

วารสารวิศวกรรม และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

Journal of Engineering and Industrial Technology,
Kalasin University

ปีที่ 4 ฉบับที่ 2 (2026)

มีนาคม – เมษายน 2569

ISSN 2985 0274 (Print)

ISSN 2985 0282 (Online)





กำหนดการเผยแพร่

วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University
ปีที่ 4 ฉบับที่ 2 (มีนาคม – เมษายน 2569)
Vol. 1 No. 2 (March – April 2026)
ISSN 2985-0274 (Print)
ISSN 2985-0282 (Online)

วัตถุประสงค์

จัดทำขึ้นโดยคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ เพื่อเผยแพร่บทความวิจัย (Research Article) และบทความวิชาการ (Academic Article) เปิดรับทั้งบทความภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ที่มีคุณภาพในด้านวิศวกรรมศาสตร์ เทคโนโลยีอุตสาหกรรม และอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง และเพื่อส่งเสริมและเป็นแหล่งในการเผยแพร่ผลงานวิจัยและบทความวิชาการที่เป็นองค์ความรู้ เทคโนโลยีและนวัตกรรมที่ทันสมัย นอกจากนี้ยังเป็นสื่อกลางแลกเปลี่ยนความรู้และแนวคิดทางวิชาการ ของบุคลากรทั้งภายในและนอกสถาบัน โดยมีขอบเขตของวารสาร ดังนี้

- วิศวกรรมทั่วไป (General Engineering)
- วิศวกรรมอุตสาหกรรมและวิศวกรรมการผลิต (Industrial and Manufacturing Engineering)
- วิศวกรรมเครื่องกล (Mechanical Engineering)
- เทคโนโลยีสื่อและประยุกต์ใช้ (Media Technology and Application)
- สถาปัตยกรรม (Architecture)

เงื่อนไขการตีพิมพ์

บทความที่ส่งเข้ามายังวารสารจะได้รับการประเมินคุณภาพของผลงานทางวิชาการโดยหัวหน้ากองบรรณาธิการ (Editor in Chief) ถ้าบทความมีคุณภาพที่อาจได้รับการตีพิมพ์ หัวหน้ากองบรรณาธิการจะมอบหมายให้บรรณาธิการประจำเรื่อง (Section editor) เป็นผู้พิจารณาและดำเนินการส่งบทความให้ผู้ประเมินบทความ (Peer reviewers) ซึ่งเป็นผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาที่เกี่ยวข้อง จำนวนอย่างน้อย 3 ท่าน ต่างสถาบัน และไม่สังกัดเดียวกับผู้นิพนธ์ ซึ่งบทความที่ถูกส่งไปยังผู้ประเมินจะเป็นแบบปกปิดรายชื่อทั้งผู้เขียนบทความ และผู้ประเมิน (Double-Blinded Review) เมื่อผู้ประเมินบทความส่งข้อคิดเห็นมายังบรรณาธิการประจำเรื่อง บทความที่ถูกประเมินจะได้รับการตัดสินใจจากกองบรรณาธิการโดยอาศัยความคิดเห็นของผู้ประเมินเสียงข้างมาก ดังนี้ ยอมรับให้ตีพิมพ์โดยไม่มีการแก้ไข (Accept Submission) บทความมีการแก้ไข (Revisions Required) และ ปฏิเสธการตีพิมพ์บทความ (Decline Submission)

ที่ปรึกษา

อธิการบดีมหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
รองอธิการบดี ด้านวิชาการ การวิจัย การบริการวิชาการ และการประกันคุณภาพและมาตรฐานการศึกษาทุกระดับ	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ศาสตราจารย์ ดร.ระพีพันธ์ ปิตาคะโส	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ดร.วิจิตรา โพธิสาร	มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์

บรรณาธิการ

ดร.สรายุทธ จิตะภาส

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ผู้ช่วยบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สถิตพงศ์ เสี่ยงมศักดิ์

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ดร.สวลี อุดรา

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.วรวัฒน์ เสงี่ยมวิบูล

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

รองศาสตราจารย์ ดร.อดิศักดิ์ ปัตติยะ

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

รองศาสตราจารย์ ดร.ชูพงษ์ ทองคำสมุทร

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

รองศาสตราจารย์ ดร.สุนทร สุทธิปาก

มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี

รองศาสตราจารย์ ดร.ธัญญา ประเมษฐานุวัฒน์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

พระนครเหนือ วิทยาเขตปทุมธานี

รองศาสตราจารย์ ดร.สฤตลดา วรรณปะเช

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

พระนครเหนือ วิทยาเขตปทุมธานี

รองศาสตราจารย์ ดร.สัจจาภาจ จอมโนนเขวา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รองศาสตราจารย์ ดร.สินาค โกศลนันท์

มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

รองศาสตราจารย์ ดร.เกตุร ดวงอุปมา

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

รองศาสตราจารย์ ดร.นรงค์ วิชาผา

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย เหลาหา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

วิทยาเขตขอนแก่น

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิศานาถ แก้ววินิต

มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดวงดาว วัฒนากลาง

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรอนงค์ แสงผ่อง

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิศณุ ชัยจิตวณิชกุล

มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มณฑนา ทองสุพล

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัจฉรา ชุมพล

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไทยทัศน์ สุดสวนสี

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วรพจน์ สมมูล

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ปิยณัฐ โตอ่อน

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ทีมจัดการบทความและรูปแบบ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไทยทัศน์ สุดสวนสี

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ว่าที่ร้อยตรี อนุชา ศรีบุญรัมย์

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ดร.สวลี อุดรา

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ออกแบบปกวารสาร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพนธ์ เนียมสา

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

ทีมเอกสารและการประสานงาน

ดร.สวลี อุดรา

นางนกร สุตสนธิ์

นางสาวนภัทรธิดา พรหมดีราช

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

กำหนดการเผยแพร่ :

ปีละ 6 ฉบับ

ฉบับที่ 1 มกราคม - กุมภาพันธ์

ฉบับที่ 2 มีนาคม - เมษายน

ฉบับที่ 3 พฤษภาคม - มิถุนายน

ฉบับที่ 4 กรกฎาคม - สิงหาคม

ฉบับที่ 5 กันยายน - ตุลาคม

ฉบับที่ 6 พฤศจิกายน – ธันวาคม

สำนักงาน

กองบรรณาธิการวารสาร "วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์"

"Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University"

คณะวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

62/1 ถนนเกษตรสมบูรณ์ ต.กาฬสินธุ์ อ.เมือง จ.กาฬสินธุ์ 46000

บรรณาธิการ

ดร.สรายุทธ ฐิตะภาส

โทร: 088-574-2199

Email: jeit@ksu.ac.th

ISSN 2985-0274 (Print)

ISSN 2985-0282 (Online)

บทบรรณาธิการ

วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ปีที่ 4 ฉบับที่ 2 เดือนมีนาคม – เดือนเมษายน ปีพุทธศักราช 2569 จัดทำขึ้นตามเป้าหมายและยุทธศาสตร์ของการดำเนินงานตามแนวทางการพัฒนาและขับเคลื่อนของมหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ซึ่งวารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่บทความวิจัย (Research Article) และบทความวิชาการ (Academic Article) ที่มีคุณภาพในด้านวิศวกรรมศาสตร์ เทคโนโลยีอุตสาหกรรม และอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง เพื่อส่งเสริมและเป็นแหล่งในการเผยแพร่ผลงานวิจัยและบทความวิชาการที่เป็นองค์ความรู้เทคโนโลยีและนวัตกรรมที่ทันสมัย สนับสนุนให้คณาจารย์ นักวิชาการ และผู้ทรงคุณวุฒิในด้านวิศวกรรมศาสตร์ เทคโนโลยีอุตสาหกรรมและอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องเสนอผลงานวิชาการ นอกจากนี้ยังเป็นสื่อกลางแลกเปลี่ยนความรู้และแนวคิดทางวิชาการ ของบุคลากรทั้งภายในและนอกสถาบัน

ในโอกาสนี้ขอขอบพระคุณอย่างสูงสำหรับผู้มีส่วนเกี่ยวข้อง รวมทั้งผู้เขียนบทความทุกท่านที่ส่งบทความมาลงตีพิมพ์เผยแพร่และขอขอบพระคุณผู้อ่านทุกท่าน หวังเป็นอย่างยิ่งว่าผู้อ่านทุกท่านจะได้รับประโยชน์จากผลงานทางวิชาการในวารสารฉบับนี้

ดร.สรายุทธ จิตะภาส

บรรณาธิการ

สารบัญ

	หน้า
กองบรรณาธิการ	II
บทบรรณาธิการ	IV
บทความวิจัย	
ผลของการกวนต่ออัตราการเกิดก๊าซชีวภาพในถังหมักแบบสองขั้นตอน พงษ์พันธ์ พรหมพิพัตต์, พงศกร ชิดชอบ และ ศุภรินทร์ คำสุวรรณ	1-11
Development of Photovoltaic–Thermal Porous Solar Dryer Eakpoom Boonthum, Apinunt Namkhat, Adun Janyalertadun, Prapanphong Somsila, Kan Komanee, Narong Uengkimbuan, and Umphisak Teeboonma	12-24
การพัฒนาโปรเกรสซีฟเว็บแอปพร้อมด้วยปัญญาประดิษฐ์สำหรับการจำแนกโรคใบข้าว ปิยะพงษ์ แดงขำ และ วดีนาถ วรรณสวัสดิ์กุล	25-39
ระบบไอโอทีสำหรับติดตามสัญญาณชีพและยืนยันตัวตนผู้ป่วยสำหรับโรงพยาบาลอัจฉริยะ พัทยะธรรมบุตร และ เอกชัย เน้นอุดร	40-52
การศึกษาการเปรียบเทียบการใช้พลังงานต่อจำนวนผู้โดยสารของรถไฟฟ้า สายสีแดงสายเหนือของรถไฟฟ้า Hitachi Series 1000 และ Hitachi Series 2000 ทวีทรัพย์ ตุ่มทอง, วิชัย ศิวะโกศิษฐ์, วิรุณศักดิ์ สันติเพ็ชร และ สรวีศ ลิ้มทองกุล	53-71
การผลิตคอนกรีตบล็อกเชิงตันไม่รับน้ำหนักจากส่วนผสมวัสดุขากต้นข้าวโพด ทิพา ตันเจริญรัตน์, นคร ไชยวงศ์ศักดิ์, ศศิชา สุขกาย, กฤษณะพันธุ์ ตันเจริญรัตน์, ไพโรจน์ ด้วงนคร, รัชนี ลือดารา, วัฒนพล อยู่สวัสดิ์, มีชัย เทพนุรัตน์ และ เสกสรรค์ วินยางค์กุล	72-88
การออกแบบและพัฒนาระบบภูมิสารสนเทศบนเว็บร่วมกับคิวอาร์โค้ด เพื่อการท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรม ตำบลป่าตาล จังหวัดลพบุรี ญาณพัฒน์ ลาภพาณิชย์กุล และ ดวงทิพย์ รับพรดี	89-102

ผลของการกวนต่ออัตราการเกิดก๊าซชีวภาพในถังหมักแบบสองขั้นตอน

พงษ์พันธ์ พรหมพิพัทธ์¹, พงศกร ชิดชอบ^{1,*} และ ศุกรินทร์ คำสุวรรณ¹

¹สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

*ผู้ประสานงานบทความต้นฉบับ: phongsagorn.chi@neu.ac.th โทรศัพท์: 081-4487015
(รับบทความ: 5 ตุลาคม 2568; แก้ไขบทความ: 28 มกราคม 2569; ตอบรับบทความ: 3 กุมภาพันธ์ 2569)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงผลของการกวนต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนโดยใช้ถังหมักแบบสองขั้นตอน ในช่วงอุณหภูมิปานกลางที่ 35 องศาเซลเซียส โดยติดตั้งฮีตเตอร์แบบจุ่มเพื่อควบคุมอุณหภูมิในถังหมักกรดและถังหมักมีเทน และปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง เริ่มต้นเท่ากับ 8 โดยถังหมักแบบสองขั้นตอน ประกอบด้วยถังหมักกรดขนาด 250 ลิตร จำนวน 1 ถัง ถังหมักก๊าซมีเทนขนาด 500 ลิตร จำนวน 2 ถัง และถังเก็บก๊าซจำนวน 1 ถัง ต่อกันแบบอนุกรม ใช้กรรมวิธีการเติมสารอินทรีย์ (กากมันสำปะหลังผสมกับน้ำ) แบบครั้งคราว (Batch Feeding) โดยกำหนดให้มีระยะเวลาพักเก็บสารอินทรีย์ 12 ชั่วโมง และมีของแข็งทั้งหมดในสารละลายที่เข้าระบบ 20 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อปริมาตร) คิดเป็นอัตราการป้อนสารอินทรีย์เข้าระบบเท่ากับ 0.417 กรัมชีโอดี/ลิตร-วัน และมีการเพิ่มความถี่ของการกวนโดยเริ่มจากที่ไม่มีการกวนและมีการกวนด้วยความถี่ 0, 12, 8, 4 และ 2 ชั่วโมง/ครั้งละ 10 นาที พบว่า มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเฉลี่ย 140, 160, 190, 240 และ 280 ลิตร/วัน การใช้พลังงานไฟฟ้าในการกวนเฉลี่ย 0, 373, 1,119, 2,238 และ 4,470 วัตต์-ชั่วโมง/วัน พลังงานสุทธิที่ผลิตได้เฉลี่ย 898, 654, 100, -697 และ -2,672 วัตต์-ชั่วโมง/วัน

คำสำคัญ: ก๊าซชีวภาพ กากมันสำปะหลัง สภาวะไร้อากาศ การกวน ถังหมักแบบสองขั้นตอน

การอ้างอิงบทความ: พงษ์พันธ์ พรหมพิพัทธ์, พงศกร ชิดชอบ และ ศุกรินทร์ คำสุวรรณ, "ผลของการกวนต่ออัตราการเกิดก๊าซชีวภาพในถังหมักแบบสองขั้นตอน," วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์, ปีที่ 4, ฉบับที่ 2, หน้า 1-11, 2569.

Effect of Mixing on Biogas Production Rate in a Two-Stage Digester

Phongphan Promphiphak^{1,*}, Phongsagorn Chidchob¹ and Sukarin Khamssuwan¹

¹Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Northeastern University

*Corresponding Author: phongsagorn.chi@neu.ac.th, Tel: 081-4487015

(Received: October 5, 2025; Revised: January 28, 2026; Accepted: February 3, 2026)

Abstract

This study demonstrates the effect of stirring on the biogas production rate from cassava pulp under anaerobic conditions using a two-stage digester system which is operated in the mesophilic temperature range (35 °C). Immersion heaters were installed to control the temperature in both the acidogenic and methanogenic digesters, and the initial pH was adjusted to 8. The two-stage digestion system consisted of one acidogenic digester with a working volume of 250 liters, two methanogenic digesters with working volumes of 500 liters each, and one gas storage tank, all tanks are connected in series. The system was operated under batch feeding conditions using organic substrate prepared by mixing cassava pulp with water. The hydraulic retention time was set at 12 hours, and the total solids concentration of the solution was maintained at 20% (w/v), corresponding to an organic loading rate of 0.417 g COD L⁻¹day⁻¹. The stirring frequency was varied from no stirring to intermittent stirring at frequencies of 12, 8, 4, and 2 hours per cycle, with a stirring duration of 10 min per cycle. The results showed that the average biogas production rates were 140, 160, 190, 240, and 280 L day⁻¹, respectively. The average electrical energy consumption for stirring was 0, 373, 1,119, 2,238, and 4,470 Wh day⁻¹, respectively. The average net energy outputs were 898, 654, 100, -697, and -2,672 Wh day⁻¹, respectively.

Keywords: Biogas, Cassava Pulp, Anaerobic Conditions, Mixing. Two-Stage Digestion System

Please cite this article as: P. Promphiphak, P. Chidchob and S. Khamssuwan, "Effect of Mixing on Biogas Production Rate in a Two-Stage Digester," *The Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University*, vol. 4, no. 2, pp. 1-11, 2026.

1. บทนำ

ในปัจจุบันความต้องการพลังงานของโลกเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ขณะที่แหล่งพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลมีอยู่อย่างจำกัดและก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะการปล่อยก๊าซเรือนกระจกส่งผลให้หลายประเทศหันมาให้ความสำคัญกับการพัฒนาพลังงานทดแทนที่มีความยั่งยืนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น ก๊าซชีวภาพ (Biogas) เป็นพลังงานทดแทนที่ผลิตได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน โดยมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบหลักสามารถนำไปใช้ผลิตพลังงานความร้อนและพลังงานไฟฟ้า อีกทั้งยังช่วยลดปริมาณของเสียจากภาคเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม ในช่วงที่ผ่านมางานวิจัยด้านการผลิตก๊าซชีวภาพได้มุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบถังหมัก การปรับปรุงคุณสมบัติของวัตถุดิบ การควบคุมสภาวะการหมัก เช่น อุณหภูมิ ค่า pH และอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ เพื่อให้การผลิตก๊าซมีความเสถียรและให้ผลผลิตสูงขึ้น นอกจากนี้ การกวนผสมในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศก็เป็นปัจจัยสำคัญต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ เนื่องจากช่วยเพิ่มโอกาสที่จุลินทรีย์จะสัมผัสกับสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้อย่างทั่วถึงแล้ว ยังส่งผลให้ปฏิกิริยาการย่อยสลายเกิดขึ้นได้รวดเร็วขึ้น โดยเฉพาะในกรณีกากมันสำปะหลังจากอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังซึ่งมีแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก การกวนผสมสามารถลดการจับตัวกันเป็นก้อนของแป้ง ทำให้การย่อยสลายแป้งเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น นอกจากนี้ การกวนผสมยังช่วยกระจายอุณหภูมิภายในถังหมักให้สม่ำเสมอ ลดการเกิดบริเวณที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน และสามารถช่วยลดระยะเวลาเก็บกักของถังปฏิกิริยา (Hydraulic Retention Time: HRT) ได้ วิธีการกวนผสมสามารถดำเนินการได้หลายรูปแบบ โดยการใช้ใบพัดกวนให้ประสิทธิภาพสูงกว่าการผสมด้วยการหมุนเวียนของก๊าซที่เกิดขึ้นภายในระบบ ทั้งนี้ การกวนผสมสามารถเลือกใช้ได้ทั้งแบบต่อเนื่องและแบบเป็น

ช่วงเวลา อย่างไรก็ตาม แบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทน (Methanogenic Bacteria) มีความไวต่อการกวนที่มีความรุนแรงสูง โดยเฉพาะการผสมแบบรวดเร็ว (Rapid Mixing) ที่มีค่า Velocity Gradient (G) มากกว่า 500 s^{-1} ซึ่งอาจทำให้แบคทีเรียหลุดออกจากระบบหรือถูกยับยั้ง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพลดลงหรือทำให้ระบบหมักล้มเหลวได้ ดังนั้น การกำหนดอัตราและรูปแบบการกวนที่เหมาะสมจึงเป็นปัจจัยสำคัญต่อเสถียรภาพของระบบ [1] นอกจากการกวนผสมแล้ว รูปแบบของระบบหมักก๊าซชีวภาพก็เป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยระบบหมักแบบสองขั้นตอน (Two-Stage Process) ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ ระบบดังกล่าวประกอบด้วยถังหมัก 2 ถังต่อเนื่องกัน ได้แก่ ถังหมักกรด (Acidogenic Reactor) และถังหมักมีเทน (Methanogenic Reactor) ซึ่งสามารถลดขนาดของถังหมักมีเทนลงได้ประมาณครึ่งหนึ่งหรือรองรับปริมาณน้ำเสียได้เพิ่มขึ้นประมาณสองเท่า ทั้งนี้เนื่องจากแบคทีเรียสร้างกรดและแบคทีเรียสร้างมีเทนมีความต้องการสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน การแยกกระบวนการหมักออกเป็นสองขั้นตอนจึงช่วยให้สามารถควบคุมสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมสำหรับแบคทีเรียแต่ละกลุ่มได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้การย่อยสลายสารอินทรีย์และการผลิตก๊าซชีวภาพมีประสิทธิภาพสูงขึ้น

งานวิจัยที่ผ่านมาได้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการกวนผสมและระบบหมักแบบสองขั้นตอนต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ Paranjpe et al. [2] ได้ศึกษาเปรียบเทียบการหมักแบบไร้อากาศขั้นตอนเดียว (Single-Stage Anaerobic Digestion: SSAD) และแบบสองขั้นตอน (Two-Stage Anaerobic Digestion: TSAD) โดยใช้ขยะอาหารและน้ำเสียที่ไม่ได้รับการบำบัดเป็นวัตถุดิบพบว่า TSAD ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพสะสมสูงกว่า SSAD อย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่าผลผลิตก๊าซชีวภาพ

สะสม 1,914.8 มิลลิลิตร (ml) เมื่อเทียบกับ SSAD 1,349.4 ml และความเข้มข้นของก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นจาก 51% เป็น 75% อีกทั้งยังเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยได้ Volatile Solids (VS) และเพิ่มผลผลิตก๊าซชีวภาพรวมขึ้น 41.9% [2] Saipa et al. ศึกษาผลของอัตราการกวนผสมและการหมุนเวียนตะกอน พบว่าการกวนทุก 6 และ 12 ชั่วโมง รอบละ 10 นาที ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ย 283.34 และ 240.63 ลิตรต่อวัน (L/d) ตามลำดับ และมีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน 0.688 และ 0.564 ลิตรก๊าซมีเทนต่อกรัมของ (Volatile Solids) ($\text{L CH}_4 \text{ g}^{-1} \text{ VS}$) แสดงให้เห็นว่าความถี่ของการกวนมีผลต่ออัตราการเกิดก๊าซชีวภาพอย่างชัดเจน [3] Karim et al. [4] รายงานว่าผลของการกวนมีความสำคัญต่อการเกิดก๊าซมากขึ้นเมื่อวัตถุดิบมีปริมาณของแข็งสูง โดยการหมักมูลวัวที่มีของแข็ง 10–15% ภายใต้การกวนสามารถเพิ่มผลผลิตก๊าซชีวภาพได้ประมาณ 10–30% เมื่อเทียบกับระบบที่ไม่มีการกวน [4] และงานวิจัยของ Callaghan et al. [5], Angelidaki et al. [6], Hernandez and Edyvean [7], Dinsdale et al. [8], และ Cho et al. [9] ต่างยืนยันว่าระบบถังหมักแบบกวนผสมสมบูรณ์ (Continuous Stirred Tank Reactor: CSTR) และระบบหมักแบบสองขั้นตอน ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพและมีเทนสูงกว่า โดยเฉพาะในกรณีของเสียที่มีความเข้มข้นสูงหรือมีสารยับยั้ง เช่น ฟีนอล ถึงแม้ว่างานวิจัยที่ผ่านมาได้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการกวนผสมและระบบหมักแบบสองขั้นตอนอย่างชัดเจน ซึ่งพบว่า งานวิจัยส่วนใหญ่ศึกษาผลของการกวนผสมหรือระบบหมักแบบสองขั้นตอนแยกจากกัน ซึ่งข้อมูลเกี่ยวกับผลของอัตราการกวนผสมในระบบหมักแบบสองขั้นตอน ยังมีจำกัด โดยเฉพาะในกรณีกากมันสำปะหลังจากอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังซึ่งมีลักษณะเฉพาะด้านการจับตัวของแป้ง และยังขาดแนวทางเชิงวิศวกรรมในการกำหนดอัตราการกวนที่เหมาะสมที่ช่วยเพิ่มผลผลิต

ก๊าซชีวภาพโดยไม่ส่งผลกระทบต่อแบคทีเรียที่สร้างก๊าซมีเทน

ดังนั้น งานวิจัยฉบับนี้จึงมุ่งศึกษาผลของการกวนผสมต่ออัตราการเกิดก๊าซชีวภาพในถังหมักแบบสองขั้นตอน โดยใช้กากมันสำปะหลังจากอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบหลัก เพื่อศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของอัตราการกวนในระบบหมักแบบสองขั้นตอน ผู้วิจัยหวังว่าผลการศึกษานี้จะช่วยพัฒนาแนวทางการออกแบบและควบคุมระบบหมักก๊าซชีวภาพให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ลดความเสี่ยงของความไม่เสถียรของระบบ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมได้อย่างเหมาะสม อันจะเป็นประโยชน์ต่อการจัดการของเสียและการผลิตพลังงานทดแทนจากอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังในอนาคตต่อไป

2. วิธีวิจัย

2.1 วัตถุดิบ

ใช้กากมันสำปะหลังจากกระบวนการผลิตแป้งมันโดยนำกากมันสำปะหลังสดมาผสมกับน้ำที่ค่า TS (Total Solids) = 20% (ของแข็งทั้งหมดในสารละลายที่เข้าระบบ 20%) จำนวน 140 ลิตร (L) ผสมกันในถังผสมดังแสดงในรูปที่ 1 การคำนวณหาค่า TS ของกากมันผสมน้ำดังสมการที่ (1)

$$TS\% = \frac{W_d - W_c}{W_w - W_c} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ

$$W_c = \text{น้ำหนักภาชนะเปล่า (g)}$$

$$W_w = \text{น้ำหนักภาชนะ + ตัวอย่างเปียก (g)}$$

$$W_d = \text{น้ำหนักภาชนะ + ตัวอย่างหลังอบแห้ง (g)}$$

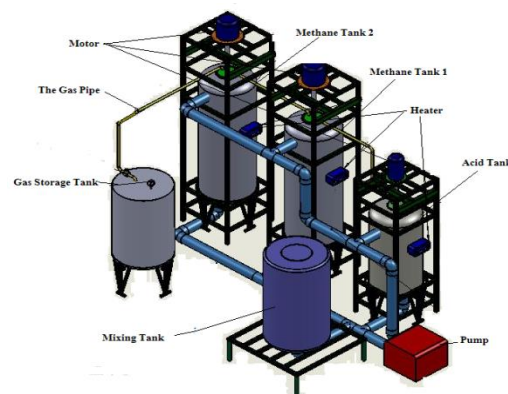
$$V = \text{ปริมาตรตัวอย่าง (ml)}$$

การเริ่มต้นทดลองวัตถุดิบตั้งต้นจะใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากโรงงานแปรงมันสำปะหลังจำนวน 40 ลิตร โดยทำการเก็บรักษาจากมันสำปะหลังสดไว้ที่ห้องควบคุมอุณหภูมิ (0 – 4 องศาเซลเซียส) และก่อนนำไปใช้งานมีการวิเคราะห์กากมันสำปะหลังที่ผสมกับน้ำให้ได้ค่า TS = 20% ก่อนทำการทดลองทุกครั้ง โดยมีค่า COD 5,011 มิลลิกรัมต่อลิตร (m/L) โดยวิเคราะห์ค่าด้วยวิธีไทเทรตและปรับ pH เริ่มต้น เท่ากับ 8 โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการปรับค่า และวัดค่าด้วย pH meter [10]

2.2 การออกแบบระบบถังหมักแบบสองขั้นตอน

ถังหมักก๊าซชีวภาพแบบสองขั้นตอน มีถังผสมกากมันสำปะหลังกับน้ำจำนวน 1 ถัง ขนาด 330 L ทำจากพลาสติก ถังหมักกรดจำนวน 1 ถัง ขนาด 250 L ทำจากสแตนเลส ถังหมักมีเทนจำนวน 2 ถัง ขนาด 500 L ทำจากสแตนเลส และถังเก็บก๊าซสำหรับนำไปใช้งานจำนวน 1 ถัง โดยในถังหมักกรดและถังหมักมีเทน จะมีการติดตั้งใบกวนและเพลาทำจากสแตนเลสกำลังด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 1 แรงม้า (hp) ผ่านชุดเฟืองทดขนาด 1:20 รอบต่อนาที (rpm) และมีการควบคุมอุณหภูมิภายในถังหมักกรดและถังหมักมีเทน 1, 2 ที่ 35 °C โดยใช้ Heater แบบจุ่ม ขนาด 2,450 วัตต์ (W) เป็นตัวให้ความร้อนแก่น้ำในถังหมักจำนวน 5 ตัว โดยติดตั้งที่ถังหมักกรด 1 ตัว และติดตั้งที่ถังหมักมีเทนจำนวน 2 ถัง ถังละ 2 ตัว ควบคุมอุณหภูมิด้วย Temperature Control โดยตั้งค่าไว้ที่ 35 °C และใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K เป็นตัวเซนเซอร์จับอุณหภูมิภายในถังหมัก แต่ละถังวางลวดอย่างมีการวัดระดับน้ำและช่องทางการถ่ายเทของเหลวโดยใช้ปั๊มสูบน้ำขนาด 1 hp เพื่อที่จะสูบจาก ถังหมักกรดไปยังถังหมักมีเทนถังที่ 1 และสูบจากถังหมักมีเทนถังที่ 1 ไปยังถังหมักมีเทนถังที่ 2 ถังหมักมีเทนถังที่ 2 จะมีท่อปล่อยน้ำทิ้งออกสู่ระบบนิเวศโดยน้ำที่ออกไปได้รับการบำบัดแล้ว ลักษณะของถังหมักก๊าซชีวภาพ

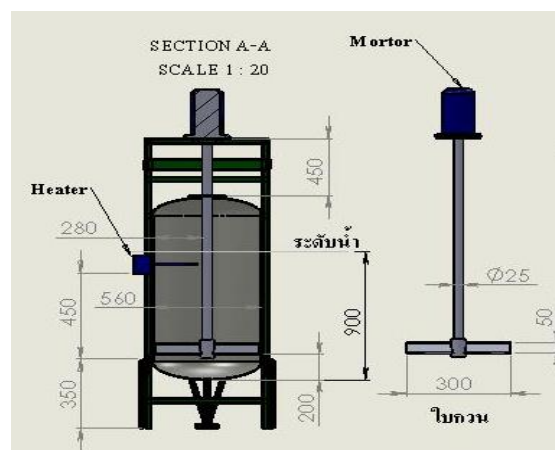
แบบสองขั้นตอน และลักษณะของใบกวนในถังหมักกรดและถังหมักมีเทนแสดงดังรูปที่ 1, 2, 3 และ รูปที่ 4



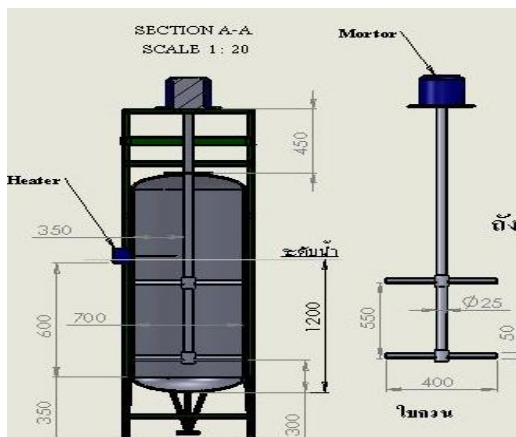
รูปที่ 1 ลักษณะแบบของถังหมักก๊าซชีวภาพแบบสองขั้นตอน



รูปที่ 2 ถังหมักก๊าซชีวภาพแบบสองขั้นตอน



รูปที่ 3 ลักษณะของใบกวนที่ถังหมักกรด



รูปที่ 4 ลักษณะของไบโกลนที่ถังหมักมีเทน

2.3 การทำงานของระบบ

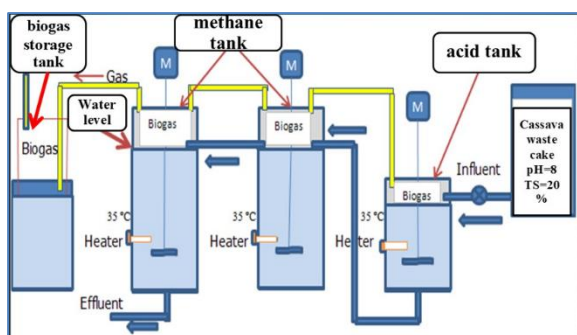
การทดลองเริ่มต้นจากการเตรียมวัตถุดิบ โดยนำกากมันสำปะหลังผสมกับน้ำในอัตราส่วนกากมันสำปะหลัง 10 กิโลกรัม (Kg) ต่อน้ำ 160 L จากนั้นปรับค่า pH ของส่วนผสมให้เท่ากับ 8 และทำการกวนในถังผสมจนเกิดความเป็นเนื้อเดียวกัน (ดังแสดงในรูปที่ 2) เมื่อเตรียมวัตถุดิบเรียบร้อยแล้วจึงป้อนส่วนผสมเข้าสู่ถังหมักกรดในปริมาตร 140 L ภายในถังหมักกรดมีการเติมหัวเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นที่ได้จากโรงงานแปรรูปมันสำปะหลังในปริมาตร 40 L พร้อมทั้งควบคุมอุณหภูมิของระบบให้อยู่ที่ 35 °C และติดตั้งระบบกวนแบบใบพัดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการสัมผัสระหว่างจุลินทรีย์กับสารอาหาร โดยกำหนดระยะเวลาการเก็บในถังหมักกรดเท่ากับ 4 วัน เมื่อครบระยะเวลากักเก็บ มวลน้ำจากถังหมักกรดจะถูกปั๊มเข้าสู่ถังหมักมีเทนถังที่ 1 ในขณะเดียวกันจะมีการเตรียมวัตถุดิบชุดใหม่ในถังผสมและป้อนเข้าสู่ถังหมักกรดเพื่อทดแทนปริมาตรที่ถูกส่งออกไป ทำให้ระบบสามารถดำเนินการได้อย่างต่อเนื่อง ถังหมักมีเทนถังที่ 1 มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 35 °C และติดตั้งระบบกวนแบบใบพัดเช่นเดียวกับถังหมักกรด จากนั้นมวลน้ำจากถังหมักมีเทนถังที่ 1 จะถูกปั๊มต่อไปยังถังหมักมีเทนถังที่ 2 ซึ่งเชื่อมต่อกันในลักษณะแบบอนุกรม โดยถังหมัก

มีเทนถังที่ 2 มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 35 °C และติดตั้งระบบกวนแบบใบพัดเช่นเดียวกัน ระบบจะใช้ระยะเวลาประมาณ 24 วัน เพื่อให้มวลน้ำไหลผ่านและเติมเต็มถังหมักมีเทนทั้งสองถังครบถ้วน เมื่อระบบดำเนินการครบวงจร มวลน้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดแล้วจากถังหมักมีเทนถังที่ 2 จะถูกปล่อยออกจากระบบสู่สิ่งแวดล้อม การดำเนินงานของระบบจะทำให้เข้าใจในลักษณะดังกล่าวจนกว่าระบบจะเข้าสู่สภาวะคงที่ หลังจากนั้นจึงเริ่มดำเนินการเก็บข้อมูลการทดลอง (ดังแสดงในรูปที่ 2)

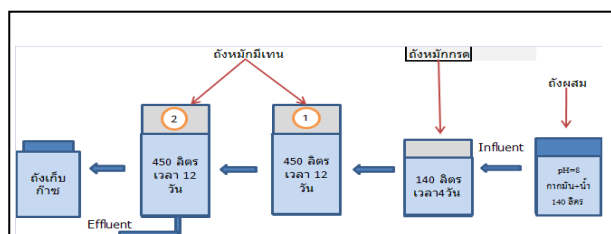
2.4 วิธีการทดลองและเก็บข้อมูล

ระบบการทดลองประกอบด้วยถังหมักกรดขนาด 250 L จำนวน 1 ถัง และถังหมักมีเทนขนาด 500 L จำนวน 2 ถัง โดยกำหนดอัตราการป้อนวัตถุดิบเข้าสู่ระบบเท่ากับ 0.0375 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน (m^3/d) วัตถุดิบที่ใช้คือกากมันสำปะหลัง 10 กิโลกรัม ผสมกับน้ำ 160 ลิตร และมีการปรับค่า pH ก่อนเข้าสู่ระบบให้เท่ากับ 8 ทุกครั้ง การทดลองนี้กำหนดตัวแปรควบคุม 2 ตัวแปร ได้แก่ อุณหภูมิภายในถังหมักที่ 35 °C โดยติดตั้งฮีตเตอร์แบบจุ่ม เพื่อควบคุมอุณหภูมิในถังหมักกรดและถังหมักมีเทน และค่า pH เท่ากับ 8 ขณะที่ตัวแปรต้นคือความถี่ของการกวนผสม โดยกำหนดระยะเวลาการเก็บรวมของระบบ (Hydraulic Retention Time: HRT) เท่ากับ 12 วัน ทั้งในถังหมักกรดและถังหมักมีเทน ระบบจะดำเนินการป้อนวัตถุดิบและถ่ายเทมวลน้ำระหว่างถังหมักที่เชื่อมต่อกันแบบอนุกรมอย่างต่อเนื่อง จนกว่าระบบจะเข้าสู่สภาวะคงที่ ซึ่งใช้ระยะเวลาประมาณ 1 เดือน หลังจากนั้นจึงเริ่มดำเนินการบันทึกผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5 และ 6 ระบบควบคุมอุณหภูมิจะทำงานตลอดระยะเวลาการทดลอง โดยระบบทำความร้อนจะหยุดทำงานเมื่ออุณหภูมิภายในถังถึง 35 °C และจะเริ่มทำงานอีกครั้งเมื่ออุณหภูมิลดต่ำกว่าค่าที่กำหนด ส่วนระบบกวนผสมใช้มอเตอร์ร่วมกับชุดเกียร์ทดรอบและชุดควบคุมมอเตอร์ โดยกำหนดความถี่

ของการกวนเป็น 0, 1, 3, 6 และ 12 ครั้ง/วัน ครั้งละ 10 นาที ซึ่งสอดคล้องกับการกวนทุก ๆ 0, 24, 8, 4 และ 2 ชั่วโมงตามลำดับ การเก็บข้อมูลดำเนินการเป็นระยะเวลา 4 วัน ต่อหนึ่งเงื่อนไขการทดลอง โดยทำการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพในช่วงเวลาเดียวกันของทุกวัน และดำเนินการทดลองจนครบทุกระดับความถี่ของการกวน รวมระยะเวลาในการเก็บข้อมูลทั้งหมด 20 วัน ดังแสดงในรูปที่ 7 นอกจากนี้ ในระหว่างการทดลองยังมีการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ก๊าซชีวภาพ Biogas Check และ เครื่องวิเคราะห์ก๊าซชีวภาพ GC-8A (ใช้วิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ) ควบคู่ไปด้วย



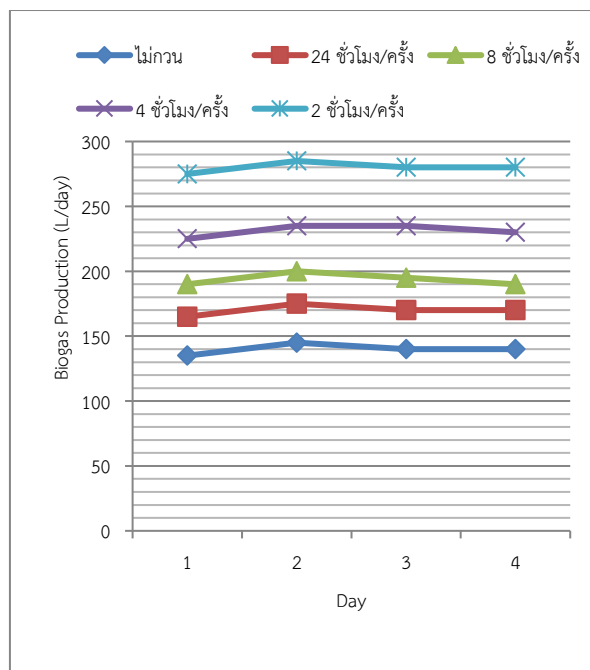
รูปที่ 5 การทำงานของระบบการผลิตก๊าซชีวภาพ



รูปที่ 6 Flowchart ของระบบหมักก๊าซชีวภาพแบบ
สองขั้นตอน

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

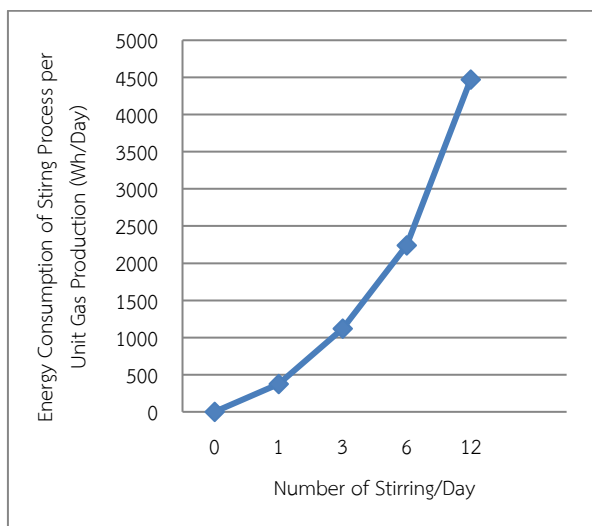
3.1 ผลการวิจัย



รูปที่ 7 ผลของการกวนต่ออัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ
ต่อวัน

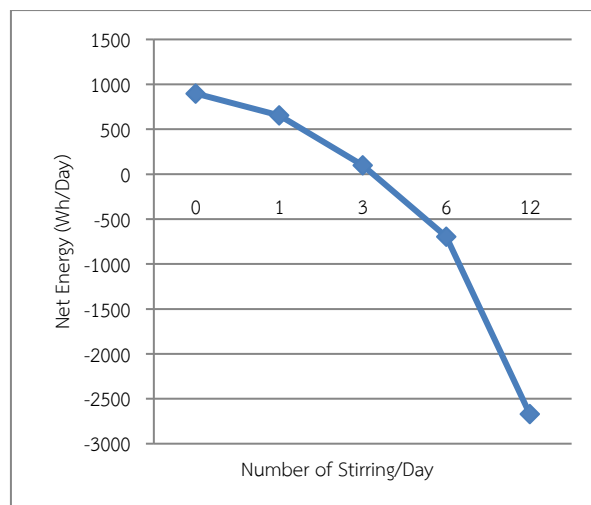
จากกราฟรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่ายิ่งมีการกวนมากเท่าไรอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพก็จะยิ่งเพิ่มมากขึ้นจากที่ไม่มีการกวนและเริ่มมีการกวนด้วยความถี่วันละ 24, 8, 4, และ 2 ชั่วโมง/ครั้ง พบว่ามีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพโดยเฉลี่ย 140, 160, 190, 240, และ 280 L/d โดยจากการที่ไม่มีการกวนมีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ 140 L/d เมื่อมีการกวนด้วยความถี่ 24 ชั่วโมง/ครั้ง หรือ 1 ครั้ง/วัน พบว่ามีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้น 12.5% มีการกวนด้วยความถี่ 8 ชั่วโมง/ครั้ง หรือ 3 ครั้ง/วัน มีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้น 26.3% มีการกวนด้วยความถี่ 4 ชั่วโมง/ครั้ง หรือ 6 ครั้ง/วัน มีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้น 41.6% และมีการกวนด้วยความถี่

2 ชั่วโมง/ครั้ง หรือ 12 ครั้ง/วัน มีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้น 50%



รูปที่ 8 ผลของการกวนต่อการใช้พลังงานไฟฟ้า

จากกราฟรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่ายิ่งมีการกวนมากเท่าไรการใช้พลังงานไฟฟ้าก็จะยิ่งเพิ่มมากขึ้น จากที่ไม่มีการกวนและเริ่มมีการกวนด้วยความถี่วันละ 24, 8, 4, และ 2 ชั่วโมง/ครั้ง หรือ 1, 6, 8, และ 12 ครั้ง/วัน พบว่ามีการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยเฉลี่ย 0, 373, 1,119, 2,238 และ 4,470 วัตต์-ชั่วโมง/วัน Wh day^{-1} โดยจากการที่ไม่มีการกวนก็ไม่มีการใช้พลังงานไฟฟ้า และเมื่อมีการกวนด้วยความถี่ 24 ชั่วโมง/ครั้ง พบว่ามีการใช้พลังงานไฟฟ้า $0.373 \text{ Wh day}^{-1}$ เมื่อมีการกวนด้วยความถี่ 8 ชั่วโมง/ครั้ง มีการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 66.6% มีการกวนด้วยความถี่ 4 ชั่วโมง/ครั้ง มีการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 83.3% มีการกวนด้วยความถี่ 2 ชั่วโมง/ครั้ง มีการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 91.6% ซึ่งได้ทำการติดตั้งมิเตอร์ไฟฟ้าเพื่อเก็บข้อมูลในการใช้พลังงาน



รูปที่ 9 ผลของการกวนต่อพลังงานสุทธิที่ได้รับ

จากกราฟรูปที่ 9 จะเห็นได้ว่ายิ่งมีการกวนด้วยความถี่มากเท่าไรพลังงานสุทธิที่ได้รับก็จะยิ่งลดน้อยลง จากที่ไม่มีการกวนและเริ่มมีการกวนด้วยความถี่วันละ 24, 8, 4, และ 2 ชั่วโมง/ครั้ง พบว่าพลังงานสุทธิที่ได้รับโดยเฉลี่ย 898, 654, 100, -697 และ $-2,672 \text{ Wh day}^{-1}$ โดยจากการที่ไม่มีการกวนพบว่า พลังงานสุทธิที่ได้รับ 898 Wh day^{-1} และเมื่อมีการกวนด้วยความถี่ 24 ชั่วโมง/ครั้ง พบว่าพลังงานสุทธิที่ได้รับลดลง 27.1% มีการกวนด้วยความถี่ 8 ชั่วโมง/ครั้ง พลังงานสุทธิที่ได้รับลดลง 88.8% มีการกวนด้วยความถี่ 4 ชั่วโมง/ครั้ง พลังงานสุทธิที่ได้รับลดลง 177.6% มีการกวนด้วยความถี่ 2 ชั่วโมง/ครั้ง พลังงานสุทธิที่ได้รับลดลง 397.5%

3.2 อภิปรายผลการวิจัย

ผลการวิจัยนี้ได้เน้นศึกษาผลของการกวนต่ออัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ โดยใช้กากมันสำปะหลังเป็น Substrate (กากมันสำปะหลังผสมกับน้ำ) ในการทดลอง และจะสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อมีการกวนด้วยความถี่ที่มากขึ้นอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพก็เพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อมีการกวนมากเท่าไรก็ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นเท่านั้น ซึ่งโดยทั่วไปในระบบผสมการผสม

สามารถเลือกรูปแบบได้ทั้งการผสมแบบต่อเนื่องและ
เป็นช่วงเวลา ซึ่งถ้ามีการกวนตลอดเวลาบางที่อาจจะ
ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานโดยไม่จำเป็น เช่นในการกวน
ที่ความถี่ 8 ชั่วโมง/ครั้ง เกิดก๊าซชีวภาพ 190 L/d
อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า $1,119 \text{ Wh day}^{-1}$ เทียบกับ
การกวนด้วยความถี่ 4 ชั่วโมง/ครั้ง เกิดก๊าซชีวภาพ
240 L/d อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า $2,238 \text{ Wh day}^{-1}$
ซึ่งจะมีผลต่อค่าพลังงานสุทธิ ค่าพลังงานสุทธิ =
(พลังงานที่ได้รับ - พลังงานที่ใช้) โดยพลังงานที่ได้รับ
คือ อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ คูณด้วย ค่าความร้อน
ของก๊าซ (HV) ผลการวิเคราะห์หองค์ประกอบก๊าซ
ชีวภาพ มีก๊าซมีเทน (CH_4) ประมาณ 53.8-54.3%
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์(CO_2) ประมาณ 24.6% และ
ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ประมาณ 148 ppm
และประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีมีค่าสูงถึง
98.87% จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ความถี่ใน
การกวนเพิ่มขึ้น 50% อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ
เพิ่มขึ้นแค่ 20.8% และอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า
เพิ่มขึ้น 50% ซึ่งเมื่อดูจากผลการวิจัยแล้วเปอร์เซ็นต์
อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นค่อนข้างน้อย เมื่อ
เทียบกับเปอร์เซ็นต์ความถี่ของการกวน และ
เปอร์เซ็นต์อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า เนื่องจาก
Substrate (กากมันสำปะหลังผสมน้ำ) มีโปรตีนน้อย
และ มีค่า COD ขาเข้าเพียง 5,011 m/L ซึ่งถือว่ามีความ
ค่อนข้างน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเสียจากโรงงาน
อุตสาหกรรม เนื่องจากถังหมักก๊าซชีวภาพแบบสอง
ขั้นตอนมีประสิทธิภาพกำจัดซีโอดีมีค่าสูงถึง 98.87%
จะเห็นได้ว่าการกวนผสมด้วยความถี่ 8 ชั่วโมง/ครั้ง
เป็นความถี่ที่เหมาะสมที่สุดในแง่ของความคุ้มค่าทาง
พลังงาน และมีศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้กับ
ระบบที่มีค่า COD ขาเข้าสูงในระดับอุตสาหกรรมเพื่อ
เพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพในอนาคต

4. สรุป

การศึกษาผลของการกวนต่ออัตราการผลิตก๊าซ
ชีวภาพ จากกากมันสำปะหลังภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนโดยใช้ถังหมักแบบสองขั้นตอน ในช่วงอุณหภูมิปานกลาง (Mesophilic Range) ที่ 35°C และ
ปรับค่า pH เริ่มต้น เท่ากับ 8 โดยมีการเพิ่มความถี่
ของการกวนโดยเริ่มจากไม่มีการกวนและมีการกวน
ด้วยความถี่วันละ 2, 4, 8, และ 10 ชั่วโมง/ครั้ง ครั้ง
ละ 10 นาที/วัน พบว่า มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ
โดยเฉลี่ย 140, 160, 190, 240 และ 280 ลิตร/วัน
การใช้พลังงานไฟฟ้าในการกวนโดยเฉลี่ย 0, 373,
1,119, 2,238 และ $4,470 \text{ Wh day}^{-1}$ พลังงานสุทธิ
ที่ผลิตได้โดยเฉลี่ย 898, 654, 100, -697 และ -2,672
 Wh day^{-1} โดยมีก๊าซมีเทน (CH_4) ประมาณ 53.8-
54.3% ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์(CO_2) ประมาณ
24.6% และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ประมาณ
148 ppm และประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีมีค่าสูง
ถึง 98.87%

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้ทำวิจัยขอขอบคุณศูนย์วิจัย และพัฒนา
พลังงานทดแทนมหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้ความ
อนุเคราะห์ทุนวิจัย ขอขอบคุณภาควิชา
วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น และมหาวิทยาลัยภาค
ตะวันออกเฉียงเหนือ ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่และ
เวลาในการทำวิจัย ขอขอบคุณภาควิชาจุลชีวภาพ
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้ความ
อนุเคราะห์ให้ใช้อุปกรณ์ภายในห้องปฏิบัติการ และ
สถานที่ในการทดสอบ รวมทั้งให้คำปรึกษาเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง
National starch and Chemical (Thailand) Limited
ที่ให้ความอนุเคราะห์วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Srivichai and C. Rodsrida, "Factors affecting anaerobic digestion efficiency to produce biogas," *RMUTI Journal of Science and Technology*, vol. 13, no. 3, pp. 162-175, 2020. Available: <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rmutijo/article/view/229891>.
- [2] A. Paranjpe, S. Saxena, and P. Jain, "Biogas yield using single and two stage anaerobic digestion: An experimental approach," *Energy for Sustainable Development*, vol. 74, pp. 6-19, 2023. DOI: 10.1016/j.esd.2023.03.005.
- [3] S. Saipa, T. Chuenban, N. Homduang, J. Chanathawon, and R. Niransilp, "A study of mixing time and sludge recirculation affecting biogas production from sweet corn residues by dry anaerobic digestion," *Journal of Chulachomklao Royal Military Academy*, vol. 18, no. 1, pp. 87-105, 2020. Available: <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/crma-journal/article/view/243159>.
- [4] K. Karim, R. Hoffmann, T. Klasson, and M. H. Al-Dahhan, "Anaerobic digestion of animal waste: Waste strength versus impact of mixing," *Bioresource Technology*, vol. 96, no. 16, pp. 1771-1781, 2005. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852405000738>.
- [5] F. J. Callaghan, D. A. J. Wase, K. Thayanithy, and C. F. Forster, "Continuous co-digestion of cattle slurry with fruit and vegetable wastes and chicken manure," *Biomass and Bioenergy*, vol. 27, no. 1, pp. 71-77, 2002. DOI: 10.1016/S0961-9534(01)00057-5.
- [6] I. Angelidaki, X. Chen, J. Cui, P. Kaparaju, and L. Ellegaard, "Thermophilic anaerobic digestion of source-sorted organic fraction of household municipal solid waste: Start-up procedure for continuously stirred tank reactors," *Water Research*, vol. 40, no. 12, pp. 2621-2628, 2006. DOI: 10.1016/j.watres.2006.05.015.
- [7] J. E. Hernandez and R. G. J. Edyvean, "Comparison between a two-stage and single-stage digester when treating a synthetic wastewater contaminated with phenol," *Biotechnology and Bioengineering*, vol. 108, no. 5, pp. 1003-1012, 2011. DOI: 10.1002/bit.23015.
- [8] R. M. Dinsdale, G. C. Premier, F. R. Hawkes, and D. L. Hawkes, "Two-stage anaerobic co-digestion of waste activated sludge and fruit/vegetable waste using inclined tubular digesters," *Bioresource Technology*, vol. 72, no. 2, pp. 159-168, 2000. DOI: 10.1016/S0960-8524(99)00105-4.
- [9] J. K. Cho, S. C. Park, and H. N. Chang, "Biochemical methane potential and solid-state anaerobic digestion of Korean food wastes," *Bioresource Technology*, vol. 52, no. 3, pp. 245-253, 1995. DOI: 10.1016/0960-8524(95)00031-9.

- [10] P. Promphiphak and T. Wongwuttanasatian, "Biogas production from cassava waste cake in a two-stage anaerobic digestion system," *Advanced Materials Research*, vol. 512-515, pp. 351-355, 2012. Available: <https://www.scientific.net/AMR.512-515.351>.

Development of Photovoltaic–Thermal Porous Solar Dryer

Eakpoom Boonthum¹, Apinunt Namkhat¹, Adun Janyalertadun¹, Prapanphong Somsila²,
Kan Komane³, Narong Uengkimbuan⁴, and Umphisak Teeboonma^{1,*}

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University

² Department of Mechanical Engineering, Faculty of Agriculture and Technology, Rajamangala University of Technology Isan,
Surin Campus

³ Department of Mechanical Technology, Faculty of Industrial Technology, Nakhon Phanom University

⁴ Department of Physics, Faculty of Science, Burapha University

*Corresponding Author: umphisak.t@ubu.ac.th, Tel: 045-353303

(Received: October 23, 2025; Revised: January 21, 2026; Accepted: February 3, 2026)

Abstract

Drying is a key post-harvest process for preserving agricultural and herbal products. However, under humid tropical conditions, drying remains energy-intensive and limited in performance. This study presents the development and performance evaluation of a photovoltaic–thermal (PVT) solar dryer integrated with porous absorbers to enhance heat and mass transfer. The system consists of a 150 W PVT panel and a solar air collector equipped with porous steel mesh absorbers with porosities of 0.98 and 0.96, together with a non-porous reference configuration. Drying experiments were conducted in Thailand under tropical conditions at an air velocity of 0.1 m/s using kaffir lime leaves. The results show that porous integration increases the effective heat transfer area and thermal energy retention, resulting in a drying rate increase of up to 50% and a reduction in specific energy consumption (SEC) of up to 33.3% compared with the non-porous system. The configuration with a porosity of 0.96 provided the best overall performance. Overall, integrating porous materials into a PVT solar dryer significantly improves drying performance and energy efficiency.

Keywords: Solar Drying, Photovoltaic-Thermal (PVT), Porous Material, Kaffir Lime

Please cite this article as: E. Boonthum, A. Namkhat, A. Janyalertadun, P. Somsila, K. Komane, N. Uengkimbuan, and U. Teeboonma, “Development of Photovoltaic–Thermal Porous Solar Dryer,” *The Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University*, vol. 4, no. 2, pp. 12-24, 2026.

บทความวิจัย (Research Article)

1. Introduction

The escalating global energy and environmental challenges have intensified the demand for sustainable technologies capable of reducing dependence on fossil fuels while maintaining process efficiency. Among renewable energy sources, solar energy is regarded as one of the most promising options due to its high potential, environmental benignity, and suitability for practical applications [1–3]. In particular, Thailand receives high levels of solar irradiation throughout the year, making solar thermal technologies especially attractive for agricultural processing and food preservation applications. Drying is a critical post-harvest operation that accounts for a substantial share of energy consumption in agricultural processing chains. Conventional open sun drying, although widely practiced, suffers from several limitations, including long drying times, contamination risks, and non-uniform product quality. Dryers provide better process control and hygiene; however, their high energy consumption and operating costs often restrict adoption, especially among small-scale farmers and rural communities. Consequently, numerous previous studies [4–6] have investigated solar-assisted drying systems as a sustainable alternative, as they are capable of reducing energy consumption without compromising product quality. In recent years, efforts to enhance the performance of solar dryers have focused on design optimization for forced convection and the integration of thermal energy storage

systems. Both sensible and latent heat storage materials, particularly phase change materials (PCMs), have been demonstrated to effectively improve drying continuity and system stability under fluctuating climatic conditions [7–9].

Recently, photovoltaic–thermal (PVT) systems have attracted increasing attention due to their capability to simultaneously generate electrical power and recover useful thermal energy from photovoltaic panels, thereby enhancing overall solar energy utilization. Previous studies [10–12] have confirmed that PVT-based solar dryers are able to supply electrical power to auxiliary components while concurrently providing thermal energy for the drying process, resulting in superior performance compared with conventional solar drying systems.

At the same time, the application of porous media in solar air collectors has emerged as an effective approach to enhance heat transfer by increasing the heat transfer surface area, intensifying convective heat exchange, and improving thermal energy retention. Previous studies [13–15] have reported that porous absorbers can enhance temperature uniformity and drying performance. However, excessively low porosity may lead to increased pressure drop across the airflow path, thereby deteriorating overall system performance. Despite these advances, the integration of photovoltaic–thermal (PVT) systems and performance enhancement through porous media has largely been investigated in a fragmented manner.

บทความวิจัย (Research Article)

To date, limited research has examined the combined effects of PVT systems and porous absorber characteristics within a single solar drying system, particularly under humid tropical climatic conditions, where ambient humidity strongly influences drying behavior and energy efficiency. Moreover, the influence of porous material porosity on the performance of integrated PVT-based drying systems remains insufficiently understood.

Therefore, this study aims to develop and experimentally evaluate a photovoltaic–thermal porous solar dryer that integrates waste heat recovery from photovoltaic panels with a porous absorber–enhanced solar air collector. Kaffir lime leaves were used as the drying material, and experiments were conducted under real tropical climatic conditions in Thailand to investigate temperature variation, drying rate, and specific energy consumption at different porosity levels.

2. Design Parameters

The theoretical design of the solar drying system is based on several simplifying assumptions. The temperatures of the absorber plate and the drying air are assumed to vary only along the flow direction. The glass cover and the frame of the solar collector are considered to absorb a negligible amount of solar radiation, while the remaining collector components are assumed to be adequately insulated to minimize heat losses. The solar collector consists of an absorber plate with a

selective coating, a transparent glass cover, and thermal insulation. The absorber plate is designed to satisfy the required operating temperature and airflow rate. The glass cover reduces convective and radiative heat losses, whereas the thermal insulation limits heat losses from the bottom and side surfaces of the collector, thereby enhancing overall collector efficiency. The solar radiation–receiving area is designed to match the airflow rate within the drying chamber and is calculated using Eq. (1).

$$A_c = \frac{mC_p(T_o - T_i)}{\eta} \quad (1)$$

The air mass flow rate is defined as:

$$m = \rho AV \quad (2)$$

where A_c is the solar radiation–receiving area of the solar collector (m^2), m denotes the air mass flow rate (kg/s), C_p is the specific heat capacity of air ($\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$), T_o and T_i represent the outlet and inlet air temperatures of the solar collector ($^{\circ}\text{C}$), I is the solar irradiation (W/m^2), η denotes the solar collector efficiency, ρ is the air density (kg/m^3), A is the cross-sectional area of the drying chamber (m^2), and V is the air velocity inside the drying chamber (m/s).

The required electrical power of the photovoltaic panel is estimated using Eq. (3):

บทความวิจัย (Research Article)

$$P_{PV} = \frac{E_{use}}{T} \quad (3)$$

where P_{pv} is the required photovoltaic power (W), E_{use} is the required electrical energy (kWh), and T is peak sun hour of Thailand (h).

3. System Design and Construction

The solar collector was designed based on an air mass flow rate of 0.145 kg/s, corresponding to a maximum air velocity of 0.2 m/s. Previous studies [16-17] have reported that the recommended air velocity for solar drying applications lies in the range of 0.1–0.2 m/s. The design assumptions further included an average solar irradiation of 800 W/m², a 5 °C temperature rise across the solar collector, and an assumed solar collector efficiency of 0.7, which falls within the commonly reported range of 70–80% [18–19]. Using Eq. (1), the minimum required solar radiation–receiving area was calculated to be 1.303 m². Accordingly, the collector dimensions were selected as 0.75 × 1.85 m, providing an effective absorption area of 1.387 m², which exceeds the design requirement.

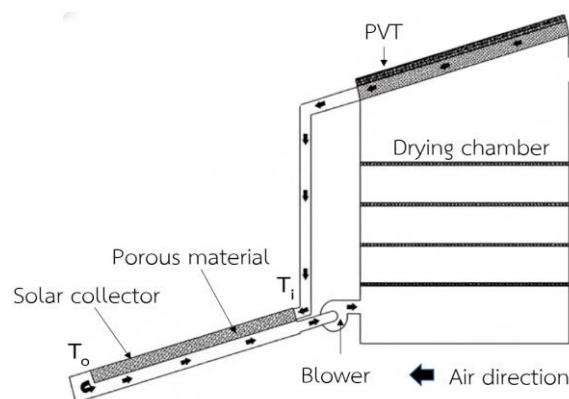


Figure 1. Schematic diagram of solar dryer



Figure 2. Photograph of solar dryer

The electrical subsystem was designed to meet a total energy demand of 0.5 kWh under a peak sun hour of 5 h. The required photovoltaic capacity to supply the fan load was estimated at 100 Wp; however, a 150 Wp photovoltaic panel was selected to enhance operational reliability and accommodate power fluctuations. Battery sizing was based on a nominal voltage of 12 V, a usable capacity of 60%, and an inverter efficiency of 80%, resulting in a minimum battery

บทความวิจัย (Research Article)

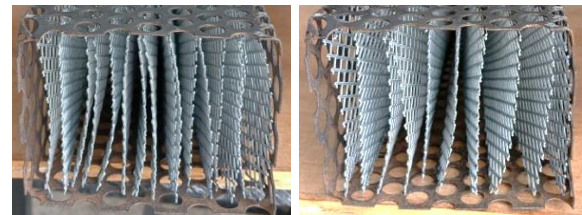
requirement of 12 V, 86.8 Ah. To comply with commercial specifications and ensure continuous operation, a 12 V, 100 Ah battery was adopted together with a 12 V, 15 A solar charge controller.

The PVT-porous drying system consists of a drying chamber equipped with a fan and a solar air-heating unit comprising a solar collector coupled with a photovoltaic-thermal (PVT) module. The overall system configuration and the fabricated prototype are illustrated in Figures 1 and 2.

4. Experimental Setup

The photovoltaic-thermal porous solar dryer (PVT-porous solar dryer) developed in this study operates as an active system and integrates a 150 W photovoltaic-thermal (PVT) panel. The PVT panel is mounted on the top of a cubic drying chamber fabricated from insulated steel sheets with dimensions of 1 m × 1 m × 1 m. An air duct connects the PVT unit to a dual-pass solar air collector with dimensions of 0.75 m × 1.85 m × 0.25 m. The solar air collector contains a 1.5 mm thick steel absorber plate, above which porous absorber materials are installed to enhance heat retention and heat transfer. The porous structures are fabricated from perforated steel sheets with a hole diameter of 10 mm and a thickness of 1.2 mm (2 PPI). The perforated metal sheets were assembled into hollow rectangular modules with dimensions of 100 × 90 mm and arranged across the width of the solar collector. Steel meshes were inserted

inside the hollow structures. Previous studies [15,20] have reported that this type of porous material exhibits high heat transfer effectiveness, with typical porosity values in the range of 0.96–0.98. Accordingly, two porosity levels, $\varepsilon = 0.96$ and $\varepsilon = 0.98$, were investigated in the present study. Heated air from the solar collector was supplied to the drying chamber through an air duct installed at the lower sidewall, driven by a fan. The system configuration and the arrangement of the porous absorber materials used in the experiments are illustrated in Figure 3.



(a) $\varepsilon = 0.96$

(b) $\varepsilon = 0.98$

Figure 3. Porous absorber material

The porosity of the porous material was calculated using Eq. (4):

$$\varepsilon = \frac{V_p}{V_t} \quad (4)$$

where V_p is the pore volume (m^3) and V_t is the total volume of the porous structure (m^3).

Experimental drying tests were conducted in Thailand under tropical climatic conditions

บทความวิจัย (Research Article)

during June and July 2025, between 9:00 a.m. and 4:00 p.m. Kaffir lime leaves were used as the drying material, with an initial sample mass of 200 g for each experiment. Moisture content was determined according to the standard AOAC (2019) method [21]. The hot air velocity inside the drying system was measured using a hot-wire anemometer. Air temperature was monitored using K-type thermocouples connected to a data logger, while the sample mass was measured using a load cell and a digital balance.

5. Data Analysis

The moisture ratio (MR) was evaluated by assuming negligible equilibrium moisture content and was defined as the ratio of the moisture content at any given time to the initial moisture content, as expressed in Eq. (5):

$$MR = \frac{M_t}{M_{in}} \quad (5)$$

where MR is the moisture ratio (–), M_{in} is the initial moisture content on a dry basis (d.b.), and M_t is the moisture content at time t (d.b.).

The moisture content at each time interval was then calculated using Eq. (6):

$$MC = \frac{w - d}{d} \quad (6)$$

where MC is the moisture content (d.b.), w is the wet mass at a given time (g), and d is the dry mass of the product (g).

The drying rate (DR), representing the mass of moisture removed per unit time, was determined using Eq. (7):

$$DR = \frac{\Delta w}{\Delta t} \quad (7)$$

where DR is the drying rate (g/h), Δw is the mass of evaporated water (g), and Δt is the corresponding drying time interval (h).

The specific energy consumption (SEC), defined as the energy required to remove a unit mass of moisture, was calculated using Eq. (8):

$$SEC = \frac{3.6E}{w_i - w_f} \quad (8)$$

where SEC is the specific energy consumption (MJ/kg), w_i and w_f are the wet masses before and after drying, respectively (kg), and E is the total energy input (kWh).

Measurement uncertainties were evaluated for key parameters, including air temperature, air velocity, solar irradiance, and mass. The uncertainties associated with the K-type thermocouples, hot-wire anemometer, solar radiation meter, and weighing devices were $\pm 1.0^\circ\text{C}$, $\pm 5\%$, $\pm 5\%$, and $\pm 0.1\text{g}$, respectively.

บทความวิจัย (Research Article)

The individual uncertainties are summarized in Table 1.

Table 1: Individual uncertainties of measured parameters

Parameter	Device	Uncertainty
Temperature	K-type Thermocouple	$\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$
Air velocity	Hot Wire Anemometer	$\pm 5\%$
Solar radiation	Pyranometer	$\pm 5\%$
Scale	Digital scale & load cell	$\pm 0.1\text{ g}$

The combined uncertainty was estimated using the root-sum-of-squares (RSS) method, as expressed in Eq. (9):

$$U_{total} = \sqrt{U_T^2 + U_V^2 + U_{SR}^2 + U_M^2} \quad (9)$$

where U_{total} is the combined uncertainty, and U_T , U_V , U_{SR} , and U_M represent the relative uncertainties of temperature, velocity, solar radiation, and mass, respectively.

The uncertainty associated with calculated parameters, including the drying rate and specific energy consumption, was evaluated using standard error propagation procedures based on the guide to the expression of uncertainty in measurement.

The combined uncertainty of the drying rate was determined to be $\pm 7\%$.

6. Results and Discussions

6.1 Temperature profile in the solar dryer

Experiments were conducted at an air velocity of 0.10 m/s between 9:00 a.m. and 4:00 p.m. to examine temperature distribution under different porous configurations.

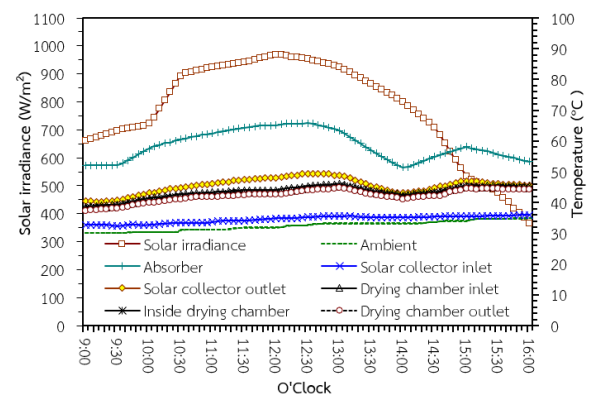


Figure 4. Temperature profile in the solar dryer without porous material

Figure 4 shows the temperature profile of the non-porous system. During the tests, solar irradiance ranged from 371 to 972 W/m², with an average of 764 W/m². The drying chamber temperature varied between 38 °C and 45 °C (average 42.7 °C), while the inlet air temperature ranged from 39 to 46 °C (average 43.2 °C). Ambient temperature remained stable at 30–35 °C (average 32.6 °C). The absorber temperature was higher, ranging

บทความวิจัย (Research Article)

from 51 to 66 °C with a mean of 58.5 °C, whereas the solar collector inlet temperature varied slightly between 33 °C and 36 °C (average 34.6 °C).

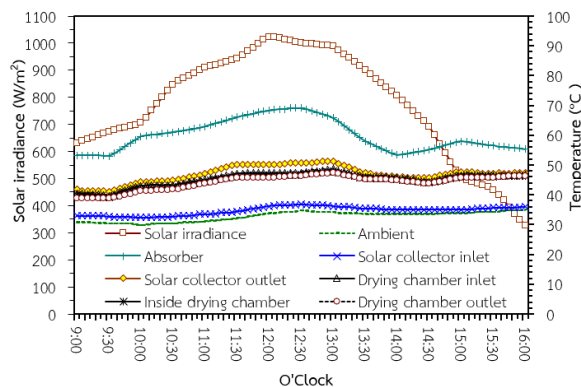


Figure 5. Temperature profile in the solar dryer with porous material ($\epsilon = 0.98$)

Figure 5 shows the temperature profiles for the porous configuration with a porosity of 0.98 at the same air velocity. Solar irradiance ranged from 332 to 1,028 W/m², with an average equal to the non-porous case (764 W/m²). The drying chamber temperature increased to 39–48 °C, with an average of 44.6 °C, while the inlet air temperature ranged from 40 °C to 48 °C (average 45.0 °C). Ambient temperature remained similar to the baseline, averaging 33.0 °C. The absorber temperature rose to 53–69 °C, with a mean of 60.0 °C, whereas the solar collector inlet temperature showed only a slight increase to 33–37 °C (average 34.9 °C).

Figure 6 presents the temperature distribution for the porous configuration with

a porosity of 0.96. Solar irradiance ranged from 389 to 1,005 W/m², with an average of 770 W/m². This configuration produced the highest drying chamber temperature, ranging from 40 to 55 °C (average 47.6 °C). The inlet air temperature increased to 41–55 °C, with a mean of 48.0 °C. Ambient temperature remained stable at 31–33 °C (average 32.2 °C). The absorber temperature reached 53–68 °C, yielding the highest average value of 60.8 °C among all cases, while the solar collector inlet temperature remained nearly constant at 33–35 °C (average 34.0 °C).

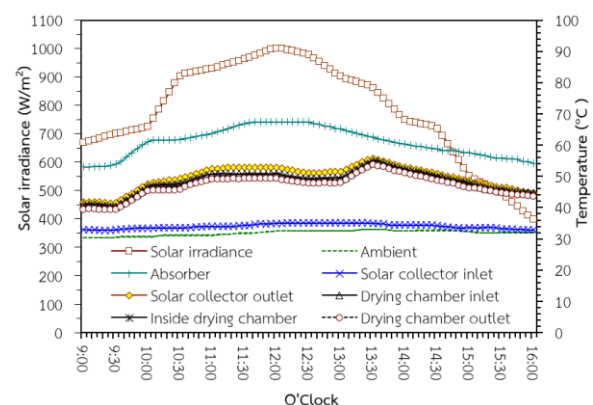


Figure 6. Temperature profile in the solar dryer with porous material ($\epsilon = 0.96$)

In summary, the experimental results demonstrate that the incorporation of porous materials significantly enhances heat retention and increases the air temperature within the drying chamber. This improvement is attributed to the increased heat transfer surface area provided by the porous structure, as well as its ability to store thermal energy.

บทความวิจัย (Research Article)

This thermal behavior directly leads to improved drying performance, as discussed in the following sections.

6.2 Effect of Porous Materials on Solar Dryer Performance

6.2.1 Effect of Porous Materials on Drying Time

Figure 7 shows the moisture ratio (MR) as a function of drying time at a fixed air velocity of 0.10 m/s for three configurations: non-porous, 0.96 porosity, and 0.98 porosity. In all cases, MR decreased continuously up to 420 min, indicating a dominant falling-rate drying regime controlled by internal moisture diffusion.

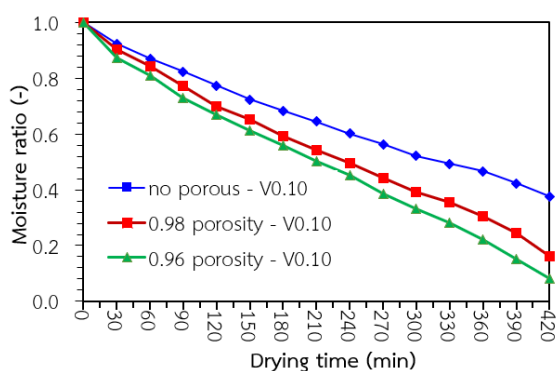


Figure 7. Moisture ratio versus drying time for different porous configurations

The incorporation of porous materials significantly accelerated drying. The 0.96 porosity configuration achieved the lowest final MR (0.13), compared with 0.19 for 0.98 porosity and 0.42 for the non-porous case. This improvement is attributed to the

increased heat exchange surface area, which leads to higher air temperatures within the drying chamber and promotes internal moisture vapor diffusion. As a result, the average drying rate increased by approximately 50%, from 7.71 g/h for the non-porous configuration to 11.57 g/h for the porous configuration with a porosity of 0.96. These results confirm that porous materials, particularly at lower porosity levels, significantly enhance drying efficiency while reducing drying time and energy demand. These findings are consistent with previous studies [22–24], highlighting the critical role of enhanced transport mechanisms in accelerating moisture removal.

6.2.2. Effect of Porous Materials on Drying Rate

Figure 8 shows the drying rates of kaffir lime leaves at an air velocity of 0.10 m/s for three configurations: the non-porous system and porous systems with porosities of 0.98 and 0.96. The configuration with a porosity of 0.96 achieved a higher drying rate than that with a porosity of 0.98.

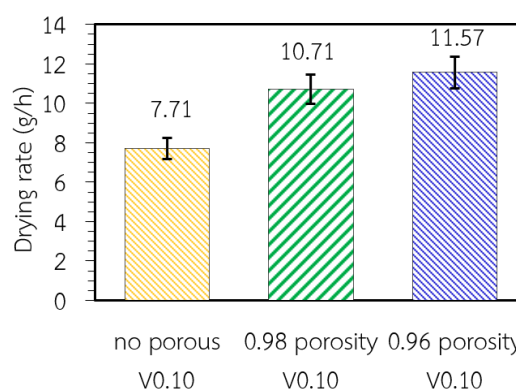


Figure 8. Drying rate under different porous material configurations.

บทความวิจัย (Research Article)

These results indicate that maximum porosity does not necessarily yield the best drying performance, as the structure with a porosity of 0.98 contains an excessive void fraction, which reduces the effective surface area available for heat exchange. These findings are consistent with previous studies [22–23, 25], which reported that porous material structures can significantly enhance drying performance.

6.2.3. Effect of Porous Materials on Specific Energy Consumption

Figure 9 shows the specific energy consumption (SEC) at an air velocity of 0.10 m/s for three configurations: the non-porous system and porous systems with porosities of 0.98 and 0.96. The incorporation of porous materials clearly reduced SEC.

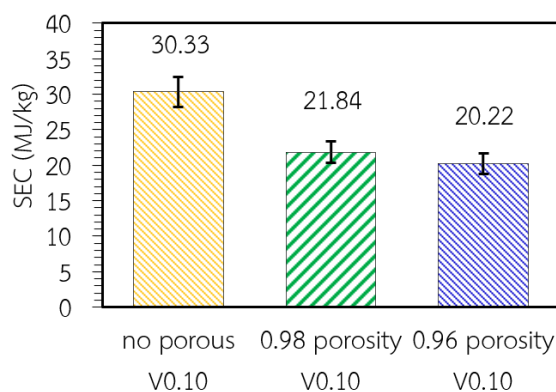


Figure 9. Specific energy consumption for different porous configurations

The non-porous configuration exhibited the highest SEC of 30.33 MJ/kg, while SEC decreased to 21.84 MJ/kg and 20.22 MJ/kg for

porosities of 0.98 and 0.96, corresponding to reductions of 28.0% and 33.3%, respectively.

The lowest SEC obtained at a porosity of 0.96 indicates that, although this configuration requires higher fan power due to increased pressure drop compared with the 0.98 porosity case, it enables greater moisture evaporation for the same drying duration. Consequently, the porosity of 0.96 resulted in the minimum SEC. These findings are consistent with previous studies [26–27] and highlight the importance of optimizing porous structure characteristics for the development of energy-efficient and sustainable solar drying systems.

7. Conclusions

This study successfully developed and experimentally evaluated a PVT solar dryer integrated with porous absorbers under tropical climatic conditions. The results indicate that porous integration significantly improved drying performance and energy efficiency. Compared with the non-porous configuration, the average drying rate increased by approximately 50%. A porosity of 0.96 provided the best overall performance. In addition, specific energy consumption was reduced by up to 33.3%. These findings confirm that the PVT–porous solar dryer is an effective and energy-efficient solution for agricultural drying in humid tropical environments.

บทความวิจัย (Research Article)

8. Acknowledgments

This research was supported by the Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University.

9. References

- [1] A. Al-Shetwi, "Sustainable development of renewable energy integrated power sector: Trends, environmental impacts, and recent challenges," *Science of the Total Environment*, vol. 822, pp. e153645, 2022. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.153645.
- [2] A. Osman, L. Chen, M. Yang, G. Msigwa, M. Farghali, S. Fawzy, D. W. Rooney, and P. Yap, "Cost, environmental impact, and resilience of renewable energy under a changing climate: A review," *Environmental Chemistry Letters*, vol. 21, pp. 741-764, 2023. DOI: 10.1007/s10311-022-01532-8.
- [3] D. Gayen, R. Chatterjee, and S. Roy, "A review on environmental impacts of renewable energy for sustainable development," *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 21, pp. 5285-5310, 2023. DOI: 10.1007/s13762-023-05380-z.
- [4] K. Venkateswarlu and S. V. K. Reddy, "Recent trends on energy-efficient solar dryers for food and agricultural products drying: A review," *Waste Disposal & Sustainable Energy*, vol. 6, pp. 335-353, 2024. DOI: 10.1007/s42768-024-00193-3.
- [5] M. C. García-Muñoz, Y. Romero-Barrera, L. F. Amortegui-Sánchez, E. Villagran, J. J. Espitia-González, and K. J. Pedroza-Berrio, "Solar dehydration of mangoes as an alternative for system sustainability, food and nutritional security, and energy transition," *Sustainability*, vol. 17, no. 12, pp. e5313, 2025. DOI: 10.3390/su17125313.
- [6] M. A. Rahman, S. M. M. Hasnain, P. Paramasivam, R. Zairov, and A. G. Ayanie, "Solar drying for domestic and industrial applications: A comprehensive review of innovations and efficiency enhancements," *Global Challenges*, vol. 9, pp. e202400301, 2025. DOI: 10.1002/gch2.202400301.
- [7] A. Bareen, S. Dash, P. Kalita, and K. Dash, "Experimental investigation of an indirect solar dryer with PCM-integrated solar collector as a thermal energy storage medium," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 31, pp. 18209-18225, 2024. DOI: 10.1007/s11356-023-26690-2.
- [8] S. Madhankumar, K. Viswanathan, W. Wu, and M. I. Taipabu, "Analysis of indirect solar dryer with PCM energy storage material: Energy, economic, drying and optimization," *Solar Energy*, vol. 249, pp. 667-683, 2023. DOI: 10.1016/j.solener.2022.12.009.
- [9] R. Venkatesh, P. Sharma, C. C. Subbarao, V. Mohanavel, K. Veerababu, A. Jadhav, M. Ravichandran, M. Soudagar, M. A. Alotaibi, and R. Sivanraju, "Enhancement of solar dryer performance and collector

บทความวิจัย (Research Article)

- efficiency of paraffin PCM/copper fin featured solar dryer," *Scientific Reports*, vol. 15, pp. e3176, 2025. DOI: 10.1038/s41598-025-01555-5.
- [10] E. Çiftçi, A. Khanlari, A. Sözen, İ. Aytac, and A. D. Tuncer, "Energy and exergy analysis of a photovoltaic thermal (PVT) system used in a solar dryer: A numerical and experimental investigation," *Renewable Energy*, vol. 180, pp. 410-423, 2021. DOI: 10.1016/j.renene.2021.08.081.
- [11] A. D. Tuncer, A. Khanlari, F. Afshari, A. Sözen, E. Çiftçi, B. Kusun, and İ. Şahinkesen, "Experimental and numerical analysis of a grooved hybrid photovoltaic–thermal solar drying system," *Applied Thermal Engineering*, vol. 218, pp. e119288, 2023. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.119288.
- [12] S. Mirzaei, M. Ameri, and H. Morteza pour, "Comparative energy-exergy and economic-environmental analyses of recently advanced solar photovoltaic and photovoltaic thermal hybrid dryers: A review," *Drying Technology*, vol. 41, pp. 655-706, 2023. DOI: 10.1080/07373937.2022.2113793.
- [13] O. Ahmed and Z. Mohammed, "Influence of porous media on the performance of hybrid PV/thermal collectors," *Renewable Energy*, vol. 112, pp. 378-387, 2017. DOI: 10.1016/j.renene.2017.05.061.
- [14] R. Kansara, M. Pathak, and V. K. Patel, "Performance assessment of flat-plate solar collectors with internal fins and porous media through an integrated approach of CFD and experimentation," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 165, pp. e106932, 2021. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2021.106932.
- [15] A. F. Ismail, A. S. A. Hamid, A. Ibrahim, H. Jarimi, and K. Sopian, "Performance analysis of a double-pass solar air thermal collector with porous media using lava rock," *Energies*, vol. 15, no. 3, pp. e905, 2022. DOI: 10.3390/en15030905.
- [16] E. Getahun, M. Delele, N. Gabbiye, S. Fanta, P. Demissie, and M. Vanierschot, "Importance of integrated CFD and product quality modeling of solar dryers for fruits and vegetables: A review," *Solar Energy*, vol. 220, pp. 88-110, 2021. DOI: 10.1016/j.solener.2021.03.049.
- [17] S. T. Sileshi, A. Hassen, and K. D. Adem, "Simulation of mixed-mode solar dryer with vertical air distribution channel," *Heliyon*, vol. 8, no. 11, pp. e11898, 2022. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e11898.
- [18] A. D. Tuncer, A. Sözen, A. Khanlari, A. Amini, and C. Şirin, "Thermal performance analysis of a quadruple-pass solar air collector assisted pilot-scale greenhouse dryer," *Solar Energy*, vol. 203, pp. 304-316, 2020. DOI: 10.1016/j.solener.2020.04.030.
- [19] A. Acharya, H. Davidsson, B. Baral, and M. Andersson, "Investigation of thermodynamic performance of a solar dryer equipped with double-pass flat, V-corrugated, and low-e coated collectors," *Case Studies in Thermal*

บทความวิจัย (Research Article)

- Engineering*, vol. 64, pp. e105482, 2024. DOI: 10.1016/j.csite.2024.105482.
- [20] S. Bunchan, B. Krittacom, and R. Luampon, "Heat transfer enhancement of a solar collector by placing wire mesh stainless porous material on the absorber plate of an indirect forced convection solar dryer," *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 32, pp. e101304, 2022. DOI: 10.1016/j.tsep.2022.101304.
- [21] AOAC International, *Official Methods of Analysis of AOAC International*, 21st ed., Washington, DC: AOAC International, 2019.
- [22] B. Li, C. Liu, Z. Li, Y. Liu, H. Zhang, X. Zhang, C. Lv, and Z. Zeng, "Experimental and numerical study on dynamic porosity of the flow layer during the paddy grain convective drying process," *AgriEngineering*, vol. 7, no. 6, pp. e164, 2025. DOI: 10.3390/agriengineering7060164.
- [23] M. Salhi, D. Chaatouf, B. Raillani, S. Amraoui, and A. Mezrhab, "Investigating the effect of food tray porosity on the drying process," *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, vol. 76, pp. e102939, 2022. DOI: 10.1016/j.ifset.2022.102939.
- [24] W. Guo, L. Tong, L. Yang, S. Zhao, S. Yin, C. Liu, and L. Wang, "A thick-layer drying kinetic model and drying characteristics of moisture-containing porous materials," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 149, pp. e107133, 2023. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2023.107133.
- [25] S. Qiu, S. Xu, B. Rao, A. Mujumdar, and P. Xu, "A multi-scale model for impingement drying of porous slabs," *Journal of Food Engineering*, vol. 335, pp. e111194, 2022. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2022.111194.
- [26] A. Arabhosseini, H. Samimi-Akhijahani, and M. Motahayyer, "Increasing the energy and exergy efficiencies of a collector using porous and recycling systems," *Renewable Energy*, vol. 132, pp. 308-325, 2019. DOI: 10.1016/j.renene.2018.07.132.
- [27] H. Karami, M. Kaveh, I. Golpour, E. Khalife, R. Rusinek, and B. Dobrzanski, "Thermodynamic evaluation of a forced convective hybrid solar dryer during drying of rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.) leaves," *Energies*, vol. 14, no. 18, pp. e5835, 2021. DOI: 10.3390/en14185835.

การพัฒนาโปรแกรมเว็บไซต์แอปพร้อมกับปัญญาประดิษฐ์สำหรับการจำแนกโรคใบข้าว

ปิยะพงษ์ แดงขำ¹ และ วดีนาถ วรรณสวัสดิ์กุล^{1,*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมการสื่อสารและสารสนเทศ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

*ผู้ประสานงานบทความต้นฉบับ: wadeenat.w@lawasri.tru.ac.th โทรศัพท์: 090-5640990

(รับบทความ: 26 พฤศจิกายน 2568; แก้ไขบทความ: 18 มกราคม 2569; ตอรับบทความ: 11 กุมภาพันธ์ 2569)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาแอปพลิเคชัน RiceCare PWA สำหรับจำแนกโรคใบข้าวโดยใช้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ร่วมกับ Progressive Web Apps (PWA) เพื่อให้เกษตรกรสามารถวิเคราะห์โรคจากภาพใบข้าวได้อย่างสะดวก รวดเร็ว และใช้งานได้แม้ในพื้นที่ที่มีสัญญาณอินเทอร์เน็ตจำกัด โมเดลปัญญาประดิษฐ์ได้รับการฝึกด้วยชุดข้อมูลภาพ 6 คลาสจาก Rice Leafs Disease Dataset โดยใช้แพลตฟอร์ม Google Teachable Machine ก่อนทำการประเมินประสิทธิภาพด้วยตัวชี้วัดเชิงสถิติ 8 รายการ ประกอบไปด้วย Precision, Recall, F1-Score, Specificity, NPV, FPR, FNR และ MCC ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าโมเดลมีความแม่นยำสูง โดยค่า Precision อยู่ระหว่าง 0.70–0.78 ค่า Recall อยู่ระหว่าง 0.72–0.82 และค่า MCC อยู่ในช่วง 0.65–0.76 สะท้อนถึงความเสถียรและความสอดคล้องของผลทำนายเมื่อเทียบกับข้อมูลจริง แอปพลิเคชัน RiceCare พัฒนาในรูปแบบ PWA เพื่อให้ประมวลผลแบบออฟไลน์ได้ ซึ่งจะสะดวกในการใช้งานภาคสนามที่อาจไม่มีสัญญาณอินเทอร์เน็ต การทดสอบระบบบนสมาร์ตโฟน Android จำนวน 6 รุ่น พบว่าเวลาเฉลี่ยในการประมวลผลภาพเพียง 1.46 วินาที และมีอัตราความสำเร็จในการทำงานสูงถึงร้อยละ 99.4 แม้จะพบความล่าช้าเพียงเล็กน้อยในการโหลดครั้งแรกที่ต้องดาวน์โหลดโมเดล ผลการทดสอบภาคสนามในแปลงนาจำนวน 200 ภาพ พบว่าผลการจำแนกของแอปสอดคล้องกับเกษตรกรถึงร้อยละ 90.5 โดยเฉพาะใบข้าวปกติที่ตรงกันเกือบร้อยละ 100 แสดงถึงศักยภาพของแอปในการสนับสนุนการวินิจฉัยโรคในสภาพแวดล้อมจริง นอกจากนี้ผลการประเมินความพึงพอใจจากผู้ใช้จริง 10 รายอยู่ในระดับดีมาก ด้วยค่าเฉลี่ย 4.65 ผลการวิจัยยืนยันว่า RiceCare PWA เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการตรวจโรคใบข้าว ช่วยลดเวลาการวินิจฉัย เพิ่มความแม่นยำ และเป็นแนวทางสำคัญในการประยุกต์ AI และ PWA เพื่อสนับสนุนการเกษตรอัจฉริยะในระดับชุมชนอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: โรคใบข้าว ปัญญาประดิษฐ์ Teachable Machine, Progressive Web Apps

การอ้างอิงบทความ: ปิยะพงษ์ แดงขำ และ วดีนาถ วรรณสวัสดิ์กุล, "การพัฒนาโปรแกรมเว็บไซต์แอปพร้อมกับปัญญาประดิษฐ์สำหรับการจำแนกโรคใบข้าว," วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์, ปีที่ 4, ฉบับที่ 2, หน้า 25-39, 2569.

Development of a Progressive Web Apps with Artificial Intelligence for Rice Leaf Disease Classification

Piyapong Dangkham¹ and Wadeenat Wannasawaskul^{1,*}

¹Department of Communication and Information Engineering, Faculty of Industrial Technology, Thepsatri Rajabhat University

*Corresponding Author: wadeenat.w@lawasri.tru.ac.th, Tel: 090-5640990

(Received: November 26, 2025; Revised: January 18, 2026; Accepted: February 11, 2026)

Abstract

This research presents the development of RiceCare PWA, an application for classifying rice leaf diseases using Artificial Intelligence (AI) integrated with Progressive Web Apps (PWA) technology. The system is designed to provide farmers with a convenient and rapid tool for analyzing diseases from leaf images, even in areas with limited internet connectivity. The AI model was trained on a 6-class dataset from the rice leaf disease dataset using the Google Teachable Machine platform. The model's performance was evaluated through eight statistical metrics: precision, recall, F1-score, specificity, NPV, FPR, FNR, and MCC. The results demonstrate high classification accuracy, with precision values ranging from 0.70 to 0.78, recall between 0.72 and 0.82, and MCC between 0.65 and 0.76, reflecting strong stability and correlation between predictions and actual ground truth data. By leveraging PWA technology, ricecare enables offline processing, which is crucial for field operations in remote areas. System testing across six Android smartphone models revealed an average image processing time of only 1.46 seconds and a high operational success rate of 99.4%, with only minor initial latency during the first-time model download. Field testing on 200 rice leaf images showed a 90.5% agreement rate between the application's results and expert farmers' assessments, with nearly 100% accuracy in identifying healthy leaves. Furthermore, a user satisfaction survey with 10 participants yielded an excellent rating of 4.65. These findings confirm that RiceCare PWA is an effective tool for rice disease detection, reducing diagnostic time, increasing accuracy, and serving as a sustainable framework for applying AI and PWA in community-level smart agriculture.

Keywords: Rice Leaf Diseases, Artificial Intelligence, Teachable Machine, Progressive Web Apps

Please cite this article as: P. Dangkham and W. Wannasawaskul, "Development of a Progressive Web Apps with Artificial Intelligence for Rice Leaf Disease Classification," *The Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University*, vol. 4, no. 2, pp. 25-39, 2026.

บทความวิจัย (Research Article)

1. บทนำ

โรคพืชเป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อผลผลิตและสร้างความเสียหายทางเศรษฐกิจ ซึ่งปัจจุบันเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (AI) โดยเฉพาะการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการวินิจฉัยและจำแนกโรคพืชจากภาพถ่ายได้อย่างแม่นยำและรวดเร็วกว่าวิธีดั้งเดิมที่ต้องอาศัยประสบการณ์และความชำนาญของบุคคล [1] การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเหล่านี้สอดคล้องกับแนวทางเกษตรแม่นยำ (Precision Agriculture) ที่เน้นการใช้ข้อมูลและเทคโนโลยีเพื่อการตัดสินใจในการจัดการพื้นที่เพาะปลูก ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและลดต้นทุน [2] นอกจากนี้การนำ AI มาพัฒนาร่วมกับระบบการจัดการความรู้ยังช่วยส่งผ่านข้อมูลสู่เกษตรกร เพื่อรับมือกับสถานการณ์วิกฤตและยกระดับคุณภาพผลผลิตได้อย่างยั่งยืน [3]

ปัจจุบันเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์โดยเฉพาะการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการปฏิวัติกระบวนการวินิจฉัยโรคพืชทดแทนวิธีการดั้งเดิมที่ต้องอาศัยความชำนาญเฉพาะบุคคล โดยมีการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน (CNN) ซึ่งได้รับการยอมรับว่ามีประสิทธิภาพสูงในการสกัดคุณลักษณะและจำแนกภาพถ่ายโรคพืชที่มีความซับซ้อน [4] งานวิจัยจำนวนมากนิยมใช้วิธีการถ่ายโอนการเรียนรู้ (Transfer Learning) ร่วมกับสถาปัตยกรรมมาตรฐาน เช่น VGG16, Inception V3 และ ResNet เพื่อลดระยะเวลาการเรียนรู้และเพิ่มความแม่นยำ เช่นงานวิจัยที่ทำการเปรียบเทียบโมเดลเพื่อจำแนกโรคแตงกวาพบว่า VGG16 ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดถึง 98% [5] รวมถึงการปรับค่าพารามิเตอร์ใน ResNet50 ร่วมกับอัลกอริทึมเพิ่มประสิทธิภาพ (Optimization Algorithms) เพื่อจำแนกโรคพืชทางใบได้อย่างถูกต้อง [6] นอกจากนี้โมเดลพื้นฐานแล้ว ยังมีการพัฒนารูปแบบสถาปัตยกรรมแบบผสมผสาน (Hybrid Models) เพื่อแก้ปัญหาความซับซ้อนของลักษณะอาการโรค เช่น

การผสานเครือข่ายแคปซูล (Capsule Network) เข้ากับ CNN และกลไกความสนใจ (Attention Mechanism) เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการเรียนรู้ความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ของโรคใบขาว ซึ่งช่วยให้โมเดลมีความแม่นยำสูงถึง 96.01% [7] อีกทั้งยังมีการนำเทคนิค Soft Computing เช่น ANFIS ร่วมกับ K-Means มาใช้ในการจำแนกโรคใบมะเขือเทศได้สำเร็จ [8] อย่างไรก็ตาม ปัญหาสำคัญของการใช้ Deep Learning คือความเสี่ยงต่อการเรียนรู้เกิน (Overfitting) เมื่อข้อมูลมีจำกัด จึงมีการเสนอใช้กลยุทธ์ต่าง ๆ เช่น การเพิ่มปริมาณข้อมูล (Data Augmentation) การใช้ Dropout และการหยุดก่อนกำหนด (Early Stopping) เพื่อให้โมเดลมีเสถียรภาพและแม่นยำเมื่อนำไปใช้งานจริงกับโรคข้าว [9] นอกจากนี้การวินิจฉัยโรคแล้ว การนำเทคโนโลยีมาจัดระบบองค์ความรู้ท้องถิ่นก็มีความสำคัญ ดังเช่นงานวิจัยของประมุข สุขสภาวะ และ อธิพล สืบชมภู [10] ที่พัฒนาแอปพลิเคชันบนสมาร์ตโฟนร่วมกับเทคนิคต้นไม้ตัดสินใจ (Decision Tree) เพื่อจำแนกพืชสมุนไพรพื้นบ้าน ซึ่งช่วยให้ผู้ใช้งานเข้าถึงข้อมูลได้ง่ายและมีความแม่นยำสูงถึง 92% แสดงให้เห็นว่าการพัฒนาเครื่องมือที่ใช้งานผ่านสมาร์ตโฟนเป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพสูงในการนำเทคโนโลยีไปประยุกต์ใช้จริงในระดับชุมชน

จากปัญหาและโอกาสดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันสำหรับจำแนกโรคข้าวด้วยภาพใบข้าวซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจของจังหวัดลพบุรี [11] โดยประยุกต์ใช้ Teachable Machine ร่วมกับเทคโนโลยี Progressive Web App (PWA) ซึ่งเป็นจุดเด่นสำคัญที่ช่วยขจัดข้อจำกัดด้านการเข้าถึงเทคโนโลยี เนื่องจาก PWA สามารถทำงานได้เหมือนแอปพลิเคชันพื้นฐาน (Native App) โดยไม่ต้องดาวน์โหลดติดตั้งและรองรับการใช้งานในโหมดออฟไลน์ (Offline) ซึ่งเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับพื้นที่เกษตรกรรมที่สัญญาณอินเทอร์เน็ตไม่ครอบคลุม ผลลัพธ์จากการวิจัยนี้จะเป็นเครื่องมือสำคัญที่ช่วยให้

บทความวิจัย (Research Article)

เกษตรกรในระดับชุมชนสามารถวินิจฉัยโรคข้าวได้ด้วยตนเองอย่างรวดเร็วและแม่นยำ ลดภาระการพึ่งพาผู้เชี่ยวชาญ ลดต้นทุนการตรวจแปลง และช่วยให้เกษตรกรสามารถตรวจพบโรคได้ตั้งแต่ระยะเริ่มต้นนำไปสู่การวางแผนป้องกันกำจัดโรคที่ทันทั่วทั้งพื้นที่และช่วยลดความเสียหายของผลผลิตข้าวในชุมชนได้อย่างยั่งยืน

2. โมเดลปัญญาประดิษฐ์การจำแนกโรคใบข้าว

ในการพัฒนาเครื่องมือวิเคราะห์โรคใบข้าวอัตโนมัติ ผู้วิจัยได้นำเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ด้านการจำแนกภาพ (Image Classification) มาใช้เพื่อให้สามารถตรวจจับอาการของโรคจากภาพใบข้าวได้อย่างเป็นระบบและลดความคลาดเคลื่อนจากการประเมินด้วยมนุษย์ โมเดลที่พัฒนานี้ถูกออกแบบให้รองรับลักษณะโรค 5 ประเภทที่พบในประเทศไทย พร้อมคลาสใบปกติรวมเป็น 6 คลาส โดยใช้ชุดข้อมูลภาพต้นแบบจากงานวิจัยและฐานข้อมูลสาธารณะร่วมกับองค์ความรู้โรคข้าวจากแหล่งข้อมูลทางการ เพื่อให้การฝึกแบบจำลองมีความสมบูรณ์มากที่สุด

กระบวนการสร้างโมเดลประกอบด้วยสามขั้นตอนหลัก ได้แก่ (1) การเตรียมและจัดการชุดข้อมูลภาพใบข้าว เพื่อให้ได้ข้อมูลที่เป็นมาตรฐานและสอดคล้องกับจำนวนคลาสที่ต้องการจำแนก (2) การฝึกโมเดลด้วยเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องผ่านระบบ Google Teachable Machine ซึ่งช่วยให้สามารถสร้างโมเดลภาพได้อย่างรวดเร็วโดยไม่ต้องเขียนโค้ด และ (3) การทดสอบและประเมินผลโมเดลด้วยตัวชี้วัดเชิงสถิติหลายรายการ เพื่อให้มั่นใจว่าโมเดลมีความแม่นยำเพียงพอต่อการนำไปใช้จริงในแปลงนาและสภาพแวดล้อมที่มีความหลากหลาย

2.1 การเตรียมและจัดการชุดข้อมูลภาพใบข้าว

ผู้วิจัยได้ทำการรวบรวมองค์ความรู้หลัก (Knowledge Base) ด้านโรคใบข้าวจากแหล่งข้อมูลทุติยภูมิ (Secondary Data) ที่มีความน่าเชื่อถือสูง โดยอ้างอิงข้อมูลจากคลังความรู้องค์ความรู้เรื่องข้าว (Rice Knowledge Bank) ซึ่งจัดทำและเผยแพร่โดยกรมการข้าว กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ [12] โดยได้คัดเลือกข้อมูลในส่วนโรคใบข้าว และการป้องกันกำจัด ที่มีการจำแนกโรคสำคัญที่พบในประเทศไทย ข้อมูลที่นำมาใช้ประกอบด้วยรายละเอียดของโรคที่พบบ่อย 5 ชนิด ได้แก่ โรคใบจุดสีน้ำตาล โรคไหม้ โรคขอบใบแห้ง โรคใบวงสีน้ำตาล และโรคใบขีดสีน้ำตาล โดยสกัดข้อมูล 2 ส่วนหลักคือ (1) ลักษณะอาการที่ปรากฏบนใบ และ (2) แนวทางการจัดการและป้องกันรักษา เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบการแสดงผลลัพธ์การวิเคราะห์ของโมเดลปัญญาประดิษฐ์ ดังแสดงในตารางที่ 1

ในการฝึกสอนโมเดลปัญญาประดิษฐ์ (AI Model) ผู้วิจัยได้ใช้ชุดข้อมูล "Rice Leafs Disease Dataset" ซึ่งเป็นชุดข้อมูลที่เผยแพร่สาธารณะบนแพลตฟอร์ม Kaggle ชุดข้อมูลนี้รวบรวมโดย Saputra [13] และประกอบด้วยรูปภาพใบข้าวทั้งหมด 2,627 ภาพ ผู้วิจัยได้ใช้ข้อมูลทั้งหมด 6 คลาส ที่มีในชุดข้อมูล โดยแบ่งเป็น 5 คลาส สำหรับโรคข้าวที่แสดงไว้ในตารางที่ 1 ได้แก่ Brown Spot, Leaf Blast, Bacterial Leaf Blight, Leaf Scald และ Narrow Brown Spot และคลาสที่ 6 คือ Healthy หรือใบข้าวปกติ เพื่อใช้เป็นกลุ่มควบคุม ในการฝึกสอนโมเดลรายละเอียดชุดข้อมูล และจำนวนข้อมูลที่เลือกมาใช้ในแต่ละคลาสแสดงได้ดังตารางที่ 2

บทความวิจัย (Research Article)

ตารางที่ 1 ลักษณะอาการโรคใบข้าวและวิธีดูแลรักษา

โรคข้าว (Disease)	อาการ (Symptoms)	วิธีดูแลรักษา (Treatment)
โรคใบจุดสีน้ำตาล (Brown Spot)	แผลที่ใบข้าว พบมากในระยะแตกกอ มีลักษณะเป็นจุดสีน้ำตาล รูปกลมหรือรูปไข่ ขอบนอกสุดของแผลมีสีเหลือง	พ่นด้วยสารป้องกันกำจัดเชื้อรา เช่น คาร์เบนดาซิม แมนโคเซ็บ โพรพิโคนาโซล ทีบูโคนาโซล ครีโซซิม-เมทิล หรือ คาร์เบนดาซิม+แมนโคเซ็บ ปลุกพืชหมุนเวียนเพื่อช่วยลดความรุนแรงของโรค
โรคไหม้ (Leaf Blast)	ใบมีแผล จุดสีน้ำตาลคล้ายรูปตา มีสีเทาอยู่ตรงกลางแผล	คลุกเมล็ดพันธุ์ด้วยสารป้องกันกำจัดเชื้อรา เช่น ไตรไซคลาโซล คาซูกาไมซิน ฉีดพ่นสารป้องกันกำจัดเชื้อรา เช่น ไตรไซคลาโซล คาซูกาไมซิน ไม่ควรใส่ปุ๋ยไนโตรเจนสูงเกินไป
โรคขอบใบแห้ง (Bacterial Leaf Blight)	ใบที่เป็นโรคขอบใบมีรอยขีดข่วน ต่อมาจะเปลี่ยนเป็นสีเหลือง ที่แผลมีหยดน้ำสีครีมคล้ายยางสนกลม ๆ ขนาดเล็กเท่าหัวเข็มหมุด ต่อมาจะกลายเป็นสีน้ำตาลและหลุดไปตามน้ำหรือฝน	ใช้สารป้องกันกำจัดโรคพืช เช่น ไอโซโพรไทโอเลน คอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ ในดินที่อุดมสมบูรณ์ไม่ควรใส่ปุ๋ยไนโตรเจนมาก ไม่ควรระบายน้ำจากแปลงที่เป็นโรคไปสู่แปลงอื่น
โรคใบวงสีน้ำตาล (Leaf Scald)	ระยะแรกมีลักษณะเป็นรอยขีด ขาว ๆ แผลสีน้ำตาลปนเทา ขอบแผลสีน้ำตาลอ่อน จากนั้นแผลจะขยายใหญ่ขึ้นเป็นรูปวงรีติดต่อกัน ทำให้เกิดอาการใบไหม้บริเวณกว้าง และเปลี่ยนเป็นสีฟางข้าว	กำจัดพืชอาศัยของเชื้อราสาเหตุโรค ฉีดพ่นสารป้องกันกำจัดโรคพืช เช่น ไธโอฟาเนทเมทิล โพรพิโคนาโซล ตามอัตราที่ระบุ
โรคใบขีดสีน้ำตาล (Narrow Brown Spot)	ใบมีสีน้ำตาลเป็นขีด ๆ ขนานไปกับเส้นใบ ข้าว มักพบในระยะข้าวแตกกอ แผลไม่กว้าง ตรงกลางเล็กและไม่มียอยขีดที่แผล ต่อมาแผลจะขยายมาติดกัน แผลจะมีมากตามใบล่างและปลายใบ	ใช้ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์ (0-0-60) อัตรา 5-10 กิโลกรัมต่อไร่ ให้ฉีดพ่นด้วยสารป้องกันกำจัดเชื้อรา เช่น คาร์เบนดาซิม

2.2 การฝึกโมเดล

ในการฝึกสอนโมเดลปัญญาประดิษฐ์ ผู้วิจัยได้เลือกใช้ Google Teachable Machine ซึ่งเป็นแพลตฟอร์มบนเว็บเบราว์เซอร์ที่ช่วยให้สามารถสร้างโมเดลการเรียนรู้ของเครื่องได้โดยไม่ต้องเขียนโค้ด ผู้วิจัยได้เริ่มต้นด้วยการสร้าง Image Project และกำหนดคลาส ทั้งหมด 6 คลาส เพื่อให้สอดคล้องกับ

ชุดข้อมูล Rice Leafs Disease Dataset ที่เตรียมไว้ ดังแสดงในตารางที่ 2 จากนั้น ผู้วิจัยได้อัปโหลดรูปภาพจากชุดข้อมูลฝึกสอน (Training set) ซึ่งมีคลาสละ 350 ภาพ เข้าไปยัง Teachable Machine และเริ่มกระบวนการฝึกโมเดล โดยใช้พารามิเตอร์มาตรฐานที่ระบบกำหนดไว้ ดังนี้ Epochs ที่ 50 รอบ Batch Size ที่ 16 และ Learning Rate ที่ 0.01

บทความวิจัย (Research Article)

ตารางที่ 2 รายละเอียดชุดข้อมูลในการฝึกสอนโมเดล

ชื่อคลาส	ชื่อโรคใบข้าว	จำนวน	ตัวอย่างชุดข้อมูล		
Brown Spot	โรคใบจุดสีน้ำตาล	350			
Leaf Blast	โรคไหม้	350			
Bacterial Leaf Blight	โรคขอบใบแห้ง	350			
Leaf Scald	โรคใบวงสีน้ำตาล	350			
Narrow Brown Spot	โรคใบขีดสีน้ำตาล	350			
Healthy	ไม่มีโรค	350			

2.3 การทดสอบและประเมินผลโมเดล

การประเมินผลเบื้องต้นโดยใช้ข้อมูลจากชุดข้อมูลทดสอบ (Test Set) ในหน้าต่าง Preview เพื่อยืนยันความแม่นยำ โดยใช้ข้อมูลในการทดสอบคลาสละ 150 ภาพ ผลการตรวจสอบความถูกต้องแสดงได้ดังรูปที่ 1 เพื่อให้การประเมินผลมีความครบถ้วนและสะท้อนความสามารถของโมเดลในหลายมิติ ผู้วิจัยใช้ตัวชี้วัดเชิงสถิติ 8 รายการ โดยอาศัยค่าพื้นฐานจาก Confusion Matrix จำนวนผลทำนายที่ถูกต้องและผิดในแต่ละคลาส การคำนวณตัวชี้วัดทั้งหมดใช้สมการที่ (1) – (8) [14]

ความแม่นยำของการทำนายโรค

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (1)$$

ความสามารถในการตรวจพบโรคจริง

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (2)$$

ค่าความสมดุลระหว่าง Precision และ Recall

$$F1 - score = \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall} \quad (3)$$

ความสามารถในการแยกแยะใบที่ไม่เป็นโรค

$$Specificity = \frac{TN}{TN + FP} \quad (4)$$

บทความวิจัย (Research Article)

ความแม่นยำของการทำนายว่าไม่เป็นโรค

$$NPV = \frac{TN}{TN + FN} \quad (5)$$

ความถี่ในการทำนายผิดว่าเป็นโรค

$$FPR = \frac{FP}{FP + TN} \quad (6)$$

ความถี่ในการทำนายผิดว่าไม่เป็นโรค

$$FNR = \frac{FN}{FN + TP} \quad (7)$$

ตัวชี้วัดสมมูลของความสัมพันธ์ระหว่างผลจริงกับ
ผลทำนาย เหมาะสำหรับข้อมูลหลายคลาสและข้อมูล
ที่ไม่สมดุล (Matthews Correlation Coefficient)

$$MCC = \frac{(TP \times TN) - (FP \times FN)}{\sqrt{(TP + FP)(TP + FN)(TN + FP)(TN + FN)}} \quad (8)$$

การประเมินโมเดลด้วยตัวชี้วัดเชิงสถิติ แสดงดัง
ตารางที่ 3 เมื่อโมเดลมีความแม่นยำเป็นที่น่าพอใจ
แล้ว ผู้วิจัยได้ทำการส่งออก โมเดลในรูปแบบ
TensorFlow.js ซึ่งจะได้ไฟล์ model.json,
metadata.json, และ weights.bin เพื่อนำไปผนวก
รวมกับแอปพลิเคชัน RiceCare PWA ทำให้สามารถ
ทำการวิเคราะห์ภาพ ได้โดยตรงบนอุปกรณ์ของผู้ใช้
แม้อยู่ในสถานะออฟไลน์



รูปที่ 1 แผนภาพ Confusion Matrix แสดงผลการจำแนกโรคใบข้าว 6 คลาส

บทความวิจัย (Research Article)

ตารางที่ 3 ผลการประเมินโมเดลด้วยตัวชี้วัดเชิงสถิติ

Class	Precision	Recall	F1	Specificity	NPV	FPR	FNR	MCC
Leaf Blast	0.72	0.72	0.72	0.94	0.94	0.06	0.28	0.66
Brown Spot	0.70	0.73	0.71	0.94	0.94	0.06	0.27	0.65
Leaf Scald	0.72	0.72	0.72	0.95	0.94	0.05	0.28	0.67
Narrow Brown Spot	0.77	0.72	0.74	0.96	0.94	0.04	0.28	0.69
Bacterial Leaf Blight	0.77	0.75	0.76	0.95	0.95	0.05	0.25	0.71
Healthy Leaf	0.78	0.82	0.80	0.95	0.96	0.05	0.18	0.76

จากตารางที่ 3 แสดงค่าการประเมินประสิทธิภาพของโมเดลจำแนกโรคใบข้าวจำนวน 6 คลาส ด้วยตัวชี้วัดเชิงสถิติ โดยรวมโมเดล มีความสามารถในการจำแนกแต่ละโรคได้ในระดับดีทุกคลาส โดยค่า Precision อยู่ระหว่าง 0.70–0.78 และค่า Recall อยู่ระหว่าง 0.72–0.82 แสดงว่าโมเดลสามารถทำนายถูกทั้งในมุมมองความแม่นยำและความครอบคลุมของข้อมูลจำนวนมาก นอกจากนี้ ค่า F1-score ซึ่งเป็นตัวชี้วัดสมดุลระหว่าง Precision และ Recall อยู่ในช่วง 0.71–0.80 สะท้อนถึงความเหมาะสมของโมเดลในการใช้งานจริง

ค่าตัวชี้วัดด้านการจำแนกเชิงลบ ได้แก่ Specificity และ NPV อยู่ในระดับสูง (0.94–0.96) ทำให้โมเดลมีความสามารถในการแยกแยะใบข้าวที่ไม่เป็นโรคได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขณะที่ค่า FPR อยู่ในช่วง 0.04–0.06 และค่า FNR อยู่ในช่วง 0.18–0.28 ซึ่งอยู่ในระดับที่ยอมรับได้สำหรับงานภาคสนาม

สุดท้ายตัวชี้วัด MCC ซึ่งสะท้อนความสมดุลของผลการจำแนกทั้ง 4 ส่วน (TP, FP, TN, FN) อยู่ในช่วง 0.65–0.76 บ่งชี้ว่าคุณภาพโดยรวมของโมเดลถือว่าดี และมีความสอดคล้องระหว่างผลทำนายกับข้อมูลจริง

3. แอปพลิเคชันการจำแนกโรคใบข้าว RiceCare

เพื่อตอบสนองวัตถุประสงค์ในการสร้างเครื่องมือวิเคราะห์โรคใบข้าวที่เกษตรกรสามารถเข้าถึงได้ง่ายและใช้งานได้จริงในภาคสนาม ผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาแอปพลิเคชัน RiceCare ในรูปแบบของ Progressive Web Application (PWA) ซึ่งเป็นการผสมผสานข้อดีของเว็บไซต์และการทำงานแบบแอปพลิเคชันบนสมาร์ตโฟน สถาปัตยกรรมของแอปพลิเคชันประกอบด้วยเทคโนโลยีหลักดังนี้

1) โครงสร้างหลัก (Frontend Stack) พัฒนาด้วยเทคโนโลยีเว็บมาตรฐาน ได้แก่ HTML5, CSS3, และ JavaScript (ES6+) โดยใช้เฟรมเวิร์ก Tailwind CSS ในการออกแบบส่วนประสานผู้ใช้ (User Interface) ให้มีความเรียบง่ายและตอบสนองต่อทุกขนาดหน้าจอ (Responsive Design)

2) การทำงานแบบออฟไลน์ (Offline Capability) หัวใจสำคัญของแอปพลิเคชันคือการทำงานแบบ PWA โดยการใช้ Service Worker เพื่อทำหน้าที่แคช (Cache) ไฟล์สำคัญของแอปพลิเคชันทั้งหมดไว้ในอุปกรณ์ของผู้ใช้ ซึ่งรวมถึงไฟล์ HTML, CSS, JavaScript และที่สำคัญที่สุดคือไฟล์โมเดลปัญญาประดิษฐ์ (model.json) ทำให้ผู้ใช้สามารถเปิดแอปและทำการวิเคราะห์โรคใบข้าวได้ทันที แม้อยู่ในพื้นที่ที่ไม่มีสัญญาณอินเทอร์เน็ต นอกจากนี้ ยังมี

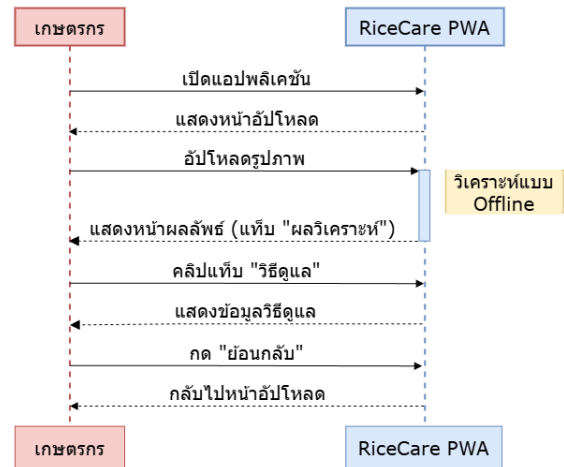
บทความวิจัย (Research Article)

การใช้ Web App Manifest (manifest. json) เพื่อให้ผู้ใช้สามารถติดตั้งแอป (Add to Home Screen) ลงบนอุปกรณ์ได้

3) โมเดลปัญญาประดิษฐ์ (AI Model) แอปพลิเคชันใช้โมเดลการจำแนกประเภทรูปภาพ (Image Classification) ที่สร้างจาก Google Teachable Machine และส่งออก มาในรูปแบบ TensorFlow.js การใช้ TensorFlow.js ทำให้สามารถประมวลผลการวิเคราะห์ (Inference) ได้โดยตรงบนเบราว์เซอร์ของผู้ใช้ (Client-Side) โดยไม่ต้องส่งรูปภาพกลับไปยังเซิร์ฟเวอร์ ซึ่งช่วยรักษาความเป็นส่วนตัวและลดการใช้งานข้อมูลอินเทอร์เน็ต

4) การออกแบบส่วนประสานผู้ใช้ (UI/UX) ผู้วิจัยออกแบบ UI โดยเน้นความเรียบง่ายและโฟกัสที่ละขั้นตอน โดยแบ่งการทำงานออกเป็น 2 หน้าจอหลัก (Screens) ได้แก่ (1) หน้าอัปโหลด (Upload Screen) สำหรับให้ผู้ใช้ถ่ายภาพหรือเลือกภาพใบข้าวที่ต้องการวิเคราะห์ (2) หน้าผลลัพธ์ (Result Screen) เมื่อวิเคราะห์เสร็จ แอปจะสลับมายังหน้านี้ ซึ่งถูกออกแบบให้มี 2 แท็บ (Tabs) เพื่อแบ่งข้อมูลให้ชัดเจน ได้แก่ แท็บผลการวิเคราะห์ แสดงค่าความน่าจะเป็นของโรคที่ตรวจพบ และแท็บวิธีดูแลรักษา แสดงคำอธิบาย อาการ และแนวทางการป้องกันที่สอดคล้องกับผลลัพธ์ โดยอ้างอิงจากตารางที่ 1

เพื่อให้เห็นภาพรวมการทำงานของระบบทั้งหมด ตั้งแต่การรับภาพจนถึงการประเมินผล ผู้วิจัยได้นำเสนอแผนภาพการทำงานของแอปพลิเคชันดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งสรุปขั้นตอนการประมวลผลของ RiceCare อย่างเป็นระบบ



รูปที่ 2 แผนภาพการทำงานของแอปพลิเคชัน

จากรูปที่ 2 แสดงลำดับขั้นตอนการทำงานของแอปพลิเคชัน RiceCare โดยแบ่งการทำงานออกเป็น 2 ส่วนคือ เกษตรกร (ผู้ใช้งาน) และ RiceCare PWA (แอปพลิเคชัน) กระบวนการเริ่มต้นเมื่อเกษตรกรเปิดแอปพลิเคชันและอัปโหลดรูปภาพใบข้าว ตัวแอปจะทำการวิเคราะห์แบบ Offline ทันทีโดยไม่ต้องใช้อินเทอร์เน็ต เมื่อวิเคราะห์เสร็จ แอปพลิเคชันจะแสดงผลหน้าผลลัพธ์ โดยเกษตรกรสามารถสลับแท็บระหว่างผลวิเคราะห์และวิธีดูแล หรือกดย้อนกลับเพื่อไปหน้าอัปโหลดได้

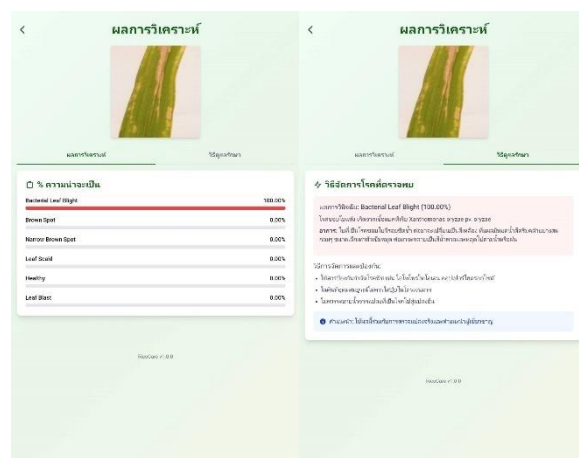
4. ผลการทดลอง

หลังจากที่ได้ออกแบบและพัฒนาแอปพลิเคชัน RiceCare ดังรูปที่ 3-4 ซึ่งประกอบด้วยสถาปัตยกรรมแบบ PWA การทำงานออฟไลน์ผ่าน Service Worker การประมวลผล AI ด้วย TensorFlow.js บนเบราว์เซอร์ และการออกแบบ UI/UX ให้ใช้งานง่ายในภาคสนาม ขั้นตอนต่อไปคือการประเมินคุณภาพของแอปและประสิทธิภาพของโมเดลการจำแนกโรคใบข้าว รวมถึงการทดสอบกับผู้ใช้งานจริงในพื้นที่เป้าหมาย

บทความวิจัย (Research Article)



รูปที่ 3 หน้าอัปโหลดของแอปพลิเคชัน RiceCare



รูปที่ 4 ผลวิเคราะห์ของแอปพลิเคชัน RiceCare

4.1 การทดสอบแอปพลิเคชัน RiceCare

เพื่อประเมินคุณภาพของแอปพลิเคชัน RiceCare ในมิติต่าง ๆ ได้แก่ ความถูกต้องของการทำงานตามฟังก์ชันที่ออกแบบ ความเร็วและความถี่ในการประมวลผลภาพ ความสามารถทำงาน

ออฟไลน์ และความเหมาะสมของการแสดงผลและการทำงานผ่านสมาร์ตโฟน วิธีการทดสอบจะใช้สมาร์ตโฟน Android รวม 6 รุ่น ทำการตรวจสอบฟังก์ชันหลักของระบบ เช่น การอัปโหลดภาพ การวิเคราะห์โรค การแสดงผลแท็บคำแนะนำ การทำงานในสถานะไม่มีอินเทอร์เน็ต แสดงดังตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4 การทดสอบคุณภาพแอปพลิเคชัน RiceCare

หัวข้อทดสอบหลัก	รายละเอียดการทดสอบ	เกณฑ์การยอมรับ	ผลการทดสอบ
ความถูกต้องของฟังก์ชัน	ทดสอบการอัปโหลดรูป การวิเคราะห์โรค การแสดงผลแท็บผลวิเคราะห์ และวิธีดูแล บนสมาร์ตโฟน Android 6 รุ่น	ทุกฟังก์ชันทำงานได้ครบถ้วน โดยไม่เกิด error หรือค้าง	ผ่าน
ความเร็วการประมวลผล	จับเวลาเฉลี่ยตั้งแต่กดวิเคราะห์รูปจนแสดงผล	เวลาเฉลี่ย ≤ 2.0 วินาที	1.4 วินาที
การทำงานออฟไลน์	ปิดอินเทอร์เน็ตแล้วทดสอบอัปโหลดรูปและวิเคราะห์โรค	แอปพลิเคชันสามารถเปิดใช้งานและวิเคราะห์รูปได้ครบทุกฟังก์ชัน	ผ่าน
เสถียรภาพระบบ	ทดสอบใช้งานต่อเนื่อง ≥ 30 ครั้งต่อเครื่อง โดยสลับหน้า Upload/ผลลัพธ์	ไม่พบอาการค้าง (Freeze) หรือค้าง (Crash)	ผ่าน (พบอาการผิดปกติ น้อยมาก)
เวลาโหลดครั้งแรก	วัดเวลาตั้งแต่เปิดแอปครั้งแรกจนโหลดไฟล์โมเดลปัญญาประดิษฐ์เสร็จ	เวลาโหลดครั้งแรกไม่เกิน 10 วินาที	6-9 วินาที (อยู่ในเกณฑ์แต่ควรพัฒนาเพิ่ม)
ความเหมาะสมของการแสดงผล	ตรวจสอบขนาดตัวอักษร ปุ่ม และการตอบสนองต่อหน้าจอหลายขนาด	อ่านง่าย กดง่าย ไม่ทับซ้อน รองรับจอ 5-7 นิ้ว	ผ่าน

บทความวิจัย (Research Article)

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบเชิงปริมาณตามอุปกรณ์

อุปกรณ์ทดสอบ	เวลาโหลดครั้งแรก (วินาที)	เวลาเฉลี่ย ประมวลผลต่อภาพ (วินาที)	จำนวนครั้ง ทดสอบ (ครั้ง)	จำนวนครั้งที่เกิดปัญหา (Crash/Freeze)	อัตรา ความสำเร็จ (%)
Device-1	7.2	1.35	30	0	100
Device-2	6.8	1.42	30	0	100
Device-3	8.1	1.50	30	1 (Initial latency)	96.7
Device-4	9.0	1.60	30	0	100
Device-5	6.5	1.38	30	0	100
Device-6	7.9	1.48	30	0	100
เฉลี่ย	7.6	1.46	180	1	99.4

จากตารางที่ 4 สรุปได้ว่าแอปพลิเคชัน RiceCare ผ่านการประเมินคุณภาพในภาพรวมเกือบทุกด้านตามเกณฑ์ที่กำหนด โดยด้านการทำงานของฟังก์ชันการประมวลผลผลลัพธ์ การทำงานแบบออฟไลน์ และความถูกต้องของข้อมูลคำแนะนำ ล้วนทำงานได้ตามที่ออกแบบโดยไม่มีข้อผิดพลาด และให้ผลลัพธ์ภายในเวลาที่ยอมรับได้ ส่วนด้านความเสถียร แม้จะพบอาการค้างบางครั้งเมื่อทำการทดสอบซ้ำจำนวนมาก แต่ไม่พบการค้างออกของระบบ ซึ่งถือว่าอยู่ในระดับที่ยอมรับได้สำหรับแอปพลิเคชันที่มีการประมวลผลด้วยโมเดลปัญญาประดิษฐ์ สำหรับเวลาโหลดครั้งแรก พบว่าต้องใช้เวลามากกว่าเกณฑ์ที่กำหนด เนื่องจากต้องดาวน์โหลดโมเดลปัญญาประดิษฐ์ ขนาด 2-3 MB แต่ถือเป็นข้อจำกัดเชิงเทคนิคที่สามารถยอมรับได้เมื่อใช้งานครั้งแรกเท่านั้น และไม่กระทบต่อการใช้งานในครั้งถัดไป

จากตารางที่ 5 พบว่าแอปพลิเคชัน RiceCare PWA มีประสิทธิภาพโดยรวมอยู่ในระดับดีมากและมีความเสถียรสูงเมื่อทดสอบบนสมาร์ตโฟน Android ทั้ง 6 รุ่น โดยมีเวลาโหลดครั้งแรกเฉลี่ย 7.6 วินาที ซึ่งถือว่าเหมาะสม ส่วนเวลาเฉลี่ยในการประมวลผลภาพหลังจากโหลดโมเดลแล้วอยู่ที่เพียง 1.46 วินาที แสดงถึงความเร็วในการวิเคราะห์ที่เพียงพอต่อการใช้

งานในภาคสนาม นอกจากนี้จากการทำซ้ำรวม 180 ครั้ง พบปัญหาเพียง 1 ครั้งเท่านั้น (คิดเป็นอัตราความสำเร็จ 99.4%) ซึ่งเป็นความผิดพลาดเฉพาะบนอุปกรณ์รุ่นหนึ่งในการโหลดครั้งแรก

4.2 การทดสอบการจำแนกโรคใบข้าว

การทดสอบโมเดลในแปลงนาได้ดำเนินการในพื้นที่ หมู่บ้านสระกะเบื้อง ตำบลหนองเต่า อำเภอบ้านหมี่ จังหวัดลพบุรี ซึ่งเป็นพื้นที่ปลูกข้าวสำคัญของอำเภอ โดยเกษตรกรรายงานว่าพบโรคใบข้าวประมาณ 50% ของพื้นที่ทั้งหมด ทีมวิจัยจึงสุ่มเก็บภาพใบข้าวจากหลายตำแหน่งในแปลงจริง และจัดกลุ่มตามสัดส่วนการพบโรคในพื้นที่ เช่น โรคใบไหม้ และโรคใบจุดสีน้ำตาลพบบ่อยที่สุด โรคขอบใบแห้งพบในระดับปานกลาง ขณะที่โรค Leaf Scald พบน้อยที่สุด (<5%) และใบข้าวสมบูรณ์พบประมาณครึ่งหนึ่งของจำนวนภาพทั้งหมด การเก็บข้อมูลภาคสนามทำให้ได้ภาพรวมจำนวน 200 ภาพ แบ่งเป็นชนิดต่าง ๆ ตามสัดส่วนที่พบจริงในพื้นที่ จากนั้นนำภาพทั้งหมดเข้าสู่แอปพลิเคชัน RiceCare เพื่อวิเคราะห์โรค พร้อมบันทึกผลลัพธ์เทียบกับการวินิจฉัยของเกษตรกรในพื้นที่ ผลลัพธ์ถูกสรุปในตารางที่ 6

บทความวิจัย (Research Article)

ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบผลการระบุโรคระหว่างเกษตรกรและแอปพลิเคชัน RiceCare

โรคใบข้าว	การระบุโรค (จำนวนภาพ)		สัดส่วนความสอดคล้อง	
	เกษตรกร	RiceCare	จำนวนภาพ	ร้อยละ
โรคใบจุดสีน้ำตาล (Brown Spot)	40	38	34	85.0
โรคไหม้ (Leaf Blast)	45	43	39	86.7
โรคขอบใบแห้ง (Bacterial Leaf Blight)	20	22	17	85.0
โรคใบวงสีน้ำตาล (Leaf Scald)	5	6	4	80.0
โรคใบขีดสีน้ำตาล (Narrow Brown Spot)	25	27	23	92.0
ใบข้าวสมบูรณ์ (Healthy)	65	64	64	98.5
รวมทั้งหมด	200	200	181	90.5

ผลจากตารางที่ 6 พบว่าแอปพลิเคชัน RiceCare มีความสอดคล้องกับการวินิจฉัยของเกษตรกรในภาพรวม สูงถึง 90.5% สะท้อนว่าแอปพลิเคชัน RiceCare สามารถใช้งานจริงในแปลงนาได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในกรณีใบข้าวสมบูรณ์ ซึ่งแอปพลิเคชัน RiceCare ให้ผลตรงกับเกษตรกรมากถึง 98.5% แสดงว่าระบบสามารถแยกแยะใบที่ไม่เป็นโรคได้ดีมาก ส่วนโรคที่พบมาก เช่น Leaf Blast และ Brown Spot มีความสอดคล้องในระดับ 85–87% ซึ่งถือว่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับสภาพแวดล้อมจริงที่แสง เงา และตำแหน่งใบมีความหลากหลายสูง

อย่างไรก็ตาม ในคลาสที่พบน้อย เช่น Leaf Scald ความสอดคล้องลดลงเหลือประมาณ 80% เนื่องจากจำนวนตัวอย่างในพื้นที่มีน้อย ทำให้โมเดลยังเรียนรู้ลักษณะโรคได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ ซึ่งชี้ให้เห็นแนวทางปรับปรุงในอนาคต เช่น การเพิ่มภาพจากฤดูกาลอื่นหรือพื้นที่ที่พบโรคชนิดนี้มากกว่าเดิม

4.3 การทดสอบความพึงพอใจของผู้ใช้งาน

ประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานเกษตรกรในพื้นที่ใช้งานจริงต่อแอปพลิเคชัน RiceCare จำนวน 10 คน เครื่องมือที่ใช้ในการประเมินความพึงพอใจเป็นแบบสอบถามชนิดมาตราส่วนประมาณค่า (Rating Scale) 5 ระดับ ตามวิธีของ Likert (Likert's Scale) ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน

ด้านประเมิน	ค่าเฉลี่ย	สรุปผล
ความง่ายในการใช้งาน	4.70	ดีมาก
ความเร็วในการประมวลผล	4.40	ดี
ความเข้าใจง่ายของผลลัพธ์	4.70	ดีมาก
ความพึงพอใจโดยรวม	4.80	ดีมาก
เฉลี่ยรวม	4.65	ดีมาก

บทความวิจัย (Research Article)

ผลจากตารางที่ 7 แสดงผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานต่อแอปพลิเคชัน RiceCare พบว่า ผู้ใช้งานมีความพึงพอใจในระดับดีมาก โดยมีค่าเฉลี่ยรวมเท่ากับ 4.65 สะท้อนให้เห็นว่าแอปพลิเคชัน RiceCare สามารถตอบสนองการใช้งานของเกษตรกรได้อย่างมีประสิทธิภาพ ตอบโจทย์การใช้งานของผู้ใช้ได้อย่างเหมาะสมทั้งด้านประสิทธิภาพ ความสะดวก และความชัดเจนของข้อมูลที่นำเสนอ

5. สรุปผลการทดลองและการอภิปรายผล

จากผลการประเมินโมเดลปัญญาประดิษฐ์การจำแนกโรคใบข้าว พบว่าโมเดลสามารถจำแนกโรคใบข้าว 6 คลาสได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยค่า Precision อยู่ในช่วง 0.70–0.78, Recall 0.72–0.82 และ F1-Score 0.71–0.80 แสดงถึงความสมดุลระหว่างความแม่นยำและความครอบคลุมของการตรวจพบโรค ขณะเดียวกันค่า Specificity และ NPV สูงถึง 0.94–0.96 แสดงว่าโมเดลมีความสามารถดีมากในการแยกใบที่ไม่เป็นโรคออกจากใบที่เป็นโรค ส่วนค่า MCC อยู่ในช่วง 0.65–0.76 ยืนยันว่าโมเดลมีคุณภาพเชิงสถิติที่เชื่อถือได้ แม้ชุดข้อมูลจะมีความไม่สมดุลบ้าง โดยเฉพาะคลาส Leaf Scald ที่มีตัวอย่างน้อย ทำให้ค่าตัวชี้วัดของคลาสนี้ยังต่ำกว่าคลาสนั้นและเป็นข้อจำกัดสำคัญของงานวิจัย ซึ่งควรเพิ่มข้อมูลในอนาคตเพื่อให้โมเดลเรียนรู้ลักษณะโรคได้ครบถ้วนยิ่งขึ้น ด้านวิศวกรรมระบบ แอปพลิเคชัน RiceCare PWA แสดงให้เห็นว่าการประมวลผล AI บนเบราว์เซอร์ด้วย TensorFlow.js สามารถใช้งานได้จริงในภาคสนาม เมื่อทดสอบบนสมาร์ทโฟน Android 6 รุ่น พบว่าเวลาโหลดโมเดลครั้งแรกเฉลี่ย 7.6 วินาที และเวลาเฉลี่ยในการประมวลผลต่อภาพเพียง 1.46 วินาที พร้อมอัตราความสำเร็จของการทำงาน 99.4% จากการทดสอบรวม 180 ครั้ง ปัญหาที่พบมีเพียงเหตุการณ์โหลดช้าหรือค้างเล็กน้อยในบางอุปกรณ์ ซึ่งอยู่ในระดับยอมรับได้สำหรับโมเดลขนาด 2-3 MB แสดงให้เห็นว่า

โครงสร้าง PWA, Service Worker และ TF.js สามารถตอบโจทย์การประมวลผลแบบ Edge Computing ได้โดยไม่ต้องพึ่งเซิร์ฟเวอร์ภายนอก ช่วยลดภาระเครือข่ายและปัญหาสัญญาณอินเทอร์เน็ตในพื้นที่เกษตรกรรม

สำหรับการทดสอบในแปลงนาจริงที่หมู่บ้านสระกะเบื้อง พบว่าผลการจำแนกโรคของแอปพลิเคชันมีความสอดคล้องกับการประเมินของเกษตรกรเฉลี่ย 90.5% โดยเฉพาะใบข้าวสมบูรณ์ที่ตรงกันถึง 98.5% สะท้อนว่าระบบสามารถใช้เป็นเครื่องมือยืนยัน (Second Opinion) ที่ช่วยลดความคลาดเคลื่อนจากการสังเกตด้วยสายตาได้ดี ในขณะเดียวกัน โรคที่มีตัวอย่างน้อยอย่าง Leaf Scald มีความสอดคล้องประมาณ 80% ซึ่งชี้ให้เห็นว่าความน่าเชื่อถือของโมเดลในแต่ละคลาสนั้นขึ้นกับปริมาณและความหลากหลายของข้อมูลภาพอย่างมาก จึงควรขยายฐานข้อมูลให้ครอบคลุมฤดูกาลปลูก พันธุ์ข้าว และสภาพแสงในภาคสนามที่หลากหลายกว่าเดิม สุดท้าย ผลการประเมินความพึงพอใจจากเกษตรกรผู้ใช้งานจริงมีค่าเฉลี่ย 4.65 ระดับดีมาก ในด้านความง่ายในการใช้งาน ความเร็ว และความเข้าใจผลลัพธ์ แสดงให้เห็นว่าการออกแบบ UI/UX แบบสองแท็บผลวิเคราะห์ และวิธีดูแล สามารถแปลงผลเชิงเทคนิคของโมเดล AI ให้กลายเป็นข้อมูลเชิงปฏิบัติการที่ใช้ได้จริงในแปลงนา ในมุมมองเชิงวิศวกรรม งานวิจัยนี้จึงพิสูจน์ให้เห็นแนวทางการออกแบบระบบวิเคราะห์โรคพืชที่รวมโมเดล Deep Learning เข้ากับสถาปัตยกรรม PWA บนอุปกรณ์พกพาได้อย่างมีประสิทธิภาพ พร้อมทั้งชี้ให้เห็นทิศทางการพัฒนาต่อ เช่น การบีบอัดโมเดลเพื่อลดเวลาโหลด การเสริมข้อมูลภาคสนามในคลาสที่หายาก และการเชื่อมต่อกับระบบฐานข้อมูลโรคแบบศูนย์กลางในอนาคต

บทความวิจัย (Research Article)

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] พัชรวิภา ใจจักรคำ, สมภพ ศรีลัมพ์, และ มาลินี ศรีอริยพันธ์, “การประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์ในการจัดการโรคพืชยุคใหม่: โอกาสที่มาพร้อมข้อควรระวัง,” *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 36, ฉบับที่ 2, หน้า 1 – 5, เม.ย. – มิ.ย. 2569.
- [2] โกศล สุขเกษม, พระวัชรพุทธิบัณฑิต (ปริดา บัวเมือง), ไพรัตน์ ฉิมหาด, ทิพย์วรรณ จันทรา, พระณัฐพงษ์ จันทโร, และ ชีรวัฒน์ ทองบุญชู, “เกษตรยุคใหม่ สู่แนวทางเกษตรแม่นยำเพื่อความยั่งยืน,” *วารสารสังคมพัฒนศาสตร์*, ปีที่ 8, ฉบับที่ 6, หน้า 372 – 386, มิ.ย. 2568.
- [3] กฤติยา รุจิโชค, “การจัดการความรู้การผลิตข้าวด้วยเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์เพื่อพัฒนาเกษตรกรและเพิ่มคุณภาพการผลิตอย่างยั่งยืน,” *วารสาร มจร พุทธปัญญาปริทรรศน์*, ปีที่ 7, ฉบับที่ 3, หน้า 231 – 242, ก.ค. – ก.ย. 2565.
- [4] Das, P. K., Rupa, S. S., Pumrin, S., Das, U. C., & Hossen, M. K., “Deep Learning for Plant Disease Detection and Classification: A Systematic Analysis and Review,” *Current Applied Science and Technology*, vol.24, no.4, pp. 1-24, 2024. DOI: 10.55003/cast.2024.259016
- [5] Bholra, A., Verma, S., & Kumar, P., “A comparative analysis of deep learning models for cucumber disease classification using transfer learning,” *Journal of Current Science and Technology*, vol.13, no.1, pp. 23–35, 2023.
- [6] อนัญญา พรหมโคตร, “ประสิทธิภาพการจำแนกโรคพืชที่แสดงลักษณะทางใบด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม แบบคอนโวลูชันร่วมกับอัลกอริทึมการเพิ่มประสิทธิภาพและฟังก์ชันกระตุ้น,” *Journal of Information Science and Technology*, ปีที่ 14, ฉบับที่ 1, หน้า 34 – 44, ม.ค. – มิ.ย. 2567.
- [7] Suksukont, A., & Naowanich, E., “Integration of Capsule Network with CNN for Plant Leaf Disease Classification,” *APHEIT International Journal of Interdisciplinary Social Sciences and Technology*, vol.14, no.1, pp. 48-58, 2025.
- [8] Sivagami, S., & Mohanapriya, S., “Tomato leaf disease detection using image processing technique,” *International Journal of Agricultural Technology*, vol.17, no.3, pp. 1135-1146, 2021.
- [9] Sookkhasem, S., Rungwachira, P., & Piyawitwanich, S., “CNN-Based Approach to Rice Plant Disease Classification: Overfitting Prevention Strategies,” *Thailand Electrical Engineering Journal*, vol.4, no.3, pp. 1-5, 2024.
- [10] ประมูล สุขสกาฬวงศ์ และ ชีรพล สืบชมภู, “การพัฒนาแอปพลิเคชันพืชสมุนไพรพื้นบ้าน พื้นที่ป่าชุมชนเทศบาลเกาะแก้ว ด้วยเทคนิคการจำแนกข้อมูลด้วยต้นไม้ตัดสินใจ,” *วารสารวิชาการการจัดการเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม*, ปีที่ 12, ฉบับที่ 1, หน้า 145 – 156, ม.ค. – มิ.ย. 2568.
- [11] กรมพัฒนาที่ดิน, “แนวทางการส่งเสริมการเกษตรที่เหมาะสมตามฐานข้อมูลแผนที่เกษตรเชิงรุก (AGRI-MAP) จังหวัดลพบุรี,” *กระทรวงเกษตรและสหกรณ์*, 2564.
- [12] กรมการข้าว, “โรคข้าว และการป้องกันกำจัด,” องค์ความรู้เรื่องข้าว. [ออนไลน์]. Available:

บทความวิจัย (Research Article)

https://rkb.ricethailand.go.th/web/content_t_page.php?code=A-VIVSO5ZWVG [เข้าถึงเมื่อ: 25 ต.ค. 2568].

- [13] D. I. D. Saputra, “Rice leafs disease dataset,” Kaggle. [Data set]. 2022.
[online]. Available:
<https://www.kaggle.com/datasets/dedeikhsandwisaputra/rice-leafs-disease-dataset>. [Accessed: 25 October 2025].
- [14] Tharwat A., “Classification assessment methods,” *Applied Computing and Informatics*, vol.17, no.1, pp. 168–192, 2021. DOI: 10.1016/j.aci.2018.08.003

ระบบไอโอทีสำหรับติดตามสัญญาณชีพและยืนยันตัวตนผู้ป่วยสำหรับโรงพยาบาลอัจฉริยะ

พัทยะ ธรรมบุตร¹ และ เอกชัย แนนอุดร^{2,*}

¹สาขาวิชาการจัดการสารสนเทศและนวัตกรรมดิจิทัล คณะการบัญชีและการจัดการ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

²สาขาวิชาธุรกิจดิจิทัลและระบบสารสนเทศ คณะการบัญชีและการจัดการ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

*ผู้ประสานงานบทความต้นฉบับ: ekkachai.n@mbs.msu.ac.th โทรศัพท์: 064-8538555

(รับบทความ: 2 ตุลาคม 2568; แก้ไขบทความ: 8 กุมภาพันธ์ 2569; ตอรับบทความ: 18 กุมภาพันธ์ 2569)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบติดตามสัญญาณชีพและระบุตัวตนผู้ป่วยอัจฉริยะด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) ระบบที่สร้างขึ้นประกอบด้วยเซ็นเซอร์หลายตัวสำหรับวัดสัญญาณชีพและใช้รหัสคิวอาร์ (QR Code) บนสายรัดข้อมือเพื่อยืนยันตัวตนผู้ป่วยซึ่งช่วยลดความเสี่ยงจากการระบุตัวตนผิดพลาดและเพิ่มความปลอดภัยในการรักษา ระบบนี้ยังมีการเชื่อมต่อเข้ากับระบบสารสนเทศโรงพยาบาล (HIS) เพื่อเก็บข้อมูลสัญญาณชีพแบบเรียลไทม์ ทำให้บุคลากรทางการแพทย์สามารถติดตามอาการและประเมินความรุนแรงของโรคได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นการยกระดับคุณภาพการดูแลรักษาพยาบาลให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ประสิทธิภาพการใช้งานของระบบได้รับการประเมินด้วย System Usability Scale (SUS) โดยได้คะแนนอยู่ในเกณฑ์ที่ใกล้เคียงกับค่ามาตรฐานทั่วไป นอกจากนี้ยังมีการประเมินประสิทธิภาพในด้านคุณภาพการให้บริการ (Quality of Services: QoS) ซึ่งครอบคลุมความพร้อมใช้งานร้อยละ 88.33 ความแม่นยำร้อยละ 73-89 และความเสถียรของระบบร้อยละ 65.75 ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าระบบที่นำเสนอสามารถช่วยลดภาระงานของบุคลากรทางการแพทย์และบันทึกข้อมูลซ้ำซ้อน ซึ่งอาจก่อให้เกิดข้อผิดพลาดและความล่าช้า โดยเครื่องมือนี้สามารถวัดสัญญาณชีพสำคัญ 3 ค่า ได้แก่ ความดันโลหิต ระดับออกซิเจนในเลือด และอุณหภูมิร่างกาย ข้อมูลจะถูกส่งไปยังฐานข้อมูลของโรงพยาบาลโดยอัตโนมัติ ทำให้บุคลากรทางการแพทย์สามารถเข้าถึงข้อมูลที่ถูกต้องและเป็นปัจจุบัน เพื่อการตัดสินใจในการรักษาพยาบาลได้อย่างมีประสิทธิภาพ ระบบนี้จึงเป็นส่วนสำคัญในการสนับสนุนโครงการโรงพยาบาลอัจฉริยะ (Smart Hospital) ตามนโยบายของกระทรวงสาธารณสุข

คำสำคัญ: อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง สัญญาณชีพ โรงพยาบาลอัจฉริยะ คุณภาพการบริการ ระบบติดตามแบบเรียลไทม์

การอ้างอิงบทความ: พัทยะ ธรรมบุตร และ เอกชัย แนนอุดร, "ระบบไอโอทีสำหรับติดตามสัญญาณชีพและยืนยันตัวตนผู้ป่วยสำหรับโรงพยาบาลอัจฉริยะ," วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์, ปีที่ 4, ฉบับที่ 2, หน้า 40-52, 2569.

An Integrated IoT-Based System for Vital Sign Monitoring and Patient Identification for Smart Hospitals

Pattaya Tammaboot¹ and Ekkachai Naenudorn^{2,*}

¹ Department of Smart City Management and Digital Innovation, Mahasarakham Business School, Mahasarakham University

² Department of Digital Business and Information Systems, Mahasarakham Business School, Mahasarakham University

*Corresponding Author: ekkachai.n@mbs.msu.ac.th, Tel: 064-8538555

(Received: October 2, 2025; Revised: February 8, 2026; Accepted: February 18, 2026)

Abstract

This study aimed to develop an intelligent system for vital-sign monitoring and patient identification using Internet of Things (IoT) technology. The proposed system integrates multiple sensors to measure vital signs and employs a QR code embedded on a wristband to verify patient identity, thereby reducing the risk of misidentification and enhancing patient safety. The system is also connected to the Hospital Information System (HIS) to enable real-time recording of vital-sign data, allowing healthcare personnel to monitor patient conditions and assess disease severity promptly, thus improving the efficiency and quality of clinical care. System usability was evaluated using the System Usability Scale (SUS), and the obtained score was close to the general benchmark. In addition, system performance in terms of Quality of Service (QoS) was assessed, covering key indicators including availability (88.33%), accuracy (73–89%), and system stability (65.75%). The findings indicate that the proposed system can reduce healthcare workers' workload and minimize redundant documentation, which may otherwise lead to errors and delays. The device automatically measures three essentials vital signs blood pressure, blood oxygen saturation, and body temperature—and transmits the data directly to the hospital database, enabling medical staff to access accurate and up-to-date information for effective clinical decision-making. Therefore, the system serves as an important component in supporting the Smart Hospital initiative in accordance with the policy of the Ministry of Public Health.

Keywords: Internet of Things, Vital Signs, Smart Hospital, Quality of Services, Realtime Monitoring

Please cite this article as: P. Tammaboot and E. Naenudorn, "An Integrated IoT-Based System for Vital Sign Monitoring and Patient Identification for Smart Hospitals," *The Journal of Engineering and Industrial Technology*, Kalasin University, vol. 4, no. 2, pp. 40-52, 2026.

บทความวิจัย (Research Article)

1. บทนำ

ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีการให้บริการด้านสุขภาพยังคงเผชิญกับความท้าทายสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อตรงต่อความปลอดภัยของผู้ป่วยในระดับโลก ข้อมูลจากการศึกษาของ Johns Hopkins Medicine ในปี 2016 ประเมินการว่าความผิดพลาดทางการแพทย์เป็นสาเหตุการเสียชีวิตอันดับที่สามในสหรัฐอเมริกาโดยมีจำนวนผู้เสียชีวิตสูงถึง 251,000 รายต่อปี [1] และการศึกษาที่ดีพิมพ์ในวารสาร BMJ ปี 2024 ยังระบุว่าเฉพาะความผิดพลาดในการวินิจฉัยโรคอาจส่งผลให้มีผู้พิการหรือเสียชีวิตในสหรัฐอเมริกาได้สูงถึง 795,000 รายต่อปี [2] องค์การอนามัยโลก (WHO) ได้ตระหนักถึงประเด็นนี้และเปิดตัวโครงการ “Medication Without Harm” โดยประมาณการว่าความผิดพลาดในการใช้ยาสร้างความเสียหายคิดเป็นมูลค่ามหาศาลถึง 42 พันล้านดอลลาร์สหรัฐต่อปีทั่วโลก [3]

ขณะเดียวกันประเทศไทยกำลังอยู่ในช่วงเปลี่ยนผ่านสู่ยุคดิจิทัลตามยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปี (พ.ศ. 2561 – 2580) ซึ่งกำหนดให้เทคโนโลยีดิจิทัลเป็นกลไกสำคัญในการขับเคลื่อนทุกภาคส่วนโดยเฉพาะอย่างยิ่งในภาคบริการสาธารณสุขที่ต้องมีการปรับตัวเพื่อยกระดับประสิทธิภาพและความปลอดภัยในการดูแลรักษาผู้ป่วย [4] การพัฒนาสู่โรงพยาบาลอัจฉริยะ (Smart Hospital) จึงเป็นส่วนหนึ่งของวิสัยทัศน์นี้ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดการสร้างเมืองอัจฉริยะ (Smart City) ที่ใช้เทคโนโลยีเพื่อยกระดับคุณภาพชีวิตในหลากหลายมิติรวมถึงการดำรงชีวิตอัจฉริยะ

อย่างไรก็ตามในบริบทของประเทศไทยปัญหาดังกล่าวยังมีความซับซ้อนจากปัจจัยเชิงระบบที่สำคัญ เช่นภาระงานที่หนักของบุคลากรทางการแพทย์อันเนื่องมาจากสัดส่วนแพทย์ต่อประชากรที่ต่ำ (อัตราส่วน 1 ต่อ 922 ปีพ.ศ. 2567) ทำให้มีเวลาจำกัดในการตรวจรักษาผู้ป่วย [5] การบันทึกเวช

ระเบียนด้วยลายมือภายใต้ข้อจำกัดนี้จึงเพิ่มความเสี่ยงต่อความคลาดเคลื่อนอย่างมีนัยสำคัญทั้งจากการอ่านค่าที่ผิดพลาดหรือการสับสนในตัวเลขซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการรักษาผิดคนหรือจ่ายยาผิดขนาด [6] นอกจากนี้ระบบเวชระเบียนแบบกระดาษยังทำให้การเข้าถึงข้อมูลย้อนหลังเป็นไปอย่างล่าช้าและขาดความสามารถในการติดตามสถานะของผู้ป่วยแบบเรียลไทม์

เพื่อแก้ไขปัญหาเชิงระบบที่กล่าวมาผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการพัฒนาระบบอัจฉริยะที่ใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) สำหรับการติดตามสัญญาณชีพและระบุตัวตนผู้ป่วยแบบบูรณาการระบบนี้มุ่งหวังที่จะลดความเสี่ยงจากความผิดพลาดของมนุษย์โดยการทำให้กระบวนการบันทึกข้อมูลสุขภาพของผู้ป่วยเป็นไปอย่างอัตโนมัติและต่อเนื่องโดยเฉพาะการวัดค่าชีพจรอุณหภูมิร่างกายและระดับออกซิเจนในเลือดพร้อมทั้งยืนยันตัวตนของผู้ป่วยแบบอัตโนมัติเพื่อป้องกันการสับสนในการตรวจรักษาการส่งข้อมูลทั้งหมดไปยังฐานข้อมูลส่วนกลางแบบเรียลไทม์ยังช่วยให้แพทย์สามารถตัดสินใจทางการแพทย์ได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำซึ่งเป็นคุณสมบัติสำคัญของโรงพยาบาลอัจฉริยะ

โรงพยาบาลมหาสารคามใช้เครื่องวัดสัญญาณชีพผู้ป่วยแบบดั้งเดิมที่มีการวัดด้วยเครื่องมือที่เป็นระบบ Analog (อนาล็อก) แล้วจดบันทึกลงแบบฟอร์มในสมุดบันทึกโดยเจ้าหน้าที่ผู้เกี่ยวข้องเพื่อจัดทำรายงานให้กับแพทย์เจ้าของไข้เพื่อเป็นข้อมูลประกอบการรักษาผู้ป่วยแต่ละราย ซึ่งวิธีการเก็บข้อมูลดังกล่าวทำให้เกิดข้อผิดพลาดหลายอย่าง เช่น ลงบันทึกข้อมูลผิดคน การวัดค่าสัญญาณชีพมีความผิดพลาดหรือคลาดเคลื่อน การจัดทำรายงานมีความล่าช้า ส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการดูแลรักษาผู้ป่วยทั้งนี้ก็จะส่งผลทำให้ข้อมูลที่ได้มีความคลาดเคลื่อนไม่สมบูรณ์ และความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจะส่งผลโดยตรงต่อการรักษาผู้ป่วยและอาจเกิดอันตรายถึงขั้นเสียชีวิตได้

บทความวิจัย (Research Article)

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องมือวัดสัญญาณชีพอัจฉริยะและการยืนยันตัวตนผู้ป่วยด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things: IoT) รวมถึงประเมินประสิทธิภาพของเครื่องมือดังกล่าวด้วยการวัดคุณภาพการให้บริการ (Quality of Services: QoS) และประเมินความพึงพอใจในการใช้งานด้วยวิธี System Usability Scale (SUS) เพื่อเป็นส่วนหนึ่งในการยกระดับมาตรฐานการดูแลสุขภาพและลดความเสี่ยงจากความผิดพลาดทางการแพทย์ในโรงพยาบาลอัจฉริยะในยุคดิจิทัล

2. ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในการพัฒนาระบบอัจฉริยะที่ใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) สำหรับการติดตามสัญญาณชีพและระบุตัวตนผู้ป่วยแบบบูรณาการในโรงพยาบาลอัจฉริยะผู้วิจัยได้ทำการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องในประเด็นสำคัญดังต่อไปนี้

2.1 แนวคิดโรงพยาบาลอัจฉริยะ

แนวคิด Smart Hospital มุ่งใช้เทคโนโลยีดิจิทัลเพื่อเพิ่มคุณภาพการรักษา ลดความผิดพลาดเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการ และสนับสนุนการตัดสินใจเชิงคลินิกจากข้อมูลที่ถูกต้องและทันเวลาซึ่งสอดคล้องกับทิศทางสุขภาพดิจิทัลของกระทรวงสาธารณสุขที่ผลักดันการพัฒนาระบบสารสนเทศสุขภาพ โครงสร้างพื้นฐานข้อมูล และการเชื่อมโยงบริการด้วยมาตรฐาน/แพลตฟอร์มดิจิทัลระดับประเทศในมิติการดูแลผู้ป่วยใน โรงพยาบาลอัจฉริยะมักเน้น 2 แก่นสำคัญคือการติดตามอาการแบบใกล้ชิด/เรียลไทม์และความปลอดภัยจากการระบุตัวตนผู้ป่วยผิดพลาดซึ่งเป็นจุดตั้งต้นของงานวิจัยเชิงระบบที่ผสาน IoT + Patient Identification เข้ากับ HIS [7]

2.2 IoT และการติดตามสัญญาณชีพ แนวโน้มสถาปัตยกรรมและประโยชน์ทางคลินิก

งานทบทวนในช่วงหลังชี้ว่า IoT ถูกนำมาใช้มากในระบบติดตามสุขภาพ/สัญญาณชีพ เพราะช่วยเก็บข้อมูลจากอุปกรณ์ตรวจวัด ส่งต่อผ่านเครือข่าย และประมวลผลเพื่อสนับสนุนการติดตามอาการอย่างต่อเนื่อง ทั้งในโรงพยาบาลและการดูแลระยะไกล

แนวโน้มสถาปัตยกรรมที่พบบ่อยคืออุปกรณ์สวมใส่/อุปกรณ์ข้างเคียง (Edge Devices) เกตเวย์/เครือข่าย ระบบกลาง/คลาวด์ แสดงผลแดชบอร์ด/บันทึกเข้าเวชระเบียนเพื่อทำให้ข้อมูล “พร้อมใช้” สำหรับทีมรักษา โดยงานวิจัยเชิงประยุกต์จำนวนมากมุ่งไปที่การวัดสัญญาณชีพหลายรายการและส่งข้อมูลแบบต่อเนื่องเพื่อการเฝ้าระวังความรุนแรงของโรค [8]

2.3 ความปลอดภัยด้านการยืนยันตัวตนผู้ป่วย: หลักการสากลและเทคโนโลยีที่ใช้จริง

การระบุตัวตนผู้ป่วยผิดพลาดเป็นประเด็นความปลอดภัยที่เกิดขึ้นตอนของการดูแล (ให้ยา เก็บตัวอย่าง ส่งตรวจ ทำหัตถการ ฯลฯ) องค์การอนามัยโลกแนะนำให้ใช้อย่างน้อย 2 ตัวระบุ (Two Identifiers) เช่น ชื่อ-สกุลร่วมกับวันเดือนปีเกิด/เลขประจำตัวผู้ป่วย และไม่ควรรู้ “หมายเลขเตียง” เป็นตัวระบุ World Health Organization ขณะที่ The Joint Commission ก็เน้นหลัก Two Identifiers ในมาตรฐานความปลอดภัยผู้ป่วยเช่นกัน

2.4 Barcode/2D/QR Wristband

เทคโนโลยีสายรัดข้อมือแบบบาร์โค้ด (รวมถึง 2D/QR) เป็นแนวทางที่ใช้จริงอย่างแพร่หลาย เพราะต้นทุนต่ำ ใช้กับ Workflow ได้ง่าย และผูกกับตัวระบุผู้ป่วยได้ชัดเจน วรรณกรรมเชิงประจักษ์จำนวนมากรายงานว่าการสแกนสายรัดข้อมือร่วมกับระบบให้ยา/

บทความวิจัย (Research Article)

ยืนยันตัวตนช่วยลดความคลาดเคลื่อนและเพิ่มความปลอดภัย เช่น เมตาอะนาไลซิสด้าน Barcode Wristband Scanning พบแนวโน้มลดความผิดพลาดด้านยาอย่างมีนัยสำคัญ PMC และงานคลาสสิกใน NEJM รายงานผลลด Error ในกระบวนการให้ยาเมื่อใช้เทคโนโลยีบาร์โค้ดร่วมกับระบบบันทึกอิเล็กทรอนิกส์ New England Journal of Medicine ในบริบทไทย มีงานในฐาน TCI ที่ชี้ว่าการใช้ Barcode Scanning ช่วยลด Medication Errors และสนับสนุนความปลอดภัยผู้ป่วย โดยเฉพาะยา LASA Thai Journal Online สำหรับ QR Code โดยเฉพาะ มีงานที่รายงานการประยุกต์ “QR Code Identity Tag/Bracelet” เพื่อใช้ในงานระบุตัวตน/เข้าถึงข้อมูลผู้ป่วยในโรงพยาบาล ResearchGate ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางระบบของคุณที่ใช้ QR บนสายรัดข้อมือ [9]

2.5 การเชื่อมต่อกับ HIS และมาตรฐาน Interoperability

การทำให้ข้อมูล IoT ถูกใช้ประโยชน์จริงในโรงพยาบาล จำเป็นต้องเชื่อมกับ HIS/EMR ด้วยมาตรฐานแลกเปลี่ยนข้อมูล งานวิจัยด้านมาตรฐานรายงานการประยุกต์ HL7 FHIR ร่วมกับอุปกรณ์สุขภาพส่วนบุคคล/อุปกรณ์ตรวจวัด เพื่อส่ง Observation, Device, Patient ไปยังระบบโรงพยาบาล (แนวคิด Devices on FHIR) PMC นอกจากนี้ยังมีงานที่ชี้ว่า FHIR เหมาะกับการทำ Interoperability ผ่าน RESTful Services และเป็นแนวทางที่นำไปสร้างกรอบงานแบบเรียลไทม์สำหรับข้อมูลจากอุปกรณ์ติดตามสรีรวิทยา การยึดมาตรฐานเหล่านี้ช่วยลดปัญหา Vendor Lock-In เพิ่มการขยายระบบในอนาคต และเอื้อต่อการทำ Dashboard/Decision Support ที่ใช้ข้อมูลจากหลายแหล่ง [10]

2.6 เกณฑ์ประเมินระบบ: QoS และ Usability

ระบบ IoT ทางคลินิกมักประเมินทั้งด้านประสิทธิภาพเครือข่าย/ระบบ และด้านผู้ใช้

1) QoS/คุณภาพการให้บริการ ตัวชี้วัดที่พบได้บ่อย ได้แก่ Availability, Reliability/Stability, Latency, Throughput และความถูกต้องของข้อมูล/การวัด

2) System Usability Scale เป็นเครื่องมือมาตรฐานที่ใช้แพร่หลาย โดยงานสรุปจำนวนมากชี้ว่า “ค่าเฉลี่ย” ของ SUS มักอยู่ราว 68 คะแนน (ตีความเชิง Percentile/เกรดได้)

กรอบประเมินแบบผสม (QoS + SUS) จึงสอดคล้องกับวรรณกรรม และเหมาะกับงานที่ต้องการพิสูจน์ว่า “ระบบใช้ได้จริงในงานบริการ” ไม่ใช่แค่ทำงานได้ในเชิงเทคนิค [11]

2.7 สังเคราะห์ช่องว่างความรู้ (Research Gap)

จากวรรณกรรมข้างต้น พบว่า (1) IoT Vital Sign Monitoring มีแนวทางและตัวอย่างมาก แต่การทำให้ข้อมูลไหลเข้า HIS อย่างเป็นมาตรฐานและเสถียรยังเป็นความท้าทาย (2) เทคโนโลยีสายรัดข้อมือ/บาร์โค้ด/QR มีหลักฐานสนับสนุนด้านความปลอดภัย แต่ผลสำเร็จขึ้นกับ Workflow และการยอมรับของผู้ใช้ (3) งานจำนวนมากประเมินเพียงมิติเดียว (เช่น ความแม่นยำของเซนเซอร์ หรือ Usability) [12]

บทความวิจัย (Research Article)

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

การดำเนินการวิจัยครั้งนี้แบ่งออกเป็นส่วนตัวอย่าง
ดังนี้

3.1 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ประชากรที่ใช้ในการวิจัยนี้ประกอบด้วยบุคลากร
ทางการแพทย์ได้แก่แพทย์จำนวน 144 คนพยาบาล
จำนวน 570 คนและเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องกับการดูแล
ผู้ป่วยในโรงพยาบาลรวมทั้งสิ้น 784 คนกลุ่มตัวอย่าง
สำหรับการประเมินประสิทธิภาพการใช้งานและความ
พึงพอใจ คัดเลือกด้วยวิธีการคัดเลือกแบบเจาะจง
(Purposive Sampling) จากบุคลากรแผนกผู้ป่วยใน
ที่มีประสบการณ์เกี่ยวข้องกับการวัดและบันทึก
สัญญาณชีพ และเป็นผู้ใช้งานระบบโดยตรง
โดยกำหนดสัดส่วนผู้เข้าร่วมตามบทบาทหน้าที่
(Quota) ให้ครอบคลุมแพทย์ พยาบาล และเจ้าหน้าที่
ที่เกี่ยวข้องรวมจำนวน 30 คน

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา

1) เครื่องมือวัดสัญญาณชีพอัจฉริยะและการ
ยืนยันตัวตนผู้ป่วยเป็นระบบที่ผู้วิจัยสร้างขึ้นเพื่อเป็น
เครื่องมือหลักในการเก็บรวบรวมข้อมูลสัญญาณชีพ
และระบุตัวตนผู้ป่วย

2) แบบประเมินประสิทธิภาพด้านคุณภาพการ
ให้บริการ (QoS) เพื่อใช้ในการประเมินประสิทธิภาพ
ของเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น

3) แบบประเมินความพึงพอใจในการใช้งานด้วย
System Usability Scale (SUS) เพื่อใช้ในการ
ประเมินความพึงพอใจต่อการใช้งานระบบ

3.3 การวัดประสิทธิภาพด้วยคุณภาพการให้บริการ (Quality of Service: QoS)

การวัดประสิทธิภาพใช้เกณฑ์พื้นฐาน 4 ปัจจัยซึ่ง
ได้ประยุกต์และปรับให้เหมาะสมกับบริบทของระบบ
ที่พัฒนาขึ้นโดยอ้างอิงแนวคิดจากงานวิจัยของ
Al-Fuqaha และคณะ [13] ทั้งนี้ การประเมิน
ประสิทธิภาพจะครอบคลุมปัจจัยสำคัญ 4 ประการดัง
รายละเอียดต่อไปนี้

1) ความพร้อมใช้งาน (Availability) วัดจาก
อัตราส่วนของเวลาที่เครื่องมือใช้งานได้จริงต่อเวลา
ทั้งหมด

$$A = \frac{N_{suc}}{N_{all}} \quad (1)$$

เมื่อ

A คือ ค่าความพร้อมในการให้บริการ

N_{suc} คือ ผลรวมของเวลาทั้งหมดที่
ผู้ใช้เครื่องมือวัดสามารถใช้เครื่องมือ
วัดใช้งานได้จริง

N_{all} คือ ผลรวมของเวลาทั้งหมดที่
ผู้ใช้เครื่องมือวัด ในช่วงเวลาที่
กำหนด

2) ความแม่นยำ (Accuracy) วัดความสามารถ
ของเครื่องมือในการแสดงค่าที่วัดได้เข้าใกล้ค่าความจริง

$$Accuracy = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP} \quad (2)$$

บทความวิจัย (Research Article)

เมื่อ

TP (True Positive) คือ โมเดลทำนายว่าเป็น
บวกและถูกต้อง

TN (True Negative) คือ โมเดลทำนายว่าเป็น
ลบและถูกต้อง

FP (False Positive) คือ โมเดลทำนายว่าเป็น
บวกแต่ผิด

FN (False Negative) คือ โมเดลทำนายว่าเป็น
ลบแต่ผิด

3) ความเสถียรของระบบ (Reliability) วัดจาก
อัตราส่วนของจำนวนครั้งที่ใช้งานสำเร็จต่อจำนวนครั้งที่
ใช้งานทั้งหมด

$$R = \frac{T_{suc}}{T_{all}} \quad (3)$$

เมื่อ

R คือ ค่าความเสถียรของระบบ

T_{suc} คือ จำนวนครั้งที่ทั้งหมดที่ผู้ใช้เครื่องมือ
ใช้เครื่องมือวัดได้สำเร็จในช่วงเวลาที่
กำหนด

T_{all} คือ จำนวนครั้งที่ทั้งหมดที่ผู้ใช้เครื่องมือ
ใช้เครื่องมือวัดในช่วงเวลาที่กำหนด

4) ความสำเร็จในการนำส่งข้อมูล (Throughput)
วัดจากจำนวนทรานแซกชันที่สามารถทำงานได้ใน
หนึ่งวินาที

$$Tp = \frac{TN_s}{T_{Total}} \quad (4)$$

$$Tpn = \frac{Tp}{\max(Tp)} \quad (5)$$

เมื่อ

Tp คือ ค่า Throughput หน่วยเป็น
InVoke/Second

N_{suc} คือ จำนวนทรานแซกชัน
(Transaction) หรือการร้องขอ
(Request) ที่ถูก สร้างขึ้นหรือ
ทำงานได้ในช่วงเวลาการทดสอบ

T_{total} คือ ค่าช่วงเวลาการทดสอบ หน่วย
เป็น Second

Tpn คือ ค่า Throughput Normalize
 $\max(Tp)$ คือ ค่า Throughput ที่มีค่าสูงสุด

3.4 ประเมินความพึงพอใจในการใช้งานด้วยวิธี System Usability Scale (SUS)

โดยมีโครงสร้างและการคำนวณคะแนนคือ
แบบสอบถาม SUS ประกอบด้วยคำถาม 10 ข้อที่ผู้ใช้
จะให้คะแนนบนระดับ Likert Scale 5 ระดับตั้งแต่ 1
(ไม่เห็นด้วยอย่างยิ่ง) ถึง 5 (เห็นด้วยอย่างยิ่ง) คำถาม
จะสลับระหว่างข้อความเชิงบวกและเชิงลบเพื่อลด
อคติในการตอบของผู้ใช้ [14]

การคำนวณคะแนน SUS มีขั้นตอนเฉพาะเพื่อ
เปลี่ยนคะแนนดิบให้เป็นคะแนนมาตรฐานจาก 0-100
โดยมีวิธีการดังนี้

1) สำหรับคำถามเลขคี่ (1, 3, 5, 7, 9) นำคะแนน
ที่ผู้ใช้ตอบมาลบด้วย 1

2) สำหรับคำถามเลขคู่ (2, 4, 6, 8, 10) นำ 5 มา
ลบด้วยคะแนนที่ผู้ใช้ตอบ

บทความวิจัย (Research Article)

3) นำผลลัพธ์ที่ได้มารวมกันทั้งหมดแล้วนำไปคูณด้วย 2.5 เพื่อให้ได้คะแนนสุดท้ายโดยคะแนนนี้เป็นค่าสะท้อนระดับการใช้งานที่ผู้ใช้รับรู้ (Perceived Usability)

จากนั้นทำการแปรผลคะแนนและจุดเด่นคะแนน SUS ที่ได้สามารถนำมาแปรผลเพื่อประเมินระดับการใช้งานของระบบได้โดยทั่วไปคะแนนเฉลี่ยของ SUS อยู่ที่ 68 ซึ่งถือเป็นค่ามาตรฐาน (Benchmark) [10] คะแนนต่ำกว่า 50 คือบ่งชี้ว่าระบบมีปัญหาการใช้งานอย่างรุนแรงคะแนน 50-70 คือระบบพอใช้งานได้แต่ยังต้องการการปรับปรุงคะแนน 70-85 คือระบบใช้งานได้ดี และคะแนนมากกว่า 85 คือระบบมีประสิทธิภาพด้านการใช้งานดีเยี่ยม

3.5 ออกแบบส่วนติดต่อกับผู้ใช้ (User Interface) และการเขียนโปรแกรม (Coding)

ในขั้นตอนการวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ดำเนินการออกแบบส่วนติดต่อกับผู้ใช้ (User Interface) และการเขียนโปรแกรม (Coding) สำหรับระบบอัจฉริยะเพื่อการติดตามสัญญาณชีพและระบุตัวตนผู้ป่วยในโรงพยาบาลอัจฉริยะโดยมุ่งเน้นการสร้างประสบการณ์ใช้งานที่ง่ายและมีประสิทธิภาพหน้าจอแสดงผลสัญญาณชีพผู้ป่วยได้รับการออกแบบให้แสดงข้อมูลสำคัญประกอบด้วยชีพจร (อัตราการเต้นของหัวใจ) ระดับออกซิเจนในเลือดและอุณหภูมิร่างกาย ข้อมูลเหล่านี้จะถูกบันทึกและแสดงผลแบบเรียลไทม์ พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับข้อมูลย้อนหลังทำให้บุคลากรทางการแพทย์สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณชีพได้อย่างต่อเนื่องนอกจากนี้ระบบยังนำเสนอข้อมูลในรูปแบบกราฟเชิงเส้นเพื่อช่วยให้สามารถวิเคราะห์แนวโน้มได้อย่างรวดเร็วซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการตรวจจับความผิดปกติที่อาจเกิดขึ้นเพื่อให้สามารถเข้าช่วยเหลือผู้ป่วยได้อย่างทันท่วงทีและในส่วนของการเขียนโปรแกรมผู้วิจัยได้

เลือกใช้ภาษา Python ในการพัฒนาเครื่องมือวัดสัญญาณชีพอัจฉริยะเนื่องจากเป็นภาษาที่มีความยืดหยุ่นสูงและมีไลบรารีรองรับการทำงานกับไมโครคอนโทรลเลอร์อย่าง Raspberry Pi รุ่น 4 B+ อย่างกว้างขวางโดยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นนี้จะทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของเซนเซอร์ต่าง ๆ เพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลสัญญาณชีพการประมวลผลข้อมูลการแสดงผลบนหน้าจอและการส่งข้อมูลไปยังระบบหลักของโรงพยาบาลซึ่งการใช้ภาษา Python Version 3.15 ช่วยให้การพัฒนาเป็นไปได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพสูง

รูปที่ 1 แสดงส่วนติดต่อผู้ใช้สำหรับการบันทึกข้อมูลผู้ป่วย



รูปที่ 2 แสดงส่วนติดต่อผู้ใช้สำหรับการแสดงผลข้อมูลในรูปแบบกราฟเชิงเส้น

บทความวิจัย (Research Article)

4. ผลการดำเนินงาน

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและประเมินประสิทธิภาพของเครื่องมือวัดสัญญาณชีพอัจฉริยะโดยมีผลการวิเคราะห์ข้อมูลดังนี้

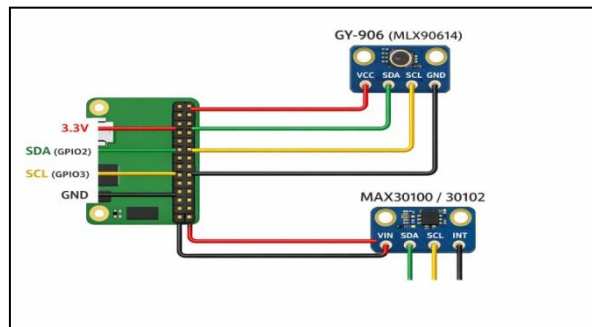
4.1 เครื่องมือวัดสัญญาณชีพอัจฉริยะ

เครื่องมือวัดสัญญาณชีพอัจฉริยะที่ใช้สำหรับการวัดสัญญาณชีพและยืนยันตัวตนผู้ป่วยซึ่งเป็นผลงานวิจัยที่พัฒนาขึ้นสำหรับโรงพยาบาลโดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 เครื่องมือวัดสัญญาณชีพอัจฉริยะและยืนยันตัวตนผู้ป่วย

การต่อวงจรเครื่องมือที่สร้างขึ้น สามารถต่อแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 วงจรการเชื่อมต่ออุปกรณ์ร่วมกับ Raspberry

4.2 ผลการวัดประสิทธิภาพด้วย QoS

ด้านความพร้อมใช้งาน (Availability) การทดสอบในโรงพยาบาลมหาสารคาม 120 ครั้งพบว่าพร้อมใช้งาน 106 ครั้งคิดเป็นร้อยละ 88.33 ด้านความถูกต้อง (Accuracy) ค่าชีพจร (Heart Rate) มีความถูกต้อง 107 ครั้งจาก 120 ครั้งคิดเป็นร้อยละ 89.17 ค่าระดับออกซิเจนในเลือด (SpO2) มีความถูกต้อง 107 ครั้งจาก 120 ครั้งคิดเป็นร้อยละ 89.17 ค่าอุณหภูมิร่างกาย (TEMP) มีความถูกต้อง 88 ครั้งจาก 120 ครั้งคิดเป็นร้อยละ 73.33 ด้านความเสถียร (Reliability) การทดสอบ 120 ครั้งวัดสำเร็จ 109 ครั้งและไม่สำเร็จ 11 ครั้งคิดเป็นร้อยละ 90.83 และด้านความสำเร็จในการส่งข้อมูล (Throughput) ค่าเฉลี่ยของ Throughput จากการใช้เครื่องมือวัดคือ 38.30 bps (Byte Per Second) การวัดที่มีความคาดเคลื่อนนั้น เนื่องจากอุปกรณ์เซนเซอร์ ไม่ใช่เกรดทางการแพทย์ และเป็นอุปกรณ์ที่มีราคาถูกตามท้องตลาดทั่วไป

4.3 ผลการประเมินความพึงพอใจ

การประเมินความพึงพอใจในการใช้งานเครื่องมือวัดสัญญาณชีพอัจฉริยะและการยืนยันตัวตนผู้ป่วยในโรงพยาบาลมหาสารคามดำเนินการโดยใช้

บทความวิจัย (Research Article)

แบบประเมิน System Usability Scale (SUS) ผลการวิเคราะห์จากกลุ่มตัวอย่างแสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยของ SUS Score อยู่ที่ 65.75 ซึ่งต่ำกว่าค่าเฉลี่ยมาตรฐานที่ยอมรับโดยทั่วไปซึ่งอยู่ที่ 68.0 เล็กน้อย โดยผู้เชี่ยวชาญส่วนใหญ่ให้คะแนนในระดับ "พอใช้ได้" (OK) และมีความน่าพึงพอใจอยู่ในระดับ "Marginal" ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบยังคงมีโอกาสนในการปรับปรุงให้ดีขึ้นเพื่อเพิ่มความง่ายในการใช้งานและความพึงพอใจของผู้ใช้

ผลการประเมินรายบุคคลพบว่าคะแนนสูงสุด (MAX. SUS Score) คือ 80 และ 77.5 ซึ่งจัดอยู่ในระดับ "ดี" (Good) และ "ยอมรับได้" (Acceptable) โดยมีผู้ใช้งาน 3 คนที่ให้คะแนนสูงถึง 80 และถูกจัดอยู่ในกลุ่ม "Promoter" ในทางกลับกันคะแนนต่ำสุด (MIN. SUS Score) คือ 27.5 ซึ่งจัดอยู่ในระดับ "แย่มาก" (Poor) และ "ยอมรับไม่ได้" (Not Acceptable) นอกจากนี้ยังมีผู้ใช้งานอีก 8 คนที่ให้คะแนนต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานทำให้ถูกจัดอยู่ในกลุ่ม "Detractor" ที่ไม่พึงพอใจในการใช้งานผลลัพธ์นี้บ่งชี้ว่าแม้ผู้ใช้บางส่วนจะมองว่าระบบใช้งานได้ดีแต่ยังมีปัญหาด้านความสะดวกในการใช้งานที่ต้องได้รับการแก้ไขเพื่อให้ระบบเป็นที่ยอมรับและใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพสำหรับบุคลากรทุกคน

5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้สรุปผลการวิจัยที่สำคัญและให้ข้อเสนอแนะสำหรับการต่อยอดและพัฒนาในอนาคตโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1 อภิปรายผลการวิจัย

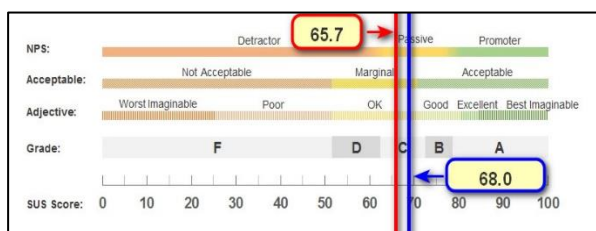
ผลการประเมินคุณภาพการให้บริการ (Quality of Services: QoS) พบว่ามีผลการดำเนินงานที่น่าพอใจในหลายด้านแต่ยังต้องปรับปรุงเพื่อบรรลุตาม

เกณฑ์ของโรงพยาบาลอัจฉริยะในด้านความพร้อมใช้งาน (Availability) ระบบมีความพร้อมใช้งานอยู่ที่ร้อยละ 88.33 แสดงให้เห็นถึงความจำเป็นในการลดช่วงเวลาที่ระบบไม่ทำงาน (Downtime) โดยอาจพิจารณาใช้เซนเซอร์เกรดทางการแพทย์ที่มีความเสถียรสูงขึ้นและจัดเตรียมเครื่องวัดสัญญาณชีพสำรองในด้านความถูกต้อง (Accuracy) ผลการวัดแสดงให้เห็นว่าระบบมีความถูกต้องสูงโดยเฉพาะค่าชีพจรและระดับออกซิเจนในเลือดที่มีความถูกต้องเท่ากันที่ร้อยละ 89.17 ส่วนอุณหภูมิร่างกายมีความถูกต้องที่ร้อยละ 73.33 สำหรับด้านความเสถียรภาพ (Reliability) จากการวัด 120 ครั้งระบบมีความสำเร็จในการวัดถึง 109 ครั้งคิดเป็นร้อยละ 90.83 อย่างไรก็ตามปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความไม่เสถียรได้แก่การเลือกใช้เซนเซอร์ที่ไม่ได้มาตรฐานทางการแพทย์และการออกแบบตำแหน่งการวางเซนเซอร์ที่ไม่เหมาะสมสุดท้ายในด้านความสำเร็จในการส่งข้อมูล (Throughput) ค่าเฉลี่ยของระบบอยู่ที่ 38.30 bps ซึ่งได้รับผลกระทบจากปัจจัยต่าง ๆ เช่นแบนด์วิดท์ของเครือข่ายระยะทางและความหน่วงการสูญเสียแพ็กเก็ตและภาระของเครือข่ายการวัดผล QoS ซึ่งให้เห็นว่าระบบที่พัฒนาขึ้นมีศักยภาพในการทำงานที่ดีในเรื่องความถูกต้องและความเสถียรในการวัดค่าแต่ยังคงต้องมีการปรับปรุงด้านความพร้อมใช้งานเพื่อตอบสนองต่อมาตรฐานของโรงพยาบาลอัจฉริยะได้อย่างครบถ้วน

จากการวิเคราะห์ผลการประเมินความพึงพอใจในการใช้งานเครื่องมือวัดสัญญาณชีพอัจฉริยะและยืนยันตัวตนผู้ป่วยในโรงพยาบาลด้วยวิธี System Usability Scale (SUS) พบว่ามีค่าเฉลี่ย SUS Score อยู่ที่ 65.7 ซึ่งต่ำกว่าค่าเฉลี่ยมาตรฐานที่ยอมรับโดยทั่วไปเล็กน้อยที่ 68 ดังแสดงในรูปที่ 4 ผลลัพธ์นี้บ่งชี้ว่าระบบมีระดับการใช้งานอยู่ในเกณฑ์ที่ "พอใช้" (OK) แต่ยังคงมีโอกาสนในการปรับปรุงให้ดียิ่งขึ้นโดยการแปลผลในรูปแบบต่าง ๆ ยืนยันถึงข้อสรุปนี้

บทความวิจัย (Research Article)

การอยู่ในระดับเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 41–59 และอยู่ในเกรด C ทั้งยังถูกประเมินว่าอยู่ในระดับ "Marginal" ในแง่ของการยอมรับและผู้ใช้ส่วนใหญ่อยู่ในกลุ่ม "Passive" ซึ่งบ่งชี้ว่าผู้ใช้งานไม่ได้รู้สึกประทับใจมากพอที่จะแนะนำระบบนี้ให้กับผู้อื่น (Promoter and Detractors) สาเหตุที่ผลการประเมินอยู่ในระดับดังกล่าวอาจเนื่องมาจากโรงพยาบาลมีการทดลองใช้เครื่องมือจากบริษัทผู้ผลิตรายอื่นในช่วงเวลาเดียวกันทำให้เกิดการเปรียบเทียบระหว่างเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นเองกับเครื่องมือเชิงพาณิชย์ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของนิตยาสุภาภรณ์และคณะ (2020) ที่พบว่าแอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้นใช้งานได้ยากทำให้ได้คะแนน SUS ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานโดยสรุปแล้วเครื่องมือวัดสัญญาณชีพอัจฉริยะที่พัฒนาขึ้นมีศักยภาพในการใช้งานและผ่านเกณฑ์ขั้นต่ำที่ยอมรับได้แต่จำเป็นต้องมีการปรับปรุงเพิ่มเติมเพื่อยกระดับความสะดวกและประสิทธิภาพในการใช้งานให้เป็นที่ยอมรับในวงกว้างมากขึ้นซึ่งจะช่วยให้ระบบสามารถนำไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืนในบริบทของโรงพยาบาลอัจฉริยะต่อไป



รูปที่ 4 แสดงแผนภาพการประเมินความพึงพอใจด้วย System Usability Scale

5.2 ข้อจำกัดของงานวิจัย

1) ความแม่นยำ/ความเที่ยงตรงไม่รับประกัน เพราะไม่ผ่านการสอบเทียบมาตรฐาน และผลแปรตามสภาพแวดล้อม/การใช้งาน

2) ความน่าเชื่อถือระยะยาวต่ำ (ค่า Drift, อุปกรณ์/สายหลวม เสียหายง่าย) และความสม่ำเสมอระหว่างเครื่องแต่ละชุดไม่เท่ากัน

3) ความปลอดภัยผู้ป่วยมีความเสี่ยง เช่น ไฟฟ้าลัดวงจร/ความร้อน/การสัมผัสผิวหนัง และไม่มีระบบ Fail-Safe ที่ผ่านการทดสอบ

4) ไม่ผ่านมาตรฐาน/การรับรองเครื่องมือแพทย์ จึงควรใช้ได้แค่เฝ้าระวัง/วิจัย ไม่ควรใช้เป็นหลักในการวินิจฉัยหรือสั่งการรักษา

5) ความเสี่ยงด้านข้อมูลและไซเบอร์ (การเข้ารหัส/สิทธิ์/บันทึกการใช้งาน/การอัปเดตแพตช์ไม่ครบ) เสี่ยงผิด PDPA

6) ภาระซ่อมบำรุงและการรับผิดชอบสูง พึ่งพาคนทำ/เอกสารไม่ครบ อะไหล่คนละล็อตทำให้ต้องตั้งค่าใหม่ และมีความเสี่ยงด้านนิติความรับผิดชอบหากเกิดเหตุไม่พึงประสงค์

5.3 ข้อเสนอแนะเชิงปฏิบัติ

การพัฒนาและใช้งานระบบ IoT เพื่อการดูแลผู้ป่วยอย่างยั่งยืนจำเป็นต้องคำนึงถึงประเด็นสำคัญหลายด้านเป็นอันดับแรกด้านความปลอดภัยและความเป็นส่วนตัวของข้อมูลซึ่งเป็นข้อมูลสุขภาพที่มีความละเอียดอ่อนจึงควรมีการพัฒนากระบวนการรักษาความปลอดภัยที่แข็งแกร่งโดยใช้เทคโนโลยีเข้ารหัสข้อมูลและระบบยืนยันตัวตนเพื่อป้องกันการรั่วไหลของข้อมูลและปกป้องความเป็นส่วนตัวของผู้ป่วย นอกจากนี้การพัฒนาความน่าเชื่อถือและความถูกต้องของอุปกรณ์เป็นสิ่งจำเป็นเพื่อลดความคลาดเคลื่อนของข้อมูลและทำให้การติดตามอาการมีความแม่นยำสูงขึ้นซึ่งจะช่วยให้การวินิจฉัยและการรักษาเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพสำหรับปัญหาด้านการเข้าถึงเทคโนโลยี และต้นทุนรัฐบาลและหน่วยงานสาธารณสุขควรมีบทบาทในการส่งเสริมการเข้าถึง

บทความวิจัย (Research Article)

เทคโนโลยีในทุกกลุ่มประชากรรวมถึงลดต้นทุนของอุปกรณ์เพื่อให้สามารถนำไปใช้ในวงกว้างได้มากขึ้น สุดท้ายการให้ความรู้แก่ผู้ป่วยและบุคลากรทางการแพทย์เป็นปัจจัยสำคัญที่จะช่วยให้การใช้งานระบบ IoT เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดโดยควรมีการจัดอบรมอย่างต่อเนื่องเพื่อให้ผู้เกี่ยวข้องเข้าใจวิธีการใช้งานที่ถูกต้องและสามารถใช้ประโยชน์จากข้อมูลที่ได้รับได้อย่างเต็มที่การดำเนินการตามข้อเสนอแนะเหล่านี้จะช่วยให้การนำ IoT มาใช้ในการดูแลสุขภาพสามารถยกระดับคุณภาพชีวิตของผู้ป่วยได้อย่างแท้จริงและเป็นรากฐานที่มั่นคงสำหรับระบบสาธารณสุขในอนาคต

5.4 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

งานวิจัยในอนาคตควรมุ่ง 4 แกนหลัก (1) ความถูกต้องเทียบมาตรฐาน (2) อัลกอริทึมเพิ่มความน่าเชื่อถือ/ลดความคาดเคลื่อน (3) ความเสถียร–ความปลอดภัย–PDPA (4) ผลลัพธ์การใช้งานจริงและความคุ้มค่า เพื่อยกระดับ IoT ในรูปแบบการพัฒนาเอง ให้ “น่าเชื่อถือพอสำหรับการเฝ้าระวังในระบบบริการ” และขยายผลได้อย่างปลอดภัย

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณคณาจารย์สาขาวิชาการจัดการสารสนเทศและนวัตกรรมดิจิทัล คณะการบัญชีและการจัดการมหาวิทยาลัยมหาสารคามสำหรับคำแนะนำและการสนับสนุนทางวิชาการที่สำคัญยิ่งนอกจากนี้ขอขอบคุณบุคลากรของโรงพยาบาลมหาสารคามที่ให้ความร่วมมือและช่วยเหลืออย่างดียิ่งตลอดการศึกษาค้นคว้าวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Makary and M. Daniel, "Medical error–the third leading cause of death in the US," *BMJ*, vol. 353, p. i2139, May 2016. DOI: 10.1136/bmj.i2139.
- [2] D. E. Newman-Toker, N. Nassery, A. C. Schaffer, C. W. Yu-Moe, G. D. Clemens, Z. Wang, Y. Zhu, A. S. Saber Tehrani, M. Fanai, A. Hassoon, and D. Siegal, "Burden of serious harms from diagnostic error in the USA," *BMJ Qual. Saf.*, vol. 33, no. 2, pp. 109-120, Jul. 2024. DOI: 10.1136/bmjqs-2021-014130.
- [3] World Health Organization, "Medication Without Harm," 2025. [online]. Available: <https://www.who.int/initiatives/medication-without-harm>. [Accessed: 1 Aug. 2025].
- [4] พงศธร พอกเพิ่มดี, "แผนยุทธศาสตร์ชาติระยะ 20 ปี (ด้านสาธารณสุข) พ.ศ. 2561-2580," *วารสารวิชาการสาธารณสุข*, ปีที่ 29, ฉบับที่ 1, 2563.
- [5] ไทยพับลิก้า (ThaiPublica), "วิกฤตสาธารณสุขไทย! คาดปี'69 ผู้ป่วยหามอ 40.5 ล้านครั้ง/ปี," [ออนไลน์]. Available: <https://thaipublica.org/2025/08/thai-medical-brain-drain-public-health-impact/>. [เข้าถึงเมื่อ: 1 ส.ค. 2568].
- [6] เมดเคอรี (Medcury), "ทำไมลายมือหมออ่านยากป้องกันปัญหาที่อาจตามมาด้วยระบบHIS," [ออนไลน์]. Available: <https://www.medcury.health/post/9-bad-effects-of-illegible-handwriting-from-doctors-and-solutions>. [เข้าถึงเมื่อ: 1 ส.ค. 2568].

บทความวิจัย (Research Article)

- [7] S. Lee and H. Do, "Comparison and analysis of ISO/IEEE 11073, IHE PCD-01, and HL7 FHIR messages for personal health devices," *Healthcare Informatics Research*, vol. 24, no. 1, pp. 46-52, 2018.
- [8] M. Hyzy, R. Bond, M. Mulvenna, L. Bai, and S. Leigh, "System Usability Scale Benchmarking for Digital Health Apps: Meta-analysis," *JMIR mHealth and uHealth*, vol. 10, no. 8, p. e37290, 2022.
- [9] K. Ashton, "That internet of things thing," *RFID JOURNAL*, pp. 97-114, 2009.
- [10] ชินวัจน์ งามวรรณกร, สุทัศน์ รุ่งระวีวรรณ, และ อมรเทพ มณีเนียม, "การพัฒนาระบบควบคุมอุปกรณ์ภายในโรงงานขนาดย่อม ด้วยเทคโนโลยีไร้สายผ่านแอปพลิเคชันบนอุปกรณ์เคลื่อนที่ ภายใต้แนวคิดอินเทอร์เน็ตสำหรับทุกสรรพสิ่ง," รายงานผลการวิจัย, มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา, ยะลา, 2561.
- [11] J. Brooke, "SUS - A quick and dirty usability scale," in *Usability evaluation in industry 1996*, 1996, pp. 189-194.
- [12] The Story, "System Usability Scale (SUS) - What is it? Why is it worth using it?," 2025. [online]. Available: <https://thestory.is/en/journal/system-usability-scale-what-is-it/>. [Accessed: 8 Aug. 2025].
- [13] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari, and M. Ayyash, "Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 17, no. 4, pp. 2347-2376, Fourth Quarter 2015. DOI: 10.1109/COMST.2015.2444095.
- [14] A. Bangor, P. T. Kortum, and J. T. Miller, "An empirical evaluation of the System Usability Scale," *Int. J. Hum.-Comput. Interact.*, vol. 24, no. 5, pp. 574-594, 2008.

การศึกษาการเปรียบเทียบการใช้พลังงานต่อจำนวนผู้โดยสารของรถไฟฟ้าสายสีแดงสายเหนือ ของรถไฟฟ้า Hitachi Series 1000 และ Hitachi Series 2000

ทวีทรัพย์ ตุ่มทอง^{1,*}, วิชัย ศิวะโกศิษฐ์¹, วิรุณศักดิ์ สันติเพ็ชร¹ และ สรวิศ ลิ้มทองกุล¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

*ผู้ประสานงานบทความต้นฉบับ: thaweasup.t@ku.th โทรศัพท์: 098-8260341

(รับบทความ: 15 ตุลาคม 2568; แก้ไขบทความ: 9 กุมภาพันธ์ 2569; ตอรับบทความ: 17 กุมภาพันธ์ 2569)

บทคัดย่อ

การศึกษานี้เปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตร (kWh/pass-km) และต่อตู้-กิโลเมตร (kWh/car-km) ของรถไฟฟ้าสายสีแดงสายเหนือ ระหว่าง Hitachi Series 1000 (6 Car) และ Hitachi Series 2000 (4 Car) โดยใช้ข้อมูลจากระบบ SCADA และ OD Matrix ของระบบ AFC ในเดือนตุลาคม พ.ศ. 2566 ผลการวิเคราะห์พบว่า Series 1000 มีค่าเฉลี่ยการใช้พลังงานต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตรสูงกว่า (0.2179–0.2411) เมื่อเทียบกับ Series 2000 (0.1547–0.1749) และมีค่าเฉลี่ยการใช้พลังงานต่อตู้-กิโลเมตรมากกว่า (4.5933 เทียบกับ 3.3335) ซึ่งสะท้อนถึงความแตกต่างด้านประสิทธิภาพพลังงานของทั้งสองชนิดรถไฟฟ้า ผลการศึกษานี้มีนัยสำคัญต่อการเลือกใช้ขบวนรถตามปริมาณผู้โดยสาร การวางแผนเดินรถแบบยืดหยุ่นตามช่วงเวลา การประเมินต้นทุนพลังงานในระยะยาว และการสนับสนุนการจัดซื้อหรือปรับปรุงขบวนรถในอนาคต เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความคุ้มค่าของระบบรถไฟฟ้าโดยรวม

คำสำคัญ: ระบบรวมศูนย์เพื่อการกำกับ-ควบคุม-และจัดเก็บข้อมูลแบบเรียลไทม์ ระบบจัดเก็บค่าโดยสารอัตโนมัติ หน่วยไฟฟ้าต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตรเฉลี่ยของรถไฟฟ้า หน่วยไฟฟ้าต่อตู้-กิโลเมตรเฉลี่ยของรถไฟฟ้า

การอ้างอิงบทความ: ทวีทรัพย์ ตุ่มทอง, วิชัย ศิวะโกศิษฐ์, วิรุณศักดิ์ สันติเพ็ชร และ สรวิศ ลิ้มทองกุล, "การศึกษาการเปรียบเทียบการใช้พลังงานต่อจำนวนผู้โดยสารของรถไฟฟ้าสายสีแดงสายเหนือ ของรถไฟฟ้า Hitachi Series 1000 และ Hitachi Series 2000," วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์, ปีที่ 4, ฉบับที่ 2, หน้า 53-71, 2569.

A Comparative Study of Energy Consumptions per Passenger between Hitachi Series 1000 EMU and Hitachi Series 2000 EMU for the State Railway of Thailand Northern Red Line

Thaweesup Toomtong^{1,*}, Wichai Siwakosit¹, Wiroonsak Santipach¹ and Sorawit Limthongkul¹

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

*Corresponding Author: thaweesup.t@ku.th, Tel: 098-8260341

(Received: October 15, 2025; Revised: February 9, 2026; Accepted: February 17, 2026)

Abstract

This study compares the electrical energy consumption per passenger-kilometer (kWh/pass-km) and per car-kilometer (kWh/car-km) of the Northern Red Line electric train service between Krungthep Apiwat Central Station (KTW) and Rangsit Station (RST), focusing on two train types: the Hitachi Series 1000 (6 car) and the Hitachi Series 2000 (4 car). Energy consumption data were obtained from the SCADA system, while passenger volume data were collected from the OD Matrix of the AFC system during October 2023. The analysis revealed that the Series 1000 consumed more energy per passenger-kilometer (0.2179–0.2411 kWh/pass-km) compared to the Series 2000 (0.1547–0.1749 kWh/pass-km), and also exhibited higher energy consumption per car-kilometer (4.5933 versus 3.3335 kWh/car-km), reflecting differences in energy efficiency between the two train types. The findings have significant implications for railway operations: train selection should be aligned with passenger demand, with Series 2000 offering greater efficiency during low-demand periods; flexible scheduling that deploys Series 2000 during off-peak hours and Series 1000 during peak hours can balance energy efficiency with passenger capacity; long-term energy cost assessments can benefit from the observed differences in energy consumption per passenger-kilometer, particularly in scenarios of route expansion or increased service frequency; and empirical evidence from this study can support future procurement or retrofitting decisions to enhance energy efficiency, especially when expanding the system or increasing fleet size.

Keywords: SCADA, AFC, Kilowatt-Hours per Passenger-Kilometer, Kilowatt-Hours per Car-Kilometer

Please cite this article as: T. Toomtong, W. Siwakosit, W. Santipach and S. Limthongkul, “A Comparative Study of Energy Consumptions per Passenger between Hitachi Series 1000 EMU and Hitachi Series 2000 EMU for the State Railway of Thailand Northern Red Line,” *The Journal of Engineering and Industrial Technology*, Kalasin University, vol. 4, no. 2, pp. 53-71, 2026.

บทความวิจัย (Research Article)

1. บทนำ

โครงการรถไฟฟ้าชานเมืองสายสีแดง เป็นโครงการที่สร้างเพื่อเชื่อมต่อการเดินทางระหว่างชานเมืองและในตัวเมืองกรุงเทพมหานคร ซึ่งการเดินทางด้วยรถไฟฟ้าจะช่วยหลีกเลี่ยงปัญหาการจราจรติดขัด และสามารถควบคุมเวลาการเดินทางได้ดี กระทรวงคมนาคมและการรถไฟแห่งประเทศไทยจึงได้จัดการเดินรถของโครงการรถไฟฟ้าชานเมืองสายสีแดงจากสถานีกลางกรุงเทพอภิวัฒน์ถึงสถานีรังสิต (สายสีแดงเข้ม North Line) และจากสถานีกลางกรุงเทพอภิวัฒน์ถึงสถานีตลิ่งชัน (สายสีแดงอ่อน West Line) โดยให้บริษัท รถไฟฟ้า ร.ฟ.ท. จำกัด เป็นผู้ดูแลการเดินรถ โดยเริ่มเดินรถเต็มรูปแบบวันแรกเมื่อวันที่ 29 พฤศจิกายน พ.ศ.2564 โดยปัจจุบันโครงการรถไฟฟ้าชานเมืองสายสีแดงมีรถไฟฟ้า 2 ชนิด คือ Hitachi Series 1000 (รถไฟฟ้า 6 Car) และ Hitachi Series 2000 (รถไฟฟ้า 4 Car) โดยรูปแบบรถไฟฟ้ามีระบบรับไฟฟ้าจากเหนือหัว (Overhead Catenary System) 25kV 1 เฟส ซึ่งรถแต่ละชนิดจะมีการใช้ไฟฟ้าที่ต่างกัน



รูปที่ 1 แสดงลักษณะของรถไฟฟ้าสายสีแดงที่จอดอยู่ Depot [1]

โดยการศึกษานี้จะแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างและความสมเหตุสมผลในการเลือกใช้ชนิดรถในการให้บริการ ทั้งนี้จะมีการคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้า 2 ชนิด คือที่หน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อผู้-กิโลเมตร (kWh/pass-km) และหน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อผู้-กิโลเมตร (kWh/pass-km) จากรูปแบบการเดินรถต่าง ๆ ทั้งนี้การบันทึกผลค่าพลังงานไฟฟ้าของรถไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิดอยู่ช่วงเดือนตุลาคม พ.ศ.2566 ซึ่งเดือนนี้มีการจัดการเดินรถให้บริการหลายรูปแบบ ซึ่งจะสามารถนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบได้

2. การทบทวนวรรณกรรม (Literature Review)

2.1 งานวิจัยด้านการใช้พลังงานของระบบขนส่งสาธารณะ

งานของ พงศธร เหล่าอัน และคณะ (2565) [2] ศึกษาดัชนีประสิทธิภาพการใช้พลังงานและการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของรถโดยสารในเมือง พบว่าการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบสามารถสะท้อนความคุ้มค่าของการเลือกใช้รูปแบบขนส่งสาธารณะได้อย่างชัดเจน

ภาณุพงศ์ นันทสินธ์ และคณะ (2561) [3] วิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจเลือกใช้บริการรถโดยสารพลังงานไฟฟ้า โดยชี้ให้เห็นว่าประสิทธิภาพด้านพลังงานและความสะดวกสบายเป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อพฤติกรรมผู้โดยสาร

2.2 งานวิจัยด้านการใช้พลังงานของรถไฟฟ้าและรถไฟความเร็วสูง

Zhang et al. (2022) [4] ศึกษาการใช้พลังงานของรถไฟฟ้าความเร็วสูงภายใต้สภาพการทดสอบจริง พบว่าความเร็วและสภาพการเดินรถมีผลโดยตรงต่อการใช้พลังงาน

บทความวิจัย (Research Article)

Zhao et al. (2022) [5] เสนอการปรับตารางเดินรถและการจัดรูปแบบขบวนรถไฟให้เหมาะสมกับความต้องการผู้โดยสาร เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน

Kondo (2012) [6] พัฒนาวิธีการคำนวณพลังงานที่ใช้โดยรถไฟแบบง่าย ซึ่งช่วยให้สามารถประเมินการใช้พลังงานได้รวดเร็วโดยไม่ต้องใช้ข้อมูลเชิงลึกมาก

R. Mu et al. [7] กล่าวถึงการประเมินการใช้พลังงานของรถไฟผ่านแนวคิดด้านวิศวกรรมระบบบนพื้นฐานของแบบจำลอง (Model-Based Systems Engineering) โดยใช้แพลตฟอร์มการจำลองร่วม (Co-Simulation) และไลบรารี ZEMT เพื่อจำลองโครงสร้างการใช้พลังงานของรถไฟความเร็วสูงในประเทศจีน ผลการศึกษาพบว่าการใช้แบบจำลองคอมพิวเตอร์ที่รวมปัจจัยด้านสภาพแวดล้อมและระบบย่อยของรถไฟเข้าด้วยกัน สามารถให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับข้อมูลการเดินรถจริง ซึ่งเป็นแนวทางที่มีความสมเหตุสมผลในการนำมาใช้ศึกษาเพื่อพยากรณ์และวางแผนการจัดการพลังงานอัจฉริยะสำหรับรถไฟในอนาคต

BTS (2025) [8] รายงานค่าความเข้มข้นการใช้พลังงาน (Energy Intensity) ของรูปแบบการเดินทางต่าง ๆ ซึ่งชี้ให้เห็นว่ารถไฟมีประสิทธิภาพสูงกว่ารถโดยสารและรถยนต์ส่วนบุคคล

2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการใช้พลังงานของรถไฟ

H. B. Zhao (2016) [9] ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของรถไฟ EMU และการใช้พลังงาน พบว่าความเร็วที่สูงขึ้นทำให้การใช้พลังงานเพิ่มขึ้นแบบไม่เชิงเส้น

Ghaviha et al. (2014) [10] เสนออัลกอริทึมการควบคุมที่เหมาะสมสำหรับรถไฟ EMU เพื่อลดการใช้พลังงานโดยการปรับการเร่งและการเบรก

Jong & Chang (2005) [11] พัฒนาโมเดลการประมาณการใช้พลังงานของรถไฟ โดยเน้นการ

เชื่อมโยงระหว่างปัจจัยทางเทคนิค เช่น น้ำหนักขบวน ความเร็ว และความหนาแน่นผู้โดยสาร

2.4 การเชื่อมโยงวรรณกรรม

จากการทบทวน พบว่า งานวิจัยในประเทศไทย [2], [3] มุ่งเน้นไปที่รถโดยสารและพฤติกรรมผู้โดยสาร แต่ยังไม่ครอบคลุมการวิเคราะห์เชิงลึกของรถไฟในระบบเมือง

งานวิจัยต่างประเทศ [4]–[11] ให้ความสำคัญกับการใช้พลังงานของรถไฟและความเร็วสูง โดยเน้นการวิเคราะห์เชิงเทคนิค เช่น ความเร็ว ตารางเดินรถ และการควบคุมพลังงาน

อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีงานที่เปรียบเทียบการใช้พลังงานของรถไฟสองรุ่นที่ให้บริการจริงในระบบเดียวกัน ภายใต้บริบทของประเทศไทย

2.5 ช่องว่างงานวิจัย (Research Gap)

1) ขาดการศึกษาเชิงเปรียบเทียบในบริบทจริงของประเทศไทย แม้งานวิจัยต่างประเทศจะมีการวิเคราะห์พลังงานของรถไฟ แต่ยังไม่มีการศึกษาเปรียบเทียบรถไฟต่างรุ่นที่ใช้งานจริงในระบบเดียวกัน เช่น Hitachi Series 1000 (6 Car) และ Hitachi Series 2000 (4 Car) บนเส้นทางโครงการรถไฟฟ้าชานเมืองสายสีแดง

2) ขาดการเชื่อมโยงระหว่างข้อมูลการใช้พลังงานและพฤติกรรมผู้โดยสาร งานวิจัยส่วนใหญ่เน้นด้านเทคนิค (เช่น ความเร็ว ตารางเดินรถ) แต่ยังไม่ได้นำข้อมูลผู้โดยสารจริง (OD Matrix จาก AFC) มาวิเคราะห์ร่วมกับการใช้พลังงาน

3) ขาดข้อมูลเชิงประจักษ์ในระดับท้องถิ่น งานวิจัยในไทยยังมุ่งไปที่รถโดยสารหรือการตัดสินใจ

บทความวิจัย (Research Article)

เลือกใช้บริการ แต่ยังไม่มียังข้อมูลเชิงประจักษ์เกี่ยวกับการใช้พลังงานของรถไฟฟ้าในระบบเมือง

3. อุปกรณ์และวิธีการ

3.1 การวัดและขอบเขตการเก็บค่าพลังงานไฟฟ้า

ค่าพลังงานไฟฟ้าจากการใช้พลังงานของรถไฟฟ้าชนิด 6 Car และ 4 Car และบันทึกค่าพลังงานไฟฟ้าจาก ห้องศูนย์ควบคุมการเดินรถไฟฟ้าสายสีแดง โดยใช้โปรแกรมที่มาพร้อมกับระบบ SCADA ที่ชื่อ Query ซึ่งระบบจะอ่านค่าพลังงานไฟฟ้าจากอาคารจ่ายไฟฟ้าย่อย (Bulk Substation) ของโครงการรถไฟฟ้าสายสีแดงที่มีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 1 ตามรายละเอียดคุณลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์และการเลือกการอ่านค่าพลังงานจะอ่านออกมาทุก ๆ 1 นาที แล้วนำมาคำนวณต่อเป็นหน่วยพลังงานไฟฟ้าหรือกิโลวัตต์-ชั่วโมง (kWh) โดยจะเก็บค่าพลังงานไฟฟ้าของเดือนตุลาคม พ.ศ.2566 ซึ่งเดือนดังกล่าวมีการเดินรถที่มีเวลาระยะห่างระหว่างขบวนรถ (Headway) ที่เหมือนกันตลอดทั้งเดือนและช่วงเวลาให้บริการเร่งด่วน (Peak Time) คือ 07.00 น. ถึง 09.30 น. และ 17.00 น. ถึง 19.30 น. ของทุกวัน โดยมีการปรับการเดินรถโดยนำรถไฟฟ้า 6 Car และรถไฟฟ้า 4 Car มาวิ่งร่วมกัน 3 รูปแบบ ดังนี้

รูปแบบที่ 1 ใช้รถไฟฟ้า 6 Car 7 ขบวน และใช้รถไฟฟ้า 4 Car 1 ขบวน ในช่วงวันที่ 1 ถึง 3 ตุลาคม พ.ศ.2566 โดยช่วงเวลาให้บริการปกติ (Off Peak Time) จะใช้รถไฟฟ้า 6 Car จำนวน 6 ขบวน และช่วงเวลาให้บริการเร่งด่วน (Peak Time) จะใช้รถไฟฟ้า 6 Car เพิ่ม 1 ขบวน และจะใช้รถไฟฟ้า 4 Car เพิ่ม 1 ขบวน

รูปแบบที่ 2 ใช้รถไฟฟ้า 6 Car 6 ขบวน และใช้รถไฟฟ้า 4 Car 2 ขบวน ในช่วงวันที่ 4 ถึง 17 ตุลาคม พ.ศ.2566 โดยช่วงเวลาให้บริการปกติ (Off Peak

Time) จะใช้รถไฟฟ้า 6 Car จำนวน 6 ขบวน และช่วงเวลาให้บริการเร่งด่วน (Peak Time) จะใช้รถไฟฟ้า 4 Car เพิ่ม 2 ขบวน

รูปแบบที่ 3 ใช้รถไฟฟ้า 6 Car 4 ขบวน และใช้รถไฟฟ้า 4 Car 4 ขบวน ในช่วงวันที่ 18 ถึง 31 ตุลาคม พ.ศ.2566 โดยช่วงเวลาให้บริการปกติ (Off Peak Time) จะใช้รถไฟฟ้า 6 Car จำนวน 2 ขบวนและใช้รถไฟฟ้า 4 Car จำนวน 4 ขบวน และช่วงเวลาให้บริการเร่งด่วน (Peak Time) จะใช้รถไฟฟ้า 6 Car เพิ่ม 2 ขบวน

ซึ่งเส้นทางการเก็บค่าพลังงานของการเดินรถไฟฟ้าสายสีแดงจากสถานีกลางกรุงเทพอภิวัฒน์ถึงสถานีรังสิต (สายสีแดงเข้ม North Line) โดย SCADA จะแบ่งการวัดคือ

- North Line UP Track คือการเดินรถไฟฟ้าสายสีแดงจากสถานีกลางกรุงเทพอภิวัฒน์ (KWT) ถึงสถานีรังสิต (RST)

- North Line Down Track คือการเดินรถไฟฟ้าสายสีแดงจากสถานีรังสิต (RST) ถึงสถานีกลางกรุงเทพอภิวัฒน์ (KWT)

โดยจะนำค่าพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการบันทึกข้อมูลจากระบบ SCADA ของโครงการรถไฟฟ้าสายสีแดงช่วงสถานีกลางกรุงเทพอภิวัฒน์ (KWT) ถึงสถานีรังสิต (RST) ที่มีการจัดการเดินรถ 3 รูปแบบของเดือนตุลาคม พ.ศ.2566 มาวิเคราะห์หาค่าพลังงานไฟฟ้าของรถไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิดและเปรียบเทียบการใช้พลังงานตามรูปแบบการเดินรถทั้ง 3 รูปแบบ และวิเคราะห์เปรียบเทียบกับปริมาณผู้โดยสารต่อตู้ แบ่งเป็น 2 กรณีสมมติฐาน

- 1) สมมติฐานที่จำนวนผู้โดยสารเฉลี่ยต่อขบวนเท่ากัน หน่วยเป็น ผู้โดยสารต่อขบวน

- 2) สมมติฐานที่จำนวนผู้โดยสารต่อตู้เท่ากัน และนำผลจากสมมติฐานมาเป็นข้อมูลสำหรับการเสนอแนะ

บทความวิจัย (Research Article)

และการจัดการเลือกใช้ชนิดรถไฟฟ้าในการให้บริการ หรือการจัดแผนการเดินทางสำหรับการเตรียมการกรณี มีปริมาณผู้โดยสารเพิ่มมากขึ้นในอนาคต

กำหนดสมการวิเคราะห์พลังงานไฟฟ้างตามสมการที่ 1

$$E_{t_i} = n_{6_i} U_6 + n_{4_i} U_4 \quad (1)$$

E_{t_i} คือ ค่าพลังงานไฟฟ้าหรือหน่วยพลังงานไฟฟ้า รวมของช่วงวันที่บันทึกข้อมูลพลังงานไฟฟ้าจากระบบ SCADA หรือ หน่วยเป็น กิโลวัตต์-ชั่วโมง (kWh)

n_{6_i} คือ จำนวนขบวนรถไฟฟ้า 6 Car เฉลี่ยต่อวัน หน่วยเป็นขบวน

U_6 คือ ค่าพลังงานรถไฟฟ้า 6 Car ต่อขบวนต่อวัน หน่วยเป็น กิโลวัตต์-ชั่วโมง (kWh)

n_{4_i} คือ จำนวนขบวนรถไฟฟ้า 4 Car เฉลี่ยต่อวัน หน่วยเป็นขบวน

U_4 คือ ค่าพลังงานรถไฟฟ้า 4 Car ต่อขบวนต่อวัน หน่วยเป็น กิโลวัตต์-ชั่วโมง (kWh)

กำหนดสมการหาค่าจำนวนเที่ยววิ่งเฉลี่ยของรถ ทั้ง 2 ชนิดในแต่ละรูปแบบของการเดินรถ ตามสมการที่ 2

$$n_x = \frac{(A_x T_{op}) + (B_x T_p)}{(T_{op} + T_p)} \quad (2)$$

โดย x จะเท่ากับ 4 และ 6

A_x เท่ากับจำนวนขบวนของรถไฟฟ้าชนิดนั้น ๆ ที่ใช้ให้บริการในเวลาปกติ (Off Peak Time) หน่วยเป็น ขบวน

B_x เท่ากับจำนวนขบวนของรถไฟฟ้าชนิดนั้น ๆ ที่ใช้ให้บริการในเวลาเร่งด่วน (Peak Time) หน่วยเป็น ขบวน

T_{op} เท่ากับระยะเวลาให้บริการช่วงเวลาปกติ (Off Peak Time) หน่วยเป็นชั่วโมง

T_p เท่ากับระยะเวลาให้บริการช่วงเวลาเร่งด่วน (Peak Time) หน่วยเป็นชั่วโมง

การคำนวณค่า U_6 และ U_4 ใช้สมมติฐานให้ค่า U_6 และ U_4 ในสภาวะการเดินรถที่ใกล้เคียงกันจะมี ค่าเท่ากัน โดยเปรียบเทียบระหว่างช่วงวันที่มีค่า n_6 และ n_4 แตกต่างกันจาก 2 รูปแบบการเดินรถ ตาม สมการที่ 2 ดังนี้

$$E_{t_1} = n_{6_1} U_6 + n_{4_1} U_4$$

$$E_{t_2} = n_{6_2} U_6 + n_{4_2} U_4$$

จะได้ค่าสมการหาค่า U_6 และ U_4 ดังนี้

$$\begin{pmatrix} U_4 \\ U_6 \end{pmatrix} = \frac{1}{n_{6_1} n_{4_2} - n_{6_2} n_{4_1}} \begin{bmatrix} n_{4_2} & -n_{4_1} \\ -n_{6_2} & n_{6_1} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} E_{t_1} \\ E_{t_2} \end{pmatrix}$$

จะได้ค่า U_4 และ U_6 ดังสมการที่ 3 และสมการที่ 4

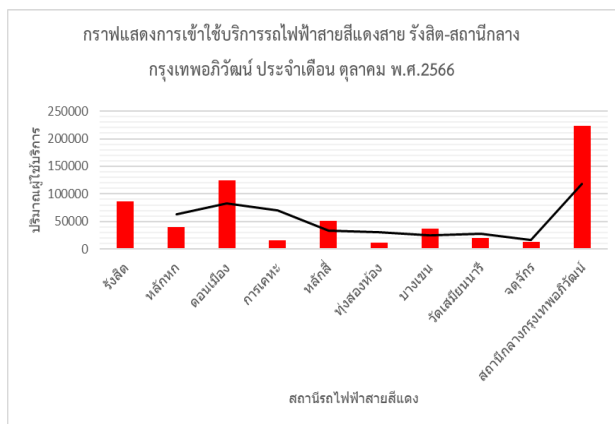
$$U_4 = \frac{E_{t_1} n_{4_2} - E_{t_2} n_{4_1}}{n_{6_1} n_{4_2} - n_{6_2} n_{4_1}} \quad (3)$$

$$U_6 = \frac{-E_{t_1} n_{6_2} + E_{t_2} n_{6_1}}{n_{6_1} n_{4_2} - n_{6_2} n_{4_1}} \quad (4)$$

โดย $n_{4_1} \neq n_{4_2}$ และ $n_{6_1} \neq n_{6_2}$

บทความวิจัย (Research Article)

ข้อมูลปริมาณผู้โดยสารที่มีการใช้บริการรถไฟฟ้าสายสีแดงจากตาราง OD Matrix ซึ่งได้มาจากการบันทึกค่าของระบบจัดเก็บค่าโดยสารอัตโนมัติ (Automatic Fare Collection: AFC) ประจำเดือน ตุลาคม พ.ศ.2566 โดยจะใช้การอ่านค่าขาเข้าผู้โดยสารแทนการเข้าใช้บริการรถไฟฟ้าสายสีแดง ตามรูปที่ 2 ดังนี้



รูปที่ 2 แสดงปริมาณผู้โดยสารใช้บริการรถไฟฟ้าสายสีแดง ช่วงสถานีกลางกรุงเทพอภิวัฒน์ถึงสถานีรังสิต ประจำเดือน ตุลาคม พ.ศ.2566

โดยกำหนดให้

C คือ จำนวนผู้โดยสารที่ใช้บริการใน 1 วัน จากข้อมูล OD Matrix โดยการเฉลี่ยจากข้อมูล OD Matrix ประจำเดือน ตุลาคม พ.ศ.2566

r_i เท่ากับจำนวนเที่ยววิ่งของแต่ละขบวนรถไฟฟ้าใน 1 วัน โดยสมมติให้รถแต่ละขบวนมีจำนวนเฉลี่ยเท่ากันใน 1 วันหน่วยเป็นเที่ยว-ขบวน ตามสมการที่ 5

$$r_i = \frac{\text{จำนวนเที่ยววิ่งของรถทุกขบวนใน 1 วัน}}{n_{4_i} + n_{6_i}} \quad (5)$$

S_{avg} คือระยะทางโดยสารเฉลี่ยของรถไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิด วิ่งให้บริการใน 1 วัน หน่วยเป็นกิโลเมตร (km) ตามสมการที่ 6

$$S_{avg} = 13.2r_i \quad (6)$$

การวิเคราะห์ปริมาณผู้โดยสารต่อตู้ (pass/car) แบ่งเป็น 2 กรณีสมมติฐานดังนี้

1) สมมติฐานที่จำนวนผู้โดยสารเฉลี่ยต่อขบวนเท่ากัน หน่วยเป็น ผู้โดยสารต่อขบวน (pass/train)

$$\text{จำนวนผู้โดยสารต่อขบวน} = \frac{C}{\text{จำนวนเที่ยววิ่งใน 1 วัน}} \quad (7)$$

จำนวนผู้โดยสารต่อตู้รถไฟฟ้าชนิด 6 Car

$$= \frac{\text{จำนวนผู้โดยสารต่อขบวน}}{6} \quad (8)$$

จำนวนผู้โดยสารต่อตู้รถไฟฟ้าชนิด 4 Car

$$= \frac{\text{จำนวนผู้โดยสารต่อขบวน}}{4} \quad (9)$$

วิเคราะห์หาค่าพลังงานไฟฟ้าของรถไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิดที่หน่วยเป็น หน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตร (kWh/pass-km) ดังสมการที่ 10 และ 11

$$u_{e6} = \frac{U_6}{(6)(S_{avg})(\text{จำนวนผู้โดยสารต่อตู้})} \quad (10)$$

บทความวิจัย (Research Article)

u_{e6} คือหน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตรของรถไฟฟ้าชนิด 6 Car

$$u_{e4} = \frac{U_4}{(4)(S_{avg})(\text{จำนวนผู้โดยสารต่อตู้})} \quad (11)$$

u_{e4} คือหน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตรของรถไฟฟ้าชนิด 4 Car

2) สมมติฐานที่จำนวนผู้โดยสารต่อตู้เท่ากัน

กำหนดให้ p_i คือจำนวนผู้โดยสารต่อตู้ของรูปแบบการเดินรถที่ i หน่วยคือ ผู้โดยสารต่อตู้ (pass/car) ดังสมการที่ 12

$$p_i = \frac{C}{(4n_4r_i) + (6n_6r_i)} \quad (12)$$

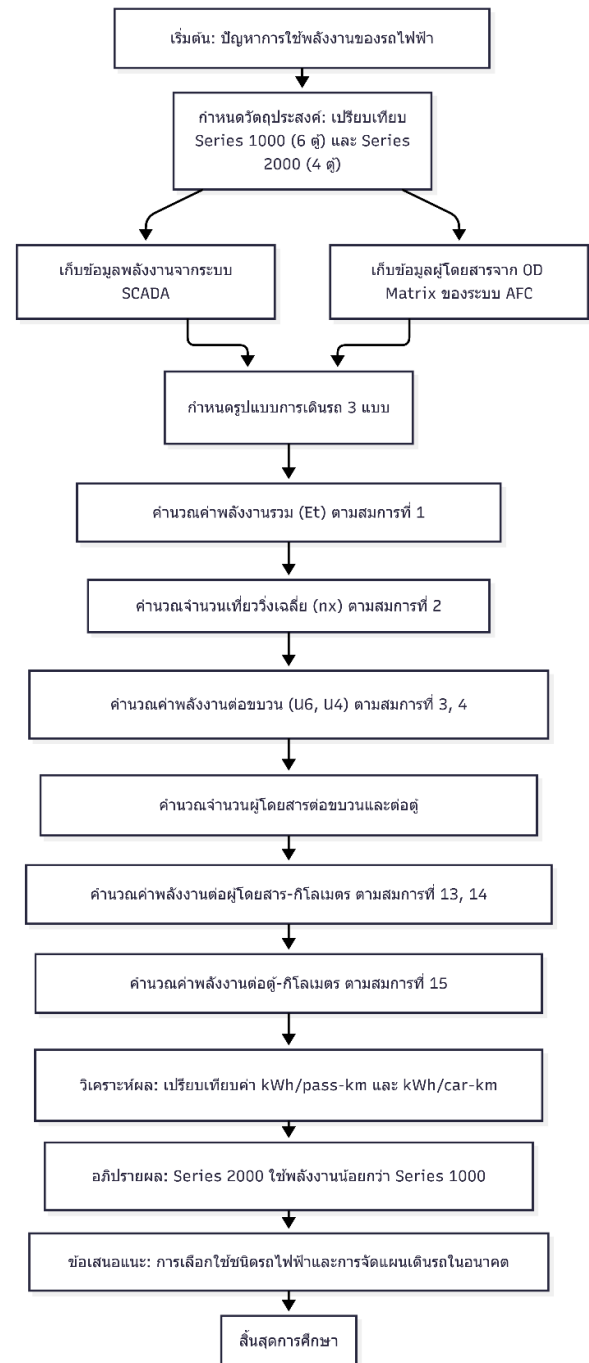
วิเคราะห์หาค่าพลังงานไฟฟ้าของรถไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิดที่หน่วยคือ หน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตร (kWh/pass-km) ดังสมการที่ 13 และ 14

$$u_{e6} = \frac{U_6}{(6)(S_{avg})(\text{จำนวนผู้โดยสารต่อตู้})} \quad (13)$$

u_{e6} คือหน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตรของรถไฟฟ้าชนิด 6 Car

$$u_{e4} = \frac{U_4}{(4)(S_{avg})(\text{จำนวนผู้โดยสารต่อตู้})} \quad (14)$$

u_{e4} คือหน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตรของรถไฟฟ้าชนิด 4 Car



รูปที่ 3 แสดง Flowchart วิธีการศึกษาและเปรียบเทียบค่าพลังงานไฟฟ้าของรถทั้ง 2 ชนิด

การวิเคราะห์หาค่าหน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อผู้-กิโลเมตรของรถไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิด หน่วยคือ หน่วย

บทความวิจัย (Research Article)

พลังงานไฟฟ้าต่อตู้-กิโลเมตร (kWh/pass-km) ดัง
สมการที่ 15

$$u'_{ex} = (u_{ex})(p_i) \quad (15)$$

u'_{ex} ค่าหน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อตู้-กิโลเมตรของ
รถไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิด

4. ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการบันทึกค่าพลังงานในเดือนตุลาคม พ.ศ.
2566 สามารถประมวลผลการเดินรถทั้ง 3 รูปแบบ
ในช่วงเวลาเร่งด่วน (Peak Time) และช่วงเวลาคงที่
(Off Peak) ได้ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงจำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่ใช้ในการเดิน
รถทั้ง 3 รูปแบบ

รูปแบบ	Off-Peak		Peak-Time	
	รถไฟฟ้า 6 Car	รถไฟฟ้า 4 Car	รถไฟฟ้า 6 Car	รถไฟฟ้า 4 Car
รูปแบบที่ 1	6 ขบวน	0 ขบวน	1 ขบวน	1 ขบวน
รูปแบบที่ 2	6 ขบวน	0 ขบวน	0 ขบวน	2 ขบวน
รูปแบบที่ 3	2 ขบวน	4 ขบวน	2 ขบวน	0 ขบวน

ค่าหน่วยพลังงานไฟฟ้ารวมของช่วงวันที่บันทึก
ข้อมูลจากระบบ SCADA ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าพลังงานไฟฟ้ารวมทั้ง 3 รูปแบบการเดิน
รถของเดือน ตุลาคม พ.ศ.2566

รูปแบบ	ค่าพลังงานรวมทั้งที่บันทึกได้จาก ระบบ SCADA (kWh)
รูปแบบที่ 1	71,664.44
รูปแบบที่ 2	54,406.96
รูปแบบที่ 3	47,898.82

ช่วงเวลา Peak และ Off Peak ในการให้บริการ
เดินรถไฟฟ้าสายสีแดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ช่วงเวลาการให้บริการเดินรถของรถไฟฟ้าสาย
สีแดง [12]

จะได้ระยะเวลาให้บริการคือ 05.00 น. ถึง 00.00 น.
ระยะเวลา รวม 19 ชั่วโมง และจะได้ระยะเวลา
ให้บริการช่วง Off Peak 14 ชั่วโมง และระยะเวลา
ให้บริการช่วง Peak Time 5 ชั่วโมง

บทความวิจัย (Research Article)

รูปที่ 5 แสดงปริมาณเที่ยววิ่งในการให้บริการของรถไฟฟ้าสายสีแดงใน 1 วัน โดยในเส้นทางระหว่างสถานีกลางกรุงเทพอภิวัฒน์ถึงสถานีรังสิต มีการให้บริการทั้งหมด 178 เที่ยว (รวมเที่ยววิ่งทั้งหมดของรถไฟฟ้าทุกขบวนจากสถานีกลางกรุงเทพอภิวัฒน์ถึงสถานีรังสิตและสถานีรังสิตถึงสถานีกลางกรุงเทพอภิวัฒน์)



รูปที่ 5 แสดงข้อมูลจำนวนรถที่ให้บริการทั้งหมด 178 เที่ยวต่อวัน ของวันที่ 15 ตุลาคม พ.ศ.2566 [13]

จากการบันทึกค่าพลังงานไฟฟ้าแล้วมาคำนวณหาหน่วยพลังงานไฟฟ้า ซึ่งจะคำนวณหาค่าจำนวนเที่ยววิ่งของรถไฟฟ้า 6 Car (n_6) และจำนวนรถไฟฟ้า 4 Car (n_4) จากการเดินรถทั้ง 3 รูปแบบในช่วงเดือน ตุลาคม พ.ศ.2566 ข้อมูลจากการคำนวณของสมการที่ 2 สามารถคำนวณค่า n_6 และ n_4 ตามสมการที่ 2 ได้ตัวอย่างเช่น

สำหรับรูปแบบการเดินรถที่ 1 คือ ใช้รถไฟฟ้า 6 Car 7 ขบวนและใช้รถไฟฟ้า 4 Car 1 ขบวน ในช่วงวันที่ 1 ถึง 3 ตุลาคม พ.ศ.2566 โดยช่วงเวลา Off Peak ใช้รถไฟฟ้า 6 Car 6 ขบวน และช่วงเวลา Peak

Time จะใช้รถไฟฟ้า 6 Car เพิ่ม 1 ขบวน และใช้รถไฟฟ้า 4 Car เพิ่ม 1 ขบวน

จากสมการที่ 2 คำนวณ n_6 จะใช้ A_6 เท่ากับ 6 ขบวนและ B_6 เท่ากับ 7 ขบวน และจากรูปที่ 4 ระยะเวลาให้บริการทั้งหมด 19 ชั่วโมง แบ่งเป็นช่วง Peak Time 5 ชั่วโมง และช่วง Off Peak Time 14 ชั่วโมง จะได้ T_p เท่ากับ 5 ชั่วโมง และ T_{op} เท่ากับ 14 ชั่วโมง

ดังนั้น

$$n_6 = \frac{(6 \times 14) + (7 \times 5)}{(14 + 5)} = 6.26$$

ดังนั้นจะสามารถคำนวณ n_6 และ n_4 ได้ตามตารางที่ 3 ของทั้ง 3 รูปแบบการเดินรถ

ตารางที่ 3 สรุปจำนวนเที่ยววิ่งของรถไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิด สำหรับการเดินรถใน 3 รูปแบบของเดือน ตุลาคม พ.ศ. 2566

ลำดับ	A_x	B_x	T_p	T_{op}	n_x
รูปแบบ 1	6	7	5	14	$n_6 = 6.26$
	0	1	5	14	$n_4 = 0.26$
รูปแบบ 2	6	6	5	14	$n_6 = 6$
	0	2	5	14	$n_4 = 0.52$
รูปแบบ 3	2	4	5	14	$n_6 = 2.52$
	4	4	5	14	$n_4 = 4$

การคำนวณหาค่า U_6 และ U_4 เมื่อเปรียบเทียบการเดินรถรูปแบบที่ 2 และการเดินรถรูปแบบที่ 3 จากสมการที่ 3 และสมการที่ 4 จะได้ U_6 และ U_4 ดังนี้

บทความวิจัย (Research Article)

$$U_6 = 8484.0 \text{ kWh}$$

$$U_4 = 6608.5 \text{ kWh}$$

การคำนวณหาค่า U_6 และ U_4 เมื่อเปรียบเทียบการเดินรถรูปแบบที่ 1 และการเดินรถรูปแบบที่ 3 จากสมการที่ 3 และ สมการที่ 4 จะได้ U_6 และ U_4 ดังนี้

$$U_6 = 11246 \text{ kWh}$$

$$U_4 = 4862 \text{ kWh}$$

เพราะฉะนั้นจะได้ช่วงค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อขบวนสูงสุดและต่ำสุดของการเลือกใช้รถไฟฟ้า 6 Car และรถไฟฟ้า 4 Car ดังนี้

$$U_6 = 8484.0 - 11246 \text{ kWh}$$

$$U_4 = 4862 - 6608.5 \text{ kWh}$$

จากรูปที่ 2 สามารถคำนวณปริมาณผู้โดยสารที่ใช้บริการต่อวันในเดือน ตุลาคม พ.ศ.2566 ได้ปริมาณผู้โดยสารใช้บริการต่อวันเฉลี่ยที่ 20,075 คน

จากสมการที่ 5 สามารถคำนวณ r_i ของทั้ง 3 รูปแบบการเดินรถได้ที่ 27.3 เที่ยว

จากสมการที่ 6 จะได้

$$S_{avg} = 13.2r_i$$

$$S_{avg} = (13.2)(27.30)$$

$$S_{avg} = 360.36 \text{ km}$$

การวิเคราะห์ปริมาณผู้โดยสารต่อตู้ (pass/car) แบ่งเป็น 2 กรณีสมมติฐานดังนี้

1) สมมติฐานที่จำนวนผู้โดยสารเฉลี่ยต่อขบวนเท่ากัน หน่วยเป็น ผู้โดยสารต่อขบวน (pass/train)

จากสมการที่ 7

$$\text{จำนวนผู้โดยสารต่อขบวน} = \frac{C}{\text{จำนวนเที่ยววิ่งใน 1 วัน}}$$

$$\text{จำนวนผู้โดยสารต่อขบวน} = \frac{20,075}{178}$$

$$\text{จำนวนผู้โดยสารต่อขบวน} = 112.78 \frac{\text{pass}}{\text{train}}$$

จากสมการที่ 8 จะได้จำนวนผู้โดยสารต่อตู้ของรถไฟฟ้า 6 Car จะได้เท่ากับ

$$\frac{112.78}{6} = 18.79 \frac{\text{pass}}{\text{car}}$$

จากสมการที่ 9 จะได้จำนวนผู้โดยสารต่อตู้ของรถไฟฟ้า 4 Car จะได้เท่ากับ

$$\frac{112.78}{4} = 28.19 \frac{\text{pass}}{\text{car}}$$

จากสมการที่ 10 จะได้ค่าพลังงานไฟฟ้าที่รถไฟฟ้า 6 Car หน่วยเป็น หน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตร (kWh/pass-km)

$$u_{e6} = \frac{U_6}{(6)(S_{avg})(\text{จำนวนผู้โดยสารต่อตู้})}$$

$$u_{e6} = \frac{8484.0 - 11246 \text{ kWh}}{(6)(360.36)(18.79) \text{ pass-km}}$$

บทความวิจัย (Research Article)

$$u_{e_6} = 0.2088 - 0.2768 \frac{\text{kWh}}{\text{pass-km}}$$

จากสมการที่ 11 จะได้ค่าพลังงานไฟฟ้าที่รถไฟฟ้า 4 Car หน่วยเป็น หน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตร (kWh/pass-km)

$$u_{e_4} = \frac{U_4}{(4)(S_{avg})(\text{จำนวนผู้โดยสารต่อตู้})}$$

$$u_{e_4} = \frac{4862 - 6608.5}{(4)(360.36)(28.19)} \frac{\text{kWh}}{\text{pass-km}}$$

$$u_{e_4} = 0.1196 - 0.1626 \frac{\text{kWh}}{\text{pass-km}}$$

จะได้ข้อมูลจากการวิเคราะห์ค่าพลังงานไฟฟ้าที่หน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตร (kWh/pass-km) เมื่อเปรียบเทียบรถไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิดจากสมมติฐานที่ 1 ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แสดงค่าพลังงานไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิดของทั้ง 3 รูปแบบจากสมมติฐานที่ 1

ลำดับรูปแบบ	หน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตร (kWh/pass-km)
1	$u_{e_6} = 0.2088 - 0.2768$
	$u_{e_4} = 0.1196 - 0.1626$
2	$u_{e_6} = 0.2088 - 0.2768$
	$u_{e_4} = 0.1196 - 0.1626$
3	$u_{e_6} = 0.2088 - 0.2768$
	$u_{e_4} = 0.1196 - 0.1626$

2) สมมติฐานที่จำนวนผู้โดยสารต่อตู้เท่ากัน

กำหนดให้ p คือจำนวนผู้โดยสารต่อตู้ หน่วยคือผู้โดยสารต่อตู้ (pass/car) โดยแบ่งตามรูปแบบการเดินรถทั้ง 3 รูปแบบ

รูปแบบการเดินที่ 1 จะได้ค่า n_x จากตารางที่ 3 ดังนี้

$$n_6 = 6.26 \text{ และ } n_4 = 0.26$$

จะได้จำนวนผู้โดยสารต่อตู้ (p_i) จากสมการที่ 12 ของรูปแบบการเดินรถที่ 1 จะได้ p_1 ดังนี้

$$p_1 = \frac{\text{จำนวนผู้โดยสารใน 1 วัน}}{(4n_4 r_i) + (6n_6 r_i)} \frac{\text{pass}}{\text{car}}$$

$$p_1 = \frac{20,075}{(4)(0.26)(27.3) + (6)(6.26)(27.3)}$$

$$p_1 = 19.05 \frac{\text{pass}}{\text{car}}$$

จากสมการที่ 13 จะได้ค่า u_{e_6} คือค่าหน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตรของรถไฟฟ้า 6 Car

$$u_{e_6} = \frac{U_6}{(6)(S_{avg})(\text{จำนวนผู้โดยสารต่อตู้})}$$

$$u_{e_6} = \frac{8484.0 - 11246}{(6)(360.36)(19.05)} \frac{\text{kWh}}{\text{pass-km}}$$

$$u_{e_6} = 0.2059 - 0.2730 \frac{\text{kWh}}{\text{pass-km}}$$

บทความวิจัย (Research Article)

จากสมการที่ 14 จะได้ค่า u_{e4} คือค่าหน่วย
พลังงานไฟฟ้าต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตรของรถไฟฟ้า 4 Car

$$u_{e4} = \frac{U_4}{(4)(S_{avg})(\text{จำนวนผู้โดยสารต่อตู้})}$$

$$u_{e4} = \frac{4862-6608.5}{(4)(360.36)(19.05)} \frac{\text{kWh}}{\text{pass-km}}$$

$$u_{e4} = 0.1770-0.2406 \frac{\text{kWh}}{\text{pass-km}}$$

รูปแบบการเดินที่ 2 จะได้ค่า n_x จากตารางที่ 3
ดังนี้

$$n_6 = 6 \text{ และ } n_4 = 0.52$$

จะได้จำนวนผู้โดยสารต่อตู้ (p_i) จากสมการที่ 12
ของรูปแบบการเดินรถที่ 2 จะได้ p_2 ดังนี้

$$p_2 = \frac{\text{จำนวนผู้โดยสารใน 1 วัน}}{(4n_4r_i)+(6n_6r_i)} \frac{\text{pass}}{\text{car}}$$

$$p_2 = \frac{20,075}{(4)(0.52)(27.3)+(6)(6)(27.3)}$$

$$p_2 = 19.31 \frac{\text{pass}}{\text{car}}$$

จากสมการที่ 13 จะได้ค่า u_{e6} คือค่าหน่วย
พลังงานไฟฟ้าต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตรของรถไฟฟ้า 6 Car

$$u_{e6} = \frac{U_6}{(6)(S_{avg})(\text{จำนวนผู้โดยสารต่อตู้})}$$

$$u_{e6} = \frac{8484.0-11246}{(6)(360.36)(19.31)} \frac{\text{kWh}}{\text{pass-km}}$$

$$u_{e6} = 0.2031-0.2693 \frac{\text{kWh}}{\text{pass-km}}$$

จากสมการที่ 14 จะได้ค่า u_{e4} คือค่าหน่วย
พลังงานไฟฟ้าต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตรของรถไฟฟ้า 4 Car

$$u_{e4} = \frac{U_4}{(4)(S_{avg})(\text{จำนวนผู้โดยสารต่อตู้})}$$

$$u_{e4} = \frac{4862-6608.5}{(4)(360.36)(19.31)} \frac{\text{kWh}}{\text{pass-km}}$$

$$u_{e4} = 0.1746-0.2374 \frac{\text{kWh}}{\text{pass-km}}$$

รูปแบบการเดินที่ 3 จะได้ค่า n_x จากตารางที่ 3
ดังนี้

$$n_6 = 2.52 \text{ และ } n_4 = 4$$

จะได้จำนวนผู้โดยสารต่อตู้ (p_i) จากสมการที่ 12
ของรูปแบบการเดินรถที่ 1 จะได้ p_3 ดังนี้

$$p_3 = \frac{\text{จำนวนผู้โดยสารใน 1 วัน}}{(4n_4r_i)+(6n_6r_i)} \frac{\text{pass}}{\text{car}}$$

$$p_3 = \frac{20,075}{(4)(4)(27.3)+(6)(2.52)(27.3)}$$

บทความวิจัย (Research Article)

$$p_3 = 23.63 \frac{\text{pass}}{\text{car}}$$

จากสมการที่ 13 จะได้ค่า u_{e6} คือค่าหน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตรของรถไฟฟ้า 6 Car

$$u_{e6} = \frac{U_6}{(6)(S_{\text{avg}})(\text{จำนวนผู้โดยสารต่อตู้})}$$

$$u_{e6} = \frac{8484.0-11246}{(6)(360.36)(23.63)} \frac{\text{kWh}}{\text{pass-km}}$$

$$u_{e6} = 0.1660-0.2202 \frac{\text{kWh}}{\text{pass-km}}$$

จากสมการที่ 14 จะได้ค่า u_{e4} คือค่าหน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตรของรถไฟฟ้า 4 Car

$$u_{e4} = \frac{U_4}{(4)(S_{\text{avg}})(\text{จำนวนผู้โดยสารต่อตู้})}$$

$$u_{e4} = \frac{4862-6608.5}{(4)(360.36)(23.63)} \frac{\text{kWh}}{\text{pass-km}}$$

$$u_{e4} = 0.1428-0.1940 \frac{\text{kWh}}{\text{pass-km}}$$

จะได้ข้อมูลจากการวิเคราะห์ค่าหน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตร (kWh/pass-km) เมื่อเปรียบเทียบรถไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิดจากสมมติฐานที่ 2 ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่าพลังงานไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิดของทั้ง 3 รูปแบบการเดินรถจากสมมติฐานที่ 2

ลำดับรูปแบบ	ค่าหน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตร (kWh/pass-km)
1	$u_{e6}=0.2059-0.2730$
	$u_{e4}=0.1770-0.2406$

ตารางที่ 5 ค่าพลังงานไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิดของทั้ง 3 รูปแบบการเดินรถจากสมมติฐานที่ 2 (ต่อ)

ลำดับรูปแบบ	ค่าหน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตร (kWh/pass-km)
2	$u_{e6}=0.2031-0.2693$
	$u_{e4}=0.1746-0.2374$
3	$u_{e6}=0.1660-0.2202$
	$u_{e4}=0.1428-0.1940$

ดังนั้นจะได้ข้อมูลค่าพลังงานไฟฟ้าและค่าเฉลี่ยช่วงพลังงานไฟฟ้าของการเลือกใช้รถไฟฟ้า 6 Car และรถไฟฟ้า 4 Car ที่หน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตร (kWh/pass-km) ของสมมติฐานที่ 1 และ 2 ดังแสดงการเปรียบเทียบตามตารางที่ 6

บทความวิจัย (Research Article)

ตารางที่ 6 แสดงค่าพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการวิเคราะห์จากทั้ง 2 สมมติฐาน

รูปแบบ		ค่าพลังงานไฟฟ้าหน่วยกิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตรของสมมติฐานที่ 1 (kWh/pass-km)	ค่าพลังงานไฟฟ้าหน่วยกิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตรของสมมติฐานที่ 2 (kWh/pass-km)	ค่าเฉลี่ยช่วงพลังงานไฟฟ้าของแต่ละรูปแบบ
1	u_{e_6}	0.2088-0.2768	0.2059-0.2730	0.2411
	u_{e_4}	0.1196-0.1626	0.1770-0.2406	0.1749
2	u_{e_6}	0.2088-0.2768	0.2031-0.2693	0.2395
	u_{e_4}	0.1196-0.1626	0.1746-0.2374	0.1735
3	u_{e_6}	0.2088-0.2768	0.1660-0.2202	0.2179
	u_{e_4}	0.1196-0.1626	0.1428-0.1940	0.1547

จากผลตารางที่ 6 ที่ค่าเฉลี่ยของหน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตร (kWh/pass-km) ของทั้ง 3 รูปแบบการเดินรถ โดยจากการวิเคราะห์จะแสดงให้เห็นว่าเมื่อค่าสูงสุดของรถไฟฟ้า 4 Car มีโอกาสที่จะมากกว่าของค่าต่ำสุดรถไฟฟ้า 6 Car ซึ่งจากค่าเฉลี่ยของช่วงพลังงานไฟฟ้าของการจัดรูปแบบการเดินรถที่มีการนำรถไฟฟ้ามาวิ่งร่วมกันนั้นยังสามารถช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าลงได้จริง

การวิเคราะห์หาค่าพลังงานไฟฟ้าของรถไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิด ที่หน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตร (kWh/car-km) จากตารางที่ 5 โดย u'_{e_x} คือหน่วยพลังงานไฟฟ้าของรถไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิดต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตร (kWh/car-km) จากสมการที่ 15 จะได้

$$u'_{e_x} = (u_{e_x})(p_i)$$

ในตารางที่ 7 แสดงค่าหน่วยพลังงานไฟฟ้าของรถไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิดต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตร (kWh/car-km) ของ

สมมติฐานทั้ง 2 กรณี ซึ่งจะได้ว่าค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 รูปแบบการเดินรถ ซึ่งจะได้ค่าของรถไฟฟ้า 6 Car เท่ากับ 4.5933 (kWh/car-km) และของรถไฟฟ้า 4 Car เท่ากับ 3.3335 (kWh/car-km) เท่ากันทั้ง 3 รูปแบบ จะวิเคราะห์ได้ว่าในหน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตรนั้นค่าของรถไฟฟ้า 6 Car มีค่ามากกว่าของรถไฟฟ้า 4 Car ทั้ง 3 รูปแบบการเดินรถ โดยผลการศึกษาจะแสดงให้เห็นว่า รถไฟฟ้า 4 Car มีค่าเฉลี่ยการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตรและต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตรต่ำกว่ารถไฟฟ้า 6 Car อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงความแตกต่างด้านประสิทธิภาพพลังงานของขบวนรถที่มีจำนวนตู้ต่างกัน โดยผลลัพธ์นี้สอดคล้องกับแนวคิดของงานวิจัยที่ชี้ว่าการจัดรูปแบบขบวนรถและการบริหารจัดการการเดินรถมีผลโดยตรงต่อการใช้พลังงานของระบบรถไฟฟ้า [5], [10]

ตารางที่ 7 แสดงค่าพลังงานไฟฟ้าของรถไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิด ที่หน่วยเป็น กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตร (kWh/car-km)

รูปแบบ		ค่าพลังงานไฟฟ้าหน่วยไฟฟ้าต่อผู้-กิโลเมตรของสมมติฐานที่ 1	ค่าพลังงานไฟฟ้าหน่วยไฟฟ้าต่อผู้-กิโลเมตรของสมมติฐานที่ 2	ค่าเฉลี่ยช่วงพลังงานของแต่ละรูปแบบ
1	u'_{e_6}	3.9768-5.2714	3.9238-5.2012	4.5933
	u'_{e_4}	2.2790-3.0976	3.3730-4.5846	3.3335
2	u'_{e_6}	3.9768-5.2714	3.9238-5.2012	4.5933
	u'_{e_4}	2.2790-3.0976	3.3730-4.5846	3.3335
3	u'_{e_6}	3.9768-5.2714	3.9238-5.2012	4.5933
	u'_{e_4}	2.2790-3.0976	3.3730-4.5846	3.3335

นอกจากนี้ ผลการศึกษายังสนับสนุนข้อค้นพบของ Zhang et al. [4] ที่ระบุว่าปัจจัยด้านสภาพการเดินรถและความเร็วมีผลต่อการใช้พลังงานของรถไฟฟ้าความเร็วสูง ซึ่งในกรณีของรถไฟฟ้าสายสีแดงนี้ การเลือกใช้ขบวนที่มีจำนวนตู้เหมาะสมกับปริมาณผู้โดยสารจึงสามารถลดการใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และขณะเดียวกัน งานของ Zhao [9] ก็ชี้ให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและการใช้พลังงานของ EMU ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษานี้ที่แสดงให้เห็นว่าการจัดแผนการเดินรถที่เหมาะสมสามารถลดการใช้พลังงานต่อผู้โดยสารได้จริง ซึ่งผลลัพธ์ยังสอดคล้องกับแนวทางการประเมินประสิทธิภาพการใช้พลังงานในระบบขนส่งสาธารณะของ เหล่าอัน และคณะ [2] ที่เสนอให้ใช้ตัวชี้วัดด้านพลังงานและการปล่อยก๊าซเป็นเกณฑ์ในการเลือกใช้รูปแบบการเดินทาง ซึ่งในกรณีนี้ การใช้ค่า kWh/pass-km และ kWh/car-km เป็นตัวชี้วัดสามารถสะท้อนประสิทธิภาพของขบวนรถไฟฟ้าได้อย่างชัดเจนและสามารถนำไปวิเคราะห์ของงานวิจัยที่ใช้การขนส่งด้วยวิธีอื่น ๆ ได้อีกด้วย

5. สรุป

การศึกษการเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าของรถไฟฟ้าสายสีแดงสายเหนือ ระหว่างรถไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิด คือรถไฟฟ้าชนิด Hitachi Series 1000 (6 Car) และรถไฟฟ้าชนิด Hitachi Series 2000 (4 Car) จะได้จากการบันทึกข้อมูลและคำนวณหาผลลัพธ์เฉลี่ยในหน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตร และค่าผลลัพธ์เฉลี่ยในหน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อผู้-กิโลเมตรที่ใช้วิ่งที่ช่วงสถานีกลางกรุงเทพอภิวัฒน์ (KTV) ถึงสถานีรังสิต (RST) ซึ่งจากข้อมูลที่บันทึกมา มีการปรับแผนการเดินรถทั้งหมด 3 รูปแบบ ภายในเดือนตุลาคม พ.ศ.2566 โดยจะมีรายละเอียดต่างดังนี้

5.1 รูปแบบที่ 1

ค่าหน่วยพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตร ของรถไฟฟ้า 6 Car และรถไฟฟ้า 4 Car

$$u_{e_6} = 0.2411 \frac{\text{kWh}}{\text{pass-km}}$$

บทความวิจัย (Research Article)

$$u_{e_4} = 0.1479 \frac{\text{kWh}}{\text{pass-km}}$$

มีค่าแตกต่างที่ร้อยละ 27.42

5.2 รูปแบบที่ 2

ค่าหน่วยพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตร ของรถไฟฟ้า 6 Car และรถไฟฟ้า 4 Car

$$u_{e_6} = 0.2395 \frac{\text{kWh}}{\text{pass-km}}$$

$$u_{e_4} = 0.1735 \frac{\text{kWh}}{\text{pass-km}}$$

มีค่าแตกต่างที่ร้อยละ 27.52

5.3 รูปแบบที่ 3

ค่าหน่วยพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตร ของรถไฟฟ้า 6 Car และรถไฟฟ้า 4 Car

$$u_{e_6} = 0.2179 \frac{\text{kWh}}{\text{pass-km}}$$

$$u_{e_4} = 0.1547 \frac{\text{kWh}}{\text{pass-km}}$$

มีค่าแตกต่างที่ร้อยละ 28.98 และการเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าหน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตร ของรถไฟฟ้าสายสีแดงสายเหนือ ของรถไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิด ที่ใช้วิ่งช่วงสถานีกลางกรุงเทพอภิวัฒน์ (KTB) ถึงสถานีรังสิต (RST) โดยจากการบันทึกข้อมูลและ

คำนวณหาค่าผลลัพธ์เฉลี่ยของการเดินรถทั้ง 3 รูปแบบในเดือน ตุลาคม พ.ศ.2566 ภายใต้ 2 สมมติฐาน ดังตารางที่ 7 นี้คือ

$$u'_{e_6} = 4.5933 \frac{\text{kWh}}{\text{car-km}}$$

$$u'_{e_4} = 3.3335 \frac{\text{kWh}}{\text{car-km}}$$

ซึ่งจะเห็นว่าค่าพลังงานที่ใช้ของรถไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิดในหน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตร ต่างกันอยู่ที่ร้อยละ 27.42

สรุปได้ว่าการเดินรถทั้ง 3 รูปแบบนี้ที่มีการนำรถไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิดมาวิ่งร่วมกันในพื้นที่เดียวกัน ระยะทางเดียวกัน เวลาระยะห่างระหว่างขบวนรถ (Headway) เท่ากัน จะได้ว่าความแตกต่างของค่าพลังงานที่ใช้ของรถไฟฟ้าทั้ง 2 ในหน่วยเปรียบเทียบ 2 หน่วยคือหน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตร และหน่วยพลังงานไฟฟ้าต่อผู้โดยสาร-กิโลเมตร มีความแตกต่างกันประมาณร้อยละ 27 ถึง 28 และเนื่องจากการใช้บริการของรถไฟฟ้าสายสีแดงยังไม่สูงมากและปริมาณผู้โดยสารขณะนั้นมีปริมาณยังไม่มาก เมื่อเทียบกับรถไฟฟ้าสายอื่น ดังนั้นค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าของรถไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิดเมื่อเทียบกับปริมาณผู้โดยสารจึงยังไม่คุ้มค่าเท่าที่ควร แต่ก็สามารถนำข้อมูลนี้เป็นข้อมูลสำหรับจัดเตรียมแผนการเลือกใช้รถในการวิ่งให้บริการเมื่อปริมาณผู้โดยสารเพิ่มขึ้นเพื่อให้สอดคล้องกับต้นทุนการซ่อมบำรุงและค่าใช้จ่ายต้นทุนทางไฟฟ้าให้สอดคล้องกันในอนาคตต่อไป โดยจะมีผลลัพธ์เชิงนัยสำคัญ (Implications) ดังนี้

1) การเลือกใช้ขบวนรถตามปริมาณผู้โดยสาร สำหรับรุ่น Hitachi Series 2000 (4 Car) เหมาะสมสำหรับการให้บริการในช่วง Off-Peak เนื่องจากใช้

บทความวิจัย (Research Article)

พลังงานต่อผู้โดยสารต่ำกว่า Hitachi Series 1000 (6 Car) อย่างชัดเจน [8]

2) การวางแผนการเดินทางแบบยืดหยุ่น การจัดรูปแบบการเดินทางที่ผสมผสาน Hitachi Series 1000 (6 Car) และ Hitachi Series 2000 (4 Car) ตามช่วงเวลา สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานและลดต้นทุนการดำเนินงาน [5]

3) การสนับสนุนการจัดซื้อและปรับปรุงขบวนรถในอนาคต ข้อมูลเชิงประจักษ์จากการศึกษานี้สามารถใช้เป็นหลักฐานประกอบการตัดสินใจในการจัดซื้อหรือปรับปรุงขบวนรถใหม่ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพด้านพลังงาน [7], [11]

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณทางศูนย์วิศวกรรมระบบราง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์และบริษัท รถไฟฟ้า ร.ฟ.ท. จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการสืบค้นข้อมูลและทำวิจัยสำหรับค่าพลังงานไฟฟ้าเพื่อมาเปรียบเทียบได้ตามหัวข้อของงานวิจัยได้ และขอขอบคุณกองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ที่ได้รับพิจารณาเพื่อเผยแพร่บทความวิชาการนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Sara-Rail (สาระ-รถไฟ), "รถไฟฟ้า Hitachi Series 1000 และ Hitachi Series 2000," Facebook, 2023. [Online]. Available: <https://www.facebook.com/SaraRail.TH/photos>. [Accessed: Nov. 15, 2024].
- [2] พงศธร เหล่าอัน, ธเนศ เสถียรนาม, วิชุดา เสถียรนาม, นวรงค์ ชลคุป, พีรวัฒน์ สายสิริรัตน์, และ ญัฐพล พรสัตยวงศ์, "ดัชนีประสิทธิภาพ

การใช้พลังงานและการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของรถโดยสารประจำทางในเมืองขอนแก่น," *วารสารวิจัย มข. (ฉบับบัณฑิตศึกษา)*, ปีที่ 22, ฉบับที่ 3, หน้า 22-26, ก.ค.-ก.ย. 2565.

- [3] ภาณุพงศ์ นันทสินธุ์, ดนัย นิลสุวรรณ, พรอนันต์ กิจอมรชัย, สิปปภาส สิริเกษมสุข, ศุภชัย เหมือนโพธิ์, และ ดำรง ถาวร, "ปัจจัยที่ส่งผลต่อการตัดสินใจเลือกใช้บริการรถโดยสารสาธารณะพลังงานไฟฟ้า," *วารสารมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์*, ปีที่ 2, ฉบับที่ 2, หน้า 55-58, ก.ค.-ธ.ค. 2561.
- [4] Q. Zhang, H. Yu, X. Su, and Y. Li, "Energy Consumption Analysis of High-Speed Trains under Real Vehicle Test Conditions," *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2022, pp. 1-13, May 2022. DOI: 10.1155/2022/1876579.
- [5] P. Zhao, Y. Li, B. Han, R. Yang, and Z. Liu, "Integrated Optimization of Rolling Stock Scheduling and Flexible Train Formation Based on Passenger Demand for an Intercity High-Speed Railway," *Sustainability*, vol. 14, no. 5650, pp. 1-22, May 2022. DOI: 10.3390/su14095650.
- [6] M. Kondo, "A Simplified Method to Calculate the Energy Consumed by Rolling Stock," *Railway Technology Avalanche*, no. 38, pp. 226-229, Mar. 2012.
- [7] R. Mu, F. Gao, H. Zhao, F. Xia, and Y. Fu, "Simulation of EMU: Vehicle Energy Consumption Evaluation," in *Proceedings of the 5th International Conference on*

บทความวิจัย (Research Article)

- Electrical Engineering and Information Technologies for Rail Transportation (EITRT) 2021*, Singapore: Springer, 2022, pp. 107-117. DOI: 10.1007/978-981-16-9913-9_10.
- [8] Bureau of Transportation Statistics (BTS), "Energy Intensity of Passenger Modes," [online]. Available: <https://www.bts.gov/content/energy-intensity-passenger-modes>. [Accessed: 2 Dec. 2025].
- [9] H. B. Zhao, "Relationship between Energy Consumption and Speed of the EMU," in *Proceedings of the 4th International Conference on Electrical & Electronics Engineering and Computer Science (ICEECS 2016)*, Beijing, China: Atlantis Press, 2016, pp. 579-583. DOI: 10.2991/iceeecs-16.2016.116.
- [10] N. Ghaviha, F. Wallin, E. Dahlquist, and M. Bohlin, "An Algorithm for Optimal Control of an Electric Multiple Unit," in *Proceedings of the 55th Conference on Simulation and Modelling (SIMS 55)*, Aalborg, Denmark, 2014, pp. 300-307.
- [11] J.-C. Jong and E.-F. Chang, "Models for estimating energy consumption of electric trains," *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, vol. 6, pp. 278-291, 2005.
- [12] บริษัท รถไฟฟ้า ร.ฟ.ท. จำกัด, "รถไฟฟ้าสายสีแดง เพิ่มความถี่เดินรถ 10-15 นาที เริ่ม 15 ส.ค.นี้," [ออนไลน์]. Available: [https://www.prachachat.net/breaking-](https://www.prachachat.net/breaking-news/news-1370409)
- [news/news-1370409](https://www.prachachat.net/breaking-news/news-1370409). [เข้าถึงเมื่อ: 15 พ.ย. 2024].
- [13] บริษัท รถไฟฟ้า ร.ฟ.ท. จำกัด, "สรุปรายงานประจำวัน (Daily Report)," เอกสารภายในองค์กร, บริษัท รถไฟฟ้า ร.ฟ.ท. จำกัด, 2024.

การผลิตคอนกรีตบล็อกเชิงตันไม่รับน้ำหนักจากส่วนผสมวัสดุขากต้นข้าวโพด

ทิพา ตันเจริญรัตน์^{1*}, นคร ไชยวงศ์ศักดิ์², ศศิชา สุขกาย¹, กฤษณะพันธุ์ ตันเจริญรัตน์¹, ไพโรจน์ ด้วงนคร³,
รัชณี ลือดารา³, วัฒนพล อยู่สวัสดิ์¹, มีชัย เทพนุรัตน์⁴ และ เสกสรรค์ วินยางค์กุล²

¹โปรแกรมวิชาสถาปัตยกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย

²โปรแกรมวิชาวิศวกรรมโลหการ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย

³โปรแกรมวิชาอุตสาหกรรมศิลป์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย

⁴โปรแกรมวิชาฟิสิกส์ คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย

*ผู้ประสานงานบทความฉบับนี้: tipa.tan@crru.ac.th โทรศัพท์: 098-6688-258

(รับบทความ: 31 ตุลาคม 2568; แก้ไขบทความ: 3 กุมภาพันธ์ 2569; ตอรับบทความ: 16 มีนาคม 2569)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร โดยเฉพาะแกลบด้านในของลำต้นข้าวโพดมาใช้เป็นส่วนผสมทดแทนมวลรวมบางส่วนในการผลิตคอนกรีตบล็อก โดยมุ่งวิเคราะห์ผลของการแทนที่มวลรวมด้วยแกลบข้าวโพดในสัดส่วนร้อยละ 15, 20 และ 25 ต่อคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของคอนกรีตบล็อก การทดลองครอบคลุมการประเมินความหนาแน่นและความต้านทานแรงอัด เพื่อพิจารณาความเหมาะสมของวัสดุที่พัฒนาขึ้นสำหรับการใช้งานเป็นบล็อกผนังไม่รับน้ำหนัก ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มปริมาณแกลบข้าวโพดในส่วนผสม ความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องจาก 2,453.4 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่สัดส่วนร้อยละ 15 เหลือ 2,243.8 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่สัดส่วนร้อยละ 25 ในทำนองเดียวกัน ค่าความต้านทานแรงอัดลดลงจาก 24.274 MPa ที่สัดส่วนร้อยละ 15 เหลือ 15.848 MPa ที่สัดส่วนร้อยละ 25 แนวโน้มดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณแกลบข้าวโพดส่งผลให้โครงสร้างภายในของคอนกรีตบล็อกมีความพรุนเพิ่มขึ้น ส่งผลต่อการลดลงของน้ำหนักและกำลังรับแรงอัด อย่างไรก็ตาม ค่าความต้านทานแรงอัดของคอนกรีตบล็อกทุกสัดส่วนยังอยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการใช้งานเป็นบล็อกผนังไม่รับน้ำหนัก เมื่อพิจารณาความสมดุลระหว่างน้ำหนักและกำลังรับแรงอัดพบว่าสัดส่วนการแทนที่ไม่เกินร้อยละ 20 ให้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุด โดยยังคงความแข็งแรงในระดับที่เพียงพอ พร้อมทั้งช่วยลดน้ำหนักของวัสดุได้อย่างมีนัยสำคัญ งานวิจัยนี้จึงแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของแกลบข้าวโพดในการประยุกต์ใช้เป็นส่วนผสมในคอนกรีตบล็อก และเป็นแนวทางหนึ่งในการพัฒนาวัสดุก่อสร้างจากทรัพยากรทางการเกษตรที่มีอยู่ในท้องถิ่นอย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะสมต่อการใช้งานจริง

คำสำคัญ: คอนกรีตบล็อกเชิงตันไม่รับน้ำหนัก ขากต้นข้าวโพด วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร

การอ้างอิงบทความ: ทิพา ตันเจริญรัตน์, นคร ไชยวงศ์ศักดิ์, ศศิชา สุขกาย, กฤษณะพันธุ์ ตันเจริญรัตน์, ไพโรจน์ ด้วงนคร, รัชณี ลือดารา, วัฒนพล อยู่สวัสดิ์, มีชัย เทพนุรัตน์ และ เสกสรรค์ วินยางค์กุล, "การผลิตคอนกรีตบล็อกเชิงตันไม่รับน้ำหนักจากส่วนผสมวัสดุขากต้นข้าวโพด," วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์, ปีที่ 4, ฉบับที่ 2, หน้า 72-88, 2569.

Development and Production of Solid Nonloadbearing Concrete Masonry Units Using Corn Stalks-Based Materials

Tipa Tancharoenrat^{1,*}, Nakorn Chaiwongsakda², Sasicha Sukkay¹, Krisanapan Tancharoenrat¹,
Pairoj Daungnakorn³, Ratchanee Reudara³, Wattanapon Ausawat¹, Meechai Tepnurat⁴
and Seksan Winyangkul²

¹ Architecture Program, Faculty of Industrial Technology, Chiang Rai Rajabhat University

² Logistics Engineering Program, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University

³ Industrial Arts Program, Faculty of Industrial Technology, Chiang Rai Rajabhat University

⁴ Physic Program, Faculty of Education, Chiang Rai Rajabhat University

*Corresponding Author: tipa.tan@crju.ac.th Tel: 098-6688-258

(Received: October 31, 2025; Revised: February 3, 2026; Accepted: March 16, 2026)

Abstract

This study aims to investigate the feasibility of utilizing agricultural waste, specifically the inner core of corn stalks, as a partial replacement of conventional aggregates in concrete block production. The research focuses on analyzing the effects of replacing natural aggregates with corn core at proportions of 15%, 20%, and 25% by volume on the physical and mechanical properties of concrete blocks. Experimental evaluations included density and compressive strength tests to assess the suitability of the developed material for non-load-bearing wall applications. The results indicate that increasing the corn core content in the mixture leads to a continuous reduction in density, decreasing from 2,453.4 kg/m³ at 15% replacement to 2,243.8 kg/m³ at 25% replacement. Similarly, compressive strength declined from 24.274 MPa at 15% replacement to 15.848 MPa at 25% replacement. This trend suggests that a higher proportion of corn core increases the internal porosity of the concrete matrix, resulting in reduced unit weight and compressive capacity. Nevertheless, the compressive strength values at all replacement levels remained within an acceptable range for non-load-bearing wall applications. Considering the balance between weight reduction and mechanical performance, a replacement ratio not exceeding 20% was found to provide the most suitable outcome. At this proportion, the concrete blocks maintained adequate structural integrity while achieving a meaningful reduction in density. The findings demonstrate the potential of corn core as an alternative aggregate component in concrete block manufacturing and highlight its applicability as a locally available agricultural resource for producing lightweight construction materials suitable for practical implementation.

Keywords: Solid Nonloadbearing Concrete Masonry Units, Corn Stalk, Agricultural Waste

Please cite this article as: T. Tancharoenrat, N. Chaiwongsakda, S. Sukkay, K. Tancharoenrat, P. Daungnakorn, R. Reudara, W. Ausawat, M. Tepnurat and S. Winyangkul, "Development and Production of Solid Nonloadbearing Concrete Masonry Units Using Corn Stalks-Based Materials," *The Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University*, vol. 4, no. 2, pp. 72-88, 2026.

บทความวิจัย (Research Article)

1. บทนำ

ปัญหามลพิษทางอากาศจากการเผาวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเป็นหนึ่งในปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย โดยเฉพาะจังหวัดเชียงราย ซึ่งหลังฤดูเก็บเกี่ยวจะมีซากต้นข้าวโพดจำนวนมากที่เกษตรกรนิยมเผาทิ้งในพื้นที่โล่งเพื่อเตรียมพื้นที่เพาะปลูกใหม่ การเผาดังกล่าวก่อให้เกิดฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 และก๊าซเรือนกระจกในปริมาณสูง ส่งผลกระทบต่อคุณภาพอากาศ สุขภาพของประชาชน และระบบนิเวศโดยรวม ดังนั้น การหาวิธีการจัดการวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรให้เกิดประโยชน์สูงสุดจึงเป็นแนวทางสำคัญในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน

ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา แนวคิดการพัฒนาวัสดุก่อสร้างสีเขียว (Green Construction Materials) ได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้นทั้งในระดับประเทศและระดับนานาชาติ คอนกรีตบล็อก หรือ อิฐบล็อก ถือว่าเป็นวัสดุก่อสร้างที่นิยมนำมาใช้ก่อผนังภายในอาคารเนื่องจากมีความแข็งแรง ทนไฟ ช่วยระบายความร้อนจากภายในสู่ภายนอกอาคารได้ ราคาประหยัดและก่อสร้างได้รวดเร็ว อย่างไรก็ตามคอนกรีตบล็อกที่ผลิตในเชิงพาณิชย์ส่วนใหญ่ใช้ปูนซีเมนต์และน้ำ ผสมเข้ากับวัสดุผสมละเอียด หินฝุ่นและทราย ซึ่งกระบวนการผลิตมีการใช้พลังงานและปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณมาก เพื่อแก้ไขปัญหาเหล่านี้ นักวิจัยจึงมองหาวัสดุทางเลือกที่เหลือใช้จากทางการเกษตรมาใช้เป็นส่วนผสมของวัสดุก่อสร้าง เพื่อให้เกิดการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

ในบรรดาวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรทั้งหมด ซากต้นข้าวโพดถือเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมเนื่องจากเส้นใยจากแกนของลำต้นข้าวโพดสั้นและละเอียด มีความยืดหยุ่นเพราะมอดูลัสมีค่าต่ำ ความหนาแน่นต่ำน้ำหนักจึงเบาเหมาะสำหรับการนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์หรือทรายบางส่วนในคอนกรีตบล็อก ช่วยลดความหนาแน่นของวัสดุโดยไม่ทำให้กำลังอัดลดลงมากนัก นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มความ

พรุนและคุณสมบัติการเป็นฉนวนกันความร้อน งานวิจัยที่ผ่านมาได้ยืนยันว่าการใช้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในการผลิตคอนกรีตบล็อก ไม่เพียงแต่ช่วยลดน้ำหนักของโครงสร้าง แต่ยังช่วยลดปริมาณของเสียและรอยเท้าคาร์บอน (Carbon Footprint) จากกระบวนการก่อสร้างอีกด้วย

ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและผลิตคอนกรีตบล็อกเชิงต้นไม่รับน้ำหนักจากแกนด้านในลำต้นข้าวโพด ซึ่งมีความหนาแน่นต่ำมาก และโครงสร้างพาราเร็นไคมา (Parenchyma Structure) เด่นชัด แตกต่างจากงานส่วนใหญ่ที่ใช้เปลือก ชัง หรือ แก้วซีเมนต์ อีกทั้งได้กำหนดขนาดอนุภาคควบคุมที่ 0.5 มิลลิเมตร (มม.) เพื่อให้มีลักษณะใกล้เคียงทรายหยาบ และสามารถแทนที่เชิงปริมาตรได้ โดยแกนด้านในลำต้นข้าวโพดเพื่อใช้เป็นวัสดุก่อสร้างทางเลือกที่ยั่งยืนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยเน้นการปรับสัดส่วนของส่วนผสมให้เหมาะสม การทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางกลของอิฐบล็อก การดำเนินงานประกอบด้วยเตรียมส่วนผสม ปูนตีสีเมนต์ น้ำ ทราย และซากต้นข้าวโพด เพื่อทำการผสม การขึ้นรูป การบ่ม และการทดสอบสมบัติของอิฐตามมาตรฐานอุตสาหกรรมไทย [1] (มอก. 1776-2560) ผลลัพธ์ของงานนี้คาดว่าจะช่วยส่งเสริมการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์ชุมชน และเป็นแนวทางในการลดมลพิษทางอากาศในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทยอย่างยั่งยืน

2. วัตถุประสงค์

1) ทดสอบออกแบบส่วนผสมวัสดุที่จัดทำคอนกรีตบล็อกเชิงต้นไม่รับน้ำหนักจากส่วนผสมวัสดุแกนด้านในลำต้นข้าวโพด

2) ประเมินและทดสอบประสิทธิภาพคอนกรีตบล็อกเชิงต้นไม่รับน้ำหนักจากส่วนผสมวัสดุแกนด้านในลำต้นข้าวโพดให้มีความแข็งแรงตามผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม และทดสอบทางวัสดุศาสตร์

บทความวิจัย (Research Article)

3. ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

การพัฒนาคอนกรีตบล็อกเชิงตันไม่รับน้ำหนักจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรถือเป็นแนวทางสำคัญที่ช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมและเพิ่มมูลค่าให้กับของเหลือใช้ทางการเกษตร โดยเฉพาะในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทยซึ่งประสบปัญหาการเผาซากต้นข้าวโพดหลังการเก็บเกี่ยว ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 ที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม [2] การนำวัสดุเหลือใช้จากต้นข้าวโพดมาผลิตเป็นวัสดุก่อสร้างประเภทผนังอาคารจึงเป็นแนวทางที่ตอบโจทย์ต่อการจัดการทรัพยากรอย่างยั่งยืน และยังสอดคล้องกับแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) ที่มุ่งเน้นการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าและลดการเกิดของเสีย

คอนกรีตบล็อก (Concrete Masonry Units) เป็นวัสดุก่อสร้างที่มีคุณสมบัติน้ำหนักเบา ช่วยลดภาระน้ำหนักของโครงสร้างอาคาร ก่อสร้างง่ายและราคาถูก [3] ผนังคอนกรีตบล็อกแบ่งออกเป็น 2 ประเภทตามหลัก มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม หรือ มอก. ได้แก่ คอนกรีตบล็อกรับน้ำหนัก (Nonloadbearing Concrete Masonry Unit) ใช้สำหรับผนังที่ออกแบบโดยให้รับน้ำหนักบรรทุกและน้ำหนักตัวเอง และคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก (Loadbearing Concrete Masonry Unit) ใช้สำหรับผนังที่ออกแบบโดยไม่รับน้ำหนักบรรทุก นอกจากน้ำหนักตัวเอง (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2564) [1] โดยทั่วไป การผลิตคอนกรีตบล็อกจะใช้ส่วนผสมที่มีปูนซีเมนต์ น้ำ หินฝุ่นและทราย ซึ่งมีส่วนต่อการสร้างผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการผลิตส่งผลต่อการเกิดภาวะเรือนกระจก [4] ดังนั้นการใช้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเป็นส่วนผสมทดแทนบางส่วนของทรายหรือปูนซีเมนต์จึงเป็นแนวทางที่ช่วยลดทั้งต้นทุนและผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม

วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น แกลบ ฟางข้าว ชังข้าวโพด และซากต้นข้าวโพด มีศักยภาพสูงในการนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนในงานก่อสร้าง เนื่องจากมีเส้นใยธรรมชาติที่สามารถยึดเกาะกับปูนซีเมนต์ได้ดี และมีความหนาแน่นต่ำ [5] การใช้วัสดุเหล่านี้สามารถลดปริมาณของเสียจากการเกษตรและลดการเผาทำลายที่เป็นสาเหตุของมลพิษทางอากาศ งานของ Ahmad et al. (2025) [6] ชี้ให้เห็นว่าการนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาแปรรูปเป็นวัสดุก่อสร้างสามารถช่วยลดการปล่อยฝุ่น PM2.5 [7,8] ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังสร้างรายได้เสริมให้กับเกษตรกรและชุมชนท้องถิ่น

ต้นข้าวโพดเป็นวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรที่มีปริมาณมากในประเทศไทย โดยเฉพาะในจังหวัดเชียงราย และเชียงใหม่ ซึ่งมีการปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เป็นจำนวนมาก ส่วนประกอบของลำต้นข้าวโพดแบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ เปลือกของ ลำต้น (Stalk Rind) และแกนด้านในของลำต้นข้าวโพด (Stalk Pith) โดยพบคุณสมบัติเส้นใยจากแกนของลำต้นข้าวโพดจะสั้นและละเอียดกว่า มีปริมาณเซลล์พืชพื้นฐานหรือพาราเณคิมา (Parenchyma) และท่อลำเลียง (Vessel) สูงที่สุด [5] ดังนั้นจึงมีความยืดหยุ่นเพราะมอดูลัสมีค่าต่ำ ความหนาแน่นต่ำน้ำหนักจึงเบาเหมาะสำหรับการนำมาเป็นส่วนผสมของอิฐก่อผนัง [9] คุณสมบัติเหล่านี้ทำให้ซากต้นข้าวโพดสามารถนำมาใช้แทนทรายบางส่วนในส่วนผสมของคอนกรีตบล็อกได้อย่างมีประสิทธิภาพ Saowanee Suksa. เมื่อปี 2016 [10] ศึกษาการใช้ต้นข้าวโพดแทนทรายบางส่วนในคอนกรีตมวลเบา พบว่าช่วยลดความหนาแน่นของคอนกรีตลงได้-โดยมีกำลังอัดเฉลี่ยอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน อีกทั้งต้นทุนการผลิตยังถูกกว่าตามท้องตลาดทั่วไป งานของ Pongsak Jittabut เมื่อปี 2019 [11] พบว่า การศึกษาค่าการนำความร้อนของคอนกรีตบล็อกผสมด้วยใบข้าวโพดสามารถลดการนำความร้อนเข้าสู่อาคารได้ถึงร้อยละ 54.93 ซึ่งการใช้วัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรสามารถพัฒนาคุณสมบัติการ

บทความวิจัย (Research Article)

เป็นฉนวนกันความร้อนได้เป็นอย่างดี โดยการใช้ซากต้นข้าวโพดเป็นวัสดุผสมในคอนกรีตบล็อกหรืออิฐบล็อกจึงเป็นแนวทางหนึ่งที่ช่วยส่งเสริมการใช้วัสดุท้องถิ่นและลดการพึ่งพาทรัพยากรจากภายนอก

การนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรไปใช้ในระดับอุตสาหกรรมจำเป็นต้องพิจารณาความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์และความต่อเนื่องของห่วงโซ่อุปทานอย่างรอบด้าน อย่างไรก็ตาม วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือแกนด้านในลำต้นข้าวโพด (Stalk Pith) ซึ่งเป็นส่วนที่มีมูลค่าเชิงพาณิชย์ต่ำและในหลายพื้นที่ยังถูกกำจัดด้วยการเผา มากกว่าส่วนที่ใช้เป็นอาหารสัตว์โดยตรง จึงลดการแข่งขันเชิงทรัพยากรกับภาคเกษตรกรรมหลัก แนวทางการประยุกต์ใช้ที่เหมาะสมอาจเริ่มในระดับชุมชนหรือโรงงานขนาดเล็กในพื้นที่เพาะปลูกเพื่อลดต้นทุนการขนส่งและเพิ่มมูลค่าในท้องถิ่น สอดคล้องกับแนวคิดการใช้ทรัพยากรหมุนเวียนและการพัฒนาอุตสาหกรรมฐานชีวมวล งานวิจัยก่อนหน้านี้ชี้ให้เห็นว่าวัสดุจากลำต้นข้าวโพดสามารถพัฒนาเป็นวัสดุเสริมแรงหรือวัสดุเชิงประกอบในงานก่อสร้างได้อย่างมีศักยภาพ [12-15] และมีแนวโน้มสนับสนุนความยั่งยืนด้านสิ่งแวดล้อมเมื่อประเมินในระดับระบบ [16], [17] ดังนั้น การแสดงความคุ้มค่าเชิงเปรียบเทียบในอนาคตควรครอบคลุมการวิเคราะห์ต้นทุนตลอดวงจรชีวิต (Life Cycle Cost) และการประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ (LCA) ควบคู่กับการเปรียบเทียบสมรรถนะเชิงกลและเชิงพลังงานกับผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์ เพื่อยืนยันศักยภาพเชิงอุตสาหกรรมอย่างเป็นรูปธรรม

จากการศึกษารวบรวมทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่าการผลิตคอนกรีตบล็อกจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรจากต้นข้าวโพด เป็นแนวทางที่มีศักยภาพสูงทั้งในเชิงสิ่งแวดล้อม เศรษฐกิจ และเทคโนโลยี เนื่องจากสามารถลดปัญหาการเผาทำลาย ลดมลพิษทางอากาศ และเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือใช้ ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางการพัฒนาอุตสาหกรรมวัสดุก่อสร้างที่ยั่งยืนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมในปัจจุบัน

4. วิธีดำเนินการวิจัย

4.1 การดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลัก ได้แก่

1) การเตรียมวัสดุ โดยเก็บซากต้นข้าวโพดจากพื้นที่อำเภอเทิง จังหวัดเชียงราย ทำการทำความสะอาด คัดแยกเปลือกออกจากแกนด้านในลำต้นข้าวโพด บดละเอียด และตากแห้ง

2) การออกแบบส่วนผสม โดยปรับสัดส่วนของแกนด้านในลำต้นข้าวโพด ปูนซีเมนต์ หินทราย และน้ำ เพื่อให้ได้อัตราส่วนที่เหมาะสม

3) การผลิตอิฐโดยใช้แม่พิมพ์ขนาดมาตรฐาน มอก. 1776-2560 และบ่มภายใต้อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 28 วัน

4) การทดสอบสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความหนาแน่น และกำลังอัด เพื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมโดยผลกำลังอัดที่ได้จากการทดสอบลูกบาศก์ตาม มอก. 1776-2560 เพื่อเปรียบเทียบแนวโน้มความแข็งแรงของส่วนผสมต่าง ๆ โดยส่วนผสมถูกออกแบบสำหรับการผลิตคอนกรีตเชิงต้นไม่รับน้ำหนักโดยการทดสอบกำลังอัดในงานวิจัยนี้ใช้ตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 50 มม. เพื่อประเมินศักยภาพเชิงวัสดุภายใต้สภาวะควบคุม โดยค่าที่ได้ จึงสะท้อนสมบัติในระดับวัสดุ (Material Level) แต่ไม่สามารถนำไปเปรียบเทียบกับเกณฑ์ผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อกเชิงต้นไม่รับน้ำหนัก มอก. 2895-2564 (TIS 2895-2564) [18] ได้โดยตรง แต่ใช้เป็นข้อมูลประกอบเพื่อประเมินแนวโน้มและความเป็นไปได้ของการพัฒนาในระดับบล็อกจริง โดยพิจารณาจากขนาดตัวอย่าง (Size Effect) จากทฤษฎีและผลการศึกษาด้าน Size Effect ในวัสดุพบว่ากำลังอัดของตัวอย่างขนาดเล็กมีแนวโน้มสูงกว่าตัวอย่างขนาดใหญ่ประมาณ 10-25% [19,20] ดังนั้นค่ากำลังอัดที่ได้จากลูกบาศก์ขนาด 50 มม.

บทความวิจัย (Research Article)

จะมีค่าที่สูงกว่าค่าที่วัดได้จากบล็อกขนาดจริงตาม
มอก. 2895-2564

โดยตัวแปรในการออกแบบการทดลองให้
ครอบคลุมตัวแปรหลักที่มีผลโดยตรงต่อคุณสมบัติทาง
กายภาพและกำลังอัด ได้แก่ สัดส่วนการแทนที่แกน
ด้านในลำต้นข้าวโพดที่ 15%, 20% และ 25% ภายใต้
เงื่อนไขควบคุมเดียวกัน ทั้งด้านอัตราส่วนน้ำต่อ
ซีเมนต์ ขนาดอนุภาค (0.5 มม.) และระยะเวลาบ่ม 28 วัน
ซึ่งแกนด้านในลำต้นข้าวโพดถูกบดละเอียดและร่อน
คัดขนาดก่อนนำไปผสม เพื่อให้มีการกระจายตัว
สม่ำเสมอภายในเมทริกซ์ปูนซีเมนต์ และลดความ
แปรปรวนของขนาด

การสำรวจและวิเคราะห์ลักษณะของต้นข้าวโพด
จากการทบทวนวรรณกรรมถึงส่วนประกอบของต้น
ข้าวโพดที่เหมาะสมในการนำมาเป็นส่วนผสมใน
คอนกรีตบล็อก พบว่า ส่วนของลำต้นข้าวโพด
เหมาะสมที่สุด และพบว่าเป็นพืชเศรษฐกิจที่ปลูกกัน
มากในอำเภอเทิง จึงได้ติดต่อเกษตรกรในพื้นที่นำซาก
ต้นข้าวโพด มาวิเคราะห์และสำรวจลักษณะของต้น
ข้าวโพด โดยสามารถวิเคราะห์ได้ดังต่อไปนี้

1) ต้นข้าวโพด มีส่วนของใบที่กางออกรูปทรง
เรียวยาว อีกส่วนเป็นกาบใบหุ้มอยู่ตามลำต้น ในส่วน
ของลำต้นพบลักษณะตั้งตรง เป็นทรงกระบอกและ
เป็นปล้อง ๆ คล้ายต้นไผ่

2) ส่วนลำต้นข้าวโพด มีลักษณะ 2 เนื้อวัสดุ

(1) เปลือกของลำต้นข้าวโพด เมื่อแห้งแล้วมี
เนื้อผิวที่แข็ง มีสีเหลืองน้ำตาลอ่อน สามารถนำมา
บดละเอียดเพื่อทำการทดสอบเป็นส่วนผสมอิฐได้

(2) แกนด้านในของลำต้นข้าวโพด เป็นเนื้อ
ผิวที่น้ำหนักเบา สีขาว มีความเหนียว มีรูพรุนเล็กน้อย
สามารถนำมาบดละเอียดเพื่อทำการทดสอบเป็น
ส่วนผสมอิฐได้ ตามภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แกนด้านในของลำต้นข้าวโพด

3) การเลือกชิ้นส่วน ใช้แกนด้านในของลำต้น
ข้าวโพด เข้าสู่ขั้นตอนการบดละเอียด แล้วคัดแยก
ขนาดเนื้อวัสดุเพื่อทำการคัดเลือกขนาดที่เหมาะสม
สำหรับการหาสัดส่วนของส่วนผสมคอนกรีตบล็อกใน
การทดลอง ขั้นตอนการทำงาน

(1) นำต้นข้าวโพดมาตัดใบและแกะกาบใบที่
หุ้มอยู่ทิ้งให้เหลือเพียงลำต้น

(2) นำลำต้นข้าวโพดเข้าเครื่องตัดกิ่งไม้เพื่อ
สะดวกต่อการแกะเอาแกนด้านในของลำต้นข้าวโพด

(3) ทำการตัดและคว้านเนื้อแกนด้านในของ
ลำต้นข้าวโพด

(4) นำชิ้นส่วนแกนด้านในของลำต้นข้าวโพด
มาปั่นด้วยเครื่องปั่นแบบละเอียด

(5) นำตะแกรงมากรองแยกชิ้นส่วนออกเป็น
สี่ขนาด มี 4 ตะแกรง ดังนี้

- ขนาดรู 1 มม.
- ขนาดรู 0.5 มม.
- ขนาดรู 0.25 มม.
- ขนาดรู 0.1 มม.

วิเคราะห์และเลือกขนาดแกนด้านในของลำต้น
ข้าวโพด โดยเลือกใช้เป็นขนาดความละเอียด 0.5 มม.
(เทียบตามขนาดของทรายหยาบในขบวนการทำอิฐ
ก่อสร้าง)

บทความวิจัย (Research Article)

ทำการทดลอง อัตราส่วนการผสมแกนด้านใน
ของลำต้นข้าวโพดในการทำอิฐก่อสร้างด้วย เพลต
ทดลองการทำอิฐก่อสร้างขนาด 5 เซนติเมตร (cm) x
5 เซนติเมตร (cm)

4.2 การหาอัตราส่วนผสม

การหาอัตราส่วนผสมของวัสดุผสมสำหรับ
คอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก ตามตารางที่ 1 ของ
อัตราส่วนผสมของอิฐก่อสร้าง ตามมาตรฐาน

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของวัสดุผสมสำหรับคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก

3	ส่วนผสมทั้งหมด (ร้อยละของน้ำหนักมวลรวม)			
	ปูนซีเมนต์	ทราย	แกนด้านในลำต้นข้าวโพด	มวลรวมทั้งหมด
1 (15%)	25	60	15	100
2 (20%)	25	55	20	100
3 (25%)	25	50	25	100
ส่วนผสมทั้งหมด (ร้อยละของปริมาตร รวม 0.5 ลิตร)				
สูตร	ปูนซีเมนต์ (ml)	ทราย (ml)	แกนด้านในลำต้นข้าวโพด (ml)	ปริมาตรรวมทั้งหมด (ml)
1 (15%)	110	330	60	500
2 (20%)	110	310	80	500
3 (25%)	110	290	100	500

หมายเหตุ: ml คือ มิลลิลิตร

เมื่อพิจารณา $(25 : 60 : 15) = (1 : 2.4 : 0.6)$
โดยน้ำหนัก ความหนาแน่น ปูนซีเมนต์ 3,150
กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m^3) ค่าความ
ถ่วงจำเพาะ 3.15 ความหนาแน่น ทราย 2,660
 kg/m^3 ค่าความถ่วงจำเพาะ 2.66 ความหนาแน่น
แกนด้านในลำต้นข้าวโพด 40 kg/m^3 ค่าความ
ถ่วงจำเพาะ 0.04 ในการทดสอบใช้ลูกปูน ขนาด
(50)(50)(50) ลูกบาศก์มิลลิเมตร (mm^3) ซึ่งมีปริมาตร
125 ลูกบาศก์เซนติเมตร (cm^3) จำนวน 3 ลูก โดยจะ
ใช้ปริมาณของ ส่วนผสมที่ 125(3) มีปริมาตร 375 cm^3

ดังนั้นในการทำส่วนผสม จะดำเนินการผสมที่
500 cm^3 หรือ 0.5 ลิตร เมื่อ

ใช้อัตราส่วน $(25 : 75) = (1 : 3)$ ดังนั้น อัตราส่วน
โดยปริมาตร

ของ ปูนซีเมนต์ $1/3.15 = 0.317$

ของ ทราย $3/2.66 = 1.128$

ดังนั้นอัตราส่วนโดยปริมาตรเป็น

$(0.317 : 1.128) = (1 : 3.56)$

ดังนั้น ถ้าผสม 0.5 ลิตร พิจารณา ปริมาตรรวม
 $1 + 3.56 = 4.56$

เมื่อพิจารณาในอัตราส่วนโดยปริมาตรของแกน
ด้านในลำต้นข้าวโพดที่ 15% ดังนั้น ทรายที่ใช้

บทความวิจัย (Research Article)

0.39(0.85) มีปริมาตร 330 มิลลิลิตร (ml) ดังนั้น แกนด้านในลำต้นข้าวโพดที่ใช้ 0.39(0.15) มีปริมาตร 60 ml ดังนั้น ปูนซีเมนต์ ที่ใช้ มีปริมาตร 110 ml

ในอัตราส่วนโดยปริมาตรของแกนด้านในลำต้นข้าวโพดที่ 15% ปูนซีเมนต์ ที่ใช้ มีปริมาตร 110 ml ทราายที่ใช้ มีปริมาตร 330 ml แกนด้านในลำต้นข้าวโพดที่ใช้ มีปริมาตร 60 ml ในการผสมที่ปริมาตร 0.5 ลิตร

เมื่อพิจารณาในอัตราส่วนโดยปริมาตรของแกนด้านในลำต้นข้าวโพดที่ 20% ดังนั้น ทราายที่ใช้ 0.39(0.80) มีปริมาตร 310 ml ดังนั้น แกนด้านในลำต้นข้าวโพดที่ใช้ 0.39(0.20) มีปริมาตร 80 ml ดังนั้น ปูนซีเมนต์ ที่ใช้มีปริมาตร 110 ml

เมื่อพิจารณาในอัตราส่วนโดยปริมาตรของแกนด้านในลำต้นข้าวโพดที่ 25% ดังนั้น ทราายที่ใช้ 0.39(0.75) มีปริมาตร 290 ml ดังนั้น แกนด้านในลำต้นข้าวโพดที่ใช้ 0.39(0.25) มีปริมาตร 100 ml ดังนั้น ปูนซีเมนต์ ที่ใช้มีปริมาตร 110 ml

โดยช่วงร้อยละ 15–25 ของน้ำหนักมวลรวมถูกเลือกเพื่อเป็นช่วงการทดลองที่ครอบคลุมระดับการแทนที่ต่ำ กลาง และสูง ภายใต้ข้อจำกัดด้านความต่อเนื่องของโครงสร้างเนื้อคอนกรีต ความสามารถในการผลิตจริง และความสอดคล้องกับมาตรฐานการใช้งานผนังไม่รับน้ำหนัก ทั้งนี้เพื่อวิเคราะห์จุดสมดุลระหว่างการเพิ่มสัดส่วนวัสดุธรรมชาติและการรักษาสรรถนะเชิงกลของผลิตภัณฑ์อย่างเป็นระบบ

4.3 การนำแกนด้านในลำต้นข้าวโพดมาเทียบเป็นส่วนผสมการทำอิฐก่อสร้าง

จากการคำนวณตามสูตรมาตรฐานด้านบนได้ตามตารางที่ 1 โดยนักวิจัยได้วิเคราะห์สัดส่วนแกนด้านในลำต้นข้าวโพด มาทดแทนทราายหยาบเป็น 3 สัดส่วน โดยเริ่มจาก สัดส่วน 15% โดยใช้เทมเพลต

ของ การทดสอบทำอิฐก่อสร้างขนาด 5 cm x 5 cm ตามขั้นตอนดังแสดงในตารางที่ 2 ดังนี้

ตารางที่ 2 ขั้นตอนการทำอิฐก่อสร้างขนาด 5 cm x 5 cm

ขั้นตอนวิธีการ	รูปภาพ
1. นำเพลตทดสอบการขึ้นรูปของอิฐก่อสร้างขนาด 5 cm x 5 cm	
2. นำปูนซีเมนต์มาผสม ปริมาตร 110 ml	
3. นำทราายหยาบมาผสม ปริมาตร 330 ml	
4. นำส่วนแกนด้านในลำต้นข้าวโพด ปริมาตร 60 ml	
5. นำเกียงคนส่วนผสมให้เข้ากันในถาดผสมขนาดเล็ก	
6. ตวงน้ำใสใน ปริมาตร 80 ml แล้วใช้เกียงคนส่วนผสมให้เข้ากัน	

บทความวิจัย (Research Article)

ตารางที่ 2 ขั้นตอนการทำอิฐก่อสร้างขนาด 5 cm x 5 cm (ต่อ)

ขั้นตอนวิธีการ	รูปภาพ
7. นำส่วนผสมของทั้งหมด มาใส่เพลดทอลอง 3 ช่อง โดยแบ่งเป็น 3 ชั้น	
8. ใช้ค้อนทุบ 32 ครั้งในพื้นที่ปริมาตรสี่เหลี่ยมจัตุรัส	
9. วางเพลดไว้ให้ปูนซีเมนต์เซตตัว 28 วัน	

การกำหนดอัตราส่วนผสมพื้นฐานสำหรับคอนกรีตบล็อกเชิงตันไม่รับน้ำหนัก โดยยึดแนวปฏิบัติการผลิตบล็อกทั่วไปในอุตสาหกรรมของอัตราส่วนโดยน้ำหนักต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร โดยสูตรควบคุมของคอนกรีตบล็อกเชิงตันถูกกำหนดที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ 320 kg/m³ ทราย 1,780 kg/m³ (ในการเปลี่ยนแปลง สูตร 15%, 20% และ 25% ลดปริมาณทรายใส่แกนด้านในลำต้นข้าวโพดตามที่กำหนด) และน้ำ 165 kg/m³ โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.52 ให้ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยประมาณ

2,260–2,300 kg/m³ การทดสอบความชื้นเหลวด้วยวิธี Slump Test ให้ค่า 18 ± 2 mm สำหรับสูตรควบคุม และลดลงตามสัดส่วนการแทนที่วัสดุชีวมวล ทั้งนี้เพื่อให้มั่นใจว่าส่วนผสมยังคงเหมาะสมต่อกระบวนการอัดขึ้นรูป และสามารถทำซ้ำการทดลองได้ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด

5. ผลการวิจัย

ผลการวิเคราะห์การทดสอบออกแบบส่วนผสมวัสดุที่จัดทำนวัตกรรมผลิตภัณฑ์สถาปัตยกรรมจากลำต้นข้าวโพดที่มีความแข็งแรงจากการทดสอบหาค่าความหนาแน่น และกำลังอัดคอนกรีตบล็อกที่ผลิตจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร โดยได้ทำการทดสอบกับตัวอย่างอิฐทั้งหมด 10 ก้อน แบ่งออกเป็น 3 สูตรผสมตามสัดส่วนของซึ่งข้าวโพดที่แตกต่างกัน ได้แก่ 15%, 20% และ 25% ผลการทดสอบค่าความหนาแน่น และกำลังอัดสูงสุด (Max Force) มีดังแสดงในตารางที่ 3 ต่อไปนี้

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบกำลังอัด (Max Force: kN)

สัดส่วนแกนด้านในลำต้นข้าวโพด	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย
15%	60.45	61.12	60.69
20%	45.5	51.83	49.71
25%	35.85	42.86	39.62

จากการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตบล็อกจากแกนด้านในลำต้นข้าวโพดทั้ง 3 สูตรผสม ผลการทดสอบกำลังอัดสูงสุดของคอนกรีตบล็อกเชิงตันไม่รับน้ำหนักที่ผสมแกนด้านในลำต้นข้าวโพดพบว่า เมื่อเพิ่มสัดส่วนแกนจาก 15% เป็น 20% และ 25% ค่ากำลังอัดเฉลี่ยลดลงจาก 60.69 kN เป็น 49.71 kN และ 39.62 kN ตามลำดับ ค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดใน

บทความวิจัย (Research Article)

แต่ละสัดส่วนก็ลดลงตามแนวเดียวกัน โดยค่าต่ำสุดลดจาก 60.45 เป็น 45.5 และ 35.85 kN และค่าสูงสุดลดจาก 61.12 เป็น 51.83 และ 42.86 kN แนวโน้มนี้แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มสัดส่วนแกนชีวมวลที่มีน้ำหนักเบาและพูนสูงเข้ามาในบล็อก ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงอัดลดลง เนื่องจากแกนลำต้นข้าวโพดไม่สามารถรับแรงอัดได้เท่ามวลรวมธรรมชาติของคอนกรีต แม้ว่ากำลังอัดจะลดลงตามสัดส่วนแกน แต่บล็อกยังสามารถใช้ก่อสร้างผนังไม่รับน้ำหนักได้ และสัดส่วนที่เหมาะสมเพื่อรักษากำลังอัดเพียงพอควรอยู่ที่ 15–20% จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าว ชี้ให้เห็นว่าสูตรผสม 20% ให้ทั้งประสิทธิภาพด้านกำลังอัดและความสม่ำเสมอที่ดีที่สุด ในขณะที่สูตร 15% ถึงแม้จะมีค่าเฉลี่ยค่อนข้างสูงแต่มีความไม่แน่นอนในการผลิตในทางตรงกันข้าม สูตร 25% ให้ผลลัพธ์ด้านกำลังอัดต่ำเกินไปสำหรับการนำไปใช้งาน

จากการวิเคราะห์สถิติแบบเปรียบเทียบเป็นคู่ (Post-Hoc Analysis) ของผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตบล็อกจากแกนด้านในลำต้นข้าวโพดสามารถสรุปความแตกต่างระหว่างสูตรผสมต่าง ๆ ได้ดังนี้

การเปรียบเทียบระหว่าง 15% และ 20% พบว่าความแตกต่างของกำลังอัดมีนัยสำคัญ สะท้อนให้เห็นว่า การเพิ่มสัดส่วนแกนลำต้นข้าวโพด 5% ทำให้กำลังอัดลดลงอย่างชัดเจน การเปรียบเทียบระหว่าง 15% และ 25% มีความแตกต่างที่ชัดเจนมากที่สุด แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มแกนชีวมวลมากที่สุดในกลุ่มทดลองส่งผลให้กำลังอัดลดลงอย่างมีนัยสำคัญ การเปรียบเทียบระหว่าง 20% และ 25% ก็พบความแตกต่างที่มีนัยสำคัญ แต่ระดับความแตกต่างไม่สูงเท่ากับการเปรียบเทียบกับ 15% การเพิ่มสัดส่วนแกนลำต้นข้าวโพดในบล็อกมีผลต่อกำลังอัดโดยมีแนวโน้มของกำลังอัดลดลงตามสัดส่วนแกนด้านในลำต้นข้าวโพดที่เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาพื้นที่กดที่ 25 cm^2 ซึ่งเท่ากับ 2500 mm^2 ดังนั้นเมื่อหาความต้านทานแรงอัดสุทธิ

ตามมาตรฐานมอก. 2895-2564 (TIS 2895-2564) มีความต้านทานแรงอัดสุทธิแต่ละก้อนไม่น้อยกว่า $3.45 \text{ MPa (N/mm}^2\text{)}$ และความต้านทานแรงอัดสุทธิเฉลี่ย ต้องไม่น้อยกว่า $4.14 \text{ MPa (N/mm}^2\text{)}$ และมาตรฐานค่าความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกเชิงตันไม่รับน้ำหนักดังแสดงในตารางที่ 4 และในการทดสอบสำหรับการหาค่าความหนาแน่นจากสูตร เพื่อทำการเทียบกับมาตรฐานในการแบ่งประเภทของอิฐดังแสดงในสมการที่ (1)

ตารางที่ 4 ความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกเชิงตันไม่รับน้ำหนัก หน่วยเป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ประเภท	ความหนาแน่น (ρ)
น้ำหนักเบา	$< 1,680$
น้ำหนักปานกลาง	$1,680 \leq \rho < 2,000$
น้ำหนักทั่วไป	$\geq 2,000$

การคำนวณค่าความหนาแน่นจากสูตร

$$\rho = \frac{m_d(1000)}{m_s - m_i} \quad (1)$$

โดย ρ คือความหนาแน่นเป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร, m_s คือมวลชิ้นทดสอบเมื่ออิมมัวด้วยน้ำ เป็นกิโลกรัม, m_d คือมวลชิ้นทดสอบเมื่ออบแห้ง เป็นกิโลกรัม, m_i คือมวลชิ้นทดสอบเมื่อชั่งในน้ำ เป็นกิโลกรัม

จากการพิจารณาหาค่าความต้านทานแรงสุทธิของคอนกรีตบล็อกจากแกนด้านในลำต้นข้าวโพดที่ได้ทำการออกแบบสามารถพิจารณาผลได้ดังตารางที่ 5 โดยการทดสอบกลุ่มตัวอย่างของสัดส่วนแกนด้านในลำต้นข้าวโพด 10 ชิ้นได้ค่าค่าต่ำสุด ค่าสูงสุดและค่าเฉลี่ย

บทความวิจัย (Research Article)

โดยการผสมแกนด้านในลำต้นข้าวโพดลงในคอนกรีตบล็อกเชิงตันไม่รับน้ำหนัก ทำให้ความต้านทานแรงอัดลดลงอย่างชัดเจนตามสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น โดยที่ 15%–25% ของแกนชีวมวลทำให้ความแข็งแรงเฉลี่ยลดลงจาก 24.274 เป็น 15.848 N/mm²

ตารางที่ 5 ความต้านทานแรงอัดสุทธิคอนกรีตบล็อกจากแกนด้านในลำต้นข้าวโพด (N/mm²)

สัดส่วนแกนด้านในลำต้นข้าวโพด	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย
15%	24.18	24.448	24.274
20%	18.2	20.732	19.884
25%	14.34	17.144	15.848

ทุกสัดส่วนผสม (15–25%) ให้ค่าความต้านทานแรงอัดเฉลี่ยสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน 4.14 MPa โดยมากกว่าเกณฑ์ตั้งแต่ 3.8 ถึง 5.9 เท่า โดยมีค่าที่สูงกว่าผลด้าน Size Effect ที่ประมาณไว้ที่ 1.10–1.25 เท่า

ผลการทดลองค่าความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกเชิงตันไม่รับน้ำหนักที่ผสมแกนด้านในลำต้นข้าวโพดพบว่า เมื่อเพิ่มสัดส่วนแกนจาก 15% เป็น 20% และ 25% ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกเชิงตันไม่รับน้ำหนักที่ผสมแกนด้านในลำต้นข้าวโพดพบว่า 15%, 20% และ 25%

สัดส่วนแกนด้านในลำต้นข้าวโพด	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย
15%	2,398	2,528	2,453.4
20%	2,295	2,403	2,348.6
25%	2,198	2,290	2,243.8

โดยค่าเฉลี่ยความหนาแน่นลดลงจาก 2,453.4 เป็น 2,348.6 และ 2,243.8 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรตามลำดับ ค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดในแต่ละสัดส่วนก็ลดลงตามแนวเดียวกัน โดยค่าต่ำสุดลดลงจาก 2,398 เป็น 2,295 และ 2,198 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และค่าสูงสุดลดลงจาก 2,528 เป็น 2,403 และ 2,290 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร แนวโน้มนี้สะท้อนให้เห็นว่าแกนลำต้นข้าวโพดซึ่งเป็นวัสดุชีวมวลพรุนและน้ำหนักเบา เมื่อผสมในปริมาณสูงขึ้นจะลดปริมาณมวลรวมธรรมชาติในคอนกรีต ส่งผลให้ความหนาแน่นของบล็อกลดลง แต่แม้ที่สัดส่วนแกนด้านในลำต้นข้าวโพด 25% ความหนาแน่นเฉลี่ยยังคงมากกว่า 2,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ทำให้คอนกรีตบล็อกยังจัดอยู่ในประเภทน้ำหนักทั่วไปตามมาตรฐาน มอก. 2895-2564 การลดความหนาแน่นนี้ช่วยลดน้ำหนักบล็อก ทำให้ก่อสร้างง่ายและลดภาระโครงสร้าง ขณะเดียวกันค่าช่วงต่ำสุด–สูงสุดแสดงถึงความแปรปรวนจากกระบวนการผลิตและการกระจายตัวของวัสดุในบล็อก ซึ่งอยู่ในระดับที่สม่ำเสมอและเหมาะสมสำหรับการใช้งานผนังไม่รับน้ำหนัก

ในสูตรผสมที่เหมาะสม (แทนที่ทราย 20% โดยปริมาตรของมวลรวมละเอียด) ปริมาณแกนลำต้นข้าวโพดที่ใช้คิดเป็น 80 ml ต่อส่วนผสม 0.5 ลิตร หรือคิดเป็น 0.00008 m³ ต่อ 0.0005 m³ ของคอนกรีตบล็อกตัวอย่าง เทียบเท่าการแทนที่มวลรวมธรรมชาติประมาณ 16% โดยปริมาตร หากคำนวณในระดับ 1 m³ ของคอนกรีต จะสามารถลดการใช้ทรายได้ 0.16 m³ หรือ 425 kg (คำนวณจากความหนาแน่นทราย 2,660 kg/m³) ในด้านคาร์บอนฟุตพริ้นท์ การผลิตทรายมีค่าการปล่อยคาร์บอนโดยเฉลี่ย 0.005–0.01 kgCO₂e/kg ขณะที่ชีวมวลที่ไม่ผ่านกระบวนการเผาหรือแปรรูปหนักถือว่ามีค่าการปล่อยใกล้เคียงศูนย์ในขั้นต้น ดังนั้น การลดทราย 425 kg ต่อ 1 m³ สามารถลดการปล่อยคาร์บอนได้ 2.1–4.3 kgCO₂e ต่อ 1 m³ ของผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ หากพิจารณาว่าชีวมวล 1 kg ที่ถูกเผาจะปล่อย CO₂ อยู่

บทความวิจัย (Research Article)

1.6–1.8 kgCO₂e การนำแกนลำต้นข้าวโพดมาใช้แทนการเผาในปริมาณ 6.4 kg ต่อ 1 m³ (คำนวณจากความหนาแน่นชีวมวล 40 kg/m³ × 0.16 m³) จะช่วยลดการปล่อยคาร์บอนได้ 10–12 kgCO₂e ต่อ 1 m³ เพิ่มเติมในด้านต้นทุน วัสดุแกนลำต้นข้าวโพดในพื้นที่มีต้นทุนวัตถุดิบใกล้เคียง (เป็นของเหลือ) ต้นทุนหลักอยู่ที่การบดและคัดขนาด ซึ่ง

ประเมินเบื้องต้นไม่เกิน 300–500 บาทต่อตัน ขณะที่ทรายก่อสร้างมีราคา 350–500 บาทต่อตัน การแทนที่ทราย 425 kg ต่อ 1 m³ จะลดต้นทุนวัสดุได้ประมาณ 150–210 บาทต่อ 1 m³ ดังแสดงในตารางที่ 7 ซึ่งสะท้อนศักยภาพด้านความคุ้มค่าในระดับชุมชนหรือโรงงานใกล้เคียงวัตถุดิบ

ตารางที่ 7 การประเมินความคุ้มค่าเชิงปริมาณกรณีแทนที่ทราย 20% โดยปริมาตรของมวลรวมละเอียด (คิดต่อ 1 m³ ของคอนกรีตบล็อก)

รายการเปรียบเทียบ	กรณีคอนกรีตปกติ	กรณีแทนที่ทราย 20%	ผลต่าง/ผลประโยชน์ที่ได้
ปริมาณทรายที่ใช้	1.00 เทียบฐาน	0.84 m ³	ลดทราย 0.16 m ³
มวลทราย ($\rho = 2,660 \text{ kg/m}^3$)	2,660 kg	2,235 kg	ลด 425 kg
ปริมาณชีวมวล ($\rho \approx 40 \text{ kg/m}^3$)	0 kg	6.4 kg	ใช้ของเหลือทดแทน
การปล่อย CO ₂ จากทราย (0.005–0.01 kgCO ₂ e/kg)	13–27 kgCO ₂ e	11–22 kgCO ₂ e	ลด 2.1–4.3 kgCO ₂ e
CO ₂ ที่หลีกเลี่ยงจากการไม่เผาชีวมวล (1.6–1.8 kgCO ₂ e/kg)	0	หลีกเลี่ยง 10–12 kgCO ₂ e	ลดการปล่อยเพิ่ม
ศักยภาพลด CO ₂ รวม	–	–	12–16 kgCO ₂ e/m ³
ต้นทุนทราย (350–500 บาท/ตัน)	930–1,330 บาท	780–1,120 บาท	ลด 150–210 บาท/m ³
ต้นทุนชีวมวล (บด/คัดขนาด 300–500 บาท/ตัน)	–	2–3 บาท	ต้นทุนเพิ่มต่ำมาก

หมายเหตุ: kgCO₂e (kilogram of carbon dioxide equivalent) หมายถึง กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า

จากการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 7 การแทนที่ทราย 20% โดยปริมาตรสามารถลดการใช้ทรายได้ประมาณ 425 kg ต่อ 1 m³ ของผลิตภัณฑ์ ส่งผลให้ลดการปล่อยคาร์บอนจากกระบวนการได้ราว 2–4 kgCO₂e และหากพิจารณาการหลีกเลี่ยงการเผาชีวมวล จะสามารถลดการปล่อยได้รวมที่ 12–16 kgCO₂e ต่อ 1 m³ ขณะเดียวกัน ต้นทุนวัตถุดิบมี

แนวโน้มลดลงที่ 150–210 บาทต่อ 1 m³ เนื่องจากชีวมวลมีต้นทุนต่ำมากเมื่อเทียบกับทราย

6. อภิปรายและสรุปผล

จากผลการทดสอบคอนกรีตบล็อกที่ผสมแกนด้านในลำต้นข้าวโพดทั้ง 3 สูตร พบแนวโน้มที่ชัดเจนว่า การเพิ่มสัดส่วนแกนชีวมวลส่งผลให้ทั้ง ความ

บทความวิจัย (Research Article)

หนาแน่น และ กำลังอัดสูงสุด ของบล็อกทดลองอย่างต่อเนื่อง สำหรับสูตรผสม 15% มีกำลังอัดเฉลี่ย 60.69 kN ซึ่งถือว่าสูงสุดในกลุ่มทดลอง แสดงว่าบล็อกมีความแข็งแรงเพียงพอสำหรับการใช้งานผนังไม่รับน้ำหนัก และยังสามารถรับแรงอัดได้ดี สำหรับสูตรผสม 20% มีกำลังอัดเฉลี่ย 49.71 kN การลดลงนี้สะท้อนผลของการแทนที่มวลรวมธรรมชาติด้วยวัสดุชีวมวลที่มีน้ำหนักเบาและพรุน สำหรับสูตรผสม 25% มีกำลังอัดเฉลี่ยลดลงมากที่สุด 39.62 kN ตามลำดับ ทำให้บล็อกมีความสามารถรับแรงอัดลดลงอย่างมีนัยสำคัญ จากผลการทดลองพบว่าสูตรผสม 15–20% แกนด้านในลำต้นข้าวโพด เป็นช่วงที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก เนื่องจากยังคงความแข็งแรงเพียงพอในการรับแรงอัดในขณะเดียวกันก็ช่วยลดน้ำหนักบล็อก ทำให้ก่อสร้างง่ายและลดภาระโครงสร้าง สูตรที่เหมาะสมที่สุดคือสูตรผสมสัดส่วนแกนด้านในลำต้นข้าวโพด 20% เนื่องจากให้สมดุลที่ดีระหว่างความแข็งแรงและการลดน้ำหนัก มีกำลังอัดเฉลี่ย 49.71 kN โดยสูตรนี้ยังคงอยู่ในเกณฑ์น้ำหนักทั่วไปตามมาตรฐาน มอก. 2895-2564 และเหมาะสมต่อการใช้งานผนังไม่รับน้ำหนัก ทำให้สามารถลดปริมาณวัสดุและค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากผลการทดลองค่าความต้านทานแรงอัดสุทธิของคอนกรีตบล็อกที่ผสมแกนด้านในลำต้นข้าวโพดพบว่า ผลการทดสอบความต้านทานแรงอัดสุทธิของคอนกรีตบล็อกจากการผสมแกนด้านในลำต้นข้าวโพดพบว่าทุกสัดส่วนที่ทำการทดสอบ ได้แก่ 15%, 20% และ 25% ล้วนมีค่าความต้านทานแรงอัดเฉลี่ยสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด (4.14 MPa) อย่างมีนัยสำคัญ โดยให้ค่าเฉลี่ย 24.27 MPa, 19.88 MPa และ 15.85 MPa ตามลำดับ ซึ่งคิดเป็นค่าความต้านทานแรงอัดเฉลี่ยสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานประมาณ 5.86 เท่า, 4.80 เท่า และ 3.83 เท่าตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการนำวัสดุเหลือใช้จากลำต้นข้าวโพดมาใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีตบล็อกสามารถเพิ่มศักยภาพ

การใช้งานได้จริง แนวโน้มลดลงตามสัดส่วนการผสมสะท้อนให้เห็นว่า การเพิ่มสัดส่วนวัสดุชีวมวลที่มีน้ำหนักเบาและพรุนสูง ทำให้ความต้านทานแรงอัดของบล็อกทดลองอย่างชัดเจน เนื่องจากแกนลำต้นข้าวโพดไม่สามารถรับแรงอัดได้เท่ากับมวลรวมธรรมชาติของคอนกรีต ตาม มอก. 2895-2564 ที่รวมกับการพิจารณา Size Effect จากตัวอย่างในการทดสอบที่ 1.10–1.25 เท่า คอนกรีตบล็อกน้ำหนักทั่วไปควรมีความต้านทานแรงอัดเพียงพอสำหรับผนังไม่รับน้ำหนัก (Non-Load-Bearing) ที่สัดส่วน 25% ความต้านทานแรงอัดเฉลี่ยลดลงเหลือ 15.848 N/mm² แต่ยังเพียงพอสำหรับการใช้งานผนังไม่รับน้ำหนัก โดยการผสมแกนด้านในลำต้นข้าวโพดลงในคอนกรีตบล็อกเชิงต้นไม่รับน้ำหนัก ส่งผลให้ ความต้านทานแรงอัดลดลงตามสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากวัสดุชีวมวลมีน้ำหนักเบาและพรุนสูงแทนที่มวลรวมธรรมชาติที่รับแรงอัดได้ดี แต่บล็อกยังคงสามารถใช้ก่อผนังไม่รับน้ำหนัก ได้ โดยสัดส่วนที่เหมาะสมควรไม่เกิน 20% เพื่อรักษาความแข็งแรงเพียงพอ

ในส่วนของความต้านทานแรงอัดในระยะยาวหลังจากนำไปใช้งาน ซึ่งกระบวนการผลิตเส้นใยถูกบดละเอียดและถูกห่อหุ้มภายในเมทริกซ์ปูนซีเมนต์ซึ่งช่วยลดการสัมผัสกับปัจจัยภายนอกโดยตรง จึงคาดว่าจะชะลอการเสื่อมสภาพได้ในระดับหนึ่ง แม้หากเกิดการเปลี่ยนแปลงของเส้นใยในอนาคต ผลกระทบหลักที่อาจเกิดขึ้นคือการเพิ่มโพรงขนาดเล็กภายในเนื้อวัสดุและการลดลงของกำลังอัดบางส่วน แต่เนื่องจากผลิตภัณฑ์จัดอยู่ในกลุ่มคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก จึงมีความเสี่ยงเชิงโครงสร้างค่อนข้างต่ำ ทั้งนี้เพื่อเพิ่มความเชื่อมั่นในการใช้งานระยะยาว ควรมีการศึกษาต่อยอดในด้านการทดสอบแรงสภาพ และการประเมินการดูดซึมน้ำ รวมถึงการปรับปรุงสภาพเส้นใยก่อนผสม

การผสมแกนกลางลำต้นข้าวโพดในปริมาณที่เหมาะสม อาจช่วยเพิ่มคุณสมบัติบางอย่าง เช่น การการใช้วัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร แต่ยังคงความ

บทความวิจัย (Research Article)

หนาแน่นมากกว่า $2,000 \text{ kg/m}^3$ แสดงว่าบล็อกยังคงมี สัดส่วนของมวลรวมธรรมดา (ปูน และทราย) เป็นส่วนใหญ่ และ ยังคงอยู่ในกลุ่มคอนกรีตบล็อกแข็งตัน ไม่รับน้ำหนักชนิดน้ำหนักทั่วไป โดยการเพิ่มปริมาณ แกนลำต้นข้าวโพดในส่วนผสมของคอนกรีตบล็อกแข็งตันไม่รับน้ำหนัก ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นลดลงอย่างต่อเนื่องที่สัดส่วน 15%, 20% และ 25% ได้ค่าความหนาแน่นเฉลี่ย 2,453.4, 2,348.6 และ 2,243.8 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ค่าความหนาแน่นทั้งหมดมากกว่า $2,000$ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งยังอยู่ในเกณฑ์น้ำหนักทั่วไป ตามมาตรฐาน มอก. ซึ่งแกนลำต้นข้าวโพดจึงสามารถใช้เป็นวัสดุทดแทนบางส่วนเพื่อลดน้ำหนักของบล็อกได้ โดยไม่กระทบต่อมาตรฐานความหนาแน่นขั้นต่ำของบล็อกคอนกรีตน้ำหนักทั่วไป โดยงานวิจัยมุ่งพัฒนาคอนกรีตบล็อกที่มีคุณสมบัติน้ำหนักเบาจากสูตรปกติ แต่ผลการทดสอบพบว่าค่าความหนาแน่นของทุกสูตรยังคงมากกว่า $2,200 \text{ kg/m}^3$ ซึ่งอยู่ในช่วงคอนกรีตน้ำหนักปกติ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาเชิงแนวโน้ม พบว่าการเพิ่มสัดส่วนแกนด้านในลำต้นข้าวโพดส่งผลให้ความหนาแน่นลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยลดลงประมาณร้อยละ 8–9 เมื่อเทียบกับสูตรที่มีสัดส่วนต่ำสุด สะท้อนให้เห็นว่าการแทนที่มวลรวมบางส่วนด้วยวัสดุชีวมวลสามารถลดน้ำหนักรวมของผลิตภัณฑ์ได้จริง แม้ยังไม่ถึงระดับคอนกรีตมวลเบาตามนิยามมาตรฐานสากล ซึ่งขอบเขตของงานวิจัยมุ่งเน้นคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักตามมาตรฐาน มอก. 2895-2564 โดยต้องมีความแข็งแรงเพียงพอและสามารถใช้งานได้อย่างปลอดภัย การรักษาความหนาแน่นให้อยู่ในช่วงคอนกรีตน้ำหนักปกติ ขณะเดียวกันสามารถลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ และลดน้ำหนักรวมบางส่วนได้ จึงสะท้อนแนวทางการพัฒนาเชิงปรับปรุงสมรรถนะ (material optimization) มากกว่าการเปลี่ยนประเภทวัสดุ ดังนั้น ผลการทดลองจึงสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ในการลดน้ำหนักสัมผัสและเพิ่มความยั่งยืนของวัสดุ แม้ว่ายังไม่อยู่ในกลุ่มคอนกรีตมวลเบาอย่างสมบูรณ์ ซึ่งอาจเป็น

แนวทางพัฒนาต่อยอดในอนาคตจากแนวโน้มนี้ชี้ให้เห็นศักยภาพของการใช้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในการผลิตวัสดุทดแทนซีเมนต์ เพื่อเพิ่มความยั่งยืนและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยการประเมินเชิงปริมาณเบื้องต้นแสดงให้เห็นว่าการแทนที่ทรายบางส่วนด้วยแกนลำต้นข้าวโพดในสัดส่วน 20% สามารถลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ 425 kg/m^3 ลดการปล่อยคาร์บอนรวมในช่วง 12–16 $\text{kgCO}_2\text{e/m}^3$ และมีศักยภาพลดต้นทุนวัสดุได้ในระดับหนึ่ง ซึ่งสนับสนุนความสำคัญเชิงสิ่งแวดล้อมและเศรษฐศาสตร์

ผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์เชิงปริมาณอย่างชัดเจนระหว่างสัดส่วนการแทนที่แกนด้านในลำต้นข้าวโพดกับสมรรถนะของคอนกรีตบล็อก โดยเมื่อเพิ่มสัดส่วนจาก 15% เป็น 25% ค่ากำลังอัดลดลงจาก 24.27 MPa เป็น 15.85 MPa และความหนาแน่นลดลงจาก 2,453.4 เป็น 2,243.8 kg/m^3 ซึ่งเป็นไปตามกลไกวัสดุเชิงประกอบ เนื่องจากชีวมวลมีความพรุนและความหนาแน่นต่ำ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายแรงอัดลดลง อย่างไรก็ตาม ทุกสัดส่วนยังมีค่าความต้านทานแรงอัดสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน มอก. 2895-2564 (4.14 MPa) หลายเท่า และยังคงอยู่ในช่วงคอนกรีตบล็อกน้ำหนักทั่วไป (ความหนาแน่น $> 2,000 \text{ kg/m}^3$) จึงไม่ได้สะท้อนปัญหาเชิงโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ แต่แสดงถึงขอบเขตการออกแบบที่เหมาะสมโดยเฉพาะช่วง 15–20% ซึ่งให้สมดุลระหว่างความแข็งแรง การลดน้ำหนัก และประโยชน์ด้านความยั่งยืน

ในมิติระยะยาว แม้การเสื่อมสภาพของเส้นใยอาจก่อให้เกิดโพรงขนาดเล็กและทำให้กำลังอัดลดลงบางส่วน แต่เส้นใยถูกบดละเอียดและถูกห่อหุ้มในเมทริกซ์ซีเมนต์ จึงจำกัดการสัมผัสกับสภาพแวดล้อมโดยตรง อีกทั้งผลิตภัณฑ์จัดอยู่ในประเภทบล็อกไม่รับน้ำหนัก ทำให้ความเสี่ยงเชิงโครงสร้างต่ำ เมื่อพิจารณาร่วมกับศักยภาพการลดการใช้ทราย ลดการปล่อยคาร์บอน และแนวโน้มลดต้นทุนวัสดุ และ

บทความวิจัย (Research Article)

สนับสนุนแนวทางการพัฒนาวัสดุก่อสร้างที่มีความ
สมดุลทั้งด้านสมรรถนะและความยั่งยืน

7. ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัย

ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยต่อเนื่อง โดยการพัฒนางานวิจัยใน 3 มิติหลัก ได้แก่ (1) มิติด้านวิศวกรรมวัสดุ โดยศึกษาการปรับปรุงสภาพผิวมวลก่อนผสม (เช่น การเคลือบผิวหรือปรับสภาพเส้นใย) การวิเคราะห์จุลโครงสร้าง และการทดสอบความทนทานระยะยาว เพื่อเพิ่มความแตกต่างเชิงสมรรถนะ (2) มิติเชิงอุตสาหกรรมและการผลิตจริง โดยออกแบบกระบวนการผลิตต้นแบบ (pilot scale) วิเคราะห์ความสม่ำเสมอของวัตถุดิบ ห่วงโซ่อุปทาน และการควบคุมคุณภาพ และ (3) มิติเชิงเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อม โดยดำเนินการวิเคราะห์ต้นทุนตลอดวงจรชีวิต และการประเมินวัฏจักรชีวิต เพื่อแสดงความคุ้มค่าเชิงระบบ เปรียบเทียบกับบล็อกเชิงพาณิชย์อย่างเป็นรูปธรรม โดยแบ่งเป็นหัวข้อได้ดังนี้

1) ควรศึกษาปัจจัยอื่น ๆ ที่อาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพอิฐเพิ่มเติม เช่น ขนาดอนุภาคของแกนด้านในลำต้นข้าวโพดวิธีการผสม และสภาพการบ่ม เพื่อเพิ่มความเสถียรภาพของกระบวนการผลิต

2) ผลการทดสอบกำลังอัดในงานวิจัยนี้อยู่ที่อายุ 28 วันแต่ยังไม่มีการศึกษาในประเด็นการเปลี่ยนสภาพในระยะยาวของเส้นใยชีวภาพ ดังนั้นผู้วิจัยวางแผนศึกษาต่อยอดในประเด็นด้านการทดสอบแรงสภาพ การปรับปรุงเส้นใยก่อนผสม และการประยุกต์ใช้ในวัสดุประกอบอาคารประเภทอื่นที่รับแรงต่ำ

3) ขยายช่วงตัวแปรให้ครอบคลุมมากขึ้น ทั้งในด้านตัวแปรเชิงวัสดุ (material variables) ได้แก่ สัดส่วนและขนาดอนุภาคของแกนข้าวโพด อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ การใช้วัสดุปอชโซลาน การปรับสภาพเส้นใยก่อนผสม และตัวแปรเชิงกระบวนการ (process variables) ได้แก่ วิธีและระยะเวลาการ

ผสม แรงอัดขึ้นรูป สภาพและระยะเวลาการบ่ม รวมถึงการวิเคราะห์เชิงจุลภาค เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของข้อสรุปทางสถิติ และเพิ่มศักยภาพการประยุกต์ใช้งานเชิงพาณิชย์ในอนาคต

4) การวิเคราะห์ต้นทุนตลอดวงจรชีวิต การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม และการเปรียบเทียบกับต้นทุนต่อหน่วยกำลังอัดหรือประสิทธิภาพเชิงพลังงาน กับบล็อกเชิงพาณิชย์ เพื่อแสดงภาพรวมเชิงระบบอย่างเป็นรูปธรรม

5) การพัฒนาคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนักจากส่วนผสมวัสดุจากต้นข้าวโพดในรูปแบบอื่นๆ เช่น การนำไปออกแบบอิฐตกแต่งผนังสร้างลวดลายให้เกิดสุนทรียะจากธรรมชาติ การพัฒนาเป็นอิฐบล็อกช่องลมช่วยป้องกันฝุ่น PM 2.5 ในอนาคต เป็นต้น

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ผ่านมหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2568

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, *มอก. 1776-2560 ปูนก่อและปูนฉาบ (Mortar for masonry and plastering)*. กรุงเทพฯ: กระทรวงอุตสาหกรรม, 2560.
- [2] S. Saksakulkrai, S. Chantara, P. Kraisitnitikul, D. Srivastava, and Z. Shi, "Unveiling the origins of Northern Thailand's haze: comprehensive chemical characterization and source apportionment of PM_{2.5} using targeted molecular markers," *Journal of*

บทความวิจัย (Research Article)

- Environmental Sciences*, vol. 159, pp. 635–648, 2026.
- [3] W. Fhagatong, S. Visitsak, and S. Surit, "Structure Weight Estimation of Low Rise Steel Frame Buildings by Generative Design," *Kmutnb Journal*, 2019.
- [4] S. P. Sravut, "Strength Development of Hollow Non-Bearing Concrete Masonry Units Using Fly Ash As An Additive," *M.Eng. thesis, Suranaree Univ. of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand*, 2017.
- [5] Z. Lu, Z. Zhao, M. Wang, and W. Jia, "Effects of corn stalk fiber content on properties of biomass brick," *Construction and Building Materials*, vol. 127, pp. 11–17, 2016.
- [6] M. S. Ahmad, M. N. Ahmad, T. Muhammad, M. J. Khan, F. Jabbar, S. A. Alghamdi, M. Alhomrani, and A. S. Alamri, "Utilizing agricultural waste in brick manufacturing for sustainable consumption and circular economy," *Scientific Reports*, vol. 15, Art. 22741, 2025.
- [7] J. Chen and C.-S. Poon, "Photocatalytic cementitious materials: Influence of the microstructure of cement paste on photocatalytic pollution degradation," *Environmental Science & Technology*, vol. 43, no. 22, pp. 8584–8590, Nov. 2009.
- [8] F. Hamidi and F. Aslani, "TiO₂-based photocatalytic cementitious composites: Materials, properties, influential parameters, and assessment techniques," *Nanomaterials*, vol. 9, no. 10, Art. 1444, 2019.
- [9] สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร, "ข้าวโพด," 2016. [ออนไลน์]. Available: <https://ebook.lib.ku.ac.th/ebook27/ebook/2011-005-0086/#p=8>. [Accessed: 24 Oct. 2025].
- [10] S. Saowanee, "Lightweight Concrete Block Form Corn Stalks," *M.Arch. thesis, Chiang Mai Univ., Chiang Mai, Thailand*, 2016. [Online]. Available: <https://cmudc.library.cmu.ac.th/frontend/Info/item/dc:124735>
- [11] J. Pongsak, "The Mechanical Properties and Thermal Conductivity of Concrete Block from Agricultural Wastes," *The Journal of KMUTNB*, vol. 29, no. 2, pp. 342–351, 2019.
- [12] R. Jarabo, M. C. Monte, E. Fuente, S. F. Santos, and C. Negro, "Corn stalk from agricultural residue used as reinforcement fiber in fiber-cement production," *Ind. Crops Prod.*, vol. 43, pp. 832–839, 2013.
- [13] M. R. Ahmad, B. Chen, S. Y. Oderji, and M. Mohsan, "Development of a new bio-composite for building insulation and structural purpose using corn stalk and magnesium phosphate cement," *Energy and Buildings*, vol. 173, pp. 719–733, 2018.
- [14] S. Salem, Y. Hamdy, E.-S. Abdelraouf, and M. Shazly, "Towards sustainable concrete: Cement replacement using Egyptian cornstalk ash," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 17, p. e01193, Dec. 2022.

บทความวิจัย (Research Article)

- [15] S. A. Stel'makh, A. N. Beskopylny, E. M. Shcherban', D. V. Mavzolevskii, S. P. Drukarenko, A. A. Chernil'nik, D. M. Elshaeva, and A. A. Shilov, "Influence of Corn Cob Ash Additive on the Structure and Properties of Cement Concrete," *Constr. Mater. & Prod.*, vol. 7, no. 3, 2024.
- [16] M. M. Ahmed, et al., "Utilizing Agricultural Residues from Hot and Cold Climates for Construction Materials," *Sustainability*, vol. 16, no. 23, 2024.
- [17] S. A. Mohammed, et al., "An environmental sustainability roadmap for partially substituting agricultural waste for sand in cement blocks," *Frontiers in Built Environment*, vol. 9, 2023.
- [18] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, *มอก. 2895-2564 คอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก (Non-load bearing concrete masonry units)*. กรุงเทพฯ: กระทรวงอุตสาหกรรม, 2564.
- [19] Z. P. Bazant and J. Planas, *Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 1998.
- [20] A. M. Neville, *Properties of Concrete*, 5th ed. Harlow, U.K.: Pearson Education Limited, 2011.

การออกแบบและพัฒนาระบบภูมิสารสนเทศบนเว็บร่วมกับคิวอาร์โค้ด เพื่อการท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรม ตำบลป่าตาล จังหวัดลพบุรี

ญาณพัฒน์ ลาภพาณิชย์กุล¹ และ ดวงทิพย์ รัับพรดี^{1,*}

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีมีัลติมีเดีย คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

*ผู้ประสานงานบทความฉบับ: duangthip.r@lawasri.tru.ac.th โทรศัพท์: 081-8530961
(รับบทความ: 15 มกราคม 2569; แก้ไขบทความ: 25 มีนาคม 2569; ตอรับบทความ: 1 เมษายน 2569)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบภูมิสารสนเทศบนเว็บร่วมกับคิวอาร์โค้ด เพื่อการท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมในพื้นที่ตำบลป่าตาล จังหวัดลพบุรี โดยมีเป้าหมายเพื่อสนับสนุนการจัดการและการเข้าถึงข้อมูลเชิงพื้นที่ในบริบทการท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมอย่างมีประสิทธิภาพ ระบบถูกพัฒนาภายใต้สถาปัตยกรรมแบบลูกข่าย-แม่ข่าย โดยเน้นการเชื่อมโยงข้อมูลเชิงพื้นที่กับการเข้าถึงข้อมูล ณ สถานที่จริงผ่านคิวอาร์โค้ด การทดสอบระบบดำเนินการในพื้นที่ศึกษาจริง โดยใช้กลุ่มตัวอย่างจำนวน 210 คน ประกอบด้วยประชาชนในพื้นที่ นักท่องเที่ยว และผู้ใช้งานทั่วไป เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยคือแบบประเมินความพึงพอใจในรูปแบบมาตราประมาณค่าแบบลิเคิร์ต และวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ผลการวิจัยพบว่า ระบบสามารถทำงานได้ครบถ้วนตามที่ออกแบบไว้ และผู้ใช้งานมีความพึงพอใจต่อระบบในระดับดีทุกด้าน โดยมีค่าเฉลี่ยรวมเท่ากับ 3.94 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.69 ซึ่งสะท้อนถึงประสิทธิภาพของระบบในการสนับสนุนการเข้าถึงข้อมูลการท่องเที่ยวเชิงพื้นที่ในบริบทจริง นอกจากนี้ ระบบยังแสดงให้เห็นแนวทางการบูรณาการข้อมูลเชิงพื้นที่และวัฒนธรรมร่วมกับการมีส่วนร่วมของชุมชน เพื่อส่งเสริมการใช้งานอย่างต่อเนื่องและความยั่งยืนในระดับพื้นที่

คำสำคัญ: ระบบภูมิสารสนเทศบนเว็บ คิวอาร์โค้ด การท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรม การจัดการข้อมูลเชิงพื้นที่

การอ้างอิงบทความ: ญาณพัฒน์ ลาภพาณิชย์กุล และ ดวงทิพย์ รัับพรดี, "การออกแบบและพัฒนาระบบภูมิสารสนเทศบนเว็บร่วมกับคิวอาร์โค้ดเพื่อการท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรม ตำบลป่าตาล จังหวัดลพบุรี," วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์, ปีที่ 4, ฉบับที่ 2, หน้า 89-102, 2569.

Design and Development of a Web-Based Geoinformatics System Integrated with QR Code for Cultural Tourism in Pa Tan Subdistrict, Lopburi Province

Yanapat Lappanitchyakul¹ and Duangthip Rubporndee^{1,*}

¹Multimedia Technology, Faculty of Information Technology, Thepsatri Rajabhat University

*Corresponding Author: duangthip.r@lawasri.tru.ac.th, Tel: 081-8530961

(Received: January 15, 2026; Revised: March 25, 2026; Accepted: April 1, 2026)

Abstract

This research aims to design and develop a web-based geoinformatics system integrated with QR code technology for cultural tourism in Pa Tan Subdistrict, Lopburi Province. The system is intended to support the management and accessibility of spatial data within the context of cultural tourism. The system was developed under a client-server architecture, emphasizing the integration of spatial data with on-site information access through QR code technology. The system was evaluated in a real-world environment using a sample of 210 participants, including local residents, tourists, and general users. The research instrument was a five-level Likert scale questionnaire for user satisfaction. The data were analyzed using descriptive statistics, including mean and standard deviation. The results showed that the system functioned according to the design specifications. Users reported satisfaction at a good level in all aspects, with an overall mean score of 3.94 and a standard deviation of 0.69, these findings indicate that the system effectively supports access to spatial information in real-world tourism contexts. Furthermore, the system demonstrates an approach to integrating spatial and cultural data with community participation, promoting continuous usage and sustainability at the local level.

Keywords: Web-Based Geoinformatics System, QR Code, Cultural Tourism, Spatial Data Management

Please cite this article as: Y. Lappanitchyakul and D. Rubporndee, "Design and Development of a Web-Based Geoinformatics System Integrated with QR Code for Cultural Tourism in Pa Tan Subdistrict, Lopburi Province," *The Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University*, vol. 4, no. 2, pp. 89-102, 2026.

บทความวิจัย (Research Article)

1. บทนำ

ในยุคปัจจุบัน เทคโนโลยีสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographic Information System: GIS) และ นวัตกรรมดิจิทัลได้เข้ามามีบทบาทสำคัญต่อการ พัฒนาการท่องเที่ยว โดยเฉพาะการท่องเที่ยวเชิง วัฒนธรรมและชุมชน การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีดิจิทัล ช่วยอำนวยความสะดวกในการเข้าถึงข้อมูลของ นักท่องเที่ยว และช่วยเชื่อมโยงข้อมูลกับพื้นที่จริงได้ อย่างมีประสิทธิภาพ [1] อย่างไรก็ตาม การนำ เทคโนโลยีมาใช้ในระดับพื้นที่ยังคงเผชิญกับความท้าทายสำคัญ ทั้งในด้านความตระหนักรู้ของผู้ใช้งาน ความปลอดภัยของข้อมูลส่วนบุคคล และกลไกการ นำไปปฏิบัติที่ยังขาดประสิทธิภาพ [2] โดยเฉพาะใน บริบทของประเทศไทยที่ยังพบข้อจำกัดด้านการ พัฒนาการท่องเที่ยวอัจฉริยะและการบูรณาการข้อมูล เพื่อการใช้งานอย่างเป็นระบบ [3] ส่งผลให้การสื่อสาร คุณค่าของแหล่งท่องเที่ยวไปยังนักท่องเที่ยวยังไม่เกิด ประสิทธิภาพเท่าที่ควร

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่ามี การ ประยุกต์ใช้เทคโนโลยีที่หลากหลายเพื่อสนับสนุนการ ท่องเที่ยวและการจัดการข้อมูลเชิงพื้นที่ โดยงานของ Yanis et al. [1] สนับสนุนแนวคิดการใช้คิวอาร์โค้ด ร่วมกับเว็บแอปพลิเคชันเพื่อเชื่อมโยงข้อมูลดิจิทัลกับ การเข้าถึงข้อมูลในสถานที่จริง ขณะที่ Jilong et al. [4] สะท้อนให้เห็นแนวทางการพัฒนาระบบภูมิสารสนเทศ บนเว็บเพื่อให้บริการข้อมูลการท่องเที่ยวผ่านเครือข่าย อินเทอร์เน็ต สำหรับบริบทของการจัดการข้อมูลเชิง พื้นที่ บังอร และสุพิชฌาย์ [5] และสุรวุช [6] แสดงให้ เห็นบทบาทของระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ในการ เชื่อมโยงแหล่งท่องเที่ยวกับบริบทชุมชน ขณะที่ ไพศาล และอาบทิพย์ [7] แสดงให้เห็นการประยุกต์ใช้ เทคโนโลยีคิวอาร์โค้ดเพื่อบริการข้อมูลในแหล่ง ท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรม นอกจากนี้ ภาคภูมิ และคณะ [8] และกิตติโชค และคณะ [9] ยังสะท้อนแนวทางการ พัฒนาเว็บแอปพลิเคชันบนแผนที่ภูมิศาสตร์และการ

ประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อสนับสนุนการแนะนำ แหล่งท่องเที่ยว ส่วนสิริวรรณพิชา และยุภาวรรณ [10] ชี้ให้เห็นความสำคัญของอัตลักษณ์ทางภาษาและ วัฒนธรรมต่อการพัฒนาการท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรม ในระดับพื้นที่ และวุฒิพงษ์ และรัศมี [11] สะท้อน แนวทางการออกแบบและพัฒนาระบบบริการข้อมูล ภูมิสารสนเทศบนเครือข่ายอินเทอร์เน็ตเพื่อการ ท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรม

เมื่อพิจารณาเชิงวิพากษ์พบว่า แม้งานวิจัยที่ผ่าน มาจะสะท้อนถึงศักยภาพของเทคโนโลยีดิจิทัลต่อการ พัฒนาการท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรม แต่ยังพบข้อจำกัด ในด้านการเชื่อมโยงข้อมูลเชิงพื้นที่กับข้อมูลแหล่ง ท่องเที่ยวให้สามารถเข้าถึงได้อย่างสะดวกและเป็น ระบบในระดับพื้นที่ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการ ออกแบบและพัฒนาระบบภูมิสารสนเทศบนเว็บ ร่วมกับคิวอาร์โค้ด โดยใช้ตำบลป่าตาล จังหวัดลพบุรี เป็นพื้นที่ประยุกต์ใช้ เพื่อสนับสนุนการเข้าถึงข้อมูล สำหรับการท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมให้มีประสิทธิภาพ มากยิ่งขึ้น

2. การออกแบบระบบ

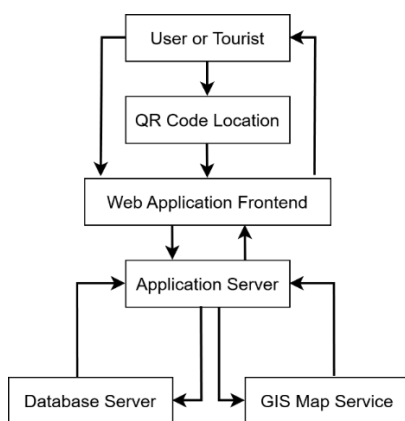
อธิบายแนวคิดและกระบวนการออกแบบระบบ ภูมิสารสนเทศบนเว็บร่วมกับคิวอาร์โค้ดในเชิง วิศวกรรม โดยมุ่งเน้นการกำหนดสถาปัตยกรรมระบบ การออกแบบเว็บแอปพลิเคชัน และการจัดการข้อมูล เชิงพื้นที่ เพื่อสนับสนุนการให้บริการข้อมูลการ ท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมผ่านระบบแผนที่ดิจิทัลและ การเข้าถึงข้อมูลด้วยเทคโนโลยีคิวอาร์โค้ดอย่างเป็น ระบบ

2.1 สถาปัตยกรรมระบบ

สถาปัตยกรรมระบบถูกออกแบบเพื่อกำหนด โครงสร้างการทำงานและความสัมพันธ์ระหว่าง

บทความวิจัย (Research Article)

องค์ประกอบหลักของระบบสารสนเทศการท่องเที่ยวเชิงพื้นที่ โดยรองรับการเข้าถึงข้อมูลผ่านเว็บแอปพลิเคชัน การจัดการข้อมูลเชิงพื้นที่ และการเชื่อมโยงข้อมูลจากพื้นที่จริงผ่านเทคโนโลยีคิวอาร์โค้ด โครงสร้างดังกล่าวช่วยให้ระบบมีความเป็นโมดูล เพิ่มความยืดหยุ่นในการขยาย และรองรับการบูรณาการข้อมูลจากหลายแหล่งได้ภายใต้สถาปัตยกรรมเดียวกัน ในการทำงานของระบบ ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงข้อมูลได้ 2 รูปแบบ ได้แก่ การใช้งานผ่านเว็บแอปพลิเคชันโดยตรง และการเข้าถึงผ่านคิวอาร์โค้ดที่ติดตั้ง ณ สถานที่จริง เมื่อผู้ใช้งานเลือกดูข้อมูลหรือสแกนคิวอาร์โค้ด ระบบจะส่งคำขอไปยังส่วนจัดการข้อมูล จากนั้นระบบจะเรียกข้อมูลจากฐานข้อมูลและส่งกลับมาแสดงผลให้ผู้ใช้งานในรูปแบบแผนที่ และรายละเอียดสถานที่ โดยการทำงานดังกล่าวช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงข้อมูลเชิงพื้นที่ได้อย่างต่อเนื่อง และสอดคล้องกับการใช้งานจริง ดังแสดงในรูปที่ 1



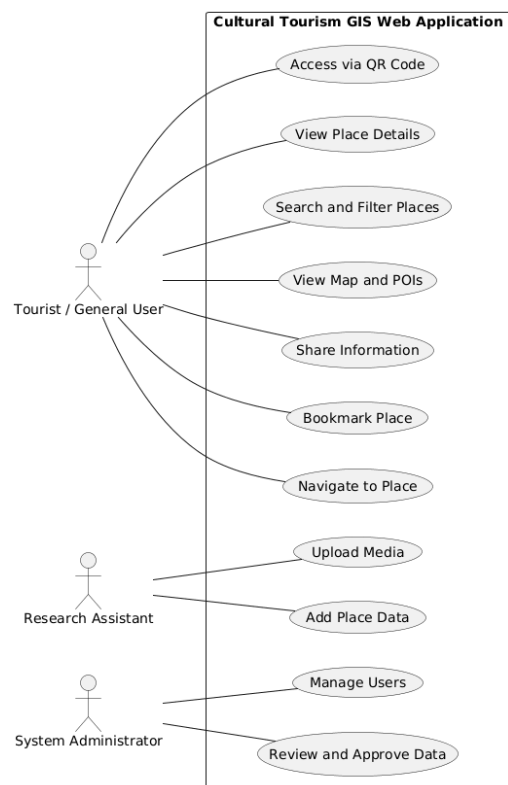
รูปที่ 1 โครงสร้างการทำงานของระบบและการไหลของข้อมูลระหว่างผู้ใช้งาน ระบบ และฐานข้อมูล

จากรูปที่ 1 คำร้องขอของผู้ใช้งานถูกส่งผ่านเว็บแอปพลิเคชันไปยัง Backend API เพื่อประมวลผลร่วมกับฐานข้อมูลและบริการแผนที่ก่อนส่งผลลัพธ์กลับมาแสดงเป็นแผนที่ดิจิทัลและข้อมูลประกอบที่สัมพันธ์กับตำแหน่งจริงของผู้ใช้งาน

2.2 การออกแบบเว็บแอปพลิเคชันและฟังก์ชันหลัก

การออกแบบระบบภูมิสารสนเทศบนเว็บร่วมกับคิวอาร์โค้ดมุ่งเน้นการกำหนดฟังก์ชันหลักให้สอดคล้องกับผู้ใช้งานหลายบทบาท และรองรับการให้บริการผ่านเว็บเบราว์เซอร์โดยไม่ต้องติดตั้งโปรแกรม ระบบถูกพัฒนาภายใต้แนวคิดการแยกส่วนระหว่างส่วนติดต่อผู้ใช้งานและส่วนประมวลผล โดยใช้กลไกการสื่อสารแบบ Request-Response ผ่าน RESTful API เพื่อจัดการคำร้องขอและเรียกใช้บริการข้อมูลเชิงพื้นที่อย่างเป็นระบบ

เพื่อแสดงขอบเขตความสามารถของระบบในเชิงฟังก์ชัน งานวิจัยได้กำหนดบทบาทผู้ใช้งานและกรณีใช้งานหลักในรูปแบบแผนภาพกรณีใช้งาน (Use Case Diagram) ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนภาพการใช้งาน (Use Case Diagram) ของระบบ

บทความวิจัย (Research Article)

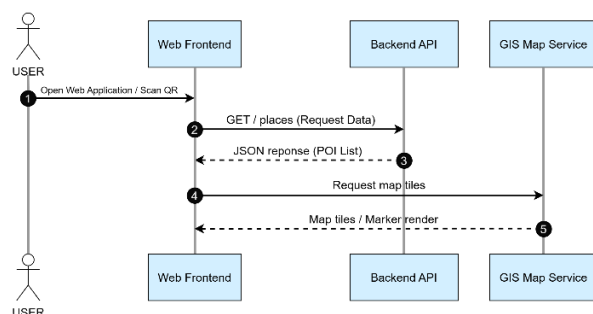
จากรูปที่ 2 แสดงบทบาทผู้ใช้งาน 3 กลุ่ม ได้แก่ นักท่องเที่ยว/ผู้ใช้งานทั่วไป ผู้ช่วยวิจัย และผู้ดูแลระบบ โดยระบบรองรับการใช้งานครอบคลุมการเข้าถึงข้อมูลเชิงพื้นที่ (แผนที่-ค้นหา-รายละเอียด-คิวอาร์โค้ด) และการกำกับดูแลข้อมูล (เพิ่มข้อมูล-ตรวจสอบ-อนุมัติ) เพื่อคงคุณภาพข้อมูลก่อนเผยแพร่

2.3 การออกแบบการจัดการข้อมูลและส่วนติดต่อผู้ใช้งาน

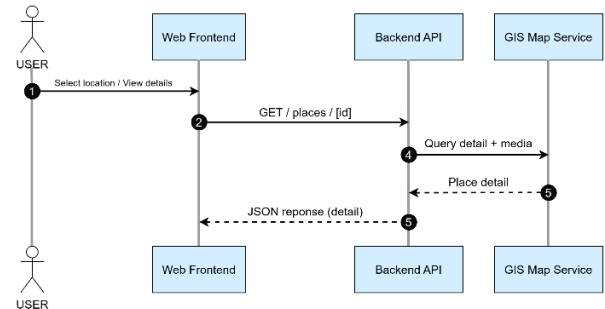
การออกแบบส่วนนี้มุ่งเน้น (1) โครงสร้างการจัดการข้อมูลที่รองรับการให้บริการข้อมูลเชิงพื้นที่และเนื้อหาประกอบ และ (2) ส่วนติดต่อผู้ใช้งานที่สนับสนุนการโต้ตอบแบบ End-To-End ตั้งแต่การค้นหา การดูรายละเอียด ไปจนถึงการบันทึก แชร์ และนำทาง โดยมีการสื่อสารผ่าน API เป็นแกนกลางเพื่อให้การทำงานของโมดูลต่าง ๆ เป็นไปอย่างสอดคล้อง

2.3.1 การสื่อสารแบบ Request-Response ผ่าน API

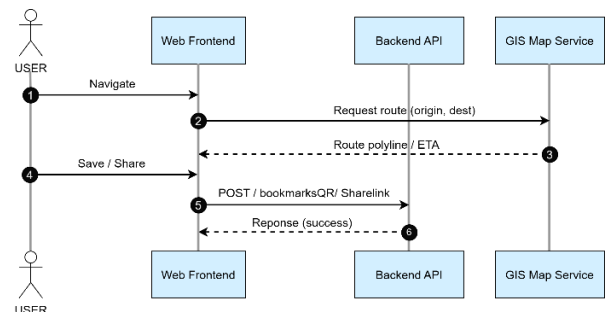
เพื่อให้เห็นการทำงานจริงระหว่าง Front-End, Backend API, GIS Service และ Database ในลักษณะ Request-Response งานวิจัยกำหนดลำดับการทำงานเป็น Sequence Diagram ดังแสดงในรูปที่ 3-5



รูปที่ 3 การโหลดหน้าแรกและข้อมูลแผนที่



รูปที่ 4 การเรียกดูรายละเอียดสถานที่



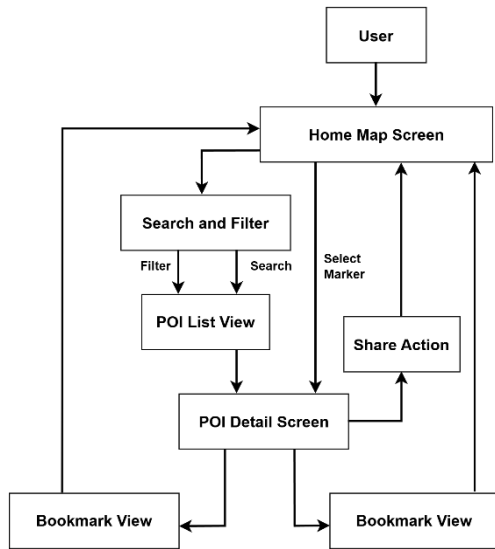
รูปที่ 5 การนำทางและฟีเจอร์เสริม

จากรูปที่ 3-5 แสดงการสื่อสารระหว่างส่วนติดต่อผู้ใช้งานกับระบบผ่าน Backend API ตามรูปแบบ Request-Response โดย Backend API ทำหน้าที่เป็นจุดศูนย์กลางในการเรียกใช้ข้อมูลจากฐานข้อมูลและบริการแผนที่ เพื่อให้ผลลัพธ์ที่ส่งกลับมีความสอดคล้องกับบริบทเชิงพื้นที่และการโต้ตอบของผู้ใช้งาน

2.3.2 โครงสร้างการนำทางและหน้าจอหลัก

เพื่อแสดงลำดับการทำงานของผู้ใช้งานในระบบและจุดที่ระบบเรียกใช้ฟังก์ชันสำคัญ งานวิจัยกำหนด UI Flow Diagram ดังแสดงในรูปที่ 6

บทความวิจัย (Research Article)

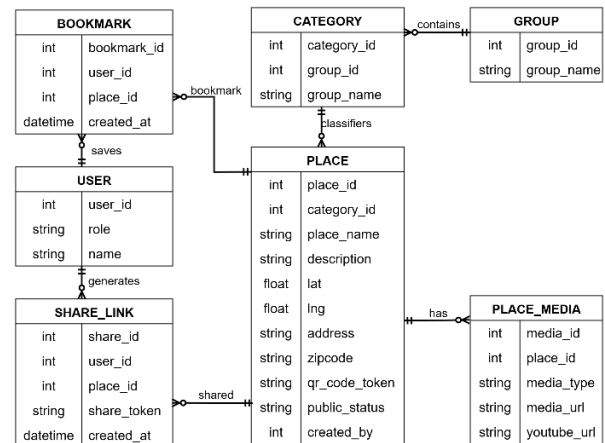


รูปที่ 6 User Navigation UI Flow

จากรูปที่ 6 แสดงลำดับการนำทางของผู้ใช้งานผ่านหน้าจอหลัก แผงค้นหา รายการสถานที่ และหน้ารายละเอียด โดยเชื่อมต่อฟังก์ชันสนับสนุน ได้แก่ การนำทาง การบันทึก และการแชร์ เพื่อให้ผู้ใช้งาน ทำงานครบกระบวนการภายในอินเทอร์เฟซเดียว

2.3.3 โครงสร้างข้อมูลที่รองรับจุดสนใจ หมายเหตุ สื่อ และการบันทึก

เพื่อให้ฐานข้อมูลสอดคล้องกับระบบจริง งานวิจัยเลือกแสดงโครงสร้างในรูปแบบ ER ที่สะท้อน เอนทิตีด้านการท่องเที่ยว ได้แก่ สถานที่ หมายเหตุ ประเภท สื่อประกอบ ผู้ใช้ รายการบันทึก และลิงก์ แชร์ ดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งเป็นการแสดงโครงสร้าง ฐานข้อมูลเชิงสัมพันธ์ของระบบ โดยกำหนด Place เป็นเอนทิตีหลักเชื่อมกับ Category/Group เพื่อรองรับการจัดหมวดหมู่ และเชื่อมกับ Place_Media เพื่อจัดเก็บสื่อประกอบ ขณะเดียวกันเอนทิตี Bookmark และ Share_Link รองรับการทำบันทึกและการแชร์ข้อมูลในบริบทการใช้งานจริง



รูปที่ 7 ER Diagram ของระบบ

2.4 การออกแบบด้านความสามารถในการขยายระบบและความปลอดภัย

ระบบถูกออกแบบโดยยึดหลักการแยกส่วนการทำงานและการให้บริการผ่าน Backend API แบบ Stateless เพื่อรองรับการขยายตัวของผู้ใช้งานและปริมาณข้อมูลในอนาคต โดยการแยกส่วนติดต่อผู้ใช้ ส่วนประมวลผล และส่วนจัดเก็บข้อมูลช่วยลดการพึ่งพากันขององค์ประกอบ และเอื้อต่อการปรับปรุงหรือขยายระบบโดยไม่กระทบต่อโครงสร้างหลัก ในด้านความปลอดภัย ระบบกำหนดสิทธิ์การเข้าถึงตามบทบาทผู้ใช้งาน แยกการจัดการข้อมูลของผู้ช่วยวิจัยและผู้ดูแลระบบออกจากผู้ใช้งานทั่วไป พร้อมใช้สถานะการเผยแพร่เป็นกลไกควบคุมคุณภาพข้อมูลก่อนแสดงผล และออกแบบให้การเข้าถึงข้อมูลผ่านคิวอาร์โค้ดทำงานผ่าน API เดียวกัน เพื่อให้สามารถควบคุม ตรวจสอบ และติดตามการใช้งานได้อย่างเป็นระบบ

3. การทดลองและการทดสอบระบบ

ส่วนนี้นำเสนอการทดลองและการทดสอบระบบ เพื่อยืนยันการทำงานของระบบให้เป็นไปตามสถาปัตยกรรมและการออกแบบเชิงวิศวกรรมที่ได้

บทความวิจัย (Research Article)

นำเสนอไว้ก่อนหน้านี้ โดยดำเนินการทดลองภายใต้บริบทการใช้งานจริงในพื้นที่ศึกษา และมุ่งเน้นการตรวจสอบการทำงานของโมดูลหลักและกระบวนการจัดการข้อมูลเชิงพื้นที่

3.1 รูปแบบและขั้นตอนการทดลองระบบ

การวิจัยครั้งนี้มุ่งเน้นการออกแบบและพัฒนาระบบภูมิสารสนเทศบนเว็บร่วมกับเทคโนโลยีคิวอาร์โค้ด เพื่อสนับสนุนการท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมในระดับพื้นที่ โดยใช้ข้อมูลเชิงพื้นที่และข้อมูลแหล่งท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมของตำบลป่าตาล จังหวัดลพบุรี เป็นข้อมูลประกอบในการออกแบบ พัฒนา และทดสอบการทำงานของระบบ งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาระบบเป็นหลัก มิได้มุ่งศึกษากระบวนการจัดการข้อมูลระดับชุมชนในเชิงลึกโดยตรง แต่ให้ความสำคัญกับการนำข้อมูลในบริบทพื้นที่จริงมาประยุกต์ใช้ เพื่อให้สามารถประเมินประสิทธิภาพของระบบที่พัฒนาขึ้นได้อย่างเหมาะสม

การทดลองดำเนินการในพื้นที่ตำบลป่าตาล จังหวัดลพบุรี โดยใช้การทดลองเชิงภาคสนาม เพื่อให้สอดคล้องกับบริบทการใช้งานจริงของระบบ ประชากรที่ศึกษา ได้แก่ ผู้ที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานระบบในพื้นที่ ประกอบด้วย ประชาชนในพื้นที่ กลุ่มชุมชน กลุ่มอนุรักษ์ นักท่องเที่ยว และผู้ใช้งานทั่วไป กลุ่มตัวอย่างจำนวน 210 คน ได้มาจากการคัดเลือกแบบ โดยกำหนดเกณฑ์การคัดเลือกจากผู้ที่มีประสบการณ์หรือมีส่วนเกี่ยวข้องกับการใช้งานระบบ และสามารถให้ข้อมูลเพื่อการประเมินประสิทธิภาพของระบบได้

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ แบบประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานระบบ ซึ่งพัฒนาในรูปแบบมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ ครอบคลุมด้านการใช้งานระบบ ด้านความถูกต้องของข้อมูล และด้านประสบการณ์ผู้ใช้งาน โดยแบบประเมินดังกล่าวได้รับ

การตรวจสอบความเหมาะสมของเนื้อหาโดยผู้เชี่ยวชาญ และนำไปทดลองใช้ก่อนการเก็บข้อมูลจริง ทั้งนี้ การแปลผลความพึงพอใจใช้เกณฑ์การแบ่งช่วงค่าเฉลี่ยออกเป็นระดับ ได้แก่ มากที่สุด มาก ปานกลาง น้อย และน้อยที่สุด ตามแนวทางการวิจัยเชิงพฤติกรรมศาสตร์

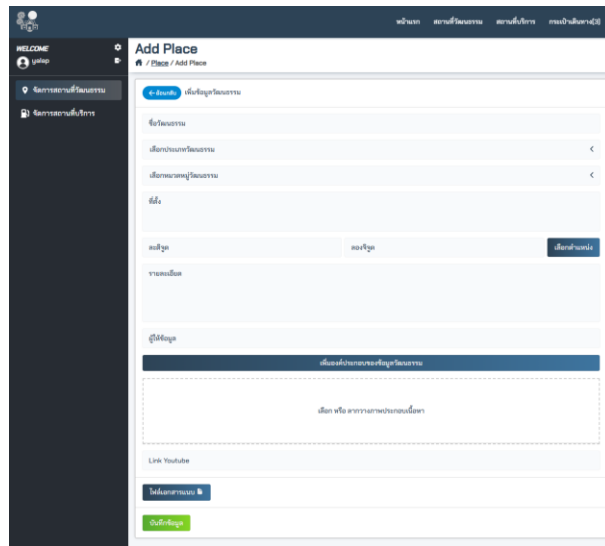
กระบวนการทดลองเริ่มจากการรวบรวมและบันทึกข้อมูลแหล่งท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมโดยผู้ช่วยวิจัยผ่านระบบส่วนหลังบ้าน ทั้งนี้ บทบาทของผู้ช่วยวิจัยในงานวิจัยนี้เป็นการจำลองกระบวนการบันทึกข้อมูลในระยะพัฒนาและทดสอบระบบ โดยในกรณีการใช้งานจริง ผู้บันทึกข้อมูลสามารถเป็นเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องหรือผู้ดูแลระบบในพื้นที่ จากนั้นข้อมูลจะถูกตรวจสอบและอนุมัติโดยผู้ดูแลระบบก่อนเผยแพร่สู่ผู้ใช้งานทั่วไป ในขั้นตอนการกำกับดูแลข้อมูล ผู้ดูแลระบบจะพิจารณาความครบถ้วนของข้อมูล ความถูกต้องของตำแหน่งเชิงพื้นที่ และความสอดคล้องของข้อมูลประกอบ เช่น รายละเอียดสถานที่ ภาพถ่าย และพิกัด ก่อนอนุมัติให้เผยแพร่ผ่านระบบ เพื่อช่วยลดความคลาดเคลื่อนของข้อมูลและเพิ่มความน่าเชื่อถือของสารสนเทศที่แสดงผลแก่ผู้ใช้งาน

ภายหลังจากการเผยแพร่ข้อมูล ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงข้อมูลผ่านเว็บแอปพลิเคชัน และผ่านการสแกนคิวอาร์โค้ด ณ สถานที่จริง ซึ่งเชื่อมโยงไปยังข้อมูลรายละเอียดของแต่ละจุดท่องเที่ยวในระบบ โดยผู้ใช้งานสามารถทดลองใช้งานฟังก์ชันต่าง ๆ ของระบบ ได้แก่ การค้นหาข้อมูล การแสดงผลแผนที่ การดูรายละเอียดสถานที่ และการนำทาง ภายใต้บริบทการใช้งานจริงในพื้นที่ศึกษา

ในการทดลอง ผู้วิจัยได้ดำเนินการลงพื้นที่ร่วมกับผู้ใช้งานในกลุ่มต่าง ๆ เพื่อให้ครอบคลุมลักษณะการใช้งานที่หลากหลาย และสะท้อนพฤติกรรมการใช้งานจริงของระบบ หลังจากเสร็จสิ้นการทดลอง ผู้วิจัยได้เก็บรวบรวมข้อมูลความพึงพอใจของผู้ใช้งานเพื่อนำไปวิเคราะห์ผลด้วยสถิติเชิงพรรณนา เพื่อประเมิน

บทความวิจัย (Research Article)

ประสิทธิภาพของระบบที่พัฒนาขึ้น โดยกระบวนการทดลองดังกล่าวเป็นการทำงานระบบร่วมกับผู้ใช้งานจริงในพื้นที่ ดังแสดงในรูปที่ 8



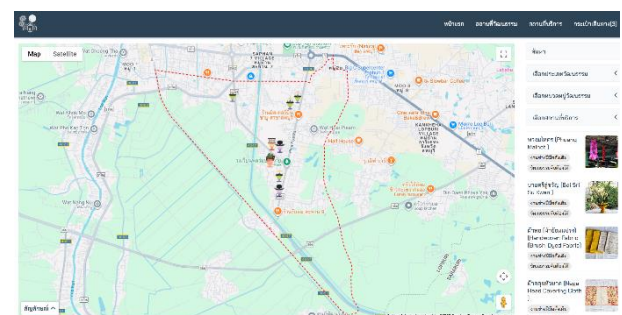
รูปที่ 8 การทดลองใช้งานเว็บแอปพลิเคชันในพื้นที่ตำบลป่าตาล จังหวัดลพบุรี

จากรูปที่ 8 แสดงการลงพื้นที่เก็บข้อมูลและทดลองใช้งานระบบโดยผู้ช่วยวิจัยและผู้ใช้งานจริง

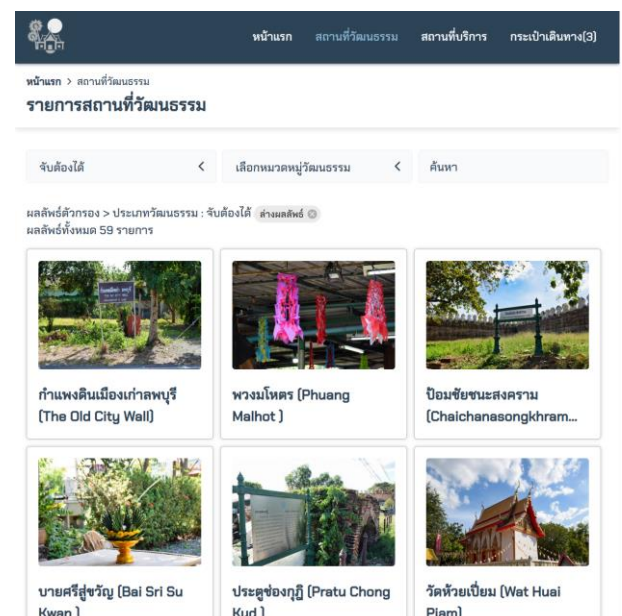
3.2 การทดสอบการทำงานของระบบ

การทดสอบระบบมุ่งเน้นการตรวจสอบฟังก์ชันหลักของระบบให้สอดคล้องกับโมดูลที่ออกแบบไว้ในสถาปัตยกรรมระบบ ได้แก่ การแสดงผลแผนที่และหมวดสถานที่ การค้นหาข้อมูล การเข้าถึงข้อมูลผ่านคิวอาร์โค้ด การแสดงรายละเอียดสถานที่ และการนำทางไปยังสถานที่จริง โดยระบบสามารถดึงข้อมูลจากฐานข้อมูลฝั่ง Back-End และแสดงผลข้อมูลเชิงพื้นที่บนแผนที่แบบโต้ตอบผ่าน Google Maps API ได้อย่างถูกต้อง

ในส่วนของการแสดงผลแผนที่ ระบบสามารถแสดงตำแหน่งสถานที่ที่ท่องเที่ยวในรูปแบบหมุดบนแผนที่ดิจิทัล โดยผู้ใช้งานสามารถเลือกดูรายละเอียดของแต่ละสถานที่ผ่านการคลิกที่หมุดบนแผนที่ ซึ่งจะแสดงข้อมูลที่เกี่ยวข้อง เช่น ชื่อสถานที่ ประเภทสถานที่ และข้อมูลประกอบอื่น ๆ ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 การแสดงผลแผนที่และหมวดสถานที่จากข้อมูลในฐานข้อมูล



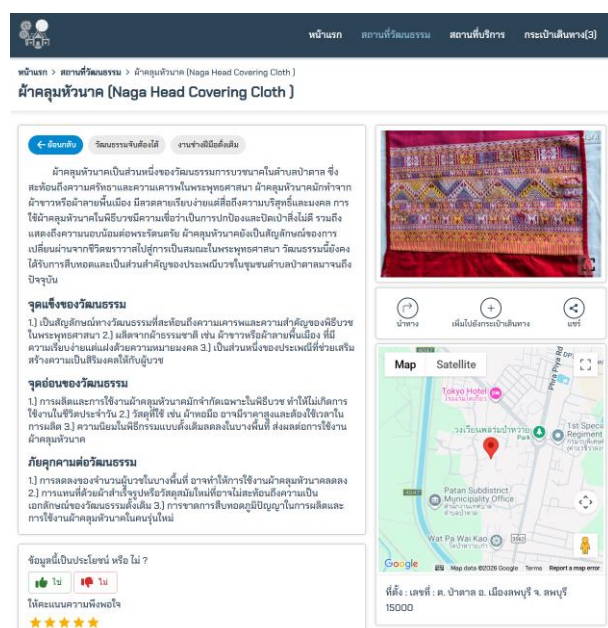
รูปที่ 10 ตัวอย่างหน้าจอการค้นหาและแสดงรายการสถานที่

ญาณพัฒน์ ลาภพาณิชย์กุล และ ดวงทิพย์ รั้งพรดี, การออกแบบและพัฒนาระบบภูมิสารสนเทศบนเว็บร่วมกับคิวอาร์โค้ดเพื่อการท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรม ตำบลป่าตาล จังหวัดลพบุรี

บทความวิจัย (Research Article)

รูปที่ 10 เป็นตัวอย่างหน้าจอการค้นหาและแสดงรายการสถานที่ในส่วนของการค้นหาและแสดงรายการสถานที่ ระบบรองรับการค้นหาข้อมูลตามคำสำคัญและการแสดงผลรายการสถานที่ในรูปแบบรายการ เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถเลือกเข้าถึงข้อมูลได้สะดวกยิ่งขึ้น โดยสามารถแสดงข้อมูลสถานที่พร้อมภาพประกอบและรายละเอียดเบื้องต้น

นอกจากนี้ ระบบยังรองรับการเข้าถึงข้อมูลผ่านเทคโนโลยีคิวอาร์โค้ด ซึ่งถูกติดตั้งไว้ ณ จุดแหล่งท่องเที่ยวในพื้นที่ศึกษา เมื่อผู้ใช้งานทำการสแกนคิวอาร์โค้ดผ่านอุปกรณ์เคลื่อนที่ ระบบจะเชื่อมโยงไปยังหน้าเว็บแอปพลิเคชันที่แสดงข้อมูลรายละเอียดของสถานที่นั้นโดยอัตโนมัติ โดยข้อมูลดังกล่าวถูกเรียกผ่าน Backend API และแสดงผลร่วมกับ Google Maps API ในรูปแบบแผนที่เชิงโต้ตอบ ทำให้ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงข้อมูลเชิงพื้นที่ได้โดยตรงจากสถานที่จริง ระบบยังรองรับการแสดงรายละเอียดสถานที่ผ่านหน้าเว็บแอปพลิเคชันที่เชื่อมโยงกับข้อมูลเชิงพื้นที่และสื่อประกอบ ดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 11 หน้าจอแสดงรายละเอียดสถานที่ผ่านเว็บแอปพลิเคชัน

จากรูปที่ 11 แสดงการเข้าถึงข้อมูลรายละเอียดสถานที่ผ่านระบบ โดยรองรับการบันทึกข้อมูล การเข้าถึงข้อมูล และการนำทางไปยังสถานที่จริงผ่าน Google Maps API ซึ่งช่วยเพิ่มความสะดวกในการใช้งานในบริบทการท่องเที่ยวจริง

ผลการทดสอบฟังก์ชันการทำงานของระบบแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถทำงานได้ครบถ้วนตามขอบเขตที่ออกแบบไว้ โดยฟังก์ชันหลัก ได้แก่ การแสดงแผนที่ การค้นหาข้อมูล การเข้าถึงข้อมูลผ่านคิวอาร์โค้ด การแสดงรายละเอียดสถานที่ และการนำทาง สามารถทำงานได้อย่างถูกต้องและสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของระบบ ดังแสดงในตารางที่ 1 ผลการทดสอบฟังก์ชันการทำงานของระบบ

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบการทำงานของฟังก์ชันหลักของระบบ

ฟังก์ชันที่ทดสอบ	รายละเอียดการทดสอบ	ผลการทดสอบ
การแสดงผลแผนที่และหมวดสถานที่	ตรวจสอบการแสดงผลตำแหน่งจากฐานข้อมูล	ผ่าน
การค้นหาข้อมูล	ค้นหาตามหมวดและคำค้น	ผ่าน
การแสดงผลรายละเอียดสถานที่	ตรวจสอบข้อมูลข้อความ และภาพ	ผ่าน
การสแกนคิวอาร์โค้ด	เข้าถึงข้อมูลจากพื้นที่จริง	ผ่าน
การนำทาง	เรียกใช้งาน Google Maps API	ผ่าน
การบันทึกข้อมูล	เพิ่มสถานที่ลงรายการบันทึก	ผ่าน
การแชร์ข้อมูล	แชร์ข้อมูลสถานที่ไปยังแพลตฟอร์มอื่น	ผ่าน

บทความวิจัย (Research Article)

จากตารางที่ 1 ผลการทดสอบฟังก์ชันการทำงานของระบบ แสดงรายการฟังก์ชันหลักของระบบพร้อมผลการทดสอบ โดยพบว่าทุกฟังก์ชันสามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้

นอกจากนี้ ระบบยังได้รับการประเมินความสอดคล้องกับความต้องการของผู้ใช้งานในด้านต่าง ๆ ได้แก่ Map & POI Module, Search Module, QR Code Module, Detail Module, Navigation Module และ Admin Module โดยผลการประเมินพบว่าระบบสามารถตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้งานได้ในระดับที่เหมาะสม ดังแสดงในตารางที่ 2 ความสอดคล้องของฟังก์ชันการทำงานของระบบกับความต้องการของผู้ใช้งาน

ตารางที่ 2 ความสอดคล้องระหว่างการออกแบบระบบและการทดสอบ

โมดูลในสถาปัตยกรรมระบบ	ฟังก์ชันที่ออกแบบ	วิธีการทดสอบ
Map & POI Module	แสดงแผนที่และหมวดสถานที่	ทดลองใช้งานจริงและตรวจสอบการแสดงผล
Search Module	ค้นหาข้อมูลตามหมวดและคำค้น	ทดสอบการค้นหาจากผู้ใช้งาน
QR Code Module	เข้าถึงข้อมูลจากพื้นที่จริง	สแกนคิวอาร์โค้ด ณ จุดท่องเที่ยว
Detail Module	แสดงรายละเอียดสถานที่	ตรวจสอบข้อมูลภาพ และพิกัด
Navigation Module	นำทางไปยังสถานที่จริง	เรียกใช้ Google Maps
Admin Module	ตรวจสอบและอนุมัติข้อมูล	ทดสอบบทบาทผู้ช่วยวิจัยและผู้ดูแลระบบ

3.3 เกณฑ์และวิธีการประเมินผล

การประเมินผลการใช้งานระบบดำเนินการโดยใช้แบบสอบถามความพึงพอใจจากกลุ่มตัวอย่างจำนวน 210 คน โดยใช้มาตราประมาณค่าแบบลิเคิร์ต เพื่อประเมินความคิดเห็นในด้านการใช้งาน ข้อมูลเชิงพื้นที่ แผนที่ การนำทาง และภาพรวมของระบบ ทั้งนี้ โครงสร้างของแบบประเมินแสดงดังตารางที่ 3

แบบประเมินดังกล่าวได้รับการพิจารณาความเหมาะสมของข้อคำถามโดยผู้เชี่ยวชาญจำนวน 3 คน ก่อนนำไปใช้จริง เพื่อให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการวิจัยและบริบทของระบบที่พัฒนาขึ้น จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยสถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เพื่ออธิบายระดับความพึงพอใจของผู้ใช้งานต่อระบบ

ตารางที่ 3 โครงสร้างแบบประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานระบบ

ด้านการประเมิน	ประเด็นที่ใช้ในการประเมิน
ด้านการใช้งาน	ความสะดวกและความง่ายในการใช้งานระบบ
ด้านข้อมูล	ความชัดเจนและความครบถ้วนของข้อมูล
ด้านแผนที่	ความถูกต้องของตำแหน่งและการแสดงผล
ด้านการนำทาง	ความสะดวกในการเดินทางไปยังสถานที่
ภาพรวมระบบ	ความเหมาะสมของระบบต่อการใช้งานจริง

จากตารางที่ 3 แสดงฟังก์ชันหลักของระบบและผลการทดสอบการทำงาน โดยพบว่าระบบสามารถทำงานได้ครบถ้วนตามขอบเขตที่ออกแบบไว้ ทั้งในด้านการแสดงผลข้อมูล การค้นหาข้อมูล และการเข้าถึงข้อมูลเชิงพื้นที่ผ่านฟังก์ชันต่าง ๆ ของระบบ

บทความวิจัย (Research Article)

ซึ่งสะท้อนถึงความพร้อมของระบบในการรองรับการใช้งานในบริบทพื้นที่จริง

ข้อมูลที่น่าสนใจในส่วนนี้เป็นผลของการทดลองและการทดสอบเชิงระบบ เพื่อยืนยันการทำงานของเว็บแอปพลิเคชันตามสถาปัตยกรรมและการออกแบบที่กำหนดไว้ โดยครอบคลุมการทำงานของฟังก์ชันหลักของระบบและการตอบสนองต่อการใช้งานของผู้ใช้งานในสถานการณ์จริง ทั้งนี้ การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณจากแบบประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานจะนำเสนอในหัวข้อถัดไป

4. ผลการทดลองและอภิปรายผล

ส่วนนี้นำเสนอผลการทดลองจากการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานระบบภูมิสารสนเทศบนเว็บร่วมกับคิวอาร์โค้ดเพื่อการท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรม โดยใช้ข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างจำนวน 210 คน ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณด้วยสถิติเชิงพรรณนาแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถรองรับการใช้งานจริงได้อย่างเหมาะสม และสอดคล้องกับการออกแบบระบบและสถาปัตยกรรมที่นำเสนอไว้ก่อนหน้านี้

4.1 ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน

ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานต่อระบบภูมิสารสนเทศบนเว็บร่วมกับคิวอาร์โค้ดวิเคราะห์จากแบบสอบถามประมาณค่าแบบลิเคิร์ตครอบคลุม 5 ด้าน ได้แก่ ด้านการใช้งาน ด้านข้อมูล ด้านแผนที่ ด้านการนำทาง และภาพรวมของระบบ โดยผลการวิเคราะห์สถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เป็นต้น

การประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานในงานวิจัยนี้ใช้มาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ โดยนำผลมาวิเคราะห์ด้วยค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เพื่อแสดงระดับความคิดเห็นของผู้ใช้งาน และใช้

เกณฑ์การแปลผลแบ่งออกเป็น 5 ระดับ ได้แก่ มากที่สุด มาก ปานกลาง น้อย และน้อยที่สุด แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานต่อระบบ (n = 210)

ด้านการประเมิน	$\bar{X}$	S.D.	ระดับความคิดเห็น
ด้านการใช้งาน	3.91	0.71	ดี
ด้านข้อมูล	3.94	0.63	ดี
ด้านแผนที่	3.95	0.73	ดี
ด้านการนำทาง	3.95	0.73	ดี
ภาพรวมของระบบ	3.94	0.69	ดี

จากตารางที่ 4 พบว่าผู้ใช้งานมีความพึงพอใจต่อระบบอยู่ในระดับดีทุกด้าน โดยด้านการแสดงแผนที่และการนำทางมีค่าเฉลี่ยสูงที่สุด สะท้อนถึงประสิทธิภาพของการออกแบบระบบแผนที่เชิงโต้ตอบและการเชื่อมโยงข้อมูลเชิงพื้นที่ ขณะที่ด้านการใช้งานและด้านข้อมูลมีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับใกล้เคียงกัน แสดงถึงความสม่ำเสมอของประสบการณ์ผู้ใช้งานในภาพรวม ค่าเฉลี่ยความพึงพอใจโดยรวมเท่ากับ 3.94 ร่วมกับค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ไม่สูง แสดงให้เห็นว่าความคิดเห็นของผู้ใช้งานมีความสอดคล้องกัน และสะท้อนการใช้งานจริงในบริบทพื้นที่ศึกษา

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานในงานวิจัยนี้มีแนวโน้มสอดคล้องกับงานวิจัย [1], [6] ด้านระบบภูมิสารสนเทศและการท่องเที่ยวที่เน้นการเข้าถึงข้อมูลเชิงพื้นที่และการใช้งานผ่านอุปกรณ์เคลื่อนที่ โดยเฉพาะในด้านความสะดวกในการเข้าถึงข้อมูลและการใช้งานในบริบทพื้นที่จริง ซึ่งช่วยสนับสนุนประสิทธิภาพของระบบที่พัฒนาขึ้น

4.2 การอภิปรายผลการทดลองเชิงระบบ

เมื่อพิจารณาผลการประเมินร่วมกับผลการทดสอบระบบในส่วนที่ 3 พบว่าการออกแบบสถาปัตยกรรมระบบแบบลูกข่าย-แม่ข่าย และการแยกโมดูลการทำงานช่วยให้ระบบสามารถรองรับการใช้งานของผู้ใช้งานหลายกลุ่มได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะโมดูลการแสดงผลแผนที่และหมุดสถานที่ซึ่งเป็นแกนหลักของระบบ

ความพึงพอใจด้านการใช้งานและการนำทางสะท้อนถึงความเหมาะสมของการออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้งานและการเชื่อมโยงข้อมูลเชิงพื้นที่ผ่านบริการแผนที่ภายนอก ขณะเดียวกัน คะแนนด้านข้อมูลในระดับดีแสดงถึงประสิทธิภาพของกระบวนการจัดการและกำกับดูแลข้อมูลที่แยกบทบาทผู้ช่วยวิจัยและผู้ดูแลระบบอย่างชัดเจน ซึ่งช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือของข้อมูลก่อนเผยแพร่สู่ผู้ใช้งานทั่วไป

โดยรวม ผลการทดลองยืนยันว่าการออกแบบระบบในเชิงวิศวกรรมสามารถรองรับการใช้งานจริงในบริบทการท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรม และมีความยืดหยุ่นเพียงพอสำหรับการขยายระบบในอนาคต จากผลการวิจัยดังกล่าวสามารถเชื่อมโยงกับแนวคิดในบทนำที่มุ่งเน้นการบูรณาการข้อมูลเชิงพื้นที่และข้อมูลวัฒนธรรมในระดับชุมชน โดยระบบที่พัฒนาขึ้นช่วยให้สามารถจัดการและเชื่อมโยงข้อมูลแหล่งท่องเที่ยวในพื้นที่ได้อย่างเป็นระบบ สนับสนุนการเข้าถึงข้อมูลของผู้ใช้งานในบริบทจริง และส่งเสริมการมีส่วนร่วมของชุมชนผ่านกระบวนการจัดการข้อมูลเชิงพื้นที่

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงแนวทางการบูรณาการระบบภูมิสารสนเทศบนเว็บร่วมกับเทคโนโลยีคิวอาร์โค้ด เพื่อสนับสนุนการบริหารจัดการข้อมูลการท่องเที่ยวเชิงพื้นที่และวัฒนธรรมในระดับชุมชนอย่างเป็นระบบ

4.3 ข้อจำกัดของระบบและแนวทางการพัฒนาในอนาคต

แม้ว่าระบบที่พัฒนาขึ้นจะแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการรองรับการใช้งานในบริบทพื้นที่จริงได้ดี แต่ยังมีข้อจำกัดในด้านความถูกต้องและความครบถ้วนของข้อมูล ซึ่งขึ้นอยู่กับความทันตัวของข้อมูลผู้ใช้งานในพื้นที่ รวมถึงความพร้อมของอุปกรณ์และสภาพแวดล้อมในการใช้งานจริง ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบในบางกรณี นอกจากนี้ขอบเขตของการทดลองยังจำกัดอยู่ในพื้นที่ตำบลป่าตาล จังหวัดลพบุรี จึงอาจยังไม่ครอบคลุมบริบทการใช้งานในพื้นที่อื่น

แนวทางการพัฒนาในอนาคตสามารถขยายพื้นที่ศึกษาให้ครอบคลุมมากยิ่งขึ้น เชื่อมโยงข้อมูลกับแหล่งข้อมูลภายนอก และเพิ่มฟังก์ชันการใช้งานเพื่อสนับสนุนการท่องเที่ยวเชิงสร้างสรรค์ รวมถึงส่งเสริมการมีส่วนร่วมของชุมชนในระดับที่กว้างขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความยั่งยืนของระบบในระยะยาว

5. บทสรุป

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการออกแบบและพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันแผนที่ท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมในพื้นที่ตำบลป่าตาล จังหวัดลพบุรี โดยบูรณาการเทคโนโลยีเว็บแอปพลิเคชัน แพลตฟอร์มสารสนเทศภูมิศาสตร์ และการเข้าถึงข้อมูลผ่านคิวอาร์โค้ด เพื่อสนับสนุนการเข้าถึงข้อมูลเชิงพื้นที่ในบริบทการใช้งานจริง ระบบถูกออกแบบภายใต้สถาปัตยกรรมแบบลูกข่าย-แม่ข่าย และแยกโมดูลการทำงานอย่างชัดเจน เพื่อรองรับการจัดการข้อมูล การแสดงผลแผนที่ และการโต้ตอบของผู้ใช้งานหลายกลุ่ม

ผลการทดลองและการทดสอบระบบแสดงให้เห็นว่าเว็บแอปพลิเคชันสามารถทำงานได้ครบถ้วนตามฟังก์ชันที่ออกแบบไว้ และการทดลองใช้งานจริงยืนยันถึงความเหมาะสมของสถาปัตยกรรมระบบและ

บทความวิจัย (Research Article)

กระบวนการกำกับดูแลข้อมูล โดยเฉพาะการแยก
บทบาทระหว่างผู้ช่วยวิจัยและผู้ดูแลระบบซึ่งช่วยเพิ่ม
ความน่าเชื่อถือของข้อมูล

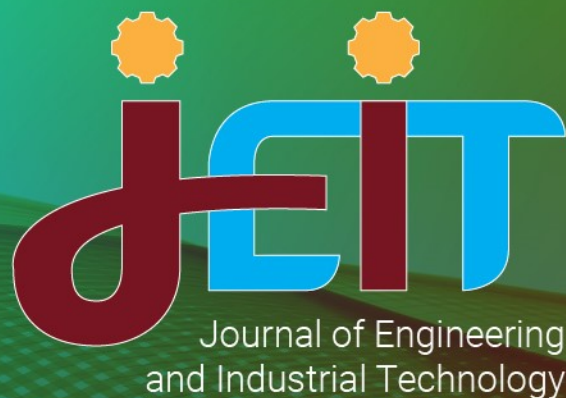
ผลการประเมินจากกลุ่มตัวอย่างจำนวน 210 คน
พบว่าผู้ใช้งานมีความพึงพอใจต่อระบบอยู่ในระดับดี
ทุกด้าน สะท้อนศักยภาพของระบบในการนำไปใช้งาน
จริง และสามารถใช้เป็นต้นแบบในการพัฒนาระบบ
สารสนเทศการท่องเที่ยวเชิงพื้นที่ในระดับชุมชนและ
พื้นที่อื่นต่อไปในอนาคต

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Yanis, M. Zainal, R. A. Putra, and A. Y. Paembonan, "Integration of QR-Code and Web-Based Applications for Developing Digital Tourism in Iboih Village, Indonesia as a Lesson Learned Media on the Volcanic Island," *GeoJournal of Tourism and Geosites*, vol. 47, no. 2, pp. 499-507, 2023. DOI: 10.30892/gtg.47217-1049.
- [2] S. Amir, N. Dura, M. A. Yusof, H. Nakamura, and R. A. Nongs, "Challenges of Smart Tourism in Malaysia Eco-Tourism Destinations," *Planning Malaysia*, vol. 18, no. 4, pp. 442-451, 2020. DOI: 10.21837/pm.v18i14.844.
- [3] คม คัมภีรานนท์, "การวิเคราะห์ความสามารถในการแข่งขันของ Smart Tourism (การท่องเที่ยวอัจฉริยะ) ในประเทศไทย โดยใช้แนวคิด Diamond Model," *วารสารสุทธิปริทัศน์*, ปีที่ 33, ฉบับที่ 107, หน้า 39-50, ก.ค. - ก.ย. 2562.
- [4] S. S. Jilong, A. R. A. Rasam, R. Ghazali, S. A. Jaafar, and F. D. S. Bahry, "Development of a Web Mapping System for Tourism Attractive Places in Bintulu, Sarawak," *Journal of Information and Knowledge Management (JIKM)*, vol. 13, no. 2, pp. 92-105, 2023. DOI: 10.24191/jikm.v13i2.9118.
- [5] บังอร บุญปั้น, และ สุพิชฌาย์ ธนารุณ, "การประยุกต์ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์เพื่อสร้างแผนที่ออนไลน์การท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมกลุ่มชาติพันธุ์ลาว: กรณีศึกษา อำเภอนครหลวง จังหวัดพระนครศรีอยุธยา," *วารสารวิชาการอยุธยาศึกษา*, ปีที่ 14, ฉบับที่ 1, หน้า 102-116, ม.ค. - มิ.ย. 2565.
- [6] สุรวัช หมู่เก็ม, "การจัดการระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ สำหรับการพัฒนาเส้นทางท่องเที่ยวเชิงชุมชนเชิงอาหารอย่างยั่งยืน กรณีศึกษา ตำบลท่าข้าม จังหวัดสงขลา," ใน *รายงานสืบเนื่องจากการประชุม การประชุมหาดใหญ่วิชาการระดับชาติและนานาชาติ ครั้งที่ 16*, 2568, หน้า 776-786.
- [7] ไพศาล กาญจนวงศ์, และ อาบทิพย์ กาญจนวงศ์, "การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีบาร์โค้ดสองมิติเพื่อบริการข้อมูลให้นักท่องเที่ยวในแหล่งท่องเที่ยว กรณีศึกษา วัดพระธาตุตอดยสุเทพวรวิหาร เชียงใหม่," *วารสารครินครินทรวัดวิชัยและพัฒนา (สาขามนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์)*, ปีที่ 9, ฉบับที่ 17, หน้า 120-134, ม.ค. - มิ.ย. 2560.
- [8] ภาคภูมิ คงนิล, สุวิมล มรรควิบูลย์ชัย, อุบลรัตน์ ศิริสุขโกคา, และ ไพศาล สิมะเลาเต่า, "การพัฒนาต้นแบบเว็บแอปพลิเคชันส่งเสริมการท่องเที่ยวเชิงประวัติศาสตร์และธรรมชาติของจังหวัดอุดรดิษฐ์บนแผนที่ภูมิศาสตร์," ใน *รายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม ครั้งที่ 15*, 2566, หน้า 442-452.

บทความวิจัย (Research Article)

- [9] กิตติโชค คุ่มครอง, อุบลรัตน์ ศิริสุขโกคา, และ
ไพศาล สิมาลาเต่า, "การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันให้บริการแนะนำสถานที่ท่องเที่ยวด้วย
ปัญญาประดิษฐ์ร่วมกับระบบบริหารจัดการ
ข้อมูลบนแผนที่ภูมิศาสตร์ กรณีศึกษาจังหวัด
ราชบุรี," *วารสารวิทยาสารสนเทศและเทคโนโลยี*,
ปีที่ 6, ฉบับที่ 1, หน้า 43-55, ม.ค. - มิ.ย.
2568.
- [10] สิริวรรณพิชา ธนจิราวัฒน์, และ ยุภาวรรณ ดวง
อินตา, "การพัฒนาการท่องเที่ยวเชิงชาติพันธุ์
ลาวครั่งและลาวเวียงในจังหวัดนครปฐมผ่านอัต
ลักษณ์ทางภาษาและวัฒนธรรมประเพณี,"
วารสารนวัตกรรมการศึกษาและการวิจัย, ปีที่ 8,
ฉบับที่ 2, หน้า 556-579, เม.ย. - มิ.ย. 2567.
DOI: 10.14456/jeir.2024.35.
- [11] วุฒิพงษ์ แสงมณี, และ รัชมี สุวรรณวีระกำธร,
"การออกแบบและพัฒนาเฟรมเวิร์คเพื่อ
สนับสนุนระบบบริการข้อมูลภูมิสารสนเทศบน
เครือข่ายอินเทอร์เน็ตสำหรับการท่องเที่ยวเชิง
วัฒนธรรมในจังหวัดปัตตานี," *วารสารปริชาต*,
ปีที่ 37, ฉบับที่ 4, หน้า 812-827, ต.ค. - ธ.ค.
2567. DOI: 10.55164/pactj.v37i4.271428.



วารสารวิศวกรรม และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

Journal of Engineering and Industrial Technology,
Kalasin University

กองบรรณาธิการวารสาร
"วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์"
"Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University"
คณะวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
62/1 ถนนเกษตรสมบูรณ์ ต.กาฬสินธุ์ อ.เมือง จ.กาฬสินธุ์ 46000
โทร: 088-574-2199 Email: jeit@ksu.ac.th