



The Journal of Industrial Technology

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ ๒๑ ฉบับที่ ๓ ประจำปี ๒๕๖๘

VOLUME 21 | ISSUE 3 | 2025 | Focused on engineering and industrial technology

Published by College of Industrial Technology (CIT), KMUTNB

กองบรรณาธิการวารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

ที่ปรึกษา

ศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ เขียวยงจีน
รองศาสตราจารย์ ดร.สมิทร ส่งพิริยะกิจ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

บรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.อรรถพล แก้ววิลัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

รองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.บุญลือ สวัสดิ์มงคล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์ อัครเอกพาลิน
ศาสตราจารย์ ดร.สุทธิศักดิ์ พงศ์ธนาพานิช
ศาสตราจารย์ ดร.นวดล เหล่าศิริพจน์
ศาสตราจารย์ ดร.พิเชษฐ ลิ่มสุวรรณ
ศาสตราจารย์ ดร.สำเริง จักรใจ
ศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช
ศาสตราจารย์ ดร.หทัยกานต์ มนัสปิยะ
ศาสตราจารย์ ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช
ศาสตราจารย์ ดร.ปริญญา จินดาประเสริฐ
ศาสตราจารย์ นาวาอากาศโท ดร.สรวิชัย สุจิตจร
รองศาสตราจารย์ ดร.ธนดัย กุลรวาณิชพงษ์
รองศาสตราจารย์ ดร.อภิรัตน์ เล่าห์บุตรี
รองศาสตราจารย์ ดร.สุรัตน์ ผลศิลป์
รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงฤดี นายสุวรรณ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กองบรรณาธิการนานาชาติ

Professor Dr.Athanasios Thanos Tsolakis
Professor Dr.Cristina Leonelli
Professor Dr.Greg Heness
Professor Dr.Michiya Matsusaki
Professor Dr.Kannan Venkatramanan

University of Birmingham, United Kingdom
University of Modena and Reggio Emilia, Italy
University of Technology Sydney, Australia
Osaka University, Japan
SCSVMV University, India

หัวหน้าฝ่ายจัดการ

รองศาสตราจารย์ ดร.กัมปนาท เทียนน้อย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ฝ่ายจัดการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐศักดิ์ เตียวงศ์สมบัติ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปานทิพย์ บุญส่ง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ผู้จัดการวารสาร

นางสาวชลดา เชื้อประดิษฐ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

Editorial Board of The Journal of Industrial Technology

Advisory Board

Professor Dr.Ing.Suchart Siengchin	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Associate Professor Dr.Smith Songpiriyakij	King Mongkut's University of Technology North Bangkok

Editor-in-Chief

Associate Professor Dr.Attaphon Kaewvilai	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
---	---

Associate Editor

Associate Professor Dr.Boonlue Sawatmongkhon	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
--	---

Editorial Board Members

Professor Dr.Prayoot Akkaraekthalin	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Professor Dr.Sutthisak Phongthanapanich	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Professor Dr.Navadol Laosiripojan	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Professor Dr.Pichet Limsuwan	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Professor Dr.Sumrerng Jugjai	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Professor Dr.Pranut Potiyaraj	Chulalongkorn University
Professor Dr.Hathaikarn Manuspiya	Chulalongkorn University
Professor Dr.Phadungsak Ratanadecho	Thammasat University
Professor Dr.Prinya Chindaprasirt	Khon Kaen University
Professor Wing Commander Dr.Sarawut Sujitjorn	Suranaree University of Technology
Associate Professor Dr.Thanatchai Kulworawanichpong	Suranaree University of Technology
Associate Professor Dr.Apirat Laobuthee	Kasetsart University
Associate Professor Dr.Sureerat Polsilapa	Kasetsart University
Associate Professor Dr.Duangrudee Chaysuwan	Kasetsart University

International Editors

Professor Dr.Athanasios Thanos Tsolakis	University of Birmingham, United Kingdom
Professor Dr.Cristina Leonelli	University of Modena and Reggio Emilia, Italy
Professor Dr.Greg Heness	University of Technology Sydney, Australia
Professor Dr.Michiya Matsusaki	Osaka University, Japan
Professor Dr.Kannan Venkatramanan	SCSVMV University, India

Head of Administrative Management

Associate Professor Dr.Kampanart Theinnoi	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
---	---

Administrative Management

Assistant Professor Dr.Prasertsak Tiawongsombat	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Assistant Professor Dr.Pantip Boonsong	King Mongkut's University of Technology North Bangkok

Journal Manager

Miss Chonlada Chueapradit	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
---------------------------	---

วัตถุประสงค์

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเป็นวารสารตีพิมพ์เผยแพร่บทความวิจัยและบทความวิชาการ เพื่อเป็นสื่อกลางในการเผยแพร่องค์ความรู้ งานวิจัย สิ่งประดิษฐ์และนวัตกรรม ของภาคการศึกษาและอุตสาหกรรม โดยบทความมีเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับสาขาวิชาทางด้านเทคโนโลยีวิศวกรรมศาสตร์ อาทิเช่น วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมเคมี วิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ วิศวกรรมวัสดุและกระบวนการผลิต วิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม วิศวกรรมพลังงานและพลังงานทดแทน วิศวกรรมคอมพิวเตอร์และแบบจำลอง เป็นต้น

ทั้งนี้ บทความจะผ่านขั้นตอนการประเมินเบื้องต้นถึงคุณภาพและขอบเขตของเนื้อหา ความถูกต้องของรูปแบบการเตรียมบทความ ความซ้ำซ้อน และการคัดลอกวรรณกรรม (Duplication and Plagiarism) โดยกองบรรณาธิการวารสารฯ จากนั้น บทความจะได้รับการประเมินคุณภาพทางวิชาการโดยผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้องอย่างน้อย 3 ท่าน ซึ่งเป็นบุคคลภายนอกจากหลากหลายสถาบัน ทั้งนี้ ผู้นิพนธ์ (Author) และผู้ประเมิน (Reviewer) จะไม่ทราบข้อมูลของกันและกัน (Double-Blinded Peer Reviews) และไม่ได้สังกัดหน่วยงานเดียวกัน โดยบทความที่ผ่านการปรับปรุงตามผลการประเมินจะได้รับพิจารณาอนุมัติให้ตีพิมพ์บทความขั้นตอนสุดท้าย กองบรรณาธิการจะดำเนินการตรวจสอบบทความและพิสูจน์อักษรก่อนที่จะเผยแพร่บทความแบบออนไลน์ และจัดพิมพ์บทความทั้งหมดรวมเล่มเพื่อดำเนินการเผยแพร่ต่อไป

อนึ่ง ผลงานวิจัยและผลงานทางวิชาการที่ปรากฏเผยแพร่ในวารสารฯ เป็นความคิดเห็นอิสระของผู้แต่ง โดยผู้แต่งเป็นผู้รับผิดชอบต่อผลทางกฎหมายใด ๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นจากบทความเผยแพร่นั้น ซึ่งกองบรรณาธิการและคณะผู้จัดทำวารสารฯ ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป

กำหนดออกวารสาร

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมมีกำหนดการออกปีละ 3 ฉบับ โดยฉบับที่ 1 จะจัดพิมพ์ระหว่างเดือนมกราคม – เมษายน ฉบับที่ 2 จะจัดพิมพ์ระหว่างเดือน พฤษภาคม – สิงหาคม และฉบับที่ 3 จะจัดพิมพ์ระหว่างเดือนกันยายน – ธันวาคม ของทุกปี

ผู้จัดพิมพ์

หน่วยวิจัยและส่งเสริมวิชาการ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ชั้น 3 อาคาร 63 เลขที่ 1518 ถนนประชากรราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
โทร. 02-555-2000 ต่อ 6249, Email: JIT.journal@gmail.com

Objectives

The journal of industrial technology is an academic publication which devotes to be a medium to disseminate knowledge, research, invention, and innovation for academics. The article provides and reports of interest to the field of engineering technology such as mechanical engineering, civil engineering, electrical and electronic engineering, chemical engineering, materials engineering, production engineering, industrial engineering, environmental engineering, energy and renewable energy engineering, computational engineering and etc.

For publication, the submitted articles will be reviewed through a preliminary assessment process for the quality and scope of the content, duplication, and plagiarism by the editorial board and then evaluated for an academic quality for academic quality by at least 3 experts in related fields, who are outsiders from various institutions. The authors and reviewers do not know each other's information (double-blinded peer reviews) and are not affiliated with the same institution. The high quality-reviewed manuscript will be considered to be accepted for publication. For the last step, the editorial board will verify and proofread the articles before online publishing and printing out all in the journal for further publication.

In addition, the research and academic works published in this journal are considered the independent opinions of the author. The author is responsible for any legal consequences that may result from the published articles with which editorial members do not always necessarily agree.

Publishing Schedule

The journal of industrial technology is published in 3 issues per year. Issue 1 will be published between January and April of every year. Issue 2 will be published between May and August of every year. Issue 3 will be published between September and December of every year.

Publisher

Research and Academic Supports Division College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Building 63, 3rd Floor, 1518, Pracharat 1 Road, Wongsawang, Bangsue, Bangkok, Thailand, 10800, Tel. +66 2 555-2000 ext. 6249, Email: JIT.journal@gmail.com

บทบรรณาธิการ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology, ISSN Online: 2697-5548) ปีที่ 21 ฉบับที่ 3 กองบรรณาธิการมีความยินดีเป็นอย่างยิ่งที่จะเรียนให้ทุกท่านได้ทราบว่าวารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมได้รับการประเมินคุณภาพวารสารจัดอยู่ในฐานข้อมูล TCI กลุ่มที่ 1 ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (Thai Citation Index: TCI) มีผลรับรองตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2568 ถึงวันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2572

การดำเนินงานของวารสารฯ ฉบับนี้ ทางกองบรรณาธิการและคณะผู้จัดทำวารสารฯ ได้ดำเนินการพิจารณาและเผยแพร่บทความด้วยระบบ Online Journal Submission (OJS) ทั้งนี้ วารสารฯ ได้ดำเนินการขอเลขรหัสทรัพยากรสารสนเทศดิจิทัล (Digital Object Identifier: DOI) ผ่านระบบ CrossRef และ Digital Object Identifier System ให้กับทุกบทความที่ได้รับการตีพิมพ์ รวมถึงนำเข้าข้อมูลบทความสู่ฐานข้อมูล TCI แบบ Fast Track (Fast-track Indexing System) และฐานข้อมูล Google Scholar ซึ่งทำให้การสืบค้นและการอ้างอิงข้อมูลบทความด้วยระบบออนไลน์นั้นถูกต้องและรวดเร็วยิ่งขึ้น

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ได้จัดพิมพ์ 3 ฉบับต่อปี คือฉบับที่ 1 เดือนมกราคม - เดือนเมษายน ฉบับที่ 2 เดือนพฤษภาคม - เดือนสิงหาคม และฉบับที่ 3 เดือนกันยายน - เดือนธันวาคม สำหรับการเผยแพร่บทความแบบออนไลน์นั้นได้ดำเนินการผ่านทางเว็บไซต์ ojs.kmutnb.ac.th/index.php/jointech และ ph01.tci-thaijo.org/index.php/jit_journal ที่อยู่ในระบบ Thai Journals Online (ThaiJO)

ปัจจัยหลายประการที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อคุณภาพวารสารคือคุณภาพของบทความที่มีคุณค่าทางวิชาการเป็นที่ยอมรับ กระบวนการคัดกรองและการตรวจสอบที่มีมาตรฐาน โดยผู้ทรงคุณวุฒิเฉพาะสาขาวิชา ข้อเสนอแนะที่ทรงคุณค่า รวมทั้ง การจัดการที่มีประสิทธิภาพเพื่อดำเนินการจัดพิมพ์และการเผยแพร่บทความให้เป็นไปตามระยะเวลาที่กำหนด ส่งผลให้วารสารฯ มีความน่าเชื่อถือและผ่านการรับรองโดย TCI

ทางคณะผู้จัดทำวารสารฯ ขอกราบขอบพระคุณที่ปรึกษาวารสารฯ กองบรรณาธิการ ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ ที่สละเวลาและใช้ความรู้ความสามารถในการทำให้คุณภาพของวารสารฯ เป็นที่น่าเชื่อถือและมีคุณค่าเป็นประโยชน์ต่อวงการวิชาการ และขอขอบคุณนักวิชาการทุกท่านที่ส่งบทความที่มีคุณค่าทางวิชาการเข้าร่วมทำให้วารสารฯ ดำเนินการสำเร็จตามวัตถุประสงค์ ทางคณะผู้จัดทำวารสารฯ พร้อมทั้งจะรับฟังข้อเสนอแนะจากทุกภาคส่วนเพื่อทำให้วารสารฯ มีการพัฒนามากยิ่งขึ้น และเป็นที่ยอมรับในระดับสากลต่อไป

บรรณาธิการ



สารบัญ

	หน้า
กองบรรณาธิการวารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (Editorial Board of The Journal of Industrial Technology)	A
วัตถุประสงค์ (Objectives)	C
บทบรรณาธิการ	E
บทความวิจัย	
การพัฒนาเครื่องทำน้ำร้อนระบบไฮบริด (Development of Hybrid Water Heaters) <i>Chanchajit Wannurak</i>	1-15
การศึกษาเปรียบเทียบแบบจำลองแบตเตอรี่ระหว่างแบบจำลองไฟฟ้าสมมูลและแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับอากาศยานไร้คนขับจากข้อมูลการบินจริง (A Comparative Study Battery Modeling between Equivalent Circuit and Neural Network for UAVs Using Real Flight Data) <i>Prasopphok Phumma, Waiard Saikong, Suradet Tantrairatn</i>	16-28
A Lesson Learned from the UK Rail Project: An Analysis of Critical Success Factors (CSFs) through the Project Life Cycle (PLC) <i>Oranicha Buthphorm</i>	29-41
การประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพร่วมกับการวัดขนาดร่างกายในการออกแบบโต๊ะปฏิบัติงานสำหรับผู้พิการ (Applying Quality Function Deployment with Anthropometric to Design A Working Bench Table for Persons with Disabilities) <i>Ratklaio Khwanlamoon, Surasak Jindathip, Atipunt Loymuangklang, Sirichai Yodwangjai</i>	42-58
การออกแบบและพัฒนาเครื่องคั่วและบั่นละเอียดพริกแห้งกึ่งอัตโนมัติ (Machine Design and Development of A Semi-automatic Machine for Roasting and Grinding Dry Chili) <i>Wichok Promdaung, Sathaporn sitthiwong</i>	59-71



สารบัญ (ต่อ)

บทความวิจัย (ต่อ)	หน้า
การหาสภาวะที่เหมาะสมโดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนองสำหรับการกลึงคว้านรูในเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด S20C (Optimization of Condition Using Response Surface Methodology for Boring Process in S20C Carbon Steel) <i>Julaluk Rodjananugoon, Apichon Thongmung Kamnerdwam, Surasit Rawangwong, Chainarong Srivabut, Wikanet Phetsuwan, Nattawat Narato, Tanat Sangngam</i>	72-89
อิทธิพลของครีบขวางการไหลและอุณหภูมิอากาศที่มีต่อกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือก (Influence of Flow-Obstructing Fins and Air Temperature on the Paddy Drying Process) <i>Pornsawan Tongbai, Taveesin Lekpradit, Kankamon Phucronghin, Preecha Somwang, Natthapong Prapakarn, Nuttapong Wongbubpa</i>	90-105
การออกแบบและพัฒนาตู้อบแห้งพลังแสงอาทิตย์แบบไฮบริดด้วยระบบลมร้อนแห้งควบคู่การควบแน่นไอน้ำ สำหรับการอบแห้งสมุนไพรไทย (Design and Development of A Hybrid Solar Drying Chamber with Dry Hot Air and Integrated Moisture Condensation for Thai Herb Dehydration) <i>Samit Preechayan, Seksid Kamolchai, Ekkawit Wangkanklang</i>	106-120
ปฏิวัติการพยากรณ์อายุขัยและความเสียหายสะสมของสายเมนหลักทองแดง XLPE ด้วย Multiphysics Simulation และ AI อัจฉริยะ: กรณีศึกษา อาคารเรียนช่างอุตสาหกรรม มทร.ศรีวิชัย (Revolutionizing Lifespan Prediction and Cumulative Damage Assessment of XLPE Copper Main Cables Using Multiphysics Simulation and Intelligent AI: A Case Study of the Industrial Technician School Building, RMUTSV) <i>Santi Karisan, Suporn Rittipukdee, Santiphong Khongkaeo, Sittisak Rojchaya</i>	121-137
การพัฒนาบรรดผักอัตโนมัติด้วยการแบ่งรดทีละส่วนโดยใช้ปั๊มน้ำโซลาร์เซลล์ (Development of An Automatically Vegetables Irrigation Based on Partitioned Areas Using Solar-powered Pump) <i>Sangphet Ngonchaiyaphum, Santi Chuannok</i>	138-153



สารบัญ (ต่อ)

บทความวิจัย (ต่อ)	หน้า
แนวทางการเป็นกลางทางคาร์บอนของสถานศึกษา: กรณีศึกษามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล รัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล (Guidelines for Being Carbon Neutral for Educational Institutions: A Case Study of Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Wang Klai Kangwon Campus) <i>Netchanok Pringsakul, Pongsakorn Kachapongkun</i>	154-169
ผลของการควบคุมอัตราการไหลของอากาศต่อประสิทธิภาพของเตาถลุงแร่เหล็กแบบเผาตรงที่ติดตั้ง อุปกรณ์อุ่นอากาศ (Effect of Air Flow Rate Control on the Performance of a Direct Reduction Ironmaking Furnace with an Air Preheater) <i>Pairote Nathiang</i>	170-185
วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเพื่อการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบหลายรุ่นการผลิตที่มี หุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานและคำนึงถึงค่าคะแนนความเสี่ยงด้านการยศาสตร์เฉลี่ยถ่วงน้ำหนักตามเวลา (An Optimization Approach for Solving a Mixed Model Assembly Line Balancing Problem with Collaborative Robots (Cobots) by Considering Time-weighted Average (TWA) Ergonomic Risk Score) <i>Tanupat Aksornprom, Krisada Asawarungsaengkul</i>	186-208
การศึกษาลดเวลาการรอคอยที่แผนกผู้ป่วยนอกโรงพยาบาลกรณีศึกษา (Reducing Waiting Times for Outpatient Services: A Case Study of Hospital Operations) <i>Chatchawan Chinvigai, Jamon Wasuratmanee, Atipun Loymuangklang, Prapapat Chandaeng, Songwit Srijunruk</i>	209-228
A Comparative Analysis of Supervised Machine Learning Algorithms for Fault Prediction in Automotive Suspension Systems <i>Pachara Juyploy, Withit Chatlatanagulchai</i>	229-240
ข้อมูลสำหรับผู้เขียนและการเตรียมต้นฉบับ (Authors Guideline and Manuscript Preparation)	S1
แบบฟอร์มนำส่งบทความ (Manuscript Submission Form)	S2

การพัฒนาเครื่องทำน้ำร้อนระบบไฮบริด

ชาญจิต วรรณหุรักษ์ *

สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้า, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: chanchajit.w@dru.ac.th

วันที่รับบทความ: 2 พฤษภาคม 2567; วันที่ทบทวนบทความ: 17 กรกฎาคม 2568; วันที่ตอบรับบทความ: 6 สิงหาคม 2568

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 8 ธันวาคม 2568

บทคัดย่อ: การใช้ระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์มีลักษณะแตกต่างจากระบบพลังงานทดแทนชนิดอื่น ๆ เนื่องจากค่ารังสีแต่ละชั่วโมงมีค่าไม่คงที่และค่ารังสีอาทิตย์ในแต่ละเดือนก็แตกต่างกัน ดังนั้น จำนวนชั่วโมงการทำงานของระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์จึงถูกจำกัดอยู่ที่ประมาณ 4-6 h/d ในช่วงเวลาหลัง 10.00 น. เป็นต้นไป วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ คือเพื่อพัฒนาเครื่องทำน้ำร้อนระบบไฮบริด ศึกษาอุณหภูมิของน้ำร้อนที่นำไปใช้และศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ โดยเครื่องทำน้ำร้อนระบบไฮบริดที่สร้างขึ้นจะใช้แผงรับรังสีอาทิตย์แบบ แผ่นเรียบ ประกอบด้วยส่วนประกอบหลักสองส่วน คือ แผงรับรังสีอาทิตย์และถังเก็บน้ำร้อน เครื่องทำน้ำร้อนระบบไฮบริดใช้การไหลเวียนของน้ำระหว่างแผงรับรังสีอาทิตย์และถังเก็บน้ำร้อน แผงรับรังสีอาทิตย์มีขนาด 2×1 ตารางเมตร ทำมุมเอียง 15 องศา และ ส่วนถังเก็บน้ำร้อนมีขนาด 40 ลิตร มีความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ในการทดลอง 900 W/m^2 ติดตั้งใช้งานที่ชมรมผู้สูงอายุตำบลบางยอ องค์การบริหารส่วนตำบลบางยอ จังหวัดสมุทรปราการ ในกิจกรรมนันทนาการและการใช้เวลาว่างสำหรับผู้สูงอายุ (การแช่เท้าด้วยสมุนไพร) ทดลองในวันที่ 8 เดือนเมษายน 2568 และเริ่มสะสมความร้อนในเวลา 12.00 น. เมื่อเวลาผ่านไป 1 h (Δt) อุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อนมีค่า 59.77°C กรณีไม่มีแหล่งความร้อนเสริมและกรณีมีแหล่งความร้อนเสริมสามารถเพิ่มอุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อนได้สูงสุด 154.06°C การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์เพื่อหาระยะเวลาคืนทุนของเครื่องทำน้ำร้อนระบบไฮบริด พบว่ามีระยะเวลาคืนทุนประมาณ 6.6 ปี

คำสำคัญ: เครื่องทำน้ำร้อน; ระบบไฮบริด; ถังเก็บรังสีอาทิตย์

Development of Hybrid Water Heaters

Chanchajit Wannurak*

Division of Electrical Technology, Faculty of Science and Technology, Dhonburi Rajabhat University

* Corresponding author, E-mail: Chanchajit.w@dru.ac.th

Received: 2 May 2024; Revised: 17 July 2025; Accepted: 6 August 2025

Online Published: 8 December 2025

Abstract: Solar water heating systems differ from other renewable energy systems in that their monthly solar radiation values and hourly radiation values fluctuate. As a result, after 10:00 a.m., the solar water heating system's operating hours are restricted to roughly 4-6 hours per day. This research's primary goals are to create a hybrid water heater, investigate the temperature of the hot water used, and assess its financial worth. The flat-plate solar collector used in the developed hybrid water heater is made up of two primary parts: a hot water tank and a solar collector. Water is circulated between the hot water tank and the solar collector in the hybrid water heater. The 40-liter hot water tank and the 2x1-square-meter solar collector are angled 15 degrees. The experiment's solar radiation intensity is 900 W/m². It is set up for senior citizens' leisure and recreational activities in the Bang Yo Subdistrict Elderly Club, Bang Yo Subdistrict Administrative Organization, Samut Prakan Province (Herbal foot soaking). On April 8, 2025, the experiment was carried out, and at noon, it began to accumulate heat. After one hour (" Δt "), the water temperature in the hot water tank was 59.77 °C in the absence of an additional heat source, and it could reach a maximum of 154.06 °C in the presence of an extra heat source. According to the economic research used to calculate the hybrid water heater's payback period, it would take about 6.6 years.

Keywords: Water Heater; Hybrid System; Solar Collector

1. บทนำ

ปัจจุบันการใช้พลังงานเป็นพลังงานทดแทนประสบความสำเร็จอย่างมากในการนำเอาความร้อนที่ได้จากแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ โดยเฉพาะการพัฒนาเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Solar Collector) เป็นอุปกรณ์หลักของระบบ เพื่อผลิตน้ำร้อนเก็บไว้ในถังเก็บน้ำร้อน (Hot Water Tank) เช่น R. Tang และ G. Li [1] ได้ศึกษาตัวเก็บรังสีอาทิตย์และระบบทำน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์โดยวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนภายในตัวเก็บรังสีอาทิตย์แผ่นเรียบ ประการที่สองนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณรังสีสะสมบนหลอดเดียวของแผงโซลาร์เซลล์ และศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์โครงสร้างและการติดตั้งต่อประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ขั้นตอนสุดท้ายจะนำเสนอการออกแบบระบบทำน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และการใช้งานในอาคารและเปรียบเทียบทางเศรษฐกิจระหว่างเครื่องทำน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ เครื่องทำน้ำร้อนไฟฟ้า และเครื่องทำน้ำร้อนที่ใช้ก๊าซเป็นเชื้อเพลิงสำหรับการจ่ายน้ำร้อนในอาคารในคูหนิง S. Rahman และคณะวิจัย [2] ได้ศึกษาประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ (FPSC) โดยเน้นที่ประสิทธิภาพเชิงความร้อน ซึ่งแตกต่างจากนาโน ฟลูอิด Al_2O_3 และ TiO_2 ที่ได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวาง Si_3N_4 มีค่าการนำความร้อนที่เหนือกว่า ($10\text{--}20\text{ W/m}\cdot\text{K}$) และความหนาแน่นต่ำกว่า ($2.6\text{--}3.2\text{ g/cm}^3$) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่านาโนฟลูอิด Si_3N_4 ที่เศษส่วนปริมาตร 0.09% สามารถปรับปรุงค่าการนำความร้อนได้ 33% และเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนได้ 8% เมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ใช้ฐานน้ำทั่วไป การผสมผสาน Si_3N_4 ช่วยลดพื้นที่ตัวเก็บความ

ร้อนที่จำเป็นลง 6.1% ทำให้ประหยัดต้นทุนและออกแบบระบบได้ การวิเคราะห์วงจรชีวิตเผยให้เห็นว่าการปล่อยคาร์บอนลดลง 12% และระยะเวลาคืนทุนสั้นลง 15% (5.5 ปี) นอกจากนี้ K. Dumeedae และคณะวิจัย [3] S. Poomsawat และ W. Poomsawat [4] ได้ศึกษาเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมไฟฟ้าใช้หลักการเทอร์โมไฮโฟน N.T. Alwan และคณะวิจัย [5] ได้ประเมินประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์: การทดลองและการวิจัยเชิงทฤษฎี R. Chargui และคณะวิจัย [6] ได้ศึกษาระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบไฮบริดใหม่ที่ผสานกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก: การวิเคราะห์เชิงทดลองและเชิงตัวเลข A. Faddouli และคณะวิจัย [7] ได้ศึกษาเปรียบเทียบระหว่างเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบปกติกับระบบไฮบริดเทอร์มอล/เทอร์โมอิเล็กทริกอัจฉริยะ G. Li และ Y. Du [8] ได้ศึกษาการตรวจสอบประสิทธิภาพและผลประโยชน์ทางเศรษฐกิจของกลยุทธ์การควบคุมใหม่สำหรับระบบไฮบริดเครื่องทำน้ำร้อนที่ใช้ปั๊มความร้อนและก๊าซ

สำหรับการใช้ระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ มีลักษณะแตกต่างจากระบบพลังงานทดแทนชนิดอื่น ๆ เนื่องจากค่ารังสีแต่ละชั่วโมงมีค่าไม่คงที่และค่ารังสีอาทิตย์ในแต่ละเดือนก็แตกต่างกันอีกด้วย ดังนั้นจำนวนชั่วโมงการทำงานของระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์จึงถูกจำกัดอยู่ที่ประมาณ 4-6 h/d ในช่วงเวลาหลัง 10.00 น. เป็นต้นไป ตามแนวโน้มค่ารังสีอาทิตย์ที่เพิ่มสูงขึ้นและสามารถผลิตน้ำร้อนอุณหภูมิสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ [9] จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น ระบบการผลิตน้ำร้อนจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์เป็นที่น่าสนใจรวมถึงการพัฒนาเพื่อผลิตออกมา

เชิงพาณิชย์ นอกจากนี้ยังเป็นการใช้ประโยชน์จากพลังงานธรรมชาติ ดังนั้นการค้นคว้าและวิจัยเรื่องการพัฒนาเครื่องทำน้ำร้อนระบบไฮบริดจึงมีความจำเป็นเพื่อเป็นการเพิ่มศักยภาพจำนวนชั่วโมงการทำงานของระบบผลิตน้ำร้อนดังกล่าว จากงานวิจัยการพัฒนาเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบของผู้วิจัยเอง [10] ที่ทำน้ำร้อนได้โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวนั้น นำมาพัฒนาใหม่ให้ดีขึ้นโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานไฟฟ้า (ติดตั้งฮีทเตอร์ไฟฟ้าที่ถังเก็บน้ำร้อน) จุดมุ่งหมายเพื่อพัฒนาสร้างเครื่องทำน้ำร้อนระบบไฮบริด ศึกษาอุณหภูมิของน้ำร้อนที่นำไปใช้และศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย/ทดลอง

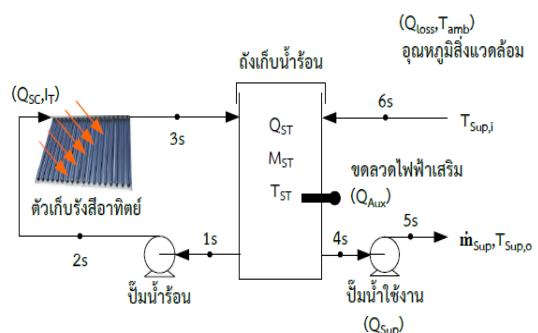
2.1 การเตรียมอุปกรณ์การทดลอง

ในการพัฒนาเครื่องทำน้ำร้อนระบบไฮบริดผู้วิจัยได้นำตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบเรียบ (Flat Plate Collector) มาปรับปรุง โดยเครื่องทำน้ำร้อนระบบไฮบริดเป็นแบบไหลบังคับ ดังแสดงรูปที่ 1 มีหลักการทำงาน คือ น้ำในถังเก็บน้ำร้อนถูกจ่ายไปยังตัวเก็บรังสีอาทิตย์โดยปั๊มน้ำจากจุด 1s ไปยังจุด 2s เพื่อรับพลังงานความร้อนจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ และมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นที่จุด 3s จากนั้นจะถูกนำไปเก็บไว้ยังถังเก็บน้ำร้อนเพื่อสะสมความร้อน หรือเพิ่มอุณหภูมิในถังเก็บน้ำร้อนให้สูงขึ้นจนกระทั่งอุณหภูมิในถังเพียงพอต่อการใช้งาน จะถูกจ่ายออกจากถังเก็บน้ำร้อนที่จุด 4s โดยปั๊มน้ำ เพื่อใช้ประโยชน์ต่อไป ที่จุด 5s น้ำร้อนเมื่อถูกนำไปใช้งานโดยการแลกเปลี่ยนความร้อนจะมีอุณหภูมิลดลงและถูก

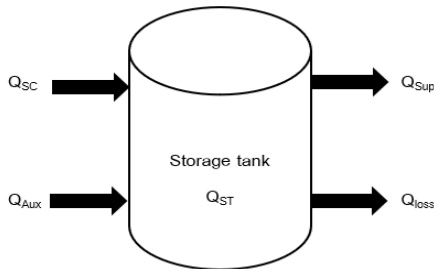
นำกลับมารับความร้อนอีกครั้งที่จุด 6s โดยจ่ายกลับไปยังถังเก็บน้ำร้อน ในกรณีที่น้ำร้อนถูกนำไปใช้งานโดยตรง จะทำการเติมน้ำเย็นเข้าสู่ถังเก็บน้ำร้อนที่จุด 6s ซึ่งทำให้น้ำในถังเก็บน้ำร้อนมีอุณหภูมิลดลงค่อนข้างมาก เนื่องจากน้ำที่นำมาเติมมักจะมีอุณหภูมิต่ำ โดยตัวอย่างการใช้ความร้อนจากระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบสัมผัสตรง อาทิเช่น การนำไปใช้ในห้องอาบน้ำ เป็นต้น [9]

กรณีที่ระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ไม่สามารถเพิ่มอุณหภูมิได้ตามความต้องการของการใช้งาน เช่น กรณีฤดูฝนที่มีฝนตกและมีเมฆปกคลุมค่อนข้างมาก หรือต้องการเพิ่มชั่วโมงการใช้งานของน้ำร้อน เป็นต้น ระบบผลิตความร้อนเสริม จะถูกนำมาใช้งานร่วมกับระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ เช่น การเพิ่มขดลวดไฟฟ้า (Electrical Heater) เป็นต้น

เมื่อพิจารณาที่ถังเก็บน้ำร้อนของระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำสามารถหาได้จากการสมดุลพลังงาน โดยสมมติให้ถังเก็บน้ำมีอุณหภูมิมีสมาเสมอ ไม่มีการแยกชั้นของอุณหภูมิของของไหล และไม่มีการสะสมพลังงานในตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ดังแสดงรูปที่ 2



รูปที่ 1 ผังการทำงานของเครื่องทำน้ำร้อนระบบไฮบริด



รูปที่ 2 สมดุลพลังงานของถังเก็บน้ำระบบผลิตน้ำร้อน

จากรูปที่ 2 สมการทางคณิตศาสตร์ของถังเก็บน้ำระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ จากการพิจารณาสมดุลพลังงานทางความร้อนของถังเก็บน้ำ โดยมีพลังงานความร้อนเข้าสู่ถังเก็บน้ำ คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ได้รับจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Q_{SC}) และอัตราการให้ความร้อนจากระบบผลิตความร้อนเสริม (Q_{AUX}) ซึ่งเท่ากับผลรวมของอัตราการสะสมความร้อนในถังเก็บน้ำร้อน (Q_{ST}) อัตราการสูญเสียของถังเก็บน้ำร้อน (Q_{LOSS}) และพลังงานความร้อนออกจากถังเก็บน้ำ คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนของน้ำร้อนที่นำไปใช้งาน (Q_{SUP}) ดังแสดงในสมการ (1) และ (2) [9]

เมื่อพิจารณาการนำน้ำไปใช้ประโยชน์ สามารถคำนวณหาอุณหภูมิน้ำภายในถังเก็บน้ำได้จากสมการ (3) และ (4)

2.2 ขั้นตอนการทดลอง

1. หาค่ารังสีอาทิตย์ โดยทั่วไปนิยมใช้วันที่ที่เป็นตัวแทนของเดือนในการคำนวณ ซึ่งการหาวันที่ตัวแทนของเดือนนั้นทำได้โดยการคำนวณค่ารังสีอาทิตย์เมื่ออยู่นอกชั้นบรรยากาศของโลก (H_0) ในแต่ละวันของเดือนนั้น ๆ แล้วหาค่าเฉลี่ยของเดือนนั้นใกล้เคียงกับวันใดมากที่สุด วันนั้นก็จะเป็วันที่ตัวแทนของเดือน สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1

$$Q_{SC} + Q_{AUX} = Q_{ST} + Q_{LOSS} + Q_{SUP} \quad (1)$$

$$Q_{SC} + Q_{AUX} = \frac{M_{ST} C_{P_{ST}} T_{ST}^{t+\Delta t} - T_{ST}^t}{\Delta t} + (UA)_{ST} (T_{ST}^t - T_{amb}) + \dot{m}_{sup} C_{p_{bulk, Sup}} (T_{Sup, o} - T_{Sup, i}) \quad (2)$$

เมื่อ $T_{ST}^{t+\Delta t}$ = อุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำเมื่อเวลาเปลี่ยนไป ($^{\circ}C$)

T_{ST}^t = อุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำในช่วงเวลาที่พิจารณา ($^{\circ}C$)

Δt = ผลต่างของเวลา (s)

M_{ST} = มวลของน้ำในถังเก็บน้ำ (kg)

$C_{P_{ST}}$ = ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำในถังเก็บน้ำ (kJ/kgK)

$\dot{m}_{sup}$ = อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำที่นำไปใช้งาน (kg/s)

$T_{Sup, o}$ = อุณหภูมิน้ำร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์ ($^{\circ}C$)

$T_{Sup, i}$ = อุณหภูมิน้ำเย็นที่ไหลเข้าสู่ถังเก็บน้ำ ($^{\circ}C$)

$$T_{ST}^{t+\Delta t} = T_{ST}^t + (\Delta t / M_{ST} C_{P_{ST}}) [Q_{SC} + Q_{AUX} - Q_{LOSS} - Q_{SUP}] \quad (3)$$

$$\text{หรือ } T_{ST}^{t+\Delta t} = T_{ST}^t + (\Delta t / M_{ST} C_{P_{ST}}) [A_{SC} [F_R (\tau \alpha)_e I_T - F_R U_L (T_{f, i} - T_{amb})] + Q_{AUX} - (UA)_{ST} (T_{ST}^t - T_{amb}) - \dot{m}_{sup} C_{p_{bulk, Sup}} (T_{Sup, o} - T_{Sup, i})] \quad (4)$$

ตารางที่ 1 วันที่เป็นตัวแทนของแต่ละเดือน [9]

เดือน	ม.ค	ก.พ	มี.ค	เม.ย	พ.ค	มิ.ย
วันที่	17	16	16	15	15	11
เดือน	ก.ค	ส.ค	ก.ย	ต.ค	พ.ย	ธ.ค
วันที่	17	16	15	15	14	10

2. ค่ารังสีอาทิตย์เมื่ออยู่นอกชั้นบรรยากาศของโลกในแต่ละวัน อันเป็นผลมาจากพระอาทิตย์ขึ้นจนถึงพระอาทิตย์ตก สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$H_0 = G_{SC} [24 \times 3,600 / \pi] [1 + 0.033 \cos(360n/365)]$$

$$\times [\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + (2\pi \omega_s / 360) \sin \phi \sin \delta] \quad (5)$$

$$\text{โดยที่ } \delta = 23.45 \sin[(360(284+n))/365] \quad (6)$$

$$\omega_s = \cos^{-1} [-\tan \phi \tan \delta] \quad (7)$$

เมื่อ H_0 = ค่ารังสีอาทิตย์เมื่ออยู่นอกชั้นบรรยากาศโลก (MJ/m².d)

G_{SC} = ค่าคงที่สุริยะ (1,372 W/m²) [9]

ϕ = มุมละติจูด

δ = มุมเดคลิเนชัน

ω_s = มุมชั่วโมงที่พระอาทิตย์ตกดิน

3. รังสีอาทิตย์ที่ตกบนพื้นโลกจะประกอบด้วยรังสีตรงและรังสีกระจาย สำหรับประเทศไทยค่ารังสีอาทิตย์กระจายเฉลี่ย พิจารณาค่ารังสีอาทิตย์รายวันที่เฉลี่ยในแต่ละเดือน จากข้อมูลทางสถิติของประเทศไทยสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$H_d/H_0 = -4.6408 + 26.5495(H/H_0) - 28.3422(H/H_0)^2 - 31.4546(H/H_0)^3 + 46.4421(H/H_0)^4 \quad (8)$$

เมื่อ H_0 = รังสีกระจายรายวันในแนวระดับ (MJ/m².d)

H = รังสีรวมรายวันในแนวระดับ (MJ/m².d)

4. ค่ารังสีรวมรายชั่วโมงในแนวระดับสามารถคำนวณได้ โดยค่าอัตราส่วนรังสีรวมรายชั่วโมงต่อรังสีรวมรายวัน ดังสมการ (9)

$$r_t = \frac{I}{H} = \frac{\pi}{24} \times \frac{(a+b \cos \omega)(\cos \omega - \cos \omega_s)}{\sin \omega_s - \frac{2\pi \omega_s \cos \omega_s}{360}} \quad (9)$$

$$\text{โดยที่ } a = a_1 + a_2 \sin(\omega_s - 60^\circ) \quad (10)$$

$$b = b_1 + b_2 \sin(\omega_s - 60^\circ) \quad (11)$$

เมื่อ I = รังสีรวมรายชั่วโมงในแนวระดับ (MJ/m².h)

ω = มุมชั่วโมง กำหนดให้เที่ยงวันเวลาสุริยะมีค่าเป็นศูนย์และให้แต่ละชั่วโมงมีค่าเท่ากับ 15° โดยในตอนเช้ามีค่าเป็นลบและตอนบ่ายมีค่าเป็นบวก

a, b = ค่าคงที่ที่สถานีต่างๆ ของประเทศไทย

ตารางที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์ a และ b สถานีกรุงเทพ [11]

สถานี	a_1	a_2	b_1	b_2
กรุงเทพฯ	0.792	-0.250	0.189	0.471

5. คำนวณค่ารังสีอาทิตย์ เวลาที่ใช้ในการคำนวณต้องเป็นเวลาสุริยะ ซึ่งแตกต่างจากเวลามาตรฐานท้องถิ่น สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างเวลามาตรฐานท้องถิ่นและเวลาสุริยะ หาได้จากสมการ (12)

$$\text{Solar time} - \text{Standard time} = 4(L_{std} - L_{loc}) + E/60 \quad (12)$$

$$\text{โดยที่ } E = 9.87 \sin(2B) - 7.53 \cos(B) - 1.5 \sin(B) \quad (13)$$

$$B = 360(n-1) / 365 \quad (14)$$

เมื่อ L_{std} = ตำแหน่งเส้นลองจิจูดที่ใช้คำนวณเวลามาตรฐานท้องถิ่น

L_{loc} = ตำแหน่งเส้นลองจิจูดของบริเวณที่พิจารณา

E = สมการเวลา

n = วันที่ของปีหรือวันจูเลียน

6. ค่ารังสีกระจายรายชั่วโมงในแนวระดับสามารถคำนวณได้ โดยค่าอัตราส่วนของรังสีกระจายรายชั่วโมงต่อค่ารังสีกระจายรายวัน ดังสมการ (15)

$$r_d = \frac{I_d}{H_d} = \frac{\pi}{24} \times \frac{[\cos(\omega) - \cos(\omega_s)]}{[\sin(\omega_s) - \frac{2\pi\omega_s \cos(\omega_s)}{360}]} \quad (15)$$

เมื่อทราบค่ารังสีรวมและรังสีกระจายรายชั่วโมงใน
แนวระดับจากสมการข้างต้น ดังนั้นสามารถคำนวณหาค่ารังสี
ตรงรายชั่วโมงในแนวระดับ (I_b) ได้ดังสมการ (16)

$$I_b = I - I_d \quad (16)$$

เมื่อ I_b = รังสีตรงรายชั่วโมงในแนวระดับ (MJ/m².h)

I_d = รังสีกระจายรายชั่วโมงในแนวระดับ
(MJ/m².h)

7. การใช้งานจริงต้องวางตัวเก็บรังสีอาทิตย์ให้ทำมุม
เอียงกับแนวระดับ เพื่อให้สามารถรับรังสีอาทิตย์ได้ดีตลอด
ทั้งปี ซึ่งจากการศึกษาพบว่ามุมเอียงดีที่สุดคือ เอียงเท่ากับมุม
ละติจูดของพื้นที่ที่ทำการติดตั้ง ดังนั้นสามารถหาค่ารังสี
อาทิตย์ที่ตกบนระนาบในแนวเอียงได้ดังสมการ (17)

$$I_T = I_b R_b + I_d [1 + \cos(\beta)] / 2 \quad (17)$$

นอกจากนี้รังสีอาทิตย์ที่กระทบโดยตรงกับตัวเก็บรังสี
อาทิตย์ที่ทำมุมเอียงกับแนวระดับแล้ว ยังมีรังสีอาทิตย์
อีกส่วนหนึ่งที่สะท้อนมาจากสิ่งของต่างๆ โดยรอบของตัว
เก็บรังสีอาทิตย์ ดังนั้นค่ารังสีอาทิตย์ที่ตกลงบนตัวเก็บ
รังสีอาทิตย์จะคำนวณได้จากสมการ (18)

$$I_T = I_b R_b + I_d [1 + \cos(\beta)] / 2 + \rho_g (I_b + I_d) [1 - \cos(\beta)] / 2 \quad (18)$$

โดยที่ $R_b = \cos(\theta) / \cos(\theta_z)$ (19)

$$\cos(\theta) = \sin(\delta) \sin(\phi) \cos(\beta)$$

$$- \sin(\delta) \cos(\phi) \sin(\beta) \cos(\gamma)$$

$$+ \cos(\delta) \cos(\phi) \cos(\beta) \cos(\omega)$$

$$+ \cos(\delta) \sin(\phi) \sin(\beta) \cos(\gamma) \cos(\omega)$$

$$+ \cos(\delta) \sin(\beta) \sin(\gamma) \sin(\omega) \quad (20)$$

$$\cos(\theta_z) = \sin(\delta) \sin(\phi) + \cos(\delta) \cos(\phi) \cos(\omega) \quad (21)$$

เมื่อ I_T = รังสีรวมรายชั่วโมงที่ตกกระทบตั้งฉากบน ระนาบ
เอียง (MJ/m².h)

β = มุมที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์เอียงทำมุมกับแนวระดับ (°)

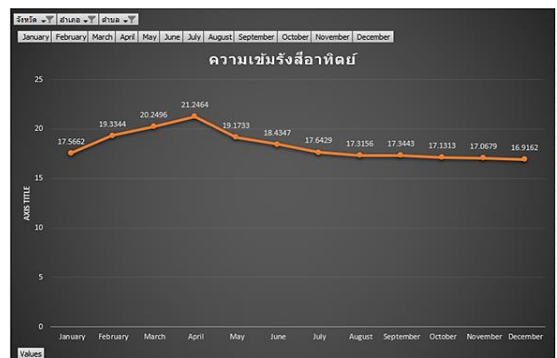
θ = มุมที่รังสีตรงตกกระทบกับแกนที่ตั้งฉากบนระนาบใน
แนวเอียง (°)

θ_z = มุมที่รังสีตรงตกกระทบกับแกนที่ตั้งฉากบนระนาบ
ในแนวระดับ (°)

ρ_g = ตัวประกอบการสะท้อนของรังสีอาทิตย์ที่มาจาก
สิ่งแวดล้อม มีค่าประมาณ 0.8 เมื่อวางบนพื้นคอนกรีต

γ = มุมเอียงของระนาบเอียงมีค่าเป็นศูนย์เมื่อตัวเก็บ
รังสีอาทิตย์หันไปทางทิศใต้ มีค่าเป็นลบในทิศตะวันออก
และมีค่าเป็นบวกในทิศตะวันตก

การคำนวณค่ารังสีอาทิตย์รายชั่วโมงที่ตกบนระนาบ
เอียงของจังหวัดสมุทรปราการ ตำบลบางยอ ซึ่งคำนวณ
จากโปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบผลิตน้ำ
ร้อนพลังงานแสงอาทิตย์[12] ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ค่ารังสีรวมรายวันในแนวระดับตำบลบางยอ

8. เมื่อพิจารณาตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่สามารถคงตัวที่ขณะใด ๆ จะพบว่าค่ารังสีที่ถูกดูดกลืนมีค่าเท่ากับค่าอัตราความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์รวมกับค่าอัตราความร้อนที่สูญเสียจากผิวดูดรังสี แสดงในสมการ (22) และ (23)

$$Q_{\text{Solar}} = Q_{\text{sc}} + Q_{\text{loss}} \quad (22)$$

โดยที่

$$(\tau\alpha)_e I_T A_{\text{SC}} = \dot{m}_f C_p (T_{f,i} - T_{f,i}) + U_L A_{\text{SC}} (T_p - T_{\text{amb}}) \quad (23)$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ได้รับจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์สามารถเขียนได้เป็น ดังแสดงในสมการที่ (24)

$$Q_{\text{SC}} = (\tau\alpha)_e I_T A_{\text{SC}} - U_L A_{\text{SC}} (T_p - T_{\text{amb}}) \quad (24)$$

เมื่อ Q_{SC} = อัตราความร้อนที่ได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (W)

$(\tau\alpha)_e$ = ประสิทธิภาพเชิงแสงของตัวเก็บรังสีอาทิตย์

I_T = รังสีรวมรายชั่วโมงที่ตกกระทบตั้งฉากบนระนาบเอียง (W/m^2)

A_{SC} = พื้นที่ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (m^2)

U_L = ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวมจากผิวดูดรังสีอาทิตย์ ($\text{W/m}^2.\text{K}$)

T_p = อุณหภูมิผิวตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ($^{\circ}\text{C}$)

T_{amb} = อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ($^{\circ}\text{C}$)

$\dot{m}_f$ = อัตราการไหลของน้ำผ่านตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (kg/s)

C_p = ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (J/kg.K)

$T_{f,i}$ = อุณหภูมิของน้ำเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ($^{\circ}\text{C}$)

$T_{f,o}$ = อุณหภูมิของน้ำออกจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ($^{\circ}\text{C}$)

9. ในทางปฏิบัติอุณหภูมิผิวตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (T_p) วัดได้ค่อนข้างยาก ดังนั้นจึงปรับค่าสมการดังกล่าวโดยกำหนด ค่าตัวประกอบการดึงความร้อน (Heat Removal Factor, F_R) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ

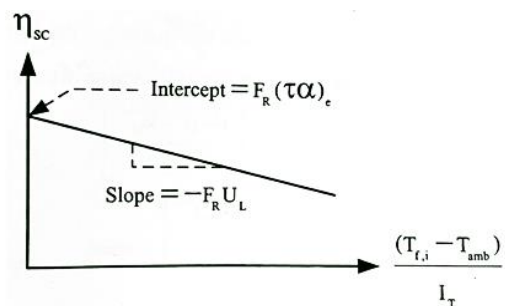
น้ำที่เข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ดังแสดงในสมการที่ (25)

$$Q_{\text{SC}} = F_R (\tau\alpha)_e I_T A_{\text{SC}} - F_R U_L A_{\text{SC}} (T_{f,i} - T_{\text{amb}}) \quad (25)$$

เมื่อ F_R ค่าตัวประกอบการดึงความร้อนเป็นสัดส่วนของความร้อนที่ได้จริงจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ต่อพลังงานความร้อนที่ถูกดูดกลืนโดยตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ค่า F_R มีลักษณะคล้ายกับค่าประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์เนื่องจากเป็นค่าอัตราส่วนของพลังงานความร้อนจริงต่อพลังงานความร้อนสูงสุดที่เป็นไปได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ดังนั้นประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (η_{SC}) ในการนำความร้อนไปใช้ประโยชน์ ดังแสดงในสมการที่ (26)

$$\eta_{\text{SC}} = Q_{\text{SC}} / I_T A_{\text{SC}} = F_R (\tau\alpha)_e - [F_R U_L (T_{f,i} - T_{\text{amb}}) / I_T] \quad (26)$$

อนึ่งหากพิจารณาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างค่า η_{SC} และ $(T_{f,i} - T_{\text{amb}}) / I_T$ โดยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นจะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวอยู่ในรูปสมการสมรรถนะเส้นตรง $Y = -aX + b$ โดยค่า $-a = -F_R U_L$ คือความชัน และ $b = F_R (\tau\alpha)_e$ คือค่าจุดตัดแกน η_{SC} ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 สมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์

ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีค่า $F_R(T\alpha)_e$ สูง แสดงว่าการส่งผ่านค่าดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีค่าสูง ส่วนค่า $-F_R U_L$ แสดงค่าการสูญเสียความร้อน ดังนั้นหากค่าดังกล่าวมีค่าสูง แสดงว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ป้องกันความร้อนสูญเสียได้ไม่ดี หนึ่งค่าตัวแปรทั้ง 2 นี้ถือเป็นตัวแปรสำคัญในการเปรียบเทียบสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ดังแสดงตัวอย่างของ ค่าตัวแปรทั้ง 2 ในตารางที่ 3

10. ประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ โดยคำนวณระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) ของเครื่องทำน้ำร้อนระบบไฮบริด ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (27) [12]

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = \frac{\text{เงินสดจ่ายเงินลงทุนสุทธิเมื่อเริ่มโครงการ}}{\text{เงินสดรับสุทธิรายเดือน}} \quad (27)$$

3. ผลการทดลอง

3.1 ผลการพัฒนาเครื่องทำน้ำร้อนระบบไฮบริด

ตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีขนาดกว้าง 1 เมตร ยาว 2 เมตร สูง 0.15 เมตร ด้านล่างเป็นโฟมหนา 50 มิลลิเมตร ชั้นที่สองรองทับฉนวนกันความร้อนและแผ่นสังกะสี ท่อดูดรังสีภายในติดเชื่อมต่อกับท่อทองแดงขนาด 1/2 นิ้ว ยาว 2 เมตร กว้าง 1 เมตร จำนวน 30 ท่อ ต่อเข้ากับท่อทองแดงนำเข้าน้ำออกขนาด 7/8 นิ้ว จำนวน 2 ท่อ ระยะห่าง 5 เซนติเมตร แบบขนานกัน ฟันสีดำด้านบนปิดด้วยกระจกใสหนา 5 มิลลิเมตร ระยะห่างท่อดูดรังสีกับกระจก 100 มิลลิเมตร ใช้ถังเก็บความร้อน 40 ลิตร 1 ใบ ภายในติดตั้งฮีตเตอร์ไฟฟ้า ขนาด 2,200 วัตต์ จำนวน 2 ตัว และเทอร์โมคัปเปิลชนิด K โครงสร้างฐานวางตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีขนาดกว้าง 1.20 เมตร ยาว 2.50 เมตร สูง 1.27 เมตรทำมุม 15 องศา

ตารางที่ 3 คุณลักษณะตัวเก็บรังสีอาทิตย์ [9]

คุณลักษณะ	แบบแผ่นเรียบ
พื้นที่ (Gross area, m ²)	2.00
ค่าตัวแปรประสิทธิภาพ	
$-F_R U_L \text{ W/m}^2\text{-K}$	10.370
$-F_R(T\alpha)_e$	0.802

ติดตั้งปั้มน้ำขนาด 450 W จำนวน 2 ตัวที่โครงสร้างสำหรับไหลวนระบบภายในตัวเก็บรังสีอาทิตย์ 1 ตัว และทางออกของถังเก็บความร้อน 1 ตัว เพื่อนำน้ำร้อนไปใช้ ติดตั้งเครื่องวัดอัตราการไหลที่ทางออกของน้ำร้อนตัวเก็บรังสีอาทิตย์ กำหนดตำแหน่งวัดอุณหภูมิ 4 จุด คือ 1. ท่อน้ำเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (T_{fi}), 2. ท่อน้ำออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (T_{fo}), 3. อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (T_{amb}) และ 4. ที่ถังเก็บน้ำร้อน (T_{fw}) และติดตั้งตัวควบคุมอุณหภูมิ โซลิดสเตตรีเลย์ และเบรกเกอร์ Mitsubishi MCCBs รุ่น NF30-CS การใช้งานสามารถตั้งอุณหภูมิควบคุมการทำงานของฮีตเตอร์ในการทำความร้อนได้ ทั้งนี้ รายละเอียดการพัฒนาเครื่องทำน้ำร้อนระบบไฮบริดแสดงดังรูปที่ 5-11



รูปที่ 5 ถังเก็บความร้อนภายในติดตั้งฮีตเตอร์ไฟฟ้าและเทอร์โมคัปเปิลชนิด K



รูปที่ 6 ติดตั้งปั้มน้ำที่โครงสร้าง 2 ตัว



รูปที่ 9 เครื่องทำน้ำร้อนระบบไฮบริด



รูปที่ 7 ติดตั้งเครื่องวัดอัตราการไหลที่ทางออกของ
น้ำร้อนตัวเก็บรังสีอาทิตย์



รูปที่ 10 การเตรียมน้ำร้อน



รูปที่ 8 ติดตั้งตัวควบคุมอุณหภูมิ โซลิดสเตตรีเลย์และ
เบรกเกอร์ภายในตู้ไฟ



รูปที่ 11 กิจกรรมการแช่เท้าด้วยน้ำร้อน

3.2 ผลการศึกษาอุณหภูมิของน้ำในเครื่องทำน้ำร้อนระบบไฮบริด

การทดลองโดยการคำนวณอุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อนจากเครื่องทำน้ำร้อนระบบไฮบริดที่ใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบเรียบ ดังแสดงในรูปที่ 8 ติดตั้งใช้งานที่ชมรมผู้สูงอายุตำบลบางยอ องค์การบริหารส่วนตำบลบางยอ จังหวัดสมุทรปราการ กิจกรรมนันทนาการและการใช้เวลาว่างสำหรับผู้สูงอายุ (การแช่เท้าด้วยสมุนไพร) ทดลองในวันที่ 8 เดือนเมษายน 2568 และเริ่มสะสมความร้อนในเวลา 12.00 น. เมื่อเวลาผ่านไป 1 h (Δt) อุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อนมีค่าเท่าไร

กำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นการทำงานดังต่อไปนี้

1. รังสีรวมเฉลี่ยรายวันของเดือนเมษายน (H) เท่ากับ $21.25 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{d}$
2. ค่าคงที่สุริยะ (G_{sc}) เท่ากับ $1,372 \text{ W/m}^2$
3. ละติจูดองค์การบริหารส่วนตำบลบางยอ จังหวัดสมุทรปราการ (ϕ) เท่ากับ 13.68° N หรือ 100.56° E
4. ค่าสัมประสิทธิ์ $a_1 = 0.792$, $a_2 = -0.250$, $b_1 = 0.189$, และ $b_2 = 0.471$ ของจังหวัดสมุทรปราการ (ใช้ค่าเทียบเคียงของจังหวัดกรุงเทพฯ)
5. ตัวเก็บรังสีอาทิตย์หันไปทิศใต้ ($\gamma = 0$)
6. ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ทำมุมกับพื้นดินเท่ากับมุมละติจูดขององค์การบริหารส่วนตำบลบางยอ จังหวัดสมุทรปราการ ($\beta = 13.68^\circ$)
7. ตัวเก็บรังสีอาทิตย์วางอยู่บนพื้นคอนกรีต (ρ_g) เท่ากับ 0.8
8. ตัวเก็บ รังสีอาทิตย์ แบบ เรียบ มี ค่า F_R ($\tau\alpha$)_e เท่ากับ 0.802 และค่า $F_R U_L = 10.370 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

9. ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ ($C_{p_{HW}}$) เท่ากับ $4.2 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$

10. ขนาดถังเก็บน้ำ (M_{st}) เท่ากับ 40 kg

11. อัตราการไหลของน้ำผ่านตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (m_{HW}) เท่ากับ 2.0 L/min

12. สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของถังเก็บน้ำร้อน (UA_{ST}) เท่ากับ $16\text{--}20 \text{ W/}^\circ\text{C}$

13. ขดลวดไฟฟ้าเสริม (Auxiliary Electrical Heater) จำนวน 2 อันมีขนาด (Q_{AUX}) เท่ากับ 4.4 kW

14. อุณหภูมิน้ำเริ่มต้น (T_{HW}) เท่ากับ 30°C

15. อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (T_{amb}) เท่ากับ 28°C

แนวทางการวิเคราะห์

ขั้นตอนที่ 1) หาตัวแทนวันที่ของเดือนเมษายน (n) จากตารางที่ 1 พบว่า ตัวแทนเดือนเมษายนมีค่าเท่ากับ 15

ขั้นตอนที่ 2) คำนวณหามุมเดคลิเนชัน (δ) ที่เป็นมุมระหว่างตำแหน่งของดวงอาทิตย์ที่เที่ยงสุริยะ กระทำกับ แนวระนาบอิกเควเตอร์ หากจากสมการ

$$\delta = 23.45 \sin[(360(284+n))/365]$$

แทนค่า $\delta = 23.45 \times \sin[(360 \times (284+15))/365]$

มุมเดคลิเนชัน - 21.27°

ขั้นตอนที่ 3) คำนวณหามุมชั่วโมงที่พระอาทิตย์ตกดิน (ω_s) ที่เป็นมุมตกกระทบระหว่างค่ารังสีตรงกับพื้นในแนวระดับ

หากจากสมการ $\omega_s = \cos^{-1} [-\tan(\phi)\tan(\delta)]$

แทนค่า $\omega_s = \cos^{-1} [-\tan(13.68)\tan(-21.27)]$

มุมชั่วโมงที่พระอาทิตย์ตกดิน 84.52°



ขั้นตอนที่ 4) คำนวณหาค่ารังสีอาทิตย์เมื่ออยู่นอกชั้นบรรยากาศโลก (H_0) หาจากสมการ

$$H_0 = G_{sc} [24 \times 3,600 / \pi] [1 + 0.033 \cos(360n/365)] \times [\cos(\phi) \cos(\delta) \sin(\omega_s) + (2\pi \omega_s / 360) \sin(\phi) \sin(\delta)]$$

แทนค่า

$$H_0 = 1372 \times [24 \times 3,600 / \pi] [1 + 0.033 \times \cos(360 \times 15 / 365)] \times [\cos(13.68) \cos(-21.27) \sin(84.56) + (2 \times \pi \times 84.56 / 360) \sin(13.68) \sin(-21.27)]$$

ค่ารังสีอาทิตย์เมื่ออยู่นอกชั้นบรรยากาศโลก 29.11 MJ/m²·d

ขั้นตอนที่ 5) คำนวณหาค่ารังสีกระจายรายวัน (H_d) หาจากสมการ $H_d / H_0 = -4.6408 + 26.5495(H/H_0) - 28.3422(H/H_0)^2 - 31.4546(H/H_0)^3 + 46.4421(H/H_0)^4$
แทนค่า $H_d / 29.11 = -4.6408 + 26.5495 \times (21.25/29.11) - 28.3422 \times (21.25/29.11)^2 - 31.4546 \times (21.25/29.11)^3 + 46.4421 \times (21.25/29.11)^4$

ค่ารังสีกระจายรายวัน 17.15 MJ/m²·h

ขั้นตอนที่ 6) คำนวณหาค่ารังสีตรงรายวัน (H_b)

หาจากสมการ $H_b = H - H_d$

แทนค่า $H_b = 21.25 - 17.15$

ค่ารังสีตรงรายวัน 4.1 MJ/m²·h

ขั้นตอนที่ 7) คำนวณหาค่าคงที่ a และ b ที่สถานีต่าง ๆ

ของประเทศไทย หาจากสมการ $a = a_1 + a_2 \sin(\omega_s - 60^\circ)$

แทนค่า $a = 0.792 + [-0.250 \times \sin(84.56 - 60)]$

ค่าคงที่ $a = 0.69$

หาจากสมการ $b = b_1 + b_2 \sin(\omega_s - 60^\circ)$

แทนค่า $b = 0.189 + [0.471 \times \sin(84.56 - 60)]$

ค่าคงที่ $b = 0.39$

ขั้นตอนที่ 8) คำนวณหาเวลาสุริยะ หาจากสมการ

$$B = 360(n-1) / 365$$

แทนค่า $B = 360 \times (15 - 1) / 365$

ค่า $B = 13.81$

หาจากสมการ $E = 9.87 \sin(2B) - 753 \cos(B) - 1.5 \sin(B)$

แทนค่า $E = [9.87 \times \sin(2 \times 13.81)] [7.53 \times \cos(13.81)] - [1.5 \times \sin(13.81)]$

ค่า $E = -3.09 \text{ min}$

หาจากสมการ

$$\text{Solar time} - \text{Standard time} = (4[L_{\text{std}} - L_{\text{loc}}] + E) / 60$$

แทนค่า $\text{Solar time} - 12.00 = (4 \times [105 - 100.56] - 3.09) / 60$

เวลาสุริยะ = 12.24

ขั้นตอนที่ 9) คำนวณหา ω โดยจะมีค่าเท่ากับ 0 ที่เวลาเที่ยงสุริยะ และแต่ละชั่วโมงมีค่าเท่ากับ 15°

หาจากสมการ $\omega_{\text{Solar time}} = \omega_{12.00} \pm (15 \Delta t_{\text{Solar time}} / 60)$

แทนค่า $\omega_{\text{Solar time}} = 0 + [15 \times (24/60)]$

ค่า ω เท่ากับ 6°

ขั้นตอนที่ 10) คำนวณหาค่ารังสีรวมรายชั่วโมง (I)

$$\frac{I}{H} = \frac{\pi}{24} \times \frac{[(a+b) \cos(\omega)] [\cos(\omega) - \cos(\omega_s)]}{\sin(\omega_s) - \frac{2\pi \omega_s \cos(\omega_s)}{360}}$$

แทนค่า

$$\frac{1}{21.25} = \frac{\pi}{24} \times \frac{[(0.69 + 0.39) \times \cos(6)] [\cos(6) - \cos(84.56)]}{\left[\sin(84.56) - \frac{2\pi \times 84.56 \times \cos(84.56)}{360} \right]}$$

ค่ารังสีรวมรายชั่วโมง 3.12 MJ/m²·h



ขั้นตอนที่ 11) คำนวณหาค่ารังสีกระจายรายชั่วโมง (I_d)

$$\text{หาจากสมการ} \quad \frac{I_d}{H_d} = \frac{\pi}{24} \times \frac{[\cos(\omega)] - \cos(\omega_s)}{\sin(\omega_s) \frac{2\pi\omega_s \cos(\omega_s)}{360}}$$

$$\text{แทนค่า} \quad \frac{I_d}{17.15} = \frac{\pi}{24} \times \frac{[\cos(6) - \cos(84.56)]}{\sin(84.56) \frac{2\pi \times 84.56 \times \cos(84.56)}{360}}$$

ค่ารังสีกระจายรายชั่วโมง 2.35 MJ/m²·h

ขั้นตอนที่ 12) คำนวณหาค่ารังสีตรงรายชั่วโมง (I_b)

$$\text{หาจากสมการ} \quad I_b = I - I_d$$

$$\text{แทนค่า} \quad I_b = 3.12 - 2.35$$

ค่ารังสีตรงรายชั่วโมง 0.77 MJ/m²·h

ขั้นตอนที่ 13) คำนวณหาค่า R_b หาจากสมการ

$$\cos(\theta) = \sin(\delta)\sin(\phi)\cos(\beta)$$

$$- \sin(\delta)\cos(\phi)\sin(\beta)\cos(\gamma)$$

$$+ \cos(\delta)\cos(\phi)\cos(\beta)\cos(\omega)$$

$$+ \cos(\delta)\sin(\phi)\sin(\beta)\cos(\gamma)\cos(\omega)$$

$$+ \cos(\delta)\sin(\beta)\sin(\gamma)\sin(\omega)$$

$$\text{แทนค่า} \cos(\theta) = \sin(-21.27)\sin(13.68)\cos(13.68)$$

$$- \sin(-21.27) \cos(13.68) \sin(13.68) \cos(0)$$

$$+ \cos(-21.27) \cos(13.68) \cos(13.68) \cos(6)$$

$$+ \cos(-21.27) \sin(13.68)\sin(13.68)\cos(0)\cos(6)$$

$$+ \cos(-21.27) \sin(13.68) \sin(0) \sin(6)$$

$$\text{ค่า} \cos(\theta) \text{ เท่ากับ } 0.93$$

หาจากสมการ

$$\cos(\theta_z) = \sin(\delta)\sin(\phi) + \cos(\delta)\cos(\phi)\cos(\omega)$$

$$\text{แทนค่า} \cos(\theta_z) = (\sin(-21.27)\sin(13.68)$$

$$+ \cos(-21.27) \cos(13.68)\cos(6))$$

$$\text{ค่า} \cos(\theta_z) \text{ เท่ากับ } 0.81$$

$$\text{หาจากสมการ} \quad R_b = \cos(\theta) / \cos(\theta_z)$$

$$\text{แทนค่า} \quad R_b = 0.93 / 0.81$$

$$\text{ค่า } R_b \text{ เท่ากับ } 1.15$$

ขั้นตอนที่ 14) คำนวณหาค่ารังสีอาทิตย์รายชั่วโมง

ที่บนระนาบเอียง (I_T) หาจากสมการ

$$I_T = I_b R_b + I_d [1 + \cos(\beta)]/2 + \rho_g (I_b + I_d) [(1 - \cos(\beta))/2]$$

$$\text{แทนค่า} \quad I_T = [0.77 \times 1.15] + [2.35 \times [(1 + \cos(13.68))/2]]$$

$$+ [0.8 \times (0.77 + 2.35) [(1 - \cos(13.68))/2]]$$

ค่ารังสีอาทิตย์รายชั่วโมงที่บนระนาบเอียง 3.24 MJ/m²·h

$$3.24 \times 10^6 / 3,600 \text{ W/m}^2 \text{ เท่ากับ } 900 \text{ W/m}^2$$

ขั้นตอนที่ 15) คำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อน

ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Q_{SC}) หาจากสมการ

$$Q_{SC} = F_R (\tau \alpha)_e I_T A_{SC} - F_R U_L A_{SC} (T_{fi} - T_{amb})$$

$$\text{แทนค่า} \quad Q_{SC} = 0.802 \times 900 \times 2 - 10.370 \times 2 \times (32 - 28)$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ 1.36 kW

ขั้นตอนที่ 16) คำนวณหาอัตราการสูญเสียความ

ร้อนของถังเก็บน้ำ (Q_{Loss}) หาจากสมการ

$$Q_{Low} = UA_{ST} (T_{HW} - T_{amb})$$

$$\text{แทนค่า} \quad Q_{Low} = 16 \times (32 - 28)$$

อัตราการสูญเสียความร้อนของถังเก็บน้ำ 64 W

$$\text{เท่ากับ } 0.064 \text{ kw}$$

ขั้นตอนที่ 17) คำนวณหาอุณหภูมิน้ำในถังเก็บ

($T_{HW+\Delta t}$) กรณีไม่มีแหล่งความร้อนเสริม หาจากสมการ

$$T_{HW+\Delta t} = [(Q_{SC} - Q_{Loss}) \Delta t / (M_{ST} CP_{HW})] + T_{HW}$$

$$\text{แทนค่า} \quad T_{HW+\Delta t} = [(1.36 - 0.064) \times 3,600 / (40 \times 4.2)] + 32$$

อุณหภูมิน้ำในถังเก็บกรณีไม่มีแหล่งความร้อนเสริม
59.77 °C

ขั้นตอนที่ 18) คำนวณหาอุณหภูมิน้ำในถังเก็บ
($T_{NW+\Delta T}$) กรณีมีแหล่งความร้อนเสริม หาจากสมการ
$$T_{HW+\Delta t} = [(Q_{SC} + Q_{AUX} - Q_{Loss}) \Delta t / (M_{ST} CP_{HW})] + T_{HW}$$

แทนค่า $T_{HW+\Delta t} = [(1.36 + 4.4 - 0.064) \times 3,600 / (40 \times 4.2)] + 32$

อุณหภูมิน้ำในถังเก็บกรณีมีแหล่งความร้อนเสริม
154.06 °C

3.3 ผลการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

ในการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์เพื่อหาระยะเวลา
คืนทุน จำเป็นต้องทราบจำนวนเงินที่ลงทุนสำหรับสร้าง
เครื่องทำน้ำร้อนระบบไฮบริดและจำนวนเงินค่าไฟฟ้าที่
ต้องเสียไปสำหรับการใช้เครื่องทำน้ำร้อนระบบไฮบริด
รายปี [13] ซึ่งพบว่า ในการสร้างเครื่องทำน้ำร้อนระบบ
ไฮบริดจะมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานประมาณ 8,000
บาท (ปรับปรุงตัวเก็บรังสีอาทิตย์ โครงสร้าง บิมน้ำและ
ฮีตเตอร์) จำนวนเงินค่าไฟฟ้าที่ต้องเสียไปสำหรับการ
ใช้เครื่องทำน้ำร้อนระบบไฮบริดรายปีประมาณ 1,219
บาท จากการทำกิจกรรมเดือนละ 1 ครั้งตลอด 1 ปี โดย
ทำให้สามารถคำนวณหาระยะคืนทุนของเครื่องทำน้ำ
ร้อนระบบไฮบริดได้ประมาณ 6.6 ปี

4. สรุปผลการทดลอง

การพัฒนาของเครื่องทำน้ำร้อนระบบไฮบริดที่สร้าง
ขึ้นเอง โดยใช้แผงรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ
ประกอบด้วยส่วนประกอบหลักสองส่วน คือ แผงรับรังสี
อาทิตย์และถังเก็บน้ำร้อน เครื่องทำน้ำร้อนระบบไฮบริด
ใช้การไหลเวียนของน้ำระหว่างแผงรับรังสีอาทิตย์

และถังเก็บน้ำร้อน แผงรับรังสีอาทิตย์มีขนาด 2x1
ตารางเมตร ทำมุมเอียง 15 องศาและส่วนถังเก็บน้ำร้อน
มีขนาด 40 ลิตร ในการศึกษาครั้งนี้ จากการคำนวณ
ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ในการทดลอง 900 W/m²
ติดตั้งใช้งานเครื่องทำน้ำร้อนระบบไฮบริดที่ชมรม
ผู้สูงอายุตำบลบางยอ องค์การบริหารส่วนตำบลบางยอ
จังหวัดสมุทรปราการในกิจกรรมนันทนาการและการใช้
เวลาว่างสำหรับผู้สูงอายุ (การแช่เท้าด้วยสมุนไพร)
ทดลองในวันที่ 8 เดือน เมษายน 2568 และเริ่มสะสม
ความร้อนในเวลา 12.00 น เมื่อเวลาผ่านไป 1 h (Δt)
อุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อนมีค่า 59.77 °C กรณีไม่มี
แหล่งความร้อนเสริมและกรณีมีแหล่งความร้อนเสริม
สามารถเพิ่มอุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อนได้สูงสุด
154.06 °C นำน้ำร้อนไปใช้ประโยชน์ในกิจกรรมได้
การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์เพื่อหาระยะเวลาคืนทุน
ของเครื่องทำน้ำร้อนระบบไฮบริด พบว่ามีระยะเวลาคืน
ทุนประมาณ 6.6 ปี

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์รัชชัย
สอนสนาม ที่กรุณาให้คำแนะนำปรึกษาตลอดจน
ปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่
อย่างดียิ่งและคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรีที่ช่วยในการสนับสนุน
เงินทุนในการทำวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] R.Tang and G.Li, Handbook of energy systems
in green buildings: Solar collectors and solar
hot water systems, Springer-Verlag GmbH.,
BIN, Germany, 2018.

- [2] S. Rahman, S. Issa, Z. Said and A. Hachicha, Techno-economic and life cycle analysis of a nano-enhanced flat plate solar collector for improved thermal performance, *Energy Nexus*, 2025, 18, 100433.
- [3] K. Dumeedae, S. Sueyu and S. Kasor, Solar water heater hybrid with electric, *YRU Journal of Science and Technology*, 2017, 2(1), 65-75.
- [4] S. Poomsawat and W. Poomsawat, A study of the efficiency of a solar water heater, *Srinakharinwirot University Engineering Journal*, 2019, 14(1), 67-77.
- [5] N.T. Alwan, M.H. Majeed, I.M. Khudhur, S.E. Shcheklein, O.M. Ali, S.J. Yaqoob and R. Alayi, Assessment of the performance of solar water heater: an experimental and theoretical investigation, *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 2022, 17, 528-539.
- [6] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652622027081>. (Accessed on 10 April 2025)
- [7] A. Faddouli, S. Fadili, H. Labrim, B. Hartiti, M. Ertugrul, N. Belouaggadia and M. Stitou, Comparative study of a normal solar water heater and smart thermal/thermoelectric hybrid systems, *Materials Today, Proceeding*, 2020, 30 Part 4, 1039-1042.
- [8] G. Li and Y. Du, Performance investigation and economic benefits of new control strategies for heat pump-gas fired water heater hybrid system, *Applied Energy*, 2018, 232, 101-118.
- [9] N. Chaiyati, Thermal renewable energy technology and system design, Report, College of Renewable Energy Maejo University, Thailand, 2019.
- [10] C. Wannurak, Development of solar water heater with flat plate solar collector, *The 6th RMUTP Conference on Engineering and Technology, Proceeding*, 2022, 5-8. (in Thai)
- [11] S. Khlongboonchit, Principle of solar hot water system in industry, Thesis, Faculty of Engineering, Report, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand. 2009.
- [12] https://eassess.su.ac.th/web1/solar_app/#. (Accessed on 10 April 2025)
- [13] T. Rudchapo and M. Punon, Development of solar water heater, *Local Research and Innovation Journal*, 2015, 11(Special), 68-74.

การศึกษาเปรียบเทียบแบบจำลองแบตเตอรี่ระหว่างแบบจำลองไฟฟ้าสมมูลและแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับอากาศยานไร้คนขับจากข้อมูลการบินจริง

ประสพโชค พุมมา¹ วัยอาจ สายคง^{2*} และ สุรเดช ตัญญูตรัยรัตน์³

¹ ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

² ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการเผาไหม้และพลังงานทางเลือก, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

³ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: waiard.s@cit.kmutnb.ac.th

วันที่รับบทความ: 11 มิถุนายน 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 25 กรกฎาคม 2568; วันที่ตอบรับบทความ: 18 สิงหาคม 2568

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 8 ธันวาคม 2568

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาเชิงเปรียบเทียบของแบบจำลองแบตเตอรี่สำหรับอากาศยานไร้คนขับ โดยมุ่งเน้นที่การเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองวงจรไฟฟ้าสมมูลกับแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม และประเมินประสิทธิภาพของแต่ละแบบจำลองด้วยค่าความคลาดเคลื่อนรากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของแรงดันที่ขั้วเทียบกับค่าวัดจริงในการประเมินสองครั้ง คือ ครั้งแรกในรอบแรก หรือแบตเตอรี่สภาพใหม่ และครั้งที่สองเมื่อแบตเตอรี่สภาพเก่า หรือเมื่อใช้งานในการจ่ายโหลดสำหรับการบินสำรวจพื้นที่การเกษตรในรอบที่ 50 ผลการทดสอบในรอบแรกพบว่า แบบจำลองวงจรไฟฟ้าสมมูลมีความแม่นยำสูงได้ค่าคลาดเคลื่อน 0.1544 ในทางตรงกันข้ามแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมเกิดปัญหาจากชุดข้อมูลฝึกที่จำกัดได้ค่าคลาดเคลื่อน 0.8742 เมื่อแบตเตอรี่เสื่อมสภาพลง แบบจำลองวงจรไฟฟ้าสมมูลมีความแม่นยำลดลงเนื่องจากไม่สามารถปรับตัวตามพฤติกรรมที่เปลี่ยนแปลงไปตามจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมมีผลการพยากรณ์ดีขึ้นได้ค่าคลาดเคลื่อน 0.472 ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าแบบจำลองวงจรไฟฟ้าสมมูลจะแม่นยำเมื่อแบตเตอรี่สภาพใหม่แต่ขาดความสามารถในการปรับตัวจึงต้องอาศัยปรับปรุงค่าพารามิเตอร์เสมอ โดยที่แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสามารถเรียนรู้พฤติกรรมของแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพได้

คำสำคัญ: อากาศยานไร้คนขับ; แบบจำลองแบตเตอรี่; วงจรไฟฟ้าสมมูล; โครงข่ายประสาทเทียม

A Comparative Study Battery Modeling between Equivalent Circuit and Neural Network for UAVs Using Real Flight Data

Prasophchok Phumma¹, Waiard Saikong^{2*} and Suradet Tantrairatn³

¹ Department of Mechanical Power Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

² Research Centre for Combustion Technology and Alternative Energy - CTAE, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

³ School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

* Corresponding author, E-mail: waiard.s@cit.kmutnb.ac.th

Received: 11 June 2025; Revised 25 July 2025; Accepted: 18 August 2025

Online Published: 8 December 2025

Abstract: This research presents a comparative study of battery models for unmanned aerial vehicles (UAVs), focusing on the comparison between the equivalent circuit model (ECM) and the artificial neural network (ANN) model. The performance of each model is evaluated based on the root mean square error (RMSE) between the estimated terminal voltage and the actual measured value in two evaluations: first, with a fresh battery, and second, with an aged battery after being used in flight operations for agricultural area surveys in the 50th cycle. The test results in the first cycle show that the ECM provides high accuracy, with an RMSE of 0.1544. In contrast, the ANN model, affected by the limitation of its training dataset, yields a higher error of 0.8742. When the battery degrades, the ECM's accuracy decreases due to its inability to adapt to behavioral changes across increasing cycles. Meanwhile, the ANN model shows improved prediction performance, with an RMSE of 0.472. These findings indicate that while the ECM offers high accuracy for fresh batteries, it lacks adaptability and requires parameter updates. On the other hand, the ANN model can learn degraded battery behavior.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicles (UAVs); Battery Model; Equivalent Circuit Model; Neural Network

1. บทนำ

อากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicles: UAVs) ทั่วโลกมีแนวโน้มเติบโตอย่างมีนัยสำคัญ จากการคาดการณ์อัตราการเติบโตเฉลี่ยสะสมต่อปี อยู่ที่ 14.1% ระหว่างปี 2021 ถึง 2023 [1] โดยเฉพาะในภาคเกษตรกรรมถูกปฏิวัติวิธีการทำเกษตรด้วยเทคโนโลยีช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและความยั่งยืน [2] อากาศยานไร้คนขับมีบทบาทสำคัญ สார்วพื้นที่ การเกษตรและทรัพยากร ด้วยระบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าร่วมกับแหล่งกักเก็บพลังงาน เช่น แบตเตอรี่ลิเทียมพอลิเมอร์ (Li-Po) ที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีความหนาแน่นพลังงานสูง และมีน้ำหนักเบา [3-5] อย่างไรก็ตามอากาศยานไร้คนขับมีระยะเวลาการบินจำกัดเมื่อทำงานภายใต้สภาวะโหลดส่งผลต่อสมรรถนะและความน่าเชื่อถือในการปฏิบัติการบิน การจำลองแบตเตอรี่ (Battery Modeling) เป็นการศึกษาอธิบายพฤติกรรมของแบตเตอรี่ภายใต้สภาวะโหลดที่เปลี่ยนแปลงระหว่างช่วงการบินจำเป็นต้องมีการประมาณสถานะแบตเตอรี่ที่ถูกต้องแม่นยำเพื่อรับรองความปลอดภัยและช่วยวางแผนการทำงาน ในปัจจุบันแบบจำลองแบตเตอรี่มีหลากหลายรูปแบบ ถูกพัฒนาเพื่อศึกษาพฤติกรรมของแบตเตอรี่ตามวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกัน [6, 7] แบบจำลองที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย ได้แก่ แบบจำลองวงจรไฟฟ้าสมมูล (Equivalent Circuit Models: ECM) และแบบจำลองกล่องดำ (Black-box Models) เช่น โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks: ANN) แบบจำลองวงจรไฟฟ้าสมมูลใช้องค์ประกอบของวงจรไฟฟ้าเพื่ออธิบายพฤติกรรมตามโดเมนเวลา ซึ่งมีโครงสร้างไม่ซับซ้อนมี

การคำนวณรวดเร็วและแม่นยำ อย่างไรก็ตามแบบจำลองข้อจำกัดสำคัญ ในการติดตามพฤติกรรมที่เปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากไม่สามารถปรับค่าพารามิเตอร์ได้เองเมื่อแบตเตอรี่เสื่อมสภาพเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการใช้งานแบตเตอรี่ไปในระยะเวลาหนึ่ง ในทางตรงกันข้ามโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks) เรียนรู้ความสัมพันธ์ของข้อมูลพฤติกรรมไม่เป็นเชิงเส้นของแบตเตอรี่ได้ดี อย่างไรก็ตามแบบจำลองนี้อาศัยชุดข้อมูลสำหรับการฝึกใช้เวลานานในการรวบรวมข้อมูลและมีแนวโน้มเกิดการเรียนรู้โอเวอร์ฟิต (Overfitting) ซึ่งแบบจำลองได้เรียนรู้จากชุดข้อมูลที่ใช้ฝึกอย่างใกล้ชิดมากเกินไปจนแบบจำลองไม่สามารถคาดการณ์ข้อมูลใหม่ได้อย่างถูกต้อง นอกเหนือแบบจำลองทั้งสอง เช่น แบบจำลองทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Models) เหมาะสำหรับการออกแบบวัสดุหรือพัฒนาแบตเตอรี่มีโครงสร้างแบบจำลองซับซ้อน ทำให้ต้องการประมวลผลสูงจากพารามิเตอร์จำนวนมากจึงไม่เหมาะสมสำหรับระบบอากาศยานไร้คนขับประยุกต์ใช้งานตามเวลาจริง แบบจำลองเชิงประจักษ์ (Empirical Model) ใช้สมการคณิตศาสตร์มาสร้างฟังก์ชันเชิงเส้นเพื่อหาเส้นโค้งอย่างง่ายจากข้อมูลการแต้อากาศยานไร้คนขับ สภาวะการเปลี่ยนแปลงของแบตเตอรี่อย่างรวดเร็วและไม่เป็นเชิงเส้น แบบจำลองไฮบริด (Hybrid Models) ผสานข้อดีของแบบจำลองอื่นเข้าด้วยกัน อย่างไรก็ตามแบบจำลองมีความซับซ้อนในการออกแบบและอาศัยข้อมูลจำนวนมากเพื่อใช้สำหรับฝึกสอนข้อมูลและตรวจสอบความถูกต้อง ทั้งนี้แบบจำลองไปประยุกต์ใช้งาน จำเป็นต้องพิจารณาลักษณะการใช้งานหรือรูปแบบของโหลดที่แตกต่างกัน

ซึ่งจะส่งผลต่อความแม่นยำของแบบจำลอง หากไม่มีการปรับปรุงแบบจำลองด้วยข้อมูลสภาพแวดล้อมจริง (Real Filed Measurement Data) จะไม่สามารถใช้อธิบายพฤติกรรมที่เกิดขึ้นได้กับแบตเตอรี่ได้ โดยเฉพาะโหลดของอากาศยานไร้คนขับลักษณะเคลื่อนที่สลับหยุด (Intermittent Movement) ตลอดเวลาเพื่อรักษาสถานะทำการบินในอากาศ ซึ่งแตกต่างจากโหลดยานยนต์ไฟฟ้าที่มีลักษณะอย่างต่อเนื่อง งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาแบบจำลองมักศึกษาจากข้อมูลโหลดจำลองที่ขาดข้อมูลการบินภายใต้การทำการกิจจริงซึ่งไม่สะท้อนต่อพฤติกรรมที่เกิดขึ้นตามรอบการใช้งานจริงที่เปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นงานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาเปรียบเทียบแบบจำลองวงจรไฟฟ้าสมมูลและแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมจากข้อมูลปฏิบัติการบินจริงใช้อธิบายพฤติกรรมของแบตเตอรี่สำหรับอากาศยานไร้คนขับสำหรับการเกษตรและวิเคราะห์พฤติกรรมของแบตเตอรี่ตามรอบการใช้งานในปริมาณข้อมูลเบื้องต้นผลการศึกษาครั้งนี้ช่วยให้เห็นคุณสมบัติข้อจำกัดแต่ละแบบเป็นแนวทางสำหรับการพัฒนาแบบจำลองที่เหมาะสมแม่นยำเพิ่มขึ้นและปรับตัวได้ดีในอนาคต

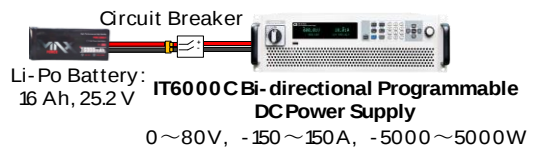
2. วิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 การทดสอบแบตเตอรี่

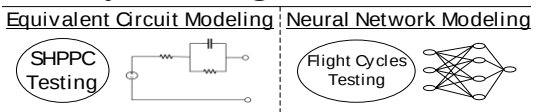
ก่อนจะดำเนินการสร้างแบบจำลองแบตเตอรี่ จะต้องดำเนินการทดสอบแบตเตอรี่เพื่อหาประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ตามรอบการใช้งานที่เปลี่ยนแปลง สำหรับการทดสอบแบตเตอรี่นี้จะประกอบด้วย 2 วิธีหลัก ได้แก่ การทดสอบแบตเตอรี่แบบไฮบริดพัลส์เฉพาะ (Specific Hybrid Pulse Power Characterization: SHPPC) และ

การทดสอบโหลดจากข้อมูลการบิน โดยทั้งสองวิธีการทดสอบจะใช้แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมพอลิเมอร์แสดงดังตารางที่ 1 และแสดงแผนการดำเนินการดังรูปที่ 1 ชุดการทดสอบด้วยเครื่อง IT6000C (Bi-Directional Programmable DC Power Supply) การชาร์จและคายประจุตามรูปแบบโปรไฟล์ที่กำหนดผ่านมัลติเมตริกซ์ของเครื่องทดสอบ สามารถตั้งพิกัดแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 0 ถึง 80 โวลต์ พิกัดกระแส 0 ถึง 150 แอมป์ เก็บบันทึกข้อมูลพฤติกรรมแรงดันและกระแสที่เกิดขึ้นลงในหน่วยความจำพิกพาเพื่อนำข้อมูลที่ได้มาสร้างแบบจำลองแบตเตอรี่ทั้งสองแบบระหว่างวงจรไฟฟ้าสมมูลกับโครงข่ายประสาทเทียมจากข้อมูลการบินจริง

Battery Testing

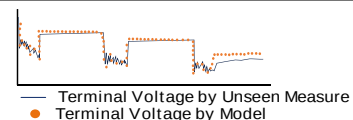


Battery Modeling



Evaluate Modeling

Phase 1st: Fresh battery usage cycle
Phase 2nd: After battery usage 50 cycle



Analysis Comparison & Conclusion

รูปที่ 1 แผนการดำเนินการวิจัยแบบจำลองแบตเตอรี่

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของแบตเตอรี่ลิเทียมพอลิเมอร์

คุณสมบัติ	รายละเอียด
ประเภท	ถุงกระเป๋ (Pouch cell)
	6 เซลล์ต่อแบบอนุกรม
แรงดันไฟฟ้า	25.2 โวลต์
ความจุ	16 แอมแปร์ชั่วโมง
พลังงานจำเพาะ	255 วัตต์ชั่วโมงต่อกิโลกรัม
อายุการใช้งาน	300 รอบ

ที่เก็บรวบรวมเป็นจำนวนรอบการบินและสิ้นสุดเมื่อแบตเตอรี่ลิเทียมพอลิเมอร์มีสภาพเปลี่ยนแปลงโดยทั่วไปพิจารณาเกณฑ์ 90 เปอร์เซ็นต์ของความจุแบตเตอรี่เดิม [8, 9] แสดงการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่แต่ไม่หมดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ สำหรับงานวิจัยนี้สามารถเก็บรวบรวมข้อมูลการบินของสถานะแบตเตอรี่แสดงดังตารางที่ 2 และรูปแบบโหลดแสดงดังรูปที่ 2 ซึ่งเป็นจำนวนรอบการบินทั้งหมด 50 รอบ เพื่อศึกษาเปรียบเทียบแต่ละแบบจำลองสามารถแบ่งได้เป็น 2 เงื่อนไข ได้แก่ เงื่อนไขแรก ศึกษาแบบจำลองแบตเตอรี่ช่วงสภาพใหม่อยู่ในระหว่างรอบที่ 1 ถึง 15 และเงื่อนไขที่สอง ศึกษาแบตเตอรี่ช่วงเสื่อมสภาพลงในระหว่างรอบที่ 16 ถึง 50 จากนั้นจะวัดประสิทธิภาพแบบจำลองในแต่ละเงื่อนไข โดยกำหนดให้รอบที่ 15 เป็นโหลดสำหรับประเมินแรงดันคาดการณ์สำหรับเงื่อนไขแรก และกำหนดให้รอบที่ 50 เป็นโหลดสำหรับประเมินแรงดันคาดการณ์สำหรับเงื่อนไขที่สอง เนื่องจากกำหนดแบ่งข้อมูล (Data split) สำหรับเทรนข้อมูล 90 เปอร์เซ็นต์ (รอบที่ 1 ถึง 45) และทดสอบ 10 เปอร์เซ็นต์ (รอบที่ 46 ถึง 49)

การทดสอบแบบไฮบริดพัลส์เฉพาะเป็นการทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ในแต่ละช่วงของความจุ โดยส่วนใหญ่จะถูกทดสอบจากโรงงานขณะแบตเตอรี่สภาพใหม่ [8, 9] ด้วยโหลดลักษณะพัลส์เฉพาะอย่างต่อเนื่อง พฤติกรรมของแบตเตอรี่ที่ตอบสนองต่อโหลดพัลส์จะนำไปสร้างแบบจำลองแบตเตอรี่วงจรไฟฟ้าสมมูล งานวิจัยนี้ใช้โหลดพัลส์เฉพาะที่แตกต่างกันสองโหลด ได้แก่ โหลดพัลส์กระแสเฉลี่ยที่ 31 แอมป์ แสดงถึงอากาศยานขณะใช้โหลดการบินเฉลี่ย และโหลดพัลส์กระแสสูงสุด 47 แอมป์ แสดงถึงอากาศยานขณะใช้โหลดการบินสูงสุด ซึ่งคิดรวมโหลดทั้งหมดเป็น 2 เปอร์เซ็นต์ของความจุจะทดสอบจนกว่าความจุจะถึง 90 เปอร์เซ็นต์ โดยแสดงขั้นตอนการทดสอบนี้ได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 2 ข้อมูลการบินจริงของสถานะแบตเตอรี่

จำนวนรอบ	แรงดัน (โวลต์)	ความจุ (%)
1	25.2	100
15	25.197	99.375
25	25.195	98.562
35	25.195	98.39
45	25.193	97.05
50	25.192	91.75

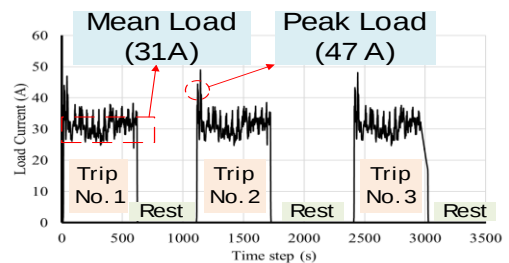
ตารางที่ 3 การทดสอบไฮบริดพัลส์เฉพาะ

ลำดับ	โหลด	โหมด
1	8 แอมป์	ชาร์จจนเต็ม
2	0 แอมป์ 5 วินาที	ช่วงแบ่งเปอร์เซ็นต์แต่ละความจุ
3	31 แอมป์ 10 วินาที	พัลส์โหลดเฉลี่ย
4	0 แอมป์ 200 วินาที	พักคายประจุ
5	47 แอมป์ 10 วินาที	พัลส์โหลดสูงสุด
6	0 แอมป์ 200 วินาที	พักคายประจุ

การทดสอบโหลดจากข้อมูลการบิน เป็นการจำลอง โหลดที่เกิดขึ้นตามเงื่อนไขการใช้งานพฤติกรรม ลักษณะพลวัต (Dynamic) ที่ตอบสนองของแบตเตอรี่ที่ เปลี่ยนแปลงตามรอบการใช้งาน [10, 11] ในการกิจ สำรวจพื้นที่ทางการเกษตรด้วยอากาศยานไร้คนขับแบบหลาย ใบพัด (Multirotor UAVs) ที่มีรูปแบบจำนวน 3 เทียวบินใน 1 รอบการใช้งานด้วยโหลดโหลดเฉลี่ย 31 แอมป์ โหลดสูงสุดเคลื่อนที่ขึ้นจากพื้น 47 แอมป์ แสดง ดังรูปที่ 2 ซึ่งการสำรวจนี้ได้มีแผนการบินด้วยลักษณะ การบินความเร็วเฉลี่ย 5 เมตรต่อวินาทีเป็นระดับ ความสูง 40 เมตร ทำภารกิจสำรวจตามจุดพิกัดที่ กำหนด ผ่านอุปกรณ์ควบคุมภาคพื้น แสดงดังรูปที่ 3

2.2 แบบจำลองแบตเตอรี่

วิธีการสร้างแบบจำลองแบตเตอรี่ จะนำข้อมูลจากการ ทดสอบแบตเตอรี่มาใช้งาน ซึ่งการทดสอบแบบไฮบริด พัลส์จะนำมาสร้างแบบจำลองวงจรไฟฟ้าสมมูล โดยการ ประมาณค่าหาพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าและการทดสอบ โหลดการบินจากข้อมูลการบินจะนำมาสร้างแบบจำลอง โครงข่ายประสาทเทียมเพื่อการพยากรณ์แรงดันไฟฟ้าที่ ขั้วคาดการณ์ของรอบการใช้งานแบตเตอรี่ แบบจำลอง วงจรไฟฟ้าสมมูลได้พัฒนาจากอุปกรณ์ทางไฟฟ้าของ แบตเตอรี่ [14] ซึ่งประกอบด้วยความต้านทานภายใน แบบโอห์มมิก (R_i) แสดงถึงค่าความต้านทานของขั้วต่อ ภายในแบตเตอรี่ แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (U_{oc}) แสดงถึง ค่าแรงดันขณะไม่มีการจ่ายโหลดของแบตเตอรี่ คู่ของ เครื่องหมายตัวต้านทาน (R_p) และตัวเก็บประจุ (C_p) ตาม จำนวน n ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงถึงลักษณะการตอบสนอง ของแบตเตอรี่ที่เปลี่ยนแปลงตามโดเมนเวลาผ่อนปรน

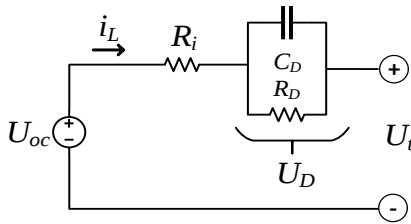


รูปที่ 2 รูปแบบโหลดการบินสำรวจทางการเกษตร



รูปที่ 3 แผนการบินสำรวจทางการเกษตร

(Relaxation Time) โดยอ้างอิงจากกฎของเคียร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's Laws) เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันไฟฟ้าบนตัวเก็บประจุและตัวต้านทานจะนำ ข้อมูลจากการทดสอบไฮบริดพัลส์มาใช้งาน ส่วนโหลด การบินไม่นิยมนำมาใช้เนื่องจากโหลดของอากาศยาน ไร้คนขับมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ขาดการ ตอบสนองของแบตเตอรี่เปลี่ยนแปลงตามโดเมนเวลา งานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองคู่เครื่องหมายตัวเก็บประจุและตัว ต้านทานจำนวนหนึ่งคู่ หรือ แบบจำลองเทวินิน (Thevenin Model, $RC\ n=1$) แสดงในรูปที่ 4 เป็น แบบจำลองที่ได้รับความนิยมมากที่สุดเนื่องจากให้ ความแม่นยำและประสิทธิภาพในการคำนวณ [13-15] และแสดงดังสมการที่ (1) - (5) [16, 17]



รูปที่ 4 แบบจำลองเทวินิน

$$U_{t,k} = U_{OC,k} - i_{L,k}R_{i,k} - U_{D,k} \quad (1)$$

โดยที่ U_t คือ แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่ U_D คือ แรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามโดเมนเวลา i_L คือ กระแสไหลผ่านวงจร U_{OC} คือ แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด R_i คือ ความต้านทานภายใน ตามเวลาของ k

$$y_k = U_{t,k} \quad (2)$$

$$\phi_{1,k} = [1 \ U_{t,k-1} \ i_{L,k} \ i_{L,k-1}] \quad (3)$$

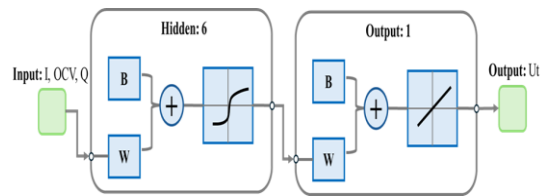
$$\theta_{1,k} = [(1 - a_1)U_{OC,k} \ a_1 \ a_2 \ a_3]^T \quad (4)$$

$$y_k = \phi_{1,k}\theta_{1,k} \quad (5)$$

y_k คือ ผลลัพธ์ของแบบจำลองเทวินิน ϕ คือ คุณลักษณะเวกเตอร์โดยการประมาณกำลังสองน้อยที่สุดแบบเรียกซ้ำ (Recursive Least Squares: RLS) θ คือ พารามิเตอร์เวกเตอร์ $a_1 \ a_2 \ a_3$ เป็นพารามิเตอร์จากการเปลี่ยนแปลงตามเวลาคงที่ (Time constant)

แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมเป็นการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine learning) ที่ขับเคลื่อนด้วยข้อมูลที่สามารถเรียนรู้สร้างความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลนำเข้าและผลลัพธ์ ประยุกต์ใช้งานเพื่อคาดการณ์

พฤติกรรมของระบบที่มีความซับซ้อนไม่เป็นเชิงเส้น งานวิจัยนี้ ใช้ซอฟต์แวร์ MATLAB แถบเครื่องมือ Neural Net Fitting เพื่อคาดการณ์แรงดันขั้วแบตเตอรี่ [18-20] สถาปัตยกรรมของแบบจำลองประกอบด้วยโครงข่ายประสาทชั้นซ่อน (Hidden Layers) ทั้งหมด 6 ชั้น พร้อมทั้งใช้เทคนิคการตรวจสอบแบบไขว้แบบ (k-fold cross validation) ในแต่ละรอบของการฝึก แสดงดังรูปที่ 5 เพื่อให้โครงข่ายสามารถเรียนรู้ และสามารถแสดงการคำนวณดังสมการที่ (6)



รูปที่ 5 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

$$y_l = \phi(\sum_{k=3}^n w_{k,l} x_k + b_l) \quad (6)$$

โดยที่ X_k คือ ตัวแปรอินพุต y_l คือ ค่าผลลัพธ์ของแต่ละนิวรอน w_{ik} คือ ค่าน้ำหนักของอินพุตตัวที่ k ที่เชื่อมต่อกับนิวรอนตัวที่ l ในชั้นซ่อน และ ϕ คือ ฟังก์ชันกระตุ้น

ข้อมูลที่ใช้สำหรับการฝึกสอนได้จากชุดข้อมูลของโหนดการบิน ซึ่งข้อมูลจะแบ่งเป็นสองชุด ได้แก่ ข้อมูลชุดแรกจากข้อมูลการบินตั้งแต่รอบที่ 1 ถึงรอบที่ 15 ใช้ในการศึกษาแบบจำลองเมื่อแบตเตอรี่สภาพใหม่ และข้อมูลชุดที่สองจากข้อมูลการบินตั้งแต่รอบที่ 1 ถึงรอบที่ 45 ใช้ในการศึกษาแบบจำลองเมื่อแบตเตอรี่สภาพเก่าขึ้น ทั้งสองชุดข้อมูลจะประกอบด้วยคุณลักษณะสามตัวแปร คือ กระแสไหลแรงดันไฟฟ้า

วงจรเปิด และความจุ ซึ่งเป็นตัวแปรที่มีความสัมพันธ์ต่อผลลัพธ์แรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว

2.3 การวัดประสิทธิภาพแบบจำลอง

การประเมินและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองแบตเตอรี่ที่จะประเมินสองครั้งของการใช้งานแบตเตอรี่ โดยครั้งแรกของรอบแรก ส่วนการประเมินครั้งที่สองหลังจากผ่านการใช้งานแบตเตอรี่รอบที่ 50 โดยเกณฑ์วัดค่าคลาดเคลื่อนรากกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error :RMSE) ซึ่งเป็นตัวชี้วัดที่ใช้วัดความแตกต่างระหว่างการพยากรณ์แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วที่ได้จากแบบจำลองกับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ววัดค่าจริง สามารถแสดงดังสมการที่ (7) ดังนี้

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (U_{ti} - \hat{U}_{ti})^2} \quad (7)$$

โดยที่ i คือ ลำดับของข้อมูล n คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด $\hat{U}_t$ คือ แรงดันขั้วแบตเตอรี่ที่ทำนายได้จากแบบจำลองที่จุดข้อมูล

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

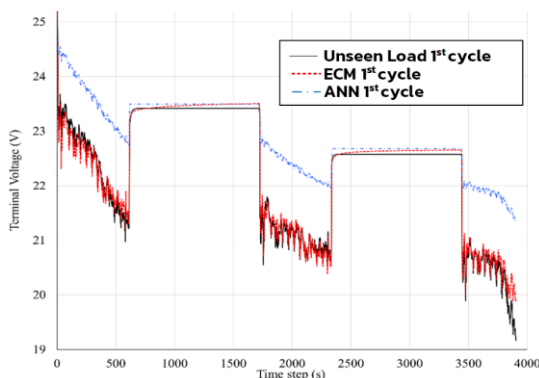
ในส่วนนี้จะแสดงผลการวิจัยสามส่วน ได้แก่ ผลลัพธ์ส่วนแรกจากการประมาณค่าพารามิเตอร์จากการทดสอบไฮบริดฟิลส์เฉพาะในรอบการใช้งานแบตเตอรี่สภาพใหม่แสดงไว้ในตารางที่ 4 ผลลัพธ์ส่วนที่สองจากการพยากรณ์แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของแบบจำลองระหว่างวงจรไฟฟ้าสมมูลกับโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อวัดประสิทธิภาพของแต่ละแบบจำลองและผลลัพธ์ส่วนสุดท้ายจากเปรียบเทียบค่าคลาดเคลื่อนรากกำลังสองเฉลี่ยในช่วงที่ประเมินตามรอบการใช้งาน

ผลลัพธ์การพยากรณ์แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเปรียบเทียบกับค่าวัดจริงถูกประเมินด้วยโหลดการบินรอบสองครั้ง ได้แก่ การประเมินครั้งที่ 1 ในรอบแรก และการประเมินครั้งที่ 2 ในรอบที่ 50 ด้วยกราฟที่มีสัญลักษณ์ที่แตกต่างกัน โดยเส้นทึบสีดำ แทน ข้อมูลโหลดการบินอนาคตที่ไม่เคยใช้งานในแบบจำลองมาก่อน เส้นประสีแดง แทน แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วคาดการณ์จากแบบจำลองไฟฟ้าสมมูลหรือแบบเทวินิน และเส้นประจุดสีฟ้า แทน แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วคาดการณ์จากแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

จากผลลัพธ์การประเมินครั้งที่ 1 ในรอบแรกสามารถแสดงดังรูปที่ 6 พบว่า แรงดันไฟฟ้าที่ขั้ววัดจริงแบตเตอรี่เริ่มต้นลดลงที่แรงดันไฟฟ้า 23.5 โวลต์อย่างต่อเนื่องในระหว่างโหลดการบินในรอบแรกแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วจากแบบจำลองวงจรไฟฟ้าสมมูล สามารถคาดการณ์สอดคล้องใกล้เคียงกับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ววัดจริงได้ทั้งในช่วงโหลดการบินทั้งสามเที่ยวและช่วงพัก

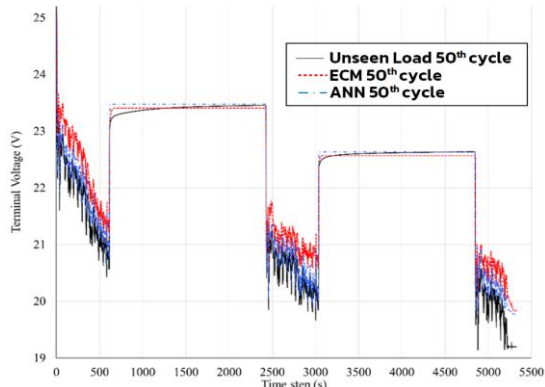
ตารางที่ 4 ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์

SoC (%)	U_{oc} (V)	R_i (ohm)	R_o (ohm)	C_o (F)	Ah
0	25.2	0.046	0.008	1131.724	0
10	24.5	0.047	0.008	1015.332	1.63
20	23.9	0.050	0.009	1040.852	3.26
30	23.5	0.056	0.012	1088.498	4.88
40	23.0	0.050	0.006	943.286	6.40
50	22.7	0.051	0.004	1628.874	8.02
60	22.6	0.050	0.005	1044.479	9.65
70	22.4	0.051	0.003	1419.839	11.27
80	22.3	0.051	0.007	1094.238	12.80
90	21.4	0.055	0.017	594.583	14.63



รูปที่ 6 การประเมินแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วคาบการณ
ครั้งแรก แบตเตอรี่สภาพใหม่ (รอบแรก)

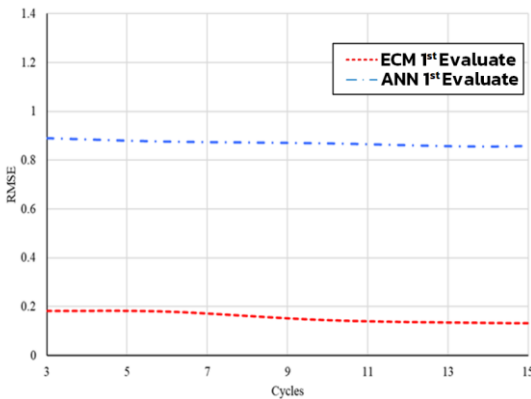
จากค่าพารามิเตอร์จากการทดสอบไฮบริดฟัลส์เฉพาะตอนแบตเตอรี่สภาพใหม่ สำหรับแรงดันไฟฟ้าคาดการณ์จากแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมคาดการณ์แม่นยำได้น้อยกว่าและไม่ใกล้เคียงกับค่าวัดจริงโดยเฉพาะในช่วงแรงดันไฟฟ้าตอบสนองตามโดเมนเวลาและช่วงพักของแบตเตอรี่ จากข้อมูลฝึกสอนชุดข้อมูลจำนวนน้อยยังไม่สามารถเรียนรู้ความสัมพันธ์ได้จากข้อมูลส่งผลให้มีการทำนายแรงดันไฟฟ้าที่ได้มีเกินจากค่าวัด ผลลัพธ์การประเมินในครั้งที่สองหลังผ่านการใช้งานรอบที่ 50 สามารถแสดงไว้ในรูปที่ 7 พบว่าแรงดันไฟฟ้าที่ชั่ววัดจริงแบตเตอรี่เริ่มต้นลดลงที่แรงดันไฟฟ้า 22.7 โวลต์อย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะโหลดการบินที่เร็วสุดท้ายที่แรงดันไฟฟ้าจ่ายโหลดได้น้อยกว่ารอบแรก แสดงถึงแบตเตอรี่สภาพเก่าขึ้นแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วคาบการณจากแบบจำลองไฟฟ้าสมมูลที่ยังใช้พารามิเตอร์ชุดเดิมไม่แม่นยำเหมือนกับการประเมินก่อนหน้านี้แต่ยังคงมีแนวโน้มเหมือนกับค่าวัดจริง ขณะที่แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแสดงประสิทธิภาพความแม่นยำมากขึ้น ด้วยชุดข้อมูลการ



รูปที่ 7 การประเมินแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วคาบการณ
ครั้งที่สอง แบตเตอรี่สภาพเปลี่ยนแปลง (รอบที่ 50)

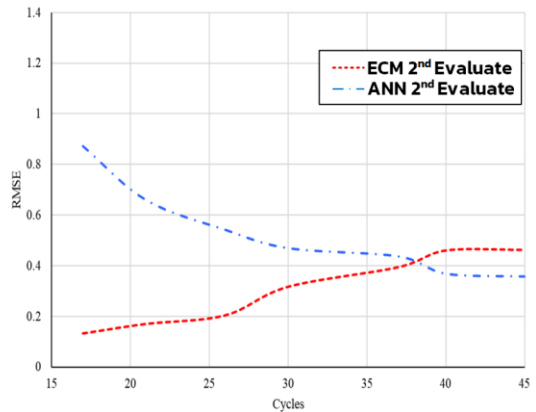
ฝึกสอนที่ครอบคลุมมากขึ้น ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่ชั่วคาบการณใกล้เคียงกับค่าวัดจริง

จากผลลัพธ์การเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนรากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองตามรอบการใช้งานของแบตเตอรี่ แสดงให้เห็นผลลัพธ์ที่แตกต่างกันในแต่ละช่วงของการประเมิน พบว่า การประเมินครั้งแรกตลอดรอบการใช้งานแบตเตอรี่ทั้งหมด 15 รอบ แสดงดังรูปที่ 8 แบบจำลองวงจรไฟฟ้าสมมูลมีความแม่นยำสูงกว่า โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.1544 เปรียบเทียบกับแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.8742 สะท้อนถึงพารามิเตอร์ที่ได้จากแบบจำลองวงจรไฟฟ้าสามารถอธิบายพฤติกรรมเชิงพลวัตตามโดเมนเวลาได้ในช่วงเริ่มต้นของการใช้งานที่พารามิเตอร์ยังคงมีความเสถียร ซึ่งแตกต่างจากแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแสดงถึงความเสี่ยงของการเรียนรู้โอเวอร์ฟิต เนื่องจากขาดความหลากหลายของชุดข้อมูลฝึกที่มีจำกัดส่งผลต่อการพยากรณ์แรงดันไฟฟ้าที่ชั่วจากโหลดการบินที่ไม่เคยใช้งานมาก่อน



รูปที่ 8 ค่าความคลาดเคลื่อนรกกกำลังสองเฉลี่ย
เมื่อแบตเตอรี่สภาพใหม่

สำหรับผลลัพธ์เปรียบเทียบในช่วงที่สองของการประเมินแสดงในรูปที่ 9 แบบจำลองไฟฟ้าสมมูลที่ใช้พารามิเตอร์เดิมแสดงความแม่นยำที่ลดลงค่าความคลาดเคลื่อน 0.3349 เมื่อเทียบกับแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่มีค่าเท่ากับ 0.472 ผลลัพธ์นี้สะท้อนถึงข้อจำกัดของแบบจำลองวงจรไฟฟ้าสมมูลในการปรับตัวเมื่อแบตเตอรี่เปลี่ยนแปลงไม่สามารถอธิบายสภาพเปลี่ยนแปลงของการใช้งานแบตเตอรี่จากค่าพารามิเตอร์เดิมได้ทำให้ความแม่นยำลดลงในรอบการใช้งานเกิน 30 รอบ เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแสดงผลที่ดีขึ้น โดยมีค่าคลาดเคลื่อนรกกกำลังสองเฉลี่ยลดลงเมื่อถึงรอบการใช้งานเกิน 40 รอบ และมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกับแบบจำลองไฟฟ้าสมมูลสะท้อนถึงความสามารถในการเรียนรู้พฤติกรรมเชิงพลวัตของแบตเตอรี่ในสภาพเปลี่ยนแปลงเสื่อมลง



รูปที่ 9 ค่าความคลาดเคลื่อนรกกกำลังสองเฉลี่ย
เมื่อแบตเตอรี่สภาพเปลี่ยนแปลง

4. บทสรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการศึกษาแบบจำลองแบตเตอรี่และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองสำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมพอลิเมอร์ของอากาศยานไร้คนขับระหว่าง แบบจำลองวงจรไฟฟ้าสมมูล และ แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม การศึกษาได้ชี้ให้เห็นถึงจุดเด่นและข้อจำกัดที่สำคัญของแต่ละแบบจำลองพยากรณ์แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วแบตเตอรี่ตลอดรอบการใช้งาน ด้วยตัวชี้วัดค่าความคลาดเคลื่อนรกกกำลังสองเฉลี่ย พบว่า การประเมินครั้งแรกแบบจำลองวงจรไฟฟ้าสมมูลอาศัยค่าพารามิเตอร์ ได้ค่าคลาดเคลื่อน 0.1544 ในทางตรงกันข้าม แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมประสบปัญหาการเรียนรู้โอเวอร์ฟิตเนื่องจากข้อจำกัดของชุดข้อมูลฝึก ได้ค่าคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.8742 อย่างไรก็ตาม เมื่อแบตเตอรี่มีสภาพเสื่อมตามรอบ

การใช้งาน แบบจำลองวงจรไฟฟ้าสมมูล ที่ใช้พารามิเตอร์เดิมกลับมีความแม่นยำลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากไม่สามารถปรับพารามิเตอร์ให้ตอบสนองต่อพฤติกรรมที่เปลี่ยนแปลงไปได้ ขณะเดียวกันแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม กลับแสดงประสิทธิภาพที่ดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อได้รับการฝึกด้วยชุดข้อมูลที่หลากหลายและครอบคลุม ทำให้สามารถติดตามพฤติกรรมแบตเตอรี่ที่เสื่อมสภาพได้ดีขึ้น โดยมีค่าคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.0472 ซึ่งใกล้เคียงกับแบบจำลองวงจรไฟฟ้าสมมูล ดังนั้นแบบจำลองวงจรไฟฟ้าสมมูล จะมีความแม่นยำสูงในสถานะเริ่มต้น แต่ก็มีข้อจำกัดด้านความสามารถในการปรับตัวเมื่อแบตเตอรี่สภาพเก่าขึ้น รวมถึงความซับซ้อนและเปลืองทรัพยากรเป็นอย่างมากในการหาพารามิเตอร์ใหม่จากการทดสอบไฮบริดฟัลส์เฉพาะ ในขณะที่แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม แม้จะต้องการข้อมูลคุณลักษณะจำนวนมากในการฝึก แต่สามารถแสดงให้เห็นถึงศักยภาพที่เหนือกว่าในการเรียนรู้และปรับตัวกับพฤติกรรมแบตเตอรี่ที่ซับซ้อนและเปลี่ยนแปลงไปตามอายุการใช้งาน จากผลการศึกษาแนวทางที่น่าสนใจสำหรับการวิจัยในอนาคตคือการพัฒนา แบบจำลองแบบผสมผสาน (Hybrid Modeling) ที่รวมจุดเด่นของทั้งแบบจำลองวงจรไฟฟ้าสมมูล และ แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม เข้าด้วยกันช่วยเพิ่มความแม่นยำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสถานะที่แบตเตอรี่เริ่มเสื่อมสภาพ นอกจากนี้การศึกษาข้อมูลคุณลักษณะที่สำคัญสำหรับแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมจากชุดข้อมูลจำกัด เพื่อเป็นแนวทางพัฒนาแบบจำลองแบตเตอรี่ให้มีความน่าเชื่อถือและนำไปใช้งานได้จริงในระบบอากาศยานไร้คนขับในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับสนับสนุนจาก วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือตามสัญญาเลขที่ CIT-2022-GRAD-15

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] <https://www.icao.int/annual-report-2021/Pages/emerging-and-cross-cutting-aviation-issues-increased-use-of-unmanned-aircraft-systems-uas.aspx>. (Accessed on 2 June 2025)
- [2] R. Guebsi, S. Mami and K. Chokmani, Drones in precision agriculture: A comprehensive review of applications, technologies, and Challenges, *Drones*, 2024, 8(11), 686.
- [3] C. Xiao, B. Wang, D. Zhao and C. Wang, Comprehensive investigation on lithium batteries for electric and hybrid-electric unmanned aerial vehicle applications, *Thermal Science and Engineering Progress*, 2023, 38, 101677.
- [4] P. Phumma and W. Saikong, Comparative characteristics of power delivery and temperature between conventional and hybrid energy storage system in UAVs, *The 5th Research, Invention, and Innovation Congress (RI2C 2024)*, Proceeding, 2024, 6.

- [5] Jyoti and R.S. Batth, Classification of unmanned aerial vehicles: A mirror review, The 2020 International Conference on Intelligent Engineering and Management (ICIEM 2020), Proceeding, 2020, 408–413.
- [6] W. Vermeer, G.R. Chandra Mouli and P. Bauer, A comprehensive review on the characteristics and modeling of lithium-ion battery aging, IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2022, 8(2), 2205–2232.
- [7] S. Jiao, G. Zhang, M. Zhou and G. Li, A comprehensive review of research hotspots on battery management systems for UAVs, IEEE Access, 2023, 11, 84636–84650.
- [8] M. Mitici, B. Hennink, M. Pavel and J. Dong, Prognostics for lithium-ion batteries for electric vertical take-off and landing aircraft using data-driven machine learning, Energy and AI, 2023, 12, 100233.
- [9] Y.C. Paw and E.Y.M. Ang, Battery cycle life assessment for a lift+cruise electric vertical takeoff and landing transporter drone, Journal of Energy Storage, 2023, 66, 107493.
- [10] J. Sun and J. Kainz, Optimization of hybrid pulse power characterization profile for equivalent circuit model parameter identification of lithium-ion battery based on Taguchi method, Journal of Energy Storage, 2023, 70, 108034.
- [11] W. Saikong, P. Phumma, S. Tantrairatn and C. Sumpavakup, A comparative study on battery modelling via specific hybrid pulse power characterization testing for unmanned aerial vehicles in real flight conditions, World Electric Vehicle Journal, 2025, 16(2), 55.
- [12] L. Mariga, I. Silva Tiburcio, C.A. Martins, A.N. Almeida Prado and C. Nascimento, Measuring battery discharge characteristics for accurate UAV endurance estimation, The Aeronautical Journal, 2020, 124(1277), 1099–1113.
- [13] C. Chen, Z. Wei and A.C. Knoll, Charging optimization for lithium-ion battery in electric vehicles: A review, IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2022, 8, 3068–3089.
- [14] H. Miniguano, A. Barrado, A. Lazaro, P. Zumel and C. Fernandez, General parameter identification procedure and comparative study of lithium-ion battery models, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(1), 235–245.
- [15] S. Wang, C. Fernandez, L. Shang, Z. Li and J. Li, Online state of charge estimation for the aerial lithium-ion battery packs based on the improved extended Kalman filter method, Journal of Energy Storage, 2017, 9, 69–83.

- [16] J.I. Hidalgo-Reyes, J.F. Gómez-Aguilar, R.F. Escobar-Jiménez, V.M. Alvarado-Martínez and M.G. López-López, Classical and fractional-order modeling of equivalent electrical circuits for supercapacitors and batteries, energy management strategies for hybrid systems and methods for the state of charge estimation, A state of the art review, *Microelectronics Journal*, 2019, 85, 109–128.
- [17] H. He, R. Xiong, X. Zhang, F. Sun and J. Fan, State-of-charge estimation of the lithium-ion battery using an adaptive extended Kalman filter based on an improved Thevenin model, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 60, 1461–1469.
- [18] G. Di Rito, A. Suti, A. Ricci, R. Galatolo and G. Mattei, Experimental characterisation of lithium-polymer battery packs and BLDC machines for hybrid propulsion systems of lightweight UAVs, 2022 IEEE 9th International Workshop on Metrology for AeroSpace, *Proceeding*, 2022, 49–53.
- [19] R. Xiong and W. Shen, *Advanced battery management technologies for electric vehicles*, John Wiley & Sons, Ltd., 2019.
- [20] P. Venugopal, S.S. Shankar, C.P. Jebakumar, R. Agarwal, H.H. Alhelou, S.S. Reka and M.E. Hamedani Golshan, Analysis of optimal machine learning approach for battery life estimation of lithium-ion cell, *IEEE Access*, 2021, 9, 159616–159626.
- [21] L. Apa, Z.D. Prete, F. Forconi, M. Palermo, F.R. Fulginei, E. Rizzuto and L. Sabino, Neural network approaches for state of charge prediction of rechargeable lithium polymer batteries, *IEEE 22nd Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON 2024)*, *Proceeding*, 2024, 236–241.
- [22] F. Manzoor, H. Saleem, I.H. Naqvi and N.A. Zaffar, Online state of charge estimation framework using hybrid equivalent circuit model and neural network, 2023 IEEE Power and Energy Society General Meeting (IEEE PESGM 2023), *Proceeding*, 2023, 1–5.

A Lesson Learned from the UK Rail Project: An Analysis of Critical Success Factors (CSFs) through the Project Life Cycle (PLC)

Oranicha Buthphorm

Faculty of Science and Social Sciences, Burapha University, Sakaew Campus

* Corresponding author, E-mail: oranicha@buu.ac.th

Received: 16 May 2025; Revised: 4 September 2025; Accepted: 11 September 2025

Online Published: 8 December 2025

Abstract: This study examines the critical success factors (CSFs) of railway construction projects through the lens of the Project Life Cycle (PLC), addressing the defining, planning, implementing, and closing phases. Although CSFs have been widely studied, their systematic application to Thailand's railway sector remains limited, particularly in linking lessons from international best practices. Employing a systematic literature review and content analysis, the research synthesizes evidence from major United Kingdom projects, including Crossrail and High Speed 2 (HS2), and compares them with experiences in Thailand. The analysis identifies governance, stakeholder collaboration, and risk management as decisive CSFs across all PLC phases. Key findings highlight that early participatory consultations enhance legitimacy, structured risk registers and stakeholder mapping strengthen planning, while real-time monitoring and independent audits improve implementation oversight. In the closing phase, structured handovers and training programs are vital for operational continuity. By integrating international lessons with a PLC perspective, this study provides policymakers and practitioners with a structured framework for improving the governance, efficiency, and sustainability of Thai railway projects. Beyond this sectoral focus, the PLC–CSFs framework demonstrates wider applicability to large-scale infrastructure initiatives, contributing to both theoretical advancement and practical guidance for sustainable transport development in Thailand.

Keywords: Rail Project; Critical Success Factors; Project Life Cycle



1. Introduction

Rail transport plays a pivotal role in industrial development and socioeconomic growth, particularly in facilitating domestic and international trade. Projects involving constructing of railways are inherently complex due to their size, duration, linear site characteristics, high investment, and involvement of several organizations [1]. In Thailand, the national infrastructure strategy (2015–2022) prioritizes railway development, with a particular emphasis on double-track projects. Despite this strategic importance, Thailand's railway development has repeatedly encountered delays and cost escalations across various project types. For example, the completed Chira Junction–Khon Kaen double-track line was marked by disputes over land acquisition and procurement, which exposed persistent challenges in governance and inter-agency coordination [2]. Current double-track projects continue to face difficulties stemming from overlapping institutional responsibilities, inadequate monitoring systems, and recurrent budget revisions. High-speed rail initiatives, particularly the Bangkok–Nakhon Ratchasima project, have been further impeded by political uncertainties, financing constraints, and protracted negotiations with international partners, leading to recurring extensions of project timelines [3]. Collectively, these recurring obstacles—land acquisition disputes, procurement inefficiencies, weak oversight, and political as well as financial instability not only

undermine the timely delivery of anticipated public benefits but also exacerbate financial burdens. Such issues underscore the pressing need for governance reforms, proactive risk management, and systematic stakeholder engagement in Thailand's railway sector.

To confront these challenges, the analytical framework of Critical Success Factors (CSFs) has gained prominence in infrastructure and project management research since the foundational contributions of Pinto and Slevin [4]. CSFs refer to a limited number of key areas where satisfactory performance ensures successful project outcomes. Through the utilization of the Project Life Cycle (PLC) paradigm, which encompasses the processes of defining, planning, implementing, and closing, CSFs can be methodically assessed to discover their function at every step of project development [5]. The integration of PLC with CSFs analysis is particularly significant as it not only isolates the most influential factors but also clarifies their temporal relevance and mechanisms of impact, thereby equipping project managers with actionable insights throughout the project's progression.

This study adopts a comparative perspective by examining railway projects in the United Kingdom (UK), notably Crossrail and High-Speed 2 (HS2). These projects present instructive parallels with Thailand in terms of extensive government investment, reliance on public–private partnerships, stakeholder diversity, and recurring challenges of



cost escalation and schedule slippage. At the same time, UK projects have demonstrated comparatively stronger governance structures and stakeholder engagement mechanisms, offering valuable lessons applicable to the Thai context. While international scholarship has extensively explored CSFs, studies that apply a PLC-based perspective to Thailand's railway industry remain scarce. Addressing this gap not only enhances theoretical understanding but also provides practical contributions to policy and practice in infrastructure delivery.

In light of these considerations, this research pursues three core objectives: (1) to identify the CSFs across the four phases of the PLC; (2) to extract lessons learned from UK railway projects; and (3) to propose strategies for enhancing the performance of Thailand's railway development initiatives, with particular focus on double-track projects.

2. Methodology

This study adopted a qualitative research design based on an extensive literature review and documentary analysis. The methodological process consisted of four stages: (1) literature identification and selection, (2) content analysis, (3) drawing lessons from UK rail experiences, and (4) synthesizing suggestions for Thailand.

2.1 Literature identification and selection

Prominent databases such as Scopus, Web of Science, and Google Scholar were used to obtain pertinent scholarly articles and official reports. "Critical success factors," "railway project," "project life cycle," and "cost overrun" were the keywords utilized. Publications from 1980 to 2022 that addressed both construction management and transportation-related topics were the focus of the search. The study had to cover CSFs, success criteria, project performance; it had to adopt or be pertinent to PLC stages. From an initial pool of 167 articles, thirteen papers met the criteria and were systematically reviewed.

2.2 Content analysis

To extract CSFs and map them onto the PLC framework, content analysis was used. 1. Coding the factors mentioned in each study; 2. Classifying them into the four PLC phases (definition, planning, implementation, and closure); 3. Finding the factors that are most emphasized by calculating the frequency of occurrence; 4. To guarantee conceptual consistency, cross-check with theoretical frameworks.

2.3 Extraction of lessons from UK rail projects

The lessons analyzed in this study were derived from major UK rail initiatives, particularly Crossrail [6], HS2 [7], and the Crossrail Learning Legacy database [8], together with official reports



from the UK Department for Transport. These sources provided evidence of both successes and challenges, which were synthesized into lessons relevant for Thai railway development. Emphasis was placed on identifying practices that strengthened project governance, enhanced stakeholder participation, and improved risk management, thereby offering transferable insights for Thai railway projects.

2.4 Synthesis of recommendations for Thailand

To produce context-specific suggestions for Thailand's railway projects, the CSFs found through content analysis were finally combined with the case findings from the UK. The study examined quantitative information for Thailand's railway industry in addition to case studies from the UK. The goal of the synthesis process was to

(a) identify techniques that may be applied in different countries, (b) adapt them to fit the institutional and socioeconomic context of Thailand, and (c) create practical recommendations for practitioners, policymakers, and project managers

3. Results

3.1 The CSFs across the four PLC phases

CSFs determine a project's success, and the efficacy of these elements is frequently linked across various phases. The top three most important parameters for each PLC phase were determined by analyzing 41 CSFs from earlier studies (1980–2022). This method emphasizes how CSFs in one phase impact those in the next and provides a more organized guide than a generic list (Tables 1a – 1d).

Table 1a Top three CSFs in the defining phase

Rank (Score 0-5)	CSF	References	Rationale
1 (4)	Clear mission, goals, and objectives	Ikele et al. [9]	Establishes project vision and prevents scope ambiguity
1 (4)	Stakeholder consultation and engagement	Khang & Moe [10]	Early involvement reduces later conflicts
3 (3)	Competency of project designers and promoters	Khang & Moe [10]	Ensures feasibility and realistic expectations

**Table 1b** Top three CSFs in the planning phase

Rank (Score 0-5)	CSF	References	Rationale
1 (5)	Adequate resource allocation (finance, workforce, equipment)	Abeysekara et al. [11]	Prevents delays and cost overruns
1 (5)	Risk management and contingency planning	Pinto & Slevin [4]; Ikele et al. [9]	Anticipates uncertainties and mitigates failures
3 (4)	Early supply chain and stakeholder involvement	Wuni & Shen [12]	Strengthens coordination and trust

Table 1c Top three CSFs in the implementation phase

Rank (Score 0-5)	CSF	References	Rationale
1 (5)	Strong project leadership and troubleshooting	Pinto & Slevin [4]	Guides team and resolve on-site challenges
2 (4)	Quality control and auditing mechanisms	Hassan et al. [13]	Ensure compliance with standards
2 (4)	Skilled workforce and technical expertise	Wuni & Shen [12]	Maintains efficiency and productivity

Table 1d Top three CSFs in the closing phase

Rank (Score 0-5)	CSF	References	Rationale
1 (3)	Competence of project manager during handover	Khang & Moe [10]	Facilitates smooth transition to operations
1 (3)	Documentation and knowledge transfer	Niu et al. [14]	Preserves institutional learning
3 (2)	Establishing long-term cooperation with operators	Niu et al. [14]	Sustains project benefits and service quality



Together, the score values (0–5) represent the frequency with which a factor was emphasized in the reviewed literature, with “5” indicating the highest recurrence and influence of a factor. The tables reveal that CSFs are emphasized during the planning and implementation phases, particularly in the areas of resource allocation, risk management, and leadership. Conversely, the closure phase has received relatively less emphasis in the literature, although effective documentation and long-term cooperation remain essential for project sustainability.

By defining the project's core vision and objectives, the defining phase lays the groundwork for success (Table 1a).

The planning phase is immediately impacted by the results of the defining phase, such as well-defined objectives and early, stakeholder support. The framework required for successful execution is provided by proper resource allocation and risk management set up during the planning phase (Table 1b).

Strong project leadership throughout implementation facilitates more efficient project closure (Table 1c). A formal conclusion and handover of the project to the operations team occurs during the closing phase. The project manager's ability to provide an effortless transition to the operational stage during the handover is the most crucial aspect of this phase (Table 1d).

3.2 Lessons from the UK's rail projects

To strengthen the comparative analysis, this study reviewed lessons from the UK's two largest rail projects [6, 7]. These initiatives offer valuable insights into structuring governance, stakeholder engagement, and risk management practices. By mapping the key lessons to the PLC, the findings highlight practical mechanisms that could be adapted to improve Thai railway projects. Table 2 presents these key lessons in relation to each PLC phase.

3.2.1 Comparative Analysis: UK vs Thailand

Table 3 demonstrates the railway projects in both the UK and Thailand encounter recurring delays and cost overruns, yet their responses differ markedly. In the UK, despite overruns in [6, 7], mechanisms such as parliamentary reviews, statutory consultations, and independent cost boards enhance accountability and institutional learning. By contrast, Thai projects continue to face land acquisition disputes, procurement conflicts, and weak monitoring, resulting in delays of 40–60% in double-track construction [15] and over 80% in high-speed rail [5].

Governance frameworks: UK projects benefit from clearly defined governance structures, independent oversight, and transparent parliamentary review processes, which reinforce accountability and policy continuity. Thai projects, however, often



suffer from fragmented responsibilities and policy discontinuity, as seen in the [5], where overlapping agency roles and delayed decisions contributed to cost overruns.

Stakeholder collaboration: The UK institutionalizes early stakeholder engagement through statutory consultation, reducing resistance to land acquisition. For example, [7] established formal consultation processes before construction. Thailand, by contrast, continues to face disputes with landowners and communities, exemplified by the [2, 3] which were delayed by expropriation conflicts and contested contracts.

Risk management: Initiative-taking risk anticipation in UK projects is supported by tools such as BIM and real-time monitoring dashboards, enabling timely corrective actions. In Thailand, risk management is largely reactive, with double-track projects under construction averaging 40–60% delays and high-speed rail exceeding 80%, reflecting systemic weaknesses in monitoring and contingency planning.

In summary, Thailand's challenges concentrate in the defining and planning phases, where weak feasibility studies, land disputes, and procurement issues create cascading inefficiencies during implementation and closing. Conversely, the UK experience demonstrates that institutionalized governance, stakeholder consultation, and initiative-taking risk management reduce uncertainties and

strengthen delivery. These contrasts form the foundation for the actionable recommendations outlined in the following section.

3.3 Recommendations for Thailand

To address the third objective of this study—deriving actionable guidelines for improving Thai railway projects—the following recommendations are synthesized from the comparative analysis of CSFs across the PLC and the lessons learned from UK projects. These strategies are tailored to Thailand's institutional context to strengthen governance, stakeholder engagement, and risk management throughout the project lifecycle.

Building on UK lessons and Thai evidence, actionable strategies are proposed for each PLC phase as follow:

3.3.1 Defining phase

Institutionalize participatory pre-project evaluations and transparent feasibility reviews. Early consultation would mitigate politically influenced studies and reduce land disputes.

3.3.2 Planning phase

Mandate risk registers and stakeholder mapping as part of official submissions. These tools anticipate conflicts such as those in [2] and [3].

3.3.3 Implementation phase

Adopt real-time monitoring and independent audits, similar to Crossrail's digital dashboards, to reduce cost overruns and contractor delays.

**Table 2** Key Lessons from UK Rail Projects by PLC Phase

PLC Phase	UK Lesson (Crossrail / HS2)	Relevance for Thai Railway Projects
Defining	Sponsor-led, independent delivery unit (Crossrail Ltd) with clearly defined roles	Emphasizes need for clear project governance and stakeholder clarity at project inception
Planning	Early establishment of SMART KPIs driving alignment across team and phases	Supports performance-based planning, cost control, and accountability
Implementation	Digital risk registers with health & safety focus (HS2), and digital construction data tracking	Demonstrates value of initiative-taking monitoring, Building Information Modelling (BIM), and centralized risk tracking
Closing	Structured learning legacy capturing institutional knowledge and best practices	Suggests creating a knowledge repository and handover protocols for Thai rail projects

Table 3 Comparative Delay Factors in UK and Thai Rail Projects Mapped to PLC Phases

PLC Phase	UK: Institutional Practices & Success Factors	Thailand: Delay Factors & Evidence
Defining	Statutory consultations; feasibility reviewed by parliament.	Politically influenced feasibility (Bangkok – Nakorn Ratchasima high-speed [3])
Planning	Independent cost boards; phased budgeting; transparent procurement.	Weak early engagement; land disputes, delays in contractor appointment, cost underestimation; fragmented coordination; land expropriation disputes (Bangkok – Nakorn Ratchasima high-speed [3], >80% delays, Ban Phai – Nong Pok [15]).
Implementation	BIM, dashboards, and independent audits for initiative-taking monitoring.	Contractor delays; weak oversight; design issues (Ban Phai – Nong Pok [15], double-track delays 40–60%)
Closing	Learning Legacy programs transfer knowledge.	Lack of systematic reviews and handover protocols; repeated inefficiencies (Thanon Jira Junction –Khon Kaen [4] readiness delays).



3.3.4 Closing phase

Establish structured handover protocols and training for operations staff, supported by a public “Learning Legacy” repository to prevent knowledge loss. These recommendations underscore governance reforms, proactive risk management, and institutionalized stakeholder engagement as essential strategies for advancing Thailand’s railway sector. Adapted from UK practices but tailored to the Thai context, they not only address recurring delays in project implementation but also strengthen the long-term sustainability of national transport infrastructure. Following these guidelines could help Thailand’s rail projects operate glued to their schedules, guaranteeing effective operation and boosting public confidence in the system.

3.3.5 Actionable Recommendations for Thai Railway Projects

Building on the comparative analysis, four priority areas emerge across the PLC: participatory pre-project evaluation (defining), systematic risk registers and stakeholder mapping (planning), real-time monitoring with independent audits (implementation), and structured handover with capacity building (closing). These strategies, consolidated in Table 4, highlight how lessons from UK railway projects can be adapted to strengthen governance, risk management, and stakeholder engagement in Thai rail projects.

4. Discussion

The PLC framework proved effective in mapping CSFs across rail projects, supporting [4] emphasis on reinforcing success factors throughout the lifecycle and [5] validation of PLC as a reliable evaluation tool. Applied to the Thai context, the analysis highlights persistent weaknesses in governance, stakeholder engagement, and risk management.

4.1 Governance

Thai projects continue to suffer from overlapping responsibilities and delayed decisions, as illustrated by [3]. By contrast, UK projects institutionalize parliamentary oversight and independent boards, which improve continuity and transparency.

4.2 Stakeholder engagement

Community resistance and land disputes have caused extensive delays in Thai projects, including [2, 3]. The UK approach, exemplified by HS2, demonstrates that statutory consultations and early engagement can reduce resistance and enhance legitimacy.

4.3 Risk management

While UK projects employ initiative-taking mechanisms such as BIM and real-time dashboards, Thai projects remain reactive. This is reflected in delays of 40–60% in [2], and more than 80% in high-speed rail initiatives [3], with major financial consequences.

**Table 4** Weaknesses and recommendations for Thai rail projects across the PLC

PLC Phase	Key Weaknesses in Thailand	Relevant CSFs	Lessons from UK	Recommendations for Thailand
Defining	Politically influenced feasibility studies; limited stakeholder engagement, land disputes	Clear objectives; stakeholder involvement; risk assessment	Comprehensive demand modelling; statutory consultations	Independent feasibility review; demand-driven planning; institutionalizes early community consultation
Planning	Cost estimation errors, budget revisions; fragmented coordination; land expropriation delays	Accurate cost/time estimation; integrated planning; governance structures	Independent cost boards; phased budgeting	Establish cost verification committees; integrated planning units; transparent land compensation
Implementation	Contractor delays due to procurement disputes; weak monitoring; reactive safety oversight	Contractor capacity; risk monitoring; safety management; communication	Digital monitoring systems; independent safety regulators	Contractor capacity proof; BIM/digital dashboards; independent safety oversight
Closing	Lack of systematic post-project review; limited knowledge transfer; weak maintenance integration	Knowledge management; post-project review; sustainability planning	Post-completion audits; “Learning Legacy”	Post-project evaluations; public knowledge repositories; integrated maintenance plans



Overall, governance, stakeholder collaboration, and risk management emerge as interdependent CSFs that decisively influence project performance. Strengthening these areas could shift Thai railway projects from recurring inefficiencies toward improved accountability, timeliness, and sustainability.

4.4 Public vs private roles

In the Thai context, most railway projects are state driven, with the Ministry of Transport (MOT), the SRT, and the Mass Rapid Transit Authority (MRTA) as primary sponsors. Consequently, governance weaknesses—such as overlapping mandates and political discontinuity—reflect challenges unique to public sector delivery. By contrast, private sector participation, particularly under Public Private Partnership (PPP) schemes, faces different bottlenecks, including procurement disputes and investment uncertainties. Recognizing these distinctions is essential for tailoring governance reforms and risk management tools to both public and mixed-delivery models.

4.5 Limitations and Directions for Future Research

This study is limited by its reliance on secondary sources, which, while valuable, may not fully reflect the contextual realities of Thai railway projects. The comparative framework with the UK provides useful lessons but risks over-generalization due to institutional and legal differences. Furthermore, the

absence of primary data, such as interviews or stakeholder surveys, constrains the depth of contextual understanding. Future research should therefore employ field-based methods—including case studies and direct stakeholder engagement—to validate and enrich the applicability of the PLC–CSFs framework in Thailand and to generate more actionable policy recommendations.

5. Conclusion

The study fulfilled three objectives: it identified the CSFs across the four stages of the PLC, extracted lessons from United Kingdom railway projects, and translated these insights into actionable guidelines for Thai railway initiatives. The findings highlight governance reform, stakeholder collaboration, and initiative-taking risk management as decisive factors for improving delivery in large-scale transport projects. By linking the UK's technology-driven risk management and statutory consultation practices to Thailand's challenges—such as land acquisition and procurement disputes—this study demonstrates how cross-national learning can inform more efficient, accountable, and sustainable project implementation. Beyond the immediate focus on rail, the PLC–CSFs framework also provides broader analytical utility for motorways, logistics hubs, and smart city infrastructure, thereby contributing to both scholarly debates and practice-oriented strategies for sustainable development.



5.1 Policy Implications

The results point to clear operational pathways for Thai transport governance. At the defining phase, the MOT and Department of Rail Transport (DRT) should institutionalize statutory consultations to strengthen legitimacy and stakeholder alignment. At the planning phase, agencies and private contractors need to embed risk registers and stakeholders mapping into project approval protocols to anticipate and mitigate disputes. At the implementation phase, organizations such as the SRT and the MRTA must adopt real-time monitoring systems and independent audits as standard tools to ensure accountability and transparency. Finally, at the closing phase, structured handover mechanisms and capacity-building programs for operational staff are essential for sustaining long-term performance. Embedding these measures within national transport strategies and regulatory frameworks would not only enhance the timeliness and efficiency of rail projects but also reinforce investor confidence and institutional resilience across Thailand's wider infrastructure sector.

6. References

- [1] P.E.D. Love, J. Zhou, D.J. Edwards, Z. Irani and C.-P. Sing, Off the rails: The cost performance of infrastructure rail projects, *Transport Research Part A: Policy and Practice*, 2017, 99, 14–29.
- [2] <https://www.otp.go.th/post/view/2483>. (Accessed on August 27, 2025)
- [3] <https://www.highspeedrail-thai-china.com/en/progress-en/>. (Accessed on 27 August 2025)
- [4] J.K. Pinto and D.P. Slevin, Critical success factors across the project life cycle: definitions and measurement techniques, *Project Management Journal*, 1988, 19(3), 67-75.
- [5] S. Toor and S.O. Ogunlana, Problems are causing delays in major construction projects in Thailand, *Construction Management and Economics*, 2008, 26(4), 395–408.
- [6] <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/664b0afebd01f5ed32793e3e/crossrail-lessons-learned-report.pdf>. (Accessed on 1 December 2022)
- [7] <https://www.hs2.org.uk/what-is-hs2/h2-project-update/>. (Accessed on 25 August 2025)
- [8] <https://learninglegacy.crossrail.co.uk/documents/sustainability-strate>. (Accessed on 9 December 2022)
- [9] O. Ikele, R. Agazuma and B. Akhiwu, Prospect of reliability in project management process using life cycle approach, A case study of oil and gas project scientific, *Journal of Research and Reviews*, 2022, 3(3), 1-7.



- [10] D.B. Khang and T.L. Moe, Success criteria and factors for international development projects: A life-cycle-based framework, *Project Management Journal*, 2008, 39(1), 72–84.
- [11] B. Abeysekara, P. Perera, G.K.C. Shrestha, L. Gunaruwan, A. Kumara, R. Sadiq and K. Hewage, Improving the capital deployment efficiency: An infrastructure investment planning process in transportation project, *Research in transportation economics*, 2021, 88, 101048.
- [12] I.Y. Wuni and G.Q. Shen, Critical success factors for modular integrated construction projects: a review, *Building Research and Information*, 2020, 48(7), 763-784.
- [13] Z. Hassan and R.M. Adzmi, A theoretical framework of critical, *International Journal of Engineering*, 2018, 7(4.35), 650-655.
- [14] Y. Niu, D. Zhao, X. Deng, R. Lu and X. Zhao, Determinants for cooperation strategies of international joint ventures in high-speed railway projects, *Journal of civil engineering and Management*, 2021, 27(5), 331-345.
- [15] <https://www.srtbanphainongphokc1.com/index.asp>. (Accessed August 26, 2025)



การประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพร่วมกับการวัดขนาดร่างกายในการออกแบบโต๊ะปฏิบัติงานช่างสำหรับผู้พิการ

รัตน์เกล้า ขวัญละมุล สุรศักดิ์ จินดาทิพย์ อธิพันธ์ ลอยเมืองกลาง และ ศิริชัย ยศวังใจ*

ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม,

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: sirichai.y@cit.kmutnb.ac.th

วันที่รับบทความ: 27 พฤษภาคม 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 9 กรกฎาคม 2568; วันที่ตอบรับบทความ: 12 กันยายน 2568

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 9 ธันวาคม 2568

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาและประยุกต์ใช้วิธีการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพร่วมกับการวัดขนาดสัดส่วนร่างกายเพื่อออกแบบโต๊ะปฏิบัติงานช่างที่เหมาะสมสำหรับผู้พิการทางการเคลื่อนไหวส่วนล่าง โดยใช้กระบวนการบ้านคุณภาพเป็นเมทริกซ์หลักในการเชื่อมโยงความต้องการของผู้ใช้งานกับข้อกำหนดทางเทคนิค ขั้นตอนแรกดำเนินการเก็บข้อมูลความต้องการของผู้ใช้งานผ่านแบบสอบถาม และแปลงเป็นข้อกำหนดทางเทคนิคตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ จากนั้นสร้างเมทริกซ์ความสัมพันธ์เพื่อประเมินระดับความสำคัญของแต่ละข้อกำหนด ขั้นตอนที่สองดำเนินการวัดขนาดสัดส่วนร่างกายของผู้พิการจำนวน 15 คน จากมูลนิธิพระมหาไถ่เพื่อการพัฒนาผู้พิการ โดยวัดค่าทางสรีรศาสตร์ 9 รายการ เช่น ความสูงจากพื้นถึงที่นั่ง ความสูงของเข่า ความกว้างระหว่างขา ระยะเอื้อมถึงด้านหน้า ระยะเอื้อมถึงด้านข้าง ระยะจากพื้นถึงข้อศอก ความกว้างของวิลแชร์ ความสูงจากพื้นถึงสายตา และระยะการหมุนตัวของวิลแชร์ เพื่อนำมาประกอบการออกแบบโต๊ะให้เหมาะสมกับการใช้งานจริง ผลลัพธ์จากทั้งสองขั้นตอนถูกนำมาสังเคราะห์เพื่อกำหนดคุณลักษณะของโต๊ะปฏิบัติงานช่างต้นแบบที่สอดคล้องกับความต้องการของผู้ใช้และข้อจำกัดทางร่างกาย ผลการประเมินค่าความสำคัญ พบว่า หลังการพัฒนาต้นแบบ ค่าความสำคัญเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 5.93 เปอร์เซนต์ โดยเฉพาะในด้านความปลอดภัยและเสถียรภาพที่เพิ่มขึ้นสูงสุดถึง 11.03 เปอร์เซนต์สะท้อนให้เห็นถึงประสิทธิภาพของต้นแบบในการตอบสนองต่อความต้องการของผู้พิการได้อย่างแท้จริง

คำสำคัญ: การแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ; การวัดขนาดร่างกาย; โต๊ะปฏิบัติงานช่าง; ผู้พิการ; ออกแบบผลิตภัณฑ์

Applying Quality Function Deployment with Anthropometric to Design A Working Bench Table for Persons with Disabilities

Ratklao Khwanlamoon, Surasak Jindathip, Atipunt Loymuangklang and Sirichai Yodwangjai*

Department of Industrial Engineering Technology, College of Industrial Technology,
King Mongkut's University of Technology North Bangkok

* Corresponding author, E-mail: sirichai.y@cit.kmutnb.ac.th

Received: 27 May 2025; Revised 9 July 2025; Accepted: 12 September 2025

Online Published: 9 December 2025

Abstract: This research aims to study and apply the Quality Function Deployment technique in conjunction with anthropometric measurements to design a workbench suitable for individuals with lower-limb disabilities. The House of Quality matrix was employed as the primary tool to link user requirements with technical specifications. In the first phase, user needs were collected through questionnaires and translated into technical requirements based on product standards. A relationship matrix was then constructed to evaluate the importance of each requirement. In the second phase, anthropometric data were collected from 15 individuals with disabilities at the Redemptorist Foundation for People with Disabilities. Nine key measurements were taken, including seat height, knee height clearance, leg width clearance, forward reach range, side reach range, elbow height, wheelchair width, eye level height and wheelchair turning radius. These data were used to define appropriate dimensions for the workbench design. The results from both phases were synthesized to develop a prototype that reflects user needs and accommodates physical limitations. The evaluation of the importance rating showed an average increase of 5.93% after prototype development, with the highest improvement observed in the safety and stability dimension (11.03%), indicating the effectiveness of the design in meeting the needs of wheelchair users.

คำสำคัญ: Quality function deployment; Anthropometric; Working bench table; Person with disabilities; Product design



1. บทนำ

ปัจจุบันกรมส่งเสริมและพัฒนาคุณภาพชีวิตผู้พิการ รายงานสถานการณ์ผู้พิการในประเทศไทยในเดือน เมษายน ปี 2568 มีจำนวนเฉลี่ยที่ 3.39 เปอร์เซ็นต์ ของประชากรทั้งหมด เมื่อแบ่งประเภทของผู้พิการใน แต่ละลักษณะของความพิการ พบว่า พิการทางการ เคลื่อนไหว/ทางร่างกายสูงถึง 51.98 เปอร์เซ็นต์ มีการจ้างงานจากสถานประกอบการจำนวน 42.98 เปอร์เซ็นต์ แต่มีการประกอบอาชีพช่วง และ อาชีพงานบริการจำนวนน้อย [1] จากการสำรวจข้อมูล ครั้วเรือนผู้พิการส่วนใหญ่จะมีรายได้ไม่เพียงพอ ต่อการดำรงชีพ ภาครัฐต้องอุดหนุนงบประมาณ สนับสนุน ส่วนผู้พิการกลุ่มใหญ่ที่มีปัญหาทางการ เคลื่อนไหวจะใช้เก้าอี้มีล้อสำหรับผู้พิการหรือวีลแชร์ (Wheelchair) ซึ่งสามารถเคลื่อนไหวและใช้ชีวิตได้ สะดวกขึ้นภายใต้สภาพแวดล้อมที่เอื้ออำนวย ในช่วง เวลาที่ผ่านมา มีการเก็บรวบรวมข้อมูลสัดส่วนร่างกาย ของผู้ที่ใช้วีลแชร์ในกลุ่มผู้สูงอายุและผู้พิการ [2] เพื่อใช้ เป็นฐานข้อมูลในการอ้างอิง และนำข้อมูลที่ได้มาช่วยใน การออกแบบและปรับปรุงสภาพแวดล้อมให้เหมาะสม [3] จากการสำรวจในกลุ่มผู้พิการที่มีปัญหาการ เคลื่อนไหวระดับนั่งวีลแชร์ที่มีความบกพร่องหรือ สูญเสียความสามารถในการเคลื่อนไหว เช่น ขาอ่อนแรง ขาขาด เจ็บป่วยเรื้อรังจนกระทบต่อการทำงานของขา แต่มีอวัยวะส่วนบน (แขนทั้งสองข้าง) ยังใช้งานได้ ตามปกติ มีการเรียน ผูกอาชีพและประกอบอาชีพด้าน อิเล็กทรอนิกส์ เทคโนโลยีสารสนเทศและคอมพิวเตอร์ งานประดิษฐ์และตกแต่งชิ้นไม้เป็นอีกอาชีพหนึ่งที่ผู้ พิการต้องการเพิ่มศักยภาพในตนเองด้วยงานที่ใช้ด้วย

เครื่องมือพื้นฐาน เช่น ค้อน สว่า เลื่อย รวมไปถึง เครื่องมือช่างไฟฟ้าขนาดเล็ก โดยโต๊ะทำงานที่ใช้เป็น โต๊ะทำงานทั่วไปที่นำมาดัดแปลง หรือโต๊ะปฏิบัติงาน ช่างเฉพาะก็ไม่สามารถใช้งานได้ เนื่องจากข้อจำกัด เบื้องต้นทางการเคลื่อนไหว และการนั่งบนวีลแชร์ที่มี การเคลื่อนที่ไม่สะดวกและการเอื้ออำนวยอุปกรณ์ในการ ทำงานอาจได้รับอันตรายจากการเสียดสีกล้ามเนื้อจากวีล แชร์ก่อกับยังไม่มีโต๊ะปฏิบัติงานช่างที่ออกแบบมา สำหรับผู้ใช้วีลแชร์

ดังนั้น ผู้วิจัยมีความสนใจในการสำรวจ พัฒนา และ ออกแบบโต๊ะปฏิบัติงานช่างสำหรับผู้พิการที่มีการ เคลื่อนไหวระดับนั่งวีลแชร์ด้วยหลักการแปลงหน้าที่เชิง คุณภาพซึ่งเป็นวิธีหนึ่งซึ่งช่วยในการออกแบบและพัฒนา ผลิตภัณฑ์ที่แปลงความต้องการของลูกค้าที่แท้จริงให้ เป็นข้อกำหนดหรือรายละเอียดของการออกแบบ ผลิตภัณฑ์ทางวิศวกรรม ร่วมกับการวัดขนาดร่างกาย ของผู้พิการที่มีการเคลื่อนไหวระดับนั่งวีลแชร์ที่มีขนาด ร่างกายแตกต่างจากขนาดร่างกายของคนทั่วไปเพื่อใช้ กำหนดขนาดโต๊ะปฏิบัติงานช่างสำหรับผู้พิการในการ ใช้งานร่วมกับวีลแชร์ได้อย่างเหมาะสม [4] และเพิ่ม โอกาสในการประกอบอาชีพให้แก่ผู้พิการทางการ เคลื่อนไหวมากขึ้น

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ

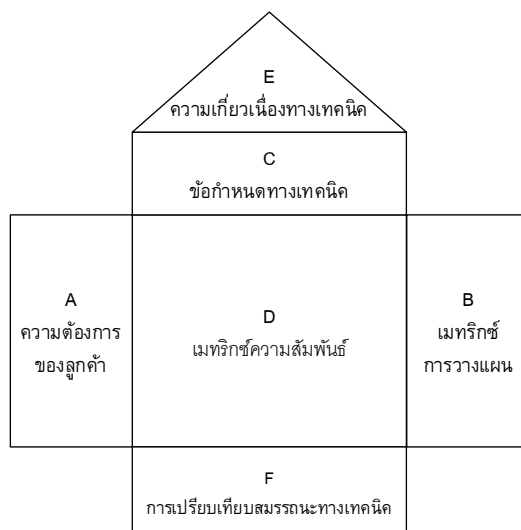
การแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ (Quality Function Deployment: QFD) เป็นเทคนิคการออกแบบ ผลิตภัณฑ์ สินค้า บริการ หรือกระบวนการ โดยมี จุดมุ่งหมายเพื่อให้สอดคล้องกับความต้องการของลูกค้า



อย่างสูงสุด แนวทางนี้ความต้องการของลูกค้า มาเป็นปัจจัยหลักในการกำหนดคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ ผสานกับกระบวนการออกแบบทางวิศวกรรม และการเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ของคู่แข่งในตลาด เพื่อให้สามารถตอบสนองต่อความคาดหวังของผู้บริโภคได้อย่างมีประสิทธิภาพ QFD ทำหน้าที่เชื่อมโยงข้อมูลจากหลายมิติ ได้แก่ ความต้องการของลูกค้า ข้อมูลทางเทคนิคของผลิตภัณฑ์ และข้อมูลด้านการผลิต ซึ่งกระบวนการนี้จำเป็นต้องอาศัยการทำงานร่วมกันของหลายฝ่าย ทั้งในด้านการวิเคราะห์ การออกแบบ และการสื่อสารข้อมูล เพื่อให้เกิดการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพและตรงตามความต้องการของตลาดเป้าหมาย

Akao [5] นำเสนอรูปแบบเทคนิค QFD ที่ประกอบด้วย 4 เมทริกซ์หลัก คือ เมทริกซ์การวางแผนผลิตภัณฑ์ เมทริกซ์การออกแบบผลิตภัณฑ์ เมทริกซ์การวางแผนกระบวนการ และเมทริกซ์การควบคุมกระบวนการ โดยกระบวนการพัฒนาจะเริ่มต้นที่เมทริกซ์แรกที่เรียกว่า บ้านคุณภาพ (House of Quality: HOQ) ซึ่งมีส่วนประกอบแสดงดังรูปที่ 1

ส่วนประกอบที่ 1 (A) ความต้องการของลูกค้า โดยการนำความต้องการของลูกค้าที่ได้มาคัดกรองและจัดเรียงเรียงใหม่ ส่วนประกอบที่ 2 (B) สร้างเมทริกซ์การวางแผน ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์รูปแบบเดิมและรูปแบบใหม่ เพื่อทำการกำหนดอัตราการปรับปรุงผลิตภัณฑ์ ส่วนประกอบที่ 3 (C) การกำหนดข้อกำหนดทางเทคนิค โดยข้อกำหนดที่ต้องการจะอธิบายลักษณะทั่วไปของผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นตัวแทนคุณลักษณะเฉพาะทางคุณภาพหรือเรียกว่า



รูปที่ 1 ส่วนประกอบของบ้านคุณภาพ

ความต้องการของผลิตภัณฑ์ด้านเทคนิคที่เกี่ยวข้องกับผู้บริโภคด้วยเทคนิคการระดมสมอง

จากนั้น นำข้อมูลที่ได้ คือ ข้อกำหนดทางเทคนิค และค่ากำหนดเป้าหมายทางเทคนิคมาใส่ในส่วน C ของบ้านคุณภาพ เพื่อรับรู้ถึงทิศทางในการทำการปรับปรุงส่วนประกอบที่ 4 (D) สร้างเมทริกซ์ความสัมพันธ์ เป็นการกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างความต้องการของผู้บริโภค (ส่วน A) และข้อกำหนดทางเทคนิค (ส่วน C) ของบ้านคุณภาพ การสร้างขั้นตอนนี้มีความเข้าใจถึงความสามารถของแต่ละเทคนิคต่อระดับความพึงพอใจลูกค้า ส่วนใหญ่มีการใช้สัญลักษณ์ตัวเลข คือ 0, 1, 3 และ 9 แทนความสัมพันธ์ คือ ไม่มีความสัมพันธ์ มีความสัมพันธ์น้อย มีความสัมพันธ์ปานกลาง และมีความสัมพันธ์มาก ตามลำดับ ส่วนประกอบที่ 5 (E) ความเกี่ยวเนื่องในทางเทคนิค เป็นส่วนของหลังคาของ



บ้านคุณภาพ แสดงถึงความเกี่ยวเนื่องของเทคนิคที่นำมาใช้เป็นตัวแทนลักษณะเฉพาะทางคุณภาพ โดยมีการใช้สัญลักษณ์ “O” คือ มีความสัมพันธ์ต่อกันมาก “X” คือ มีความสัมพันธ์ต่อกันน้อย และ “ช่องว่าง” คือ ไม่มีความสัมพันธ์ต่อกันเลย และส่วนประกอบที่ 6 (F) การเปรียบเทียบสมรรถนะทางเทคนิค ในส่วนนี้แสดงถึงความสำคัญในปริมาณต่าง ๆ เพื่อให้ผู้พัฒนาทราบว่าความต้องการและตัวแทนลักษณะเฉพาะทางคุณภาพใดที่ต้องการปรับปรุงหรือต้องการเอาใจใส่มากขึ้น

หลักการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ ถูกนำไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในกระบวนการออกแบบผลิตภัณฑ์หลากหลายประเภท เพื่อให้สามารถตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ ได้แก่ ผลิตภัณฑ์เซรามิก [6] แก้วอเนกประสงค์สำหรับผู้สูงอายุ [7] รวมไปถึงโต๊ะปฏิบัติงานเชื่อม [8] เป็นต้น

2.2 การวัดขนาดร่างกาย

การออกแบบทางกายศาสตร์เป็นการนำคุณสมบัติทางกายภาพและสัดส่วนของร่างกายมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบเพื่อกลุ่มประชากรเฉพาะโดยวัตถุประสงค์เพื่อลดปัญหาความเมื่อยล้า อาการบาดเจ็บ ความเครียดจากการทำงานที่ไม่ถูกหลักการยศาสตร์ และการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่ไม่สอดคล้องกับสัดส่วนร่างกาย Mekcharoen and Ladavichitikul [9] แบ่งการวัดสัดส่วนร่างกายออกเป็น 2 ประเภท คือ การวัดในระยะทางร่างกายอยู่นิ่งและการวัดในระยะที่ร่างกายเคลื่อนไหว ซึ่งสามารถวัดระยะได้จากร่างกายจริง ภาพถ่าย หรือวิดีโอ ด้วย

โปรแกรมสำเร็จรูป Jarosz [10] นำเสนอข้อมูลสัดส่วนร่างกายในทำนองปกติและขนาดวีลแชร์ และนำมาวิเคราะห์ร่วมกับตำแหน่งการวัดในทำนองบรรทัดวีลแชร์เพื่อหาสัดส่วนของผู้ใช้วีลแชร์ในการสร้างแบบจำลองการเอื่อม เปรียบเทียบระหว่างพื้นที่การเอื่อมของคนปกติกับของผู้ใช้วีลแชร์ Paquet and Feathers [11] นำเสนอวิธีการวัดสัดส่วนร่างกายของผู้ใช้วีลแชร์และผู้ใช้วีลแชร์ไฟฟ้าด้วยระบบกล้อง 3 มิติ

ทั้งนี้ มีงานวิจัยที่นำหลักการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพร่วมกับหลักการยศาสตร์ร่วมกัน เช่น Ginting et al. [12] ประยุกต์ใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพในขั้นตอนแรกของรวบรวม ประเมินความต้องการของผู้บริโภคและขั้นตอนที่สองใช้วิธีการยศาสตร์ในการกำหนดขนาดสำหรับพัฒนาเครื่องตัดพื้นรองเท้า Adrianto et al. [13] ประยุกต์วิธีการยศาสตร์ร่วมกับเทคนิคการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพเรียกว่า Ergonomic Function Deployment (EFD) เพื่อพัฒนาตู้ขนาดเล็กที่ใช้ฆ่าเชื้อไวรัสโคโรนา 19 เช่นเดียวกับ Safira et al. [14] ประยุกต์ใช้ EFD ในการพัฒนาตู้เก็บหนังสือ

3. วิธีการดำเนินงาน

3.1 ข้อมูลกลุ่มตัวอย่าง

กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย คือ ผู้พิการทางการเคลื่อนไหวส่วนล่างโดยมีแขนทั้งสองข้างใช้งานได้ปกติ ที่มูลนิธิพระมหาไถ่เพื่อการพัฒนาผู้พิการ จำนวน 15 คน การเก็บข้อมูลเป็นแบบสัมภาษณ์และการสังเกตพฤติกรรมจากการเคลื่อนไหวบนวีลแชร์

3.2 ประยุกต์หลักการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ

ส่วนประกอบที่ 1 (A) ระบุความต้องการของผู้ใช้งาน ทำการเก็บข้อมูลความต้องการผู้ใช้งานจากการสัมภาษณ์ โดยใช้คำถามปลายเปิด และนำข้อมูลที่ได้มาจัดระเบียบโดยใช้แผนภาพกลุ่มเชื่อมโยง (Affinity Diagram) โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ประกอบด้วย ส่วนที่ 1 สัมภาษณ์ความต้องการของผู้ใช้การถึงคุณลักษณะโต๊ะปฏิบัติงานช่างที่ต้องการ โดยแบ่งออกเป็น 7 ด้าน ประกอบด้วย ด้านการใช้งาน ด้านความปลอดภัย ด้านการเข้าถึงและความสะดวกสบาย ด้านสิ่งแวดล้อม ด้านการปรับแต่งด้านความยั่งยืน และด้านความสะดวกในการขนย้ายและติดตั้ง และส่วนที่ 2 คุณลักษณะของโต๊ะปฏิบัติงานช่างที่ออกแบบตามหลักการวัดขนาดร่างกาย โดยนำทั้ง 2 ส่วน ให้ผู้พิจารณาประเมินคะแนนด้วยแบบสอบถาม ค่าคะแนนมีค่าอยู่ระหว่าง 1-5 นำค่าที่ประเมินได้มาคิดค่าระดับความสำคัญ (Import Weight) หรือ ค่า IMP ซึ่งคำนวณจากค่าเฉลี่ยเรขาคณิต (Geometric mean) ดังสมการ (1)

$$IMP = \sqrt[n]{N_1 \times N_2 \times \dots \times N_n} \quad (1)$$

โดยที่

N คือ คะแนนความสำคัญของคุณลักษณะจากการประเมินลูกค้าที่ ($i = 1, 2, \dots, n$)

n = จำนวนผู้ประเมิน

ส่วนประกอบที่ 2 (B) นำแบบสอบถามที่ได้จากการสัมภาษณ์ผู้ใช้งาน ใช้ประเมินความพอใจโต๊ะปฏิบัติงานช่างในปัจจุบัน เพื่อกำหนดค่าคุณภาพที่เป็นปัจจุบัน (Potential) คำนวณหาอัตราส่วนปรับปรุง (Improve Ratio) จุดขาย (Sale Point) คะแนนดิบ (Raw Weight)

และคะแนนดิบปกติ (Normalize Raw Weight) สามารถคำนวณได้ดังสมการ (2) - (4)

$$Improve\ ratio = Potential / IMP \quad (2)$$

$$Absolute\ weight = Target \times Improve\ ratio \quad (3)$$

$$Normalize\ raw\ weight = IMP \times Improve\ ratio \times Sale\ point \quad (4)$$

กำหนดค่าจุดขายด้วย 3 ค่า คือ 1.00 หมายถึง ไม่ใช่จุดขาย 1.20 หมายถึง เป็นจุดขาย และ 1.50 หมายถึง จุดขายมาก ซึ่งค่าคะแนนดิบปกติจะถูกแปลงให้อยู่ในช่วง 0 ถึง 1 และเป็นค่าที่บ่งบอกกลยุทธ์ในการพัฒนาให้ตอบสนองความต้องการผู้ใช้

ส่วนประกอบที่ 3 (C) ทำการระดมความคิดเพื่อหาความสัมพันธ์ของข้อกำหนดให้ตอบสนองความต้องการของผู้ใช้ โดยอ้างอิงตามมาตรฐานด้านความปลอดภัย และกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ที่ค่าเป้าหมาย (Target movement) ด้วยสัญลักษณ์ ▲ หมายถึง ค่าเป้าหมายยิ่งมากยิ่งขึ้น ▼ หมายถึง ค่าเป้าหมายที่ตั้งไว้เหมาะสม และ ◇ หมายถึง ค่าเป้าหมายยิ่งน้อยยิ่งขึ้น

ส่วนประกอบที่ 4 (D) ทำการประเมินความสัมพันธ์ระหว่างความต้องการของผู้ใช้งานกับข้อกำหนดทางเทคนิค โดยการให้คะแนนจะแบ่งเป็นระดับได้ดังนี้ ไม่ให้ระดับคะแนน หมายถึง ไม่มีความสัมพันธ์กัน คะแนน 1 หมายถึง ความสัมพันธ์น้อย คะแนน 3 หมายถึง ความสัมพันธ์ปานกลาง และคะแนน 9 หมายถึง ความสัมพันธ์มาก

ส่วนประกอบที่ 5 (E) ส่วนนี้อยู่บริเวณหลังคาบ้าน เป็นบริเวณที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างข้อกำหนดทางเทคนิคต่าง ๆ โดยระบุข้อจำกัดในการออกแบบโดยใช้สัญลักษณ์เครื่องหมายบวก (+) หมายถึง



ความสัมพันธ์ที่ส่งเสริมกัน สัญลักษณ์เครื่องหมายลบ (-) หมายถึง ความสัมพันธ์น้อย หรือไม่ใส่สัญลักษณ์ หมายถึง ไม่มีความสัมพันธ์กัน

ส่วนประกอบที่ 6 (F) ทำการหาความสำคัญของคุณลักษณะทางกายภาพ โดยคำนวณค่าน้ำหนักความสำคัญข้อกำหนดทางเทคนิคสมบูรณ์ (Absolute Technical Requirement Import: ATRI) และค่าน้ำหนักความสำคัญข้อกำหนดทางเทคนิคโดยเปรียบเทียบ (Relative Technical Requirement Important: %RTRI) สามารถคำนวณได้จากสมการ (5) และ (6)

$ATRI = (\text{คะแนนความสัมพันธ์ของข้อกำหนดทางเทคนิคต่อความต้องการของลูกค้า} \times \text{ค่า IMP})$ (5)

$\%RTRI = (\text{ค่าน้ำหนักความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคสมบูรณ์} \times \text{ผลรวมของค่าน้ำหนักความสำคัญของข้อกำหนดทางเทคนิคสมบูรณ์}) \times 100$ (6)

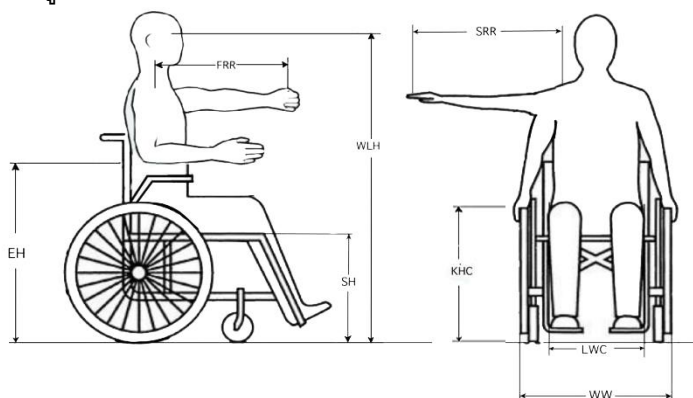
3.3 การเก็บข้อมูลทางสรีรศาสตร์

เก็บข้อมูลด้านสรีรศาสตร์จะใช้ระยะการวัดสัดส่วนของผู้ใช้วีลแชร์ที่ประยุกต์มาจากการงานวิจัยของ Jarosz [10] ประกอบด้วย ความสูงจากพื้นถึงที่นั่ง (Seat

Height: SH) ความสูงของเข่า (Knee Height Clearance: KHC) ความกว้างระหว่างขา (Leg Width Clearance: LWC) ระยะเอื้อมถึงด้านหน้า (Forward Reach Range: FRR) ระยะเอื้อมถึงด้านข้าง (Side Reach Range: SRR) ระยะจากพื้นถึงข้อศอก (Elbow Height: EH) ความกว้างของวีลแชร์ (Wheelchair Width: WW) ความสูงจากพื้นถึงสายตา (Eye Level Height: ELH) และระยะการหมุนตัวของวีลแชร์ (Wheelchair Turning Radius: WTR) แสดงดังรูปที่ 2

3.4 ประเมินความพึงพอใจ

การประเมินความพึงพอใจของกลุ่มผู้พิการทางการเคลื่อนไหวส่วนล่างที่มีแขนทั้งสองข้างใช้งานปกติ โดยเป็นกลุ่มเดียวกันที่ใช้วิจัยในช่วงต้นจากมูลนิธิพระมหาไถ่เพื่อการพัฒนาผู้พิการ การเก็บรวบรวมข้อมูลใช้แบบสอบถามที่พัฒนาขึ้นโดยอ้างอิงจากหลักการออกแบบเพื่อทุกคน (Universal design) และหลักการออกแบบตามสรีรศาสตร์ (Ergonomics design) เพื่อสะท้อนถึงประสิทธิภาพในการใช้งานและความสะดวกสบายของโต๊ะปฏิบัติงานข้างอย่างแท้จริง



รูปที่ 2 ระยะการวัดขนาดสัดส่วนของผู้ใช้วีลแชร์



4. ผลการวิจัย

4.1 ผลการประยุกต์ใช้หลักการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพ

ผลของส่วนประกอบที่ 1 (A) ความต้องการลูกค้าจากการเก็บรวบรวมข้อมูลความต้องการจากผู้พิการทางการเคลื่อนไหวส่วนล่างโดยมีแขนทั้งสองข้างใช้งานได้ปกติที่มีมูลนิธิพระมหาไถ่เพื่อการพัฒนาผู้พิการจำนวน 15 คน ที่ประเมินความต้องการคุณลักษณะทางกายศาสตร์ที่ต้องมีในโต๊ะฝึกปฏิบัติงานช่วงจำนวน 20 ความต้องการ ด้วยคะแนน 1-5 และนำค่า IMP ที่คำนวณได้ไปกำหนดค่าเป้าหมายในเมทริกซ์การวางแผน และนำค่า IMP มาจัดเรียงลำดับความสำคัญเพื่อเลือกคุณลักษณะทางกายศาสตร์ที่ต้องมีในโต๊ะฝึกปฏิบัติงานช่วง เพื่อเป็นตัวกำหนดกลยุทธ์ที่ตอบสนองต่อผู้ใช้ในขั้นตอนถัดไป ตัวอย่าง ความต้องการที่ 1 สามารถรองรับการใช้งานอุปกรณ์ที่หลากหลายอยู่ลำดับที่ 5 และความต้องการที่ 6 ด้านวัสดุที่ใช้ปลอดภัยเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอยู่ลำดับที่ 20 ดังตารางที่ 1

ตัวอย่างการคำนวณความต้องการที่ 1 สามารถรองรับการใช้งานอุปกรณ์ที่หลากหลาย มีผู้พิการประเมินให้คะแนนระดับ 3 จำนวน 2 คน คะแนนระดับ 4 จำนวน 3 คน และคะแนนระดับ 5 จำนวน 10 คน นำค่าที่ประเมินทั้งหมด 15 ค่า มาคูณกัน พบว่าผลคูณของคะแนนทั้งหมดเท่ากับ 5.625×10^9 และถอดรากผลคูณทั้งหมด ($n=15$) ได้ค่าเฉลี่ยเรขาคณิตตามสมการ (1) เท่ากับ 4.47

$$IMP = \sqrt[15]{3_1 \times 3_2 \times 4_1 \times 4_2 \times 4_3 \times 5_1 \times 5_2 \times 5_3 \times \dots \times 5_{10}}$$

$$IMP = \sqrt[15]{5.625 \times 10^9}$$

$$IMP = 4.47$$

ตารางที่ 1 ค่า IMP ของแต่ละความต้องการของผู้ใช้

	ความต้องการ	ค่า IMP	ลำดับ
1.	สามารถรองรับการใช้งานอุปกรณ์ที่หลากหลาย	4.47	5
2.	มีที่จับหรือเครื่องมือที่ช่วยให้ใช้งานได้	4.53	1
3.	มีขอบมุมที่เรียบและไม่มีคม	4.47	5
4.	สามารถรับน้ำหนักได้ 250-300 กิโลกรัม	4.33	11
5.	มีพื้นที่เพียงพอสำหรับการหมุนหรือเคลื่อนย้ายวิลแชร์	4.40	7
6.	วัสดุที่ใช้ปลอดภัยและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม	3.31	20
7.	มีช่องหรือพื้นที่สำหรับเก็บเครื่องมือ	4.40	7
8.	สามารถติดตั้งอุปกรณ์เสริมได้	4.13	19
9.	วัสดุที่ใช้ในการผลิตมีความทนทาน	4.20	17
10.	สามารถซ่อมแซมหรือเปลี่ยนชิ้นส่วนได้ง่ายในกรณีที่ชำรุด	4.20	17
11.	มีน้ำหนักที่เหมาะสมสำหรับการขนย้าย	4.33	11
12.	ความสูงสามารถปรับได้	4.53	1
13.	มีพื้นที่ให้ผู้ใช้สอดขาได้	4.53	1
14.	สะดวกต่อการเลื่อนวิลแชร์เข้าใช้	4.33	11
15.	มีพื้นที่สำหรับผู้ใช้งานที่ขนาดขาแตกต่างกัน	4.40	7
16.	มีพื้นที่สามารถเอื้อมไปข้างหน้า	4.26	15
17.	มีพื้นที่สามารถเอื้อมถึงทุกทิศทาง	4.26	15
18.	มีความสูงสำหรับการทำงานขณะนั่ง	4.53	1
19.	มีพื้นที่สำหรับการเคลื่อนไหวของวิลแชร์	4.40	7
20.	ตำแหน่งหรืออุปกรณ์ต่าง ๆ อยู่ในระดับสายตา	4.33	11

ผลของส่วนประกอบที่ 2 (B) เมทริกซ์การวางแผน นำค่า IMP ที่ได้จากส่วนประกอบที่ 1 ใช้เป็นเสมือนค่า เป้าหมาย (Target) และนำผลการประเมินที่ได้จาก แบบสอบถามที่ค่าเฉลี่ยมาใช้กำหนดค่าคุณภาพรวม ของโตะปฏิบัติงานช่างปัจจุบัน (Potential) ตัวอย่างเช่น โตะสามารถรองรับอุปกรณ์การใช้งานที่หลากหลาย มี ค่าประเมินปัจจุบันที่ระดับ 3 มีค่าเป้าหมาย (ค่า IMP) เท่ากับ 4.47 ดังนั้น อัตราส่วนปรับปรุงมีค่า 4.47/3 เท่ากับ 1.49 มีค่าจุดขายเท่ากับ 1.50 เมื่อคำนวณค่า คะแนนดิบ $4.47 \times 1.49 \times 1.50$ มีค่าเท่ากับ 9.99 แสดงดังรูปที่ 3

ผลของส่วนประกอบที่ 3 (C) ข้อกำหนดทางเทคนิค จะอ้างอิงข้อมูลตามมาตรฐานด้านความปลอดภัย ความ แข็งแรงของเฟอร์นิเจอร์ มาตรฐานวัสดุ และการเข้าถึง ของผู้พิการทั้งหมด 13 ข้อกำหนด [15] ประกอบด้วย

1. วัสดุพื้นโตะ (ANSI/BIFMA x5.5)
2. ระบบปรับความสูงต่ำช่วง 65-75 เซนติเมตร
3. มีอุปกรณ์เสริม 1 จุด
4. ขอบมุมโตะโค้งมน
5. ความสูงพื้นโตะ มากกว่า 55 เซนติเมตร
6. ความกว้างพื้นโตะ มากกว่า 75 เซนติเมตร
7. ราวจับอยู่ในรัศมีเอื้อม น้อยกว่า 50 เซนติเมตร
8. ความสูงลิ้นชักจากพื้น 80-90 เซนติเมตร
9. โครงสร้างรับน้ำหนักได้ 300 กิโลกรัม
10. พื้นผิวของโตะมากกว่า 50 เซนติเมตร และ ลึกมากกว่า 20 เซนติเมตร
11. ความลึกใช้งานของโตะน้อยกว่า 65 เซนติเมตร
12. พื้นผิวว่างรอบโตะมากกว่า 90 เซนติเมตร
13. โครงสร้างถอดประกอบได้

ผลของส่วนประกอบที่ 4 (D) เมทริกซ์ ความสัมพันธ์ ทำการให้คะแนนจากความสัมพันธ์ ระหว่างความต้องการของผู้ใช้กับข้อกำหนดทาง เทคนิค ด้วยคะแนน 1, 3 และ 9 ตัวอย่างเช่น โตะ สามารถรองรับการใช้งานอุปกรณ์ที่หลากหลาย กับ วัสดุพื้น โตะ ผ่าน มาตรฐาน ANSI/BIFMA x5.5 มีความสัมพันธ์ด้วยระดับคะแนน 9 ซึ่งหมายความว่า มีความสัมพันธ์กันมาก ในทาง กลับกัน ความสัมพันธ์ระหว่างโตะมีขอบมุมที่เรียบ และไม่มีความคม กับวัสดุพื้นโตะผ่านมาตรฐาน ANSI/BIFMA x5.5 มีความสัมพันธ์ด้วยระดับ คะแนน 1 ซึ่งหมายความว่า มีความสัมพันธ์กันน้อย แสดงดังรูปที่ 3

ผลของส่วนประกอบที่ 5 (E) ความเกี่ยวเนื่อง ในทางเทคนิค แสดงถึงความสัมพันธ์ของข้อกำหนด เทคนิคต่าง ๆ ว่ามีความสัมพันธ์กันในทิศทางใด ตัวอย่างเช่น ความสัมพันธ์ระหว่างวัสดุพื้นโตะ ผ่าน มาตรฐาน ANSI/BIFMA x5.5 กับ โครงสร้างโตะ รับน้ำหนักได้มากกว่า 300 กิโลกรัม โดยไม่เสียรูป ประเมินความสัมพันธ์ด้วยเครื่องหมายบวก ซึ่งหมายถึง ข้อกำหนดทางเทคนิค 2 ข้อนี้ มีความสัมพันธ์ที่ส่งเสริมกัน ถ้ามีทั้ง 2 ข้อกำหนดจะ ส่งเสริมกัน ในทางกลับกัน ความสัมพันธ์ระหว่างวัสดุ พื้นโตะ ผ่านมาตรฐาน ANSI/BIFMA x5.5 กับ ความ สูงพื้นโตะที่ได้โตะ มากกว่า 55 เซนติเมตร ไม่ใช่ สัญลักษณ์ ซึ่งหมายถึง ข้อกำหนดทางเทคนิค 2 ข้อนี้ ไม่มีความสัมพันธ์กัน แสดงดังรูปที่ 3

ความสัมพันธ์ระหว่างข้อกำหนดเชิงเทคนิค	
มีความสัมพันธ์มาก	+
มีความสัมพันธ์น้อย	-
ไม่มีความสัมพันธ์	
ค่าความสัมพันธ์	
มีความสัมพันธ์มาก	9
มีความสัมพันธ์ปานกลาง	3
มีความสัมพันธ์น้อย	1
ทิศทางเป้าหมาย	
ยิ่งมากยิ่งดี	▲
ตามมาตรฐาน	◆
ยิ่งน้อยยิ่งดี	▼

ความต้องการ	ค่า IMP	ข้อกำหนดทางเทคนิค		ทิศทางการปรับปรุง												ข้อกำหนดทางเทคนิคเป้าหมาย	ระดับความสำคัญของคุณลักษณะทางเทคนิค (ATRI)	ร้อยละความสำคัญของคุณลักษณะทางเทคนิค (%TRI)	ลำดับความสำคัญ
		ความต้องการของผู้ใช้		▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲				
การใช้งาน	4.47	ได้สามารถรองรับการใช้งานอุปกรณ์ที่หลากหลาย	9	3	9											ข้อกำหนดมาตรฐาน ANSI/BIFMA X5.5	87.19	102.7	118.2
	4.53	ที่นั่งหรือเครื่องมือที่ช่วยให้ใช้งานได้	3	9												ข้อกำหนดมาตรฐาน 70-110 ซม. (ปรับค่าให้เข้ากันได้)	14.7	8.98	3.81
ความปลอดภัย	4.47	ได้มีขอบเขตที่เรียบและมีความคม	1		9											มีจุดยึดมาตรฐาน 1 จุด (ขอรับอุปกรณ์ เช่น ปากกาลูบขีด)	118.2	50.16	150.7
	4.33	ได้สามารถรับน้ำหนักได้ 250-300 กิโลกรัม	3													น้ำหนักตัวได้ >= 5 มม. (ลดการพ่นเป็นเส้นเล็ก)	12.1	12.1	8.84
การเข้าถึงและความสะดวก	4.40	มีพื้นที่เพียงพอรองรับได้ สำหรับพนักพิง														>= 68 ซม. (จากที่นั่งถึงส่วนล่างของโต๊ะ)	150.7	158.1	116.3
	3.31	วัสดุที่ใช้ปลอดภัยต่อผู้ใช้และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม	1		3											ติดตั้งวางเข้ามาในพื้นโต๊ะ <= 50 ซม. จากขอบโต๊ะ	116.3	65.37	91.8
ปัญหาทรัพยากรและ สิ่งแวดล้อม	4.40	มีช่องหรือพื้นที่สำหรับเก็บเครื่องมือที่เข้าถึงได้ง่าย														ติดตั้งช่องเก็บของใต้โต๊ะตามแนวขอบโต๊ะ	65.37	91.8	62.13
	4.13	ได้สามารถติดตั้งอุปกรณ์เสริม เช่น ที่จับหรือที่ยึด		9												พื้นที่ว่างใต้โต๊ะสำหรับวางเท้า >= 300 มม. โดยไม่เกะกะ	91.8	62.13	115.7
การปรับแต่ง	4.20	วัสดุที่ใช้ในการผลิตได้ มีความทนทานและคงทนในระยะยาว	3													พื้นที่ว่างรอบโต๊ะ >= 50 ซม. และลึก >= 20 ซม.	115.7	36.6	37.8
	4.20	ได้ออกแบบให้ซ่อมแซมหรือเปลี่ยนชิ้นส่วนได้ง่ายในกรณีที่ชำรุด														ความลึกใช้งานของโต๊ะ <= 65 ซม.	36.6	116.62	10.89
ความยั่งยืนและวัสดุ	4.33	ได้มีน้ำหนักที่เหมาะสมสำหรับการขนย้าย														พื้นที่ว่างรอบโต๊ะ >= 90 ซม. ตามมาตรฐาน 2010 ADA	10.89	9.37	0.05
	4.53	ความสูงสามารถปรับได้		9	3											โครงสร้างยกสูง มีล้อลดระดับขึ้น/ลง	9.37	0.05	12
ความสูงของโต๊ะปฏิบัติงาน	4.53	มีพื้นที่ให้ผู้ใช้สามารถถอดขาได้			9	9										ค่าเป้าหมาย (Protection)	15.39	0.08	1
	4.33	สะดวกต่อการเลื่อนวีลแชร์เข้าใช้งาน	3		9	9										ค่าเป้าหมาย (Target)	15.39	0.05	9
ความกว้างระหว่างขา	4.40	มีพื้นที่สำหรับผู้ใช้วางเท้าขาแยกต่างหาก		9	9											อัตราส่วนปรับปรุง (Improve ratio)	14.06	0.07	3
	4.26	มีพื้นที่สามารถเอียงขาไปข้างหน้า														จุดขาย (Sale point)	14.06	0.07	8
ระยะเอียงขา	4.26	มีพื้นที่สามารถเอียงขาไปข้างหลัง														คะแนนดิบ (Raw weight)	13.61	0.07	4
	4.53	มีความสูงสำหรับการทำงานขณะนั่ง		9	3											คะแนนดิบปกติ (Normalized raw weight)	13.61	0.07	16
ความกว้างของรองเข็น	4.40	มีพื้นที่สำหรับการเคลื่อนไหวของวีลแชร์		3	9											ลำดับสำคัญ	13.61	0.03	6
	4.33	ตำแหน่งหรืออุปกรณ์ต่าง ๆ อยู่ในระดับสายตา															13.61	0.03	7
ความสูงจากพื้นถึงสายตา																			

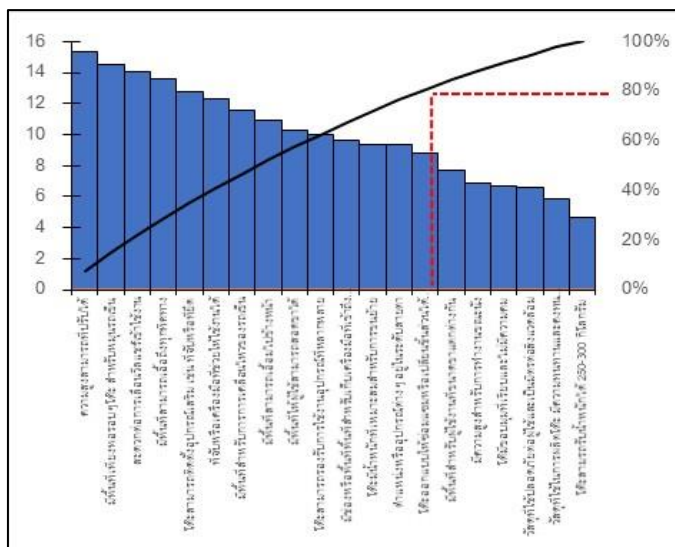
รูปที่ 3 บ้านคุณภาพของโต๊ะปฏิบัติงานสำหรับผู้พิการทางการเคลื่อนไหวส่วนล่าง



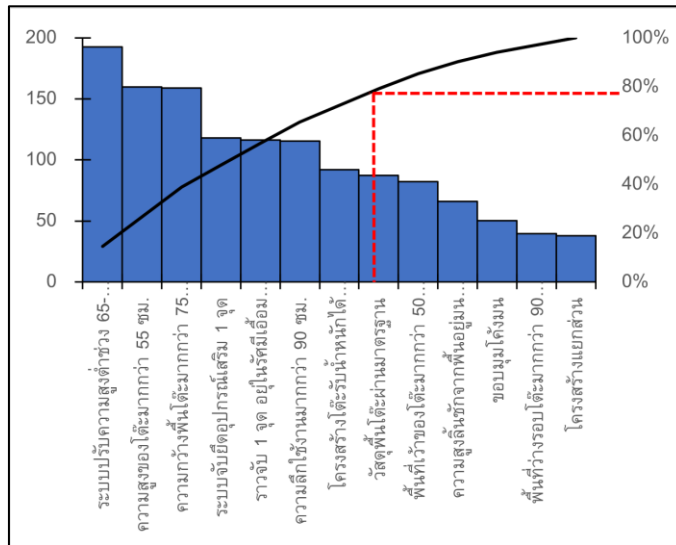
ผลของส่วนประกอบที่ 6 (F) เปรียบเทียบสมรรถนะทางเทคนิค ค่าพิกัด ATRI และ %RTRI เพื่อให้ลำดับความสำคัญของข้อกำหนดเทคนิคที่นำไปพัฒนาต่อ ตัวอย่างเช่น ระดับน้ำหนักของความต้องการด้านเทคนิครายการ “วัสดุพื้นโต๊ะผ่านมาตรฐาน” เท่ากับผลรวมของคะแนนความสัมพันธ์ระหว่างความต้องการของลูกค้าด้านเทคนิค x ค่า IMP มีรายละเอียดดังนี้ $(9 \times 4.47) + (3 \times 4.53) + (1 \times 4.47) + (3 \times 4.33) + (1 \times 3.31) + (3 \times 4.20)$ เท่ากับ 87.19 เมื่อแปลงเป็น %RTRI มีค่าเท่ากับ 6.62 เปอร์เซนต์

ในส่วนของส่วนประกอบที่ 2 (B) เมทริกซ์การวางแผน จะนำค่าคะแนนดิบมาเรียงลำดับด้วยแผนภาพพาราโต เพื่อเป็นตัวกำหนดกลยุทธ์ที่ตอบสนองต่อผู้ใช้ขอยกตัวอย่าง 3 ลำดับแรก ประกอบด้วย ลำดับที่ 1 ความสูงสามารถปรับได้ ลำดับที่ 2 มีพื้นที่เพียงพอ

รอบ ๆ โต๊ะสำหรับหมูนวลแชร์ และลำดับที่ 3 สะดวกต่อการเลื่อนวีลแชร์เข้าใช้งาน แสดงดังรูปที่ 4 ร่วมกับข้อกำหนดทางเทคนิคเป้าหมายของส่วนประกอบที่ 6 (F) (ถูกแปลงมาจากข้อกำหนดทางเทคนิคในส่วนที่ 2) จากนั้นนำเป้าหมายทางด้านเทคนิคมาจัดเรียงลำดับด้วยแผนภาพพาราโต พบว่า ข้อกำหนดทางเทคนิคที่อยู่ในสัดส่วน 80 เปอร์เซนต์ ประกอบด้วย ระบบปรับความสูงต่ำช่วง 65-75 เซนติเมตร ความสูงของโต๊ะมากกว่า 55 เซนติเมตร ความกว้างพื้นโต๊ะมากกว่า 75 เซนติเมตร ระบบจับยึดอุปกรณ์เสริม 1 จุด รวบรวม 1 จุด อยู่ในรัศมีเอื้อม น้อยกว่า 50 เซนติเมตร ความลึกใช้งานมากกว่า 90 เซนติเมตร โครงสร้างโต๊ะรับน้ำหนักได้มากกว่า 300 กิโลกรัม และวัสดุพื้นโต๊ะผ่านมาตรฐาน แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 4 แผนภูมิพาราโตของคะแนนดิบปกติ



รูปที่ 5 แผนภูมิพาเรโตค่าน้ำหนักสมบูรณ์ของข้อกำหนดทางเทคนิค

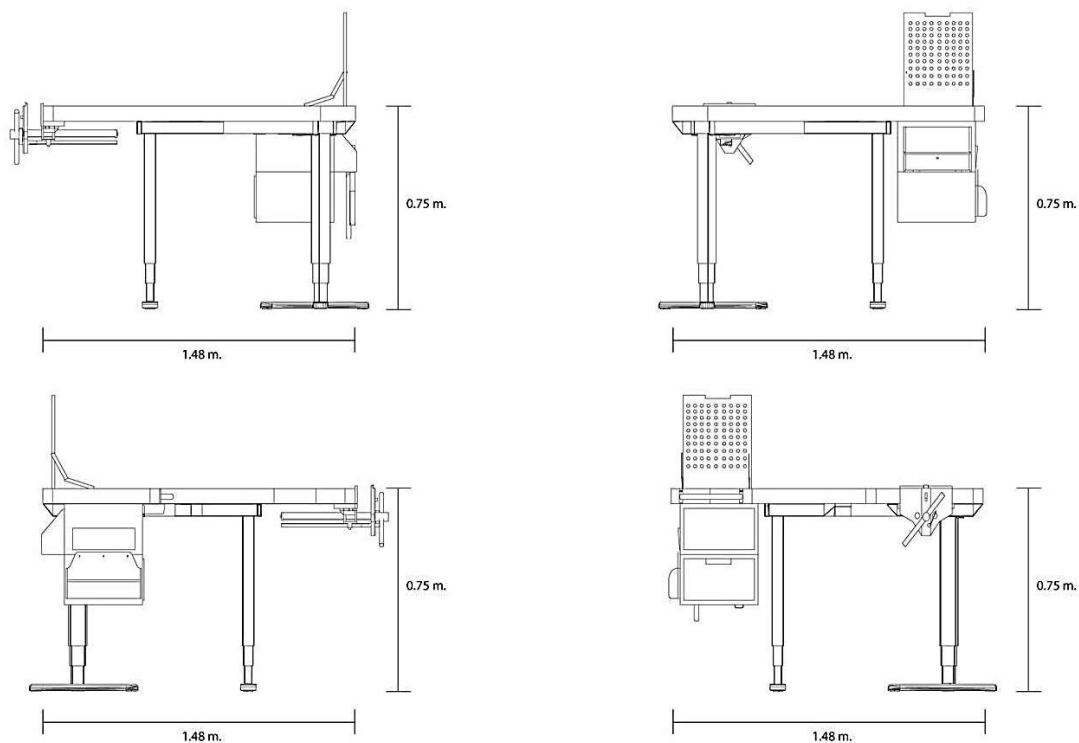
4.2 ผลการเก็บข้อมูลทางสถิติศาสตร์

ค่าจากการวัดระยะของผู้พิการทางการเคลื่อนไหว ส่วนล่างมีการกำหนดค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์เพื่อใช้ในการออกแบบแสดงดังตารางที่ 2 โดยนำค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่เหมาะสมในแต่ละวัดขนาดร่างกายมาทำการออกแบบโต๊ะปฏิบัติงานช่วง ประกอบไปด้วย ความสูงจากพื้นถึงที่นั่ง (P_{95} = 55.0 เซนติเมตร) ความสูงของเข่า (P_{95} = 60.0 เซนติเมตร) ความกว้างระหว่างขา (P_{95} = 48.0 เซนติเมตร) ระยะเอ้อมถึงด้านหน้า (P_5 = 65.5 เซนติเมตร) ระยะเอ้อมถึงด้านข้าง (P_5 = 61.0 เซนติเมตร) ระยะจากพื้นถึงข้อศอก (P_5 = 65.8 เซนติเมตร) ความกว้างของวิลแชร์ (P_{95} = 79.0 เซนติเมตร) ความสูงจากพื้นถึงสายตา (P_{50} = 116.0 เซนติเมตร) และระยะการหมุนตัวของวิลแชร์ ($\bar{x}$ = 150.0 เซนติเมตร) ร่วมกับข้อกำหนดเทคนิค

เป้าหมายในบ้านคุณภาพโดยมีตัวอย่างแบบร่างต้นแบบดังรูปที่ 6 และรูปแบบสามมิติรูปที่ 7 – 8

ตารางที่ 2 ค่าที่ได้จากการวัดสัดส่วนร่างกาย (หน่วย: เซนติเมตร)

ระยะการวัดขนาด	P_5	P_{50}	P_{95}
1. ความสูงจากพื้นถึงที่นั่ง	51.8	53.0	55.0
2. ความสูงของเข่า	54.8	57.0	60.0
3. ความกว้างระหว่างขา	40.8	44.0	48.0
4. ระยะเอ้อมถึงด้านหน้า	65.5	72.0	82.0
5. ระยะเอ้อมถึงด้านข้าง	61.0	73.0	76.0
6. ระยะจากพื้นถึงข้อศอก	65.8	68.0	75.0
7. ความกว้างของวิลแชร์	56.8	75.0	79.0
8. ความสูงจากพื้นถึงสายตา	113.0	116.0	119.0
9. ระยะการหมุนตัวของวิลแชร์	$\bar{x}$ = 150.0		



รูปที่ 6 แบบร่างโต๊ะปฏิบัติงานช่างสำหรับผู้ใช้วีลแชร์



รูปที่ 7 รูปแบบสามมิติ (ด้านหน้า)



รูปที่ 8 รูปแบบสามมิติ (ด้านหลัง)



4.3 ผลการประเมินความพึงพอใจ

ผลการประเมินความพึงพอใจก่อนและหลังพัฒนา โตะปฏิบัติงานช่างของผู้ฝึกการ แบ่งออกเป็น 4 ด้าน ประกอบด้วย ด้านที่ 1 ผู้ฝึกการการเข้าถึงและความสะดวกสบาย ด้านที่ 2 การรองรับร่างกายและการใช้งาน ด้านที่ 3 ความปลอดภัยและเสถียรภาพ และด้านที่ 4 ความยืดหยุ่นและการปรับแต่ง แสดงดังตารางที่ 3 โดยคะแนนประเมินจะถูกแปลงเป็นค่า IMP เพื่อวิเคราะห์แนวโน้มว่าการออกแบบตอบสนองต่อความต้องการผู้ใช้น้อยเพียงใด โดยคะแนนประเมินก่อนการพัฒนาโตะปฏิบัติงานช่างมีค่า 4.35, 4.43, 4.08 และ 4.23 ตามลำดับ และคะแนนประเมินหลังการพัฒนาโตะปฏิบัติงานช่างมีค่า 4.52, 4.44, 4.53 และ 4.59 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าหลังการพัฒนาต้นแบบโตะปฏิบัติงานช่างมีการให้ความสำคัญของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นจากเดิมเฉลี่ย 5.93 เปอร์เซนต์

จากตารางที่ 3 เมื่อพิจารณาค่าคะแนนความสำคัญที่ผู้ฝึกการให้ต่อข้อคำถามในแต่ละด้านพบว่า ในด้านการเข้าถึงและความสะดวกสบาย ผู้ใช้งานให้ความสำคัญกับพื้นที่โตะปฏิบัติงานช่างที่ต้องมีความโล่งเพียงพอ เพื่อให้สามารถเลื่อนวีลแชร์เข้าไปใช้งานได้สะดวก โดยมีค่า IMP เพิ่มขึ้น

3.91 เปอร์เซนต์ ซึ่งความต้องการในหัวข้อความสูงปรับระดับได้ มีพื้นที่เพียงพอรอบๆ โตะ และสะดวกต่อการเลื่อนวีลแชร์เข้าใช้งาน อยู่ใน 3 อันดับแรกที่ทำให้ความสำคัญ ด้านการรองรับร่างกายและการใช้งาน ผู้ใช้งานให้ความสำคัญกับความสามารถของโตะในการรองรับผู้ใช้ที่มีขนาดขาหรือวีลแชร์ที่แตกต่างกัน โดยก่อนการพัฒนาแบบร่างมีการให้คะแนนค่า IMP ที่สูงกว่าด้านอื่น ๆ ที่ 4.43 และหลังพัฒนาแบบร่างมีค่า IMP ที่ 4.44 เพิ่มขึ้นเพียง 0.23 เปอร์เซนต์ เพราะค่าลำดับความสำคัญในเมทริกซ์การวางแผนที่เปรียบเทียบกับคู่แข่งอยู่ในลำดับท้าย ๆ เนื่องจากไม่มีคู่แข่งที่เป็นโตะปฏิบัติงานช่างแบบที่ใกล้เคียงกัน ด้านความปลอดภัยและเสถียรภาพ ผู้ใช้งานให้ความสำคัญกับการออกแบบที่มีลักษณะโค้งมนเพื่อลดความเสี่ยงจากการบาดเจ็บ ซึ่งมีค่า IMP เพิ่มขึ้นสูงสุดถึง 11.03 เปอร์เซนต์ ซึ่งสอดคล้องกับค่าความสัมพันธ์ระหว่างความต้องการของผู้ใช้กับข้อกำหนดทางเทคนิคที่ประเมินด้วยคะแนน 9 (ความสัมพันธ์มาก) และในด้านความยืดหยุ่นและการปรับแต่ง ผู้ใช้งานให้ความสำคัญกับความสามารถของโตะในการรองรับอุปกรณ์เสริม โดยมีค่า IMP เพิ่มขึ้น 8.51 เปอร์เซนต์ เมื่อพิจารณาในความต้องการ

ตารางที่ 3 ค่า IMP ก่อนและหลังพัฒนาต้นแบบโตะปฏิบัติงานช่าง

ด้าน	ก่อนพัฒนา	หลังพัฒนา	ค่าเปอร์เซนต์ IMP ที่เพิ่มขึ้น
การเข้าถึงและความสะดวกสบาย	4.35	4.52	3.91
การรองรับร่างกายและการใช้งาน	4.43	4.44	0.23
ความปลอดภัยและเสถียรภาพ	4.08	4.53	11.03
ความยืดหยุ่นและการปรับแต่ง	4.23	4.59	8.51



ให้โต๊ะปฏิบัติงานช่างสามารถติดตั้งอุปกรณ์เสริมได้พบว่า มีค่า ลำดับความสำคัญใน 5 อันดับแรก แสดงให้เห็นว่าการพัฒนาต้นแบบมีแนวโน้มตอบสนองต่อความต้องการของผู้พิการได้ดียิ่งขึ้นในทุกมิติ

5. สรุปผล

งานวิจัยนี้ทำการพัฒนาโต๊ะปฏิบัติงานช่างโดยศึกษาความต้องการของผู้พิการทางการเคลื่อนไหวส่วนล่างจากมูลนิธิพระมหาไถ่เพื่อการพัฒนาผู้พิการ โดยประยุกต์หลักการแปลงหน้าที่เชิงคุณภาพที่เป็นบ้านคุณภาพซึ่งประกอบด้วย 6 ส่วนหลัก และประยุกต์ใช้หลักการวัดขนาดร่างกายในการเก็บข้อมูลสัดส่วนผู้พิการทางการเคลื่อนไหวส่วนล่างที่ใช้วีลแชร์ประกอบด้วย 9 ระยะการวัด เพื่อเป็นการกำหนดขนาดที่เหมาะสม ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากทั้ง 2 ส่วน นำไปพัฒนาตัวอย่างแบบร่างต้นแบบโต๊ะปฏิบัติงานช่าง หลังจากได้ต้นแบบร่างของโต๊ะปฏิบัติงานช่างแล้ว ได้ดำเนินการประเมินค่า IMP จากผู้ใช้งานใน 4 ด้าน ประกอบด้วย ด้านการเข้าถึงและความสะดวกสบาย ด้านการรับรองร่างกายและการใช้งาน ด้านความปลอดภัยและเสถียรภาพ และด้านความยืดหยุ่นและการปรับแต่งผลการประเมิน พบว่า ค่า IMP หลังการพัฒนาต้นแบบเพิ่มขึ้นจากก่อนการพัฒนามากถึง 5.93 เปอร์เซนต์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ต้นแบบโต๊ะปฏิบัติงานช่างที่พัฒนาขึ้นสอดคล้องกับความต้องการของผู้พิการมากขึ้นและได้รับความสำคัญในมุมมองของผู้ใช้เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ขนาดสัดส่วนร่างกายและความสามารถของผู้พิการเป็นข้อจำกัดหนึ่งที่สำคัญในการกำหนดตำแหน่งสำหรับการวัดขนาด เนื่องจากกลุ่มผู้พิการตัวอย่างมีส่วนของร่างกายช่วงบนมีระดับความสามารถในการใช้งานที่

แตกต่างกัน กอปรกับลักษณะวีลแชร์ที่แต่ละคนใช้สมรรถนะที่แตกต่างกัน ซึ่งทำให้ค่าเปอร์เซนต์ไทล์ที่ 5, 50 และ 95 ไม่แตกต่างกันมาก ส่วนแบบร่างที่พัฒนาขึ้นยังไม่มีการสร้างโต๊ะปฏิบัติงานช่างจริงทำให้กลุ่มผู้พิการตัวอย่างยังไม่ได้ใช้งานจริงทำให้ค่า IMP ด้านการรองรับร่างกายและการใช้งานมีค่าเพิ่มขึ้นเพียง 0.23 เปอร์เซนต์ ซึ่งต่างจากด้านอื่น ๆ ที่ประเมินด้วยแบบร่างได้ ในการพัฒนางานวิจัยต่อไป สามารถประยุกต์วิธีการออกแบบทางวิศวกรรมหรือสร้างต้นแบบโต๊ะปฏิบัติงานช่างจริง เพื่อทดสอบความเหมาะสมต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยได้รับความอนุเคราะห์จากจากมูลนิธิพระมหาไถ่เพื่อการพัฒนาผู้พิการและวิทยาลัยเทคโนโลยีพระมหาไถ่พทยาในการเข้าไปศึกษาและเก็บข้อมูลตัวอย่าง

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] www.dep.go.th/th/law-academic/knowledge-base/disabled-person-situation. (Accessed on 13 May 2025)
- [2] P. Jongkol, An anthropometric measurement and analysis of wheelchair users, Research Report, Suranaree University of Technology, 2018. (in Thai)
- [3] J. Sitranon and T. Chotiratanapinun, Wardrobe design for people with physical disabilities and wheelchair users, Journal of Fine and Applied Arts Khon Kaen University, 2020, 12(2), 91-107. (in Thai)



- [4] N. Adan and S.Z.M. Sawal, Applied anthropometric for wheelchair user in Malaysia, *Measurement*, 2019, 136, 786-794.
- [5] Y. Akao, *Quality function deployment: integrating customer requirements into product design*, CRC Press, NY, USA, 2024.
- [6] S. Rawangwong, C. Homkhiew, T. Pirom, J. Rodjananugoon and C. Laosat, Application of quality function development technique in combination with kansei engineering in the design and development of ceramic tea set products, *The Journal of Industrial Technology*, 2022, 18(3), 29-46. (in Thai)
- [7] T. Pirom, A. T. Kamnerdwam, S. Rawangwong, C. Homkhiew, C. Srivabut and C. Laosat, Design and development of a multifunctional table-chair set for the elderly people by using quality function deployment, *Kasem Bundit Engineering Journal*, 2025, 15(1), 103-123. (in Thai)
- [8] S. Phieboosilapa, P. Srimuang, J. Yarangsi and A. Pimpru, Design of a welding table prototype based on ergonomics with quality function deployment, *Journal of Advanced Development in Engineering and Science*, 2023, 13(38), 118-133. (in Thai)
- [9] N. Mekcharoen and P. Ladavichitkul, Approximation of anthropometric data from basic factor for workstation design of teens, *Industrial Engineering Conference Network (IE-Network 2012)*, Proceeding, 20212, 457-463. (in Thai)
- [10] E. Jarosz, Determination of the workspace of wheelchair users, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 1996, 17(2), 123-133.
- [11] V. Paquet and D. Feathers, An anthropometric study of manual and powered wheelchair users, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2004, 33(3), 191-204.
- [12] R. Ginting, U. Tarigan and N. Panjaitan, The application of quality function deployment and ergonomics: A case study for a new product design of a Texon cutting tool, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Proceeding, 2019, 012009.
- [13] R.A. Adrianto, D. Wahyudi, D. Tiaramadhanti, J.M. Mesinay and A. Juraida, Product development of mini chamber with ergonomic function deployment (EFD) method, *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education*, 2021, 12(4), 771-781.

- [14] E. Safira, N. Nofirza, A. Anwardi, H. Harpito, M. Rizki and N. Nazaruddin, Evaluation of human factors in redesigning library bookshelves for the blind using the ergonomic function deployment (EFD) method, The 3rd South American International Industrial Engineering and Operations Management Conference (IEOM), Proceeding, Paraguay, 2022, 2050-2062.
- [15] ISO 21542-2011, Building Construction-Accessibility and Usability of the Built Environment, 2011.



การออกแบบและพัฒนาเครื่องคว่ำและปั่นละเอียดพริกแห้งกึ่งอัตโนมัติ

วิโชค พรหมตวง^{1,2} และ สถาพร สิทธิวงศ์^{1,2*}

¹ ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

² ศูนย์ปฏิบัติการวิจัยและพัฒนานวัตกรรมแบบผสมผสาน, ภายใต้มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: sathaporn.s@cit.kmutnb.ac.th

วันที่รับบทความ: 20 พฤษภาคม 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 4 สิงหาคม 2568; วันที่ตอบรับบทความ: 12 กันยายน 2568

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 9 ธันวาคม 2568

บทคัดย่อ : งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ออกแบบและพัฒนาเครื่องคว่ำและปั่นละเอียดพริกแห้งกึ่งอัตโนมัติ สามารถควบคุมอุณหภูมิและความชื้นได้ เพิ่มประสิทธิภาพและความสม่ำเสมอในกระบวนการแปรรูปพริก เครื่องที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วย ระบบคว่ำพริกแห้งด้วยความร้อนจากฮีตเตอร์ไฟฟ้า ควบคุมอุณหภูมิด้วยเทอร์โมสตัทและไมโครคอนโทรลเลอร์ พร้อมแสดงผลผ่านหน้าจอ LCD และระบบปั่นละเอียดสามารถปรับระดับความละเอียดได้ ตั้งค่าอุณหภูมิได้สูงสุด 160 °C จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการคว่ำอยู่ที่ 80 °C โดยค่าที่แสดงบนหน้าจอ LCD มีความคลาดเคลื่อนจากเครื่องวัดอุณหภูมิอ้างอิง 2.05 °C ในการทดลองกับความชื้นสัมพัทธ์ที่กำหนดไว้ 70, 75, 80, 85, 90, 95 และ 100 %RH พบว่าค่าความชื้นที่ 85 %RH จะให้กลิ่นหอม สีแดงสด และใช้เวลาในการคว่ำ 9 นาที โดยพริกแห้งที่ใช้ทดลองมีน้ำหนักเริ่มต้น 500 กรัม หลังการคว่ำลดลงเหลือ 457 กรัม ขั้นตอนการปั่นพบว่าช่วงเวลา 3–5 นาที ให้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุด โดยการทำงานของเครื่องในหนึ่งรอบการผลิต ใช้เวลาเฉลี่ย 18 นาที (คว่ำ 9 นาที, ระบายความร้อน 5 นาที, ปั่น 4 นาที)

คำสำคัญ: เครื่องคว่ำพริก; เครื่องปั่นละเอียด; ความชื้นสัมพัทธ์; ระบบควบคุมอุณหภูมิ; พริกแห้งกึ่งอัตโนมัติ

Machine Design and Development of A Semi-automatic Machine for Roasting and Grinding Dry Chili

Wichok Promdaung^{1,2} and Sathaporn Sitthiwong^{1,2*}

¹ Department of Electrical Engineering Technology, College of Industrial Technology,
King Mongkut's University of Technology North Bangkok

² Center of Integrated Innovation Research and Development under Industrial Standards and
Technopark, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

* Corresponding author, E-mail: sathaporn.s@cit.kmutnb.ac.th

Received: 20 May 2025; Revised 4 August 2025; Accepted: 12 September 2025

Online Published: 9 December 2025

Abstract: This research aims to develop a semi-automatic roasting and grinding machine for dried chili peppers that can control temperature and humidity as desired, in order to enhance efficiency in the processing as well as improve the consistency of the output. The developed prototype consists a dry chili roasting system using electric heater heat controlled by a thermostat and microcontroller, with results displayed on an LCD screen, and a grinding system that allows adjustment of the fineness. The maximum temperature can be set at 160 °C, but experiments show that the optimal roasting temperature is 80 °C, with the reading on the LCD deviating from the reference thermometer by a maximum of about 2.05 °C. In experiments with defined relative humidity levels of 70, 75, 80, 85, 90, 95, and 100% RH, it was found that at 85% RH, the chili produced a pleasant aroma, bright red color, and took about 9 minutes to roast. The dried chili used in the experiment initially weighed 500 grams and reduced to about 457 grams after roasting. In the grinding process, and it was found that the period of 3–5 minutes. The work of the blending machine was 9 minutes, with the heat radiated 5 minutes before the blending, and the blending time 4 minutes, altogether 18 minutes, for one working round.

Keywords: Chili Roasting Machine; Fine Grinder; Relative Humidity; Temperature Control System; Semi-Automatic Dried Chili Processing



1. บทนำ

พริกถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น การผลิตซอสพริก น้ำพริก และเครื่องปรุงรสต่าง ๆ การแปรรูปพริกช่วยสร้างงานให้กับเกษตรกรและแรงงานในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง พริกเป็นพืชที่เกี่ยวข้องกับชีวิตประจำวันของคนไทยมาเป็นเวลานาน มีพื้นที่ปลูกมากเป็นอันดับ 1 ของพืชผักทั้งหมด ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกพริก 589,617 ไร่ (ปี 2566-2567) จำนวนเกษตรกรที่ปลูกพริกมีประมาณ 125,000 ครัวเรือน มีผลผลิตพริก 663,834 ตัน ผลผลิตร้อยละ 60 เป็นพริกชี้หนูผลใหญ่ รองลงมาคือพริกใหญ่ (25%) พริกชี้หนูผลเล็ก (10%) และพริกอื่น ๆ (5%) ผลผลิตประมาณร้อยละ 20 แปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น ซอสพริก น้ำพริกเผา พริกเครื่องแกง ฯลฯ ผลผลิตพริกร้อยละ 97 ใช้บริโภคในประเทศ ที่เหลือประมาณร้อยละ 3 ส่งออกและแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อส่งออกและบริโภคในประเทศ นอกจากพริกสามารถใช้ประโยชน์ทั้งในรูปผลสดและพริกแห้ง ในปี 2566 ประเทศไทยมีผลผลิตพริกมากกว่า 156,105 ตัน พริกแห้งและพริกคั่วเป็นผลิตภัณฑ์แปรรูปที่มีมูลค่าเพิ่มสูง และสามารถส่งออกไปยังประเทศในอาเซียน เช่น สิงคโปร์ และ มาเลเซีย มูลค่าการส่งออกพริกบดหรือป่นในปี 2561 ปริมาณ 556.95 ตัน มีมูลค่า 220.42 ล้านบาท [1]

อย่างไรก็ตาม การผลิตพริกป่นในอุตสาหกรรมครัวเรือนยังไม่มีเครื่องคั่วและบั่นละเอียดให้สำเร็จที่เดียวและที่ผลิตพริกป่นยังใช้คนในการคั่วพริกซึ่งทำให้ส่งกลิ่นฉุนต่อผู้ผลิต คณะผู้วิจัยจึงได้ศึกษาวิธีการผลิตพริกป่นในหลาย ๆ วิธีเพื่อลดการสัมผัสของผู้ผลิตพริกป่น งานวิจัยฉบับนี้นำเสนอการจัดทำเครื่องคั่วและบั่นละเอียดพริกแห้งกึ่งอัตโนมัติ โดยเครื่องคั่วและบั่น

ละเอียดที่จัดสร้างขึ้นจะมีลักษณะการทำงานแบบกึ่งอัตโนมัติที่มีการควบคุมอุณหภูมิโดยการปรับค่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายลดความร้อนสำหรับการสร้างอุณหภูมิ

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 ขดลวดความร้อน

ขดลวดความร้อนหรือฮีตเตอร์เป็นอุปกรณ์ทำความร้อนในอุตสาหกรรม การทำงานเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านลวดตัวนำที่มีค่าความต้านทานสูง ลวดตัวนำจะร้อน ดังนั้นลวดที่ใช้ผลิตฮีตเตอร์จะต้องมีคุณสมบัติเหนียวและทนอุณหภูมิได้สูง ลวดฮีตเตอร์ทำจากวัสดุ นิกเกิล : โครเมียม สัดส่วน 80 : 20 ทนอุณหภูมิได้ 1,250 °C ฮีตเตอร์มีหลายประเภทและรูปทรงตามลักษณะการใช้งาน เช่น ฮีตเตอร์แท่ง, ฮีตเตอร์ท่อกลม, ฮีตเตอร์จุ่ม, ฮีตเตอร์อินฟราเรด, ฮีตเตอร์รัดท่อ, และฮีตเตอร์แผ่น

2.2 อินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์ (Inverter) ใช้สำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำหรือ Induction Motor เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 1 แหล่งจ่ายไฟฟ้าทั่วไปที่มีแรงดันและความถี่คงที่จะถูกแปลงให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC) โดยใช้วงจรคอนเวอร์เตอร์ (Converter Circuit) เอาต์พุตนำมาผ่านวงจรกรองด้วยคาปาซิเตอร์ (Filter Capacitor) ทำให้มีแรงดันที่เรียบยิ่งขึ้น จากนั้นส่งต่อไปยังวงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter) เพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถควบคุมแรงดันและความถี่ที่จ่ายออกจากเอาต์พุตไปยังมอเตอร์ งานวิจัยนี้ใช้อินเวอร์เตอร์ในการควบคุมการหมุนของมอเตอร์เพื่อคั่วพริก

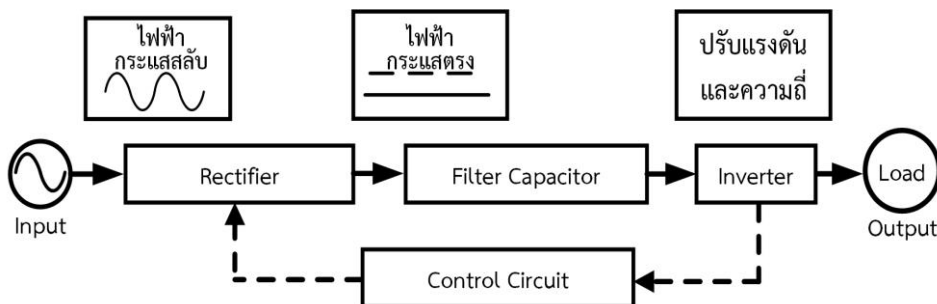


2.3 การควบคุมมุมเฟส

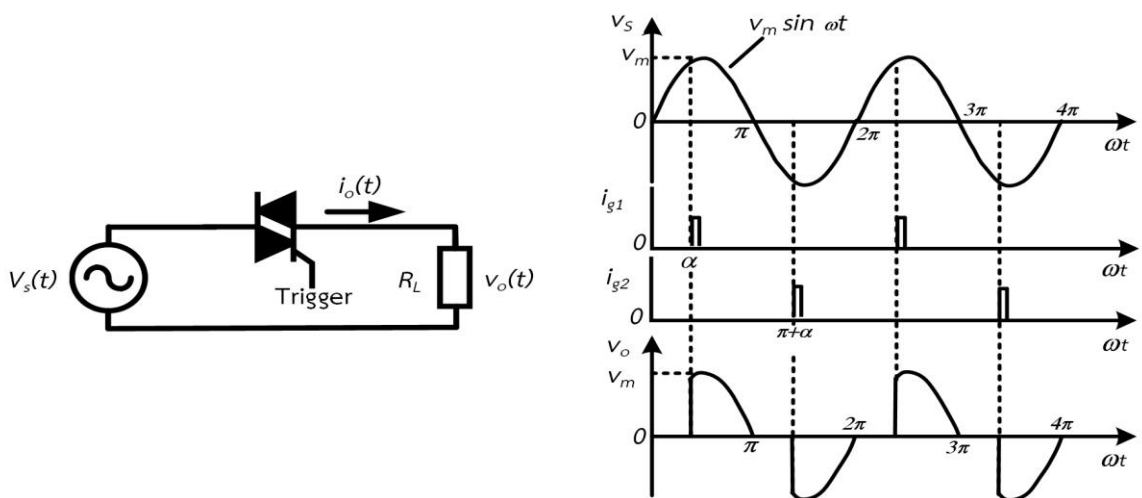
การควบคุมไตรแอดให้น่ากระแสน เวลาใดเวลาหนึ่งได้ทั้งสองซีกคือซีกบวกและซีกลบ สำหรับการควบคุมไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียวสามารถควบคุมกำลังไฟที่จ่ายให้กับโหลดได้ [2] จากวงจรดังรูปที่ 2 ประกอบด้วยแรงดันอินพุต(V_s) กระแสเกต i_{g1} และ i_{g2} เป็นสัญญาณพัลส์(Pulse) ทำหน้าที่จุดชนวนให้ไตรแอดนำกระแส และแรงดันเอาต์พุต(V_o) ในส่วนกำลังไฟฟ้าด้านโหลดเอาต์พุตจะมีขนาดขึ้นอยู่กับมุมองศาในการจุดชนวน

2.4 Arduino Uno R3 และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ / ความชื้น

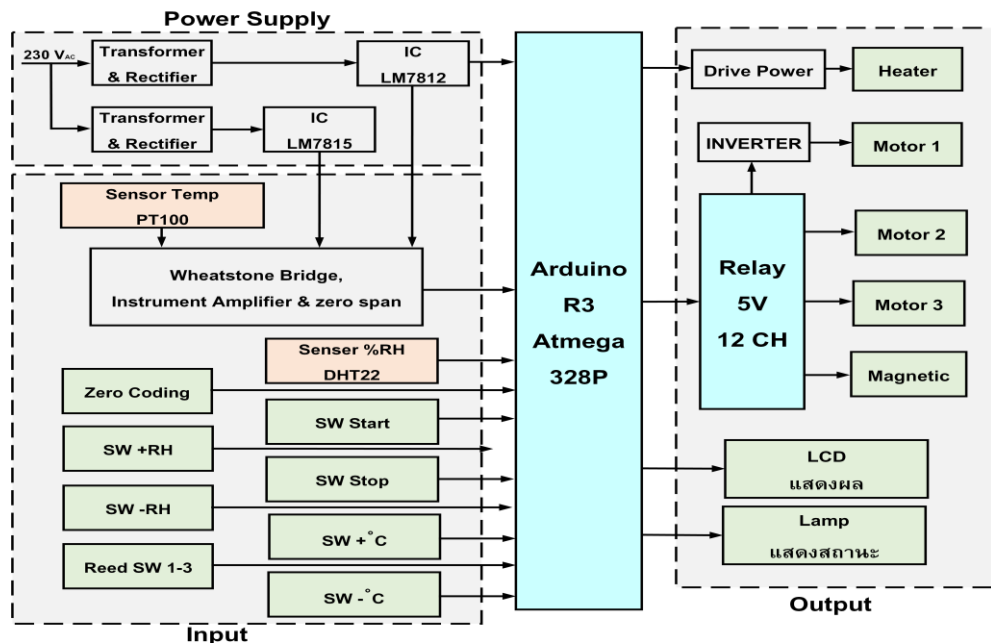
บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno R3 ทำหน้าที่ประมวลผลและควบคุมการทำงานของเครื่อง โดยมีอินพุตคือเซนเซอร์อุณหภูมิและความชื้น ทำหน้าที่เช็คค่าอุณหภูมิและความชื้นในหม้อคั่วพริก และปุ่มกดรับค่าจากผู้ใช้งาน ด้านเอาต์พุตประกอบด้วย มอเตอร์, จอแสดงผล, ไฟแสดงสถานะ ดังรูปที่ 3



รูปที่ 1 บล็อกไดอะแกรมอินเวอร์เตอร์สำหรับการควบคุมมอเตอร์



รูปที่ 2 วงจรการควบคุมด้วยเฟสคอนโทรลด้วยไตรแอด



รูปที่ 3 ไดอะแกรมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์

การทำงานของรูปที่ 3 แรงดันอินพุตไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V_{AC} ต่อผ่านหม้อแปลงลดแรงดัน วงจรเรกติไฟ์และไอซีคงค่าแรงดัน LM7812 ขนาด 12 V_{DC} และไอซีคงค่าแรงดัน LM7815 ขนาด 15 V_{DC} เพื่อเป็นไฟเลี้ยงให้กับบอร์ด Arduino UNO R3 และวงจร Wheatstone Bridge ที่ใช้ Sensor-PT100 ต่อร่วมในวงจรเพื่อเป็นตัววัดอุณหภูมิและสัญญาณเอาต์พุตที่ออกจากวงจร Wheatstone Bridge จะถูกส่งไปยังวงจร Instrument Amplifier and Zero Span เพื่อทำการขยายและปรับแต่งสัญญาณให้ได้ 0-5 V เพื่อจ่ายเข้าสู่บอร์ด Arduino UNO R3 นำมาเป็นสัญญาณที่ใช้ควบคุมอุณหภูมิและใช้ Sensor DHT22 [3] เป็นตัววัดความชื้นมาเป็นเงื่อนไขเพื่อกำหนดการหยุดการทำงานของกระบวนการคัด การกำหนดหรือปรับค่าของอุณหภูมิจะใช้สวิทช์กดเพิ่มอุณหภูมิ (SW +°C) และใช้สวิทช์ลดอุณหภูมิ

(SW -°C) และใช้สวิทช์ (+RH) สำหรับเพิ่มความชื้น และใช้สวิทช์ (-RH) เพื่อลดความชื้น จะใช้สวิทช์ (SW-Start) สั่งเริ่มทำงาน สวิทช์ (Stop) เพื่อหยุดการทำงาน (Zero Coding) เป็นสัญญาณบอกตำแหน่งขณะแรงดัน 220 V_{AC} อินพุตของขดลวดความร้อนตัดผ่านศูนย์ ในการควบคุมอุณหภูมิแบบ PI โดย Arduino [4] ซึ่งส่งสัญญาณพัลส์ไปยังวงจรขับไตรแอกคือวงจรควบคุมความร้อนของขดลวดความร้อน (Heater) เพื่อควบคุมอุณหภูมิกระแสของ Heater และ Motor 1 (M1) ทำหน้าที่หมุนใบกวนที่ความถี่ 2.5 Hz และปั่นละเอียดที่ความถี่ 50 Hz Motor 2 (M2) ทำหน้าที่ปรับระดับถังทำให้หมุนขึ้นหมุนลง Motor 3 (M3) ทำหน้าที่ดึงชุด ครีชเปลี่ยนแกนระหว่างใบกวนกับใบมีดปั่นละเอียด และใช้ Magnetic ในการตัด-ต่อกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเครื่องคว่ำและปั่นละเอียดพริกแห้งกึ่งอัตโนมัติ



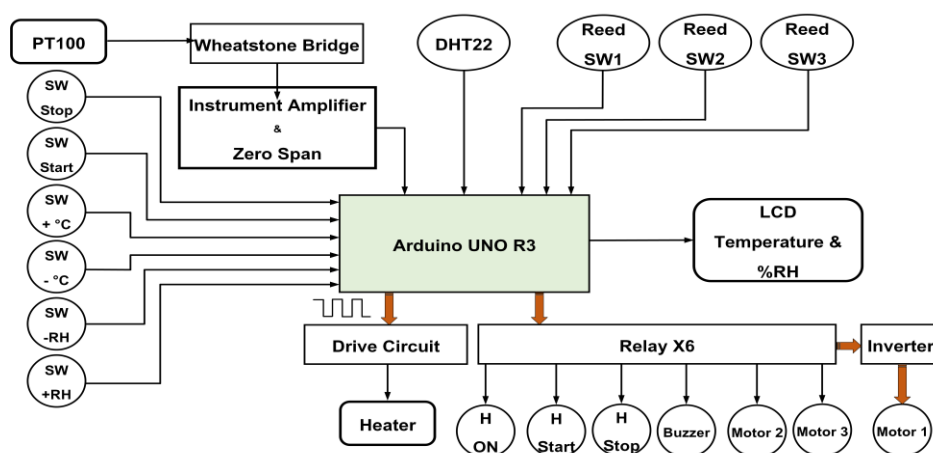
การทำงานของเครื่องคว่ำและปั่นละเอียดพริกแห้ง กิ่งอัตโนมัติที่ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ หลักการทำงานในภาคควบคุมของเครื่องคว่ำและปั่นละเอียดพริกแห้งกิ่งอัตโนมัติ โดยกำหนดให้เซ็นเซอร์ RTD PT100 เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ นำสัญญาณมาขยายผ่านวงจร Instrument Amplifier and Zero Span ให้ได้สัญญาณ 0-5 V เข้า Arduino-UNO R3 เพื่อใช้ในการควบคุมอุณหภูมิ กำหนดให้เซ็นเซอร์ DHT22 เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นของอากาศที่ระบายออกมา สำหรับขดลวดความร้อน (Heater) จะทำหน้าที่ให้ความร้อนกับถังคว่ำ โดยระบบจะควบคุมแบบ PI ในโปรแกรม Arduino ส่งสัญญาณมากระตุ้นวงจรควบคุมมุมเฟส (Phase Control) เพื่อกำหนดมุมเฟสของรูปคลื่น [5] ตามเงื่อนไขการทำงานของโปรแกรมควบคุมจะทำให้กำลังไฟฟ้าของขดลวดความร้อน (Heater) เพิ่มขึ้นหรือลดลงตามผลต่างของอุณหภูมิที่กำหนดไว้ ส่วนของ M1 ทำหน้าที่หมุนใบกวนภายในถัง สำหรับ M2 ทำหน้าที่ปรับมุมเอียงถัง โดยทำงานร่วมกับ Reed Switch เมื่อความชื้นลดลง

ตามที่กำหนดจะหยุดให้ความร้อน ส่วนของ M3 ทำหน้าที่ดึงชุดคริชเปลี่ยนใบกวนเป็นใบปั่นของ M1 ทำการปั่น เมื่อจบการทำงาน Buzzer จะส่งเสียงดังแล้วเครื่องคว่ำและปั่นละเอียดพริกแห้งจะหยุดทำงาน ฟังก์ชันที่กล่าวมาทำงานภายใต้การควบคุมของ Arduino ประกอบด้วยวงจรในรูปที่ 4 และส่วนประกอบของเครื่องคว่ำและปั่นละเอียดพริกแห้งดังรูปที่ 5

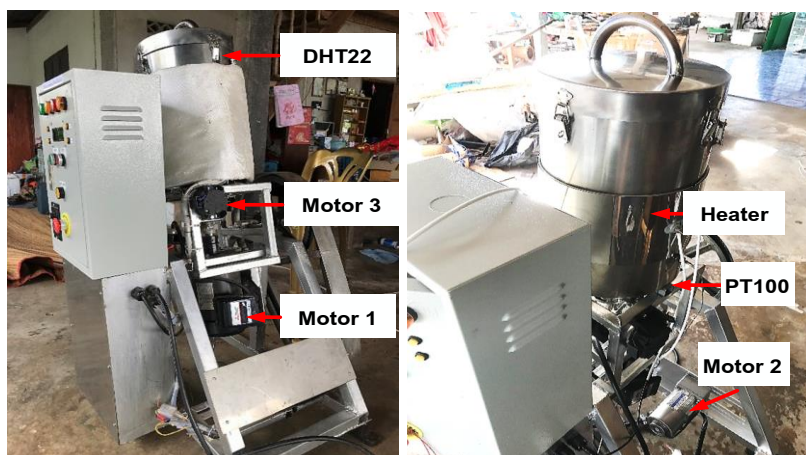
2.5 ขั้นตอนเตรียมวัตถุดิบ

นำพริกแห้งเด็ดก้านจัดเตรียมสำหรับการทดลอง ครั้งละ 500 กรัม ดังรูปที่ 6 และนำพริกแห้งไปคว่ำและปั่นละเอียดด้วยเครื่องคว่ำและปั่นละเอียดพริกแห้ง กิ่งอัตโนมัติ โดยกำหนดอุณหภูมิที่ใช้ในการคว่ำในแต่ละรอบ 60, 70, 80, 90, และ 100 °C ตามลำดับ

กำหนดความชื้น 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95, และ 100 %RH ตามลำดับขณะคว่ำจนที่ค่าอุณหภูมิและความชื้นทุก ๆ 1 นาที จากการคว่ำและปั่นละเอียดพริกแห้ง สังเกตว่าในช่วงอุณหภูมิและความชื้นใดเหมาะสมที่สุด นำไปตั้งเป็นค่าเริ่มต้นของเครื่อง



รูปที่ 4 การทำงานในภาคควบคุม



รูปที่ 5 ตำแหน่งและส่วนประกอบของเครื่องคั่วและปั่นละเอียดพริกแห้ง



รูปที่ 6 แสดงพริกแห้งที่ตากก่อนคั่วและปั่นละเอียด

3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

3.1 การทดสอบขั้นตอนการคั่ว

การเก็บผลในขั้นตอนคั่ว ในการทดลองใช้พริกแห้ง 500 กรัม โดยกำหนดอุณหภูมิในการคั่ว 60, 70, 80, 90, และ 100 °C ในแต่ละรอบตามลำดับ และกำหนดความชื้น 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95, และ 100% RH ตามลำดับ ผลการสังเกตความหอมและสีของพริกแห้ง เมื่อกำหนดอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 1

3.2 การทดสอบขั้นตอนปั่นละเอียด

นำพริกแห้งไปปั่นละเอียดด้วยเครื่องคั่วและปั่นละเอียดพริกแห้งกึ่งอัตโนมัติ โดยกำหนดอุณหภูมิที่ใช้ในการคั่วในแต่ละรอบ 60, 70, 80, 90, และ 100 °C ตามลำดับ และกำหนดความชื้น 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95, และ 100 %RH ตามลำดับ แสดงผลสังเกตความละเอียดของพริกปั่นดังตารางที่ 2 ระยะเวลาในการปั่นละเอียดของพริกดูความละเอียดที่ได้ของพริกดังรูปที่ 7



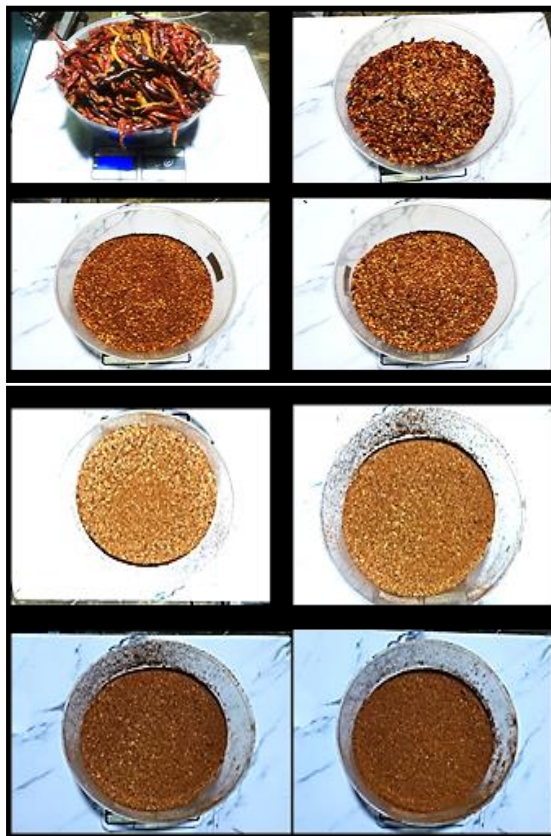
ตารางที่ 1 ผลการสังเกตความหอมและสีของพริกแห้ง เมื่อกำหนดอุณหภูมิที่แตกต่างกัน [6]

อุณหภูมิในการคั่ว (°C)	ความหอมและสีของพริกแห้ง
60	ไม่มีกลิ่นหอมสีแดงสวย
70	กลิ่นหอมอ่อน ๆ สีแดงสวย
80	กลิ่นหอมพอดีสีแดงสวย
90	กลิ่นไหม้อ่อน ๆ สีคล้ำ
100	กลิ่นไหม้สีกากดำ

ตารางที่ 2 แสดงผลสังเกตความละเอียดของพริกป่น เมื่อกำหนดระยะเวลาในการปั่นที่แตกต่างกัน [7]

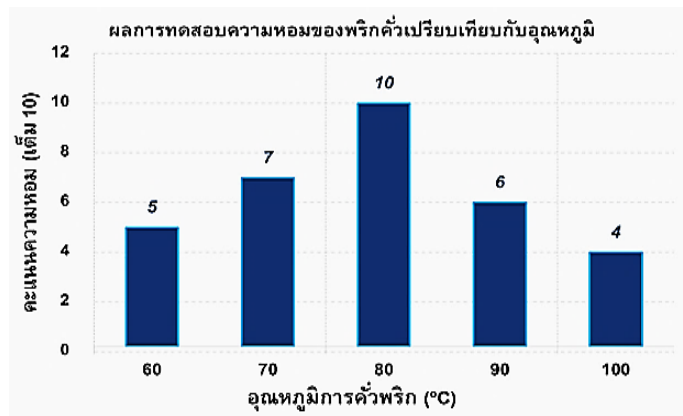
ระยะเวลาในการปั่นละเอียด (นาที)	ความละเอียดที่ได้
1	ไม่ละเอียด
2	ละเอียดไม่มาก
3	ละเอียดไม่มาก
4	ละเอียดพอดี
5	ละเอียดมาก
5	ละเอียดเกินไป
7	ละเอียดเกินไป

การคั่วที่ใช้พริกแห้งที่คั่วออกที่มีน้ำหนัก 500 กรัม โดยกำหนดค่าอุณหภูมิในการคั่วที่ต่างกันคือ 60, 70, 80, 90, และ 100 °C พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการคั่วพริกจะอยู่ที่ 80 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ทำให้สีของพริกแห้งมีสีแดงสวย และมีกลิ่นหอม เหมาะสมในการนำพริกไปประกอบอาหาร ดังตารางที่ 1 และรูปที่ 8 ผู้เข้าร่วมทดสอบ



รูปที่ 7 ลักษณะพริกป่นตามลำดับเวลาการปั่น

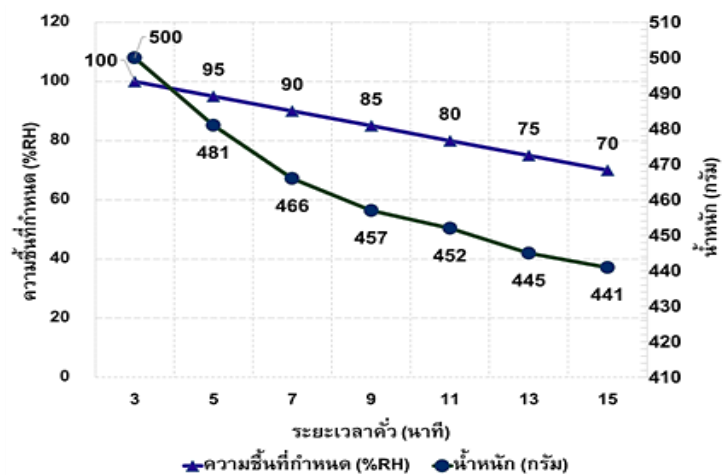
จำนวน 10 คน โดย 1 = ไม่หอมเลย, 10 = หอมมาก และการกำหนดค่าความชื้นสำหรับการสังเกตคั่วที่ค่า 70, 75, 80, 85, 90, 95, และ 100 %RH พบว่าค่าความชื้นที่ดีที่สุดในการหุ้ดคั่วจะมีค่าอยู่ที่ 85 %RH ลักษณะสีของพริกที่ค่าความชื้น 70 %RH ดังรูปที่ 9 และน้ำหนักลดลงเหลือ 441 กรัม กราฟรูปที่ 10 จะเป็นการแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่าง เวลา น้ำหนัก และค่าความชื้นของพริกที่คั่ว



รูปที่ 8 ผลการทดสอบความหอมจากผู้ร่วมทดสอบ



รูปที่ 91 ลักษณะของพริกก่อนและหลังการคั่ว



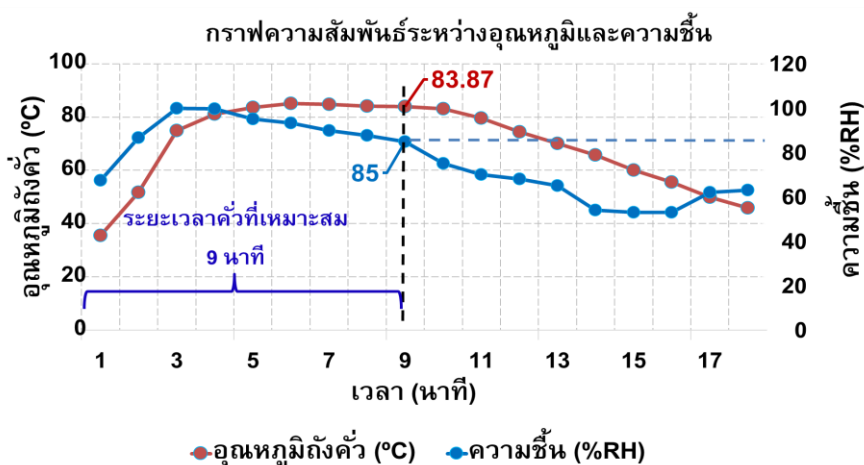
รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ของค่าน้ำหนักพริกกับค่าความชื้นและเวลา



จากผลการทำงานของเครื่องคว่ำและปั่นละเอียดพริกแห้งกึ่งอัตโนมัติจะมีการกำหนดค่าเริ่มต้นของอุณหภูมิและความชื้นในการใช้งาน ตามการทดสอบที่ได้ผลดีที่สุดจากข้างต้น คือ ความชื้นในการหยุดคว่ำที่ 85 %RH อุณหภูมิในการคว่ำ 80 °C โดยมีการกำหนดระยะเวลาสำหรับการระบายความร้อน 5 นาที และปั่นละเอียด 4 นาที

จากรูปที่ 11 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและค่าความชื้นเห็นได้ว่าช่วงเริ่มต้นของการคว่ำจะมีอุณหภูมิและความชื้นมีค่าเท่ากับสภาพอากาศภายนอกที่อยู่ในสภาวะปกติคือค่าความชื้นประมาณ 60-70 %RH และค่าอุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 35-40 °C จากนั้นเมื่อเครื่องเริ่มทำงานในขั้นตอนของการคว่ำ ความร้อนที่ได้จากขดลวดความร้อน (Heater) จะเริ่มแพร่กระจายไปรอบ ๆ ตัวถัง ส่งผลให้ความชื้นที่อยู่ในตัวพริกก็จะระเหยออกมา ส่งผลให้อากาศที่ระบายออกมามีความชื้นที่เพิ่มขึ้นและอุณหภูมิที่ต้องการคว่ำอยู่ประมาณ 80 °C เมื่อความชื้นลดลงมาถึง 85 %RH จะตัดการทำงานของฮีตเตอร์ อุณหภูมิจะเริ่มลดลง และ

ความชื้นลดลงเพราะการระบายความร้อนออกมาทำให้ความชื้นลดลงเมื่อความชื้นที่ระบายออกมาต่ำลงค่าความชื้นก็จะกลับมาเท่ากับค่าความชื้นของอากาศภายนอก และจากการถ่ายเทความร้อนพริกจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นทำให้น้ำที่อยู่ภายในพริกเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำและระเหยสู่อากาศและถ่ายเทไปสู่อากาศร้อน [8] ซึ่งในช่วงการดำเนินการอบแห้งเมื่อความชื้นถูกพาออกจากพริกทำให้ภายในพริกมีปริมาณน้ำลดลง [9] ในระหว่างนี้อุณหภูมิของอากาศที่ไหลอยู่ภายในจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น ด้านการเปลี่ยนแปลงของความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity, RH) ภายในบริเวณห้องอบของเครื่องคว่ำและปั่นละเอียดพริกแห้งกึ่งอัตโนมัติ จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าขณะเริ่มการทดสอบในช่วงแรกค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่อ่านค่าได้มีการเพิ่มขึ้น พร้อมกับการเพิ่มขึ้นของค่าอุณหภูมิอย่างต่อเนื่องจนถึงค่าที่กำหนดระบบการควบคุมอุณหภูมิจะสั่งหยุดการทำงานซึ่งในขณะนี้ อุณหภูมิและความชื้นยังคงลดลงเรื่อย ๆ [10] จนถึงค่าค่าหนึ่งค่าความชื้นจะเริ่มขึ้นอีกครั้ง



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ของค่าความชื้นในพริกกับค่าความชื้นและเวลา



สำหรับทดสอบการบั่นละเอียดโดยใช้เวลาในการบั่นละเอียด 1, 2, 3, 4, 5, 6, และ 7 นาที จะเห็นได้ว่าใช้ระยะเวลาในการบั่นนานขึ้นยิ่งทำให้พริกบั่นละเอียดมากขึ้น ดังรูปที่ 9 แต่ความละเอียดที่มากไปก็เกินความจำเป็น ทำให้เสียเวลาและพลังงานที่ใช้ในการบั่นละเอียด [11] ซึ่งความละเอียดที่เหมาะสมที่สุดและใกล้เคียงกับพริกบั่นในท้องตลาดอยู่ในช่วงเวลา 3-5 นาที

การใช้พลังงานไฟฟ้าและค่าไฟฟ้าจากการใช้เครื่องคว้และบั่นละเอียดพริกแห้งกิ่งอ้ดโนมัดี้ จากการทํางานของเครื่องคว้และบั่นละเอียดพริกแห้งกิ่งอ้ดโนมัดี้ ในทํางานของเครื่องจะกําหนดค่าเริ่มต้นในการใช้งานตามการทดลองที่ได้ผลดีที่สดุ [11] จากข้างต้น คือความชื้นในการหยุดคว้ที่ 85 %RH อุณหภูมิในการคว้ 80 °C ระยะเวลาในการบั่นละเอียด 4 นาที และผู้ใช้งานสามารถปรับอุณหภูมิและความชื้นได้ โดยกดปุ่มที่หน้าตู้ ส่วนการแสดงผลสามารถแสดงผลด้วยจอ LCD ซึ่งจะมีการแสดงค่า พังค์ชันขณะทํางาน ค่าอุณหภูมิ และความชื้นในส่วนของการคว้ 1 รอบใช้เวลารวมทั้งหมด 18 นาที การคํานวณการใช้ไฟฟ้าและค่าไฟฟ้าจากการใช้เครื่องคว้และบั่นละเอียดพริกแห้งกิ่งอ้ดโนมัดี้ จากสมการการคํานวณค่าไฟฟ้าดังนี้

$$p = v \cos(\theta) \quad (1)$$

$$w = \frac{p \times t}{1,000} \quad (2)$$

เมื่อ w คือหน่วยการใช้ไฟฟ้า (กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง)

p คือกำลังไฟฟ้าที่ใช้งาน (วัตต์)

t คือจำนวนชั่วโมง (ชั่วโมง)

การคํานวณการใช้ไฟฟ้าและค่าไฟฟ้าจากการใช้เครื่องคว้และบั่นละเอียดพริกแห้งกิ่งอ้ดโนมัดี้จากการ

คํานวณหาหน่วยการใช้ไฟฟ้าจากสมการที่ (2) ในการคว้ที่อุณหภูมิ 80 °C และความชื้นในการหยุดคว้ 85 %RH เตรียมการบั่น 5 นาที และบั่นละเอียด 4 นาที ใช้เวลาในการทดสอบในการใช้เครื่องคว้และบั่นละเอียดพริกแห้งกิ่งอ้ดโนมัดี้ มีหน่วยการใช้ไฟฟ้ารวม = $0.0327040(4) + 0.0207167 + 0.0019906(9) + 0.0038628(4) = 0.184899267$ ยูนิท ในการคิดค่าไฟฟ้า ใช้หลักอัตราค่าไฟฟ้า แบบกําวหน้าประเภทที่ 1 บ้านอยู่อาศัยโดยมีอัตราปกติปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าไม่เกิน 150 หน่วยต่อเดือนใน 15 หน่วยแรก (หน่วยที่ 1-15) คิดราคาหน่วยละ 2.3488 บาท คิดเป็นเงิน = $0.184899267 \times 2.3488 = 0.4342696$ เป็นเงินประมาณ 0.44 บาท

4. บทสรุป

เครื่องคว้และบดละเอียดพริกแห้งกิ่งอ้ดโนมัดี้สามารถกําหนดอุณหภูมิและความชื้นได้ตามต้องการซึ่งการควบคุมอุณหภูมิแบบ PI ร่วมกับเฟสคอนโทรล ทำให้อุณหภูมิที่ได้มีความสม่ำเสมอ [12] ซึ่งในการทดลองการควบคุมอุณหภูมิแบบ PI โดยกําหนดอุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 30 นาที และได้มีการสร้างสถานการณ์รบกวนโดยการเปิดฝาดังระบายอากาศทำให้อุณหภูมิลดลงกะทันหันแล้วปิดฝากลับเพื่อดูว่าระบบ PI สามารถควบคุมอุณหภูมิให้กลับมา 80 °C พบว่าอุณหภูมิไม่คงที่ที่มีความคลาดเคลื่อนจากค่าที่กำหนดสูงสุดประมาณ 2 °C เมื่อทำการรบกวนระบบให้อุณหภูมิตําลงกะทันหัน พบว่า ระบบสามารถควบคุมอุณหภูมิให้กลับมา 80 °C ภายในเวลา 2 นาที ในการบั่นพริกให้ละเอียดโดย ใบมีดจะหมุนด้วยความเร็วประมาณ 950 รอบ/นาที และสามารถตั้งอุณหภูมิ



สูงสุดได้ 160°C แต่จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมในการคั่วคือ 80°C อุณหภูมิที่แสดงผลบนหน้าจอ LCD มีความคลาดเคลื่อนจากเครื่องวัดอุณหภูมิที่ใช้อ้างอิงสูงสุดประมาณ 2.05°C เมื่อกำหนดความชื้นที่แตกต่างกันคือ 70, 75, 80, 85, 90, 95, และ 100 %RH พบว่า ค่าความชื้นในการหยุดคั่วที่ 85 %RH มีกลิ่นหอม สีแดงสวย เหมาะสมในการนำพริกไปประกอบอาหารสดคล่อง [12] เมื่อใช้อุณหภูมิเกิน 90°C จะส่งผลต่อการเกิดสารอะคริลาไมด์ในพริกป่นสดคล่องกับ [13] อาจมีผลต่อความหอมและสีของพริกแห้งด้วย เวลาที่ใช้เหมาะสมในการคั่วอยู่ประมาณ 9 นาที และน้ำหนักพริกจะลดลงจาก 500 กรัม เหลืออยู่ 457 กรัม ขั้นตอนบั่นละเอียด โดยทำการบั่นละเอียดในแต่ละรอบตามระยะเวลาที่ตั้งคือ 1, 2, 3, 4, 5, 6, และ 7 นาที ตามลำดับ ในการบั่นพริกให้ละเอียดไปมีดจะหมุนด้วยความเร็วประมาณ 950 รอบ/นาที พบว่าในช่วงเวลา 3-5 นาที เป็นช่วงเวลาที่เหมาะสมในการบั่นละเอียด สรุปเวลาในการทำงานของเครื่องคั่วประมาณ 9 นาที ระบายความร้อนก่อนบั่นละเอียด 5 นาที บดละเอียด 4 นาที รวมเป็นประมาณ 18 นาที ต่อ 1 รอบการทำงาน

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณนางสาวสโรชา ประกอบเพียร และนาย ศักดิ์สิทธิ์วิสุทธิ์ นักศึกษาระดับปริญญาตรี ที่ช่วยทำการทดสอบเครื่องคั่วและบั่นละเอียดพริกแห้งกิ่งอัตโนมัติ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Sukchum, S. Surasereewong and K. Chaethong, Influence of processing and storage conditions on physicochemical properties of chili powder and roasted chili powder, RMUTP Research Journal, 2022, 16(1), 83–94.
- [2] B. Wangsilabatra, P. Chophabundit, Single phase sinusoidal voltage waveform ac voltage control based on chopper for resistive load, Pathumwan Academic Journal, 2012, 2(5), 65–71.
- [3] H. Azhari, T. Nasution and S.H. Sinaga, Design of monitoring system temperature and humidity using dht22 sensor and nrf24l01 based on arduino, Journal of Physics Conference Series, 2023, 21(1), 1–9.
- [4] N. Somchaiwong, J. Phiboonsin and P. Chaikam, Designing and constructing an essential oil distiller with closed loop control, Journal of Technology Management Rajabhat Maha Sarakham University, 2022, 9(1), 25–36.
- [5] L.S. Tat and Y.K. Haur, Remote ac power control by using microcontroller, Journal of Telecommunication Electronic and Computer Engineering, 2016, 8(12), 53–58.



- [6] M. Liu, L. Hu, N. Deng, Y. Cai, H. Li, B. Zhang and J. Wang, Effects of different hot-air drying methods on the dynamic changes in color, Nutrient and Aroma Quality of Three Chili Pepper (*Capsicum Annuum* L.) Varieties, Food Chem X 2024, 22, 101262.
- [7] S.S Singh, B.M. Ghodki and T.K. Goswami, Effect of grinding methods on powder quality of king chili, Journal of Food Measurement and Characterization, 2018, 12(3), 1686–1694.
- [8] A. Krzykowski, S. Rudy, R. Polak, B. Biernacka, A. Krajewska, E. Janiszewska-Turak, I. Kowalska, J. Żuchowski, B. Skalski, and D. Dziki, Drying of red chili pepper (*Capsicum annuum* L.): Process kinetics, color changes carotenoid content and phenolic profile, Molecules, 2024, 29(21), 5164.
- [9] C. Hommalee, S. Wiriyasart and P. Naphon, Development of cold-hot water dispenser with thermoelectric module systems, Journal Heat Transfer - Asian Research, 2019, 48(3), 854–863.
- [10] E. Kathiravan, U.N.D. Harinarayanan, K. Murugavel, K. Subburamu, S. Karuppusamy, D. Maduraimuthu, V.S. Sethuraman, G. Jothiprakash, K. Palaniappan and S. Sridarane, Drying kinetics and mathematical modelling of aggregatum onion (*Allium cepa* L. var. *aggregatum* Don.) dried using cabinet dryer, Fresenius Environmental Bulletin, 2025, 33(12), 1469–1479.
- [11] N. Hussain, N.A. Rahim and N. Azhar, Physicochemical properties of chili padi centil (*capsicum frutescens*) powder dried at different drying temperatures, Food Research 4, 2020, 4(1), 139–144.
- [12] N. Sukchum, Changes in capsaicinoid during product development process of chili powder, Thesis, Rangsit University, Thailand, 2020.
- [13] P. Kluengklangdon, M. Uraroongroj, Effect of temperature and duration of thermal process on the occurrence and stability of acrylamide in chili powder, Bulletin of the Department of Medical Sciences, 2017, 59(4), 216–225.



การหาสภาวะที่เหมาะสมโดยการใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนองสำหรับการกลึงคว้านในเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S20C

จุฬาลักษณ์ โรจนานุกุล¹ อภิชาล ทองมั่ง กำเนิดว่า¹ สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์^{1,2*}

ชัยณรงค์ ศรีระบุตร¹ วิมเนศ เพชรสุวรรณ¹ ณัฐวัตร นระโต¹ และ ธนัท แสงงาม¹

¹ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

² หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการแปรรูปวัสดุ, สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: surasit.r@rmutsv.ac.th

วันที่รับบทความ: 25 เมษายน 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 18 กรกฎาคม 2568; วันที่ตอบรับบทความ: 29 กันยายน 2568

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 9 ธันวาคม 2568

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบการทดลองบ็อกซ์-เบห์นเคน และวิเคราะห์ด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนองสำหรับการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวในการกลึงคว้านในเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S20C โดยมีปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย ความเร็วรอบ 800-1,700 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.04-0.08 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกในการตัด 0.10-0.50 มิลลิเมตร และความยาวด้ามมีด 45-55 มิลลิเมตร ซึ่งจากการทดลองพบว่า ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าความขรุขระผิว คือ ความเร็วรอบ อัตราป้อน ความลึกในการตัด และความยาวด้ามมีด โดยค่าความขรุขระผิวจะเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วรอบลดลง นอกจากนี้ ค่าความขรุขระผิวจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้อัตราป้อน ความลึกในการตัด และความยาวด้ามมีด ลดลง ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมต่อความขรุขระผิว คือ ความเร็วรอบ 1,685 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.04 มิลลิเมตรต่อนาที ความลึกในการตัด 0.39 มิลลิเมตร และความยาวด้ามมีด 45 มิลลิเมตร โดยมีค่าความขรุขระผิวเท่ากับ 2.267 ไมโครเมตร การยืนยันผลการทดลองโดยการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการพยากรณ์กับค่าที่วัดจริงจากการทดลอง โดยกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจากการเปรียบเทียบผลการทดลอง พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ของค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยเท่ากับ 3.16 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้และค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

คำสำคัญ: บ็อกซ์-เบห์นเคน; การคว้าน; ความเร็วรอบ; ความยาวด้ามมีด; เหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S20C

Optimization of Condition Using Response Surface Methodology for Boring Process in S20C Carbon Steel

Julaluk Rodjananugoon¹, Apichon Thongmung Kamnerdwam¹, Surasit Rawangwong^{1,2*}
Chainarong Srivabut¹, Wikanet Phetsuwan¹, Nattawat Narato¹ and Tanat Sangngam¹

¹ Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Srivijaya

² Materials Processing Technology Research Unit, Department of Industrial Engineering,
Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya

* Corresponding author, E-mail: E-mail: surasit.r@rmutsv.ac.th

Received: 15 April 2025; Revised 18 July 2025; Accepted: 29 September 2025

Online Published: 9 December 2025

Abstract: This research designed a Box-Behnken experiment and analyzed it using surface response methodology to predict the boring process of carbon steel grade S20C. The experimental variables encompass speed from 800 to 1,700 rpm, feed rate from 0.04 to 0.08 mm/rev, depth of cut from 0.10 to 0.50 mm, and overhang length from 45 to 55 mm. The experiment found that all the main factors affecting the surface roughness values were speed, feed rate, depth of cut, and overhang length. The surface roughness values increase significantly as speed decreases. Moreover, the surface roughness tends to decrease when decreasing the feed rate, depth of cut, and overhang length. The optimal conditions for surface roughness (R_a) of 2.267 micrometers were speed of 1,685 rpm, feed rate of 0.04 mm/rev, depth of cut of 0.39 mm, and overhang length of 45 mm. The experimental results were confirmed by comparing the predicted values with the actual measured values from the experiment, with a maximum surface roughness prediction error of 5%. The comparison of the experimental results revealed that the mean absolute percentage error value of the surface roughness was 3.16 percent, which is less than the specified error value and remains within the acceptable range.

Keywords: Box-Behnken; Boring; Speed; Overhang length; S20C carbon steel



1. บทนำ

เหล็กกล้าคาร์บอนเป็นวัสดุที่มีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมที่หลากหลาย โดยเฉพาะในงานขึ้นรูปโครงสร้างเครื่องจักร ชิ้นส่วนแม่พิมพ์ อุตสาหกรรมยานยนต์ และชิ้นส่วนทางวิศวกรรมอื่น ๆ ด้วยคุณสมบัติที่โดดเด่นด้านความแข็งแรง ทนทานต่อแรงกระทำและมีความสามารถในการต้านทานการสึกหรอในระดับหนึ่ง อีกทั้งยังสามารถเพิ่มความแข็งและความแข็งแรงได้ด้วยการผ่านกระบวนการทางความร้อน ทำให้เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในภาคการผลิต

เหล็กกล้าคาร์บอน แบ่งเป็น 3 ประเภทคือ เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง และเหล็กกล้าคาร์บอนสูง คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าคาร์บอนแต่ละประเภทขึ้นอยู่กับปริมาณธาตุคาร์บอนที่ผสม โดยจะส่งผลทางตรงต่อความแข็งแรง และความทนทานของวัสดุ ในภาค อุตสาหกรรมเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยม เนื่องจากมีสมบัติที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปเป็นชิ้นส่วนต่าง ๆ ได้หลายวิธี เช่น การกลึง การกัด การไส การเจาะ เป็นต้น การขึ้นรูปด้วยกระบวนการกลึง (Turning) ถือเป็นหนึ่งในวิธีการผลิตที่มีความสำคัญอย่างยิ่งและมักถูกเลือกใช้เป็นลำดับแรกในกระบวนการผลิต เนื่องจากกระบวนการกลึงมีความสามารถในการขึ้นรูปชิ้นงานได้หลากหลายรูปแบบ อีกทั้งยังให้ความแม่นยำสูงและมีประสิทธิภาพในการทำงาน จึงทำให้เป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วน การขึ้นรูปด้วยการกลึงปอกจะส่งผลให้ขนาดของชิ้นงานลดลง ส่วนการขึ้นรูปด้วยการกลึงคว้านรูใน (Boring) จะเป็นการขยายรูในของชิ้นงานโตขึ้น ซึ่งในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงกระบวนการกลึงคว้านรูใน โดยการที่จะกลึงคว้านรูใน

นั้นชิ้นงานจะต้องผ่านกระบวนการเจาะมาก่อน จากนั้นนำไปกลึงคว้านด้วยมีดกลึงคว้านรูใน ซึ่งในการกลึงคว้านให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพนั้น จะต้องใช้ค่าปัจจัยหรือพารามิเตอร์ที่มีความเหมาะสม ประกอบด้วย ความเร็วรอบ (Speed) อัตราป้อน (Feed Rate) ความลึกในการตัด (Depth of Cut) และวัสดุมีดกลึง (Cutting Tool) เป็นต้น หากกำหนดปัจจัยไม่เหมาะสมจะทำให้ชิ้นงานที่ได้ไม่มีคุณภาพ เกิดความสูญเสียในกระบวนการผลิต และเกิดต้นทุนที่สูง สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง เกรด S20C ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในด้านการทำโครงสร้างเครื่องจักร ชิ้นส่วนแม่พิมพ์ ชิ้นส่วนเครื่องจักร อุตสาหกรรมยานยนต์ และชิ้นส่วนอุตสาหกรรมทั่วไป เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ทนทานต่อการเสียดสี มีความแข็งแรงและสามารถต้านทานต่อความล้าได้ดี [1-2]

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า มีการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบต่าง ๆ เพื่อวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีผลต่อการกลึง ดังเช่น การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial Design) [3-4] และประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองด้วยวิธีทาคุชิ (Taguchi Method) [5-7] อีกทั้งยังมีการประยุกต์ใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology: RSM) สำหรับวิเคราะห์อิทธิพลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ และสภาวะที่เหมาะสมในการกลึงคว้านรูใน [8-11] โดยวิธีการพื้นผิวตอบสนองมีงานวิจัยที่ได้นำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับการออกแบบการทดลองบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken) [10, 12-14] ซึ่งการออกแบบการทดลองบ็อกซ์-เบห์นเคน มีจุดเด่นในการลดจำนวนการทดลองในการศึกษาผลกระทบของตัวแปรหลายตัว เมื่อเทียบกับการ



ออกแบบแปดทอเรียลเต็มรูปแบบ และเหมาะสำหรับการประเมินผลกระทบแบบไม่เป็นเชิงเส้นของตัวแปรต่อตัวแปรตอบสนอง รวมไปถึงการประยุกต์วิธีการพื้นผิวตอบสนองใช้ร่วมกับการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง (Central Composite Designs: CCD) [15] ซึ่งการออกแบบการทดลองแต่ละวิธีแตกต่างกันในวิธีการและจุดประสงค์ในการใช้เพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ในการทดลองที่เกี่ยวข้องกับการกลึง การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองวิธีการต่าง ๆ ข้างต้นนั้น นอกจากสามารถวิเคราะห์อิทธิพลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ และสถานะที่เหมาะสมได้แล้ว ยังนำไปสู่การพยากรณ์ค่าความขรุขระผิว (Surface Roughness) ของกระบวนการกลึงชิ้นงาน [4, 8-14] ได้อีกด้วย ซึ่งวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้เพื่อประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองบ็อกซ์-เบนเคน สำหรับการหาค่าที่เหมาะสมและการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวในการกลึงคว้านรูในเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S20C เพื่อเป็นแนวทางในการกำหนดปัจจัยและสถานะการกลึงที่เหมาะสม ช่วยให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพสูง พร้อมทั้งลดต้นทุนและเวลาในการผลิตอันจะเป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมการผลิตสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตและการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่ายิ่งขึ้น

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 เครื่องมือ เครื่องจักร และวัสดุที่ใช้ทดลอง

เครื่องจักรที่และเครื่องมือ ใช้ในการทดลองประกอบด้วย เครื่องกลึง ยี่ห้อ Harrison รุ่น M 300 มีค่าทางเทคนิคสำคัญ ๆ ประกอบด้วย ความเร็วรอบสูงสุด 2,500 รอบต่อนาที อัตราป้อนสูงสุด 1 มิลลิเมตร

ดอรรอบ เม็ดมีดกลึงคาร์ไบด์ ยี่ห้อ Kyocera ชนิด Turning Insert เกรด CA5525 ตามมีดคว้าน ยี่ห้อ Kyocera ชนิด Internal Turning เกรด S16Q-SDUCR11 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ความยาว 250 มิลลิเมตร ดอกสว่าน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 18 และ 22 มิลลิเมตร เครื่องวัดความขรุขระ ยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น SJ-210 ลักษณะการวัดแบบหัวกดเคลื่อนที่ความละเอียดในการวัดอยู่ที่ 350 ไมโครเมตร ระยะในการวัด 12.5 มิลลิเมตร ความเร็วในการวัด 0.5 มิลลิเมตรต่อวินาที และทิศทางการวัดจะถอยกลับหลัง และวัสดุในการทดลองเป็นเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด S20C ปริมาณคาร์บอนระหว่าง 0.18-0.23%

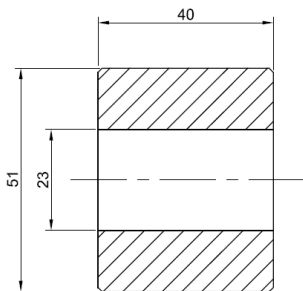
2.2 การออกแบบวิธีการวัด

การออกแบบวิธีการวัด จะวัดค่าความขรุขระผิวบนผิวชิ้นงานที่ทำารกลึงคว้านรูในขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรู 23 มิลลิเมตร ความยาวลึก 40 มิลลิเมตร แสดงดังภาพที่ 1 (ก) และกำหนดจุดวัดห่างจากหน้าตัดของชิ้นงานประมาณ 13 มิลลิเมตร โดยแบ่งชิ้นงานออกเป็น 3 ส่วน ส่วนละ 120 องศา แสดงดังภาพที่ 1 (ข) ในแต่ละสถานะการกลึงจะวัด 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ย และวัดทันทีเมื่อกลึงเสร็จเพื่อลดความคลาดเคลื่อนของข้อมูล โดยวัดในทิศทางขนานกับทิศทางการกลึง

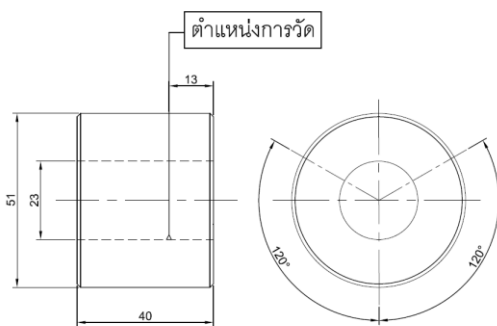
2.3 การดำเนินการทดลอง

2.3.1 ศึกษาปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อความขรุขระผิวและสถานะที่เหมาะสมในการกลึงคว้านรูใน

การกำหนดช่วงปัจจัยการทดลองนั้น พิจารณาจากคุณลักษณะของเม็ดมีดคว้าน และคุณลักษณะของ



(ก) กำหนดขนาดของชิ้นงานทดสอบ



(ข) การกำหนดช่วงการวัดชิ้นงาน

รูปที่ 1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบและการกำหนดช่วงการวัดชิ้นงาน

ตารางที่ 1 การกำหนดค่าปัจจัยสำหรับการทดลอง

ปัจจัย	ต่ำ (-1)	กลาง (0)	สูง (1)
ความเร็วรอบ (S) รอบ/นาที	800	1,200	1,700
อัตราป้อน (F) มิลลิเมตร/รอบ	0.04	0.06	0.08
ความลึกในการตัด (D) มิลลิเมตร	0.10	0.30	0.50
ความยาวด้ามมีด (L) มิลลิเมตร	45	50	55

เครื่องกลึงที่ใช้ในการทดลอง โดยปัจจัยหรือค่าพารามิเตอร์ที่แนะนำจากบริษัทผู้ผลิตเกี่ยวกับคุณลักษณะของเมตมีด คือ ความเร็วตัด 120-240 เมตรต่อนาที ความลึกในการตัด 0.5-2.0 มิลลิเมตร อัตราป้อน 0.10-0.25 มิลลิเมตรตอร์อบ และจากข้อจำกัดของเครื่องกลึง มีความเร็วรอบปรับได้จริงระหว่าง 800-1,700 รอบต่อนาที หรือความเร็วตัด 122 เมตรต่อนาที และอัตราป้อนระหว่าง 0.04-0.08 มิลลิเมตรตอร์อบ โดยกำหนดปัจจัยที่ต้องควบคุม 4 ปัจจัย คือ ความเร็วรอบ อัตราป้อน ความลึกในการตัด และความยาวด้ามมีด แสดงดังตารางที่ 1 จากนั้นนำปัจจัยทั้งหมดมาออกแบบการทดลอง และขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ โดยกำหนดให้ค่าผลตอบแทนเป็นค่าความขรุขระผิว (R_a)

2.3.2 ทดลองกลึงเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความขรุขระผิวและสภาวะที่เหมาะสมในการกลึงคว้านรูใน

1) การออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน ได้กำหนดตัวแปรที่คาดว่าจะมีผลต่อความขรุขระผิวจำนวน 4 ปัจจัย ปัจจัยละ 3 ระดับ แสดงดังตารางที่ 2 โดยมีทั้งหมด 29 สภาวะการทดลอง และมีการวัดซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อลดความแปรปรวนของข้อมูล ซึ่งจะใช้รหัส (Code) แทนระดับของปัจจัย คือ 0, 1 และ -1

2) จัดเตรียมชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด S20C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงาน 51 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูคว้าน 23 มิลลิเมตร ความยาวชิ้นงาน 40 มิลลิเมตร จำนวน 29 ชิ้นงาน

จากนั้นทำการกลึงคว้านรูในตามค่าระดับและปัจจัยที่กำหนด ตามแนวยาวของชิ้นงาน แล้วนำไปวัดค่าความขรุขระผิว ชิ้นละ 3 จุด แต่ละข้อมูลทำการหมุนชิ้นงาน 120 องศา และวัดห่างจากปลายชิ้นงานประมาณ 13 มิลลิเมตร บันทึกผลข้อมูล หาค่าเฉลี่ย



และวิเคราะห์ค่าความขรุขระผิวโดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology: RSM) ด้วยโปรแกรม Design-Expert 8.0.6

3) การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง เมื่อทำการทดลองตามที่ออกแบบไว้ ก่อนจะนำข้อมูลไปวิเคราะห์ ต้องตรวจสอบก่อนว่าข้อมูลที่เก็บมานั้นมีคุณภาพหรือไม่ โดยพิสูจน์จากการทดสอบความเป็นปกติของข้อมูล การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล และการทดสอบความเสถียรภาพของความแปรปรวน

4) การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความขรุขระผิว จะใช้โปรแกรม

Design-Expert 8.0.6 ในการวิเคราะห์เพื่อพิจารณาถึงปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง

5) การพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวของการทดลองเพื่อทำนายสภาวะที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลอง โดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (RSM) ซึ่งเป้าหมายของการทดลองจะกำหนดเป้าหมายให้มีค่าความขรุขระผิวน้อยที่สุด

6) การยืนยันผลการทดลองโดยการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการพยากรณ์กับค่าที่วัดจริงจากการทดลอง โดยกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 2 การกำหนดค่าปัจจัยสำหรับการทดลองและการออกแบบการทดลอง

ลำดับ	ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)	อัตราป้อน (มิลลิเมตร/รอบ)	ความลึกในการตัด (มิลลิเมตร)	ความยาวด้ามมีด (มิลลิเมตร)	ค่าความขรุขระผิว (ไมโครเมตร)
1	1,200 (0)	0.06 (0)	0.5 (1)	45 (-1)	3.052
2	1,200 (0)	0.06 (0)	0.3 (0)	50 (0)	2.931
3	1,200 (0)	0.06 (0)	0.3 (0)	50 (0)	2.892
4	1,200 (0)	0.08 (1)	0.3 (0)	45 (-1)	3.103
5	1,700 (1)	0.04 (-1)	0.3 (0)	50 (0)	2.433
6	1,200 (0)	0.06 (0)	0.5 (1)	55 (1)	3.283
7	1700 (1)	0.08 (1)	0.3 (0)	50 (0)	2.485
8	800 (-1)	0.04 (-1)	0.3 (0)	50 (0)	4.162
9	1200 (0)	0.06 (0)	0.3 (0)	50 (0)	2.912
10	1,200 (0)	0.08 (1)	0.1 (-1)	50 (0)	2.988
11	800 (-1)	0.06 (0)	0.3 (0)	45 (-1)	4.124
12	1,200 (0)	0.04 (-1)	0.3 (0)	45 (-1)	2.763
13	800 (-1)	0.08 (1)	0.3 (0)	50 (0)	4.281



ตารางที่ 2 (ต่อ) การกำหนดค่าปัจจัยสำหรับการทดลองและการออกแบบการทดลอง

ลำดับ	ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)	อัตราป้อน (มิลลิเมตร/รอบ)	ความลึกในการตัด (มิลลิเมตร)	ความยาวด้ามมีด (มิลลิเมตร)	ค่าความขรุขระผิว (ไมโครเมตร)
14	800 (-1)	0.06 (0)	0.5 (1)	50 (0)	4.355
15	800 (-1)	0.06 (0)	0.1 (-1)	50 (0)	4.102
16	1,200 (0)	0.06 (0)	0.1 (-1)	55 (1)	3.011
17	1,200 (0)	0.06 (0)	0.3 (0)	50 (0)	3.105
18	800 (-1)	0.06 (0)	0.3 (0)	55 (1)	4.091
19	1,200 (0)	0.04 (-1)	0.1 (-1)	50 (0)	2.768
20	1,200 (0)	0.06 (0)	0.1 (-1)	45 (-1)	2.817
21	1,700 (1)	0.06 (0)	0.3 (0)	45 (-1)	2.356
22	1,200 (0)	0.06 (0)	0.3 (0)	50 (0)	2.920
23	1,700 (1)	0.06 (0)	0.3 (0)	55 (1)	2.878
24	1,200 (0)	0.04 (-1)	0.3 (0)	55 (1)	3.177
25	1,700 (1)	0.06 (0)	0.5 (1)	50 (0)	2.829
26	1,200 (0)	0.08 (1)	0.3 (0)	55 (1)	3.136
27	1,200 (0)	0.08 (1)	0.5 (1)	50 (0)	3.198
28	1,200(0)	0.04 (-1)	0.5 (1)	50 (0)	2.874
29	1,700(1)	0.06 (0)	0.1 (-1)	50 (0)	2.287

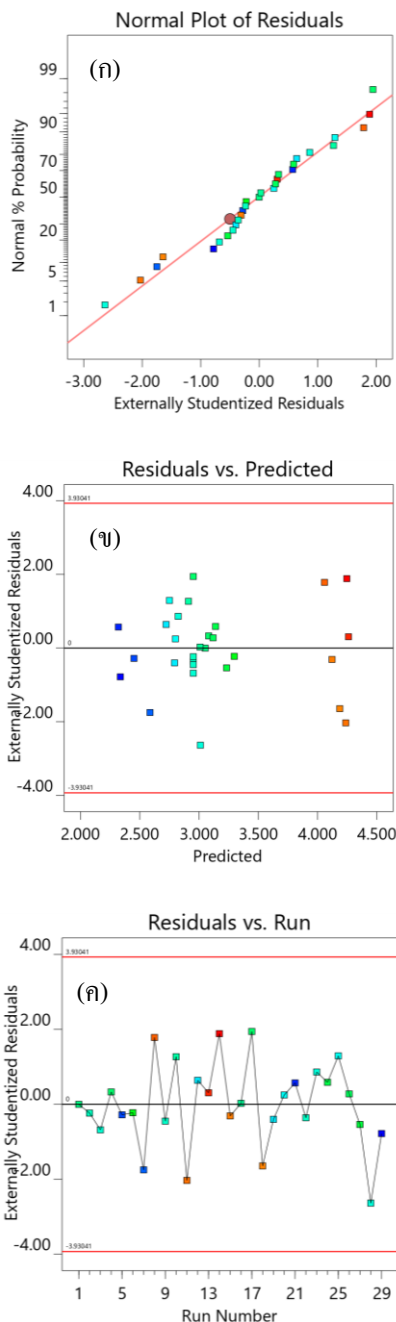
7) การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) ของค่าความขรุขระผิวในการกลึงคว้านรูป เป็นการวิเคราะห์ค่าความขรุขระผิวกับตัวแปรต่าง ๆ คือ ความเร็วรอบ อัตราป้อน ความลึกในการตัด และความยาวด้ามมีด โดยใช้ข้อมูลจากการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อความขรุขระผิวโดยใช้โปรแกรม Design-Expert 8.0.6

8) การหาค่าสภาวะที่เหมาะสมในการกลึง ในส่วนนี้จะใช้ Response Optimization ในการคำนวณเพื่อหาระดับของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความขรุขระผิว (R_a) มีค่าต่ำที่สุด

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

3.1 การตรวจสอบความถูกต้องของการทดลอง

เมื่อทดลองตามแผนการทดลองแล้ว ทำการตรวจสอบคุณสมบัติ 3 ประการ ประกอบด้วย กราฟแสดงการแจกแจงข้อมูลแบบปกติ (Normality Plot) กราฟค่าเศษเหลือต่อลำดับค่าที่พยากรณ์ (Residuals vs. Predicted) และกราฟแสดงค่าเศษเหลือต่อลำดับการทดลอง (Residuals vs. Run) แสดงดังรูปที่ 2 พบว่า ข้อมูลมีคุณภาพและมีความถูกต้องในทางสถิติ



รูปที่ 2 แผนภาพการตรวจสอบความถูกต้องของ
ข้อมูลความขรุขระผิว

จากรูปที่ 2 (ก) เป็นการแสดงกราฟ Normal Probability พบว่าไม่มีค่าที่ผิดปกติเกิดขึ้นในกราฟ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า ข้อมูลการตอบสนองมีการแจกแจงเป็นแบบปกติ [7] นอกจากนี้ รูปที่ 2 (ข) พบว่า ค่าเศษเหลือมีการกระจายตัวเป็นแบบอิสระและมีการกระจายล้อมรอบเส้นตรงกึ่งกลาง (Center Line) สรุปได้ว่า ค่าเศษเหลือไม่มีแนวโน้มหรือรูปแบบที่แน่นอน และรูปที่ 2 (ค) จะเห็นได้ว่า ข้อมูลยังมีการกระจายตัวที่ไม่มีความสัมพันธ์กับลำดับการทดลองที่เป็นแนวโน้มหรือมีความสัมพันธ์ที่สามารถคาดการณ์ได้ตลอดจนไม่มีค่าที่ผิดปกติเกิดขึ้นในกราฟ

3.2 การวิเคราะห์รูปแบบจำลองการถดถอยทางสถิติที่เหมาะสมของค่าความขรุขระผิว

จากผลการทดลองสามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อเลือกรูปแบบจำลองการถดถอยทางสถิติที่เหมาะสมของค่าความขรุขระผิว โดยพิจารณาจากค่า Sequential Model Sum of Squares มีนัยสำคัญ (Adjusted Coefficient of Determination: Adj- R^2) และ Predicted (Coefficient of Determination: Pred- R^2) มีค่าสูง และค่า Lack-of-Fit ไม่มีนัยสำคัญ แสดงดังตารางที่ 3 พบว่า ค่า R_a มีความเหมาะสมกับรูปแบบการจำลองเชิงเส้นโค้งหรือรูปแบบกำลังสอง (Quadratic Model) ซึ่งมีค่า Adj- R^2 เท่ากับ 97.34 เปอร์เซ็นต์ และ Pred- R^2 และ 93.64 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าใกล้เคียงกันและมากกว่ารูปแบบอื่น ๆ และมีค่า P-Value ของ Lack-of-Fit เท่ากับ 0.4212 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ($P > 0.05$) ซึ่งหมายความว่ารูปแบบจำลองสมการถดถอยมีความสมรูปกับข้อมูล ดังนั้น จึงสรุปได้ว่ารูปแบบจำลองเชิงเส้นโค้งหรือรูปแบบกำลังสองมีความเหมาะสมที่จะใช้ในการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย [3, 4]

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์หารูปแบบสมการที่เหมาะสมในการกลิ้งคว้านรูในเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด S20C

Source	Sequential p-value	Lack of Fit p-value	Adjusted R-Squared	Predicted R-Squared	
Linear	< 0.0001	0.0274	0.8507	0.8108	
2FI	0.8870	0.0183	0.8229	0.6734	
Quadratic	< 0.0001	0.4212	0.9734	0.9364	Suggested
Cubic	0.3324	0.4633	0.9789	0.7877	Aliased

3.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความขรุขระผิว

นำข้อมูลค่าความขรุขระผิวมาวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัย เพื่อศึกษาว่ามีปัจจัยใดบ้างที่มีผลกระทบต่อความขรุขระผิว ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ระดับนัยสำคัญ 0.05 ด้วยโปรแกรม Design-Expert 8.0.6 พบว่าจากการทดลอง R Square มีค่าเท่ากับ 98.67% และค่า Adjust R Square มีค่าเท่ากับ 97.34% มีค่ามากกว่า 75.00% ซึ่งมีความหมายว่าถ้าหากความแปรปรวนในข้อมูลความขรุขระผิว สามารถอธิบายได้ด้วยปัจจัยจากการทดลอง 93.64% แสดงว่าข้อมูลจากการทดลองสอดคล้องกับแบบจำลองการถดถอย [6] นอกจากนี้ค่า Lack of Fit มีค่า P -Value เท่ากับ 0.4212 แสดงให้เห็นว่าสมการถดถอยสำหรับค่าความขรุขระผิวมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ และสามารถวิเคราะห์ต่อไปได้ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยผลการวิเคราะห์ดังกล่าว ดังตารางที่ 4

โดยมีสมมติฐานการทดลอง คือ

H_0 : ปัจจัยไม่มีผลต่อความขรุขระผิวเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด S20C

H_1 : ปัจจัยมีผลต่อความขรุขระผิวเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด S20C

จากตารางที่ 4 ทำการวิเคราะห์ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 มีเกณฑ์การตัดสินใจคือถ้า P -Value มีค่าน้อยกว่า 0.05 จะปฏิเสธ H_0 ซึ่งหมายถึงปัจจัยนั้น ๆ มีผลต่อความขรุขระผิว สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1) การวิเคราะห์ปัจจัยหลัก ที่มีผลต่อความขรุขระผิว พบว่าปัจจัยความเร็วรอบ อัตราป้อน ความลึกในการตัด และความยาวด้ามมีด ซึ่งมีค่า P -Value น้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธสมมติฐาน H_0 สรุปได้ว่าปัจจัยทั้งหมดดังกล่าวมีผลต่อความขรุขระผิวอย่างมีนัยสำคัญ [7] แสดงดังรูปที่ 3

2) การวิเคราะห์ปัจจัยกำลังสอง ที่มีผลต่อความขรุขระผิว พบว่าปัจจัยกำลังสองของปัจจัยความเร็วรอบ ซึ่งมีค่า P -Value น้อยกว่า 0.05 จึงทำการปฏิเสธสมมติฐาน H_0 สรุปได้ว่าปัจจัยกำลังสองของความเร็วรอบมีผลต่อความขรุขระผิว อย่างมีนัยสำคัญ

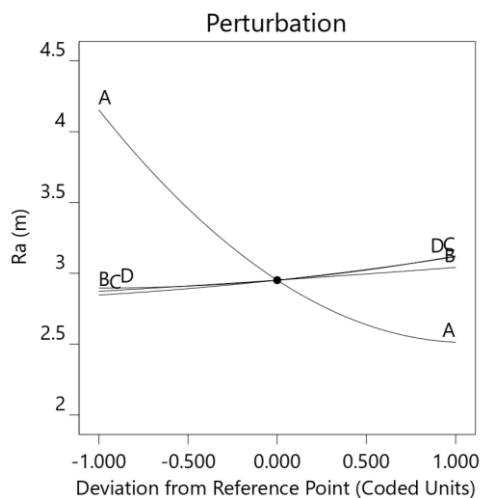
3) การวิเคราะห์ปัจจัยอันตรกิริยา ที่มีผลต่อความขรุขระผิว พบว่าปัจจัยอันตรกิริยาระหว่างความเร็วรอบกับความยาวด้ามมีด ซึ่งมีค่า P -Value น้อยกว่า 0.05 จึงทำการปฏิเสธสมมติฐาน H_0 สรุปได้ว่าปัจจัยอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยความเร็วรอบกับความยาวด้ามมีด มีผลต่อความขรุขระผิวอย่างมีนัยสำคัญ



ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความขรุขระผิวของเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด S20C

Source	Sum of Squares	DF	Mean Squares	F-Value	P-Value	
Model	9.66	14	0.69	74.30	< 0.0001	Significant
A-Speed	8.08	1	8.08	870.00	< 0.0001*	
B-Feed	0.086	1	0.086	9.23	0.0089*	
C-Depth of cut	0.22	1	0.22	23.49	0.0003*	
D-Over Hang	0.15	1	0.15	16.62	0.0011*	
AB	1.122E-003	1	1.122E-003	0.12	0.7333	
AC	0.021	1	0.021	2.25	0.1560	
AD	0.077	1	0.077	8.29	0.0121*	
BC	2.704E-003	1	2.704E-003	0.29	0.5980	
BD	0.036	1	0.036	3.91	0.0681	
CD	3.423E-004	1	3.423E-004	0.037	0.8505	
A ²	0.95	1	0.95	102.00	< 0.0001*	
B ²	1.816E-004	1	1.816E-004	0.020	0.8908	
C ²	5.757E-003	1	5.757E-003	0.62	0.4442	
D ²	0.022	1	0.022	2.36	0.1465	
Residual	0.13	14	9.288E-003			
Lack of Fit	0.100	10	9.995E-003	1.33	0.4212	Not Significant
Pure Error	0.030	4	7.519E-003			
Cor Total	9.79	28				

หมายเหตุ * หมายถึงค่าที่มีผลต่อความขรุขระผิวอย่างมีนัยสำคัญ (P<0.05)



รูปที่ 3 ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าความขรุขระผิวของเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด S20C

3.4 การวิเคราะห์รูปแบบจำลองการถดถอยทางสถิติที่เหมาะสมของความขรุขระผิว

การวิเคราะห์รูปแบบจำลองการถดถอยทางสถิติที่เหมาะสมของความขรุขระผิว กับปัจจัยในการทดลอง ได้แก่ ความเร็วรอบ อัตราป้อน ความลึกในการตัด และความยาวด้ามมีด โดยใช้ข้อมูลจากการทดลอง เพื่อศึกษาปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อค่าความขรุขระผิว โดยกำหนดความเร็วรอบ 3 ระดับ อัตราป้อน 3 ระดับ ความลึกในการตัด 3 ระดับ และความยาวด้ามมีด 3 ระดับ แสดงดังตารางที่ 1 มาวิเคราะห์รูปแบบการถดถอยทางสถิติ โดยใช้โปรแกรม Design-Expert 8.0.6 แสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์รูปแบบจำลองการถดถอย

Sources	Boring Turning
Std. Dev.	0.099
Mean	3.15
C.V. %	3.15
PRESS	0.40
R-Squared	0.9779
Adj R-Squared	0.9719
Pred R-Squared	0.9591

การวิเคราะห์รูปแบบจำลองการถดถอยทางสถิติของการกลึงคว้านรูใน พบว่า Adjust-R Square จากการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับค่า R Square ซึ่งเป็นการยืนยันผลการทดสอบให้เห็นว่ารูปแบบจำลองการถดถอยที่ได้เป็นรูปแบบที่เหมาะสม พบว่า R Square ของการกลึงคว้านรูนี้มีค่าเท่ากับ 97.79% ซึ่งมีค่าสูงสามารถสรุปได้ว่าค่าความขรุขระผิวมีผลกระทบจากปัจจัยที่กำหนดคือ ความเร็วรอบ อัตราป้อน ความลึกในการตัด และความยาวด้ามมีด ซึ่งมีค่า 97.79% ส่วนอีก 2.21% เป็นผลจากปัจจัย อื่นๆ ที่ไม่สามารถควบคุมได้ เช่นเดียวกันค่า Adjust-R Square มีค่าเท่ากับ 97.19% ซึ่งมีค่ามากกว่าค่า Predicted R Square เล็กน้อย ซึ่งมีค่าเท่ากับ 95.91% แสดงให้เห็นว่าจำนวนข้อมูลในการทดลองมีความเพียงพอต่อการทดลอง นอกจากนี้พบว่าค่า C.V. ของความขรุขระผิว มีค่าเท่ากับ 3.15% ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างต่ำและน้อยกว่า 10.00% แสดงให้เห็นถึงรูปแบบจำลองสมการถดถอยมีความสามารถในการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิว [8]

จากตารางที่ 5 ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระในการวิเคราะห์การถดถอยจะได้สมการจำลองแบบเต็ม

รูปแบบ (Full Model) ซึ่งสมการจะอยู่ในรูปแบบของ Regression Equation in Coded Units ซึ่งจะต้องเข้ารหัสของระดับแต่ละปัจจัย โดยค่าสูงสุดจะแทนด้วย 1 ค่าต่ำสุดจะแทนด้วย -1 และค่าตรงกลางจะแทนด้วย 0 แสดงดังสมการที่ (1)

$$R_a = 13.93550 - 9.75413E - 003(A) + 5.06389(B) - 1.62868(C) - 0.23269(D) - 1.86111E - 004(AB) + 8.02778E - 004(AC) + 6.16667E-005(AD) + 0.65000(BC) - 0.095250(BD) + 9.25000E - 003(CD) + 1.88724E - 006(A^2) + 0.13229(B^2) + 0.74479(C^2) + 2.32667E - 003(D^2) \quad (1)$$

นอกจากนี้ จากสมการถดถอยที่ได้จากการวิเคราะห์ ยังมี 2-Way Interaction ที่ประกอบไปด้วย ปัจจัยอันตรกิริยาระหว่าง ความเร็วรอบกับอัตราป้อน ความเร็วรอบกับความลึกในการตัด อัตราป้อนกับความลึกในการตัด อัตราป้อนกับความยาวด้ามมีด และความลึกในการตัดกับความยาวด้ามมีด ไม่ส่งผลต่อความขรุขระผิวของเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด S20C จึงทำการลดรูปสมการโดยการตัดปัจจัยอันตรกิริยาไม่ส่งผลต่อความขรุขระผิวอย่างมีนัยสำคัญออก เพื่อนำผลการพยากรณ์ที่ได้จากสมการลดรูป เปรียบเทียบกับผลการพยากรณ์ที่ได้จากสมการเต็มรูปที่สภาวะการทดลอง คือ ความเร็วรอบ 1,700 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.04 มิลลิเมตรต่อนาที ความลึกในการตัด 0.3 มิลลิเมตร และความยาวด้ามมีด 45 มิลลิเมตร ดังตารางที่ 4 โดยการพิจารณาสมการถดถอยที่มีความสมมูลกับข้อมูลนั้น จะพิจารณาค่าความผิดพลาดที่ต่ำ



ก่อน แต่หากว่าค่านั้นไม่มีความแตกต่างกัน จะพิจารณาจากค่า Adjust-R Square ที่มีค่าสูงกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระในการวิเคราะห์การถดถอยจะได้สมการจำลองแบบลดรูป (Reduced Model) ซึ่งสมการจะอยู่ในรูปแบบของ Regression Equation in Coded Units ซึ่งจะต้องเข้ารหัสของระดับแต่ละปัจจัย โดยค่าสูงสุดจะแทนด้วย 1 ค่าต่ำสุดจะแทนด้วย -1 และค่าตรงกลางจะแทนด้วย 0 แสดงดังสมการที่ (2)

$$R_a = 10.38959 - 9.46695E - 003(A) + 0.42250(B) + 0.67417(C) - 0.054400(D) + 6.16667E - 005 (AD) + 1.82404E - 006(A^2) \quad (2)$$

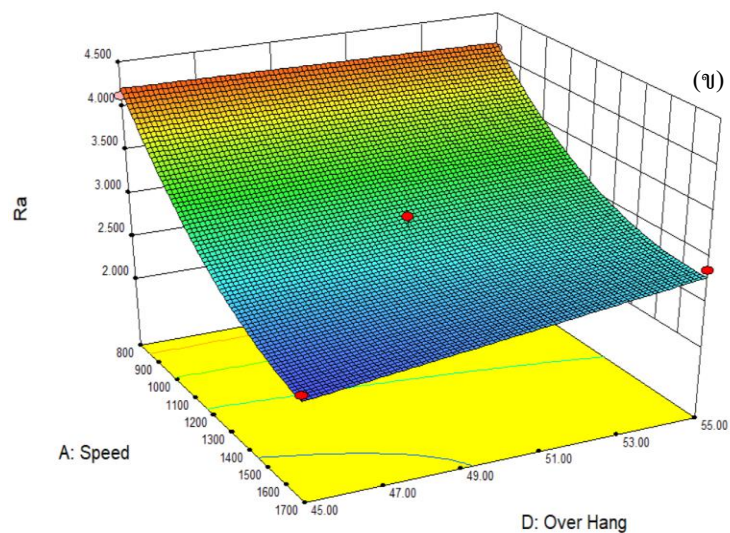
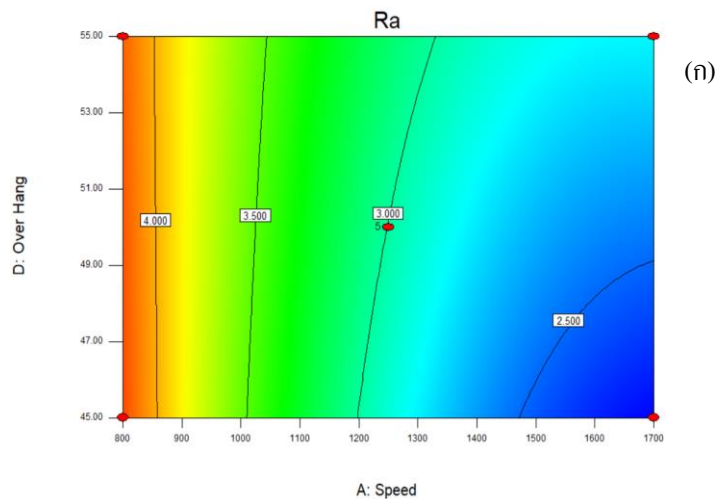
นอกจากนี้ การเปรียบเทียบผลการพยากรณ์ของสมการเต็มรูป (Full Model) เปรียบเทียบกับสมการลดรูป (Reduced Model) [9-10] แสดงดังตารางที่ 6 จากการเปรียบเทียบผลการทดลอง พบว่า สมการลดรูปมีค่า Predicted R-Square สูงกว่า ซึ่งบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพในการทำนายข้อมูลใหม่ได้ดีกว่า ดังนั้นเพื่อลดความซับซ้อนของโมเดลและเพิ่มประสิทธิภาพในการทำนาย จึงเลือกใช้สมการถดถอยลดรูปในการนำเสนอการพยากรณ์ความขรุขระผิวของเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด S20C สมการที่ (2)

3.5 การวิเคราะห์ปัจจัยหลักที่มีผลต่อการทดลองและพื้นผิวตอบสนองของค่าความขรุขระผิว

จากสมการถดถอยของค่าความขรุขระผิวในกระบวนการกลึงคว้านในเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด S20C สามารถนำมาสร้างแผนภาพพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Plot) เพื่อวิเคราะห์ว่าปัจจัยอันตรกิริยาที่ส่งผลต่อความขรุขระผิวของเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด S20C ผลการทดลองทำการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Design-Expert 8.0.6 และหาค่าผลการตอบสนองด้วย (RSM) [11-12] จากผลการทดลองพบว่าปัจจัยอันตรกิริยาระหว่างความเร็วรอบกับความยาวด้ามมีดที่มีผลต่อค่าความขรุขระผิว R_a ดังรูปที่ 4 (ก) และ (ข) จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ความเร็วรอบเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวมีค่าลดลง เนื่องจากเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นจะทำให้ระยะตัดต่อรอบสั้นลง ส่งผลให้คมตัดสัมผัสกับชิ้นงานด้วยระยะการตัดที่ละเอียดขึ้นในแต่ละรอบ ซึ่งช่วยให้พื้นผิวที่เกิดขึ้นมีความขรุขระผิวสม่ำเสมอ และลดรอยคลื่นที่เกิดจากการตัดในรอบก่อนหน้าได้ดีขึ้น นอกจากนี้ เมื่อความยาวด้ามมีดลดลง จะทำให้ความขรุขระผิวลดลงด้วย ผลการทดลองมีความสอดคล้องกับ สุรสิทธิ์ และคณะ [13] ซึ่งสรุปได้ว่า ความเร็วรอบ อัตราป้อน และความลึกในการตัดในการกลึงคว้านมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความขรุขระผิว นอกจากนี้ความยาวด้ามมีดที่เหมาะสมในการคว้าน คือ 45 มิลลิเมตร

ตารางที่ 6 ผลพยากรณ์ของสมการเต็มรูปเปรียบเทียบกับสมการลดรูป

Model	Predicted (μm)	Actual (μm)	Error %	R-Sq %	R-Sq (pred) %	Predicted (μm)
R_a	Full Model	2.280	2.433	0.306	99.72	93.44
	Reduced Model	2.267	2.433	0.875	97.79	95.91



รูปที่ 4 แผนภาพโครงร่างและแผนภาพพื้นผิวผลตอบสนองระหว่างความเร็วรอบกับความยาวด้ามมีด

(ก) กราฟโครงข่ายแสดงผลกระทบของสภาวะการทดลอง และ

(ข) กราฟพื้นผิวการตอบสนองของการทดลอง

3.6 การหาค่าสภาวะที่เหมาะสมของค่าความขรุขระผิว

การวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสมในการกลึงคว้านรูใน โดยใช้โปรแกรม Design-Expert 8.0.6 ช่วยในการวิเคราะห์เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาผลลัพธ์ โดยจะเลือกค่าระดับของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความขรุขระผิวมีค่าน้อยที่สุด และพิจารณาค่าความพึงพอใจโดยรวมของสภาวะที่เหมาะสม (Composite Desirability) โดยมีค่าความพึงพอใจโดยรวมของสภาวะที่เหมาะสมนั้น จะมีค่าเท่า 1 ซึ่งค่าความพึงพอใจโดยรวมของสภาวะที่เหมาะสมให้ค่าเป็น 0 แสดงว่าปัจจัยตัวใดตัวหนึ่ง หรือมากกว่าอยู่นอกขีดจำกัดที่ยอมรับได้ และถ้าค่าความพึงพอใจโดยรวมของสภาวะที่เหมาะสมให้ค่าเป็น 1 แสดงว่าสภาวะที่เหมาะสมนั้นได้รับความพึงพอใจอย่างสมบูรณ์

ในการวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความขรุขระผิว ดังรูปที่ 5 และตารางที่ 7 พบว่า ค่าความพึงพอใจโดยรวมของสภาวะที่เหมาะสม มีค่าเท่ากับ 1.00 ซึ่งอยู่ในระดับความพึงพอใจสูงสุด และที่ระดับความพึงพอใจดังกล่าว ทำให้ได้สภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการกลึงคว้านรูใน เหล็กกล้าคาร์บอน เกรด S20C ที่ส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวต่ำที่สุด คือ ความเร็วรอบ 1,685 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.04 มิลลิเมตรต่อนาที ความลึกในการตัด 0.39 มิลลิเมตร และความยาวด้ามมีด 45 มิลลิเมตร โดยมีค่าความขรุขระผิวเท่ากับ 2.267 ไมโครเมตร ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ จุฬาลักษณ์ และคณะ [8] กล่าวคือ สภาวะที่เหมาะสมในการกลึงคว้านรูในคือ เมื่อเพิ่ม

ความเร็วรอบ และลดอัตราป้อนกับความลึกในการตัด จะส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวลดลง นอกจากนี้หากพิจารณาประเด็นของอัตราป้อนและความลึกในการตัดที่ลดลงซึ่งมีผลต่อค่าความขรุขระผิวที่ลดลงนั้น พบว่าสอดคล้องกับงานวิจัย อภิขล และสุรสิทธิ์ [14] พบว่าปัจจัยที่เพิ่มจากงานวิจัยนี้คือ ความยาวด้ามมีดที่ลดลงมีแนวโน้มให้ค่าความขรุขระผิวจะลดลงนั่นเอง

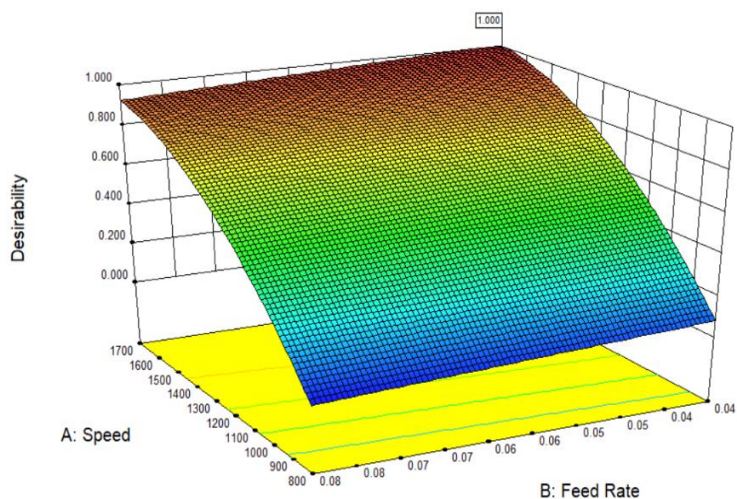
3.7 การยืนยันผลการทดลอง

ในส่วนของการยืนยันผลจะเป็นการนำสมการถดถอยมาพยากรณ์ความขรุขระผิว โดยสุ่มสภาวะการกลึงคว้านในตามขอบเขตที่กำหนด แล้วนำผลที่ได้จากการค่าความขรุขระผิวที่คำนวณจากสมการ (et) หรือ (Actual R_a) เปรียบเทียบค่าความขรุขระผิวจากการทดลอง (dt) หรือ (R_a Cal.) ที่ได้จากการทดลอง โดยกำหนดสภาวะในการทดลอง 10 สภาวะ วัดซ้ำ 3 ครั้ง และกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ โดยค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างความขรุขระผิวของค่าจริงกับค่าพยากรณ์ แสดงดังตารางที่ 8

ทั้งนี้การหาค่าเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (MAPE) แสดงดังสมการที่ (3)

$$\begin{aligned} \text{MAPE} &= \left(\frac{\sum_{i=1}^n \frac{|e_i|}{d_i}}{n} \right) \\ &= \left(\frac{31.576}{10} \right) \\ &= 3.16 \% \end{aligned} \quad (3)$$

โดยที่ dt คือค่าความขรุขระผิวจากการทดลอง (Actual R_a), et คือค่าความขรุขระผิวที่คำนวณจากสมการ (R_a Cal.) และ n คือจำนวนสภาวะการทดลอง



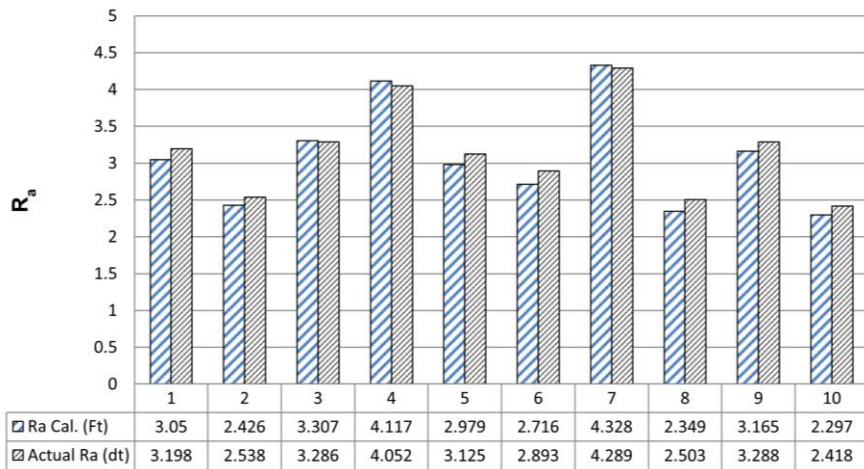
รูปที่ 5 กราฟพื้นผิวตอบสนองแสดงสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยในการกลึงคว้านรูในเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด S20C

ตารางที่ 7 ค่าสภาวะที่เหมาะสมของค่าความขรุขระผิวเฉลี่ย

Speed (rpm)	Feed Rate (mm/min)	Depth of Cut (mm)	Overhang (mm)	Prediction (R_a)	Desirability (%)
1,685	0.04	0.39	45	2.267	100

ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบค่าความขรุขระผิวที่คำนวณจากสมการถดถอยและค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยที่วัดได้จริง

No	Speed (rpm)	Feed Rate (mm/rev)	Depth of Cut (mm)	Overhang (mm)	R_a Cal (F_t)	Actual R_a (d_t)	Error $e_t = d_t - F_t$	$\frac{ e_t }{d_t} \times 100$
1	1,200	0.06	0.5	45	3.05	3.198	0.148	4.628
2	1,700	0.04	0.3	50	2.426	2.538	0.112	4.413
3	1,200	0.06	0.5	55	3.307	3.286	-0.021	-0.639
4	800	0.04	0.3	50	4.117	4.052	-0.065	-1.604
5	1,200	0.08	0.1	50	2.979	3.125	0.146	4.672
6	1,200	0.04	0.3	45	2.716	2.893	0.177	6.118
7	800	0.06	0.5	50	4.328	4.289	-0.039	-0.909
8	1,700	0.06	0.3	45	2.349	2.503	0.154	6.153
9	1,200	0.08	0.3	55	3.165	3.288	0.123	3.741
10	1,700	0.06	0.1	50	2.297	2.418	0.121	5.004
Total								31.576



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบค่าความขรุขระผิวที่คำนวณจากสมการถดถอยและค่าความขรุขระผิวเฉลี่ยที่วัดได้จริง

จากการทดลองเพื่อยืนยันผลเปรียบเทียบค่าที่ได้จากสมการถดถอยกับค่าที่วัดจริงจากการทดลองโดยกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์สำหรับวัดค่าความขรุขระผิวไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ ผลจากการทดลองหาค่า MAPE ของสมการความขรุขระผิวเท่ากับ 3.16 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งน้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้ และค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) ร่วมกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง เพื่อสามารถกำหนดแนวทางในการเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการคว้านรูในเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S20C ภายใต้ระดับของปัจจัยต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง ผลการศึกษานี้ยังนำไปสู่การสร้างสมการการพยากรณ์ค่าความขรุขระผิว ซึ่งสามารถสรุปผลที่สำคัญ ดังนี้

1) ปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าความขรุขระผิวมากที่สุดคือ ความเร็วรอบ รองลงมาคือ ความลึกในการตัด ความยาวด้ามมีด และอัตราป้อน ตามลำดับ โดยมีแนวโน้มว่าเมื่อใช้ความเร็วรอบสูงส่งผลให้ค่าความขรุขระผิวลดลง เนื่องจากเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นจะทำให้ระยะตัดต่อรอบสั้นลง ส่งผลให้คมตัดสัมผัสกับชิ้นงานด้วยระยะการตัดที่ละเอียดช่วยให้พื้นผิวที่เกิดขึ้นมีความขรุขระผิวสม่ำเสมอ และลดรอยคลื่นที่เกิดจากการตัดในรอบก่อนหน้าได้ดีขึ้น ในทางกลับกันเมื่อใช้ความลึกในการตัดต่ำ อัตราป้อนต่ำ และความยาวด้ามมีดต่ำ จะส่งผลทำให้ค่าความขรุขระผิวลดลง เนื่องจากอัตราป้อนที่ต่ำช่วยให้คมตัดสร้างรอยทางกลที่มีระยะห่างถี่และความลึกที่ตื้น ซึ่งส่งผลให้พื้นผิวที่ได้มีความขรุขระผิวต่ำและต่อเนื่องมากขึ้น นอกจากนี้ ความลึกในการตัดต่ำและความยาวด้ามมีดที่สั้นยังช่วยลดแรงตัดและแรงสั่นสะเทือนในกระบวนการตัดเฉือน ทำให้ควบคุมคุณภาพผิวได้ดีขึ้น และลดโอกาสเกิดข้อบกพร่องบนผิวชิ้นงาน



2) จากการทดลองทำให้ได้ผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระคือ ความเร็วรอบ อัตราป้อน ความลึกในการตัด และความยาวด้ามมีด ตัวแปรตามคือ ค่าความขรุขระผิว ซึ่งการนำสมการไปใช้ตรวจสอบอยู่ในขอบเขตของการทดลอง

3) ผลการวิเคราะห์พบว่า สภาวะที่เหมาะสมของการกลึงคว้านรูในที่สุดส่งผลให้มีความขรุขระผิวต่ำที่สุดคือ ความเร็วรอบ 1,685 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.04 มิลลิเมตรต่อนาที ความลึกในการตัด 0.39 มิลลิเมตร และความยาวด้ามมีด 45 มิลลิเมตร โดยมีค่าความขรุขระผิวเท่ากับ 2.267 ไมโครเมตร

4) จากการทดลองเพื่อยืนยันผลเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากสมการทดลองกับค่าที่วัดจริงจากการทดลอง โดยกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์สำหรับวัดค่าความขรุขระผิวไม่เกิน 5% ผลจากการทดลองหาค่า MAPE เท่ากับ 3.16% ซึ่งน้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้และค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

ข้อเสนอแนะของงานวิจัยนี้สามารถนำไปปรับใช้ในการทดลองกับชิ้นงานวัสดุ มีดตัด หรือกระบวนการผลิตอื่น ๆ ได้ และควรศึกษาร่วมกับภาคอุตสาหกรรมการผลิต เพื่อให้ได้แนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้ในงานจริง และควรพิจารณาปัจจัยอื่น ๆ เพิ่มเติมเพื่อให้สมการมีความสามารถในการทำนายมากขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ศรีวิชัย สำหรับการสนับสนุนอุปกรณ์ เครื่องมือ เครื่องจักร และสถานที่สำหรับการทำวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Ruksorn and S. Deepradit, The prediction of surface roughness in the S45C turning process by using response surface design, Thai Journal of Operations Research, 2019, 7, 13-19
- [2] S. Singh and R. Kumar, Optimization of process parameters in boring operation: A review, Pramana Research Journal, 2018, 8, 498-502.
- [3] P. Kumar, J.S. Oberoi, C. Singh and H. Dhiman, Analysis and optimization of parameters affecting surface roughness in boring process, International Journal of Advanced Mechanical Engineering, 2014, 4, 647-655.
- [4] I.A. Choudhury and M.A. El-Baradie, Surface roughness prediction in the turning of high-strength steel by factorial design of experiments, Journal of Materials Processing Technology, 2013, 67, 55-61.
- [5] A.M. Badadhe, S.Y. Bhavne and L.G. Navale, Optimization of cutting parameters in boring operation, Journal of Mechanical and Civil Engineering, 2013, 10-15.
- [6] P.V. Mayuresh and S.A. Sonawane, Analysis and optimization of boring process parameters by using Taguchi method on SAE 1541, International Journal of Engineering Science Invention, 2014, 3, 59-63.

- [7] A. Sankar and D. Soumyalata, Comparative assessment of carbide insert and cermet insert on surface roughness in boring of ASTM A48 grey cast iron, *International Journal of Advanced Mechanical Engineering*, 2015, 6, 440-445.
- [8] J. Rodjananugoon, S. Rawangwong and C. Homkhiew, Surface Roughness Prediction in boring turning of ductile cast iron using response surface methodology and tool wear, *RMUTL Engineering Journal*, 2021, 6, 1-10.
- [9] S.J. Raykar and N.M. Qureshi, Analysis and optimization of precision boring process for HE 30 aluminum automotive component, *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, 2015, 2, 863-868.
- [10] J. Suteja, Y. Haryono, A. Harianto and E. Rinawiyanti, Optimization of boring process parameters in manufacturing of polyacetal bushing using high speed steel, *E3S Web of Conferences*, IC-AMME 2018, 2019, 1-7.
- [11] D. Vivek and K. Ramesh, Optimization of the cutting responses in boring operation using response surface methodology, *International Journal of Engineering Research and Technology*, 2014, 3, 1739-1744.
- [12] S. Chockalingam, U. Natarajan and S.K. Sundaram, Modeling and optimization of tool wear in a passively damped boring process using response surface methodology, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2016, 69, 1443-1448.
- [13] S. Rawangwong, C. Homkhiew, J. Rodjananugoon and A.T. Kamnerdwam, Application of response surface methodology to determine an optimized condition value and the prediction of surface roughness in turning boring in aluminum 6061 with carbide cutting Tools, *IE Network Conference 2019, Proceeding*, 2019, 184-190.
- [14] A.T. Kamnerdwam and S. Rawangwong, Application of Box-behnken experimental design with response surface methodology for prediction of surface roughness in boring turning of carbon steel grade S45C, *Journal of Advanced Development in Engineering and Science*, 2022, 12, 14-17.
- [15] G.E.P. Box and D.W. Behnken, Some new three level designs for the study of quantitative variables, *Technometrics*, 1960, 2(4), 455-475.



อิทธิพลของครีบบางการไหลและอุณหภูมิอากาศที่มีต่อกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือก

พรสวรรค์ ทองใบ¹ ทวีศิลป์ เล็กประดิษฐ์¹ กรณ์ทกมล ภูครองหิน² ปรีชา สมหวัง²
ณัฐพงษ์ ประภาการ² และ ณัฐพงษ์ วงศ์บัวพา^{2*}

¹ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

² สาขาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์, คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

* ผู้ประสานงานเผยแพร่, E-mail: nuttapong.wn@rmuti.ac.th

วันที่รับบทความ: 24 มิถุนายน 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 29 กันยายน 2568; วันที่ตอบรับบทความ: 30 กันยายน 2568

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 9 ธันวาคม 2568

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของการติดตั้งอุปกรณ์ขวางการไหลในบริเวณท่ออบแห้งข้าวเปลือกและอุณหภูมิอากาศที่ส่งผลต่อกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือก ศึกษาการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกพันธุ์หอมมะลิ 105 น้ำหนัก 3 กิโลกรัม ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 21-25 มาตรฐานเปียก อบแห้งด้วยอากาศอุณหภูมิ 60°C และ 80°C ลดความชื้นลงให้เหลือร้อยละ 14 ทดสอบโดยสร้างเครื่องต้นแบบขนาดเล็กที่มีความสูงโดยรวม 2.5 เมตร ออกแบบให้บริเวณห้องแลกเปลี่ยนความร้อนและความชื้นระหว่างอากาศกับเมล็ดข้าวเปลือกเป็นท่อตรงทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.5 นิ้ว ยาว 1.5 เมตร ทดสอบเปรียบเทียบการอบแห้งด้วยท่อ 2 รูปแบบ คือ ท่อตรงที่ไม่ติดตั้งครีบลูกยางภายใน และท่อตรงที่ติดตั้งครีบลูกยางภายในท่อ ทำการทดสอบ 3 ซ้ำ โดยพิจารณาถึงการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในเมล็ดข้าวเปลือก การลดลงของความชื้นข้าวเปลือกกับเวลา อัตราการอบแห้ง และอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ผลการทดสอบพบว่าการอบแห้งด้วยท่อตรงที่ติดตั้งครีบลูกยางภายในสามารถเพิ่มอุณหภูมิให้กับเมล็ดข้าวเปลือกได้ดีกว่าท่อตรงที่ไม่ติดตั้งครีบลูกยาง พิจารณาที่อุณหภูมิทดสอบ 60°C และเวลาเดียวกันเมื่อยุติการทดสอบ ซึ่งสามารถเพิ่มอุณหภูมิได้มากกว่า 4.47 องศาเซลเซียส อิทธิพลนี้ยังมีผลทำให้อัตราการอบแห้งมีค่าที่มากขึ้นถึง 56.67 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าลดลง 21.42 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิทดสอบ 80°C ให้ผลในทางที่สอดคล้องกัน ซึ่งเป็นทิศทางที่ดีที่แสดงให้เห็นว่าการติดตั้งอุปกรณ์ขวางการไหลภายในท่อสามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและส่งผลดีต่อระบบอบแห้งได้

คำสำคัญ: ครีบลูกยางขวางการไหล; เครื่องอบแห้งข้าวเปลือก; อัตราการอบแห้ง; อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

Influence of Flow-Obstructing Fins and Air Temperature on the Paddy Drying Process

Pornsawan Tongbai¹, Taveesin Lekpradit¹, Krankamon Phukhronghin², Preecha Somwang², Natthapong Prapakarn² and Nuttapong Wongbubpa^{2*}

¹ Department of Mechanical Engineering, Rajamangala University of Technology Isan, Thailand

² Department of Mechatronics Engineering, Rajamangala University of Technology Isan, Thailand

* Corresponding author, E-mail: nuttapong.wn@rmuti.ac.th

Received: 24 June 2025; Revised 29 September 2025; Accepted: 30 September 2025

Online Published: 9 December 2025

Abstract: This research aims to investigate the influence of installing flow obstructing devices within the paddy drying duct and the drying air temperature on the paddy drying process. Experiments were conducted using 3 kilograms of Thai jasmine paddy rice 105 with initial moisture contents ranging from 21-25% wet basis. The drying air temperatures were set at 60°C and 80°C, with the target final moisture content reduced to 14% wet basis. A small-scale prototype dryer, 2.5 meters in overall height, was developed for this study. The heat and mass exchange zone was designed as a straight cylindrical vertical tube, 4.5 inches in diameter and 1.5 meters in length. Two configurations of the drying tube were examined: (1) a straight tube without an internal helical fin, and (2) a straight tube fitted with an internal helical fin. Each configuration was tested in triplicate, focusing on the increase in grain temperature, the reduction of moisture content over time, drying rate, and the specific energy consumption. The results showed that the use of the helical fin significantly enhanced heat transfer to the grains compared to the plain tube. At a drying air temperature of 60°C, the grain temperature increased by more than 4.47% under identical testing durations. This enhancement contributed to a 56.67% improvement in the drying rate, while the specific energy consumption decreased by 21.42%. A similar trend was observed at the higher air temperature of 80°C, confirming the beneficial effects of installing internal flow obstruction devices in enhancing heat transfer and improving overall drying performance.

Keywords: Flow-Obstructing Helical Fins; Paddy Dryer; Drying Rate; Specific Energy Consumption



1. บทนำ

ในกระบวนการลดความชื้นข้าวเปลือกหลังการเก็บเกี่ยว การอบแห้งถือเป็นขั้นตอนสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานของระบบอบแห้ง การอบแห้งข้าวเปลือกมักใช้อุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพต่ำ ระบบไหลของอากาศร้อนในหอบแห้งไม่สามารถถ่ายเทความร้อนไปยังเมล็ดข้าวได้อย่างทั่วถึง ทำให้การอบแห้งใช้เวลานานและสิ้นเปลืองพลังงานโดยไม่จำเป็น อีกทั้งยังส่งผลให้ความชื้นในเมล็ดข้าวลดลงไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นการปรับปรุงประสิทธิภาพของหอบแห้งให้สามารถถ่ายเทความร้อนและความชื้นได้ดียิ่งขึ้นจึงเป็นแนวทางที่มีความสำคัญ โดยเฉพาะการติดตั้งอุปกรณ์ขบวนการไหล เช่น ครีบบนในหอบแห้ง ซึ่งเป็นแนวคิดเชิงวิศวกรรมที่ใช้เพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสและรบกวนการไหลของอากาศ เพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนพลังงานที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น

งานวิจัยจำนวนมากได้ทำการคิดค้นเทคนิคทางวิศวกรรมที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนภายในห้องดังนี้ ปี 2012 ภาณุวัฒน์ หุ่นพงษ์ และคณะ [1] ศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในห้องสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยใช้ครีบบนเยื้อง ทำการทดสอบโดยใช้ครีบบนเยื้องติดตั้งในห้องสี่เหลี่ยมจัตุรัส จากการทดสอบพบว่าติดตั้งครีบบนเยื้องภายในห้องให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการทดสอบด้วยห้องที่ไม่ได้ติดตั้งครีบบนเยื้อง การทดสอบยังพบอีกว่าสัดส่วนของความสูงครีบบนต่อความสูงห้อง (e/H) และสัดส่วนของระยะพิชิตต่อความสูงห้อง (PR) ก็มีผลต่อสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเช่นกัน โดยการทดสอบที่ให้ผลของสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนที่สูงที่สุดคือ

$e/H=0.3$ และ $PR=1$ เนื่องจากเกิดความปั่นป่วนของการไหลที่มาก อีกทั้งมีผลต่อเลขนัสเซลท์ (Nusselt Number) ที่สูงมากกว่าการทดสอบอื่น ๆ ด้วยเช่นกัน

ปี 2013 ชีรพัฒน์ ชมพูคำ [2] ศึกษาเทคนิคการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนในหอบแห้งด้วยแผ่นใบบิด โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการทบทวนเทคนิคการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนด้วยการติดตั้งแผ่นใบบิด (Twisted Tape) ในหอบแห้งซึ่งจะอาศัยการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาแบบบังคับภายในหอบแห้ง จากการทบทวนงานวิจัยของผู้ที่เกี่ยวข้องพบว่า การติดตั้งแผ่นใบบิดในหอบแห้งช่วยเสริมสร้างการไหลแบบปั่นป่วนที่สูงขึ้นในห้องได้และส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูง แต่ต้องสูญเสียความดันที่เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน การสร้างสภาวะการไหลแบบหมุนวนในหอบแห้งจะช่วยลดความหนาของชั้นขอบเขตทางความร้อนและช่วยเพิ่มระยะเวลาการอยู่ในห้องที่นานยิ่งขึ้น นอกจากนั้นแล้วยังมีการทบทวนงานวิจัยไปถึงการติดตั้งใบบิดภายในห้องในลักษณะต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนอีกด้วย เช่น สมรรถนะทางความร้อนสำหรับการติดตั้งแผ่นใบบิดแบบสลับแกนและมีปีกจะให้ค่าที่สูงกว่าแบบสลับแกนที่ไม่มีปีกหรือแบบมีเฉพาะปีกอย่างเดียว หรือแม้กระทั่งการทบทวนงานวิจัยซึ่งพบว่าการใช้แผ่นใบบิดแบบติดครีบบนจะช่วยเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบความเสียดทานได้ อีกทั้งการทบทวนงานวิจัยยังพบด้วยอีกว่าการติดตั้งแผ่นใบบิดแบบเกลียวพร้อมทั้งสลับซ้ายขวาจะให้ค่าสมรรถนะทางความร้อนที่สูงกว่าท่อผิวเรียบ การทบทวนงานวิจัยดังกล่าวช่วยยืนยันให้เห็นได้ว่าการสร้างอุปสรรคขบวนการไหลภายในห้องช่วยเสริมสร้างสมรรถนะทางความร้อนของอากาศได้จริง



ในปี 2013 ภาณุวัฒน์ หุ่นพงษ์ และคณะ [3] ศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยทำการติดตั้งครีปรูปตัว W ที่ผิวบนและผิวล่างภายในท่อเพื่อสร้างสภาวะขวางการไหลของอากาศ เปรียบเทียบกับท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีผนังเรียบ ในการทดสอบจะศึกษาถึงการถ่ายเทความร้อนในรูปของเลขนัสเซิลท์ และการสูญเสียความดันในรูปตัวประกอบเสียดทาน (Friction Factor) จากการทดสอบพบว่าท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ติดตั้งครีปรูปตัว W ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบความเสียดทานมากกว่าท่อสี่เหลี่ยมผนังเรียบ นอกจากนั้นยังมีการศึกษาถึงมุมปะทะของการติดตั้งครีปรูปตัว W โดยการทดสอบพบว่าครีปรูปตัว W ที่มุม 45° ให้ค่าการสูญเสียความดันที่ค่อนข้างสูง ในขณะที่การทดสอบสำหรับการติดตั้งครีปรูปตัว W ที่มุม 20° ให้สมรรถนะการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าการทดสอบอื่น อย่างไรก็ตาม การศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยแสดงให้เห็นว่าการสร้างสภาวะขวางการไหลของอากาศในท่อด้วยการติดตั้งครีปรูปตัว W สามารถเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่สูงขึ้นได้ และเหมาะสำหรับนำไปประยุกต์ต่อยอดในงานทางวิศวกรรมอื่น ๆ ได้ด้วยเช่นกัน

ในปี 2020 อนุชา สายสร้อย และคณะ [4] ศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนภายในท่อกลมด้วยการสอดใส่แผ่นบิตผิวคลื่นและแกนสลับเข้าไปในท่อ ทำการทดสอบเพื่อศึกษาถึงการถ่ายเทความร้อน (Nu) ตัวประกอบความเสียดทาน (f) ตัวประกอบเพิ่มสมรรถนะทางความร้อน (TEF) โดยเปรียบเทียบกับท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการสอดใส่แผ่นบิต 6 ชนิดด้วยกันประกอบด้วย แผ่นบิตผิวเรียบ แผ่นบิตผิวคลื่น แผ่นบิตผิวเรียบสลับแกน แผ่นบิตผิวคลื่นสลับ

แกน แผ่นบิตผิวเรียบช่วงกลางสลับแกนด้วยแผ่นบิตผิวคลื่น และสุดท้ายแผ่นบิตผิวคลื่นช่วงกลางสลับแกนด้วยแผ่นบิตผิวเรียบ นอกจากนั้นมีการกำหนดอัตราส่วนระหว่างระยะห่างของครีปรูปตัว W ของแผ่นบิตเกลียว (y/W) คงที่ 3.0 เลขเรย์โนลด์ส (Reynolds Number) อยู่ในช่วง 4,000-8,000 ผลการทดสอบพบว่าแผ่นบิตผิวคลื่นสลับแกนมีอัตราการถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงกว่าท่อที่สอดใส่แผ่นบิตชนิดอื่น ๆ รวมถึงท่อเปล่า (ท่อที่ไม่มีแผ่นบิต) เนื่องจากการสอดใส่แผ่นบิตทำให้เกิดการขวางการไหลของอากาศอันจะทำให้ไหลได้ช้าลง อีกทั้งจะทำให้เกิดความเสียดทานระหว่างอากาศกับผิวของแผ่นบิตได้ ซึ่งจะส่งผลให้ค่าตัวประกอบความเสียดทานสูง และเมื่อพิจารณาถึงแผ่นบิตผิวคลื่นแล้วยังสร้างความเสียดทานระหว่างผิวกับอากาศได้มากขึ้นไปอีก เนื่องจากเกิดพื้นที่สัมผัสที่มากขึ้นของผิวคลื่น จากการทดสอบพบค่าตัวประกอบเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนสูงสุดที่ 1.12 ที่เลขเรย์โนลด์ส 4,000

ในปี 2021 เก่งเกล้า กุณรักษ์ และคณะ [5] ศึกษาผลของการใช้ท่อผิวครีปรูปตัว W ร่วมกับแผ่นบิตเกลียวต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน โดยงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาเพิ่มเติมจากการศึกษาก่อนหน้านี้ซึ่งได้ทดลองติดตั้งแผ่นบิตเกลียวภายในท่อผิวเรียบสำหรับการศึกษาค้นคว้าผู้วิจัยได้ติดตั้งแผ่นบิตเกลียวภายในท่อที่มีผิวครีปรูปตัว W เพื่อเสริมสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนให้สูงขึ้น ผลการทดลองพบว่าท่อผิวครีปรูปตัว W ที่ติดตั้งแผ่นบิตสามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนได้มากกว่าท่อผิวเรียบอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อตรวจสอบอัตราส่วนระหว่างระยะห่างของครีปรูปตัว W



ความกว้างของแผ่นบิตเกลียว (y/W) พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดคือ 3.0 ซึ่งให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุด นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของเลขเรย์โนลด์ส ยังส่งผลให้ค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นตาม โดยมีสาเหตุมาจากการไหลของอากาศภายในท่อที่ถูกขัดขวางและก่อให้เกิดการปั่นป่วนของการไหล ซึ่งช่วยส่งเสริมกลไกการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างของไหลกับผิวท่อและแผ่นบิตเกลียวได้อย่างมีประสิทธิภาพ และในปี 2022 นุรัตน์ ดอกไม้ และคณะ [6] ศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมโดยการใช้แผ่นบิตพื้นผิวคลื่นรูปตัววีสอดใส่เข้าเพื่อทำหน้าที่ขวางการไหลของอากาศ ในการทดสอบได้ทำการเปรียบเทียบมุมของแผ่นบิตที่ 30° และ 60° พร้อมทั้งอากาศที่ใช้ในการทดสอบจะควบคุมด้วยการปรับค่าความเร็วรอบของ Blower ด้วย Inverter ซึ่งจะต้องให้ค่าของเลขเรย์โนลด์ส (Reynolds Number) อยู่ในช่วง 4,000 ถึง 8,000 ผลการทดสอบพบว่าแผ่นบิตพื้นผิวคลื่นรูปตัววีที่ทำมุม 30° และค่าเลขเรย์โนลด์ส 4,000 ให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงสุดถึง 1.24

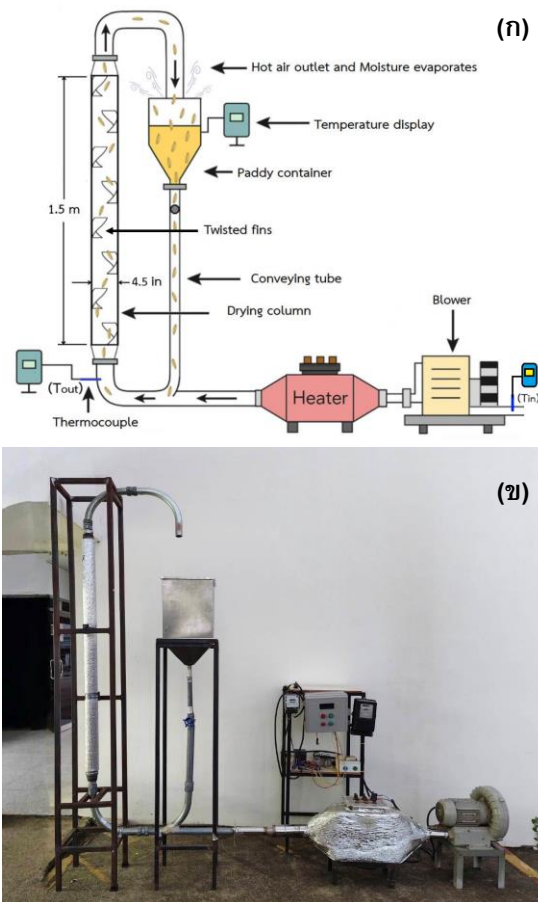
จากการค้นคว้างานวิจัยทางด้านการเพิ่มสมรรถนะและประสิทธิภาพทางความร้อนในท่อ จะเห็นได้ว่านักวิจัยจำนวนมากใช้เทคนิคการสร้างสภาวะการขวางการไหลของอากาศภายในท่อด้วยการเสริมหรือติดตั้งอุปกรณ์ภายในท่อ และถึงแม้ว่าจะมีการศึกษาเกี่ยวกับการติดตั้งครีบริบหรือไบบิตเกลียวแล้วก็ตาม แต่ยังไม่พบการนำมาประยุกต์ใช้กับการออกแบบห้องข้าวเปลือกในรูปแบบแนวตั้ง ดังนั้นเพื่อนำเอาหลักการดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบห้องข้าวเปลือกโดยเทคนิคการออกแบบห้องด้วยการใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการลำเลียงเมล็ดข้าวในท่อ

การพัฒนาและปรับปรุงโครงสร้างภายในห้องอบแห้งจึงเป็นแนวทางหนึ่งที่สำคัญ อันจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและมวลระหว่างอากาศกับเมล็ดข้าวเปลือกได้อย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาผลของการติดตั้งอุปกรณ์ขวางการไหลภายในห้องอบแห้ง และอิทธิพลของอุณหภูมิอากาศอบแห้งต่ออุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก พฤติกรรมการอบแห้ง และประสิทธิภาพการใช้พลังงานของระบบ ซึ่งนับเป็นครั้งแรกที่มีการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ท่อแนวตั้งติดตั้งครีบริบเกลียวแบบภายใน เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการออกแบบและปรับปรุงเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกต้นแบบให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นต่อไป

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 เครื่องอบแห้งต้นแบบ

งานวิจัยนี้ออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบขนาดเล็กที่มีความสูงของโครงสร้างโดยรวม 2.5 เมตร ความยาวของห้องอบแห้ง 1.5 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 4.5 นิ้ว ภายในห้องอบแห้งติดตั้งครีบริบเกลียวขวางการไหลของอากาศอบแห้งและเมล็ดข้าวเปลือกจำนวน 8 ครีบริบ ครีบริบเกลียวดังกล่าวมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง 3.8 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร ถูกทำให้บิดตัวในลักษณะคล้ายรีวิบบิ้นและเชื่อมติดกับผนังของห้องอบแห้งแบบวนตามแนววงกลมของผนังห้องจากล่างขึ้นบน จัดให้มีระยะห่างอย่างสม่ำเสมอ (ห้องอบแห้งและครีบริบเกลียวทำจากวัสดุโลหะเหล็ก) แสดงดังรูปที่ 1 เครื่องอบแห้งต้นแบบใช้เครื่องเป่าลม (Blower) ขนาด 1.5 กิโลวัตต์ (ยี่ห้อ Vortex Blower รุ่น VB-020-DN) เป็นต้นกำลังในการนำพาเมล็ดข้าวเปลือก



รูปที่ 1 (ก) ระบบของเครื่องอบแห้งต้นแบบที่ใช้ทดสอบ
(ข) เครื่องอบแห้งต้นแบบ

ที่ถูกปล่อยจากถังพัก (Paddy Container) ให้ไหลเข้าไปสู่ในส่วนล่างของบริเวณท่ออบแห้ง (Drying Column) เครื่องเป่าลมสามารถปรับความเร็วลมได้ด้วยการปรับการจ่ายแรงดันไฟฟ้าผ่านอินเวอร์เตอร์ (ยี่ห้อ SAKO รุ่น SKI780) โดยใช้ความเร็วลม 26.3 เมตรต่อวินาที ซึ่งจะถูกวัดที่ตำแหน่งต้นทางบริเวณก่อนทางเข้าท่ออบแห้งด้วยเครื่องวัดความเร็วลม (ยี่ห้อ Testo รุ่น 416)

หลักการทำงานจะเริ่มจากลมแรงดันสูงที่ถูกขับด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าเคลื่อนตัวผ่านเครื่องทำความร้อน (Heater) ขนาด 4 กิโลวัตต์ หลังจากที่ถูกเคลื่อนตัวผ่านเครื่องทำความร้อนแล้วจะได้อากาศร้อนในอุณหภูมิตามต้องการซึ่งจะใช้อากาศนี้เป็นตัวกลางในการอบแห้งพร้อมทั้งใช้สำหรับเป็นตัวนำพาเมล็ดข้าวเปลือกให้ไหลเข้าสู่บริเวณท่ออบแห้งด้วยอุณหภูมิของอากาศดังกล่าวจะถูกควบคุมด้วยอุปกรณ์ควบคุมแบบ PID (ยี่ห้อ Shinko รุ่น JCS-33A) อากาศร้อนที่มีแรงดันสูงจะพัดพาเมล็ดข้าวเปลือกที่ถูกปล่อยให้ไหลตามท่อทางเดินจากถังพักให้ไหลเข้าสู่ท่ออบแห้งจากด้านล่างขึ้นสู่ส่วนบน ในระหว่างที่เมล็ดข้าวเปลือกถูกลำเลียงเข้าสู่ท่ออบแห้งนั้นเมล็ดข้าวเปลือกจะเคลื่อนตัวผ่านครีบกวนภายในท่ออบแห้งแล้วหลุดผ่านไปสู่ปลายท่อด้านบน จากนั้นเมล็ดข้าวจะถูกลำเลียงต่อไปยังถังพักและรอการอบแห้งในรอบต่อไป

2.2 การทดสอบ

ในการทดสอบจะใช้ข้าวเปลือกพันธุ์หอมมะลิ 105 โดยจำลองความชื้นให้มีค่าใกล้เคียงกับเมล็ดข้าวที่เก็บจากฤดูกาลเก็บเกี่ยวใหม่ ซึ่งจะมีค่าความชื้นอยู่ที่ร้อยละ 20-25 มาตรฐานเปียก [7] ทำโดยพ่นละอองน้ำลงไปบนเมล็ดข้าวและคลุกเคล้าให้ทั่วกันจากนั้นเก็บในภาชนะที่บดแสงเป็นเวลา 24 ชั่วโมง [8] เพื่อรอสำหรับการใช้ในการทดสอบ งานวิจัยนี้เลือกความชื้นเริ่มต้นสำหรับการทดสอบที่ร้อยละ 25 มาตรฐานเปียก พิจารณาความชื้นสุดท้ายของการทดสอบที่ร้อยละ 14 มาตรฐานเปียก โดยค่าความชื้นสุดท้ายนี้เป็นค่าที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษา [7] ปริมาณข้าวเปลือกใน



การทดสอบครั้งละ 3 กิโลกรัม อากาศอบแห้ง 60°C และ 80°C ควบคุมด้วย Temperature Control โดยการติดตั้ง Thermocouple Type K ที่บริเวณทางเข้าของท่ออบแห้ง การทดสอบจะเปรียบเทียบกันระหว่างท่ออบแห้งสองแบบคือ ท่อตรงที่ไม่ติดตั้งครีบกเกลียวภายใน และท่อตรงที่ติดตั้งครีบกเกลียวภายในท่อ โดยเงื่อนไขการทดสอบสรุปได้ดังตารางที่ 1

ในขณะที่ระบบอบแห้งกำลังทำงาน เมล็ดข้าวเปลือกที่อยู่ในกระบวนการจะถูกขับเคลื่อนด้วยแรงดันของลมและจะวนซ้ำอย่างช้า ๆ เป็นรอบ ๆ ในระหว่างนั้นจะทำการเก็บตัวอย่างของเมล็ดข้าวเปลือกจากถังพัก ที่รองรับมาจากท่ออบแห้งทุก ๆ 5 นาที เพื่อนำไปวิเคราะห์ค่าความชื้น โดยตัวอย่างที่เก็บมาจะนำมาวิเคราะห์หาความชื้นตามมาตรฐานของ Association of Official Analytical Chemists (AOAC) [9] ด้วยการนำเมล็ดข้าวเปลือกไปอบด้วยตู้อบลมร้อน (Hot air oven) ที่อุณหภูมิ 105±2°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงจะนำมาคำนวณหาค่าความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกต่อไป การวิเคราะห์ค่าความชื้นแสดงดังสมการที่ 1

$$M_w = \frac{W_{i,oven} - W_{f,oven}}{W_{i,oven}} \quad (1)$$

โดยที่

M_w คือ เศษส่วนความชื้นมาตรฐานเปียก (เศษส่วน)

$W_{i,oven}$ คือ มวลข้าวเปลือกก่อนนำเข้าตู้อบลมร้อน (กรัม)

$W_{f,oven}$ คือ มวลข้าวเปลือกหลังนำออกจากตู้อบลมร้อน (กรัม)

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการทดสอบ

รูปแบบท่ออบแห้ง	อุณหภูมิอากาศอบแห้ง
ไม่ติดตั้งครีบกเกลียว	60°C
	80°C
ติดตั้งครีบกเกลียว	60°C
	80°C

การทดสอบจะดำเนินการไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งได้ค่าความชื้นตามที่ต้องการ (ประมาณร้อยละ 14) จึงจะยุติการทดสอบ ในการยุติการทดสอบจะใช้เครื่องวัดความชื้นเมล็ดข้าวเปลือกแบบวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (ยี่ห้อ Kett รุ่น Riceter-fv999) และทำการทดสอบรูปแบบละ 3 ซ้ำ เพื่อยืนยันผล แสดงการคำนวณค่าเบี่ยงเบน (Error Bars) จากการทดสอบซ้ำดังสมการที่ 2 [10]

$$S = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2)$$

โดยที่

S คือ ค่าเบี่ยงเบน

x คือ ค่าความชื้นข้าวเปลือก ณ เวลานั้น ๆ

$\bar{x}$ คือ ค่าเฉลี่ยความชื้นข้าวเปลือกในข้อมูลชุดนั้น

n คือ จำนวนข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่าง

2.3 วิเคราะห์การทำงานของกระบวนการอบแห้ง

เพื่อที่จะศึกษาถึงสมรรถนะของกระบวนการสำหรับระบบอบแห้งเครื่องต้นแบบที่ใช้ในการทดสอบนี้ จะทำการพิจารณาถึงความสามารถของการเพิ่มอุณหภูมิในเมล็ดข้าวเปลือกสำหรับท่อที่ติดตั้งครีบกเกลียว ความรวดเร็วในการอบแห้ง อัตราการอบแห้ง อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง



2.3.1 อัตราการอบแห้ง (Drying Rate, DR)

ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบนำมาวิเคราะห์หาปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากเมล็ดข้าวเปลือก แสดงการคำนวณดังสมการที่ 3 [11]

$$DR = \frac{W_i - W_f}{t} \quad (3)$$

โดยที่

DR คือ อัตราการอบแห้ง (กิโลกรัมน้ำต่อชั่วโมง)

W_i คือ มวลข้าวเปลือกเริ่มต้น (กิโลกรัม)

W_f คือ มวลข้าวเปลือกหลังอบแห้ง (กิโลกรัม)

t คือ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (ชั่วโมง)

2.3.2 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC)

อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะจะคำนวณในรูปของพลังงานความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศที่ผ่านเครื่องทำความร้อน แสดงการคำนวณดังสมการที่ 4 [12]

$$Q = \dot{m}_a [(1 - W_a) C_a + W_a C_v] (T_{out} - T_{in}) \Delta t \quad (4)$$

โดยที่

Q คือ พลังงานความร้อนที่ใช้เพิ่มอุณหภูมิให้อากาศ (เมกะจูล)

$\dot{m}_a$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแห้ง (กิโลกรัมต่อวินาที)

W_a คือ ความชื้นสัมบูรณ์อากาศที่ทางเข้าเครื่องทำความร้อน (กิโลกรัมต่อกิโลกรัมน้ำที่ระเหย)

C_a คือ ความร้อนจำเพาะอากาศแห้งเฉลี่ย (กิโลจูลต่อกิโลกรัม-เคลวิน)

C_v คือ ความร้อนจำเพาะของไอน้ำในอากาศเฉลี่ย (กิโลจูลต่อกิโลกรัม-เคลวิน)

T_{out} คือ อุณหภูมิอากาศออกจากเครื่องทำความร้อน (องศาเซลเซียส)

T_{in} คือ อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าเครื่องทำความร้อน (องศาเซลเซียส)

Δt คือ ระยะเวลาอบแห้งรวมเฉพาะช่วงที่มีข้าวเปลือกอยู่ในห้องอบแห้ง (วินาที)

อัตราการไหลเชิงมวล ($\dot{m}_a$) แสดงการคำนวณดังสมการ (5) [12]

$$\dot{m}_a = \rho A \bar{V} \quad (5)$$

โดย

$\dot{m}_a$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแห้ง (กิโลกรัมต่อวินาที)

ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศอบแห้งเฉลี่ย (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของห้องอบแห้ง (ตารางเมตร)

$\bar{V}$ คือ ความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัดห้องอบแห้ง (เมตรต่อวินาที)

ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากการอบแห้ง (ΔW_w) แสดงการคำนวณดังสมการ (6) [12]

$$\Delta W_w = W_d (M_{d,i} - M_{d,f}) \quad (6)$$

โดย

ΔW_w คือ น้ำที่ระเหยออกจากการอบแห้ง (กิโลกรัม)

$M_{d,i}$ คือ ร้อยละความชื้นเริ่มต้น (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้งความชื้นเริ่มต้น)

$M_{d,f}$ คือ ร้อยละความชื้นสุดท้าย (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้งความชื้นสุดท้าย)



มวลแห้งของข้าวเปลือกเริ่มต้นเฉลี่ย (W_d) แสดงการคำนวณดังสมการ (7) [12]

$$W_d = W_i(1 - m_{w,i}) \quad (7)$$

โดย

W_d คือ น้ำหนักแห้งของข้าวเปลือก (กิโลกรัม)

W_i คือ น้ำหนักข้าวเปลือกเริ่มต้น (กิโลกรัม)

$m_{w,i}$ คือ เศษส่วนความชื้นมาตรฐานเปียกเริ่มต้นของเมล็ดข้าวเปลือก (0.25)

ดังนั้นอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ของเครื่องอบแห้งจึงคำนวณได้ดังสมการ (8) [12]

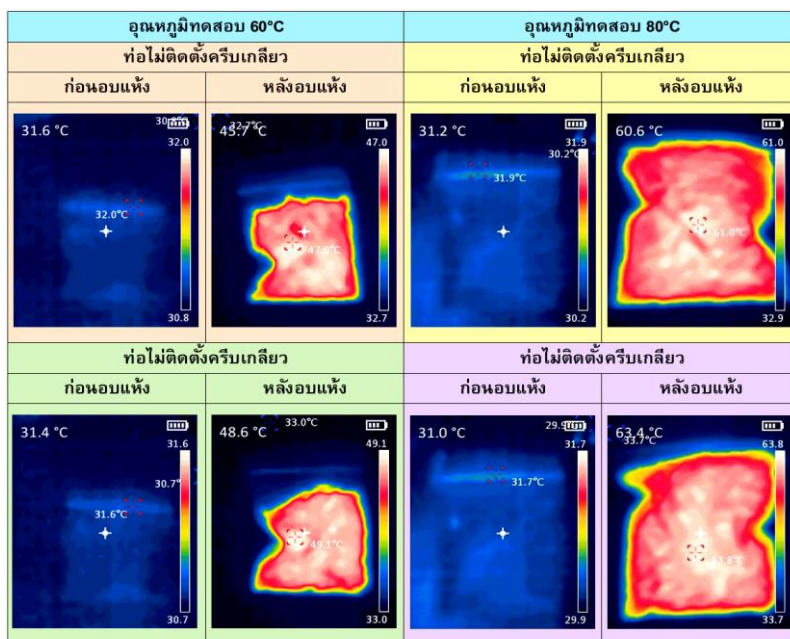
$$SEC = \frac{Q}{\Delta W_w} \quad (8)$$

3. ผลการทดสอบและอภิปราย

จากการทดสอบเปรียบเทียบระหว่างท่ออบแห้งแบบท่อตรงที่ไม่ติดตั้งครีบกี้วยภายในกับท่อตรงที่ติดตั้งครีบกี้วยภายในท่อ พบว่าการติดตั้งครีบกี้วยมีนัยสำคัญต่อพฤติกรรมการอบแห้งของเมล็ดข้าวเปลือก โดยสามารถสรุปผลการทดสอบในแต่ละด้านได้ดังนี้

3.1 ผลการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือก

การถ่ายภาพอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกทำโดยนำกลุ่มตัวอย่างของเมล็ดข้าวเปลือกก่อนกระบวนการอบแห้ง และเมื่อสิ้นสุดกระบวนการอบแห้ง (ทันที) บรรจุใส่ถุงใสแบบบางปิดสนิทปริมาณ 100 กรัม วางบนภาชนะที่ไม่นำความร้อน แล้วถ่ายภาพด้วยกล้องอินฟราเรด (ยี่ห้อ UNI-T รุ่น UH260B) ผลจากการถ่ายภาพความร้อนเมล็ดข้าวเปลือก แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 อุณหภูมิเฉลี่ยเมล็ดข้าวเปลือก



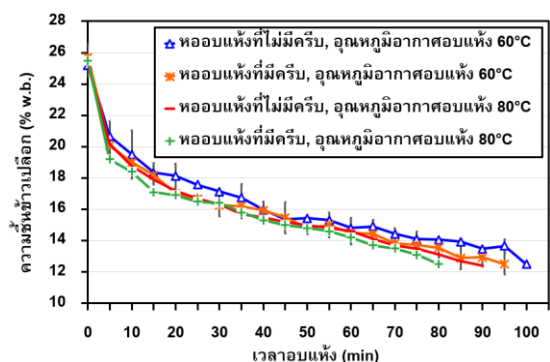
พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยของเมล็ดข้าวเปลือกหลังการอบแห้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับค่าก่อนการอบแห้งในทุกกรณี โดยมีความแตกต่างตามอุณหภูมิของอากาศอบแห้งและลักษณะของท่ออบแห้งที่ใช้ในการทดสอบ ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 60°C ท่อที่ไม่ติดตั้งครีบกี้วยอุณหภูมิเฉลี่ยเมล็ดข้าวเปลือกเพิ่มจาก 32.0°C เป็น 47.0°C ท่อที่ติดตั้งครีบกี้วยอุณหภูมิเฉลี่ยเมล็ดข้าวเปลือกเพิ่มจาก 31.6°C เป็น 49.1°C เพิ่มขึ้นมากถึง 2.1°C ในขณะที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80°C ท่อที่ไม่ติดตั้งครีบกี้วยอุณหภูมิเฉลี่ยเมล็ดข้าวเปลือกเพิ่มจาก 31.9°C เป็น 61.0°C ท่อที่ติดตั้งครีบกี้วยอุณหภูมิเฉลี่ยเมล็ดข้าวเปลือกเพิ่มจาก 31.7°C เป็น 63.8°C เพิ่มขึ้นมากถึง 2.8°C ปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้ว่า การติดตั้งครีบกี้วยาวภายในท่ออบแห้งช่วยเพิ่มการปั่นป่วนของการไหล (Turbulence) ของอากาศร้อนในแนวแกนท่อ ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยเฉพาะการถ่ายเทความร้อนแบบพา (Convective Heat Transfer) ระหว่างอากาศอบแห้งกับผิวเมล็ดข้าวเปลือก ส่งผลให้เมล็ดข้าวเปลือกดูดซับพลังงานความร้อนได้รวดเร็วและทั่วถึงมากกว่าท่อแบบเรียบ นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิต่ำสุดท้ายของเมล็ดข้าวเปลือกในท่อที่ติดตั้งครีบกี้ยมีค่าเฉลี่ยสูงกว่าท่อเปล่า (ท่อตรงที่ไม่ติดตั้งครีบกี้ยภายใน) ในทุกกรณี แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้นจากการปรับปรุงโครงสร้างของท่อ ซึ่งมีผลโดยตรงต่อความสามารถในการอบแห้งโดยเฉพาะในด้านของแรงการระเหยความชื้นภายในเมล็ด ผลลัพธ์นี้ยังสอดคล้องกับพฤติกรรมของการอบแห้ง (การลดลง

ของความชื้น) อัตราการอบแห้งและพลังงานในการระเหยน้ำ จะได้กล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

3.2 ผลการอบแห้ง

จากผลการทดสอบที่แสดงในรูปที่ 3 พบว่าความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกลดลงตามเวลาในทุกกรณีของการทดสอบ ซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับพฤติกรรมของกระบวนการอบแห้งทั่วไป โดยเฉพาะในช่วงเริ่มต้นของการอบแห้งที่ความชื้นยังสูงเมล็ดข้าวสามารถระเหยน้ำได้อย่างรวดเร็วจึงมีอัตราการลดของความชื้นที่ชัดเจน จากนั้นเมื่อใกล้เข้าสู่สภาวะสมดุลความชื้นที่ลดลงจะมีแนวโน้มชะลอตัว ซึ่งสะท้อนถึงการเข้าสู่ช่วงการอบแห้งแบบอัตราตก (Falling-rate Period) [13]

จากรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่าการทดสอบอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศสูง (80°C) มีแนวโน้มลดความชื้นได้เร็วกว่าการทดสอบอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศต่ำ (60°C) และการทดสอบอบแห้งด้วยการติดตั้งครีบกี้ยภายในท่อสามารถลดความชื้นได้เร็วกว่าการทดสอบอบแห้งในกรณีที่ไม่ติดตั้งครีบกี้ยด้วยเช่นกัน ทั้งในอุณหภูมิ 60°C และ 80°C ปรากฏการณ์นี้อธิบายได้จากกลไกของการแลกเปลี่ยนพลังงานในระบบ



รูปที่ 3 การลดลงของความชื้นกับเวลา

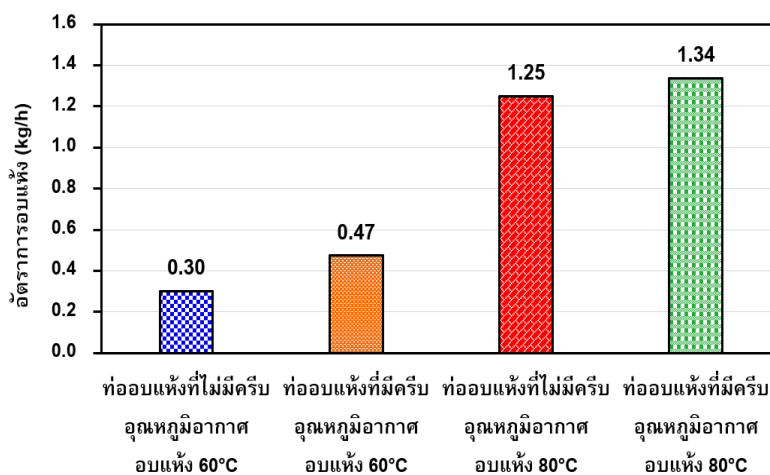


โดยที่อุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ความดันไออิมตัวที่ผิวเมล็ดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีแรงขับในการระเหย (Driving Force for Moisture Diffusion) มากขึ้น [14] ส่วนการติดตั้งครีบกี้วยช่วยเพิ่มความปั่นป่วนให้กับอากาศที่ไหลในท่ออบแห้ง ซึ่งเป็นการส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนแบบพา และลดความหนาของชั้นขอบเขต (Boundary Layer) บริเวณผิวเมล็ดข้าว ทำให้พลังงานความร้อนสามารถส่งเข้าสู่เนื้อของเมล็ดข้าวเปลือกได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

3.3 อัตราการอบแห้ง (Drying Rate)

จากผลการทดสอบ (รูปที่ 4) พบว่าทั้งอุณหภูมิของอากาศอบแห้งและการติดตั้งครีบกี้วยภายในท่อต่างมีอิทธิพลเชิงบวกต่ออัตราการอบแห้งของเมล็ดข้าวเปลือก การติดตั้งครีบกี้วยภายในท่ออบแห้งจะช่วยเพิ่มอัตราการอบแห้งของเมล็ดข้าวได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะเมื่อใช้ร่วมกับอุณหภูมิอบแห้งที่สูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบผลกระทบเชิง

ปริมาณจากทั้งสองปัจจัยพบว่าการติดตั้งครีบกี้วยส่งผลต่ออัตราการอบแห้งมากกว่าเพียงการเพิ่มอุณหภูมิของอากาศ ดังจะเห็นได้จากการทดสอบที่อุณหภูมิ 60°C ท่อที่ติดตั้งครีบกี้วยสามารถเพิ่มอัตราการอบแห้งได้ถึง 56.67 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับท่อเปล่า ในขณะที่เมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิในการทดสอบจาก 60°C เป็น 80°C แล้วพิจารณาผลการเพิ่มขึ้นของอัตราการอบแห้งพบว่าท่อที่ติดตั้งครีบกี้วยสามารถเพิ่มอัตราการอบแห้งได้เพียง 7.2 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับท่อเปล่าดังจะเห็นได้จากข้อมูลตัวเลขในรูปที่ 4 และการวิเคราะห์ดังที่ได้กล่าวมาซึ่งแสดงให้เห็นว่าการติดตั้งครีบกี้วยภายในโครงสร้างท่ออบแห้งมีนัยสำคัญต่อการเพิ่มอัตราการอบแห้งที่มากกว่าการเพิ่มอุณหภูมิสาเหตุสำคัญนี้มาจากลักษณะของการไหลและการแลกเปลี่ยนพลังงานภายในท่ออบแห้ง โดยการติดตั้งครีบกี้วยจะช่วยสร้างสภาวะการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ซึ่งเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนแบบพา [15]



รูปที่ 4 อัตราการอบแห้งข้าวเปลือก



ทำให้เมล็ดข้าวเปลือกได้รับพลังงานความร้อนที่รวดเร็วและสม่ำเสมอมากกว่าการเพิ่มอุณหภูมิของอากาศอบแห้งเพียงอย่างเดียว ซึ่งพฤติกรรมนี้จะช่วยเพิ่มแรงขับสำหรับการระเหยความชื้น (Vapor pressure difference) แต่หากการไหลของอากาศยังอยู่ในสภาวะที่ไม่สามารถแลกเปลี่ยนพลังงานได้เต็มประสิทธิภาพ เช่น การไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) ก็ยังไม่อาจเร่งอัตราการอบแห้งได้เท่ากับการปรับโครงสร้างท่อให้มีการขัดขวางการไหลได้

ทั้งนี้เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของการติดตั้งครีบกเกลียวและอุณหภูมิอากาศอบแห้งต่ออัตราการอบแห้งของเมล็ดข้าวเปลือกอย่างเป็นระบบ งานวิจัยนี้จึงใช้โปรแกรมสำเร็จรูปในการวิเคราะห์เปรียบเทียบแบบ Tukey's Honestly Significant Difference (Tukey's HSD) [10] ในกรณี ที่พบ ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เพื่อยืนยันว่าการติดตั้งครีบกเกลียวภายในท่ออบแห้งส่งผลต่ออัตราการอบแห้งอย่างมีนัยสำคัญมากกว่าการเพิ่มอุณหภูมิของอากาศอบแห้งเพียงอย่างเดียว แสดงผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 2

ผลจากการวิเคราะห์ความแตกต่างของอัตราการอบแห้ง พบว่าอัตราการอบแห้งของทุกกลุ่มมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) โดยเฉพาะระหว่างกลุ่มที่ใช้อุณหภูมิ 60°C ที่มีและไม่มีครีบกเกลียว ซึ่งมีค่าความต่างเฉลี่ย (Mean difference) เท่ากับ 0.17 และระหว่างกลุ่มที่ใช้อุณหภูมิ 80°C กับ 60°C ของกลุ่มที่ไม่มีครีบกเกลียว ซึ่งมีความต่างเฉลี่ยสูงกว่า 0.9 จากข้อมูลยังพบอีกว่าที่อุณหภูมิสูง (80°C) และการติดตั้งครีบกเกลียวยังคงทำให้ค่าอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน ($p=0.0031$) ซึ่งข้อมูลนี้ชี้ให้เห็นว่าการติดตั้ง

ตารางที่ 2 แสดงผลการเปรียบเทียบความแตกต่างของอัตราการอบแห้ง

กลุ่มเปรียบเทียบ		ความต่าง	p-value
60°C ไม่มีครีบก	60°C มีครีบก	-0.17	0.0001
60°C ไม่มีครีบก	80°C ไม่มีครีบก	-0.95	0.0001
60°C ไม่มีครีบก	80°C มีครีบก	-1.04	0.0001
60°C มีครีบก	80°C ไม่มีครีบก	-0.78	0.0001
60°C มีครีบก	80°C มีครีบก	-0.87	0.0001
80°C ไม่มีครีบก	80°C มีครีบก	-0.09	0.0031

***แสดงนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p<0.05$)

ครีบกเกลียวสามารถส่งเสริมประสิทธิภาพของระบบอบแห้งได้ไม่ว่าจะอยู่ภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิใดก็ตาม จากข้อมูลนี้จึงสามารถสรุปได้ว่า การที่ครีบกเกลียวสามารถเพิ่มอัตราการอบแห้งได้อย่างต่อเนื่องแม้ในสภาวะที่แรงขับสูงอยู่แล้ว แสดงให้เห็นถึงกลไกของการถ่ายเทความร้อนแบบพาที่ได้รับการส่งเสริมจากการปั่นป่วนของอากาศภายในท่อทำให้ชั้นขอบเขตที่พื้นผิวเมล็ดข้าวเปลือกบางลง ความร้อนถูกส่งผ่านได้รวดเร็วและสม่ำเสมอมากขึ้น ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อพฤติกรรมการแพร่ของความชื้นภายในเมล็ด ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าผลของการติดตั้งครีบกเกลียวไม่ได้เพียงแค่เสริมประสิทธิภาพที่อุณหภูมิต่ำ แต่ยังสามารถทำงาน



ได้ดีและคงความได้เปรียบแม้อยู่ในระบบที่อุณหภูมิสูง ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบเชิงวิศวกรรมสำหรับการออกแบบระบบบอบแห้งที่ต้องการประสิทธิภาพสูงโดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มพลังงานความร้อนที่มากจนเกินไป

3.4 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC)

จากรูปที่ 5 พบว่าท่อที่ติดตั้งครีบกี้วยมีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำกว่าท่อเปล่าทั้งที่อุณหภูมิ 60°C และ 80°C โดยที่อุณหภูมิ 60°C พลังงานที่ใช้ลดลงเฉลี่ย 21.42 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งบ่งชี้ว่าการติดตั้งครีบกี้วยช่วยให้กระบวนการอบแห้งใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น และเมื่อพิจารณาถึงการเปลี่ยนอุณหภูมิอบแห้งจาก 60°C เป็น 80°C ส่งผลให้อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสะท้อนถึงการที่พลังงานที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นต่อหน่วยน้ำที่ระเหยออกจากเมล็ดข้าวเปลือก ทั้งนี้เป็นผลมาจากแรงขับ (Driving force) ของการระเหยที่เพิ่มขึ้น เวลาอบแห้งของการอบแห้งที่น้อยลง และประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่สูงขึ้นในสภาวะอุณหภูมิอากาศอบแห้งที่สูง อย่างไรก็ตามแม้การเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้งจะช่วยลดอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะได้ แต่เมื่อพิจารณาร่วมกับการติดตั้งครีบกี้วยภายในท่อจะพบว่าการออกแบบทางกายภาพ (การติดตั้งครีบกี้วยภายในท่อ) ยังมีอิทธิพลที่เด่นชัดกว่าดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา

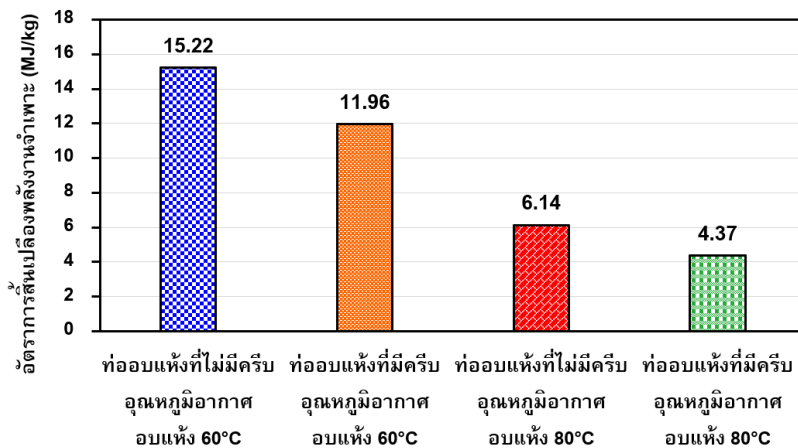
จากผลของอัตราการอบแห้งในหัวข้อที่ผ่านมาเห็นถึงความเชื่อมโยงกับการลดลงของอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะคือ อัตราการสิ้นเปลืองพลังงาน

จำเพาะมีแนวโน้มลดลงในกลุ่มที่มีอัตราการอบแห้งสูง กล่าวคือเมื่อระบบสามารถระเหยน้ำได้มากขึ้นภายในช่วงเวลาที่สั้นลง (อัตราการอบแห้งสูงขึ้น) อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะก็ลดลงตามไปด้วย การเพิ่มอัตราการอบแห้งจึงไม่เพียงแต่ลดเวลาในการทำงานของระบบเท่านั้น แต่ยังช่วยลดพลังงานสุทธิที่ต้องใช้ในการทำให้เมล็ดข้าวแห้งถึงระดับเป้าหมาย (ร้อยละ 14 มาตรฐานเปียก) ทั้งนี้ส่งผลโดยตรงต่อสมรรถนะพลังงานของระบบอบแห้งโดยรวม ดังนั้นจึงจะเห็นได้ว่าการเพิ่มอัตราการอบแห้งจากการออกแบบทางกายภาพ เช่น ติดตั้งครีบกี้วยในท่อ ไม่เพียงแต่ช่วยเร่งกระบวนการอบแห้ง แต่ยังเป็นแนวทางสำคัญในการลดพลังงานที่ใช้ต่อหน่วยน้ำที่ระเหยได้อย่างมีประสิทธิภาพได้ด้วยเช่นกัน

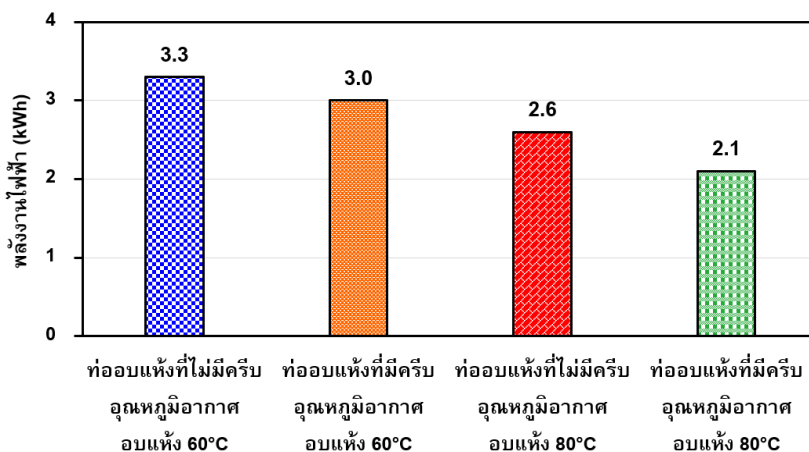
3.5 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบอบแห้ง

จากผลการทดสอบในหัวข้อที่ผ่านมาพบว่าอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการติดตั้งครีบกี้วยในท่ออบแห้ง และเมื่อใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงขึ้นที่ 80°C ซึ่งเป็นผลจากประสิทธิภาพของการแลกเปลี่ยนความร้อนที่เพิ่มขึ้น โดยสามารถเร่งกระบวนการถ่ายเทพลังงานให้กับเมล็ดข้าวเปลือกได้รวดเร็วและต่อเนื่อง ส่งผลให้พลังงานที่ใช้ต่อหน่วยน้ำที่ระเหยออกลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อพิจารณาร่วมกับข้อมูลของค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบอบแห้ง (รูปที่ 6) พบว่าปริมาณการใช้ไฟฟ้าทั้งระบบมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยในกลุ่มที่มีการติดตั้งครีบกี้วยภายในท่อ ซึ่งเป็นผลมาจากความต้านทานการไหลของอากาศที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้



รูปที่ 5 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ



รูปที่ 6 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบอบแห้ง

เครื่องเป่าลมต้องใช้กำลังมากขึ้น อย่างไรก็ตามแม้ว่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้จะลดลงเพียงเล็กน้อย แต่เมื่อเทียบกับอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะแล้วพบว่าระบบที่ติดตั้งครีบกึ่งยวยังคงมีความคุ้มค่าด้านพลังงานมากกว่า กล่าวคือการติดตั้งครีบกึ่งยวช่วยลดอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะได้ แม้ว่าเครื่องเป่าลมจะทำงานหนักขึ้นเล็กน้อย แต่ผลลัพธ์โดยรวม

คือประสิทธิภาพการใช้พลังงานของระบบดีขึ้น เนื่องจากสามารถลดความชื้นได้มากขึ้นในระยะเวลาเท่ากันหรือสั้นกว่าเดิม จากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะและพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบอบแห้งจึงสะท้อนให้เห็นว่าการออกแบบทางกล (Mechanical Design) ที่ช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อน ถึงแม้จะต้องแลกกับพลังงานกลที่ใช้



เพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่กลับให้ผลลัพธ์ในแง่ประสิทธิภาพเชิงพลังงานรวมที่ดีกว่าอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้จำกัดอยู่เพียงการอบแห้งปริมาณน้อยในระบบต้นแบบ ซึ่งอาจแตกต่างจากการใช้งานจริงในระดับอุตสาหกรรม

4. สรุปผล

การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ขวางการไหลแบบครีบกเกลียวที่ติดตั้งภายในท่ออบแห้งมีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพของกระบวนการอบแห้งข้าวเปลือก โดยเฉพาะในแง่ของการเพิ่มอุณหภูมิให้กับเมล็ดข้าวเปลือก อัตราการอบแห้ง และการใช้พลังงานที่ลดลง ที่อุณหภูมิอบแห้ง 60°C ท่อที่ติดตั้งครีบกเกลียวสามารถเพิ่มอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกได้มากกว่า 4.47 เปอร์เซ็นต์ เพิ่มอัตราการอบแห้งขึ้น 56.67 เปอร์เซ็นต์ และอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะลงได้ถึง 21.42 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับท่อเปล่า ผลลัพธ์ในทิศทางเดียวกันยังพบที่อุณหภูมิ 80°C ที่สามารถยืนยันได้ว่าการติดตั้งครีบกเกลียวภายในท่อจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในระบบอบแห้งอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นการติดตั้งอุปกรณ์ขวางการไหลแบบครีบกเกลียวภายในท่ออบแห้งจึงเป็นแนวทางที่เหมาะสมสำหรับการพัฒนาระบบอบแห้งเมล็ดข้าวเปลือกต้นแบบที่มีประสิทธิภาพทั้งด้านเวลาและพลังงานในการใช้งาน อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้ยังอยู่ในระดับต้นแบบขนาดเล็ก ซึ่งควรมีการขยายผลในระบบที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อยืนยันผลในสภาวะใช้งานจริง

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา ที่สนับสนุนการทำวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Hoonpong, S. Skullong and P. Promvonge, Heat transfer enhancement in a square channel using angled ribs, The 13th TSAE International Conference, Proceeding, 2012, 366-373. (in Thai)
- [2] T. Chompookham, Thermal enhancement technique in circular duct with twisted tape, UBU Engineering Journal, 2013, 6(2), 85-100. (in Thai)
- [3] P. Hoonpong, S. Eiamsa-ard, S. Juengjaroennirachon, S. Skullong, P. Promvonge and W. Jedsadaratanachai, Heat transfer behavior in a square duct using W-shaped fins, The 14th TSAE International Conference, Proceeding, 2013, 591-596. (in Thai)
- [4] A. Sroysroy, U. Phongrasamee, C. Choopava and J. Kuntong, Heat transfer enhancement in a circular tube inserted with wavy twisted tape and alternate axes, KKU Science Journal, 2020, 48(3), 440-449. (in Thai)

- [5] K. Kunnarak, M. Pumklom and C. Panyawatchawoong, Effect of ribbed tube with twisted tape on heat transfer, *Journal of Energy and Environmental Technology*, 2021, 8(1), 53-59. (in Thai)
- [6] N. Dokmai, S. Eiamsa-ard, P. Mukda and K. Nanan, Heat transfer augmentation in a circular tube using V-wavy twisted tape, *Agricultural Technology Journal*, 2022, 3(3), 15-26. (in Thai)
- [7] Department of Agriculture, Quality and Inspection of Thai Hom Mali Rice, Bangkok, Thailand, Jirawat Express Co., Ltd., Thailand, 2004.
- [8] S. Limpiti and V. Changrue, Effects of rewetting on milling quality of wet season Japanese rice, *Journal of Agriculture*, 1996, 12(2), 134-139.
- [9] AOAC, Official Methods of Analysis, 17th ed., Gaithersburg, MD, USA: Association of Official Analytical Chemists, 2000.
- [10] G.W. Snedecor and W.G. Cochran, *Statistical methods*, 8th ed., Iowa State University Press, IA, USA, 1989, 152-180.
- [11] S. Nuttaphon, T. Tawarat and T. Krawee, Development of a continuous flow paddy dryer with infrared radial radiation technique, *RMUTP Research Journal*, 2018, 12(2), 37-46. (in Thai)
- [12] N. Wongbubpa and T. Chitsomboon, The study of paddy drying in zig zag pipe spouted bed dryer, *Srinakharinwirot University Engineering Journal*, 2022, 17(1), 53-63. (in Thai)
- [13] M.A. Madlani and A.K. Datta, Drying kinetics of food and biological materials, In: *Handbook of food process modeling and statistical quality control*, CRC Press, FL, USA, 2005, 189-223.
- [14] W.L. McCabe, J.C. Smith and P. Harriott, *Unit operations of chemical engineering*, 7th ed., McGraw-Hill, NY, USA, 2005, 912-922.
- [15] C. Strumillo and T. Kudra, *Drying: Principles, applications and design*, Boca Raton, CRC Press, FL, USA, 2014, 39-66.



การออกแบบและพัฒนาตู้อบแห้งพลังแสงอาทิตย์แบบไฮบริดด้วยระบบ ลมร้อนแห้งควบคู่การควบแน่นไอน้ำ สำหรับการอบแห้งสมุนไพรไทย

สมิทธิ์ ปรีชาญาณ¹ เสกสิทธิ์ กมลชัย² และ เอกวิทย์ หวังกันกลาง^{2*}

¹ หลักสูตรวิศวกรรมไฟฟ้าอุตสาหกรรม, คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

² หลักสูตรวิศวกรรมยานยนต์ไฟฟ้า(ต่อเนื่อง), คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: ekkawit.w@nrru.ac.th

วันที่รับบทความ: 14 มิถุนายน 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 20 กันยายน 2568; วันที่ตอบรับบทความ: 10 ตุลาคม 2568

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 9 ธันวาคม 2568

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและประเมินสมรรถนะของระบบต้นแบบอบแห้งสมุนไพร โดยผสมผสานเทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริกเข้ากับตู้อบพลังแสงอาทิตย์เดิม ระบบต้นแบบประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ตู้อบพลังแสงอาทิตย์ ห้องอบแห้งเทอร์โมอิเล็กทริก และระบบหมุนเวียนอากาศ โดยกระบวนการใช้ความร้อนของเพลเทียร์สร้างลมร้อนอุณหภูมิ 58 °C ส่วนด้านเย็นควบแน่นไอน้ำเพื่อลดความชื้นสัมพัทธ์ ช่วยให้การอบแห้งเกิดขึ้นต่อเนื่องและเร็วขึ้นกว่าตู้อบรูปแบบเดิม ผลการทดสอบแสดงว่าสามารถลดน้ำหนักวัตถุดิบในเวลา 4 ชั่วโมง ได้แก่กระชายลดลง 61%, ใบมะรุม 50% และขิง 58% สะท้อนถึงสมรรถนะของระบบไฮบริดต้นแบบในการควบคุมสภาวะอบแห้งได้ดีกว่าการตากแดดและตู้อบพลังแสงอาทิตย์แบบดั้งเดิม ทั้งด้านควบคุมระดับอุณหภูมิ ความรวดเร็ว รวมถึงการลดความชื้นสัมพัทธ์ในระบบ ทั้งนี้ การศึกษาระบบอบแห้งด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกที่ผสมผสานการควบแน่นไอน้ำและใช้งานได้จริงยังมีจำกัด งานวิจัยนี้จึงเป็นแนวทางใหม่ในการอบสมุนไพรในบริบทชุมชนของไทย ที่คงคุณภาพวัตถุดิบ สามารถใช้ได้ภายในอาคารและการใช้พลังงานสะอาด มีศักยภาพในการขยายผลได้อย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: การอบแห้ง; ชุดอบแห้งเทอร์โมอิเล็กทริก; ตู้อบพลังแสงอาทิตย์; สมุนไพรไทย; ระบบควบแน่นไอน้ำ

Design and Development of A Hybrid Solar Drying Chamber with Dry Hot Air and Integrated Moisture Condensation for Thai Herb Dehydration

Samit Preechayan¹ Seksid Kamolchai² and Ekkawit Wangkanklang^{2*}

¹ Industrial Electrical Engineering Programs, Faculty of Industrial Technology,
Nakhonratchasima Rajabhat University

² Electric Vehicle Engineering (Continuing Program), Faculty of Industrial Technology,
Nakhonratchasima Rajabhat University

* Corresponding author, E-mail: ekkawit.w@nrru.ac.th

Received: 14 June 2025; Revised 20 September 2025; Accepted: 10 October 2025

Online Published: 9 December 2025

Abstract: This research aimed to develop and evaluate the performance of a prototype herbal drying system by integrating thermoelectric technology with a conventional solar dryer. The prototype system consists of three main components: a solar drying chamber, a thermoelectric drying chamber, and an air circulation system. The process utilizes the hot side of Peltier modules to generate hot air at 58 °C, while the cold side condenses moisture to reduce relative humidity. This enables continuous and accelerated drying compared to traditional dryers. Experimental results showed that within 4 hours, the system could reduce the weight of raw materials as follows: fingerroot by 61%, moringa leaves by 50%, and ginger by 58%. These results reflect the hybrid system's superior ability to control drying conditions compared to sun drying and conventional solar dryers, in terms of temperature regulation, drying speed, and reduction of relative humidity within the system. Since studies on thermoelectric drying systems that incorporate condensation and practical application remain limited, this research presents a novel approach for herbal drying in Thai community contexts. It helps preserve the quality of raw materials, allows for indoor use, supports clean energy utilization, and demonstrates potential for sustainable scaling.

Keywords: Dehydration; Thermoelectric Dehydration Unit (TDU); Solar dryer; Thai herbs; Condensation system

1. บทนำ

ในระบบของตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์รูปแบบเดิมที่ใช้กันอยู่โดยทั่วไป อาศัยความร้อนจากแสงอาทิตย์ในระหว่างวันเพื่อใช้อบแห้งวัตถุดิบโดยที่ความเร็ว-ช้าของการอบมีผลโดยตรงต่อคุณภาพและปริมาณของผลผลิต มีงานวิจัยที่เสนอแนวทางในการยกระดับสมรรถนะการอบแห้งหรือการพัฒนาตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเดิมให้ดีขึ้นได้โดยใช้ระบบอบแห้งแบบไฮบริดในหลากหลายรูปแบบ [1-4]

แผ่นเพลเทียร์คืออุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกที่เมื่อจ่ายพลังงานในรูปกระแสไฟฟ้าให้จะเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิขึ้นทั้งสองด้านของแผ่น หรืออาจกล่าวได้อีกนัยว่าเกิดพลังงานขึ้นสองรูปแบบคือความร้อนและความเย็นในแผ่นเดียวกันโดยจ่ายพลังงานครั้งเดียวได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นในการประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบพลังงานแสงอาทิตย์ [5-7] แต่การใช้งานในหลายๆ ด้านโดยทั่วไปมักจะใช้ประโยชน์เพียงด้านใดด้านหนึ่ง (โดยเฉพาะใช้ด้านเย็น) ของแผ่นเท่านั้น S. Preechayanon และคณะ [8] ได้ศึกษาทดลองการประยุกต์ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกแผ่นเพลเทียร์ให้เกิดประโยชน์ทั้งสองด้านของแผ่นในเวลาเดียวกัน จากการออกแบบสร้างระบบการอบแห้งขนาดเล็ก ใช้ทดสอบอบแห้งกับตัวอย่างถั่วลิสง ได้ผลทดสอบคือระบบสามารถอบแห้งได้จริง ซึ่งเป็นการใช้ประโยชน์ได้ทั้งสองด้านของแผ่นเพลเทียร์เดียวกัน และได้พร้อมกันโดยด้านร้อนใช้เพื่อสร้างลมร้อนอบแห้ง ขณะที่ด้านเย็นใช้เพื่อควบแน่นไอน้ำในอากาศแล้วนำน้ำออกจากระบบ ได้ผลทดสอบอบแห้งเปรียบเทียบกัน 4 รูปแบบ คือ การใช้เพียงแค่ด้านร้อนสร้างลมร้อนเพื่ออบแห้ง, การใช้เพียงแค่ด้านเย็นควบแน่นไอน้ำนำความชื้นออก,

การใช้เพียงระบบพัดลมอบแห้ง (ไม่ใช้ทั้งด้านร้อน และด้านเย็น), และการใช้ทั้งสองด้านพร้อมกันเพื่อสร้างลมร้อน และเพื่อควบแน่นไอน้ำ ได้ผลทดสอบอบแห้งถั่วลิสงในระบบขนาดเล็กที่ออกแบบขึ้น คือ การใช้ทั้งสองด้านของแผ่นเพลเทียร์เพื่ออบแห้งได้ผลการอบแห้งดีที่สุดเมื่อเทียบกับสี่รูปแบบ

จากผลทดสอบข้างต้น งานวิจัยนี้จึงมีสมมุติฐานคือ สามารถนำระบบการประยุกต์ใช้อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกมาเพื่อเพิ่มสมรรถนะการอบแห้งให้ตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ขึ้นได้ โดยมีแนวคิดที่จะออกแบบ-พัฒนาตู้อบต้นแบบขนาดเล็ก นั่นคือ ตู้อบแห้งพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ที่ประยุกต์ใช้ร่วมกับชุดอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (แผ่นเพลเทียร์) ให้เป็นนวัตกรรมระบบอบแห้งแบบไฮบริด เพื่อวัตถุประสงค์ในการศึกษาพารามิเตอร์ภายในระบบ และทดสอบการใช้ประโยชน์ในงานอบแห้งจริง โดยเลือกตัวอย่างสมุนไพรของไทยที่มีมูลค่าทางเศรษฐกิจสูงและใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ ใบมะรุ้ม ชিং และกระชาย

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยเชิงทดลองและนวัตกรรมนี้ ได้ทำการออกแบบสร้างตู้อบแห้งต้นแบบ จากแนวคิดในการประยุกต์ใช้ชุดเทอร์โมอิเล็กทริก (แผ่นเพลเทียร์) เป็นอุปกรณ์แปลงพลังงานไฟฟ้าให้เกิดความร้อนและความเย็นบนด้านทั้งสองของแผ่น [9] เพื่อประยุกต์ใช้ด้านร้อนสำหรับการสร้างลมร้อนอบแห้ง พร้อมกับประยุกต์ใช้ด้านเย็นในการควบแน่นเพื่อลดความชื้นภายในระบบ โดยบูรณาการสร้างระบบนี้ขึ้นร่วมกับโครงสร้างของตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบดั้งเดิม นั้น มีเป้าหมายเพื่อเพิ่มสมรรถนะการอบแห้งและเพื่อ



เพิ่มโหมดการใช้งานในช่วงเวลาที่ไม่ได้มีแสงอาทิตย์ หรือ การที่สามารถใช้งานแบบภายในอาคารได้

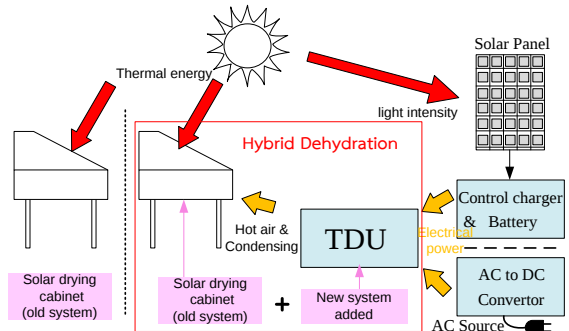
ระบบสามารถเลือกรับพลังงานอบแห้งได้จากสอง แหล่งพร้อมกัน หรือเลือกใช้ที่ละแหล่ง โดยแบ่งรูปแบบ การอบแห้งออกเป็น 3 ลักษณะ ได้แก่ (1) การอบแห้ง ด้วยพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ โดยใช้งานใน ลักษณะตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์แบบดั้งเดิม (2) การ อบแห้งด้วยพลังงานความร้อนและความเย็นจาก อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก และ (3) การอบแห้งโดยใช้ ทั้งสองระบบร่วมกัน ทั้งนี้ แหล่งพลังงานสำหรับชุด เทอร์โมอิเล็กทริกสามารถเลือกได้ระหว่าง (3) พลังงาน ทดแทนจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเหมาะกับการ ใช้งานตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ที่ต้องตั้งกลางแจ้งเพื่อ รับพลังงานจากแสงอาทิตย์อยู่แล้ว หรือ (2) พลังงาน จากแหล่งจ่ายไฟฟ้า สำหรับการอบแห้งในสภาพอากาศ ที่ไม่มีแสงแดด แสดงในรูปที่ 1

จากแนวคิดและสมมุติฐานที่กล่าวมา จึง จำเป็นต้องออกแบบและผนวกระบบเทอร์โมอิเล็กทริก รวมถึงระบบหมุนเวียนอากาศให้สอดคล้องกับ โครงสร้างตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์เดิมอย่างเหมาะสม โดยพัฒนาเป็นต้นแบบตู้อบแห้งแบบไฮบริด ด้วยการ ติดตั้ง “ชุดอบแห้งเทอร์โมอิเล็กทริก” (Thermoelectric Dehydration Unit: TDU) เพิ่มเติมเข้าสู่ระบบเดิม

2.1 การออกแบบ-สร้าง

ตู้อบแห้งต้นแบบมีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน คือ

1. ส่วนโครงสร้างตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่ง ออกแบบตามรูปแบบเดิมที่ใช้กันทั่วไปในปัจจุบัน แต่ ทำการปรับปรุงให้มีช่องทางรับพลังงานเพื่อ การอบแห้งได้ 2 รูปแบบ คือ การอบแห้งโดยใช้ความ ร้อนจากแสงอาทิตย์ (ระบบเดิม) และการอบแห้งโดย



รูปที่ 1 แนวความคิดของงานวิจัย

การใช้ความร้อนแห้งไหลเวียน ควบคู่กับการควบแน่น ลดความชื้นในระบบ (ระบบใหม่ที่เพิ่มขึ้น)

2. ชุดอบแห้งเทอร์โมอิเล็กทริก” (Thermoelectric Dehydration Unit: TDU) คือส่วนประกอบหลักใน งานวิจัยนี้ ทำหน้าที่สองประการ คือ การสร้างลมร้อน สำหรับการอบแห้ง และการควบแน่นไอน้ำภายใน ระบบเพื่อลดความชื้น ประกอบด้วยโครงสร้างตู้ ที่มี ชุดแผ่นเพลเทียร์ในจำนวนที่เหมาะสม เพื่อเพิ่ม อุณหภูมิลมร้อนภายในตู้ให้ถึงระดับเหมาะสมกับ การอบแห้งสมุนไพร โดยในขณะเดียวกันยังสามารถ สร้างการควบแน่นไอน้ำที่ด้านเย็นของแผ่นเพลเทียร์ ได้ด้วย ซึ่งแผ่นเพลเทียร์เป็นอุปกรณ์ที่สามารถแปลง พลังงานไฟฟ้ากระแสตรงให้เกิดทั้งความร้อนและ ความเย็นพร้อมกัน โดยอาศัยสมการพลังงานความ ร้อนของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก (Q) ตามแบบจำลอง ทางคณิตศาสตร์ [10] ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิ (T_c) ความต้านทานไฟฟ้า (R) กระแสไฟฟ้า (I) และ Seebeck Coefficient (S) ในการเกิดความ ต่างของอุณหภูมิ (ΔT)

$$\Delta T = \frac{S \cdot I \cdot T_c - \frac{1}{2} I^2 \cdot R - Q}{K} \quad (1)$$



โดยสามารถคำนวณปริมาณความร้อนที่เพลเทียร์ดูดซับจากด้านเย็น (Q_C) ได้จากสมการ (2)

$$Q_C = S \cdot I \cdot T_C - \frac{1}{2} I^2 \cdot R - K \cdot \Delta T \quad (2)$$

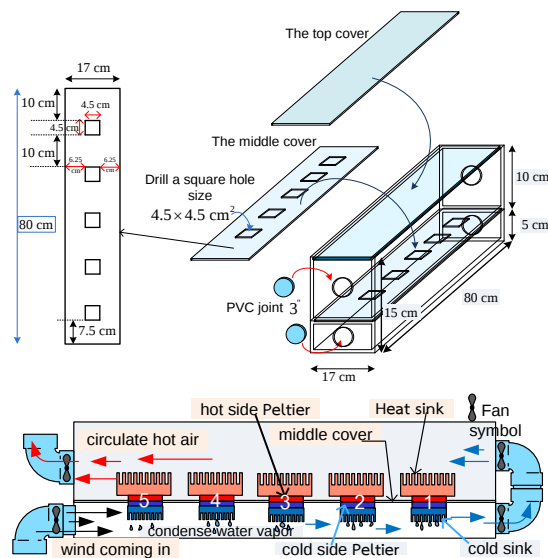
อย่างไรก็ตาม การออกแบบเพื่อประยุกต์ใช้งานในระบบจริง ประสิทธิภาพและการทำงานของแผ่นเพลเทียร์ยังขึ้นอยู่กับการสามารถในการระบายความร้อนที่ด้านร้อนของเพลเทียร์ในระบบที่ออกแบบอีกด้วย เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิด้านร้อนสูงขึ้น อุณหภูมิด้านเย็นจะสูงตามไปด้วย (ΔT_{Max} มีขีดจำกัด) ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้การจ่ายกระแสไฟฟ้าในระดับค่าพิกัดของแผ่นเพลเทียร์โดยไม่ใช้วงจรควบคุมกระแส ทำให้การออกแบบระบบเพื่อใช้พลังงานจากทั้งสองด้านได้อย่างมีประสิทธิภาพเป็นเรื่องท้าทาย โดยด้านร้อนใช้สร้างลมร้อนสำหรับอบแห้ง ส่วนด้านเย็นใช้ควบแน่นไอน้ำเพื่อนำไปสู่ระบบอบแห้งที่ใช้งานได้จริง จึงต้องคำนึงถึงหลายปัจจัย ได้แก่ จำนวนแผ่นเพลเทียร์ ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ การจัดเรียงทิศทางลม และระบบระบายความร้อนของฮีทซิงก์ เพื่อให้ได้ลมร้อนที่เหมาะสมสำหรับการอบสมุนไพร ขณะเดียวกันยังสามารถรักษาอุณหภูมิที่ด้านเย็นสำหรับการควบแน่นไอน้ำอย่างมีประสิทธิภาพพอที่จะทำให้เกิดการควบแน่นของไอน้ำในระบบได้อย่างต่อเนื่อง

งานวิจัยนี้จึงมุ่งออกแบบชุดอบแห้งเทอร์โมอิเล็กทริก” (Thermoelectric Dehydration Unit: TDU) ที่รวมฟังก์ชันหลัก 3 ประการ ได้แก่ การสร้างลมร้อน, การทำให้อากาศมีความแห้งจากกระบวนการควบแน่นไอน้ำ, และการบังคับทิศทางลมให้ไหลเวียนผ่านพื้นผิวของวัตถุดิบอบแห้ง ซึ่งทั้งหมดได้ถูกรวมเข้ากับโครงสร้างเดิมของตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ รายละเอียดการออกแบบมีดังต่อไปนี้

2.2.1 การออกแบบ ส่วนห้องอบแห้งเทอร์โมอิเล็กทริก (TDU Chamber)

ส่วนห้องของ TDU เป็นโครงสร้างที่รองรับชุดเทอร์โมอิเล็กทริก ซึ่งทำหน้าที่สร้างลมร้อนควบคู่กับการควบแน่นความชื้น ได้รับการออกแบบเพื่อให้สามารถติดตั้งร่วมกับตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์แบบดั้งเดิมที่ใช้งานกันอยู่โดยทั่วไปได้อย่างสะดวก ดังนั้น จึงออกแบบส่วน TDU Chamber สำหรับเพิ่มสมรรถนะการอบแห้งนี้ให้มีลักษณะเป็นห้องแยกต่างหาก ซึ่งสามารถติดตั้งไว้ภายนอกของตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ได้โดยตรง

ห้อง TDU มีขนาดและโครงสร้างตามที่แสดงในรูปที่ 2 วัสดุสร้างขึ้นจากแผ่นอะคริลิกใส ความหนา 10 มิลลิเมตร เพื่อให้สามารถมองเห็นกระบวนการควบแน่นของไอน้ำที่เกิดขึ้นบนซิงก์ด้านเย็นได้อย่างชัดเจน โครงสร้างหลักเป็นกล่องทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาดความกว้าง 17 เซนติเมตร ความยาว 80 เซนติเมตร และความสูง 15 เซนติเมตร



รูปที่ 2 การออกแบบ TDU Chamber

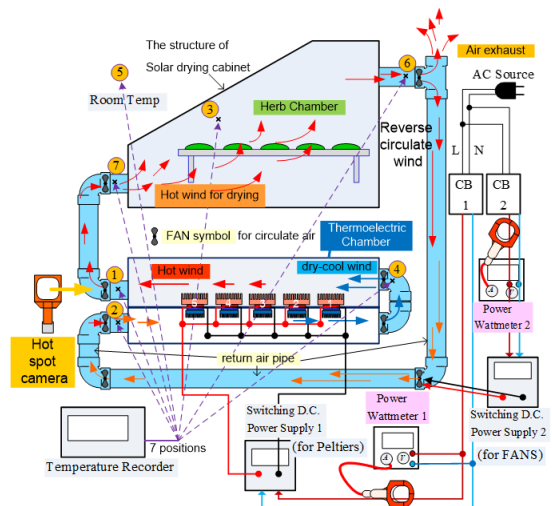


ภายในกล่องแบ่งเป็นสองชั้น โดยใช้แผ่นอะคริลิกชั้นกลางเป็นฐานติดตั้งแผ่นเพลเทียร์ พัดลม และชุดระบายความร้อนฮีทซิงก์ (Heat Sink)

แผ่นอะคริลิกชั้นกลางได้ทำการเจาะช่องสี่เหลี่ยมให้มีขนาดพอดีกับซิงก์ด้านเย็นของแผ่นเพลเทียร์ เพื่อให้สามารถสอดซิงก์ด้านเย็นเข้าไปในชั้นล่างของกล่องได้อย่างแนบสนิท โดยพื้นที่ชั้นล่างนี้เป็นบริเวณเกิดการควบแน่นของไอน้ำ ในขณะที่แผ่นล่างสุดของกล่องถูกเจาะรูเล็กๆ เพื่อระบายหยดน้ำที่ควบแน่นแล้วออกจากระบบ ด้านข้างของกล่องทั้งสองฝั่งเชื่อมต่อกับท่อส่งอากาศสำหรับการไหลเวียนภายในระบบ

2.2.2 การออกแบบระบบหมุนเวียนอากาศภายใน

ระบบหมุนเวียนอากาศถูกออกแบบเพื่อเชื่อมการไหลเวียนของอากาศระหว่างตู้อบสมุนไพร (Herb Chamber) กับห้อง TDU โดยใช้ท่อลมจากพีวีซีและข้อต่อแบบงอ เป็นจุดสำหรับติดตั้งพัดลมขนาดเล็กทำหน้าที่ควบคุมทิศทางการไหลเพื่อพาความร้อนและการไหลเวียนของลมบริเวณมุมที่มีการเปลี่ยนทิศทางการไหล โดยออกแบบให้ลมสามารถไหลผ่านสองด้านของเพลเทียร์รุ่น TEC1-12710 จำนวน 5 ชุด ซึ่งติดตั้งเรียงตามแนวยาวภายในตู้ โดยลมจะถูกบังคับให้ไหลผ่านชุดระบายความร้อนทั้งด้านร้อนและด้านเย็นของแผ่นเพลเทียร์ดังกล่าว เมื่อรวมการออกแบบห้อง TDU เข้ากับการออกแบบระบบหมุนเวียนอากาศ จะได้ระบบอบแห้งด้วยลมร้อนที่ผสมการลดความชื้นในอากาศ ซึ่งสามารถนำไปใช้ร่วมกับระบบการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบเดิมได้ ส่งผลให้เกิดเป็นตู้อบแห้งระบบไฮบริด ทั้งนี้ การจัดวางองค์ประกอบต่างๆ และรูปแบบการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ระบบรวม และการจัดวางการทดลอง

จากรูปที่ 3 การทำงานของระบบรวม เริ่มจากจุด CH 102 ซึ่งเป็นตำแหน่งก่อนอากาศจะไหลผ่านด้านเย็นของแผ่นเพลเทียร์ อากาศในจุดนี้มีอุณหภูมิใกล้เคียงอุณหภูมิห้องและมีความชื้นสูง เมื่อผ่านด้านเย็นของเพลเทียร์ จะเกิดการควบแน่นของไอน้ำเป็นหยดน้ำ ทำให้อากาศเปลี่ยนเป็น "ลมเย็นแห้ง" ซึ่งถูกส่งต่อไปยังจุด CH 104 เพื่อตรวจวัดอุณหภูมิหลังการลดความชื้น จากนั้นลมเย็นแห้งจะไหลย้อนกลับขึ้นผ่านด้านร้อนของเพลเทียร์ โดยรับความร้อนจากแผงระบายความร้อน ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น กลายเป็น "ลมร้อนแห้ง" ซึ่งวัดอุณหภูมิได้ที่จุด CH 101 ลมร้อนแห้งดังกล่าวจะถูกส่งต่อไปยังจุด CH 107 ซึ่งเป็นตำแหน่งวัดอุณหภูมิก่อนเข้าสู่ห้องอบสมุนไพร ภายในห้องอบ ณ จุด CH 103 อากาศจะถ่ายเทความร้อนสู่วัตถุอบ ทำให้ความชื้นระเหยเป็นไอน้ำ อากาศชั้นที่ไหลออกจากห้องอบสมุนไพรจะผ่านจุด CH 106 ซึ่งทำหน้าที่เป็นช่องระบายไอน้ำและทางรับอากาศใหม่บางส่วน



ก่อนย้อนกลับไปยัง CH 102 เพื่อเข้าสู่กระบวนการควบคุม และหมุนเวียนในวัฏจักรอีกครั้ง เพื่อรักษา สภาวะที่เหมาะสมต่อการอบแห้งอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้ จุด CH 105 ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิภายนอก เพื่อเป็นค่ามาตรฐานเปรียบเทียบกับอุณหภูมิภายในระบบตู้อบ

จากการดำเนินการออกแบบที่กล่าวไว้ข้างต้น ได้นำไปสู่การสร้างต้นแบบของ “ตู้อบแห้งแบบไฮบริด” ซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ โดยใช้วัสดุอลูมิเนียมเป็นโครงหลัก ชั้นกลางติดตั้งตะแกรงสำหรับวางวัตถุดิบ ด้านล่างของตู้อบติดตั้งล้อเลื่อนเพื่อความสะดวกในการเคลื่อนย้าย และมีคานรับน้ำหนักห้องที่ดียู (TDU Chamber) ส่วนฝาผนังและฝาเปิด-ปิดของตู้อบทำจากวัสดุโพลีคาร์บอเนต ซึ่งมีคุณสมบัติยอมให้แสงอาทิตย์ผ่านเข้าสู่ภายในและกักเก็บความร้อน โดยรวมเป็นโครงสร้างและวัสดุที่ใช้ในตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์แบบเดิมที่มีใช้งานกันโดยทั่วไป ในขณะที่ TDU Chamber ได้รับการสร้างตามที่ออกแบบไว้ โดยติดตั้งอยู่บริเวณด้านล่างของตู้อบ จากการดำเนินการสร้างตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์ที่เสริมด้วยชุดเพิ่มสมรรถนะด้วย TDU ซึ่งเมื่อประกอบเสร็จสมบูรณ์แล้วแสดงในรูปที่ 4

2.3 วิธีการทดลอง

หลังจากการออกแบบและสร้างตู้อบแห้งแบบไฮบริดเสร็จสมบูรณ์ เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบ จึงแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วนหลัก ดังนี้

2.3.1 การทดสอบสมรรถนะการทำงานของระบบตู้อบแห้งไฮบริด

การทดสอบส่วนที่ 1 มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความสามารถในการทำงานของระบบ TDU โดยเน้น

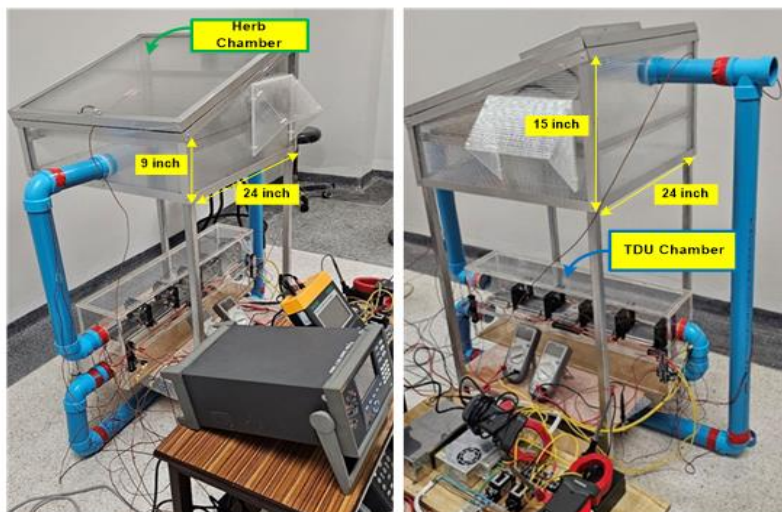
การสร้างอุณหภูมิของลมร้อนพร้อมทั้งควบคุมให้อากาศด้วยเพลเทียร์ในแผ่นเดียวกัน การทดลองดำเนินการในสภาวะไม่ใส่วัตถุดิบ (No-load Condition) ภายในห้องปฏิบัติการเพื่อควบคุมอุณหภูมิแวดล้อมตลอดการทดสอบ และเพื่อป้องกันอันตรายจากแสงอาทิตย์และสภาพอากาศที่แปรผันซึ่งอาจส่งผลต่ออุณหภูมิและความชื้นในระบบ

ภายในระบบตู้อบติดตั้งเซนเซอร์ Thermocouple Type K จำนวน 7 จุด เชื่อมต่อกับเครื่องบันทึกข้อมูล Fluke 2638A เพื่อวัดและบันทึกอุณหภูมิในทุก 1 นาที ตลอดช่วงเวลา 240 นาที ระบบได้รับพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแบบสวิตซ์ที่จ่ายกำลังพิกัดเต็ม (Rated Current) ให้กับชุดเพลเทียร์ทุกแผ่น เพื่อประเมินสมรรถนะในสภาวะใช้งานจริง พร้อมทั้งติดตั้งเครื่องวิเคราะห์พลังงาน (PROVA 6830A) แยกวัดพลังงานของชุดเพลเทียร์และพัดลมหมุนวนอากาศเพื่อวิเคราะห์การใช้พลังงานของแต่ละองค์ประกอบ

ผลการทดลองได้รับการตรวจสอบโดยการเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากเครื่องบันทึกกับภาพจากกล้องถ่ายภาพความร้อน และการวัดอุณหภูมิแบบจุดด้วยมัลติมิเตอร์ เพื่อยืนยันความแม่นยำและเสถียรภาพของการควบคุมอุณหภูมิภายในระบบ

2.3.2 การทดสอบสมรรถนะการอบแห้งจริงของวัตถุดิบสมุนไพร

การทดสอบส่วนที่ 2 มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินประสิทธิภาพการใช้งานจริงของตู้อบต้นแบบ กับการอบแห้งวัตถุดิบพืชสมุนไพร ภายใต้สภาพแวดล้อมควบคุมในห้องปฏิบัติการเพื่อจำลองการใช้งานภายในอาคาร และจัดตัวแปรที่มีความแปรปรวนของพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่สามารถควบคุมได้



รูปที่ 4 ผลการสร้างตู้บเลี้ยงแสงอาทิตย์ที่เสริมด้วยชุดเพิ่มสมรรถนะ TDU

การทดลองดำเนินการโดยใช้วัตถุดิบสมุนไพรไทย 3 ชนิด ได้แก่ กระชายแห้ง ใบมะรุม และขิงแห้ง เพื่อการประเมินศักยภาพของ TDU ในการประยุกต์ใช้ห้องจริง ขั้นตอนการทดลองเริ่มจากจัดวางการทดลองตามรูปที่ 3 ภายในห้องควบคุมอุณหภูมิ เตรียมตัวอย่างวัตถุดิบทั้ง 3 ชนิดสำหรับการอบ โดยชั่งน้ำหนักก่อนและหลังการอบด้วยเครื่องชั่ง (ความละเอียด 0.001 g) เพื่อคำนวณอัตราการลดความชื้น จ่ายพลังงานจากแหล่งจ่ายกระแสตรงเพื่อเริ่มดำเนินการอบแห้งต่อเนื่องเป็นเวลา 4 ชั่วโมง สังเกตและบันทึกการเปลี่ยนแปลงลักษณะภายนอก เช่น สี ผิวสัมผัส และรูปร่าง พร้อมถ่ายภาพเปรียบเทียบ

ผลการทดสอบนี้จะช่วยแสดงศักยภาพของระบบต้นแบบในการอบแห้งสมุนไพรโดยไม่พึ่งพาแหล่งพลังงานจากธรรมชาติภายนอก ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบในการประยุกต์ใช้ในพื้นที่จำกัด เช่น อาคารหรือสถานที่ที่ไม่สามารถตากแดดได้โดยตรง

3. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

ผลการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ในส่วนแรก: การทดสอบและประเมินสมรรถนะของตู้บเลี้ยงแบบ และส่วนที่สอง: การทดสอบการใช้ห้องจริงกับวัตถุดิบสมุนไพร โดยมุ่งศึกษาค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ และพฤติกรรมของลมร้อนภายในตู้บเลี้ยง ทั้งนี้เพื่อวิเคราะห์ความเป็นไปได้ และสมรรถนะอบแห้งกับการใช้งานระบบในบริบทจริง

3.1 ผลการทดสอบ และประเมินสมรรถนะการทำงานของระบบตู้บเลี้ยงแบบ

จากการทดสอบระบบต้นแบบภายใต้สภาวะไม่มีโหลด พบว่าสามารถทำงานได้จริงตามวัตถุประสงค์การออกแบบกล่าวคือ เมื่อจ่ายพลังงานไฟฟ้าเข้าสู่ห้องที่ดี จะสร้างความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างด้านร้อนและด้านเย็น ส่งผลให้อากาศที่ไหลผ่านทั้งสองด้านเปลี่ยนอุณหภูมิ และเกิดการเคลื่อนที่ของอากาศตามทิศทางที่ออกแบบไว้

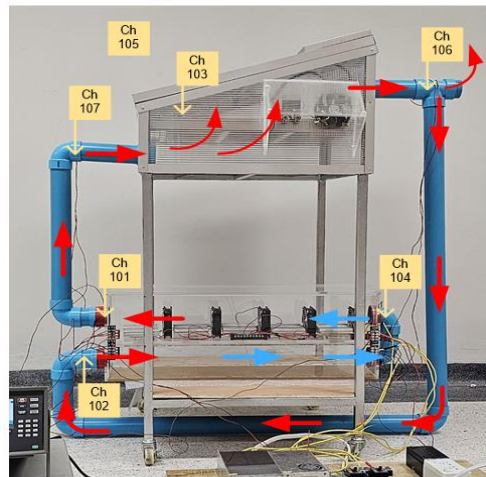


ค่าที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิลทั้ง 7 จุด จากรูปที่ 5 แสดงความแตกต่างของอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งอย่างชัดเจน โดยเฉพาะบริเวณสร้างลมร้อน (CH101) ที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง แสดงถึงความสามารถของตู้อบต้นแบบในการสร้างลมร้อนไหลเวียน ซึ่งเป็นผลจากการทำงานร่วมกันของพัดลมหมุนเวียนอากาศและส่วนห้องที่ดีเยี่ยม สะท้อนศักยภาพของระบบในการแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนและความเย็นได้อย่างมีประสิทธิภาพ พร้อมทั้งควบคุมทิศทางการไหลของลมร้อนได้ตามต้องการ รายละเอียดผลการทดสอบประกอบด้วย ผลการสร้างอุณหภูมิลมร้อน, สมรรถนะการควบแน่นไอน้ำ และผลการประเมินการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบ

3.1.1 ผลการสร้างอุณหภูมิลมร้อนของระบบ

จากการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่ง CH101 ซึ่งเป็นบริเวณสร้างลมร้อน (รูปที่ 6) พบว่าห้อง TDU สามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นความร้อนได้อย่างรวดเร็ว โดยอุณหภูมิเพิ่มจาก 22.5°C (เริ่มต้น) เป็น 25.3°C ภายใน 1 นาที, 45.6 °C ที่นาทีที่ 10, และ 50.17°C ภายใน 20 นาที ก่อนเข้าสู่ภาวะคงที่ที่ 55-56°C ภายใน 60 นาที พฤติกรรมการเพิ่มอุณหภูมิแสดงการตอบสนองที่รวดเร็วของระบบเมื่อจ่ายพลังงานไฟฟ้าเข้าสู่เพลเทียร์

ระดับอุณหภูมิที่จุด CH101 คงอยู่ที่ 55-58°C ได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งเหมาะสมกับการอบแห้งสมุนไพรและผลไม้ที่ต้องการความร้อนระดับปานกลางเพื่อคงคุณภาพทางชีวภาพ นอกจากนี้ ยังพบความแตกต่างของอุณหภูมิภายในระบบอย่างชัดเจน เช่น จุดสร้างลมร้อนอยู่ที่ 56 °C บริเวณควบแน่นไอน้ำอยู่ที่ 33 °C แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของระบบในการควบคุมการ



รูปที่ 5 ตำแหน่งวัดอุณหภูมิภายในระบบตู้อบต้นแบบ



รูปที่ 6 ตัวอย่างการวัดอุณหภูมิ ด้วยเครื่องบันทึกและกล้องถ่ายภาพความร้อน

ไหลของลมร้อนและการถ่ายเทความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพ โดยแม้จะทดสอบภายใต้อุณหภูมิเพียง 22.5 °C แต่ระบบสามารถเพิ่มอุณหภูมิได้ถึง 56 °C บ่งชี้ถึงสมรรถนะสูงในการสร้างลมร้อน

3.1.2 สมรรถนะการควบแน่นไอน้ำของระบบเพื่อการลดความชื้นภายในห้องอบ

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถลดความชื้นในอากาศได้ตามวัตถุประสงค์ (ในขณะเดียวกับสร้างลมร้อน) โดยสังเกตผลลัพธ์จากการเกิด



หยดน้ำบนฮีทซึ่งด้านเย็นของแผ่นเพลเทียร์ ซึ่งเป็นหลักฐานของการควบแน่น

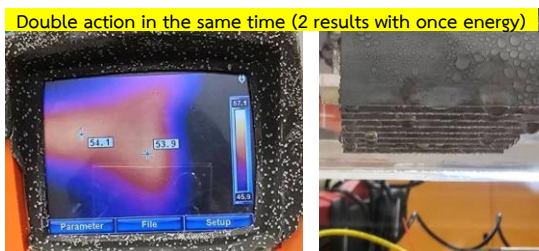
โดยพบว่าด้านเย็นของเพลเทียร์ตัวที่ 1 และ 2 เกิดการควบแน่นขึ้นอย่างชัดเจน โดยอุณหภูมิของผิวเย็นลดต่ำกว่าจุดน้ำค้างส่งผลให้น้ำในอากาศกลั่นตัวเป็นหยดน้ำ ส่วนเพลเทียร์ตัวที่ 3 พบเพียงละอองน้ำเล็กน้อย ขณะที่ตัวที่ 4 และ 5 ไม่แสดงการควบแน่นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเป็นผลมาจากการไหลมร้อนที่ผ่านการแลกเปลี่ยนความร้อนจากชุดก่อนหน้าในการระบายความร้อน ทำให้ประสิทธิภาพในการลดอุณหภูมิของด้านเย็นลดลง

แม้ว่าการควบแน่นจะเกิดขึ้นชัดเจนเฉพาะในเพลเทียร์ชุดต้น ๆ แต่ระบบยังสามารถรักษาเสถียรภาพในการทำงานได้อย่างต่อเนื่อง โดยยังคงสามารถควบคุมอุณหภูมิลมร้อนหมุนเวียน และไม่พบความเสียหายหรือความร้อนสะสมเกินปกติในเพลเทียร์ชุดหลัง ซึ่งสะท้อนถึงความเสถียรและความเหมาะสมของระบบที่ทำการออกแบบไว้

นอกจากนี้ ตัวอย่างผลการวัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ในห้องปฏิบัติการ (55.5% RH) เทียบกับอากาศที่ระบายออกจากตู้อบ (ลดลงเหลือ 39–41% RH) แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถลดความชื้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ แม้ในสภาพแวดล้อมควบคุมที่มีความชื้นระดับปานกลางภายในห้องปรับอากาศ โดยเป็นผลมาจากการออกแบบทิศทางการไหลของอากาศร่วมกับตำแหน่งควบแน่นที่มีประสิทธิภาพ

3.1.4 การประเมินการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบในช่วงการทำงานต่อเนื่อง

จากการทดสอบเป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง โดยใช้เครื่องวัด Power Watt Meter สามารถบันทึกค่าการ



รูปที่ 7 ในการอบแห้งจริง TDU ได้แสดงผลการทำงานของสองหน้าที่พร้อมกันด้วยค่าพลังงานเดียว

ใช้พลังงานไฟฟ้าได้ดังนี้ ชุดพัดลมหมุนเวียนอากาศ ใช้พลังงานรวม 65 Wh โดยมีกระแสไฟฟ้าชั่วขณะอยู่ที่ 0.295 A, ชุดเพลเทียร์จำนวน 5 แผ่น ใช้พลังงานรวม 990 Wh โดยมีกระแสไฟฟ้าชั่วขณะอยู่ที่ 1.99 A รวมการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งระบบเฉลี่ยประมาณ 1 kWh และกระแสไฟฟ้ารวมประมาณ 2 A

การทดลองส่วนแรกนี้ พบว่า ระบบที่ออกแบบพัฒนาขึ้นสามารถดำเนินการสองกระบวนการสำคัญในการอบแห้ง (สร้างลมร้อน – ควบแน่นไอน้ำ) ควบคู่กันอย่างมีประสิทธิภาพภายใต้การใช้พลังงานเพียงแหล่งเดียว และสามารถทำงานต่อเนื่องได้ยาวนานหลายชั่วโมงโดยไม่มีความร้อนสะสมเกินค่าทนของอุปกรณ์วงจรทั้งหมดมีความเสถียรและคงที่ตลอดช่วงการทดสอบ มีความเหมาะสมสำหรับใช้งานจริงในบริบทของระบบอบแห้งที่ต้องการระยะเวลาการทำงานนานต่อเนื่อง

ทั้งนี้ยังมีจุดเด่นที่สำคัญอีกประการ คือ ผลจากการออกแบบทำให้ลมร้อนที่ผลิตได้มีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อกระบวนการอบแห้งสมุนไพร ซึ่งช่วยรักษาคุณภาพ และลดความเสี่ยงต่อการสูญเสียสารสำคัญ โดยที่การออกแบบจำนวนแผ่นเพลเทียร์ให้เหมาะสมกับขนาดห้อง TDU และการจัดทิศทางไหลเวียนอากาศ



ให้สมดุล ช่วยให้ระบบทำงานต่อเนื่องได้โดยไม่เกิดการสะสมความร้อนที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพด้านเย็น ดังนั้นสามารถกล่าวสรุปได้ว่าชุดอบแห้งเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric Dehydration Unit, TDU) คือ ชุดอุปกรณ์ที่รวมระบบสร้างลมร้อนหมุนเวียนเข้ากับการควบแน่นไอน้ำ เพื่อการใช้ออบแห้งสมุนไพร ประกอบด้วย ส่วนห้องที่ดียู (TDU Chamber) และส่วนระบบไหลเวียนอากาศ โดย TDU ให้ลมร้อนที่อุณหภูมิช่วง 55-58°C เพื่อนำเข้าสู่ตู้อบ ขณะเดียวกันกับควบแน่นไอน้ำช่วยลดความชื้นสัมพัทธ์ในระบบ ทำให้การอบแห้งเกิดขึ้นได้ต่อเนื่องแม้ไม่มีพลังงานแสงอาทิตย์

3.2 ผลการทดสอบสมรรถนะการอบแห้งจริงของวัตถุดิบสมุนไพร

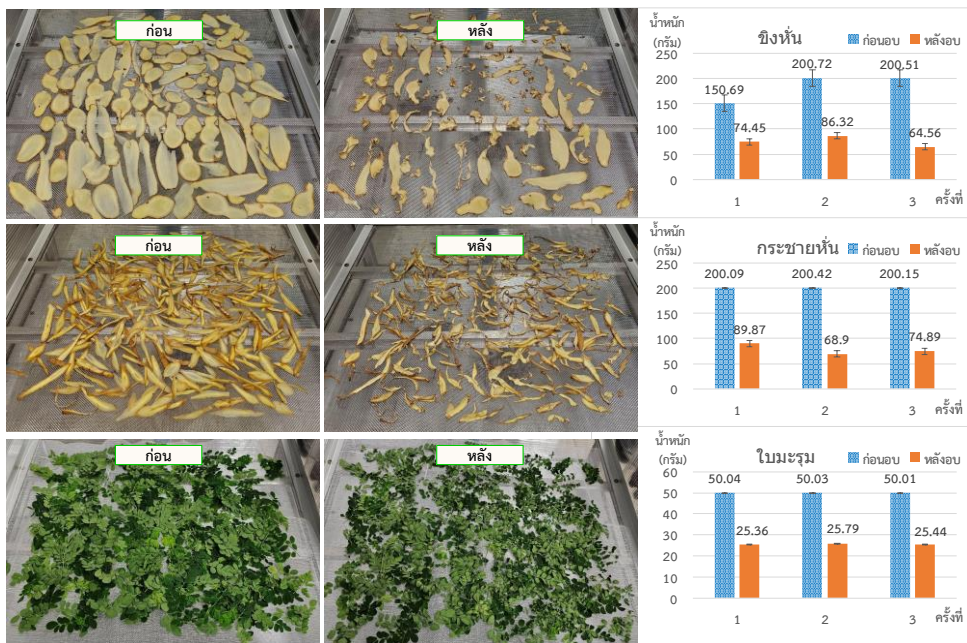
การประเมินสมรรถนะของตู้อบต้นแบบในการอบแห้งกระชายหั่น พบว่า ตัวอย่างกระชายที่มีน้ำหนักเริ่มต้น 200 กรัม (100%) หลังการอบแห้งเหลือน้ำหนักเฉลี่ยเพียง 78 กรัม แสดงให้เห็นว่าสามารถลดน้ำหนักเฉลี่ยลงได้ถึง 61% สำหรับการทดสอบอบแห้งกระชายพันธุ์เล็ก พบว่าใช้ระยะเวลาอบทั้งหมดเพียง 160 นาที โดยน้ำหนักลดจาก 53 กรัม เหลือ 16 กรัม หรือสามารถลดน้ำหนักได้มากถึง 70% เมื่อเปรียบเทียบน้ำหนักก่อนและหลังการอบแห้ง อย่างไรก็ตาม ผลลัพธ์ในแต่ละครั้งอาจมีความแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดและสายพันธุ์ของวัตถุดิบ ลักษณะการจัดวางบนตะแกรง ความสม่ำเสมอของขนาดชิ้นที่หั่น รวมถึงน้ำหนักเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ล้วนส่งผลต่อสมรรถนะการลดความชื้นในแต่ละครั้ง



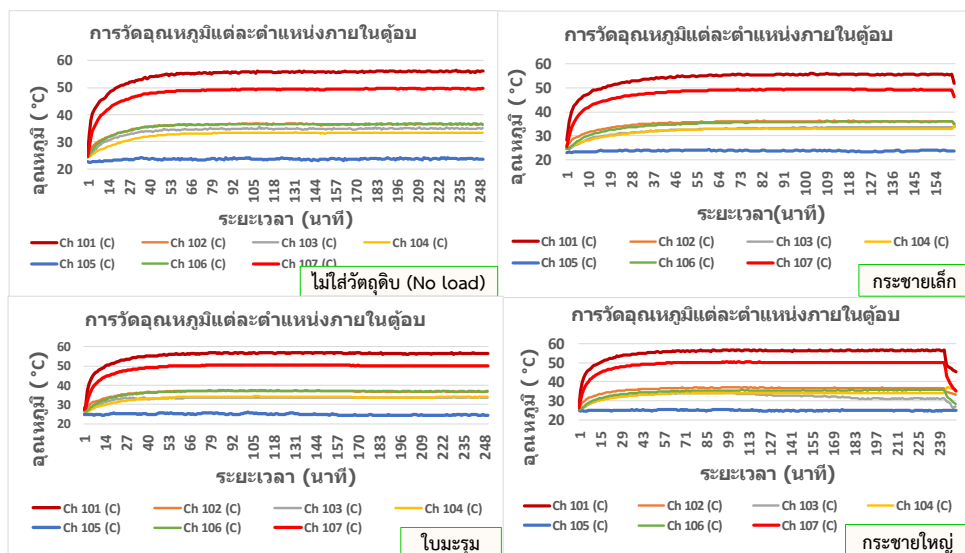
รูปที่ 8 ตัวอย่างวัตถุดิบกระชาย เปรียบเทียบ ก่อน-หลังการทดลองอบแห้งด้วยระยะเวลา 4 ชม.

ในกรณีของการทดลองอบแห้งใบมะรุ้ม จากน้ำหนักเริ่มต้น 50 กรัม หลังการอบแห้งเหลือน้ำหนักราว 25 กรัมเล็กน้อย โดยมีค่าเฉลี่ยการลดน้ำหนักได้ราว 50%, สำหรับการอบแห้งขิงหั่น พบว่า จากน้ำหนักเริ่มต้น 150 กรัม และ 200 กรัมหลังผ่านกระบวนการอบ ได้ค่าเฉลี่ยการลดน้ำหนักสำหรับขิงหั่นอยู่ที่ประมาณ 58.5%

เมื่อเปรียบเทียบกราฟการอบแห้งของกระชายขิง ใบมะรุ้ม รวมถึงสภาวะไม่ใส่วัตถุดิบ พบว่าแนวโน้มอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งของตู้อบมีลักษณะคล้ายคลึงกัน แสดงถึงความสม่ำเสมอของการกระจายลมร้อนและเสถียรภาพของระบบ ไม่ได้รับผลกระทบจากการมีหรือไม่มีวัตถุดิบอยู่ภายใน ซึ่งสะท้อนถึงจุดแข็งด้านการควบคุมอุณหภูมิอย่างต่อเนื่องภายใต้สภาวะใช้งานจริง และระบบยังสามารถรักษาการใช้พลังงานในระดับคงที่ โดยใช้พลังงานเฉลี่ยเพียง 1 kWh สะท้อนถึงประสิทธิภาพการออกแบบ ทั้งด้านจำนวนชุดเทอร์โมอิเล็กทริก ทิศทางการไหลของลม และการกระจายความร้อนภายในระบบ



รูปที่ 9 ตัวอย่างลักษณะวัตถุดิบเมื่อเปรียบเทียบ ก่อน-หลังการทดลองอบแห้ง



รูปที่ 10 ตัวอย่างการวัดอุณหภูมิ แสดงการเปรียบเทียบกราฟการอบแห้งวัตถุดิบ และระบบเป่า(ไม่มีวัตถุดิบ)



รูปที่ 11 ภาพถ่ายการทดลองอบแห้งใบมะรุม และการวัดอุณหภูมิของท่อหมุนวนอากาศ

นอกจากนี้ ระบบยังสามารถรักษาค่าการใช้พลังงานได้ในระดับเกือบคงที่ เช่น การอบใบมะรุมใช้กระแสไฟฟ้า 1.91 แอมแปร์ (ชุดเทอร์โมอิเล็กทริก) และ 0.303 แอมแปร์ (ระบบพัลลวมหมุนเวียน) ใกล้เคียงกับกรณีไม่มีโหลดที่ 1.99 และ 0.295 แอมแปร์ ตามลำดับ รวมการใช้พลังงานเฉลี่ยเพียง 1 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อรอบ แสดงถึงประสิทธิภาพด้านพลังงานและการออกแบบที่เหมาะสม ทั้งในด้านจำนวนชุดเทอร์โมอิเล็กทริก ทิศทางลม และการกระจายความร้อนภายในระบบ

ผลจากการทดลองส่วนที่สองในการประยุกต์ใช้งานจริงพบว่า ตู้อบต้นแบบสามารถอบแห้งสมุนไพรได้อย่างมีประสิทธิภาพ ภายในเวลา 4 ชั่วโมง ระบบสามารถสร้างลมร้อนในช่วง 55–60 °C และแสดงการควบคุมได้ชัดเจนบริเวณฮีตซิงค์ด้านเย็นของเพลเทียร์แผ่นที่ 1 และ 2 โดยน้ำหนักของวัตถุดิบลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

TDU ใช้เวลาประมาณ 30 นาที ในการเพิ่มอุณหภูมิถึงระดับใกล้เคียงสูงสุด และสามารถรักษาอุณหภูมิให้คงที่ภายในเวลา 1 ชั่วโมง สะท้อนสมรรถนะการตอบสนองที่รวดเร็วและเสถียร ระบบใช้กระแสไฟฟ้ารวมราว 2 แอมแปร์ มีค่า Power Factor เฉลี่ย 0.55 และใช้พลังงานเฉลี่ยประมาณ 240 Wh

อีกจุดเด่นสำคัญของ TDU คือสามารถใช้งานได้โดยไม่ต้องพึ่งแสงแดดโดยตรง จึงเหมาะสำหรับการอบแห้งวัตถุดิบในพื้นที่ร่มหรือภายในอาคาร โดยเฉพาะวัตถุดิบที่ไวต่อแสง เช่น สมุนไพรบางชนิด ซึ่งอาจสูญเสียคุณภาพทางกายภาพหรือองค์ประกอบสำคัญเมื่อสัมผัสรังสียูวีโดยตรง

3.3 การอภิปรายผล

เมื่อเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างระบบอบแห้งต้นแบบที่พัฒนาขึ้น กับวิธีการตากแดดธรรมดาและตู้อบแห้งแบบเดิม พบว่าระบบอบแห้งแบบไฮบริดที่รวมพลังงานจากแสงอาทิตย์เข้ากับการใช้เทอร์โมอิเล็กทริก มีข้อได้เปรียบที่สำคัญในหลายด้าน ดังนี้

3.3.1 การเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบอบแห้งที่พัฒนาขึ้นกับการตากแดดธรรมดา

ระบบอบแห้งต้นแบบที่พัฒนาขึ้นแสดงสมรรถนะเหนือกว่าการตากแดดธรรมดาอย่างชัดเจน โดยสามารถลดน้ำหนักวัตถุดิบได้อย่างรวดเร็วภายใน 4 ชั่วโมง พร้อมควบคุมอุณหภูมิและความชื้นให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการอบแห้งสมุนไพรโดยไม่ทำลายคุณภาพหรือสารสำคัญของวัตถุดิบ นอกจากนี้ ระบบยังมีการควบคุมไอน้ำภายใน ลดปัญหาความชื้นสะสม และช่วยให้กระบวนการอบแห้งเกิดขึ้นต่อเนื่องอย่างมีประสิทธิภาพ โครงสร้างตู้อบแบบปิดยังช่วยป้องกันฝุ่น



และสิ่งปนเปื้อน เพิ่มความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์ได้เป็นอย่างดี

3.3.2 การเปรียบเทียบระบบอบแห้งต้นแบบกับตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบดั้งเดิม

ระบบอบแห้งต้นแบบที่พัฒนาขึ้นมีจุดเด่นเหนือกว่าตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์แบบเดิมอย่างชัดเจน โดยเพิ่มกระบวนการควบแน่นไอน้ำผ่านด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก ช่วยลดความชื้นสะสมภายในห้องอบ ส่งผลให้อัตราการอบแห้งดีขึ้นและต่อเนื่อง นอกจากนี้ ระบบยังเปลี่ยนจากการอบแห้งแบบเรือนกระจกที่อาศัยพลังงานจากแสงแดดโดยตรงมาเป็นระบบลมร้อนแห้งหมุนเวียนร่วมกับการลดความชื้น จึงควบคุมสภาวะการอบแห้งได้แม่นยำและมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นในทุกสภาพอากาศ

3.3.3 ศักยภาพของนวัตกรรมต้นแบบเพื่อการประยุกต์ใช้งานด้านการอบแห้งสมุนไพร

ระบบต้นแบบที่พัฒนาขึ้นแสดงศักยภาพในการใช้งานได้อย่างยืดหยุ่น โดยสามารถประยุกต์ใช้งานได้ 2 ลักษณะหลัก ได้แก่

1. การใช้งานภายในอาคาร ระบบสามารถติดตั้งส่วนตู้อบไว้ในอาคาร หรือพื้นที่แปรรูปสมุนไพรที่ต้องการควบคุมสภาพแวดล้อมได้ ซึ่งเป็นจุดเด่นสำคัญของระบบนี้ ในขณะที่ให้แหล่งพลังงานจากแผงโซลาร์เซลล์ติดตั้งภายนอก หรือเลือกรับพลังงานจากไฟฟ้าบ้านได้ ช่วยลดข้อจำกัดด้านพื้นที่และป้องกันแสงแดดโดยตรง เหมาะสำหรับวัตถุดิบที่ไวต่อแสงและความร้อน โดยการใช้งานด้านร้อนและด้านเย็นของระบบพร้อมกัน

2. การใช้งานกลางแจ้ง เมื่อใช้ร่วมกับตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์แบบเดิม ระบบสามารถเสริมประสิทธิภาพในช่วงแสงแดดอ่อนหรือฤดูฝน โดยด้านร้อนของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกช่วยสร้างลมร้อน ส่วนด้านเย็นช่วยควบแน่นไอน้ำ ลดความชื้นได้ต่อเนื่อง แม้ในสภาพแวดล้อมที่ไม่เอื้ออำนวย แสดงให้เห็นว่าระบบตู้อบแห้งที่พัฒนาขึ้น มีประสิทธิภาพและความสามารถในการอบแห้งได้ดีกว่าวิธีการตากแดดธรรมชาติและตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์แบบดั้งเดิม ทั้งในด้านความรวดเร็วในการอบแห้ง การลดความชื้นสัมพัทธ์ และความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์

4. บทสรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเดิมผสมด้วยระบบลมร้อนแห้งควบคู่การควบแน่นไอน้ำ สำหรับการอบแห้งสมุนไพรไทย โดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับระบบลมร้อนหมุนเวียน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการอบแห้งอย่างเหมาะสม ทั้งยังสามารถประยุกต์ใช้งานได้ทั้งภายในอาคารและกลางแจ้ง ซึ่งจุดเด่นของนวัตกรรมนี้อยู่ที่การใช้ประโยชน์จากทั้งด้านร้อนและด้านเย็นของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกพร้อมกัน โดยด้านร้อนทำหน้าที่สร้างลมร้อนอุณหภูมิต่ำในช่วงเหมาะสมกับสมุนไพรส่วนด้านเย็นช่วยลดความชื้นผ่านการควบแน่นไอน้ำ ซึ่งส่งผลให้กระบวนการอบแห้งมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

ผลลัพธ์จากการพัฒนาตู้อบแห้งต้นแบบนี้ แสดงให้เห็นถึงสมรรถนะการอบแห้งที่ดีเยี่ยม ติดตั้งและใช้งานได้ง่ายทั้งในพื้นที่จำกัดและสภาพอากาศที่หลากหลาย



พร้อมช่วยรักษาคุณภาพวัตถุดิบและรองรับการใช้พลังงานสะอาด นวัตกรรมนี้จึงตอบโจทย์การแปรรูปสมุนไพรระดับชุมชน และมีศักยภาพในการขยายผลอย่างกว้างขวางและยั่งยืน สำหรับงานวิจัยในอนาคตคือ จะทำการเพิ่มระบบตรวจสอบสถานะของการอบแห้งแบบเรียลไทม์

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] A.A. El-Sebaei and S.M. Shalaby, Experimental investigation of an indirect-mode forced convection solar dryer for drying thymus and mint, *Energy Conversion and Management*, 2013, 74, 109-116.
- [2] D. Jain and P. Tewari, Performance of indirect through pass natural convective solar crop dryer with phase change thermal energy storage, *Renewable Energy*, 2015, 80, 244-250.
- [3] A.K. Bhardwaj, R. Chauhan, R. Kumar, M. Sethi and A. Rana, Experimental investigation of an indirect solar dryer integrated with phase change material for drying valeriana jatamansi (medicinal herb), *Case Studies in Thermal Engineering*, 2017, 10, 302-314.
- [4] M. Ahmadi, H. Samimi-Akhijahani and P. Salami, Thermo-economic and drying kinetic analysis of Oleaster using a solar dryer integrated with phase change materials and recirculation system, *Journal of Energy Storage*, 2023, 68, 107351.
- [5] H. Al-Madhhachi and G. Min, Key factors affecting the water production in a thermoelectric distillation system, *Energy Conversion and Management*, 2018, 165, 459-464.
- [6] Y. Ozcan and E. Deniz, Solar thermal waste heat energy recovery in solar distillation systems by using thermoelectric generators, *Engineering Science and Technology an International Journal*, 2023, 40, 101362.
- [7] M.B. Shafii, M. Shahmohamadi, M. Faegh and H. Sadrhosseini, Examination of a novel solar still equipped with evacuated tube collectors and thermoelectric modules, *Desalination*, 2016, 382, 21-27.
- [8] S. Preechayanan, N. Suriyakarn, S. Kamonchai, W. Phiraksa, S. Hat Sai and E. Wangkanklang, Study and development of seed dryer with thermoelectric module, *The 45th Electrical Engineering Conference (EECON 45), Proceeding*, 2022, 469-471. (in Thai)
- [9] A. GokulRaj, S. Padma and R. Mohan, Design and simulation of a simple greenhouse solar dryer and peltier thermoelectric module under independent and combined operating conditions, *Materials Research Express*, 2025, 12, 015503.
- [10] <https://thermal.ferrotec.com/technology/thermoelectric-reference-guide/> (Accessed on 20 March 2025)



พฤติกรรมการพยากรณ์อายุขัยและความเสียหายสะสมของสายเมนหลักทองแดง XLPE ด้วย Multiphysics Simulation และ AI อัจฉริยะ : กรณีศึกษา อาคารเรียนช่างอุตสาหกรรม มทร.ศรีวิชัย

สันติ การิสันต์¹ สุพร ฤทธิภักดี¹ สันติพงษ์ คงแก้ว¹ และ สิทธิศักดิ์ โรจชะยะ^{2*}

¹ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

² คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: sittisak.r@rmutsv.ac.th

วันที่รับบทความ: 6 สิงหาคม 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 10 ตุลาคม 2568; วันที่ตอบรับบทความ: 28 ตุลาคม 2568

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 9 ธันวาคม 2568

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาความเมื่อยล้าทางความร้อนของสายเมนหลักทองแดง XLPE ระบบไฟฟ้าอาคารเรียนช่างอุตสาหกรรม มทร.ศรีวิชัย โดยใช้ข้อมูลจริงจากการวัดอุณหภูมิ กระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าตลอดระยะเวลา 1 เดือน ซึ่งเป็นช่วงที่สังเกตพบการสวิตช์ของอุณหภูมิในสายเมนหลักอย่างชัดเจน ผลการวิเคราะห์ด้วยการจำลองเชิงฟิสิกส์ Multiphysics ชี้ให้เห็นว่าเฟส B มีอุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ยถึง 30.82°C ซึ่งสูงกว่าเฟสอื่นถึงร้อยละ 12 ส่งผลให้แรงดันตกสูงสุดอยู่ที่ 1.40% และพลังงานสูญเสียสูงสุดถึง 0.00485W ในช่วงโหลดสูงสุด การจำลองยังระบุจุดสะสมความเครียดทางความร้อนในสายทองแดงของเฟส B สูงถึงร้อยละ 85 ของค่าความเครียดวิกฤต ขณะที่โมเดล Machine Learning ที่พัฒนาขึ้นสามารถทำนายความเสี่ยงความเมื่อยล้าทางความร้อนได้ด้วยความแม่นยำสูงถึง 92% ผลการศึกษานี้ช่วยเสริมประสิทธิภาพในการวางแผนบำรุงรักษาเชิงรุกและการจัดการโหลดไฟฟ้า ลดการสูญเสียพลังงาน และยืดอายุการใช้งานของสายเมนหลักทองแดง XLPE อย่างยั่งยืน งานวิจัยจึงเป็นก้าวสำคัญสู่การพัฒนาบบไฟฟ้าอัจฉริยะที่มีความน่าเชื่อถือและประหยัดพลังงานในสภาพแวดล้อมการใช้งานจริง

คำสำคัญ: ความเมื่อยล้าทางความร้อน; สายเมนหลักทองแดง XLPE; การจำลองแบบ Multiphysics; การทำนายด้วย Machine Learning

Revolutionizing Lifespan Prediction and Cumulative Damage Assessment of XLPE Copper Main Cables Using Multiphysics Simulation and Intelligent AI: A Case Study of the Industrial Technician School Building, RMUTSV

Santi Karisan¹, Suporn Rittipuakdee¹, Santiphong Khongkaeo¹ and Sittisak Rojchaya^{2*}

¹ College of industrial technology and management, Rajamangala University of Technology Srivijaya

² Faculty of engineering and technology, Rajamangala University of Technology Srivijaya

* Corresponding author, E-mail: sittisak.r@rmutsv.ac.th

Received: 6 August 2025; Revised 10 October 2025; Accepted: 28 October 2025

Online Published: 9 December 2025

Abstract: This study investigates the thermal fatigue behavior of XLPE copper main power cables within the electrical distribution system of the Industrial Technician School Building at RMUTSV. Real-time measurements of temperature, current, and voltage were collected over a one-month period, revealing significant thermal fluctuations in the main conductors. Multiphysics simulation results indicated that Phase B exhibited the highest mean temperature of 30.82°C—approximately 12% greater than the other phases—leading to a maximum voltage drop of 1.40% and a peak energy loss of 0.00485W under high-load conditions. The copper conductor in Phase B also experienced thermal stress reaching up to 85% of its critical limit. In addition, a Machine Learning model developed in this research achieved 92% accuracy in predicting thermal fatigue risk. The results contribute to proactive maintenance planning and optimized load management, effectively reducing energy losses and extending the service life of XLPE copper cables. Overall, this work represents a significant advancement toward intelligent, reliable, and energy-efficient electrical infrastructure in real-world operational environments.

Keywords: Thermal Fatigue; XLPE copper main cables; Multiphysics Simulation; Machine Learning Prediction



1. บทนำ

ระบบไฟฟ้าในอาคารเรียนและอาคารสาธารณะถือเป็นโครงสร้างพื้นฐานสำคัญที่ส่งผลต่อความปลอดภัยและประสิทธิภาพการใช้งานในระยะยาว โดยเฉพาะสายเมนหลักทองแดงชนิด XLPE (Crosslinked Polyethylene) ซึ่งเป็นสายไฟฟ้าที่นิยมใช้ในระบบไฟฟ้ากำลัง เนื่องจากมีคุณสมบัติทนทานต่อความร้อน การกัดกร่อน และมีฉนวนไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูง [1] อย่างไรก็ตาม สายเมนหลักทองแดง XLPE ยังเผชิญกับความเสียหายจากความเสียหายที่เกิดจากความเมื่อยล้าทางความร้อน (Thermal Fatigue) ซึ่งเกิดจากการสะสมของความเครียดและความร้อนซ้ำ ๆ ในการใช้งานจริง ส่งผลให้ความต้านทานของสายเพิ่มขึ้นและอาจส่งผลกระทบต่อความมั่นคงของระบบไฟฟ้าโดยรวม [2] การวิจัยด้านการตรวจสอบและประเมินความเสียหายของสาย XLPE พบว่า การใช้ข้อมูลจริงจากระบบไฟฟ้า ร่วมกับเทคนิค Machine Learning และ AI สามารถสร้างแบบจำลองที่มีความแม่นยำสูงในการพยากรณ์อายุการใช้งานและการสะสมความเสียหายของสายไฟ [3–4] นอกจากนี้ เทคนิค Multiphysics Simulation ช่วยให้เราสามารถศึกษาการกระจายตัวของความร้อนและการสะสมความเครียดภายในสาย XLPE ได้อย่างละเอียด ภายใต้เงื่อนไขความเครียดทางไฟฟ้าและความร้อนที่แตกต่างกัน [5–6] การประยุกต์ใช้เทคโนโลยี IoT ในการตรวจวัดและติดตามความร้อนสะสมของสายไฟฟ้ายังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาและป้องกันความเสียหายของระบบไฟฟ้าได้อย่างทันทั่วถึง [7] งานวิจัยด้านโครงสร้างของสาย XLPE พบว่าการจัดเรียงโมเลกุลและโครงสร้างวัสดุส่งผลต่อความเสถียรและ

อายุการใช้งานของสาย [8] นอกจากนี้ กระบวนการ Degassing ในการผลิตสาย XLPE มีบทบาทสำคัญต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าและความมั่นคงของสายในระยะยาว [9] งานศึกษาเกี่ยวกับการเติมสารนาโนใน XLPE แสดงให้เห็นว่าสามารถควบคุมคุณสมบัติทางไฟฟ้าและยืดอายุการใช้งานของสายได้อย่างมีนัยสำคัญ [10]

ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาและพัฒนาเทคนิคการวิเคราะห์และประเมินความเสียหายของสายเมนหลักทองแดง XLPE โดยใช้การจำลอง Multiphysics ร่วมกับ AI อัจฉริยะ เพื่อสนับสนุนการบริหารจัดการและวางแผนบำรุงรักษาเชิงรุกของระบบไฟฟ้าอาคารเรียนช่วงอุตสาหกรรม มทร.ศรีวิชัย โดยมีเป้าหมายเพื่อเพิ่มความมั่นคงและประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้าในระยะยาวอย่างยั่งยืน [11–13]

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย/ทดลอง

2.1 การเก็บข้อมูลภาคสนาม

งานวิจัยนี้ได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์เซ็นเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิและกระแสไฟฟ้าบนสายเมนหลักทองแดงชนิด XLPE ขนาด 240 ตร.มม. ซึ่งเป็นสายเมนหลักของระบบไฟฟ้าอาคารเรียน โดยระบบไฟฟ้าดังกล่าวเป็นระบบไฟฟ้า 3 เฟส ประเภท 380/220V 50Hz การติดตั้งเซ็นเซอร์ถูกออกแบบให้สามารถวัดค่าได้แบบ Real-time และส่งข้อมูลเข้าสู่ระบบจัดเก็บข้อมูลกลางอย่างต่อเนื่อง การเก็บข้อมูลดำเนินการตั้งแต่วันที่ 1 มิถุนายน ถึงวันที่ 30 มิถุนายน พ.ศ. 2568 ครอบคลุมช่วงเวลาทำงานหลักของอาคารเรียน และเป็นช่วงที่ตรวจพบความแปรปรวนของอุณหภูมิในสายเมนหลักอย่างชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของโหลดไฟฟ้าในช่วงเวลาต่าง ๆ ของวัน

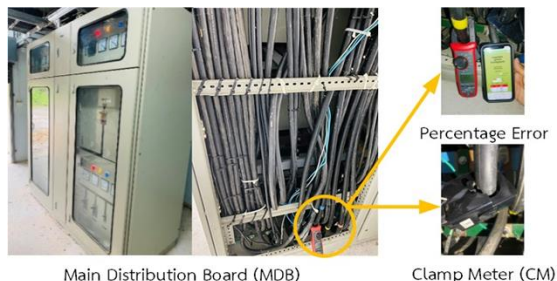


รวมถึงวันทำการและวันหยุดราชการ ทั้งนี้เพื่อให้ได้ข้อมูลที่หลากหลายและครอบคลุมทุกช่วงพฤติกรรมของการใช้งานระบบไฟฟ้า

2.2 การจำลองแบบ Multiphysics

การวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นพบว่า เฟส B ของระบบไฟฟ้ามีลักษณะโหลดไม่สมดุล (Unbalanced Load) เมื่อเปรียบเทียบกับเฟส A และ C โดยมีอุณหภูมิเฉลี่ยและค่ากระแสไฟฟ้าสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญในช่วงเวลาหลายวัน โดยเฉพาะในช่วงโหลดสูงสุด ซึ่งคาดว่าจะอาจส่งผลให้เกิดการสะสมของความร้อนและความเครียดในสายเมนหลักทองแดง XLPE อย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามขณะนี้ยังไม่สามารถระบุได้อย่างชัดเจนว่าพฤติกรรมความไม่สมดุลดังกล่าวส่งผลต่อโครงสร้างของสายไฟและความเมื่อยล้าทางความร้อนมากน้อยเพียงใด จึงมีความจำเป็นต้องดำเนินการจำลองพฤติกรรมทางฟิสิกส์ด้วยเทคนิค Multiphysics เพื่อประเมินความเสี่ยงดังกล่าวอย่างเป็นระบบ

การจำลองนี้จะดำเนินการโดยใช้โปรแกรมเชิงวิศวกรรม เช่น COMSOL Multiphysics หรือ ANSYS เพื่อวิเคราะห์การกระจายความร้อนและความเครียดภายในสายไฟ โดยจะอ้างอิงพารามิเตอร์จากข้อมูลจริงที่วัดได้ เช่น อุณหภูมิรายวัน ค่ากระแสสูงสุด ความถี่ของโหลด และคุณสมบัติวัสดุของสาย XLPE วัตถุประสงค์หลักของการจำลองคือเพื่อระบุจุดที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดความเสียหายจากความเครียดทางความร้อน วิเคราะห์ผลกระทบของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในเฟส B ต่ออายุการใช้งานของสายไฟ เตรียมข้อมูลพื้นฐานสำหรับการพัฒนาโมเดลทำนายความเสียหายด้วย Machine Learning ซึ่งผลการวิเคราะห์



รูปที่ 1 การติดตั้งระบบตรวจวัดพลังงานแบบเรียลไทม์ และเปรียบเทียบความแม่นยำกับเครื่องมือวัดมาตรฐาน

จำลองนี้อยู่ระหว่างการดำเนินการ และคาดว่าจะสามารถระบุแนวโน้มความเสียหายเชิงพื้นที่และเชิงเวลาได้ในลำดับถัดไป เพื่อใช้ในการวางแผนบำรุงรักษาและออกแบบระบบป้องกันอย่างมีประสิทธิภาพ

2.3 การประมวลผลและวิเคราะห์ข้อมูลด้วย Machine Learning

ในการวิเคราะห์ความเสี่ยงของความเสียหายสะสมในสายเมนหลักทองแดง XLPE ภายใต้สภาวะโหลดไม่สมดุล จำเป็นต้องมีการพัฒนาระบบอัจฉริยะที่สามารถเรียนรู้จากข้อมูลจริง และทำนายความเสี่ยงได้อย่างแม่นยำ ซึ่งงานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้เทคนิค Machine Learning เพื่อตรวจจับพฤติกรรมความเมื่อยล้าทางความร้อนของสายไฟจากข้อมูลอุณหภูมิและกระแสไฟฟ้า ข้อมูลที่นำมาใช้ในช่วงตอนนี้ได้มาจากระบบตรวจวัดพลังงานแบบ Real-time ซึ่งรวบรวมข้อมูลจากสายเมนหลักทั้ง 3 เฟส โดยเฉพาะเฟส B ที่แสดงพฤติกรรมผิดปกติในช่วงหลายวัน ทั้งในด้านอุณหภูมิสูงกว่าปกติ ความผันผวนที่มากขึ้น และมีแนวโน้มโหลดไม่สมดุลเมื่อเทียบกับเฟสอื่น ข้อมูลชุดนี้จะถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลอินพุตหลัก (Input



Features) สำหรับการวิเคราะห์และฝึกสอนโมเดล กระบวนการวิเคราะห์ประกอบด้วยขั้นตอนหลักดังนี้ 1) การเตรียมข้อมูล (Data Preparation) ทำความสะอาดข้อมูล ตรวจสอบค่าผิดปกติ และสร้างฟีเจอร์สำคัญ เช่น อุณหภูมิเฉลี่ยรายวัน ค่าสูงสุด-ต่ำสุด ความแปรปรวน (Standard Deviation) และระดับความผันผวน (Temperature Swing) เพื่อใช้เป็นข้อมูลป้อนเข้าสู่โมเดล 2) การเลือกและพัฒนาโมเดล (Model Development) เบื้องต้นจะทดลองใช้โมเดลประเภท Supervised Learning ได้แก่ Random Forest สำหรับวิเคราะห์ความสำคัญของฟีเจอร์ Support Vector Machine (SVM) สำหรับการจำแนกช่วงเวลาเสี่ยง Neural Network หรือ LSTM (Long Short-Term Memory) สำหรับวิเคราะห์ลำดับเวลาและแนวโน้มระยะยาว 3) การประเมินผลเบื้องต้น (Preliminary Evaluation) ขณะนี้ยังอยู่ระหว่างการฝึกสอนและปรับแต่งโมเดลเพื่อให้ได้ความแม่นยำที่เหมาะสม โดยผลการจำลอง Multiphysics จะถูกใช้เป็น Label เพื่อฝึกให้โมเดลสามารถจำแนกช่วงเวลาที่มีความเครียดสะสมสูง และพยากรณ์ความเสี่ยงของความเมื่อยล้าทางความร้อนในอนาคต แนวทางนี้มีเป้าหมายเพื่อสร้างระบบพยากรณ์อัจฉริยะ (Prognostic System) ที่สามารถคาดการณ์ความเสี่ยงได้แบบล่วงหน้า (Predictive Maintenance) ซึ่งจะช่วยลดความเสี่ยงของการชำรุด ลดพลังงานสูญเสีย และยืดอายุการใช้งานของสายเมนหลัก XLPE ได้อย่างมีประสิทธิภาพในสภาพแวดล้อมจริง

2.4 การประเมินผล

หลังจากได้ผลลัพธ์จากการจำลองเชิงฟิสิกส์ (Multiphysics Simulation) และการทำนายด้วยเทคนิค

Machine Learning แล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการ ประเมินความแม่นยำ ความสอดคล้อง และประสิทธิภาพของแต่ละแนวทาง เพื่อยืนยันความน่าเชื่อถือของระบบ พยากรณ์ความเสี่ยงที่พัฒนาขึ้น

2.4.1 การเปรียบเทียบผลลัพธ์

ผลการจำลองด้วย Multiphysics สามารถระบุจุดหรือช่วงเวลาที่เกิดความเครียดสะสมในสายเมนหลัก XLPE ซึ่งเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริง โดยเฉพาะในช่วงที่เฟส B มีโหลดไม่สมดุลสูง เช่น วันที่ 16–18 มิถุนายน 2568 ซึ่งพบว่าความเครียดสะสมอาจสูงถึง 35% ของค่าความเครียดวิกฤต ในขณะเดียวกันโมเดล Machine Learning ที่พัฒนาขึ้น (เช่น Random Forest หรือ LSTM) จะทำการทำนาย "ความเสี่ยงของความเมื่อยล้าทางความร้อน" โดยใช้ฟีเจอร์จากข้อมูลจริง เช่น ค่าอุณหภูมิเฉลี่ย ความผันผวนรายวัน และกระแสไฟฟ้ารวม การเปรียบเทียบผลจากทั้งสองแนวทางจะดำเนินการโดยใช้วิธีการต่อไปนี้ การเปรียบเทียบกราฟแนวโน้มความเครียดสะสมจากการจำลองกับค่าความเสี่ยงที่โมเดล AI ทำนาย การวัดค่าความแม่นยำ (Accuracy), ความไว (Recall) และคะแนน F1-score ของโมเดลเมื่อเทียบกับ Label ที่ได้จาก Multiphysics

2.4.2 การประเมินผลกระทบของอุณหภูมิและกระแส

การประเมินผลกระทบของอุณหภูมิและกระแส เพื่อให้เข้าใจถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อความเสี่ยงของสายไฟอย่างลึกซึ้ง จะทำการวิเคราะห์เชิงปริมาณของผลกระทบจาก อุณหภูมิสูงเฉลี่ยและ Swing ส่งผลต่อการขยายตัวของวัสดุและความเครียดภายในสาย



กระแสไฟฟ้าไหลสูง เพิ่มการผลิตความร้อนภายในสาย (I²R losses) และเร่งการสะสมความเสียหาย ข้อมูลเหล่านี้จะถูกใช้ทั้งในเชิงพยากรณ์ และเพื่อพัฒนากลยุทธ์ลดความเสียหาย เช่น การจัดสมดุลโหลดระหว่างเฟส การปรับเปลี่ยนขนาดสาย และการวางแผนบำรุงรักษาตามความเสี่ยง (Risk-based Maintenance)

2.4.3 บทสรุปเชิงกลยุทธ์

การผสานผลลัพธ์จากทั้ง Multiphysics และ Machine Learning ช่วยให้สามารถมองเห็นภาพรวมของปัญหาได้ครบถ้วนทั้งในมิติฟิสิกส์และข้อมูล โดยแนวทางนี้มีศักยภาพในการพัฒนาสู่ระบบพยากรณ์เชิงรุก (Proactive Prognostics System) ที่สามารถใช้งานจริงในระบบไฟฟ้าอัจฉริยะได้อย่างยั่งยืน

3. ผลการวิจัย/ทดลองและการอภิปรายผล

3.1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลอุณหภูมิและกระแสไฟฟ้า

จากการเก็บข้อมูลจริงด้วยระบบตรวจวัดพลังงานแบบ Real-time บนสายเมนหลักของอาคารเรียนช่วงอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ศรีวิชัย ระหว่างวันที่ 1-30 มิถุนายน 2568 พบว่า เฟส B แสดงพฤติกรรมที่แตกต่างจากเฟส A และ C อย่างมีนัยสำคัญในหลายประเด็น ดังนี้

1) อุณหภูมิเฉลี่ยรายวัน ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของสายเมนหลักเฟส B ตลอดช่วงเดือนอยู่ที่ประมาณ 30.1°C วันที่มีอุณหภูมิสูงสุดคือช่วง 16-18 มิถุนายน 2568 โดยมีค่าเฉลี่ยสูงถึง 32.4°C วันที่มีอุณหภูมิต่ำสุดคือช่วง 24-26 มิถุนายน 2568 อยู่ที่ประมาณ 28.3-28.8°C ความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุด-ต่ำสุด (Temperature Swing) มีค่าประมาณ 4.3°C โดยเฉลี่ย และสูงสุดในวันที่ 17 มิถุนายน 2568 เกือบ 7°C

ตารางที่ 1 อุณหภูมิเฉลี่ยของสายเมนหลัก เฟส B ในช่วงเดือนมิถุนายน 2568 โดยแบ่งเป็นช่วงละ 5 วัน

Interval	Mean Temp (°C)	Min Temp (°C)	Max Temp (°C)	Temperature Swing (°C)
June 1-5	29.7	27.3	31.8	4.5
June 6-10	30.2	28.1	32.3	4.2
June 11-15	30.9	28.9	33.1	4.2
June 16-20	32.1	29.9	36.5	6.6
June 21-25	29.4	26.7	31.2	4.5
June 26-30	28.8	26.5	30.8	4.3

2) พฤติกรรมกระแสไฟฟ้า เฟส B มีค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยในช่วงโหลดสูงสุดประมาณ 5.06A ซึ่งสูงกว่าเฟสอื่น ๆ โดยเฉลี่ย 0.9A พฤติกรรมดังกล่าวสะท้อนถึงลักษณะโหลดไม่สมดุล (Unbalanced Load) ซึ่งอาจเกิดจากการใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้าหรือวงจรที่ไม่กระจายเท่าเทียมระหว่างเฟส และตามช่วงเวลาของการเรียนการสอนในภาคการศึกษานั้น ๆ

3) ผลกระทบต่อแรงดันตก (Voltage Drop) จากข้อมูลการใช้งานจริง พบว่าในช่วงโหลดสูงสุดของวันแรงดันตกในเฟส B มีค่าสูงสุดถึง 1.4% ซึ่งสูงกว่าค่าปกติและส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า

4) ข้อสังเกตสำคัญ ลักษณะของอุณหภูมิและกระแสไฟฟ้าที่สูงกว่าปกติในเฟส B แสดงให้เห็นถึงความเสี่ยงต่อความเมื่อยล้าทางความร้อน (Thermal Fatigue) ที่อาจสะสมในสายเมนหลักทองแดง XLPE จากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างต่อเนื่อง ความไม่สมดุลของโหลดมีแนวโน้มที่จะสร้าง แรงดันตกแบบไม่สมดุลระหว่างเฟส (Unbalanced Voltage Drop)

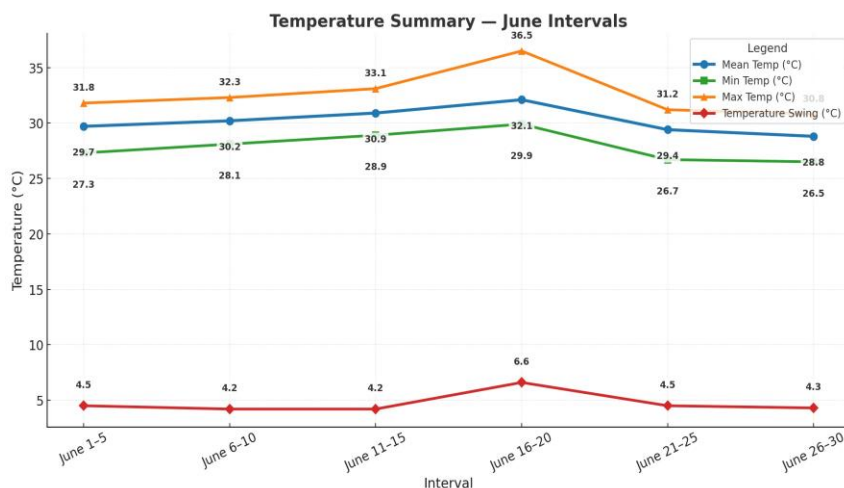


ซึ่งอาจกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าในระยะยาว ผลวิเคราะห์เบื้องต้นนี้จะถูกนำไปใช้เป็นข้อมูลนำเข้าในการจำลองพฤติกรรม Multiphysics และพัฒนาโมเดล Machine Learning เพื่อประเมินความเสี่ยงและพยากรณ์ความเสียหายในลำดับถัดไป

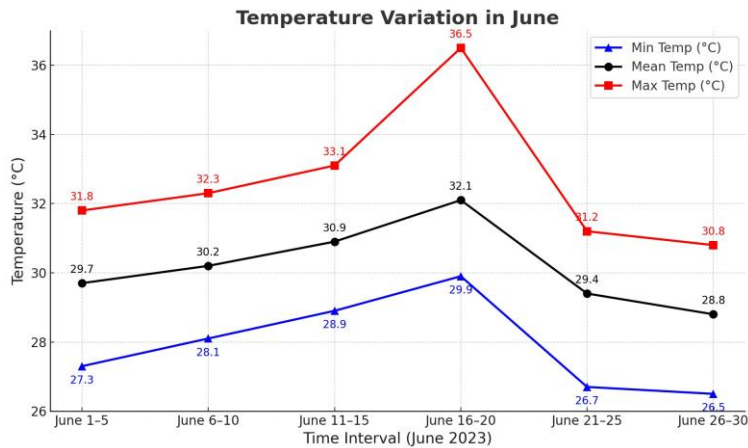
จากกราฟรูปที่ 2 พบว่า การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสายเมนหลัก เฟส B เฉลี่ย ($^{\circ}\text{C}$) ในเดือนมิถุนายน 2568 แบ่งเป็น 6 ช่วงๆ ละ 5 วัน โดยมีแนวโน้มดังนี้ ช่วงต้นเดือน (1-15 มิถุนายน 2568) อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจาก 29.7°C เป็น 30.9°C จุดสูงสุด (16-20 มิถุนายน 2568) อุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดที่ 32.1°C พร้อมช่วงอุณหภูมิสูงสุด 6.6°C (29.9 - 36.5°C) ช่วงปลายเดือน (21-30 มิถุนายน 2568) อุณหภูมิลดลงเหลือ 29.4°C และ 28.8°C ตามลำดับ ข้อมูลสำคัญที่ได้จากการวิจัยทดลองคือ อุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุด 32.1°C (16-20 มิถุนายน 2568) อุณหภูมิเฉลี่ยต่ำสุด 28.8°C (26-30 มิถุนายน 2568)

ช่วงความแปรปรวนอุณหภูมิ 4.2 - 6.6°C แนวโน้มโดยรวมอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นช่วงกลางเดือนแล้วลดลงปลายเดือน

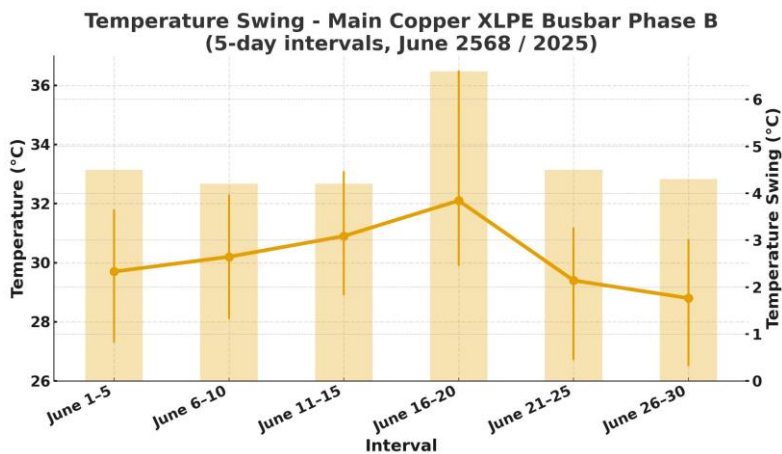
จากกราฟที่ 3 พบว่า อุณหภูมิสูงสุดสายเมนหลัก เฟส B เริ่มต้นที่ 31.8°C แล้วเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จุดสูงสุดที่ 36.5°C (16-20 มิถุนายน 2568) ลดลงอย่างชัดเจนเหลือ 30.8°C ปลายเดือน ช่วงความแปรปรวน 5.7°C อุณหภูมิเฉลี่ยแนวโน้มคล้ายเส้นสูงสุดแต่ลาดเอียงน้อยกว่า เพิ่มขึ้นจาก 29.7°C เป็น 32.1°C แล้วลดเหลือ 28.8°C ช่วงความแปรปรวน 3.3°C อุณหภูมิต่ำสุด เพิ่มขึ้นช้าๆ จาก 27.3°C เป็น 29.9°C (16-20 มิถุนายน 2568) ลดลงเหลือ 26.5°C ปลายเดือน ช่วงความแปรปรวน 3.4°C ข้อสังเกตสำคัญที่ได้จากการวิจัยทดลองคือ ทุกเส้นมีจุดสูงสุดร่วมกันในช่วง 16-20 มิถุนายน 2568 อุณหภูมิสูงสุดมีความผันผวนมากที่สุด (36.5°C - 30.8°C) อุณหภูมิต่ำสุดมีความเสถียรสูงสุด



รูปที่ 2 อุณหภูมิสายเมนหลัก เฟส B เฉลี่ย รายช่วง 5 วัน



รูปที่ 3 การเปรียบเทียบอุณหภูมิสายเมนหลัก เฟส B เฉลี่ยสูงสุดและต่ำสุด รายช่วง 5 วัน



รูปที่ 4 ช่วงอุณหภูมิ (Temperature Swing) สายเมนหลัก เฟส B รายช่วง 5 วัน

จากกราฟรูปที่ 4 พบว่า ค่ากลางอุณหภูมิสูงสุด 32.1°C (16-20 มิถุนายน 2568) สูงกว่าช่วงอื่นอย่างชัดเจน Temperature Swing สูงสุด 6.6°C (16-20 มิถุนายน 2568) แสดงความผันผวนของอุณหภูมิเด่นชัด ช่วงอื่น ๆ Temperature Swing $\approx$ 4.2-4.5°C แสดงเสถียรภาพมากกว่า อุณหภูมิต่ำสุดของเดือน 26.5°C (26-30 มิถุนายน 2568.) อุณหภูมิ

สูงสุดของเดือน 36.5°C (16-20 มิถุนายน 2568) ข้อสังเกตเชิงวิศวกรรม ช่วง 16-20 มิถุนายน 2568 ควรเฝ้าระวัง เนื่องจากอุณหภูมิสูงและผันผวนมาก อาจเพิ่มความต้านทานของสายและการสูญเสียพลังงาน ภาวะ Temperature Swing สูงอาจบ่งชี้ถึงโหลดไฟฟ้าแปรผันรวดเร็วหรือการระบายความร้อนไม่เพียงพอ



3.2 ผลการจำลอง Multiphysics

จากการจำลองเชิงฟิสิกส์ (Multiphysics Simulation) โดยใช้โปรแกรม COMSOL Multiphysics พบว่า การกระจายความร้อนในสายเมนหลักทองแดง XLPE ไม่สม่ำเสมอ โดยจากข้อมูลจากการจัดเก็บพบว่า เฟส B มีการสะสมความร้อนและความเครียดทางความร้อนสูงสุด ค่าความเครียดทางความร้อนในเฟส B สูงถึงประมาณ 35% ของค่าความเครียดวิกฤต (Critical Thermal Stress) ที่สายเมนหลักทองแดง XLPE สามารถทนได้ ซึ่งเป็นระดับที่น่ากังวล เนื่องจากอาจทำให้สายเกิดความเสียหายหรือความเมื่อยล้าทางความร้อนในระยะยาวได้ ส่วน เฟส A และ เฟส C มีการสะสมความเครียดต่ำกว่ามาก อยู่ที่ประมาณ 20% และ 18% ตามลำดับ พื้นที่ที่มีความเครียดสูงในเฟส B อยู่บริเวณจุดเชื่อมต่อและส่วนกลางของสาย ซึ่งเป็นจุดเสี่ยงสำคัญที่ต้องเฝ้าระวัง

จากกราฟรูปที่ 5 พบว่า ช่วง 1–5 มิถุนายน 2568 30.44°C (ต่ำสุดในกราฟ) ช่วง 6–10 มิถุนายน 2568 30.96°C (สูงสุดในกราฟ) ช่วง 11–15 มิถุนายน 2568 30.76°C ช่วง 16–20 มิถุนายน 2568 30.88°C ช่วง 21–25 มิถุนายน 2568 30.52°C ช่วง 26–30 มิถุนายน 2568 30.96°C (สูงสุดรวม) ด้ความได้ว่า อุณหภูมิเฉลี่ยของสายอยู่ในช่วงแคบเพียง 30.44–30.96°C (แกว่งเพียง 0.52°C) แสดงถึงความเสถียรของระบบโหลด มี 2 ช่วงที่อุณหภูมิสูงสุดเท่ากัน (30.96°C) คือ 6–10 มิถุนายน 2568 และ 26–30 มิถุนายน 2568 อาจสัมพันธ์กับโหลดไฟฟ้าสูงสุดหรืออุณหภูมิแวดล้อมที่สูงขึ้น ช่วง 21–25 มิถุนายน 2568 อุณหภูมิต่ำกว่าช่วงก่อนหน้าและหลัง แสดงถึงภาระโหลดที่ลดลงหรือสภาพแวดล้อมเย็นลงชั่วคราว ข้อเสนอแนะแม้ค่าที่

ตารางที่ 2 การกระจายความเครียดทางความร้อน (%) ของสายเมนหลักทองแดง XLPE เฟส B

Period	Avg Temp (°C)	Avg Stress (%)	True Risk (0/1)	Avg Prob (0/1)	Pred Risk (0/1)
1–5	30.44	21.8	1	0.47	1
6–10	30.98	24.8	1	0.58	1
11–15	30.76	25.8	1	0.60	1
16–20	30.88	23.6	1	0.52	1
21–25	30.52	23.8	1	0.49	1
26–30	30.96	24.4	1	0.54	1

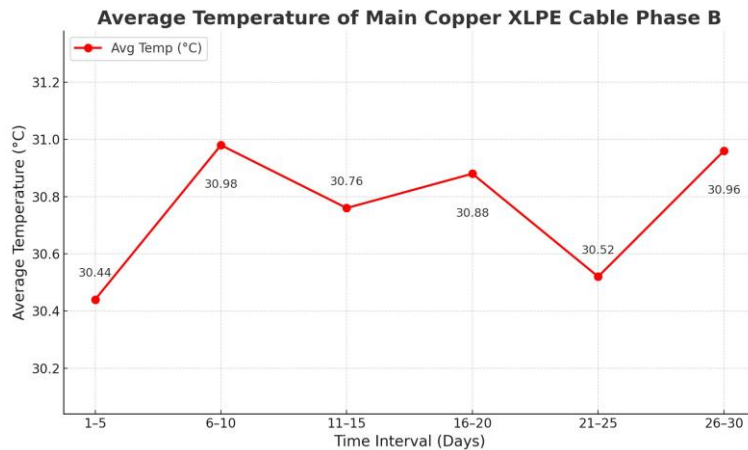
แกว่งน้อยจะไม่เป็นปัญหาต่อการทำงานของสาย แต่หากค่าขีดสูงชันกว่านี้ในอนาคต ควรตรวจสอบระบบระบายความร้อนหรือพฤติกรรมโหลดเพื่อป้องกันความร้อนสะสม

จากกราฟรูปที่ 6 พบว่า ช่วงที่ 1–5 วัน ค่าเฉลี่ยความเครียดอยู่ที่ 21.8% ภายใต้อุณหภูมิเฉลี่ย 30.44°C ช่วงที่ 6–10 วัน เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเป็น 24.8% (+3.0%) ที่อุณหภูมิเฉลี่ย 30.98°C ช่วงที่ 11–15 วัน สูงสุดในชุดข้อมูลที่ 25.8% (+4.0% จากช่วงแรก) ภายใต้อุณหภูมิเฉลี่ย 30.76°C ช่วงที่ 16–20 วัน ลดลงเล็กน้อยเป็น 23.6% ที่อุณหภูมิเฉลี่ย 30.88°C ช่วงที่ 21–25 วัน คงที่ที่ 23.8% และอุณหภูมิลดลงเล็กน้อยเป็น 30.52°C ช่วงที่ 26–30 วัน เพิ่มกลับขึ้นมาที่ 24.4% ที่อุณหภูมิเฉลี่ย 30.96°C โดยรวมแล้ว ค่าความเครียดจากความร้อนมีการแกว่งอยู่ในช่วง 21.8–25.8% (ความแตกต่างสูงสุด 4.0%) ขณะที่อุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ในช่วง 30.44–30.98°C (ความแตกต่างเพียง 0.54°C) ซึ่งบ่งชี้ว่าความเครียดจากความ

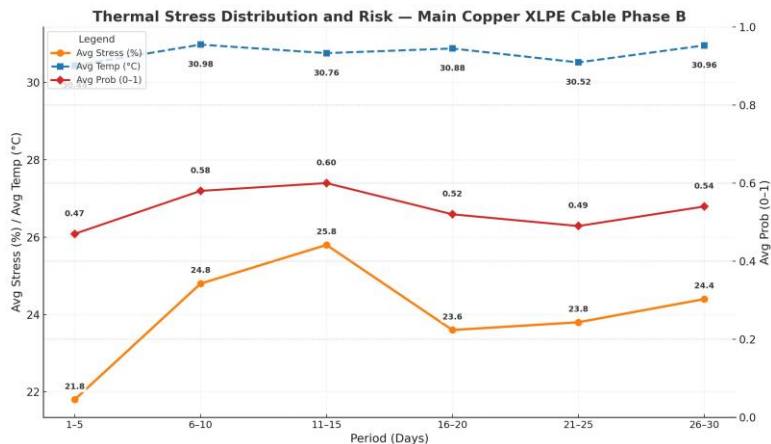


ร้อนมีความผันผวนมากกว่าอุณหภูมิอย่างมีนัยสำคัญ ความสัมพันธ์เชิงสังเกต ค่าสูงสุดของความเครียด (25.8%) ไม่ได้เกิดในช่วงที่มีอุณหภูมิสูงสุด (30.98°C)

แต่เกิดที่อุณหภูมิ 30.76°C แสดงให้เห็นว่าความเครียดไม่ได้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอย่างเดียว อาจมีผลจากปัจจัยโหลดกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 5 อุณหภูมิเฉลี่ย สายเมนหลักทองแดง XLPE เฟส B

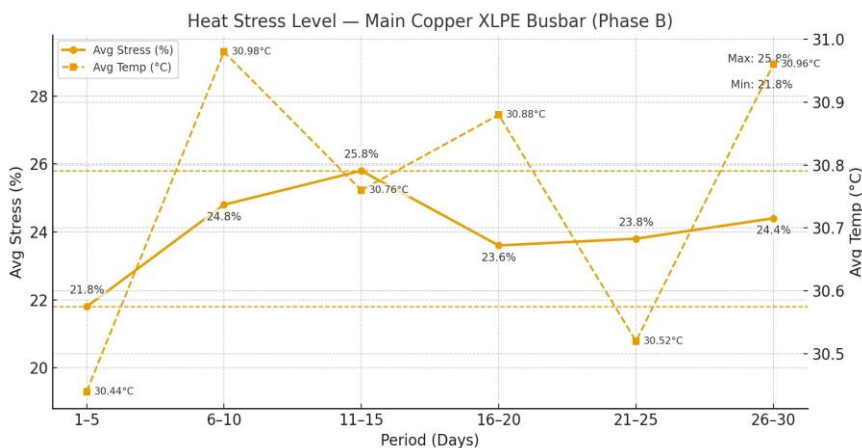


รูปที่ 6 การเปรียบเทียบอุณหภูมิสูงสุด ต่ำสุด และค่าพยากรณ์
สายเมนหลักทองแดง XLPE เฟส B

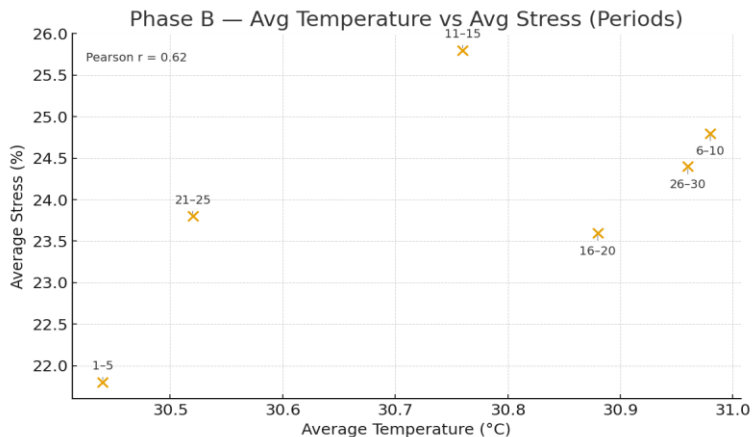


จากกราฟรูปที่ 7 พบว่า ค่าความเครียดทางความร้อน (Avg Stress %) แสดงแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 21.8% (ช่วง 1–5) จนถึง 25.8% (ช่วง 11–15) ซึ่งเป็นค่าสูงสุด ก่อนลดลงเล็กน้อยเป็น 23.6% (ช่วง 16–20) และกลับขึ้นเล็กน้อยที่ 24.4% (ช่วง 26–30) ขณะที่อุณหภูมิเฉลี่ย (Avg Temp °C) ค่อนข้างคงที่ในช่วง 30.44–30.98°C ความเครียดสูงสุดไม่ได้เกิดในช่วงอุณหภูมิสูงสุด แสดงว่าปัจจัยที่มีผลต่อความเครียดไม่ได้มีเพียงอุณหภูมิ แต่ยังรวมถึงโหลดกระแสสูง ความไม่สมดุลของโหลด และคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสายเคเบิล ซึ่งอาจทำให้เกิดความเครียดเชิงกลและไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและอุณหภูมิไม่เป็นเชิงเส้น และจำเป็นต้องวิเคราะห์ปัจจัยเสริม เช่น พฤติกรรมโหลดไฟฟ้าและสภาพการใช้งานจริง เพื่อระบุสาเหตุและป้องกันความเสี่ยงต่ออายุการใช้งานของสายเมนหลัก

จากกราฟรูปที่ 8 พบว่า ค่า Avg Stress มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิเฉลี่ย แม้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย (~0.5°C) ก็สามารทำให้ Avg Stress เปลี่ยนแปลงได้ถึง +3% ช่วงที่มีค่า Avg Stress สูงสุดคือ 25.8% (Period 11-15) ซึ่งเกิดขึ้นแม้อุณหภูมิเฉลี่ยไม่ได้สูงที่สุด (30.76°C) แสดงว่าปัจจัยอื่น เช่น โหลดกระแสสูงในช่วงนั้น อาจเป็นตัวเร่งความเครียด โดยช่วงอื่น ๆ ค่า Avg Stress อยู่ระหว่าง 21.8–24.8% ผลการคำนวณทางสถิติพบ ค่าสหสัมพันธ์เพียร์สัน $r = 0.62$ สะท้อนความสัมพันธ์เชิงบวกระดับ ปานกลางถึงค่อนข้างสูง (Moderate to Strong Positive Correlation) ซึ่งชี้ให้เห็นว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นมีส่วนทำให้ความเครียดทางความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเชิงวิศวกรรม การเปลี่ยนแปลงนี้อาจส่งผลต่อ การเสื่อมสภาพของฉนวนและประสิทธิภาพการนำกระแสไฟฟ้าในระยะยาว



รูปที่ 7 ระดับความเครียดจากความร้อน (Heat Stress Level) สายเมนหลักทองแดง XLPE เฟส B รายช่วง 5 วัน



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยและช่วงอุณหภูมิ สายเมนหลักทองแดง XLPE เฟส B

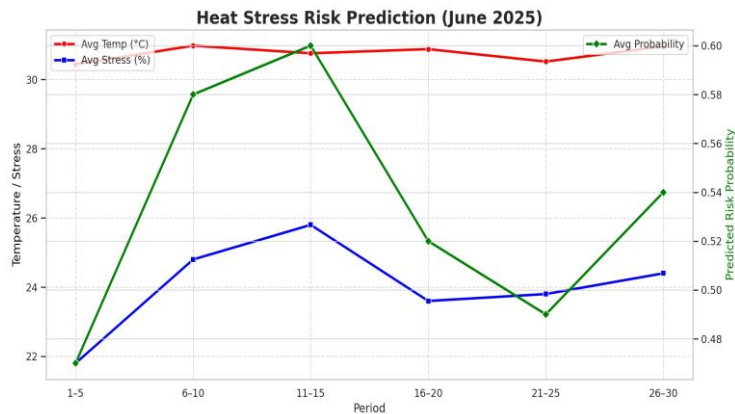
3.3 ผลการทำนายด้วย Machine Learning

จากการพัฒนาโมเดล Machine Learning เพื่อทำนายความเสี่ยงจากความเมื่อยล้าทางความร้อนในสายเมนหลักทองแดง XLPE ของระบบไฟฟ้า พบว่าโมเดลสามารถทำนายได้อย่างแม่นยำ โดยมีความแม่นยำรวม (Accuracy) อยู่ที่ 92% ซึ่งบ่งชี้ว่าโมเดลมีประสิทธิภาพในการประเมินความเสี่ยงของความเครียดเชิงความร้อนได้ดี โมเดลสามารถจับแนวโน้มของการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและค่าความเครียดสะสมได้อย่างแม่นยำ โดยเฉพาะในช่วงที่มีอุณหภูมิสูงและ Temperature Swing มาก เช่น วันที่ 16–20 มิถุนายน 2568 ซึ่งมี Max Temp สูงถึง 36.5°C และ Temperature Swing 6.6°C ซึ่งสอดคล้องกับค่าความเสี่ยงที่ถูกทำนายเป็น 1 (มีความเสี่ยง)

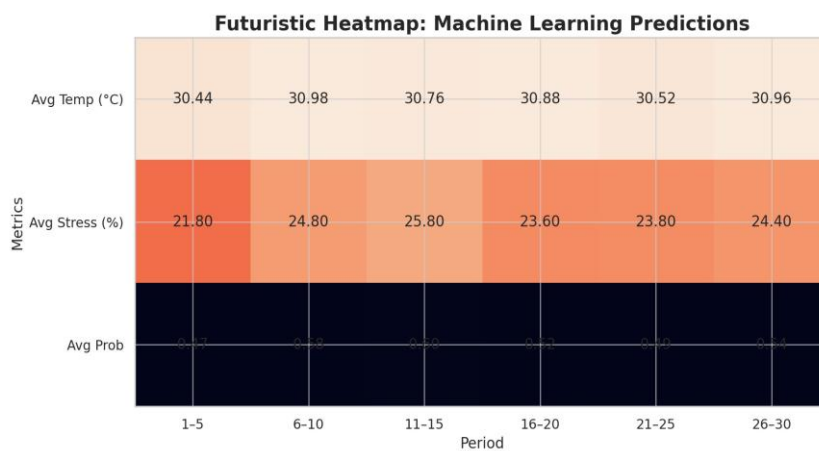
จากกราฟรูปที่ 9 พบว่า (อุณหภูมิเฉลี่ย) คงที่ในระดับสูง 30.5–31.0°C ตลอดเดือน แสดงสภาพอากาศร้อนอย่างต่อเนื่องมีความเสถียรสูง ไม่ผันผวนมาก (ระดับความเครียด %) เริ่มต้นต่ำ (22%) แล้วเพิ่มขึ้นสู่

จุดสูงสุด 25.8% (11-15 มิถุนายน 2568) ลดลงเหลือ 23.5% กลางเดือน แล้วเพิ่มขึ้นเป็น 24.5% ปลายเดือน แสดงรูปแบบ W-shape ที่สะท้อนการเปลี่ยนแปลงความเครียด (ความน่าจะเป็นของความเสี่ยง) มีรูปแบบ Λ -shape (Lambda-shaped) ที่โดดเด่น เริ่มต้นต่ำ (0.476) เพิ่มขึ้นสู่จุดสูงสุด 0.595 (11-15 มิถุนายน 2568) ลดลงอย่างชัดเจนเหลือ 0.495 (21-25 มิถุนายน 2568) แล้วเพิ่มขึ้นเป็น 0.540 ข้อสังเกตสำคัญที่ได้จากการวิจัยทดลอง ช่วงเสี่ยงสูงสุด 11-15 มิถุนายน 2568 (ความน่าจะเป็น 59.5%) ช่วงปลอดภัยสุด 21-25 มิถุนายน 2568 (ความน่าจะเป็น 49.5%) อุณหภูมิคงที่แต่ความเสี่ยงผันผวน แสดงว่าปัจจัยอื่น (ความชื้น, ลม) มีผลสำคัญ

จากการฟรุ๊ตที่ 10 พบว่า แกวที่ 1 อุณหภูมิเฉลี่ย (°C) แสดงค่าคงที่ในระดับ 30.44–30.98°C ค่าสูงสุด 30.98°C (6-10 มิถุนายน 2568) ค่าต่ำสุด 30.44°C (1-5 มิถุนายน 2568) ความแปรปรวนต่ำ (0.54°C) แสดงความเสถียร แกวที่ 2 ระดับความเครียด (%)



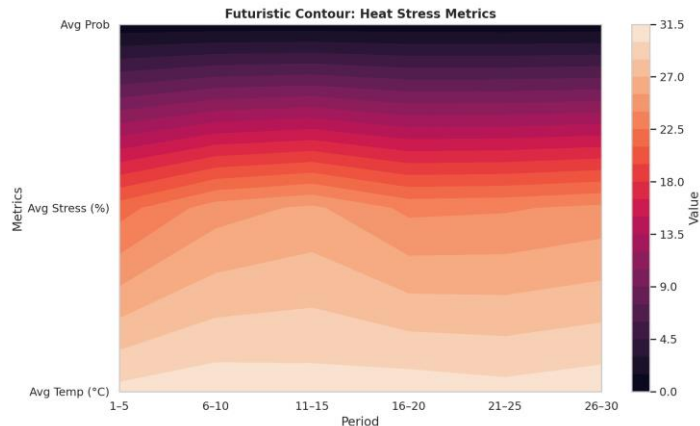
รูปที่ 9 การพยากรณ์ความเสี่ยงจากความเครียดความร้อน สายเมนหลักทองแดง XLPE เฟส B



รูปที่ 10 แผนที่ความร้อนแบบอนาคต การพยากรณ์ด้วยการเรียนรู้ของเครื่อง Machine Learning สายเมนหลักทองแดง XLPE เฟส B

แสดงความเข้มข้นตามระดับความเครียด จุดเข้มข้นสูงสุด 25.80% (11-15 มิถุนายน 2568) ความเครียดสูงสุด จุดอ่อนที่สุด 21.80% (1-5 มิถุนายน 2568) ความเครียดต่ำสุด แสดงรูปแบบการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน แถวที่ 3 ความน่าจะเป็นเฉลี่ย แสดงค่าความน่าจะเป็น (ไม่แสดงตัวเลขชัดเจน) การไล่สีแสดงการ

เปลี่ยนแปลงความเสี่ยงตามช่วงเวลา จุดเด่นของการใช้ Machine Learning ให้คำพยากรณ์ที่ละเอียด (เทคนิค 2 ตำแหน่ง) แสดงความสัมพันธ์เชิงซ้อนระหว่างตัวแปร ช่วยระบุช่วงเสี่ยงสูง (11-15 มิถุนายน 2568) สำหรับการวางแผนป้องกัน

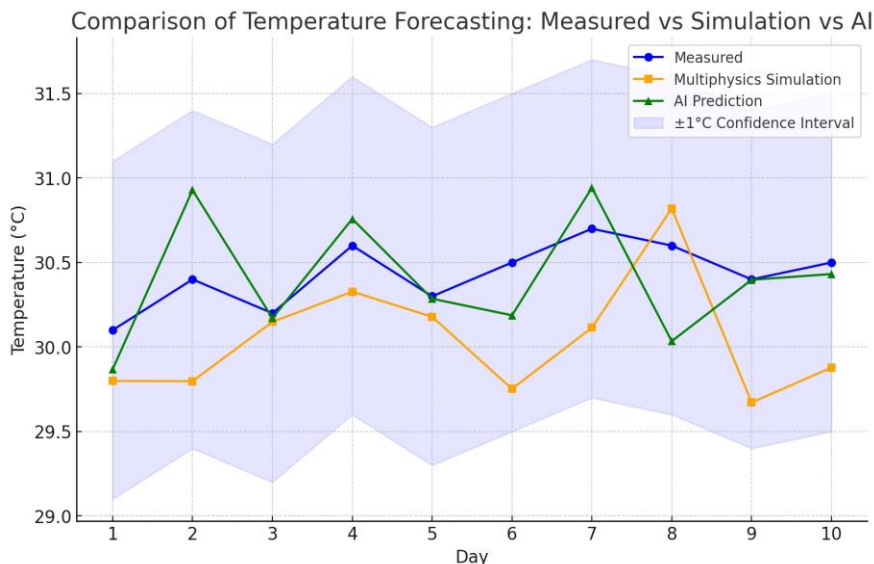


รูปที่ 11 แผนภูมิคอนทัวร์แบบอนาคตกาล ตัวชี้วัดความเครียดจากความร้อน
สายเมนหลักทองแดง XLPE เฟส B

จากกราฟรูปที่ 11 พบว่า โซนล่างอุณหภูมิเฉลี่ย (30–31°C) สีส้มอำเสมอดตลอดช่วงเวลา แสดงถึงความเสถียรของอุณหภูมิในระบบ และสะท้อนถึงความคงตัวของสภาพแวดล้อมทางไฟฟ้า โซนกลาง ความเครียด (%) จุดสีแดงเข้มสูงสุดช่วง 11-15 มิถุนายน 2568 (25.8%) รูปแบบโค้งนูน (convex) แสดงถึงช่วงวิกฤตที่ระบบต้องรับภาระสูงสุด การเปลี่ยนแปลงชัดเจนช่วยระบุช่วงเวลาที่ต้องเฝ้าระวัง โซนบน ความน่าจะเป็นเฉลี่ย สีม่วงเข้ม-ดำแสดงค่าที่หลากหลายและความเข้มข้นสูงสุดช่วงกลางวัน แสดงการกระจายความเสี่ยงที่ไม่สม่ำเสมอ ทำให้สามารถระบุช่วงเวลาที่มีโอกาสเกิดความผิดปกติสูง การไล่เฉดสีและ Scale Bar (0-31.5) ช่วยให้เห็น จุดวิกฤต และแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงตามเวลา อย่างชัดเจน สามารถใช้ในการวิเคราะห์เชิงลึกและวางแผนจัดการความเสี่ยงจากความร้อน ประโยชน์เชิงปฏิบัติที่ได้จากแผนภูมิสามารถใช้เป็นเครื่องมือช่วย วางแผน Maintenance Scheduling, ตรวจสอบความเสถียรของระบบ และลดความเสี่ยงจากความร้อนระบบไฟฟ้า

3.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือของการพยากรณ์อุณหภูมิ: Multiphysics Simulation และ AI Prediction

ในการประเมินสภาวะความร้อนของระบบจำหน่ายไฟฟ้าในอาคาร การพยากรณ์อุณหภูมิของสายเมนหลักอย่างแม่นยำเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยลดความเสี่ยงต่อความเสียหายและเพิ่มประสิทธิภาพของการจัดการพลังงาน แนวทางการพยากรณ์สามารถแบ่งออกเป็นสองกลุ่มหลัก ได้แก่ การจำลองเชิงฟิสิกส์ (Multiphysics Simulation) ซึ่งอธิบายพฤติกรรมความร้อนจากสมการพื้นฐานทางวิศวกรรม และการทำนายด้วยปัญญาประดิษฐ์ (AI Prediction) ซึ่งใช้ข้อมูลจริงในการเรียนรู้รูปแบบและแนวโน้มของอุณหภูมิ การเปรียบเทียบประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือของทั้งสองวิธีจึงมีความสำคัญ เพื่อประเมินความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้ในบริบทที่แตกต่างกัน ทั้งด้านการออกแบบระบบไฟฟ้าเชิงป้องกันและการพยากรณ์เชิงปฏิบัติการในอาคารอัจฉริยะ การศึกษานี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์ความสอดคล้องระหว่างผลการพยากรณ์ของ



รูปที่ 12 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือของการพยากรณ์อุณหภูมิระหว่างข้อมูล วัดจริง การจำลองแบบ Multiphysics และการทำนายด้วย AI

ทั้งสองแบบจำลองกับข้อมูลอุณหภูมิที่วัดได้จริง เพื่อประเมินความถูกต้องและเสถียรภาพของแบบจำลองในเชิงวิศวกรรมพลังงาน

จากการสรุปที่ 12 พบว่า ผลจากการจำลองด้วย Multiphysics Simulation และผลการทำนายด้วย AI Prediction พบว่า AI Prediction สามารถติดตามแนวโน้มอุณหภูมิได้ใกล้เคียงค่าจริงมากกว่า โดยมีค่า MAE ประมาณ 0.42°C ขณะที่ Multiphysics Simulation มีค่า MAE ประมาณ 0.65°C ทั้งสองวิธีมีความน่าเชื่อถือสูงภายในช่วง $\pm 1^{\circ}\text{C}$ แสดงให้เห็นว่า AI มีความแม่นยำและตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ดีกว่า ส่วน Simulation ให้ข้อมูลเชิงฟิสิกส์ที่เป็นประโยชน์ต่อการออกแบบระบบพลังงานอัจฉริยะในอาคาร

4. บทสรุป

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการวิเคราะห์ความแม่นยำทางความร้อนของสายเมนหลักทองแดง XLPE โดยผลจากการจำลองแบบ Multiphysics กับเทคนิค Machine Learning บนข้อมูลจริงจากระบบไฟฟ้าอาคารเรียนช่างอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย พบว่าเฟส B มีอุณหภูมิและกระแสไฟฟ้าสูงสุด ส่งผลให้เกิดแรงดันตกสูงสุด 1.40% และพลังงานสูญเสียสูงสุด 0.00485W ในช่วงโหลดสูงสุด ผลการวิเคราะห์พบว่า AI Prediction ติดตามแนวโน้มอุณหภูมิได้ใกล้เคียงค่าจริงมากกว่า ($\text{MAE} \approx 0.42^{\circ}\text{C}$) ขณะที่ Multiphysics Simulation มี $\text{MAE} \approx 0.65^{\circ}\text{C}$ ทั้งสองวิธีน่าเชื่อถือภายใน $\pm 1^{\circ}\text{C}$ แสดงว่า AI แม่นยำและตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ดีกว่า ในขณะที่ Simulation ให้ข้อมูลเชิง



ฟิสิกส์ที่ช่วยออกแบบระบบพลังงานอัจฉริยะ โมเดล Machine Learning ที่พัฒนาขึ้นช่วยผู้ปฏิบัติงานวางแผน Maintenance Scheduling ล่วงหน้า และบริหารโหลดไฟฟ้าใน Smart Building ให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ลดการสูญเสียพลังงานและความเสี่ยงระบบล้มเหลว งานวิจัยนี้จึงยกระดับความเข้าใจพฤติกรรมความร้อนของสายไฟฟ้าและวางรากฐานสู่ระบบไฟฟ้าอัจฉริยะที่ยั่งยืนในยุคดิจิทัล

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะกรรมการผู้วิจัยขอขอบคุณวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย สำหรับการสนับสนุนทุนวิจัยและอนุญาตให้ใช้พื้นที่และอุปกรณ์ ขอขอบคุณทีมงานวิจัย คณาจารย์ บุคลากร และครอบครัวที่ให้คำแนะนำและกำลังใจตลอดกระบวนการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Andrews, R.N. Hampton, A. Smedberg, D. Wald, V. Waschk and W. Weissenberg, The role of degassing in XLPE power cable manufacture, IEEE Electrical Insulation Magazine, 2006, 22(6), 5–16.
- [2] S. Pramualsingha and P. Yutthagowith, Engineering lifetime model of crosslinked polyethylene under electrical and thermal stresses, Sensors and Materials, 2021, 33(7), 2445–2457.
- [3] A. Ghaforian, P. Duggan and L. Lu, A comprehensive review of cable monitoring techniques for nuclear power plants, Energies, 2025, 18(9), 2333.
- [4] M. Balachandran, Aging and degradation studies in crosslinked polyethylene (XLPE), in: Crosslinkable polyethylene, Springer, Singapore, 2021, 189–210.
- [5] W. Jiang-Qiong, L. Wei-Kang, Z. Wen-Ye, W. Bao-Quan and Z. Jun-Wei, Aging and life control of cross-linked polyethylene as cable insulation material, Acta Physica Sinica, 2024, 73(7).
- [6] S. Nilsson, T. Hjertberg and A. Smedberg, Structural effects on thermal properties and morphology in XLPE, European Polymer Journal, 2010, 46(8), 1759–1769.
- [7] N. Hampton, R. Hartlein, H. Lennartsson, H. Orton and R. Ramachandran, Long-life XLPE insulated power cable, The 7th International Conference on Insulated Power Cables, Proceeding, France, 2007, pp. 24–28.
- [8] J. V. Gulmine and L. Akcelrud, Correlations between structure and accelerated artificial ageing of XLPE, European Polymer Journal, 2006, 42(3), 553–562.

- [9] G.C. Montanari, C. Laurent and G. Teyssedre, From LDPE to XLPE: Investigating the change of electrical properties, Part I, Space charge, conduction and lifetime, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(3), 438–446.
- [10] M. Roy, J.K. Nelson, R.K. MacCrone and L.S. Schadler, Candidate mechanisms controlling the electrical characteristics of silica/XLPE nanodielectrics, Journal of Materials Science, 2007, 42(11), 3789–3799.
- [11] Q. Shao, S. Fan, Z. Zhang, F. Liu, Z. Fu, P. Lv and Z. Mu, Artificial intelligence in cable fault detection and localization: Recent advances and research challenges, Energies, 2025, 18(14), 3662.
- [12] R. van Dinter, G. Ekmekci, S. Rieken, B. Tekinerdogan and C. Catal, Architecting a digital twin-based predictive maintenance system for modelling cable joint degradation, PHM Society Asia-Pacific Conference, Proceeding, Japan, 2023, R10-02.
- [13] K. Guo, Q. Li, S. Wang, J. Zhang and Z. Zhang, Research on the application of intelligent algorithms in preventive damage prediction and diagnosis of power cable channels, Applied Mathematics and Nonlinear Sciences, 2024, 9(1), 1-17.



การพัฒนาระบบรดน้ำผักอัตโนมัติด้วยการแบ่งรดทีละส่วนโดยใช้ปั๊มน้ำโซลาร์เซลล์

แสงเพชร อนุชัยภูมิ และ สันติ ชวนนอก*

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: santi.c@nrru.ac.th

วันที่รับบทความ: 3 กรกฎาคม 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 9 ตุลาคม 2568; วันที่ตอบรับบทความ: 29 ตุลาคม 2568

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 11 ธันวาคม 2568

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้นำเสนอระบบรดน้ำผักอัตโนมัติแบบแบ่งโซน ซึ่งออกแบบมาเพื่อลดภาระงานที่ต้องทำตามเวลาอย่างสม่ำเสมอ โดยใช้ปั๊มน้ำจากปั๊มน้ำพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดซับเมอร์ซีบีแอล กำลัง 750 วัตต์ ร่วมกับแผงโซลาร์เซลล์ 330 วัตต์ จำนวน 3 แผง ระบบนี้ประกอบด้วยบอร์ดควบคุมหลักที่วัดปริมาณน้ำด้วยตัวรับรู้อัตราการไหล เพื่อส่งข้อมูลไปยังชุดควบคุมโซเลนอยด์วาล์วขนาด 1 นิ้วจำนวน 4 ชุด สำหรับการจ่ายน้ำแบบแบ่งโซน วาล์วแต่ละชุดถูกควบคุมผ่านการสื่อสารไร้สาย LoRa ในรูปแบบการสื่อสารแบบจุดเดียวสู่หลายจุด ซึ่งช่วยลดการเดินสายและเพิ่มความยืดหยุ่นในการติดตั้ง ปริมาณน้ำในแต่ละโซนถูกกำหนดผ่านโค้ดโปรแกรม ระบบนี้รองรับสปริงเกอร์ 6 ตัวต่อโซน โดยติดตั้งแต่ละตัวห่างกัน 4 เมตร ซึ่งเป็นระยะ 2 เท่าของรัศมีการกระจายน้ำตามแนวทางที่เกษตรกรนิยมใช้ ครอบคลุมพื้นที่ 96 ตารางเมตรต่อโซน รวมพื้นที่ 384 ตารางเมตร โดยอัตราการให้น้ำอยู่ระหว่าง 42 ถึง 54 ลิตรต่อนาที่ ภายใต้ความเข้มแสงอาทิตย์ 600 ถึง 1000 วัตต์ต่อตารางเมตร ระบบที่พัฒนาขึ้นนี้ช่วยเพิ่มผลผลิตของแรงงาน ประหยัดพลังงาน ส่งเสริมการใช้พลังงานสะอาด และสามารถประยุกต์ใช้กับระบบน้ำหยดได้ การพัฒนาในอนาคต อาทิ การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานของวงจรควบคุมวาล์วน้ำเพื่อขยายระยะเวลาการใช้งานแบตเตอรี่ การเพิ่มกำลังปั๊มและขนาดวาล์วเพื่อเพิ่มพื้นที่รดน้ำต่อโซน

คำสำคัญ: ระบบรดน้ำผักอัตโนมัติ; รดน้ำพืชแบบแบ่งโซน; ควบคุมวาล์วน้ำระยะไกล

Development of An Automatically Vegetables Irrigation Based on Partitioned Areas Using Solar-powered Pump

Sangphet Ngonchaiyaphum and Santi Chuannok*

Department of Industrial Electrical Engineering, Faculty of Industrial Technology,
Nakhon Ratchasima Rajabhat University

* Corresponding author, E-mail: santi.c@nrru.ac.th

Received: 3 July 2025; Revised 9 October 2025; Accepted: 29 October 2025

Online Published: 11 December 2025

Abstract: This research presents a zone-automatic vegetable irrigation system designed to reduce timely basis task. The system utilizes water from a 750-watt submersible solar-powered pump energized with three 330-watt solar panels. This system consists of main board that measures water volume using a flow rate sensor, providing data to control four sets of 1-inch solenoid valves for zone-by-zone irrigation. Each valve is controlled via LoRa wireless communication in a direct point-to-multipoint topology, which minimizes wiring and enhances installation flexibility. Water volume for each zone is defined in codes. The system supports six sprinklers per zone, each spaced 4 meters apart-twice the typical spray radius used by local farmers-covering 96 square meters per zone, totaling 384 square meters across four zones. Experimental results show water flow rates ranging from 42 to 54 liters per minute under solar irradiance levels of 600 to 1000 watts per square meter. The developed system increases labor productivity, conserves energy, promotes clean energy usage, and is adaptable to drip irrigation systems. Future development includes optimizing energy efficiency for the valve-controlled circuitry to extend battery life and increasing pump capacity and valve size to expand irrigation coverage per zone.

Keywords: Automatic vegetable watering system; Water plants by zones; Remotely control water valves



1. บทนำ

ประเทศไทยมีพื้นที่เกษตรกรรมที่กว้างขวางและอุดมสมบูรณ์ ประชากรจำนวนมากจึงประกอบอาชีพเกษตรกร ทั้งในรูปแบบอาชีพหลักและอาชีพเสริม อย่างไรก็ตาม เกษตรกรที่ทำกิจกรรมมักประสบปัญหาในการจัดสรรเวลาในการดูแลแปลงเพาะปลูก โดยเฉพาะการรดน้ำพืชผลในพื้นที่กว้างพร้อมกันอาจส่งผลต่อแรงดันน้ำที่ลดลง เพื่อลดปัญหาดังกล่าว แนวคิดเรื่องเกษตรอัจฉริยะ (Smart Farming) ได้รับการพัฒนา โดยใช้เทคโนโลยีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการ ลดต้นทุน และเพิ่มผลผลิต หนึ่งในตัวอย่างคือ FAARM series พัฒนาโดยเนคเทค ซึ่งประกอบด้วย FAARM SENSE สำหรับติดตามสภาพแวดล้อม และระบบ FAARM FiT สำหรับควบคุมกระบวนการเกษตร [1] นอกจากนี้ เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตประสาทรพสิ่ง (IoT) ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในระบบให้น้ำอัจฉริยะที่ช่วยเพิ่มผลิตผลหล่อไม่ฝรั้งโดยอาศัยการตรวจวัดสภาพแวดล้อม [2] รวมถึงการประยุกต์ใช้เครือข่ายสื่อสารไร้สายอย่าง LoRa และ LoRaWAN เพื่อส่งข้อมูลจากตัวรับรู้ในพื้นที่เกษตรกรรมไปยังศูนย์ควบคุม [3] ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งาน เช่น การติดตั้งระบบเทปน้ำหยดอัตโนมัติในการปลูกพริกหยวกในประเทศปารากวัย ซึ่งเชื่อมต่อกับระบบตรวจสอบผ่านการสื่อสาร LoRaWAN [4] และระบบควบคุมการรดน้ำมะเขือเทศด้วยตัวรับรู้วัดความชื้นในดินร่วมกับบอร์ด Vinduino และ LoRa [5] ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้น้ำและลดภาระของเกษตรกร มีการพัฒนาระบบควบคุมการให้น้ำพืชโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ร่วมกับโมดูลรับ-ส่งสัญญาณ

LoRa และวงจรควบคุมดีซีแลตซิงโซเลนอยด์ (DC latching solenoid) โดยใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ D-size เพื่อเพิ่มเสถียรภาพและประหยัดพลังงาน [6]

ในส่วนของผู้วิจัยได้ให้ความสำคัญต่อการลดต้นทุนพลังงานที่ใช้ในการสูบน้ำ ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้นำแผงโซลาร์เซลล์มาใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานมอเตอร์กระแสตรงในปั้มน้ำขนาดเล็ก [7] และได้พัฒนาระบบเลือกแหล่งพลังงานระหว่างแผงโซลาร์เซลล์กับไฟฟ้ากระแสสลับของการไฟฟ้าเพื่อให้ระบบทำงานได้อย่างต่อเนื่องแม้ไม่มีแสงแดดแต่ใช้พลังงานจากแผงโซลาร์เซลล์ให้มากที่สุด [8] และได้ดำเนินการวัดสมรรถนะของระบบเลือกแหล่งพลังงานผ่านเครือข่าย LoRa [9] ในแนวทางเดียวกับ Viswanatha [10]

จากงานวิจัย [1-10] ทำให้เกิดแนวคิดว่าหากใช้วิธีการแบ่งพื้นที่การใช้น้ำออกเป็นโซนจะช่วยลดกำลังของปั้มและจำนวนแผงโซลาร์เซลล์ลงได้ และการนำดีซีแลตซิงโซเลนอยด์มาใช้เพื่อควบคุมการเปิด-ปิดวาล์วน้ำผ่านการสื่อสารไร้สาย LoRa ในรูปแบบการสื่อสารแบบจุดเดียวสู่หลายจุด (Point-to-Multipoint) ที่มีข้อได้เปรียบ ZigBee ทั้งปัจจัยระยะทางการรับ-ส่ง ความง่ายในการพัฒนาซอฟต์แวร์ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน และความคุ้มค่าต้นทุน จะเพิ่มความสะดวกในการปรับเปลี่ยนโครงสร้าง (Layout) ระบบให้น้ำในแปลงเพาะปลูก และลดความเสี่ยงอันตรายจากไฟฟ้าเมื่อเทียบกับการใช้ เอซีโซเลนอยด์ (AC solenoid) รวมทั้งลดการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ที่ใช้ควบคุมโซเลนอยด์ ซึ่งเป็นการพัฒนาต่อยอดระบบ WATER FIT สำหรับการให้น้ำเพื่อการเพาะปลูก ที่วิจัยและพัฒนาโดยเนคเทค โดยการพัฒนาแบบรดน้ำผักอัตโนมัติด้วย



สปริงเกลอร์ที่ละโซน โดยใช้พลังงานจากแผงโซลาร์เซลล์เป็นแหล่งพลังงานสำหรับปั๊มน้ำชนิดขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ เพื่อเพิ่มความดันน้ำให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการทำงานของสปริงเกลอร์ ส่วนการเปิด-ปิดวาล์วน้ำได้เลือกใช้วาล์วประเภทโกลบอลวาล์วชนิดใช้พลังงานต่ำที่เปิด-ปิดน้ำโดยอาศัยความแตกต่างของความดันที่มาจากน้ำด้านเข้า (Inlet) กับความดันที่เกิดจากสปริงและน้ำใน Bonnet Chamber ด้วยเหตุนี้ ระบบควบคุมวาล์วน้ำใช้ดีซีแลตซิงโซเลนอยด์แม่ใช้พลังงานต่ำ แต่สังเกตว่า ผู้ผลิตวาล์วน้ำชนิดนี้มักกำหนดค่าความดันน้ำต่ำสุด-สูงสุดในการใช้งาน

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงการออกแบบ-ทดสอบ การเลือกใช้อุปกรณ์ต่างๆ ที่หาซื้อได้ง่ายและต้นทุนไม่สูง ส่งผลให้ไม่สามารถหาข้อมูลสเปกของอุปกรณ์บางตัวสำหรับการคำนวณออกแบบได้ จึงได้ใช้วิธีเทียบเคียงข้อมูลสเปกที่เผยแพร่โดยผู้ผลิตรายอื่น และการวัดทดสอบช่วยในการออกแบบ ซึ่งมี 2 ส่วน ได้แก่

1. ส่วนประกอบทางไฟฟ้า ซึ่งครอบคลุมอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์ บอร์ดส่ง-รับสัญญาณ LoRa วงจรควบคุมดีซีแลตซิงโซเลนอยด์ และวงจรแปลงผันแบบเพิ่มระดับแรงดัน (Boost Converter)

2. ส่วนประกอบทางชลศาสตร์ (Hydraulics) ได้แก่ ปั๊มน้ำ วาล์วน้ำ ระบบท่อและสปริงเกลอร์

2.1 การออกแบบโครงสร้างระบบโดยรวม

ส่วนประกอบโดยรวมของระบบรดน้ำอัตโนมัติด้วยการแบ่งรดที่ละโซนโดยใช้ปั๊มน้ำโซลาร์เซลล์ประกอบด้วยกล่องควบคุมปั๊มน้ำระบบออฟกริดที่รับ

พลังงานจากแผงโซลาร์เซลล์เพื่อขับปั๊มน้ำ ซึ่งใช้มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านเป็นต้นกำลัง บอร์ดควบคุมหลักเชื่อมต่อกับตัวรับรู้อัตราการไหลของน้ำกับบอร์ดส่งสัญญาณ LoRa เพื่อส่งข้อมูลไปยังบอร์ดควบคุมวาล์วน้ำผ่านบอร์ดรับสัญญาณ LoRa เพื่อควบคุมการเปิด-ปิดวาล์วน้ำ ขนาด 1 นิ้วด้วยดีซีแลตซิงโซเลนอยด์ จำนวน 4 ชุด สำหรับการจ่ายน้ำในแต่ละโซนด้วยสปริงเกลอร์ 6 ตัว แสดงดังรูปที่ 1

วัตถุอัตราการไหล



รูปที่ 1 โครงสร้างระบบโดยรวม



2.2 ระบบควบคุมการทำงานโดยรวม

รูปที่ 2 แสดงบล็อกไดอะแกรมการควบคุมทางไฟฟ้าของระบบรดน้ำแบบอัตโนมัติโดยแบ่งหน้าที่ละโซน โดยมีตัวรับรู้อัตราการไหลของน้ำ ไมโครคอนโทรลเลอร์ บอร์ดส่ง-รับสัญญาณ LoRa และโกลบวาล์วที่ถูกควบคุมด้วยดีซีรีเลย์ซึ่งโซเลนอยด์

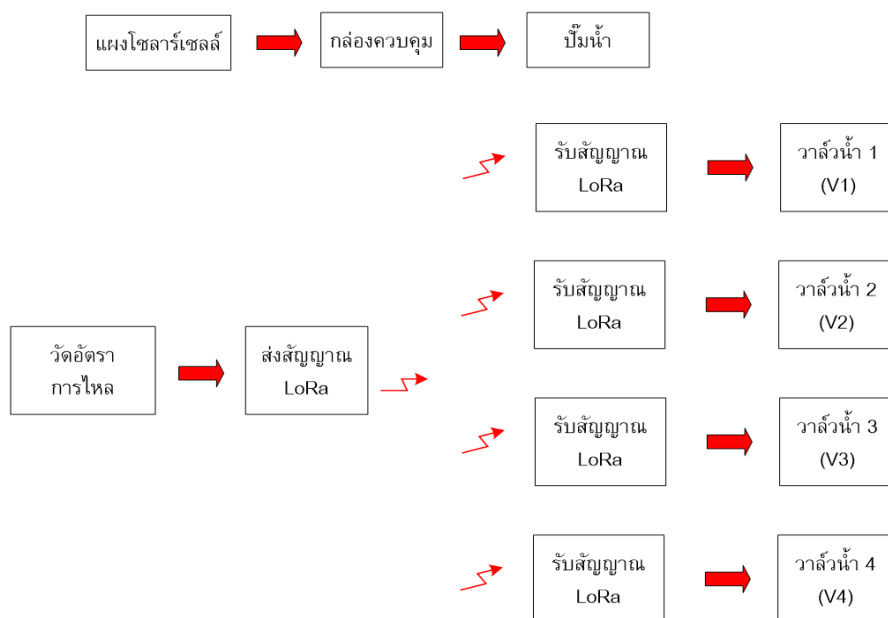
2.3 ภาคส่งสัญญาณ LoRa

รูปที่ 3 แสดงบล็อกไดอะแกรมภาคส่งสัญญาณ LoRa ที่ประกอบด้วย ไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งรับสัญญาณจากตัวรับรู้อัตราการไหล รุ่น YF-DN50 ผ่านขา D9 เพื่อคำนวณค่าปริมาณน้ำและส่งข้อมูลผ่านขา D10 ถึง D13 สู่บอร์ดส่งสัญญาณ LoRa ที่มีชิปเบอร์ SX1278 เป็นส่วนประกอบหลักไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านบอร์ดรับสัญญาณ LoRa สำหรับควบคุมการเปิด-ปิดวาล์วน้ำตามค่าปริมาณน้ำที่

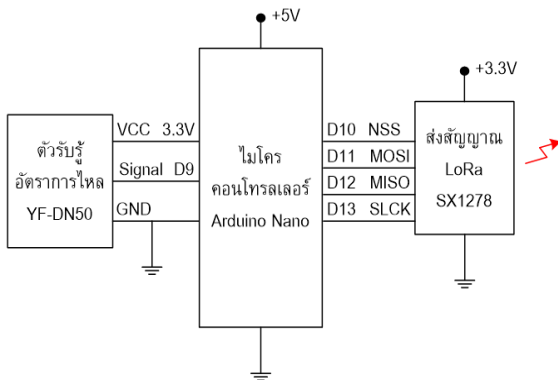
กำหนดไว้ในแต่ละโซน การเชื่อมต่ออุปกรณ์ภาคส่งสัญญาณ LoRa แสดงดังรูปที่ 4

2.4 ภาครับสัญญาณ LoRa และควบคุมวาล์วน้ำ

ภาครับสัญญาณ LoRa ประกอบไปด้วย บอร์ดรับสัญญาณ LoRa ที่ใช้ชิปเบอร์ SX1278 ทำหน้าที่รับ-ส่งข้อมูลด้วยโปรโตคอล SPI กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านขา D10 ถึง D13 ของ Arduino Nano ซึ่งทำหน้าที่ส่งสัญญาณพัลส์ออกจากขา D2 และขา D3 เข้าสู่ขาอินพุต IN1 และ IN2 ของวงจร H-bridge ที่อยู่ภายในไอซีเบอร์ DRV8833 โดยมีวงจรแปลงผันแบบเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ 9 โวลต์ ชนิดลิเทียมไอออนขนาดความจุ 650 มิลลิแอมแปร์-ชั่วโมง ซึ่งจ่ายแรงดันจริงในย่าน 7.4 ถึง 8.4 โวลต์ ให้เป็น 10.8 โวลต์ ต่อกับขาไฟเลี้ยงวงจร H-bridge ผ่านความต้านทาน R1 เพื่อควบคุมการเปิด-ปิด



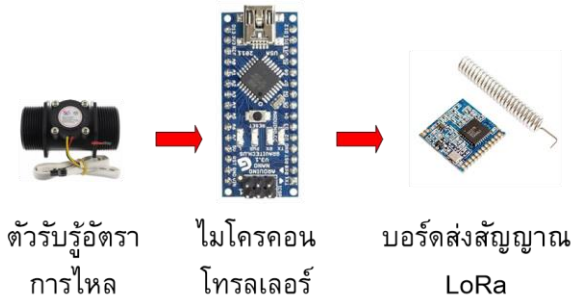
รูปที่ 2 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมโดยรวม



รูปที่ 3 บล็อกไดอะแกรมภาคส่งสัญญาณ LoRa

วาล์วน้ำด้วยดีซีแลตซิงโซเลนอยด์ซึ่งต่ออยู่กับเอาต์พุตของวงจร H-bridge ตามรูปที่ 5 ส่วนวงจรแปลงผันแบบเพิ่มระดับที่ใช้งานเป็นบอร์ดสำเร็จรูปและมีไอซีเบอร์ XL6009 เป็นส่วนประกอบหลัก

การหาค่าความจุตัวเก็บประจุ C1 อาศัยวิธีการวัดสัญญาณกระแสไฟฟ้าและแรงดันที่ตกคร่อมดีซีแลตซิงโซเลนอยด์ เพื่อนำมาใช้เป็นเกณฑ์เลือกค่าตัวเก็บประจุ โดยอาศัยรูปร่างสัญญาณกระแสตามที่กล่าวในารวิจัย [11] จากรูปที่ 6 แสดงผลการวัดกระแสและแรงดันที่ตกคร่อมโซเลนอยด์เมื่อ C1 มีค่า 1000 และ 2,200 ไมโครฟารัด การลดลงก่อนการเพิ่มขึ้นอีกครั้งของกระแส (Solenoid_Valve_I) ถูกใช้เป็นเกณฑ์พิจารณาระดับแรงดันที่เพียงพอต่อการเปลี่ยนสถานะของดีซีแลตซิงโซเลนอยด์ กล่าวคือ เมื่อพิจารณารูปที่ 6 ส่วนที่พื้นหลังสีดำ ซึ่งแสดงผลของ C1 มีค่าความจุระบุ 1000 ไมโครฟารัด ระดับแรงดันที่ตกคร่อมโซเลนอยด์ (Solenoid_Valve_V) ลดลงประมาณ 4 โวลต์ ส่วนรูปสัญญาณบนพื้นหลังสีขาวในรูปที่ 6 แสดงผลการวัดสัญญาณเมื่อ C1 มีค่าความจุระบุ 2,200 ไมโครฟารัด



รูปที่ 4 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ภาคส่งสัญญาณ LoRa

พบว่าขณะที่ก้านโซเลนอยด์เอาชนะแรงยึด แรงดันลดลงเพียง 2 โวลต์ และเมื่อนำผลการวัดแรงดันและค่าประจุที่ได้จากการคำนวณจากสัญญาณกระแส โดยใช้ฟังก์ชันคำนวณปริพันธ์ในออสซิลโลสโคป Tektronix รุ่น MDO3024 ในช่วงเวลา 16.86 มิลลิวินาที มาพิจารณาเลือกค่าความจุโดยอาศัยสมการ (1)

$$\Delta q = C * \Delta v \quad (1)$$

เมื่อ

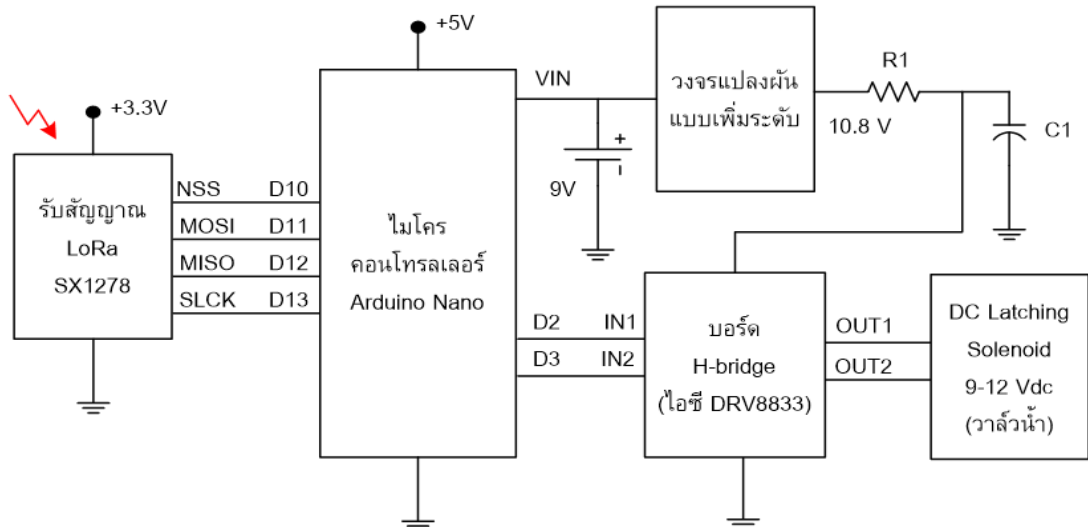
Δq = ค่าประจุไฟฟ้าที่ถูกใช้เพื่อเปิด-ปิดวาล์ว (คูลอมบ์)

C = ค่าความจุของตัวเก็บประจุ (ฟารัด)

กรณี $C1 = 1,000$ กับ $2,200$ ไมโครฟารัด ผลการวัดประจุ (Δq) ค่าคำนวณแรงดันและผลการวัด (Δv) มีผลดังในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการวัดค่าแรงดันตกคร่อมโซเลนอยด์

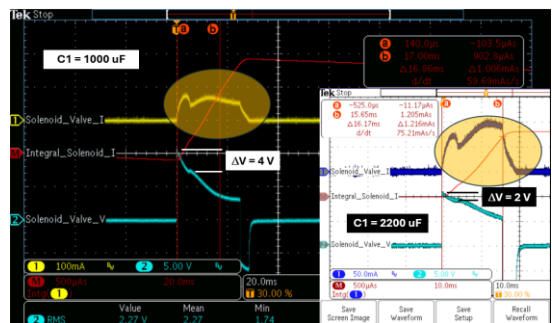
C1 (ฟารัด)	Δq (คูลอมบ์)	Δv (คำนวณ/วัด)
$1,000 * 10^{-6}$	$1.0 * 10^{-3}$	1.0 โวลต์ / 7.0 โวลต์
$2,200 * 10^{-6}$	$1.2 * 10^{-3}$	0.5 โวลต์ / 5.0 โวลต์



รูปที่ 5 บล็อกไดอะแกรมภาครับสัญญาณ LoRa และควบคุมวาล์วน้ำ

จากตารางที่ 1 พบว่า ผลการวัดสัญญาณทั้ง 2 กรณีไม่สอดคล้องกับการคำนวณ ตามสมการ (1) และด้วยข้อเท็จจริงที่ออสซิลโลสโคปสามารถวัดแรงดันได้แม่นยำสูงกว่าการวัดกระแสในย่าน 100 ถึง 150 มิลลิแอมป์ ด้วยโพรบวัดกระแส Tektronix รุ่น A622 ซึ่งมีค่าคลาดเคลื่อนออฟเซตคงที่ (Fixed Offset Error) ± 50 มิลลิแอมป์ ผู้วิจัยจึงได้ใช้ผลการวัดแรงดันที่ลดลง ณ เวลาที่ก้านโซเลนอยด์หลุดพ้นจากแรงยึดในการเลือกตัวเก็บประจุ C1 เท่ากับ 2,200 ไมโครฟารัด

สำหรับตัวต้านทาน R1 ถูกเลือกค่าจาก 3 ปัจจัย ได้แก่ 1) จำกัดกระแสชั่วขณะจากแบตเตอรี่ที่เป็นผลจากตัวเก็บประจุ C1 กับตัวเก็บประจุด้านออกของวงจรแปลงผันถูกอัดประจุแบบเรโซแนนซ์ผ่านไดโอดและตัวเหนี่ยวนำ 2) จำกัดกระแส 1 ใน 10 ของค่าที่วงจรจ่ายได้สูงสุด 2 แอมป์ จะได้ (10.8 โวลต์/0.2 แอมป์) R1 ประมาณ 50 โอห์ม 3) ระยะเวลาในการอัดประจุ C1 ให้ทันต่อความถี่ของการเปิด-ปิดวาล์ว



รูปที่ 6 รูปสัญญาณกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมดีซีแลตซิงโซเลนอยด์ขณะเปิดวาล์วน้ำ

การประมาณระยะเวลาจ่ายพลังงานของแบตเตอรี่ 9 โวลต์ ชนิดลิเทียมไอออนขนาดความจุ 650 มิลลิแอมป์-ชั่วโมง ซึ่งจ่ายแรงดันจริงในย่าน 7.4 ถึง 8.4 โวลต์ โดยหาผลค่ากระแสรวมในวงจรต่างๆ ที่ทำหน้าที่ควบคุมวาล์ว โดยแสดงในหน่วยมิลลิแอมป์ ในวงเล็บปีกกา ดังนี้ 1) วงจรแปลงผัน ไอซี XL6009 {5.0} 2) วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ ประกอบด้วย

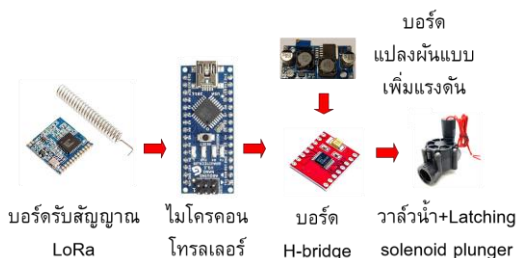


ATmega328P 16 MHz, Active mode {9.5} ไอซี LM1117-5.0 {10.0} ไอซี CH340G {0.2} และ LED สีแดง {3.0} 3) วงจรรับสัญญาณ LoRa ไอซี SX1278 {10.8} และ 4) วงจร H-Bridge ไอซี DRV8833 {3.0} เท่ากับ $(5.0 + 9.5 + 10.0 + 0.2 + 3.0 + 10.8 + 3.0)$ รวม 41.5 มิลลิแอมแปร์ อาศัย สเปกของ แบตเตอรี่ Soshine 9 โวลต์ 650 มิลลิแอมแปร์-ชั่วโมง ที่เผยแพร่บนอินเทอร์เน็ต เมื่อจ่ายกระแส 50 มิลลิแอมแปร์ กระทั่งแรงดันลดลงจาก 8.4 เหลือ 7 โวลต์ (ซึ่งเป็นแรงดันต่ำสุดที่ไอซี LM1117-5.0 ยังรักษาระดับแรงดันได้) สามารถจ่ายพลังงานได้ นานกว่า 11 ชั่วโมง ส่วนระยะเวลาที่ประมาณจากประจุที่ใช้สำหรับเปลี่ยนสถานะวาล์ว คือ 150 มิลลิแอมแปร์ นานกว่า 3 ชั่วโมง แปลงเป็นจำนวนครั้งจากความกว้างของพัลส์ 16.6 มิลลิวินาทีได้ จำนวน 635,264 ครั้ง

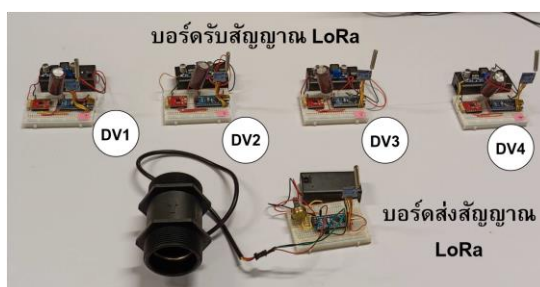
จากรูปที่ 7 ไมโครคอนโทรลเลอร์รับค่าปริมาณน้ำจากข้อมูลที่ได้รับมาจากบอร์ดส่ง-รับสัญญาณ LoRa ทุกๆ 1 วินาที เพื่อควบคุมการเปิด-ปิดวาล์วน้ำตามปริมาณน้ำสำหรับแต่ละโซนที่ถูกกำหนดไว้ในโค้ดโปรแกรม

2.5 การประกอบติดตั้งอุปกรณ์รับ-ส่งสัญญาณ LoRa

การประกอบติดตั้งอุปกรณ์เครื่องรับสัญญาณ LoRa ตามรูปที่ 8 เริ่มจากแบตเตอรี่ 9 โวลต์ชนิดอัดประจุใหม่ได้ บรรจุในใส่ แบตเตอรี่ที่มีสวิทช์เปิด-ปิดแรงดันไฟฟ้าเข้าสู่บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งมีวงจรแปลงผันแบบลดระดับแรงดันไฟฟ้าเป็น 5 โวลต์และ 3.3 โวลต์ อีกส่วนหนึ่งผ่านวงจรแปลงขึ้นแรงดันไฟฟ้าเป็น 10.8 โวลต์เพื่อเลี้ยงวงจร H-bridge สำหรับขับดีซีมอเตอร์โซเลนอยด์ที่ใช้ควบคุมวาล์วน้ำ



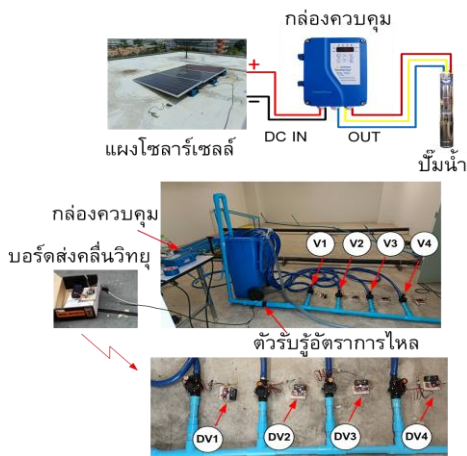
รูปที่ 7 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ควบคุมวาล์วน้ำ



รูปที่ 8 ลักษณะการประกอบติดตั้งอุปกรณ์บอร์ดส่งและรับสัญญาณ LoRa

2.6 การประกอบติดตั้งอุปกรณ์ระบบสูบน้ำสำหรับทดลองในห้องปฏิบัติการ

จัดวางอุปกรณ์ตามรูปที่ 9 โดยแบ่งออกเป็นระบบสูบน้ำจากบิ๊มน้ำร่วมกับแผงโซลาร์เซลล์แบบออฟกริดและวาล์วน้ำพลังงานต่ำที่ถูกควบคุมผ่านดีซีแลตซิงโซเลนอยด์ซึ่งมีโครงสร้างเป็นโกลบวาล์ว จำนวน 4 ตัว ที่แม้จะสั่งซื้อได้สะดวกและราคาถูกแต่ไม่สามารถหาข้อมูลสเปกได้ จึงอาศัยค่าประมาณโดยใช้ข้อมูลของวาล์วชนิด-ขนาดเดียวกันของผู้ผลิต Rainbird [12] คือ รุ่น I100-PGA9V GLOBE 2.5CM ซึ่งระบุค่า สูญเสียความดัน (Pressure Loss) ในช่วงอัตราการไหล 50 ถึง 100 ลิตร/นาที เท่ากับ 0.41 – 0.43 บาร์



รูปที่ 9 การติดตั้งอุปกรณ์ระบบสูบน้ำ

โดยเลือกใช้ค่าประมาณในช่วง คือ 0.42 บาร์ (4.30 เมตร) หรือ 6.1 PSI ช่วงความดันด้านเข้าที่สามารถเปิด-ปิดน้ำได้ คือ 15 ถึง 150 PSI ใช้วิธีการสูบน้ำแบบหมุนวนกลับในถัง ระดับความสูงของปั๊มน้ำ (Pump Head) 1 เมตร ใช้แบตเตอรี่ 9 โวลต์ จ่ายพลังงานให้กับบอร์ดควบคุมหลักที่ใช้ส่งข้อมูลปริมาณน้ำผ่านสัญญาณ LoRa และวงจรต่างๆ ที่ใช้รับสัญญาณ LoRa และควบคุมการเปิด-ปิดวาล์วแต่ละตัว (DV1-DV4) ตัวรับรู้อัตราการไหลถูกเชื่อมต่อกับบอร์ดส่งสัญญาณ LoRa ด้วยสายสัญญาณยาว 3 เมตร ส่วนแผงโซลาร์เซลล์ได้ต่อสายมายังกล่องควบคุมปั๊มยาวประมาณ 10 เมตร

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยปริมาณทางไฟฟ้าและอัตราการไหลของวาล์วตัวที่ 1 ณ ค่าความเข้มแสงต่างๆ

ความเข้มแสง (W/m ²)	กำลังไฟฟ้า (W)	แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	อัตราการไหล (l/min)
1000	711	94.0	7.5	56.2
600	412	100.4	4.1	45.2
200	144	90.1	1.6	27.3

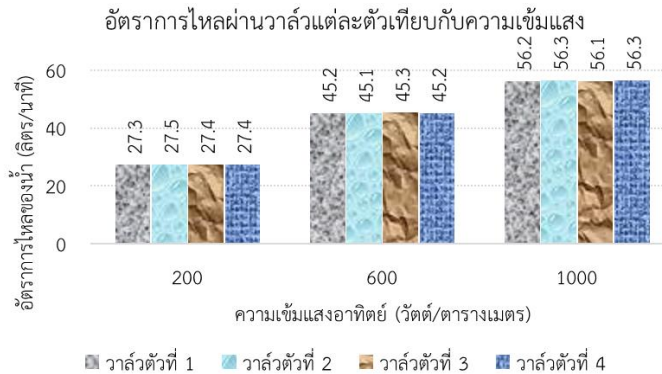
3. ผลการทดลอง

การศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาระบบรดผักอัตโนมัติด้วยการแบ่งรดที่ละส่วนโดยใช้ปั๊มน้ำโซลาร์เซลล์ทั้งในระดับห้องปฏิบัติการและการทดสอบใช้งานในพื้นที่จริง การทดลองได้ใช้อุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่แตกต่างกันตามวัตถุประสงค์ของการทดลองดังต่อไปนี้

3.1 การทดลองวัดอัตราการไหลของน้ำตามความเข้มแสงอาทิตย์ในห้องปฏิบัติการ

มีวัตถุประสงค์การทดลองเพื่อ 1) วัดอัตราการไหลของน้ำที่ได้จากปั๊มเทียบกับค่าที่ระบุบน Nameplate โดยนำค่าการสูญเสียความดันที่เกิดจากวาล์วน้ำท่อพีวีซี และสายยาง มาคิดร่วมด้วย 2) บันทึกค่ากำลังไฟฟ้า กระแสและแรงดันที่แสดงบนจอแสดงผลของกล่องควบคุมปั๊มตามความเข้มแสงอาทิตย์เป็นตัวแปรต้น ดำเนินการทดลองภายใต้ความเข้มแสงอาทิตย์ 3 ค่า ได้แก่ 1,000 600 และ 200 วัตต์/ตารางเมตร (โดยประมาณ) ทดลองและบันทึกค่าซ้ำ 3 ครั้ง ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 2 และรูปที่ 10

ผลการทดลองพบว่า เมื่อค่าความเข้มแสงอาทิตย์ 1,000 วัตต์/ตารางเมตร กำลังไฟฟ้าที่แสดงบนหน้าปัดของกล่องควบคุมปั๊มมีค่าเฉลี่ย 711 วัตต์ ปั๊มให้อัตราการไหล ประมาณ 56 ลิตร/นาที่ เมื่อค่า



รูปที่ 10 อัตราการไหลผ่านวาล์วน้ำแต่ละตัว

ความเข้มแสงลดลงเหลือ 600 วัตต์/ตารางเมตร และ 200 วัตต์/ตารางเมตร ได้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 412 และ 144 วัตต์ อัตราไหลของน้ำ ประมาณ 45 และ 27 ลิตร/นาที ตามลำดับ

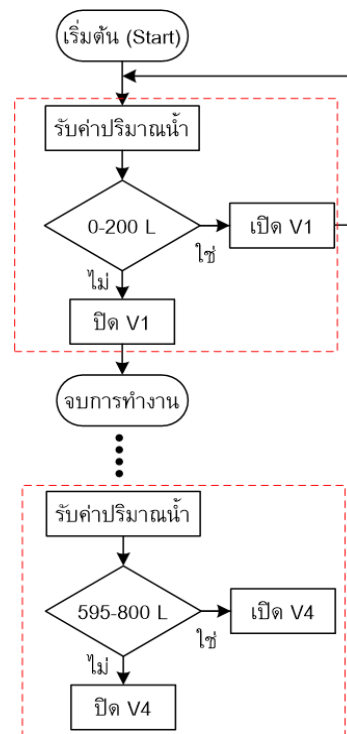
จากรูปที่ 10 เมื่อพิจารณาผลการวัดอัตราการไหลผ่านวาล์วน้ำแต่ละตัวตามความเข้มแสงอาทิตย์ ณ ความเข้มแสง 200 วัตต์/ตารางเมตร ปริมาณน้ำผ่านสปริงเกอร์แต่ละตัวจะมีค่าเพียง 4.5 ลิตร/นาที (27 หารด้วย 6) ซึ่งต่ำกว่าสเปก คือ 9.17 ลิตร/นาที ถึงร้อยละ 50 จึงอาจไม่พอต่อการทำงานของสปริงเกอร์

การทดสอบการควบคุมดีซีแลตซิงโซเลนอยด์เพื่อเปิด-ปิดวาล์วน้ำผ่านบอร์ดส่ง-รับสัญญาณ LoRa พบว่าสามารถควบคุมการเปิด-ปิดวาล์วตามปริมาณน้ำที่กำหนดสำหรับแต่ละวาล์วหรือแต่ละโซนได้ถูกต้องตามลำดับ ดังนี้

วาล์ว (V1) = 0 – 200 วาล์ว (V2) = 195 – 400

วาล์ว (V3) = 395 – 600 วาล์ว (V4) = 595 – 800
สังเกตว่า วาล์ว 2 ตัวถูกควบคุมให้เปิดน้ำพร้อมกันระหว่างช่วงรอยต่อของปริมาณน้ำที่กำหนดไว้สำหรับแต่ละโซน เพื่อป้องกันไม่ให้ความดันช่วงเปลี่ยนสถานะ

ของวาล์วน้ำสูงเกินไป รายละเอียดแสดงผังงาน (Flowchart) รูปที่ 11 ซึ่งรองรับเฉพาะการเปลี่ยนโซนอัตโนมัติ



รูปที่ 11 ผังงานการเปิด-ปิดวาล์วน้ำ



ส่วนการทดสอบระยะเวลาที่แบตเตอรี่ 9 โวลต์สามารถจ่ายกระแสเลี้ยงอุปกรณ์ในภาครับ LoRa และวงจรควบคุมวาล์วน้ำได้ประมาณ 12 ชั่วโมง ใกล้เคียงกับประมาณการ 11 ชั่วโมง ที่แสดงในหัวข้อ 2.4

3.2 การประกอบติดตั้งอุปกรณ์ระบบรดน้ำสำหรับทดสอบ ณ พื้นที่ปลูกผัก ตำบลพุดซา

จัดวางอุปกรณ์ต่างๆ ตามรูปที่ 14 โดยวัดปริมาณน้ำด้วยตัวรับรู้อัตราการไหลรุ่น YF-ND50 ซึ่งไม่สามารถหาข้อมูลการสูญเสียความดันของน้ำที่ไหลผ่านตัววัดได้วิเคราะห์ข้อมูลที่เผยแพร่สำหรับมิเตอร์น้ำขนาดต่างๆ ของผู้ผลิต Rainbird [13] ที่มีโครงสร้างหลักการทำงานเหมือนกับ YF-ND50 ประกอบกับข้อมูลที่เผยแพร่สำหรับมิเตอร์ รุ่น HC-150-FLOW และ HC-200-FLOW ของผู้ผลิต Hunter เมื่อพิจารณาอัตราการไหล 54-58 ลิตร/นาที ค่าสูญเสียความดันของตัวรับรู้อัตราการไหล รุ่น YF-ND50 มีค่าน้อยมากจึงตัดทิ้งได้

รูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราการไหล กับ Total Dynamic Head (TDH) ของปั๊มที่มีหน่วยเป็นเมตร ที่ระบุค่าบน Nameplate โดยมีสมการความสัมพันธ์ระหว่าง Head (H) กับ Flow rate (Q) คือ

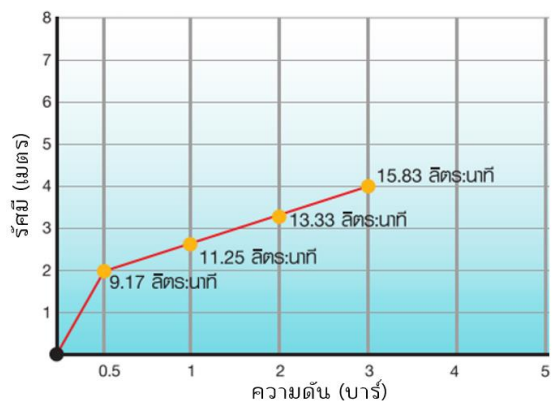
$$H = -0.0015 \cdot Q^2 - 1.4478 \cdot Q + 96.87$$

เมื่อ แทน Q เท่ากับ 54 ลิตร/นาที ซึ่งเป็นอัตราการไหลต่ำสุดสำหรับสปริงเกลอร์ 6 ตัวๆ ละ 9 ลิตร/นาที ส่งผลให้ $H = (-4.37 - 78.18 + 96.87) = 14.31$ เมตร ซึ่งใช้เพื่อออกแบบระบบท่อและสปริงเกลอร์

ด้วยปัจจัยแหล่งจำหน่ายที่ส่งผลต่อการจัดหา-จัดซื้อ ท่อน้ำที่เลือกใช้ใน ระบบ สปริงเกลอร์ ประกอบด้วยสายยางขนาด 1 นิ้ว ร่วมกับท่อและข้อต่อพีวีซีตามมาตรฐาน มอก. 17-2561 ซึ่งเป็นท่อสำหรับ



รูปที่ 12 Nameplate ของปั๊มน้ำชนิดขับเคลื่อนด้วยแบตเตอรี่



รูปที่ 13 คุณลักษณะของสปริงเกลอร์ รุ่น 303-C1

ระบบประปาในครัวเรือน แทนการใช้ท่อพีวีซีสี่เหลี่ยมสำหรับภาคเกษตรโดยตรง ในการหาค่าสูญเสียความดันในระบบสปริงเกลอร์ที่เกิดจากท่อและสายยางได้อ้างอิงโนโมแกรมที่สร้างจากสูตรของ Hazen-Williams ที่เผยแพร่โดยผู้ผลิตท่อน้ำในประเทศรายใหญ่ [14] ส่วนสายยางใช้ข้อมูลที่เผยแพร่โดย Dultmeier [15] ดังผลในตารางที่ 3 โดยแสดงตัวอย่างการประมาณค่าความดันสูญเสียในท่อเมนย่อยขนาด 1 นิ้ว ความยาว 10 เมตร (5 ช่วงๆ ละ 2 เมตร) โดยแสดงค่าในวงเล็บปีกกา “{ }” ที่กันด้วยเครื่องหมาย “|” เรียงลำดับ ดังนี้ “{อัตราการไหลลิตรต่อนาที | ค่าความดันสูญเสียต่อความยาวท่อ 100 เมตร | ค่าความดันสูญเสียในท่อยาว 2 เมตร}” ซึ่งผลการคำนวณในแต่ละช่วงของท่อ ได้แก่



ช่วงที่ 1 {45|5.68|0.114} ช่วงที่ 2 {36|2.72|0.054} ช่วงที่ 3 {27|1.60|0.032} ช่วงที่ 4 {18|0.78|0.016} และ ช่วงที่ 5 {9| 0.25|0.005} ผลรวมความดันสูญเสีย (0.114+ 0.054+ 0.032+ 0.016+ 0.005) ประมาณ 0.22 เมตร ส่วนสายยางขนาด 1 นิ้ว ยาว 5.8 ม. ความดันสูญเสีย เมื่ออัตราการไหล 54 ลิตร/นาที ประมาณ 6.78 PSI ต่อ 100 ฟุต แปลงเป็น 0.27 เมตร

เงื่อนไข การคำนวณ

- 1) เสดความดัน (Pressure Head) ที่สปริงเกอร์ รุ่น 303-C1 ใช้เพื่อกระจายน้ำ 9 ลิตร/นาที ประมาณ 0.5 บาร์ หรือ 7.25 PSI ดังรูปที่ 13
- 2) ค่า TDH ของปั้ม 14.31 เมตร เมื่ออัตราการไหล ประมาณ 54 ลิตร/นาที
- 3) สภาพจริงของแปลงทดสอบรดน้ำผัก ส่งผลให้สามารถละเลยค่า Elevation Head
- 4) ไม่นำ Velocity Head ในระบบท่อมาคิด

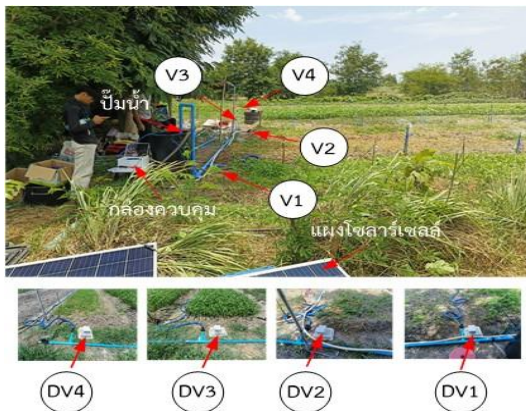
ตารางที่ 3 ค่าความดันสูญเสียในระบบสปริงเกอร์

ส่วนประกอบ	ตำแหน่งสปริงเกอร์	
	ใกล้ที่สุด	ไกลที่สุด
ท่อเมน (Main Line) 1.25" (7.5 ม.)	ตัดทิ้ง	0.14 ม.
ท่อเมนย่อย (Lateral Line) 1" (รวม 10ม.)	0.22 ม.	0.22 ม.
วาล์วน้ำ	4.30 ม.	4.30 ม.
ตัวรับรู้อัตราการไหล	ตัดทิ้ง	ตัดทิ้ง
ข้อต่อต่างๆ	0.07 ม.	0.21ม.
สายยาง 1" (ยาว 5.8 ม.)	0.27 ม.	0.27 ม.
ผลรวมความดันสูญเสีย	4.86 ม.	5.14 ม.
ความดันน้ำด้านเข้าสปริงเกอร์ (อย่างต่ำ 0.5 บาร์)	9.45ม. = 0.93 บาร์	9.17ม. = 0.90 บาร์

3.3 การทดสอบระบบรดน้ำผักในพื้นที่ปลูกผักจริง ณ ตำบลพุดซา

จัดวางอุปกรณ์ดังรูปที่ 14 ใช้วิธีเติมน้ำใส่ถังพักน้ำ ที่วางในระดับเดียวกับระบบสปริงเกอร์ และจุ่มปั้มน้ำลงในถังพัก ต่อตัวรับรู้อัตราการไหลของน้ำเข้ากับท่อเมนขนาด 1.25 นิ้ว และแยกเป็นโซนโดยต่อวาล์วน้ำขนาด 1 นิ้วแยกจากท่อเมนจำนวน 4 ตัว มีบอร์ดควบคุมการเปิด-ปิดวาล์วน้ำ (DV1 ถึง DV4) ต่อกับท่อเมนย่อยขนาด 1 นิ้ว ของแต่ละโซน ซึ่งติดตั้งสปริงเกอร์จำนวน 6 ตัว โดยต่อแยกจากท่อเมนย่อยด้วยท่อขนาด 1/2 นิ้ว ยาว 60 เซนติเมตร แต่ละตัวห่างกัน 2 เมตร แต่ละแถวห่างกันประมาณ 2 เมตร ซึ่งทำให้ได้รูปร่างพื้นที่การให้น้ำเป็นรูปสี่เหลี่ยม

ดำเนินการวัดปริมาณน้ำผ่านสปริงเกอร์ตำแหน่งที่อยู่ใกล้ปั้มน้ำ และ ตำแหน่งที่อยู่ไกลที่สุด โดยใช้มิเตอร์น้ำซึ่งถูกติดตั้งในแนวตั้ง ดังรูปที่ 15



รูปที่ 14 การทดลองการควบคุมสปริงเกลอร์
แต่ละโซนในพื้นที่จริง

ส่วนผลการทดลองวัดปริมาณน้ำผ่านสปริงเกลอร์ของแต่ละโซนด้วยมิเตอร์น้ำ ในระยะเวลา 5 นาที เมื่อความเข้มแสงอาทิตย์ 1,000 วัตต์/ตารางเมตร พบว่าได้ค่าปริมาณน้ำประมาณ 41-43 ลิตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันทั้งโซนที่ 1 และโซนที่ 4 ทั้งสปริงเกลอร์ตัวแรกและตัวท้ายของแต่ละโซน เมื่อวิเคราะห์ผลทดสอบเทียบกับการออกแบบ สาเหตุที่ปริมาณน้ำได้ต่ำกว่าค่าที่ออกแบบ คือ 45 ลิตรในระยะเวลา 5 นาที (9 ลิตร/นาที) อาจเนื่องมาจาก การวางมิเตอร์น้ำที่ถูกออกแบบให้ใช้งานโดยวางในแนวนอน แต่ถูกติดตั้งในแนวตั้งในการทดสอบ เนื่องจาก ต้องเพิ่มข้อต่อท่อและยากต่อการทำให้แข็งแรงมั่นคง ทั้งนี้ค่าสูญเสียความดันในมิเตอร์น้ำดังแสดงในรูปที่ 16 ในช่วงอัตราการไหลที่ใช้งาน 9 ถึง 16 ลิตร/นาที ซึ่งมีค่าต่ำจึงสามารถตัดทิ้งได้

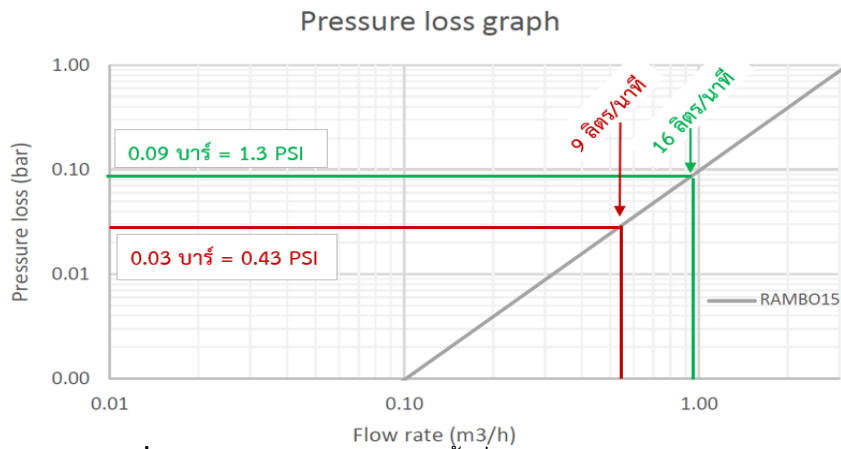
ในการทดสอบการควบคุมวาล์วน้ำในพื้นที่จริง ได้ลดปริมาณน้ำแต่ละโซนจากเดิมประมาณ 200 ลิตร/โซน เป็น 50 ลิตร/โซน เพื่อลดเวลาในการรอการเปลี่ยนโซน



รูปที่ 15 การวัดปริมาณน้ำ
สปริงเกลอร์แถวที่ 1

รูปที่ 17 แสดงผลการวัดรัศมีการกระจายน้ำผ่านวาล์วน้ำแต่ละโซนตามความเข้มแสงอาทิตย์พบว่าเมื่อความเข้มแสงอาทิตย์ 1,000 วัตต์/ตารางเมตร มีค่ามากที่สุดที่ 320 เซนติเมตร และต่ำสุดที่ 55 เซนติเมตร แต่มีลักษณะการกระจายของน้ำไม่สม่ำเสมอ เมื่อความเข้มแสง 200 วัตต์/ตารางเมตร

ผลการทดลองระยะทางในการควบคุมการเปิด-ปิดวาล์วน้ำเพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่ในการรดน้ำผักได้ไม่น้อยกว่า 1 ไร่ ทำการทดลองโดยใช้บอร์ดส่งที่ต่อกับตัวรับรู้อัตราการไหลและเครื่องรับสัญญาณ LoRa และวงจรต่างๆ ที่ใช้ควบคุมการเปิด-ปิดวาล์วน้ำจำนวน 1 ชุด โดยได้ใช้วิธีวางเครื่องส่งอยู่กับที่และวางเครื่องรับตามแนวขอบเขต จำนวน 4 ตำแหน่งครอบคลุมพื้นที่ 2 ไร่ 2 งาน (ใช้ App Ling บนไอแพดในการวัดพื้นที่) ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์การทดลองแสดงดังรูปที่ 18 ผลทดสอบการรับ-ส่งสัญญาณควบคุมวาล์วน้ำครอบคลุมพื้นที่ได้มากกว่า 2 ไร่



รูปที่ 16 แสดงค่าสูญเสียความดันน้ำที่ผ่านมิเตอร์ รุ่น RAMBO15



รูปที่ 17 รังสีการกระจายน้ำผ่านหัวน้ำแต่ละตัว



รูปที่ 18 การจัดวางการทดลองระยะรับส่งสัญญาณควบคุมหัวน้ำ



4. บทสรุป

ระบบรดน้ำอัตโนมัติด้วยการแบ่งรดทีละส่วนโดยใช้ปั๊มน้ำโซลาร์เซลล์กำลัง 750 วัตต์ (สูบน้ำได้สูงสุด 3,780 ลิตร/ชั่วโมง เฮดสูงสุด 95 เมตร เมื่อความเข้มแสงอาทิตย์ 1,000 วัตต์/ตารางเมตร ใช้เพิ่มความดันให้เพียงพอสำหรับสปริงเกอร์ ที่ต้องการน้ำ 9 ลิตร/นาที่ (ความดัน 0.5 บาร์) ได้ 6 ตัว รัศมีการกระจายน้ำแต่ละตัวประมาณ 320 เซนติเมตร เมื่อสปริงเกอร์แต่ละตัวถูกติดตั้งห่างกัน 4 เมตร ซึ่งเป็น 2 เท่าของรัศมีการกระจายน้ำตามแนวทางที่เกษตรกรปฏิบัติกันทั่วไป ครอบคลุมพื้นที่ 96 ตารางเมตร/โซน โดยอัตราการให้น้ำอยู่ระหว่าง 42 ถึง 54 ลิตร/นาที่ ในช่วงความเข้มแสงอาทิตย์ 600 ถึง 1000 วัตต์/ตารางเมตร ระบบรดน้ำผักด้วยสปริงเกอร์ 4 โซน ครอบคลุมพื้นที่ 384 ตารางเมตร และสามารถขยายพื้นที่ได้โดยเพิ่มจำนวนวาล์วและอุปกรณ์แต่ละโซน โดยระบบปั๊มน้ำและระบบควบคุมหลักยังคงเดิม โดยมีความต้องการพัฒนาโปรแกรมเพื่อใช้งานอุปกรณ์ต่างๆ ในโหมดพลังงานต่ำและสามารถประมวลผลและแสดงผลค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่อ่านได้จากตัวรับรู้ มาใช้เป็นเงื่อนไขในการทำงานของระบบโดยอัตโนมัติมากขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา ประจำปีงบประมาณ 2566

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] <https://www.nectec.or.th/en/innovation/product-innovation/faarmseries.html>. (Accessed on 15 June 2024)
- [2] S. Tadsuan and P. Taerakul, Increasing yield and reducing the cost of cultivation of asparagus with the internet of things, The Journal of Industrial Technology, 2022, 18(3), 70-88. (in Thai)
- [3] M.Z.S. Hadi, D.A. Altarin and M. Yuliana, Smart agriculture system design to realize food sustainability based on LoRa Communication, IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite (COMNETSAT), Proceeding, 2023, 591-596.
- [4] J.M. Manzano, J. Bareiro, G.B. Cáceres, J.R. Salvador and P. Millán, Irrigation control by mimicry, IFAC PapersOnLine, 2022, 55(32), 147-152.
- [5] H. Zhang, H. Long, F.D. Gioia, D. Choi, A. Elia and P. Heinemann, LoRaWAN based internet of things (IoT) system for precision irrigation in plasticulture fresh-market tomato, Smart Agricultural Technology, 2022, 2(1), 100053.
- [6] M. Usmonov and F. Gregoretti, Design and implementation of a LoRa based wireless control for drip irrigation systems, Shanghai: 2nd International Conference on Robotics and Automation Engineering (ICRAE), Proceeding, 2017, 248-253.

- [7] S. Ngonchaiyaphum and S. Chuannok, Using tiny PV for designing module for switching loads to PV Panel when Solar Irradiance is Enough, The 43th Electrical Engineering Conference (EECON-43), Proceeding, 2020, 537-540. (in Thai)
- [8] S. Ngonchaiyaphum and S. Chuannok, Electric supply switching system for operating solar pump set stably enough for deploying in village water supply system, The 45th Electrical Engineering Conference (EECON-45), Proceeding, 2022, 408-411. (in Thai)
- [9] S. Ngonchaiyaphum and S. Chuannok, Solar water pump power source switching monitoring system via LoRa network, The 45th Electrical Engineering Conference (EECON-45), Proceeding, 2022, 342-345. (in Thai)
- [10] V. Viswanatha, A.C. Ramachandra, R.R.S. Venkata, P.K. Ashwini, R.M. Srinivasa and M.B. Sathisha, Implementation of IoT in Agriculture: A Scientific Approach for Smart Irrigation, 2022 IEEE 2nd Mysore Sub Section International Conference (MysuruCon), Proceeding, 2022, 1-6.
- [11] M. Balakrishnan and N.K. Navaneeth, Detection of plunger movement in DC solenoids, Texas Instruments, 2015, SSIY001.
- [12] <https://www.rainbird.com/sites/default/files/media/documents/2022-02/2022-02-16-d42076-pga-series-technical-spec.pdf>. (Accessed on 16 October 2024)
- [13] https://www.rainbird.com/sites/default/files/media/documents/2018-01/ref_PressureLossThroughWaterMeters.pdf. (Accessed on 18 October 2024)
- [14] <https://thaipipe.co.th/demos/product/content-01/01/pic-b/04.pdf>. (Accessed on 25 October 2024)
- [15] <https://assets.dultmeier.com/assets/pdfs/tech-library/02Water8.pdf>. (Accessed 25 October 2024)



แนวทางการเป็นกลางทางคาร์บอนของสถานศึกษา: กรณีศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล

เนตชนก พริ้งสกุล และ พงศกร คชาพงศ์กุล*

วิทยาลัยพลังงานและสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืนรัตนโกสินทร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: pongsakorn.kerd@rmutr.ac.th

วันที่รับบทความ: 13 มิถุนายน 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 7 พฤศจิกายน 2568; วันที่ตอบรับบทความ: 20 พฤศจิกายน 2568

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 11 ธันวาคม 2568

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า และประเมินศักยภาพการดูดซับคาร์บอนของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล และเสนอแนวทางการดำเนินงานสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอนที่เป็นไปได้ โดยใช้แนวทางตามมาตรฐาน GHG Protocol และ ISO 14064-1:2006 ครอบคลุมการกำหนดขอบเขตการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (ประเภท 1 2 และ 3) การเก็บข้อมูลกิจกรรม และการคำนวณปริมาณและปัจจัยการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าในปี พ.ศ.2567 พบว่ามหาวิทยาลัยปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่ารวม 1,607.89 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อปี โดยแหล่งปล่อยหลักคือการใช้พลังงานไฟฟ้า คิดเป็นร้อยละ 72.33 รองลงมาคือการจัดการของเสียด้วยวิธีฝังกลบ การปล่อยก๊าซมีเทนจากระบบบำบัดน้ำเสีย และการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับการเดินทาง ขณะเดียวกัน พื้นที่สีเขียวภายในมหาวิทยาลัยสามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าได้ถึง 930.52 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อปี ทำให้ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าสุทธิอยู่คงเหลือประมาณ 677.35 ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อปี งานวิจัยนี้ยังเสนอแนวทางการลดผลกระทบที่จะเกิดขึ้น เช่น การเพิ่มประสิทธิภาพพลังงาน การใช้พลังงานหมุนเวียน และการพัฒนาการชดเชยคาร์บอน โดยการวางยุทธศาสตร์สู่เป้าหมายความเป็นกลางทางคาร์บอนในระดับสถาบันอุดมศึกษา

คำสำคัญ: ความเป็นกลางทางคาร์บอน; มหาวิทยาลัยยั่งยืน; คาร์บอนฟุตพริ้นท์

Guidelines for Being Carbon Neutral for Educational Institutions: A Case Study of Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Wang Klai Kangwon Campus

Netchanok Pringsakul and Pongsakorn Kachapongkun*

Rattanakosin College for Sustainable Energy and Environment, Rajamangala University of Technology
Rattanakosin

* Corresponding author, E-mail: pongsakorn.kerd@rmutr.ac.th

Received: 13 June 2025; Revised: 7 November 2025; Accepted: 20 November 2025

Online Published: 11 December 2025

Abstract: This research aims to assess and analyze the amount of carbon dioxide equivalent emissions, explore and evaluate the potential for carbon sequestration, and propose a possible carbon neutrality operational approach at Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Wang Klai Kangwon Campus. The study follows the guidelines of the GHG Protocol and ISO 14064-1:2006, covering the identification of emission scopes (Scope 1 2 and 3), activity data collection, and calculation of emission factors. The study found that in 2024, the campus emitted a total of 1,607.89 tCO₂eq/year. The main source of emissions was electricity consumption (Scope 2), accounting for 72.33 % of the total, followed by Waste management by landfill, Methane emissions from wastewater treatment systems and Fuel consumption for official travel. Meanwhile, green spaces within the campus were able to absorb up to 930.52 tCO₂eq /year, resulting in net emissions of approximately 677.35 tCO₂eq /year. The research also proposes mitigation strategies, including energy efficiency improvement, renewable energy adoption and carbon offset programs, to support strategic planning toward achieving carbon neutrality in higher education institutions.

Keywords: Carbon neutrality; Sustainable University; Carbon footprint



1. บทนำ

ภาวะโลกร้อนและการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศนับเป็นปัญหาสำคัญระดับโลกในศตวรรษที่ 21 ซึ่งเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ที่นำไปสู่การปล่อยก๊าซเรือนกระจกในปริมาณสูง ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ระบบนิเวศ และคุณภาพชีวิตของมนุษยชาติ [1] การบรรเทาผลกระทบดังกล่าวจึงกลายเป็นวาระสำคัญที่ทุกภาคส่วนต้องร่วมมือกัน โดยเฉพาะการเปลี่ยนผ่านสู่แนวทางการพัฒนาที่ยั่งยืนและความเป็นกลางทางคาร์บอน [2, 3] ในปี พ.ศ. 2558 (ค.ศ. 2015) ประเทศสมาชิกกว่า 190 ประเทศได้ลงนามใน “ข้อตกลงปารีส” ซึ่งเป็นกรอบความร่วมมือในการจำกัดอุณหภูมิโลกไม่ให้สูงเกิน 2°C และมุ่งหมายให้ไม่เกิน 1.5°C เหนือระดับก่อนยุคอุตสาหกรรม [4] ซึ่งการบรรลุเป้าหมายนี้จำเป็นต้องลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าสุทธิให้เป็นศูนย์ภายในปี ค.ศ. 2025 [5] อย่างไรก็ตาม ความสำเร็จของเป้าหมายระดับโลกนี้ต้องพึ่งพาการดำเนินการในระดับท้องถิ่นอย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในภาคการศึกษา [6] สถาบันอุดมศึกษาในฐานะแหล่งบ่มเพาะองค์ความรู้และศูนย์กลางของการเปลี่ยนแปลงทางสังคม มีบทบาทสำคัญในการเป็นต้นแบบของการพัฒนาอย่างยั่งยืน [7, 8] หลายมหาวิทยาลัยทั่วโลกได้ริเริ่มนโยบายและแผนปฏิบัติการด้านความยั่งยืนและคาร์บอนเป็นศูนย์ [9, 10] ทั้งนี้แนวคิด “มหาวิทยาลัยยั่งยืน” หรือ “มหาวิทยาลัยคาร์บอนเป็นศูนย์” ไม่เพียงแต่สะท้อนผ่านการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อมในเชิงกายภาพ แต่ยังรวมถึงการจัดการเชิงนโยบาย ระบบสนับสนุน และพฤติกรรมของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียในองค์กร [11, 12]

ตัวอย่างเช่น Leuphana University ประเทศเยอรมนี ได้พัฒนาระบบมหาวิทยาลัยที่ยั่งยืนในทุกมิติ ทั้งด้านพลังงาน อาคาร และพฤติกรรมของผู้ใช้ [3] ขณะที่ University of British Columbia ประเทศแคนาดา ได้นำแนวทางนโยบายสู่การปฏิบัติอย่างเป็นรูปธรรมเพื่อเป้าหมายความยั่งยืนระยะยาว [9] และการศึกษาในเยอรมนีแสดงให้เห็นว่าการดำเนินการสู่มหาวิทยาลัยคาร์บอนเป็นศูนย์นั้นสามารถทำได้จริง หากมีการวางแผนและสนับสนุนอย่างต่อเนื่อง [13] สำหรับประเทศไทย มหาวิทยาลัยต่างๆ เริ่มตระหนักถึงบทบาทของตนในการสนับสนุนเป้าหมายระดับประเทศและระดับโลก โดยมุ่งเน้นการลดการปล่อยคาร์บอน การใช้พลังงานหมุนเวียน การจัดการทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ และการพัฒนาแนวทางเชิงระบบเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน ซึ่งบทบาทนี้มีความสำคัญยิ่งในการขับเคลื่อนประเทศสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอนภายในปี พ.ศ. 2593 สถาบันการศึกษาที่มีการประเมินการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า เช่น คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น โดยใช้ ปี พ.ศ.2557-2561 มีการประเมินการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า เท่ากับ $2.105 \text{ tCO}_2\text{eq}$ และปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อคน เท่ากับ $0.3 \text{ tCO}_2\text{eq/คน}$ [14] มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ โดยใช้ปี พ.ศ.2554 มีการประเมินการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า เท่ากับ $3,469.14 \text{ tCO}_2\text{eq}$ และปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อคน เท่ากับ $0.57 \text{ tCO}_2\text{eq/คน}$ [15]



มหาวิทยาลัยพะเยาโดยใช้ปี พ.ศ.2565 มีการประเมินการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าเท่ากับ 11,614.00 tCO₂eq และปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อคน เท่ากับ 0.5206 tCO₂eq/คน [16]

จากผลการนำเสนอแสดงให้เห็นการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าของสถาบันศึกษาที่เป็นองค์กรหนึ่งที่มีการปล่อย และการตระหนักถึงบทบาทของตนในการสนับสนุนเป้าหมายระดับประเทศและระดับโลกในการหาแนวทางการลดการปล่อยคาร์บอนในสถาบันศึกษา

2. วิธีการวิจัย

ประเมินวิเคราะห์ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า และสำรวจประเมินศักยภาพการกักเก็บคาร์บอน ซึ่งในที่นี้ใช้คำว่า การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า เพื่อหาแนวทางนำไปสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอนภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวลนั้น ดำเนินการผ่านกระบวนการ 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การกำหนดขอบเขตและการคำนวณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า การบรรเทาผลกระทบ และการตรวจสอบและกำหนดกลยุทธ์เพื่อความเป็นกลางทางคาร์บอน ดังนี้

2.1 การกำหนดขอบเขตและการคำนวณการปล่อยมลพิษ

2.1.1 การกำหนดขอบเขตของ Carbon Footprint

ใช้แนวทางตามมาตรฐาน GHG Protocol และ ISO 14064-1:2006 [17] ในการกำหนดขอบเขตของการรายงาน โดยพิจารณากิจกรรมที่ปล่อยคาร์บอนทั้งทางตรง (ประเภท 1) เช่น การใช้เชื้อเพลิงในอาคาร/

ยานพาหนะ และทางอ้อม (ประเภท 2 และ 3) เช่น การใช้ไฟฟ้าและการใช้น้ำประปา [18]

2.1.2 การรวบรวมข้อมูล

ข้อมูลการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าถูกรวบรวมจากแหล่งต่าง ๆ เช่น การใช้พลังงาน การขนส่ง และการจัดการของเสีย เป็นต้น โดยอ้างอิงปัจจัยการปล่อย เช่น IPCC Guidelines [18] U.S. EPA WARM Model [19, 20] UKDEIS [21] หรือฐานข้อมูลด้านเกษตรกรรมจาก WFLDB [22] โดยรวบรวมข้อมูลในช่วงเดือนมกราคม พ.ศ.2567 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ.2567 ภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล

2.1.3 การคำนวณการปล่อยมลพิษ

ใช้สมการพื้นฐาน:

$$\text{GHG Emissions} = \text{Activity Data} \times \text{EF} \quad (1)$$

โดย Activity Data คือ ข้อมูลเชิงปริมาณที่สะท้อนถึงการใช้ทรัพยากรหรือกิจกรรมที่ก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า

Emission Factor (EF) คือ ค่าคงที่ที่ใช้แสดงปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า [23] ที่ปล่อยออกมาต่อหน่วยของกิจกรรมหรือทรัพยากรที่ใช้ โดยกิจกรรมต่าง ๆ จะถูกแปลงเป็นปริมาณการปล่อย (tCO₂eq) โดยอ้างอิงศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (GWP) ตาม IPCC AR5 [24]

2.2 การบรรเทาผลกระทบ

2.2.1 การวิเคราะห์ผลลัพธ์

หลังการคำนวณ ควรแสดงผลการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าแยกตามกิจกรรมเพื่อตรวจสอบว่าแหล่งใดเป็นสัดส่วนมากที่สุด



และระบุกิจกรรมภายในองค์กรที่ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าในปริมาณสูงกว่ากิจกรรมอื่นอย่างมีนัยสำคัญ เพื่อออกแบบมาตรการลดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

2.2.2 การดำเนินการบรรเทาผลกระทบ

การระบุกิจกรรมที่กำลังพัฒนาหรือที่สามารถดำเนินการได้และมีผลกระทบต่อการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าอย่างชัดเจน โดยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าให้เหลือน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ในกระบวนการปฏิบัติงาน โครงการที่อาจรวมถึงการเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานในอาคาร, การใช้พลังงานหมุนเวียน, การจัดการของเสียแบบหมุนเวียน หรือโครงการวิจัยเพื่อเปลี่ยนรูปแบบการใช้ทรัพยากร เป็นต้น [25]

2.3 การตรวจสอบและกลยุทธ์ความเป็นกลางทางคาร์บอน

2.3.1 การตรวจสอบ

การประเมินควรดำเนินการโดยบุคคลที่สามที่เป็นหน่วยงานอิสระและมีความสามารถ เพื่อให้มั่นใจว่าการวัดปริมาณและการรายงานเป็นไปตามมาตรฐาน การตรวจสอบภายนอกเบื้องต้น เป็นกระบวนการสำคัญที่มีบทบาทในการสร้างความเชื่อมั่นในความถูกต้องครบถ้วน และความน่าเชื่อถือของข้อมูลการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าขององค์กร โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการจัดจำแนกประเภทของแหล่งปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (ประเภท 1 ประเภท 2 และ ประเภท 3) และการเลือกใช้ปัจจัยการปล่อยที่เหมาะสม มีความทันสมัย และมาจากแหล่งข้อมูลที่น่าเชื่อถือได้ ก่อนที่จะมีการกำหนดเป้าหมายการลดการ

ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าอย่างเป็นทางการหรือเข้าสู่กระบวนการวางยุทธศาสตร์ความเป็นกลางทางคาร์บอนในระยะยาว โดยเฉพาะในบริบทของสถาบันอุดมศึกษา ซึ่งมีความหลากหลายของแหล่งปล่อย องค์กรสามารถใช้ข้อมูลดังกล่าวในการกำหนด “ปีฐาน” (Base Year) สำหรับการติดตามผลและเป็นข้อมูลตั้งต้นในการจัดทำเป้าหมายด้านความยั่งยืนหรือความเป็นกลางทางคาร์บอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.3.2 กลยุทธ์การชดเชยและความเป็นกลางทางคาร์บอน

หลังจากประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์แล้ว สถาบันต้องจัดทำกลยุทธ์เพื่อลดและ/หรือชดเชยการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ โดยมุ่งสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอน กลยุทธ์นี้ควรครอบคลุมทั้งการลดการปล่อย ณ แหล่งกำเนิด และการชดเชยการปล่อยที่เหลือด้วยโครงการคาร์บอนเครดิต เช่น การปลูกป่า พลังงานหมุนเวียน หรือการซื้อ Carbon Credits เช่น VER หรือ CER จากโครงการที่ได้รับการรับรองตามหลักความโปร่งใสและไม่ซ้ำซ้อน (Non-double-counting) เพื่อชดเชยการปล่อยมลพิษที่เหลืออยู่

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

3.1 บริบทองค์กร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ประกอบด้วย 5 คณะ ได้แก่ อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี อุตสาหกรรมการโรงแรม การท่องเที่ยว บริหารธุรกิจ วิศวกรรมศาสตร์ และศิลปศาสตร์ ในปีการศึกษา 2567 มีนักศึกษา 3,297 คน



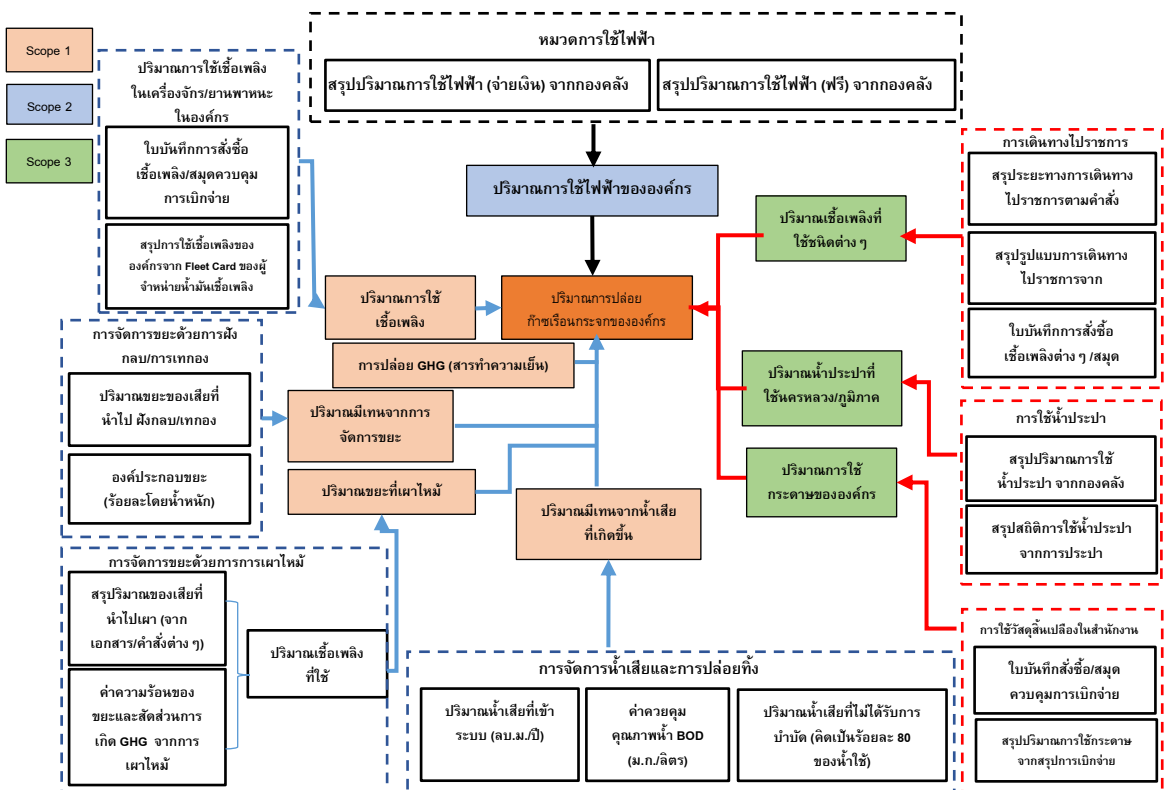
และพนักงาน 223 คน มีพื้นที่มหาวิทยาลัย 512,000 ตารางเมตร และพื้นที่อาคาร 153,000 ตารางเมตร

3.2 การวิเคราะห์ผลลัพธ์ก๊าซเรือนกระจก

3.2.1 แนวทางการรวบรวมข้อมูล

Flow data สำหรับการรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลในการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ประกอบด้วยการกำหนดขอบเขตว่าข้อมูลจะครอบคลุมกิจกรรมใดบ้างที่ส่งผลต่อการปล่อยก๊าซเรือนกระจกขององค์กร ส่วน

การรวบรวมข้อมูลต้องรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับกิจกรรมต่างๆ ที่กำหนดไว้ เช่น การใช้พลังงาน การขนส่ง การใช้ทรัพยากร และการใช้ผลิตภัณฑ์ เพื่อนำข้อมูลที่ถูกต้องสมบูรณ์มาเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลที่รวบรวมมาเพื่อระบุแหล่งที่มาและปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ซึ่งประโยชน์ของการทำ flow data เป็นการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อช่วยให้เข้าใจในการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมขององค์กร



รูปที่ 1. Flow Data สำหรับการรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูล



3.2.3 ภาพรวมการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าทั้งปี

มหาวิทยาลัยมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าทั้งหมด 1,607.89 tCO₂eq /ปี แบ่งตามประเภทการปล่อยได้เป็น 3 กลุ่ม ตามตารางที่ 1

3.2.3 การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่ารายละเอียดแต่ละประเภท

1. ประเภท 1 การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าทางตรง

การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ที่มีการเคลื่อนที่ (Mobile Combustion) จากเครื่องจักรและยานพาหนะภายในองค์กร รวม 51.41 tCO₂eq /ปี คิดเป็นร้อยละ 3.45 โดยปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าจากการเผาไหม้ที่มีการเคลื่อนที่มีการคำนวณจากปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิง

การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าที่เกิดขึ้นจากการรั่วไหล (Fugitive Emissions) ปุ๋ยเคมี 0.04 tCO₂eq /ปี สารทำความเย็น (R410a) 4.64 tCO₂eq /ปี สารทำความเย็น (R22) 42.77 tCO₂eq /ปี การปล่อยก๊าซมีเทนจากระบบ Septic tank 176.20 tCO₂eq และการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าจากการรั่วไหลรวม คิดเป็น 223.64 tCO₂eq /ปี โดยการปล่อยก๊าซมีเทนจากระบบ Septic Tank มาจากการคำนวณหาค่า Total CH₄ Emissions From Domestic Wastewater [26]

2.ประเภท 2 การปล่อยทางอ้อมจากการใช้ไฟฟ้า มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่ารวมทั้งสิ้น 1,163.00 tCO₂eq /ปี ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 72.33 ของการปล่อยทั้งหมดของมหาวิทยาลัย เป็นแหล่งปล่อยที่สำคัญที่สุด

ตารางที่ 1 ภาพรวมปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า 3 ประเภท

ขอบเขต ดำเนินงาน	GHG (tCO ₂ eq)	%
ประเภทที่ 1	279.06	17.36%
ประเภทที่ 2	1,163.00	72.33%
ประเภทที่ 3	165.83	10.31%
รวม	1,607.89	100.00%

3. ประเภท 3 การปล่อยทางอ้อมอื่น ๆ เกิดขึ้นจากกิจกรรมที่ไม่ได้อยู่ภายใต้การควบคุมโดยตรงขององค์กร แต่เกิดขึ้นในห่วงโซ่อุปทานและกิจกรรมที่เกี่ยวข้อง เช่น การใช้วัสดุสิ้นเปลือง การใช้น้ำประปา และขยะของเสีย (ฝังกลบ) สำหรับมหาวิทยาลัย การปล่อยประเภทนี้ได้ครอบคลุมแหล่งการปล่อยหลักที่สามารถควบคุมข้อมูลได้ง่าย ซึ่งพบว่าการปล่อยแหล่งที่สำคัญ ได้แก่ การใช้น้ำประปา มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าประมาณ 35.61 tCO₂eq /ปี การใช้วัสดุสำนักงานและวัสดุสิ้นเปลือง เช่น กระดาษ A4 สีขาว มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า รวมประมาณ 9.08 tCO₂eq /ปี และขยะของเสีย (ฝังกลบ) มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าถึง 121.14 tCO₂eq /ปี ซึ่งเป็นแหล่งปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าที่มีปริมาณรองจากการใช้ไฟฟ้า โดยเป็นกิจกรรมที่เกิดขึ้นภายนอกการควบคุมโดยตรงแต่เกี่ยวข้องกับภาระกิจขององค์กร

รูปที่ 2 แสดงปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าแต่ละกิจกรรม โดยกิจกรรมที่มีการปล่อยมากที่สุดคือการใช้ไฟฟ้า คิดเป็นสัดส่วน ร้อยละ 72.33 ของปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าทั้งหมด

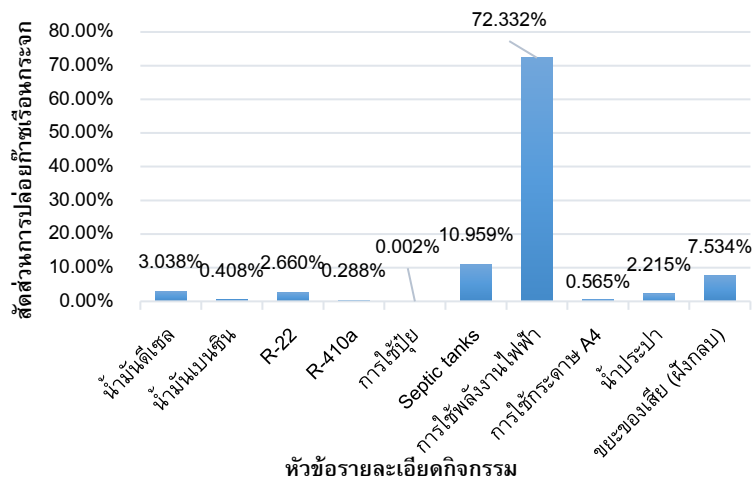


เมื่อพิจารณาค่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เทียบเท่าต่อจำนวนบุคลากร คิดเป็น 0.46 tCO₂eq / คน ซึ่งถือว่ามีความต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ มหาวิทยาลัยพะเยา 0.52 tCO₂eq /คน [16] และ

มหาวิทยาลัยชัยภูมิ 0.57 tCO₂eq /คน [15] แต่ยังคงสูงกว่าคณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 0.30 tCO₂eq /คน [14]

ตารางที่ 2 ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่ารายละเอียดแต่ละประเภท

ขอบเขต	ประเภทการปล่อย	Activity Data	หน่วย	Emission Factor	ปริมาณ tCO ₂ eq	ข้อมูลอ้างอิง
ประเภท 1	การเผาไหม้แบบเคลื่อนที่					
	น้ำมันดีเซล (ยานพาหนะ)	17,820.53	ลิตร	2.7406	48.84	IPCC Vol.2 table 3.2.1, 3.2.2, DEDE
	น้ำมันเบนซิน (เครื่องตัดหญ้า)	2,833.38	ลิตร	2.3171	6.57	IPCC Vol.2 table 3.3.1, DEDE
	-การรั่วไหลและอื่น ๆ					
	สารทำความเย็นR22	24.30	กิโลกรัม	1760.0000	42.77	IPCC 2013, AR5
ประเภท 1	สารทำความเย็นR410a	2.40	กิโลกรัม	1932.5000	4.64	IPCC 2013, AR5
	การรั่วไหลจากการปั๊ม	50.00	กิโลกรัม	0.7024	0.04	IPCC 2019 [27]
	การปล่อยก๊าซมีเทนระบบSeptic tanks	6,292.80	kgCH ₄	28.0000	176.20	IPCC 2014, AR5
ประเภท 2	การใช้พลังงานไฟฟ้า	2,326,463.81	kWh	0.4999	1,163.00	Thai National LCI Database, TIISMTEC-NSTDA, AR5
	การใช้กระดาษ A4	4,319.75	กิโลกรัม	2.1020	9.08	Thai National LCI Database, TIISMTEC-NSTDA
ประเภท 3	น้ำประปา	65,816.00	ลูกบาศก์เมตร	0.5410	35.61	Thai National LCI Database, TIISMTEC-NSTDA (with TGO electricity 2016-2018)
	ขยะของเสีย(ฝังกลบ)	4,326.30	kgCH ₄	28.0000	121.14	IPCC 2014, AR5
รวม					1,607.89	



รูปที่ 2 สัดส่วนการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าของแต่ละกิจกรรม

3.2.4 การเปรียบเทียบปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าจากการใช้ไฟฟ้ากับจำนวนประชากรในมหาวิทยาลัย

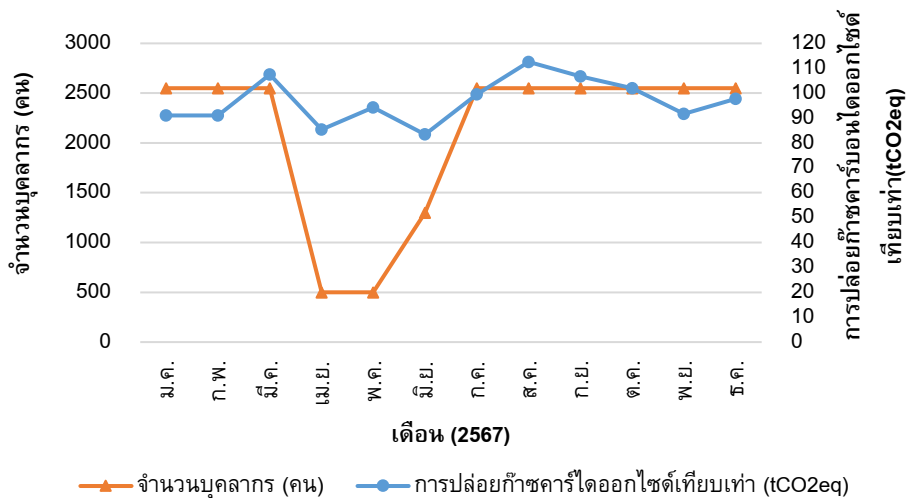
การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าจากการใช้ไฟฟ้า ส่วนใหญ่เกิดจากการเรียนการสอนในแต่ละเดือน แสดงดังรูปที่ 3

เนื่องจากกิจกรรมการใช้ไฟฟ้าเป็นกิจกรรมที่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่ามากที่สุด ดังนั้น จากรูปที่ 3 เป็นการเปรียบเทียบการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า จากการใช้พลังงานไฟฟ้า กับจำนวนประชากรที่ปฏิบัติงานภายในมหาวิทยาลัย ในแต่ละเดือนในปี พ.ศ. 2567 พบว่าในช่วงเดือนเมษายน ถึงมิถุนายน จะมีการใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยลง เนื่องจากเป็นช่วงปิดภาคการศึกษาและวันหยุดราชการ ยาวเมื่อเทียบกับ 3 เดือนแรกที่ผ่านมาทำให้มีการใช้ไฟฟ้าลดลง เมื่อถึงช่วงเดือนกรกฎาคมถึงธันวาคม ซึ่งเป็นช่วงเปิดภาคการศึกษา ทำให้การใช้ไฟฟ้าในอาคาร

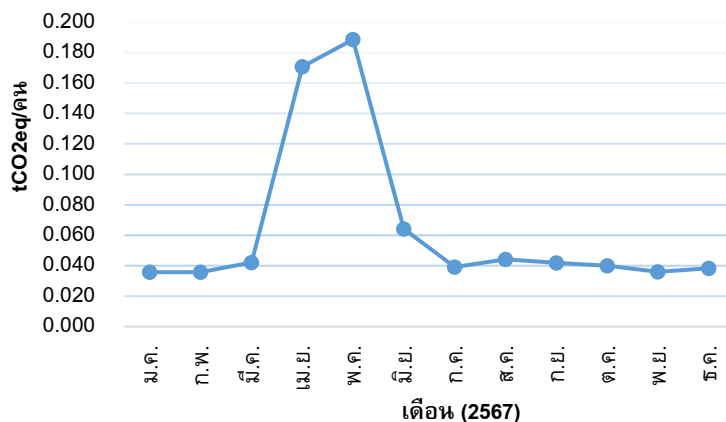
กลับมาเพิ่มขึ้น ส่วนในช่วงเดือนสิงหาคมถึงพฤศจิกายนพบการใช้พลังงานลดลงเนื่องจากมาจากปัจจัยทางด้านสภาพอากาศที่เย็นขึ้น การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวสะท้อนให้เห็นถึงผลของพฤติกรรมการใช้พลังงานของบุคลากรและนักศึกษาซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลโดยตรงกับการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการใช้พลังงาน

จากรูปที่ 4 แสดงการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าจากการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อจำนวนประชากรในมหาวิทยาลัยในแต่ละเดือน

แสดงให้เห็นว่าในช่วงที่ไม่มีการเรียนการสอน การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าจากการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อจำนวนประชากร มีปริมาณที่สูงถึง 0.19 tCO₂eq ต่อคน ในเดือนพฤษภาคม แสดงให้เห็นว่าการใช้พลังงานไฟฟ้ายังสูงอยู่จากการทำงานของเจ้าหน้าที่ โดยเฉพาะในระบบปรับอากาศ เนื่องจากในช่วงเดือนดังกล่าวเป็นฤดูร้อน



รูปที่ 3 กราฟเปรียบเทียบการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าจากการใช้ไฟฟ้ากับจำนวนประชากรในแต่ละเดือน



รูปที่ 4 การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าจากการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อจำนวนประชากร

3.2.5 การดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าจากชีวมวลในพื้นที่สีเขียว

มหาวิทยาลัยมีพื้นที่สีเขียวที่ช่วยดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าได้รวม

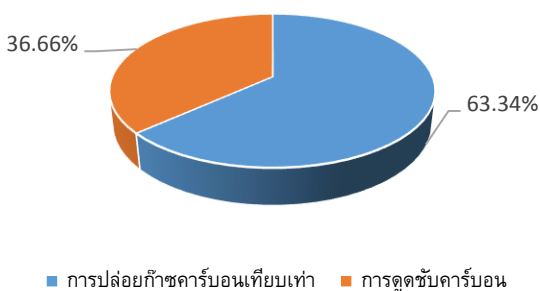
930.52 tCO₂eq /ปี โดยพรรณไม้ทั่วไปมีบทบาทสำคัญสูงสุดในกระบวนการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ปริมาณการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าของพื้นที่สีเขียว

กลุ่มชนิดไม้	ปริมาณการดูดซับ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (tCO ₂ eq/ปี)
พรรณไม้ทั่วไป	901.89
พรรณปาล์ม	28.57
ไผ่	0.46
รวม	930.52

3.2.6 การวิเคราะห์ผลลัพธ์โดยรวม

แม้ว่ามหาวิทยาลัยฯ จะมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่ารวม 1,607.89 tCO₂eq/ปี แต่ด้วยการดูดซับจากพื้นที่สีเขียวอย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ปริมาณการปล่อยสุทธิหลังหักลบอยู่ที่ประมาณ 677.35 tCO₂eq/ปี



รูปที่ 5 ปริมาณการปล่อยและการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า
วิทยาเขตวังไกลกังวล

3.3 แนวทางการบรรเทาผลกระทบ

จากการวิเคราะห์ข้อมูล ปี พ.ศ.2567 พบว่ามหาวิทยาลัยมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าในปีที่ศึกษารวม 1,607.89 tCO₂eq/ปี โดยแหล่งปล่อยหลักได้แก่ การใช้พลังงานไฟฟ้า ร้อยละ 72.33 การจัดการของเสีย (ฝังกลบ) ร้อยละ 7.53 การปล่อยก๊าซมีเทนในระบบ Septic Tanks ร้อยละ 10.96 การใช้น้ำมันเชื้อเพลิงจากยานพาหนะ ร้อยละ 3.04 และการรั่วไหลจากระบบทำความเย็น R-22 ร้อยละ 2.78

เพื่อบรรเทาผลกระทบจากการปล่อยดังกล่าว มหาวิทยาลัยได้มีแนวทางดำเนินการมาตรการลดการปล่อย ทั้งในเชิงโครงสร้างพื้นฐาน และในเชิงนโยบายการจัดการพื้นที่ ดังนี้

1. การจัดการพื้นที่สีเขียวภายในมหาวิทยาลัย การปลูกและดูแลพรรณไม้ต่าง ๆ โดยการดูดซับจากพื้นที่สีเขียวนี้ถือเป็นกลไกสำคัญในการชดเชยการปล่อย และบรรเทาผลกระทบโดยตรงจากกิจกรรมภายในมหาวิทยาลัย

2. การรณรงค์ลดการใช้พลังงานที่เกินความจำเป็น หรือการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน โดยเฉพาะอุปกรณ์ที่ใช้ไฟฟ้า และการใช้พลังงานหมุนเวียน เป็นต้น

3. การควบคุมการใช้สารทำความเย็น การควบคุมและบันทึกการรั่วไหลของสารทำความเย็นอย่างเป็นระบบ เพื่อเป็นฐานในการวางแผนเปลี่ยนไปใช้สารทำความเย็นชนิดที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากขึ้น

4. การติดตามการเดินทางของบุคลากร การเก็บข้อมูลการเดินทางไปราชการของบุคลากรเพื่อติดตามผลกระทบจากกิจกรรมเคลื่อนที่ ซึ่งเป็นข้อมูลพื้นฐานใน



การวางแผนลดกิจกรรมที่มีการปล่อยสูง หรือส่งเสริมการใช้ระบบขนส่งสาธารณะหรือรถร่วมเดินทาง

5. การรณรงค์การคัดแยกขยะที่ต้นทางเพื่อเพิ่มสัดส่วนขยะรีไซเคิลและขยะอินทรีย์ เพื่อลดการฝังกลบ

3.4 การชดเชยและความเป็นกลางทางคาร์บอน

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณการดูดซับและการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า พบว่ามหาวิทยาลัยยังมีปริมาณการปล่อยสุทธิที่ต้องชดเชยเพิ่มเติมอยู่ที่ 677.35 tCO₂eq /ปี คิดเป็น ร้อยละ 42.13 ของปริมาณการปล่อยทั้งหมด ซึ่งเป็นช่องว่างที่ต้องวางกลยุทธ์การชดเชยเพิ่มเติม เพื่อบรรลุเป้าหมายความเป็นกลางทางคาร์บอน ดังนั้น กลยุทธ์ที่สามารถดำเนินการเพิ่มเติมเพื่อชดเชยคาร์บอนที่เหลือ ได้แก่

1. การเพิ่มพื้นที่สีเขียวและชนิดพันธุ์พืชที่มีศักยภาพในการดูดซับคาร์บอนสูง เช่น การปลูกไม้โตเร็วหรือไม่ยืนต้นที่มีค่าการกักเก็บสูงในพื้นที่ที่ยังสามารถพัฒนาได้ เพื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอนชีวมวลในระยะยาว

2. การจัดทำโครงการชดเชยคาร์บอน โดยพิจารณาการเข้าร่วมโครงการปลูกป่าร่วมกับชุมชน หรือการจัดซื้อคาร์บอนเครดิตจากโครงการภายนอกที่ได้รับการรับรองตามมาตรฐานสากล เช่น CER (Certified Emission Reductions) หรือ VER (Verified Emission Reductions) ซึ่งสามารถชดเชยคาร์บอนได้โดยไม่เกิดการนับซ้ำ (non-double-counting)

3. การลดการปล่อยที่ต้นทาง ด้วยมาตรการที่มีศักยภาพลดการใช้พลังงานหรือเปลี่ยนแหล่งพลังงาน เช่น การติดตั้งระบบพลังงานแสงอาทิตย์ในอาคาร การส่งเสริมการใช้ระบบขนส่งที่ปล่อยมลพิษต่ำ และการเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ปรับอากาศ

แนวทางการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยพัฒนาระบบการจัดการพลังงานของมหาวิทยาลัย ซึ่งจะเป็นกรอบในการดำเนินโครงการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน สอดคล้องกับแผนยุทธศาสตร์ของกระทรวงพลังงานที่ผลักดันให้เกิดการนำมาตรฐานระบบการจัดการพลังงานไปสู่การเป็นมาตรฐานสากล [28]

ขั้นตอนการพัฒนาการจัดการพลังงานมี 8 ขั้นตอน

1. กำหนดโครงสร้างการจัดการพลังงาน
2. การประเมินสถานะเบื้องต้น
3. การกำหนดนโยบายและการประชาสัมพันธ์
4. การประเมินศักยภาพด้านเทคนิค
5. การกำหนดมาตรการ เป้าหมายและการคำนวณผลตอบแทนด้านการเงิน
6. การจัดทำแผนปฏิบัติการ
7. การตรวจติดตามและประเมินการจัดการพลังงาน
8. การทบทวนผลการดำเนินการ

จากการดำเนินการในขั้นตอนนี้ มหาวิทยาลัยได้ดำเนินการจัดทำแผนปฏิบัติการ โดยมีแนวทางคือ มาตรการศักยภาพด้านการอนุรักษ์พลังงาน ตาราง 4 เป็นการจัดทำแผนการอนุรักษ์พลังงานเพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้า และการเปลี่ยนรูปการใช้พลังงานเป็นพลังงานแสงอาทิตย์ ดังนั้นการดำเนินงานต้องทำตามระบบการจัดการพลังงาน 8 ขั้นตอน แล้วจึงดำเนินการตามแผน และตรวจวัดวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นจริง ซึ่งจากการประมาณการมหาวิทยาลัยสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าลงได้ 299,592.00 kWh/ปี เป็นเงิน 1,192,376.16 บาท/ปี หรือคิดเป็นการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า 149.77 tCO₂eq /ปี ทั้งนี้เป็นการวางแผนเบื้องต้นในการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าขององค์กร ซึ่งสามารถจัดทำมาตรการได้มากกว่านี้



ตารางที่ 4 แผนปฏิบัติงานด้านการอนุรักษ์พลังงาน

มาตรการอนุรักษ์พลังงาน	เป้าหมายการประหยัดพลังงานต่อปี			ลดการปล่อย GHG tCO ₂ eq/ปี
	kW	kWh/ปี	บาท/ปี	
พลังงานหมุนเวียน แสงอาทิตย์แบบ เชื่อมต่อสายส่ง	170.00	248,200.00	987,836.00	124.08
การเปลี่ยนมาใช้ หลอดไฟพลังงาน	17.60	51,392.00	204,540.16	25.69
รวม	187.60	299,592.00	1,192,376.16	149.77

โดยเฉพาะมาตรการระยะยาวที่ต้องใช้เงินลงทุนสูง คือ การเปลี่ยนเครื่องจักรอุปกรณ์ให้มีประสิทธิภาพสูง เพื่อให้ใช้พลังงานให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดต่อไป

4. บทสรุป

จากการประเมินการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เทียบเท่าและการดูดซับคาร์บอนในพื้นที่ เพื่อมุ่งสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอนของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตวังไกลกังวล โดยการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าทั้งหมด 1,607.89 tCO₂eq /ปี พบว่าการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าเกิดจากการใช้ไฟฟ้ามีปริมาณ 1,163.00 tCO₂eq /ปี คิดเป็นร้อยละ 72.33 เนื่องจากสถานศึกษามีความจำเป็นต้องใช้ในการเรียนการสอน และส่วนหนึ่งมาจากการดำเนินงานของบุคลากรในหน่วยงานต่าง ๆ ขององค์กร ส่วนปริมาณการดูดซับคาร์บอนในพื้นที่ของมหาวิทยาลัย 930.52 tCO₂eq /ปี ทำให้มีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

เทียบเท่าที่ยังเหลืออยู่ 677.35 tCO₂eq /ปี ดังนั้นการจัดทำมาตรการการลดการใช้พลังงานหรือการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานเป็นสิ่งสำคัญ โดยเฉพาะการใช้พลังงานหมุนเวียนเช่นการติดตั้ง Solar Rooftop เป็นวิธีการหนึ่งที่ช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าได้ เนื่องจากสถานศึกษามีการเรียนการสอนในช่วงเวลากลางวันเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่มียังมีแสงอาทิตย์มากที่สุด อีกทั้งการเพิ่มพื้นที่สีเขียวและการจัดทำโครงการชดเชยคาร์บอนก็เป็นส่วนหนึ่งในกลยุทธ์ในการชดเชยเพิ่มเติมอีกด้วย

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีมาจากความกรุณาและความร่วมมือของบุคลากรในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตวังไกลกังวล จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วง คณะผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์เกี่ยวกับการศึกษาการปล่อยคาร์บอนฟุตพริ้นท์และแนวทางการเป็นกลางทางคาร์บอนของมหาวิทยาลัยต่อไป

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] C.E. Button and J.Walton, Towards carbon neutrality and environmental sustainability at CCSU, *International Journal of Sustainability in Higher Education*, 2009, 10, 279–286.
- [2] S. Jain, A. Agarwal, V. Jani, S. Singhal, P. Sharma and R. Jalan, Assessment of carbon neutrality and sustainability in educational campuses (CaNSEC): A general framework, *Ecological Indicators*, 2017, 76, 131–143.
- [3] O. Opel, N. Strodel, K.F. Werner, J. Geffken, A. Tribel and W.K.L. Ruck, Climate-neutral and sustainable campus Leuphana University of Lueneburg, *Energy*, 2017, 141, 2628-2639.
- [4] H.L. Soest, M.G.J. Elzen and D.P. van Vuuren, Net-zero emission targets for major emitting countries consistent with the Paris Agreement, *Nature Communications*, 2021, 12, 2140.
- [5] A. Millot and N. Maizi, From open-loop energy revolutions to closed-loop transition: What drives carbon neutrality, *Technological Forecasting and Social Change*, 2021, 172, 121003.
- [6] M. Salvia, D. Reckien, F. Pietrapertosa, P. Eckersley, N.A. Spyridaki, A. Krook-Riekkola, et al., Will climate mitigation ambitions lead to carbon neutrality, An analysis of the local-level plans of 327 cities in the EU, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 135, 110253.
- [7] L. Sharp, Higher education: The quest for the sustainable campus, *Sustainability: Science, Practice and Policy*, 2017, 5, 1–8.
- [8] L.P. Amaral, N. Martins and J.B. Gouveia, Quest for a sustainable university: A review, *International Journal of Sustainability in Higher Education*, 2015, 16(2), 155–172.
- [9] N.A. Gudzs, Implementing the sustainable development policy at the University of British Columbia, *International Journal of Sustainability in Higher Education*, 2004, 5, 156–168.
- [10] H.A. Baer and A. Gallois, How committed are Australian Universities to environmental sustainability? A perspective on and from the University of Melbourne, *Critical Social*, 2018, 44(2), 357–373.
- [11] T. Mitchell, The nine elements of a sustainable campus, *Sustainability: The Journal of Record*, 2014, 7, 174-175.

- [12] P. Fonseca, P. Moura, H. Jorge and A. de Almeida, Sustainability in university campus: Options for achieving nearly zero energy goals, *International Journal of Sustainability in Higher Education*, 2018, 19, 790–816.
- [13] E. Udas, M. Wolk and M. Wilmking, The “carbon-neutral university” A study from Germany, *International Journal of Sustainability in Higher Education*, 2018, 19, 130–145.
- [14] P. Pathaimas, J. Rittirong, T. Puek and K. Theppamorn, Carbon footprint of organization: Case study faculty of public health, Khon Kean University, *KKU Journal for Public Health Research*, 2020, 13, 34-43. (in Thai)
- [15] S. Surawut and H. Dussadeeporn, Carbon footprint of an organization case study of Chaiyaphum Rajabhat University, *Engineering Journal Chiang Mai University*, 2019, 26(1), 227-233. (in Thai)
- [16] <https://www.up.ac.th/NewsReadBlog2.aspx,itemID=29323>. (Accessed on 1 May 2025)
- [17] ISO 14064-1:2006, Greenhouse Gases—Part 1: Specification with Guidance at the Organization Level for Quantification and Reporting of Greenhouse Gas Emissions and Removals, 2006.
- [18] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, The National Greenhouse Gas Inventories Programme, IGES, Hayama, Japan, 2008.
- [19] U.S. Environmental Protection Agency, Greenhouse gas emissions estimation methodologies for biogenic emissions from selected source categories: Solid waste disposal, Wastewater Treatment and Ethanol Fermentation, DC, USA, 2010.
- [20] U.S. Environmental Protection Agency, Documentation for greenhouse gas emission and energy factors used in the waste reduction model (WARM), ICF, DC, USA, 2015.
- [21] UK Department for Business, Energy & Industrial Strategy (BEIS), 2019 Government GHG conversion factors for company reporting: Methodology paper for emission factors final report, OGL, UK, 2019.
- [22] T. Nemecek, X. Bengoa, J. Lansche, A. Roesch, M. Faist-Emmenegger, V. Rossi, and S. Humbert, Methodological guidelines for the life cycle inventory of agricultural products, 3rd Ed., World Food LCA Database, Zurich, Switzerland, 2019.
- [23] <https://thaicarbonlabel.tgo.or.th/>. (Accessed on 1 May 2025).

- [24] G. Myhre, D. Shindell, F.M. Bréon, W. Collins, J.Fuglestedt, J. Huang, D. Koch, J.F.Lamarque, D.Lee, B. Mendoza, et al., Anthropogenic and natural radiative forcing, In: Climate change 2013: The physical science basis, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2013, 659–740.
- [25] C. Allen, M. Reid, J. Thwaites, R. Glover and T. Kestin, Assessing national progress and priorities for the Sustainable development goals (SDGs): Experience from Australia, Sustainability Science, 2019, 15, 521–538.
- [26] D. Michiel, T. Sirintornthep, V. Sonia, I. William, P. Craig, P. Riitta and W. Can, Wastewater treatment and discharge, In: 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2006.
- [27] H. Kristell, A. Hiroko, B. Martial, C. Ngonidzashe, K. Asa, M. James, P. Agustin, O. Stephen, R. Kristina, et al., N₂O emissions from managed soils and CO₂ emissions from lime and urea application, In: 2019 Refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Newzealand, 2019.
- [28] Department of Alternative Energy Development and Efficiency, The energy conservation promotion act, B.E. 2535, 1992. (in Thai)



ผลของการควบคุมอัตราการไหลของอากาศต่อประสิทธิภาพของเตาถลุงแร่เหล็กแบบเผาตรงที่ติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศ

ไพโรจน์ นะเที่ยง*

สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: Pairote.n@gmail.com

วันที่รับบทความ: 16 พฤษภาคม 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 17 พฤศจิกายน 2568; วันที่ตอบรับบทความ: 20 พฤศจิกายน 2568
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 11 ธันวาคม 2568

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของการควบคุมอัตราการไหลของอากาศเข้าสู่ห้องปฏิกรณ์ของเตาถลุงแร่เหล็กแบบเผาตรงที่มีการติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถลุงและลดการใช้เชื้อเพลิง ทำการทดลองโดยการควบคุมตัวแปร 2 ปัจจัย ได้แก่ (1) ความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับอุปกรณ์ส่งอากาศ ในช่วง 10 ถึง 50 เฮิร์ตซ์ และ (2) การปรับเปลี่ยนรูปแบบการส่งอากาศผ่านสถานะของวาล์วปีกผีเสื้อ 2 สถานะ ผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของข้อมูลพบว่าทั้งสองปัจจัยมีอิทธิพลต่อความเร็วลมที่รูลมของชั้นปฏิกรณ์ของเตาถลุงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.001$) ผลจากการนำไปประยุกต์ใช้ในการถลุงจริง พบว่าสถานะการทำงานที่เหมาะสมในแต่ละช่วงมีความแตกต่างกัน โดยในช่วงอุ่นเตา ถลุงควรกำหนดค่าความถี่ 40 เฮิร์ตซ์ โดยปรับตำแหน่งของวาล์วปีกผีเสื้อของช่องทางอากาศเข้าอุณหภูมิปกติที่ช่องเปิดระดับ 3 และปรับตำแหน่งของวาล์วปีกผีเสื้อของช่องทางของอากาศที่ส่งมาจากอุปกรณ์อุ่นอากาศที่ช่องเปิดระดับ 0 ส่วนในช่วงการถลุงเมื่อระดับอุณหภูมิภายในชั้นเตาปฏิกรณ์ของเตาถลุงคงที่ 1,200 องศาเซลเซียส ควรกำหนดค่าความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ โดยปรับตำแหน่งของวาล์วปีกผีเสื้อของช่องทางอากาศเข้าอุณหภูมิปกติที่ช่องเปิดระดับ 1 เพื่อนำอากาศที่มีปริมาณออกซิเจนหนาแน่นผสมกับอากาศอุ่นที่ส่งมาจากอุปกรณ์อุ่นอากาศซึ่งมีปริมาณออกซิเจนเบาบางกว่า และให้ปรับตำแหน่งของวาล์วปีกผีเสื้อของอากาศที่ส่งมาจากอุปกรณ์อุ่นอากาศที่ช่องเปิดระดับ 3 ภายใต้สถานะการควบคุมตัวแปรนี้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ ทำให้กระบวนการรีดักชันมีประสิทธิภาพมากขึ้น และให้ผลผลิตเหล็กอ่อนได้เฉลี่ย 25.55% และลดอัตราส่วนการใช้เชื้อเพลิงจาก 3:1 ส่วนเพียงเหลือ 2:1 ส่วน ได้อย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ: เตาถลุงแร่เหล็ก, การควบคุมอัตราการไหลของอากาศ, อุปกรณ์อุ่นอากาศ, ประสิทธิภาพการถลุง

Effect of Air Flow Rate Control on the Performance of a Direct Reduction Ironmaking Furnace with an Air Preheater

Pairote Nathiang*

Department of Industrial Technology, Faculty of Industrial Technology, Uttaradit Rajabhat University

* Corresponding author, E-mail: Pairote.n@gmail.com

Received: 16 May 2025; Revised: 17 November 2025; Accepted: 20 November 2025

Online Published: 11 December 2025

Abstract: This research investigated the effects of regulating airflow rates into the reactor chamber of a direct-fired iron ore blast furnace equipped with an air preheater. The primary objectives were to enhance smelting efficiency while concurrently reducing fuel consumption. The experiments were centered on two critical variables: (1) the frequency of electric current supplied to the air supply device, which varied between 10 and 50 Hz, (2) the air delivery pattern, which was adjusted through two settings of the butterfly valve. The analysis of variance conducted on the collected data indicated that both factors significantly impacted the air velocity at the air holes of the blast furnace reactor layer ($p < 0.001$). The findings derived from practical smelting applications demonstrated that optimal operating conditions varied across different phases. During the furnace preheating phase, a frequency of 40 Hz with the standard temperature air inlet throttle at level 3 and the air preheater throttle closed at level 0 yielded the best results. In the smelting phase at 1,200 °C, an optimal frequency of 20 Hz was achieved by setting the standard temperature air inlet throttle to level 1 and the air preheater throttle to level 3, ensuring proper air mixing with a higher oxygen concentration. By effectively managing these variables, the research demonstrated significant improvements in combustion efficiency, thereby enhancing the reduction process. This approach resulted in an average yield of 25.55% mild steel and a notable reduction in the fuel consumption ratio from 3:1 to 2:1.

Keywords: Ironmaking furnace, Air flow rate control, Air preheater, Smelting efficiency



1. บทนำ

แร่เหล็ก (Iron) เป็นวัสดุที่มีกำลังรับแรงดึงสูง มีความคงทนตลอดอายุการใช้งานและมีรูปทรงมาตรฐานที่ไม่เปลี่ยนแปลงได้ง่ายเมื่อมีแรงกระทำ [1] สำหรับแหล่งแร่เหล็กโบราณที่สำคัญของประเทศไทย อาทิ แหล่งแร่เหล็กน้ำพี้ จังหวัดอุดรธานี แหล่งแร่เหล็กเมืองลิ้น จังหวัดลำพูน และแหล่งแร่เหล็กเมืองลอง จังหวัดแพร่ โดยสินแร่เหล็กที่พบจะจัดอยู่ในกลุ่มของแร่ฮีมาไทต์ (Fe_2O_3) และแร่แมกนีไทต์ (Fe_3O_4) [2] ปัจจุบันการนำแร่เหล็กมาใช้ประโยชน์จะใช้ในรูปแบบเพื่อการอนุรักษ์สำหรับการผลิตสินค้าในระดับชุมชนเป็นหลัก จึงทำให้การถลุงสินแร่เหล็กของอุตสาหกรรมเหล็กในระดับชุมชนใช้การถลุงตามแบบกรรมวิธีการเผาตรง (Direct Reduced Iron : DRI) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ไม่ซับซ้อนและมีต้นทุนการผลิตต่ำ [3] โดยใช้หลักการลดออกไซด์ของแร่เหล็กด้วยถ่านไม้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อเพิ่มก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในห้องปฏิกรณ์ของเตาถลุง เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ทำให้แร่เหล็กในสภาพเหล็กออกไซด์กลายเป็นเหล็กอ่อนบริสุทธิ์ (Wrought Iron) มีคาร์บอนผสมอยู่น้อยกว่า 0.5% [4] ซึ่งต้องทำให้อุณหภูมิภายในห้องปฏิกรณ์ของเตาถลุงอยู่ในช่วง 1,200-1,300 องศาเซลเซียส เพื่อหลอมละลายสารมลทินให้เป็นตะกรันเหลว (Liquid Slag) แยกตัวออกมา [5] การเพิ่มอุณหภูมิภายในห้องปฏิกรณ์จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ส่งอากาศเพื่อนำอากาศที่มีออกซิเจนเข้าไปทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงที่อยู่ภายในเตาถลุง

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาการถลุงแร่เหล็กแบบเผาตรง พบว่างานวิจัย

ของอนุวัฒน์ จุติลาภการ [6] ได้ออกแบบเตาถลุงตามหลักการเตาแบบพาหะของญี่ปุ่น สามารถทำอุณหภูมิภายในปฏิกรณ์ของเตาถลุงในช่วง 1,200-1,300 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการไหลของอากาศในช่วงอุณหภูมิในระดับ 850 l/min และลดระดับในช่วงของการถลุงที่ระดับ 650 l/min พบว่าการถลุงแร่เหล็ก 15 กิโลกรัม ได้เหล็กหลังการถลุง 3.16 กิโลกรัม คิดเป็น 21.11% ใช้เวลาในการถลุง 2.30 ชั่วโมง ใช้เชื้อเพลิงถ่านไม้ 51.67 กิโลกรัม ส่วนงานวิจัยของพิทักษ์ คล้ายชม และคณะ [7] ที่ใช้ระบบการควบคุมอัตโนมัติเพื่อการควบคุมปริมาณอัตราการไหลของอากาศด้วยความเร็วคงที่ในระดับ 650 l/min ทั้งในช่วงการอุ่นเตาและในช่วงของการถลุง พบว่าการถลุงแร่เหล็ก 5 กิโลกรัม ใช้เวลาในการถลุง 1.19 ชั่วโมง ได้เหล็กหลังการถลุง 1.62 กิโลกรัม คิดเป็น 32.33% ใช้เชื้อเพลิงถ่านไม้ 53.67 กิโลกรัม และงานวิจัยของอดุลย์ พุกอินทร์ [8] ที่ได้ทำการทดลองถลุงแร่แบบเผาตรงด้วยเตาถลุงที่ปั้นด้วยดินผสมแกลบ ทราบและดินเหนียว ด้วยการควบคุมอัตราการไหลของอากาศเข้าสู่ชั้นปฏิกรณ์ของเตาถลุงที่แตกต่างกัน 3 ระดับ ในแต่ละช่วงเวลาของการถลุง โดยช่วงการอุ่นเตาถลุงกำหนดอัตราการไหลของอากาศในระดับ 3.7 m/s ส่วนในช่วงของการถลุงลดอัตราการไหลของอากาศลงที่ระดับ 2.6 m/s และในช่วงของการไล่ตะกรันเหลว (Liquid Slag) ออกจากเตาถลุงได้ลดอัตราการไหลของอากาศในระดับต่ำสุดที่ 1.8 m/s พบว่าการถลุงแร่เหล็ก 20 กิโลกรัม จะได้เนื้อเหล็กหลังการถลุง 2.3 กิโลกรัม คิดเป็น 11.5% โดยใช้เวลาในการถลุง 2.56 ชั่วโมง ใช้เชื้อเพลิงถ่านไม้ 58.50 กิโลกรัม ผลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมดต่างส่งผล



ให้อัตราส่วนของเนื้อเหล็กหลังการถลุงเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเตาถลุงแบบดั้งเดิมที่ผู้ประกอบการอุตสาหกรรมเหล็กระดับชุมชนใช้อยู่ในปัจจุบัน แต่ยังคงใช้ปริมาณถ่านเชื้อเพลิงในการถลุงตามสัดส่วนปกติ คือ ใช้เชื้อเพลิง 3 ส่วน ต่อการถลุงแร่เหล็ก 1 ส่วน [9] จึงไม่สามารถลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงที่เป็นต้นทุนสำคัญในการผลิตลงได้ เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวจึงมีการนำวิธีวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) มาประยุกต์ใช้เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของเวลา อุณหภูมิ และอัตราส่วนน้ำหนักของเชื้อเพลิงต่อปริมาณเนื้อเหล็กหลังการถลุง ซึ่งทำให้สามารถระบุปัจจัยสำคัญและปรับปรุงประสิทธิภาพของการรีดักชัน (Reduction) ให้สูงขึ้นได้อย่างมีนัยสำคัญ [10]

อย่างไรก็ตามงานวิจัยส่วนใหญ่ที่ผ่านมา ยังคงมุ่งเน้นไปที่การควบคุมปัจจัยเดียว หรือยังไม่ได้พิจารณาการทำงานร่วมกันระหว่างการควบคุมอัตราการไหลของอากาศอย่างละเอียด เช่น การปรับค่าความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ต้นกำลังของอุปกรณ์ส่งอากาศ (Blower) และการปรับเปลี่ยนรูปแบบการส่งอากาศ ซึ่งควบคุมผ่านสถานะของวาล์วปีกผีเสื้อ (Butterfly Valve) ที่ใช้ร่วมกับอุปกรณ์อุ่นอากาศอย่างเป็นระบบ ในทางทฤษฎีการเผาไหม้ (Combustion Theory) ปัจจัยทั้งสองนี้ถือเป็นตัวแปรหลักที่ควบคุมกระบวนการเผาไหม้โดยตรง โดยค่าความถี่ของกระแสไฟฟ้า (Frequency) จะเป็นตัวควบคุมความเร็วรอบของอุปกรณ์ส่งอากาศ ซึ่งสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณอากาศ (Air Volume) ที่เข้าสู่ห้องปฏิกรณ์ของเตาถลุง ปัจจัยนี้จึงส่งผลต่ออัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิงและ

ประสิทธิภาพของปฏิกิริยารีดักชัน ส่วนรูปแบบการส่งอากาศซึ่งควบคุมผ่านสถานะของวาล์วปีกผีเสื้อจะเป็นตัวกำหนดอุณหภูมิของอากาศ (Inlet Air Temperature) ที่ป้อนเข้าสู่เตาถลุง ซึ่งการใช้ความร้อนจากอุปกรณ์อุ่นอากาศถือเป็นหัวใจสำคัญของการนำพลังงานความร้อนทั้งกลับมาใช้ใหม่ที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนและลดการใช้เชื้อเพลิงโดยตรง ด้วยเหตุนี้การทำความเข้าใจอิทธิพลของตัวแปรเหล่านี้จึงเป็นสิ่งจำเป็นต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของเตาถลุงตามแบบกรรมวิธีการเผาตรง งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอผลของการควบคุมอุปกรณ์ส่งอากาศที่สามารถกำหนดค่าอัตราการนำอากาศเข้าไปสู่ห้องปฏิกรณ์ของเตาถลุง และนำผลการศึกษามากำหนดเป็นค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นในการควบคุมอัตราการไหลของอากาศกับการใช้งานเตาถลุงตามแบบกรรมวิธีการเผาทางตรง (Direct Iron Smelting Process) ที่มีการติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศไว้ที่ปลายปล่องเตาถลุงเพื่อนำความร้อนทิ้ง (Waste Heat) กลับมาแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศ อุณหภูมิปกติให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นก่อนเข้าสู่ห้องปฏิกรณ์ของเตาถลุง [11] โดยมุ่งหวังให้เกิดการลดสัดส่วนของการใช้เชื้อเพลิงในการถลุงตามอัตราส่วนปกติที่ใช้กันโดยทั่วไป

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

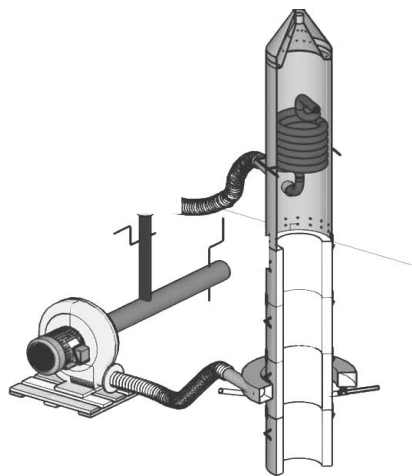
งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) เพื่อศึกษาผลของการควบคุมอุปกรณ์ส่งอากาศที่จะนำไปใช้ร่วมกับเตาถลุงตามแบบกรรมวิธีการเผาทางตรง (Direct Iron Smelting Process) โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังนี้



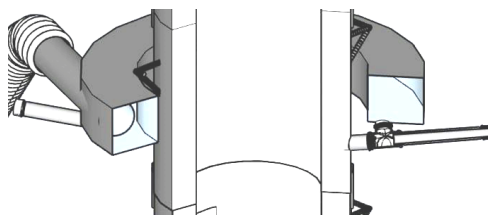
2.1 เครื่องมือ/อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

2.1.1 เตาถลุงแร่เหล็กแบบเผาตรง

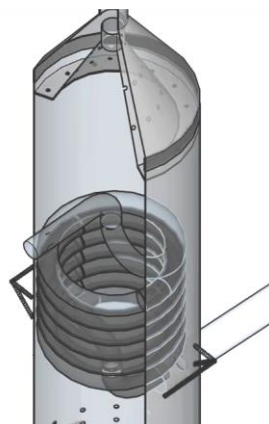
โครงสร้างของเตาถลุงแบ่งเป็นห้าชั้นสามารถถอดประกอบได้ ดังรูปที่ 1 ลักษณะเตาถลุงเป็นรูปทรงกระบอกขึ้นรูปจากเหล็กแผ่นรีดร้อน หนา 2 มิลลิเมตร เปลือกเตาด้านในกรุด้วยซีเมนต์ ทนไฟ หนา 5 เซนติเมตร สามารถทนอุณหภูมิสูงสุด 1,500 องศาเซลเซียส ชั้นที่หนึ่งเป็นฐานสำหรับรองรับตัวเตาถลุงและเป็นช่องทางไหลของตะกรันเหลว (Slag) ชั้นที่สองเป็นชั้นปฏิกรณ์ของเตาถลุง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 35 เซนติเมตร สูง 35 เซนติเมตร เจาะรูลมเข้าที่ผนังเตาถลุงให้ สูงจากฐานเตาด้านล่างขึ้นมาถึงเส้นผ่านศูนย์กลางรูลม 280 มิลลิเมตร ในทิศทางตรงกันข้ามกัน โดยรอบตัวเตาถลุงจำนวน 4 รู ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร โดยมีส่วนของห้องลม (Wind Belt) ที่เตาถลุงชั้นที่สองสำหรับใช้ส่งลมเข้าไปยังส่วนด้านล่างของเตาถลุง ทำจากเหล็กแผ่นมีความหนา 7 มิลลิเมตร ม้วนขึ้นรูปเป็นทรงกระบอกสวมรัดที่ด้านข้างของผนังเตาชั้นที่สอง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 533 มิลลิเมตร สูง 152 มิลลิเมตร โดยจะอยู่สูงจากขอบด้านล่างสุดของฐานเตาถลุงชั้นที่สองขึ้นมา 288 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 2 ส่วนชั้นที่สามจะเป็นชั้นของการเผาไหม้เชื้อเพลิงเพื่อทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ใช้สำหรับทำปฏิกิริยากับเนื้อเหล็ก ส่วนชั้นที่สี่จะเป็นชั้นสำหรับบรรจุถ่านเชื้อเพลิงเข้าสู่ตัวเตาถลุง และชั้นที่ห้าเป็นส่วนของชุดแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) แบบอุปกรณ์อุ่นอากาศ (Air Preheater) เป็นท่อขดแบบเกลียว (Coiled Tubes) ท่อเหล็ก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 250 มิลลิเมตร เป็นอุปกรณ์อุ่นอากาศที่มีขนาดเล็กและใช้เนื้อที่ในการติดตั้งน้อย [12] ดังรูปที่ 3



รูปที่ 1 โครงสร้างเตาถลุงแร่เหล็กแบบเผาตรง



รูปที่ 2 ห้องปฏิกรณ์ของเตาถลุง (ชั้นที่ 2)



รูปที่ 3 อุปกรณ์อุ่นอากาศที่อยู่ภายในชุดแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger)



2.1.2 ชุดควบคุมอากาศไหลเข้าสู่ชั้นปฏิกรณ์ของเตาถลุง

ผู้วิจัยได้ออกแบบช่องสำหรับดึงอากาศเข้าเตาถลุงเป็นสองทาง คือ ช่องที่ 1 เป็นช่องทางอากาศเข้าอุณหภูมิปกติ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ส่วนช่องที่ 2 เป็นช่องทางของอากาศที่ส่งมาจากอุปกรณ์อุ่นอากาศ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ดังรูปที่ 4 โดยช่องสำหรับดึงอากาศไหลเข้าไปในชั้นปฏิกรณ์ของเตาถลุงจะติดตั้งแผ่นวาล์ว ปีกผีเสื้อไว้ที่ด้านในของท่อส่งอากาศเข้าทั้งสอง เพื่อให้ควบคุม/บังคับอากาศด้วยการปรับระดับองศาการเอียงของแผ่นวาล์วปีกผีเสื้อออกเป็น 3 ระดับ ดังรูปที่ 5 โดยใช้วิธีการควบคุมด้วยเครื่องควบคุมความถี่ (Inverter) เพื่อควบคุมมอเตอร์ของอุปกรณ์ ส่งอากาศขนาด 2 H₂ 2 P 50 H₂ ที่ค่าความเร็วรอบของแกนหมุนใบพัดสูงสุด 2,950 rpm ความเร็วลมสูงสุด 26 cm / 923 cfm และปริมาณลมต่อหน่วยพื้นที่ 225 mm.w.g.

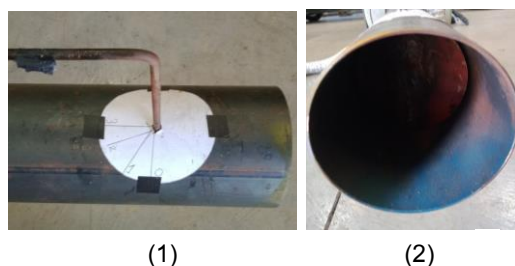
2.2 วิธีการทดลองการควบคุมอัตราการไหลของอากาศเข้าสู่ห้องปฏิกรณ์ของเตาถลุง

ผู้วิจัยได้กำหนดปัจจัยสำหรับการทดลองเอาไว้ 2 ปัจจัยหลัก ประกอบด้วย

ปัจจัยที่ 1. ระดับค่าความถี่ของกระแสไฟฟ้า (H₂) ที่จ่ายให้กับมอเตอร์ต้นกำลังของอุปกรณ์ส่งอากาศ (Blower) โดยใช้เครื่องควบคุมความถี่ (Inverter) ซึ่งค่าความถี่นี้จะสัมพันธ์โดยตรงกับความเร็วรอบของใบพัด โดยได้กำหนดระดับการทดลองไว้ 9 ระดับ ตั้งแต่ระดับต่ำสุดถึงสูงสุดตามย่านความถี่ของเครื่อง (Inverter) คือ ระดับ 10 ถึง 50 H₂ ซึ่งเป็นช่วงที่ให้ระดับความเร็วลมครอบคลุมการทำงานของเตาถลุงทั้ง



รูปที่ 4 ช่องทางดึงอากาศเข้าสู่ห้องปฏิกรณ์ของเตาถลุงชั้นที่ 2



รูปที่ 5 (1) การปรับองศาของวาล์วปีกผีเสื้อ 3 ระดับ
(2) แผ่นวาล์วปีกผีเสื้อภายในช่องอากาศเข้า

ในช่วงอุ่นเตา ช่วงถลุง และในช่วงของการเจาะไล่ตะกรันเหลว (Slag)

ปัจจัยที่ 2. การปรับเปลี่ยนรูปแบบการส่งอากาศซึ่งควบคุมผ่านสถานะของวาล์วปีกผีเสื้อ (Butterfly Valve) โดยกำหนดไว้ 2 สถานะที่แตกต่างกัน ได้แก่ สถานะที่ 1. เป็นการเปิดวาล์วเฉพาะช่องอากาศเข้าที่อุณหภูมิปกติ และสถานะที่ 2. เป็นการเปิดวาล์วเฉพาะช่องอากาศร้อนที่ส่งมาจากอุปกรณ์ อุ่นอากาศ ทั้งนี้ในแต่ละสภาวะการทดลองจะดำเนินการซ้ำจำนวน 3 ครั้ง และทำการวัดอัตราการไหลของอากาศเข้าชั้นปฏิกรณ์ของเตาถลุง ดังรูปที่ 6



จากนั้นนำข้อมูลที่รวบรวมได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two-Way ANOVA) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Minitab 19 เพื่อทดสอบความแปรปรวนและวิเคราะห์ค่าระดับความเร็วลมที่สัมพันธ์กับอัตราการไหลของอากาศเข้าสู่ห้องปฏิกรณ์เตาถลุง

2.3 วิธีการทดสอบประสิทธิภาพการถลุงแร่เหล็กแบบเผาตรง

ผู้วิจัยได้นำผลจากการทดลองในขั้นตอนที่ 2.2 มาใช้เพื่อกำหนดเป็นค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นสำหรับการควบคุมอัตราการไหลของอากาศเข้าสู่ห้องปฏิกรณ์ของเตาถลุง ดังรูปที่ 7 โดยทำการถลุงแร่เหล็กชนิดฮีมาไทต์ (Hematite) Fe_2O_3 จากแหล่งแร่บ้านน้ำพี้ ตำบลน้ำพี้ จังหวัดอุดรธานี ใช้วิธีการเตรียมแร่เหล็กด้วยการบดให้เป็นเม็ดขนาดไม่เกิน 5 มิลลิเมตร แล้วนำมาแบ่งใส่ถุงพลาสติกถุงละ 1.5 กิโลกรัม จำนวน 10 ถุง รวม 15 กิโลกรัม ใช้ถ่านไม้จากต้นยูคาลิปตัสที่มีขนาดเฉลี่ย 1-2 ลูกบาศก์นิ้ว อัตราการป้อนเชื้อเพลิงเข้าเตาถลุงเฉลี่ย 15 นาที่ / การใช้เชื้อเพลิง 1.5 กิโลกรัม

ขั้นตอนที่ 1 ช่วงการอุ่นเตาถลุง/ช่วงการสะสมความร้อนของอุปกรณ์อุ่นอากาศ ใช้ระยะเวลารวม 15 นาที่ เริ่มจากการใส่ถ่านชาร์ต (เชื้อเพลิงถ่านไม้ที่ติดไฟ) ลงไปในเตาถลุงให้อยู่ในระดับเท่ากับรูลมของเตาปฏิกรณ์เตาถลุงชั้นที่ 2 จากนั้นเติมถ่านเชื้อเพลิงเข้าไปจนเต็มเตาถลุงชั้นที่ 4 (ปริมาณ 20 กิโลกรัม) แล้วทำการอัดอากาศเข้าภายในเตาถลุงด้วยการปรับระดับเครื่องควบคุมความถี่ (Inverter) ที่ระดับ 40 Hz (ค่าระดับความเร็วลม 6.55 m/s) โดยปรับตำแหน่งของวาล์วปีกผีเสื้อของช่องทางอากาศเข้า อุณหภูมิปกติที่ช่องเปิดระดับ 3 และปรับตำแหน่งของวาล์วปีกผีเสื้อ



รูปที่ 6 การวัดอัตราการไหลของอากาศเข้าสู่ชั้นปฏิกรณ์ของเตาถลุงด้วยเครื่อง (Air Flow Anemometer) รุ่น GM8902



รูปที่ 7 การประกอบ/ติดตั้งเพื่อทดสอบประสิทธิภาพเตาถลุงแร่เหล็กแบบเผาตรง

ของช่องทางของอากาศที่ส่งมาจากอุปกรณ์อุ่นอากาศที่ช่องปิดระดับ 0



ขั้นตอนที่ 2 ช่วงของการถลุง เมื่อระดับ อุณหภูมิ ภายในชั้นปฏิกรณ์ของเตาถลุงคงที่ 1,200 องศาเซลเซียส จึงใส่แร่เหล็กครั้งที่ 1 (น้ำหนัก 3 กิโลกรัม) พร้อมกับเติมถ่านเชื้อเพลิงปริมาณ 1.5 กิโลกรัม และทำการปรับระดับความเร็วลมที่เครื่องควบคุมความถี่ (Inverter) ที่ระดับ 20 Hz (ระดับค่าความเร็วลม 2.36 m/s) ซึ่งเป็นระดับที่พบว่าเหมาะสำหรับการทำปฏิกิริยารีดักชันตามผลการทดลองของอดุลย์ พุกอินทร์ [8] โดยปรับตำแหน่งของวาล์วปีกผีเสื้อของช่องทางอากาศเข้าอุณหภูมิปกติที่ช่องเปิดระดับ 1 เพื่อนำอากาศที่มีปริมาณออกซิเจนหนาแน่นผสมกับอากาศอุ่นที่ส่งมาจากอุปกรณ์อุ่นอากาศ ซึ่งมีปริมาณออกซิเจนเบาบางกว่า เพื่อไม่ให้ถ่านภายในเตาถลุงดับ [13] และให้ปรับตำแหน่งของวาล์วปีกผีเสื้อของอากาศที่ส่งมาจากอุปกรณ์อุ่นอากาศที่ช่องเปิดระดับ 3 โดยอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านจากอุปกรณ์อุ่นอากาศมีอุณหภูมิเฉลี่ย 110 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 8 และเมื่อครบเวลา 15 นาที จึงใส่แร่เหล็กครั้งที่ 2 (น้ำหนัก 3 กิโลกรัม) พร้อมกับเติมถ่านเชื้อเพลิงเข้าไปในเตาถลุงปริมาณ 1.5 กิโลกรัม แล้วทำเช่นเดิมเพื่อถลุงแร่เหล็กจนครบจำนวน โดยเว้นระยะเวลาห่างกัน 15 นาที

ขั้นตอนที่ 3 ช่วงการเจาะไล่ตะกรันเหลว (Slag) ดำเนินการหลังจากใส่แร่เหล็กครั้งที่ 5 ลงไปในเตาถลุง 15 นาที จากนั้นเติมถ่านเชื้อเพลิงต่อไปจนครบเวลา 1 ชั่วโมง ด้วยอัตราการป้อนเชื้อเพลิง 15 นาที/เชื้อเพลิง 1.5 กิโลกรัม พร้อมกับเจาะไล่ตะกรันเหลว (Slag) ออกจากเตาถลุงทุกๆ 15 นาที โดยให้ทำการปรับระดับเครื่องควบคุมความถี่ (Inverter) และปรับตำแหน่งของวาล์วปีกผีเสื้อของช่องทางอากาศเข้าในระดับเดียวกับขั้นตอนที่ 2



รูปที่ 8 การวัดระดับอุณหภูมิของอากาศที่ไหลผ่านมาจากอุปกรณ์อุ่นอากาศ

ขั้นตอนที่ 4 ช่วงปิดเตาถลุง หยุดเติมถ่านเชื้อเพลิง หลังจากการเจาะไล่ตะกรันเหลว (Slag) ครึ่งสุดท้ายแล้วปล่อยให้เชื้อเพลิงที่เหลือภายในเตาถลุงเผาไหม้จนหมด โดยทำการปรับระดับปริมาณอากาศไหลเข้าภายในชั้นปฏิกรณ์ของเตาถลุงด้วยการปรับระดับเครื่องควบคุมความถี่ (Inverter) ที่ระดับ 20 Hz (ค่าระดับความเร็วลม 2.36 m/s) โดยปรับตำแหน่งของวาล์วปีกผีเสื้อของช่องทางอากาศเข้าอุณหภูมิปกติที่ช่องเปิดระดับ 3 และให้ปรับตำแหน่งของวาล์วปีกผีเสื้อของช่องทางอากาศที่ส่งมาจากอุปกรณ์อุ่นอากาศที่ช่องเปิดระดับ 0 จากนั้น เมื่อเตาถลุงเย็นตัวลงจึงทำการยกเพื่อแยกชั้นเตาถลุงออกจากกัน เพื่อนำก้อนแร่เหล็กที่ได้ออกจากชั้นปฏิกรณ์เตาถลุง ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 (1) ตะกรัน (Slag) (2) เหล็กอ่อนบริสุทธิ์ (Wrought Iron) ที่ได้หลังการถลุง



3. ผลการวิจัย/ทดลองและการอภิปรายผล

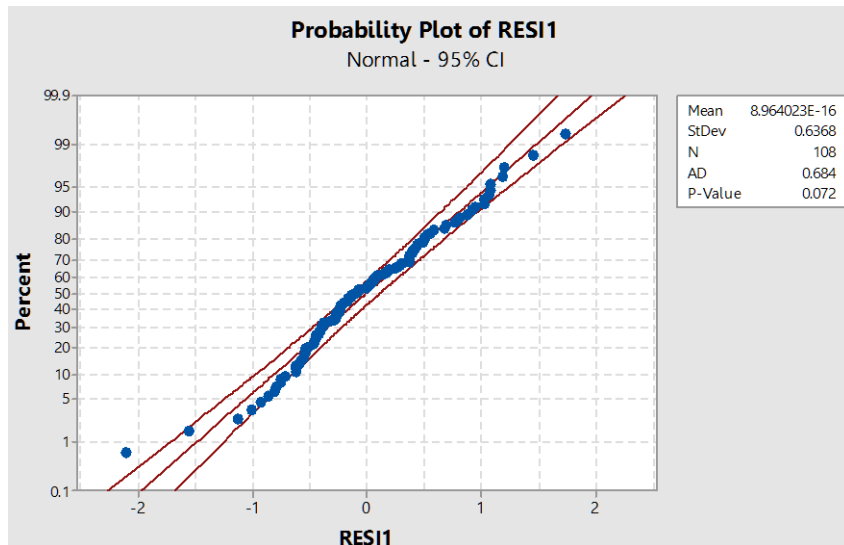
3.1 ผลการทดลองการควบคุมอัตราการไหลของอากาศเข้าสู่ห้องปฏิกรณ์ของเตาถลุง เมื่อกำหนดให้ตำแหน่งของวาล์วปีกผีเสื้อช่องอากาศปกติสถานะเปิดระดับ 3 ส่วนช่องอากาศที่ส่งมาจากอุปกรณ์อุ่นอากาศสถานะปิดระดับ 0 ดังตารางที่ 1

จากตารางที่ 1 ผลจากการตรวจสอบค่าการกระจายตัวแบบปกติเพื่อหาส่วนตกค้างของ ข้อมูลของค่าระดับความเร็วลมที่ไหลเข้าไปในชั้นปฏิกรณ์ของเตาถลุง (ชั้นที่2) พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติตามแนวเส้นตรง ซึ่งเป็นการแสดงว่าส่วนตกค้างจากผลการทดลองไม่แสดงสิ่งผิดปกติให้เห็น และค่า P-Value ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.05 ดังรูปที่ 10

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยด้านความถี่ของกระแสไฟฟ้า (H_2) ที่จ่ายให้กับมอเตอร์ของอุปกรณ์ส่งอากาศ ปรากฏดังตารางที่ 2 พบว่าปัจจัยความถี่มีอิทธิพลต่อค่าความเร็วลมที่ไหลเข้าสู่ชั้นปฏิกรณ์ของเตาถลุงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยค่า F-Value เท่ากับ 102.36 และมีค่า P-Value เท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 อย่างมาก แสดงให้เห็นว่าความแตกต่างของระดับความถี่ในช่วงที่ทำการศึกษา ($10-50 H_2$) ส่งผลต่อความเร็วลมที่เกิดขึ้นภายในเตาถลุงอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือ การเปลี่ยนแปลงความถี่ของกระแสไฟฟ้าส่งผลโดยตรงต่อความเร็วรอบของแกนหมุนใบพัด (Blower) และก่อให้เกิดความแตกต่างของอัตราการไหลของอากาศอย่างมีนัยสำคัญเชิงกลไก

ตารางที่ 1 ค่าระดับความเร็วลมที่ไหลเข้าไปในชั้นปฏิกรณ์ของเตาถลุง

ความถี่ กระแสไฟฟ้า (H_2)	ความเร็วรอบแกน หมุนของ (Blower) (rpm)	ค่าระดับความเร็วลมของรูลมภายในชั้นปฏิกรณ์ของเตาถลุง (m/s)			
		รูลมที่ 1 (hold)	รูลมที่ 2 (hold)	รูลมที่ 3 (hold)	รูลมที่ 4 (hold)
10	600	1.750	1.770	1.601	1.675
15	900	2.450	2.138	2.196	2.269
20	1,200	3.305	3.372	3.476	4.120
25	1,500	4.485	4.117	4.588	4.465
30	1,800	5.832	4.085	5.401	4.966
35	2,100	5.440	4.754	6.719	5.550
40	2,400	7.226	5.265	7.463	6.266
45	2,700	8.699	6.006	8.571	8.205
50	2,900	8.289	7.485	8.936	8.968



รูปที่ 10 แสดงความน่าจะเป็นแบบปกติส่วนตกค้างของข้อมูล (จากตารางที่ 1)

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าระดับความเร็วลม

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Hz	8	521.88	65.2355	102.36	0.000
Error	99	63.09	0.6373		
Total	107	584.98			

การวิเคราะห์การแบ่งกลุ่มของระดับค่าความถี่กระแสไฟฟ้า (H_z) ที่จ่ายให้กับมอเตอร์ต้นกำลังของ (Blower) จากเครื่องควบคุมความถี่ (Inverter) ซึ่งสัมพันธ์กับค่าความเร็วรอบของแกนหมุนใบพัดของ (Blower) เมื่อทำการแบ่งกลุ่มโดยใช้วิธีการของ Fisher LSD Method ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 พบว่าที่ระดับค่าความถี่ 50 H_z และ 45 H_z มีค่าเฉลี่ยของระดับค่าความเร็วลมสูงที่สุด 8.42008 m/s และ 7.87050 m/s ตามลำดับ ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่ม A ซึ่งบ่งบอกว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับค่าความถี่กระแสไฟฟ้า (H_z) อื่นๆ ระดับ

ค่าความถี่กระแสไฟฟ้า 40 H_z มีค่าเฉลี่ยความเร็วลมลดลงเล็กน้อย 6.55525 m/s อยู่ในกลุ่ม B ซึ่งต่างจากระดับ 50 H_z และ 45 H_z อย่างมีนัยสำคัญ แต่ยังคงมีค่าความเร็วลมสูง และที่ค่าระดับค่าความถี่กระแสไฟฟ้า (H_z) ที่ต่ำลง เช่น 40 H_z , 35 H_z ไปจนถึง 10 H_z มีค่าเฉลี่ยของความเร็วลมลดลงตามลำดับ ซึ่งมีการแยกกลุ่มที่ชัดเจนระหว่างในแต่ละระดับของค่าความถี่ (H_z) โดยผลลัพธ์นี้ชี้ให้เห็นว่าเมื่อค่าความถี่ (H_z) มีค่าสูงขึ้นจะมีผลทำให้ระดับค่าความเร็วลมสูงขึ้นตามไปอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังตารางที่ 3



ตารางที่ 3 การแบ่งกลุ่มของระดับค่าความถี่ของค่ากระแสไฟฟ้า (H_2) โดยใช้วิธีการของ Fisher LSD

Method

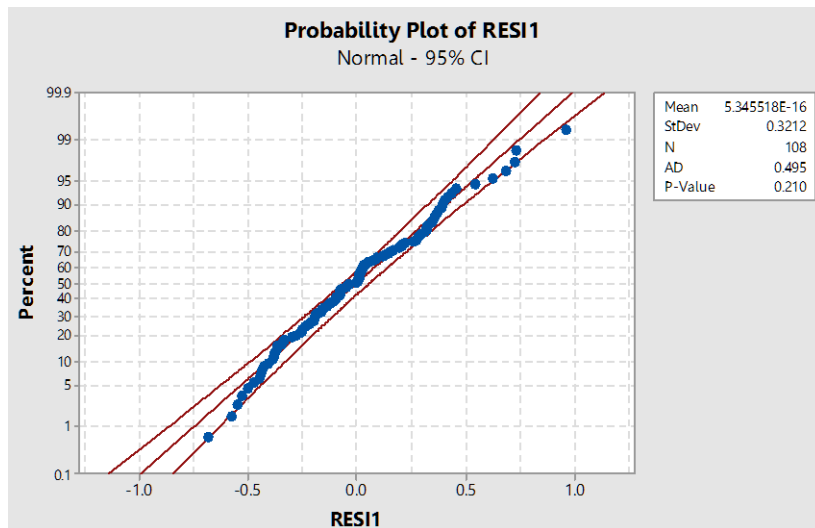
ค่าความถี่กระแสไฟฟ้า (H_2)	N	Mean	Grouping
50	12	8.42008	A
45	12	7.87050	A
40	12	6.55525	B
35	12	5.61608	C
30	12	5.07117	C
25	12	4.41408	D
20	12	3.56867	E
15	12	2.26367	F
10	12	1.69908	F

ผลการทดลองการควบคุมอัตราการไหลของอากาศเข้าสู่ห้องปฏิกรณ์ของเตาถลุง เมื่อกำหนดให้ตำแหน่งของวาล์วปีกผีเสื้อช่องอากาศปกติสถานะปิดระดับ 0 ส่วนช่องอากาศที่ส่งมาจากอุปกรณ์อุ่นอากาศสถานะเปิดระดับ 3 ดังตารางที่ 4

จากตารางที่ 4 ผลจากการตรวจสอบค่าการกระจายตัวแบบปกติเพื่อหาส่วนตกค้างของข้อมูลค่าของค่าระดับความเร็วลมที่ไหลเข้าไปในชั้นปฏิกรณ์ของเตาถลุง (ชั้นที่2) พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติตามแนวเส้นตรง ซึ่งเป็นการแสดงว่าส่วนตกค้างจากผลการทดลองนี้ไม่แสดงสิ่งผิดปกติให้เห็น และค่า P-Value ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.05 ดังรูปที่ 11

ตารางที่ 4 ค่าระดับความเร็วลมไหลเข้าไปในชั้นปฏิกรณ์ของเตาถลุง

ค่าความถี่กระแสไฟฟ้า (H_2)	ความเร็วรอบแกนหมุนของ (Blower) (rpm)	ค่าระดับความเร็วลมของรูลมภายในชั้นปฏิกรณ์ของเตาถลุง (m/s)			
		รูลมที่ 1 (hold)	รูลมที่ 2 (hold)	รูลมที่ 3 (hold)	รูลมที่ 4 (hold)
10	600	1.388	1.212	1.676	1.293
15	900	1.976	1.659	2.106	1.742
20	1,200	2.582	2.003	2.599	2.255
25	1,500	3.085	2.656	3.305	3.268
30	1,800	3.780	2.474	4.278	3.506
35	2,100	4.429	3.309	4.821	4.574
40	2,400	4.878	4.363	5.695	5.703
45	2,700	6.001	5.261	6.295	6.551
50	2,900	7.378	6.251	8.205	7.611



รูปที่ 11 แสดงความน่าจะเป็นแบบปกติส่วนตกค้างของข้อมูล (จากตารางที่ 4)

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของทั้งสองปัจจัย ได้แก่ ความถี่ของกระแสไฟฟ้า (H_2) และสถานะการเปิด-ปิดของวาล์วปีกผีเสื้อ ต่อค่าความเร็วลม (m/s) พบว่า ปัจจัยความถี่ของกระแสไฟฟ้ามีค่า F-Value เท่ากับ 161.31 และค่า P-Value เท่ากับ 0.000 ซึ่งต่ำกว่า 0.05 แสดงให้เห็นว่าความถี่ของกระแสไฟฟ้ามีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อระดับความเร็วลมที่ไหลเข้าสู่ชั้นปฏิกรณ์ของเตาสูง นอกจากนี้สถานะการเปิด-ปิดของวาล์วปีกผีเสื้อเมื่อช่องอากาศปกติที่ปิดระดับ 0 และช่องอากาศจากอุปกรณ์อุ่นอากาศที่เปิดระดับ 3 ยังมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความเร็วลมเช่นเดียวกัน เนื่องจากค่า P-Value ต่ำกว่า 0.05 ตามผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 5

จากการวิเคราะห์การแบ่งกลุ่มของระดับค่าความถี่ของค่ากระแสไฟฟ้า (H_2) ที่จ่ายให้กับมอเตอร์ต้นกำลังจากเครื่องควบคุมความถี่ (Inverter) ที่สัมพันธ์กับค่าความเร็วรอบของแกนหมุนใบพัด (Blower) เมื่อทำการแบ่งกลุ่มโดยใช้วิธีการของ Fisher LSD Method

ตารางที่ 5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าระดับความเร็วลม

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Hz	8	376.785	47.0982	161.31	0.000
Error	99	28.90	0.2920		
Total	107	405.690			

ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 พบว่าที่ระดับค่าความถี่ 50 H_2 มีค่าเฉลี่ยของระดับค่าความเร็วลมสูงที่สุด 7.36142 m/s และอยู่ในกลุ่ม A ซึ่งบ่งบอกว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับค่า H_2 อื่นๆ ส่วนระดับค่าความถี่ H_2 ที่ต่ำลง เช่น 45 H_2 , 40 H_2 , 35 H_2 ไปจนถึง 10 H_2 มีค่าเฉลี่ยของระดับค่าความเร็วลมที่ลดลงตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าค่าความถี่ (H_2) มีผลอย่างมากต่อการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของค่าระดับความเร็วลม โดยผลลัพธ์นี้ชี้ให้เห็นว่าเมื่อค่าความถี่ (H_2) มีค่าสูงขึ้นมีผลทำให้ค่าความเร็วลมสูงขึ้นตามไปอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังตารางที่ 6



ตารางที่ 6 การแบ่งกลุ่มของระดับค่าความถี่ของค่ากระแสไฟฟ้า (H_2) โดยใช้วิธีการของ Fisher LSD

Method

ค่าความถี่กระแสไฟฟ้า (H_2)	N	Mean	Grouping
50	12	7.36142	A
45	12	6.02708	B
40	12	5.16025	C
35	12	4.28375	D
30	12	3.50983	E
25	12	3.07875	E
20	12	2.36000	F
15	12	1.98367	F
10	12	1.39258	G

3.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการถลุงแร่เหล็กแบบเผาดรง

จากการที่ผู้วิจัยได้ทำการถลุงแร่เหล็กตามกรรมวิธีการในขั้นตอนที่ 2.3 โดยดำเนินการทดลองซ้ำ (Replication) ทั้งหมด 3 ครั้ง ซึ่งเป็นจำนวนที่พิจารณาจากข้อจำกัดด้านต้นทุนการดำเนินงานและระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองแต่ละครั้งที่ยาวนาน

ผลการทดลองพบว่าภายใต้เงื่อนไขที่ควบคุมทำให้ปริมาณเหล็กที่ได้หลังการถลุงมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย โดยเฉลี่ยแล้วสามารถผลิตเนื้อเหล็กได้ 3.83 กิโลกรัม คิดเป็นเปอร์เซ็นต์เหล็กเฉลี่ย 25.55% และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) สำหรับน้ำหนักเหล็กเพียง 0.25 กิโลกรัม ซึ่งค่าที่ต่ำนี้บ่งชี้ว่ากระบวนการทดสอบประสิทธิภาพการถลุงแร่เหล็กแบบเผาดรงมีความสม่ำเสมอและมีเสถียรภาพสูง ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ผลการถลุงแร่เหล็กน้ำหนัก 15 กิโลกรัม

ครั้งที่	เวลาถลุง (ชม.)	เวลาทั้งหมด (ชม.)	แร่ (กก.)	ถ่าน (กก.)	เหล็ก (กก.)	% เหล็ก
1	1.15	2.45	15	35	3.80	25.33
2	1.15	2.45	15	35	3.60	24.00
3	1.15	2.45	15	35	4.10	27.33
ค่าเฉลี่ย (Mean)					3.83	25.55
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.)					0.25	1.68

จากการทดลองนี้พบว่าการควบคุมอัตราการไหลของอากาศร่วมกับการใช้อุปกรณ์อุ่นอากาศ ทำให้ได้ผลผลิตเหล็กเฉลี่ย 25.55% ซึ่งเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าให้ผลผลิตที่สูงกว่างานวิจัยของ อนุวัฒน์ จุติลาภถาวร [6] และอดุลย์ พุกอินทร์ [8] ที่ได้ผลผลิต 21.11% และ 11.5% ตามลำดับ โดยอาจเป็นผลมาจากอุณหภูมิของอากาศร้อนจากอุปกรณ์อุ่นอากาศที่มีอุณหภูมิสูงถึง 110 องศาเซลเซียส ในช่วงของการถลุงน่าจะมีส่วนช่วยให้การเผาไหม้เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพมากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Karamarkovic และคณะ [14] และส่งผลดีต่อกระบวนการรีดักชันภายในขั้นปฏิกรณ์ของเตาถลุง อย่างไรก็ตามผลผลิตที่ได้จากงานวิจัยนี้ยังคงต่ำกว่างานวิจัยของพิทักษ์ คล้ายชม และคณะ [7] ซึ่งใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติและได้ผลผลิตสูงถึง 32.33% ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการควบคุมอัตราการไหลของอากาศให้มีความเร็วคงที่ด้วยระบบอัตโนมัติยังคงเป็นวิธีการที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด



4. บทสรุป

การศึกษาผลของการควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่มีต่อประสิทธิภาพของเตาถลุงแร่เหล็กแบบเผาตรงที่มีการติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศ เพื่อนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์ ด้วยการควบคุมอัตราการไหลของอากาศโดยการค่าปรับ ความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ของอุปกรณ์ส่งอากาศ (Blower) ในช่วง 10 ถึง 50 เฮิร์ตซ์ จำนวน 9 ระดับ ร่วมกับการปรับเปลี่ยนรูปแบบการส่งอากาศซึ่งควบคุมผ่านสถานะของวาล์วปีกผีเสื้อ (Butterfly Valve) โดยกำหนดไว้ 2 สถานะที่แตกต่างกัน พบว่าทั้งความถี่ของกระแสไฟฟ้าและการปรับเปลี่ยนรูปแบบการส่งอากาศมีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อระดับความเร็วลมที่เข้าสู่ภายในห้องปฏิกรณ์ ($p < 0.001$) โดยค่า F-value ที่สูงสำหรับปัจจัยความถี่ชี้ให้เห็นว่าการปรับความถี่เป็นกลไกหลักในการควบคุมปริมาณอากาศที่ป้อนเข้าสู่ระบบ นอกจากนี้ผลการแบ่งกลุ่มค่าเฉลี่ยความเร็วลมด้วยวิธี Fisher LSD Method ยังแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างชัดเจนของระดับความเร็วลมที่สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ของมอเตอร์อุปกรณ์ส่งอากาศ (Blower) ส่วนผลการทดสอบประสิทธิภาพการถลุงแร่เหล็กด้วยการควบคุมอัตราการไหลของอากาศมาใช้ในการกำหนดสภาวะการทำงานของเตาถลุง โดยทำการถลุงแร่ฮีมาไทต์ จำนวน 15 กิโลกรัม ร่วมกับเชื้อเพลิงถ่านไม้ยูคาลิปตัส ปริมาณ 35 กิโลกรัม ภายใต้ระยะเวลาการถลุงเฉลี่ย 2.45 ชั่วโมง ผลการทดลองถลุงซ้ำ 3 ครั้ง พบว่าสามารถผลิตเหล็กอ่อน (Wrought Iron) ได้เฉลี่ย 3.83 กิโลกรัม คิดเป็นร้อยละ

ของเนื้อเหล็กหลังการถลุง 25.55% ผลจากการวิจัยนี้ชี้ให้เห็นถึงประโยชน์ของระบบควบคุมอัตราการไหลของอากาศเมื่อนำไปใช้ร่วมกับเตาถลุงแร่เหล็กแบบเผาตรงที่มีการติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศไว้ที่ปลายปล่องเตาถลุง ซึ่งการที่อากาศป้อนเข้าสู่เตาถลุงได้รับการอุ่นเบื้องต้นจากความร้อนทิ้งที่มีผลทำให้กระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่ออัตราการรีดักชันออกไซด์ของแร่เหล็ก และเป็นปัจจัยสำคัญที่นำไปสู่การเพิ่มขึ้นของเหล็กที่ได้หลังการถลุง และยังมีผลในการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่ส่งผลทำให้อัตราส่วนการใช้เชื้อเพลิงลดลงเหลือเพียง 2 ส่วน ซึ่งต่ำกว่าการถลุงแร่เหล็กด้วยความร้อนโดยทั่วไปที่ใช้เชื้อเพลิงถึง 3 ส่วนต่อการถลุงแร่เหล็กเพียง 1 ส่วน นอกเหนือจากนี้ยังสำคัญทางเศรษฐศาสตร์ที่เกิดจากการเพิ่มผลผลิตและลดต้นทุนแล้ว ผลการวิจัยนี้ยังมีความคุ้มค่าในมิติของสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างยิ่ง การที่สามารถลดอัตราการใช้ถ่านเชื้อเพลิงในการผลิตลงได้นั้นไม่เพียงแต่ช่วยลดการพึ่งพาทรัพยากรธรรมชาติ แต่ยังส่งผลโดยตรงต่อการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และมลภาวะทางอากาศ ขณะเดียวกันการนำเทคโนโลยีอุปกรณ์อุ่นอากาศมาใช้เพื่อนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ ถือเป็นหลักการสำคัญของการประหยัดพลังงานและเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) ที่ช่วยให้กระบวนการถลุงเหล็กแบบดั้งเดิมของผู้ประกอบการอุตสาหกรรมเหล็กระดับชุมชนเป็นอุตสาหกรรมที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและสามารถพัฒนาต่อไปได้อย่างยั่งยืน

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้ดำเนินการวิจัยใคร่ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Phuk-in, Comparison of alloying elements between nam phi iron ore and iron ore of in uttardit province, Engineering Journal of Research and Development, 2020, 31(2), 191-198.
- [2] P. Chaiyaros, Archaeometallurgy of Muang Long: The significance of iron in the history and people of Lanna, Master Degree Thesis, Silpakorn University, Thailand, 2022.
- [3] X. Jiang, L. Wang, and F. M. Shen, Shaft furnace direct reduction technology, Advanced Materials Research, 2013, 805-806, 654-659.
- [4] S. Yang-Sub and J. Sung-Mo, Conditions for minimizing direct reduction in smelting reduction iron making, International Journal of Engineering Science Technology, 2018, 58(2), 274–281.
- [5] J. In-Hyeon, K. Hyun-Soo and S. Yasushi, Trickle flow behaviors of liquid Iron and molten slag in the lower part of blast furnace, International Journal of Engineering Science Technology, 2013, 53(12), 2090–2098.
- [6] A. Jutilapthaworn, Constructing of Kiln and nam phi steel smelting, Research Report, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University, Thailand, 2009.
- [7] P. Khlaichom, A. Phromfaiy and P. Nathiang, Efficiency improvement of cupola namphi iron ore furnace by using automatic control system, UTK Research Journal, 2018, 12(2), 49–59.
- [8] A. Phuk-in, Thai local nam phi iron ore and furnace smelting combined with sustained ancient method, Engineering Journal of Research and Development, 2018, 29(4), 77–87.
- [9] P. Nathiang, Knowledge based for nam-phi iron furnace, Development Thong Saen Khan District Uttaradit, Journal of Industrial Technology and Engineering Pibulsongkram Rajabhat University, 2019, 1(2), 35–51.
- [10] I. Sonmez and K. Sahbudak, Optimization of sponge iron (direct reduced iron) production with Box-Wilson experimental design by using iron pellets and lignite as reductant, Revista de Metalurgia, 2023, 59(2), e241.

- [11] W. Duangrisen, Development of air heater using pipe heat exchanger, Research Report, Faculty of Agricultural Technology and Agro Industry, Rajamangala University of Technology Suvornabhumi, Thailand, 2009.
- [12] A. Donmuang, Heat transfer characteristics of helical oscillating heat pipe, Doctor of Philosophy Degree Thesis, Mahasarakham University, Thailand, 2019.
- [13] G. Zhang, Y. Li, D.B. Mohammed and D. Toghraie, Optimization of a high-temperature recuperator equipped with corrugated helical heat exchanger for improvement of thermal-hydraulic performance, *Journal of Case Studies in Thermal Engineering*, 2022, 33, 101956.
- [14] V. Karamarkovic, M. Marašević, R. Karamarković, and M. Karamarković, Recuperator for waste heat recovery from rotary kilns, *Applied Thermal Engineering Journal*, 2013, 54, 470-480.



วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเพื่อการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบ หลายรุ่นการผลิตที่มีหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานและคำนึงถึงค่าคะแนน ความเสี่ยงด้านการยศาสตร์เฉลี่ยถ่วงน้ำหนักตามเวลา

ธนุภัทร อักษรพรหม และ กฤษฎดา อัสวรุ่งแสงกุล*

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: krisada.a@eng.kmutnb.ac.th

วันที่รับบทความ: 10 กันยายน 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 18 พฤศจิกายน 2568 ; วันที่ตอบรับบทความ: 2 ธันวาคม 2568

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 11 ธันวาคม 2568

บทคัดย่อ: วัตถุประสงค์ของการวิจัยครั้งนี้คือการพัฒนาตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของปัญหาการจัดสมดุลสายประกอบหลายรุ่นการผลิตประเภทที่ 2 (MMALBP-II) ที่มีหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงาน (Cobot) และคำนึงถึงค่าคะแนนความเสี่ยงด้านการยศาสตร์เฉลี่ยถ่วงน้ำหนักตามเวลา และทดสอบประสิทธิภาพของการค้นหาคำตอบด้วยวิธี Branch and Cut เพื่อลดความเสี่ยงด้านการยศาสตร์ให้กับมนุษย์ทั้งวัยแรงงานและวัยสูงอายุ ด้วยการทำงานร่วมกับ Cobot ผลจากการทดสอบประสิทธิภาพของวิธี Branch and Cut ผ่านซอฟต์แวร์ IBM ILOG CPLEX 22.1.2 พบว่า สามารถแก้ปัญหาการจัดสมดุลที่สร้างขึ้นจากต้นแบบปัญหาที่ยาก (Benchmark Problem) และพบคำตอบที่เป็นไปได้ (Feasible Solution) 63 การทดลอง จากทั้งหมด 75 การทดลอง คิดเป็น 84 เปอร์เซ็นต์ พบคำตอบที่ดีที่สุด (Optimal Solution) 53 การทดลอง จากทั้งหมด 75 การทดลอง คิดเป็น 70.6 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าเฉลี่ย %gap ของเวลารอบการผลิตรวมจากขอบเขตล่างของเวลารอบการผลิตรวมเฉลี่ยเท่ากับ 17.9% จากผลการทดสอบประสิทธิภาพพบว่า วิธี Branch and Cut สามารถแก้ปัญหาขนาดเล็กและขนาดกลางในเวลาที่กำหนด (3600 วินาที) โดยมีค่าเฉลี่ย %gap อยู่ที่ 0% และ 4.8% ตามลำดับ แต่ในปัญหาขนาดใหญ่ 12 จาก 15 ปัญหาวิธี Branch and Cut ไม่สามารถหาคำตอบที่เป็นไปได้ภายในเวลาที่กำหนด

คำสำคัญ: การจัดสมดุลสายการประกอบหลายรุ่นการผลิต; การประเมินความเสี่ยงด้านการยศาสตร์; หุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงาน; สังคมผู้สูงอายุ; อัลกอริทึมการแตกกิ่งและตัด; การแปลงอสมการให้เป็นเส้นตรง

An Optimization Approach for Solving a Mixed Model Assembly Line Balancing Problem with Collaborative Robots (Cobots) by Considering Time-weighted Average (TWA) Ergonomic Risk Score

Tanupat Aksornprom and Krisada Asawarungsaengkul*

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

* Corresponding author, E-mail: krisada.a@eng.kmutnb.ac.th

Received: 5 December 2019; Revised 18 November 2025; Accepted: 2 December 2025

Online Published: 11 December 2025

Abstract: The objective of this research is to develop a mathematical model of the Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem Type II (MMALBP-II) with collaborative robots (Cobots) considering time-weighted average (TWA) ergonomic risk score, and to test the performance of solving the model using the Branch and Cut method to reduce ergonomic risk for both working-age and elderly workers through human–Cobot collaboration. The performance evaluation using IBM ILOG CPLEX 22.1.2 showed that the model could solve benchmark balancing problems and find feasible solutions in 63 out of 75 experiments (84%). Optimal solutions were found in 53 out of 75 experiments (70.6%). On average, the total %gap of the total cycle time deviated from the lower bound of the average cycle time by 17.9%. The results further indicated that Branch and Cut could solve small- and medium-sized problems within the time limit (3600 seconds), with an average optimality %gap of 0% and 4.8%, respectively. However, for large-sized problems, in 12 out of 15 cases, Branch and Cut was unable to find a feasible solution within the given time.

Keywords: Mixed-model Assembly Line Balancing; Ergonomic Risk Assessment; Collaborative Robot; Aging Society; Branch and Cut Algorithm; Linearization



1. บทนำ

ในปัจจุบันที่สังคมของประเทศไทยได้ก้าวเข้าสู่สังคมผู้สูงอายุ (Aging Society) อย่างเต็มตัว แนวคิดของสังคมที่เปลี่ยนไปและเทคโนโลยีทางการแพทย์ที่พัฒนาขึ้นทำให้สภาวะแวดล้อมทางสังคมมีการเปลี่ยนแปลงเข้าไปหาสังคมผู้สูงอายุสมบูรณ์ (Aged Society) มากขึ้น ทำให้สัดส่วนของวัยแรงงานลดลง [1] เพื่อตอบสนองต่อความเปลี่ยนแปลงสัดส่วนประชากรและลดผลกระทบที่เกิดขึ้น ผู้ประกอบการควรพิจารณาการจ้างงานแรงงานสูงอายุ เพื่อให้ส่วนงานผลิตสามารถรับมือกับปัญหาการขาดแคลนแรงงานได้อย่างเหมาะสม อาการของผู้ที่เป็นโรค Work-related Musculo Skeletal Disorders (WMSDs) ที่พบได้บ่อยเช่น การปวด ตึง ล้า ขา บวม บริเวณกล้ามเนื้อ หรือข้อ ในผู้ที่มีอาการหนักอาจส่งผลกระทบต่อระบบประสาทถึงขั้นวิงเวียน ซึ่งเป็นต้นเหตุของอุบัติเหตุอื่นได้ ซึ่งสำหรับผู้สูงอายุที่ร่างกายอยู่ในสภาวะถดถอย อาจร้ายแรงถึงขั้นเรื้อรังได้ วิธีประเมินความเสี่ยงด้านการยศาสตร์ RULA (Rapid Upper Limb Assessment) [2] ซึ่งเป็นวิธีการประเมินความเสี่ยงด้านการยศาสตร์ที่ง่าย รวดเร็ว และมีเป้าหมายที่การประเมินความเสี่ยงด้านการยศาสตร์ของร่างกายท่อนบน ทำให้ RULA เหมาะเป็นวิธีการประเมินความเสี่ยงด้านการยศาสตร์ที่ใช้ประเมินความเสี่ยงด้านการยศาสตร์ในสายการประกอบที่ใช้เวลาส่วนใหญ่ยืนอยู่กับที่และใช้ร่างกายท่อนบนในการประกอบสินค้า การแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบหลายรุ่นการผลิต หรือ MMALBP (Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem) เป็น การแก้ปัญหาการตัดสินใจการจัดงานให้สถานงานเพื่อจัด

สมดุลภาระงานของการประกอบสินค้ามากกว่า 1 รุ่นการผลิตพร้อมกันโดยมีเป้าหมายคือการจัดงานให้กับสถานงานภายใต้เงื่อนไขไม่ละเมิดความสัมพันธ์ก่อนหลังของงานที่กำหนดไว้ในทุกรุ่นการประกอบให้ได้ผลิตภาพสายการผลิต (Line Efficiency) สูงที่สุด การประเมินความเสี่ยงด้วยวิธี RULA ถูกบูรณาการเข้ากับการจัดสมดุลสายการประกอบใน [3, 4] ในลักษณะการแก้ปัญหาจัดสมดุลสายการประกอบหลายเป้าหมายและแก้ปัญหาด้วยวิธีตัวแบบทางคณิตศาสตร์และวิธีการฮิวริสติก (Heuristic Method) หุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานขนาดเล็ก (Collaborative Robot หรือ Cobot) ที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้สามารถทำงานร่วมกับมนุษย์ในพื้นที่ทำงานร่วมกัน (Collaborative Working Space) ได้โดยไม่ต้องมีเครื่องป้องกันขวางกั้น ตามนิยามในมาตรฐาน ISO 15066-2016 [5] งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดสมดุลสายการประกอบที่มีมนุษย์และหุ่นยนต์นำเสนอแนวคิดความร่วมมือกันระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ (human robot collaboration หรือ HRC) และถูกบูรณาการกับการจัดสมดุลสายการประกอบผ่านการตัดสินใจเลือกให้ Cobot หรือมนุษย์ทำงานใด ๆ หรือทำร่วมในงานเดียวกัน ถูกนำเสนอใน [6, 7] วิธีการแตกกิ่งและตัด (Branch and Cut Algorithm) เป็นวิธีการเชิงแม่นตรง (Exact Algorithm) ที่ใช้ในการแก้ปัญหาตัวแบบโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม (Integer Linear Programming) เพื่อให้ได้คำตอบที่ดีที่สุด (Optimal Solution) โดยหลักการของวิธีนี้คือการผสมผสานระหว่างแนวคิดของวิธีการแตกกิ่งและกำหนดขอบเขต (Branch and Bound) และการเพิ่มระนาบตัด (Cutting Planes) ซึ่งเป็นสมการข้อจำกัดเพิ่มเติม เพื่อ



ปรับปรุงขอบเขตของคำตอบและเร่งให้การหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดเป็นไปได้รวดเร็วยิ่งขึ้น ที่ช่วยตัดทอนพื้นที่คำตอบที่ไม่มีทางดีกว่าคำตอบปัจจุบันออกไป สำหรับปัญหาการตัดสินใจแบบโปรแกรมจำนวนเต็มผสมเชิงเส้น (Mixed-Integer Linear Programming) ในซอฟต์แวร์ IBM ILOG CPLEX 22.1.2 ใช้วิธีการแตกกิ่งและตัด (Branch and Cut) ในการค้นหาคำตอบ [8] ตารางสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและเปรียบเทียบกับงานวิจัยนี้จะแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตารางเปรียบเทียบงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดสมดุลสายการประกอบที่มี Cobot และคำนึงถึงความเสี่ยงด้านการยศาสตร์

งานวิจัย	ALBP	*RA	*Obj	*EC
[9]	SALBP	*EE	*CT	-
[10]	SALBP	-	-	-
[11]	MMALBP	*EE	*CT, *ER	-
[12]	MMALBP	NIOSH, OCRA, RULA	*CT	-
[13]	SALBP	OCRA	*CT, *ER	-
[14]	SALBP	REBA	*CT	-
บทความนี้	MMALBP	TWA-RULA	*CT	TWA-RULA

*RA = Risk Assessment, *Obj = Objective Function, *CT = Cycle Time, *EC = Ergonomic Constraints, *ER = Ergonomic Risk, *EE = Energy Expenditure

จากตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่างานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดสมดุลสายการประกอบที่มี Cobot ทำงานร่วมกับแรงงานมนุษย์ในปัจจุบันนิยมนำคะแนนจากการประเมินความเสี่ยงด้านการยศาสตร์มาประยุกต์ใช้ในลักษณะของการเป็นค่าเป้าหมาย (Objective Value) ของการจัดสมดุลสายการประกอบหลายเป้าหมาย (Multiple Objective Assembly Line Balancing) ดังนั้นจากการศึกษาวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องสามารถสรุปความแตกต่างของงานวิจัยนี้กับวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องได้ดังนี้

1. ในวรรณกรรมที่ทบทวน ยังไม่พบการนำเอาคะแนนความเสี่ยงด้านการยศาสตร์มาเป็นข้อจำกัดของสายการประกอบ โดยสายการประกอบที่มีผู้สูงอายุอาจไม่เหมาะแก่การใช้คะแนนความเสี่ยงเป็นวัตถุประสงค์ เพราะไม่สามารถรันได้หลังจากการจัดสมดุลแล้วผู้สูงอายุจะได้รับความเสี่ยงที่ไม่เกินความเสี่ยงที่ก่อให้เกิดอันตราย [2]

2. ในวรรณกรรมที่ทบทวน ยังไม่พบงานวิจัยใดนำเสนอการจัดสมดุลสายการประกอบที่คำนึงถึงคะแนนความเสี่ยงด้านการยศาสตร์เฉลี่ยถ่วงน้ำหนักตามเวลา (TWA RULA Score) แม้ในสายการประกอบมีการเปลี่ยนท่าทางการทำงานไปมาอย่างชัดเจนในช่วงเวลาหนึ่งรอบการผลิต

3. ในวรรณกรรมที่ทบทวน ยังไม่พบการประยุกต์ให้ผู้สูงอายุทำงานร่วมกับ Cobot ผ่านวิธีการจัดสมดุลสายการประกอบ



2. ลักษณะของปัญหา

ในสายการประกอบสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ แรงงานต้องทำงานกับชิ้นส่วนขนาดเล็ก การวางชิ้นส่วนหรือบัดกรีบนแผงวงจรไฟฟ้า (PCB) ทำให้ผู้ปฏิบัติงานต้องก้มศีรษะมาก เอื้อมมือในท่าทางผิดธรรมชาติ และทำงานซ้ำซาก ทำให้ 80 เปอร์เซนต์ ของท่าทางการทำงานมีคะแนนที่ประเมินด้วยวิธี RULA อยู่ในระดับ 5-7 (ต้องมีการแก้ไขทันที) [15] ซึ่งการทำงานร่วมกับ Cobot สามารถลดคะแนนความเสี่ยงด้านการยศาสตร์ของแรงงานในสายการประกอบได้ [16]

ในสายการประกอบมีการเปลี่ยนท่าทางการทำงานระหว่างรอบการผลิต ส่งผลให้การประเมินความเสี่ยงด้วยวิธี RULA แบบดั้งเดิมไม่ครอบคลุมหรือไม่สะท้อนความเสี่ยงที่เกิดขึ้นตลอดวงรอบได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นระดับคะแนนความเสี่ยงด้านการยศาสตร์ของงานในสายการประกอบในงานวิจัยนี้ต้องถูกถ่วงน้ำหนักเฉลี่ยตามเวลา ตามสมการที่ 1 ตามแนวทางที่นำเสนอใน [17]

$$\frac{\sum_{n \in N} t_n \cdot r_n}{\sum_{n \in N} t_n} = TWAR \quad (1)$$

สมการที่ 1 มีตัวแปรดังนี้

$TWAR$ = คะแนนความเสี่ยงด้านการยศาสตร์ที่ประเมินด้วยวิธี RULA เฉลี่ยถ่วงน้ำหนักตามเวลาในเวลารอบการผลิตใดๆ

N = เซตของท่าทางการทำงาน

r_n = คะแนนความเสี่ยงด้านการยศาสตร์ที่ประเมินด้วยวิธี RULA ของการทำงานในท่าที่ n

t_n = เวลาที่ทำงานในท่าที่ n

สรุปปัญหาในปัจจุบันที่นำเสนอคือการผลิตสินค้าให้ทันและตรงกับความต้องการของลูกค้า สัดส่วนผู้สูงอายุที่เพิ่มขึ้น และระดับความเสี่ยงด้านการยศาสตร์ที่มนุษย์ต้องเผชิญในสายการประกอบ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการพัฒนาตัวแบบที่บูรณาการ Cobot ในสายการประกอบที่มีแรงงานวัยทำงานและสูงอายุ และคำนึงระดับความเสี่ยงด้านการยศาสตร์ด้วยปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบประเภทที่ 2 (ลดเวลารอบการผลิตจากจำนวนสถานีงานที่กำหนด) ประเภทหลายรุ่นการผลิตเพื่อตอบสนองความต้องการที่หลากหลาย ด้วยการเลือกทางเลือกการทำงานที่แรงงานทำอย่างเดียว, Cobot ทำอย่างเดียว, หรือแรงงานกับ Cobot ทำร่วมกันโดยคำนึงถึงข้อจำกัดด้านคะแนนความเสี่ยงด้านการยศาสตร์ และมีวัตถุประสงค์คือลดเวลารอบการผลิตให้ต่ำที่สุดด้วยโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มผสม (Mixed-Integer Linear Programming)

3. ตัวแบบทางคณิตศาสตร์

สายการประกอบในงานวิจัยนี้เป็นสายการประกอบแบบเส้นตรง สำหรับผลิตผลิตภัณฑ์หลายรุ่นการผลิตในงานวิจัยนี้มีข้อกำหนดพื้นฐาน และตัวแบบทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) ดังนี้

1. จำนวนสถานีงานถูกกำหนดไว้ล่วงหน้า และมีเป้าหมายของการจัดสมดุลคือการหารอบเวลาการผลิตที่สั้นที่สุด

2. งานทุกงานในแต่ละสถานีต้องไม่ละเมิดความสัมพันธ์ก่อนหลังของงาน (งานก่อนหน้าต้องอยู่ในสถานีงานก่อนหน้าหรือสถานีงานเดียวกันกับงานตามหลังทันทีเท่านั้น)



3. งานแต่ละงานเป็นหน่วยย่อยที่สุดที่ไม่สามารถแบ่งงานใด ให้สถานงาน 2 หรือมากกว่าทำได้

4. ทุกสถานงานสามารถทำได้ทุกงาน

5. ในช่วงเวลาใด ๆ ทุกสถานงานสามารถทำงานได้เพียง 1 งานเท่านั้น ไม่สามารถทำงานมากกว่า 1 งานขนานกันได้ หากไม่ใช่งานที่มนุษย์กับหุ่นยนต์ทำร่วมกัน มนุษย์หรือหุ่นยนต์ที่ไม่ได้ทำงานต้องหยุดรอให้อีกฝ่ายทำให้เสร็จก่อนจึงเริ่มงานใหม่ได้

6. สถานงานแต่ละสถานสามารถบรรจุมนุษย์ได้ 1 คน (ช่วงวัย) และ/หรือ Cobot ได้ 1 ตัว (ประเภท) เท่านั้น

7. แรงงานมนุษย์ทุกช่วงวัยพร้อมทำงานเสมอ

8. การปรับเปลี่ยนเครื่องมือ, เวลาในการติดตั้งของ Cobot สามารถละทิ้งได้หรือได้บวกรวมในเวลากการทำงานแต่ละงานแล้ว

9. เวลาการทำงานของมนุษย์ทุกช่วงวัยใช้เวลาเท่ากัน [18]

10. เวลาในการทำงานของหุ่นยนต์เปลี่ยนไปตามประเภทของหุ่นยนต์ หุ่นยนต์บางประเภทอาจทำงานบางงานไม่ได้

3.1 เซตและดัชนี (Set and Indices) สำหรับตัวแบบทางคณิตศาสตร์มีดังต่อไปนี้

$ij \in I = \{1, \dots, NI\}$ = ดัชนีของงาน

E = เซตคู่ของงานที่มีความสัมพันธ์ก่อนหลังทันทีซึ่งกันและกัน

$k \in K = \{1, \dots, NS\}$ = ดัชนีของสถานงาน

$m \in M = \{1, \dots, NM\}$ = ดัชนีของรุ่นสินค้า

$p \in P = \{1, \dots, (NR \cdot NH) + NR + NH\}$
= ดัชนีของทางเลือกการทำงาน

$r \in R = \{1, \dots, NR\}$ = ดัชนีของประเภทหุ่นยนต์

$h \in H = \{1, \dots, NH\}$ = ดัชนีของช่วงวัยแรงงานมนุษย์

3.2 ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variables) ที่ใช้งานในตัวแบบทางคณิตศาสตร์มีดังต่อไปนี้

ts_{mi} = เวลาเริ่มงานของงาน i ในการผลิตสินค้ารุ่น m

SE_{ij} = เท่ากับ 1 เมื่องาน i ทำก่อนงาน j ในสถานเดียวกัน และเท่ากับ 0 เมื่อเป็นอย่างอื่น

x_{ikp} = เท่ากับ 1 เมื่องาน i อยู่ในสถานงาน k และถูกทำด้วยทางเลือกการทำงาน p และเท่ากับ 0 เมื่อเป็นอย่างอื่น

v_{rk} = เท่ากับ 1 เมื่อหุ่นยนต์ประเภท r อยู่ในสถานงาน k และเท่ากับ 0 เมื่อเป็นอย่างอื่น

w_{hk} = เท่ากับ 1 เมื่อมนุษย์ช่วงวัย h อยู่ในสถานงาน k และเท่ากับ 0 เมื่อเป็นอย่างอื่น

tr_{mk} = คะแนนเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักตามเวลาของความเสียด้านการยศาสตร์ของสถานงาน k ในการผลิตสินค้ารุ่น m

as_{kp} = เท่ากับ 1 เมื่องานในสถานงาน k ถูกทำด้วยทางเลือกงาน p และเท่ากับ 0 เมื่อเป็นอย่างอื่น

ct_m = เวลารอบการผลิตของสายการประกอบในการผลิตสินค้ารุ่น m

3.3 พารามิเตอร์ (Parameters) ที่ใช้งานในตัวแบบทางคณิตศาสตร์มีดังต่อไปนี้

NM = จำนวนรุ่นการผลิต

NI = จำนวนงาน

NS = จำนวนสถานงาน

NR = จำนวนประเภทของ Cobot

NH = จำนวนช่วงวัยของแรงงานมนุษย์



$limr_h$ = ขีดจำกัดด้านคะแนนความเสี่ยงด้านการยศาสตร์ของแต่ละช่วงวัยของแรงงานมนุษย์ [2]

r_{mip} = คะแนนความเสี่ยงด้านการยศาสตร์ของงาน i ที่ทำโดยทางเลือกการทำงาน p ในการผลิตสินค้ารุ่น m อ้างอิงจากสายการประกอบสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ [16]

t_{mip} = เวลาในการทำงานของงาน i ที่ทำโดยทางเลือกการทำงาน P

NA = จำนวนสัดส่วนแรงงานวัยสูงอายุชั้นต่ำภายในสายการประกอบ โดยสัดส่วนถูกอ้างอิงจากสัดส่วนผู้สูงอายุในประชากรของประเทศไทย [1]

MB = ข้อจำกัดด้านงบประมาณการลงทุนในการใช้งาน Cobot

c_p = ค่าใช้จ่ายการทำงานในทางเลือกการทำงาน p

φ = จำนวนเต็มบวกที่มีค่ามาก ๆ (Big M)

3.4 สมการฟังก์ชันจุดประสงค์ (Objective Function) ที่ใช้งานในแบบทางคณิตศาสตร์

$$\min \sum_{m \in M} ct_m \quad (2)$$

สมการที่ 2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ลดเวลารอบการผลิตรวมทุกรุ่นการผลิตให้ต่ำที่สุด

3.5 สมการข้อจำกัด (Constraint) ที่ใช้งานในแบบทางคณิตศาสตร์มีดังต่อไปนี้

$$\sum_{l \in K} \sum_{p \in P} l \cdot x_{ikp} - \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} k \cdot x_{jkp} \leq 0 \quad (3)$$

$$; \forall i, j, (i, j) \in E$$

สมการที่ 3 กำหนดความสัมพันธ์ก่อนหลังของงานแต่ละงาน โดยงาน j ที่ป็นงานตามหลังงาน i ทันที

(Immediate Successor) ไม่สามารถอยู่ในสถานีก่อนหน้างาน i ได้

$$\sum_{i \in I} \sum_{p \in P} t_{mip} \cdot x_{ikp} \leq ct_m \quad (4)$$

$$; \forall k, m$$

สมการที่ 4 กำหนดเวลาการทำงานของสถานีงาน k ซึ่งเป็นผลรวมของงาน i ที่อยู่ในสถานีงานที่ทำด้วยทางเลือกการทำงาน p ในการผลิตสินค้ารุ่น m ต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับเวลารอบการผลิต ct_m

$$ts_{mi} + t_{mip} \cdot x_{ikp} + \varphi \cdot (x_{ikp} + x_{jkp} - 2) \leq ts_{mj} \quad (5)$$

$$; \forall k, m, p, i, j, (i, j) \in E$$

สมการที่ 5 กำหนดให้งาน j ในการผลิตสินค้ารุ่น m ไม่สามารถเริ่มงานได้หากงาน i ยังไม่เสร็จ เมื่องาน i มาก่อนงาน j อยู่ในสถานีงาน k และงาน i กับงาน j เป็นงานก่อนหน้าตามหลังกันทันที

$$ts_{mj} + t_{mjp} \cdot x_{jkp} - 2 \cdot \varphi \cdot (2 - x_{ikp} - x_{jkp}) \leq ts_{mi} + \max(t_{mip}) \cdot SE_{ij} \quad (6)$$

$$; \forall k, m, p, i, j, (i, j) \in E, i > j$$

สมการที่ 6 กำหนดให้งาน i ในการผลิตสินค้ารุ่น m ไม่สามารถเริ่มงานได้หากงาน j ยังไม่เสร็จ เมื่องาน i ตามหลังงาน j อยู่ในสถานีงาน k และงาน i กับงาน j ไม่เป็นงานก่อนหน้าตามหลังกันทันที

$$ts_{mi} + t_{mip} \cdot x_{jkp} - 2 \cdot \varphi \cdot (2 - x_{ikp} - x_{jkp}) \leq ts_{mj} + \max(t_{mip}) \cdot (1 - SE_{ij}) \quad (7)$$

$$; \forall k, m, p, i, j, (i, j) \in E, i > j$$



สมการที่ 7 กำหนดให้งาน j ในการผลิตสินค้ารุ่น m ไม่สามารถเริ่มงานได้หากงาน i ยังไม่เสร็จ เมื่องาน i มาก่อนหน้างาน j อยู่ในสถานงาน k และงาน i กับงาน j ไม่เป็นงานก่อนหน้าตามหลังกันทันที

$$ts_{mi} \geq 0 ; \forall i, m \quad (8)$$

สมการที่ 8 กำหนดให้เวลาเริ่มงานของงาน i ในการผลิตสินค้ารุ่น m ไม่สามารถต่ำกว่า 0 ได้

$$\sum_{p \in P} as_{kp} = 1 ; \forall k \in K \quad (9)$$

สมการที่ 9 กำหนดให้ทุกสถานงานสามารถเลือกการทำงาน p ได้เพียงหนึ่งทางเท่านั้น

$$\varphi \cdot as_{kp} \geq \sum_{i \in I} x_{ikp} ; \forall k, p \quad (10)$$

สมการที่ 10 กำหนดให้ทุกงาน i ในทุกสถานงาน k สามารถใช้ทางเลือกการทำงาน p ได้เพียงหนึ่งทางเท่านั้น

$$\sum_{r \in R} v_{rk} \leq 1 ; \forall k \quad (11)$$

สมการที่ 11 กำหนดให้แต่ละสถานงาน k สามารถมีหุ่นยนต์ r ได้ไม่เกิน 1 ประเภท

$$\sum_{h \in H} w_{hk} \leq 1 ; \forall k \quad (12)$$

สมการที่ 12 กำหนดให้แต่ละสถานงาน k สามารถมีมนุษย์ช่วงวัย h ได้ไม่เกิน 1 คนโดยช่วงวัย $h=1$ หมายถึงแรงงานมนุษย์วัยแรงงาน $h=2$ หมายถึงวัยผู้สูงอายุ

$$\sum_{k \in K} w_{2k} \geq NA \cdot NS \quad (13)$$

สมการที่ 13 กำหนดให้จำนวนผู้สูงอายุ ($h=2$) ในสายการประกอบต้องไม่น้อยกว่าสัดส่วนผู้สูงอายุ NA ในประชากรประเทศไทย [1]

$$\varphi \cdot w_{hk} \geq as_{hk} + \sum_{p \in P} as_{kp} \quad (14)$$

$$p \in (NR \cdot h) + NH + 1, \dots, (NR \cdot h) + NH + NR$$

สมการที่ 14 กำหนดให้แต่ละสถานงาน k ที่ทำงานด้วยทางเลือกการทำงาน p ต้องมีมนุษย์ช่วงวัยเหมาะสมกับทางเลือกการทำงาน โดยสมการนี้ทำให้ w_{hk} ถูกเลือกในวัยของมนุษย์ตามทางเลือกการทำงานของสถานงาน as_{kp} และสมการนี้จะใช้เพื่อตรวจสอบจำนวนมนุษย์วัยสูงอายุ ($h=2$) สำหรับสมการที่ 13

$$\sum_{p \in P} as_{kp} \cdot c_p \leq MB ; \forall k \in K \quad (15)$$

สมการที่ 15 กำหนดให้ค่าใช้จ่ายรวมของสายการประกอบด้านหุ่นยนต์ต้องไม่เกินงบประมาณของสายการประกอบ MB

$$\frac{(\sum_{i \in I} \sum_{p \in P} t_{mip} \cdot r_{mip} \cdot x_{ikp} + (ct_m - \sum_{i \in I} \sum_{p \in P} t_{mip} \cdot x_{ikp}))}{ct_m} \leq limr_h ; \forall k, m, h \quad (16)$$

สมการที่ 16 กำหนดให้ค่าคะแนนความเสี่ยงด้านการยศาสตร์เฉลี่ยถ่วงน้ำหนักตามเวลาที่ประเมินด้วยวิธี RULA ของสถานงาน k ที่มีแรงงานมนุษย์ช่วงวัย h ต้องไม่เกินขีดจำกัดของแรงงานแต่ละช่วงวัย h ในการผลิตสินค้ารุ่น m ซึ่งสมการการคำนวณอ้างอิงจาก [3] โดยขีดจำกัดด้านคะแนนความเสี่ยงด้านการยศาสตร์ $limr_h$ แต่ละช่วงวัยของแรงงานมนุษย์จะถูกกำหนดไว้ล่วงหน้าให้เท่ากับ $\{4, 2\}$ สถานงานที่มีมนุษย์วัยแรงงานอยู่ ($h=1$) จะถูกกำหนดไว้ที่ 4 สถานงานที่มีมนุษย์วัยสูงอายุอยู่ ($h=2$) จะถูกกำหนดไว้ที่ 2 เพื่อความปลอดภัยด้านการยศาสตร์ของแรงงานมนุษย์ทุกช่วงวัย [2]



3.6 การแปลงสมการให้เป็นเส้นตรง (Linearization) ของสมการข้อจำกัด

เนื่องจากสมการที่ 16 เป็นการคำนวณค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักตามเวลาของคะแนนความเสี่ยงที่ประเมินด้วยวิธี RULA ซึ่งในการคำนวณต้องหารด้วยตัวแปรตัดสินใจ ct_m ส่งผลให้ตัวแบบกลายเป็นตัวแบบโปรแกรมจำนวนเต็มผสมไม่เชิงเส้น (Mixed Integer Non-Linear Programming) ดังนั้นต้องแปลงสมการข้อจำกัดที่ 16 เป็นอสมการเชิงเส้นตรงเพื่อสามารถหาคำตอบด้วยวิธี B&C ได้

สมการที่ 16 ถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนเศษและส่วน และเพิ่มตัวแปรตัดสินใจ NU_{mk} เพื่อใช้แทนส่วนเศษของสมการที่ 16 ตามสมการที่ 17

$$NU_{mk} = \sum_{i \in I} \sum_{p \in P} t_{mip} \cdot x_{ikp} + (ct_m - \sum_{i \in I} \sum_{p \in P} t_{mip} \cdot x_{ikp}) ; \forall k, m \quad (17)$$

และปรับฝั่งขวาของสมการที่ 16 เป็นสมการที่ 18

$$NU_{mk} = tr_{mk} \cdot ct_m ; \forall k, m \quad (18)$$

หนึ่งในเทคนิคที่ใช้ในการแปลงให้สมการที่เป็นผลคูณของตัวแปรตัดสินใจที่เป็นจำนวนจริง (สมการที่ 18) ที่พบในวรรณกรรมคือเทคนิค McCormick Envelopes [19] ซึ่งเป็นการสร้างสมการกำหนดขอบเขตล่างและบนของผลคูณของตัวแปรตัดสินใจที่เป็นจำนวนจริงใด ๆ ด้วยการกำหนดพารามิเตอร์เสริม ได้แก่ค่ามากที่สุดและน้อยสุดของคะแนนความเสี่ยงด้านการยศาสตร์และเวลารอบการผลิตดังนี้

$minct_m$ = เวลารอบการผลิตต่ำสุดที่เป็นไปได้ซึ่งคำนวณจากสมการที่ 19

$$minct_m = \frac{\sum_{i \in I} min(t_{mip})}{NS} \quad (19)$$

$maxct_m$ = เวลารอบการผลิตสูงสุดที่เป็นไปได้ซึ่งคำนวณจากสมการที่ 20

$$maxct_m = \frac{\sum_{i \in I} max(t_{mip})}{NS} \quad (20)$$

$minr$ = ค่าต่ำสุดที่เป็นไปได้ของคะแนนความเสี่ยงด้านการยศาสตร์ที่ประเมินด้วยวิธี RULA (เท่ากับ 0 เนื่องจากบางงานที่ไม่ต้องทำหรือ Cobot ทำแทนจึงไม่มีคะแนนความเสี่ยง)

$maxr$ = ค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ของคะแนนความเสี่ยงด้านการยศาสตร์ที่ประเมินด้วยวิธี RULA ในงานวิจัยครั้งนี้กำหนดเท่ากับขอบเขตบนของการจำกัดคะแนนความเสี่ยง (เท่ากับ 4)

โดยพารามิเตอร์เสริมถูกใช้เพื่อสร้างขอบเขตล่างและบนของคะแนนความเสี่ยงด้านการยศาสตร์ที่ประเมินด้วยวิธี RULA เฉลี่ยถ่วงน้ำหนักตามเวลา tr_{mk} ตามสมการที่ 21 ถึง 24

$$NU_{mk} \geq minct_m \cdot tr_{mk} + ct_m \cdot minr - minct_m \cdot minr \quad (21)$$

$$; \forall k, m$$

$$NU_{mk} \leq maxct_m \cdot tr_{mk} + \quad (22)$$



$$\begin{aligned}
 &ctm \cdot maxr - maxctm \cdot minr \\
 &; \forall k, m \\
 &NUmk \geq maxctm \cdot trmk + \\
 &ctm \cdot minr - maxctm \cdot minr \quad (23) \\
 &; \forall k, m
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &NUmk \leq minctm \cdot trmk + \\
 &ctm \cdot maxr - minctm \cdot maxr \quad (24) \\
 &; \forall k, m
 \end{aligned}$$

กำหนดขีดจำกัดด้านการยศาสตร์ของแรงงานมนุษย์ช่วงวัยที่ h อยู่ในสถานงาน k ในแนวทางเดียวกับสมการที่ 16 ด้วยสมการที่ 25

$$\begin{aligned}
 &tr_{mk} \leq limr_h \cdot w_{hk} \\
 &; \forall k, m, h \quad (25)
 \end{aligned}$$

3.7 การสร้างตัวอย่างปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบหลายรุ่นการผลิตที่แรงงานมนุษย์และหุ่นยนต์ทำงานร่วมกันโดยคำนึงถึงคะแนนความเสี่ยงด้านการยศาสตร์

Cobot มีค่าใช้จ่ายในการทำงานตามทางเลือกการทำงาน c_p (ค่าไฟ ค่าบำรุงรักษา Cobot) ไม่เท่ากัน ในงานวิจัยนี้อ้างอิงจากค่าเฉลี่ยค่าใช้จ่ายการใช้ Cobot ค่าใช้จ่ายของ Cobot ตามทางเลือกการทำงานสามารถแบ่งได้ดังนี้

— ค่าใช้จ่ายด้านหุ่นยนต์ในการทำงานสำหรับสถานที่ที่หุ่นยนต์ทำงานอย่างเดียวเท่ากับ 10.11, 12.79, 18.55, 20.83 หน่วย ในตารางที่ 2 ทางเลือกการทำงานที่ Cobot ทำงานตัวเดียวจะแสดงเป็นเลข 0 หมายถึงมนุษย์ช่วงวัยใดก็ตามทำงานในสถานงานนี้ได้

— ในสถานงานที่ Cobot ทำงานร่วมกับคนเพิ่มค่าใช้จ่ายอีก 20% เพราะ Cobot ต้องใช้พลังงานเพิ่มขึ้นในการรักษาความปลอดภัยเมื่อทำงานร่วมกับมนุษย์ ทั้งการขยับแขนกลให้ช้าลง การหยุดเมื่อเข้าใกล้มนุษย์มากเกินไปตามมาตรฐาน ISO [5]

— ในสถานงานที่ Cobot ไม่ได้ทำงาน ไม่คิดค่าใช้จ่ายด้าน Cobot

ตารางที่ 2 แสดงตัวอย่างและค่าใช้จ่ายของการทำงานในแต่ละทางเลือก

จากการค้นคว้าในวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องเวลาในการทำงานของแต่ละงานสำหรับแรงงานมนุษย์ทั้ง 2 ช่วงวัย (แรงงานวัยแรงงาน, แรงงานวัยสูงอายุ) ในสายการประกอบไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ [18] ดังนั้นเวลาในการทำงานของแรงงานมนุษย์ทุกช่วงวัยในสายการประกอบใช้เวลาเท่ากันดังตัวอย่างในตารางที่ 2

Cobot จะมีความเร็วที่ลดลงเมื่อต้องทำงานในพื้นที่ทำงานร่วมกับมนุษย์ [5] และทุกสถานงานต้องมีมนุษย์อยู่ ดังนั้นเวลาในการทำงานของ Cobot เมื่อต้องทำงานตัวเดียวจะใช้เวลาเพิ่มขึ้น 30 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์ [20] ดังตัวอย่างในตารางที่ 2

เวลาในการทำงานของ Cobot ในงานที่ Cobot สามารถทำได้จะมีค่าเท่ากับเวลาในการทำงานของแรงงานมนุษย์คูณกับผลการสุ่มจากการแจกแจงแบบเอกรูปแบบต่อเนื่อง (Continuous Uniform Distribution) ตามสมการที่ 26

$$t_{mi(r+NH)} = t_{mi1} \cdot U(1.3, 1.4); \forall m, i, r \quad (26)$$



เวลาที่ใช้ในการทำงานร่วมกันของแรงงานมนุษย์ และ Cobot ในลักษณะการแบ่งงานกันทำ (Collaboration) เช่น การช่วยกันขันนอตคนละข้างของสินค้า การให้มนุษย์จับสินค้าและให้ Cobot เชื่อม จะทำให้เวลาในการทำงานในภาพรวมลดลง เหลือ 60 ถึง 70 เปอร์เซ็นต์ของเวลาทำงานของมนุษย์ [20] ดังตัวอย่างในตารางที่ 2

ในงานที่ Cobot ทำงานร่วมกับมนุษย์ได้จะมีระยะเวลาการทำงานเท่ากับเวลาในการทำงานของแรงงานมนุษย์คูณกับผลการสุ่มจากการแจกแจงแบบเอกรูปแบบต่อเนื่องตามสมการที่ 27

$$t_{mi((NR \cdot h)+NH+r)} = t_{mi1} \cdot U(0.6, 0.7) \quad (27)$$

$$; \forall m, i, r, h$$

ขีดจำกัดทางกายภาพและเครื่องมือของ Cobot ทำให้ในบางงาน Cobot ไม่สามารถทำได้ ทำให้ 28 เปอร์เซ็นต์ของงานในแต่ละรุ่นการผลิต Cobot ไม่สามารถทำได้ด้วยตัวเองได้ และ 21 เปอร์เซ็นต์ของงาน Cobot ไม่สามารถทำร่วมกับแรงงานมนุษย์ได้ [21] งานที่ Cobot ไม่สามารถทำได้จะมีค่า t_{mip} เท่ากับ 999 ดังตัวอย่างในตารางที่ 2

ค่าคะแนนความเสี่ยงด้านการยศาสตร์แต่ละงานของมนุษย์ทุกช่วงวัยจะเป็นผลจากการสุ่มด้วยการแจกแจงแบบสามเหลี่ยม (Triangular Distribution) ตามสมการที่ 28 พารามิเตอร์ของการแจกแจงอ้างอิงจากการศึกษาท่าทางการทำงานในสายการประกอบสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ [16] ดังตัวอย่างในตารางที่ 2

$$r_{mi1} = \text{Triangular}(2, 7, 5.5) \quad (28)$$

ในขณะที่ Cobot ทำงานในงานที่ Cobot ทำตัวเดียว และเวลาที่ว่างงาน จะถือว่าแรงงานมนุษย์ยืนรอการทำงานในงานถัดไปดังนั้นคะแนนความเสี่ยงด้านการยศาสตร์ในขณะที่ Cobot ทำงานเพียงอย่างเดียวจะถือว่าไม่มีการประเมิน RULA (คะแนนเท่ากับ 0)

ในขณะที่ Cobot และแรงงานมนุษย์ทำงานในงานที่ทำร่วมกัน คะแนนความเสี่ยงด้านการยศาสตร์มีโอกาส 10% ที่จะมีคะแนนลดลง 1 คะแนนจากคะแนนความเสี่ยงเมื่อมนุษย์ทำงานคนเดียว [16] ดังนั้นคะแนนความเสี่ยงด้านการยศาสตร์เมื่อ Cobot ทำงานร่วมกับมนุษย์จะถูกลบออกด้วยผลจากการสุ่มจากการแจกแจงแบร์นูลลีที่มีอัตราสำเร็จเท่ากับ 0.1 ตามสมการที่ 29 และตัวอย่างในตารางที่ 2

$$r_{mi((NR \cdot h)} = r_{mi1} - \text{Bernoulli}(0.1) \quad (29)$$

$$; \forall m, i, r, h$$

เพื่อการทดสอบประสิทธิภาพของตัวแบบทางคณิตศาสตร์ในการแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบ ตัวอย่างปัญหาในการทดลองในงานวิจัยนี้การจัดสมดุลสายการผลิตเทียบเคียง (Benchmark Problem) จาก <https://assembly-line-balancing.de> เป็นต้นแบบ และทำการสร้างปัญหาตัวอย่างด้วยการเติมส่วนที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยเข้าไป โดยงานแต่ละงานถูกเพิ่มความแปรปรวนของเวลาในการทำงาน 30 เปอร์เซ็นต์ ($\pm 30\%$) ของเวลาทำงานเดิม และแต่ละงานมีโอกาสถูกข้าม 20 เปอร์เซ็นต์ งานที่ถูกข้ามจะถูกตั้งเวลาการทำงาน เท่ากับ 0



ตารางที่ 2 ตัวอย่างของลำดับทางเลือกการทำงาน
ของแรงงานมนุษย์และหุ่นยนต์

ลำดับ ทางเลือก	h	r	C_p	t_{mip}	r_{mip}
1	1	0	0	1	5
2	2	0	0	1	5
3	0	1	10.11	1.34	0
4	0	2	12.79	1.39	0
5	0	3	18.55	999	0
6	0	4	20.83	1.33	0
7	1	1	12.132	0.67	4
8	1	2	15.348	0.61	5
9	1	3	22.26	0.60	4
10	1	4	24.99	999	4
11	2	1	12.132	0.67	4
12	2	2	15.348	0.61	5
13	2	3	22.26	0.60	4
14	2	4	24.99	999	4

ปัญหาเทียบเคียงที่ถูกนำมาใช้เป็นต้นแบบ
ของปัญหภายในงานวิจัยจะถูกแบ่งออกเป็น 3
ขนาด ตามจำนวนงาน NI และจำนวนรุ่นการผลิต
 NM ใน แต่ละปัญหา

**3.8 ตัวอย่างเชิงตัวเลข (Numerical
Example) ของคำตอบจากการแก้ปัญหาการ
จัดสมดุลสายการประกอบหลายรุ่นการผลิตที่
แรงงานมนุษย์และหุ่นยนต์ทำงานร่วมกันและ
คำนึงถึงคะแนนความเสี่ยงด้านการยศาสตร์**

ในส่วนนี้จะนำเสนอตัวอย่างของคำตอบที่ได้จาก
การแก้ปัญหาตัวอย่างขนาดเล็ก $2m7t$ ที่มีจำนวนรุ่นการ
ผลิต (NM) เท่ากับ 2 รุ่น และจำนวนงาน (NI) เท่ากับ

ตารางที่ 3 เมทริกซ์ความสัมพันธ์ก่อนหลังของงาน
ในปัญหาตัวอย่าง

งาน	1	2	3	4	5	6	7
1	0	1	0	1	0	0	0
2	0	0	1	0	1	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	1
5	0	0	0	0	0	1	0
6	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0

7 งานซึ่งมีเมทริกซ์ความสัมพันธ์ก่อนหลังของงาน
อ้างอิงจากงานวิจัยโดย Mertens, 1967 [22] ตาม
ตารางที่ 3

ในตารางที่ 3 แถว (row) และ คอลัมน์ (Column)
จะแสดงถึงดัชนีงานของงาน งานในแถว i ที่เป็นงาน
ที่มาก่อนทันทีของงานในคอลัมน์ j จะทำให้ตำแหน่ง
(i, j) เท่ากับ 1 และหากไม่มีความสัมพันธ์ก่อนหลังกัน
ทันทีจะเท่ากับ 0

งานแต่ละงาน i ในรุ่นการผลิต m จะมีเวลาในการ
ทำงาน (t_{mip}) ที่พัฒนาด้วยการะบวนการตามข้อ 3.8
ตามตารางที่ 4

และงาน i ในรุ่นการผลิต m จะมีคะแนนความ
เสี่ยงด้านการยศาสตร์ (r_{mip}) ที่พัฒนาด้วย
กระบวนการในข้อ 3.8 ตามตารางที่ 5

ตารางที่ 4 รายละเอียดด้านเวลาการทำงานของ
ปัญหาตัวอย่างขนาดเล็ก 2m7t

<i>i</i>	1	2	3	4	5	6	7
<i>p</i>	เวลาการทำงานของงานในรุ่นการผลิตที่ 1 (<i>m</i> =1)						
1	1	5	5	3	4	8	6
2	1	5	5	3	4	8	6
3	1.34	7	6.55	4.14	5.24	10.4	7.86
4	1.31	6.55	6.65	3.93	5.56	10.72	7.86
5	1.33	6.9	6.85	4.11	5.4	10.48	7.98
6	1.33	7	6.65	4.11	5.4	11.04	8.1
7	0.64	3.3	3.35	2.01	2.68	5.2	3.66
8	0.6	3.1	3.45	1.95	2.76	5.36	4.02
9	0.65	3.1	3.2	1.92	2.68	5.36	4.02
10	0.68	3.4	3.2	1.92	2.64	5.2	3.72
11	0.64	3.3	3.35	2.01	2.68	5.2	3.66
12	0.6	3.1	3.45	1.95	2.76	5.36	4.02
13	0.65	3.1	3.2	1.92	2.68	5.36	4.02
14	0.68	3.4	3.2	1.92	2.64	5.2	3.72
<i>p</i>	เวลาการทำงานของงานในรุ่นการผลิตที่ 2 (<i>m</i> =2)						
1	1	4	4	3	4	8	5
2	1	4	4	3	4	8	5
3	1.31	5.48	5.56	3.99	5.2	10.88	6.85
4	1.37	5.24	5.28	4.17	5.52	10.64	6.85
5	1.35	5.48	5.44	3.96	5.56	10.48	6.5
6	1.4	5.44	5.4	4.14	5.56	10.56	6.95
7	0.67	2.72	2.68	1.89	2.44	4.96	3.45
8	0.64	2.52	2.76	1.98	2.6	5.04	3.2
9	0.63	2.6	2.56	1.8	2.56	4.96	3.1
10	0.68	2.56	2.64	2.07	2.76	5.28	3.3
11	0.67	2.72	2.68	1.89	2.44	4.96	3.45
12	0.64	2.52	2.76	1.98	2.6	5.04	3.2
13	0.63	2.6	2.56	1.8	2.56	4.96	3.1
14	0.68	2.56	2.64	2.07	2.76	5.28	3.3

ตารางที่ 5 รายละเอียดด้านคะแนนความเสี่ยงด้าน
การยศาสตร์ของปัญหาตัวอย่างขนาดเล็ก 2m7t

<i>i</i>	1	2	3	4	5	6	7
<i>p</i>	เวลาการทำงานของงานในรุ่นการผลิตที่ 1 (<i>m</i> =1)						
1	5	5	3	6	5	4	4
2	5	5	3	6	5	4	4
3	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	999	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	999
7	3	5	2	6	3	4	4
8	5	4	3	5	4	3	3
9	999	4	3	6	5	4	3
10	5	3	2	5	3	2	3
11	3	5	2	6	3	4	4
12	5	4	3	5	4	3	3
13	999	4	3	6	5	4	3
14	5	3	2	5	3	2	3
<i>p</i>	เวลาการทำงานของงานในรุ่นการผลิตที่ 2 (<i>m</i> =2)						
1	4	4	5	4	3	2	5
2	4	4	5	4	3	2	5
3	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0
5	0	999	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	999	0	0
7	3	2	3	3	3	1	3
8	4	2	3	999	3	2	3
9	3	4	4	2	3	1	5
10	3	4	5	4	1	1	3
11	3	2	3	3	3	1	3
12	4	2	3	999	3	2	3
13	3	4	4	2	3	1	5
14	3	4	5	4	1	1	3



จากการแก้ปัญหาการจัดสมดุลปัญหาตัวอย่างที่มีรายละเอียดของปัญหาตัวอย่างตามตารางที่ 3 ถึง ตารางที่ 5 สามารถจัดสมดุลและจัดสรรงานให้กับสายการประกอบที่มีสถานีนงาน (NS) เท่ากับ 4 สถานีนงานได้ตามตาราง 6 ดังนี้

จากตารางที่ 6 ตัวอย่างเชิงตัวเลข (Numerical Example) ของคำตอบของการแก้ปัญหาการจัดสมดุลจะแสดงงานที่ถูกจัดสรรให้กับสถานีนงานในคอลัมน์ t , แรงงานมนุษย์ประจำสถานีนงาน แสดงในคอลัมน์ h , Cobot ประจำสถานีนงาน แสดงในคอลัมน์ r , ทางเลือกประจำสถานีนงาน แสดงในคอลัมน์ as_{kp} , เวลาการทำงานของสถานีนงาน แสดงในคอลัมน์ stt_{mk} และคะแนนความเสี่ยงด้านการยศาสตร์ถ่วงน้ำหนักตามเวลา แสดงในคอลัมน์ str_{mk}

โดยเวลาการทำงานของสถานีนงาน (stt_{mk}) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 29

$$\sum_{i \in I} \sum_{p \in P} t_{mip} \cdot x_{ikp} = stt_{mk} \quad (29)$$

$$; \forall k, m$$

และคะแนนความเสี่ยงเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักตามเวลาของสถานีนงาน (str_{mk}) คำนวณได้จากสมการ 30

$$\frac{(\sum_{i \in I} \sum_{p \in P} t_{mip} \cdot r_{mip} \cdot x_{ikp} + (ct_m - \sum_{i \in I} \sum_{p \in P} t_{mip} \cdot x_{ikp}))}{ct_m} \quad (30)$$

$$= str_{mk}$$

$$; \forall k, m$$

จากตัวอย่างในตารางที่ 6 ในสถานีนงานที่ 4 ที่ทำงานด้วยทางเลือกการทำงานที่ 10 (แรงงานมนุษย์วัยแรงงานทำงานร่วมกับ Cobot ประเภทที่ 4) ทำการ

ตารางที่ 6 คำตอบจากการแก้ปัญหาตัวอย่าง

สถานี	t	h	r	as_{kp}	stt_{mk}	str_{mk}
1	1, 2	2	2	4	7.9, 6.6	0, 0
2	3, 5	1	4	10	5.8, 5.4	3.2, 3.4
3	6	1	0	1	8, 8	4, 4
4	4, 7	1	4	10	5.6, 5.4	3.8, 3.1

ประกอบงานที่ 4 และงานที่ 7 ซึ่งใช้เวลา 1.92 และ 3.72 ตามลำดับในรุ่นการประกอบที่ 1 และใช้เวลา 2.07 และ 3.33 ตามลำดับในรุ่นการประกอบที่ 2 ทำให้เวลาในการทำงานของสถานีที่ 4 เท่ากับ 5.6 ในรุ่นการประกอบที่ 1 และ 5.4 ในรุ่นการประกอบที่ 2 และมีคะแนนความเสี่ยงด้านการยศาสตร์เฉลี่ยถ่วงน้ำหนักตามเวลาเท่ากับ 3.8 ในรุ่นการประกอบที่ 1 และ 3.1 ในรุ่นการประกอบที่ 2

4. การทดสอบประสิทธิภาพของวิธี B&C

4.1 ประสิทธิภาพของตัวแบบที่ผ่านการแปลงอสมการเป็นสมการเชิงเส้น

เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของตัวแบบโปรแกรมจำนวนเต็มผสมเชิงเส้น (MILP) ที่ผ่านการแปลงอสมการให้เป็นสมการเชิงเส้น (ใช้สมการที่ 2 ถึง 15 และสมการที่ 21 ถึง 25 แทนสมการที่ 16) ผลการค้นหาคำตอบของตัวแบบได้ถูกเปรียบเทียบกับคำตอบที่ค้นหาด้วยตัวแบบที่ไม่ผ่านการแปลงสมการซึ่งเป็นตัวแบบโปรแกรมจำนวนเต็มผสมไม่เชิงเส้น (MINLP) ที่ไม่ผ่านการแปลงอสมการให้เป็นสมการเชิงเส้น (ใช้สมการที่ 2 ถึง 16) โดยการค้นหาคำตอบด้วยตัวแบบ MILP จะใช้วิธี B&C ผ่านซอฟต์แวร์ IBM ILOG CPLEX 22.1.2 และการค้นหาคำตอบด้วย



ตัวแบบ MINLP จะใช้วิธี Global Solver (Local Search Procedure) ผ่านซอฟต์แวร์ LINGO 19.0 เนื่องจากซอฟต์แวร์ CPLEX ไม่รองรับการค้นหาคำตอบด้วยตัวแบบ MINLP ทั้ง 2 วิธีประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ Intel Core i5-9400 CPU 2.90GHz RAM 16.0 GB ผลของการเปรียบเทียบจะแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 แสดงผลการทดลองหาคำตอบในปัญหาขนาดเล็กที่มีจำนวนสถานีงาน NS เท่ากับ 5 และต้นทุนค่าใช้จ่ายด้านหุ่นยนต์ MB เท่ากับ 80 พบว่าคำตอบที่ได้นั้น ตัวแบบที่ไม่ผ่านการแปลงอสมการ (ตัวแบบ MINLP) ให้ผลที่แย่กว่าตัวแบบที่ผ่านการแปลงอสมการเป็นเส้นตรง (MILP) และใช้เวลานานกว่าตัวแบบที่แปลงอสมการเป็นเส้นตรง (MILP) ทำให้สรุปได้ว่าประสิทธิภาพของตัวแบบที่ผ่านการแปลงอสมการเป็นเส้นตรง (MILP) สูงกว่าในการหาคำตอบในงานวิจัยนี้

4.2 ประสิทธิภาพของวิธี B&C

ในส่วนนี้จะนำเสนอการทดลองแก้ปัญหาตัวอย่าง โดยแต่ละปัญหาจะถูกทดลองปัญหาละ 3 ปัญหาย่อย ซึ่งแต่ละปัญหาย่อยมีจำนวนสถานีงาน NS และต้นทุนค่าใช้จ่ายด้านหุ่นยนต์ MB ที่ต่างกัน ในปัญหขนาดเล็กทดลองด้วยการกำหนดจำนวนสถานี NS เท่ากับ 3, 4 และ 5 สถานี กำหนดจำนวนสถานีของปัญหาขนาดกลางเท่ากับ 4, 5 และ 6 สถานี กำหนดจำนวนสถานีของปัญหขนาดใหญ่เท่ากับ 6, 7 และ 8 สถานี ต้นทุนค่าใช้จ่ายด้านหุ่นยนต์ในกรณีที่สถานีงานเท่ากับ 3 จะเริ่มต้นที่ 60 หน่วยและเพิ่มขึ้น 10 หน่วย

ตารางที่ 7 ผลการเปรียบเทียบคำตอบของปัญหขนาดเล็กที่แก้ปัญหาด้วยตัวแบบ MILP และ MINLP

ชื่อปัญหา	NS	MB	CPLEX	time	LINGO	time
2m7t	5	80	16	2.2	16	76.3
3m7t	5	80	12.2	2.1	12.7	1hr
2m8t	5	80	19.7	1.8	21.1	1hr
3m8t	5	80	36.4	2.1	36.8	1hr
2m9t	5	80	12.0	3.1	13.1	1hr
3m9t	5	80	19.2	2.9	21.6	1hr
2m11t	5	80	16.1	4.5	16.1	187
3m11t	5	80	23.3	4.8	24.7	1hr
2m19t	5	80	1.5	48	1.6	1hr
3m19t	5	80	3.5	302	4.3	1hr

ทุกสถานีงาน การค้นหาคำตอบถูกจำกัดระยะเวลาที่ 3600 วินาที

จากผลการทดลอง พบว่าจากจำนวนที่ทำการทดลองทั้งหมด 75 การทดลอง 63 การทดลอง (คิดเป็น 84 เปอร์เซ็นต์) วิธี B&C พบคำตอบที่เป็นไปได้ (Feasible Solution) ได้ ซึ่ง 12 การทดลอง (คิดเป็น 16 เปอร์เซ็นต์) ในปัญหขนาดใหญ่ไม่พบคำตอบ

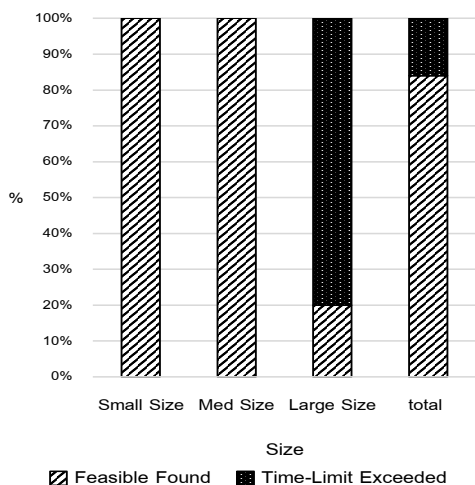
เนื่องจากซอฟต์แวร์ใช้วิธี B&C ค้นหาคำตอบจนถึงเวลาที่กำหนดและได้หยุดทำการค้นหาคำตอบโดยที่ไม่พบคำตอบที่เป็นไปได้ (Time-Limit Exceeded) รูปที่ 1 แสดงกราฟแสดงสัดส่วนของการทดลองที่พบคำตอบที่เป็นไปได้ (Feasible Solution)

จากการทดลอง ยังพบอีกว่า 53 การทดลอง (คิดเป็น 70.6 เปอร์เซ็นต์) วิธี B&C พบคำตอบที่ดีที่สุด (Optimal Solution) (%gap เท่ากับ 0 เปอร์เซ็นต์) ได้



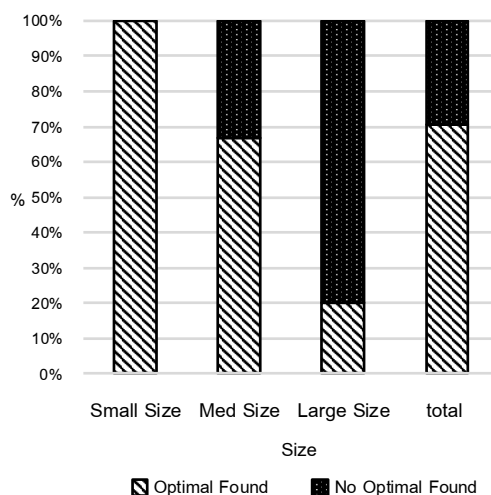
ภายในระยะเวลาที่กำหนด โดยแบ่งเป็นในปัญหาขนาดเล็ก 30 การทดลอง (100 เปอร์เซ็นต์) ปัญหาขนาดกลาง 20 การทดลอง (66.67 เปอร์เซ็นต์) และขนาดใหญ่ 3 การทดลอง (20 เปอร์เซ็นต์) รูปที่ 2

แสดงสัดส่วนการพบ Optimal Solution ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ %gap ในปัญหาแต่ละขนาดแสดงในตารางที่ 8 และรูปที่ 3



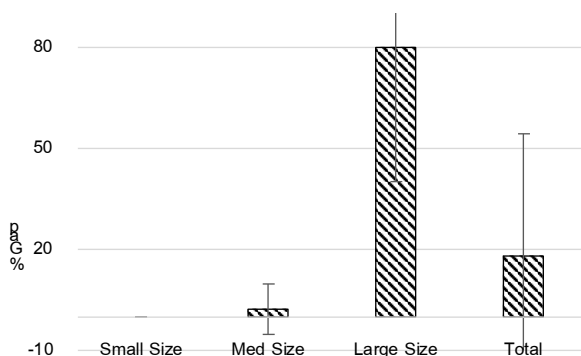
รูปที่ 1 สัดส่วนของการทดลองที่

Feasible Solution



รูปที่ 2 สัดส่วนของการทดลองที่

Optimal Solution และไม่พบ



รูปที่ 3 %gap จากปัญหาเทียบเคียง



ตารางที่ 8 %gap จากปัญหาเทียบเคียง

ขนาด ปัญหา	Small Size	Med Size	Large Size	Total
Mean	0	4.89	80	17.95
SD	0	7.47	40	36.43

4.3 การวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis)

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงการทดลองเพื่อวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis) ของตัวแบบ ด้วยการปรับพารามิเตอร์ของตัวแบบทางคณิตศาสตร์ซึ่งจะทำการทดลองทั้งหมด 4 การทดลองเพื่อเทียบผลต่างเป็นเปอร์เซ็นต์ของค่าเป้าหมายผลรวมเวลารอบการผลิตทุกรุ่นการผลิต ($\sum_{m \in M} Ct_m$) กับผลการทดลองกรณีพื้นฐาน (Base Case) ซึ่งมีรายละเอียดตามตารางที่ 9 ดังนี้

ตารางที่ 9 รายละเอียดของการทดลองในกรณีพื้นฐาน (Base Case)

หัวข้อ	รายละเอียด
ผังความสัมพันธ์ก่อนหลัง	Jackson, 1956
จำนวนรุ่นการผลิต (NM)	3
จำนวนงาน (NI)	11
จำนวนสถานีงาน (NS)	4
ขีดจำกัดด้านการยศาสตร์ ($limr_h$)	{4, 2}
สัดส่วนผู้สูงอายุ (NA)	20%
งบประมาณด้าน Cobot (MB)	70
เวลาการทำงานร่วมกันของ แรงงานมนุษย์และ Cobot	$t_{mi1} \cdot U(0.6, 0.7)$
	$(t_{mi}((NR \cdot h) + NH + r))$

จากตารางที่ 9 จะแสดงให้เห็นว่าโจทย์ปัญหากรณีพื้นฐานจะอ้างอิงผังความสัมพันธ์ก่อนหลังจากปัญหาที่ถูกนำเสนอในงานวิจัยโดย Jackson, 1956 [23] ซึ่งมีงาน (NI) ทั้งหมด 11 งาน และถูกปรับรุ่นการผลิต (NM) ให้เป็นงานประกอบของสินค้า 2 รุ่นการผลิต และจัดสมดุลลงสถานีงาน (NS) เท่ากับ 4 สถานีงานภายใต้เงื่อนไข ขีดจำกัดด้านการยศาสตร์ ($limr_h$) เท่ากับ {4, 2} สัดส่วนผู้สูงอายุ (NA) เท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์ และงบประมาณด้าน Cobot (MB) เท่ากับ 70 หน่วย โดยที่เวลาการทำงานร่วมกันของแรงงานมนุษย์และ Cobot มีสมมติฐานเชิงสุ่มเป็นตามสมการที่ 27

การทดลองที่จะใช้เปรียบเทียบมีทั้งหมด 5 การทดลองได้ถูกเปลี่ยนพารามิเตอร์ 1 พารามิเตอร์และคงพารามิเตอร์ที่เหลือไว้ให้ตรงกับกรณีพื้นฐาน เพื่อแยกอิทธิพลของแต่ละพารามิเตอร์ต่อค่าเป้าหมายคะแนนความเสี่ยงด้านการยศาสตร์เฉลี่ยถ่วงน้ำหนักตามเวลาของสูงสุดของแต่ละรุ่นการผลิต ซึ่งพารามิเตอร์ที่แตกต่างจากกรณีพื้นฐานจะแสดงในคอลัมน์การทดลองของแต่ละการทดลอง ค่าเป้าหมายผลรวมเวลารอบการผลิตทุกรุ่นการผลิต ($\sum_{m \in M} Ct_m$) และผลต่างจากค่าเป้าหมายในกรณีพื้นฐานจะแสดงในคอลัมน์ obj คอลัมน์ %diff ตามลำดับ และระดับคะแนนความเสี่ยงเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักตามเวลาสูงสุดของแต่ละรุ่นการผลิตจะแสดงในคอลัมน์ $max(str_{mk})$ ตามตารางที่ 10



ตารางที่ 10 ผลการทดลองการทดสอบความไว

การทดลอง	obj	%diff	max(str _{mk})
SC0: Base case	23.63	0%	3.9, 3.8, 2.9
SC1: $\limr_h = \{3, 1\}$	29.51	+25%	3.3, 3.3, 2.5
SC2: $NA = 0.5$	34.51	+46%	3.3, 3.3, 2.5
SC3: $MB = 35$	31.04	+31%	3.9, 3.4, 3.3
SC4: $t_{mi((NR-h)+NH+r)} = t_{mi1} \cdot U(0.4, 0.5)$;$\forall m, i, r, h$	15.52	-34%	3.6, 3.2, 3.4
SC5: $\limr_h = \{7, 7\}$	22.59	-4%	4.1, 3.9, 3.4

จากผลการทดลองในตารางที่ 10 สามารถตั้งข้อสังเกตได้ดังนี้

1. ในกรณีที่ 1 ด้วยระดับคะแนนความเสี่ยงของงานในกรณีพื้นฐานที่สูง เมื่อลดขีดจำกัดของคะแนนความเสี่ยงด้านการยศาสตร์ จะทำให้มีการให้ Cobot ทำงานแทนผู้สูงอายุมากขึ้น และทำให้เวลารอบการผลิต (ค่าเป้าหมาย) สูงขึ้น 25 เปอร์เซ็นต์

2. ในกรณีที่ 2 ด้วยระดับคะแนนความเสี่ยงของงานในกรณีพื้นฐานที่สูง เมื่อเพิ่มสัดส่วนผู้สูงอายุในสายการประกอบขึ้นจะทำให้เวลารอบการประกอบสูงขึ้น 46 เปอร์เซ็นต์

3. ในกรณีที่ 3 เมื่อลดงบประมาณด้านการใช้งาน Cobot ลงครึ่งหนึ่ง จะทำให้มีการให้ Cobot ทำงานในสายการประกอบลดลง และทำให้เวลารอบการผลิต (ค่าเป้าหมาย) สูงขึ้น 31 เปอร์เซ็นต์

4. ในกรณีที่ 4 เมื่อลดเวลาการทำงานร่วมกันของแรงงานมนุษย์และ Cobot ลง 10 เปอร์เซ็นต์จะทำให้เวลารอบการผลิต (ค่าเป้าหมาย) มีค่าลดลง 34 เปอร์เซ็นต์

5. ในกรณีที่ 5 เมื่อตัดขอบเขตด้านการยศาสตร์ (กำหนดขีดจำกัดของคะแนนความเสี่ยงด้านการยศาสตร์ให้เป็นค่าสูงสุดของวิธี RULA) ทำให้เวลารอบการผลิต (ค่าเป้าหมาย) มีค่าลดลง 4 เปอร์เซ็นต์ แต่ก็ทำให้คะแนนความเสี่ยงด้านการยศาสตร์เฉลี่ยถ่วงน้ำหนักตามเวลามีค่าเกินระดับปลอดภัยที่ไม่ส่งผลเสียต่อร่างกายในรุ่นการผลิตที่ 1

6. จากปัญหาตัวอย่าง ทั้ง 5 การทดลองย่อยวิธี B&C สามารถค้นหาคำตอบที่ดีที่สุด (Optimal Solution) ได้ภายในเวลาที่กำหนด

4.4 คุณภาพของคำตอบที่พัฒนาด้วยวิธี B&C ภายในระยะเวลาที่กำหนด

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงตัวอย่างของการพัฒนาคำตอบด้วยวิธี B&C ภายในเวลาที่กำหนด ซึ่งจะแสดงในรูปแบบแผนภูมิ %gap และเวลาในหน่วยวินาที

โดยปัญหาตัวอย่าง 10 ปัญหา ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ขนาด (เล็ก กลาง และใหญ่) ตามจำนวนงาน (NI) แต่ละขนาดปัญหาถูกแบ่งย่อยออกอีก เป็น 2 จำนวนรุ่นการผลิต (NM) ปัญหาในขนาดและรุ่นการผลิตที่กำหนดจะถูกทดสอบ 2 ครั้งด้วยจำนวนสถานีงานที่



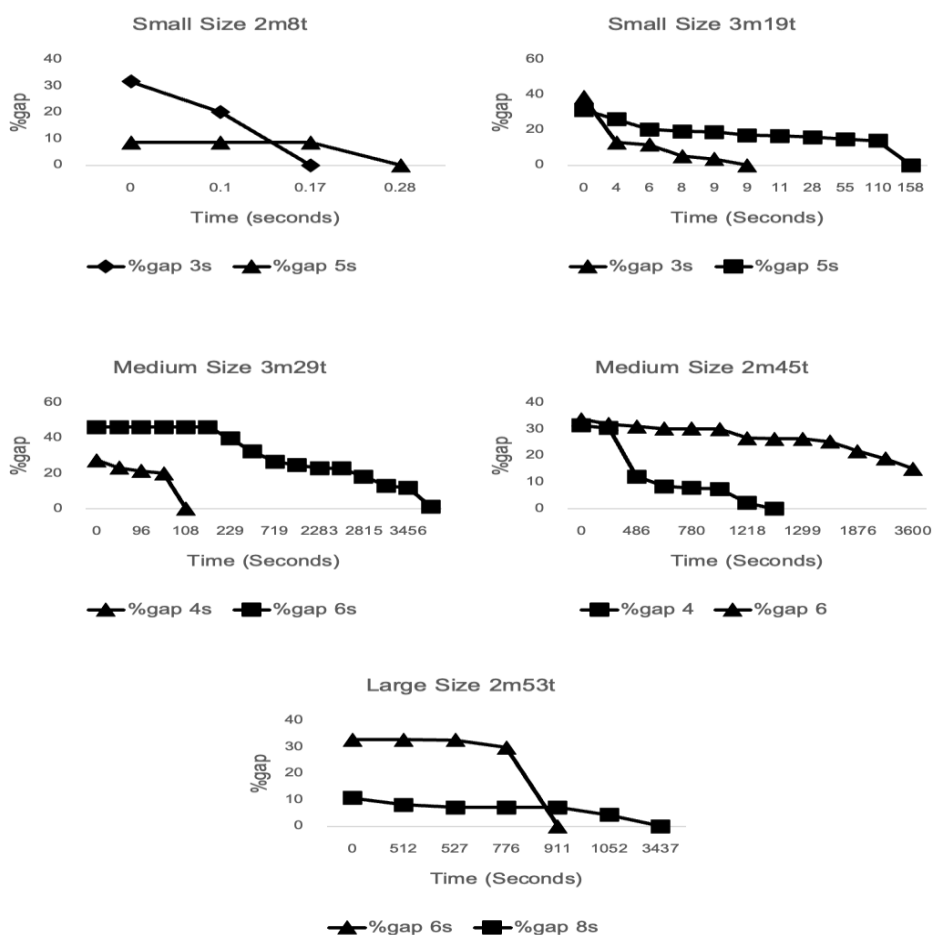
ไม่เท่ากัน เพื่อแสดงถึงอิทธิพลของงานชิ้นงานที่มีต่อระยะเวลาในการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุด

ปัญหาที่ถูกยกมาเป็นตัวอย่างมีรายชื่อและรายละเอียดตามตารางที่ 11

การทดลองกับปัญหาในตารางที่ 11 แสดงเป็นแผนภูมิในรูปที่ 4

ตารางที่ 11 รายละเอียดปัญหาที่ใช้ในการทดสอบ

ชื่อปัญหา	NM	NI	ปัญหาอ้างอิง	NS
2m8t	2	8	[24]	3, 5
3m19t	3	19	[25]	3, 5
2m29t	2	29	[26]	4, 6
3m45t	3	45	[27]	4, 6
2m53t	2	53	[28]	6, 8



รูปที่ 4 แผนภูมิ %gap และเวลาในการพัฒนาคำตอบ



จากรูปที่ 4 จะแสดงแผนภูมิแบบเส้นที่แสดง %gap และเวลาในการพัฒนาคำตอบของการแก้ปัญหาการจัดสมดุลด้วยวิธี B&C

โดยในแต่ละรูปย่อยจะเป็นการพัฒนาคำตอบของปัญหาแต่ละปัญหตามตารางที่ 11 และเส้นกราฟแต่ละเส้นจะแสดงการพัฒนาคำตอบด้วยจำนวนสถานีงานที่แตกต่างกันตามตารางที่ 11

จากการทดลองพบว่าในปัญหาขนาดเดียวกัน การเพิ่มจำนวนสถานีงาน จะส่งผลถึงเวลาที่ใช้ในการพัฒนาคำตอบจนได้คำตอบที่ดีที่สุดอย่างชัดเจน โดยสามารถสังเกตได้จากความชันของแผนภูมิ ซึ่งสามารถเห็นได้ชัดในปัญหาขนาดกลางและใหญ่ ที่มีจำนวนสถานีมากจะทำให้เวลาที่ใช้เพิ่มขึ้นจนเกือบถึงขีดจำกัดเวลาที่กำหนดในปัญหาขนาดใหญ่ จึงสามารถสรุปขนาดของปัญหาที่เหมาะสมกับวิธี B&C ได้ว่าเป็นปัญหาขนาดเล็กถึงกลาง (จำนวนงาน (NI) ไม่เกิน 45 งาน) ที่มีจำนวนสถานีงาน (NS) ไม่เกิน 6 สถานีงาน

5. บทสรุปงานวิจัย

ในงานวิจัยครั้งนี้สามารถสรุปได้ดังนี้

— งานวิจัยนี้ได้พัฒนาตัวแบบโปรแกรมจำนวนเต็มผสมเชิงเส้น (MILP) สำหรับแก้ปัญหาการจัดสมดุลสายการประกอบหลายรุ่นการผลิตที่แรงงานมนุษย์ทั้งแรงงานวัยทำงานและผู้สูงอายุทำงานร่วมกับ Cobot โดยคำนึงถึงความเสี่ยงด้านการยศาสตร์เฉลี่ยถ่วงน้ำหนักตามเวลา ที่มีเป้าหมายที่การลดเวลารอบการผลิต และทดสอบประสิทธิภาพด้วยการทดลองแก้ปัญหาด้วยวิธี B&C ผ่านซอฟต์แวร์ IBM ILOG

CPLEX 22.1.2 กับปัญหาเทียบเคียง (Benchmark Problem) ที่สร้างโดยอิงปัญหาเทียบเคียงดั้งเดิมจาก www.assembly-line-balancing.de

— จากการทดสอบประสิทธิภาพพบว่าวิธี B&C สามารถจัดสมดุลและพบคำตอบที่เป็นไปได้ (Feasible Solution) อย่างมีประสิทธิภาพในทุกขนาดปัญหา (84 เปอร์เซ็นต์ จาก 75 การทดลอง) นอกจากนี้ยังพบคำตอบที่ดีที่สุด (Optimal Solution) ในปัญหาขนาดเล็กทั้งหมดและส่วนใหญ่ในปัญหขนาดกลาง (67 เปอร์เซ็นต์)

— แนวทางจากงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในสายการประกอบที่มีความอันตรายด้านการยศาสตร์ หรือใช้รับมือกับปัญหาแรงงานที่มีอายุเพิ่มสูงขึ้นในสายการประกอบ ด้วยการบูรณาการ Cobot มาทำงานร่วมกับมนุษย์อย่างปลอดภัยในด้านการยศาสตร์ เพราะแรงงานที่อายุเพิ่มขึ้นจะรับความเสี่ยงด้านการยศาสตร์ได้ลดลง

— จากการวิเคราะห์ความไวของตัวแบบทางคณิตศาสตร์พบว่า การลดคะแนนความเสี่ยงด้านการยศาสตร์, การเพิ่มจำนวนสัดส่วนผู้สูงอายุ และการลดงบประมาณด้านการใช้งาน Cobot ลงครั้งหนึ่ง จะส่งผลทำให้ค่าเป้าหมาย (ผลรวมเวลารอบการผลิต) เพิ่มขึ้น 25, 46 และ 31 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วนการลดเวลาการทำงานของการทำงานร่วมกันระหว่างแรงงานมนุษย์ทุกช่วงวัยกับ Cobot การยกเลิกข้อจำกัดด้านการยศาสตร์จะส่งผลให้ค่าเป้าหมายผลรวมเวลารอบการผลิตทุกรุ่นการผลิต ($\sum_{m \in M} C_m$) มีค่าลดลง 34 และ 4 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ



— ทั้งนี้หากนำตัวแบบไปประยุกต์ใช้ในสายการประกอบสินค้าอื่น ๆ ที่มีท่าทางการทำงานผิดธรรมชาติ (เช่น สายการประกอบรถยนต์, เครื่องใช้ไฟฟ้า หรือผลิตภัณฑ์อาหาร) สามารถปรับสมการที่ 30 ให้มีค่าตามการประเมินความเสี่ยงด้านการยศาสตร์ของสายการประกอบนั้น ๆ ได้ และหากต้องการปรับเปลี่ยนขีดจำกัดของระดับคะแนนความเสี่ยงสามารถปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ $limr_h$ ให้เหมาะสมได้ หากสัดส่วนของผู้สูงอายุมีการเปลี่ยนแปลงตามบริบทสังคม ตัวแบบสามารถปรับสัดส่วนของผู้สูงอายุได้ด้วยพารามิเตอร์ NA

— ปัญหาขนาดกลางที่มีจำนวนสถานีงาน NS มากขึ้นไม่แนะนำให้ใช้วิธี B&C เพราะไม่พบคำตอบที่ดีที่สุดได้ภายในเวลาที่กำหนด เช่นเดียวกับในกรณีของปัญหาขนาดใหญ่ ไม่แนะนำให้ใช้วิธี B&C เพราะส่วนใหญ่ (80 เปอร์เซ็นต์) ไม่พบคำตอบที่เป็นไปได้ภายในเวลาที่กำหนด (Time-Limit Exceeded)

— ด้วยความยากของปัญหาที่เป็นระดับ NP-Hard ที่มีความซับซ้อนของปัญหาทำให้เวลาที่ใช้ในการแก้ปัญหาการตัดสินใจเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดไม่เป็นฟังก์ชันพหุนามของอินพุต ทำให้ในอนาคต หากต้องแก้ปัญหาขนาดใหญ่ควรมีการพัฒนาอัลกอริทึมแบบเมตาฮิวริสติก (Metaheuristics) เพื่อใช้ในการค้นหาคำตอบในปัญหาที่ใหญ่ขึ้นและจำนวนสถานีงานมากขึ้นต่อไป

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] <https://population.un.org> (Access on 10 August 2025)
- [2] L. McAtamney and E. Nigel, RULA: A survey method for the investigation of work-related upper limb disorders, *Applied Ergonomics*, 1993, 24(2), 91-99.
- [3] C. Jaturanonda and S. Nanthavanij, Heuristic procedure for two-criterion assembly line balancing problem, *Industrial Engineering and Management Systems*, 2006, 5(2), 84-96.
- [4] C. Jaturanonda, S. Nanthavanij and S. Das, Heuristic procedure for the assembly line balancing problem with postural load smoothness, *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 2013, 19(4), 531-541.
- [5] ISO/TS 15066:2016 Robots and Robotic Devices — Collaborative Robots, 2016.
- [6] C. Weckenborg, K. Kieckhäfer, C. Müller, M. Grunewald and T. Spengler, Balancing of assembly lines with collaborative robots, *Business Research*, 2019, 1-40
- [7] G. Bruno and D. Antonelli, Dynamic task classification and assignment for the management of human-robot collaborative teams in workcells, *The International Journal of Advanced Manufacturing*, 2018, 98(9-12), 2415-2427

- [8] <https://www.ibm.com/docs/en/cofz/12.10.0?topic=concepts-branch-cut-in-cplex> (Access on 10 August 2025)
- [9] K. Stecké and M. Mokhtarzadeh, Balancing collaborative human–robot assembly lines to optimise cycle time and ergonomic risk, *International Journal of Production Research*, 2022, 60(1), 25-47
- [10] C. Sikora and C. Weckenborg, Balancing of assembly lines with collaborative robots: comparing approaches of the Benders' decomposition algorithm, *International Journal of Production Research*, 2023, 61(15), 5117-5133.
- [11] C. Weckenborg and T. Spengler, Assembly Line Balancing with Collaborative Robots under consideration of Ergonomics: a cost-oriented approach, *IFAC-PapersOnLine*, 2019, 52(13), 1860-1865.
- [12] M. Mokhtarzadeh, M. Rabbani and N. Manavizadeh, A novel two-stage framework for reducing ergonomic risks of a mixed-model parallel U-shaped assembly-line, *Applied Mathematical Modelling*, 2021, 93, 597-613.
- [13] L. Tiacchi, Assigning rest times to workers in assembly lines with ergonomically hazardous tasks: An approach to defend companies' profitability, *International Journal of Production Research*, 2024, 62(4), 1239-1261.
- [14] O. Polat, Ö. Mutlu, and E. Özgormus, A mathematical model for assembly line balancing problem type 2 under ergonomic workload constraint, *The Ergonomics Open Journal*, 2018, 11(1), 1-10.
- [15] H. Daneshmandi, D. Kee, M. Kamalinia, M. Oliaei and H. Mohammadi, An ergonomic intervention to relieve musculoskeletal symptoms of assembly line workers at an electronic parts manufacturer in Iran, *Work*, 2018, 61(4), 515–521.
- [16] K. Bouillet, S. Lemonnier, F. Clanche and G. Gauchard, Does the introduction of a cobot change the productivity and posture of the operators in a collaborative task?, *PloS One*, 2023, 18(8), e0289787.
- [17] K. Tung, Y. Fukumura, N. Baker, J. Forrest and S. Roll, Identifying an optimal sampling method to estimate postural risk in a dynamic work task, *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 63(1), 1028-1033.

- [18] A. Börsch-Supan and M. Weiss, Productivity and age: Evidence from work teams at the assembly line, *The Journal of the Economics of Ageing*, 2016, 7, 30-42.
- [19] G.P. McCormick, Computability of global solutions to factorable nonconvex programs: Part I — Convex underestimating problems. *Mathematical Programming*, 1976, 10, 147-175.
- [20] A. Quenehen, N. Klement, A. Abdeljaouad, L. Roucoules and O. GIBARU, Economic and ergonomic performance enhancement in assembly process through multiple collaboration modes between human and robot, *International Journal of Production Research*, 2022, 61(5), 1517-1531.
- [21] E. Stecké and M. Mokhtarzadeh, Balancing collaborative human–robot assembly lines to optimise cycle time and ergonomic risk, *International Journal of Production Research*, 2021, 60(1), 25-47.
- [22] P. Mertens, Fließbandabstimmung mit dem Verfahren der begrenzten enumeration nach Müller- Merbach, *Ablauf- und Planungsforschung*, 8, 429 - 433.
- [23] J. Jackson, A computing procedure for a line balancing problem, *Management Science*, 1956, 2(3), 261-271.
- [24] E. Bowman, Assembly-line balancing by linear programming, *Operations Research*, 1967, 8(3), 385-389.
- [25] N. Thomopoulos, Line Balancing- Sequencing for mixed-model assembly, *Management Science*, 1967, 14(2), 59-75.
- [26] G. Buxey, Assembly line balancing with multiple stations, *Management Science*, 1974, 20(6), 1010-1021.
- [27] M. Kilbridge and L. Wester, A review of analytical systems of line balancing, *Operations Research*, 1962, 10(5), 626 - 638.
- [28] R. Hahn, *Produktionsplanung bei Linienfertigung*, De Gruyter, Berlin, Germany, 1972.



การศึกษาลดเวลาการรอคอยที่แผนกผู้ป่วยนอกโรงพยาบาลกรณีศึกษา

ชัชวาล ชินวิทย์ จามร วสุรัตน์มณี อธิพันธ์ ลอยเมืองกลาง
ประภาภัทร จันทร์แดง และ ทรงวิทย์ ศรีจันทร์รักษ์*

ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหการ, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: songwit.s@cit.kmutnb.ac.th

วันที่รับบทความ: 20 พฤษภาคม 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 20 ตุลาคม 2568; วันที่ตอบรับบทความ: 3 ธันวาคม 2568
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 12 ธันวาคม 2568

บทคัดย่อ: ระยะเวลาการรอคอยที่นานของคนไข้เป็นปัญหาหลัก และเรื้อรังของทุกโรงพยาบาล ดังนั้น งานวิจัยฉบับนี้มุ่งเน้นที่กระบวนการให้บริการในแผนกผู้ป่วยนอกของโรงพยาบาลแห่งหนึ่ง เพื่อศึกษาการเข้ารับบริการของผู้ป่วยนอก และเสนอแนวทางปรับปรุงการรอคอยของผู้ป่วยนอก จากการศึกษาพบว่ามีผู้ป่วยเฉลี่ยประมาณ 120 คนต่อวัน โดยผู้ป่วยใช้เวลาในระบบเฉลี่ยประมาณ 1 ชั่วโมง 49 นาที ซึ่งส่วนใหญ่เป็นระยะเวลาที่ใช้ในการรอคอยมากกว่าการได้รับการจริง จากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่าผู้ป่วยมักมารับบริการกระจุกตัวในช่วงเช้า เนื่องจากคาดหวังว่าจะได้รับการตรวจโดยเร็ว ส่งผลให้จุดบริการบางแห่งมีระยะเวลาการรอคอยเกินกว่ามาตรฐานที่กำหนด โดยเฉพาะจุดซักประวัติที่มีระยะเวลาเฉลี่ย 29.48 นาที ตามมาตรฐานคู่มือปฏิบัติงานที่กำหนดไว้ไม่ควรเกิน 20 นาที และห้องตรวจแพทย์ที่มีระยะเวลาเฉลี่ย 33.54 นาที ตามมาตรฐานคู่มือปฏิบัติงานที่กำหนดไว้ไม่ควรเกิน 30 นาที งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเสนอแนวทางในการลดระยะเวลาการรอคอยของผู้ป่วย โดยออกแบบระบบการนัดหมายผู้ป่วยจำนวน 8 รูปแบบ เพื่อกระจายการมารับบริการของผู้ป่วยให้เหมาะสมกับช่วงเวลา และทำการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม Arena Simulation ผลการศึกษาพบว่า รูปแบบการนัดหมายที่กำหนดให้ผู้ป่วยเข้ารับบริการทุก 30 นาที และนัดผู้ป่วยจำนวนมากในช่วงท้ายของวัน เป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดระยะเวลาการรอคอย โดยสามารถลดเวลาที่ผู้ป่วยใช้ในระบบลงได้ถึงร้อยละ 29.03 ลดระยะเวลาการรอคอยเฉลี่ยที่จุดซักประวัติเหลือ 20.33 นาที คิดเป็นร้อยละ 30.98 และลดระยะเวลาการรอคอยเฉลี่ยที่จุดซักประวัติเหลือ 33.45 นาที คิดเป็นร้อยละ 25.90 เมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบการให้บริการในปัจจุบัน

คำสำคัญ: การจำลองสถานการณ์; กระบวนการให้บริการแผนกผู้ป่วยนอก; การลดระยะเวลาการรอคอย; ระบบการนัดหมาย

Reducing Waiting Times for Outpatient Services: A Case Study of Hospital Operations

Chatchawan Chinvigai, Jamon Wasuratmanee, Atipun Loymuangklang
Prapapat Chandaeng and Songwit Srijunruk*

Department of Industrial Engineering Technology, College of Industrial Technology,
King Mongkut's University of Technology North Bangkok

* Corresponding author, E-mail: songwit.s@cit.kmutnb.ac.th

Received: 20 May 2025; Revised: 20 October 2025; Accepted: 3 December 2025

Online Published: 12 December 2025

Abstract: Long waiting times are a major challenge in the outpatient departments of hospitals in Thailand. This study examines the outpatient service process in a hospital that serves an average of 120 patients per day. Patients typically spend a substantial amount of time waiting rather than receiving medical care, averaging approximately 1 hour and 49 minutes. Specifically, the average waiting time at the medical history-taking station was 29.48 minutes, exceeding the standard of 20 minutes. Moreover, patients waited an average of 35.54 minutes before physician consultation, which surpasses the standard of 30 minutes. To address this issue, eight appointment scheduling scenarios were designed to better distribute patient arrivals throughout the day. These scenarios were simulated using Arena Simulation to evaluate their effectiveness. The results indicated that the scheduling model assigning patient appointments every 30 minutes, with a higher concentration of appointments in the later hours, was the most effective. This scenario reduced the total time in the system by 29.03%, decreased the average waiting time at the medical history-taking station to 20.33 minutes (a 30.98% reduction), and lowered the average waiting time before physician consultation to 33.45 minutes (a 25.90% reduction), compared with the current process. These findings provide practical insights for improving outpatient scheduling and reducing patient waiting times in hospital settings.

Keywords: Simulation; Outpatient Service Process; Reducing Waiting Time; Appointment System



1. บทนำ

แผนกผู้ป่วยนอก (ตรวจโรคทั่วไป) เป็นแผนกที่มีบทบาทสำคัญในการให้บริการแก่ผู้ป่วยทั่วไปที่มาตรวจรับคำปรึกษา วินิจฉัยโรค และการรักษาเบื้องต้น หรือส่งต่อไปยังหน่วยบริการอื่น ๆ ดังนั้น หน่วยงานนี้ต้องสามารถตอบสนองการให้บริการผู้ป่วยได้อย่างรวดเร็ว [1] การมีผู้ป่วยเข้ามารับบริการเป็นจำนวนมากอย่างต่อเนื่อง [2] และการที่ผู้ป่วยเข้ามารับบริการในช่วงเวลาเดียวกัน [3] ย่อมส่งผลให้เกิดปัญหาความแออัด และระยะเวลารอคอยของผู้ป่วยที่ยาวนาน เนื่องจากแผนกผู้ป่วยนอกมีจำนวนเจ้าหน้าที่ และพื้นที่ให้บริการที่จำกัด ไม่สามารถรองรับจำนวนผู้ป่วยได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมทั้งการจัดการลำดับความสำคัญของการใช้ทรัพยากร บุคลากรทางการแพทย์ [4] สิ่งเหล่านี้เป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพการให้บริการโดยรวม และการตอบสนองความพึงพอใจของผู้ป่วย [5] ทั้งยังสร้างแรงกดดันแก่บุคลากรทางการแพทย์ ซึ่งอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพในการทำงาน และคุณภาพการให้บริการ สำหรับปัญหาการรอคอยที่นานของผู้ป่วยของแผนกผู้ป่วยนอก (ตรวจโรคทั่วไป) โรงพยาบาลการณศึกษา จากการเก็บข้อมูลเบื้องต้น พบว่า ระยะเวลาในการรอคอยมากกว่าระยะเวลาการรับบริการทางการแพทย์ ผู้ป่วยใช้เวลาในระบบเฉลี่ยประมาณ 1 ชั่วโมง 49 นาที มีผู้ป่วยหนาแน่นที่สุดช่วงเวลา 07.00 –11.00 น. ทำให้เกิดความแออัดที่จุดบริการ และเป็นช่วงที่ระยะเวลารอคอยเฉลี่ยสูงที่สุด โดยเฉพาะจุดซักประวัติ และห้องตรวจแพทย์ มีเวลารอคอยโดยเฉลี่ย 29.48 และ 33.54 นาที ตามลำดับ สูงกว่าค่ามาตรฐาน [6] ที่กำหนดไว้ไม่ควรเกิน 20 และ 30 นาที ตามลำดับ จากงานวิจัยอื่น ๆ ได้

กล่าวถึงปัญหาความแออัดของให้บริการในช่วงเช้า ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ผู้ป่วยเข้ามารับบริการเป็นจำนวนมาก จากกรณีศึกษาของโรงพยาบาลวารินชำราบ พบว่า จุดให้บริการวัดสัญญาณชีพเป็นจุดคอขวดของระบบ แกวคอยเกิดขึ้นอย่างหนาแน่นในช่วงเช้า ผู้ป่วยต้องใช้เวลารอคอยโดยเฉลี่ย 117.72 นาที แนวทางการปรับปรุงโดยการเลื่อนเวลาเปิดให้บริการของจุดวัดสัญญาณชีพ จุดซักประวัติ และห้องตรวจหมายเลข 2, 3 และ 4 ให้เร็วขึ้น 30 นาที ส่งผลให้เวลารอคอยเฉลี่ยลดลงเหลือ 96.26 นาที (ลดลง 18.23%) และสามารถลดค่าใช้จ่ายจากแกวคอยได้ 2,560 บาทภายในเวลา 5.5 ชั่วโมง [7] ส่วนงานวิจัยของไพฑูรย์ [8] เสนอแนวทางการลดระยะเวลาการรอคอยการให้บริการตรวจโรคทั่วไป ได้ประยุกต์ใช้แผนภูมิการไหลของกระบวนการ แผนภูมิกระบวนการเปรียบกับเวลา พบว่า การรอคอยของผู้ป่วยที่ยาวนาน คือ การจัดทำเวชระเบียน มากกว่า 33 นาที ผู้ป่วยต้องรอพบแพทย์มากกว่า 50 นาที และรอรับยานานมากกว่า 63 นาที สำหรับฝั่งล้างปลานำมาใช้วิเคราะห์สาเหตุของปัญหา มีการนำเสนอแนวทางปรับปรุงกิจกรรมการให้บริการแบบรวมโดยการจัดตั้งคลินิกหน่วยแพทย์เคลื่อนที่ในการให้บริการเชิงรุกเพื่อลดการเดินทางมาโรงพยาบาล พบว่าระยะเวลาการรับบริการของผู้ป่วยเพียง 18 นาที สามารถลดระยะเวลาในการรอคอยได้ 172 นาที (ลดลง 90.52%) สำหรับการศึกษาระบบบริการของโรงพยาบาลชุมชนหนึ่ง พบว่าผู้ป่วยใช้เวลารอคอยโดยเฉลี่ยถึง 2 ชั่วโมงครึ่งต่อวัน และมักจะมารับบริการกระจุกตัวในช่วงเช้าเช่นเดียวกัน การจำลองสถานการณ์ชี้ว่า การกระจายเวลานัดหมาย โดยนัดผู้ป่วยทุก 60 นาที และเพิ่มจำนวนผู้ป่วยในช่วงต้นของ



คลินิก เป็นแนวทางที่สามารถลดเวลารอคอยได้ถึง 21.33% และช่วยให้การใช้ทรัพยากรมีประสิทธิภาพมากขึ้น [9] และจากการศึกษาวิจัยพบว่า โรงพยาบาลที่เกิดความแออัดในช่วงเช้าเกิดจากระบบการนัดหมายที่ไม่มีประสิทธิภาพ โดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มบุคลากรงานวิจัยนี้ได้พัฒนาระบบการนัดหมายใหม่ โดยการจัดลำดับนัดหมายให้เหมาะสมและเพิ่มจำนวนผู้ป่วยในช่วงท้ายของวัน พบว่าวิธีนี้ช่วยลดเวลารอคอยบริการได้มากถึง 54% เมื่อเทียบกับระบบเดิม [10]

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ประยุกต์ทฤษฎีแถวคอย (Queuing Theory) ซึ่งประกอบด้วยลูกค้า (Customer) ที่เข้าระบบแถวคอย (Queuing) เพื่อเข้ารับบริการให้บริการจากหน่วยงานให้บริการ (Service) เพื่อศึกษารูปแบบการเข้ารับบริการของผู้ป่วยนอก การรอคอยหรือแถวคอย และรูปแบบการให้บริการของพื้นที่ต่าง ๆ ในแผนกผู้ป่วยนอก โดยใช้สัญลักษณ์แคนดอล (Kendoll Notation) แสดงพารามิเตอร์ $A/B/s$ โดยตัวอักษร A หมายถึง รูปแบบการเข้ามาของผู้ป่วยนอก (Arrivals Pattern) ใช้สัญลักษณ์ M: Markovian แสดงจำนวนของผู้ป่วยนอกเป็นการแจกแจงปัวซอง หรือระยะเวลาระหว่างการมาของคนป่วยนอกมีการแจกแจงเป็นเอ็กซ์โปเนนเชียล ถ้า D: Deterministic แสดงระยะเวลาระหว่างการเข้ามาของผู้ป่วยนอกเป็นแบบคงที่ ส่วน G: General แสดงระยะเวลาระหว่างการเข้ามาของผู้ป่วยนอกเป็นแบบทั่วไป สำหรับตัวอักษร B หมายถึง รูปแบบของเวลาการให้บริการ (Service Pattern) ใช้สัญลักษณ์ M, D, G เช่นเดียวกัน และตัวอักษร s หมายถึง จำนวนหน่วยที่ให้บริการ (Service) อาจเป็นแบบหนึ่งช่องทาง (Single Service) เช่น จุดชั่งน้ำหนัก จัดให้มีเพียง 1 เคาน์เตอร์ หรืออาจ

มีแบบหลายช่องทาง และหลายแถวคอย เช่น จุดชั่งน้ำหนักมี 2 เคาน์เตอร์ มีแถวคอย 2 แถว หรืออาจเป็นแบบหลายช่องทาง และหนึ่งแถวคอย เช่น จุดชั่งน้ำหนักมี 2 เคาน์เตอร์ มีแถวคอยเพียงหนึ่งแถว ผู้ป่วยมาถึงถ้าจุดชั่งน้ำหนักใดว่างก็สามารถเข้าใช้บริการได้ ถ้าไม่ว่างก็จะรอในแถวคอยซึ่งแถวเดียว สำหรับกฎระเบียบการให้บริการมีหลายวิธี ดังนี้ ให้บริการตามลำดับก่อนหลัง (First Come First Serve: FCFS) ให้บริการคนที่เข้าที่หลังสุดก่อน (Last Come First Serve: LCFS) ให้บริการแบบสุ่ม (Service in Random Order: SIRO) ให้บริการแบบอภิสิทธิ์ไม่เป็นตามลำดับ (Priority) หรือให้บริการทั่วไป (General Service Discipline: GD) ยกตัวอย่างการเขียนสัญลักษณ์แคนดอล เช่น $M/M/1$ รูปแบบการเข้ามาของผู้ป่วยนอกเป็นแบบปัวซอง โดยเวลาการให้บริการเป็นแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล และมีจำนวนช่องทางการให้บริการทั้งสิ้น 1 ช่อง เป็นต้น

นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์การจำลองแบบปัญหาเพื่อจำลองสถานการณ์จริง (Simulation) ของการเข้ารับบริการของคนป่วยนอก และการให้บริการต่าง ๆ ของโรงพยาบาล หนึ่ง มีงานวิจัยจำนวนไม่น้อยประยุกต์ใช้การจำลองสถานการณ์จริงด้วยคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยศึกษา และเข้าใจถึงพฤติกรรมของระบบนั้น โดยประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ อาทิ เช่น อารีนา (Arena) โปรโมเดล (Promodel) หรือเฟกซิม (Flexsim) ซึ่งมีคุณลักษณะที่แตกต่างกัน [11] ดังตารางที่ 1 สำหรับโปรแกรมอารีนา มักนิยมถูกประยุกต์ใช้ในงานวิจัยต่าง ๆ มากกว่าโปรแกรมอื่น ๆ เช่น การประยุกต์ใช้โปรแกรมอารีนาเข้ามาช่วยสร้างแบบจำลองสถานการณ์ และวิเคราะห์เปรียบเทียบแนวทางต่าง ๆ



ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างโปรแกรมจำลองสถานการณ์

คุณลักษณะ	Arena	Promodel	Flexsim
รูปแบบการใช้งาน	การใช้งานด้วยการลาก-วาง (drag and drop) เพื่อสร้างระบบแบบ flowchart	การใช้งานด้วยการลาก-วาง (drag and drop) รองรับภาษา if-then-else, template	การใช้งานด้วยการลาก-วาง (drag and drop) เพื่อสร้างระบบเสมือนจริง
ความยากง่ายในการเรียนรู้	ง่ายในการเรียนรู้	ง่ายในการเรียนรู้	ง่ายในการเรียนรู้
การรองรับรูปแบบ 2 – 3 มิติ	2 มิติ	2 มิติ	2 – 3 มิติ
การแสดงผลแบบแอนิเมชัน	2 มิติ แบบ hierarchical modeling	2 มิติ เชื่อมกับการสร้างโมเดล	3 มิติเสมือนจริงแบบพลวัต
การวิเคราะห์ข้อมูล	ใช้ Excel, Access, DB อื่น ๆ	เชื่อมกับตาราง, รายงานผล Tabular & Graphical	Data visualization ในตัว, เสนอ scenario เปรียบเทียบ

ของการปรับปรุงการให้บริการ ของแผนผู้ป่วยนอก กรณีศึกษาโรงพยาบาลแหลมฉบัง จังหวัดชลบุรี เพื่อลดระยะเวลารอคอยของผู้ป่วยนอก [12] [13] เช่นเดียวกับการจำลองสถานการณ์ของระบบการให้บริการผู้ป่วยนอกโรงพยาบาลชุมชน จังหวัดสุพรรณบุรีด้วยโปรแกรม Arena โดยการปรับปรุงให้ผู้ป่วยที่มีนัดให้มาช่วงเช้าเท่านั้น ส่งผลให้ระยะเวลาการรอคอยเฉลี่ยของผู้ป่วยนอกแบบที่มีนัดและไม่มียอดลดลง [14] จากงานวิจัยต่าง ๆ มีการผสมผสานใช้หลายเครื่องมือรวมทั้งการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ เข้ามาช่วยวิเคราะห์ข้อมูล และเปรียบเทียบผลหาแนวทางการปรับปรุงที่เหมาะสมในการลดระยะเวลารอคอยของผู้ป่วยที่เข้ารับบริการ

ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเข้ารับบริการของผู้ป่วยนอก แผนกผู้ป่วยนอกของโรงพยาบาลขนาดกลางแห่งหนึ่ง ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เพื่อเสนอแนวทางแก้ไขลดระยะเวลารอคอยของผู้ป่วย โดย

ขอบเขตการวิจัยศึกษามุ่งเน้นการลดเวลารอคอยเฉลี่ย เฉพาะกลุ่มผู้ป่วยที่มีนัดหมาย ตั้งแต่ผู้ป่วยเข้าสู่จุดคัดกรองของแผนกผู้ป่วยนอก จนกระทั่งได้รับการตรวจวินิจฉัยจากแพทย์ และผู้ป่วยออกจากแผนกผู้ป่วยนอกเท่านั้น นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้โปรแกรมอารีนา (Arena) เข้ามาช่วยจำลองสถานการณ์จริง วิเคราะห์หาแนวทางการปรับปรุงที่สามารถลดเวลารอคอยของผู้ป่วยให้มากที่สุด และแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพการให้บริการผู้ป่วยนอก

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 ศึกษาการให้บริการ และปัญหาการให้บริการของแผนกผู้ป่วยนอกโรงพยาบาลกรณีศึกษา

แผนกผู้ป่วยนอกโรงพยาบาลรับผิดชอบรักษาโรคทั่วไป และคัดกรองผู้ป่วยเพื่อส่งต่อไปยังแผนกอื่น ๆ ให้บริการในเวลาราชการ วันจันทร์ – ศุกร์ เวลา 8.30 – 16.30 น. จากข้อมูลย้อนหลัง พ.ศ. 2564 – 2566 มี

ผู้ป่วยเข้ารับบริการโดยเฉลี่ย 37,858 คน/ปี แบ่งผู้ป่วยได้ 2 ประเภท คือ ผู้ป่วยนัดหมาย และผู้ป่วยไม่นัดหมาย มีขั้นตอนการรับบริการ ดังแสดงในรูปที่ 1

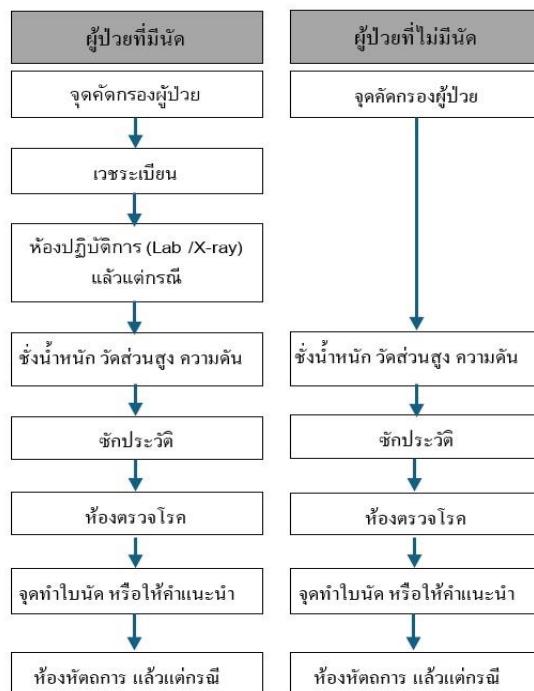
2.2 การเก็บรวบรวมข้อมูล

ผู้วิจัยได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลในปี พ.ศ. 2567 เดือน มีนาคม - พฤษภาคม พ.ศ. 2567 เป็นระยะเวลา 3 เดือน วันจันทร์ถึงวันศุกร์ ตั้งแต่เวลา 6.00 – 16.00 น. โดยเก็บข้อมูลที่จุดลงทะเบียนหรือจุดคัดกรอง, ห้องเวชระเบียน, ห้อง Lab/X-ray, จุดชั่งน้ำหนัก วัดส่วนสูง และความดัน, จุดซักประวัติ, ห้องตรวจโรค, จุดทำใบนัด หรือให้คำแนะนำ, ห้องหัตถการ แล้วแต่กรณี

2.3 วิเคราะห์สภาพการให้บริการที่แผนกผู้ป่วยนอกในปัจจุบัน

วิเคราะห์สภาพการให้บริการที่แผนกผู้ป่วยนอกในปัจจุบันเพื่อให้เห็นแนวโน้มของปริมาณผู้ป่วยที่เข้ารับบริการในแต่ละจุดบริการและในแต่ละช่วงเวลา ข้อมูลเหล่านี้จะวิเคราะห์ในรูปแบบกราฟแท่งแบ่งช่วงเวลาเป็นช่วงละ 1 ชั่วโมงเพื่อให้เห็นแนวโน้มในการรับบริการอย่างชัดเจนเพื่อการวิเคราะห์ข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 2

จากรูปที่ 2 สามารถแยกประเภทของผู้ป่วย คือ แบบมีนัด และแบบไม่นัด พบว่าในช่วงเช้าผู้ป่วยนัดจะมีพฤติกรรมมารับบริการที่มาก สำหรับช่วงบ่ายนั้นจะมีผู้ป่วยไม่นัดมารับบริการมากกว่าผู้ป่วยนัด สำหรับระยะเวลารวมทั้งหมดที่ผู้ป่วยอยู่ในระบบแบ่งตามช่วงเวลาของผู้ป่วยเข้ารับบริการ โดยในช่วงเช้าถึงเที่ยงผู้ป่วยจะใช้เวลารอยู่ในระบบมากตามลำดับ เช่น

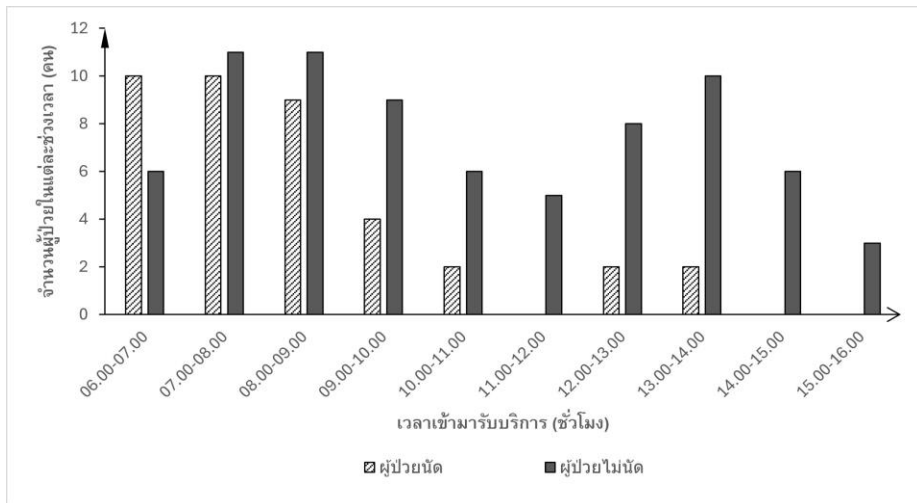


รูปที่ 1 ขั้นตอนการรับบริการของผู้ป่วยนอก

ตารางที่ 2 ปริมาณผู้ป่วยโดยเฉลี่ยต่อวันที่เข้ามาใช้บริการ

วัน	ผู้ป่วยที่มีนัด (คน)	ผู้ป่วยไม่นัด (คน)
จันทร์	37	80
อังคาร	58	68
พุธ	47	70
พฤหัสบดี	45	70
ศุกร์	40	85

ผู้ป่วยที่เข้ามาใช้บริการในเวลา 6.00 น. แต่จุดบริการเปิดให้บริการ 7.00 น. แสดงในรูปที่ 3 จึงทำให้เวลารอคอยของผู้ป่วยมากขึ้นไปอีกส่งผลให้เวลาที่ผู้ป่วยอยู่ในระบบมาก



รูปที่ 2 จำนวนแต่ละประเภทผู้ป่วยที่เข้ามาใช้บริการในแต่ละช่วงเวลา

สรุปได้ว่ายิ่งผู้ป่วยมาก่อนเวลาเท่าไร นั่นคือระยะเวลาที่อยู่ในระบบก็จะมากขึ้นตามลำดับ นอกจากนี้ผู้ป่วยมีความเชื่อว่ายิ่งมาเข้าเท่าไร ก็จะได้รับบริการเร็วเท่านั้น ส่งผลให้มีผู้ป่วยเข้ามากระจุกตัวในช่วงเช้า สำหรับการนัดผู้ป่วย มีการระบุนวันที่ให้มารับบริการ แต่ไม่ระบุเวลาที่ชัดเจน เป็นอีกเหตุผลหนึ่งที่ผู้ป่วยต้องมาโรงพยาบาลแต่เช้าเช่นกัน จากการวิเคราะห์ข้อมูล พบว่า จุดบริการที่มีระยะเวลารอคอยเฉลี่ยนานที่สุด คือ จุดซักประวัติ และห้องตรวจแพทย์ ผู้ป่วยต้องรอคอยนานโดยเฉลี่ย 29.48 นาที และ 33.54 นาทีตามลำดับ ซึ่งนานกว่ามาตรฐานที่กำหนด (อ้างอิงตาม คู่มือปฏิบัติงานคู่มือฯ รพ.พนมสารคาม และคู่มือฯ รพ.สมเด็จพระ)

2.4 การวิเคราะห์ข้อมูลนำเข้าและการแจกแจง

แผนกผู้ป่วยนอกของโรงพยาบาลกรณีศึกษา มีลักษณะของระบบแถวคอยแบบหลายช่องทาง-หลายขั้นตอน สามารถจำแนกเป็นแบบจำลองคิวประเภท

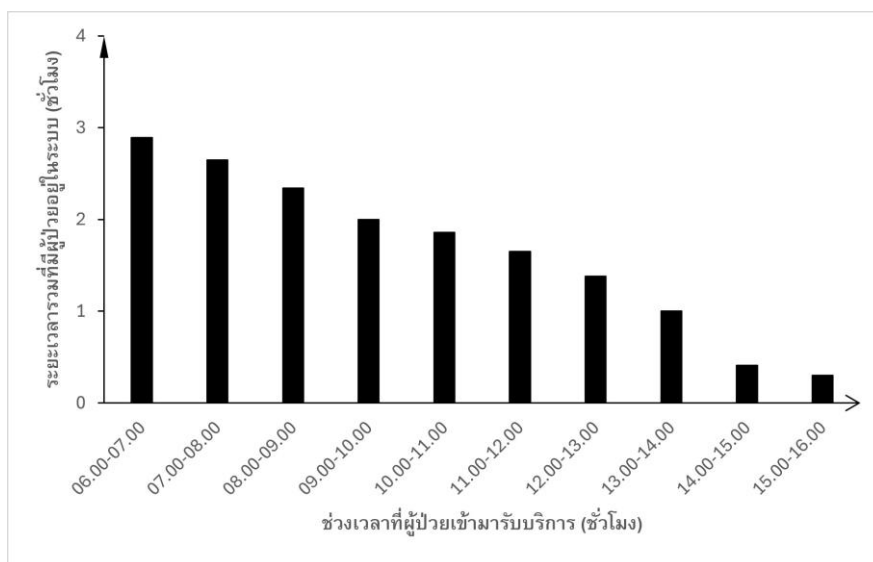
M/G/s โดยที่ผู้ป่วยเดินทางเข้ามาใช้บริการแบบสุ่มมีหลายช่องบริการ และแต่ละจุดให้บริการใช้เวลาที่มีการแจกแจงไม่จำเพาะเจาะจง สอดคล้องกับ Fundamentals of Queueing Theory [15] ที่กล่าวว่าแบบจำลอง M/G/s เหมาะกับสถานการณ์ที่มีเวลาการให้บริการแปรผันสูง และไม่สามารถระบุลักษณะจำเพาะของการแจกแจงได้

จากการเก็บข้อมูลของแผนกผู้ป่วยนอกของโรงพยาบาลกรณีศึกษาพบว่า ผู้ที่เข้ารับบริการที่แผนกผู้ป่วยนอกมีเวลารอคอยทั้งหมดคือ 149.5 นาที เวลารับบริการจริงเฉลี่ยคือ 38 นาที โดยข้อมูลที่เก็บบันทึก คือ (1) จำนวนผู้ป่วยที่เข้ามาในระบบต่อหน่วยเวลา (2)ระยะห่างระหว่างการมาถึงของผู้ป่วย (3) เวลาการให้บริการของจุดบริการต่างๆ จากนั้นนำข้อมูลนี้มาทำการแจกแจง โดยใช้เครื่องมือ Input analyzer ของโปรแกรม Arena เพื่อสร้างแบบจำลองสถานการณ์ดังแสดงในตารางที่ 3



ตารางที่ 3 การแจกแจงการเข้ามารับบริการของผู้ป่วยที่ไม่มีนัดหมาย และผู้ป่วยที่มีนัดหมาย

ช่วงเวลา	ผู้ป่วยไม่มีนัดหมาย		ผู้ป่วยที่มีนัดหมาย	
	รูปแบบการแจกแจง	P-value	รูปแบบการแจกแจง	P-value
6.00-7.00	$0.999 + 11 * \text{BETA}(0.78, 1.19)$	> 0.15	$-0.5 + \text{LOGN}(6.49, 7.83)$	0.0792
7.00-8.00	$-0.5 + \text{LOGN}(6.27, 6.27)$	0.492	$-0.001 + \text{EXPO}(3.84)$	0.694
8.00-9.00	$0.5 + \text{GAMM}(3.59, 1.29)$	0.166	$-0.001 + \text{EXPO}(3.15)$	0.19
9.00-10.00	$-0.001 + \text{LOGN}(6.23, 10.5)$	0.358	$-0.5 + \text{LOGN}(3.82, 4.38)$	0.141
10.00-11.00	$-0.001 + 26 * \text{BETA}(0.562, 2.51)$	0.433	$-0.5 + \text{LOGN}(4.31, 4.7)$	0.47
11.00-12.00	$-0.5 + \text{LOGN}(8.1, 9.06)$	0.0807	$\text{EXPO}(7.09)$	> 0.15
12.00-13.00	$0.999 + \text{EXPO}(15.2)$	> 0.15	$1.5 + 15 * \text{BETA}(0.466, 0.397)$	0.05
13.00-14.00	$\text{EXPO}(6.29)$	0.651	$7 * \text{BETA}(0.672, 1.26)$	> 0.15
14.00-15.00	$\text{EXPO}(5.44)$	0.712	$-0.001 + \text{WEIB}(5.32, 0.76)$	> 0.15
15.00-16.00	$\text{EXPO}(7.55)$	0.306	$3 + 4.55 * \text{BETA}(0.0176, 0.0292)$	0.14



รูปที่ 3 เวลาเฉลี่ยที่ผู้ป่วยอยู่ในระบบแต่ละช่วงเวลา



การแจกแจงของข้อมูลจะต้องตรวจสอบสมมติฐานมีอยู่ 2 วิธี คือ วิธี Chi Square Test เหมาะกับข้อมูลที่มีมากกว่า 50 ข้อมูล และ วิธี Kolmogorov-Smirnov Test เหมาะกับข้อมูลที่มีจำนวนน้อย โดยมีการตั้งสมมติฐานการทดสอบ ดังนี้

H_0 : ข้อมูลมีการแจกแจงตามแบบที่ต้องการทดสอบ

H_1 : ข้อมูลไม่มีการแจกแจงตามแบบที่ต้องการทดสอบ

โดยกำหนดให้ค่าความเชื่อมั่นเท่ากับ 95% (ระดับนัยสำคัญ 0.05) และค่า P-value ต้องมีค่ามากกว่า 0.05 จึงยอมรับสมมติฐานหลัก H_0

3. การจำลองสถานการณ์

3.1 แบบจำลองสถานการณ์ก่อนปรับปรุง

การสร้างแบบจำลองสถานการณ์ในโปรแกรม Arena จะต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองสถานการณ์เพื่อพิสูจน์ว่าแบบจำลองสามารถทำงานได้เหมือนระบบจริง โดยการนำรูปแบบการแจกแจงจากตารางที่ 3 มาใช้เป็นข้อมูลนำเข้าลงใน Create module เพื่อกำหนดอัตราการเข้ามาของผู้ป่วยโดยแยกเป็นผู้ป่วยนัดและไม่นัด ตั้งแต่เวลา 6.00 - 16.00 น. ทั้งหมด 20 ช่วง และใช้ Assign module เพื่อระบุตัวแปรที่มาจาก Create module ในจุดบริการต่าง ๆ จะใช้ Process module ในการตั้งค่าโดยใช้รูปแบบการแจกแจงเวลาการให้บริการที่จุดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4 จากนั้นนำไปสร้างในแบบจำลองสถานการณ์ของจุดบริการต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4 และ 5 ตามลำดับ

3.2 การหาจำนวนรอบของการรันซ้ำที่เหมาะสม

การหาจำนวนรอบการรันซ้ำที่เหมาะสมมีผลต่อความแม่นยำ และความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง ค่า Half Width ควรอยู่ในช่วง 10 - 20% ของค่าเฉลี่ยตัวแปรที่สนใจ [16] มีสูตรดังนี้

$$N = \frac{n_0 \times H_0^2}{H^2}$$

กำหนดให้

N คือ จำนวนรอบในการรันซ้ำที่คำนวณได้

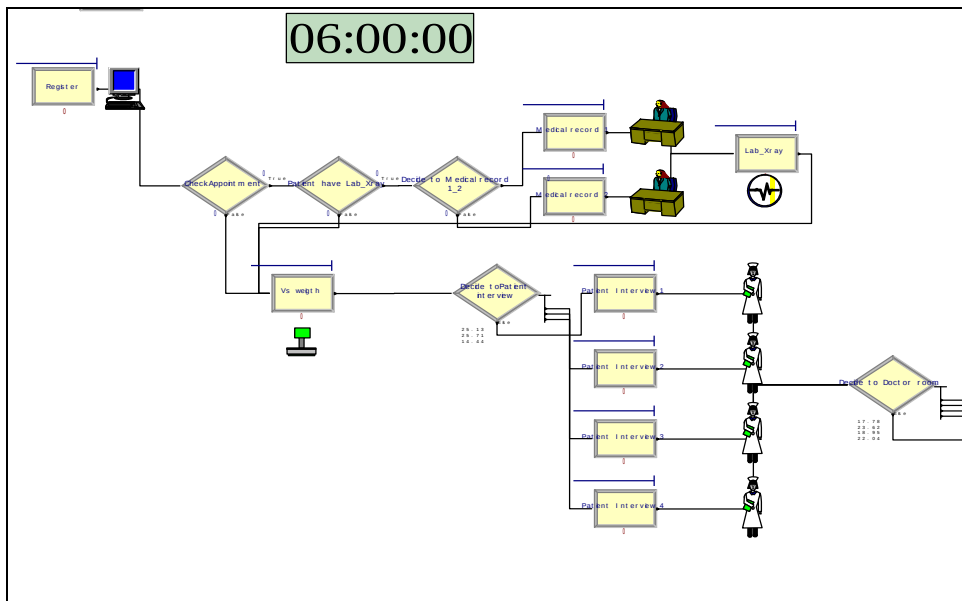
n_0 คือ จำนวนรอบในการรันซ้ำที่ทดลองครั้งแรก

H_0 คือ Half Width ที่ได้จากการทดลองครั้งแรก

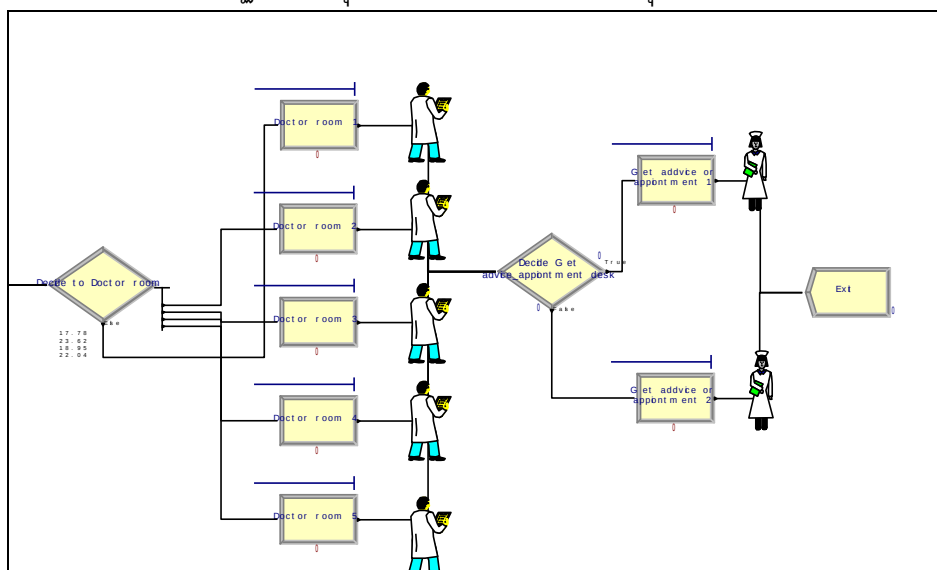
H คือ Half Width ที่เหมาะสม

ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดจำนวนรอบในการรันครั้งแรกคือ 5 ครั้ง ($n_0 = 5$) โดยนำเวลารอคอยที่จุดซักประวัติ 1 และเวลาที่ใช้ในระบบทั้งหมด มาคำนวณหาจำนวนรอบของการรันซ้ำที่เหมาะสม พบว่า จำนวนการรันซ้ำที่เหมาะสมคือ 358 รอบ

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model validation) เป็นกระบวนการที่ตรวจสอบความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของแบบจำลองเพื่อให้มั่นใจว่าแบบจำลองสามารถใช้แทนระบบงานจริงได้ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธี Two-Sample t-test มาใช้ในการทดสอบเพื่อทดสอบว่า ระบบงานจริงและระบบงานจำลองของจำนวนผู้ป่วยที่ออกจากระบบเวลารอคอยที่จุดบริการต่างๆ และเวลาทั้งหมดที่ผู้ป่วยอยู่ในระบบ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 [16]



รูปที่ 4 แบบจำลองสถานการณ์ของจุดลงทะเบียน จุดเวชระเบียน
ห้องปฏิบัติการ จุดชั่งน้ำหนักวัดความดัน และจุดซักประวัติ



รูปที่ 5 แบบจำลองสถานการณ์ของห้องตรวจโรค และจุดบริการหลังพบแพทย์



ตารางที่ 4 การแจกแจงเวลาการให้บริการแต่ละจุดบริการ

จุดให้บริการ	รูปแบบการแจกแจง	P-value
จุดคัดกรอง	TRIA(0.5, 0.765, 3.5)	0.247
เวชระเบียน 1	POIS(1.61)	0.164
เวชระเบียน 2	POIS(1.39)	0.236
ห้องปฏิบัติการ X-ray	2.5 + LOGN(17.1, 19.2)	> 0.75
ซั้่งน้ำหนัก ส่วนสูง ความดัน	6 * BETA(4.47, 6.24)	0.238
จุดซักประวัติ 1	1 + LOGN(4.3, 2.01)	0.222
จุดซักประวัติ 2	2 + WEIB(3.77, 2.11)	0.38
จุดซักประวัติ 3	1 + LOGN(4.45, 1.93)	> 0.75
จุดซักประวัติ 4	2 + ERLA(1.09, 3)	0.0912
ห้องตรวจโรค 1	1 + ERLA(0.677, 6)	> 0.75
ห้องตรวจโรค 2	0.5 + 12 * BETA(5.59, 7.97)	0.101
ห้องตรวจโรค 3	0.5 + GAMM(0.571, 8.25)	0.206
ห้องตรวจโรค 4	0.5 + ERLA(0.801, 6)	0.0558
ห้องตรวจโรค 5	1.1 + WEIB(4.87, 3.01)	0.47
จุดบริการหลังพบแพทย์ 1	ERLA(1, 4)	0.7
จุดบริการหลังพบแพทย์ 2	GAMM(0.867, 3.64)	0.0532

โดยมีขั้นตอนการทดสอบสมมติฐาน ดังนี้

H_0 : ค่าเฉลี่ยของทั้งสองกลุ่มไม่แตกต่างกัน

H_1 : ค่าเฉลี่ยของทั้งสองกลุ่มแตกต่างกัน

จากนั้นใช้สูตรการคำนวณหาค่า t-Statistic เพื่อเปรียบเทียบกลุ่มตัวอย่างสองกลุ่มที่แตกต่างกัน (ระบบงานจริงและระบบงานจำลอง) มีสูตรดังนี้

$$t_0 = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}$$

กำหนดให้

$\bar{X}_1$ คือ ค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างที่ 1

$\bar{X}_2$ คือ ค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างที่ 2

s_1^2 หรือ s_2^2 คือ ความแปรปรวนของแต่ละกลุ่ม

n_1 หรือ n_2 คือ จำนวนตัวอย่างในแต่ละกลุ่ม

หลังจากนั้นคำนวณหาค่า Degree of Freedom (v) เพื่อนำค่า t-Statistic ไปเปิดตาราง t-distribution เพื่อทดสอบสมมติฐานว่าค่าเฉลี่ยของทั้งสองกลุ่มมีความแตกต่างกันหรือไม่ Degree of Freedom (v) คำนวณโดยใช้สูตร ดังนี้



$$v = t_{\frac{\alpha}{2}}, \frac{\left(\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}\right)^2}{\frac{\left(\frac{S_1^2}{n_1}\right)}{n_1 - 1} + \frac{\left(\frac{S_2^2}{n_2}\right)}{n_2 - 1}}$$

จากการจำลองสถานการณ์และการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง มีผลลัพธ์ของการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองและเปรียบเทียบผลลัพธ์จากแบบจำลองของกระบวนการจริงและผลลัพธ์จากแบบจำลองก่อนปรับปรุง ดังแสดงในตารางที่ 5

3.4 แนวทางการปรับปรุงรูปแบบการนัดหมาย

แนวทางการปรับปรุงพิจารณาจากจุดที่มีเวลารอคอยนาน และมีคนหนาแน่นเป็นจำนวนมาก ได้แก่ จุดซักประวัติ และบริเวณห้องตรวจโรค ดังนั้นได้เสนอให้จัดทำระบบนัดหมายที่ชัดเจน โดยกำหนดวัน และเวลาที่ชัดเจนในแต่ละช่วงเวลา เพื่อช่วยลดความแออัดในระบบ และลดระยะเวลาการรอคอยการเข้ารับบริการ โดยการจัดการนัดหมายเป็นแบบ Blocking Booking มี 2 รูปแบบ คือ (1) Multiple-block/Fixed-interval กำหนดการนัดหมายให้มีจำนวนผู้ป่วยในแต่ละ Block เท่ากัน และระยะห่างของการนัดหมายคงที่ (2) Variable-block มุ่งเน้นการปรับเปลี่ยนอัตราการเข้ามาในระบบของผู้ป่วย โดยกำหนดให้มีจำนวนผู้ป่วยในแต่ละในแต่ละช่วงเวลาไม่เท่ากัน แบ่งเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงแรก ช่วงกลาง และช่วงท้าย สามารถนำไปสร้างทางเลือกต่าง ๆ ดังในตารางที่ 6

การสร้างแบบจำลองสถานการณ์หลังปรับปรุงจะใช้ Module ต่าง ๆ ในโปรแกรมอาร์นาเหมือนกับ

แบบจำลองสถานการณ์ก่อนปรับปรุง ยกเว้น Create module ของผู้ป่วยนัด

3.5 การทดสอบ Pair t-Test ของแบบจำลองสถานการณ์ก่อนและหลังปรับปรุง

การสร้างแบบจำลองสถานการณ์ทั้ง 8 ทางเลือกเมื่อได้ผลลัพธ์แล้วจะต้องนำมาทดสอบ Pair t-Test ของแบบจำลองสถานการณ์หลังปรับปรุง Gosset (1908) เป็นการทดสอบสมมติฐานเพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของกลุ่มข้อมูลเดียวกันทั้งก่อนและหลังการทดลอง โดยมีสูตรดังนี้

$$t_0 = \frac{\bar{D} - \mu D}{\frac{S.D}{n}}$$

$\bar{D}$ คือ ค่าเฉลี่ยของตัวอย่าง

μD คือ ค่าเฉลี่ยของประชากร

S.D คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

n คือ ขนาดตัวอย่าง (กำหนดให้ $n=5$)

การตั้งสมมติฐานของการทดสอบ Pair t-Test มีดังนี้
 H_0 : ระบบงานหลังปรับปรุง มีค่าไม่น้อยกว่าก่อนปรับปรุง
 H_1 : ระบบงานหลังปรับปรุง มีค่าน้อยกว่าก่อนปรับปรุง

หากสมมติฐานยอมรับ H_1 และปฏิเสธ H_0 แสดงว่า ระบบงานหลังปรับปรุงนั้นมีค่าน้อยกว่าระบบงานก่อนปรับปรุง จากการประมวลผลทางเลือกทั้ง 8 ทางเลือก พบว่า ค่า t ที่คำนวณได้ของทางเลือกทั้งหมดอยู่ในปฏิเสธ H_0 และ ยอมรับ H_1 แสดงว่าเวลาในการรอคอยเฉลี่ยแนวทางการปรับปรุงทั้ง 8 ทางเลือก น้อยกว่าแนวทางก่อนปรับปรุงหรือปัจจุบัน



ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบผลระบบจำลอง

เวลารอคอยพื้นที่ต่าง ๆ	ระบบจริง	แบบจำลอง	%ความแตกต่าง
จุดชักประวัติ 1	28.37	28.16	0.74 %
จุดชักประวัติ 2	32.50	30.26	7.14 %
จุดชักประวัติ 3	36.54	35.01	4.28 %
จุดชักประวัติ 4	21.71	26.40	21.59 %
ห้องตรวจโรค 1	43.46	45.01	3.50 %
ห้องตรวจโรค 2	49.26	45.02	8.99 %
ห้องตรวจโรค 3	55.03	53.27	3.25 %
ห้องตรวจโรค 4	38.16	34.95	8.78 %
ห้องโรคตรวจ 5	44.24	44.31	0.13 %
เวลาทั้งหมดที่ผู้ป่วยใช้บริการอยู่ในระบบ	149.5	146.2	2.23 %

ตารางที่ 6 แนวทางเลือกปรับปรุงสำหรับการสร้างแบบจำลองสถานการณ์

รายละเอียดของแนวทาง					
ทางเลือก	Multiple Block	Variable Block			ระยะทางการหัด (นาที)
		ช่วงแรก	ช่วงกลาง	ช่วงท้าย	
1	✓				✓
2	✓				✓
3		✓			✓
4		✓			✓
5			✓		✓
6			✓		✓
7				✓	✓
8				✓	✓



3.6 อรรถประโยชน์ของบุคลากรในการทำงาน

อรรถประโยชน์ของบุคลากรในการทำงานสะท้อนถึงระดับการใช้ทรัพยากรบุคลากรอย่างมีประสิทธิภาพ หากมีการใช้งานมากเกินไปอาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพ และคุณภาพของบริการ การเปรียบเทียบค่า Utilization ก่อนและหลังการปรับปรุง เพื่อประเมินว่าการลดลงของอัตราการใช้งานสอดคล้องกับการลดลงของระยะเวลารอคอยหรือไม่ เมื่อทำการวิเคราะห์แนวทางทางเลือกการปรับปรุงทั้งหมดโดยใช้ Schedule Utilization ของโปรแกรมอารีนา

4. ผลการทดลองและอภิปรายผล

จากการประมวลผลทางเลือกทั้ง 8 ทางเลือก เวลารอคอยเฉลี่ยของผู้เข้ารับบริการมีค่าดังตารางที่ 7 และค่าอรรถประโยชน์ของบุคลากรในการทำงานของแพทย์และพยาบาลมีค่าดังตารางที่ 8 จากแนวทางการปรับปรุงโดยกำหนดเวลานัดหมายผู้ป่วยเป็นแบบ Block Booking โดยกำหนดการเข้ามาของผู้ป่วยเป็นแบบคงที่ให้มีระยะห่างกัน 30 และ 60 นาที และแบบกำหนดการเข้ามาของผู้ป่วยในแต่ละช่วงเวลาไม่เท่ากัน โดยแบ่งเป็น 3 ช่วงเวลา คือ ช่วงเช้า ช่วงหลังพักเที่ยง และช่วงบ่ายก่อนปิดการให้บริการ 16.00 น. พบว่า ทุกแนวทางทางเลือกของการปรับปรุงทั้ง 8 แนวทางสามารถลดเวลารอคอยเฉลี่ย ส่งผลต่อการลดภาระของบุคลากรทางการแพทย์ในพื้นที่ห้องตรวจโรค 1 – 5 โดยพิจารณาค่าอรรถประโยชน์ที่ลดลงเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างทุกแนวทางการปรับปรุงทั้งหมด พบว่า แนวทางเลือกที่ 7 แบบ Variable Block ที่กำหนดการนัดหมายของผู้ป่วยเป็นจำนวนมากในช่วงท้ายก่อนปิดการให้บริการ และนัด

คนป่วยห่างกัน 30 นาที/คน ในแบบจำลองสถานการณ์ผู้ป่วยใช้เวลารอคอยเฉลี่ยน้อยที่สุดของทุกจุดซักประวัติ และทุกห้องตรวจโรค เมื่อเปรียบเทียบกับแนวทางอื่น ๆ ผู้ป่วยใช้เวลาเฉลี่ยในระบบเพียง 103.71 นาที เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีปัจจุบัน หรือก่อนปรับปรุง ผู้ป่วยต้องใช้เวลาในระบบโดยเฉลี่ย 146.20 นาที ผู้ป่วยใช้เวลาเฉลี่ยในระบบลดลง 42.49 นาที หรือลดลงร้อยละ 29.03 สอดคล้องกับการวิเคราะห์ค่าอรรถประโยชน์ (Utilization) ของบุคลากรของแต่ละทางเลือก พบว่าแนวทางเลือกที่ 7 ค่าอรรถประโยชน์ลดลงเหลือเพียงร้อยละ 82.05 เมื่อเปรียบเทียบกับก่อนปรับปรุงมีค่าถึงร้อยละ 95.21 แสดงว่าแนวทางเลือกนี้ช่วยลดภาระงานของบุคลากรทางการแพทย์ และพยาบาล เนื่องจากสามารถลดความแออัดของผู้ป่วยที่ต้องมาแต่ละเช้า ต้องใช้เวลานานในแผนผู้ป่วยนอก ดังนั้น ทางโรงพยาบาลสามารถลดเวลารอคอยเฉลี่ยของผู้ป่วย และเวลาเฉลี่ยที่ผู้ป่วยอยู่ในระบบได้ โดยเฉพาะวิธีปัจจุบัน หรือก่อนการปรับปรุง พื้นที่ของจุดซักประวัติ และห้องตรวจมีความแออัดของผู้ป่วยสูง การลดลงของระยะเวลารอคอย การเข้ารับบริการนี้สะท้อนให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการปรับปรุง ดังแสดงในรูปที่ 6 และ 7 จากการเปรียบเทียบระยะเวลาเฉลี่ยที่จุดซักประวัติก่อนและหลังการปรับปรุง ดังรูปที่ 6 และ 7 พบว่า แนวทางนัดหมายแบบ Variable Block ในทางเลือกที่ 7 สามารถลดเวลารอคอยเฉลี่ยเหลือ 20.33 นาที (ลดลงร้อยละ 30.98) เช่นเดียวกับการเปรียบเทียบระยะเวลาเฉลี่ยที่ห้องตรวจโรคก่อนและหลังการปรับปรุง พบว่าเวลารอคอยเฉลี่ยลดลงจาก 45.26 นาที เหลือเพียง 33.54 นาที (ลดลงร้อยละ 25.90)

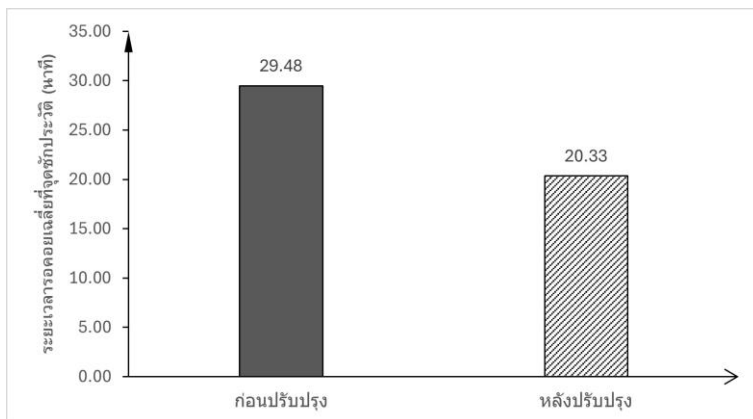


ตารางที่ 7 การเปรียบเทียบเวลารอคอยเฉลี่ยของผู้ป่วยของแต่ละทางเลือก

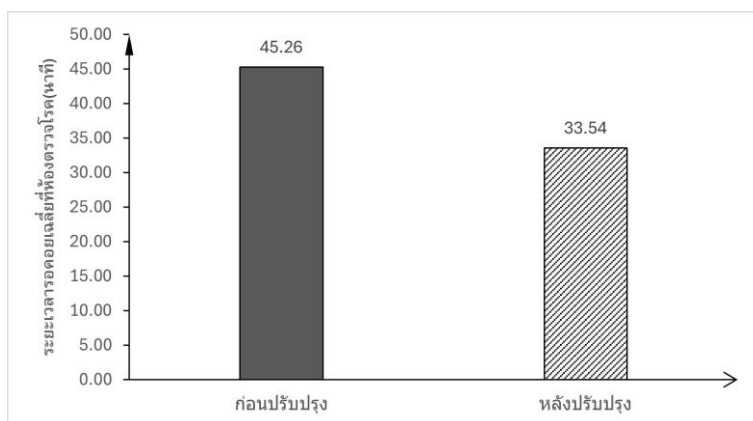
จุดบริการ	เวลารอคอยเฉลี่ยแต่ละทางเลือก (นาที)								
	ปัจจุบัน	1	2	3	4	5	6	7	8
จุดซักประวัติ 1	28.16	30.50	30.10	30.70	32.09	28.38	26.96	21.05	20.32
จุดซักประวัติ 2	30.26	19.59	19.88	18.14	20.76	20.11	19.43	17.93	17.09
จุดซักประวัติ 3	35.01	22.77	23.25	21.55	24.56	23.36	22.22	20.31	20.64
จุดซักประวัติ 4	26.40	23.35	23.29	23.42	27.01	22.78	23.06	21.22	21.76
ห้องตรวจโรค 1	45.01	40.3	39.71	41.22	43.00	39.81	38.79	37.90	38.88
ห้องตรวจโรค 2	45.02	35.87	35.32	37.18	37.40	33.91	34.18	34.69	34.51
ห้องตรวจโรค 3	53.27	37.19	37.71	36.99	36.70	37.10	37.98	37.97	37.49
ห้องตรวจโรค 4	34.95	25.88	24.80	28.42	26.42	24.60	25.09	24.35	25.14
ห้องตรวจโรค 5	44.31	35.48	34.94	39.25	36.04	31.80	33.38	27.43	31.70
เวลาเฉลี่ยที่ผู้ป่วยอยู่ในระบบทั้งหมด	146.20	112.01	111.20	118.21	115.27	107.99	109.46	103.71	106.27

ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบอรรถประโยชน์ (Utilization) ของบุคลากรทางแพทย์ และพยาบาลของแต่ละทางเลือก

จุดบริการ	ร้อยละของ Utilization ของแต่ละทางเลือก								
	ปัจจุบัน	1	2	3	4	5	6	7	8
พยาบาลจุดซักประวัติ 1	78.08	80.31	77.99	75.99	75.78	76.57	76.20	72.48	72.97
พยาบาลจุดซักประวัติ 2	62.49	64.44	63.91	62.31	61.23	62.09	61.01	58.74	59.52
พยาบาลจุดซักประวัติ 3	62.03	64.26	63.69	60.83	60.58	61.03	61.02	57.34	58.26
พยาบาลจุดซักประวัติ 4	39.87	41.08	40.95	38.76	38.95	38.79	38.95	36.99	37.95
แพทย์ห้องตรวจโรค 1	84.39	77.25	76.18	79.35	76.36	74.30	75.76	71.82	73.38
แพทย์ห้องตรวจโรค 2	81.31	76.20	75.06	76.87	74.53	72.22	72.59	66.67	70.35
แพทย์ห้องตรวจโรค 3	85.91	76.74	75.16	80.36	75.10	72.86	73.58	69.30	71.42
แพทย์ห้องตรวจโรค 4	59.67	57.14	57.14	57.91	57.02	54.52	53.58	50.18	52.42
แพทย์ห้องตรวจโรค 5	95.21	89.45	89.38	89.39	87.76	86.56	88.28	82.05	85.23



รูปที่ 6 เวลารอคอยจุดซักประวัติก่อน-หลังปรับปรุง



รูปที่ 7 เวลารอคอยห้องตรวจก่อน-หลังปรับปรุง

การปรับปรุงประสิทธิภาพการให้บริการของแผนกผู้ป่วยนอก เพื่อลดเวลารอคอยเฉลี่ยในระบบแถวคอยงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นการปรับเปลี่ยนระยะเวลาการนัดหมายของผู้ป่วย กำหนดอัตราการเข้ามาของผู้ป่วยประเภทนัดหมายให้แต่ละช่วงเวลาที่แตกต่างกันได้ ทำให้สามารถกำหนดจำนวนผู้ป่วยนอกที่แน่นอนสอดคล้องกับงานวิจัยกรณีศึกษาของโรงพยาบาลแหลมฉบัง [12] [13] ที่นำเสนอแนวทางการปรับปรุงอัตราการเข้ามาของผู้เข้ารับบริการโดยเฉพาะในช่วง

เช้าเวลา นอกจากนี้มีการเพิ่มช่องทางการให้บริการสอดคล้องกับงานวิจัย [17] เพิ่มช่องบริการของห้องตรวจโรค โดยปรับเปลี่ยนนายแพทย์จากแผนกอื่นที่มีค่าอัตราการใช้ประโยชน์ของบุคลากรต่ำเข้ามาช่วยเสริม ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยนี้ที่ไม่สามารถใช้แนวทางการเพิ่มบุคลากร หรือเพิ่มจำนวนช่องการให้บริการ เนื่องจากข้อจำกัดที่โรงพยาบาลกรณีศึกษาไม่สามารถเพิ่ม หรือเปลี่ยนย้ายบุคลากรทางการแพทย์จากหน่วยงานอื่นได้ ส่วนจัดตารางนัดหมายเป็นช่วง ๆ



(Block Booking) สอดคล้องกับงานวิจัยกรณีศึกษา โรงพยาบาล เมืองเจดดาห์ ประเทศซาอุดีอาระเบีย [18] ได้เสนอแนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงาน เพื่อลดเวลารอคอย พบว่า การจัดการนัดหมายแบบ Block Booking ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด เนื่องจากสามารถควบคุมอัตราการเข้ามาของคนป่วยได้ โดยกำหนดให้ (1) คนไข้ใหม่เข้ารับบริการในช่วงเช้า (2) ให้คนไข้ใหม่แทรกหลังจากกลุ่มผู้ป่วยนัดหมายได้รับบริการแล้ว (3) กำหนดเวลานัดหมายสำหรับผู้ป่วยใหม่ในช่วงท้ายของวัน ซึ่งแตกต่างจากแนวทางการปรับปรุงของงานวิจัยนี้ ที่ไม่ได้กำหนดวิธีการนัดหมายสำหรับผู้ป่วยใหม่ หรือผู้ป่วยเก่า ขณะที่งานวิจัย [7] ได้เสนอแนวทางการเพิ่มเวลาในการให้บริการ โดยเลื่อนเวลาทำงานของบุคลากรทางการแพทย์ให้เร็ว จะได้บริการผู้ป่วยได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามแนวทางนี้จะส่งผลต่อการเพิ่มภาระการทำงานที่มากขึ้น ไม่สอดคล้องกับงานวิจัยนี้ที่ต้องการลดภาระการทำงานของบุคลากรทางการแพทย์

5. สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

การปรับปรุงประสิทธิภาพการให้บริการของแผนกผู้ป่วยนอก โรงพยาบาลกรณีศึกษา วิธีการปัจจุบันของการนัดหมายผู้ป่วยมีเพียงการระบุวันนัดหมาย แต่ไม่ระบุเวลานัดหมายที่แน่นอน ส่งผลให้ผู้ป่วยนัดต้องเดินทางมาโรงพยาบาลตั้งแต่เช้า ส่งผลให้เกิดความหนาแน่น และใช้เวลาารอคอยเข้ารับที่นาน จากการศึกษา และวิเคราะห์โดยการสร้างจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรมอาร์นา พบว่า จุดซั๊กประวัติของพยาบาล และห้องตรวจโรคของแพทย์ มีผู้ป่วยนอกรอคอยอย่างหนาแน่น และมีเวลารอคอยมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งใน

ช่วงเวลา 7.00-11.00 น. มีปริมาณผู้ป่วยเข้ามาใช้บริการเป็นจำนวนมากที่สุด ส่งผลให้ผู้ป่วยต้องใช้เวลาอยู่ในระบบโดยเฉลี่ย 149.5 นาที ดังนั้น ผู้วิจัยได้เสนอแนวทางปรับปรุงทั้งหมด 8 แนวทาง สามารถพิจารณานำไปปฏิบัติได้จริงสอดคล้องกับข้อจำกัดต่าง ๆ ของโรงพยาบาลกรณีศึกษา แนวทางต่าง ๆ เหล่านี้มุ่งเน้นการปรับอัตราการเข้ามาของผู้ป่วยนอกประเภทนัดหมาย เพื่อสามารถกำหนดจำนวนผู้ป่วยได้ค่อนข้างแน่นอนให้สอดคล้องกับความสามารถการให้บริการของบุคลากรทางการแพทย์ โดยเฉพาะห้องตรวจโรค จากการสร้างแบบจำลองสถานการณ์ และวิเคราะห์ผลพบว่า แนวทางการปรับปรุงที่ 7 ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดสามารถลดเวลารอคอยเฉลี่ยของทุกพื้นที่การให้บริการของแผนกผู้ป่วยนอก ช่วยให้ผู้ป่วยประเภทนัดหมายใช้เวลาอยู่ในระบบโดยเฉลี่ยลดลงถึง 42.49 นาที หรือลดลงร้อยละ 29.03 โดยเฉพาะการลดความแออัดของผู้ป่วยในพื้นที่ของโรงพยาบาล นอกจากนี้ยังช่วยลดภาระการทำงานของบุคลากรทางการแพทย์ในการให้บริการในแต่ละหน่วยงาน

เพื่อให้เกิดความยั่งยืนในการปรับปรุงที่เสนอมา จำเป็นต้องยึดกฎระเบียบการให้บริการของกำหนดลำดับ และเวลานัดหมายเพื่อจัดระเบียบผู้ป่วยนอกที่รอคอยในแถวคอย และอัตราการเข้ามาของผู้ป่วยนอกประเภทนัดหมายตามที่กำหนดไว้

แนวทางดังกล่าวข้างต้นเป็นเพียงแนวทางการปรับปรุงที่เกิดจากการจำลองสถานการณ์จริงด้วยคอมพิวเตอร์เท่านั้น สามารถนำไปประกอบการพิจารณาของผู้เกี่ยวข้องผู้เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงประสิทธิภาพของโรงพยาบาลกรณีศึกษา



ผลการศึกษาพบว่า การปรับปรุงระบบนัดหมายแบบ Variable Block ตามแบบจำลองที่ 7 ช่วยลดระยะเวลารอคอยของผู้ป่วยและเพิ่มประสิทธิภาพการให้บริการ โดยเฉพาะในช่วงเวลาที่มีความแออัด นอกจากนี้ ยังลดภาระการทำงานของบุคลากรและทำให้ระบบบริการมีความยืดหยุ่นมากขึ้น โดยการกระจายภาระงานช่วยลดความแออัดในช่วงที่มีผู้ป่วยจำนวนมาก

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. พิจารณาใช้อาสาสมัครแทนพยาบาลในจุดบริการที่ไม่เกี่ยวกับการวินิจฉัย เพื่อช่วยลดภาระงานพยาบาลและเพิ่มประสิทธิภาพการบริการในช่วงเวลาที่มีความแออัด
2. พิจารณาการยุบรวมจุดให้บริการ ยกตัวอย่างเช่น การยุบรวมจุดซั้่งน้ำหนัก ส่วนสูง และความดัน เข้ากับจุดซักประวัติเป็นหน่วยงานเดียวกัน
3. การปรับปรุงการออกไปนัดโดยใช้ระบบอัตโนมัติหรือโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการนัดหมาย
4. ในการศึกษาครั้งต่อไป ควรพิจารณาการเรียงต้นทุ่นรวม เนื่องจากแนวทางการปรับปรุงต่าง ๆ อาจสะท้อนต่อต้นทุ่นการดำเนินงานที่เพิ่มขึ้นในบางหน่วยงาน หรือบางขั้นตอนเท่านั้น การพิจารณาเพียงต้นทุ่นเพียงตัวใดตัวหนึ่ง อาจส่งผลต่อการประกอบ การพิจารณาตัดสินใจเลือกแนวทางการปรับปรุงที่เหมาะสมได้

5. ในการศึกษาครั้งต่อไป ควรมุ่งเน้นในเรื่องลดความสูญเสียเปล่าแฝงในกระบวนการทำงานต่าง ๆ เพื่อลดเวลาการให้บริการ โดยการประยุกต์ใช้หลักแนวคิดลีน (Lean Thinking) เข้ามาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] G. Ngowtanasuwan and P. Ruengtam, Applied simulation model for design of improving medical record area in out-patient department (OPD) of a governmental hospital, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2013, 101, 147-158.
- [2] S. Inganuraksakul, An evaluation of the project to reduce congestion at phutthasothon hospital by using modern drugstore (K.Y.1) in Chachoengsao Province, Thesis, Thammasat University, Thailand, 2022. (in Thai)
- [3] L. Jialing, Z. Guiju, L. Li and S. Wenwu, Big data-enabled analysis of factors affecting patient waiting time in the nephrology department of a large tertiary hospital, *Journal of Healthcare Engineering*, 2021, 5555029.
- [4] L. Wang, E. Demeulemeester, Simulation modeling and analysis of the inpatient surgical department in a university hospital, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2025, 142, 103103.

- [5] L. Yuping, G. Weijuan, K. Xiang, M. Olaf and L. Guangyu, Factors associated with outpatient satisfaction in tertiary hospitals in China: A systematic review, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17, 7070.
- [6] <http://www.klanghospital.go.th/index.php/> (Accessed on 23 May 2025)
- [7] S. Srilakorn and S. Sinthuchaun, An application of queuing theory and simulation to reducing waiting time for outpatient of warinchamrap hospital, *IE Network Conference, Proceeding*, 2017, 1130-1135. (in Thai)
- [8] P. Thingsan and A. Naipinit, Establishing guidelines for reducing waiting time for general disease testing service of prajak silpakom hospital, *NEU Academic and research journal*, 2020, 10(1), 59-72. (in Thai)
- [9] N. Lailomthong, Reducing congestion of patients receiving services at a community hospital: A case study, *Thesis*, Chulalongkorn University, Thailand, 2013. (in Thai)
- [10] C. Panawiwat, Development of appointment systems for outpatient department services, *Thesis*, Chulalongkorn University, Thailand, 2013. (in Thai)
- [11] A. Amaluk and P. Klomijit, A comparative study on commercial simulation package, *International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI 2024)*, *Proceeding*, 2024, 194-199.
- [12] T. Kongtong A. Kamphan and A. Cheewathammanon, Using simulations to reduce waiting time at the outpatient department of laem chabang hospital, *Thai Journal of Operations Research*, 11(2), 2023, 41 50. (in Thai)
- [13] CH. Chamnanlor, K. Suksan and J. Saibunna, Simulation to improve service performance of outpatient department in laem chabang hospital, *SWU Engineering Journal* 2018, 13(1), 166-175. (in Thai)
- [14] P. Manmor and T. Wasusri, The reduction of patient's waiting time at an outpatient department using simulation modeling: A community hospital in suphanburi province, 2019, 15(2), 51-62. (in Thai)
- [15] D. Gross, J.F. Shortle, J.M. Thompson and C.M. Harris, *Fundamentals of Queueing Theory*, 4th ed., Wiley, NY, USA, 2008.
- [16] P. Srisarakoo and K. Jantorasamai, Appropriate number of replications and its effect on simulation model accuracy, *Thesis*, Kasetsart University, Thailand, 2019. (in Thai)



- [17] J. Ahmad, J. Iqbal, I. Ahmad, Z.A. Khan, M.I. Tiwana, K. Khan, A simulation based study for managing hospital resources by reducing patient waiting time, IEEE Access, 2020, 193523-193531.
- [18] A. Jamjoom, M. Abdullah, M. Abulkhair, T. Alghamdi, A. Mogbil, Improving outpatient waiting time using simulation approach, UKSim-AMSS 8th European Modelling Symposium, Proceeding, 2014, 117-125.

A Comparative Analysis of Supervised Machine Learning Algorithms for Fault Prediction in Automotive Suspension Systems

Pachara Juyploy^{1*} and Withit Chatlatanagulchai²

¹ Materials Handling and Logistics Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

² Mechanical engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

* Corresponding author, E-mail: pachara.j@eng.kmutnb.ac.th

Received: 19 July 2024; Revised 18 November 2025; Accepted: 8 December 2025

Online Published: 12 December 2025

Abstract: Intense automotive vibrations, while common, can seriously compromise driver health. This research utilizes machine learning (ML) to predict potential failures in car suspension systems, targeting an enhancement in vehicle reliability and safety. While numerous studies have simulated suspension faults, the increasing data complexity from uncertain parameters necessitates more efficient algorithms for precise fault identification. This study, therefore, conducts a comparative analysis of several supervised machine learning algorithms to determine the most accurate method for this predictive task. The algorithms were evaluated using four distinct feature set preparations: original data, standard deviation data, principal component analysis data, and a combined set of mean standard deviation and principal component analysis. The findings reveal that the Artificial Neural Network (ANN) and Support Vector Classifiers (SVC) algorithms yield the highest prediction accuracy. Notably, this peak accuracy was achieved when utilizing the combined feature set (mean standard deviation and Principal Component Analysis (PCA)). These results offer a valuable contribution toward designing more robust car suspension systems and advancing future preventive maintenance strategies.

Keywords: Suspension Systems; Machine Learning Algorithm; Predictive Maintenance; Supervised Learning Techniques



1. Introduction

The impact of whole-body vehicle vibrations on human health has been a subject of significant investigation. Occupational health data, for example, highlights accidents linked to driver fatigue following prolonged vibration exposure [1]. This exposure is associated with numerous health risks, including chronic back pain, digestive disorders, and hearing damage [2]. Consequently, research has focused on vehicle suspension system enhancements, such as active controls to optimize ride smoothness [3] and studies on the vibration impacts of varying road conditions [4]. To better address these challenges, machine learning (ML) is increasingly being adopted as a powerful tool for predicting and assessing potentially harmful variations in suspension systems.

The predictive capabilities of ML have been proven effective across diverse industries, such as forecasting brake quality defects [5] and predicting critical health outcomes in clinical settings [6, 7]. Within vehicle diagnostics, ML applications are varied [8]. While some studies have focused on fault detection using unsupervised clustering methods [9-12], the use of supervised techniques is particularly promising for fault prediction. These algorithms ranging from simpler statistical models like Naïve Bayes (NB) to complex, non-linear models like Artificial Neural Networks (ANN) and

Support Vector Classifiers (SVC) are selected for this study because they represent a broad and well-established spectrum of supervised learning approaches, allowing for a robust comparison of their suitability for this specific diagnostic task.

Despite this growing body of research, a significant research gap exists. There is a lack of comprehensive, direct comparison studies that evaluate a wide range of supervised ML algorithms using the same standardized dataset for car suspension fault prediction. Many existing studies focus on only one or two algorithms, making it difficult for engineers to determine which method is truly optimal for this application.

Therefore, this study aims to fill this gap by conducting a robust comparative analysis of eight widely used supervised and unsupervised ML techniques. The selected algorithms include one unsupervised technique, K-Means (KM) Clustering, and seven supervised techniques: K-Nearest Neighbors (KNN), Support Vector Classifiers (SVC), Logistic Regression (LR), Linear Discriminant Analysis (LDA), Naïve Bayes (NB), Artificial Neural Network (ANN), and Decision Tree (DT). This research systematically validates the accuracy of these algorithms, employing careful parameter tuning to prevent underfitting and overfitting [13, 14].



This paper provides a detailed evaluation, highlighting how specific preprocessing strategies, combined with optimal algorithm tuning, contribute to achieving the highest classification accuracy for car suspension failures.

2. Materials and Methods

To accurately diagnose faults within the automotive suspension system, this study implements a dual-stage machine learning approach. Initially, an unsupervised K-means clustering technique is applied to discover inherent grouping structures within the vibration data. Subsequently, a comprehensive suite of seven supervised learning algorithms specifically KNN, SVC, LR, LDA, NB, ANN, and DT is utilized to construct predictive models capable of classifying the specific degree of suspension damage. The car suspension vibration data is divided into two main parts: the training dataset and the validation dataset. The training dataset is used to calibrate the algorithm's parameters, while the validation dataset is used to evaluate the algorithm's performance [15]. The process began by assessing the unsupervised learning method using K-means, which involves determining the specified number of clusters and using the Calinski-Harabasz Criterion to find the appropriate number of clusters. Once the exact

number of clusters is determined, supervised learning methods are used to predict car suspension damage.

2.1 Datasets

The acceleration data obtained from the left front wheel suspension is studied, and the car parameters are referenced from [16]. The event occurs at the 20-second mark, with the spring coefficient reductions starting from 10% up to 100% in 2% increments, at a sampling frequency of 100 Hz. At each increment of spring reduction, the simulation generates 2000 data points, corresponding to a duration of 20 seconds. The fault scenario in the spring coefficient ranges from 60% to 100% reduction. The Data scenarios are categorized into four levels: Good, Usual, Fail, and Fail High, as shown in Table 1.

Table1 Data scenarios

Categories	Spring Coefficient
	Reduction (%)
Good	10% - <35%
Usual	45% - <65%
Fail	65% - 80%
Fail high (Severe)	90%-100%

2.2 Preparing for Datasets

Dataset preparation involved extracting raw acceleration signals from the car suspension damage simulation. This data capture encompassed a full spectrum of vibration patterns, ranging from normal operation to severe irregularity. Unsupervised machine learning was then applied to this raw data to mathematically determine the optimal number of damage clusters.

To ensure robust model evaluation, the collected data was partitioned using an 80:20 ratio, allocating the majority for model training and the remaining 20% for validation purposes. The training subset served to calibrate the supervised algorithms, whereas the validation subset facilitated performance assessment. Furthermore, to optimize model hyperparameters and verify accuracy stability, a 5-fold cross-validation strategy was implemented. Statistical enhancement of the dataset was achieved through two primary preprocessing methods: Standard Deviation normalization and Principal Component Analysis (PCA).

To rigorously test algorithmic performance under different conditions, four distinct feature sets were derived from the primary data: 1) The unprocessed 'Raw' signals; 2) Data standardized via Standard Deviation; 3) A dimensionality-reduced set using PCA (retaining 80% variance); and 4) A comprehensive set combining Mean, Standard

Scaler, and PCA. These variations were specifically engineered to identify which preprocessing strategy yields the highest diagnostic accuracy.

2.3 Tools

MATLAB was used for initial data preparation, including standard deviation and PCA transformation of the data. All unsupervised and supervised algorithms were executed using MATLAB Live Editor and MATLAB Classification Learner [17], including generating all result graphs

3. Clustering Unsupervised ML

K-means clustering [18], [19] was selected to partition the suspension vibration data into distinct fault categories without requiring pre-labeled training examples. The optimal number of clusters for this specific dataset was identified as K=4, derived from the Calinski-Harabasz Criterion analysis (Fig. 1) [20]. To ensure robust grouping based on feature similarity, the algorithm utilized the Squared Euclidean distance metric. Configuration settings included a single replicate run with a maximum of 100 iterations, ensuring convergence on the complex vibration patterns. Each cluster represents distinct patterns of acceleration measurements associated with specific levels of suspension damage. The algorithm discerns various types and levels of damage, detailed in Table 2 and Fig. 2. The data preprocessing involved mean, standard deviation, and PCA techniques

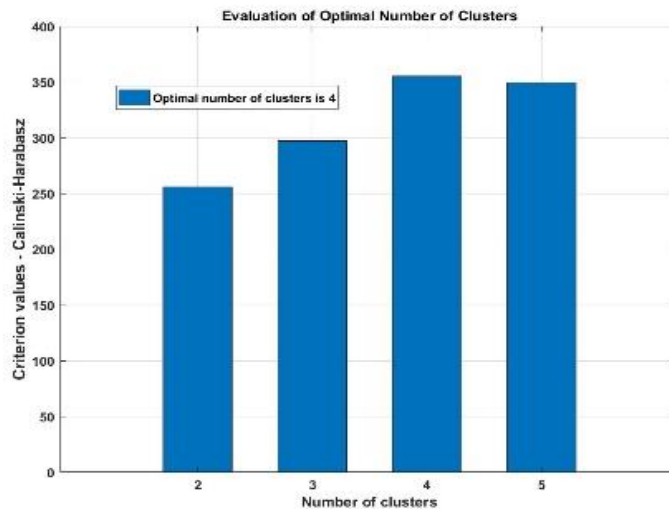


Fig. 1 optimal K=4 using the Calinski-Harabasz Criterion

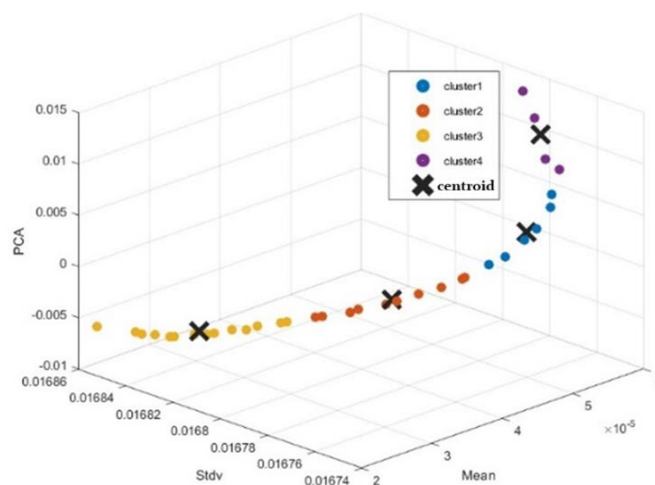


Fig. 2 Four clusters acceleration data using the K-Means Clustering

Table 2 shows 4 divisions of data data clusters when examine the springs reduction grouping by K-Means Clustering. It is consistent with the data

scenarios defined in the car suspension damage simulation.

**Table 2** Spring reduction clusters acceleration data using the K-Means Clustering

Spring reduction	Cluster	Membership %	Centroid points		
			Mean	Stdv	PCA
			($\times 10^{-5}$)	($\times 10^{-2}$)	($\times 10^{-3}$)
0% - 40%	3	41.1	2.65x	1.682	-5.28
43% - 65%	2	29.4	3.62	1.677	-40.38
68% - 80%	1	17.6	4.69	1.675	5.654
83% - 90%	4	11.7	5.66	1.677	11.00

Table 3 Tuning parameters

Tuning Parameters	Detail Description
Ne	Number of neighbors
B	Box constraint level
K	Kernel scale
N	Number of layers
F	First Layer size
S	Second Layer size
Sp	Maximum Number of splits

Table 4 Types of the dataset

Types of the Dataset	Detail Description
Raw	Original data
St	Standard deviation
PCA	Principal Component Analysis
M + St+ PCA	Mean + Standard deviation + PCA

4. Predicting using Supervised ML

Parameters are employed to optimize the algorithms prior to applying supervised machine learning. Table 3 defines five distinct sets of parameters for five different algorithms, aimed at identifying optimal performance across four dataset types (Raw, Standard Deviation, PCA, and Mean + Standard Deviation + PCA). The best hyperparameters were determined through various parameter configurations to assess the suitability of each dataset. Table 4 Show types of datasets.

Algorithmic tuning for the KNN, SVC, LR, and ANN models was executed based on the specific configurations detailed in Table 3. Conversely, the LDA and NB classifiers were deployed using their standard default settings. Comprehensive training and testing procedures were applied to all algorithms across the four prepared dataset variants. The resulting performance metrics for each model are presented in Table 5.

Table 5 Accuracy for each algorithm

Algorithm	Types of the dataset	Tuning parameters	Accuracy (%)
KNN	Raw	Ne=3	68.5
	St	Ne=11	54.8
	PCA	Ne=7	91.8
	M+ St + PCA	Ne=1	95.9
SVC	Raw	B=5	74.0
	St	B=1	50.7
	PCA	B=1	91.8
	M+ St + PCA	B=4	98.6
LR	Raw	K=4	53.1
	St	K=5	31.5
	PCA	K=1	31
	M +St + PCA	K=1	82.2
LDA	Raw	Default	94.5
	St	Default	42.5
	PCA	Default	80.6
	M +S t+ PCA	Default	83.8
NB	Raw	Default	78.1
	St	Default	56.2
	PCA	Default	86.3
	M +St + PCA	Default	93.2
ANN	Raw	N=2 F=10 S=10	90.4
	St	N =1 F=10	52.1
	PCA	N =2 F=10 S =10	94.5
	M +St + PCA	N=1 F=10	98.6
DT	Raw	Sp = 100	95
	St	Sp =100	43.8
	PCA	Sp = 100	87.7
	M +St + PCA	Sp = 100	89.0



The training and comparison of all machine learning models were conducted using the MATLAB Classification Learner App. For complex models (KNN, SVC, ANN, and DT), the app's automated hyperparameter tuning function was utilized to find the optimal parameter values that yielded the highest validation accuracy. For simpler models (LR, LDA, and NB), the app's default parameter settings were employed as they generally do not require extensive tuning for this application.

The test results proved that various algorithms perform better when data is preprocessing, and the parameters are tuned. The results showed that KNN, SVC, LR, NB, and ANN achieved the highest accuracy when using preprocessing with Mean + Standard Deviation + PCA. However, LDA and DT performed better with raw data and slightly had lower accuracy when using preprocessing with Mean + Standard Deviation + PCA. In conclusion, Mean + Standard deviation + PCA leads to optimal accuracy results. Furthermore, fine-tuning parameters and scaling data can enhance algorithmic precision.

The summary of the top three algorithms achieving the highest accuracy, as presented in Table 6, identifies the best-performing algorithms in the following order: ANN, SVC, and KNN. These algorithms achieve near-perfect accuracy,

Table 6 The best algorithms

Type of the datasets	Algorithm	% Accuracy
M+St+ PCA	ANN	98.6
M+St+ PCA	SVC	98.6
M+St+ PCA	KNN	95.9

utilizing datasets that have been preprocessed with Mean + Standard deviation + PCA to attain optimal performance.

4. Discussion and Conclusion

Although car vibrations are typically considered normal, it's crucial to monitor their intensity because excessive vibrations can negatively affect human health. Moreover, unsupervised and supervised machine learning algorithms are powerful techniques for clustering, categorizing damage, and predicting uncertain and complex vehicle damage data.

For example, a related study by Saleh and Fleyeh (2022) [21] also utilized supervised machine learning to predict the status of road signs. Their study investigated the effects of using principal component analysis and data scaling on prediction accuracy. The authors of that paper applied three algorithms: Random Forest, Artificial Neural Network (ANN), and



Support Vector Machines (SVM). In their findings, Random Forest achieved the highest accuracy, precision, recall, and F1 score, all at 98%.

In contrast, the findings from the present study, which focused on car suspensions, revealed that the ANN and SVC algorithms achieve the highest accuracy of 98.6% when using the dataset of the combined mean standard deviation and principal component analysis data.

This superior performance (from ANN and SVC) can be attributed to the inherent ability of both algorithms to manage the complex, non-linear relationships present in the vehicle suspension vibration data.

ANN (Artificial Neural Network): Is designed to learn intricate patterns through its multi-layer structure. This made it highly effective at detecting the subtle, complex relationships within the feature-engineered dataset (Mean + Stdv + PCA) that other models missed.

SVC (Support Vector Classifiers): Excels in high-dimensional spaces. By utilizing the "Kernel Trick" (which the MATLAB app employs), SVC can create a flexible, non-linear decision boundary (hyperplane). This allowed it to effectively separate the complex 'Fault' and 'Good' classes, a task where simpler linear models failed.

Conversely, models like Logistic Regression (LR)

and Linear Discriminant Analysis (LDA) performed poorly because they are limited by their linear assumptions, which were not suitable for the complexity of this dataset. Similarly, Naïve Bayes (NB) was hindered by its 'naïve' assumption that all features are independent, which is not true for highly correlated vibration sensor data.

This analysis underscores that for complex fault prediction tasks involving vibration data, non-linear models like ANN and SVC are the most robust and appropriate choices.

4.1 Practical Implications

The high accuracy of ANN and SVC models enables their use in an on-board diagnostic (OBD) system. This system could process real-time vibration data, alert the driver to potential faults, and transform maintenance from reactive to predictive. This directly enhances driver safety, reduces long-term repair costs, and increases vehicle reliability.

4.2 Limitations and Future Work

The primary limitation is the use of simulation data, which may not capture real-world complexities; the study also focused only on spring faults. Future work must validate these models using data from real vehicles and expand the system to detect other fault types (e.g., damper failure). Investigating deep learning models (like CNNs or RNNs) could also yield further improvements.



5. Acknowledgement

This work was supported by the Faculty of Engineering under the funding agreement No. ENG-NEW-63-30. The authors would like to express their sincere gratitude for this valuable support, which made the completion of this study possible.

6. References

- [1] Land Transportation Safety and Health Association, Explanation of safety guidelines for cargo handling operations. 2018.
http://rikusai.or.jp/wp-content/uploads/pdfs/niyaku-guideline_kaisetsu_H30.pdf (Accessed on 22 August 2022) (in Japanese)
- [2] J. Tatsuno and S. Maeda, Effect of whole-body vibration exposure in vehicles on static standing balance after riding, *Vibration*, 2023, 6(2), 343–358.
- [3] S.S. Sedeh, R.S. Sedeh and K. Navi, Reducing harmful effects of road excitations on human health by designing car active Suspension systems, *International Conference on Bioinformatics and Computational Biology (BIOCOMP'06)*, Proceeding, 2006, 236-241.
- [4] U. Kirbas, Investigation of the effects of whole-body vibration exposure on vehicle drivers when travelling over covered manholes embedded in public roadways, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2022, 88, 103277.
- [5] MH. Yorulmus, HB. Bolat and C. Bahadird, Predictive quality defect detection using machine learning algorithms: A case study from automobile industry, *In Intelligent and Fuzzy Techniques for Emerging Conditions and Digital Transformation INFUS 2021 Conference, Proceeding*, 2022, 263-270.
- [6] G. Kong, K. Lin and Y. Hu, Using machine learning methods to predict in-hospital mortality of sepsis patients in the ICU, *BMC Medical Informatics and Decision Making*, 2020, 20, 251.
- [7] V. Ganesan M.P. Talawar, H. Pant, M.S. Sayyed, M.S. Tamboli, M.N. Shaik and M.N. Shaik, Predictive maintenance in healthcare IoT: A machine learning-based approach, *European Chemical Bulletin*, 2023, 12(4), 15909-15922.

- [8] A. Theissler, J. Perez-Velazquez, M. Kettelgerdes and G. Elger, Predictive maintenance enabled by machine learning: Use cases and challenges in the automotive industry, *Reliability Engineering and System Safety*, 2021, 215, 107864.
- [9] G. Wang and S. Yin, Data-driven fault diagnosis for an automobile suspension system by using a clustering based method, *Journal of the Franklin Institute*, 2014, 351(6), 3231-3244.
- [10] S. Yin and Z. Huang, Performance monitoring for vehicle suspension system via fuzzy positivistic C-means clustering based on accelerometer measurements, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2014, 20(5), 2613-2620.
- [11] Y. Wang, X. Zheng, L. Wang, G. Lu, Y. Jia, K. Li and M. Li, Sensor fault detection of vehicle suspension systems based on transmissibility operators and Neyman–Pearson test, *Reliability Engineering and System Safety*, 2023, 232, 109067.
- [12] K. Wu, J. Liu, M. Li, J. Liu and Y. Wang, Multi-mode active suspension control based on a genetic K-means clustering linear quadratic algorithm, *Applied Sciences*, 2021, 11(21), 10493.
- [13] R. Tabares-Soto, S. Orozco-Arias, V. Romero-Cano, V.S. Bucheli, J.L. Rodríguez-Sotelo J, and C.F. Jiménez-Varón, A comparative study of machine learning and deep learning algorithms to classify cancer types based on microarray gene expression data, *PeerJ Computer Science*, 2020, 6, e270.
- [14] J. Zou, M. Huss, A. Abid, P. Mohammadi, A. Torkamani, and A. Telenti, A primer on deep learning in genomics , *Nature Genetics*, 2018, 51(1),12-18.
- [15] G. Eraslan, Z. Avsec, J. Gagneur, and F.J. Theis, Deep learning: New computational modelling techniques for genomics, *Nature Reviews Genetics*, 2019, 20 (7), 389–403.
- [16] P. Juyploy and W. Chatlatanagulchai, Reducing harmful effects on human health of car vibrations using a combination of unsupervised and supervised machine learning algorithm, *The Journal of Industrial Technology*, 2024, 20 (1), 171–185
- [17] S.M. Senthamil, and S.J. Rani, Classification of admission data using classification learner toolbox, In *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1979, 012043.



- [18] S. Eke, T. Aka-Ngnui, G. Clerc and I. Fofana, Characterization of the operating periods of a power transformer by clustering the dissolved gas data, IEEE 11th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), Proceeding, 2017, 298-303.
- [19] N.L. Wibowo, M.A. Soeleman and A.Z. Fanani, Antlion optimizer algorithm modification for initial centroid determination in K-means algorithm, Jurnal RESTI, 2023, 7(4), 870-883.
- [20] S. Lukasik, P.A. Kowalski, M. Charytanowicz, and P. Kulczycki, Clustering using flower pollination algorithm and Calinski-Harabasz index, IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), Proceeding, 2016, 24, 2724-2728.
- [21] R. Saleh and H. Fleyeh, Using supervised machine learning to predict the status of road signs, Transportation Research Procedia, 2020, 62, 221-228.



ข้อมูลสำหรับผู้เขียนและการเตรียมต้นฉบับ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมตีพิมพ์ปีละ 3 ฉบับ โดยวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ บทความที่พิจารณาตีพิมพ์ต้องไม่เคยตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารใดมาก่อน และไม่อยู่ในระหว่างการพิจารณาของวารสารอื่น เรื่องที่ตีพิมพ์จะต้องได้รับการกลั่นกรองจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาที่เกี่ยวข้องแบบปกปิดข้อมูล (Double-Blind Peer-Review) และได้รับความเห็นชอบจากบรรณาธิการวารสารฯ

บทความต้องมีความยาวไม่น้อยกว่า 5 หน้ากระดาษ B5 หรือไม่น้อยกว่า 2500 คำ โดยนับคำด้วยคำสั่ง word count ใน MS Word (ไม่ควรเกิน 15 หน้ากระดาษ) บทความประกอบด้วยชื่อเรื่อง ชื่อผู้เขียน สถานที่ทำงาน การติดต่อผู้เขียน บทคัดย่อ และคำสำคัญ (3 - 5 คำ) โดยเนื้อหาดังกล่าวทั้งหมดต้องจัดเตรียมในรูปแบบภาษาไทย 1 หน้ากระดาษ และภาษาอังกฤษ 1 หน้ากระดาษ

เนื้อเรื่องของบทความวิจัยประกอบด้วย 5 - 6 ส่วน คือ (1) บทนำ (2) วิธีการดำเนินงานวิจัย/ทดลอง (3) ผลการวิจัย/ทดลองและการอภิปรายผล (4) บทสรุป (5) กิตติกรรมประกาศ (ถ้ามี) และ (6) เอกสารอ้างอิง

สำหรับเนื้อเรื่องของบทความวิชาการให้เตรียมเป็นบทความที่เรียบเรียงเนื้อหาจากหนังสือ งานวิจัย ประสบการณ์ หรือเรื่องแปล เพื่อเผยแพร่ความรู้ในสาขาต่างๆ หรือแสดงข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์มีคุณค่าทางวิชาการ โดยองค์ประกอบของบทความวิชาการอาจคล้ายคลึงกับบทความวิจัย แต่ไม่มีเนื้อหาของการดำเนินงานวิจัยและผลการวิจัย ซึ่งผู้เขียนสามารถกำหนดได้เองตามความเหมาะสมของบทความวิชาการ

ผู้เขียนบทความสามารถดาวน์โหลดรูปแบบบทความสำเร็จรูปและแบบฟอร์มนำส่งบทความได้จากเว็บไซต์: ojs.kmutnb.ac.th/index.php/jointech

Authors Guideline and Manuscript Preparation

JIT is published tri-annually by College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All considered articles have not been published elsewhere and are not currently submitted for consideration in other journals. All articles are independently assessed by specialist in their relevant fields (Double-Blind Peer Review), and must be approved by the editor.

The length of the manuscript is not less than 5 pages in B5 paper size or not less than 2500 words using a word count of MS Word (should not exceed 15 pages). The first page of the manuscript should contain the full title, author's name(s), affiliation, contact address of correspondence, abstract and keywords (3-5 words).

The content of the research article consists of 5-6 parts, arranged in the following details; (1) introduction (2) experimental procedure (3) results and discussion (4) conclusion (5) acknowledgement (if any) and (6) references.

For review or academic article, the contents may prepare from text book, research experiences, or translation for publishing knowledge in various fields or provide useful and valuable comments. The main contents may contain a similar section to the research article but without sections of the experimental and results. The topic and content can be specified by the author as appropriate for the article.

The author can download manuscript templates and submission form in the journal's website: ojs.kmutnb.ac.th/index.php/jointech.



แบบฟอร์มนำส่งบทความ

1. ชื่อบทความวิจัย/บทความวิชาการ

ภาษาไทย

ภาษาอังกฤษ

2. ประเภทบทความ ☐ บทความวิจัย ☐ บทความวิชาการ

3. ชื่อ-สกุลเจ้าของบทความ หรือผู้แทนส่งบทความ

4. สถานที่ติดต่อเจ้าของบทความหรือผู้แทนส่งบทความ

ที่อยู่

โทรศัพท์

โทรสาร

E-mail

5. รายชื่อและที่อยู่ของผู้ร่วมบทความ (สามารถเพิ่มรายชื่อได้ในเอกสารแนบเพิ่มเติม)

ชื่อ-สกุล (ภาษาไทย ตัวบรรจง)	ชื่อ-สกุล (ภาษาอังกฤษ ตัวบรรจง)	หน่วยงาน	โทรศัพท์	E-mail

6. เสนอรายชื่อผู้ประเมิน

1. โทรศัพท์

E-mail

2. โทรศัพท์

E-mail

3. โทรศัพท์

E-mail

7. การรับรองบทความ

☐ ขอรับรองว่าบทความต้นฉบับนี้ยังไม่ได้เคยได้รับการเผยแพร่และตีพิมพ์ในวารสารอื่นใดมาก่อน

เจ้าของบทความ (ลงชื่อ)

8. แบบฟอร์มนี้ข้าพเจ้าได้แนบต้นฉบับบทความดังรายการต่อไปนี้ครบถ้วนแล้ว

☐ ส่งบทความทางระบบออนไลน์ที่เว็บไซต์ <http://ojs.kmutnb.ac.th/index.php/jointtech/index>

☐ ส่งบทความทางไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ ที่ e-mail: JIT.journal@gmail.com

☐ ส่งบทความด้วยตัวเอง หรือทางไปรษณีย์

ขอรับรองว่าข้อความดังกล่าวข้างต้นเป็นจริงทุกประการ

ลงชื่อ เจ้าของบทความ หรือผู้แทนส่งบทความ

(.....)

วันที่ เดือน พ.ศ.



Manuscript Submission Form

1. Title

2. Type of manuscript ☐ Research Article ☐ Academic Article (Review)

3. Corresponding Author Name

4. Affiliation

Tel. Fax E-mail

5. List of co-author(s) and address

Name	Affiliation	Telephone	E-mail

6. Suggested reviews (Author must suggest the reviewer at least three people in the field of research presented in manuscript including name, organization, contact address and e-mail)

1. Tel. Email

2. Tel. Email

3. Tel. Email

7. Manuscript's certification

☐ I certify that this manuscript has not been accepted nor submitted for publication elsewhere.

Corresponding's author name (Signature)

8. Together with this form, I (we) have been attached other documents included:

☐ Manuscript submission by system online at <http://ojs.kmutnb.ac.th/index.php/joindtech/index>

☐ Manuscript submission by e-mail: JIT.journal@gmail.com

☐ Manuscript submission by self or post-mail

I hereby certify that the information above is true and accurate.

Signature Corresponding author

(.....)

Date Month Year

The Journal of Industrial Technology

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ ๒๑ ฉบับที่ ๓ ประจำปี ๒๕๖๘

บทความ (Articles)

- Development of Hybrid Water Heaters, The Journal of Industrial Technology, 2025, 21(3), 1-15.
- A Comparative Study Battery Modeling between Equivalent Circuit and Neural Network for UAVs Using Real Flight Data, The Journal of Industrial Technology, 2025, 21(3), 16-28.
- A Lesson Learned from the UK Rail Project: An Analysis of Critical Success Factors (CSFs) through the Project Life Cycle (PLC), The Journal of Industrial Technology, 2025, 21(3), 29-41.
- Applying Quality Function Deployment with Anthropometric to Design A Working Bench Table for Persons with Disabilities, The Journal of Industrial Technology, 2025, 21(3), 42-58.
- Machine Design and Development of A Semi-automatic Machine for Roasting and Grinding Dry Chili, The Journal of Industrial Technology, 2025, 21(3), 59-71.
- Optimization of Condition Using Response Surface Methodology for Boring Process in S20C Carbon Steel, The Journal of Industrial Technology, 2025, 21(3), 72-89.
- Influence of Flow-Obstructing Fins and Air Temperature on the Paddy Drying Process, The Journal of Industrial Technology, 2025, 21(3), 90-105.
- Design and Development of A Hybrid Solar Drying Chamber with Dry Hot Air and Integrated Moisture Condensation for Thai Herb Dehydration, The Journal of Industrial Technology, 2025, 21(3), 106-120.
- Revolutionizing Lifespan Prediction and Cumulative Damage Assessment of XLPE Copper Main Cables Using Multiphysics Simulation and Intelligent AI: A Case Study of the Industrial Technician School Building, RMUTSV, The Journal of Industrial Technology, 2025, 21(3), 121-137.
- Development of An Automatically Vegetables Irrigation Based on Partitioned Areas Using Solar-powered Pump, The Journal of Industrial Technology, 2025, 21(3), 138-153.
- Guidelines for Being Carbon Neutral for Educational Institutions: A Case Study of Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Wang Klai Kangwon Campus, The Journal of Industrial Technology, 2025, 21(3), 154-169.
- Effect of Air Flow Rate Control on the Performance of a Direct Reduction Ironmaking Furnace with an Air preheater, The Journal of Industrial Technology, 2025, 21(3), 170-185.
- An Optimization Approach for Solving a Mixed Model Assembly Line Balancing Problem with Collaborative Robots (Cobots) by Considering Time-weighted Average (TWA) Ergonomic Risk Score, The Journal of Industrial Technology, 2025, 21(3), 186-208.
- Reducing Waiting Times for Outpatient Services: A Case Study of Hospital Operations, The Journal of Industrial Technology, 2025, 21(3), 209-228.
- A Comparative Analysis of Supervised Machine Learning Algorithms for Fault Prediction in Automotive Suspension Systems, The Journal of Industrial Technology, 2025, 21(3), 229-240.