

<http://ojs.kmutnb.ac.th/index.php/joindtech>

ISSN: 1686-9869 (Print), ISSN: 2697-5548 (Online)



DRIVEN BY



The Journal of Industrial Technology

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ ๑๗ ฉบับที่ ๒ ประจำปี ๒๕๖๔

VOLUME 17 | ISSUE 2 | 2021 | Focused on engineering and industrial technology

Published by College of Industrial Technology (CIT), KMUTNB

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ ๑๗ ฉบับที่ ๒ ประจำปี ๒๕๖๔

กองบรรณาธิการวารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

ที่ปรึกษา

ศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ เข้ายงจีน
รองศาสตราจารย์ ดร.สมิตร ส่งพิริยะกิจ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

บรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรรถพล แก้ววิลัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

รองบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญลือ สวัสดิ์มงคล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์ อัครเอกพาลิน
ศาสตราจารย์ ดร.สุทธิศักดิ์ พงศ์รักษาพานิช
ศาสตราจารย์ ดร.นวดล เหล่าศิริพจน์
ศาสตราจารย์ ดร.พิเชษฐ ลิ่มสุวรรณ
ศาสตราจารย์ ดร.สำเร็จ จักรใจ
ศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช
ศาสตราจารย์ ดร.หทัยกานต์ มนัสปิยะ
ศาสตราจารย์ ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช
ศาสตราจารย์ ดร.ปริญญา จินดาประเสริฐ
ศาสตราจารย์ นาวาอากาศโท ดร.สรารุณี สุจิตจร
รองศาสตราจารย์ ดร.ธนัชชัย กุลรวานิชพงษ์
รองศาสตราจารย์ ดร.อภิรัตน์ เล่าห์บุตรี
รองศาสตราจารย์ ดร.สุรรัตน์ ผลศิลป์
รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงฤดี ฉายสุวรรณ

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

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

Associate Editor

Assistant 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.Hathai Karn 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 บทความจะได้รับการประเมินคุณภาพทางวิชาการโดยผู้ทรงคุณวุฒิทางสาขาที่เกี่ยวข้องไม่น้อยกว่า 2 คน (Double-Blinded Peer Review) ซึ่งทั้งผู้พิมพ์ (Author) และผู้ประเมิน (Reviewer) จะไม่ทราบข้อมูลรายชื่อของกันและกัน โดยบทความที่ผ่านการปรับปรุงตามผลการประเมินจะได้รับพิจารณาอนุมัติให้ตีพิมพ์บทความ ขั้นตอนสุดท้าย 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 ถนนประชาราษฎร์ 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 by the double-blinded peer review from the experts in related fields. The authors and reviewers will not know each other's contact information. 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 as the independent opinions of the author. The author is responsible for any legal consequences that may result from the published articles which editorial members not always necessary to 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 Print: 1686-9869, ISSN Online: 2697-5548) ฉบับที่ 2 ปีที่ 17 ทางกองบรรณาธิการมีความยินดีเป็นอย่างยิ่งที่จะเรียนให้ทุกท่านได้ทราบว่าวารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ได้รับการประเมินคุณภาพวารสารด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (Thai Citation Index: TCI) ให้อยู่ในฐานข้อมูล TCI กลุ่มที่ 1 ในปี พ.ศ. 2564 – พ.ศ. 2567 (รับรองตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2564 ไปจนถึง วันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2567)

การดำเนินงานของวารสารฯ ฉบับนี้ ทางกองบรรณาธิการและคณะผู้จัดทำวารสารฯ ได้ดำเนินการพิจารณาบทความผ่านระบบ Online Journal Submission (OJS) และเผยแพร่บทความในรูปแบบออนไลน์ผ่านทางเว็บไซต์ร่วมกับการเผยแพร่แบบรูปเล่ม นอกจากนี้ วารสารฯ ได้ดำเนินการขอเลขรหัสทรัพยากรสารสนเทศดิจิทัลหรือดีโอไอ (Digital Object Identifier: DOI) ผ่านระบบ CrossRef และ Digital Object Identifier System ให้กับทุกบทความที่ได้รับการตีพิมพ์ รวมถึงนำเข้าข้อมูลบทความสู่ฐานข้อมูล TCI แบบ Fast Track (Fast-track Indexing System) ซึ่งจะทำให้การสืบค้นอ้างอิงข้อมูลของบทความและข้อมูลของผู้พิมพ์ด้วยระบบออนไลน์นั้น ถูกต้องสมบูรณ์และรวดเร็วยิ่งขึ้น

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ได้จัดพิมพ์ 3 ฉบับต่อปี คือฉบับที่ 1 เดือนมกราคม - เดือนเมษายน ฉบับที่ 2 เดือนพฤษภาคม - เดือนสิงหาคม และฉบับที่ 3 เดือนกันยายน - เดือนธันวาคม นอกจากนี้วารสารฯ ยังเผยแพร่บทความแบบออนไลน์ผ่านทางเว็บไซต์ <http://ojs.kmutnb.ac.th/index.php/jointtech> และฐานข้อมูล Thai Journals Online (ThaiJO) รวมถึง Google Scholar

ปัจจัยหลายประการที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อคุณภาพวารสารคือคุณภาพของบทความที่มีคุณค่าทางวิชาการเป็นที่ยอมรับ กระบวนการคัดกรองและการตรวจสอบที่มีมาตรฐาน โดยผู้ทรงคุณวุฒิเฉพาะทางข้อเสนอแนะที่ทรงคุณค่า รวมทั้ง การจัดการที่มีประสิทธิภาพเพื่อดำเนินการจัดพิมพ์และการเผยแพร่บทความให้เป็นไปตามระยะเวลาที่กำหนด ส่งผลให้วารสารฯ มีความน่าเชื่อถือและผ่านการรับรองของ TCI

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

บรรณาธิการ



สารบัญ

	หน้า
กองบรรณาธิการวารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (Editorial Board of The Journal of Industrial Technology)	A
วัตถุประสงค์ (Objectives)	C
บทบรรณาธิการ	E
บทความวิจัย	
ETT Medic: แอปพลิเคชันสำหรับลดระยะเวลาการให้บริการและแถวคอยของ การให้บริการทางด้านการแพทย์ในโรงพยาบาล	1
ETT Medic: An Application for Minimizing Service Times and Waiting Queues of Medical Services in Hospitals	
อินทวดี จันทร์ทักษิณภาส ธนเดช โชคอำนวย สหพล สำเภาทอง และ อนุสรณ์ จึงตระการ	
การศึกษาเพื่อหาค่าความหนาที่เหมาะสมสำหรับแผ่นพื้นไร้คานคอนกรีตอัดแรงภายหลังชนิดมีคานกว้าง	19
Optimum Thickness of Post-Tension Concrete Flat Slab with Band Beam	
พงษ์นรินทร์ จงรักษ์ถาวร สายันต์ ศิริมนตรี และ ชนะชัย ทองโฉม	
จลนพลศาสตร์การอบแห้งขมิ้นชันแบบชั้นบางด้วยเครื่องอบแห้งแบบ ลมร้อน	32
Thin Layer Drying Kinetics of Turmeric using Hot Air Dryer	
ปาริชาติ ราชมณี สุริดา พิทักษ์วินัย วาณิช นิลนนท์ และ วุฒิไกร บัวแก้ว	
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางปลายอิเล็กโทรดสำหรับการเชื่อมชิ้นงานความหนาต่างกันใ กระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด	46
Electrode Tip Diameters for Different Thickness Workpieces in Resistance Spot Welding	
สิทธิพงษ์ แสงอินทร์	
ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพโดยการหมักร่วมระหว่างใบไม้เหลือทิ้งในชุมชนและมูลวัว	56
Efficiency of Biogas Production by Co-Digestion between Leaf Waste in Community and Cow Dung	
ประภัสรา ธรรมวัชรางกูร สุนทรี จินธรรม และ วนัสพรวิศม์ สวัสดิ์	



สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทความวิจัย (ต่อ)	
การลดความสูญเปล่าในการปฏิบัติงานของกระบวนการจ่ายสินค้า: กรณีศึกษา บริษัทอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องดื่ม จำกัด Waste Reduction in the Operation of the Product Shipping Process: A Case Study of the Beverage Industry Company Limited <i>สมชาย เป็รัมย์พรหม และ นภาพร ภาษาสุข</i>	69
การพิจารณาหาสภาวะที่เหมาะสมในการเชื่อมพอกผิวต่อการต้านทานการสึกหรอด้วย กระบวนการเชื่อมแก๊สทังสเตนอาร์คแบบลวดร้อนโดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง Consideration of the Optimizing Condition in Welding Hardfacing on Wear Resistance with Hot- Wire Gas Tungsten Arc Welding Process by Response Surface Methodology (RSM) <i>สิทธิชัย เจริญราช ยอดเปรม ภูเก้าเนต และ สุรียา ประสมทอง</i>	87
การศึกษาโครงสร้างทางโลหะวิทยาและความต้านทานการกัดกร่อนของรอยเชื่อมท่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่าง ชนิดเกรด ASTM A790 SAF 2205 และ ASTM A312 TP 316L โดยกระบวนการเชื่อมอาร์คทังสเตนแก๊สปกคลุม The Study on Metallurgical Structure and Corrosion Resistance of Dissimilar Welds between ASTM A790 SAF 2205 and ASTM A312 TP 316L Stainless Steel Pipe by Gas Tungsten Arc Welding Process <i>ภิกษุ เลิศวิจิตรพันธ์ ณรงค์เดช พัฒนไพบูลย์ สิทธิพงษ์ แสงอินทร์ และ พิเศษฐ์ธาวิณ เจริญประดับ</i>	103
Design and Fabricate an Electric Oven in Combination with Solar Energy to Increase Production of Seasoned Sour Tamarind for Duang Thong Community Enterprise <i>Thongchai Khruaphue and Nisit Ong-ar</i>	117
ข้อมูลสำหรับผู้เขียนและการเตรียมต้นฉบับ (Authors Guideline and Manuscript Preparation)	S1
แบบฟอร์มนำส่งบทความ (Manuscript Submission Form)	S2
รายนามผู้ทรงคุณวุฒิตรวจและพิจารณาบทความ	S4



ETT Medic: แอปพลิเคชันสำหรับลดระยะเวลาการให้บริการและ แถวคอยของการให้บริการทางการแพทย์ในโรงพยาบาล

อินทวดี จันทร์ทักษิณภาส ธนเดช โชคอำนวย สหพล สำเภาทอง และ
อนุสรณ์ จิงตระการ*

ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

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

วันที่รับบทความ: 18 พฤศจิกายน 2563; วันที่ทบทวนบทความ: 4 เมษายน 2564; วันที่ตอบรับบทความ: 5 พฤษภาคม 2564
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 16 พฤษภาคม 2564

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดระยะเวลาการให้บริการสาธารณสุขที่โรงพยาบาลของรัฐในจังหวัดใหญ่ ผู้ป่วยจำเป็นต้องรอคอยคิวเป็นระยะเวลานานก่อนที่จะได้รับการรักษาพยาบาล งานศึกษาหลายงานแสดงให้เห็นว่าผู้ป่วยจำนวนมากที่ไปโรงพยาบาลเป็นเคสที่ไม่ฉุกเฉิน เนื่องจากเป็นโรคที่ไม่ร้ายแรงและสามารถหายได้เอง ผู้ป่วยเหล่านี้ก่อให้เกิดความแออัดในโรงพยาบาล และทำให้ระยะเวลาการให้บริการสาธารณสุขยาวนานขึ้น เพื่อแก้ไขปัญหานี้ จึงได้ออกแบบแอปพลิเคชันเพื่อให้ผู้ป่วยตรวจสอบอาการได้ด้วยตนเอง แอปพลิเคชันประกอบด้วย ชุดคำถามที่เหมือนกับชุดคำถามที่แพทย์ใช้วินิจฉัยโรค ดังนั้น ผู้ป่วยจึงสามารถใช้แอปพลิเคชันนี้เพื่อตรวจสอบอาการว่าจำเป็นที่จะต้องพบแพทย์หรือไม่ การใช้แอปพลิเคชันสามารถคัดกรองผู้ที่ไม่มีความจำเป็นต้องพบแพทย์ได้ จึงทำให้ระยะเวลาการให้บริการทางสาธารณสุขลดลง จากการทดสอบที่โรงพยาบาลบ้านแพ้ว สาขาพระราม 2 พบว่า แอปพลิเคชันมีแนวโน้มลดเคสที่ไม่จำเป็นต้องพบแพทย์ออกไปได้ร้อยละ 60 จากการสร้างและวิเคราะห์แบบจำลองแถวคอยของโรงพยาบาลแสดงให้เห็นว่าจำนวนผู้ป่วยที่ลดลงนี้สามารถลดระยะเวลาเฉลี่ยการให้บริการทางสาธารณสุขจาก 33 นาที/คน เหลือเพียง 6 นาที/คน จึงมีความเป็นไปได้ว่าการใช้แอปพลิเคชันช่วยคัดกรองนี้สามารถลดระยะเวลาบริการทางสาธารณสุขของโรงพยาบาลได้ก็ตามที่มีลักษณะแบบจำลองแถวคอยเหมือนกับโรงพยาบาลบ้านแพ้ว

คำสำคัญ: การลดระยะเวลาการให้บริการทางการแพทย์; การลดแถวคอย; โมบายแอป

ETT Medic: An Application for Minimizing Service Times and Waiting Queues of Medical Services in Hospitals

Inthawadee Chantaksinopas, Tanadate Chokaumnuy, Sahapol Sampaotong and Anusorn Chungtragarn *

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

* Corresponding author, E-mail: anusorn.c@cit.kmutnb.ac.th

Received: 18 November 2020; Revised: 4 April 2020; Accepted: 5 May 2021

Online Published: 16 May 2021

Abstract: This project aims to reduce the service time of public health services at government hospitals. In big cities, it can be seen that patients need to stay in a long queue and wait for a long time before receiving medical treatments. Many studies show that this problem comes from patients who suffer common diseases and no need to see doctors. These patients lead to overcrowding hospitals and long health service time problems. In order to tackle the problem, an android based self-medical assessment application is used. The application contains sets of the questionnaire which are similar to question sets used by a doctor to discover sickness. Therefore, people can exploit the app to check on their symptoms for the need of seeing a doctor. This will filter out the unnecessary cases at the hospital. Hence, reducing the health service time. The application is tested at Ban Phaeo Hospital RAMA II branch, which found that it may reduce unnecessary cases by 60%. The relationship between dropping in unnecessary cases and the health service time reducing is indicated by using a queueing model of the hospital, which see the health service time decrease from 33 minutes/person to 6 minutes/person. Thus, it is possible to apply this application to improve the health services in the hospital where the queue model is similar to the Ban Phaeo Hospital.

Keywords: medical service minimizing; waiting queue reducing; mobile phone app



1. บทนำ

หนึ่งในปัญหาที่สำคัญที่เกิดขึ้นกับเมืองใหญ่ที่จำนวนประชากรหนาแน่นคือปัญหาเรื่องการเข้ารับบริการทางด้านสาธารณสุขในโรงพยาบาลรัฐบาลที่ปัจจุบันมีจำนวนผู้เข้ารับบริการจำนวนมาก โดยจากการศึกษาสถิติจำนวนผู้ป่วยในจำแนกตามเพศและโรค/กลุ่มโรค 298 โรค ตามบัญชีจำแนกโรคระหว่างประเทศ [1] ระบุจำนวนผู้ป่วยรวมปี 2556 มีจำนวน 17,999,153 คน ปี 2558 มีจำนวน 19,126,383 คน และในปี 2561 มีจำนวน 20,519,449 คน แสดงให้เห็นว่าจำนวนผู้เข้ารับบริการทางด้านสาธารณสุขมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปี การเจ็บป่วยตามกลุ่มโรคเหล่านี้แบ่งเป็น 2 ประเภทหลักคือโรคติดต่อหรือโรคติดต่อและโรคเรื้อรังที่ไม่ติดต่อ สาเหตุของการเจ็บป่วยอาจเกิดจากมีภูมิคุ้มกันอ่อนแอจากพันธุกรรมจากบิดามารดา และพฤติกรรมกรรมการดูแลสุขภาพ เช่น ขาดสารอาหาร พักผ่อนไม่เพียงพอ ทำงานหักโหมร่างกายสะสมความเครียด [2] เมื่อพิจารณาจำนวนของแพทย์ผู้ให้บริการเป็นสัดส่วนแพทย์ต่อประชากร 1000 คน [3, 4] ในปี 2557, 2559 และ 2561 มีค่าประมาณ 0.469, 0.478 และ 0.556 ตามลำดับ ถึงแม้สัดส่วนแพทย์จะมีค่าเพิ่มขึ้นในแต่ละชั้นปี อย่างไรก็ตามอัตราส่วนนี้ยังไม่เพียงพอตามมาตรฐานของ WHO ที่แนะนำสัดส่วนแพทย์ 1 คนต่อประชากร 1000 [5] ดังนั้นเมื่อผู้ป่วยเข้ารับบริการมีจำนวนมากย่อมทำให้ผู้ป่วยใช้เวลาในการเข้ารับบริการนานมากขึ้นและอาจจะต้องใช้เวลาอย่างมากต่อการเข้ารับบริการในแต่ละครั้ง

เมื่อพิจารณาเวลาส่วนใหญ่ที่ผู้ป่วยใช้ในการเข้ารับบริการจากสถานพยาบาลพบว่าโดยมากจะเกิดจากการรอคอย ธนิตา ฉิมวงษ์ จิราพร นิลสุ และนภาพร วาณิชย์กุล [6] พบว่าผู้ป่วยเบาหวาน ใช้เวลาเข้ารับบริการในคลินิกเบาหวาน โรงพยาบาลระยองเฉลี่ยคนละ 237.04 นาที โดยมีเวลาเฉลี่ยเข้าพบแพทย์เพียง 2.35 นาที เวลาที่รอคอยการเข้าพบแพทย์เฉลี่ยถึง 59.5 นาที ได้มีงานวิจัยที่วิเคราะห์ถึงปัญหาและเสนอแนวทางปรับปรุงเพื่อลดเวลาในการรอคอยและเข้ารับบริการนี้ เช่น สุเมธา ศรีละคร และสมบัติ สินธุชวาน์ [7] ได้ใช้วิธีสร้างแบบจำลองวิเคราะห์แถวคอยผู้ป่วยนอกโรงพยาบาลวารินชำราบซึ่งแบ่งผู้ป่วยนอกเป็น 4 ประเภทคือ ผู้ป่วยทั่วไป ผู้ป่วยสูงอายุ ผู้ป่วยหูดอกจุกปาก ผู้ป่วยด้านศัลยกรรม พบว่าผู้ป่วยแผนกทั่วไปเกิดแถวคอยนานที่สุด โดยเวลารอคอย สูงสุด 2 อันดับแรก คือ จุดวัดชีพจรและจุดตรวจรักษา จึงได้สร้างแบบจำลองโดย ARENA เพื่อลดระยะเวลาการรอคอย โดยใช้วิธีการเลื่อนเวลาการทำงานของแพทย์และพยาบาลเร็วขึ้น 30 นาที และแผนกจ่ายยาให้บริการเร็วขึ้น 1 ชั่วโมง โดยสามารถลดเวลารอคอยเฉลี่ยของผู้ป่วยจาก 396.65 นาที เหลือเพียง 111.65 นาที หรือลดลงได้จากเดิมร้อยละ 28.15 ป่อแก้ว เรืองเพ็ง [8] สร้างจำลองระบบแถวคอยผู้ป่วยนอกคลินิกอายุรกรรมจากข้อมูลในระบบจริงด้วย ARENA และเสนอวิธีแก้ปัญหแถวคอยในงานเวชระเบียน งานตรวจโรค และงานเภสัชกรรม โดยเพิ่มเจ้าหน้าที่ลงทะเบียนงานเวชระเบียน 1 คน เพิ่มและเปลี่ยนสัดส่วนหน้าที่การทำงานของเภสัชกรโดยใช้จำนวนรวมเท่าเดิม พบว่าผู้ป่วยอยู่ในระบบงานเวชระเบียน



งานตรวจ และงานเภสัชกรรม โดยเฉลี่ยลดลงจากเดิม ร้อยละ 70 40 และ 29 ตามลำดับ กรณีศึกษา คงยีน พรนิภา เพชรไทย และทีมงานเวชศาสตร์ฟื้นฟู [9] ใช้ หลัก PDCA ปรับปรุงการให้บริการแก่ผู้ป่วยหน่วย ตรวจโรคเวชศาสตร์ฟื้นฟูโดยมีเป้าหมายเพื่อลด ระยะเวลารอคอย โดยจากการวิเคราะห์ปัญหาพบ ปัจจัยที่เกี่ยวข้องประกอบด้วยบุคลากร ผู้ป่วย ระบบงาน และระบบการจัดการสารสนเทศ จึงทำการ ปรับปรุงโดยใช้วิธีจัดอัตราแพทย์และพยาบาลให้ เหมาะสม หากแพทย์ติดภาระต้องหาแพทย์ออกตรวจ แทน สร้างจิตอาสาการให้บริการ ด้านระบบงาน ปรับปรุงด้วยการให้ผู้ป่วยมีส่วนร่วมนัดแบบระบุเวลา ปรับจำนวนผู้ป่วยให้สอดคล้องอัตราการให้บริการของ แพทย์ กระจายเวลานัดผู้ป่วยเพื่อลดเวลาที่ผู้ป่วยต้อง มาก่อนเวลานัด แจ้งบัตรคิวตามลำดับเวลานัด สร้าง ป้ายแสดงลำดับคิว และใช้เทคนิคการเตรียมผู้ป่วยคิว ถัดไป นั่งรอที่ หน้าห้องตรวจ หลังการปรับการ ให้บริการพบว่าผู้ป่วยที่นัดหมายรอคอยเฉลี่ย 13 นาที จากเดิมที่รอคอยเฉลี่ย 24 นาที คัทลียา วสุธาดา [10] พบว่าผู้ป่วยโรคเรื้อรัง ศูนย์สุขภาพชุมชนเมือง ท่าช้าง จังหวัดจันทบุรีใช้เวลารอคอยการรับบริการ เฉลี่ย 158 นาทีโดยมีสาเหตุมาจากเจ้าหน้าที่นัดผู้ป่วย ทุกโรคมาเวลาเดียวกัน จึงพัฒนาคุณภาพบริการโดยใช้วิธีการวิเคราะห์โครงสร้างเชิงตรรกะ 10 ขั้นตอน พัฒนารูปแบบการดำเนินงานเพื่อลดระยะเวลารอคอย โดยกระจายปริมาณผู้ป่วยไปช่วงเวลาที่แตกต่างกัน และ นัดหมายร่วมกับผู้ป่วย ประชาสัมพันธ์ข้อมูล แสดง ข้อมูลบนบอร์ด กำหนดระยะเวลาการให้บริการที่ เหมาะสม และลดขั้นตอนที่ไม่ก่อให้เกิดประโยชน์ต่อ การให้บริการ หลังการพัฒนาผู้ป่วยใช้เวลารอคอยการ

รับบริการเฉลี่ย 101 นาที ไชนัย สุภศิริ สมใจ พุทธา พิทักษ์ผล และดวงใจ เปลี่ยนนารุง [11] ได้ทำการวิจัย กิ่งทดลองเพื่อศึกษาผลของรูปแบบบริการผู้ป่วย เบาหวาน โดยใช้รูปแบบบริการที่ประยุกต์จากทฤษฎี แถวคอยเพื่อลดระยะเวลาการรอคอย พบว่าการให้บริการ โดยใช้ผู้มีประสบการณ์เป็นผู้จัดคิว โดยจัดผู้ป่วยสลับ คิวระหว่างจุดบริการเพื่อลดระยะเวลารอคอยในจุด บริการที่มีผู้ป่วยคั่งค้าง ทำให้ลดระยะเวลารอคอยจาก 164.96 นาที เป็น 143.36 นาที ต่อศักดิ์ อุทัยไขฟ้า ณัฐชานันท์ อังศุเรศณี และฉัตรวิตร กำลิ่งเอก [12] เสนอแนวทางปรับปรุงการให้บริการผู้ป่วยนอก โรงพยาบาลเพื่อลดระยะเวลารอคอยของผู้ป่วย โดยใช้วิธีผสมผสานระหว่างเทคนิค ECRS ร่วมกับการจัด วางผังบริเวณ ผลของการวิเคราะห์พบว่า การเดิน และการรอคอยระหว่างกระบวนการทำให้เกิดเวลาสูญเปล่า ผลการทดลองโดยการปรับเปลี่ยนวิธีการทำงานแบบ ใหม่รวมกับการปรับปรุงผังบริเวณสามารถลดเวลา การให้บริการเฉลี่ยลงเหลือ 100 นาทีจากเดิมซึ่งใช้ เวลาในการให้บริการเฉลี่ย 127 นาที คิดเป็นจำนวน การลดเวลาสูญเปล่าลงได้ร้อยละ 15 พันธิภา พิณญะ คุณ อารี ชิวเกษมสุข และเพ็ญจันทร์ แสนประสาน [13] พัฒนารูปแบบการบริการคลินิกเบาหวาน โรงพยาบาลศูนย์เจ้าพระยายมราช จังหวัดสุพรรณบุรี โดยประยุกต์ใช้แนวคิดแบบลีน กำจัดขั้นตอนที่ไม่จำเป็นออก และรวมขั้นตอนที่เหลือเข้าด้วยกัน ทำให้ลดขั้นตอนการให้บริการจาก 16 ขั้นตอนเหลือ 6 ขั้นตอน ทำให้ระยะเวลาการให้บริการที่สั้นที่สุด ลดลงจาก 106 นาทีเป็น 47 นาที และระยะเวลา ที่ยาวที่สุดลดลงจาก 434 นาทีเป็น 168 นาที



จากการศึกษางานวิจัยต่าง ๆ อาจสรุปได้ว่าปัญหาการใช้เวลาเข้ารับบริการที่นานเกินไปเกิดจากจำนวนผู้เข้ารับบริการมีมากกว่าจำนวนผู้ให้บริการ โดยผู้เข้ารับบริการส่วนมากคิดว่าป่วยและจำเป็นต้องพบแพทย์ ทั้งที่ในความเป็นจริงแล้วการเจ็บป่วยนั้นสามารถรักษาได้ด้วยตัวเอง งานวิจัยจากโครงการความจำเป็นในการเข้ารับบริการรักษาพยาบาลจากมุมมองของผู้ป่วยและแพทย์ [14] ระบุว่าผู้ป่วยนอกที่เข้ารับบริการคิดว่าการเจ็บป่วยของตนมีความจำเป็นต้องเข้ารับบริการร้อยละ 71.8 ผู้ป่วยที่คิดว่าตนมีความจำเป็นระดับปานกลางในการเข้ารับบริการร้อยละ 27.60 และมีผู้ป่วยเพียงร้อยละ 0.6 เท่านั้นที่คิดว่าไม่จำเป็นต้องเข้ารับบริการ เมื่อแพทย์ได้รักษาผู้ป่วยแล้ว การประเมินความจำเป็นที่ผู้ป่วยต้องเข้ารับบริการมีระดับต่ำกว่าผู้ป่วย โดยแพทย์ประเมินว่าผู้ป่วยมีความจำเป็นต้องมารับบริการ มีความจำเป็นระดับปานกลาง และไม่มีความจำเป็นร้อยละ 38.9 47.4 และ 13.60 ตามลำดับ การที่แพทย์และผู้ป่วยมีมุมมองความจำเป็นในการเข้ารับบริการต่างกันเนื่องจากความแตกต่างกันทางด้านความรู้เกี่ยวกับสุขภาพ ความเจ็บป่วย การรักษาพยาบาล และประสบการณ์ในการตรวจรักษา ดังนั้นจึงอาจจะเป็นไปได้ที่จะแก้ปัญหาระยะเวลาการเข้ารับบริการที่นานเกินไปโดยการลดจำนวนคนที่ไม่มีความจำเป็นจะต้องเข้าพบแพทย์หรือใช้บริการสถานพยาบาล

วิธีการลดระยะเวลาการรอคอยในระบบสาธารณสุขโดยส่วนใหญ่มักปรับปรุงและพัฒนาโดยใช้วิธีเพิ่มจำนวนบุคลากรไม่ว่าจะเป็นแพทย์ พยาบาล เจ้าหน้าที่เวชระเบียน [6-9] เลื่อนเวลาให้บริการบางขั้นตอนเร็วขึ้น [7] ใช้ระบบการจัดการเพื่อกำจัด

ขั้นตอนที่ไม่จำเป็น [12, 13] นัดหมายผู้ป่วยโดยกระจายเวลานัดให้เหมาะสมกับจำนวนแพทย์ตรวจ [9, 10] และใช้การสลับคิวในแถวคอยในขั้นตอนมีผู้ป่วยคั่งค้างไปยังขั้นตอนอื่นก่อน [11] แต่ยังไม่มีการปรับปรุงลดระยะเวลาการรอคอยโดยการลดจำนวนผู้ป่วยที่ไม่มีความจำเป็นในการเข้าพบแพทย์ ผู้วิจัยจึงให้ความสำคัญและมีคิดแนวทางแก้ปัญหาระยะเวลาการเข้ารับบริการที่นานเกินด้วยวิธีการใช้แอปพลิเคชันที่ช่วยคัดกรองผู้ป่วยที่ไม่มีความจำเป็นในการพบแพทย์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดจำนวนผู้ป่วยที่เข้ารับบริการ ซึ่งการลดจำนวนผู้ป่วยในส่วนนี้จะทำให้สามารถลดระยะเวลาในการเข้ารับบริการทางด้านสาธารณสุขได้เช่นกัน ผู้ป่วยที่ไม่มีความจำเป็นต้องพบแพทย์เป็นผู้ที่มีอาการ 6 กลุ่มโรคดังแสดงใน [1] จำนวนผู้ป่วยรวมทั้ง 6 กลุ่มโรคโดยเฉลี่ยตั้งแต่ปี 2556-2561 มีจำนวน 552,252 คนจากจำนวนผู้ป่วยทั้ง 298 กลุ่มโรคโดยเฉลี่ย 18,920,958 คน คิดเป็นร้อยละ 2.92 ของจำนวนผู้ป่วยทั้ง 298 กลุ่มโรค ผู้วิจัยได้จำแนกกลุ่มโรคเป็น 9 โรค ประกอบด้วย (1) ท้องเดินหรือท้องร่วง (2) ขาดวิตามินซี (3) ขาดวิตามินเอ (4) ไมเกรน (5) บ้านหมุนจากการเปลี่ยนท่า (6) หวัดภูมิแพ้ (7) ไข้หวัด (8) ภาวะแพ้อาหารอักเสบ และ (9) ภาวะแพ้บัสสวาระอักเสบ โดยได้ทำการศึกษาข้อมูลจากโรงพยาบาลบ้านแพ้ว สาขาพระราม 2 ได้รับคำยืนยันจากแพทย์ผู้ตรวจรักษาว่าเป็นกลุ่มโรคที่สามารถรักษาได้ด้วยตัวผู้ป่วยเองและไม่มีความจำเป็นต้องพบแพทย์ หากสามารถคัดกรองผู้ป่วยในกลุ่มข้างต้นออกไปได้ น่าจะสามารถลดจำนวนผู้เข้ารับการรักษาได้มากและส่งผลกระทบต่อระยะเวลาในการเข้ารับบริการเฉลี่ยลดลง



2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการวิจัยเริ่มจากการค้นคว้าข้อมูลเกี่ยวกับปัญหาที่ทำการศึกษาซึ่งได้กล่าวในบทนำ จากนั้นจึงทำการรวบรวมและค้นคว้าข้อมูลเพื่อออกแบบแอปพลิเคชันที่เหมาะสมในการแก้ปัญหาที่ตั้งแสดงในหัวข้อ 2.1 ในหัวข้อ 2.2 แสดงวิธีการออกแบบชุดคำถามเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ทางการแพทย์ การออกแบบสร้างแอปพลิเคชันแสดงในหัวข้อที่ 2.3 และเพื่อแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของการลดจำนวนผู้ป่วยและระยะเวลาในการให้บริการทางด้านสาธารณสุข จึงต้องมีการสร้างแบบจำลองแถวคอยของโรงพยาบาลขึ้น โดยแบบจำลองแถวคอยนี้จะแสดงให้เห็นถึงจำนวนผู้มาใช้บริการเฉลี่ยต่อวันและระยะเวลาเฉลี่ยของการให้บริการ ดังนั้นการใช้แบบจำลองแถวจึงน่าจะเหมาะสมในการแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการทำงาน เหมือนกับในงานวิจัยที่ [8-10] การเก็บข้อมูลและการสร้างแบบจำลองแถวคอยของโรงพยาบาลบ้านแพ้วจะแสดงในหัวข้อที่ 2.4

2.1 การรวบรวมข้อมูลเพื่อการออกแบบแอปพลิเคชัน

ปัจจุบันมีแอปพลิเคชันที่เป็นเครื่องมือสำหรับช่วยเหลือและลดการพบแพทย์ที่โรงพยาบาล เช่น Raksa [18] ที่ออกแบบมาเป็นช่องทางในการพบกันระหว่างแพทย์และคนไข้แบบออนไลน์ ผู้ใช้แอปพลิเคชันสามารถเลือกแพทย์ที่จะขอคำปรึกษาผ่านการแชทและมีการจัดส่งยาถึงบ้าน แอปพลิเคชันใกล้มีหมอ [19] และ Doctor Me [20] เป็นแอปพลิเคชันที่เน้นการตรวจอาการด้วยตัวคนไข้เอง ทั้งสองแอปพลิเคชันนี้ถูกออกแบบเพื่อวินิจฉัยโรคที่ครอบคลุมทุกส่วนของร่างกาย มีการใช้รูปภาพประกอบ

เพื่อการใช้งานที่ง่ายขึ้น ใช้คำถามและตัวเลือกอาการเบื้องต้นที่เกิดกับส่วนร่างกาย เมื่อเลือกแล้วจะมีข้อมูลแสดงอาการเกี่ยวกับโรคเบื้องต้น วิธีการวิเคราะห์จะใช้ชุดคำถามเหมือนที่แพทย์ใช้ในการวินิจฉัยจริง และประมวลผลเบื้องต้นจากคำตอบที่ผู้ใช้เลือก ถ้าผู้ใช้ได้รับการอบรมความรู้ทางด้านสาธารณสุขจะสามารถใช้แอปพลิเคชันได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นและนำมาใช้เพื่อช่วยลดภาระงานของแพทย์ได้อย่างดี

เพื่อการออกแบบ แอปพลิเคชันให้สามารถแก้ปัญหาได้ตรงตามวัตถุประสงค์ ขั้นตอนการออกแบบเริ่มจากการเก็บข้อมูลความต้องการเกี่ยวกับแอปพลิเคชันจากผู้เกี่ยวข้อง โดยในที่นี้ได้ทำการเก็บข้อมูลจากแพทย์ประจำโรงพยาบาลบ้านแพ้ว จ.สมุทรสาคร จำนวน 2 คน บุคลากรทางการแพทย์จากคลินิกบริการทางการแพทย์จำนวน 4 ท่าน และผู้ใช้โดยทั่วไปจำนวน 20 ท่าน ได้รับข้อมูลสรุปตามความสำคัญได้ดังนี้

- (1) แอปพลิเคชันจะต้องมีความน่าเชื่อถือในการวินิจฉัยโรค
- (2) แอปพลิเคชันจะต้องไม่มีความซับซ้อน และใช้งานได้ง่าย
- (3) มีคำอธิบายเกี่ยวกับโรคที่วินิจฉัยได้อย่างชัดเจน
- (4) มีคำแนะนำเกี่ยวกับการดูแลรักษาโรคที่วินิจฉัยได้เบื้องต้น
- (5) มีเสถียรภาพในการใช้งาน

โดยรวมแล้วผู้ใช้งานต้องการให้แอปพลิเคชันมีความน่าเชื่อถือและสามารถใช้งานได้ง่ายเป็นหลัก



2.2 การออกแบบชุดคำถามเพื่อการวินิจฉัยโรคในแอปพลิเคชัน

การออกแบบชุดคำถามเพื่อการคัดกรองเริ่มจากการค้นคว้าหาข้อมูลเกี่ยวกับโรคที่ผู้ป่วยสามารถที่จะรักษาตัวเองได้โดยไม่มีอาการจำเป็นต้องพบแพทย์ โดยได้ข้อมูลจากสำนักงานปลัด กระทรวงสาธารณสุข ดังที่กล่าวมาในหัวข้อที่ 1 จากนั้นจึงได้ศึกษาข้อมูลเพื่อการวินิจฉัยโรคจากตำราแพทย์ โดยได้ข้อมูลวิธีการวินิจฉัยโรคเบื้องต้นจากหนังสือ 2 เล่มคือ ตำราการตรวจรักษาโรคทั่วไปเล่มที่ 1 แนวทางการตรวจรักษาโรคและการใช้ยา [15] และ ตำราการตรวจรักษาโรคทั่วไปเล่มที่ 2 โรคกับการดูแลรักษาและการป้องกัน [16] นอกจากนี้ยังได้ทำการค้นคว้าข้อมูลเกี่ยวกับโรคต่าง ๆ ที่สามารถดูแลรักษาได้ด้วยตนเอง โดยไม่จำเป็นต้องพบแพทย์ [17] กลุ่มโรคที่คัดกรองออกมาได้มีจำนวน 6 กลุ่มโรค ได้แก่ (1) โรคท้องร่วง (2) โรคไมเกรนหรือเวียนศีรษะ (3) โรคของระบบหายใจส่วนบน เช่น ไข้หวัด หวัดภูมิแพ้ (4) โรคกระเพาะอาหารอักเสบ (5) โรคกระเพาะปัสสาวะอักเสบ และ (6) โรคขาดวิตามินต่าง ๆ เช่น โรคขาดวิตามินเอ โรคขาดวิตามินซี โดยโรคในกลุ่มนี้ได้รับคำยืนยันว่าหากผู้ป่วยเข้าพบแพทย์ด้วยอาการเหล่านี้ แพทย์จะให้ยาในเบื้องต้นเพื่อรอดูอาการ หากอาการไม่ดีขึ้นจึงให้คนไข้เข้าพบแพทย์อีกครั้งเพื่อวินิจฉัยโรคเพิ่มเติมหรือทำการรักษาขั้นถัดไป

ถึงแม้ปัจจุบันมีการพัฒนาวิธีการวิเคราะห์โรคให้มีความแม่นยำมากขึ้นโดยการใช้ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligent) และ Machine Learning มาช่วยวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อการวินิจฉัยโรค อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวต้องการข้อมูลและการคำนวณที่

ซับซ้อน และมีประสิทธิภาพใช้กับการวิเคราะห์โรคที่อันตรายถึงชีวิตและโรคที่อาจเกิดความผิดพลาดในการวิเคราะห์ได้ง่ายเมื่อทำการวิเคราะห์โดยแพทย์ที่เป็นมนุษย์ ในขณะที่โรคที่ผู้ป่วยรักษาด้วยตนเองได้นั้นการวินิจฉัยไม่จำเป็นต้องตรวจอาการอย่างละเอียดและวินิจฉัยได้จากอาการเบื้องต้นที่บอกโดยผู้ป่วย ดังนั้นจึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องใช้วิธีการคำนวณที่ซับซ้อนมาก การวินิจฉัยโรคใช้เพียงกลุ่มคำถามที่ค่อนข้างง่ายและแพทย์ใช้ในการตรวจสอบอาการเบื้องต้นกับคนไข้เหมือนกันทุกคน ดังนั้นจึงเป็นกลุ่มคำถามที่มักคงที่ (Static) การสร้างชุดคำถามคงที่ น่าจะเป็นวิธีที่เหมาะสมและเพียงพอต่อการทำงาน วิธีการสร้างชุดคำถามในงานนี้จะใช้วิธีการเหมือนกัต้นไม้ตัดสินใจ (Decision Tree) ที่ใช้ในงาน [21] ซึ่งมีความแม่นยำในการวิเคราะห์ที่ดีเพียงพอที่จะใช้ในการวิเคราะห์โรคได้

จากกลุ่มโรคทั้ง 6 กลุ่มที่คัดกรองมานี้ อาการหลักของโรคที่สังเกตได้สามารถแบ่งโรคออกเป็นกลุ่มโรคที่มีอาการร่วมหรือคล้ายกันได้จำนวน 9 โรค คือ (1) ไข้หวัด (2) โรคบ้านหมุนจากการเปลี่ยนท่า (3) ไมเกรน โดยทั้งสามโรคนี้มีอาการหลักร่วมกันคือปวดศีรษะหรือเวียนหัว (4) โรคกระเพาะอาหารอักเสบ (5) โรคท้องเดินหรืออุจจาระร่วง (6) โรคกระเพาะปัสสาวะอักเสบ โดยทั้งสามโรคนี้มีอาการร่วมกันคือปวดท้อง (7) โรคหวัดจากภูมิแพ้ มีอาการหลักคือจามน้ำมูกไหลและอาการคันจมูกและคอ (8) โรคขาดวิตามินเอ มีอาการหลักคือตาฝ้าฟางมองไม่ชัด (9) โรคลักปิดลักเปิด มีอาการหลักคือเหงือกบวมแดงและมีอาการเจ็บ ดังนั้นการออกแบบชุดคำถามสำหรับการวิเคราะห์โรคจะเริ่มจากการซักอาการโรค



รวมซึ่งเป็นอาการหลักของโรค เพื่อค้นหาว่าโรคที่เป็นอยู่ในกลุ่มใด เมื่อหากกลุ่มโรคได้แล้วจะถามคำถามที่เจาะจงไปในอาการของโรคมามากขึ้นเพื่อระบุว่าเป็นโรคใดดังแสดงในรูปที่ 1 โดยชุดคำถามนี้ได้มาจาก [15, 16] ซึ่งเป็นคำถามที่แพทย์ใช้ซักอาการผู้ป่วย

ชุดคำถามเป็นแบบเลือกตอบสองตัวเลือก คือ “ใช่” และ “ไม่” หากคำตอบเป็น “ใช่” คือมีอาการป่วยตรงกับคำถาม ตัวนับจะเพิ่มค่าที่ละหนึ่งเพื่อนับจำนวนการตอบว่า “ใช่” เพื่อใช้ในการประเมินความเป็นไปได้ของโรค โดยผลการประเมินจะแบ่งออกเป็น 3 ระดับคือ

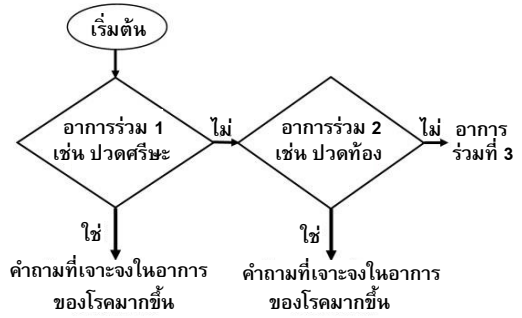
(1) ระดับความน่าจะเป็นที่เป็นโรคนั้น **น้อย** (ระดับสีเหลือง) เมื่อมีจำนวนการตอบ “ใช่” น้อยกว่า 1/3 จากจำนวนคำถามทั้งหมดของชุดคำถามโรคนั้น ๆ

(2) ระดับความน่าจะเป็นที่เป็นโรคนั้น **ปานกลาง** (ระดับสีส้ม) เมื่อมีการตอบ “ใช่” มากกว่า 1/3 แต่น้อยกว่า 2/3 จากจำนวนคำถามทั้งหมดของชุดคำถามโรคนั้น ๆ

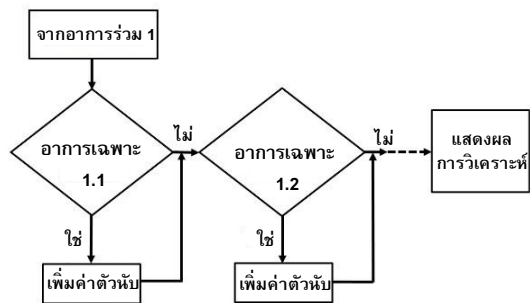
(3) ระดับความน่าจะเป็นที่เป็นโรคนั้น **มาก** (ระดับสีแดง) เมื่อมีการตอบ “ใช่” มากกว่า 2/3 จากจำนวนคำถามทั้งหมดของชุดคำถามของโรคนั้น ๆ สามารถหาได้จาก [22]

2.3 การออกแบบแอปพลิเคชัน

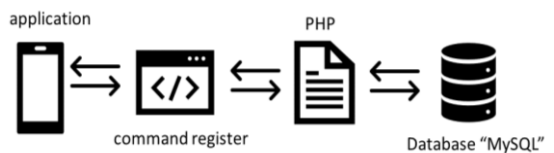
ในส่วนของการออกแบบแอปพลิเคชันใช้สถาปัตยกรรมแบบ Client-Server โดยใช้ Android Studio ในการออกแบบส่วนของการเชื่อมต่อกับผู้ใช้ (Client) และใช้ MySQL เพื่อสร้างฐานข้อมูล (Server) และใช้ PHP เชื่อมต่อระหว่างผู้ใช้และฐานข้อมูล โดยระบบแสดงดังรูปที่ 3 แอปพลิเคชันแบ่งการทำงานเป็นฟังก์ชันย่อย 3 ฟังก์ชัน คือ (1) วินิจฉัยโรค (2) แสดงข้อมูลโรค (3) แนะนำการรักษาอาการเบื้องต้น ดังรูปที่ 4



รูปที่ 1 ผังการไหลชุดคำถามวิเคราะห์โรค

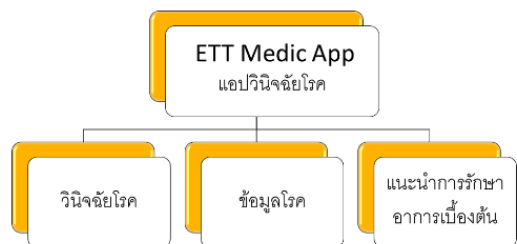


รูปที่ 2 ผังการไหลแสดงคำถามเจาะจงโรค



รูปที่ 3 สถาปัตยกรรมการเชื่อมต่อระหว่างผู้ใช้และ

ฐานข้อมูล



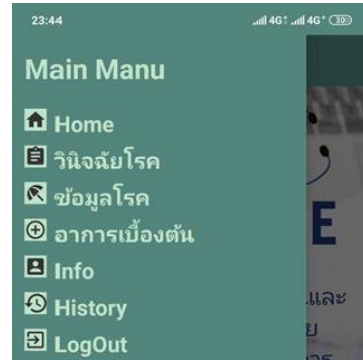
รูปที่ 4 ฟังก์ชันการทำงานของแอปพลิเคชัน



ฟังก์ชันการวินิจฉัยโรคประมวลผลโดยการใช้ออปติเคชันสอบถามผู้ใช้โดยชุดคำถาม ซึ่งเป็นชุดคำถามเดียวกับที่แพทย์ใช้ถามผู้ป่วยเพื่อวินิจฉัยโรคเบื้องต้น ชุดคำถามจะสอบถามอาการเป็นขั้นตอนเริ่มจาก อาการร่วมของโรคต่าง ๆ และเพิ่มความเฉพาะเจาะจงในข้อถัดไปเพื่อการวินิจฉัยโรคที่แม่นยำมากขึ้น ผลการวินิจฉัยจะแสดงผลลัพธ์ได้ 10 แบบคือ (1) ไม่สามารถวินิจฉัยได้แนะนำให้พบแพทย์ (2) ไข้หวัด (3) เวียนหัวบ้านหมุน (4) ไมเกรน (5) ปวดท้องกระเพาะอักเสบ (6) ท้องเสีย (7) ปวดท้องจากกระเพาะปัสสาวะอักเสบ (8) หวัดจากภูมิแพ้ (9) โรคเกิร์ตกระดี่ขึ้นตาจากการขาดวิตามินเอ (10) โรคลักปิดลักเปิดจากการขาดวิตามินซี ตัวอย่างของการใช้ออปติเคชันแสดงดังรูปที่ 5 และ รูปที่ 6

ฟังก์ชันการแสดงผลข้อมูลโรคจะแสดงรายละเอียดของ 9 โรคพื้นฐานที่แอปพลิเคชันสามารถวินิจฉัยได้ เช่น ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับโรค สาเหตุของการเกิดโรค ลักษณะอาการ ภาวะแทรกซ้อนของโรค และข้อแนะนำเกี่ยวกับการรักษาและการป้องกันโรค ดังแสดงในรูปที่ 7

ฟังก์ชันการดูอาการเบื้องต้นจะให้ความรู้เกี่ยวกับอาการต่าง ๆ ของโรคที่อาจเกิดขึ้นได้ และแสดงคำแนะนำการรักษาในเมืองต้น วัตถุประสงค์ของฟังก์ชันนี้คือพยายามให้ผู้ป่วยรักษาพยาบาลตัวเองเนื่องจากอาการต่าง ๆ เหล่านี้ เมื่อแพทย์วินิจฉัยในเมืองต้นจะรักษาตามอาการที่เป็น ซึ่งผู้ป่วยสามารถซื้อยามารับประทานมารักษาตัวเองจนหายได้โดยไม่ต้องพบแพทย์



รูปที่ 5 ตัวอย่างแอปพลิเคชันหน้าเมนูหลัก



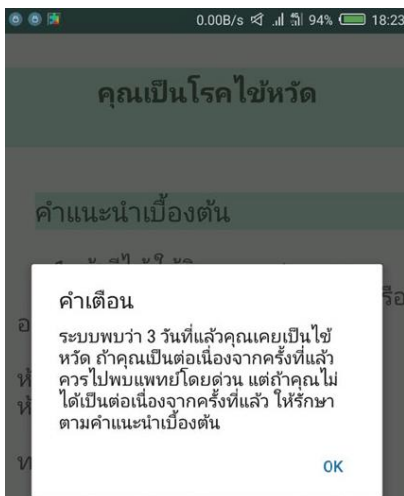
รูปที่ 6 ตัวอย่างของชุดคำถามวินิจฉัยโรค



รูปที่ 7 หน้าแอปพลิเคชันแสดงผลข้อมูลทั่วไปของโรค

หลังจากการวินิจฉัย แอปพลิเคชันจะมีการแจ้งผลพร้อมกับคำแนะนำในการดูแลรักษาตัวเอง พร้อมทั้งบันทึกข้อมูลลงบนฐานข้อมูล MySQL ที่ได้สร้างไว้ แอปพลิเคชันจะสามารถตรวจพบในกรณีที่ผู้ป่วยเกิดอาการซ้ำ ๆ เมื่อใช้แอปพลิเคชันคัดกรองในระยะเวลาสามวัน ในกรณีนี้แอปพลิเคชันจะวินิจฉัยว่าผู้ป่วยได้ทำตามคำแนะนำเบื้องต้นแล้วแต่อาการป่วยไม่หายไป จึงมีคำเตือนให้พบแพทย์ดังแสดงในรูปที่ 8

แอปพลิเคชัน ETT Medic ถูกทดสอบการใช้งานที่โรงพยาบาลบ้านแพ้ว สาขาพระราม 2 สมุทรสาคร ซึ่งมีลักษณะเป็นโรงพยาบาลชุมชน พื้นที่การให้บริการโดยรอบมีลักษณะเป็นนิคมอุตสาหกรรม ทำให้มีผู้เข้ารับบริการให้บริการค่อนข้างหนาแน่นทำให้มีระยะเวลาในการรอเพื่อเข้ารับบริการค่อนข้างนาน การทดสอบแอปพลิเคชันจัดทำโดยเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้จากแอปพลิเคชันกับผลการวิเคราะห์ที่ได้จากแพทย์ในผู้ป่วยรายเดียวกัน ผลการวิเคราะห์ที่ตรงกัน



รูปที่ 8 หน้าแอปแจ้งเตือนตรวจพบการเป็นโรคซ้ำ

แสดงให้เห็นถึงความประสิทธิภาพของแอปพลิเคชันในการคัดกรองผู้ป่วย อย่างไรก็ตามจากโจทย์ของงานวิจัยที่ต้องการลดเวลาในการเข้ารับบริการ จึงจำเป็นต้องมีการแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนผู้ป่วยที่ลดลงและเวลาในการเข้ารับบริการซึ่งความสัมพันธ์นี้สามารถแสดงให้เห็นโดยแบบจำลองแถวคอยของโรงพยาบาล (Queuing Model) ดังนั้นจึงจะต้องมีการสร้างแบบจำลองแถวคอยโดยการเก็บข้อมูลและใช้ทฤษฎีแถวคอย ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

2.4 การสำรวจและสร้างแบบจำลองแถวคอยของการให้บริการของโรงพยาบาล เพื่อใช้ในการวิเคราะห์เวลาการให้บริการ

ผู้วิจัยลงพื้นที่สำรวจเพื่อศึกษาระบบการให้บริการของโรงพยาบาลบ้านแพ้ว สาขาพระราม 2 ซึ่งเป็นสาขาในพื้นที่ของโรงพยาบาลบ้านแพ้ว (องค์กรมมหาชน) ให้บริการลักษณะ Extended OPD หรือ แผนกผู้ป่วยนอก เพื่อลดความแออัดจากโรงพยาบาลบ้านแพ้ว และอำนวยความสะดวกให้ผู้ป่วยได้รับบริการที่ไม่ซับซ้อนได้อย่างสะดวกรวดเร็ว จากการศึกษาะบบการให้บริการของโรงพยาบาลบ้านแพ้ว สาขาพระราม 2 โดยเก็บข้อมูลตั้งแต่เวลา 7.00-21.00 น. เป็นเวลา 7 วัน ด้วยการแจกบัตรคิวให้ผู้เข้ารับบริการและบันทึกเวลาเข้าใช้บริการ เมื่อผู้ใช้บริการได้รับบริการแล้วเสร็จจะเก็บบัตรคิวคืนและทำการบันทึกเวลาออกพบว่าจำนวนผู้ป่วยนอกเข้ารับบริการต่อ 5 นาทีเป็นดังรูปที่ 9 ทั้งนี้กราฟมีลักษณะคล้ายการแจกแจงแบบเลขชี้กำลัง จึงทำการทดสอบว่าข้อมูลจำนวนผู้เข้ารับบริการมีการแจกแจงแบบปัวส์ซองดังสมการที่ (1)



ด้วยวิธีไคกำลังสอง (Chi-square Test)

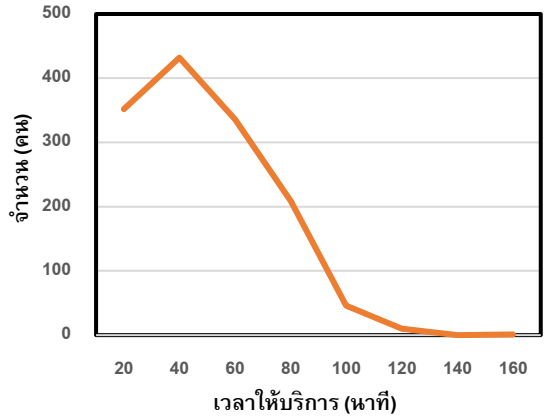
$$P(X = x) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^x}{x!} ; x = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

เมื่อ x คือจำนวนผู้เข้ารับบริการต่อ 1 หน่วยเวลา λ คืออัตราเฉลี่ยของผู้เข้ารับบริการต่อเวลา โดยใช้สมมติฐานการทดสอบ H_0 : ข้อมูลมีการแจกแจงแบบปัวส์ซอง และ H_1 : ข้อมูลไม่มีการแจกแจงแบบปัวส์ซอง กำหนดระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ กำหนดบริเวณปฏิเสธ H_0 ที่ $\chi^2 \geq \chi_{0.05,4}^2$ จากการทดสอบพบว่า $\chi^2 = 0.48$ มีค่าน้อยกว่า $\chi_{0.05,4}^2 = 9.488$ ตกอยู่ในบริเวณยอมรับ H_0 ดังนั้น จำนวนผู้ป่วยที่เข้ารับบริการต่อ 5 นาที มีการแจกแจงแบบปัวส์ซอง เมื่อ λ มีค่าเท่ากับ 1.71 คน/5 นาทีหรือ 0.342 คน/นาที

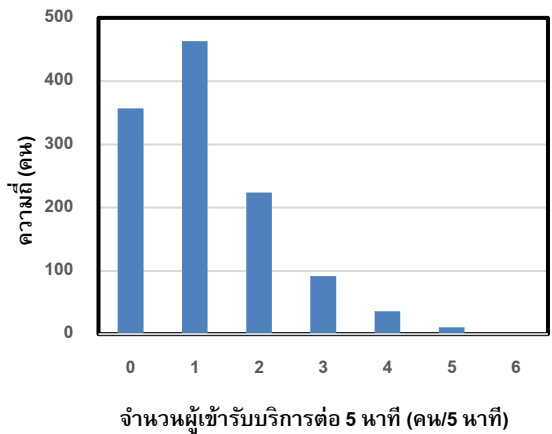
อัตราการให้บริการผู้ป่วยนอกแสดงเป็นกราฟระหว่างความถี่และเวลาให้บริการมีลักษณะกราฟดังรูปที่ 10 ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับการแจกแจงแบบเลขชี้กำลัง จึงทำการทดสอบว่าข้อมูลจำนวนผู้เข้ารับบริการมีการแจกแจงแบบเลขชี้กำลัง มีฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น (Probability Density Function: pdf) ดังสมการที่ (2) ด้วยวิธีไคกำลังสอง

$$f_T(t) = \mu e^{-\mu t} ; t > 0 \quad (2)$$

เมื่อ T แทนเวลาให้บริการ และ μ อัตราการให้บริการลูกค้าต่อหน่วยเวลา โดยใช้สมมติฐานการทดสอบ H_0 : ช่วงเวลาให้บริการมีการแจกแจงแบบเลขยกกำลัง และ H_1 : ช่วงเวลาให้บริการไม่มีการแจกแจงแบบเลขยกกำลัง กำหนดระดับนัยสำคัญ $\alpha=0.05$



รูปที่ 9 กราฟความถี่จำนวนของผู้มารับบริการ (คน/ 5 นาที)



รูปที่ 10 กราฟจำนวนผู้เข้ารับบริการกับช่วงเวลาให้บริการ

กำหนดบริเวณปฏิเสธ H_0 ที่ $\chi^2 \geq \chi_{0.05,6}^2$ จากการทดสอบพบว่า $\chi^2 = 3.83$ มีค่าน้อยกว่า $\chi_{0.05,6}^2 = 12.592$ ตกอยู่ในบริเวณยอมรับ H_0 ดังนั้น ช่วงเวลาให้บริการผู้เข้ารับบริการมีการแจกแจง



แบบเลขชี้กำลังที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 มีอัตราการให้บริการเฉลี่ย 0.025 คนต่อนาที โครงสร้างของระบบให้บริการของโรงพยาบาลบ้านแพ้ว พระราม 2 เป็นระบบให้บริการแบบมาก่อนได้รับบริการก่อน ตั้งแต่เวลา 8.00-12.00 และ 13.00-20.00 น. ระบบให้บริการเป็นตาข่ายคิวได้ไม่จำกัดจำนวน ผู้เข้ารับบริการมีจำนวนไม่จำกัด ให้บริการเป็นระบบแถวคอยแบบช่องทางเดียว-หลายขั้นตอน โดยมีเวลาเฉลี่ยที่ผู้มารับบริการแต่ละคนต้องอยู่ในระบบ (\bar{T}) เป็นดังสมการที่ (3)

$$\bar{T} = \frac{\rho}{\lambda(1-\rho)} = \frac{1}{\mu - \lambda} \quad (3)$$

เมื่อ $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$ คือ ความหนาแน่นการจราจร (Traffic Intensity)
 μ คือ อัตราเฉลี่ยของการให้บริการลูกค้า (คน/นาที)
 λ คือ อัตราเฉลี่ยของลูกค้าที่เข้ารับบริการ (คน/นาที)

จากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าอัตราการเข้ารับบริการของผู้รับบริการของโรงพยาบาลบ้านแพ้ว สาขาพระรามสองมีการแจกแจงแบบปัวส์ซอง ในขณะที่เวลาการให้บริการของโรงพยาบาลมีการแจกแจงแบบเลขชี้กำลัง จากทฤษฎีของการวิเคราะห์แถวคอย (Queueing Theory) อาจกล่าวได้ว่างานวิจัยนี้สามารถวิเคราะห์เวลาการให้บริการของโรงพยาบาลด้วยแบบจำลองแถวคอยแบบ M/M/1 ซึ่งมีลักษณะให้บริการได้ช่องทางเดียวและมีพื้นที่รอคอยแบบไม่จำกัด โดยการวิเคราะห์เวลาการให้บริการจะแสดงในส่วนถัดไป

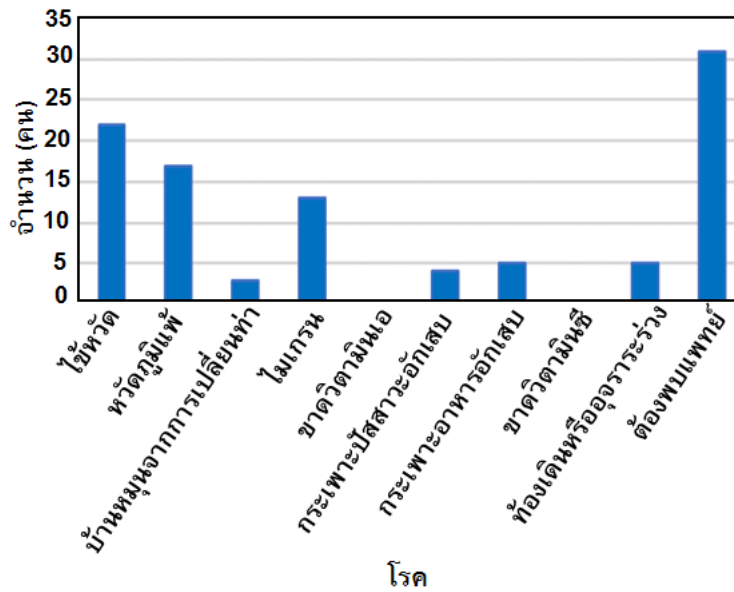
3. ผลการวิจัยและการวิจารณ์ผล

3.1 การทดสอบความถูกต้องการวินิจฉัยโดยแอปพลิเคชัน

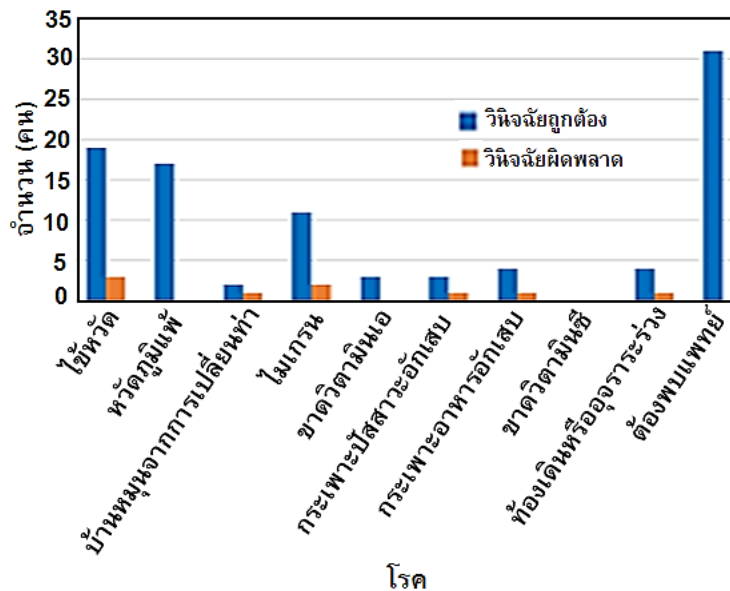
ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบแอปพลิเคชันลดเวลาการให้บริการด้านสาธารณสุขกับกลุ่มตัวอย่างโดยสุ่มจากผู้ป่วยนอกของโรงพยาบาลบ้านแพ้ว พระราม 2 จำนวน 100 คน โดยให้กลุ่มตัวอย่างใช้แอปพลิเคชันก่อนเข้าตรวจโดยแพทย์ดังแสดงตามรูปที่ 11 ได้ผลวินิจฉัยโรคจำแนกจำนวนผลวินิจฉัยแต่ละโรคดังรูปที่ 12 ผลวินิจฉัยของกลุ่มตัวอย่างมีความจำเป็นต้องพบแพทย์จำนวน 31 คน และไม่มีความจำเป็นต้องพบแพทย์จำนวน 69 คน โดยกลุ่มที่มีความจำเป็นต้องพบแพทย์แสดงในกราฟแยกเป็นโรคต่าง ๆ จากกราฟแสดงผลวินิจฉัยโรคของกลุ่มตัวอย่างที่ไม่มีความจำเป็นต้องพบแพทย์จำนวนสูงสุด 3 อันดับแรกคือโรคไข้หวัด หวัดภูมิแพ้ และโรคไมเกรน จำนวน 22 17 และ 13 คนตามลำดับ



รูปที่ 11 การทดสอบแอปพลิเคชันโดยผู้ป่วยนอก รพ.บ้านแพ้ว



รูปที่ 12 ผลวินิจฉัยโดยแอปพลิเคชันจากกลุ่มตัวอย่าง



รูปที่ 13 จำนวนความถูกต้องและผิดพลาดของการวินิจฉัยโดยแอปพลิเคชัน



เมื่อเปรียบเทียบกับผลวินิจฉัยโดยแพทย์กับผลวินิจฉัยโดยแอปพลิเคชัน พบว่าแอปพลิเคชันวินิจฉัยกลุ่มตัวอย่างที่ไม่จำเป็นต้องพบแพทย์ผิดพลาดจำนวน 9 คนจาก 69 คน คิดเป็นร้อยละ 13.05 ความผิดพลาดของการวินิจฉัยมีสาเหตุจากกลุ่มตัวอย่างมีอาการแทรกซ้อนจำเป็นต้องรักษาโดยแพทย์ เช่น ไข้สูง หรืออาการอื่นที่อาจส่งผลให้อาการโรครุนแรงขึ้น ทั้งนี้จำนวนการวินิจฉัยถูกต้องและผิดพลาดจำแนกตามโรคได้ดังรูปที่ 13

ถ้ากำหนดให้แอปพลิเคชันทำงานถูกต้องไม่มีความผิดพลาดจะพบว่าจากผู้เข้ารับการทดสอบ 100 คนจะมีผู้ที่จำเป็นต้องพบแพทย์จำนวนเท่ากับ 40 คน โดยแบ่งเป็น 31 คนที่แอปพลิเคชันทำงานได้ถูกต้องและอีก 9 คนที่แอปพลิเคชันวินิจฉัยผิด และมีผู้ไม่มีความจำเป็นต้องพบแพทย์จำนวน 60 คน ดังนั้นจะสามารถลดจำนวนผู้เข้ารับบริการลงได้ถึงจำนวน 60% ซึ่งสามารถใช้ตัวเลขจำนวนนี้วิเคราะห์ทางสถิติแสดงให้เห็นถึงการลดระยะเวลาในการเข้ารับบริการทางสาธารณสุขในส่วนถัดไป

3.2 การลดระยะเวลาและการลดแถวคอยของการให้บริการ

จากสถิติบริการผู้ป่วยนอกรายปีของโรงพยาบาลบ้านแพ้วจำแนกตามคลินิกให้บริการปี 2560-2561 โรงพยาบาลบ้านแพ้ว พระราม 2 ดังแสดงตารางที่ 1 พบว่าแผนกอายุรกรรมเป็นแผนกที่มีจำนวนผู้ป่วยมากที่สุด โดยมีผู้ป่วยนอกปี 2560 และ 2561 จำนวน 68,945 และ 71,075 คน ตามลำดับโรงพยาบาลให้เหตุผลว่าผู้ใช้บริการส่วนใหญ่มักมีอาการเจ็บป่วยไม่มาก และไม่มีอาการร้ายแรง เช่น ปวดหัว ตัวร้อน ไอ

สามารถดูแลรักษาหายเองได้ การรักษาของแผนกอายุรกรรมดูแลกลุ่มโรคทั่วไป 11 กลุ่มโรค ได้แก่ โรคภูมิแพ้ โรคปอดและโรกระบบทางเดินหายใจ โรคติดเชื้อ ภาวะการนอนหลับผิดปกติ โรคความดันโลหิตสูง โรคต่อมไทรอยด์ โรคไต โรคข้อและรูมาติซึม โรคติดต่อทางเพศสัมพันธ์ โรคในผู้สูงอายุ และปัญหาทางสุขภาพจิต การรักษาของแผนกอายุรกรรมส่วนใหญ่เป็นการให้คำปรึกษาและจ่ายยาให้แก่ผู้ป่วยกลับบ้านเพื่อดูตัวเองในเบื้องต้น หากอาการไม่ดีขึ้นจึงให้ผู้ป่วยกลับมาพบแพทย์อีกครั้ง

ตารางที่ 1 สถิติผู้ป่วยนอกโรงพยาบาลบ้านแพ้ว

แผนก	2560	2561
อุบัติเหตุ-ฉุกเฉิน	2,118	2,591
สูติ-นรีเวชกรรม	491	445
หู คอ จมูก	43	28
จักษุวิทยา	345	237
ศัลยกรรมกระดูกและข้อ	25	5
กุมารเวชกรรม	437	3,835
ศัลยกรรม	10,218	11,208
อายุรแพทย์	68,945	71,075

เนื่องจากรูปแบบการจัดระบบแถวคอยของโรงพยาบาลบ้านแพ้ว พระราม 2 จัดเป็นระบบแถวคอยแบบช่องทางเดียว-หลายขั้นตอน (M/M/1) ซึ่งเป็นระบบแถวคอยที่มีขั้นตอนการให้บริการหลายขั้นตอน ในระบบนี้ผู้มาใช้บริการต้องได้รับบริการจากหลายหน่วยให้บริการประกอบด้วย จุดรับบัตรคิวและคัดกรองเบื้องต้น จุดซักประวัติวัดอุณหภูมิและความดัน ห้องตรวจโรค และห้องรับยา พบว่าแต่ละขั้นตอนมีเวลารอเฉลี่ย เวลาให้บริการเฉลี่ย จากการเก็บข้อมูล



โดยใช้วิธีการแจกบัตรคิวและบันทึกเวลาก่อนเข้ารับบริการเปรียบเทียบกับเวลาเมื่อได้รับบริการเสร็จทำให้ได้เวลาเฉลี่ยของการบริการในแต่ละจุดบริการของผู้ใช้งานแอปพลิเคชันทั้ง 100 คน ดังตารางที่ 2 จากตารางจึงสามารถคำนวณเวลาเฉลี่ยที่ผู้ใช้บริการอยู่ในระบบ (\bar{T}) ได้เท่ากับ 33 นาที เมื่อพิจารณาสถิติผู้ป่วยนอกแผนกอายุรกรรมปี 2560 และ 2561 พบว่าอัตราเฉลี่ยผู้ป่วยเข้ารับบริการต่อวันเท่ากับ 142.54 คน/วัน แพทย์แผนกอายุรกรรมให้บริการวันละ 12 ชั่วโมง ดังนั้นในกรณีที่ยังไม่ได้มีการใช้แอปพลิเคชันอัตราเฉลี่ยผู้ป่วยเข้ารับบริการต่อนาที (λ_1) มีค่า 0.198 คน/นาที จากสมการที่ (3) พบว่าอัตราเฉลี่ยการให้บริการผู้ป่วย (μ) มีค่าเท่ากับ 0.228 คน/นาที แสดงได้ดังรูปที่ 14

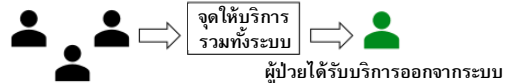
จากการตรวจสอบความถูกต้องการวินิจฉัยในหัวข้อ 3.1 แอปพลิเคชันวินิจฉัยว่าผู้ป่วยจำเป็นต้องพบแพทย์ร้อยละ 31 และไม่จำเป็นต้องพบแพทย์ร้อยละ 69 แต่ในจำนวนนี้วินิจฉัยผิดพลาดร้อยละ 13.04 จึงกล่าวได้ว่าจำนวนผู้ป่วยที่เข้ามาใช้บริการที่แผนกอายุรกรรมมีความจำเป็นที่ต้องพบแพทย์ร้อยละ 39.99 $[100(0.31+(0.69)(0.1304))]$ ดังนั้นหากมีการใช้แอปพลิเคชันวินิจฉัยโรคจะทำให้จำนวนผู้ป่วยเฉลี่ยในปี 2560-2561 ที่จำเป็นต้องพบแพทย์เหลือเพียง 57.01 คน/วัน คิดเป็นอัตราเฉลี่ยผู้ป่วยเข้ารับบริการต่อนาที (λ_2) เพียง 0.079 คนต่อนาที หากอัตราการให้บริการผู้ป่วย (μ) มีค่าคงเดิม จะทำให้เวลาเฉลี่ยที่อยู่ในระบบทั้งหมดเท่ากับ 6.62 นาที โดยสรุปจากสถิติโรงพยาบาลบ้านแพ้ว ผู้มาใช้บริการแผนกอายุรกรรมก่อนใช้แอปพลิเคชัน มีอัตราการเข้ารับบริการเฉลี่ย 0.288 คน/นาที เวลาเฉลี่ยที่อยู่ในระบบ 33 นาที/คน

ตารางที่ 2 สถิติผู้ป่วยนอกโรงพยาบาลบ้านแพ้ว

ขั้นตอน	เวลารอเฉลี่ย (นาที)	เวลาให้บริการเฉลี่ย (นาที)
จุดรับบัตรคิวและคัดกรองเบื้องต้น	2	2
จุดซักประวัติ วัตถุประสงค์และคำถามต้น	6	5
ห้องตรวจโรค	6	7
ห้องรับยา	3	2
รวมเวลารอเฉลี่ย	17	-
รวมเวลาให้บริการเฉลี่ย	-	16
เวลาที่อยู่ในระบบเฉลี่ย	33 นาที	

อัตราเฉลี่ยผู้ป่วยเข้ารับบริการ

$$\lambda_1 = 0.198 \text{ คน/นาที} \quad T = 33 \text{ นาที/คน}$$



รูปที่ 14 แลวดอกของการให้บริการผู้ป่วยนอกโรงพยาบาลบ้านแพ้ว

หากมีการใช้แอปพลิเคชันจะทำให้ลดจำนวนผู้ป่วยที่ไม่มีความจำเป็นในการพบแพทย์ได้ร้อยละ 66.66 เหลือผู้ป่วยเพียงร้อยละ 33.34 ที่จำเป็นต้องพบแพทย์ ทำให้อัตราการเข้ารับบริการเฉลี่ยหลังใช้แอปพลิเคชันเหลือเพียง 0.079 คน/นาที และเวลาเฉลี่ยที่อยู่ในระบบเหลือเพียง 6.62 นาที

4. การอภิปรายผล

จากผลการทดลองเบื้องต้นกระทำที่โรงพยาบาลบ้านแพ้วสาขาพระรามสองซึ่งมีลักษณะเป็นโรงพยาบาลประจำชุมชนไม่ใช่โรงพยาบาลขนาดใหญ่และให้บริการในแผนกอายุรกรรมเป็นหลักโดยสามารถตรวจวินิจฉัยโรคเบื้องต้นเท่านั้น ดังนั้นจึงเป็นโรงพยาบาลลำดับแรกๆ ที่ผู้ป่วยในบริเวณนั้นขอเข้า



รับบริการทำให้มีความคับคั่งของผู้เข้ารับบริการสูง การวิเคราะห์เวลาในการให้บริการสามารถใช่แบบจำลองแบบ M/M/1 ดังที่แสดงให้เห็นในหัวข้อ 2.4 โดยจากการทดลองใช้แอปพลิเคชันคัดกรองผู้ที่ไม่มีความจำเป็นต้องพบแพทย์พบว่าสามารถลดจำนวนผู้เข้ารับบริการจาก 142.54 คน/วัน เหลือเพียง 57.01 คน/วัน คิดเป็นร้อยละ 60 ซึ่งถือว่าลดลงได้อย่างมาก โดยจากการคำนวณจะสามารถลดระยะเวลาในการเข้ารับบริการจาก 33.34 นาที/คน เหลือเพียง 6.62 นาที/คน แต่อย่างไรก็ตามการลดเวลานี้อยู่ภายใต้สมมติฐานคือแอปพลิเคชันทำงานถูกต้อง 100% แต่จากการทดลองพบว่ายังมีข้อผิดพลาดอยู่บ้าง ทั้งนี้เกิดจากการที่ผู้ป่วยมีอาการไม่ชัดเจน เช่น มีไข้ต่ำ ซึ่งเป็นอาการร่วมกันระหว่างโรคที่จำเป็นต้องพบแพทย์และโรคที่ไม่จำเป็นต้องพบแพทย์ เนื่องจากโรงพยาบาลไม่สามารถตรวจอาการได้อย่างละเอียด ในทางปฏิบัติแพทย์โรงพยาบาลบ้านแพ้วจะจ่ายยาลดไข้และให้กลับไปดูอาการ ซึ่งเมื่อเวลาผ่านอาการไข้อาจจะหายไปหรือถ้ายังมีอาการแพทย์จะส่งต่อคนไข้ไปยังโรงพยาบาลที่เหมาะสมต่อไป ดังนั้นการทำงานในแอปพลิเคชันเมื่อเจออาการป่วยข้างต้นจึงแนะนำให้รับประทานยาลดไข้และดูอาการด้วยตัวเองเหมือนกับคำแนะนำของแพทย์ เมื่อทำตามคำแนะนำข้างต้นแล้วอาการยังไม่หายจึงมีหมายเหตุต่อท้ายในแอปพลิเคชันเพื่อแนะนำให้พบแพทย์ต่อไป ในกรณีนี้อาจเกิดการวินิจฉัยผิดพลาดได้บ้าง ส่วนของการคำนวณเวลาในกรณีนี้จะถือรวมเป็นกรณีที่ต้องเข้าพบแพทย์ทั้งหมด นอกจากนี้ความผิดพลาดของแอปพลิเคชันยังเกิดจากการที่ผู้ป่วยมีความจำเป็นต้องพบแพทย์แต่มีอาการแทรกซ้อนตรง

กับในชุดคำถามของแอปพลิเคชันทุกข้อคำถาม ในกรณีนี้แอปพลิเคชันจะวินิจฉัยว่าไม่จำเป็นต้องพบแพทย์เนื่องจากเมื่อมีอาการตรงทุกข้อแอปพลิเคชันจะสามารถวิเคราะห์โรคและให้คำแนะนำได้ ในกรณีนี้จัดเป็นข้อผิดพลาดร้ายแรง แต่ในขั้นทดลองเบื้องต้นยังไม่พบการผิดพลาดในกรณีดังกล่าว

5. บทสรุป

จากการทดลองอาจกล่าวได้ว่าแอปพลิเคชันช่วยลดระยะเวลาในการเข้าใช้บริการทางด้านสาธารณสุขได้ในระดับที่ดี ความเป็นไปได้อย่างมากสำหรับการปรับใช้กับโรงพยาบาลที่มีลักษณะแบบจำลองแถวคอยเหมือนกับโรงพยาบาลบ้านแพ้ว สาขาพระราม 2 ส่วนของแอปพลิเคชันยังมีข้อผิดพลาดอยู่บ้าง อาจจะต้องมีการจัดทำชุดคำถามที่มีความละเอียดมากขึ้นเพื่อการวินิจฉัยที่แม่นยำและมีความน่าเชื่อถือที่มากขึ้น นอกจากนี้ยังต้องการทดลองในระยะยาวกับโรงพยาบาลที่มีระบบการทำงานและแบบจำลองแถวคอยที่แตกต่างออกไปเพื่อวิเคราะห์หาประสิทธิภาพที่แท้จริง ซึ่งจะนำเสนอในโอกาสต่อไป

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] http://statbbi.nso.go.th/staticreport/Page/sector/EN/report/sector_05_15_EN_.xlsx (Accessed on 15 May 2021), (in Thai)
- [2] <https://www.bangkokhospital.com/th/disease-treatment/reasons-of-the-sickness> (Accessed on 15 May 2021), (in Thai)
- [3] http://statbbi.nso.go.th/staticreport/Page/sector/EN/report/sector_01_11202_EN_.xlsx (Accessed on 15 May 2021), (in Thai)



- [4] http://statbbi.nso.go.th/staticreport/Page/sector/EN/report/sector_05_24_EN_.xlsx
(Accessed on 15 May 2021), (in Thai)
- [5] http://www.who.int/gho/health_workforce/physicians_density/en/
(Accessed on 15 May 2021)
- [6] T. Chimwong, J. Nilsu and N. Wanitkun, Applying the LEAN concept for quality improvement in the diabetic clinic of Rayong hospital, *Nursing Journal of The Ministry of Public Health*, 2014, 24(1), 121-135. (in Thai).
- [7] S. Srilakorn and S. Sindhuchao, An application of queuing theory and simulation for reducing waiting time of out-patients of warinchamrab hospital, *Industrial Engineering Network Conference 2017 (IE Network 2017)*, Proceeding, 2017, 1130-1135. (in Thai)
- [8] P. Ruengpeng, Simulation of queuing systems for outpatient service: A case study of the internal medicine at Phatthalung hospital," *Veridian E-Journal, Silpakorn University (Humanities, Social Sciences and Arts)*, 2013, 6(3), 834-845. (in Thai).
- [9] K. Kongyuen, P. Petthai and Rehabilitation Medical staffs, reduce the waiting time, *Annual Conference of Golden Jubilee Medical Center*, Proceeding, 2013, 275-291. (in Thai)
- [10] C. Vasuthada, The operational system improvement for service time reduction of patients with chronic diseases, Thachang primary care unit, Chanthaburi province, *Journal of Phrapokklao Nursing College*, 2017, 28(1), 80-89. (in Thai)
- [11] S. Supasiri, S. Puttapitukpol and D. Plianbumroong, The effects of a service model for the diabetic out-patient department on waiting time and patients' satisfaction, *Thai Journal of Cardio-Thoracic Nursing*, 2017, 28(1), 44-56. (in Thai)
- [12] T. Utaikhaifah, N. Angsuserani, T. Kamlangaek, Service improvement on out-patient department of state-owned hospitals, *Industrial Engineering Network Conference 2012 (IE Network 2012)*, Proceeding, 2012, 586-594. (in Thai)
- [13] P. Pinyakhun, A. Cheevakasemsook and Penjun Sanprasarn, The development of a diabetic clinic service model by applying lean concept at Chaoprayayomraj regional hospital, Suphan buri province, *Journal of The Royal Thai Army Nurses*, 2017, 18(supplement), 280-290. (in Thai)



- [14] U. Saegow, A. Wattanapisit and R. Asksornthong, Necessity of hospital visit: comparing patient and doctor perspectives, Health Systems Research Institute, 2017, <https://kb.hsri.or.th/dspace/handle/11228/4805>. (Accessed on 15 May 2021), (in Thai)
- [15] S. Archa-arnuphab, General disease treatment book, Volume 1: Disease treatment and drug use guidelines. 4th ed., Holistic Publishing Company, Bangkok, 2008. (in Thai)
- [16] S. Archa-arnuphab, General disease treatment book, Volume 2: Disease treatment and drug use guidelines. 4th ed., Holistic Publishing Company, Bangkok, 2008. (in Thai)
- [17] Notification of The Ministry of Public Health B.E. 1999, Household remedy, Royal Thai Government Gazette, Volume 116, Section 36D, 13 March 1999, 9-49. (in Thai)
- [18] <https://www.doctorraksa.com> (Accessed on 15 May 2021), (in Thai)
- [19] <https://www.bangkoklifeneews.com/17199912/%20> (Accessed on 15 May 2021), (in Thai)
- [20] <https://www.opendream.co.th/project/doctorme> (Accessed on 15 May 2021), (in Thai)
- [21] T. Suriyawong, P. Boonmatham, S. Boonmatham and V. Khonchoho, The general medical diagnosis expert system by decision tree technique on the smartphone application, Journal of Technology Management Rajabhat Maha Sarakham University, 2018, 4(2), 84-93. (in Thai)
- [22] T. Chokaumnuy, S. Sampaotong, Public health service time reducing using an android based application, Bachelor Thesis, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Thailand, 2019. (in Thai)



การศึกษาเพื่อหาค่าความหนาที่เหมาะสมสำหรับแผ่นพื้นไร้คานคอนกรีตอัดแรงภายหลังชนิดมีคานกว้าง

พงษ์นรินทร์ จงรัชฎาวาร สายันต์ ศิริมนตรี และ ชนะชัย ทองโถม*

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: tchanach@engr.tu.ac.th

วันที่รับบทความ: 25 มีนาคม 2564; วันที่ทบทวนบทความ: 4 พฤษภาคม 2564; วันที่ตอบรับบทความ: 13 พฤษภาคม 2564

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 24 พฤษภาคม 2564

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาเพื่อหาความหนาที่เหมาะสมสำหรับแผ่นพื้นไร้คานคอนกรีตอัดแรงภายหลังชนิดมีคานกว้าง โดยใช้หลักการหาความเหมาะสมด้วยระเบียบวิธีฟังก์ชันพหุนาม ในการวิเคราะห์โครงสร้างใช้วิธีโครงสร้างข้อแข็งเสมือน โดยใช้โปรแกรม ADAPT-PT/RC 2015 ในการช่วยคำนวณ ความกว้างของคานที่ศึกษามี 3 กรณี คือ 1/3 1/4 และ 1/5 ของความกว้างแผ่นพื้น ความยาวช่วงของพื้นในแต่ละกรณีเท่ากับ 15 18 และ 20 เมตร ตามลำดับ สำหรับน้ำหนักบรรทุกจรจะกำหนดให้แปรเปลี่ยนไปตามประเภทการใช้สอยของอาคาร ได้แก่ ส่วนพักอาศัย ส่วนสำนักงาน และส่วนที่จอดรถ มีค่าเท่ากับ 200 300 และ 400 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ตามลำดับ โดยมีการพิจารณาน้ำหนักบรรทุกคงที่ ที่นอกเหนือจากน้ำหนักของพื้นเอง 120 และ 300 กิโลกรัมต่อตารางเมตร จากนั้นนำผลที่ได้จากการออกแบบไปหาฟังก์ชันพหุนาม เพื่อหาค่าความหนาที่เหมาะสมเพื่อเป็นข้อมูลให้วิศวกรสามารถนำไปเป็นแนวทางออกแบบเบื้องต้นและประมาณราคา จากการศึกษพบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) มีค่าเท่ากับ 1.0 และสรุปผลได้ว่า สำหรับส่วนพักอาศัย ส่วนสำนักงาน และส่วนที่จอดรถ กรณีความกว้างของคานเท่ากับ 1/3 ของความกว้างพื้น อัตราส่วนความยาวช่วงต่อความหนาของพื้นที่เหมาะสม เท่ากับ 34 32 และ 33 ตามลำดับ กรณีความกว้างของคานเท่ากับ 1/4 ของความกว้างแผ่นพื้น อัตราส่วนความยาวช่วงต่อความหนาของพื้นที่เหมาะสม เท่ากับ 33 31 และ 32 ตามลำดับ กรณีความกว้างของคานเท่ากับ 1/5 ของความกว้างแผ่นพื้น อัตราส่วนความยาวช่วงต่อความหนาของพื้นที่เหมาะสม เท่ากับ 31 29 และ 30

คำสำคัญ: แผ่นพื้นไร้คาน; คอนกรีตอัดแรง; ระบบดิ่งภายหลังชนิดมีคานกว้าง; ทฤษฎีโครงสร้างเสมือน; ความหนาที่เหมาะสม



Study on Optimum Thickness of Post-Tension Concrete Flat Slab with Band Beam

Pongnarin Jongrukthavorn, Sayan Sirimontree and Chanachai Thongchom^{*}

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University

^{*} Corresponding author, E-mail: tchanach@engr.tu.ac.th

Received: 25 March 2021; Revised 4 May 2021; Accepted: 13 May 2021

Online Published: 24 May 2021

Abstract: This paper aims to find the optimum thickness for post-tensioned slabs with band beam using the polynomial optimization method. In the structural analysis, the equivalent frame method using the ADAPT-PT/RC 2015 software is used. In this study, three widths of the band beam were used such as 1/3, 1/4 and 1/5 of the slab width. The span length of the floor slab in each case was 15, 18 and 20 meters, respectively. The value of live load was 200, 300 and 400 kg/m² which depending on the type of building's usability, including residential, office and parking areas, were used. In addition to the weight of the floor itself, the superimposed dead loads such as 120 and 300 kg/m² were taken into account in the analysis process. The results of the design are then used to find the appropriate thickness using the polynomial optimization method to provide information for engineers to guide the design and estimate the cost. Based on the analysis, it was found that the correlation coefficient (R^2) was 1.0. For residential, office and parking areas, the width of the band beam is 1/3 of the floor width, the suitable ratio of span length to slab's optimum thickness are 34, 32, and 33, respectively. For the width of the band beam is 1/4 of the width of the slab, the suitable ratio of span length to slab's optimum thickness are 33, 31, and 32, respectively. In the case of band beam width equal to 1/5 of the width of the slab, the suitable ratio of span length to slab's optimum thickness is 31, 29 and 30.

Keywords: Flat slab; Post-tensioned concrete; Band beam; Equivalent frame method; Optimum thicknesses



1. บทนำ

ปัจจุบันโครงการอสังหาริมทรัพย์ถูกผสม ได้รับความนิยมน้อยลงแพร่หลาย ในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา มีความต้องการระบบโครงสร้างที่สามารถทำให้ โครงสร้างอาคารมีช่วงความยาวที่ยาวขึ้น เพื่อให้ได้ ประโยชน์ใช้สอยสูงสุดมีมากขึ้น ดังนั้นระบบ โครงสร้างพื้นคอนกรีตอัดแรงภายหลังชนิดมีคาน กว้าง ที่มีลักษณะแผ่นพื้นท้องเรียบโดยมีส่วนเพิ่ม ความหนาบริเวณแถบเสายาวตลอดช่วงแผ่นพื้น ซึ่ง สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้มากกว่าพื้นไร้คานทั่วไป อีกทั้งยังสามารถเพิ่มความยาวช่วงได้มากกว่าพื้นไร้ คานทั่วไปอีกด้วย ซึ่งการที่จะหาราคาที่เหมาะสมจึง เป็นเรื่องยากและเสียเวลา เนื่องจากต้องคำนวณซ้ำๆ หลายๆ ครั้ง และผลการวิเคราะห์ที่ได้อาจไม่ใช่ค่าที่ เหมาะสมที่สุด

Post-Tensioning Institute [1] มีข้อเสนอแนะเกี่ยวกับ ความหนาของแผ่นพื้นต่ำสุดที่ไม่ต้องตรวจสอบการ แอนตัว ไว้เป็นอัตราส่วนความยาวช่วงต่อความหนา พื้นดังตารางที่ 1 ได้แสดงค่าความยาวช่วงต่อความ หนาพื้นของชนิดของพื้นต่างๆ ประกอบด้วย พื้นทาง เดี่ยว พื้นสองทาง พื้นไร้คานแบบมีแป้นหัวเสา พื้นสอง ทางแบบรังผึ้ง และความกว้างของคาน, B/3 โดยที่ อัตราส่วนของ LL/DL ต้องมีค่าน้อยกว่า 1 เมื่อ LL = น้ำหนักบรรทุกจร (กิโลกรัม/ตารางเมตร) DL = น้ำหนัก บรรทุกตายตัวของพื้นทั้งหมด (กิโลกรัม/ตารางเมตร)

ในโครงการที่มีความต้องการช่วงความยาวของพื้นที ่มาก ซึ่งจะส่งผลต่อน้ำหนักคงที่ของพื้นโดยตรง ดังนั้นจึง มีข้อสงสัยว่า ค่าอัตราส่วนความยาวช่วงต่อความหนา พื้นในตารางที่ 1 ยังคงใช้ได้กับระบบดังกล่าวได้หรือไม่

ตารางที่ 1 อัตราส่วนความยาวช่วงต่อความหนาของพื้น [1]

ชนิดของพื้น	ความยาวช่วงต่อ ความหนาพื้น
พื้นทางเดียว	48
พื้นสองทาง	45
พื้นไร้คานแบบมีแป้นหัวเสา	50
พื้นสองทางแบบรังผึ้ง (5ft × 5ft)	35
ความกว้างของคาน, B/3	30

นอกจากนั้นการแปรเปลี่ยนความกว้างของคานจะ ส่งผลต่อความหนาดำสุดที่แนะนำอย่างไรและส่งผล กับราคาค่าก่อสร้างอย่างไร ทั้งนี้เพื่อเป็นข้อมูลช่วยใน การออกแบบและประมาณราคาเบื้องต้น

ในปัจจุบันมีโปรแกรมช่วยวิเคราะห์และออกแบบ ระบบแผ่นพื้นไร้คานคอนกรีตอัดแรงซึ่งใช้วิธีการ วิเคราะห์ไฟไนต์อีลีเมนต์ (Finite Element Analysis) เช่น RAM Concept [2] และ CSI SAFE [3] ซึ่งเป็ นการมองโครงสร้างในแบบสามมิติโดยตรง ฉัตร สุจินดา [4] ได้ศึกษาแล้วว่าวิธีการดังกล่าวให้ คำตอบที่ใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริงของโครงสร้างได้ มากกว่าสองมิติ สมชาย ตงอาภรณ์ และฉัตร สุจินดา [5] ได้ศึกษาเพื่อหาความหนาที่เหมาะสม สำหรับแผ่นพื้น ไร้คานคอนกรีตอัดแรงโดยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์แบบ สามมิติ โดยใช้โปรแกรม RAM Concept โดยมี Span Length คือ 8 เมตร โดยได้ศึกษาน้ำหนักบรรทุกจร 300-500 กิโลกรัม/ตารางเมตร พัทธนันท์ มณีชนพันธ์ ได้ศึกษาเพื่อหาความหนาที่เหมาะสม สำหรับแผ่นพื้น ไร้คานคอนกรีตอัดแรง (ช่วงเสา 6.75 และ 9 เมตร) โดยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์แบบสามมิติ โดยใช้โปรแกรม RAM Concept [2]



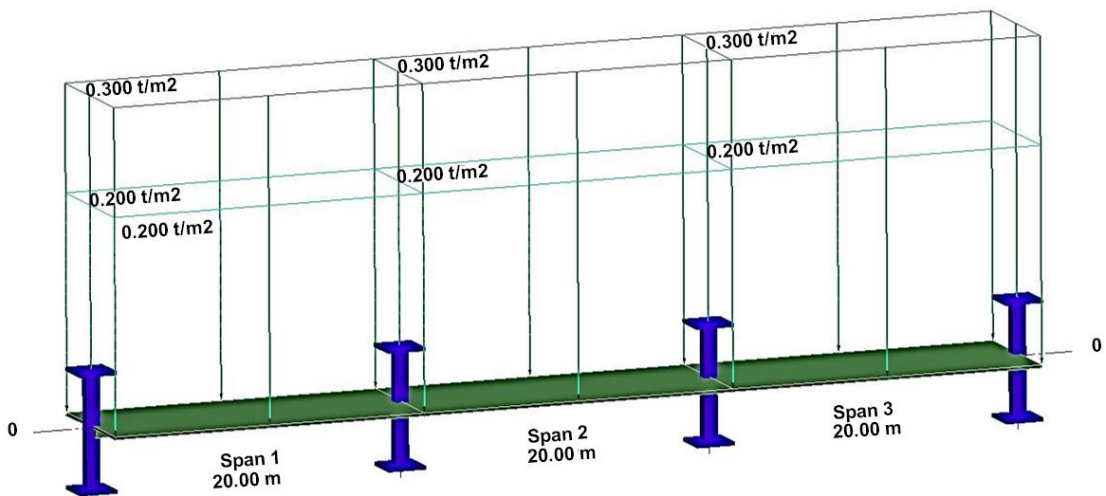
ในงานวิจัยนี้จึงได้ประยุกต์หลักการในการหาความเหมาะสมด้วยระเบียบวิธีฟังก์ชันพหุนาม การออกแบบพื้นไร้คานคอนกรีตอัดแรงภายหลังชนิดมีคานกว้างใช้การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีโครงข้อแข็งเสมือนสองมิติ (Equivalent Frame Method) โดย [6] วินัย สังหิตกุล ได้ศึกษาการคำนวณออกแบบอย่างเหมาะสมสำหรับพื้นคอนกรีตไร้คานอัดแรงภายหลัง และ [7] อติพันธ์ ธีรานุพัฒนา ได้ศึกษาการคำนวณออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดสำหรับพื้นคอนกรีตไร้คานอัดแรงภายหลังด้วยวิธีซิมเพล็กซ์ ซึ่งการวิเคราะห์โดยวิธีดังกล่าวสามารถใช้โปรแกรม ADAPT-PT/RC [8] ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันแพร่หลายในประเทศไทยมาทดลองออกแบบเพื่อหาความหนาที่เหมาะสม ที่ให้ราคาต่ำก่อสร้างต่ำสุดโดยใช้ข้อมูลราคาวัสดุก่อสร้างและค่าแรงในประเทศไทย

2. ขั้นตอนการศึกษา

2.1 แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์

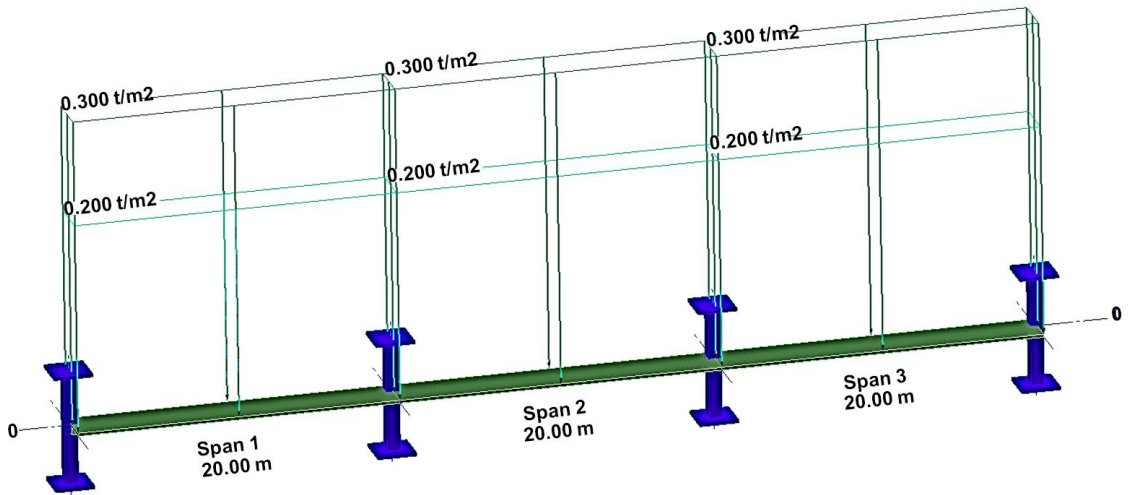
การสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์โครงสร้างระบบแผ่นพื้นไร้คานคอนกรีตอัดแรงภายหลังชนิดมีคานกว้างจะใช้ วิธีโครงข้อแข็งเสมือน (Equivalent Frame Method) โดยใช้โปรแกรม ADAPT-PT/RC [8] ในการช่วยคำนวณ แบบจำลองของระบบแผ่นพื้นไร้คานคอนกรีตอัดแรงภายหลังชนิดมีคานกว้าง แสดงในรูปที่ 1 โดยรูปที่ 1(ก) แสดงแนวกึ่งกลางแผ่นพื้นรูปที่ 1(ข) แนวขอบแผ่นพื้น และรูปที่ 1(ค) ตั้งจากแนวกึ่งกลางแผ่นพื้น

ในการวิเคราะห์และออกแบบจะพิจารณาเฉพาะน้ำหนักกระทำในแนวตั้ง (Gravity Load) ซึ่งประกอบด้วยน้ำหนักบรรทุกคงที่ของพื้น (Dead Load, DL)

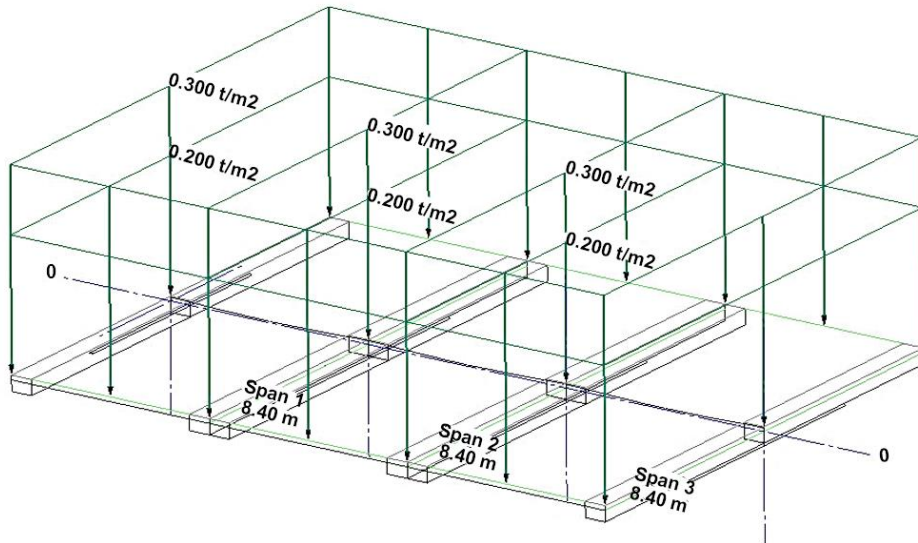


(ก)

รูปที่ 1 แบบจำลองของระบบแผ่นพื้นไร้คานคอนกรีตอัดแรงภายหลังชนิดมีคานกว้าง โดยโปรแกรม ADAPT-PT/RC 2015: (ก) แนวกึ่งกลางแผ่นพื้น



(ข)



(ค)

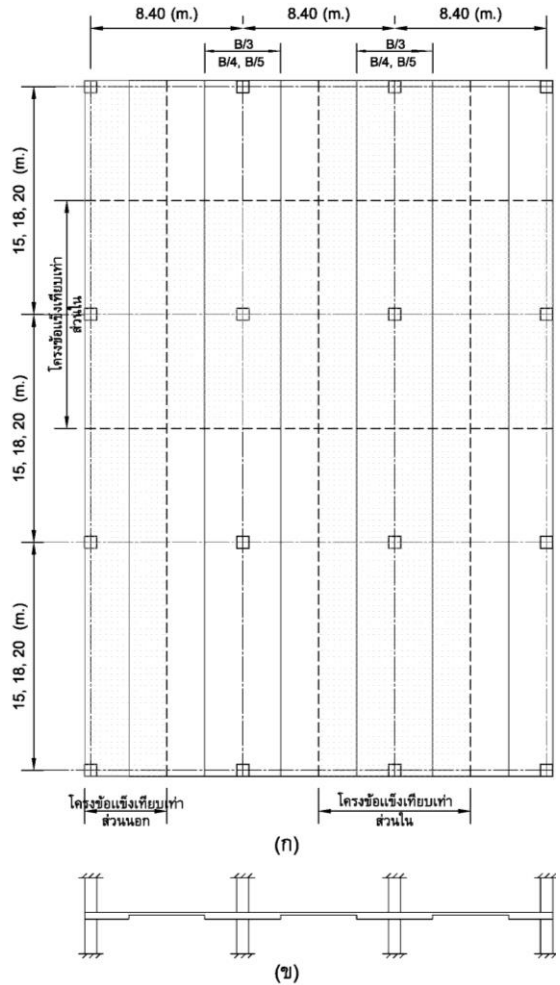
รูปที่ 1 (ต่อ) แบบจำลองของระบบแผ่นพื้นไร้คานคอนกรีตอัดแรงภายหลังชนิดมีคานกว้าง โดยโปรแกรม ADAPT-PT/RC 2015: (ข) แนวขอบแผ่นพื้น (ค) ตั้งฉากแนวกึ่งกลางแผ่นพื้น



น้ำหนักบรรทุกคงที่ที่เพิ่มขึ้นที่ไม่รวมน้ำหนักพื้น (Super-Imposed Dead Load, SDL) และน้ำหนักบรรทุกจร (Live Load, LL) ซึ่งแบ่งตามประเภทตามการใช้งาน ตัวแปรหลักที่ใช้ศึกษา ได้แก่ ความยาวช่วง (L) และความหนาของคาน (D) เพื่อพิจารณาหาความหนาที่เหมาะสมในแต่ละกรณี การวิเคราะห์และออกแบบจะคำนวณหาปริมาณเหล็กเสริมอัดแรงที่เพียงพอต่อการต้านน้ำหนักบรรทุกใช้งาน โดยไม่ทำให้หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตเกินกว่าหน่วยแรงที่ยอมให้ จากนั้นทำการตรวจสอบการรับน้ำหนักสูงสุดของพื้นที่สภาวะประลัยโดยผลจากน้ำหนักบรรทุกคูณด้วยตัวคูณน้ำหนักบรรทุก (Load factor) ต้องไม่เกินกว่ากำลังต้านทานของพื้นที่ พร้อมทั้งทำการตรวจสอบแรงเฉือนและออกแบบเหล็กเสริมรับแรงเฉือน นอกจากนี้จะพิจารณาการแอ่นตัวที่สภาวะใช้งาน ทั้งที่เกิดขึ้นในทันที และ ตามเวลา ทั้งนี้ในการคำนวณจะเป็นไปตามมาตรฐาน ACI 318-08 [9] และมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง [10] หลังจากนั้นคำนวณหาค่าของวัสดุ ได้แก่ ปริมาณคอนกรีต ปริมาณเหล็กเสริม ค่าแรง และราคาต่าก่อสร้าง

2.2 กรณีศึกษาและขั้นตอนการวิเคราะห์หาความหนาของแผ่นพื้นที่เหมาะสม

แปลนแสดงตำแหน่งพื้นและเสาที่ใช้ในการศึกษาแสดงดังรูปที่ 2 ความกว้างแผ่นพื้น (B) = 8.4 เมตร ความกว้างของคาน (Band Beam) จะทำการศึกษาเป็น 3 กรณี ได้แก่ B/3 B/4 B/5 สำหรับความยาวช่วงที่ศึกษามี 3 ช่วง ได้แก่ 15 18 และ 20 เมตร ตามลำดับ เสาบนและล่างมีความสูงเท่ากับ 3.5 เมตร มีขนาดหน้าตัด 0.80×0.80 เมตร โดยเสาใช้คอนกรีต



รูปที่ 2 (ก) แบบแปลน (ข) รูปด้าน ที่ใช้เป็นกรณีศึกษาเพื่อหาความหนาที่เหมาะสมและราคาต่าก่อสร้างรวมต่ำสุด

ที่มีกำลังอัดประลัย $f_c' = 240$ กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร และพื้นที่คอนกรีตที่มีกำลังอัดประลัย $f_c' = 320$ กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร พื้นรับน้ำหนักบรรทุกจร ตามสภาพการใช้งานของอาคารเป็น ที่พักอาศัย สำนักงาน และ ที่จอดรถ คือ 200 300 และ 400 กิโลกรัม/ตารางเมตร ตามลำดับ น้ำหนักคงที่ที่ไม่รวม



บทความวิจัย

น้ำหนักของตัวพื้น ในแต่ละประเภทของการใช้อาคาร เท่ากับ 120 และ 300 กิโลกรัม/ตารางเมตร ในการออกแบบพื้นไร้คานคอนกรีตอัดแรงภายหลังชนิดมีคานกว้าง จะเป็นการอัดแรงโดยสมบูรณ์ (Fully Prestress) คือให้มีปริมาณลวดอัดแรงเพียงพอสำหรับต้านทานโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักบรรทุก และใช้เหล็กเสริมอื่นที่จำเป็นตามที่มาตรฐาน [9, 10] กำหนด

การคำนวณราคาค่าวัสดุและค่าแรงจะใช้ข้อมูลในปัจจุบันของประเทศไทย โดยมีแหล่งที่มาจาก ดัชนีเศรษฐกิจการค้า กระทรวงพาณิชย์ [11] และกรมบัญชีกลาง กระทรวงการคลัง [12] ดังแสดงในตารางที่ 2 จากปริมาณวัสดุที่ได้จากการออกแบบในแต่ละกรณีจะได้ปริมาณและราคาค่าก่อสร้าง

ตารางที่ 2 ราคาค่าต่อหน่วยของวัสดุและค่าแรง

ประเภท	ราคาต่อหน่วย (baht)	
	ค่าวัสดุ	ค่าแรง
คอนกรีตกำลังอัดประลัย (f_c') เท่ากับ 320 kg/cm ²	2357 (ต่อ m ³)	150 (ต่อ m ³)
เหล็กเส้น SD-40	19.1 (ต่อ kg)	3.3 (/ kg)
ลวดเกลียวอัดแรง (Low relaxation) 12.7 mm.(1/2นิ้ว) Grade 270	45.2 (ต่อ kg)	20 (ต่อ kg)
ไม้แบบ (คิด25%)	135 (ต่อ m ²)	135 (ต่อ m ²)
แหล่งที่มาข้อมูล: ดัชนีเศรษฐกิจการค้า กระทรวงพาณิชย์ [11] และกรมบัญชีกลาง กระทรวงการคลัง [12]		

ตารางที่ 3 แสดงตัวอย่างของผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ ในกรณีความกว้างของคานเท่ากับ B/3 เป็นที่พักอาศัย รับน้ำหนักบรรทุกจรเท่ากับ 200 กิโลกรัมต่อตารางเมตร และมีน้ำหนักตายตัวเพิ่มเติมที่ไม่รวมน้ำหนักของพื้นเท่ากับ 300 กิโลกรัมต่อตารางเมตร มีความยาวช่วงเท่ากับ 15 เมตร

ตารางที่ 3 ตัวอย่างแสดงปริมาณและราคาค่าก่อสร้างรวมของกรณีพื้นใช้งานเป็นที่พักอาศัย มีความกว้างของคาน B/3 ความยาวช่วง 15 เมตร

ความกว้างของคาน B/3 (cm)	ประเภทวัสดุ / ค่าแรง	ปริมาณ	ราคา	ราคาค่า
		(unit)	ค่าวัสดุรวม	ก่อสร้างรวม
			(baht)	(baht)
40	คอนกรีต	314.74 m ³	2,507	789,047.16
	เหล็กเส้น	4,471.23 kg	22.4	100,155.53
	ลวดเกลียวอัดแรง	9,598.60 kg	65.2	625,828.72
	ไม้แบบ	1,392.11 m ²	270	375,869.16
	รวม			1,890,900.58
42	คอนกรีต	323.16 m ³	2,507	810,174.15
	เหล็กเส้น	3,886.03 kg	22.4	87,046.99
	ลวดเกลียวอัดแรง	9,428.30 kg	65.2	614,725.16
	ไม้แบบ	1,397.60 m ²	270	377,353.08
	รวม			1,889,299.38
44	คอนกรีต	331.59 m ³	2,507	831,301.14
	เหล็กเส้น	3,829.98 kg	22.4	85,791.53
	ลวดเกลียวอัดแรง	9,294.80 kg	65.2	606,020.96
	ไม้แบบ	1,403.10 m ²	270	378,837.00
	รวม			1,901,950.64

ข้อมูลที่ได้จาก ตารางที่ 3 สามารถนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างราคาค่าก่อสร้างรวมและความหนาของแผ่นพื้นไร้คานคอนกรีตอัดแรงภายหลังชนิดมีคานกว้างในลักษณะของฟังก์ชันพหุนามได้ดังแสดงในรูปที่ 3

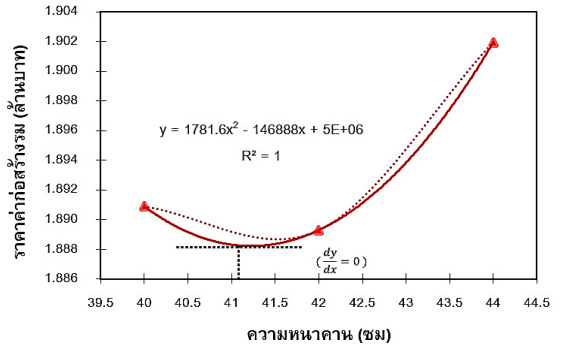


2.3 การสร้างฟังก์ชันพหุนาม

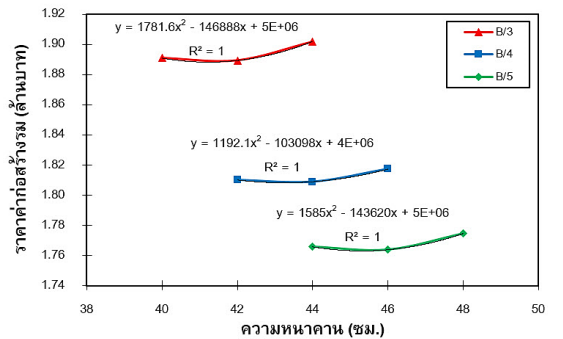
การสร้างฟังก์ชันพหุนามของผลรวมราคาค่าก่อสร้างรวม กับความหนาของแต่ละกรณีศึกษา เมื่อความชันของเส้นโค้ง ($\frac{dy}{dx} = 0$) มีค่าเท่ากับศูนย์ คือ ค่าความหนาที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ราคาค่าก่อสร้างรวมต่ำสุด รูปที่ 3 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างค่าก่อสร้างรวม และความหนาของแผ่นพื้นไร้คานคอนกรีตอัดแรงภายหลังชนิดมีคานกว้างของกรณีศึกษาที่อัตราส่วน B/3 (โดย B คือ ความกว้างแผ่นพื้น) สำหรับน้ำหนักบรรทุกทุกจร 200 กิโลกรัมต่อตารางเมตร และมีน้ำหนักตายตัวเพิ่มเติมเท่ากับ 300 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ที่ช่วงความยาว (L) เท่ากับ 15 เมตร

รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าก่อสร้างรวม และความหนาของแผ่นพื้นไร้คานคอนกรีตอัดแรงภายหลังชนิดมีคานกว้างของทุกกรณีศึกษา (B/3 B/4 และ B/5) สำหรับน้ำหนักบรรทุกทุกจร 200 กิโลกรัมต่อตารางเมตร และมีน้ำหนักตายตัวเพิ่มเติมเท่ากับ 300 กิโลกรัมต่อตารางเมตร สำหรับความยาวช่วงเท่ากับ 15 เมตร

โดยตารางที่ 4 5 และ 6 แสดงความหนาที่เหมาะสมที่ราคาค่าก่อสร้างรวมต่ำสุด สำหรับความยาวช่วง 15 18 และ 20 เมตร ตามลำดับ และตารางที่ 7 แสดงค่าสรุปอัตราส่วนความยาวช่วงต่อความหนาของแผ่นพื้นไร้คานคอนกรีตอัดแรงภายหลังชนิดมีคานกว้างสำหรับความยาวช่วง 15 18 และ 20 เมตร ตามลำดับในกรณีความกว้างของคานต่างๆ (B/3 B/4 และ B/5) ที่น้ำหนักบรรทุกที่ต่างกัน



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าก่อสร้างรวมและความหนาของแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงภายหลังชนิดมีคานกว้าง ในกรณี B/3 และ L เท่ากับ 15 เมตร



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าก่อสร้างรวมและความหนาของแผ่นพื้นไร้คานคอนกรีตอัดแรงภายหลังชนิดมีคานกว้าง ทุกกรณีศึกษา สำหรับน้ำหนักบรรทุกทุกจร 200 กิโลกรัมต่อตารางเมตร และมีน้ำหนักตายตัวที่ไม่ใช่ น้ำหนักของพื้นเอง 300 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ความยาวช่วง 15 เมตร



ตารางที่ 4 ความหนาที่เหมาะสมที่ราคาต่ำก่อสร้างรวมต่ำสุด สำหรับความยาวช่วง 15 เมตร

ลำดับ	กรณีศึกษาความกว้างแผ่นพื้น	SDL (kg/m ²)	LL (kg/m ²)	ความหนาพื้น (cm)	ความหนา คาน (cm)
1	B/3	300	200	19	41.22
	B/4	300	200	19	43.24
	B/5	300	200	19	45.31
2	B/3	300	300	19	42.70
	B/4	300	300	19	44.75
	B/5	300	300	19	50.91
3	B/3	120	400	19	40.47
	B/4	120	400	19	42.67
	B/5	120	400	19	45.79

ตารางที่ 5 ความหนาที่เหมาะสมที่ราคาต่ำก่อสร้างรวมต่ำสุด สำหรับความยาวช่วง 18 เมตร

ลำดับ	กรณีศึกษาความกว้างแผ่นพื้น	SDL (kg/m ²)	LL (kg/m ²)	ความหนาพื้น (cm)	ความหนา คาน (cm)
1	B/3	300	200	19	51.18
	B/4	300	200	19	53.22
	B/5	300	200	19	56.25
2	B/3	300	300	19	53.43
	B/4	300	300	19	54.50
	B/5	300	300	19	59.51
3	B/3	120	400	19	53.43
	B/4	120	400	19	54.50
	B/5	120	400	19	59.51



ตารางที่ 6 ความหนาที่เหมาะสมที่ราคาต่ำก่อสร้างรวมต่ำสุด สำหรับความยาวช่วง 20 เมตร

ลำดับ	กรณีศึกษาความกว้างแผ่นพื้น	SDL (kg/m ²)	LL (kg/m ²)	ความหนาพื้น (cm)	ความหนาดาน (cm)
1	B/3	300	200	19	57.27
	B/4	300	200	19	59.30
	B/5	300	200	19	63.35
2	B/3	300	300	19	61.22
	B/4	300	300	19	63.23
	B/5	300	300	19	68.27
3	B/3	120	400	19	59.49
	B/4	120	400	19	61.51
	B/5	120	400	19	66.53

ตารางที่ 7 อัตราส่วนความยาวช่วงต่อความหนาของแผ่นพื้นไร้คานคอนกรีตอัดแรงภายหลังชนิดมีคานกว้าง สำหรับความยาวช่วง 15 18 และ 20 เมตร

ชนิดของพื้น	กรณีศึกษาความกว้างของคาน	SDL (kg/m ²)	LL (kg/m ²)	ความหนาพื้น (cm)	ความยาวช่วงต่อความหนาดาน
ความกว้างของคาน	B/3	300	200	19	34
		300	300	19	32
		120	400	19	33
	B/4	300	200	19	33
		300	300	19	31
		120	400	19	32
	B/5	300	200	19	31
		300	300	19	29
		120	400	19	30



3. อภิปรายผลการศึกษา

ขั้นตอนการออกแบบพื้นที่ใต้ ความหนาของพื้นที่ ทำให้ได้ปริมาณลวดอัดแรง จะคำนึงถึงค่าหน่วยแรงดึง และหน่วยแรงอัดที่สภาวะต่างๆ และค่าระยะโก่งตัวของพื้น ทั้งกรณีการโก่งตัวทันที และการโก่งตัวระยะยาวต้องมีค่าน้อยกว่าค่าที่ยอมให้ตามข้อกำหนด ACI 318-08 [10] และมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง [11]

จากตารางแสดงปริมาณและราคาค่าก่อสร้างรวม ซึ่งผลรวมค่าก่อสร้างรวมคือราคาคอนกรีต เหล็กเสริม ลวดอัดแรง และไม้แบบ โดยที่ปริมาณคอนกรีต เพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของพื้นมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น ต่างกับปริมาณเหล็กเสริมที่เมื่อความหนาของพื้นเพิ่มขึ้น จะมีปริมาณเหล็กเสริมลดลงทั้งนี้ก็เนื่องจากความหนาของพื้นที่เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับปริมาณลวดอัดแรงก็พบว่าที่ความหนาน้อยจะมีปริมาณลวดอัดแรงมาก และเมื่อเพิ่มความหนาของพื้นปริมาณลวดอัดแรงจะลดลงเนื่องมาจากที่ระยะยกตัวของลวดอัดแรง (Sag) เพิ่มขึ้น นอกจากนี้น้ำหนักบรรทุกของพื้น และความยาวช่วงที่เพิ่มขึ้น จะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน

จากเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างราคาค่าก่อสร้างรวม (y) และความหนา (x) แล้วหาฟังก์ชันพหุนามกำลังสอง ที่ความชันเป็นศูนย์ ($\frac{dy}{dx} = 0$) จะได้ความหนาที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ราคาค่าก่อสร้างรวมต่ำสุดได้

จากข้อแนะนำ Post-Tensioning Institute [1] อัตราส่วนความยาวช่วงต่อความหนาของพื้น สำหรับชนิดของพื้นความกว้างของคาน (B/3) มีค่าเท่ากับ 30 เมื่อเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความยาวช่วงต่อความหนาของแผ่นพื้นไร้คานคอนกรีตอัดแรงภายหลังชนิด

มีคานกว้างที่ได้จากการศึกษาสำหรับส่วนพักอาศัย ส่วนสำนักงาน และส่วนที่จอดรถ เท่ากับ 34 32 และ 33 ตามลำดับ พบว่ามีความน้อยกว่า ซึ่งกล่าวได้ว่า อัตราส่วนความยาวช่วงต่อความหนาของพื้น ตามข้อแนะนำของ Post-Tensioning Institute [1] สามารถใช้ได้กับกรณีศึกษาในงานวิจัยนี้

4. บทสรุป

จากการศึกษาเพื่อหาความหนาที่เหมาะสมของแผ่นพื้นไร้คานคอนกรีตอัดแรงภายหลังชนิดมีคานกว้างโดยใช้หลักการหาความเหมาะสมด้วยระเบียบวิธีฟังก์ชันพหุนาม ใช้การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีโครงข้อแข็งเสมือนสองมิติ (Equivalent Frame Method) โดยใช้โปรแกรม ADAPT-PT/RC ในการช่วยคำนวณ จะเป็นการอัดแรงโดยสมบูรณ์ (Fully Prestress) คือให้มีปริมาณลวดอัดแรงเพียงพอสำหรับต้านทานโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักบรรทุก การวิเคราะห์และออกแบบจะคำนวณหาปริมาณเหล็กเสริมอัดแรงเพียงพอต่อการต้านน้ำหนักบรรทุกใช้งาน โดยไม่ทำให้หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตเกินกว่าหน่วยแรงที่ยอมให้ จากนั้นทำการตรวจสอบการรับน้ำหนักสูงสุดของพื้นที่สภาวะประลัยโดยผลจากน้ำหนักบรรทุกคูณด้วยตัวคูณน้ำหนักบรรทุก (Load factor) ต้องไม่เกินกว่ากำลังต้านทานของพื้น พร้อมทั้งทำการตรวจสอบแรงเฉือนและออกแบบเหล็กเสริมรับแรงเฉือน นอกจากนั้นจะพิจารณาการแอ่นตัวที่สภาวะใช้งาน ทั้งที่เกิดขึ้นในทันที และ ตามเวลา ทั้งนี้ในการคำนวณจะเป็นไปตามมาตรฐาน ACI 318-08 [10] และมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง [11] หลังจากนั้นคำนวณหาค่าของวัสดุ



ได้แก่ ปริมาณคอนกรีต ปริมาณเหล็กเสริม ค่าแรง และราคาค่าก่อสร้างที่ทำให้ราคาค่าก่อสร้างรวมต่ำสุด โดยให้ความกว้างแผ่นพื้น เท่ากับ 8.4 เมตร เสามีขนาดหน้าตัดที่ใหญ่เพียงพอ ความกว้างของคาน (Band beam) จะทำการศึกษาเป็น 3 กรณี คือ 1/3 1/4 และ 1/5 ของความกว้างแผ่นพื้น โดยมีความยาวช่วงในแต่ละกรณีเท่ากับ 15 18 และ 20 เมตร ตามลำดับ สำหรับน้ำหนักบรรทุกจร ได้แก่ ส่วนพักอาศัย ส่วนสำนักงาน และส่วนที่จอดรถ มีค่าเท่ากับ 200 300 และ 400 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ตามลำดับ และน้ำหนักบรรทุกตายตัวเพิ่มเติม มีค่าเท่ากับ 120 และ 300 กิโลกรัมต่อตารางเมตร โดยการคำนวณราคาจะอ้างอิงราคาวัสดุและค่าแรงที่เป็นข้อมูลในประเทศไทยจากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างราคาค่าก่อสร้างรวม และความหนาของแต่ละกรณีศึกษา แล้วหาฟังก์ชันพหุนามกำลังสอง ที่ความชันเป็นศูนย์ ($\frac{dy}{dx} = 0$) จะได้ความหนาที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ราคาค่าก่อสร้างรวมต่ำสุดได้

สำหรับความสัมพันธ์ของค่าก่อสร้างรวม และความหนาของแผ่นพื้นไร้คานคอนกรีตอัดแรงภายหลังชนิดมีคานกว้าง ในทุกกรณีมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) มีค่าเท่ากับ 1.0 และสรุปผลได้ว่า สำหรับส่วนพักอาศัย ส่วนสำนักงาน และส่วนที่จอดรถ กรณีความกว้างของคานเท่ากับ 1/3 ของความกว้างพื้น อัตราส่วนความยาวช่วงต่อความหนาพื้นที่เหมาะสม เท่ากับ 34 32 และ 33 กรณีความกว้างของคานเท่ากับ 1/4 ของความกว้างแผ่นพื้น อัตราส่วนความยาวช่วงต่อความหนาพื้นที่เหมาะสม เท่ากับ 33

31 และ 32 และ กรณีความกว้างของคานเท่ากับ 1/5 ของความกว้างแผ่นพื้น อัตราส่วนความยาวช่วงต่อความหนาพื้นที่เหมาะสมเท่ากับ 31 29 และ 30

จากข้อแนะนำ Post-Tensioning Institute [1] เมื่อเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนความยาวช่วงต่อความหนาของแผ่นพื้นไร้คานคอนกรีตอัดแรงภายหลังชนิดมีคานกว้างที่ได้จากการศึกษาสำหรับส่วนพักอาศัย ส่วนสำนักงาน และส่วนที่จอดรถ พบว่ามีความน้อยกว่า ซึ่งกล่าวได้ว่าตามข้อแนะนำของ [1] สามารถใช้ได้กับกรณีศึกษาในงานวิจัย และสำหรับค่าอัตราส่วนความยาวช่วงต่อความหนาของแผ่นพื้นไร้คานคอนกรีตอัดแรงภายหลังชนิดมีคานกว้างที่ได้ศึกษาในงานวิจัยนี้ยังสามารถนำไปใช้ในการออกแบบเบื้องต้นและประมาณราคาได้ในกรณีที่อาคารมีน้ำหนักบรรทุกของพื้น และความยาวช่วงที่ใกล้เคียงอีกด้วย

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] P.R. Gupta, Post-tensioning manual, 6th Ed., The Post-Tensioning Institute, Phoenix, AZ, USA. 2006, pp.174.
- [2] RAM Concept V8i, RAM International., Available: <https://www.bentley.com/en/products/product-line/structural-analysis-software/ram-concept> (Accessed on 24 May 2021)
- [3] CSI SAFE 12, Computers and Structures Inc., Available: <https://www.csiamerica.com/products/safe> (Accessed on 24 May 2021)



- [4] C. Suchinda, A comparison of post-tensioned concrete flat slabs designing results between 2D equivalent frame method and 3D plate finite element method, The 13th National Convention on Civil Engineering, Proceeding, 2008, Art. No. STR-010. (in Thai)
- [5] S. Tongarporn and C. Suchinda, A study to determine optimal thicknesses for post-tension concrete flat slab using 3D plate finite element, The 5th Annual Concrete Conference, Proceeding, 2009, Art. No. STR-7. (in Thai)
- [6] W. Sanghitkul, Optimum design of post-tensioned flat plate, Thesis, Chulalongkorn University, Thailand, 1996. (in Thai)
- [7] A. Teeranupatana, Optimum design of post-tensioned flat plates by the simple method, Thesis, Chulalongkorn University, Thailand, 1999. (in Thai)
- [8] ADAPT structural concrete software, ADATP-PT/RC 2015, Available: https://adaptsolutions.files.wordpress.com/2010/01/pt_rc_2015_user_manual_08282015_v1_0_final.pdf (Accessed on 24 May 2021)
- [9] ACI 318-08, Building code requirements for structural concrete (ACI 318-08) and Commentary, 2008.
- [10] EIT1008-38, Building code requirements for reinforced concrete by the strength design Method, 2015. (in Thai).
- [11] Construction materials price index for November 2017, Economic Indices, Ministry of Commerce, 2017. (in Thai)
- [12] Labor/operation index for quantities take-off and estimating the appraisal cost for construction work, The Comptroller General's Department, Ministry of Finance, 2017. (in Thai)



จลนพลศาสตร์การอบแห้งขมิ้นชั้นแบบชั้นบางด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน

ปาริชาติ ราชมณี¹ สุธิดา พิทักษ์วิชัย² วาณิช นิลนนท์³ และ วุฒิกไร บัวแก้ว^{4*}

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีการอาหาร, คณะเทคโนโลยีการเกษตร, มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

²สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

³สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์,

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

⁴สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

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

วันที่รับบทความ: 20 มกราคม 2564; วันที่ทบทวนบทความ: 15 พฤษภาคม 2564; วันที่ตอบรับบทความ: 17 พฤษภาคม 2564

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 16 มิถุนายน 2564

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งขมิ้นชั้นบางด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลของความชื้น อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง 40 50 60 และ 70 °C ความเร็วลมประมาณ 1 m/s จากผลการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลของความชื้นของขมิ้นชั้น มีค่าอยู่ระหว่าง 3.28×10^{-11} ถึง 1.67×10^{-10} m²/s พารามิเตอร์สี่ L* (ความสว่าง) a* (ค่าความเป็นสีแดง/สีเขียว) และ b* (ค่าสีเหลือง/สีน้ำเงิน) ถูกนำมาใช้เพื่อประมาณการเปลี่ยนแปลงของสีในระหว่างการอบแห้ง ค่า L*, a* และ b* ของขมิ้นชั้นอบแห้งมีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้น นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์ปริมาณสารเคอร์คูมินของขมิ้นสดและขมิ้นแห้งซึ่งถูกทำให้แห้งในอุณหภูมิต่าง ๆ พบว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมีผลต่อการลดปริมาณเคอร์คูมิน ในการทดลองนี้ปริมาณเคอร์คูมินของขมิ้นชั้นแห้งยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของยาสมุนไพร

คำสำคัญ: ขมิ้นชั้น; จลนพลศาสตร์การอบแห้ง; ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลของความชื้น; เครื่องอบแห้งแบบลมร้อน

Thin Layer Drying Kinetics of Turmeric using Hot Air Dryer

Parichat Ratmanee¹, Sutida Phitakwinai², Wanich Nilnont³ and Wutthikrai Buakaew^{4*}

¹ Department of Food Science and Technology, Faculty of Agricultural Technology,
Rajabhat Mahasarakham University

² Department of Mechanical Engineering, Faculty of Industrial Education, Rajamangala University of
Technology Suvarnabhumi

³ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture,
Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

⁴ Department of Mechatronics Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of
Technology Rattanakosin

* Corresponding author, E-mail: wutthikrai.b@rmutr.ac.th

Received: 20 January 2021; Revised 15 May 2021; Accepted: 17 May 2021

Online Published: 16 June 2021

Abstract: This research aims to study the drying kinetics of turmeric using a hot air dryer to investigate the effective moisture diffusivity. The drying temperatures of turmeric are 40, 50, 60 and 70 °C. The air velocity is approximately 1 m/s. The results showed that the effective moisture diffusivity of turmeric was between 3.28×10^{-11} to 1.67×10^{-10} m²/s. Color parameters L* (lightness), a* (redness/greenness) and b* (yellowness/blueness) were used to estimate color changes during drying. L*, a* and b* values of dried turmeric decreased as the drying temperature increased. In addition, the curcumin content of fresh turmeric and dried turmeric, which were dried at various temperatures, were analyzed. It was found that affected the reduction of the curcumin content. In this experiment, the curcumin content of dried turmeric is still within the standard of herbal medicine.

Keywords: Turmeric; Drying kinetics; Effective moisture diffusivity; Hot air dryer



1. บทนำ

เนื่องจากประเทศไทยได้มีความร่วมมือระหว่างภาครัฐและภาคเอกชนในการจัดทำแผนแม่บทแห่งชาติ ว่าด้วยการพัฒนาสมุนไพรไทย ฉบับที่ 1 พ.ศ.2560–2564 [1] เพื่อสร้างความมั่นคงทางสุขภาพและความยั่งยืนของเศรษฐกิจที่สามารถแก้ปัญหาพัฒนา และส่งเสริมสมุนไพรไทยให้ไปไกลระดับโลกได้อย่างมีมาตรฐาน ซึ่งขมิ้นชัน (Turmeric) เป็นหนึ่งในพืชสมุนไพรที่เป็น Product Champions ของประเทศที่รัฐบาลให้การสนับสนุน [2] ขมิ้นชันมีสารประกอบทางเคมีที่แสดงฤทธิ์ทางเภสัชวิทยามีอยู่ 2 ชนิด คือ น้ำมันหอมระเหย (Essential Oil) และสารเคอร์คิวมินอยด์ (Curcuminoids) ภายในสารเคอร์คิวมินอยด์นั้นประกอบด้วยสารหลักอยู่ 3 ชนิด คือ เคอร์คิวมิน (Curcumin, CUR) ดีเมท็อกซีเคอร์คิวมิน (Demethoxycurcumin, DMC) และบิสดีเมท็อกซีเคอร์คิวมิน (Bisdemethoxycurcumin, BDMC) โดยมีสมบัติเป็นสารออกฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ฤทธิ์ต้านการอักเสบ ฤทธิ์ต้านจุลินทรีย์ ฤทธิ์ต้านมะเร็ง และอื่น ๆ [3] จึงนำขมิ้นชันมาใช้ประโยชน์ทั้งด้านอาหาร ยา รักษาโรค เครื่องสำอาง [4-7] ขมิ้นชันสามารถนำมาใช้บริโภคได้ทั้งแบบสดและแบบที่ผ่านการแปรรูปด้วยกรรมวิธีต่าง ๆ เช่น การทำแห้ง การสกัดสาร และการกลั่นน้ำมันหอมระเหย ซึ่งการทำแห้งเป็นกระบวนการที่ลดความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีการต่าง ๆ เช่น การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบเชิงกล [8-11] การอบแห้งด้วยพลังงานร่วม [12-13] การตากแดดธรรมชาติ [11, 14-15] และการอบแห้งด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ [16-19] ที่มีอุปกรณ์ในการเปลี่ยนรูป

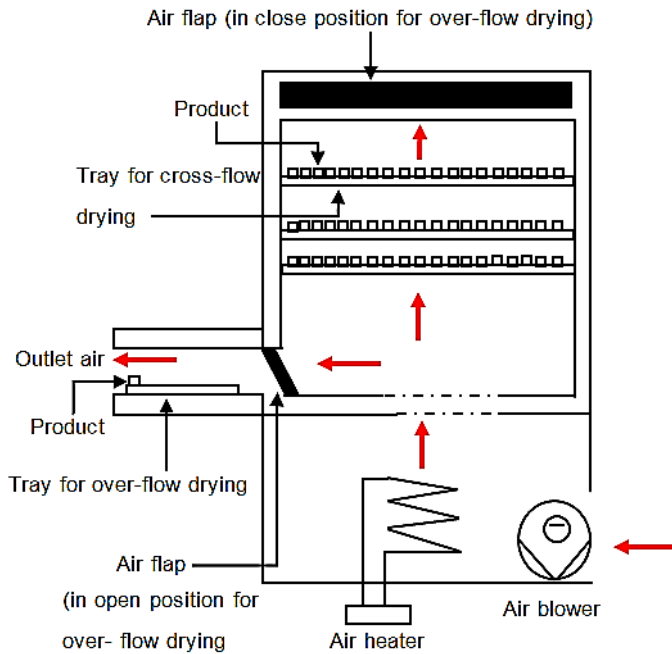
พลังงานรังสีอาทิตย์เป็นพลังงานความร้อนที่เรียกว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Solar Collector) [20-21]

จลนพลศาสตร์ของการอบแห้งของผลิตภัณฑ์มีความสำคัญ เนื่องจากเป็นข้อมูลของการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์กับเวลา ซึ่งจะทำให้ระบุเวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์นั้น ๆ ให้ความชื้นตามที่ต้องการ นอกจากนั้นแล้วยังเป็นข้อมูลสำคัญในการสร้างแบบจำลองเอมพิริคัลซึ่งมักอยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและเวลาในการอบแห้ง โดยที่อัตราส่วนความชื้นมีความสำคัญในแบบจำลองการแพร่ของเหลวซึ่งเป็นการเลียนแบบกฎการแพร่ข้อที่ 2 ของฟิคส์ (Fick's Second Law of Diffusion) [22] ดังนั้นในงานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอผลการศึกษาในรูปแบบจลนพลศาสตร์การอบแห้งขมิ้นชันด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลของความชื้น ซึ่งสามารถใช้เป็นข้อมูลที่สำคัญในการออกแบบเครื่องอบแห้งและทำการหาสารเคอร์คิวมินที่ออกฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระโดยมีอุณหภูมิสำหรับการอบแห้งอยู่ระหว่าง 40 – 70 °C

2. อุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย

2.1 เครื่องอบแห้งแบบลมร้อน

ในการทดลองอบแห้ง ขมิ้นชันจะถูกอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนซึ่งประกอบด้วยชุดลดความร้อนแบบ Air Heater พัดลม (Air Blower) และส่วนของอุปกรณ์ที่ทำการอบแห้ง (Drying Section) การทำงานของเครื่องอบแห้งนี้แสดงได้ดังรูปที่ 1 โดยเริ่มจากพัดลมทำหน้าที่ดูดอากาศจากภายนอก



รูปที่ 1 แผนภาพแสดงการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน

ผ่านขดลวดความร้อนแบบ Air Heater เพื่อปรับอุณหภูมิให้ได้ตามเงื่อนไขการทดลอง จากนั้นอากาศร้อนจะไหลผ่านผลิตภัณฑ์ที่วางอยู่บนถาด เครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนนี้สามารถอบแห้งได้ 2 แบบ คือ การอบแห้งแบบชั้นบางแบบ Parallel Flow ซึ่งเป็นแบบที่ใช้สำหรับการทดลองนี้และการอบแห้งแบบ Cross Flow ถ้าต้องการอบแห้งแบบชั้นบางแบบ Parallel Flow จะปิดฝาเครื่องด้านบน (Air Flap) เพื่อไม่ให้อากาศออกทางด้านบนให้ออกทางด้านข้างเพียงด้านเดียว ซึ่งห้องอบแห้งชั้นบางจะอยู่ทางด้านซ้ายของเครื่องอบแห้ง แต่ถ้าต้องการการอบแห้งแบบ Cross Flow จะปิดฝาเครื่องด้านข้าง (Air Flap) เพื่อไม่ให้อากาศออกทางด้านข้างให้ออกทางด้านบนเพียงด้านเดียว

2.2 วิธีดำเนินการวิจัย

การอบแห้งขมิ้นชันโดยใช้เครื่องอบแห้งแบบลมร้อน ซึ่งเป็นการอบแห้งแบบชั้นบาง ด้วยอากาศร้อนเป็นตัวกลางในการให้ความร้อน อุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการอบแห้งที่ 40 50 60 และ 70 °C และใช้ความเร็วลมที่ประมาณ 1 m/s เนื่องจากขมิ้นชันเป็นผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรที่มีความชื้นไม่สูงมากนัก จึงมีผลทำให้กระบวนการอบแห้งมีการลดลงของความชื้นเป็นแบบอัตราการอบแห้งลดลงเท่านั้น ซึ่งอัตราการระเหยน้ำจะขึ้นอยู่กับความต้านทานต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลน้ำภายในผลิตภัณฑ์ โดยการถ่ายเทความร้อนและมวลไม่ได้เกิดขึ้นที่ผิวอย่างเดียว ดังนั้นความเร็วของอากาศร้อนที่ใช้จึงไม่จำเป็นต้องมีค่าที่สูง



ในส่วนอุณหภูมิของการอบแห้งนั้น อุณหภูมิของผลิตผลจะมีค่าเพิ่มเติมตามอุณหภูมิของอากาศร้อนซึ่งในกรณีการอบแห้งผลิตผลที่เป็นอาหารและวัสดุชีวภาพส่วนใหญ่มักอยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงจึงใช้อุณหภูมิอากาศร้อนที่อบแห้งที่ค่อนข้างต่ำเพื่อให้สอดคล้องกับกลไกการถ่ายเทความร้อนและมวลของน้ำ ซึ่งไม่ก่อให้เกิดความเสียหายในด้านคุณภาพของผลิตผลที่ได้จากการอบแห้ง [23]

ในการเตรียมตัวอย่างทดลองให้นำไขมันชั้นมาล้างเอาชีส์ฝุ่นและสิ่งสกปรกออก จากนั้นนำไขมันชั้นมาลอกเปลือกและหั่นให้มีความหนาประมาณ 3 mm แล้วนำไขมันชั้นวางเรียงกระจายบนถาดไม่วางซ้อนทับกัน ดังแสดงในรูปที่ 2 และทำการชั่งมวล โดยแต่ละถาดมีมวลไขมันชั้นประมาณ 300 g การทดลองนี้จะอบแห้งจนกระทั่งมวลของไขมันชั้นคงที่ซึ่งได้ทำการชั่งมวลทุก ๆ 15 นาที หลังจากนั้นนำมวลไขมันชั้นนั้นไปอบแห้งในเตาอบ (Oven) ที่อุณหภูมิ $105 \pm 2^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตามมาตรฐาน AOAC [24] เพื่อหามวลแห้งของไขมันชั้นและนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าความชื้นระหว่างการอบแห้งต่อไป

ภายในเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนที่ใช้ในการอบแห้งไขมันชั้นได้ติดตั้งเครื่องมือวัดที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ประกอบด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิแบบเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouples) ชนิด K มีค่าความแม่นยำ 0.1°C ในการชั่งมวลของไขมันชั้นระหว่างการอบแห้งใช้เครื่องชั่งแบบ Electronic Balance มีขนาดความสามารถ 3000 g ค่าความแม่นยำ 0.01 กรัม การวัดความเร็วอากาศใช้เครื่องมือวัดแบบ Anemometer ชนิด Hot Wire ของ Emtech รุ่น 45158 ค่าความแม่นยำ $\pm 3\%$



รูปที่ 2 ไขมันชั้นที่ใช้ในการทดลอง

2.3 การคำนวณหาอัตราส่วนความชื้น

อัตราการเปลี่ยนแปลงมวลน้ำในวัสดุเทียบกับความชื้นเริ่มต้นเทียบกับเวลา อัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) คือ ค่าที่บ่งบอกถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลน้ำในวัสดุเทียบกับความชื้นเริ่มต้นเมื่อเวลาการอบแห้งดำเนินไปเป็นเวลาใด ๆ [22-25] เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} \quad (1)$$

โดยที่ MR คือ อัตราส่วนความชื้น, M_0 คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ (%d.b.), M_t คือ ความชื้นของวัสดุที่เวลาใด ๆ (%d.b.) และ M_{eq} คือ ความชื้นสมดุลของวัสดุ (%d.b.) ซึ่งเป็นค่าบ่งบอกถึงปริมาณน้ำที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์ ณ อุณหภูมิต่าง ๆ ที่เกิดภาวะสมดุลระหว่างไอน้ำในวัสดุและไอน้ำในอากาศ หรือกล่าวได้ว่าเป็นภาวะที่ไอน้ำไม่ระเหยออกจากวัสดุเนื่องจากมีภาวะสมดุลกับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่อยู่รอบ ๆ วัสดุนั้น กรณีสภาพอากาศที่ใช้อบแห้งต่างกันจะมีความชื้นสมดุลที่ต่างกัน การอบแห้งที่ใช้เวลายาวนานพบว่าความชื้นเริ่มต้นของวัสดุจะมีค่ามากกว่าความชื้นสมดุลมาก ๆ ทำให้สามารถหาอัตราส่วนความชื้นได้จากสมการ (2) [22, 26] และ



ความชื้นของวัสดุตามมาตรฐานแห้งหาได้จากสมการ (3)

$$MR = \frac{M_t}{M_o} \quad (2)$$

$$M = \frac{m_i - m_d}{m_d} \quad (3)$$

เมื่อ M คือความชื้นของวัสดุมาตรฐานแห้ง (%), m_i คือมวลเริ่มต้น (kg) และ m_d คือมวลแห้งของวัสดุ (kg)

2.4 การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลของความชื้น

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลของความชื้น (Effective Moisture Diffusivity, D_{eff}) ของขม้นชั้นในกระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อน ทำการวิเคราะห์โดยมีสมมติฐานการถ่ายเทความชื้นที่เป็นไปตามกฎการแพร่ของฟิคส์ (Fick's Diffusion) ซึ่งพิจารณาการถ่ายเทความชื้นจากภายในวัสดุมายังผิวด้วยสมบัตการแพร่ยังผลของความชื้นเพียงอย่างเดียว โดยมีการแปรค่าของความชื้นที่จุดต่าง ๆ ในวัสดุที่เป็นไปตามสมการแพร่ของฟิคส์ [22] ดังนี้

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla(D_{eff}(\nabla M)) \quad (4)$$

เมื่อ D_{eff} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลของความชื้นในวัสดุ (m^2/s) และ t คือเวลาในการอบแห้ง (s)

ในการหาการแปรค่าของความชื้นตามตำแหน่งในช่วงเวลาการอบแห้งสามารถหาผลเฉลยได้ด้วยวิธีแบบวิเคราะห์ (Analytical Solution) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลของความชื้นมีค่าคงที่ตลอดในช่วงเวลาการอบแห้ง ความชื้นมีการเคลื่อนที่ออก

จากวัสดุเป็นแบบหนึ่งมิติ ไม่คิดการหดตัวของวัสดุ ในกรณีวัสดุเป็นแผ่นเรียบสามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้ [22, 27]

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(- (2n+1)^2 \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (5)$$

โดยที่เมื่อแทนค่า n ในสมการ (5) จะพบว่า $n = 1, 2, 3$ ขึ้นไปจะได้พจน์ที่มีค่าน้อยลงตามลำดับ ดังนั้นจึงแทนค่า $n = 0$ ลงในสมการ (5) ทำให้ได้สมการ MR ที่มีความสัมพันธ์กับสมบัตการแพร่ยังผลของความชื้นดังนี้ [28]

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(- \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) \quad (6)$$

เมื่อ L คือครึ่งส่วนของความหนาชั้นขม้นชั้น (m) สมการ (6) ทำการจัดรูปใหม่ให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงรูปมาตรฐาน ($y = mx \pm c$) ที่อยู่ในรูปของ Logarithmic ดังนี้

$$\ln MR = \left(- \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right) + \ln \frac{8}{\pi^2} \quad (7)$$

จากสมการ (7) จะเห็นได้ว่า $-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}$ คือความชันของกราฟที่มีค่าลดลงเมื่อเวลา t เพิ่มขึ้น และ $\ln \frac{8}{\pi^2}$ คือจุดตัดบนแกน $+y$ ซึ่งเมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\ln MR$ ที่มีความสัมพันธ์กับ t สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลของความชื้นได้จากสมการดังนี้

$$D_{eff} = (\text{slope}) \frac{4L^2}{\pi^2} \quad (8)$$



2.5 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพด้านสี

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพด้านสี ด้วยเครื่องวัดสี (Colorimeter) ของ Hunter Lab รุ่น ColorFlex EZ ทำการทดสอบวัดค่าสีขึ้นตัวอย่างไขมันชั้นซึ่งผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 40 50 60 และ 70 °C จำนวน 5 ซ้ำ ต่อ 1 ตัวอย่าง โดยทำการวิเคราะห์ค่าความสว่าง (L^*) ค่าสีเขียว-สีแดง (a^*) ค่าสีน้ำเงิน-สีเหลือง (b^*) ซึ่งค่า L^* ที่เข้าใกล้ 100 หมายถึง ตัวอย่างมีความสว่างมากจนเป็นสีขาวหรือ สีจาง แต่ถ้าค่า L^* เข้าใกล้ 0 หมายถึง ตัวอย่างมีความสว่างน้อยลงจนเป็นสีคล้ำ ส่วนค่า a^* ที่เป็นบวก แสดงว่า ตัวอย่างเป็นสีแดง แต่ถ้าค่า a^* ที่เป็นลบ แสดงว่า ตัวอย่างเป็นสีเขียว และในค่า b^* ที่เป็นบวกแสดงว่า ตัวอย่างเป็นสีเหลือง แต่ถ้าค่า b^* เป็นลบแสดงว่า ตัวอย่างเป็นสีน้ำเงิน [29]

2.6 การวิเคราะห์หาปริมาณสารเคอร์คูมิน

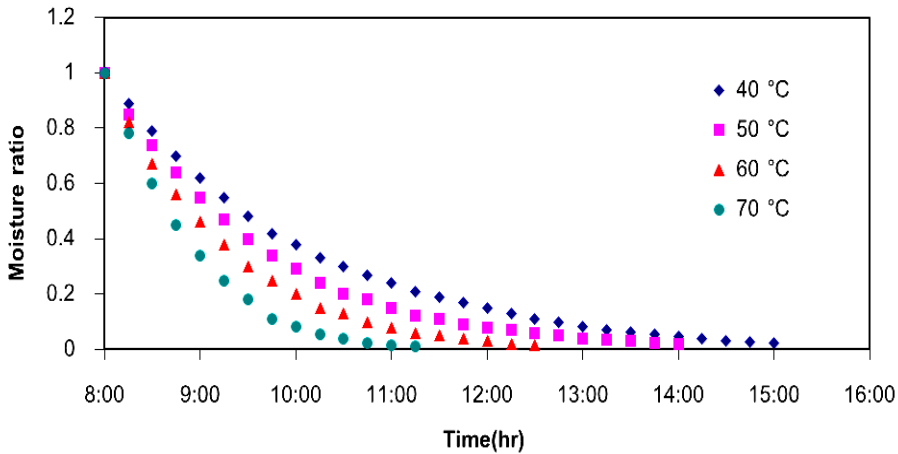
ในการวิเคราะห์หาปริมาณสารเคอร์คูมิน ด้วยการสกัดสารเคอร์คูมินในไขมันชั้น โดยนำไขมันชั้นปริมาณ 0.3 g ละลายใน 95% เอทานอลปริมาตร 10 ml เก็บไว้ที่ขวดสีชาปิดฝาให้สนิท วางไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 หลังจากนั้นบีบเอาตัวอย่างจากขวดสีชามา 0.2 ml ใส่ในปิเปตเจอร์ขนาด 15 ml แล้วเติมตัวทำละลาย 95% เอทานอลปริมาตร 5 ml หลังจากนั้นบีบเอา 0.2 ml ใส่ลงในขวดวัดปริมาตร 10 ml แล้วปรับปริมาตรตัวทำละลาย 95% เอทานอลปริมาตร 10 ml นำตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณเคอร์คูมินที่สกัดได้โดยใช้เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-visible Spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น

425 นาโนเมตร ซึ่งเป็นค่าการดูดกลืนคลื่นแสงสูงสุดของสารสกัดเคอร์คูมินที่วัดได้จากนั้นนำไปทำกราฟมาตรฐาน [30]

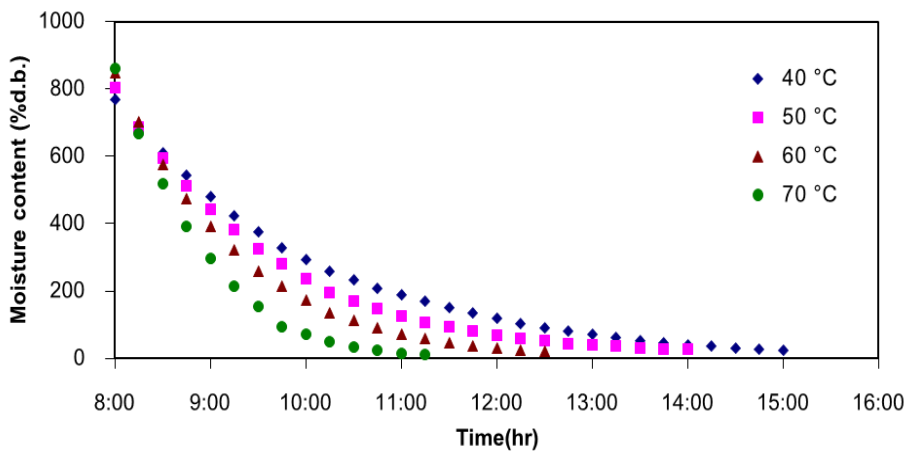
3. ผลการทดลอง

3.1 ผลการทดลองศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้ง

ในการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้ง โดยทำการอบแห้งไขมันชั้น ซึ่งทำการทดลองอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและความเร็วของอากาศอบแห้ง โดยทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 40 50 60 และ 70 °C และความเร็วของอากาศมีค่าเท่ากับ 1 m/s โดยใช้ตัวอย่างของไขมันชั้นที่มีมวลเริ่มต้นในการอบแห้งจำนวน 300 g ทำการชั่งทุก ๆ 15 นาทีจนกระทั่งมวลของไขมันชั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลง พบว่าตลอดระยะเวลาในการอบแห้งไขมันชั้นนั้นจะมีอัตราการลดลงของความชื้นที่แตกต่างกัน โดยอัตราเปลี่ยนแปลงความชื้นในไขมันชั้นในช่วงระยะเริ่มต้นจะมีค่าสูงหรือปริมาณความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งเป็นการลดลงของปริมาณความชื้นฐานแห้งเทียบกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง และรูปที่ 4 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความชื้นในรูปอัตราส่วนความชื้นที่เป็นการเปลี่ยนแปลงของความชื้นในแต่ละช่วงเวลาของการอบแห้งเทียบกับความชื้นเริ่มต้น โดยที่อัตราส่วนความชื้นจะเป็นตัวแปรที่สำคัญในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลของความชื้น (D_{eff}) น้ำที่อยู่ในไขมันชั้นจะมีอยู่มาก เมื่ออากาศร้อนที่มีค่าความชื้นจำเพาะคงที่แต่ค่าความจุความชื้นสูงขึ้นตามระดับอุณหภูมิมาสัมผัสกับผลิตภัณฑ์ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นกับเวลาในการอบแห้งขมิ้นชันที่อุณหภูมิต่าง ๆ



รูปที่ 4 การอบแห้งขมิ้นชันแบบชั้นบางที่อุณหภูมิต่าง ๆ

จะเกิดการถ่ายเทความร้อนออกจากอากาศมายังผลิตภัณฑ์ โดยความร้อนนี้จะทำให้พลังงานที่อยู่ในโมเลกุลของน้ำที่ผลิตภัณฑ์สูงขึ้นและเคลื่อนที่ออกจากผลิตภัณฑ์สู่ผิวด้วยการแพร่และระเหยออกสู่อากาศอบแห้ง ทำให้ความชื้นจำเพาะและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศอบแห้งมีปริมาณสูงขึ้น ในขณะที่

อุณหภูมิของอากาศที่ภาวะนี้มีค่าลดต่ำลงก่อนออกจากเครื่องอบแห้ง ซึ่งพบว่าอุณหภูมิมอบแห้งที่สูงจะใช้เวลาการอบแห้งน้อยที่สุด ซึ่งอุณหภูมิมอบแห้ง 70 °C จะใช้เวลาประมาณ 3 ชั่วโมง 15 นาที โดยผลการทดลองดังกล่าวมีผลที่สอดคล้องกับการอบแห้งกาแฟ [31] และการอบแห้งมะม่วงสุก [27]



3.2 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลของความชื้น

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลของความชื้น (Effective Moisture Diffusivity, D_{eff}) ของขมิ้นชั้นใน กระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อนที่หาจากสมการแพร่ของฟิคส์ พบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 3.28×10^{-11} m²/s และ 1.67×10^{-10} m²/s ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลของความชื้นที่ได้นี้เป็นค่าที่อยู่ในช่วงของสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลของอาหารประเภทผักและผลไม้ที่มีการอบแห้งโดยมีค่าอยู่ระหว่าง 10^{-8} m²/s ถึง 10^{-12} m²/s [32] จากการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลของความชื้นนี้มีค่าสูงขึ้นตามอุณหภูมิการอบแห้ง ทั้งนี้เนื่องจากพลังงานความร้อนที่มีค่าสูงขึ้นตามระดับอุณหภูมิของการอบแห้งนี้จะไปทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของน้ำที่มีผลทำให้โมเลกุลเป็นอิสระต่อกันเพิ่มขึ้นและแพร่ออกมาที่อากาศอบแห้งได้มากตามระดับอุณหภูมิอบแห้ง

3.3 คุณภาพสีของขมิ้นชั้น

การทดสอบคุณภาพสีของขมิ้นชั้นทั้งก่อนและหลังทำการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนซึ่งทำการทดสอบด้วยเครื่องวัดสีอาหารยี่ห้อ Hunter Lab รุ่น ColorFlex EZ โดยวัดวิเคราะห์ค่าสีของขมิ้นชั้นอบแห้งในเทอมของตัวแปร L^* , a^* และ b^* ทำการวัดสีตัวอย่าง 5 ซ้ำ ซึ่งได้ผลการทดลองเป็นค่าเฉลี่ยดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่าขมิ้นสดเทียบกับขมิ้นอบแห้งที่อุณหภูมิต่างกันมีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ในการอบแห้งจะส่งผลต่อ คุณภาพสีของขมิ้นชั้น คือ ค่าความสว่างหรือมืด (L^*) ค่าความเป็นสีแดงหรือเขียว (a^*) และค่าสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน (b^*) ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่า

ตารางที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลของความชื้น

Temperature (°C)	Diffusivity (m ² /s)
40	3.28×10^{-11}
50	4.38×10^{-11}
60	9.02×10^{-11}
70	1.67×10^{-10}

เมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น จะส่งผลต่อคุณภาพสีของขมิ้นชั้น ซึ่งค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าสีเหลือง (b^*) มีแนวโน้มที่จะลดลงที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yomsungnoen [33] จากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง จะส่งผลทำให้รงควัตถุหรือสารให้สีถูกทำลายและสลายตัวได้ ความร้อนการอบแห้งจะทำให้เกิดการสูญเสียน้ำและความชื้น รวมทั้งมีการสลายตัวและการรวมตัวของกรดอะมิโนกับสารประกอบรีดิวซ์ซึ่งในระหว่างการอบแห้งจะมีการเคลื่อนที่ของไอน้ำและความชื้นผ่านชั้นผิวของวัตถุดิบเกิดเป็นปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard Reaction) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาสีน้ำตาลชนิดที่ไม่เกี่ยวกับเอนไซม์ (Non-enzymatic Browning Reaction) เป็นการเกิด ปฏิกิริยาระหว่างน้ำตาลรีดิวซ์ (Reducing Sugar) กับกรดอะมิโนโปรตีน หรือสารประกอบไนโตรเจนอื่นๆ โดยความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้วัตถุดิบหรือผลิตภัณฑ์อบแห้งมีสีเข้มขึ้น และโดยทั่วไปการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ พีเอช ปริมาณความชื้นของวัตถุดิบหรือผลิตภัณฑ์และเวลาในการอบแห้ง ซึ่งการเกิดสีน้ำตาลจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น [34]



ตารางที่ 2 การวิเคราะห์ค่าสีของขมิ้นสดเทียบกับขมิ้นที่อบแห้งจากสภาวะต่างกัน

ตัวอย่าง	ค่าสี		
	L*	a*	b*
ขมิ้นสด	43.55 ± 2.39 ^{bc}	29.89 ± 1.57 ^a	48.95 ± 2.46 ^{bc}
อุณหภูมิ 40 °C	48.85 ± 0.70 ^a	30.09 ± 1.34 ^a	53.23 ± 0.81 ^a
อุณหภูมิ 50 °C	47.43 ± 2.56 ^a	26.34 ± 1.54 ^b	49.73 ± 2.92 ^b
อุณหภูมิ 60 °C	40.67 ± 2.34 ^c	24.48 ± 0.81 ^c	45.88 ± 2.33 ^c
อุณหภูมิ 70 °C	39.13 ± 3.48 ^d	23.21 ± 0.84 ^c	41.91 ± 3.81 ^d

หมายเหตุ : a, b, c, d = ตัวอักษรกำกับของตัวเลขที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

3.4 ปริมาณสารเคอร์คูมินในขมิ้นชั้น

จากการวิเคราะห์ปริมาณสารเคอร์คูมินขมิ้นสดและขมิ้นที่อบแห้งในสภาวะต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งมีผลต่อปริมาณสารเคอร์คูมิน อุณหภูมิสูงขึ้นมีผลต่อปริมาณสารเคอร์คูมินลดลงที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยที่ความร้อนในการอบแห้ง มีผลต่อการทำลายผนังเซลล์พืช ทำให้เมื่อนำขมิ้นชั้นที่ผ่านการอบแห้งมาสกัดเพื่อหาสารเคอร์คูมิน จึงสามารถสกัดสารออกมาได้มาก ซึ่งการอบแห้งขมิ้นชั้นที่อุณหภูมิ 40 50 60 และ 70 °C มีผลต่อปริมาณสารเคอร์คูมินที่สกัดได้ แต่อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิที่อบแห้งเพิ่มสูงขึ้น จะส่งผลให้ปริมาณสารเคอร์คูมินลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยที่อุณหภูมิที่อบแห้งที่ 40 °C มีปริมาณสารเคอร์คูมินมากที่สุด อยู่ที่ 4.526 ± 0.19 ซึ่งการอบแห้งเป็นการให้ความร้อนที่สัมผัสโดยตรงจะส่งผลต่อการสลายของสารเคอร์คูมิน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย Suresh et al. [35] และอุณหภูมิที่แตกต่างในการอบแห้ง เมื่อเทียบปริมาณ

สารเคอร์คูมินที่พบในขมิ้นชั้นที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนกับมาตรฐานยาสมุนไพรไทย ซึ่งกำหนดให้วัตถุขมิ้นชั้นที่เป็นผงแห้งต้องมีปริมาณเคอร์คูมิน

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์ปริมาณสารเคอร์คูมินที่สกัดจากขมิ้นสดและขมิ้นที่อบแห้งจากสภาวะต่างกัน

ตัวอย่าง	ปริมาณสารเคอร์คูมิน (mg/L)
ขมิ้นสด	0.724 ± 0.19 ^e
อุณหภูมิ 40 °C	4.526 ± 0.19 ^a
อุณหภูมิ 50 °C	3.369 ± 0.19 ^b
อุณหภูมิ 60 °C	2.597 ± 0.07 ^c
อุณหภูมิ 70 °C	2.493 ± 0.18 ^d

หมายเหตุ : a, b, c, d = ตัวอักษรกำกับของตัวเลขที่แตกต่างกันในแนวตั้ง ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95



4. บทสรุป

จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งขมิ้นชันด้วยการอบแห้งแบบลมร้อนที่มีอุณหภูมิอบแห้ง 40 50 60 และ 70 °C พบว่าอัตราการลดลงของความชื้นจะสูงขึ้นตามอุณหภูมิการอบแห้ง ซึ่งการอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 °C ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยสุด และมีอัตราการอบแห้งแบบลดลงเพียงอย่างเดียว สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลของความชื้น (D_{eff}) ของขมิ้นชันที่หาได้จากแบบจำลองของ Fick's diffusion พบว่ามีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ 70 °C โดยมีค่า 1.67×10^{-10} m²/s และมีค่าต่ำสุดที่อุณหภูมิ 40 °C โดยมีค่า 3.28×10^{-11} m²/s ในส่วนของค่าสี ค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าสีเหลือง (b^*) มีแนวโน้มที่จะลดลง เมื่ออุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้น และปริมาณสารเคอร์คูมินพบว่ามีอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานยาสมุนไพรในการใช้อุณหภูมิการอบแห้งทั้ง 4 ระดับอุณหภูมิ ซึ่งผลการศึกษาในครั้งนี้สามารถใช้ข้อมูลที่ได้ออกมาทดลองนี้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการพัฒนาออกแบบระบบอบแห้งให้มีความเหมาะสมต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ที่สนับสนุนทุนวิจัย ตลอดจนสาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและคณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ และสาขาวิชาเทคโนโลยีการอาหาร คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ที่ให้การสนับสนุนในด้านเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับดำเนินการทดลอง

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] https://www.dtam.moph.go.th/index.php?option=com_content&view=article&id=1672%3Adl0021&catid=42&Itemid=334&lang=th&fbclid=IwAR33GYWmnyKi75lr5o1v5t7uLyF0MMaZ7olwIXSrvxNFEa78Mh3HGifrh2l (Accessed on 14 June 2021), (In Thai)
- [2] https://www.ditp.go.th/ditp_web61/article_sub_view.php?filename=contents_attach/607229/607229.pdf&title=607229&cate=1143&d=0 (Accessed on 14 June 2021), (In Thai)
- [3] C. Changtam, Usefulness and various biological activities of *Curcuma longa* L., Huachiew Chalermprakiet Science and Technology Journal, 2015, 1(2), 94-109. (In Thai)
- [4] H.P. Ammon and M.A. Wahl, Pharmacology of curcuma longa, *Planta Medica*, 1991, 57(1), 1-7.
- [5] P.R. Waghmare, P.G. Kakade, P.L. Takdhat, A.M. Nagrale, S.M. Thakare, and M.M. Parate, Turmeric as medicinal plant for the treatment of acne vulgaris, *PharmaTutor*, 2017, 5(4), 19-27.
- [6] C. Swaddichai and S. Im-iam, Turmeric, *The Journal of Prapokkiao Hospital Clinical Medical Education Center*, 2016, 33(3), 265-270. (In Thai)



- [7] S. Onsurathum, S. Pinlaor and T. Boonmars Effect of curcumin on opisthorchiasis and cholangiocarcinoma in animal models, Srinagarind Medical Journal, 2012, 27(supplement), 389-396. (In Thai)
- [8] C. Niamnuy, J. Siwawut and R. Kadeedang (2012) Kinetics of Drying and Phenolic Compound Changes of *Centella asiatica* (Linn.) Urban During Hot Air Drying, Agricultural Science Journal, 43(3), 208-211. (In Thai)
- [9] P. Toomthong and U. Teeboonma (2010) Drying Kinetic and Diffusion Coefficient of *Tilapia Nilotica*, UBU Engineering Journal, 3(2), 9-16. (In Thai)
- [10] N. Phosee, P. Khongbutr, K. Uttamating and R. Assawarachan, Effect of temperature on moisture ratio and color changes of mint leaves during hot air drying process, RMUTSB Academic Journal, 2013, 1(2), 103-114. (In Thai)
- [11] S. Sharma, K. Dhalsamant, P.P. Tripathy and R.K. Manepally, Quality analysis and drying characteristics of turmeric (*Curcuma longa* L.) dried by hot air and direct solar dryers, LWT Food Science and Technology, 2021, 138, 110687.
- [12] N. Seanmeema, N. Poomsa-ad, and L. Wiset, Curcumin drying by heat pump dryer, Journal of Science and Technology Mahasarakham University, 2013, 32(5), 631-635. (In Thai)
- [13] N. Krachang and N. Uengkimbuan, Kinetics and modeling of turmeric using hot air and infrared drying, Burapha Science Journal, 2016, 21(3), 239-248. (In Thai)
- [14] J. Prasad and V.K. Vijay, Open sun drying of *tinospora cordifolia*, *Curcuma longa* L. and *zingiber officinale*. Thermal analysis, Food Science and Technology International, 2005, 11(6), 409-416.
- [15] H. Essalhi, M. Benchrifa, R. Tadili, and M.N. Bargach, Experimental and theoretical analysis of drying grapes under an indirect solar dryer and in open sun, Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2018, 49, 58-64.
- [16] A.K. Karthikeyan and S. Murugavelh, Thin layer drying kinetics and exergy analysis of turmeric (*Curcuma longa*) in a mixed mode forced convection solar tunnel dryer, Renewable Energy, 2018, 128(Part A), 305-312.



- [17] D.K. Rabha, P. Muthukumar and C. Somayaji, Energy and exergy analyses of the solar drying processes of ghost chilli pepper and ginger, *Renewable Energy*, 2017, 105, 764-773.
- [18] S. Janjai, N. Lamlert, P. Intawee, B. Mahayothee, J. Müller, B. K. Bala and M. Nagle, Experimental and simulated performance of a PV-ventilated solar greenhouse dryer for drying of peeled longan and banana, *Solar Energy*, 2009, 83(9), 1550–1565.
- [19] W. Nilnont and S. Phitakwinai, Energy and exergy potential assessment of solar tunnel dryer, *Engineering Journal of Research and Development*, 2019, 30(3), 91-107. (In Thai)
- [20] S. Puban and V. Chantawong, Drying of katoy squid using solar thermal energy, *The Journal of Industrial Technology*, 2015, 11(1), 78 – 87. (in Thai)
- [21] W. Nilnont and S. Phitakwinai, Performance assessment of flat plate solar collector, *The Journal of Industrial Technology*, 2018, 14(3), 116-137. (In Thai)
- [22] J. Crank, *The mathematics of diffusion*. 2nd ed., Oxford University Press, London, 1975.
- [23] S. Devahastin, *Drying of foods and biomaterials*, Top publishing Co., Ltd., Bangkok, 2012.
- [24] AOAC. *Official methods of analysis*, 18th ed., Association of Official Analytical Chemists, Washington, DC. 2006.
- [25] I. Doymaz, Drying behaviour of green beans, *Journal of Food Engineering*, 2005, 69(2), 161-165.
- [26] B.K. Bala, *Drying and storage of cereal grains*. Oxford & IBH Publishing Co. Pvt. Ltd., New Delhi, 1997.
- [27] W. Nilnont and S. Phitakwinai, Drying kinetics of mango using solar tunnel dryer, *The Journal of KMUTNB*, 2020, 30(1), 36-47. (In Thai)
- [28] D. Evin, Thin layer drying kinetics of *Gundelia tournefortii* L., *Food and Bioproducts Processing*, 2012, 90(2), 323–332.
- [29] A. Hamathulin, S. Simla, S. Boontang and S. Inchuen, Relationship between color value and anthocyanin content in purple waxy corn germplasm, *Khon Kaen Agriculture Journal*, 2012, 40(supplement), 59-64. (In Thai)
- [30] J. Kamfu and K. Jamjang, Determination of Curcumin from *Alpinia galangal*, *Boesenbergia rotunda*, The 5th Kamphaeng Phet Rajabhat University National Conference, Proceeding, 2018, 642-647. (In Thai)



- [31] S. Phitakwinai, S. Thepa and W. Nilnont, Thin-layer drying of parchment Arabica coffee by controlling temperature and relative humidity, 2019, Food Science and Nutrition, 7(9), 2921-2931.
- [32] I. Doymaz, Evaluation of some thin-layer drying models of persimmon slices (Diospyros kaki L.), Energy Conversion and Management, 2012, 56, 199-205.
- [33] Y. Yomsungnoen, Y. Waiprib, and A. Tongta, Effects of temperature and velocity of superheated steam on moisture content and color of dried turmeric, Agricultural Science Journal, 2014, 45(2, supplement), 697-700. (In Thai)
- [34] N. Ratanapanon, Non-enzymatic browning, Food Chemistry Book, Odeonstore, Bangkok, 2002, pp. 321.
- [35] D. Suresh, H. Manjunatha, and K. Srinivasan, Effect of heat processing of spices on the concentrations of their bioactive principles: Turmeric (*Curcuma longa*), red pepper (*Capsicum annuum*) and black pepper (*Piper nigrum*), Journal of Food Composition and Analysis, 2017, 20(3-4), 346–351.



ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางปลายอิเล็กโทรดสำหรับการเชื่อมชิ้นงาน ความหนาต่างกันในกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด

สิทธิพงษ์ แสงอินทร์*

ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมการเชื่อม, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

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

วันที่รับบทความ: 2 เมษายน 2564; วันที่ทบทวนบทความ: 12 พฤษภาคม 2564; วันที่ตอบรับบทความ: 17 พฤษภาคม 2564
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 16 มิถุนายน 2564

บทคัดย่อ: กระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดโดยเฉพาะการเชื่อมโลหะที่มีความหนาต่างกันและการใช้อิเล็กโทรดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากันในการเชื่อมนั้น ส่งผลให้ชิ้นงานทั้งสองด้านเกิดการหลอมละลายไม่สมดุลกัน เนื่องจากโลหะทั้งสองด้านเกิดความต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกัน โลหะด้านที่มีความหนาน้อยกว่าจะถูกหลอมละลายมากกว่าทำให้ชิ้นงานหลอมละลายไม่สมบูรณ์ บางครั้งอาจเกิดการหลอมทะลุของชิ้นงานด้านที่มีความหนาน้อยกว่า ดังนั้นจึงเป็นที่มาของการศึกษาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางปลายอิเล็กโทรดสำหรับการเชื่อมชิ้นงานที่ความหนาต่างกันในกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุดโดยได้ทำการทดลองเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน ASTM A36 ความหนา 1 มิลลิเมตร กับความหนา 2 มิลลิเมตร เลือกใช้ปลายอิเล็กโทรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร และ 6.5 มิลลิเมตร กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 5000 5500 และ 6000 แอมแปร์ ช่วงเวลาการทำงาน 45 ไซเคิล แรงกด 1600 นิวตัน ทำการเชื่อมโดยเริ่มจากการเลือกใช้เส้นผ่านศูนย์กลางปลายอิเล็กโทรดขนาดเดียว จากนั้นจึงเปลี่ยนขนาดปลายอิเล็กโทรดให้มีขนาดที่ต่างกัน จากผลการศึกษสามารถสรุปผลการทดลองได้ว่า การเลือกใช้ปลายอิเล็กโทรดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร สัมผัสกับชิ้นงานด้านที่มีความหนา 1 มิลลิเมตร และใช้ปลายอิเล็กโทรดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 มิลลิเมตร สัมผัสกับชิ้นงานด้านที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร จะให้รอยเชื่อมที่สมบูรณ์ เนื่องจากความต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าและความร้อนสมดุลกัน ส่งผลให้ชิ้นงานมีความต้านทานแรงดึงสูงสุด

คำสำคัญ: เส้นผ่านศูนย์กลางปลายอิเล็กโทรด; การเชื่อมความต้านทานแบบจุด; การสมดุลความร้อน

Electrode Tip Diameters for Different Thickness Workpieces in Resistance Spot Welding

Sittipong Sang-in *

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

* Corresponding author, E-mail: sittipong.a@cit.kmutnb.ac.th

Received: 2 April 2021; Revised 12 May 2021; Accepted: 17 May 2021

Online Published: 16 June 2021

Abstract: In resistance spot welding, especially the welding of metals with different thicknesses but with the electrode with the same diameter, it resulted in both sides of the workpiece had unbalanced melting. It was due to the metals in both sides had the resistance to the electric flow differently the metal on the side with less thickness was melted more, making the incomplete melting. Sometimes there was the penetrating melting through the thinner workpiece side. Accordingly, there was the study of the electrode tip diameters for workpieces with different thicknesses in resistance spot welding. There was a trial of welding carbon steel ASTM A36 with the thickness of 1 mm and 2 mm, the electrode tip diameters of 6.5 and 8 mm were chosen, the welding current 5000, 5500 and 6000 Amp, the working period 45 cycles and the pressing force 1,600 N. The welding began with first using the same-diameter electrode tip, then with different-diameter tips. From the study result, it could be concluded that the use of the electrode tip with the diameter 8 mm in contact with the workpiece side 1 mm and the diameter 6.5 mm with 2-mm thickness gave the perfect welds. It was because the resistance of electric flow and the heat was balanced, making it had maximum tensile strength.

Keywords: Electrode Tip Diameters; Resistance Spot Welding; Heat Balance



1. บทนำ

การเชื่อมความต้านทานแบบจุดเป็นกระบวนการเชื่อมที่นิยมใช้กันในอุตสาหกรรมยานยนต์และอุตสาหกรรมอื่นอีกมากมาย เนื่องจากข้อดีของการเชื่อมความต้านทานแบบจุดนั้น สามารถทำการเชื่อมได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังมีผลกระทบต่อความร้อนน้อย กระบวนการเชื่อมชนิดนี้อาศัยหลักความต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าในการให้ความร้อน จากนั้นกดอิเล็กโทรดค้างไว้เพื่อให้บริเวณชิ้นงานหลอมละลายติดกัน

สำหรับขั้นตอนการเชื่อมความต้านทาน ชิ้นงานจะถูกวางให้ซ้อนกันอยู่ระหว่างแท่งอิเล็กโทรดทั้งสองของเครื่องเชื่อม โดยอิเล็กโทรดจะกดชิ้นงานเอาไว้เมื่อปล่อยกระแสไหลผ่าน จะเกิดความต้านทานบริเวณผิวสัมผัสของชิ้นงานทั้งสอง ความร้อนหลอมละลายผิวงาน แรงกดทำให้ชิ้นงานหลอมละลายเป็นเนื้อเดียวกัน ขณะเดียวกันกระแสไฟฟ้าจะถูกตัด และอิเล็กโทรดจะกดอัดต่อเนื่องอีกสักครู่ เพื่อให้รอยเชื่อมเย็นตัว แล้วอิเล็กโทรดก็จะปล่อยชิ้นงาน ซึ่งผลจากการเชื่อมจะได้รอยเชื่อมเป็นจุด มีขนาดเท่ากับพื้นที่หน้าตัดของอิเล็กโทรด [1]

ปัญหาที่เกิดขึ้นในการเชื่อมความต้านทานแบบจุด โดยเฉพาะการเชื่อมโลหะที่มีความหนาต่างกัน ใช้อิเล็กโทรดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากันในการเชื่อมนั้นได้ส่งผลต่อขนาดรอยเชื่อม โดยโลหะด้านที่มีความหนาน้อยกว่าถูกหลอมละลายมากกว่าทำให้ชิ้นงานหลอมละลายไม่สมบูรณ์ในด้านที่มีความหนามากกว่า บางครั้งอาจเกิดการหลอมทะลุของชิ้นงานด้านที่มีความหนาน้อยกว่า หรืออาจส่งผลให้เกิดข้อบกพร่องของรอยเชื่อม ทำให้มีคุณภาพไม่เหมาะสมต่อการ

นำไปใช้งาน นอกจากนี้ในงานวิจัยที่ผ่านมาของ Girish Kelkar (2007) [2] ได้พบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อการสมมูลความร้อนและความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมได้แก่ การเลือกวัสดุที่จะนำมาทำเป็นอิเล็กโทรด ขนาดของอิเล็กโทรด และรูปร่างของปลายอิเล็กโทรด

จากปัญหาดังกล่าวข้างต้น บทความวิจัยนี้จึงขอเสนอการศึกษาวิจัยเพื่อเลือกอิเล็กโทรดที่ใช้ในการเชื่อมความต้านทานแบบจุด โดยออกแบบให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปลายหัวอิเล็กโทรดที่ต่างจากกัน สำหรับการเชื่อมโลหะความหนาต่างกัน การวิจัยพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับขนาดของอิเล็กโทรด และการทดสอบคุณภาพทางกลของรอยเชื่อม เพื่อให้ได้รอยเชื่อมที่มีคุณภาพและเหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดสอบ

อิเล็กโทรดทองแดงจัดเตรียมรูปร่างตามมาตรฐาน AWS C1.1M/C1.1 [3] ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร วัสดุงานเป็นเหล็กกล้าคาร์บอน ASTM A36 มีส่วนผสมทางเคมีตามมาตรฐานอ้างอิงดังตารางที่ 1 และสมบัติทางกลดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมี [4]

Chemical Composition (% weight, max)				
C	Si	Mn	P	S
0.26	0.40	-	0.04	0.05

ตารางที่ 2 สมบัติทางกล [4]

Mechanical Properties		
Tensile Strength (MPa)	Yield Point (MPa, min)	Elongation, (% min)
450 – 550	250	20



ในการวิจัยได้ออกแบบอิเล็กโทรดชนิดปลายหน้าตัดราบเรียบ โดยการจัดทำอิเล็กโทรด 2 ชิ้น เพื่อใช้ในการทดสอบหาตัวแปรการเชื่อมความต้านทานที่ส่งผลต่อความต้านทานแรงดึงและขนาดของรอยเชื่อมจุด

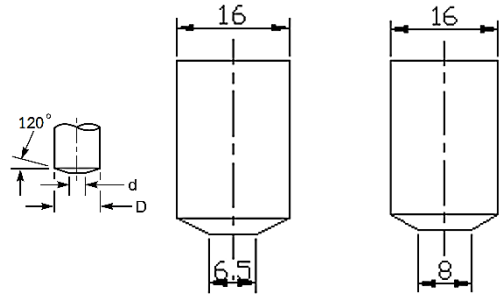
นำทองแดงมากลึงให้ได้ขนาดตามที่ออกแบบไว้ ดังรูปที่ 1 กำหนดขนาดของทองแดง ชั้นที่ 1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร และขนาดที่ปลายอิเล็กโทรด 6.5 มิลลิเมตร มุมรวม 120 องศา ชั้นที่ 2 กำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร และขนาดที่ปลายอิเล็กโทรด 8.0 มิลลิเมตร มุมรวม 120 องศา ดังรูปที่ 2

การเตรียมชิ้นงาน ตัดเหล็กกล้า ASTM A36 ความหนา 1 มิลลิเมตร และ 2 มิลลิเมตร มีขนาดความกว้าง 25 มิลลิเมตร และความยาว 100 มิลลิเมตร รอยต่อชนิดรอยต่อเกย ระยะเกย 25 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASME BPVC Section IX (2019) [5]

กำหนดพารามิเตอร์สำหรับการวิจัย โดยใช้ช่วงกระแสไฟฟ้า 5000 5500 6000 แอมแปร์ และช่วงเวลา 45 ไซเคิล แรงกด 1600 นิวตัน โดยมีรายละเอียดการทดลองในตารางที่ 3

ทำการเชื่อมตามพารามิเตอร์ที่ได้กำหนดไว้ด้วยเครื่องเชื่อมเครื่องหมายเลข TECNA รุ่น TE 25 Item 3415 [6] โดยเชื่อมพารามิเตอร์ละ 4 ชิ้นเพื่อนำไปทำการทดสอบแรงดึง 3 ชิ้น และนำไปเตรียมโครงสร้างมหภาคเพื่อวัดขนาดของรอยเชื่อม 1 ชิ้น ทั้งหมดจำนวน 60 ชิ้น 15 พารามิเตอร์

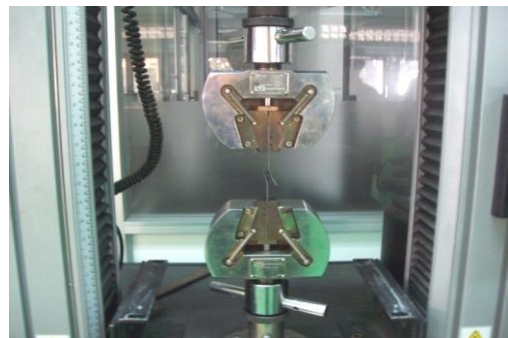
นำชิ้นงานที่ได้หลังการเชื่อม ทำการทดสอบแรงดึง ดังรูปที่ 3 เพื่อหาค่าความต้านทานแรงดึงที่รอยต่อสามารถรับภาระได้ การดึงขึ้นทดสอบด้วยแรงคงที่ จนกระทั่งชิ้นงานขาดออกจากกัน ทำการดึงขึ้นทดสอบ



รูปที่ 1 การออกแบบขนาดปลายอิเล็กโทรด



รูปที่ 2 อิเล็กโทรดที่ได้จากการออกแบบ



รูปที่ 3 การทดสอบแรงดึง

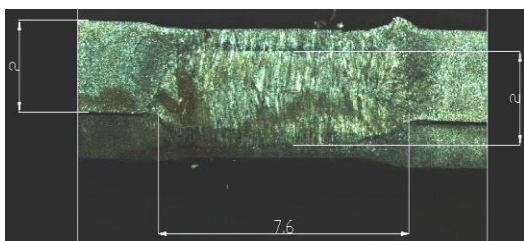
ในแต่ละพารามิเตอร์ พารามิเตอร์ละ 3 ชิ้น รวมทั้งหมด 45 ชิ้นและบันทึกผลค่าของภาระที่แนวเชื่อมรับได้สูงสุด



ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

ความหนาชิ้นงาน (มิลลิเมตร)	ปลายอิเล็กโทรด (มิลลิเมตร)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	ช่วงเวลา (ไซเคิล)	แรงกด (นิวตัน)	จำนวนชิ้นงาน (ชิ้น)
1-1	8-8	5000	45	1600	4
		5500	45	1600	4
		6000	45	1600	4
2-2	8-8	5000	45	1600	4
		5500	45	1600	4
		6000	45	1600	4
2-1	8-8	5000	45	1600	4
		5500	45	1600	4
		6000	45	1600	4
2-1	8-6.5	5000	45	1600	4
		5500	45	1600	4
		6000	45	1600	4
2-1	6.5-8	5000	45	1600	4
		5500	45	1600	4
		6000	45	1600	4

จากนั้น ทำการวัดขนาดของรอยเชื่อมจากชิ้นงาน จากภาพถ่ายโครงสร้างมหภาค โดยใช้โปรแกรม Auto CAD และนำค่าที่ได้จากการวัดมาเปรียบเทียบกับขนาดของรอยเชื่อมตามผลของพารามิเตอร์ที่ทำการเชื่อมทดสอบดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 การวัดขนาดรอยเชื่อม

3. ผลการทดสอบและการอภิปรายผล

3.1 อธิพจน์ของพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อรอยเชื่อม

ในการทดลองเบื้องต้นผู้วิจัยได้กำหนดค่ากระแสไฟฟ้าที่ 5000 5500 6000 แอมแปร์ พบว่าขณะทำการเชื่อมที่กระแส 6000 แอมแปร์ เกิดการกระเด็นของน้ำโลหะอย่างรุนแรง แสดงดังรูปที่ 5 ซึ่งการกระเด็นของน้ำโลหะบริเวณรอยเชื่อมจุด จะส่งผลให้น้ำโลหะกระเด็นจากส่วนของผิวโลหะงานที่หลอมละลาย ทำพื้นที่หน้าตัดของรอยเชื่อมให้มีขนาดเล็กกว่ากรณีไม่มีการกระเด็นของน้ำโลหะ สอดคล้องกับ Al-Mukhtar (2016) [7] การเพิ่มความร้อนโดยการปรับเพิ่มกระแส เวลาและความดัน เพิ่มพื้นที่แนวเชื่อมจุด มักมีข้อบกพร่องและการแตกร้าวเกิดขึ้นด้วย



การกระเด็นของน้ำโลหะอาจเกิดได้จากหลายปัจจัย ความสะอาดของผิวชิ้นงาน ความสะอาดของผิวที่ปลายอิเล็กโทรด เกิดช่องว่างระหว่างหน้าสัมผัสกับชิ้นงาน กระแสไฟฟ้าที่สูงเกินไปและแรงกดชิ้นงาน การศึกษาของ Loulou (2001) [8] พบว่าตอนท้ายของกระบวนการ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะมีค่าสูง ในกรณีที่เกิดขึ้นในการทดลองนี้เกิดจากการเลือกใช้กระแสที่สูงเกินไปจึงทำให้เกิดการระเบิดของน้ำโลหะอย่างรุนแรง



รูปที่ 5 ชิ้นงานเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า 6000 แอมแปร์

3.2 ผลการทดสอบแรงดึง

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบแรงดึง

กระแสไฟฟ้า 5000 แอมแปร์	ขนาดของแรงที่รับได้สูงสุด (นิวตัน)				ตำแหน่งรอยขาด
	ขนาดของชิ้นงาน	1	2	3	
1 กับปลายอิเล็กโทรดขนาด 8 มิลลิเมตร	7240.25	7178.52	7682.63	7367.14	แนวเชื่อม
1 กับ 2 มิลลิเมตร ปลายอิเล็กโทรดขนาด 8 มิลลิเมตร	8278.47	8009.39	7997.01	8094.96	1 มิลลิเมตร
2 กับ 2 มิลลิเมตร ปลายอิเล็กโทรดขนาด 8 มิลลิเมตร	14973.92	12272.15	8730.61	11992.23	แนวเชื่อม
1 กับ 2 มิลลิเมตร ปลายอิเล็กโทรดขนาด 6.5 และ 8 มิลลิเมตร	7846.67	7486.31	7821	7717.99	1 มิลลิเมตร
1 กับ 2 มิลลิเมตร ปลายอิเล็กโทรดขนาด 8 และ 6.5 มิลลิเมตร	7604.26	7680.01	7980.76	7755.01	1 มิลลิเมตร

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบแรงดึง

กระแสไฟฟ้า 5500 แอมแปร์	ขนาดของแรงที่รับได้สูงสุด (นิวตัน)				ตำแหน่งรอยขาด
	ขนาดของชิ้นงาน	1	2	3	
1 กับปลายอิเล็กโทรดขนาด 8 มิลลิเมตร	7547.39	7492	7630.33	7556.57	แนวเชื่อม
1 กับ 2 มิลลิเมตร ปลายอิเล็กโทรดขนาด 8 มิลลิเมตร	8056.01	8174.1	8554.35	8261.49	แนวเชื่อม
2 กับ 2 มิลลิเมตร ปลายอิเล็กโทรดขนาด 8 มิลลิเมตร	12475.41	12613.86	7932.34	11007.21	แนวเชื่อม
1 กับ 2 มิลลิเมตร ปลายอิเล็กโทรดขนาด 6.5 และ 8 มิลลิเมตร	8221.12	8296.78	8176.84	8231.58	แนวเชื่อม
1 กับ 2 มิลลิเมตร ปลายอิเล็กโทรดขนาด 8 และ 6.5 มิลลิเมตร	8486.06	8110.89	8380.04	8325.66	1 มิลลิเมตร



ตารางที่ 6 ผลการทดสอบแรงดึง

ขนาดของชิ้นงาน	กระแสไฟฟ้า 6000 แอมแปร์				ตำแหน่งรอยขาด
	ขนาดของแรงที่รับได้สูงสุด (นิวตัน)				
	1	2	3	เฉลี่ย	
1 กับปลายอิเล็กโทรดขนาด 8 มิลลิเมตร	8046.37	7626.14	7898.46	7856.99	ชิ้นงาน
1 กับ 2 มิลลิเมตร ปลายอิเล็กโทรดขนาด 8 มิลลิเมตร	7448.8	7442.62	7915.56	7602.33	แนวเชื่อม 1 มิลลิเมตร
2 กับ 2 มิลลิเมตร ปลายอิเล็กโทรดขนาด 8 มิลลิเมตร	16031.32	13400.07	12943.08	14124.83	แนวเชื่อม
1 กับ 2 มิลลิเมตร ปลายอิเล็กโทรดขนาด 6.5 และ 8 มิลลิเมตร	8443.67	8434.53	7844.66	8240.95	1 มิลลิเมตร
1 กับ 2 มิลลิเมตร ปลายอิเล็กโทรดขนาด 8 และ 6.5 มิลลิเมตร	7830.35	8220.73	8060.67	8037.25	แนวเชื่อม 1 มิลลิเมตร

3.2.1 ผลของความหนากับขนาดอิเล็กโทรด

ผลการวิจัยพบว่า การเชื่อมชิ้นงานความหนา 1 มิลลิเมตร กับ 2 มิลลิเมตร ด้วยปลายอิเล็กโทรดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร ทั้ง 2 ด้าน และชิ้นงานความหนา 1 มิลลิเมตรกับ 2 มิลลิเมตร ด้วยปลายอิเล็กโทรดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร และ 6.5 มิลลิเมตร ตามลำดับ จะมีค่าต้านทานแรงดึงที่สูงขึ้นจนถึงจุดสูงสุด แล้วจากนั้นค่าต้านทานแรงดึงจะต่ำลง เนื่องจากชิ้นงานได้รับกระแสไฟฟ้าสูงเกินไปจนทำให้เกิดกระเด็นของน้ำโลหะบริเวณรอยเชื่อม โดยที่บริเวณรอยเชื่อมจะสูญเสียเนื้อโลหะไปบางส่วน การศึกษาของ Vural (2006) [9] พบว่าความร้อนที่ไม่สมดุลรูปทรงของแนวเชื่อมจุดไม่สามารถเกิดขึ้นแบบสมมาตรได้ กรณีนี้เป็นสาเหตุทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงลดลง เนื่องจากมีพื้นที่หน้าตัดในการรับแรงลดลง ซึ่งต่างจากชิ้นงานความหนา 1 มิลลิเมตร กับ 2 มิลลิเมตร ที่เชื่อมด้วยปลายอิเล็กโทรดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 มิลลิเมตร และ 8 มิลลิเมตร ตามลำดับ ค่าต้านทานแรงดึงยังไม่ลดลงเนื่องจากกระแสไฟฟ้าเชื่อมไม่สูงพอที่จะทำให้การกระเด็นของ

น้ำโลหะอันเนื่องมาจากใช้ปลายอิเล็กโทรดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร ด้านชิ้นงานความหนา 2 มิลลิเมตร ซึ่งมีความต้านทานสูงกว่าชิ้นงานด้านที่หนา 1 มิลลิเมตร

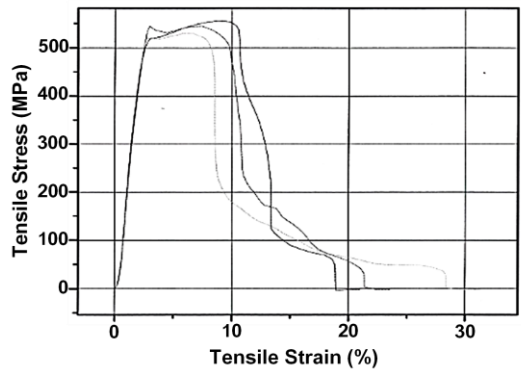
ชิ้นงานความหนา 1 มิลลิเมตรกับ 2 มิลลิเมตร ที่เชื่อมด้วยปลายอิเล็กโทรดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร และ 6.5 มิลลิเมตร ตามลำดับ ด้วยกระแสไฟฟ้า 5500 แอมแปร์ มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดที่ 8325.66 นิวตัน และเมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะการขาดที่พารามิเตอร์ดังกล่าว ชิ้นทดสอบมีการขาดที่เนื้อของวัสดุตั้งรูปที่ 6



รูปที่ 6 ชิ้นงานทดสอบแรงดึง



รูปที่ 7 แสดงตัวอย่างกราฟผลทดสอบแรงดึงของชิ้นงานหนา 1 มิลลิเมตร กับ 2 มิลลิเมตรที่เชื่อม ด้วยอิเล็กโทรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร และ 6.5 มิลลิเมตร แสดงถึงค่าความเค้นและความเครียดของรอยเชื่อม ที่แสดงพฤติกรรมการขาดแบบเหนียว เนื่องจากมีพื้นที่ใต้กราฟระหว่างความเค้นและความเครียดมาก แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างในการหลอมละลายของโลหะที่ส่งผลมาจากการเลือกใช้ขั้วปลายอิเล็กโทรดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกัน

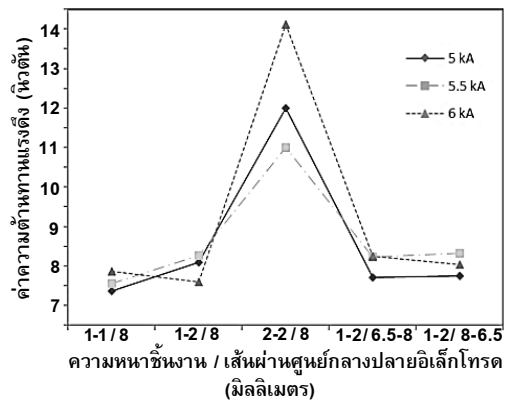


รูปที่ 7 กราฟผลทดสอบแรงดึง

3.2.2 ผลกระทบของกระแสไฟฟ้าและขนาดปลายอิเล็กโทรดต่อการหลอมละลาย

การทดลองโดยใช้กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 5000 5500 6000 แอมแปร์ โดยแสดงค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงดึงดังรูปที่ 8 และแบ่งผลที่ได้จากการทดลองออกเป็น 3 ลักษณะ ดังนี้

1. เลือกใช้ขั้วปลายอิเล็กโทรดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเท่ากัน ชิ้นงานทั้งสองด้านมีอัตราการหลอมละลายที่ไม่เท่ากัน เนื่องจากความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเท่ากัน แต่ความหนาของชิ้นงานไม่เท่ากัน ความต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นของชิ้นงานทั้งสองด้านจึงไม่เท่ากัน ชิ้นงานด้านที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร จะเกิดความต้านทานมากกว่าชิ้นงานด้านที่มีความหนา 1 มิลลิเมตร เกิดความร้อนสูงกว่าและเกิดการหลอมละลายมากกว่าชิ้นงานด้านที่มีความหนา 1 มิลลิเมตร โดย Vural (2013) [10] พบว่าอุณหภูมิสูงสุดระหว่างรอบการเชื่อมอยู่ที่กึ่งกลางของพื้นผิวสัมผัสของชิ้นงานการหลอมจะเกิดขึ้นในส่วนนี้ จากนั้นวัสดุใกล้เคียงกับบริเวณนี้จะหลอมละลาย มีผลต่อขนาดของแนวเชื่อมจุด



รูปที่ 8 ค่าเฉลี่ยความต้านทานแรงดึง

2. เลือกใช้ขั้วปลายอิเล็กโทรดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 8 มิลลิเมตร สัมผัสกับชิ้นงานด้านที่มีความหนา 1 มิลลิเมตร และใช้ขั้วปลายอิเล็กโทรดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 6.5 มิลลิเมตร สัมผัสกับชิ้นงานด้านที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร ผลจากการทดลองคือชิ้นงานด้านที่มีความหนา 1 มิลลิเมตร เกิดการหลอมละลายน้อยกว่าชิ้นงาน ด้านที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร เนื่องจากปลายอิเล็กโทรดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 6.5 มิลลิเมตร เกิดความหนาแน่นสูงกว่าส่งผลให้บริเวณนั้นเกิดความต้านทาน



กระแสไฟฟ้าสูงจึงเกิดความร้อนสูงกว่าชิ้นงานหนา 1 มิลลิเมตร ที่ใช้ปลายอิเล็กโทรดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 8 มิลลิเมตร ดังนั้นชิ้นงานด้านที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร จึงมีอัตราการหลอมละลายที่ใกล้เคียงกับชิ้นงานด้านที่มีความหนา 1 มิลลิเมตร

3. เลือกใช้ปลายอิเล็กโทรดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 8 มิลลิเมตร สัมผัสกับชิ้นงานด้านที่มีความหนา 2 มิลลิเมตรและใช้ปลายอิเล็กโทรดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 6.5 มิลลิเมตร สัมผัสกับชิ้นงานด้านที่มีความหนา 1 มิลลิเมตร ผลจากการทดลองคือชิ้นงานด้านที่มีความหนา 1 มิลลิเมตร เกิดการหลอมละลายของชิ้นงานที่สูงกว่าเนื่องจากความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าบริเวณนั้นสูงจึงทำให้เกิดความต้านทานกระแสไฟฟ้าและความร้อนที่เกิดขึ้นบริเวณนั้นสูง ส่วนบริเวณชิ้นงานด้านที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร ที่ใช้ปลายอิเล็กโทรดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 8 มิลลิเมตร เนื่องจากความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณนั้นมีน้อยจึงทำให้เกิดความต้านทานและความร้อนที่เกิดขึ้นต่ำ ดังนั้นชิ้นงานด้านที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร จึงมีอัตราการหลอมละลายที่น้อยกว่าชิ้นงานด้านที่มีความหนา 1 มิลลิเมตร

4. บทสรุป

ผลการทดสอบแรงดึงการเลือกใช้ปลายอิเล็กโทรดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กสัมผัสกับชิ้นงานด้านหน้าและการเลือกใช้ปลายอิเล็กโทรดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่สัมผัสกับชิ้นงานด้านข้างและเชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม เป็นการสร้างสมดุลความร้อนที่ส่งผลให้บริเวณรอยเชื่อมมีการหลอมละลายของรอยเชื่อมที่สมบูรณ์ ใ้รอยเชื่อมมีความ

แข็งแรง ทนต่อแรงดึงสูง เกิดการระเบิดของน้ำโลหะที่น้อย ผลกระทบทางความร้อนแคบ

ผลการวัดขนาดรอยเชื่อมจากโครงสร้างมหภาค การเลือกใช้ปลายอิเล็กโทรดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กสัมผัสกับชิ้นงานด้านหน้าและการเลือกใช้ปลายอิเล็กโทรดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ สัมผัสกับชิ้นงานด้านข้าง เป็นวิธีการสร้างสมดุลความร้อนขึ้นระหว่างชิ้นงานทั้งสองเนื่องจากการความแตกต่างของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอิเล็กโทรดทำให้เกิดความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่เข้าสู่ชิ้นงานในแต่ละด้านแตกต่างกันส่งผลให้เกิดความต้านทานกระแสไฟฟ้าที่ชิ้นงานหนาใกล้เคียงกับความต้านทานกระแสไฟฟ้าที่ชิ้นงานบางและทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างชิ้นงานทั้งสองใกล้เคียงกันและเกิดการหลอมละลายใกล้เคียงกันรอยเชื่อมที่ได้จึงอยู่กึ่งกลางระหว่างชิ้นงาน

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] W. Pattapong, Welding processes, KMUTNB Textbook Publishing Center, Bangkok, 2002. (in Thai)
- [2] G. Kelkar, Improving heat balance in resistance welding, WJM Technologies, CA, USA, 2007.
- [3] AWS C1.1M/C1.1, Recommended Practices for Resistance Welding, 2000.
- [4] ASME Section II Part A, Ferrous Material Specifications, 2019.
- [5] ASME BPVC Section IX, Welding and Brazing Qualifications, 2019.



- [6] TECNA, Rocker arm resistance welder: Item 3415, User Manual and Installation, 1997.
- [7] A.M. Al-Mukhtar, Review of resistance spot welding sheets: Processes and failure mode, Advanced Engineering Forum, 2016, 17, 31-57.
- [8] T. Loulou and J.P. Bardon, Estimation of thermal contact conductance during resistance spot welding, Experimental Heat Transfer, 2001, 14(4), 251- 264.
- [9] M. Vural, A. Akkuş and B. Eryürek, Effect of welding nugget diameter on the fatigue strength of the resistance spot welded joints of different steel sheets. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 176(1-3), 127-132.
- [10] M. Vural, Finite element analysis of the thermo-mechanical behavior of the resistance spot welding, Usak University Journal of Material Sciences, 2013, 2(1), 31-44.



ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพโดยการหมักร่วมระหว่างไบโม่เหลื่อทิ้ง ในชุมชนและมูลวัว

ประภัสรา ธรรมวัชรานุกร สุทธิจิณธรรม และ วันัสพรรัตน์ สวัสดิ์*

สาขาวิชานวัตกรรมการจัดการสิ่งแวดล้อม, วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการ, มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์
ในพระบรมราชูปถัมภ์

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: vanatpornratt@vru.ac.th

วันที่รับบทความ: 10 พฤษภาคม 2564; วันที่ทบทวนบทความ: 2 มิถุนายน 2564; วันที่ตอบรับบทความ: 11 มิถุนายน 2564

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 4 สิงหาคม 2564

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพโดยการหมักร่วมระหว่างไบโม่เหลื่อทิ้งในชุมชนและมูลวัว ในชุมชนตำบลช่างเหล็ก อำเภอบางไทร จังหวัดพระนครศรีอยุธยา โดยการศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการนั้นมีการกำหนดสภาวะที่เหมาะสมคือ เศษไบโม่ และมูลวัวหมักร่วมกันในอัตราส่วน 1:1 ในถังปฏิกรณ์ 5 ลิตร ของแข็งทั้งหมดในระบบ 2.5 %TS อุณหภูมิ 35-37 °C จากผลการวิจัยพบว่า ค่าพีเอชภายในระบบมีค่า 6.60-7.20 สภาพต่างมีค่า 1,100-3,200 มิลลิกรัมต่อลิตร CaCO_3 กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid) คือ กรดอะซิติกที่เป็นวัตถุดิบหลักสำหรับผลิตก๊าซมีเทนโดยกลุ่มแบคทีเรียผลิตมีเทน (Methane Producing Bacteria) ตั้งแต่การเดินระบบชั่วโมงที่ 48 เริ่มมีกรดอะซิติกเกิดขึ้นมีค่า 18.945 mM และมีการใช้กรดอะซิติกอย่างต่อเนื่องจนหมด ปริมาณมีเทนสะสมสูงสุด 4,183 ml และค่าเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนสูงสุดนั้นมีค่า 64.61 % ตามลำดับ จากค่าจลนศาสตร์การผลิตมีเทนพบว่า อัตราการผลิตมีเทนสูงสุด (H_{max}) มีค่า 5,295.65 ml และอัตราเร็วในการผลิตมีเทนต่อชั่วโมง (R_{max}) มีค่า 13.77 ml hr⁻¹ ดังนั้น จากการวิจัยสามารถสรุปว่าไบโม่เหลื่อทิ้งในชุมชนสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพได้

คำสำคัญ: ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ; ไบโม่เหลื่อทิ้ง; การปรับสภาพทางกายภาพ; การหมักร่วม

Efficiency of Biogas Production by Co-Digestion between Leaf Waste in Community and Cow Dung

Prapatsara Thamwatchalangkoon, Soontharee Chintham and Vanatpornratt Sawasdee*

Program in Innovation of Environmental Management, College of Innovative Management,
Valaya Alongkorn Rajabhat University under The Royal Patronage

* Corresponding author, E-mail: vanatpornratt@vru.ac.th

Received: 10 May 2021; Revised 2 June 2021; Accepted: 11 June 2021

Online Published: 4 August 2021

Abstract: This research studied on the efficiency of biogas production by co-digestion between leaf waste in the community and cow dung in Chang Lex community, Bangsai, Pranakorn Sri Ayutthaya province. The efficiency of biogas production in lab-scale was studied with optimum condition setting that co-digestion ratio between leaf waste in community and cow dung 1:1 in reactor 5 liters with 2.5% total solid and temperature 35-37 °C. The research results were found pH in the system was around 6.60-7.20 and the alkalinity was 1,100-3,200 mg L⁻¹ CaCO₃. The major volatile fatty acid is acetic acid that material for methane gas production by methane-producing bacteria. Until the start-up system in 48 hours, the acetic acid was produced at 18.945 mM and continuously used until it was depleted. The highest cumulative methane was 4,183 ml and the percentage of methane production was 64.61%, respectively. From the kinetic of methane production, the maximum methane production (H_{max}) was 5,295.65 ml and the rate of methane production per hour (R_{max}) was 13.77 ml hr⁻¹. Therefore, the conclusion from this research was leaf waste in the community can be used to material for biogas production.

Keywords: Efficiency of biogas production; Leaf waste; Physical pretreatment; Co-digestion



1. บทนำ

ปัจจุบันสถานการณ์มลพิษทางอากาศในประเทศไทยมีความรุนแรงมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากการเผาในพื้นที่เปิดโล่ง (Open Burning) นั้นส่งผลให้เกิดมลพิษทางอากาศ โดยกระบวนการเผาไหม้ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ออกไซด์ของไนโตรเจน (NOx) ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) อนุภาคประกอบของสารอินทรีย์ระเหย (VOCs) [1] โดยเฉพาะฝุ่นละอองขนาดเล็ก ทั้งในส่วนของฝุ่น PM 10 และ PM 2.5

มลพิษทางอากาศก่อให้เกิดปัญหาทัศนวิสัยในการมองเห็นลดลง ไม่สามารถมองเห็นได้ในระยะไกล นอกจากนี้ยังทำให้ระคายเคืองตา ระคายคอ แน่นหน้าอก ก่อให้เกิดโรคทางเดินหายใจ โรคหอบหืด และโรคหอบหืดอีกด้วย [2] ปัญหาเหล่านี้ถือว่าเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเกิดมลพิษทางอากาศ อย่างไรก็ตามการเผาในพื้นที่เปิดโล่งนั้นยังถือเป็นวิธีที่สะดวกในการจัดการเศษใบไม้สำหรับชุมชน โดยชุมชนตำบลช่างเหล็ก อำเภอบางโพธิ์ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา เป็นหนึ่งในพื้นที่ที่มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ฯ รับผิดชอบ ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีปริมาณใบไม้แห้งในพื้นที่สาธารณะต่างๆ ถนน วัด และโรงเรียนเป็นจำนวนมาก โดยการจัดการใบไม้ของชุมชนในปัจจุบันคือการเผาในพื้นที่เปิดโล่ง (รูปที่ 1) ซึ่งถือเป็นสาเหตุสำคัญทำให้เกิดมลพิษทางอากาศและส่งผลกระทบต่อสุขภาพของคนในชุมชน

ดังนั้น การแก้ปัญหาการเผาใบไม้เหลือทิ้งในพื้นที่เปิดโล่งจึงเป็นสิ่งจำเป็น ใบไม้แห้งถือเป็นหนึ่งในวัสดุลิกโนเซลลูโลส ประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นตัวกูดิบบดตั้งต้นใน



รูปที่ 1 (A) การจัดการใบไม้ของชุมชนโดยการเผาในพื้นที่เปิดโล่ง และ (B) ใบไม้รวมที่ร่วงหล่นในชุมชน

การผลิตก๊าซชีวภาพได้เป็นอย่างดี ก๊าซชีวภาพเป็นก๊าซที่เกิดจากกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Digestion) โดยสารอินทรีย์ในระบบจะถูกย่อยสลายโดยเชื้อจุลินทรีย์ ก๊าซที่ได้ ประกอบด้วย ก๊าซมีเทน (CH₄) 55-65% ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) 30% ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S) 2% และก๊าซอื่น ๆ 3%

สำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพนั้นจะมีการเติมเชื้อจุลินทรีย์ หรือมูลสัตว์ซึ่งเป็นแหล่งของเชื้อจุลินทรีย์เพื่อให้เกิดกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนในระบบ และได้ผลผลิต คือ ก๊าซชีวภาพ



โดยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศเกิดขึ้น โดยจุลินทรีย์ไม่ใช้อากาศย่อยสลายสารอินทรีย์จาก สารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ เช่น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมัน ให้กลายเป็นกรดอินทรีย์ขนาดเล็ก จากนั้น จะถูกย่อยสลายต่อโดยแบคทีเรียผลิตกรดอะซิติกจะ เปลี่ยนกรดอินทรีย์ขนาดเล็กให้กลายเป็นกรดอะซิติก และก๊าซไฮโดรเจน ในขั้นตอนสุดท้ายแบคทีเรีย ผลิตก๊าซมีเทนจะทำการเปลี่ยนกรดอะซิติกให้ กลายเป็นก๊าซมีเทน และก๊าซอื่น ๆ [3] และนำก๊าซ ชีวภาพมาใช้ประโยชน์ในชุมชนและครัวเรือนอย่าง ปลอดภัยและยั่งยืน

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการแก้ปัญหาการ เผาเศษใบไม้ในชุมชนพื้นที่ตำบลช่างเหล็ก อำเภอ บางไทร จังหวัดพระนครศรีอยุธยา โดยการใช้ ประโยชน์จากเศษใบไม้ที่มีจำนวนมาก นำมาเป็น วัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพ เพื่อเป็นต้นแบบการ จัดการสิ่งแวดล้อมและการผลิตพลังงานทดแทน สำหรับชุมชนอื่น รวมถึงลดการเผาใบไม้ที่จะเป็น แหล่งก่อให้เกิดมลพิษอากาศในชุมชนต่อไป

2. วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพโดย การหมักร่วมระหว่างใบไม้เหลือทิ้งในชุมชนและมูลวัว นั้น จะดำเนินการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการนำ ใบไม้เหลือทิ้งในชุมชนมาผลิตก๊าซชีวภาพ โดยสภาวะ ที่เหมาะสมนั้นประกอบด้วย ขนาดของวัตถุดิบ ปริมาณของแข็งรวมทั้งหมดที่เติมในระบบผลิตก๊าซ ชีวภาพ การควบคุมค่าพีเอชให้เหมาะสมสำหรับการ ทำงานของจุลินทรีย์ อัตราส่วนระหว่างใบไม้เหลือทิ้ง และมูลวัว โดยสามารถดำเนินการดังนี้

2.1 การจัดเตรียมวัตถุดิบ

2.1.1 ใบไม้เหลือทิ้ง (Leaf Waste) ที่นำมาใช้ใน งานวิจัยเป็นใบไม้รวมที่ร่วงหล่นในพื้นที่ชุมชน (รูปที่ 2) โดยจะมีการปรับสภาพทางกายภาพ คือ การ นำใบไม้มาลดขนาดให้เป็นชิ้นเท่ากัน และทำการ วิเคราะห์หาค่าของแข็งทั้งหมดที่แท้จริงโดยการหาค่า ของแข็งทั้งหมด (Total Solid: TS) สามารถวิเคราะห์ โดยชั่งน้ำหนักด้วยกระเบื้อง และน้ำหนักตัวอย่าง จากนั้นนำไปอบในเตาอบ (Oven) ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้น ทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น (Desiccator) และชั่ง น้ำหนักที่หายไป จากนั้นนำไปคำนวณหาค่าของแข็ง ที่แท้จริง [4]



รูปที่ 2 ลักษณะใบไม้เหลือทิ้งในชุมชน

2.1.2 มูลวัว (Cow Dung) ที่ใช้ในงานวิจัยนำมาจาก ในชุมชนในพื้นที่ตำบลช่างเหล็ก โดยนำมาผ่าน ตะแกรงร่อน (Mesh) ขนาดรูตะแกรง 710 μm เพื่อ กำจัดเศษสิ่งสกปรกที่เจือปนมาก่อนนำเข้าสู่ระบบ ผลิตก๊าซชีวภาพ ดังรูปที่ 3

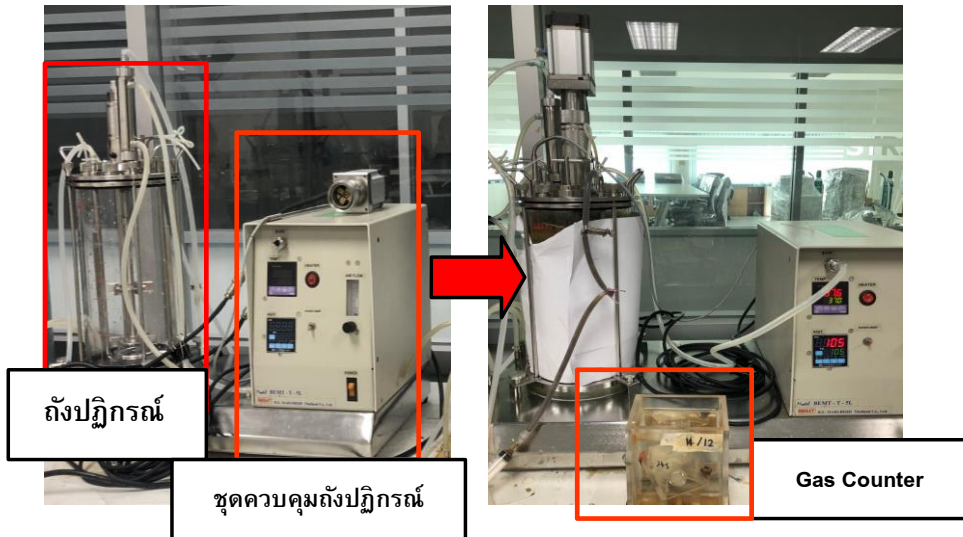


รูปที่ 3 มูลวัว (Cow Dung)

2.1.3 ถังปฏิกรณ์ (Reactor) ที่ใช้ในงานวิจัยเป็นถังปฏิกรณ์ขนาด 5 ลิตร (Working Volume 4 liter) มีระบบการกวนสมบูรณ์ (Completely Mixed) โดยใบกวนมีความยาว 3.5 ส่วน ใน 4 ส่วนของความสูงถังทำให้ระบบเกิดการกวนอย่างต่อเนื่อง และทำให้วัตถุดิบสามารถสัมผัสกันได้อย่างทั่วถึง ดังรูปที่ 4

2.2 การทดสอบประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ

การออกแบบการทดสอบประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการ โดยทำการเติมใบไม้ และมูลวัวในถังปฏิกรณ์โดยหมักร่วมกันในอัตราส่วน 1:1 w/v [5] โดยมีการนำอัตราส่วนจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมาปรับใช้ในการวิจัยครั้งนี้ กำหนดปริมาณของแข็งทั้งหมดในระบบ 2.5%TS ซึ่งได้จากการ Pretest ก่อนการทำการทดลองพบว่า ค่าของแข็งในระบบที่เหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพในงานวิจัยนี้ คือ 2.5%TS มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 35-37 องศาเซลเซียส และค่าพีเอชเริ่มต้น 7.2 เติมน้ำแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) 8 กรัมต่อลิตร เพื่อรักษาสภาพต่างในระบบ [6] และควบคุมอัตราการกวน 100 รอบต่อนาที จากนั้นวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง ดังตารางที่ 1 โดยความถี่ในการวิเคราะห์คือ ทุกๆ 48 ชั่วโมง



รูปที่ 4 ถังปฏิกรณ์ขนาด 5 ลิตร



ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ที่ดำเนินการติดตามสำหรับการทดสอบประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์/เครื่องมือ
ค่าพีเอช (pH)	pH Meter
ค่าสภาพต่าง (Alkalinity)	Titration
ปริมาณก๊าซชีวภาพแต่ละวัน	Gas counter
องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ	Gas chromatography (Shimadzu GC-2014)
กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid)	Gas chromatography (Shimadzu GC-2010)

2.3 การคำนวณค่าทางจลศาสตร์ที่ได้จากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

การคำนวณค่าทางจลศาสตร์ที่ได้จากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ดังสมการที่ (1) โดยการนำข้อมูลมิลลิลิตรมีเทนสะสม และเวลาที่ได้จากการหมัก เข้าสมการ Modify Gompertz แสดงดังสมการ ของโปรแกรม Sigma Plot Version 11.0 [7]

$$H = H_{max} \times \exp \left\{ - \exp \left[\frac{R_{max}}{H_{max}} e (\lambda - t) + 1 \right] \right\} \quad (1)$$

โดยที่ H คือ ปริมาณก๊าซมีเทนสะสม (ml)

T คือ ระยะเวลาในการหมัก (hr)

R_{max} คือ อัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด (ml hr⁻¹)

H_{max} คือ ปริมาณก๊าซมีเทนสูงสุด (ml)

λ คือ ระยะเวลาแลกเฟส (hr)

E คือ ค่าคงที่ 2.7182818

3. ผลการทดสอบและการอภิปรายผล

จากการดำเนินการวิจัยการศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพโดยการหมักร่วมระหว่างไบโม่เหลื่อทิ้งในชุมชนและมูลวัวนั้น พบว่าเมื่อมีการควบคุมสภาวะที่เหมาะสม สำหรับการทำงานของกลุ่มจุลินทรีย์แบบไม่ใช้อากาศ จะทำให้สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถนำสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ ไปปรับใช้ในชุมชนได้เป็นอย่างดี นำไปสู่การใช้ประโยชน์ของเหลือทิ้งอย่างยั่งยืน

3.1 ค่าพีเอช (pH) และสภาพต่าง (Alkalinity)

ระบบผลิตก๊าซชีวภาพนั้นเป็นการย่อยสลายแบบไร้อากาศซึ่งค่าพีเอช และค่าสภาพต่างถือเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับระบบ เนื่องจากกลุ่มแบคทีเรียที่เจริญเติบโตและดำเนินกิจกรรมนั้นสามารถเจริญเติบโตได้ดีที่ค่าพีเอชเป็นกลาง และค่าสภาพต่างที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 1,000-3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร CaCO₃ [8] ดังนั้นจึงปรับค่าพีเอชเริ่มต้นที่ 7.20 และเติม CaCO₃ เพื่อรักษาสภาพต่างในระบบ การติดตามค่าพีเอชแสดงดังรูปที่ 5

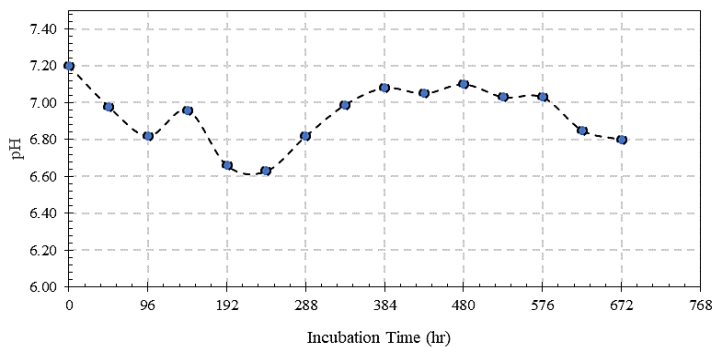
ค่าพีเอชตั้งแต่เริ่มเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพจนถึงชั่วโมงสุดท้ายของการเดินระบบพบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 6.60-7.20 ซึ่งเป็นช่วงที่มีความเหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุลิกโนเซลลูโลสเป็นอย่างดี ค่าพีเอชเริ่มต้นนั้นสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพจากไบโม่มีการปรับค่าพีเอชให้สูงกว่า 7.00 คือ 7.20 เนื่องจากเพื่อป้องกันไม่ให้ค่าพีเอชลดลงมากเกินไป อีกทั้งวัสดุลิกโนเซลลูโลสใช้เวลาในการย่อยสลายนานกว่าวัสดุชนิดอื่น จึงอาจส่งผลให้เกิดการสะสมกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในระบบ และทำให้ค่าพีเอชลดลง



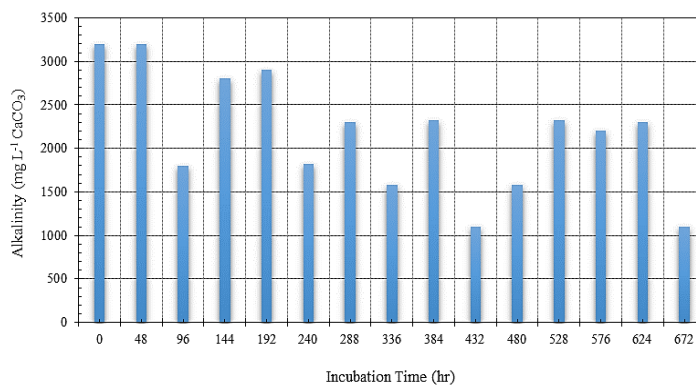
มากเกินไป ทำให้ส่งผลกระทบต่อกลุ่มแบคทีเรียที่ทำงานในระบบทำงานได้อย่างไม่มีประสิทธิภาพ

เมื่อพิจารณาถึงค่าสภาพต่างในระบบพบว่าระบบสามารถรักษาสภาพต่างไว้ได้เป็นอย่างดี โดยสภาพต่างตั้งแต่เริ่มต้นเดินระบบถึงชั่วโมงสุดท้ายในการเดินระบบมีค่าระหว่าง 1,100-3,200 มิลลิกรัมต่อลิตร CaCO_3 (รูปที่ 6) ซึ่งเป็นค่าสภาพต่างที่เหมาะสมสำหรับการทำงานของแบคทีเรียภายในระบบ อย่างไรก็ตามการรักษาค่าสภาพต่างในงานวิจัยนั้นมีการเติม CaCO_3 เพื่อให้สภาพต่างอยู่ในช่วงที่กำหนดได้ในการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากไปมันนั้น

จำเป็นต้องมีการเติม CaCO_3 เนื่องจากไปมันเป็นวัสดุลิกโนเซลลูโลสที่ย่อยสลายยาก ทำให้แบคทีเรียในระบบย่อยได้ช้า ทำให้เกิดการย่อยสลายสารอาหารบางส่วนที่ปะปนมาเกินไปอย่างรวดเร็วโดยแบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด (Acid Forming Bacteria) แต่แบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทน (Methane Producing Bacteria) นั้นเจริญเติบโตช้า ส่งผลให้เกิดการสะสมกรดในระบบและค่าพีเอชลดลงได้ จึงต้องมีการเติม CaCO_3 เพื่อรักษาสภาพต่างในระบบ เพื่อให้การทำงานของกลุ่มแบคทีเรียผลิตกรด และผลิตมีเทนสามารถทำกิจกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 5 ค่าพีเอชในช่วงการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

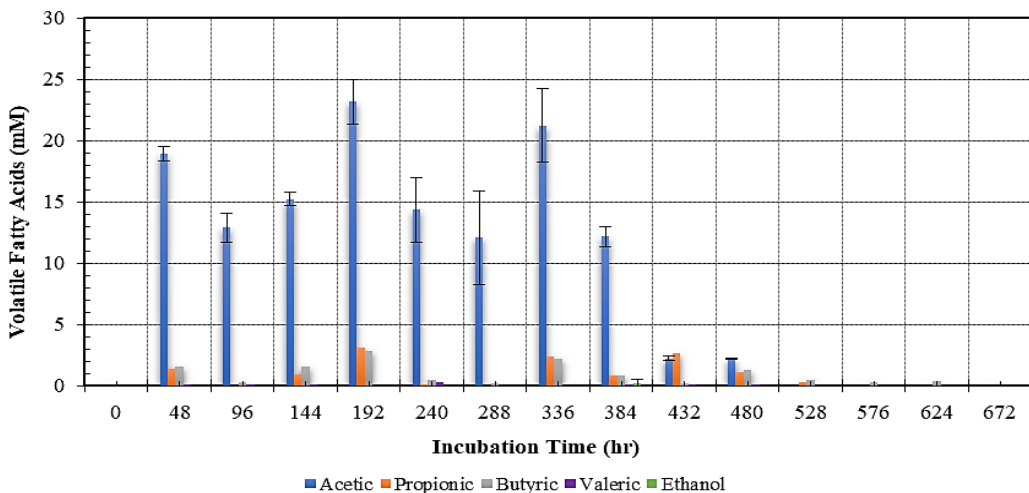


รูปที่ 6 ค่าสภาพต่างในช่วงการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

3.2 กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid)

กรดอินทรีย์ระเหยง่ายเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ เนื่องจากกรดอินทรีย์เป็นสารตั้งต้นสำคัญของแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทน (Methane Producing Bacteria) [8] ซึ่งกรดอินทรีย์ถูกผลิตขึ้นโดยแบคทีเรียผลิตกรด (Acid Forming Bacteria) ถ้ามีการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในระบบมากเกินไป แสดงว่าระบบมีแบคทีเรียผลิตมีเทนน้อยเกินไป หรือแสดงว่าแบคทีเรียผลิตกรดผลิตกรดไขมันระเหยได้เร็วเกินไป กรดไขมันระเหยที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเป็นสัญญาณว่าระบบกำลังเสียสมดุล เพราะทำให้ค่าพีเอชลดลงจนไม่อยู่ในช่วงที่เหมาะสมของแบคทีเรียที่อยู่ในระบบไม่ว่าจะเป็นแบคทีเรียผลิตมีเทนหรือแบคทีเรียผลิตกรด แม้ว่าแบคทีเรียผลิตกรดจะทนต่อกรดที่ผลิตขึ้นได้มากกว่าแบคทีเรียผลิตมีเทนสังเกตได้จากแบคทีเรียผลิตกรดสามารถอยู่ได้ในช่วงพีเอชที่กว้างกว่า [9]

ในช่วงเริ่มต้นของการเดินระบบยังไม่มีการผลิตและสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่าย เนื่องจากเป็นช่วงที่แบคทีเรียในระบบกำลังปรับตัวสำหรับสภาวะการผลิตก๊าซชีวภาพ เมื่อถึงชั่วโมงที่ 48 พบว่าแบคทีเรียผลิตกรดเริ่มทำงาน แสดงจากค่ากรดอะซิติกที่เกิดขึ้น มีค่า 18.945 mM และในช่วงต่อมา มีการผลิตกรดและใช้อย่างต่อเนื่องโดยแบคทีเรียผลิตมีเทน สอดคล้องกับค่าเปอร์เซ็นต์มีเทนที่เกิดขึ้นพบว่าการผลิตมีเทนเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง และสูงสุดที่ชั่วโมงที่ 384 สอดคล้องกับค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่ลดลง ดังนั้นจากค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่าย ค่าเปอร์เซ็นต์มีเทน และปริมาณมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นพบว่ามีแบคทีเรียผลิตมีเทน (Methane Producing Bacteria) และแบคทีเรียผลิตกรด (Acid Forming Bacteria) มีการทำกิจกรรมที่สอดคล้องกัน อีกทั้งยังไม่มีมีการสะสมกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในระบบซึ่งนำไปสู่การลดลงของค่าพีเอชในระบบ



รูปที่ 7 ค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่ายในระหว่างการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

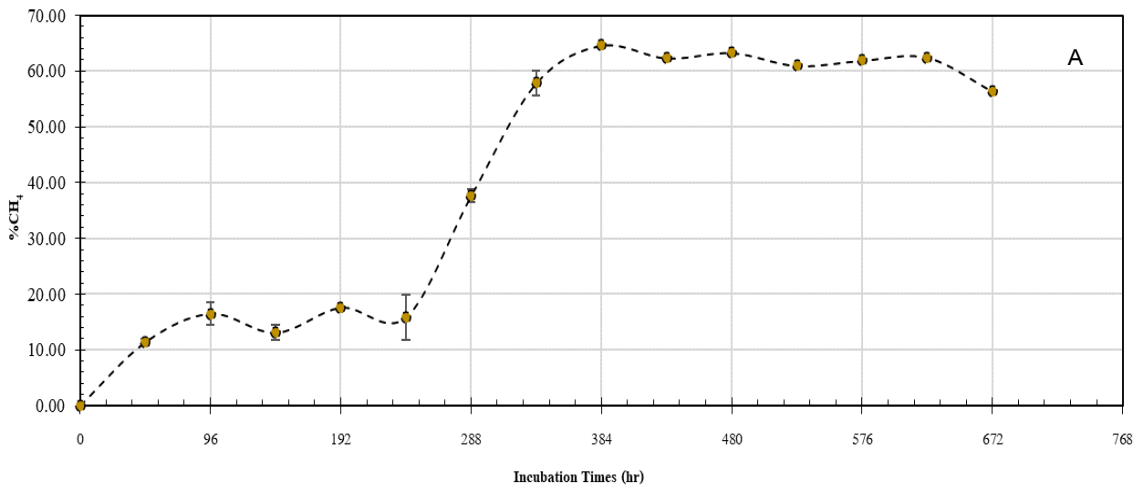


3.3 ก๊าซชีวภาพ (Biogas)

จากการผลิตก๊าซชีวภาพโดยการหมักร่วมระหว่าง ไบโม่แห้งและมูลวัวที่เป็นวัตถุดิบเหลือทิ้งจากชุมชน พบว่ามีค่าเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนสูงสุดนั้นมีค่า 64.61 % ปริมาณมีเทนสะสมสูงสุด 4,183 ml และ ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม 7,371 ml ตามลำดับ (รูปที่ 8 A, B, C)

เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาเป็นการศึกษาการย่อยสลายของเศษก้านและใบลำไย โดยหมักร่วมกับมูลสุกร พบว่าเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนสูงสุดที่ได้คือ 34 % [10] นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยอื่น ๆ ที่มีการใช้วัตถุดิบลิกโนเซลลูโลสเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ ดังตารางที่ 2 จากตารางการเปรียบเทียบงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า สามารถนำพีชน้ำ หญ้า วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร และวัสดุเหลือทิ้งอื่น ๆ ที่มีองค์ประกอบของวัตถุดิบลิกโนเซลลูโลส มาใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพได้เป็นอย่างดี

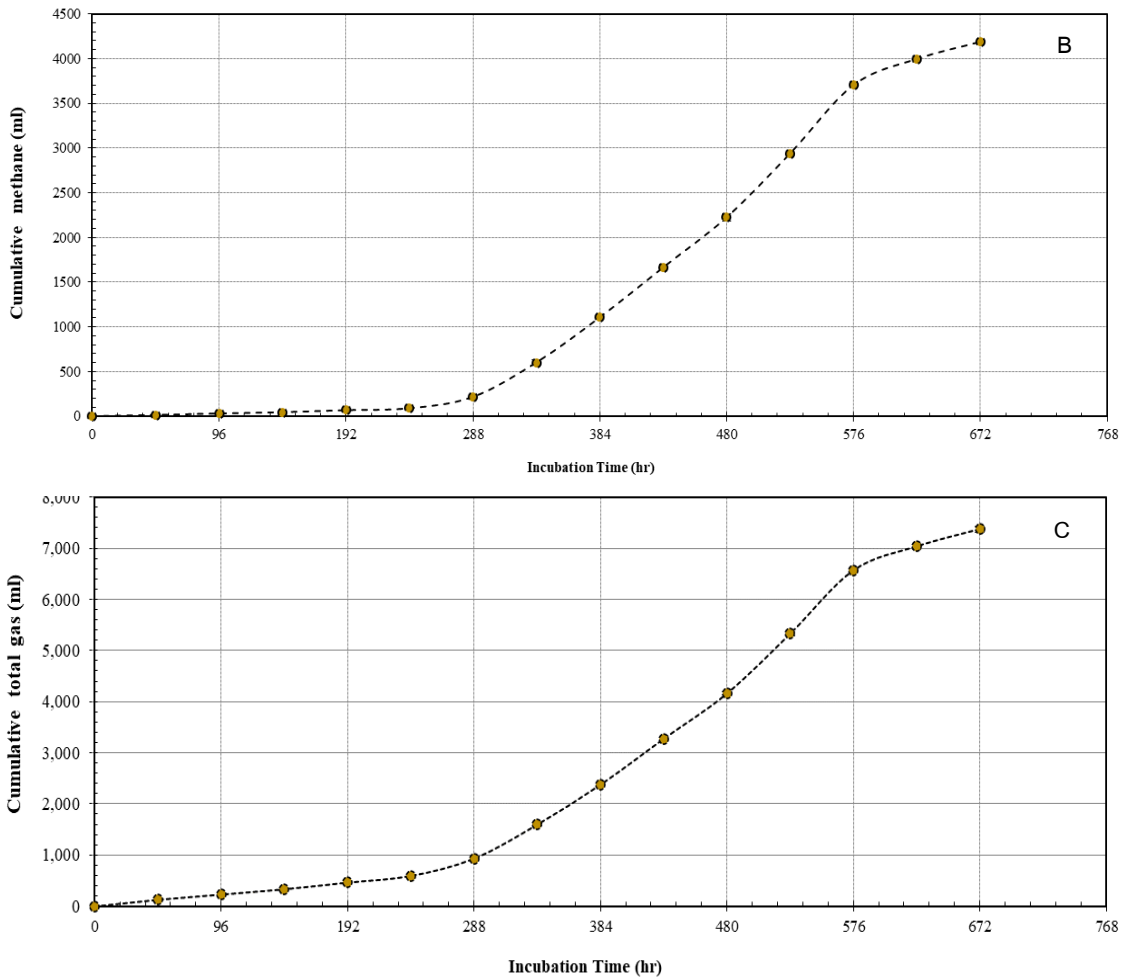
และจากการเป็นวัสดุเหลือทิ้งทำให้มีปริมาณมาก จึงเป็นการลดปัญหาการขาดแคลนวัตถุดิบที่ใช้ผลิตก๊าซชีวภาพ และเป็นการกำจัดวัสดุเหลือทิ้งได้อย่างถูกวิธี ไม่ก่อให้เกิดมลพิษอากาศ ในส่วนจลนศาสตร์การผลิตมีเทน พบว่า อัตราการผลิตมีเทนสูงสุด (H_{max}) มีค่า 5,295.65 ml และ อัตราเร็วในการผลิตมีเทนต่อชั่วโมง (R_{max}) มีค่า 13.77 ml hr⁻¹ เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาซึ่งใช้วัตถุดิบโนเซลลูโลสพบว่าอัตราการการผลิตมีเทนสูงสุด และ อัตราเร็วในการผลิตมีเทนต่อชั่วโมงของการผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์มีค่า H_{max} 354 ml และ R_{max} มีค่า 4.8 ml hr⁻¹ ตามลำดับ [10] แสดงให้เห็นว่าการผลิตก๊าซชีวภาพโดยใช้วัตถุดิบ คือ ไบโม่ และมูลวัวหมักร่วม อีกทั้งควบคุมค่าพีเอช และสภาพต่างในระบบให้เหมาะสม จะทำให้สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 8 (A) ค่าเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทน (B) ปริมาณมีเทนสะสม และ (C) ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม



บทความวิจัย



รูปที่ 8 (ต่อ) (A) ค่าเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทน (B) ปริมาณมีเทนสะสม และ (C) ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบงานวิจัยที่ผ่านมาและงานวิจัยปัจจุบัน

วัตถุดิบ	การปรับสภาพ	ปริมาณก๊าซชีวภาพ	% CH ₄	อ้างอิง
หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ร่วมกับเชื้อจุลินทรีย์ในอัตราส่วน 1: 2	ปรับสภาพทางกายภาพด้วยการนำหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 บดละเอียด	26.25 ลิตร		[5]
ใบลำไยทั้งใบเขียว (สด) และใบน้ำตาล (แห้ง) ในอัตราส่วน 3: 1 ระยะเวลา 14 วัน	-	544 ลิตร	34 %	[10]

**ตารางที่ 2 (ต่อ) การเปรียบเทียบงานวิจัยที่ผ่านมาและงานวิจัยปัจจุบัน**

วัตถุดิบ	การปรับปรุงสภาพ	ปริมาณก๊าซชีวภาพ	% CH ₄	อ้างอิง
การหมักร่วมระหว่างมูลสุกรและสาหร่าย ทางกระรอกในอัตราส่วน 3.75 : 1.25%TS	ปรับปรุงสภาพทางกายภาพด้วยการนำสาหร่าย ทางกระรอกหั่นชิ้นเล็กและบดละเอียดด้วย เครื่องปั่น	1.36 ลิตร	49.97%	[12]
เศษผักกวางตุ้งร่วมกับมูลโคในอัตราส่วน 170 มิลลิลิตร : มูลโค 10 กรัม	ปรับปรุงสภาพทางกายภาพด้วยการนำเศษ ผักกวางตุ้งมาหั่นชิ้นเล็กและบดละเอียด ด้วยเครื่องปั่น	0.347 ลิตร		[13]
ผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงสภาพด้วยการ นึ่งเป็นเวลา 60 นาทีร่วมกับมูลวัวใน อัตราส่วน 1:4	ปรับปรุงสภาพด้วยการนำผักตบชวาอบให้แห้ง ที่อุณหภูมิ 60-70 องศาเซลเซียส นาน 48 ชั่วโมง แล้วปรับปรุงสภาพทางกายภาพด้วย การบดด้วยเครื่องปั่นปรับปรุงสภาพโดยการนึ่ง โดยให้น้ำร้อน เป็นเวลา 60 นาที จากนั้น อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60-70 องศา เซลเซียส นาน 48 ชั่วโมง	0.176 ลิตร		[14]
ใบไม้ และมูลวัว อัตราส่วน 1:1 ค่าของแข็งทั้งหมด 2.5%TS	ปรับปรุงสภาพทางกายภาพด้วยการนำใบไม้ มาตัดให้เป็นชิ้นเท่ากัน	7.37 ลิตร	64.61 %	งานวิจัยนี้

4. สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

จากผลการดำเนินงานวิจัยทั้งหมดพบว่า การนำ
ใบไม้เหลือทิ้งจากชุมชนมาใช้เป็นหนึ่งในวัตถุดิบตั้ง
ต้นสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพนั้น สามารถผลิตก๊าซ
มีเทนได้ถึง 64.61 % ดังนั้นจึงสามารถนำข้อมูล
สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพจากใบไม้
หมักร่วมกับมูลวัวคือ อัตราส่วนการหมักร่วม 1:1 w/v
ค่าของแข็งทั้งหมดที่ใส่ในระบบ 2.5 % TS ปริมาณ
CaCO₃ 8 g L⁻¹ ที่ใส่ในระบบเพื่อให้สามารถควบคุม
สภาพต่างได้ ความเร็วรอบในการหมุน 100 รอบต่อ
นาที เพื่อให้วัตถุดิบและแบคทีเรียในระบบสามารถ
สัมผัสกันได้อย่างสมบูรณ์ เป็นข้อมูลเพื่อส่งต่อไปกับ
ชุมชน และถือได้ว่าเป็นพลังงานทางเลือก รวมถึงการ

จัดการใบไม้ ลดการเผาในพื้นที่เปิดโล่งได้เป็นอย่างดี
อย่างไรก็ตามการนำสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการ
ผลิตก๊าซชีวภาพจากห้องปฏิบัติการไปใช้ในชุมชนนั้น
ควรมีการปรับสภาวะให้เหมาะสมกับชุมชนนั้นๆ และ
ง่ายต่อการใช้งานต่อไป

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Rongmuang, W. Arjhan, P. Liplap and
T. Hinsui, Assessment of pollutant emission
from open field burning of rice straw, Farm
Engineering from Open Field Burning of Rice
Straw, 2017, 3(1), 53-61. (in Thai)



- [2] B. Jolanun, A. Phutharukchat and C. Khamtui, Community-based renewable energy from *Mimosa Pigra L.* charcoal briquettes, *KKU Research Journal*, 2011, 16(1), 20-31. (in Thai)
- [3] W. Markphan, U. Tipruk, T. Sansee, S. Kaewdam and W. Suksong, Biogas production from food waste by anaerobic digestion, *Journal of Science and Technology*, Ubon Ratchathani University, 2020, 22(2), 116-122. (in Thai)
- [4] E.W. Rice, R.B. Baird and A.D. Eaton, Standard methods for the examination of water and wastewater, 23rd Ed., American Public Health Association, Washington DC, USA, 2017.
- [5] F. Promma, D. Thanaboripat and P. Sirirote, Biogas production from 3 strains of napier grass (*Pennisetum purpureum*), *Journal of Science Ladkrabang*, 2014, 23(2), 30-50. (in Thai)
- [6] S.S.Salek, O.D.Bozkurt, A.G.V. Turnhout, R.Kleerebezem and M.C.M.V. Loosdrechta, Kinetics of CaCO₃ precipitation in an anaerobic digestion process integrated with silicate minerals, *Ecological Engineering*, 2016, 86, 105-112.
- [7] K. Tjorve, and Tjorve, The use of Gompertz models in growth analyses, and new Gompertz-model approach: An addition to the Unified-Richards family, *PLOS ONE*, 2017, 12(6), 1-17.
- [8] S. Sirianuntapiboon, Wastewater Treatment System, Top Publishing, Bangkok, 2014. (in Thai)
- [9] K. Triantafyllou, C. Chang and M. Pimentel, Methanogens, Methane and gastrointestinal motility, *Journal of Neurogastroenterology and Motility*, 2014, 20(1), 31-40.
- [10] K. Panyaping, W. Kan-In, S. Saenphrom and A. Khampanyo, Biochemical methane potential of several kinds of petioles and leaves waste, *Journal of Community Development Research*, 2012, 5(1), 64-73. (in Thai)
- [11] S. Vanatpornratt and N. Pisutpaisal, Economic feasible evaluation of biogas production from napier grass, *Research Journal of Biotechnology*, 2015, 10(3), 94-98.
- [12] J. Chompoo, S. Chaiyasit and W. Suebsaiprom, Utilization of aquatic weeds as co-digestion with swine manure for biogas production, *King Mongkut's Agricultural Journal*, 2017, 35(3), 9-18. (in Thai)



- [13] S. Jijai, F. Iardisong S. Muleng, The potential of biogas production from the vegetable waste in municipal market, Yala, International Academic & Research Conference of Rajabhat University, Proceeding, 2017, 395-402. (in Thai)
- [14] K. Pomngern, P. Soh-salam and R. Pawongrat, Biogas production from steam-pretreated water hyacinth with cow dung by batch fermentation, Princess Narathiwat University Journal, 2016, 8(3), 129-139. (in Thai)

การลดความสูญเสียเปล่าในการปฏิบัติงานของกระบวนการจ่ายสินค้า: กรณีศึกษา บริษัทอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องตี๋ม จำกัด

สมชาย เปรียงพรม* และ นภาพร ภาษาสุข

สาขาวิชาการบริหารอุตสาหกรรมการผลิตและบริการ, ภาควิชาการบริหารอุตสาหกรรมการผลิตและบริการ,
คณะพัฒนาธุรกิจและอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: somchai.p@bid.kmutnb.ac.th

วันที่รับบทความ: 29 มีนาคม 2564; วันที่ทบทวนบทความ: 6 กรกฎาคม 2564; วันที่ตอบรับบทความ: 16 กรกฎาคม 2564

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 28 สิงหาคม 2564

บทคัดย่อ: การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการปฏิบัติงานในกระบวนการจ่ายสินค้าสำเร็จรูปด้วยเทคนิคการลดความสูญเสียเปล่าของการปฏิบัติงาน โดยกำหนดขั้นตอนดำเนินงานดังนี้ 1) ศึกษาขั้นตอนการปฏิบัติงานและการเก็บรวบรวมข้อมูลด้วยแผนภูมิกระบวนการไหล 2) การวิเคราะห์ขั้นตอนการปฏิบัติงานด้วยเทคนิค 5W1H 3) วิเคราะห์ความสูญเสียเปล่าของกิจกรรมการปฏิบัติงานตามหลักสายธารแห่งคุณค่า และ 4) การประยุกต์ใช้การปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานด้วยหลักการ ECRS จากการศึกษากิจกรรมการปฏิบัติงานจ่ายสินค้าด้วยแผนภูมิกระบวนการไหลมีกิจกรรมการปฏิบัติงานทั้งหมด 14 กิจกรรม การวิเคราะห์กิจกรรมการปฏิบัติงานด้วยเทคนิค 5W1H และการวิเคราะห์ความสูญเสียเปล่าของกิจกรรมตามหลักสายธารแห่งคุณค่า พบกิจกรรมที่มีมูลค่าเพิ่ม 6 กิจกรรม กิจกรรมที่ไม่ก่อให้เกิดมูลค่าเพิ่ม 4 กิจกรรม และกิจกรรมที่ไม่ก่อให้เกิดมูลค่าแต่มีความจำเป็นต้องปฏิบัติ 4 กิจกรรม จากนั้นกำหนดแนวทางการแก้ปัญหาตามหลัก ECRS หลังการปรับปรุงการทำงาน พบว่าประสิทธิภาพการปฏิบัติงานในกระบวนการจ่ายสินค้าสำเร็จรูปเพิ่มขึ้น เปรียบเทียบได้จากตัวชี้วัดดังนี้ ขั้นตอนการทำงานลดลง 4 ขั้นตอน จากก่อนปรับปรุง 14 ขั้นตอน เหลือ 10 ขั้นตอน (ลดลง 28.57 เปอร์เซ็นต์) ส่งผลให้ระยะเวลาในการทำงานต่อรอบลดลง 982 วินาที จากก่อนปรับปรุง 2,749 วินาที เหลือ 1,767 วินาที (ลดลง 35.52 เปอร์เซ็นต์)

คำสำคัญ: การเพิ่มประสิทธิภาพปฏิบัติงาน; แผนภูมิกระบวนการไหล; เทคนิคการวิเคราะห์งาน 5W1H; การวิเคราะห์กิจกรรมการปฏิบัติงาน; การลดความสูญเสียเปล่าตามหลัก ECRS

Waste Reduction in the Operation of the Product Shipping Process: A Case Study of the Beverage Industry Company Limited

Somchai Preangprom* and Napaporn Pasasuk

Division of Manufacturing and Service Industry Management, Department of Manufacturing and Service Industry Management, Faculty of Business and Industrial Development, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

* Corresponding author, E-mail: somchai.p@bid.kmutnb.ac.th

Received: 29 March 2021; Revised 6 July 2021; Accepted: 16 July 2021

Online Published: 28 August 2021

Abstract: The purpose of this study was to improve the efficiency of the operations involved in the finished product shipping process, using operational waste reduction techniques. The processes of the study consisted of the following parts: 1) Operation process study and information gathering using process flow charts. 2) Operation process analysis using 5W1H technique. 3) Operational activities' waste analysis - according to the value stream principle. 4) Operational efficiency improvement implementation using ECRS principles. According to the study of shipping operation by using flow process chart, there are 14 activities. 5W1H technique was used to analyse the operational process and value stream principle has been used in the activities wastes analysis. The result found that there are 6 value-added activities, 4 non-value added activities, and 4 necessary non-value added activities. The ECRS principle has been used to improve the operational process. After the implementation, the work efficiency of the operators was increasing. The comparisons of the indicators are as follows: The prior 14 procedures are reduced by 4 procedures into 10 procedures (28.57 percent reduction), which resulted in the work interval being reduced 982 second from 2,749 second to 1,767 second (35.52 percent reduction).

Keywords: Operational Efficiency Improvement; Flow Process Chart; 5W1H Analysis Techniques, Operational activity analysis; Waste Reduction by ECRS Principle



1. บทนำ

ตลาดเครื่องตี๋มในโลก แบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ (1) กลุ่มเครื่องตี๋มไม่มี แอลกอฮอล์ มีส่วนแบ่งตลาดประมาณ 65% ในเชิงปริมาณการบริโภคในแต่ละปี ประกอบด้วยเครื่องตี๋มหลากหลายประเภท เช่น น้ำตี๋มบรรจุขวด น้ำอัดลม โซดา เครื่องตี๋มบำรุงกำลัง เครื่องตี๋มเกลือแร่ น้ำผลไม้ ชา-กาแฟพร้อมตี๋ม เป็นต้น และ (2) กลุ่มเครื่องตี๋มแอลกอฮอล์ มีส่วนแบ่งตลาดประมาณ 35% ในเชิงปริมาณการบริโภคในแต่ละปี อาทิ เบียร์ สุรา ไวน์ การคาดการณ์ปี 2562-2564 การบริโภคเครื่องตี๋มในประเทศ (สัดส่วน 90% ของปริมาณการผลิตทั้งหมด) มีแนวโน้มเติบโตเล็กน้อยตามภาวะเศรษฐกิจ [1]

ปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตและจัดจำหน่ายเครื่องตี๋มสำเร็จรูปเป็นสินค้าประเภทตลาดแข่งขันสมบูรณ์ [2] ส่งผลให้ผู้บริโภคมีโอกาสในการตัดสินใจที่จะเลือกบริโภคมากขึ้น ซึ่งการที่ธุรกิจจะประสบผลสำเร็จได้จะต้องไม่คำนึงเพียงแต่ผลิตผลตามที่ต้องการเท่านั้น ผู้ประกอบการยังให้ความสำคัญกับระบบการบริหารจัดการสินค้าคงคลังและโลจิสติกส์ที่ส่งผลต่อมุมมองด้านคุณค่าของผู้บริโภค โดยการดำเนินงานคลังสินค้าจะช่วยสนับสนุนงานด้านการผลิต การขนส่ง และการบริการลูกค้า นอกจากนี้การบริหารจัดการสินค้าคงคลังที่ดีจะต้องมีการปรับปรุงและพัฒนากระบวนการทำงาน ที่ไม่ก่อให้เกิดประโยชน์ เพื่อให้ทำงานได้เต็มประสิทธิภาพ และเพิ่มผลผลิตให้กับสถานประกอบการ

การจัดการคลังสินค้าถือเป็นกิจกรรมหลักที่มีความสำคัญอย่างยิ่งกิจกรรมหนึ่งในกระบวนการทำงานด้านโลจิสติกส์ โดยการดำเนินงานคลังสินค้าจะ

ช่วยสนับสนุนงานด้านการผลิต การขนส่ง และการบริการลูกค้า อีกทั้งยังเกี่ยวข้องกับสถานที่ในการรองรับในการจัดเก็บวัตถุดิบและสินค้าเพื่อส่งต่อไปยังลูกค้า ในภาคธุรกิจและอุตสาหกรรม การลดความสูญเปล่าในกระบวนการจัดการคลังสินค้าด้วยการปรับปรุงการดำเนินงานของคลังสินค้าก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดด้านการจัดการและเกิดประสิทธิภาพมากที่สุด [3]

บริษัทกรณีศึกษา เป็นบริษัทที่ดำเนินธุรกิจเกี่ยวกับการผลิตเครื่องตี๋มประเภทไม่มีแอลกอฮอล์ ได้แก่ ผลิตภัณฑ์ชาเขียวสำเร็จรูป เพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้าทั้งภายในประเทศและต่างประเทศ จึงได้ให้ความสำคัญกับการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานทุกส่วน เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคได้ทันทั่วทั้งที่ และจากการศึกษากระบวนการทำงานในแผนกคลังสินค้าและจัดส่งสินค้าพบว่ากระบวนการทำงานในบางขั้นตอนของกระบวนการจ่ายสินค้ายังขาดประสิทธิภาพ เช่น พนักงานมีวิธีการปฏิบัติงานที่ก่อให้เกิดความสูญเปล่า การรอคอยในการส่งต่องาน และการดำเนินกิจกรรมที่ไม่สร้างมูลค่าเพิ่ม ฯลฯ ส่งผลให้พนักงานปฏิบัติงานไม่เต็มกำลังความสามารถ รวมถึงการตอบสนองความต้องการการจ่ายสินค้ายังไม่เป็นไปตามกำหนด ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อต้นทุนการดำเนินงาน เช่น ค่าล่วงเวลาของพนักงาน ค่าใช้จ่ายโรงงานด้านอื่นๆ เป็นต้น รวมถึงอาจส่งผลกระทบต่อความพึงพอใจของลูกค้าตามมา ปัจจุบันกระบวนการจ่ายสินค้าของสถานประกอบการกรณีศึกษามีความต้องการการจ่ายสินค้าให้กับรถบรรทุกที่เข้ามารับสินค้า แต่เฉลี่ยวันละ 403.2 คันต่อเดือน คิดเป็นความต้องการเฉลี่ยวันละ 16.8 คัน ปัจจุบันสามารถจ่ายสินค้าให้กับรถบรรทุก



เฉลี่ย ประมาณ 2,749 วินาทีต่อคัน (หรือประมาณ 45.81 นาที) ส่งผลให้เกิดการทำงานล่วงเวลาประมาณ 1-2 ชั่วโมงต่อวัน จากความต้องการการจ่ายสินค้าทั้งหมดในแต่ละเดือน

จากปัญหาดังกล่าวผู้ศึกษาจึงเล็งเห็นความสำคัญแก้อุปสรรคในกระบวนการจ่ายสินค้า ซึ่งปัจจุบันแนวคิดในการเพิ่มประสิทธิภาพไม่ใช่แค่เพียงมุ่งเน้นลดปัจจัยนำเข้าหรือการลดต้นทุนเท่านั้น แต่เป็นการวิเคราะห์กระบวนการทำงานที่ส่งผลให้เกิดความสูญเปล่าภายในคลังสินค้าและจัดส่งสินค้า ดังนั้นผู้ศึกษาจึงมีแนวคิดที่จะนำหลักการวิเคราะห์ขั้นตอนการทำงานตามหลัก 5W1H ร่วมกับการวิเคราะห์กิจกรรมการปฏิบัติงานที่ไม่ก่อให้เกิดมูลค่า รวมถึงการนำแนวคิดการลดความสูญเปล่าตามหลัก ECRS มาใช้เพื่อลดหรือกำจัดความสูญเปล่าที่เกิดขึ้น ในกระบวนการจัดการคลังสินค้าดังกล่าว โดยผู้ศึกษาได้ศึกษาแนวทางของแก้อุปสรรคดังนี้

อมรรัตน์, ณีฐพล และศิริพงษ์ (2561) กล่าวว่า การศึกษาและปรับปรุงสายการผลิตขึ้นส่วนรถยนต์กรณีศึกษา จากการศึกษาปัญหาเบื้องต้นพบว่าการผลิตใช้เวลานานและมีขั้นตอนในการผลิตที่ยุงยาก ซับซ้อน แล้วใช้แนวคิดกำจัดความสูญเปล่าที่เกิดขึ้นในกระบวนการ การดำเนินการปรับปรุงเริ่มจากการศึกษากระบวนการผลิตโดยใช้เครื่องมือการศึกษาวิธีการทำงาน และการศึกษาเวลา ทำการจำแนกความสูญเปล่าที่เกิดขึ้นในกระบวนการทำงานตามหลักการความสูญเปล่า 7 ประการ จากนั้นใช้แผนผังก้างปลาในการวิเคราะห์หาสาเหตุของแต่ละปัญหา เพื่อนำไปใช้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานด้วยหลักการ ECRS ซึ่งผลที่ได้จากการปรับปรุงส่งผลให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นร้อยละ 18.27 [4]

คลอเคลีย วจนะวิชากร (2562) กล่าวว่า การศึกษาเพื่อลดความสูญเปล่าในกระบวนการผลิตด้วยการวิเคราะห์และออกแบบเครื่องมือจากการศึกษาเพื่อหาแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการทำงานให้เหมาะสมที่สุดโดยใช้หลักการพื้นฐานคือ แผนภูมิกระบวนการไหล (flow process chart) แผนภูมิ why-why chart และ เทคนิคการปรับปรุงงาน (ECRS) มาใช้ในการศึกษา พบว่าสามารถลดปัญหาความสูญเปล่าที่เกิดจากกระบวนการผลิตที่มีปัญหา มาจากขั้นตอนการทำงานมากเกินไป วิธีการทำงานที่ซับซ้อน และความเสี่ยงในการเกิดอุบัติเหตุจากวิธีการทำงานได้ ผลลัพธ์จากการปรับปรุงส่งผลให้รอบเวลาในการผลิตลดลงร้อยละ 13.04 [5]

พัชรและดาธิดา (2555) กล่าวว่า ความสูญเปล่าเป็นกิจกรรมที่เพิ่มต้นทุน แต่ไม่เพิ่มคุณค่าของสินค้าหรือบริการให้แก่ลูกค้า การค้นหาความสูญเปล่าในวิธีการทำงานตามหลัก 5W1H เพื่อค้นหาสาเหตุรากเหง้าของปัญหาที่แท้จริง รวมถึงการนำเทคนิค ECRS มาช่วยลดความสูญเปล่าในกระบวนการผลิตหรือการทำงาน เพื่อให้การดำเนินงานหรือการปฏิบัติงานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ [6]

มัญยาภรณ์ และวิภาวรรณ (2556) กล่าวว่า การศึกษาวิธีการประกอบสินค้าประเภทก๊อกร้า เพื่อหาแนวทางในการจัดสมดุลการผลิตใหม่ เพื่อให้การผลิตมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยเมื่อทำการวิเคราะห์ขั้นตอนการทำงานด้วย 5W1H และดำเนินการปรับปรุงวิธีการทำงานโดย ECRS พบว่าสามารถลดขั้นตอนการทำงานย่อยจาก 24 ขั้นตอน เหลือ 16 ขั้นตอน และลดเวลาในการประกอบลงจาก 3.24 นาที เหลือ 2.44 นาที [7]



ศรัณย์ และประจวบ (2563) กล่าวว่า การศึกษาการทำงานของกระบวนการด้วยแผนภูมิการไหลวิเคราะห์คุณค่าของกิจกรรม การตั้งคำถาม 5W1H สามารถระบุปัญหาที่เกิดในกระบวนการผลิตได้ รวมถึงการประยุกต์ใช้หลักการ ECRS มาเป็นแนวทางสำหรับการปรับปรุงกระบวนการผลิตด้วยการแก้ไขจุดถ่วงขึ้นงานและการปรับระยะห่างเริ่มต้นของขึ้นงานในการอบสี สามารถลดของเสียประเภทตำแหน่งตัวอักษรเอียงบนขึ้นงานได้ 10,976 ชิ้นต่อวัน หรือคิดเป็นจำนวนของเสียที่ลดลง 100% ของแผนการผลิตรายวัน [8]

สุนันทา (2555) กล่าวว่า การปรับปรุงขั้นตอนการรับและการเบิกจ่ายสินค้า รวมถึงการจัดลำดับความสำคัญของสินค้าตามหลัก ABC และการออกแบบแผนผังการจัดเก็บตามหลักการจัดกลุ่มสินค้าดังกล่าว ส่งผลต่อความเป็นระเบียบเรียบร้อยของคลังสินค้า และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการเบิกจ่ายสินค้าด้านเวลาลดลงเฉลี่ย 33 นาทีต่อวัน รวมถึงความผิดพลาดในการตรวจนับสินค้าลดลงจากร้อยละ 46.14 เป็นร้อยละ 21.25 [9]

พิชิต ตานันท์ (2559) กล่าวว่า การเพิ่มประสิทธิภาพในการบริหารจัดการคลังสินค้า ภายใต้ข้อจำกัดด้านพื้นที่ ด้วยการปรับปรุงวิธีการปฏิบัติงานภายในคลังสินค้า รวมถึงการจัดการแบ่งกลุ่มสินค้าแบบ Zoning ตามหลัก ABC Analysis สามารถลดเวลาในขั้นตอนการรับสินค้าเข้าคลังได้ร้อยละ 32.8 และลดเวลาในการเบิกจ่ายสินค้าได้ร้อยละ 45.54 [10]

การศึกษางานวิจัยดังกล่าวข้างต้นเพื่อเป็นแนวทางสำหรับปรับปรุงวิธีการปฏิบัติงาน และการลด

เวลาการปฏิบัติงานในกระบวนการจ่ายสินค้า เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพและประโยชน์สูงสุดต่อสถานประกอบการดังกล่าวตามมา [11-13]

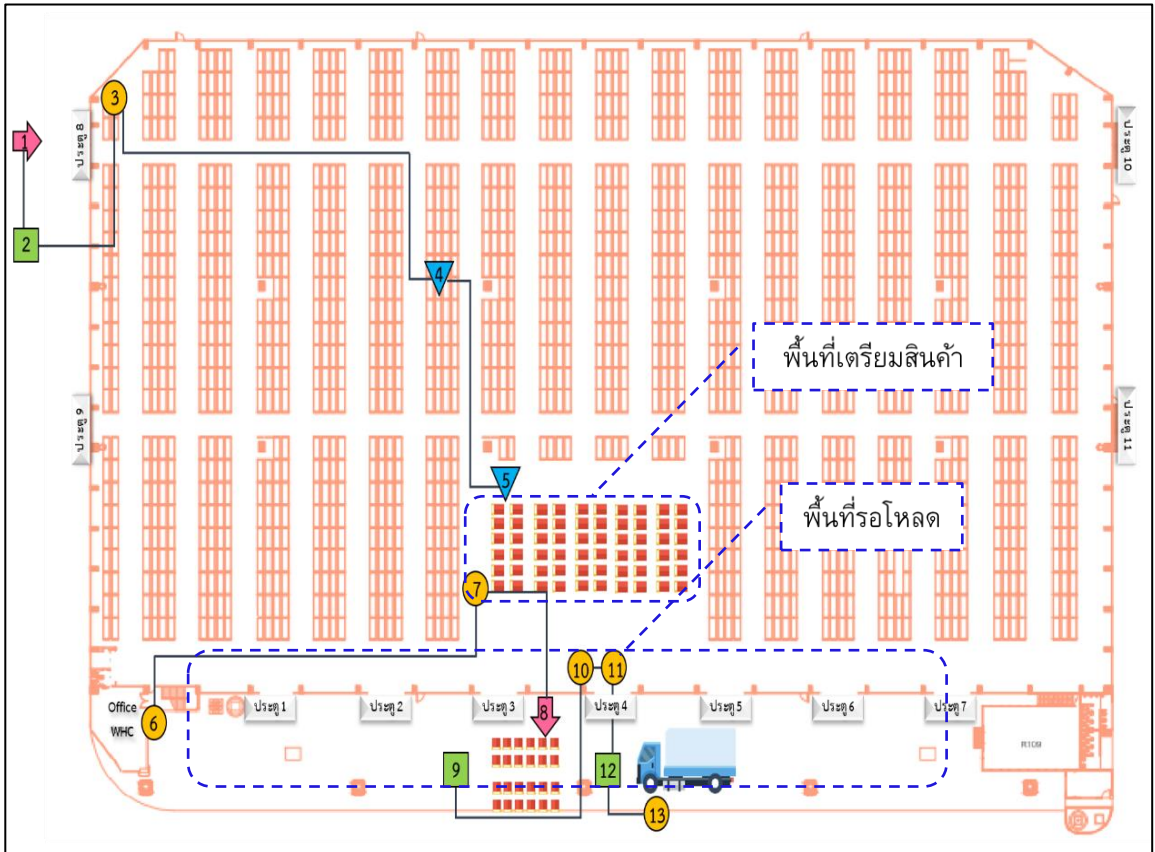
2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การศึกษาข้อมูลกระบวนการทำงานในกระบวนการจ่ายสินค้า (Outbound)

การศึกษาข้อมูลกระบวนการทำงานในกระบวนการจ่ายสินค้า ประกอบด้วยการศึกษาข้อมูลทั่วไปที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการจ่ายสินค้า เช่น พื้นที่คลังสินค้า แผนภูมิกระบวนการทำงาน แผนภูมิกระบวนการไหล (Flow Process Chart) และอุปกรณ์ที่ใช้ในคลังสินค้า ในส่วนนี้ผู้ศึกษาจะแสดงเฉพาะข้อมูลที่จำเป็นต่อการอธิบายเพื่อให้เกิดความเข้าใจในขั้นตอนการปฏิบัติงานให้มากที่สุด

2.1.1 พื้นที่คลังสินค้าและขั้นตอนการรับ-จ่ายสินค้าภายในคลัง รูปที่ 1 แสดงพื้นที่การจัดเก็บสินค้าและขั้นตอนการรับ-จ่ายสินค้าภายในคลังหมายเลข 1 ถึง 5 เป็นกระบวนการรับสินค้าเข้าคลังและการจัดการสินค้าภายในคลัง ส่วนหมายเลข 6 ถึง 13 เป็นกระบวนการจ่ายสินค้าเพื่อเตรียมสินค้าและส่งมอบสินค้าไปยังลูกค้า

2.1.2 ขั้นตอนการปฏิบัติงานของจ่ายสินค้า การรวบรวมข้อมูลการทำงานสำหรับวิเคราะห์ปัญหาโดยจำแนกกิจกรรมต่างๆ ตามการปฏิบัติงานของพนักงานจ่ายสินค้า โดยมีรายละเอียดขั้นตอนการปฏิบัติงานของการจ่ายสินค้าแบ่งออกเป็น 14 ขั้นตอนย่อยดังรูปที่ 2



รูปที่ 1 พื้นที่คลังสินค้าและขั้นตอนการรับ-จ่ายสินสินค้า

จากการศึกษาขั้นตอนการปฏิบัติงานของการจ่ายสินค้าด้วยแผนภูมิกระบวนการไหลในรูปที่ 2 พบว่า ขั้นตอนการปฏิบัติการจ่ายสินค้า (ก่อนการปรับปรุง) มีทั้งหมด 14 กิจกรรม แบ่งออกเป็นดังนี้ 1) กิจกรรมการปฏิบัติงานมี 6 กิจกรรม 2) กิจกรรมการเคลื่อนย้ายมี 3 กิจกรรม 3) กิจกรรมล่าช้า หรือ (รอ) มี 3 กิจกรรม และ 4) กิจกรรมการตรวจสอบมี 2 กิจกรรม ใช้เวลาในการปฏิบัติงานจ่ายสินค้าแต่ละรอบเฉลี่ย 2,749 วินาที หรือคิดเป็น 45 นาที 49 วินาที

2.2 การวิเคราะห์วิธีการทำงานในปัจจุบัน

การศึกษาข้อมูลขั้นตอนการปฏิบัติงานของพนักงานในปัจจุบัน เพื่อหาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน เริ่มจากการวิเคราะห์แผนภูมิกระบวนการไหลของขั้นตอนการวิเคราะห์กิจกรรมการจ่ายสินค้าตามหลัก 5W1H ร่วมกับการวิเคราะห์กิจกรรมการปฏิบัติงานเพื่อลดความสูญเปล่าของกิจกรรมที่ไม่ก่อให้เกิดมูลค่า ตามแนวคิดการลดความสูญเปล่าของกิจกรรมดังนี้ [5-8]



แผนภูมิหมายเลข 1			แผ่นที่ 1		สรุปผล				
ผลิตภัณฑ์	วัสดุ	พนักงาน			กิจกรรม	ปัจจุบัน	หลังปรับปรุง	ลดลง	
			ปฏิบัติงาน		●	6			
			เคลื่อนย้าย		➡	3			
			ล่าช้า		◐	3			
กิจกรรม	การจ่ายสินค้า		ตรวจสอบ		■	2			
			เก็บ		▼	0			
วิธีการทำงาน			ปัจจุบัน	ปรับปรุง					
ลำดับ	คำอธิบาย		เวลา (วินาที)	สัญลักษณ์					หมายเหตุ
				●	➡	◐	■	▼	
1	รับใบเบิกสินค้า		83	●					
2	จัดหาสินค้าให้ตรงตามใบเบิกสินค้า		106	●					
3	บันทึกข้อมูลใบตรวจสอบสภาพสินค้าและรถขนส่ง		290	●					
4	รถเคลื่อนย้ายสินค้าไปที่ลานโหลดสินค้า		275			◐			
5	เดินไปที่ลานโหลดสินค้า		71		➡				
6	ตรวจสอบสินค้าและติดบาร์โค้ด		374				■		
7	เดินกลับเข้ามาในคลังสินค้า		24		➡				
8	สแกนบาร์โค้ด		429	●					
9	ติดต่อเรียกรถขนส่งสินค้า		40	●					
10	รอรถขนส่งสินค้า		509			◐			
11	เดินไปที่ลานโหลดสินค้า		85		➡				
12	ตรวจสอบสภาพรถและพนักงานขับรถ		46				■		
13	รอพนักงานขับรถยกโหลดสินค้าขึ้นรถขนส่ง		381			◐			
14	ลงชื่อและเวลาการโหลดสินค้า		36	●					
รวม			2,749						

รูปที่ 2 แผนผังกระบวนการไหลของขั้นตอนการจ่ายสินค้า (ก่อนการปรับปรุง)

การวิเคราะห์กิจกรรมการจ่ายสินค้าตามหลัก 5W1H เพื่อให้ทราบรายละเอียดของกิจกรรมการจ่ายสินค้าแต่ละกิจกรรมว่าใคร ทำอะไร ที่ไหน เมื่อไหร่ อย่างไร ทำไม่ต้องทำ และวิเคราะห์กิจกรรมที่มี

มูลค่าเพิ่ม (Value Added Activities: VA) กิจกรรมที่ไม่มีมูลค่าเพิ่ม (Non Value Added Activities: NVA) และกิจกรรมที่จำเป็นแต่ไม่มีมูลค่าเพิ่ม (Necessary but Non Value Added Activities: NNVA) ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การวิเคราะห์กิจกรรมการจ่ายสินค้า (ก่อนปรับปรุง)

ลำดับ	5W1H	กิจกรรม	การวิเคราะห์กิจกรรม
1	What	รับใบเบิกสินค้า	NNVA
	Where	คลังสินค้า	
	When	เมื่อถึงรอบเวลาการจ่ายสินค้าทุกต้นชั่วโมง	
	Who	พนักงานจ่ายสินค้า	
	Why	เพื่อรับใบเบิกสินค้าตามรอบเวลาการเข้ารับสินค้าเพื่อนำมาจัดเตรียมสินค้า	
	How	รับใบเบิกสินค้าจากพนักงานควบคุมคลังสินค้า	
2	What	การจัดหาสินค้าให้ตรงตามใบเบิกสินค้า	VA
	Where	คลังสินค้า	
	When	ทันทีหลังได้รับเอกสารใบเบิกสินค้า	
	Who	พนักงานจ่ายสินค้าและพนักงานขับรถยก	
	Why	เพื่อจัดสินค้าให้ถูกต้องตามรายละเอียดที่ระบุในใบเบิกสินค้า	
	How	นำใบเบิกสินค้าไปเทียบหาสินค้าบริเวณที่פקสินค้า (Stage)	
3	What	บันทึกข้อมูลในใบตรวจสอบสภาพสินค้าและรถขนส่ง	VA
	Where	คลังสินค้า	
	When	ขณะที่พนักงานขับรถยกจัดเตรียมสินค้าไว้ที่ลานโหลดสินค้า	
	Who	พนักงานจ่ายสินค้า	
	Why	ระบุรายละเอียดลงในใบตรวจสอบสภาพสินค้าสินค้าและรถขนส่งให้ตรงตามข้อมูลในใบเบิกสินค้า	
	How	บันทึกข้อมูลในใบตรวจสอบสภาพสินค้าและรถขนส่ง โดยอ้างอิงข้อมูลตามใบเบิกสินค้า ดังนี้ วันที่ เลขที่ใบเบิกสินค้า ปลายทาง ทะเบียนรถ ชื่อพนักงานขับรถ รายการสินค้า จำนวนสินค้า	



ตารางที่ 1 การวิเคราะห์กิจกรรมการจ่ายสินค้า (ก่อนปรับปรุง) (ต่อ)

ลำดับ	5W1H	กิจกรรม	การวิเคราะห์กิจกรรม
4	What	รถเคลื่อนย้ายสินค้าไปที่ลานโหลดสินค้า	NVA
	Where	ภายในบริเวณคลังสินค้าหรือบริเวณที่พักสินค้า (Stage)	
	When	เมื่อบันทึกข้อมูลในใบตรวจสอบสภาพสินค้าและรถขนส่งเรียบร้อยแล้ว	
	Who	พนักงานจ่ายสินค้า	
	Why	การย้ายสินค้าจากพื้นที่จัดเก็บไปยังลานโหลดขนย้ายโดยพนักงานขับรถยก	
	How	รถการเคลื่อนย้ายสินค้าไปที่ลานโหลด	
5	What	เดินไปที่ลานโหลดสินค้า (รอบที่หนึ่ง)	NNVA
	Where	จากจุดเตรียมสินค้าไปยังลานโหลดสินค้า	
	When	ระหว่างพนักงานขับรถยกจัดเตรียมสินค้าไปที่ลานโหลดสินค้า	
	Who	พนักงานจ่ายสินค้า	
	Why	เพื่อไปตรวจสอบสภาพสินค้าและติดบาร์โค้ดพาเลท ยังลานโหลด	
	How	เดินไปยังลานโหลด	
6	What	ตรวจสอบสินค้าและติดบาร์โค้ด	VA
	Where	ลานโหลดสินค้า	
	When	หลังจากพนักงานขับรถยกจัดเตรียมสินค้าไว้ที่ลานโหลดสินค้าครบถ้วน	
	Who	พนักงานจ่ายสินค้า	
	Why	ยืนยันการตรวจสอบสภาพสินค้าให้เป็นไปตามข้อกำหนดของโรงงาน และ การติดบาร์โค้ดพาเลทเพื่อเป็นหลักฐานการขนส่งสินค้า	
	How	ตรวจสอบสภาพสินค้าทุกพาเลท และนำบาร์โค้ดที่ติดอยู่กับพาเลทสินค้ามาติดลงบนใบตรวจสอบสภาพสินค้าและรถขนส่ง	
7	What	เดินกลับเข้าไปในคลังสินค้า	NVA
	Where	จากลานโหลดเข้าไปในคลังสินค้า	
	When	เมื่อตรวจสอบสภาพสินค้าและติดบาร์โค้ดที่ลานโหลดเรียบร้อยแล้ว	
	Who	พนักงานจ่ายสินค้า	
	Why	เพื่อเข้าไปสแกนยืนยันการตรวจสอบสินค้าที่จะทำการจ่ายให้กับรถขนส่ง	
	How	เดิน	



ตารางที่ 1 การวิเคราะห์กิจกรรมการจ่ายสินค้า (ก่อนปรับปรุง) (ต่อ)

ลำดับ	5W1H	กิจกรรม	การวิเคราะห์กิจกรรม
8	What	การสแกนบาร์โค้ด	VA
	Where	ภายในคลังสินค้า	
	When	หลังตรวจสอบสภาพสินค้าและติดบาร์โค้ดถูกต้องตามข้อกำหนดในเอกสารตรวจสอบสภาพสินค้าและรถขนส่ง	
	Who	พนักงานจ่ายสินค้า	
	Why	ยืนยันการเลือกพาเลทสินค้าที่จะทำการจ่ายให้กับรถขนส่งถูกต้อง	
	How	ใช้อุปกรณ์อ่านบาร์โค้ด (Handheld) สแกนที่บาร์โค้ดพาเลทสินค้า รหัสการจัดวางสินค้า รหัสการขายสินค้า ให้ครบตามจำนวน	
9	What	การติดต่อรถขนส่งสินค้า	NNVA
	Where	ภายในบริเวณคลังสินค้า	
	When	หลังจากสแกนบาร์โค้ดพาเลทสินค้าครบเรียบร้อยแล้ว ได้ตรวจสอบความถูกต้องในระบบว่ามีการเลือกพาเลทสินค้าตามใบเบิกสินค้าอย่างครบถ้วน สถานะ "ยืนยันการขนส่งสินค้า"	
	Who	พนักงานจ่ายสินค้า	
	Why	เพื่อให้รถขนส่งสินค้าเข้ามารับสินค้าบริเวณลานโหลดสินค้า	
	How	พนักงานจ่ายสินค้าติดต่อรถขนส่งสินค้าโดยใช้วิทยุสื่อสาร แจ้งทะเบียนรถและสถานที่การรับสินค้าให้ถูกต้อง	
10	What	รถขนส่งสินค้า	NVA
	Where	ภายในคลังสินค้า	
	When	หลังจากติดต่อรถขนส่งเรียบร้อยแล้ว	
	Who	พนักงานจ่ายสินค้า	
	Why	รถขนส่งสินค้าเข้ามายังพื้นที่รอโหลดสินค้า	
	How	พักรอในพื้นที่คลังสินค้าหรือบริเวณลานโหลด	



ตารางที่ 1 การวิเคราะห์กิจกรรมการจ่ายสินค้า (ก่อนปรับปรุง) (ต่อ)

ลำดับ	5W1H	กิจกรรม	การวิเคราะห์กิจกรรม
11	What	เดินไปที่ลานโหลดสินค้า (รอบที่สอง)	NVA
	Where	จากคลังไปยังลานโหลด	
	When	หลังจากติดต่อรถขนส่งและรถขนส่งเข้ามายังพื้นที่รอโหลดเรียบร้อยแล้ว	
	Who	พนักงานจ่ายสินค้า	
	Why	เพื่อไปตรวจสอบสภาพรถขนส่งและพนักงานขนส่ง	
	How	เดิน	
12	What	ตรวจสอบสภาพรถและพนักงานขับรถ	VA
	Where	บริเวณลานโหลดสินค้า	
	When	เมื่อรถเข้ามายังลานโหลด	
	Who	พนักงานจ่ายสินค้า	
	Why	เพื่อตรวจสอบสภาพรถ และพนักงานขับรถ เพื่อป้องกันความเสียหายระหว่างขนส่ง	
How	ตรวจสอบสภาพความพร้อมของรถและพนักงานขับรถ		
13	What	รอพนักงานขับรถยกโหลดสินค้าขึ้นรถขนส่ง	NNVA
	Where	บริเวณลานโหลดสินค้า	
	When	หลังจากตรวจสอบสภาพรถและพนักงานขับรถเรียบร้อยแล้ว	
	Who	พนักงานจ่ายสินค้า	
	Why	เพื่อรอบันทึกข้อมูลหลังจากการโหลดสินค้าขึ้นรถขนส่งเรียบร้อยแล้ว	
	How	รอ ณ บริเวณลานโหลด ระหว่างรถยกสินค้ายกสินค้าขึ้นรถขนส่ง	
14	What	ลงชื่อผู้บันทึกข้อมูลและเวลาในการโหลดสินค้า	VA
	Where	บริเวณลานโหลดสินค้า	
	When	เมื่อโหลดสินค้าได้ครบถ้วน และสินค้าอยู่ในสภาพสมบูรณ์ทุกพาเลท	
	Who	พนักงานจ่ายสินค้าและพนักงานขับรถ	
	Why	เพื่อให้การจ่ายสินค้าถูกต้องตามเงื่อนไข	
	How	ลงชื่อผู้บันทึกข้อมูลและเวลาในการโหลดสินค้า จากนั้นส่งเอกสารให้กับพนักงานขับรถลงชื่อยืนยันการรับสินค้า	



ตารางที่ 1 การวิเคราะห์ขั้นตอนการปฏิบัติงานตามหลัก 5W1H ประกอบกับการวิเคราะห์ความสูญเปล่าของกิจกรรม พบว่ากิจกรรมที่มีมูลค่าเพิ่ม (VA) มี 6 กิจกรรม กิจกรรมที่ไม่มีมูลค่าเพิ่ม (NVA) มี 4 กิจกรรม และกิจกรรมที่ไม่มีมูลค่าเพิ่มแต่มีความจำเป็นต้องปฏิบัติ (NNVA) มี 4 กิจกรรม ตารางที่ 2 สรุปกิจกรรมความสูญเปล่าของการปฏิบัติงานได้ทั้งหมด 7 กิจกรรม ได้แก่ กิจกรรมที่ 4, 7, 8, 9, 10, 11 และ 13 ตามลำดับ และปัญหาที่พบจากการปฏิบัติงาน ซึ่งสามารถสรุปประเด็นปัญหาที่พบจากกิจกรรมการปฏิบัติงานได้ทั้งหมด 9 ปัญหา ทั้งนี้การวิเคราะห์และสรุปดังกล่าวข้างต้น เพื่อค้นหาว่ากิจกรรมใดก่อให้เกิดความสูญเปล่าและสามารถลดความสูญเปล่าตามหลัก ECRS ได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของงานปัจจุบัน

2.3 ออกแบบแนวทางการแก้ปัญหา

การออกแบบแนวทางการแก้ปัญหากำหนดเป้าหมายหลัก คือ การเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานและทำการมอบหมายหน้าที่ความรับผิดชอบให้กับพนักงานผู้ปฏิบัติงานได้ปฏิบัติตามแผนที่วางไว้ โดยนำแนวคิดการลดความสูญเปล่าในการดำเนินงาน ตามหลัก ECRS มาใช้ในการกำหนดแผนการปรับปรุง ด้วยการขจัดส่วนที่ไม่จำเป็น (Eliminate) การรวมกระบวนการทำงานเข้าด้วยกัน (Combine) การจัดลำดับกระบวนการทำงาน (Rearrange) การปรับเปลี่ยนขั้นตอนให้ง่ายขึ้น (Simplify) ดังแสดงในตารางที่ 3

การนำเครื่องมือการวิเคราะห์กระบวนการปฏิบัติงานกระบวนการไหล การวิเคราะห์ปัญหา 5W1H และเทคนิคการปรับปรุงการทำงาน ECRS

มาใช้หาแนวทางที่เหมาะสมในการแก้ปัญหากระบวนการจ่ายสินค้า โดยการลดขั้นตอนการทำงานที่ไม่ก่อให้เกิดประโยชน์ รวมถึงสามารถลดระยะเวลาในการปฏิบัติงานโดยรวมในกระบวนการจ่ายสินค้าได้

3. ผลการดำเนินงาน

3.1 ผลการดำเนินงานหลังการปรับปรุง

หลังจากการศึกษาค้นคว้าของกระบวนการจ่ายสินค้าแล้วนำหลักการการลดความสูญเปล่าในกระบวนการทำงาน ECRS มาประยุกต์ใช้ รวมถึงปรับปรุงขั้นตอนในการปฏิบัติงาน สามารถปรับแผนผังกระบวนการไหลของการทำงาน และสร้างวิธีการปฏิบัติงานใหม่ได้ดังรูปที่ 3 ส่งผลให้ขั้นตอนการดำเนินงานการจ่ายสินค้าลดลงเหลือ 10 ขั้นตอน

3.2 เปรียบเทียบการดำเนินงานก่อนและหลังการปรับปรุง

จากการสุ่มตัวอย่าง จำนวนทั้งหมด 30 ตัวอย่าง เท่ากันกับการสุ่มตัวอย่างก่อนปรับปรุง พบว่าการนำแนวคิดการลดความสูญเปล่ามาใช้ในการปรับปรุงกระบวนการทำงาน ส่งผลให้ขั้นตอนในการทำงานของพนักงานลดลง จากก่อนปรับปรุง 14 ขั้นตอน ลดลงเหลือ 10 ขั้นตอน และใช้เวลาปฏิบัติงานรวมทั้ง 2,749 วินาที ลดลงเหลือ 1,767 วินาที ดังแสดงในตารางที่ 4

3.3 ผลการดำเนินงานตามตัวชี้วัด

จากการปรับปรุงกระบวนการทำงานสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของพนักงานได้สรุปผลการเปรียบเทียบก่อนและหลังปรับปรุงดังแสดงในตารางที่ 4



ตารางที่ 2 สรุปการวิเคราะห์กิจกรรมความสูญเปล่าของการทำงานปัจจุบันและปัญหาที่เกิดจากการปฏิบัติงาน

ลำดับที่	กิจกรรมลำดับที่/ชื่อกิจกรรม/ (ผลการวิเคราะห์กิจกรรม)	ปัญหาที่พบ
1	กิจกรรมที่ 4 / รอเคลื่อนย้ายสินค้า ไปที่ลานโหลดสินค้า / (NVA)	1. เกิดการรอคอยของพนักงานจ่ายสินค้าในขณะที่พนักงานขับรถ ยกขนย้ายสินค้าจากจุดพักไปยังลานโหลด
2	กิจกรรมที่ 7 / เดินกลับไปยัง คลังสินค้า / (NVA)	2. เกิดความสูญเปล่าระหว่างการเดินเนื่องจาก วิธีการทำงาน ปัจจุบันพนักงานต้องกลับเข้ามาสแกนบาร์โค้ดภายในคลังสินค้า
3	กิจกรรมที่ 8 / การสแกนบาร์โค้ด เพื่อจ่ายสินค้า / (VA)	3. การสแกนบาร์โค้ดปัจจุบันมีขั้นตอนการทำงานย่อยที่ซ้ำซ้อน ทั้งหมด 3 ขั้นตอน ต่อการจ่ายสินค้า 1 พาเลทดังนี้ 1) สแกนเลขที่พาเลทสินค้า 2) สแกนบาร์โค้ดข้อมูลการจัดวางสินค้า 3) สแกนบาร์โค้ดการขายสินค้า ตัวอย่างเช่น สินค้ามีจำนวน 24 พาเลทต้องสแกนบาร์โค้ดทั้งหมด 24 พาเลท X 3 ครั้ง รวมทั้งหมด 72 ครั้ง
4	กิจกรรมที่ 9 / การติดต่อรถขนส่ง สินค้า / (NNVA)	4. การติดต่อเรียกรถขนส่งสินค้าไม่มีการจัดลำดับการปฏิบัติงาน ก่อนหลังให้เหมาะสม ส่งผลให้เกิดเวลาที่สูญเปล่าขณะรถขนส่ง สินค้า 5. พนักงานจ่ายสินค้า ไม่มีการติดต่อรถขนส่งสินค้าตามลำดับการ รับสินค้าที่เจ้าหน้าที่จัดทำเอกสารการขายสินค้า (Billing) ได้ส่ง ข้อมูลพนักงานขับรถมาทางอีเมลล์
5	กิจกรรมที่ 10 / รอรถขนส่งสินค้า / (NVA)	6. เกิดการรอคอยของพนักงานจ่ายสินค้าในขณะที่รถขนส่งเข้า มายังพื้นที่โหลดสินค้า
6	กิจกรรมที่ 11 / เดินไปที่ลานโหลด สินค้า (รอบที่สอง) / (NVA)	7. เกิดความสูญเปล่าระหว่างการเดินเนื่องจากต้องกลับไปยังลาน โหลดสินค้า
7	กิจกรรมที่ 13 / รอการยกสินค้า ขึ้นรถ / (NNVA)	8. เกิดปัญหาการรอคอยโหลดสินค้าในลำดับถัดไปการขนย้ายสินค้า จากจุดพักสินค้าไปยังลานโหลด พนักงานขับรถยกไม่มีการจัดเรียง พาเลทสินค้าบริเวณลานโหลดสินค้าตามลำดับรถขนส่งที่เข้ามา รับสินค้า (ส่งผลให้เกิดการรอโหลดสินค้าในลำดับถัดไป) 9. วิธีการจัดวางพาเลทสินค้าในพื้นที่รอโหลดสินค้า ส่งผลให้ใช้พื้นที่ จัดเตรียมพาเลทสินค้าในกระบวนการจ่ายสินค้าได้ไม่เต็ม ประสิทธิภาพ



ตารางที่ 3 การกำหนดแนวทางการแก้ปัญหาโดยใช้เทคนิคการลดความสูญเปล่า

ปัญหา	แนวคิดการลดความสูญเปล่าในกระบวนการทำงาน
1. เกิดการรอคอยของพนักงานจ่ายสินค้าใน ขณะที่พนักงานขับรถยกขนย้ายสินค้าจากจุดพัก ไปยังลานโหลด	การจัดลำดับกระบวนการทำงาน (Rearrange) โดย กำหนดให้พนักงานเริ่มขั้นตอนการติดต่อรถขนส่งเพื่อเข้า มายังจุดโหลดสินค้าหลังจากทำขั้นตอนที่ 3 คือ บันทึก ข้อมูลในใบตรวจสอบสภาพสินค้าและรถขนส่งเสร็จเรียบร้อยแล้ว
2. เกิดความสูญเปล่าระหว่างการเดินเนื่องจาก ต้องกลับไปในคลังสินค้า	การขจัดส่วนที่ไม่จำเป็น (Eliminate) โดยการย้ายจุดสแกน บาร์โค้ดจากตำแหน่งเดิมมาไว้บริเวณลานโหลด เพื่อไม่ให้เกิด ความสูญเปล่าระหว่างการเดินไปกลับเข้าออกของพนักงาน
3. วิธีการสแกนบาร์โค้ดมีขั้นตอนการทำงานย่อย ที่ซ้ำซ้อน ทั้งหมด 3 ขั้นตอน ต่อการจ่ายสินค้า 1 พาเลท	การขจัดส่วนที่ไม่จำเป็น (Eliminate) โดยการลดการสแกน สินค้าให้เหลือเพียงครั้งเดียวหลังจากตรวจสอบสินค้าและ ติดบาร์โค้ดแล้ว
4. การติดต่อเรียกรถขนส่งสินค้าไม่มีการ จัดลำดับการปฏิบัติงานก่อนหลังให้เหมาะสม ทำ ให้เกิดเวลาที่สูญเปล่า ขณะรถขนส่งสินค้า	การจัดลำดับกระบวนการทำงาน (Rearrange) โดย กำหนดให้พนักงานตรวจสอบสินค้า ติดต่อรถขนส่งสินค้า ต่อจากขั้นตอนการบันทึกข้อมูลในใบตรวจสอบสภาพสินค้า และรถขนส่ง เพื่อให้ในขณะที่พนักงานรอรถขนส่งสินค้า สามารถตรวจสอบสภาพสินค้า และสแกนบาร์โค้ดบริเวณ ลานโหลดสินค้าได้
5. พนักงานตรวจสอบสินค้า ไม่มีการติดต่อรถ ขนส่งสินค้าตามลำดับการรับสินค้าที่เจ้าหน้าที่ จัดทำเอกสารการขายสินค้า (Billing)	การจัดลำดับกระบวนการทำงาน (Rearrange) กำหนดให้ การติดต่อรถขนส่งสินค้าตามลำดับการรับสินค้าที่เจ้าหน้าที่ จัดทำเอกสารการขายสินค้า (Billing)
6. เกิดการรอคอยของพนักงานจ่ายสินค้าใน ขณะที่รถขนส่งเข้ามายังพื้นที่โหลดสินค้า	การจัดลำดับกระบวนการทำงาน (Rearrange) กำหนดให้ พนักงานติดต่อเรียกรถขนส่งหลังจากจัดเตรียมสินค้าเสร็จ ทันที
7. เกิดความสูญเปล่าระหว่างการเดินเนื่องจาก ต้องกลับไปยังลานโหลดสินค้า	การขจัดส่วนที่ไม่จำเป็น (Eliminate) โดยการย้ายจุดสแกน บาร์โค้ดจากตำแหน่งเดิมมาไว้บริเวณลานโหลด เพื่อไม่ให้เกิด ความสูญเปล่าระหว่างการเดินไปกลับเข้าออกของพนักงาน

**ตารางที่ 3** การกำหนดแนวทางการแก้ปัญหาโดยใช้เทคนิคการลดความสูญเปล่า (ต่อ)

ปัญหา	แนวคิดการลดความสูญเปล่าในกระบวนการทำงาน
8. เกิดปัญหาการรอคอยการไหลตสินค้าในลำดับถัดไป การขนย้ายสินค้าจากจุดพักสินค้าไปยังลานไหล พนักงานขับรถยกไม่มีการจัดเรียงพาเลทสินค้าบริเวณลานไหลตสินค้าตามลำดับรถขนส่งที่เข้ามารอรับสินค้า (ส่งผลให้เกิดการรอไหลตสินค้าในลำดับถัดไป)	การปรับเปลี่ยนวิธีการให้ง่ายขึ้น (Simplify) โดยกำหนดวิธีการจัดเรียงสินค้าตามลำดับการขนส่งเพื่อให้การใช้พื้นที่เกิดประสิทธิภาพสูงสุด โดยมอบหมายหน้าที่ให้กับพนักงานขับรถยกให้ตรวจสอบลำดับรถขนส่งสินค้าที่บันทึกไว้ในเอกสารทุกครั้ง และจัดเรียงสินค้าให้ตรงตามลำดับที่ระบุในเอกสาร เพื่อให้เกิดความสม่ำเสมอในกระบวนการจ่ายสินค้า และลดเวลาในการรอคอยรถขนส่งสินค้า
9. วิธีการจัดวางพาเลทสินค้าในพื้นที่รอไหลตสินค้า ส่งผลให้ใช้พื้นที่จัดเตรียมพาเลทสินค้าในกระบวนการจ่ายสินค้าได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ	การปรับเปลี่ยนวิธีการให้ง่ายขึ้น (Simplify) โดยมอบหมายหน้าที่ให้กับพนักงานขับรถยกปรับเปลี่ยนรูปแบบการจัดวางพาเลทสินค้า โดยเพิ่มการจัดวางพาเลทสินค้า จากกว้าง 2 แถว ยาว 6 แถว เป็นกว้าง 3 แถว ยาว 4 แถว เพื่อใช้พื้นที่การจัดวางพาเลทสินค้าได้เพิ่มขึ้นจากเดิม และเพิ่มความสามารถในการจ่ายสินค้า

ตารางที่ 4 สรุปผลการเปรียบเทียบขั้นตอนและเวลาของการปฏิบัติงานก่อนและหลังปรับปรุง

ตัวชี้วัด	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง	ผลต่าง	ร้อยละ
1. ขั้นตอนในการทำงาน (ขั้นตอน)	14	10	ลดลง 4	28.57
2. ระยะเวลาในการทำงาน (วินาที)	2,749	1,767	ลดลง 982	35.52
3. ลดการทำงานล่วงเวลาประมาณ (ชั่วโมง)	1-2	ไม่มี	ลดลง 1-2	100



แผนภูมิหมายเลข 1			แผ่นที่ 1		สรุปผล				
ผลิตภัณฑ์	วัสดุ	พนักงาน	กิจกรรม		ปัจจุบัน	หลังปรับปรุง	ลดลง		
			ปฏิบัติงาน		6	6	0		
			เคลื่อนย้าย		3	1	2		
			ลำช้า		3	1	2		
กิจกรรม	การจ่ายสินค้า		ตรวจสอบ		2	2	0		
			เก็บ		0	0	0		
วิธีการทำงาน			ปัจจุบัน	ปรับปรุง					
ลำดับ	คำอธิบาย		เวลา (วินาที)	สัญลักษณ์					หมายเหตุ
1	รับใบเบิกสินค้า		84						
2	จัดหาสินค้าให้ตรงตามใบเบิกสินค้า		112						
3	บันทึกข้อมูลใบใบตรวจสอบสภาพสินค้าและรถขนส่ง		253						
4	ติดต่อเรียกรถขนส่งสินค้า		51						
5	เดินไปที่ลานโหลดสินค้า		80						
6	ตรวจสอบสินค้าและติดบาร์โค้ด		368						
7	สแกนบาร์โค้ด		321						
8	ตรวจสอบสภาพรถและพนักงานขับรถ		62						
9	รอพนักงานขับรถยกโหลดสินค้าขึ้นรถขนส่ง		396						
10	ลงชื่อและเวลาการโหลดสินค้า		40						
รวม			1,767	5	2	1	2		

รูปที่ 3 แผนผังกระบวนการไหลของขั้นตอนการจ่ายสินค้า (หลังการปรับปรุง)

4. สรุปผลการดำเนินงาน

การดำเนินการศึกษานี้เพื่อปรับปรุงกระบวนการทำงานของพนักงานในกระบวนการจ่ายสินค้า โดยเริ่มศึกษากระบวนการดำเนินงานของพนักงาน แสดงด้วยแผนภูมิกระบวนการไหล (Flow Process Chart) จากนั้นทำการวิเคราะห์ขั้นตอนการปฏิบัติงานตาม

หลักการ 5W1H ร่วมกับการวิเคราะห์กิจกรรมการปฏิบัติงานที่มีมูลค่าเพิ่ม VA ไม่มีมูลค่าเพิ่ม NVA และไม่มีมูลค่าเพิ่มแต่มีความจำเป็น NNVA และสรุปปัญหาหลักเพื่อนำมาปรับปรุงกระบวนการทำงานด้วยหลักการลดความสูญเปล่า (ECSR)



จากกรณีศึกษาสามารถสรุปผลตามตัวชี้วัดที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการจ่ายสินค้าดังนี้

1. สามารถลดขั้นตอนการทำงานในกระบวนการจ่ายเครื่องเต็มสำเร็จรูปได้ จากการปรับปรุงวิธีการทำงาน โดยขั้นตอนการทำงานก่อนปรับปรุง 14 ขั้นตอน และเมื่อสร้างมาตรฐานการทำงานให้กับพนักงานใหม่ การทำงานหลังปรับปรุงเหลือ 10 ขั้นตอน ลดลง 4 ขั้นตอน คิดเป็นร้อยละ 28.57

2. สามารถลดเวลาในการปฏิบัติงาน จากการปรับปรุงวิธีการปฏิบัติงานตามหลัก ECRS ส่งผลให้ระยะเวลาในการปฏิบัติงานรวมลดลง จากก่อนปรับปรุง 2,749 วินาที และหลังปรับปรุงเหลือ 1,767 วินาที เวลาการปฏิบัติงานลดลง 982 วินาที (ลดลง 16.36 นาที) หรือลดลงคิดเป็นร้อยละ 35.72

3. สามารถลดเวลาการทำงานล่วงเวลาลงได้จากประมาณ 1-2 ชั่วโมงต่อวันสามารถลดเวลาการทำงานล่วงเวลาได้ทั้งหมด

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] <https://www.krungsri.com/th/research/industry/industry-outlook/Food-Beverage/Beverage/IO/io-beverage-20-th>. (Accessed on 26 December 2019)
- [2] S. Sungtong, Market structure competitive behavior and market performance of indigo product Sakon Nakhon Province, MUT Journal of Business Administration, 2019, 16(2), 126-150. (in Thai)

- [3] N. Nimitphuwadon, Waste reduction in warehousing process with LEAN concept case study : Furniture industry, Journal of Modern Management Science, 2014, 7(2), 65-78. (in Thai)
- [4] A. Pinchaimoon, N. Siriruk and S. Lueachai, Improvement production line of auto part using industrial engineering tools, The Journal of Industrial Technology, 2018, 14(3), 93-105. (in Thai)
- [5] K. Wajanawichakon, Waste reduction for efficiency improvement in broom production processes: A case study of community enterprise Bung Wai, Ubon Ratchathani, UBU Engineering Journal, 2019, 13(1), 141-152. (in Thai)
- [6] P. Pattharathadakit and D. Sutivong, Improvement of standard procedure in beverage concentrate manufacturing process, Research and Development Journal, 2012, 23(1), 62-74. (in Thai)
- [7] M. pooripanyakun and W. Klaewthanong, Efficiency improvement in faucet assembly line, Industrial Engineering Network Conference (IE Network 2013), Proceeding, 2013, Art. No. POM001. (in Thai)



- [8] S. Narkbovornwijit and P. Klomjit, Improvement work method for defect reduction in marking brake pad process, The Journal of Industrial Technology, 16(2), 2020, 104-120. (in Thai)
- [9] S. Siricharoenwat, Increasing efficiency of inventory management in case of phumthai comsys company limited, Thesis, University of the Thai Chamber of Commerce, Thailand. 2012.
- [10] P. Karuni-art, Increasing efficiency of inventory management in case of Majorette (Thailand) Co.,LTD, The 12th RSU National Graduate Research Conference 2017, Proceeding, 2017, 45-51. (in Thai)
- [11] T. Tiwaratreewit and W. Ngam-boonchuay, Time reduction of goods issue in warehouse case study holland star packaging Co., Ltd, The 2nd Innovation for Learning and Invention 2018 (ILI 2018), Proceeding, 2018, Art. No. ILI-052, 467-475.
- [12] S. Thoucharee and R. Pitakaso, The application using value steam mapping for efficiency increasing logistic and supply chain of rice management in northeastern area of Thailand, KKU Research Journal, 2012, 17(5), 687-705. (in Thai)
- [13] U. Wannasiri, Applying of lean concepts to increase the efficiency of storage space: A case study of door and window equipment dealers, NKRAFA Journal of Science and Technology, 2019, 15(1), 67-78. (in Thai)

การพิจารณาสภาวะที่เหมาะสมในการเชื่อมพอกผิวต่อการต้านทานการสึกหรอด้วยกระบวนการเชื่อมแก๊สทั้งสแตนอาร์คแบบลวดร้อนโดยวิธีพื้นผิวตอบสนอง

สิทธิชัย เจริญราช* ยอดเปรม ภูกำเนิด และ สุริยา ประสมทอง

สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยนครพนม

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: Akecharone@npu.ac.th

วันที่รับบทความ: 29 มีนาคม 2564; วันที่ทบทวนบทความ: 6 กรกฎาคม 2564; วันที่ตอบรับบทความ: 16 กรกฎาคม 2564

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 30 สิงหาคม 2564

บทคัดย่อ: การพิจารณาสภาวะที่เหมาะสมในการเชื่อมพอกผิวแข็งโดยใช้เทคนิคพื้นผิวตอบสนอง โดยทำการออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนเพื่อศึกษาผลของปัจจัย 3 ปัจจัย คือ กระแสไฟในการเชื่อม กระแสไฟลวดร้อน และความเร็วเดินเชื่อมต่อการต้านทานการสึกหรอของแนวเชื่อม จากการทดลองพบว่าปัจจัยในการทดลองทั้ง 3 ปัจจัย ส่งผลต่อปริมาณการสึกหรอของแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง ข้อมูลการทดลองที่ได้มีความเหมาะสมกับสมการควอดราติก เนื่องจากให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจสูง (ร้อยละ 97.80) เมื่อนำสมการที่ได้มาสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนองสามมิติของปริมาณการสึกหรอแนวเชื่อมและกราฟโครงร่างเพื่อพิจารณาสภาวะที่เหมาะสมในการเชื่อม พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการต้านทานการสึกหรอของแนวเชื่อม คือ กระแสไฟในการเชื่อมที่ 200.505 Amp กระแสไฟลวดร้อน 180 Amp และความเร็วในการเชื่อมที่ 80 mm/min ให้ปริมาณการสึกหรอของแนวเชื่อมต่ำกว่า 3.4366 mm^3 จากนั้นทำการเปรียบเทียบค่าที่เหมาะสมและการทดสอบจริง ผลการเปรียบเทียบพบว่ามีความสอดคล้องกัน

คำสำคัญ: สภาวะที่เหมาะสม; ลวดร้อน; วิธีพื้นผิวตอบสนอง

Consideration of the Optimizing Condition in Welding Hardfacing on Wear Resistance with Hot-Wire Gas Tungsten Arc Welding Process by Response Surface Methodology (RSM)

Sittichai Charoenrat*, Yodprem Pookamnerd and Suriya Prasomthong

Division of Industrial Technology, Faculty of industrial Technology, Nakhon Phanom University

* Corresponding author, E-mail: Akecharone@npu.ac.th

Received: 29 March 2021; Revised 6 July 2021; Accepted: 16 July 2021

Online Published: 30 August 2021

Abstract: Response Surface Methodology (RSM) was used to determine optimum condition for welding hardfacing. Box-Behnken experimental design was applied to optimize the welding current, hot wire current and welding speed on wear resistant of weld. The results showed that these three factors affected on wear rate of welding hardfacing. The obtained experimental data were suitable for the quadratic equation because it showed high coefficient of determination (97.80 %). The 3D response surface plot and the contour plot derived from the mathematical models were applied to determine the optimal condition. The optimum welding condition were follows: welding current 200.505 amp, hot wire current 180 amp, and welding speed 80 mm/min, the wear rate lower of weld was 3.4366 mm³. The optimization and experiment results were then compared. The results of the comparison showed a good correspondence.

Keywords: Optimization; Hot wire; Response Surface Methodology



1. บทนำ

การเชื่อมพอกผิวแข็ง (Welding Hardfacing) อาศัยการเกิดสารประกอบรวมกันระหว่างโลหะเติม และโลหะเชื่อมเพื่อเพิ่มสมบัติทางกลให้กับแนวเชื่อม [1] โดยการเชื่อมพอกผิวแข็งในปัจจุบันที่นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมมีหลากหลายกระบวนการ เช่น การเชื่อมลวดหุ้มฟลักซ์ (Shield Metal Arc Welding, SMAW) การเชื่อมอาร์คโลหะแก๊สคลุม (Gas Metal Arc Welding, GMAW) การเชื่อมแก๊สทังสเตนอาร์ค (Gas Tungsten Arc Welding, GTAW) การเชื่อมใต้ฟลักซ์ (Submerged Arc Welding, SAW) การเชื่อมพลาสมา (Plasma Transferred Arc Welding, PTA) [2-5] ซึ่งความแตกต่างของกระบวนการเชื่อมเหล่านี้ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพการเชื่อมและอัตราการเงาของแนวเชื่อม การต้านทานการสึกหรอของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งมักพบในแนวเชื่อมที่มีความแข็งสูงแต่ข้อเสียคือความเหนียวต่ำ และมีรายงานว่า การต้านทานการสึกหรอของแนวเชื่อมที่ดีต้องมีทั้งความแข็งและความเหนียวที่เพียงพอ [6-8] ซึ่งสมบัติทางกลทั้งสองที่กล่าวมามีขึ้นอยู่กับการยึดเกาะของแนวเชื่อม [9-11] กระบวนการเชื่อม SMAW, GMAW, SAW และ PTA ล้วนแล้วแต่ให้ความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานสูง ซึ่งกระบวนการเหล่านี้มีพื้นที่แนวการหลอมละลายและพื้นที่ที่กระทบร้อนขนาดใหญ่อาจส่งผลให้เกิดการเสียรูปของโลหะเชื่อมได้ง่าย เช่น การบิดงอ ที่เกิดจากความเค้นตกค้าง ตลอดจนความร้อนที่สูงเกินไปมักทำให้เกิดโครงสร้างวิตแมนสแตทเทินเฟอร์ไรต์ (Widmanstätten Ferrite) บริเวณพื้นที่ที่กระทบร้อนหลังจากการเย็นตัวของแนวเชื่อมซึ่งไม่ส่งผลดีต่อแนวเชื่อม

กรณีรับแรงกระแทกเนื่องจากโครงสร้างวิตแมนสแตทเทินเฟอร์ไรต์มักมีความเปราะเมื่อเทียบกับโครงสร้างอื่น อีกทั้งความร้อนที่สูงเกินไปส่งผลให้ระยะเวลาในการเย็นตัวของแต่ละชั้นในแนวเชื่อมนานทำให้ลดประสิทธิภาพด้านเศรษฐศาสตร์จากกระบวนการที่ยาวนานขึ้น [12] ส่วนกระบวนการเชื่อม GTAW เป็นกระบวนการที่ให้ความร้อนต่ำเมื่อเทียบกับกระบวนการอื่น แต่ไม่ได้รับความนิยมในการเชื่อมที่มีอัตราการเติมสูง เนื่องจากไม่สามารถเติมลวดเชื่อมได้อย่างต่อเนื่อง

ปัจจุบันกระบวนการเชื่อม GTAW ถูกออกแบบให้สามารถเติมลวดเชื่อมได้อย่างอัตโนมัติ โดยมีชุดป้อนลวดแยกออกจากแหล่งพลังงานสามารถปรับระดับความเร็วในการเติมลวดเข้าสู่บ่อหลอมได้โดยลวดเชื่อมวิ่งผ่านชุด Contact Tube ที่สามารถปรับกระแสไฟจากชุดให้ความร้อนลวดเชื่อม (Wire Heating Power source) ซึ่งเป็นตัวสร้างความต้านทานให้ลวดเชื่อมก่อนเข้าสู่บ่อหลอมละลาย เรียกว่ากระบวนการเชื่อมแก๊สทังสเตนอาร์คแบบลวดร้อน (Gas Tungsten Arc Welding : GTAW-Hot Wire) จึงเป็นไปได้ว่าการเชื่อมที่ให้ความร้อนกับลวดเชื่อมก่อนเข้าสู่บ่อหลอมละลายจะช่วยให้การอาร์คเสถียรและสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของแนวเชื่อมได้ โดย Schreiber และคณะวิจัย [13] ได้เปรียบเทียบขนาดของลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ทังสเตนคาร์ไบด์ด้วยกระบวนการเชื่อมแบบลวดร้อนพบว่าปริมาณความร้อนในแนวเชื่อมส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมกล่าวคือความร้อนในแนวเชื่อมต่ำขนาดของทังสเตนคาร์ไบด์ในแนวเชื่อมมีขนาดใหญ่ แต่เมื่อความร้อนในแนวเชื่อมสูงขึ้นขนาดของทังสเตนคาร์ไบด์มีขนาดเล็กลง ซึ่งขนาดของโครงสร้างจุลภาคที่



เหล็กงิลโหะหมักจะมีความแข็งและความแข็งแรงสูงขึ้น Gao และคณะวิจัย [14] ได้พัฒนากระบวนการเชื่อม แก๊สทังสเตนอาร์คแบบลวดร้อนในการเชื่อมพอกผิวแข็ง ด้วยลวดเชื่อมทังสเตนอาร์คพบว่ากระแสลวดร้อน สามารถเพิ่มการกระจายตัวของอนุภาคทังสเตนคาร์ไบด์ในแนวเชื่อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ Huan และคณะวิจัย [15] ได้ศึกษากระบวนการเชื่อมอลูมิเนียมกับเหล็กกล้าไร้สนิมโดยใช้ลวดเชื่อมคู่ระหว่างลวดทองแดงกับลวดอลูมิเนียมแบบลวดร้อนพบว่าความแข็งแรงแนวเชื่อมเพิ่มสูงขึ้นกว่ากรณีการใช้ลวดแบบปกติ และมีหลากหลายงานวิจัยที่กล่าวถึงประสิทธิภาพของกระบวนการเชื่อมแบบ GTAW-Hotwire

จากที่กล่าวมาเบื้องต้นพบว่ากระบวนการเชื่อม GTAW-Hot wire เริ่มมีบทบาทในกระบวนการเชื่อม โลหะเพิ่มสูงขึ้นในอุตสาหกรรม ดังนั้นจึงมีความจำเป็น อย่างยิ่งที่จะต้องทำการศึกษาวิจัยในการเชื่อม เช่น กระแสไฟเชื่อม กระแสไฟลวดร้อน ความเร็วในการเชื่อม ฯลฯ เพื่อเป็นข้อมูลในกระบวนการผลิตที่จะเกิดขึ้นทั้งในปัจจุบันและอนาคต โดยการหาปัจจัยที่เหมาะสมนิยมใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) [16] มาช่วยในการวิเคราะห์ซึ่งวิธี RSM เป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์และสถิติที่เป็นประโยชน์ในการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ปัญหาซึ่งแสดงผลตอบสนองต่อผลจากตัวแปรต่าง ๆ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาจุดหรือความเหมาะสมต่อผลนั้น ทำให้ง่ายในการจัดการและการอธิบายผลเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่น เช่น Ragavendran และคณะวิจัย [17] ตรวจสอบสภาวะที่เหมาะสมของการเชื่อม

โดยใช้ความร้อนร่วมระหว่างเลเซอร์กับการเชื่อม TIG ทำการตรวจสอบการซึมลึกของแนวเชื่อมด้วยวิธี RSM พบว่าความแม่นยำของแบบจำลองอยู่ในเกณฑ์ดี Kiaee และคณะวิจัย [18] ศึกษาการหาสภาวะที่เหมาะสมของตัวแปรกระบวนการเชื่อม GTAW ที่ส่งผลต่อแรงดึงและความแข็งแรงของแนวเชื่อมด้วยวิธี RSM จากการตรวจสอบพบว่ากระแสไฟในการเชื่อม 130 Amp ความเร็วในการเชื่อม 9.4 cm/min และอัตราการไหลของแก๊ส 15.1 L/min ให้ค่าแรงดึงและความแข็งแรงเชื่อมที่ดีที่สุด Selvamani และคณะวิจัย [19] ประยุกต์ใช้วิธี RSM สำหรับการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการต่อเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำด้วยกระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทาน พบว่าวิธีการ RSM สามารถออกแบบกระบวนการทดลองได้อย่างมีประสิทธิภาพ Srivastava และคณะวิจัย [20] ศึกษาสภาวะตัวแปรกระบวนการที่เหมาะสมของกระบวนการเชื่อม GMAW ด้วยวิธี RSM จากการดำเนินการพบว่า RSM สามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และยังมีหลากหลายงานวิจัยที่กล่าวถึงการหาสภาวะในการเชื่อมที่เหมาะสมด้วยวิธี RSM [21-22] ดังนั้นเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยในการเชื่อมต่อปริมาณการสึกหรอของแนวเชื่อม ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้วิธี RSM และการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design, BBD) [16] มาวิเคราะห์ปัจจัยในการเชื่อม ได้แก่ กระแสไฟเชื่อม กระแสไฟลวดร้อน และความเร็วในการเชื่อมโดยคาดหวังว่าวิธี RSM จะสามารถออกแบบกระบวนการเชื่อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเป็นประโยชน์สำหรับผู้ผลิต ตลอดจนการศึกษาดำเนินงานเชื่อมต่อไป



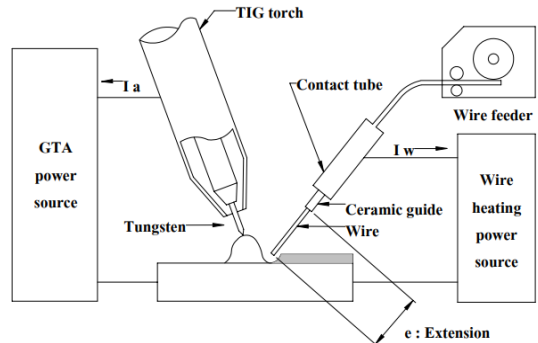
2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุและกระบวนการเชื่อม

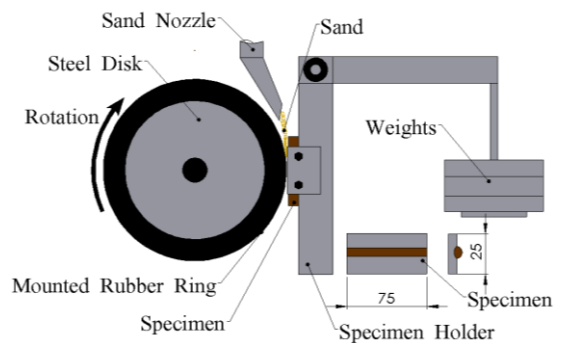
รูปที่ 1 แสดงระบบการเชื่อม GTAW-Hot wire ในการทดลองใช้แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าในการเชื่อมเป็นแบบรักษาระยะแรงแคคที่ ใช้ทั้งสแตนเลสอิเล็กโทรดขนาด 3.2 mm. มุมอิเล็กโทรด 30° ด้วยการต่อขั้วไฟฟ้าแบบ DCEN แก๊สคลูมอาร์กอน 99 % อัตราการไหลของแก๊สปกคลุม 15 L/min เติมลวดแบบอัตโนมัติความเร็วในการเติม 100 mm/min ใช้เครื่องเชื่อม GTAW-Hot wire ยี่ห้อ EWM รุ่น T351 Tetrix ระบบแรงดันคงที่ขนาด 300 Amp ทำการเชื่อมแบบแนวเดี่ยวนบนเหล็กกล้าคาร์บอน เชื่อมด้วยลวดเชื่อมไร้ฟลักซ์พอกผิวแข็งกลุ่มเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.6 mm ส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 1

2.2 การตรวจสอบการสึกหรอแนวเชื่อม

การทดสอบการสึกหรอของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งทดสอบตามมาตรฐาน ASTM-G65 / Procedure A ชิ้นงานรูปทรงสี่เหลี่ยมพื้นผ้าขนาด 75 x 25 mm ขัดด้วยทรายละเอียดอัตราการไหลของทราย 300 g/min เวลาในการทดสอบ 30 min น้ำหนักทดสอบ 130 N สำหรับการทดสอบการสึกหรอแสดงดังรูปที่ 2 และการเตรียมชิ้นทดสอบแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 1 ระบบการเชื่อม GTAW – Hot wire [23]

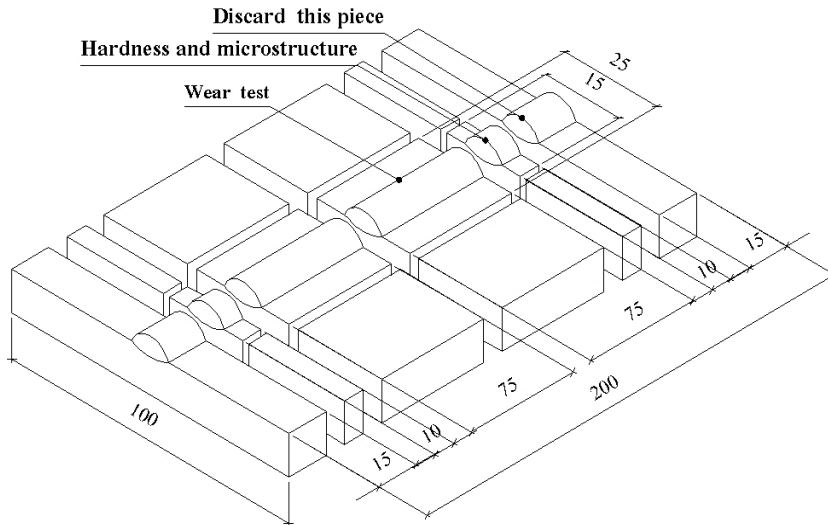


รูปที่ 2 การทดสอบการสึกหรอตามมาตรฐาน ASTM-G65 [23]

อุปกรณ์ควบคุมความเร็วในการเชื่อมคงที่ดัดแปลงจากเครื่องตัดโลหะแผ่นด้วยแก๊สทำให้การเชื่อมเป็นแบบอัตโนมัติ สามารถปรับตั้งความเร็วการเคลื่อนหัวเชื่อมได้

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมและวัสดุในการทดลอง

Material	Element (% wt)						
	C	Cr	Mn	Si	V	Mo	Fe
EN 14700T Fe8	0.500	8.500	1.500	2.500	-	-	Bal.
Carbon steel	0.420	0.560	0.510	0.360	0.110	0.005	Bal.



รูปที่ 3 การเตรียมชิ้นทดสอบสมบัติแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง [23]

2.3 การออกแบบการทดลอง

การทดลองเพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณการสึกหรอของแนวเชื่อมโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design, BBD) ที่มี 3 ปัจจัย คือ กระแสไฟในการเชื่อม (Welding Current, X1) กระแสไฟลวดร้อน (Hot wire Current, X2) และ ความเร็วในการเชื่อม (Welding Speed, X3) โดยการกำหนดระดับของปัจจัยพิจารณาจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและข้อจำกัดของเครื่องมือในการทดลอง ซึ่งระดับของปัจจัยในการทดลองมี 3 ระดับ คือ ระดับต่ำ (-1) ระดับปานกลาง (0) และระดับสูง (1) แสดงดังตารางที่ 2 และลำดับการทดลองดังตารางที่ 3 การวิเคราะห์ผลการทดลองใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ได้แก่ การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Square) และ

การวิเคราะห์ความแปรปรวน จากนั้นสร้างสมการทำนายปริมาณการสึกหรอของแนวเชื่อมโดยนำค่าของปัจจัยที่ได้จากการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยของการสึกหรอแนวเชื่อมให้อยู่ในรูปของสมการที่ (1) เมื่อ Y คือ ค่าผลตอบสนอง (การสึกหรอของแนวเชื่อม) ในส่วนของการสร้างพื้นผิวตอบสนองของปริมาณการสึกหรอที่ได้จากการทดลองทำการเปรียบเทียบปัจจัยในการทดลอง คือ กระแสไฟในการเชื่อมกับกระแสไฟลวดร้อน และความเร็วในการเชื่อมด้วย ตลอดจนหาปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด และใช้วัดความพึงพอใจของผลตอบ (Composite Desirability : D) ซึ่งค่าความพึงพอใจของผลตอบมีค่าอยู่ระหว่าง 0-1 ถ้า D มีค่าเท่ากับ 1 หมายถึงผลตอบนั้นได้รับความพึงพอใจอย่างสมบูรณ์ [24]

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i X_i + \sum_{i=1}^3 \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=i+1}^3 \beta_{ij} X_i X_j \quad (1)$$



ตารางที่ 2 ปัจจัยและระดับของปัจจัยแต่ละการทดลอง

ปัจจัย	ระดับ		
	-1	0	1
Welding Current (X_1) (Amp)	150	200	250
Hot wire current (X_2) (Amp)	120	150	180
Welding Speed (X_3) (mm/min)	80	100	120

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการสึกหรอ

ตารางที่ 3 แสดงผลการตรวจสอบการสึกหรอของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งพบว่ามีความแปรปรวนการสึกหรอ (Volume loss) อยู่ในช่วง 3.4935 – 11.0031 mm³ การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยค่าการตอบสนองใช้แบบจำลองการถดถอยที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ พบว่าการจำลองแบบ quadratic มีความเหมาะสมโดยพิจารณาจากค่า p-value ($p < 0.05$) lack of fit ($p \geq 0.05$) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Sq) สูงจากการวิเคราะห์ค่า R-Sq ในตารางที่ 4 แสดงการวิเคราะห์การถดถอยจะเห็นได้ว่าค่า R-Sq มีค่าร้อยละ 97.80 หมายความว่าตัวแปรอิสระ (กระแสไฟในการเชื่อม กระแสไฟลวดร้อน และความเร็วในการเชื่อม) สามารถอธิบายความแปรผันหรือการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร แสดงว่าแบบจำลองสามารถนำไปสร้างสมการทำนายหาค่าผลตอบได้อย่างเหมาะสม

ตารางที่ 5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนเป็นการตรวจสอบความผันแปรของแบบจำลองจากการ

วิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณการสึกหรอของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 พบว่าค่า p-value ของเทอมอันตรกิริยาเท่ากับ 0.046 และค่าเทอมกำลังสองมีค่าเท่ากับ 0.001 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่านัยสำคัญทางสถิติที่กำหนด แสดงว่ามีส่วนโค้งเกิดขึ้นที่พื้นผิวตอบสนองอาจกล่าวได้ว่าสามารถใช้สมการแบบจำลองกำลังสองสำหรับการทำนายอัตราการสึกหรอของแนวเชื่อมจากการตรวจสอบการสึกหรอ การสร้างสมการทำนายปริมาณการสึกหรอของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งโดยนำค่าของปัจจัยที่ได้จากการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยการสึกหรอแสดงในตารางที่ 4 มาเขียนแสดงดังสมการที่ (2) เมื่อพิจารณาความเหมาะสมของสมการ (Lack-of-Fit) ในตารางที่ 5 พบว่าค่า p-value ของ Lack-of-Fit มีค่าเท่ากับ 0.074 ซึ่งมีใกล้เคียงและมีค่ามากกว่า 0.05 [25] อาจกล่าวได้ว่าแบบจำลองนี้มีความเพียงพอของตัวแปรในสมการ จึงสามารถนำสมการมาทำนายปริมาณการสึกหรอของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งได้

$$\text{Volume loss} = 4.634 + 0.602X_1 - 1.295X_2 - 0.324X_3 + 0.521X_2^2 - 0.149X_3^2 - 0.712X_1X_2 \quad (2)$$



ตารางที่ 3 ปัจจัยและพารามิเตอร์ในการทดลอง

Run	Factor of Experimental			Volume loss (mm ³)
	X ₁	X ₂	X ₃	
1	200(0)	150(0)	100(0)	4.524
2	200(0)	150(0)	100(0)	4.521
3	150(-1)	180(1)	100(0)	8.061
4	250(1)	180(1)	100(0)	7.011
5	150(-1)	150(0)	80(-1)	7.342
6	200(0)	150(0)	100(0)	5.174
7	200(0)	120(-1)	80(-1)	7.301
8	250(1)	150(0)	120(1)	8.865
9	150(-1)	150(0)	120(1)	6.923
10	200(0)	180(1)	80(-1)	3.493
11	200(0)	150(0)	100(0)	4.488
12	150(-1)	120(-1)	100(0)	9.205
13	250(1)	150(0)	80(-1)	9.469
14	200(0)	150(0)	100(0)	4.464
15	250(1)	120(-1)	100(0)	11.003
16	200(0)	180(1)	120(1)	3.904
17	200(0)	120(-1)	120(1)	5.323

ตาราง 4 การวิเคราะห์การถดถอยของพื้นผิวตอบสนอง

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	4.634	0.226	20.53	0.000
Welding Current	0.602	0.178	3.37	0.012
Hot wire current	-1.295	0.178	-7.26	0.000
Welding Speed	-0.324	0.178	-1.81	0.113
(Hot wire current)*(Hot wire current)	0.521	0.246	2.12	0.072
(Welding Speed)*(Welding Speed)	-0.149	0.246	-0.61	0.563
(Welding Current)*(Welding Speed)	-0.712	0.252	-2.82	0.026

S = 0.504824, R-sq = 97.80 %, R-sq (adj) = 94.98 %



ตารางที่ 5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณการสึกหรอของแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	79.368	8.818	34.60	0.000
Linear	3	17.160	5.720	22.45	0.001
Square	3	58.746	19.582	76.84	0.001
Interaction	3	3.461	1.153	4.53	0.046
Error	7	1.783	0.254		
Lack-of-Fit	3	1.416	0.472	5.15	0.074
Pure Error	4	0.367	0.091		
Total	16	81.152			

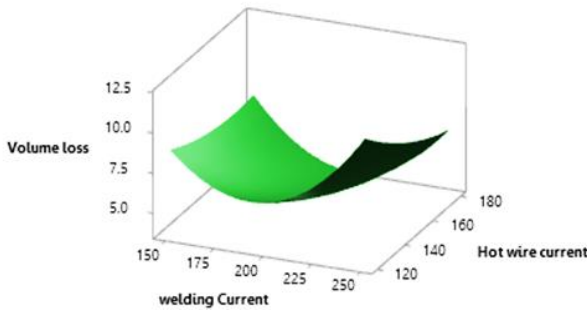
การสร้างพื้นผิวตอบสนองของปริมาณการสึกหรอของแนวเชื่อมเมื่อได้สมการสำหรับการทำนายปริมาณการสึกหรอของแนวเชื่อมแล้วจึงนำมาสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนองดังแสดงในรูปที่ 4 จากกราฟแสดงพื้นผิวตอบสนองปริมาณการสึกหรอของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งรูปที่ 4 (ก) แสดงระดับของกระแสไฟในการเชื่อมกับระดับของกระแสไฟลวดร้อนพบว่าเมื่อระดับของกระแสไฟในการเชื่อมเพิ่มสูงขึ้นแนวโน้มของปริมาณการสึกหรอแนวเชื่อมเพิ่มสูงขึ้น แต่พบว่าเมื่อระดับของกระแสไฟลวดร้อนเพิ่มขึ้นแนวโน้มของการสึกหรอแนวเชื่อมลดลง อาจเกิดจากกระแสไฟเชื่อมสูงแนวโน้มของปริมาณการเงาจึงเพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้ขนาดปริมาณการเงาจึงระหว่างโลหะเชื่อมกับวัสดุเชื่อมมากเกินไป ทำให้ความแข็งของแนวเชื่อมลดลง จากนั้นเมื่อนำกราฟแสดงพื้นผิวตอบสนองอิทธิพลร่วมระหว่างกระแสไฟในการเชื่อมกับกระแสไฟลวดร้อนดังแสดงในรูปที่ 4 (ก) มาแสดงในลักษณะกราฟโครงร่าง จะเห็นความสัมพันธ์ของกระแสไฟในการเชื่อมกับกระแสไฟลวดร้อนต่อปริมาณการสึกหรอแนวเชื่อมมีลักษณะไม่เป็นเส้นตรง (Nonlinear effect) ดังแสดงในรูปที่ 4 (ข) โดยเส้นโค้ง

ด้านบนสุดในพื้นที่สีน้ำเงินเข้มแสดงการสึกหรอของแนวเชื่อมต่ำกว่า 4 mm³ ส่วนเส้นโค้งที่ต่ำลงมาแสดงอัตราการสึกหรอของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งที่เพิ่มขึ้นเป็น 4 6 และ 8 mm³ ตามลำดับ

รูปที่ 5 แสดงพื้นผิวตอบสนองปริมาณการสึกหรอแนวเชื่อมระหว่างกระแสเชื่อมและความเร็วในการเชื่อมพบว่าปริมาณการสึกหรอแนวเชื่อมต่ำสุดที่กระแสไฟเชื่อมระดับกลางแต่เมื่อลดหรือเพิ่มกระแสไฟเชื่อมแนวโน้มของปริมาณการสึกหรอแนวเชื่อมเพิ่มสูงขึ้นซึ่งแตกต่างจากความเร็วเชื่อมเมื่อทำการลดหรือเพิ่มความเร็วยุติจะไม่ส่งผลต่อปริมาณการสึกหรอแนวเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 5 (ก) จากนั้นนำอิทธิพลร่วมของกระแสไฟเชื่อมกับความเร็วเชื่อมมาแสดงในลักษณะกราฟโครงร่าง จะเห็นความสัมพันธ์ของกระแสไฟเชื่อมกับความเร็วเชื่อมส่งผลต่อปริมาณการสึกหรอของแนวเชื่อมมีลักษณะไม่เป็นเส้นตรงดังรูปที่ 5 (ข) โดยที่เส้นโค้งบริเวณกึ่งกลางแสดงถึงปริมาณการสึกหรอแนวเชื่อมต่ำสุดที่ 5 m³ ส่วนเส้นโค้งถัดออกไปจะแสดงถึงปริมาณการสึกหรอของแนวเชื่อมที่เพิ่มสูงขึ้น คือ 5 6 7 และ 8 mm³ ตามลำดับ

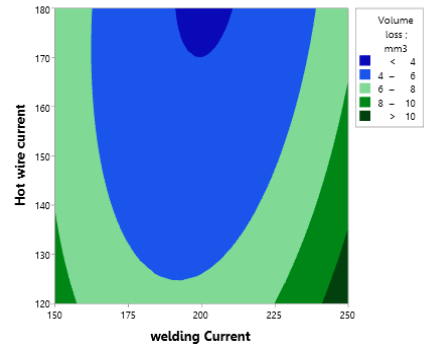


Surface Plot of Volume loss ; mm3 vs Hot wire current, welding Current



(ก)

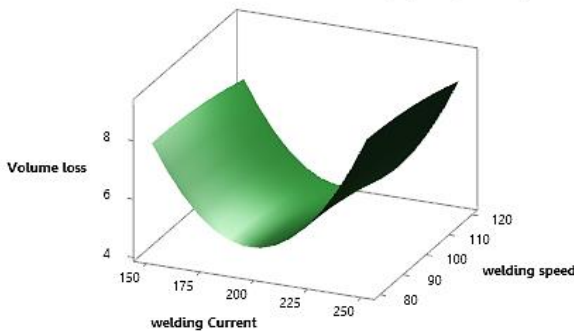
Contour Plot of Volume loss ; mm3 vs Hot wire current, welding Current



(ข)

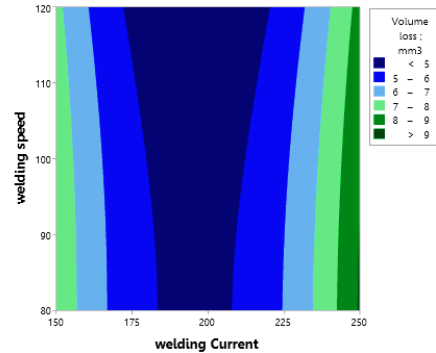
รูปที่ 4 แสดงการสึกหรอของแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง (ก) พื้นผิวตอบสนอง (ข) กราฟโครงร่าง ระหว่างกระแสไฟในการเชื่อมและกระแสไฟลวดร้อน

Surface Plot of Volume loss ; mm3 vs welding speed, welding Current



(ก)

Contour Plot of Volume loss ; mm3 vs welding speed, welding Current



(ข)

รูปที่ 5 แสดงการสึกหรอของแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง (ก) พื้นผิวตอบสนอง (ข) กราฟโครงร่าง ระหว่างกระแสไฟในการเชื่อมและความเร็วในการเชื่อม

จากนั้นทำการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของปัจจัยระหว่างกระแสไฟลวดร้อนและความเร็วในการเชื่อมที่ส่งผลต่อ ดังรูปที่ 6 พบว่าปริมาณการสึกหรอแนวเชื่อมลดลงเมื่อเพิ่มกระแสไฟลวดร้อนสูงขึ้น แต่ความเร็วในการเชื่อมไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณการสึกหรอของแนวเชื่อมมากนัก ดังรูปที่ 6

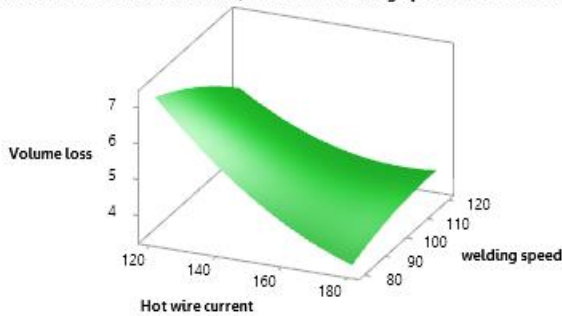
(ก) จากนั้นนำกราฟพื้นผิวตอบสนองของอิทธิพลระหว่างกระแสไฟลวดร้อนกับความเร็วในการเชื่อมมาแสดงในลักษณะกราฟโครงร่าง ดังรูปที่ 6 (ข) พบว่ากระแสไฟลวดร้อนและความเร็วในการเชื่อมมีลักษณะไม่เป็นเส้นตรง โดยที่เส้นโค้งทางขวาสุดของกราฟแสดงถึงปริมาณอัตราการสึกหรอแนวเชื่อมน้อยกว่า 4 mm³



ส่วนเส้นโค้งตัดออกไปแสดงปริมาณการสึกหรอของการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ได้อัตราการสึกหรอของแนวเชื่อมต่ำสุดโดยใช้ฟังก์ชัน response optimizer พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการต้านทานการสึกหรอของแนวเชื่อม คือ กระแสไฟใน

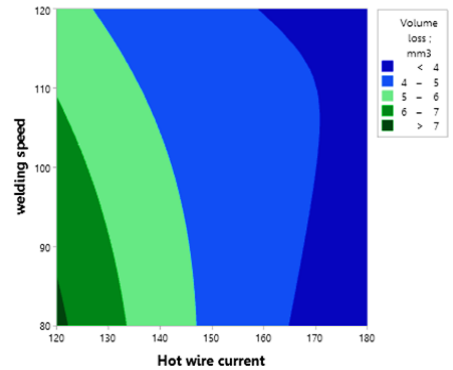
แนวเชื่อมเพิ่มสูงขึ้นเป็น 4 5 และ 6 mm³ ตามลำดับ การเชื่อมที่ 200.505 Amp กระแสไฟลวดร้อน 180 Amp และความเร็วในการเชื่อมที่ 80 mm/min ให้ปริมาณการสึกหรอของแนวเชื่อมต่ำสุดเฉลี่ยที่ 3.4366 mm³ โดยมีค่าความพึงพอใจรวมเท่ากับ 1 ดังแสดงในรูปที่ 7

Surface Plot of Volume loss ; mm3 vs welding speed, Hot wire current



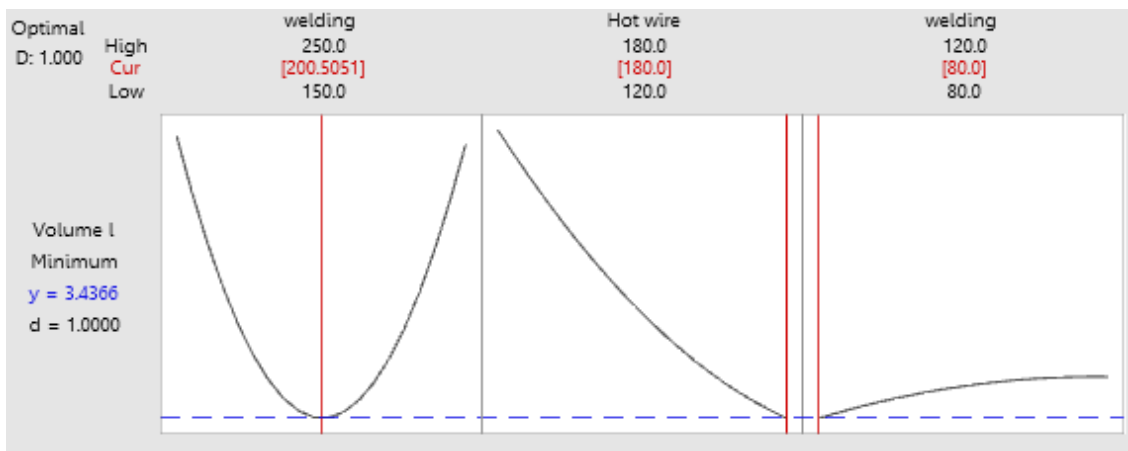
(ก)

Contour Plot of Volume loss ; mm3 vs welding speed, Hot wire current



(ข)

รูปที่ 6 แสดงการสึกหรอของแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง (ก) พื้นผิวตอบสนอง (ข) กราฟโครงร่าง ระหว่างกระแสไฟในการเชื่อมและความเร็วในการเชื่อม



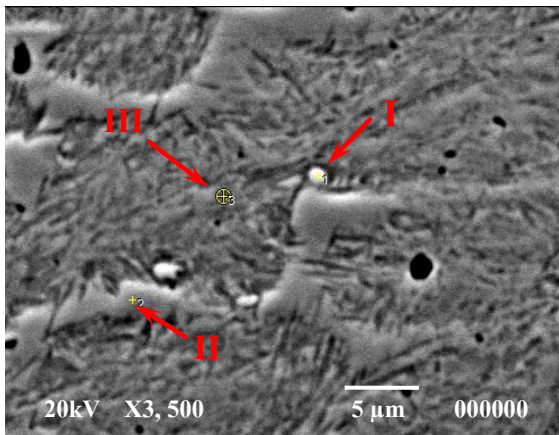
รูปที่ 7 การวิเคราะห์ระดับที่เหมาะสมของปัจจัยต่อการสึกหรอของแนวเชื่อมพอก



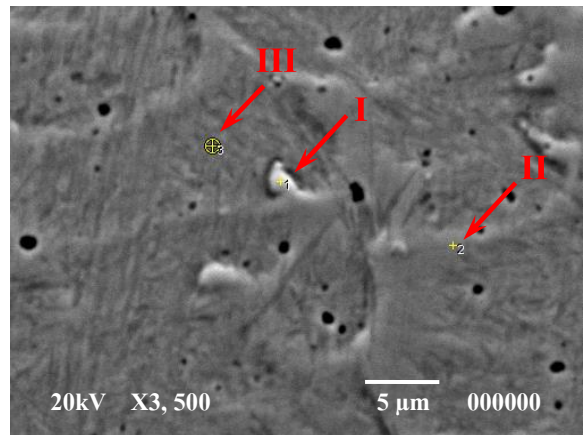
3.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและส่วนผสมทางเคมีของแนวเชื่อมด้วยเครื่องอิเล็กตรอนแบบส่องกราดกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) รุ่น JEOL Scanning electron microscope JSM-5410LV จากการศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็งด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองดังแสดงในหัวข้อที่ผ่านมา พบว่าปัจจัยที่ให้ค่าการต้านทานการสึกหรอต่ำสุด คือ การทดลองที่ 10 ให้ค่าการต้านทาน

การสึกหรอที่ 3.4935 mm^3 และปัจจัยการทดลองที่ให้ค่าการต้านทานการสึกหรอสูงสุด คือ การทดลองที่ 15 ให้ค่าการต้านทานการสึกหรอที่ 11.0031 mm^3 จึงนำปัจจัยทั้งสองมาการเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคและส่วนผสมทางเคมี ดังแสดงในรูปที่ 8 จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ให้อัตราการสึกหรอต่ำสุดซึ่งเป็นลำดับการทดลองที่ 10 คือ กระแสไฟในการเชื่อม 200 Amp กระแสไฟลวดร้อน 180 Amp และความเร็วในการเดินเชื่อม 100 mm/min



(ก) ลำดับการทดลองที่ 10



(ข) ลำดับการทดลองที่ 15

รูปที่ 8 โครงสร้างจุลภาคและตำแหน่งการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีแนวเชื่อม

(ก) ลำดับการทดลองที่ 10 และ (ข) ลำดับการทดลองที่ 15

ตารางที่ 6 การวิเคราะห์ความส่วนผสมทางเคมีแนวเชื่อมลำดับการทดลองที่ 10

Point	Main Element (%wt)					
	C	Si	V	Cr	Mn	Fe
I	0.74	2.45	0.11	7.62	1.85	87.23
II	0.61	1.48	0.10	5.41	0.30	92.10
III	0.64	1.37	-	5.14	0.40	92.45



ตารางที่ 7 การวิเคราะห์ความส่วนผสมทางเคมีแนวเชื่อมลำดับการทดลองที่ 15

Point	Main Element (%wt)					
	C	Si	V	Cr	Mn	Fe
I	0.57	0.60	0.08	6.90	1.29	90.56
II	0.52	0.39	-	4.77	0.58	93.74
III	0.54	0.71	0.06	4.94	0.48	93.27

พบว่าลักษณะโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วย โครงสร้างซีเมนไทต์ และลักษณะคล้ายคาร์ไบด์แทรก ขึ้นบนพื้นหลักของเบไนต์ (Bainitic Matrix) ดังแสดง ในรูปที่ 8 (ก) และเมื่อทำการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีแนวเชื่อม ดังแสดงในตารางที่ 6 พบปริมาณธาตุผสมหลักในแนวเชื่อมทั้งสามจุดที่ตรวจสอบมีปริมาณสูง เช่น คาร์บอน ซิลิคอน วาเนเดียม โครเมียม และแมงกานีส ส่งผลให้มีการต้านทานการสึกหรอที่ดี ซึ่งแตกต่างจากลำดับการทดลองที่ 15 คือ กระแสไฟเชื่อมที่ 250 Amp กระแสไฟลวดร้อน 120 Amp และความเร็วในการเดินเชื่อม 100 mm/min จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคลักษณะคล้ายโครงสร้างซีเมนไทต์ และคาร์ไบด์แทรกขึ้นบนพื้นหลักของเพอร์ไลต์ (Pearlitic Matrix) ดังรูปที่ 8 (ข) จากการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 7 ซึ่งปริมาณธาตุผสมหลักมีปริมาณลดลง ส่งผลให้การต้านทานการสึกหรอลดลง ซึ่งสอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Ayadi และ Hadji [26] กล่าวว่า การกระจายตัวของโครเมียม วาเนเดียม และแมงกานีสสูงขึ้นจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงและการต้านทานการสึกหรอที่ดี

5. สรุปผลการทดลอง

การประยุกต์ใช้วิธีพื้นผิวตอบสนองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยในการเชื่อมที่เหมาะสมต่อการสึกหรอของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งโดยใช้หลักการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken พบว่าทั้ง 3 ปัจจัย คือ กระแสไฟในการเชื่อม (X1) กระแสไฟลวดร้อน (X2) และความเร็วในการเชื่อม (X3) มีผลต่อปริมาณการสึกหรอของแนวเชื่อม โดยทั้ง 3 ปัจจัยมีผลเกี่ยวเนื่องกัน ซึ่งสามารถแสดงในรูปแบบของสมการทำนายปริมาณการสึกหรอของแนวเชื่อม คือ $Volume\ loss = 4.634 + 0.602X_1 - 1.295X_2 - 0.324X_3 + 0.521X_2^2 - 0.149X_3^2 - 0.712X_1X_2$ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจร้อยละ 97.80 เมื่อพิจารณาปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการต้านทานการสึกหรอของแนวเชื่อม คือ กระแสไฟในการเชื่อมที่ 200.505 Amp กระแสไฟลวดร้อน 180 Amp และความเร็วในการเชื่อมที่ 80 mm/min ให้ปริมาณการสึกหรอของแนวเชื่อมต่ำสุดเฉลี่ยที่ $3.4366\ mm^3$ โดยมีค่าความพึงพอใจรวมเท่ากับ 1



6. เอกสารอ้างอิง

- [1] D.G. Ahn, Hardfacing technologies for improvement of wear characteristics of hot working tools: a review, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2013, 14(7), 1271-1283.
- [2] Y.S. Tarnng, S.C Juang and C.H. Chang, The use of grey-based Taguchi methods to determine submerged arc welding process parameters in hardfacing, *Journal of materials processing technology*, 2002, 128(1-3), 1-6.
- [3] V.Balasubramanian, R . Varahamoorthy, C. S Ramachandran and C. Muralidharan, Selection of welding process for hardfacing on carbon steels based on quantitative and qualitative factors, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, 40, 887-897.
- [4] G.R.C. Pradeep, A. Ramesh and B.D. Prasad, A review paper on hardfacing processes and materials, *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2010, 2(11), 6507-6510.
- [5] J.J. Coronado, H.F. Caicedo and A.L. Gómez, The effects of welding processes on abrasive wear resistance for hardfacing deposits. *Tribology International*, 2019, 42(5), 745-749.
- [6] S.H. Kim and Y.S. Kim, Effect of ductility on dry sliding wear of medium carbon steel under low load conditions, *Metals and Materials*, 1999, 5(3), 267-271.
- [7] A.P. Modi, Effects of microstructure and experimental parameters on high stress abrasive wear behaviour of a 0.19 wt% C dual phase steel, *Tribology International*, 2007, 40(3), 490-497.
- [8] M.R. Chen, S.J. Lin, J.W. Yeh, M.H. Chuang, S.K. Chen and Y.S. Huang, Effect of vanadium addition on the microstructure, hardness, and wear resistance of Al 0.5 CoCrCuFeNi high-entropy alloy, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2006. 37(5), 1363-1369.
- [9] M. Sadeghian, M. Shamanian and A. Shafyiei, Effect of heat input on microstructure and mechanical properties of dissimilar joints between super duplex stainless steel and high strength low alloy steel, *Materials & Design*, 2014, 60, 678-684.
- [10] H. Dong, X. Hao and D. Deng, Effect of welding heat input on microstructure and mechanical properties of HSLA steel joint, *Metallography, microstructure, and analysis*, 2014, 3(2), 138-146.



- [11] H. Vashishtha, R.V. Taiwade, S. Sharma and A.P. Patil, Effect of welding processes on microstructural and mechanical properties of dissimilar weldments between conventional austenitic and high nitrogen austenitic stainless steels, *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, 25, 49-59.
- [12] F. Wang, S. Williams, P. Colegrove and A. Antonysamy, Microstructure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Ti-6Al-4V, *Metallurgical and materials transactions A*, 2003, 44(2), 968-977.
- [13] F. Schreiber, B. Allebrodt and T. Erpel, Hardfacing material solutions for high performance coatings in wear and corrosion applications. *Zavarivanje i zavarene konstrukcije*, 2019, 64(1), 11-21.
- [14] S. Gao, H. Nakashin, M. Yamamoto, K. Shinozaki, K. Kadoi, H. Watanabe, and G. AP, Development of WC hard-facing welding process using pulse heated hot-wire gas tungsten arc welding system, *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, 2013, 31(4), 57s-60s.
- [15] H. He, C. Wu, S. Lin and C. Yang, Pulsed TIG welding–brazing of aluminum–stainless steel with an Al-Cu twin hot wire, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2019, 28(2), 1180-1189.
- [16] S.K. Shihab, Optimization of WEDM process parameters for machining of friction-stir-welded 5754 aluminum alloy using Box–Behnken design of RSM, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2018, 43(9), 5017-5027.
- [17] M. Ragavendran, N. Chandrasekhar, R. Ravikumar, R. Saxena, M. Vasudevan and A.K. Bhaduri, Optimization of hybrid laser–TIG welding of 316LN steel using response surface methodology (RSM), *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 94, 27-36.
- [18] N. Kiaee and M.A. Khafri, Optimization of gas tungsten arc welding process by response surface methodology, *Materials and Design* (2014), 54, 25-31.
- [19] S.T. Selvamani, S. Divagar and M. Vigneshwar, Application of response surface methodology (RSM) in friction welding AISI 1020 grade steel joints, *International Journal of Engineering Research in Africa*, 2015, 16, 38-44.
- [20] S. Srivastava and R.K. Garg, Process parameter optimization of gas metal arc welding on IS:2062 mild steel using response surface methodology, *Journal of Manufacturing Processes*, 2017,25, 296-305.



- [21] P.M. Ajith, T.A. Husain, P. Sathiya and S. Aravindan, Multi-objective optimization of continuous drive friction welding process parameters using response surface methodology with intelligent optimization algorithm, *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2015, 22(10), 954-960.
- [22] R. Paventhan, P.R. Lakshminarayanan and V. Balasubramanian, Prediction and optimization of friction welding parameters for joining aluminium alloy and stainless steel, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, 21(7), 1480-1485.
- [23] S. Prasomthong and S. Namkaew, The influence of adding aluminum welding wire on Properties and chemical composition of the welding hardfacing welded low carbon steel by gas tungsten arc welding process, *The Journal of Industrial Technology*, 2019, 15(1), 27-36. (in Thai)
- [24] K. Hinkelmann and O. Kempthorne, *Design and analysis of experiments, Volume 1: Introduction to experimental design 1st ED.*, John Wiley and Sons, Inc., NY, USA, 1994.
- [25] I. Worapun, C. Chooppava and C. Thinwongpituk, Optimal conditions of friction welding process for AISI 1015 steel using response surface methodology, *Asia-Pacific Journal of Science and Technology*, 2013, 18(6), 909-924. (in Thai)
- [26] S. Ayadi and A. Hadji, Effect of Chemical composition and heat treatments on the microstructure and wear behavior of manganese steel, *International Journal of Metal casting*, (2021), 15: 510-519.



การศึกษาโครงสร้างทางโลหะวิทยาและความต้านทานการกัดกร่อนของรอยเชื่อมท่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิดเกรด ASTM A790 SAF 2205 และ ASTM A312 TP 316L โดยกระบวนการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนแก๊สปกคลุม

ภิสัก เลิศวิจิตรพันธุ์* ณรงค์เดช พัฒนไพบูลย์ สิทธิพงษ์ แสงอินทร์ และ พิเศษฐ์ธาวิณ เจริญญประดับ

ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมการเชื่อม, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

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

วันที่รับบทความ: 15 พฤษภาคม 2564; วันที่ทบทวนบทความ: 25 กรกฎาคม 2564; วันที่ตอบรับบทความ: 28 กรกฎาคม 2564
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 30 สิงหาคม 2564

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้ศึกษาการเชื่อมท่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิดระหว่างเกรด ASTM A790 SAF 2205 และ ASTM A312 TP 316L ด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนแก๊สปกคลุมที่ส่งผลต่อโครงสร้างทางโลหะวิทยาและความต้านทานการกัดกร่อนของแนวเชื่อม ในการทดลองนี้ใช้ลวดเชื่อม AWS A5.9 ER2209 เชื่อมรอยต่อระหว่างท่อเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด ASTM A790 SAF 2205 เข้าด้วยกัน ส่วนอีกเงื่อนไขหนึ่งใช้ลวดเชื่อม AWS A5.14 ERNiCrMo-3 เชื่อมรอยต่อระหว่างท่อเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด ASTM A790 SAF 2205 และ ASTM A312 TP 316L จากนั้นตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง และทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนด้วยเทคนิคโพเทนชิโอดีนามิกส์ โพลาริเซชันรวมถึงเทคนิคแบบจุ่ม (Immersion Test) ผลการวิจัยพบว่าโครงสร้างพื้นฐานของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด ASTM A790 SAF 2205 มีองค์ประกอบเป็นเฟอร์ไรต์และออสเทนไนต์ ส่วนเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด ASTM A312 TP 316L มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นออสเทนไนต์ ส่วนบริเวณแนวเชื่อมด้วยโลหะเติม AWS A5.9 ER2209 และ AWS A5.14 ERNiCrMo-3 พบโครงสร้างเฟอร์ไรต์-ออสเทนไนต์และออสเทนไนต์ ตามลำดับ นอกจากนี้การใช้ทั้งสองเทคนิคทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนพบว่า อัตราการกัดกร่อนสูงสุดเกิดขึ้นกับแนวเชื่อมด้วยลวดเชื่อม AWS A5.14 ERNiCrMo-3 บนรอยต่อระหว่างวัสดุท่อเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด ASTM A790 SAF 2205 และ ASTM A312 TP 316L

คำสำคัญ: ความต้านทานการกัดกร่อน; เหล็กกล้าไร้สนิม; ASTM A790 SAF 2205; ASTM A312 TP 316L

The Study on Metallurgical Structure and Corrosion Resistance of Dissimilar Welds between ASTM A790 SAF 2205 and ASTM A312 TP 316L Stainless Steel Pipe by Gas Tungsten Arc Welding Process

Pisak Lertvijitpun^{*}, Narongdet Pattanaphiboon, Sittipong Sang-in and Phisittawin Reanpradub

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

^{*} Corresponding author, E-mail: pisak.l@cit.kmutnb.ac.th

Received: 15 May 2021; Revised 25 July 2021; Accepted: 28 July 2021

Online Published: 30 August 2021

Abstract: This research studies dissimilar welding between ASTM A790 SAF 2205 and ASTM A312 TP 316L stainless steel pipe by using gas tungsten arc welding (GTAW) process which affects the metallurgical structure and corrosion resistance of weldment. The filler metal used in this experiment is AWS A5.9 ER2209 for joining the ASTM A790 SAF 2205 together and AWS A5.14 ERNiCrMo-3 for joining the dissimilar material between ASTM A790 SAF 2205 and ASTM A312 TP 316L. The metallurgical structure was examined by using an optical microscope (OM) and the corrosion resistance of welded joint was carried out with potentiodynamic polarization and immersion test method. From the result, it was found that the general microstructure of ASTM A790 SAF 2205 comprises ferrite and austenite, ASTM A312 TP 316L is austenite. AWS A5.9 ER2209 and AWS A5.14 ERNiCrMo-3 welded metal found ferrite-austenite and austenite respectively. Moreover, both corrosion resistance test methods reflect the highest corrosion rate that occurs on the dissimilar welded joint between ASTM A790 SAF 2205 and ASTM A312 TP 316L which was welded by AWS A5.14 ERNiCrMo-3 filler metal.

Keywords: Corrosion Resistance; Stainless Steel; ASTM A790 SAF 2205; ASTM A312 TP 316L



1. บทนำ

เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (Duplex Stainless Steel: DDS) และเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก (Austenitic Stainless Steel) ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมโดยเฉพาะอย่างยิ่งในการลำเลียงน้ำมันดิบ และก๊าซธรรมชาติ ที่ต้องการสมบัติด้านความแข็งแรงทนต่อแรงดันในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูง รวมถึงความต้านทานการกัดกร่อนในบรรยากาศที่ปนเปื้อนด้วยสารเคมี เช่น คลอไรด์ สารปรอท คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์ [1] ความแตกต่างระหว่างการเลือกใช้เหล็กกล้าไร้สนิมทั้ง 2 เกรด ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และความเค้นที่เกิดขึ้นในการใช้งานซึ่งในบริเวณที่ต้องรับความเค้นที่อุณหภูมิสูง จะเลือกใช้งานเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ เช่นเกรด ASTM A790 SAF 2205 ส่วนในบริเวณที่ต้องการสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนเป็นหลักจะเลือกใช้เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก เช่นเกรด ASTM A312 TP 316L เพื่อให้สอดคล้องกับสมบัติของวัสดุ [2] อย่างไรก็ตามการลำเลียงก๊าซธรรมชาติดังกล่าวจะต้องลำเลียงผ่านสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไปตามธรรมชาติจึงสามารถปรับเปลี่ยนวัสดุให้ตรงกับสมบัติที่ต้องการและจำเป็นดังนั้นจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงชนิดของวัสดุ สำหรับท่อลำเลียงที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมโดยทั่วไปแล้วจะใช้กระบวนการเชื่อมแบบหลอมละลาย จากวรรณกรรมวิจัยพบว่าการเชื่อมแบบหลอมละลายระหว่างเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์และเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกสามารถกระทำได้และผ่านเกณฑ์การยอมรับเช่นการทดสอบรอยเชื่อมแบบทำลายสภาพและไม่ทำลายสภาพตามมาตรฐานสากล ในกรณีที่ใช้ปริมาณ

ความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานต่ำจะส่งผลให้มีสัดส่วนของเฟอไรต์ต่อออสเทนไนต์สูงกว่ากรณีที่ใช้ปริมาณความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานสูง รวมถึงกรณีที่ใช้ปริมาณความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานสูงจะส่งผลให้เกิดออสเทนไนต์ทุติยภูมิมากยิ่งขึ้นทำให้ความต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็มของวัสดุต่ำลง ในบรรยากาศแมกนีเซียมคลอไรด์ [1, 3] อย่างไรก็ตามยังไม่มีรายงานเกี่ยวกับผลกระทบของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิดระหว่างเกรด ASTM A790 SAF 2205 และเกรด ASTM A312 TP 316L ต่อความต้านทานการกัดกร่อน ซึ่งโดยทั่วไปจะมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงของวัสดุในการบวนการเชื่อม งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความต้านทานการกัดกร่อนและโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์เกรด ASTM A790 SAF 2205 และเกรด ASTM A312 TP 316L ด้วยโลหะเติม AWS A5.14 ERNiCrMo-3 ในกระบวนการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนแก๊สปกคลุม (GTAW)

2. วัสดุและขั้นตอนในการวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

โลหะงานที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือท่อเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ เกรด ASTM A790 SAF 2205 และเกรด ASTM A312 TP 316L ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 88.90 มิลลิเมตร หนา 5.49 มิลลิเมตร ความยาว 150 มิลลิเมตร ส่วนโลหะเติมที่ใช้คือ AWS A5.9 ER2209 และ AWS A5.14 ERNiCrMo-3 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 มิลลิเมตรส่วนผสมทางเคมีของโลหะงานแสดงดังตารางที่ 1 และของโลหะเติมแสดงดังตารางที่ 2 ตามลำดับ



ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะงาน (จากใบรับรองส่วนผสมทางเคมีของผู้ผลิต)

Materials	ส่วนผสมทางเคมี (Wt.%)											
	Cr	Ni	Nb	Ti	Al	Cu	C	N	Mo	Si	Mn	Fe
A312 TP 316L	17.0	11.0	-	-	-	-	0.02	0.10	2.02	-	1.54	Bal.
A790 SAF 2205	22.0	5.24	-	-	-	0.15	0.02	0.16	3.12	0.65	0.77	Bal.

ตารางที่ 2 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะเติม (จากใบรับรองส่วนผสมทางเคมีของผู้ผลิต)

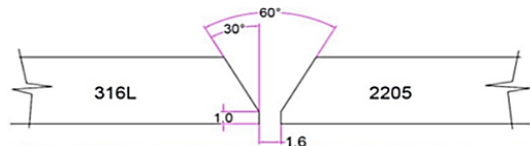
Materials	ส่วนผสมทางเคมี (Wt.%)											
	Cr	Ni	Nb	Ti	Al	Cu	C	N	Mo	Si	Mn	Fe
ERNiCrMo-3	22.10	64.50	3.40	0.21	0.11	0.01	0.01	-	9.40	0.03	0.01	-
ER2209	23.20	8.60	-	-	-	0.04	0.01	0.17	3.29	0.42	1.45	Bal.

2.2 การเตรียมชิ้นงานเชื่อม

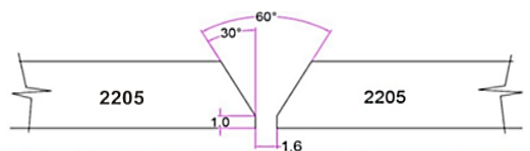
งานวิจัยนี้สร้างรอยเชื่อมต่อโดยตัดเตรียมท่อเหล็กกล้าไร้สนิมตามรายละเอียดในหัวข้อ 2.1 และบากมุมเติมโลหะให้มีมุมรวมที่ 60 องศา โดยแบ่งเป็น 2 เงื่อนไขดังนี้คือ (1) การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ASTM A790 SAF 2205 กับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ASTM A312 TP 316L ด้วยโลหะเติมชนิด AWS A5.14 ERNiCrMo-3 แสดงในรูปที่ 1 และชุดที่ (2) เกิดจากการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ASTM A790 SAF 2205 จำนวน 2 ชั้น ด้วยโลหะเติมชนิด AWS A5.9 ER2209 แสดงในรูปที่ 2

2.3 การดำเนินการเชื่อม

ดำเนินการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนแก๊สปกคลุม (GTAW) ในตำแหน่งท่าเชื่อม 6G โดยกำหนดพารามิเตอร์ในการเชื่อมดังตารางที่ 3



รูปที่ 1 รอยต่อเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ASTM A790 SAF 2205 กับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก A312 TP 316L ด้วยโลหะเติมชนิด AWS A5.14 ERNiCrMo-3



รูปที่ 2 รอยต่อเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ASTM A790 SAF 2205 ด้วยโลหะเติมชนิด AWS A5.9 ER2209

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ในการเชื่อม

พารามิเตอร์	โลหะเติม	
	ERNiCrMo-3	ER2209
แรงดันอาร์ก	10-11 V	11 V
กระแสไฟเชื่อม	94-133 A	93.5-137.5 A
ความเร็วในการเชื่อม	34.14-73.79 mm/min	58.18-118.34 mm/min
อุณหภูมิระหว่างแนวเชื่อม	<150	<250
อัตราการไหลแก๊สปกคลุม	10 L/min	10 L/min
อัตราการไหลแก๊สรองหลัง	20 L/min	20 L/min

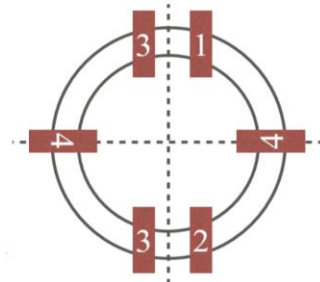
สังเกตเห็นได้ว่าการเชื่อมด้วยโลหะเติมทั้ง 2 ชนิด พารามิเตอร์บางตัวจะมีความแตกต่างกันได้บ้าง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพฤติกรรมและสมบัติของวัสดุโลหะเติมและโลหะงานซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดตามมาตรฐานสมาคมการเชื่อมสหรัฐอเมริกา (AWS)

หลังขั้นตอนผ่านกระบวนการเชื่อมแล้วจะถูกนำมาตรวจสอบโดยไม่ทำลายสภาพด้วยวิธีการตรวจสอบด้วยสายตา เพื่อให้มั่นใจว่าขั้นตอนเชื่อมผ่านเกณฑ์การยอมรับเบื้องต้น ทั้งนี้เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยต่อยอดโดยงานวิจัยก่อนหน้ามีการกำหนดองค์ประกอบในการเชื่อมลักษณะเดียวกันแต่มุ่งเน้นการทดสอบสมบัติเชิงกล [1] จึงทำให้งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนบริเวณแนวเชื่อม

2.4 การเตรียมชิ้นทดสอบและกำหนดำเนินการวิจัย

หลังจากผ่านการตรวจสอบแนวเชื่อมด้วยสายตาแล้ว นำชิ้นงานเชื่อมมาทำการตัดเป็นชิ้นงานทดสอบในตำแหน่งต่างๆ ดังนี้ ตำแหน่งที่ 1 ชิ้นงานตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค 2 ชิ้นงานตรวจสอบโครงสร้างมหภาค 3 ชิ้นงานทดสอบความต้านทาน

การกัดกร่อนด้วยเทคนิคโพเทนชิโอดินามิกส์ โพลาริเซชัน และ 4 ชิ้นงานทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนด้วยเทคนิคแบบจุ่ม ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ตำแหน่งการตัดเตรียมชิ้นงานทดสอบ

2.4.1 การทดสอบด้วยเทคนิคโพเทนชิโอดินามิกส์ โพลาริเซชัน (Potentiodynamic Polarization)

สำหรับการทดสอบการกัดกร่อน ดำเนินการโดยใช้เทคนิคโพเทนชิโอดินามิกส์ โพลาริเซชัน ทำโดยเตรียมชิ้นงานทดสอบโดยการตัดขวางแนวเชื่อมในตำแหน่งที่ 3 (6 และ 12 นาฬิกา) ขนาดชิ้นทดสอบกว้าง 15 มิลลิเมตร ยาว 40 มิลลิเมตร และนำไปผ่านกระบวนการตัดปาดผิวให้เรียบเพื่อขจัดความโค้งงอ



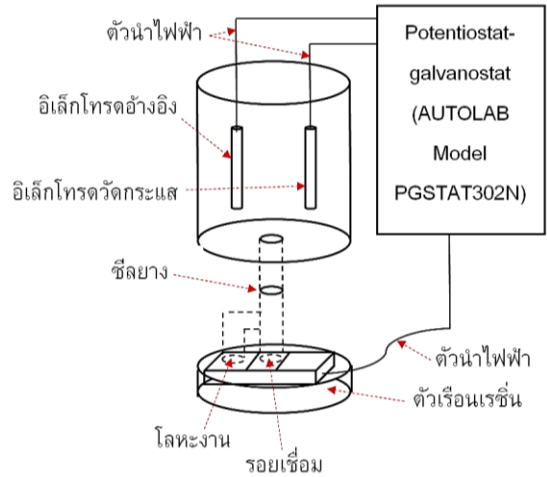
ผิวท่อด้านในและด้านนอก หลังจากนั้นชิ้นงานจะถูกนำมาบดกรีเชื่อมต่อกับสายไฟและขึ้นตัวเรือนด้วยเรซินเพื่อให้ขัดมันผิวหน้าทดสอบได้สะดวก ซึ่งการขัดผิวหน้าจะขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180, 400, 800, 1200 และ 2000 ตามลำดับ จากนั้นขัดมันบนผ้าสักหลาดด้วยผงอะลูมิน่า ทำความสะอาดชิ้นงานพร้อมกับตรวจสอบขอบเขตบริเวณที่จะทำการทดสอบด้วยการกัดกรวดโดยใช้เทคนิคเดียวกันกับการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและทำสัญลักษณ์บนชิ้นงาน จากนั้นขัดมันด้วยผงอะลูมิน่าอีกครั้งและติดตั้งเข้ากับเครื่องทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนด้วยเทคนิคโพเทนชิโอไดนามิกส์ โพลาริเซชัน (Potentiostat-galvanostat: AUTOLAB Model PGSTAT302N) โดยลักษณะการติดตั้งชิ้นทดสอบดังรูปที่ 4 และมีตัวแปรในการทดสอบดังตารางที่ 4

เมื่อได้ค่าความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อนจากการทดสอบแล้วจะนำมาคำนวณหามวลและความหนาที่สูญเสียไปในระหว่างการทดสอบหรืออัตราการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นดังสมการที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

$$\frac{dm}{Adt} = i \frac{AW}{nF} \quad (1)$$

$$\frac{dl}{dt} = i \frac{AW}{nF\rho} \quad (2)$$

โดยที่ $\frac{dm}{Adt}$ คือมวลที่สูญเสียไป ($g/s \cdot cm^2$) $\frac{dl}{dt}$ คือความหนาที่สูญเสียไป (cm/s) i คือความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อน (A/cm^2) AW คือน้ำหนักอะตอมของวัสดุ n คือจำนวนอิเล็กตรอนแลกเปลี่ยน F คือค่าคงที่ฟาราเดย์ ($96,485 C/mol$) และ ρ คือความหนาแน่นของวัสดุ (g/cm^3) [4]



รูปที่ 4 การติดตั้งชิ้นทดสอบการกัดกร่อน

ตารางที่ 4 ตัวแปรการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนด้วยเทคนิคโพเทนชิโอไดนามิกส์ โพลาริเซชัน

ตัวแปร	ค่าที่ใช้ทดสอบ
ศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น	-1.5 โวลต์
ศักย์ไฟฟ้าสิ้นสุด	1.5 โวลต์
อัตราการสแกน	0.00166 โวลต์ต่อวินาที
อิเล็กโทรดวัดกระแส	Pt
อิเล็กโทรดอ้างอิง	Ag/AgCl

2.4.2 การทดสอบด้วยเทคนิคแบบจุ่ม (Immersion)

การทดสอบนี้ดำเนินการตามกรอบมาตรฐาน ASTM G31 โดยตัดเตรียมชิ้นทดสอบให้มีขนาด กว้าง 20 มิลลิเมตร ยาว 40 มิลลิเมตร มีความหนาตามวัสดุท่อเดิม พื้นผิวชิ้นงานจะทำความสะอาดด้วยแปรงลวดเหล็กกล้าไร้สนิม ล้างด้วยอะซิโตนในเครื่องล้างอัลตราโซนิค การเตรียมสารละลายใช้น้ำกลั่นปริมาตร 600 มิลลิลิตร ผสมกับ เพอร์ริกคลอไรด์



68.72 กรัม และกรดไฮโดรคลอริก 16 มิลลิลิตร ทำการชั่งน้ำหนักขึ้นทดสอบด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.0001 กรัม จากนั้นนำขึ้นทดสอบที่ได้เตรียมไว้จุ่มลงในสารละลายดังกล่าวเป็นเวลา 72 ชั่วโมง อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบคือ 22 ± 2 องศาเซลเซียส ทั้งนี้จะดำเนินการตรวจสอบน้ำหนักของวัสดุทุกๆ 24 ชั่วโมง

2.4.3 การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา

ชิ้นงานถูกตัดให้มีขนาดกว้าง 10 มิลลิเมตร ยาว 40 มิลลิเมตร จำนวน 2 ชิ้น สำหรับการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาค โดยการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180, 400, 800, 1200 และ 2000 ตามลำดับ จากนั้นขัดมันบนผ้าสักหลาดด้วยผงอะลูมินา ทำความสะอาดและเป่าแห้งด้วยลมที่อุณหภูมิห้อง การกัดผิวหน้าชิ้นงาน สำหรับชิ้นงานที่เชื่อมด้วยโลหะเติมชนิด AWS A5.9 ER2209 ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 20 กรัม ผสมกับน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ในการกัดผิวหน้าชิ้นงาน สำหรับชิ้นงานที่เชื่อมด้วยโลหะเติมชนิด AWS A5.14 ERNiCrMo-3 จะใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 20 กรัม กับน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ในการกัดกรดชิ้นงานทางด้านที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ใช้คอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4) 10 กรัม สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 50 มิลลิลิตร และน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร สำหรับกัดกรดชิ้นงานด้านที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ASTM A790 TP 316L สำหรับบริเวณแนวเชื่อมจะใช้กรดออกซาลิก 10 กรัม กับน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ทุกสารละลายที่ใช้ในการกัดผิวหน้าจะใช้เทคนิคเคมีไฟฟ้าด้วยแรงดันไฟฟ้า 6 โวลต์ กระแส 0.3 มิลลิแอมแปร์ จากนั้นตรวจสอบโครงสร้างมหภาค

ด้วยกล้องสเตอริโอ เพื่อดูความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมและตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงเพื่อวิเคราะห์ผลร่วมกับผลการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อน

3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

3.1 ผลการตรวจสอบด้วยสายตา (Visual Test)

จากการตรวจสอบด้วยสายตาโดยใช้เกณฑ์ตามมาตรฐาน ASME B31.1 พบว่าชิ้นงานเชื่อมทั้งรอยต่อบริเวณผิวหน้าของรอยเชื่อมมีความสูงสม่ำเสมอเท่ากัน และมีการหลอมละลายระหว่างโลหะเติมทั้ง 2 ชนิดและวัสดุฐานอย่างสมบูรณ์ตลอดแนวเส้นรอบวงท่อ ไม่พบรอยกัดแห่วงข้างแนวเชื่อม การวัดความสูงของแนวเชื่อมอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดคือไม่เกิน 4 มิลลิเมตร

3.2 ผลการทดสอบด้วยเทคนิคโพเทนชิโอไดนามิกส์ โพลาริเซชัน (Potentiodynamic Polarization)

จากหัวข้อที่ 2.4.1 จะเห็นว่าทำการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนด้วยเทคนิคโพเทนชิโอไดนามิกส์ โพลาริเซชันใน ตำแหน่ง 12 นาฬิกา และตำแหน่ง 6 นาฬิกา รวมเป็น 2 ชั้นทดสอบ ผลจากการทดสอบแสดงค่า E_{corr} (ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน) I_{corr} (กระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน) และ E_{pit} (ศักย์ไฟฟ้าที่ก่อให้เกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม) ดังตารางที่ 5 โดยพบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเฉลี่ยของวัสดุโลหะงานเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ASTM A790 SAF 2205 มีค่าสูงสุดที่ -0.227 โวลต์ ตามด้วยวัสดุโลหะงานเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ASTM A312 TP 316L ที่ -0.285 โวลต์ แนวเชื่อมด้วยวัสดุ AWS A5.9



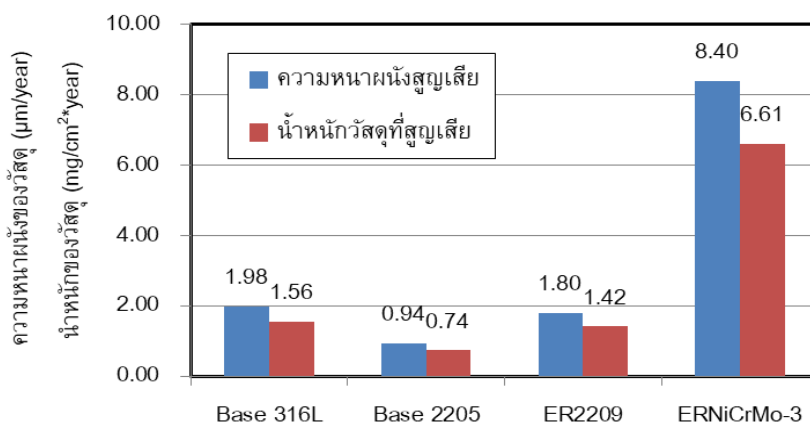
ตารางที่ 5 ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน กระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน และศักย์ไฟฟ้าที่ก่อให้เกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม

ชิ้นงาน / ตำแหน่ง	E_{corr} (V)			I_{corr} (A)			E_{pit} (V)		
	12 นาฬิกา	6 นาฬิกา	เฉลี่ย	12 นาฬิกา	6 นาฬิกา	เฉลี่ย	12 นาฬิกา	6 นาฬิกา	เฉลี่ย
Base 316L	-0.286	-0.283	-0.285	1.825×10^{-7}	1.589×10^{-7}	1.707×10^{-7}	0.433	0.417	0.425
Base 2205	-0.286	-0.167	-0.227	0.797×10^{-7}	0.828×10^{-7}	0.812×10^{-7}	1.143	1.211	1.177
แนวเชื่อม (ER2209)	-0.313	-0.275	-0.294	1.672×10^{-7}	1.429×10^{-7}	1.551×10^{-7}	1.118	1.125	1.122
แนวเชื่อม (ERNiCrMo-3)	-0.391	-0.214	-0.303	7.583×10^{-7}	6.906×10^{-7}	7.245×10^{-7}	1.132	1.000	1.066

ER2209 ที่ -0.294 โวลต์ และค่าต่ำสุดคือแนวเชื่อมด้วยวัสดุ AWS A5.14 ERNiCrMo-3 ที่ -0.303 โวลต์ ส่วนกระแสการกัดกร่อนเฉลี่ยพบว่าแนวเชื่อมด้วยวัสดุ AWS A5.14 ERNiCrMo-3 มีค่าสูงสุดที่ 7.245×10^{-7} แอมแปร์ แสดงถึงการกัดกร่อนเกิดขึ้นมากที่สุด และค่าต่ำสุดคือโลหะงาน ASTM A790 SAF 2205 ที่ 8.283×10^{-8} แอมแปร์ เกิดการกัดกร่อนต่ำที่สุด ทั้งนี้จะพบว่าค่า E_{corr} ในตำแหน่ง 6 นาฬิกามีค่าต่ำกว่าที่ตำแหน่ง 12 นาฬิกา เนื่องจากการเชื่อมใช้ตำแหน่งท่าเชื่อม 6G โดยเริ่มเชื่อมจากตำแหน่ง 6 นาฬิกา ขึ้นไปที่ตำแหน่ง 12 นาฬิกา หากพิจารณาถึงปริมาณความร้อนที่สะสมในแต่ละตำแหน่งจะพบว่าตำแหน่ง 12 นาฬิกา มีความร้อน

สะสมสูงกว่าตำแหน่ง 6 นาฬิกา สามารถส่งผลกระทบต่อโครงสร้างทางโลหะวิทยาและความต้านทานการกัดกร่อนที่ลดลงได้ [3] ส่วนการคำนวณหาอัตราการกัดกร่อนในรูปแบบของความหนาของผนังท่อที่หายไปและน้ำหนักของวัสดุที่สูญเสียไปจะสามารถนำเสนอได้ดังแผนภูมิแท่งดังรูปที่ 5

จากรูปที่ 5 แสดงอัตราการกัดกร่อนในลักษณะของความหนาผนังท่อที่บางลง และน้ำหนักของวัสดุที่สูญเสียไปในการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนซึ่งพบว่าวัสดุโลหะงานเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์เกรด 2205 มีความต้านทานการกัดกร่อนสูงสุด ส่วนแนวเชื่อมด้วยวัสดุ AWS A5.14 ERNiCrMo-3 มีความต้านทานการกัดกร่อนต่ำที่สุด



รูปที่ 5 แผนภูมิแสดงอัตราการกัดกร่อน

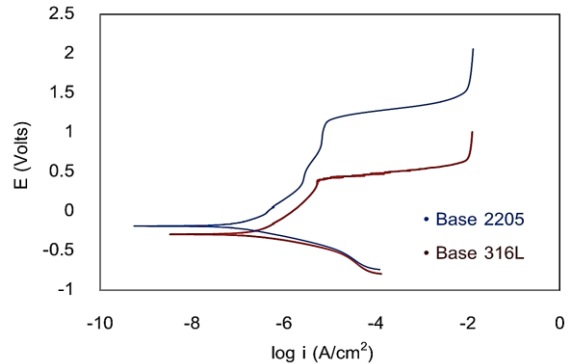


อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเปรียบเทียบความต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็มของวัสดุโลหะงานจะพบว่าวัสดุโลหะงานเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ASTM A790 SAF 2205 มีค่าเฉลี่ยสูงสุดที่ 1.177 โวลต์ ส่วนเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ASTM A312 TP 316L มีค่าเฉลี่ยต่ำสุดที่ 0.425 โวลต์ ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณธาตุเจือโครเมียม โมลิบดีนัม และไนโตรเจนของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกที่มีสูงกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกซึ่งเป็นปัจจัยหลักในการต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็ม [5] ส่วนแนวเชื่อมด้วยวัสดุ AWS A5.9 ER2209 มีค่า 1.122 โวลต์ และแนวเชื่อมด้วยวัสดุ AWS A5.14 ERNiCrMo-3 มีค่า 1.066 โวลต์ ผลการทดสอบด้วยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติกโพลาริเซชันโดยการเปรียบเทียบความต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็มระหว่างวัสดุโลหะงาน และแนวเชื่อมแสดงดังรูปที่ 6 และ 7 ตามลำดับ

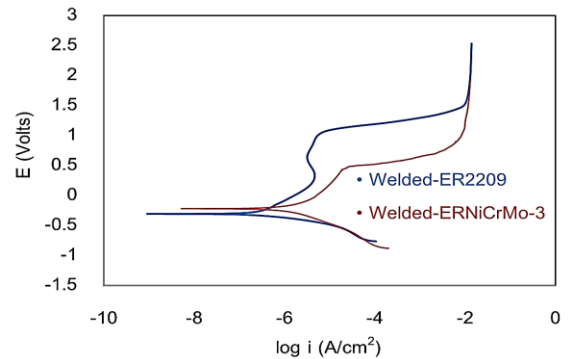
3.3 ผลการทดสอบด้วยเทคนิคแบบจุ่ม (Immersion Test)

จากการทดสอบด้วยเทคนิคแบบจุ่มชิ้นงานเชื่อมด้วยโลหะเติม AWS A5.9 ER2209 และ AWS A5.14 ERNiCrMo-3 ซึ่งมีน้ำหนักเริ่มต้นแตกต่างกันเล็กน้อย (สามารถเกิดความแปรผันได้) ระยะเวลาการจุ่ม 24, 48 และ 72 ชั่วโมง เกิดการกัดกร่อนที่ผิวชิ้นงานดังรูปที่ 8 และ 9 ตามลำดับ และพบว่าน้ำหนักที่สูญเสียไปของชิ้นงานทั้ง 2 ชนิดสามารถจับน้ำหนักค่าได้ดังตารางที่ 6

จากรูปที่ 8 และ 9 แสดงให้เห็นร่องรอยของการกัดกร่อนที่เพิ่มมากขึ้นตามเวลาที่จุ่มทดสอบซึ่งสอดคล้องกับค่าน้ำหนักชิ้นทดสอบและน้ำหนักที่สูญเสียไปตามตารางที่ 6 และพบว่าการกัดกร่อนของ

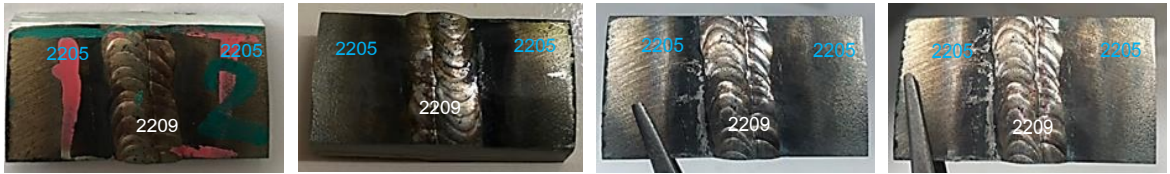


รูปที่ 6 แสดงความต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็มของวัสดุโลหะงาน



รูปที่ 7 แสดงความต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็มของแนวเชื่อม

ชิ้นทดสอบที่ผ่านการเชื่อมด้วยโลหะเติม AWS A5.9 ER2209 สังเกตเห็นการกัดกร่อนบริเวณรอยเชื่อมมากกว่าบริเวณโลหะงานซึ่งสอดคล้องกับค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของโลหะงานที่สูงกว่าบริเวณแนวเชื่อม นอกจากนี้พบว่าเกิดการกัดกร่อนน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่เชื่อมด้วยโลหะเติม AWS A5.14 ERNiCrMo-3 ทั้งนี้เป็นเพราะ ชิ้นงานเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมต่างเกรด ประกอบไปด้วยวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ASTM A312 TP 316L



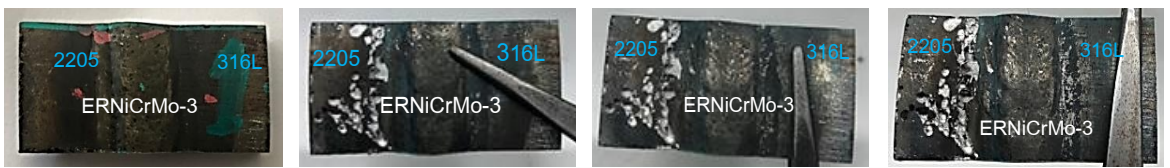
(ก)

(ข)

(ค)

(ง)

รูปที่ 8 ชิ้นงานเชื่อมด้วยโลหะเติม AWS A5.9 ER2209 (ก) ไม่ผ่านการจุ่ม และผ่านการจุ่มที่เวลา (ข) 24 ชั่วโมง (ค) 48 ชั่วโมง และ (ง) 72 ชั่วโมง



(ก)

(ข)

(ค)

(ง)

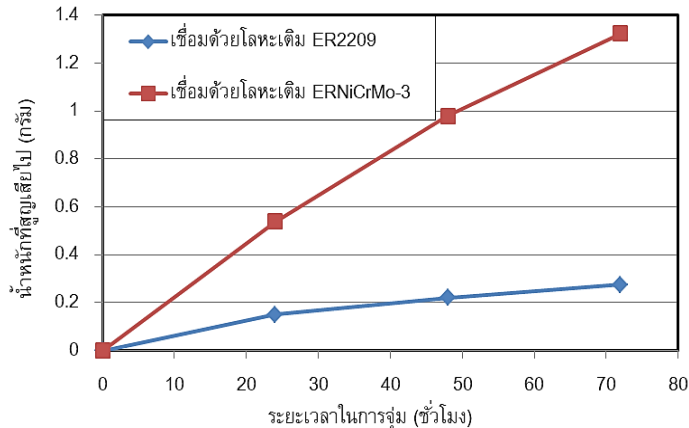
รูปที่ 9 ชิ้นงานเชื่อมด้วยโลหะเติม AWS A5.14 ERNiCrMo-3 (ก) ไม่ผ่านการจุ่ม และผ่านการจุ่มที่เวลา (ข) 24 ชั่วโมง (ค) 48 ชั่วโมง และ (ง) 72 ชั่วโมง

ตารางที่ 6 คำนวณน้ำหนักที่สูญเสียไปของชิ้นทดสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิคแบบจุ่ม

ระยะเวลา (ชั่วโมง)	น้ำหนักชิ้นทดสอบ (กรัม)		น้ำหนักที่สูญเสียไป (กรัม)	
	เชื่อมด้วยโลหะเติม		เชื่อมด้วยโลหะเติม	
	ER2209	ERNiCrMo-3	ER2209	ERNiCrMo-3
0	37.1863	35.8080	0.0000	0.0000
24	37.0352	35.2687	0.1511	0.5393
48	36.9657	34.8286	0.2206	0.9794
72	36.9120	34.4839	0.2743	1.3241

โลหะเติม AWS A5.14 ERNiCrMo-3 และเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ASTM A790 SAF 2205 จึงมีความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนที่มากกว่าในกรณีรอยเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ASTM A790 SAF 2205 และโลหะเติม AWS A5.9 ER2209 ซึ่งเป็นผลมาจากอิทธิพลจากการกัดกร่อนแบบกัลวานิก (Galvanic Corrosion) ที่เกิดขึ้นเมื่อโลหะต่างชนิดสัมผัสกันในสารละลายที่มีฤทธิ์กัดกร่อน [3, 6]

ด้วยเหตุผลนี้ หากสังเกตจากรูปที่ 9 จะเห็นว่าบริเวณผลกระทบร้อน (HAZ) ของโลหะงานฝังวัสดุ ASTM A312 TP 316L ถูกกัดกร่อนได้อย่างชัดเจน ทั้งนี้เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและน้ำหนักของชิ้นทดสอบที่สูญเสียไปดังรูปที่ 10 สำหรับชิ้นทดสอบทั้ง 2 ชนิดพบว่าในช่วง 0-24 ชั่วโมงเส้นกราฟความสัมพันธ์มีความชันที่สูงกว่าช่วง 24-48 ชั่วโมง และ 48-72 ชั่วโมง ตามลำดับ



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการจุ่มต่อน้ำหนักที่สูญเสียไปในการถูกกัดกร่อน

อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของสารละลายกัดกร่อนที่ใช้ในการทดลองเป็นข้อพึงระวังซึ่งเมื่อเวลาผ่านไปจะมีความเข้มข้นลดลงทำให้อัตราการกัดกร่อนลดลงตามไปด้วย

3.4 ผลการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา

ผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคพบว่าแนวเชื่อมไม่ปรากฏจุดบกพร่อง โดยผ่านเกณฑ์การยอมรับตามมาตรฐาน โครงสร้างมหภาคของชิ้นงานเชื่อมแสดงดังรูปที่ 11 สำหรับชิ้นงานเชื่อมด้วยโลหะเติม AWS A5.9 ER2209 และรูปที่ 12 สำหรับชิ้นงานเชื่อมด้วยโลหะเติม AWS A5.14 ERNiCrMo-3 ตามลำดับ

จากผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคพบว่าสำหรับวัสดุโลหะงาน ASTM A790 SAF 2205 มีโครงสร้างที่ประกอบไปด้วยเฟอร์ไรต์ และออสเทนไนต์ โดยมีการจัดเรียงตัวตามที่สททางารริคขึ้นรูปในกระบวนการผลิตท่อไร้ตะเข็บ [7] ดังรูปที่ 13 ส่วนวัสดุ ASTM A312 TP 316L มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นออสเทนไนต์ ดังรูปที่ 14 ตามลำดับ



รูปที่ 11 โครงสร้างมหภาคของชิ้นงานเชื่อมด้วยโลหะเติม AWS A5.9 ER2209



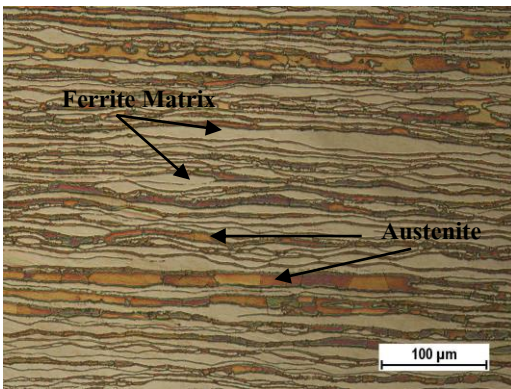
รูปที่ 12 โครงสร้างมหภาคของชิ้นงานเชื่อมด้วยโลหะเติม AWS A5.14 ERNiCrMo-3

นอกจากนี้ยังพบว่าโครงสร้างจุลภาคพื้นฐานของแนวเชื่อมด้วยโลหะเติมชนิด AWS A5.9 ER2209 บริเวณแนวเชื่อมทับหน้า ปรากฏโครงสร้างที่ประกอบไปด้วยเฟสเฟอร์ไรต์และเฟสออสเทนไนต์ โดยเฟสออสเทนไนต์ที่พบนั้นมีด้วยกัน 3 รูปแบบ คือ (1) เฟสออสเทนไนต์รูปแบบ “Widmānstten” (Widmānstten-Type Austenite: WA) (2) เฟสออสเทนไนต์ที่อยู่ใน

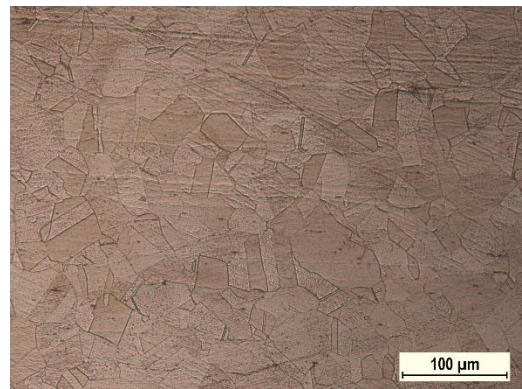


เกรน (Intragranular Austenite: IGA) และ (3) เฟส ออสเทนไนต์ที่อยู่ตามขอบเกรน (Grain Boundary Austenite: GBA) [7, 8] ดังรูปที่ 15 ส่วนแนวเชื่อมที่เชื่อมด้วยโลหะเติม AWS A5.14 ERNiCrMo-3 มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นออสเทนไนต์ และมีรูปแบบการแข็งตัวแบบคอลัมน์าร์เดนไดรต์ (Columnar Dendritic) [9, 10] ดังรูปที่ 16

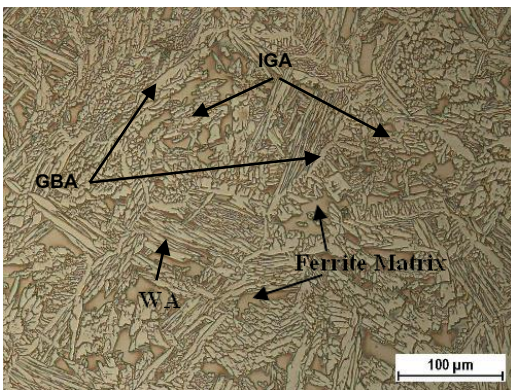
ทั้งนี้จากผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค สามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์กับความต้านทานการกัดกร่อนได้ว่า กรณีที่ของเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์นั้นมีสัดส่วนของโครงสร้างเฟอไรต์สูงกว่ากรณีของรอยเชื่อมโลหะต่างชนิดที่มีโลหะงานและโลหะเติมซึ่งมีโครงสร้างเป็นออสเทนไนต์ และจากวรรณกรรมวิจัยพบว่าโครงสร้างที่ทนต่อการกัดกร่อน



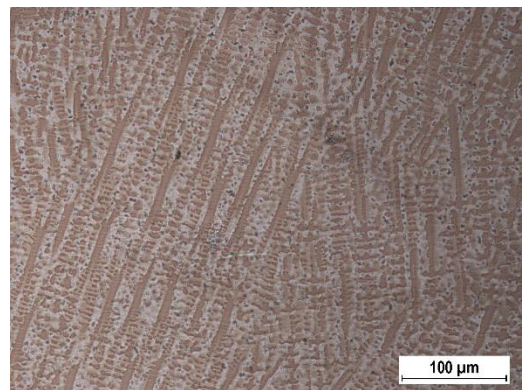
รูปที่ 13 แสดงโครงสร้างทางจุลภาควัสดุโลหะงาน ASTM A790 SAF 2205



รูปที่ 14 แสดงโครงสร้างทางจุลภาควัสดุโลหะงาน ASTM A312 TP 316L



รูปที่ 15 แสดงโครงสร้างจุลภาคแนวเชื่อมด้วยโลหะเติม AWS A5.9 ER2209



รูปที่ 16 แสดงโครงสร้างจุลภาคแนวเชื่อมด้วยโลหะเติม AWS A5.14 ERNiCrMo-3



แบบรูเข็มได้ดีกว่าคือโครงสร้างเฟอร์ไรต์ สอดคล้องกับงานวิจัยนี้ที่พบว่ารอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ASTM A790 SAF 2205 ด้วยโลหะเติมชนิด AWS A5.9 ER2209 ด้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็มได้ดีกว่ารอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ASTM A790 SAF 2205 กับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ASTM A312 TP 316L ด้วยโลหะเติมชนิด AWS A5.14 ERNiCrMo-3 ทั้งในการทดสอบด้วยเทคนิคโพเทนชิโอไดนามิกส์ โพลาริเซชันและด้วยเทคนิคแบบจุ่ม

4. สรุปผลการวิจัย

1. การเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ASTM A790 SAF 2205 ด้วยโลหะเติมชนิด AWS A5.9 ER2209 และการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ASTM A790 SAF 2205 กับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ASTM A312 TP 316L ด้วยโลหะเติมชนิด AWS A5.14 ERNiCrMo-3 ในกระบวนการเชื่อม GTAW ไม่พบจุดบกพร่องของแนวเชื่อม โดยผ่านเกณฑ์การยอมรับตามมาตรฐานการเชื่อมสากล

2. การทดสอบด้วยเทคนิคโพเทนชิโอไดนามิกส์ โพลาริเซชันสรุปได้ว่าโลหะเติม AWS A5.14 ERNiCrMo-3 มีศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนต่ำที่สุด เกิดกระแสการกัดกร่อนสูงที่สุด ส่วนเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ASTM A790 SAF 2205 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนสูงที่สุดและเกิดกระแสการกัดกร่อนต่ำที่สุด

3. เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ASTM A312 TP 316L มีค่าศักย์ไฟฟ้ารูเข็ม (E_{pit}) ต่ำสุด ส่วนเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ASTM A790 SAF 2205 มีค่าศักย์ไฟฟ้ารูเข็ม (E_{pit}) สูงสุด

4. การทดสอบด้วยเทคนิคแบบจุ่มพบว่าแนวเชื่อมด้วยโลหะเติม AWS A5.14 ERNiCrMo-3 นั้นเป็นแนวเชื่อมที่ประกอบด้วยโลหะต่างชนิดถึง 3 ชนิด ซึ่งเร่งให้เกิดการกัดกร่อนที่สูงกว่าแนวเชื่อมด้วยโลหะเติม AWS A5.9 ER2209

5. จากการทดสอบทั้งการกัดกร่อนด้วยเทคนิคโพเทนชิโอไดนามิกส์ โพลาริเซชันและการทดสอบแบบจุ่มกล่าวได้ว่ารอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ASTM A790 SAF 2205 ด้วยโลหะเติมชนิด AWS A5.9 ER2209 ด้านทานการกัดกร่อนได้ดีกว่ารอยเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ ASTM A790 SAF 2205 กับเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก ASTM A312 TP 316L ด้วยโลหะเติมชนิด AWS A5.14 ERNiCrMo-3 ทั้งนี้ให้พิจารณาถึงระยะเวลาและความคุ้มค่าในการใช้งาน อย่างไรก็ตามต้องคำนึงถึงความเข้มข้นของสารละลายในสภาวะแวดล้อมจริงด้วย

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] R. Pornpanom, P. Wathanatham and K. Eidhed, The Study of dissimilar metal welding between duplex 2205 and austenitic 316L stainless steels by using GTAW process, Industrial Engineering Conference Network 2016 (IE Network 2016), Proceedings, 2016, 1349-1355. (in Thai)
- [2] J.C. Lippold and D.J. Kotecki, Welding metallurgy and weldability of stainless steels, 1st ED., John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, 2005.



- [3] J. Verma and R.V. Taiwade, Dissimilar welding behavior of 22% Cr series stainless steel with 316L and its corrosion resistance in modified aggressive environment, *Journal of Manufacturing Process* 24(Part 1), 2016, 1-10.
- [4] S. Chandra-ambhorn, *Foundations of corrosion*, 5th Ed., Chulalongkorn University Publisher, Thailand, 2015.
- [5] Y. Prawoto, Synergy of erosion and galvanic effects of dissimilar steel welding: Field failure analysis case study and laboratory test results, *Journal of King Saud University – Engineering Sciences* 25 (1), 2013, 59–64.
- [6] S. Li, X. Ren, X. Ji and Y. Gui, Effects of microstructure changes on the superplasticity of 2205 duplex stainless steel, *Materials and Design* 55, 2014, 146-151.
- [7] S. Geng, J. Sun, L. Guo and H. Wang, Evolution of microstructure and corrosion behavior in 2205 duplex stainless steel GTA-welding joint, *Journal of Manufacturing Process*, 2015, 24, 32-37.
- [8] Y. Zhang, S. Cheng, S. Wu and F. Cheng, The evolution of microstructure and intergranular corrosion resistance of duplex stainless steel joint in multi-pass welding, *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, 277, 116471.
- [9] N.P. Kumar and N.S. Shanmugam, Some studies on nickel based Inconel 625 hard overlays on AISI 316L plate by gas metal arc welding based hardfacing process, *Wear*, 2020, 456-457, 203394.
- [10] S. Sirohi, C. Pandey and A. Goyal, Role of the Ni-based filler (IN625) and heat-treatment on the mechanical performance of the GTA welded dissimilar joint of P91 and SS304H steel, *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 65, 174-189.

Design and Fabricate an Electric Oven in Combination with Solar Energy to Increase Production of Seasoned Sour Tamarind for Duang Thong Community Enterprise

Thongchai Khruaphue^{1*} and Nisit Ong-art²

¹ Program in Production Technology, Faculty of Agricultural and Industrial Technology, Phetchabun Rajabhat University, Thailand

² Program in Industrial Electrical Technology, Faculty of Agricultural and Industrial Technology, Phetchabun Rajabhat University, Thailand

* Corresponding author, E-mail: Thongchai010426@gmail.com

Received: 22 June 2021; Revised 19 August 2021; Accepted: 23 August 2021

Online Published: 30 August 2021

Abstract: The purposes of this study were to design and fabricate an electric oven in combination with solar energy. The study compared the efficiency of the former three-phase current oven with variables in temperature, time, dryness percentage, and power consumption. The results of the aspect of transferring knowledge and technology show that 4.31 ± 0.61 total average satisfaction with good level acceptance. The result in the efficiency of an electric oven with solar energy, in using only electricity, was found that the highest temperature 60 degrees Celsius was the best drying temperature with a percentage of dry consistency at 91 percent and consumption rate at 6.51 baht per hour. Compared to the former oven with the electric and solar energy oven by considering the best variables, it was found that the developed oven had the percentage of dry consistency at 94 percent, used average timing in drying at 190 minutes and consumption rate was around 5.62 baht per hour. This was able to reduce cost, time, and consumption rate compared with the former oven that had the dry consistency percentage at 85 percent, use average timing in drying around 240 minutes with consumption rate around 13.77 baht per hour.

Keywords: Electric oven; Solar energy; Seasoned sour tamarind; Duang Thong Community Enterprise



1. Introduction

The famous tamarind is cultivated in Phetchabun province. The tamarind is usually processed to many products such as dried tamarind, tamarind vinegar and tamarind pie. The dried tamarind is one of the most popular products for consumer. Currently, Duang Thong Community Enterprise, Nong Phai, Phetchabun is a group producing processed products from sour tamarind in the "Sour Tamarind" brand. Since the seasoned sour tamarind products are distributed both internal and export to other countries, they cannot produce as the requirement of consumers, the order of reservation and distribution is more every year. The current producing power is 80-100 kilogram/day. Producing seasoned sour tamarind has many processes; grinding, pressing, drying, cutting, and packing which the most important process is dryness since the essence of tamarind should be keep dry and moisture in the appropriate condition before packing. If the tamarind is too dry, the sour flavor will be decreased [1]. If the tamarind is too moisture, it will be caused fungus on the surface. Currently, Duang Thong Community Enterprise uses the method of drying in the sunlight, switching in the three-phase electric oven and drying with sunlight has the disadvantage in unable controlling the moisture and sometimes the sunlight is not sufficient, it has to take a long time in the sun

drying. Drying with only one electric three-phase oven cannot increase production power and it has to merely apply with a three-phase current and the cost is expensive with the budget in setting for a large amount. Another problem with the three-phase oven is that there is no moisture controlling system, which affects tamarind for slower dryness [2].

Consequently, the purposes of the study were to design and fabricate an electric oven in combination with solar energy to increase production of seasoned sour tamarind at a lower cost and apply it to a one-phase electric current for general accommodation. Solar energy is renewable energy that cannot be exhausted [3, 4] and it can generate heat at high and very high level when it is stored in transparent material or room. Due to many advantage factors, it is particularly suitable for heating several products. The drying equipment generally cannot control the humidity and temperature during baking as a result, the roasted tamarind is not of the desired quality. Currently, the production technology has changed rapidly. Increase efficiency and reduce production costs are one of the important components of replacing human labor, reducing waste, and accelerating production. Electric oven with solar energy is the alternative way as the solution to the mentioned problems since the capital of producing oven is low and it can work



in both sunlight and no light condition [5]. Moreover, the moisture-controlling system with ventilating fan caused the tamarind to easily dry than normal. If there is no sunlight, the heater would increase to the required temperature [6]. Since the oven can work with every household and can be applied to everyone in the enterprise group of sour tamarind, thus, it can increase production power per day.

2. Materials and methods

2.1 Conventional drying equipment.

This study examined the efficiency of the former oven (three-phase), electric oven with solar energy (one-phase) which would examine into 2 functions; using only electric current for heating without sunlight energy and using electric current for heating with solar energy, for comparing information and results. The examination was done in both the former oven and developed oven with drying temperature at 45, 50, 55, 60, 65, and 70 degrees Celsius [6, 7] which is the highest temperature of the ovens. 30 kilograms of tamarind were used in each experiment (The oven can apply 30-50 kilograms per time), timing in tamarind drying from the moisture content of tamarind is 28-30% db. and the moisture control was maintained between at 15-20% db. which was suitable moisture value for

consistency drying of tamarind piece in producing seasoned sour tamarind. After that, dryness was measured by random method with tamarind slices [1] and estimated the consumption rate by calculating the electric current with electric meter gauge comparing to each drying time. The study examined three times in each experimental variable. The moisture content of tamarind was determined by method of standard AOAC 1990.

2.2 The design of the electric oven with solar energy.

In the design of the electric oven in combination with solar energy as shown in Fig. 1 (A) it is a modular design with four main components; 1 front cover element, 6 grill elements, 1 top cover element, 1 piece, and 1 set of oven structure parts. Fig. 1 (B) is an illustration of the oven with 6 pieces of 3 tier grills and the front and top covers can be opened 90 degrees to facilitate the loading of 2 tamarind grills in the top and easily taking in and off the 2 middle grills and 2 lower grills. It is also easy to maintenance. Fig. 1 (C) was an assembly design with the solar energy control setting, 4 heater systems, and moisture controlling systems with 2 ventilating fans [5, 8]. The dimensions of the electric oven are approximately 120 centimeters wide, 180 centimeters long and 150 centimeters high.

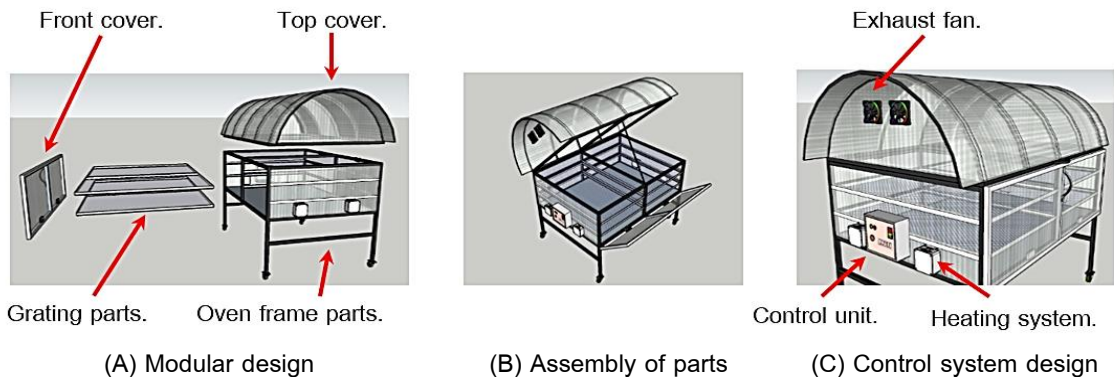


Fig. 1 Design characteristics of the electric oven with solar energy

2.3 The invention of the electric oven with solar energy.

From Fig. 2, the former three-phase electric oven, the oven structure was rectangular and made of stainless steel. The top of the oven was a 6,000 watt heating unit without a moisture control system. The capacity of tamarind in each drying was 40-50 kilograms. When compared with electric oven with solar energy as shown in Fig. 3, which was a complete oven and ready to work. The installation of 4 heat controls and each unit was 1,000 watt, 1 solar cell with 120 watts was in the top in a compatible with a 12 volt 55 amp renewable battery for working when there was no sunlight. This operation can be continuously worked for 6 to 8 hours after no sunlight condition [4, 6]. When the battery power ran out, the system would be switched to electric power. With this advantage, the electric oven with solar energy used a lower consumption rate than

the former one [7]. In the conversion of energy systems to use by a 2,500 watt 12 volt inverter and a 12 volt 10 amp charger. The setting of the heating control system for quick-drying in the oven and a moisture control system with ventilating fans were as follows. For drying processing, 30 kilograms of tamarind was placed in a drying chamber on the two-level tray. The power supply of the heating system was controlled by the control unit. The air velocity during drying of 0.35 meters per second and the temperature of the drying chamber was measured by Thermocouple (Type K) [8]. Perform color measurements with a highly accurate WR10 digital color difference meter. For the early drying period, the drying process operated by using solar energy in a day and the power supply for the drying process was switched to electric power at night.



Fig. 2 The former three-phase electric oven

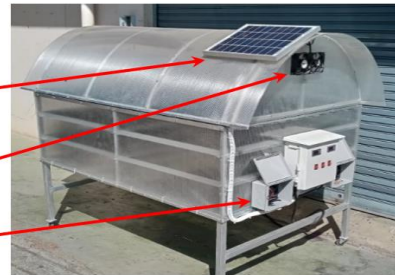


Fig. 3 Electric oven with solar energy

3. Results and Discussions

3.1 The result of transferring knowledge and technology of electric oven with solar energy

Knowledge and technology transfer to Duang Thong Community Enterprise, Phetchabun province in which 20 participants had 3-8 years of working experience in drying tamarind. The evaluation was in 3 aspects which the results of satisfaction as shown in Table 1. It was found that the overall satisfaction was 4.31 ± 0.61 and the score was at a good level. When considering each aspect, the most average score was knowledge transferring with 4.39 ± 0.58 and with a good level. Moreover, when summarizing the overall assessment of knowledge transfer of electric oven with solar energy, there were no points that were below the standard indicators (Key Results: KR) of the project. It can show that the design and development of an electric oven in combination with solar energy to produce seasoned sour tamarind can meet the needs of the target audiences effectively [9].

3.2 The results of the experimental in drying seasoned sour tamarind.

From the experiment of drying seasoned sour tamarind in an electric oven with solar energy as shown in Fig. 4, the results of the experiment as shown in Fig. 5 (A), the tamarind was too dry and rough, in dull and tasteless color with a color value between $L=34.81$ $a=19.32$ $b=37.23$. The weight is light due to the over and high-temperature drying, causing the surface of tamarind to dried faster than the inner side. When compared to Fig. 5 (B), which was exactly dry with a soft surface and in red and brown color, with color value is between $L=28.80$ $a=15.35$ $b=25.09$. The tamarind pulp was moistured and wet with a good smell from drying, due to the appropriate temperature related to heating and its consistency dry throughout the piece of tamarind [6]. Fig. 5 (C), the tamarind was too moist, sticky together as a lump in dark brown color, the color value is between $L=25.20$ $a=5.07$ $b=15.99$.

**Table 1** Result of transferring knowledge and technology of electric oven with solar energy

Assessment Details	\bar{x}	S.D.	Level
Knowledge transfer process			
Trainers have knowledge and ability to convey	4.48	0.58	Good
Trainers have easy-to-understand techniques and methods for transferring knowledge	4.50	0.52	Very good
Trainers can answer questions covering questions	4.25	0.62	Good
Trainers have a variety of media to transfer knowledge	4.48	0.58	Good
Trainers used the time for training and demonstration appropriately	4.25	0.62	Good
Average	4.39	0.58	Good
Usefulness			
Bring knowledge and technology to apply in daily life	4.38	0.65	Good
The electric oven with solar energy has been used to increase productivity	3.97	0.72	Good
Average	4.17	0.68	Good
Satisfaction			
Satisfaction for electric oven with solar energy	4.50	0.52	Very good
Satisfaction for transfer of knowledge and technology	4.25	0.62	Good
Average	4.37	0.57	Good
Total Average	4.31	0.61	Good

Because it dried at a low temperature for a long time, some part of tamarind was not ready in the transpiration process, causing a lot of moisture to accumulate [7,10].

3.3 The results of the efficiency testing of the former electric oven (3-phase type).

The researchers tested the efficiency of the former electric oven as data in comparison with the designed and developed one. Table 2 shows that the most appropriate temperature was at 65 degrees Celsius. The percentage of drying

consistency was 85 percent and the consumption-rate was 13.77 baht per hour. The enterprise group was able to dry twice a day with 80-100 kilograms per day. However, the more or less temperature than 65 degrees Celsius, it was affected to consistency percentage in dryness, too much or too little [6, 11]. Moreover, the timing of drying is more than the developed oven since the former oven did not have an air or moisture absorption system during drying and it caused more accumulated moisture, so it would take more time to dry as well [12].



Fig. 4 Flavored sour tamarind cooked by the electric oven with solar energy



(A) Tamarind that is too dry. (B) Suitable dry tamarind. (C) Very moist tamarind.

Fig. 5 Characteristics of dried tamarind by the electric oven with solar energy

Table 2 Results of the efficiency testing of the former electric oven.

Experimental Variables	Average Drying time (Minute)	Drying Consistency (Percent)	Consumption Rate (Baht per hour)
Temperature 45 °C	450	71	25.81
Temperature 50 °C	390	79	22.35
Temperature 55 °C	355	76	20.64
Temperature 60 °C	275	85	15.48
Temperature 65 °C	240	85	13.77
Temperature 70 °C	180	87	10.32



3.4 The results of efficiency testing of an electric oven with solar energy from using only electricity.

From Table 3, the experiment found that the maximum temperature of the oven was 60 degrees Celsius and a slow increase in heating due to it used only one heat setting. Therefore, the suitable variable in dryness was at 60 degrees Celsius, the percentage of the drying consistency was 91 percent and the consumption rate was 6.51 baht per hour. If the temperature was less than 60 degrees Celsius, the consistency in dryness was low [13]. Since the timing for dryness was 245 minutes, the ability in drying was twice a day.

3.5 The results of efficiency testing of an electric oven with solar energy.

Table 4 shows that the most suitable temperature was 65 degrees Celsius, the percentage of drying consistency was 94 percent and the consumption rate was 5.62 baht per hour. The drying time was 190 minutes and it was able to dry 3 times a day. The capacity was increase from around 80-100 kilograms per day to about 120-150 kilograms per day. However, from the analysis, it was found that heat, moisture, and time greatly affected the tamarind drying process. If the temperature was too hot, the tamarind dried unevenly. Some part was dried than other parts [14].

Table 3 Results of efficiency testing of an electric oven with solar energy from using only electricity

Experimental Variables	Average Drying Time (Minute)	Drying Consistency (Percent)	Consumption Rate (Baht per hour)
Temperature 45 °C	425	78	11.38
Temperature 50 °C	350	82	9.48
Temperature 40 °C	315	88	8.52
Temperature 60 °C	245	91	6.51

Table 4 Results of efficiency testing of an electric oven with solar energy

Experimental Variables	Average Drying Time (Minute)	Drying Consistency (Percent)	Consumption Rate (Baht per hour)
Temperature 45 °C	390	82	11.55
Temperature 50 °C	330	86	9.75
Temperature 55 °C	295	88	8.71
Temperature 60 °C	210	91	6.23
Temperature 65 °C	190	94	5.62
Temperature 70 °C	135	96	4.02



On the other hand, if the temperature was lower, it affected moisture in tamarind to take longer in drying [15]. Hence, moisture-controlling systems with ventilating fans can vent the humidity very well.

In comparison, it was found that the electric oven combined with solar energy is more efficient than conventional ovens. Considering the percentage of tamarind drying at uniform dryness throughout the pods and energy consumption of all variables, when considering the best variable, the baking temperature was 65 °C, which is the variable that Duangthong Community Enterprise Group has most satisfied and wanted both in terms of dryness, tamarind color, time and energy consumption because the tamarind is not dry and not too moist, and when considering at 70 °C, the percentage drier was higher than all variables. However, the baked tamarind is dry only on the skin surface. Due to the high temperature, the area dries out too quickly.

4. Conclusion

The objectives of the research were to design and fabricate the electric oven in combination with solar energy for Duang Thong Community Enterprise to increase the production of seasoned sour tamarind comparing the efficiency of the former oven and the developed one. The results of tamarind drying by the electric oven with solar energy in considering to the best variable

percentage of drying consistency at 94 percent with drying time average at 190 minutes and approximately consumption rate at 5.62 baht per hour. Compared to the former oven, the best variable of drying consistency percentage was 85 percent, the drying time was around 240 minutes and the consumption rate was approximately 13.77 baht per hour. Compared to the power, it can save money around 8.15 baht per hour and save the time about 50 minutes per time. If considered in 1 day, the former oven can dry twice a day but the electric oven with solar energy can dry 3 times a day. The production can increase by at least 20-50 kilograms per day. Normally, the enterprise group can dry tamarind 80-100 kilograms per day, and if the low-cost ovens were built more and used by the members in this enterprise group, they will be able to increase their production capacity according to the number of machines since the ovens can be applied with the household electricity.

5. Acknowledgments

The research team would like to express our deepest gratitude, appreciation for the Science Research and Innovation Fund through Thailand Science Research and Innovation (TSRI) under the research and innovation strategy of Phetchabun Rajabhat University which provides funding in the implementation of this research project in creating this potential knowledge.



Moreover, cordially thanks to the Department of Production Technology, majoring in Industrial Electronical Technology, Faculty of Agricultural Technology and Industrial Technology for supporting research tools and equipment. Furthermore, we would like to thank Duang Thong Community Enterprise, in Nong Phai district of Phetchabun province for providing data to complete this project and applied the electric oven with solar energy to enhance quality in producing seasoned sour tamarind. Finally, the research team would like to thank everyone for giving beneficial advice, support, encouragement and guidance while conducting this research.

6. References

- [1] N. Chaiyat, Upgrading of Low temperature solar heat with cascade vapor compression and absorption heat pump, *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, 2019, 3(4), 1923-1934.
- [2] U. Teeboonma and S. Jongjam, Ginger drying using infrared-vacuum technique, *Burapha Science Journal*, 2010, 15(2), 76-86.
- [3] S. Saelee, S. Manoton, W. Maneephan, P. Unturo, S. Sonsaree, E. Boonthum, E. Kaewcharoen, Drying giant sour tamarind preserves with a solar dryer: Giant sour tamarind farmers group Phitsanulok Province, The 6th Pibulsongkram National Conference (PBR 2020), *Proceeding*, 2020, 18-27. (in Thai)
- [4] B.W. Brook and C.J.A. Bradshaw, Key role for nuclear energy in global biodiversity conservation, *Conservation Biology*, 2015, 29(3), 702-712.
- [5] P. Klaimanee, W. Onniam, N. Yaikaew, Three phase inverter driver for three phase induction motor in single-phase electrical system. Project, Sripatum University, 2012. (in Thai)
- [6] P. Sa-adchom, P. Supavititpatana and T. Supavititpatana, Effect of drying temperature on foam-mat tamarind drying using far-Infrared radiation, The 18th TSAE National Conference (TSAE 2017), *Proceeding*, Article No. TFE010, 277-282. (in Thai)
- [7] S. Khwan-on, S. Vatcharasukpo, Analysis and simulation of a high step-up DC-DC converter for renewable energy system applications, *Applied Mechanics and Materials*, 2015, 775, 378-382.
- [8] J. Kaewdiao, N. Dussadee, C. Thararux, N. Homdoun and S. Chindaruksa, Air flow simulation and design of a rotary tray solar dryer combined with infrared rays for fish products, The 14th Conference on Energy Network of Thailand (E-NETT), *Proceeding*, 2018, 6-12. (in Thai)



- [9] S. Srisawad, T. Khruueaphue and S. Theakthum, Design and fabrication of tobacco leaf-stripping machine to enhance economic production of farmers in Phetchabun Province, SNRU Journal of Science and Technology, 2020, 12(3), 198-206. (in Thai)
- [10] A. Borah, K. Hazarika and S.M. Khayer, Drying kinetics of whole and sliced turmeric rhizomes (*Curcuma longa* L.) in a solar conduction dryer, Information Processing in Agriculture, 2015, 2(2), 85–92.
- [11] J. Prasad, V.K. Vijay, G.N. Tiwari, and V.P.S. Sorayan, Study on performance evaluation of hybrid drier for turmeric (*Curcuma longa* L.) drying at village scale, Journal of Food Engineering, 2006, 75(4), 497-502.
- [12] B.M.A. Amer, M.A. Hossain, and K. Gottschalk, Mathematical modelling of solar assisted hybrid dryer for banana, Energy Conversion and Management, 2010, 51(4), 813–820.
- [13] P. Yinkunthod, Drying agricultural product using solar energy, Master Thesis, King Mongkut's University of Technology Thanaburi, Thailand, 2005. (in Thai)
- [14] A. Ekpong, W. Phomkong, and E. Onsaard, The effects of maltodextrin as a drying aid and drying temperature on production of tamarind powder and consumer acceptance of the powder, International Food Research Journal, 2016, 23(1), 300-308. (in Thai)
- [15] S. Methakhup, N. Chiewchan and S. Devahastin, Effects of drying methods and conditions on drying kinetics and quality of Indian gooseberry flake, LWT - Food Science and Technology, 2005, 38(6), 579-587.



ข้อมูลสำหรับผู้เขียนและการเตรียมต้นฉบับ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมตีพิมพ์ปีละ 3 ฉบับ โดยวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ บทความที่พิจารณาตีพิมพ์ต้องไม่เคยตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารใดมาก่อน และไม่อยู่ในระหว่างพิจารณาของวารสารอื่น เรื่องที่ตีพิมพ์จะต้องได้รับการกลั่นกรองจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาที่เกี่ยวข้อง แบบปกปิดข้อมูล (Double-Blind Peer-Review) และได้รับความเห็นชอบจากบรรณาธิการวารสารฯ

บทความต้องมีความยาวไม่น้อยกว่า 5 หน้ากระดาษ B5 หรือไม่น้อยกว่า 2500 คำ โดยนับคำด้วยคำสั่ง word count ใน MS Word (ไม่เกิน 15 หน้ากระดาษ) บทความประกอบด้วยชื่อเรื่อง ชื่อผู้เขียน สถานที่ทำงาน การติดต่อผู้เขียน บทคัดย่อ และคำสำคัญ (3 - 5 คำ) โดยเนื้อหาตั้งกล่าวทั้งหมดต้องจัดเตรียมในรูปแบบภาษาไทย 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 เพื่อเผยแพร่ความรู้ในสาขาต่าง ๆ หรือแสดงข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์มีคุณค่าทางวิชาการ โดยองค์ประกอบของบทความวิชาการอาจคล้ายคลึงกับบทความวิจัย แต่ไม่มีเนื้อหาของการดำเนินงานวิจัยและผลการวิจัย ซึ่งผู้เขียนสามารถกำหนดได้เองตามความเหมาะสมของบทความวิชาการ

ผู้เขียนบทความสามารถดาวน์โหลดรูปแบบบทความสำเร็จรูปและแบบฟอร์มนำส่งบทความได้จากเว็บไซต์: ojs.kmutnb.ac.th/index.php/jointtech

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 no less than 2500 words using a word count command of MS Word (up to 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/jointtech.



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

 ขอรับรองว่าบทความต้นฉบับนี้ยังไม่เคยได้รับการเผยแพร่และตีพิมพ์ในวารสารอื่นใดมาก่อน

เจ้าของบทความ (ลงชื่อ)

8. แบบฟอร์มนี้ข้าพเจ้าได้แนบต้นฉบับบทความดังรายการต่อไปนี้ครบถ้วนแล้ว

 ส่งบทความทางระบบออนไลน์ที่เว็บไซต์ <http://ojs.kmutnb.ac.th/index.php/jointech/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/jointech/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



รายนามผู้ทรงคุณวุฒิตรวจและพิจารณาบทความ
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
ปีที่ 17 ฉบับที่ 2 - พ.ศ. 2564

- | | |
|--|--|
| 1. รองศาสตราจารย์ ดร.สมิตร ส่งพิริยะกิจ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 2. รองศาสตราจารย์ ดร.กัมปนาท เทียนน้อย | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 3. รองศาสตราจารย์ ดร.ปิตินันต์ กร้ามาต | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 4. รองศาสตราจารย์ ดร.อรรถพล แก้ววิลัย | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 5. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนิด สวัสดิ์เสวี | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| 6. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เวชิต ภาคย์พิสุทธิ์ | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| 7. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กษิติศ พนมสุวรรณ | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 8. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษดา มามาตร | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 9. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กนกกาญจน์ จิรกุลสมโชค | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 10. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัฐวุฒิ ฐัแทนคุณ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 11. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมุล แซ่เฮง พิสิษฐ์สังฆการ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 12. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชฎานี ทิพยเสมอ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 13. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นราวัชต์พร นवलสุวรรณค์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 14. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เปรมพร เขมาวุฒม์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 15. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กิตติชัย อธิกุลรัตน์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 16. อาจารย์ ดร.รัศมี แสงศิริมงคลยิ่ง | มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร |
| 17. อาจารย์ ดร.ลักษมี อังกูร์ชด์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 18. อาจารย์ ดร.โสภิตา ท่วมมี | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 19. อาจารย์ ดร.พลกฤษณ์ ภิรมนัส | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 20. อาจารย์สมพร เพียรสุขมณี | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| 21. อาจารย์เจตนาพงศ์ พาโลมัส | มหาวิทยาลัยศรีปทุม |

The Journal of Industrial Technology

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ ๑๗ ฉบับที่ ๒ ประจำปี ๒๕๖๔

บทความวิจัย (Research Articles)

- I. Chantaksinopas, T. Chokaumnuy, S. Sampaotong and A. Chungtragarn, ETT Medic: An Application for Minimizing Service Times and Waiting Queues of Medical Services in Hospitals, The Journal of Industrial Technology, 2021, 17(2), 1-18. (In Thai)
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2021.05.001
- P. Jongrukthavorn, Sayan Sirimontree and C. Thongchom, Study on Optimum Thickness of Post-Tension Concrete Flat Slab with Band Beam, The Journal of Industrial Technology, 2021, 17(2), 19-31. (In Thai)
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2021.05.002
- P. Ratmanee, S. Phitakwinai, W. Nilnont and W. Buakaew, Thin Layer Drying Kinetics of Turmeric using Hot Air Dryer, The Journal of Industrial Technology, 2021, 17(2), 32-45. (In Thai)
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2021.06.001
- S. Sang-in, Electrode Tip Diameters for Different Thickness Workpieces in Resistance Spot Welding, The Journal of Industrial Technology, 2021, 17(2), 46-55. (In Thai)
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2021.06.002
- P. Thamwatchalangkoon, S. Chintham and V. Sawasdee, Efficiency of Biogas Production by Co-Digestion between Leaf Waste in Community and Cow Dung, The Journal of Industrial Technology, 2021, 17(2), 56-68. (In Thai)
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2021.08.001
- S. Preangprom and N. Pasasuk, Waste Reduction in the Operation of the Product Shipping Process: A Case Study of the Beverage Industry Company Limited, The Journal of Industrial Technology, 2021, 17(2), 69-86. (In Thai)
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2021.08.002
- S. Charoenrat, Y. Pookamnerd and Suriya Prasomthong, Consideration of the Optimizing Condition in Welding Hardfacing on Wear Resistance with Hot-Wire Gas Tungsten Arc Welding Process by Response Surface Methodology, The Journal of Industrial Technology, 2021, 17(2), 87-102. (In Thai)
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2021.08.003
- P. Lertvijitpun, N. Pattanaphiboon, S. Sang-in and P. Reanpradub, The Study on Metallurgical Structure and Corrosion Resistance of Dissimilar Welds between ASTM A790 SAF 2205 and ASTM A312 TP 316L Stainless Steel Pipe by Gas Tungsten Arc Welding Process, The Journal of Industrial Technology, 2021, 17(2), 103-116. (In Thai)
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2021.08.004
- T. Khruaphue, N. Ong-art, Design and Fabricate an Electric Oven in Combination with Solar Energy to Increase Production of Seasoned Sour Tamarind for Duang Thong Community Enterprise, The Journal of Industrial Technology, 2021, 17(2), 117-127.
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2021.08.005