วารสารวิชาการ

พลังงานทดแทนสู่ชุมชน

ปีที่ 9 ฉบับที่ 2 เดือนพฤษภาคม- สิงหาคม 2569

J-REC

JOURNAL
OF RENEWABLE
ENERGY FOR
COMMUNITY

2

J-REC BY **TRECA**

วารสารวิชาการ

พลังงานทดแทนสู่ชุมชน

J-REC

JOURNAL OF RENEWABLE ENERGY FOR COMMUNITY

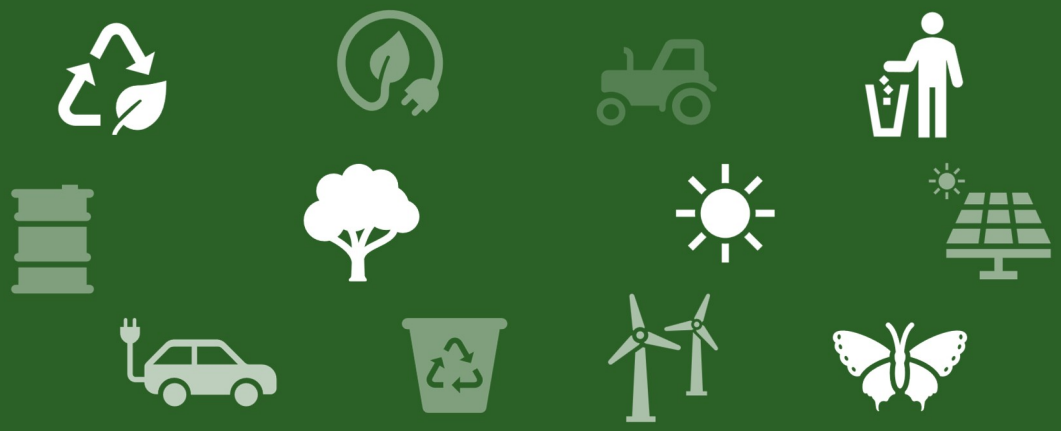
สมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ต.คลองหก อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12110 อีเมล : treca2012@gmail.com โทร : 02 549 3497

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเป็นเอกสารเผยแพร่งานผลงานวิชาการและงานวิจัยทางด้านพลังงานทดแทน ในเครือข่ายพลังงานของประเทศไทย
2. เพื่อเป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนความรู้ทั้งภาคทฤษฎีและภาคปฏิบัติ และงานวิชาการใหม่ๆ ด้านพลังงานทดแทนระหว่างนักวิจัยและผู้ใช้งานในภาครัฐและเอกชน
3. เพื่อส่งเสริมสนับสนุนให้คณาจารย์ บุคลากรทางการศึกษา นิสิต นักศึกษา และผู้สนใจทำผลงานทางด้านพลังงานทดแทนที่เป็นประโยชน์ต่อสังคมและประเทศชาติ
4. เพื่อเป็นเอกสารรวบรวมรายงานวิจัยและบทความทางวิชาการที่มีคุณภาพและมีคุณค่าทางด้านพลังงานทดแทนสู่การใช้



เจ้าของและลิขสิทธิ์ สมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย
ที่ตั้งสมาคมฯ ศูนย์วิจัยและบริการด้านพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
39 ม.1 ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12110
โทร. 0-2549-3497 www.reca.or.th/jrec

วารสารวิชาการพลังงานทดแทนสู่ชุมชน
พิมพ์ออกเผยแพร่ 3 ฉบับต่อปี ตั้งแต่ เดือนมกราคม-เมษายน พฤษภาคม-สิงหาคม และ กันยายน-ธันวาคม
ติดต่อขอรับเป็นสมาชิกได้โดยตรงที่ สมาคมพลังงานทดแทนแห่งประเทศไทย

วัตถุประสงค์สมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชน แห่งประเทศไทย

1. เพื่อส่งเสริมความร่วมมือ ทางด้านวิชาการระหว่างภาครัฐ ภาคเอกชนและภาคประชาชน ในด้านพลังงาน ทดแทน การอนุรักษ์พลังงานและสิ่งแวดล้อมเพื่อชุมชนต่างๆ ทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศ
2. เพื่อจัดหาทุนเพื่อสนับสนุนการศึกษาวิจัย ฝึกอบรม การดำเนินโครงการด้านพลังงานทดแทนให้กับภาครัฐ ภาคเอกชนและภาคประชาชน จากแหล่งทุนทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศ
3. ไม่ดำเนินการส่งเสริมและพัฒนากิจกรรมใดๆ ที่มุ่งไปสู่การดำเนินงานทางการเมือง
4. ไม่ดำเนินการให้มีการจัดตั้งโต๊ะบิลเลียดหรือกระทำการอันผิดต่อขนบธรรมเนียมและจารีตประเพณี ที่ดีของสังคมไทย
5. เพื่อส่งเสริมให้สมาคมมีรายได้จากโควต้าสลากกินแบ่งรัฐบาล หรือสลากการกุศลของรัฐบาลที่พิมพ์ออกจำหน่าย เพื่อนำรายได้มาใช้ดำเนินการตามวัตถุประสงค์ของสมาคม
6. เพื่อส่งเสริมกิจกรรมทางสังคมด้านสาธารณะประโยชน์ด้านต่างๆ รวมถึงกิจกรรมเพื่อการจัดสวัสดิการให้กับสมาชิก

หลักการและเหตุผล

ในปัจจุบันทั่วโลกต้องเผชิญกับปัญหาด้านพลังงานที่รุนแรงกว่าในอดีตมากอันเนื่องมาจากความต้องการใช้พลังงานและราคาพลังงานเชื้อเพลิงที่มีการปรับตัวอยู่ในระดับสูงอย่างต่อเนื่อง ผลกระทบที่สำคัญจากปัญหาดังกล่าวคือความมั่นคง ทางด้านการจัดหาพลังงาน ขณะเดียวกันการใช้พลังงานที่สูงขึ้นก็ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจนเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก (Green House Effects) ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลกอย่างรุนแรง ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาด้านพลังงานดังกล่าวจึงได้มีแนวคิดในการส่งเสริมและสนับสนุนให้มีการใช้พลังงานหมุนเวียนกันมากขึ้น โดยเฉพาะพลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่มีการนำมาใช้เป็นระยะเวลายาวนาน ไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม (Green & Clean Energy) อีกทั้งยังสามารถนำมาใช้ได้อย่างไม่มีวันหมดสิ้น

จุดมุ่งหมาย

การทำงานกันทั้งส่วนภาครัฐและประชาชนในการใช้พลังงานทดแทน การอนุรักษ์พลังงานและใส่ใจต่อสิ่งแวดล้อมของชุมชนในประเทศไทย ตลอดจนการศึกษาวิจัย ดำเนินการหาเทคโนโลยีที่เหมาะสมต่างๆ มาใช้เป็นพลังงานทดแทนเพื่อความเหมาะสมและให้เกิดความยั่งยืนของชุมชนและประชาชนในประเทศไทย

วารสารวิชาการพลังงานทดแทนสู่ชุมชน

JOURNAL OF RENEWABLE ENERGY FOR COMMUNITY

คณะกรรมการจัดทำวารสารวิชาการสู่ชุมชน

คณะกรรมการที่ปรึกษา

อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

กองบรรณาธิการ

หัวหน้ากองบรรณาธิการ	รองศาสตราจารย์ ดร.วิรชัย โรยนรินทร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองบรรณาธิการ	นายกสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย (รศ.ดร.พิสิษฏ์ มณีโชติ)
ผู้ช่วยกองบรรณาธิการ	กรรมการสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย (ผศ.ดร.จิรวดี ผล ประเสริฐ)
กองบรรณาธิการ	ศาสตร์ตราจารย์ ดร.สมชาย วงศ์วิเศษ ศาสตร์ตราจารย์ ดร.ทนงกียรติ เกียรติศิริโรจน์ ศาสตร์ตราจารย์ ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช รองศาสตราจารย์ ดร.ธนิท เรืองรุ่งชัยกุล รองศาสตราจารย์ ดร.ประพิธาริ์ ธนารักษ์ ผู้ช่วยศาสตร์ตราจารย์ ดร.วรจิตต์ เศรษฐพรรค์ ผู้ช่วยศาสตร์ตราจารย์ ดร.ปรีชา ศรีประภาคาร ผู้ช่วยศาสตร์ตราจารย์ วารุณี อริยะวิริยะนันท์ ดร.ชานนท์ บุญมีพิพิธ

เลขานุการ

นางสาวกิ่งกานต์ พันธุวาณิชย์

ผู้ช่วยเลขานุการ

นางสาวกชมาศ แม่นยำ

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร.สุรเชรษฐ์ สีชำนาญ	วิศกรรมศาสตร์ สาขาเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขต สกลนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรวิศ สอนสารี	คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม
ดร.ณัฐวุฒิ ขาวสะอาด	สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา ศรีประภาคาร	คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ดร.บงกช ประสิทธิ์	วิทยาลัยพลังงานทดแทนและสมาร์ตกริดเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนเรศวร
ดร.ชานนท์ บุญมีพิพิธ	วิทยาลัยพลังงานและสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืนรัตนโกสินทร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

บทบรรณาธิการ

วารสารวิชาการพลังงานทดแทนสู่ชุมชนโดยร่วมมือของเครือข่ายสมาชิกสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย (TRECA) ซึ่งเป็นฉบับที่ 1 ของปีที่ 9 และนับเป็นการตีพิมพ์สารสารในรูปแบบออนไลน์ ISSN 2773-8693 (Online) วารสารฉบับนี้เป็นเนื้อหาของบทความทางวิชาการมุ่งสร้างผลงานที่เด่นทางด้านวิจัยและมุ่งสู่การใช้งานจริง ซึ่งได้รวบรวมความรู้ทางวิชาการที่สามารถถ่ายทอดให้แก่สังคมทางด้านพลังงานทดแทนในสาขาต่างๆ เพื่อทำให้วารสารนี้เป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนวิชาการและแนวความคิด ในแวดวงวิชาการทั้งผู้วิจัยและผู้ใช้งาน อันเป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่งในการสร้างผลงานทางวิชาการสู่ชุมชนและสังคม โดยดำรงไว้ซึ่งความเป็นตัวตนทางวิชาการของผู้เขียนและวัตถุประสงค์ของสมาคมฯที่ทรงคุณค่า บทความในวารสารฉบับนี้มีจำนวนทั้งสิ้น 10 บทความ ซึ่งในแต่ละบทความมีความเป็นไปได้ในทิศทางเดียวกันของรูปแบบพลังงานทดแทนต่างๆ ครอบคลุมกระบวนการในการวิจัยและการศึกษาสู่ภาคการใช้งาน ผู้อ่านจะได้รับความรู้ที่หลากหลายจากการอ่านวารสารฉบับนี้ ในแนวทางที่จะจุดประกายความคิดหรือการต่อยอดความคิดทางด้านพลังงานทดแทนสาขาต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการอ่านอย่างวิพากษ์ และตั้งคำถามเพื่อให้เกิด การแลกเปลี่ยนในทางวิชาการอย่างสร้างสรรค์ อันจะช่วยให้ความรู้และความคิดเดิมถูกแพร่ขยายออกไปได้อย่างกว้างขวาง อีกทั้งให้วารสารฉบับนี้เป็นแหล่งความรู้ในทุกระดับภาคส่วน ของทุกคนในสังคมไทยโดย ไม่ยึดติดตนเองและอยู่กับความรู้ความคิดของตนเองอยู่เสมออย่างไม่หยุดนิ่ง และท้ายที่สุดแล้วความรู้ความคิด ที่ถูกต่อขยายออกไปนั้น ก็จะนำไปสู่การปรับเปลี่ยนกระบวนทัศน์ทางความคิดของสังคมและชุมชน อย่างกว้างขวาง อันจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางวิชาการของสังคมเพื่อความยั่งยืนของประเทศชาติ กองบรรณาธิการขอขอบพระคุณคณะทำงานทุกท่าน คณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความวิชาการและทุกภาคส่วนที่ได้สละเวลาอันมีค่าอ่านบทความ เพื่อความถูกต้องทางวิชาการ และเป็นวารสารที่ดีต่อการพัฒนาประเทศ ทั้งนี้หากผู้อ่านมีความประสงค์จะตีพิมพ์บทความทางออนไลน์ที่ www.reca.or.th/jrec เพื่อ การพิจารณาและตีพิมพ์ในวารสารฉบับต่อๆไป

กองบรรณาธิการ

สารบัญ

นวัตกรรมด้านพลังงาน

การออกแบบระบบตรวจวัดและติดตามการใช้พลังงานไฟฟ้าในอาคาร.....9
การพัฒนาและการตรวจสอบแบบจำลองวงจรสมมูลอันดับหนึ่งของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนด้วยการทดสอบฮาร์ดแวร์.....19
การเปรียบเทียบผลการผลิตไฟฟ้าระยะสั้นกับผลการจำลองด้วยโปรแกรม PVsyst โครงการระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ขนาด 500 กิโลวัตต์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ 32
การประเมินศักยภาพการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนทิ้งของไอเสียผ่านวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์: กรณีใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดท่อหมุนเวียน.....40

พลังงานเพื่อการเกษตร

การพัฒนาระบบควบคุมความชื้นและอุณหภูมิสำหรับโรงเรือนปลูกเมล่อน.....49
โรงเรือนประหยัดพลังงานสำหรับการเพาะชำต้นกล้าบีทรูทโดยการใช้เทคนิคการทำความเย็นแบบผสมผสาน.....60

พลังงานเพื่อชุมชน

ผลกระทบของการให้ความร้อนทางตรงและทางอ้อมในการผลิตถ่านชีวภาพจากแกลบกาแฟ.....72

การบริหารจัดการพลังงานชุมชน

การประเมินมาตรการปรับปรุงกรอบอาคารด้วยแบบจำลองพลังงานในระดับกลุ่มอาคารสถานศึกษา: กรณีศึกษามหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์.....81

การออกแบบระบบตรวจวัดและติดตามการใช้พลังงานไฟฟ้าในอาคาร

Design of Building Energy Measurement and Monitoring System

พรหมพักตร์ บุญรักษา[1] ธีระพงษ์ บุญรักษา[2*] ภัทรพล ภู่ยอดยิ่ง[2] ธีรวัฒน์ ป้องกัน[2] เศรษฐวัฒน์ หนูขาว[2] วริทธิ์ แย้มวงษา[2]
อนุสรณ์ ผ่องประภา[3] เกศรา พละไชย[4] และ บุญเรือง มะรังศรี[5]

Promphak Boonraksa[1] Terapong Boonraksa[2] Pattarapon Pooyodying[2] Teerawat Pongkan[2]
Settawat Nookhaw[2] Valit Yamwongsa[2] Anusorn Phongprapa[3] Kedsara Palachai[4] and Boonruang Marungsri[5]

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์และเทคโนโลยีอัจฉริยะ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ นนทบุรี 11000
[2] สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ นครปฐม 73170

[3] สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี 10170
[4] สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี 10170
[5] สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา 30000
[1] Department of Mechatronics Engineering, Faculty of Engineering and Architecture,

Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Nonthaburi 11000

[2] School of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology
Rattanakosin, Nakhon Pathom, 73170

[3] Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Bangkokthonburi University, 10170

[4] School of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Bangkokthonburi University,10170

[5] School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology,

Nakhon Ratchasima, 30000

[*]Corresponding author: Tel.: 0897177065 E-mail address: terapong.boo@rmutr.ac.th

Abstract

The electrical energy demand in buildings continues to rise, making energy monitoring and tracking an essential factor for effective energy management. This study aims to design and develop an electrical energy measurement system capable of collecting accurate and reliable data, while supporting real-time monitoring of energy usage. The developed system can seamlessly transfer measurement data from monitoring devices to a user-friendly display platform, enabling convenient access for users. System testing, conducted in comparison with a standard energy measurement instrument (Fluke 1738 Power Logger), showed that the real power (P) and apparent power (S) have deviations of only 3.485% and

0.832%, respectively. The measurement results had relatively small measurement deviations. These findings demonstrate that the proposed system is accurate and practical for real-world applications, and holds strong potential as a tool to support building energy management and future development toward smart building systems.

Keywords: Energy measurement system, Energy management system, Power meter, Energy monitoring system

บทคัดย่อ

การใช้พลังงานไฟฟ้าในอาคารมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้การตรวจวัดและติดตามการใช้พลังงานเป็นปัจจัยสำคัญต่อการจัดการพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าที่สามารถเก็บข้อมูลได้อย่างถูกต้อง เชื่อถือได้ และรองรับการติดตามการใช้พลังงานแบบเรียลไทม์ ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถเชื่อมโยงข้อมูลจากอุปกรณ์ตรวจวัดไปยังแพลตฟอร์มแสดงผลที่ใช้งานง่าย เพื่อเพิ่มความสะดวกในการเข้าถึงข้อมูลของผู้ใช้งาน ทำการทดสอบระบบโดยเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดพลังงานมาตรฐาน Fluke 1738 Power Logger พบว่ากำลังไฟฟ้าจริง (P) และกำลังไฟฟ้าปรากฏ (S) มีความคลาดเคลื่อนเพียง 3.485% และ 0.832% ผลการวัดมีค่าความคลาดเคลื่อนค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมืออ้างอิง แสดงให้เห็นว่าระบบที่พัฒนาขึ้นมีความถูกต้องเหมาะสมต่อการใช้งานจริง และมีศักยภาพในการสนับสนุนการจัดการพลังงานในอาคาร รวมถึงการต่อยอดสู่ระบบอาคารอัจฉริยะในอนาคต

คำสำคัญ: การตรวจวัดพลังงานไฟฟ้า ระบบจัดการพลังงาน พาวเวอร์มิเตอร์ ระบบติดตามการใช้พลังงาน

บทนำ

การใช้พลังงานไฟฟ้าในอาคารมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องตามความต้องการใช้งานด้านความสะดวกสบายและเทคโนโลยีสมัยใหม่ การจัดการพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการลดค่าใช้จ่ายและเพิ่มความยั่งยืนของการดำเนินงาน ระบบตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าถือเป็นเครื่องมือพื้นฐานที่ช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถติดตาม วิเคราะห์ และควบคุมการใช้พลังงานได้อย่างแม่นยำ การออกแบบระบบตรวจวัดที่เหมาะสมสำหรับอาคารจึงมีบทบาทสำคัญต่อการวางแผนด้านพลังงาน การบำรุงรักษา และการพัฒนาสู่มาตรฐานอาคารอัจฉริยะ

การบริหารจัดการพลังงานในอาคารถือเป็นประเด็นสำคัญที่ได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากอาคารเป็นแหล่งใช้พลังงานขนาดใหญ่และมีแนวโน้มการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง การพัฒนาระบบตรวจวัดและจัดการพลังงานไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพจึงมีบทบาทสำคัญต่อการลดการสิ้นเปลืองพลังงานและการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ดังนั้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจึงมุ่งเน้นไปที่แนวทางการออกแบบระบบตรวจวัดพลังงานอาคาร เทคโนโลยีด้านสถาปัตยกรรมระบบการจัดการพลังงาน และวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อสนับสนุนการวางแผนพลังงานอย่างยั่งยืน จากงานวิจัยก่อนหน้าได้มีการออกแบบและพัฒนาระบบตรวจวัดและจัดการพลังงานในอาคารโดยใช้โครงสร้างแบบสามชั้น ซึ่งประกอบด้วย (1) Field spacing tier สำหรับเก็บข้อมูลการใช้พลังงานรูปแบบต่าง ๆ เช่น ไฟฟ้า น้ำ และก๊าซ, (2) Network communication tier สำหรับถ่ายโอนและประมวลผลข้อมูลจากอุปกรณ์วัดไปยังระบบคอมพิวเตอร์ และ (3) Station level management tier สำหรับการเฝ้าติดตาม วิเคราะห์ข้อมูล และคาดการณ์แนวโน้มการใช้พลังงานในอนาคต ระบบสามารถทำการตรวจวัดและวิเคราะห์พลังงานแบบเรียลไทม์ ทำให้การจัดการพลังงานในอาคารมีความละเอียดมากขึ้นและตอบสนองต่อเป้าหมายด้านการประหยัดพลังงานและการลดการปล่อยคาร์บอน สะท้อนให้เห็นถึงประโยชน์ของระบบ

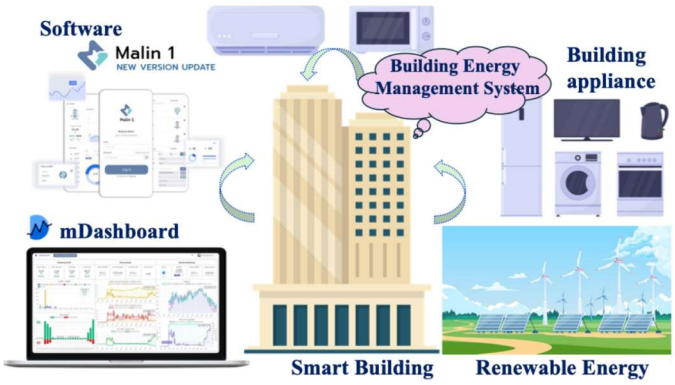
ตรวจวัดพลังงานอาคารที่สามารถใช้เป็นเครื่องมือเชิงปฏิบัติในการจัดการพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังมีความสามารถในการทำนายแนวโน้มการใช้พลังงานเพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลเชิงวิทยาศาสตร์ในการวางแผนและตัดสินใจเชิงนโยบายในอนาคต [1] มีการเสนอแนวคิดใหม่โดยเน้นการออกแบบเชิงสังคม–เทคนิค (Sociotechnical design) ซึ่งไม่ได้พิจารณาเพียงมิติทางเทคโนโลยี แต่ยังผสานกลยุทธ์ด้านพฤติกรรมผู้ใช้อาคารเข้าไปในระบบจัดการพลังงานด้วย งานวิจัยพัฒนาหลักการออกแบบที่สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางเชิงปฏิบัติในการออกแบบสถาปัตยกรรมของระบบจัดการพลังงานให้ตอบสนองทั้งประสิทธิภาพพลังงานและพฤติกรรมการใช้งานจริง นอกจากนี้ยังมีการสร้างต้นแบบการทดสอบ เพื่อยืนยันความเป็นไปได้และศักยภาพในการประยุกต์ใช้จริงในอาคารภาครัฐ [2] งานวิจัยด้านการปรับปรุงอาคารเพื่อลดการใช้พลังงาน (Building energy retrofits) ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง เนื่องจากอาคารเก่ามีการใช้พลังงานสูงและมักเกิดช่องว่างระหว่างค่าพลังงานที่คาดการณ์กับค่าจริง (Performance gap) ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิผลของมาตรการปรับปรุงที่ผ่านมา งานวิจัยหลายชิ้นเน้นการใช้การจำลองพลังงานของอาคาร (Building energy simulations) เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์และตัดสินใจ แต่ข้อจำกัดคือไม่สามารถสะท้อนข้อมูลจริงของการใช้งานอาคารได้ครบถ้วน จึงเกิดความจำเป็นที่จะต้องพัฒนาแนวทางที่รวมการตรวจวัดจริงเข้ากับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การประยุกต์ใช้ Error Domain Model Falsification (EDMF) ซึ่งเป็นเทคนิค Bayesian inference สำหรับจัดการกับความไม่แน่นอน ร่วมกับ Hierarchical algorithm ที่เน้นการเลือกตำแหน่งและเวลาการตรวจวัดโดยใช้เกณฑ์การเพิ่มค่าสารสนเทศสูงสุด (Maximizing joint entropy) การบูรณาการสองแนวทางนี้ช่วยลดจำนวนการตรวจวัดที่จำเป็นลงครึ่งหนึ่ง แต่ยังคงได้ผลลัพธ์ในการระบุแบบจำลองใกล้เคียงกับการตรวจวัดเต็มรูปแบบ อีกทั้งยังช่วยลดความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์และการพยากรณ์พลังงาน [3] มีการเสนอแนวทางแบบผสมผสานในการออกแบบ Building Automation and Control Systems (BACS) โดยผสานมาตรฐาน EN 15232 ซึ่งเป็นกรอบทางเทคนิคในการประเมินฟังก์ชันการควบคุมพลังงานอาคาร ร่วมกับ Smart Readiness Indicator (SRI) ที่พัฒนาตาม Energy Performance of Buildings Directive 2018 (EPBD 2018) เพื่อใช้วัดระดับความอัจฉริยะของอาคาร แนวทางนี้ช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงาน และสนับสนุนการพัฒนาอาคารให้ตอบสนองความต้องการของผู้ใช้และการทำงานร่วมกับไมโครกริด [4]

อาคารเป็นแหล่งใช้พลังงานขนาดใหญ่ที่มีแนวโน้มการใช้ไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้การจัดการพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพกลายเป็นปัจจัยสำคัญเพื่อลดค่าใช้จ่ายและการปล่อยก๊าซเรือนกระจก การตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าถือเป็นเครื่องมือพื้นฐานที่ช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถติดตาม วิเคราะห์ และวางแผนการใช้พลังงานได้อย่างแม่นยำ อย่างไรก็ตาม ระบบตรวจวัดแบบดั้งเดิมยังมีข้อจำกัดด้านความแม่นยำและการเข้าถึงข้อมูล งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นออกแบบและพัฒนาระบบตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าที่มีความถูกต้อง เชื่อถือได้ และรองรับการใช้งานจริง เพื่อสนับสนุนการจัดการพลังงานและการพัฒนาอาคารสู่ความเป็นอัจฉริยะในอนาคต

การตรวจวัดพลังงานไฟฟ้า

การตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าเป็นกระบวนการสำคัญที่ช่วยให้สามารถประเมินและวิเคราะห์การใช้พลังงานในระบบไฟฟ้าได้อย่างถูกต้อง การตรวจวัดที่แม่นยำทำให้สามารถระบุพฤติกรรมการใช้พลังงาน ค้นหาจุดที่สิ้นเปลือง และวางแผนปรับปรุงประสิทธิภาพได้อย่างเป็นระบบ ปัจจุบันมีการนำอุปกรณ์วัดและระบบสื่อสารข้อมูลที่ทันสมัยมาใช้ เพื่อเพิ่มความสะดวกในการติดตามและจัดเก็บข้อมูลแบบเรียลไทม์ การตรวจวัดที่มีมาตรฐานจึงเป็นรากฐานของการจัดการพลังงานทั้งในระดับครัวเรือน อาคาร และโรงงานอุตสาหกรรม อีกทั้งยังมีส่วนสำคัญต่อการลดต้นทุนและการพัฒนาอย่างยั่งยืน มิเตอร์ไฟฟ้าแบบสองทิศทาง (Bidirectional Energy Meter) ถูกออกแบบให้มีฟังก์ชันด้าน Home Automation เพิ่มเติม โดยสามารถวัดค่าพลังงานจากโหลดและข้อมูลจากตัวควบคุมการชาร์จ แล้วส่งข้อมูลเข้าสู่ฐานข้อมูล แอปพลิเคชัน Android จะดึงข้อมูลจากฐานข้อมูลมาแสดงผลบนหน้าจอ พร้อมทั้งสามารถตรวจสอบสถานะของสวิตช์โหลดผ่านฐานข้อมูลได้อีกด้วย [5][6] โครงสร้างการทำงานโดยรวมของระบบอัตโนมัติภายในอาคารแสดงในรูปที่ 1 กรอบการดำเนินงานประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก ขั้นตอนแรก คือ การตรวจสอบพลังงานและการเก็บข้อมูล โดยทำการรวบรวมข้อมูลการใช้พลังงานของอาคารและข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับอาคาร เช่น ทิศทางอาคาร ผนัง หลังคา ระบบหน้าต่างและกระจก ประตู พื้นฐานและชั้นใต้ดิน วัสดุผิวภายนอก กันสาด ค่า SHGC ค่าการเป็นฉนวน (R-value, U-value) และการส่งผ่านแสง ตลอดจนการติดตามพฤติกรรมการใช้พลังงานของผู้ใช้อาคารผ่านแบบสอบถาม การสำรวจ การสัมภาษณ์ และการตรวจวัด

แบบเรียลไทม์ด้วยเซนเซอร์ IoT ขั้นตอนที่สอง คือ การพัฒนาแบบจำลองพฤติกรรมผู้ใช้อาคารเพื่อสร้างตารางการใช้งานและรูปแบบการใช้พลังงานสังเคราะห์จากข้อมูลที่เก็บได้ และขั้นตอนสุดท้ายคือการนำข้อมูลจากทั้งสองขั้นตอนมาวิเคราะห์ด้วยการสร้างแบบจำลองพลังงานอาคารและการประเมินประสิทธิภาพการใช้พลังงาน เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่สะท้อนถึงพฤติกรรมจริงและสภาพการใช้พลังงานของอาคารอย่างครบถ้วน [7]



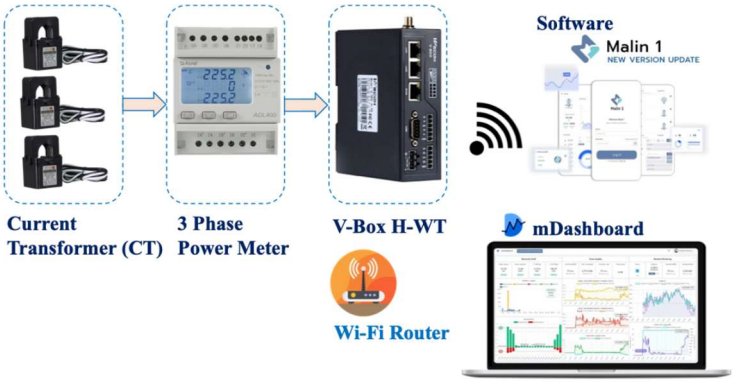
รูปที่ 1 ระบบตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าในอาคารอัจฉริยะ

วิธีการวิจัย

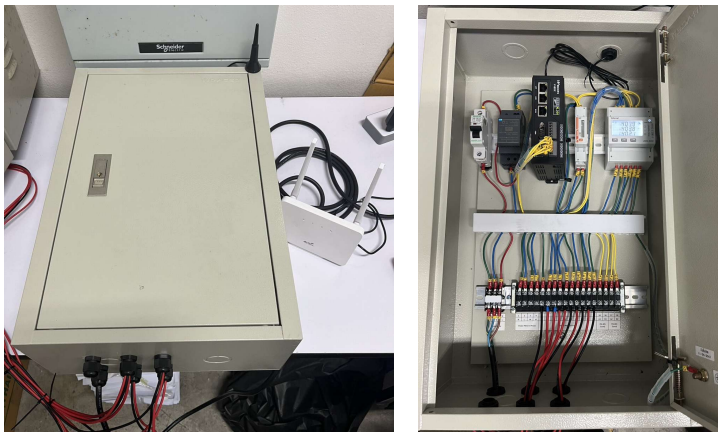
การจัดการพลังงานไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพจำเป็นต้องอาศัยทั้งการตรวจวัดและการคำนวณที่ถูกต้องและแม่นยำ การออกแบบระบบตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าจะช่วยให้สามารถเก็บข้อมูลด้านแรงดัน กระแส กำลังไฟฟ้า และพลังงานได้อย่างต่อเนื่องและเป็นระบบ ข้อมูลเหล่านี้เป็นรากฐานสำคัญในการวิเคราะห์รูปแบบการใช้ไฟฟ้าและประสิทธิภาพของโหลด ในขณะเดียวกัน การคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าก็เป็นอีกส่วนที่มีความสำคัญ เพราะช่วยแปลงข้อมูลที่วัดได้ให้กลายเป็นตัวเลขที่สะท้อนต้นทุนการใช้พลังงานจริง การคำนวณดังกล่าวสามารถทำได้ทั้งในมิติของพลังงานแอคทีฟ พลังงานรีแอคทีฟ และการคำนวณค่าไฟฟ้าตามอัตราของการไฟฟ้า ซึ่งจะช่วยสนับสนุนการวางแผนประหยัดพลังงานและการจัดการด้านเศรษฐศาสตร์พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1) การออกแบบระบบตรวจวัดพลังงานไฟฟ้า

การออกแบบระบบตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าเป็นขั้นตอนสำคัญในการติดตามและควบคุมการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ โดยระบบที่ดีจะต้องสามารถเก็บข้อมูลแรงดัน กระแส กำลังไฟฟ้า และพลังงานได้อย่างถูกต้องเพื่อนำไปวิเคราะห์และปรับปรุงการจัดการพลังงาน รูปที่ 2 แสดงชุดประมวลผลและแสดงผลการวัดพลังงานไฟฟ้า ประกอบด้วยพาวเวอร์มิเตอร์ 3 เฟส ที่ใช้สำหรับวัดค่ากำลังไฟฟ้า แรงดัน และกระแสไฟฟ้า จากนั้นข้อมูลจะถูกส่งเข้าสู่ตู้ควบคุมซึ่งทำหน้าที่รวมอุปกรณ์และป้องกันระบบไฟฟ้า ก่อนจะส่งต่อไปยัง V-BOX H-WF ที่เป็นเกตเวย์สำหรับรวบรวมและแปลงสัญญาณเพื่อส่งข้อมูลขึ้นสู่ระบบคลาวด์ผ่านเครือข่าย LAN หรือ Wi-Fi ข้อมูลดังกล่าวจะถูกประมวลผลและจัดเก็บบนแพลตฟอร์ม MALIN 1 และสามารถแสดงผลในรูปแบบกราฟ รายงาน หรือข้อมูลเรียลไทม์ผ่าน mDashboard ทำให้ผู้ใช้งานสามารถติดตามและวิเคราะห์การใช้พลังงานไฟฟ้าได้อย่างสะดวกและแม่นยำ รูปที่ 3 แสดงชุดประมวลผลและแสดงผลการวัดพลังงานไฟฟ้าที่ติดตั้งจริง ระบบตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ไม่ได้ใช้ Raspberry Pi เป็นหน่วยประมวลผลหรือเกตเวย์สำหรับการสื่อสารข้อมูล แต่เลือกใช้ V-BOX H-WF เป็นอุปกรณ์เกตเวย์หลักในการรวบรวมข้อมูลจากพาวเวอร์มิเตอร์และส่งข้อมูลผ่านเครือข่าย LAN หรือ Wi-Fi ไปยังระบบคลาวด์ โดยข้อมูลถูกจัดเก็บและประมวลผลผ่านแพลตฟอร์ม MALIN 1 และแสดงผลผ่าน mDashboard การเลือกใช้โครงสร้างดังกล่าวช่วยลดความซับซ้อนในการเชื่อมต่ออุปกรณ์และเหมาะสมกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยที่มุ่งเน้นการตรวจวัดและติดตามการใช้พลังงานไฟฟ้าแบบเรียลไทม์ ระบบกำหนดช่วงเวลาการบันทึกและจัดเก็บข้อมูลพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าทุก 5 นาที โดยข้อมูลจะถูกส่งผ่าน V-BOX H-WF ไปยังระบบคลาวด์และจัดเก็บบนแพลตฟอร์ม MALIN 1 เพื่อใช้สำหรับการติดตามและวิเคราะห์การใช้พลังงาน ทั้งนี้ ในหนึ่งวันจะประกอบด้วยข้อมูลจำนวน 288 ช่วงเวลา



รูปที่ 2 ชุดประมวลผลและแสดงผลการวัดพลังงานไฟฟ้า



รูปที่ 3 ชุดประมวลผลและแสดงผลการวัดพลังงานไฟฟ้าที่ติดตั้งจริง

2) การคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้า

การคำนวณกำลังและพลังงานไฟฟ้าในระบบสามเฟสมีความสำคัญต่อการติดตามการใช้ไฟฟ้าและการประเมินค่าใช้จ่ายพลังงานอย่างแม่นยำ โดยใช้การบันทึกข้อมูลเป็นช่วงเวลา เพื่อสะท้อนพฤติกรรมการใช้โหลดจริงได้อย่างละเอียดและต่อเนื่องตลอดทั้งวัน ซึ่งช่วยให้สามารถวิเคราะห์กำลังไฟฟ้าจริง กำลังรีแอคทีฟ และพลังงานรวม เพื่อนำไปใช้ในการวางแผนจัดการพลังงานและคิดค่าไฟฟ้าได้ถูกต้องตามเกณฑ์ สามารถคำนวณกำลังไฟฟ้าปรากฏได้ดังสมการที่ (1) และสามารถหาตัวประกอบกำลังและกำลังไฟฟ้าจริงได้จากสมการที่ (2) และ (3)

$$S_t = \sqrt{P_t^2 + Q_t^2} \tag{1}$$

$$PF_t = \frac{P_t}{S_t} \tag{2}$$

$$P_t = \sqrt{3}\, V_{LL} I_L \cos\theta \tag{3}$$

พลังงานไฟฟ้าที่ใช้สามารถคำนวณได้จากค่าเฉลี่ยของกำลังไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลา 5 นาที โดยกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยถูกนำมาคูณกับช่วงเวลา เพื่อให้ได้ค่าพลังงานไฟฟ้าในช่วงนั้น ซึ่งจะได้ทั้งพลังงานไฟฟ้า (kWh) ตามสมการที่ (4) จากนั้นเมื่อนำค่าพลังงานที่ได้จากแต่ละช่วงเวลา 5 นาทีมาบวกกันตลอด 24 ชั่วโมง หรือ 288 ช่วงเวลา จะได้ค่าพลังงานไฟฟ้ารวมต่อวันตามสมการที่ (5) ซึ่งสามารถสะท้อนถึงปริมาณการใช้ไฟฟ้าจริงในหนึ่งวัน ทั้งด้านพลังงานที่นำไปใช้งานโดยตรงและพลังงานรีแอคทีฟ

$$E_{kWh,t} = P_t \times \frac{5}{60} \tag{4}$$

$$E_{day} = \sum_{t=1}^{288} E_{kWh,t} \quad (5)$$

บทความนี้คำนวณค่าไฟฟ้าสำหรับผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทที่ 3 ตารางที่ 1 แสดงอัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลาของการใช้ ซึ่งจะอาศัยข้อมูลกำลังไฟฟ้าที่บันทึกทุก 5 นาที นำมาคูณกับช่วงเวลา เพื่อหาพลังงานไฟฟ้า (kWh) ของแต่ละช่วง และรวมผลตลอดทั้งวัน จากนั้นจะแยกพลังงานเป็นช่วง On-peak และ Off-peak ตามโครงสร้างอัตราของการไฟฟ้า นอกจากนี้ยังต้องหาค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด (Demand) โดยคำนวณค่าเฉลี่ยกำลังในช่วงเวลา 15 นาที และเลือกค่าสูงสุด ซึ่งจะถูกนำไปคิดค่า Demand ร่วมกับค่าพลังงานไฟฟ้า เมื่อได้พลังงานช่วง Peak และ Off-peak แล้ว จึงนำมาคำนวณเป็นค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน ส่วน Demand ที่ได้จากค่ากำลังสูงสุดถูกคิดตามอัตราที่กำหนด พร้อมรวมค่าบริการประจำเดือน ค่า Ft และค่าปรับด้านเพาเวอร์แฟกเตอร์ และนำมารวมกับ VAT 7% เพื่อให้ได้ค่าไฟฟ้ารวมต่อเดือน

$$Cost_{energy} = (C_{on_peak} \times E_{on_peak}) + (C_{off_peak} \times E_{off_peak}) \quad (6)$$

$$Cost_{demand} = (C_{demand} \times P_{demand}) \quad (7)$$

$$Cost_{Ft} = [C_{Ft} \times (E_{on_{peak}} + E_{off_{peak}})] \quad (8)$$

$$C_{subtotal} = Cost_{energy} + Cost_{demand} + Cost_{Ft} + C_{service} \quad (9)$$

$$VAT = 0.07 \times C_{subtotal} \quad (10)$$

$$Cost_{total} = C_{subtotal} + VAT \quad (11)$$

โดยที่

C_{on_peak} คือ ค่าไฟฟ้าต่อหน่วยพลังงานช่วง On peak (บาท/kWh)

C_{off_peak} คือ ค่าไฟฟ้าต่อหน่วยพลังงานช่วง Off-peak (บาท/kWh)

C_{demand} คือ ค่าความต้องการพลังไฟฟ้า (บาท/kW)

$C_{service}$ คือ ค่าบริการรายเดือน (บาท/เดือน)

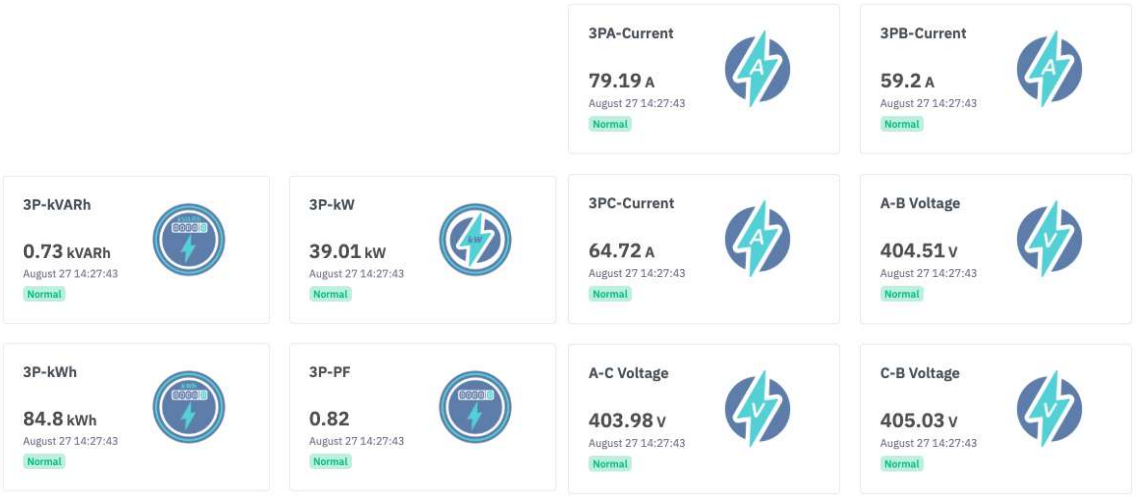
C_{Ft} คือ ค่า Ft (บาท/kWh)

ตารางที่ 1 อัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลาของการใช้ (Time of Use Tariff : TOU Tariff)

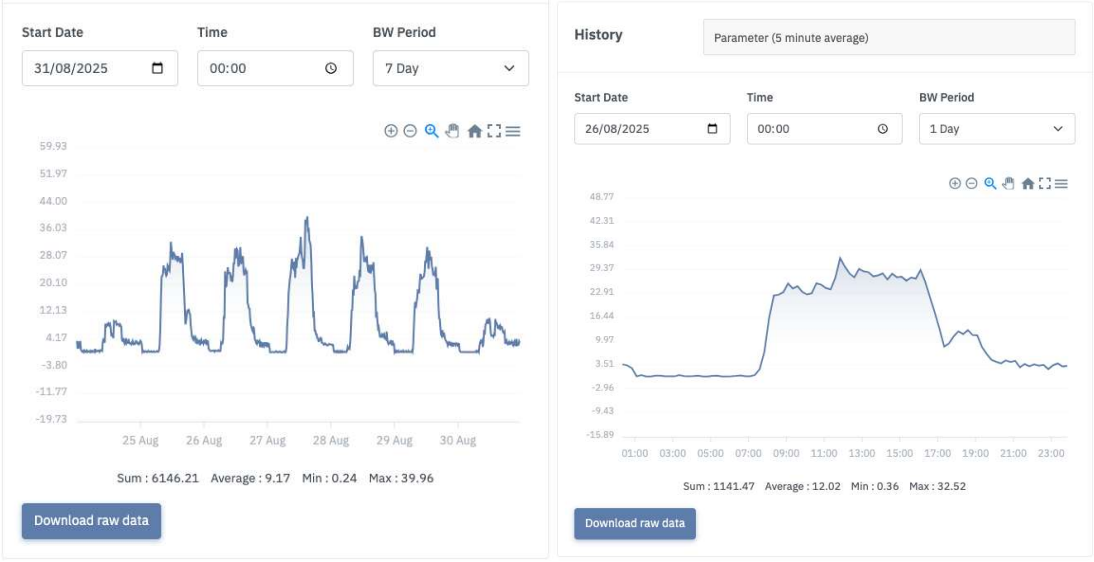
ระดับแรงดันไฟฟ้า	ค่าความต้องการพลังไฟฟ้า (Peak) (บาท/กิโลวัตต์)	ค่าพลังงานไฟฟ้า (บาท/หน่วย)		ค่าบริการ (บาท/เดือน)
		On-Peak	Off-Peak	
แรงดัน 22 – 33 กิโลโวลต์	132.93	4.1839	2.6037	312.24

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

ผลการวิจัยและการอภิปรายผลแสดงให้เห็นผลการดำเนินงานวิจัย ทั้งในเชิงข้อมูลเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ พร้อมทั้งการตีความหมายและเชื่อมโยงกับทฤษฎี จากการออกแบบระบบตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าในอาคารและทำการทดสอบวัดพลังงานในอาคารแสดงให้เห็นว่าระบบที่สร้างขึ้นสามารถตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าได้ตามที่ออกแบบ รูปที่ 4 แสดงผลการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า ในการประเมินความถูกต้องของระบบ ได้เปรียบเทียบค่าที่ตรวจวัดจากระบบที่พัฒนาขึ้นกับเครื่องมืออ้างอิง Fluke 1738 Power Logger ภายใต้สภาวะการทำงานเดียวกัน โดยพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละของพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า ได้แก่ แรงดัน กระแส กำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ กำลังไฟฟ้าปรากฏ ความถี่ และตัวประกอบกำลัง



รูปที่ 4 ผลการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า



(ก) (ข)

รูปที่ 5 กำลังไฟฟ้าราย 7 วัน และกำลังไฟฟ้ารายวันที่ตรวจวัดในหน่วยกิโลวัตต์

รูปที่ 5 (ก) แสดงกำลังไฟฟ้าราย 7 วันที่ตรวจวัดในหน่วยกิโลวัตต์ ระหว่างวันที่ 25 - 31 สิงหาคม 2568 มีกำลังไฟฟ้าสูงสุด 39.96 kW รูปที่ 5 (ข) แสดงกำลังไฟฟ้ารายวัน ของวันที่ 26/08/2025 (ค่าเฉลี่ยทุก 5 นาที) ภาพรวมแสดงโหลดฐานช่วงกลางคืนประมาณ 2–3 kW โหลดของช่วงกลางวันที่ 20–28 kW และโหลดสูงสุดที่ 32.52 kW ในช่วงเที่ยง จากนั้นโหลดค่อย ๆ ลดลง มีค่าโหลดเฉลี่ยทั้งวัน 12.02 kW ค่าต่ำสุด 0.36 kW และคิดเป็นพลังงานตลอดวัน 288.5 kWh

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า

พารามิเตอร์	ค่าจาก Power meter Fluke 1738 Power Logger			ระบบตรวจวัดพลังงานที่สร้างขึ้น			ค่าความคลาดเคลื่อน (%)
	เฟส A	เฟส B	เฟส C	เฟส A	เฟส B	เฟส C	
แรงดันไฟฟ้า (V)	400.55	401.99	401.45	399.26	401.60	399.83	0.274
กระแสไฟฟ้า (A)	67.71	53.74	59.38	71.07	53.08	59.42	1.515
กำลังไฟฟ้าปรากฏ (kVA)	42.09			42.44			0.832
กำลังไฟฟ้าจริง (kW)	34.43			35.63			3.485
กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (kvar)	24.21			22.79			5.865
ความถี่ (Hz)	50.03			50.03			0.00
ตัวประกอบกำลัง (PF)	0.83			0.84			1.20

ตารางที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่วัดจาก Fluke 1738 Power Logger และระบบตรวจวัดพลังงานที่สร้างขึ้น ของวันที่ 3 กันยายน 2568 เวลา 15:30 น. จากการทดสอบ ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจวัดและติดตามพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง รวมทั้งสามารถส่งข้อมูลผ่าน V-BOX H-WF ไปยังระบบคลาวด์และแสดงผลผ่าน mDashboard ได้แบบเรียลไทม์ การเปรียบเทียบกับ Fluke 1738 Power Logger พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดัน กระแส กำลังไฟฟ้าปรากฏ กำลังไฟฟ้าจริง ความถี่ และตัวประกอบกำลังอยู่ที่ 0.274%, 1.515%, 0.832%, 3.485%, 0.000% และ 1.20% ตามลำดับ ขณะที่กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด 5.865% ซึ่งเป็นประเด็นที่ควรปรับปรุงในอนาคต ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถนำมาใช้สำหรับการตรวจวัดและติดตามรูปแบบการใช้พลังงานในอาคารได้ อย่างไรก็ตาม การใช้งานที่ต้องการความแม่นยำสูงควรพิจารณาคุณลักษณะความแม่นยำของอุปกรณ์ตรวจวัดเพิ่มเติม รูปที่ 6 แสดงการตรวจวัดพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าด้วยพาวเวอร์มิเตอร์ Fluke 1738 Power Logger เปรียบเทียบกับชุดประมวลผลและแสดงผลการวัดพลังงานไฟฟ้าที่สร้างขึ้น

รูปที่ 6 การตรวจวัดพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าด้วยพาวเวอร์มิเตอร์ Fluke 1738 Power Logger เปรียบเทียบกับชุดประมวลผลและแสดงผลการวัดพลังงานไฟฟ้าที่สร้างขึ้น

ตารางที่ 3 ค่าพลังงานไฟฟ้าเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2568

ประเภทผู้ใช้ไฟฟ้า	แรงดันไฟฟ้า	ความต้องการพลังงานไฟฟ้า	พลังงานไฟฟ้าช่วง On Peak	พลังงานไฟฟ้าช่วง Off Peak	พลังงานไฟฟ้าช่วง Holiday	รวมเงินค่าไฟฟ้า
ประเภทที่ 3.2 กิจการขนาดกลาง (TOU)	22-33 kV	39.60 kW	5,493.60 kWh	756.00 kWh	1,024.00 kWh	36,965.83 บาท

ตารางที่ 3 แสดงข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าของผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทกิจการขนาดกลาง ในเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2568 โดยมีความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุด 39.60 กิโลวัตต์ ปริมาณการใช้ไฟฟ้าแบ่งเป็นช่วงเวลา ได้แก่ ช่วง On Peak 5,493.60 กิโลวัตต์ชั่วโมง ช่วง Off Peak 756.00 กิโลวัตต์ชั่วโมง และช่วง Holiday 1,024.00 กิโลวัตต์ชั่วโมง รวมการใช้ไฟฟ้าทั้งหมด 7,273.60 กิโลวัตต์ชั่วโมง เมื่อรวมค่าใช้ไฟฟ้าทุกส่วนแล้วคิดเป็นเงินทั้งสิ้น 36,965.83 บาท

สรุปผลการวิจัย

จากการออกแบบและพัฒนาระบบตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าในอาคาร พบว่าระบบที่สร้างขึ้นสามารถตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าได้ครบถ้วนตามที่ออกแบบ ทั้งแรงดัน กระแส กำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ และค่าตัวประกอบกำลัง ผลการทดสอบการวัดกำลังไฟฟ้ารายวันในวันที่ 26 สิงหาคม 2568 แสดงให้เห็นรูปแบบโหลดที่สอดคล้องกับพฤติกรรมการใช้งานอาคาร โดยมีโหลดฐานช่วงกลางคืนที่ 2–3 kW และมีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด 32.52 kW ในช่วงกลางวัน รวมพลังงานตลอดวัน 288.5 kWh ขณะที่ค่าเฉลี่ยทั้งวันอยู่ที่ 12.02 kW ส่วนการตรวจวัดต่อเนื่องในช่วง 7 วัน ระหว่างวันที่ 25–31 สิงหาคม 2568 พบว่ามีกำลังไฟฟ้าสูงสุด 39.96 kW แสดงถึงความสามารถของระบบในการเก็บและติดตามข้อมูลระยะยาว เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้กับเครื่องมืออ้างอิง Fluke 1738 Power Logger พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันและกระแสไฟฟ้าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ระดับความต่างเพียงเล็กน้อย ทำให้มั่นใจได้ว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้แทนเครื่องมือวัดเชิงพาณิชย์ในการติดตามและจัดการพลังงานไฟฟ้าในอาคารได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังรองรับการแสดงผลแบบเรียลไทม์ผ่านแพลตฟอร์มออนไลน์ ซึ่งช่วยเพิ่มความสะดวกในการวิเคราะห์และประยุกต์ใช้เพื่อการจัดการพลังงานอย่างยั่งยืน งานวิจัยในอนาคตจะทำการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์และการเรียนรู้ของเครื่องเพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมโหลด คาดการณ์การใช้พลังงาน และแจ้งเตือนความผิดปกติของระบบไฟฟ้า

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนการดำเนินงานโดยสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ร่วมกับโครงการวิจัยมูลฐาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ สัญญาเลขที่ FRB68023/2568 รหัสโครงการ 202970 โครงการวิจัย เรื่อง การจัดการพลังงานที่เหมาะสมของอาคารอัจฉริยะด้วยอัลกอริทึมเมตาฮิวริสติก โดยพิจารณาอัตราส่วนกำลังไฟฟ้าสูงสุดต่อค่าเฉลี่ย: กรณีศึกษาโหลดการใช้งานไฟฟ้าในอาคารเรียน ปีงบประมาณ 2568 คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และมหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Bocheng, Z., "Design of Building Energy Monitoring and Management System," *2012 Second International Conference on Business Computing and Global Informatization*, Shanghai, China, 2012, pp. 645-648, doi: 10.1109/BCGIN.2012.173.

[2] Lima Baima, R., Andolfi, L., Burcheri, L. M., Pavić, I., and Fridgen, G. (2024). *Sociotechnical Design of Building Energy Management Systems in the Public Sector: Five Design Principles*. https://doi.org/10.2139/ssrn.4851104

[3] Quesada-Allerhand, J., Kazanci, O. B., Hepf, C., Auer, T., and Smith, I. F. C. (2025). A combined approach to Measurement-System-Design and system identification in building energy retrofits. Energy and Buildings, 338, Article 115711. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115711

[4] O**ż**adowicz, A. (2022). A Hybrid Approach in Design of Building Energy Management System with Smart Readiness Indicator and Building as a Service Concept. *Energies*, *15*(4), 1432. https://doi.org/10.3390/en15041432

[5] Saleem, M. S., Asad, A., Muwahid, U., Raza, A., and Haider, A. (2023). Design and Development of Net Metering-Based Energy Meter. *Engineering Proceedings*, *46*(1), 22. https://doi.org/10.3390/engproc2023046022

[6] Boonraksa, T., *et al*., "Optimal Appliance Scheduling in Grid-Connected Commercial Buildings by Considering the Electric Vehicle Charging Load Using Metaheuristic Optimization Algorithms," *2024 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI)*, Nakhon Ratchasima, Thailand, 2024, pp. 145-150, doi: 10.1109/ICPEI61831.2024.10748852.

[7] Azhar, N., Arif, F., and Khan, A. B. (2023). Framework for Energy Performance Measurement of Residential Buildings Considering Occupants' Energy Use Behavior. *Engineering Proceedings*, *44*(1), 15. https://doi.org/10.3390/engproc2023044015

การพัฒนาและการตรวจสอบแบบจำลองวงจรสมมูลอันดับหนึ่งของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนด้วยการทดสอบฮาร์ดแวร์

Development and Hardware Validation of a First-Order Equivalent Circuit Model for Lithium-ion Batteries

ทัด ธนากิจ[1] ณัฐพนธ์ หาดอ้าน[1] อมรเทพ แม่นสุข[1] กมลภัสสร์ มั่นศิลป์[2] วัชรากร ปิ่นธุรัตน์[1*] และ บุญเรือง มะรังศรี[3]

That Thannakit[1] Nattapon Hadarn[1] Amonthep mansuk[1] Kamonpad Mansilp[2] Watcharakorn Pinthurat[1*] and Boonruang Marungsri[3]

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก จันทบุรี 22210

[2]สาขาวิศวกรรมยานยนต์สมัยใหม่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก จันทบุรี 22210

[3]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา 30000

[1]Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Tawan-Ok, Chanthaburi 22010

[2]Department of Modern Automotive Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Tawan-Ok, Chanthaburi 22010

[3]School o School of Electrical Engineering, Institute of Engineering,
Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000

Corresponding author: watcharakorn_pi@rmutto.ac.th

Abstract

This study presents the development and hardware validation of a first-order equivalent circuit model (ECM) for a lithium-ion battery using MATLAB/Simulink (License No. 41282542). The model consists of the open-circuit voltage (OCV), internal resistance, and a resistance–capacitance network to represent the steady-state and transient behaviors of the battery. The model parameters were determined from the relationships between the state of charge (SoC) and the electrical parameters of the battery. A hardware testing setup was then developed to measure the battery voltage, load current, and SoC of a 3.7-V, 12-Ah lithium-ion battery under a discharge condition for model validation. The comparison results showed that the simulated voltage, load current, and SoC followed the overall trends of the experimental measurements. The simulated voltage decreased from approximately 3.68 V to 3.64 V, while the experimental voltage ranged from approximately 3.67 to 3.65 V. The simulated load current was approximately 1.70 A, whereas the experimental current ranged from approximately 1.60 to 1.65 A. At approximately 1,200 s, the experimental SoC was 29.8%, compared with 28.0% obtained from the simulation. The differences between the simulation and experimental results can be

attributed to physical factors that were not included in the model, such as temperature effects, variations in internal resistance, and losses in the practical system.

Keywords: Lithium-ion battery, mathematical modeling, equivalent circuit model, first-order circuit

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองวงจรสมมูลอันดับหนึ่งของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน โดยมุ่งเน้นการประเมินความสามารถของแบบจำลองในการแทนพฤติกรรมทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ภายใต้สภาวะการคายประจุจริง แบบจำลองได้รับการพัฒนาด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink (License No. 41282542) โดยประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแรงดันวงจรเปิด ความต้านทานภายใน และวงจรความต้านทาน–ตัวเก็บประจุสำหรับแทนพฤติกรรมทั้งในสภาวะคงที่และสภาวะชั่วคราว ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองถูกกำหนดให้เป็นฟังก์ชันของสถานะประจุของแบตเตอรี่ จากนั้นผู้วิจัยได้พัฒนาชุดทดสอบฮาร์ดแวร์สำหรับตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า กระแสโหลด และสถานะประจุของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนขนาด 3.7 V ความจุ 12 Ah เพื่อใช้ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองภายใต้สภาวะการคายประจุ ผลการตรวจสอบพบว่าแบบจำลองสามารถสะท้อนแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรหลักได้สอดคล้องกับผลการทดลอง โดยแรงดันจากแบบจำลองลดลงจากประมาณ 3.68 V เป็น 3.64 V ขณะที่ผลการทดลองกับแบตเตอรี่จริงอยู่ในช่วงประมาณ 3.67–3.65 V กระแสโหลดจากแบบจำลองมีค่าประมาณ 1.70 A ขณะที่ผลการทดลองกับแบตเตอรี่จริงอยู่ในช่วงประมาณ 1.60–1.65 A และที่เวลาประมาณ 1,200 s ค่าสถานะประจุจากการทดลองกับแบตเตอรี่จริงและการจำลองมีค่าเท่ากับ 29.8% และ 28.0% ตามลำดับ หรือมีความแตกต่างประมาณ 1.8 จุดเปอร์เซ็นต์ ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าแบบจำลองวงจรสมมูลอันดับหนึ่งสามารถใช้แทนพฤติกรรมทางไฟฟ้าหลักของแบตเตอรี่ภายใต้เงื่อนไขการทดสอบที่กำหนดได้ อย่างไรก็ตาม ความแตกต่างระหว่างผลการจำลองและผลการทดลองสะท้อนข้อจำกัดของแบบจำลองที่ยังไม่ได้พิจารณาผลของอุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ตามสภาวะการทำงาน และความสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบจริง

คำสำคัญ : แบตเตอรี่ลิเธียมไอออน, แบบจำลองทางคณิตศาสตร์, แบบจำลองสมมูลวงจร, วงจรอันดับหนึ่ง

1. บทนำ

ในปัจจุบัน แบตเตอรี่ลิเธียมไอออนมีบทบาทสำคัญในระบบพลังงานสมัยใหม่ [1] เนื่องจากมีความหนาแน่นพลังงานสูง สามารถนำกลับมาใช้งานซ้ำได้ และมีประสิทธิภาพในการกักเก็บพลังงาน จึงถูกนำไปประยุกต์ใช้ในยานยนต์ไฟฟ้า ระบบกักเก็บพลังงาน และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ การวิเคราะห์และทำนายพฤติกรรมทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่จึงมีความสำคัญต่อการออกแบบระบบจัดการแบตเตอรี่และระบบจัดการพลังงาน โดยเฉพาะการทำนายแรงดัน กระแส และสถานะประจุภายใต้สภาวะการชาร์จและคายประจุที่แตกต่างกัน [2], [3]

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นเครื่องมือสำคัญสำหรับการศึกษาพฤติกรรมของแบตเตอรี่โดยไม่จำเป็นต้องทดสอบแบตเตอรี่จริงในทุกสภาวะ แบบจำลองแบตเตอรี่สามารถแบ่งได้เป็นแบบจำลองเชิงไฟฟ้าเคมี แบบจำลองเชิงประจักษ์ และแบบจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้า โดยแบบจำลองวงจรสมมูล (Equivalent Circuit Model: ECM) ได้รับความสนใจ เนื่องจากมีโครงสร้างไม่ซับซ้อน สามารถกำหนดพารามิเตอร์จากข้อมูลการทดลอง และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับโปรแกรมจำลองและระบบควบคุมได้ [4], [5], [6] แบบจำลองอันดับหนึ่งซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันวงจรเปิด ความต้านทานภายใน และวงจรความต้านทาน–ตัวเก็บประจุ สามารถอธิบายพฤติกรรมแรงดันของแบตเตอรี่ทั้งในสภาวะคงที่และสภาวะชั่วคราวได้ โดยงานวิจัยที่ผ่านมาได้ศึกษาการประมาณค่าพารามิเตอร์และการสร้างแบบจำลองแบตเตอรี่ด้วย MATLAB/Simulink รวมถึงการประมาณสถานะประจุของแบตเตอรี่ [7], [8], [9]

แม้แบบจำลองวงจรสมมูลอันดับหนึ่งจะได้รับการนำมาใช้อย่างแพร่หลายเนื่องจากมีโครงสร้างไม่ซับซ้อนและเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในงานจำลองและระบบควบคุม อย่างไรก็ตาม ความสามารถของแบบจำลองในการแทนพฤติกรรมของแบตเตอรี่จริงยังขึ้นอยู่กับวิธีการกำหนดค่าพารามิเตอร์และเงื่อนไขการใช้งาน ดังนั้น การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยข้อมูลจากการทดลองจริงภายใต้เงื่อนไขเดียวกันจึงมีความสำคัญ เพื่อประเมินทั้งความสามารถและข้อจำกัดของแบบจำลองในการประยุกต์ใช้งานจริง [10], [11]

อย่างไรก็ตาม พฤติกรรมของแบตเตอรี่จริงได้รับอิทธิพลจากปัจจัยหลายประการ เช่น อุณหภูมิ ความต้านทานภายในที่เปลี่ยนแปลงตามสถานะประจุ อัตราการคายประจุ ความไม่เป็นเชิงเส้นของโหลด และความสูญเสียในวงจรจริง [12], [13], [14] ดังนั้น แม้แบบจำลองอันดับหนึ่งจะมีข้อดีด้านความเรียบง่ายและเหมาะสมสำหรับการจำลอง แต่จำเป็นต้องมีการตรวจสอบกับผลการทดลองจริงเพื่อประเมินความสามารถในการแทนพฤติกรรมของแบตเตอรี่ภายใต้สภาวะการใช้งานจริง นอกจากนี้ การประเมินความถูกต้องควรพิจารณาทั้งการเปรียบเทียบแนวโน้มของผลลัพธ์และค่าความคลาดเคลื่อนเชิงปริมาณของตัวแปรสำคัญ ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า กระแสโหลด และสถานะประจุ

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนาแบบจำลองวงจรสมมูลอันดับหนึ่งของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนที่กำหนดพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าให้แปรผันตามสถานะประจุ และนำแบบจำลองไปประยุกต์ใช้ในโปรแกรม MATLAB/Simulink จากนั้นได้พัฒนาชุดทดสอบฮาร์ดแวร์สำหรับตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า กระแสโหลด และสถานะประจุของแบตเตอรี่จริงภายใต้สภาวะการคายประจุ เพื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลจากแบบจำลอง การศึกษานี้มุ่งประเมินความสามารถของแบบจำลองในการสะท้อนพฤติกรรมทางไฟฟ้าหลักของแบตเตอรี่ รวมทั้งวิเคราะห์ปัจจัยที่อาจก่อให้เกิดความแตกต่างระหว่างผลการจำลองและผลการทดลอง

1.1 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

1. เพื่อพัฒนาแบบจำลองวงจรสมมูลอันดับหนึ่งของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน โดยกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างสถานะประจุและพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่
2. เพื่อพัฒนาแบบจำลองในโปรแกรม MATLAB/Simulink และพัฒนาชุดทดสอบฮาร์ดแวร์สำหรับตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า กระแสโหลด และสถานะประจุภายใต้สภาวะการคายประจุ
3. เพื่อประเมินความสอดคล้องระหว่างผลการจำลองและผลการทดลองจริง รวมทั้งวิเคราะห์ปัจจัยและข้อจำกัดที่ส่งผลต่อความแตกต่างของผลลัพธ์

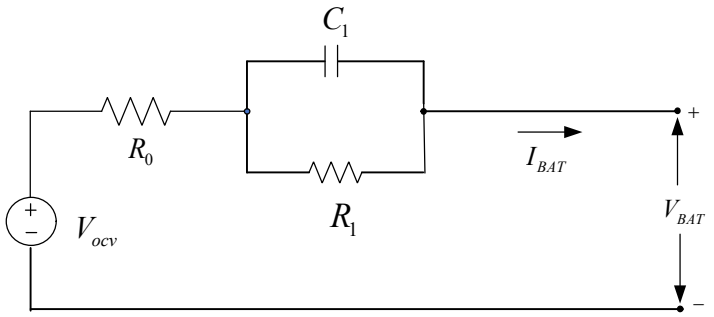
1.2 ข้อสมมติและข้อจำกัดของแบบจำลอง

แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อแทนพฤติกรรมทางไฟฟ้าหลักของแบตเตอรี่ด้วยโครงสร้างวงจรที่เรียบง่ายและเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในการจำลอง ดังนั้น การพัฒนาแบบจำลองจึงอยู่ภายใต้ข้อสมมติที่ว่าพฤติกรรมแรงดันของแบตเตอรี่สามารถอธิบายได้ด้วยแรงดันวงจรเปิด ความต้านทานภายใน และวงจรความต้านทาน–ตัวเก็บประจุหนึ่งชุด โดยกำหนดให้พารามิเตอร์หลักของแบบจำลองแปรผันตามสถานะประจุของแบตเตอรี่

อย่างไรก็ตาม แบบจำลองนี้ยังไม่ได้พิจารณาผลของอุณหภูมิ การเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ Hysteresis และการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ตามอัตราการคายประจุอย่างละเอียด ดังนั้น ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองจึงควรตีความภายใต้ขอบเขตและเงื่อนไขการทดลองที่กำหนดในงานวิจัยนี้

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบตเตอรี่นี้มุ่งเน้นการศึกษาพฤติกรรมการลดลงของแรงดันและการทำงานของแบตเตอรี่ ส่วนนี้นำเสนอหลักการของแบบจำลองวงจรสมมูลอันดับหนึ่งที่ใช้แทนพฤติกรรมทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน โดยอธิบายองค์ประกอบของวงจร ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันวงจรเปิด สถานะประจุ ความต้านทานภายใน และการตอบสนองแบบพลวัตของวงจรความต้านทาน–ตัวเก็บประจุ ซึ่งเป็นพื้นฐานสำหรับการพัฒนาแบบจำลองในโปรแกรม MATLAB/Simulink



รูปที่ 1 วงจรแบบจำลองสมมูลอันดับหนึ่งของแบตเตอรี่

2.1 วงจรแบบจำลองสมมูลอันดับหนึ่งของแบตเตอรี่

วงจรสมมูลอันดับหนึ่งของแบตเตอรี่แสดงดังรูปที่ 1 โดยภายในวงจรประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก ได้แก่ ตัวต้านทานภายใน R_0, R_1 ซึ่งใช้แทนการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อน และตัวเก็บประจุ C_1 ซึ่งใช้แทนคุณสมบัติการเก็บประจุของแบตเตอรี่ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สมการที่ (1) ใช้ในการคำนวณแรงดันที่แบตเตอรี่ $V_{BAT}(t)$ ที่สามารถจ่ายให้โหลดได้จริง โดยพิจารณาจากแรงดันวงจรเปิด (Open Circuit Voltage, OCV) ของแบตเตอรี่ $V_{ocv}(t)$ และการลดลงของแรงดันจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ ความต้านทานของสายไฟ และการสูญเสียแรงดันอื่น ๆ แรงดันวงจรเปิดวงจรสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$V_{BAT}(t) = V_{OCV}(t) - V_1(t) - V_0(t) \quad (1)$$

โดยที่ $V_{BAT}(t)$ คือ แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของวงจรแบตเตอรี่ $V_{OCV}(t)$ คือ แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดของแบตเตอรี่ $V_1(t)$ คือ แรงดันตกคร่อมตัวต้านทานและตัวเก็บประจุชุดที่หนึ่ง และ $V_0(t)$ คือ แรงดันตกคร่อมตัวต้านทานตัวที่หนึ่ง ในงานวิจัยนี้กำหนดให้กระแส มีค่าเป็นบวกในกรณีการคายประจุของแบตเตอรี่ และค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการทดสอบมาจากงานวิจัยของ Yao และคณะ [15]

ค่าของแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานและตัวเก็บประจุชุดที่หนึ่งที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา มีผลกระทบจากกระแสที่ไหลผ่านโหลด $I_{Load}(t)$ และตัวต้านทาน $R_1(t)$ ดังนั้น การคำนวณค่าแรงดันในช่วงเวลาถัดไป $V_1(t+1)$ สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$V_1(t+1) = \int \left(\frac{I_{Load}(t)}{C_1(t)} - \frac{V_1(t)}{C_1(t) \times R_1(t)} \right) dt \quad (2)$$

โดยที่ $V_1(t+1)$ คือ แรงดันตกคร่อมความต้านทานและตัวเก็บประจุชุดที่หนึ่ง $C_1(t)$ คือ ตัวเก็บประจุชุดที่หนึ่ง $R_1(t)$ คือ ความต้านทานชุดที่หนึ่ง และ $I_{Load}(t)$ คือ กระแสไฟฟ้าโหลดที่เกิดขึ้นในวงจรแบตเตอรี่

ตารางที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์ d_i สำหรับการคำนวณความต้านทาน $R_0(t)$ ตามสมการที่ (3)

สัมประสิทธิ์	ค่า
d_0	-0.04868
d_1	0.2129

สัมประสิทธิ์	ค่า
d_2	-0.3831
d_3	0.3659
d_4	-0.1996
d_5	0.06241
d_5	-0.01078
d_5	0.002851

ในทำนองเดียวกัน การคำนวณค่าความต้านทานเชิงเส้น $R_0(t)$ ซึ่งเป็นค่าความต้านทานที่สัมพันธ์กับค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่เป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าตามค่าของกระแสที่ไหลผ่าน และค่า $R_0(t)$ สามารถคำนวณได้จาก

$$R_0(t) = \left(d_0 \times SoC^7(t)\right) + \left(d_1 \times SoC^6(t)\right) + \left(d_2 \times SoC^5(t)\right) + \left(d_3 \times SoC^4(t)\right) + \left(d_4 \times SoC^3(t)\right) + \left(d_5 \times SoC^2(t)\right) + \left(d_6 \times SoC(t)\right) + d_7 \quad (3)$$

โดยที่ $R_0(t)$ คือ ค่าความต้านทานภายในตัวที่หนึ่ง d คือ ค่าคงที่ของแบตเตอรี่ได้จากการทดลองแสดงในตารางที่ 1 และ $SoC(t)$ คือ สถานะประจุเหลืออยู่ของแบตเตอรี่

สมการที่ (4) แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า $V_0(t)$ ที่เกิดจากกระแสไฟฟ้า $I_{Load}(t)$ ที่ไหลผ่านความต้านทาน $R_0(t)$ โดยอ้างอิงจากสมการนี้สามารถใช้ในการคำนวณแรงดันตกคร่อมที่ความต้านทาน $R_0(t)$ ค่าความต้านทานภายในตัวที่หนึ่ง และค่า $V_0(t)$ แสดงดังนี้

$$V_0(t) = I_{Load}(t) \times R_0(t) \quad (4)$$

โดยที่ $V_0(t)$ คือ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมความต้านทานตัวที่หนึ่ง $I_{Load}(t)$ คือ กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในวงจรแบตเตอรี่เมื่อมีการจ่ายโหลด และ $R_0(t)$ คือ ค่าความต้านทานภายในตัวที่หนึ่ง

สมการที่ (5) ใช้คำนวณการประมาณค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน ซึ่งเป็นค่าที่แสดงปริมาณพลังงานที่เหลืออยู่ในแบตเตอรี่เมื่อเทียบกับความจุทั้งหมดของแบตเตอรี่ โดยค่าสถานะประจุ $SoC(t)$ คำนวณได้จาก

$$SoC(t) = SoC_0 - \int \frac{100}{a^u \times 3600} I_{Load}(t)dt \quad (5)$$

โดยที่ $SoC(t)$ คือ สถานะประจุเหลืออยู่ของแบตเตอรี่ SoC_0 คือ ค่าสถานะประจุเริ่มต้นของแบตเตอรี่ และ a^u คือ ค่าความจุของแบตเตอรี่ (Ah) สถานะประจุของแบตเตอรี่ถูกคำนวณด้วยวิธีการสะสมประจุไฟฟ้าจากค่ากระแสที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยอาศัยค่าความจุที่กำหนดของแบตเตอรี่และสถานะประจุเริ่มต้นเป็นเงื่อนไขเริ่มต้นของการจำลอง [16], [17]

แรงดันวงจรเปิด $V_{OCV}(t)$ ซึ่งเป็นแรงดันที่วัดได้เมื่อไม่มีโหลดเชื่อมต่อกับแบตเตอรี่หรือแหล่งจ่ายไฟฟ้า โดยมีการแปลผันตามสถานะประจุของแบตเตอรี่ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6)

$$V_{OCV}(t) = \left(K_0 \times SoC^5(t)\right) + \left(K_1 \times SoC^4(t)\right) + \left(K_2 \times SoC^3(t)\right) + \left(K_3 \times SoC^2(t)\right) + \left(K_4 \times SoC(t)\right) + K_5$$

(6)

โดยที่ $V_{OCV}(t)$ คือ แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดของแบตเตอรี่ และ K คือ ค่าคงทีได้จากการทดลองแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์ K_i สำหรับการคำนวณความต้านทาน $V_{OCV}(t)$ ตามสมการที่ (6)

สัมประสิทธิ์	ค่า
K_0	5.062
K_1	-15.72
K_2	18.57
K_3	-9.559
K_4	2.508
K_5	3.333

การคำนวณค่าความต้านทาน $R_1(t)$ ซึ่งเป็นค่าความต้านทานในวงจรสมมูลของแบตเตอรี่โดยใช้สมการ Polynomialในการคำนวณโดยขึ้นอยู่กับสองตัวแปรหลัก ได้แก่ ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่และค่าคงที่ โดยค่าของ $R_1(t)$ คำนวณได้จาก

$$R_1(t) = \left(a_0 \times SoC^8(t)\right) + \left(a_1 \times SoC^7(t)\right) + \left(a_2 \times SoC^6(t)\right) + \left(a_3 \times SoC^5(t)\right) + \left(a_4 \times SoC^4(t)\right) + \left(a_5 \times SoC^3(t)\right) + \left(a_6 \times SoC^2(t)\right) + \left(a_7 \times SoC(t)\right) + a_8$$

(7)

โดยที่ $R_1(t)$ คือ ค่าความต้านทานภายในของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบตเตอรี่ และ a คือ ค่าคงที่ได้จากการทดลองแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์ a_i สำหรับการคำนวณความต้านทาน $R_1(t)$ ตามสมการที่ (7)

สัมประสิทธิ์	ค่า
a_0	0.2345
a_1	-1.438
a_2	3.497
a_3	-4.409
a_4	3.135
a_5	-1.277
a_6	0.2909
a_7	-0.03471
a_8	0.002402

สุดท้าย ค่าตัวเก็บประจุ $C_1(t)$ ซึ่งเป็นค่าตัวเก็บประจุในวงจรสมมูลอันดับหนึ่งของแบตเตอรี่ โดยใช้สมการ Polynomial เหมือนความต้านทาน $R_1(t)$ ในการคำนวณโดยขึ้นอยู่กับสองตัวแปรหลัก ได้แก่ ค่าสถานะประจุของแบตเตอรี่และค่าคงที่ และค่า $C_1(t)$ คำนวณได้จาก

$$C_1(t) = \left(c_0 \times 10^7 \times SoC^8(t)\right) + \left(c_1 \times 10^7 \times SoC^7(t)\right) + \left(c_2 \times 10^7 \times SoC^6(t)\right) + \left(c_3 \times 10^7 \times SoC^5(t)\right) + \left(c_4 \times 10^7 \times SoC^4(t)\right) + \left(c_5 \times 10^7 \times SoC^3(t)\right) + \left(c_6 \times 10^5 \times SoC^2(t)\right) + \left(c_7 \times 10^5 \times SoC(t)\right) + c_8 \quad (8)$$

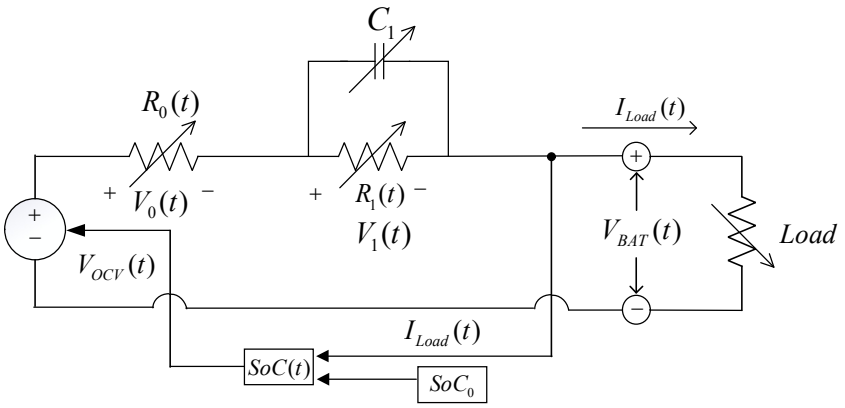
โดยที่ C_1 คือ ความจุที่เกิดจากการแพร่กระจายของไอออน และ c คือ ค่าคงที่ได้จากการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์ c_i สำหรับการคำนวณความต้านทาน $C_1(t)$ ตามสมการที่ (8)

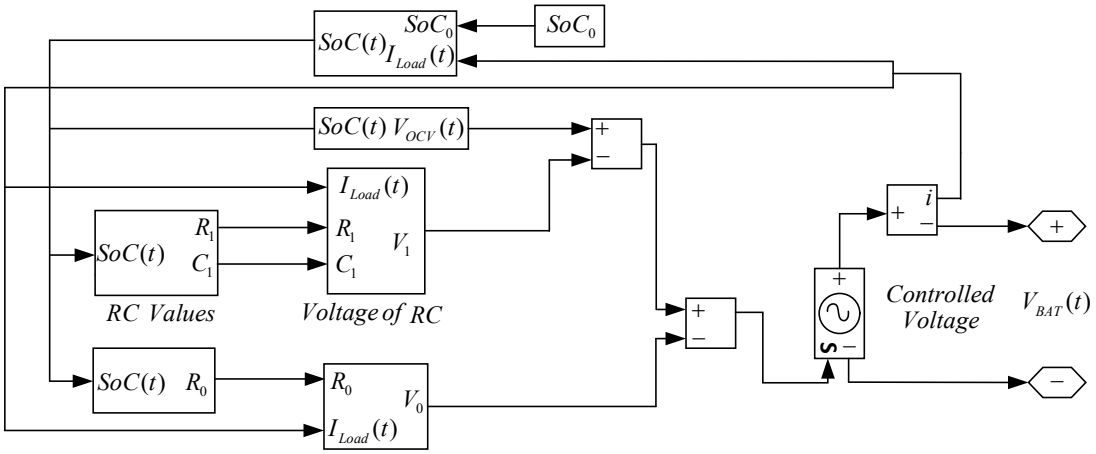
สัมประสิทธิ์	ค่า
c_0	1.139
c_1	-4.641
c_2	7.585
c_3	-6.355
c_4	2.875
c_5	-6.515
c_6	3.539
c_7	1.356
c_8	-107.2

2.2 วงจรภาพรวมแบบจำลองแบตเตอรี่ลิเธียมของทฤษฎีวงจรสมมูลอันดับหนึ่ง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบตเตอรี่ของทฤษฎีวงจรสมมูลอันดับหนึ่งดังรูปที่ 2 ถูกใช้ในงานวิจัยครั้งนี้เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของแรงดันแบตเตอรี่เมื่อมีโหลดเชื่อมต่อ ซึ่งคำนึงถึงแรงดันวงจรเปิด $V_{OCV}(t)$ และแรงดันตกคร่อมที่เกิดจากความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ แบบจำลองนี้ประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดัน $V_{OCV}(t)$ ซึ่งแทนด้วยค่าค่าแรงดันของแบตเตอรี่ในสภาวะเปิดวงจร ความต้านทานภายในแบ่งออกเป็น $R_0(t)$ ซึ่งเป็นค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปตามสถานะประจุของแบตเตอรี่ และ $R_1(t)$ ซึ่งเป็นค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปตามสถานะประจุของแบตเตอรี่ โดยมีตัวเก็บประจุ $C_1(t)$ เป็นตัวแทนของพฤติกรรมการตอบสนองต่อโหลด การทำงานของวงจรนี้จะช่วยให้สามารถจำลองแรงดันของแบตเตอรี่ $V_{BAT}(t)$ ได้อย่างแม่นยำเมื่อเชื่อมต่อกับโหลด



รูปที่ 2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบตเตอรี่ลิเธียมของทฤษฎีวงจรสมมูลอันดับหนึ่ง



รูปที่ 3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรอันดับหนึ่งของแบตเตอรี่โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink

2.3 วงจรภาพรวมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบตเตอรี่โดย MATLAB/Simulink

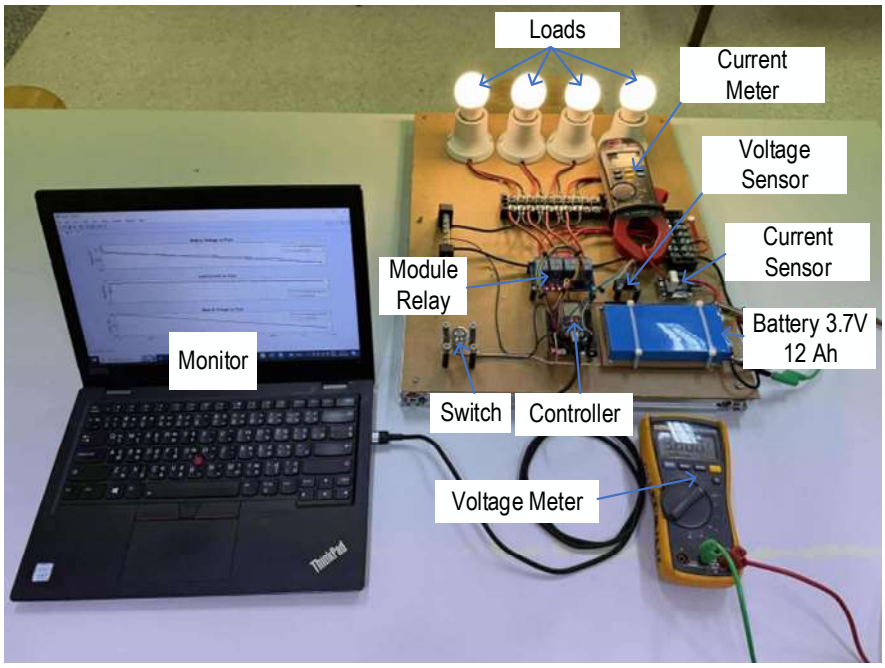
แบบจำลองสมการวงจรเทียบเท่าของทฤษฎีวงจรสมมูลอันดับหนึ่งของแบตเตอรี่ (Battery Equivalent Circuit Model, ECM) แสดงในรูปที่ 3 ถูกสร้างขึ้นด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อใช้ในการจำลองพฤติกรรมทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน โดยแบบจำลองนี้ประกอบด้วยแรงดันเปิดวงจรที่ขึ้นกับสถานะประจุ ร่วมกับเครือข่ายค่าความต้านทานและตัวเก็บประจุซึ่งใช้แทนการตอบสนองแบบพลวัต (Dynamic Response) และความต้านทานภายในที่ใช้แทนการสูญเสียแบบโอห์มมิก (Ohmic Loss) แรงดันรวมจากองค์ประกอบต่าง ๆ จะได้แรงดันที่ขาออกของแบตเตอรี่ ซึ่งสามารถอธิบายลักษณะการทำงานทั้งในสภาวะคงที่และสภาวะชั่วคราวของการคายประจุได้อย่างแม่นยำ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ถูกนำไปพัฒนาในโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อจำลองพฤติกรรมแรงดันและการเปลี่ยนแปลงของสถานะประจุภายใต้สภาวะการคายประจุที่กำหนด โดยโครงสร้างของแบบจำลองเชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างสถานะประจุ แรงดันวงจรเปิด ความต้านทานภายใน และพารามิเตอร์ของวงจร RC เพื่อใช้คำนวณแรงดันที่ขั้วแบตเตอรี่ตามเวลา

3. การออกแบบฮาร์ดแวร์เพื่อใช้ในการทดสอบของแบตเตอรี่

รูปที่ 4 แสดงชุดทดลองฮาร์ดแวร์ที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการทดสอบการคายประจุของแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนจริง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบผลการทำงานจริงของแบตเตอรี่กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาในงานวิจัย ระบบทดสอบประกอบด้วยแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนขนาด 3.7 V ความจุ 12 Ah ซึ่งทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับโหลดที่กำหนด ระบบควบคุมการเชื่อมต่อโหลดด้วยรีเลย์ที่สั่งงานโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ ขณะเดียวกันแรงดันและกระแสของแบตเตอรี่ถูกตรวจวัดและบันทึกอย่างต่อเนื่องตลอดช่วงเวลาการคายประจุ ข้อมูลที่ได้ถูกนำไปใช้ในการคำนวณและเปรียบเทียบกับผลจากแบบจำลอง MATLAB/Simulink ภายใต้เงื่อนไขเริ่มต้นเดียวกัน

ในระบบทดลองมีการติดตั้งเซนเซอร์วัดกระแสและแรงดันเพื่อตรวจวัดพฤติกรรมของแบตเตอรี่ในระหว่างการทำงาน โดยค่าที่ได้จะถูกส่งเข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์และส่งต่อไปยังคอมพิวเตอร์ (Monitor) เพื่อบันทึกและประมวลผลข้อมูล นอกจากนี้ยังมีเครื่องมือวัดภายนอก เช่น แอมป์มิเตอร์และโวลต์มิเตอร์ สำหรับใช้ตรวจสอบความถูกต้องของค่าที่วัดได้จากระบบ ข้อมูลที่บันทึกไว้จะถูกใช้ในการวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับผลการจำลอง เพื่อประเมินความแม่นยำและประสิทธิภาพของแบบจำลองแบตเตอรี่ในสภาวะจริง ซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญในการตรวจสอบความถูกต้องของโมเดลทางคณิตศาสตร์และการพัฒนาระบบจัดการพลังงานในอนาคต



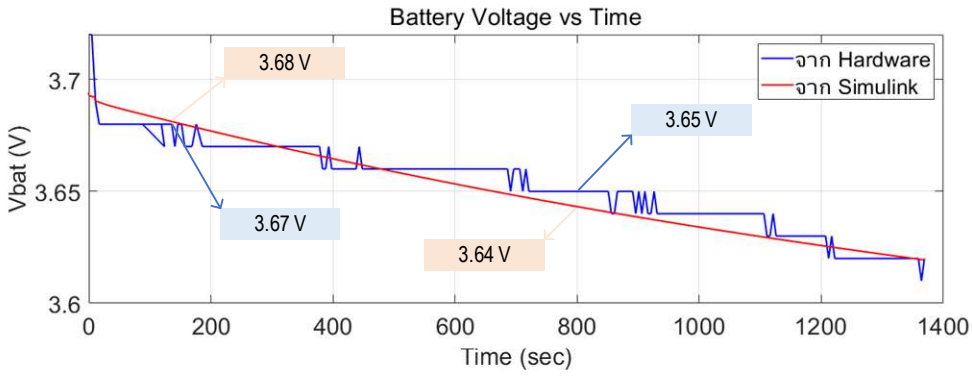
รูปที่ 4 ชุดทดลองฮาร์ดแวร์สำหรับการทดสอบระบบแบตเตอรี่และโหลด

4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

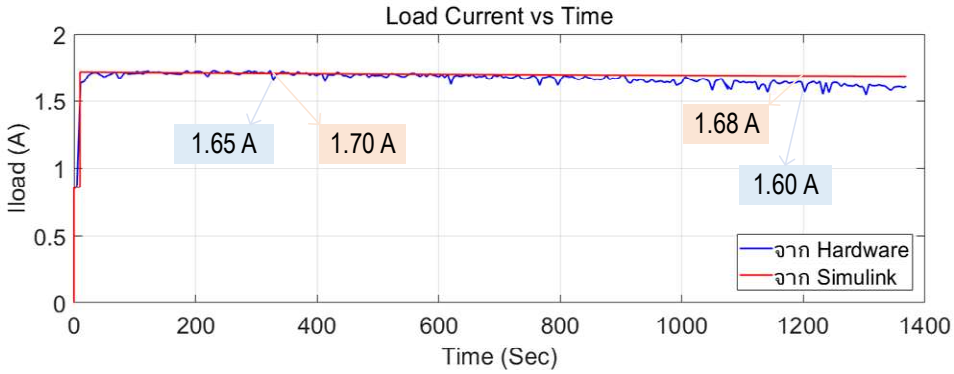
การทดลองเริ่มต้นจากการกำหนดสถานะประจุเริ่มต้นของแบตเตอรี่ จากนั้นเชื่อมต่อแบตเตอรี่เข้ากับโหลดและเริ่มบันทึกข้อมูลแรงดันไฟฟ้าและกระแสโหลดตามช่วงเวลาที่กำหนด ข้อมูลที่ได้จากการทดลองถูกนำมาใช้ในการประเมินการเปลี่ยนแปลงของสถานะประจุและเปรียบเทียบกับผลการจำลอง โดยกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นของแบบจำลองให้สอดคล้องกับเงื่อนไขของการทดลอง

4.1 การเปรียบเทียบแรงดัน

ผลการทดลองพบว่า แรงดันของแบตเตอรี่จริงลดลงมากกว่าในแบบจำลอง แม้เริ่มต้นที่ค่าเดียวกัน ผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าแรงดันจากการทดลองและแรงดันจากแบบจำลองมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาการคายประจุในทิศทางเดียวกัน อย่างไรก็ตาม รูปแบบการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่วัดได้จากระบบจริงมีความผันผวนมากกว่าผลจากแบบจำลอง ความแตกต่างดังกล่าวอาจเกี่ยวข้องกับปัจจัยที่ไม่ได้รวมอยู่ในแบบจำลองโดยละเอียด เช่น การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ความต้านทานของสายไฟและจุดเชื่อมต่อ การเปลี่ยนแปลงของความต้านทานภายใน และลักษณะการทำงานของโหลด



รูปที่ 5 การเปรียบเทียบแรงดันแบตเตอรี่ระหว่างการทดสอบด้วยฮาร์ดแวร์และแบบจำลองใน MATLAB/Simulink



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบการตอบสนองของกระแสโหลดระหว่างการทดสอบด้วยฮาร์ดแวร์และแบบจำลองใน MATLAB/Simulink

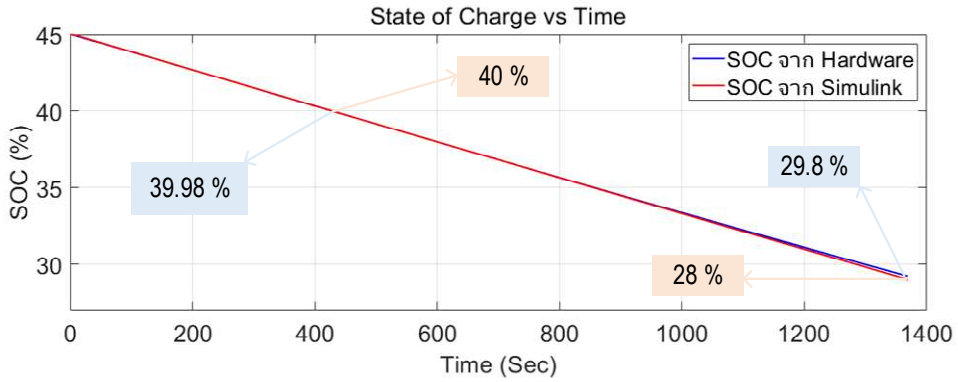
รูปที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ระหว่างผลการทดลองจริงและผลการจำลองด้วย MATLAB/Simulink พบว่าแรงดันไฟฟ้าจากทั้งสองกรณีมีแนวโน้มลดลงตามเวลาการคายประจุ โดยผลการจำลองลดลงจากประมาณ 3.68 V เป็น 3.64 V ขณะที่ผลการทดลองจริงอยู่ในช่วงประมาณ 3.67–3.65 V ลักษณะดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถสะท้อนแนวโน้มการลดลงของแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ภายใต้สภาวะการคายประจุที่ทดสอบได้

อย่างไรก็ตาม ผลการทดลองจริงมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเป็นช่วงมากกว่าผลการจำลอง ซึ่งอาจเกิดจากพฤติกรรมของแบตเตอรี่จริงที่ได้รับอิทธิพลจากอุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงของความต้านทานภายใน การตอบสนองของโหลด และความสูญเสียในสายไฟและจุดเชื่อมต่อ ขณะที่แบบจำลองอันดับหนึ่งใช้ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่ขึ้นกับ SoC เป็นหลักและไม่ได้รวมผลกระทบดังกล่าวอย่างละเอียด ดังนั้น ความแตกต่างของผลลัพธ์จึงสะท้อนข้อจำกัดของแบบจำลองในการแทนพฤติกรรมทางกายภาพของแบตเตอรี่จริง

4.2 การเปรียบเทียบกระแส

รูปที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบกระแสโหลดระหว่างผลการทดลองจริงและผลการจำลอง พบว่ากระแสโหลดจากทั้งสองกรณีมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน โดยหลังจากช่วงเริ่มต้นของการทำงาน ผลการจำลองแสดงค่ากระแสโหลดประมาณ 1.70 A ขณะที่ค่าที่วัดได้จากระบบจริงอยู่ในช่วงประมาณ 1.60–1.65 A โดยมีความแตกต่างประมาณ 0.05–0.10 A ความแตกต่างดังกล่าวสะท้อนว่าพฤติกรรมของโหลดและการเปลี่ยนแปลงของแรงดันในระบบจริงส่งผลต่อกระแสที่เกิดขึ้น ซึ่งยังไม่ได้ถูกแทนอย่างละเอียดในแบบจำลอง

การแกว่งตัวของกระแสจากการทดลองจริงเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ค่อนข้างคงที่จากแบบจำลองอาจเกิดจากความต้านทานภายในของแบตเตอรี่ ความต้านทานของสายไฟ พฤติกรรมของโหลด และความไม่คงที่ของระบบวัด ซึ่งไม่ได้ถูกจำลองอย่างละเอียดในแบบจำลองอันดับหนึ่ง นอกจากนี้ การลดลงของกระแสในช่วงท้ายของการทดลองอาจสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงแรงดันของแบตเตอรี่และคุณสมบัติของโหลดในสภาวะจริง



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบค่าระดับประจุแบตเตอรี่ (SoC) จากการวัดฮาร์ดแวร์และการจำลองด้วย MATLAB/Simulink แสดงผลใกล้เคียงกันตลอดเวลา

4.3 การเปรียบเทียบสถานะประจุ

รูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบสถานะประจุ (SoC) ระหว่างผลการทดลองจริงและผลการจำลองด้วย MATLAB/Simulink พบว่าทั้งสองกรณีมีแนวโน้มลดลงตามเวลาการคายประจุ โดยในช่วงเวลาประมาณ 400 s ค่า SoC จากการทดลองจริงเท่ากับ 39.98% ขณะที่ผลการจำลองมีค่าประมาณ 40.0% คิดเป็นความแตกต่างประมาณ 0.02 จุดเปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกันสูงในช่วงต้นของการทดสอบ เมื่อเวลาการคายประจุเพิ่มขึ้นจนถึงประมาณ 1,200 s ค่า SoC จากการทดลองจริงลดลงเหลือประมาณ 29.8% ขณะที่ผลการจำลองมีค่าประมาณ 28.0% หรือมีความแตกต่างประมาณ 1.8 จุดเปอร์เซ็นต์ ความแตกต่างที่เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปอาจเกิดจากผลสะสมของความคลาดเคลื่อนในการประมาณ SoC รวมถึงอิทธิพลของอุณหภูมิ ความต้านทานภายใน และความสูญเสียทางไฟฟ้าในระบบจริง ซึ่งไม่ได้ถูกพิจารณาอย่างละเอียดในแบบจำลอง

ผลการเปรียบเทียบสถานะประจุแสดงให้เห็นว่าในช่วงเริ่มต้นของการทดสอบ ผลจากแบบจำลองมีความสอดคล้องกับผลการทดลองในระดับสูง โดยที่เวลาประมาณ 400 s ค่าสถานะประจุจากการทดลองเท่ากับ 39.98% ขณะที่ผลการจำลองมีค่าประมาณ 40.0% อย่างไรก็ตาม เมื่อระยะเวลาการคายประจุเพิ่มขึ้น ความแตกต่างระหว่างผลทั้งสองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยที่เวลาประมาณ 1,200 s ผลการทดลองมีค่า 29.8% ขณะที่ผลการจำลองมีค่า 28.0% หรือมีความแตกต่างประมาณ 1.8 จุดเปอร์เซ็นต์ ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงการสะสมของความคลาดเคลื่อนตามระยะเวลาการทำงาน ซึ่งอาจเกิดจากข้อจำกัดในการกำหนดพารามิเตอร์ของแบบจำลองและปัจจัยทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงระหว่างการทดลอง

4.4 การอภิปรายผล

โดยภาพรวม แบบจำลองวงจรสมมูลอันดับหนึ่งสามารถสะท้อนแนวโน้มหลักของแรงดัน กระแส และสถานะประจุของแบตเตอรี่ภายใต้เงื่อนไขการทดสอบที่กำหนดได้ อย่างไรก็ตาม ความแตกต่างระหว่างผลการจำลองและผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการกำหนดพารามิเตอร์ให้ขึ้นกับสถานะประจุเพียงอย่างเดียวอาจยังไม่เพียงพอสำหรับการแทนพฤติกรรมของแบตเตอรี่ในระบบจริง เนื่องจากพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่สามารถเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ อัตราการคายประจุ สภาพการใช้งาน และการเสื่อมสภาพ นอกจากนี้ ความต้านทานของสายไฟ จุดเชื่อมต่อ และลักษณะของโหลดจริงอาจส่งผลต่อค่าที่ตรวจวัดได้ ดังนั้น ความสามารถของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นควรตีความภายใต้ขอบเขตของเงื่อนไขการทดลองในงานวิจัยนี้

5. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการพัฒนาและตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองวงจรสมมูลอันดับหนึ่งสำหรับแบตเตอรี่ลิเธียมไอออน โดยกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างสถานะประจุและพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของแบบจำลอง และนำไปพัฒนาในโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อจำลองพฤติกรรมของแบตเตอรี่ภายใต้สภาวะการคายประจุ จากนั้นได้พัฒนาชุดทดสอบฮาร์ดแวร์สำหรับตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า กระแสโหลด และสถานะประจุของแบตเตอรี่ขนาด 3.7 V ความจุ 12 Ah เพื่อนำมาใช้ตรวจสอบผลการจำลอง ผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถสะท้อนแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า กระแสโหลด และสถานะประจุได้สอดคล้องกับผลการทดลองภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด โดยแรงดันจากแบบจำลองและการทดลองมีแนวโน้มลดลงในทิศทางเดียวกัน ขณะที่กระแสโหลดมีความแตกต่างประมาณ 0.05–0.10 A สำหรับสถานะประจุ พบว่าความแตกต่างระหว่างผลการทดลองและผลการจำลองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการคายประจุ และมีค่าประมาณ 1.8 จุดเปอร์เซ็นต์ที่เวลาประมาณ 1,200 s ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าแบบจำลองวงจรสมมูลอันดับหนึ่งสามารถใช้แทนพฤติกรรมทางไฟฟ้าหลักของแบตเตอรี่ได้ภายใต้ขอบเขตของเงื่อนไขการทดลอง โดยมีข้อได้เปรียบด้านโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ในการจำลองและการศึกษาระบบจัดการพลังงาน อย่างไรก็ตาม ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นระหว่างผลการจำลองและผลการทดลองสะท้อนข้อจำกัดของแบบจำลองที่ยังไม่ได้พิจารณาผลของอุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ตามอัตราการคายประจุ การเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ และความสูญเสียในระบบจริง

สำหรับการศึกษาต่อไป ผู้วิจัยจะพัฒนาแบบจำลองให้สามารถพิจารณาผลของอุณหภูมิ อัตราการคายประจุ และการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ตามสภาวะการทำงาน รวมทั้งตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองภายใต้รูปแบบโหลดและเงื่อนไขการใช้งานที่หลากหลาย เพื่อเพิ่มขอบเขตและความน่าเชื่อถือของการประยุกต์ใช้งานแบบจำลองในระบบแบตเตอรี่จริง

เอกสารอ้างอิง

[1] Wakihara, M. (2001). Recent developments in lithium on batteries. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, *33*(4), 109-134.

[2] Kim, T., Song, W., Son, D. Y., Ono, L. K., & Qi, Y. (2019). Lithium-ion batteries: outlook on present, future, and hybridized technologies. *Journal of Materials Chemistry A*, *7*(7), 2942-2964.

[3] Sakti, A., Gallagher, K. G., Sepulveda, N., Uckun, C., Vergara, C., de Sisternes, F. J., ... & Botterud, A. (2017). Enhanced representations of lithium-ion batteries in power systems models and their effect on the valuation of energy arbitrage applications. *Journal of Power Sources*, *342*, 279-291.

[4] He, H., Xiong, R., & Fan, J. (2011). Evaluation of lithium-ion battery equivalent circuit models for state of charge estimation by an experimental approach. *Energies*, *4*(4), 582-598.

[5] Nejad, S., Gladwin, D. T., & Stone, D. A. (2016). A systematic review of lumped-parameter equivalent circuit models for real-time estimation of lithium-ion battery states. *Journal of Power Sources*, *316*, 183-196.

[6] Zhang, L., Peng, H., Ning, Z., Mu, Z., & Sun, C. (2017). Comparative research on RC equivalent circuit models for lithium-ion batteries of electric vehicles. *Applied Sciences*, *7*(10), 1002.

[7] Khayamy, M., Nasiri, A., & Okoye, O. (2020). Development of an equivalent circuit for batteries based on a distributed impedance network. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, *69*(6), 6119-6128.

[8] Baveja, R., Bhattacharya, J., Panchal, S., Fraser, R., & Fowler, M. (2023). Predicting temperature distribution of passively balanced battery module under realistic driving conditions through coupled equivalent circuit method and lumped heat dissipation method. *Journal of Energy Storage*, *70*, 107967.

[9] Kim, J., & Kowal, J. (2022). Development of a Matlab/Simulink model for monitoring cell state-of-health and state-of-charge via impedance of lithium-ion battery cells. *Batteries*, *8*(2), 8.

[10] Nemes, R., Ciornei, S., Ruba, M., Hedesiu, H., & Martis, C. (2019, May). Modeling and simulation of first-order Li-Ion battery cell with experimental validation. In *2019 8th International Conference on Modern Power Systems (MPS)* (pp. 1-6). IEEE.

[11] Lai, X., Gao, W., Zheng, Y., Ouyang, M., Li, J., Han, X., & Zhou, L. (2019). A comparative study of global optimization methods for parameter identification of different equivalent circuit models for Li-ion batteries. *Electrochimica Acta*, *295*, 1057-1066.

[12] Sang, V. T. D., Duong, Q. H., Zhou, L., & Arranz, C. F. (2024). Electric vehicle battery technologies and capacity prediction: a comprehensive literature review of trends and influencing factors. *Batteries*, *10*(12), 451.

[13] Liu, G., Ouyang, M., Lu, L., Li, J., & Han, X. (2014). Analysis of the heat generation of lithium-ion battery during charging and discharging considering different influencing factors. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, *116*(2), 1001-1010.

[14] Hruska, L. W., & Savinell, R. F. (1981). Investigation of factors affecting performance of the iron-redox battery. *Journal of the Electrochemical Society*, *128*(1), 18-25.

[15] Yao, L. W., Aziz, J. A., Kong, P. Y., & Idris, N. R. N. (2013, November). Modeling of lithium-ion battery using MATLAB/Simulink. In *IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (pp. 1729-1734). IEEE.

[16] Meng, J., Ricco, M., Luo, G., Swierczynski, M., Stroe, D. I., Stroe, A. I., & Teodorescu, R. (2017). An overview and comparison of online implementable SOC estimation methods for lithium-ion battery. *IEEE Transactions on Industry Applications*, *54*(2), 1583-1591.

[17] How, D. N., Hannan, M. A., Lipu, M. H., & Ker, P. J. (2019). State of charge estimation for lithium-ion batteries using model-based and data-driven methods: A review. *IEEE Access*, *7*, 136116-136136.

การเปรียบเทียบผลการผลิตไฟฟ้าระยะสั้นกับผลการจำลองด้วยโปรแกรม PVsyst โครงการระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ขนาด 500 กิโลวัตต์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์

Short-Term Electricity Generation Comparison between Actual and PVsyst-Simulated Results of a 500 kW Solar Power Generation Project at Princess of Naradhiwas University

สุวินันท์ จันทอุไร[1*] พลากร พรหมเมศร์[2]

Suwinant Chanthaurai[1*] and Palakorn Prommet[2]

[1*]นักศึกษาปริญญาโท สาขาการจัดการเทคโนโลยีและนวัตกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์
[2]สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์
[1]Master of Engineering Program in Technology and Innovation Management, Faculty of Science Faculty of Engineering, Princess of Naradhiwas University, Narathiwas 96000
[2]Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Princess of Naradhiwas University, Narathiwas 96000
[*]Corresponding author: Tel.: 089-9749867. E-mail address: suwinant.c@pnu.ac.th

Abstract

This study aims to analyze and compare the short-term performance of a ground-mounted photovoltaic (PV) power generation system installed at Princess of Naradhiwas University. The system consists of a 502.20 kWp DC PV array and a 500 kW AC inverter. Actual power generation data collected from January to June 2025 were compared with simulation results obtained from PVsyst under consistent technical parameters, including installed capacity, a module tilt angle of 20°, and an azimuth angle of 0°. The results showed an average simulation accuracy of 80.05% and an average deviation of 19.95%, with monthly deviations ranging from 11.78% to 30.80%. The discrepancies were associated with variations in solar irradiance, weather conditions, module temperature, and dust accumulation on the PV modules. The findings can serve as a guideline for evaluating PV system performance and supporting preventive maintenance planning to improve the reliability and operational performance of photovoltaic power generation systems.

Keywords: Solar Photovoltaic, Electricity Generation, PVsyst.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งวิเคราะห์และเปรียบเทียบสมรรถนะการผลิตไฟฟ้าระยะสั้นของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดิน ณ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ โดยระบบมีกำลังติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 502.20 kWp (DC) และอินเวอร์เตอร์ขนาด 500 kW (AC) ใช้ข้อมูลการผลิตจริงระหว่างเดือนมกราคมถึงมิถุนายน พ.ศ. 2568 เปรียบเทียบกับผลการจำลองจากโปรแกรม PVsyst ภายใต้พารามิเตอร์ทางเทคนิคเดียวกัน ได้แก่ กำลังติดตั้ง มุมเอียงแผง

20° และมุมอะซิมุท 0° ผลการศึกษาพบว่า ผลการจำลองมีความแม่นยำเฉลี่ย 80.05% และมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 19.95% โดยค่าความคลาดเคลื่อนรายเดือนอยู่ในช่วง 11.78–30.80% ความแตกต่างมีแนวโน้มสัมพันธ์กับความแปรผันของรังสีดวงอาทิตย์ สภาพอากาศ อุณหภูมิแผง และการสะสมของฝุ่นบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ผลการวิจัยสามารถใช้เป็นแนวทางในการประเมินสมรรถนะและวางแผนบำรุงรักษาเชิงป้องกันของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

คำสำคัญ: พลังงานแสงอาทิตย์, การผลิตไฟฟ้า, โปรแกรม PVsyst.

บทนำ

การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เป็นเทคโนโลยีพลังงานทดแทนที่มีการขยายตัวอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากช่วยลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิลและผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม การประเมินสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (PV systems) จึงมีความสำคัญต่อการวางแผน ออกแบบ และบำรุงรักษาระบบให้มีประสิทธิภาพ โปรแกรม PVsyst เป็นเครื่องมือที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายสำหรับการจำลองพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ สมรรถนะของระบบ และการสูญเสียภายใต้เงื่อนไขการทำงานต่าง ๆ [1-2] อย่างไรก็ตาม ความแม่นยำของผลการจำลองขึ้นอยู่กับข้อมูลนำเข้า โดยเฉพาะข้อมูลสภาพภูมิอากาศและพารามิเตอร์ของระบบ ดังนั้น การเปรียบเทียบผลการจำลองกับข้อมูลที่ตรวจวัดได้จริงจึงมีความสำคัญต่อการประเมินความแม่นยำและความเหมาะสมของแบบจำลองสำหรับสภาพพื้นที่ติดตั้ง [3-4]

งานวิจัยหลายชิ้นได้รายงานการตรวจสอบความสอดคล้องระหว่างผลการจำลองและข้อมูลจริง โดยพบว่าค่าผลิตไฟฟ้าที่ได้จาก PVsyst อาจมีความแตกต่างไปตามพื้นที่ติดตั้งและสภาพภูมิอากาศ [5] นอกจากนี้ การเปรียบเทียบระหว่างเครื่องมือจำลองหลายชนิด เช่น PVsyst, HOMER, และ SAM ยังช่วยให้เห็นถึงจุดแข็งและข้อจำกัดของแต่ละโปรแกรม [6-7] โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้โปรแกรม PVsyst เนื่องจากเป็นซอฟต์แวร์ที่มีความแม่นยำสูงในการจำลองเชิงเทคนิค รองรับการวิเคราะห์พลังงาน การสูญเสีย และสมรรถนะของระบบได้อย่างครอบคลุม มีฐานข้อมูลสภาพอากาศมาตรฐาน (Meteonorm) และได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในงานวิจัยด้านวิศวกรรมพลังงานแสงอาทิตย์ทั่วโลก ซึ่งเหมาะสมต่อการประเมินระบบขนาดกลางถึงขนาดใหญ่ในเชิงวิชาการและเชิงปฏิบัติจริง

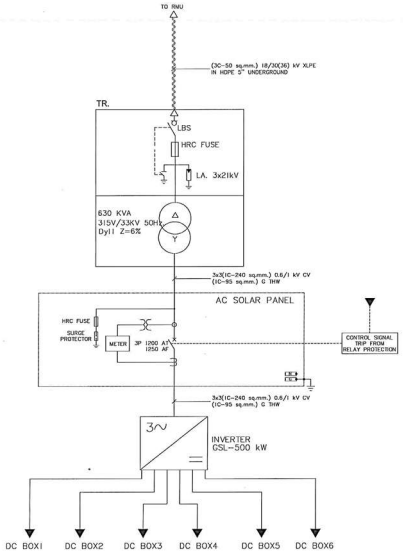
การศึกษาในระบบขนาดใหญ่ยังชี้ให้เห็นถึงศักยภาพของ PVsyst ในการประเมินระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบกักเก็บพลังงาน (Photovoltaic plus Energy Storage System) ซึ่งช่วยเพิ่มเสถียรภาพในการจ่ายไฟฟ้า [8] อีกด้านหนึ่ง งานวิจัยที่ใช้ PVsyst ร่วมกับฐานข้อมูล Meteonorm ได้สะท้อนผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่มีต่อสมรรถนะของระบบ PV [9] ในขณะที่งานด้านการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ของโครงการ PV ที่ใช้ข้อมูลวัดจริงประกอบกับผลจำลองได้ช่วยยืนยันความคุ้มค่าและความเป็นไปได้ของโครงการ [10]

ดังนั้น การเปรียบเทียบผลการจำลองกับข้อมูลที่ตรวจวัดจริงจึงมีความสำคัญต่อการประเมินสมรรถนะของระบบ งานวิจัยนี้มุ่งเปรียบเทียบผลผลิตไฟฟ้าระยะสั้นของระบบขนาด 500 kW ณ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ กับผลการจำลองด้วยโปรแกรม PVsyst เพื่อประเมินความแม่นยำและวิเคราะห์ปัจจัยที่มีแนวโน้มส่งผลต่อความแตกต่างระหว่างผลการผลิตจริงและผลการจำลองภายใต้สภาพพื้นที่ศึกษา

วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งบนพื้นดิน ขนาดกำลังผลิต 500 kW ณ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ ซึ่งออกแบบและติดตั้งเพื่อจ่ายพลังงานไฟฟ้าเข้าสู่ระบบโครงข่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ระบบประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตัลไลน์ ขนาด 310 W จำนวน 1,620 แผง จัดเรียงเป็น 81 สตริง สตริงละ 20 แผง ให้กำลังผลิตรวม 502.20 kWp (DC) พลังงานไฟฟ้ากระแสตรงจากแผงจะถูกส่งเข้าสู่อินเวอร์เตอร์ขนาด 500 kW (AC) เพื่อแปลงเป็นกระแสสลับ จากนั้นผ่านตู้ AC Solar Panel และหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 630 kVA อัตราส่วน 31.5/33 kV – 0.4 kV ก่อนเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย

ภาพที่ 1 ระบบผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 500 kW



ภาพที่ 2 Single Line Diagram Inverter 500 kW

1. เก็บข้อมูลการผลิตจริง

การเก็บข้อมูลกำลังผลิตในงานวิจัยนี้อ้างอิงจากค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จริงของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ขนาดกำลังติดตั้ง 500 kW ณ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ ข้อมูลถูกบันทึกโดย Data Logger ของอินเวอร์เตอร์ (AC Output) ตั้งแต่เดือนมกราคมถึงมิถุนายน พ.ศ. 2568 โดยมีการเก็บแบบรายวันและสรุปผลเป็นรายเดือน เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการจำลองจากโปรแกรม PVsyst ข้อมูลที่วัดประกอบด้วยพลังงานไฟฟ้าจริง (kWh) กำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบ (kWp) และปริมาณการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เพื่อสะท้อนสมรรถนะของระบบภายใต้การทำงานจริง

$$CO_{2,reduction} = E_{PV} \times EF_{grid} \quad (1)$$

โดยที่ $CO_{2,reduction}$ คือ ปริมาณการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ($kgCO_2$)

E_{PV} คือ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จริงจากระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (kWh)

EF_{grid} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของระบบไฟฟ้า ($kgCO_2$/kWh)

ในการศึกษานี้กำหนดค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการผลิตไฟฟ้าของระบบโครงข่าย (EF_{grid}) เท่ากับ 0.4954 $kgCO_2$/kWh ตามแนวทางการประเมิน Carbon Footprint for Organization ขององค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน) (TGO) ทั้งนี้ ปริมาณการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์คำนวณจากพลังงานไฟฟ้าที่ระบบผลิตได้จริงคูณด้วยค่า EF_{grid} ดังสมการที่ (1) [13]

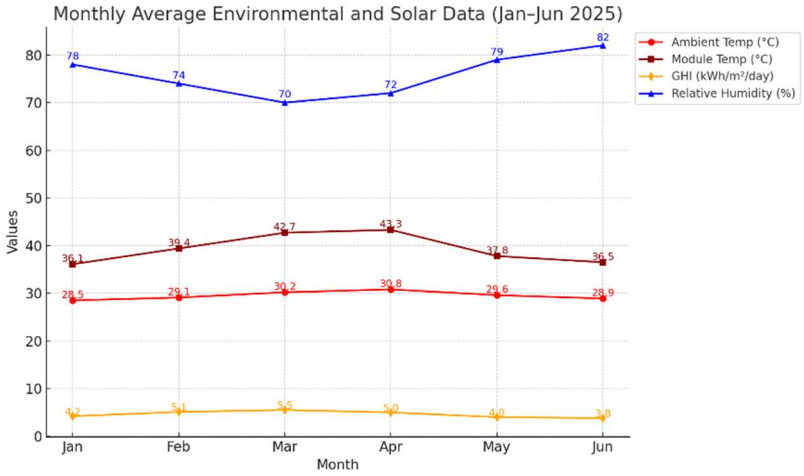
ตารางที่ 1 ข้อมูลพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จริงและการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

เดือน	กำลังไฟฟ้าสูงสุด (kW)	พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้(kWh)	ลดคาร์บอนไดออกไซด์ CO_2 ($kgCO_2$)
ม.ค.-68	500	42,797.10	21,201.70
ก.พ.-68	500	53,777.70	26,641.50
มี.ค.-68	500	61,456.80	30,445.70
เม.ย.-68	500	55,204.80	27,348.50
พ.ค.-68	500	45,087.80	22,336.50
มิ.ย.-68	500	34,828.90	17,254.20

การเก็บข้อมูลสิ่งแวดล้อมของระบบ PV ครอบคลุมตัวแปรสำคัญ ได้แก่ อุณหภูมิอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ สภาพท้องฟ้า และรังสีดวงอาทิตย์ (GHI) โดยใช้เครื่องมือ Pyranometer Kipp & Zonen CMP11 เซ็นเซอร์วัดสภาพแวดล้อม RIKA Sensor RK330-01 และเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิใต้แผง RIKA Sensor RK220-01 ข้อมูลจริงนี้ช่วยประเมินสมรรถนะและวางแผนบำรุงรักษาเชิงป้องกันอย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 2 ข้อมูลสภาพอากาศและรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยรายเดือน

เดือน	อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)	ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย (%)	สภาพท้องฟ้า	รังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ย (kWh/m²/วัน)	อุณหภูมิแผงเฉลี่ย (°C)
ม.ค.-68	28.5	78	เมฆมาก ฝนบ่อย	4.2	36.1
ก.พ.-68	29.1	74	ท้องฟ้าโปร่ง	5.1	39.4
มี.ค.-68	30.2	70	แดดจัด, อากาศร้อน	5.5	42.7
เม.ย.-68	30.8	72	ร้อนจัด, ฝนประปราย	5.0	43.3
พ.ค.-68	29.6	79	ฝนชุก, ท้องฟ้าปิด	4.0	37.8
มิ.ย.-68	28.9	82	ฝนชุก, เมฆหนา	3.8	36.5



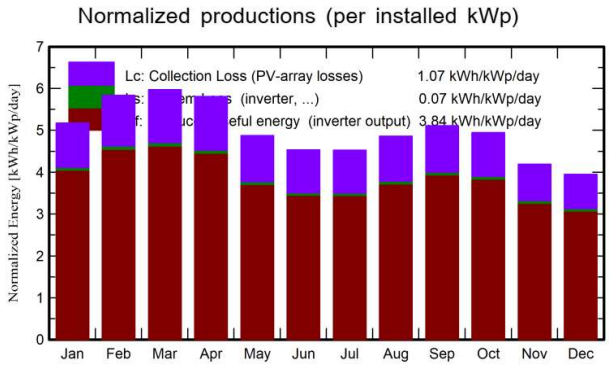
ภาพที่ 3 เปรียบเทียบข้อมูลสภาพอากาศและรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยรายเดือน

จากการวิเคราะห์ข้อมูลสภาพภูมิอากาศในช่วงเดือนมกราคมถึงมิถุนายน พ.ศ. 2568 พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ได้แก่ ค่ารังสีดวงอาทิตย์ อุณหภูมิแผง และสภาพอากาศโดยรอบ โดยเดือนมีนาคมและเมษายนมีรังสีสูงสุด 5.5 และ 5.0 kWh/m²/วัน ส่งผลให้ระบบผลิตไฟฟ้าได้สูงสุดของปี ขณะที่เดือนพฤษภาคมและมิถุนายนมีรังสีต่ำสุดเพียง 4.0 และ 3.8 kWh/m²/วัน เนื่องจากฝนตกชุกและเมฆหนา ทำให้ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลง

2. การจำลองกำลังผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

การจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ดำเนินการด้วยโปรแกรม PVsyst เวอร์ชัน 8.0.7 (Demo Version) โดยกำหนดกำลังติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 502.20 kWp (DC) รุ่น SOLARTRON SP310 ร่วมกับอินเวอร์เตอร์ KStar GSL0500 ขนาด 500 kW (AC) ระบบติดตั้ง ณ ตำบลโคกเคียน อำเภอเมือง จังหวัดนราธิวาส พิกัด 6.44°N,

101.79°E ความสูง 12 เมตร ใช้ข้อมูลสภาพอากาศจาก Meteonorm 8.2 (1991–2009) กำหนดมุมเอียงแผง 20° หันไปทางทิศใต้ (Azimuth 0°) ไม่มีการบังเงา และใช้เงื่อนไข Unlimited Grid Load การเปรียบเทียบกำหนดให้ระบบจริงและแบบจำลองใช้พารามิเตอร์ทางเทคนิคที่สอดคล้องกัน โดยวิเคราะห์ข้อมูลช่วงเดือนมกราคมถึงมิถุนายน พ.ศ. 2568 พิจารณาพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ และสมรรถนะของระบบ ทั้งนี้ แบบจำลองใช้ข้อมูลสภาพอากาศจาก Meteonorm 8.2 ขณะที่สภาวะการทำงานจริงใช้ข้อมูลที่ตรวจวัด ณ พื้นที่ติดตั้ง เพื่อประเมินความแตกต่างระหว่างผลการจำลองและผลการผลิตจริงอย่างเป็นระบบ



ภาพที่ 4 จำลองการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม PVsyst

3. สมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

การประเมินสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในการศึกษานี้อ้างอิงแนวทางตามมาตรฐาน IEC 61724-1:2017 โดยพิจารณาค่าผลผลิตอ้างอิง (Reference Yield: (Y_r)) ผลผลิตสุดท้าย (Final Yield: (Y_f)) และอัตราส่วนสมรรถนะ (Performance Ratio: PR) เพื่อใช้ในการประเมินสมรรถนะการผลิตพลังงานไฟฟ้าของระบบ รวมทั้งวิเคราะห์การสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญในการวางแผนบำรุงรักษาและปรับปรุงสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ [11-12]

ค่าพลังงานไฟฟ้าทางทฤษฎีที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Reference Yield) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$Y_r = \frac{H_i}{G_{STC}} \tag{2}$$

โดยที่ Y_r คือ พลังงานไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับต่อกำลังติดตั้งในทาง ทฤษฎี (kWh/kWp)

H_i คือ พลังงานจากรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวเซลล์แสงอาทิตย์ (kWh/m^2)

G_{STC} คือ ค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ STC = 1 kW/m^2

ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้งานจริงจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Final Yield) สามารถคำนวณได้จากสมการ (3)

$$Y_f = \frac{E_{tot}}{P_o} \tag{3}$$

โดยที่ Y_f คือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้งานจริงที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ (kWh/kWp)

E_{tot} คือ พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกใช้โดยภาระทางไฟฟ้า (kWh)

สมรรถนะของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (Performance Ratio: PR) เป็นดัชนีชี้วัดสมรรถนะการทำงานของระบบ โดยแสดงถึงศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้า ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4)

$$PR = \frac{Y_f}{Y_r} \tag{4}$$

โดยที่ PR คือ สมรรถนะของระบบเซลล์แสงอาทิตย์

พลังงานสูญเสียในระบบสามารถคำนวณได้จากผลต่างระหว่างผลผลิตทางทฤษฎีและผลผลิตจริง ตามสมการที่ (5)

$$L_S = Y_r - Y_f \tag{5}$$

โดยที่ L_S คือ พลังงานที่สูญเสียในระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (kWh/kWp)

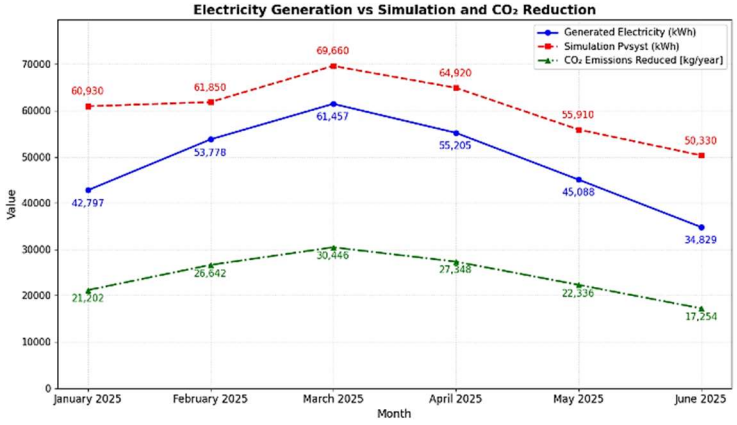
ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

ผลการจำลองแสดงค่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตเข้าสู่ระบบโครงข่าย 669.32 MWh/ปี ค่าการผลิตจำเพาะ (Specific Production) 1,403 kWh/kWp/ปี และค่าดัชนีสมรรถนะ (Performance Ratio) 77.25% พร้อมวิเคราะห์การสูญเสียในระบบ เช่น การสูญเสียจากอุณหภูมิ 12.7% การสูญเสียจากการเดินสายไฟฟ้ากระแสตรง 1.1% และการสูญเสียจากการไม่ตรงกันของโมดูล 2.0%

ตารางที่ 3 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบและการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

เดือน	ผลผลิตจริง (kWh)	PVsyst (kWh)	รังสีอาทิตย์ (kWh/m²/วัน)	ลด CO_2 ($kgCO_2$)
ม.ค.	42,797.10	60,930	4.2	21,201.70
ก.พ.	53,777.70	61,850	5.1	26,641.50
มี.ค.	61,456.80	69,660	5.5	30,445.70
เม.ย.	55,204.80	64,920	5.0	27,348.50
พ.ค.	45,087.80	55,910	4.0	22,336.50
มิ.ย.	34,828.90	50,330	3.8	17,254.20
รวม	**293,153.10**	**363,600**	–	**145,228.10**

จากการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบช่วงเดือนมกราคมถึงมิถุนายน พ.ศ. 2568 พบว่า พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จริงต่ำกว่าผลการจำลองด้วยโปรแกรม PVsyst ทุกเดือน โดยผลิตได้จริงรวม 293,153.10 kWh ขณะที่ผลการจำลองเท่ากับ 363,600 kWh ความแตกต่างมีแนวโน้มสัมพันธ์กับปริมาณรังสีดวงอาทิตย์และสภาพภูมิอากาศ โดยเดือนมีนาคมมีรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยสูงสุด 5.5 kWh/m²/วัน และผลิตไฟฟ้าได้สูงสุด 61,456.80 kWh ขณะที่เดือนมิถุนายนมีรังสีต่ำสุด 3.8 kWh/m²/วัน และผลิตไฟฟ้าได้ต่ำสุด 34,828.90 kWh นอกจากนี้ ระบบสามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้รวม 145,228.10 $kgCO_2$ ในช่วง 6 เดือน แสดงให้เห็นว่าปริมาณรังสีดวงอาทิตย์และสภาพภูมิอากาศสัมพันธ์กับสมรรถนะการผลิตไฟฟ้าและศักยภาพในการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของระบบ



ภาพที่ 5 เปรียบเทียบผลระยะ 6 เดือน

ผลการวิจัยพบว่า พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จริงของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 500 kW มีค่าต่ำกว่าผลการจำลองจากโปรแกรม PVsyst ในทุกเดือนระหว่างเดือนมกราคมถึงมิถุนายน พ.ศ. 2568 โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 11.78–30.80% และมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 19.95% เดือนมิถุนายนมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด ซึ่งสัมพันธ์กับค่ารังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยต่ำและสภาพอากาศที่มีฝนชุกและเมฆหนา ขณะที่เดือนมีนาคมมีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุดและมีค่ารังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยสูงสุด 5.5 kWh/m²/วัน นอกจากนี้ ระบบสามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ได้รวม 145,228.10 $kgCO_2$ ในช่วงระยะเวลาการศึกษา 6 เดือน สะท้อนถึงประโยชน์ของระบบในด้านสิ่งแวดล้อม ความแตกต่างระหว่างผลผลิตจริงและผลการจำลองมีแนวโน้มเกิดจากความแตกต่างระหว่างข้อมูลสภาพอากาศจริงกับฐานข้อมูล Meteonorm รวมถึงปัจจัยด้านฝุ่นสะสม ความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิแผง ซึ่งส่งผลต่อสมรรถนะของระบบ ผลการศึกษาสอดคล้องกับงานวิจัยที่ระบุว่ารังสีดวงอาทิตย์และอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญต่อสมรรถนะของระบบ PV [1-6] ดังนั้น การใช้ข้อมูลสภาพอากาศที่ตรวจวัดจริงและการปรับพารามิเตอร์ของแบบจำลองให้สอดคล้องกับสภาพพื้นที่ จะช่วยเพิ่มความแม่นยำของผลการจำลองและสนับสนุนการวางแผนบำรุงรักษาระบบในอนาคต [7-9]

สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้มุ่งเปรียบเทียบสมรรถนะการผลิตไฟฟ้าจริงของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 500 kW กับผลการจำลองจากโปรแกรม PVsyst โดยใช้ข้อมูลการผลิตจริงระหว่างเดือนมกราคมถึงมิถุนายน พ.ศ. 2568 ผลการวิเคราะห์พบว่า ผลการจำลองจากโปรแกรม PVsyst ให้ค่าพลังงานสูงกว่าผลผลิตจริงในทุกเดือน โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 19.95% และความแม่นยำเฉลี่ย 80.05% ค่าความคลาดเคลื่อนรายเดือนอยู่ในช่วง 11.78–30.80% ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าผลการจำลองสามารถใช้เป็นแนวทางในการประเมินสมรรถนะของระบบได้ แต่ยังได้รับอิทธิพลจากความแตกต่างระหว่างข้อมูลสภาพอากาศในฐานข้อมูล Meteonorm กับสภาพภูมิอากาศจริงของพื้นที่ติดตั้ง แสดงให้เห็นว่าโปรแกรม PVsyst สามารถใช้ประเมินสมรรถนะของระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพในระดับหนึ่ง แม้จะมีความแตกต่างบางส่วนจากข้อมูลจริงเนื่องจากปัจจัยด้านภูมิอากาศและสภาพแวดล้อม

ผลการศึกษาพบว่าระบบสามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ 145,228.10 $kgCO_2$ ในช่วงเดือนมกราคมถึงมิถุนายน พ.ศ. 2568 สะท้อนศักยภาพของพลังงานแสงอาทิตย์ในการลดการปล่อยคาร์บอนในระดับท้องถิ่น เพื่อเพิ่มความแม่นยำของการจำลอง ควรใช้ข้อมูลรังสีอาทิตย์จริงจากสถานีอุตุนิยมวิทยาและปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศ รวมทั้งขยายช่วงเวลาการศึกษาครอบคลุมทั้งปีเพื่อวิเคราะห์แนวโน้มระยะยาว

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณาจารย์ เจ้าหน้าที่ และผู้เกี่ยวข้องทุกท่านที่ได้ให้คำปรึกษาและความร่วมมือในการดำเนินงานจนสำเร็จ

เอกสารอ้างอิง

[1] A. K. Behura, A. K. Sahoo, S. Mohanty, and R. Pradhan, “Towards better performances for a novel rooftop solar PV system: Case study of a 248 kW grid-tied plant,” *Solar Energy*, vol. 225, pp. 1165–1177, 2021, doi: 10.1016/j.solener.2021.01.045.

[2] M. Baqir and H. K. Channi, “Analysis and design of solar PV system using PVsyst software,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 57, pp. 2320–2326, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2021.09.029.

[3] A. Kaleshwarwar and S. Bahadure, “Validating the credibility of solar simulation tools using measured data,” *Energy and Buildings*, vol. 301, art. 113697, 2023, doi: 10.1016/j.enbuild.2023.113697.

[4] S. Zainali, S. Ma Lu, B. Stridh, A. Avelin, S. Amaducci, M. Colauzzi, and P. E. Campana, “Direct and diffuse shading factors modelling for the most representative agrivoltaic system layouts,” *Applied Energy*, vol. 339, art. 120981, 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.120981.

[5] Y. K. Singh, S. Dubey, P. Rajput, K. Y. Singh, and K. Pandey, “Real-time and modelled performance assessment and validation studies of PV modules operating in varied climatic zones: A review,” *Energy and Built Environment*, Early Access, 2023, doi: 10.1016/j.enbenv.2023.11.009.

[6] R. J. Yang, L. Zhang, and H. Li, “Digitalising BIPV energy simulation: A cross-tool investigation,” *Energy and Buildings*, vol. 318, art. 114484, 2024, doi: 10.1016/j.enbuild.2024.114484.

[7] C. Vargas-Salgado, D. Díaz-Bello, D. Alfonso-Solar, and F. Lara-Vargas, “Validations of HOMER and SAM tools in predicting energy flows and economic analysis for renewable systems: Comparison to a real-world system result,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 69, art. 103896, 2024, doi: 10.1016/j.seta.2024.103896.

[8] G. Zhao, H. Li, X. Chen, J. Wang, Y. Xu, and F. Zhang, “Simulation test of 50 MW grid-connected ‘PV + energy storage’ project using PVsyst,” *Results in Engineering*, vol. 22, art. 102331, 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.102331.

[9] S. Abedi, M. H. Moradi, and R. Shirmohammadi, “Real-time photovoltaic energy assessment using a GSM-based smart monitoring system: Addressing the impact of climate change on solar energy estimation software,” *Energy Reports*, vol. 10, pp. 2361–2373, 2023, doi: 10.1016/j.egyr.2023.09.038.

[10] D. N. Katongole, K. Nyeinga, D. Okello, J. Mubiru, and Y. Kisira, “Empowering the solar energy landscape: The techno-economic analysis of grid-connected PV power plants in Uganda,” *Energy for Sustainable Development*, vol. 82, art. 101544, 2024, doi: 10.1016/j.esd.2024.101544.

[11] International Electrotechnical Commission (IEC), *IEC 61724-1: Photovoltaic system performance – Monitoring – Part 1: Measurement, data exchange and analysis*, Geneva, Switzerland, 2017.

[12] International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme (IEA-PVPS), *Task 13: Guidelines for the Operation and Maintenance of Photovoltaic Systems*, Report T13-25, 2022.

[13] Thailand Greenhouse Gas Management Organization (Public Organization), “Greenhouse Gas Emissions from Designated Factories,” Thailand Greenhouse Gas Management Organization (TGO), 2020. [Online].

การประเมินศักยภาพการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนทิ้งของไอเสียผ่านวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์: กรณีใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดท่อหมุนเวียน

Mathematical Modeling for Evaluating the Electricity Generation Potential from Exhaust Waste Heat via an Organic Rankine Cycle: A Case Study Using a Run-Around Coil Heat Exchanger

ธรณิศวร์ ดีทายาท[1], เหนือพล ดวงเบี้ย[1,2], วาสนา คำโอภาส[1,3], อรรถกร อาสนคำ[1]และทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์[1]

[1] ห้องปฏิบัติการวิจัยระบบทางอุณหภาพ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50200
[2] สำนักงานบริหารงานวิจัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50200

[3] สถาบันวิจัยพหุศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50200

ABSTRACT

This study investigated the potential for electricity generation from exhaust waste heat at various temperatures and flow conditions using an Organic Rankine Cycle (ORC) with R245fa as the working fluid. A mathematical model was developed for a system incorporating a run-around coil heat exchanger to transfer heat from the exhaust gas to a hot-water loop, which subsequently supplied heat to the ORC evaporator. The minimum exhaust gas temperature after heat recovery was maintained at 120°C to prevent water vapor condensation, while a pinch temperature difference of 10°C was imposed for the heat exchange processes. The analysis considered exhaust gas temperatures ranging from 150 to 300°C and hot-water-to-exhaust-gas heat capacity rate ratios ranging from 2 to 5. The results showed that increasing the exhaust gas temperature increased both the produced hot-water temperature and the ORC evaporator temperature, resulting in higher thermal efficiency and greater power output. For an exhaust-gas heat capacity rate of 1.2 kW/K, the model predicted ORC thermal efficiencies of approximately 14.1–17.2% and power outputs of approximately 5.08–37.08 kW. The highest evaluated thermal efficiency and power output were 17.17% and 37.08 kW, respectively, at an exhaust gas temperature of 300°C and a hot-water-to-exhaust-gas heat capacity rate ratio of 3. However, excessively reducing the heat capacity rate ratio could increase the evaporator temperature beyond the suitable operating range. For an ORC using R245fa, the evaporator temperature was therefore recommended to be maintained below approximately 150°C. These findings demonstrated that the proposed mathematical model could be used to estimate the electricity generation potential of exhaust waste heat and to identify appropriate operating conditions for an ORC integrated with a run-around coil heat exchanger.

Keywords: Organic Rankine cycle; exhaust gas; electricity generation; run-around coil heat exchanger

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาศักยภาพในการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนทิ้งของไอเสียที่อุณหภูมิและอัตราการไหลต่าง ๆ ผ่านวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ (Organic Rankine Cycle; ORC) ที่ใช้ R245fa เป็นสารทำงาน โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ร่วมกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดท่อหมุนเวียน สำหรับถ่ายเทความร้อนจากไอเสียสู่น้ำร้อนก่อนนำไปให้ความร้อนแก่อีวาปอเรเตอร์ของวัฏจักร กำหนดให้อุณหภูมิไอเสียหลังการแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าต่ำสุด 120°C เพื่อป้องกันการควบแน่นของไอน้ำในไอเสีย และกำหนดความแตกต่างของอุณหภูมิพินช์ในการแลกเปลี่ยนความร้อนเท่ากับ 10°C การศึกษาพิจารณาอุณหภูมิไอเสียในช่วง 150–300°C และอัตราส่วนความจุความร้อนรวมของน้ำร้อนต่อไอเสียในช่วง 2–5

ผลการศึกษาพบว่า เมื่ออุณหภูมิไอเสียเพิ่มขึ้น อุณหภูมิน้ำร้อนที่ผลิตได้และอุณหภูมิอีวาปอเรเตอร์ของวัฏจักรเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพทางความร้อนและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้เพิ่มขึ้น สำหรับกรณีที่อัตราความจุความร้อนรวมของไอเสียเท่ากับ 1.2 kW/K แบบจำลองให้ค่าประสิทธิภาพทางความร้อนของ ORC ประมาณ 14.1–17.2% และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ประมาณ 5.08–37.08 kW โดยค่าประสิทธิภาพและกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่พิจารณาได้เท่ากับ 17.17% และ 37.08 kW ตามลำดับ ที่อุณหภูมิไอเสีย 300°C และอัตราส่วนความจุความร้อนรวมของน้ำต่อไอเสียเท่ากับ 3 อย่างไรก็ตาม เมื่ออัตราส่วนความจุความร้อนรวมของน้ำต่อไอเสียลดลงมากเกินไป อุณหภูมิอีวาปอเรเตอร์อาจสูงเกินช่วงการทำงานที่เหมาะสม โดยสำหรับ R245fa ควรควบคุมอุณหภูมิอีวาปอเรเตอร์ไม่ให้เกินประมาณ 150°C ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถใช้ประเมินศักยภาพการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนทิ้งของไอเสีย และช่วยกำหนดเงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสมของระบบ ORC ร่วมกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดท่อหมุนเวียนได้

คำสำคัญ: วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์; แก๊สไอเสีย; การผลิตไฟฟ้า; ขดท่อหมุนเวียน

บทนำ

วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนทิ้งจากแหล่งต่างๆ เช่น ไอเสียจากเครื่องปั่นไฟฟ้าที่ใช้น้ำมันดีเซลหรือแก๊สชีวภาพ ไอเสียจากเตาเผาหรือหม้อไอน้ำ หรือ น้ำร้อนทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ทำให้ประสิทธิภาพรวมในการผลิตพลังงานของหน่วยงานมีค่าสูงขึ้น Jian sing et. al., 2015 [1] นำความร้อนทิ้งจากน้ำร้อนที่ระบายความร้อนในเครื่องยนต์เรือ และแก๊สไอเสียของเครื่องยนต์มาผลิตไฟฟ้าผ่านวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ทำให้ประสิทธิภาพระบบเพิ่มขึ้น 10.2% ธรณิศวร์ และ ทนงเกียรติ 2557 [2] พบว่า การเพิ่มอัตราการไหลและอุณหภูมิน้ำร้อนเข้าเครื่องทำระเหยของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ทำให้ประสิทธิภาพวัฏจักรเพิ่มขึ้น โดยต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยจะลดลง โศดิษฐ์ ดรุณ และคณะ, 2559 [3] ได้ศึกษาศักยภาพการนำแก๊สไอเสีย ของเครื่องยนต์แก๊สชีวภาพของโรงไฟฟ้าจากหลุมฝังกลบขยะ มาผลิตน้ำร้อนเพื่อป้อนให้แก่วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ที่ใช้ R245fa เป็นสารทำงาน สามารถผลิตไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากเดิม 3.4% โดยมีต้นทุนในการผลิตไฟฟ้า 2.38 บาท/kWh ณพล ไชยมงคล และคณะ [4] ได้ใช้ วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ผลิตไฟฟ้าจากน้ำร้อนทิ้งอุณหภูมิสูง ในโรงไฟฟ้าถ่านหินแห่งหนึ่ง โดยพบว่ามีต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าเพียง 1.39 บาท/kWh และความร้อนที่เหลือสามารถนำมาใช้ทำความเย็นผ่านระบบทำความเย็นแบบดูดกลืน สำหรับการปรับอากาศในอาคารได้อีกทางหนึ่ง ในช่วงที่ผ่านมา ORC ได้รับความสนใจอย่างต่อเนื่องสำหรับการนำความร้อนทิ้งจากเครื่องยนต์และกระบวนการอุตสาหกรรมกลับมาใช้ผลิตไฟฟ้า โดยการศึกษาครอบคลุมตั้งแต่วัฏจักรพื้นฐานไปจนถึงวัฏจักรแบบ regenerative, supercritical และ multi-loop รวมถึงการเลือกใช้สารทำงานรุ่นใหม่เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม [5] นอกจากการออกแบบวัฏจักรและการเลือกสารทำงานแล้ว สมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนยังเป็นปัจจัยสำคัญต่อประสิทธิภาพและต้นทุนของระบบ ORC เนื่องจากเป็นองค์ประกอบหลักในการถ่ายเทพลังงานระหว่างแหล่งความร้อนกับสารทำงาน [6] โดยเฉพาะในระบบนำความร้อนจากไอเสียกลับมาใช้ประโยชน์ การออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจำเป็นต้องพิจารณาทั้งความสามารถในการรับความร้อนและความดันตกคร่อมด้านไอเสีย เนื่องจากความดันตกคร่อมที่สูงอาจส่งผลต่อสมรรถนะโดยรวมของระบบต้นกำเนิดไอเสีย [7] งานวิจัยล่าสุดยังแสดงให้เห็นถึงการพัฒนา ORC สำหรับการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ในหลายระดับ ตั้งแต่การวิเคราะห์รูปแบบวัฏจักรและเงื่อนไขการทำงานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ [8] ไปจนถึงการพัฒนาและทดสอบระบบ ORC ระดับ 50 kWe สำหรับความร้อนทิ้งในอุตสาหกรรม [9]

แม้ว่างานวิจัยที่ผ่านมาได้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของ ORC ในการนำความร้อนทิ้งจากแหล่งต่าง ๆ กลับมาใช้ผลิตไฟฟ้า แต่การศึกษาส่วนใหญ่มุ่งเน้นการวิเคราะห์ระบบภายใต้เงื่อนไขของแหล่งความร้อนหรือระบบเฉพาะกรณี จึงยังขาดแนวทางอย่างง่ายสำหรับการประเมินศักยภาพการผลิตไฟฟ้าจากไอเสียเมื่อทราบเพียงอุณหภูมิและอัตราความจุความร้อนรวมของแหล่งความร้อน งานวิจัยนี้จึงนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับประเมินสมรรถนะ ORC ที่ใช้

R245fa เป็นสารทำงาน โดยพิจารณาผลของอุณหภูมิไอเสีย อัตราส่วนความจุความร้อนรวมของน้ำต่อไอเสีย และข้อจำกัดด้านอุณหภูมิในการแลกเปลี่ยนความร้อนร่วมกัน

ในระบบที่นำเสนอ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดท่อหมุนเวียน (run-around coil heat exchanger) ถูกใช้เป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนจากไอเสียไปยัง ORC ผ่านวงจรน้ำร้อน การจัดระบบในลักษณะนี้มีข้อดีด้านความยืดหยุ่นในการติดตั้งและการบำรุงรักษา นอกจากนี้การใช้ขดท่อแลกเปลี่ยนความร้อนในทางเดินไอเสียยังสามารถออกแบบให้มีความดันตกคร่อมต่ำ เพื่อลดผลกระทบต่อการทำงานของระบบต้นกำเนิดไอเสีย ดังนั้น แนวทางที่นำเสนอจึงเหมาะสำหรับใช้ประเมินเบื้องต้นทั้งศักยภาพการผลิตไฟฟ้าและเงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสมของระบบ ORC สำหรับแหล่งความร้อนทิ้งที่มีอุณหภูมิและอัตราความจุความร้อนรวมแตกต่างกัน

ทฤษฎี

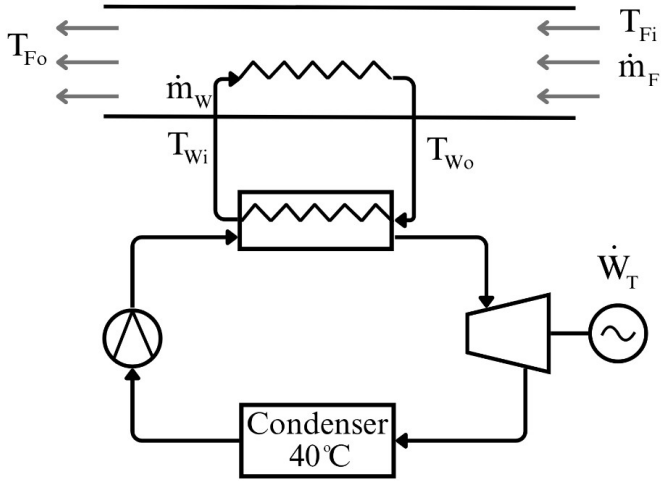
รูปที่ 1 แสดงการนำความร้อนทิ้งจากไอเสีย อัตราการไหล $\dot{m}_F$ อุณหภูมิไอเสีย T_{Fi} มาแลกเปลี่ยนความร้อนกับชุดแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Run-around coil ที่มีน้ำอัตราการไหล $\dot{m}_W$ เป็นสารทำงาน น้ำร้อนที่ได้จะถูกนำให้ความร้อนแก่อีวาปอเรเตอร์ ของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ ในงานนี้จะกำหนดให้อุณหภูมิไอเสียหลังจากแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าต่ำสุดที่ 120°C เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการควบแน่นของไอน้ำในไอเสีย ซึ่งมักจะกำหนดให้สูงกว่า 100°C [4] กำหนด c_p ของไอเสียมีค่า 1.2 kJ/kgK อัตราความร้อนที่จ่ายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และอีวาปอเรเตอร์ของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ สามารถคำนวณจาก

$$\dot{Q}_F = \dot{Q}_G = \left(\dot{m}c_p\right)_F \left(T_{Fi} - T_{Fo}\right) = \left(\dot{m}c_p\right)_W \left(T_{Wi} - T_{Wo}\right) \quad (1)$$

จะได้

$$T_{Wo} = \frac{\left(\dot{m}c_p\right)_F}{\left(\dot{m}c_p\right)_W}\left(T_{Fi} - T_{Fo}\right) + T_{Wi} \quad (2)$$

กำหนด Pinch temperature ระหว่างไอเสียและน้ำที่ท่อไอเสีย 10°C [11] นั่นคือ T_{Wi} = 120 – 10 = 110°C ซึ่งเมื่อกำหนดอุณหภูมิไอเสีย, T_{Fi}, อัตราความจุความร้อนรวมของไอเสีย, $\left(\dot{m}c_p\right)_F$ และอัตราความจุความร้อนรวมของน้ำ $\left(\dot{m}c_p\right)_W$ จะสามารถคำนวณอุณหภูมิน้ำร้อนที่ออกจากอุปกรณ์, T_{Wo}, จากสมการ (2) เพื่อมาจ่ายความร้อนที่อีวาปอเรเตอร์จองวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์



รูปที่ 1 การดึงความร้อนจากไอเสีย เพื่อผลิตไฟฟ้าผ่านวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์

วัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ จะถูกสมมุติให้ทำงานแบบวัฏจักรมาตรฐาน ซึ่งในที่นี้กำหนดอุณหภูมิคอนเดนเซอร์ 40°C และเมื่อกำหนด pinch temperature ในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอุณหภูมิอีวาปอเรเตอร์ T_G และอุณหภูมิน้ำร้อน 10°C ดังนั้นสามารถกำหนดค่า อุณหภูมิอีวาโปเรเตอร์, T_G,จากไดอะแกรม T-s ของวัฏจักรได้

เมื่ออุณหภูมิอีวาโปเรเตอร์, T_G, และอุณหภูมิคอนเดนเซอร์, T_C, ถูกกำหนดค่าประสิทธิภาพของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์, η_{th}, ของสารทำงาน R245fa สามารถคำนวณได้จาก [11]

$$\eta_{th} = 85.75^{5}FOM^{2} - 140.16FOM + 59.55 \quad (3)$$

FOM เป็นกลุ่มตัวแปรไร้มิติ เรียกว่า ฟิกเกอร์ออฟเมอริต (Figure of Merit) โดยคำนวณจาก [12]

$$FOM = \left(\frac{c_p \Delta T}{h_{fg}}\right)^{0.1} \left(\frac{T_C}{T_G}\right)^{0.8} \quad (4)$$

C_p คือความจุความร้อนของสารทำงานที่อุณหภูมิเฉลี่ย T_G และ T_C, $\Delta T = T_G - T_C$, h_{fg} คือค่าความร้อนแฝงที่อุณหภูมิ T_G ข้อมูลต่างๆในการคำนวณของาร R245fa สามารถหาได้จาก REFPROP [13]

กำลังงานที่ผลิตได้จากวัฏจักร $\dot{W}_T$ สามารถคำนวณจาก

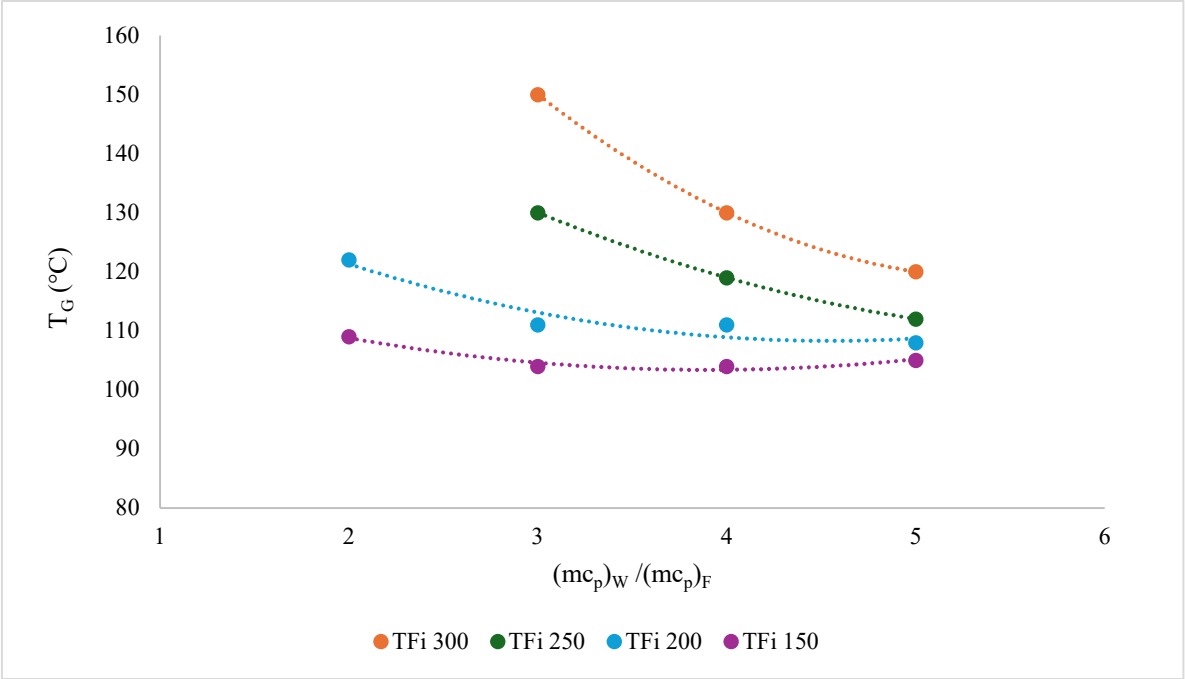
$$\dot{W}_T = \eta_{th}\dot{Q}_G \quad (5)$$

ผลการศึกษา

สมรรถนะวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์

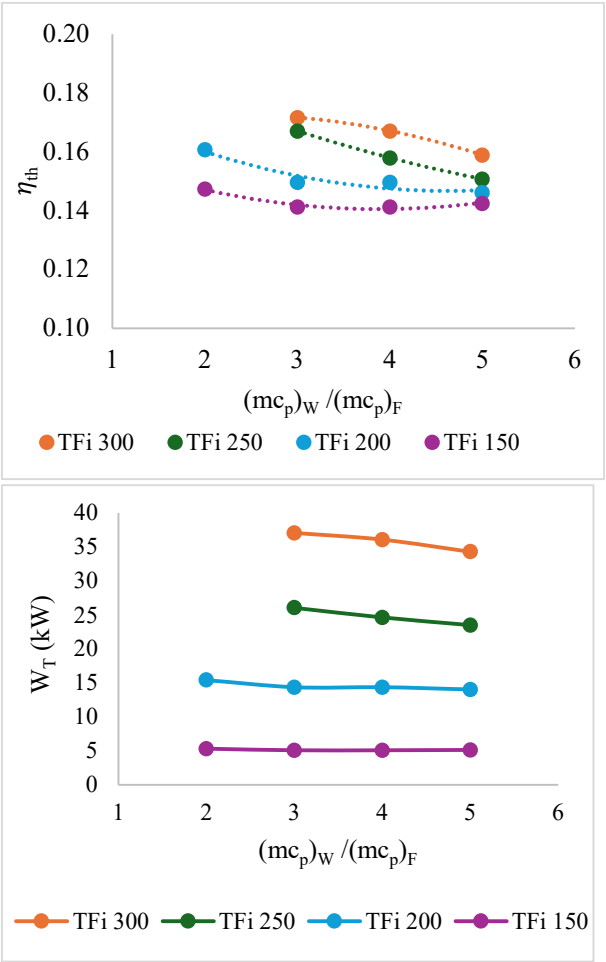
รูปที่ 2 แสดงอุณหภูมิอีวาปอเรเตอร์, T_G, ของวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของอัตราความจุความร้อนรวมของน้ำต่ออัตราความจุความร้อนรวมของไอเสีย $(\dot{m}c_p)_W/(\dot{m}c_p)_F$ ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยกำหนด อุณหภูมิไอเสียหลังจากแลกเปลี่ยนความร้อนแล้วอยู่ที่ 120°C และ pinch temperature ในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างไอเสียและน้ำอยู่ที่ 10°C (T_{Wi}=110°C) เมื่ออุณหภูมิไอเสีย, T_{Fi}, มีค่าเพิ่มขึ้น อุณหภูมิน้ำร้อนที่ผลิตได้, T_{wo}, และอุณหภูมิอีวาปอเรเตอร์ของวัฏจักร, T_G, จะเพิ่มขึ้นด้วย

จะเห็นได้ว่า ถ้าอัตราส่วนของอัตราความจุความร้อนรวมของน้ำต่ออัตราความจุความร้อนรวมของไอเสีย $(\dot{m}c_p)_W/(\dot{m}c_p)_F$ ลดลง อุณหภูมิอีวาปอเรเตอร์, T_G, อาจสูงเกินกว่าที่วัฏจักรจะทำงานได้ ดังนั้นในกรณี ที่อุณหภูมิไอเสีย, T_{Fi}, มีค่าสูง ควรให้อัตราส่วนของอัตราความจุความร้อนรวมมีค่าสูง เพื่อควบคุมอุณหภูมิอีวาปอเรเตอร์, T_G, ไม่ให้สูงเกินไป สำหรับวัฏจักรที่ใช้สารทำงาน R245fa อุณหภูมิดังกล่าว ไม่ควรเกิน 150°C ซึ่งใกล้กับจุดวิกฤติมากเกินไป



รูปที่ 2 อุณหภูมิอีวาปอเรเตอร์, T_G, จากวัฏจักร ที่อุณหภูมิไอเสีย T_{Fi} และอัตราส่วนความจุความร้อนรวม$(\dot{m}c_p)_W/(\dot{m}c_p)_F$ ค่าต่างๆ

อุณหภูมิอีวาปอเรเตอร์, T_G , ที่เพิ่มขึ้น จะเป็นปัจจัยที่ทำให้ประสิทธิภาพวัฏจักร, η_{th}, และกำลังงานที่ได้จากวัฏจักรสูงขึ้น, W_T, รูปที่ 3 แสดงประสิทธิภาพวัฏจักรและกำลังงานที่ผลิตได้ที่อุณหภูมิ T_{Fi} และอัตราส่วน $(\dot{m}c_p)_W/(\dot{m}c_p)_F$ ค่าต่างๆกัน



รูปที่ 3 ประสิทธิภาพและกำลังงานที่ผลิตได้จากวัฏจักร ที่อุณหภูมิไอเสีย T_{Fi} และอัตราส่วนความจุความร้อนรวม $(\dot{m}c_p)_W/(\dot{m}c_p)_F$ ค่าต่างๆ

จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพรวมและกำลังงานที่ได้จากวัฏจักร จะมีค่าสูงตามอุณหภูมิไอเสียที่เพิ่มขึ้น และขณะเดียวกันจะต้องลดอัตราส่วน $(\dot{m}c_p)_W/(\dot{m}c_p)_F$ ซึ่งในกรณีหลัง จะต้องเลือกค่าอัตราส่วนให้เหมาะสม มิเช่นนั้นการลดค่าอัตราส่วนดังกล่าวจะทำอุณหภูมิ T_G มีค่าสูงเกินไปจนระบบไม่สามารถทำงานได้

กรณีศึกษา

สำหรับแก๊สร้อนอุณหภูมิและอัตราส่วนความจุความร้อนรวมต่างๆ การศึกษานี้ได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางความร้อนของ ORC จากงานวิจัยที่ผ่านมาและจากการศึกษานี้ พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันดังตารางที่ 1 ดังนั้นการศึกษานี้สามารถช่วยประเมินศักยภาพของ ORC เบื้องต้นได้ เมื่อทราบอุณหภูมิไอเสียและอัตราความจุความร้อนรวมในช่วงดังกล่าว

ตารางที่ 1 ประสิทธิภาพ ORC เปรียบเทียบระหว่างงานวิจัยอื่นๆและการศึกษานี้

อุณหภูมิแก๊สร้อน	อัตราส่วนความจุ	n_{th} จากงานวิจัย	n_{th} จากการศึกษานี้	% ความแตกต่าง

(°C)	ความร้อนรวม			จากงานวิจัย
175	3	15.34 [14]	14.50	5.78
290	4	16.70 [15]	16.58	0.72

สรุป

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อประเมินศักยภาพในการผลิตไฟฟ้าจากความร้อนทิ้งของไอเสียผ่านวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ที่ใช้ R245fa เป็นสารทำงาน โดยใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดท่อหมุนเวียนเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนจากไอเสียสู่วงจรน้ำร้อน ภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิไอเสียหลังการแลกเปลี่ยนความร้อนไม่ต่ำกว่า 120°C ความแตกต่างของอุณหภูมิพินช์เท่ากับ 10°C และอุณหภูมิคอนเดนเซอร์เท่ากับ 40°C ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

- เมื่ออุณหภูมิไอเสียเพิ่มขึ้น อุณหภูมิน้ำร้อนที่ผลิตได้และอุณหภูมิอีวาปอเรเตอร์ของ ORC เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพทางความร้อนและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้เพิ่มขึ้น
- สำหรับกรณีที่อัตราความจุความร้อนรวมของไอเสียเท่ากับ 1.2 kW/K และอุณหภูมิไอเสียอยู่ในช่วง 150–300°C แบบจำลองให้ค่าประสิทธิภาพทางความร้อนของ ORC ประมาณ 14.1–17.2% และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ประมาณ 5.08–37.08 kW
- ค่าประสิทธิภาพทางความร้อนและกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่พิจารณาได้เท่ากับ 17.17% และ 37.08 kW ตามลำดับ ที่อุณหภูมิไอเสีย 300°C และอัตราส่วนความจุความร้อนรวมของน้ำต่อไอเสียเท่ากับ 3
- อัตราส่วนความจุความร้อนรวมของน้ำต่อไอเสียมีผลโดยตรงต่ออุณหภูมิอีวาปอเรเตอร์ โดยเมื่ออัตราส่วนดังกล่าวลดลง อุณหภูมิอีวาปอเรเตอร์จะเพิ่มขึ้น และอาจสูงเกินช่วงการทำงานที่เหมาะสมของวัฏจักร
- สำหรับ ORC ที่ใช้ R245fa เป็นสารทำงาน ควรควบคุมอุณหภูมิอีวาปอเรเตอร์ไม่ให้เกินประมาณ 150°C ดังนั้นในกรณีที่อุณหภูมิไอเสียสูง ควรเลือกใช้อัตราส่วนความจุความร้อนรวมของน้ำต่อไอเสียที่สูงขึ้น เพื่อควบคุมอุณหภูมิอีวาปอเรเตอร์ให้อยู่ในช่วงการทำงานที่เหมาะสม
- ผลการศึกษานี้สามารถใช้เป็นแนวทางเบื้องต้นในการประเมินศักยภาพการผลิตไฟฟ้าและเลือกเงื่อนไขการทำงานของระบบ ORC สำหรับการนำความร้อนทิ้งจากไอเสียกลับมาใช้ประโยชน์ในงานวิศวกรรมได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณหน่วยวิจัยระบบทางอุณหภาพ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] J. Song, Y. Song and C. Gu, “Thermodynamic analysis and performance optimization of an Organic Rankine Cycle (ORC) waste heat recovery system for marine diesel engines,” *Energy*, vol. 82, pp. 976–985, 2015.

[2] ธรณิศวร์ ดีทายาท และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์, “การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์ขนาดโมดูลาร์ที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง,” *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, ปีที่ 21, ฉบับที่ 3, หน้า 84–93, 2557.

[3] โศภิษฐ์ ดรุณ, ธรณิศวร์ ดีทายาท และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์, “การใช้ไอเสียจากเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพเป็นแหล่งความร้อนให้กับวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์เพื่อผลิตไฟฟ้า,” ใน *การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการ การถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 15*, สุราษฎร์ธานี, 29–30 มีนาคม 2559.

[4] ณพล ไชยมงคล, ธรณิศวร์ ดีทายาท และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์, “การศึกษาระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำเย็นด้วยวัฏจักรแรงคินสารอินทรีย์และระบบทำความเย็นแบบดูดซึมจากความร้อนทิ้งในโรงไฟฟ้าถ่านหิน,” *วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม*, ปีที่ 18, ฉบับที่ 2, หน้า 80–91, 2568.

[5] C. E. Sprouse III, “Review of Organic Rankine Cycles for Internal Combustion Engine Waste Heat Recovery: Latest Decade in Review,” *Sustainability*, vol. 16, no. 5, 1924, 2024. https://doi.org/10.3390/su16051924.

[6] P. Lu, Z. Liang, X. Luo, Y. Xia, J. Wang, K. Chen, Y. Liang, J. Chen, Z. Yang, J. He, and Y. Chen, “Design and optimization of Organic Rankine Cycle based on heat transfer enhancement and novel heat exchanger: A review,” *Energies*, vol. 16, no. 3, 1380, 2023. https://doi.org/10.3390/en16031380.

[7] X. Li, J. Song, G. Yu, Y. Liang, H. Tian, G. Shu and C. N. Markides, “Organic Rankine cycle systems for engine waste-heat recovery: Heat exchanger design in space-constrained applications,” *Energy Conversion and Management*, vol. 199, 111968, 2019. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111968.

[8] T. Klamrassamee, T. Kittijungjit, Y. Sukjai and Y. Laoonual, “Thermodynamic, economic, and carbon emission evaluation of various Organic Rankine cycle configurations for maximizing waste heat recovery potential,” *Energy Conversion and Management: X*, vol. 26, 100943, 2025. https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.100943.

[9] J. H. Park, J. Kim and J. G. Kwon, “50 kWe R1336mzz(Z) ORC power generation system for industrial waste heat recovery: System design and commissioning test results,” *Energy*, vol. 323, 135698, 2025. https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.13569

[10] G. Gonzalez, R. Baar, J. Drueckhammer and C. Kaeppner, “The thermodynamics of exhaust gas condensation,” *SAE International Journal of Engines*, vol. 10, no. 4, pp. 1411–1421, 2017.

[11] N. P. Chaimongkol, T. Deethayat, D. Wang and T. Kiatsiriroat, “Waste heat harvesting from continuous blowdown for power generation via organic Rankine cycle network: Case study of a coal-fired power plant,” *Results in Engineering*, vol. 20, 2023.

[12] C. R. Kuo, S. W. Hsu, K. H. Chang and C. C. Wang, “Analysis of a 50 kW organic Rankine cycle system,” *Energy*, vol. 36, pp. 5877–5885, 2011.

[13] T. Deethayat, A. Asanakham and T. Kiatsiriroat, “Performance analysis of low temperature organic Rankine cycle with zeotropic refrigerant by Figure of Merit (FOM),” *Energy*, vol. 96, pp. 96–102, 2016. https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.047.

[14] Y. Li and T. Tang, “Performance analysis and optimization of a series heat exchangers organic Rankine cycle utilizing multi-heat sources from a marine diesel engine,” *Entropy*, vol. 23, 906, 2021.

[15] H. A. Al-Rawashdeh, M. R. Gomaa, R. J. Mustafa and A. O. Hasan, “Efficiency and exergy enhancement of ORC powered by recovering flue gases-heat system in cement industrials: A case study,” *International Review of Mechanical Engineering*, vol. 13, pp. 185–197, 2019.

ภาคผนวก

ตารางที่ a.1 *ผลการคำนวณที่* $(\dot{m}c_p)_F$ = 1.2 kW/K $(\dot{m}c_p)_W/(\dot{m}c_p)_F$ = 4

T_{Fi} (C)	T_{Fo} (C)	T_{wi} (C)	T_{wo} (C)	T_G (C)	$\dot{Q}_G$ (kW)	η_{th}	$\dot{W}_T$ (kW)
300	120	110	155.0	130	216	0.1670	36.09
250	120	110	142.5	119	156	0.1579	24.64
200	120	110	130.0	111	96	0.1496	14.36
150	120	110	117.5	104	36	0.1412	5.08

ตารางที่ a.2 *ผลการคำนวณที่* $(\dot{m}c_p)_F$ = 1.2 kW/K $(\dot{m}c_p)_W/(\dot{m}c_p)_F$ = 3

T_{Fi} (C)	T_{Fo} (C)	T_{wi} (C)	T_{wo} (C)	T_G (C)	$\dot{Q}_G$ (kW)	η_{th}	$\dot{W}_T$ (kW)
300	120	110	170.0	150	216	0.1717	37.08
250	120	110	153.3	130	156	0.1671	26.06
200	120	110	136.7	111	96	0.1496	14.36
150	120	110	120.0	104	36	0.1412	5.08

ตารางที่ a.3 *ผลการคำนวณที่* $(\dot{m}c_p)_F$ = 1.2 kW/K $(\dot{m}c_p)_W/(\dot{m}c_p)_F$ = 2

T_{Fi} (C)	T_{Fo} (C)	T_{wi} (C)	T_{wo} (C)	T_G (C)	$\dot{Q}_G$ (kW)	η_{th}	$\dot{W}_T$ (kW)
300	120	110					
250	120	110					
200	120	110	150.0	122	96	0.1607	15.43
150	120	110	125.0	109	36	0.1473	5.30

ตารางที่ a.4 *ผลการคำนวณที่* $(\dot{m}c_p)_F$ = 1.2 kW/K $(\dot{m}c_p)_W/(\dot{m}c_p)_F$ = 5

T_{Fi} (C)	T_{Fo} (C)	T_{wi} (C)	T_{wo} (C)	T_G (C)	$\dot{Q}_G$ (kW)	η_{th}	$\dot{W}_T$ (kW)
300	120	110	146.0	120	216	0.1589	34.32
250	120	110	136.0	112	156	0.1507	23.52
200	120	110	126.0	108	96	0.1462	14.03
150	120	110	116.0	105	36	0.1425	5.13

การพัฒนาระบบควบคุมความชื้นและอุณหภูมิสำหรับโรงเรือนปลูกเมล่อน

Development of Moisture and Temperature Control System for Melon Greenhouses

ชารีฟ จ่าวัง, ยูวารี เวาะและ, ลุตฟี สือนิ, อีลีหย๊ะ สนิโซ, วาริษา วาแม และมูฮำมัดคอยรี หะยีบากา*

Charif Jawang, Yuwaree Wohlaeh, Lutfee Sueni, Eleeyah Saniso, Warisa Wamae

and Muhammadkhoiri Hayibaka*

สาขาวิชาพลังงานทดแทน คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา ยะลา 95000

Renewable Energy Program, Faculty of Science Technology and Agriculture,

Yala Rajabhat University, Yala, 95000

*Corresponding author: Tel.: 0930866739. E-mail address: muhammadkhoiri.h@yru.ac.th

Abstract

This study aimed to develop a soil moisture, relative humidity, and temperature control system for melon greenhouses located in Raman District, Yala Province, Thailand. The control system was designed and installed with components including a soil moisture sensor, a drip irrigation system, ventilation fans, and a misting unit, all connected to a microcontroller to regulate environmental conditions suitable for melon growth. The system operated based on a threshold-based control principle, whereby the microcontroller automatically activated or deactivated each device when the measured values deviated from predefined set points. The experiment was conducted from June to August 2023, during which data on soil moisture, relative humidity, and both internal and external temperatures of the greenhouse were recorded. The results revealed that the system effectively maintained soil moisture levels consistent with the water requirements of melons at different growth stages, controlled the internal temperature within the range of 25–30 °C despite an average external temperature of 33.18 °C, and sustained relative humidity between 65–80 %RH throughout the experiment. System performance was evaluated by comparing the measured environmental conditions with the predefined set points. These findings indicate that the developed control system can assist in managing the environmental conditions inside melon greenhouses according to the predefined control conditions.

Keywords: Moisture Control System, Temperature Control System, Melon Greenhouses

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบควบคุมความชื้นในดิน ความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิสำหรับโรงเรือนปลูกเมล่อนในพื้นที่อำเภอรามัน จังหวัดยะลา โดยออกแบบและติดตั้งระบบควบคุมที่ประกอบด้วยเซ็นเซอร์วัดความชื้นในดิน ระบบน้ำหยด พัดลมระบายอากาศ และระบบพ่นหมอกเชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อปรับสภาพแวดล้อมให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเมล่อน โดยระบบควบคุมทำงานตามหลักการแบบกำหนดค่ามาตรฐาน ซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์จะสั่งเปิด–ปิดอุปกรณ์อัตโนมัติเมื่อค่าที่วัดได้เบี่ยงเบนจากค่าที่ตั้งไว้ล่วงหน้า การทดลองดำเนินการระหว่างเดือนมิถุนายน–สิงหาคม 2566 โดยเก็บข้อมูลความชื้นในดิน ความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือน และอุณหภูมิทั้งภายในและภายนอกโรงเรือน ผลการวิจัยพบว่าระบบสามารถรักษาความชื้นในดินให้อยู่ในระดับที่สอดคล้องกับความต้องการของเมล่อนแต่ละระยะการเจริญเติบโต ควบคุมอุณหภูมิภายในให้อยู่ในช่วง 25-30 °C แม้อุณหภูมิภายนอกเฉลี่ยอยู่ที่ 33.18 °C และรักษาความชื้นสัมพัทธ์ให้อยู่ในช่วง 65-80 %RH ตลอดการทดลอง โดยประเมินการทำงานของระบบจากการเปรียบเทียบค่าที่ตรวจวัดได้กับค่า Set Point ที่กำหนด ผลการศึกษาพบว่าระบบสามารถช่วยจัดการสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือนให้เป็นไปตามเงื่อนไขการควบคุมที่กำหนด

คำสำคัญ: ระบบควบคุมความชื้น ระบบควบคุมอุณหภูมิ โรงเรือนปลูกเมล่อน

บทนำ

เมล่อน (Cucumis melo L.) เป็นพืชเศรษฐกิจที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีรสชาติหวาน กลิ่นหอม และมีมูลค่าทางการตลาดสูง [1-2] ความต้องการบริโภคเมล่อนในประเทศไทยเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้เกษตรกรจำนวนมากหันมาปลูกเมล่อนเพื่อสร้างรายได้ อย่างไรก็ตามการปลูกเมล่อนมีข้อจำกัดที่สำคัญ เนื่องจากไม่ใช่พืชที่มีถิ่นกำเนิดในประเทศไทย จึงมีความอ่อนไหวต่อปัจจัยสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น และโรคพืช [3] โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการปลูกเมล่อนอยู่ในช่วง 25–30 °C ในเวลากลางวัน และ 18–20 °C ในเวลากลางคืน หากอุณหภูมิสูงเกิน 30 °C หรือต่ำกว่า 15 °C จะส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโต การออกดอก และการติดผลของพืช [4]

การปลูกพืชในโรงเรือนจึงเป็นแนวทางที่ช่วยควบคุมปัจจัยแวดล้อมให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช โดยเฉพาะการจัดการความชื้นในดินและอุณหภูมิ ซึ่งมีผลโดยตรงต่อคุณภาพผลผลิต [5] นอกจากนี้เทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ เช่น ระบบควบคุมด้วยเซ็นเซอร์และไมโครคอนโทรลเลอร์ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการในโรงเรือนได้ ทั้งในด้านการให้น้ำ การรักษาความชื้น และการระบายอากาศ [6-7] ซึ่งช่วยลดความเสี่ยงจากความแปรปรวนของสภาพอากาศ และเพิ่มความมั่นคงในการผลิตผลไม้คุณภาพสูง ทั้งนี้ที่ผ่านมามีงานวิจัยจำนวนหนึ่งที่มุ่งเน้นการพัฒนาระบบควบคุมสภาพแวดล้อมสำหรับการปลูกเมล่อนและพืชในโรงเรือน เช่น งานวิจัยของเอกรัฐและเดือนแรม (2562) ที่นำเสนอการควบคุมความชื้นในดินเพื่อปรับปรุงคุณภาพผลผลิตเมล่อน [8] งานวิจัยของ Azaza et al. (2016) ได้พัฒนาระบบควบคุมโรงเรือนโดยใช้ fuzzy logic ผสานกับการตรวจวัดและการส่งข้อมูลแบบไร้สาย เพื่อจัดการอุณหภูมิและความชื้นภายในโรงเรือนโดยรวม ซึ่งสามารถลดการใช้พลังงานและทรัพยากรได้อย่างมีประสิทธิภาพ [9] งานวิจัยอีกชิ้นโดย Volosciuc et al. (2024) ได้ทดลองระบบโรงเรือนอัจฉริยะขนาดเล็กด้วยโครงข่าย IoT ร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์และแอปพลิเคชันมือถือสำหรับการควบคุมระยะไกล งานเหล่านี้แสดงให้เห็นศักยภาพของการรวม fuzzy logic, IoT และพลังงานทดแทนในการจัดการสภาพแวดล้อมในโรงเรือน [10] และงานวิจัยของศิวัตม์ และคณะ (2566) ที่ใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งควบคุมปัจจัยในกระบวนการผลิตเห็ดในโรงเรือนอัจฉริยะ [11]

จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่ามีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี IoT ระบบควบคุมอัตโนมัติ และระบบพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับการจัดการสภาพแวดล้อมในโรงเรือน อย่างไรก็ตามระบบที่นำเสนอในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาระบบควบคุมสำหรับโรงเรือนปลูกเมล่อนขนาดเล็กในพื้นที่อำเภอรามัน จังหวัดยะลา โดยบูรณาการการควบคุมความชื้นในดิน ความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิไว้ในระบบเดียว และใช้ค่า Set Point เป็นเงื่อนไขในการสั่งงานระบบน้ำหยด ระบบพ่น

หมอก และพัดลมระบายอากาศ เพื่อให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมของพื้นที่ศึกษา ดังนั้นการวิจัยนี้มุ่งเน้นการออกแบบและสร้างระบบควบคุมอัตโนมัติโดยใช้เทคโนโลยีเซ็นเซอร์ร่วมกับพลังงานทดแทน เพื่อให้เกษตรกรสามารถจัดการสภาพแวดล้อมในโรงเรือนอย่างเหมาะสม อันจะนำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตเมล่อนและสนับสนุนความยั่งยืนทางการเกษตรในระดับชุมชน

วิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง โดยมีรายละเอียดการศึกษาและทบทวนเอกสาร การออกแบบและสร้างระบบควบคุม การติดตั้งระบบ การเก็บรวบรวมข้อมูลและการวิเคราะห์ข้อมูล ดังต่อไปนี้

1. การศึกษาและทบทวนเอกสาร

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาและทบทวนเอกสาร งานวิจัย และข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการเพาะปลูกเมล่อน การจัดการน้ำ ความต้องการใช้น้ำของพืช ระบบควบคุมอัตโนมัติ ตลอดจนเทคโนโลยีการจัดการสภาพแวดล้อมในโรงเรือน เพื่อนำข้อมูลดังกล่าวมาใช้เป็นพื้นฐานในการออกแบบระบบควบคุมความชื้นในดิน ความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิ

2. การออกแบบและสร้างระบบควบคุม

ทำการออกแบบระบบควบคุมความชื้นและอุณหภูมิสำหรับโรงเรือนปลูกเมล่อน โดยใช้อุปกรณ์หลัก ได้แก่

- แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตัลไลน์ ขนาด 340 W
- บอร์ดควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ (Arduino UNO R3)
- Relay Module สำหรับควบคุมการทำงานของอุปกรณ์
- เซ็นเซอร์วัดความชื้นในดิน
- เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์
- พัดลมระบายอากาศ
- ระบบน้ำหยดอัตโนมัติ
- ระบบพ่นหมอก

โดยอุปกรณ์ทั้งหมดได้รับการติดตั้งและเชื่อมต่อเข้ากับบอร์ด Arduino UNO R3 เพื่อรับข้อมูลจากเซ็นเซอร์และสั่งงานอุปกรณ์ควบคุมตามเงื่อนไขที่กำหนด โดยระบบประกอบด้วยส่วนตรวจวัด ส่วนประมวลผล และส่วนควบคุม ได้แก่ เซ็นเซอร์สำหรับตรวจวัดสภาพแวดล้อม Arduino UNO R3 สำหรับประมวลผลข้อมูล Relay Module สำหรับสั่งเปิด–ปิดอุปกรณ์ ระบบน้ำหยดสำหรับควบคุมความชื้นในดิน ระบบพ่นหมอกสำหรับควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ และพัดลมระบายอากาศสำหรับควบคุมอุณหภูมิ

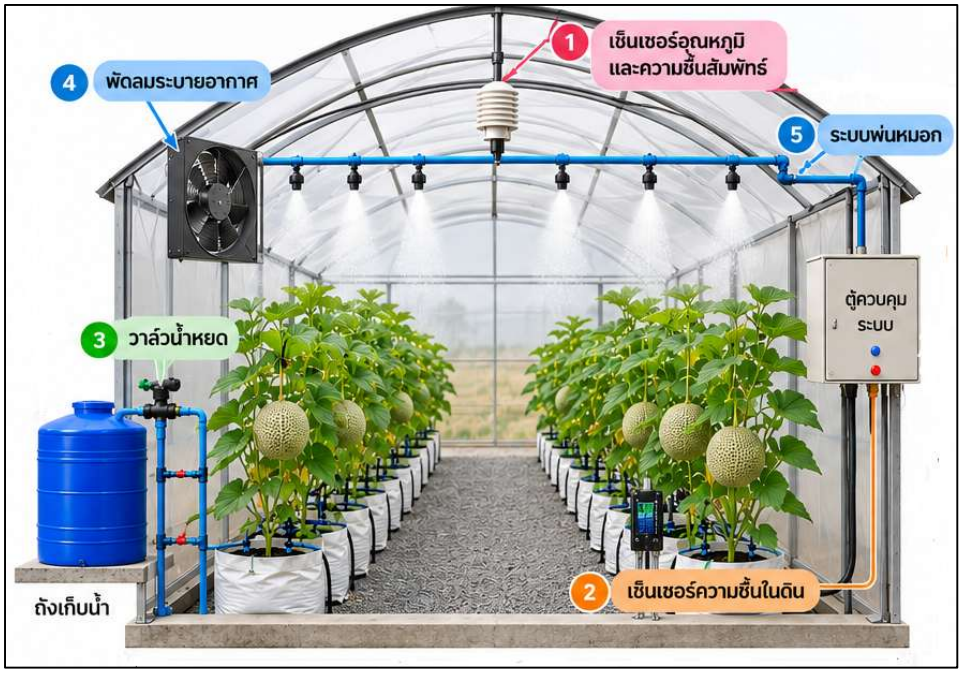
ทั้งนี้เซ็นเซอร์ที่ติดตั้งภายในระบบทำหน้าที่ตรวจวัดความชื้นในดิน อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ โดยข้อมูลจากเซ็นเซอร์ถูกส่งเข้าสู่ Arduino UNO R3 เพื่อประมวลผลและเปรียบเทียบกับค่า Set Point ก่อนสั่งงานอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง ก่อนเริ่มการทดลอง ผู้วิจัยตรวจสอบการทำงานของเซ็นเซอร์และระบบควบคุมโดยทดสอบการรับค่าจากเซ็นเซอร์และการตอบสนองของอุปกรณ์ตามเงื่อนไขที่กำหนด

(ก) (ข)

ภาพที่ 1 (ก) การเตรียมพื้นที่และติดตั้งระบบน้ำหยดตามแนวแปลงในโรงเรือน (ข) การเจริญเติบโตของต้นเมล่อน

3. การติดตั้งระบบ

โรงเรือนที่ใช้ในการทดลองได้รับการติดตั้งระบบตรวจวัดและควบคุมสภาพแวดล้อม ประกอบด้วยเซ็นเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ เซ็นเซอร์ตรวจวัดความชื้นในดิน ระบบน้ำหยด ระบบพ่นหมอก และพัดลมระบายอากาศ โดยอุปกรณ์ตรวจวัดและควบคุมทั้งหมดเชื่อมต่อกับชุดควบคุมระบบเพื่อประมวลผลข้อมูลและสั่งงานอุปกรณ์ตามค่า Set Point ที่กำหนด ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์และเซ็นเซอร์ภายในโรงเรือนแสดงดังภาพที่ 2



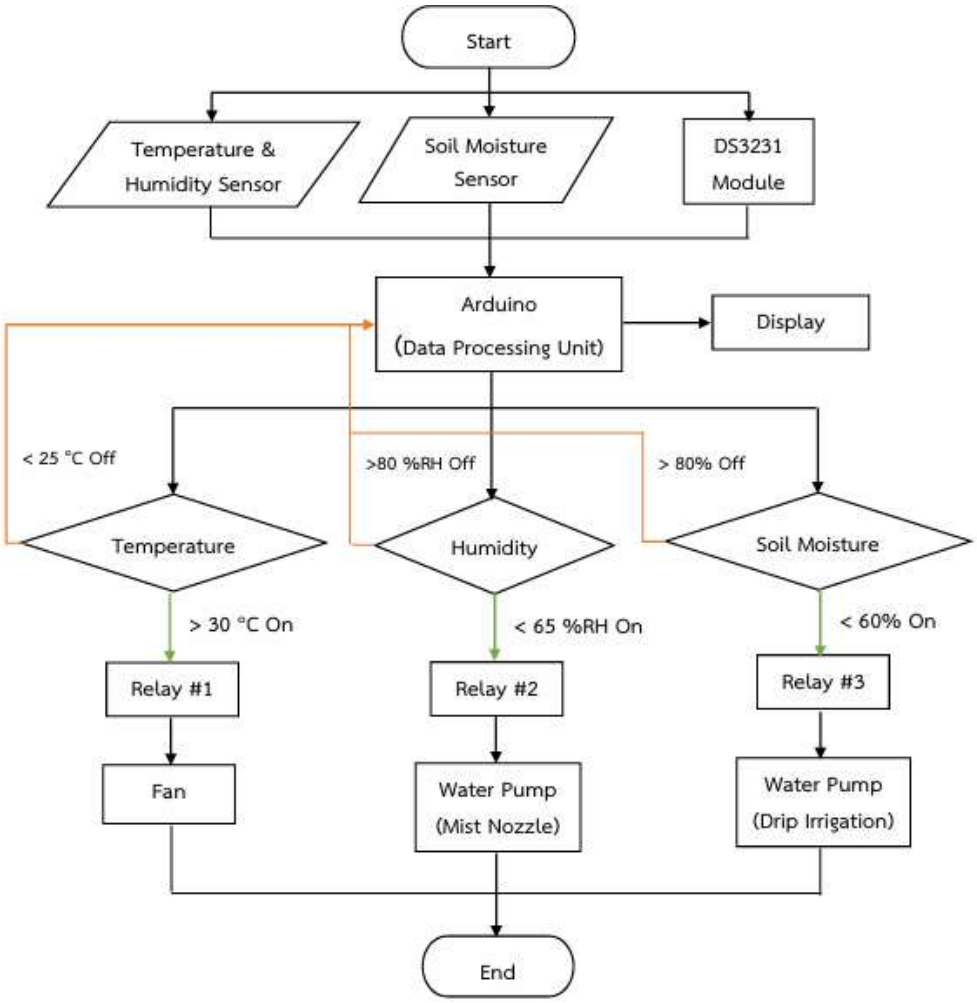
ภาพที่ 2 แผนผังโรงเรือนและตำแหน่งติดตั้งระบบควบคุมและเซ็นเซอร์

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการควบคุมของระบบ

ตัวแปร	ค่า Set Point	การตอบสนองของระบบ
อุณหภูมิ	>30 ℃	พัดลมระบายอากาศทำงาน
ความชื้นสัมพัทธ์	<65 %RH	ระบบพ่นหมอกทำงาน
ความชื้นในดิน	<60%	ระบบน้ำหยดทำงาน

จากตารางที่ 1 การกำหนดค่า Set Point ของระบบใช้เป็นค่าเกณฑ์สำหรับสั่งงานอุปกรณ์โดยอัตโนมัติ โดยกำหนดให้อุณหภูมิสูงกว่า 30 ℃ เป็นเงื่อนไขในการเปิดพัดลมระบายอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่า 65 %RH เป็นเงื่อนไขในการเปิดระบบพ่นหมอก และความชื้นในดินต่ำกว่า 60% เป็นเงื่อนไขในการเปิดระบบน้ำหยด ทั้งนี้ ค่าอุณหภูมิ 30 ℃ พิจารณาจากช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเมล่อนตามเอกสารอ้างอิง [4] ส่วนค่า 65 %RH และ 60% ถูกใช้เป็นค่าเกณฑ์ในการควบคุมของระบบตามเงื่อนไขของการทดลอง

โดยการทำงานของระบบควบคุมอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นแสดงดังภาพที่ 3 ซึ่งประยุกต์แผนผังการทำงานของระบบจากงานวิจัยของเอกรัฐและเดือนแรม (2562) [8] โดยเริ่มจากการรับข้อมูลจากเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ (Temperature & Humidity Sensor), เซนเซอร์วัดความชื้นในดิน (Soil Moisture Sensor) และโมดูลนาฬิกาแบบเรียลไทม์ (DS3231 Module) ข้อมูลที่ได้จะถูกส่งเข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino UNO ซึ่งทำหน้าที่ประมวลผลและเปรียบเทียบค่ากับค่าที่กำหนดไว้ล่วงหน้า เมื่อค่าที่วัดได้เบี่ยงเบนจากค่าที่กำหนด ระบบจะสั่งการผ่านโมดูลรีเลย์ เพื่อควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนี้ 1) ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 30 ℃ ระบบจะเปิดพัดลมระบายอากาศ (Relay #1) 2) ถ้าความชื้นสัมพัทธ์ภายในต่ำกว่า 65 %RH ระบบจะเปิดปั๊มน้ำพ่นหมอก (Relay #2) 3) ถ้าความชื้นในดินต่ำกว่า 60% ระบบจะเปิดปั๊มน้ำระบบน้ำหยด (Relay #3) ในกรณีที่ค่าต่าง ๆ อยู่ในช่วงเหมาะสม ระบบจะหยุดการทำงานของอุปกรณ์โดยอัตโนมัติ ทั้งนี้ข้อมูลที่วัดได้จะถูกแสดงผลผ่านจอแสดงผล (Display) เพื่อให้ผู้ใช้สามารถติดตามค่าความชื้นและอุณหภูมิในขณะนั้นได้อย่างต่อเนื่อง



ภาพที่ 3 แผนผังการทำงานระบบควบคุมความชื้นและอุณหภูมิสำหรับโรงเรือนปลูกเมล่อน

4. การเก็บรวบรวมข้อมูลและการวิเคราะห์ข้อมูล

ทำการทดลองและเก็บข้อมูลดำเนินการในช่วงเดือนมิถุนายน – สิงหาคม 2566 โดยทำการวัดและบันทึกค่าต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการปลูกเมล่อน ได้แก่ ค่าความชื้นในดิน ค่าความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือน และอุณหภูมิภายในและภายนอกโรงเรือน ข้อมูลถูกบันทึกอย่างต่อเนื่อง โดยกำหนดช่วงเวลาในการบันทึกทุก ๆ 30 นาที ตั้งแต่เวลา 08.00–17.00 น. ของทุกวัน ในระหว่างการทดลอง ข้อมูลที่ได้ถูกนำมาจัดทำเป็นกราฟแสดงค่าความชื้นและอุณหภูมิเพื่อใช้เปรียบเทียบกับค่าที่กำหนดไว้ล่วงหน้า การบันทึกข้อมูลดำเนินการเฉพาะช่วงเวลา 08.00–17.00 น. เนื่องจากเป็นช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความชื้นสูงสุดในรอบวัน ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการทำงานของระบบควบคุม เช่น การทำงานของพัดลมหรือระบบพ่นหมอก ขณะที่ในช่วงกลางคืนค่าดังกล่าวมีความคงที่และระบบไม่ได้ทำงาน จึงไม่จำเป็นต้องเก็บข้อมูลตลอด 24 ชั่วโมง ทั้งนี้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบันทึกและลดข้อมูลซ้ำซ้อนที่ไม่ส่งผลต่อการวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยการวิเคราะห์ข้อมูลใช้วิธีเชิงพรรณนา เพื่อประเมินประสิทธิภาพการทำงานของระบบควบคุม และผลลัพธ์ที่ได้ถูกนำไปอภิปรายร่วมกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่ออธิบายถึงความเหมาะสม ศักยภาพ และความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ระบบควบคุมในสภาพจริง ทั้งนี้การเลือกช่วงเดือนมิถุนายน–สิงหาคม 2566 เนื่องจากเป็นช่วงที่พื้นที่จังหวัดยะลามีสภาพ

อากาศร้อนชื้นและมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความชื้น ซึ่งเหมาะสำหรับใช้ทดสอบการตอบสนองของระบบควบคุมภายใต้สภาพแวดล้อมจริงของพื้นที่ศึกษา

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบ สร้าง และวิเคราะห์ของระบบควบคุมความชื้นและอุณหภูมิสำหรับโรงเรือนปลูกเมล่อน ทำการทดสอบเก็บข้อมูลการใช้งานระบบ ตั้งแต่เดือนมิถุนายน-สิงหาคม 2566 โดยมีรายละเอียดผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัยดังต่อไปนี้

1. ค่าความชื้นในดิน

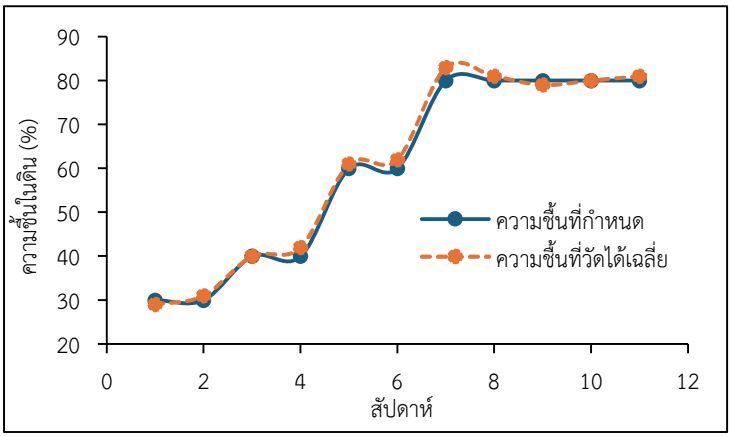
ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมสามารถรักษาความชื้นในดินให้อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมต่อความต้องการของเมล่อนในแต่ละระยะการเจริญเติบโต (ภาพที่ 4) โดยในระยะสัปดาห์ที่ 2–7 ซึ่งเป็นช่วงตั้งตัวและออกดอกติดผล พบว่าค่าความชื้นในดินเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและสอดคล้องกับความต้องการใช้น้ำที่สูงขึ้นของพืช ขณะที่ในระยะสัปดาห์ที่ 7–11 ค่าความชื้นมีความคงที่และเสถียร ซึ่งเป็นช่วงที่พืชต้องการน้ำในระดับสม่ำเสมอเพื่อสนับสนุนการพัฒนาของผลผลิต และเมื่อเข้าสู่สัปดาห์ที่ 12 ระบบสามารถลดหรือหยุดการให้น้ำตามเงื่อนไขที่กำหนดในช่วงปลายการทดลอง

การที่ระบบควบคุมสามารถปรับและรักษาความชื้นในดินได้ตามความต้องการของพืชนั้น แสดงถึงความสามารถของระบบในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของความชื้นในดินตามค่าเกณฑ์ที่กำหนด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Li et al. (2024) ที่กล่าวว่าการควบคุมความชื้นในดินช่วยเพิ่มคุณภาพผลผลิตและลดการสูญเสียน้ำ [12] อีกทั้งยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Riahi et al. (2024) ที่พบว่าการควบคุมความชื้นอย่างสม่ำเสมอในโรงเรือนปลูกพืชด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์และ Fuzzy Logic สามารถลดความเครียดของพืชและช่วยให้การเจริญเติบโตมีเสถียรภาพมากขึ้น [13] ทั้งนี้ความชื้นในดินมีความเกี่ยวข้องกับความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือน เนื่องจากน้ำในดินสามารถสูญเสียออกสู่บรรยากาศผ่านกระบวนการระเหย และพืชมีการคายน้ำ โดยเฉพาะในช่วงที่อุณหภูมิสูง กระบวนการดังกล่าวสามารถเพิ่มปริมาณไอน้ำในอากาศและมีผลต่อความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือน ในทางกลับกัน การระบายอากาศและระบบพ่นหมอกก็มีผลต่อความชื้นสัมพัทธ์เช่นกัน ดังนั้นความชื้นในดินและความชื้นในอากาศจึงมีความเกี่ยวข้องกันในเชิงกระบวนการ

2. อุณหภูมิภายในและภายนอกโรงเรือน

จากภาพที่ 5 (ก) แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิภายนอกโรงเรือนเฉลี่ย 33.18 °C ซึ่งถือว่าสูงเกินค่าที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเมล่อน อย่างไรก็ตามระบบสามารถควบคุมอุณหภูมิภายในโรงเรือนให้อยู่ในช่วง 25-30 °C ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในช่วงเหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตและการติดผลของเมล่อน อุณหภูมิที่เหมาะสมนี้มีผลต่อกระบวนการสังเคราะห์แสง การสร้างดอกตัวเมีย และการพัฒนาผลเมล่อน งานวิจัยของ Kumsong et al. (2023) พบว่าการควบคุมอุณหภูมิในโรงเรือนโดยใช้ระบบอัตโนมัติช่วยเพิ่มอัตราการติดผลและคุณภาพผลผลิต [14] ในขณะที่งานวิจัยของ Fei et al. (2021) กล่าวว่า การ ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสามารถช่วยลดความผันผวนของอุณหภูมิภายในโรงเรือนและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน [15] ทั้งนี้อุณหภูมิภายในโรงเรือนที่รักษาได้ให้อยู่ในช่วง 25-30 °C แม้อุณหภูมิภายนอกเฉลี่ย 33.18 °C เกิดจากกลไกการระบายอากาศตามธรรมชาติร่วมกับการระเหยของน้ำจากดินและการคายน้ำของพืช ซึ่งดูดซับพลังงานความร้อนออกจากอากาศ และมีการระบายความร้อนเพิ่มเติมจากพัดลม นอกจากนี้วัสดุคลุมโรงเรือนแบบ PE ยังช่วยลดการรับรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ ส่งผลให้ความร้อนสะสมภายในลดลง กลไกเหล่านี้ทำให้ระบบสามารถควบคุมอุณหภูมิได้อย่างมีเสถียรภาพและประหยัดพลังงาน

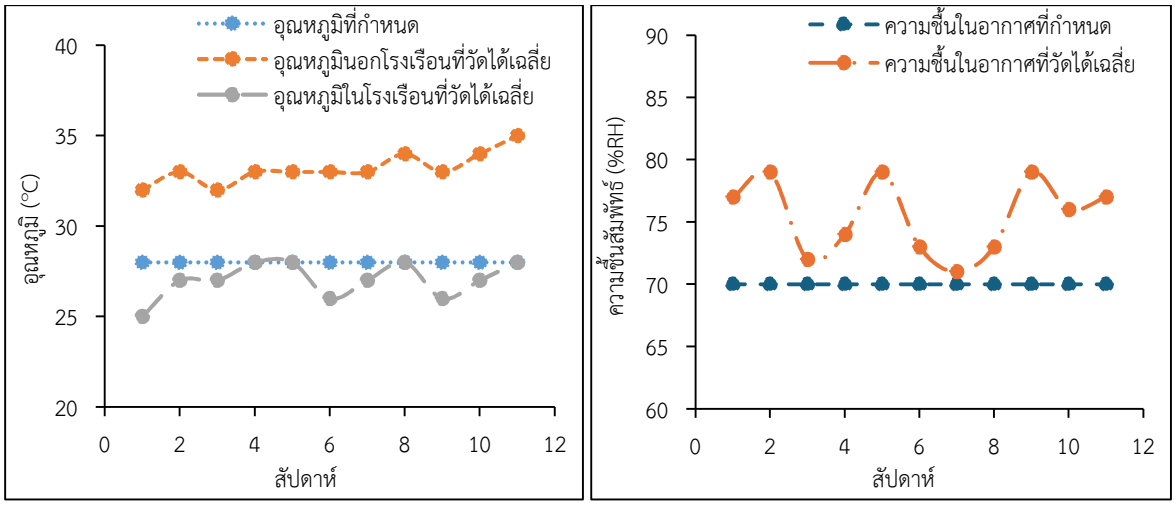
การรักษาอุณหภูมิภายในให้อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมยังช่วยป้องกันปัญหาดอกตัวผู้มากเกินไปหรือการหลุดร่วงของดอกตัวเมียซึ่งพบได้บ่อยในสภาวะอากาศร้อนจัด [16] นอกจากนี้ การระบายอากาศที่เหมาะสมยังช่วยลดการสะสมของความชื้นที่มากเกินไปซึ่งอาจก่อให้เกิดโรคพืช เช่น ราน้ำค้างและโรคเชื้อราอื่น ๆ ได้



ภาพที่ 4 ค่าความชื้นในดินของการให้น้ำต้นเมล่อนระหว่างค่าที่กำหนดกับค่าที่วัดได้

3. ค่าความชื้นสัมพัทธ์ในโรงเรือน

ผลการทดลองพบว่าระบบสามารถรักษาความชื้นสัมพัทธ์ในโรงเรือนให้อยู่ในช่วง 65-80 %RH ไว้ตลอดระยะเวลาการเก็บข้อมูล (ภาพที่ 5 (ข)) แม้ในช่วงฤดูร้อนที่เปลี่ยนผ่านสู่ฤดูฝนซึ่งมีความแปรปรวนสูงของสภาพอากาศ โดยค่าความชื้นสัมพัทธ์มีความผันผวนตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและการระบายอากาศ แต่ยังคงรักษาระดับให้อยู่ในเกณฑ์ที่เอื้อต่อการเจริญเติบโตของเมล่อน ความสามารถในการควบคุมค่าความชื้นสัมพัทธ์ในโรงเรือนนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Rukhiran et al. (2023) ที่ใช้ IoT ในการควบคุมปัจจัยการผลิตของเห็ด พบว่าการควบคุมความชื้นอย่างเหมาะสมช่วยลดความเสี่ยงจากโรคพืชและเพิ่มผลผลิตต่อรอบการเพาะปลูก [17] อีกทั้ง Subedi et al. (2019) ยังรายงานว่าการใช้ IoT-based monitoring system สำหรับการเพาะเห็ดสามารถรักษาสภาพแวดล้อมให้คงที่แม้ในช่วงที่มีความแปรปรวนสูงของสภาพภูมิอากาศ [18]



(ก) (ข)

ภาพที่ 5 (ก) อุณหภูมิภายในและภายนอกโรงเรือนเปรียบเทียบกับค่า Set Point และ (ข) ความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนเปรียบเทียบกับค่า Set Point

ผลการวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจวัดและควบคุมความชื้นในดิน อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนตามค่าเกณฑ์ที่กำหนด โดยระบบสามารถตอบสนองต่อค่าที่ตรวจวัดและสั่งงานอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องโดยอัตโนมัติ อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษานี้มุ่งเน้นเฉพาะการควบคุมสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือน จึงยังไม่สามารถสรุปผลโดยตรงต่อผลผลิตหรือคุณภาพของเมล่อนได้

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาระบบควบคุมความชื้นและอุณหภูมิสำหรับโรงเรือนปลูกเมล่อนในพื้นที่อำเภอรามัน จังหวัดยะลา โดยใช้ Arduino UNO R3 ร่วมกับเซ็นเซอร์และอุปกรณ์ควบคุม ได้แก่ ระบบน้ำหยด ระบบพ่นหมอก และพัดลมระบายอากาศ ระบบทำงานตามค่า Set Point ที่กำหนดสำหรับความชื้นในดิน อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์

ผลการทดลองพบว่า ระบบสามารถควบคุมอุณหภูมิภายในโรงเรือนให้อยู่ในช่วง 25–30 °C ขณะที่อุณหภูมิภายนอกมีค่าเฉลี่ย 33.18 °C และสามารถควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนให้อยู่ในช่วง 65–80 %RH นอกจากนี้ระบบน้ำหยดสามารถทำงานตามเงื่อนไขของค่าความชื้นในดินที่กำหนดไว้ในแต่ละช่วงการเจริญเติบโต

โดยสรุป ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจวัดและควบคุมสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือนตามเงื่อนไขที่กำหนด และสามารถประยุกต์ใช้สำหรับการจัดการสภาพแวดล้อมในโรงเรือนปลูกเมล่อนในพื้นที่ศึกษาได้ อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้ไม่ได้ประเมินผลผลิตและคุณภาพของเมล่อนโดยตรง รวมทั้งไม่ได้วิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อนของเซ็นเซอร์และต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ ดังนั้น การศึกษาในอนาคตควรเพิ่มเติมการสอบเทียบและประเมินความแม่นยำของเซ็นเซอร์ การเปรียบเทียบผลผลิตกับกลุ่มควบคุม และการวิเคราะห์ต้นทุนของระบบ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากได้รับทุนอุดหนุนจากงบประมาณกองทุนวิจัยและงานสร้างสรรค์ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2566 มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา และผู้วิจัยขอขอบคุณหลักสูตรพลังงานทดแทน และหลักสูตรฟิสิกส์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา ที่อำนวยความสะดวกในด้านสถานที่และอุปกรณ์เครื่องมือต่าง ๆ จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

[1] Tian, M., Yu, R., Guo, S., Yang, W., Liu, S., Du, H., ... & Zhang, X. (2024). Effect of Vermicompost Application on the Soil Microbial Community Structure and Fruit Quality in Melon (Cucumis melo). *Agronomy*, *14*(11), 2536. https://doi.org/10.3390/agronomy14112536

[2] Ma, M., Liu, S., Wang, Z., Shao, R., Ye, J., Yan, W., ... & Che, G. (2022). Genome-wide identification of the SUN gene family in melon (Cucumis melo) and functional characterization of two CmSUN genes in regulating fruit shape variation. *International Journal of Molecular Sciences*, *23*(24), 16047. https://doi.org/10.3390/ijms232416047

[3] Kamyod, C., & Yooyatiwong, T. (2022, January). The Practical IoT System Designed for a Melon Farm: A Case Study for Farmer Development in Northern Thailand Region. In *2022 Joint International Conference on Digital Arts, Media and Technology with ECTI Northern Section Conference on Electrical, Electronics, Computer and Telecommunications Engineering (ECTI DAMT & NCON)* (pp. 497-500). IEEE. https://doi.org/10.1109/ECTIDAMTNCON53731.2022.9720323

[4] Haq, I. U., Ullah, S., Amin, F., Nafees, M., Shah, W., Ali, B., ... & Ercisli, S. (2023). Physiological and germination responses of muskmelon (Cucumis melo L.) seeds to varying osmotic potentials and cardinal temperatures via a hydrothermal time model. *ACS omega*, *8*(37), 33266-33279. https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acsomega.3c01100

[5] Zhang, W., Zhong, W., Liu, Z., Du, B., Li, M., Huang, M., ... & Tang, Y. (2024). Precision regulation and forecasting of greenhouse tomato growth conditions using an improved GA-BP model. *Sustainability*, *16*(10), 4161. https://doi.org/10.3390/su16104161

[6] Correa-Quiroz, J. J., Toribio-Barrueto, M. A., & Castro-Vargas, C. (2025). IoT System with ESP32 for Smart Drip Irrigation and Climate Monitoring in Greenhouses. *Emerging Science Journal*, *9*(3), 1133-1157. http://dx.doi.org/10.28991/ESJ-2025-09-03-01

[7] Cikarge, G. P., & Arifin, F. (2018, December). Oyster mushrooms humidity control based on fuzzy logic by using Arduino ATMega238 microcontroller. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1140, No. 1, p. 012002). IOP Publishing. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1140/1/012002

[8] เอกรัฐ ชะอุ่มเอียด และเดือนแรม แพ่งเกี่ยว (2562). การควบคุมความชื้นในดินสำหรับโรงเรือนเมล่อน. *วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย. 11*(2): 269-278.

[9] Azaza, M., Tanougast, C., Fabrizio, E., & Mami, A. (2016). Smart greenhouse fuzzy logic based control system enhanced with wireless data monitoring. *ISA transactions*, *61*, 297-307. https://doi.org/10.1016/j.isatra.2015.12.006

[10] Volosciuc, C., Bogdan, R., Blajovan, B., Stângaciu, C., & Marcu, M. (2024). GreenLab, an IoT-Based Small-Scale Smart Greenhouse. *Future Internet*, *16*(6), 195. https://doi.org/10.3390/fi16060195

[11] ศิวัตม์ กมลคุณานนท์ นัฐพงศ์ ส่งเนียม ดุษณี ศุภวรรธนะกุล และธนภูมิ ศิริงาม (2566). การพัฒนาระบบควบคุมปัจจัยในกระบวนการผลิตเห็ดกลุ่มเย็นในโรงเรือนอัจฉริยะโดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของทุกสรรพสิ่ง. *Life Sciences and Environment Journal, 24*(1): 1-13.

[12] Li, Z., Duan, S., Ouyang, X., Song, S., Chen, D., Fan, X., ... & Shen, H. (2024). Coupled soil moisture management and alginate oligosaccharide strategies enhance citrus orchard production, water and potassium use efficiency by improving the rhizosphere soil environment. *Agricultural Water Management*, *297*, 108828. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108828

[13] Riahi, J., Nasri, H., Mami, A., & Vergura, S. (2024). Effectiveness of the fuzzy logic control to manage the microclimate inside a smart insulated greenhouse. *Smart Cities*, *7*(3). https://doi.org/10.3390/smartcities7030055

[14] Kumsong, N., Thepsilvisut, O., Imorachorn, P., Chutimanukul, P., Pimpha, N., Toojinda, T., ... & Ehara, H. (2023). Comparison of different temperature control systems in tropical-adapted greenhouses for green romaine lettuce production. *Horticulturae*, *9*(12), 1255. https://doi.org/10.3390/horticulturae9121255

[15] Fei, X., Xiao-Long, W., & Yong, X. (2021). Development of energy saving and rapid temperature control technology for intelligent greenhouses. *IEEE Access*, *9*, 29677-29685. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3059199

[16] Lohani, N., Singh, M. B., & Bhalla, P. L. (2020). High temperature susceptibility of sexual reproduction in crop plants. *Journal of Experimental Botany*, *71*(2), 555-568. https://doi.org/10.1093/jxb/erz426

[17] Rukhiran, M., Sutanthavibul, C., Boonsong, S., & Netinant, P. (2023). IoT-based mushroom cultivation system with solar renewable energy integration: Assessing the sustainable impact of the yield and quality. *Sustainability*, *15*(18), 13968. https://doi.org/10.3390/su151813968

[18] Subedi, A., Luitel, A., Baskota, M., & Acharya, T. D. (2019, November). IoT based monitoring system for white button mushroom farming. In *Proceedings* (Vol. 42, No. 1, p. 46). MDPI. https://doi.org/10.3390/ecsa-6-06545

โรงเรือนประหยัดพลังงานสำหรับการเพาะชำต้นกล้าบีทรูท โดยการใช้เทคนิคการทำความเย็นแบบผสมผสาน

Energy-saving greenhouses for beetroot Seedling cultivation using Hybrid Cooling Techniques

ชลีดล อินยาศรี[1] เจิมธง ปรารถนารักษ์[1] และปองพล รักการงาน[1*]

Chaleedol Inyasri [1] Chermdhong Prattanaruk[1] and Pongphol Rakkanrane[1*]

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี เพชรบุรี 76000

[1]Division of Energy Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology,

Phetchaburi Rajabhat University, Phetchaburi 76000

Abstract

This research aims to design and construct an energy-saving greenhouse for beetroot seedling cultivation in a tropical climate and to investigate the performance of a hybrid environmental control system. The system consists of an evaporative cooling system, a mist spray system, and a shading system, utilizing a solar photovoltaic (PV) system with an installed capacity of 1,500 W. A comparative experiment was conducted between the controlled greenhouse and a conventional greenhouse in Phetchaburi Province. The results revealed that the hybrid environmental control system could reduce the internal temperature to be 3-5°C lower on average than that of the conventional greenhouse, achieving a cooling efficiency of 89.51%. This controlled environment resulted in a germination period that was 3 days faster and an average seedling height that was 1.5 cm greater compared to the conventional greenhouse. These findings demonstrate that the application of the hybrid cooling system significantly outperforms the conventional greenhouse in terms of both environmental control performance and the effectiveness of beetroot seedling growth.

Keywords: Energy-saving greenhouse / Evaporative cooling system/ Beetroot / Hybrid control system

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างโรงเรือนประหยัดพลังงานสำหรับการเพาะชำต้นกล้าบีทรูทในสภาพอากาศร้อนชื้น และศึกษาประสิทธิภาพของระบบควบคุมสภาวะแวดล้อมแบบผสมผสาน ซึ่งประกอบด้วย ระบบทำความเย็นแบบระเหยน้ำ ระบบพ่นหมอก และระบบพรางแสง โดยใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์พิกัดกำลังการผลิต 1,500 วัตต์ เป็นแหล่งพลังงานหลัก ทำการทดลองเปรียบเทียบระหว่างโรงเรือนควบคุมสภาวะแวดล้อมกับโรงเรือนปกติ ณ จังหวัดเพชรบุรี ผลการวิจัยพบว่า ระบบควบคุมแบบผสมผสานสามารถลดอุณหภูมิภายในโรงเรือนได้ต่ำกว่าโรงเรือนปกติเฉลี่ย 3-5 องศาเซลเซียส โดยมีประสิทธิภาพการระบายความร้อนสูงถึงร้อยละ 89.51 สภาวะแวดล้อมดังกล่าวส่งผลให้ต้นกล้าบีทรูทมีระยะเวลาการงอกเร็วขึ้น 3 วัน และมีอัตราการเจริญเติบโตด้านความสูงเฉลี่ยมากกว่าโรงเรือนปกติ 1.5 เซนติเมตร แสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้ระบบทำความเย็นแบบผสมผสานมีประสิทธิภาพดีกว่าโรงเรือนแบบปกติอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งในด้านของสมรรถนะการควบคุมสภาวะแวดล้อมและด้านประสิทธิผลต่อการเจริญเติบโตของต้นกล้าบีทรูท

คำสำคัญ: โรงเรือนประหยัดพลังงาน / ระบบทำความเย็นแบบระเหยน้ำ / บีทรูท / ระบบควบคุมแบบผสมผสาน

บทนำ

บีทรูท (Beetroot) เป็นพืชที่อุดมไปด้วยสารต้านอนุมูลอิสระ โดยเฉพาะสารบีทานิน ซึ่งช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของเนื้องอกและมะเร็ง อีกทั้งยังมีสารไนเตรตสูง ช่วยในการขยายหลอดเลือด ลดความดันโลหิต และเพิ่มประสิทธิภาพการไหลเวียนโลหิต จึงเป็นที่ต้องการของผู้รักสุขภาพและอุตสาหกรรมแปรรูปอาหาร [1] บีทรูทเป็นพืชที่มีถิ่นกำเนิดในแถบเมดิเตอร์เรเนียนและทวีปยุโรป เจริญเติบโตได้ดีในสภาพอากาศหนาวเย็น เช่น พื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย [2] อย่างไรก็ตาม การขยายพื้นที่เพาะปลูกมายังเขตภูมิอากาศร้อนชื้น เช่น จังหวัดเพชรบุรี มักประสบปัญหาสำคัญโดยเฉพาะระยะเพาะกล้า ซึ่งเป็นช่วงที่พืชมีความเปราะบางที่สุดต่อความร้อนและความผันผวนของสภาพอากาศ โดยอุณหภูมิที่สูงเกินไปทำให้พืชชะงักการเจริญเติบโต ให้ผลผลิตต่ำ และมีความเสี่ยงสูงต่อการระบาดของโรคและแมลง ทำให้เกษตรกรต้องพึ่งพาสารเคมีในการกำจัดศัตรูพืช ซึ่งส่งผลกระทบต่อเนื่องถึงต้นทุนการผลิตและความปลอดภัยของผู้บริโภค

แนวทางการแก้ปัญหาการปลูกพืชต่างถิ่นในสภาพอากาศที่ไม่เอื้ออำนวย คือการใช้ระบบโรงเรือน (Greenhouse) มาประยุกต์ใช้เพื่อป้องกันความแปรปรวนของสภาพอากาศ เช่น ฝนที่ตกหนักทำลายระบบราก หรือการระบาดของแมลงศัตรูพืช อย่างไรก็ตาม การใช้โครงสร้างโรงเรือนเพียงอย่างเดียวในพื้นที่เขตร้อนอย่างจังหวัดเพชรบุรี อาจเกิดปัญหาความร้อนสะสมภายในที่สูงเกินไป จึงจำเป็นต้องมีการนำเทคโนโลยีการควบคุมสภาพแวดล้อมเข้ามาประยุกต์ใช้เพื่อควบคุมสภาวะต่าง ๆ ตรงตามที่พืชต้องการ จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องพบว่า การใช้ระบบทำความเย็นแบบระเหยน้ำ (Evaporative Cooling System) ร่วมกับระบบควบคุมอัตโนมัติ สามารถลดอุณหภูมิภายในโรงเรือนให้อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืชได้ดี [3 – 4] อีกทั้งการบูรณาการเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) ร่วมกับระบบพ่นหมอกความละเอียดสูง ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการลดอุณหภูมิและความชื้นเฉพาะจุดได้อย่างรวดเร็ว [5 – 7] นอกจากนี้ การนำระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้ร่วมกับระบบควบคุมโรงเรือน ยังเป็นแนวทางสำคัญที่ช่วยลดต้นทุนค่าไฟฟ้าและเพิ่มความมั่นคงทางพลังงานให้กับเกษตร รวมถึงช่วยให้ระบบสามารถทำงานได้ในพื้นที่ที่ไฟฟ้าเข้าไม่ถึงอีกด้วย [8 – 9]

จากแนวทางการศึกษาดังกล่าว คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาโรงเรือนประหยัดพลังงานสำหรับการเพาะชำต้นกล้าบีทรูท โดยการประยุกต์ใช้เทคนิคการทำความเย็นแบบผสมผสาน ได้แก่ ระบบทำความเย็นแบบระเหยน้ำ (Evaporative Cooling System) ระบบพ่นหมอก ระบบเปิด-ปิดม่านพรางแสง และระบบระบายอากาศ โดยใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานหลักภายในโรงเรือน

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของระบบควบคุมสภาวะแวดล้อมแบบผสมผสาน สำหรับการเพาะปลูกต้นกล้าบีทรูทในสภาพอากาศจังหวัดเพชรบุรี
2. เปรียบเทียบการเจริญเติบโตของต้นกล้าบีทรูทที่ปลูกในโรงเรือนที่ควบคุมสภาวะแวดล้อมกับโรงเรือนที่ไม่มีการควบคุมสภาวะ

วิธีการวิจัย

การศึกษาควบคุมสภาวะแวดล้อมในโรงเรือนด้วยเทคนิคการทำความเย็นแบบผสมผสาน ประกอบด้วย ระบบทำความเย็นแบบระเหยน้ำ ระบบพ่นหมอก ระบบม่านพรางแสง และระบบระบายอากาศ เปรียบเทียบการเจริญเติบโตของต้นกล้าบีทรูท โดยวัสดุปลูกที่ใช้ในการศึกษาคือ ขุยมะพร้าว เพื่อช่วยรักษาความชุ่มชื้นและการระบายอากาศ ทำให้รากของพืชสามารถเจริญเติบโตได้อย่างอิสระและแข็งแรง โดยทำการทดสอบเปรียบเทียบการเจริญเติบโตในด้านความสูงของต้นกล้าในโรงเรือนที่ควบคุมสภาวะแวดล้อมกับโรงเรือนที่ไม่มีการควบคุมสภาวะ ณ มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี จังหวัดเพชรบุรี

ดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูลอุณหภูมิ ความชื้น และความเข้มรังสีอาทิตย์ ตั้งแต่เวลา 06.00 – 18.00 น. เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบควบคุมสภาวะแวดล้อมแบบผสมผสานที่เหมาะสมต่อการเพาะปลูกต้นกล้าบีทรูทในสภาพอากาศร้อนชื้นของจังหวัดเพชรบุรี ช่วยเพิ่มอัตราการรอดและการเจริญเติบโตของต้นกล้าบีทรูทซึ่งเป็นแนวทางในการจัดการโรงเรือนเกษตรอัจฉริยะที่สามารถควบคุมสภาวะแวดล้อมในโรงเรือนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ลดความสูญเสียและเพิ่มศักยภาพในการผลิตพืชนอกฤดูกาลได้

3.1 ออกแบบและสร้างโรงเรือน

ในการออกแบบโครงสร้างโรงเรือนที่ใช้ในการทดสอบเป็นโรงเรือนแบบปิด โครงสร้างโรงเรือนเป็นลักษณะหลังคาทรงจั่วต่างระดับหรือทรงจั่วสองชั้น ซึ่งเป็นลักษณะหลังคาที่จุดยอดของหลังคาทั้งสองด้านไม่ชนกัน โดยจะมีด้านหนึ่งยกสูงกว่าอีกด้านหนึ่ง ทำให้เกิดช่องว่างในแนวตั้งบริเวณสันหลังคาขนาดกว้าง 0.15 เมตร ทำหน้าที่เป็นปล่องระบายอากาศ โดยในส่วนนี้มีการติดตั้งมุ้งกันแมลงเพื่อป้องกันศัตรูพืชเข้า แต่ยังสามารถระบายอากาศออกได้ ขนาดของโรงเรือน มีความกว้าง 2.5 เมตร ยาว 4 เมตร และสูง 3 เมตร วัสดุที่ใช้ทำโครงสร้างหลังคาเป็นเหล็กกล่องโปร่งกัลป์วาไนซ์ ขนาด 1 นิ้ว ส่วนกรอบอาคารใช้เหล็กกล่องโปร่งกัลป์วาไนซ์ ขนาด 1.5 นิ้ว ส่วนเสริมเพิ่มความแข็งแรงในส่วนของหลังคาใช้เหล็กกล่องโปร่งกัลป์วาไนซ์ ขนาด 1.5 นิ้วคลุมด้วยพลาสติกโพลีเอทิลีนชนิดขุ่นคลุมทั้งโรงเรือน ในส่วนของหลังคาโรงเรือนทางทิศเหนือติดตั้งแสลนกันแสงสีเขียว 60% ทางทิศใต้ติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Thin film ขนาด 300 วัตต์ จำนวน 5 แผง ติดตั้งแผง Cooling pad ทางด้านทิศตะวันออก และติดตั้งพัดลมดูดอากาศทางฝั่งตรงข้ามหรือทิศตะวันตกเพื่อการพาบังคับอากาศให้กระจายทั่วโรงเรือน ซึ่งโรงเรือนที่ใช้ทำการทดลองแสดงดังภาพที่ 1

ภาพที่ 1 ลักษณะโครงสร้างของโรงเรือนเพาะชำต้นกล้าของบีทรูท

3.2 การออกแบบระบบทำความเย็นแบบระเหยน้ำ

การออกแบบระบบทำความเย็นแบบระเหยน้ำ ได้ทำการวัดความเร็วลมก่อนทำการจัดวางโรงเรือน พบว่ามีลมพัดผ่านจากทิศตะวันออกมากที่สุด จึงออกแบบติดตั้งแผงคูลลิ่งแพดทางด้านทิศตะวันออก ขนาดกว้าง 1.2 เมตร ยาว หนา 0.15 เมตร และสูง 0.90 เมตร และติดตั้งพัดลมดูดอากาศทางด้านทิศตะวันตก ขนาดหน้าตัด 12 นิ้ว 2 ตัว เพื่อดูดความเย็นจากแผงคูลลิ่งแพด และระบายความชื้นออกจากโรงเรือน แสดงตำแหน่งในการติดตั้งดังภาพที่ 2

(a) (b) (c)

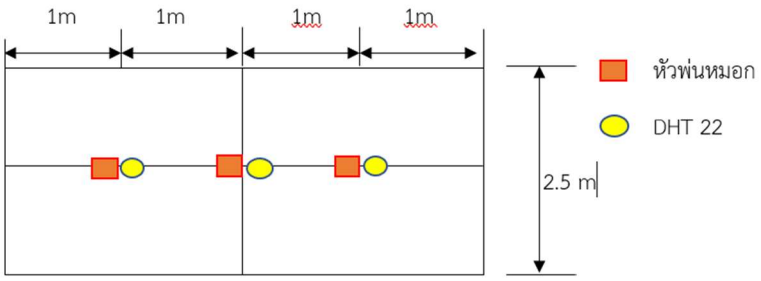
ภาพที่ 2 (a) ตำแหน่งติดตั้งระบบพ่นหมอก (b) ตำแหน่งติดตั้ง Cooling Pad และ (c) ตำแหน่งติดตั้งพัดลมดูดอากาศ

3.3 ออกแบบระบบระบายอากาศ

การออกแบบระบบระบายอากาศ นอกจากจะใช้หลักการของโครงสร้างของโรงเรือนร่วมกับระบบทำความเย็นแบบระเหยน้ำแล้ว ยังได้เพิ่มระบบการทำงานของระบบพ่นหมอก และระบบการทำงานของม่านพรางแสง โดยกำหนดให้ทำงานในช่วงเวลา 10:00 น. – 15:00 น. ภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิเฉลี่ยมากกว่าหรือเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส และน้อยกว่าหรือเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส การติดตั้งอุปกรณ์แสดงดังนี้

1) ออกแบบติดตั้งระบบพ่นหมอก เลือกใช้หัวพ่นหมอกแบบ 4 ทิศทาง ขนาดความละเอียด 0.6 มิลลิเมตร ติดตั้งภายในโรงเรือนจำนวน 3 จุด ระยะห่างในการติดตั้งจุดละ 1 เมตร พร้อมทั้งติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นด้วย Sensor DHT22 จำนวน 3 จุด ระยะห่างในการติดตั้งแต่ละจุด 1 เมตร แสดงดังแสดงในภาพที่ 3

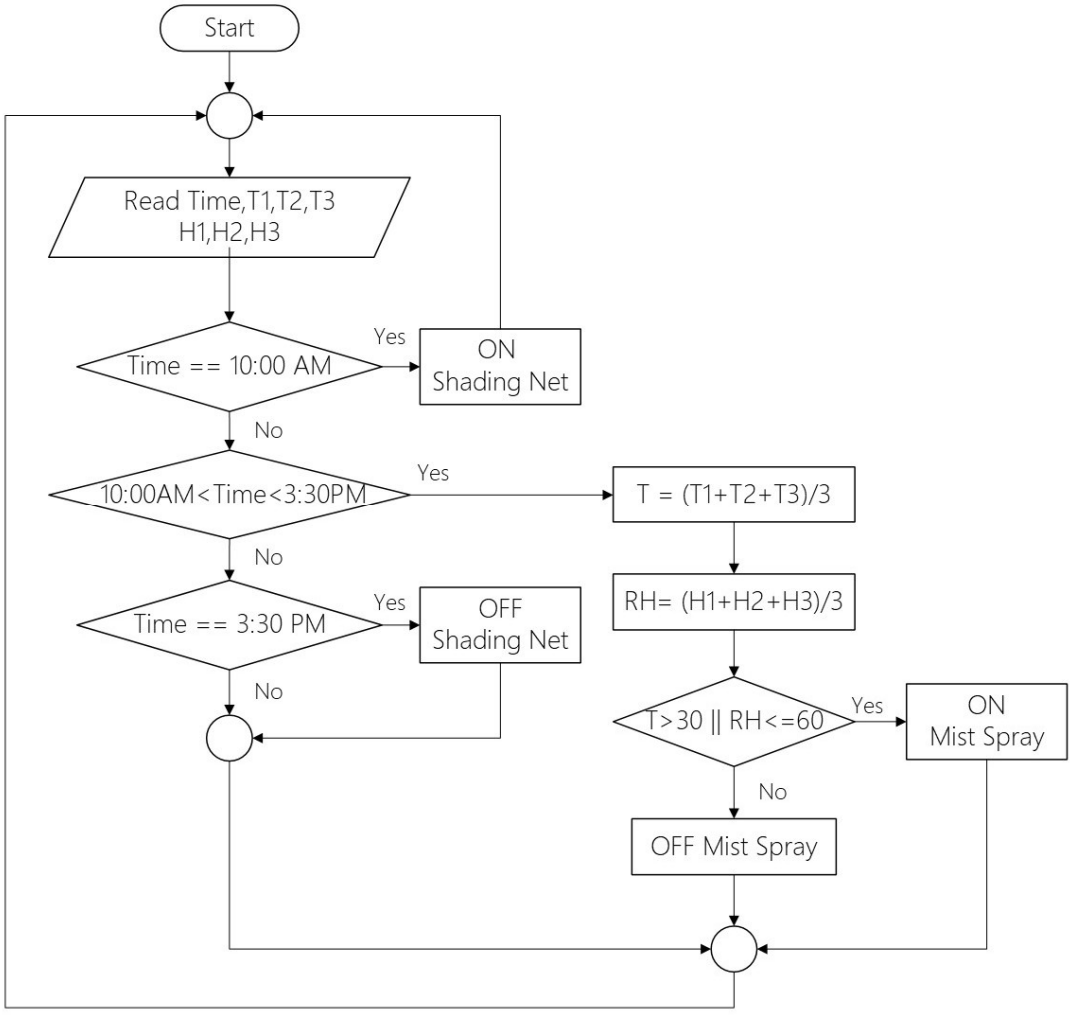
2) การออกแบบติดตั้งม่านพรางแสง จะทำการติดตั้งม่านพรางแสงด้านบนหลังคาโรงเรือนทางด้านทิศเหนือของโรงเรือนเพียงทิศทางเดียว เนื่องจากทางด้านทิศใต้มีการติดตั้งแผงเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งมีการบังแดดอยู่แล้ว ม่านพรางแสงในโรงเรือน



ภาพที่ 3 ตำแหน่งการจัดวางหัวพ่นหมอก และตำแหน่งSensor DHT 22

3.4 การทำงานของระบบควบคุมระบบระบายอากาศ

อัลกอริทึมของระบบควบคุมการทำงานของระบบระบายอากาศ ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ออดุยโน่ เริ่มต้นทำงานรับข้อมูลเวลาจากโมดูลนาฬิกา (RTC) เซนเซอร์ตรวจจับอุณหภูมิและความชื้น DHT22 จำนวน 3 ตัว เพื่ออ่านค่าเวลาและอ่านค่าอุณหภูมิและความชื้นปัจจุบันเข้ามาในระบบ จากนั้นทำการตรวจสอบเวลาเปิดม่านพรางแสง หากพบว่าเป็นเวลา 10:00 น. จะสั่งให้เปิดม่านพรางแสง (On shading net) (เซอร์โวมอเตอร์หมุนตามเข็มนาฬิกาเป็นเวลา 20 วินาที) จบการทำงานในรอบนี้ จากนั้นทำการตรวจสอบเงื่อนไขที่ 2 เวลาอยู่ในช่วง 10:00 - 15:30 น. ระบบจะเข้าสู่กระบวนการควบคุมความชื้น โดยนำค่าอุณหภูมิและความชื้นจากเซนเซอร์ทั้ง 3 ตัว มาคำนวณหาค่าอุณหภูมิเฉลี่ย และค่าความชื้นเฉลี่ย จากนั้นตรวจสอบเงื่อนไข หากอุณหภูมิเฉลี่ยที่ได้มีค่ามากกว่า 30 องศาเซลเซียส หรือ ความชื้นเฉลี่ยที่ได้มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 60% ระบบจะสั่งให้เปิดระบบพ่นหมอกและทำงานเป็นเวลา 1 วินาที (หากไม่ตรงตามเงื่อนไขจะสั่งปิดระบบพ่นหมอก) และสุดท้ายหากตรวจสอบเงื่อนไขที่ 3 พบว่าเป็นเวลาเท่ากับ 15:30 น. ระบบจะสั่งปิดม่านพรางแสง (เซอร์โวมอเตอร์หมุนทวนเข็มนาฬิกาเป็นเวลา 20 วินาที) ทั้งนี้หากเวลาไม่ตรงกับเงื่อนไขใด ๆ ที่กำหนดไว้เลย ระบบจะทำงานวนกลับไปเริ่มต้นใหม่เพื่อให้ระบบทำงานอัตโนมัติตลอดเวลา แสดงผังการทำงานของระบบควบคุมระบบระบายอากาศดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ผังการทำงานของระบบควบคุมระบบระบายอากาศ

3.5 การคำนวณหาค่าประสิทธิภาพการระบายความร้อน

การคำนวณประสิทธิภาพของระบบปรับสภาวะอากาศร่วมกับระบบพ่นหมอก ระบบม่านพรางแสง และระบบทำความเย็นแบบระเหยน้ำ คำนวณจากสมการดังนี้

1) การคำนวณประสิทธิภาพการระบายความร้อนของโรงเรือน

$$\eta = \frac{T_{D1}-T_{D2}}{T_{D1}-T_{W1}} \text{ , } \eta_E = \frac{Q_{input}-Q_{out}}{Q_{input}} \times 100 \quad (1)$$

โดยที่ η_E คือ ประสิทธิภาพการทำความเย็นแบบระเหย (%)

T_{D1} คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศก่อนผ่านระบบทำความเย็นแบบระเหย (ºC)

T_{D2} คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศหลังผ่านระบบทำความเย็นแบบระเหย (ºC)

T_{W1} คือ อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศก่อนผ่านระบบทำความเย็นแบบระเหย (ºC)

2) การคำนวณหาค่าอัตราการระบายอากาศ

เนื่องจากโรงเรือนเป็นระบบปิด ใช้การระบายอากาศแบบบังคับ คำนวณหาค่าอัตราการระบายอากาศได้จาก

$$G = \frac{S_T}{2} C_d \left[2g\varepsilon^2 \left(\frac{\Delta T}{T}\right)\left(\frac{H}{2}\right) + C_W U^2 \right]^{0.5} \quad (2)$$

โดยที่ G คือ อัตราการระบายอากาศ (m^3/s)

S_T คือ ผลรวมของ $S_R + S_S$ (m^2)

C_d คือ Discharge Coefficient

g คือ Gravitational (m/s^2)

ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิระหว่างด้านในกับด้านนอก (K)

T คือ อุณหภูมิของอากาศด้านนอก (K)

H คือ ระยะความสูงระหว่างช่องอากาศเข้าและออก (m)

C_W คือ Wind effect coefficient

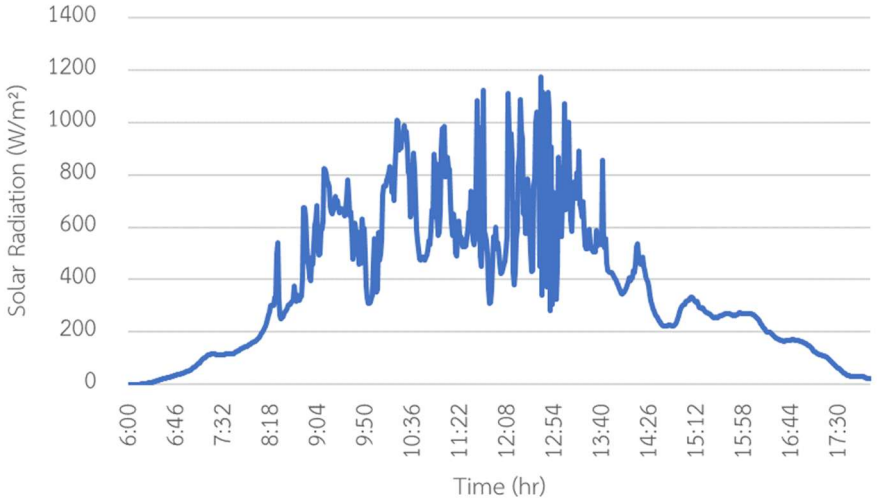
U คือ ความเร็วลมภายนอกโรงเรือน (m/s)

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

การศึกษานี้มุ่งเน้นการประเมินประสิทธิภาพของระบบควบคุมสภาวะแวดล้อมภายในโรงเรือนสำหรับเพาะปลูกต้นกล้าบีทรูท โดยประยุกต์ใช้เทคนิคการทำความเย็นแบบผสมผสาน ประกอบด้วย ระบบทำความเย็นแบบระเหยน้ำ ระบบพ่นหมอก ระบบม่านพรางแสง และระบบระบายอากาศ เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะกับโรงเรือนที่ไม่ได้ควบคุมสภาวะแวดล้อม ผลการศึกษาตัวแปรสภาพแวดล้อมที่สำคัญ มีดังนี้

4.1 ค่ารังสีแสงอาทิตย์

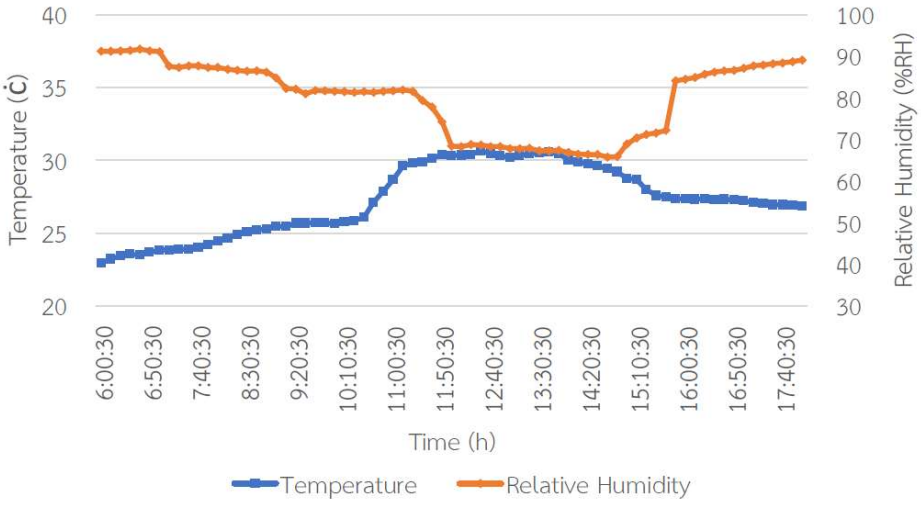
รังสีอาทิตย์ถือเป็นปัจจัยภายนอกที่สำคัญและมีอิทธิพลต่อภาระความร้อนภายในโรงเรือน ส่งผลกับการเจริญเติบโตของพืช จากการเก็บบันทึกข้อมูลค่ารังสีอาทิตย์ด้วยอุปกรณ์ไพรานอร์มิเตอร์ (Pyranometer) ณ มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี ในช่วงเวลา 6.00 น. – 18.00 น. พบว่าความเข้มรังสีอาทิตย์มีความผันผวนตลอดวันตามการเคลื่อนที่ของเมฆ โดยช่วงที่มีความเข้มแสงสูงที่สุดอยู่ในช่วงเวลา 9:00 น. – 14:00 น. และมีค่ารังสีอาทิตย์สูงสุดถึง 1,114 วัตต์ต่อตารางเมตร ซึ่งบ่งบอกถึงค่าความเข้มแสงที่สูงมากในช่วงเวลาประมาณ 12:00 – 13:00 น. และมีค่ารังสีอาทิตย์เฉลี่ยทั้งวันอยู่ที่ 384.10 วัตต์ต่อตารางเมตร ดังแสดงในภาพที่ 4 ดังนั้น จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องควบคุมสภาวะในโรงเรือนด้วยเทคนิคการทำความเย็นแบบผสมผสานที่ได้ออกแบบนี้ เช่นการใช้ม่านพรางแสงเพื่อลดค่าความเข้มแสงในช่วงพีค และใช้ระบบทำความเย็นแบบระเหยน้ำร่วมกับระบบพ่นหมอก เพื่อควบคุมโรงเรือนให้สามารถรักษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับเพาะปลูกต้นกล้าได้ตลอดทั้งวัน



ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างรังสีอาทิตย์เทียบต่อเวลา

4.2 อุณหภูมิและความชื้น

อุณหภูมิและความชื้นเป็นตัวแปรสำคัญของการควบคุมสภาวะในโครงเรือนพืชเพื่องจากอุณหภูมิและความชื้นส่งผลโดยตรงกับการเจริญเติบโตของพืช โดยอุณหภูมิและความชื้นของระบบการทำความเย็นแบบระเหยเป็นส่วนสำคัญ เก็บค่าอุณหภูมิและความชื้น โดยเก็บค่าทุก ๆ 1 นาที ตั้งแต่เวลา 6.00 – 18.00 น. ดังภาพที่ 5

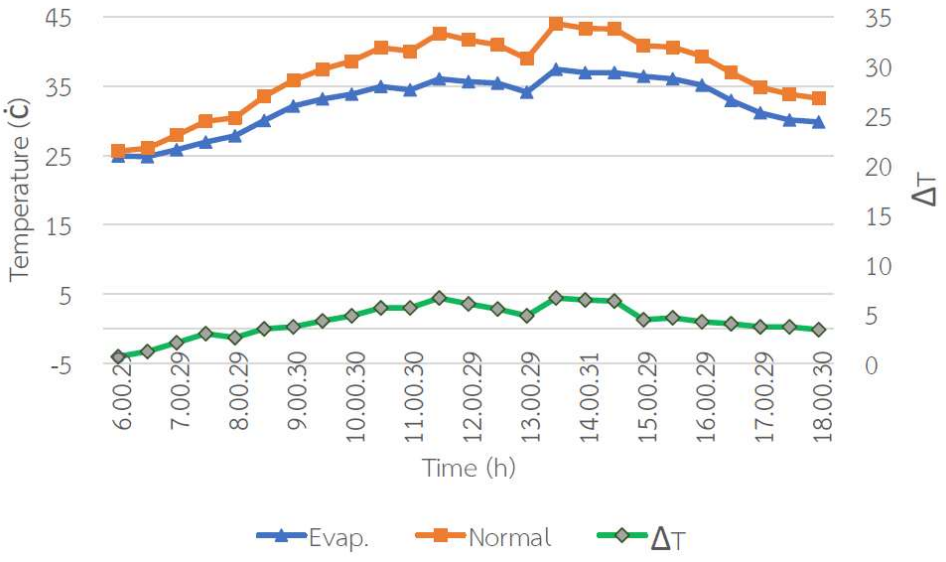


ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความชื้น

จากข้อมูลในภาพที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นของโรงเรือนที่มีการปรับสภาพอากาศด้วยเทคนิคการทำความเย็นแบบผสมผสาน พบว่าช่วงที่อุณหภูมีการปรับตัวสูงขึ้นอย่างรวดเร็วคือในช่วงเวลา 10:30 น. – 11:30 น. และพบว่าอุณหภูมิภายในโรงเรือนสูงสุดที่ประมาณ 30 – 31 องศาเซลเซียส และทรงตัวอยู่ในระดับนี้จนถึงช่วงเวลาประมาณ 15:00 น. ในคณะเดียวกันความชื้นสัมพัทธ์มีค่าลดลงในช่วงใกล้เคียงกันอยู่ที่ระดับประมาณ 65 – 70 %RH แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพของระบบควบคุมสภาวะในโรงเรือนสามารถรักษาอุณหภูมิสูงสุดไว้ไม่ให้เกิน 31°C และรักษาความชื้นไม่ให้ต่ำกว่า 65% ในช่วงกลางวัน ซึ่งสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ในการควบคุมสภาวะเพื่อการเจริญเติบโตของพืช

4.3 ความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างโรงเรือนที่ควบคุมสภาวะกับโรงเรือนที่ไม่ได้ควบคุมสภาวะ

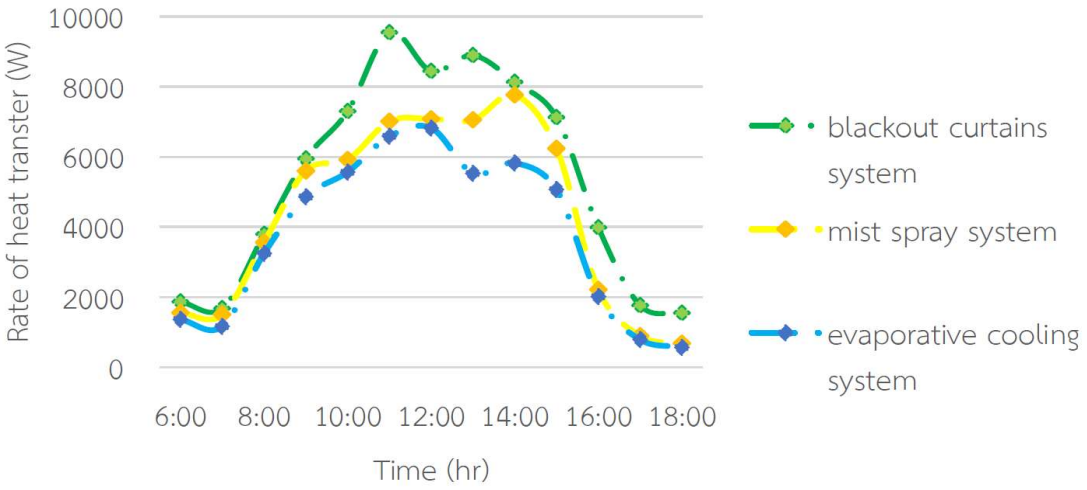
ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในโรงเรือนที่ใช้ระบบควบคุมแบบผสมผสานกับโรงเรือนที่ไม่ได้มีการควบคุมสภาวะแวดล้อม ดังแสดงในภาพที่ 6 พบว่า ระบบควบคุมสภาวะแวดล้อมสามารถลดอุณหภูมิสะสมภายในโรงเรือนได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยในช่วงเวลาที่อุณหภูมิสูงที่สุด พบว่า โรงเรือนแบบปกติมีอุณหภูมิสูงสุดถึง 43.3 องศาเซลเซียส ในขณะที่โรงเรือนที่ควบคุมสภาวะแวดล้อมสามารถรักษาอุณหภูมิได้ โดยมีอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ 37.4 องศาเซลเซียส ที่เวลา 13:30 น. เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยตลอดทั้งวัน โรงเรือนควบคุมสภาวะแวดล้อมมีอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 32.49 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่าโรงเรือนปกติที่มีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 36.78 องศาเซลเซียส ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิ (ΔT) เฉลี่ยตลอดทั้งวันอยู่ที่ 4.29 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าระบบทำความเย็นแบบผสมผสานช่วยลดความร้อนสะสมในโรงเรือนได้อย่างมีประสิทธิภาพ



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์อุณหภูมิโรงเรือนที่ควบคุมสภาวะเทียบกับโรงเรือนปกติ

4.4 ปริมาณความร้อนที่โรงเรือนได้รับ

ผลการศึกษาอัตราการถ่ายเทความร้อนภายในโรงเรือนเปรียบเทียบทั้ง 3 ระบบ ได้แก่ ระบบทำความเย็นแบบระเหยน้ำ ระบบม่านพรางแสง และระบบพ่นหมอก ในช่วงเวลา 6:00 น. – 18:00 น. แสดงดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณความร้อนสะสมของโรงเรือน

จากภาพที่ 7 แสดงปริมาณอัตราการถ่ายเทความร้อนภายในโรงเรือนที่มีการควบคุมสภาวะแวดล้อม พบว่า ลักษณะการถ่ายเทความร้อนมีการแปรผันตรงกับความเข้มรังสีอาทิตย์ โดยจะเพิ่มสูงขึ้นในช่วง 10:00 น. – 15:00 น. จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของทั้ง 3 ระบบ พบว่า ระบบทำความเย็นแบบระเหยน้ำ มีประสิทธิภาพในการลดภาระความร้อนได้ดีที่สุด โดยมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดอยู่ที่ 6,882.1 วัตต์ และมีค่าเฉลี่ยตลอดทั้งวันอยู่ที่ 3,799.2 วัตต์ รองลงมาคือระบบพ่นหมอก ซึ่งมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดอยู่ที่ 7,767.7 วัตต์ และมีค่าเฉลี่ยตลอดทั้งวันอยู่ที่ 4,389.2 วัตต์ ในขณะที่ระบบม่านพรางแสง มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดอยู่ที่ 9,550.5 วัตต์ และมีค่าเฉลี่ยตลอดทั้งวันอยู่ที่ 5,386.1 วัตต์ แสดงให้เห็นว่า ระบบทำความเย็นแบบระเหย สามารถลดการสะสมความร้อนภายในโรงเรือนได้อย่างมีนัยสำคัญที่สุดเมื่อเทียบกับอีกสองระบบ เนื่องมาจากกลไกการทำงานที่อาศัยความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ โดยระบบจะดึงความร้อนจากอากาศเพื่อใช้ในการเปลี่ยนสถานะของน้ำให้กลายเป็นไอ ส่งผลให้อุณหภูมิและความร้อนสะสมภายในโรงเรือนลดต่ำลงมากกว่าระบบอื่น ๆ อย่างมีประสิทธิภาพ

คำนวณประสิทธิภาพของระบบปรับสภาพอากาศของโรงเรือนที่มีการควบคุมสภาวะแวดล้อมด้วยสมการที่ 1 พบว่าโรงเรือนที่ได้ออกแบบมีค่าประสิทธิภาพการระบายความร้อนเท่ากับ 89.51%

4.5 อัตราการเจริญเติบโตของต้นกล้าบีทรูท

จากการควบคุมสภาวะในโรงเรือนด้วยเทคนิคการทำความเย็นแบบผสมผสาน ได้แก่ ระบบทำความเย็นแบบระเหยน้ำ ระบบพ่นหมอก ระบบเปิด-ปิดม่านพรางแสง และระบบระบายอากาศ ในโรงเรือนเพาะชำต้นกล้าบีทรูทเปรียบเทียบกับโรงเรือนปกติที่ไม่ได้ควบคุม ผลการเจริญเติบโตของต้นกล้าบีทรูทที่ปลูกในโรงเรือนที่ควบคุมสภาวะอากาศและโรงเรือนที่ไม่ได้ควบคุม โดยทำการวัดความสูงของลำต้น แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การเจริญเติบโตของต้นกล้าบีทรูทปลูกในโรงเรือนที่ควบคุมสภาวะและโรงเรือนแบบปกติ

Greenhouse Type	Time				
	3 Day	7 Day	14 Day	21 Day	28 Day
โรงเรือนควบคุมสภาวะ	เริ่มงอก	2.5±0.5 cm	4.5±0.5 cm	6±1.0 cm	8.5±1.5 cm
โรงเรือนแบบปกติ	ยังไม่งอก	1.5±0.5 cm	3.5±0.5 cm	4.5±0.5 cm	6±1.0 cm

จากข้อมูลในตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของต้นกล้าบีทรูทระหว่างโรงเรือนควบคุมสภาวะและโรงเรือนแบบปกติ พบว่า ในโรงเรือนควบคุมสภาวะ เมล็ดบีทรูทเริ่มงอกแล้ว ในขณะที่โรงเรือนแบบปกติยังไม่มีการงอกของเมล็ด แสดงให้เห็นว่าสภาพแวดล้อมที่ควบคุมเอื้อต่อการกระตุ้นให้เมล็ดงอกได้เร็วกว่า เมื่อเปรียบเทียบความสูงของลำต้นในระยะเวลาต่าง ๆ พบว่า ต้นกล้าในโรงเรือนควบคุมสภาวะมีความสูงมากกว่าโรงเรือนแบบปกติในทุกช่วงการบันทึกข้อมูล โดยความแตกต่างของความสูงระหว่างสองโรงเรือนจะพบว่ายิ่งระยะเวลานานขึ้น ความแตกต่างของความสูงยิ่งเพิ่มมากขึ้นโดย

เฉลี่ยตลอดสิ้นสุดการทดลองเพาะต้นกล้า พบว่าความสูงต่างกันโดยเฉลี่ยคือ 1.5 cm แสดงให้เห็นว่าระบบทำความเย็นแบบผสมผสานในโรงเรือนควบคุมสภาวะมีประสิทธิภาพดีกว่าโรงเรือนแบบปกติ ทั้งในด้านของระยะเวลาในการงอกที่สั้นกว่าและอัตราการเจริญเติบโตที่มากกว่า

สรุปผลการวิจัย

จากการออกแบบและสร้างโรงเรือนประหยัดพลังงานสำหรับการเพาะชำต้นกล้าบีทรูทในสภาพอากาศร้อนชื้น และศึกษาประสิทธิภาพของระบบควบคุมสภาวะแวดล้อมแบบผสมผสาน ซึ่งประกอบด้วย ระบบทำความเย็นแบบระเหยน้ำ ระบบพ่นหมอก และระบบพรางแสง โดยใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ผลลัพธ์ด้านประสิทธิภาพการควบคุมสภาวะแวดล้อม พบว่าระบบทำความเย็นแบบระเหยน้ำมีประสิทธิภาพในการลดภาระความร้อนสะสมได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับระบบพ่นหมอกและม่านพรางแสง โดยภาพรวมระบบมีประสิทธิภาพการระบายความร้อน อยู่ที่ร้อยละ 89.51 ระบบควบคุมสภาวะแวดล้อมสามารถลดอุณหภูมิภายในโรงเรือนได้ต่ำกว่าโรงเรือนปกติโดยเฉลี่ยประมาณ 3-5 องศาเซลเซียส และสามารถลดอุณหภูมิได้สูงสุดถึง 6.8 องศาเซลเซียสในช่วงเวลากลางวัน สามารถรักษาอุณหภูมิเฉลี่ยให้อยู่ที่ 26.1 องศาเซลเซียส และรักษาความชื้นสัมพัทธ์ให้อยู่ระหว่างร้อยละ 60-80 ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของวัศพล และคณะ (2567) ซึ่งได้ศึกษาการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในโรงเรือนระบบระเหยน้ำเย็น พบว่า สามารถควบคุมอุณหภูมิเฉลี่ยให้มีค่าประมาณ 25 องศาเซลเซียส และสามารถควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ได้ประมาณร้อยละ 70 ได้ ส่วนผลลัพธ์ด้านประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของต้นกล้าบีทรูท จากการทดลองพบว่าสภาพแวดล้อมที่ควบคุมได้ช่วยกระตุ้นให้เมล็ดบีทรูทงอกเร็วกว่าโรงเรือนปกติถึง 2-3 วัน ต้นกล้าในโรงเรือนควบคุมสภาวะมีการเจริญเติบโตด้านความสูงดีกว่าโรงเรือนปกติอย่างมีนัยสำคัญตลอดระยะเวลาการทดลองเพาะต้นกล้า โดยมีความสูงมากกว่าโรงเรือนปกติเฉลี่ยอยู่ที่ 1.5 เซนติเมตร

การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีโรงเรือนอัจฉริยะที่ใช้พลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับการทำความเย็นแบบผสมผสานเป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพสูงในการจัดการโรงเรือนเพาะชำในเขตภูมิอากาศร้อน ซึ่งช่วยลดความสูญเสียและเพิ่มอัตราการรอดของพืชเมืองหนาวอย่างบีทรูทได้ และยังส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทน ซึ่งเป็นต้นแบบสำหรับการพัฒนาเกษตรอัจฉริยะในพื้นที่เขตร้อนต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ วิสาหกิจชุมชนเกษตรอินทรีย์วิถีพอเพียงตำบลบางเค็ม อำเภอเขาย้อย จังหวัดเพชรบุรี ที่เอื้อเฟื้อข้อแนะนำในการวิจัย ขอขอบพระคุณ คุณอุไร กาลปักษ์ หัวกลุ่มยุทธศาสตร์และสารสนเทศ สำนักงานเกษตรจังหวัดเพชรบุรี คุณสุพจน์ กลิ่นพ่วง ประธานศูนย์เรียนรู้วิสาหกิจชุมชนเกษตรอินทรีย์วิถีพอเพียงตำบลช่องสะแก อำเภอเมืองจังหวัดเพชรบุรี สำหรับข้อเสนอแนะและข้อมูลด้านโรงเรือนในการศึกษาวิจัย ขอขอบพระคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านการใช้เครื่องมือในการทำการศึกษาวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] Clifford, T., Howatson, G., West, D. J., & Stevenson, E. J. (2015). **The potential benefits of red beetroot supplementation in health and disease**. Nutrients, 7(4), 2801-2822.

[2] Somyaprasert, N., Nunwong, N., Mungraiklang, J., & Prasertsri, P. (2023). **Sensory acceptance of beetroot juice jelly in healthy volunteers**. Burapha Journal of Medicine, 10(2), 1-12.

[3] ธนากร น้ำหอมจันทร์ และ อติกร เสรีพัฒนานนท์. (2557). **ระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในโรงเรือนเพาะปลูกพืชไร้ดินแบบทำความเย็นด้วยวิธีการระเหยของน้ำร่วมกับการสเปรย์ละอองน้ำแบบอัตโนมัติ โดยใช้ระบบควบคุมเชิงตรรกะแบบโปรแกรมได้**. วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 8(1), 98-111.

[4] Junpayap, W., Treeamnuk, T., & Treeamnuk, K. (2024). **Temperature and relative humidity control in a greenhouse evaporative cooling-pad system**. RMUTP Research Journal Sciences and Technology, 18(2), 175–187.

[5] Ariyapim, N., & Addoddorn, C. (2021). **The design and construction of automatic temperature and humidity control system for fairy mushroom house controlled by microcontroller**. Journal of Energy and Environment Technology of Graduate School Siam Technology College, 7(2), 59-72.

[6] ปรีชา ทุมมุ, ธนากร กองบาง, คมสัน มูลเพีย, และ วีรชาติ คงทวี. (2564). **การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีทำความเย็นแบบท่อใต้ดินเพื่อควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในโรงเรือนเพาะเห็ดนางฟ้า**. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 31(4), 624-637.

[7] Chuenatsadongkot T., & Chitphutthanakul S. (2022). **Study and Development of Humidity and Temperature Control System by using Smartphones for Lettuce Greenhouses.** VRU Research and Development Journal Science and Technology, 17(3), 33-46.

[8] Jaroenrat, K., Phuangsombut A., Jaisin C., & Srichumroenrattana N. (2019). **Development of Temperature and Humidity Control System for Mushroom House by using Air Sensors and Solar-Powered System**. Veridian E-Journal Science and Technology Silpakorn University, 6(1), 1-12.

[9] วิชัย นระมาตย์ และ วศกร ไตรพัฒน์. (2567). **การประยุกต์ใช้พลังงานเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อควบคุมอุณหภูมิในโรงเรือนด้วยวิธีการพ่นหมอกและสั่งงานด้วยอินเทอร์เน็ตประสานสรรพสิ่ง.** วารสารเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี, 14(2).

[10] เฉลิมชาติ เสาวรัจ, กระวี ตรีอำนรรค และเทวรัตน์ ตรีอำนรรค. (2561). **สมรรถนะการทำงานร่วมของโรงเรือนเพาะปลูกแบบพ่นหมอกกับระบบระบายอากาศที่ควบคุมด้วยสมการสมดุลความชื้นของอากาศ**.วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย, 24(2), 63-69.

[11] จิตรา จันโสด, วานิด รอดเนียม, วันเพ็ญ บัวคง และศักดิ์อนันต์ แซ่ลิ่ม. (2567). **การพัฒนาโรงเรือนควบคุมสภาพแวดล้อม เพื่อเพิ่มผลผลิตผักอินทรีย์**.วารสารแก่นเกษตร 52 คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ. ขอนแก่น ฉบับที่ 1: 75-88(2567)./doi:10.14456/kaj.2024.6

[12] ปองพล รักการงาน. (2549). **การวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์และทดลองสมบัติการส่งผ่านของวัสดุคลุมโรงเรือน**. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี;

[13] มานพ แย้มแฟง, จักรวาล บุญหวาน, ชิโนรส ละอองวรรณ, ณัฐกฤช อัสนี, รัตนชัย ไพรินทร์ และ มนพร คุปตาสา (2563). **การประยุกต์ใช้ระบบการทำความเย็นแบบระเหยร่วมกับระบบการทำความเย็นแบบอัดไอมาใช้ในโรงเรือนเลี้ยงไหม**. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลธัญบุรี, หน้า 13-23.

ผลกระทบของการให้ความร้อนทางตรงและทางอ้อมในการผลิตถ่านชีวภาพจากแกลบกาแฟ

Effects of direct and indirect heating on biochar production from coffee husks

นิกราน หอมดวง[1*] ประภัสสร รัตนะไพบูลย์[1] พนธกร เหลี่ยมเคลือบ[1] สุภกิจ ชัยเมืองเลน[2] ถิรวัฒน์ วงษาเทียม[1]
ขจรเกียรติ กันทะหล้า[1] สุระพล ริยะนา[1] และกิตติกร สาสุจิตต์[1]

Nigran Homdoung[1*], Praphatsorn Rattanaphaiboon[1], Phontakorn Liam-Kloub[1], Supakit Chaimuanglen[2],
Kajonkiat Kantala[1], Tirawat Wongsatiam[1], Surapon Riyana[1] and Kittikorn Sasujit[1]

[1] วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ สันทราย เชียงใหม่ 50290

[2] ศูนย์วิจัยและพัฒนาวัสดุอุตสาหกรรมสร้างสรรค์ เกาะคา ลำปาง 52130

[1] School of Renewable Energy, Maejo University, Sansai, Chiang Mai 50290
[2] Creative Industrial Material Research and Development Center, Kokha, Lampang 52130
[1]Corresponding author: Tel.: 084-1773632. E-mail address: nigranghd@gmail.com

Abstract

The problem of biochar production when using stable and small-sized raw materials (such as rice husks and coffee husks) with conventional biochar production kiln, that was leading to low-quality biochar, high energy consumption and long production times. However, to solve the problem of biochar production process to higher quality produce charcoal. This research aims to develop, modify and present a direct heating technique compared to indirect heating when using a 200 L circulating gas charcoal production kiln. Indirect heating was the use of a conventional circulating gas charcoal kiln, while direct heating was carried out 1 set of heat transfer channels or flue gas flow channels. The heat input into the system uses heat from longan wood waste combined with the pyrolysis gas remaining from the charcoal production process. The material to produce biochar was used coffee husks from coffee production and processing plants in Chiang Mai province. The experiment was conducted to test and analyze the comparative effect of direct and indirect heating with gas circulation charcoal kiln. The study was found that, the use of direct heating system resulted higher energy efficiency in charcoal production than indirect heating in terms of charcoal and wood vinegar production. Overall, the temperature inside the charcoal production kiln was obtained in a range of 400-500°C, the charcoal yield was of 23.37% and maximum thermal efficiency of the charcoal production was of 40.38%. The biochar production time was approximately 7 h. The biochar produced was black in color, that suitable for use as a soil improver for agriculture.

Keywords: biomass, biochar, charcoal kiln, pyrolysis process, coffee husk

บทคัดย่อ

ปัญหาการผลิตถ่านชีวภาพเมื่อใช้วัตถุดิบที่มีรูปร่างเสถียรและมีขนาดเล็ก (เช่น แกลบข้าวและแกลบกาแฟ) กับการใช้เตาผลิตถ่านชีวภาพทั่วไปทำให้ได้ถ่านชีวภาพคุณภาพต่ำ สิ้นเปลืองพลังงานสูง และเวลาในการผลิตยาวนาน อย่างไรก็ตามเพื่อแก้ไขปัญหากระบวนการผลิตถ่านชีวภาพให้ถ่านมีคุณภาพสูงขึ้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์พัฒนา ดัดแปลงและนำเสนอเทคนิคการให้ความร้อนทางตรงเทียบกับการให้ความร้อนทางอ้อมเมื่อใช้เตาผลิตถ่านแบบแก๊สไหลเวียนขนาด 200 L การให้ความร้อนทางอ้อมคือการใช้เตาผลิตถ่านแบบแก๊สไหลเวียนแบบดั้งเดิม ในขณะที่การให้ความร้อนทางตรงได้เพิ่มช่องถ่ายเทความร้อนหรือการไหลของแก๊สร้อนจำนวน 1 ชุด ความร้อนป้อนเข้าระบบใช้ความร้อนจากเศษไม้ลำไยร่วมกับไพโรไลซิสแก๊สที่เหลือจากกระบวนการผลิตถ่าน วัสดุที่นำมาผลิตถ่านชีวภาพใช้แกลบกาแฟจากโรงงานผลิตและแปรรูปกาแฟในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ การทดลองได้ดำเนินการทดสอบและวิเคราะห์เปรียบเทียบผลของการให้ความร้อนทางตรงและแบบทางอ้อมกับเตาผลิตถ่านแบบแก๊สไหลเวียน ผลการศึกษาพบว่าการใช้ระบบการให้ความร้อนทางตรงจะทำให้เตาผลิตถ่านมีสมรรถนะทางพลังงานสูงกว่าการให้ความร้อนทางอ้อมในด้านของผลผลิตถ่านและน้ำส้มควันไม้ที่ได้ ในภาพรวมอุณหภูมิภายในเตาผลิตถ่านจะอยู่ในช่วง 400-500°C ผลผลิตถ่านที่ได้ 23.37% และประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดของเตาผลิตถ่าน 40.38% มีระยะเวลาการผลิตถ่านชีวภาพสูงสุดประมาณ 7 h ถ่านชีวภาพที่ได้มีลักษณะสีดำสนิท เหมาะสมสำหรับการนำไปเป็นตัวช่วยปรับปรุงคุณภาพดินเพื่อการเกษตรได้

คำสำคัญ: ชีวมวล ถ่านชีวภาพ เตาผลิตถ่าน กระบวนการไพโรไลซิส แกลบกาแฟ

บทนำ

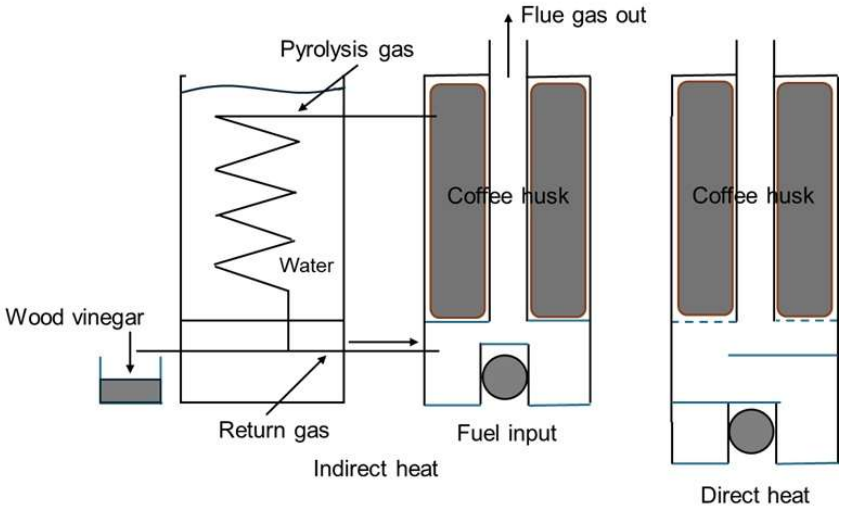
เตาผลิตถ่านขนาด 200 ลิตร ในปัจจุบันมีการออกแบบและพัฒนาให้มีสมรรถนะเพิ่มสูงขึ้นมากเมื่อเทียบกับเตาผลิตถ่าน แบบ 200 ลิตร แบบดั้งเดิม ของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) กระทรวงพลังงาน จากการวิเคราะห์เตาผลิตถ่านที่มีอยู่มีการพัฒนาสมรรถนะเพิ่มขึ้นทั้งหมด 3 ส่วน ได้แก่ ระบบการปล่อยควันหรือแก๊สที่เกิดขึ้นระหว่างการผลิตถ่าน การนำเอาแก๊สหลังจากการควบแน่นน้ำส้มควันไม้มาดำเนินการเผาไหม้ซ้ำ และการออกแบบห้องปฏิกิริยาไพโรไลซิสเพื่อไม่ให้รับความร้อนจากแหล่งความร้อนโดยตรง [1] การพัฒนาระบบการปล่อยควันหรือแก๊สที่เกิดขึ้นระหว่างการผลิตถ่านมีวัตถุประสงค์เพื่อลดปริมาณควันหรือแก๊สที่ปล่อยออกเตาผลิตถ่าน การพัฒนานี้มุ่งหวังเปลี่ยนควันหรือแก๊สที่ได้จากการผลิตถ่านให้เป็นของเหลวแทน ซึ่งก็คือ น้ำส้มควันไม้ ในส่วนของการนำเอาแก๊สหลังจากกระบวนการควบแน่นมาเผาไหม้ซ้ำมีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการกำจัดควันที่เกิดจากการผลิตถ่านทั้งหมด ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการไปใช้ในชุมชนที่มีประชากรอาศัยอยู่อย่างหนาแน่น แก๊สที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสเป็นแก๊สเชื้อเพลิง เมื่อได้รับความร้อนและออกซิเจนจะทำให้ลุกไหม้ได้และถ้านำความร้อนนี้มาใช้ประโยชน์ จะเป็นการนำเอาความร้อนทิ้งมาใช้ประโยชน์อีกครั้ง ในด้านของการออกแบบห้องเผาไหม้ที่ไม่ต้องการให้เปลวไฟหรือความร้อนที่ป้อนสัมผัสกับชีวมวลผลิตถ่านได้โดยตรง การออกแบบลักษณะนี้มุ่งเน้นต้องการให้สารระเหยของชีวมวลที่ปล่อยออกมามีคุณสมบัติเป็นแก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูงและสามารถเผาไหม้ได้ [2] เมื่อเทียบกับโปรดิวเซอร์แก๊สที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่น อย่างไรก็ตามในกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น ซังข้าวโพด เศษไม้ หรือกลุ่มเปลือกผลไม้ เป็นต้น เตาผลิตถ่านชนิดนี้สามารถดำเนินกระบวนการไพโรไลซิสได้อย่างไม่มีปัญหาแต่อย่างใด อย่างไรก็ตามเมื่อนำเตาผลิตถ่านชนิดนี้ไปทดลองใช้กับชีวมวลประเภท แกลบ ขี้เลื่อย แกลบกาแฟหรือวัสดุที่กองแล้วไม่มีช่องอากาศไหลผ่านได้หรือไหลผ่านยาก เตาผลิตถ่านชนิดนี้จะไม่สามารถทำงานหรือผลิตถ่านออกมาได้ กล่าวคืออุณหภูมิภายในเตาจะขึ้นช้ามาก และอุณหภูมิไพโรไลซิสในภาพรวมจะต่ำกว่าอุณหภูมิการผลิตถ่านทั่วไปซึ่งควรอยู่ในช่วง 400-500°C ผลที่ได้ชีวมวลจะไม่สามารถผลิตเป็นถ่านได้ทั้งหมด ที่สำคัญคุณภาพของถ่านต่ำและใช้เชื้อเพลิงชีวมวลในการให้ความร้อนสูงมาก เพื่อเป็นการทำให้เตาผลิตถ่านแบบแก๊สไหลเวียนสามารถผลิตถ่านชีวภาพจากวัสดุกลุ่มนี้ได้ จึง

จำเป็นต้องดัดแปลงระบบการให้ความร้อนเป็นแบบทางตรงเพิ่มร่วมกับการให้ความร้อนแบบทางอ้อมของเตาชนิดเดิมที่มีอยู่แล้ว โดยมีการดัดแปลงเพิ่มเติมในส่วนของห้องเพิ่มความร้อนที่อยู่ด้านใต้ของเตาผลิตถ่าน เพื่อเป็นการยืนยันผลการดัดแปลงพัฒนา เตาผลิตถ่านให้มีสมรรถนะเพิ่มสูงขึ้นและทำงานได้ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการแสดงผลการประเมินสมรรถนะเตาผลิตถ่านชีวภาพแบบแก๊สไหลเวียนที่ดัดแปลงระบบการให้ความร้อนในกระบวนการผลิตถ่านเป็นการให้ความร้อนทางตรงเทียบกับเตาผลิตถ่านชีวภาพแบบแก๊สไหลเวียนดั้งเดิม (ใช้ระบบการให้ความร้อนทางอ้อม) ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบจะเป็นประโยชน์และเป็นทางเลือกสำคัญสำหรับเกษตรกรและผู้ที่สนใจทั่วไป ในการตัดสินใจเลือกนำเอาเตาผลิตถ่านนี้ไปใช้ให้เหมาะกับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีอยู่ในท้องถิ่นตัวเองในอนาคต

วิธีการวิจัย

เตาผลิตถ่านแบบแก๊สไหลเวียนและการดัดแปลง

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาเปรียบเทียบผลของการให้ความร้อนกับเตาผลิตถ่านแบบแก๊สไหลเวียนแบบให้ความร้อนความร้อนทางอ้อม (Indirect heat) และทางตรง (Direct heat) เตาผลิตถ่านชนิดให้ความร้อนทางอ้อมคือเตาที่ให้ความร้อนจากการเผาเชื้อเพลิงเชื้อมวลผ่านผนังทั้งหมด 2 ด้าน คือจากผนังปล่องไฟหรือไอเสียกับผนังด้านพื้นของเตาผลิตถ่าน ความร้อนจากเปลวไปชีวมวลจะไม่สามารถสัมผัสกับชีวมวลที่ผลิตถ่านได้โดยตรงแต่ความร้อนจะถ่ายเทความร้อนผ่านผนังแผ่นโลหะแล้วไปหาชีวมวลแทน ดูภาพที่ 1 ประกอบ ส่วนเตาผลิตถ่านที่ให้ความร้อนทางตรงจะมีการเจาะรูให้แก๊สร้อนจากการเผาไหม้ไหลผ่านผนังรูเตาด้านล่างและให้ความร้อนจากแก๊สร้อนถ่ายเทความร้อนให้กับชีวมวลได้โดยตรง ขณะที่เปลวไฟจะไม่สัมผัสกับชีวมวลเนื่องจากมีการทำห้องกันไฟล้วงประมาณ 2 ชั้น ในภาพรวมส่วนประกอบของเตาผลิตถ่านประกอบด้วย ห้องปฏิกิริยาไพโรไลซิส ชุดควบแน่นน้ำส้มควันไม้และห้องเผาไหม้ชีวมวลเพื่อป้อนความร้อนเข้าระบบ ตรงกลางห้องเผาไหม้จะมีการติดตั้งปล่องไฟหรือแก๊สร้อนอยู่ตรงกลางเพื่อระบายควัน ที่ชุดควบแน่นน้ำส้มควันไม้จะทำท่อแยกเป็น 2 ทาง ด้านหนึ่งเป็นท่อปล่อยน้ำส้มควันไม้ออกจากเตาผลิตถ่านและอีกด้านจะนำมาต่อร่วมเข้าห้องเผาไหม้ชีวมวลเพื่อนำแก๊สที่เหลือจากกระบวนการผลิตถ่านมาเผาไหม้ซ้ำอีกครั้ง



ภาพที่ 1 เตาผลิตถ่านชีวภาพแบบแก๊สไหลเวียนที่นำมาทดสอบและดัดแปลง

กระบวนการไพโรไลซิสและหลักการการทำงานของเตาผลิตถ่านแบบแก๊สไหลเวียน

หลักการทำงานของเตาผลิตถ่านแบบแก๊สไหลเวียนใช้กระบวนการคาร์บอไนเซชั่นหรือกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าในการผลิตถ่าน โดยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าคือกระบวนการให้ความร้อนกับชีวมวลในสภาวะปราศจากออกซิเจนหรือมีปริมาณออกซิเจนเพียงเล็กน้อยหรือบางส่วนเท่านั้น กระบวนการผลิตถ่านเริ่มต้นด้วยการที่ชีวมวลรับความร้อนเข้าสู่ตัวเอง ความร้อนนี้จะเข้าไปทำให้ความชื้นหรือน้ำที่อยู่ในชีวมวลระเหยออก โดยน้ำจะระเหยได้และถูกขับออกจากชีวมวล อุณหภูมิในเตาผลิตถ่านหรือห้องไพโรไลซิสต้องมีอุณหภูมิสูงกว่า 100˚C เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงเกิน 100˚C สารระเหยที่บางตัวที่อยู่ในเนื้อชีวมวลจะเริ่มต้นสลายตัวและถูกขับออกมาภายนอกชีวมวล มวลของชีวมวลจะเริ่มลดลงและสูญเสียรูปร่าง [4] ที่อุณหภูมิ 150˚C ส่วนประกอบของชีวมวลกลุ่มลิกโนเซลลูโลสจะเริ่มต้นสลายตัว โดยที่อุณหภูมิ 200-300˚C จะเป็นการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส และที่อุณหภูมิ 250-380˚C จะเป็นการสลายตัวของเซลลูโลส กลุ่มลิกนินเป็นกลุ่มที่มีโครงสร้างที่ซับซ้อนมีช่วงการสลายตัวที่กว้างที่สุด โดยการสลายตัวจะเริ่มต้นเกิดขึ้นที่ 200-1000˚C [4] ช่วงของการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสไปจนถึงลิกนิน ชีวมวลจะเปลี่ยนสีจากสีน้ำตาลเป็นสีดำสนิท การใช้งานเตาผลิตถ่านแบบแก๊สไหลเวียนจะเริ่มต้นด้วยการใช้เชื้อเพลิงไม้ลำไยเผาให้ความร้อนทางด้านล่างของเตา ความร้อนจากไม้ลำไยจะถ่ายเทความร้อนให้กับชีวมวลที่อยู่ภายในห้องไพโรไลซิส ความชื้นและสารระเหยของชีวมวลจะไหลออกจากชีวมวลและลำเลียงเข้าสู่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในรูปแบบของไอหรือแก๊ส เมื่อผ่านเครื่องควบแน่นไอหรือแก๊สจะควบแน่นเป็นน้ำและน้ำส้มควันไม้ ในขณะที่แก๊สไม่ควบแน่นได้จะถูกลำเลียงเป็นไพโรไลซิสแก๊สและถูกนำไปเป็นเชื้อเพลิงหรือเผาไหม้ซ้ำร่วมกับไม้ลำไยที่เผา

การเตรียมแกลบกาแฟและเชื้อเพลิงชีวมวลป้อนให้ความร้อน

แกลบกาแฟที่นำมาผลิตเป็นถ่านชีวภาพ เป็นแกลบกาแฟที่ได้มาจากโรงงานบริษัทกาแฟชาวไทยภูเขา จำกัด ตั้งอยู่อำเภอแม่แตง จังหวัดเชียงใหม่ ภายใต้กิจกรรมพัฒนากระบวนการผลิตและส่งเสริมการใช้ประโยชน์จากเชื้อเพลิงชีวมวลและถ่านชีวภาพ ภายใต้โครงการยกระดับธุรกิจ SME ด้วยการประยุกต์ใช้โมเดลเศรษฐกิจใหม่ BCG ประจำปีงบประมาณ 2568 ของศูนย์วิจัยและพัฒนาวัสดุอุตสาหกรรมสร้างสรรค์ จังหวัดลำปาง ลักษณะของกาแฟจะมีลักษณะเป็น ฝอยบางๆ สีน้ำตาล มีความหนาแน่นปรากฏเฉลี่ย 218 kg/m^3 มีค่าความร้อนเฉลี่ย 15.95 MJ/kg ในส่วนของเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้ป้อนให้ความร้อนเป็นเศษไม้ลำไยที่ได้จากการตัดแต่งกิ่งของเกษตรกร มีการตัดและตากทิ้งทิ้งไว้ประมาณ 1 เดือน มีความหนาแน่นเฉลี่ย 635 kg/m^3 มีความค่าความร้อนเฉลี่ย 15.80 MJ/kg ในการผลิตถ่านชีวภาพแต่ละครั้งจะใช้แกลบกาแฟเฉลี่ย 22.70 kg/ครั้ง และเศษไม้เพื่อเผาให้ความร้อนเฉลี่ย 50–80 kg

เครื่องมือวัดและการวิเคราะห์ข้อมูล

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย เครื่องชั่งน้ำหนักของเศษไม้ น้ำหนักถ่าน และเครื่องวัดอุณหภูมิการผลิตถ่าน การวัดน้ำหนักเศษไม้และถ่านชีวภาพที่ได้ใช้เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัลของ CST รุ่น CDR-30 ชั่งน้ำหนักได้สูงสุด 30 kg ค่าความละเอียด 1 g ในส่วนเครื่องวัดอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการผลิตถ่านได้ใช้เครื่องวัดอุณหภูมิของ Lutron รุ่น BTM-4208SD ช่วงการวัดอุณหภูมิ -100 ถึง 1300˚C มีค่าความละเอียด 0.1˚C ใช้หัววัดอุณหภูมิ Type K มีการจัดวางหัววัดตามตำแหน่งแนวตั้งเตาผลิตถ่าน การวิเคราะห์ค่าความร้อนชีวมวลและถ่าน วิเคราะห์ด้วยเครื่องบอมบ์แคลอรี่มิเตอร์ ยี่ห้อ LECO รุ่น AC500 สุดท้ายดำเนินการวิเคราะห์ผลผลิตถ่านที่ได้ (Charcoal yield: CY) ความหนาแน่นทางเชิงพลังงาน (Energy density: ED) ผลผลิตพลังงานที่ได้ (Energy yield: EY) และประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal efficiency: η_{th}) ดังสมการต่อไปนี้ [1]

$$CY = \frac{m_C}{m_R} \times 100 \quad (1)$$

$$ED = \frac{CV_C}{CV_R} \quad (2)$$

$$EY = CY \times ED \quad (3)$$

$$E_C = m_C \times CV_C \quad (4)$$

$$E_R = m_R \times CV_R \quad (5)$$

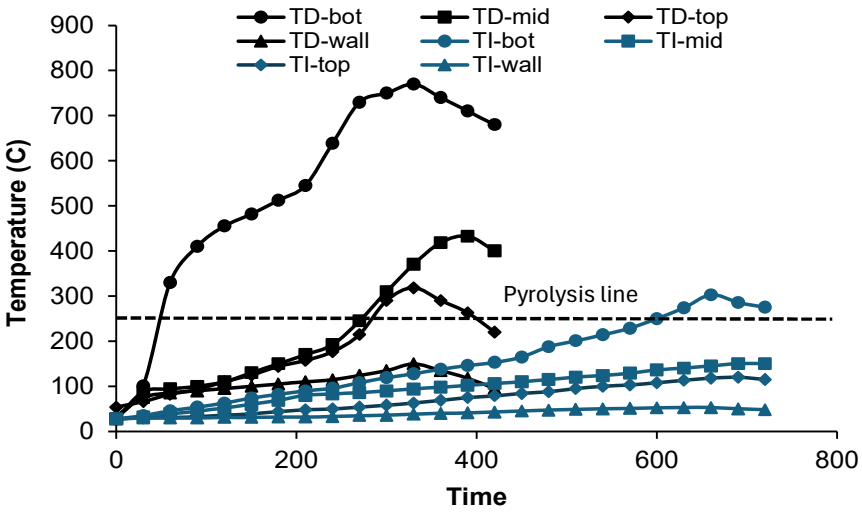
$$\eta_{th} \frac{E_C}{E_R} \times 100 \quad (6)$$

กำหนด m_C , m_R คือมวลของถ่านที่ผลิตได้ (kg) และมวลของเศษไม้ที่นำมาผลิตถ่าน (kg) CV_C, CV_R ค่าความร้อนของถ่านที่ผลิตได้ (MJ/kg) และค่าความร้อนของเศษไม้ที่นำมาผลิตถ่าน (MJ/kg) E_C คือค่าพลังงานของถ่านที่ผลิตได้ (MJ) และ E_R ค่าพลังงานของเศษไม้นำมาผลิตถ่าน (MJ)

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

ผลการให้ความร้อนทางอ้อมและทางตรงต่ออุณหภูมิเตา

ภาพที่ 2 แสดงผลการเปรียบเทียบการให้ความร้อนทางอ้อมและทางตรงให้กับเตาผลิตถ่านแบบแก๊สไหลเวียนเมื่อใช้แกลบกาแฟผลิตเป็นถ่านชีวภาพ การให้ความร้อนทางอ้อมโดยการถ่ายเทความร้อนจากผนังปล่องและพื้นที่ของเตาอย่างเดียวจะทำให้อุณหภูมิภายในเตาผลิตถ่านเพิ่มสูงขึ้นค่อนข้างช้า โดยอุณหภูมิเฉลี่ยเตาที่จะทำให้ลิกโนเซลลูโลสจะเริ่มต้นสลายตัวที่ 150°C เตาผลิตถ่านใช้เวลาสร้างอุณหภูมิสูงถึง 9 h สาเหตุที่อุณหภูมิของเตาผลิตถ่านเพิ่มขึ้นได้ช้าเนื่องจากแกลบกาแฟเมื่อบรรจุอยู่ในห้องปฏิกิริยาไพโรไลซิสมีช่องว่างหรือช่องอากาศที่ต่ำเมื่อเทียบกับการใช้ไม้ฟืนหรือวัสดุอื่นที่มีรูปร่างไม่เสถียร ด้วยรูปร่างของวัสดุที่มีความเสถียรและมีช่องว่างต่ำทำให้วัสดุก้อนนั้นมีลักษณะคล้ายเป็นฉนวนความร้อนจากจุดศูนย์กลางเตาหรือบริเวณปล่องไม่สามารถถ่ายเทแพร่กระจายไปยังด้านข้างได้หรือถ้าได้ก็ค่อนข้างต่ำมาก [5] ดังนั้นจึงทำให้ระยะเวลาการคายน้ำหรือไล่ความชื้นในภาพรวมทำได้ช้ามาก อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับการให้ความร้อนทางตรงคือการนำเอาความร้อนจากการเผาไหม้หรือแก๊สร้อนป้อนเข้าสู่เตาผลิตถ่านโดยตรงทางด้านล่างด้วยอุณหภูมิของแก๊สร้อนที่สูงร่วมกับความร้อนของผนังปล่องจะทำให้ประสิทธิภาพการไล่ความชื้นในแกลบกาแฟดีกว่าการใช้ความร้อนทางอ้อม อุณหภูมิการให้ความร้อนทางตรงที่สามารถทำให้ลิกโนเซลลูโลสเริ่มต้นสลายตัวที่ 150 °C เตาผลิตถ่านใช้เวลาสร้างอุณหภูมิประมาณ 1 h



ภาพที่ 2 การวิเคราะห์อุณหภูมิเตาผลิตถ่านชีวภาพแบบให้ความร้อนทางตรงและทางอ้อม

การเปรียบเทียบระยะเวลาและผลผลิตถ่านชีวภาพที่ได้

การประเมินด้านมิติของเวลาในการผลิตถ่านชีวภาพ ชัดเจนแล้วว่าการใช้เตาผลิตถ่านแบบแก๊สไหลเวียนแบบธรรมดาที่ไม่ผ่านกระบวนการดัดแปลงเพิ่มหรือการให้ความร้อนแบบทางอ้อมจะใช้ระยะเวลาในการผลิตถ่านสูงถึง 12 h หรือมากกว่านั้น ในขณะที่การใช้เตาผลิตถ่านแบบแก๊สไหลเวียนที่ทำการดัดแปลงห้องส่งถายความร้อนทางตรงหรือการให้ความร้อนทางตรงจะใช้เวลาในการผลิตถ่านรวมไม่เกิน 7 h เท่านั้น การลดระยะเวลาในกระบวนการผลิตถ่านลงจะช่วยลดต้นทุนด้านวัสดุที่ใช้เป็นแหล่งป้อนความร้อนและแรงงานได้ [6] ซึ่งต้นทุนทางด้านแรงงานเป็นปัจจัยสำคัญของการควบคุมต้นทุนการผลิตถ่านและในส่วนของลักษณะผลผลิตถ่านชีวภาพที่ได้ การใช้เตาผลิตถ่านที่ให้ความร้อนแบบทางอ้อมจะได้ถ่านชีวภาพที่บางส่วนยังไม่แปรสภาพเป็นถ่านชีวภาพได้ทั้งหมด (ภาพซ้ายมือ) ในขณะที่ภาพขวามือ ลักษณะถ่านที่ได้จะมีสีดำสนิทและมีความเป็นคาร์บอนสูงเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ปรับปรุงดิน

(Indirect heat) (Direct heat)

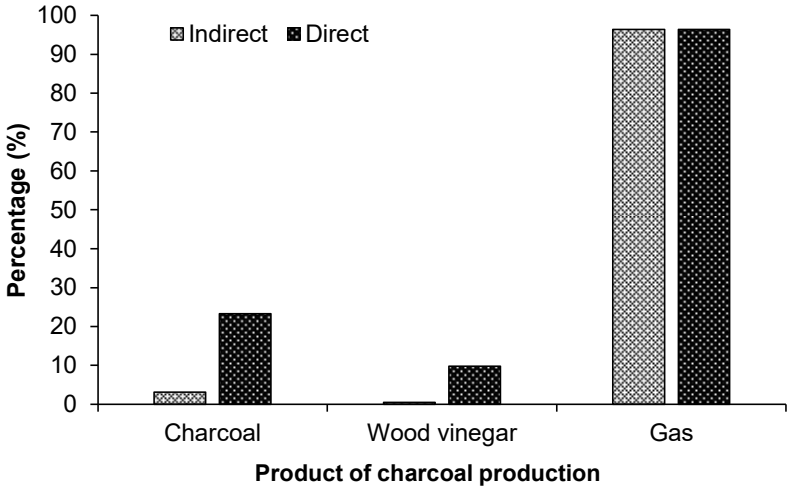
ภาพที่ 3 ลักษณะของถ่านชีวภาพจากแกลบกาแฟที่ได้จากการให้ความร้อนทางอ้อมและทางตรง

การวิเคราะห์สัดส่วนผลผลิตที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส

ภาพที่ 4 แสดงผลการเปรียบเทียบสัดส่วนผลผลิตที่ได้จากเตาผลิตถ่านแบบแก๊สไหลเวียนแบบการให้ความร้อนทางอ้อมและแบบดัดแปลงการให้ความร้อนทางตรง โดยพบว่าการให้ความร้อนทางตรงจะให้ผลผลิตถ่านชีวภาพคิดเป็น 23.37% ได้ผลผลิตในส่วนของเหลว (น้ำส้มควันไม้) 9.80% แก๊สที่เหลือทั้งหมดจะเป็นแก๊สที่ถูกนำไปใช้ในการเผาไหม้ให้ความร้อนร่วมกับไม้ลำไย เมื่อพิจารณาในส่วนของการใช้ความร้อนทางอ้อมได้ผลผลิตถ่านคิดเป็น 3.11% ได้ของเหลวหรือน้ำส้มควันไม้ประมาณ 0.50% และแก๊สที่เหลือประมาณ 96.40% ถูกป้อนเข้าห้องเผาไหม้ให้ความร้อนทั้งหมด อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงผลผลิตที่จำเป็นต้องได้คือ ถ่านชีวภาพและน้ำส้มควันไม้ ก็พบว่าในส่วนของเตาผลิตถ่านแบบแก๊สไหลเวียนที่ให้ความร้อนทางตรงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงเตาทั้งหมด 2 ส่วน คือ ในส่วนของตัวเตาผลิตถ่านและระบบควบแน่นของเหลว โดยในส่วนของตัวเตาผลิตถ่านจำเป็นต้องสร้างกลไกที่ทำให้แกลบกาแฟเกิดการเคลื่อนที่ซึ่งจะทำให้เกิดการสามารถถ่ายเทความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ [7] และระยะเวลาการผลิตจะสั้นลง ในส่วนของระบบควบแน่นจำเป็นต้องเพิ่มประสิทธิภาพการควบแน่นให้สูงขึ้นกว่าเดิม เช่น การใช้ระบบน้ำไหลวนเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อน การเพิ่มพื้นที่การถ่ายเทความร้อน [8] เป็นต้น

การวิเคราะห์ศักยภาพทางพลังงานเตาผลิตถ่านชีวภาพจากแกลบกาแฟ

ตารางที่ 1 แสดงผลการวิเคราะห์ศักยภาพทางพลังงานของการใช้เตาผลิตถ่านชีวภาพจากแกลบกาแฟ เนื่องจากแกลบกาแฟมีความหนาแน่นต่ำ มีน้ำหนักเบาเมื่อบรรจุลงถังขนาดปริมาตร 200 L จะมีมวลแกลบกาแฟอยู่ในเตาประมาณ 22.70 kg ในการศึกษาเปรียบเทียบการให้ความร้อนทางตรงได้ผลผลิตถ่านชีวภาพ (Charcoal yield) เฉลี่ย 5.31 kg ในขณะที่ การให้ความร้อนทางอ้อมได้ผลผลิตถ่านชีวภาพเฉลี่ย 0.71 kg คิดเป็นผลผลิตถ่านที่ได้เฉลี่ย 23.37% และ 3.11% ในส่วนของความหนาแน่นทางพลังงาน (Energy density) หรืออัตราส่วนค่าความร้อนถ่านที่ผลิตได้ต่อค่าความร้อนของชีวมวลก่อนการผลิตถ่าน การให้ความร้อนทางตรงให้ความหนาแน่นทางพลังงานเฉลี่ย 1.73 ในขณะที่ การให้ความร้อนทางอ้อมให้ความหนาแน่นทางพลังงานเฉลี่ย 1.49 และเมื่อคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal efficiency) ของการให้ความร้อนทางตรงและทางอ้อมจะให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อน 40.38% และ 4.63% ตามลำดับ



ภาพที่ 4 สัดส่วนผลผลิตที่ได้จากกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพ

ตารางที่ 1 การวิเคราะห์ศักยภาพทางพลังงานของการใช้เตาผลิตถ่านชีวภาพจากแกลบกาแฟ

Output	Direct	Indirect
Mass of biomass (kg)	22.70	22.70
Charcoal yield (kg)	5.31	0.71
Charcoal yield (%)	23.37	3.11
Energy density	1.73	1.49
Energy yield (%)	40.38	4.63
Energy input (MJ)	362	362
Energy output (MJ)	146	17
Thermal efficiency (%)	40.38	4.63

สรุปผลการวิจัย

ในภาพรวมของการผลิตถ่านชีวภาพจากแกลบกาแฟจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องใช้หลักการให้ความร้อนทางตรงกับเตาผลิตถ่านแบบแก๊สไหลเวียน ซึ่งผลจากการดัดแปลงเตาผลิตถ่านและการทดสอบการให้ความร้อนทางตรงสามารถลดระยะเวลาการผลิตถ่านลงได้มากกว่า 40% ที่สำคัญการให้ความร้อนโดยตรงทำได้ผลผลิตถ่านชีวภาพ ความหนาแน่นทางพลังงาน และประสิทธิภาพทางความร้อนโดยรวมสูงกว่าการให้ความร้อนทางอ้อมหรือการใช้เตาผลิตถ่านแบบแก๊สไหลเวียนแบบดั้งเดิมมากกว่า 7.7 เท่า ในด้านคุณภาพของถ่านเมื่อมองจากลักษณะของสีถ่านชีวภาพด้วยการให้ความร้อนทางตรงพบว่ามีสีดำสนิทไม่มีแกลบกาแฟในส่วนที่เป็นชีวมวลหลงเหลืออยู่เลย อย่างไรก็ตามเพื่อให้เตาผลิตถ่านแบบแก๊สไหลเวียนแบบใช้ความร้อนทางตรงมีสมรรถนะสูงเพิ่มขึ้นก็จำเป็นต้องทำให้แกลบกาแฟมีการขยับหรือเคลื่อนตัวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน ในส่วนของการเก็บน้ำส้มควันไม้ก็จำเป็นอย่างยิ่งในการเพิ่มพื้นที่การถ่ายเทความร้อนและใช้น้ำเย็นหรือน้ำอุณหภูมิต่ำไหลวนเพิ่มขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยและพัฒนาวัสดุอุตสาหกรรมสร้างสรรค์ จังหวัดลำปาง ที่สนับสนุนงบประมาณการดำเนินโครงการกิจกรรมพัฒนากระบวนการผลิตและส่งเสริมการใช้ประโยชน์จากเชื้อเพลิงชีวมวลและถ่านชีวภาพ ภายใต้โครงการยกระดับธุรกิจ SME ด้วยการประยุกต์ใช้โมเดลเศรษฐกิจใหม่ BCG ประจำปีงบประมาณ 2568 และได้มาซึ่งผลการศึกษาวิจัยในบทความนี้ ขอขอบคุณ บริษัทกาแฟชาวไทยภูเขา จำกัด (ฮิลล์คอฟฟ์) สนับสนุนเตาผลิตถ่านแบบแก๊สไหลเวียน (ดั้งเดิม) และวัสดุแกลบกาแฟ เพื่อการทดสอบ ขอขอบคุณวิทยาลัยพลังงานทดแทนที่สนับสนุนเครื่องมือและพื้นที่การทำงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] คณิต มานะธุระ และอุกฤต สมัครสมาน. (2022). สมรรถนะของเตาไพโรไลซิสกะลามะพร้าวชนิดให้ความร้อนด้วยตนเอง. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์**. 11(2), 13-20.

[2] Kryshtopa, S., Kryshtopa, L., Panchuk, M., Smigins, R., and Dolishnii, B. (2021). Composition and energy value research of pyrolise gases. **In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. 628, 012008, 1-11.

[3] นิกราน หอมดวง พันธวัฒน์ ไชยวรรณ์ ภูนิทัต สายแก้ว ประภัสสร รัตนไพบูลย์ กิตติกร สาสุจิตต์ เสริมสุข บัวเจริญ นงเยาว์ หอมดวง ยิ่งรัก อรรถเวชกุล และ ชูรัตน์ ธารารัตน์. (2020). การพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสสำหรับการใช้งานผลิตความร้อนและถ่านชีวภาพ. **วารสารวิชาการพลังงานทดแทนสู่ชุมชน**. 4(1), 47-53.

[4] Díez, D., Urueña, A., Piñero, R., Barrio, A., and Tamminen, T. (2020). Determination of hemicellulose, cellulose, and lignin content in different types of biomasses by thermogravimetric analysis and pseudocomponent kinetic model (TGA-PKM method). **Processes**, 8(9), 1048, 1-21.

[5] Raeisian, L., Mansoori, Z., Hosseini-Abardeh, R., and Bagherzadeh, R. (2013). An investigation in structural parameters of needle-punched nonwoven fabrics on their thermal insulation property**. Fibers and Polymers**, 14(10), 1748-1753.

[6] อาคม ปะหลามานิต พิสิฐ ทรงเลิศ ภคินี ธงไชย รวิสุดา แดงเปีย และสุเมธ ไชยประพัทธ์. (2020). ชนิดและสัดส่วนตัวประสานต่อคุณภาพถ่านกะลาตาลโตนดอัดแท่งโดยใช้ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**, 28(6), 1107-1125.

[7] Panwar, N. L. (2024). Pyrolysis technologies for biochar production in waste management: a review. **Clean Energy**, 8(4), 61-78.

[8] Than, P., and Suluksna, K. (2019). Experiment on Influent Parameters on Wood Vinegar Burning Process. **In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. 501, 012066, 1-20.

การประเมินมาตรการปรับปรุงกรอบอาคารด้วยแบบจำลองพลังงานในระดับกลุ่มอาคารสถานศึกษา: กรณีศึกษามหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์

Evaluation of Building Envelope Retrofit Measures Using Building Energy Modeling at Campus Level: A Case Study of Dhurakij Pundit University

ศุภรัชชัย วรรัตน์[1] และ ประยุทธ์ ฤทธิเดช[1*]
Suparatchai Vorarat[1] and Prayuth Rittidatch[1*]

[1]อาจารย์, หลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาการจัดการทางวิศวกรรม วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์ 10210
[1]Lecturer, Graduate Program in Engineering Management, College of Engineering and Technology, Dhurakij Pundit University, Bangkok, 10210
*Corresponding author E-mail: prayuth.rit@dpu.ac.th

Abstract

This study aimed to construct and validate a Building Energy Model (BEM) and evaluate the effectiveness of building envelope retrofit measures at the campus level. Seven educational buildings at Dhurakij Pundit University, operating under a single electricity meter with a total annual electricity consumption of 2,404,000 kWh/year, were investigated. The building energy model was developed using OpenStudio coupled with EnergyPlus and validated by comparing the simulated results with actual electricity consumption data. The overall deviation between the simulated and actual annual electricity consumption was −0.27%, indicating good agreement between the model and measured annual energy use. Model validation was conducted with reference to the framework of ASHRAE Guideline 14-2014. A sensitivity analysis using a Tornado Diagram was subsequently performed, and twelve building envelope retrofit measures were evaluated, focusing on reducing the U-values of walls and roofs and the Solar Heat Gain Coefficient (SHGC) of fenestration systems. The sensitivity analysis indicated that reducing the SHGC of fenestration had the greatest influence on energy savings, followed by increasing wall and roof insulation. Among the twelve measures, the integrated retrofit strategy (Measure 12), comprising 65 mm wall insulation, reduced glazing SHGC, and an increase in roof insulation thickness to 150 mm, achieved the highest energy savings. This measure reduced annual electricity consumption by 68,647 kWh/year, equivalent to 2.86%, and reduced carbon dioxide equivalent emissions by 41,092 kgCO_2e/year. The findings demonstrate that a building energy model validated against actual energy consumption data can serve as a decision-support tool for evaluating and selecting building envelope retrofit measures at the campus level and can support the transition toward Near Zero Energy Buildings (NZEB) and Thailand's Carbon Neutrality 2050 target.

Keywords: Building Envelope Retrofit, Building Energy Model, Model Validation, NZEB, Carbon Reduction

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างและตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองพลังงานอาคาร (Building Energy Model: BEM) และประเมินประสิทธิผลของมาตรการปรับปรุงกรอบอาคารในระดับกลุ่มอาคารสถานศึกษา โดยศึกษากลุ่มอาคารจำนวน 7 อาคารภายใต้ระบบมิเตอร์ไฟฟ้าเดียวกันของมหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์ ซึ่งมีการใช้พลังงานไฟฟ้ารวม 2,404,000 kWh/year แบบจำลองพลังงานสร้างขึ้นโดยใช้โปรแกรม OpenStudio ร่วมกับ EnergyPlus และตรวจสอบความถูกต้องโดยเปรียบเทียบผลการจำลองกับข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าจริง พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนรวมระหว่างผลการจำลองและข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าจริงเท่ากับ −0.27% แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีความสอดคล้องกับการใช้พลังงานจริงในระดับรายปี โดยการตรวจสอบแบบจำลองอ้างอิงกรอบแนวทางของ ASHRAE Guideline 14-2014 จากนั้นทำการวิเคราะห์ความไวของตัวแปร (Sensitivity Analysis) ด้วย Tornado Diagram และประเมินมาตรการปรับปรุงกรอบอาคารจำนวน 12 แนวทาง โดยมุ่งเน้นการลดค่า U-value ของผนังและหลังคา และค่า Solar Heat Gain Coefficient (SHGC) ของช่องเปิด ผลการวิเคราะห์ความไวพบว่าการลดค่า SHGC ของช่องเปิดเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการประหยัดพลังงานสูงที่สุด รองลงมาคือการเพิ่มฉนวนผนังและฉนวนหลังคา ผลการประเมินมาตรการพบว่ามาตรการแบบบูรณาการ (Measure 12) ซึ่งประกอบด้วยการเพิ่มฉนวนผนังหนา 65 mm การลดค่า SHGC ของกระจก และการเพิ่มความหนาฉนวนหลังคาเป็น 150 mm ให้ผลการประหยัดพลังงานสูงที่สุด โดยสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ 68,647 kWh/year หรือ 2.86% และลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าได้ 41,092 kgCO_2e/year ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าแบบจำลองพลังงานที่ผ่านการตรวจสอบกับข้อมูลการใช้พลังงานจริงสามารถใช้เป็นเครื่องมือสนับสนุนการประเมินและคัดเลือกมาตรการปรับปรุงกรอบอาคารในระดับกลุ่มอาคารสถานศึกษา และสนับสนุนแนวทางการพัฒนาอาคารสู่ Near Zero Energy Building (NZEB) และเป้าหมาย Carbon Neutrality 2050 ของประเทศไทย

คำสำคัญ: การปรับปรุงกรอบอาคาร, แบบจำลองพลังงานอาคาร, การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง, NZEB, การลดการปล่อยคาร์บอน

บทนำ

ภาคอาคารเป็นหนึ่งในภาคส่วนที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงและมีบทบาทสำคัญต่อการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทย โดยเฉพาะในเขตภูมิอากาศร้อนชื้นที่ภาระการทำความเย็น (Cooling Load) มีสัดส่วนสูงต่อการใช้พลังงานรวม ภายใต้กรอบแผนพลังงานแห่งชาติ (National Energy Plan: NEP 2024–2037) และเป้าหมาย Carbon Neutrality 2050 [1,2] การเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานในอาคารจึงเป็นกลยุทธ์สำคัญด้านการจัดการความต้องการพลังงาน (Demand-Side Management) ควบคู่กับการพัฒนาพลังงานหมุนเวียน มาตรการปรับปรุงกรอบอาคาร (Building Envelope Retrofit) เป็นแนวทางเชิงรับ (Passive Strategy) ที่สามารถลดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคารผ่านผนัง หลังคา และช่องเปิด ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อภาระการทำความเย็นของระบบปรับอากาศ งานวิจัยก่อนหน้าทั้งในประเทศและต่างประเทศแสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงคุณสมบัติทางความร้อนของกรอบอาคาร เช่น การลดค่า U-value ของผนังและหลังคา หรือการลดค่า Solar Heat Gain Coefficient (SHGC) ของกระจก สามารถลดการใช้พลังงานได้ประมาณ 2–6% ของการใช้พลังงานรวม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะอาคารและสภาพภูมิอากาศ [3,4] นอกจากนี้ ภาคอาคารยังมีสัดส่วนการใช้พลังงานสูงในระดับโลกและมีศักยภาพในการลดการใช้พลังงานอย่างมีนัยสำคัญ [5]

จากการทบทวนวรรณกรรมพบข้อจำกัดสำคัญของการศึกษาด้านการปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานของอาคารสถานศึกษาในประเทศไทยสามประการ ประการแรก งานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นการวิเคราะห์ในระดับอาคารเดี่ยว (Single-Building Analysis) ขณะที่การศึกษาในระดับกลุ่มอาคารหลายหลังภายใต้ระบบมิเตอร์ไฟฟ้าเดียวกันยังมีจำกัด ทั้งที่รูปแบบ

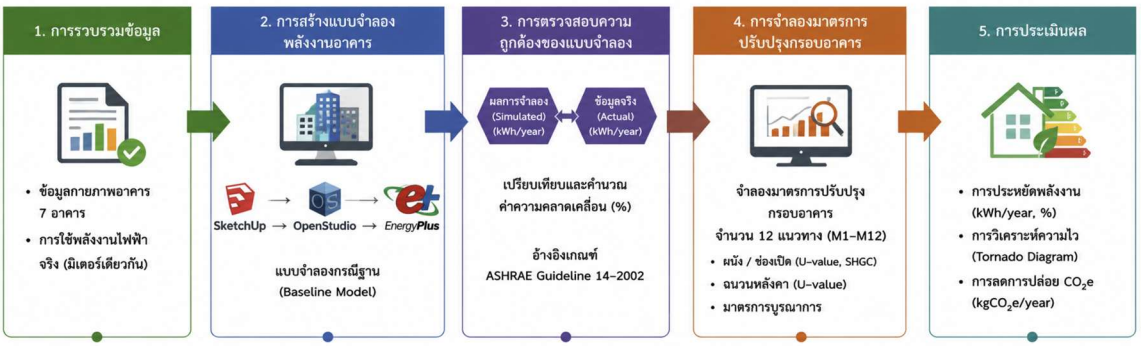
ดังกล่าวสามารถสะท้อนการใช้พลังงานในระดับมหาวิทยาลัยหรือองค์กรได้ใกล้เคียงกับสภาพการดำเนินงานจริงมากกว่าประการที่สอง งานวิจัยจำนวนมากมุ่งเน้นการรายงานผลการประหยัดพลังงานในหน่วย kWh ขณะที่การเชื่อมโยงผลการประหยัดพลังงานกับการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยใช้ค่า Emission Factor ที่สอดคล้องกับบริบทของประเทศไทยยังมีจำกัด และประการที่สาม การศึกษาที่รายงานการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองพลังงาน (Model Validation) โดยเปรียบเทียบผลการจำลองกับข้อมูลการใช้พลังงานจริงตามแนวทางมาตรฐานสากล เช่น ASHRAE Guideline 14-2014 [6] ยังมีจำนวนจำกัด ทั้งที่กระบวนการดังกล่าวมีความสำคัญต่อการสร้างความน่าเชื่อถือของแบบจำลองก่อนนำไปใช้ประเมินมาตรการประหยัดพลังงาน

การศึกษานี้เลือกใช้ EnergyPlus ร่วมกับ OpenStudio ในการสร้างและวิเคราะห์แบบจำลองพลังงานอาคาร เนื่องจาก EnergyPlus สามารถจำลองการถ่ายเทความร้อนและการใช้พลังงานของอาคารโดยพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางความร้อนของกรอบอาคาร สภาพภูมิอากาศ ตารางการใช้งาน ภาระความร้อน และระบบปรับอากาศ ขณะที่ OpenStudio สนับสนุนการสร้าง จัดการ และปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ของแบบจำลองอย่างเป็นระบบ [7–9] จุดเด่นของการใช้เครื่องมือทั้งสองร่วมกันสำหรับการศึกษานี้ คือความสามารถในการกำหนดกรณีฐานและปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ของกรอบอาคารภายใต้เงื่อนไขการจำลองเดียวกัน ทำให้สามารถเปรียบเทียบมาตรการหลายรูปแบบและตรวจสอบผลการจำลองกับข้อมูลการใช้พลังงานจริงได้อย่างเป็นระบบ งานวิจัยของ Rittidatch และคณะ [9,10] แสดงให้เห็นถึงการประยุกต์ใช้ EnergyPlus ร่วมกับ OpenStudio ในการประเมินมาตรการปรับปรุงกรอบอาคารสถานศึกษา ขณะที่ Chuaewong และคณะ [2] รายงานว่าการปรับเปลี่ยนวัสดุกรอบอาคารของอาคารสำนักงานภาครัฐมีศักยภาพในการลดการใช้พลังงาน อย่างไรก็ตาม การประเมินในระดับกลุ่มอาคารหลายหลังภายใต้ระบบมิเตอร์เดียวกัน โดยบูรณาการการตรวจสอบแบบจำลองด้วยข้อมูลการใช้พลังงานจริง การวิเคราะห์ความไวของพารามิเตอร์ และการประเมินผลด้านการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ยังเป็นประเด็นที่ควรได้รับการศึกษาเพิ่มเติม

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) สร้างและตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองพลังงานสำหรับกลุ่มอาคารสถานศึกษาจำนวน 7 อาคารภายใต้ระบบมิเตอร์ไฟฟ้าเดียวกัน โดยเปรียบเทียบผลการจำลองจาก OpenStudio และ EnergyPlus กับข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าจริง และ (2) ประเมินประสิทธิผลของมาตรการปรับปรุงกรอบอาคารจำนวน 12 แนวทาง โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่า U-value ของผนังและหลังคา และค่า Solar Heat Gain Coefficient (SHGC) ของช่องเปิด กระบวนการประเมินประกอบด้วยการกำหนดกรณีฐาน การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง การจำลองมาตรการปรับปรุงกรอบอาคาร การวิเคราะห์ความไวของพารามิเตอร์ด้วย Tornado Diagram และการคำนวณการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าโดยใช้ค่า Emission Factor ของประเทศไทย [11,12] ผลการศึกษาจะใช้เพื่อระบุมาตรการและพารามิเตอร์ของกรอบอาคารที่มีศักยภาพสูงในการลดการใช้พลังงานและการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า เพื่อเป็นข้อมูลสนับสนุนการตัดสินใจด้านการจัดการพลังงานในระดับกลุ่มอาคารสถานศึกษา ตลอดจนสนับสนุนแนวทางการพัฒนาอาคารสู่ Near Zero Energy Building (NZEB) และเป้าหมาย Carbon Neutrality 2050 ของประเทศไทย

วิธีการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการประเมินมาตรการปรับปรุงกรอบอาคารด้วยแบบจำลองพลังงานในระดับกลุ่มอาคารสถานศึกษา โดยใช้มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์เป็นกรณีศึกษา ครอบคลุมอาคารจำนวน 7 อาคารที่อยู่ภายใต้ระบบมิเตอร์ไฟฟ้าเดียวกัน กระบวนการวิจัยประกอบด้วย 5 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ (1) การรวบรวมข้อมูลด้านกายภาพของอาคารและข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าจริง (2) การสร้างแบบจำลองพลังงานอาคาร (3) การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยเปรียบเทียบผลการจำลองกับข้อมูลการใช้พลังงานจริง (4) การกำหนดและจำลองมาตรการปรับปรุงกรอบอาคารจำนวน 12 แนวทาง และ (5) การวิเคราะห์ผลการประหยัดพลังงาน ความไวของพารามิเตอร์ และการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า โดยขั้นตอนการดำเนินงานแสดงดังภาพที่ 1

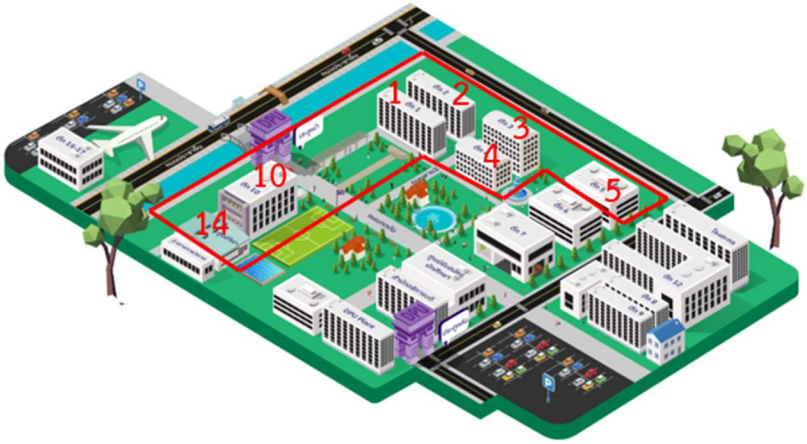


ภาพที่ 1 ขั้นตอนการประเมินมาตรการปรับปรุงกรอบอาคารด้วยแบบจำลองพลังงาน (Energy Retrofit Analysis Workflow)

1. ข้อมูลด้านกายภาพของอาคารและการใช้พลังงานไฟฟ้า

การศึกษาครอบคลุมอาคารภายในมหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์จำนวน 7 อาคาร ได้แก่ อาคาร 1 อาคาร 2 อาคาร 3 อาคาร 4 อาคาร 5 อาคารจอดรถและอเนกประสงค์ และอาคารศูนย์กีฬา ดังแสดงในภาพที่ 2 ข้อมูลที่รวบรวมประกอบด้วย พื้นที่ใช้สอย พื้นที่ปรับอากาศและไม่ปรับอากาศ เวลาเปิดใช้งานอาคาร จำนวนผู้ใช้อาคาร อุปกรณ์ไฟฟ้า ลักษณะและวัสดุของผนังและหลังคา สัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ผนัง (Window-to-Wall Ratio: WWR) ตลอดจนคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุที่ใช้เป็นข้อมูลนำเข้าสำหรับการสร้างแบบจำลอง รายละเอียดข้อมูลทางกายภาพของอาคารแสดงในตารางที่ 1

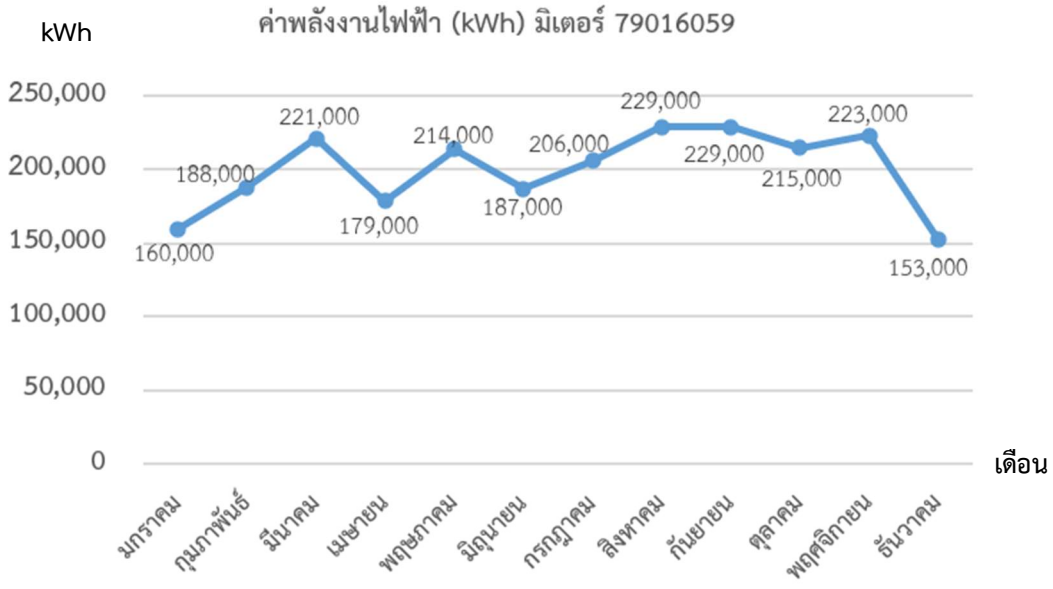
อาคารทั้ง 7 หลังใช้พลังงานไฟฟ้าภายใต้ระบบมิเตอร์เดียวกัน หมายเลข 79016059 ประเภทอัตราค่าไฟฟ้า 4.2.2 (TOU) โดยใช้ข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าจริงรายเดือนตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเดือนธันวาคมเป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง กลุ่มอาคารมีการใช้พลังงานไฟฟ้ารวม 2,404,000 kWh/year หรือเฉลี่ย 200,333.33 kWh/month โดยรูปแบบการใช้พลังงานไฟฟ้ารายเดือนแสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 2 The diagram shows the location of buildings within Dhurakij Pundit University

ตารางที่ 1 Physical data of the buildings used to simulate energy consumption in the walls and roofs

Building information	Building 1	Building 2	Building 3	Building 4	Building 5	Parking and multipurpose building	Sports center building
Usable area (m^2)	3590.05	3583.08	7159.43	4257.96	10370.84	23307.40	3642.15
Air-conditioned area (m^2)	3033.03	2400.05	3867.5	2915.59	6076.2	4800.00	2178.00
Non-air-conditioned area (m^2)	476.02	1183.03	3291.93	1342.37	4294.61	18507.4	1464.00
Building walls (materials) -Precast -Masonry wall -Glass wall	- Masonry wall -Glass wall	-Masonry wall -Glass wall	-Masonry wall -Glass wall	-Masonry wall -Glass wall	-Precast -Glass wall	-Precast -Glass wall	-Masonry wall -Glass wall
OTTV/RTTV (W/sq.m)	52.60/16	54.80/16	32.40/24	46.60/24	38.90/24	54.20/ -	43.60/19.20
Window-to-Wall Ratio (WWR)	North (N) 0.234	South (S) 0.234	East (E) 0.211	West (W) 0.211			



ภาพที่ 3 Graph of electricity consumption data for building groups 1-5,10,14 (meter 79016059)

2. การสร้างแบบจำลองพลังงานอาคาร

แบบจำลองพลังงานอาคาร (Building Energy Model: BEM) ของอาคารทั้ง 7 หลังถูกสร้างขึ้นจากข้อมูลทางกายภาพและข้อมูลการใช้งานจริงของอาคาร โดยสร้างรูปทรงเรขาคณิตของอาคารในรูปแบบสามมิติด้วย SketchUp จากนั้นนำข้อมูลเข้าสู่ OpenStudio เพื่อกำหนดพื้นที่ใช้งาน ตารางเวลาใช้งานอาคาร ภาระภายใน และคุณสมบัติทางความร้อนของกรอบอาคาร ก่อนส่งข้อมูลไปยัง EnergyPlus เพื่อคำนวณการใช้พลังงานของอาคาร ตัวแปรด้านกรอบอาคารที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองประกอบด้วยคุณสมบัติทางความร้อนของผนัง กระจก ฉนวน และหลังคา โดยพิจารณาค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) ความหนาแน่น (Density) ความร้อนจำเพาะ (Specific Heat) ค่า Solar Heat Gain Coefficient (SHGC) และค่าการส่งผ่านของกระจก (Transmittance) ตามชนิดของวัสดุ รายละเอียดคุณสมบัติของวัสดุแสดงในตารางที่ 2 การกำหนดแบบจำลองในลักษณะดังกล่าวมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้าง Baseline Model ที่สะท้อนสภาพการใช้งานของกลุ่มอาคารก่อนนำไปตรวจสอบความถูกต้องและใช้เป็นกรณีฐานสำหรับเปรียบเทียบมาตรการปรับปรุงกรอบอาคารในขั้นตอนต่อไป

ตารางที่ 2 Thermal variable properties of the materials used to improve the building frame [13]

List of materials	Thermal Conductivity value (W/m.k)	Density value (kg/m^3)	Specific Heat value (kJ/kg^oC)	SHGC value	Transmittance
1. Concrete wall (Precast) 75 mm	0.16	2,350	0.84	-	-
2. Thick clear glass 6 mm	-	-	-	0.72	0.846
3. Heat insulation 65 mm	0.035	24	0.96	-	-
4. Wooden wall 75 mm	0.13	500	1.61	-	-
5. Thick Low-E glass 6 mm	-	-	-	0.55	0.846
6. Double-glazing glass 6 mm	-	-	-	0.74	0.078
7. Solar Tag glass 6 mm	-	-	-	0.41	0.324
8. Clear Float glass	-	-	-	0.82	0.88
9. B4100 film	-	-	-	0.29	0.128
10. Stay Cool roof insulation 150 mm	0.042	12	0.96	-	-

3. การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

เพื่อประเมินความน่าเชื่อถือของแบบจำลองก่อนนำไปใช้วิเคราะห์มาตรการปรับปรุงกรอบอาคาร ทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Validation) โดยเปรียบเทียบค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าประจำปีจากการจำลองด้วย OpenStudio และ EnergyPlus (Simulated Energy Use) กับข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าจริง (Actual Energy Use) ของอาคารทั้ง 7 หลังภายใต้ระบบมิเตอร์เดียวกัน

ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างผลการจำลองและข้อมูลจริงคำนวณตามสมการ (1) [2,14]

$$\text{ความคลาดเคลื่อน (\%)} = \frac{|E_{sim} - E_{actual}|}{E_{actual}} \times 100 \quad (1)$$

โดยที่

E_{sim} = พลังงานที่ได้จากแบบจำลอง (กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อปี)

E_{actual} = พลังงานที่ใช้จริง (กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อปี)

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองดำเนินการโดยเปรียบเทียบผลการจำลองกับข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าจริง โดยอ้างอิงกรอบแนวทางการตรวจสอบแบบจำลองพลังงานของ ASHRAE Guideline 14-2014 [6] ผลการตรวจสอบใช้สำหรับประเมินความสอดคล้องของแบบจำลองกับการใช้พลังงานจริงก่อนนำแบบจำลองไปใช้เป็นกรณีฐานสำหรับการจำลองมาตรการ M1–M12 ในขั้นตอนต่อไป

4. การกำหนดและจำลองมาตรการปรับปรุงกรอบอาคาร

ภายหลังจากแบบจำลองกรณีฐานผ่านการตรวจสอบความถูกต้องแล้ว ได้กำหนดมาตรการปรับปรุงกรอบอาคารจำนวน 12 แนวทาง (M1–M12) เพื่อประเมินผลของการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางความร้อนของกรอบอาคารต่อการใช้พลังงาน โดยกรณีฐานประกอบด้วยผนังคอนกรีต Precast และ Masonry Wall กระจกใสทั่วไปที่มีค่า SHGC 0.72–0.82 และฉนวนหลังคาหนา 75 mm มาตรการที่ศึกษาจำแนกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ (1) กลุ่มปรับปรุงผนังและช่องเปิด (Wall and Fenestration Retrofit) โดยปรับลดค่า U-value ของผนังและค่า SHGC ของช่องเปิดผ่านการเพิ่มฉนวนผนัง การเปลี่ยนชนิดกระจก และการติดฟิล์มกรองแสง (2) กลุ่มปรับปรุงหลังคา (Roof Insulation Enhancement) โดยเพิ่มความหนาของฉนวนหลังคาจาก 75 เป็น 150 mm เพื่อลดการถ่ายเทความร้อนผ่านหลังคา และ (3) กลุ่มมาตรการแบบบูรณาการ (Integrated Envelope Retrofit) โดยรวมการปรับปรุงผนัง ช่องเปิด และหลังคาเข้าด้วยกัน การจำลองแต่ละมาตรการดำเนินการโดยเปลี่ยนเฉพาะพารามิเตอร์ของกรอบอาคารตามเงื่อนไขที่กำหนดใน M1–M12 ขณะที่คงเงื่อนไขพื้นฐานอื่นของแบบจำลองไว้เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงการใช้พลังงานกับ Baseline Model ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน รายละเอียดค่า U-value ของผนัง ค่า SHGC ของช่องเปิด และค่า U-value ของหลังคาของแต่ละมาตรการแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สรุปเชิงปริมาณของมาตรการปรับปรุงกรอบอาคารและการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ทางความร้อน

Measure	Wall U-value (W/m²K)	Window SHGC	Roof U-value (W/m²K)	Expected Cooling Load Impact (%)	Literature Support
Baseline	2.13	0.72–0.82	0.56	0	–
M1	0.54	0.72	0.56	5–12	Kumar et al., 2019 [3]
M2	0.54	–	0.56	10–25	Zhang et al., 2020 [4]
M3	2.13	0.72	0.56	3–10	Phdungsilp, 2017 [15]
M4	1.73	0.72	0.56	2–6	Li et al., 2013 [16]
M5	2.13	0.55	0.56	6–15	Zhang et al., 2020 [4]
M6	2.13	≈0.40	0.56	10–20	Kumar et al., 2019 [3]
M7	2.13	0.41	0.56	10–20	Zhang et al., 2020 [4]
M8	2.13	0.82	0.56	0–3	Li et al., 2013 [16]
M9	2.13	0.29	0.56	12–25	Kumar et al., 2019 [3]
M10	0.54	0.29	0.56	15–28	Combined effect

Measure	Wall U-value (W/m^2K)	Window SHGC	Roof U-value (W/m^2K)	Expected Cooling Load Impact (%)	Literature Support
M11	2.13	0.72	0.28	4–10	Kumar et al., 2019 [3]
M12	0.54	0.29	0.28	18–35	Integrated envelope strategy

ช่วงร้อยละของ Expected Cooling Load Impact เป็นค่าประมาณการเชิงกลไกที่อ้างอิงจากงานวิจัยในภูมิอากาศร้อนชื้น ซึ่งรายงานว่าการปรับปรุงค่า U-value ของผนังและหลังคาสามารถลดภาระความเย็นได้ประมาณ 5–15% ของ cooling load ขณะที่การลดค่า SHGC ของกระจกสามารถลดภาระความเย็นได้ในช่วง 10–25% ขึ้นอยู่กับสัดส่วนพื้นที่กระจกและทิศทางอาคาร [3,4,16] ทั้งนี้ค่าร้อยละดังกล่าวใช้เพื่อสนับสนุนการอภิปรายเชิงกลไก (mechanism-based discussion) โดยผลการประหยัดพลังงานที่รายงานในงานวิจัยนี้อ้างอิงจากผลการจำลองด้วย EnergyPlus เป็นหลัก

5. การประเมินผลการประหยัดพลังงาน การวิเคราะห์ความไว และการลด CO_2e

ผลการจำลองของมาตรการทั้ง 12 แนวทางนำมาเปรียบเทียบกับกรณีฐาน โดยประเมินจาก (1) ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้ารายปี (kWh/year) (2) ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ลดลงเมื่อเทียบกับกรณีฐาน (kWh/year) และ (3) ร้อยละการประหยัดพลังงาน (%) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิผลของแต่ละมาตรการและระบุมาตรการที่ให้ผลการประหยัดพลังงานสูงที่สุด นอกจากนี้ทำการวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis) ด้วย Tornado Diagram เพื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของพารามิเตอร์ด้านกรอบอาคารต่อการประหยัดพลังงาน โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่า SHGC ของช่องเปิด ฉนวนผนัง และฉนวนหลังคา เพื่อระบุพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อการลดการใช้พลังงานของกลุ่มอาคาร การลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (CO_2e) คำนวณจากปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้ของแต่ละมาตรการและค่า Emission Factor ของประเทศไทย [11,12] ตามสมการ (2)

$$CO_2e\ \text{Reduction} = \text{Energy Saving} \times \text{Emission Factor} \quad (2)$$

โดยที่ CO_2e Reduction มีหน่วยเป็น $kgCO_2e$/year และ Energy Saving มีหน่วยเป็น kWh/year ผลการประเมินทั้งสามส่วนใช้สำหรับเปรียบเทียบประสิทธิผลของมาตรการ M1–M12 และระบุมาตรการที่เหมาะสมสำหรับการจัดการพลังงานในระดับกลุ่มอาคารสถานศึกษา

ผลการวิจัย

1.ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองพลังงาน

ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองพลังงานโดยเปรียบเทียบค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองด้วย OpenStudio และ EnergyPlus กับข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าจริงของอาคารทั้ง 7 หลัง แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบค่าพลังงานจากแบบจำลองกับค่าการใช้พลังงานจริง

Building	Actual Energy Consumption (kWh/year)	Simulated Energy Consumption(kWh/year)	Margin of Deviation (±%)
อาคาร 1	244,678	252,100	+3.0%
อาคาร 2	177,334	170,900	−3.6%
อาคาร 3	454,762	467,200	+2.7%
อาคาร 4	392,529	386,400	−1.6%
อาคาร 5	617,659	628,700	+1.8%
อาคารจอดรถและเอนกประสงค์	403,931	411,600	+1.9%
อาคารศูนย์กีฬา	83,448	80,900	−3.0%
รวมทั้งหมด	2,404,341	2,397,800	−0.27%

จากตารางที่ 4 พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของแต่ละอาคารอยู่ในช่วง −3.6% ถึง +3.0% ขณะที่ค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าจริงรวมเท่ากับ 2,404,341 kWh/year และผลการจำลองรวมเท่ากับ 2,397,800 kWh/year คิดเป็นค่าความคลาดเคลื่อนรวม −0.27% ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีความสอดคล้องกับข้อมูลการใช้พลังงานจริง และสามารถนำแบบจำลองที่ผ่านการตรวจสอบไปใช้เป็นกรณีฐานสำหรับการประเมินมาตรการปรับปรุงกรอบอาคารทั้ง 12 แนวทางในขั้นตอนต่อไป

2. ผลการประหยัดพลังงานจากมาตรการปรับปรุงกรอบอาคาร

ภายหลังจากแบบจำลองพลังงานผ่านการตรวจสอบความถูกต้องแล้ว ได้นำแบบจำลองดังกล่าวมาใช้ประเมินมาตรการปรับปรุงกรอบอาคารจำนวน 12 แนวทาง (M1–M12) โดยเปรียบเทียบผลการใช้พลังงานของแต่ละมาตรการกับกรณีฐานภายใต้เงื่อนไขการใช้งานเดียวกัน ผลการจำลองด้วย OpenStudio และ EnergyPlus พบว่ามาตรการทั้ง 12 แนวทางสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ในช่วง 10,389.52–68,647.10 kWh/year หรือ 0.43–2.86% ของการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมของกลุ่มอาคาร ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการประหยัดพลังงานของมาตรการปรับปรุงกรอบอาคารทั้ง 12 แนวทาง

มาตรการ	Energy Saving (kWh/year)	Energy Saving (%)	CO_2e Reduction ($kgCO_2e$/year)
M1	32,221.54	1.34	19,287.81
M2	16,129.71	0.67	9,655.24
M3	10,389.52	0.43	6,219.17

M4	25,519.76	1.06	15,276.13
M5	34,369.47	1.43	20,573.56
M6	54,975.41	2.29	32,908.28
M7	42,313.81	1.76	25,329.05
M8	43,130.42	1.79	25,817.87
M9	50,133.82	2.09	30,010.10
M10	44,438.76	1.85	26,601.04
M11	57,028.06	2.37	34,137.00
M12	**68,647.10**	**2.86**	**41,092.15**

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิผลของแต่ละมาตรการ พบว่า M12 ให้ผลการประหยัดพลังงานสูงที่สุดเท่ากับ 68,647.10 kWh/year หรือ 2.86% รองลงมาคือ M11 เท่ากับ 57,028.06 kWh/year หรือ 2.37% และ M6 เท่ากับ 54,975.41 kWh/year หรือ 2.29% ตามลำดับ ขณะที่ M3 ให้ผลการประหยัดพลังงานต่ำที่สุดเท่ากับ 10,389.52 kWh/year หรือ 0.43%

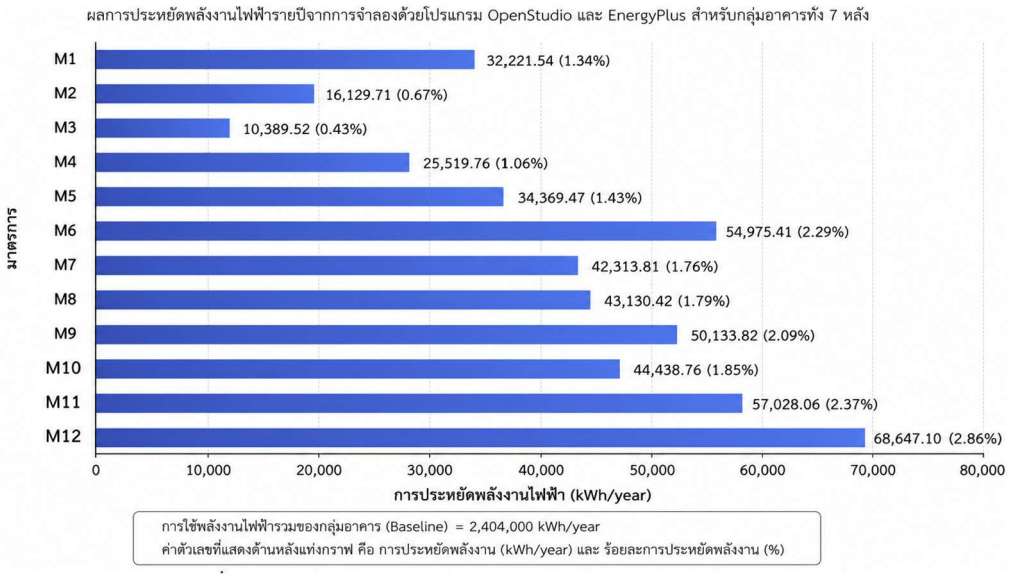
ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ประสิทธิผลของมาตรการไม่ได้ขึ้นอยู่กับการปรับปรุงองค์ประกอบใดองค์ประกอบหนึ่งเพียงอย่างเดียว แต่สัมพันธ์กับคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุและลักษณะของมาตรการที่นำมาใช้ โดยเฉพาะ M12 ซึ่งเป็นมาตรการแบบบูรณาการ ประกอบด้วยการติดตั้งฉนวนกันความร้อนที่ผนังหนา 65 mm การติดฟิล์มที่กระจก และการเพิ่มความหนาของฉนวนหลังคาเป็น 150 mm สามารถลดการใช้พลังงานได้สูงที่สุด แสดงให้เห็นถึงประโยชน์ของการปรับปรุงผนัง ช่องเปิด และหลังคาร่วมกัน เมื่อเทียบกับมาตรการที่ปรับปรุงองค์ประกอบของกรอบอาคารแยกส่วน

3. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของมาตรการ

จากผลการจำลองมาตรการปรับปรุงกรอบอาคารทั้ง 12 แนวทาง พบว่าประสิทธิภาพในการลดการใช้พลังงานมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 10,389.52 ถึง 68,647.10 kWh/year หรือ 0.43–2.86% ของการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมของกลุ่มอาคาร ทั้งนี้ M12 ให้ผลการประหยัดพลังงานสูงที่สุดเท่ากับ 68,647.10 kWh/year (2.86%) รองลงมาคือ M11 เท่ากับ 57,028.06 kWh/year (2.37%) และ M6 เท่ากับ 54,975.41 kWh/year (2.29%) ตามลำดับ เมื่อพิจารณามาตรการด้านผนังและช่องเปิด พบว่าผลการประหยัดพลังงานไม่ได้เพิ่มขึ้นตามลำดับหมายเลขของมาตรการ แต่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุที่นำมาปรับปรุง โดย M6 สามารถลดการใช้พลังงานได้ 54,975.41 kWh/year (2.29%) ซึ่งสูงกว่า M5, M7 และ M8 ที่สามารถลดได้ 34,369.47 (1.43%), 42,313.81 (1.76%) และ 43,130.42 kWh/year (1.79%) ตามลำดับ ขณะที่ M9 ให้ผลค่อนข้างสูงที่ 50,133.82 kWh/year (2.09%) ผลดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าการเลือกคุณสมบัติของวัสดุและช่องเปิดมีผลต่อประสิทธิภาพการลดการใช้พลังงานของกลุ่มอาคาร

สำหรับการปรับปรุงฉนวนหลังคา M11 ซึ่งเพิ่มความหนาของฉนวนจาก 75 เป็น 150 mm สามารถลดการใช้พลังงานได้ 57,028.06 kWh/year หรือ 2.37% ซึ่งเป็นผลการประหยัดสูงเป็นอันดับสองของมาตรการทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าการลดการถ่ายเทความร้อนผ่านหลังคาเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่มีศักยภาพสูงสำหรับกลุ่มอาคารที่ศึกษา

มาตรการ M12 ซึ่งเป็นมาตรการแบบบูรณาการ โดยประกอบด้วยการติดตั้งฉนวนผนังหนา 65 mm การติดฟิล์มที่กระจก และการเพิ่มฉนวนหลังคาเป็น 150 mm ให้ผลการประหยัดพลังงานสูงที่สุดที่ 68,647.10 kWh/year หรือ 2.86% และสามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าได้ 41,092.15 $kgCO_2e$/year ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ในกรณีศึกษานี้ การปรับปรุงองค์ประกอบของกรอบอาคารร่วมกันให้ผลการลดการใช้พลังงานสูงกว่าการปรับปรุงผนัง ช่องเปิด หรือหลังคาแยกส่วน แสดงดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 การเปรียบเทียบผลการประหยัดพลังงานของมาตรการปรับปรุงกรอบอาคารทั้ง 12 แนวทาง (จากการจำลองด้วยโปรแกรม OpenStudio และ EnergyPlus)

เพื่อให้เห็นภาพรวมของประสิทธิภาพมาตรการแต่ละประเภท สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 6

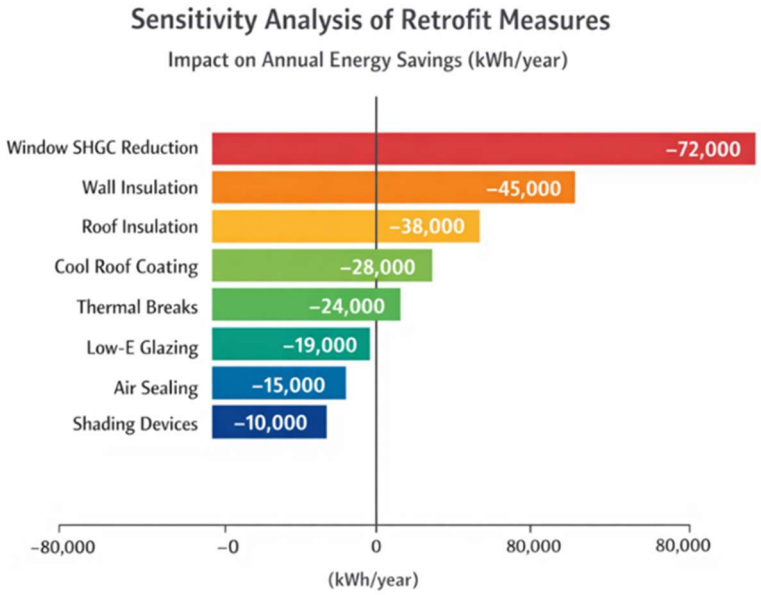
ตารางที่ 6 สรุปผลการประหยัดพลังงานของมาตรการหลัก

Group of Measures	Characteristics	Energy Saving Period (%)	Outcome Trend
ผนัง (Wall)	ลด U-value	0.8–1.8	ปานกลาง
ช่องเปิด (Window/SHGC)	ลด SHGC	1.5–2.5	สูง
หลังคา (Roof)	เพิ่มฉนวน	0.5–1.2	ต่ำ–ปานกลาง
บูรณาการ (Integrated)	รวมทุกองค์ประกอบ	**2.5–2.86**	สูงที่สุด

จากตารางที่ 6 พบว่ามาตรการลด SHGC มีผลต่อการลดพลังงานมากที่สุดในระดับมาตรการเดี่ยว มาตรการผนังและหลังคามีผลในระดับรอง และการรวมหลายมาตรการให้ผลการประหยัดพลังงานสูงที่สุดอย่างชัดเจน

4. การวิเคราะห์ความไวของพารามิเตอร์

การวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis) ดำเนินการเพื่อประเมินอิทธิพลของพารามิเตอร์ด้านกรอบอาคารที่มีต่อการประหยัดพลังงานของกลุ่มอาคาร โดยใช้ Tornado Diagram ในการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของผลการประหยัดพลังงานเมื่อปรับค่าพารามิเตอร์สำคัญ ได้แก่ ค่า Solar Heat Gain Coefficient (SHGC) ของช่องเปิด ฉนวนผนัง (Wall Insulation) และฉนวนหลังคา (Roof Insulation) ภายใต้เงื่อนไขการจำลองเดียวกัน ผลการวิเคราะห์พบว่า ค่า SHGC ของช่องเปิดเป็นพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อการประหยัดพลังงานสูงที่สุด โดยมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงการใช้พลังงานประมาณ 72,000 kWh/year รองลงมาคือ ฉนวนผนังประมาณ 45,000 kWh/year และฉนวนหลังคาประมาณ 38,000 kWh/year ตามลำดับ ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า สำหรับกลุ่มอาคารที่ศึกษา การควบคุมความร้อนจากรังสีอาทิตย์ที่ผ่านช่องเปิดมีอิทธิพลต่อการลดการใช้พลังงานมากกว่าการปรับปรุงฉนวนผนังและฉนวนหลังคาเมื่อพิจารณาพารามิเตอร์แยกส่วน แสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ผลการวิเคราะห์ความไวของพารามิเตอร์กรอบอาคารต่อการประหยัดพลังงาน

ผลการวิเคราะห์ความไวยังสอดคล้องกับผลการจำลองมาตรการปรับปรุงกรอบอาคาร โดยมาตรการที่มีการปรับปรุงคุณสมบัติของช่องเปิดร่วมกับองค์ประกอบอื่นของกรอบอาคารมีแนวโน้มให้ผลการประหยัดพลังงานสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม ผลของมาตรการไม่ได้ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ใดพารามิเตอร์หนึ่งเพียงอย่างเดียว เนื่องจากมาตรการแบบบูรณาการเป็นผลจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างผนัง ช่องเปิด และหลังคา ดังเห็นได้จาก M12 ซึ่งเป็นมาตรการแบบบูรณาการและให้ผลการประหยัดพลังงานสูงที่สุด 68,647.10 kWh/year หรือ 2.86% ดังนั้น ผลการวิเคราะห์ความไวจึงชี้ให้เห็นว่า SHGC เป็นพารามิเตอร์ที่ควรให้ความสำคัญเป็นลำดับแรกในการพิจารณามาตรการปรับปรุงกรอบอาคารสำหรับกรณีศึกษานี้ ขณะที่การปรับปรุงฉนวนผนังและฉนวนหลังคายังคงมีบทบาทสำคัญ และการพิจารณาพารามิเตอร์เหล่านี้ร่วมกันสามารถใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนการคัดเลือกมาตรการปรับปรุงกรอบอาคารที่เหมาะสมในระดับกลุ่มอาคารสถานศึกษา

5. การวิเคราะห์ในระดับรายอาคาร

ผลการวิเคราะห์ในระดับรายอาคารแสดงให้เห็นว่า ศักยภาพในการประหยัดพลังงานของแต่ละอาคารมีความแตกต่างกันตามลักษณะทางกายภาพ พื้นที่ปรับอากาศ และองค์ประกอบของกรอบอาคารที่แตกต่างกัน โดยเมื่อพิจารณาผลการจำลองของมาตรการปรับปรุงกรอบอาคารในอาคารทั้ง 7 หลัง พบว่าอาคารขนาดใหญ่ เช่น อาคาร 3 และอาคาร 5 มีค่าการลดการใช้พลังงานเชิงปริมาณสูงกว่าอาคารขนาดเล็ก ขณะที่อาคารที่มีสัดส่วนของช่องเปิดและพื้นที่ปรับอากาศแตกต่างกันมีการตอบสนองต่อมาตรการด้านผนัง ช่องเปิด และหลังคาแตกต่างกันไป

เมื่อพิจารณามาตรการที่ให้ผลการประหยัดพลังงานสูงสุดในระดับรายอาคาร พบว่า มาตรการแบบบูรณาการ (M12) ให้ผลการประหยัดพลังงานสูงสุดในทุกอาคารที่ศึกษา โดยเป็นมาตรการที่รวมการเพิ่มฉนวนผนัง การลดค่า SHGC ของช่องเปิด และการเพิ่มฉนวนหลังคา ผลดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าการปรับปรุงองค์ประกอบของกรอบอาคารร่วมกันมีศักยภาพในการลดการใช้พลังงานมากกว่าการปรับปรุงองค์ประกอบเพียงส่วนเดียวในบริบทของอาคารกรณีศึกษา อย่างไรก็ตาม ปริมาณพลังงานที่ประหยัดได้ของแต่ละอาคารมีความแตกต่างกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเลือกมาตรการปรับปรุงกรอบอาคารควรพิจารณาคุณลักษณะเฉพาะของแต่ละอาคารร่วมกับผลการจำลอง ไม่ควรกำหนดมาตรการเดียวกันโดยพิจารณาเฉพาะผลรวมในระดับกลุ่มอาคารเท่านั้น การวิเคราะห์ในระดับรายอาคารจึงช่วยสนับสนุนการจัดลำดับความสำคัญของการปรับปรุงอาคารและช่วยให้การวางแผนจัดการพลังงานในระดับมหาวิทยาลัยมีความเหมาะสมมากขึ้น

6. ผลการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (CO_2e)

จากผลการลดการใช้พลังงาน ได้นำมาคำนวณการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (CO_2e) โดยใช้ค่า Emission Factor ของประเทศไทย พบว่าแนวโน้มของการลด CO_2e สอดคล้องโดยตรงกับระดับการประหยัดพลังงาน M12 สามารถลดการปล่อยก๊าซได้สูงสุดที่ 41,092 kgCO_2e/year ขณะที่มาตรการเดี่ยวให้ค่าการลดอยู่ในช่วงประมาณ 6,000–34,000 kgCO_2e/year แม้ว่าสัดส่วนการลดพลังงานรวมจะอยู่ในระดับไม่สูงมาก (<3%) แต่เมื่อพิจารณาในระดับกลุ่มอาคาร พบว่าสามารถลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างชัดเจนในเชิงปริมาณ และสามารถสนับสนุนเป้าหมายการลดคาร์บอนในระดับองค์กรได้อย่างเป็นรูปธรรม

7. การวิเคราะห์เชิงภาพรวมในระดับกลุ่มอาคาร

การวิเคราะห์ในระดับกลุ่มอาคารภายใต้ระบบมิเตอร์ไฟฟ้าเดียวกันสะท้อนรูปแบบการใช้พลังงานจริงในระดับองค์กร ซึ่งแตกต่างจากการวิเคราะห์อาคารเดี่ยว โดยผลการศึกษาพบว่า 1) การใช้มาตรการพร้อมกันในหลายอาคารก่อให้เกิดผลสะสม (cumulative effect) 2) การลด SHGC ส่งผลต่อ Cooling Load อย่างชัดเจน และ 3) การบูรณาการหลายมาตรการให้ผลดีกว่ามาตรการเดี่ยวอย่างชัดเจน ผลลัพธ์ดังกล่าวยืนยันว่า envelope retrofit เป็นกลยุทธ์ด้าน demand-side management ที่มีประสิทธิภาพ และเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในระดับสถาบันการศึกษา

อภิปรายผลการวิจัย

1. ประสิทธิภาพของมาตรการปรับปรุงกรอบอาคารเชิงกลไก (Mechanism-Based Interpretation)

ผลการจำลองพลังงานแสดงให้เห็นว่ามาตรการที่ 12 ซึ่งเป็นการบูรณาการฉนวนผนังหนา 65 mm การติดฟิล์มกรองแสง และการเพิ่มฉนวนหลังคาเป็น 150 mm ให้ผลการประหยัดพลังงานสูงสุดที่ 68,647 kWh/year คิดเป็น 2.86% ของการใช้พลังงานรวมทั้งหมดของกลุ่มอาคาร การลดลงดังกล่าวสะท้อนกลไกการลดการถ่ายเทความร้อนผ่านกรอบอาคาร (Envelope Heat Transfer Reduction) ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อภาระการทำความเย็น (Cooling Load) ของระบบปรับอากาศในสภาพภูมิอากาศร้อนชื้น ในบริบทของกรุงเทพมหานคร ซึ่งมีค่ารังสีดวงอาทิตย์และอุณหภูมิภายนอกสูงตลอดปี การลดค่า U-value ของผนังและหลังคา รวมถึงการลดค่า Solar Heat Gain Coefficient (SHGC) ของกระจก มีผลต่อการลด sensible heat gain อย่างชัดเจน กลไกดังกล่าวสอดคล้องกับงานของ Kumar [3] และ Zhang [4] ที่รายงานว่าการเพิ่มประสิทธิภาพฉนวนสามารถลดภาระความเย็นได้ 10–25% ของ cooling load ขึ้นอยู่กับลักษณะสัดส่วนกรอบอาคาร (Envelope-to-Floor Ratio) แม้สัดส่วนการประหยัดพลังงานรวมในงานวิจัยนี้อยู่ที่ 2.86% ของพลังงานรวมทั้งระบบ แต่เมื่อพิจารณาเฉพาะพลังงานในส่วนของระบบปรับอากาศ ผลกระทบเชิงสัดส่วนมีแนวโน้มสูงกว่านั้น ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่า envelope retrofit เป็นมาตรการเชิงรับ (passive strategy) ที่มีประสิทธิภาพและไม่เพิ่มภาระพลังงานระบบอื่น

2. การเปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้า (Comparative Interpretation)

เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้าในบริบทอาคารสถานศึกษาไทย เช่น Wisawato [17] และChuaewong [2] พบว่าระดับการประหยัดพลังงานอยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน โดยส่วนใหญ่รายงานผลการลดพลังงานในช่วง 2–6% สำหรับมาตรการ envelope retrofit แบบเดี่ยว อย่างไรก็ตามความแตกต่างสำคัญของงานวิจัยนี้คือการประเมินในระดับ “กลุ่มอาคารหลายอาคารภายใต้ระบบมิเตอร์เดียวกัน” ซึ่งสะท้อนภาพรวมการจัดการพลังงานในระดับองค์กร (Campus-Level Perspective) มากกว่าการวิเคราะห์อาคารเดี่ยว ผลลัพธ์จึงมีความใกล้เคียงกับสภาพการดำเนินงานจริงและสามารถนำไปใช้ประกอบการตัดสินใจเชิงนโยบายได้มากกว่า นอกจากนี้การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนรวมเพียง −0.27% ช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์ ซึ่งเป็นประเด็นที่ยังพบไม่มากในงานวิจัยด้าน BEM ในประเทศกำลังพัฒนา

3. นัยสำคัญเชิงนโยบายและการลดคาร์บอน (Policy and Carbon Implications)

การลดการใช้พลังงานไฟฟ้า 68,647 kWh/year ส่งผลให้ลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าได้ 41,092 $kgCO_2e$/year ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่ามาตรการเชิงรับของกรอบอาคารสามารถสนับสนุนการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในระดับองค์กรได้ หากนำแนวทางดังกล่าวไปประยุกต์ใช้กับกลุ่มอาคารสถานศึกษาในวงกว้าง อาจมีส่วนช่วยสนับสนุนเป้าหมายด้านประสิทธิภาพพลังงานและ Carbon Neutrality 2050 ของประเทศไทย

4. ข้อจำกัดของงานวิจัย

แม้ว่างานวิจัยนี้จะมีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองตามมาตรฐานสากล แต่ยังมีข้อจำกัดบางประการ ได้แก่

1) ยังไม่ได้วิเคราะห์ต้นทุนตลอดอายุการใช้งาน (Life Cycle Cost) อย่างละเอียด

2) ยังไม่ได้ประเมินคาร์บอนฝังตัว (Embodied Carbon) ของวัสดุฉนวน

3) ยังไม่ได้วิเคราะห์ผลกระทบต่อ comfort index เช่น PMV/PPD

ดังนั้นการศึกษาครั้งต่อไปควรบูรณาการการวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์และวงจรชีวิตวัสดุ เพื่อประเมินความยั่งยืนในมิติที่ครบถ้วนมากยิ่งขึ้น

5. แนวทางการต่อยอดสู่ NZEB

ผลการศึกษายืนยันว่า envelope retrofit เป็นมาตรการพื้นฐานที่ควรดำเนินการก่อนการติดตั้งระบบพลังงานหมุนเวียน เนื่องจากการลดความต้องการพลังงาน (Energy Demand Reduction) จะช่วยลดขนาดระบบผลิตไฟฟ้าจากโซลาร์เซลล์ที่ต้องติดตั้งในอนาคต ดังนั้นการบูรณาการมาตรการที่ 12 ร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคาอาจทำให้อาคารสามารถก้าวสู่ Near Zero Energy Building (NZEB) ได้ในเชิงปฏิบัติจริง

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้สร้างและตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองพลังงานอาคารสำหรับกลุ่มอาคารสถานศึกษาจำนวน 7 อาคาร ภายใต้ระบบมิเตอร์ไฟฟ้าเดียวกันของมหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์ โดยใช้ OpenStudio ร่วมกับ EnergyPlus ในการจำลองการใช้พลังงานไฟฟ้า ผลการเปรียบเทียบผลการจำลองกับข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าจริงพบค่าความคลาดเคลื่อนรวม −0.27% แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีความสอดคล้องกับข้อมูลการใช้พลังงานจริงในระดับรายปี โดยการตรวจสอบแบบจำลองอ้างอิงกรอบแนวทางของ ASHRAE Guideline 14-2014 ก่อนนำแบบจำลองไปใช้เป็นกรณีฐานในการประเมินมาตรการปรับปรุงกรอบอาคาร ผลการประเมินมาตรการปรับปรุงกรอบอาคารจำนวน 12 แนวทางพบว่า มาตรการแบบบูรณาการ (M12) ซึ่งประกอบด้วยการเพิ่มฉนวนผนังหนา 65 mm การลดค่า SHGC ของช่องเปิด และการเพิ่มความหนาของฉนวนหลังคาเป็น 150 mm ให้ผลการประหยัดพลังงานสูงที่สุด โดยสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ 68,647 kWh/year หรือ 2.86% และลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าได้ 41,092 $kgCO_2e$/year นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ความไวของพารามิเตอร์แสดงให้เห็นว่า ค่า SHGC ของช่องเปิดเป็นพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อการประหยัดพลังงานสูงที่สุด รองลงมาคือฉนวนผนังและฉนวนหลังคา ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลองที่แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงองค์ประกอบของกรอบอาคารร่วมกันมีศักยภาพในการลดการใช้พลังงานมากกว่าการพิจารณาองค์ประกอบแยกส่วนในบริบทของกลุ่มอาคารที่ศึกษา

ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า การใช้แบบจำลองพลังงานที่ตรวจสอบกับข้อมูลการใช้พลังงานจริงสามารถเป็นเครื่องมือสนับสนุนการประเมินและคัดเลือกมาตรการปรับปรุงกรอบอาคารในระดับกลุ่มอาคารสถานศึกษาได้ แม้ว่าการประหยัดพลังงานสูงสุดของกรณีศึกษานี้จะคิดเป็น 2.86% ของการใช้พลังงานไฟฟ้ารวม แต่ผลการลดพลังงานและการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าในระดับกลุ่มอาคารสามารถใช้เป็นข้อมูลประกอบการวางแผนจัดการพลังงานในระดับมหาวิทยาลัยได้ ดังนั้น การปรับปรุงกรอบอาคารจึงเป็นหนึ่งในมาตรการเชิงรับที่สามารถนำมาใช้เพื่อลดความต้องการพลังงาน

ของอาคาร และเป็นพื้นฐานสำหรับการพิจารณามาตรการด้านพลังงานอื่นเพิ่มเติมเพื่อสนับสนุนการพัฒนาอาคารสถานศึกษาสู่ Near Zero Energy Building (NZEB) และเป้าหมาย Carbon Neutrality 2050 ของประเทศไทย

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์ วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี และฝ่ายซ่อมบำรุงอาคารและยานพาหนะ ที่สนับสนุนข้อมูลด้านอาคาร ข้อมูลค่าพลังงานไฟฟ้า รวมถึงข้อมูลอื่น ๆ ที่เป็นประโยชน์สำหรับการทำการวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Srimuang K, Sreshthaputra A, Pinich S. Evaluation of Energy Conservation Measures and Greenhouse Gas
Emission Reduction in Office and Residential Condominium Buildings Using Marginal Abatement Cost Curves. Sarasatr. 2022; 5(3): 509-522.

[2] Chuaewong T, Vorarat S, Rittidatch P. Energy improvement of building frames in government office buildings using energy modeling: Case study of Bang Mae Nang Municipality Office. EAU Heritage J Sci Technol. 2024 May-Aug; 18(2): 92-106.

[3] Kumar R, Suman BM, Sharma A. Thermal performance of building envelopes and energy saving potential
of insulation materials under warm climatic conditions. Energy Build. 2019; 197: 129-144.

[4] Zhang Y, Zhou X, Lin B. Energy performance optimization of educational buildings in tropical climates using envelope design strategies. Appl Energy. 2020; 268: 114956.

[5] González-Torres M, Pérez-Lombard L, Coronel JF, Maestre IR, Yan D. A review on buildings energy information: Trends, end-uses, fuels and drivers. Energy Rep. 2022; 8: 626-637.

[6] *Measurement of Energy, Demand, and Water Savings*, ASHRAE Guideline 14-2014, ASHRAE, Atlanta, GA, USA, 2014.

[7] Brackney L, Parker A, Macumber D, Benne K. Building Energy Modeling with OpenStudio. Cham: Springer; 2018.

[8] Nakkorn N, Vorarat S, Phdungsilp A. Development of Integrated Building Energy Modeling in Pattaya City,
Thailand. EAU Heritage J Sci Technol. 2023; 17(3): 56-71.

[9] Rittidatch P, Phdungsilp A, Vorarat S. Evaluation of Energy Renovation Measures of the Building Envelope
in Educational Building Using Building Energy Modeling: A Case Study in Dhurakij Pundit University. J
Adv Dev Eng Sci. 2023; 11(31): 128-142.

[10] Rittidatch, P., Phdungsilp, A., & Vorarat, S. Evaluation of building envelope retrofitting measures in educational buildings using energy modeling: A case study at Dhurakij Pundit University. Pathumwan Academic Journal. 2021; 11(31): 128–142.

[11] Thailand Greenhouse Gas Management Organization (TGO). Emission Factor (CFO). Bangkok: TGO; 2024.
p. 2.
[12] Thailand Greenhouse Gas Management Organization (TGO). Emission Factor Database, Version 2. Bangkok: TGO; 2024. Available from: https://thaicarbonlabel.tgo.or.th/
[13] Rittidatch P. Modelling of Energy Demand and Supply Towards Carbon Neutrality in Dhurakij Pundit University, Thailand [Master's thesis]. Bangkok: Dhurakij Pundit University; 2023.
[14] Anusakdakul W. Guidelines for Development of Net Zero Energy Buildings for Governmental Office Buildings in Thailand [Master's thesis]. Bangkok: Silpakorn University; 2016.
[15] Phdungsilp A. Projections of Energy Use and Carbon Emissions for Bangkok, Thailand. J Rev Glob Econ. 2017 Jun 9; 6: 248-257.
[16] Li DHW, Yang L, Lam JC. Impact of climate change on energy use in the built environment: A review. Energy. 2013; 61: 106-114.
[17] Wisawato K, Phdungsilp A. Analysis of energy performance improvements and economic impacts for discovery learning libraries of Bangkok Metropolitan Administration. Proceedings of the 5th International Electrical Engineering Congress (iEECON); 2017 Mar 8-10; Pattaya, Thailand. p. 277-280.
DOI: 10.1109/IEECON.2017.8075786.

วารสารวิชาการ

พลังงานทดแทนสู่ชุมชน

J-REC

JOURNAL OF RENEWABLE ENERGY FOR COMMUNITY

สมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ต.คลองหก อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12110 อีเมล : treca2012@gmail.com โทร : 02 549 3497