว่าแบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึก ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการใช้แบบจำลองเชิงลึกอาจเป็นวิธีที่เหมาะสมกว่าในการจำแนกรูปภาพที่มีความซับซ้อน

สรุป

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึกประเภทโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน 4 วิธี ได้แก่ วิธี ResNet-50 วิธี VGG-19 วิธี DenseNet201 และ วิธี InceptionV3 สำหรับการจำแนกรูปภาพเหง้าสมุนไพร ในวงศ์ขิง 4 ชนิด ได้แก่ ขมิ้นชัน ขมิ้นอ้อย ไพล และว่านนางคำ และ เพื่อปรับแต่งพารามิเตอร์ของแบบจำลองให้มีความเหมาะสม และ ประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง สำหรับใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้น ในการนำไปใช้ในกระบวนการจำแนกสมุนไพร จุดเด่นในงานวิจัยนี้ คือ การได้รวบรวมข้อมูลรูปภาพสมุนไพรประเภทเหง้า ที่มีลักษณะคล้ายคลึงกันมาก ทั้ง 4 ชนิด ด้วยกล้องสมาร์ตโฟน เผยแพร่สาธารณะสำหรับนักวิจัยในการนำไปใช้ในงานวิจัยด้านการประมวลผลภาพให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ผู้วิจัยทดลองจำแนกรูปภาพสมุนไพร ด้วยแบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึก 4 วิธี คือ 1) ResNet-50 2) VGG-19 3) DenseNet201 และ 4) InceptionV3 และใช้วิธี Hyperparameter เพื่อหาค่าที่ดีที่สุดของแต่ละแบบจำลอง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า วิธี DenseNet201 ที่มีจำนวนรอบการฝึก 200 รอบ มีความแม่นยำสูงสุดถึงเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองอื่น ๆ ที่ได้ทำการทดลอง มีค่าความสูญเสียเท่ากับ 0.01 แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน ในการจำแนกรูปภาพพืชสมุนไพรได้อย่างแม่นยำ เป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง เช่น การแพทย์แผนไทย อุตสาหกรรมยา อาหารเสริม และเวชสำอาง เพื่อช่วยให้กระบวนการคัดแยกวัตถุดิบสมุนไพรให้มีความแม่นยำและได้มาตรฐานมากยิ่งขึ้น ซึ่งโดยทั่วแล้ว การตรวจสอบคัดแยกพืชสมุนไพร มักดำเนินการภายใต้สภาวะแสงที่เพียงพอ เพื่อให้สามารถประเมินลักษณะ และ คุณสมบัติต่าง ๆ ของพืชสมุนไพรได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ ในงานวิจัยนี้ ดำเนินการถ่ายภาพพืชสมุนไพร ภายใต้สภาวะแสงที่ควบคุมได้ในห้องปฏิบัติการ เพื่อลดความแปรปรวน และ เพิ่มความถูกต้องในการประเมินผล อย่างไรก็ตาม เพื่อให้การประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง มีความครอบคลุมและสอดคล้อง กับการใช้งานในสถานการณ์จริง การศึกษาต่อไป ควรพิจารณาทดสอบแบบจำลอง ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่หลากหลายมากขึ้น เช่น การถ่ายภาพในที่แสงน้อย หรือ จากมุมมองที่แตกต่างกัน การทดสอบดังกล่าว จะช่วยให้มั่นใจว่าแบบจำลองสามารถจำแนกรูปภาพ ได้อย่างถูกต้องในสภาวะที่ใกล้เคียงกับการใช้งานจริง

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยในอนาคต ผู้วิจัยมีแนวคิดในการจำแนกรูปภาพสมุนไพร ที่ไม่ควบคุมคุณภาพของรูปภาพ การควบคุมแสง และพื้นหลังของวัตถุ หรือรูปภาพที่ต้องการระบุหรือจำแนกมีสิ่งบดบัง และเพิ่มจำนวนชนิดพืชสมุนไพรที่นำมาใช้ในการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

Aakif, A., & Khan, M. F. (2015). Automatic classification of plants based on their leaves. **Biosystems Engineering**, 139, 66-75.

Alshammari, K., Alshammari, R., Alshammari, A., & Alkhudaydi, T. (2024). An improved pear disease classification approach using cycle generative adversarial network. **Scientific Reports**, 14(1), 6680.

Andradóttir, S. (2015). A Review of Random Search Methods. In M. C. Fu (Ed.). **Handbook of Simulation Optimization** (pp. 277-292). Springer New York.

Angkoso, C. V., Kusumaningsih, A., & Tjahyaningtijas. (2023). **Automatic Recognition of Madurese Herbal Medicine Rhizome Images Using the Efficientnet Convolutional Neural Network**. 2023 International Conference on Information Technology and Computing (ICITCOM) (pp. 313-317), 1-2 December 2023 at Yogyakarta, Indonesia.

Borkatulla, B., Ferdous, J., Uddin, A. H., & Mahmud, P. (2023). Bangladeshi medicinal plant dataset. **Data in Brief**, 48, 109211.

Cap, Q. H., Uga, H., Kagiwada, S., & Iyatomi, H. (2022). LeafGAN: An Effective Data Augmentation Method for Practical Plant Disease Diagnosis. **IEEE Transactions on Automation Science and Engineering**, 19(2), 1258-1267.

Chen, Y., Li, Y., & Zhang, S. (2023). Research on image recognition of three Fritillaria cirrhosa species based on deep learning. **Scientific Reports**, 13(1), 19486.

Espinoza, S., Aguilera, C., Rojas, L., & Campos, P. G. (2024). Analysis of Fruit Images With Deep Learning: A Systematic Literature Review and Future Directions. **IEEE Access**, 12, 3837-3859.

Falkner, S., Klein, A., & Hutter, F. (2018). **BOHB: Robust and Efficient Hyperparameter Optimization at Scale**. Proceedings of the 35th International Conference on Machine Learning, Proceedings of Machine Learning Research.

slam, M. T., Rahman, W., Hossain, M. S., Roksana, K., Domínguez Azpíroz, I., Martínez Diaz, R., Ashraf, I., & Samad, M. A. (2024). Medicinal Plant Classification Using Particle Swarm Optimized Cascaded Network. **IEEE Access**, 12, 42465-42478.

Islam, S., Ahmed, M. R., Islam, S., Rishad, M. M. A., Ahmed, S., Utshow, T. R., & Siam, M. I. (2023). BDMediLeaves: A leaf images dataset for Bangladeshi medicinal plants identification. **Data in Brief**, 50, 109488.

Ji, H., Liu, X., Wang, L., Fan, L., & Liu, S. (2024). **Image Recognition of Chinese Herbal Medicine Using Adaptive Gamma Correction Based on Convolutional Neural Network**. 2024 IEEE 13th Data Driven Control and Learning Systems Conference (DDCLS) (pp.1428-1433), 17-19 May 2024 at Kaifeng, China.

Kaur, R., Jain, M., McAdams, R. M., Sun, Y., Gupta, S., Mutharaju, R., & Singh, H. (2023). An Ontology and Rule-Based Clinical Decision Support System for Personalized Nutrition Recommendations in the Neonatal Intensive Care Unit. **IEEE Access**, 11, 142433-142446.

Liashchynskyi, P., & Liashchynskyi, P. (2019). Grid search, random search, genetic algorithm: a big comparison for NAS. **arXiv preprint arXiv***:*1912.06059.

Liu, B., Tan, C., Li, S., He, J., & Wang, H. (2020). A Data Augmentation Method Based on Generative Adversarial Networks for Grape Leaf Disease Identification. **IEEE Access**, 8, 102188-102198.

Liu, Y., Roy, S. S., Nebie, R. H. C., Zhang, Y., & Nair, M. G. (2013). Functional Food Quality of Curcuma caesia, Curcuma zedoaria and Curcuma aeruginosa Endemic to Northeastern India. **Plant Foods for Human Nutrition**, 68(1), 72-77.

Mookdarsanit, L., & Mookdarsanit, P. (2022). Thai Herb Identification with Medicinal Properties Using Convolutional Neural Network. **Suan Sunandha Science and Technology Journal**, 6(2), 34-40.

Pacal, I., Kunduracioglu, I., Alma, M. H., Deveci, M., Kadry, S., Nedoma, J., Slany, V., & Martinek, R. (2024). A systematic review of deep learning techniques for plant diseases. **Artificial Intelligence Review**, 57(11), 304.

Panmuang, M., & Rodmorn, C. (2023). Herb Leaf Image Classification with Deep Convolutional Neural Networks. **Science and Technology Nakhon Sawan Rajabhat University Journal**, 15(22), 51-65.

Promkot, A. n. (2024). Efficiency of plant diseases classification by convolutional neural network with optimization algorithm and activation function. **J ournal of Information Science and Technology**, 14(1), 34-44.

Ragab, M., Katib, I., Sharaf, S. A., Assiri, F. Y., Hamed, D., & Al-Ghamdi, A. A. M. (2023). Self-Upgraded Cat Mouse Optimizer With Machine Learning Driven Lung Cancer Classification on Computed Tomography Imaging. **IEEE Access**, 11, 107972-107981.

Ruder, S. (2016). An overview of gradient descent optimization algorithms. **arXiv preprint arXiv***:*1609.04747.

Sarma, P., Boruah, P. A., & Buragohain, R. (2023). MED 117: A dataset of medicinal plants mostly found in Assam with their leaf images, segmented leaf frames and name table. **Data in Brief**, 47, 108983.

Sellami, M., Slimeni, O., Pokrywka, A., Kuvačić, G., D Hayes, L., Milic, M., & Padulo, J. (2018). Herbal medicine for sports: a review. **Journal of the International Society of Sports Nutrition**, 15(1), 14.

Sharma, V., Chaurasia, K., & Bansal, A. (2024). **Optimizing Species Recognition in Medicinal Plants: A Comprehensive Evaluation of Deep Learning Models.** 2024 14th International Conference on Cloud Computing, Data Science & Engineering (Confluence) (pp. 738-743), 18-19 January 2024 at Noida, India.

Sharrab, Y., Al-Fraihat, D., Tarawneh, M., & Sharieh, A. (2023). **Medicinal Plants Recognition Using Deep Learning**. 2023 International Conference on Multimedia Computing, Networking and Applications (MCNA) (pp. 116-122), 19-22 June 2023 at Valencia, Spain.

Smith, S. P., Adam, M. T. P., Manning, G., Burrows, T., Collins, C., & Rollo, M. E. (2022). Food Volume Estimation by Integrating 3D Image Projection and Manual Wire Mesh Transformations. **IEEE Access**, 10, 48367-48378.

Soumya, T., Jayasree, P. R., & Manish Kumar, P. R. (2023). Zingiberaceae Plants: A Cornucopia of Promising Chemotherapeuticals for Cancer Cure. In K. Arunachalam, X. Yang, & S. Puthanpura Sasidharan (Eds.). **Bioprospecting of Tropical Medicinal Plants** (pp. 427-462). Springer Nature Switzerland.

Tan, J. W., Lim, K. M., & Lee, C. P. (2021). **Herb Classification with Convolutional Neural Network**. 2021 IEEE International Conference on Artificial Intelligence in Engineering and Technology (IICAIET) (pp. 1-4), 13-15 September. 2021 at Kota Kinabalu, Malaysia.

Tian, D., Zhou, C., Wang, Y., Zhang, R., & Yao, Y. (2024). NB-TCM-CHM: Image dataset of the Chinese herbal medicine fruits and its application in classification through deep learning. **Data in Brief**, 54, 110405.

Wang, H., Tan, X., Huang, Z., Pan, B., & Tian, J. (2020). Mining incomplete clinical data for the early assessment of Kawasaki disease based on feature clustering and convolutional neural networks. **Artificial Intelligence in Medicine**, 105, 101859.

Wang, W., Tian, W., Liao, W., Cai, B., & Li, B. (2021). **Identifying Chinese Herbal Medicine by Image with Three Deep CNNs.** Proceedings of the 5th International Conference on Control Engineering and Artificial Intelligence (pp. 1-8), 14 - 16 January 2021 at Sanya, China.

Yao, X., Wang, X., Wang, S.-H., & Zhang, Y.-D. (2022). A comprehensive survey on convolutional neural network in medical image analysis. **Multimedia Tools and Applications**, 81(29), 41361-41405.

Zhao, J., Almodfer, R., Wu, X., & Wang, X. (2023). A dataset of pomegranate growth stages for machine learning-based monitoring and analysis. **Data in Brief**, 50, 109468.

Zhao, Y., Chen, Z., Gao, X., Song, W., Xiong, Q., Hu, J., & Zhang, Z. (2022). Plant Disease Detection Using Generated Leaves Based on DoubleGAN. **IEEE/ACM Transactions on Computational Biology and Bioinformatics**, 19(3), 1817-1826.

Zhong, Y., Zhang, S., Liu, Z., Zhang, X., Mo, Z., Zhang, Y., Hu, H., Chen, W., & Qi, L. (2024). Unsupervised Fusion of Misaligned PAT and MRI Images via Mutually Reinforcing Cross-Modality Image Generation and Registration. **IEEE Transactions on Medical Imaging**, 43(5), 1702-1714.

Zhu, H., Liu, Q., Qi, Y., Huang, X., Jiang, F., & Zhang, S. (2018). P lant identification based on very deep convolutional neural networks. **Multimedia Tools and Applications**, 77(22), 29779-29797.

การพัฒนาแผ่นไม้เทียมจากเศษกิ่งไม้มะปรางผสมกับพลาสติกพอลิเอทิลีน สำหรับวิสาหกิจชุมชน

กิตติพันธ์ บุญโตสิตระกูล[1] ณรงค์ศักดิ์ เย็นประเสริฐ[2] กิตติพงษ์ สุวีโร[3] อิทธิ ผลิตศิริ[4*]
ทวีศักดิ์ ศรีจันทร์อินทร์[5] ปราโมทย์ วีรานุกูล[6] อภิโชติ อุฬารตินนท์[7]

Received : March 6, 2025
Revised : June 20, 2025
Accepted : August 3, 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักในการพัฒนาแผ่นไม้เทียมที่ผลิตจากพลาสติกผสมชีวมวล โดยใช้เศษกิ่งไม้มะปรางซึ่งเป็นวัสดุจากธรรมชาติและพลาสติกพอลิเอทิลีน ซึ่งเป็นพลาสติกที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในการผลิตวัสดุอุตสาหกรรม โดยมุ่งเน้นให้เหมาะสมกับการใช้ในวิสาหกิจชุมชนที่ต้องการวัสดุที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ในหลายด้าน ในการทดลองนี้ ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบส่วนผสมของเศษกิ่งไม้มะปรางและพลาสติกพอลิเอทิลีนในอัตราส่วนที่แตกต่างกันจำนวน 10 อัตราส่วน เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตแผ่นเทียม แผ่นไม้เทียมที่ได้จะนำไปทดสอบคุณสมบัติเชิงกลตามมาตรฐาน มอก. 2998-2562 และ มอก.876-2547 ซึ่งเกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์ไม้เทียมจากพลาสติกผสมชีวมวล

ผลการทดสอบพบว่า แผ่นไม้เทียมที่มีความเหมาะสมที่สุด ควรมีอัตราส่วนของพลาสติกพอลิเอทิลีน 3.5 ส่วนต่อเศษกิ่งไม้มะปราง 1 ส่วน โดยน้ำหนัก ซึ่งแผ่นไม้เทียมดังกล่าว มีค่าความหนาแน่น 877.35 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความต้านทานแรงดัด 14.10 เมกะพาสคัล มอดุลัสยืดหยุ่น 2,112.98 เมกะพาสคัล และความต้านทานแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า 0.95 เมกะพาสคัล ทำให้แผ่นไม้เทียมที่ใช้อัตราส่วนนี้เหมาะสมต่อการใช้งานภายในอาคาร โดยเฉพาะในงานตกแต่งภายในที่มีการรับแรงจากการใช้งานไม่มากนัก

คำสำคัญ: กิ่งไม้มะปราง แผ่นไม้เทียม พลาสติกพอลิเอทิลีน วิสาหกิจชุมชน

[1,6] สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
[2, 4, 5, 7]สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
[3] สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญญบุรี
** ผู้นิพนธ์หลัก อีเมล: itthi.w@rmutsb.ac.th*

DEVELOPMENT OF WOOD-PLASTIC COMPOSITE PANELS FROM MARIAN PLUM BRANCH RESIDUES AND POLYETHYLENE FOR COMMUNITY ENTERPRISES

Kittiphan Boontositrakul[1] Narongsak Yenparsert[2] Kittipong Suweero[3] Itthi Plitsiri[4*]
Thaveesak Srichanin[5] Pramot Weeranukul[6] Apichote Urantinon[7]

Abstract

The primary objective of this research was to develop wood-plastic composite panels produced from plastic-biomass composites, utilizing Marian plum branch residues, a natural material, and polyethylene plastic, which is widely used in producing industrial materials. The project was aimed to fabricate material suitable for use in community enterprises that require multifunctional applications and practical materials. In the current study, the researchers designed ten different mixing ratios of Marian plum branch residues and polyethylene to determine the most suitable composition for manufacturing composite wood panels. The wood-plastic composite panels gained were tested for mechanical properties according to the Thai Industrial Standards TIS 2998-2562 and TIS 876-2547, which relate to wood-plastic composite panels produced from plastic-biomass composites.

Test results indicated that the optimal wood-plastic composite panels should be consisted of a ratio of 3.5 parts of polyethylene plastic to 1 part of Marian plum branch residues by weight. The panel achieved a density of 877.35 kilograms per cubic meter, a bending strength of 14.10 megapascals, a modulus of elasticity of 2,112.98 megapascals, and a perpendicular tensile strength of 0.95 megapascals. These properties were suggested that the developed synthetic wood panel has been well-suited for indoor applications, particularly for interior decoration, where only moderate mechanical loads are encountered.

Keywords: Marian plum branch, Wood-plastic composite panels, Polyethylene, Community enterprises

---

[1,6] Department of Industrial Engineering, Faculty of Industrial Education, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon
[2, 4, 5, 7] Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi
[3] Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi
** Corresponding author, e-mail: itthi.w@rmutsb.ac.th*

บทนำ

แผ่นไม้สังเคราะห์จากพลาสติกผสมชีวมวล (Wood Like Plastic – Biomass Composites หรือ Wood Plastic Composite, WPC) เป็นวัสดุที่ผลิตจากการผสมผงไม้กับพลาสติก ซึ่งสามารถนำมาใช้ทดแทนไม้จริงในหลายประเภทของการใช้งาน (Ribeiro, 2023; Sunitha et al., 2023) เช่น แผ่นฝ้าเพดาน แผ่นกรุตกแต่งผนัง และเฟอร์นิเจอร์ภายในอาคาร เป็นต้น (Friedrich, 2018; Kılıç et al., 2023; Yeshiwas, 2024) การใช้วัสดุประเภทดังกล่าวมีแนวโน้มเติบโตอย่างรวดเร็วทั้งในด้านความต้องการและต้นทุนในการผลิตที่เพิ่มสูงขึ้น ในปี 2024 พบว่า การใช้งานในภาคอุตสาหกรรมการก่อสร้างคิดเป็น 71.3% ของรายได้ตลาด WPC ทั่วโลก (Grand View Research, 2024) การนำวัสดุทดแทนที่มาจากธรรมชาติ เช่น เศษกิ่งไม้จากการตัดแต่ง หรือวัสดุเหลือใช้จากภาคเกษตรกรรม มาเป็นวัตถุดิบในการผลิตแผ่นไม้สังเคราะห์ จึงถือเป็นแนวทางสำคัญในการสนับสนุนความยั่งยืนของอุตสาหกรรมอย่างมีประสิทธิภาพ

เศษกิ่งไม้ที่เกิดจากกระบวนการดูแลและตัดแต่งต้นมะปรางถือเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่เกษตรกรต้องเผชิญกับต้นทุนในการกำจัดที่ค่อนข้างสูง โดยในพื้นที่เขตกรุงเทพมหานคร คิดอัตราค่าบริการในการเก็บเศษกิ่งไม้ระยะทางไม่เกิน 10 กิโลเมตร 500 บาทต่อเที่ยว และ ระยะทางเกิน 10 กิโลเมตร 700 บาทต่อเที่ยว (สำนักข่าวพลังปวงชน, 2566) ทั้งนี้ เนื่องจากหน่วยงานภาครัฐได้ออกมาตรการเพื่อส่งเสริมการลดและหลีกเลี่ยงการกำจัดวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรด้วยวิธีการเผา อันเนื่องมาจากผลกระทบต่อคุณภาพอากาศและปัญหามลพิษ (สำนักงานคณะกรรมการกฤษฎีกา, 2535) เกษตรกรจึงจำเป็นต้องพิจารณาวิธีจัดการอื่น ๆ เช่น การแปรรูปเป็นปุ๋ยหมักหรือการฝังกลบ อย่างไรก็ตาม กระบวนการดังกล่าวมักไม่เหมาะสำหรับเศษกิ่งไม้ขนาดใหญ่ อีกทั้งยังมีความเสี่ยงต่อการเกิดเชื้อราในบริเวณพื้นที่เพาะปลูก โดยเฉพาะในกรณีของต้นมะปราง เพื่อลดปัญหาดังกล่าว เกษตรกรและกลุ่มวิสาหกิจชุมชนจึงเล็งเห็นถึงโอกาสในการนำเศษวัสดุเหลือใช้เหล่านี้มาผลิตเป็นแผ่นชิ้นไม้อัด เพื่อใช้เป็นวัสดุในงานก่อสร้าง เช่น การกรุพื้น ผนัง หรือฝ้าเพดาน ซึ่งนอกจากจะช่วยลดปริมาณของเสียทางการเกษตรแล้ว ยังเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจ เนื่องจากเนื้อไม้มะปรางมีลักษณะเด่นในด้านสีส้มที่สวยงามและมีเอกลักษณ์เฉพาะตัวเมื่อเปรียบเทียบกับไม้ประเภทอื่น

LDPE (Low-Density Polyethylene) และ HDPE (High-Density Polyethylene) เป็นพลาสติกในกลุ่ม โพลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่ผลิตจากมอนอเมอร์เอทิลีน (Ethylene, C_2H_4) โดยทั้งสองชนิดมีโครงสร้างโมเลกุลและสมบัติเฉพาะที่แตกต่างกัน ส่งผลให้มีการใช้งานที่หลากหลาย ในกระบวนการผลิตแผ่นไม้เทียม ยังสามารถใช้ขยะพลาสติกเป็นสารเชื่อมประสานแทนการใช้กาวสังเคราะห์ได้ Nuryawan et al. (2020) ได้ผลิตแผ่นไม้เทียม โดยใช้พลาสติกประเภท LDPE เป็นตัวเชื่อมประสาน คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติเชิงกล ถูกประเมินตามมาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น (JIS) A 5908:2003 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า แผ่นไม้เทียมที่ใช้ LDPE เป็นตัวเชื่อมประสานนั้น เป็นไปตามมาตรฐาน JIS โดย Kajaks et al. (2018)

ได้นำผงไม้มาผสมกับพลาสติก HDPE เพื่อผลิตชิ้นตัวอย่างแผ่นไม้เทียมสำหรับนำไปทดสอบคุณสมบัติเชิงกล ผลทดสอบจากชิ้นงานตัวอย่าง พบว่า คุณสมบัติแรงดึง ความดัดงอ และความแข็งขนาดเล็กมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของ พลาสติก HDPE ในส่วนความต้านทานต่อน้ำจะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อสารมีเพศสัมพันธ์โพลีเอทิลีนมาเลต (MAPE) ในคอมโพสิต การนำขยะพลาสติกประเภท LDPE และ HDPE มาใช้ในการผลิตแผ่นไม้เทียม จึงมีส่วนช่วยในการลดต้นทุนการผลิต เสริมสร้างคุณสมบัติเชิงกล และมีบทบาทสำคัญในการลดปริมาณขยะที่เกิดขึ้นในชีวิตประจำวันของประชากรในประเทศ

การพัฒนาผลิตภัณฑ์แผ่นไม้สังเคราะห์จากเศษกิ่งมะปรางและพลาสติกเหลือใช้ มีเป้าหมายเพื่อเพิ่มรายได้ให้แก่กลุ่มวิสาหกิจชุมชน ลดปริมาณของเสียจากภาคการเกษตร และแก้ไขปัญหามลพิษทางทะเลอย่างเป็นระบบ โดยแนวทางดังกล่าวสามารถสนับสนุนการสร้างงานและยกระดับรายได้ให้แก่เกษตรกรและประชาชนในชุมชน นอกจากนี้ยังช่วยลดต้นทุนในกระบวนการเกษตร ลดการเผาทำลายวัสดุเหลือใช้ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ และส่งเสริมการใช้ทรัพยากรที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้ขยะพลาสติกประเภท LDPE ซึ่งเป็นพลาสติกที่นิยมใช้เป็นถุงแกง สำหรับเคลือบผิวในส่วนของขั้นตอนการขึ้นรูปวัสดุ ซึ่งเป็นขยะพลาสติกที่ไม่ค่อยมีมูลค่าเมื่อเปรียบเทียบกับขยะพลาสติกเหลือทิ้งชนิดอื่น (จักรภัทร ปรีดาวัฒน์ และคณะ, 2566) และเลือกใช้ขยะพลาสติกประเภท HDPE ซึ่งเป็นพลาสติกที่มีปริมาณมาก และมีการใช้อย่างแพร่หลายมาเป็นส่วนผสม ทั้งนี้การนำขยะพลาสติกมาใช้ประโยชน์จะช่วยลดปริมาณขยะที่อาจจะลงสู่ทะเลได้ดี เนื่องจากขยะพลาสติกสามารถแตกตัวเป็นไมโครพลาสติก (Microplastic) หรือเศษพลาสติกที่มีขนาดเล็กกว่า 5 มิลลิเมตร (Adithama et al, 2023; Jebashalomi et al., 2024) ทำให้ขยะพลาสติกดังกล่าวสามารถถูกพัดพาลงไปสู่ทะเลผ่านทางแม่น้ำลำคลองได้

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของแผ่นไม้เทียม ที่ใช้ขยะพลาสติก LDPE ขึ้นรูป และขยะพลาสติก HDPE เป็นส่วนผสม

2. เพื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของแผ่นไม้เทียม ที่ใช้ขยะพลาสติก LDPE ในการขึ้นรูป และขยะพลาสติก HDPE เป็นส่วนผสม

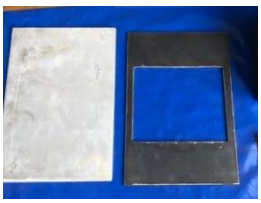
วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัสดุและอุปกรณ์

วัสดุและอุปกรณ์ ประกอบด้วย เศษกิ่งไม้ต้นมะปราง ขวดพลาสติกชนิด HDPE ถุงพลาสติกชนิด LDPE กบไสไม้ไฟฟ้า ขนาด 3 นิ้ว ที่ปรับความหนาใบมีดประมาณ 0.6 ถึง 0.8 มิลลิเมตร เครื่องบดย่อยพลาสติก

พร้อมตะแกรงขนาด 1 นิ้ว และ 3 มิลลิเมตร แบบหล่อที่มีขนาด 15 x 17.5 เซนติเมตร และความหนา 5 มิลลิเมตร ถูกนำมาใช้งาน โดยอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการขึ้นรูปแผ่นชิ้นไม้อัดเป็นเครื่องอัดราบด้วยความร้อน ซึ่งดำเนินการผ่านระบบมือหมุน รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดของวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

ชื่อวัสดุ	ภาพประกอบ	ชื่ออุปกรณ์	ภาพประกอบ
เศษกิ่งไม้ต้นมะปราง		กบไสไม้ไฟฟ้า ขนาด 3 นิ้ว	
ขวดพลาสติกชนิด HDPE		เครื่องบดย่อยพลาสติก	
ถุงพลาสติกชนิด LDPE		แบบหล่อ ชิ้นงาน	
		เครื่องอัดราบด้วยความร้อนผ่านระบบมือหมุน	

2. การออกแบบส่วนผสม

การออกแบบส่วนผสมเพื่อหาความเหมาะสมของอัตราส่วนผสมที่จะใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงาน เพื่อนำไปทดสอบคุณสมบัติเชิงกล ออกแบบอัตราส่วนผสมโดยใช้เศษไม้มะปราง 1 ส่วนโดยน้ำหนัก ต่อเศษขวดพลาสติกชนิด HDPE เท่ากับ 1.0 ถึง 6.0 ส่วนโดยน้ำหนัก รวม 11 อัตราส่วน ดำเนินการอัดแผ่นไม้โดยตั้งค่าความหนาแน่นเริ่มต้นไว้ที่ 880 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรเป็นเกณฑ์ควบคุมเบื้องต้น เนื่องจากมาตรฐาน มอก. 2998-2562 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2562) กำหนด ความหนาแน่นของแผ่นไม้เทียมให้มีค่าอยู่ระหว่าง 800 ถึง 1,500 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ดังแสดงเป็นอัตราส่วนในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ออกแบบอัตราส่วนผสมของชิ้นงานทดสอบ

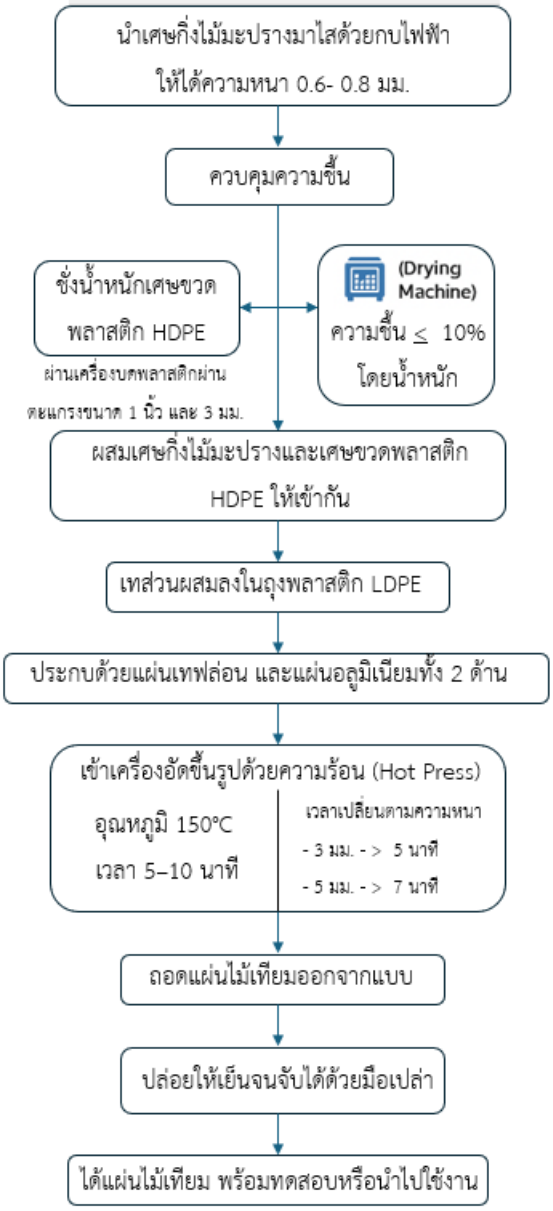
อัตราส่วน	เศษกิ่งไม้ที่ผ่านการไส	เศษขวด HDPE	ความหนาแน่น (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)
M-1.0	1	1.0	880 (ลักษณะแผ่นไม่สมบูรณ์)
M-1.5	1	1.5	880
M-2.0	1	2.0	880
M-2.5	1	2.5	880
M-3.0	1	3.0	880
M-3.5	1	3.5	880
M-4.0	1	4.0	880
M-4.5	1	4.5	880
M-5.0	1	5.0	880
M-5.5	1	5.5	880
M-6.0	1	6.0	880

หมายเหตุ อัตราส่วน M-1.0 ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นไม้เทียมสำหรับนำไปทดสอบได้

3. กระบวนการผลิต

นำเศษกิ่งไม้มะปรางมาไสด้วยกบไฟฟ้าให้ได้เศษไม้ที่มีความหนาประมาณ 0.6 – 0.8 มิลลิเมตร และควบคุมความชื้นไม่เกินร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก โดยนำไปเข้าเครื่องอบแห้ง (Drying Machine) และนำเศษกิ่งไม้มะปรางที่ไสแล้วชั่งน้ำหนัก ต่อมา ชั่งน้ำหนักเศษขวดพลาสติก HDPE ที่บดย่อยด้วยเครื่องบดพลาสติกผ่านตะแกรงขนาด 1 นิ้ว และ 3 มิลลิเมตร ตามอัตราส่วนที่ออกแบบ นำเศษกิ่งไม้มะปรางที่ไสและเศษขวดพลาสติก HDPE ที่บดย่อยและชั่งน้ำหนักแล้ว มาผสมให้เข้ากัน และเทส่วนผสมที่ได้ลงในถุงพลาสติก LDPE ประกบส่วนผสมที่ใส่อยู่ในถุง LDPE ด้วยแผ่นเทฟล่อน และแผ่นอลูมิเนียมทั้ง 2 ด้าน จากนั้นนำเศษกิ่งไม้ที่อยู่ในแบบหล่อและประกบแผ่นเทฟล่อนและแผ่นอลูมิเนียมแล้ว ไปใส่ในเครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน ตามค่ามาตรฐาน

โดยทั่วไปของกระบวนการ Hot Press สำหรับแผ่นไม้เทียม โดยใช้ความร้อน 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ถึง 10 นาที ขึ้นอยู่กับความหนา เช่น ความหนา 3 มิลลิเมตร ใช้เวลา 5 นาที ความหนา 5 มิลลิเมตร ใช้เวลา 7 นาที นำแผ่นไม้เทียมที่ขึ้นรูปออกมาเพื่อถอดแบบ นำแผ่นเหล็กและแผ่นเทฟล่อนออกจากแผ่นไม้เทียมที่ขึ้นรูป รอให้อุณหภูมิลดลงจนสามารถถือด้วยมือเปล่าได้ จะได้แผ่นไม้เทียมจากเศษกิ่งไม้มะปรางสำหรับนำไปทดสอบหรือนำไปใช้งานต่อไป โดยมีลำดับขั้นตอนแสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แผนภาพแสดงกระบวนการผลิตแผ่นไม้เทียม

4. การทดสอบคุณสมบัติ

การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เรื่องไม้สังเคราะห์จากพลาสติกชีวมวล; มอก.2998-2562 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2562) และมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแผ่นชิ้นไม้อัดชนิดอัดราบ; มอก.876- 2547 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2547) ประกอบด้วย

4.1 คุณสมบัติทางกายภาพ ลักษณะทั่วไปของแผ่นไม้สังเคราะห์ เช่น ความกว้าง ยาว ความแตกต่างของเส้นทแยงมุม ความตรงของขอบ

4.2 คุณสมบัติเชิงกล ได้แก่ ปริมาณความชื้น การพองตัวตามความหนา ความต้านทางแรงดัด มอดุลัสยืดหยุ่น ความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า และการดูดซึมน้ำ โดยมีรายละเอียดและวิธีการทดสอบดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 รายละเอียดและวิธีการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของแผ่นไม้เทียม

ลำดับ	คุณสมบัติ	รายละเอียด / วิธีทดสอบ
1.	ปริมาณความชื้น (Moisture Content)	ร้อยละของน้ำในวัสดุโดยน้ำหนัก ทดสอบโดยอบที่ 105°C จนคงที่ ใช้มาตรฐาน ASTM D4442
2.	การพองตัวตามความหนา (Thickness Swelling)	วัดการเปลี่ยนแปลงของความหนาหลังแช่น้ำ 24 ชม. (%TS) ใช้ตาม ASTM D1037
3.	ความต้านทานแรงดัด (Modulus of Rupture – MOR)	ค่าความแข็งแรงสูงสุดก่อนหักจากการทดสอบดัด ใช้ตาม ASTM D790
4.	มอดุลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity – MOE)	ความสามารถของวัสดุในการยืดหยุ่น (ความชันของกราฟแรง-การโก่ง) ใช้มาตรฐานเดียวกับ MOR
5.	ความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า (Internal Bond Strength – IB)	ทดสอบการดึงชั้นผิววัสดุออกจากกัน ใช้มาตรฐาน ASTM D1037
6.	การดูดซึมน้ำ (Water Absorption)	ทดสอบปริมาณน้ำที่วัสดุดูดซึมเข้าไปเมื่อแช่น้ำ ใช้มาตรฐาน ASTM D570/D1037

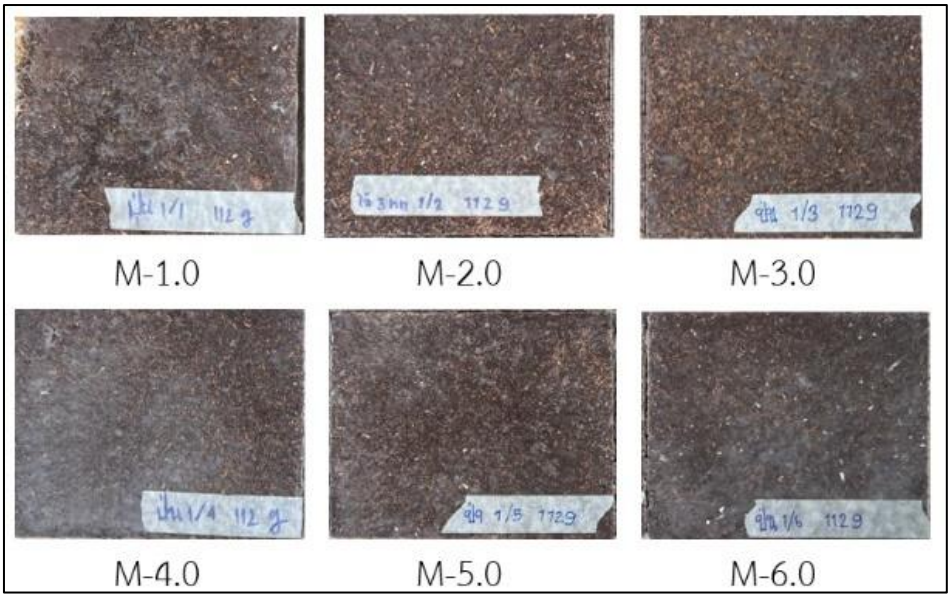
หมายเหตุ ใช้จำนวนตัวอย่างทดสอบ 5 ตัวอย่าง ต่อค่าการทดสอบแต่ละค่า

ผลการดำเนินงานวิจัย

ผลการพัฒนาแผ่นไม้เทียมจากเศษกิ่งไม้มะปรางผสมกับพลาสติกพอลิเอทิลีน สรุปได้ดังนี้

ลักษณะทั่วไป

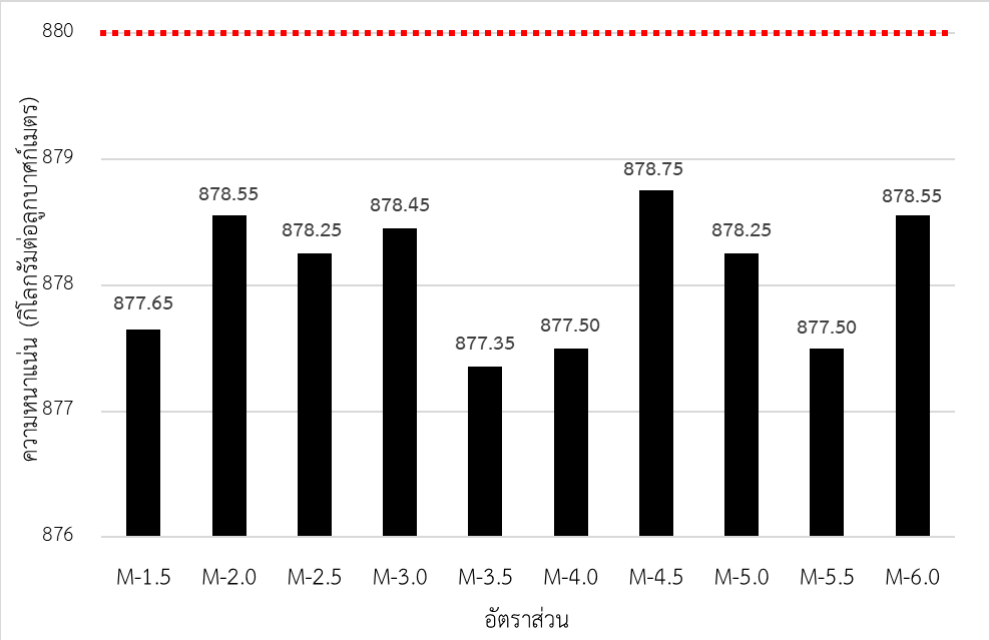
ลักษณะทั่วไปของแผ่นไม้เทียมจากเศษกิ่งไม้มะปรางที่ขึ้นรูปทั้ง 10 อัตราส่วน ที่ผสมเศษขวดพลาสติกในปริมาณตั้งแต่ M-1.5 ขึ้นไปจนถึง M-6.0 พบว่า แผ่นไม้เทียมทั้งหมดมีขอบที่ได้ฉากกับระนาบผิว และผิวหน้าจะมีเนื้อค่อนข้างเรียบ ไม่มีการโค้งงอ ร้าว หรือ บิวเบี้ยว ตามที่มาตรฐาน มอก.2998-2562 กำหนด โดยผิวหน้าของแผ่นไม้สังเคราะห์จะมีสีค่อนข้างแดง และไม้ที่มีความสดมากกว่าจะมีเนื้อที่อ่อนกว่าไม้ที่แห้งหรือเก่ากว่า นอกจากนี้หากต้องการให้เนื้อไม้มีสีสม่ำเสมอ ควรมีการไสเปลือกไม้ออกก่อนจะทำการไส แสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ผิวหน้าของแผ่นไม้เทียมจากเศษกิ่งไม้มะปรางผสมเศษพลาสติก

ความหนาแน่น

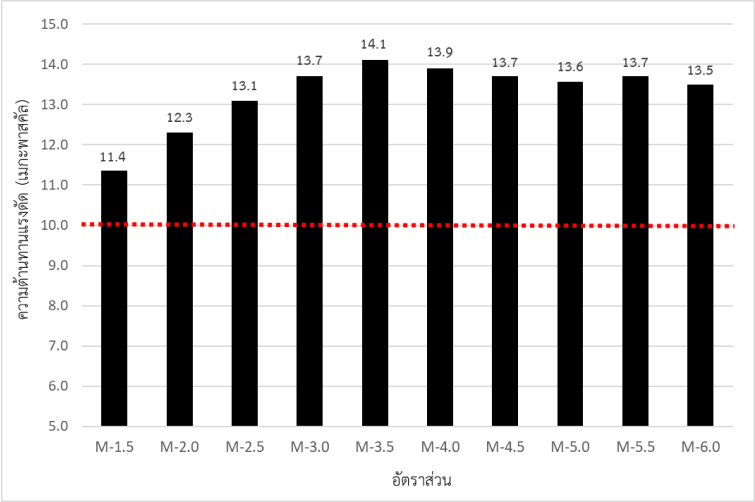
ผลการทดสอบความหนาแน่นของแผ่นไม้เทียมจากเศษกิ่งไม้มะปรางที่ขึ้นรูปทั้ง 10 อัตราส่วน พบว่า แผ่นไม้เทียมทั้งหมดมีค่าความหนาแน่น อยู่ระหว่าง 877.35 ถึง 878.75 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร แสดงดังภาพที่ 3 ซึ่งค่าความหนาแน่นน้อยกว่าค่า ความหนาแน่นที่ออกแบบไว้เล็กน้อย คือ 880 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และอยู่ในช่วงค่ามาตรฐาน มอก.2998-2562 ที่ระบุค่าระหว่าง 800 ถึง 1,500 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร



ภาพที่ 3 ความหนาแน่นของแผ่นไม้เทียมจากเศษกิ่งไม้มะปรางอัตราส่วนต่างๆ

ความต้านการดัดโค้ง

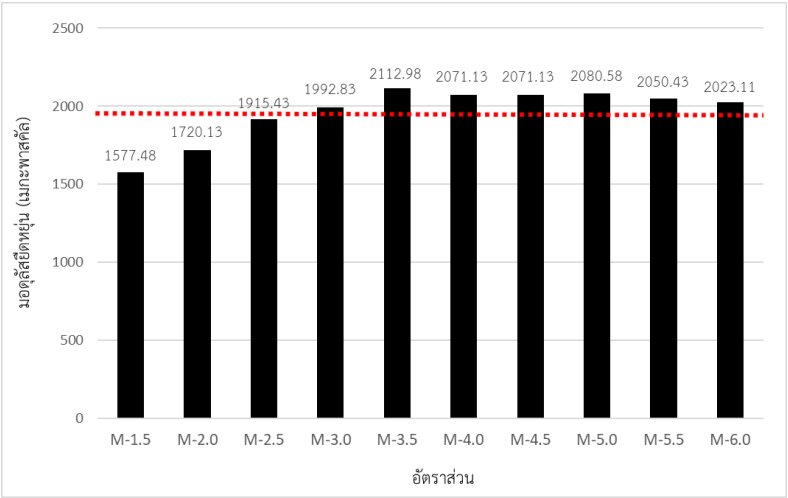
ผลการทดสอบความต้านทานแรงดัดของแผ่นไม้เทียมจากเศษกิ่งไม้มะปราง พบว่า ปริมาณพลาสติกมีผลต่อแนวโน้มของความต้านการดัดโค้งของแผ่นไม้เทียม โดยแผ่นไม้เทียมจากเศษกิ่งไม้ต้นมะปรางที่มีค่าความต้านการดัดโค้งสูงที่สุดคือ แผ่นไม้สังเคราะห์จากเศษกิ่งไม้มะปรางที่มีปริมาณพลาสติก เท่ากับ 3.5 ส่วนโดยน้ำหนัก ต่อเศษกิ่งไม้มะปราง 1 ส่วนโดยน้ำหนัก (M-3.5) ส่วนแผ่นไม้เทียมจากเศษกิ่งไม้มะปรางที่มีค่าความต้านทานแรงดัดต่ำที่สุดคือ แผ่นไม้เทียมจากเศษกิ่งไม้มะปรางที่มีปริมาณพลาสติกน้อยที่สุด (M-1.5) เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน มอก.2998-2562 ซึ่งระบุค่าความต้านทานแรงดัดไม่น้อยกว่า 10 เมกะพาสคาล พบว่า แผ่นไม้เทียมจากเศษกิ่งไม้มะปรางทุกอัตราส่วน ผ่านเกณฑ์มาตรฐานในการใช้งานไม้เทียมจากพลาสติกชีวมวลที่ใช้ภายในอาคาร และสามารถใช้เป็นวัสดุตกแต่ง ที่มีการรับแรงจากการใช้งานต่ำ เช่น เป็นวัสดุที่ใช้ในการกรุผนัง ฝ้าเพดาน แสดงดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ความต้านทานแรงดัดของแผ่นไม้เทียมจากเศษกิ่งไม้มะปรางอัตราส่วนต่างๆ

มอดุลัสยืดหยุ่น

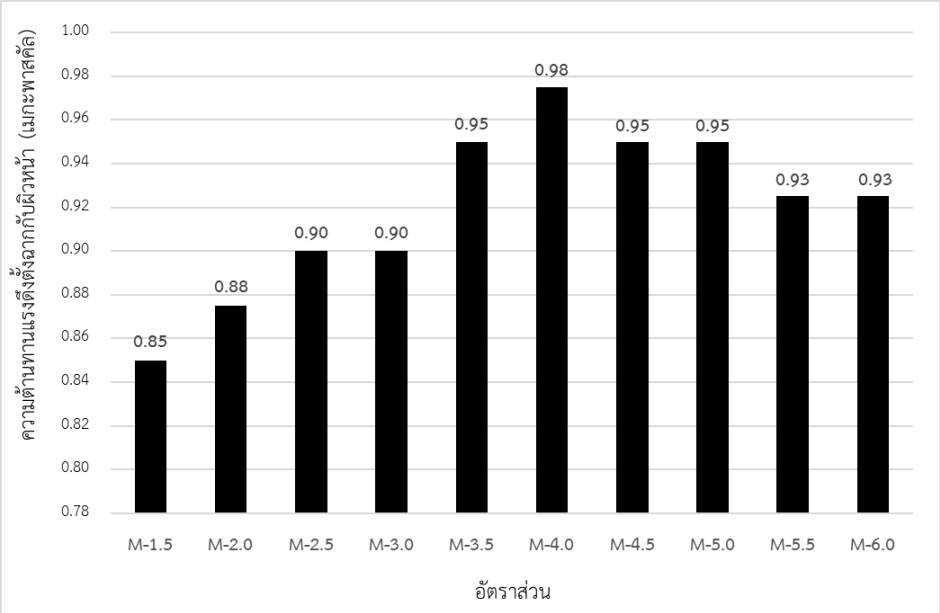
ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านมอดุลัสยืดหยุ่นของแผ่นไม้เทียมจากเศษกิ่งไม้มะปรางที่ขึ้นรูปแล้วทั้ง 10 อัตราส่วน พบว่า มอดุลัสยืดหยุ่นเป็นคุณสมบัติที่มีความสัมพันธ์กับค่าความต้านทานแรงดัด (Bledzki & Gassan, 1999) โดยแผ่นไม้เทียมจากเศษกิ่งไม้มะปรางอัตราส่วนที่มีความต้านทานแรงดัด และปริมาณพลาสติกที่เหมาะสมมีแนวโน้มที่จะมีค่ามอดุลัสยืดหยุ่นสูง เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน มอก.876-2547 ที่กำหนดให้มอดุลัสยืดหยุ่นมีค่าไม่น้อยกว่า 1,950 เมกะปาสคาล ที่ความหนา 3 – 6 มิลลิเมตร พบว่า แผ่นไม้เทียมจากเศษกิ่งไม้มะปรางตั้งแต่อัตราส่วน M-3.0 ถึง M-6.0 มีค่ามอดุลัสยืดหยุ่นที่สูงกว่ามาตรฐาน แสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 มอดุลัสยืดหยุ่นของแผ่นไม้เทียมจากเศษกิ่งไม้มะปรางอัตราส่วนต่างๆ

ความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า

ในส่วนของผลการทดสอบความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าของแผ่นไม้สังเคราะห์จากเศษกิ่งไม้ต้นมะปรางที่ขึ้นรูปแล้วทั้ง 10 อัตราส่วน พบว่า แผ่นชิ้นไม้อัดจากเศษกิ่งไม้ต้นมะปรางที่มีค่าความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าสูงที่สุดจะเป็นแผ่นชิ้นไม้อัดที่มีปริมาณพลาสติกที่เหมาะสม เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน มอก. 876-2547 ซึ่งกำหนดให้แผ่นชิ้นไม้อัดต้องมีความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าสูงกว่า 0.4 เมกะพาสคัล จะเห็นว่าแผ่นไม้เทียมจากเศษกิ่งไม้ต้นมะปรางทั้งหมดสูงกว่ามาตรฐานกำหนด แสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าของแผ่นไม้เทียมจากเศษกิ่งไม้มะปรางอัตราส่วนต่างๆ

ปริมาณความชื้นและการพองตัวตามความหนา

ผลการทดสอบพบว่า แผ่นไม้เทียมจากเศษกิ่งไม้มะปรางทั้ง 10 อัตราส่วนมีปริมาณความชื้นเท่ากับ 0% ซึ่งบ่งชี้ว่าแผ่นไม้เทียมดังกล่าวมีความแห้งสนิท ปราศจากความชื้นตกค้างในเนื้อวัสดุ ความชื้นที่ต่ำเช่นนี้มีผลดีต่อคุณสมบัติทางกายภาพของแผ่นไม้เทียม เช่น ลดการบิดงอ การพองตัว และการเสื่อมสภาพจากเชื้อราและแมลง ในส่วนของการทดสอบการพองตัวตามความหนาของแผ่นไม้สังเคราะห์ พบว่าไม่มีการพองตัวเกิดขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้พลาสติก HDPE เป็นวัสดุผสม เนื่องจากพลาสติก HDPE มีคุณสมบัติทึบน้ำ ไม่ดูดซับความชื้น (พนุชศดี เย็นใจ และคณะ, 2559) จึงช่วยป้องกันการพองตัวของแผ่นไม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เมื่อเปรียบเทียบค่าการพองตัวของแผ่นไม้เทียมกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.876-2547 ซึ่งกำหนดให้ค่าการพองตัวไม่เกิน 12% พบว่าแผ่นไม้เทียมจากเศษกิ่งไม้มะปรางทั้งหมดมีค่าการพองตัวที่ต่ำกว่า

ค่าที่กำหนดในมาตรฐาน แสดงให้เห็นว่าแผ่นไม้เทียมนี้มีคุณสมบัติตรงตามหรือดีกว่ามาตรฐานที่กำหนด และการนำเศษไม้มาผสมกับขยะพลาสติก HDPE เคลือบผิวด้วยพลาสติก LDPE สามารถป้องกันการพองตัวของแผ่นไม้เทียมได้อย่างมีนัยสำคัญ

การดูดซึมน้ำ

เมื่อนำแผ่นชิ้นไม้เทียมจากเศษกิ่งไม้มะปรางทั้ง 10 อัตราส่วน ไปทดสอบค่าการดูดซึมน้ำ พบว่า ค่าการดูดซึมน้ำของแผ่นไม้เทียมจากเศษกิ่งไม้มะปรางทุกอัตราส่วนไม่มีการดูดซึมน้ำ ซึ่งคุณสมบัติมีแนวโน้มเช่นเดียวกับการพองตัวตามความหนา เนื่องจากแผ่นชิ้นไม้เทียมจากเศษกิ่งไม้ต้นมะปรางถูกเคลือบด้วยพลาสติก LDPE ในขั้นตอนการขึ้นรูป ส่งผลให้พลาสติก LDPE มีคุณสมบัติทึบน้ำ ไม่ดูดซับความชื้น จึงช่วยป้องกันการดูดซึมน้ำของแผ่นไม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อเปรียบเทียบค่าการดูดซึมน้ำกับมาตรฐาน มอก.2998-2562 กำหนดให้ต้องมีค่าไม่เกินร้อยละ 10 พบว่า แผ่นไม้เทียมจากเศษกิ่งไม้มะปรางทุกอัตราส่วนมีค่าการดูดซึมน้ำผ่านตามที่มาตรฐาน มอก.2998-2562 กำหนด

สรุป

สรุปผลจากผลการศึกษา “การพัฒนาแผ่นไม้เทียมจากเศษกิ่งไม้มะปรางผสมกับพลาสติกพอลิเอทิลีนสำหรับวิสาหกิจชุมชน” สามารถสรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะได้ดังนี้

1. การผลิตแผ่นชิ้นไม้เทียมจากเศษกิ่งไม้มะปราง โดยการนำเศษกิ่งไม้จากต้นมะปรางมาผสมกับพลาสติก HDPE และพลาสติก LDPE แล้วอัดขึ้นรูปให้มีความหนา 5 มิลลิเมตร ด้วยการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 7 นาที พบว่าสามารถผลิตแผ่นไม้เทียมที่มีความแข็งแรงด้านความต้านการดัดโค้ง เพียงพอสำหรับการใช้งานในลักษณะวัสดุกรุผนัง ฝ้าเพดาน และแผ่นปูพื้นทางเดินภายในอาคาร ตามมาตรฐาน มอก.2998-2562

2. จากผลการทดสอบสมบัติของแผ่นชิ้นไม้เทียมจากเศษกิ่งไม้ต้นมะปราง ทั้ง 10 อัตราส่วน สามารถสรุปได้ว่า แผ่นไม้เทียมทุกอัตราส่วนมีค่าความหนาแน่น และความต้านการดัดโค้ง ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเรื่องไม้สังเคราะห์จากพลาสติกชีวมวล (มอก.2998-2562) กำหนด ในส่วน ค่ามอดุลัสยืดหยุ่น ปริมาณความชื้น การพองตัวตามความหนา และความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า ซึ่ง มอก.2998-2562 ไม่ได้กำหนด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงค่าไปเปรียบเทียบกับ มอก.876-2547 ซึ่งเป็นมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแผ่นชิ้นไม้อัดชนิดอัดราบ พบว่า แผ่นไม้เทียมทุกอัตราส่วน มีค่าปริมาณความชื้น การพองตัวตามความหนา และความต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าที่ผ่านมาตรฐาน มีเพียงอัตราส่วน M-1.5, M-2.0 และM-2.5 เท่านั้นที่มีค่ามอดุลัสยืดหยุ่นไม่ผ่านมาตรฐาน

3. จากผลวิจัยสรุปได้ว่า การหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการขึ้นรูปแผ่นไม้เทียมจากเศษกิ่งไม้มะปราง อัตราส่วนที่เหมาะในการขึ้นรูปแผ่นไม้เทียมจากเศษกิ่งไม้มะปรางคือ แผ่นไม้เทียมจากเศษกิ่งไม้มะปรางที่ผสมพลาสติก เท่ากับ 3.5 ส่วนโดยน้ำหนัก ต่อเศษกิ่งไม้ต้นมะปราง 1 ส่วนโดยน้ำหนัก (อัตราส่วน M-3.5) เนื่องจากมีค่าความต้านการดัดโค้งสูงสุด และมีคุณสมบัติผ่านตามที่มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.876-2547 และ มอก.2998-2562 ทุกการทดสอบ

ข้อเสนอแนะ

ควรมีการทดสอบคุณลักษณะด้านความปลอดภัยของแผ่นไม้สังเคราะห์ตามมาตรฐาน มอก.2998-2562 เช่น การทดสอบการปลดปล่อยฟอร์มัลดีไฮด์จากแผ่นชิ้นไม้อัด เพื่อให้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ ได้อย่างหลากหลายและปลอดภัย และเพิ่มเติมการวิเคราะห์วงจรชีวิตผลิตภัณฑ์ (Life Cycle Assessment) เพื่อประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อให้เห็นภาพได้ชัดเจนถึงคุณประโยชน์ต่อ ชุมชน และสิ่งแวดล้อมมากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณแผ่นดินจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ประจำปีงบประมาณ 2566 ผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณต่อหน่วยงานที่ให้การสนับสนุนมา ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

จักรภัทร ปรีดาวัฒน์, สุชาลิณี มธุรสมนตรี, เอกตินัย จันทร์ศรี, และณรงค์ชัย โอเจริญ. (2566). ความเป็นไปได้ในการใช้ถุงพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วในกระบวน การขึ้นรูปแบบหมุน. **วิศวสารลาดกระบัง**, 40(1), 1–9.

พนุชศดี เย็นใจ, ทรงกลด จารุสมบัติ, และธีระ วีณิน. (2559). การผลิตแผ่นชิ้นไม้อัดจากเศษเหลือทิ้งของไม้เสม็ดขาว. **วารสารวิจัยและพัฒนา วไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**, 11(2), 131-140.

สำนักข่าวพลังปวงชน. (2566). **กทม.ให้บริการเก็บเศษวัสดุกิ่งไม้-ใบไม้ แนะทำปุ๋ยหมักแทนการเผา**. สืบค้นจาก https://innews.news/news.php?n=35449&utm.

สำนักงานคณะกรรมการกฤษฎีกา. (2535, 5 เมษายน). พระราชบัญญัติการสาธารณสุข พ.ศ. 2535. **ราชกิจจานุเบกษา**, 109(38), 27.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.). (2547). **มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เรื่องแผ่นชิ้นไม้อัดชนิดราบ (มอก.876-2547)**, กรุงเทพฯ: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.). (2562). **มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เรื่องไม้สังเคราะห์จากพลาสติกชีวมวล (มอก.2998-2562)**, กรุงเทพฯ: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม.

Adithama, R. M., Munifah, I., Yanto, D. H. Y., & Meryandini, A. (2023). Biodegradation of low-density polyethylene microplastic by new halotolerant bacteria isolated from saline mud in Bledug Kuwu, Indonesia. **Bioresource Technology Reports**, 22, 101466.

Bledzki, A. K., & Gassan, J. (1999). Composite Reinforced with Cellulose Based Fibers. **Progress in Polymer Science**, 24(2), 221-274.

Friedrich, D. (2018). Comparative study on artificial and natural weathering of wood-polymer compounds: A comprehensive literature review. **Case Studies in Construction Materials**, 9, e00196.

Grand View Research. (2024). **Wood Plastics Composites Market Size, Share & Trends Analysis Report By Product (Polyethylene, Polypropylene), By Application (Automotive Components), By Region, And Segment Forecasts, 2025 - 2030**. Retrieved from https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/wood-plastic-composites-market.

Jebashalomi, V., Charles, P. E., & Rajaram, R. (2024). Microbial degradation of low-density polyethylene (LDPE) and polystyrene using Bacillus cereus (OR268710) isolated from plastic-polluted tropical coastal environment. **Science of the Total Environment**, 924, 171580.

Kajaks, J., Kalnins, K., & Naburgs, R. (2018). Wood plastic composites (WPC) based on high-density polyethylene and birch wood plywood production residues. **International Wood Products Journal**, 9(1), 15-21.

Kılıç, İ., Avcı, B., Atar, İ., Korkmaz, N., Yılmaz, G., & Mengeloğlu, F. (2023). Using Furniture Factory Waste Sawdust in Wood-plastic Composite Production and Prototype Sample Production. **BioResources**, 18(4), 7212-7229.

Nuryawan, A., Hutauruk, N. O., Purba, E. Y. S., Masruchin, N., Batubara, R., Risnasari, I., & McKay, D. (2020). Properties of wood composite plastics made from predominant Low Density Polyethylene (LDPE) plastics and their degradability in nature. **PloS one**, 15(8), e0236406.

Ribeiro, L. S., Stolz, C. M., Amario, M., Silva, A. L. N. D., & Haddad, A. N. (2023). Use of post-consumer plastics in the production of wood-plastic composites for building components: A Systematic Review. **Energies**, 16(18), 6549.

Sunitha, V. L., Supraja, P., Prasad, K. D., Navaneeth, M., Babu, A., Mahesh, V., & Kumar, R. R. (2023). Wood plastic composites (WPC) waste based triboelectric nanogenerator for mechanical energy harvesting and self-powered applications. **Materials Letters**, 351, 134995.

Yeshiwas, T. A., Yigezu, B. S., & Desalegn, Y. M. (2024). Investigation on the mechanical properties of wood-plastic composites for the application of ceiling panels. **Materials Research Express**, 11(8), 085304.

ปัจจัยเชิงสาเหตุที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพชีวิตของหญิงตั้งครรภ์ จังหวัดสุพรรณบุรี

ณัฏฐ์ฉวี อ๊อกซู[1*] วิราสิริริ์ วสีวีรสิว์[2]

Received : May 7, 2025
Revised : July 27, 2025
Accepted : August 3, 2025

บทคัดย่อ

คุณภาพชีวิตของหญิงตั้งครรภ์มีความสำคัญอย่างยิ่งเพราะส่งผลถึงการดูแลสุขภาพก่อนคลอดอย่างเพียงพอ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการลดอัตราการเสียชีวิตของมารดา การศึกษานี้เป็นการวิจัยเชิงพรรณนาแบบภาคตัดขวาง โดยใช้การวิเคราะห์สมการโครงสร้างและการวิเคราะห์เส้นทางอิทธิพล เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพชีวิตของหญิงตั้งครรภ์ จังหวัดสุพรรณบุรี กลุ่มตัวอย่างเป็นหญิงตั้งครรภ์ จำนวน 400 คน สุ่มตัวอย่างแบบเจาะจงเลือกโรงพยาบาลจำนวน 4 แห่ง โดยการเรียงลำดับจำนวนหญิงตั้งครรภ์จากมากไปหาน้อยและสุ่มอย่างง่าย เครื่องมือใช้แบบสอบถามแบ่งเป็น 6 ส่วนให้เติมข้อมูลและให้เลือกตอบ วิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติพื้นฐาน วิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยันและเส้นทางอิทธิพล ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป

ผลการวิจัย พบว่า คุณภาพชีวิตของหญิงตั้งครรภ์ภาพรวมส่วนใหญ่อยู่ในระดับมาก ร้อยละ 70.75 ปัจจัยความรอบรู้เรื่องภาวะตั้งครรภ์ แรงจูงใจในการส่งเสริมสุขภาพ และการสนับสนุนทางสังคมมีอิทธิพลทางตรงต่อพฤติกรรมส่งเสริมสุขภาพ มีค่าสัมประสิทธิ์อิทธิพล 0.56, 0.21 และ 0.11 ตามลำดับ และมีอิทธิพลทางอ้อมต่อคุณภาพชีวิต มีค่าสัมประสิทธิ์อิทธิพล 0.48, 0.18 และ 0.10 ตามลำดับ พฤติกรรมส่งเสริมสุขภาพมีอิทธิพลทางตรงต่อคุณภาพชีวิต มีค่าสัมประสิทธิ์อิทธิพล 0.86 ปัจจัยทั้งหมดสามารถร่วมกันอธิบายความผันแปรของคุณภาพชีวิตได้ร้อยละ 65 (R^2=0.65) โมเดลปัจจัยเชิงสาเหตุที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพชีวิตของหญิงตั้งครรภ์ที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นสอดคล้องกลมกลืนกับข้อมูลเชิงประจักษ์ มีค่าดัชนี Chi-Square = 415.71 df = 211 Chi-Square/df = 1.97 CFI = 0.97 GFI = 0.98 AGFI = 0.96 RMSEA = 0.04 และ SRMR = 0.04

ผลการศึกษาชี้ว่าความรอบรู้เรื่องภาวะตั้งครรภ์ แรงจูงใจในการส่งเสริมสุขภาพ การสนับสนุนทางสังคม และพฤติกรรมส่งเสริมสุขภาพ เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพชีวิตของหญิงตั้งครรภ์ ดังนั้นหน่วยงานสาธารณสุขควรพัฒนาโปรแกรมที่เน้นการเสริมสร้างองค์ประกอบเหล่านี้เพื่อยกระดับคุณภาพชีวิตหญิงตั้งครรภ์

คำสำคัญ: การวิเคราะห์โครงสร้างสมการ การวิเคราะห์เส้นทางอิทธิพล คุณภาพชีวิต หญิงตั้งครรภ์

---

[1] นิสิตหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยเวสเทิร์น อีเมล: nutchavee2024@gmail.com
[2] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ คณะบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเวสเทิร์น อีเมล: Wirasiri07@gmail.com
** ผู้นิพนธ์หลัก อีเมล: nutchavee2024@gmail.com*

CAUSAL FACTORS INFLUENCING QUALITY OF LIFE AMONG PREGNANT WOMEN SUPHAN BURI PROVINCE

Natchavee Oksue[1*] Wirasiri Waseeweerasi[2]

Abstract

The quality of life of pregnant women is critical as it affects adequate prenatal care, which is a key factor in reducing maternal mortality rates. This research study employed a descriptive cross-sectional design using structural equation modeling (SEM) and path analysis to investigate the factors influencing the quality of life among pregnant women in Suphan Buri Province, Thailand. The research sample comprised 400 pregnant women selecting through purposive sampling from four hospitals, which were chosen by ranking the number of pregnant women from highest to lowest and using simple random sampling. The questionnaire was the research instrument, which was divided into six sections, including both open-ended and closed-ended questions. Data analysis involved descriptive statistics, confirmatory factor analysis (CFA), and path analysis using statistical software.

The research findings revealed that many pregnant women had an overall quality of life at a high level, accounting for 70.75%. Pregnancy health literacy, health promotion motivation, and social support had direct effects on health promoting behaviors with standardized path coefficients of 0.56, 0.21, and 0.11, respectively. Moreover, they had indirect effects on quality of life with coefficients of 0.48, 0.18, and 0.10, respectively. Health promoting behavior had direct effect on quality of life, with a coefficient of 0.86. These factors collectively explained 65% of the variance in quality of life (R^2 = 0.65). The developed structural equation model demonstrated good fit with empirical data, indicated by fit indices: Chi-Square = 415.71 df = 211 Chi-Square/df = 1.97 CFI = 0.97 GFI = 0.98 AGFI = 0.96 RMSEA = 0.04 and SRMR = 0.04.

The research findings highlighted that pregnancy health literacy, motivation for health promotion, social support, and health-promoting behaviors have been key determinants influencing the quality of life among pregnant women. Therefore, public health agencies should develop programs focusing on strengthening these components to enhance the quality of life among this population.

Keywords: Structural equation modeling, Path analysis, Quality of life, Pregnant women

---

[1] *Student of Doctor of Philosophy Program in Public Health, Western University, e-mail: nutchavee2024@gmail.com*

[2] *Assistant Professor, Graduate School, Western University, e-mail: Wirasiri07@gmail.com*

** Corresponding author: nutchavee2024@gmail.com*

บทนำ

คุณภาพชีวิตของหญิงตั้งครรภ์เป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งเนื่องจากหญิงตั้งครรภ์มีการเปลี่ยนแปลงทั้งด้านร่างกาย อารมณ์ จิตใจ และพฤติกรรมการดูแลสุขภาพ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวส่งผลกระทบกับหญิงตั้งครรภ์และทารกในครรภ์ด้วย หญิงตั้งครรภ์ที่มีสุขภาพร่างกายสมบูรณ์แข็งแรง มีจิตใจผ่อนคลายมีความสุข การมีสัมพันธภาพทางสังคม และอาศัยอยู่ในบริบทที่มีสิ่งแวดล้อมที่ดีส่งผลดีต่อทั้งหญิงตั้งครรภ์และทารกในครรภ์ด้วยเช่นกัน (อัญญา ปลดเปลื้องและคณะ, 2567) องค์การอนามัยโลกให้ความสำคัญกับการพัฒนาที่ยั่งยืนด้านการลดการตายมารดาให้น้อยกว่า 70 ต่อการเกิดมีชีพแสนคน ภายในปี พ.ศ. 2573 ซึ่งปัจจุบันปัญหาการตายมารดายังคงเป็นปัญหาที่สำคัญและมีความยากลำบากในการไปสู่ความสำเร็จตามเป้าหมายที่ตั้งไว้ ประเทศสมาชิกทั่วโลกจึงร่วมมือกันในการขับเคลื่อนการดำเนินงานการลดการตายมารดาที่สามารถป้องกันได้ (กองอนามัยมารดาและทารก กรมอนามัย, 2567) สถิติอัตราส่วนการตายมารดาต่อการเกิดมีชีพของประเทศไทย ปีงบประมาณ 2567 พบว่า อัตราส่วนการตายมารดาไทยต่อการเกิดมีชีพแสนคน 19.83 จากเป้าหมายที่กำหนดให้อัตราส่วนการตายมารดาไทยต่อการเกิดมีชีพแสนคน ไม่เกิน 17 (กระทรวงสาธารณสุข, 2567)

จังหวัดสุพรรณบุรี จากรายงานผลการดำเนินงาน ปีงบประมาณ 2567 พบว่า อัตราส่วนการตายมารดาต่อการเกิดมีชีพแสนคน 37.93 สูงกว่าเป้าหมายของประเทศไทยและสูงที่สุดในเขตสุขภาพที่ 5 นอกจากนี้ตัวชี้วัดหญิงตั้งครรภ์ได้รับการฝากครรภ์ครั้งแรกก่อนหรือเท่ากับ 12 สัปดาห์ หญิงตั้งครรภ์ที่ได้รับการดูแลก่อนคลอด 5 ครั้งตามเกณฑ์ และหญิงตั้งครรภ์ที่มารับบริการในหน่วยบริการได้รับยาเม็ดที่มีส่วนประกอบของไอโอดีน ยังไม่บรรลุเป้าหมาย โดยมีผลการดำเนินงานเพียง ร้อยละ 74.90, 69.53 และ74.39 จากเป้าหมายร้อยละ 75, 75 และ 88 ขึ้นไป ตามลำดับ (กระทรวงสาธารณสุข, 2567) กล่าวได้ว่าผลการดำเนินงานด้านการดูแลหญิงตั้งครรภ์ที่ต่ำกว่าเป้าหมายดังกล่าว สะท้อนถึงคุณภาพชีวิตของหญิงตั้งครรภ์ที่ยังไม่อยู่ในระดับที่เหมาะสม โดยการได้รับการดูแลที่ล่าช้าและไม่ครบถ้วน อาจส่งผลต่อความมั่นคงทางสุขภาพของมารดาและทารกในครรภ์ได้

คุณภาพชีวิตของหญิงตั้งครรภ์ที่ดีจะส่งผลให้มีการดูแลสุขภาพก่อนคลอดอย่างเพียงพอ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการลดอัตราการเสียชีวิตของมารดา (World Health Organization, 2016) ปัจจัยที่เป็นสาเหตุของการมีคุณภาพชีวิตที่ดีของหญิงตั้งครรภ์ จากการทบทวนวรรณกรรม พบว่า ปัจจัยที่เป็นสาเหตุโดยตรงต่อคุณภาพชีวิตของหญิงตั้งครรภ์ส่วนใหญ่เป็นปัจจัยทางด้านร่างกายและจิตใจ เช่น การจัดการตนเองด้านสุขภาพ คุณภาพการนอนหลับ การออกกำลังกายหรือการมีกิจกรรมทางกาย การมองโลกในแง่ดี การมีครอบครัวและเพื่อนฝูง เป็นต้น ซึ่งเป็นพฤติกรรมส่งเสริมสุขภาพของหญิงตั้งครรภ์นั่นเอง (กนกอร ปัญญาโส และคณะ; 2563, Boutib et al., 2022) ปัจจัยที่เป็นสาเหตุทางอ้อมกับคุณภาพชีวิตของหญิงตั้งครรภ์ เช่น ความรอบรู้ด้านสุขภาพ การสนับสนุนทางสังคม แรงจูงใจในการส่งเสริมสุขภาพ เป็นต้น ซึ่งปัจจัยทางอ้อมดังกล่าวจะส่งผ่านปัจจัยที่เป็น

สาเหตุโดยตรงคือพฤติกรรมส่งเสริมสุขภาพไปมีอิทธิพลต่อคุณภาพชีวิตหญิงตั้งครรภ์ (อาทิตยา แก้วน้อย และคณะ; 2561, ตติรัตน์ เตชะศักดิ์ศรี และคณะ; 2560, Bektemur et al., 2024)

จากสถานการณ์หญิงตั้งครรภ์ดังกล่าวข้างต้นและจากการศึกษาแนวคิดทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าปัจจัยต้นเหตุของพฤติกรรมสุขภาพนั้น ตามแนวคิดทฤษฎีด้านพฤติกรรมศาสตร์โดยเฉพาะด้านพฤติกรรมการส่งเสริมสุขภาพและป้องกันโรคนั้นมีหลากหลาย เช่น แนวคิดความรอบรู้สุขภาพ ทฤษฎีแรงจูงใจในการส่งเสริมสุขภาพโรค ทฤษฎีการสนับสนุนทางสังคม ต่างก็เป็นแนวคิดทฤษฎีที่มีผลต่อการมีพฤติกรรมส่งเสริมสุขภาพ ทั้งสิ้น (จักรพันธ์ เพ็ชรภูมิ, 2561) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าคุณภาพชีวิตของหญิงตั้งครรภ์เป็นผลลัพธ์จากความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนของหลายปัจจัยที่ต้องวิเคราะห์เชิงโครงสร้างเพื่อเข้าใจภาพรวมอย่างเป็นระบบ ผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาปัจจัยเชิงสาเหตุที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพชีวิตของหญิงตั้งครรภ์ จังหวัดสุพรรณบุรี เนื่องจากจังหวัดสุพรรณบุรี เป็นพื้นที่ที่มีอัตราส่วนการตายมารดาต่อการเกิดมีชีพแสนคนสูงกว่าเป้าหมายระดับประเทศและสูงที่สุดในเขตสุขภาพที่ 5 และเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยันโมเดลที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นกับข้อมูลเชิงประจักษ์ ซึ่งผลการวิจัยครั้งนี้สามารถนำไปใช้กำหนดนโยบายและแผนการปฏิบัติงานในการส่งเสริมพฤติกรรมสุขภาพของหญิงตั้งครรภ์ สามารถนำแนวคิด ทฤษฎีดังกล่าวไปสร้างโปรแกรมส่งเสริมพัฒนาคุณภาพชีวิตของหญิงตั้งครรภ์ต่อไป

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

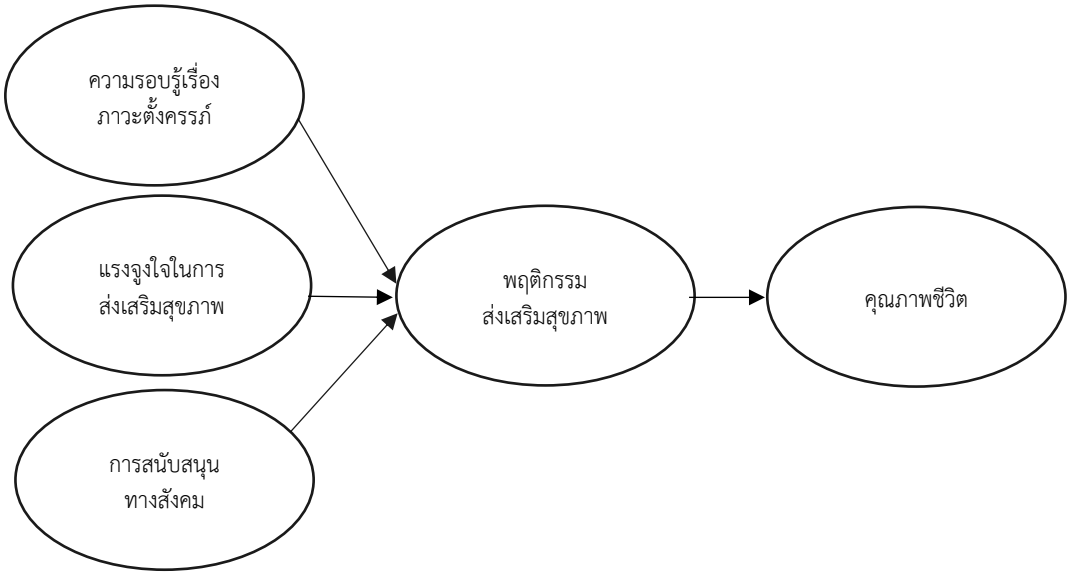
1. เพื่อศึกษาระดับคุณภาพชีวิตของหญิงตั้งครรภ์ในจังหวัดสุพรรณบุรีในมิติด้านร่างกาย ด้านจิตใจ ด้านสัมพันธภาพทางสังคม และด้านสิ่งแวดล้อม
2. เพื่อประเมินความเหมาะสมของโมเดลปัจจัยเชิงโครงสร้างที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพชีวิตของหญิงตั้งครรภ์ โดยใช้ข้อมูลจริงที่เก็บรวบรวมจากกลุ่มตัวอย่าง
3. เพื่อวิเคราะห์เส้นทางอิทธิพลของปัจจัยเชิงสาเหตุที่ส่งผลต่อคุณภาพชีวิตของหญิงตั้งครรภ์ตามโมเดลที่พัฒนาขึ้นโดยใช้ข้อมูลเชิงประจักษ์

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษานี้เป็นการวิจัยแบบภาคตัดขวาง (Cross-Sectional Study) ที่ใช้วิธีวิเคราะห์โมเดลปัจจัยเชิงโครงสร้าง (Structural Equation Modeling: SEM) และการวิเคราะห์เส้นทางอิทธิพล (Path Analysis) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์และตรวจสอบผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพชีวิตของหญิงตั้งครรภ์ในจังหวัดสุพรรณบุรี งานวิจัยนี้ได้รับการพิจารณาและอนุมัติจากคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์

มหาวิทยาลัยเวสเทิร์น (เลขที่ WTU 2567-0143) เมื่อวันที่ 28 มกราคม 2568 โดยดำเนินการภายใต้หลักจริยธรรมตามประกาศฮีลซิงกิ (The Declaration of Helsinki)

กรอบแนวคิดโมเดลการวิจัย



ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ประชากรที่ใช้ในการวิจัยนี้ คือ หญิงตั้งครรภ์ที่มีอายุ 20 ปีบริบูรณ์ขึ้นไปและมีชื่อในทะเบียนหญิงตั้งครรภ์ในโรงพยาบาลเจ้าพระยายมราช โรงพยาบาลสมเด็จพระสังฆราชองค์ที่ 17 โรงพยาบาลด่านช้างและโรงพยาบาลอู่ทอง จังหวัดสุพรรณบุรี ปีงบประมาณ 2567 จำนวน 2,278 คน กำหนดขนาดของกลุ่มตัวอย่างโดยใช้เกณฑ์ของ Hair ซึ่งใช้หลักการพิจารณาจำนวนพารามิเตอร์อิสระที่ต้องประมาณค่า มีกฎการคำนวณด้วยอัตราส่วนระหว่างหน่วยตัวอย่างต่อจำนวนตัวแปรสังเกตได้อยู่ระหว่าง 10-20 ต่อ 1 (Murtagh, F., & Heck, A., 2012) ผู้วิจัยใช้ค่ากลางของการประมาณค่าเป็น 15 ต่อ 1 โดยโมเดลที่พัฒนาขึ้นมีตัวแปรสังเกตได้จำนวน 24 ตัวแปร ดังนั้นขนาดกลุ่มตัวอย่าง คือ 24 ตัวแปรคูณ 15 เท่า ได้ขนาดตัวอย่าง 360 คน เพื่อป้องกันความผิดพลาดจากการเก็บข้อมูลจึงเก็บตัวอย่างเพิ่มอีกประมาณร้อยละ 10 หรือ 40 คน จึงได้ขนาดกลุ่มตัวอย่างทั้งหมด 400 คน โดยมีวิธีการสุ่มตัวอย่างตามขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดพื้นที่วิจัยด้วยวิธีการเลือกแบบเจาะจง (Purposive Sampling) จังหวัดสุพรรณบุรีมีโรงพยาบาลสังกัดกระทรวงสาธารณสุข จำนวน 10 แห่ง เลือกมา 4 แห่ง โดยการเรียงลำดับจำนวนหญิง

ตั้งครรภ์จากมากไปหาน้อย จึงได้พื้นที่วิจัย คือ โรงพยาบาลเจ้าพระยายมราช โรงพยาบาลสมเด็จพระสังฆราชองค์ที่ 17 โรงพยาบาลด่านช้างและโรงพยาบาลอู่ทอง

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณขนาดกลุ่มตัวอย่างของแต่ละโรงพยาบาลเป็นสัดส่วนกันด้วยวิธีเทียบบัญญัติไตรยางศ์ ได้ขนาดกลุ่มตัวอย่างในแต่ละโรงพยาบาล ดังนี้

โรงพยาบาล	จำนวนหญิงตั้งครรภ์ ทั้งหมด (คน)	จำนวนตัวอย่าง (คน)
เจ้าพระยายมราช	837	147
สมเด็จพระสังฆราชองค์ที่ 17	559	98
ด่านช้าง	488	86
อู่ทอง	394	69
รวม	2,278	400

ขั้นตอนที่ 3 สุ่มอย่างง่าย (Simple Sampling Random) โดยการจัดทำบัญชีชื่อหญิงตั้งครรภ์ที่มีอายุ 20 ปีบริบูรณ์ขึ้นไปและมีชื่อในทะเบียนหญิงตั้งครรภ์ในโรงพยาบาลแต่ละแห่งตามเป้าหมาย และเขียนสลากชื่อหญิงตั้งครรภ์ แล้วจับสลากชื่อมาจนครบจำนวน 400 คน ตามต้องการ

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือการวิจัยใช้แบบสอบถาม (Questionnaire) แบ่งออกเป็น 6 ส่วน ส่วนที่ 1 แบบสอบถามเกี่ยวกับปัจจัยส่วนบุคคลของผู้ตอบแบบสอบถาม ได้แก่ อายุ อาชีพ การศึกษาสูงสุด สถานภาพสมรส และจำนวนครั้งการตั้งครรภ์ ลักษณะคำถามเป็นแบบเปิดให้เติมข้อมูลและให้เลือกตอบ ส่วนที่ 2 แบบสอบถามความรอบรู้เรื่องภาวะตั้งครรภ์ ส่วนที่ 3 แบบสอบถามแรงจูงใจในการส่งเสริมสุขภาพ ส่วนที่ 4 แบบสอบถามการสนับสนุนทางสังคม ส่วนที่ 5 แบบสอบถามพฤติกรรมส่งเสริมสุขภาพ และส่วนที่ 6 แบบสอบถามคุณภาพชีวิต ผู้วิจัยสร้างและประยุกต์ใช้แบบวัดคุณภาพชีวิตฉบับภาษาไทยของทิพย์วัลย์ เรืองขจร (2554) โดยแบบสอบถามส่วนที่ 2 ถึง 6 มีลักษณะคำถามเป็นแบบประเมินค่าตามแบบของลิเคิร์ท (Likert’s scale) 5 คำตอบ ได้แก่ เห็นด้วยอย่างยิ่ง (5 คะแนน) เห็นด้วย (4 คะแนน) ไม่แน่ใจ (3 คะแนน) ไม่เห็นด้วย (2 คะแนน) และไม่เห็นด้วยอย่างยิ่ง (1 คะแนน) เกณฑ์การแบ่งระดับคุณภาพชีวิตหญิงตั้งครรภ์ประยุกต์ใช้เกณฑ์ของ Bloom (1971) โดยแบ่งช่วงคะแนนเฉลี่ย ได้แก่ ระดับมาก (คะแนนเฉลี่ยตั้งแต่ 80 ขึ้นไป) ระดับปานกลาง (คะแนนเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 60-79) และระดับน้อย (คะแนนเฉลี่ยต่ำกว่า 60)

การตรวจคุณภาพเครื่องมือ

ตรวจสอบความตรง (Validity) ของแบบสอบถาม โดยนำแบบสอบถามที่สร้างเสร็จแล้วไปให้ผู้เชี่ยวชาญ 5 ท่าน พิจารณาและประเมินความครอบคลุมของเนื้อหา ความสอดคล้องระหว่างเนื้อหา จุดมุ่งหมายเป็นรายข้อ กำหนดให้พิจารณาว่าข้อใดมีเนื้อหาตรงตามทฤษฎี นิยามเชิงปฏิบัติการและวัตถุประสงค์การวิจัย โดยตอบ เห็นด้วย ให้ +1 ไม่เห็นด้วย ให้ -1 และ ไม่แน่ใจ ให้ 0 นำผลที่ได้ไปคำนวณหาสัมประสิทธิ์ของความสอดคล้องด้วยIndex of Concordance (IOC) สรุปผลค่า IOC แบบสอบถามงานวิจัยนี้อยู่ระหว่าง 0.60-1.00

การตรวจสอบความเที่ยง (Reliability) ของแบบสอบถาม โดยนำแบบสอบถามที่ปรับปรุงเสร็จแล้วไปทดลองใช้กับหญิงตั้งครรภ์ที่มีอายุ 20 ปีบริบูรณ์ขึ้นไป จังหวัดสุพรรณบุรี ที่ไม่ใช่กลุ่มตัวอย่าง จำนวน 30 คน ผลการหาค่าความเที่ยงของแบบสอบถาม พบว่า มีค่าความเที่ยงทั้งฉบับเท่ากับ 0.95

วิธีการเก็บรวบรวมข้อมูล

เก็บข้อมูลด้วยเครื่องมือแบบสอบถามโดยขออนุญาตเก็บรวบรวมข้อมูลการวิจัยจากพื้นที่วิจัย คัดเลือกผู้ช่วยเก็บแบบสอบถามในโรงพยาบาลเป้าหมายแห่งละ 1 คน แล้วชี้แจงรายละเอียดแบบสอบถาม ใบยินยอมเข้าร่วมวิจัยและวิธีเก็บแบบสอบถาม จัดทำสลากชื่อหญิงตั้งครรภ์ทั้งหมดและจับสลากรายชื่อหญิงตั้งครรภ์จนครบ 400 คนตามต้องการ แล้วดำเนินเก็บแบบสอบถามและตรวจสอบความครบถ้วนสมบูรณ์ของแบบสอบถามเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป

การวิเคราะห์ข้อมูลและสถิติ

1. การวิเคราะห์ข้อมูลทั่วไป ใช้สถิติการแจกแจงความถี่ (Frequency distribution) ร้อยละ (Percentage) ค่าเฉลี่ย (Mean) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation)

2. การวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยันและเส้นทางอิทธิพล โดยการวิเคราะห์โมเดลสมการโครงสร้าง (Structural Equation Model: SEM) เกณฑ์ดัชนีความสอดคล้องกลมกลืน ดังตารางที่ 1 (สุภมาส อังศุโชติ, 2554)

ตารางที่ 1 เกณฑ์ที่ใช้ในการตรวจสอบวัดระดับความสอดคล้องกลมกลืน (Goodness of Fit Measures)

ดัชนีความกลมกลืน	เกณฑ์
ค่าไคสแควร์ต่ออองศาแห่งอิสระ (Chi-Square/df)	< 2.00
ดัชนีวัดระดับความกลมกลืนเปรียบเทียบ (Comparative Fit Index: CFI)	$\geq$ 0.95
ดัชนีวัดระดับความกลมกลืน (Goodness of Fit Index: GFI)	$\geq$ 0.95
ดัชนีวัดระดับความกลมกลืนที่ปรับแก้แล้ว (Adjusted Goodness of Fit Index: AGFI)	$\geq$ 0.95
ความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่าพารามิเตอร์ (Root Mean Squared Error of Approximation: RMSEA)	< 0.05
รากของค่าเฉลี่ยกำลังสองของส่วนเหลือมาตรฐาน (Standardized Root Mean Squared Residual: SRMR)	< 0.05

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ผลการวิจัย

1. ข้อมูลส่วนบุคคล

ตารางที่ 2 จำนวน ร้อยละ ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานข้อมูลส่วนบุคคลของหญิงตั้งครรภ์ (n=400)

ข้อมูลส่วนบุคคล	จำนวน	ร้อยละ
1.อายุ (ปี)		
20-24	117	29.25
25-29	167	41.75
30 ขึ้นไป	116	29.00
อายุต่ำสุด 20 ปี สูงสุด 40 ปี เฉลี่ย 27.25 ปี S.D. 4.59		
2.อาชีพ		
เกษตรกร	35	8.75
ค้าขาย	61	15.25
รับราชการหรือพนักงานรัฐวิสาหกิจ	24	6.00
พนักงานสถานประกอบการ	51	12.75
รับจ้างทั่วไป	96	24.00
แม่บ้าน ทำงานบ้าน หรือไม่ได้ประกอบอาชีพ	85	21.25
อาชีพอิสระ	48	12.00
3.การศึกษาสูงสุด		
ไม่ได้เรียนหนังสือ	5	1.25
ประถมศึกษา	40	10.00
มัธยมศึกษาตอนต้น	109	27.25
มัธยมศึกษาตอนปลาย/ปวช.	166	41.50
อนุปริญญา/ปวส.	29	7.25
ปริญญาตรีขึ้นไป	51	12.75
4.สถานภาพสมรส		
สมรสอยู่ด้วยกัน	374	93.50
หม้าย/หย่า/แยก	26	6.50
5.จำนวนครั้งการตั้งครรภ์		
ครรภ์แรก	147	36.75
ครรภ์ที่ 2	150	37.50
ครรภ์ที่ 3 ขึ้นไป	103	25.75

จากตารางที่ 2 พบว่า หญิงตั้งครรภ์ส่วนมากมีอายุระหว่าง 25-29 ปี (ร้อยละ 41.75) ส่วน อายุ 20-24 ปี และ 30 ปีขึ้นไป สัดส่วนใกล้เคียงกัน (ร้อยละ 29.25 และ 29.00 ตามลำดับ) มีอายุต่ำสุด 20 ปี สูงสุด 40 ปี อายุเฉลี่ยระหว่าง 22-32 ปี (27.25±4.59) ประกอบอาชีพ รับจ้างทั่วไป สัดส่วนใกล้เคียงกับเป็นแม่บ้าน ทำงานบ้าน หรือไม่ได้ประกอบอาชีพ (ร้อยละ 24.00 และ 21.25 ตามลำดับ) ส่วนมากมีระดับการศึกษาสูงสุดระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย/ปวช. (ร้อยละ 41.50) เกือบทุกคนมีสถานภาพสมรสอยู่ด้วยกัน (ร้อยละ 93.50) จำนวนครั้งการตั้งครรภ์เป็นครรภ์ที่ 2 หรือ ครรภ์แรก สัดส่วนใกล้เคียงกัน (ร้อยละ 37.50 และ 36.75 ตามลำดับ)

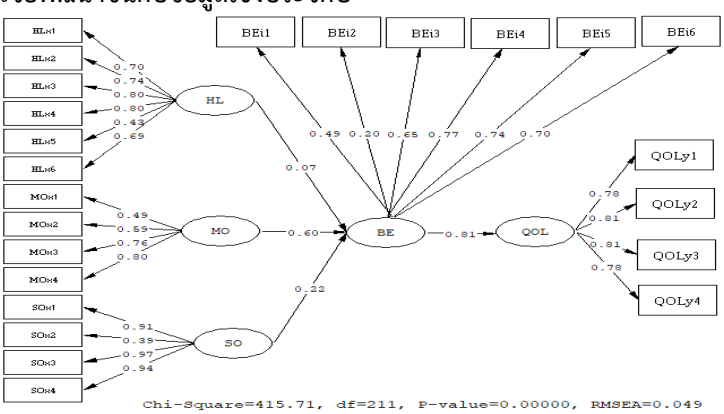
2. คุณภาพชีวิตของหญิงตั้งครรภ์

ตารางที่ 3 จำนวนและร้อยละระดับคุณภาพชีวิตของหญิงตั้งครรภ์ ภาพรวมและจำแนกเป็นรายด้าน (n=400)

คุณภาพชีวิต	มาก		ปานกลาง		น้อย	
	จำนวน	ร้อยละ	จำนวน	ร้อยละ	จำนวน	ร้อยละ
ด้านจิตใจ	343	85.75	55	13.75	2	0.50
ด้านสิ่งแวดล้อม	337	84.25	63	15.75	0	0
ด้านร่างกาย	303	75.75	97	24.25	0	0
ด้านสัมพันธภาพทางสังคม	277	69.25	121	30.25	2	0.50
คุณภาพชีวิตภาพรวม	**283**	**70.75**	**117**	**29.25**	**0**	**0**

จากตารางที่ 3 พบว่า หญิงตั้งครรภ์มีระดับคุณภาพชีวิตในภาพรวมอยู่ในระดับมาก ร้อยละ 70.75 ระดับปานกลาง ร้อยละ 29.25 จำแนกรายด้านเรียงจากมากไปหาน้อย ได้ดังนี้ ด้านจิตใจ ด้านสิ่งแวดล้อม ด้านร่างกาย และด้านสัมพันธภาพทางสังคม ร้อยละ 85.75, 84.25, 75.75 และ 69.25 ตามลำดับ

3. การตรวจสอบความสอดคล้องกลมกลืนของโมเดลปัจจัยเชิงสาเหตุที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพชีวิตของหญิงตั้งครรภ์ ที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นกับข้อมูลเชิงประจักษ์



ภาพที่ 1 โมเดลปัจจัยเชิงสาเหตุที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพชีวิตของหญิงตั้งครรภ์ (หลังปรับโมเดล)

ผลการตรวจสอบความสอดคล้องของตัวแบบที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นกับข้อมูลเชิงประจักษ์ พิจารณาจากสถิติที่ใช้ตรวจสอบความสอดคล้องระหว่างโมเดลกับข้อมูลเชิงประจักษ์ ได้แก่ Chi-Square = 415.71 df = 211 Chi-Square/df = 1.97 มีค่าน้อยกว่า 2 ดัชนี CFI = 0.97 มีค่ามากกว่า 0.95 ดัชนี GFI = 0.98 มีค่ามากกว่า 0.95 ดัชนี AGFI = 0.96 มีค่ามากกว่า 0.95 ดัชนี RMSEA = 0.04 มีค่าน้อยกว่า 0.05 และดัชนี SRMR = 0.04 มีค่าน้อยกว่า 0.05 สถิติที่สำคัญทุกดัชนีผ่านเกณฑ์ตามที่กำหนดไว้ สรุปได้ว่า โมเดลที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นมีความสอดคล้องกลมกลืนกับข้อมูลเชิงประจักษ์

4. เส้นทางอิทธิพลของปัจจัยเชิงสาเหตุที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพชีวิต

ตารางที่ 4 เส้นทางอิทธิพลของปัจจัยเชิงสาเหตุที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพชีวิตของหญิงตั้งครรภ์

ตัวแปร	พฤติกรรมส่งเสริมสุขภาพ			คุณภาพชีวิต		
	อิทธิพลทางตรง	อิทธิพลทางอ้อม	อิทธิพลรวม	อิทธิพลทางตรง	อิทธิพลทางอ้อม	อิทธิพลรวม
ความรอบรู้เรื่องภาวะตั้งครรภ์	0.11**	-	0.11**	-	0.10**	0.10**
แรงจูงใจในการส่งเสริมสุขภาพ	0.56**	-	0.56**	-	0.48**	0.48**
การสนับสนุนทางสังคม	0.21**	-	0.21**	-	0.18**	0.18**
พฤติกรรมส่งเสริมสุขภาพ	-	-	-	0.86**	-	0.86**
สมการโครงสร้างของตัวแปร				พฤติกรรมส่งเสริมสุขภาพ		คุณภาพชีวิต
R Square					0.66	0.65

** p-Value < 0.01

จากตารางที่ 4 พบว่า แรงจูงใจในการส่งเสริมสุขภาพ การสนับสนุนทางสังคม และความรอบรู้เรื่องภาวะตั้งครรภ์ มีอิทธิพลทางตรงต่อพฤติกรรมส่งเสริมสุขภาพ มีค่าสัมประสิทธิ์อิทธิพลเท่ากับ 0.56 0.21 และ 0.11 ตามลำดับ ส่วนพฤติกรรมส่งเสริมสุขภาพ มีอิทธิพลทางตรงต่อคุณภาพชีวิต มีค่าสัมประสิทธิ์อิทธิพลเท่ากับ 0.86 แรงจูงใจในการส่งเสริมสุขภาพ การสนับสนุนทางสังคม และความรอบรู้เรื่องภาวะตั้งครรภ์ มีอิทธิพลทางอ้อมต่อคุณภาพชีวิตส่งผ่านพฤติกรรมส่งเสริมสุขภาพ มีค่าสัมประสิทธิ์อิทธิพลเท่ากับ 0.48 0.18 และ 0.10 ตามลำดับ พฤติกรรมส่งเสริมสุขภาพ มีอิทธิพลรวมต่อคุณภาพชีวิตมากที่สุด มีค่าสัมประสิทธิ์อิทธิพลเท่ากับ 0.86 รองลงมาปัจจัยแรงจูงใจในการส่งเสริมสุขภาพ การสนับสนุนทางสังคมและความรอบรู้เรื่องภาวะตั้งครรภ์ มีอิทธิพลรวมต่อคุณภาพชีวิต มีค่าสัมประสิทธิ์อิทธิพลเท่ากับ 0.48 0.18 และ 0.10 ตามลำดับ ความรอบรู้เรื่องภาวะตั้งครรภ์ แรงจูงใจในการส่งเสริมสุขภาพ และการสนับสนุนทางสังคม สามารถร่วมกันอธิบายความผันแปรของพฤติกรรมส่งเสริมสุขภาพ ได้ร้อยละ 66 (R^2=0.66) และความรอบรู้เรื่องภาวะตั้งครรภ์ แรงจูงใจในการ

ส่งเสริมสุขภาพ การสนับสนุนทางสังคม และพฤติกรรมส่งเสริมสุขภาพ สามารถร่วมกันอธิบายความผันแปรของคุณภาพชีวิต ได้ร้อยละ 65 (R^2=0.65)

อภิปรายผล

1. หญิงตั้งครรภ์มีระดับคุณภาพชีวิตในภาพรวมอยู่ในระดับมาก จำแนกรายด้านเรียงจากมากไปหาน้อย ได้ดังนี้ ด้านจิตใจ ด้านสิ่งแวดล้อม ด้านร่างกาย และด้านสัมพันธภาพทางสังคม อภิปรายได้ว่าเนื่องจากหญิงตั้งครรภ์ส่วนใหญ่มีอายุระหว่าง 25-29 ปี ส่วนมากมีระดับการศึกษาสูงสุดระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย/ปวช. ซึ่งเป็นวัยที่มีวุฒิภาวะและความรับผิดชอบต่อชีวิตจึงสืบค้นข้อมูลความรู้เกี่ยวกับภาวะตั้งครรภ์รวมถึงการปรับตัวเข้ากับภาวะตั้งครรภ์ได้ และหญิงตั้งครรภ์เกือบทั้งหมดมีสถานภาพสมรสอยู่ด้วยกัน ทำให้มีความสมบูรณ์ของครอบครัว มีความรู้สึกอบอุ่น ปลอดภัยและมีความสุขจากการตั้งครรภ์ จึงทำให้คุณภาพชีวิตด้านจิตใจมากที่สุด สอดคล้องกับการศึกษาของอัญญา ปลดเปลื้องและคณะ (2561) พบว่า หญิงตั้งครรภ์มีคุณภาพชีวิตสูงและสัมพันธภาพในครอบครัว การมองโลกในแง่ดีและการเห็นคุณค่าในตนเองโดยมีอิทธิพลต่อคุณภาพชีวิตของหญิงตั้งครรภ์

2. โมเดลปัจจัยเชิงสาเหตุที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพชีวิตของหญิงตั้งครรภ์ที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นมีความสอดคล้องกลมกลืนกับข้อมูลเชิงประจักษ์ แสดงว่า องค์ประกอบของโมเดลที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นมีตัวแปรเป็นไปตามแนวคิดและทฤษฎีที่นำมาใช้ซึ่งประกอบด้วย ความรอบรู้เรื่องภาวะตั้งครรภ์ แรงจูงใจในการส่งเสริมสุขภาพ การสนับสนุนทางสังคมและพฤติกรรมส่งเสริมสุขภาพมีผลต่อคุณภาพชีวิต นั่นคือหญิงตั้งครรภ์มีคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้นได้จากการมีความรอบรู้เรื่องภาวะตั้งครรภ์ มีแรงจูงใจในการส่งเสริมสุขภาพ ได้รับการสนับสนุนทางสังคมและมีพฤติกรรมส่งเสริมสุขภาพที่ถูกต้อง เป็นไปตามแนวคิดทฤษฎีด้านพฤติกรรมศาสตร์โดยเฉพาะด้านพฤติกรรมการส่งเสริมสุขภาพ เช่น แนวคิดความรอบรู้สุขภาพ ทฤษฎีแรงจูงใจในการส่งเสริมสุขภาพโรค และทฤษฎีการสนับสนุนทางสังคม เป็นต้น (จักรพันธ์ เพ็ชรภูมิ, 2561) สอดคล้องกับการศึกษาของตติรัตน์ เตชะศักดิ์ศรี และคณะ (2560) พบว่า โมเดลแบบจำลองเชิงสาเหตุคุณภาพชีวิตของหญิงตั้งครรภ์ ประกอบด้วยความรอบรู้ทางสุขภาพ การแสวงหาข้อมูลทางสุขภาพ การสนับสนุนทางสังคมและการจัดการตนเอง

3. ปัจจัยความรอบรู้เรื่องภาวะตั้งครรภ์ แรงจูงใจในการส่งเสริมสุขภาพ การสนับสนุนทางสังคมมีอิทธิพลทางตรงต่อพฤติกรรมส่งเสริมสุขภาพและมีอิทธิพลทางอ้อมต่อคุณภาพชีวิต พฤติกรรมส่งเสริมสุขภาพมีอิทธิพลทางตรงต่อคุณภาพชีวิต แสดงว่า ถ้าหญิงตั้งครรภ์มีความรอบรู้เรื่องภาวะตั้งครรภ์ดี มีแรงจูงใจในการส่งเสริมสุขภาพ และได้รับการสนับสนุนทางสังคมดี จะส่งผลให้พฤติกรรมส่งเสริมสุขภาพดีด้วย และเมื่อหญิงตั้งครรภ์มีพฤติกรรมส่งเสริมสุขภาพที่ดีก็จะส่งผลต่อเนื่องไปถึงการมีคุณภาพชีวิตที่ดีด้วย สอดคล้องกับรายงานวิจัยที่พบว่า ความรอบรู้ด้านสุขภาพมีความสัมพันธ์กับพฤติกรรมส่งเสริมสุขภาพของหญิงตั้งครรภ์ (วิลาสินี บุตรศรี และอัญสุรีย์ ศิริโสภณ, 2563) แรงจูงใจในการส่งเสริมสุขภาพด้านการรับรู้ประโยชน์ของการปฏิบัติ

การรับรู้อุปสรรคของการปฏิบัติ การรับรู้สมรรถนะแห่งตนมีความสัมพันธ์ทางบวกกับพฤติกรรมส่งเสริมสุขภาพของสตรีตั้งครรภ์เสี่ยงต่อการคลอดก่อนกำหนด (อาทิตยา แก้วน้อยและคณะ, 2561) การสนับสนุนทางสังคมมีความสัมพันธ์ทางบวกกับพฤติกรรมการส่งเสริมสุขภาพของหญิงตั้งครรภ์ (สินี กะราลัย และจารุรัตน์ ศรีรัตนประภาส, 2561; พัชรี เกษรบุญนาค, 2564; Jalili Bahabadi et al., 2020; Nguyen et al., 2022) พฤติกรรมส่งเสริมสุขภาพมีอิทธิพลทางตรงต่อคุณภาพชีวิตของหญิงตั้งครรภ์ (ตติรัตน์ เตชะศักดิ์ศรี และคณะ, 2560; Boutib et al., 2022; Azita F. et al., 2024) แต่ไม่สอดคล้องกับการศึกษาของดวงพร ไมตรีจิตต์ (2561) ที่พบว่า พฤติกรรมการดูแลสุขภาพและการสนับสนุนทางสังคมไม่มีความสัมพันธ์กับคุณภาพชีวิตของหญิงตั้งครรภ์ที่มีภาวะความดันโลหิตสูง ทั้งนี้อาจเกี่ยวเนื่องด้วยกลุ่มหญิงตั้งครรภ์มีภาวะความดันโลหิตสูงซึ่งเป็นโรคเรื้อรังที่ต้องมีพฤติกรรมดูแลสุขภาพเฉพาะโรคมากกว่าหญิงตั้งครรภ์ปกติและอาจยังมีปัจจัยอื่นที่ส่งผลต่อคุณภาพชีวิตได้ด้วย

สรุป

หญิงตั้งครรภ์มีระดับคุณภาพชีวิตในภาพรวมอยู่ในระดับมาก จำแนกรายด้านเรียงจากมากไปหาน้อยได้ดังนี้ ด้านจิตใจ ด้านสิ่งแวดล้อม ด้านร่างกาย และด้านสัมพันธภาพทางสังคม โมเดลที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นมีความสอดคล้องกลมกลืนกับข้อมูลเชิงประจักษ์ มีค่าดัชนี Chi-Square = 415.71 df = 211 ไค-สแควร์สัมพัทธ์ = 1.97 CFI = 0.97 GFI = 0.98 AGFI = 0.96 RMSEA = 0.04 และ SRMR = 0.04 ปัจจัยความรอบรู้เรื่องภาวะตั้งครรภ์ แรงจูงใจในการส่งเสริมสุขภาพ การสนับสนุนทางสังคม มีอิทธิพลทางตรงต่อพฤติกรรมส่งเสริมสุขภาพและมีอิทธิพลทางอ้อมต่อคุณภาพชีวิต พฤติกรรมส่งเสริมสุขภาพมีอิทธิพลทางตรงต่อคุณภาพชีวิต ซึ่งความรอบรู้เรื่องภาวะตั้งครรภ์ แรงจูงใจในการส่งเสริมสุขภาพและการสนับสนุนทางสังคม สามารถร่วมกันอธิบายความผันแปรของพฤติกรรมส่งเสริมสุขภาพ ได้ร้อยละ 66 และความรอบรู้เรื่องภาวะตั้งครรภ์ แรงจูงใจในการส่งเสริมสุขภาพ การสนับสนุนทางสังคมและพฤติกรรมส่งเสริมสุขภาพ สามารถร่วมกันอธิบายความผันแปรของคุณภาพชีวิต ได้ร้อยละ 65

ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้

1. หน่วยงานที่มีบทบาทหน้าที่เกี่ยวกับนโยบายส่งเสริมสุขภาพหญิงตั้งครรภ์ควรบูรณาการด้านการส่งเสริมสุขภาพหญิงตั้งครรภ์ตามแนวคิดความรอบรู้เรื่องภาวะตั้งครรภ์ การสร้างแรงจูงใจ และพฤติกรรมส่งเสริมสุขภาพของหญิงตั้งครรภ์ รวมถึงการจัดสรรงบประมาณและพัฒนาแนวทางปฏิบัติที่ส่งเสริมการสร้างแรงสนับสนุนทางสังคมแก่หญิงตั้งครรภ์ทั้งในระดับครอบครัว ชุมชน และระบบบริการเข้าสู่แผนยุทธศาสตร์ที่มุ่งเน้นการพัฒนาคุณภาพชีวิตของหญิงตั้งครรภ์อย่างเป็นองค์รวม

2. หน่วยบริการสุขภาพทุกระดับ ควรออกแบบโปรแกรมส่งเสริมสุขภาพหญิงตั้งครรภ์ที่ครอบคลุมองค์ประกอบความรอบรู้เรื่องภาวะตั้งครรภ์ การสร้างแรงจูงใจในการส่งเสริมสุขภาพและการสนับสนุนทางสังคม เพื่อให้หญิงตั้งครรภ์มีพฤติกรรมส่งเสริมสุขภาพที่ดี และคุณภาพชีวิตที่ดี เช่น มีกิจกรรมให้ความรู้และทำแบบประเมินพฤติกรรมสุขภาพในทุกครั้งที่มาตรวจครรภ์ เป็นต้น

3. หน่วยงานที่เกี่ยวข้องสามารถนำผลการวิจัยเป็นข้อมูลพื้นฐานในการส่งเสริมการวิจัยเชิงลึกเกี่ยวกับคุณภาพชีวิตในกลุ่มหญิงตั้งครรภ์ หรือการจัดทำหลักสูตรฝึกอบรมต่างๆ เพื่อส่งเสริมคุณภาพชีวิตหญิงตั้งครรภ์

ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

1. ควรศึกษาแนวคิดทฤษฎีอื่นที่เป็นสาเหตุของคุณภาพชีวิตหญิงตั้งครรภ์เพิ่มเติมจากความรอบรู้เรื่องภาวะตั้งครรภ์ แรงจูงใจในการส่งเสริมสุขภาพ การสนับสนุนทางสังคมและพฤติกรรมส่งเสริมสุขภาพ เช่น การรับรู้ความสามารถของตนเอง (Self-Efficacy) หรือ ภาวะสุขภาพจิต (Mental Well-being / Psychological Distress) เป็นต้น เพื่อได้องค์ประกอบที่แตกต่างในการเลือกใช้ส่งเสริมคุณภาพชีวิตหญิงตั้งครรภ์ต่อไป

2. ควรศึกษาองค์ประกอบเชิงสำรวจของโมเดลที่พัฒนาขึ้นก่อนวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยัน เพื่อยืนยันตัวแปรที่นำมาใช้อย่างมีประสิทธิผลตรงต่อความต้องการของการนำผลการวิจัยไปประยุกต์ใช้ต่อไป

3. ควรนำผลการวิจัยไปสร้างรูปแบบหรือพัฒนารูปแบบการส่งเสริมคุณภาพชีวิตหญิงตั้งครรภ์โดยมีองค์ประกอบด้านความรอบรู้เรื่องภาวะตั้งครรภ์ การสร้างแรงจูงใจในการส่งเสริมสุขภาพ การสนับสนุนทางสังคมและพฤติกรรมส่งเสริมสุขภาพของหญิงตั้งครรภ์ เพื่อประเมินผลเปรียบเทียบก่อนและหลังการใช้โมเดลในด้านคุณภาพชีวิตของหญิงตั้งครรภ์

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา คณะกรรมการสอบ และผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ให้คำแนะนำและความกรุณาตลอดการทำวิจัย ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเวสเทิร์นและบุคลากรที่เกี่ยวข้องทุกท่าน รวมถึงหญิงตั้งครรภ์ที่ให้ความร่วมมือในการตอบแบบสอบถาม อันเป็นประโยชน์ต่อการศึกษานี้

เอกสารอ้างอิง

กนกอร ปัญญาโส, ศิริวรรณ แสงอินทร์, และอุษา เชื้อหอม. (2563). ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับคุณภาพชีวิตในมิติสุขภาพของหญิงตั้งครรภ์ที่มีภาวะเบาหวานในโรงพยาบาลรัฐบาล เขตภาคเหนือตอนบน. **วารสารคณะพยาบาลศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา**, 28(3), 27-40.

กระทรวงสาธารณสุข. (2567). **ระบบคลังข้อมูลด้านการแพทย์และสุขภาพ: อัตราส่วนการตายมารดาต่อการเกิดมีชีพประเทศไทย ปีงบประมาณ 2567 [ข้อมูลสถิติ]**. สืบค้นจาก http://hdc.moph.go.th/center/rpublic/main

กองอนามัยมารดาและทารก กรมอนามัย. (2567). **วิเคราะห์สถานการณ์และผลารดาเนินงานตัวชี้วัด "อัตราส่วนการตายมารดาไทยต่อแสนการเกิดมีชีพ ผลการดาเนินเดือนตุลาคม 2566 - มีนาคม 2567"**. สืบค้นจาก https://hp.anamai.moph.go.th/webupload/4xceb3b571ddb70741ad132d75876bc41d/tinymce/OPDC/OPDC2567S/02MIHD/IDC35/OPDC2567_IDC3-5_01.pdf.

จักรพันธ์ เพ็ชรภูมิ. (2561). **พฤติกรรมสุขภาพ: แนวคิด ทฤษฎีและการประยุกต์ใช้ (พิมพ์ครั้งที่ 3)**. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร.

ดวงพร ไมตรีจิตต์. (2561). **ความสัมพันธ์ระหว่างพฤติกรรมการดูแลสุขภาพ ความวิตกกังวล การสนับสนุนทางสังคมกับคุณภาพชีวิตของหญิงตั้งครรภ์ที่มีภาวะความดันโลหิตสูง**. วิทยานิพนธ์ หลักสูตรพยาบาลศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาการผดุงครรภ์ คณะพยาบาลศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา.

ตติรัตน์ เตชะศักดิ์ศรี, สุพิศ ศิริอรุณรัตน์, พิริยา ศุภศรี, วรรณทนา ศุภสีมานนท์, นารีรัตน์ บุญเนตร, และชรริน ขวัญเนตร. (2560). แบบจำลองเชิงสาเหตุคุณภาพชีวิตของหญิงตั้งครรภ์. **วารสารเครือข่ายวิทยาลัยพยาบาลและการสาธารณสุขภาคใต้**, 4(1), 28-46.

ทิพย์วัลย์ เรืองขจร. (2554). **วิทยาศาสตร์เพื่อคุณภาพชีวิต**. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา.

พัชรี เกสรบุญนาค. (2564). **ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อวิถีชีวิตด้านส่งเสริมสุขภาพของหญิงวัยรุ่นตั้งครรภ์แรกในจังหวัดนครปฐม**. วิทยานิพนธ์บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยคริสเตียน.

วิลาสินี บุตรศรี, และอัญสุรีย์ ศิริโสภณ. (2563). ปัจจัยทำนายพฤติกรรมส่งเสริมสุขภาพในหญิงตั้งครรภ์ที่รับบริการฝากครรภ์ในโรงพยาบาลชุมชน จังหวัดนครสวรรค์. **วารสารสหเวชศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา**, 5(1), 60-70.

สินี การาลัย, และจารุรัตน์ ศรีรัตนประภาส. (2561). ความสัมพันธ์ระหว่างการสนับสนุนทางสังคมและพฤติกรรมการส่งเสริมสุขภาพของหญิงตั้งครรภ์วัยรุ่น. **วารสารคณะพยาบาลศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา** 26(1), 1-10.

สุภมาส อังศุโชติ. (2554). **สถิติสำหรับการวิจัยทางสังคมศาสตร์และพฤติกรรมศาสตร์: เทคนิคการใช้โปรแกรม LISREL**. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ: เจริญมั่นคงการพิมพ์.

อัญญา ปลดเปลื้อง, อมราวดี บุญยรัตน์, สุพรรณี กัณหดิลก, เพ็ญพักตร์ ลูกอินทร์, ณัฐพร อุทัยธรรม, พรพรรณ พรมประยูร, และจิริยา อินทนา. (2561). การวิเคราะห์เส้นทางปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพชีวิตของหญิงตั้งครรภ์. **วารสารพยาบาลกระทรวงสาธารณสุข**, 27(3), 42-56.

อาทิตยา แก้วน้อย, ศรีสมร ภูมนสกุล, และสายลม เกิดประเสริฐ. (2561). ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับพฤติกรรมส่งเสริมสุขภาพและอายุครรภ์เมื่อคลอดของสตรีตั้งครรภ์ที่เสี่ยงต่อการคลอดก่อนกำหนด. **วารสารรามาธิบดีพยาบาลสาร**, 24(3), 264-278.

Azita Fathnezhad-Kazemi, A., Seifinadergoli, Z., & Ahmadi, M. (2024). Factors affecting the quality of life in pregnant women with diabetes: the mediating effect of illness acceptance. **BMC Pregnancy and Childbirth**, 24(1), 513.

Bektemur, G., Keles, E., Kaya, L., & Baydili, K. N. (2024). Determinants of health-promoting behaviors in pregnant women. **Revista da Associação Médica Brasileira**, 70(7), e20231798.

Bloom, B. S. (1971). **Handbook on formative and summative evaluation of student learning**. N/A

Boutib, A., Chergaoui, S., Marfak, A., Hilali, A., & Youlyouz-Marfak, I. (2022). Quality of life during pregnancy from 2011 to 2021: systematic review. **International journal of women's health**, 14, 975-1005.

Jalili Bahabadi, F., Estebsari, F., Rohani, C., Rahimi Khalifeh Kandi, Z., Sefidkar, R., & Mostafaei, D. (2020). Predictors of health-promoting lifestyle in pregnant women based on Pender's health promotion model. **International journal of women's health**, 12, 71-77.

Murtagh, F., & Heck, A. (2012). **Multivariate data analysis** (Vol. 131). Springer Science and Business Media.

Nguyen, L. D., Nguyen, L. H., Ninh, L. T., Nguyen, H. T. T., Nguyen, A. D., Vu, L. G., ... & Ho, R. C. (2022). Women's holistic self-care behaviors during pregnancy and associations with psychological well-being: implications for maternal care facilities. **BMC pregnancy and childbirth**, 22(1), 631.

World Health Organization. (2016). **Standards for improving quality of maternal and newborn care in health facilities**. Geneva: World Health Organization.

การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์

ณหทัย โชติกลาง[1*] วีระวัฒน์ อุ่นเสน่หา[2] ณัฐสิมา โทขันธ์[3]

Received : February 12,2025
Revised : June 30, 2025
Accepted : August 4, 2025

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินค่าคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของอาคารศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ โดยอ้างอิงแนวทางการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กรตามมาตรฐานขององค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) การเก็บรวบรวมข้อมูลดำเนินขึ้นในช่วงเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2566 ถึงเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2567 ซึ่งกำหนดเป็นปีฐานสำหรับการคำนวณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (CO_2eq) ผลการประเมินพบว่า ศูนย์วิทยาศาสตร์มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกรวมทั้งสิ้น 205,830.40 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า จำแนกตามขอบเขตของกิจกรรมที่ก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ได้แก่ ขอบเขตที่ 1 เท่ากับ 16.60 kgCO_2eq คิดเป็นร้อยละ 0.01 ขอบเขตที่ 2 เท่ากับ 173,401.77 kgCO_2eq คิดเป็นร้อยละ 84.25 ขอบเขตที่ 3 เท่ากับ 32,412.58 kgCO_2eq คิดเป็นร้อยละ 15.75 กิจกรรมที่ส่งผลให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุดคือ การใช้พลังงานไฟฟ้าคิดเป็นสัดส่วนสูงสุด (ร้อยละ 84.25) รองลงมาคือ การเดินทางระหว่างสถานศึกษาและที่พักอาศัยของบุคลากร (ร้อยละ 15.50) จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึงความจำเป็นในการกำหนดแนวทางและมาตรการเพื่อลดการใช้พลังงานภายในองค์กรอย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: ก๊าซเรือนกระจก คาร์บอนฟุตพริ้นท์องค์กร
ศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์

[1] อาจารย์ประจำหลักสูตรวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ อีเมล: Nahathai@vru.ac.th
[2] ผู้ช่วยศาสตราจารย์หลักสูตรวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ อีเมล: Weerawat@vru.ac.th
[3] ผู้ช่วยศาสตราจารย์หลักสูตรวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ อีเมล: Natsima@vru.ac.th
** ผู้นิพนธ์หลัก อีเมล: Nahathai@vru.ac.th*

CARBON FOOTPRINT ASSESSMENT OF SCIENCE CENTER, VALAYA ALONGKORN RAJABHAT UNIVERSITY UNDER ROYAL PATRONAGE

Nahathai Chotklang[1*] Weerawat Ounsanesa[2] Natsima Tokhun[3]

Abstract

The objective of the current study was to assess the organizational carbon footprint of the Science Center at Valaya Alongkorn Rajabhat University under the Royal Patronage. The assessment was carried out based on the guidelines established by Thailand Greenhouse Gas Management Organization (Public Organization). Data collection was conducted for one year between August 2023 to July 2024 which was defined as baseline period for calculating greenhouse-gas emissions in form of carbon dioxide equivalent (CO_2eq). The results were indicated that the total greenhouse-gas emissions of the Science Center were 205,830.40 kilograms of CO_2eq, which were categorized into the following scopes of activities: Scope 1 was equal to 16.60 kgCO_2eq (0.01%). Scope 2 was equal to 173,401.77 kgCO_2eq (84.25%) and Scope 3 was equal to 32,412.58 kgCO_2eq (15.75%). Electricity consumption was identified as the major activity contributing to greenhouse-gas emissions, representing the percentage of 84.25. Then, staff commuting between the university and residences representing the second-largest percentage of 15.50%. The findings were highlighted the necessity to implement effectively energy-saving guidelines and policies within the organization.

Keywords: Carbon footprint for organization (CFO), Greenhouse gas, Science Center Valaya Alongkorn Rajabhat University under the Royal Patronage

---

[1] Lecturer of Environmental Science Program in Science and Technology, Valaya Alongkorn Rajabhat University under the Royal Patronage, e-mail: Nahathai@vru.ac.th

[2] Assistant Professor of Environmental Science Program in Science and Technology, Valaya Alongkorn Rajabhat University under the Royal Patronage, e-mail: Weerawat@vru.ac.th

[3] Assistant Professor of Environmental Science Program in Science and Technology, Valaya Alongkorn Rajabhat University under the Royal Patronage, e-mail: Natsima@vru.ac.th

** Corresponding author, e-mail: Nahathai@vru.ac.th*

บทนำ

จากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศซึ่งเป็นผลมาจากก๊าซเรือนกระจกที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และจากข้อมูลของโครงการติดตามการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโคเปอร์นิคัส (Copernicus Climate Change Service: C3S) ของสหภาพยุโรป ระบุว่า ปี พ.ศ. 2567 (ค.ศ. 2024) มีแนวโน้มที่จะมีอุณหภูมิเฉลี่ยทั่วโลกสูงขึ้นจากระดับก่อนยุคอุตสาหกรรม อย่างน้อย 1.55 องศาเซลเซียส ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงความรุนแรงที่เพิ่มขึ้นของวิกฤตการณ์การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในปัจจุบัน (BBC NEWS ไทย, 2024) ที่คาดว่าจะมีผลกระทบที่มีความรุนแรงมากขึ้นทั้งในเชิงความ ผันผวน ความถี่ และขอบเขตที่กว้างขวางมากขึ้น ซึ่งจะสร้างความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สิน ระบบโครงสร้างพื้นฐานที่จำเป็นตลอดจนระบบผลิตทางการเกษตรที่สัมพันธ์ต่อเนื่องกับความมั่นคงด้านอาหารและน้ำ ประเทศไทยจึงได้ให้ความสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ โดยได้มีการระบุในยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปี (2561-2580) ด้านการสร้างการเติบโตบนคุณภาพชีวิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยมีตัวชี้วัดที่สำคัญ คือ ปริมาณก๊าซเรือนกระจก ซึ่งประเด็นที่สำคัญคือสร้างการเติบโตอย่างยั่งยืนบนสังคมที่เป็นมิตรต่อสภาพภูมิอากาศ มุ่งเน้นการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และสร้างสังคมคาร์บอนต่ำ เพิ่มพื้นที่สีเขียว ส่งเสริมการเพิ่มพื้นที่ป่าเพื่อเป็นแหล่งกักเก็บก๊าซเรือนกระจก (ยุทธศาสตร์ชาติ พ.ศ.2561-2580, 2561) รวมถึงประเทศไทยได้มีความตกลงปารีส (Paris Agreement) ที่ประเทศไทยมีเป้าหมายการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเป็นศูนย์ (Net Zero Greenhouse Gas Emission) ภายในปี ค.ศ. 2065 ซึ่งมีการรับรองในปี ค.ศ. 2015 (UNFCCC COP21) โดยมีพันธกิจที่ต้องดำเนินการคือ จัดทำ จัดส่งและรักษาการมีส่วนร่วมที่ประเทศกำหนด (Nationally Determined Contributions: NDC) จัดทำเป้าหมายและแผนการลดก๊าซเรือนกระจก จัดทำบัญชีแสดงผลการดำเนินงานตามเป้าหมายและแผนการลดก๊าซเรือนกระจกของประเทศ และจัดส่งรายงานบัญชีก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทย ประชาคมโลกจึงผลักดันให้ภาคีสมาชิกยกระดับเป้าหมายการดำเนินงานให้สอดคล้องตามเป้าหมายของความตกลงปารีส ประเทศไทยจึงแสดงความมุ่งมั่นที่จะดำเนินการเพื่อมุ่งสู่เป้าหมายความเป็นกลางทางคาร์บอน (Carbon Neutrality) ภายในปี ค.ศ. 2050 และการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเป็นศูนย์ (Net Zero Greenhouse Gas Emission) ภายในปี ค.ศ. 2065 (ฐานข้อมูลกองการต่างประเทศ, 2566) ซึ่งประเทศไทยได้มีการจัดทำบัญชีก๊าซเรือนกระจกมาอย่างต่อเนื่อง ประกอบด้วยก๊าซเรือนกระจกสำคัญ 6 ชนิดที่ต้องรายงานตามพันธกรณีของกรอบอนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์(CO_2) มีเทน (CH_4) ไนตรัสออกไซด์ (N_2O) ไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (HFCs) เปอร์ฟลูออโรคาร์บอน (PFCs) และซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF6) (สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2563)

จากสถานการณ์ดังกล่าวข้างต้นการหาแนวทางเพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมต่าง ๆ ภายในประเทศจึงเป็นสิ่งที่สำคัญ คาร์บอนฟุตพริ้นท์เป็นเครื่องมือที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อวัดผลกระทบของผลิตภัณฑ์

และบริการจากกิจกรรมของคนที่มีต่อสิ่งแวดล้อมในเชิงปริมาณ โดยใช้ตัวบ่งชี้คือโอกาสในการเกิดภาวะโลกร้อน (Global Warming Potential; GWP) การจัดทำคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร (Carbon Footprint for Organization: CFO หรือ Corporate Carbon Footprint: CCF) เป็นวิธีการหนึ่งในการแสดงข้อมูลการปล่อยและดูดกลับก๊าซเรือนกระจกที่ปล่อยจากการดำเนินงานขององค์กรจากกิจกรรมต่างๆ ทั้งการผลิตและการบริการขององค์กรนั้น และจะนำไปกำหนดแนวทางการบริหารจัดการเพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้อย่างมีประสิทธิภาพทั้งในระดับหน่วยงาน บริษัท โรงงานระดับอุตสาหกรรม และระดับประเทศ (องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน), 2562)

การศึกษาหลายฉบับพบว่าหน่วยงานภาครัฐและสถาบันการศึกษามีบทบาทสำคัญในการเป็นต้นแบบของการพัฒนาอย่างยั่งยืน โดยเฉพาะในด้านการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม (องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน), 2562) ; สำนักงานสภาพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ, 2561) อย่างไรก็ตามงานวิจัยในประเทศไทยเกี่ยวกับการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ในระดับอาคารเฉพาะหรือหน่วยงานภายในมหาวิทยาลัยยังค่อนข้างจำกัด ส่งผลให้ขาดข้อมูลเชิงลึกที่สามารถใช้เป็นแนวทางในการกำหนดมาตรการเฉพาะพื้นที่ (เกษม จันทร์แก้ว, 2556) ในระดับสากล งานวิจัยของ Wiedmann และ Minx (2008) ได้เสนอแนวคิดในการประเมินผลกระทบขององค์กรจากการดำเนินกิจกรรมต่าง ๆ ผ่านเครื่องมือคาร์บอนฟุตพริ้นท์อย่างเป็นระบบ ซึ่งได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เช่น ฐานข้อมูล IPCC (2006) และแนวทาง ISO 14064-1 (ISO, 2018) ที่ช่วยกำหนดขอบเขตและความชัดเจนของข้อมูลที่ใช้ในการประเมิน เช่น งานวิจัยของ (Kamble & Kavathekar, 2018) วิเคราะห์คาร์บอนฟุตพริ้นท์ของอาคารเรียนในวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์เมืองบาฮาล โดยพิจารณาจากการใช้พลังงานไฟฟ้า การใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล และการเดินทางของบุคลากร โดยปัจจุบันยังขาดการศึกษาเชิงลึกเกี่ยวกับการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ในระดับอาคารหรือหน่วยงานเฉพาะภายในสถาบันการศึกษาในประเทศไทย ซึ่งข้อมูลดังกล่าวมีความสำคัญในการวางแผนและดำเนินมาตรการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอย่างมีประสิทธิภาพและสอดคล้องกับบริบทของแต่ละองค์กร

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ โดยการรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมต่าง ๆ ภายในศูนย์วิทยาศาสตร์ เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการวางแผนและดำเนินมาตรการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกอย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์

วิธีดำเนินการวิจัย

การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการทบทวนวรรณกรรมที่มีการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กรในหน่วยงานต่างๆ พบว่าประเทศไทยใช้แนวทางการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กรณ์ตามองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) หรือ อบก. (TGO) ที่ได้กำหนดวิธีการคำนวณปริมาณการปล่อยและดูดกลับก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse gas emissions and removals) ที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมการดำเนินงานขององค์กร หรือที่เรียกว่า “คาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร” ซึ่งมีแนวทางการประเมินแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก (องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน), 2565)

การกำหนดขอบเขตขององค์กร (Organization Boundary)

ขอบเขตที่ทำการศึกษา อาคารศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ ศูนย์วิทยาศาสตร์แบ่งออกเป็น 4 ส่วนงานคือ สำนักงานศูนย์วิทยาศาสตร์ ส่วนปฏิบัติการทางฟิสิกส์ ส่วนปฏิบัติการทางเคมี และส่วนปฏิบัติการทางชีววิทยา มีบุคลากรรวมจำนวน 22 คน เก็บข้อมูลระหว่างเดือนสิงหาคม 2566 ถึงเดือน กรกฎาคม 2567

การกำหนดขอบเขตการดำเนินงาน (Operational Boundary)

กำหนดขอบเขตการดำเนินงานแบ่งออกเป็น 3 ขอบเขตเพื่อให้ครบบคลุมกิจกรรมของศูนย์วิทยาศาสตร์ ขอบแขตและกิจกรรมแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ขอบเขตและกิจกรรมการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของศูนย์วิทยาศาสตร์

ขอบเขต	กิจกรรม	แหล่งเก็บข้อมูล
ประเภทที่ 1 การปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยตรง	1.การใช้สารทำความเย็นในเครื่องปรับอากาศ	บันทึกการซ่อมบำรุง
	2.การใช้อุปกรณ์ดับเพลิง	บันทึกการใช้
	3.การใช้สารทำความสะอาด	บันทึกการเบิกจ่าย
	4.การปฏิบัติงานนอกสถานที่	ข้อมูลการเดินทาง
ประเภทที่ 2 การปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยอ้อมจากการใช้พลังงาน	1.ปริมาณการซื้อพลังงานไฟฟ้า	บันทึกหน่วยการใช้ไฟฟ้า
ประเภทที่ 3 การปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดย อ้อม จากแหล่งอื่นๆ	1.การกำจัดขยะขององค์กรภายนอก	ข้อมูลปริมาณขยะ
	2.การเดินทางไป-กลับระหว่างองค์กรกับที่พักอาศัยของบุคลากร	ข้อมูลการเดินทาง
	3.การใช้สารเคมีในการเรียนการสอน	บันทึกการเบิกจ่าย
	4.การใช้กระดาษ	บันทึกการเบิกจ่าย

วิธีการคำนวณปริมาณการปล่อยหรือดูดกลับก๊าซเรือนกระจก

การคำนวณโดยใช้ข้อมูลกิจกรรมต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในศูนย์วิทยาศาสตร์ คูณกับค่าแฟกเตอร์การปล่อยหรือดูดกลับก๊าซเรือนกระจก และแสดงผลให้อยู่ในรูปของตัน (กิโลกรัม) คาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (CO_2 equivalent) แสดงดังสมการที่ (1)

$$GHG = \text{Activity data} \times EF \qquad (1)$$

โดยที่ GHG คือ ปริมาณก๊าซเรือนกระจก

Activity data คือ ข้อมูลกิจกรรมที่ทำให้เกิดก๊าซเรือนกระจก

EF (GHG Emission Factor) คือ ค่าแฟกเตอร์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก

เมื่อคำนวณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเสร็จสิ้นแล้ว จากนั้นสรุปข้อมูลเพื่อวิเคราะห์หากิจกรรมที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของศูนย์วิทยาศาสตร์

การประเมินความไม่แน่นอน เป็นขั้นตอนที่แสดงให้เห็นถึงคุณภาพของข้อมูลที่นำมาใช้ในการประเมิน เป็นขั้นตอนสำคัญที่แสดงให้เห็นถึงระดับคุณภาพของข้อมูล ความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นกับข้อมูล และค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เลือกใช้ สามารถตรวจสอบระดับคุณภาพของข้อมูลได้โดยการกำหนดระดับคะแนนดังแสดงในตาราง 2 และตาราง 3 ดังนี้

ตารางที่ 2 ค่าที่ใช้ในการคำนวณระดับคุณภาพของข้อมูล

รายการ	**ระดับคุณภาพของข้อมูล**			
ลักษณะการเก็บข้อมูล	X = 6 คะแนน	Y = 3 คะแนน	Z = 1 คะแนน	
ค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจก	A = 4 คะแนน EF จากการวัดที่มีคุณภาพ	B = 3 คะแนน EF จากผู้ผลิต EF ระดับประเทศ	C = 2 คะแนน EF ระดับภูมิภาค	D = 1 คะแนน EF ระดับสากล

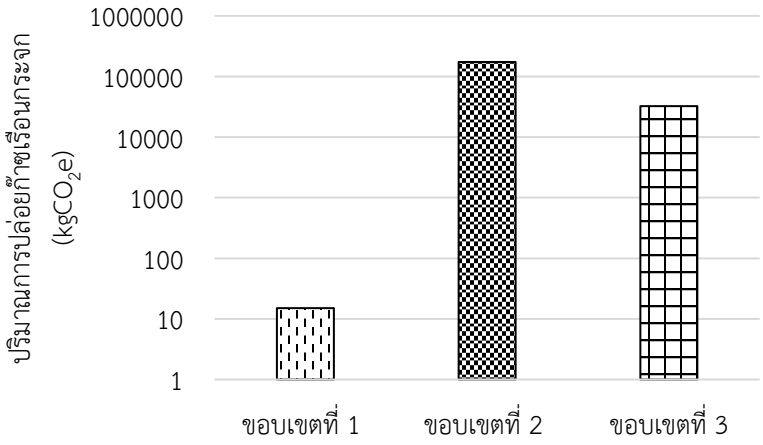
ตารางที่ 3 ระดับความไม่แน่นอนและคุณภาพข้อมูล

ระดับ	ระดับคะแนนโดยรวมของข้อมูล	คำอธิบาย
1	1-6	มีความไม่แน่นอนสูงคุณภาพของข้อมูลไม่ดี
2	7-12	มีความไม่แน่นอนเล็กน้อย คุณภาพของข้อมูลปานกลาง
3	13-18	มีความไม่แน่นอนต่ำ คุณภาพของข้อมูลดี
4	19-24	มีความไม่แน่นอนต่ำ คุณภาพของข้อมูลดีเยี่ยม

ที่มา: องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) (2565)

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ผลการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของศูนย์วิทยาศาสตร์ระหว่างเดือนสิงหาคม 2566 ถึงเดือนกรกฎาคม 2567 แสดงอยู่ในรูปของกิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า จำแนกเป็น 3 ขอบเขต จากผลการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของศูนย์วิทยาศาสตร์มีค่าการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 205,830.40 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า โดยแบ่งเป็นการปล่อยก๊าซเรือนกระจกขอบเขตที่ 1 2 และ 3 มีค่า 16.60, 173,401.77 และ 32,412.58 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 0.01 84.25 และ 15.75 ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดของศูนย์วิทยาศาสตร์

ข้อมูลแสดงคาร์บอนฟุตพริ้นท์และสัดส่วนการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของศูนย์วิทยาศาสตร์แสดงดังตารางที่ 4

ขอบเขตที่ 1 ปริมาณก๊าซเรือนกระจกมาจากกิจกรรมการใช้สารทำความสะอาดปริมาณรวม 10.37 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ประกอบด้วยน้ำยาสกัดสนิม น้ำยาดับกลิ่นฆ่าเชื้อ น้ำยาเช็ดถูพื้น น้ำยาทำความสะอาดห้องน้ำ/อเนกประสงค์ น้ำยาเช็ดกระจก และน้ำยาล้างจาน และจากกิจกรรมการปฏิบัติงานนอกสถานที่ซึ่งมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเท่ากับ 5.69 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า คิดเป็นร้อยละ 64.57 35.43 ตามลำดับ ขณะที่ข้อมูลการใช้สารทำความเย็นในเครื่องปรับอากาศไม่มีการเติมสารในช่วงระยะเวลาที่เก็บข้อมูล และเครื่องดับเพลิงของศูนย์วิทยาศาสตร์ได้มีการเปลี่ยนมาใช้เครื่องดับเพลิงที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและไม่มีการใช้งานในช่วงที่เก็บข้อมูลจึงทำให้ไม่มีค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในส่วนนี้

ขอบเขตที่ 2 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมการใช้พลังงานไฟฟ้ามีปริมาณ 173,401.77 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า โดยเป็นพลังงานไฟฟ้าที่ซื้อมาจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคซึ่งคิดเป็นปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่มากที่สุดจากทั้ง 3 ขอบเขต ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 84.25 ของปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกรวมของศูนย์วิทยาศาสตร์ สอดคล้องกับงานวิจัยของคณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดลที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการใช้ไฟฟ้าคิดเป็นร้อยละ 80 (Aroonsrimorakota et al., 2556) รวมถึงคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยซึ่งมีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมการใช้ไฟฟ้ามากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 70 จากกิจกรรมทั้งหมด (สุรชาติ ยาวิราช และอรรจน์ เศรษฐบุตร, 2561) คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล วิทยาเขตพญาไท มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมาจากกิจกรรมการใช้ไฟฟ้าคิดเป็นร้อยละ 92.3 (วริศรา สิขิวัฒน์ และคณะ, 2563) มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชียมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการใช้ไฟฟ้าคิดเป็นร้อยละ 78.94 (ฐิติกร หมายมั่น และคณะ, 2561) และมหาวิทยาลัยวลัยที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมการใช้ไฟฟ้าคิดเป็นร้อยละ 64.07 (ฟาเดีย เชิญถนอมวงศ์ และธนพิพัฒน์ สัมพันธมาศ, 2563) เนื่องจากไฟฟ้าเป็นสิ่งที่จำเป็นในการดำเนินกิจกรรมต่าง ๆ ภายในศูนย์วิทยาศาสตร์ เช่น การให้แสงสว่าง การใช้เครื่องปรับอากาศ การใช้ลิฟต์ หรือการใช้เครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ รวมถึงการใช้อุปกรณ์สำนักงานของบุคลากร ดังนั้นการใช้พลังงานไฟฟ้าจึงเป็นกิจกรรมที่มีการปล่อยปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุด

ขอบเขตที่ 3 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุดมาจากกิจกรรมการเดินทางไป-กลับระหว่างองค์กรกับที่พักอาศัยของบุคลาากร มีปริมาณ 31,180.23 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า รองลงมาคือจากกิจกรรมการกำจัดขยะขององค์กรภายนอก 774.55 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า การใช้กระดาษ A4 394.13 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า และการใช้สารเคมีในการเรียนการสอน 63.67 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า คิดเป็นร้อยละ 96.20 2.39 1.22 และ 0.20 ตามลำดับ ซึ่งการเดินทางไป-กลับระหว่างองค์กรกับที่พักอาศัยคิดเป็นการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่มากที่สุดในขอบเขตที่ 3 โดยบุคลากรในศูนย์

วิทยาศาสตร์มีการเดินทางด้วยรถยนต์และรถจักรยานยนต์ สอดคล้องกับงานวิจัยในมหาวิทยาลัยโคลัมเบียที่ประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ ผลการศึกษาพบว่าการเดินทางของนักศึกษาและบุคลากรเป็นแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกหลัก (González & Rodríguez, 2022) ขณะที่การกำจัดขยะมูลฝอยของศูนย์วิทยาศาสตร์ จะใช้บริการกำจัดขยะมูลฝอยของเทศบาลท่าโขลง จังหวัดปทุมธานี ซึ่งเป็นการกำจัดขยะแบบฝังกลบ เนื่องจากมีนักศึกษามาเรียนที่อาคารศูนย์วิทยาศาสตร์จำนวนน้อยดังนั้นจึงทำให้มีปริมาณขยะน้อยตามไปด้วย ขณะที่การใช้กระดาษและการใช้สารเคมีในการเรียนการสอนมีค่ามีค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกน้อยเมื่อเทียบกับการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมอื่น ๆ ในขอบเขตที่ 3 เนื่องจากปัจจุบันมหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ ได้มีการใช้ระบบอีสารบรรณในการส่งเอกสารหรือบันทึกข้อความต่างๆให้กับบุคลากรทั้งมหาวิทยาลัยแทนการใช้กระดาษ รวมถึงการใช้สารเคมีในการเรียนการสอนที่เลือกมาคำนวนจำนวน 10 ชนิดเท่านั้นโดยเลือกจากการเบิกจ่ายชนิดสารเคมีที่บ่อยที่สุดประกอบกับจำนวนนักศึกษาที่มีจำนวนน้อย จึงทำให้มีค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในส่วนนี้น้อยกว่ากิจกรรมอื่น ๆ

ตารางที่ 4 ผลการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของศูนย์วิทยาศาสตร์

กิจกรรม	ปริมาณการใช้ (ปี)	ปริมาณก๊าซเรือนกระจก ($kgCO_2e$)	สัดส่วนการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (ร้อยละ)
ขอบเขตที่ 1			
การใช้สารทำความสะอาด (สารเคมีจำนวน 5 ชนิด)	15.2 กิโลกรัม	10.37	64.57
การปฏิบัติงานนอกสถานที่	184 กิโลเมตร	5.69	35.43
ขอบเขตที่ 2			
พลังงานไฟฟ้า	297,890 กิโลวัตต์	173,401.77	100
ขอบเขตที่ 3			
การกำจัดขยะขององค์กรภายนอก	853.52 กิโลกรัม	774.55	2.39
การเดินทางไป-กลับระหว่างองค์กรกับที่พักอาศัย	213,498 กิโลเมตร	31,180.23	96.20
การใช้สารเคมีในการเรียนการสอน	50.11 กิโลกรัม	63.67	0.20
การใช้กระดาษ	187.5 กิโลกรัม	394.13	1.22

การวิเคราะห์ความไม่แน่นอน

การประเมินความไม่แน่นอนแสดงดังตารางที่ 4 พบว่า ข้อมูลส่วนใหญ่จัดอยู่ในระดับ 1 ซึ่งหมายถึงข้อมูลมีความไม่แน่นอนสูงและคุณภาพไม่ดี สาเหตุสำคัญคือประเทศไทยยังไม่มีฐานข้อมูลค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (EF) ที่ครอบคลุมกิจกรรมทุกรูปแบบ จึงจำเป็นต้องอ้างอิงค่าจาก แหล่งสากล เช่น IPCC หรือฐานข้อมูลต่างประเทศ เพื่อให้สามารถคำนวณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้อย่างครอบคลุมในทุกกิจกรรมภายในศูนย์วิทยาศาสตร์

ตารางที่ 5 การประเมินและจัดการความไม่แน่นอน

ขอบเขต/กิจกรรม	คะแนนการเก็บข้อมูล (Q)	คะแนนค่า EF (E)	ผลการประเมิน Q x E	ระดับคุณภาพ
ขอบเขตที่ 1				
การใช้สารทำความสะอาด	3	1	3	1
การปฏิบัติงานนอกสถานที่	3	1	3	1
ขอบเขตที่ 2				
พลังงานไฟฟ้า	3	3	9	2
ขอบเขตที่ 3				
การกำจัดขยะขององค์กรภายนอก	3	1	3	1
การเดินทางไป-กลับระหว่างองค์กรกับที่พักอาศัย	3	1	3	1
การใช้สารเคมีในการเรียนการสอน	3	1	3	1

สรุป

1. ผลการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ในพระบรมราชูปถัมภ์พบว่ามีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกรวม 205.83 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อปี แบ่งเป็นขอบเขตที่ 1 มีปริมาณ 16.60 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ ขอบเขตที่ 2 มีปริมาณ 173,401.77 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์และขอบเขตที่ 3 มีการปล่อย 32,412.58 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ โดยขอบเขตที่ 2 เป็นขอบเขตที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุดรองลงมาคือขอบเขตที่ 3 และขอบเขตที่ 1

2. จากปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของขอบเขตที่ 1 พบว่ากิจกรรมที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุดคือการใช้สารทำความสะอาด รองลงมาคือ การปฏิบัติงานนอกสถานที่ มีปริมาณ 10.37 และ 5.69 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ตามลำดับ ขณะที่กิจกรรมการใช้ไฟฟ้าจากขอบเขตที่ 2 มีปริมาณมากที่สุดคือ 173,401.77 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ และขอบเขตที่ 3 ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุดมาจากกิจกรรมการเดินทางไป-กลับระหว่างองค์กรกับที่พักอาศัยของบุคลากร รองลงมาคือการกำจัดขยะขององค์กรภายนอก การใช้กระดาษ และการใช้สารเคมีในการเรียนการสอน โดยมีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเท่ากับ 31,180.23 774.55 394.13 และ 63.67 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ตามลำดับ

ข้อเสนอแนะ

1. จากผลการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของศูนย์วิทยาศาสตร์พบว่า การใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นกิจกรรมที่ก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในปริมาณสูงที่สุด ดังนั้น ศูนย์วิทยาศาสตร์ควรดำเนินการกำหนดมาตรการเพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้าอย่างเป็นระบบ โดยอาจเริ่มจากการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของอุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น การบำรุงรักษาเครื่องปรับอากาศอย่างสม่ำเสมอ การเปลี่ยนมาใช้หลอดไฟฟ้าประหยัดพลังงาน (LED) การตั้งอุณหภูมิของเครื่องปรับอากาศให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมกับสภาพอากาศ (เช่น 25°C) ตลอดจนการกำหนดระเบียบการเปิด–ปิดเครื่องใช้ไฟฟ้าอย่างเป็นเวลา นอกจากนี้ การส่งเสริมความรู้ ความเข้าใจ และการมีส่วนร่วมของนักศึกษาและบุคลากรในกิจกรรมด้านการอนุรักษ์พลังงาน ถือเป็นอีกแนวทางสำคัญในการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการใช้พลังงานภายในองค์กรไปในทิศทางที่ยั่งยืนมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้เพื่อให้เกิดผลสัมฤทธิ์ในระยะยาว มหาวิทยาลัยควรสนับสนุนให้มีการนำพลังงานหมุนเวียนมาใช้ในหน่วยงานภายใน เช่น การติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV) บนหลังคาอาคาร (Rooftop Solar) เพื่อเป็นแหล่งพลังงานทางเลือก และควบคู่กับการปลูกต้นไม้เพื่อเพิ่มพื้นที่สีเขียวในมหาวิทยาลัย ซึ่งจะช่วยดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จากบรรยากาศ และสร้างสภาพแวดล้อมที่เอื้อต่อการเรียนรู้และสุขภาวะที่ดีของผู้ใช้อาคาร การดำเนินมาตรการเหล่านี้จะไม่เพียงแต่ช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของศูนย์วิทยาศาสตร์เท่านั้น แต่ยังเป็นแนวทางในการเสริมสร้างความเป็นองค์กรที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Green Organization) และสนับสนุนเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืนในระดับมหาวิทยาลัยอย่างแท้จริง

2. การประเมินในครั้งนี้นับเป็นการดำเนินการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของศูนย์วิทยาศาสตร์เป็นครั้งแรก ซึ่งยังมีข้อจำกัดในด้านข้อมูลประกอบบางประการที่ไม่สามารถนำมารวมในการคำนวณได้ในขณะนี้ ดังนั้น เพื่อเพิ่มความถูกต้อง ครอบคลุม และสามารถเปรียบเทียบผลได้ในระยะยาว ควรมีการวางแผนการเก็บรวบรวมข้อมูลในแต่ละขอบเขต (Scope) ให้มีความละเอียดและครบถ้วนมากยิ่งขึ้นในการศึกษาครั้งถัดไป ตัวอย่างของข้อมูลที่ควรจัดเก็บเพิ่มเติม ได้แก่ การติดตั้งมาตรวัดน้ำแยกตามอาคารเพื่อประเมินการใช้น้ำอย่าง

เฉพาะเจาะจง การจัดการขยะอย่างเป็นระบบ โดยเฉพาะการคัดแยกขยะและการนำขยะกลับมาใช้ประโยชน์ก่อนเข้าสู่กระบวนการกำจัด ซึ่งจะช่วยลดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการจัดการของเสีย นอกจากนี้ควรมีการเก็บข้อมูลจำนวนผู้ใช้บริการภายในอาคารอย่างละเอียด เช่น จำนวนนักศึกษาและบุคลากร รวมถึงปริมาณการใช้น้ำประจำวัน และปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมภายในอาคาร การดำเนินการดังกล่าวจะช่วยให้การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ในอนาคตมีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น และสามารถนำมาใช้เป็นข้อมูลปีฐาน (Baseline Data) สำหรับการวางแผนและดำเนินมาตรการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในระดับหน่วยงานภายในมหาวิทยาลัยได้อย่างมีประสิทธิภาพ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความอนุเคราะห์ของศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ และทุนสนับสนุนงานวิจัยปีงบประมาณ 2566 ทุนส่งเสริมนักวิจัยรุ่นใหม่จากสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยองกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ จังหวัดปทุมธานี

เอกสารอ้างอิง

เกษม จันทร์แก้ว. (2556). การจัดการสิ่งแวดล้อมแบบผสมผสาน. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ฐานข้อมูลกองการต่างประเทศ. (2566). **ความตกลงปารีส (Paris Agreement)**. สืบค้นจาก https://fad.mnre.go.th/th/mph/content/208

ฐิติกร หมายมั่น, สมบัติ ทีฆทรัพย์, อติกร เสรีพัฒนานนท์, และบัณฑิต รัตนไตร. (2561). การลดปริมาณคาร์บอนฟุตพริ้นท์องค์กรของมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย. **วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**. 12(2), 195-209.

ฟาเดีย เชิญถนอมวงศ์, และธนพิพัฒน์ สัมพันธมาศ. (2567). การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของมหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์. **Science, Technology, and Social Sciences Procedia**, (1), 1-10.

ยุทธศาสตร์ชาติ พ.ศ. ๒๕๖๑-๒๕๘๐. (2561, 13 ตุลาคม). ราชกิจจานุเบกษา. เล่มที่ 135 ตอนที่ 82 ก, หน้า 1-71.

วริศรา สิขิวัฒน์, วิภาดา ทองหอม, ศุภิสรา แขวงโสภา, ธนกฤต เนียมหอม, และวิธิดา พัฒนอิสรานุกูล. (2563). คาร์บอนฟุตพรินท์ของคณะสาธารณสุขศาสตร์มหาวิทยาลัยมหิดล วิทยาเขตพญาไท. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ววท.)**, 29(4), 604-617.

สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2563). **แผนที่นำทางการลดก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทย ปี พ.ศ. 2564 – 2573.** สืบค้นจาก https://www.onep.go.th/book/แผนที่นำทางการลดก๊าซ

สำนักงานสภาพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ. (2561). **ยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปี (พ.ศ. 2561–2580).** กรุงเทพฯ: สศช.

สุรชาติ ยาวิราช, และอรรจน์ เศรษฐบุตร. (2561). **การศึกษาการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของอาคารเรียนในมหาวิทยาลัยกรณีศึกษา คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย**. การประชุมวิชาการเทคโนโลยีอาคารด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม ครั้งที่ 5, วันที่ 29 มิถุนายน 2561 ณ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. (35-46). ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน). (2562). **แนวทางประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร**. สืบค้นจาก https://lowcarboncity.tgo.or.th/scaleup/uploads/docs/2_CFO.pdf

องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน). (2565). **ข้อกำหนดในการคำนวนและรายงานคาร์บอนฟุตพริ้นท์ขององค์กร (ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 6)**. (พิมพ์ครั้งที่ 8). กรุงเทพฯ: องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน).

Aroonsrimorakot, S., Yuwaree, C., Arunlertaree, C., Hutajareorn, R., & Buadit, T. (2013). Carbon footprint of Faculty of Environment and Resource Studies, Mahidol University, Salaya Campus. **Thailand. APCBEE Procedia**, 5, 175–180.

BBC NEWS ไทย. (2024). **ปี 2024 ปีแรกที่โลกร้อนทะลุขีดจำกัด 1.5 องศาเซลเซียส**. สืบค้นจาก https://www.bbc.com/thai/articles/c4gpm2pgj99o

González, M. C., & Rodríguez, J. A. (2022). Assessing the carbon footprint of a Colombian university campus: Towards a standardized approach. **Environmental Science and Pollution Research**, 29(5), 22119–22131.

International Organization for Standardization. (2018). **ISO 14064-1:2018 – Greenhouse gases – Part 1: Specification with guidance at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals. ISO**. Retrieved from https://www.iso.org/standard/66453.html.

Wiedmann, T., & Minx, J. (2008). **A Definition of 'Carbon Footprint'**. In C.C. Pertsova (Ed.), Ecological Economics Research Trends (pp. 1–11). Nova Science Publishers.

Kamble, N. N., & Kavathekar, B. R. (2018). Carbon Footprint of an Academic Building – A Case Study. **International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)**, 7(9), 1–4.

OPTIMIZING WORKFORCE UTILIZATION AND LINE BALANCING IN SME TIE-DYE PRODUCTION: AN MPL-WP AND MPL-NWP MODELING APPROACH

Chanokporn Smuthkalin[1] **Anan Butrat**[2*]

Received : April 2, 2025
Revised : July 26, 2025
Accepted : August 27, 2025

Abstract

This study proposed a mathematical model to optimize workforce utilization in Small and Medium-sized Enterprises (SMEs) operating multiple tie-dye production lines involving a total of 10 distinct jobs with processing times ranging from 15 to 60 minutes. Two assignment strategies were developed and compared: the Multiple Production Line with Worker Pool (MPL-WP) model, allowing workers to be flexibly assigned across production lines, and the Multiple Production Line without Worker Pool (MPL-NWP) model, restricting workers to specific lines. The models were formulated as binary integer programming problems incorporating processing time constraints, precedence relations, and takt time to ensure feasible production schedules. Using the Python-MIP optimization package, various scenarios with differing production demands and available times were solved to analyze the relationship among these factors and the required workforce size. Results were indicated that the MPL-WP model generally reduced the total number of workers needed by up to 25% compared to the MPL-NWP model, particularly under high-demand or time-constrained conditions. This has highlighted the operational benefits of worker flexibility in improving labor efficiency and reducing costs. Moreover, the findings were provided actionable insights for SMEs seeking to enhance productivity despite limited resources and fluctuating demands, reinforcing the practicality and relevance of flexible assignment models in real-world production planning.

Keywords: Assignment model, Binary integer programming, SME, Tie-dye production, Workforce optimization

---

[1] *Department of Technology Management, Faculty of Industrial Technology, Valaya Alongkorn Rajabhat University under the Royal Patronage, e-mail: chanokporn.s@vru.ac.th*
[2] *Department of Industrial Management Engineering, Faculty of Industrial Technology, Valaya Alongkorn Rajabhat University under the Royal Patronage, e-mail: anan.but@vru.ac.th*
** Corresponding author, e-mail: anan.but@vru.ac.th*

Introduction

In the vibrant world of Small and Medium-sized Enterprises (SMEs), particularly those involved in the textile industry, efficiency and resource utilization are paramount. This paper introduces a mathematical model that addresses these challenges through a job assignment approach, specifically designed for two similar production lines involved in the coloring process of tie-dye. The products of this SME are categorized into two color series: the multi-color series and the Signature Blue series, as shown in Figure 1.

(a) (b)

Figure 1 (a) Signature Blue series, (b) Multi-color series

To produce a tie-dye shirt in both series, the process begins with the tying of the fabric, a crucial step that determines the pattern and design of the final product. The fabric is tied in a specific manner to achieve a square pattern, a popular design in tie-dye textiles. Next, the dye is prepared. For the multi-color series, a mixture of blue, orange, yellow, and purple dyes is used—each in equal proportions (1 unit each)—to create a vibrant and balanced color palette. For the Signature Blue series, a single blue dye is used, resulting in a monochromatic yet striking design. The mixed dye is then injected into the fabric. This step requires precision and care to ensure that the dye penetrates the fabric evenly while maintaining the integrity of the square pattern. Finally, the tie-dye tools are removed, and the fabric is hung to dry. This step allows the dye to set and the pattern to emerge clearly.

Throughout this process, workers play a central role in each stage. From fabric tying and dye preparation to injection and drying, these tasks are performed manually and require skill, timing, and attention to detail. Any inefficiency in task allocation—such as assigning too many jobs to one worker or leaving others underutilized—can lead to production delays, reduced quality, and unnecessary labor costs. This is especially problematic for SMEs, where the

workforce is limited and demand may vary across products. As such, effective worker assignment is not just a matter of efficiency—it is critical for the viability and sustainability of operations. Given these challenges, the development of an optimization model becomes essential. This study proposes mathematical models that minimize the number of workers required while ensuring all production tasks are completed accurately and on time. The models are structured to address key constraints such as takt time, task precedence, and job completeness. The uniqueness of our models lies in their adaptability to handle the complexities introduced by variations in pattern and color in the tie-dye process, despite the shirts undergoing the same set of production steps.

The assignment problem has been widely studied across various industries, evolving from classical models focused on minimizing cost or maximizing efficiency in task assignments (Silva et al., 2021; Zain & Akbar, 2022). Studies have expanded to address more complex scenarios such as the Balanced and Unbalanced Assignment Problems, where the number of tasks and agents differs (Liu et al., 2023). Further, the Prohibited Assignment Problem (PAP), which restricts certain assignments, has been explored to reflect real-world constraints in industries requiring flexible planning (Ibrahim et al., 2024; Song & Cheng, 2022). Similarly, the Bottleneck Assignment Problem (BAP) minimizes the maximum cost in an assignment, offering solutions for industries sensitive to production delays or bottlenecks (Michael et al., 2022).

The Quadratic Assignment Problem (QAP), known for its application in facility layouts and manufacturing plant designs, has been recognized as NP-hard, with extensive research dedicated to its complexity and solution methods (Misevičius et al., 2024). The Generalized Assignment Problem (GAP) extends these principles by allowing agents to handle multiple tasks within capacity constraints, which is highly relevant to SMEs managing diverse production demands (Baldé et al., 2021). Multi-objective approaches further refine the assignment problem by balancing criteria such as cost, time, and worker satisfaction, as demonstrated in fuzzy and stochastic models (Beaula & Saravanan, 2022; Ulutaş et al., 2023). The incorporation of these models into transportation and routing problems, such as the Traveling Salesman Problem (TSP) and the Vehicle Routing Problem (VRP), has expanded their applications to logistics and production scheduling (Alanzi & Menai, 2025; Bogyrbayeva et al., 2022). Additionally, the Air

Crew Assignment Problem showcases practical use in complex human resource scheduling (Kushwaha & Sen, 2025).

Despite this rich body of research, few studies specifically address the challenges faced by SMEs operating multiple production lines. While studies in scheduling (Pinedo, 2022; Jansen et al., 2022), flexible manufacturing systems (Weckenborg et al., 2024; Bouška et al., 2023), and supply chain management (Kumar et al., 2023; Schoenfelder et al., 2025) offer relevant insights, they often assume large-scale industrial settings. SMEs face distinct constraints, such as limited workforce, product variation, and fluctuating demand, which require specialized models. Recent research emphasizes the importance of sustainability and resource optimization in production systems (Jamwal et al. 2021), aligning with operational strategies discussed in production management (Rajeev et al., 2017).

However, while existing studies on the assignment problem touch on workforce optimization, line balancing, and pooling strategies, they haven't merged these techniques. Moreover, their application to Small and Medium-sized Enterprises (SMEs) or tie-dye production is unaddressed as illustrated in Table 1.

Table 1 The studies about the assignment problem related to this study

Model / Study	Optimization		Pooling Strategies	SME	Tie-dye Production
	Workforce	Line Balancing			
Zain & Akbar (2022)	✓				
Liu et al. (2023)	✓		✓		
Ibrahim et al. (2024)	✓				
Smith & Lee (2022)	✓		✓		
Michael et al. (2022)	✓	✓			
Beaula & Saravanan (2022)	✓				
Kushwaha & Sen (2025)	✓	✓			
Pinedo (2022)	✓	✓			
Jansen et al. (2022)	✓	✓			
Bouška et al. (2023)	✓	✓			
Schoenfelder et al. (2025)	✓		✓		
Proposed Models	✓	✓	✓	✓	✓

Objectives

This study proposes two versions of the model for multiple production lines: one that allows for worker pooling (MPL-WP) and another that does not (MPL-NWP). Implemented using Python-MIP and tested across multiple scenarios of time availability and demand, the models demonstrate how job assignment efficiency can be significantly improved even within the labor and operational limits of SMEs. These models fill this gap by comparing worker pool and non-worker pool strategies to optimize workforce utilization and line balancing in SMEs with multiple tie-dye production lines.

Materials and methods

1. Multiple Production Line with Worker Pool Model (MPL-WP)

This model is designed to minimize the size of the workforce under certain assumptions. These include: the number of workers must be equal to the number of tasks, each worker can be assigned more than one task, and each job must be performed by exactly one worker. The takt time is calculated based on the total demand. This model assumes a single pool of workers, implying that all jobs from all production lines are gathered into one set. In addition, the takt time should not less than the maximum production time of all job from all production line.

Indices

I = Number of job (i = 1, 2, ..., N)

Parameter

TT = Takt time

PT_i = Processing time to produce a unit of job i

Pred = Precedence relations between jobs;

Decision variable

x_{ij} = Binary job assignment variable for worker j be assigned to job i

y_j = Binary variable to hire worker j

Objective function

$$MIN = \sum_{j=1}^{M} y_j \tag{1}$$

Constraint

$$\sum_{i=1}^{N} PT_i \times x_{ij} \leq TT \times y_j \qquad \forall\, j\ in\ J \qquad (2)$$

$$\sum_{j}^{N} x_{ij} = 1 \qquad \forall\, i\ in\ I \qquad (3)$$

$$\sum_{j}^{N} x_{sj} \times j \geq \sum_{j}^{N} x_{rj} \times j \qquad \forall\, s,r\ in\ Pred \qquad (4)$$

This model's main goal (1) is to minimize the workforce size, which in turn optimizes the use of resources. This is accomplished by a series of well-structured constraints. The first constraint (2) guarantees that the total processing time for all jobs doesn't surpass the cycle time or 100% utilization of one worker, preventing resource overuse. The second constraint (3) mandates that each job is performed only once, ensuring all tasks are finished within the production cycle. The third constraint (4) follows the predecessor constraint, preserving the order of the production sequence.

2. Multiple Production Line with non-Worker Pool Model (MPL-NWP)

This model is designed to minimize the size of the workforce for each production line under certain assumptions. These include: the number of workers must be equal to the number of tasks, each worker can be assigned more than one task, and each job must be performed by exactly one worker. The takt time is calculated based on the total demand. This model assumes a pool of workers for each production line, implying that jobs from each production line are separated into k distinct sets. In addition, the takt time should not less than the maximum production time of all job from all production line.

Indices

I = Number of job (i = 1, 2, ..., N)

K = Number of production line (i = 1, 2, ..., M)

Parameter

CT^k = Takt time of Production line k

PT_i^k = Processing time to produce a unit of job i of Production line k

$Pred^k$ = Precedence relations between jobs;

Decision variable

x_{ij}^k = Binary assignment variable for worker j be assigned to job i of production line k

y_j^k = Binary variable to hire worker j of production line k

Objective function

$$MIN = \sum_{k=1}^{M}\sum_{j=1}^{N} y_j^k \tag{5}$$

Constraint

$$\sum_{i=1}^{N} PT_i^k \times x_{ij}^k \leq CT^k \times y_j^k \qquad \forall\, j\ in\ J, k\ in\ K \tag{6}$$

$$\sum_{j}^{N} x_{ij}^k = 1 \qquad \forall\, i\ in\ I\ , k\ in\ K \tag{7}$$

$$\sum_{j}^{N} x_{sj}^k \times j \geq \sum_{j}^{N} x_{rj}^k \times j \qquad \forall\, s, r\ in\ Pred^k\ , k\ in\ K \tag{8}$$

This model's main goal (5) is to minimize the workforce size of each production line. The first constraint (6) guarantees that the total processing time for all jobs doesn't surpass the cycle time of each production line. The second constraint (7) mandates that each job of each production line is performed only once. The third constraint (8) follows the predecessor constraint, preserving the order of the sequence of each production line

3. Production Line Data

The processing times were obtained through field observations conducted at a small-to-medium-sized enterprise (SME) located in Pathum Thani province, Thailand. This SME specializes in the production of tie-dye fabric products, including both the multi-color series and the signature blue series. As Table 2, the production process for the multi-color and Signature Blue tie-dye series consists of a series of jobs that vary in complexity and processing time. For the multi-color series, the process involves fabric tying, squaring, dye mixing (blue, orange, yellow, and purple), dye injection, and drying, with processing times ranging from 15 to 60 minutes. The Signature Blue series follows a similar process, but with fewer colors, including fabric tying, squaring, dye injection, and drying, with tasks taking between 15 and 50 minutes. Each task has defined successor steps, ensuring the proper sequence of operations across two separate production lines as Figure 2.

(a) (b)

Figure 2. Precedence relations, (a) Multi-color series, (b) Signature blue series

Table 2 The information of multi-color and Signature blue production line

No. of job	Job description	Processing time	Successor	No. of Line
1	To tie the fabric (multi-color series)	25	2	1
2	To square pattern tie-dye (multi-color series)	15	3,4	1
3	To mix facbric dye of blue, orange, yellow and purple color (per 1 unit)	60	4	1
4	To inject the mixed dye to the fabric (multi-color series)	40	5	1
5	Remove the tie-dye tools and hang the fabric to dry again (multi-color series)	15	-	1
6	To tie the fabric (Signature blue)	50	7	2
7	To square pattern tie-dye (Signature blue)	30	8,9	2
8	To inject the mixed dye to the fabric (Signature blue)	20	9	2
9	To mix facbric dye of blue color (per 1 unit)	15	10	2
10	Remove the tie-dye tools and hang the fabric to dry again (Signature blue)	30	-	2

4. Scenario Experiments

These 9 scenario experiments were set to vary demand and available time on the worker size that also obtained through observations conducted at the same SME. The scenarios included variations in the demand in range of 100-200 units for Signature Blue and Multi-color products, and the available time in range of 2-6 hours as shown in Table 3. Moreover, the values of takt time are varied based on demand and available time.

Table 3 A summary of the scenario experiments

Scenarios	Demand (units)			Available time (Hours)	Takt time (sec)		
	Signature Blue	Multi-color	Total		MPL-WP	MPL-NWP	
						k=1	k=2
1	100	100	200	2	36*	72	72
2	100	100	200	4	72	144	144
3	150	100	250	4	57.6*	96	144
4	200	100	300	4	48*	72	144
5	200	150	350	4	41.14*	72	96
6	100	100	200	6	108	216	216
7	150	100	250	6	86.4	144	216
8	200	100	300	6	72	108	216
9	200	150	350	6	61.71	108	144

*These takt time less than the maximum processing time

Results and discussion

After using Python-MIP to optimize both models with the case study data, the results from the scenario experiments provided valuable insights into the relationship between demand, available time, and required worker size. Table 4 presents the optimal number of workers and their job assignments for Scenarios 2, 6, 7, 8, and 9 under two models: MPL-WP and MPL-NWP. Scenarios 1, 3, 4, and 5 are excluded, as optimal results for the MPL-WP model were not obtained in those cases.

In Scenario 2, the MPL-WP model required 5 workers: Worker A was assigned to Job 6; Worker B to Jobs 1, 2, and 7; Worker C to Job 3; Worker D to Jobs 4 and 5; and Worker E to Jobs 8, 9, and 10 as shown in Figure 3(a). In contrast, the MPL-NWP model achieved a more efficient solution with 4 workers, where Worker A handled Jobs 1 to 4, Worker B took Job 5, Worker C covered Jobs 6 to 9, and Worker D completed Job 10 as shown in Figure 3(b). In Scenario 6, MPL-WP needed 3 workers (A to Jobs 1 and 6–7, B to Jobs 2 and 8–9, and C to Jobs 3–5 and 10), while MPL-NWP used only 2 workers (A to Jobs 1–5 and B to Jobs 6–10). For Scenario 7, MPL-WP used 4 workers: Worker A handled Jobs 1, 6, and 7; Worker B took Jobs 2 and 8; Worker C was assigned Jobs 3 and 9; and Worker D took Jobs 4, 5, and 10. The MPL-NWP model used 3 workers, assigning Worker A to Jobs 1–4, Worker B to Job 5, and Worker C to Jobs 6–10. In Scenario 8, MPL-WP required 5 workers: Workers A to Job 6; B to Jobs 1, 2, and 7; C to Jobs 3

and 8; D to Jobs 4 and 5; and E to Jobs 9 and 10. MPL-NWP needed 3 workers, with Worker A assigned to Jobs 1–3, Worker B to Jobs 4–5, and Worker C to Jobs 6–10. In Scenario 9, MPL-WP required 6 workers and MPL-NWP achieved the solution with 4 workers, showing better efficiency under separate-line constraints.

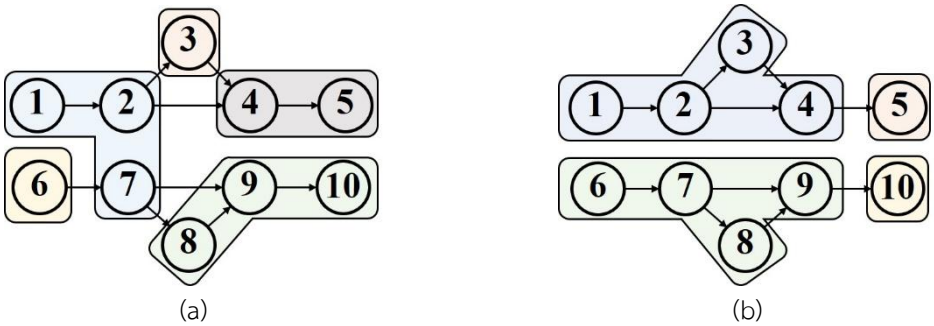


Figure 3 Optimal solution of scenario 2 (a) MPL-WP, (b) MPL-NWP

Table 4 Optimal job assignment plans

Sce.	MPL-WP Worker size	No. of job 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	MPL-NWP Worker size	No. of job 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1												6	A	A	B	C	C	D	E	E	E	F
2	5	B	B	C	D	D	A	B	E	E	E	4	A	A	A	A	B	C	C	C	C	D
3												5	A	A	B	C	C	D	E	E	E	E
4												5	A	A	B	C	C	D	D	D	D	E
5												5	A	A	B	C	C	D	D	E	E	E
6	3	A	B	B	C	C	A	A	B	C	C	2	A	A	A	A	A	B	B	B	B	B
7	4	A	B	B	D	D	A	C	C	C	D	3	A	A	A	A	B	C	C	C	C	C
8	5	B	B	C	D	D	A	B	E	E	E	3	A	A	A	B	B	C	C	C	C	C
9	6	B	B	C	D	D	A	E	E	F	F	4	A	A	A	B	B	C	C	C	C	D

After obtaining the optimal solutions from all scenarios, a comparison of worker size and labor cost was conducted across four levels of total demand: 200, 250, 300, and 350 units, as presented in Tables 5 to 8. Each table shows how different models (MPL-WP and MPL-NWP), available time, and takt time affect the efficiency of workforce utilization and overall labor cost. In addition, the labor cost was calculated based on the new minimum wage rate (July 1, 2025). For Pathum Thani province, the applicable wage rate is 372 Baht per day.

Table 5 compares the optimal worker size and labor cost for a total demand of 200 units under different available time conditions and model applications (MPL-WP and MPL-NWP).

In Case 1, using MPL-WP with only 2 hours available and a takt time of 36 seconds (which is less than the maximum processing time), the model fails to find a feasible solution due to time constraints. Case 2 applies MPL-WP with 4 hours available, requiring 5 workers and resulting in a labor cost of 1,860 Baht. In Case 3, when the available time increases to 6 hours, the same model requires only 3 workers, reducing labor cost to 1,116 Baht, demonstrating the benefit of extended production time. Cases 4 to 6 apply the MPL-NWP model. Case 4, with 2 hours available, requires 6 workers and results in the highest labor cost of 2,232 Baht. In Case 5, with 4 hours, the labor cost drops to 1,488 Baht with 4 workers. The most cost-effective result appears in Case 6, where 6 hours of available time allow the model to operate with only 2 workers, achieving the lowest labor cost of 744 Baht which is the best choice for the 200 units of total demand.

Table 6 presents the optimal worker size and labor cost for a total demand of 250 units under different available time conditions and model applications. In Case 1, using the MPL-WP model with only 4 hours of available time and a takt time of 57.6 seconds, the model could not find a feasible solution, as the takt time was less than the maximum processing time. In Case 2, still using MPL-WP but with 6 hours of available time and a takt time of 86.4 seconds, the model achieved a feasible solution with 4 workers, resulting in a labor cost of 1,488 Baht. Switching to the MPL-NWP model, Case 3 (4-hour scenario) required 5 workers, leading to a higher labor cost of 1,860 Baht, while Case 4 (6-hour scenario) reduced the required workforce to 3 workers, achieving the lowest labor cost of 1,116 Baht which is the best choice for the 200 units of total demand.

Table 7 presents the optimal worker size and labor cost for a total demand of 300 units, with different time constraints and model applications (MPL-WP and MPL-NWP). In Case 1, the MPL-WP model with only 4 hours of available time (takt time = 48 seconds) could not generate a feasible solution, as the takt time was less than the maximum processing time. In Case 2, increasing the available time to 6 hours (takt time = 72 seconds) allowed MPL-WP to produce a feasible solution with 5 workers and a labor cost of 1,860 Baht. For the MPL-NWP model, both Case 3 and Case 4 produced feasible solutions. In Case 3, with 4 hours available (takt time = 72 and 144 seconds), the model required 5 workers, matching MPL-WP in cost at

1,860 Baht. However, in Case 4, extending the available time to 6 hours (takt time = 108 and 216 seconds) reduced the workforce requirement to just 3 workers, resulting in the lowest labor cost of 1,116 Baht which is the best choice for the 200 units of total demand.

Table 8 presents the optimal worker size and labor cost for a total demand of 350 units, considering different time constraints and two model types: MPL-WP and MPL-NWP. In Case 1, the MPL-WP model with 4 hours of available time (takt time = 41.14 seconds) failed to produce a feasible solution because the takt time was shorter than the maximum processing time. However, in Case 2, increasing the available time to 6 hours (takt time = 61.71 seconds) enabled the MPL-WP model to generate a feasible solution, requiring 6 workers and resulting in a labor cost of 2,232 Baht. Under the MPL-NWP model, both Case 3 and Case 4 produced feasible solutions. In Case 3, with 4 hours available (takt times = 72 and 96 seconds), the model required 5 workers at a labor cost of 1,860 Baht. In Case 4, when the available time increased to 6 hours (takt times = 108 and 144 seconds), the optimal worker size dropped to 4, and labor cost was minimized to 1,488 Baht which is the best choice for the 200 units of total demand.

Table 5 The optimal worker size and labor cost based on 200 units of total demand

Case	Applied model	Demand (units)			Available time (Hours)	Takt time (sec)			Optimal worker size	Labor cost (Baht)
		Signature Blue	Multi-color	Total		MPL-WP	MPL-NWP k=1	MPL-NWP k=2		
1	MPL-WP	100	100	200	2	36*			None	None
2					4	72			5	1,860
3					6	108			3	1,116
4	MPL-NWP				2		72	72	6	2,232
5					4		144	144	4	1,488
6					6		216	216	2	744

*These takt time less than the maximum processing time

Table 6 The optimal worker size and labor cost based on 250 units of total demand

Case	Applied model	Demand (units)			Available time (Hours)	Takt time (sec)			Optimal worker size	Labor cost (Baht)
		Signature Blue	Multi-color	Total		MPL-WP	MPL-NWP k=1	MPL-NWP k=2		
1	MPL-WP	150	100	250	4	57.6*			None	None
2					6	86.4			4	1,488
3	MPL-NWP				4		96	144	5	1,860
4					6		144	216	3	1,116

*These takt time less than the maximum processing time

Table 7 The optimal worker size and labor cost based on 300 units of total demand

Case	Applied model	Demand (units)			Available time (Hours)	Takt time (sec)			Optimal worker size	Labor cost (Baht)
		Signature Blue	Multi-color	Total		MPL-WP	MPL-NWP			
							k=1	k=2		
1	MPL-WP	200	100	300	4	48*			None	None
2					6	72			5	1,860
3	MPL-NWP				4		72	144	5	1,860
4					6		108	216	3	1,116

*These takt time less than the maximum processing time

Table 8 The optimal worker size and labor cost based on 350 units of total demand

Case	Applied model	Demand (units)			Available time (Hours)	Takt time (sec)			Optimal worker size	Labor cost (Baht)
		Signature Blue	Multi-color	Total		MPL-WP	MPL-NWP			
							k=1	k=2		
1	MPL-WP	200	150	350	4	41.14*			None	None
2					6	61.71			6	2,232
3	MPL-NWP				4		72	96	5	1,860
4					6		108	144	4	1,488

*These takt time less than the maximum processing time

In comparison to existing research, our study provides new insights into the application of assignment models tailored for small and medium-sized enterprises (SMEs) with multiple production lines—an area that remains underrepresented in current literature. Traditional assignment models, such as those discussed by Silva et al. (2021) and Zain & Akbar (2022), typically focus on optimizing cost or task efficiency under fixed and idealized conditions. However, our research extends these foundational principles by addressing the real-world challenges SMEs face, including workforce limitations, fluctuating demand, and production flexibility requirements. In particular, the integration of worker pool (MPL-WP) and non-worker pool (MPL-NWP) strategies in our study builds on the direction set by Liu et al. (2023), who introduced historical data to improve adaptability in generalized assignment contexts.

Moreover, our study contributes to the evolving literature on the Generalized Assignment Problem (GAP), particularly regarding its application in complex and capacity-constrained environments like SMEs. Smith & Lee (2022) demonstrated the potential of Lagrangian relaxation for solving reliability-oriented GAP, and our research complements this by offering a production-line-specific application using MILP. Similar to the foundational work by

Ibrahim et al. (2024) on GAP, we show that workforce allocation across tasks—within the bounds of available time and labor capacity—can lead to significant cost savings. Importantly, while much of the existing research, such as that by Baldé et al. (2021), emphasizes large-scale networks or industrial applications, our focus on SMEs addresses a clear research gap where resource optimization is more constrained yet critically important.

Additionally, this study draws a parallel between our model structure and the Quadratic Assignment Problem (QAP), a well-established model in facility layout and manufacturing optimization, as reviewed by Misevičius et al. (2024) and Baldé et al. (2021) While QAP is traditionally applied to spatial planning and layout configurations, the mathematical similarities allow us to adapt its principles to worker assignment across parallel production lines. Our approach also resonates with the flexibility frameworks proposed by Weckenborg et al. (2024), where decision models for flexible manufacturing systems (FMS) stress the importance of dynamic scheduling, line balancing, and multi-line coordination. By evaluating MPL-WP and MPL-NWP, we emphasize the operational trade-offs between resource sharing and independence—mirroring key considerations in flexible system design.

Lastly, our work addresses a persistent gap in the literature concerning the unique needs of SMEs in production scheduling and workforce planning. As Kumar et al. (2023) and Schoenfelder et al. (2025) have observed, existing research tends to emphasize large organizations or public-sector scheduling, often overlooking SMEs. By formulating a model specifically for tie-dye production lines in SMEs, we reflect the call for more sustainable and context-specific optimization strategies as emphasized by Jamwal et al. (2021) and Rajeev et al. (2017). The integration of real-world labor rates, production constraints, and the dual-model comparison provides a practical framework that supports decision-making in resource-limited SME settings.

Despite offering valuable insights, this research has several limitations that should be acknowledged. First, the optimization models (MPL-WP and MPL-NWP) were developed and tested under controlled conditions with predefined production times, demand levels, and limited variability in worker skills. This may not fully capture the dynamic and uncertain nature of real-world SME production environments, where disruptions, machine breakdowns, or last-

minute order changes can significantly affect operations. Second, the study assumes consistent worker productivity and does not account for learning curves, fatigue, or differences in individual performance, which can influence the accuracy of workforce planning. Additionally, the models were applied to a specific case involving tie-dye production lines in a single province, which may limit the generalizability of the findings to other industries or regions with different labor policies, product types, or manufacturing processes. Lastly, while the labor cost was calculated using the new minimum wage for Pathum Thani in 2025 (372 Baht/day), future changes in wage policies, labor laws, or economic conditions may impact cost-effectiveness and model applicability over time.

Conclusions

This study demonstrates the application of assignment models to optimize workforce utilization in SMEs with multiple tie-dye production lines. By comparing the worker pool (MPL-WP) and non-worker pool (MPL-NWP) strategies, the results clearly show that these models can minimize labor costs and reduce the number of required workers without compromising production goals. For example, under a demand of 300 units and 6 hours of available time, the MPL-NWP model required only 3 workers with a total labor cost of 1,116 Baht—the lowest among all scenarios. This emphasizes how properly structured assignments and sufficient available time can yield highly cost-efficient outcomes. The analysis further reveals that MPL-NWP consistently outperforms MPL-WP in scenarios where worker sharing is limited or infeasible, which is common in many SMEs. These findings offer concrete evidence that assignment models tailored to SME constraints can significantly improve labor planning. The results benefit SME managers by providing a practical decision-support tool that enhances workforce flexibility, reduces unnecessary labor costs, and aligns production capacity with fluctuating demand. This research also contributes to the growing emphasis on sustainable and resource-optimized operations in small and medium enterprises, bridging a gap in current literature that often overlooks this sector's operational complexity.

Recommendation

While this study provides valuable insights into optimizing workforce utilization in SMEs with multiple tie-dye production lines, incorporating broader perspectives into the research itself could further enrich its contributions. One limitation is the reliance on a specific case study and a fixed production structure, which may limit the generalizability of the findings across different industries or operational environments. For instance, the assumption in the MPL-NWP model that workers cannot be shared across production lines may not reflect more flexible or hybrid systems used in other contexts. Additionally, this study focused on predefined job tasks and constant worker availability, which may not capture real-world dynamics such as fluctuating demand, varying task durations, or unforeseen workforce constraints.

To address these limitations and bring new dimensions to this research, future extensions could be embedded within the current framework. For example, integrating real-time data analytics into the assignment model—such as dynamic demand updates or worker attendance—could enhance responsiveness and decision-making accuracy. Moreover, applying the proposed models to different types of SMEs, such as those in food processing or textiles, would provide a richer comparative analysis and demonstrate wider applicability. The research could also be expanded to include sustainability considerations. Incorporating green manufacturing practices, energy efficiency, or environmental impacts into workforce planning could align labor optimization with broader social and ecological goals. Additionally, the use of AI and machine learning for predictive scheduling and adaptive worker assignments would introduce an innovative layer, positioning this research at the forefront of smart manufacturing practices tailored for SMEs. These enhancements would not only strengthen the model's robustness but also open up new, interdisciplinary perspectives that make the research more relevant and impactful.

References

Alanzi, E., & Menai, M. E. B. (2025). Solving the traveling salesman problem with machine learning: A review of recent advances and challenges. **Artificial Intelligence Review**, 58(9), 267.

Baldé, M. A. M. T., Gueye, S., & Ndiaye, B. M. (2021). A greedy evolutionary hybridization algorithm for the optimal network and quadratic assignment problem. **Operational Research International Journal**, 21(3), 1663–1690.

Beaula, T., & Saravanan, S. (2022). Solution to fuzzy multi-objective assignment problems using diagonal optimal method. **Communications in Mathematics and Applications**, 13(4), 1277–1285.

Bogyrbayeva, A., Meraliyev, M., Mustakhov, T., & Dauletbayev, B. (2022). Learning to solve Vehicle Routing Problems: A survey. **arXiv**.

Bouška, M., Šucha, P., Novák, A., & Hanzálek, Z. (2023). Deep learning-driven scheduling algorithm for a single machine problem minimizing the total tardiness. **European Journal of Operational Research**, 308(3), 990–1006.

Ibrahim, N. S., Shuib, A., & Zaharudin, Z. A. (2024). Modified Hungarian model for lecturer-to-course assignment. In **AIP Conference Proceedings**, 2850(1), 080001.

Jansen, K., Klein, K. M., Maack, M., & Rau, M. (2022). Empowering the configuration-IP: New PTAS results for scheduling with setup times. **Mathematical Programming**, 195(1), 367–401.

Kumar, A., Shrivastav, S. K., Shrivastava, A. K., Panigrahi, R. R., Mardani, A., & Cavallaro, F. (2023). Sustainable supply chain management, performance measurement, and management: A review. **Sustainability**, 15(6), 5290.

Kushwaha, D. K., & Sen, G. (2025). An integrated modeling approach for multi-class individual crew scheduling in demand channels. **Computers & Industrial Engineering**, 205, 111168.

Liu, H., Zhang, H., Luo, K., Xu, Y., Xu, Y., & Tong, W. (2023). Online generalized assignment problem with historical information. **Computers & Operations Research**, 149, 106047.

Michael, E., Wood, T. A., Manzie, C., & Shames, I. (2022). Sensitivity analysis for bottleneck assignment problems. **European Journal of Operational Research**, 303(1), 159–167.

Misevičius, A., Andrejevas, A., Ostreika, A., Verene, D., & Žekiene, G. (2024). An Improved Hybrid Genetic-Hierarchical Algorithm for the Quadratic Assignment Problem. **Mathematics**, 12(23), 3726.

Jamwal, A., Agrawal, R., Sharma, M., & Giallanza, A. (2021). Industry 4.0 Technologies for Manufacturing Sustainability: A Systematic Review and Future Research Directions. **Applied Sciences**, 11(12), 5725.

Pinedo, M. L. (2022). **Scheduling: Theory, algorithms, and systems (6th ed.)**. Springer.

Rajeev, A., Pati, R. K., Padhi, S. S., & Govindan, K. (2017). Evolution of sustainability in supply chain management: A literature review. **Journal of Cleaner Production**, 162, 299-314.

Schoenfelder, J., Heins, J., & Brunner, J. O. (2025). Task assignments with rotations and flexible shift starts to improve demand coverage and staff satisfaction in healthcare. **Journal of Scheduling**, 28(3), 329–353.

Silva, A., Coelho, L. C., & Darvish, M. (2021). Quadratic assignment problem variants: A survey and an effective parallel memetic iterated tabu search. **European Journal of Operational Research**, 292(3), 1066–1084.

Smith, A., & Lee, B. (2022). Solving the reliability-oriented generalized assignment problem by Lagrangian relaxation and Alternating Direction Method of Multipliers. **Expert Systems with Applications**, 205, 117644.

Ulutaş, A., Kiridena, S., Shukla, N., & Topal, A. (2023). A new fuzzy stochastic integrated model for evaluation and selection of suppliers. **Axioms**, 12(12), 1070.

Weckenborg, C., Schumacher, P., Thies, C., & Spengler, T. S. (2024). Flexibility in manufacturing system design: A review of recent approaches from operations research. **European Journal of Operational Research**, 315(2), 413–441.

Zain, I., & Akbar, Y. R. (2022). Division of tasks using the Hungarian method. **Journal of Business and Management Review**, 3(8), 502–514.

การออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์และระบบติดตามสมรรถนะของระบบแบบเรียลไทม์ด้วยเทคโนโลยีไอโอที

นฤมล วันน้อย[1] วาสนา วงศ์ษา[2] นิสิต องอาจ[3] ชัยสิทธิ์ วันน้อย[4*]

Received : March 14, 2025
Revised : May 20, 2025
Accepted : August 27, 2025

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์และระบบติดตามสมรรถนะของระบบแบบเรียลไทม์ด้วยเทคโนโลยีไอโอที โดยมีวัตถุประสงค์หลักคือการออกแบบและสร้างระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์พร้อมระบบติดตามการใช้พลังงานไฟฟ้าแบบเรียลไทม์ และประเมินประสิทธิภาพของระบบติดตามสมรรถนะ โดยระบบติดตามนี้ได้ออกแบบให้สามารถตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า รวมถึงข้อจำกัดต่าง ๆ เช่น กระแสไฟฟ้าสูงสุด กำลังไฟฟ้าติดตั้ง และเปอร์เซ็นต์การใช้โหลด ข้อมูลทั้งหมดจะแสดงผลผ่านสมาร์ทโฟนโดยใช้แอพพลิเคชันบลิง ผู้ใช้สามารถติดตามสถานะของระบบได้แบบเรียลไทม์ การออกแบบระบบยังคำนึงถึงการทำงานที่เสถียรและความเที่ยงตรงในการตรวจวัดค่าไฟฟ้า ผลการศึกษาพบว่าค่าความผิดพลาดเฉลี่ยในการตรวจวัดกระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 0.99% และแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยมีค่าความผิดพลาด 0.15% ทำให้การตรวจวัดมีความแม่นยำสูง ระบบนี้ถูกนำไปทดสอบกับการใช้งานจริงในการจ่ายพลังงานให้กับระบบส่องสว่างไล่แมลงในภาคเกษตรกรรม ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์สามารถจ่ายพลังงานได้ครอบคลุมช่วงเวลาการทำงานของโหลด นอกจากนี้ระบบติดตามสมรรถนะการผลิตไฟฟ้านี้ช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถตรวจสอบความสามารถในการผลิตไฟฟ้าและประเมินขีดความสามารถของระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถวางแผนการใช้พลังงานตามปริมาณโหลดที่ต้องการได้อย่างแม่นยำ

คำสำคัญ: เซลล์แสงอาทิตย์ เทคโนโลยีไอโอที ระบบติดตามสมรรถนะแบบเรียลไทม์

---

[1] อาจารย์ประจำหลักสูตร สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ อีเมล: narumon.wan@pcru.ac.th
[2] อาจารย์ประจำหลักสูตร สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ อีเมล: wassanaw@pcru.ac.th
[3] อาจารย์ประจำหลักสูตร สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ อีเมล: nisit_fang@hotmail.com
[4] อาจารย์ประจำหลักสูตร สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ อีเมล: chaisit.w@pcru.ac.th
** ผู้นิพนธ์หลัก อีเมล: chaisit.w@pcru.ac.th*

A DESIGN OF A SOLAR PHOTOVOLTAIC POWER GENERATION SYSTEM AND REAL-TIME PERFORMANCE MONITORING SYSTEM USING IoT TECHNOLOGY

Narumon Wannoi[1] Wassana Wongsa[2] Nisit Ong-Art[3] Chaisit Wannoi[4*]

Abstract

This article presented the design of a solar photovoltaic power generation system and real-time performance monitoring system using IoT technology. The primary objective was to design and develop a solar-power generation system equipped with a real-time monitoring system of energy consumption as well as to evaluate the efficiency of the performance monitoring system. The monitoring system was designed to measure voltage, electrical current and power, including various constraints, for examples; maximum current, installed power capacity, and load percentage. All data would be displayed on a smartphone using the Blynk application, allowing users to monitor the status of system as real time. The system design was also emphasized on a stable operation and accurate measurement of electrical current. The research results were indicated that the average error of electrical current measurement was 0.99%, while the average error of voltage measurement was 0.15%, demonstrating high accuracy. The system was tested in real-situation applications by supplying power to an insect-repellent lighting system used in agriculture. The test results showed that the solar photovoltaic power generation system could provide sufficient energy covering the operational period of the load. Furthermore, the performance monitoring system of electrical-power generation enabled users to verify power-generation capabilities and evaluate capacity of system efficiently. It also helped users to precisely plan an energy consumption based on load demand.

Keywords: Solar Photovoltaic, IoT Technology, Real-Time Performance Monitoring System

---

[1] *Department of Electrical Engineering Technology, Faculty of Agricultural and Industrial Technology, Phetchabun Rajabhat University, e-mail: narumon.wan@pcru.ac.th*

[2] *Department of Computer Engineering, Faculty of Agricultural and Industrial Technology, Phetchabun Rajabhat University, e-mail: wassanaw@pcru.ac.th*

[3] *Department of Electrical Engineering Technology, Faculty of Agricultural and Industrial Technology, Phetchabun Rajabhat University, e-mail: nisit_fang@hotmail.com*

[4] *Department of Electrical Engineering Technology, Faculty of Agricultural and Industrial Technology, Phetchabun Rajabhat University, e-mail: chaisit.w@pcru.ac.th*

** Corresponding author, e-mail : chaisit.w@pcru.ac.th*

บทนำ

ในปัจจุบันพลังงานไฟฟ้านั้นมีส่วนสำคัญเป็นอย่างมากในการพัฒนาระบบการเกษตรเพื่อพัฒนาและเพิ่มผลผลิต ซึ่งจะดีเป็นอย่างยิ่งหากระบบผลิตไฟฟ้านั้นเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสมสำหรับระบบเกษตรกรรมและปศุสัตว์ในพื้นที่ห่างไกลระบบไฟฟ้า หรือระบบที่ต้องการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากภายนอกเพื่อลดต้นทุนในการผลิต แต่ในการออกแบบและติดตั้งระบบการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจะมีค่าในส่วนการลงทุนและดูแลรักษาค่อนข้างสูง ดังนั้นการออกแบบและการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์นั้นต้องออกแบบให้มีปริมาณหรือขนาดที่เหมาะสม ไม่ว่าจะเป็นกำลังการผลิต จำนวนแผงของเซลล์แสงอาทิตย์ ขนาดของชุดกักเก็บพลังงาน ซึ่งสิ่งต่าง ๆ เหล่านี้ก็คือต้นทุนในการผลิต โดยหากมีขนาดใหญ่มากก็สิ้นเปลืองเงินลงทุนและขนาดเล็กไปก็ไม่เพียงพอในการนำไปใช้งาน และที่สำคัญหากระบบที่ติดตั้งแล้ว จะมีวิธีการตรวจสอบได้อย่างไรว่าระบบนั้นยังทำงานได้เต็มประสิทธิภาพ มีอุปกรณ์ตัวไหนมีประสิทธิภาพลดลง หรือว่าเสียหาย ซึ่งการซ่อมบำรุงรักษาอุปกรณ์เหล่านี้หากกำหนดแผนบำรุงรักษาไม่เหมาะสมก็สิ้นเปลืองและถือเป็นต้นทุนอีกอย่างหนึ่ง

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาวิจัยเพื่อออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์และระบบติดตามสมรรถนะของระบบแบบเรียลไทม์ด้วยเทคโนโลยีไอโอที เพื่อการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากภายนอกและใช้ในการวางแผนการใช้พลังงานไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ โดยในการศึกษาวิจัยนั้นได้ทำการออกแบบสำหรับโรงเรือนเลี้ยงแพะในพื้นอำเภอเมืองจังหวัดเพรชบูรณ์ โดยการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ได้นำเสนอหลักการหาขนาดที่เหมาะสมเช่น ขนาดกำลังการผลิตของแผงโซลาร์เซลล์ และขนาดชุดกักเก็บพลังงาน ซึ่งขนาดของทั้งสองส่วนเป็นสิ่งสำคัญและเป็นปัจจัยพื้นฐานแรกในการออกแบบว่าจะต้องกำหนดเท่าไหร่ที่เหมาะสม โดยในการออกแบบนั้นจะต้องคำนึงถึงรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของปริมาณการใช้พลังงานของโหลดและกำลังไฟฟ้าที่กักเก็บนั้นต้องสามารถรองรับปริมาณโหลดในช่วงที่ไม่มีแสงอาทิตย์ได้ ซึ่งข้อมูลเหล่านี้มีส่วนสำคัญเป็นอย่างยิ่งในการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ (ปณต ศรีภครัชต์ และคณะ, 2562) และ (อรุณรักษ์ ตันพานิช และคณะ, 2567) โดยในการศึกษาวิจัยนี้จะเริ่มศึกษาตั้งแต่รูปแบบขบวนการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์อและขบวนการทำงานชุดกักเก็บพลังงาน และศึกษารูปแบบการเปลี่ยนแปลงและปริมาณโหลดทุก ๆ ชั่วโมงในรอบวัน ซึ่งข้อมูลดังกล่าวจะถูกใช้ในการศึกษาเพื่อใช้ในการออกแบบเพื่อกำหนดขนาดกำลังผลิต กำหนดจำนวนแผงโซลาร์เซลล์ และชุดกักเก็บพลังงานให้มีความเหมาะสม

นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ยังได้ศึกษาเพื่อสร้างระบบต้นแบบในการตรวจวัดและแสดงผลสมรรถนะของระบบในการผลิตไฟฟ้าด้วยเทคโนโลยีไอโอที ซึ่งเทคโนโลยีไอโอทีนั้นได้มีการนำมาประยุกใช้ในการควบคุมและระบบติดตามผ่านระบบอินเตอร์เน็ตอย่างแพร่หลาย โดย (Chang et al., 2015) และ (นิติคม อริยพิมพ์, และชัยพร อัดโดดดร, 2565) ได้นำเทคโนโลยีไอโอทีมาประยุกต์ใช้ในระบบบ้านอัจฉริยะ และนอกจากนี้

(จักรพงษ์ โนอ๊วบ และคณะ, 2566) และ (ฉัตรชัย โกสุม และคณะ, 2022) นำมาประยุกต์ใช้ในการกำหนดกำลังไฟฟ้าและตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าในรูปแบบสมาร์ทมิเตอร์ รวมถึง (ภาคิณ มณีโชติ และคณะ, 2563) ได้มีการนำมาประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดและติดตามสมรรถนะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งในการศึกษาวิจัยนี้ได้พัฒนาระบบต้นแบบในการติดตามสมรรถนะของระบบโดยใช้เทคโนโลยีไอโอทีซึ่งประกอบไปด้วยค่าแรงดันไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้า ค่ากำลังไฟฟ้า ค่าจำกัดของกระแสไฟฟ้าของระบบ ค่าเปอร์เซ็นต์กำลังไฟฟ้าติดตั้ง และกราฟการเปลี่ยนแปลงของโหลดโดยได้ออกแบบร่วมกับแอปพลิเคชันบลิงในการแสดงผลแบบเรียลไทม์บนสมาร์ทโฟน

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

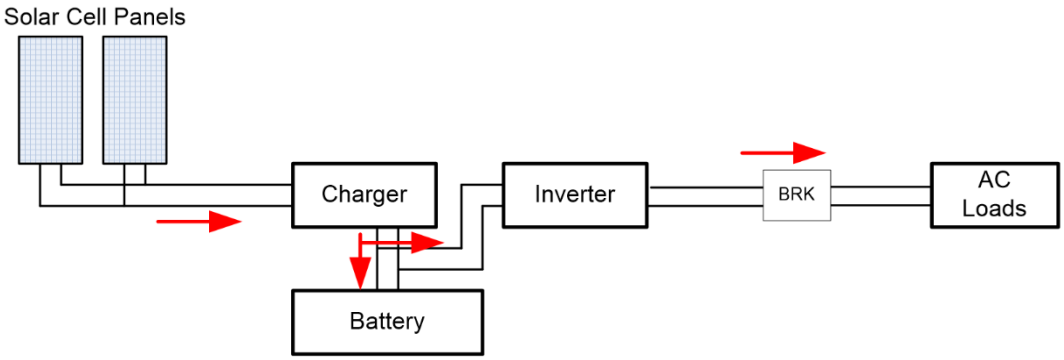
วัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้เพื่อออกแบบและสร้างระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์และระบบติดตามสมรรถนะของระบบแบบเรียลไทม์ด้วยเทคโนโลยีไอโอที และเพื่อประเมินประสิทธิภาพระบบติดตามสมรรถนะของระบบแบบเรียลไทม์ด้วยเทคโนโลยีไอโอที

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาวิจัยได้กำหนดแนวทางหรือวิธีการดำเนินการวิจัยโดยสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

1. ศึกษารูปแบบขบวนการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ขบวนการทำงานชุดกักเก็บพลังงานและระบบติดตามสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

ขั้นตอนนี้จะเป็นการศึกษารูปแบบขบวนการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ และชนิดตัวกักเก็บพลังงานเพื่อหาระบบที่เหมาะสม โดยรูปแบบการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เป็นแบบระบบอิสระ (Stand alone system) หรือระบบ Off-grid (ปณต ศรีภครัชต์ และคณะ, 2562) ที่มีแบตเตอรี่และระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้าสำหรับโหลดชนิด AC โดยระบบนี้สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 1

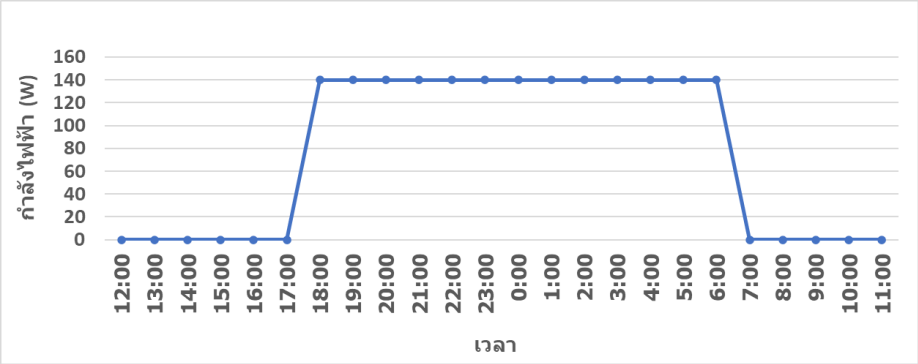


ภาพที่ 1 ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบระบบอิสระหรือระบบ Off-grid

จากภาพที่ 1 ประกอบด้วยแผงโซลาร์เซลล์ (Solar cell panels) ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานที่ได้จากแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าซึ่งพลังงานไฟฟ้าที่ได้จะถูกส่งไปยังชุดชาร์จ (Charger) เพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ในการส่งพลังงานไปเก็บประจุไว้ที่ชุดแบตเตอรี่ (Battery) ในขณะเดียวกันหากมีการใช้พลังงานไฟฟ้า ซึ่งในการออกแบบนี้ได้ออกแบบให้สามารถรองรับโหลดประเภท AC ซึ่งเป็นโหลดที่ใช้ในฟาร์มโดยในระบบนั้นจะมีอุปกรณ์อินเวอร์เตอร์ (Inverter) ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าในรูปแบบแรงดันกระแสตรงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าในรูปแบบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับได้ ดังนั้นในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์นี้สามารถเก็บพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ไว้ในแบตเตอรี่ หากต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าในขณะที่มีแสงแดดระบบสามารถดึงพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์และแบตเตอรี่ออกมาใช้งานได้ แต่ในกรณีที่ไม่มีแสงแดดระบบสามารถดึงพลังงานเฉพาะจากแบตเตอรี่ที่ได้เก็บพลังงานไว้ออกมาใช้งานได้

2. ศึกษาและเก็บข้อมูลปริมาณโหลดและรูปแบบการเปลี่ยนแปลงในรอบวัน

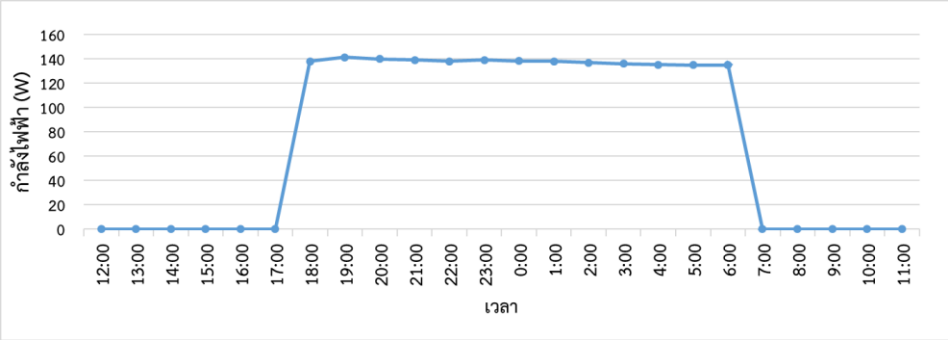
จากการศึกษาโหลดไฟฟ้าที่ใช้บริเวณพื้นที่คอกแพะซึ่งมีทั้งหมด 7 บล็อคประกอบด้วยหลอดไล่แมลงทั้งหมด 7 หลอด โดยในงานวิจัยได้ใช้เป็นหลอดแอลอีดีสีเหลืองซึ่งกำลังวัตต์ของแต่ละหลอดอยู่ที่ 20W ดังนั้นโหลดโดยรวมอยู่ที่ 140W สำหรับรูปแบบการใช้พลังงานจะอยู่ประมาณ 12 ชั่วโมงต่อวัน จากเวลาประมาณ 18:00 น. จนกระทั่งถึง 06:00 น. ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 กำลังไฟฟ้าของโหลดที่ใช้ต่อวัน

3. ออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์

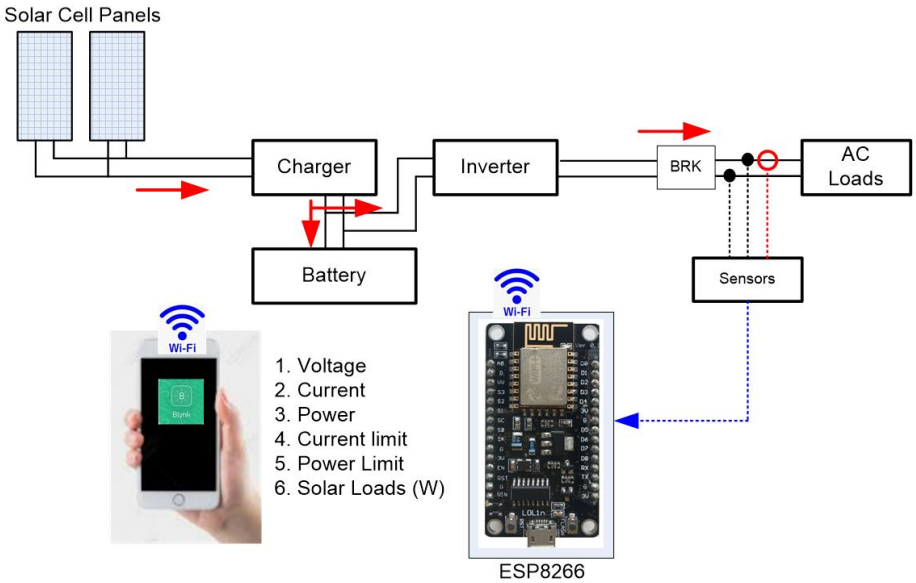
การออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจะเป็นการคำนวณเพื่อกำหนดขนาดกำลังผลิตเพื่อหาจำนวนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชุดชาร์จ อินเวอร์เตอร์ พร้อมขนาดชุดกักเก็บพลังงานที่มีความเหมาะสมสามารถรองรับการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับโหลดและครอบคลุมการใช้ประมาณ 12 ชั่วโมง ในช่วงที่ไม่มีแสงอาทิตย์ดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 พลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโหลดในรอบเวลา 12 ชั่วโมง

4. ออกแบบระบบติดตามสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเทคโนโลยีไอโอที

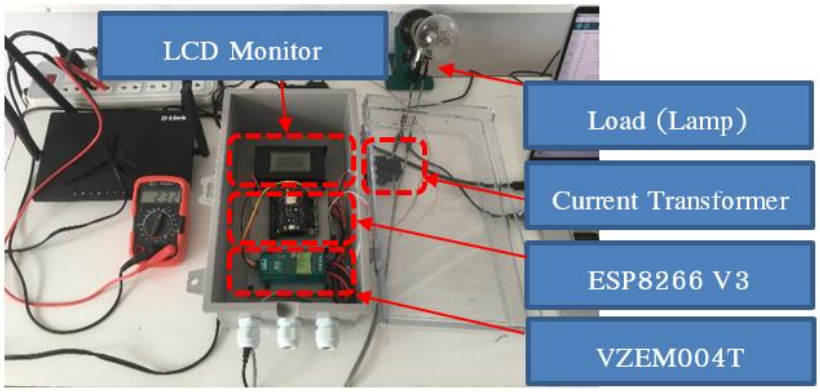
การศึกษาในขั้นตอนนี้ได้ประยุกต์ใช้เทคโนโลยีไอโอที (ฉัตรชัย โกสุม และคณะ, 2022) และ (ภาคิณ มณีโชติ และคณะ, 2563) เข้ามาใช้ในการออกแบบระบบติดตามสมรรถนะระบบการผลิตไฟฟ้าโดยแสดงผลแบบเรียลไทม์ผ่านโทรศัพท์มือถือโดยทำงานร่วมกับแอปพลิเคชันบลิง (Blynk Application) ซึ่งภาพโดยรวมการทำงานของระบบสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4



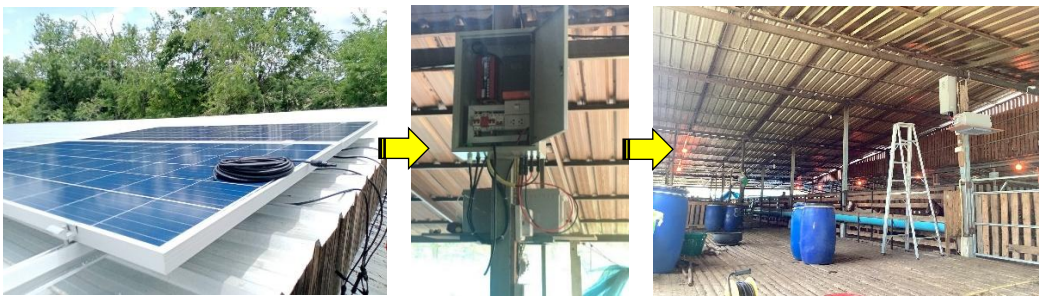
ภาพที่ 4 ระบบติดตามสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเทคโนโลยีไอโอที

จากภาพที่ 4 ในการออกแบบระบบติดตามสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเทคโนโลยีไอโอทีนั้น ได้ใช้อุปกรณ์ในการประมวลผลคือ ESP8266V3 ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สามารถเชื่อมต่อกับ

สัญญาณ Wi-Fi โดยมีอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่จ่ายไปยังโหลด ซึ่งประกอบไปด้วยชุด VZEM004T สำหรับตรวจวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้า ซึ่งรายละเอียดและส่วนประกอบชุดระบบติดตามสมรรถนะสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 5 และเมื่อระบบติดตามสมรรถนะได้รับค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าจากชุดตรวจวัดก็จะทำการประมวลผลและส่งค่าเพื่อแสดงผลบนโทรศัพท์มือถือผ่านการเชื่อมต่อสัญญาณ Wi-Fi โดยค่าที่แสดงผลจะประกอบไปด้วยแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้าของระบบ เปอร์เซ็นต์ค่าจำกัดของกระแสไฟฟ้า และเปอร์เซ็นต์ค่ากำลังไฟฟ้าติดตั้ง พร้อมกราฟการเปลี่ยนแปลงปริมาณโหลด โดยลักษณะการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ และชุดระบบติดตามสมรรถนะและโหลดไฟฟ้าสามารถแสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 5 ส่วนประกอบชุดระบบติดตามสมรรถนะ



(ก) (ข) (ค)

ภาพที่ 6 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (ก) ชุดควบคุมระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์และระบบติดตามสมรรถนะ (ข) และ การทดสอบจ่ายไฟให้โหลดไฟฟ้าสำหรับคอกเลี้ยงแพะ (ค)

5. ทดสอบและประเมินประสิทธิภาพระบบ

ในการประเมินประสิทธิภาพของระบบจะพิจารณาจากค่าความผิดพลาดในการอ่านค่า ดังสมการที่ 1

$$\%Error = \left| \frac{Value_{(Pototype)} - Value_{(Standard)}}{Value_{(Standard)}} \right| \times 100\% \quad (1)$$

เมื่อกำหนดให้ $\%Error$ คือ ค่าความผิดพลาด, $Value_{(\text{Pototype})}$ คือ ค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดต้นแบบ, $Value_{(\text{Standard})}$ คือ ค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดมาตรฐาน

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ผลการศึกษาวิจัยการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์และระบบติดตามสมรรถนะของระบบแบบเรียลไทม์ด้วยเทคโนโลยีไอโอทีนั้นสามารถแบ่งออกเป็นหัวข้อได้ดังนี้

1. ผลการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์

จากภาพที่ 2 พบว่าโหลดที่ได้ออกแบบไว้เป็นโหลดหลอดไฟฟ้าที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 220Vac ขนาด 20W จำนวน 7 หลอด โหลดโดยรวม 140W ต่อชั่วโมง ดังนั้นสามารถหาขนาดแบตเตอรี่ที่ต้องจ่ายพลังงานให้กับโหลด 140W โดยเลือกใช้แบตเตอรี่ระดับแรงดัน 12 Vdc กระแสโหลดจะอยู่ที่ 11.66 A ดังสมการที่ 2

$$I = \frac{P}{V} = \frac{140}{12} = 11.66A \quad (2)$$

โดยกำหนดให้ P คือ กำลังไฟฟ้า, V คือ แรงดันไฟฟ้า, I คือ กระแสไฟฟ้า

และหากต้องการจ่ายโหลด 12 ชั่วโมง แบตเตอรี่ต้องสามารถจ่ายกระแสโดยรวมประมาณ 140Ah และที่สำคัญค่าความลึกในการใช้งานของแบตเตอรี่นั้นต้องนำมาพิจารณาเพื่อให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่นั้นสามารถใช้งานได้ยาวนานยิ่งขึ้น โดยในงานวิจัยนี้ได้กำหนดค่าความลึกในการใช้งานของแบตเตอรี่ (Dept of charge: DOC) อยู่ที่ 70 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น ค่าความจุที่ 70 เปอร์เซ็นต์ที่แบตเตอรี่ที่ต้องจ่ายโดยรวมคือ 140Ah ที่ 12 ชั่วโมง ดังนั้นค่าความจุของแบตเตอรี่โดยรวมที่ 100 เปอร์เซ็นต์อยู่ที่ 200 Ah ดังแสดงได้ดังสมการที่ 3

$$Battery\ capacity = \frac{100x140}{70} = 200\ Ah \quad (3)$$

และหากพิจารณาปริมาณแสงแดดในประเทศไทยที่สามารถผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ได้อย่างเต็มประสิทธิภาพจะอยู่ในช่วงเวลา 10:00-15:00 น. โดยประมาณ 5 ชั่วโมงต่อวัน ดังนั้นในการออกแบบชุดชาร์จแบตเตอรี่ต้องสามารถชาร์จแบตเตอรี่ให้เต็มประจุได้ภายใน 5 ชั่วโมง ดังนั้น ปริมาณโหลดหลอดไฟฟ้าใช้พลังงานไฟฟ้า 12 ชั่วโมง ใช้พลังงานไฟฟ้าของแบตเตอร์รี่ไป 140 Ah หรือคิดเป็น 70 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งพลังงานไฟฟ้าของแบตเตอร์รี่จะเหลืออยู่ 60 Ah คิดเป็น 30 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นขนาดชาร์จเจอร์สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 4

$$Battery\ charger = \frac{140Ah}{5h} = 28\ A \tag{4}$$

ดังนั้น ขนาดชุดชาร์จแบตเตอรี่ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ขนาด 30A ที่ระดับ 12 Vdc ตามระดับแรงดันแบตเตอร์รี่ที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งสามารถประจุแบตเตอร์รี่กลับคืนได้ภายใน 5 ชั่วโมง หากความจุของแบตเตอรี่ขนาด 200Ah และจ่ายโหลดคงที่ที่ 11.66 A จะสามารถจ่ายโหลดได้ดังสมการที่ 5

$$\text{Hours} = \frac{200Ah}{11.66A} = 17.15\text{h} \tag{5}$$

ดังนั้น แบตเตอร์รี่นี้สามารถจ่ายโหลดได้ประมาณ 17.15 ชั่วโมง แต่ในการออกแบบนั้นได้ออกแบบให้ใช้งานเพียง 70 เปอร์เซ็นต์ของความสามารถทั้งหมดของแบตเตอร์รี่ ดังสมการที่ 6

$$\begin{aligned} 70\ \%\ \text{of Batterry Capacity} &= \frac{70x200Ah}{100} \\ &= 140\ \text{Ah} \end{aligned} \tag{6}$$

ดังนั้น จำนวนชั่วโมงในการจ่ายโหลดของแบตเตอรี่ที่ขนาด 140Ah หากจ่ายโหลดคงที่ที่ 11.66 A สามารถจ่ายโหลดได้ 12 ชั่วโมง ดังแสดงในสมการที่ 7

$$\text{Hours} = \frac{140Ah}{11.66A} = 12\text{h} \tag{7}$$

ซึ่งจากภาพที่ 2 หากมีการใช้โหลดอย่างคงที่ค่าแอมแปร์ชั่วโมงของแบตเตอร์รี่จะลดลงเรื่อย ๆ ในทุก ๆ ชั่วโมง ชั่วโมงละ 11.66 A จนกระทั่ง 12 ชั่วโมง โดยหากเริ่มเปิดโหลดตอนเวลา 18:00 น. และปิดโหลดตอนเวลา 06:00 น. ตามเวลาใช้งานจริงของเกษตรกร แบตเตอร์รี่จะเหลืออยู่ที่ 30% หรือ 60 Ah จากนั้น ณ เวลา 10:00 น. ระบบเริ่มชาร์จประจุให้กับแบตเตอร์รี่เต็มประสิทธิภาพ ซึ่งในการออกแบบในการชาร์จประจุนี้ได้

ออกแบบไว้ที่ 30A ดังนั้น ความจุของแบตเตอร์รี่ก็จะเพิ่มขึ้นมาจาก 60Ah หรือ 30% เป็น200Ah หรือ 100% โดยใช้เวลาประมาณ 5 ชั่วโมง ซึ่งแสดงการคำนวณได้ดังสมการที่ 8

$$\text{Hours}=\frac{140Ah}{30A}=4.67\text{h} \approx 5\text{h} \tag{8}$$

สำหรับการคำนวณแผงต้องสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ไม่น้อยกว่า 30A ที่แรงดันไฟฟ้า 12 Vdc ดังนั้นขนาดกำลังวัตต์ของแผงโซลาร์เซลล์นั้นสามารถหาได้ดังสมการที่ 9

$$\text{Solar Power}=12\text{x}30=360\text{W} \tag{9}$$

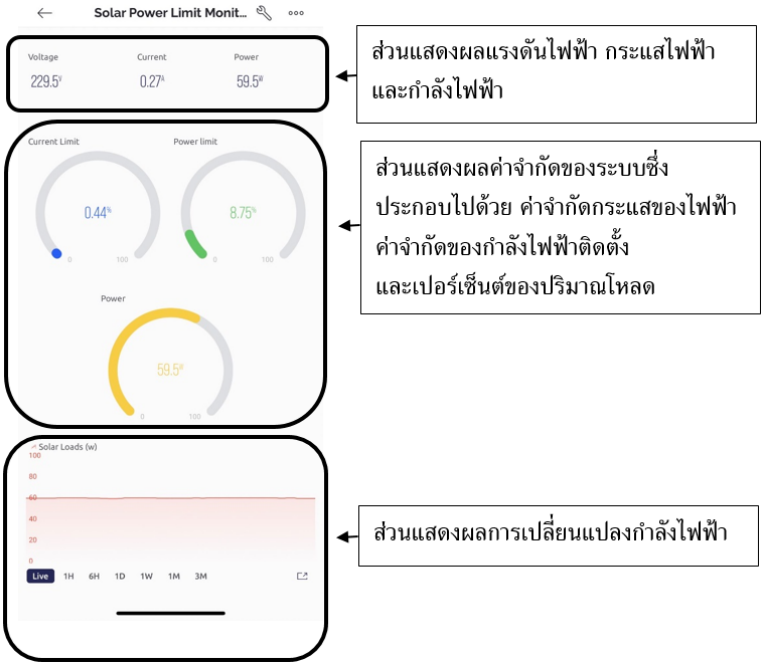
ซึ่งจะพบว่า ขนาดกำลังวัตต์ขั้นต่ำของแผงโซลาร์เซลล์อยู่ที่ 360W แต่เนื่องจากสภาพพื้นที่ของฟาร์มที่อยู่ใกล้ภูเขาจะมีโอกาศมีเมฆหมอกค่อนข้างเยอะโดยเฉพาะ ในช่วงฤดูฝนปริมาณแสงแดดจะน้อยมาก และการใช้งานในบางครั้งอาจมีการใช้พลังงานไฟฟ้าในงานอื่นในฟาร์มเล็กน้อยจึงต้องมีส่วนเผื่อสำหรับการใช้งานไฟฟ้านอกเหนือจากการชาร์จประจุ โดยในงานวิจัยจึงได้เผื่อกำลังผลิตโดยได้ออกแบบใช้แผงโซลาร์เซลล์ ขนาด 360W จำนวน 2 แผง ขนาดแรงดันประมาณ 39 Vdc 9.23A นำมาต่อขนานกันซึ่งแรงดันคงที่ที่ 39 V แต่จะได้กระแสเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 18.46A กำลังไฟฟ้าโดยรวมอยู่ที่ 720 W แต่ในการชาร์จประจุได้ออกแบบระบบให้ชาร์จประจุแบตเตอร์รี่ที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 12 Vdc ดังนั้นกระแสไฟฟ้าสูงสุดในการชาร์จจะอยู่ที่ 60A ดังแสดงในสมการที่ 10

$$\text{Max current charging}=\frac{720}{12}=60\text{A} \tag{10}$$

ซึ่งทำให้สามารถมั่นใจได้ว่ามีกำลังผลิตเพียงพอสำหรับการชาร์จประจุที่ 30 A และมีส่วนเผื่อสำหรับการใช้งานไฟฟ้านอกเหนือจากการชาร์จประจุอีกประมาณ 30A หรือ 360 W ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบขนาดชาร์จเจอร์สำหรับประจุแบตเตอรี่อยู่ที่ 30A และขนาดของอินเวอร์เตอร์อยู่ที่ 1000W

2. ผลการออกแบบระบบติดตามสมรรถนะของระบบแบบเรียลไทม์ด้วยเทคโนโลยีไอโอที

โดยในการออกแบบนั้นได้ใช้เทคโนโลยีไอโอทีโดยใช้ร่วมกับโปรแกรม Blynk ในการแสดงผลเพื่อติดตามสมรรถนะของระบบบนสมาร์ทโฟนโดยหน้าจอในการแสดงผลนั้นสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 หน้าจอแสดงผลบนสมาร์ทโฟน

โดยส่วนประกอบหลักของหน้าจอแสดงผลนั้นจะประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักคือ ในส่วนแรกจะเป็นในส่วนการตรวจวัด ค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า ในส่วนที่สองคือจะเป็นในส่วนของการแสดงค่าจำกัดของระบบ และส่วนสุดท้ายคือ กราฟแสดงผลการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าของโหลด

3. ผลการประเมินประสิทธิภาพระบบติดตามสมรรถนะระบบแบบเรียลไทม์ด้วยเทคโนโลยีไอโอที

ผลประเมินค่าความผิดพลาดการอ่านค่าของระบบนั้นได้ทำการเปรียบเทียบกับเครื่องวัดมัลติมิเตอร์รุ่น DT-9205A โดยได้ทำการเพิ่มโหลดประเภทหลอดไฟฟ้าจำนวน 5 ค่า โดยผลการสอบเทียบสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1 พบว่าผลประเมินค่าความผิดพลาดการอ่านค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.99 % โดยที่ค่า S.D. อยู่ที่ 0.62 และค่าความผิดพลาดการอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.15 % โดยที่ค่า S.D. อยู่ที่ 0.07

ตารางที่ 1 ผลการประเมินค่าความผิดพลาดการอ่านค่าของระบบ

โหลด	เครื่องมือวัดมาตรฐาน		เครื่องต้นแบบ		%ค่าความผิดพลาด	
(W)	กระแสไฟฟ้า	แรงดันไฟฟ้า	กระแสไฟฟ้า	แรงดันไฟฟ้า	กระแสไฟฟ้า	แรงดันไฟฟ้า
60	0.26	231	0.26	231.2	0	0.09
120	0.52	227	0.53	227.4	1.92	0.18
180	0.79	226	0.80	226.2	1.27	0.09
240	1.07	224	1.08	224.3	0.93	0.13
265	1.18	223	1.19	223.6	0.85	0.27
		ค่าเฉลี่ย			0.99	0.15
		S.D.			0.62	0.07

สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์และระบบติดตามสมรรถนะของระบบแบบเรียลไทม์ด้วยเทคโนโลยีไอโอทีโดยได้นำเสนอวิธีการศึกษาในการการหาขนาดที่เหมาะสมของการผลิตไฟฟ้าพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์โดยผลการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์นั้นพบว่าระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์นี้สามารถจ่ายพลังงานให้กับระบบส่องสว่างไล่แมลงได้ครอบคลุมช่วงเวลาทำงานของเกษตรกรที่ต้องการคือ 12 ชั่วโมง สำหรับผลการออกแบบระบบติดตามสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์แบบเรียลไทม์นั้นพบว่าระบบสามารถแสดงผลบนมือถือผู้ใช้งานได้ โดยประสิทธิภาพระบบติดตามสมรรถนะของระบบแบบเรียลไทม์ซึ่งในงานวิจัยนี้จะพิจารณาจากผลการประเมินค่าความผิดพลาดการอ่านค่าของระบบโดยพบว่า ค่าความผิดพลาดการอ่านค่าของระบบในส่วนของการอ่านกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.99 % โดยค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) อยู่ที่ 0.62 และค่าความผิดพลาดการอ่านค่าของระบบในส่วนของการอ่านแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.15 % โดยค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) อยู่ที่ 0.07

ข้อเสนอแนะ

จากผลการประเมินประสิทธิภาพการทำงานของระบบนั้นพบว่ายังมีค่าความผิดพลาดอยู่โดยอาจเกิดจากการเชื่อมต่อสายในวงจรและความยาวของสายสัญญาณซึ่งอาจส่งผลให้เกิดค่าความต้านทานแฝงขึ้นดังนั้นในการเชื่อมต่อควรให้มีจุดเชื่อมต่อน้อยที่สุด และความยาวของสายสัญญาณสั้นที่สุดเพื่อลดค่าความผิดพลาดในการอ่านและแสดงค่าของระบบติดตามสมรรถนะของระบบแบบเรียลไทม์ได้ และนอกจากนี้ระบบติดตามสมรรถนะ

ของระบบนั้นยังสามารถประยุกต์ใช้งานทางด้านการวางแผนด้านการอนุรักษ์พลังงานไฟฟ้าซึ่งทำให้เราสามารถออกแบบและกำหนดการจ่ายโหลดไฟฟ้าให้เหมาะสมกับกำลังไฟฟ้าของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ทุนสนับสนุนงานวิจัยพัฒนาวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) ปีงบประมาณ พ.ศ. 2566 มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ และขอบขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำต่าง ๆ และขอขอบคุณกลุ่มวิสาหกิจชุมชนผู้เลี้ยงแพะ อำเภอเมือง จังหวัดเพชรบูรณ์ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทดสอบให้กับงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

จักรพงษ์ โนอ๊วบ, รัฐกาญน์ แก้วเบี่ยง, นภาพร ตุ้มทองคำ, นฤมล วันน้อย, วรชัย ศรีเมือง, และชัยสิทธิ์ วันน้อย. (2566). เครื่องวัดกำลังไฟฟ้าอัจฉริยะสำหรับการติดตามสมรรถนะ แผงผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์. **วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม**, 5(2), 115-130.

ฉัตรชัย โกสุม, ปานฤทัย โกสุม, เกชา อยู่แก้ว, และประกิจ ธรรมนิทัศนา. (2022). เครื่องกำหนดกำลังงานไฟฟ้าสำหรับการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้า. **Journal of Science and Technology Thonburi University**. 6(1), 13-27.

นิติคม อริยพิมพ์, และชัยพร อัดโดดดร. (2565). การออกแบบและสร้างระบบไอโอทีสำหรับบ้านจาลองแบบอัจฉริยะที่ควบคุมด้วย ไมโครคอนโทรลเลอร์. **วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ**, 17(1), 29-39.

ปณต ศรีภครัชต์, จีรศักดิ์ บุญโชติ, บัญชา ศรีวิโรจน์, และศุภวัฒน์ ลาวัณย์วิสุทธิ์. (2562). การออกแบบและติดตั้งระบบแสงสว่างด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ ณ ลานปฏิบัติธรรมวัดป่าธรรมคีรี. **วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยธนบุรี (วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี)**, 3(1), 1-6.

ภาคิณ มณีโชติ, วัชระ วงค์ปัญโญ, และบุญวัฒน์ วิจารณ์พล. (2563). การพัฒนาสมาร์ตมิเตอร์สำหรับการใช้ในการจัดการพลังงานไฟฟ้าในศูนย์พลังงานมหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร. **วารสารวิชาการสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (เพื่อการพัฒนาท้องถิ่น) มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์**, 15(1), 51-66.

อรุณรักษ์ ตันพานิช, คฑาวุธ ชุมขวัญ, ศุภกร แก้วละเอียด, และอรสา มั่งสกุล. (2567). การออกแบบระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับกล้องวงจรปิดด้วยทฤษฎีการแก้ปัญหา เชิงนวัตกรรม กรณีศึกษาพื้นที่เกษตรสวนมังคุด จังหวัดนครศรีธรรมราช. **วารสารวิจัยและพัฒนา วไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์**, 19(1), 47-62.

Chang, C.-Y., Kuo, C.-H., Chen, J.-C., & Wang, T.-C. (2015). Design and implementation of an IoT access point for smart home. **Applied Sciences**, 5(4), 1882-1903.

การจำแนกคุณภาพยางแผ่นโดยใช้การประมวลผลภาพและการจัดกลุ่มแบบเคมีน

นคินทร พัฒนชัย[1] สัน นามตะคุ[2*] ศศิน เทียนดี[3]

Received : September 23, 2024
Revised : July 22, 2025
Accepted : August 27, 2025

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันเกษตรกรผู้ปลูกยางพาราประสบปัญหาการปนเปื้อนเชื้อราในยางแผ่น และการคัดแยกคุณภาพยางแผ่นต้องอาศัยประสบการณ์และทักษะเฉพาะบุคคล งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวิธีการจำแนกคุณภาพยางแผ่นโดยใช้การประมวลผลภาพและการจัดกลุ่มแบบเคมีน ซึ่งเป็นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีดิจิทัลกับงานด้านการเกษตร เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ลดระยะเวลา และสร้างความแม่นยำในการคัดแยกคุณภาพยางแผ่นให้กับเกษตรกร งานวิจัยนี้กำหนดเงื่อนไขของยางแผ่น จำนวน 4 รูปแบบ คือ 1) ยางแผ่นดิบที่มีเชื้อรา 2) ยางแผ่นดิบที่ไม่มีเชื้อรา 3) ยางแผ่นรมควันที่มีเชื้อรา และ 4) ยางแผ่นรมควันที่ไม่มีเชื้อรา โดยทำการบันทึกภาพยางแผ่นเหล่านี้ด้วยกล้องดิจิทัลใน 3 สภาพแสง คือ 1) แสงที่ควบคุม 2) แสงในห้อง และ 3) แสงกลางแจ้ง ซึ่งภาพใช้ระบบสีอาร์จีบี (RGB) จากนั้นนำภาพยางแผ่นแต่ละรูปแบบและแต่ละสภาพแสงนั้นมาตัดภาพเป็นขนาด 100 x 100 พิกเซล สภาพแสงละ 150 ภาพ ประกอบด้วยภาพสำหรับคำนวณหาค่ากลุ่มสีโดยการจัดกลุ่มแบบเคมีน จำนวน 400 ภาพ ในงานวิจัยนี้ทำการจัดกลุ่มแบบเคมีนด้วยค่า K เท่ากับ 5 ซึ่งจะได้กลุ่มค่าสีตัวแทนของเชื้อรา จำนวน 3 กลุ่ม และกลุ่มค่าสีตัวแทนของปกติ จำนวน 2 กลุ่ม และภาพสำหรับทดสอบตัวจำแนกที่ได้จากการจัดกลุ่มแบบเคมีนจำนวน 200 ภาพ ซึ่งให้ค่าความถูกต้อง (Accuracy) เท่ากับ 96.57 % ค่าความแม่นยำ (Precision) เท่ากับ 99.95 % ค่าการเรียกคืน (Recall) เท่ากับ 93.19 % และค่าความแม่นยำเชิงสมดุล (F1-Score) เท่ากับ 96.45 % ตามลำดับ

คำสำคัญ: การจัดกลุ่มข้อมูลแบบเคมีน การจำแนกคุณภาพยางแผ่น การประมวลผลภาพ

---

[1] ผู้ช่วยศาสตราจารย์, วิชาเอกคอมพิวเตอร์ สาขาวิชานวัตกรรมการจัดการเรียนรู้ คณะศึกษาศาสตร์และนวัตกรรมการศึกษา มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ อีเมล: nakintorn.pa@ksu.ac.th

[2] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร., สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสุขภาพ มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ อีเมล: san.na@ksu.ac.th

[3] อาจารย์ ดร., สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน อีเมล: sasin.t@ku.th

** ผู้นิพนธ์หลัก อีเมล: san.na@ksu.ac.th*

SHEET RUBBER QUALITY CLASSIFICATION USING IMAGE PROCESSING AND THE K-MEANS ALGORITHM

Nakintorn Pattanachai[1] San Namtaku[2*] Sasin Tiendee[3]

Abstract

The research on sheet rubber quality classification using image processing and K-Means algorithm was aimed to 1) study about the algorithm of classifying quality of sheet rubber using image-processing method 2) classify the quality of sheet rubber by using image-processing method and 3) determine the quality classification efficiency of sheet rubber by image processing method. The research methods were as follows: The first step was data collection, the second step was the analysis of need and processes of system, the third step was to design algorithm for quality classification of sheet rubber using image processing, the fourth step was the system development, the fifth step was about testing the system to correct any defects, the sixth step related to evaluate the working performance and the seventh step related to the summary of research results. Statistics for data analysis were average and percentage.

The research results were revealed that 1) the algorithm for classifying the quality of sheet rubber were as follows: 1.1) To design a method of photographing sheet rubber comprised 3 formats including control light format, room light, and outdoors. 1.2) Pre-processing images – images were cropped for creating dataset employing 150 cropped images of both raw and smoked rubber sheet in form of light patterns with size 100 x 100 pixels. But 100 images were used in the clustering process and only 50 images were used to create test data per type 1.3) To analyze the color brightness level employing clustering with K-Means algorithm. 2) The quality of sheet rubber classified by image processing has been divided into 2 groups: The first group was normal sheet rubber and the moldy sheet rubber. Overall, the evaluation of accuracy was 96.57 percent, of precision was 99.95 percent, of recall was 93.19 percent as well as of F1-Score was 96.45 percent, respectively.

Keywords: K-Means clustering, Rubber sheet classification, Image processing

---

[1] *Assistant Professor, Major in Computer, Program in Learning Management Innovation, Faculty of Education and Educational Innovation, Kalasin University, e-mail: nakintorn.pa@ksu.ac.th*

[2] *Assistant Professor Dr., Program in Science and Mathematics, Faculty of Science and Health Technology, Kalasin University, e-mail: san.na@ksu.ac.th*

[3] *Lecturer Dr., Program in Computer Science, Faculty of Liberal Arts and Science, Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus, e-mail: sasin.t@ku.th*

** Corresponding author, e-mail: san.na@ksu.ac.th*

บทนำ

ยางพาราเป็นพืชเศรษฐกิจสำคัญของประเทศไทย โดยเดิมนิยมปลูกในภาคใต้มาเป็นเวลาหลายทศวรรษ แต่ปัจจุบันได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เนื่องจากสภาพภูมิอากาศเอื้ออำนวย ทำให้ยางพาราในภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีเปอร์เซ็นต์เนื้อยางแห้งสูงกว่าภาคใต้ การส่งเสริมการปลูกยางพาราในภูมิภาคนี้เริ่มต้นอย่างเป็นทางการในปี พ.ศ. 2532 ตามนโยบายของรัฐบาล โดยมอบหมายให้สำนักงานกองทุนสงเคราะห์การทำสวนยาง (สกย.) ขยายพื้นที่ปลูกใน 14 จังหวัด เพื่อฟื้นฟูสิ่งแวดล้อม เพิ่มพื้นที่สีเขียว สร้างอาชีพและรายได้ที่มั่นคงให้แก่เกษตรกรในท้องถิ่น ส่งผลให้การปลูกยางพาราในภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องมากว่า 30 ปี

ปัจจุบันเกษตรกรผู้ปลูกยางพาราประสบปัญหาการปนเปื้อนเชื้อราในยางแผ่นดิบ และการคัดแยกคุณภาพยางยังต้องอาศัยประสบการณ์และทักษะเฉพาะบุคคล ซึ่งขาดมาตรฐานในการตรวจวัดความถูกต้อง งานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายพัฒนาการจำแนกคุณภาพยางแผ่นด้วยระบบคอมพิวเตอร์ เพื่อนำเทคโนโลยีดิจิทัลมาประยุกต์ใช้ทางด้านการเกษตรเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ลดระยะเวลา และสร้างความแม่นยำในการคัดแยกคุณภาพยางแผ่นให้กับกลุ่มเกษตรกร

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจำแนกคุณภาพแผ่นยางโดยใช้การประมวลผลภาพและการจัดกลุ่มแบบเคมีน Arifin et al. (2020) ได้เสนอวิธีการคัดแยกแผ่นยางรมควันตามการตรวจจับเชื้อราโดยใช้กระบวนการประมวลผลภาพร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมแบบ Perceptron ซึ่งสามารถจำแนกแผ่นยางรมควันออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ แผ่นยางที่มีเชื้อราและไม่มีเชื้อรา โดยใช้ข้อมูลภาพจำนวน 1,000 ภาพในการฝึกสอน และ 50 ภาพในการทดสอบ ได้ค่าความแม่นยำสูงถึง 96% และ Puttipipatkajorn et al. (2020) ได้พัฒนาวิธีการตรวจวัดปริมาณความชื้นในแผ่นยางพาราอย่างรวดเร็วและไม่ทำลายตัวอย่าง โดยใช้เทคนิค Near-Infrared Spectroscopy (NIRS) ทำการรวบรวมตัวอย่างแผ่นยางจากสวนยางในภาคตะวันออกของประเทศไทย จำนวน 300 ตัวอย่าง แบ่งเป็นชุดสอบเทียบ 200 ตัวอย่าง และชุดทำนาย 100 ตัวอย่าง และพัฒนาสมการสอบเทียบด้วยแบบจำลองการวิเคราะห์หลายรูปแบบ เช่น Partial Least Squares Regression (PLSR) และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแต่ละโมเดล ผลการศึกษาพบว่า แบบจำลอง NIRS สามารถประเมินค่าความชื้นในแผ่นยางได้อย่างแม่นยำ รวดเร็ว และเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมได้ นอกจากนี้ Limhengha & Sudsawat (2025) ได้พัฒนาระบบต้นแบบการจำแนกคุณภาพแผ่นยางโดยพิจารณาจากดัชนีความเหลือง (Yellowness Index: YI) โดยการใช้ระบบสี CIELAB และ CIE1931 ร่วมกับเทคนิคการประมวลผลภาพ (Image Processing) พบว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีที่ได้จากระบบต้นแบบกับค่ามาตรฐานอยู่ในระดับสูง ช่วยเพิ่มความแม่นยำในการคัดแยกสีของยางแผ่นแบบเรียลไทม์ได้ จะเห็นได้ว่าการจำแนกคุณภาพแผ่นยางมีความสำคัญและมีนักวิจัยที่ให้ความสนใจ ซึ่งยังไม่มีการนำการจัดกลุ่มแบบเคมีนมาใช้ในการจำแนกคุณภาพแผ่นยาง จึงทำให้เกิดการพัฒนาวิธีการจำแนกคุณภาพยางแผ่นโดยใช้การประมวลผลภาพและการจัดกลุ่มแบบเคมีนนี้ขึ้น

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาวิธีการจำแนกคุณภาพยางแผ่นโดยใช้การประมวลผลภาพและการจัดกลุ่มแบบเคมีน

2. เพื่อจำแนกคุณภาพยางแผ่นจากภาพ แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 ยางแผ่นที่มีเชื้อรา และกลุ่มที่ 2 ยางแผ่นที่ไม่มีเชื้อรา

3. เพื่อวัดประสิทธิภาพของวิธีการจำแนกคุณภาพยางแผ่นโดยใช้การประมวลผลภาพและการจัดกลุ่มแบบเคมีน

วิธีดำเนินการวิจัย

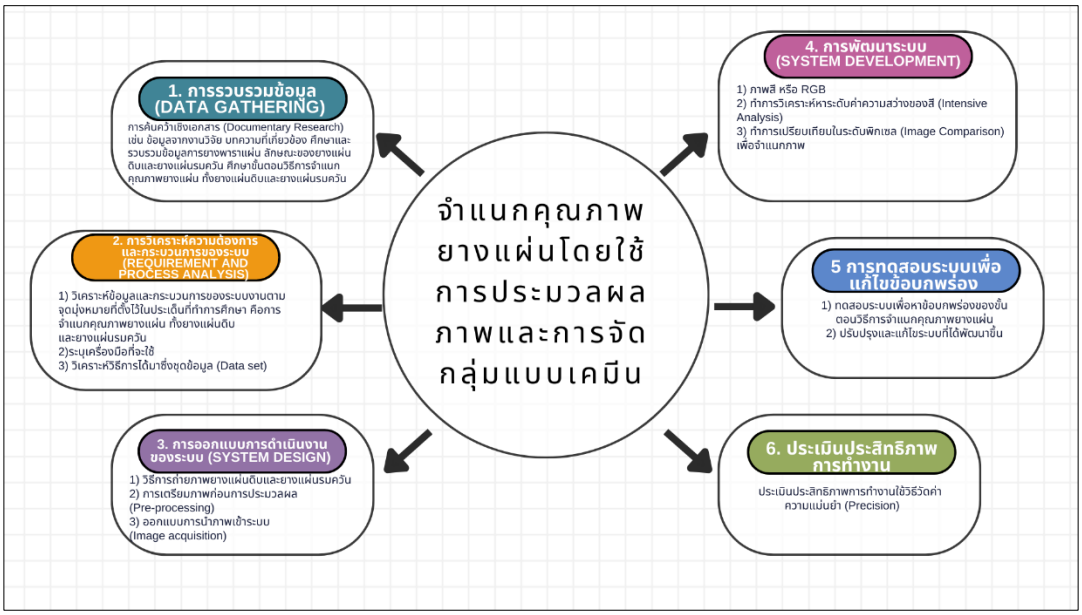
การจำแนกคุณภาพยางแผ่นโดยใช้การประมวลผลภาพและการจัดกลุ่มแบบเคมีน มีวิธีดำเนินการวิจัยดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 ขั้นการรวบรวมข้อมูล ขั้นตอนที่ 2 การวิเคราะห์ความต้องการและกระบวนการของระบบ ขั้นตอนที่ 3 ออกแบบขั้นตอนวิธีในการจำแนกคุณภาพยางแผ่นโดยใช้การประมวลผลภาพและการจัดกลุ่มแบบเคมีน ขั้นตอนที่ 4 การพัฒนาระบบ ขั้นตอนที่ 5 การทดสอบระบบเพื่อแก้ไขข้อบกพร่อง ขั้นตอนที่ 6 ประเมินประสิทธิภาพการทำงาน และขั้นตอนที่ 7 สรุปผลการวิจัย ดังภาพที่ 1 และรายละเอียดดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 ขั้นการรวบรวมข้อมูล

การค้นคว้าเชิงเอกสาร (Documentary Research) เช่น ข้อมูลจากงานวิจัย บทความที่เกี่ยวข้อง ศึกษาและรวบรวมข้อมูลการทำยางแผ่น ลักษณะของยางแผ่นดิบและยางแผ่นรมควัน (สถาบันพลาสติก, 2564; สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์กรมหาชน), 2564; สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ, 2552) ศึกษาขั้นตอนวิธีการจำแนกคุณภาพยางแผ่นดิบและยางแผ่นรมควัน

ขั้นตอนที่ 2 การวิเคราะห์ความต้องการและกระบวนการของระบบ

ทำการวิเคราะห์ข้อมูลและกระบวนการของระบบงานตามจุดมุ่งหมายที่ตั้งไว้ในประเด็นที่ทำการศึกษา คือ 1) การจำแนกคุณภาพยางแผ่นดิบและยางแผ่นรมควัน 2) ระบุเครื่องมือที่จะใช้ในขั้นตอนการศึกษาขั้นตอนวิธีการจำแนกคุณภาพยางแผ่น และ 3) วิเคราะห์วิธีการได้มาซึ่งชุดข้อมูลภาพของยางแผ่นดิบและรมควัน (Dataset)



ภาพที่ 1 วิธีดำเนินการวิจัยของการจำแนกคุณภาพยางแผ่นโดยใช้การประมวลผลภาพและการจัดกลุ่มแบบเคมีน

ขั้นตอนที่ 3 การออกแบบระบบ

ดำเนินการออกแบบระบบใน 4 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 การออกแบบวิธีการจำแนกคุณภาพยางแผ่นโดยใช้การประมวลผลภาพและการจัดกลุ่มแบบเคมีน ส่วนที่ 2 การออกแบบวิธีการแปลงข้อมูลภาพดิจิทัลของยางแผ่นดิบและยางแผ่นรมควันให้อยู่ในรูปแบบข้อมูลดิจิทัล (Digital Format) ส่วนที่ 3 การออกแบบวิธีการบันทึกภาพยางแผ่นดิบและยางแผ่นรมควัน มีจำนวน 3 สภาพแสง คือ 1) แสงที่ควบคุม โดยใช้แสงในห้องร่วมกับการใช้หลอดไฟเดย์ไลท์สำหรับสตูดิโอถ่ายภาพ ขนาดอุณหภูมิสี 5500K ความถี่ 50 เฮิรตซ์ จำนวนวัตต์เท่ากับ 150 วัตต์ เต้ารับแบบ E27 ที่มีลักษณะหลอดขั้วเกลียวและเป็นแสงสีขาว 2) แสงในห้อง เป็นแสงไฟจากหลอดนีออนที่ติดตั้งอยู่ในห้องทั่วไป และ 3) แสงกลางแจ้ง โดยบันทึกภาพในช่วงเช้าและช่วงบ่าย ซึ่งในการบันทึกภาพยางแผ่นดิบและยางแผ่นรมควัน 1 แผ่น จะบันทึกภาพทั้ง 2 ด้านของแผ่นยางในทุกสภาพแสงดังกล่าวมานี้ ส่วนที่ 4 การออกแบบวิธีการเตรียมภาพก่อนการประมวลผล (Pre-processing) การนำภาพมาตัดเพื่อสร้างชุดข้อมูล (Dataset) สำหรับใช้ในการคำนวณหากลุ่มค่าสีของยางแผ่นด้วยการจัดกลุ่มแบบเคมีน และการปรับปรับปรุงภาพ (Image Enhancement) เพื่อให้ภาพมีความเหมาะสมในการประมวลผลภาพ

ภาพที่ 2 ตัวอย่างของสตูดิโอสำหรับบันทึกภาพยางแผ่น

ขั้นตอนที่ 4 การพัฒนาระบบ

ในขั้นตอนนี้จะแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่ 1 การรับข้อมูลภาพยางแผ่นที่ได้บันทึกภาพตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ ซึ่งอยู่ในระบบสีอาร์จีบี (RGB) โดยที่แต่ละพิกเซลของภาพจะประกอบไปด้วย 3 ค่า คือ ค่าสีแดง (Red) ค่าสีเขียว (Green) และค่าสีน้ำเงิน (Blue) ขั้นตอนที่ 2 การเตรียมภาพก่อนการประมวลผล (Pre-processing) งานวิจัยนี้กำหนดเงื่อนไขของยางแผ่น จำนวน 4 รูปแบบ คือ 1) ยางแผ่นดิบที่มีเชื้อรา 2) ยางแผ่นดิบที่ไม่มีเชื้อรา 3) ยางแผ่นรมควันที่มีเชื้อรา และ 4) ยางแผ่นรมควันที่ไม่มีเชื้อรา โดยทำการบันทึกภาพยางแผ่นเหล่านี้ด้วยกล้องดิจิทัลใน 3 สภาพแสง คือ 1) แสงที่ควบคุม 2) แสงในห้อง และ 3) แสงกลางแจ้ง ซึ่งภาพใช้ระบบสีอาร์จีบี (RGB) จากนั้นนำภาพยางแผ่นแต่ละรูปแบบและแต่ละสภาพแสงนั้นมาตัดภาพเป็นขนาด 100 x 100 พิกเซล สภาพแสงละ 150 ภาพ ประกอบด้วยภาพสำหรับคำนวณหาค่ากลุ่มสีโดยการจัดกลุ่มแบบเคมีน จำนวน 100 ภาพ และภาพสำหรับทดสอบตัวจำแนกที่ได้จากการจัดกลุ่มแบบเคมีนจำนวน 50 ภาพ ขั้นตอนที่ 3 การจัดกลุ่มค่าสีของยางแผ่นโดยใช้การจัดกลุ่มแบบเคมีน ซึ่งเป็นการจัดแบ่งกลุ่มค่าสีของแผ่นยางออกเป็น K กลุ่ม และแทนค่าแต่ละกลุ่มด้วยค่าสี (R, G, B) เฉลี่ยของกลุ่ม ซึ่งใช้เป็นจุดศูนย์กลาง (Centroid) ของกลุ่มค่าสี ในการวัดระยะห่างของข้อมูลค่าสีในกลุ่มเดียวกันนั้น จะคำนวณระยะทางของค่าสี (R, G, B) กับจุดศูนย์กลางของกลุ่มค่าสี และจะถูกจัดเข้ากลุ่ม (Cluster) กับกลุ่มค่าสีที่มีจุดศูนย์กลางที่ใกล้ที่สุด โดยใช้สูตรระยะทางแบบยูคลิด (Euclidean Distance) ขั้นตอนที่ 4 การนำตัวจำแนกที่ได้จากการจัดกลุ่มแบบเคมีนทำการทดสอบกับข้อมูลภาพค่าสีตัวแทนของยางแผ่นที่ปกติและค่าสีตัวแทนของยางแผ่นที่มีเชื้อรามาใช้กับข้อมูลภาพชุดทดสอบ

ขั้นตอนที่ 5 การทดสอบระบบเพื่อแก้ไขข้อบกพร่อง

ดำเนินการทดสอบระบบเพื่อหาข้อบกพร่องของวิธีการจำแนกคุณภาพยางแผ่นโดยใช้การประมวลผลภาพและการจัดกลุ่มแบบเคมีน เพื่อทำการปรับปรุงและแก้ไขระบบที่ได้พัฒนาขึ้น

ขั้นตอนที่ 6 ประเมินประสิทธิภาพการทำงาน

ดำเนินการประเมินประสิทธิภาพการทำงานของวิธีการจำแนกคุณภาพยางแผ่นโดยใช้การประมวลผลภาพและการจัดกลุ่มแบบเคมีน และประเมินประสิทธิภาพจากเมทริกซ์ความสับสน (Confusion Matrix)

สถิติที่ใช้ในการวิจัยและวิเคราะห์ข้อมูล

ดำเนินการวิเคราะห์ค่าความถูกต้อง (Accuracy) ค่าความแม่นยำ (Precision) ค่าการเรียกคืน (Recall) และ ค่าความแม่นยำเชิงสมดุล (F1-Score) ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยแบบฮาร์โมนิกระหว่างค่าความแม่นยำ (Precision) และค่าการเรียกคืน (Recall) วิธีการคำนวณแสดงดังสมการที่ (1) ถึง (4)

$$\text{Accuracy} = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \tag{1}$$

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP+FP} \tag{2}$$

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP+FN} \tag{3}$$

$$\text{F1-Score} = 2\times\frac{\text{Precision x Recall}}{\text{Precision + Recall}} \tag{4}$$

โดยที่ TP (True Positive) คือ ผลบวกจริง (ของจริงเป็นสียางแผ่นปกติ และทำนายเป็นปกติ)

FN (False Negative) คือ ผลลบเท็จ (ของจริงเป็นสียางแผ่นปกติ แต่ทำนายเป็นเชื้อรา)

FP (False Positive) คือ ผลบวกเท็จ (ของจริงเป็นสียางแผ่นเชื้อรา แต่ทำนายเป็นปกติ)

TN (True Negative) คือ ผลลบจริง (ของจริงเป็นสียางแผ่นเชื้อรา และทำนายเป็นเชื้อรา)

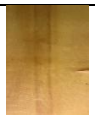
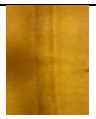
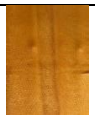
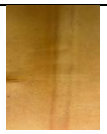
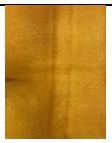
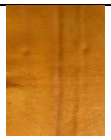
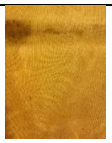
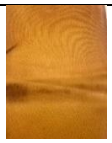
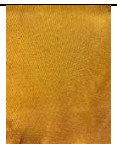
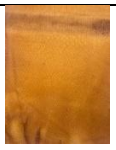
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ผลการวิจัย

1. ผลการศึกษาขั้นตอนวิธีการจำแนกคุณภาพยางแผ่นโดยใช้การประมวลผลภาพและการจัดกลุ่มแบบเคมีน มีผลการวิจัยดังนี้

1.1 การออกแบบวิธีการบันทึกภาพยางแผ่นดิบและยางแผ่นรมควันใน 3 สภาพแสง คือ แสงที่ควบคุม แสงในห้อง และแสงกลางแจ้งในช่วงเช้าและช่วงบ่าย ดังตารางที่ 1 ซึ่งจะถูกนำไปใช้ในการเตรียมภาพก่อนการประมวลผล (Pre-processing)

ตารางที่ 1 ภาพตัวอย่างของยางแผ่นดิบและยางแผ่นรมควัน

ยางแผ่น	แสดงที่ควบคุม	แสงในห้อง	แสงกลางแจ้ง
ยางแผ่นดิบ	 ยางแผ่นดิบเต็มแผ่น	 ยางแผ่นดิบเต็มแผ่น	 ยางแผ่นดิบเต็มแผ่น
	 ยางแผ่นดิบด้านหน้า	 ยางแผ่นดิบด้านหน้า	 ยางแผ่นดิบด้านหน้า
	 ยางแผ่นดิบด้านหลัง	 ยางแผ่นดิบด้านหลัง	 ยางแผ่นดิบด้านหลัง
ยางแผ่นรมควัน	 ยางแผ่นรมควันเต็มแผ่น	 ยางแผ่นรมควันเต็มแผ่น	 ยางแผ่นรมควันเต็มแผ่น
	 ยางแผ่นรมควันด้านหน้า	 ยางแผ่นรมควันด้านหน้า	 ยางแผ่นรมควันด้านหน้า
	 ยางแผ่นรมควันด้านหลัง	 ยางแผ่นรมควันด้านหลัง	 ยางแผ่นรมควันด้านหลัง

1.2 การเตรียมภาพก่อนการประมวลผล (Pre-processing) การนำภาพยางแผ่นดิบและภาพยางแผ่นรมควันมาตัดเป็นขนาด 100 x 100 พิกเซล สภาพแสงละ 150 ภาพ เพื่อสร้างเป็นชุดข้อมูล (Dataset) สำหรับคำนวณหากลุ่มค่าสีของยางแผ่นด้วยการจัดกลุ่มแบบเคมีนเพื่อสร้างตัวจำแนกและทดสอบตัวจำแนก ดังตารางที่ 2 และข้อมูลภาพที่ใช้แสดงดังภาพที่ 3 ถึง 8

ตารางที่ 2 การสร้างชุดข้อมูล (Dataset) สำหรับสร้างตัวจำแนกและทดสอบตัวจำแนก

ยางแผ่น	แสงที่ควบคุม	แสงในห้อง	แสงกลางแจ้ง	รวม	ชุดข้อมูลสำหรับสร้างตัวจำแนก	ชุดข้อมูลสำหรับทดสอบตัวจำแนก
ยางแผ่นดิบปกติ	50	50	50	150	100	50
ยางแผ่นรมควันปกติ	50	50	50	150	100	50
ยางแผ่นดิบมีเชื้อรา	50	50	50	150	100	50
ยางแผ่นรมควันมีเชื้อรา	50	50	50	150	100	50

จากตารางที่ 2 การสร้างชุดข้อมูลสำหรับสร้างตัวจำแนก จำนวน 400 ภาพ ดังภาพที่ 3 และ 4 เพื่อคำนวณหากลุ่มค่าสีของยางแผ่นปกติและกลุ่มค่าสีของยางแผ่นมีเชื้อราโดยใช้วิธีการจัดกลุ่มแบบเคมีน ในงานวิจัยนี้กำหนดใช้ค่า K เท่ากับ 5 กลุ่ม ซึ่งกลุ่มเหล่านี้จะถูกนำมาใช้เป็นตัวจำแนกว่าค่าสีใด ๆ จะเป็นค่าสีปกติหรือเป็นค่าสีของเชื้อราบนยางแผ่น และสร้างชุดข้อมูลสำหรับทดสอบตัวจำแนก จำนวน 200 ภาพ แสดงดังภาพที่ 5 ถึง 8 เพื่อนำมาทดสอบความถูกต้องของตัวจำแนกและประเมินประสิทธิภาพของตัวจำแนกต่อไป

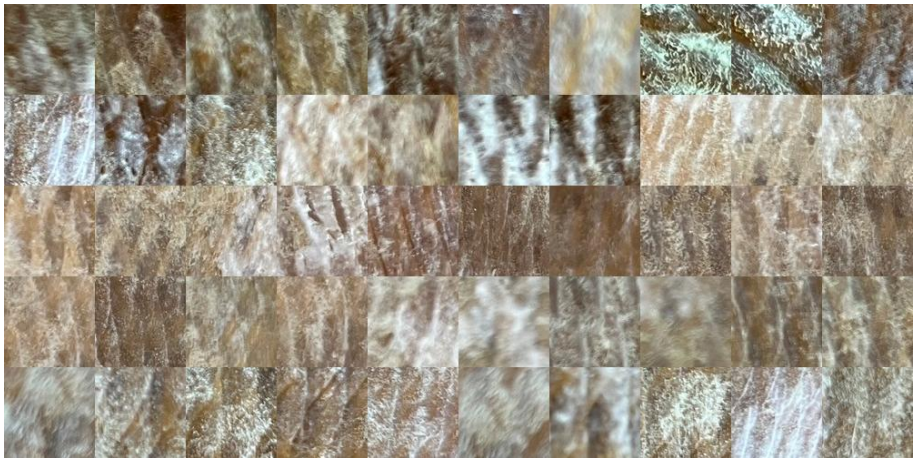
ภาพที่ 3 ภาพยางแผ่นดิบและรมควันปกติ มีขนาดภาพ 100 x 100 พิกเซล สำหรับใช้สร้างตัวจำแนก

ภาพที่ 4 ภาพยางแผ่นดิบและรมควันมีเชื้อรา มีขนาดภาพ 100 x 100 พิกเซล สำหรับใช้สร้างตัวจำแนก

ภาพที่ 5 ภาพยางแผ่นดิบปกติ มีขนาดภาพ 100 x 100 พิกเซล ใช้สำหรับการทดสอบตัวจำแนก

ภาพที่ 6 ภาพยางแผ่นรมควันปกติ มีขนาดภาพ 100 x 100 พิกเซล ใช้สำหรับการทดสอบตัวจำแนก

ภาพที่ 7 ภาพยางแผ่นดิบมีเชื้อรา มีขนาดภาพ 100 x 100 พิกเซล ใช้สำหรับการทดสอบตัวจำแนก



ภาพที่ 8 ภาพยางแผ่นรมควันมีเชื้อรา มีขนาดภาพ 100 x 100 พิกเซล ใช้สำหรับการทดสอบตัวจำแนก

2. ผลการจำแนกคุณภาพยางแผ่นโดยวิธีการประมวลผลภาพและการจัดกลุ่มแบบเคมีน

การจำแนกคุณภาพยางแผ่น ได้แบ่งคุณภาพออกเป็นยางแผ่นปกติและยางแผ่นมีเชื้อรา โดยวิธีการประมวลผลภาพและการจัดกลุ่มแบบเคมีน ซึ่งจะนำชุดข้อมูลภาพสำหรับสร้างตัวจำแนก จำนวน 400 ภาพ แต่ละภาพมีขนาด 100 x 100 พิกเซล รวมทั้งหมด 4,000,000 พิกเซล แต่ละพิกเซลประกอบด้วยค่าสีแดง (R) ค่าสีเขียว (G) และค่าสีน้ำเงิน (B) แสดงดังภาพที่ 3 และ 4 ผลลัพธ์ที่ได้จากการจัดกลุ่มแบบเคมีน จะทำให้ได้ค่าสีเฉลี่ยที่เป็นตัวแทนของค่าสียางแผ่นปกติและค่าสีเฉลี่ยที่เป็นตัวแทนยางแผ่นมีเชื้อรา ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้การจัดกลุ่มแบบเคมีน ใช้ค่า K เท่ากับ 5 ซึ่งทำให้ได้ค่าสีเฉลี่ยที่เป็นตัวแทนยางแผ่นปกติ จำนวน 2 ค่าสี งานวิจัยนี้แทนด้วยสีฟ้าและสีน้ำเงิน และค่าสีเฉลี่ยที่เป็นตัวแทนยางแผ่นมีเชื้อรา จำนวน 3 ค่าสี งานวิจัยนี้แทนด้วยสีแดง สีชมพู และสีเหลือง และจะนำชุดข้อมูลภาพสำหรับทดสอบตัวจำแนก จำนวน 200 ภาพ แต่ละภาพมีขนาด

100 x 100 พิกเซล รวมทั้งหมด 2,000,000 พิกเซล ผลลัพธ์ของการจำแนกคุณภาพยางแผ่นโดยวิธีการประมวลผลภาพและการจัดกลุ่มแบบเคมีนแสดงดังตารางที่ 3 และประเมินประสิทธิภาพจากเมทริกซ์ความสับสน (Confusion Matrix) แสดงดังตารางที่ 4 โดยผลการทดสอบตัวจำแนกโดยใช้ภาพยางแผ่นดิบและรมควันที่ปกติแสดงดังภาพที่ 9 และ 10 และผลการทดสอบตัวจำแนกโดยใช้ภาพยางแผ่นดิบและรมควันมีเชื้อรา แสดงดังภาพที่ 11 และ 12 ซึ่งภาพดังกล่าวนี้เป็นการนำภาพที่มีขนาด 100 x 100 พิกเซลมาเรียงต่อกัน

ตารางที่ 3 ผลการจำแนกคุณภาพยางแผ่นโดยวิธีการประมวลผลภาพและการจัดกลุ่มแบบเคมีน

กรณีการทดสอบ	ผลการทดสอบ
TP (True Positive)	931,899
FN (False Negative)	68,101
FP (False Positive)	427
TN (True Negative)	999,573

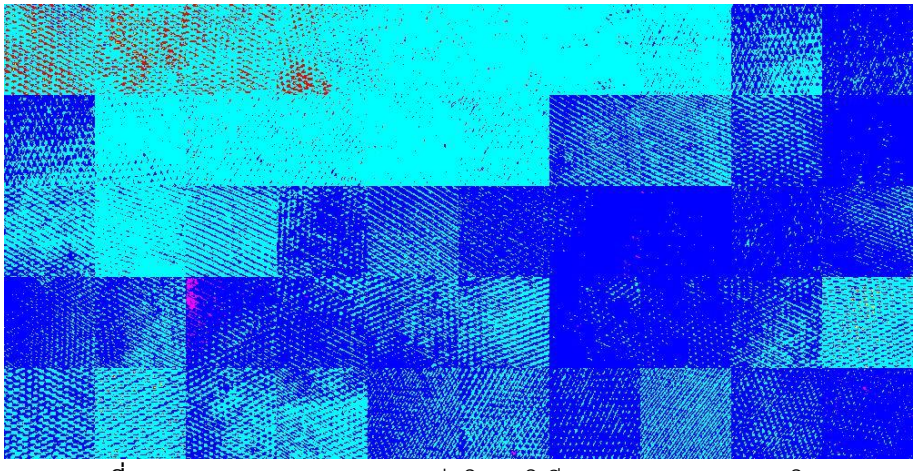
จากตารางที่ 3 การจำแนกคุณภาพยางแผ่น ได้แบ่งคุณภาพออกเป็นยางแผ่นปกติและยางแผ่นมีเชื้อราโดยใช้การประมวลผลภาพและการจัดกลุ่มแบบเคมีน จากการทดสอบจำนวน 2,000,000 พิกเซล พบว่า TP (True Positive) คือ ผลบวกจริง (ของจริงเป็นสียางแผ่นปกติ และทำนายเป็นปกติ) มีค่าเท่ากับ 931,899 พิกเซล FN (False Negative) คือ ผลลบเท็จ (ของจริงเป็นสียางแผ่นปกติ แต่ทำนายเป็นเชื้อรา) มีค่าเท่ากับ 68,101 พิกเซล FP (False Positive) คือ ผลบวกเท็จ (ของจริงเป็นสียางแผ่นเชื้อรา แต่ทำนายเป็นปกติ) มีค่าเท่ากับ 427 พิกเซล และTN (True Negative) คือ ผลลบจริง (ของจริงเป็นสียางแผ่นเชื้อรา และทำนายเป็นเชื้อรา) มีค่าเท่ากับ 999,573 พิกเซล นำผลการทดสอบนี้ไปใช้ในการประเมินประสิทธิภาพด้วยเมทริกซ์ความสับสน (Confusion Matrix) ต่อไป

ตารางที่ 4 ผลการประเมินประสิทธิภาพด้วยเมทริกซ์ความสับสน (Confusion Matrix)

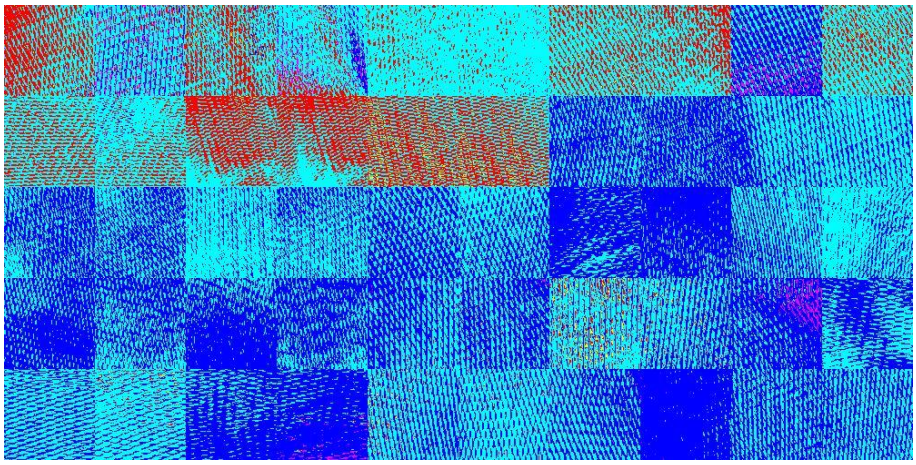
การประเมิน	ร้อยละ
ค่าความถูกต้อง (Accuracy)	96.57
ค่าความแม่นยำ (Precision)	99.95
ค่าการเรียกคืน (Recall)	93.19
ค่าความแม่นยำเชิงสมดุล (F1-Score)	96.45

จากตารางที่ 4 ผลการประเมินประสิทธิภาพของการจำแนกคุณภาพยางแผ่นโดยใช้การประมวลผลภาพและการจัดกลุ่มแบบเคมีน มีค่าความถูกต้อง (Accuracy) เท่ากับ ร้อยละ 96.57 ค่าความแม่นยำ

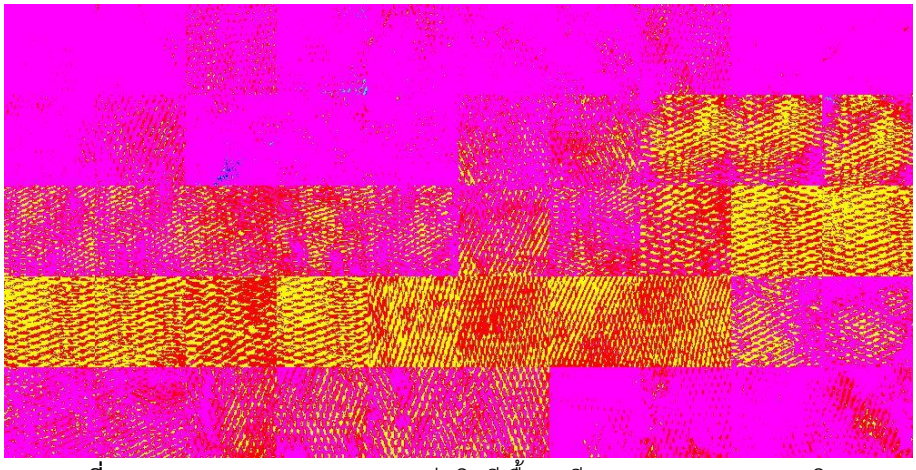
(Precision) เท่ากับ ร้อยละ 99.95 ค่าการเรียกคืน (Recall) เท่ากับ ร้อยละ 93.19 และค่าความแม่นยำเชิงสมดุล (F1-Score) เท่ากับ ร้อยละ 96.45



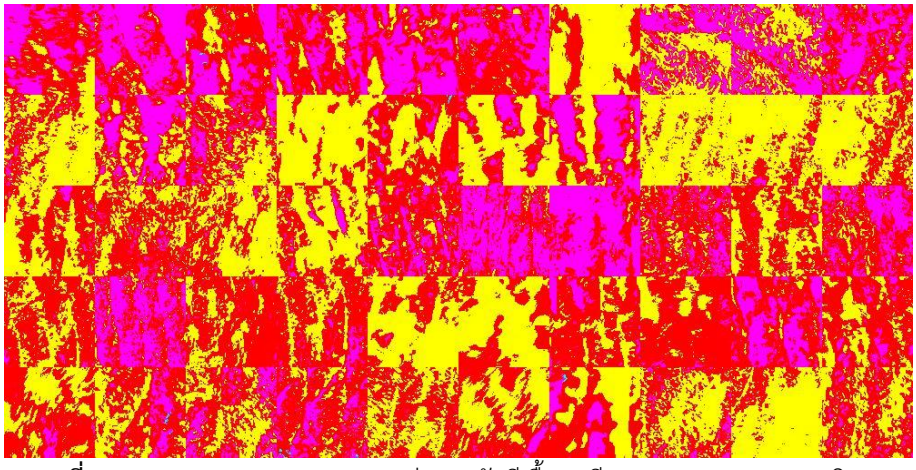
ภาพที่ 9 ผลการทดสอบของภาพยางแผ่นดิบปกติ มีขนาดภาพ 100 x 100 พิกเซล



ภาพที่ 10 ผลการทดสอบของภาพยางแผ่นรมควันปกติ มีขนาดภาพ 100 x 100 พิกเซล



ภาพที่ 11 ผลการทดสอบของภาพยางแผ่นดิบมีเชื้อรา มีขนาดภาพ 100 x 100 พิกเซล



ภาพที่ 12 ผลการทดสอบของภาพยางแผ่นรมควันมีเชื้อรา มีขนาดภาพ 100 x 100 พิกเซล

อภิปรายผล

1. การจำแนกคุณภาพแผ่นยางโดยใช้การประมวลผลภาพและการจัดกลุ่มแบบเคมีน ดำเนินการวิจัยตามแนววัฏจักรการพัฒนาระบบ (System Development Life Cycle: SDLC) ซึ่งประกอบด้วย การรวบรวมข้อมูล วิเคราะห์ความต้องการ ออกแบบขั้นตอนวิธี พัฒนาระบบ ทดสอบ แก้ไขข้อบกพร่อง และประเมินประสิทธิภาพ ซึ่งในการออกแบบและพัฒนาวิธีการจำแนกคุณภาพแผ่นยางนั้นได้ใช้การประมวลผลภาพและการจัดกลุ่มแบบเคมี และในการประเมินผลได้ใช้การประเมินผลด้วยเมทริกซ์สับสน (Confusion Matrix) ที่น่าเชื่อถือและนิยมใช้กัน ในส่วนของการเตรียมข้อมูลภาพของงานวิจัยนี้มีแนวทางที่สอดคล้องกับงานวิจัย เรื่อง Development of calibration models for rapid determination of moisture content in rubber sheets using portable near-infrared spectrometer ของ Puttipipatkajorn et al. (2020) ได้พัฒนาวิธีการตรวจวัด

ปริมาณความชื้นในแผ่นยางพาราอย่างรวดเร็วและไม่ทำลายตัวอย่าง โดยใช้เทคนิค Near-Infrared Spectroscopy (NIRS) ทำการรวบรวมตัวอย่างแผ่นยางจากสวนยางในภาคตะวันออกของประเทศไทย จำนวน 300 ตัวอย่าง แบ่งเป็นชุดสอบเทียบ 200 ตัวอย่าง และชุดทำนาย 100 ตัวอย่าง และพัฒนาสมการสอบเทียบด้วยแบบจำลองการวิเคราะห์หลายรูปแบบ เช่น Partial Least Squares Regression (PLSR) และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแต่ละโมเดล ผลการศึกษาพบว่า แบบจำลอง NIRS สามารถประเมินค่าความชื้นในแผ่นยางได้อย่างแม่นยำ รวดเร็ว และเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในระดับไร่และโรงงาน จึงสะท้อนถึงศักยภาพของการประยุกต์เทคโนโลยีดิจิทัลการตรวจสอบและคัดแยกคุณภาพยางพาราในการทำเกษตรกรรมสมัยใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. จากผลการทดลองและภาพที่ 10 จะเห็นว่ามีค่าสีบางพิกเซลถูกทำนายว่าเป็นเชื้อรา ซึ่งสาเหตุที่เป็นเช่นนี้อาจเพราะว่า เนื่องจากบริเวณที่มีเชื้อราจะมีค่าสีค่อนข้างเข้ม หากค่าสีของแผ่นยางที่อยู่ในบริเวณแสงน้อยก็อาจจะถูกทำนายเป็นเชื้อราได้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Fibriani et al. (2017) ได้ทำการวิจัย เรื่อง Colour Based Image Processing Method for Recognizing Ribbed Smoked Sheet Grade งานวิจัยนี้เสนอเทคนิคการประมวลผลภาพด้วยสีเพื่อจดจำเกรดยางแผ่นรมควัน (RSS) เพื่อให้กระบวนการคัดแยก RSS ได้รวดเร็วยิ่งขึ้นแม่นยำกว่าแบบดั้งเดิม ภาพแผ่น RSS ที่กล้องจับไว้จะถูกแปลงให้เป็นภาพระดับสีเทาเพื่อลดความซับซ้อนในการจดจำสนิมและเชื้อราบนแผ่น RSS จากนั้นภาพระดับสีเทาจะถูกแปลงเป็นภาพขาวดำ (Binary) โดยใช้ค่าเกณฑ์ที่ได้รับจากสีอ้างอิง RSS1 การจดจำเกรดถูกกำหนดโดยการนับร้อยละของพิกเซลสีขาว ผลปรากฏว่าระบบมีความแม่นยำถึงร้อยละ 88.00 และในส่วนของข้อบกพร่องส่วนใหญ่มีอยู่ในการจำแนก RSS2 เนื่องจากการกระจายแสงไม่เท่ากันกับภาพ RSS และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Arifin et al. (2020) ได้ทำงานวิจัย เรื่อง Classification of RSS (Ribbed Smoke Sheet) Based on Presence or Absence of Fungus using the NN (Neural Network) Perceptron Method ตามการมีหรือไม่มีเชื้อราโดยใช้วิธี Neural Network Perceptron Method โดยการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อดำเนินกระบวนการจำแนกประเภทตามการปรากฏของเชื้อราบนแผ่นยางรมควันโดยอัตโนมัติ งานวิจัยนี้ใช้การประมวลผลภาพด้วยภาพแผ่นยางเป็นข้อมูลเข้า และผลการจำแนกประเภทเป็นข้อมูลออก กระบวนการจำแนกประเภทของแผ่นยางรมควันใช้วิธีการ Neural Network Perceptron ที่มีการจำแนกสองประเภท ได้แก่ แผ่นยางรมควันที่ขึ้นรา และแผ่นยางรมควันที่ไม่ขึ้นรา การศึกษาครั้งนี้ใช้ภาพ Ribbed Smoked Sheets 1,000 ชิ้นเป็นข้อมูลการฝึกอบรม และใช้ภาพยางแผ่นรมควัน 50 ภาพเป็นข้อมูลการทดสอบ โดยมีค่าความแม่นยำ ร้อยละ 96.00

สรุป

จากการวิจัยการจำแนกคุณภาพยางแผ่นโดยใช้การประมวลผลภาพร่วมกับการจัดกลุ่มแบบ K-means พบว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถจำแนกคุณภาพยางแผ่นออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ยางแผ่นปกติและยางแผ่นที่มีเชื้อรา ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีค่าความถูกต้อง (Accuracy) ร้อยละ 96.57, ค่าความแม่นยำ (Precision) ร้อยละ 99.95, ค่าการเรียกคืน (Recall) ร้อยละ 93.19 และค่าความแม่นยำเชิงสมดุล (F1-Score) ร้อยละ 96.45 จากการประเมินผลด้วยเมทริกซ์ความสับสน (Confusion Matrix) การออกแบบระบบดำเนินการตามวัฏจักรการพัฒนาระบบ (SDLC) ตั้งแต่ขั้นตอนการเก็บรวบรวมข้อมูล วิเคราะห์ ออกแบบ พัฒนา ทดสอบ และประเมินประสิทธิภาพ โดยระบบสามารถประมวลผลภาพขนาด 100 x 100 พิกเซล จำนวน 400 ภาพ สำหรับการสร้างตัวจำแนก และ 200 ภาพ สำหรับการทดสอบตัวจำแนก โดยใช้วิธีการจัดกลุ่มค่าสีของพิกเซลด้วย K-means clustering (K=5) ซึ่งให้ผลการจำแนกได้ตรงตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย ผลการจำแนก พบว่าค่าสีของพิกเซลในบริเวณที่มีความเข้มมากกว่าปกติ อาจมีผลทำให้เกิดการคาดเคลื่อนในการจำแนกเป็นเชื้อรา ทั้งที่เป็นยางแผ่นปกติ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น งานของ Fibriani et al. (2017) และ Arifin et al. (2020) ที่ระบุว่าการกระจายของแสงและค่าสีในภาพมีผลต่อประสิทธิภาพของการจำแนกคุณภาพยางแผ่นเช่นกัน

ข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยการจำแนกคุณภาพยางแผ่นโดยใช้การประมวลผลภาพและการจัดกลุ่มแบบเคมีน พบว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถจำแนกคุณภาพยางแผ่นออกเป็นสองประเภท ได้แก่ ยางแผ่นปกติและยางแผ่นที่มีเชื้อรา ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีค่าความถูกต้อง (Accuracy) และค่าความแม่นยำ (Precision) ในระดับสูง อย่างไรก็ตาม จากกระบวนการดำเนินการวิจัย พบว่ามีประเด็นที่สามารถพัฒนาและต่อยอดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความครอบคลุมของระบบจำแนกคุณภาพยางแผ่นได้ในอนาคต

ข้อเสนอแนะประการแรก คือ ควรมีการศึกษานำเทคนิคการจำแนกประเภทอื่น ๆ ที่ได้รับการยอมรับในวงการวิจัยปัญญาประดิษฐ์และการประมวลผลภาพ อาทิ วิธีการจำแนกแบบ Support Vector Machine (SVM), Decision Tree หรือ Convolutional Neural Networks (CNN) มาประยุกต์เปรียบเทียบกับวิธีการจัดกลุ่มแบบ K-means เพื่อประเมินประสิทธิภาพเชิงเปรียบเทียบในแง่ของความแม่นยำ ความเร็วในการประมวลผล และความสามารถในการจำแนกภาพในสภาวะแสงและพื้นหลังที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ เพื่อค้นหาวิธีการหรือแนวทางที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการประยุกต์ใช้จริงในอุตสาหกรรมยางพารา

ประการถัดมา ควรดำเนินการศึกษาผลของจำนวนกลุ่ม (K) ในการจัดกลุ่มแบบ K-means ที่แตกต่างกันต่อความแม่นยำของการจำแนกคุณภาพยางแผ่น โดยทำการทดลองปรับค่าจำนวนกลุ่มในช่วงต่าง ๆ เพื่อหา

K ที่เหมาะสมที่สุดกับลักษณะเฉพาะของภาพถ่ายยางแผ่นในสภาพแวดล้อมการผลิตจริง ซึ่งจะช่วยเพิ่มความแม่นยำและลดความคลาดเคลื่อนจากการจำแนกผิดพลาดที่อาจเกิดจากค่าสีหรือความเข้มของแสงในภาพถ่ายได้

นอกจากนี้ในทางปฏิบัติควรควบคุมสภาพแสงและตำแหน่งการบันทึกภาพในกระบวนการเก็บรวบรวมข้อมูลภาพให้มีคงที่ เพื่อป้องกันผลกระทบจากความแตกต่างของแสงและเงาที่อาจมีผลต่อการวิเคราะห์ค่าสีและการจัดกลุ่มข้อมูลภาพ ซึ่งมีผลต่อความแม่นยำของระบบจำแนกคุณภาพยางแผ่น

งานวิจัยในอนาคตควรขยายขอบเขตของการศึกษาไปยังยางแผ่นประเภทอื่น ๆ หรือยางแผ่นที่มีลักษณะเฉพาะหลากหลายรูปแบบ เช่น ยางแผ่นเกรดต่าง ๆ ที่ใช้กันในอุตสาหกรรมยางพารา และยางแผ่นที่ผ่านกระบวนการผลิตจากแหล่งผลิตต่าง ๆ เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบในสภาวะการใช้งานจริงที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น รวมถึงควรพัฒนาเทคโนโลยีการจำแนกคุณภาพยางแผ่นแบบเรียลไทม์ (Real-time Classification) ที่สามารถนำไปติดตั้งใช้งานร่วมกับเครื่องจักรหรือสายการผลิตได้โดยตรง

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนให้ดำเนินโครงการวิจัย จากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2566 รหัสข้อเสนอโครงการ 4295739 เลขที่สัญญา FRB008/2566

เอกสารอ้างอิง

สถาบันพลาสติก. (2564). **อุตสาหกรรมต้นน้ำ: ยางแผ่นดิบ**. สืบค้นจาก https://shorturl.asia/eps8x

สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน). (n.d.). **ฐานข้อมูลงานวิจัยยางพารา.** สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน). สืบค้นจาก http://agknowledge.arda.or.th/rubber

สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน). (2552). **ตำราเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ: การจำแนกประเภทข้อมูลภาพ (Image Classification)**. สืบค้นจาก https://learn.gistda.or.th/wp-content/uploads/book/SpacetechologyandGEOinformatics.pdf

Arifin, Z., Mukti, E. Y. M., Tamamy, A. J., & Heryanto, M. A. (2020). **Classification of RSS (Ribbed Smoke Sheet) based on presence or absence of fungus using the NN (Neural Network) Perceptron method.** In 2020 International Seminar on Application for Technology of Information and Communication (iSemantic) (pp. 359–363). Lincoln: Universitas Dian Nuswantoro.

Fibriani, I., Sumardi, N., Satriya, A. B., & Utomo, S. B. (2017). **Colour based image processing method for recognizing ribbed smoked sheet grade**. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 185, 012025. https://doi.org/10.1088/1757-899X/185/1/012025

Puttipipatkajorn, A., & Puttipipatkajorn, A. (2020). Development of calibration models for rapid determination of moisture content in rubber sheets using portable near-infrared. **Journal of Innovative Optical Health Sciences**, 13(2), 2050009. https://doi.org/10.1142/s1793545820500091

Limhengha, S., & Sudsawat, S. (n.d.). Real-time color classification of para rubber using advanced image processing and yellowness index analysis for quality control [Preprint]. **SSRN**. https://doi.org/10.2139/ssrn.5167002

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF AN IOT-BASED AUTOMATIC WATER PUMP CONTROL SYSTEM FOR RESIDENTIAL APPLICATIONS

Ongart Tubburee[1] Kanyarat Ek-iam[2*]

Received : June, 30, 2025
Revised : August 25, 2025
Accepted : August 27, 2025

Abstract

Inadequate water pressure and inefficient energy utilization remain critical challenges in residential plumbing, especially in densely populated housing complexes during peak demand intervals. Conventional water pumps react directly to pressure fluctuations, leading to frequent cycling, energy inefficiency, and diminished equipment lifetimes. This paper presents an IoT-based control system for household water pumps, incorporating an ESP3 2 microcontroller, a pressure transducer transmitter (PTT) sensor, and an ultrasonic water level sensor to tackle these difficulties. The system functions in automated and manual modes using the Blynk mobile application, controlling electric ball valve and water pump operations according to real-time data and user-specified thresholds. A case study involving a single residence validated the system's efficacy in sustaining consistent water pressure, surpassing 12.0 psi, with an average of 19.4 psi and a maximum of 23.4 psi. The PTT sensor exhibited a relative error of less than 1.7%, remaining within the ±2% accuracy threshold. Furthermore, the system diminished electrical consumption by 31.4% relative to traditional functioning. The results underscore the system's potential to enhance energy economy, operational dependability, and remote control capabilities as well as facilitate its incorporation into intelligent and sustainable home water management.

Keywords: Energy efficiency, IoT, Pressure sensor, Residential applications, Water pump

---

[1] Assistant Professor, Department of Industrial Electrical Technology, Faculty of Industrial Technology, Valaya Alongkorn Rajabhat University under the Royal Patronage, e-mail: ongart.tub@vru.ac.th
[2] Assistant Professor, Department of Industrial Electrical Technology, Faculty of Industrial Technology, Valaya Alongkorn Rajabhat University under the Royal Patronage, e-mail: kanyarat@vru.ac.th
** Corresponding author, e-mail: kanyarat@vru.ac.th*

Introduction

Water is an essential resource, crucial for the lives of humans and other living species. The availability of clean and adequate water for residential use and consumption is regarded as a fundamental human right that should be widely and fairly available. Access to clean water significantly influences public health and overall well-being. In Thailand, various governmental entities, such as the Metropolitan Waterworks Authority, the Provincial Waterworks Authority, and local administrative groups, are responsible for ovesrseeing water delivery systems in urban and rural regions. The Department of Health and the Department of Water Resources are tasked with the creation and transfer of village-level water delivery systems to local authorities to ensure sustainable management (Babel et al., 2021). Nonetheless, the escalating impacts of global warming have resulted in more frequent and severe droughts, especially during the summer months when water demand markedly rises. Simultaneously, Thailand is undergoing population growth, swift economic development, and significant infrastructure enhancement, all of which escalate the demand for water resources (Ancheta et al., 2025; Tangworachai et al., 2023). The establishment of clean water supply infrastructure to adequately service all sections of the nation has emerged as a paramount national objective. Many residential areas, particularly those within housing estate developments, experience poor water pressure at the home level. This condition frequently leads to the incapacity to utilize water efficiently at various locations inside the residence concurrently. As a result, numerous homeowners opt to install supplementary water pump systems to enhance water pressure. Conventional pump systems, however, often respond instantly to water demand, even for short periods, resulting in frequent motor responses. Such behavior leads to increased electricity consumption and diminishes the operating lifespan of the pump motor and related devices (Abdelsalam & Gabbar, 2021).

A review of pertinent literature demonstrates that using automatic control systems with microcontrollers, like Arduino boards, along with pressure sensors, has worked well for checking water pressure and managing water pump operations based on real usage. These systems have shown the capability to diminish system effort and enhance energy efficiency (Isminarti, 2023; Akhund et al., 2022). Furthermore, the advancement of information technology has facilitated the remote control of electrical devices via the Internet, often known as the Internet of Things

(IoT). This technology enables real-time monitoring and remote operation of equipment, such as water pumps, via smartphones or other mobile devices, thereby enhancing convenience and increasing the ability to manage the system from a distance (Bouali et al., 2021; Hahm et al., 2020). Recent studies have highlighted the role of IoT in water resource optimization, system automation, and energy savings, especially in the context of smart homes and sustainable infrastructure (Tran et al., 2023; Ismail et al., 2022). In addition, IoT frameworks integrated with fog computing have been proposed to meet the low-latency requirements of control systems in smart utilities (Kumari et al., 2019). This research aims to design and implement a water pump control system for residential applications by integrating IoT technology with real-time pressure sensor data processing. The suggested system is designed to autonomously control water pump operation based on real-time water pressure, thereby optimizing water usage, minimizing unnecessary energy consumption, and enhancing operational efficiency and system maintenance. This study employed a residential property in a housing development as a case analysis.

Objectives

The objectives of this study are to investigate present water pressure situations and water consumption behaviors in a residential area and to develop, install, and evaluate the performance of an IoT-based control system for water pump operation.

Materials and methods

1. Examination of Water Pressure and Consumption Habits

This study chose a residential unit inside a designated housing development project for recording empirical data regarding low water pressure issues in the domestic water supply system and to examine the water consumption habits of residents. Data collection transpired from March 3-9, 2025. A custom system for monitoring water pressure was fitted into household plumbing. A pressure transducer transmitter (PTT) sensor measured 0–100 pounds per square inch (psi) with a specified accuracy of within 2.0% of the reading (full scale) and converted pipe water pressure into an analog electrical output. An ESP32 microcontroller board processed the

analog signal in real time. The Blynk app displayed processed data for real-time water pressure monitoring during actual consumption.

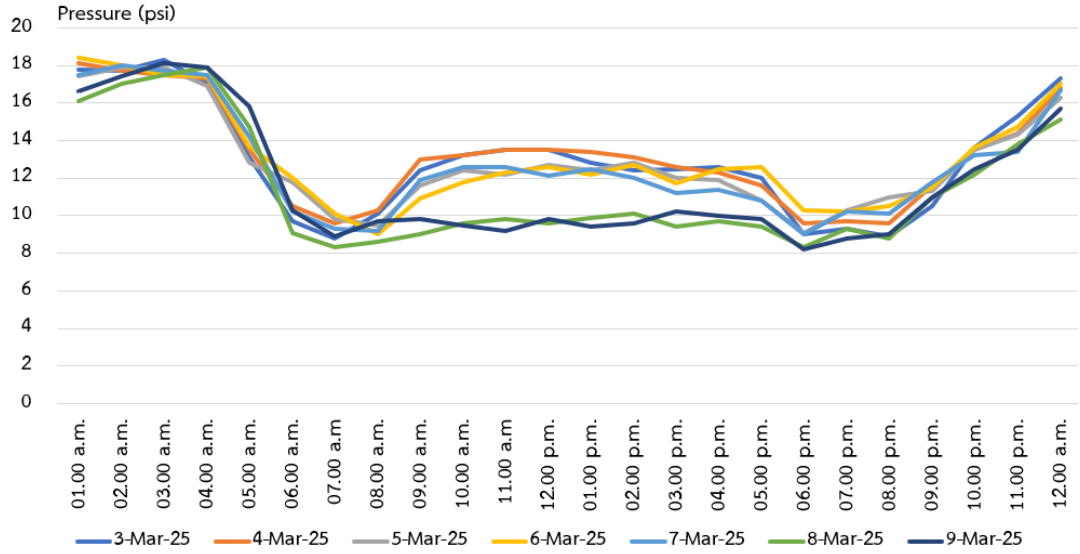


Figure 1 Pipe water pressure recordings from March 3–9, 2025.

The data monitoring system was set to record water pressure values constantly at hourly intervals for a duration of seven days. This design allowed the researchers to analyze variations in water pressure at different times of the day and during the week. The reported results are illustrated in Figure 1. The results demonstrate that water pressure varied according to the time of day and the day of the week. During weekends (Saturday and Sunday), the water pressure demonstrated a significant decline. The minimum pressure measured was 8.2 psi on Sunday, March 9, 2025. On weekdays, from Monday to Friday, the water pressure generally increased, reaching a minimum of 8.8 psi on Monday, March 3, 2025. This tendency corresponds with the customary water consumption routines of residents in the housing estate, who often utilize water simultaneously during morning hours (Prior to departing for work) and evening hours (Subsequent to returning home). The concurrent utilization habits lead to a significant decrease in water pressure during peak times, causing an insufficient water supply for residential needs. The interviews with participating residents indicated that a minimum water pressure of roughly 12.0 psi is deemed sufficient for daily routine home activities. Consequently, the

proposed system established 12.0 psi as the reference value for the design and control of the autonomous water pump system.

2. Design and Implementation of a Water Pump Control System.

The design and development of the control system for the water pump in residential applications in this research were performed in accordance with the system architecture depicted in Figure 2. The system's major purpose is to improve the efficiency of domestic water management through the application of IoT technology, solving the problem of low water pressure experienced at specific periods in residential housing estates utilized as the case study. Figure 3 illustrates that the control system utilizes an ESP32 microcontroller as its central processing unit. The ESP32 features an embedded ESP-WROOM-32 chip, a 32-bit microcontroller that facilitates wireless communication using Wi-Fi, rendering it ideal for IoT applications. The system utilizes two PTT sensors (0–100 psi) to continuously monitor water pressure at two points inside the household plumbing system. One sensor is strategically placed to gauge water pressure from the supply pipe, while the other is installed post-pump to measure pressure prior to distribution to residential ends. The pressure measurement value from both sensors is transmitted to the ESP32 microcontroller for comparison with a reference value established based on actual water pressure and usage behaviors detailed in Section 1. The system operates under two separate control cases based on this comparison:

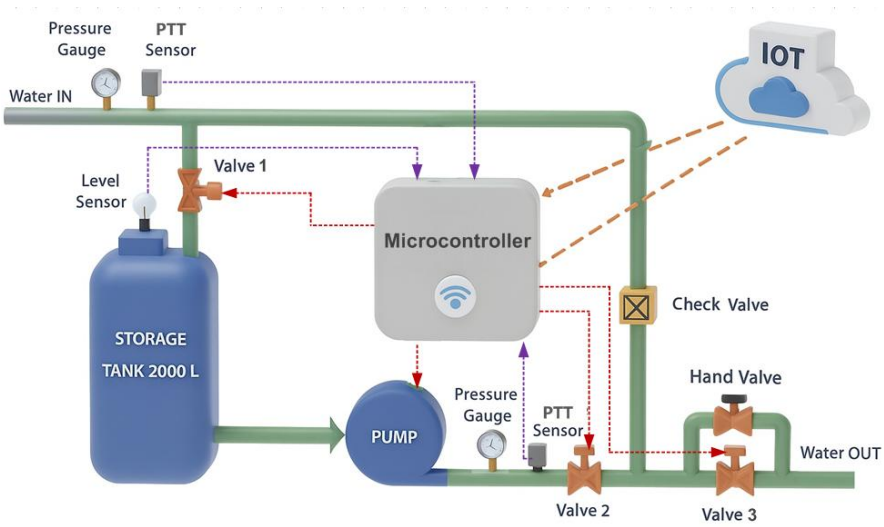


Figure 2 Diagram of the proposed water pump control system for residential applications.

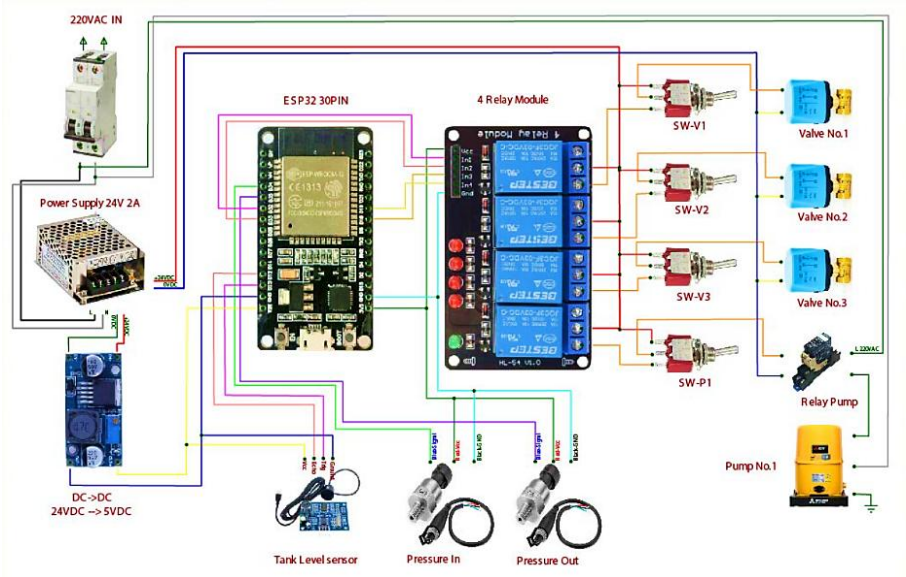
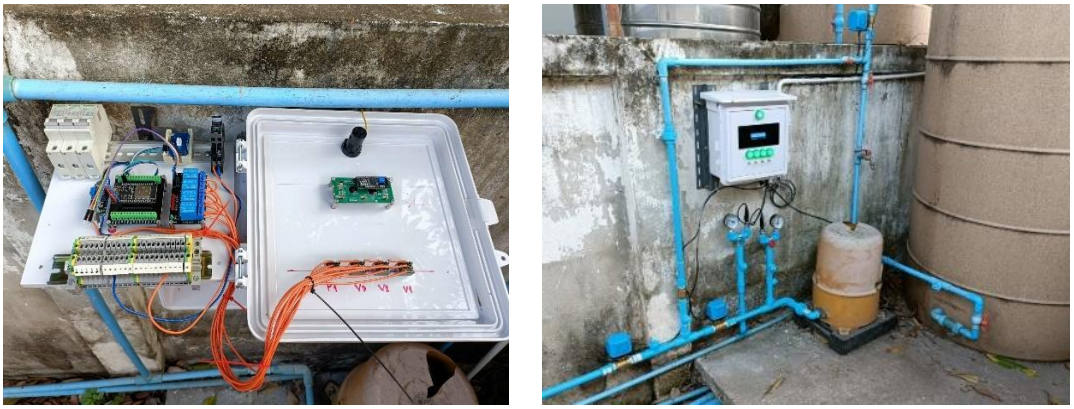


Figure 3 Hardware configuration of the proposed control system for water pumps in residential applications.

Case 1: The water pressure from the supply meets or exceeds the reference value. In this situation, the control system turns on Relay 3 on the JQC3F-03VDC-C relay module to connect the circuit and provide 24 VDC to Electric Ball Valve 3 (Valve 3). This approach enables water to flow directly from the municipal system to the residential ends without operating the pump. This method minimizes unnecessary pump running and facilitates energy conservation.

Case 2: The water pressure from the municipal supply falls below the limit. The system activates both Relay 2 and Relay 3 to turn on Electric Ball Valves 2 (Valve 2) and 3 while concurrently transmitting a control signal to Relay 4 to turn on the contact and deliver 220 V AC single-phase power to a 150 W Mitsubishi water pump. The pump draws water from a storage tank and supplies it for home use. A check valve was installed to prevent the reverse flow of water into the supply line.

The system is fitted with a JSN-SR04T ultrasonic water level sensor to guarantee uninterrupted water availability from the storage tank. Should the water level in the tank descend beyond a designated threshold, the ESP32 transmits a control signal triggering Relay 1, which supplies power to Electric Ball Valve 1 (Valve 1) to facilitate the intake of water from the municipal supply into the storage tank. Upon reaching the designated upper water level, the valve is automatically stopped.



(a) (b)

Figure 4 Overview of the proposed system (a) Control devices and circuitry, (b) Practical installation in a residential

3. Control Program Development

The control programming for the IoT-based water pump system for households, designed and developed in actual settings as illustrated in Figure 4, was established according to the steps outlined in the flowchart in Figure 5. The control process begins with an inspection of the Auto Mode variable, which defines the system's operational mode. When the Auto Mode value is entered as 1, the system operates in Automatic Mode and performs device control according to a predetermined set of logical circumstances. In this mode, the system first measures the water level in the storage tank with an ultrasonic sensor and compares it to the reference level. If the water level is lower than 95% of the tank's capacity, the system sends a logic HIGH to turn on Relay 1, thereby opening Valve 1 to begin water filling. When the water level surpasses 95%, the system automatically sends a command to close the valve. The system concurrently measures the water pressure using a PTT sensor located in the primary water supply line and compares the obtained result with a reference pressure of 12.0 psi. However, users can set a reference value through the Blynk app, which is adjustable between 8.0 and 16.0 psi according to their preferences. When the detected pressure falls below the reference value, the system delivers a logic HIGH to Relays 2 and 3, thereby opening Valves 2 and 3, while concurrently sending a logic HIGH to Relay 4 to start the water pump. When the outlet pipe pressure surpasses twice the established reference value, the control system sends a logic LOW signal to deactivate Relays 2 and 4, thus closing Valve 2 and shutting off the water pump.

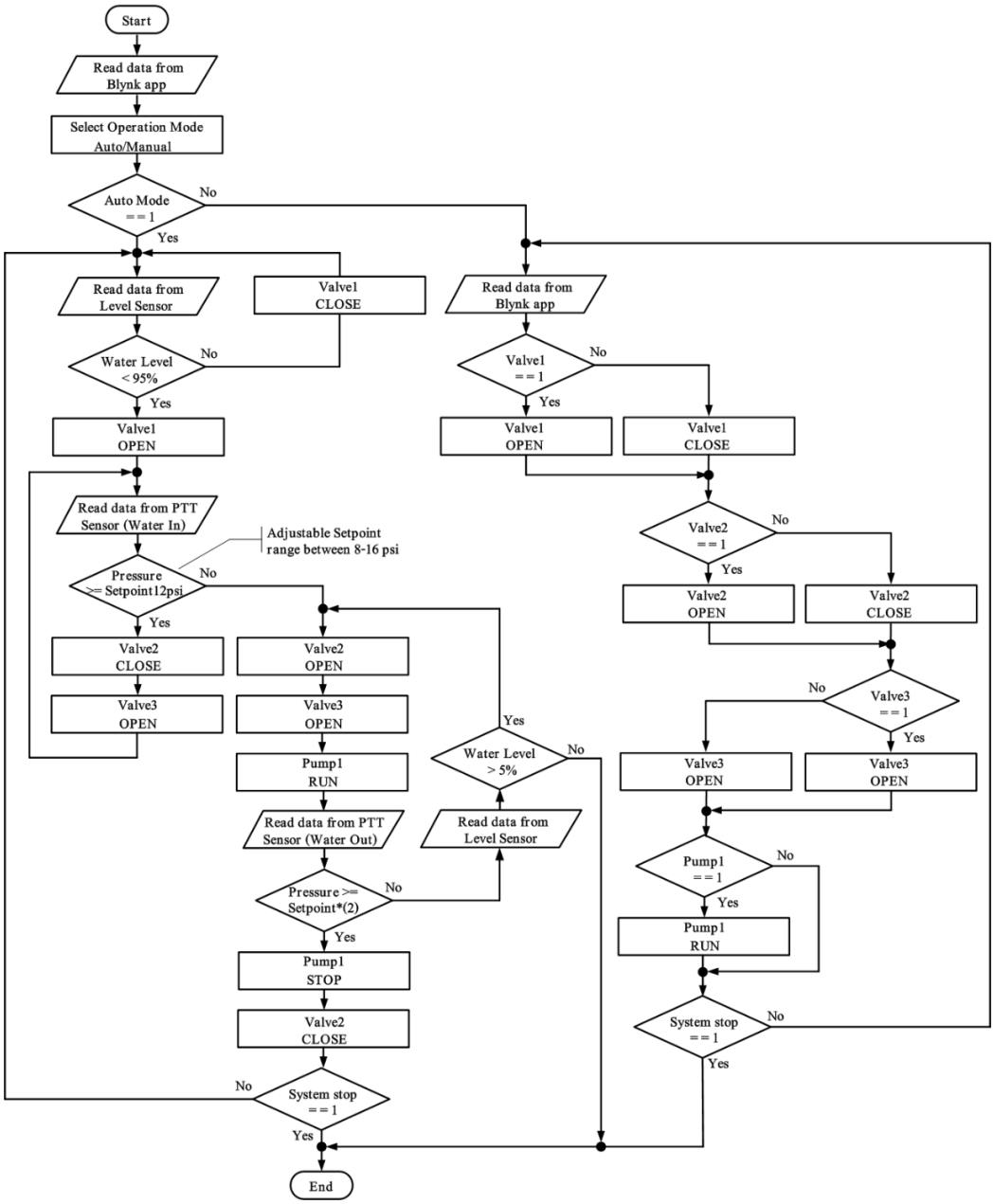
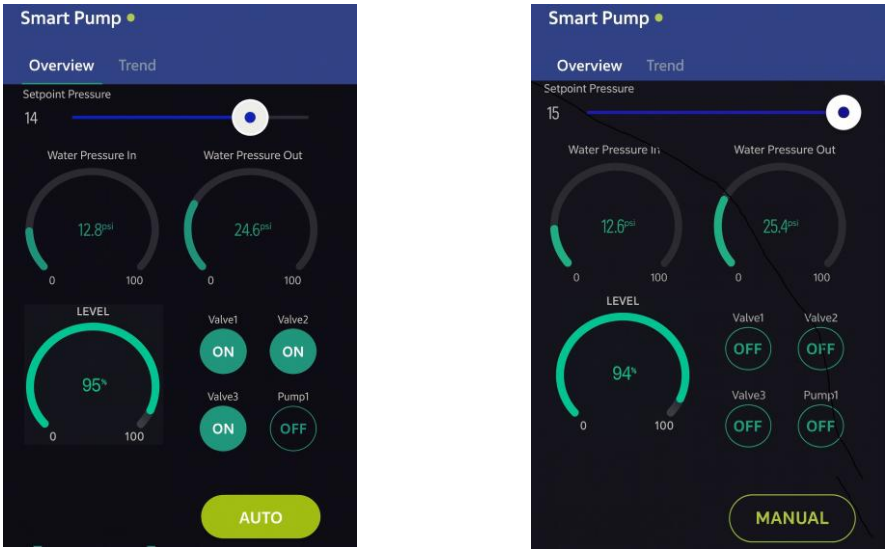


Figure 5 Flowchart of the control program design for the proposed system

Furthermore, if the water pressure falls below the reference value while the pump is running, the system continuously monitors the water level in the storage tank. When the level falls below 5%, the system immediately stops the pump and closes Valve 2. However, the pump resumes only when the water level is above 5% and the supply pressure stays below

the set limit. While the Auto Mode value is 0, the system operates in Manual Mode. In this mode, the Blynk app enables users to turn on or off each electric valve using direct commands. The system provides complete user autonomy for real-time control without automated interference.



(a) (b)

Figure 6 Screenshots of the Blynk app interface for IoT control. (a) Automated control mode, (b) Manual control mode

4. Designing and Applying an IoT-Based Control System

The IoT-based control solution for the residence's water pump enables real-time monitoring and control remotely through smartphones or mobile devices utilizing the Blynk app. This technology allows users to remotely manage electric valves and the water pump, providing real-time feedback on the application interface. The system was designed to facilitate two operational modes: Automatic Control Mode and Manual Control Mode. Figure 6(a) depicts the system performing in automatic mode. In the testing, the reference pressure was set at 14.0 psi, although the actual pressure from the municipal water supply was measured at 12.8 psi. The water level in the storage tank was concurrently measured at 95%. Under these conditions, the system autonomously started the pump, as evidenced by the statuses of Valve 2 and Valve 3, both of which were bright green. The proposed control system produced a maximum water

pressure output of 24.6 psi, which did not exceed twice the reference pressure (28.0 psi). Figure 6(b) illustrates the system performing in Manual Control Mode, allowing the user to directly control the opening and closing of each valve via the Blynk interface. All commands and real-time system status are presented on the smartphone screen, facilitating intuitive and transparent user interaction. The proposed IoT-based control system augments user convenience and enhances the overall efficacy of the system. Crucially, the capacity to remotely monitor and control the system enhances safety, particularly during emergencies.

Results and discussion

To evaluate the feasibility and performance of the proposed IoT-based control system for residential water pumps, the system was installed and implemented in a household designated as the case study. We recorded system performance evaluations under real operating situations after installation. We illustrate the testing approach and results as follows:

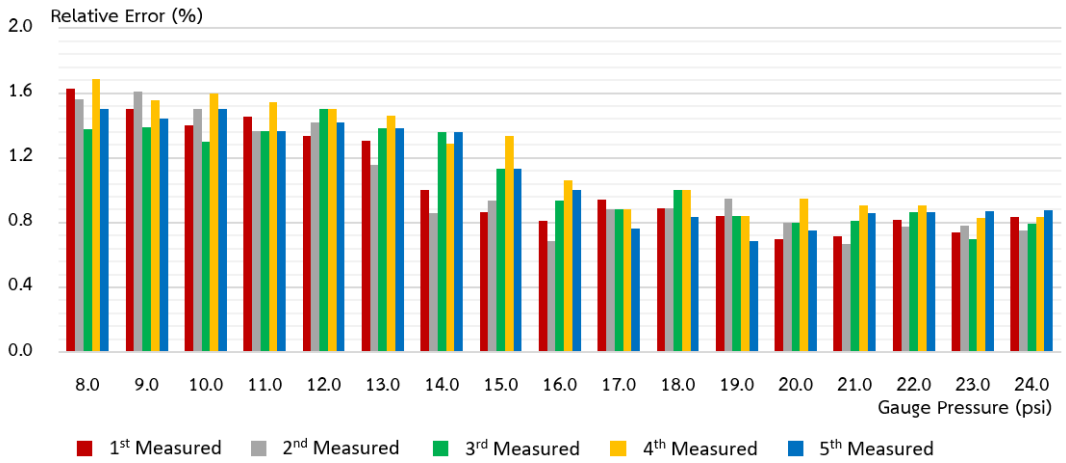


Figure 7 Relative error of PTT sensor measurements at various gauge pressures

1. Evaluation of the Precision of the PTT Sensor

The PTT sensor utilized in this study has a measuring range of 0–100 psi and is capable of monitoring pressure in oil, air, and water systems. The manufacturer specifies an accuracy of 2% of the reading (full scale). The performance was evaluated by carefully comparing the values from the PTT sensor with those from a calibrated water pressure gauge that measures 0–100

psi, connected in parallel, as seen in Fig. 4(b). The municipal supply line's water pressure was changed using a manually operated valve at the pipe inlet, allowing for a variation between 8.0 psi, the minimum recorded before the proposed system, and 24.0 psi, the maximum observed during the proposed control system's operation. Five independent measurement trials were executed, each separated by a three-minute interval, with the results depicted in Figure 7.

Figure 7 demonstrates that throughout all trials, the relative error continuously remained below 1.7%, which is comfortably within the manufacturer's specified accuracy range of 2%. Furthermore, the trend seen indicates a progressive decline in relative error as the applied pressure escalates, with the minimal errors nearing 0.6% at pressures exceeding 18.0 psi. The experimental results confirm that a selected PTT sensor delivers adequately precise measurements for the specified application. The error levels adhere to the designated tolerance and guarantee the trustworthiness of the measured pressure values for incorporation into the proposed control system.

2. Evaluation of Water Pump Performance Relative to Water Pressure

This section executed the performance evaluation of the proposed control system to regulate water pressure in the distribution pipeline via practical applications. The system communicated with the IoT to record water pressure in the pipeline before distribution to different areas of the house. Measurements were carried out hourly throughout a continuous week from May 12-18, 2025. The data recorded are illustrated in Figure 8.

Figure 8 illustrates that the maximum water pressure recorded during the monitoring period was 23.4 psi, recorded on May 13, 2025, at 11:00 a.m. On the contrary, the minimum recorded pressure was 12.5 psi, noted on May 16, 2025, at 10:00 p.m. This result indicated that all recorded measurements consistently exceeded the setting reference value of 12.0 psi. The average water pressure recorded for the week was 19.4 psi. The results indicate that the proposed control system successfully maintained water pressure within the designated range specified in the control program, reflecting steady and dependable performance under real-world operating situations.

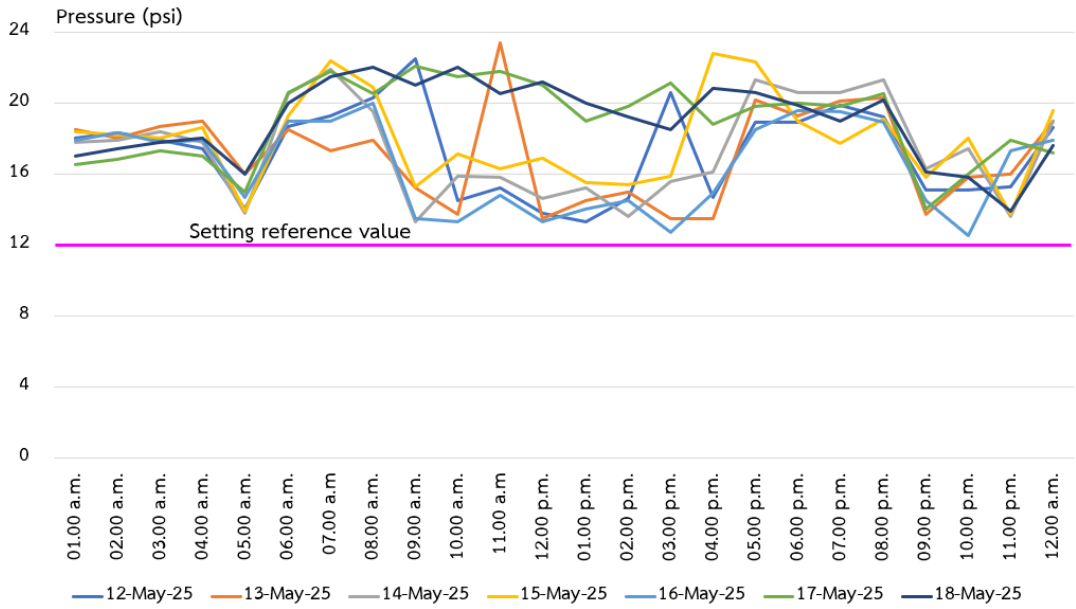


Figure 8 Graph depicting recorded water pressure from May 12-18, 2025

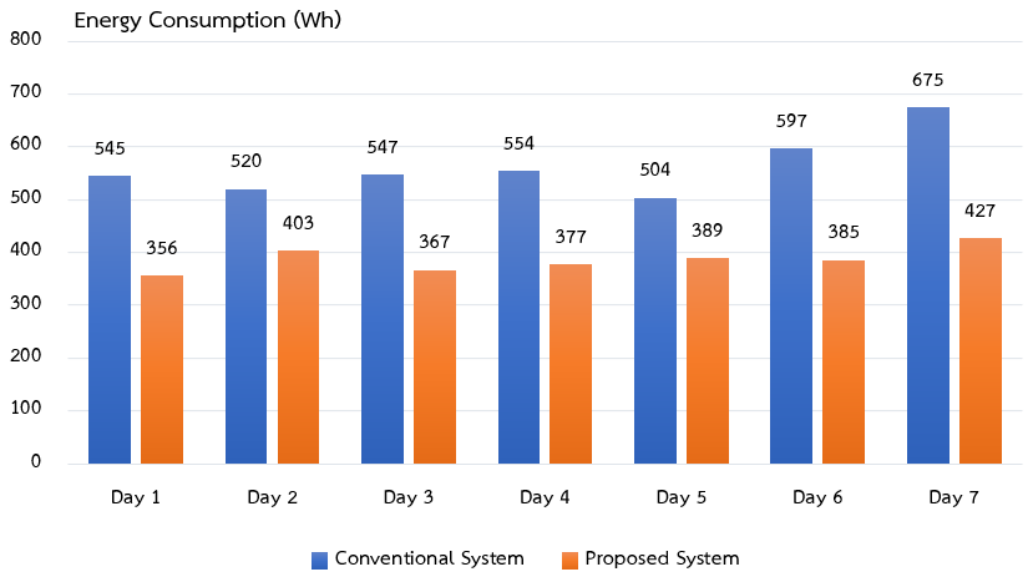


Figure 9 Comparison of energy consumption between the traditional and proposed systems.

3. Comparative Evaluation of Electric Energy Consumption

Figure 9 shows the daily electrical energy use measured over a week, from May 5 to May 11, 2025 (Monday to Sunday), when water was supplied directly by the water pump without using the proposed control system. The conventional system for controlling a 150 W Mitsubishi

water pump, which reacts instantaneously to water demand without optimization, recorded a weekly energy use of 3.9 kWh. The maximum daily usage was recorded on May 11, 2025, at 675.0 Wh, and the minimum was 504.0 Wh. When the proposed control system was adopted during a second seven-day period, from May 12 to May 18, 2025. The residents preserved their water consumption behaviors from the preceding week to guarantee consistency in comparison. The results indicated that the weekly total energy consumption decreased to 2.70 kWh. This amount denotes an energy savings of 1.2 kWh, corresponding to a 31.4% decline in overall energy use. The decrease in energy consumption is due to the effective performance of the water pump under the control scheme, which minimized unnecessary pump runtime and thus lowered the total power demand.

Conclusions

The research detailed the design, implementation, and evaluation of an IoT-based system to control a water pump specifically for residential use. The system successfully controlled water distribution in low-pressure conditions by integrating real-time pressure and water level monitoring with a dual-mode control system (Automatic and manual). The ESP32 microcontroller, along with PTT sensors and ultrasonic sensors, allowed for quick control using the Blynk mobile app, enabling users to check and manage the system from afar. The experimental results confirmed the system's reliability and performance in real-world situations. The selected PTT sensor exhibited a relative error of less than 1.7%, which is well within the manufacturer’s stated accuracy margin of 2.0%. The proposed system consistently produced water pressure exceeding the user-defined threshold of 12.0 psi, attaining an average weekly pressure of 19.4 psi and a maximum of 23.4 psi. The control technique markedly enhanced energy efficiency, decreasing electrical consumption by 31.4% relative to traditional pump operation. The proposed system improves user convenience, operational stability, and energy efficiency, showcasing its promise as a scalable and economical solution for intelligent household water management. Future research ought to focus on enhancing the system's scalability for use in multi-story residential buildings or small towns, where pressure distribution dynamics are more intricate. The incorporation of machine learning or adaptive control

techniques may improve system response to fluctuating demand patterns. Integrating cloud-based data logging and analytics systems could enhance long-term performance monitoring, predictive maintenance, and system optimization. These developments would enhance the application and resilience of IoT-based water management solutions in various household settings.

Recommendation

The research case study focused on a single-story residential dwelling situated within a housing estate. Consequently, the application of the results and control system design to alternative residential buildings or office facilities necessitates additional research. It is crucial to reassess the current water pressure conditions and residents' water consumption behavior in the new context to guarantee the system is optimized to sustain sufficient water pressure levels that correspond with usage demands at various times of the day. This contextual adaptation is essential for maintaining system performance, reliability, and user pleasure across many situations.

Acknowledgements

The authors wish to convey their profound appreciation to the Faculty of Industrial Technology and the Research and Development Institute at Valaya Alongkorn Rajabhat University under the Royal Patronage for their financial support regarding research materials and equipment, as well as for enabling access to the testing instruments utilized in this research.

References

Abdelsalam, A. A., & Gabbar, H. A. v(2021). vEnergy saving and management of water pumping networks. **Heliyon**, 7(8), e07820.

Akhund, T. M. N. U., Newaz, N. T., Zaman, Z., Sultana, A., Barros, A., & Whaiduzzaman, M. (2022). **Iot-based low-cost automated irrigation system for smart farming**. Intelligent Sustainable Systems: Selected Papers of WorldS4 2021, Volume 1 (pp. 83-91). Singapore: Springer Nature Singapore.

Ancheta, M. A., Shrestha, S., Koottatep, T., & Shanmugam, M. (2025). Resilience assessment methodology of urban water supply and sanitation systems integrating climate change and extreme events: a case study in Bangkok, Thailand. **AQUA—Water Infrastructure, Ecosystems and Society**, 74(6), 405-421.

Babel, M. S., Shrestha, A., Anusart, K., & Shinde, V. (2021). Evaluating the potential for conserving water and energy in the water supply system of Bangkok. **Sustainable Cities and Society**, 69, 102857.

Bouali, E. T., Abid, M. R., Boufounas, E. M., Hamed, T. A., & Benhaddou, D. (2021). Renewable energy integration into cloud & IoT-based smart agriculture. **IEEE access**, 10, 1175-1191.

Hahm, S.I., Kim, J., Jeong, A., Yi, H., Chang, S., Kishore, S.N., Chauhan, A. & Cherian, S.P. (2020). Reliable real-time operating system for IoT devices. **IEEE Internet of Things Journal**, 8(5), 3705-3716.

Ismail, S., Dawoud, D. W., Ismail, N., Marsh, R., & Alshami, A. S. (2022). IoT-based water management systems: survey and future research direction. **IEEE Access**, 10, 35942-35952.

Isminarti, I. (2023). Automatic water level controlling and monitoring system using IoT application. **International Journal of Artificial Intelligence Research**, 7(2).

Kumari, A., Tanwar, S., Tyagi, S., Kumar, N., Obaidat, M. S., & Rodrigues, J. J. (2019). Fog computing for smart grid systems in the 5G environment: Challenges and solutions. **IEEE Wireless Communications**, 26(3), 47-53.

Tangworachai, S., Wong, W. K., & Lo, F. Y. (2023). Determinants of water consumption in Thailand: sustainable development of water resources. **Studies in Economics and Finance**, 40(5), 950-970.

Tran, D. T., Le, H. S., & Huh, J. H. (2023). Building an automatic irrigation fertilization system for smart farm in greenhouse. **IEEE Transactions on Consumer Electronics**, 70(2), 4685–4698.

ต้นแบบระบบแจ้งเตือนข้อผิดพลาดการทำงานของอุปกรณ์ผลิตออกซิเจนโดยใช้อินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง

จตุพร จิรันดร[1*] จรัญ ธรรมใจ[2] นรงฤทธิ์ เสนาจิตร[3]

Received : January 08, 2025
Revised : May 24, 2025
Accepted : August 27, 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบ ปรับปรุง และพัฒนาระบบต้นแบบแจ้งเตือนสำหรับการควบคุมการเติมอากาศซึ่งทำการทดลองที่ธนาคารปู กลุ่มพังสาย ต.กระดังงา อ.สทิงพระ จ.สงขลา เมื่อเกิดไฟฟ้าดับจำนวน 3 ครั้งในระยะเวลา 1 เดือน โดยใช้รูปแบบการพัฒนาระบบ System Development Life Cycle (S.D.LC) เข้ามาช่วยในการรวบรวมข้อมูล การวิเคราะห์ ออกแบบการปฏิบัติงาน และพัฒนาในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำโดยการบูรณาการเทคโนโลยี IoT และ NB-IoT สำหรับการตรวจสอบและควบคุมแบบเรียลไทม์ และทดสอบระบบการทำงานของระบบต้นแบบ ส่วนสถิติที่ใช้จะเป็นในเชิงบริหารข้อมูลด้วยระบบสารสนเทศคือสถิติเชิงพรรณาและหาความสัมพันธ์ในลักษณะกระบวนการทำงาน ได้แก่ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งจากการประเมินความพึงพอใจประสิทธิภาพต้นแบบพบว่า ด้านความปลอดภัยของข้อมูล ($\overline{X}$ = 4.40, S.D. = 0.533), ความสามารถในการใช้งาน ($\overline{X}$ = 4.39, S.D. = 0.512) และประสิทธิภาพ ($\overline{X}$ = 4.39, S.D. = 0.560) ระบบสามารถช่วยลดผลกระทบจากไฟฟ้าดับได้สำเร็จโดยการแจ้งเตือนทันเวลา ระบบแจ้งเตือนนี้สามารถปรับขนาดที่เป็นไปได้สำหรับการใช้งานเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำต่างๆ เช่น การเพาะเลี้ยงกุ้งและปลา โดยบูรณาการเทคโนโลยีอินเตอร์เน็ตทุกสรรพสิ่งสำหรับการตรวจสอบสภาพแวดล้อมแบบเรียลไทม์

คำสำคัญ: ต้นแบบแจ้งเตือน ธนาคารปู ไฟฟ้าดับ ระบบตรวจสอบ เอ็นบีไอโอที ไอโอที

---

[1] *อาจารย์ประจำหลักสูตรระบบสารสนเทศ คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย อีเมล: jatuporn2523@gmail.com*

[2] *อาจารย์ประจำหลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหการ คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย อีเมล: jaran.t@rmutsv.ac.th*

[3] *อาจารย์ประจำหลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิชาไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย อีเมล: narongrit.s@rmutsv.ac.th*

** ผู้นิพนธ์หลัก อีเมล: jatuporn2523@gmail.com*

A PROTOTYPE OF MALFUNCTION ALERT SYSTEM FOR OXYGEN-GENERATOR EQUIPMENT BASED ON INTERNET OF THINGS

Jatuporn Jirandorn[1*] Jaran Tamjai[2] Narongrit Sanajit[3]

Abstract

The purposes of the current study were to design, improve, and develop a prototype of alert system for aeration control. The research experiment was carried out at the Crab Bank of Phang Sai Community in Kradangnga Subdistrict, Sathing Phra District, Songkhla Province. The system was tested during three power outages over one-month period. The System Development Life Cycle (S.D.LC) framework was employed to facilitate data collection, analysis and operational design. In addition, the development of aquacultural system was integrated with IoT and NB-IoT technologies for real-time monitoring and control. Then, the prototype system was tested for its functionality. To analyze the data, descriptive statistics, and correlation analysis in the context of information management, including mean and standard deviation were employed. The research findings were found that users' satisfaction towards the effectiveness of the prototype were as follows: data security was average at 4.40 ($\bar{X}$ = 4.40, S.D. = 0.533), usability was average at 4.39 ($\bar{X}$ = 4.39, S.D. = 0.512), and its effectiveness was average at .39 ($\bar{X}$ = 4.39, S.D. = 0.560). Notably, the system successfully mitigated the impact of power outages through timely alerts. In addition, this alert system has been able to be scaled for various types of aquacultures, for example, shrimp and fish farming, by integrating IoT technology for real-time environmental monitoring.

Keyword: A Prototype of Alert-System, Bank Crab, Power Outage, Monitoring System, NB-IoT, IoT

---

[1] *Lecturer of Department of Digital Business Information Systems, Faculty of Business Administration, Rajamangala University of Technology Srivijaya, e-mail: jatuporn2523@gmail.com*

[2] *Lecturer of Industrial Engineering Program, Faculty of Industrial Education and Technology, Rajamangala University of Technology Srivijaya, e-mail: jaran.t@rmutsv.ac.th*

[3] *Lecturer of Electrical Engineering Program, Faculty of Industrial Education and Technology, Rajamangala University of Technology Srivijaya, e-mail: narongrit.s@rmutsv.ac.th*

** Corresponding author, e-mail: jatuporn2523@gmail.com*

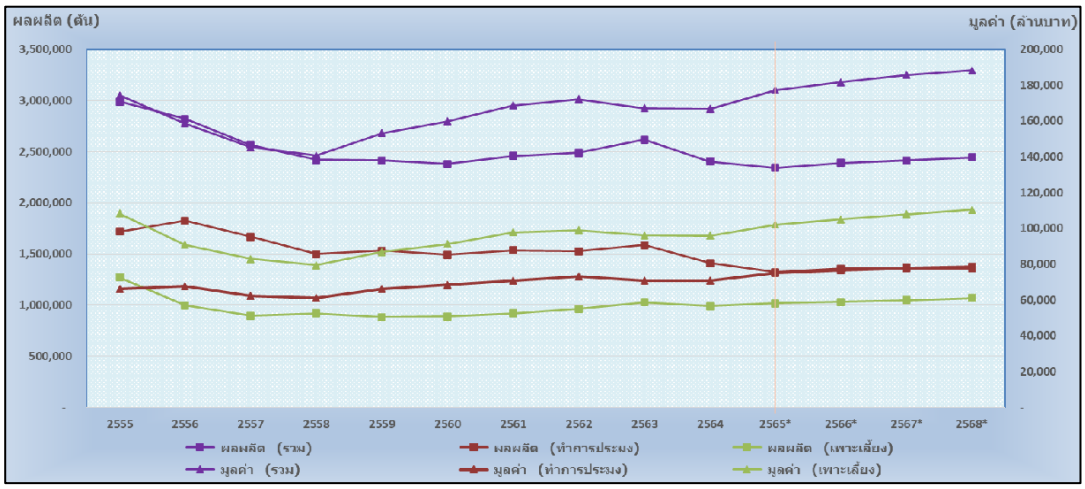
บทนำ

ทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง นับเป็นฐานทุนเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย รวมถึงระดับภูมิภาคและระดับโลก สถานภาพทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่งมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาและมีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมาก ทั้งอิทธิพลของปัจจัยที่มาจากการใช้ประโยชน์ของมนุษย์และจากปรากฏการณ์ตามธรรมชาติ รวมทั้งผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศโลก ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศทางทะเล ได้แก่ ป่าชายเลน ป่าชายหาด แหล่งหญ้าทะเล แนวปะการัง สัตว์และพืชทะเล และระบบนิเวศพื้นทะเลเสื่อมโทรมลง รวมทั้งการเกิดภัยพิบัติธรรมชาติและปัญหาการกัดเซาะชายฝั่งที่มีผลกระทบต่อความสมดุลทางระบบนิเวศ และความหลากหลายทางชีวภาพของทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง

การดำเนินงานบริหารจัดการทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่งที่ผ่านมา นับได้ว่ายังไม่มีทิศทางที่ชัดเจน โดยที่หน่วยงานรับผิดชอบในการดูแลการใช้ประโยชน์ทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่งมีจำนวนมากและต่างก็มีกฎหมายและระเบียบข้อบังคับของตนเอง ประกอบกับรัฐบาลและองค์กรระหว่างประเทศทางด้านการใช้ประโยชน์และการอนุรักษ์ทรัพยากรทางทะเลให้ความสำคัญและกำหนดไว้ในนโยบาย รวมทั้งยุทธศาสตร์ในการบริหารจัดการ ซึ่งในบางครั้งยุทธศาสตร์การใช้ประโยชน์และการอนุรักษ์ทรัพยากรของหลายหน่วยงานเกิดความขัดแย้งกันทำให้การบูรณาการการจัดการใช้ประโยชน์กระทำได้ยาก จึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาจัดทำกรอบของการปฏิบัติงานให้ครอบคลุมภารกิจของแต่ละหน่วยงาน ลดความซ้ำซ้อน รวมทั้งแก้ปัญหาข้อจากัดในเรื่องศักยภาพของบุคลากร งบประมาณที่มีจากัด การประสานงานกับส่วนเกี่ยวข้อง และความฉับไวในการตอบสนองต่อการเสื่อมสลายของทรัพยากรทั้งโดยมนุษย์และธรรมชาติ (กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่งกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2566) ซึ่งสอดคล้องกับกรอบซึ่งสอดคล้องกับกรอบยุทธศาสตร์ชาติที่มีเป้าหมายเพื่อพัฒนาประเทศอย่างยั่งยืนของยุทธศาสตร์ที่ 5 ด้านการสร้างการเติบโตบนคุณภาพชีวิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ในส่วนของการมุ่งเน้นการให้ความสำคัญกับการสร้างการเติบโตของประเทศจากกิจกรรมทางทะเลที่หลากหลายควบคู่ไปกับการดูแลฐานทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่งทั้งหมด ภายใต้อำนาจและสิทธิประโยชน์ของประเทศที่พึงมีพึงได้ เพื่อความเป็นธรรมและลดความเหลื่อมล้ำทางสังคม โดยมุ่งเน้นการถ่ายทอดองค์ความรู้เรื่องทะเลที่ถูกต้องและเพียงพอ เพิ่มมูลค่าของเศรษฐกิจฐานชีวภาพทางทะเล ปรับปรุงและฟื้นฟูทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่งทั้งระบบ พัฒนาและเพิ่มสัดส่วนกิจกรรมทางทะเลที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (ราชกิจจานุเบกษา, 2566)

ในช่วงระยะเวลาที่ผ่านมาการทำประมงของประเทศไทยมีปัจจัยหลายประการที่ส่งผลให้สถานการณ์การประมงเปลี่ยนแปลงไป เช่น แหล่งประมงมีความเสื่อมโทรม มีการทำประมงเกินศักยภาพการผลิตของธรรมชาติ (Overfishing) สภาพภูมิอากาศ กฎหมาย กฎระเบียบและนโยบายต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการประมงของไทยอยู่ในภาวะวิกฤต โดยพิจารณาจากการประมาณการผลผลิตและมูลค่าของสัตว์น้ำจากการประมงของ

ประเทศไทย พ.ศ. 2565-2568 ของกรมประมง พบว่า ผลผลิตและมูลค่าสัตว์น้ำจากการประมงช่วงเวลา 10 ปีที่ผ่านมา (พ.ศ. 2555 - 2564) และข้อมูลประมาณการล่วงหน้า พ.ศ. 2565 - 2568 จะเป็นข้อมูลเบื้องต้นที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการกำหนดนโยบายเพื่อนำไปสู่การบริหารจัดการด้านการประมงให้มีความยั่งยืนต่อไป โดยช่วงเวลา 10 ปีที่ผ่านมา ผลผลิตมีแนวโน้มลดลงในอัตราร้อยละ 2.21 ส่วนมูลค่ามีได้จากการทำการประมงเฉลี่ย1,580,596 ตันต่อปี (ร้อยละ 61.82) คิดเป็นมูลค่า 67,831 ล้านบาทต่อปี (ร้อยละ 42.20) และผลผลิตจาการเพาะเลี้ยงเฉลี่ย 976,205 ตันต่อปี (ร้อยละ 38.18) คิดเป็นมูลค่า 92,911 ล้านบาทต่อปี (ร้อยละ 57.80) ดังแสดงจากภาพที่ 1 (กรมประมง, 2566)



ภาพที่ 1 แสดงผลผลิตและมูลค่าสัตว์น้ำจากการประมง พ.ศ. 2555 – 2568

ซึ่งในพื้นที่จังหวัดสงขลาได้มีการจัดตั้งธนาคารปู กลุ่มประมงพื้นบ้านทรัพย์อนันต์ อำเภอสิงหนคร จังหวัดสงขลา ซึ่งเป็นแหล่งเพาะฟักลูกปูที่มีขนาดใหญ่ ทางทีมวิจัยจึงเข้าสำรวจกระบวนการในการเพาะฟักลูกปูและปัญหาโดยการสัมภาษณ์ คุณชำนาญ มานิล วิทยากรผู้เชี่ยวชาญประจำธนาคารปู อธิบายกระบวนการในการเพาะเลี้ยงลูกปูในโรงเพาะฟัก โดยมีรายละเอียดดังนี้

เมื่อชาวประมงจับได้แม่ปู 10-50 ตัว คละสายพันธุ์อย่างปูม้า ปูเสือ ปูดาว มีบ้างที่จับได้ปูดำซึ่งเป็นปูน้ำกร่อยเพียงแม่ปูหนึ่งตัว หากมีน้ำหนัก 100-200 กรัม จะผลิตไข่ได้ 700,000-1,000,000 ฟอง หากแม่ปูมีสุขภาพดีจะยิ่งผลิตไข่ที่แข็งแรง ไข่จะแยกเป็นเม็ดเดี่ยว และมีอัตราการฟักเป็นตัวอ่อนสูง เฉลี่ย 600,000 ตัว หรือหากแม่ปูมีน้ำหนัก 200 - 300 กรัม จะผลิตไข่ได้ราว 1,800,000 ฟอง และมีอัตราการฟักเป็นตัวอ่อนสูงเฉลี่ย 1,000,000 ตัว

ส่วนปัญหาที่เกิดขึ้นจากการเพาะเลี้ยงลูกปูของธนาคารปูนั้นจะอยู่ที่อุปกรณ์ผลิตออกซิเจน (เครื่องอัดอากาศ 2ตัว ทำงานร่วมกับมอเตอร์ 2 ตัว) ของโรงเพาะเลี้ยงมีจำนวน 1 ชุด ตามภาพที่ 2 โดยที่เครื่องอัดอากาศ

จะมีท่ออ่อน และท่อพีวีซีเชื่อมต่ออยู่ หากเครื่องไม่สามารถทำงานได้ ทำให้ไม่มีออกซิเจนส่งไปยังไข่ หรือ ลูกปูที่เพาะเลี้ยง ซึ่งถ้าขาดออกซิเจนประมาณ 2 ชั่วโมงจะทำให้ไข่ หรือ ลูกปูที่เพาะเลี้ยงไว้ทั้งหมดตาย ซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้นมาจากสาเหตุ

(1) อุปกรณ์ผลิตออกซิเจนขัดข้อง (Oxygen generator equipment failure) เกิดจากเศษของท่ออ่อนที่ต่อกับเครื่องอัดอากาศหลุดลงไปในเครื่องอัดอากาศ ทำให้เครื่องอัดอากาศหยุดทำงาน แต่มอเตอร์ที่ต่อกับเครื่องอัดอากาศที่ทำหน้าที่ในการดึงอากาศเข้าไปในเครื่องอัดอากาศยังคงทำงานอยู่ ส่งผลให้มอเตอร์ทำงานหนัก มีอุณหภูมิร้อนขึ้น และพังในที่สุด ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายในการซ่อมมอเตอร์ หรือ อาจต้องซื้อมอเตอร์ใหม่ถ้าไม่สามารถซ่อมได้ ซึ่งค่าใช้จ่ายในส่วนนี้ค่อนข้างสูง

ทางผู้วิจัยได้พัฒนาต้นแบบระบบแจ้งเตือนให้กับสมาชิก หรือ ผู้ที่เกี่ยวข้อง ในกรณีที่เครื่องอัดอากาศหยุดทำงานแล้วให้ระบบส่งข้อความไปยังกลุ่มสมาชิก แจ้งว่าเครื่องอัดอากาศหยุดทำงาน และให้สมาชิกที่อยู่ใกล้ที่สุดทำการปิดเครื่องอัดอากาศที่เกิดปัญหาขึ้น ทำให้สามารถลดความเสียหายที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์อีกทั้งจะทำให้ลดค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นได้ (ปิยวัฒน์ โครตพรม และคณะ, 2567; ชลิญญา สุดา และคณะ, 2567)

จากเดิมที่อุปกรณ์ผลิตออกซิเจน 1 ชุด ซึ่งถ้าอุปกรณ์ภายในตัวใดตัวหนึ่งมีปัญหาอาจส่งผลให้ไม่สามารถผลิตออกซิเจนได้สอดคล้องกับความต้องการออกซิเจนของลูกปูได้ ซึ่งจากการปรึกษาคุณชำนาญ มานิล วิทยากรผู้เชี่ยวชาญประจำธนาคารปู เพื่อหาแนวทางสำหรับการแก้ไขปัญหานี้ทำให้ทราบว่าถ้ามีการเพิ่มอุปกรณ์ผลิตออกซิเจนเพิ่ม 1 ชุดอาจช่วยให้การผลิตออกซิเจนให้กับลูกปูมีความต่อเนื่องขึ้น และลดอัตราการตายลงได้ ส่งผลให้ทางทีมวิจัยอาจสั่งเครื่องผลิตออกซิเจนมาเพิ่มอีก 1 ชุด และทำการเปลี่ยนกระบวนการทำงานของเครื่องผลิตออกซิเจนโดยการสลับการทำงาน 12 ชั่วโมงต่อชุด และการทำงานในรูปแบบเดิมไม่มีการตรวจสอบความพร้อม หรือ ดูแลอุปกรณ์ฯ ทำให้ทางทีมวิจัยได้นำเอาแนวคิดการบำรุงรักษาเชิงป้องกันเข้ามาใช้ในการบำรุงรักษาอุปกรณ์ฯ เพื่อต้องการให้อุปกรณ์ฯ มีความพร้อมในการทำงานตลอดเวลา และยืนอายุการใช้งานของอุปกรณ์ได้นานขึ้น

(2) กรณีไฟฟ้าดับ ทำให้อุปกรณ์ผลิตออกซิเจนไม่ทำงาน ถึงแม้ว่าทางธนาคารฯจะมีเครื่องปั่นไฟอยู่แล้ว เพียงแต่เครื่องปั่นไฟจะสามารถทำงานได้ก็ต่อเมื่อมีคนมาเปิดเครื่องเท่านั้น ซึ่งทางทีมผู้วิจัยได้ทำการสอบถามไปยังธนาคารฯ ทำไมถึงไม่ใช้เครื่องปั่นไฟแบบอัตโนมัติ ได้รับเหตุผลได้ว่าเครื่องแบบอัตโนมัติมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง

จากกรณีนี้สิ่งที่ทีมวิจัยทราบปัญหาที่เกิดขึ้นจากวิทยากรผู้เชี่ยวชาญประจำธนาคารปู เวลาไฟฟ้าดับในหลาย ๆ ครั้งไม่มีใครเข้าไปเปิดเครื่องปั่นไฟ เพราะ คิดว่ามีคนเข้าไปเปิดแล้ว ทำให้ผู้วิจัยพัฒนาระบบแจ้งเตือนเมื่อมีไฟดับ และการแจ้งเตือนเมื่อมีการเปิดเครื่องปั่นไฟให้กับสมาชิกในกลุ่มฯ เพื่อลดความผิดพลาดที่อาจจะ

เกิดขึ้น ทำให้สามารถลดภาวะการตายของไข่ หรือลูกปูที่ทำการเพาะฟักได้ รวมถึงมีการเก็บข้อมูลขึ้น Cloud เพื่อเอาไว้สำหรับการพิจารณาข้อมูลต่อไปในอนาคตได้

เกิน ที่เกิดขึ้น รวมถึงมีแบตสำรอง หรือ มีระบบไฟสำรองกรณีเกิดไฟดับเกิดขึ้นได้

โดยระบบต้นแบบดังกล่าวสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับกลุ่ม หรือ ธนาคารปูต่าง ๆ ได้ เพื่อก้าวไปสู่การประยุกต์ใช้ IoT ร่วมกับภาคอุตสาหกรรม อีกทั้งยังเป็นต้นแบบในการเรียนการสอนที่ประยุกต์ศาสตร์ทางด้านระบบไฟฟ้า ระบบเครื่องกล ระบบสารสนเทศ เข้าด้วยกัน และก่อให้เกิดประโยชน์ต่อชุมชนอย่างเป็นรูปธรรม สอดคล้องกับงานวิจัยที่มีการใช้ที่มีการใช้เทคโนโลยีเซ็นเซอร์ช่วยเพิ่มความยั่งยืนในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำและเพิ่มผลผลิต (Ramanathan et al., 2023; Chuyen et al., 2023; Li Yunfeng and Tianpei., 2019; Ubina and Cheng., 2022)

ภาพที่ 2 อุปกรณ์ผลิตออกซิเจนให้กับลูกปู

วัตถุประสงค์

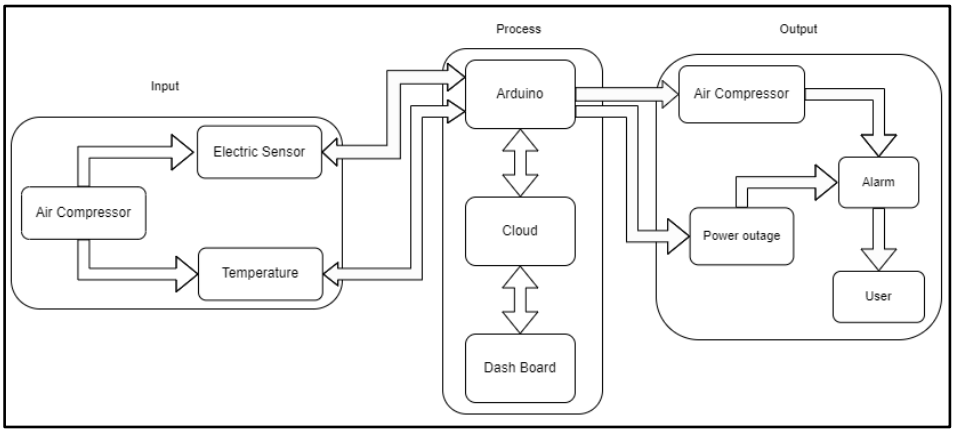
1. เพื่อศึกษา ออกแบบ และปรับปรุงระบบควบคุมการทำงานของระบบเติมอากาศ
2. เพื่อพัฒนาต้นแบบระบบแจ้งเตือนการทำงานของระบบเติมอากาศ

วิธีดำเนินการวิจัย

กรอบแนวคิดการวิจัย

การศึกษาและรวบรวมการใช้งานเครื่องผลิตออกซิเจนสำหรับการเพาะเลี้ยงลูกปูร่วมกับการใช้อินเทอร์ในทุกสรรพสิ่ง (Internet of Things) สำหรับการแสดงผลอุณหภูมิของเครื่องผลิตออกซิเจนทำงานโดยใช้บอร์ด Nb-iot DEVIO NB-DEVKIT I (อัตภาพ มณีเติม และศิริวรรณ แดงฉ่ำ, 2567; เกวลิน ยะติน และคณะ, 2567; พิมรินทร์ คีรินทร์ และคณะ, 2567) ซึ่งเป็นบอร์ดสำหรับรับข้อมูลจากเซ็นเซอร์ในตรวจสอบกระแสไฟฟ้าและ

การวัดอุณหภูมิของเครื่องเติมอากาศโดยที่ข้อมูลอุณหภูมิที่ได้จะถูกเก็บผ่านแพลตฟอร์มคลาวด์ของ Netpie (สกรณ์ บุษบง และคณะ, 2563; ธนากร น้ำหอมจันทร์, 2566; พัชรา เพชรวิโรจน์ชัย และคณะ, 2567) ทำให้ผู้ใช้งานสามารถดูอุณหภูมิการทำงานของเครื่องปั๊มอากาศผ่านอินเทอร์เน็ตอีกทั้งยังมีระบบแจ้งเตือนกรณีที่เครื่องปั๊มอากาศไม่ทำงานที่อาจเกิดจากไฟดับหรือเครื่องไม่ทำงานผ่านทาง LINE Notify ให้กับผู้ใช้ได้ทราบเมื่อเกิดข้อผิดพลาดกับเครื่องปั๊มอากาศเพื่อให้ผู้ใช้ หรือ ผู้ดูแลเข้ามาจัดการในส่วนของลูกปูทั้งนี้กรอบแนวคิดการดำเนินการวิจัยแสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 กรอบแนวคิดการดำเนินงานวิจัย

จากภาพที่ 3 กระบวนการดำเนินงานวิจัยต้นแบบระบบแจ้งเตือนข้อผิดพลาดการทำงานของอุปกรณ์ผลิตออกซิเจนโดยใช้อินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่งสำหรับการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วย 3 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 การเก็บข้อมูล ในส่วนนี้เป็นการเก็บข้อมูลของอุณหภูมิของเครื่องผลิตออกซิเจนและการตรวจสอบสถานะไฟฟ้าที่เข้ามาทำให้เครื่องผลิตออกซิเจนสามารถทำงานได้โดยใช้เซ็นเซอร์ตรวจจับความร้อน (K-type Thermocouple) ร่วมกับเซ็นเซอร์

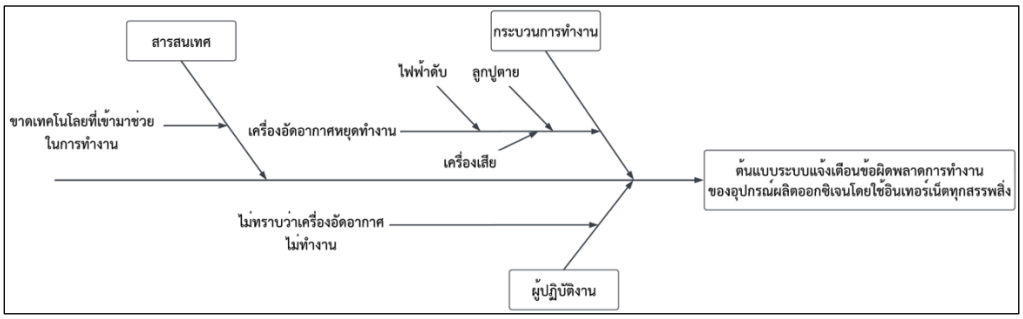
ส่วนที่ 2 การบันทึกข้อมูล ในส่วนนี้เป็นดึงข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์มาเก็บบน Netpie และให้มันแสดงผลผ่านทาง application netpie และผ่านบนเว็บเบราเซอร์

ส่วนที่ 3 การแจ้งเตือน ในส่วนนี้เป็นการแจ้งเตือนกับผู้ใช้ในกรณีเครื่องผลิตออกซิเจนหยุดทำงานจากไฟฟ้าดับให้กับผู้ใช้งานผ่านทาง LINE Notify

ทางผู้วิจัยได้นำหลักการทฤษฎีของวงจรการพัฒนาระบบ (System Development Life Cycle: S.D.LC) (โอภาส เอี่ยมสิริวงศ์, 2566) มาใช้เป็นแนวทางในการออกแบบและพัฒนาระบบประกอบด้วย

การกำหนดปัญหาและวิเคราะห์ความต้องการของผู้ใช้ (requirement analysis)

ผู้วิจัยได้สัมภาษณ์ผู้เกี่ยวข้องในกระบวนการทำงานและปัญหาจากระบบงานเดิมพบว่าการเพาะฟักปูต้องใช้ออกซิเจนตลอดเวลาจึงมีการเปิดทำงานของ เครื่องปั๊มอากาศตลอด 24 ชั่วโมง ซึ่งถ้าเกิดไฟฟ้าดับ หรือ เกิดเหตุขัดข้องเครื่องปั๊มอากาศไม่สามารถทำงานได้จะส่งผลให้ลูกปูขาดออกซิเจนและตายได้ซึ่งทางผู้วิจัยใช้แผนภูมิก้างปลาสำหรับการแสดงปัญหาและความต้องการของผู้ใช้งาน ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 แผนภูมิก้างปลาสำหรับการแสดงปัญหาและความต้องการของผู้ใช้งาน

การวิเคราะห์ (Analysis)

จากการวิเคราะห์กระบวนการและปัญหาที่เกิดขึ้นของธนาคารปูพบว่า นอกจากปัญหาเรื่องกระแสไฟฟ้าเกิดดับแล้วยังพบว่าเมื่อใช้เครื่องปั๊มอากาศเป็นเวลานานทำให้มีฝุ่นหรือสิ่งสกปรกเข้าไปอุดตันทางเข้าของอากาศและมีท่อยางฝั่งทางอากาศออกไปยังบ่อเพาะฟักเลี้ยงลูกปูส่งผลให้เครื่องปั๊มอากาศเกิดความเสียเกิดความร้อนที่สูงขึ้น

การออกแบบและพัฒนา(Design and develop)

จากกระบวนการวิเคราะห์ทางผู้วิจัยได้ออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับพัฒนาต้นแบบระบบฯ โดยมีรายละเอียดดังนี้

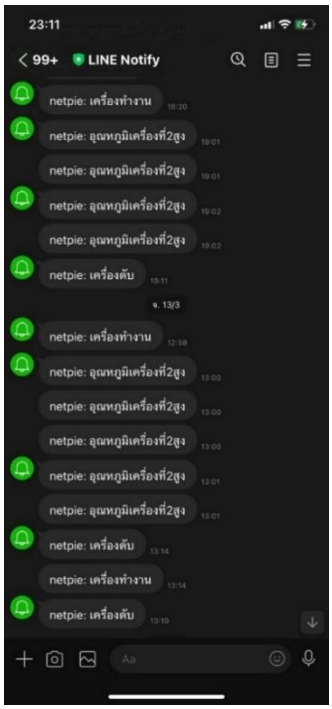
1. เซนเซอร์เซนเซอร์ตรวจจับความร้อน K-type Thermocouple ซึ่งสามารถทำงานร่วมกับเครื่องปั๊มอากาศออกซิเจนที่เปิดใช้ในระยะเวลานานได้ และทำการส่งข้อมูลอุณหภูมิของเครื่องปั๊มอากาศออกซิเจนเข้าแพลตฟอร์มคลาวด์ Netpie โดยให้ผู้ใช้สามารถดูผ่านทาง dashboard

2. ใช้ตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ ไว้ใช้ประประมวลและส่งข้อมูล ที่มีชื่อว่า Nb-iot DEVIO NB-DEVKIT I เนื่องจากสามารถเชื่อมต่อเข้าหากันได้เป็นมาตรฐานระบบโครงข่ายสัญญาณอินเทอร์เน็ตที่ใช้พลังงานต่ำ ทำให้ประหยัด Bandwidth ใช้พลังงานน้อย

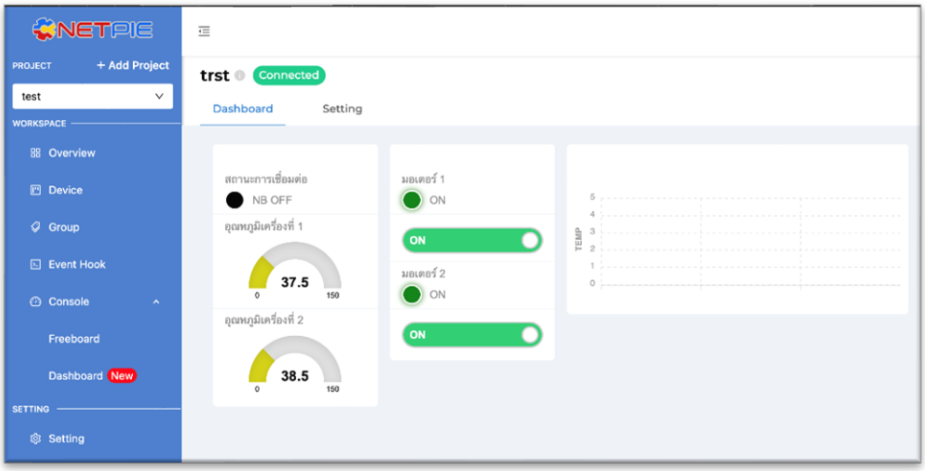
3. ใช้ Netpie application ซึ่งเป็นแพลตฟอร์มที่นอกจากจะสามารถเก็บข้อมูลแล้วสามารถใช้ในการควบคุมการสั่งการทำ งาน เปิด-ปิดอุปกรณ์ และแสดงข้อมูลอุณหภูมิผ่านแดชบอร์ด

4. การพัฒนาซอฟต์แวร์ (Software Development) หลังจากการออกแบบเสร็จเรียบร้อย ผู้จัดทำต้องทำการพัฒนาต้นแบบฯขึ้น

การทดสอบ (Testing) ทดสอบต้นแบบฯที่พัฒนาขึ้นมา เพื่อค้นหาจุดบกพร่องและแก้ไขเมื่อลงพื้นที่ธนาคารปู



ภาพที่ 5 แสดงหน้าจอการแจ้งเตือนการทำงานของเครื่องปั๊มอาการศผ่าน Line notification



ภาพที่ 6 แสดงหน้าจอ Dashboard แสดงการทำงานและอุณหภูมิของเครื่องปั๊มอากาศ

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ผลการวิจัย

การศึกษาระดับความพึงพอใจที่มีต่อการใช้งานระบบแจ้งเตือนที่ ธนาคารปู กลุ่มประมงพื้นบ้านทรัพย์อนันต์ อำเภอสิงหนคร จังหวัดสงขลา เพียงแห่งเดียวและทดสอบการทำงานของต้นแบบประมาณ 1 เดือน ซึ่งการทดสอบการทำงานของระบบจำนวน 3 ครั้ง โดยนำเสนอผลการวิเคราะห์ตามลำดับของจุดมุ่งหมาย 2 ส่วน ดังนี้

1. ผลการวิเคราะห์ข้อมูลส่วนบุคคลของผู้ตอบแบบสอบถาม

ตารางที่ 1 แสดงจำนวน และร้อยละของข้อมูลส่วนบุคคล

ข้อมูลส่วนบุคคล	จำนวน (คน)	ร้อยละ
เพศ		
ชาย	23	57.50
หญิง	17	42.50
อายุ		
20 – 30 ปี	3	7.50
31 – 40 ปี	16	40.00
41 – 50 ปี	9	22.50
51 – 60 ปี	10	25.00
61 ปีขึ้นไป	2	5.00
ระดับการศึกษา		
ประถมศึกษา	24	60.00
มัธยมศึกษา	13	32.50
ปวส./อนุปริญญา	3	7.50
รายได้		
5,000 – 10,000 บาท	28	70.00
10,001 – 15,000 บาท	12	30.00
รวม	**40**	**100.00**

จากตารางที่ 1 พบว่า ผู้ตอบแบบสอบถาม จำนวน 40 คน ส่วนใหญ่เป็นเพศชาย จำนวน 23 คน คิดเป็นร้อยละ 57.50 และเพศหญิง จำนวน 17 คน คิดเป็นร้อยละ 42.50 ส่วนใหญ่อายุ 31 – 40 ปี จำนวน 16 คน คิดเป็นร้อยละ 40.00 รองลงมาอายุ 51 - 60 ปี จำนวน 10 คน คิดเป็นร้อยละ 25.00 อายุ 41 – 50 ปี จำนวน 9 คน คิดเป็นร้อยละ 22.50 อายุ 20 – 30 ปี จำนวน 3 คน คิดเป็นร้อยละ 7.50 และอายุ 61 ปีขึ้นไป จำนวน 2 คน คิดเป็นร้อยละ 5.00 ส่วนใหญ่ระดับการศึกษาระดับประถมศึกษา จำนวน 24 คน คิดเป็นร้อยละ 60.00 รองลงมาระดับมัธยมศึกษา จำนวน 13 คน คิดเป็นร้อยละ 32.50 และระดับปวส./อนุปริญญา จำนวน

3 คน คิดเป็นร้อยละ 7.50 ส่วนใหญ่รายได้ 5,000 – 10,000 บาท จำนวน 28 คน คิดเป็นร้อยละ 70 รองลงมารายได้ 10,001 – 15,000 บาท จำนวน 12 คน คิดเป็นร้อยละ 30.00 ตามลำดับ

2. ผลการวิเคราะห์ความพึงพอใจที่มีต่อการทำงานของระบบแจ้งเตือน

ตารางที่ 2 แสดงระดับความพึงพอใจการใช้งานระบบ

ความพึงพอใจ	$\bar{X}$	S.D.	ระดับความพึงพอใจ
ด้านความสามารถในการทำงานได้ตามหน้าที่	4.33	0.376	มากที่สุด
ด้านความง่ายต่อการใช้งาน	4.39	0.512	มากที่สุด
ด้านความเร็ว	4.39	0.560	มากที่สุด
ด้านการรักษาความปลอดภัยของข้อมูล	4.40	0.533	มากที่สุด
รวม	**4.38**	**0.374**	มากที่สุด

จากตารางที่ 2 พบว่า ผู้ตอบแบบสอบถาม จำนวน 40 คน มีระดับความพึงพอใจที่มีต่อการใช้งานระบบอยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X}$ = 4.38, S.D. = 0.374) เมื่อพิจารณาเป็นรายด้าน พบว่าด้านที่มีระดับความพึงพอใจมากที่สุด คือ ด้านการรักษาความปลอดภัยของข้อมูล อยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X}$ = 4.40, S.D. = 0.533) รองลงมาด้านความง่ายต่อการใช้งาน อยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X}$ = 4.39, S.D. = 0.512) ด้านความเร็ว อยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X}$ = 4.39, S.D. = 0.560) และด้านความสามารถในการทำงานได้ตามหน้าที่ อยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X}$ = 4.33, S.D. = 0.376) ตามลำดับ

ตารางที่ 3 แสดงระดับความพึงพอใจการใช้งานระบบ ด้านความสามารถในการทำงานได้ตามหน้าที่ (Function)

ความพึงพอใจ	$\bar{X}$	S.D..	ระดับความพึงพอใจ
ระบบสามารถแจ้งเตือนให้ผู้ใช้งานทราบเมื่อเกิดไฟดับ	4.35	0.483	มากที่สุด
ระบบสามารถแจ้งเตือนได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ	4.28	0.716	มากที่สุด
ระบบแจ้งเตือนสามารถทำงานได้ตามวัตถุประสงค์และความต้องการของผู้ใช้	4.37	0.540	มากที่สุด
ระบบแจ้งเตือนสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้	4.30	0.516	มากที่สุด
รวม	**4.33**	**0.376**	มากที่สุด

จากตารางที่ 3 พบว่า ผู้ตอบแบบสอบถาม จำนวน 40 คน มีระดับความพึงพอใจที่มีต่อการใช้งานระบบ ด้านความสามารถในการทำงานได้ตามหน้าที่ (Function) อยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X}$ = 4.33, S.D. = 0.376) เมื่อพิจารณาเป็นรายข้อ พบว่าข้อที่มีระดับความพึงพอใจมากที่สุด คือ ระบบแจ้งเตือนสามารถทำงานได้ตามวัตถุประสงค์และความต้องการของผู้ใช้ อยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X}$ = 4.37, S.D. = 0.540) รองลงมาระบบสามารถแจ้งเตือนให้ผู้ใช้งานทราบเมื่อเกิดไฟดับ อยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X}$ = 4.35, S.D. = 0.483) ระบบแจ้งเตือนสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ อยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X}$ = 4.30, S.D. = 0.516) และระบบสามารถแจ้งเตือนได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ อยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X}$ = 4.28, S.D. = 0.716) ตามลำดับ

ตารางที่ 4 แสดงระดับความพึงพอใจการใช้งานระบบ ด้านความง่ายต่อการใช้งาน (Usability)

ความพึงพอใจ	$\bar{X}$	S.D.	ระดับความพึงพอใจ
ระบบแจ้งเตือนใช้งานได้ง่ายและเป็นมิตรกับผู้ใช้งาน	4.37	0.540	มากที่สุด
สามารถเข้าถึงระบบแจ้งเตือนได้สะดวกและรวดเร็ว	4.40	0.591	มากที่สุด
รวม	**4.39**	**0.512**	มากที่สุด

ตารางที่ 4 พบว่า ผู้ตอบแบบสอบถาม จำนวน 40 คน มีระดับความพึงพอใจที่มีต่อการใช้งานระบบด้านความง่ายต่อการใช้งาน (Usability) อยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X}$ = 4.39, S.D. = 0.512) เมื่อพิจารณาเป็นรายข้อ พบว่าข้อที่มีระดับความพึงพอใจมากที่สุด คือ สามารถเข้าถึงระบบแจ้งเตือนได้สะดวกและรวดเร็ว อยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X}$ = 4.40, S.D. = 0.591) รองลงมาระบบแจ้งเตือนใช้งานได้ง่ายและเป็นมิตรกับผู้ใช้งาน อยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{X}$ = 4.37, S.D. = 0.540) ตามลำดับ

ตารางที่ 5 แสดงระดับความพึงพอใจการใช้งานระบบ ด้านความเร็ว (Performance)

ความพึงพอใจ	$\bar{X}$	S.D.	ระดับความพึงพอใจ
ระบบแจ้งเตือนมีการประมวลผลที่รวดเร็ว	4.45	0.597	มากที่สุด
ระบบสารมารถแจ้งเตือนได้ทันเวลาเมื่อเกิดไฟดับ	4.33	0.656	มากที่สุด
รวม	**4.39**	**0.560**	มากที่สุด

จากตารางที่ 5 พบว่า ผู้ตอบแบบสอบถาม จำนวน 40 คน มีระดับความพึงพอใจที่มีต่อการใช้งานระบบ ด้านความเร็ว (Performance) อยู่ในระดับมากที่สุด ($\overline{X}$ = 4.39, S.D. = 0.560) เมื่อพิจารณาเป็นรายข้อ พบว่าข้อที่มีระดับความพึงพอใจมากที่สุด คือ ระบบแจ้งเตือนมีการประมวลผลที่รวดเร็ว อยู่ในระดับมากที่สุด ($\overline{X}$ = 4.45, S.D. = 0.597) รองลงมาระบบสารมารถแจ้งเตือนได้ทันเวลาเมื่อเกิดไฟดับ อยู่ในระดับมากที่สุด ($\overline{X}$ = 4.33, S.D. = 0.656) ตามลำดับ

อภิปรายผล

จากการศึกษาการทำงานของธนาคารปูผู้วิจัยได้ลงพื้นที่และพบปัญหาสำคัญเกี่ยวกับการขาดระบบการแจ้งเตือนที่มีประสิทธิภาพเมื่อเกิดไฟดับทางถ้าผู้ดูแลเปิดเครื่องปั่นไฟให้เครื่องเติมอากาศสำหรับลูกล่าช้ามีโอกาสที่เกิดความเสี่ยงที่ลูกปูตาย ทำให้ทางผู้วิจัยได้ออกแบบ และปรับปรุง กระบวนการในการทำงานใหม่โดยใช้ไอโอทีเข้ามาพัฒนาต้นแบบระบบแจ้งเตือนการทำงานของระบบเติมอากาศสำหรับการแสดงผลความร้อนรวมถึงการแจ้งเตือนผ่านระบบไลน์พบว่าระบบไอโอทีช่วยให้ทางกลุ่มฯทำงานได้ง่ายขึ้นเพราะมีการแจ้งเตือนทุกครั้งที่เกิดไฟฟ้าดับและทางกลุ่มได้เข้ามาเปิดเครื่องปั่นไฟเพื่อลดอัตราการตายของลูกปูซึ่งสอดคล้องกับวัตถุประสงค์และความต้องการของผู้ใช้งานอีกทั้งมีประโยชน์ต่อการใช้งานในด้านการควบคุมปัจจัยต่าง ๆ เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและอำนวยความสะดวกต่อการทำงานอย่างเหมาะสม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ วีรวัตร คำภู และคณะ (2567). ที่มีการใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่งควบคุมอุณหภูมิจากแสงอาทิตย์สำหรับการแปรรูปผลิตภัณฑ์อาหารส่งผลให้สามารถนำอาหารจำหน่ายได้เร็วกว่าไม่ใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่งอีกทั้งยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ ศิวัตม์ กมลคุณานนท์ และคณะ (2566) มีการใช้อินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง สำหรับการควบคุมปัจจัยการผลิตเห็ดทั้งในด้านความชื้นสัมพันธ์ อุณหภูมิ ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และแสงส่งผลให้ผลผลิตเห็ดมีผลผลิตที่สูงขึ้น และ ปิยวัฒน์ โคตรพรม และคณะ(2567) มีการนำเอาระบบอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่งประยุกต์ใช้สำหรับการตรวจสอบคุณภาพน้ำสำหรับการเลี้ยงปลาแบบไบโอฟลอค

สรุป

จากการพัฒนาปัญหาครั้งนี้ได้ ทำการนำตัวเซนเซอร์ตรวจจับความร้อน (K-type Thermocouple) เพื่อดูอุณภูมิของมอเตอร์และส่งสัญญาณเครือข่ายไร้สายไปยัง NB-iot มาช่วยในการสั่งให้ตัวเซนเซอร์ตรวจจับความร้อนส่งข้อมูลความร้อน ตาม ที่ได้กำหนดไว้พร้อมทั้งมีการควบคุมปั๊มอากาศออกซิเจน ผ่านแอปพลิเคชัน Netpie และแสดงผลค่าความร้อนและสถานะการใช้งานบนแดชบอร์ดแอปพลิเคชัน Netpie ซึ่งมีการทดสอบการใช้งานระบบจริงจากกลุ่มผู้ใช้งานโดยวัดการทำงานของระบบผลจำนวน 3 ครั้ง กับกลุ่มตัวอย่างและแต่ละครั้งมีการแจ้งเตือนไปยังมือถือของผู้ใช้งานในส่วนของระดับความพึงพอใจการใช้งานระบบพบว่าผู้ตอบแบบสอบถาม จำนวน 40 คน มีระดับความพึงพอใจที่มีต่อการใช้งานระบบ อยู่ในระดับมากที่สุด ($\overline{X}$ = 4.38,

S.D. = 0.374) เมื่อพิจารณาเป็นรายด้าน พบว่าด้านที่มีระดับความพึงพอใจมากที่สุด คือ ด้านการรักษาความปลอดภัยของข้อมูล อยู่ในระดับมากที่สุด ($\overline{X}$ = 4.40, S.D. = 0.533) รองลงมาด้านความง่ายต่อการใช้งาน อยู่ในระดับมากที่สุด ($\overline{X}$ = 4.39, S.D. = 0.512) ด้านความเร็ว อยู่ในระดับมากที่สุด ($\overline{X}$ = 4.39, S.D. = 0.560) และด้านความสามารถในการทำงานได้ตามหน้าที่ อยู่ในระดับมากที่สุด ($\overline{X}$ = 4.33, S.D. = 0.376) ตามลำดับ ส่วนระดับความพึงพอใจที่มีต่อการใช้งานระบบ ด้านความสามารถในการทำงานได้ตามหน้าที่ (Function) อยู่ในระดับสูงสุด ($\overline{X}$ = 4.33, S.D. = 0.376) ความพึงพอใจการใช้งานระบบ ด้านความง่ายต่อการใช้งาน (Usability) อยู่ในระดับมากที่สุด ($\overline{X}$ = 4.39, S.D. = 0.512) จากผลการประเมินความพึงพอใจตัวระบบต้นแบบส่งผลให้อัตราการตายของลูกปูลดลง ใช้งานง่าย ทราบสถานะของการทำงานของเครื่องเติมอากาศ และเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานดีขึ้น เนื่องจาก เกิดไฟดับมีการแจ้งเตือนไปยังผู้เกี่ยวข้องซึ่งผู้เกี่ยวข้องจะเข้ามาเปิดเครื่องปั่นไฟให้กับเครื่องเติมอากาศส่งผลทำให้ลูกปูรอด

ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้

1. ต้นแบบระบบแจ้งเตือนข้อผิดพลาดการทำงานของอุปกรณ์ผลิตออกซิเจนโดยใช้อินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่งได้นำไปใช้กับศูนย์เพาะฟักลูกปูพังสาย อ.สทิ้งพระ จ.สงขลา โดยใช้ในการแจ้งเตือนเมื่อเกิดเหตุไฟฟ้าดับกับผู้ที่เกี่ยวข้องได้ทราบและเข้ามาดำเนินการกับลูกปูได้อย่างทันเวลา ทำให้ทราบสถานะของเครื่องเติมอากาศและใช้งานได้ง่าย

ข้อเสนอในการศึกษาครั้งต่อไป

1. ควรมีขยายการใช้งานจากการเพาะฟักลูกปูไปยังกิจกรรมอื่น ๆ เช่น การแจ้งเตือนไฟฟ้าดับจากบ่อเลี้ยงกุ้ง เป็นต้น เพื่อเป็นข้อมูลในการพัฒนารูปแบบการทำงานที่เหมาะสมกับใช้งานต่อไป

2. ควรใช้เทคโนโลยี edge computing เข้ามาช่วยในการประมวลทำให้ลดระยะเวลาในการส่งข้อมูลและประมวลผลข้อมูลร่วมกับการใช้ anomaly detection เข้ามาช่วยในการหาสิ่งผิดปกติที่เกิดขึ้นทำให้สามารถแก้ไขข้อผิดพลาดได้อย่างทันเวลา

3. ควรเพิ่มสถิติสำหรับการหาค่า Accuracy, Response Time, False Alarm Rate สำหรับหาประสิทธิภาพการทำงานของระบบ

กิจกรรมประกาศ

ผลงานวิจัยในครั้งนี้คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณกองทุนสงเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม ร่วมกับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่มอบโอกาสและทุนสำหรับการดำเนินการวิจัยเพื่อให้ทางคณะผู้วิจัยได้พัฒนานวัตกรรมสำหรับสนับสนุนการฟักลูกปูร่วมกับทางศูนย์เพาะฟักลูกปูพังสายที่ช่วยเอื้อเฟื้อสถานที่ ความรู้ความเข้าใจในด้านต่าง ๆ เกี่ยวกับการเพาะพักลูกปูด้วยการนำเทคโนโลยีเข้ามาช่วยสำหรับการดำเนินงานให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่งกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2566). **แผนแม่บทการบริหารจัดการทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง พ.ศ. ๒๕๖๐-๒๕๗๙**. สืบค้นจาก https://n9.cl/3guoe

กรมประมง. (2566). **ประมาณการผลผลิตและมูลค่าสัตว์น้ำจากการประมงของประเทศไทย พ.ศ. ๒๕๖๖ - ๒๕๖๙**. สืบค้นจาก https://n9.cl/a0o9p

เกวลิน ยะติน, ธงชัย มณีชูเกตุ, และชวโรจน์ ใจสิน. (2567). การพัฒนาระบบตรวจวัดปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำและระบบตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าในบ่อเพาะเลี้ยง NB-IoT. **SURANAREE JOURAL OF SOCIAL SCIENCE**, 18(2), 1-21.

ชลิญญา สุดา, สายัณห์ อุ่นนันกาศ, โดม อดุลย์สุข, จงกล พรมยะ, และจอมสุดา ดวงวงษา. (2567). การเลี้ยงปลาชะโอนระดับความหนาแน่นที่แตกต่างกันในระบบน้ำหมุนเวียนแบบปิดขนาดเล็กในพื้นที่มีปริมาณน้ำที่จำกัดของต้นแบบเกษตรอัจฉริยะบนระบบไอโอที (IoT), **วารสารแก่นเกษตร**, 50(2), 348-361**.**

ธนากร น้ำหอมจันทร์. (2566). การพัฒนาระบบการวัดระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับการศึกษาวิจัยโดยใช้แพลตฟอร์มเน็ตพาย. **วารสารวิชาการปทุมวัน**, 12(35), 32-49.

ปิยวัฒน์ โคตรพรม, ธนากร ไชยโคตร, และประชา คำภักดี. (2567). การพัฒนาระบบตรวจสอบคุณภาพน้ำที่ใช้เทคโนโลยีไอโอทีสำหรับการเลี้ยงปลาแบบไบโอฟลอค. **วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม**, 17(4), 28-42.

พิมรินทร์ คีรินทร์, เสกสรรค์ ศิวิลัย, และอรอุมา พร้าโมต. (2566). ระบบติดตามคุณภาพน้ำในการเลี้ยงปลาในกระชังด้วยเทคโนโลยี NB-IOT โดยใช้ดัชนีวัดทางกายภาพ. **วารสารวิจัยและพัฒนาวไลยอลงกรณ์ในพระบรมราชูปถัมภ์ สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**, 19(1), 1-14.

พัชรา เพชรวิโรจน์ชัย, ธัชนันท์ แดงกนิษฐ์ สิทธิวรนันท์, เกษรินตร์ ห่านประเสริฐ, วัชรพล ทรัพย์วัฒน์, โกสินทร์ นวลจุ้ย, ปราโมทย์ สีฆ้อง, เขมิกา พงษ์เมธี, และสมปราชญ์ ศรีถกล. (2567). ชุดตรวจอากาศอัตโนมัติภาคสนามและระบบสมาร์ทอุตุนิยมวิทยาเพื่อการเกษตร. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม**, 43(4), 400-412.

ราชกิจจานุเบกษา. (2566). **ยุทธศาสตร์ชาติ (พ.ศ. ๒๕๖๑-๒๕๘๐).** สืบค้นจาก https://www.ratchakitcha.soc.go.th/DATA/PDF/2561/A/082/T_0001.PDF

วีรวัตร คำภู, ชาญชัย นามพล, และสุทิพย์ เป้งทอง. (2567). การพัฒนานวัตกรรมเครื่องอบด้วยการควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติจากพลังงานแสงอาทิตย์แบบผสมผสานด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง (IoT). **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม**, 43(1), 8-15.

ศิวัตม์ กมลคุณานนท์, นัฐพงศ์ ส่งเนียม, ดุษณี ศุภวรรธนะกุล, และธนภูมิ ศิริงาม. (2566). การพัฒนาระบบควบคุมปัจจัยในกระบวนการผลิตเห็ดกลุ่มเย็นในโรงเรือนอัจฉริยะโดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของทุกสรรพสิ่ง. **Life Science and Environment Journal**, 24(1), 1-13.

สกรณ์ บุษบง, อมรเพชร ตลับทอง, และวราวธุ จอสูงเนิน. (2563). การพัฒนาระบบปลูกผักไฮโดรโปนิกส์ด้วยสมองกลฝังตัวผ่าน NETPIE. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์**, 4(1), 67-71.

อัตภาพ มณีเติม, และศิริวรรณ แดงฉ่ำ. (2567). ตัวแบบระบบปัญญาประดิษฐ์เพื่อการเพาะปลูกเกษตรอินทรีย์แบบมีส่วนร่วม. **Journal of Applied Informatics and Technology**, 6(2), 196-221.

โอภาส เอี่ยมสิริวงศ์. (2566). **การวิเคราะห์และออกแบบระบบ (SYSTEMS ANALYSIS AND DESIGN).** ซีเอ็ดยูเคชั่น.

Chuyen, T. D., Nguyen, D. D., Cuong, N. C., & Thong, V. V. (2023). Design and manufacture control system for water quality based on IoT technology for aquaculture in the Vietnam. **Bulletin of Electrical Engineering and Informatics**, 12(4), 1893-1900.

Ramanathan, R., Duan, Y., Valverde, J., Van Ransbeeck, S., Ajmal, T., & Valverde, S. (2023). Using IoT sensor technologies to reduce waste and improve sustainability in Artisanal Fish Farming in Southern Brazil. **Sustainability**, 15(3), 2078.

Ubina, N. A., & Cheng, S. C. (2022). A review of unmanned system technologies with its application to aquaculture farm monitoring and management. **Drones**, 6(1), 12.

Yunfeng, L., & Tianpei, Z. (2019). **A design of dissolved oxygen monitoring system based on Nb-IoT**. 2019 International Conference on Smart Grid and Electrical Automation (ICSGEA). (pp. 98-101).

การเพิ่มมูลค่ากากมูลโคด้วยการใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตอิฐบล็อกประสาน

ประชุม คำพุฒ[1*]

Received : October 26, 2023
Revised : May 22, 2025
Accepted : August 27, 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำกากมูลโคในฟาร์มโคนมมาเพิ่มมูลค่า ด้วยการผลิตเป็นอิฐบล็อกประสาน โดยใช้กากมูลโคที่ได้จากเครื่องแยกกากไปตากแห้งแล้วเข้าเครื่องบดละเอียดขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 4 มาใช้เป็นส่วนผสมทดแทนดินลูกรังบางส่วน กำหนดส่วนผสมโดยน้ำหนัก คือ ปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรัง เท่ากับ 1 : 5 จากนั้นใช้กากมูลโคนมแทนที่ดินลูกรังด้วยอัตราส่วน 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 และ 0.7 โดยน้ำหนักตามลำดับ ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 ทำการผสมและขึ้นรูปเป็นก้อนตัวอย่างอิฐบล็อกประสานขนาด 22.5 x 11.5 x 6 ซม. นำตัวอย่างไปบ่มในสภาพอากาศปกติ ทำการทดสอบการดูดซึมน้ำและความหนาแน่นที่อายุ 28 วัน และทดสอบความต้านทานแรงอัดที่อายุ 7, 14, 21 และ 28 วัน ผลการวิจัย พบว่าการผสมกากมูลโคแทนที่ดินลูกรังในอัตราส่วนที่มากขึ้นส่งผลให้ความต้านทานแรงอัดและความหนาแน่นมีแนวโน้มลดลง การดูดซึมน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน มผช.602-2547 อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังต่อกากมูลโค เท่ากับ 1 : 4.8 : 0.2 จัดเป็นอิฐบล็อกประสานประเภทรับน้ำหนัก (สามารถผสมกากมูลโคนมได้มากที่สุด) นำไปใช้ก่อผนังรับแรง และอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังต่อกากมูลโค เท่ากับ 1 : 4.4 : 0.6 จัดเป็นอิฐบล็อกประสานประเภทไม่รับน้ำหนัก สามารถนำไปใช้งานในการก่อสร้างอาคารโรงเรือน และงานตกแต่งอาคาร จัดสวน หรือทำขอบแปลงปลูกผักได้

คำสำคัญ: กากมูลโค ความต้านทานแรงอัด ดินลูกรัง อิฐบล็อกประสาน

[1] ผู้ช่วยศาสตราจารย์หน่วยวิจัยวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อีเมล: prachoom_k@rmutt.ac.th

** ผู้นิพนธ์หลัก อีเมล: prachoom_k@rmutt.ac.th*

ENHANCING THE VALUE OF COW DUNG AS AN INGREDIENT FOR PRODUCING INTERLOCKING BLOCKS

Prachoom Khamput [1*]

Abstract

This study aimed to enhance the value of cow dung residue from dairy farms by using it as an ingredient in the production of interlocking bricks. Cow dung obtained from a waste separator was dried and sieved through a No. 4 sieve. The processed cow dung was then mixed with laterite soil as a partial replacement for the soil. The mixture proportions were determined by weight, with a cement-to-laterite ratio of 1:5, and the laterite soil was replaced with cow dung at levels of 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, and 0.7 parts by weight. The water-to-cement ratio was maintained at 0.5. The mixtures were molded into interlocking brick samples with dimensions of 22.5 × 11.5 × 6 cm and cured under room temperature conditions. Water absorption and density were evaluated at 28 days, while compressive strength was tested at 7, 14, 21, and 28 days. The results indicated that water absorption increased with the addition of cow dung. Based on the 602-2547 standard, a cement-to-laterite-to-cow dung ratio of 1 : 4.8 : 0.2 was classified as a load-bearing interlocking block (suitable for mixing with the highest amount of cow dung). Additionally, a cement-to-laterite-to-cow dung ratio of 1 : 4.4 : 0.6 was classified as non-load-bearing interlocking bricks. These products have potential applications in building construction, residential housing, building decoration, landscaping, and garden edging.

Keywords: Cow dung, Compressive strength, Laterite soil, Interlocking bricks

[1] *Assistant professor, Environmental Friendly Materials Research Unit, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, e-mail: prachoom_k@rmutt.ac.th*

** Corresponding author, e-mail: prachoom_k@rmutt.ac.th*

บทนำ

จากข้อมูลของกรมปศุสัตว์ ในปี 2563 ประเทศไทยมีจำนวนโคนมทั้งหมด 681,100 ตัว เป็นแม่โครีดนมจำนวน 312,800 ตัว มีน้ำนมดิบที่ผลิตได้ 3,547 ตันต่อวัน (สำนักเทคโนโลยีชีวภาพการผลิตปศุสัตว์, 2564) โดยโคนม 1 ตัวถ่ายมูลประมาณ 6 กก. ต่อวัน ดังนั้นจะมีมูลโคทั่วประเทศประมาณ 4,000 ตันต่อวัน ราคาขายตันละ 600 บาท มูลโคส่วนใหญ่เป็นของแข็งประกอบไปด้วยเศษของพืชและสัตว์ซึ่งเป็นอาหารที่สัตว์กินเข้าไปแล้วไม่สามารถย่อยหรือนำไปใช้ประโยชน์ได้หมด จึงเหลือเป็นกากที่สัตว์ขับถ่ายออกมา (ภาพที่ 1) โดยเศษอาหารเหล่านี้ได้ผ่านกระบวนการย่อยสลายไปบางส่วนแล้วในทางเดินอาหาร มูลโคส่วนมากนำไปทำเป็นปุ๋ยหรือเลี้ยงไส้เดือน (คริษฐ์สพล หนูพรหม และคณะ, 2560) และจากปริมาณมูลโคที่มีอยู่เป็นจำนวนมากหากทำการแยกกากออกแล้วจะมีความสะอาดและมีเส้นใยเป็นจำนวนมาก จึงสามารถนำไปเพิ่มมูลค่าได้ เช่น ทำเป็นกระดาษ ทำเป็นกระถางต้นไม้ที่ย่อยสลายได้ (Surtia et al., 2014) เป็นต้น

ภาพที่ 1 กองมูลโคภายในฟาร์มโคนม อำเภอมวกเหล็ก จังหวัดสระบุรี (ที่มา: ดัดแปลงจาก ประชุม คำพุฒ, 2566)

อิฐบล็อกประสานเป็นวัสดุก่อสร้างที่มีความแข็งแรง รูปทรงสวยงาม มีกระบวนการผลิตไม่ยุ่งยาก ใช้เครื่องจักรต้นทุนต่ำที่เหมาะสำหรับชุมชน ใช้พลังงานในการผลิตน้อย ซึ่งจุดเด่นของอิฐบล็อกประสาน คือ สามารถใช้วัสดุเหลือทิ้งมาเป็นส่วนผสมเพื่อเสริมแรงหรือลดต้นทุนในการผลิตได้ ทั้งวัสดุเหลือทิ้งจากภาคอุตสาหกรรมจำพวกขี้เถ้าเหลือทิ้งต่าง ๆ (ประชุม คำพุฒ, 2561; จรูญ เจริญเนตรกุล, 2557) หรือเศษหินฝุ่นที่เหลือทิ้งจากเหมืองแร่ต่าง ๆ ทั่วประเทศ (ประชุม คำพุฒ และคณะ, 2558; ประชุม คำพุฒ, 2560; ประชุม คำพุฒ และสัจจะชาญ พรัดมะลิ, 2561) ซึ่งผลจากการวิจัยพบว่าส่วนผสมที่พอเหมาะจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความแข็งแรงและผ่านมาตรฐาน มผช.602-2547 เรื่องอิฐบล็อกประสาน (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2547) นอกจากเศษวัสดุเหลือทิ้งจากภาคอุตสาหกรรมแล้ว ยังมีการนำวัสดุเหลือทิ้งจากภาคการเกษตรจำพวกเส้นใยธรรมชาติมาใช้เป็นส่วนผสมในการทำอิฐบล็อกประสาน อาทิ การนำเส้นใยมะพร้าวมาผสมในอิฐบล็อก

ประสาน (Khedari. et al., 2005) การใช้ฟางข้าวผสมในอิฐบล็อกประสาน (ปิยะพล สีหาบุตร และคณะ, 2559) อิฐบล็อกประสานที่ผสมแกนกัญชง (ประชุม คำพุฒ, 2562ก) อิฐบล็อกประสานที่ผสมเศษก้านใบยาสูบ เป็นต้น (ประชุม คำพุฒ, 2562ข) การใช้จากกากมะพร้าวมาใช้ในการผลิตคอนกรีตบล็อก (วันปิติ ธรรมศรี และคณะ, 2565) และงานวิจัยที่ใกล้เคียงกับบทความนี้ คือ การใช้กากมูลโคเป็นส่วนผสมคอนกรีตเพื่อเป็นแนวทางผลิตอิฐบล็อกประสาน (ประชุม คำพุฒ, 2566) ซึ่งผลการวิจัยที่ผ่านมากล่าวโดยสรุปได้ว่าเส้นใยธรรมชาติต่าง ๆ ที่นำมาใช้เป็นส่วนผสมในอิฐบล็อกประสานส่งผลให้การรับแรงอัดและความหนาแน่นมีแนวโน้มลดลงจึงมีคุณสมบัติด้านการเป็นฉนวนความร้อนที่ดีขึ้น การดูดซึมน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่เส้นใยธรรมชาติมีส่วนช่วยในด้านการรับแรงดึง การรับแรงดัด และช่วยลดการแตกร้าวที่ผิวหน้าได้

ดังนั้นการนำกากมูลโคมาใช้เป็นส่วนผสมทดแทนดินลูกรังบางส่วนในการผลิตอิฐบล็อกประสาน จึงมีความเป็นไปได้ที่จะเป็นการเพิ่มมูลค่าของกากมูลโคและยังช่วยให้คุณสมบัติบางประการของอิฐบล็อกประสานดีขึ้นได้เหมือนกับการใช้เส้นใยธรรมชาติแบบอื่น ๆ และยังสามารถมีคุณสมบัติผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน มผช.602-2547 เรื่องอิฐบล็อกประสาน โดยสูตรที่เหมาะสมจากงานวิจัยสามารถจำแนกประเภทได้ทั้งแบบรับน้ำหนักที่นำไปใช้ก่อสร้างเป็นผนังอาคารรับน้ำหนัก และแบบไม่รับน้ำหนักที่นำไปใช้ประโยชน์เป็นวัสดุกั้นห้อง วัสดุตกแต่งอาคาร วัสดุจัดสวน และขอบแปลงผัก รวมทั้งสามารถเพิ่มรายได้ให้กับเกษตรกร ชุมชน และผู้ประกอบการ ตามแนวทางของระบบเศรษฐกิจหมุนเวียน (circular economy) ที่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อเพิ่มมูลค่ากากมูลโคด้วยการนำมาใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตอิฐบล็อกประสาน โดยทำการทดลองสูตรผสม ทดสอบสมบัติของอิฐบล็อกประสานตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช.602-2547 การนำไปใช้งานจริง และคำนวณต้นทุนการผลิต

วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีการดำเนินงานวิจัยประกอบด้วย วัสดุและอุปกรณ์ การกำหนดส่วนผสม การขึ้นรูปตัวอย่างและการทดสอบ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. วัสดุและอุปกรณ์

1.1 ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก จากร้านค้าวัสดุก่อสร้างทั่วไป ตามมาตรฐาน *มอก*.2594-2556 เรื่อง ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2556)

1.2 ดินลูกรัง จากเหมืองดินลูกรังจังหวัดชัยภูมิ นำมาบดย่อยผ่านตะแกรงเบอร์ 40 (ภาพที่ 2) มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.67 (ดินลูกรังที่นำมาใช้จะเป็นลักษณะคล้ายกับเม็ดทรายมากกว่าดิน)

1.3 กากมูลโคนมแห้ง จากฟาร์มโคนมในอำเภอมวกเหล็ก จังหวัดสระบุรี ที่ได้จากการใช้เทคโนโลยีเครื่องแยกกาก นำกากมูลโคมาอบให้แห้งจนกระทั่งไม่เหลือความชื้น แล้วทำการบดย่อยผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (ภาพที่ 3) มีค่าความถ่วงจำเพาะ 0.35-0.50

1.4 น้ำประปา

1.5 เครื่องบดย่อยกากมูลโคพร้อมตะแกรงคัดขนาด (ภาพที่ 4)

1.6 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล ความละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง

1.7 เครื่องผสมคอนกรีตแบบกระทะ

1.8 เครื่องอัดอิฐบล็อกประสานแบบมือโยก ติดตั้งแบบหล่อ ขนาด 22.5 x 11.5 x 6 ซม. (ภาพที่ 5)

1.9 อุปกรณ์ทดสอบความหนาแน่น และการดูดซึมน้ำ

1.10 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine)

ภาพที่ 2 ดินลูกรัง จากเหมืองดินลูกรังจังหวัดชัยภูมิ

ภาพที่ 3 กากมูลโคนมแห้ง จากฟาร์มโคนมในอำเภอมวกเหล็ก จังหวัดสระบุรี ขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 4

ภาพที่ 4 เครื่องบดย่อยกากมูลโคพร้อมตะแกรงคัดขนาด (ที่มา: ประชุม คำพุฒ, 2566)

ภาพที่ 5 เครื่องอัดอิฐบล็อกประสานแบบมือโยกพร้อมติดตั้งแบบหล่อขนาด 22.5x11.5x6 ซม.
(ที่มา: ประชุม คำพุฒ, 2566)

2. การกำหนดส่วนผสม

ทำการกำหนดส่วนผสมของอิฐบล็อกประสานโดยน้ำหนัก เริ่มจากการใช้อัตราส่วนควบคุม คือ ปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังเท่ากับ 1 : 5 จากนั้นใช้กากมูลโคแทนที่ดินลูกรังในปริมาณร้อยละ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 และ 0.7 ตามลำดับ โดยทุกอัตราส่วนใช้ปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.5 รายละเอียดส่วนผสมแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของอิฐบล็อกประสาน (โดยน้ำหนัก)

อัตราส่วนที่	สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์ (กก.)	ดินลูกรัง (กก.)	กากมูลโค (กก.)	น้ำประปา (กก.)
1	C 1 : 5 : 0	1	5	0	0.5
2	C 1 : 4.9 : 0.1	1	4.9	0.1	0.5
3	C 1 : 4.8 : 0.2	1	4.8	0.2	0.5
4	C 1 : 4.7 : 0.3	1	4.7	0.3	0.5
5	C 1 : 4.6 : 0.4	1	4.6	0.4	0.5
6	C 1 : 4.5 : 0.5	1	4.5	0.5	0.5
7	C 1 : 4.4 : 0.6	1	4.4	0.6	0.5
8	C 1 : 4.3 : 0.7	1	4.3	0.7	0.5

หมายเหตุ ตัวอย่างสัญลักษณ์ C 1 : 4.9 : 0.1 หมายถึง ซีเมนต์ 1 ส่วน ดินลูกรัง 4.9 ส่วน กากมูลโค 0.1 ส่วน

3. การขึ้นรูปตัวอย่างและการทดสอบ

ข้อกำหนดในการทดลอง การขึ้นรูปตัวอย่างเพื่อทำการทดสอบแต่ละสมบัติของแต่ละสูตรผสม กำหนดให้ใช้ตัวอย่างทดสอบสูตรอัตราส่วนละจำนวน 30 ตัวอย่าง แล้วทำการการสุ่มเลือก 5 ตัวอย่าง ที่ให้ผลการทดสอบโดยเฉลี่ยมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ไม่เกิน 0.50 มาทำการหาเฉลี่ย ทำกราฟความสัมพันธ์และวิเคราะห์ผลการทดสอบ

3.1 การขึ้นรูปก้อนตัวอย่างอิฐบล็อกประสาน

วิธีการดำเนินงานเริ่มจากการตวงส่วนผสมประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ ดินลูกรัง กากมูลโค และน้ำ ตามอัตราส่วนในตารางที่ 1 ผสมวัตถุดิบด้วยเครื่องผสมแบบกระทะ คลุกเคล้าให้เข้ากัน แล้วนำส่วนผสมที่เข้ากันดีแล้วเทลงแบบหล่อและอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดอิฐบล็อกประสานแบบมือโยกขนาด 22.5 x 11.5 x 6 ซม. (ภาพที่ 6) นำตัวอย่างอิฐบล็อกประสานออกจากแบบหล่อ แล้วนำไปบ่มในที่ร่มอากาศถ่ายเทสะดวก (ภาพที่ 7) เพื่อทำการทดสอบสมบัติตามมาตรฐาน มผช.602-2547 เรื่องอิฐบล็อกประสาน

ภาพที่ 6 อิฐบล็อกประสานที่มีส่วนผสมของกากมูลโค

ภาพที่ 7 การบ่มอิฐบล็อกประสานในสภาพอากาศปกติ

3.2 การทดสอบสมบัติของอิฐบล็อกประสาน

การทดสอบสมบัติตามมาตรฐาน มผช.602-2547 เรื่องอิฐบล็อกประสาน (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2547) ประกอบด้วย

1) ลักษณะทั่วไป คือ ต้องไม่มีรอยแตกหรือร้าว อาจบิ่นได้เล็กน้อย

2) มิติ มีความคลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน ± 2 มม.

3) ความต้านแรงอัด แบ่งออกเป็นชนิดรับน้ำหนักค่าเฉลี่ยต้องไม่น้อยกว่า 7 เมกะปาสคัล และชนิดไม่รับน้ำหนักค่าเฉลี่ยต้องไม่น้อยกว่า 2.5 เมกะปาสคัล

4) การดูดซึมน้ำหรือมาตรฐาน มผช. ใช้คำว่า “การดูดกลืนน้ำ” ทดสอบเฉพาะชนิดรับน้ำหนัก โดยมีข้อกำหนดตาม ตารางที่ 2 ทั้งนี้จากน้ำหนักของอิฐบล็อกประสานที่ประกอบการพิจารณาค่าการดูดซึมน้ำสามารถนำมาทำการทดสอบสมบัติด้านความหนาแน่นเพิ่มเติม เพื่อช่วยในการวิเคราะห์สมบัติของอิฐบล็อกประสานต่อไป

ตารางที่ 2 ข้อกำหนดการดูดซึมน้ำ (ทดสอบเฉพาะชนิดรับน้ำหนัก) ตามมาตรฐาน มผช.602-2547

น้ำหนักอิฐบล็อกประสานเมื่ออบแห้ง (กก.)	**การดูดกลืนน้ำสูงสุด เฉลี่ยจากอิฐบล็อกประสาน 5 ก้อน (กก./ลบ.ม.)**
ไม่มากกว่า 1,680	288
1,681 ถึง 1,760	272
1,761 ถึง 1,840	256
1,841 ถึง 1,920	240
1,921 ถึง 2,000	224
มากกว่า 2,000	208

ค่าความต้านแรงอัดทำการทดสอบอิฐบล็อกประสานที่อายุการบ่ม 7, 14, 21 และ 28 วัน (ภาพที่ 7) ทำการคำนวณโดยนำแรงอัดสูงสุดที่กระทำหารด้วยพื้นที่หน้าตัดที่รับแรงอัด ส่วนค่าการดูดซึมน้ำและความหนาแน่นของอิฐบล็อกประสานทำการทดสอบที่อายุการบ่ม 28 วัน (ภาพที่ 8) ส่วนวิธีการทดสอบการดูดซึมน้ำ (ภาพที่ 9) และความหนาแน่น ทำโดยการวัดปริมาตรก้อนตัวอย่าง ชั่งน้ำหนักปกติ ชั่งน้ำหนักหลังแช่น้ำ และชั่งน้ำหนักหลังอบแห้ง โดยวิธีการคำนวณค่าความหนาแน่นให้นำน้ำหนักปกติหารด้วยปริมาตร ค่าการดูดซึมน้ำให้นำน้ำหนักหลังแช่น้ำลบออกด้วยน้ำหนักหลังอบแห้ง

ภาพที่ 8 การทดสอบความต้านแรงอัดของอิฐบล็อกประสาน

ภาพที่ 9 การแช่อิฐบล็อกประสานในน้ำสะอาดเพื่อทดสอบการดูดซึมน้ำ

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

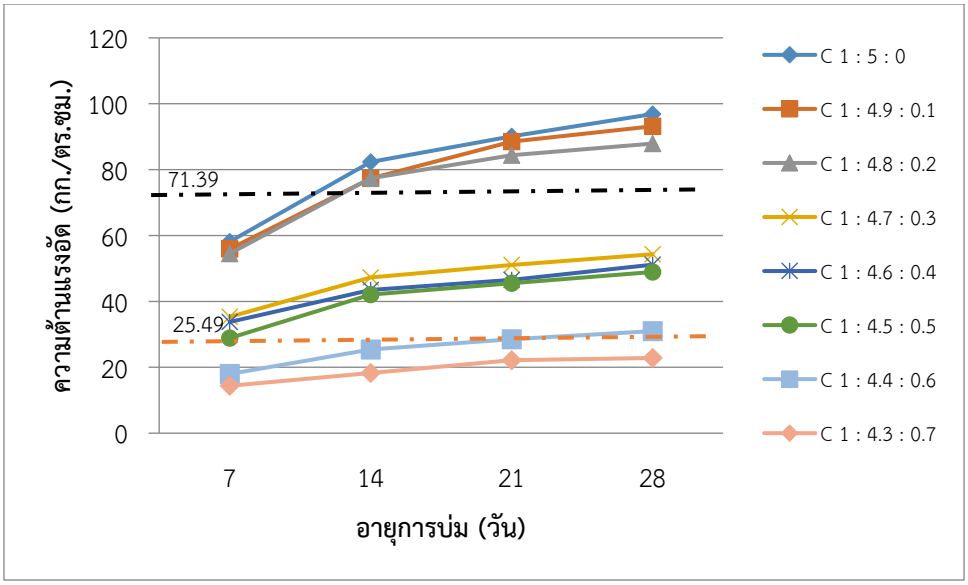
1. ลักษณะทั่วไป

ผลการทดสอบอิฐบล็อกประสานผสมกากมูลโคด้วยการตรวจพินิจพบว่า อิฐบล็อกประสานทุกอัตราส่วนไม่มีรอยแตกร้าว มีมิติความคลาดเคลื่อนไม่เกินกว่า ± 2 มม. จึงผ่านตามข้อกำหนดของมาตรฐาน

2. ความต้านแรงอัด

ผลการทดสอบความต้านแรงอัดของอิฐบล็อกประสานในภาพที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงอัดและอายุการบ่มของก้อนตัวอย่างอิฐบล็อกประสานผสมกากมูลโคขนาด 22.5 x 11.5 x 6 ซม. ที่อัตราส่วนต่าง ๆ อายุการบ่มที่ 7, 14, 21 และ 28 วัน ตามลำดับ พบว่าเมื่ออายุการบ่มเพิ่มมากขึ้นค่าความต้านทานแรงอัดมีค่าสูงขึ้นตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์กับน้ำจะพัฒนาความสามารถในการรับแรงเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่มากขึ้น และสามารถรับแรงได้เต็มที่เมื่ออายุ 28 วัน (ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2555) และเมื่อผสมกากมูลโคในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้ค่าความต้านแรงอัดมีแนวโน้มลดลงตามลำดับ เนื่องจากกากมูลโคเป็นวัสดุชีวภาพที่ไม่แข็งแรงเท่ากับมวลรวมปกติ (ดินลูกรัง) การที่ผสมกากมูลโคในปริมาณมากเกินไปนั้นก้อนตัวอย่างอิฐบล็อกประสานจะรับแรงได้ลดลงไปเรื่อย ๆ จนไม่สามารถรับแรงได้ เพราะว่าปริมาณเส้นใยของกากมูลโคมีปริมาณมากเกินไปจนทำให้ความสามารถในการยึดเกาะตัวของเนื้ออิฐบล็อกประสานลดลง มีช่องว่างภายในเนื้ออิฐบล็อกประสานมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าความหนาแน่นของตัวอย่างอิฐบล็อกประสานที่ลดลงตามลำดับเช่นเดียวกัน อีกทั้งยังสอดคล้องกับงานวิจัยที่ใช้วัสดุชีวภาพในการผสมเป็นมวลรวมบางส่วนในคอนกรีต (ประชุม คำพุฒ, 2562ก) โดยเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยที่ใช้เส้นใยธรรมชาติในการผสมคอนกรีต (นิรมล ปั้นลาย และคณะ, 2562) อีกทั้งการผสมกากมูลโคในปริมาณที่มากขึ้นในขณะที่ปริมาณน้ำยังคงเท่าเดิมนั้น ทำให้เส้นใยของกากมูลโคไปดูดซึมน้ำจากซีเมนต์เพสต์ส่งผลให้ปริมาณน้ำในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นลดลง ความต้านทานแรงอัดจึงลดลง เช่นเดียวกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่ใช้เส้นใยธรรมชาติผสมในคอนกรีต (สัจจะชาญ พรัดมะลิ และประชุม คำพุฒ, 2564)

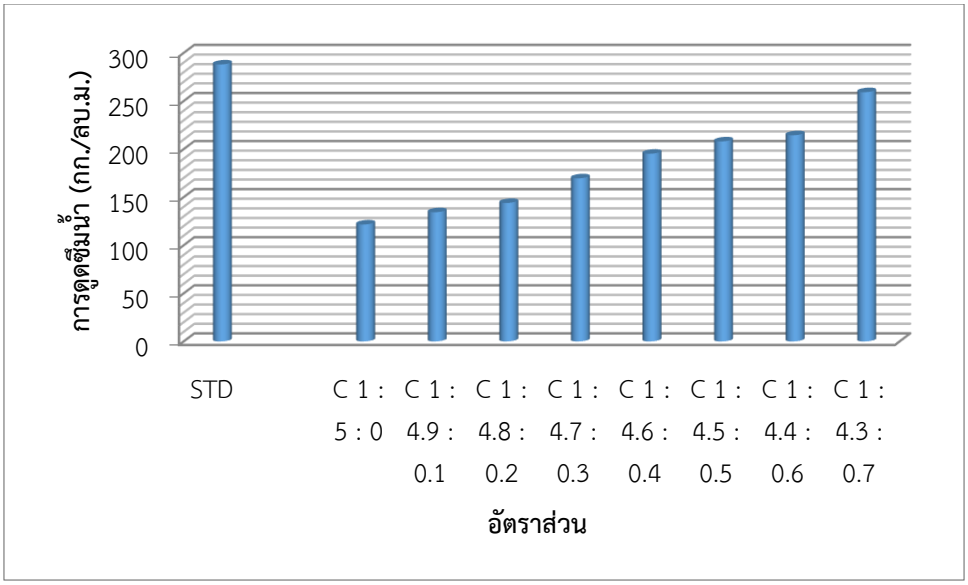
เมื่อนำผลการทดสอบไปเปรียบเทียบกับมาตรฐาน มผช.602-2547 เรื่องอิฐบล็อกประสาน พบว่าสามารถจำแนกประเภทของอิฐบล็อกประสานได้ โดยที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังต่อกากมูลโค เท่ากับ C 1 : 4.8 : 0.2 มีค่าความต้านแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 87.91 กก./ตร.ซม. จัดเป็นอิฐบล็อกประสานประเภทรับน้ำหนักที่กำหนดค่าความต้านแรงอัดเฉลี่ยไม่น้อยกว่า 7 เมกะปาสคัล (71.39 กก./ตร.ซม.) ซึ่งสาเหตุที่เลือกใช้อัตราส่วนนี้เนื่องจากสามารถผสมกากมูลโคได้มากที่สุดที่ยังมีค่าความต้านแรงอัดผ่านตามเกณฑ์ที่กำหนด และที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังต่อกากมูลโค เท่ากับ C 1 : 4.4 : 0.6 มีค่าความต้านแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 30.98 กก./ตร.ซม. จัดเป็นอิฐบล็อกประสานประเภทไม่รับน้ำหนัก กำหนดค่าความต้านทานแรงอัดเฉลี่ยไม่น้อยกว่า 2.5 เมกะปาสคัล (25.49 กก./ตร.ซม.) จึงสามารถเลือกใช้อัตราส่วนได้ตามความต้องการให้เหมาะสมกับการใช้งาน



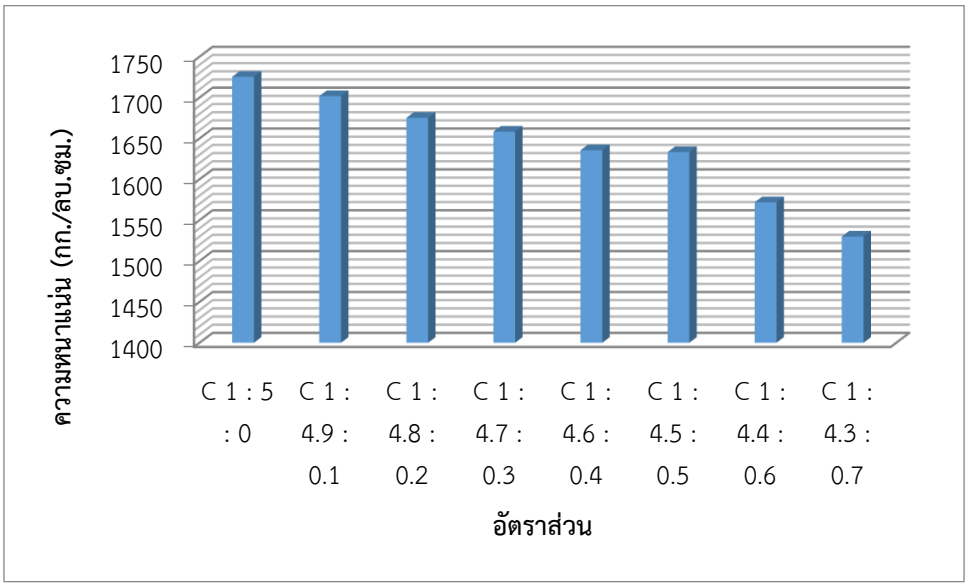
ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงอัดและอายุการบ่มของก้อนตัวอย่างอิฐบล็อกประสานที่อัตราส่วนต่าง ๆ

3. การดูดซึมน้ำและความหนาแน่น

ภาพที่ 11 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ และ ภาพที่ 12 ผลการทดสอบความหนาแน่น ที่อายุ 28 วัน ของก้อนตัวอย่างอิฐบล็อกประสานผสมกากมูลโคขนาด 22.5 x 11.5 x 6 ซม. พบว่าเมื่อผสมกากมูลโคแห้งในก้อนตัวอย่างอิฐบล็อกประสานในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้การดูดซึมน้ำ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากกากมูลโคเป็นวัสดุชีวภาพมีเส้นใยพืชจำนวนมากจึงดูดซึมน้ำและความชื้นได้ดีกว่ามวลรวมปกติซึ่งเป็นทราย (ประชุม คำพุฒ, 2562ข) ดังนั้นเมื่อผสมกากมูลโคในตัวอย่างอิฐบล็อกประสานในปริมาณที่มาก และเมื่อตัวอย่างอิฐบล็อกประสานสัมผัสกับความชื้นหรือแช่น้ำโดยตรงจึงส่งผลให้ก้อนตัวอย่างอิฐบล็อกประสานมีค่าการดูดซึมน้ำสูงมากขึ้นตามไปด้วย ในทางกลับกันความหนาแน่นมีค่าลดลงตามลำดับเนื่องจากกากมูลโคมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าหรือมีน้ำหนักเบากว่ามวลรวมปกติคือดินลูกรัง จึงทำให้ก้อนตัวอย่างอิฐบล็อกประสานมีความหนาแน่นลดลงมีน้ำหนักที่เบาลง ซึ่งเป็นข้อดีในเรื่องของการเป็นฉนวนป้องกันความร้อนและฉนวนป้องกันเสียง อย่างไรก็ดีความหนาแน่นอัตราส่วน C1 : 4.6 : 0.4 และ C1 : 4.5 : 0.5 มีความหนาแน่นค่อนข้างใกล้เคียงกันอาจเนื่องมาจากความคลาดเคลื่อนของการให้แรงในการอัดขึ้นรูปอิฐบล็อกประสานด้วยเครื่องอัดแบบมือโยก ทั้งนี้ค่าความหนาแน่นที่ได้ก็ยังคงเป็นไปในทิศทางแนวโน้มเดียวกัน



ภาพที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซึมน้ำและอัตราส่วนต่าง ๆ ของอิฐบล็อกประสานที่อายุ 28 วัน



ภาพที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและอัตราส่วนต่าง ๆ ของอิฐบล็อกประสานที่อายุ 28 วัน

4. การใช้งานก่อผนังอาคารจริง

ภาพที่ 13 การขนส่งอิฐบล็อกประสาน (ซ้าย) การก่อผนังอาคารด้วยอิฐบล็อกประสาน (ขวา)

ภาพที่ 13 การใช้อิฐบล็อกประสานผสมกากมูลโคก่อผนังอาคารจริง โดยทำเป็นผนังอาคารสำหรับเป็นศูนย์การเรียนรู้การทำอิฐบล็อกประสานที่ ตำบลมวกเหล็ก อำเภอมวกเหล็ก จังหวัดสระบุรี ซึ่งการทดสอบเริ่มตั้งแต่การขนส่งอิฐบล็อกประสานจาก หน่วยวิจัยวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี ไปยังสถานที่ก่อสร้าง และทำการก่อผนังอาคารตรวจสอบการแตกหักเสียหาย ความเรียบ สม่ำเสมอ ได้ระดับ และได้ฉาก ผลการทดสอบพบว่า อิฐบล็อกประสานผสมกากมูลโคไม่มีความเสียหายระหว่างการขนส่ง โดยไม่มีการแตกร้าว ไม่แตกหัก ขอบไม่บิ่น เมื่อนำมาก่อเป็นผนังอาคารสามารถทำการก่อ-ฉาบ ใช้งานได้จริงเหมือนกับอิฐบล็อกประสานปกติที่ไม่ผสมกากมูลโค ทั้งนี้เนื่องจากอิฐบล็อกประสานผสมกากมูลโคมีคุณสมบัติต่าง ๆ ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน มผช.602-2547 จึงสามารถนำไปใช้งานทดแทนอิฐบล็อกประสานแบบปกติได้

5. การคำนวณต้นทุนการผลิต

การคิดคำนวณต้นทุนการผลิตอิฐบล็อกประสานผสมกากมูลโค คิดต้นทุนที่ห้องปฏิบัติการทดสอบ ใช้สูตรอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังต่อกากมูลโค เท่ากับ 1 : 4.4 : 0.6 มีค่าความต้านแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 30.98 กก./ตร.ซม. จัดเป็นอิฐบล็อกประสานประเภทไม่รับน้ำหนัก ที่เลือกอัตราส่วนนี้มาคำนวณต้นทุนการผลิต เนื่องจากเป็นอัตราส่วนที่ได้รับความนิยมจากลูกค้าในการสั่งซื้อ โดยต้นทุนการผลิตต่อก้อนแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ต้นทุนการผลิตอิฐบล็อกประสานผสมกากมูลโค (ต่อก้อน)

รายการต้นทุน	ราคา (บาท)
ปูนซีเมนต์	2.500
ดินลูกรัง	2.630
น้ำ	0.002
ขนส่งวัสดุ (รวมกากมูลโค)	0.500
แรงงาน	1.500
ไฟฟ้าเครื่องอัด	0.233
ไฟฟ้าเครื่องผสม	0.066
เบ็ดเตล็ด	0.100
รวม	7.531

ที่มา : อ้างอิงข้อมูลจากผู้ประกอบการผลิตอิฐบล็อกประสานในพื้นที่จังหวัดสระบุรี

ตารางที่ 3 เป็นการคิดต้นทุนการผลิตอิฐบล็อกประสานที่มีส่วนผสมของกากมูลโคของสูตรที่เลือกในห้องปฏิบัติการ โดยคิดต้นทุนกากมูลโครวมกับต้นทุนค่าขนส่งวัสดุ เนื่องจากกากมูลโคเป็นวัสดุเหลือทิ้งในฟาร์มโคนม ซึ่งต้นทุนหลัก ๆ จะเป็นปูนซีเมนต์กับดินลูกรัง รองลงไปเป็นค่าแรงงานและค่าขนส่งวัสดุตามลำดับ โดยอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังต่อกากมูลโค เท่ากับ C 1 : 4.4 : 0.6 มีต้นทุนการผลิต 7.531 บาทต่อก้อน สามารถตั้งราคาขายได้เท่ากับอิฐบล็อกประสานปกติในท้องตลาด 12 บาทต่อก้อน ได้กำไร 4.469 บาทต่อก้อน จึงมีความคุ้มค่ากับการผลิตและจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ ซึ่งจะใช้เป็นข้อมูลในการจัดทำแผนธุรกิจ พร้อมคิดความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์การลงทุนต่อไป

สรุป

การเพิ่มมูลค่ากากมูลโคด้วยการนำมาใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตอิฐบล็อกประสาน โดยทำการทดลองสูตรผสมกากมูลโคนมแทนที่ดินลูกรังในอัตราส่วนต่าง ๆ ทดสอบสมบัติของอิฐบล็อกประสานตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช.602-2547 การนำไปใช้งานจริง และคำนวณต้นทุนการผลิต ผลการทดสอบพบว่า ลักษณะทั่วไปของอิฐบล็อกประสานทุกก้อนผ่านตามเกณฑ์ที่กำหนด เมื่อผสมกากมูลโคปริมาณมากขึ้นส่งผลให้การดูดซึมน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ความหนาแน่น และความต้านทานแรงอัดมีแนวโน้มลดลง โดยอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังต่อกากมูลโค เท่ากับ C 1 : 4.8 : 0.2 มีค่าความต้านแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 87.91 กก./ตร.ซม. จัดเป็นอิฐบล็อกประสานประเภทรับน้ำหนักใช้เป็นวัสดุก่อผนังอาคารที่ต้องการรับน้ำหนักมาก และอัตราส่วน C 1 : 4.4 : 0.6 มีค่าความต้านแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 30.98 กก./ตร.ซม. จัดเป็นอิฐบล็อกประสานประเภทไม่รับน้ำหนัก นำไปใช้งานได้ปกติเหมือนกับอิฐบล็อกประสานทั่วไป และมีต้นทุนการผลิตต่อก้อนไม่เกิน 8 บาท

ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะในการนำผลงานวิจัยไปใช้

การนำอิฐบล็อกประสานที่มีส่วนผสมของกากมูลโคไปใช้ประโยชน์ สามารถส่งเสริมให้ชุมชน เกษตรกรในพื้นที่ หรือผู้ประกอบการวิสาหกิจขนาดย่อม ทำการผลิตและจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ได้ โดยมีจุดเด่นด้านการเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม การเป็นฉนวนความร้อนที่ดี มีน้ำหนักเบา

ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป

ในงานวิจัยในครั้งต่อไปควรดำเนินการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์การลงทุน การจัดทำแผนธุรกิจ การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์อิฐประสานที่มีส่วนผสมของกากมูลโคและเปรียบเทียบกับอิฐบล็อกประสานปกติหรืออิฐบล็อกประสานทางเลือกอื่น ๆ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณบางส่วนจากหน่วยบริหารและจัดการทุนด้านการเพิ่มความสามารถในการแข่งขันของประเทศ (*บพข.*) ได้รับการสนับสนุนเครื่องจักรในการผลิตจากหน่วยวิจัยวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และได้รับการสนับสนุนกากมูลโคจากผู้ประกอบการฟาร์มโคนม ในอำเภอมวกเหล็ก จังหวัดสระบุรี

เอกสารอ้างอิง

คริษฐ์สพล หนูพรหม, อมรรัตน์ ชุมทอง, พงษ์ศักดิ์ มานสุริวงศ์, และฝนทิพย์ ทองนุ้ย. (2560). ผลของมูลโคและน้ำหมักชีวภาพต่อ การเจริญเติบโตและผลผลิตของบรอคโคลี. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**, 25(4), 627-638.

จรูญ เจริญเนตรกุล. (2557). อิฐบล็อกประสานที่มีส่วนผสมเถ้าและกะลาปาล์มน้ำมัน. **วารสารการพัฒนาชุมชนและคุณภาพชีวิต**, 2(1), 103-112.

นิรมล ปั้นลาย, ประชุม คำพุฒ, และกิตติพงษ์ สุวีโร. (2562). ผลิตภัณฑ์แผ่นใยซีเมนต์อัดผสมชานอ้อย. **วารสารวิจัยเทคโนโลยีนวัตกรรม**, 3(2), 59-67.

ประชุม คำพุฒ, กิตติพงษ์ สุวีโร, อมเรศ บกสุวรรณ, และนิรมล ปั้นลาย. (2558). การใช้ฝุ่นหินภูเขาไฟในผลิตภัณฑ์บล็อกประสาน. **วารสารการพัฒนาชุมชนและคุณภาพชีวิต**, 3(2), 239-247.

ประชุม คำพุฒ. (2560). การใช้เศษหินของเหมืองแร่แอนดีไซต์สำหรับพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์บล็อกประสาน. **วารสารวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไทย**, 31(3), 13-19.

ประชุม คำพุฒ, และสัจจะชาญ พรัดมะลิ. (2561). การใช้เทคโนโลยีสำหรับชุมชนในการพัฒนาผลิตภัณฑ์บล็อกประสานจากเศษหินบะซอลต์. **วารสารวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไทย**, 32(2), 9-15.

ประชุม คำพุฒ. (2561). การใช้เถ้ากะลามะพร้าวเป็นมวลรวมในผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อก. **วารสารวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไทย**, 32(1), 9-16.

ประชุม คำพุฒ. (2562ก). **ผลิตภัณฑ์อิฐบล็อกประสานจากแกนต้นกัญชง.** การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 14, โรงแรมวรวนา หัวหิน โฮเต็ล แอนด์ คอนเวนชั่น, หัวหิน, ประจวบคีรีขันธ์, 6-8 มีนาคม 2562, ENV-008, 6 หน้า.

ประชุม คำพุฒ. (2562ข). **ผลิตภัณฑ์อิฐบล็อกประสานจากเศษก้านใบยาสูบ.** งานประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยรังสิต ประจำปี 2562 (RSU National Research Conference 2019), อาคารพิฆเณศ Student Center มหาวิทยาลัยรังสิต, ปทุมธานี, 4 พฤษภาคม 2562, หน้า 231-240.

ประชุม คำพุฒ. (2566). การใช้กากมูลโคเป็นส่วนผสมคอนกรีตเพื่อเป็นแนวทางผลิตอิฐบล็อกประสาน. **วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา**, 8(2), 42-51.

ปริญญา จินดาประเสริฐ, และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2555). **ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต.** พิมพ์ครั้งที่ 7, สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, 381 หน้า.

ปิยะพล สีหาบุตร, เพ็ญชาย เวียงใต้, ภคพล ช่างยันต์, และเจษฎ์ศิริ เถื่อนมูลละ. (2560). การใช้ฟางข้าวในอิฐบล็อกประสาน. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยมหาสารคาม**, 36(4), 478–485.

วันปิติ ธรรมศรี, นันทพร อ่อนปัดชา, อุษณีย์ ปีนอก, และมัณฑนา ศรีทองคำ. (2565). การนำวัสดุเหลือใช้จากกากมะพร้าวมาใช้ในการผลิตคอนกรีตบล็อก. **วารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์**, 17(1), 117-129.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2547). **มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช.602-2547 เรื่องอิฐบล็อกประสาน.** กระทรวงอุตสาหกรรม. กรุงเทพมหานคร.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2556). **มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม *มอก.*2594-2556 เรื่องปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก.** กระทรวงอุตสาหกรรม. กรุงเทพมหานคร.

สำนักเทคโนโลยีชีวภาพการผลิตปศุสัตว์. (2564). **แผนปฏิบัติการด้านโคนมและผลิตภัณฑ์นม ระยะที่ 1 (ปี พ.ศ.2564-2570)**. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ . สืบค้นจาก https://dld.go.th/th/index.php/th/newsflash/banner-news/23844-final-plan2564-2570 14 มิถุนายน 2564.

สัจจะชาญ พรัดมะลิ, และประชุม คำพุฒ. (2564). **คอนกรีตบล็อกดินขาวผสมฟางข้าว**. การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 20, แบบออนไลน์, 12-13 พฤษภาคม 2564, หน้า 139-145.

Khedari, J., Watsanasathaporn, P., & Hirunlabh, J. (2005). Development of fibre-based soil–cement block with low thermal conductivity. **Cement and Concrete Composites**, 27, 111–116.

Surtia, G., Panchal, P., Patel, M., RK, R., & Kumar, V. (2016). Improving livelihood initiatives through environmental friendly solutions derived from livestock byproduct. **International Journal of Science, Environment and Technology**, 5(2), 658–665.

การพัฒนาและทดสอบระบบโรงเรือนเพาะปลูกผักกาดหอมโดยรายงานผลผ่านสมาร์ทโฟน

ธีรวัฒน์ ชื่นอัศดงคต[1*] ธนัตถ์ เจนสัญญายุทธ[2] ศรายุทธ์ จิตรพัฒนากุล[3]

Received : April 6, 2025
Revised : July 22, 2025
Accepted : August 27, 2025

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้ได้ศึกษาการควบคุมอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความชื้นในดินของโรงเรือนระบบพ่นหมอกโดยใช้ชุดควบคุม Arduino เพื่อควบคุมการเปิดปิดอุปกรณ์ไฟฟ้าผ่านสมาร์ทโฟนสำหรับการปลูกผักกาดหอม โดยใช้เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ และความชื้นในดินเพื่อตรวจสอบและควบคุมการทำงานอัตโนมัติ ซึ่งสามารถตรวจสอบค่าผ่านสมาร์ทโฟนได้ตลอดเวลา ระบบใช้งานปั๊มน้ำแรงดันสูงขนาด 24 Vdc 6.9 bar ติดตั้งร่วมกับหัวพ่นหมอกขนาด 0.6 มิลลิเมตร จำนวน 12 ตัว และพัดลมระบายอากาศขนาด 8 นิ้ว 30 วัตต์ จำนวน 1 ตัว ทำการเชื่อมต่อทำงานผ่านแอปพลิเคชัน Blynk IoT ผ่าน WiFi ผลการทดสอบพบว่า ระบบสามารถควบคุมอุณหภูมิภายในโรงเรือนให้อยู่ที่ค่าเฉลี่ย 30.5 องศาเซลเซียส โดยลดอุณหภูมิจากสภาพแวดล้อมภายนอกเฉลี่ย 3.48 องศาเซลเซียส และเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์สูงสุดประมาณร้อยละ 5.0 ค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์ตลอดช่วงเวลาทดสอบอยู่ที่ร้อยละ 1.05 นอกจากนี้ ระบบยังสามารถรักษาความชื้นในดินให้อยู่ในระดับคงที่ โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณร้อยละ 27.5 จากการทดสอบการควบคุมอุณหภูมิ ความชื้นในอากาศ และความชื้นในดิน พบว่า ระบบสามารถควบคุมปัจจัยทั้งสามให้อยู่ในขอบเขตที่เหมาะสมสำหรับการเพาะปลูกผักกาดหอมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ ในการตรวจวัดค่าต่าง ๆ ของระบบจากการสอบเทียบอุปกรณ์ พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนของเซนเซอร์ที่ใช้วัดอุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ ±0.58 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ ±3.42% RH และความชื้นในดิน ±2.93% ซึ่งควรนำมาพิจารณาในการวิเคราะห์ผลการทดลองและการออกแบบระบบในอนาคตเพื่อเพิ่มความแม่นยำของการควบคุม

คำสำคัญ: ความชื้นในดิน ความชื้นสัมพัทธ์ ชุดควบคุม Arduino

---

[1] อาจารย์ประจำหลักสูตร สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี อีเมล: teerawat.c@rbru.ac.th

[2] อาจารย์ประจำหลักสูตร สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี อีเมล: Thanat.J@rbru.ac.th

[3] อาจารย์ประจำหลักสูตร สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี อีเมล: sarayut134@gmail.com

** ผู้นิพนธ์หลัก อีเมล: teerawat.c@rbru.ac.th*

DEVELOPMENT AND EVALUATION OF A SMART GREENHOUSE SYSTEM FOR LETTUCE CULTIVATION WITH REAL-TIME SMARTPHONE MONITORING

Teerawat Chuenatsadongkot[1*] Thanat Jensanyayut[2] Sarayut Chitphutthanakul[3]

Abstract

This research study investigated the control of temperature, relative humidity, and soil moisture in a misting greenhouse system using an Arduino control unit to regulate the operation of electrical devices via a smartphone for growing lettuce. In addition, sensors for measuring temperature, relative humidity, and soil moisture were employed to monitor and automatically control the system, with real-time data accessible through a smartphone. The system utilized a 24Vdc, 6.9 bar high-pressure water pump with 12 misting nozzles of 0.6 mm and a single 8-inch 30-Watt exhaust fan. All were connected through the Blynk IoT application via Wi-Fi. The experimental results showed that the system could maintain an average temperature of 30.5°C within the greenhouse, reduce the ambient temperature by an average of 3.48°C, and increase relative humidity by up to 5.0%. The average of relative humidity during the test period was 1.05%. Additionally, the system was able to maintain a stable soil moisture level with an average of 27.5%. The study demonstrated that the system could effectively control temperature, humidity, and soil moisture within the optimal range for lettuce cultivation. Due to the measurement of various system parameters, it was found that the sensors used had a margin of error of approximately ±0.58°C for temperature, ±3.42% RH for relative humidity, and ±2.93% for soil moisture. These errors should be taken into consideration when analyzing the experimental results and designing future systems to enhance the accuracy of control.

Keywords: Soil moisture, Relative humidity, Arduino control unit

---

[1] *Lecturer of Mechanical Engineering, Faculty of Industrial Technology, Rambhai Barni Rajabhat University, e-mail: teerawat.c@rbru.ac.th*

[2] *Lecturer of Electrical Engineering, Faculty of Industrial Technology, Rambhai Barni Rajabhat University, e-mail: Thanat.J@rbru.ac.th*

[3] *Lecturer of Energy Technology, Faculty of Industrial Technology, Rambhai Barni Rajabhat University, e-mail: sarayut134@gmail.com*

** Corresponding author, e-mail: teerawat.c@rbru.ac.th*

บทนำ

ปัจจุบันมีแนวทางการเพาะปลูกพืชผักหลายรูปแบบ เช่น การปลูกบนดิน การปลูกแบบปลอดสารเคมี และการปลูกแบบไฮโดรโปนิกส์ ซึ่งแต่ละวิธีมีเป้าหมายแตกต่างกันไป ขนาดและลักษณะของการเพาะปลูกขึ้นอยู่กับผู้ผลิต โดยภาคอุตสาหกรรมมักมีระบบโครงสร้างขนาดใหญ่ ขณะที่เกษตรกรรายย่อยหรือธุรกิจขนาดเล็กเลือกใช้โครงสร้างที่เหมาะสมกับต้นทุนและปริมาณผลผลิต การเพาะปลูกในโรงเรือนเป็นวิธีที่ได้รับความนิยม เนื่องจากช่วยควบคุมปัจจัยแวดล้อมได้ดี ลดการปนเปื้อนของเชื้อโรคและป้องกันแมลงศัตรูพืช อีกทั้งยังสามารถปรับสภาพอากาศให้เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของพืช ซึ่งช่วยเพิ่มคุณภาพและปริมาณผลผลิตในระยะยาว

สภาพแวดล้อมมีบทบาทสำคัญต่อการเจริญเติบโตของผัก โดยปัจจัยหลักที่มีผล ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ แสงแดด ธาตุอาหารในดิน และคุณภาพอากาศ (จิตรา จันโสด และคณะ, 2567) เพื่อควบคุมปัจจัยเหล่านี้ การพัฒนาโรงเรือนเพาะปลูกได้รับความสนใจอย่างมาก ธนากร น้ำหอมจันทร์ และอติกร เสรีพัฒนานนท์ (2557) ได้พัฒนาระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในโรงเรือนเพาะปลูกพืชไร้ดิน โดยใช้การระเหยของน้ำและการสเปรย์ละอองน้ำอัตโนมัติ ควบคุมด้วยระบบโปรแกรมเชิงตรรกะ ผลการทดลองพบว่าโรงเรือนสามารถควบคุมอุณหภูมิไม่เกิน 30 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยที่ 80.54% อย่างไรก็ตาม ในบางช่วงเวลา ค่าความชื้นและอุณหภูมิอาจเกินที่กำหนด เนื่องจากสภาพอากาศภายนอกที่แปรปรวน นอกจากนี้ อัษฎางค์ บุญศรี และคณะ (2563) ได้พัฒนาระบบควบคุมความชื้นและอุณหภูมิในโรงเรือนเพาะเห็ดนางฟ้า ใช้สมาร์ทโฟนในการสั่งงาน พบว่าระบบมีการตอบสนองที่ดี และสามารถควบคุมอุณหภูมิที่ 26.46 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 91.19% นอกจากนั้น ธีรวัฒน์ ชื่นอัศดงคต และศรายุทธ จิตรพัฒนากุล (2565) ศึกษาการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในโรงเรือนโดยใช้ระบบพ่นหมอกและพัดลมระบายความร้อน ควบคุมผ่านโมดูล SONOFF WiFi ด้วยสมาร์ทโฟน ผลการทดสอบพบว่าอุณหภูมิสามารถควบคุมได้ระหว่าง 26-31 องศาเซลเซียส และลดได้สูงสุด 8 องศาเซลเซียส ส่วนความชื้นอยู่ระหว่าง 70-87% จากงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าการควบคุมผ่านแอปพลิเคชันบนสมาร์ทโฟนมีประสิทธิภาพและตอบสนองได้รวดเร็ว เนื่องด้วยการใช้ระบบควบคุมผ่านทางไกลมีประสิทธิภาพที่สูง จึงได้ทำการศึกษางานวิจัยของ วุฒิพล จันทร์สระคู และคณะ (2563) ได้พัฒนาโรงเรือนควบคุมสภาพแวดล้อมแบบอัตโนมัติสำหรับการผลิตพืชผักปลอดภัยจากสารพิษตกค้าง โดยใช้เทคโนโลยี Internet of Things (IoT) เพื่อควบคุมอุณหภูมิ ความชื้น และปัจจัยอื่น ๆ ผลการวิจัยพบว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถควบคุมสภาพแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้ผลผลิตมีคุณภาพและปริมาณเพิ่มขึ้นทั้งในด้านขนาดของผลผลิต และความสมบูรณ์ของผลผลิต นอกจากนี้ ณิชกานต์ คำลือ และคณะ (2563) ได้พัฒนาชุดปลูกพืชระบบปิดสำหรับควบคุมสภาวะแวดล้อมทางการเกษตรที่สามารถควบคุมระบบให้สารละลายธาตุอาหารแบบอัตโนมัติ ปรับสภาวะอากาศให้มีอุณหภูมิและความชื้นเหมาะสมกับการเจริญเติบโตของพืช รวมถึงติดตั้งระบบแสงเทียมที่ใช้หลอด LED เพื่อให้พืชสามารถสังเคราะห์แสงได้ตลอดเวลา ผลการทดลอง

พบว่าพืชที่ปลูกในระบบนี้มีการเจริญเติบโตที่ดีและมีคุณภาพสูง อีกทั้ง งานวิจัยโดย สหพงศ์ สมวงค์ และมิตรชัย จงเชี่ยวชำนาญ (2019) ได้พัฒนาระบบควบคุมสภาพแวดล้อมสำหรับการเพาะผักไมโครกรีน โดยระบบสามารถควบคุมอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความชื้นในดิน และแสงสว่างได้อย่างอัตโนมัติ ผลการทดลองพบว่าผักไมโครกรีนที่ปลูกในระบบนี้มีการเจริญเติบโตที่ดี มีความยาวเฉลี่ยมากกว่าการปลูกแบบทั่วไปประมาณ 3.2 เซนติเมตร และน้ำหนักเฉลี่ยมากกว่าร้อยละ 70.51 จากการศึกษางานวิจัยดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าการพัฒนาโรงเรือนและระบบควบคุมสภาพแวดล้อมที่มีประสิทธิภาพ สามารถช่วยเพิ่มผลผลิตและคุณภาพของผักได้อย่างมีนัยสำคัญ

การพัฒนาระบบเพาะปลูกในโรงเรือนที่สามารถควบคุมการดูแลรักษาผ่านทางไกลได้ยังคงเป็นหัวข้อที่มีการวิจารณ์ในแง่ของประสิทธิภาพและคุณภาพของผลผลิตที่ได้ว่า จะคงความมีคุณภาพสูงเทียบเท่ากับการดูแลแบบดั้งเดิมหรือไม่ จากการศึกษาของ ปิยวัตร มากศรี และคณะ (2564) ซึ่งได้ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบคุณภาพผลผลิตระหว่างการควบคุมการปลูกด้วยระบบเทคโนโลยีและการปลูกแบบดั้งเดิม พบว่า ผักที่ได้รับการดูแลผ่านระบบเทคโนโลยีมีการเจริญเติบโตได้ตามมาตรฐาน โดยจำนวนใบและความเข้มของสีใบไม่ต่ำกว่าผักที่ปลูกในดินแบบดั้งเดิม อย่างไรก็ตาม การควบคุมในแปลงที่ใช้เทคโนโลยียังไม่สามารถรักษาความสม่ำเสมอของผลผลิตได้ทั่วทั้งแปลง งานวิจัยดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า การปลูกในโรงเรือนที่ใช้เทคโนโลยีสามารถผลิตผักที่มีคุณภาพใกล้เคียงกับการปลูกในดินแบบดั้งเดิม นอกจากนั้นทางผู้วิจัยได้มีการศึกษาถึงการยอมรับการใช้ระบบควบคุมผ่านทางไกลในระดับสากล โดย Folorunso et al. (2024) ได้ออกแบบเพื่อควบคุมสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือน โดยใช้เซ็นเซอร์ DTH11 เพื่อตรวจสอบอุณหภูมิและความชื้น เซ็นเซอร์ความชื้นอากาศ ความชื้นในดิน และ LDR สำหรับความเข้มของแสง ในขณะเดียวกันก็มีการใช้ระบบเก็บข้อมูลบนคลาวด์และแอปพลิเคชันมือถือเพื่อแจ้งข้อมูลสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือนให้ผู้ใช้ทราบตลอดเวลา ซึ่งสามารถควบคุมพารามิเตอร์เหล่านี้เพื่อให้การผลิตพืชมีประสิทธิภาพแม่นยำสูงสุด นอกจากนั้น Arif & Abbas (2015) ได้พัฒนาระบบการควบคุมกำลังปรับตัวและนำระบบชลประทานมาใช้เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้คน โดยใช้เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายและใช้เซิร์ฟเวอร์กับบริการเว็บของลูกค้าเพื่อควบคุมและติดตามข้อมูล ความชื้นในดิน ความชื้นอากาศ อุณหภูมิ คาร์บอนไดออกไซด์ และแสง ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าโมเดลการควบคุมสามารถวัดข้อมูลจากเซ็นเซอร์ได้อย่างแม่นยำ และเป็นเครื่องมือที่มีความแม่นยำในการคำนวณค่าของเซ็นเซอร์ที่ปรับเปลี่ยนไปตามเวลาตลอดเวลา

จากการศึกษาและวิเคราะห์งานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าในปัจจุบันมีการพัฒนาระบบควบคุมปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชผักในโรงเรือนเพาะปลูกโดยการใช้สมาร์ทโฟนอย่างแพร่หลาย ซึ่งระบบเหล่านี้ได้รับการยอมรับจากผู้ใช้งานจริงในเรื่องของคุณภาพและความสะดวกสบายในการใช้งาน อีกทั้งยังเป็นการแสดงให้เห็นถึงความสามารถของเทคโนโลยีที่สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพในการเกษตรกรรมได้อย่างชัดเจน ดังนั้น

ในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและพัฒนาระบบโรงเรือนในการเพาะปลูกผักกาดหอมโดยควบคุมผ่านระบบสมาร์ทโฟน โดยมีการนำระบบควบคุมอัตโนมัติมาใช้ควบคุม

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

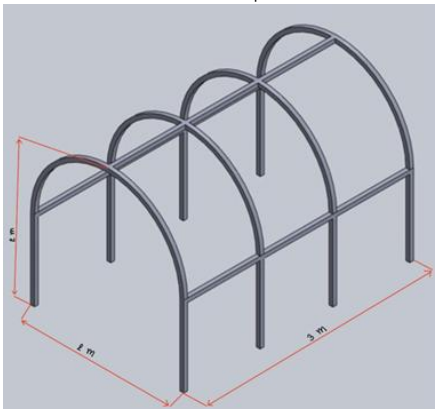
1. เพื่อพัฒนาระบบโรงเรือนในการเพาะปลูกผักกาดหอมโดยรายงานผลผ่านระบบสมาร์ทโฟน
2. เพื่อทดสอบสมรรถนะการควบคุมอุณหภูมิ ความชื้นอากาศ และความชื้นในดินของระบบอัตโนมัติ

วิธีดำเนินการวิจัย

ระเบียบวิธีการดำเนินงานวิจัยนี้มีแบ่งเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

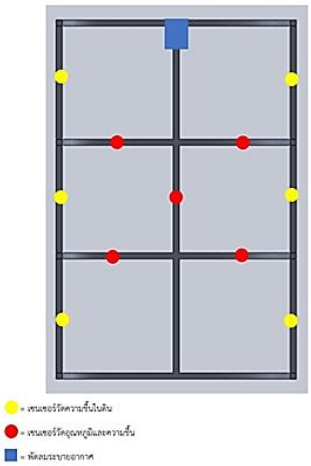
1. โรงเรือนเพาะปลูก

งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาโรงเรือนเพาะปลูกขนาดกว้าง 2 เมตร ยาว 3 เมตร และสูง 2 เมตร โดยโครงสร้างใช้ท่อเหล็กกลมเคลือบสังกะสี ขนาด 1 นิ้ว หนา 0.18 เซนติเมตร ดังภาพที่ 1 โดยมีการติดตั้งพัดลมเพื่อควบคุมการไหลเวียนของอากาศซึ่งมีการทำงานอัตโนมัติตามการแจ้งเตือนของค่าตัวแปรต่างๆ ที่วัดค่าได้จากระบบควบคุม ซึ่งประกอบไปด้วยระบบควบคุมและการวัดค่าอุณหภูมิและความชื้นภายในโรงเรือนอัจฉริยะ โดยการติดตั้งเซนเซอร์มีการจัดระยะห่างอย่างเท่าเทียมเพื่อให้การวัดอุณหภูมิและความชื้นทั่วถึง ระบบระบายอากาศและระบบพ่นหมอกก็มีการติดตั้งหัวพ่นหมอกในตำแหน่งที่เหมาะสมเพื่อให้การระบายความร้อนมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยทำการคลุมด้วยพลาสติก Polyethylene ดังภาพที่ 2 ซึ่งมีคุณสมบัติทนทานต่อการฉีกขาดเมื่อสัมผัสกับลม ฝน และรังสียูวี (กรองได้ร้อยละ 7) รวมทั้งทนต่อสารเคมีและสามารถกรองแสงแดดได้ร้อยละ 20 การควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในโรงเรือนจะพิจารณาจากอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ทั้งภายในและภายนอกโรงเรือน ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ แสดงไว้ในภาพที่ 3 โดยตำแหน่งที่ติดตั้งได้มีการทดสอบในหลายตำแหน่ง ซึ่งตำแหน่งที่เลือกใช้เป็นตำแหน่งที่ครอบคลุมถึงการเฉลี่ยค่าต่างๆ ของภายในโรงเรือนได้



ภาพที่ 1 ขนาดของโครงสร้างโรงเรือนปลูกผักสลัด

ภาพที่ 2 โรงเรือนปลูกผักกาดหอมเมื่อคลุมผ้าใบแล้ว



ภาพที่ 3 ตำแหน่งของเซนเซอร์วัดค่าตัวแปรต่างๆ

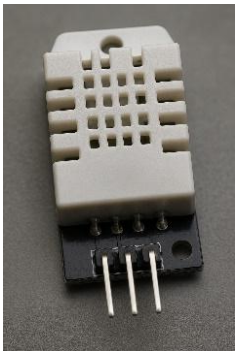
2. สภาวะที่เหมาะสมต่อการปลูกผักกาดหอม

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการปลูกผักกาดหอมในโรงเรือนเพาะปลูก ซึ่งมีการควบคุมปัจจัยภายในโรงเรือนให้เหมาะสมอยู่เสมอ ปัจจัยที่ควบคุม ได้แก่ อุณหภูมิภายในโรงเรือน ความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือน และความชื้นในดินของแปลงเพาะปลูก ในการเพาะปลูก ผักกาดหอมเหมาะสำหรับการปลูกในสภาพอากาศที่มีอุณหภูมิประมาณ 25 องศาเซลเซียส โดยไม่ควรมีอุณหภูมิสูงกว่า 30 องศาเซลเซียส เพราะอุณหภูมิสูงเกินไปจะทำให้ใบเริ่มมีสีเข้มหรือมีรสขม ผักกาดหอมต้องการแสงแดดประมาณ 4-6 ชั่วโมงต่อวัน แต่ไม่ควรได้รับแสงแดดจัดเกินไปเพื่อหลีกเลี่ยงการไหม้ของใบ และต้องการความชื้นสัมพัทธ์ในระดับสูง (60-70%) ร่วมกับการรักษาดินให้ชื้นแต่ไม่ขังน้ำ มีความชื้นในดินประมาณ 20-40% VWC (จริญญา ฤทธิรัมย์, 2563) ดินที่ดีที่สุดควรเป็นดินร่วนปนทรายที่ระบายน้ำได้ดี

3. ระบบการควบคุมสมดุลสั่งการทำงานโรงเรือน

การควบคุมอุณหภูมิและความชื้นภายในโรงเรือนอัจฉริยะดำเนินการผ่านกระบวนการพ่นละอองน้ำ (fogging) โดยใช้หัวพ่นละอองน้ำที่มีขนาดหัวฉีด 0.3 มิลลิเมตร อัตราการจ่ายน้ำ 1.2 ลิตรต่อชั่วโมง รวมจำนวนทั้งสิ้น 12 หัวฉีด (ดังภาพที่ 4) ทั้งนี้ เพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขนาดแรงดันน้ำที่ระบบต้องการที่จะทำให้การพ่นละอองน้ำมีประสิทธิภาพ ขนาด 24 โวลต์ จะช่วยเพิ่มแรงดันของน้ำเพื่อให้สามารถกระจายตัวได้อย่างทั่วถึงภายในพื้นที่โรงเรือน และมีการติดตั้งพัดลมระบายอากาศจำนวน 1 เครื่อง เพื่อช่วยระบายอากาศภายในโรงเรือน ลดความร้อนสะสม และปรับสมดุลของอุณหภูมิและความชื้นให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมที่ต้องการ ทั้งนี้ ค่าพารามิเตอร์ด้านอุณหภูมิและความชื้นจะถูกตรวจวัดโดยใช้เซ็นเซอร์ DHT22 ซึ่งเป็นโมดูลตรวจวัดที่มีความแม่นยำสูงและสามารถเชื่อมต่อกับบอร์ดควบคุมได้โดยตรง (ดังภาพที่ 5) ก่อนนำโมดูลเซ็นเซอร์ DHT22 ไปใช้งานจริง ได้มีการดำเนินการสอบเทียบและทดสอบความแม่นยำของเซ็นเซอร์ โดยเทียบจาก Thermo-Hygrometer ที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการ เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของค่าที่วัดได้ และเพื่อให้มั่นใจว่าข้อมูลที่ได้รับมีความถูกต้องและสามารถนำไปใช้ควบคุมสภาวะแวดล้อมภายในโรงเรือนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ภาพที่ 4 พ่นหมอกขนาด 0.3 มม.

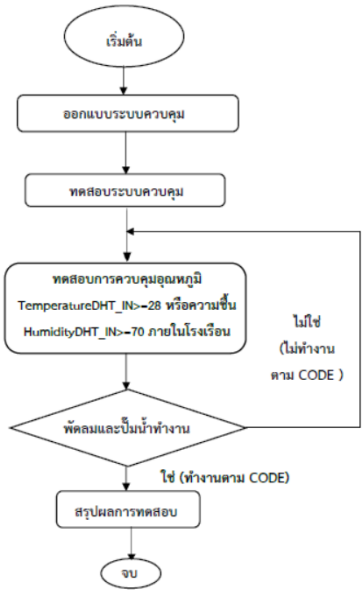


ภาพที่ 5 เซ็นเซอร์ DHT22

การตรวจสอบและควบคุมอุณหภูมิและความชื้นภายในโรงเรือนสามารถดำเนินการได้โดยการติดตั้งเซ็นเซอร์วัดค่าภายในพื้นที่เพาะปลูก ทั้งนี้ เซ็นเซอร์ดังกล่าวจะถูกเชื่อมต่อกับระบบควบคุมอัตโนมัติที่ใช้บอร์ด Arduino เป็นศูนย์กลางในการประมวลผลและส่งคำสั่งผ่านเครือข่าย WiFi ตลอดเวลา นอกจากนี้ ระบบยังสามารถเชื่อมโยงกับแอปพลิเคชัน Blynk IoT (ดังแสดงในภาพที่ 6)

ภาพที่ 6 แอพลิเคชั่น Blynk IoT สำหรับตรวจสอบผล

เพื่อให้ผู้ใช้สามารถสั่งการทำงานของระบบพ่นหมอกและพัดลมระบายอากาศผ่านสมาร์ทโฟนได้อย่างสะดวก กลไกการทำงานของระบบถูกกำหนดให้เซ็นเซอร์ส่งค่าการวัดไปยังโปรแกรม Arduino และดำเนินการตามเงื่อนไขที่ตั้งไว้ กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิภายในโรงเรือนสูงกว่า 29 องศาเซลเซียส หรือค่าความชื้นสัมพัทธ์ลดลงต่ำกว่า 60% ระบบจะสั่งให้ปั๊มน้ำทำงานเพื่อพ่นละอองน้ำ และเปิดพัดลมเพื่อระบายอากาศร้อนออกจากโรงเรือน โดยกระบวนการทั้งหมดเป็นไปตามแผนผังการทำงานที่แสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 7 แผนผังการสั่งงานผ่านแอพพลิเคชั่น Blynk IoT

4. การประเมินสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุม

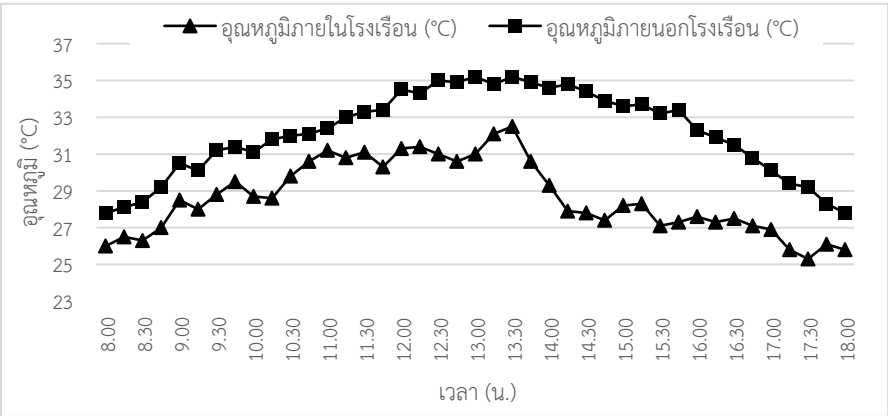
การประเมินสมรรถนะของระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในโรงเรือนเพาะปลูกพิจารณาจากปัจจัยหลัก ได้แก่ การลดลงของอุณหภูมิ การควบคุมความชื้นอากาศ และความชื้นในดิน เมื่อเปรียบเทียบกับภายนอกโรงเรือน ช่วงเวลาทดสอบกำหนดตั้งแต่ 08.00 – 18.00 น. ซึ่งเป็นช่วงที่แสงแดดส่งผลต่ออุณหภูมิและความชื้นภายในโรงเรือน เนื่องจากจังหวัดจันทบุรีมีสภาพอากาศแปรปรวนจากปริมาณป่าไม้และสวนผลไม้ที่เอื้อต่อการเกิดฝนตลอดปี การทดสอบจึงเลือกดำเนินการในเดือนกุมภาพันธ์ ซึ่งมีโอกาสเกิดพายุและฝนน้อย ทั้งนี้ค่าที่วัดได้ถูกคำนวณเป็นค่าเฉลี่ยในช่วงเวลาที่กำหนด เพื่อให้ผลลัพธ์สะท้อนภาพรวมได้แม่นยำขึ้น

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การตรวจวัดค่าต่างๆ ได้มีการสอบเทียบอุปกรณ์เพื่อพิจารณาความคลาดเคลื่อนของผลที่ได้จากเซนเซอร์ พบว่า ความคลาดเคลื่อนของเซนเซอร์ที่ใช้วัดอุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ ±0.58 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ ±3.42% RH และความชื้นในดิน ±2.93% ซึ่งถือว่ามีความแม่นยำที่สูงมาก ในการทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมได้เลือกทดสอบตั้งแต่วันที่ 15 – 28 กุมภาพันธ์ 2568 ในเวลา 8.00 น. – 18.00 น. ผลการทดสอบจะแสดงออกมาเป็นค่าเฉลี่ยของช่วงเวลาในแต่ละวัน แสดงออกมาได้ดังต่อไปนี้

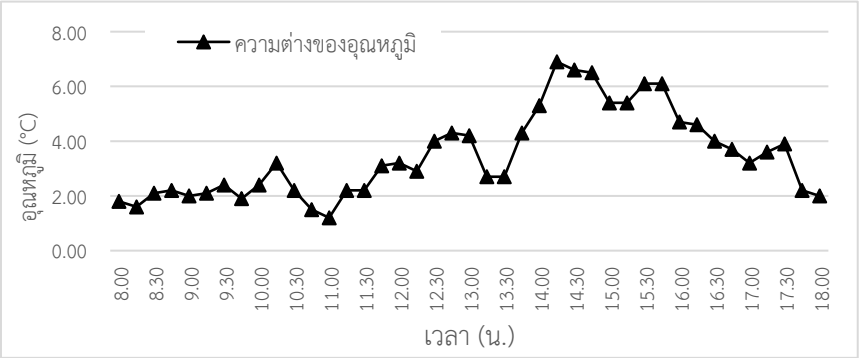
1. ผลการทดสอบความสามารถในการลดอุณหภูมิจากภายนอก

ในการทดสอบความสามารถในการลดอุณหภูมิจากบริเวณภายนอกโรงเรือนเพาะปลูก เป็นการวัดค่าของอุณหภูมิที่บริเวณภายนอกโรงเรือนในตำแหน่งใกล้เคียงที่ตั้งโรงเรือน กับวัดค่าอุณหภูมิด้วยชุดควบคุมสมดุลอุณหภูมิภายในโรงเรือนเพาะปลูก โดยการเก็บค่าจะทำการเก็บค่าไปพร้อมกัน ที่ช่วงระยะเวลาเดียวกัน เพื่อให้ได้ค่าที่สามารถเปรียบเทียบความแตกต่างได้จริงที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 8



ภาพที่ 8 อุณหภูมิภายในและภายนอกโรงเรือนเพาะปลูกในช่วงเวลาเดียวกัน

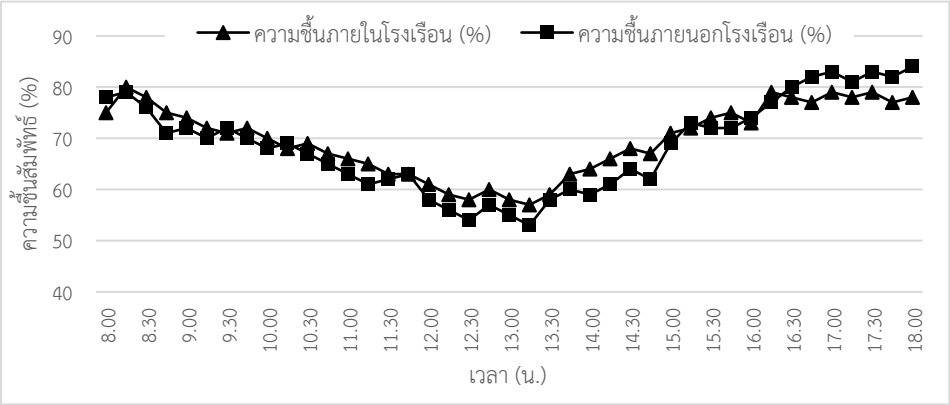
จากภาพที่ 8 แสดงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายนอกโรงเรือนตามช่วงเวลา โดยในเวลา 08.00 น. อุณหภูมิยังคงต่ำกว่า 30°C และเพิ่มขึ้นต่อเนื่องจนถึงจุดสูงสุดที่ 35°C ในเวลา 12.45 น. หลังจากนั้นอุณหภูมิลดลงเรื่อย ๆ จนถึง 27.5°C ในเวลา 18.00 น. สำหรับอุณหภูมิภายในโรงเรือน มีการใช้ระบบควบคุมผ่านหัวพ่นหมอกและพัดลมระบายอากาศเพื่อรักษาระดับอุณหภูมิตามสภาวะภายนอก โดยในช่วงที่อุณหภูมิภายนอกต่ำ ระบบควบคุมสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม เมื่ออุณหภูมิภายนอกสูงขึ้นโดยเฉพาะช่วง 12.00 – 13.30 น. การควบคุมทำได้ยากขึ้นเนื่องจากการสะสมความร้อนภายในโรงเรือนจำเป็นต้องเปิดระบบระบายอากาศอย่างเต็มที่ ทั้งนี้ อุณหภูมิภายในยังสามารถรักษาให้อยู่ที่ประมาณ 30.5°C ซึ่งลดลงจากอุณหภูมิภายนอกได้อย่างมีนัยสำคัญ จากการวิเคราะห์ค่าความต่างของอุณหภูมิ (ภาพที่ 9) พบว่าระบบควบคุมสามารถลดอุณหภูมิได้สูงสุด 6°C ในเวลา 15.30 น. ซึ่งเป็นช่วงที่อุณหภูมิภายนอกเริ่มลดลง ทั้งนี้ค่าเฉลี่ยของการลดอุณหภูมิอยู่ที่ 3.48°C ตลอดช่วงเวลาทดสอบ



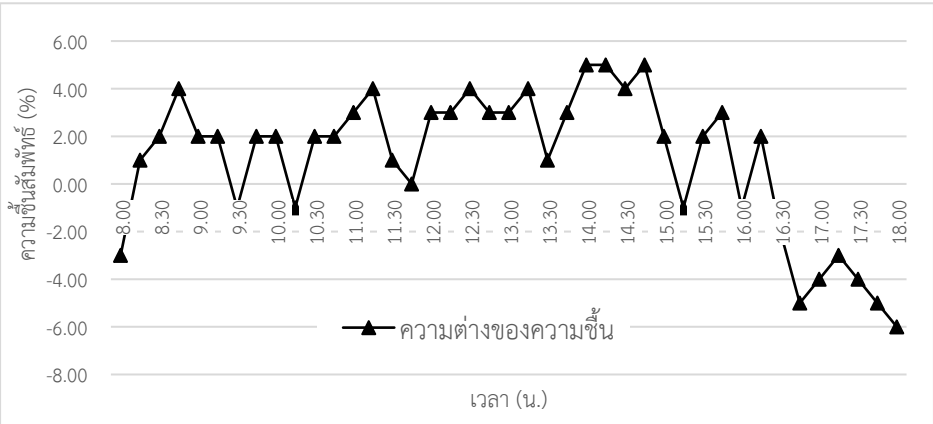
ภาพที่ 9 ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิภายนอกกับภายในโรงเรือนเพาะปลูก

2. ผลการทดสอบการควบคุมความชื้นของอากาศภายในโรงเรือนเพาะปลูก

จากภาพที่ 10 การประเมินประสิทธิภาพการควบคุมความชื้นภายในโรงเรือนเพาะปลูก ได้ทำการวัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ทั้งภายในและภายนอกโรงเรือนในช่วงเวลาเดียวกัน ผลการวัดพบว่าความชื้นภายนอกโรงเรือนในช่วงเช้า (08:00 น.) อยู่ที่ 78% เนื่องจากอุณหภูมิต่ำและน้ำค้าง จากนั้นลดลงถึง 54% ในช่วงเที่ยง (12:30 น.) และเพิ่มขึ้นเป็น 84% ในช่วงเย็น (18:00 น.) ปัจจัยที่มีผลต่อความชื้น ได้แก่ สภาพอากาศ เช่น ฝนตกหรือเมฆมาก ส่วนการควบคุมความชื้นภายในโรงเรือน ระบบหัวพ่นหมอกสามารถเพิ่มความชื้นได้สูงสุด 5.0% ในช่วงเวลา 14:15 น. และค่าเฉลี่ยการปรับความชื้นอยู่ที่ 1.05% ดังแสดงในภาพที่ 11 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงช่องว่างระหว่างความชื้นภายในและภายนอกโรงเรือนของแต่ละช่วงเวลา โดยรวมสามารถควบคุมให้ความชื้นอยู่ในช่วง 60%–80% ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



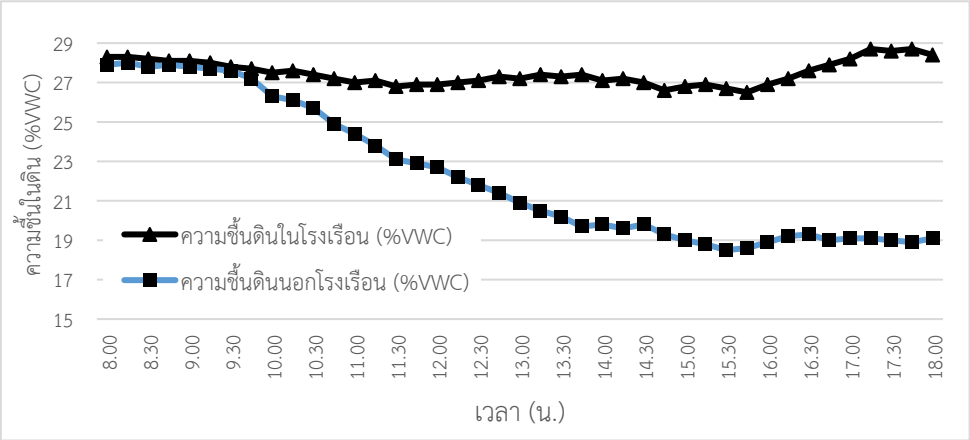
ภาพที่ 10 ความชื้นสัมพัทธ์ภายในและภายนอกโรงเรือนเพาะปลูก



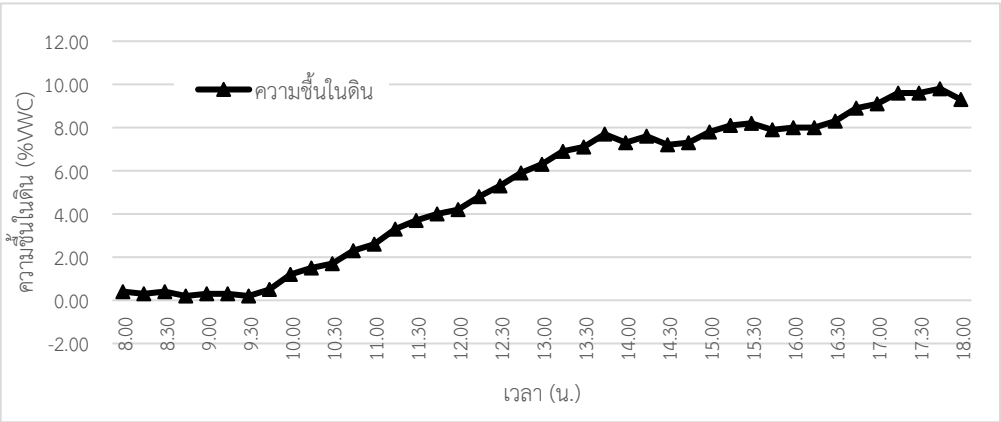
ภาพที่ 11 ความแตกต่างระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ภายในกับภายนอกโรงเรือนเพาะปลูก

3. ผลการทดสอบการควบคุมความชื้นในดิน

จากภาพที่ 12 การประเมินประสิทธิภาพของระบบควบคุมความชื้นในดินภายในโรงเรือนเพาะปลูก ได้ทำการวัดค่าความชื้นในดินทั้งภายในและภายนอกโรงเรือนในเวลาเดียวกัน เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ ผลการวิเคราะห์แสดงว่า ความชื้นในดินภายนอกโรงเรือนในช่วงเช้า (08:00 น.) อยู่ที่ประมาณ 27.9% VWC จากอุณหภูมิที่ต่ำและน้ำค้าง แต่ลดลงต่อเนื่องหลังได้รับแสงแดดจนถึงระดับต่ำสุดที่ 18.5% VWC ในเวลา 15:30 น. ขณะที่ความชื้นในดินภายในโรงเรือนคงที่มากกว่า โดยเฉลี่ยที่ 27.5% VWC เนื่องจากระบบพ่นละอองน้ำที่ทำงานตลอดทั้งวัน ทำให้ความชื้นลดลงเพียงเล็กน้อย ช่วงเวลาหนึ่ง ความแตกต่างของความชื้นระหว่างภายในและภายนอกโรงเรือนอาจถึง 9.80% ดังแสดงในภาพที่ 13 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงช่องว่างระหว่างความชื้นในดินภายในและภายนอกโรงเรือนของแต่ละช่วงเวลา โดยรวมแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของระบบควบคุมความชื้นในการรักษาระดับที่เหมาะสมสำหรับการเพาะปลูก



ภาพที่ 12 ความชื้นในดินภายในและภายนอกโรงเรือนเพาะปลูก



ภาพที่ 13 ความแตกต่างระหว่างความชื้นในดินภายในกับภายนอกโรงเรือนเพาะปลูก

จากผลทดสอบการปลูกผักกาดหอมภายในโรงเรือน พบว่า มีข้อดีที่ชัดเจนด้านความง่ายในการปลูก เนื่องจากสามารถควบคุมสภาพอากาศได้อย่างเหมาะสม ไม่ต้องกังวลต่อพายุฝน แสงแดดที่แรงเกินไปจนใบผักไหม้ อีกทั้งยังช่วยป้องกันแมลงศัตรูพืชได้เป็นอย่างดี ส่งผลให้สามารถปลูกได้ต่อเนื่องตลอดปีและมีผลผลิตสม่ำเสมอ

สรุป

จากการศึกษาระบบควบคุมอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ และความชื้นในดินในโรงเรือนเพาะปลูกผักกาดหอม ซึ่งมีข้อกำหนดอุณหภูมิในช่วง 25–30 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ที่ร้อยละ 60-70 และความชื้นในดินประมาณร้อยละ 20-40 การพัฒนาโรงเรือนจึงได้กำหนดขอบเขตการควบคุมตามปัจจัยเหล่านี้ ระบบที่พัฒนาขึ้นใช้การควบคุมผ่านชุด Arduino วัดค่าผ่านเซนเซอร์ DHT22 ซึ่งมีการสอบเทียบได้ความคลาดเคลื่อนสำหรับตรวจสอบค่าอุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ ±0.58 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์อากาศร้อยละ ±3.42 RH และความชื้นในดินร้อยละ ±2.93 เพื่อสั่งงานการเปิด-ปิดของระบบพ่นหมอกและพัดลมระบายอากาศ การตรวจสอบค่าของอุณหภูมิและความชื้นสามารถทำได้ผ่านแอปพลิเคชัน Blynk IoT ที่เชื่อมต่อผ่าน WiFi ผลการทดสอบพบว่า ระบบสามารถควบคุมอุณหภูมิภายในโรงเรือนให้อยู่ที่ค่าเฉลี่ย 30.5 องศาเซลเซียส โดยสามารถลดอุณหภูมิจากสภาพแวดล้อมภายนอกได้เฉลี่ย 3.48 องศาเซลเซียส และสามารถเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ได้สูงสุดประมาณร้อยละ 5.0 ค่าเฉลี่ยการปรับระดับความชื้นตลอดช่วงเวลาทดสอบอยู่ที่ร้อยละ 1.05 นอกจากนี้ ระบบยังสามารถรักษาความชื้นในดินให้อยู่ในระดับที่คงที่ โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณร้อยละ 27.5จากผลการทดสอบการควบคุมสมดุลของอุณหภูมิ ความชื้นในอากาศ และความชื้นในดิน พบว่าในช่วงเวลาส่วนใหญ่ระบบสามารถควบคุมปัจจัยทั้งสามให้อยู่ในขอบเขตที่เหมาะสมสำหรับการเพาะปลูกผักกาดหอมได้ดี อย่างไรก็ตาม ในบางช่วงที่อุณหภูมิภายนอกสูงมาก ระบบไม่สามารถลดอุณหภูมิได้ทันที ต้องรอให้เวลาผ่านไปหลังจากการสเปรย์น้ำ อุณหภูมิถึงจะลดลงในระดับที่ต้องการ ดังนั้นในการพัฒนางานวิจัยต่อไป ควรมีการกำหนดเวลาตอบสนองสำหรับการทำงานของระบบให้มีช่วงเวลาระยะเวลาดังกล่าวเพิ่มเติม

ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยจะยังคงพบปัญหาเกี่ยวกับการควบคุมสมดุลของอุณหภูมิและความชื้น ในช่วงที่อากาศร้อนที่สุดของวัน การสเปรย์น้ำในโรงเรือนไม่สามารถลดอุณหภูมิได้ทันท่วงที ต้องรอให้เวลาผ่านไปหลังการสเปรย์น้ำอุณหภูมิจึงจะลดลงอยู่ในขอบเขตที่ต้องการ และควรพิจารณาผลความแม่นยำของเซนเซอร์วัดค่าจากการสอบเทียบสำหรับการวิเคราะห์ผลการทดลองและการออกแบบระบบในอนาคตเพื่อเพิ่มความแม่นยำของการควบคุมจึงควรมีการกำหนดค่าในการตอบสนองสำหรับการทำงานของระบบให้มีการเผื่อช่วงระยะเวลาการทำงานดังกล่าวในงานวิจัยถัดไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ต้องขอขอบคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณีที่ให้การสนับสนุนในด้านของอุปกรณ์ทดสอบและวัสดุที่ใช้สำหรับการสร้างโครงสร้างโรงเรือนเพาะปลูก

เอกสารอ้างอิง

จิตรา จันโสด, วานิด รอดเนียม, วันเพ็ญ บัวคง, และศักดิ์อนันต์ แซ่ลิ่ม. (2567). การพัฒนาโรงเรือนควบคุมสภาพแวดล้อมเพื่อเพิ่มผลผลิตผักอินทรีย์. **วารสารแก่งเกษตร,** 52(1), 75-88.

จริญญา ฤทธิรัมย์. (2563). **อิทธิพลของแสงและอุณหภูมิต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของผักกาดหอมในโรงงานผลิตพืชด้วยแสง**. วิทยานิพนธ์ สาขาวิชาพืชศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

ณิชกานต์ คำลือ, ทิพวรรณ กระต่ายทอง, และยุพารัตน์ เหล่าชัย. (2563) . **การพัฒนาชุดปลูกระบบปิดสำหรับควบคุมสภาวะแวดล้อมทางการเกษตร**. ปริญญานิพนธ์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยนเรศวร.

ธนากร น้ำหอมจันทร์, และอติกร เสรีพัฒนานนท์. (2557). ระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในโรงเรือนเพาะปลูกพืชไร้ดินแบบทำความเย็นด้วยวิธีการระเหยของน้ำร่วมกับการสเปรย์ละอองน้ำแบบอัตโนมัติโดยใช้ระบบควบคุมเชิงตรรกะแบบโปรแกรมได้. **EAU Heritage Journal Science and Technology**, 8(1), 98-111.

ธีรวัฒน์ ชื่นอัศดงคต, และศรายุทธ์ จิตรพัฒนากุล. (2565). การศึกษาและพัฒนาระบบควบคุมความชื้นและอุณหภูมิผ่านสมาร์ทโฟนสาหรับโรงเรือนปลูกผักสลัด. **วารสารวิจัยและพัฒนา วไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**, 17(3), 33-46.

ปิยวัตร มากศรี, วรพงศ์ อินทร์พรหม, ศักดิ์โสภณ บุญเกื้อ, พีรพงศ์ หนูช่วย, นรานันท์ ขามณี, ณัฐปภัสร์ บุญดา, และชิโนรส ละอองวรรณ. (2564). **เทคโนโลยีการควบคุมระบบอัตโนมัติสำหรับการปลูกพืช**. การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ครั้งที่ 4, 22 พฤษภาคม 2564 ณ มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม จังหวัดกรุงเทพมหานครฯ, 175-182.

วุฒิพล จันทร์สระคู, สราวุฒิ ปานทน, รัติกาล ยุทธศิลป์, ธนพงศ์ แสนจุ้ม, เอกภาพ ป้านภูมิ, วรรธนะ สมนึก, คุรุวรรณ์ ภามาตย์, ปาริชาติ พจนศิลป์, จารุพงศ์ ประสพสุข, ณัฏฐ์ชยธร ขันติยะพุฒิเมธ และอนุสรณ์ เทียนศิริฤกษ์. (2563). **วิจัยและพัฒนาโรงเรือนควบคุมสภาพแวดล้อมแบบอัตโนมัติสาหรับการผลิตพืชผักปลอดภัยสารพิษตกค้าง**. รายงานโครงงานวิจัยกรมวิชาการเกษตร, 47-57.

สหพงศ์ สมวงค์, และมิตรชัย จงเชี่ยวขำนำญ. (2019). ก ารพัฒนาระบบควบคุมสภาพแวดล้อมสาหรับการเพาะผักไมโครกรีน. **วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ**, 5(2), 15-25.

อัษฎางค์ บุญศรี, นิวดี คลังสีดา, จารุกิตติ์ พิบูลนฤดม, ธัญญลักษณ์ บุตรศรีเพชร, และเพ็ญนภา ทองแฉล้ม. (2563). **การพัฒนาระบบควบคุมความชื้นและอุณหภูมิในโรงเรือนเพาะเห็ดนางฟ้าด้วยระบบสมาร์ทโฟน**. การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 4 ด้านนวัตกรรมเพื่อการเรียนรู้และสิ่งประดิษฐ์ ประจำปี 2563, 17 ธันวาคม 2563 ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี. 224-237.

Arif, K. I., & Abbas, H. F. (2015). Design and implementation a smart greenhouse. **International journal of computer science and mobile computing**, 4(8), 335-347.

Folorunso, T. A., Oshiga, O., Bala, J. A., & Ojogunwa, D. A. (2024). Development of an Internet of Things based smart greenhouse. **International Journal of Computer Trends and Technology**, 72(5), 96–101.

การเพิ่มมูลค่าและการพัฒนาผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าว (ฟุริคาเคะ) จากดักแด้ไหมสายพันธุ์พื้นถิ่น จังหวัดสุรินทร์

รัชวรรณ จันทเขต[1*] ดวงศิริ ดวงแว่ว[2] สุพิมพา วัฒนสังขโสภณ[3]

Received : October 18, 2024
Revised : July 22, 2025
Accepted : August 27, 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์จากดักแด้ไหมพันธุ์พื้นถิ่น ศึกษาคุณค่าทางด้านโภชนาการ การเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์ และถ่ายทอดองค์ความรู้สู่ชุมชน พัฒนาผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าว (ฟุริคาเคะ) ด้วยอัตราส่วนปลาต่อดักแด้ สูตรที่ 1 (100 : 0) สูตรที่ 2 (50 : 50) สูตรที่ 3 (0 : 100) และสูตรที่ 4 (0 : 150) และทดสอบทางด้านประสาทสัมผัส (9 - Points hedonic scale) ทดลองแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design, RCBD) โดยให้ผู้ทดสอบที่ผ่านการฝึกฝน จำนวน 20 คน และประชาชนในพื้นที่ จำนวน 50 คน ผลการวิจัยพบว่า ผู้ทดสอบที่ผ่านการฝึกฝนให้การยอมรับผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าว (ฟุริคาเคะ) จากดักแด้ไหม ด้านความชอบโดยรวมในระดับยอมรับมากคือ สูตรที่ 4 (ค่าเฉลี่ย 8.10 ± 0.73) คุณค่าทางด้านโภชนาการต่อ 100 กรัม พบว่า ค่าพลังงานทั้งหมด ความชื้น โปรตีน ไขมันทั้งหมด คาร์โบไฮเดรต ใยอาหาร เถ้า และ แคลเซียม ดังนี้ 567.99 kcal, 1.01 % 35.06 %, 39.83 %, 17.32 %, 7.11 % , 6.79 % และ 310.40 mg ตามลำดับ จากการเก็บรักษาเป็นเวลา 3 เดือน พบว่า ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด ยีสต์และรา และ *E.Coli* มีผลดังนี้ 3,000 CFU/g, น้อยกว่า 10 CFU/g และ น้อยกว่า 3 CFU/g ตามลำดับ โดยยังไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด จากการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมี มีผลค่า a_w เท่ากับ 0.35 และค่าสีค่าความสว่าง L*, ค่าความเป็นสีแดง (a*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b*) เท่ากับ 47.35, 4.40 และ 22.98 ตามลำดับ จากการปรับปรุงผลิตภัณฑ์ด้านสีเป็นรสต้มยำพบว่ามีค่าความเป็นสีแดง (a*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b*) เพิ่มขึ้นเท่ากับ 13.36 และ 29.10 ซึ่งผลิตภัณฑ์จากดักแด้ไหมเป็นแหล่งอาหารทางเลือกโปรตีนใหม่ที่น่าสนใจ

คำสำคัญ: ดักแด้ไหม ผงโรยข้าว (ฟุริคาเคะ) เพิ่มมูลค่า

---

[1] อาจารย์ประจำหลักสูตรครุศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาคหกรรมศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์ อีเมล: ratchawan.ja@srru.ac.th

[2] อาจารย์ประจำหลักสูตรครุศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาคหกรรมศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์ อีเมล: Tuk_aha@srru.ac.th

[3] อาจารย์ประจำหลักสูตรเทคโนโลยีบัณฑิต (เทคโนโลยีอุตสาหกรรม) คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์ อีเมล: supimpa765@gmail.com

** ผู้นิพนธ์หลัก อีเมล: ratchawan.ja@srru.ac.th*

VALUE ADDITION AND PRODUCT DEVELOPMENT OF FURIKAKE RICE SEASONING POWDER FROM THE LOCAL SILKWORM PUPAE SPECIES OF SURIN PROVINCE

Ratchawan Jantakhat[1*] Duangsiri Duangwaew[2] Supimpa Wattanasangkhasophon[3]

Abstract

The current research was aimed to develop products made from local silkworm pupae, evaluate their nutritional value, assess product changes, and transfer knowledge to the community. Furikake rice seasoning powder was developed with fish-to-silkworm pupae ratios as follows: Formula 1 (100:0), Formula 2 (50:50), Formula 3 (0:100), and Formula 4 (0:150). Sensory testing was conducted using a 9-point hedonic scale. The experiment was carried out employing Randomized Complete Block Design namely, RCBD with 20 trained testers and 50 participants from the local area. The research results showed that the trained assessors preferred rice seasoning powder (Furikake) from silkworm pupae in the aspect of overall preference and Formula 4 was highly accepted with the value of mean score of 8.10 ± 0.73. In terms of nutritional value per 100 grams, the findings indicated the following contents: total energy, moisture, protein, total fat, carbohydrates, dietary fiber, ash and calcium which were 567.99 kcal, 1.01%, 35.06%, 39.83%, 17.32%, 7.11%, 6.79% and 310.40 mg, respectively. After 3 months of storage, the results were found as follows: total plate count (TPC), yeast and mold (Y&M), and E. coli were 3,000 CFU/g, less than 10 CFU/g, and less than 3 CFU/g, respectively. All of which were within acceptable standards. Due to the analysis of physical and chemical properties, the water activity (aw) was measured at 0.35, and the color values for brightness (L*), redness (a*), and yellowness (b*) were 47.35, 4.40, and 22.98, respectively. The improvement of the product in terms of color to Tom Yum flavor was resulted in increasing the redness (a*) value and the yellowness (b*) value at 13.36 and 29.10, respectively. Silkworm pupae products have been an interestingly new option of protein source.

Keywords: Silkworm pupae, Rice seasoning powder (Furikake), Value addition

---

[1] *Lecturer of Education Program Major Home Economics Faculty of Science and Technology, Surindra Rajabhat University, e-mail: ratchawan.ja@srru.ac.th*

[2] *Lecturer of Education Program Major Home Economics Faculty of Science and Technology, Surindra Rajabhat University, e-mail: Tuk_aha@srru.ac.th*

[3] *Lecturer of Technology program (Industrial Technology) Faculty of Industrial Technology, Surindra Rajabhat University, e-mail: supimpa765@gmail.com*

** Corresponding author, e-mail: ratchawan.ja@srru.ac.th*

บทนำ

จังหวัดสุรินทร์เป็นจังหวัดในภาคอีสานใต้ ที่มีการปลูกหม่อนเลี้ยงไหม สาวไหม และทอเป็นผืน ด้วยภูมิปัญญาท้องถิ่น การผลิตผ้าไหมสุรินทร์ถือเป็นอุตสาหกรรมในครัวเรือนโดยเฉพาะพื้นที่กลุ่มเป้าหมาย บ้านโคกเกาะ ตำบลอู่โลก อำเภอลำดวน จังหวัดสุรินทร์ ได้รับการจัดตั้งเป็นหมู่บ้านอนุรักษ์ไหมไทยพื้นบ้าน จากกรมหม่อนไหม กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ มีการจัดตั้งกลุ่มปลูกหม่อนเลี้ยงไหม จากกระบวนการสาวไหมพบว่ามีดักแด้ไหมเป็นวัตถุดิบผลพลอยได้ จำนวนมากกว่า 80 กิโลกรัมต่อปี ประชาชนในพื้นที่มีการนำดักแด้มาบริโภคในครัวเรือน และจำหน่ายแต่ก็ไม่สามารถส่งไปจำหน่ายได้ไกล ซึ่งมีข้อจำกัดในเรื่องอายุการเก็บรักษาสั้น ประชาชนในพื้นที่อยากให้หน่วยงานภาครัฐส่งเสริมต่อยอดสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับดักแด้ไหมที่เลี้ยงด้วยพันธุ์พื้นถิ่น เพื่อเป็นแนวทางในการจัดสร้างกลุ่มอาชีพแปรรูปอาหารจากดักแด้ไหม การนำดักแด้ไหมไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ เช่น ผงโรยข้าว (ฟุริคาเคะ) จากดักแด้ไหมสายพันธุ์พื้นถิ่น ผู้วิจัยมีแนวคิดในการพัฒนาเป็นผงโรยข้าว เนื่องจากให้คุณค่าทางโภชนาการ ช่วยเพิ่มรสชาติให้กับอาหาร สะดวกในการบริโภค และเก็บรักษาไว้ได้นาน จากการสืบค้นงานวิจัยพบว่า ดักแด้ไหมมีผลดีต่อการเสริมสร้างภูมิคุ้มกัน ป้องกันเนื้องอก ต่อต้านแบคทีเรีย ควบคุมระดับน้ำตาลไขมันในเลือด และลดความดันโลหิต (Zhou et al., 2022) คุณค่าทางโภชนาการที่สำคัญต่อดักแด้ไหม 100 กรัม ดักแด้ไหมมีโปรตีน 21.5 กรัม ไขมัน 13 กรัม เทียบกับไข่ขาว มีโปรตีน 12.7 กรัม ไขมัน 9 กรัม (Wu et al., 2021) มีฟอสโฟลิปิดร้อยละ 26.40 ที่ประกอบด้วยเลซิติน ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อร่างกายคือ ควบคุมระดับคอเลสเตอรอล ช่วยในการเสริมสร้างความจำ ป้องกันการเกิดนิ่วในถุงน้ำดี (กรมหมอนไหม, 2555) นอกจากนี้ยังพบว่า มีกรดกลูตามมิคซึ่งเป็นกรดอะมิโนให้รสอูมามิ เหมือนกับสารโมโนโซเดียมกลูตาเมต (monosodium glutamate) (Zhang, et al., 2013). พื้นที่วิจัยและพื้นที่โดยรอบยังไม่มีการผลิตเชิงพาณิชย์ และยังไม่มีคู่แข่งทางการตลาด ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จะก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ใหม่ ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการผลิตเชิงพาณิชย์ ส่งผลให้ประชาชนในพื้นที่สามารถพึ่งพาตนเองเกิดการยกระดับระบบเศรษฐกิจฐานรากให้เข้มแข็ง เป็นต้นแบบให้เกษตรกรกลุ่มชุมชนอื่นต่อไป

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าว (ฟุริคาเคะ) จากดักแด้ไหมพันธุ์พื้นถิ่นที่ผู้บริโภคให้การยอมรับ
2. เพื่อศึกษาคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าว (ฟุริคาเคะ) จากดักแด้ไหมพันธุ์พื้นถิ่น
3. เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าว (ฟุริคาเคะ) จากดักแด้ไหม พันธุ์พื้นถิ่นในระหว่างการเก็บรักษา
4. เพื่อถ่ายทอดองค์ความรู้สู่ชุมชน

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การศึกษากระบวนการทำผงดักแด้

นำดักแด้ไหมไปลวกน้ำเดือด เป็นเวลา 1 นาที พักให้คลายร้อน ทิ้งไว้ให้สะเด็ดน้ำ นำไปปั่น จากนั้นชั่งน้ำหนัก ถาดละ 250 กรัม เกลี่ยใส่ถาดขนาด กว้าง x ยาว x ลึก (16 x 21 x 1 นิ้ว) ที่รองด้วยแผ่นรองอบ เกลี่ยให้สม่ำเสมอมีความหนาไม่เกิน 1 เซนติเมตร อบด้วยอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อครบ 1 ชั่วโมงแรกพลิกกลับด้าน อบต่อจนครบเวลา 2 ชั่วโมง นำออกจากเตาพักไว้ให้คลายร้อน นำไปปั่นละเอียด จากนั้นนำไปอบต่อ ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง ใช้การควบคุมค่า a_w เป็นเกณฑ์ในการอบจนได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีค่า a_w 0.24 ± 0.01 จัดเก็บไว้ในถุงสูญญากาศ

2. การพัฒนาผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าว (ฟุริคาเคะ) จากดักแด้ไหมพันธุ์พื้นถิ่นที่ผู้บริโภคให้การยอมรับ

2.1 ศึกษาสูตรพื้นฐานผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าว

ตารางที่ 1 แสดงสูตรพื้นฐานการทำผงโรยข้าว 5 สูตร

วัตถุดิบ	สูตรที่ 1 (กรัม)	สูตรที่ 2 (กรัม)	สูตรที่ 3 (กรัม)	สูตรที่ 4 (กรัม)	สูตรที่ 5 (กรัม)
เนื้อปลา	28	12	160	12	58
สาหร่าย	6	4	30	12	1
พริก	-	-	-	8	-
งาขาว	13	40	130	20	10
งาดำ	13	20	100	20	10
โชยุ	7	15	40	16	8
เกลือ	2	-	15	4	2
น้ำตาลทราย	3	-	50	8	4
ผงปรุงรส	6	-	-	-	3
น้ำเปล่า	15	-	150	16	-
น้ำมันงา	-	3	-	-	-

หมายเหตุ: สูตรที่ 1 ดัดแปลงจาก (นพรัตน์ มะเห และคณะ, 2564)
สูตรที่ 2 (พลพรรคนักปรุง, 2566)
สูตรที่ 3 ดัดแปลงจาก (กนกกานต์ วีระกุล และคณะ, 2560)
สูตรที่ 4 ดัดแปลงจาก (วรรณิณี จันทร์แก้ว และคณะ, 2562)
สูตรที่ 5 ดัดแปลงจาก (รจนา นุชนุ่ม, 2551)

นำสูตรพื้นฐานทั้ง 5 สูตร ทดสอบการยอมรับกับกลุ่มทดสอบที่ผ่านการฝึกฝน จำนวน 20 คน คือ นักศึกษาสาขาวิชาคหกรรมศาสตร์ที่มีความชำนาญในการตรวจสอบคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ เป็นการทดสอบในห้องปฏิบัติการที่กลุ่มตัวอย่างมีความชำนาญ มีขั้นตอนฝึกฝนดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 ฝึกหัดด้านการใช้เทอมพรรณนาและรู้จักสเกล ขั้นตอนที่ 2 ฝึกให้รู้จักแยกความแตกต่างและให้พรรณนาลักษณะและระดับความแตกต่าง ขั้นตอนที่ 3 การฝึกจะลดระดับความแตกต่างของลักษณะเฉพาะของตัวอย่างลงไป ขั้นตอนที่ 4 การฝึกครั้งนี้จะเน้นที่ความถูกต้องและทำซ้ำได้ โดยผู้ฝึกหัดจะได้รับตัวอย่างเดิมแต่เปลี่ยนรูปแบบการทดสอบ เช่น แบบจัดลำดับ (ranking test) แบบให้แต้ม (scoring test/ratio scaling) เพื่อดูความมั่นคงของประสาทสัมผัสในการรับรู้ต่อลักษณะเฉพาะของอาหาร (ปราณี อ่านเปรื่อง, 2557) เพื่อคัดเลือกสูตรที่ได้รับการยอมรับมากที่สุดนำไปเป็นสูตรที่จะพัฒนาต่อไป โดยมีวิธีการทำผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าวสูตรพื้นฐาน ดังนี้ นำปลาแห้ง (ปลาช่อนทะเลแห้ง) ไปล้างสะเด็ดน้ำพอหมาด ตัดเป็นขนาด 5 x 5 เซนติเมตร นำไปอบเตาไมโครเวฟ เป็นเวลา 2 นาที แกะเอาส่วนเนื้อปลานำมาปั่นละเอียด ตั้งเตาคั่วงาขาว งาดำ 3 นาที พักไว้ จากนั้นชั่งเตรียมวัตถุดิบตามสัดส่วนที่กำหนดในแต่ละสูตร ตั้งกระทะใช้ไฟอ่อน ใส่น้ำเปล่า น้ำตาล เกลือ โชยุ จนส่วนผสมละลายเข้ากัน และเริ่มเดือดใส่ปลาแห้ง ตามสัดส่วนแต่ละสูตร ลงไปคลุกให้เข้ากัน ใส่งาขาว งาดำ และตามด้วยสาหร่าย คลุกเคล้าให้ส่วนผสมเข้ากันต่ออีก 5 นาที นำเข้าอบด้วยตู้อบลมร้อน 90 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง ควบคุมค่า a_w ผลิตภัณฑ์สุดท้ายได้ 0.24 ± 0.01

2.2 การพัฒนาผลิตภัณฑ์จากดักแด้ไหมพันธุ์พื้นถิ่น

2.2.1 นำสูตรที่ได้รับการยอมรับมากที่สุดจากสูตรพื้นฐาน มาศึกษาปริมาณสัดส่วนปลาแห้งต่อผงดักแด้ในการทำผลิตภัณฑ์ หลังจากตั้งกระทะใช้ไฟอ่อน ใส่น้ำเปล่า น้ำตาล เกลือ โชยุ จนส่วนผสมละลายเข้ากัน และเริ่มเดือดใส่ปลาแห้งต่อผงดักแด้ ตามสัดส่วนแต่ละสูตร โดยสูตรที่ 1 ปลาแห้งต่อผงดักแด้ (100:0) สูตรที่ 2 ปลาแห้งต่อผงดักแด้ (50:50) สูตรที่ 3 ปลาแห้งต่อผงดักแด้ (0:100) และสูตรที่ 4 ปลาแห้งต่อผงดักแด้ (0:150) ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงสัดส่วนปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ในการทำผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าว (ฟุริคาเคะ) จากดักแด้ไหม

วัตถุดิบ	**ปริมาณสัดส่วน (ร้อยละ)**			
	ปลาแห้งต่อผงดักแด้ (100:0) สูตรที่ 1	ปลาแห้งต่อผงดักแด้ (50:50) สูตรที่ 2	ปลาแห้งต่อผงดักแด้ (0:100) สูตรที่ 3	ปลาแห้งต่อผงดักแด้ (0:150) สูตรที่ 4
ดักแด้	0	16.10	32.18	48.28
เนื้อปลา	32.18	16.10	0	0
สาหร่าย	6.90	6.90	6.90	6.90

ตารางที่ 2 แสดงสัดส่วนปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ในการทำผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าว (ฟุริคาเคะ) จากดักแด้ไหม (ต่อ)

วัตถุดิบ	ปริมาณสัดส่วน (ร้อยละ)			
	ปลาแห้งต่อผงดักแด้ (100:0) สูตรที่ 1	ปลาแห้งต่อผงดักแด้ (50:50) สูตรที่ 2	ปลาแห้งต่อผงดักแด้ (0:100) สูตรที่ 3	ปลาแห้งต่อผงดักแด้ (0:150) สูตรที่ 4
งาขาว	14.94	14.94	14.94	14.94
งาดำ	14.94	14.94	14.94	14.94
โชยุ	8.05	8.05	8.05	8.05
เกลือ	2.30	2.30	2.30	2.30
น้ำตาลทราย	3.45	3.45	3.45	3.45
น้ำเปล่า	17.24	17.24	17.24	17.24

3. การวางแผนการทดลอง ผู้วิจัยได้ทำการวางแผนการทดลองแบบสุ่มตลอดโดยสมบูรณ์ (Complete randomize design, CRD) สำหรับลักษณะการวิเคราะห์ทางชีวภาพ กายภาพและเคมี จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าว (ฟุริคาเคะ) จากดักแด้ไหมมาทำการทดสอบทางด้านประสาทสัมผัส (9 - Points hedonic scale) ทดลองแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design, RCBD) นำผลจากการทดสอบทางประสาทสัมผัสมาวิเคราะห์แต่ละด้านโดยใช้ค่าเฉลี่ย (Mean : $\overline{X}$) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ใช้สถิติทดสอบความแปรปรวนทางเดียว (One – way ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้ Duncan’s new multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

4. ศึกษาคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าว (ฟุริคาเคะ) จากดักแด้ไหมพันธุ์พื้นถิ่น

นำผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าว (ฟุริคาเคะ) จากดักแด้ไหมที่ได้รับการยอมรับมากที่สุด ไปทดสอบคุณค่าทางด้านโภชนาการ โดยวิเคราะห์ ดังนี้ ค่าพลังงานทั้งหมด คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมันทั้งหมด เถ้า ความชื้น ใยอาหาร และแคลเซียม (AOAC International, 2019)

5. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าว (ฟุริคาเคะ) จากดักแด้ไหมพันธุ์พื้นถิ่นในระหว่างการเก็บรักษา นำผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าว (ฟุริคาเคะ) จากดักแด้ไหมที่ได้รับการยอมรับทางด้านประสาทสัมผัสมากที่สุด มาเก็บรักษาเป็นเวลา 3 เดือน บรรจุไว้ในถุงซิปล็อค เก็บรักษาในอุณหภูมิห้อง ทำการตรวจวิเคราะห์ทุกเดือน โดยมีรายละเอียดการตรวจวิเคราะห์ ดังนี้ ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด ด้วยวิธี (American Public Health Association, 2015) ปริมาณยีสต์และรา ด้วยวิธี (AOAC International, 2016) *E. coli* ด้วยวิธี (U.S. Food and Drug Administration, 2024)

6. ถ่ายทอดองค์ความรู้ให้กับชุมชนท้องถิ่น จัดกิจกรรมอบรมเชิงปฏิบัติการทำผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าว (ฟุริคาเคะ) จากดักแด้ไหมพื้นถิ่นจังหวัดสุรินทร์ ให้กับชุมชนกลุ่มเป้าหมายบ้านโคกเกาะ ตำบลอู่โลก อำเภอลำดวน จังหวัดสุรินทร์ ที่มีความพร้อมและสนใจเข้าร่วมกิจกรรม จำนวน 30 คน

7. กลุ่มเป้าหมายที่ใช้ในการทดสอบทางประสาทสัมผัส

7.1 นักศึกษาสาขาวิชาคหกรรมศาสตร์ ที่ผ่านการฝึกฝนทางด้านประสาทสัมผัสมาแล้ว จำนวน 20 คน เลือกโดยวิธีเจาะจง เป็นผู้ทดสอบในห้องปฏิบัติการที่ผ่านการคัดเลือกและฝึกฝนให้เข้าใจกระบวนการทดสอบด้วยประสาทสัมผัสผู้ทดสอบที่ผ่านการฝึกฝน (Trained panelist) ฝึกในระดับที่มีความชำนาญในการตรวจสอบคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์อาหาร ผู้ทดสอบประเภทนี้จะมีจำนวนประมาณ 10-20 คน การใช้กลุ่มตัวอย่างที่ผ่านการฝึกฝนจะช่วยในความแม่นยำลดระยะเวลา งบประมาณในการทดสอบ ทำการฝึกฝน ณ ห้องปฏิบัติการอาหาร อาคาร 7 คหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์

7.2 ประชาชนอาสาสมัครในพื้นที่ จำนวน 50 คน กำหนดคุณสมบัติเฉพาะกลุ่มประชาชนในพื้นที่วิจัยมีอายุระหว่าง 20-70 ปี ทั้งเพศหญิงและเพศชาย มีสุขภาพอนามัยดี ไม่มีความบกพร่องทางด้านประสาทสัมผัส ไม่เป็นผู้ที่มีประวัติแพ้อาหาร ผู้ทดสอบทั่วไปอาจจะเป็นผู้เข้ารับการอบรมเชิงปฏิบัติการหรือไม่เข้าร่วมก็ได้ ในกรณีประเมินหาความนิยมหรือการยอมรับผลิตภัณฑ์อาหารของผู้บริโภค สุ่มตัวอย่างจากประชากรเป้าหมาย โดยทั่วไปจำนวน 50-200 คน ผู้ทดสอบประเภทนี้ไม่จำเป็นต้องมีพื้นความรู้ทางการประเมินคุณภาพด้วยประสาทสัมผัสมาก่อน งานวิจัยนี้ผ่านการรับรองจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์รหัสรับรอง HE651011

8. การเก็บรวบรวมข้อมูล เตรียมตัวอย่างโดยชั่งผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าว (ฟุริคาเคะ) จากดักแด้ไหมแต่ละสูตรหนัก 5 กรัม โรยบนข้าวสวย และมีแก้วน้ำ 1 แก้ว สำหรับบ้วนปากก่อนชิมตัวอย่างถัดไปเริ่มทดสอบในเวลา 10.00 น. เว้นช่วงการทดสอบแต่ละครั้งห่างกัน 2 วัน ทำการทดสอบ 3 ซ้ำ

9. เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูล เป็นแบบทดสอบทางประสาทสัมผัส (9 - Points hedonic scale) 9 ระดับ คณะผู้วิจัยได้กำหนดเกณฑ์ในการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยเพื่อการพรรณนาระดับการยอมรับของผู้บริโภค ในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น ลักษณะเนื้อสัมผัส รสชาติ และการยอมรับรวม โดยกำหนดอันตรภาคชั้น ดังนี้

ค่าเฉลี่ยระหว่าง 1.00 – 1.88	หมายถึง คุณลักษณะนั้นอยู่ในระดับไม่ยอมรับมากที่สุด
ค่าเฉลี่ยระหว่าง 1.89 – 2.77	หมายถึง คุณลักษณะนั้นอยู่ในระดับไม่ยอมรับมาก
ค่าเฉลี่ยระหว่าง 2.78 – 3.66	หมายถึง คุณลักษณะนั้นอยู่ในระดับไม่ยอมรับปานกลาง
ค่าเฉลี่ยระหว่าง 3.67 – 4.55	หมายถึง คุณลักษณะนั้นอยู่ในระดับไม่ยอมรับเล็กน้อย
ค่าเฉลี่ยระหว่าง 4.56 – 5.44	หมายถึง คุณลักษณะนั้นอยู่ในระดับเฉย ๆ
ค่าเฉลี่ยระหว่าง 5.45 – 6.33	หมายถึง คุณลักษณะนั้นอยู่ในระดับการยอมรับเล็กน้อย

ค่าเฉลี่ยระหว่าง 6.34 – 7.22 หมายถึง คุณลักษณะนั้นอยู่ในระดับการยอมรับปานกลาง

ค่าเฉลี่ยระหว่าง 7.23 – 8.11 หมายถึง คุณลักษณะนั้นอยู่ในระดับการยอมรับมาก

ค่าเฉลี่ยระหว่าง 8.12 – 9.00 หมายถึง คุณลักษณะนั้นอยู่ในระดับการยอมรับมากที่สุด

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

1. การศึกษากระบวนการทำผงดักแด้ไหม

ผู้วิจัยได้นำดักแด้ไปปั่นมีลักษณะเป็นของเหลวข้นก่อนนำมาอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาด เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสทำให้อัตราการทำแห้งดีขึ้น ดักแด้ที่ได้หลังจากผ่านการอบแห้งแบบถาดจะมีลักษณะแห้งเป็นแผ่นต้องนำไปบดเป็นผง มีค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ a_w 0.24 ± 0.01 ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ a_w ของผงดักแด้ไหม

วิเคราะห์ค่า a_w			**ค่าเฉลี่ย±SD**
ครั้งที่ 1	**ครั้งที่ 2**	**ครั้งที่ 3**	
0.24	0.23	0.25	0.24 ± 0.01

ดักแด้ที่ผ่านการอบทั้งตัวเปลือกนอกของดักแด้จะแข็งทำให้น้ำที่อยู่ภายในเคลื่อนที่มาที่ผิวหน้าได้ไม่ดี โครงสร้างของอาหารที่มีโครงสร้างไม่แน่นน้ำในอาหารสามารถเคลื่อนที่มาที่ผิวหน้าอาหารได้ ทำให้อัตราการทำแห้งสูง (อรพิน ชัยประสพ, 2558) จากวิธีการที่ศึกษาผงดักแด้มีค่าสีค่าความสว่าง L*, ค่าความเป็นสีแดง (a*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b*) เท่ากับ 51.50, 12.19 และ 39.12 ตามลำดับ และมีลักษณะละเอียดสามารถกรองผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช การอบแห้งดักแด้ที่อุณหภูมิสูงจะกระตุ้นปฏิกิริยา Maillard ซึ่งเป็นการเรียงตัวใหม่ของกรดอะมิโนและน้ำตาลรีดิวซ์ (Loo, et al., 2022) ดังภาพที่ 1

ก ข

ภาพที่ 1 ผงดักแด้ไหมจากการศึกษา (ก) เทียบกับผงดักแด้หนอนไหม (ข) ของ Loo, et al., (2022)

2. การพัฒนาผลิตภัณฑ์จากดักแด้ไหมพันธุ์พื้นถิ่นที่ผู้บริโภคให้การยอมรับ

2.1 ศึกษาสูตรพื้นฐานผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าว

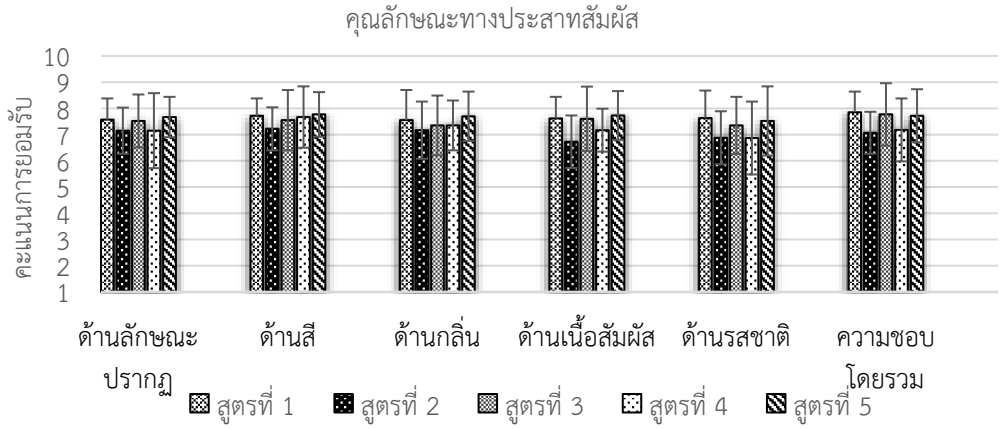
จากการศึกษาสูตรพื้นฐานผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าว 5 สูตร ผู้ทดสอบที่ผ่านการฝึกฝน ทั้ง 20 คน ให้การยอมรับคะแนนด้านความชอบโดยรวมของสูตรที่ 1 สูงกว่าทุกสูตรคะแนนเฉลี่ย 7.85±0.79 ผลปรากฏดังตารางที่ 4 และภาพที่ 2

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบทางด้านประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าวสูตรพื้นฐาน

สูตรที่	ค่าเฉลี่ย					
	ลักษณะปรากฏ	สี	กลิ่น (ปลา งา สาหร่าย)	ลักษณะเนื้อสัมผัส (ไม่แข็ง กระด้าง)	รสชาติ (กลมกล่อม)	ความชอบโดยรวม
สูตรที่ 1	7.57^{a}±0.81	7.72^{a}±0.66	7.55^{a}±1.15	7.62^{a}±0.82	7.63^{a}±1.05	7.85^{a}±0.79
สูตรที่ 2	7.15^{b}±0.88	7.22^{b}±0.82	7.17^{b}±1.09	6.73^{c}±1.00	6.88^{b}±1.01	7.07^{b}±0.80
สูตรที่ 3	7.52^{ab}±1.01	7.55^{ab}±1.15	7.35^{ab}±1.14	7.60^{a}±1.23	7.35^{a}±1.09	7.77^{a}±1.19
สูตรที่ 4	7.15^{b}±1.43	7.67^{a}±1.17	7.35^{ab}±0.95	7.17^{b}±0.82	6.87^{b}±1.39	7.18^{b}±1.20
สูตรที่ 5	7.67^{a}±0.77	7.77^{a}±0.85	7.70^{a}±0.94	7.73^{ab}±0.93	7.52^{a}±1.32	7.72^{a}±1.01

หมายเหตุ: 1) a, b คือ ตัวอักษรที่กำกับต่างกันในแนวตั้งแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ns คือ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$)

2) สูตรที่ 1 ดัดแปลงจาก (นพรัตน์ มะเห และคณะ, 2564) สูตรที่ 2 (พลพรรคนักปรุง, 2566) สูตรที่ 3 ดัดแปลงจาก (กนกกานต์ วีระกุล และคณะ, 2560) สูตรที่ 5 ดัดแปลงจาก (รจนา นุชนุ่ม, 2551)



ภาพที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบการยอมรับทางประสาทสัมผัสในแต่ละคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าว สูตรพื้นฐาน 5 สูตร

ผู้ทดสอบให้คะแนนด้านความชอบโดยรวมของสูตรพื้นฐานสูตรที่ 1 ค่าเฉลี่ย 7.85±0.79 มากกว่าทุกสูตรและเมื่อพิจารณาที่ด้านรสชาติมีคะแนนมากกว่าทุกสูตรคะแนนเฉลี่ย 7.63±1.05 เนื่องจากสูตรที่ 1 มีสัดส่วนของวัตถุดิบที่เหมาะสมมีรสชาติกลมกล่อม เช่นเดียวกับดวงรัตน์ พรเทวบัญชา (2554) กล่าวว่าปัจจัยที่มีผลต่อการยอมรับของผู้บริโภคมากที่สุดคือ รสชาติ สำหรับสูตรที่ 2 กลุ่มเป้าหมายให้การยอมรับโดยรวมน้อยที่สุด เนื่องจากมีรสชาติที่จืดและส่วนผสมของงาขาวและงาดำมากดูไม่น่ารับประทาน

2.2 การพัฒนาผลิตภัณฑ์จากดักแด้ไหมพันธุ์พื้นถิ่น

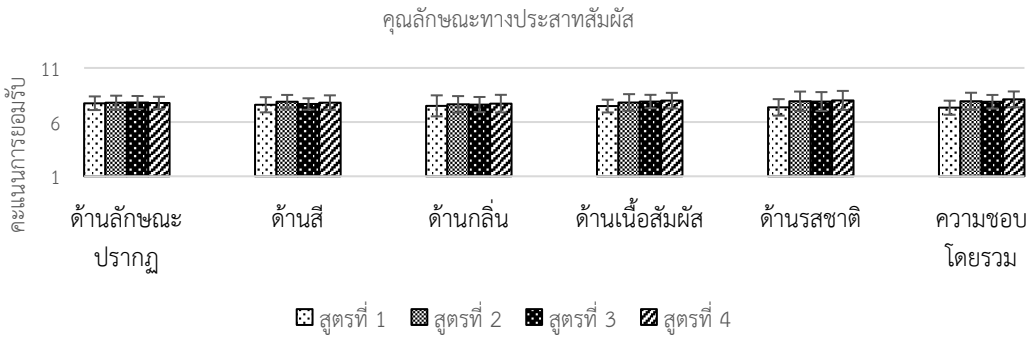
ผลการทดสอบทางด้านประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าว (ฟุริคาเคะ) จากดักแด้ไหมสูตรที่ได้รับการยอมรับมากที่สุด จากสูตรพื้นฐานสูตรที่ 1 ดัดแปลงจาก (นพรัตน์ มะเห และคณะ, 2564) มาศึกษาปริมาณสัดส่วนปลาแห้งต่อผงดักแด้ ผลการทดสอบดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบทางด้านประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าว (ฟุริคาเคะ) จากดักแด้ไหม

ร้อยละดักแด้	ลักษณะปรากฏ^{ns}	สี^{ns}	กลิ่น^{ns} (ปลา ดักแด้ งา สาหร่าย)	ลักษณะเนื้อสัมผัส (ไม่แข็ง กระด้าง)	รสชาติ (กลมกล่อม)	ความชอบโดยรวม
สูตรที่ 1	7.74±0.63	7.60±0.70	7.50±0.97	7.48^{b}±0.59	7.36^{b}±0.76	7.33^{b}±0.65
สูตรที่ 2	7.79± 0.65	7.88±0.63	7.64±0.76	7.81^{a}±0.77	7.93^{a}±0.89	7.93^{a}±0.78
สูตรที่ 3	7.81 ±0.60	7.67±0.53	7.62±0.70	7.90^{a}±0.62	7.90^{a}±0.87	7.88^{a}±0.63
สูตรที่ 4	7.76 ±0.58	7.79±0.68	7.71±0.81	7.98^{a}±0.72	8.00^{a}±8.88	8.10^{a}±0.73

หมายเหตุ: 1) a, b คือ ตัวอักษรที่กำกับต่างกันในแนวตั้งแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ns คือ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$)

2) ปลาแห้งต่อผงดักแด้ สูตรที่ 1 (100:0) สูตรที่ 2 (50:50) สูตรที่ 3 (0:100) สูตรที่ 4 (0:150)



ภาพที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบการยอมรับทางประสาทสัมผัสในแต่ละคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าว (ฟุริคาเคะ) จากดักแด้ไหม

จากตารางที่ 5 และภาพที่ 3 สามารถรายงานผลการทดสอบทางด้านประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าว (ฟุริคาเคะ) จากดักแด้ไหมโดยพิจารณาคะแนนการยอมรับด้านความชอบโดยรวมเป็นเกณฑ์การตัดสินการยอมรับ พิจารณาร่วมกับคุณลักษณะแต่ละด้านมีผลการทดสอบทางด้านประสาทสัมผัส ดังนี้

ด้านลักษณะปรากฏ พบว่า ผู้ทดสอบให้การยอมรับที่ระดับยอมรับมากทุกสูตร (ค่าเฉลี่ยระหว่าง 7.74 - 7.81) โดยเรียงลำดับค่าเฉลี่ยการยอมรับ ดังนี้ สูตรที่ 3 (ค่าเฉลี่ย 7.81 ±0.60) สูตรที่ 2 (ค่าเฉลี่ย 7.79± 0.65) สูตรที่ 4 (ค่าเฉลี่ย 7.76 ±0.58) และสูตรที่1 (ค่าเฉลี่ย 7.74±0.63) ตามลำดับ สูตรที่ 1 - สูตรที่ 4 ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับ (P>0.05) เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยการยอมรับพบว่า สูตรที่ 3 การยอมรับด้านลักษณะปรากฏมีค่าเฉลี่ย 7.81±0.60 เมื่อพิจารณาที่ตัวผลิตภัณฑ์มีความสมดุลของผงดักแด้ งาขาว งาดำ และสาหร่ายสูงสุด ดังภาพที่ 4

(ก) สูตรที่ 1 ปลาต่อดักแด้ (100:0)

(ข) สูตรที่ 2 ปลาต่อดักแด้ (50:50)

(ค) สูตรที่ 3 ปลาต่อดักแด้ (0:100)

(ง) สูตรที่ 4 ปลาต่อดักแด้ (0:150)

ภาพที่ 4 แสดงลักษณะปรากฏของผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าว (ฟุริคาเคะ) จากดักแด้ไหมแต่ละสูตร

ด้านสี พบว่า ผู้ทดสอบให้การยอมรับที่ระดับยอมรับมาก (ค่าเฉลี่ยระหว่าง 7.60 - 7.88) โดยเรียงลำดับค่าเฉลี่ยการยอมรับ ดังนี้ สูตรที่ 2 (ค่าเฉลี่ย 7.88±0.63) สูตรที่ 4 (ค่าเฉลี่ย7.79±0.68) สูตรที่ 3 (ค่าเฉลี่ย7.67±0.53) และสูตรที่ 1 (ค่าเฉลี่ย 7.60±0.70) ตามลำดับ สูตรที่ 1 - สูตรที่ 4 ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับ (P>0.05) เนื่องจากสีของทุกสูตร มีองค์ประกอบที่คล้ายกันได้แก่ ผงดักแด้ ปลาแห้ง งา และสาหร่าย

ด้านกลิ่น พบว่า ผู้ทดสอบให้การยอมรับผลิตภัณฑ์ในระดับยอมรับมาก (ค่าเฉลี่ยระหว่าง 7.50 – 7.71) โดยเรียงลำดับค่าเฉลี่ยการยอมรับ ดังนี้ สูตรที่ 4 (ค่าเฉลี่ย 7.71±0.81) สูตรที่ 2 (ค่าเฉลี่ย 7.64±0.76) สูตรที่ 3 (ค่าเฉลี่ย 7.62±0.70) และสูตรที่ 1 (ค่าเฉลี่ย 7.50±0.97) ตามลำดับ สูตรที่ 1 - สูตรที่ 4 ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับ (P>0.05) เมื่อพิจารณาที่ตัวผลิตภัณฑ์สูตรที่ 4 มีส่วนประกอบของดักแด้ผงมากสุด เปรียบเทียบสูตรที่มีส่วนประกอบของเนื้อปลาแห้ง พบว่าสูตรที่มีส่วนประกอบของเนื้อปลาแห้ง

จะส่งเสริมให้ผลิตภัณฑ์มีกลิ่นที่แรงขึ้น เช่นเดียวกับการศึกษาของอินทิรา ลิจันทร์พร และคณะ (2566) กล่าวว่า การใส่ผงดักแด้ไหมในผลิตภัณฑ์บราวนีเมื่อใช้ในปริมาณสูงขึ้นส่งผลต่อคุณภาพด้านสี เนื้อสัมผัส จะทำให้บราวนีมีกลิ่นเฉพาะตัว

ด้านลักษณะเนื้อสัมผัส พบว่า ผู้ทดสอบให้การยอมรับผลิตภัณฑ์ในระดับยอมรับมาก (ค่าเฉลี่ยระหว่าง 7.48 – 7.98) โดยเรียงลำดับค่าเฉลี่ยการยอมรับ ดังนี้ สูตรที่ 4 (ค่าเฉลี่ย 7.98±0.72) สูตรที่ 3 (ค่าเฉลี่ย 7.90±0.62) สูตรที่ 2 (ค่าเฉลี่ย 7.81±0.77) และสูตรที่ 1 (ค่าเฉลี่ย 7.48±0.59) ตามลำดับ สูตรที่ 2 สูตรที่ 3 และสูตรที่ 4 แตกต่างจากสูตรที่ 1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ ($P \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยการยอมรับพบว่า สูตรที่ 4 การยอมรับด้านลักษณะเนื้อสัมผัสสูงสุด มีค่าเฉลี่ย 7.98±0.72 เมื่อพิจารณาที่ตัวผลิตภัณฑ์พบว่า สูตรที่ 4 มีส่วนประกอบของดักแด้ผงมีเนื้อสัมผัสที่เป็นผงละเอียดไม่แข็งกระด้าง แตกต่างจากสูตรที่ 1 มีส่วนประกอบของเนื้อปลาแห้งจะมีเนื้อสัมผัสที่แข็งกระด้างส่งผลต่อความรู้สึกขณะเคี้ยว

ด้านรสชาติ พบว่า ผู้ทดสอบให้การยอมรับผลิตภัณฑ์ในระดับยอมรับมาก (ค่าเฉลี่ย 7.36-8.00) โดยเรียงลำดับค่าเฉลี่ยการยอมรับ ดังนี้ สูตรที่ 4 (ค่าเฉลี่ย 8.00±0.88) สูตรที่ 2 (ค่าเฉลี่ย 7.93±0.89) สูตรที่ 3 (ค่าเฉลี่ย 7.90±0.87) และสูตรที่ 1 (ค่าเฉลี่ย 7.36±0.76) ตามลำดับ สูตรที่ 2 สูตรที่ 3 และสูตรที่ 4 แตกต่างจากสูตรที่ 1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ ($P \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยการยอมรับพบว่า สูตรที่ 4 การยอมรับด้านรสชาติสูงสุด เมื่อพิจารณาที่ตัวผลิตภัณฑ์พบว่า มีส่วนประกอบของดักแด้ผงปริมาณมากกว่าทุกสูตร จากรายงานการวิจัยดักแด้ไหมพันธุ์อิรี่มีกรดกลูตามิค 12.9 กรัม/100กรัม (Longvah, et al., 2011) จึงทำให้มีรสชาติอร่อยเนื่องจากเกลือของกรดกลูตามิก คือกลูตาเมต (glutamate) มีความสัมพันธ์กับการรับรสอูมามิ และจากงานวิจัยพบว่ากรดอะมิโนของดักแด้ไหมพื้นถิ่น จังหวัดสุรินทร์ พันธุ์ทับทิมสยาม x วนาสวรรค์ มีค่ากรดกลูตามิกสูงที่สุดเท่ากับ 5,766 มิลลิกรัม (ดวงศิริ ดวงแว่ว และรัชวรรณ จันทเขต, 2566)

ด้านความชอบโดยรวม พบว่า ผู้ทดสอบให้การยอมรับผลิตภัณฑ์ในระดับยอมรับมากทุกสูตร (ค่าเฉลี่ย 7.33 - 8.10) โดยเรียงลำดับค่าเฉลี่ยการยอมรับ ดังนี้ สูตรที่ 4 (ค่าเฉลี่ย 8.10±0.73) สูตรที่ 2 (ค่าเฉลี่ย 7.93±0.78) สูตรที่3 (ค่าเฉลี่ย 7.88±0.63) และสูตรที่ 1 (ค่าเฉลี่ย7.33±0.65) ตามลำดับ สูตรที่ 2 สูตรที่ 3 และสูตรที่ 4 แตกต่างจากสูตรที่ 1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ ($P \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยการยอมรับพบว่า สูตรที่ 4 การยอมรับด้านความชอบโดยรวมสูงสุด และมีความสอดคล้องกับคะแนนเฉลี่ยด้านกลิ่น ด้านลักษณะเนื้อสัมผัส ด้านรสชาติ สูงกว่าทุกสูตรทำให้ผลิตภัณฑ์มีกลิ่นที่ดีมีเนื้อสัมผัสไม่แข็งกระด้าง และมีรสอูมามิ

3. ศึกษาคุณค่าทางด้านโภชนาการของผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าว(ฟุริคาเคะ) จากดักแด้ไหม

การศึกษาคุณค่าทางด้านโภชนาการของผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าว (ฟุริคาเคะ) จากดักแด้ไหม ที่มีความชอบโดยรวมมากที่สุด คือ สูตรที่ 4 ปลาแห้งต่อผงดักแด้ปริมาณสัดส่วน (0:150) มาทำการตรวจวิเคราะห์ผลการตรวจวิเคราะห์รายละเอียดดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 คุณค่าทางด้านโภชนาการของผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าว (ฟุริคาเคะ) จากดักแด้ไหมต่อ 100 กรัม

รายการวิเคราะห์ (ต่อ 100 กรัม)	**ค่าเฉลี่ย±SD**
พลังงานทั้งหมด (กิโลแคลอรี)	567.99±0.83
ความชื้น	1.01±0.02
โปรตีน (%)	35.06±0.01
ไขมัน (%)	39.83±0.16
คาร์โบไฮเดรต (%)	17.32±0.13
ใยอาหาร	7.11±0.07
เถ้า (%)	6.79± 0.01
แคลเซียม (mg)	310.40±2.23

จากผลการตรวจวิเคราะห์คุณค่าทางด้านโภชนาการของผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าว (ฟุริคาเคะ) จากดักแด้ไหม (ต่อ 100 กรัม) พบว่า ค่าพลังงานทั้งหมด 567.99 kcal ความชื้น 1.01% โปรตีน 35.06 % ไขมันทั้งหมด 39.83 % คาร์โบไฮเดรต 17.32 % ใยอาหาร 7.11 % เถ้า 6.79 % และแคลเซียม 310.40 mg สอดคล้องกับการวิจัยเรื่องการพัฒนาคุกกี้ที่เสริมด้วยดักแด้ไหม (Bombyx mori) พบว่าการเติมดักแด้ไหมในผลิตภัณฑ์ 15 % ทำให้มีโปรตีนคาร์โบไฮเดรต และแร่ธาตุ เพิ่มขึ้น 17.65 ±0.82, 61.31±0.94 และ 2.92± 0.06 (Silva Torres, et al., 2022) และจากการศึกษาของ อินทิรา ลิจันทร์พร และคณะ (2566) พบว่า องค์ประกอบทางเคมีของผงดักแด้ไหมอีรี่ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์บราวนีมีค่า โปรตีน 10.29 ไขมัน 32.73 คาร์โบไฮเดรต ร้อยละ 31.82 และใยอาหาร 2.91 ผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าวมีส่วนประกอบหลักเป็นผงดักแด้ไหมจึงทำให้มีโปรตีนสูง และไขมันที่ดี สอดคล้องกับการศึกษาของดวงศิริ ดวงแว่ว และรัชวรรณ จันทเขต (2566) พบว่าองค์ประกอบทางเคมีพื้นฐานและแร่ธาตุของดักแด้ไหมพื้นถิ่นจังหวัดสุรินทร์ พันธุ์ทับทิมสยาม x วนาสวรรค์ (ต่อ 100 กรัม น้ำหนักแห้ง) มีค่าโปรตีน 58.79 (%) ไขมัน 32.12 (%) และแคลเซียม 142.02 (mg/100 กรัม) อย่างไรก็ตาม ผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าว(ฟุริคาเคะ) จากดักแด้ไหม (ต่อ 100 กรัม) เป็นแหล่งของโปรตีนทางเลือกเมื่อเทียบกับแหล่งโปรตีนอื่นๆ (ต่อ 100 กรัม) เช่น ปลานิลสด ประกอบด้วยโปรตีน 18.23 กรัม เนื้อหมูสันในดิบ ประกอบด้วยโปรตีน 21.31 กรัม ไก่บ้านเนื้ออก และหนังดิบ ประกอบด้วยโปรตีน 23.60 กรัม และถั่วลิสงดิบ ประกอบด้วยโปรตีน 29.70 กรัม (สำนักโภชนาการ กรมอนามัย, 2561) แต่อย่างไรก็ตามสารก่อภูมิแพ้ที่มีอยู่ในดักแด้ไหมโปรตีนชนิดเดียวที่จัดเป็นสารก่อภูมิแพ้ในหนอนไหมตัวอ่อนคืออาร์จินีนไคเนส อาร์จินีนไคเนสเป็นสารก่อภูมิแพ้ในสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังอีกชนิดหนึ่งที่รู้จักกันดีเป็นเอนไซม์ที่พบในแมลงและสัตว์จำพวกกุ้ง อาจทำให้เกิดการแพ้ต่าง ๆ ได้ เช่น อาการทางผิวหนัง ระบบทางเดินหายใจ (Wu, et al., 2021)

4. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าว (ฟุริคาเคะ) จากดักแด้ไหมพันธุ์พื้นถิ่นในระหว่างการเก็บรักษา

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าว (ฟุริคาเคะ) จากดักแด้ไหมพันธุ์พื้นถิ่นในระหว่างการเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 3 เดือน โดยนำมาทดสอบทางด้านจุลินทรีย์ ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ a_w รายละเอียดดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์ทางด้านจุลินทรีย์ ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ a_w

เดือนที่ตรวจวิเคราะห์	TPC CFU/g	Y&M CFU/g	*E. coli* MPN/g	a_w
เดือนที่ 1	29,000	ยีสต์ น้อยกว่า10,รา 60	น้อยกว่า 3	0.24
เดือนที่ 2	7,000	ยีสต์ น้อยกว่า10,รา 30	น้อยกว่า 3	0.28
เดือนที่ 3	3,000	น้อยกว่า10	น้อยกว่า 3	0.35

จากการตารางที่ 7 การเปลี่ยนแปลงของเชื้อจุลินทรีย์ในระยะเวลาการเก็บรักษาเป็นเวลา 3 เดือน เชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด มีจำนวนเชื้อ 3,000 CFU/g ยีสต์และรา น้อยกว่า 10 CFU/g เชื้ออีโคไล (*E. coli*) น้อยกว่า 3 MPN/g ผลของเชื้อมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากเชื้อจุลินทรีย์จะมีกราฟการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วในระยะที่ 2 จะเริ่มคงที่ในระยะที่ 3 และจะลดจำนวนลงอย่างรวดเร็วในระยะที่ 4 ระยะการตายของจุลินทรีย์ เมื่อปัจจัยหรือสภาพแวดล้อมไม่เหมาะสม เช่น อุณหภูมิที่ไม่เหมาะสม ก็อาจทำให้จุลินทรีย์ลดจำนวนลงหรือถูกทำลาย การลดลงของสารอาหารสำหรับการเจริญเติบโต จุลินทรีย์จำเป็นต้องได้รับสารอาหารในการเจริญเติบโต (ธารารัตน์ ชือตอฟ, 2558) หากเก็บผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าว (ฟุริคาเคะ) จากดักแด้ไหมไว้เป็นระยะเวลานาน สารอาหารที่จุลินทรีย์ใช้ในการเจริญเติบโตอาจหมดไป ทำให้การเจริญเติบโตของเชื้อลดลง และสภาวะแวดล้อมไม่เหมาะสม การเก็บรักษาในสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นอาจส่งผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ได้ และค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ a_w เดือนที่ 3 มีค่าเท่ากับ 0.35 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากอาหารนั้นมีความสามารถในการดูดความชื้นจากอากาศได้หากความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย และอาหารมีความสามารถในการดูดความชื้นได้มากเส้นกราฟ adsorption isotherm จะมีความชันมาก (นิธิยา รัตนาปนนท์, 2557) ผงดักแด้มีองค์ประกอบที่สามารถดูดซับความชื้นจากอากาศได้ หากบรรจุภัณฑ์ไม่แน่นหนา และระยะเวลาในการเก็บรักษาเป็นช่วงเดือนเมษายนที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมดุลของน้ำทำให้โมเลกุลของน้ำเคลื่อนที่เร็วขึ้น ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสถานะและสมดุลของน้ำในอาหาร

5. ถ่ายทอดองค์ความรู้ให้กับชุมชนท้องถิ่น

จากการจัดกิจกรรมอบรมเชิงปฏิบัติการทำผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าว (ฟุริคาเคะ) จากดักแด้ไหมพันธุ์พื้นถิ่น จังหวัดสุรินทร์ มีจำนวนผู้เข้ารับการอบรมจำนวน 30 คน ดังภาพที่ 4 การทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัสที่มีต่อผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าว(ฟุริคาเคะ) ดักแด้ไหมพันธุ์พื้นถิ่น ได้รับการยินยอมเป็นอาสาสมัครจากผู้ที่เข้ารับการอบรมเชิงปฏิบัติการที่มีคุณสมบัติตามเกณฑ์การคัดเลือก และประชาชนในพื้นที่ที่สมัครใจเป็นอาสาสมัครในการทดสอบรวมจำนวนทั้งสิ้น 50 คน ดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ความพึงพอใจที่มีต่อผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าว(ฟุริคาเคะ) ดักแด้ไหม จากอาสาสมัครในพื้นที่ 50 คน

คุณลักษณะทางประสาทสัมผัส	ค่าเฉลี่ยระดับความพึงพอใจ	แปลผลระดับการยอมรับ
ลักษณะปรากฏ	8.38±0.85	ยอมรับมากที่สุด
สี	8.10±0.97	ยอมรับมาก
กลิ่น (ดักแด้ งา สาหร่าย)	8.42±0.70	ยอมรับมากที่สุด
ลักษณะเนื้อสัมผัส (ไม่แข็ง กระด้าง)	8.32±0.82	ยอมรับมากที่สุด
รสชาติ (กลมกล่อม)	8.50±0.74	ยอมรับมากที่สุด
ความชอบโดยรวม	8.50±0.65	ยอมรับมากที่สุด

จากตารางที่ 8 ผลการทดสอบการยอมรับจากอาสาสมัครให้การยอมรับด้านความชอบโดยรวมในระดับยอมรับมากที่สุด ค่าเฉลี่ย 8.50±0.65 เมื่อพิจารณาที่ผลการยอมรับด้านสี มีค่าเฉลี่ย 8.10±0.97 ซึ่งระดับการยอมรับมีค่าเฉลี่ยน้อยกว่าทุกด้าน ผู้วิจัยจึงได้ปรับปรุงสูตรต้นแบบผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าว(ฟุริคาเคะ) ดักแด้ไหมรสต้มยำในระดับห้องปฏิบัติการ มีส่วนประกอบวัตถุดิบ ดังนี้ ดักแด้ (ร้อยละ40.62) สาหร่าย (ร้อยละ5.80) งาขาว (ร้อยละ12.57) งาดำ (ร้อยละ12.57) ซอสโชยุ (ร้อยละ6.77) เกลือ (ร้อยละ2.32) น้ำตาล (ร้อยละ2.90) น้ำเปล่า (ร้อยละ14.51) ผงปรุงรสวิงซ์แซ่บ (ร้อยละ13.54) ผงปาปรีกา (ร้อยละ5.80) และใบมะกรูด (ร้อยละ 0.58) ตามลำดับ วิเคราะห์คุณค่าทางด้านโภชนาการ ต่อ 100 กรัม ดังนี้ พลังงานทั้งหมด 485.42 (kcal/100g) พลังงานจากไขมัน 243.54 (kcal/100g) ความชื้น 3.32 (%) โปรตีน 31.04 (%) ไขมัน 27.06 (%) คาร์โบไฮเดรต 29.43 (%) ใยอาหาร 6.97 (g/100g) เถ้า 9.15 (%) และแคลเซียม 282.82 (mg/100g) ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ a_w มีค่าเท่ากับ 0.26 ค่าสีค่าความสว่าง (L*) ค่าความเป็นสีแดง (a*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b*) เท่ากับ 37.65, 13.36 และ 29.10 เมื่อเปรียบเทียบค่าสีกับผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าว(ฟุริคาเคะ) ดักแด้ไหมรสต้นตำหรับ มีค่าความสว่าง L*, ค่าความเป็นสีแดง (a*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b*) เท่ากับ 47.35 4.40 และ 22.98 จากการปรับปรุงผลิตภัณฑ์รสต้มยำ พบว่ามีค่าความเป็นสีแดง (a*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b*) เพิ่มขึ้นเท่ากับ 13.36 และ 29.10 ผลิตภัณฑ์ ดังภาพที่ 5

(ก) รสต้นตำรับ (ข) รสต้มยำ

ภาพที่ 5 เปรียบเทียบลักษณะปรากฏด้านสีของผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าว(ฟุริคาเคะ) ดักแด้ไหม 2 สูตร

ภาพที่ 6 ภาพการอบรมเชิงปฏิบัติการทำผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าว (ฟุริคาเคะ) จากดักแด้ไหมพื้นถิ่นจังหวัดสุรินทร์ จำนวนผู้เข้าร่วม 30 คน

ภาพที่ 7 ทดสอบความพึงพอใจในผลิตภัณฑ์กับประชาชนอาสาสมัครในพื้นที่ จำนวน 50 คน

สรุป

ผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าว(ฟุริคาเคะ) ดักแด้ไหม สูตรที่ผู้ทดสอบให้การยอมรับมากที่สุด คือ สูตรที่ 4 ปลาแห้งต่อผงดักแด้ปริมาณสัดส่วน (0:150) การเสริมดักแด้ผง ทำให้ผลิตภัณฑ์มีกลิ่นที่ดี มีเนื้อสัมผัสไม่แข็งกระด้าง และมีรสอูมามิ (กลมกล่อม) ต่างจากสูตรที่มีส่วนผสมของปลาแห้งจะทำให้ผลิตภัณฑ์มีกลิ่นที่แรงขึ้นและเนื้อสัมผัสมีความกระด้าง ดักแด้มีกรดกลูตามิค 12.9 กรัม/100กรัม (Longvah, et al., 2011) จึงทำให้มีรสชาติกลมกล่อม ผลการวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการ มีโปรตีนและไขมันดี ร้อยละ35.06 และ ร้อยละ 39.83

ซึ่งมากกว่าหมูเนื้อแดง ให้โปรตีน 20.3 กรัม ไขมัน 6.2 กรัม และ เนื้อไก่ ให้โปรตีน 19.3 กรัม ไขมัน 9.4 กรัม (Wu, et al., 2021) จากการเก็บรักษาเป็นเวลา 3 เดือน เชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมด (TPC) มีจำนวนเชื้อ 3,000 CFU/g เชื้อยีสต์และรา (Y&M) มีจำนวนน้อยกว่า 10 CFU/g เชื้ออีโคไล (*E. coli*) มีจำนวนน้อยกว่า 3 MPN/g ซึ่งปริมาณเชื้อยังไม่เกินเกณฑ์อาหารพร้อมบริโภคที่มีปริมาณน้ำอิสระในอาหารน้อยกว่า 0.86 มีเกณฑ์เชื้อจุลินทรีย์ทั้งหมดน้อยกว่า $1x10^6$ CFU/กรัม เชื้อยีสต์และรา น้อยกว่า 100 CFU/กรัม *E. coli* น้อยกว่า 3 MPN/g (กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์, 2560) งานวิจัยนี้ก่อให้เกิดนวัตกรรมอาหารสูตรใหม่เป็นแหล่งอาหารทางเลือกสำหรับโปรตีนช่วยเพิ่มรสชาติให้กับอาหาร

ข้อเสนอแนะ

1. ผู้วิจัยควรมีการตรวจวิเคราะห์ค่าสีในผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าว (ฟุริคาเคะ) จากดักแด้ไหมพันธุ์พื้นถิ่นในระหว่างการเก็บรักษา 3 เดือน เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์ และเปรียบเทียบค่าสีกับผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าว (ฟุริคาเคะ) จากดักแด้ไหม (รสต้มยำ)

2. ผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าว (ฟุริคาเคะ) จากดักแด้ไหม (รสต้มยำ) เป็นการปรับปรุงสูตรด้านสีในระดับห้องปฏิบัติการเพื่อเป็นต้นแบบในการพัฒนาสูตรศึกษาการยอมรับที่มีต่อผลิตภัณฑ์ในครั้งต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ที่มอบทุนประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2566 ครั้งนี้ ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. พงษ์ธิพันธ์ ผึ่งผาย สาขาวิชาเคมีประยุกต์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์ ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำในการวิจัย รองประธานกลุ่มปลูกหม่อนเลี้ยงไหมบ้านโคกเกาะและประชาชนในพื้นที่ให้ความร่วมมือเป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

กนกกานต์ วีระกุล จันทร์จนา ศิริพันธ์วัฒนา และสุธิดา โสดา. (2560). **การสร้างสรรค์นวัตกรรมและคุณค่าให้กับอาหารท้องถิ่นเพื่อสุขภาพและคู่มือการผลิตอาหารท้องถิ่นเพื่อสุขภาพ : กรณีศึกษา วัตถุดิบท้องถิ่นจากจังหวัดเชียงราย หนองคาย เพชรบุรี สุราษฎร์ธานี**. โรงเรียนการเรือน มหาวิทยาลัยสวนดุสิต.

กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์. (2560). **เกณฑ์คุณภาพทางจุลชีววิทยาของอาหารและภาชนะสัมผัสอาหาร.** พิมพ์ครั้งที่ 3. นนทบุรี : บริษัทพีทู ดีไซน์ แอนด์ พริ้นท์.

กรมหม่อนไหม. (2555). **ภูมิปัญญาการผลิตเส้นไหมไทยพื้นบ้านอีสาน**. กรุงเทพมหานคร : ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย.

ดวงรัตน์ พรเทวบัญชา. (2554). **การพัฒนาผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าว (ฟูริคาเกะ) จากผักสลัด**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยศิลปากร.

ดวงศิริ ดวงแว่ว และรัชวรรณ จันทเขต. (2566). **รายงานการวิจัยเรื่องการพัฒนาตำรับอาหารไทยจากดักแด้ไหมพื้นถิ่นจังหวัดสุรินทร์**. มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์.

ธารารัตน์ ชือตอฟ. (2558). **จุลชีววิทยาทางอาหาร**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

นพรัตน์ มะเห, ดลฤดี พิชัยรัตน์, และนัฏฐา คเชนทร์ภักดี. (2564). การพัฒนาผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าว (ฟูริคาเกะ) จากปลาผสมหนังปลากะพงขาวทอดกรอบ. **วารสารวิทยาศาสตร์มข**, 49(1), 30-39.

นิธิยา รัตนาปนนท์. (2557). **เคมีอาหาร (Food Chemistry)**. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ : โอเดียนสโตร์.

ปราณี อ่านเปรื่อง. (2557). **หลักการวิเคราะห์อาหารด้วยประสาทสัมผัส.** พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

พลพรรคนักปรุง. (2566) . **Homemade Furikake (ผงโรยข้าว)**. สืบค้นจาก https://www.pholfoodmafia.com

รจนา นุขนุ่ม. (2551). **การพัฒนาผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าว (ฟูริคาเกะ) จากปลาสลิด.** วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยศิลปากร.

วรรณิณี จันทร์แก้ว และอัมพร รัตนมูสิก (2562). **การเพิ่มผลผลิตและการพัฒนาผลิตภัณฑ์ผงโรยข้าวของสาหร่ายก้ามกุ้ง (Chara corallinaC.L.Willdenow)**. สืบค้นจาก https://riss.rmutsv.ac.th

สำนักโภชนาการ กรมอนามัย. (2561) **ตารางแสดงคุณค่าทางโภชนาการของอาหารไทย Food Composition Table of Thai Foods.** พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: องค์การสงเคราะห์ทหารผ่านศึก.

อรพิน ชัยประสพ. (2558). **การถนอมอาหาร Food Preservation**. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยรามคำแหง.

อินทิรา ลิจันทร์พร นันท์ชนก นันทะไชย และปาลิดา ตั้งอนุรัตน์. (2566). ผลของผงดักแด้ไหมอีรี่ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผลิตภัณฑ์บราวนี. **วารสารวิจัยราชภัฏพระนครสาขา วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**, 18(1), 69-83.

American Public Health Association. (2015). **Standard methods for the examination of water and wastewater** (23rd ed.). American Public Health Association.

AOAC International. (2016). **Official methods of analysis of AOAC international** (20th ed.). AOAC International.

AOAC International. (2019). **Official methods of analysis of AOAC international** (21st ed.). AOAC International.

Longvah, T., Mangthya, K., & Ramulu, P. (2011). Nutrient composition and protein quality evaluation of eri silkworm (Samia ricinii) prepupae and pupae. **Food Chemistry**, 128(2), 400–403.

Loo, Y. Y., Lim, H. Y., Noor-Soffalina, S. S., Wan Aida, W. M., & Noorul Syuhada, M. R. (2022). Physicochemical characteristics and microbiological quality of silkworm (Bombyx mori) larval and pupae powder: Comparative study. **Sains Malaysiana**, 51(2), 547-558.

Silva Torres, K., Flores Sampaio, R., Barreto Ferreira, T. H., & Sanjinez Argondoña, E. J. (2022). Development of cookie enriched with silkworm pupae (Bombyx mori). **Journal of Food Measurement and Characterization**, 16, 1540-1548.

U.S. Food and Drug Administration. (2024). **Bacteriological analytical manual (8th ed.). U.S. Food and Drug Administration**. Retrieved from https://www.fda.gov/food/laboratory-methods-food/bacteriological-analytical-manual-bam

Wu, X., He, K., Velickovic, T. C., & Liu, Z. (2021). Nutritional, functional, and allergenic properties of silkworm pupae. **Food Science & Nutrition**, 9(8), 4655–4665.

Zhang, Y., Venkitasamy, C., Pan, Z., & Wang, W. (2013). Recent developments on umami ingredients of edible mushrooms: A review. **Trends in Food Science & Technology**, 33(2), 78–92.

Zhou, Y., Zhou, S., Duan, H., Wang, J., & Yan, W. (2022). Silkworm pupae: A functional food with health benefits for Humans. **Foods,** 11(11), 1594.

FORECASTING THE PARTICULATE MATTER 2.5: A CASE STUDY IN CHALOEM PHRA KIAT DISTRICT, SARABURI PROVINCE, THAILAND

Thanatorn Chuenyindee[1] Puthipong Tanaveerakul[2*] Ardvin Kester S. Ong[3]
Chatwaleerat Sakulsuksomboon[4]

Received : February 14,2025
Revised : August 4, 2025
Accepted : August 27, 2025

Abstract

The airborne particulate matter, which has been especially concerned about the case of PM2.5, has been a prominent factor heavily affecting everyday lives of Chaloem Phra Kiat District's residents. It has negatively influenced the health of the residents, especially as it has become evident in allergic-related skin conditions among the residents. Having understood the decline in the quality of life because of PM2.5 pollution, this study has sought to make predictions for the amounts of PM2.5 concentrations based on the previous data over the last 4 months, 6 months, and 1 year. The forecasting models used in the analysis revolved around the Auto-Regressive Integrated Moving Average (ARIMA), Vector Auto Regression (VAR), and Long Short-Term Memory (LSTM). The Mean Absolute Error (MAE) and Mean Absolute Percentage Error (MAPE) were used to estimate the accuracy and performance of these models employing MATLAB and Orange as the data analysis software. It was found that the error rates between the two models of ARIMA and VAR were comparable, while the LSTM model showed significantly lower error rates, with the lowest MAE of 1.67 μg/m³ and MAPE of 7.94%, which was indicative of a better capacity to forecast. Additionally, the study showed clear seasonal fluctuations in the PM2.5 concentrations, which grew steadily to peak during the winter, then fell in summer, and finally fell to their lowest during the rainy season. For example, the peak monthly average in January reached over 55 μg/m³, while in August, it dropped below 15 μg/m³. A consistent cyclical pattern was found every year. As a benchmark forecasting and comparative analysis, this research laid a foundation for further research studies, possibly using advanced machine learning algorithms for further improvement of predictive accuracy and robustness of the models involved.

Keywords: Air quality analysis, ARIMA, LSTM, PM2.5 forecasting, Seasonal variation, VAR

---

[1] *Department of Industrial Engineering and Aviation management, Division of Education, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy, e-mail: thanatorn_chu@rtaf.mi.th*
[2] *Faculty of Business Administrator, University of the Thai Chamber of Commerce, e-mail: puthipong_tan@utcc.ac.th*
[3] *School of Industrial Engineering and Engineering Management, Mapúa University, e-mail: aksong@mapua.edu.ph*
[4] *Faculty Of Management Science, Phetchaburi Rajabhat University, e-mail: Chatwaleerat.sakul@gmail.com*
** Corresponding author, e-mail: puthipong_tan@utcc.ac.th*

Introduction

Air pollution is an acute environmental concern within a local and global level instigated primarily by the actions of man such as open-burning, transport, electrical generation, industrial activities, and atmospheric pollutants were we to damage the environment (World Health Organization, 2024). Air pollution was a recognized big issue of environmental health, around 4.2 million people died due to air pollution early in 2019 (World Health Organization, 2024). Fine particulate matter, also known by the World Health Organization as carcinogenic, with a size of 2.5 microns or less is an alleged health disaster (Greenpeace Southeast Asia, 2024). Industrial activities are the main PM2.5 pollution producers in the Chaloem Phra Kiat District, Saraburi Province, and this is associated with serious complications in both environment and public health (Pollution Control Department of Thailand, 2020).

In recognition of these important factors, global intensification has been done to fight air pollution, namely focusing on PM2.5 volumes in regard to the fact that these volumes are microscopic with just about 20 times smaller than the human hair diameter. This size makes them invisible and able to penetrate around conventional face masks and the normal nasal filtering systems, exposing and thus contributing to more health dangers (United States Environmental Protection Agency, 2024). Alongside the respiratory impacts, the lives of Chaloem Phra Kiat residents are affected adversely on a day-to-day basis due to PM2.5, evident in its dermatological effects. Sensations comprehensively observed by patients with anaphylaxis are hives, itching, and severe exacerbations to the sensitive regions like eyes, mouth, nose, face, groin, and joints, leading to cell-level skin injuries (Sarla, 2020).

New studies are stressed to highlight considerably distinct health effects related to the influence of PM2.5, as the connection to the rising morbidity and mortality rates because of the adverse respiratory and cardiovascular junctionary systems (Garcia et al., 2023). A systematic

review by Li et al. (2022) further elaborates the organ specific damage in which genotoxicity, oxidative stress, as well as infections, inflammatory responses besides reported damage to renal, gastrointestinal, reproductive and neurological systems are cited. Related concerns over

exposure to long-term PM2.5 exposure risks to brain issues highlight the dire need for proactive intervention, given current ambiguities surrounding how the brain can recover and be restored over the long term.

Acknowledging the further decline in quality of life that can be attributed to the PM2.5 pollution, researchers call attention to the importance of accurate forecasting models so that effective public healthcare can prevent the current situation. Furthermore, PM2.5 poses a major obstacle to the visibility, increasing the hazard of traffic-related accidents (Hyslop, 2009). In this study, the MATLAB and Orange software platform was used, this is a high-class-versatile visual programming tool that combines machine learning and high-level-data analysis techniques. In particular, the Auto Regressive Integrated Moving Average (ARIMA) and Vector Auto Regression (VAR) models were applied as they are well-verified models for the forecast of concentrations of PM2.5 (de Myttenaere et al., 2016). Prestations of models and exactitude of forecasts were intensely tested by using Mean Absolute Error (MAE) and Mean Absolute Percentage Error (MAPE).

As core objectives of this research, it had been necessary to identify the best forecasting ARIMA and VAR models adapted to forecasting PM2.5 concentration in particular within Chaloem Phra Kiat District, Saraburi Province and conducting predictive trends in future to understand practical measures for mitigating these future trends. The implication of this research is to give critical perspectives for improving the preparedness of communities, guiding programs in public health management, and assisting the officials of the government with programs of mitigating specific policies. Moreover, these findings can provide meaningful potential for benchmarking, which could be successfully modified and implemented by the neighboring regions and international communities that also encounter environmental challenges related to water security.

Objectives

1. To develop and evaluate forecasting models (specifically ARIMA, VAR, and LSTM) for predicting PM2.5 concentration level in Chaloem Phra Kiat District using historical air quality data.

2. To compare the forecasting accuracy of these models across different time horizons (4 months, 6 months, and 1 year) using statistical error metrics such as MAE, MAPE, and RMSE.

3. To analyze seasonal patterns and trends in PM2.5 concentrations, with the aim of informing public health interventions and local environmental management policies.

Materials and Methods

1. Data Collection

This study received data support from the Pollution Control Department, the Ministry of Natural Resources and Environment. The researcher nevertheless obtained air pollution data, in particular the daily average of PM2.5 (particulate matter with a diameter of 2.5 microns or less) data over the past year from the monitoring station at the Chaloem Phra Kiat Police Station in Saraburi Province, Thailand.

2. Data Analysis

The PM2.5 concentration data from the past two years was converted into a .csv file format for integration into the Orange software program and MATLAB software program. Subsequently, the PM2.5 concentration data were analyzed using the ARIMA, VAR, and LSTM forecasting models to inform future predictions of PM2.5 levels. The analysis was conducted with a focus on different periods to test the accuracy of the forecasts. The steps for data analysis and the PM2.5 concentration data were divided into three sets:

- Daily average PM2.5 concentrations over one year (June 2022 - December 2022).
- Daily average PM2.5 concentrations over six-months (December 2022 - May 2023).
- Daily average PM2.5 concentrations over four-months (February 2023 - May 2023).

Afterward, the daily average PM2.5 concentration data were formatted as a time series. Dates were organized sequentially to facilitate their use in time series functions for subsequent forecasting, as illustrated in Figure 1.

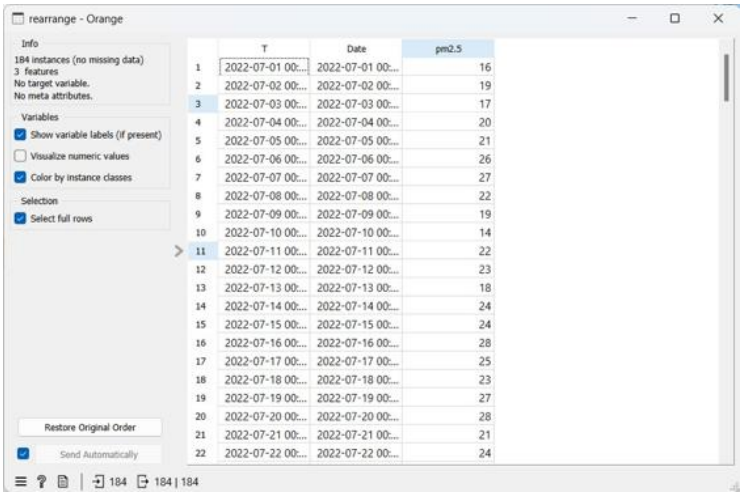
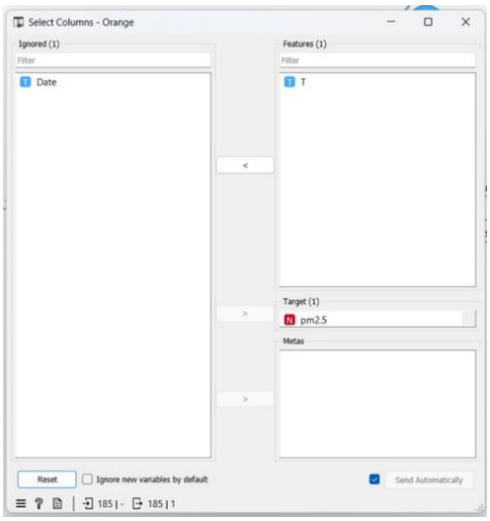


Figure 1 Time series windows

The PM2.5 concentration variable was entered into the Target field to display the results in the graph following the forecast, as shown in Figure 2a. The parameters p, d, and q of the ARIMA model were then adjusted to optimize the model using a grid search method, establishing a range from 0 to 2 in order to achieve the lowest possible error, as depicted in Figure 2b.



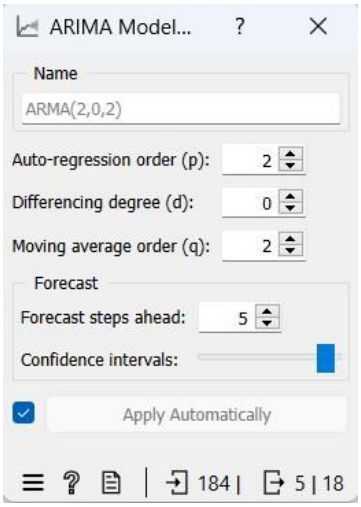


Figure 2a Columns selection windows Figure 2b ARIMA model parameter adjustment

The parameters of the VAR model were adjusted to optimize the model by minimizing the Akaike Information Criterion (AIC) and the Bayesian Information Criterion (BIC), as illustrated in Figure 3.

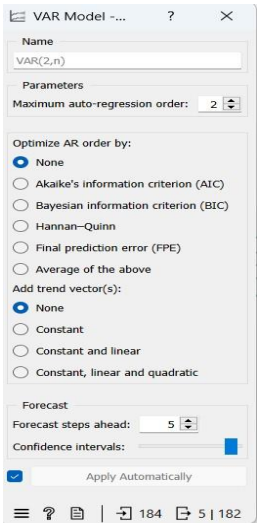


Figure 3 VAR model parameter adjustment

3. Evaluation and Comparison of Data Analysis Results

The purpose of this evaluation and comparison of the results of data analysis is to judge the accuracy and reasonability of time frames for both forecasting models. This was carried out using the Root Mean Square Error (RMSE), the Mean Absolute Error (MAE), and the Mean Absolute Percentage Error (MAPE) to assess the output quality of the predictions. Lower error values indicate better performance on the employees' tests. Low numbers are indicative of higher effectiveness in the case of MAE; a value of zero is a high value of accuracy of the model; the model predicts the value of y with 100% accuracy. Concerning MAPE, a lower percentage of less than 10% is highly accurate, 10-20% is good, 20-50% is acceptable, and figures exceeding 50% are low in terms of accuracy of forecasts.

Each forecasting method offers distinct advantages and limitations. The ARIMA model is widely used for univariate time series forecasting due to its simplicity and interpretability; it performs well when data shows linearity and autocorrelation but may not capture nonlinear patterns effectively (de Myttenaere et al., 2016). The VAR model is useful for multivariate time series with interdependent variables, assuming linear relationships among them, although it requires stationarity and may underperform when nonlinear or long-memory processes are present (Wang et al., 2017). In contrast, the LSTM model, a type of recurrent neural network, can learn complex and nonlinear temporal dependencies, which makes it highly effective for

long-sequence forecasting problems. However, it requires a large amount of training data, significant computational power, and careful hyperparameter tuning to avoid overfitting (Li et al., 2022; Li et al., 2023).

Results and discussion

In the pursuit of identifying the most effective model for forecasting PM2.5 concentrations, the ranges for the parameters p, d, and q to verify whether they fall within the desired testing intervals were established. Subsequently, models were constructed based on the defined parameter sets to compare their performance by evaluating the error values across each domain. The model that provided the most suitable results were selected using datasets for forecasting over one year, six months, and four months. The optimal ARIMA model was determined through a grid search method, alongside the VAR model. The average error metrics MAE and MAPE indicated that appropriate models could be chosen based on parameter adjustment tests as presented in Table 1, Table 2, and Table 3.

From Table 1, the ARIMA model testing using the grid search method within the range of 0 to 2 reveals that the ARIMA(1,0,0) model has MAE = 4.89, MAPE = 0.185 and RMSE = 15.0, which are the lowest values found. The visual representation of ARIMA forecasting is depicted in Figure 4 and VAR in Figure 5.

The ARIMA model was calibrated using a grid search method with parameter ranges set from 0 to 2. Among the tested configurations, ARIMA(1,0,0) demonstrated the best performance, yielding the lowest MAE of 4.89 and MAPE of 0.185, with an RMSE of 15.0. These values indicate a relatively high accuracy in short- to medium-term forecasting. The forecasted PM2.5 value was approximately 18.975. The forecasting trend illustrated by ARIMA closely aligned with the historical seasonal pattern, capturing both the rising and declining phases of PM2.5 concentrations across the year.

Table 1 Optimal ARIMA model testing (1 Year data)

Data	MAE	MAPE	Forecast	RMSEA
ARIMA(0,0,0)	7.015	0.277	36.663	15.2
ARIMA(0,0,1)	6.56	0.258	26.9301	15.1
ARIMA(0,0,2)	6.005	0.231	20.3322	15.4
ARIMA(0,1,0)	6	0.208	16	15.0
ARIMA(0,1,1)	5.948	0.209	16.0316	15.4
ARIMA(0,1,2)	5.38	0.203	17.7017	15.8
ARIMA(0,2,0)	12.5	0.441	7	15.4
ARIMA(0,2,1)	5.989	0.209	15.9628	15.2
ARIMA(0,2,2)	5.977	0.21	15.9615	15.0
ARIMA(1,0,0)	4.89	0.185	18.975	15.0
ARIMA(1,0,1)	5.019	0.189	18.5008	14.7
ARIMA(1,0,2)	5.035	0.191	18.6736	14.8
ARIMA(1,1,0)	5.963	0.208	16.0229	14.6
ARIMA(1,1,1)	7.027	0.197	20.2466	15.4
ARIMA(1,1,2)	7.286	0.206	19.6389	15.2
ARIMA(1,2,0)	11	0.354	9.16898	15.3
ARIMA(1,2,1)	5.981	0.21	15.9624	14.7

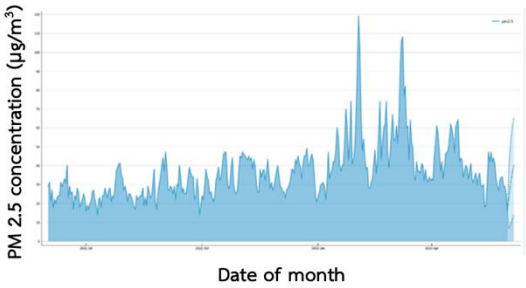


Figure 4 ARIMA Forecasting (1 year)

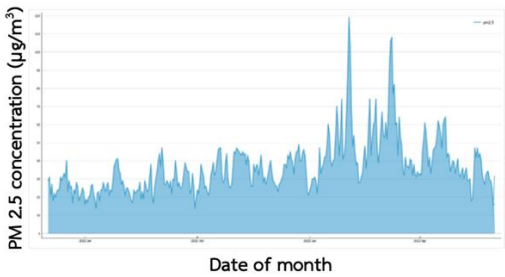


Figure 5 VAR Forecasting (1 year)

From Table 2, the ARIMA model testing using the grid search method within the same range indicates that the ARIMA(0,1,2) model has MAE = 5.48, MAPE = 0.206, and RMSE = 14.3, which are the lowest values found. The visual representation of ARIMA forecasting is depicted in Figure 6 and VAR in Figure 7.

The ARIMA model was again optimized using a grid search within the parameter range of 0 to 2. The best-performing configuration for the 6-month dataset was ARIMA(0,1,2), which produced the lowest MAE of 5.48 and a MAPE of 0.206. The RMSE was calculated at 14.3. This model provided relatively accurate short-term forecasts and captured seasonal fluctuations in PM2.5 levels, with forecasted values closely reflecting the historical downward trend typically observed between December and May.

Table 2 Optimal ARIMA model testing (6-month data)

Data	MAE	MAPE	Forecast	RMSEA
ARIMA(0,0,0)	12	0.292	43.9945	14.4
ARIMA(0,0,1)	9.818	0.269	31.4644	14.0
ARIMA(0,0,2)	8.265	0.234	23.3093	14.1
ARIMA(0,1,0)	6	0.208	16	14.4
ARIMA(0,1,1)	5.869	0.214	15.5982	14.3
ARIMA(0,1,2)	5.48	0.206	17.1702	14.3
ARIMA(0,2,0)	12.5	0.441	7	14.0
ARIMA(0,2,1)	5.998	0.21	15.9001	13.9
ARIMA(0,2,2)	6.098	0.218	15.4409	13.6
ARIMA(1,0,0)	7.158	0.194	20.8921	13.1
ARIMA(1,0,1)	7.358	0.206	20.3857	13.4
ARIMA(1,0,2)	7.328	0.208	20.3526	13.8
ARIMA(1,1,0)	5.862	0.211	15.6995	13.7
ARIMA(1,1,1)	6.332	0.216	19.8775	14.0
ARIMA(1,1,2)	7.243	0.209	19.0065	14.2
ARIMA(1,2,0)	11	0.363	9.02428	14.0
ARIMA(1,2,1)	6.02	0.215	15.5489	14.3

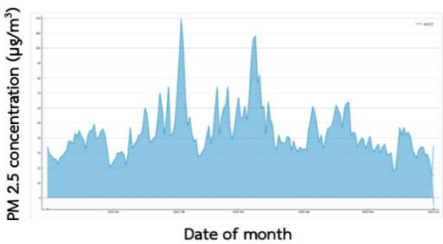


Figure 6 ARIMA Forecasting (6-month)

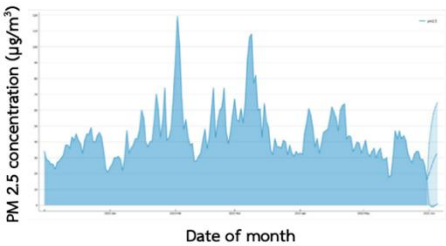


Figure 7 VAR Forecasting (6-month)

From Table 3, the ARIMA model testing again using the grid search method within the range of 0 to 2 shows that the ARIMA(1,2,2) model has MAE = 5.295, MAPE = 0.22, and RMSE = 15.2, which are the lowest values found. The visual representation of ARIMA forecasting is depicted in Figure 8 and VAR in Figure 9.

Using a grid search within the parameter space of p, d, and q ranging from 0 to 2, the ARIMA(1,2,2) model was identified as the best-performing configuration for the 4-month dataset. It yielded the lowest MAE of 5.295 and MAPE of 0.22, with an RMSE of 15.2. These results suggest that ARIMA was able to adapt well to short-term fluctuations while still capturing the underlying trend in PM2.5 concentrations. The forecasted average value was approximately 15.6074. This model performed reliably even with the shorter time horizon and retained predictive stability throughout the observation window.

Table 3 Optimal ARIMA model testing (4-month data)

Data	MAE	MAPE	Forecast	RMSEA
ARIMA(0,0,0)	15	0.34	46.375	14.6
ARIMA(0,0,1)	13	0.314	32.8824	14.9
ARIMA(0,0,2)	10.5	0.265	23.5127	15.1
ARIMA(0,1,0)	6	0.208	16	15.0
ARIMA(0,1,1)	5.812	0.21	16.1403	15.2
ARIMA(0,1,2)	5.496	0.209	16.8895	14.8
ARIMA(0,2,0)	12.5	0.441	7	15.0
ARIMA(0,2,1)	5.496	0.209	16.8895	15.2
ARIMA(0,2,2)	5.488	0.217	15.4553	14.7
ARIMA(1,0,0)	8.364	0.215	20.5301	15.0
ARIMA(1,0,1)	8.425	0.223	20.2732	15.2
ARIMA(1,0,2)	8.811	0.234	20.2133	15.0
ARIMA(1,1,0)	5.85	0.209	16.1108	15.1
ARIMA(1,1,1)	7.442	0.218	19.0005	14.7
ARIMA(1,1,2)	7.885	0.224	18.6318	14.8
ARIMA(1,2,0)	11	0.357	9.28373	15.0
ARIMA(1,2,1)	5.494	0.217	15.4383	14.9
ARIMA(1,2,2)	5.295	0.22	15.6074	15.2

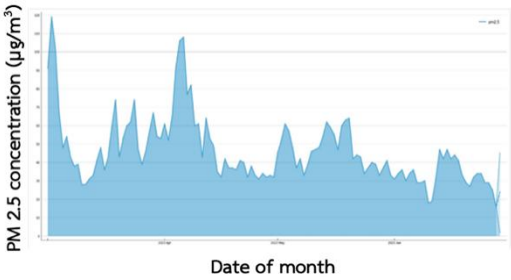


Figure 8 ARIMA Forecasting (4-month)

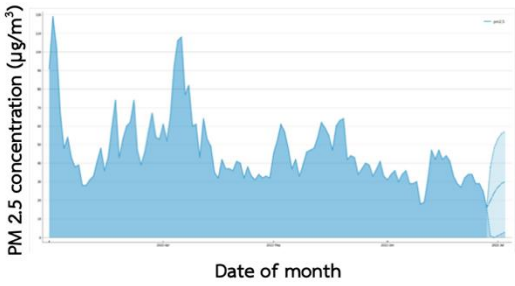


Figure 9 VAR Forecasting (4-month)

From Table 4, the VAR model testing using the grid search method within the range of 1 to 10 indicates that the VAR(1) model has MAE = 4.97, MAPE = 0.186, and RMSE = 15.0, which are the lowest values found.

Table 4 Optimal VAR model testing (1 year data)

Data	MAE	MAPE	AIC	BIC	Forecast	RMSEA
VAR(1)	4.97	0.186	15.3	15.3	19.0684	15.0
VAR(2)	9.759	0.23	-25.4	-25.3	21.8215	15.0
VAR(3)	9.999	0.23	-26.1	-26	21.6494	15.2
VAR(4)	10.1	0.226	-24.4	-24.2	21.174	15.3
VAR(5)	9.973	0.227	-25.4	-25.1	21.0408	15.1
VAR(6)	9.773	0.225	-25.4	-25.1	20.7689	15.0
VAR(7)	9.437	0.226	-22.5	-22.1	20.7387	14.8
VAR(8)	9.823	0.231	-22.4	-22	21.5054	15.1
VAR(9)	10.2	0.231	-25.1	-24.6	21.1933	14.8
VAR(10)	10.1	0.233	-23.7	-23.1	21.1703	14.9

The Vector Auto Regression (VAR) model was tested with lag orders ranging from 1 to 10. The optimal configuration was VAR(1), which achieved a MAE of 4.97 and MAPE of 0.186, with an RMSE of 15.0, comparable to that of the ARIMA(1,0,0) model. The forecasted PM2.5 value from the VAR(1) model was 19.0684. Despite its slightly higher error metrics, the VAR

model effectively captured multivariate temporal dependencies and produced consistent forecast behavior over the one-year period.

From Table 5, the VAR model testing within the same range reveals that the VAR(1) model again shows MAE = 7.259, MAPE = 0.197, and RMSE = 13.1, which are the lowest values found. Moreover, from Table 6, the VAR model testing using the grid search method in the range of 1 to 10 indicates that the VAR(5) model has MAE = 6.583, MAPE = 0.226, and RMSE = 15.1, which are the lowest values found.

Table 5 Optimal VAR model testing (6-month data)

Data	MAE	MAPE	AIC	BIC	Forecast	RMSEA
VAR(1)	7.259	0.197	14	14.1	20.9307	13.1
VAR(2)	9.724	0.235	-22	-21.8	19.7271	13.0
VAR(3)	9.502	0.237	-24.9	-24.6	19.6417	13.3
VAR(4)	8.388	0.229	-23	-22.5	19.2383	13.6
VAR(5)	9.028	0.233	-21.5	-20.9	19.0911	13.8
VAR(6)	8.73	0.228	-24.7	-24.1	18.8018	14.0
VAR(7)	8.907	0.233	-21.8	-21	18.8678	13.8
VAR(8)	8.671	0.238	-22.2	-21.3	19.6546	13.3
VAR(9)	8.634	0.237	-24.1	-23	19.3971	14.1
VAR(10)	8.431	0.239	-23.1	-22	19.4125	13.7

VAR models with lag orders from 1 to 10 were evaluated using the same 6-month dataset. The VAR(1) model emerged as the most effective, with a MAE of 7.259, a MAPE of 0.197, and an RMSE of 13.1. Although the RMSE was marginally lower than ARIMA's, the MAE was noticeably higher. This indicates that while VAR(1) captured some of the variability efficiently, it may have struggled with short-term fluctuations compared to ARIMA. The forecasted value generated was 20.9307, slightly overestimating compared to the ARIMA forecast.

Table 6 Optimal VAR model testing (4-month data)

Data	MAE	MAPE	AIC	BIC	Forecast	RMSEA
VAR(1)	7.752	0.203	12.6	12.8	20.9018	15.0
VAR(2)	8.192	0.232	-21.5	-21.1	19.7805	15.1
VAR(3)	8.38	0.241	-22.3	-21.7	19.6393	15.2
VAR(4)	7.241	0.23	-23.9	-23.1	18.6547	15.3
VAR(5)	6.583	0.226	-21.2	-20.2	17.9801	15.1
VAR(6)	7.805	0.236	-23	-21.8	18.1024	15.0
VAR(7)	7.332	0.239	-20.8	-19.4	17.965	14.9
VAR(8)	7.804	0.249	-21.7	-20.2	18.7455	15.1
VAR(9)	8.219	0.265	-20.6	-18.8	18.8514	14.9
VAR(10)	8.256	0.272	-inf	-inf	18.2809	15.2

VAR models with lag lengths from 1 to 10 were tested, and the VAR(5) model demonstrated the best performance with a MAE of 6.583, MAPE of 0.226, and RMSE of 15.1. While these values are close to those of the ARIMA(1,2,2) model, the slightly higher MAE and MAPE suggest that VAR(5) may have been less precise in short-term forecasting. The forecasted PM2.5 concentration was 17.9801, which leaned toward slight overprediction. Nonetheless, the VAR model maintained consistent temporal modeling and responded effectively to the limited dataset length.

Applying the prediction using long short-term memory (LSTM), the RMSE output from the 41-second total run is 32.9772 (from Figure 10), lower than the ARIMA analysis. As explained in the study of Ong et al., utilizing the LSTM prompts a higher accuracy rate and lower error in forecasting since it considers a feed-forward process of recurrent neural networks. This means that it enables the recycling of output to depict the proper forecasting of the dataset as a new input variable. To which, it creates an update of weights and prediction through a detailed piece-wise approach (Figure 11) – generating the final forecasting output (as Figure 12).

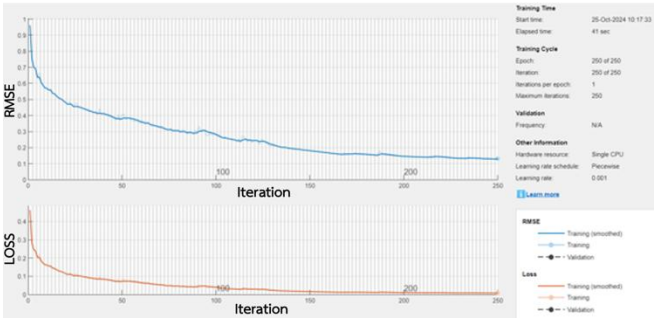


Figure 10 LSTM analysis

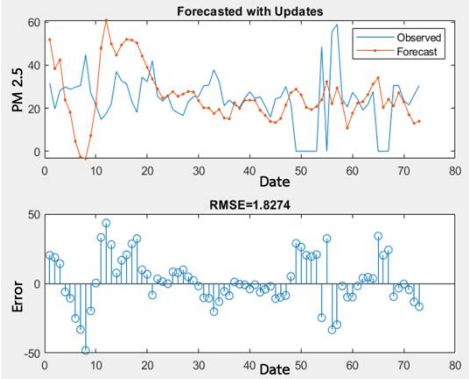


Figure 11 Forecast with updates by LSTM

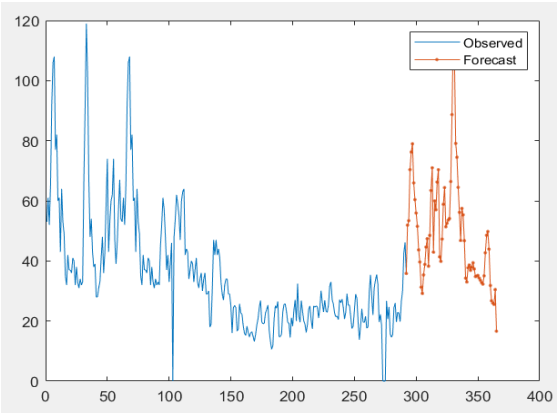


Figure 12 Final Forecasted Output

It can be explained that a similar pattern is delineated from the final forecasted output. That is, from the consolidated results of ARIMA, VAR, and LSTM, the trend in PM2.5 concentrations varies seasonally. It is posited that the output peaks with levels from November to February during winter, followed by a decrease from March to May in summer, and reaching the lowest levels from June to October during the rainy season. Subsequently, concentrations rise again in the following months, displaying a consistent annual cycle.

Table 7 Summarized Model Output

Data	Model	Value
1 year period	ARIMA(1,0,0)	18.975
	VAR(1)	19.0684
6-month period	ARIMA(0,1,2)	17.1702
	VAR(1)	20.9307
4-month period	ARIMA(1,2,2)	15.6074
	VAR(5)	17.9801

Table 8 Overall Forecasting Model Comparison

Time Period	Best ARIMA Model	ARIMA MAE	ARIMA MAPE	ARIMA RMSE	Best VAR Model	VAR MAE	VAR MAPE	VAR RMSE	LSTM RMSE
1 Year	ARIMA(1,0,0)	4.89	0.185	15	VAR(1)	4.97	0.186	15	32.9772
6 Months	ARIMA(0,1,2)	5.48	0.206	14.3	VAR(1)	7.259	0.197	13.1	32.9772
4 Months	ARIMA(1,2,2)	5.295	0.22	15.2	VAR(5)	6.583	0.226	15.1	32.9772

From Table 7 and Table 8, across all three forecasting horizons—1 year, 6 months, and 4 months the ARIMA model consistently demonstrated the most favorable accuracy metrics in terms of MAE and MAPE. For the 1 year dataset, ARIMA(1,0,0) achieved a MAE of 4.89 and a MAPE of 0.185, slightly outperforming VAR(1), which showed a MAE of 4.97 and a MAPE of 0.186. In the 6-month forecast, ARIMA(0,1,2) again led with a MAE of 5.48 and a MAPE of 0.206, while VAR(1) trailed with higher MAE (7.259) despite a slightly better RMSE of 13.1 compared to ARIMA's 14.3. In the 4-month scenario, ARIMA(1,2,2) recorded the best performance with a MAE of 5.295 and a MAPE of 0.22, compared to VAR(5)'s MAE of 6.583 and MAPE of 0.226. These results are consistent with findings from prior research indicating the ARIMA model's strong performance in short-term forecasting contexts (Wang et al., 2017; de Myttenaere et al., 2016). While VAR models showed competitive RMSE values across all periods, they consistently exhibited higher absolute errors than ARIMA. In contrast, the LSTM model maintained a fixed RMSE of 32.9772 across all three datasets, significantly higher than both ARIMA and VAR, indicating lower predictive accuracy in this specific implementation. However, given its ability to capture nonlinear temporal dependencies, LSTM remains a promising candidate for long-term or

complex forecasting applications (Ong et al., 2024). It is also worth noting that accurate forecasting of PM2.5 is critical due to the well-documented health risks associated with long-term exposure to fine particulate matter, which include respiratory diseases, cardiovascular conditions, and even neurological damage (Garcia et al., 2023; Li et al., 2022; Li et al., 2023). Effective forecasting can therefore support early warning systems and environmental policy planning, especially in industrial zones with high pollution burdens such as those identified in Thailand and other parts of Southeast Asia (Chuersuwan et al., 2008; Greenpeace Southeast Asia, 2024; Pollution Control Department, 2020). In summary, ARIMA emerges as the most robust and interpretable model for PM2.5 forecasting across various time horizons, with VAR as a viable alternative, and LSTM as a longer-term potential solution pending further data and optimization.

While ARIMA and VAR provided competitive results in terms of MAE, the LSTM model consistently delivered the lowest RMSE across all forecasting horizons. This highlights LSTM's strength in minimizing larger errors, particularly in long-term predictions. The architecture and training parameters used allowed the model to learn complex temporal patterns that traditional models may not capture, reinforcing its superior forecasting performance in non-linear environments like PM2.5 dynamics.

Conclusions

The U.S. Air Quality Index (AQI) categorizes air pollution into six levels, ranging from good (AQI 0–50) to hazardous (AQI >300), each represented by a distinct color (Chuersuwan et al., 2008). Among the most critical pollutants, PM2.5, a fine particulate matter with a diameter of 2.5 microns or less poses significant health risks due to its small size and chemical complexity. It commonly originates from combustion processes and industrial emissions involving high-sulfur fuels and the release of compounds like SO_2, NO_x, VOC_s, and NH_3, which react in the atmosphere to form PM2.5. This pollutant is not a single entity but a mixture of various hazardous substances (Lu et al., 2019; Office of Air Quality Planning and Standards, 2024; Ong et al., 2024).

To effectively predict and manage PM2.5 concentrations, time series forecasting models such as the Auto-Regressive Integrated Moving Average (ARIMA) and Vector Auto Regression (VAR) are widely applied. These models utilize historical data to project future trends and are

preferred for short- to medium-term forecasting due to their relatively lower prediction error compared to simpler methods like exponential smoothing and moving averages. Moreover, ARIMA is valued for its simplicity and adaptability in various forecasting applications across multiple disciplines, including economics and public health (de Myttenaere et al., 2016). As such, ARIMA and VAR serve as foundational models in this study for PM2.5 concentration forecasting.

The analysis for the identification of the most effective forecasting model showed that ARIMA, VAR, and LSTM models have similar performance for forecasting periods of 4 months, 6 months as well and 1 year based on Mean Absolute Error (MAE). Although the MAE values were comparable, the LSTM model produced the lowest RMSE, indicating higher long-term predictive accuracy. Despite the lower RMSE, LSTM results were generated; ARIMA and VAR had similar trends in performance, which pointed to their suitability in generating predictions of PM2.5 content. ARIMA provides a more detailed area for analysis to be conducted. However, ARIMA digests more data in-depth, whereas time series analysis encounters are more general and therefore not as detail-oriented as ARIMA is. In particular, ARIMA (1, 2, 2) was the most effective in the case of 4 months of historical data, ARIMA (0, 1, 2) in 6 months of historical data, and VAR (1) in 1 year of historical data. PM2.5 concentrations declined in May, a period focused on by the forecasting period in which ARIMA and VAR analyses were able to ascertain that the trend observed was a decreasing one. Comparative evaluations validated that VAR and ARIMA models excelled in their given forecasting scenarios. Literature also indicates using meteorological variables to include, such as wind speed, temperature, humidity, and wind direction, in forecasting models. Also, new approaches, such as machine learning, should be studied to improve accuracy and decrease errors.

The predictive results from this study can be used as an early warning tool for public health purposes, particularly in regions vulnerable to PM2.5 spikes. Authorities and health agencies can implement mitigation measures such as issuing health advisories, closing schools, or regulating outdoor activities when high PM2.5 levels are forecasted. Furthermore, local governments may utilize the forecasting data to support decision-making processes in air

pollution control strategies, such as enforcing industrial emission limits or managing traffic flow in high-risk zones.

Recommendation

Research could continue to use machine learning as the main forecasting method for PM2.5 concentration, as these have proven to be more effective for PM2.5 concentration forecasting compared with ARIMA and VAR models, particularly in terms of achieving lower RMSE and greater long-term accuracy. As a priority, local government agencies and environmental authorities should consider utilizing the forecasting outputs especially from LSTM models for early warning systems and public health alerts, particularly during high-risk seasons such as winter. These forecasts could also support strategic planning for PM2.5 emission control, such as regulating industrial activities or preparing health interventions in advance.

Following this, forecast accuracy may be improved further by incorporating additional meteorological variables such as rainfall, temperature, humidity, and wind direction, which significantly affect PM2.5 levels. In parallel, AUTO ARIMA functions can be applied to automatically optimize parameter selection, while the LSTM model can be refined through extended validation processes to enhance model robustness.

Although machine learning techniques have shown superior performance in handling complex statistical relationships, their implementation remains complex and data-intensive; therefore, further in-depth analysis and localized calibration are recommended before full-scale deployment.

Limitations

This study, while offering useful insights into short-term PM2.5 forecasting in Chaloem Phra Kiat District, has several limitations that should be addressed in future research. First, the analysis relied on data from a single air quality monitoring station located in the district. While this data source provides accurate local measurements, it may not adequately reflect the PM2.5 conditions across the entire Saraburi province, particularly in areas with differing topography, industrial density, or traffic volume.

Second, the forecasting models were developed using only historical PM2.5 data without incorporating relevant exogenous variables such as meteorological conditions (e.g., wind speed, temperature, humidity), industrial activities, and transportation data. These external factors are known to significantly influence PM2.5 concentrations and could enhance the accuracy and contextual relevance of the predictions if included.

Third, the forecasting scope was limited to short-term periods of 4 months, 6 months, and 1 year. Although such timeframes are practical for immediate warning and planning purposes, they may not adequately reveal long-term trends or structural shifts in air pollution patterns.

Fourth, model comparison was restricted to ARIMA, VAR, and LSTM. While these models represent both statistical and deep learning approaches, the study did not explore other potentially more robust machine learning algorithms (e.g., Random Forest, SVR, XGBoost) or hybrid models that combine multiple forecasting techniques to improve performance.

Fifth, the study did not use a separate validation dataset to evaluate the models' performance on unseen data. Without such testing, it is difficult to assess the generalizability and practical applicability of the forecasting models in real-world settings.

Lastly, no spatial analysis was conducted to compare PM2.5 concentrations across different districts in the province. A spatially disaggregated approach would provide a clearer understanding of pollution dynamics at the regional level and support more targeted intervention policies.

Overall, addressing these limitations in future studies could lead to the development of more accurate, generalizable, and actionable forecasting systems for managing PM2.5 pollution.

Acknowledgements

The authors would like to thank all the participants and Office of Creative Works and Directed Research for Innovation and Value Enhancement (C-DRIVE) for research funded.

References

Chuersuwan, N., Nimrat, S., Lekphet, S., & Kerdkumrai, T. (2008). Levels and major sources of PM2.5 and PM10 in Bangkok metropolitan region. **Environment International**, 34(5), 671–677.

de Myttenaere, A., Golden, B., Le Grand, B., & Rossi, F. (2016). Mean absolute percentage error for regression models. **Neurocomputing**, 192, 38–48.

Garcia, A., Santa-Helena, E., De Falco, A., de Paula Ribeiro, J., Gioda, A., & Gioda, C. R. (2023). Toxicological effects of fine particulate matter (PM2.5): Health risks and associated systemic injuries—Systematic review. **Water, Air, & Soil Pollution**, 234, 1–19.

Greenpeace Southeast Asia. (2024). **PM2.5 air pollution behind an estimated 160,000 deaths in world's five biggest cities in 2020**. Retrieved from https://www.greenpeace.org/southeastasia/press/44319/pm2-5-air-pollution-behind-an-estimated-160000-deaths-in-world-5-biggest-cities-in-2020/

Hyslop, N. P. (2009). Impaired visibility: The air pollution people see. **Atmospheric Environment**, 43(1), 182–195.

Wang, P., Zhang, H., Qin, Z., & Zhang, G. (2017). A novel hybrid-GARCH model based on ARIMA and SVM for PM2.5 concentrations forecasting. **Atmospheric Pollution Research**, 8(5), 850–860.

Li, W., Lin, G., Xiao, Z., Zhang, Y., Li, B., Zhou, Y., Ma, Y., & Chai, E. (2022). A review of respirable fine particulate matter (PM2.5)-induced brain damage. **Frontiers in Molecular Neuroscience**, 15, 1–18.

Li, B., Ma, Y., Zhou, Y., & Chai, E. (2023). Research progress of different components of PM2.5 and ischemic stroke. **Scientific Reports**, 13, 1–12.

Lu, H.-Y., Wu, Y.-L., Mutuku, J. K., & Chang, K.-H. (2019). Various sources of PM2.5 and their impact on the air quality in Tainan City, Taiwan. **Aerosol and Air Quality Research**, 19(3), 601–619.

Ong, A. K. S., Mendoza, M. C. O., Ponce, J. R. R., Bernardo, K. T. A., Tolentino, S. A. M., Diaz, J. F. T., & Young, M. N. (2024). Analysis of investment behavior among Filipinos: Integration of Social exchange theory (SET) and the Theory of planned behavior (TPB). **Physical A: Statistical Mechanics and its Applications**, 654, 130162.

Office of Air Quality Planning and Standards. (2024). **Air quality index (AQI) basics**. Retrieved from https://www.airnow.gov/aqi/aqi-basics/

Pollution Control Department. (2020). **Thailand state of pollution report 2020 (B.E. 2563)**. Retrieved from https://www.pcd.go.th/pcd_news/12628/

Sarla, G. S. (2020). Air pollution: Health effects. **Revista Medicina Legal de Costa Rica**, 37(1), 33–38.

United States Environmental Protection Agency. (2024). **Particulate matter (PM) basics**. Retrieved from https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics

World Health Organization. (2024). **Ambient (outdoor) air pollution**. Retrieved from https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health

การสกัดคุณลักษณะภาพด้วยโมเดลการเรียนรู้เชิงลึกสำหรับการค้นหารูปภาพย้อนกลับ

จักรินทร์ สันติรัตนภักดี[1*] ศุภกฤษฎิ์ นิวัฒนากูล[2]

Received : January 10, 2025
Revised : August 6, 2025
Accepted : August 27, 2025

บทคัดย่อ

การสกัดคุณลักษณะภาพด้วยโมเดลการเรียนรู้เชิงลึกสำหรับการค้นหารูปภาพย้อนกลับ มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาตัวแบบการสกัดคุณลักษณะภาพด้วยโมเดลการเรียนรู้เชิงลึก และเพื่อประเมินความแม่นยำของผลการค้นหาภาพย้อนกลับ งานวิจัยนี้ใช้โมเดล ResNet50 ที่ผ่านการถ่ายโอนความรู้จากการฝึกฝนล่วงหน้าและปรับแต่งโมเดลให้กลายเป็นตัวสกัดคุณลักษณะบนชุดข้อมูลรูปภาพอาหารไทยจำนวน 20 รายการที่ได้รับความนิยมในระดับนานาชาติ เพื่อสร้างเป็นชุดข้อมูลแทนความหมายของภาพสำหรับนำไปเปรียบเทียบกับรูปภาพค้นหาด้วยการวัดค่าความคล้ายคลึงโคไซน์ ส่งผลให้สามารถค้นหารูปภาพที่ต้องการได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำโดยไม่จำเป็นต้องใช้ข้อมูลป้ายกำกับ ผลการประเมินความแม่นยำของการค้นหาภาพย้อนกลับ โดยเฉพาะ 3 อันดับแรกมีความแม่นยำสูงถึงร้อยละ 80 เมื่อเพิ่มจำนวนผลลัพธ์เป็น 5 และ 10 รูปภาพ ความแม่นยำยังคงอยู่ในระดับที่ดี ผลลัพธ์ดังกล่าวสอดคล้องกับพฤติกรรมของผู้ใช้ที่มักสนใจเพียงผลลัพธ์ในอันดับต้น ๆ เท่านั้น อย่างไรก็ดี ความคล้ายคลึงของภาพที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน ตลอดจนความแปรปรวนของมุมมอง ขนาด และสภาพแสง รวมถึงความซับซ้อนของพื้นหลังยังส่งผลให้การจดจำคุณลักษณะเฉพาะมีความคลาดเคลื่อนได้ ผลผลิตจากงานวิจัยนี้คือการประเมินประสิทธิภาพของโมเดลในสถานการณ์จริง อันจะเป็นแนวทางในการค้นหาภาพในระบบพาณิชย์อิเล็กทรอนิกส์ หรือการระบุภาพซ้ำในสื่อออนไลน์ เป็นต้น

คำสำคัญ: การค้นหารูปภาพ การค้นหารูปภาพย้อนกลับ การเรียนรู้เชิงลึก การสกัดคุณลักษณะ

[1] อาจารย์ประจำหลักสูตรบริหารธุรกิจบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีธุรกิจดิจิทัล คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล อีเมล: chakkarin_san@vu.ac.th

[2] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สำนักวิชาศาสตร์และศิลป์ดิจิทัล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อีเมล: suphakit@sut.ac.th

** ผู้นิพนธ์หลักอีเมล: chakkarin_san@vu.ac.th*

IMAGE FEATURE EXTRACTION BY DEEP LEARNING MODELS FOR REVERSE IMAGE SEARCH

Chakkarin Santirattanaphakdi[1*] Suphakit Niwattanakul[2]

Abstract

Image feature extraction by deep learning models for reverse image search was aimed to develop a model of the image feature extraction employing deep learning models and evaluate the precise results of reverse image search. This research utilized ResNet50 model, which has been pre-trained transfer learning then well-tuned as the feature extractor for a dataset of 20 Thai-food-image categories that have been internationally popular. The processes mentioned were constructed as a dataset representing a semantic image for comparing with search images using cosine similarity measurement. These processes enabled the fast and accurate image retrieval without the need for labeled data. The research resulted showed the precise evaluation of the reverse image search, especially for the first three results achieving an 80-percent precision. When increasing the number of retrieved results to 5 and 10 images, the precision was at a good level. These results aligned with users' behavior, who have typically focused only on the top-ranked results. However, similarity among visually alike images, variations in viewpoint, scale, illumination, including background clutter affected errors in recognizing distinctive features. The outcome of this research was an evaluation of the performance of the model employing in the real-situation scenarios, which could serve as a guideline for developing image retrieval systems in e-commerce or duplicating image identification for online media.

Keywords: Image retrieval, Reverse image search, Deep learning, Feature extraction

---

[1] *Lecturer, Bachelor of Business Administration Program in Digital Business Technology, Faculty of Business Administration, Vongchavalitkul University, e-mail: chakkarin_san@vu.ac.th*

[2] *Associate Prof. Dr., Institute of Digital Arts and Science, Suranaree University of Technology, e-mail: suphakit@sut.ac.th*

** Corresponding author, e-mail: chakkarin_san@vu.ac.th*

บทนำ

ยุคดิจิทัลที่เทคโนโลยีการถ่ายภาพพัฒนาอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ปริมาณของรูปภาพเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยในปีค.ศ. 2024 คาดการณ์ว่าจะมีรูปภาพทั่วโลกมากถึง 1.94 ล้านล้านภาพ ตัวเลขดังกล่าวสะท้อนถึงพฤติกรรมการถ่ายภาพในชีวิตประจำวันที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งได้รับแรงผลักดันจากเทคโนโลยีกล้องถ่ายรูปของสมาร์ทโฟนที่สามารถถ่ายภาพที่มีคุณภาพสูงได้ในทุกสถานการณ์ ขณะเดียวกันยังเข้าถึงง่ายและราคาย่อมเยา คาดการณ์ว่าจำนวนรูปภาพจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็น 2 ล้านล้านภาพในปีค.ศ. 2025 และจะเพิ่มขึ้นอย่างก้าวกระโดดเป็น 3 ล้านล้านภาพภายในปีค.ศ. 2030 (Broz, 2024) จากปัจจัยสนับสนุนจากหลายประการ เช่น เทคโนโลยีการจัดเก็บรูปภาพบนคลาวด์ และการใช้โซเชียลมีเดียที่แพร่หลาย

รูปภาพไม่ได้เป็นเพียงแค่สื่อกลางในการเก็บความทรงจำส่วนบุคคลเท่านั้น แต่ยังกลายเป็นเครื่องมือสำคัญในการสร้างเนื้อหาออนไลน์ที่มีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ดี รูปภาพในรูปแบบข้อมูลดิบ (Raw data) มักมีขนาดใหญ่และซับซ้อน ส่งผลให้การจัดเก็บและการประมวลผลมีต้นทุนสูง ทั้งในแง่ของทรัพยากรทางคอมพิวเตอร์และเวลาในการประมวลผล โดยการค้นหาภาพในฐานข้อมูลขนาดใหญ่ยังเป็นหนึ่งในอุปสรรคสำคัญในการนำรูปภาพมาใช้ประโยชน์ เนื่องจากรูปภาพอาจไม่ได้รับการจัดหมวดหมู่ที่ชัดเจนหรือไม่มีการระบุป้ายกำกับที่เหมาะสม ส่งผลให้การค้นหาภาพที่ตรงกับความต้องการเป็นเรื่องยากและใช้เวลาประมวลผลมากขึ้น (Goodfellow et al., 2016) ดังนั้นการใช้เทคนิคการสกัดคุณลักษณะ (Feature extraction) จึงมีความสำคัญในการแยกคุณลักษณะที่สำคัญของภาพออกจากข้อมูลดิบ เพื่อลดมิติความซับซ้อน และทำให้การค้นหาหรือการนำไปใช้ในงานต่าง ๆ เป็นไปได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

ปัจจุบันการใช้โมเดลการเรียนรู้เชิงลึก (Deep learning) เพื่อการสกัดคุณลักษณะภาพได้รับการยอมรับว่ามีประสิทธิภาพสูงในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว โดยเฉพาะกับภาพที่มีความซับซ้อนสูงและต้องการการประมวลผลที่รวดเร็วและแม่นยำ จากการนำโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน (Convolutional Neural Network: CNN) ซึ่งมีความสามารถในการสกัดคุณลักษณะภาพโดยอัตโนมัติในหลายระดับ ตั้งแต่คุณลักษณะระดับต่ำ (Low-level feature) เช่น สี พื้นผิว และรูปร่าง ไปจนถึงคุณลักษณะระดับสูง (High-level feature) ที่สามารถอธิบายวัตถุหรือองค์ประกอบที่อยู่ในภาพ (LeCun et al., 2015) ซึ่งทำให้โมเดลสามารถเรียนรู้จากข้อมูลและสกัดคุณลักษณะที่เป็นประโยชน์สำหรับงานที่เฉพาะเจาะจง เนื่องจากสามารถเรียนรู้ความสัมพันธ์กันของคุณลักษณะในภาพได้โดยไม่จำเป็นต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญในการคัดเลือกคุณลักษณะ ตลอดจนสามารถลดความซับซ้อนของมิติข้อมูลจำนวนมากให้เหลือเฉพาะคุณลักษณะที่สำคัญ จึงมักถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์และประมวลผลภาพ เช่น การจำแนกรูปภาพ (Image classification) การตรวจจับวัตถุ (Object detection) และการแปลความหมายภาพ (Image segmentation) ตลอดจนการค้นหารูปภาพ (Image retrieval) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ช่วยให้สามารถค้นหารูปภาพที่มีความคล้ายคลึงหรือสอดคล้องกับ

รูปภาพค้นหา (Image query) ที่ผู้ใช้ส่งเข้ามาได้อย่างแม่นยำ (Mishra et al., 2020) จากการสกัดคุณลักษณะจากภาพ แล้วเปรียบเทียบความคล้ายคลึงกันของคุณลักษณะในภาพบนฐานข้อมูลภาพขนาดใหญ่ โดยไม่จำเป็นต้องพึ่งพาคำค้นหา (Keyword) หรือข้อความที่ผู้ใช้ป้อนเข้ามา (Razavian et al., 2014) ดังนั้นจึงสามารถจัดการกับความซับซ้อนของข้อมูลภาพที่หลากหลาย และไม่เป็นระเบียบได้ดีกว่าการใช้วิธีการค้นหาภาพแบบดั้งเดิม ทำให้สามารถค้นหารูปภาพที่มีลักษณะคล้ายคลึงกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในหลากหลายบริบท

หนึ่งในรูปแบบการค้นหารูปภาพที่มีการใช้งานเพิ่มมากขึ้นในปัจจุบันคือการค้นหาภาพย้อนกลับ (Reverse image search) โดยเฉพาะการค้นหาภาพที่คล้ายคลึงกันจากรูปภาพค้นหาบนฐานข้อมูลขนาดใหญ่ เทคโนโลยีนี้ได้รับความนิยมอย่างมากในการค้าปลีกออนไลน์ การค้นหาภาพทางการแพทย์ หรือการวิจัยทางวิทยาศาสตร์ (Deng et al., 2009) โดยเฉพาะการค้นหารูปภาพอาหารไทยที่มีความคล้ายคลึงกันนับว่าเป็นประเด็นที่ได้รับความสนใจในงานวิจัยด้านปัญญาประดิษฐ์และคอมพิวเตอร์วิทัศน์ (Computer vision) เนื่องจากอาหารไทยเป็นตัวแทนของวัฒนธรรมและเอกลักษณ์ประจำชาติที่มีความหลากหลายและรายละเอียดเฉพาะตัว ดังนั้นอาหารไทยจึงไม่ได้เป็นเพียงอาหารประจำชาติ แต่ยังมีบทบาทสำคัญในการส่งเสริมการท่องเที่ยวทั้งทางตรงและทางอ้อม โดยเฉพาะในการเสริมสร้างภาพลักษณ์ของประเทศไทยในระดับสากล และสะท้อนถึงความหลากหลายและเอกลักษณ์ทางวัฒนธรรม รวมถึงภูมิปัญญาท้องถิ่นที่ทำให้อาหารไทยได้รับการยอมรับและชื่นชมในระดับโลก อย่างไรก็ตาม กระบวนการค้นหารูปภาพที่มีลักษณะคล้ายคลึงกันนั้นเผชิญกับความท้าทายหลายด้านที่ต้องได้รับการพิจารณา เนื่องจากความหลากหลายของรายการอาหาร และเอกลักษณ์เฉพาะตัวของอาหารแต่ละรายการ เช่น ผัดไทย และผัดซีอิ๊วมีความคล้ายคลึงกันในบางแง่มุม เช่น เส้นที่ใช้หรือวิธีการปรุงอาหาร แต่ยังมีความแตกต่างในรายละเอียด เช่น ชนิดของซอส ผักที่ใช้และการตกแต่งบนจานที่เป็นเสน่ห์ที่ทำให้อาหารไทยได้รับความนิยมในระดับนานาชาติ (Tourism Authority of Thailand, 2021) นอกจากนั้นบริบทของภาพถ่ายอาหารที่มักมีพื้นหลังและองค์ประกอบอื่น ๆ เช่น จาน ช้อน หรือเครื่องเคียง ซึ่งอาจรบกวนการระบุลักษณะสำคัญของอาหารในภาพ อีกทั้งสภาพแสงในภาพ เช่น แสงธรรมชาติ หรือแสงประดิษฐ์ อาจส่งผลต่อประสิทธิภาพของโมเดลที่ใช้ประมวลผลภาพ โดยเฉพาะในกรณีที่แสงเปลี่ยนแปลงอย่างมากระหว่างภาพถ่าย

อย่างไรก็ตาม การค้นหารูปภาพย้อนกลับโดยทั่วไปจะมุ่งที่ความคล้ายคลึงเพียงแค่ลักษณะของรูปภาพที่ตรงกับรูปภาพค้นหาเท่านั้น หากแต่พฤติกรรมของผู้ใช้มักจะสนใจบริบทของผลลัพธ์จากการค้นหามากกว่า (Kiros et al., 2014) เช่นเดียวกับความสนใจของผู้ใช้ที่มักสนใจผลลัพธ์ในอันดับต้น ๆ เท่านั้น และไม่ต้องการผลลัพธ์จำนวนมากเกินไปอาจทำให้เสียเวลาในการคัดเลือกรูปภาพที่ตรงกับความต้องการได้ ความหลากหลายเหล่านี้ทำให้การพัฒนาโมเดลเพื่อค้นหาภาพที่คล้ายคลึงกันจำเป็นต้องมีความแม่นยำสูงในการดึงคุณลักษณะสำคัญที่ใช้แยกแยะรายละเอียดต่าง ๆ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในแอปพลิเคชันแนะนำรายการอาหาร เพื่อให้

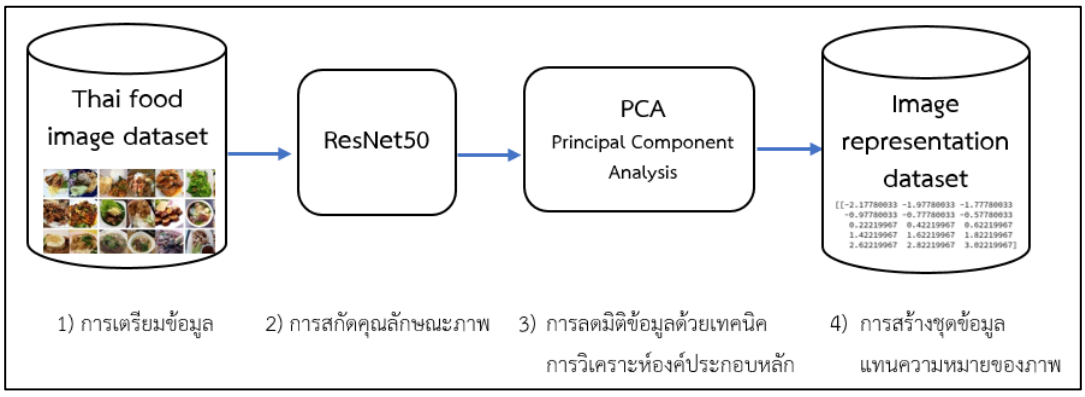
สอดคล้องกับแนวคิดการท่องเที่ยวเชิงอาหาร (Gastronomy tourism) ที่มุ่งเน้นการสัมผัสประสบการณ์ด้านอาหารและวัฒนธรรมการกินของแต่ละท้องถิ่น ซึ่งถือเป็นหนึ่งในซอฟต์พาวเวอร์ (Soft power) ที่แข็งแกร่งของประเทศไทย งานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนาตัวแบบการสกัดคุณลักษณะภาพด้วยโมเดลการเรียนรู้เชิงลึก และประเมินความแม่นยำของผลการค้นหาภาพย้อนกลับบนชุดข้อมูลรูปภาพอาหารไทยจำนวน 20 รายการที่ได้รับความนิยมในระดับนานาชาติ อันจะช่วยค้นหาภาพที่ตรงกับความต้องการจากฐานข้อมูลขนาดใหญ่อย่างมีประสิทธิภาพด้วยการใช้รูปภาพค้นหาที่เชื่อมโยงกับอาหารแต่ละรายการ อีกทั้งเป็นการเพิ่มประสบการณ์ที่ดีในการสนับสนุนความต้องการของผู้ใช้ด้วยการให้ข้อมูลอาหารไทยที่ถือเป็นหนึ่งในเอกลักษณ์ทางวัฒนธรรมของประเทศไทย

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาตัวแบบการสกัดคุณลักษณะภาพด้วยโมเดลการเรียนรู้เชิงลึก
2. เพื่อประเมินความแม่นยำของผลการค้นหาภาพย้อนกลับ

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเชิงประยุกต์เพื่อพัฒนาตัวแบบการสกัดคุณลักษณะภาพด้วยโมเดลการเรียนรู้เชิงลึกสำหรับการค้นหาภาพย้อนกลับด้วยการเขียนโปรแกรมภาษาไพทอน (Python) บน Google Colaboratory แบบมีค่าใช้จ่ายที่เพิ่มทรัพยากรการประมวลผลที่เร็วขึ้น หน่วยความจำขนาดใหญ่ขึ้น และเวลาการเชื่อมต่อที่ยาวนานขึ้น เหมาะสำหรับการฝึกโมเดลการเรียนรู้ของเครื่องที่ต้องใช้ทรัพยากรการประมวลผล ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ได้แก่ การเตรียมข้อมูล การสกัดคุณลักษณะภาพ การลดมิติข้อมูลด้วยเทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก และการสร้างชุดข้อมูลแทนความหมายของภาพ ดังภาพที่ 1

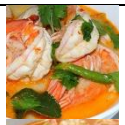
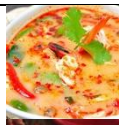


ภาพที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินการพัฒนาตัวแบบการสกัดคุณลักษณะภาพด้วยโมเดลการเรียนรู้เชิงลึก

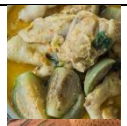
1) การเตรียมชุดข้อมูล (Dataset preparation) ที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์รูปภาพในการพัฒนาตัวแบบการสกัดคุณลักษณะ และการค้นหารูปภาพแบบย้อนกลับบนชุดข้อมูล FoodDudy (GemmyTheGeek, 2021) ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อสนับสนุนความต้องการของนักท่องเที่ยวและผู้บริโภคที่ไม่คุ้นเคยกับอาหารไทยด้วยการให้ข้อมูลเกี่ยวกับระดับความเผ็ด และส่วนประกอบสำคัญในอาหารแต่ละจาน ซึ่งมีประโยชน์ต่อผู้ที่มีข้อจำกัดด้านอาหาร เช่น การแพ้สารอาหารบางชนิด ชุดข้อมูลประกอบด้วยภาพอาหารไทย 48 รายการ จำนวนมากว่า 14,000 ภาพ รวบรวมข้อมูลเริ่มต้นจากการค้นหาภาพผ่านแพลตฟอร์มออนไลน์ เช่น Google และ Bing โดยใช้คำค้นที่ครอบคลุมชื่ออาหารที่ได้รับความนิยมในระดับนานาชาติ เช่น Tom Yum, Pad Thai, และ Green Curry โดยผ่านการคัดกรองความเหมาะสมของภาพเพื่อให้ได้ชุดข้อมูลที่สมบูรณ์ และผ่านการตรวจสอบคุณภาพความคมชัดให้เป็นไปตามมาตรฐาน เพื่อสนับสนุนการสร้างโมเดลปัญญาประดิษฐ์ที่เกี่ยวข้องกับอาหารไทยในบริบทต่าง ๆ

งานวิจัยนี้คัดเลือกรายการอาหารไทยแบบเฉพาะเจาะจง 20 รายการจากจำนวนทั้งหมด 40 อันดับที่ได้รับการแนะนำเป็นอาหารไทยที่ไม่ควรพลาด (40 Thai foods we can't live without) (Wiens, 2017) จากเว็บไซต์ CNN Travel ได้แก่ 1) ต้มยำ 2) แกงส้ม 3) แกงเขียวหวาน 4) พะแนง 5) แกงมัสมั่น 6) แกงจืด 7) ไข่เจียว 8) หมูย่าง 9) ข้าวขาหมู 10) ข้าวหมกไก่ 11) ข้าวมันไก่ 12) ลาบ 13) ผัดกะเพรา 14) ผัดเม็ดมะม่วง 15) ส้มตำ 16) ผัดผักบุ้ง 17) ผัดซีอิ๊ว 18) ผัดไทย 19) ข้าวเหนียวมะม่วง และ 20) สังขยาฟักทอง ดังตารางที่ 1 โดยสุ่มรูปภาพอาหารจากชุดข้อมูล FoodDudy รายการละ 100 รูปภาพ รวมทั้งสิ้น 2,000 รูปภาพ มาสร้างเป็นชุดข้อมูลรายการอาหารแบบไม่มีป้ายกำกับข้อมูล (Unlabelled data) เพื่อเน้นการพัฒนาระบบที่สามารถค้นหาหรือเปรียบเทียบความคล้ายคลึงระหว่างรูปภาพได้ทันทีโดยไม่ต้องใช้ป้ายกำกับเพื่อระบุคลาส ก่อนจะปรับภาพภาพทั้งหมดให้ขนาดเท่ากันเป็น 224*224 พิกเซล ซึ่งเป็นขนาดมาตรฐานที่นิยมใช้ เนื่องจากภาพที่มีขนาดไม่เท่ากันจะส่งผลให้การประมวลผลข้อมูลขาดความเป็นระบบ และเพิ่มภาระในการคำนวณของโมเดล

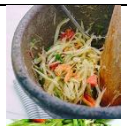
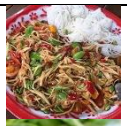
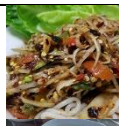
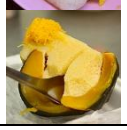
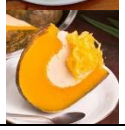
ตารางที่ 1 รายการอาหารไทยจำนวน 20 รายการ และตัวอย่างรูปภาพจากชุดข้อมูล FoodDudy

รายการอาหาร	**ตัวอย่างรูปภาพอาหาร**					
	1	**2**	**3**	**4**	**...**	**100**
1) ต้มยำ (Spicy soup)					...	
2) แกงส้ม (Sour soup)					...	

ตารางที่ 1 รายการอาหารไทยจำนวน 20 รายการ และตัวอย่างรูปภาพจากชุดข้อมูล FoodDudy (ต่อ)

รายการอาหาร	ตัวอย่างรูปภาพอาหาร					
	1	2	3	4	...	100
3) แกงเขียวหวาน (Green curry)					...	
4) พะแนง (Panang curry)					...	
5) แกงมัสมั่น (Massaman curry)					...	
6) แกงจืด (Soup)					...	
7) ไข่เจียว (Omelet)					...	
8) หมูย่าง (Grilled pork skewers)					...	
9) ข้าวขาหมู (Thai pork leg stew)					...	
10) ข้าวหมกไก่ (Thai chicken biryani)					...	
11) ข้าวมันไก่ (Hainanese chicken rice)					...	
12) ลาบ (Spicy minced salad)					...	
13) ผัดกะเพรา (Stir fried Thai basil)					...	
14) ผัดเม็ดมะม่วง (Braised chestnut)					...	

ตารางที่ 1 รายการอาหารไทยจำนวน 20 รายการ และตัวอย่างรูปภาพจากชุดข้อมูล FoodDudy (ต่อ)

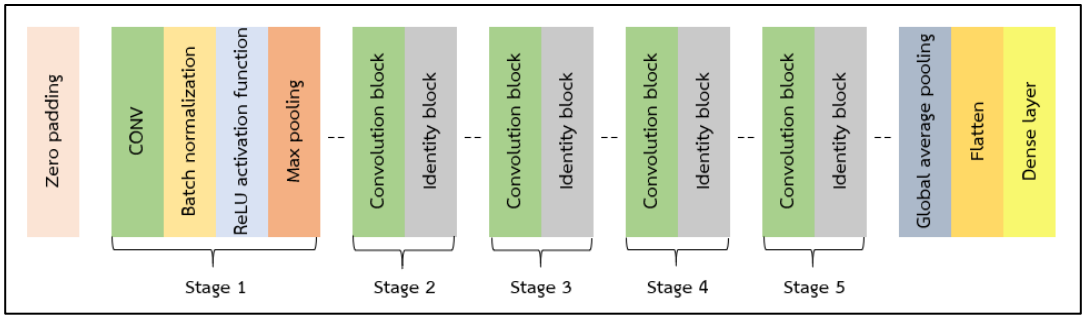
รายการอาหาร	ตัวอย่างรูปภาพอาหาร					
	1	2	3	4	...	100
15) ส้มตำ (Green papaya salad)					...	
16) ผัดผักบุ้ง (Stir-fried morning glory)					...	
17) ผัดซีอิ๊ว (Fried noodle in soy sauce)					...	
18) ผัดไทย (Thai stir-fried noodles)					...	
19) ข้าวเหนียวมะม่วง (Mango sticky rice)					...	
20) สังขยาฟักทอง (Egg custard in pumpkin)					...	

2) การสกัดคุณลักษณะภาพ (Image feature extraction) ด้วยโมเดลที่ได้รับการฝึกฝนล่วงหน้า (Pre-trained model) เพื่อนำมาใช้พัฒนาโมเดลสำหรับการจำแนกรูปภาพอาหารไทยด้วยความสามารถในการถ่ายโอนความรู้ (Transfer learning) จากการฝึกฝนบนชุดข้อมูลขนาดใหญ่ ร่วมกับการปรับแต่งโมเดลเพิ่มเติม (Fine-tuning) ให้เหมาะสมกับชุดข้อมูลด้วยการปรับค่าน้ำหนักบางส่วนของโมเดล หรือฝึกฝนเฉพาะบางชั้นของโครงข่าย ทำให้สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพแม้ในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างจากชุดข้อมูลเดิม ปัจจุบันมีหลายโมเดลที่ได้รับการฝึกฝนล่วงหน้าที่นำสถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชันมาพัฒนาเพื่อจำแนกรูปภาพ ในเบื้องต้นคณะผู้วิจัยได้คัดเลือกโมเดลเพื่อทดสอบกับชุดข้อมูลรูปภาพคน สัตว์ สิ่งของ และสถานที่ที่คณะผู้วิจัยรวบรวมเอง จำนวน 4,512 ภาพ โดยทำการประเมินจนครบ 3 รอบ แบบผลลัพธ์เป็นอิสระต่อกัน แล้วนำผลการประเมินมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อให้ความคลาดเคลื่อนลดน้อยลงจนถึงในระดับที่ยอมรับได้ ผลการประเมิน พบว่า ทั้ง 5 โมเดล ประกอบด้วย ResNet50, VGG16, MobileNetV3, DenseNet121 และ SqueezeNet นั้นมีค่าความถูกต้อง (Accuracy) ในการจำแนกข้อมูลเท่ากับร้อยละ 81.06, 81.03, 80.03, 81.05 และ 79.01 ตามลำดับ ถือว่าอยู่ในระดับที่สูงและค่าความถูกต้องทั้งหมดใกล้เคียงกัน

อย่างไรก็ดี แต่ละโมเดลนั้นมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน ทั้งในด้านความเร็วและขนาดของโมเดล ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้โมเดล ResNet50 เป็นโครงสร้างพื้นฐาน (Baseline model) เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงในการประมวลผลภาพด้วยจำนวนพารามิเตอร์ประมาณ 25 ล้านตัว ซึ่งน้อยกว่าโมเดลอื่นในรุ่นเดียวกันอย่าง VGG-16 แต่ให้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำสูงกว่าในการทดสอบประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังเป็นสถาปัตยกรรมที่เหมาะสมสำหรับการถ่ายโอนความรู้ เนื่องจากมีน้ำหนักที่ผ่านการฝึกไว้ล่วงหน้า (Pre-trained weights) ให้เลือกใช้งานหลากหลาย สามารถนำไปปรับใช้กับชุดข้อมูลใหม่ได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ โดยไม่จำเป็นต้องฝึกฝนโมเดลใหม่ตั้งแต่ต้น ด้วยความสามารถในการเรียนรู้คุณลักษณะที่ซับซ้อนทำให้ ResNet-50 เป็นหนึ่งในโมเดลพื้นฐานที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในวงการปัญญาประดิษฐ์และการเรียนรู้ของเครื่อง

โมเดล ResNet50 (Residual Network 50 layers) (He et al., 2016) เป็นโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชันที่ผ่านการถ่ายโอนความรู้จากฝึกฝนล่วงหน้าบนชุดข้อมูล ImageNet โดยออกแบบสถาปัตยกรรมเพื่อแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นเมื่อเพิ่มจำนวนเลเยอร์ในโครงข่ายที่มีความลึกสูง เนื่องจากในอดีตการเพิ่มความลึกของชั้นโครงข่ายถูกคาดหวังว่าจะช่วยให้โมเดลสามารถเรียนรู้ลักษณะเฉพาะของข้อมูลได้ละเอียดและแม่นยำมากขึ้น แต่กลับพบปัญหาสำคัญ คือความแม่นยำของโมเดลลดลงเมื่อความลึกเพิ่มขึ้น (Degradation problem) และปัญหาค่า Gradient ที่ลดลงจนแทบไม่สามารถอัปเดตพารามิเตอร์ในเลเยอร์แรก ๆ ของโครงข่ายได้ (Vanishing gradient problem) จึงเป็นที่มาของการนำแนวคิด Residual learning มาเพื่อแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าว โดยเปลี่ยนเป้าหมายของโครงข่ายจากการเรียนรู้ฟังก์ชันเป้าหมายแบบตรงไปตรงมา (Direct mapping) มาเป็นการเรียนรู้ส่วนต่างของฟังก์ชันเป้าหมาย (Residual function) แทน เพื่อลดความซับซ้อนของกระบวนการเรียนรู้ เนื่องจากฟังก์ชันที่โครงข่ายต้องเรียนรู้มีความง่ายและตรงไปตรงมากกว่าการเรียนรู้ฟังก์ชันเป้าหมายในภาพรวมทั้งหมด

การทำงานภายในโครงข่าย ResNet50 บนแนวคิด Residual learning ถูกนำมาใช้ผ่านโครงสร้างที่เรียกว่า Residual Block ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของโมเดล ในแต่ละ Residual block ข้อมูลอินพุตจะถูกส่งผ่านเลเยอร์ย่อยต่าง ๆ เช่น การทำคอนโวลูชัน การปรับแต่งด้วย Batch normalization และการใช้ฟังก์ชันกระตุ้น ReLU เพื่อสร้างฟังก์ชันที่ต้องเรียนรู้ หลังจากนั้นฟังก์ชันที่ได้จะถูกบวกกับข้อมูลอินพุตเดิมผ่านกระบวนการ Skip connection ซึ่งช่วยให้ข้อมูลสามารถไหลผ่านไปยังเลเยอร์ถัดไปได้ โดยวิธีการนี้ไม่เพียงแต่ช่วยลดการสูญเสียข้อมูลระหว่างการส่งผ่านเลเยอร์เท่านั้น แต่ยังช่วยป้องกันปัญหาค่า Gradient ที่ค่อยๆ หายไปในโครงข่ายที่มีความลึกมาก ซึ่งอาจทำให้โมเดลไม่สามารถเรียนรู้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยโครงสร้างของสถาปัตยกรรม ResNet50 ถูกออกแบบมาอย่างเป็นระบบ ประกอบด้วย 5 ส่วน ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 โครงสร้างของสถาปัตยกรรม ResNet50

จากภาพที่ 2 โครงสร้างของสถาปัตยกรรม ResNet50 ซึ่งแต่ละส่วนมีบทบาทสำคัญในการสกัดคุณลักษณะจากข้อมูลภาพ เพื่อใช้ในงานการวิเคราะห์และจำแนกประเภทภาพ มีรายละเอียดดังนี้

ส่วนที่ 1 การประมวลผลเบื้องต้น (Initial processing) โดยในช่วงแรกข้อมูลภาพจะถูกประมวลผลผ่านขั้นตอนที่สำคัญ ได้แก่ Zero padding เพื่อขยายขนาดของภาพให้เหมาะสมสำหรับการคำนวณในเลเยอร์ถัดไป ตามด้วยเลเยอร์ Convolution ซึ่งใช้ตัวกรอง (Filters) จำนวน 64 ตัวที่มีขนาด 7*7 เพื่อสกัดคุณลักษณะพื้นฐาน เช่น ขอบเขต (Edges) และพื้นผิว (Textures) ของวัตถุ หลังจากนั้นจะใช้ Batch normalization เพื่อปรับค่าข้อมูลให้เหมาะสมสำหรับการเรียนรู้ และใช้ ReLU activation เพื่อเพิ่มความไม่เชิงเส้น (Non-linearity) ของโมเดล ต่อด้วยการใช้พูลลิงแบบมากที่สุด (Max pooling) เพื่อย่อขนาดเชิงพื้นที่ของข้อมูลภาพ โดยยังคงคุณลักษณะที่สำคัญไว้สำหรับกระบวนการสกัดคุณลักษณะในระดับที่สูงขึ้นในช่วงถัดไป

ส่วนที่ 2 การสกัดคุณลักษณะเบื้องต้น (Feature extraction on early layers) โดยใช้โครงสร้าง Residual blocks จำนวน 3 บล็อก แต่ละบล็อกประกอบด้วยเลเยอร์ Convolution ขนาด 3*3 และ Skip connection เพื่อเป็นกลไกการเชื่อมต่อแบบข้ามเลเยอร์ที่สามารถช่วยลดปัญหา Gradient vanishing และเพิ่มประสิทธิภาพการเรียนรู้คุณลักษณะที่มีความลึกมากขึ้น เช่น รูปร่าง (Shapes) และสี (Color) ของวัตถุ

ส่วนที่ 3 การสกัดคุณลักษณะระดับกลาง (Feature extraction on mid-level layers) ที่ประกอบด้วย Residual blocks จำนวน 4 บล็อก ซึ่งมีการเพิ่มจำนวนตัวกรองในเลเยอร์ Convolution เพื่อเพิ่มความสามารถในการจับข้อมูลที่ซับซ้อนขึ้น คุณลักษณะที่ได้ในช่วงนี้เริ่มรวมข้อมูลเชิงโครงสร้างและเชิงบริบท (Contextual information) เช่น ลวดลาย (Patterns) และคุณลักษณะเชิงพื้นที่ (Spatial feature) ซึ่งมีความสำคัญต่อการวิเคราะห์และประมวลผลโครงสร้างภาพในระดับที่สูงขึ้น

ส่วนที่ 4 การสกัดคุณลักษณะเชิงลึก (Feature extraction on deep layers) จาก Residual blocks จำนวน 6 บล็อก เพื่อเรียนรู้คุณลักษณะในระดับที่ลึกและเป็นนามธรรมมากขึ้น เช่น การแยกรูปแบบของวัตถุเฉพาะเจาะจง และบริบทเชิงพื้นที่ของวัตถุ โดยคุณลักษณะในช่วงนี้สามารถบ่งบอกถึงความแตกต่าง

ระหว่างประเภทของวัตถุในรูปภาพได้อย่างชัดเจนจึงเหมาะสำหรับการนำไปใช้ในงานวิเคราะห์ภาพที่ต้องการความแม่นยำสูง เช่น การค้นหารูปภาพ และการจำแนกรูปภาพที่ซับซ้อน

ส่วนที่ 5 การสกัดคุณลักษณะขั้นสุดท้าย (Final feature extraction) ด้วย Residual blocks จำนวน 3 บล็อก โดยฟีเจอร์ที่ได้จากเลเยอร์สุดท้ายจะถูกย่อขนาดเชิงพื้นที่ด้วย Global average pooling ซึ่งช่วยลดความซับซ้อนของข้อมูล แต่ยังคงรักษาค่าที่สำคัญของคุณลักษณะของแต่ละตัวกรองไว้ จากนั้นข้อมูลจะถูกแปลงให้อยู่ในรูปเวกเตอร์ผ่าน Flatten layer และส่งผ่านไปยัง Dense layer สำหรับการจำแนกภาพในชุดข้อมูล ImageNet ที่มีจำนวนคลาสเท่ากัน

กระบวนการสกัดคุณลักษณะโดยนำเข้าข้อมูล (Input data) รูปภาพที่ผ่านกระบวนการเตรียมชุดข้อมูลเข้าสู่ตัวสกัดคุณลักษณะด้วยการปรับแต่ง (Fine-tuning) โมเดล ResNet50 ให้กลายเป็นตัวสกัดคุณลักษณะที่มุ่งเน้นการดึง Feature map จากภาพ โดยปรับแต่งโครงสร้างโมเดล ในส่วนที่ 5 จากการตัด Dense layer ซึ่งเป็นเลเยอร์สุดท้ายที่ทำหน้าที่จำแนกรูปภาพออกจากโมเดล แต่ยังคงรักษา Global average pooling layer ไว้ เนื่องจากมีบทบาทสำคัญในการลดมิติของ Feature map แปลงเป็นเวกเตอร์คุณลักษณะ (Feature vector) ซึ่งเป็นตัวแทนของข้อมูลที่สำคัญจากภาพที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการค้นหารูปภาพโดยไม่ต้องพึ่งพาผลลัพธ์จากการจำแนกประเภทภาพ อีกทั้งการตัด Dense layer ออก ยังช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับโมเดลในการนำเวกเตอร์คุณลักษณะไปใช้วิเคราะห์ข้อมูลเชิงลึกจากลักษณะเฉพาะของภาพ เช่น การค้นหารูปภาพที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน หรือการวิเคราะห์ลักษณะเชิงพื้นที่ของภาพในแง่มุมต่าง ๆ

3) การลดมิติข้อมูลด้วยเทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Dimensionality reduction with PCA) เนื่องจากข้อมูลที่มีจำนวนมิติสูง (High-dimensional data) ซึ่งมักจะเกิดขึ้นจากการสกัดคุณลักษณะซึ่งเวกเตอร์ที่มีจำนวนมิติสูงนั้นอาจทำให้การประมวลผลข้อมูลมีความซับซ้อนและใช้ทรัพยากรมากเกินไป อีกทั้งยังอาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของตัวแบบ (Model performance) (Keogh & Mueen 2017) ดังนั้นการลดมิติข้อมูลจึงเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการวิเคราะห์ข้อมูล งานวิจัยนี้ใช้การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal Component Analysis: PCA) (Jolliffe, 2002) ซึ่งเป็นหนึ่งในเทคนิคที่ได้รับความนิยมนำมาใช้ในการลดมิติข้อมูลจากการแปลงข้อมูลจากมิติที่สูงให้เหลือต่ำลง โดยไม่สูญเสียข้อมูลที่สำคัญมากนัก เทคนิคนี้มีพื้นฐานจากแนวคิดในการค้นหาแกนมิติใหม่ที่เรียกว่าองค์ประกอบหลัก (Principal components) ซึ่งเป็นแกนที่สามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้มากที่สุด โดยการหาค่าความแปรปรวนสูงสุดของข้อมูลในแต่ละมิตินั้นการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักจะสร้างการแปลงเชิงเส้นที่ช่วยลดจำนวนมิติของข้อมูลลงในลำดับที่สำคัญที่สุด

กระบวนการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก จะเริ่มต้นด้วยการสร้างอ็อบเจกต์องค์ประกอบหลักซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการคำนวณและระบุองค์ประกอบหลักของข้อมูลในชุดข้อมูลที่มีมิติสูง โดยการวิเคราะห์

องค์ประกอบหลักจะทำการหาค่าความแปรปรวนสูงสุดในข้อมูล และกำหนดแกนมิติใหม่ที่สอดคล้องกับความแปรปรวนเหล่านั้น หลังจากนั้นอ็อบเจกต์องค์ประกอบหลักจะถูกปรับแต่งชุดข้อมูลที่ได้จากการสกัดคุณลักษณะ เพื่อหาค่าขององค์ประกอบหลักที่สามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้มากที่สุด จึงไม่เพียงแต่จะช่วยลดมิติของข้อมูลให้เหลือเพียงมิติที่สำคัญที่สุด แต่ยังช่วยในการปรับปรุงประสิทธิภาพของการประมวลผลข้อมูลในขั้นตอนถัดไป เช่น การสร้างตัวแบบหรือการวิเคราะห์ข้อมูลเพิ่มเติม เนื่องจากการลดมิติข้อมูลจะช่วยลดความซับซ้อนของข้อมูล และลดปัญหาที่อาจเกิดจากการที่จำนวนมิติสูงเกินไป เช่น ปัญหาความแปรปรวนของข้อมูล (Variance) ที่ไม่สามารถอธิบายได้ทั้งหมด

งานวิจัยนี้กำหนดจำนวนองค์ประกอบหลักเท่ากับ 300 เพื่อควบคุมความสมดุลระหว่างการลดมิติข้อมูลและการรักษาความแปรปรวนที่สำคัญในชุดข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์หรือฝึกฝนโมเดล (Model training) ดังนั้นการเลือกจำนวนองค์ประกอบหลักที่เหมาะสมเป็นกระบวนการที่ต้องพิจารณาจากหลายปัจจัย เช่น จำนวนมิติที่ต้องการลดลง และสัดส่วนของความแปรปรวนที่ต้องการคงไว้ในข้อมูลที่ถูกแปลงแล้ว เพื่อตอบสนองความต้องการในการคงข้อมูลสำคัญไว้และเพิ่มประสิทธิภาพในการฝึกตัวแบบต่อไป

4) การสร้างชุดข้อมูลแทนความหมายของภาพ (Create the image representations dataset) ถือเป็นกระบวนการที่สำคัญในการจัดการและเก็บรักษาข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลภาพ ซึ่งเป็นการแปลงข้อมูลจากรูปภาพให้กลายเป็นข้อมูลเชิงตัวเลขที่สามารถนำมาประมวลผลและใช้งานต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ ประกอบด้วยข้อมูลสำคัญที่ได้จากขั้นตอนต่าง ๆ ในการประมวลผลภาพ เช่น เวกเตอร์คุณลักษณะที่ลดมิติแล้ว (Dimensionality-reduced feature vectors) ซึ่งได้จากกระบวนการลดมิติข้อมูลด้วยการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก เพื่อคัดเลือกและเก็บข้อมูลที่สำคัญที่สุดจากชุดข้อมูลที่มีมิติสูง รวมทั้งอ็อบเจกต์องค์ประกอบหลักที่ใช้ในการลดมิติข้อมูล ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการแปลงข้อมูลภาพให้เป็นเวกเตอร์คุณลักษณะที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานต่อไป นอกจากนี้ยังมีการบันทึกเส้นทางจัดเก็บของรูปภาพแต่ละไฟล์ ซึ่งทำให้สามารถติดตามและเข้าถึงภาพต้นฉบับได้ทันที

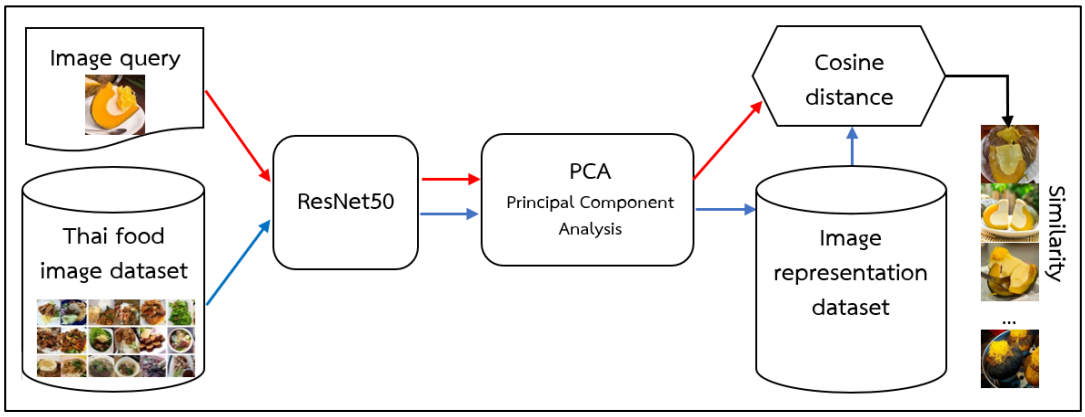
การจัดเก็บข้อมูลในลักษณะนี้จะช่วยให้ชุดข้อมูลแทนความหมายของภาพทำหน้าที่เป็นคลังข้อมูลที่สามารถนำไปใช้ในการค้นหารูปภาพ เนื่องจากข้อมูลที่เก็บรวบรวมในเชิงตัวเลขนั้นสามารถเปรียบเทียบความคล้ายคลึง (Similarity) ของภาพต่าง ๆ ได้อย่างรวดเร็วและไม่จำเป็นต้องทำการประมวลผลภาพต้นฉบับซ้ำในแต่ละครั้ง ตลอดจนช่วยให้การบริหารจัดการข้อมูลเป็นไปได้อย่างมีระเบียบและมีประสิทธิภาพ อันเป็นส่วนสำคัญในการพัฒนาแอปพลิเคชันต่อไปในอนาคต

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การสกัดคุณลักษณะภาพด้วยโมเดลการเรียนรู้เชิงลึกสำหรับการค้นหารูปภาพย้อนกลับ แบ่งผลการวิจัยและอภิปรายผลตามวัตถุประสงค์ ได้แก่ 1) เพื่อพัฒนาตัวแบบการสกัดคุณลักษณะภาพด้วยโมเดลการเรียนรู้เชิงลึก และ 2) เพื่อประเมินความแม่นยำของผลการค้นหาภาพย้อนกลับ มีรายละเอียดดังนี้

1) ผลการพัฒนาตัวแบบการสกัดคุณลักษณะภาพด้วยโมเดลการเรียนรู้เชิงลึก เพื่อสกัดคุณลักษณะรูปภาพบนชุดข้อมูลรูปภาพอาหารไทยที่ได้รับความนิยมจากนานาชาติจำนวน 20 รายการด้วยโมเดล ResNet50 ที่ผ่านการถ่ายโอนความรู้จากการฝึกฝนบนชุดข้อมูลขนาดใหญ่ ร่วมกับการปรับแต่งโมเดลเพิ่มเติมให้เหมาะสมกับชุดข้อมูลด้วยการปรับค่าน้ำหนักบางส่วนของโมเดลร่วมกับฝึกฝนเฉพาะบางชั้นของโครงข่าย ก่อนจะแปลงเป็น Feature map ซึ่งประกอบด้วยเวกเตอร์เชิงตัวเลข ขนาด 2,048 องค์ประกอบที่เป็นผลลัพธ์จากกระบวนการสกัดคุณลักษณะ โดยเวกเตอร์นี้ได้จากเลเยอร์ Global average pooling ซึ่งทำหน้าที่สรุปข้อมูลจากฟีเจอร์เมทริกซ์ขนาดใหญ่ที่ได้จากเลเยอร์ Convolutional ก่อนหน้านี้ให้อยู่ในรูปแบบของเวกเตอร์ขนาด 1 มิติที่แสดงลักษณะสำคัญของภาพ เช่น รูปร่าง รูปทรง สี หรือพื้นผิวที่โมเดลสามารถเรียนรู้และตรวจจับได้ในระหว่างการฝึกฝน โดยคุณลักษณะเหล่านี้เป็นข้อมูลที่สำคัญในเชิงบริบทและโครงสร้างของภาพต้นฉบับ

อย่างไรก็ดี ความซับซ้อนของมิติข้อมูลดังกล่าวอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพในการประมวลผล ซึ่งอาจนำไปสู่ปัญหาคำสาปแห่งมิติ (Curse of dimensionality) ดังนั้นการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักซึ่งช่วยแปลงข้อมูลจากมิติที่สูงให้เหลือมิติที่ต่ำลง โดยยังคงรักษาความแปรปรวนที่สำคัญในข้อมูลไว้ วิธีการนี้ไม่เพียงช่วยลดความซับซ้อนของข้อมูล แต่ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการประมวลผล งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่องค์ประกอบที่สำคัญที่สุดจำนวน 300 องค์ประกอบ โดยตัดข้อมูลที่มีผลกระทบน้อยหรือที่เป็นสัญญาณรบกวนออกไปก่อนจะนำไปสร้างเป็นชุดข้อมูลแทนความหมายของภาพ เพื่อเป็นตัวแบบการค้นหารูปภาพย้อนกลับ ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 กระบวนการค้นหารูปภาพย้อนกลับ

จากภาพที่ 3 กระบวนการค้นหารูปภาพย้อนกลับเริ่มต้นด้วยการนำภาพค้นหา (Query image) เข้าสู่ตัวแบบ โดยผ่านขั้นตอนการประมวลผลล่วงหน้า (Pre-processing) เพื่อปรับขนาดภาพเป็น 224*224 พิกเซลที่เหมาะสมกับการสกัดคุณลักษณะรูปภาพในโมเดล ResNet50 จากนั้นภาพจะถูกลดมิติข้อมูลด้วยการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักแล้วจะนำ Feature map ของภาพค้นหาไปเปรียบเทียบกับ Feature map ที่ถูกจัดเก็บไว้ในชุดข้อมูลแทนความหมายของภาพ ซึ่งเป็นคลังข้อมูลของภาพที่ผ่านการประมวลผลล่วงหน้าและสกัดคุณลักษณะมาแล้ว การเปรียบเทียบนี้ใช้การคำนวณค่าความคล้ึงโคไซน์ (Cosine similarity) (Manning et al., 2008) เป็นมาตรวัดทางคณิตศาสตร์ที่ใช้เพื่อวัดความแตกต่างหรือความคล้ายคลึงระหว่างเวกเตอร์สองตัวในพื้นที่เวกเตอร์เชิงมิติ ดังสมการที่ 1 ตัวอย่างการคำนวณระยะทางโคไซน์จากระยะห่างระหว่างเวกเตอร์ A และเวกเตอร์ B

$$\text{Cosine similarity} = \frac{A \,.\, B}{\|A\| \,.\|B\|} \tag{1}$$

กำหนดให้ A•B คือ ผลคูณเชิงจุด (Dot product) ของเวกเตอร์

||A|| และ ||B|| คือ ขนาดของเวกเตอร์ A และเวกเตอร์ B ซึ่งคำนวณจากผลรวมของค่ากำลังสองของแต่ละองค์ประกอบในเวกเตอร์

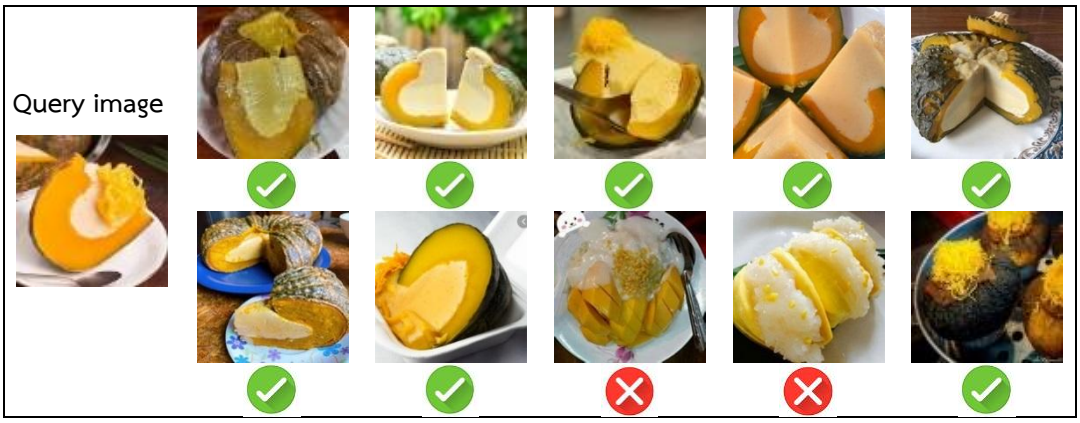
Cosine similarity คือ ค่าความคล้ายโคไซน์ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง [−1, 1]

จากสมการที่ 1 การแปลผลค่าความคล้ายเชิงโคไซน์ หากมีค่าใกล้ 1 หมายถึงเวกเตอร์ A และเวกเตอร์ B มีทิศทางที่คล้ายคลึงกันมาก ในขณะที่ค่าที่เข้าใกล้ 0 หมายถึงเวกเตอร์ไม่มีความสัมพันธ์เชิงทิศทาง และค่าที่ใกล้ -1 หมายถึงเวกเตอร์มีทิศทางตรงข้ามกัน ดังนั้นหากใช้ในการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างเวกเตอร์ จะคำนวณได้ด้วยระยะทางโคไซน์ (Cosine distance) ดังสมการที่ 2

$$\text{Cosine distance} = 1 - \text{cosine\_similarity} \tag{2}$$

จากสมการที่ 2 จะเห็นได้ว่าระยะทางโคไซน์มีค่าอยู่ในช่วง [0, 2] ดังนั้นเมื่อค่าความคลึงโคไซน์มีค่าใกล้ 1 จะส่งผลให้ระยะทางโคไซน์มีค่าใกล้ 0 ในทางกลับกัน เมื่อค่าความคลึงโคไซน์มีค่าใกล้ 0 จะส่งผลให้ระยะทางโคไซน์มีค่าใกล้ 1 และเมื่อค่าความคลึงโคไซน์มีค่าใกล้ -1 จะส่งผลให้ระยะทางโคไซน์มีค่าใกล้ 2 จะเห็นได้ว่าระยะทางโคไซน์ไม่ได้สนใจค่าขนาด (Magnitude) ของเวกเตอร์ แต่จะเน้นวัดมุมระหว่างเวกเตอร์ทั้งสอง เพื่อพิจารณาทิศทางเชิงสัมพัทธ์ (Relative orientation) ของเวกเตอร์ในพื้นที่นั้นเพื่อวัดค่าความ

แตกต่างเชิงเวกเตอร์ระหว่างภาพค้นหาและภาพในฐานข้อมูล ยิ่งค่าระยะทางน้อยเท่าใด แสดงว่าภาพในฐานข้อมูลมีความคล้ายคลึงกับภาพค้นหามากเท่านั้น ก่อนจะจัดอันดับภาพในฐานข้อมูล (Image ranking) ตามค่าความคล้ายคลึงเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยสำหรับการนำเสนอเป็นผลการค้นหารูปภาพแก่ผู้ใช้ในรูปแบบแผงภาพ (Image grid) ร่วมกับค่าความคล้ายคลึงหรือรายละเอียดของภาพนั้น ๆ ดังภาพที่ 4 ตัวอย่างรูปภาพค้นหาและผลการค้นหารูปภาพย้อนกลับจำนวน 10 รูปภาพที่ผ่านการประเมินความถูกต้องจากผู้เชี่ยวชาญ ดังนั้นจึงช่วยให้สามารถค้นหาภาพที่ต้องการได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ โดยไม่จำเป็นต้องมีข้อมูลป้ายกำกับในภาพค้นหา



ภาพที่ 4 ตัวอย่างรูปภาพค้นหา และผลการค้นหารูปภาพย้อนกลับจำนวน 10 รูปภาพ
ที่ผ่านการประเมินความถูกต้องจากผู้เชี่ยวชาญ

2) ผลประเมินความแม่นยำของผลการค้นหาภาพย้อนกลับ โดยนำโมเดลต้นแบบทดสอบโดยใช้รูปภาพค้นหาในโดเมนอาหารไทย 20 รายการจากผู้ใช้ด้วยรูปภาพค้นหาที่ตัวแบบไม่เคยเห็นมาก่อน (Unseen dataset) รายการอาหารละ 1 รูปภาพ รวมทั้งสิ้น 20 รูปภาพ เนื่องจากเป็นตัวชี้วัดความสามารถของโมเดลในการทำงานกับข้อมูลใหม่ที่มีความหลากหลาย และสะท้อนถึงประสิทธิภาพของโมเดลในสถานการณ์จริงที่มีผู้ใช้งานด้วยรูปภาพในบริบทที่แตกต่างกัน เช่น รูปภาพที่มีความแตกต่างด้านระยะถ่าย มุมมอง แสงสว่าง ตลอดจนพื้นหลัง จะช่วยทดสอบความยืดหยุ่นของโมเดลในการจัดการกับความแปรปรวนของข้อมูล เช่น ภาพถ่ายในระยะที่แตกต่างกัน อาจทำให้รายละเอียดของรูปภาพเปลี่ยนไป หรือมุมมองจากด้านบนหรือด้านข้างอาจส่งผลต่อลักษณะเด่นของอาหารแต่ละรายการ นอกจากนี้สภาพแสงที่แตกต่างกัน เช่น แสงธรรมชาติ แสงจากหลอดไฟ หรือการมีเงาในภาพ ยังเป็นปัจจัยที่เพิ่มความซับซ้อนในการสกัดคุณลักษณะ

ดังนั้นเพื่อเป็นการสะท้อนถึงความพร้อมของโมเดลต่อการใช้งานในวงกว้าง โดยเฉพาะในบริบทที่ผู้ใช้งานแต่ละคนมีแหล่งข้อมูลและเงื่อนไขที่แตกต่างกัน เนื่องจากหากโมเดลสามารถรักษาความแม่นยำในระดับสูงได้กับข้อมูลที่ไม่เคยเห็นมาก่อน จะช่วยเพิ่มศักยภาพในการนำไปใช้งานจริง การทดสอบนี้จึงถือเป็นขั้นตอนสำคัญที่ช่วยให้มั่นใจได้ว่าโมเดลสามารถตอบโจทย์ในสถานการณ์จริงได้อย่างมีประสิทธิภาพและสอดคล้องกับความต้องการของผู้ใช้งาน จึงเป็นที่มาของการให้ผู้เชี่ยวชาญเข้ามามีบทบาทในการประเมินความแม่นยำ เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือและลดข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นจากกระบวนการอัตโนมัติหรือข้อจำกัดของตัวแบบในการสกัดคุณลักษณะเฉพาะทาง

การประเมินจากผู้เชี่ยวชาญหลายคนยังช่วยลดความคลาดเคลื่อนของการประเมินที่อาจเกิดขึ้นจากการพิจารณาโดยผู้เชี่ยวชาญเพียงท่านเดียว ทำให้ผลการประเมินมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น งานวิจัยนี้กำหนดจำนวนผู้เชี่ยวชาญ 4 ท่านทำการประเมินผลด้วยรูปภาพค้นหา 1 รูปภาพต่อ 1 รายการอาหาร ท่านละ 5 รายการ หากผลการค้นหารูปภาพใดถูกต้องเท่ากับ 1 คะแนน ในทางตรงกันข้าม หากไม่ถูกต้องเท่ากับ 0 คะแนน เมื่อทำการประเมินแล้วจะนำคะแนนทั้งหมดมาคำนวณเป็นค่าความแม่นยำ (Manning et al., 2008) เพื่อประเมินประสิทธิภาพของตัวแบบดังสมการที่ 3 จำนวนผลลัพธ์ที่ถูกต้องหารด้วยจำนวนผลลัพธ์ที่ค้นหาทั้งหมดที่จำนวน k อันดับตามการแสดงผลการค้นหาเป็น 3, 5, 10, 20, 50 และ 100 รูปภาพต่อรายการ

$$\text{Precision@k} = \frac{\text{จำนวนผลลัพธ์ที่ถูกต้องใน } \boldsymbol{k} \text{ อันดับ}}{\boldsymbol{k}} \tag{3}$$

งานวิจัยนี้ให้ความสำคัญค่าความคลาดเคลื่อน (error) ระหว่างค่าที่วัดได้กับค่าที่แท้จริง ถ้าค่าที่วัดได้ใกล้เคียงกับค่าจริงมากแสดงว่าการวัดนั้นมีความถูกต้องสูง (เรวัต แสงสุริยงค์, 2565) โดยการวัดทุกครั้งมักมีค่าความคลาดเคลื่อนเชิงสถิติ (Statistical error) เกิดขึ้นเสมอ ดังนั้นเมื่อครบรอบจะทำการประเมินอีกครั้งจนครบ 3 รอบด้วยรูปภาพค้นหาเดิมแบบผลลัพธ์เป็นอิสระต่อกัน แล้วนำผลการประเมินมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อให้ความคลาดเคลื่อนลดน้อยลงจนถึงในระดับที่ยอมรับได้

ผลการประเมินจากผู้เชี่ยวชาญ พบว่า ค่าความแม่นยำจากการค้นหารูปภาพที่ k อันดับตามจำนวนการแสดงผลรูปภาพอาหารจากการค้นหาเป็น 3, 5, 10, 20, 50 และ 100 รูปภาพต่อรายการ คิดเป็นค่าความแม่นยำเฉลี่ยเท่ากับ 80%, 76%, 75%, 69%, 62% และ 45% ตามลำดับ ดังตารางที่ 2 โดยค่าความแม่นยำจะลดลงเมื่อจำนวนผลลัพธ์ที่เพิ่มขึ้น เมื่อแปลความหมายค่าความแม่นยำ พบว่า ผลลัพธ์จากการค้นหารูปภาพจำนวน 3 ลำดับอยู่ในระดับดีมาก ตามด้วยผลลัพธ์จากการค้นหารูปภาพจำนวน 5 และ 10 ลำดับอยู่ในระดับดี แต่เมื่อผลลัพธ์จากการค้นหามีจำนวนมากขึ้นเป็น 20 และ 50 รูปภาพ ค่าความแม่นยำจะลดลงอยู่ในระดับพอใช้ และเมื่อจำนวนผลลัพธ์เท่ากับ 100 รูปภาพนั้นตัวแบบจำเป็นต้องได้รับการปรับปรุงต่อไปในอนาคต

ตารางที่ 2 ค่าความแม่นยำเฉลี่ยจากการค้นหารูปภาพที่ k อันดับตามจำนวนการแสดงผลรูปภาพจากการค้นหาเป็น 3, 5, 10, 20, 50 และ 100 รูปภาพต่อรายการ

ลำดับรายการอาหาร	Precision					
	@3	@5	@10	@20	@50	@100
1) ต้มยำ	1.00	1.00	0.90	0.85	0.70	0.50
2) แกงส้ม	0.67	0.80	0.80	0.75	0.72	0.55
3) แกงเขียวหวาน	1.00	0.80	0.70	0.65	0.60	0.40
4) พะแนง	0.33	0.60	0.70	0.60	0.55	0.35
5) แกงมัสมั่น	0.67	0.60	0.60	0.55	0.50	0.30
6) แกงจืด	1.00	0.80	0.80	0.70	0.60	0.45
7) ไข่เจียว	0.67	0.60	0.70	0.65	0.55	0.40
8) หมูย่าง	1.00	1.00	0.90	0.80	0.70	0.55
9) ข้าวขาหมู	1.00	0.80	0.80	0.75	0.72	0.60
10) ข้าวหมกไก่	0.67	0.60	0.70	0.70	0.65	0.50
11) ข้าวมันไก่	0.67	0.60	0.60	0.55	0.50	0.35
12) ลาบ	1.00	0.80	0.70	0.65	0.60	0.40
13) ผัดกะเพรา	1.00	1.00	0.90	0.85	0.70	0.50
14) ผัดเม็ดมะม่วง	0.67	0.80	0.80	0.75	0.72	0.55
15) ส้มตำ	1.00	0.80	0.70	0.65	0.60	0.45
16) ผัดผักบุ้ง	0.33	0.60	0.70	0.60	0.55	0.35
17) ผัดซีอิ๊ว	0.67	0.60	0.60	0.55	0.50	0.30
18) ผัดไทย	1.00	0.80	0.80	0.70	0.60	0.45
19) ข้าวเหนียวมะม่วง	0.67	0.60	0.70	0.65	0.55	0.40
20) สังขยาฟักทอง	1.00	1.00	0.90	0.80	0.70	0.55
ค่าเฉลี่ย	**0.80**	**0.76**	**0.75**	**0.69**	**0.62**	**0.45**

จากตารางที่ 2 เมื่อพิจารณาในรายละเอียด พบว่า ค่าความแม่นยำของการค้นหารูปภาพอาหารไทยนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการที่เกี่ยวข้องกับคุณลักษณะของภาพ และประสิทธิภาพของโมเดลที่ใช้ในการประมวลผลภายใต้สถานการณ์จริงที่มีผู้ใช้งานด้วยรูปภาพในบริบทที่แตกต่างกันมีรายละเอียดดังนี้

1) ความชัดเจนของคุณลักษณะเฉพาะในภาพอาหาร จะเห็นได้จากรายการอาหารที่มีค่าความแม่นยำสูงอย่างต้มยำ และสังขยาฟักทอง แสดงถึงความสามารถของตัวแบบในการสกัดคุณลักษณะเด่นได้อย่างแม่นยำ คุณลักษณะเหล่านี้อาจรวมถึงสีสัน รูปทรงของส่วนประกอบในจาน เช่น ต้มยำมักมีสีแดงจากน้ำแกงที่ชัดเจน

ในขณะที่สังขยาฟักทองนอกจากสีเหลืองที่ชัดเจนแล้วยังมีรูปทรงเด่นชัดระหว่างชิ้นฟักทองและเนื้อสังขยา ในทางกลับกัน รายการอาหารที่มีความคล้ายคลึงกันมากอย่างพะแนง และแกงมัสมั่นนั้นอาจมีน้ำแกงที่มีสีคล้ายคลึงกัน และอยู่ภาชนะรูปทรงที่ใกล้เคียงกัน จึงอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ความคล้ายคลึง

2) บริบทของภาพที่หลากหลาย (Context of images) เช่น อาหารที่มักจัดอยู่ในภาชนะลักษณะที่ใกล้เคียงกัน รูปแบบการตกแต่งจาน หรือองค์ประกอบเสริมในภาพ อาจทำให้การสกัดคุณลักษณะสำคัญในภาพมีความคลาดเคลื่อน เช่น รายการอาหารประเภทข้าวที่ในภาพมักมีช้อนส้อมเป็นองค์ประกอบเช่นเดียวกับรายการอาหารประเภทเส้นที่มักมีตะเกียบปรากฏในภาพเป็นองค์ประกอบ

3) ความแปรปรวนของรูปภาพ (Variance of image) เนื่องจากรูปภาพอาหารนั้นมีบริบทแตกต่างจากรูปภาพในโดเมนอื่น ดังนั้นอาจประสบกับปัญหาความแปรปรวนของรูปภาพ (Gonzalez & Woods, 2008) ในหลายกรณี ประกอบด้วย

3.1) ความแปรปรวนของมุมมอง (View-point variance) เป็นผลจากการถ่ายภาพอาหารในมุมมองต่าง ๆ เช่น การหมุนหรือเปลี่ยนทิศทางของภาชนะในหลายมิติ อาจทำให้การสกัดคุณลักษณะไม่สามารถระบุวัตถุได้อย่างแม่นยำในทุกมุมมอง เนื่องจากตำแหน่งหรือทิศทางภายในภาพจะถูกลดความสำคัญทันที

3.2) ความแปรปรวนของขนาด (Scale variance) ซึ่งเกิดจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น ระยะทางระหว่างวัตถุและกล้องถ่ายภาพ หรือการขยายเข้าขยายออกของเลนส์ ส่งผลให้ขนาดของวัตถุในภาพแตกต่างกัน

3.3) สภาพแสง (Illumination conditions) โดยรูปภาพที่ถ่ายในสภาพแสงต่างกัน เช่น แสงจ้า แสงน้อย หรือแสงจากมุมที่ไม่เหมาะสม อาจทำให้การสกัดลักษณะเด่นในภาพมีความคลาดเคลื่อน

3.4) พื้นหลังที่ซับซ้อน (Cluttered background) จากการจัดภาชนะ และการตกแต่งภาพอาหารด้วยองค์ประกอบอื่นที่ไม่เกี่ยวข้องโดยใช้สีหรือลวดลายที่คล้ายกับอาหาร หรือมีวัตถุอื่นที่ไม่เกี่ยวข้องจำนวนมากในภาพอาจรบกวนการจดจำลักษณะเฉพาะของวัตถุเป้าหมาย

3.5) ความแปรปรวนภายในคลาส (Intra-class variation) เกิดจากความหลายหลายที่ถูกจัดอยู่ในคลาสเดียวกัน เช่น รายการอาหารเดียวกันแต่ถูกปรุงขึ้นจากวัตถุดิบหลักที่แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลต่อคุณลักษณะสำคัญของอาหารแต่ละรายการ

ตารางที่ 3 ตัวอย่างรูปภาพที่มีปัญหาความแปรปรวนของรูปภาพ

Context Of images	View-point variance	Scale variance	Illumination conditions	Cluttered background	Intra-class variation
					

จากตารางที่ 3 ปัญหาความแปรปรวนของรูปภาพในการประมวลผล แบ่งออกได้เป็น 3 ประเด็น ได้แก่ 1) ความแปรปรวนที่รบกวนการตรวจจับคุณลักษณะสำคัญจากสภาวะแสง และสิ่งรบกวนในฉาก ซึ่งอาจลดความเด่นชัดขององค์ประกอบที่สำคัญของอาหาร โดยบางภาพถูกถ่ายภายใต้แสงสลัวหรือเงามืดส่งผลให้สีของอาหารผิดเพี้ยนและพื้นผิวดูไม่ชัดเจน เช่น แกงที่มีน้ำข้นอาจถูกถ่ายในภาวะแสงน้อยอาจทำให้สีดูทึบเกินไปและพื้นผิวดูไม่ชัดเจน ตรงกันข้าม ภาพอาหารที่ถูกถ่ายในแสงที่จัดจ้าเกินไป ส่งผลให้สีของอาหารซีดจางหรือสว่างเกินจริง เช่น น้ำแกงที่ควรมีสีจัดจ้านกลับดูซีดจาง นอกจากนั้นภาพที่มีองค์ประกอบอื่นนอกเหนือจากอาหารบริเวณด้านหลังหรือรอบข้างถูกตกแต่งด้วยวัตถุอื่นหรือมีรายละเอียดแวดล้อมที่ไม่เกี่ยวข้องจำนวนมาก เช่น ผ้าเช็ดปาก ช้อนส้อม แก้วน้ำ หรือแม้แต่บุคคลในพื้นหลัง ตลอดจนฉากหลังที่มีลวดลายสะดุดตา ซึ่งเบี่ยงเบนความสนใจของตัวแบบไปจากอาหารซึ่งเป็นจุดหลักภายในภาพ และอาจทำให้เข้าใจผิดว่าคุณลักษณะแวดล้อมเป็นส่วนหนึ่งของอาหารนั้น 2) ความแปรปรวนที่ส่งผลให้ตัวแบบจดจำคุณลักษณะผิดพลาดจากการเปลี่ยนแปลงมุมมองและขนาดของวัตถุ โดยภาพที่ถ่ายจากมุมบน มุมข้าง หรือมุมเอียงอาจทำให้โครงสร้างและการจัดวางองค์ประกอบของอาหารเปลี่ยนแปลงไปตามภาชนะ เช่น อาหารประเภทแกงเมื่อถ่ายจากด้านบนของภาชนะอาจเห็นแค่พื้นผิวของน้ำแกง แต่เมื่อถ่ายจากด้านข้างจะเห็นความลึกและลักษณะภาชนะชัดเจนยิ่งขึ้น ตรงกันข้ามกับอาหารประเภทเส้นที่ภาพจากมุมบนจะเห็นรายละเอียดทั้งหมด แต่หากถ่ายจากด้านข้างจะมองเห็นเส้นซ้อนทับกันโดยเห็นเครื่องเคียงด้านบนไม่ชัดเจน นอกจากนั้นยังมีบางภาพที่มีการถ่ายจากระยะใกล้มากจนเห็นเฉพาะบางส่วนของอาหาร ในขณะที่บางภาพถ่ายจากระยะไกลจนทำให้อาหารดูมีขนาดเล็กและขาดรายละเอียด ความแปรปรวนนี้ทำให้ตัวแบบอาจไม่สามารถเรียนรู้คุณลักษณะเชิงโครงสร้างที่แท้จริงของ

อาหารได้อย่างถูกต้อง 3) ความหลากหลายของรูปภาพระหว่างคลาส (Intra-class variation) และความคล้ายคลึงกันของรูปภาพภายในคลาสเดียวกัน (Inter-class similarity) ซึ่งส่งผลต่อความสามารถของตัวแบบในการจำแนกภาพที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน เช่น อาหารประเภทผัด บางภาพมีสีเข้มเพราะใช้ซอสเข้มข้น ขณะที่บางภาพใช้ผักสดและมีสีเขียวสดใส ขณะที่แกงชนิดเดียวกันอาจมีน้ำแกงสีเข้มในบางภาพและสีอ่อนในอีกภาพจากวัตถุดิบหรือกรรมวิธีปรุงที่แตกต่างกันตามบริบทของผู้ประกอบอาหาร ทำให้แม้อยู่ในคลาสเดียวกันก็มีลักษณะภาพที่แตกต่างกันมาก นอกจากนี้ การตกแต่งจานด้วยเครื่องเคียงหลากสี หรือมีข้าวสวยร่วมในจานซึ่งสร้างความแตกต่างจากภาพอื่นแม้จะเป็นอาหารรายการเดียวกัน ความแปรปรวนภายในคลาสเช่นนี้อาจทำให้ตัวแบบเกิดการจดจำคุณลักษณะร่วมที่ไม่สอดคล้องกัน และส่งผลต่อความสามารถในการจำแนก ดังนั้นการจัดการกับความแปรปรวนเหล่านี้ด้วยการเพิ่มข้อมูล (Data augmentation) หรือการสร้างชุดข้อมูลที่มีความหลากหลาย ตลอดจนการเลือกตัวแบบที่มีความสามารถในการเรียนรู้แบบไม่ขึ้นกับมุมมองหรือบริบทจึงมีความสำคัญต่อการพัฒนาตัวแบบที่มีความแม่นยำในการจำแนกภาพอาหาร

สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาตัวแบบการสกัดคุณลักษณะภาพด้วยโมเดล ResNet50 บนชุดข้อมูลรูปภาพอาหารไทยที่ได้รับความนิยมจากนานาชาติจำนวน 20 รายการ ซึ่งจะได้ผลลัพธ์เป็นเวกเตอร์จำนวน 2,048 องค์ประกอบ จากนั้นใช้เทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักช่วยลดมิติของข้อมูลเหลือองค์ประกอบที่สำคัญที่สุด 300 องค์ประกอบ ก่อนจะนำไปสร้างชุดข้อมูลแทนความหมายของภาพสำหรับนำไปเปรียบเทียบกับรูปภาพค้นหาการคำนวณค่าความคล้ายคลึงโคไซน์เป็นผลลัพธ์จากการค้นหาเรียงจากมากไปน้อย ดังนั้นจึงช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถค้นหาภาพที่ต้องการได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ โดยไม่จำเป็นต้องมีข้อมูลป้ายกำกับในภาพค้นหา จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการค้นหารูปภาพบนฐานข้อมูลขนาดใหญ่

ผลการประเมินความแม่นยำเฉลี่ยของผลการค้นหาภาพย้อนกลับโดยผู้เชี่ยวชาญด้วยการทดสอบกับรูปภาพค้นหาที่ตัวแบบไม่เคยเห็นมาก่อนจำนวน 20 รูปภาพ พบว่า ค่าความแม่นยำเฉลี่ยจากการทดสอบ 3 ครั้งอยู่ในระดับที่น่าพึงพอใจ โดยเฉพาะ 3 อันดับแรกที่มีค่าความแม่นยำสูงถึง 0.80 และเมื่อเพิ่มจำนวนผลลัพธ์จากการค้นหาเป็น 5 และ 10 รูปภาพนั้นค่าความแม่นยำลดลงเล็กน้อยเท่ากับ 0.76 และ 0.75 ตามลำดับ ผลการประเมินดังกล่าวสอดคล้องกับพฤติกรรมของผู้ใช้ต้องการเพียงผลลัพธ์ที่ตนเองสนใจเท่านั้น ผลลัพธ์จำนวนมากจากการค้นหาทั้งที่ตรงและไม่ตรงกับความต้องการ อาจทำให้ผู้ใช้เสียเวลาคัดเลือกรูปภาพที่ตรงกับความต้องการอย่างแท้จริง เนื่องจากเป็นไปได้น้อยมากที่ผู้ใช้จะเลือกดูรูปภาพจากผลการค้นหาทั้งหมด จึงเป็นการเสียโอกาสสำหรับผู้ใช้หากมีรูปภาพบางส่วนที่ไม่ถูกเรียกดู โดยผู้ใช้จะเรียกดูเอกสารไม่เกิน 5 รายการที่ค้นหา (Jansen & Spink, 2006) ทั้งนี้มีเพียงผู้ใช้ร้อยละ 28.3 เท่านั้นที่เรียกดูเพียง 2-3 รายการ อีกทั้งร้อยละ

55 จะเรียกดูผลลัพธ์เพียง 1 รายการต่อ 1 การค้นหา ดังนั้นการค้นหารูปภาพจึงต้องมุ่งเพิ่มค่าความแม่นยำในผลการค้นหาในลำดับต้น ๆ มากกว่าการปรับปรุงเพื่อให้สามารถจัดการกับผลลัพธ์ที่มีจำนวนมากได้ดีขึ้น

อย่างไรก็ดี การค้นหาภาพอาหารไทยมีความท้าทายจากปัจจัยหลายประการ โดยเฉพาะความชัดเจนของคุณลักษณะเฉพาะในอาหารบางชนิดที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน ตลอดจนบริบทของภาพที่หลากหลายอาจทำให้โมเดลมีความคลาดเคลื่อนในการสกัดคุณลักษณะ นอกจากนี้ความแปรปรวนของรูปภาพยังส่งผลต่อการสกัดคุณลักษณะ เช่น มุมมอง ขนาด สภาพแสง และความซับซ้อนของพื้นหลังจากวัตถุอื่น ๆ ที่ไม่เกี่ยวข้อง ซึ่งอาจรบกวนการจดจำลักษณะเฉพาะของอาหารได้ ผลการวิจัยนี้จึงเป็นขั้นตอนสำคัญในการประเมินประสิทธิภาพของโมเดลในสถานการณ์จริงและช่วยให้เห็นถึงจุดที่จำเป็นต้องพัฒนา เพื่อให้สามารถใช้งานได้ในบริบทที่หลากหลาย ไม่ว่าจะเป็นลักษณะของภาพ ความคลาดเคลื่อน หรือเงื่อนไขการใช้งานในแต่ละสภาพแวดล้อม นอกจากนี้ ยังเป็นแนวทางการวิจัยในอนาคต เพื่อปรับปรุงความแม่นยำให้ตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้งาน และส่งเสริมการค้นหารูปภาพย้อนกลับในเชิงพาณิชย์หรือเชิงอุตสาหกรรมต่อไป

ข้อเสนอแนะ

การเพิ่มประสิทธิภาพในการค้นหารูปภาพย้อนกลับนั้นการใช้ชุดข้อมูลที่มีความหลากหลายและครอบคลุมลักษณะของอาหารไทยแต่ละรายการควรเป็นลำดับแรกในการพัฒนา ตลอดจนการปรับปรุงกระบวนการสกัดคุณลักษณะด้วยเทคนิคใหม่ ๆ เช่น การใช้ Attention mechanism เพื่อโฟกัสไปยังส่วนสำคัญของภาพ ร่วมกับการใช้เทคนิค Multi-scale feature extraction จะช่วยให้โมเดลให้เข้าใจลักษณะเฉพาะที่ละเอียดขึ้น และการใช้ Metric learning เพื่อเพิ่มความสามารถของระบบในการแยกแยะความคล้ายคลึงอย่างละเอียด จะช่วยยกระดับผลลัพธ์ให้ตอบโจทย์การใช้งานในสถานการณ์จริงได้ดียิ่งขึ้น อย่างไรก็ดี งานวิจัยในครั้งต่อไป ควรเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแต่ละโมเดลในเชิงลึกมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะการใช้ค่าความถูกต้อง (Accuracy) ค่าการเรียกคืน (Recall) ค่าประสิทธิภาพโดยรวม (F-measure) และค่าเฉลี่ยความแม่นยำเฉลี่ย (Mean Average Precision: mAP) ซึ่งใช้ประเมินประสิทธิภาพการค้นหารูปภาพย้อนกลับได้อย่างครอบคลุมในทุกมิติ

เอกสารอ้างอิง

เรวัต แสงสุริยงค์. (2565). ความเสี่ยงของการเกิดความคลาดเคลื่อนในการวิจัยเชิงปริมาณด้านสังคมวิทยา. **วารสารวิชาการมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา**, 30(1), 158-185.

Broz, M. (2024). **Photo statistics: How many photos are taken every day?**. Retrieved from https://photutorial.com/photos-statistics/

Deng, J., Dong, W., Socher, R., Li, L.-J., Li, K., & Fei-Fei, L. (2009). **ImageNet: A large-scale hierarchical image database**. In 2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (pp. 248–255). Miami, FL, USA: IEEE.

GemmyTheGeek. (2021). **Overcome your fear for Thai food with Foody Dudy**. Retrieved from https://gemmythegeek.medium.com/overcome-your-fear-for-thai-food-with-foody-dudy-7ff6d7702b22

Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. (2008). ***Digital image processing*** (3rd ed.). Pearson.

Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). ***Deep learning***. MIT Press.

He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2016). **Deep residual learning for image recognition**. In 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) (pp. 770–778). Las Vegas, NV, USA: IEEE.

Jansen, B. J., & Spink, A. (2006). How are we searching the World Wide Web? A comparison of nine search engine transaction logs. **Information processing &management**, 42(1), 248-263

Jolliffe, I. T. (2002). ***Principal component analysis*** (2nd ed.). Springer.

Keogh, E., & Mueen, A. (2017). **Curse of dimensionality**. In C. Sammut & G. I. Webb (Eds.), *Encyclopedia of machine learning and data mining* (pp. 314–315). Boston: Springer.

Kiros, R., Salakhutdinov, R., & Zemel, R. (2014). Unifying visual-semantic embeddings with multimodal neural language models. **arXiv preprint arXiv:1411.2539.**

LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. ***Nature***, *521*(7553), 436-444.

Manning, C. D., Raghavan, P., & Schütze, H. (2008). **Introduction to information retrieval**. Cambridge University Press.

Mishra, A., Kumar, A., Yadav, A., Ansari, A., & Gupta, N. (2020). Image Search Engine. **International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)**, 7(5), 2841-2844.

Razavian, A. S., Azizpour, H., Sullivan, J., & Carlsson, S. (2014). **CNN features off-the-shelf: An astounding baseline for recognition**. In 2014 IEEE conference on computer vision and pattern recognition workshops (pp. 806-813)

Tourism Authority of Thailand. (2021). ***Eat Like You Wanna Live GASTRONOMY FOR ALL***. Tourism Authority of Thailand

Wiens, M. (2017). **40 Thai foods we can't live without**. Retrieved from https://edition.cnn.com/travel/article/bangkok-food-thai-dishes/index.html

การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันที่ปรึกษากฎหมายด้านวิสาหกิจชุมชน

เฉลิมเจษฎ์ สมานุหัตถ์[1] นิคม ลนขุนทด[2] เที่ยงธรรม สิทธิจันทเสน[3] อัษฎา วรรณกายนต์[4*]

Received : January 9, 2025
Revised : August 7, 2025
Accepted : August 27, 2025

บทคัดย่อ

วิสาหกิจชุมชนในประเทศไทยมักประสบปัญหาในการเข้าถึงความรู้และคำปรึกษาทางกฎหมายที่จำเป็นต่อการดำเนินกิจการอย่างถูกต้อง ส่งผลให้ผู้ประกอบการขาดความเข้าใจในข้อกฎหมายและอาจเกิดข้อผิดพลาดในการปฏิบัติตามกฎระเบียบที่เกี่ยวข้อง งานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนา ทดสอบ และประเมินประสิทธิภาพของเว็บแอปพลิเคชันที่ปรึกษากฎหมายด้านวิสาหกิจชุมชน เพื่อสร้างเครื่องมือที่เข้าถึงได้ง่ายสำหรับการให้ความรู้และคำปรึกษาด้านกฎหมายแก่ผู้ประกอบการวิสาหกิจชุมชน การพัฒนาระบบใช้แนวคิดวงจรการพัฒนาระบบ โดยออกแบบให้สามารถเข้าถึงผ่านเว็บเบราว์เซอร์ได้โดยตรง ไม่จำเป็นต้องติดตั้งซอฟต์แวร์เพิ่มเติม ทำให้ผู้ใช้สามารถเข้าถึงระบบได้จากอุปกรณ์ที่หลากหลาย การประเมินประสิทธิภาพใช้วิธีการทดสอบแบบกล่องดำ (Black Box Testing) โดยผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 5 คน ครอบคลุม 4 ทั้งด้าน ได้แก่ ความถูกต้องและการทำงานของโปรแกรม ความสะดวกและความง่ายต่อการใช้งาน ความสามารถของโปรแกรม และความปลอดภัยของระบบ

ผลการวิจัยพบว่า เว็บแอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้นสามารถให้ความรู้และคำปรึกษาทางกฎหมายด้านวิสาหกิจชุมชนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยผลการประเมินในภาพรวมอยู่ในระดับมากที่สุด ($\overline{X}$ = 4.62, S.D. = 0.44) เมื่อพิจารณารายด้าน พบว่า ทุกด้านอยู่ในระดับมากที่สุด โดยด้านความถูกต้องและการทำงานของโปรแกรมได้คะแนนสูงสุด ($\overline{X}$ = 4.74, S.D. = 0.43) รองลงมาคือด้านความสะดวกและความง่ายต่อการใช้งาน ($\overline{X}$ = 4.67, S.D. = 0.44) ด้านความปลอดภัยของระบบ ($\overline{X}$ = 4.52, S.D. = 0.45) และด้านความสามารถของโปรแกรม ($\overline{X}$ = 4.51, S.D. = 0.44) ตามลำดับ เว็บแอปพลิเคชันนี้จึงเป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์สำหรับวิสาหกิจชุมชน และสามารถเป็นต้นแบบสำหรับการพัฒนาระบบให้คำปรึกษาทางกฎหมายในด้านอื่น ๆ หรือการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสารสนเทศเพื่อสนับสนุนการดำเนินงานของวิสาหกิจชุมชนในอนาคต

คำสำคัญ: การพัฒนาระบบ ที่ปรึกษากฎหมาย วิสาหกิจชุมชน เว็บแอปพลิเคชัน

---

[1] นักศึกษา หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์ อีเมล: chalermjade.sa@rmuti.ac.th

[2] อาจารย์ประจำหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์ อีเมล: komsurin1@hotmail.com

[3] อาจารย์ประจำหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์ อีเมล: teangtums@gmail.com

[4] อาจารย์ประจำหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์ อีเมล: asada2518@hotmail.com

** ผู้นิพนธ์หลัก อีเมล: asada2518@hotmail.com*

DEVELOPMENT OF A LEGAL-CONSULTANT WEB APPLICATION FOR COMMUNITY ENTERPRISES

Chalermjade Samanuhat[1] Nikom Lonkuntosh[2] Teangtum Sittichantasen[3] Asada Wannakayont[4]

Abstract

Community enterprises in Thailand have normally faced with challenges in accessing legal knowledge and consultation essentially for proper business operations. This has resulted in entrepreneurs lacking an understanding of legal requirements and potentially made errors in complying with relevant regulations. This research was aimed to develop, test, and evaluate the efficiency of a web application for legal consultation specifically designed for community enterprises. This was also aimed to create an easily accessible tool that provided legal knowledge and consultation to community enterprise entrepreneurs. The system development employed the Systems Development Life Cycle (SDLC) approach and was designed to be directly accessible through web browsers without requiring additional software installation, enabling users to access the system from various devices. The performance evaluation utilized the Black Box Testing method conducting by five experts. The evaluation was employed to cover four key aspects: program accuracy and functionality, convenience and ease of use, program capability, and system security.

Research findings indicated that the developed web application efficiently provided legal knowledge and consultation for community enterprises. The overall evaluation results

[1] *Doctoral Student Doctor of Philosophy Program in Industrial Technology, Faculty of Industrial Technology, Surindra Rajabhat University, e-mail: chalermjade.sa@rmuti.ac.th*

[2] *Lecturer of Doctor of Philosophy Program in Industrial Technology, Faculty of Industrial Technology, Surindra Rajabhat University, e-mail: komsurin1@hotmail.com*

[3] *Lecturer of Doctor of Philosophy Program in Industrial Technology, Faculty of Industrial Technology, Surindra Rajabhat University, e-mail: teangtums@gmail.com*

[4] *Lecturer of Doctor of Philosophy Program in Industrial Technology, Faculty of Industrial Technology, Surindra Rajabhat University, e-mail: asada2518@hotmail.com*

** Corresponding author, e-mail: asada2518@hotmail.com*

were at the highest level ($\overline{X}$= 4.62, S.D. = 0.44). When examining individual aspects, all areas achieved the highest rating level as follows: the program accuracy and functionality gained the scoring highest ($\overline{X}$= 4.74, S.D. = 0.43), following by convenience and ease of use ($\overline{X}$= 4.67, S.D. = 0.44), system security ($\overline{X}$= 4.52, S.D. = 0.45), and program capability ($\overline{X}$= 4.51, S.D. = 0.44), respectively. The current web application served as a valuable tool for community enterprises and could function as a model for developing legal consultation systems in other areas or for applying information technology to support future community enterprise operations.

Keywords: System Development, Legal Consultation, Community Enterprise, Web Application

บทนำ

วิสาหกิจชุมชน (Small and Micro Community Enterprises: SMCE) มีแนวคิดที่เกิดจากฐานรากของชุมชนที่มีการพัฒนาก่อตัวให้เกิดการมีสมาชิกที่มีส่วนร่วมในการผลิตและดำเนินธุรกิจในกิจกรรมที่สอดคล้องกัน เพื่อสร้างมูลค่าจากการใช้ทรัพยากรภายในท้องถิ่น (ทศพร แก้วขวัญไกร, 2560) การพัฒนาวิสาหกิจชุมชนจึงเป็นแนวทางสำคัญในการแก้ไขปัญหาความยากจนและสร้างความยั่งยืนทางเศรษฐกิจ สังคม และชุมชน โดยส่งเสริมการใช้ทรัพยากรท้องถิ่นอย่างมีประสิทธิภาพ (ธงพล พรหมสาขา ณ สกลนคร และ อุทิศ สังขรัตน์, 2556) เมื่อประเทศไทยมุ่งเน้นอุตสาหกรรมที่มีความได้เปรียบในการแข่งขัน รัฐบาลจึงให้ความสำคัญกับการสนับสนุนวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม รวมถึงวิสาหกิจชุมชน ซึ่งเป็นรากฐานโครงสร้างทางเศรษฐกิจของประเทศ (ธันยมัย เจียรกุล, 2557) การประกาศใช้ "พระราชบัญญัติส่งเสริมวิสาหกิจชุมชน พ.ศ. 2548" เมื่อวันที่ 19 มกราคม 2548 ได้กำหนดให้วิสาหกิจชุมชนเป็นองค์กรภาคประชาสังคมที่มีสิทธิและอำนาจในการรับการสนับสนุนอย่างเป็นระบบเพื่อการพัฒนาเศรษฐกิจชุมชนภายใต้กฎหมายแพ่งและพาณิชย์ ทำให้สามารถดำเนินกิจการโดยพึ่งพาตนเองในรูปแบบกิจการของชุมชน (ทศพร แก้วขวัญไกร, 2560) ในปี 2566 มีวิสาหกิจชุมชนทั้งสิ้น 126,891 แห่งกระจายอยู่ทั่วทุกภูมิภาคของประเทศไทย โดยข้อมูลจากระบบสารสนเทศวิสาหกิจชุมชน กรมส่งเสริมการเกษตร แสดงให้เห็นว่าสำนักงานส่งเสริมและพัฒนาการเกษตรที่มีการจดทะเบียนวิสาหกิจชุมชน มากที่สุด 3 อันดับแรก (ตัดยอดข้อมูล วันที่ 31 มีนาคม 2560) ได้แก่ สำนักงานที่ 4 จำนวน 44,762 แห่ง ตามด้วยสำนักงานที่ 6 จำนวน 20,332 แห่ง และสำนักงานที่ 5 จำนวน 9,240 แห่ง (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2565)

รายงานสถานการณ์วิสาหกิจขนาดกลาง และขนาดย่อม (MSME) ปี 2565 โดยสำนักงานส่งเสริมวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม (2566) ได้เสนอแนะเชิงนโยบายให้มีการพัฒนาศูนย์บริการให้คำปรึกษาทาง

ธุรกิจสำหรับผู้ประกอบการและบุคลากรในวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม โดยเฉพาะวิสาหกิจรายย่อย รวมถึงการพัฒนาช่องทางการให้บริการปรึกษา ฐานข้อมูลผู้เชี่ยวชาญและที่ปรึกษา และรูปแบบการให้คำปรึกษาทั้งแบบพบหน้า ออนไลน์ หรือแบบผสมผสาน โดยให้ผู้รับคำปรึกษาสามารถเลือกผู้เชี่ยวชาญและที่ปรึกษาที่ตรงกับความต้องการเฉพาะด้านของตน วิสาหกิจชุมชนต้องปฏิบัติตามกรอบกฎหมายหลายฉบับอย่างเคร่งครัด โดยวิสาหกิจชุมชนจำนวนมากยังขาดศักยภาพและมีความยากลำบากในการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยภายนอก ส่งผลให้เกิดความท้าทายในการดำเนินธุรกิจหลายด้าน (ภคมน โภคะธีรกุล, 2562) งานวิจัยเกี่ยวกับปัจจัยแวดล้อมที่สนับสนุนการพัฒนาวิสาหกิจชุมชนโดย วชิรา ไฝเจริญมงคล และจิราพร เชียงชะนา (2565) ชี้ให้เห็นความท้าทายสำคัญด้านทรัพยากรมนุษย์และการจัดการความรู้ การตลาด ระเบียบข้อบังคับ การเงิน และปัจจัยสนับสนุน ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าประเด็นด้านกฎหมายเป็นความท้าทายที่สำคัญสำหรับวิสาหกิจชุมชน จึงจำเป็นต้องมีบริการให้คำปรึกษาด้านกฎหมายหรือตัวแทนที่มีความเชี่ยวชาญเฉพาะทางเพื่อช่วยในการดำเนินกิจกรรมทางกฎหมายที่เกี่ยวข้องกับวิสาหกิจชุมชน

ด้วยความก้าวหน้าอย่างรวดเร็วของเทคโนโลยีสารสนเทศ ระบบการสื่อสาร และเครือข่ายอินเทอร์เน็ตไร้สาย ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเข้าสู่ยุคดิจิทัลอย่างเต็มรูปแบบ (รัญชิดา เกียรติกนก และเจษฎา วงศ์แสนสุขเจริญ, 2564) โดยเฉพาะอย่างยิ่งบทบาทที่เพิ่มขึ้นของอินเทอร์เน็ตและสื่อสังคมออนไลน์ในสังคมไทย (ณัฏฐพงษ์ สายพิณ, 2560) ทำให้การเข้าถึงข้อมูลการให้คำปรึกษาด้านกฎหมายสะดวกมากขึ้น แม้ว่าบริการให้คำปรึกษาด้านกฎหมายของภาคเอกชนมักมีค่าบริการสูง โดยมีธุรกิจบริการด้านกฎหมาย ส่วนใหญ่อยู่ในกรุงเทพฯ ปริมณฑล และจังหวัดใหญ่ แหล่งข้อมูลภาครัฐ เช่น ศูนย์ข้อมูลที่ปรึกษาของสำนักงานบริหารหนี้สาธารณะ ก็มีข้อมูลที่ปรึกษาด้านกฎหมายที่ครอบคลุม แม้ว่าผู้ใช้จำเป็นต้องเข้าใจประเด็นปัญหาทางกฎหมายของตนก่อนการค้นหาจากการศึกษาค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันเพื่อสนับสนุนชุมชนและวิสาหกิจชุมชน พบว่า มีความก้าวหน้าอย่างต่อเนื่องในช่วงหลายปีที่ผ่านมา โดยเฉพาะในบริบทของประเทศไทย ภคพล เหมสุลักษณ์ และคณะ (2566) ได้พัฒนาเว็บแอปพลิเคชันสำหรับสินค้าเกษตรชุมชนในอำเภอสรรคบุรี จังหวัดชัยนาท โดยระบบประกอบด้วย 5 ระบบย่อย ได้แก่ ระบบสมาชิกผู้ใช้งาน ระบบจัดการข้อมูลสินค้า ระบบจัดการข้อมูลการสั่งซื้อสินค้า ระบบแจ้งการชำระเงิน และระบบรายงานการสั่งซื้อ ผลการประเมินความพึงพอใจพบว่า อยู่ในระดับมาก แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของระบบในการช่วยกลุ่มวิสาหกิจชุมชนบริหารจัดการสินค้าเกษตร สอดคล้องกับงานวิจัยของฟ้า วิไลขำ และนงพะงา สุขโอสถ (2566) ที่พัฒนาเว็บแอปพลิเคชันประชาสัมพันธ์เส้นทางการท่องเที่ยวชุมชนราวต้นจันทน์และชุมชนบ้านวังหาด จังหวัดสุโขทัย โดยใช้วิธีดำเนินการพัฒนาระบบที่เป็นระบบ 5 ขั้นตอน ได้แก่ กำหนดความต้องการ วิเคราะห์และออกแบบ พัฒนาและติดตั้ง ทดสอบ และบำรุงรักษาระบบ ผลการประเมินพบว่าความพึงพอใจโดยรวมอยู่ในระดับมาก (ค่าเฉลี่ย 3.57) เยาวลักษณ งามแสนโรจน์ และคณะ (2567) ได้พัฒนาแอปพลิเคชันเพื่อจัดการข้อมูลชุมชนตำบลนาครัว

อำเภอแม่ทะ จังหวัดลำปาง ครอบคลุม 5 ด้าน ได้แก่ การเข้าถึงบริการของรัฐ สุขภาพ ความเป็นอยู่ รายได้ และการศึกษา ผลการประเมินประสิทธิภาพของระบบโดยผู้เชี่ยวชาญอยู่ในระดับดี และผลการศึกษาความพึงพอใจของผู้ใช้อยู่ในระดับดี และในแนวทางที่คล้ายกันกับภรัณยา ปาลวิสุทธิ์ และคณะ (2568) ได้พัฒนาแอปพลิเคชันสุขภาพผู้สูงอายุในท้องถิ่นด้วยเทคโนโลยีดิจิทัล โดยพัฒนาในรูปแบบเรซสปอนต์ซีฟเว็บไซต์เพื่อรองรับอุปกรณ์ที่มีขนาดหน้าจอแสดงผลที่แตกต่างกัน ผลการประเมินประสิทธิภาพการใช้งานแอปพลิเคชันจากกลุ่มผู้ใช้งานในภาพรวมอยู่ในระดับมาก จากการวิเคราะห์งานวิจัยข้างต้น พบแนวโน้มสำคัญในการพัฒนาแอปพลิเคชันเพื่อชุมชน ได้แก่ การมุ่งตอบสนองความต้องการเฉพาะของชุมชน การพัฒนาระบบที่ใช้งานได้หลากหลายอุปกรณ์ และการประเมินผลโดยผู้ใช้งานจริง อย่างไรก็ตาม ยังพบช่องว่างในด้านการพัฒนาระบบที่ปรึกษากฎหมายเฉพาะสำหรับวิสาหกิจชุมชน ซึ่งงานวิจัยนี้จะสามารถเติมเต็มช่องว่างดังกล่าวได้ โดยนำเทคโนโลยีเว็บแอปพลิเคชันมาประยุกต์ใช้เพื่อให้คำปรึกษาด้านกฎหมายแก่วิสาหกิจชุมชน ช่วยเสริมสร้างความเข้มแข็งและการพัฒนาที่ยั่งยืน

จากการวิเคราะห์งานวิจัยข้างต้น พบแนวโน้มสำคัญในการพัฒนาแอปพลิเคชันเพื่อชุมชน ได้แก่ การมุ่งเน้นการตอบสนองความต้องการเฉพาะของชุมชน การพัฒนาระบบที่ใช้งานได้หลากหลายอุปกรณ์ และการประเมินผลโดยผู้ใช้งานจริง อย่างไรก็ตาม อย่างไรก็ตามยังพบช่องว่างในด้านการพัฒนาระบบที่ปรึกษากฎหมายเฉพาะสำหรับวิสาหกิจชุมชน จากการวิเคราะห์การดำเนินงานที่วิสาหกิจชุมชนเผชิญในด้านการปฏิบัติตามกฎหมายและข้อจำกัดในการเข้าถึงบริการให้คำปรึกษาด้านกฎหมาย จึงมีแนวคิดในการพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันที่ปรึกษากฎหมายเฉพาะสำหรับวิสาหกิจชุมชนขึ้นมา โดยแพลตฟอร์มนี้จะผสานการมีส่วนร่วมของผู้ใช้และผู้พัฒนาระบบ โดยมีการออกแบบที่เน้นความสะดวกในการใช้งาน สามารถเข้าถึงได้ผ่านเว็บเบราว์เซอร์บนอุปกรณ์ทุกประเภท มีส่วนต่อประสานที่เข้าใจง่าย เหมาะสมกับผู้ใช้ที่มีข้อจำกัดในการใช้เทคโนโลยี เพื่อช่วยลดความเสี่ยงในการละเมิดกฎหมายโดยไม่ตั้งใจ ประหยัดต้นทุนในการเข้าถึงบริการให้คำปรึกษาด้านกฎหมาย และการเพิ่มโอกาสในการได้รับคำแนะนำจากผู้เชี่ยวชาญที่มีความเข้าใจในบริบทเฉพาะของวิสาหกิจชุมชน อันจะนำไปสู่การพัฒนาที่ยั่งยืนของวิสาหกิจชุมชนในระยะยาว ต่อไป

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันที่ปรึกษากฎหมายด้านวิสาหกิจชุมชน
2. เพื่อทดสอบและประเมินประสิทธิภาพเว็บแอปพลิเคชันที่ปรึกษากฎหมายด้านวิสาหกิจชุมชน

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยเรื่อง การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันที่ปรึกษากฎหมายด้านวิสาหกิจชุมชน เป็นการวิจัยและพัฒนา (Research and Development) ซึ่งผู้วิจัยดำเนินการวิจัยตามลำดับหัวข้อ ดังนี้

1. เครื่องมือ และการสร้างเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันที่ปรึกษากฎหมายด้านวิสาหกิจชุมชน มีเครื่องมือและการสร้างเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยที่ใช้ในการวิจัย ดังนี้

1.1 การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันที่ปรึกษากฎหมายด้านวิสาหกิจชุมชน

การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันที่ปรึกษากฎหมายด้านวิสาหกิจชุมชน โดยผู้วิจัยได้ใช้ทฤษฎีวงจรการพัฒนาระบบ (System Development Life Cycle : SDLC) 5 ขั้นตอน (โอภาส เอี่ยมสิริวงศ์, 2560) ซึ่งมีการดำเนินการตามขั้นตอน โดยมีรายละเอียดดังนี้

1.1.1 การวางแผนโครงการ (Project Planning) กระบวนการวางแผน เริ่มจากการทบทวนวรรณกรรมจากแหล่งข้อมูลที่หลากหลาย ประกอบด้วยเอกสารวิชาการ ตำรา และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อวิเคราะห์สภาพปัญหาและความต้องการของผู้ใช้งานระบบ ตลอดจนผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย เพื่อให้มีความเหมาะสมและความคุ้มค่าในการพัฒนาระบบ

1.1.2 การวิเคราะห์ (Analysis) โดยการศึกษาและรวบรวมข้อมูลปัญหาและความต้องการของผู้ใช้งานอย่างเป็นระบบจากการศึกษาพบว่า วิสาหกิจชุมชนประสบปัญหากฎหมายใน 3 ด้าน คือ การบริหารจัดการ การตลาด และการเงิน-บัญชี-ภาษี ด้านความต้องการระบบสารสนเทศ ต้องการระบบที่ใช้งานง่ายผ่านอินเทอร์เน็ต รองรับหลากหลายอุปกรณ์ มีฟังก์ชันค้นหากฎหมาย ข้อมูลที่ปรึกษา เชื่อมโยงหน่วยงานต่าง ๆ ระบบสิทธิ์ผู้ใช้ ส่วนติดต่อใช้งานง่าย กระดานถามตอบ และข้อมูลการจัดตั้งวิสาหกิจชุมชน (เฉลิมเจษฎ์ สมานุหัตถ์ และคณะ, 2567) จากข้อมูลดังกล่าว นำไปสู่การออกแบบโครงสร้างระบบที่แบ่งสิทธิ์ผู้ใช้เป็น 4 ระดับ คือ บุคคลทั่วไป สมาชิก ที่ปรึกษากฎหมาย และผู้ดูแลระบบ โดยระบบประกอบด้วยโมดูลจัดการผู้ใช้ ข้อมูลกฎหมาย การให้คำปรึกษา และการจัดการระบบ ซึ่งนำไปสู่การจัดทำแผนภาพกระแสข้อมูลเพื่อใช้ในการพัฒนาระบบต่อไป

ภาพที่ 1 แผนภาพบริบท (Context Diagram) ของระบบที่ปรึกษากฎหมายด้านวิสาหกิจชุมชน แสดงภาพรวมการทำงานของระบบที่ปรึกษากฎหมายด้านวิสาหกิจชุมชนและความสัมพันธ์กับผู้ใช้งานระบบทั้งหมด โดยแสดงขอบเขตของระบบและการไหลของข้อมูล โดยระบบออกแบบตามลำดับสิทธิ์การเข้าถึง เริ่มจากบุคคลทั่วไปที่สามารถเข้าถึงข้อมูลพื้นฐานและลงทะเบียนเป็นสมาชิก เมื่อเป็นสมาชิกแล้วจะได้รับสิทธิ์เพิ่มเติมในการขอคำปรึกษาด้านกฎหมาย ส่งคำถาม รับคำแนะนำ และจัดการข้อมูลส่วนตัว ส่วนที่ปรึกษากฎหมายทำหน้าที่ให้คำแนะนำแก่สมาชิก จัดการข้อมูลการให้คำปรึกษา และปรับปรุงฐานข้อมูลกฎหมาย

สำหรับผู้ดูแลระบบมีสิทธิ์สูงสุดในการควบคุมระบบทั้งหมด สามารถจัดการข้อมูลผู้ใช้ทุกระดับ และกำหนดสิทธิ์การเข้าถึงแก่ผู้ใช้งานทั้งหมด

ภาพที่ 2 แผนภาพกระแสข้อมูล (DFD) ของระบบที่ปรึกษากฎหมายด้านวิสาหกิจชุมชน แสดงรายละเอียดการไหลของข้อมูลและกระบวนการทำงานภายในระบบที่ปรึกษากฎหมายด้านวิสาหกิจชุมชน โดยระบบที่ปรึกษากฎหมายด้านวิสาหกิจชุมชนได้รับการออกแบบให้มีกระบวนการทำงานหลัก 4 ส่วน และคลังข้อมูล 4 ประเภท ที่ทำงานประสานกันอย่างเป็นระบบ กระบวนการทำงานหลักประกอบด้วย การจัดการผู้ใช้งาน ซึ่งดูแลการลงทะเบียน การเข้าสู่ระบบ การตรวจสอบสิทธิ์ และการจัดการข้อมูลผู้ใช้ทั้งหมด โดยแบ่งระดับการเข้าถึงตามประเภทผู้ใช้ ส่วนการจัดการข้อมูลกฎหมายรับผิดชอบการสร้าง อัพเดท และจัดการฐานข้อมูลกฎหมาย โดยผู้ดูแลระบบและที่ปรึกษากฎหมายสามารถปรับปรุงข้อมูลได้ ขณะที่สมาชิกและบุคคลทั่วไปมีสิทธิ์ค้นหาและเข้าถึงข้อมูลเท่านั้น

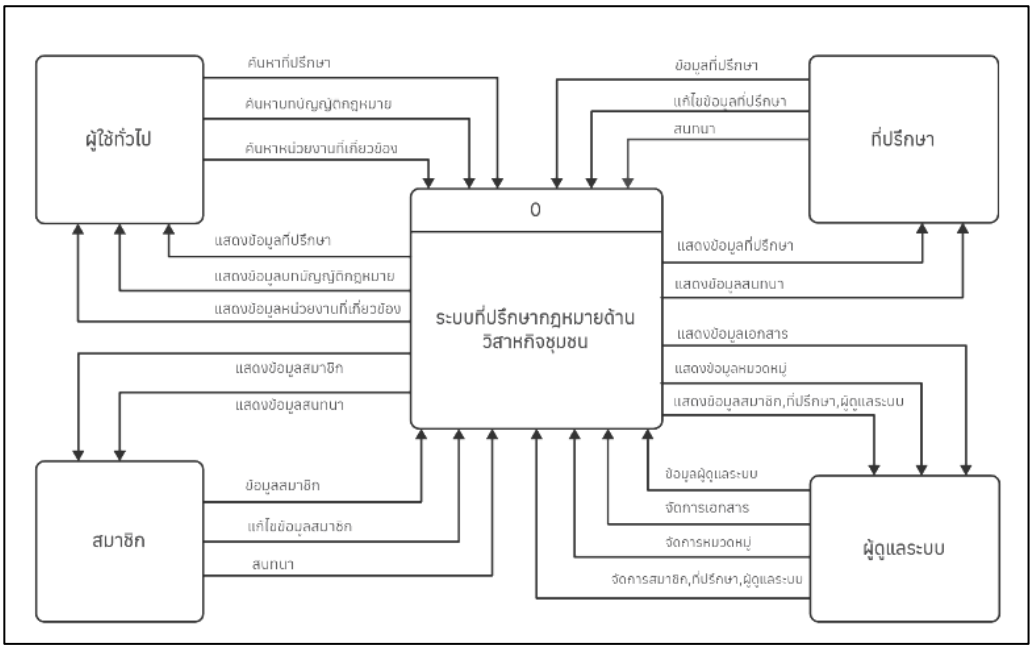
ระบบให้คำปรึกษาเป็นกระบวนการที่เชื่อมโยงการสื่อสารระหว่างสมาชิกกับที่ปรึกษากฎหมาย โดยสมาชิกสามารถส่งคำถามหรือประเด็นปัญหากฎหมาย และที่ปรึกษาสามารถให้คำตอบและคำแนะนำได้ ทั้งนี้ระบบมีการติดตามสถานะการให้คำปรึกษาตลอดกระบวนการ ส่วนการจัดการระบบเป็นหน้าที่หลักของผู้ดูแลระบบ ครอบคลุมการจัดการเชื่อมโยงเว็บไซต์ การสำรองข้อมูล และการรักษาความปลอดภัยของระบบ ในส่วนของคลังข้อมูล ประกอบด้วยฐานข้อมูลผู้ใช้ที่จัดเก็บข้อมูลผู้ใช้งานทุกระดับและสิทธิ์การเข้าถึง ฐานข้อมูลกฎหมายที่รวบรวมข้อมูลกฎหมายที่เกี่ยวข้องกับวิสาหกิจชุมชน ฐานข้อมูลการให้คำปรึกษาที่บันทึกประวัติการปรึกษา คำถาม คำตอบ และสถานะการให้คำปรึกษา และฐานข้อมูลระบบที่จัดเก็บการตั้งค่าระบบ การเชื่อมโยงเว็บไซต์ และข้อมูลเกี่ยวกับการทำงานของระบบ การออกแบบระบบทั้งหมดนี้มุ่งเน้นความสะดวกการเข้าถึงที่ง่าย และความปลอดภัย โดยคำนึงถึงข้อจำกัดด้านเทคโนโลยีของกลุ่มวิสาหกิจชุมชน ระบบได้รับการพัฒนาด้วยเทคโนโลยี Responsive Design เพื่อรองรับการทำงานบนอุปกรณ์ที่หลากหลาย ทำให้ผู้ใช้สามารถเข้าถึงข้อมูลและบริการได้ทุกที่ทุกเวลาตามความต้องการ

1.1.3 การออกแบบและการพัฒนา (Design and development) ได้ดำเนินการแบ่งเป็นสองระยะที่มีความสัมพันธ์กัน ได้แก่ 1) การออกแบบเชิงตรรกะ ระบบถูกออกแบบให้มีการจัดการสิทธิ์ผู้ใช้งานแบบลำดับชั้น โดยบุคคลทั่วไปสามารถเข้าถึงข้อมูลพื้นฐานและลงทะเบียนเป็นสมาชิก, สมาชิกมีสิทธิ์เพิ่มเติมในการขอรับคำปรึกษา, ที่ปรึกษากฎหมายสามารถให้คำแนะนำและจัดการข้อมูลการให้คำปรึกษา และผู้ดูแลระบบมีสิทธิ์สูงสุดในการจัดการระบบทั้งหมด และ 2) การออกแบบเชิงกายภาพ เลือกใช้ภาษา PHP เป็นภาษาหลักในการพัฒนา เนื่องจากมีความเสถียรและมีฟังก์ชันการทำงานที่ครอบคลุม สำหรับการจัดการฐานข้อมูลเลือกใช้ MySQL ซึ่งเป็นระบบจัดการฐานข้อมูลที่มีประสิทธิภาพสูงและรองรับการทำงานที่ซับซ้อน นอกจากนี้ ในส่วนของการพัฒนาส่วนติดต่อผู้ใช้ (Frontend) ใช้ Bootstrap Framework ซึ่งช่วยให้การออกแบบหน้าเว็บมีความ

สวยงาม ทันสมัย และรองรับการแสดงผลบนอุปกรณ์ที่หลากหลาย (Responsive Design) นอกจากนี้ยังใช้ JavaScript ร่วมกับ jQuery Library ในการพัฒนาส่วนที่ต้องการปฏิสัมพันธ์กับผู้ใช้ เช่น การตรวจสอบข้อมูล การแสดงผลแบบไดนามิก และการโต้ตอบกับผู้ใช้แบบ Real-time

1.1.4 การนำไปใช้ (Implementation Phase)

การนำระบบไปใช้ดำเนินการ เริ่มจากการติดตั้งระบบที่พัฒนาด้วย PHP, MySQL, Bootstrap และ JavaScript/jQuery ซึ่งประกอบด้วยโมดูลจัดการผู้ใช้งาน โมดูลข้อมูลกฎหมาย โมดูลให้คำปรึกษา และโมดูลจัดการระบบ จากนั้นมีการทดสอบความถูกต้องของระบบการทำงานตามสิทธิ์ผู้ใช้ทั้ง 4 ระดับและฟังก์ชันสำคัญทั้งหมด ขั้นตอนสุดท้ายคือการประเมินและปรับปรุงระบบอย่างต่อเนื่อง โครงสร้างและการทำงานของระบบได้แสดงไว้ในภาพที่ 1 และภาพที่ 2



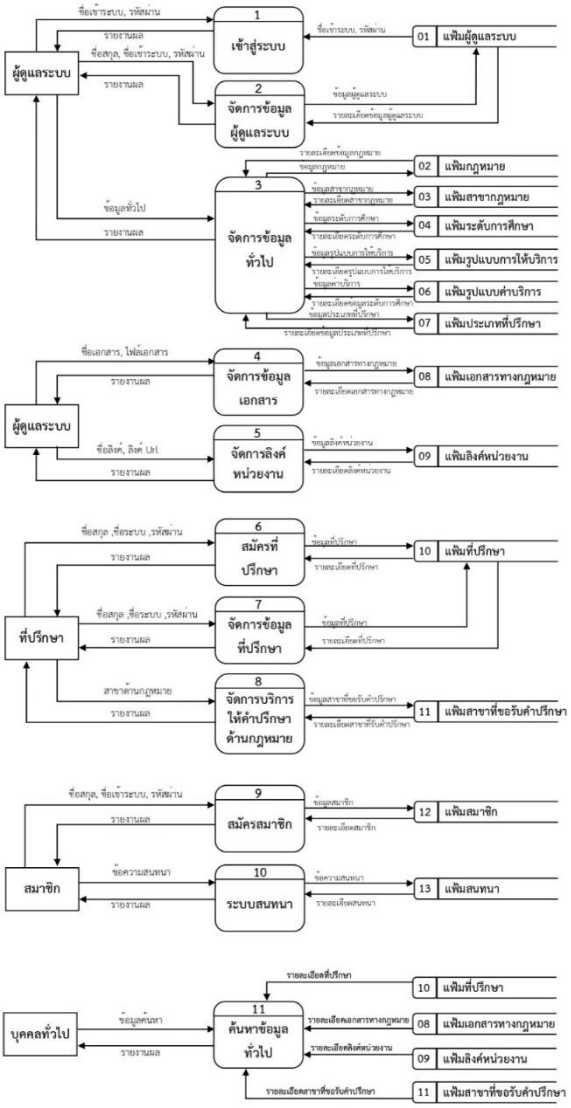
ภาพที่ 1 แผนภาพบริบท (Context Diagram) ของระบบที่ปรึกษากฎหมายด้านวิสาหกิจชุมชน
(ที่มา: เฉลิมเจษฎ์ สมานุหัตถ์, 2567)

1.1.5 การบำรุงรักษา (Maintenance) ภายหลังการติดตั้งและเริ่มใช้งานเว็บแอปพลิเคชันที่ปรึกษากฎหมายด้านวิสาหกิจชุมชน ผู้วิจัยได้ดำเนินการการบำรุงรักษาระบบใน 3 ส่วนดังนี้

1) การบำรุงรักษาระบบการจัดการสิทธิ์ผู้ใช้งานทั้ง 4 ระดับ โดยมีการตรวจสอบและปรับปรุงระบบการยืนยันตัวตน, การกำหนดสิทธิ์ และการเข้าถึงฟังก์ชันต่าง ๆ ให้มีความปลอดภัยและทำงานได้อย่างถูกต้อง รวมถึงการแก้ไขข้อบกพร่องของโปรแกรมที่อาจพบในแต่ละส่วนการทำงาน

2) การบำรุงรักษาฐานข้อมูลและเนื้อหา ครอบคลุมการปรับปรุงข้อมูลกฎหมาย, ข้อมูลที่ปรึกษา และเนื้อหาอื่น ๆ ให้มีความทันสมัย ถูกต้อง และสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของกฎหมายที่เกี่ยวข้องกับวิสาหกิจชุมชน รวมถึงการตรวจสอบความถูกต้องของการเชื่อมโยงข้อมูลกับหน่วยงานภายนอก

3) การบำรุงรักษาส่วนติดต่อผู้ใช้และฟังก์ชันการทำงาน โดยมีการติดตามและปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของระบบให้รองรับการใช้งานบนอุปกรณ์ที่หลากหลาย พร้อมทั้งพัฒนาและปรับปรุงฟังก์ชันการทำงานให้สอดคล้องกับความต้องการที่เปลี่ยนแปลงของผู้ใช้งาน โครงสร้างการทำงานดังแสดงในภาพที่ 1 และ 2



ภาพที่ 2 แผนภาพกระแสข้อมูล (DFD) ของระบบที่ปรึกษากฎหมายด้านวิสาหกิจชุมชน

(ที่มา: เฉลิมเจษฎ์ สมานุหัตถ์, 2567)

1.2 การสร้างแบบประเมินประสิทธิภาพเว็บแอปพลิเคชันที่ปรึกษากฎหมายด้านวิสาหกิจชุมชน

1.2.1 ศึกษาเอกสาร ตำรา งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับหลักการสร้างแบบประเมินประสิทธิภาพระบบสารสนเทศหรือโปรแกรมต่างๆ เพื่อเป็นแนวทางในการสร้างแบบประเมินประสิทธิภาพเว็บแอปพลิเคชันที่ปรึกษากฎหมายด้านวิสาหกิจชุมชน

1.2.2 กำหนดประเด็น เนื้อหา และขอบเขตที่จะทำการประเมินประสิทธิภาพเว็บแอปพลิเคชันตามวัตถุประสงค์ให้ครอบคลุมเนื้อหาที่ต้องการ

1.2.3 สร้างแบบประเมินประสิทธิภาพเว็บแอปพลิเคชันที่ปรึกษากฎหมายด้านวิสาหกิจชุมชนฉบับร่าง ด้วยวิธีการทดสอบระบบแบบกล่องดำ (Black Box Testing) (กฤษมันต์ วัฒนาณรงค์, 2550) ซึ่งผู้วิจัยได้กำหนดรายการประเมินประสิทธิภาพในด้านต่างๆ ไว้ แบ่งออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 ด้านความสามารถของโปรแกรม, ส่วนที่ 2 ด้านความถูกต้องและการทำงานของโปรแกรม , ส่วนที่ 3 ด้านความสะดวกและความง่ายต่อการใช้งาน และ ส่วนที่ 4 ด้านความปลอดภัยของระบบ โดยใช้เกณฑ์การประเมินประสิทธิภาพเว็บแอปพลิเคชันที่ปรึกษากฎหมายด้านวิสาหกิจชุมชน โดยใช้แบบมาตราส่วนประมาณค่า (Rating Scale) ของ Likert แบ่งเป็น 5 ระดับ

1.2.4 นำแบบประเมินประสิทธิภาพฉบับร่างเสนอต่อที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์พิจารณาความเหมาะสมของเชิงเนื้อหา สาระสำคัญ ประเด็นข้อคำถามในเรื่องที่ต้องการศึกษาและให้ข้อเสนอแนะเพื่อนำกลับมาปรับปรุงแก้ไข

1.2.5 ทำการทดสอบความเที่ยงตรง (Validity) ของเครื่องมือ โดยนำแบบประเมินประสิทธิภาพ ให้ผู้ทรงคุณวุฒิ จำนวน 5 ท่าน ตรวจสอบความสอดคล้องระหว่างเนื้อหากับสิ่งที่ต้องการศึกษา (Item Objective Congruence: IOC) ซึ่งผลการประเมินความเที่ยงตรง พบว่า ข้อคำถามมีค่าดัชนีความสอดคล้องรวมอยู่ที่ 0.97 ซึ่งถือว่าเป็นไปตามเกณฑ์ที่กล่าวไว้ว่าในมีค่าตั้งแต่ 0.5 ขึ้นไปเป็นข้อคำถามที่มีความสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการวิจัยสามารถนำไปใช้ได้ (สุรศักดิ์ อมรรัตนศักดิ์ และคณะ, 2557)

1.2.6 นำแบบประเมินประสิทธิภาพที่ปรับแก้แล้วเสนอต่อคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ ประจำมหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์ เพื่อขอรับการพิจารณาด้านจริยธรรมของการวิจัยในมนุษย์ และเมื่อคณะกรรมการฯ ให้การรับรองจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์เป็นที่เรียบร้อยแล้ว (เลขที่ HE 662056) ดำเนินการจัดทำแบบประเมินประสิทธิภาพเว็บแอปพลิเคชันฯ ฉบับสมบูรณ์ เพื่อนำไปใช้เก็บรวบรวมข้อมูลต่อไป

2. วิธีดำเนินการวิจัย

การทดสอบและประเมินประสิทธิภาพเว็บแอปพลิเคชันที่ปรึกษากฎหมายด้านวิสาหกิจชุมชน มีขั้นตอนการเก็บรวบรวมข้อมูลดังนี้

2.1 ผู้วิจัยดำเนินการติดต่อประสานงานผู้เชี่ยวชาญที่เกี่ยวข้องกับเว็บแอปพลิเคชันที่ปรึกษากฎหมายด้านวิสาหกิจชุมชน เพื่อขอความอนุเคราะห์ในการทดสอบ และประเมินประสิทธิภาพเว็บแอปพลิเคชันที่ปรึกษากฎหมายด้านวิสาหกิจชุมชน

2.2 ผู้วิจัยทำเรื่องขอออกหนังสือแต่งตั้งผู้เชี่ยวชาญ จากสำนักงานคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์ เพื่อใช้ในการเชิญเป็นผู้เชี่ยวชาญ ได้แก่ ผู้ที่มีความรู้ ประสบการณ์ทางด้านการพัฒนาระบบสารสนเทศ, ด้านการให้คำปรึกษาทางด้านกฎหมาย และด้านการประกอบการวิสาหกิจชุมชน ในการเป็นผู้เชี่ยวชาญทดสอบ และประเมินประสิทธิภาพเว็บแอปพลิเคชันที่ปรึกษากฎหมายด้านวิสาหกิจชุมชน

2.3 ผู้วิจัยนำหนังสือแต่งตั้งผู้เชี่ยวชาญในการทดสอบ และประเมินประสิทธิภาพเว็บแอปพลิเคชันที่ปรึกษากฎหมายด้านวิสาหกิจชุมชนเสนอต่อผู้เชี่ยวชาญ นัดวัน เวลา และสถานที่ในการทดสอบ และประเมินประสิทธิภาพเว็บแอปพลิเคชันที่ปรึกษากฎหมายด้านวิสาหกิจชุมชน

2.4 ชี้แจงสิทธิ์ให้กับผู้เชี่ยวชาญ โดยผู้เชี่ยวชาญมีสิทธิที่จะไม่ตอบคำถามและสามารถถอนตัวจากการวิจัยได้ทุกเมื่อโดยไม่จำเป็นต้องแจ้งล่วงหน้า และการตัดสินใจดังกล่าวจะไม่ส่งผลกระทบใด ๆ ต่อผู้เชี่ยวชาญ ในด้านการจัดการข้อมูล จะมีการเข้ารหัสเพื่อปกปิดข้อมูล และข้อมูลทั้งหมดจะถูกเก็บรักษาในที่ปลอดภัย โดยไม่มีการเปิดเผยข้อมูลรายบุคคลต่อสาธารณะ ทั้งนี้ข้อมูลจะถูกจัดเก็บในรูปแบบที่ไม่สามารถระบุตัวตนหรือเชื่อมโยงถึงผู้เชี่ยวชาญได้ และจะถูกทำลายทั้งหมดภายหลังการวิจัยและการตรวจสอบเสร็จสิ้น

2.5 ผู้วิจัยดำเนินการอธิบาย แนะนำเว็บแอปพลิเคชันที่ปรึกษากฎหมายด้านวิสาหกิจชุมชนและอธิบายวิธีการออกแบบ, การพัฒนา และวิธีการใช้งาน

2.6 ผู้เชี่ยวชาญทำการทดสอบและประเมินประสิทธิภาพเว็บแอปพลิเคชันที่ปรึกษากฎหมายด้านวิสาหกิจชุมชน

2.7 ผู้วิจัยนำผลที่ได้จากการทดสอบและประเมินประสิทธิภาพเว็บแอปพลิเคชันที่ปรึกษากฎหมายด้านวิสาหกิจชุมชนมาทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

3. สถิติที่ใช้ในการวิจัย

การวิจัยนี้ใช้สถิติในการวิเคราะห์ข้อมูลสองประเภทหลัก ได้แก่ ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ธานินทร์ ศิลป์จารุ, 2549) โดยค่าเฉลี่ยใช้ในการวัดแนวโน้มเข้าสู่ส่วนกลางของระดับประสิทธิภาพในแต่ละด้านของเว็บแอปพลิเคชัน มีเกณฑ์การประเมิน 5 ระดับ ตามแนวคิดของ Likert ได้ดังนี้ ระดับคะแนน 5 = มากที่สุด, 4 = มาก, 3 = ปานกลาง, 2 = พอใช้, 1 = ควรปรับปรุง และ ระดับคะแนนเฉลี่ย (Mean) อยู่

ระหว่าง 4.51 – 5.00 = มากที่สุด, คะแนน 3.51 – 4.50 = มาก, คะแนน 2.51 – 3.50 = ปานกลาง, คะแนน 1.51 – 2.50 = พอใช้ และ คะแนน 0.00 – 1.50 ควรปรับปรุง ส่วนค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานใช้วัดการกระจายของข้อมูลจากค่าเฉลี่ย ซึ่งแสดงให้เห็นความสอดคล้องของการประเมินจากผู้เชี่ยวชาญ

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ผลการวิจัย

1. ผลการพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันที่ปรึกษากฎหมายด้านวิสาหกิจชุมชน ได้ผลลัพธ์เป็นระบบซอฟต์แวร์ที่มีประสิทธิภาพ สามารถเข้าถึงได้ผ่านเว็บเบราว์เซอร์ โดยไม่จำเป็นต้องติดตั้งโปรแกรมเพิ่มเติมบนอุปกรณ์ของผู้ใช้งาน ระบบรองรับการใช้งานบนอุปกรณ์ที่หลากหลาย ทั้งคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล อุปกรณ์พกพา และอุปกรณ์ต่อพ่วงต่าง ๆ ซึ่งช่วยเพิ่มความสะดวกและความรวดเร็วในการเข้าถึงข้อมูล เนื้อหาของระบบมุ่งเน้นการให้ความรู้ด้านกฎหมายที่เกี่ยวข้องกับวิสาหกิจชุมชน การส่งเสริมการปฏิบัติตามกฎหมาย และการให้คำปรึกษาด้านกฎหมายแก่ผู้ประกอบการวิสาหกิจชุมชน ระบบได้ออกแบบการจัดการสิทธิ์ผู้ใช้งานแบ่งออกเป็น 4 ระดับ ประกอบด้วย บุคคลทั่วไปที่สามารถเข้าถึงข้อมูลพื้นฐาน สมาชิกที่ได้รับสิทธิ์เพิ่มเติมในการใช้งานระบบที่ปรึกษาที่มีบทบาทในการให้คำแนะนำทางกฎหมาย และผู้ดูแลระบบที่มีสิทธิ์ในการบริหารจัดการระบบโดยรวม ลักษณะการใช้งานและส่วนต่อประสานผู้ใช้ของระบบได้แสดงตัวอย่างไว้ในภาพที่ 3

2. ผลการทดสอบและประเมินประสิทธิภาพเว็บแอปพลิเคชันที่ปรึกษากฎหมายด้านวิสาหกิจชุมชน

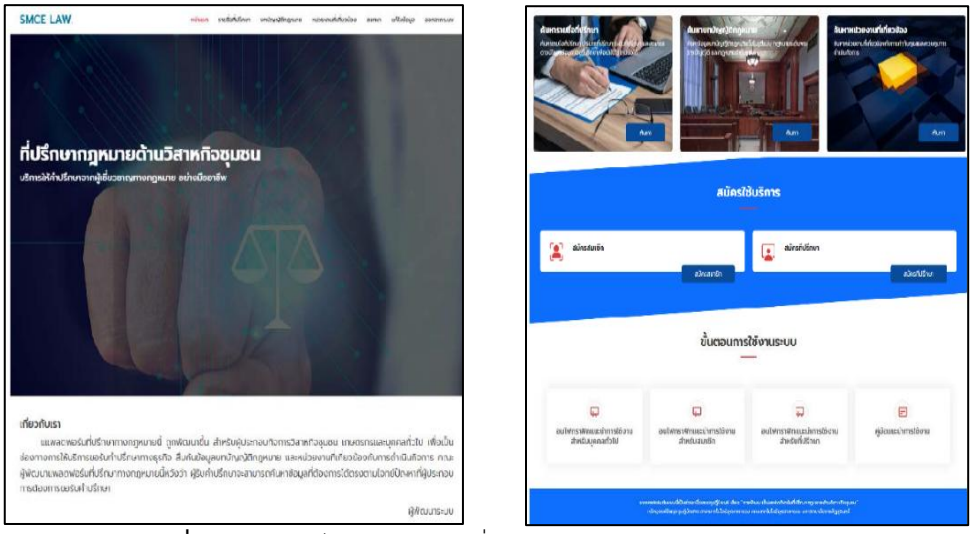
ตารางที่ 1 สรุปผลการทดสอบและประเมินประสิทธิภาพเว็บแอปพลิเคชันฯ

ด้านที่	รายการประเมิน	ค่าเฉลี่ย ($\overline{X}$)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.)	ระดับคุณภาพ
1	ด้านความสามารถของโปรแกรม	4.51	0.44	มากที่สุด
2	ด้านความถูกต้องและการทำงานของโปรแกรม	4.74	0.43	มากที่สุด
3	ด้านความสะดวกและความง่ายต่อการใช้งาน	4.67	0.44	มากที่สุด
4	ด้านความปลอดภัยของระบบ	4.52	0.45	มากที่สุด
	เฉลี่ย	**4.62**	**0.44**	**มากที่สุด**

จากตารางที่ 1 สรุปผลการทดสอบและประเมินประสิทธิภาพเว็บแอปพลิเคชันที่ปรึกษากฎหมายด้านวิสาหกิจชุมชนในภาพรวมพบว่า อยู่ในระดับที่มากที่สุด ($\overline{X}$ = 4.62, S.D. = 0.44) ระบบที่พัฒนาขึ้นมีส่วนต่อประสานผู้ใช้ที่เป็นมิตรและใช้งานง่าย ดังแสดงในภาพที่ 3 ซึ่งแสดงตัวอย่างหน้าจอการใช้งานหลักของระบบ

เมื่อพิจารณาเป็นรายด้านพบว่า มีระดับคุณภาพที่มากที่สุด ได้แก่ ด้านความถูกต้องและการทำงานของโปรแกรม ($\overline{X}$ = 4.74, S.D. = 0.43) รองลงมาได้แก่ ด้านความสะดวกและความง่ายต่อการใช้งาน

($\overline{X}$ = 4.67, S.D. = 0.44) ด้านความปลอดภัยของระบบ ($\overline{X}$ = 4.52, S.D. = 0.45) และด้านความสามารถของโปรแกรม ($\overline{X}$ = 4.51, S.D. = 0.44) ตามลำดับ



ภาพที่ 3 ตัวอย่างเว็บแอปพลิเคชันที่ปรึกษากฎหมายด้านวิสาหกิจชุมชน

อภิปรายผล

1. การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันที่ปรึกษากฎหมายด้านวิสาหกิจชุมชนได้ดำเนินการตามแนวคิดวงจรการพัฒนาระบบ (System Development Life Cycle: SDLC) ของโอภาส เอี่ยมสิริวงศ์ (2560) ซึ่งเป็นแนวทางที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในการพัฒนาระบบสารสนเทศ โดยระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถเข้าถึงได้ผ่านเว็บเบราว์เซอร์บนอุปกรณ์ที่หลากหลาย และมีระบบจัดการสิทธิ์ผู้ใช้ 4 ระดับ ประกอบด้วย บุคคลทั่วไป, สมาชิก, ที่ปรึกษากฎหมาย และผู้ดูแลระบบ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของภูมิสถิตย์ เมตตาจิตร และคณะ (2565) ที่ได้พัฒนาระบบสารสนเทศเพื่อสนับสนุนการประเมินผลการปฏิบัติงานโดยใช้แนวคิด SDLC และได้ผลลัพธ์เป็นที่น่าพอใจ นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของกัลยา ใจรักษ์ (2559), ปิยะวัน เพชรหมี (2566) และอมีนา ฉายสุวรรณ และชุมพล จันทร์ฉลอง (2566) ที่ประสบความสำเร็จในการพัฒนาระบบโดยใช้แนวคิด SDLC เช่นกัน

2. ผลการทดสอบและประเมินประสิทธิภาพของระบบโดยผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 5 ท่าน พบว่า ระบบมีประสิทธิภาพ ในระดับมากที่สุด (ค่าเฉลี่ย 4.62) โดยด้านที่มีค่าเฉลี่ยสูงสุดคือ ด้านความถูกต้องและการทำงานของโปรแกรม (ค่าเฉลี่ย 4.74) รองลงมาคือ ด้านความสะดวกและความง่ายต่อการใช้งาน (ค่าเฉลี่ย 4.67) ด้านความปลอดภัยของระบบ (ค่าเฉลี่ย 4.52) และด้านความสามารถของโปรแกรม (ค่าเฉลี่ย 4.51) ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของเอกรินทร์ วาโย (2566), ธีรภพ แสงศรี (2565) และพัชราภรณ์ หงษ์สิบสอง (2565)

ที่พัฒนาระบบสารสนเทศเพื่อสนับสนุนงานวิสาหกิจชุมชนและชุมชนในบริบทที่แตกต่างกัน และได้รับผลการประเมินประสิทธิภาพ ในระดับดีมากที่สุดเช่นเดียวกัน

การที่ผู้เชี่ยวชาญให้ความคิดเห็นว่าระบบมีประสิทธิภาพด้านความถูกต้องและการทำงานของโปรแกรมสูงที่สุด (ค่าเฉลี่ย 4.74) อาจเนื่องมาจากการพัฒนาระบบได้มีการทดสอบความถูกต้องของการทำงานอย่างละเอียดในทุกขั้นตอน มีการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลทางกฎหมาย โดยผู้เชี่ยวชาญด้านกฎหมายโดยเฉพาะ และมีการทดสอบการทำงานของระบบซ้ำหลายครั้งก่อนนำไปให้ผู้เชี่ยวชาญประเมิน ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางการพัฒนาระบบตามหลัก SDLC ที่ให้ความสำคัญกับการทดสอบและตรวจสอบคุณภาพของระบบก่อนนำไปใช้งานจริง ในขณะเดียวกัน ด้านความสามารถของโปรแกรม (ค่าเฉลี่ย 4.51) และด้านความปลอดภัยของระบบ (ค่าเฉลี่ย 4.52) ได้ค่าประสิทธิภาพน้อยเมื่อเทียบกับด้านอื่นๆ อาจมีสาเหตุมาจากหลายปัจจัย ด้านความสามารถของโปรแกรมที่ได้คะแนนน้อยที่สุดอาจเป็นเพราะยังมีฟังก์ชันการทำงานบางอย่างที่ผู้เชี่ยวชาญเห็นว่าควรเพิ่มเติม เช่น ระบบการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงลึก การปรับแต่งส่วนต่อประสานผู้ใช้ให้เหมาะสมกับความต้องการเฉพาะบุคคล หรือความสามารถในการเชื่อมต่อกับระบบอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง สำหรับด้านความปลอดภัยของระบบที่ได้คะแนนค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับด้านความถูกต้องและการทำงานของโปรแกรม อาจเนื่องมาจากการที่ระบบนี้เป็นเว็บแอปพลิเคชันที่ต้องเผชิญกับความเสี่ยงด้านความปลอดภัยทางไซเบอร์ที่มีความซับซ้อนและเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา โดยเฉพาะในประเด็นการจัดการข้อมูลทางกฎหมายที่มีความอ่อนไหวและต้องการการปกป้องในระดับสูง ผู้เชี่ยวชาญอาจพิจารณาว่าระบบยังต้องมีการปรับปรุงในส่วนของการเข้ารหัสข้อมูล การตรวจสอบสิทธิ์ หรือระบบป้องกันการโจมตีทางไซเบอร์รูปแบบต่าง ๆ ให้แข็งแกร่งยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตาม แม้ว่าด้านความสามารถของโปรแกรมและด้านความปลอดภัยของระบบจะได้ค่าประสิทธิภาพน้อยเมื่อเทียบกับด้านอื่น ๆ แต่ยังอยู่ในระดับมากที่สุด (ค่าเฉลี่ยสูงกว่า 4.50) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพโดยรวมสูง และสามารถตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้ได้เป็นอย่างดี เป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการวิจัยที่ต้องการพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันที่ปรึกษากฎหมาย ด้านวิสาหกิจชุมชนที่มีประสิทธิภาพ สามารถใช้งานได้จริง และช่วยแก้ปัญหาการเข้าถึงบริการให้คำปรึกษา ด้านกฎหมายของวิสาหกิจชุมชน

สรุป

การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันที่ปรึกษากฎหมายด้านวิสาหกิจชุมชนได้ดำเนินงานตามบรรลุวัตถุประสงค์ทั้งสองประการ โดยในด้านการพัฒนาเว็บแอปพลิเคชัน ได้ดำเนินการตามแนวคิดวงจรการพัฒนาระบบ (SDLC) อย่างเป็นระบบ เพื่อสร้างเครื่องมือที่เข้าถึงได้ง่ายผ่านเว็บเบราว์เซอร์ โดยไม่จำเป็นต้องติดตั้งซอฟต์แวร์เพิ่มเติม ทำให้ผู้ใช้สามารถเข้าถึงได้จากอุปกรณ์ที่หลากหลาย ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถให้ความรู้และคำปรึกษาทางกฎหมายที่เกี่ยวข้องกับวิสาหกิจชุมชนได้อย่างมีประสิทธิภาพ เป็นประโยชน์โดยเฉพาะสำหรับวิสาหกิจชุมชนในพื้นที่ห่างไกล ช่วยให้ผู้ประกอบการสามารถเข้าถึงข้อมูลและคำปรึกษาด้านกฎหมายได้อย่างสะดวกและประหยัด ในส่วนของการทดสอบและประเมินประสิทธิภาพ ได้ใช้วิธีการทดสอบแบบกล่องดำ โดยผู้เชี่ยวชาญจำนวน 5 คน ครอบคลุมการประเมินใน 4 ด้าน ผลการประเมินในภาพรวมอยู่ในระดับมากที่สุด เมื่อพิจารณารายด้านพบว่าทุกด้านอยู่ในระดับมากที่สุด โดยด้านความถูกต้องและการทำงานของโปรแกรมได้คะแนนสูงสุด รองลงมาคือด้านความสะดวกและความง่ายต่อการใช้งาน ด้านความปลอดภัยของระบบ และด้านความสามารถของโปรแกรม ตามลำดับ

ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะจากผลการวิจัย

วิสาหกิจชุมชนควรนำระบบนี้มาใช้เป็นเครื่องมือช่วยในการรวบรวมและเข้าถึงข้อมูลด้านกฎหมายที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินงาน แม้ว่าปัจจุบันระบบจะทำหน้าที่หลักในการนำเสนอข้อมูลและจัดการฐานข้อมูลเท่านั้น แต่ข้อมูลเหล่านี้มีความสำคัญต่อการทำความเข้าใจเบื้องต้นเกี่ยวกับประเด็นทางกฎหมายที่เกี่ยวข้อง ในอนาคตควรมีการพัฒนาระบบให้สามารถสนับสนุนกระบวนการตัดสินใจในการเลือกที่ปรึกษากฎหมายได้อย่างเป็นรูปธรรม โดยเพิ่มการประเมินความต้องการทางกฎหมายของวิสาหกิจชุมชน และจับคู่กับที่ปรึกษากฎหมายที่มีความเชี่ยวชาญตรงกับความต้องการนั้น นอกจากนี้ หน่วยงานภาครัฐและเอกชนสามารถใช้เว็บแอปพลิเคชันนี้เป็นต้นแบบในการพัฒนาระบบให้คำปรึกษาทางกฎหมายในด้านอื่น ๆ เช่น กฎหมายแรงงาน กฎหมายภาษี หรือกฎหมายทรัพย์สินทางปัญญา เพื่อขยายการให้บริการที่ปรึกษากฎหมายในวงกว้าง

ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป

ควรมุ่งเน้นการพัฒนาระบบให้สามารถสนับสนุนกระบวนการตัดสินใจอย่างแท้จริง โดยเพิ่มเติมฟังก์ชันการวิเคราะห์ความต้องการทางกฎหมายของวิสาหกิจชุมชนและการเปรียบเทียบคุณสมบัติของที่ปรึกษากฎหมายที่เหมาะสมกับความต้องการนั้น ๆ นอกจากนี้ ควรพัฒนาระบบปัญญาประดิษฐ์ (AI) เพื่อช่วยในการ คัดกรองคำถามและให้คำแนะนำเบื้องต้น ซึ่งจะช่วยลดภาระของที่ปรึกษากฎหมายและเพิ่มความรวดเร็วในการให้บริการ รวมถึงสามารถวิเคราะห์รูปแบบของปัญหาทางกฎหมายที่วิสาหกิจชุมชนมักประสบ เพื่อพัฒนาระบบการให้คำแนะนำเชิงป้องกันในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ได้กรุณาตรวจสอบเครื่องมือวิจัย และคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์ ที่ให้การรับรองโครงการวิจัยนี้ และขอขอบคุณผู้เชี่ยวชาญที่เป็นตัวแทนสมาชิกวิสาหกิจชุมชน, ผู้เชี่ยวชาญด้านกฎหมาย และผู้เชี่ยวชาญด้านสารสนเทศ ที่สละเวลาอันมีค่า ในการทดสอบและประเมินประสิทธิภาพของเว็บแอปพลิเคชันฯ รวมถึงให้ข้อเสนอแนะที่มีคุณค่าอย่างยิ่งต่อการปรับปรุง และพัฒนางานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

กรมส่งเสริมการเกษตร. (2565). **ความก้าวหน้าของการจดทะเบียนวิสาหกิจชุมชนและเครื่อข่าวิสาหกิจชุมชน (ไตรมาส 2/2565)**. สืบค้นจาก https://www.dla.go.th/upload/document/type2/2022/5/27408_1_1653533641109.pdf

กฤษมันต์ วัฒนาณรงค์. (2550). **เอกสารประกอบคำบรรยายให้กับนักศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีสารสนเทศการเกษตรและพัฒนาชนบท**. อุบลราชธานี: คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.

กัลยา ใจ รักษ์. 2016). การพัฒนาระบบแนะนำเพื่อช่วยวางแผนการท่องเที่ยวเชิงอนุรักษ์ กรณีศึกษาบ้านแม่กำปอง อำเภอแม่ออน จังหวัดเชียงใหม่. **วารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์,** 11(2), 13-24.

เฉลิมเจษฎ์ สมานุหัตถ์. (2567). **เว็บแอปพลิเคชันที่ปรึกษากฎหมายด้านวิสาหกิจชุมชน**. วิทยานิพนธ์หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์.

เฉลิมเจษฎ์ สมานุหัตถ์, นิคม ลนขุนทด, เที่ยงธรรม สิทธิจันทเสน, และอัษฎา วรรณกายนต์. (2567). ปัญหากฎหมายด้านวิสาหกิจชุมชน และความต้องการระบบสารสนเทศที่ปรึกษากฎหมายด้านวิสาหกิจชุมชน. **วารสารสังคมศาสตร์และวัฒนธรรม**, 8(3), 189-202.

ทศพร แก้วขวัญไกร. (2560). ทางรอดวิกฤติเศรษฐกิจด้วยแนวทางวิสาหกิจชุมชน. **วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์**, 9(2), 33-50.

ธงพล พรหมสาขา ณ สกลนคร และอุทิศ สังขรัตน์. (2556). **รายงานการวิจัยเรื่อง แนวทางการพัฒนาการดำเนินงานของวิสาหกิจชุมชนในเขตลุ่มทะเลสาบสงขลา**. คณะศิลปะศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ธานินทร์ ศิลป์จารุ. (2549). **การวิจัยและวิเคราะห์ทางสถิติด้วย SPSS**. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ: วี.อินเตอร์ พริ้นท์.

ธันยมัย เจียรกุล. (2557). ปัญหาและแนวทางการปรับตัวของ OTOP เพื่อพร้อมรับการเปิด AEC. The Problems and the Adaptationof OTOP to AEC. **วารสารนักบริหาร**. 34(1), 177-191.

ธีรภพ แสงศรี. (2565). การพัฒนาระบบตลาดกลางอิเล็กทรอนิกส์สำหรับเกษตรกร สำนักวิจัยและพัฒนาการเกษตรเขตที่ 1 จังหวัดเชียงใหม่. **วารสารวิชาการการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสารสนเทศ**, 8(2), 81-91.

ณัฏฐพงษ์ สายพิณ. (2560). บทบาทของการสื่อสารอินโฟกราฟิกต่อสังคมไทย. **วารสารนิเทศศาสตร์ธุรกิจบัณฑิตย์**, 11(2), 145-179.

ปิยะวัน เพชรหมี. (2566). การพัฒนาช่องทางการให้คำปรึกษาทางการแพทย์สำหรับผู้สูงอายุ. **วารสารการบริหารนิติบุคคลและนวัตกรรมท้องถิ่น**, 9(7),438-446.

ภคพล เหมสุลักษณ์ , ไพโรจน์ เสียงเอก, ประวัติ สุวรรณะดิษฐกุล, และวิภาวรรณ บัวทอง. (2566). **การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันสำหรับสินค้าเกษตรชุมชน กรณีศึกษา กลุ่มวิสาหกิจชุมชนในอำเภอสรรคบุรี จังหวัดชัยนาท.** การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 15 มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม, 13-14 กรกฎาคม 2566. นครปฐม : มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม.

ภคมน โภคะธีรกุล. (2562). แนวทางการพัฒนาวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อมของผลิตภัณฑ์อาหารแปรรูป. **วารสารวิชาการการจัดการภาครัฐและเอกชน**, 1(2), 116-125.

ภรัณยา ปาลวิสุทธิ์ และคณะ. (2568). การพัฒนาแอปพลิเคชันสุขภาพผู้สูงอายุในท้องถิ่นด้วยเทคโนโลยีดิจิทัล. **วารสารแม่โจ้เทคโนโลยีสารสนเทศและนวัตกรรม**, 11(1), 86-105.

ภูมิสถิตย์ เมตตาจิตร, ไพโรจน์ เสียงเอก, ประวัติ สุวรรณะดิษฐกุล, และวิภาวรรณ บัวทอง. (2565). **การพัฒนาระบบสารสนเทศ เพื่อสนับสนุนการประเมินผลการปฏิบัติงานของบุคลากรสายวิชาการมหาวิทยาลัยราชภัฏภูเก็ต**. การประชุมวิชาการนำเสนอผลงานวิจัยระดับชาติและนานาชาติ ครั้งที่ 15 “Global Goals, Local Actions: Looking Back and Moving Forward 2022”, 21 มีนาคม พ.ศ. 2565. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา.

เยาวลักษณ์ งามแสนโรจน์, ชัยวุฒิ โกเมศ, พิกุล แสงงาม, ธัญลักษณ์ งามขำ, และชนันกาญจน์ สุวรรณเรือง. (2567). การพัฒนาแอปพลิเคชันเพื่อจัดการข้อมูลชุมชน กรณีศึกษา ตำบลนาครัว อำเภอแม่ทะ จังหวัดลำปาง. **วารสารวิชาการการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสารสนเทศ**, 10(1), 125-143.

รัญชิดา เกียรติกนก และเจษฎา วงศ์แสนสุขเจริญ. (2564). การยอมรับและการใช้เทคโนโลยีและคุณภาพเว็บไซต์ที่มีผลต่อการตัดสินใจสั่งซื้อสินค้าผ่านระบบ e-Commerce สำหรับธุรกิจแบบ B2B. **วารสารการจัดการธุรกิจ มหาวิทยาลัยบูรพา**, 10(2), 91-105.

วชิรา ไฝเจริญมงคล, และจิราพร เชียงชะนา. (2565). **รายงานวิจัยเรื่อง การศึกษาปัจจัยแวดล้อมที่สนับสนุนการพัฒนาของวิสาหกิจชุมชน**. กองส่งเสริมวิสาหกิจชุมชน กรมส่งเสริมการเกษตร.

พัชราภรณ์ หงษ์สิบสอง. (2565). ระบบสารสนเทศเพื่อการจัดการข้อมูลวิสาหกิจชุมชนกลุ่มผ้าทอ จังหวัดน่าน. **Journal of Information and Learning,** 33(2), 98-107.

ฟ้า วิไลขำ, และนงพงา สุขโอสถ. (2566). การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันประชาสัมพันธ์เส้นทางการท่องเที่ยวในชุมชนราวต้นจันทน์และชุมชนบ้านวังหาด จังหวัดสุโขทัย. **วารสาร Journal of Information and Learning,** 34(2), 99-107.

สำนักงานส่งเสริมวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม. (2566). **รายงานสถานการณ์ MSME ปี 2565.** สืบค้นจาก https://www.sme.go.th/knowledge/รายงานสถานการณ์MSMEรายเดือน

สุรศักดิ์ อมรรัตนศักดิ์, บุญมี พันธุ์ไทย, และสมจิตรา เรื่องศรี. (2557). **ระเบียบวิจัยทางการศึกษา**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: ศูนย์ส่งเสริมวิชาการ.

อมีนา ฉายสุวรรณ, และชุมพล จันทร์ฉลอง. (2566). การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันพจนานุกรมคำศัพท์คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ. **วารสารวิจัยและพัฒนา วไลยอลงกรณ์ในพระบรมราชูปถัมภ์ สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**, 18(2), 29-44.

เอกรินทร์ วาโย. (2566). การพัฒนาระบบสารสนเทศเพื่อสนับสนุนงานวิสาหกิจชุมชน. **วารสารวิชาการการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสารสนเทศ**, 9(1), 42-59.

โอภาส เอี่ยมสิริวงศ์. (2560). **การวิเคราะห์และออกแบบระบบ**. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดยูเคชัน.

เส้นตอบสนองต่อแสงของกัญชง 4 สายพันธุ์ ในระยะการเจริญเติบโตทางลำต้น

วินัย อุดขาว[1] วสันต์ ปานนิ่ม[2] ศัลยพงศ์ ขันทองดี[3] โกศล นันทิลีพงศ์[4] เกรียงไกร สุวรรณสนธิ์[5]
วีรศิลป์ สอนจรูญ[6*]

Received : May 30, 2024
Revised : July 25, 2025
Accepted : August 27, 2025

บทคัดย่อ

พลังงานแสงเป็นแรงขับเคลื่อนที่สำคัญของกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช งานทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินระดับความต้องการแสงที่ทำให้กัญชงมีอัตราสังเคราะห์แสงสูงสุด โดยศึกษากระบวนการสังเคราะห์แสงของกัญชง 4 สายพันธุ์ ได้แก่ Auto Blues (Sandy), Sour RNA Seedless, Early Remedy และ Sour Suver Haze Seedless ในระยะการเจริญเติบโตทางลำต้น ภายใต้ความเข้มแสง (PPF) แตกต่างกัน 13 ระดับ ในช่วง 0–2000 μmolPPF m^{-2} s^{-1} ผลการศึกษาพบว่าอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิ (A) ของกัญชงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามระดับ PPF ที่เพิ่มขึ้นในช่วง 0–1000 μmolPPF m^{-2} s^{-1} แล้วเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลงเมื่อระดับความเข้มแสงสูงขึ้น โดยอัตราสังเคราะห์แสงสูงสุด (A_{max}) ของกัญชงทั้ง 4 สายพันธุ์ มีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 36.8–44.2 μmolCO_2 m^{-2} s^{-1} กัญชงทั้ง 4 สายพันธุ์ มีระดับความเข้มแสงอิ่มตัว (I_s) ซึ่งเป็นระดับความเข้มแสงที่ทำให้ค่า A เพิ่มขึ้นสูงสุด อยู่ในช่วง 916.9–1030.2 μmolPPF m^{-2} s^{-1} และมีค่าจุดชดเชยแสง (I_c) อยู่ในช่วง 77.0–99.0 μmolPPF m^{-2} s^{-1} โดยกัญชงทั้ง 4 สายพันธุ์ มีค่าอัตราหายใจเชิงแสงสูงสุด ($R_{l\ max}$) อยู่ในช่วง 7.9–11.6 μmolCO_2 m^{-2} s^{-1} ซึ่งข้อมูลความต้องการแสงที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้สามารถใช้สำหรับการจัดการแสงในการปลูกกัญชงต่อไปได้

คำสำคัญ: การสังเคราะห์แสง การหายใจเชิงแสง จุดชดเชยแสง ระดับความเข้มแสงอิ่มตัว

[1] อาจารย์ ศูนย์เทคโนโลยีชีวภาพเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน อีเมล: winai.ut@ku.th
[2] ผู้ช่วยนักวิจัย ศูนย์เทคโนโลยีชีวภาพเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน อีเมล: wason.pa@ku.th
[3] ผู้ช่วยนักวิจัย ศูนย์เทคโนโลยีชีวภาพเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน อีเมล: sanyapongkh@hotmail.com
[4] นักวิจัย บริษัท ซีพีไอ อะโกรเทค จำกัด อีเมล: kosol@cpi-th.com
[5] นักวิจัย บริษัท ซีพีไอ อะโกรเทค จำกัด อีเมล: ks409114@cpi-th.com
[6] อาจารย์ ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ อีเมล: weerasin.s@ku.th
** ผู้นิพนธ์หลัก อีเมล: weerasin.s@ku.th*

PHOTOSYNTHETIC-LIGHT RESPONSE CURVE OF FOUR HEMP (*Cannabis sativa* L.) VARIETIES AT VEGETATIVE STAGE

Winai Utkhao[1] Wason Pannim[2] Sanyapong Khantongdee[3] Kosol Nuntileepong[4] Kriangkri Suwannason[5] Weerasin Sonjaroon[6*]

Abstract

Light energy is an important driving force of photosynthesis in plants. The objective of the current experiment was to determine the light requirement for maximal photosynthesis in hemp (*Cannabis sativa* L.). Researchers examined the response of photosynthesis under thirteen different levels of light intensity (PPF) from 0–2000 μmolPPF m^{-2} s^{-1} of four hemp varieties including Auto Blues (Sandy), Sour RNA Seedless, Early Remedy, and *Sour Suver Haze Seedless] at vegetative stage. The result showed that net photosynthetic rate (A) rapidly increased in response to increasing PPF range of* 0–1000 μmolPPF m^{-2} s^{-1}, then slightly increased based on increasing PPF. *The m*aximum gross photosynthetic rates (A_{max}) among four hemp varieties were in the range of 36.8–44.2 μmolCO_2 m^{-2} s^{-1}. The light saturation points (I_s) where the A reached their maximum ranged between 916.9–1030.2 μmolPPF m^{-2} s^{-1} and the light compensation points (I_c) ranged between 77.0–99.0 μmolPPF m^{-2} s^{-1}. The maximum photorespiration rates ($R_{l\ max}$) were in the range of 7.9–11.6 μmolCO_2 m^{-2} s^{-1}. The light requirement data from this study could be used for light management in hemp cultivation.

Keywords: Photosynthesis, Photorespiration, Light compensation point, Light saturation point

---

[1] *Lecturer, Center for Agricultural Biotechnology, Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus, e-mail: winai.ut@ku.th*

[2] *Assistant researcher, Center for Agricultural Biotechnology, Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus, e-mail: wason.pa@ku.th*

[3] *Assistant researcher, Center for Agricultural Biotechnology, Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus, e-mail: sanyapongkh@hotmail.com*

[4] *Researcher, CPI Agrotech Company Limited, e-mail: kosol@cpi-th.com*

[5] *Researcher, CPI Agrotech Company Limited, e-mail: ks409114@cpi-th.com*

[6] *Lecturer, Department of horticulture, Faculty of Agriculture, Kasetsart University, e-mail: weerasin.s@ku.th*

** Corresponding author, e-mail: weerasin.s@ku.th*

บทนำ

กัญชง (*Cannabis sativa* L.) เป็นพืชที่สามารถนำส่วนต่างๆ ของต้น เช่น น้ำมันจากเมล็ด เส้นใยจากลำต้น และสารสำคัญจากช่อดอก มาใช้ประโยชน์ในทางการแพทย์ อุตสาหกรรมอาหาร เครื่องสำอาง และวัสดุศาสตร์ (Oomah et al., 2002; Bertoli et al., 2010; Sangkanu et al., 2023) ซึ่งปัจจุบันได้มีการปลูกกัญชงเชิงพาณิชย์ในหลายรูปแบบในประเทศไทย ทั้งสภาพแปลงปลูกกลางแจ้ง การปลูกในโรงเรือน และการปลูกในโรงงานผลิตพืช (plant factory) โดยปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อระดับผลผลิตและคุณภาพของกัญชงที่ปลูกได้ คือ สภาพอากาศที่ต้นกัญชงสัมผัส ซึ่งข้อมูลความต้องการสภาพอากาศ (climatic requirement) เพื่อใช้สำหรับจัดการปัจจัยการผลิตโดยเฉพาะการปลูกในเขตร้อนชื้น เพื่อให้เอื้อต่อการเติบโตและการสร้างผลผลิตของกัญชงยังมีการศึกษากันไม่มากนัก (Sengloung et al., 2009) ซึ่งแสงเป็นปัจจัยสภาพอากาศที่เป็นแรงขับเคลื่อนกระบวนการสังเคราะห์แสง การพัฒนา การเติบโต และการสร้างผลผลิตของพืชที่สำคัญปัจจัยหนึ่ง (Toledo-Ortiz et al., 2014) โดยการศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับแสงในกัญชงส่วนใหญ่มุ่งเน้นศึกษาเกี่ยวกับคุณภาพของแสง (light quality) และช่วงเวลาในการให้แสง (light duration) ซึ่งเป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยา การเติบโต การออกดอก และการสร้างผลผลิตของต้นกัญชง (Islam et al., 2021; Cheng et al., 2022; Gajdošik et al., 2022) แต่ข้อมูลอิทธิพลของความเข้มแสง (light intensity) ที่เป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลโดยตรงต่อกระบวนการสังเคราะห์แสงของต้นกัญชงยังมีอยู่อย่างจำกัด นอกจากนี้พารามิเตอร์ของกระบวนการสังเคราะห์แสงยังสัมพันธ์โดยตรงกับการเติบโตและการสร้างผลผลิตของพืช จึงสามารถใช้เป็นฐานข้อมูลสำหรับการคัดเลือกและปรับปรุงพันธุ์ได้ (Keller et al., 2024; Nowak et al., 2024) วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาอิทธิพลของความเข้มแสงต่ออัตราสังเคราะห์แสง ประสิทธิภาพการใช้แสง อัตราหายใจเชิงแสง และประเมินระดับความต้องการแสง (light requirement) ของกัญชง 4 สายพันธุ์ คือ พันธุ์ Auto Blues (Sandy) พันธุ์ Sour RNA Seedless พันธุ์ Early Remedy และพันธุ์ Sour Suver Haze Seedless ซึ่งเป็นพันธุ์ที่มีศักยภาพสูงสำหรับการผลิตในพื้นที่ภาคใต้ตอนบนของไทย จากการรวบรวมและทดสอบการปลูกทั้งในสภาพแปลง สภาพโรงเรือน และภายในโรงงานผลิตพืชของบริษัท ซีพีไอ อะโกรเทค จำกัด โดยข้อมูลที่ได้จากการทดลองในครั้งนี้สามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนารูปแบบและเทคนิคเชิงปฏิบัติการในการจัดการแสงให้ตรงตามความต้องการของกัญชง เพื่อเพิ่มศักยภาพการสังเคราะห์แสงและยกระดับผลผลิตต่อไปได้

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ศึกษาอิทธิพลของระดับความเข้มแสงต่อกระบวนการสังเคราะห์แสง ประสิทธิภาพการใช้แสง และการหายใจเชิงแสงของกัญชง 4 สายพันธุ์ ในระยะการเจริญเติบโตทางลำต้น

วิธีดำเนินการวิจัย

การเตรียมต้นพืชทดลอง

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ปลูกต้นกัญชง 4 สายพันธุ์ ได้แก่ พันธุ์ Auto Blues (Sandy) และ Sour RNA Seedless ซึ่งเป็นสายพันธุ์ไม่ไวแสง (autoflowering cultivars) เปรียบเทียบกับพันธุ์ Early Remedy และ Sour Suver Haze Seedless ซึ่งเป็นสายพันธุ์ไวแสง (photoperiod-sensitive cultivars) ในสภาพแปลงปลูกกลางแจ้ง (open field) ในพื้นที่ตำบลท่าแซะ อำเภอท่าแซะ จังหวัดชุมพร โดยเพาะเมล็ดในวัสดุปลูกพีทมอส จนกระทั่งต้นกล้ามีอายุ 14 วัน จึงย้ายลงปลูกในวัสดุปลูกที่ประกอบด้วยทราย ขุยมะพร้าว และขี้เถ้าแกลบ อัตราส่วน 1:1:1 โดยปริมาตร ในกระถางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 นิ้ว ให้น้ำพร้อมกับปุ๋ย (fertigation) ผ่านทางระบบน้ำหยด ประกอบด้วย ปุ๋ยผสมสูตร 15-5-20 ปริมาณ 1.5 g plant^{-1} day^{-1} *แมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต* ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) ปริมาณ 0.5 g plant^{-1} day^{-1} แคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) ปริมาณ 0.5 g plant^{-1} day^{-1} และจุลธาตุรวม UNILATE FC ปริมาณ 0.2 g plant^{-1} day^{-1} ให้น้ำแก่ต้นพืชวันละ 1 L plant^{-1} ติดตั้งสถานีอากาศ (WatchDog Wireless Weather Stations รุ่น 3540, Spectrum Technologies Inc., USA) ที่ระดับสูงจากพื้น 2 เมตร เพื่อเก็บข้อมูลสภาพอากาศภายในแปลงปลูกตลอดเวลาที่ทำการทดลอง ตั้งแต่เดือนมกราคม ถึงกุมภาพันธ์ 2565 โดยค่าความเข้มแสงในช่วงกลางวัน (6–18 น.) มีค่าเฉลี่ย 858.6 μmolPPF m^{-2} s^{-1} อุณหภูมิอากาศเฉลี่ยในช่วงกลางวัน 28.2 °C ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเฉลี่ยในช่วงกลางวันเท่ากับ 80.5% และกลางคืนเฉลี่ยเท่ากับ 94.1%

เส้นตอบสนองต่อแสง

เมื่อต้นกัญชงมีอายุ 36 วัน ซึ่งอยู่ในระยะการเจริญเติบโตทางลำต้น (vegetative stage) ทำการประเมินศักยภาพการสังเคราะห์แสงของใบกัญชงโดยวัดเส้นตอบสนองต่อแสง (photosynthetic light-response curve) โดยเลือกวัดใบในลำดับที่ 4–5 นับจากปลายยอด ซึ่งมีค่าดัชนีความเขียว (SPAD index) วัดด้วยเครื่อง chlorophyll meter (SPAD-502, Konica Minolta Inc., Japan) อยู่ในช่วง 40–45 ในช่วงเวลา 8–12 น. วัดใบด้วยเครื่องวัดอัตราแลกเปลี่ยนแก๊สระบบเปิด (LI-6800, Licor Inc., USA) ใช้หัววัดแบบ *multiphase flash fluorometer* chamber (6800-01A) ทำการปรับตั้งสภาพอากาศภายในหัววัด โดยกำหนดให้อัตราเร็วของอากาศที่ไหลผ่านใบ เท่ากับ 400 μmol

s^{-1} อุณหภูมิภายในหัววัดคงที่ เท่ากับ 28 °C ความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในช่วง 65–70% และความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ (air CO_2 concentration) ที่ระดับ 400 $\mu molCO_2\ mol^{-1}$ วัดอัตราแลกเปลี่ยนแก๊สภายใต้ระดับความเข้มแสง (photosynthetic photon flux, PPF) ที่ปรับลดลงเป็นขั้นทั้งหมด 13 ระดับ ตั้งแต่ 2000, 1600, 1200, 1000, 800, 600, 400, 200, 100, 75, 50, 25 และ 0 $\mu molPPF\ m^{-2}\ s^{-1}$ โดยดัดแปลงจากวิธีการของ Tang et al. (2017) เครื่องมือประเมินค่าอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิ (net photosynthetic rate, A) ค่านำไหลปากใบ (g_s) และอัตราคายน้ำ (transpiration rate, E) คำนวณค่าประสิทธิภาพการใช้น้ำ (water use efficiency, WUE) ได้จากสัดส่วนระหว่างค่าอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิต่ออัตราคายน้ำ (A/E) นอกจากนี้ ประเมินประสิทธิภาพการใช้แสงของระบบแสงสอง (photosystem II, PSII) จากค่าปริมาณแสงฟลูออเรสเซนต์ในขณะที่ใบได้รับแสงขณะนั้น (steady-state fluorescence, F_s) และปริมาณแสงฟลูออเรสเซนต์สูงสุดในขณะที่ใบได้รับความเข้มแสงสูงมาก (maximum fluorescence, F_m') คำนวณค่าประสิทธิภาพการใช้แสงของ PSII ในขณะที่ใบได้รับแสง (light-adapted quantum efficiency of PSII, ϕ_{PSII}) ได้ว่า $\phi_{PSII} = (F_m' - F_s) / F_m'$ และคำนวณอัตราเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอน (electron transport rate, ETR) ได้ว่า $ETR = \phi_{PSII} \times f \times I \times \alpha_{leaf}$ เมื่อ f คือ สัดส่วนของแสงที่ถูกดูดกลืนโดย PSII เทียบกับ PSI (สำหรับพืช C3 มีค่า 0.5) I คือความเข้มแสงในช่วงคลื่นสำหรับการสังเคราะห์แสง (PPF) และ α_{leaf} คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของใบมีค่า 0.85 (Schreiber et al., 1998)

การประเมินค่าพารามิเตอร์ของเส้นตอบสนองต่อแสง

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิกับความเข้มแสง อยู่ในรูปของสมการ non-rectangular hyperbola (Thornley & Johnson, 1990) ดังนี้

$$A = \frac{1}{2\theta}\left[\alpha PPF + A_{max} - \sqrt{(\alpha PPF + A_{max})^2 - 4\theta\alpha PPF A_{max}}\right] - R_d \qquad (1)$$

เมื่อ α คือ ประสิทธิภาพการใช้แสง (apparent quantum efficiency) เป็นค่าความชันในช่วง PPF ต่ำ (0–100 $\mu molPPF\ m^{-2}\ s^{-1}$) θ คือ ค่าควบคุมความโค้งของเส้นกราฟ (curvature factor) R_d คือ อัตราหายใจในที่มืด (dark respiration rate) A คือ อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิ (net photosynthetic rate) และ A_{max} คือ อัตราสังเคราะห์แสงสูงสุด (maximum gross photosynthetic rate)

นอกจากนี้ ฟังก์ชันของค่า ETR กับ PPF มีลักษณะเช่นเดียวกันกับความสัมพันธ์ระหว่าง A กับ PPF จึงให้ข้อมูลเข้ารูปสมการด้วยวิธีเดียวกันโดยแทนค่า A ด้วยค่าอัตราเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอน

(ETR) และ A_{max} ด้วยอัตราสูงสุดของการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนทั้งระบบ (maximum rate of linear whole-chain electron transport, ETR_{max}) ดังนี้

$$ETR = \frac{1}{2\theta}\left[\alpha PPF + ETR_{max} - \sqrt{(\alpha PPF + ETR_{max})^2 - 4\theta\alpha PPF ETR_{max}}\right] - R_d \quad (2)$$

คำนวณพารามิเตอร์ต่างๆ ของสมการเส้นตอบสนองต่อแสงข้างต้นด้วยวิธี non-linear regression โดยใช้ solver ของโปรแกรม Microsoft Excel คำนวณค่าความเข้มแสงอิ่มตัว (light saturation point, I_s) โดยกำหนดเป็นค่าความเข้มแสง เมื่อ $A = 0.85A_{max}$ และจุดชดเชยแสง (light compensation point, I_c) โดยกำหนดเป็นค่าความเข้มแสงเมื่อ $A = 0$ $\mu mol CO_2\ m^{-2}\ s^{-1}$

จากคุณสมบัติของเอนไซม์รูบิสโก (ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase, Rubisco) ที่มีความสามารถในการตรึง CO_2 (carboxylation) เพื่อสร้างสารประกอบอินทรีย์ในกระบวนการสังเคราะห์แสงแล้ว ยังสามารถตรึง O_2 (oxygenation) เพื่อเกิดกระบวนการหายใจเชิงแสง (photorespiration) ได้อีกด้วย จึงทำให้สามารถประเมินอัตราหายใจเชิงแสง (photorespiration rate, R_l) ได้ดังสมการของ Valentini et al. (1995) ดังนี้

$$R_l = \frac{1}{12}\left[ETR - 4(A - R_d)\right] \quad (3)$$

เพื่อการเปรียบเทียบ ได้คำนวณค่านำไหลปากใบสูงสุด (maximum stomatal conductance, $g_{s\ max}$) อัตราคายน้ำสูงสุด (maximum transpiration rate, E_{max}) ประสิทธิภาพการใช้น้ำสูงสุด (maximum water use efficiency, WUE_{max}) และอัตราหายใจเชิงแสงสูงสุด (maximum photorespiration rate, $R_{l\ max}$) โดยคำนวณจากค่าเฉลี่ยของ g_s, E, WUE, และ R_l ที่ระดับความเข้มแสงสูงกว่าค่าความเข้มแสงอิ่มตัว (PPF > 1000 $\mu mol PPF\ m^{-2}\ s^{-1}$) ตามวิธีการของ วินัย อุดขาว และคณะ (2559) และคำนวณสัดส่วนของอัตราเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนสูงสุดต่ออัตราสังเคราะห์แสงสูงสุด (ETR_{max}/A_{max}) ที่ได้จากจากการเข้ารูปสมการของเส้นตอบสนองต่อแสง

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป IBM SPSS Statistics 26 วิเคราะห์อิทธิพลของสายพันธุ์กัญชงด้วยวิธี one-way analysis of variance (ANOVA) โดยทดสอบระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ $p < 0.05$ และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย ด้วยวิธี Duncan’s New Multiple Range Test

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

เส้นตอบสนองต่อแสง

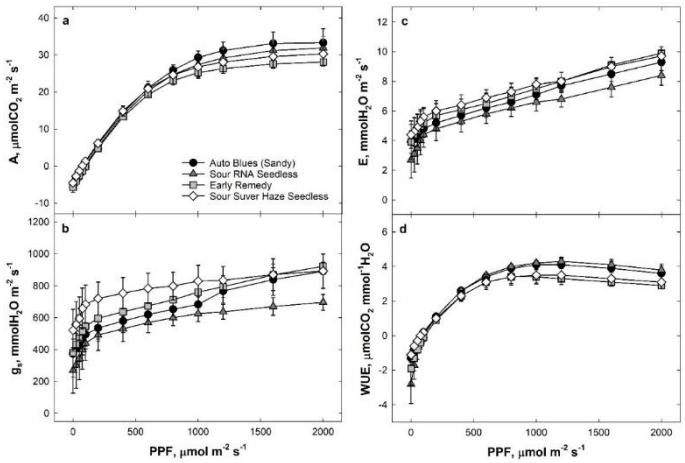
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิ (A) และค่าความเข้มแสง (PPF) หรือเส้นตอบสนองต่อแสงของกัญชงทั้ง 4 สายพันธุ์ มีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงที่คล้ายคลึงกันแต่มีระดับค่าที่แตกต่างกัน (ภาพที่ 1a) พบว่า ค่า A ในช่วงแรกที่ระดับความเข้มแสงต่ำตั้งแต่ 0 จนถึง 75 μmolPPF m^{-2} s^{-1} มีค่าติดลบ เป็นค่าสะท้อนอัตราหายใจ (respiration rate) แสดงว่าใบกัญชงยังไม่สังเคราะห์แสง (ภาพที่ 1a) โดยค่า A เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามระดับของ PPF ที่เพิ่มขึ้นในช่วงแรกตั้งแต่ระดับ 0–1000 μmolPPF m^{-2} s^{-1} แล้วเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างช้าลง โดยค่า A ลู่เข้าสู่ค่าสูงคงที่เมื่อระดับ PPF ถึงจุดอิ่มตัวแสง (I_s) ซึ่งเป็นช่วงที่ค่า A ถูกจำกัดด้วยความเข้มข้นของ CO_2 (Huber et al., 2021)

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่านำไหลปากใบ (g_s) และค่าอัตราคายน้ำ (E) จากการวัดเส้นตอบสนองต่อแสงของกัญชงทั้ง 4 สายพันธุ์ พบว่ามีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ทั้งสองคล้ายคลึงกัน โดยทั้งค่า g_s และ E มีค่าเพิ่มขึ้นตามระดับ PPF ที่เพิ่มสูงขึ้นตลอดช่วง (ภาพที่ 1b–1c) โดยใบกัญชงทั้ง 4 สายพันธุ์ มีค่านำไหลปากใบสูงสุด ($g_{s\ max}$) เฉลี่ยอยู่ในช่วง 657.5–856.8 mmolH_2O m^{-2} s^{-1} และมีค่าอัตราคายน้ำสูงสุด (E_{max}) เฉลี่ยอยู่ในช่วง 7.3–8.6 mmolH_2O m^{-2} s^{-1} (ตารางที่ 1) ในขณะที่ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพการใช้น้ำ (WUE) กับค่า PPF มีลักษณะคล้ายกันกับความสัมพันธ์ระหว่างค่า A และ PPF (ภาพที่ 1a และ 1d) โดยค่าประสิทธิภาพการใช้น้ำสูงสุด (WUE_{max}) ของใบกัญชงทั้ง 4 สายพันธุ์ มีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 3.2–4.1 μmolCO_2 $mmol^{-1}H_2O$ (ตารางที่ 1)

พารามิเตอร์ของเส้นตอบสนองต่อแสงของกัญชงที่ได้จากการเข้ารูปสมการ non-rectangular hyperbola แสดงในตารางที่ 1 พบว่าใบกัญชงทั้ง 4 สายพันธุ์ มีระดับของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่คำนวณได้จากเส้นตอบสนองต่อแสงมีค่าใกล้เคียงกัน โดยกัญชงทั้ง 4 สายพันธุ์ มีค่าจุดชดเชยแสง (I_c) อยู่ในช่วง 77.0–99.0 μmolPPF m^{-2} s^{-1} (ตารางที่ 1) ซึ่งเป็นระดับ PPF ที่ทำให้อัตราสังเคราะห์แสงเท่ากับอัตราหายใจ หรือเป็นระดับที่ใบพืชเริ่มสังเคราะห์แสง ซึ่งค่าที่ประเมินได้สูงกว่าค่าที่วัดได้จากการศึกษาเส้นตอบสนองต่อแสงของพืช C3 หลายชนิด ได้แก่ ถั่วพุ่ม ที่มีค่า I_c อยู่ในช่วง 30.2–60.5 μmolPPF m^{-2} s^{-1} (Surabhi et al., 2009) มะเขือเทศ ซึ่งมีค่า I_c เท่ากับ 29.3 μmolPPF m^{-2} s^{-1} (Li et al., 2024) และทานตะวันซึ่งมีค่า I_c อยู่ที่ 31.0 μmolPPF m^{-2} s^{-1} (Scartazza et al., 2020) สำหรับค่าความเข้มแสงอิ่มตัว (I_s) ซึ่งเป็นระดับ PPF ที่ทำให้ค่า A เพิ่มขึ้นสูงสุดของกัญชงทั้ง 4 สายพันธุ์ มีค่าอยู่ในช่วง 916.9–1030.2 μmolPPF m^{-2} s^{-1} (ตารางที่ 1) ซึ่งค่าที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาของ Murovec et al. (2022) ที่พบว่าต้นกัญชงมีค่าความเข้มแสงอิ่มตัวสูงกว่า 600 μmolPPF m^{-2} s^{-1} และมีค่าสูงกว่าค่า I_s ที่ประเมินได้ของการวัดเส้นตอบสนองต่อแสงของพืชในวงศ์เดียวกัน เช่น *Humulus lupulus* L. ที่มีค่า I_s อยู่ที่ 341.0 μmolPPF m^{-2} s^{-1} (Bauerle, 2023) โดยค่า I_s สามารถใช้เป็นระดับค่าความเข้มแสงอ้างอิงสำหรับการให้แสงเทียม (artificial light) แก่ต้นพืชที่ปลูกในโรงเรือนและโรงงานผลิตพืช เพื่อชักนำให้

พืชมีประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงสูงสุดได้ (Bilodeau et al., 2019) เมื่อพิจารณาค่าอัตราสังเคราะห์แสงสูงสุด (A_{max}) ของกัญชงที่ประเมินได้ พบว่ากัญชงทั้ง 4 สายพันธุ์ มีค่า A_{max} อยู่ในช่วง 36.8–44.2 $\mu molCO_2\ m^{-2}\ s^{-1}$ (ตารางที่ 1) ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่า A_{max} ที่ได้จากการศึกษาเส้นตอบสนองต่อแสงของกัญชงก่อนหน้านี้ที่พบว่าใบกัญชงสายพันธุ์ Stillwater มีค่า A_{max} อยู่ที่ 23.9 $\mu molCO_2\ m^{-2}\ s^{-1}$ (Rodriguez-Morrison et al., 2021)

ประสิทธิภาพการใช้แสง (α) เป็นค่าที่แสดงถึงประสิทธิภาพในการตรึง CO_2 ต่อหนึ่งหน่วยแสงของ ribulose-1,5-bisphosphate (RuBP) โดยมีเอนไซม์รูบิสโกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา carboxylation พบว่ากัญชงทั้ง 4 สายพันธุ์ มีค่า α อยู่ในช่วง 0.059–0.061 $molCO_2\ mol^{-1}$ PPF (ตารางที่ 1) ซึ่งใกล้เคียงกับพืช C3 โดยทั่วไปที่มีค่า 0.05 $molCO_2\ mol^{-1}$ PPF (Taiz & Zeiger, 2006) นอกจากนี้กัญชงทั้ง 4 สายพันธุ์ มีค่าควบคุมความโค้งของกราฟ (θ) อยู่ในช่วง 0.75–0.81 และค่าอัตราหายใจในที่มืด (R_d) อยู่ในช่วง 4.50–5.70 $\mu molCO_2\ m^{-2}\ s^{-1}$ (ตารางที่ 1) ซึ่งค่า R_d ที่ประเมินได้จากการศึกษาในครั้งนี้ มีค่าสูงกว่าค่าที่วัดได้จากการศึกษาเส้นตอบสนองต่อแสงของพืช C3 ซึ่งมีค่า R_d อยู่ในช่วง 0.50–3.10 $\mu molCO_2\ m^{-2}\ s^{-1}$ (Byrd et al., 1992) จากข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าต้นกัญชงมีความสามารถในการย่อยสลายน้ำตาลที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์แสงเพื่อใช้ในการสร้าง ATP สำหรับใช้ในกิจกรรมต่างๆ ของเซลล์และการเติบโตได้มาก เมื่อเทียบกับพืช C3 โดยทั่วไป (Rashid et al., 2020) นอกจากนี้ค่า R_d ที่สูงยังชี้ให้เห็นว่าใบกัญชงมีประสิทธิภาพในการควบคุมปฏิกิริยารีดอกซ์บริเวณสโตรมา (stroma) ภายในคลอโรพลาสต์ระหว่างที่เกิดกระบวนการสังเคราะห์แสงได้ดี (Wang et al., 2001)



ภาพที่ 1 การเปลี่ยนแปลงของ **a.** อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิ (A), **b.** ค่านำไหลปากใบ (g_s), **c.** อัตราการคายน้ำ (E) และ **d.** ประสิทธิภาพการใช้น้ำ (WUE) ที่ระดับความเข้มแสง (PPF) ต่างกันของกัญชง 4 สายพันธุ์ ในระยะการเจริญเติบโตทางลำต้น ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย ± SE ที่ได้จาก 3 ซ้ำ (n = 3)

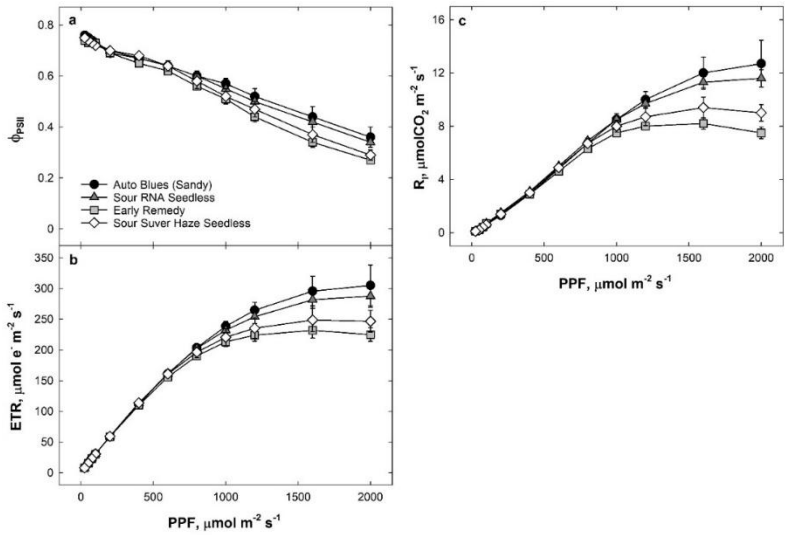
ประสิทธิภาพการใช้แสงของใบ

ประสิทธิภาพการใช้แสงของระบบแสงสอง (ϕ_{PSII}) คือ สัดส่วนของปริมาณโฟตอนแสงที่นำไปใช้ในปฏิกิริยาจากแสง (photochemical reaction) ต่อปริมาณโฟตอนแสงทั้งหมดที่ใบพืชดูดซับไว้ได้ในขณะที่ใบได้รับแสง พบว่าค่า ϕ_{PSII} ของแต่ละเส้นตอบสนองต่อแสงมีค่าลดลงเมื่อระดับ PPF เพิ่มสูงขึ้น (ภาพที่ 2a) ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอน (ETR) มีลักษณะคล้ายกันกับการเปลี่ยนแปลงระหว่างค่า A กับ PPF (ภาพที่ 1a และ 2b) เมื่อคำนวณค่าอัตราเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนสูงสุด (ETR_{max}) จากการเข้ารูปสมการเส้นตอบสนองต่อแสง ซึ่งค่าดังกล่าวสะท้อนความสามารถในการดูดซับพลังงานแสงและเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนเพื่อขับเคลื่อนปฏิกิริยาจากแสง (Bheemanahalli et al., 2022; Zhang et al., 2020) พบว่ากัญชงทั้ง 4 สายพันธุ์ มีค่า ETR_{max} เฉลี่ยอยู่ในช่วง 244.3–362.8 μmol e^- m^{-2} s^{-1} (ตารางที่ 1) ซึ่งค่าที่ประเมินได้มีค่าสูงกว่าค่าที่ประเมินได้จากการวัดเส้นตอบสนองต่อแสงของพืช C3 หลายชนิด ได้แก่ ถั่วเหลือง ที่มีค่า ETR_{max} อยู่ที่ 216.6 μmol e^- m^{-2} s^{-1} (Yao et al., 2017) มะเขือเทศ มีค่า ETR_{max} เท่ากับ 204.1 μmol e^- m^{-2} s^{-1} (Lu et al., 2019) และผักกาดเขียว มีค่า ETR_{max} อยู่ในช่วง 152.6–177.3 μmol e^- m^{-2} s^{-1} (Mittal et al., 2012) แสดงให้เห็นว่ากัญชงเป็นพืชที่มีการขับเคลื่อนอิเล็กตรอนเพื่อใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงได้สูง เมื่อเทียบกับพืช C3 โดยทั่วไป เมื่อพิจารณาค่าสัดส่วนของอัตราเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนสูงสุดต่ออัตราสังเคราะห์แสงสูงสุด (ETR_{max}/A_{max}) ซึ่งแสดงปริมาณอิเล็กตรอนต่อหนึ่งหน่วย CO_2 ที่ตรึงได้ จากการคำนวณพารามิเตอร์ของเส้นตอบสนองต่อแสง พบว่าค่า ETR_{max}/A_{max} ของกัญชงทั้ง 4 สายพันธุ์ มีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 6.7–8.1 μmol e^- μmol$^{-1}CO_2$ (ตารางที่ 1) ซึ่งใกล้เคียงกับพืช C3 โดยทั่วไปในสภาวะปกติที่ไม่ได้รับความเครียด ที่มีค่าสัดส่วนนี้อยู่ในช่วง 7.5–10.5 μmol e^- μmol$^{-1}CO_2$ (Perera-Castro & Flexas, 2023)

อัตราหายใจเชิงแสงของใบ

การหายใจเชิงแสง (photorespiration) ของพืช C3 เป็นผลจากการที่เอนไซม์รูบิสโก (Rubisco) สามารถทำปฏิกิริยาได้ทั้งกับ CO_2 (carboxylation) และกับ O_2 (oxygenation) (Eisenhut et al., 2017) ซึ่งกระบวนการหายใจเชิงแสงทำหน้าที่เป็นระบบหมุนเวียนคาร์บอน (carbon recovery system) ซึ่งจะเปลี่ยน 2-ฟอสโฟไกลโคเลต (2-phosphoglycolate, 2-PG) ไปเป็น 3-ฟอสโฟกลีเซอเรต (3-phosphoglycerate, 3-PGA) ที่สามารถกลับเข้าสู่วัฏจักรคัลวินได้ (Bauwe et al., 2012) โดยอัตราหายใจเชิงแสง (R_l) ของพืช C3 สามารถประเมินได้จากการวัดอัตราแลกเปลี่ยนแก๊สควบคู่กับการวัดปริมาณรังสีฟลูออเรสเซนต์จากการวัดเส้นตอบสนองต่อแสง ซึ่งจากผลการทดลองในครั้งนี้พบว่าค่า R_l ของกัญชงทั้ง 4 สายพันธุ์ เพิ่มขึ้นตามระดับ PPF ในช่วง 0–1200 μmolPPF m^{-2} s^{-1} หลังจากนั้น R_l

จะมีค่าสูงคงที่ (ภาพที่ 2c) เมื่อคำนวณค่าอัตราหายใจเชิงแสงสูงสุด ($R_{l\ max}$) ของกัญชงทั้ง 4 สายพันธุ์ พบว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยกัญชงสายพันธุ์ Auto Blues (Sandy) มีค่า $R_{l\ max}$ สูงสุดอยู่ที่ 11.6 $\mu molCO_2\ m^{-2}\ s^{-1}$ รองลงมาคือ สายพันธุ์ Sour RNA Seedless, Sour Suver Haze Seedless และ Early Remedy ซึ่งมีค่า $R_{l\ max}$ เท่ากับ 10.9, 9.0 และ 7.9 $\mu molCO_2\ m^{-2}\ s^{-1}$ ตามลำดับ (ตารางที่ 1) ซึ่งค่าที่ประเมินได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้ในพืช C3 หลายชนิด ได้แก่ ข้าวสาลี ที่มีค่าอยู่ในช่วง 9.5–13.1 $\mu molCO_2\ m^{-2}\ s^{-1}$ (Ye et al., 2019) องุ่น มีค่าอยู่ในช่วง 6–8 $\mu molCO_2\ m^{-2}\ s^{-1}$ (Zufferey et al., 2000) และพริก มีค่าเท่ากับ 12.7 $\mu molCO_2\ m^{-2}\ s^{-1}$ (Qiu et al., 2019)



ภาพที่ 2 การเปลี่ยนแปลงของ **a.** ประสิทธิภาพการใช้แสงของระบบแสงสอง (ϕ_{PSII}), **b.** อัตราเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอน (ETR) และ **c.** อัตราหายใจเชิงแสง (R_l) ที่ระดับความเข้มแสง (PPF) ต่างกันของกัญชง 4 สายพันธุ์ ในระยะการเจริญเติบโตทางลำต้น ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย ± SE ที่ได้จาก 3 ซ้ำ (n = 3)

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดเส้นตอบสนองต่อแสงของกัญชง 4 สายพันธุ์ ในระยะการเจริญเติบโตทางลำต้น ได้แก่ ค่านำไหลปากใบสูงสุด ($g_{s\ max}$), อัตราคายน้ำสูงสุด (E_{max}), ประสิทธิภาพการใช้น้ำสูงสุด (WUE_{max}), จุดชดเชยแสง (I_c), ค่าความเข้มแสงอิ่มตัว (I_s), อัตราสังเคราะห์แสงสูงสุด (A_{max}), ค่าประสิทธิภาพการใช้แสง (α), ค่าควบคุมความโค้งของเส้นกราฟ (θ), อัตราหายใจในที่มืด (R_d), อัตราสูงสุดของการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนทั้งระบบ (ETR_{max}), สัดส่วนของอัตราเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนสูงสุดต่ออัตราสังเคราะห์แสงสูงสุด (ETR_{max}/A_{max}) และอัตราหายใจเชิงแสงสูงสุด ($R_{l\ max}$) ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย ± SE ที่ได้จาก 3 ซ้ำ (n = 3)

Parameters	Hemp varieties				*p*-value
	Auto Blues (Sandy)	Sour RNA Seedless	Early Remedy	Sour Suver Haze Seedless	
$g_{s\ max}$, mmolH_2O m^{-2} s^{-1}	794.8 ± 77.6	657.5 ± 50.0	836.2 ± 56.0	856.8 ± 98.0	ns
E_{max}, mmolH_2O m^{-2} s^{-1}	8.2 ± 0.5	7.3 ± 0.6	8.6 ± 0.6	8.6 ± 0.3	ns
WUE_{max}, μmolCO_2 mmol$^{-1}H_2O$	3.9 ± 0.4	4.1 ± 0.2	3.2 ± 0.3	3.4 ± 0.4	ns
I_c, μmolPPF m^{-2} s^{-1}	82.5 ± 7.3	92.2 ± 18.2	99.0 ± 19.0	77.0 ± 13.7	ns
I_s, μmolPPF m^{-2} s^{-1}	1030.2 ± 92.2	1018.5 ± 52.9	916.9 ± 45.9	928.3 ± 20.9	ns
A_{max}, μmolCO_2 m^{-2} s^{-1}	44.2 ± 4.8	41.6 ± 3.6	36.8 ± 2.2	38.0 ± 2.7	ns
α, molCO_2 mol^{-1} PPF	0.061 ± 0.004	0.059 ± 0.001	0.059 ± 0.003	0.061 ± 0.001	ns
θ	0.75 ± 0.05	0.77 ± 0.02	0.81 ± 0.04	0.79 ± 0.03	ns
R_d, μmolCO_2 m^{-2} s^{-1}	4.88 ± 0.56	5.20 ± 0.99	5.70 ± 1.35	4.50 ± 0.72	ns
ETR_{max}, μmol e^- m^{-2} s^{-1}	362.8 ± 53.6	323.7 ± 22.7	244.3 ± 14.0	256.2 ± 21.1	ns
ETR_{max}/A_{max}, μmol e^- μmol$^{-1}CO_2$	8.1 ± 0.7	7.8 ± 0.1	6.7 ± 0.1	7.0 ± 0.1	ns
$R_{l\ max}$, μmolCO_2 m^{-2} s^{-1}	11.6 ± 1.2^{a}	10.9 ± 0.5^{ab}	7.9 ± 0.3^{c}	9.0 ± 0.7^{bc}	**

ค่าเฉลี่ยในแนวนอนที่ตามด้วยอักษรเหมือนกันไม่แตกต่างทางสถิติโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test

** = แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $p < 0.05$, ns = ไม่แตกต่างทางสถิติ

สรุป

การตอบสนองของกระบวนการสังเคราะห์แสงของกัญชงในระยะการเจริญเติบโตทางลำต้น ภายใต้ PPF หลายระดับในช่วง 0–2000 μmolPPF m^{-2} s^{-1} พบว่าใบกัญชงทั้ง 4 สายพันธุ์ มีค่า A เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามระดับ PPF ที่เพิ่มขึ้นในช่วง 0–1000 μmolPPF m^{-2} s^{-1} แล้วเพิ่มขึ้นอย่างช้าลงเมื่อระดับความเข้มแสงเข้าสู่จุดอิ่มตัวแสง การเพิ่มขึ้นของระดับ PPF ส่งผลให้ปากใบเปิดกว้างมากขึ้นและค่า E เพิ่มสูงขึ้นด้วย โดยค่า A_{max} ของกัญชงทั้ง 4 สายพันธุ์มีค่าอยู่ในช่วง 36.8–44.2 μmolCO_2 m^{-2} s^{-1} มีค่า I_s ซึ่งเป็นระดับ PPF ที่ทำให้ค่า A

เพิ่มขึ้นสูงสุด อยู่ในช่วง 916.9–1030.2 μmolPPF m^{-2} s^{-1} และมีค่า I_c ซึ่งเป็นระดับ PPF ที่ทำให้ใบพืชเริ่มสังเคราะห์แสง (A=0) อยู่ในช่วง 77.0–99.0 μmolPPF m^{-2} s^{-1} โดยกัญชงทั้ง 4 สายพันธุ์ มีค่า ETR_{max}/A_{max} อยู่ในช่วง 6.7–8.1 μmol e^- $\mu mol^{-1}CO_2$ และมีค่า $R_{l\ max}$ อยู่ในช่วง 7.9–11.6 μmolCO_2 m^{-2} s^{-1} ซึ่งระดับความต้องการแสงที่ได้จากการศึกษาเส้นตอบสนองต่อแสงในครั้งนี้สามารถใช้เป็นระดับอ้างอิงสำหรับการจัดการแสงในการปลูกกัญชงต่อไปได้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก บริษัท ซีพีไอ อะโกรเทค จำกัด ภายใต้โครงการความร่วมมือวิจัยและพัฒนาสายพันธุ์ และวิธีการปลูกกัญชง ขอขอบคุณการสนับสนุนจากศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีชีวภาพเกษตร สำนักงานปลัดกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีชีวภาพเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง และขอขอบคุณบริษัท ซีพีไอ อะโกรเทค จำกัด สำหรับตัวอย่างพืช และสถานที่ในการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

วินัย อุดขาว, ภฤศนันท์ เอี่ยมเอกสุวรรณ, และสุนทรี ยิ่งชัชวาลย์. (2559). การตอบสนองของปากใบและกระบวนการสังเคราะห์แสงของยูคาลิปตัส คามาลดูเลนซิส ต่อสภาวะขาดน้ำจากการชักนำด้วยพอลิเอทิลีนไกลคอล. **วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร**, 47(2), 149–161.

Bauwe, H., Hagemann, M., Kern, R., & Timm, S. (2012). Photorespiration has a dual origin and manifold links to central metabolism. **Current Opinion in Plant Biology**, 15(3), 269–275.

Bauerle, W.L. (2023). *Humulus lupulus* L. strobilus photosynthetic capacity and carbon assimilation. **Plants**, 12(9), 1816.

Bertoli, A., Tozzi, S., Pistelli, L., & Angelini, L.G. (2010). Fibre hemp inflorescences: From crop-residues to essential oil production. **Industrial Crops and Products**, 32(3), 329–337.

Bilodeau, S.E., Wu, B., Rufyikiri, A., MacPherson S, & Lefsrud, M. (2019). An update on plant photobiology and implications for cannabis production. **Frontiers in Plant Science**, 10, 296.\

Bheemanahalli, R., Ramamoorthy, P., Poudel, S., Samiappan, S., Wijewardane, N., & Reddy, K.R. (2022). Effects of drought and heat stresses during reproductive stage on pollen germination, yield, and leaf reflectance properties in maize (*Zea mays* L.). **Plant Direct**, 6(8), 1–14.

Byrd, G.T., Sage, R.F., & Brown, R.H. (1992). A comparison of dark respiration between C3 and C4 plants. **Plant Physiology**, 100(1), 191–198.

Cheng, X., Wang, R., Liu, X., Zhou, L., Dong, M., Rehman, M., Fahad, S., Liu, L., & Deng, G. (2022). Effects of light spectra on morphology, gaseous exchange, and antioxidant capacity of industrial hemp. **Frontiers in Plant Science**, 13, 937436.

Eisenhut, M., Brautigam, A., Timm, S., Florian, A., Tohge, T., Fernie, A.R., Bauwe, H., & Weber, A.P.M. (2017). Photorespiration is crucial for dynamic response of photosynthetic metabolism and stomatal movement to altered CO_2 availability. **Molecular Plant**, 10(1), 47–61.

Gajdošik, M.S., Vicić , A., Gvozdić , V., Galić , V., Begović , L., & Mlinarić , S. (2022). Effect of prolonged photoperiod on light-dependent photosynthetic reactions in *Cannabis*. **International Journal of Molecular Sciences**, 23(17), 1–19.

Huber, B.M., Louws, F.J., & Hernández, R. (2021). Impact of different daily light integrals and carbon dioxide concentrations on the growth, morphology, and production efficiency of tomato seedlings. **Frontiers in Plant Science**, 12, 615853.

Islam, M.J., Ryu, B.R., Azad, M.O.K., Rahman, M.H., Rana, M.S., Kang, C.W., Lim, J.D., & Lim, Y.S. (2021). Comparative growth, photosynthetic pigments, and osmolytes analysis of hemp (*Cannabis sativa* L.) seedlings under an aeroponics system with different LED light sources. **Horticulturae**, 7(8), 239.

Keller, B., Soto, J., Steier, A., Portilla-Benavides, A.E., Raatz, B., Studer, B., Walter, A., Muller, O., & Urban, M.O. (2024). Linking photosynthesis and yield reveals a strategy to improve light use efficiency in a climbing bean breeding population. **Journal of Experimental Botany**, 75(3), 901–916.

Li, J., Wu, Y., Feng, X., Hussain, T., Guo, K., & Liu, X. (2024). Nonuniform salinity regulate leaf characteristics and improve photosynthesis of cherry tomatoes under high salinity. **Environmental and Experimental Botany**, 217, 105565.

Lu, T., Yu, H., Li, Q., Chai, L., & Jiang, W. (2019). Improving plant growth and alleviating photosynthetic inhibition and oxidative stress from low-light stress with exogenous GR24 in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) seedlings. **Frontiers in Plant Science**, 10, 490.

Mittal, S., Kumari, N., & Sharma, V. (2012). Differential response of salt stress on *Brassica juncea*: Photosynthetic performance, pigment, proline, D1 and antioxidant enzymes. **Plant Physiology and Biochemistry**, 54, 17–26.

Murovec, J., Eržen, J.J., Flajšman, M., & Vodnik, D. (2022). Analysis of morphological traits, cannabinoid profiles, *THCAS* gene sequences, and photosynthesis in wide and narrow leaflet high-Cannabidiol breeding populations of medical cannabis. **Frontiers in Plant Science**, 13, 786161.

Nowak, R., Szczepanek, M., Błaszczyk, K., & Hassanpouraghdam, M.B. (2024). Response of photosynthetic efficiency parameters and leaf area index of alternative barley genotypes to increasing sowing density. **Scientific Reports**, 14(1), 29779.

Oomah, B.D., Busson, M., Godfrey, D.V., & Drover, J.C.G. (2002). Characteristics of hemp (*Cannabis sativa* L.) seed oil. **Food Chemistry**, 76(1), 33–43.

Perera-Castro, A.V., & Flexas, J. (2023). The ratio of electron transport to assimilation (ETR/A_N): underutilized but essential for assessing both equipment's proper performance and plant status. **Planta**, 257(2), 29.

Qiu, R., Liu, C., Li, F., Wang, Z., Yang, Z., & Cui, N. (2019). An investigation on possible effect of leaching fractions physiological responses of hot pepper plants to irrigation water salinity. **BMC Plant Biology**, 19, 297.

Rashid, F.A.A., Scafaro, A.P., Asao, S., Fenske, R., Dewar, R.C., Masle, J., Taylor, N.L., & Atkin, O.K. (2020). Diel- and temperature-driven variation of leaf dark respiration rates and metabolite levels in rice. **New Phytologist**, 228(1), 56–69.

Rodriguez-Morrison, V., Llewellyn, D., & Zheng, Y. (2021). Cannabis yield, potency, and leaf photosynthesis respond differently to increasing light levels in an indoor environment. **Frontiers in Plant Science**, 12, 646020.

Sangkanu, S., Pitakbut, T., Phoopha, S., Khanansuk, J., Chandarajoti, K., & Dej-adisai, S. (2023). A comparative study of chemical profiling and bioactivities between Thai and foreign hemp seed species (*Cannabis sativa* L.) plus an in-silico investigation. **Foods**, 13(1), 55.

Scartazza, A., Fambrini, M., Mariotti, L., Picciarelli, P., & Pugliesi, C. (2020). Energy conversion processes and related gene expression in a sunflower mutant with altered salicylic acid metabolism. **Plant Physiology and Biochemistry**, 148, 122–132.

Schreiber, U., Bilger, W., Hormann, H. & Neubauer C. (1998). **Chlorophyll fluorescence as a diagnostic tool: basics and some aspects of practical relevance**. In A.S. Raghavendra (Ed.), Photosynthesis: A Comprehensive Treatise (pp. 320–336). Cambridge University Press.

Sengloung, T., Kaveeta, L., & Nanakorn, W. (2009). Effect of sowing date on growth and development of Thai hemp (*Cannabis sativa* L.). **Agriculture and Natural Resources**, 43(3), 423–431.

Surabhi, G.K., Reddy, K.R., & Singh, S.K. (2009). Photosynthesis, fluorescence, shoot biomass and seed weight responses of three cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) cultivars with contrasting sensitivity to UV-B radiation. **Environmental and Experimental Botany**, 66(2), 160–171.

Taiz, L., & Zeiger E. (2006). **Plant Physiology**. (4th ed.). Sinauer Associates, Inc. Publishers.

Tang, K., Struik, P.C., Amaducci, S., Stomph, T.J., & Yin, X. (2017). Hemp (*Cannabis sativa* L.) leaf photosynthesis in relation to nitrogen content and temperature: implications for hemp as a bio-economically sustainable crop. **Global Change Biology Bioenergy**, 9(10), 1573–1587.

Thornley, J.H., & Johnson. I.R. (1990). **Plant and Crop Modeling–A Mathematical Approach to Plant and Crop Physiology**. (p. 660) In Clarendon Press, Oxford. UK.

Toledo-Ortiz, G., Johansson, H., Lee, K.P., Bou-Torrent, J., Stewart, K., Steel, G., Rodriguez-Concepción, M., & Halliday, K.J. (2014). The HY5-PIF regulatory module coordinates light and temperature control of photosynthetic gene transcription. **PLOS Genetics**, 10(6), e1004416.

Valentini, R., Epron, De Angelis, P., Matteucci G., & Dreyer, E. (1995). *In situ* estimation of net CO_2 assimilation, photosynthetic electron flow and photorespiration in Turkey oak (*Q. cerris* L.) leaves: diurnal cycles under different levels of water supply. **Plant, Cell & Environment**, 18(6), 631–640.

Wang, X., Lewis, J.D., Tissue, D.T., Seemann, J.R., & Griffin K.L. (2001). Effects of elevated atmospheric CO_2 concentration on leaf dark respiration of *Xanthium strumarium* in light and in darkness. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, 98(5), 2479–2484.

Yao, X., Li, C., Li, S., Zhu, Q., Zhang, H., Wang, H., Yu, C., Martin, S.K.S., & Xie, F. (2017). Effect of shade on leaf photosynthetic capacity, light-intercepting, electron transfer and energy distribution of soybeans. **Plant Growth Regulator**, 83, 409–416.

Ye, Z.P., Liu, Y.G., Kang, H.J., Duan, H.L., Chen, X.M., & Zhou, S.X. (2019). Comparing two measures of leaf photorespiration rate across a wide range of light intensities. **Journal of Plant Physiology**, 240, 153002.

Zhang, P., Zhang, Z., Li, B., Zhang, H., Hu, J., & Zhao, J. (2020). Photosynthetic rate prediction model of newborn leaves verified by core fluorescence parameters. **Scientific Reports**, 10(1), 3013.

Zufferey, V., Murisier, F., & Schultz, H.R. (2000). A model analysis of the photosynthetic response of *Vitis vinifera* L. cvs Riesling and Chasselas leaves in the field: I. Interaction of age, light and temperature. **Vitis**, 39(1), 19–26.

VRURDI–JO-04

ใบเสร็จรับเงินเลขที่ .....

ทะเบียนเลขที่ .....

สถาบันวิจัยและพัฒนา
มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์

เลขที่ 1 หมู่ 20 ถนนพหลโยธิน กม.48 ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 13180
โทรศัพท์ 0 2909 3036 โทรสาร 0 2909 3036 E-mail: rdi_journalsci@vru.ac.th Website http://rd.vru.ac.th

แบบนำส่งบทความวิจัยลงตีพิมพ์เผยแพร่
วารสารวิจัยและพัฒนา วไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

1. ข้าพเจ้าชื่อ (นาย, นาง, น.ส., ยศ) ..... นามสกุล .....
2. วุฒิการศึกษาสูงสุด ☐ ปริญญาตรี ☐ ปริญญาโท ☐ ปริญญาเอก
   คุณวุฒิ ..... สาขา .....
   สถาบัน .....
   ☐ สำเร็จการศึกษา ☐ กำลังศึกษา ปีที่คาดว่าจะสำเร็จการศึกษา วันที่ .....
3. สถานะภาพของผู้นิพนธ์บทความวิจัย ☐ อาจารย์ ☐ นักศึกษาปริญญาเอก ☐ นักศึกษาปริญญาโท ☐ บุคคลทั่วไป
   ตำแหน่งทางวิชาการ ..... ตำแหน่งทางบริหาร .....
4. ชื่อหน่วยงาน/สถานที่ทำงาน .....
   เลขที่ ..... ถนน ..... ซอย ..... ตำบล/แขวง .....
   อำเภอ/เขต ..... จังหวัด ..... รหัสไปรษณีย์ .....
   โทรศัพท์ ..... โทรสาร .....
   E-mail .....
5. ที่อยู่สำหรับติดต่อและจัดส่งเอกสาร .....
   เลขที่ ..... ถนน ..... ซอย ..... ตำบล/แขวง .....
   อำเภอ/เขต ..... จังหวัด ..... รหัสไปรษณีย์ .....
   โทรศัพท์ ..... โทรสาร ..... มือถือ .....
   E-mail .....
6. มีความประสงค์ขอส่งบทความเรื่อง
   ชื่อบทความ(ภาษาไทย) .....
   .....
   ชื่อบทความ(ภาษาอังกฤษ) .....
   .....
   เพื่อลงตีพิมพ์ในวารสาร วิจัยและพัฒนาวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
   สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ข้าพเจ้าขอรับรองว่าบทความนี้ยังไม่เคยนำลงตีพิมพ์ในวารสารฉบับใดๆ มาก่อน ทั้งนี้ ข้าพเจ้าได้ศึกษากฎเกณฑ์และคำแนะนำในการส่งบทความวิจัยเพื่อนำลงตีพิมพ์ในวารสารวิจัยและพัฒนาวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์แล้ว และยินดีปฏิบัติตามเงื่อนไขทุกประการ พร้อมนี้ข้าพเจ้าได้ชำระค่าธรรมเนียมบำรุงวารสารวิจัยและพัฒนาวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ☐บทความภาษาไทย จำนวน 4,500 บาท ☐ บทความภาษาอังกฤษ จำนวน 6,000 บาท เรียบร้อยแล้ว

ลงชื่อ.....ผู้นำส่งบทความวิจัย
(.....)
วันที่ ...../...../.....

ระเบียบการตีพิมพ์บทความวิจัย
วารสารวิจัยและพัฒนา วไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์
สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ในการส่งบทความวิจัยลงตีพิมพ์ในวารสารวิจัยและพัฒนา วไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เพื่อให้การตีพิมพ์บทความวิจัยเป็นไปโดยเรียบร้อยได้มาตรฐาน TCI และเป็นประโยชน์ทั้งผู้ส่งบทความวิจัย ผู้ใช้ประโยชน์จากบทความวิจัย รวมทั้งสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ ในการจัดทำวารสารวิจัยและพัฒนา วไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จึงได้กำหนดหลักเกณฑ์ในการพิจารณาบทความวิจัยเพื่อตีพิมพ์ในวารสารฯ ตลอดจนคำแนะนำการเขียนและส่งต้นฉบับ ดังนี้

หลักเกณฑ์ในการพิจารณาบทความวิจัยเพื่อตีพิมพ์ในวารสาร

1. เป็นบทความวิจัยในสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ตามรูปแบบของต้นฉบับในข้อกำหนดของคำแนะนำการเขียนและส่งต้นฉบับวารสารวิจัยและพัฒนา วไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
2. บทความวิจัยที่ส่งมาพิจารณาตีพิมพ์ลงในวารสารต้องเป็นบทความวิจัยที่ไม่เคยตีพิมพ์เผยแพร่ที่ใดมาก่อนและไม่อยู่ระหว่างเสนอขอตีพิมพ์ในวารสารอื่น
3. เนื้อหาในต้นฉบับควรเกิดจากการสังเคราะห์ความคิดขึ้นโดยผู้เขียนเอง ไม่ได้ลอกเลียนหรือตัดทอนมาจากผลงานวิจัยของผู้อื่น หรือจากบทความอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต หรือปราศจากการอ้างอิงที่เหมาะสม
4. ผู้ส่งบทความวิจัยต้องชำระค่าธรรมเนียมบำรุงวารสารวิจัยและพัฒนา วไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี บทความภาษาไทย บทความละ 4,500 บาท และบทความภาษาอังกฤษ บทความละ 6,000 บาท ผ่านบัญชีธนาคารตามที่มหาวิทยาลัยกำหนด เพื่อเป็นค่าดำเนินการตีพิมพ์บทความและค่าตอบแทนการพิจารณาบทความ
5. จากผู้ทรงคุณวุฒิที่กองบรรณาธิการเชิญมาเพื่อประเมินบทความก่อนการตีพิมพ์บทความ พร้อมส่งสำเนาหลักฐานการชำระค่าธรรมเนียมบำรุงวารสารฯ ได้ 2 ช่องทาง ดังนี้
   1) e-mail: rdi_journalsci@vru.ac.th
   2) เว็บไซต์ https://tci-thaijo.org/index.php/vrurdistjournal/index

   <u>ค่าธรรมเนียมวารสาร</u> จะเรียกเก็บค่าธรรมเนียมเมื่อบทความของผู้นิพนธ์ ผ่านการตรวจความถูกต้องของบทความเบื้องต้นจากบรรณาธิการเรียบร้อยแล้ว ทั้งนี้หากผู้นิพนธ์ยกเลิกบทความ หรือบทความไม่ผ่านการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิไม่ว่ากรณีใด ๆ ก็ตาม วารสารวิจัยและพัฒนา วไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ขอสงวนสิทธิ์ไม่คืนเงินค่าธรรมเนียมทุกกรณี
6. ผู้เขียนบทความวิจัยต้องดำเนินการปรับแก้ไขบทความตามผลการอ่านประเมินของกองบรรณาธิการและผู้ทรงคุณวุฒิของวารสารวิจัยและพัฒนา วไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ อย่างต่อเนื่องตลอดการตีพิมพ์ หากผู้เขียนบทความวิจัยซึ่งต่อไปนี้จะเรียกว่าผู้นิพนธ์บทความไม่ปฏิบัติตามระเบียบการตีพิมพ์บทความวิจัย วารสารวิจัยและพัฒนา วไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ กองบรรณาธิการมีสิทธิ์แจ้งยกเลิกการพิจารณาตีพิมพ์บทความวิจัยโดยไม่คืนเงินค่าธรรมเนียมบำรุงวารสารวิจัยและพัฒนา วไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์
7. บทความวิจัยที่ส่งมาจะได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิจัยและพัฒนา วไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ ต่อเมื่อได้ผ่านกระบวนการประเมินเห็นสมควรให้ตีพิมพ์เผยแพร่โดยผู้ทรงคุณวุฒิที่มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์แต่งตั้งขึ้น จำนวน 3 ท่าน

คำแนะนำการเขียนและส่งต้นฉบับ
วารสารวิจัยและพัฒนา วไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์
สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

1. **การเตรียมต้นฉบับ** ต้นฉบับบทความวิจัยต้องจัดทำสำหรับกระดาษขนาด B5(JIS) (18.2 ซม. X 25.7 ซม.) ความยาว 15 หน้ากระดาษ ตามรูปแบบวารสารวิจัยและพัฒนา วไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี พิมพ์โดยใช้โปรแกรม Microsoft Word เวอร์ชัน 2007 ขึ้นไป
2. **การตั้งค่าหน้ากระดาษ** ระยะขอบกระดาษด้านบน (Top Margin) 2.54 เซนติเมตร ด้านซ้าย (Left Margin) ด้านขวา (Right Margin) และด้านล่าง (Bottom Margin) 2 เซนติเมตร
3. **รูปแบบตัวอักษร** ใช้ TH SarabunPSK เท่านั้น ชื่อหัวข้อพิมพ์เป็นตัวหน้า ขนาด 14 Point จัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ และเนื้อหาพิมพ์เป็นตัวปกติ ขนาด 14 Point จัดกระจายหน้ากระดาษ
4. **องค์ประกอบบทความวิจัยประกอบด้วย**

4.1 ชื่อเรื่อง มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ มีความยาวไม่เกินภาษาละ 2 บรรทัด สามารถอธิบายสาระของเรื่องได้ดี รูปแบบตัวอักษร TH SarabunPSK ตัวหนา ขนาด 14 Point จัดกึ่งกลางหน้ากระดาษ

4.2 ชื่อผู้นิพนธ์บทความ มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ใช้ชื่อเต็มไม่ต้องระบุคำนำหน้าชื่อ ใส่เครื่องหมายเชิงอรรถเป็นตัวเลขยกไว้ท้ายนามสกุลเรียงลำดับตามจำนวนผู้นิพนธ์บทความและใส่เครื่องหมายดอกจัน (*) ไว้บนเลขยกเพื่อแสดงว่าเป็นผู้นิพนธ์หลัก รูปแบบตัวอักษร TH SarabunPSK ตัวหนา ขนาด 14 Point จัดกึ่งกลางหน้ากระดาษ โดยใส่รายละเอียดที่อยู่ผู้นิพนธ์บทความและอีเมลผู้นิพนธ์หลักในเชิงอรรถ

4.3 ที่อยู่ผู้นิพนธ์บทความ ใส่รายละเอียดในเชิงอรรถข้อความที่เขียนไว้ส่วนล่างของหน้ากระดาษและมีเส้นคั่นระหว่างเชิงอรรถกับตัวบทคัดย่อ (Abstract) อย่างชัดเจน โดยขีดเส้นคั่นจากริมกระดาษด้านซ้าย ไปทางด้านขวาประมาณ 1 นิ้ว หรือ 7 ตัวอักษร ใส่ตัวเลขกำกับไว้เหนือตัวอักษรตัวแรกเล็กน้อย ตัวเลขต้องตรงกับตัวเลขที่กำกับไว้กับชื่อผู้นิพนธ์บทความ ให้ระบุตำแหน่งทางวิชาการ (ถ้ามี) สถานที่ทำงาน หน่วยงานหรือสถาบัน และอีเมล์แอดเดรส (E-mail Address) ของผู้นิพนธ์บทความทุกท่าน เช่น นักศึกษาระดับ.... สาขา.... คณะ ..... มหาวิทยาลัย.... อีเมล .... หรือ อาจารย์.... สาขา..... คณะ..... มหาวิทยาลัย.... อีเมล.... หรือ ตำแหน่ง... บริษัท... ที่อยู่... อีเมล์... รูปแบบตัวอักษร TH SarabunPSK ตัวปกติ ขนาด 12 Point จัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ

4.4 บทคัดย่อ(Abstract) ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษความยาวไม่เกิน 15 บรรทัด หรือ 350 คำ โดยใช้สำนวนให้กระชับ ชัดเจนที่สุด รูปแบบตัวอักษร TH SarabunPSK ตัวปกติ ขนาด 14 Point จัดกระจายหน้ากระดาษ

4.5 คำสำคัญ(Keyword) ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษอยู่ใต้บทคัดย่อ(Abstract) คำสำคัญภาษาไทย จำนวน 3 – 5 คำเรียงตามลำดับอักษรระหว่างคำวรรค 2 วรรค ส่วน Keyword หรือคำสำคัญภาษาอังกฤษให้เรียงตามคำสำคัญภาษาไทยคั่นระหว่างคำด้วยจุลภาค (,)

4.6 เนื้อหาของบทความวิจัย ประกอบด้วยหัวข้อต่อไปนี้

4.6.1 บทนำ เป็นส่วนของเนื้อหาที่บอกความเป็นมา และเหตุผลนำไปสู่การศึกษาวิจัย

4.6.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย ให้ชี้แจงถึงจุดมุ่งหมายของการวิจัย

4.6.3 วิธีดำเนินการวิจัย ควรอธิบายวิธีดำเนินการวิจัย โดยกล่าวถึงวิธีการสุ่มกลุ่มตัวอย่าง ที่มาของกลุ่มตัวอย่าง แหล่งที่มาของข้อมูล การเก็บและรวบรวมข้อมูล การใช้เครื่องมือ สถิติที่ใช้ในการวิจัยและการวิเคราะห์ข้อมูล

4.6.4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล เป็นการเสนอสิ่งที่ได้จากการวิจัยเป็นลำดับอาจแสดงด้วยตารางกราฟ แผนภาพประกอบการอธิบาย ทั้งนี้ถ้าแสดงด้วยตาราง ควรเป็นตารางแบบไม่มีเส้นขอบตารางด้านซ้ายและขวา หัวตารางแบบธรรมดาไม่มีสี ตารางควรมีเฉพาะที่จำเป็นไม่ควรเกิน 5 ตาราง สำหรับรูปภาพประกอบควรเป็นรูปภาพขาว-ดำ ที่ชัดเจนและมีคำบรรยายใต้รูป จัดกึ่งกลางหน้ากระดาษ กรณีที่จำเป็นอาจใช้ภาพสีได้

4.6.5 สรุป เป็นการสรุปผลที่ได้จากการวิจัยและควรมีการอภิปรายผลการวิจัยว่าเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้หรือไม่เพียงใด และควรอ้างทฤษฎีหรือเปรียบเทียบการทดลองของผู้อื่นที่เกี่ยวข้องประกอบเพื่อให้ผู้อ่านเห็นด้วยตามหลักการหรือคัดค้านทฤษฎีที่มีอยู่เดิม รวมทั้งแสดงให้เห็นถึงการนำผลไปใช้ประโยชน์ และการให้ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

4.6.6 ข้อเสนอแนะ ควรมี 2 ส่วน คือ ข้อเสนอในการนำผลการวิจัยไปใช้ และข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป

4.6.7 กิตติกรรมประกาศ (ถ้ามี) ข้อความแสดงความขอบคุณผู้มีส่วนสนับสนุน ช่วยเหลือ และให้ความร่วมมือในการทำงานวิจัย รวมถึงแหล่งทุนสนับสนุนต่างๆ

4.6.8 เอกสารอ้างอิงและการอ้างอิง การเขียนเอกสารอ้างอิงและการอ้างอิง ใช้ระบบ APA (American Psychological Association) ให้เรียงลำดับชื่อผู้แต่งหรือผู้รายงานตามลำดับอักษรเริ่มด้วยเอกสารภาษาไทยก่อน แล้วต่อด้วยเอกสารภาษาต่างประเทศ

4.7 การเขียนเอกสารอ้างอิงและการอ้างในระบบ APA (American Psychological Association)

4.7.1 ชื่อวารสาร ชื่อหนังสือ และปีที่ (Volume) ไม่ใช้ชื่อย่อ

4.7.2 ชื่อภาษาอังกฤษ เขียนชื่อผู้แต่งโดยขึ้นต้นด้วย Last name ตามด้วยจุลภาค (,) และชื่อย่อตามด้วยมหัพภาค (.)

4.7.3 ชื่อไทย เขียนชื่อผู้แต่งโดยขึ้นต้นด้วยชื่อตัว ตามด้วยนามสกุล

4.7.4 กรณีผู้แต่งมากกว่าหนึ่งคน ให้เขียนชื่อผู้แต่งทั้งหมดทุกคน คั่นระหว่างชื่อด้วยจุลภาค (,) และมีคำว่า “and” หรือ “&” ในกรณีชื่อภาษาอังกฤษ หรือ “และ” ในกรณีชื่อภาษาไทยก่อนชื่อสุดท้าย

4.7.5 ถ้าไม่มีชื่อผู้แต่ง ให้ขึ้นต้นด้วยชื่อเรื่อง หรือชื่อวารสาร หรือชื่อหนังสือ ตามด้วยปีที่พิมพ์

4.7.6 ถ้าผู้แต่งเป็นหน่วยงาน หรือองค์กร ให้ใช้ชื่อหน่วยงานหรือองค์กรแทนชื่อผู้แต่ง

4.7.7 เรียงลำดับรายการตามตัวอักษรชื่อผู้แต่ง รายการที่มีทั้งเอกสารภาษาไทยและอังกฤษ ให้นำข้อมูลภาษาไทยขึ้นก่อน
ตามด้วยข้อมูลภาษาอังกฤษ พิมพ์โดยใช้ระยะห่างระหว่างบรรทัด อย่างน้อย (At least) 12 Point

4.7.8 บรรทัดที่สองและบรรทัดต่อๆ ไปของแต่ละรายการให้ย่อหน้าเข้ามา 7 ตัวอักษร หรือ 1.25 เซ็นติเมตร

4.7.9 การอ้าง – อ้างโดย(ชื่อผู้แต่ง, ปีที่พิมพ์)

4.7.10 ไม่อ้างโดยใช้คำว่า “และคณะ” หรือ “และคนอื่นๆ” หรือ et al. ยกเว้นกรณีอ้างในเนื้อเรื่องที่มีผู้แต่งตั้งแต่สามคนขึ้นไปและหลังจากได้มีการอ้างครั้งแรกไว้ก่อนหน้านั้นแล้ว หรือการอ้างที่มีผู้แต่งตั้งแต่หกคนขึ้นไป

4.7.11 การอ้างจากวารสารและนิตยสารให้ระบุหน้าแรกถึงหน้าสุดท้าย โดยไม่ใช้คำย่อ “ p.” หรือ “pp.” นอกจากหนังสือ

4.7.12 การติดต่อส่วนตัวโดยสื่อใดๆ ก็ตาม สามารถอ้างอิงได้ในเนื้อเรื่อง แต่ต้องไม่มีการระบุไว้ในรายการเอกสารอ้างอิง เพราะผู้อื่นไม่สามารถติดตามข้อมูลเหล่านี้ได้

4.7.13 การอ้างอิงจาก Website ให้ระบุวัน เดือน ปีที่พิมพ์ ถ้าไม่ปรากฏให้อ้างวันที่ทำการสืบค้น และระบุ URL ให้ชัดเจน ถูกต้อง เมื่อจบ URL address ห้ามใส่จุด (.) ข้างท้าย

4.7.14 Website ไม่บอกวันที่ ให้ระบุ n.d.

4.7.15 หลัง มหัพภาค “.” (period) เว้น 2 วรรค

4.7.16 หลัง จุลภาค “,” (comma) เว้น 1 วรรค

4.7.17 หลัง อัฒภาค “;” (semicolon) เว้น 1 วรรค

4.7.18 หลัง ทวิภาค “:” (colons) เว้น 1 วรรค

4.7.19 รูปแบบและตัวอย่างการอ้างอิงจากสิ่งพิมพ์ต่าง ๆ

1. หนังสือหรือตำรา

รูปแบบ: ชื่อผู้แต่ง. //(ปีที่พิมพ์).//**ชื่อหนังสือ.**/ครั้งที่พิมพ์(ถ้ามี). //เมืองที่พิมพ์: /สำนักพิมพ์.

ตัวอย่างเช่น ไพรัช ธัชยพงษ์, และกฤษณะ ช่างกล่อม. (2541). **งานพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานสารสนเทศแห่งชาติเพื่อการศึกษา**. กรุงเทพฯ: แพร่พิทยา.

Mitchell, T. R., & Larson, J. R., Jr. (1987**). People in organizations: An introduction to organizational behavior** (3rd ed.). New York: McGraw-Hill.

2. หนังสือหรือตำราที่มีบรรณาธิการ

รูปแบบ: ชื่อบรรณาธิการ(ผู้รวบรวม).//(ปีที่พิมพ์).//**ชื่อหนังสือ**.//เมืองที่พิมพ์:/สำนักพิมพ์.

ตัวอย่างเช่น อดุลย์ วิริยเวชกุล, (บก.). (2541). **คู่มือจัดการเรียนการสอนระดับบัณฑิตศึกษา**. นครปฐม: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล.

Gibbs, J. T., & Huang, L. N. (Eds.). (1991). **Children of color: Psychological interventions with minority youth**. San Francisco: Jossey-Bass.

3. วิทยานิพนธ์

รูปแบบ: ชื่อผู้แต่ง.//(ปีที่พิมพ์).//**ชื่อวิทยานิพนธ์**.//ระดับวิทยานิพนธ์,/มหาวิทยาลัย.

ตัวอย่างเช่น พรพิมล เฉลิมพลานุภาพ. (2535). **พฤติพรรมการแสวงหาข่าวสารและการใช้เทคโนโลยีการสื่อสารของบริษัทธุรกิจเอกชนที่มียอดขายสูงสุดของประเทศไทย.** วิทยานิพนธ์วารสารศาสตรมหาบัณฑิต คณะวารสารศาสตร์และสื่อสารมวลชน, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

Almeida, D.M. (1990). **Fathers' participation in family work: Consequences for fathers' stress and father-child relations**. Unpublished master's thesis, University of Victoria, Victoria British Columbia, Canada.

4. รายงานการประชุมหรือสัมมนาทางวิชาการ

รูปแบบ: ชื่อผู้แต่ง.//ปีที่พิมพ์.//**ชื่อเรื่อง**.//ชื่อเอกสารรวมเรื่องรายงานการประชุม,/วัน เดือน ปี สถานที่จัด. เมืองที่พิมพ์:/สำนักพิมพ์.

ตัวอย่างเช่น กรมวิชาการ. 2538. **การจัดกิจกรรมส่งเสริมนิสัยรักการอ่าน**. การประชุมปฏิบัติการรณรงค์เพื่อส่งเสริมนิสัยรักการอ่าน, 25-29 พฤศจิกายน 2528 ณ วิทยาลัยครูมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม. กรุงเทพฯ: ศูนย์พัฒนาหนังสือ กรมวิชาการ กระทรวงศึกษาธิการ.

Deci, E. L., & Ryan, R. M. (1991). **A motivational approach to self: Integration in personality**. In R. Dienstbier (Ed.), Nebraska Symposium on Motivation: Vol. 38. Perspectives on Motivation (pp. 237-288). Lincoln: University of Nebraska Press. *Motivation: Vol. 38. Perspectives on Motivation* (pp. 237-288). Lincoln: University of Nebraska Press.

5. พจนานุกรม

ตัวอย่างเช่น พจนานุกรมฉบับราชบัณฑิตยสถาน พ.ศ. 2542. (2546). กรุงเทพฯ: นานมีบุ๊คพับลิ เคชัน.

Shorter Oxford English dictionary (5 th ed.). (2002). New York: Oxford University Press.

6. วารสาร/นิตยสาร

รูปแบบ: ชื่อผู้แต่ง.//(ปีที่พิมพ์).//ชื่อเรื่อง.//**ชื่อวารสารหรือนิตยสาร**,/ปีที่ (ฉบับที่),/หน้าแรก–หน้าสุดท้าย.

ตัวอย่างเช่น ชำนิ กิ่งแก้ว, และอุษา คะเณ. (2551). การศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตโดยการลดความสูญเปล่าในกระบวนการผลิตแอลกอฮอล์. **วารสารเทคโนโลยีภาคใต้**, 1(2), 27-35.

Klimoski, R., & Palmer, S. (1993). The ADA and the hiring process in organizations. **Consulting Psychology Journal: Practice and Research**, 45(2), 10-36.

7. บทความจากหนังสือพิมพ์

รูปแบบ: ชื่อผู้แต่ง.//(ปีที่พิมพ์, เดือน, วันที่).//ชื่อเรื่อง.//**ชื่อหนังสือพิมพ์**,/หน้าที่นามาอ้าง.

ตัวอย่างเช่น สายใจ ดวงมาลี. (2548, มิถุนายน 7) มาลาเรียลาม3จว.ใต้ตอนบน สธ.เร่งคุมเข้มกันเชื้อแพร่หนัก. **คม-ชัด-ลึก**, 25.

Di Rado, A. (1995, March 15). Trekking through college: Classes explore modern society using the world of Star Trek. **Los Angeles Time**, p. A3.

8. สื่ออิเล็กทรอนิกส์

รูปแบบ: ชื่อผู้แต่ง.//(ปีที่พิมพ์).//**ชื่อเรื่อง**.//สืบค้นจาก//URL

Author, A. A. (Year). **Title of post**. Retrieved from URL

ตัวอย่างเช่น สำนักงานคณะกรรมการวัฒนธรรมแห่งชาติ กระทรวงวัฒนธรรม. (2545). **ประเพณีใส่กระจาดชาวไทยพวนสอนให้รู้จักแบ่งปัน มีน้ำใจ**. สืบค้นจาก http://www.m-culture.go.th/culture01/highlight/highlightdetail.php?highlight_id=114&lang=th

Lynch, T. (1996). **DS9 trials and tribble-ations review**. Retrieved from http://www.bradley.edu/psiphi/ DS9/ep/503r.html

5. **การส่งต้นฉบับ** ผู้นิพนธ์บทความต้องส่งต้นฉบับที่พิมพ์ตามรูปแบบของต้นฉบับในข้อกำหนดของคำแนะนำการเขียนและส่งต้นฉบับวารสารวิจัยและพัฒนา วไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ ในรูปแบบ Word Document (.docx) และ PDF File (.pdf) มาที่เว็บไซต์ https://tci-thaijo.org/index.php/vrurdistjournal/index โดยค่าธรรมเนียมวารสารจะเรียกเก็บค่าธรรมเนียมเมื่อบทความของผู้นิพนธ์ ผ่านการตรวจความถูกต้องของบทความเบื้องต้นจากบรรณาธิการเรียบร้อยแล้ว

6. **การประเมินบทความวิจัย และลิขสิทธิ์ในการตีพิมพ์เผยแพร่**

6.1 การอ่านประเมินต้นฉบับ บทความวิจัยต้นฉบับที่ส่งเข้ามาเพื่อลงตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิจัยและพัฒนา วไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จะได้รับการอ่านประเมินโดยผู้ทรงคุณวุฒิ (Peer Review) ในสาขานั้น ๆ อย่างน้อยจำนวน 3 ท่านต่อเรื่องและส่งผลการอ่านประเมินคืนผู้นิพนธ์บทความให้เพิ่มเติม แก้ไขแล้วแต่กรณี โดยบทความที่ผ่านการประเมินได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิจัยและพัฒนา วไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ผู้นิพนธ์บทความจะได้รับหนังสือแจ้งพิจารณาการตีพิมพ์ พร้อมวารสารฉบับที่บทความวิจัยนั้นลงตีพิมพ์ จำนวน 1 ฉบับ

6.2 ลิขสิทธิ์บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิจัยและพัฒนา วไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ถือเป็นกรรมสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ ห้ามนำข้อความทั้งหมดหรือบางส่วนไปพิมพ์ซ้ำ เว้นแต่จะได้รับอนุญาตจากมหาวิทยาลัยเป็นลายลักษณ์อักษร

6.3 ความรับผิดชอบ เนื้อหาต้นฉบับที่ปรากฏในวารสารวิจัยและพัฒนา วไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ เป็นความรับผิดชอบของผู้นิพนธ์บทความหรือผู้เขียนเอง ทั้งนี้ไม่รวมความผิดพลาดอันเกิดจากเทคนิคการพิมพ์

รูปแบบบทความวิจัย
วารสารวิจัยและพัฒนา วไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์
สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

2.54 ซม.

ย่อหน้า 1.25 ซม. หรือประมาณ 7 ตัวอักษร

ชื่อเรื่องภาษาไทย (ตัวหนาขนาด 14 point จัดกึ่งกลาง)

(เว้น 14 point)

ชื่อผู้นิพนธ์ภาษาไทย[1*]//ชื่อผู้นิพนธ์ภาษาไทย[2]//ชื่อผู้นิพนธ์ภาษาไทย[3]// (ตัวหนาขนาด 14 point จัดกึ่งกลาง)

(เว้น 14 point)

บทคัดย่อ (ตัวหนาขนาด 14 point จัดชิดซ้าย)

บทคัดย่อควรจะสรุปเนื้อหาทั้งหมดของบทความวิจัย โดยมีเนื้อหาครอบคลุมถึงความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ผลวิจัยและสรุปผลของการวิจัย กำหนดให้มีความยาวไม่เกิน 15 บรรทัด หรือ 350 คำ เพื่อให้บทความของท่านได้รับการจัดพิมพ์อย่างถูกต้อง ครบถ้วน ในวารสารวิจัยและพัฒนา วไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์

หมายเหตุ เครื่องหมาย / หมายถึง การเว้นวรรค 1 วรรค

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

2 ซม. ..... 2 ซม.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

เชิงอรรถ สำหรับระบุสถานะและที่อยู่ของผู้นิพนธ์บทความ

..... (ตัวปกติขนาด 14 point จัดกระจาย)

(เว้น 14 point)

คำสำคัญ: .... (3 -5 คำ) (ตัวปกติขนาด 14 point จัดชิดซ้าย)

(เว้น 14 point)

---

[1](ระบุสถานะและที่อยู่สำหรับติดต่อของผู้นิพนธ์บทความที่ 1 ตัวเอียง ขนาด 12 point จัดชิดซ้าย) ตัวอย่างเช่น
นักศึกษาหลักสูตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาบริหารการศึกษา มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์
อีเมล: rdi_journalsci@vru.ac.th

[2](ระบุสถานะและที่อยู่สำหรับติดต่อของผู้นิพนธ์บทความที่ 2 ตัวเอียง ขนาด 12 point จัดชิดซ้าย)

[3](ระบุสถานะและที่อยู่สำหรับติดต่อของผู้นิพนธ์บทความที่ 3 ตัวเอียง ขนาด 12 point จัดชิดซ้าย)

[*]ผู้นิพนธ์หลัก อีเมล:

2 ซม.

2.54 ซม.

ชื่อเรื่องภาษาอังกฤษ (ตัวหนาขนาด 14 point จัดกึ่งกลาง)

(เว้น 14 point)

ชื่อผู้นิพนธ์ภาษาอังกฤษ[1*]//ชื่อผู้นิพนธ์ภาษาอังกฤษ[2]//ชื่อผู้นิพนธ์ภาษาอังกฤษ[3]// (ตัวหนาขนาด 12 point จัดกึ่งกลาง)

(เว้น 14 point)

Abstact (ตัวหนาขนาด 14 point ชิดซ้าย)

Abstract must be written in Thai and English, within a maximum of 350 words for each language

ย่อหน้า 1.25 ซม. หรือประมาณ 7 ตัวอักษร

2 ซม. 2 ซม.

..... (ตัวปกติขนาด 14 point จัดกระจาย)

เชิงอรรถ สำหรับระบุสถานะและที่อยู่ของผู้นิพนธ์บทความ

(เว้น 14 point)

Keyword: ....., ..., ..., ..., ... (ตัวปกติขนาด 14 point จัดชิดซ้าย)

(เว้น 14 point)

---

[1]Position, Office address, Email address: author 1

[2]Position, Office address, Email address: author 2

[3]Position, Office address, Email address: author 3

[*]Corresponding author, e-mail:

2 ซม.

2.54 ซม.

บทนำ (ตัวหนาขนาด 14 point จัดชิดซ้าย)

เป็นส่วนของเนื้อหาที่บอกความเป็นมา และเหตุผลนำไปสู่การศึกษาวิจัย ..... (ตัวปกติขนาด 14 point จัดกระจาย)

(เว้น 14 point)

วัตถุประสงค์ของการวิจัย (ตัวหนาขนาด 14 point จัดชิดซ้าย)

ให้ชี้แจงถึงจุดมุ่งหมายของการวิจัย..... (ตัวปกติขนาด 14 point จัดกระจาย)

(เว้น 14 point)

วิธีดำเนินการวิจัย (ตัวหนาขนาด 14 point จัดชิดซ้าย)

ควรอธิบายวิธีดำเนินการวิจัย โดยกล่าวถึงวิธีการสุ่มกลุ่มตัวอย่าง ที่มาของกลุ่มตัวอย่าง แหล่งที่มาของข้อมูล การเก็บและรวบรวมข้อมูล การใช้เครื่องมือ สถิติที่ใช้ในการวิจัยและการวิเคราะห์ข้อมูล ..... (ตัวปกติขนาด 14 point จัดกระจาย)

(เว้น 14 point)

ผลการวิจัยและอภิปรายผล (ตัวหนาขนาด 14 point จัดชิดซ้าย)

เป็นการเสนอสิ่งที่ได้จากการวิจัยเป็นลำดับอาจแสดงด้วยตารางกราฟ แผนภาพประกอบการอธิบาย ทั้งนี้ถ้าแสดงด้วยตาราง ควรเป็นตารางแบบไม่มีเส้นขอบตารางด้านซ้ายและขวา หัวตารางแบบธรรมดาไม่มีสี ตารางควรมีเฉพาะที่จำเป็นไม่ควรเกิน 5 ตาราง สำหรับรูปภาพประกอบควรเป็นรูปภาพขาว-ดำ ที่ชัดเจนและมีคำบรรยายใต้รูป กรณีที่จำเป็นอาจใช้ภาพสีได้..... (ตัวปกติขนาด 14 point จัดกระจาย)

2 ซม. (เว้น 14 point) 2 ซม.

สรุป (ตัวหนาขนาด 14 point จัดชิดซ้าย)

เป็นการสรุปผลที่ได้จากการวิจัยว่าเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้หรือไม่เพียงใด และควรอ้างทฤษฎีหรือเปรียบเทียบการทดลองของผู้อื่นที่เกี่ยวข้องประกอบเพื่อให้ผู้อ่านเห็นด้วยตามหลักการหรือคัดค้านทฤษฎีที่มีอยู่เดิม รวมทั้งแสดงให้เห็นถึงการนำผลไปใช้ประโยชน์..... (ตัวปกติขนาด 14 point จัดกระจาย)

(เว้น 14 point)

ข้อเสนอแนะ (ตัวหนาขนาด 14 point จัดชิดซ้าย)

ควรมี 2 ส่วน คือ ข้อเสนอเกี่ยวกับงานวิจัย และข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป ..... (ตัวปกติขนาด 14 point จัดกระจาย)

(เว้น 14 point)

กิตติกรรมประกาศ(ถ้ามี) (ตัวหนาขนาด 14 point จัดชิดซ้าย)

ข้อความแสดงความขอบคุณผู้มีส่วนสนับสนุน ช่วยเหลือ และให้ความร่วมมือในการทำงานวิจัย รวมถึงแหล่งทุนสนับสนุนต่างๆ ..... (ตัวปกติขนาด 14 point จัดกระจาย)

(เว้น 14 point)

เอกสารอ้างอิง (ตัวหนาขนาด 14 point ชิดซ้าย)

การเขียนเอกสารอ้างอิงและการอ้างอิง ใช้ระบบ APA (American Psychological Association) เท่านั้น ให้เรียงลำดับชื่อผู้แต่งหรือผู้รายงานตามลำดับอักษรเริ่มด้วยเอกสารภาษาไทยก่อน แล้วต่อด้วยเอกสารภาษาต่างประเทศ..... (ตัวปกติขนาด 14 point จัดกระจาย)

2 ซม.

[ชื่อเรื่องบทความวิจัยภาษาไทย (TH SarabunPSK, 14 point, ตัวหนา, จัดกึ่งกลาง)]

[ชื่อผู้นิพนธ์บทความวิจัย][1*] [ชื่อผู้นิพนธ์บทความวิจัย][2] [ชื่อผู้นิพนธ์บทความวิจัย][3]

บทคัดย่อ

บทคัดย่อ ควรจะสรุปเนื้อหาทั้งหมดของบทความวิจัย โดยใช้สำนวนให้กระชับ ชัดเจนที่สุด มีความยาวไม่เกิน 15 บรรทัด หรือ 350 คำ รูปแบบตัวอักษร TH SarabunPSK ตัวปกติ ขนาด 14 point จัดกระจายแบบไทย “ชื่อเรื่อง” มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ มีความยาวไม่เกินภาษาละ 2 บรรทัด และให้อธิบายสาระสำคัญของเรื่องได้ดี รูปแบบตัวอักษร TH SarabunPSK ตัวหนา ขนาด 14 point จัดกึ่งกลางหน้ากระดาษ “ชื่อผู้นิพนธ์บทความวิจัย” มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ใช้ชื่อเต็มไม่ต้องระบุคำนำหน้าชื่อ ใส่เครื่องหมายเชิงอรรถเป็นตัวเลขยกไว้ท้ายนามสกุลพร้อมใส่เครื่องหมายดอกจัน (*) แสดงถึงความสำคัญชองการเป็นผู้นิพนธ์หลัก หากมีผู้นิพนธ์บทความมากกว่าหนึ่งท่านให้ใส่เครื่องหมายเชิงอรรถเป็นตัวเลขยกไว้ท้ายนามสกุลเรียงลำดับตามจำนวนผู้นิพนธ์พร้อมใส่เครื่องหมายดอกจัน (*) แสดงถึงความสำคัญชองการเป็นผู้นิพนธ์หลัก รูปแบบตัวอักษร TH SarabunPSK ตัวหนา ขนาด 14 Point จัดกึ่งกลางหน้ากระดาษ และใส่รายละเอียดที่อยู่ผู้นิพนธ์บทความไว้ในเชิงอรรถส่วนล่างของกระดาษ โดยระบุตำแหน่งทางวิชาการหรือตำแหน่งทางบริหาร(ถ้ามี) สถานที่ทำงาน หน่วยงานหรือสถาบัน และอีเมลแอดเดรส (E-mail Address) ของผู้นิพนธ์บทความทุกคน เช่น [1] นักศึกษาระดับ ... สาขา... คณะ... มหาวิทยาลัย... อีเมล: .... หรือ อาจารย์... สาขา... คณะ... มหาวิทยาลัย... อีเมล: ..... หรือ ตำแหน่ง... บริษัท... ที่อยู่.... อีเมล: ... * ผู้นิพนธ์หลัก อีเมล: .....รูปแบบตัวอักษร TH SarabunPSK ตัวเอียง ขนาด 12 Point จัดชิดซ้ายหน้ากระดาษ.....

คำสำคัญ: คำสำคัญ คำสำคัญ คำสำคัญ

---

[1] นักศึกษา หลักสูตรครุศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาการบริหารการศึกษา มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ อีเมล: .....

[2] อาจารย์ประจำหลักสูตร ภาควิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ อีเมล: .....

[3] เจ้าหน้าที่การเงิน บริษัท ธุรกิจการพิมพ์ จำกัด อีเมล: .....

** ผู้นิพนธ์หลัก อีเมล: .....*

[RESEARCH TITLE (TH SARABUNPSK, 14 POINT, BOLD, CENTER)]

[First A. Author1][1*] [Second B. Author2][2] [Third C. Author3][3]

Abstract

Abstract must be written in Thai and English, within a maximum of 350 words for each language. .....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

Keywords: Keyword, Keyword, Keyword

[1] *Doctor of Education Program in Educational Admimistration, Valaya Alongkorn Rajabhat University Under The Royal Patronage, e-mail: .....*

[2] *Department of Computer Science, Faculty of Science and Technology, Valaya Alongkorn Rajabhat University Under The Royal Patronage, e-mail: .....*

[3] *Finance Officer, Business Printing Company Limited, Nonthaburi, e-mail: .....*

** Corresponding author, e-mai : .....*

บทนำ

[บทนำ เป็นส่วนของความสำคัญและมูลเหตุที่นำไปสู่การวิจัย]..... (TH SarabunPSK, 14 point, ตัวปกติ, จัดกระจายแบบไทย)

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

[วัตถุประสงค์ของการวิจัย เป็นส่วนของเนื้อหาที่บอกความเป็นมา และเหตุผลนำไปสู่การศึกษาวิจัย]..... (TH SarabunPSK, 14 point, ตัวปกติ, จัดกระจายแบบไทย)

วิธีดำเนินการวิจัย

[วิธีดำเนินการวิจัย ควรอธิบายวิธีดำเนินการวิจัย โดยกล่าวถึงวิธีการสุ่มกลุ่มตัวอย่าง ที่มาของกลุ่มตัวอย่าง แหล่งที่มาของข้อมูล การเก็บและรวบรวมข้อมูล การใช้เครื่องมือ สถิติที่ใช้ในการวิจัยและการวิเคราะห์ข้อมูล]..... (TH SarabunPSK, 14 point, ตัวปกติ, จัดกระจายแบบไทย)

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

[ผลการวิจัยและอภิปรายผล ควรเสนอผลที่ชัดเจน ตรงประเด็น เป็นการเสนอสิ่งที่ได้จากการวิจัยเป็นลำดับอาจแสดงด้วยตารางกราฟ แผนภาพประกอบการอธิบาย] ทั้งนี้ถ้าแสดงด้วยตาราง ควรเป็นตารางแบบไม่มีเส้นขอบตารางด้านซ้ายและด้านขวา หัวตารางแบบธรรมดาไม่มีสี ตารางควรมีเฉพาะที่จำเป็นไม่ควรเกิน 5 ตาราง และมีคำอธิบายตาราง เช่น

ตารางที่ 1 รูปแบบ ขนาดและลักษณะของตัวอักษร

ส่วนประกอบ	ขนาดอักษร	ลักษณะอักษร
ชื่อบทความ (ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ)	TH SarabunPSK, 14	หนา
ชื่อผู้เขียน (ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ)	TH SarabunPSK, 14	หนา
สถานที่ติดต่อ(ระบุในเชิงอรรถ)	TH SarabunPSK, 12	เอียง, ปกติ
บทคัดย่อ / Abstract	TH SarabunPSK, 14	ปกติ
คำสำคัญ / Keywords	TH SarabunPSK, 14	ปกติ
หัวข้อหลัก	TH SarabunPSK, 14	หนา
หัวข้อรอง	TH SarabunPSK, 14	ปกติ

เนื้อความทั่วไป	TH SarabunPSK, 14	ปกติ

ตารางที่ 1 รูปแบบ ขนาดและลักษณะของตัวอักษร (ต่อ)

ส่วนประกอบ	ขนาดอักษร	ลักษณะอักษร
ตารางและภาพ	TH SarabunPSK, 14	ปกติ
กิตติกรรมประกาศ	TH SarabunPSK, 14	ปกติ
เอกสารอ้างอิง	TH SarabunPSK, 14	ปกติ

สำหรับรูปภาพประกอบควรเป็นรูปภาพขาว-ดำ ที่ชัดเจน มีขนาดของรูปภาพที่เหมาะสมและมีคำบรรยายใต้รูปภาพ

รูปภาพ

ภาพที่ 1 ตัวอย่างการจัดรูปภาพ (TH SarabunPSK, 14 point, ตัวปกติ, จัดกระจายแบบไทย)

สรุป

เป็นการสรุปผลที่ได้จากการวิจัยว่าเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้หรือไม่เพียงใด และควรอ้างทฤษฎีหรือเปรียบเทียบการทดลองของผู้อื่นที่เกี่ยวข้องประกอบเพื่อให้ผู้อ่านเห็นด้วยตามหลักการหรือคัดค้านทฤษฎีที่มีอยู่เดิม รวมทั้งแสดงให้เห็น.....(TH SarabunPSK, 14 point, ตัวปกติ, จัดกระจายแบบไทย)

ข้อเสนอแนะ

[เนื้อหาข้อเสนอแนะ ควรมี 2 ส่วน คือ ข้อเสนอเกี่ยวกับงานวิจัย และข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป] ..... (TH SarabunPSK, 14 point, ตัวปกติ, จัดกระจายแบบไทย)

กิตติกรรมประกาศ

[กิตติกรรมประกาศ ให้เขียนถึงข้อความแสดงความขอบคุณผู้มีส่วนสนับสนุน ช่วยเหลือ และให้ความร่วมมือในการทำงานวิจัย รวมถึงแหล่งทุนสนับสนุนต่างๆ] .....

……(TH SarabunPSK, 14 point, ตัวปกติ, จัดกระจายแบบไทย)

เอกสารอ้างอิง

[การเขียนเอกสารอ้างอิงและการอ้างอิง ให้ใช้ระบบ APA (American Psychological Association) เท่านั้น ให้เรียงลำดับชื่อผู้แต่งหรือผู้รายงานตามลำดับอักษรเริ่มด้วยเอกสารภาษาไทยก่อน แล้วต่อด้วยเอกสารภาษาต่างประเทศ]..... (TH SarabunPSK, 14 point, ตัวปกติ, จัดกระจายแบบไทย)

ตัวอย่าง เอกสารอ้างอิง ให้ดูที่ไฟล์ “ระเบียบการตีพิมพ์บทความวิจัย”

[RESEARCH TITLE (TH SARABUNPSK, 14 POINT, BOLD, CENTER)]

[First A. Author1][1*] [Second B. Author2][2] [Third C. Author3][3]

Abstract

Abstract must be written in Thai and English, within a maximum of 350 words for each language. .....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

Keywords: Keyword, Keyword, Keyword

[1] *Doctor of Education Program in Educational Admimistration, Valaya Alongkorn Rajabhat University Under The Royal Patronage, e-mail: .....*

[2] *Department of Computer Science, Faculty of Science and Technology, Valaya Alongkorn Rajabhat University Under The Royal Patronage, e-mail: .....*

[3] *Finance Officer, Business Printing Company Limited, Nonthaburi, e-mail: .....*

** Corresponding author, e-mai : .....*

Introduction

[บทนำ เป็นส่วนของความสำคัญและมูลเหตุที่นำไปสู่การวิจัย]..... (TH SarabunPSK, 14 point, ตัวปกติ, จัดกระจายแบบไทย)

Objectives

[วัตถุประสงค์ของการวิจัย เป็นส่วนของเนื้อหาที่บอกความเป็นมา และเหตุผลนำไปสู่การศึกษาวิจัย]..... (TH SarabunPSK, 14 point, ตัวปกติ, จัดกระจายแบบไทย)

Materials and methods

[วิธีดำเนินการวิจัย ควรอธิบายวิธีดำเนินการวิจัย โดยกล่าวถึงวิธีการสุ่มกลุ่มตัวอย่าง ที่มาของกลุ่มตัวอย่าง แหล่งที่มาของข้อมูล การเก็บและรวบรวมข้อมูล การใช้เครื่องมือ สถิติที่ใช้ในการวิจัยและการวิเคราะห์ข้อมูล]..... (TH SarabunPSK, 14 point, ตัวปกติ, จัดกระจายแบบไทย)

Results and discussion

[ผลการวิจัยและอภิปรายผล ควรเสนอผลที่ชัดเจน ตรงประเด็น เป็นการเสนอสิ่งที่ได้จากการวิจัยเป็นลำดับอาจแสดงด้วยตารางกราฟ แผนภาพประกอบการอธิบาย] ทั้งนี้ถ้าแสดงด้วยตาราง ควรเป็นตารางแบบไม่มีเส้นขอบตารางด้านซ้ายและด้านขวา หัวตารางแบบธรรมดาไม่มีสี ตารางควรมีเฉพาะที่จำเป็นไม่ควรเกิน 5 ตาราง และมีคำอธิบายตาราง เช่น

Table 1 รูปแบบ ขนาดและลักษณะของตัวอักษร

ส่วนประกอบ	ขนาดอักษร	ลักษณะอักษร
ชื่อบทความ (ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ)	TH SarabunPSK, 14	หนา
ชื่อผู้เขียน (ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ)	TH SarabunPSK, 14	หนา
สถานที่ติดต่อ(ระบุในเชิงอรรถ)	TH SarabunPSK, 12	เอียง, ปกติ
บทคัดย่อ / Abstract	TH SarabunPSK, 14	ปกติ
คำสำคัญ / Keywords	TH SarabunPSK, 14	ปกติ
หัวข้อหลัก	TH SarabunPSK, 14	หนา
หัวข้อรอง	TH SarabunPSK, 14	ปกติ
เนื้อความทั่วไป	TH SarabunPSK, 14	ปกติ

Table 1 รูปแบบ ขนาดและลักษณะของตัวอักษร (ต่อ)

ส่วนประกอบ	ขนาดอักษร	ลักษณะอักษร
ตารางและภาพ	TH SarabunPSK, 14	ปกติ
กิตติกรรมประกาศ	TH SarabunPSK, 14	ปกติ
เอกสารอ้างอิง	TH SarabunPSK, 14	ปกติ

สำหรับรูปภาพประกอบควรเป็นรูปภาพขาว-ดำ ที่ชัดเจน มีขนาดของรูปภาพที่เหมาะสมและมีคำบรรยายใต้รูปภาพ

รูปภาพ

Figure 1 ตัวอย่างการจัดรูปภาพ (TH SarabunPSK, 14 point, ตัวปกติ, จัดกระจายแบบไทย)

Conclusions

เป็นการสรุปผลที่ได้จากการวิจัยว่าเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้หรือไม่เพียงใด และควรอ้างทฤษฎีหรือเปรียบเทียบการทดลองของผู้อื่นที่เกี่ยวข้องประกอบเพื่อให้ผู้อ่านเห็นด้วยตามหลักการหรือคัดค้านทฤษฎีที่มีอยู่เดิม รวมทั้งแสดงให้เห็น.....(TH SarabunPSK, 14 point, ตัวปกติ, จัดกระจายแบบไทย)

Recommendation

[เนื้อหาข้อเสนอแนะ ควรมี 2 ส่วน คือ ข้อเสนอเกี่ยวกับงานวิจัย และข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป] ..... (TH SarabunPSK, 14 point, ตัวปกติ, จัดกระจายแบบไทย)

Acknowledgements

[กิตติกรรมประกาศ ให้เขียนถึงข้อความแสดงความขอบคุณผู้มีส่วนสนับสนุน ช่วยเหลือ และให้ความร่วมมือในการทำงานวิจัย รวมถึงแหล่งทุนสนับสนุนต่างๆ] .....(TH SarabunPSK, 14 point, ตัวปกติ, จัดกระจายแบบไทย)

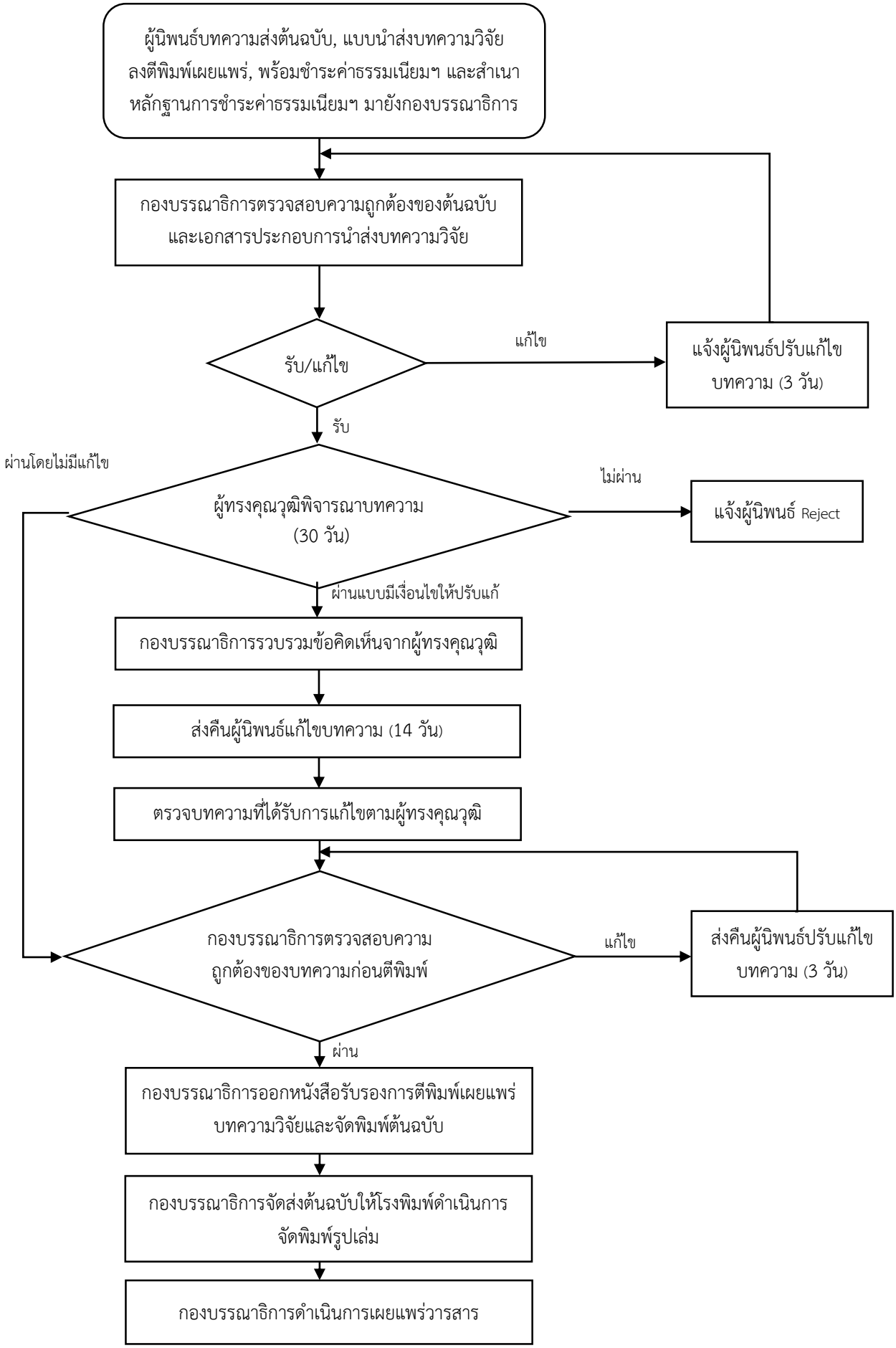
References

[การเขียนเอกสารอ้างอิงและการอ้างอิง ให้ใช้ระบบ APA (American Psychological Association) เท่านั้น ให้เรียงลำดับชื่อผู้แต่งหรือผู้รายงานตามลำดับอักษรเริ่มด้วยเอกสารภาษาไทยก่อน แล้วต่อด้วยเอกสารภาษาต่างประเทศ]..... (TH SarabunPSK, 14 point, ตัวปกติ, จัดกระจายแบบไทย)

ตัวอย่าง References ให้ดูที่ไฟล์ “ระเบียบการตีพิมพ์บทความวิจัย”

ขั้นตอนการตีพิมพ์บทความวิจัย

วารสารวิจัยและพัฒนา วไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี



ส่งเสริม เผยแพร่ และแลกเปลี่ยนความรู้ด้านการวิจัย
ระหว่าง คณาจารย์ นิสิต นักศึกษา นักวิชาการ และผู้สนใจทั่วไป

สถาบันวิจัยและพัฒนา

มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์
1 หมู่ 20 กม.48 ถนนพหลโยธิน ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 13180
โทรศัพท์ : 0-2909-3036 โทรสาร : 0-2909-3036
http://rd.vru.ac.th