http://ojs.kmutnb.ac.th/index.php/joindtech
ISSN: 2697-5548 (Online)

Crossref DRIVEN BY doi Indexed in TCI

The Journal of Industrial Technology

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ ๒๑ ฉบับที่ ๒ ประจำปี ๒๕๖๘

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ ๒๑ ฉบับที่ ๒ ประจำปี ๒๕๖๘

VOLUME 21 | ISSUE 2 | 2025 | Focused on engineering and industrial technology
Published by College of Industrial Technology (CIT), KMUTNB

กองบรรณาธิการวารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

ที่ปรึกษา

ศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ เชี่ยงฉิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.สมิตร ส่งพิริยะกิจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

บรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.อรรถพล แก้ววิลัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

รองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.บุญลือ สวัสดิ์มงคล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ อัครเอกฒาลิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.สุทธิศักดิ์ พงศ์ธนาพาณิช	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.นวดล เหล่าศิริพจน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.พิเชษฐ์ ลิ้มสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.สำเริง จักรใจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.หทัยกานต์ มนัสปิยะ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ศาสตราจารย์ ดร.ปริญญา จินดาประเสริฐ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ นาวาอากาศโท ดร.สราวุฒิ สุจิตจร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.ธนัดชัย กุลวรวานิชพงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.อภิรัตน์ เลาห์บุตรี	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.สุรีรัตน์ ผลศิลป์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงฤดี ฉายสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กองบรรณาธิการนานาชาติ

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

หัวหน้าฝ่ายจัดการ

รองศาสตราจารย์ ดร.กัมปนาท เทียนน้อย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ฝ่ายจัดการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐศักดิ์ เตียวงศ์สมบัติ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปานทิพย์ บุญส่ง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ผู้จัดการวารสาร

นางสาวชลดา เชื้อประดิษฐ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

Editorial Board of The Journal of Industrial Technology

Advisory Board

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

Editor-in-Chief

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

Associate Editor

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

Editorial Board Members

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

International Editors

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

Head of Administrative Management

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

Administrative Management

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

Journal Manager

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

วัตถุประสงค์

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

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

อนึ่ง ผลงานวิจัยและผลงานทางวิชาการที่ปรากฏเผยแพร่ในวารสารฯ เป็นความคิดเห็นอิสระของผู้แต่ง โดยผู้แต่งเป็นผู้รับผิดชอบต่อผลทางกฎหมายใด ๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นจากบทความเผยแพร่นั้น ซึ่งกองบรรณาธิการและคณะผู้จัดทำวารสารฯ ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป

กำหนดออกวารสาร

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

ผู้จัดพิมพ์

หน่วยวิจัยและส่งเสริมวิชาการ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ชั้น 3 อาคาร 63 เลขที่ 1518 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 for academic quality by at least 3 experts in related fields, who are outsiders from various institutions. The authors and reviewers do not know each other's information (double-blinded peer reviews) and are not affiliated with the same institution. The high quality-reviewed manuscript will be considered to be accepted for publication. For the last step, the editorial board will verify and proofread the articles before online publishing and printing out all in the journal for further publication.

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

Publishing Schedule

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

Publisher

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

บทบรรณาธิการ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology, ISSN Online: 2697-5548) ปีที่ 21 ฉบับที่ 2 กองบรรณาธิการมีความยินดีเป็นอย่างยิ่งที่จะเรียนให้ทุกท่านได้ทราบว่า วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมได้รับการประเมินคุณภาพวารสารจัดอยู่ในฐานข้อมูล TCI กลุ่มที่ 1 ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (Thai Citation Index: TCI) มีผลรับรองตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2568 ถึงวันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2572

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

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

ปัจจัยหลายประการที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อคุณภาพวารสารคือคุณภาพของบทความที่มีคุณค่าทางวิชาการเป็นที่ยอมรับ กระบวนการคัดกรองและการตรวจสอบที่มีมาตรฐาน โดยผู้ทรงคุณวุฒิเฉพาะสาขาวิชาข้อเสนอแนะที่ทรงคุณค่า รวมทั้ง การจัดการที่มีประสิทธิภาพเพื่อดำเนินการจัดพิมพ์และการเผยแพร่บทความให้เป็นไปตามระยะเวลาที่กำหนด ส่งผลให้วารสารฯ มีความน่าเชื่อถือและผ่านการรับรองโดย TCI

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

บรรณาธิการ

ISSN (online): 2697-5548

สารบัญ

	หน้า
กองบรรณาธิการวารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (Editorial Board of The Journal of Industrial Technology)	A
วัตถุประสงค์ (Objectives)	C
บทบรรณาธิการ	E
บทความวิจัย	
การประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศน์ทางภูมิศาสตร์วิเคราะห์ผลกระทบจากสารเบนซีนเพื่อกำหนดมาตรการเชิงพื้นในกรุงเทพมหานคร (Application of Geographic Information System for Benzene Impact Analysis and Spatial Measure Development in Bangkok Metropolitan Area) *Chakkrit Sela, Seree Tuprakay, Piyarat Premanoch, Nannapasorn Inyim*	1-15
การปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อลดจุดบกพร่องในขนมปังแฮมเบอร์เกอร์โดยการประยุกต์ใช้เทคนิค DMAIC: กรณีศึกษาบริษัทเพรซิเดนท์เบเกอรี่จำกัด(มหาชน) (The Production Process Improvement to Reduce Defect in Hamburger Buns by Applying DMAIC Technique: A Case Study of President Bakery Public Company Limited) *Thananya Phansuwan, Thanawan Boonyarattanakornkit, Prachayapon Shingpun, Ketinun Kittipongpittaya, Nattakan Jakkranuhwat*	16-29
สมบัติทางกายภาพและทางกลของมอร์ต้าร์ผสมขยะทะเลเพื่อพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ (Physical and Mechanical Properties of Mortar Containing Marine Waste for Product Development) *Wunchock Kroehong, Samart Nipunram, Pruchaya Yoddumrong, Sattawat Haruehansapong, Prachoom Khamput*	30-41
การจำแนกโควิด 19 จากภาพ CT Scan ด้วยการเรียนรู้แบบรวมกลุ่ม (Classification of COVID-19 from Chest CT Images Using Ensemble Techniques) *Pongsathorn Chedsom*	42-58
การออกแบบและพัฒนาเครื่องมือสอบเทียบมาตรฐานสำหรับเครื่องวัดระนาบชนิดมีระดับน้ำ (Design and Development of Standard Calibrator for Horizontal Sprit Level) *Wissarut Kongsagul, Ruephuwan Chantrasa*	59-75

ISSN (online): 2697-5548

สารบัญ (ต่อ)

บทความวิจัย (ต่อ) **หน้า**

การพัฒนาสมบัติการทนความร้อนของอิฐจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยและดินขาวเผาโดยการเติมเถ้าชานอ้อย (Development of Heat Resistance Properties of Geopolymer Bricks from Fly Ash and Metakaolin by Bagasse Ash Addition) 76-90

Pisit Tippayasem และ Paijit Pawan

คอนกรีตบล็อกกลวงกันความร้อนมวลรวมกากเถ้าปาล์มน้ำมันผสมหน้ากากอนามัยและหน้ากาก KF94 (Thermal Insulation Hollow Concrete Blocks using Palm Oil Clinker Containing Surgical Face Masks and KF94 Masks as Aggregate) 91-106

Preecha Salaemae, Krittiya Ongwuttiwat, Abideng Hawa

การปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตในกระบวนการผลิตเพลทคอยล์ร้อน (Improving Production Efficiency in Hot Coil Plate Production Process) 107-122

Suchadee Tumrongsuk

การหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียในน้ำผิวดินโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบไฮโดรไดนามิกส์คาวิเตชั่นด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Optimization of Coliform Bacteria Removal in Surface Water using a Hydrodynamic Cavitation Reactor with the Response Surface Methodology) 123-137

Thanakrit Nonchana, Nopparat Amattirat, Kulachate Pianthong, Ittipon Worapun

สายอากาศพื้นผิวอภิวัสดุจัดเรียงกระแสแถวลำดับสำหรับเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สายจากการสื่อสาร 5G (Metasurface Rectenna Array for Wireless Energy Harvesting from 5G Communications) 138-150

Komkris Boonying, Patharawadee Boonying, Komyuth Chaiwong

การออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์ปัจจัยการปรับตั้งค่าเครื่องย่อยไนโตรเจนที่มีผลต่อการเกิดของเสียของหลอดกลั่นไนโตรเจน (Design of Experiments to Analyze Factors for Block Digestion Affecting the Defect of Nitrogen Tubes) 151-165

Yossawat Cheewaworanontree , Kridtharit Thongsin , Piya Rontlaong

ประเภทเส้นใยพลาสติกต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นส่วนขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ (Effect of Plastic Filament Type on Mechanical Properties of 3D-printed Parts) 166-179

Thanate Ratanawilai, Pornnapa Nuttabut, Arisa Prommai, Noppanat Jaturonlux

ISSN (online): 2697-5548

สารบัญ (ต่อ)

บทความวิจัย (ต่อ) **หน้า**

การพัฒนาชุดฝึกพีแอลซีด้วยระบบสมองกลฝังตัวอาดูโน่สำหรับควบคุมอุปกรณ์นิวแมติกส์ไฟฟ้า (Development of the PLC Practical Set with the Arduino Embedded System for Electro-pneumatic Device Control) 180-195

Surachai Nampromma, Rachan Udomkham, Thaitot Kaewngao

การเพิ่มผลิตภาพและลดต้นทุนการขนถ่ายสินค้าด้วยการกำหนดเวลามาตรฐานและการศึกษาการเคลื่อนไหว: กรณีศึกษาธุรกิจบริการคลังสินค้า (Enhancing Productivity and Reducing Handling Cost through Standard Time and Motion Study: A Case Study of a Warehouse Service Business) 196-212

Sugris Limphothong, Komkrit Pitiruek

ประสิทธิภาพในการต้านทานความล้าของแผ่นพื้นคอนกรีตผสมยางรถยนต์เก่าบดละเอียดขนาดเสมือนจริง (Fatigue Performance of Full-scale Crumb Rubber Concrete Slabs) 213-225

Supanatchai Khieorod, Kittipoom Rodsin

ข้อมูลสำหรับผู้เขียนและการเตรียมต้นฉบับ (Authors Guideline and Manuscript Preparation) S1

แบบฟอร์มนำส่งบทความ (Manuscript Submission Form) S2

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.001

บทความวิจัย

การประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศน์ทางภูมิศาสตร์วิเคราะห์ผลกระทบจากสารเบนซีนเพื่อกำหนดมาตรการเชิงพื้นในกรุงเทพมหานคร

จักรกฤษ เสลา[1*] เสรีย์ ตู้ประกาย[2] ปิยะรัตน์ ปรีย์มาโนช[2] และ นันท์นภัสร อินยิ้ม[2]

[1] หลักสูตรหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมความปลอดภัย, อาชีวอนามัยและสิ่งแวดล้อม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยรามคำแหง

[2] สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยรามคำแหง

[*] ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: chakkrit.s@rumail.ru.ac.th

วันที่รับบทความ: 4 มีนาคม 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 13 พฤษภาคม 2568; วันที่ตอบรับบทความ: 26 พฤษภาคม 2568
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 19 สิงหาคม 2568

บทคัดย่อ: การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) ในการวิเคราะห์ผลกระทบจากการแพร่กระจายของสารเบนซีนในพื้นที่กรุงเทพมหานคร การศึกษาดำเนินการโดยการเก็บรวบรวมข้อมูลความเข้มข้นของสารเบนซีนจากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศในพื้นที่กรุงเทพมหานครจำนวน 4 สถานี กรมควบคุมมลพิษ ในช่วงปี พ.ศ. 2562-2566 วิเคราะห์ข้อมูลด้วยเทคนิคการประมาณค่าเชิงพื้นที่ (Spatial Interpolation) และการวิเคราะห์ซ้อนทับ (Overlay Analysis) ผลการศึกษาพบว่า พื้นที่ที่มีความเสี่ยงสูงจากการได้รับผลกระทบของสารเบนซีนกระจายตัวอยู่ในเขตอุตสาหกรรมและพื้นที่การจราจรหนาแน่น โดยเฉพาะในเขตบางนา ลาดกระบัง และคลองเตย จากผลการวิเคราะห์นำไปสู่การเสนอมาตรการเชิงพื้นที่ 3 ระดับ ได้แก่ มาตรการเร่งด่วนในพื้นที่เสี่ยงสูง มาตรการป้องกันในพื้นที่เสี่ยงปานกลาง และมาตรการเฝ้าระวังในพื้นที่เสี่ยงต่ำ ผลการวิจัยนี้สามารถนำไปใช้เป็นกรอบแนวทางเบื้องต้น ในการกำหนดนโยบายและมาตรการจัดการคุณภาพอากาศในกรุงเทพมหานคร โดยเน้นการจัดการเชิงพื้นที่ตามระดับความเสี่ยงจากการแพร่กระจายของสารเบนซีน อย่างไรก็ดี จำเป็นต้องมีการทดลองประยุกต์ใช้ในพื้นที่จริงและประเมินประสิทธิภาพของมาตรการต่อไป เพื่อให้เกิดความเหมาะสมกับบริบทการดำเนินงานจริง

คำสำคัญ: ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์; สารเบนซีน; การวิเคราะห์เชิงพื้นที่

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.001

บทความวิจัย

Application of Geographic Information System for Benzene Impact Analysis and Spatial Measure Development in Bangkok Metropolitan Area

Chakkrit Sela[1*], Seree Tuprakay[2], Piyarat Premanoch[2] and Nannapasorn Inyim[2]

[1] Doctor of Philosophy Program in Safety Engineering, Occupational Health and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Ramkhamhaeng University

[2] Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Ramkhamhaeng University

[*] Corresponding author, E-mail: chakkrit.s@rumail.ru.ac.th

Received: 4 March 2025; Revised 13 May 2025; Accepted: 26 May 2025
Online Published: 19 August 2025

Abstract: This research aims to apply Geographic Information Systems (GIS) to analyze the impacts of benzene dispersion in Bangkok. The study collected benzene concentration data from four air quality monitoring stations under the Pollution Control Department between 2019 and 2023. The data were analyzed using spatial interpolation and overlay analysis techniques. The results revealed that high-risk areas for benzene exposure were concentrated in industrial zones and high-traffic areas, particularly in Bang Na, Lat Krabang, and Khlong Toei districts. Based on the findings, the study proposed three-tiered spatial mitigation measures: urgent actions in high-risk zones, preventive measures in moderate-risk areas, and monitoring protocols in low-risk zones. The research provides a preliminary framework for developing air quality management policies in Bangkok, emphasizing spatially targeted interventions based on benzene dispersion risks. However, further field implementation and efficacy assessments are required to ensure the proposed measures align with real-world operational contexts.

Keywords: Geographic Information System; Benzene; Spatial Analysis

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.001

1. บทนำ

ปัจจุบันกรุงเทพมหานครประสบปัญหามลพิษทางอากาศที่รุนแรง โดยเฉพาะสารเบนซีน (Benzene) ซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds: VOCs) ที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงจากยานพาหนะและกิจกรรมอุตสาหกรรม จากรายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย ปี พ.ศ. 2565 พบว่าปริมาณสารเบนซีนในพื้นที่กรุงเทพมหานครมีค่าเฉลี่ยรายปีสูงถึง 2.5 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งเกินค่ามาตรฐานที่องค์การอนามัยโลกกำหนดไว้ที่ 1.7 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สารเบนซีนเป็นสารก่อมะเร็งที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อสุขภาพของประชาชน โดยเฉพาะผู้ที่อาศัยในพื้นที่ที่มีการจราจรหนาแน่นและใกล้แหล่งกำเนิดมลพิษ [1]

สารเบนซีนในอากาศยังคงเป็นปัญหาสำคัญของมลพิษทางอากาศในกลุ่มสารอินทรีย์ระเหยง่าย เนื่องจากมีแหล่งกำเนิดที่หลากหลาย การวิเคราะห์สาเหตุจำเป็นต้องพิจารณาตามประเภทของกิจกรรมและการใช้ที่ดินในแต่ละจุดตรวจวัด โดยแบ่งเป็น 3 ประเภทหลัก คือ พื้นที่ทั่วไปหรือที่อยู่อาศัยในเมืองใหญ่ พื้นที่ริมถนนที่มีการจราจรคับคั่ง และพื้นที่ชุมชนที่อยู่โดยรอบเขตอุตสาหกรรม จากข้อมูลระหว่างปี 2557-2566 พบว่าระดับสารเบนซีนบริเวณริมถนนที่มีการจราจรหนาแน่นในกรุงเทพมหานครยังคงเกินค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้

การจัดการปัญหามลพิษจากสารเบนซีนจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลเชิงพื้นที่ที่ถูกต้องและแม่นยำ ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographic Information System: GIS) เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์การกระจายตัวของมลพิษและผลกระทบที่เกิดขึ้น ธัญญรัตน์ ไชยคราม และคณะ [2] ได้ประยุกต์ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์เพื่อการวิเคราะห์พื้นที่เสี่ยงภัยสารอินทรีย์ระเหยง่าย จังหวัดระยอง พบว่าผลกระทบจากสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศเป็นระยะเวลา 1 ปี พบว่ามี 158 หมู่บ้านที่ตั้งอยู่ในพื้นที่เสี่ยงภัยระดับสูงสุด โดยมีสารอินทรีย์ระเหยง่ายเกินค่ามาตรฐานถึง 4 ชนิด คิดเป็น 38.92% ของจำนวนหมู่บ้านทั้งหมด ระดับความเสี่ยงที่สูงนี้ถือเป็นประเด็นสำคัญที่หน่วยงานท้องถิ่นในจังหวัดระยองควรให้ความสำคัญและดำเนินการเฝ้าระวังอย่างใกล้ชิด

ในด้านนโยบายและการจัดการ กรุงเทพมหานครได้กำหนดแผนแม่บทด้านการจัดการคุณภาพอากาศ พ.ศ. 2566-2570 โดยมีเป้าหมายเป้าหมายการพัฒนากรุงเทพมหานครในปี 2570 มุ่งเน้นให้มีระบบและเครื่องมือในการจัดการสิ่งแวดล้อมที่มีประสิทธิภาพเพียงพอ เพื่อควบคุมคุณภาพสิ่งแวดล้อมเมืองและแหล่งกำเนิดมลพิษในพื้นที่ตามหลักวิชาการ โดยมุ่งสร้างผลกระทบเชิงบวกต่อระบบนิเวศและคุณภาพชีวิตที่ยั่งยืนของประชาชนทุกกลุ่ม ทั้งนี้ การบริหารจัดการด้านสิ่งแวดล้อมจะดำเนินการอย่างบูรณาการและมีความคล่องตัว ผ่านการประสานความร่วมมือกับเครือข่ายภาคีต่าง ๆ อย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม การขับเคลื่อนการจัดการสิ่งแวดล้อมที่ผ่านมาประสบข้อจำกัดด้านความครอบคลุมและข้อมูลเชิงพื้นที่ ดังนั้น การนำระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) มาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์และติดตามสถานการณ์จึงเป็นเครื่องมือสำคัญที่จะช่วยผลักดันให้บรรลุเป้าหมายการพัฒนาที่วางไว้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.001

2. ทบทวนวรรณกรรม

2.1 ที่ตั้งและอาณาเขตของกรุงเทพมหานคร

กรุงเทพมหานคร เมืองหลวงของประเทศไทย ตั้งอยู่ในภาคกลางที่ละติจูด 13°44' เหนือ และลองจิจูด 100°34' ตะวันออก [3] พื้นที่ 1,568.737 ตารางกิโลเมตร แบ่งการปกครองเป็น 50 เขต (รูปที่ 1) ตั้งอยู่บนที่ราบลุ่มสามเหลี่ยมปากแม่น้ำเจ้าพระยา มีความลาดเอียงจากทิศเหนือลงสู่อ่าวไทยทางทิศใต้ ระดับความสูงเฉลี่ย 1.5-2 เมตรเหนือระดับน้ำทะเลปานกลาง [4] สภาพภูมิอากาศได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือในฤดูหนาว และลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ในฤดูฝน มีอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดปี 28-30 องศาเซลเซียส และปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายปี 1,400-1,600 มิลลิเมตร [5] ประชากรตามทะเบียนราษฎร์ ณ มกราคม 2568 มีจำนวน 5,451,191 คน ความหนาแน่นประชากรเฉลี่ย 3,526 คนต่อตารางกิโลเมตร [6]

2.2 คุณภาพอากาศในกรุงเทพมหานคร

คุณภาพอากาศในกรุงเทพมหานครยังคงเป็นประเด็นที่น่ากังวล โดยเฉพาะในช่วงฤดูแล้งที่มักพบปัญหามลพิษทางอากาศรุนแรงขึ้น จากรายงานของกรมควบคุมมลพิษ (2566) พบว่าค่าสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds: VOCs) ซึ่งเป็นสารมลพิษทางอากาศที่สำคัญก็ยังคงเป็นปัญหาในบางพื้นที่ของประเทศ โดยเฉพาะในเขตเมืองใหญ่เช่น กรุงเทพมหานคร ซึ่งแหล่งกำเนิดหลักมาจากการจราจร โรงงานอุตสาหกรรม และการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์

2.3 พื้นที่เฝ้าระวัง

กรมควบคุมมลพิษได้ดำเนินการตรวจวัด VOCs ในบรรยากาศครอบคลุมพื้นที่ 7 จังหวัด ได้แก่ กรุงเทพมหานคร ปทุมธานี เชียงใหม่ ขอนแก่น สงขลา ระยอง และอ่างทอง โดยมีการติดตาม สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) 9 ชนิดตามมาตรฐานคุณภาพอากาศของประเทศไทย (ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2564) ได้แก่ เบนซีน (1.7 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร, ค่าเฉลี่ยรายปี) 1,3-บิวทาไดอีน (2.0 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร, ค่าเฉลี่ยรายปี) คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (62 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร, ค่าเฉลี่ยรายปี) คลอโรฟอร์ม (490 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร, ค่าเฉลี่ยรายปี) ไดคลอโรมีเทน (1,600 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร, ค่าเฉลี่ยรายปี) เอทิลเบนซีน (1,000 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร, ค่าเฉลี่ยรายปี) ไตรคลอโรเอทิลีน (1,350 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร, ค่าเฉลี่ยรายปี) โทลูอีน (1,000 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร, ค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมง) และไซลีน (870 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร, ค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมง) ซึ่งต้องดำเนินการตรวจสอบอย่างเคร่งครัด เนื่องจากเป็นสารอันตรายที่มาจากแหล่งกำเนิดสำคัญ ได้แก่ การขนส่งและจราจร กระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอุตสาหกรรมปิโตรเคมี และการใช้ผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมต่าง ๆ จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของระดับสารเบนซีนในอากาศที่เกิดจากการจราจรและสถานีบริการน้ำมันในกรุงเตหะราน เพื่อประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของประชาชนโดยใช้เทคโนโลยี

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.001

ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ [7] การศึกษานี้พบว่าความเข้มข้นของเบนซีนในอากาศเขต 1 ของเตหะรานสูงเกินมาตรฐาน EPA (1.56 ppb) โดยเฉพาะบริเวณสถานีบริการน้ำมันที่มีค่าเฉลี่ยสูงถึง 29.01 ppb ตามด้วยจุดตัดการจราจร (14.98 ppb) และถนนการจราจรหนาแน่น (13.85 ppb) ในขณะที่เขตที่อยู่อาศัยมีค่าต่ำสุดที่ 3.26 ppb สาเหตุหลักมาจากน้ำมันเชื้อเพลิงคุณภาพต่ำและระบบควบคุมการระเหยของน้ำมันในปั๊มน้ำมันไม่มีประสิทธิภาพ ผลการศึกษาชี้ให้เห็นถึงความเสี่ยงด้านสุขภาพจากมลพิษทางอากาศที่ประชาชนในเตหะราน

2.4 ผลการตรวจวัด

ผลการตรวจวัดในปี พ.ศ. 2566 พบว่า ส่วนใหญ่ของพื้นที่ตรวจวัดมีค่า VOCs (สารอินทรีย์ระเหยง่าย) อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน อย่างไรก็ตาม ยังคงพบปัญหาในบางพื้นที่ โดยเฉพาะในกรุงเทพมหานครและจังหวัดระยอง [8] โดยในกรุงเทพมหานครพบสารเบนซีนเกินมาตรฐานทั้งในพื้นที่ริมถนนและพื้นที่ทั่วไป สาเหตุหลักมาจากการจราจรที่คับคั่งและการปล่อยมลพิษจากยานพาหนะ ซึ่งสารเบนซีนเป็นสารก่อมะเร็งที่อันตรายและส่งผลกระทบต่อสุขภาพในระยะยาว

2.5 โปรแกรม Quantum GIS (QGIS)

Quantum GIS (QGIS) เป็นซอฟต์แวร์ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์แบบตั้งโต๊ะที่มีประสิทธิภาพสูง จัดเป็นซอฟต์แวร์รหัสเปิด ที่ใช้งานได้ง่ายผ่านส่วนติดต่อผู้ใช้แบบกราฟิก สามารถจัดการข้อมูลภาพ ข้อมูลตาราง วิเคราะห์และนำเสนอข้อมูลในรูปแบบแผนที่ รองรับการทำงานกับข้อมูลทั้งแบบเวกเตอร์และราสเตอร์ เช่น Shapefile และ GeoTIFF รวมถึงความสามารถในการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพื้นที่ การสร้างและแก้ไขข้อมูลเชิงพื้นที่และข้อมูลเชิงบรรยายผ่านเครื่องมือที่ออกแบบมาอย่างเป็นระบบ [9]

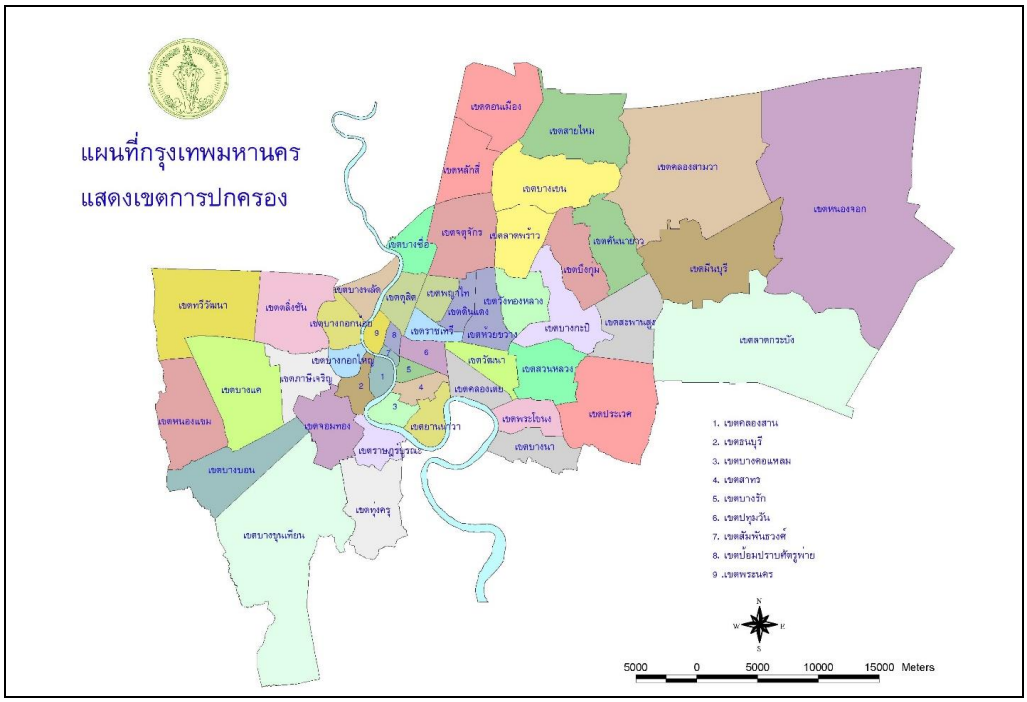
3. ขั้นตอนการวิจัย

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา

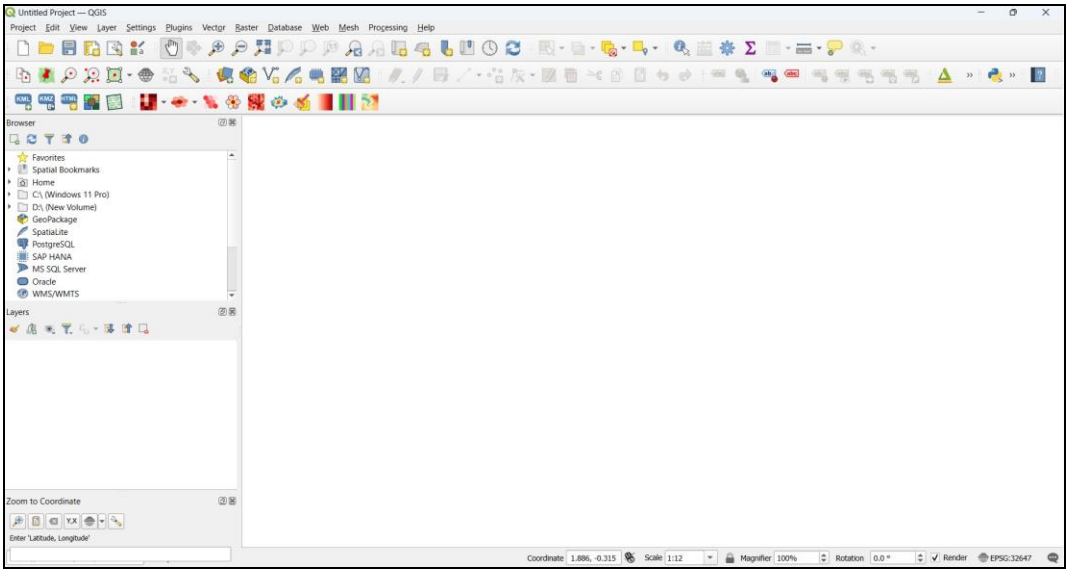
การศึกษานี้ใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพเหมาะสม พร้อมระบบปฏิบัติการและโปรแกรมพื้นฐานที่จำเป็น เพื่อรองรับการประมวลผลข้อมูลเชิงพื้นที่ที่มีความซับซ้อน โดยใช้โปรแกรม QGIS Desktop 3.34.11 (รูปที่ 2) ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์รหัสเปิด (Open Source) ที่มีความสามารถสูงในการวิเคราะห์และจัดการข้อมูลเชิงพื้นที่ (Geospatial Data) โปรแกรมนี้ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในวงการภูมิสารสนเทศ (Geoinformatics) เนื่องจากมีฟังก์ชันการทำงานที่ครอบคลุมและรองรับการทำงานกับข้อมูลหลากหลาย

รูปแบบการศึกษานี้ยังใช้ระบบกำหนดพิกัดภูมิศาสตร์ที่เป็นมาตรฐานสากล (Global Coordinate System) ในการระบุตำแหน่ง เช่น ระบบ WGS84 (World Geodetic System 1984) ซึ่งเป็นระบบที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในงานด้านภูมิสารสนเทศและระบบนำทางด้วยดาวเทียม (GPS) การใช้ระบบมาตรฐานนี้ช่วยให้การวิเคราะห์ข้อมูลมีความสอดคล้องและสามารถเปรียบเทียบกับข้อมูลจากแหล่งอื่นได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.001



รูปที่ 1 แผนที่กรุงเทพมหานคร [10]



รูปที่ 2 หน้าต่างของโปรแกรม QGIS Desktop 3.34.11

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.001

3.2 การจัดการข้อมูล

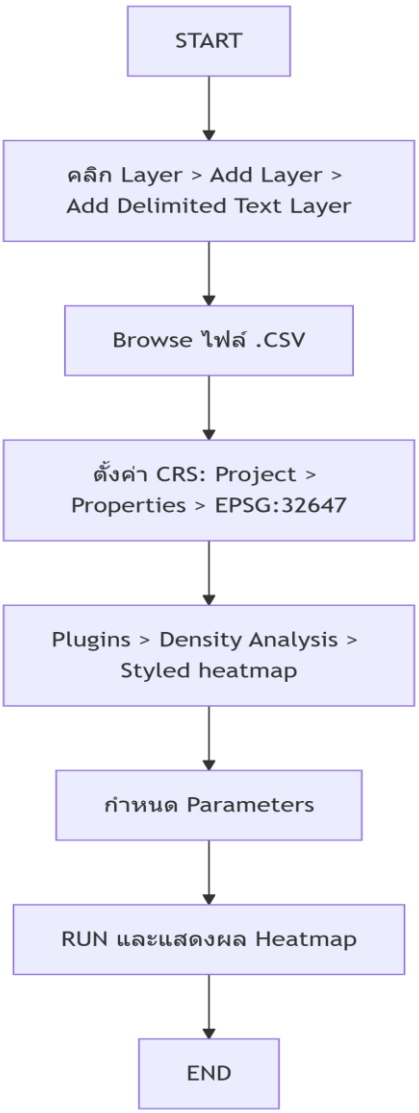
Microsoft Excel ใช้สำหรับบันทึกและจัดเก็บข้อมูลพื้นฐาน ได้แก่ ข้อมูลสถานีตรวจวัด พิกัดตำแหน่ง และค่าความเข้มข้นของสารเบนซีน การแปลงข้อมูลโปรแกรม Python ใช้สำหรับแปลงไฟล์ Excel ให้อยู่ในรูปแบบ CSV นำเข้าไฟล์ CSV สู่โปรแกรม QGIS Desktop 3.34.11 ในรูปแบบ Vector Layer แสดงผลข้อมูลในรูปแบบ Point

3.3 ขอบเขตการศึกษา

การวิจัยนี้ทำการศึกษาในพื้นที่กรุงเทพมหานคร การกำหนดข้อมูลนำเข้า ข้อมูลคุณภาพอากาศการรวบรวมข้อมูลความเข้มข้นของมลพิษทางอากาศ รวบรวมข้อมูลความเข้มข้นของสารเบนซีนจากสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศอัตโนมัติ (Automated Air Quality Monitoring Station) ในพื้นที่กรุงเทพมหานคร โดยได้รับความอนุเคราะห์ข้อมูลสารเบนซีน จากกรมควบคุมมลพิษทั้งหมด 4 สถานี ที่ทำการตรวจวัดค่าสารเบนซีน ดังนี้ 1.สถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศเขตธนบุรี (ราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา) 2.สถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศเขตปทุมวัน (ถนนพระราม 4 เขตปทุมวัน) 3.สถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศเขตดินแดง (ถนนดินแดง เขตดินแดง) 4. สถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศเขตวังทองหลาง (ถนนลาดพร้าว เขตวังทองหลาง) ลักษณะข้อมูลเป็นค่าเฉลี่ยรายเดือน ระหว่างปี พ.ศ. 2562-2566 จัดเก็บในรูปแบบไฟล์ดิจิทัลที่มีข้อมูลพิกัดตำแหน่ง (X,Y) ของแต่ละสถานี ศึกษาในกลุ่มประชากรที่อาศัยในรัศมี 5 กิโลเมตร จากการเก็บข้อมูลของสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศ ของกรมควบคุมมลพิษ

3.4 ขั้นตอนการนำเข้าข้อมูล

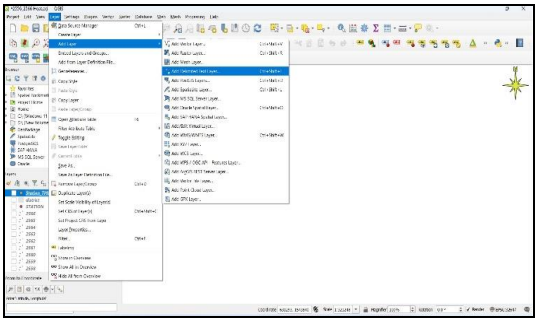
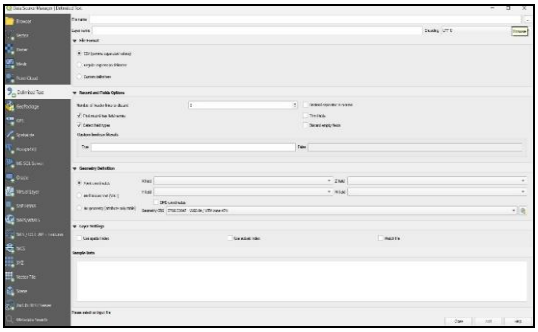
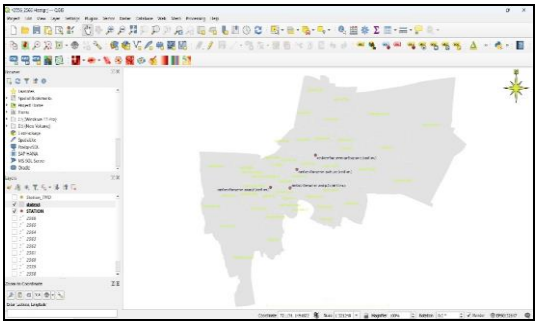
ขั้นตอนการนำเข้าข้อมูลและการใส่ค่าตัวแปรในโปรแกรม QGIS Desktop 3.34.11 ที่ใช้สำหรับแสดงผล แสดงดังรูปที่ 3 และตารางที่ 1



รูปที่ 3 ขั้นตอนการนำเข้าข้อมูล

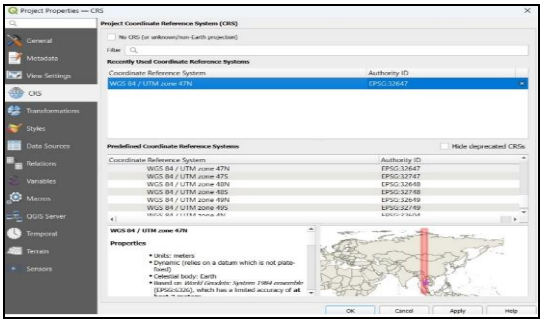
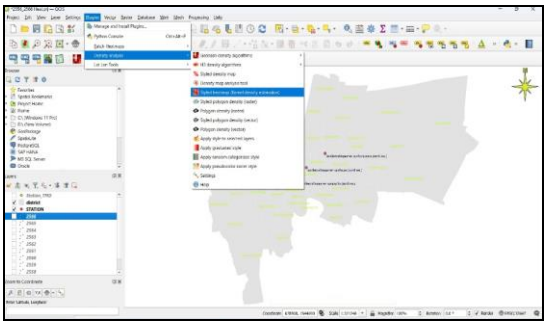
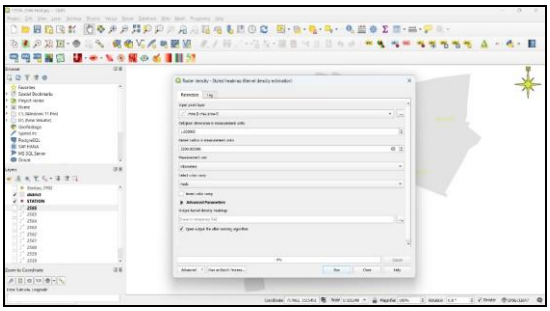
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.001

ตารางที่ 1 การใส่ค่าตัวแปรในโปรแกรม QGIS Desktop 3.34.11 ที่ใช้สำหรับแสดงผล

ลำดับที่	ขั้นตอนการใส่ค่าตามพารามิเตอร์	คำอธิบาย
1		1.คลิกที่ไอคอน Layer > Add Layer > Add Delimeted Text Layer
2		2.กดคำสั่ง Browse (3 จุดมุมขวาบน) เพื่อนำไฟล์งานที่สร้างไว้ สกุลไฟล์ .CSV (comma separated values)
3		3.เมื่อไฟล์เข้าสู่โปรแกรม ให้ตั้งค่า CRS (Coordinate Reference System) คลิกที่ไอคอน Project > Properties

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.001

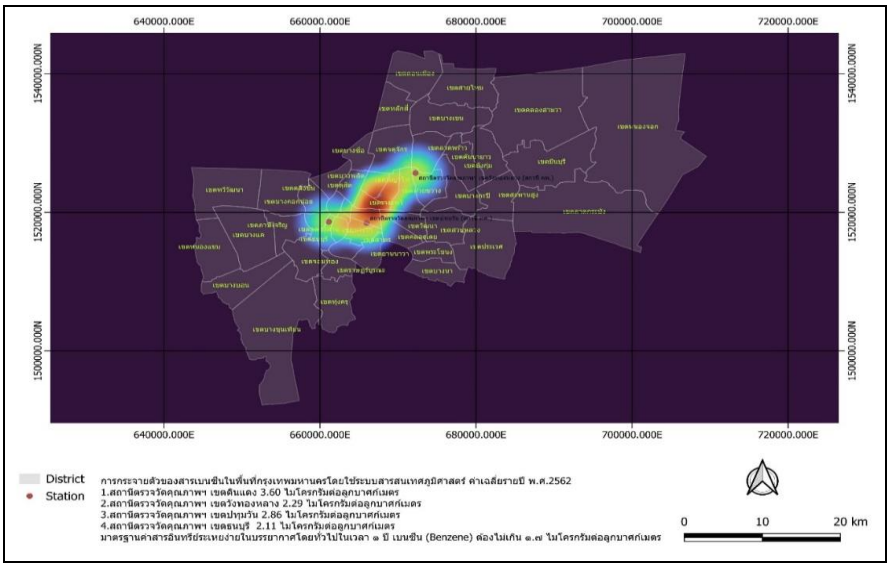
ตารางที่ 1 (ต่อ)

ลำดับที่	ขั้นตอนการใส่ค่าตามพารามิเตอร์	คำอธิบาย
4		4.เลือก WGS 84 / UTM zone 47N (Authority ID > EPSG:32647)
5		5.เลือก Plugins > Density Analysis > Styled heatmap
6		6.ใส่ค่า ตาม parameters เพื่อให้โปรแกรม Run เพื่อดูผลการประเมิน โดย โปรแกรม QGIS Desktop 3.34.11

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.001

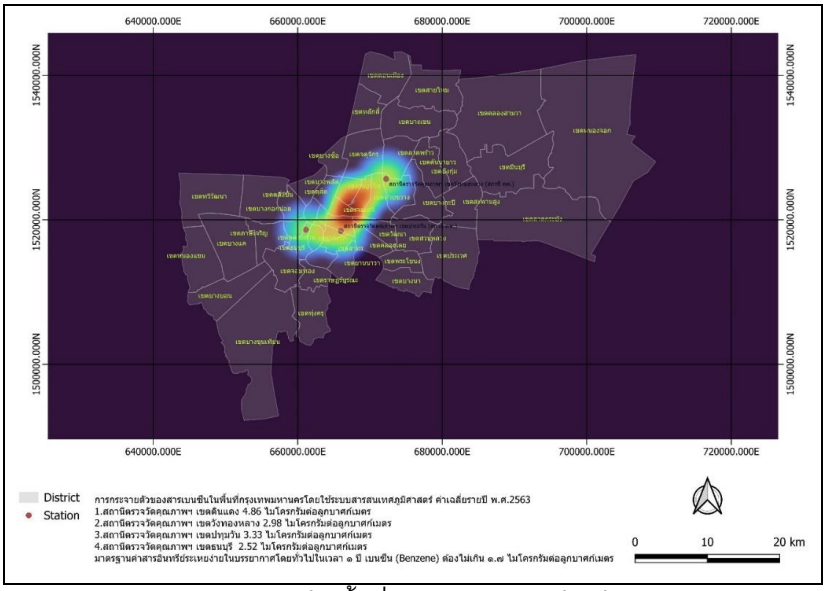
4. ผลการวิจัย

การศึกษาการกระจายตัวของสารเบนซีนในพื้นที่กรุงเทพมหานคร ระหว่างปี พ.ศ. 2562-2566 แสดงดังรูปที่ 4-8 พบว่า ค่าเฉลี่ยรายปีของสารเบนซีนในทุกพื้นที่ศึกษาส่วนใหญ่มีค่าเกินมาตรฐานที่กำหนดไว้ (1.7 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) โดยเขตดินแดงมีค่าสารเบนซีนสูงที่สุดอย่างต่อเนื่องตลอด 5 ปี และมีค่าสูงสุดในปี 2563 ที่ 4.86 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ขณะที่เขตปทุมวัน วังทองหลาง และธนบุรีมีค่าสารเบนซีนเกินมาตรฐานในระดับที่ต่ำกว่า โดยมีเพียงเขตธนบุรี ในปี 2565 เท่านั้นที่มีค่าต่ำกว่า 2 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (1.82 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) การวิเคราะห์แนวโน้มพบว่าค่าสารเบนซีนในทุกพื้นที่มีความผันผวน โดยเฉพาะในช่วงปี 2562-2564 และเริ่มมีแนวโน้มลดลงในปี 2565 แต่กลับเพิ่มขึ้นอีกครั้งในปี 2566 (รูปที่ 9) ทั้งนี้เขตดินแดงยังคงเป็นพื้นที่ที่มีความเสี่ยงสูงสุด โดยมีค่าเฉลี่ยสารเบนซีนสูงกว่าพื้นที่อื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญ และมีค่าสูงกว่ามาตรฐานมากกว่า 2 เท่าในทุกปีที่ทำการตรวจวัด ซึ่งสารเบนซีนเป็นสารอันตรายที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพทั้งระยะสั้นและยาว การสัมผัสสารนี้ในความเข้มข้นสูงหรือต่อเนื่องอาจทำให้เกิดอาการระคายเคืองตาและระบบทางเดินหายใจ ปวดหัว วิงเวียน คลื่นไส้ และในระยะยาวเพิ่มความเสี่ยงมะเร็งเม็ดเลือดขาว ทำลาย ไขกระดูก และระบบภูมิคุ้มกันบกพร่อง แหล่งกำเนิดหลักของสารเบนซีน ได้แก่ การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลจากยานพาหนะและโรงงานอุตสาหกรรม กระบวนการผลิตในโรงกลั่นน้ำมันและปิโตรเคมี รวมถึงควันบุหรี่และการเผาขยะ [11]

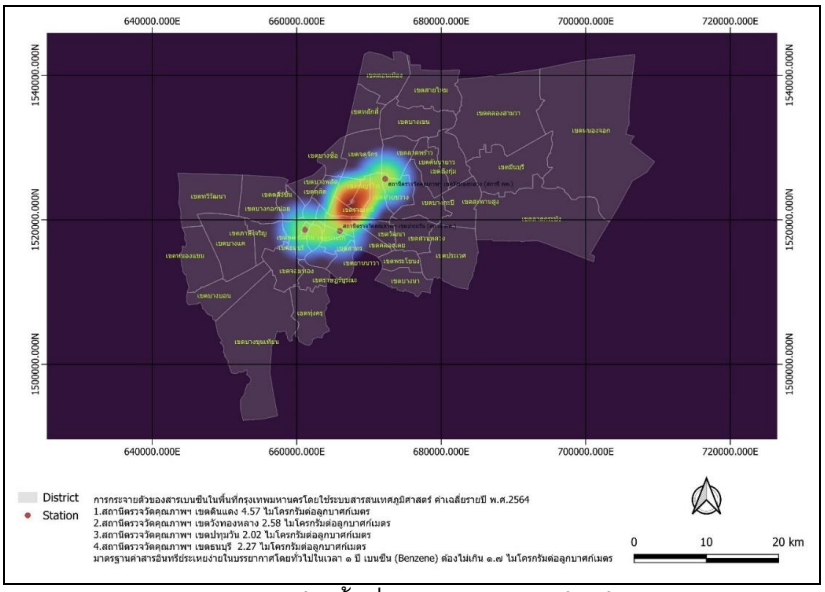


รูปที่ 4 การกระจายตัวของสารเบนซีนในพื้นที่กรุงเทพมหานครโดยใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ ค่าเฉลี่ยรายปี พ.ศ.2562

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.001

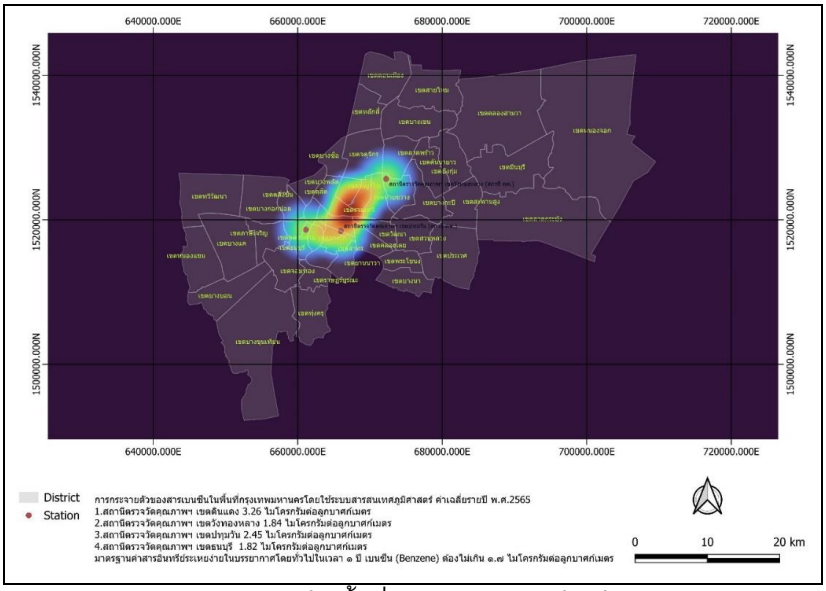


รูปที่ 5 การกระจายตัวของสารเบนซีนในพื้นที่กรุงเทพมหานครโดยใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ ค่าเฉลี่ยรายปี พ.ศ.2563

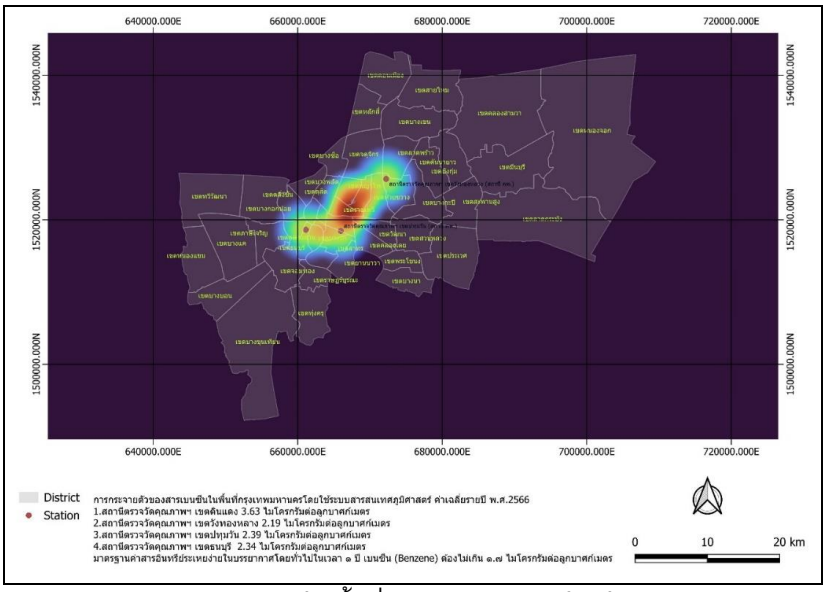


รูปที่ 6 การกระจายตัวของสารเบนซีนในพื้นที่กรุงเทพมหานคร โดยใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ ค่าเฉลี่ยรายปี พ.ศ.2564

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.001

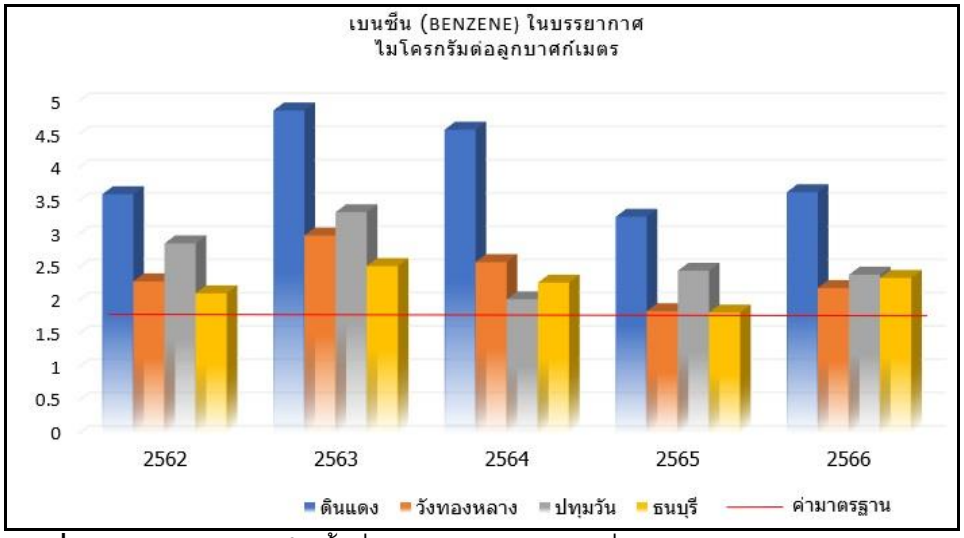


รูปที่ 7 การกระจายตัวของสารเบนซีนในพื้นที่กรุงเทพมหานครโดยใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ ค่าเฉลี่ยรายปี พ.ศ.2565



รูปที่ 8 การกระจายตัวของสารเบนซีนในพื้นที่กรุงเทพมหานคร โดยใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ ค่าเฉลี่ยรายปี พ.ศ.2566

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.001



รูปที่ 9 ปริมาณสารเบนซีนในพื้นที่กรุงเทพมหานคร ค่าเฉลี่ยรายปี พ.ศ.2562 ถึง พ.ศ.2566

5. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการกระจายตัวของสารเบนซีนในพื้นที่กรุงเทพมหานครระหว่างปี 2562-2566 พบว่าเขตที่ได้รับผลกระทบกระจุกตัวอยู่ในพื้นที่ใจกลางเมืองและเขตเศรษฐกิจสำคัญอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในเขตดินแดง วังทองหลาง ปทุมวัน และธนบุรี ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีการจราจรหนาแน่น มีอาคารสูง และมีกิจกรรมทางเศรษฐกิจสูง การมีสถานีตรวจวัดเพียง 4 สถานีอาจเป็นข้อจำกัดสำคัญในการติดตามและประเมินสถานการณ์มลพิษอย่างครอบคลุม เนื่องจากไม่สามารถสะท้อนการกระจายตัวของสารเบนซีนในพื้นที่ทั้งหมดได้อย่างแม่นยำ ทำให้อาจมีพื้นที่เสี่ยงอื่น ๆ ที่ไม่ได้รับการตรวจวัดและติดตาม

ข้อเสนอแนะเชิงนโยบายในการควบคุมสารเบนซีน

1. เพิ่มจำนวนสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศให้ครอบคลุมพื้นที่มากขึ้น โดยเฉพาะในเขตที่มีความเสี่ยงสูง และพื้นที่ที่มีแนวโน้มการพัฒนาทางเศรษฐกิจในอนาคต

2. มาตรการควบคุมการปล่อยสารเบนซีนจากแหล่งกำเนิดควรดำเนินการในหลายมิติพร้อมกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสถานีบริการน้ำมันเชื้อเพลิงซึ่งเป็นแหล่งการรับสัมผัสที่สำคัญ จากการศึกษาพบว่าผู้ประกอบอาชีพในสถานีบริการน้ำมันมีการรับสัมผัสสารเบนซีนในระดับที่เกินค่าแนะนำปลอดภัยของ ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists) ถึงร้อยละ 30 [12] โดยเฉพาะในกลุ่มผู้ประกอบการร้านค้า ดังนั้นจึงควรมีการปรับปรุงมาตรฐานน้ำมันเชื้อเพลิงควบคู่กับการเข้มงวดตรวจสอบการระเหยของสารเบนซีนจากสถานีบริการน้ำมัน การส่งเสริมการใช้ระบบขนส่งมวลชนและยานพาหนะไฟฟ้า ตลอดจนการจัดทำระบบเฝ้าระวังสุขภาพและการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการสัมผัสสารเบนซีนในกลุ่มผู้ประกอบอาชีพ [13] เหล่านี้อย่างต่อเนื่อง เพื่อลดผลกระทบต่อสุขภาพในระยะยาว

3. การพัฒนาระบบเฝ้าระวังและแจ้งเตือนความเสี่ยงจำเป็นต้องจัดทำระบบแจ้งเตือนออนไลน์แบบ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.001

Real-time ที่ประชาชนสามารถเข้าถึงข้อมูลได้ทันที ควบคู่กับการสร้างเครือข่ายการเฝ้าระวังร่วมกับภาคประชาชนและภาคเอกชนเพื่อให้เกิดการมีส่วนร่วมในการติดตามสถานการณ์ พร้อมทั้งกำหนดแผนรองรับที่ชัดเจนสำหรับกรณีที่ระดับสารเบนซีนเกินค่ามาตรฐาน เพื่อให้สามารถจัดการสถานการณ์ได้อย่างทันท่วงทีและมีประสิทธิภาพ

4. การส่งเสริมการวิจัยและพัฒนาต้องมุ่งเน้นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการแพร่กระจายของสารเบนซีนเพื่อเข้าใจกลไกการเกิดและการสะสมของมลพิษ ควบคู่ไปกับการพัฒนาเทคโนโลยีการตรวจวัดที่มีประสิทธิภาพและต้นทุนต่ำเพื่อขยายพื้นที่การตรวจวัดให้ครอบคลุมมากขึ้น รวมถึงการวิจัยผลกระทบต่อสุขภาพในระยะยาวของประชาชนในพื้นที่เสี่ยงเพื่อนำไปสู่การกำหนดมาตรการป้องกันและดูแลสุขภาพที่เหมาะสม

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Pollution Control Department, Summary report of surveillance for preparation of industrial air emission standards, Ministry of Natural Resources and Environment, 2023, 1-2. (in Thai)

[2] T. Chaiyakhom and S. Jirakajornkul, Application of geographic information system for volatile organic compounds risk area analysis in Rayong Province, Thai Journal of Science and Technology, 2014, 3(3), 160-172. (in Thai)

[3] https://apps.bangkok.go.th/info/m.info/nowbma. (Accessed on 05 February 2025)

[4] https://webportal.bangkok.go.th/public/user_files_editor/354/aboutcpud. (Accessed on 05 February 2025)

[5] Thai Meteorological Department, Climate of Bangkok Metropolis climatological report, Climate Center, Meteorological Development Division, Bangkok, 2023, 1-3. (in Thai)

[6] https://stat.bora.dopa.go.th/stat/statnew/statmonth/statmonth/#/displayData. (Accessed on 05 February 2025)

[7] F. Atabi, F. Moattar, N. Mansouri, A. Alesheikh and S. Mirzahosseini, Assessment of variations in benzene concentration produced from vehicles and gas stations in Tehran using GIS. International Journal of Environmental Science and Technology, 2023, 10, 283-294.

[8] Pollution Control Department, Summary of volatile organic compounds (VOCs) air quality monitoring according to ambient air quality standards, Ministry of Natural Resources and Environment, Bangkok, Thailand, 2023. (in Thai)

[9] Quantum GIS User Manual, Geoinformatics unit, Information Division Faculty of Environment and Resource Studies, Mahidol University, Thailand, 2013, 1-5. (in Thai)

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.001

[10] https://district.bangkok.go.th/SEDPortal/map1. (Accessed on 05 February 2025)

[11] World Health Organization (WHO), IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans, International Agency for Research on Cancer, Lyon, France, 2018, 120.

[12] N. Songpun, V. Pruktharathikul and S. Chaikleng, Benzene exposure among occupations at gasoline service stations, KKU Journal for Public Health Research, 2020, 13(1), 60-66. (in Thai)

[13] W.K. Jo and K.B. Song, Exposure to volatile organic compounds for individuals with occupations associated with potential exposure to motor vehicle exhaust and/or gasoline vapor emissions, Science of the total Environment, 2001, 269(1-3), 25-37.

บทความวิจัย

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.002

การปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อลดจุดบกพร่องในขนมปังแฮมเบอร์เกอร์โดยการประยุกต์ใช้เทคนิค DMAIC: กรณีศึกษาบริษัท เพรซิเดนท์ เบเกอรี่ จำกัด (มหาชน)

ธนัญญา พันธ์สุวรรณ[1] ธนวรรณ บุญรัตนกรกิจ[1] ปรัชญพนธ์ สิงห์ปั้น[2] เกตินันท์ กิติพงศ์พิทยา[1] และ นาฏกาญจน์ จักรานุวัฒน์[1*]

[1] ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตรและการจัดการ, คณะอุตสาหกรรมเกษตรดิจิทัล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตปราจีนบุรี

[2] บริษัท เพรซิเดนท์ เบเกอรี่ จำกัด (มหาชน)

[*] ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: nattakan.c@agro.kmutnb.ac.th

วันที่รับบทความ: 16 ธันวาคม 2567; วันที่ทบทวนบทความ: 2 พฤษภาคม 2568; วันที่ตอบรับบทความ: 28 พฤษภาคม 2568
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 19 สิงหาคม 2568

บทคัดย่อ: การผลิตขนมปังแฮมเบอร์เกอร์ให้มีคุณภาพสูง ปราศจากข้อบกพร่องถือเป็นความท้าทายที่สำคัญในกระบวนการผลิตอาหาร งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้เทคนิควิธี DMAIC ในการตรวจสอบและปรับปรุงการผลิตขนมปังแฮมเบอร์เกอร์อย่างเป็นระบบ สำหรับลดความแปรปรวนในการผลิตและยกระดับคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยเริ่มจากศึกษาลักษณะจุดบกพร่องของผลิตภัณฑ์สุดท้าย พบว่าลักษณะเบี้ยวของผลิตภัณฑ์เป็นจุดบกพร่องที่พบมากที่สุด (ร้อยละ 21) แต่เกิดจากแม่พิมพ์เสื่อมสภาพและได้รับการแก้ไขด้วยการเปลี่ยนแม่พิมพ์เรียบร้อย ดังนั้นผู้วิจัยจึงมุ่งเน้นการแก้ปัญหาลักษณะหน้าด่าง (ร้อยละ 20) ซึ่งมีสัดส่วนของเสียรองลงมาและมีสาเหตุจากกระบวนการผลิต จากนั้นวิเคราะห์สาเหตุที่แท้จริงของสาเหตุดังกล่าวโดยการใช้แผนผังสาเหตุและผลพบว่า ปัจจัยด้านปริมาตรน้ำเย็นในขั้นตอนสปองจ์และความเร็วของการปั่นผสมในกระบวนการหมักโดส่งผลต่อการเกิดลักษณะหน้าด่างในผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ภายหลังจากการปรับปรุงกระบวนการผลิต พบว่า อัตราของเสียของขนมปังแฮมเบอร์เกอร์ที่มีลักษณะหน้าด่างลดลงร้อยละ 77.29 โดยผลการวิจัยนี้ถือเป็นการนำเสนอกรอบการทำงานสำหรับผู้ผลิตในการปรับปรุงประสิทธิภาพการดำเนินงาน ลดความแปรปรวนของผลิตภัณฑ์ และปรับกระบวนการผลิตให้สอดคล้องกับมาตรฐานคุณภาพ ซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางเชิงกลยุทธ์ในการปรับปรุงการผลิตผลิตภัณฑ์ขนมปังรวมถึงขยายผลไปยังการผลิตอาหารอื่นต่อไป

คำสำคัญ: การปรับปรุงกระบวนการผลิต; จุดบกพร่อง; ขนมปังแฮมเบอร์เกอร์, เทคนิค DMAIC

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.002

บทความวิจัย

The Production Process Improvement to Reduce Defect in Hamburger Buns by Applying DMAIC Technique: A Case Study of President Bakery Public Company Limited

Thananya Phansuwan[1], Thanawan Boonyarattanakornkit[1], Prachayapon Shingpun[2], Ketinun Kittipongpittaya[1] and Nattakan Jakkranuhwat[1*]

[1] Department of Agro-Industry Technology and Management, Faculty of Digital Agro-Industry, King Mongkut's University of Technology North Bangkok Prachinburi Campus, Prachin Buri, Thailand

[2] President Bakery Public Company Limited., Bangkok, Thailand

[*] Corresponding author, E-mail: nattakan.c@agro.kmutnb.ac.th

Received: 16 December 2024; Revised 2 May 2025; Accepted: 28 May 2028
Online Published: 19 August 2025

Abstract: Producing hamburger buns that meet high-quality standards and are free from defects remains a critical challenge in the food production industry. This research aims to apply the DMAIC technique to systematically investigate and improve hamburger bun production processes, with the goal of reducing manufacturing variability and enhancing product quality. An initial defect analysis identified warpage (21%) as the most frequent defect, attributed to mold deterioration and resolved through mold replacement. Therefore, efforts focused on reducing color variation (20%), the second most prevalent defect, linked to process instability. Root cause analysis using a cause and effect diagram identified that the volume of cooling water in the sponge process and the mixing velocity during the dough process significantly influenced the occurrence of discoloration ($p \leq 0.05$). Following process improvements, the defect rate of hamburger buns with discoloration decreased by 77.29%. This study proposes a structured framework to enhance operational efficiency, reduce product variability, and ensure quality compliance, thereby offering a strategic approach for improving hamburger bun production and extend its applicability to other food manufacturing processes.

Keywords: Process improvement; Defect; Hamburger Buns; DMAIC Technique

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.002

1. บทนำ

ขนมปัง (Bread) เป็นผลิตภัณฑ์อาหารที่ได้จากการนำแป้งสาลีมาผสมกับน้ำตาล น้ำ และเกลือ รวมถึงวัตถุดิบอื่น ๆ จนได้แป้งโด (Dough) ที่มีความเหนียว ยืดหยุ่น และสามารถกักเก็บแก๊สได้ จากนั้นจึงนำไปผ่านกระบวนการอบ (Baking) เพื่อให้เนื้อสัมผัสเบา มีรูพรุน และเหมาะสมต่อการบริโภค [1, 2] ในบรรดาขนมปังชนิดต่าง ๆ ขนมปังแฮมเบอร์เกอร์ (Hamburger Buns) เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความต้องการสูงในร้านอาหารฟาสต์ฟู้ดและเบเกอรี่ โดยเฉพาะในกลุ่มตลาดค้าปลีกและบริการอาหารแบบเร่งด่วน ซึ่งต้องการสินค้าที่มีคุณภาพคงที่และรูปลักษณ์สม่ำเสมอ ดังนั้นขนมปังแฮมเบอร์เกอร์จึงต้องใช้แป้งที่มีโครงสร้างแข็งแรงเพื่อทนต่อการขึ้นฟูของโด มีลักษณะหนืด และต้องสามารถกักเก็บแก๊สสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นขนมปัง [3]

สำหรับการผลิตอาหาร ปัจจัยด้านคุณภาพและความปลอดภัย รวมถึงความสม่ำเสมอของสินค้าล้วนเป็นสิ่งสำคัญต่อการตัดสินใจของผู้บริโภค ดังนั้นผู้ผลิตจำเป็นต้องรู้คุณลักษณะทางกายภาพ เคมี และจุลินทรีย์ของสินค้าที่ส่งผลต่อการตัดสินใจซื้อของผู้บริโภค รวมถึงต้องมีกระบวนการควบคุมคุณภาพสินค้าผลิตตั้งแต่วัตถุดิบ กระบวนการผลิต และการเก็บรักษา เพื่อให้สินค้าเป็นไปตามข้อกำหนดด้านกฎระเบียบหรือมาตรฐานความปลอดภัยและความต้องการของผู้บริโภคมากที่สุด โดย Chen *et al.* [4] ระบุว่า รูปลักษณ์และสีของขนมปังเป็นปัจจัยแรกที่ผู้บริโภครับรู้และใช้ในการตัดสินใจซื้อ ซึ่งทำให้คุณลักษณะเหล่านี้กลายเป็นตัวชี้วัดสำคัญของคุณภาพผลิตภัณฑ์ หากขนมปังมีสีหรือรูปลักษณ์ไม่สม่ำเสมอ อาจถูกตีความว่าไม่สดใหม่หรือไม่ได้มาตรฐาน ส่งผลให้ผู้บริโภคปฏิเสธการซื้อและก่อให้เกิดความสูญเสียทางเศรษฐกิจอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นเพื่อควบคุมคุณภาพด้านกายภาพของผลิตภัณฑ์ ผู้ประกอบการจำเป็นต้องพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการผลิตอย่างต่อเนื่อง เพื่อลดความเสี่ยงในการเกิดข้อบกพร่อง (Defects) โดยเฉพาะการวิเคราะห์สาเหตุของข้อบกพร่องควรดำเนินการอย่างเป็นระบบ ด้วยการใช้เทคนิคหรือเครื่องมือที่เชื่อถือได้ เพื่อระบุสาเหตุที่แท้จริงและดำเนินการแก้ไขอย่างตรงจุด ป้องกันสินค้าที่มีจุดบกพร่องถึงมือผู้บริโภค

เทคนิค DMAIC เป็นขั้นตอนการวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาอย่างเป็นระบบ ภายใต้แนวทางการปรับปรุงการทำงานให้มีประสิทธิภาพของซิกซ์ซิกม่า (Six Sigma) ซึ่งถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในหลายภาคส่วนรวมถึงอุตสาหกรรมอาหาร เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิต ลดจุดบกพร่อง และเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้สูงสุด โดย Widiwati *et al.* [5] พบว่าเทคนิค DMAIC ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตขนมไหว้พระจันทร์ โดยสามารถลดของเสียจากกระบวนการผลิตลงได้ร้อยละ 50.26 และลดเวลาที่สูญเปล่าระหว่างการผลิตจาก 194 นาที เหลือเพียง 87 นาที ส่งผลให้ประสิทธิภาพโดยรวมของกระบวนการเพิ่มขึ้นร้อยละ 4.79 ในขณะที่ Arifin *et al.* [6] ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพมันฝรั่งทอดของบริษัท SME แห่งหนึ่งในประเทศอินโดนีเซีย โดยมุ่งลดข้อบกพร่องด้านความกรอบและความสม่ำเสมอของขนาดผลิตภัณฑ์ ด้วยการประยุกต์ใช้เทคนิค DMAIC เพื่อวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาเชิงระบบ ผลการวิเคราะห์พบว่า ปัญหาด้านความกรอบมีสาเหตุหลักจากจำนวนแรงงานไม่เพียงพอ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.002

รวมถึงพนักงานขาดการอบรมคุณภาพวัตถุดิบและการทอดที่ได้มาตรฐาน ส่วนปัญหาด้านความสม่ำเสมอของขนาดผลิตภัณฑ์เกิดจากแรงงานจำกัดและการขาดเครื่องคัดขนาด

โดยทั่วไป เทคนิค DMAIC ประกอบด้วย 5 ขั้นตอน ได้แก่ การกำหนดขอบเขตของปัญหา (Define), การวัดผลกระบวนการ (Measure), การวิเคราะห์ (Analyze), การปรับปรุง (Improve) และการควบคุม (Control) ซึ่งถือเป็นแนวทางเชิงระบบที่ช่วยให้สามารถระบุสาเหตุของปัญหาได้อย่างเป็นรูปธรรม และสนับสนุนการออกแบบแนวทางแก้ไขที่มีประสิทธิภาพ รวมถึงสามารถประยุกต์ใช้ได้จริง โดยเฉพาะในกระบวนการผลิตอาหารที่ต้องอาศัยข้อมูลและการควบคุมคุณภาพอย่างแม่นยำ [5-7]

จากข้อมูลการผลิตของบริษัทกรณีศึกษาพบว่า แม้กระบวนการผลิตขนมปังแฮมเบอร์เกอร์จะได้รับการออกแบบมาอย่างเป็นระบบ แต่ยังคงพบข้อบกพร่องในผลิตภัณฑ์ที่สะสมเป็นอัตราของเสียในระดับที่ไม่สามารถมองข้ามได้ในเชิงต้นทุน โดยเฉพาะข้อบกพร่องที่เกี่ยวข้องกับลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ ซึ่งจำเป็นต้องได้รับการวิเคราะห์หาสาเหตุอย่างเป็นระบบ เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจปรับปรุงกระบวนการอย่างตรงจุด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้เทคนิค DMAIC ในการวิเคราะห์และปรับปรุงข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตขนมปังแฮมเบอร์เกอร์ โดยมุ่งลดอัตราของเสียในสายการผลิต ผ่านการศึกษาสาเหตุเชิงเทคนิคและออกแบบแนวทางควบคุมที่สามารถประยุกต์ใช้ได้จริงในระดับอุตสาหกรรม เพื่อสนับสนุนการควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ให้เป็นไปตามมาตรฐาน ลดต้นทุนความสูญเสีย และยกระดับความสามารถในการแข่งขันของธุรกิจในระยะยาว

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 ศึกษากระบวนการผลิตขนมปังแฮมเบอร์เกอร์

ศึกษาส่วนผสมและขั้นตอนที่ใช้ในการผลิตตั้งแต่กระบวนการเตรียม การผลิต การบรรจุ และการรอจัดส่งสินค้า

2.2 การประยุกต์ใช้กระบวนการ DMAIC เพื่อวิเคราะห์และปรับปรุงข้อบกพร่องของผลิตภัณฑ์

การประยุกต์ใช้กระบวนการ DMAIC ดำเนินภายใต้กรอบการวิเคราะห์ตามแนวทางการนำเสนอของ Monday [7] ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอน Define Measure Analyze Improve และ Control โดยมีรายละเอียดดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การกำหนดขอบเขตปัญหา (D: Define Phase) คือ การกำหนดขอบเขตปัญหาที่ก่อให้ขนมปังแฮมเบอร์เกอร์เป็นของเสีย โดยศึกษาจากปริมาณการผลิตตั้งแต่เดือนสิงหาคมถึงเดือนตุลาคม ด้วยวิธีการสังเกต จากนั้นนำข้อมูลมาจำลองในรูปแบบ SIPOC (Supplier Input Process Output Customer) เพื่อจำแนกองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับข้อบกพร่องและเข้าใจขอบเขตงานมากขึ้น

ขั้นตอนที่ 2 การวัดผลกระบวนการ (M: Measure Phase) เป็นการกำหนดตัวชี้วัดสำหรับวัดผลกระบวนการที่เกี่ยวข้อง โดยสังเกตการทำงานของพนักงานและทำการเก็บข้อมูลปริมาณสินค้าที่ผลิตได้ จากนั้นนำมาคำนวณหาค่าร้อยละผลผลิตที่ได้ (Yield) เพื่อวิเคราะห์ประเมินการเกิดลักษณะจุดบกพร่องของ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.002

ขนมปังแฮมเบอร์เกอร์ที่ผลิตได้ของแต่ละขั้นตอนการผลิต และนำไปหาแนวทางในการปรับปรุงต่อไป

ขั้นตอนที่ 3 การวิเคราะห์ (A: Analyze Phase) คือ การพิสูจน์ตัวแปรสำคัญที่เป็นสาเหตุของปัญหามากที่สุด โดยงานวิจัยนี้ใช้แผนผังสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) หรือที่รู้จักกันทั่วไปว่า “แผนผังก้างปลา (Fishbone Diagram)” ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ได้รับความนิยมในภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากช่วยให้สามารถวิเคราะห์ปัญหาได้อย่างเป็นระบบและครอบคลุม โดยมีหลักการแบ่งสาเหตุออกเป็นหมวดหมู่หลัก เช่น บุคลากร (Man) วิธีการทำงาน (Method) เครื่องจักรหรืออุปกรณ์ (Machine) วัตถุดิบหรือวัสดุที่ใช้ (Material) และสิ่งแวดล้อมในการผลิต (Environment) เพื่อนำไปสู่การระบุสาเหตุที่มีผลกระทบมากที่สุดต่อปัญหา และเป็นแนวทางสำหรับการปรับปรุงที่มีประสิทธิภาพในขั้นตอนต่อไป

ขั้นตอนที่ 4 การปรับปรุง (I: Improve Phase) เป็นขั้นตอนของการปรับปรุงกระบวนการผลิตโดยอ้างอิงจากผลการวิเคราะห์ในขั้นตอนที่ 3 ซึ่งระบุปัจจัยที่มีผลต่อข้อบกพร่องของขนมปังแฮมเบอร์เกอร์ที่ไม่เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ จากนั้นดำเนินการเก็บข้อมูลเชิงปริมาณเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของอัตราของเสียจากข้อบกพร่องก่อนและหลังการปรับปรุง โดยใช้การวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อประเมินประสิทธิผลของแนวทางที่นำมาใช้

ขั้นตอนที่ 5 การควบคุม (C: Control Phase) เป็นขั้นตอนการวางแผนและออกแบบ โดยนำข้อปฏิบัติในขั้นตอนการปรับปรุงกระบวนการมาจัดทำเป็นคู่มือ ให้พนักงานศึกษาและปฏิบัติตาม เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปัญหาซ้ำเดิมอีกในอนาคต

2.3 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ข้อมูลที่ได้ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล (ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี t-test และวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยวิธี Pearson Correlation ด้วยโปรแกรม SPSS version 25.0

3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

3.1 ข้อมูลทั่วไปของกระบวนการผลิต

บริษัท เพรซิเดนท์ เบเกอรี่ จำกัด (มหาชน) เป็นหนึ่งในกลุ่มธุรกิจอาหารของบริษัท สหพัฒนพิบูล จำกัด โดยดำเนินการผลิตและจำหน่ายขนมปังและเบเกอรี่ภายใต้แบรนด์ “ฟาร์มเฮ้าส์” ด้วยกำลังการผลิตประมาณ 36,000 ชิ้นต่อชั่วโมง โดยใช้ระบบเครื่องจักรเป็นหลัก จากการศึกษากระบวนการผลิตขนมปังแฮมเบอร์เกอร์พบว่า แม้ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่จะได้มาตรฐานที่กำหนดสำหรับการจำหน่ายแก่คู่ค้า แต่ยังมีบางส่วนที่ไม่ผ่านเกณฑ์ เช่น ลักษณะเบี้ยวหน้ายุบ ขนาดไม่สม่ำเสมอ กันไหม้ สีไม่เหมาะสม หรือมีลักษณะหน้าด่าง รวมถึงกรณีสองชิ้นติดกันเป็นชิ้นเดียว ซึ่งผลิตภัณฑ์เหล่านี้จะถูกคัดแยกออกและนำไปจำหน่ายเป็นขนมปังเลี้ยงปลาต่อไป

3.2 ผลการประยุกต์ใช้กระบวนการ DMAIC เพื่อวิเคราะห์และปรับปรุงข้อบกพร่องของผลิตภัณฑ์

3.2.1 ขอบเขตของปัญหา

จากรูปที่ 1 เป็นกระบวนการผลิตขนมปังแฮมเบอร์เกอร์ เพื่อแสดงลำดับขั้นตอนของการผลิตโดยรวม ทั้งนี้เพื่อให้สามารถระบุขอบเขตของปัญหาได้อย่างชัดเจนและเป็นระบบ ผู้วิจัยได้จำลอง

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.002

กระบวนการในรูปแบบ SIPOC ดังตารางที่ 1 ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

รูปที่ 1 กระบวนการผลิตขนมปังแฮมเบอร์เกอร์

กระบวนการผลิตเริ่มจากวัตถุดิบถูกส่งเข้าสู่โรงงาน ผ่านการตรวจรับคุณภาพแล้วนำวัตถุดิบมาผสมกันในขั้นตอนสปองจ์ (Sponge) โดยแป้งสาลีผสมกับน้ำเพื่อพัฒนาโครงสร้างกลูเตน (Gluten) ซึ่งช่วยให้แป้งมีความเหนียวและยืดหยุ่น จากนั้นเติมยีสต์เพื่อเริ่มกระบวนการหมัก ซึ่งยีสต์จะย่อยสลายน้ำตาลให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่แทรกตัวในโครงสร้างแป้ง ทำให้ปริมาตรแป้งเพิ่มขึ้นและ

ตารางที่ 1 SIPOC ของการผลิตขนมปังแฮมเบอร์เกอร์

Supplier	Input	Process	Output	Customer
ผู้ส่งวัตถุดิบ	ยีสต์ น้ำตาล แป้ง ไขมัน น้ำ น้ำเชื่อม เกลือ	เตรียมสปองจ์ บ่มสปองจ์ ปั่นผสมแป้งโด ตัดตกแต่งแป้งโด รีดอากาศ บ่มแป้งโด ตกแต่งหน้า อบ สไลด์เป็นแผ่น บรรจุและปิดผนึก	ขนมปังแฮมเบอร์-เกอร์อบสุก มีสีและรูปลักษณ์ตามเกณฑ์คุณภาพ บรรจุในถุงสุญญา-กาศ	ลูกค้าหรือคู่ค้าได้รับผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพตรงตามข้อกำหนด

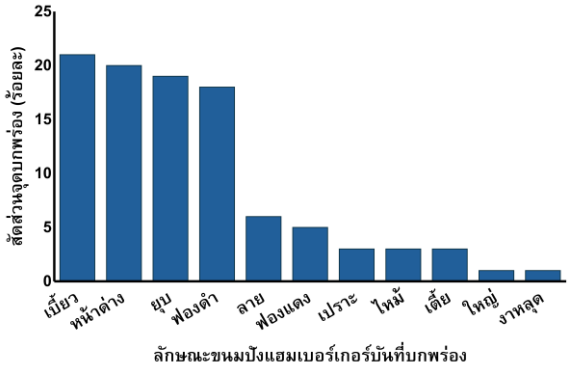
เกิดรูอากาศ (Air Cells) กระจายอยู่ภายใน ส่งผลให้แป้งมีลักษณะเบาและนุ่มคล้ายฟองน้ำ จึงเรียกว่า “สปองจ์”เมื่อสปองจ์หมักเสร็จสมบูรณ์ จะถูกนำไปผสมกับแป้งสาลี น้ำ เกลือ และไขมัน เพื่อเตรียมเป็นแป้งโด (Dough) จากนั้นนำแป้งโดตัดแบ่งเป็นชิ้นและรีดเป็นแผ่น เพื่อนำไปบ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิและเวลาที่ต้องการ เพื่อให้เนื้อแป้งนุ่ม ยืดหยุ่น และไม่ขาดง่าย ขั้นตอนต่อไปแป้งโดจะถูกตกแต่งหน้าด้วยงาขาว ก่อนเข้าสู่กระบวนการอบ (Baking) ซึ่งจะทำให้ขนมปังสุกขึ้นฟูตามโครงสร้างที่กำหนด หลังจากอบเสร็จจะมีการนำขนมปังออกจากพิมพ์ด้วยเครื่องดูด จากนั้นจึงสไลด์ขนมปังออกเป็นสองส่วน บรรจุและปิดผนึกแบบสุญญากาศด้วยเครื่องอัตโนมัติ (Packing) และลำเลียงเข้าสู่กระบวนการเก็บรักษาในคลังสินค้า (Storing) เพื่อรอการจัดส่งสู่ลูกค้าต่อไป

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.002

3.2.2 การวัดผลกระบวนการเพื่อได้ปัญหาที่ควรปรับปรุง

จากการศึกษากระบวนการผลิตขนมปังแฮมเบอร์เกอร์และการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องของผลิตภัณฑ์โดยใช้กราฟแท่ง (Bar Chart) เพื่อแสดงสัดส่วนของข้อบกพร่องแต่ละประเภท และใช้เป็นแนวทางเบื้องต้นในการกำหนดประเด็นที่ควรปรับปรุงในกระบวนการผลิต พบว่าอัตราของเสียจากกระบวนการผลิตคิดเป็นร้อยละ 2.81 ของปริมาณผลิตทั้งหมด โดยข้อบกพร่องที่พบมากที่สุดคือผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเบี้ยว ซึ่งคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 21.34 ของของเสียทั้งหมด (รูปที่ 2)

อย่างไรก็ตาม ขนมปังแฮมเบอร์เกอร์ที่มีลักษณะเบี้ยวนั้นไม่ได้เกิดจากกระบวนการผลิตที่ผิดพลาด แต่เกิดจากแม่พิมพ์ที่เสื่อมสภาพ ซึ่งสามารถแก้ไขปัญหาได้โดยการเปลี่ยนแม่พิมพ์ทันที จึงไม่ถือเป็นปัญหาที่ต้องดำเนินการปรับปรุงกระบวนการผลิตในระยะยาว ผู้วิจัยจึงมุ่งเน้นการปรับปรุงข้อบกพร่องที่เกี่ยวข้องกับลักษณะหน้าด่าง ซึ่งเป็นของเสียที่พบรองลงมา (คิดเป็นร้อยละ 20.17) และมีสาเหตุจากความไม่สม่ำเสมอของกระบวนการผลิตที่สามารถวิเคราะห์และควบคุมได้ แม้ว่าข้อบกพร่องบางประเภท เช่น ยุบตัว หรือ ฟองดำ มีสัดส่วนของเสียใกล้เคียงกับหน้าด่าง แต่ผู้วิจัยเลือกปรับปรุงหน้าด่างก่อนเนื่องจากเป็นข้อบกพร่องที่สามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนจากลักษณะภายนอกของผลิตภัณฑ์ รวมถึงสามารถวิเคราะห์และดำเนินการแก้ไขได้อย่างเป็นระบบภายใต้ทรัพยากรที่มีอยู่ในกระบวนการผลิตปัจจุบัน เพื่อให้การปรับปรุงในระยะแรกนี้เกิดผลลัพธ์ที่ชัดเจนและวางรากฐานสำหรับการพัฒนาประเด็นอื่นในลำดับถัดไป



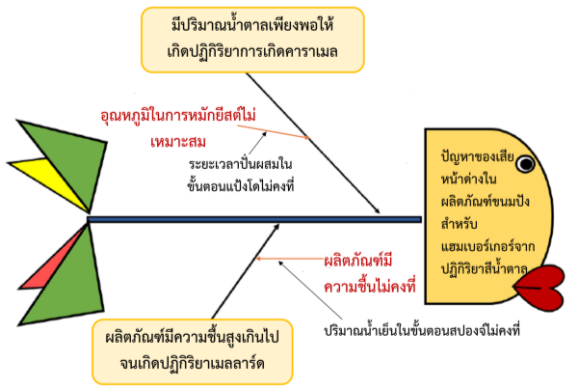
รูปที่ 2 ลักษณะจุดบกพร่องของขนมปังแฮมเบอร์เกอร์

3.2.3 การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อปัญหา

ผู้วิจัยใช้แผนผังแสดงเหตุและผล (Fishbone Diagram) เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์สาเหตุเบื้องต้นของปัญหาขนมปังแฮมเบอร์เกอร์ที่มีลักษณะหน้าด่าง อ้างอิงจากการสังเกตการณ์ในกระบวนการผลิตจริง ร่วมกับการระดมความคิดเห็นจากผู้จัดการหัวหน้างาน ร่วมกับพนักงานฝ่ายผลิตและควบคุมคุณภาพ เพื่อระบุปัจจัยที่อาจเกี่ยวข้องกับปัญหาดังกล่าว ผลการวิเคราะห์ชี้ให้เห็นว่า 2 ปัจจัยหลักที่สามารถควบคุมได้ในระดับกระบวนการและมีแนวโน้มส่งผลโดยตรงต่อการเกิดลักษณะหน้าด่าง ได้แก่ ปริมาตรน้ำเย็นที่เติมในขั้นตอนสปองจ์ และระยะเวลาในการปั่นผสมแป้งโด (รูปที่ 3) มีรายละเอียดดังนี้

1. ปริมาตรน้ำเย็นที่เติมในขั้นตอนสปองจ์ที่อาจทำให้เกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด โดยปริมาณน้ำเย็นที่ใช้ในกระบวนการสปองจ์มีผลโดยตรงต่อระดับความชื้น

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.002



รูปที่ 3 แผนผังแสดงเหตุและผลของปัญหาของเสียที่มีลักษณะหน้าด่างในผลิตภัณฑ์ขนมปังแฮมเบอร์เกอร์

ของแป้ง ซึ่งความชื้นที่มากหรือน้อยเกินไปจะส่งผลต่อสภาพแวดล้อมภายในแป้งโด และกระบวนการถ่ายเทความชื้นระหว่างการอบ โดยทั่วไปกระบวนการอบขนมปังจะเกิดการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer) และการถ่ายเทมวล (Mass Transfer) พร้อมกัน กล่าวคือความร้อนจากแหล่งความร้อนจะถ่ายเทเข้าสู่เนื้อขนมปัง ขณะที่ความชื้นภายในผลิตภัณฑ์จะเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำ และระเหยออกจากผิวชิ้นงานอย่างรวดเร็ว [8]

ในช่วงท้ายของกระบวนการอบ (ความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์เหลือประมาณร้อยละ 4 - 5) จะเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard Reaction) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาเคมีแบบไม่มีเอนไซม์มาเกี่ยวข้อง เกิดเมื่อส่วนผสมที่มีน้ำตาลรีดิวซ์ เช่น กลูโคส (Glucose) จากน้ำตาลทรายทำปฏิกิริยากับโปรตีนในแป้งสาลีภายใต้สภาวะที่มีความร้อน โดยหมู่คาร์บอนิล (Carbonyl Group) ในน้ำตาลจะทำปฏิกิริยากับหมู่อะมิโนอิสระ (Free Amino Group) ของโปรตีน ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพ และเกิดสารเมลานอยด์ดิน (Melanoidin) ซึ่งเป็นสารสีน้ำตาลที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง [9] ที่เป็นลักษณะสำคัญของการเกิดสีของขนมปัง โดยหากมีความชื้นที่ไม่สม่ำเสมอในเนื้อขนมปังจะทำให้การเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดกระจายตัวไม่เท่ากัน ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีสีผิวไม่สม่ำเสมอ หรือเกิดลักษณะหน้าด่าง

2. ระยะเวลาในการปั่นผสมแป้งโดเป็นปัจจัยที่ถูกเลือกนำมาศึกษา เนื่องจากอาจก่อให้เกิดปฏิกิริยาคาราเมล (Caramelization) ซึ่งเกิดเมื่อน้ำตาลสัมผัสความร้อนสูงเป็นเวลานานจนสลายตัว กลายเป็นพอลิเมอร์ของสารประกอบคาร์บอนที่มีสีเข้ม เรียกว่าคาราเมล (Caramel) [10] หากกระบวนการนี้ไม่สมบูรณ์ อาจส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงสีที่ผิวขนมปังไม่สม่ำเสมอ

3.2.4 แนวทางการปรับปรุงปัญหาที่เกิดขึ้น

จากการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อปัญหาของเสียหน้าด่างในผลิตภัณฑ์ขนมปังสำหรับแฮมเบอร์เกอร์ พบว่า มีสาเหตุมาจาก 2 ปัจจัย ได้แก่ ปริมาตรน้ำเย็น และระยะเวลาการปั่นผสมแป้งโด ซึ่งทุกสาเหตุถูกนำมาพิสูจน์สมมติฐานโดย ดังนี้

สาเหตุที่ 1: การทดสอบปัจจัยปริมาตรน้ำเย็นในขั้นตอนสปองจ์: การทดลองครั้งนี้ออกแบบโดยใช้แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design: CRD) เพื่อศึกษาผลของปริมาตรน้ำเย็นในขั้นตอนสปองจ์ต่อการเกิดลักษณะหน้าด่างในขนมปังแฮมเบอร์เกอร์ โดยกำหนดปริมาตรน้ำเย็นที่ใช้ในการทดลอง 7 ระดับ ได้แก่ ปริมาตรน้ำเย็นตามสูตรมาตรฐาน (ตัวอย่างควบคุม) และปริมาตรน้ำเย็นที่ปรับเพิ่มขึ้นร้อยละ 5 10 และ 15

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.002

รวมถึงปริมาตรน้ำเย็นที่ปรับลดลงร้อยละ 5 10 และ 15 โดยตัวอย่างแต่ละระดับถูกนำไปผลิตขนมปังภายใต้สภาวะการผลิตเดียวกัน แล้วถูกประเมินลักษณะของผิวหน้าขนมปังหลังการอบด้วยสายตาจากผู้เชี่ยวชาญฝ่ายควบคุมคุณภาพจำนวน 3 ท่าน ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 2 และถูกนำมาวิเคราะห์ผลทางสถิติภายใต้สมมติฐานดังนี้

สมมติฐานของปริมาตรน้ำเย็น

H_0: ปริมาตรน้ำเย็นไม่ส่งผลต่อการเกิดลักษณะหน้าด่างในขนมปังแฮมเบอร์เกอร์ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

H_1: ปริมาตรน้ำเย็นส่งผลต่อการเกิดลักษณะหน้าด่างในขนมปังแฮมเบอร์เกอร์ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

จากตารางที่ 2 พบว่า การลดปริมาตรน้ำเย็นในขั้นตอนสปองจ์ส่งผลต่ออัตราการเกิดลักษณะหน้าด่างของขนมปังแฮมเบอร์เกอร์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในกรณีที่ลดลงร้อยละ 15 ให้ผลดีที่สุด (อัตราของเสียเท่ากับร้อยละ 0.01) อย่างไรก็ตาม สภาวะนี้พบข้อบกพร่องใหม่ คือ ก้นขนมปังไม่เต็ม เนื่องจากแป้งมีความชื้นไม่เพียงพอต่อการพัฒนาโครงสร้าง ดังนั้นเมื่อพิจารณาร่วมกับปัจจัยด้านคุณภาพโดยรวม จึงสรุปว่าการลดปริมาตรน้ำเย็นลงร้อยละ 10 เป็นระดับที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากสามารถลดลักษณะหน้าด่างลงได้มาก (เหลือร้อยละ 0.55) โดยไม่กระทบต่อโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ และเมื่อวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า ค่า P-Value เท่ากับ 0.014 ($p \leq 0.05$) จึงปฏิเสธ H_0 สรุปได้ว่าปริมาตรน้ำเย็นส่งผลต่อการเกิดลักษณะหน้าด่างในขนมปังแฮมเบอร์เกอร์

ตารางที่ 2 สัดส่วนของเสียขนมปังแฮมเบอร์เกอร์ที่มีลักษณะหน้าด่างจากการศึกษาปัจจัยปริมาตรน้ำเย็น

สภาวะการทดลอง	ลักษณะหน้าด่างที่เกิดขึ้น (%)
ปริมาตรน้ำเย็นตามสูตรมาตรฐาน (ตัวอย่างควบคุม)	21.01
ปริมาตรน้ำเพิ่มขึ้นร้อยละ 5	25.57
ปริมาตรน้ำเพิ่มขึ้นร้อยละ 10	32.82
ปริมาตรน้ำเพิ่มขึ้นร้อยละ 15	34.11
ปริมาตรน้ำลดลงร้อยละ 5	14.15
ปริมาตรน้ำลดลงร้อยละ 10	0.55
ปริมาตรน้ำลดลงร้อยละ 15	0.01

โดยทั่วไปการเกิดลักษณะสีน้ำตาลในผลิตภัณฑ์ขนมปังถือเป็นการเพิ่มลักษณะปรากฏที่ดีให้ผลิตภัณฑ์ที่มีผลเชิงบวกต่อการยอมรับของผู้บริโภค โดยลักษณะสีน้ำตาลที่เกิดขึ้นมีสาเหตุมาจากคาร์โบไฮเดรต โปรตีน และน้ำที่ใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตขนมปัง ซึ่งถูกเร่งปฏิกิริยาภายใต้สภาวะที่มีความชื้นระดับต่ำถึงปานกลาง (ร้อยละ 0-20) ปริมาณน้ำอิสระ (a_w) น้อยกว่า 0.6 รวมถึงการมีอุณภูมิสูงที่ผิวตัวอย่างอาหาร จากการให้ความร้อนตั้งแต่ 120 องศาเซลเซียส [8-11] โดย Soleimani Pour-Damanabet *et al*. [12] อธิบายว่า เมื่อขนมปังได้รับความร้อน ความชื้นของตัวอย่างจะเคลื่อนที่จากใจกลางตัวอย่างสู่ผิว และเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอที่ผิวของตัวอย่าง ซึ่งก่อให้เกิดก่อสร้างเปลือกแข็ง (Crust) ปกคลุมขนมปังและเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่ผิวตามลำดับ ดังนั้นปริมาณความชื้นในตัวอย่างอาหาร

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.002

จึงมีผลต่อการเกิดเปลือกแข็งและเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลอย่างชัดเจนภายใต้ปฏิกิริยาเมลล์ลาร์ด นอกจากนี้ Wong *et al.* [9] พบว่าปฏิกิริยาสีน้ำตาลประเภทเมลล์ลาร์ด จะเกิดขึ้นได้เมื่อผิวของผลิตภัณฑ์มีความชื้นต่ำมากร่วมกับได้รับความร้อนเพียงพอ ดังนั้นการทดลองโดยการใส่น้ำเย็นในขั้นตอนสปองจ์ในงานวิจัยนี้ ถือเป็นแนวทางที่สามารถควบคุมความชื้นเริ่มต้นของแป้งให้เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดได้ อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณน้ำที่สูงเกินไป (ความชื้นเกินร้อยละ 60) อาจส่งผลให้ขนมปังแฮมเบอร์เกอร์เกิดสีเข้มมากเกินไป ผลการวิจัยสอดคล้องกับ Soleimani Pour-Damanabet *et al*. [12] ที่อธิบายว่าความชื้นเริ่มต้นในแป้งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับลักษณะของเปลือกขนมปังที่เกิดขึ้นหลังการอบ กล่าวคือ ยิ่งความชื้นของแป้งสูง เปลือกที่เกิดขึ้นจะมีความหนามากขึ้น และสีของผิวผลิตภัณฑ์จะเข้มขึ้นตามลำดับ

สาเหตุที่ 2 การทดสอบปัจจัยระยะเวลาในการปั่นผสมในขั้นตอนแป้งโด: การทดลองครั้งนี้ออกแบบโดยใช้แผนการทดลองแบบ CRD เพื่อศึกษาผลของระยะเวลาในการปั่นผสมในขั้นตอนแป้งโดต่อการเกิดลักษณะหน้าด่างในขนมปังแฮมเบอร์เกอร์ โดยกำหนดระยะเวลาที่ใช้ในการทดลอง 7 ระดับ ได้แก่ ระยะเวลาในการปั่นผสมจากสูตรมาตรฐาน (ตัวอย่างควบคุม) ระยะเวลาในการปั่นผสมที่เพิ่มขึ้น (ร้อยละ 8 16 และ 24) และระยะเวลาในการปั่นผสมที่ลดลง (ร้อยละ 8 16 และ 24) โดยตัวอย่างจากแต่ละระดับถูกนำไปผลิตขนมปังภายใต้สภาวะการผลิตเดียวกัน แล้วประเมินลักษณะสีผิวขนมปังหลังการอบด้วยสายตาจากผู้เชี่ยวชาญฝ่ายควบคุมคุณภาพจำนวน 3 ท่าน ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 3 และถูกนำมาวิเคราะห์ผลทางสถิติภายใต้สมมติฐานดังนี้

สมมติฐานของระยะเวลาในการปั่นผสมโด

H_0: ระยะเวลาปั่นผสมโดไม่ส่งผลต่อการเกิดลักษณะหน้าด่างในขนมปังแฮมเบอร์เกอร์ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

H_1: ระยะเวลาปั่นผสมส่งผลต่อการเกิดลักษณะหน้าด่างในขนมปังแฮมเบอร์เกอร์ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ตารางที่ 3 สัดส่วนของเสียขนมปังแฮมเบอร์เกอร์ที่มีลักษณะหน้าด่างจากการศึกษาปัจจัยระยะเวลาในการปั่นผสม

สภาวะการทดลอง	ลักษณะหน้าด่างที่เกิดขึ้น (%)
ระยะเวลาในการปั่นผสมจากสูตรมาตรฐาน (ตัวอย่างควบคุม)	21.01
ระยะเวลาเพิ่มขึ้นร้อยละ 8	7.49
ระยะเวลาเพิ่มขึ้นร้อยละ 16	0.17
ระยะเวลาเพิ่มขึ้นร้อยละ 24	0.02
ระยะเวลาลดลงร้อยละ 8	35.19
ระยะเวลาลดลงร้อยละ 16	68.37
ระยะเวลาลดลงร้อยละ 24	72.33

จากตารางที่ 3 พบว่าการเพิ่มระยะเวลาในการปั่นผสมโดส่งผลต่อการลดลงของลักษณะหน้าด่างในขนมปังแฮมเบอร์เกอร์อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะการเพิ่มระยะเวลาการปั่นขึ้นร้อยละ 24 มีอัตราของเสียต่ำที่สุด (ร้อยละ 0.02) อย่างไรก็ตามการใช้ระยะเวลาปั่นผสมโดที่นานเกินไปส่งผลให้ผลผลิต

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.002

ต่อวันลดลง ถือเป็นต้นทุนในเชิงปฏิบัติ ดังนั้น เมื่อพิจารณาทั้งด้านคุณภาพและประสิทธิภาพการผลิต พบว่า การเพิ่มระยะเวลาในการปั่นผสมร้อยละ 16 เป็นทางเลือกที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากสามารถลดของเสียจากหน้าด่างลงเหลือร้อยละ 0.17 โดยไม่กระทบต้นทุนการผลิตมากนัก และเมื่อวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าค่า P-Value เท่ากับ 0.037 ($p \leq 0.05$) จึงปฏิเสธ H_0 ดังนั้นการเพิ่มระยะเวลาในการปั่นผสมแป้งโดส่งผลให้เกิดลักษณะหน้าด่างในขนมปังแฮมเบอร์เกอร์ลดลง

การใช้เวลาในการปั่นผสมโดที่นานขึ้น ช่วยให้ส่วนผสมเข้ากันได้ดี โดยเฉพาะน้ำตาลที่เป็นตัวแปรสำคัญต่อการพัฒนาสีน้ำตาลในขนมปังอบ นอกจากนี้การสร้างแป้งโดที่สมบูรณ์ต้องอาศัยกระบวนการหมักที่มีประสิทธิภาพ โดยยีสต์จะย่อยสลายน้ำตาลเพื่อผลิตแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งมีบทบาทต่อการขึ้นฟูของขนมปัง จากงานวิจัย Verheyen *et al.* [13] พบว่าปริมาณแก๊สคาร์บอนได-ออกไซด์ที่ผลิตได้แปรผันตรงกับระยะเวลาในการหมักหรือบ่มแป้ง อย่างไรก็ตามอัตราการผลิตแก๊สจะลดลงเมื่อระยะเวลาผ่านไป 120 นาที [14] เนื่องจากยีสต์เกิดภาวะเครียดออสโมติก (Osmotic Stress) หรือภาวะช็อกจากออสโมซิส ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีน้ำตาลสะสมมากเกินไปภายในเซลล์ ดังนั้นหากระยะเวลาในการปั่นผสมไม่เหมาะสม อาจส่งผลให้กระบวนการหมักยีสต์ไม่สมบูรณ์ ขนมปังขึ้นฟูไม่สม่ำเสมอ และเกิดการตกค้างของน้ำตาลที่ผิวแป้ง เมื่อเข้าสู่กระบวนการอบ น้ำตาลที่ตกค้างจะเกิดการสลายตัวจากความร้อนผ่านปฏิกิริยาคาราเมล ส่งผลให้สีผิวของขนมปังไม่สม่ำเสมอและเกิดลักษณะหน้าด่าง

จากการศึกษากระบวนการผลิตข้างต้นพบว่าปริมาตรน้ำเย็นในขั้นตอนสปองจ์และระยะเวลาในการปั่นผสมแป้งโดเป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่มีเอนไซม์มาเกี่ยวข้องเป็นกลไกหลัก ซึ่งมีบทบาทหลักในการสร้างสีที่พึงประสงค์ แต่พบว่าผลลัพธ์ที่ได้มีความไม่สม่ำเสมอโดยปรากฏบริเวณสีเข้มและสีอ่อนกระจายไม่เท่ากัน ส่งผลให้ผิวผลิตภัณฑ์มีลักษณะหน้าด่าง ซึ่งไม่เป็นไปตามเกณฑ์คุณภาพที่กำหนด เพื่อเป็นการกำหนดแนวทางการปรับปรุงที่มีประสิทธิภาพ ผู้วิจัยจึงวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรน้ำเย็นและระยะเวลาในการปั่นผสมแป้งโด ที่มีผลต่อการเกิดลักษณะหน้าด่างในขนมปังแฮมเบอร์เกอร์ โดยวิธี Pearson Correlation ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

<u>สมมติฐานความสัมพันธ์ของทั้ง 2 ปัจจัย</u>

H_0: ปริมาตรน้ำเย็นในขั้นตอนสปองจ์กับระยะเวลาในการปั่นผสมโดไม่มีสัมพันธ์กัน ระดับนัยสำคัญ 0.05

H_1: ปริมาตรน้ำเย็นในขั้นตอนสปองจ์กับระยะเวลาในการปั่นผสมโดมีสัมพันธ์กัน ระดับนัยสำคัญ 0.05

จากรูปที่ 4 พบว่า ทั้ง 2 ปัจจัยมีความสัมพันธ์เชิงบวก โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (R^2) เท่ากับ 0.8137 ซึ่งหมายความว่า ร้อยละ 81.37 ของความแปรปรวนในปริมาตรน้ำเย็นสามารถอธิบายได้ด้วยระยะเวลาในการปั่นผสม และเมื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน (Pearson's Correlation Coefficient: r) พบว่าเท่ากับ 0.9021 แสดงถึง 2 ปัจจัยมีความสัมพันธ์เชิงบวกอย่างมาก และผลการทดสอบสมมติฐานมีนัยสำคัญทางสถิติที่

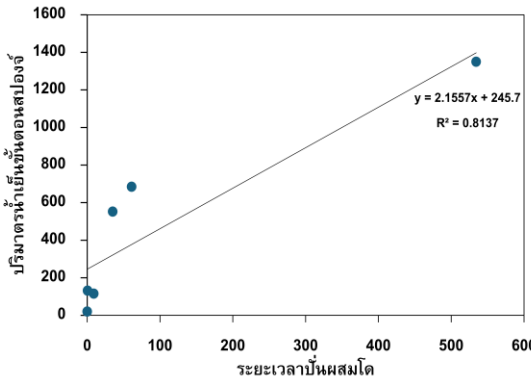
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.002

ระดับ $p \leq 0.05$ จึงปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ได้อย่างมีนัยสำคัญ

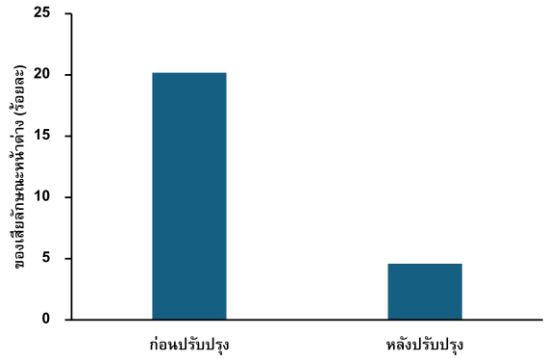
ดังนั้น การปรับปรุงกระบวนการผลิตจำเป็นต้องพิจารณาทั้ง 2 ปัจจัยควบคู่กัน กล่าวคือ ในกรณีที่เพิ่มปริมาตรน้ำเย็น ควรปรับระยะเวลาในการปั่นให้เหมาะสม เพื่อป้องกันไม่ให้แป้งมีความชื้นสูงเกินไปจนแฉะ ขณะเดียวกันหากลดปริมาตรน้ำจำเป็นต้องเพิ่มระยะเวลาในการปั่นผสม เพื่อให้ส่วนผสมเป็นเนื้อเดียวกันมากที่สุด มีผลทำให้เกิดโครงสร้างแป้งที่เหมาะสมต่อการพัฒนาเนื้อสัมผัสและสีผิวที่สม่ำเสมอของผลิตภัณฑ์

3.2.5 ผลการปรับปรับปรุง

การปรับปรุงกระบวนการผลิตในครั้งนี้ดำเนินการภายใต้เงื่อนไขที่สามารถควบคุมได้และมีความสัมพันธ์กัน โดยเน้นการปรับระดับปริมาตรน้ำเย็นในขั้นตอนสปองจ์ร่วมกับการปรับเวลาในการปั่นผสมแป้งโด เพื่อควบคุมความชื้นเริ่มต้นของแป้งและลดโอกาสการสะสมของความชื้นบริเวณผิว ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ก่อให้เกิดลักษณะหน้าด่างของผลิตภัณฑ์ จากรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่าการใช้ปริมาตรน้ำเย็นลดลงร้อยละ 10 ร่วมกับการเพิ่มระยะเวลาในการปั่นผสมโดร้อยละ 16 ส่งผลให้ขนมปังแฮมเบอร์เกอร์ที่มีลักษณะหน้าด่างลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยก่อนการปรับปรุงพบของเสียจากลักษณะหน้าด่างคิดเป็นร้อยละ 20.17 และหลังการปรับปรุงลดลงเหลือเพียงร้อยละ 4.58 (อัตราของเสียของขนมปังแฮมเบอร์เกอร์ที่มีลักษณะหน้าด่างลดลงร้อยละ 77.29)



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ของปริมาณของเสียระหว่างปัจจัยปริมาตรน้ำเย็นในขั้นตอนสปองจ์และระยะเวลาในการปั่นผสมแป้งโด



รูปที่ 5 สัดส่วนของเสียที่เกิดจากลักษณะหน้าด่างก่อนและหลังการปรับปรุงกระบวนการผลิต

อย่างไรก็ตาม เพื่อให้การปรับปรุงที่ได้ในครั้งนี้มีความยั่งยืนและไม่กลับไปสู่สภาวะเดิม จึงทำการกำหนดแนวทางควบคุมกระบวนการอย่างเป็นระบบ ได้แก่ การกำหนดค่าควบคุมมาตรฐานสำหรับปริมาตรน้ำเย็นและเวลาการปั่นผสมแป้งโด รวมถึงจัดทำเป็นคู่มือและอบรมให้ผู้ปฏิบัติงานปฏิบัติตามมาตรฐานการผลิตที่ปรับปรุงใหม่ ตลอดจนการติดตามและ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.002

บันทึกผลการผลิตอย่างสม่ำเสมอผ่านการตรวจสอบเชิงสถิติ นอกจากนี้เพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลงที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต เช่น การเสื่อมสภาพของอุปกรณ์ สภาพแวดล้อมการผลิต หรือการเปลี่ยนแปลงของสูตรวัตถุดิบ จำเป็นต้องมีการทบทวนและปรับปรุงแผนการควบคุมอย่างต่อเนื่อง โดยอาศัยความร่วมมือจากทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้องในองค์กร เพื่อเสริมสร้างความเสถียรของกระบวนการผลิตและรักษาคุณภาพผลิตภัณฑ์ในระยะยาว

4. บทสรุป

งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้กระบวนการ DMAIC เพื่อปรับปรุงคุณภาพขนมปังแฮมเบอร์เกอร์ โดยมุ่งเน้นลดปัญหาหน้าด่างซึ่งเป็นข้อบกพร่องด้านลักษณะผิวที่พบบ่อยที่สุด ผลการวิเคราะห์ชี้ว่าปริมาตรน้ำเย็นในขั้นตอนสปองจ์และระยะเวลาในการปั่นผสมแป้งโดเป็นปัจจัยสำคัญที่สามารถควบคุมได้ในระดับกระบวนการ เมื่อดำเนินการปรับระดับทั้งสองปัจจัยอย่างเหมาะสม พบว่าอัตราของเสียจากหน้าด่างลดลงถึงร้อยละ 77.29 เมื่อเทียบกับสภาวะการผลิตเดิม นอกจากนี้ได้มีการเสนอแนวทางควบคุมกระบวนการผลิต เช่น การกำหนดค่ามาตรฐานของปริมาณน้ำและเวลาการผสม พร้อมจัดทำเป็นคู่มือและอบรมให้ผู้ปฏิบัติงานเข้าใจ รวมถึงการติดตามผลอย่างต่อเนื่องเพื่อรักษาเสถียรภาพของคุณภาพในระยะยาว

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า DMAIC เป็นเครื่องมือที่สามารถประยุกต์ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพในบริบทการผลิตอาหาร โดยเฉพาะในกรณีที่มีข้อจำกัดด้านทรัพยากร อย่างไรก็ตามงานวิจัยยังมีข้อจำกัดในด้านการควบคุมตัวแปรภายใต้บริบทของโรงงานเพียงแห่งเดียว ในอนาคตควรขยายขอบเขตการศึกษาไปยังปัจจัยที่ซับซ้อนยิ่งขึ้น เช่น สภาพอากาศในเตาอบ การออกแบบแม่พิมพ์ และระบบควบคุมอัตโนมัติ รวมถึงควรบูรณาการการวิเคราะห์เสียงของลูกค้า (Voice of Customer: VOC) และประเมินผลตอบแทนการลงทุน (Return on Investment: ROI) เพื่อยืนยันความคุ้มค่าและความยั่งยืนของการปรับปรุงในเชิงเศรษฐศาสตร์ต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณบริษัทเพรซิเดนท์ เบเกอรี่ จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ในการปฏิบัติงาน รวมถึงอุปกรณ์ เครื่องมือต่าง ๆ ในการเก็บข้อมูล ตลอดจนขอขอบคุณพนักงานของบริษัททุกท่านที่ให้ความร่วมมือและช่วยเหลือตลอดการดำเนินงานวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

[1] J. Pico, J. Bernal, and M. Gómez, Wheat bread aroma compounds in crumb and crust: A review, Food Research International, 2015, 75, 200-215.

[2] M. Onishi, M. Inoue, T. Araki, H. Iwabuchi, and Y. Sagara, Characteristic coloring curve for white bread during baking, Bioscience Biotechnology Biochemistry, 2011, 75(2), 255-260.

[3] L.Tebben, Y. Shen and Y. Li, Improvers and functional ingredients in whole wheat bread: A review of their effects on dough properties and bread quality, Trends in Food Science and Technology, 2018, 81(2), 10-24.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.002

[4] W. Chen, X. Wu, Z. Liu, Y. Lui, Q. Lui, M.R. Pointer, J. Liang and T.Q. Khanh, The impact of illuminance level, correlated colour temperature and viewing background on the purchase intention for bread and cakes, Food Quality and Preference, 2022, 98(3), 104537.

[5] I.T.B. Widiwati, S. D. Liman and F. Nurprihatin, The implementation of Lean Six Sigma approach to minimize waste at a food manufacturing industry, Journal of Engineering Research, 2025, 13(2), 611-626.

[6] M.H.F. Arifin, S.A. Mustaniroh, and S.Sucipto, Application of the six sigma DMAIC in quality control of potato chips to reduce production defects, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 924(1), 012056.

[7] L. M. Monday, Define, measure, analyze, improve, control (dmaic) methodology as a roadmap in quality improvement, Global Journal on Quality and Safety in Healthcare, 2022, 5(2), 44-46.

[8] E. Purlis, Browning development in bakery products – A review, Journal of Food Engineering, 2010, 99(3), 239-249.

[9] C. Wong, H. Wijayanti and B. Bhandari, Water stress in biological, chemical, pharmaceutical and food systems: Maillard reaction in limited moisture and low water activity environment, Springer Nature, NY, USA, 2015.

[10] J. Lukinac, D.K. Komlenić, M.L. Čolić, G. Nakov and M. Jukić, Modelling the browning of bakery products during baking: a review, Ukrainian Food Journal, , 2022, 11(2), 217-234.

[11] Y. Dong and S. Karboune, A review of bread qualities and current strategies for bread bioprotection: Flavor, sensory, rheological, and textural attributes, Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2021, 20(2), 1937-1981.

[12] A. Soleimani Pour-Damanab, A. Jafary and S. Rafiee, Kinetics of the crust thickness development of bread during baking, Journal of Food Science and Technology, 2014, 51(11), 3439-3445.

[13] C. Verheyen, A. Albrecht, D. Elgeti, M. Jekle and T. Becker, Impact of gas formation kinetics on dough development and bread quality, Food Research International, 2015, 76(3), 860-866.

[14] N. Struyf, J. Laurent, B. Lefevere, J. Verspreet, K. Verstrepen and C. Courtin, Establishing the relative importance of damaged starch and fructan as sources of fermentable sugars in wheat flour and whole meal bread dough fermentations, Food Chemistry, 2017, 218, 89-98.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.003

บทความวิจัย

สมบัติทางกายภาพและทางกลของมอร์ต้าร์ผสมขยะทะเลเพื่อพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์

วันโชค เครือหงษ์[1*] สามารถ นิพันธ์รัมย์[1] ปรัชญา ยอดดำรงค์[1] ศตวรรษ หฤหรรษพงษ์[1] และ ประชุม คำพุฒ[2]

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ เขตพื้นที่อุเทนถวาย, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

[2] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: wunchock_kr@rmutto.ac.th

วันที่รับบทความ: 19 สิงหาคม 2567; วันที่ทบทวนบทความ: 9 พฤษภาคม 2568; วันที่ตอบรับบทความ: 30 พฤษภาคม 2568
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 19 สิงหาคม 2568

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้นำเสนอสมบัติทางกายภาพและทางกลของมอร์ต้าร์ผสมขยะทะเลเพื่อพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ โดยทำการเก็บขยะริมทะเลและคัดเลือกเฉพาะขวดพลาสติกมาทำการบดด้วยเครื่องบด สำหรับอัตราส่วนผสมซีเมนต์มอร์ต้าร์ต่อหินฝุ่นในอัตราส่วน 1: 4 โดยน้ำหนัก ผสมขยะพลาสติกบดในอัตราร้อยละ 3 6 และ 9 โดยน้ำหนักทั้งหมด และใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.4 จากนั้นทดสอบหน่วยน้ำหนัก การดูดซึมน้ำ ความพรุน กำลังอัด การทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ จากการศึกษาพบว่า หน่วยน้ำหนักของซีเมนต์มอร์ต้าร์ผสมพลาสติกบดมีค่าลดลงด้วยการแทนที่เพิ่มขึ้นของขยะพลาสติกบด การใช้ขยะขยะพลาสติกบดผสมในซีเมนต์มอร์ต้าร์ส่งผลให้การดูดซึมน้ำและความพรุนเพิ่มด้วยการแทนที่เพิ่มขึ้นของปริมาณขยะพลาสติก การใช้ขยะพลาสติกบดร้อยละ 6 ของน้ำหนักทั้งหมดผสมในซีเมนต์มอร์ต้าร์และหินฝุ่นสามารถพัฒนาขึ้นรูปกระถางต้นไม้ การใช้ประโยชน์จากขยะพลาสติกจากทะเลพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ที่ยั่งยืน เป็นการสร้างเศรษฐกิจหมุนเวียนและช่วยลดปัญหาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ: ขยะทะเล; พลาสติก; โครงสร้างระดับจุลภาค; เศรษฐกิจหมุนเวียน

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.003

บทความวิจัย

Physical and Mechanical Properties of Mortar Containing Marine Waste for Product Development

Wunchock Kroehong[1*], Samart Nipunram[1], Pruchaya Yoddumrong[1], Sattawat Haruehansapong[1] and Prachoom Khamput[2]

[1] Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Uthenthawai Campus, Rajamangala University of Technology Tawan-ok

[2] Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

* Corresponding author, E-mail: wunchock_kr@rmutto.ac.th

Received: 19 August 2024; Revised 9 May 2025; Accepted: 30 May 2025
Online Published: 19 August 2025

Abstract: This paper presents the physical and mechanical properties of mortar mixed with marine waste for product development. Marine debris was collected from coastal areas, and only plastic bottles were selected and crushed using a grinding machine. The cement-to-stone dust ratio was fixed at 1:4 by weight, with crushed plastic waste added at 3%, 6%, and 9% by total weight. The water-to-cement ratio was maintained at 0.4. The unit weight, water absorption, porosity, compressive strength, and microstructural analysis using a Scanning Electron Microscope (SEM) were tested. The most suitable mixture ratio was then used to form a prototype product. The study found that the unit weight of cement mortar decreased as the replacement level of crushed plastic waste increased. The incorporation of crushed plastic waste also led to higher water absorption and porosity with increasing plastic content. Using 6% crushed plastic waste by total weight in the cement mortar and stone dust mixture proved suitable for producing plant pots. This utilization of marine plastic waste to develop sustainable products promotes a circular economy and helps mitigate environmental impacts.

Keywords: Marine waste; Plastic; Microstructure; Circular economy

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.003

1. บทนำ

ปริมาณขยะพลาสติกทั่วโลกเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในทศวรรษที่ผ่านมา จากการศึกษาพบว่า โลกผลิตขยะพลาสติกมากถึง 350 ล้านตันต่อปี สำหรับประเทศไทยมีขยะพลาสติกประมาณ 2 ล้านตันต่อปีหรือประมาณร้อยละ 12 ของปริมาณขยะทั้งหมด การนำขยะพลาสติกกลับไปใช้ประโยชน์เฉลี่ยประมาณปีละ 0.5 ล้านตัน ส่วนที่เหลือ 1.5 ล้านตัน การกำจัดโดยวิธีการฝังกลบใช้เวลาย่อยสลายเป็นร้อยปีซึ่งใช้พื้นที่ในการฝังกลบปริมาณมากอย่างไรก็ตามจะมีขยะพลาสติกไม่ได้ถูกจัดเก็บอย่างถูกต้อง เป็นขยะลอยในแม่น้ำลำคลอง บางส่วนไหลลงสู่ทะเลก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทางทะเล จากข้อมูลของกรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง พบว่าขยะทะเล 3 อันดับแรก ได้แก่ ขวดพลาสติก ถุงพลาสติก และขวดแก้วร้อยละ 22.00, 19.42 และ 10.96 ตามลำดับ ขยะทะเลโดยเฉพาะขยะพลาสติกมีผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ทางทะเลในหลายด้านดังต่อไปนี้ ผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ทางทะเล โดยขยะพลาสติกสามารถเข้าไปแทรกแซงและทำลายที่อยู่อาศัยของสิ่งมีชีวิตทางทะเล เช่น ปะการัง หญ้าทะเล และโขดหิน [1] ขยะพลาสติกที่แตกตัวเป็นไมโครพลาสติก สามารถถูกกินโดยแพลงก์ตอนและสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก ซึ่งจะเข้าสู่ห่วงโซ่อาหารและสะสมในตัวสัตว์ ทำให้มีการสะสมสารพิษในระบบนิเวศน์ทางทะเล ผลกระทบต่อสัตว์มีผลต่อกระบวนการสืบพันธุ์ของสัตว์ทะเล โดยทำให้สัตว์บางชนิดไม่สามารถวางไข่ได้และผลกระทบต่อคนด้านการท่องเที่ยวในพื้นที่ชายฝั่งที่มีขยะทะเลปริมาณมาก [2] และไมโครพลาสติกที่ปนเปื้อนในอาหารทะเลสามารถเข้าสู่ร่างกายมนุษย์และมีผลกระทบต่อสุขภาพ [3] การจัดการขยะพลาสติกในประเทศไทยด้วยนโยบาย 3Rs คือการลดการใช้พลาสติก การใช้พลาสติกซ้ำ และการรีไซเคิลพลาสติก [4] เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงมีนักวิจัยการใช้ประโยชน์ขยะพลาสติก

บรรณกร ขันตา และคณะ [5] ศึกษากำลังและความต้านทานการขัดสีของคอนกรีตที่ใช้เศษขยะพลาสติกโดยใช้ขยะพลาสติก PVC PP และ PET แทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 20 และ 30 โดยปริมาตร พบว่ามีกำลังอัด กำลังดัดและกำลังดึงแบบผ่าซีกต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมที่ใช้มวลรวมธรรมชาติ และเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยมวลรวมเศษพลาสติกมากขึ้นทำให้กำลังอัด กำลังดัดและกำลังดึงแบบผ่าซีกยิ่งลดต่ำลง Prachoom Khamput และ คณะ [6] การใช้ขยะพลาสติกเป็นส่วนผสมในคอนกรีตสำหรับทำกระถางต้นไม้พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมใช้ขยะพลาสติกร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนักเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับเศษขยะพลาสติกของโรงงาน ช่วยลดปริมาณขยะพลาสติกที่ต้องนำไปกำจัดทิ้ง และลดการก่อมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม และในปี 2024 งานวิจัยของ Prachoom Khamput และ คณะ [7] ศึกษาพัฒนาบล็อกประสานจากเศษขวดน้ำพลาสติกผสมหินฝุ่นโดยนำพลาสติกที่ย่อยแทนที่มวลรวมร้อยละ 2, 4, 6, 8 และ 10 โดยปริมาตรมวลรวม พบว่าการแทนที่ทรายด้วยพลาสติกที่ย่อยร้อยละ 2 โดยปริมาตรกำลังอัดมากกว่า 40 เมกะปาสคาล ผ่านเกณฑ์มาตรฐานคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น

การศึกษาการใช้ประโยชน์ขยะทะเลมีการศึกษาขยะทะเลเพื่อประยุกต์ใช้กับงานแอสฟัลต์คอนกรีตโดยนำขยะทะเลมาย่อยให้มีขนาดเล็กและนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 30 และค้างบนตะแกรงเบอร์ 50 แล้วนำพลาสติกและเศษแก้วซึ่งเป็นขยะทะเลผสมวัสดุมวล

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.003

รวมละเอียดในแอสฟัลต์คอนกรีตพบว่าคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตเป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐานการทดสอบของกรมทางหลวงและสามารถนำมาใช้เป็นทางเลือกในการลดปริมาณขยะทะเลในงานทางวิศวกรรมได้อีกทางหนึ่งด้วย [8] และในปี 2567 มีนักวิจัย Soares et al. [9] ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้บล็อกคอนกรีตที่ผลิตจากขยะพลาสติกทางทะเลสำหรับใช้งานในการก่อสร้าง โดยใช้พลาสติกร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนักพบว่าบล็อกที่มีส่วนผสมของพลาสติกร้อยละ 5 มีความแข็งแรงในการรับแรงอัดที่ดีและมีน้ำหนักเบามีความเหมาะสมสำหรับการก่อสร้างบ้านชั้นเดียว

จากงานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่เป็นการศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางกลของผสมมอร์ต้าร์หรือคอนกรีตผสมขยะพลาสติก แต่การศึกษามอร์ต้าร์ผสมขยะพลาสติกเพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ยังมีน้อยมาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติการดูดซึมน้ำ ความพรุน หน่วยน้ำหนัก กำลังอัด และวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคของมอร์ต้าร์ผสมขยะพลาสติกจากทะเลเพื่อพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์กระถางต้นไม้ที่ชุมชนสามารถขึ้นรูปได้ง่ายและวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตเพื่อให้ชุมชนทราบสามารถจำหน่าย อย่างไรก็ตาม แผนกลยุทธ์การจัดการขยะพลาสติก พ.ศ. 2561 – 2573 โดยมุ่งเน้นการลดการใช้พลาสติกแบบใช้ครั้งเดียว การส่งเสริมการรีไซเคิล และการนำเทคโนโลยีและนวัตกรรมมาใช้ในการจัดการขยะพลาสติก เพื่อสร้างความยั่งยืนในการใช้ทรัพยากรและลดผลกระทบทางลบต่อสิ่งแวดล้อม

2. วิธีการวิจัย

2.1 วัสดุ

1. ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกตามมาตรฐานคุณภาพ มอก.2594-2556

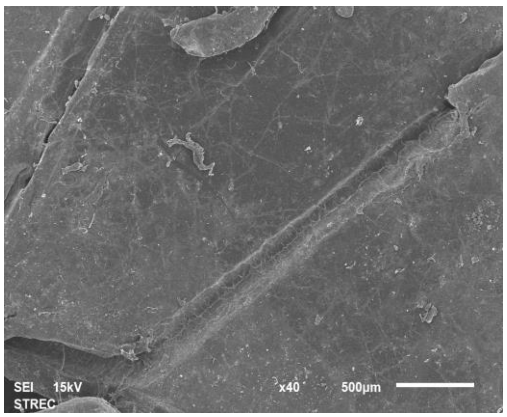
2. หินฝุ่นมีขนาด 3-4 มิลลิเมตร จากเหมืองหิน จังหวัดสระบุรี

3. ขยะทะเล ร่วมเก็บขยะทะเลกิจกรรมรักษ์ทะเลวันสิ่งแวดล้อมโลก จ. ชลบุรี แสดงดังรูปที่ 1 ขยะทะเลที่เก็บแล้วคัดเลือกเฉพาะเป็นขวดพลาสติกประเภท Polyethylene Terephthalate (PET) มาล้างด้วยน้ำสะอาดแล้วย่อยลดขนาดด้วยเครื่องบดพลาสติก โดยขยะส่วนที่เหลือทางหน่วยงานท้องถิ่นนำไปกำจัดต่อ แสดงในรูปที่ 2 ขยะทะเลที่ผ่านการย่อย เมื่อพิจารณาจากภาพถ่ายขยายมีลักษณะผิวเรียบดังแสดงในรูปที่ 2 (ข) มีขนาด 3-4 มิลลิเมตร

รูปที่ 1 ขยะทะเลที่เก็บมาบดย่อย

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.003

(ก) ขยะทะเลที่ผ่านการย่อย



(ข) ภาพถ่ายขยายขยะทะเล

รูปที่ 2 ขยะทะเลที่ผ่านการย่อย

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพของหินฝุ่นและขยะทะเลพบว่าความถ่วงจำเพาะ หน่วยน้ำหนักและโมดูลัสความละเอียดของหินฝุ่นเท่ากับ 2.69 1,654 และ 3.63 ตามลำดับ สำหรับขยะทะเลมีความถ่วงจำเพาะ หน่วยน้ำหนักและโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 1.31 562 และ 2.87 ตามลำดับ

2.2 อัตราส่วนผสม

ตารางที่ 2 อัตราส่วนของตัวอย่างโดยน้ำหนัก โดยผสมปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกต่อหินฝุ่นในอัตราส่วน 1 ต่อ 4 โดยน้ำหนักและผสมขยะทะเลในอัตราส่วนร้อยละ 3 6 และ 9 โดยน้ำหนักทั้งหมดของส่วนผสม [7] กำหนดอัตราส่วนผสมน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.4 ที่มีความข้นเหลวสามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์แบบการกระทุ้งอัดแน่น

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพของหินฝุ่นและขยะทะเล

Properties	Specific Gravity	Unit Weight (kg/m^3)	Fineness Modulus
Stone Dust	2.69	1,654	3.63
Marine Plastic	1.31	562	2.87

ตารางที่ 2 อัตราส่วนของตัวอย่าง

Mix	Cement (g)	Stone dust (g)	Plastic (g)	W/C
CT	1000	4000	0	0.4
3MP	1000	4000	150	0.4
6MP	1000	4000	300	0.4
9MP	1000	4000	450	0.4

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.003

2.3 การทดสอบ

2.3.1 หน่วยน้ำหนักการดูดซึมน้ำและความพรุน

ตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 100 x 100 x 100 มิลลิเมตร หลังจากบ่มตัวอย่างที่อายุ 28 วัน การทดสอบหน่วยน้ำหนักทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C138 การดูดซึมน้ำและความพรุนทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 642

2.3.2 กำลังอัด

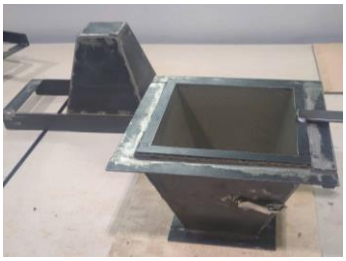
หล่อตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 100 x 100 x 100 มิลลิเมตร บ่มตัวอย่างในสภาวะอุณหภูมิห้อง ทดสอบกำลังอัดที่อายุการบ่ม 7 และ 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C109

2.3.3 โครงสร้างระดับจุลภาค

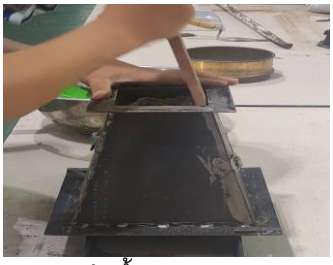
การทดสอบโครงสร้างจุลภาคของมอร์ต้าร์ที่อายุการบ่ม 28 วัน เพื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคการยึดเกาะและรอยต่อของซีเมนต์เพสต์กับพลาสติกเพื่อเป็นฐานข้อมูลในการทำวิจัย โดยนำตัวอย่างขนาดเล็กๆ ที่อยู่ตรงกลางของก้อนตัวอย่าง แล้วนำตัวอย่างหยุดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยนำตัวอย่างอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงไปทดสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยวิธีกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron microscopy หรือ SEM) โดยนำชิ้นตัวอย่างไปเคลือบผิวด้วยทองคำ และไปทดสอบถ่ายภาพขยายอนุภาคกำลังสูง

2.4 การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์

การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์สำหรับในงานวิจัยนี้เป็นกระถางต้นไม้เพราะชุมชนสามารถทำเองได้ไม่ยุ่งยากต่อการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์และสามารถนำไปจำหน่ายได้ โดยเลือกรูปแบบและขนาดของผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำหนักไม่มากไม่ต้องใช้เครื่องจักรสามารถขึ้นรูปด้วยแรงงานคน สำหรับอัตราส่วนที่เหมาะสมทำการขึ้นรูปเป็นกระถางต้นไม้ทำการเลือกจากผลการทดลอง รูปที่ 3 (ก) แสดงแบบหล่อกระถางต้นไม้ทำด้วยแผ่นเหล็กประกอบด้วย 2 ชิ้นคือแบบภายนอกและแบบภายใน สำหรับขั้นตอนการขึ้นรูปผสมปูนซีเมนต์ หินฝุ่น และขยะทะเลเข้ากันให้ดี การขึ้นรูปกระถางต้นไม้ให้หงายแบบหล่อขึ้นแล้วนำซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่ผสมเทใส่ในแบบหล่อแบ่งออกเป็น 3 ชั้น แล้วอัดแน่นด้วยการกระทุ้งด้วยไม้โดยรอบจนกระทั่งเต็มแบบหล่อแล้วปาดให้เรียบแสดงในรูปที่ 3 (ข) ส่วนการถอดแบบหล่อให้กลับด้านของกระถางต้นไม้โดยให้ด้านปากกระถางหงายขึ้นแล้วจึงถอดแบบหล่อแสดงในรูปที่ 3 (ค) นำกระถางต้นไม้บ่มในสภาวะอุณหภูมิห้อง



(ก) แบบหล่อกระถางต้นไม้



(ข) การอัดขึ้นรูปด้วยการกระทุ้ง

(ค) แบบหล่อกระถางต้นไม้

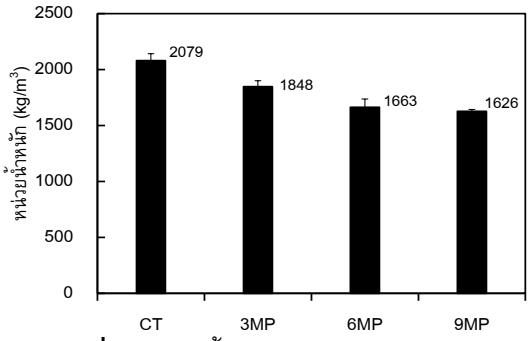
รูปที่ 3 การขึ้นรูปเป็นกระถางต้นไม้

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.003

3. ผลและการอภิปรายผล

3. หน่วยน้ำหนัก

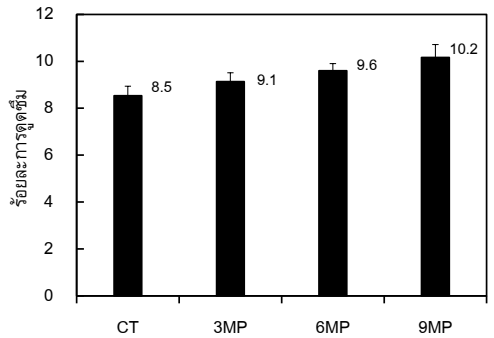
หน่วยน้ำหนักของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมขยะทะเล แสดงในรูปที่ 4 พบว่าหน่วยน้ำหนักของซีเมนต์มอร์ต้าร์ CT 3MP 6MP และ 9MP มีค่าเท่ากับ 2,079 1,848 1,663 และ 1626 กก./ม.^{3} ตามลำดับ การผสมขยะทะเลในซีเมนต์มอร์ต้าร์ซึ่งส่วนใหญ่เป็นพลาสติกมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าปูนซีเมนต์นำไปสู่การลดลงของหน่วยน้ำหนักของซีเมนต์มอร์ต้าร์ผสมขยะทะเลสอดคล้องกับการศึกษาของ Kunthawatwong et al. [10]



รูปที่ 4 หน่วยน้ำหนักของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมขยะทะเล

3.2 การดูดซึมน้ำ

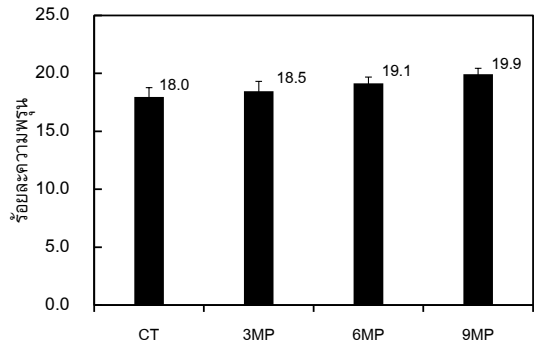
การดูดซึมน้ำของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมขยะทะเล แสดงในรูปที่ 5 พบว่าซีเมนต์มอร์ตาร์ CT 3MP 6MP และ 9MP มีค่าการดูดซึมน้ำที่อายุการบ่ม 28 วัน เท่ากับ 8.5 9.1 9.6 และ 10.2 ตามลำดับ การดูดซึมน้ำของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมขยะทะเลมีค่าเพิ่มขึ้นตามการแทนที่ด้วยขยะทะเล การเพิ่มขึ้นของการดูดซึมน้ำเนื่องจากขยะทะเลซึ่งเป็นพลาสติกจะมีรูปร่างเรียบทำให้การยึดเกาะต่ำระหว่างพลาสติกและซีเมนต์นำไปสู่ปริมาณโพรงที่มากขึ้น [11] อีกประการหนึ่งพลาสติกจะมีรูปร่างแบนการแทนที่ในปริมาณเพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการทำงานได้ลดลงส่งผลให้มีความพรุนสูงและความสามารถในการดูดซึมน้ำของซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมขยะทะเลมีค่าเพิ่มขึ้น [10]



รูปที่ 5 การดูดซึมน้ำของซีเมนต์ผสมขยะทะเล

3.3 ความพรุน

รูปที่ 6 ความพรุนของซีเมนต์ผสมขยะทะเลพบว่าความพรุนของซีเมนต์ควบคุมมีค่าเท่ากับ 18.0 และเมื่อผสมขยะทะเลร้อยละ 3 6 และ 9 ของน้ำหนักทั้งหมดมีค่าความพรุนเท่ากับ 18.5 19.1 และ 19.9 ตามลำดับ



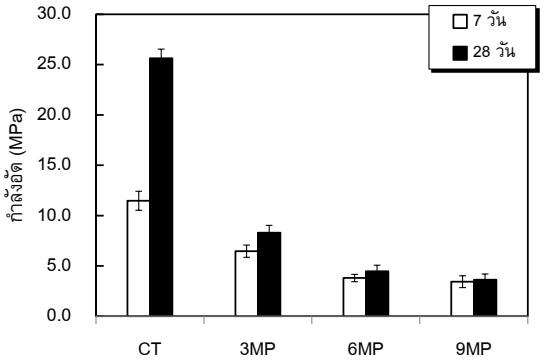
รูปที่ 6 ความพรุนของซีเมนต์มอร์ต้าร์ผสมขยะทะเล

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.003

เนื่องจากการผสมพลาสติกในปริมาณมากส่งผลให้การยึดเกาะระหว่างพลาสติกและซีเมนต์เพสต์ต่ำนำไปสู่การเกิดช่องว่างในซีเมนต์เพสต์ทำให้ปริมาณความพรุนเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับการศึกษาของ Kunthawatwong et al. [10] ศึกษาพลาสติกจากขวดน้ำมาย่อยผสมในซีเมนต์มอร์ต้าร์ทำให้ปริมาณความพรุนมีค่าเพิ่มขึ้น

3.4 กำลังอัด

รูปที่ 7 กำลังอัดของซีเมนต์ผสมขยะทะเลพบว่าซีเมนต์มอร์ต้าร์ควบคุมโดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์เมนต์ต่อหินฝุ่น 1 ต่อ 4 มีกำลังอัดที่อายุการบ่ม 7 และ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 11.5 และ 25.6 เมกะปาสคาล สำหรับกำลังซีเมนต์มอร์ต้าร์ผสมขยะทะเลกำลังอัดที่อายุ 7 วันของ 3MP 6MP และ 9MP เท่ากับ 6.5 3.8 และ 3.4 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ส่วนการบ่มที่อายุ 28 วัน ของ 3MP 6MP และ 9MP เท่ากับ 8.3 4.5 และ 3.6 เมกะปาสคาล ตามลำดับ กำลังอัดมีค่าลดลงด้วยการผสมขยะทะเลในปริมาณที่เพิ่มขึ้น การลดลงของกำลังอัดเนื่องจากการใช้ขยะทะเลซึ่งเป็นพลาสติกทำให้การยึดเหนี่ยวระหว่างพลาสติกและเพสต์มีค่าต่ำ [12, 13] และการใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ต่ำส่งผลให้ความสามารถในการทำงานได้ต่ำจึงจำเป็นต้องมีการกระทุ้งซีเมนต์มอร์ต้าร์เพื่อลดช่องว่าง อย่างไรก็ตามมาตรฐาน ASTM C129 คอนกรีตบล็อกที่ไม่รับน้ำหนักกำหนดกำลังอัดไว้ต้องไม่น้อยกว่า 4.14 เมกะปาสคาล ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าการใช้ขยะทะเลร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก สามารถพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ได้

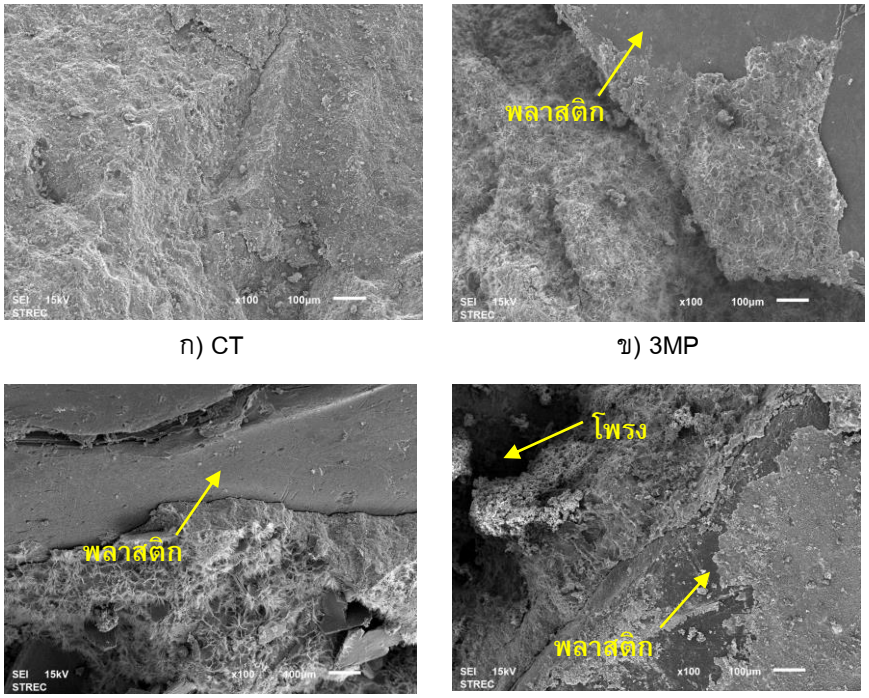


รูปที่ 7 กำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้าร์ผสมขยะทะเล

3.5 โครงสร้างจุลภาค

รูปที่ 8 ภาพถ่ายขยายของซีเมนต์มอร์ต้าร์ผสมขยะทะเลพบว่าซีเมนต์มอร์ต้าร์ควบคุมมีความแน่น จากการสังเกตพบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) มีลักษณะเป็นแผ่นและแคลเซียมดรอกไซด์และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate; C-S-H) ทำหน้าที่เป็นวัสดุประสานเป็นผลิตภัณฑ์ที่สำคัญของปฏิกิริยาไฮเดรชันส่งผลต่อกำลังอัด แสดงในรูปที่ 8 (ก) สำหรับซีเมนต์มอร์ต้าร์ผสมขยะทะเลแสดงใน รูปที่8 (ข)–(ง) มีลักษณะความพรุนสูงกว่าคอนกรีตบล็อกควบคุม นอกจากนั้นพบผลิตภัณฑ์คล้ายกับเข็มเป็นส่วนของแอททริงไกต์ (Ettringite) เมื่อพิจารณาการยึดเกาะระหว่างพลาสติกขยะทะเลซึ่งมีผิวเรียบและซีเมนต์เห็นได้อย่างชัดเจนว่าจะมีรอยต่อของการยึดซึ่งเป็นปัจจัยหลักต่อกำลังอัดที่ลดลง และเมื่อพิจารณา รูปที่ 8 (ง) เป็นอัตราส่วนที่พลาสติกในปริมาณมากที่สุดจะพบว่าปริมาณโพรงที่ค่อนข้างมากและมีขนาดใหญ่ส่งผลให้การดูดซึมน้ำและความพรุนมีค่าเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันทำให้หน่วยน้ำหนักและกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้าร์มีค่าลดลงสอดคล้องกับผลการทดสอบ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.003



ก) CT ข) 3MP

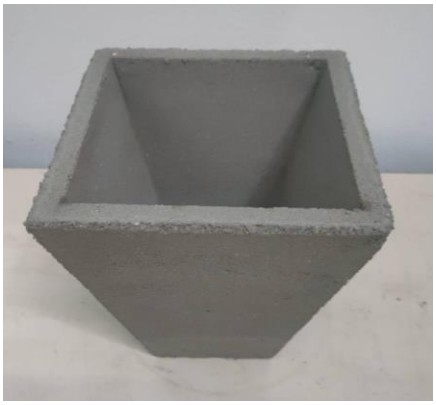
ค) 6MP ง) 9MP

รูปที่ 8 ภาพถ่ายขยายของซีเมนต์มอร์ต้าร์ผสมขยะทะเล

3.6 การขึ้นรูปกระถางต้นไม้

การวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดสอบหน่วยน้ำหนัก การดูดซึมน้ำ ความพรุน กำลังอัด และโครงสร้างจุลภาค พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมของซีเมนต์มอร์ต้าร์ผสมขยะทะเล โดยใช้อัตราส่วน ปูนซีเมนต์ต่อหินฝุ่น 1:4 ผสมขยะทะเลร้อยละ 6 โดยน้ำหนักทั้งหมดของวัสดุผสม แสดงในรูปที่ 9 สำหรับการวิเคราะห์ต้นทุนราคาของกระถางต้นไม้ผสมพลาสติกทะเล กระถางต้นไม้ 1 กระถางจะมีน้ำหนัก 3.65 กิโลกรัม โดยใช้ปูนซีเมนต์ 0.686 กิโลกรัม หินฝุ่น 2.74 กิโลกรัม และขยะทะเล 0.219 กิโลกรัม ส่วนค่าแรงงานมีค่าย่อยขยะทะเลและการขึ้นรูปกระถางต้นไม้ใช้แรงงานเพียง 1 คนได้ส่วนระบบการผลิตขึ้นรูปเป็นแบบการกระทุ้งอัดแน่น โดยอัตราการผลิต 1 ชั่วโมงสามารถผลิตได้ 10 ชิ้นต่อ 1 แบบหล่อ ตารางที่ 3 การวิเคร่ทาะห์ต้นทุนราคาของกระถางต้นไม้ผสมขยะทะเลพบว่าค่าวัสดุประมาณ 2 บาทต่อชิ้นค่าแรงประมาณ 5 บาทต่อชิ้นและงานวิจัยที่ผ่านมา [14] ต้นทุนน้ำประปาใช้ล้างพลาสติกและไฟฟ้าสำหรับย่อยพลาสติกทำผลิตภัณฑ์บล็อกปูพื้นซึ่งมีน้ำหนักต่อชิ้นใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้ประมาณ 0.25 บาทต่อชิ้น รวมราคาต่อชิ้นประมาณ 7.25 บาทต่อชิ้น อย่างไรก็ตามการสนับสนุนให้ชุมชนใช้ขยะทะเลผสมซีเมนต์มอร์ต้าร์พัฒนาเป็นกระถางต้นไม้สามารถสร้างเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) การออกแบบ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.003



(ก) ภาพถ่ายด้านบน

(ข) ภาพถ่ายด้านข้าง

รูปที่ 9 ตัวอย่างกระถางต้นไม้ผสมขยะทะเล

ผลิตภัณฑ์ที่ยั่งยืน (Sustainable Design): สร้างระบบการจัดเก็บและรีไซเคิลที่มีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีความเสี่ยงสูงต่อการเกิดขยะพลาสติกในทะเล เช่น พื้นที่ชายฝั่งและแหล่งน้ำต่าง ๆ การจัดการขยะพลาสติกอย่างมีประสิทธิภาพ (Efficient Waste Management) พัฒนาระบบการจัดการขยะที่สามารถเก็บรวบรวมและจัดการขยะพลาสติกก่อนที่จะหลุดออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะการจัดการขยะในเขตเมืองและพื้นที่ชายฝั่ง การฟื้นฟูสิ่งแวดล้อม (Environmental Restoration): ดำเนินโครงการเก็บขยะพลาสติกจากทะเลและฟื้นฟูพื้นที่ทางทะเลที่ได้รับผลกระทบจากขยะพลาสติก เช่น การจัดตั้งกลุ่มอาสาสมัครเพื่อทำความสะอาดชายหาดและแหล่งน้ำ การนำหลักการเศรษฐกิจหมุนเวียนมาใช้ในการจัดการพลาสติกในทะเล จะช่วยลดปริมาณขยะพลาสติกในทะเล ฟื้นฟูสภาพแวดล้อมทางทะเล และสร้างระบบการใช้ทรัพยากรที่ยั่งยืนมากขึ้น [15]

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์ต้นทุนราคาของกระถางต้นไม้ผสมขยะทะเล

วัสดุต่อชิ้น [กก.(บาท)]			ค่าแรง ต่อชิ้น	ไฟฟ้า/ ประปา	ราคา ต่อชิ้น
ปูนซีเมนต์	หินฝุ่น	ขยะ			
0.69(2.2)	2.74(0.0625)	0.22(-)	5	0.25	7.25

4. สรุปผล

1. หน่วยน้ำหนักของซีเมนต์มอร์ต้าร์ผสมขยะทะเลลดลงด้วยการแทนที่เพิ่มขึ้นของขยะทะเลเนื่องจากความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าปูนซีเมนต์

2 การใช้ขยะทะเลผสมในซีเมนต์มอร์ต้าร์ส่งผลให้การดูดซึมน้ำ และความพรุนเพิ่มด้วยการแทนที่เพิ่มขึ้นของปริมาณขยะทะเล

3. การใช้ขยะทะเลย่อยร้อยละ 6 ของน้ำหนักทั้งหมดผสมในซีเมนต์มอร์ต้าร์และหินฝุ่นสามารถพัฒนาขึ้นรูปกระถางต้นไม้

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.003

4. การให้ชุมชนเก็บขยะทะเลสามารถพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถจำหน่ายได้เป็นการสร้างเศรษฐกิจหมุนเวียน เป็นกระถางต้นไม้ช่วยแก้ปัญหาขยะทะเลและปัญหาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนั้นสร้างรายได้ให้กับชุมชนเป็นการส่งเสริมเศรษฐกิจหมุนเวียนให้กับชุมชน

5.กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก งบประมาณภายนอก เลขที่สัญญาทุน น.สกสว 31/2566 คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ เขตพื้นที่ อุเทนถวาย สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาที่อนุเคราะห์วัสดุและเครื่องมือในการดำเนินการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

[1] M.R. Gregory, Environmental implications of plastic debris in marine settings—entanglement, ingestion, smothering, hangers-on, hitch-hiking and alien invasions, Philosophical Transactions B, 2009, 364(1526), 2013-2025.

[2] S. Newman, E. Watkins, A. Farmer, P.t. Brink and J.-P. Schweitzer, The economics of marine litter, Marine Anthropogenic Litter, Springer, Cham, Switzerland, 2015.

[3] K.D. Cox, G.A. Covernton, H.L. Davies, J.F. Dower, F. Juanes and S.E. Dudas, Human Consumption of Microplastics, Environmental Science and Technology, 2019, 53(12), 7068-7074.

[4] N. Wichai-utcha and O. Chavalparit, 3Rs Policy and plastic waste management in Thailand, Journal of Material Cycles and Waste Management, 2019, 21(1), 10-22.

[5] B. Khanta, B. Kaewprachum, A. Kittanan and L. Prak, T. Chueasawat and T. Samranwanit, Strength and abrasion resistance of concrete usingplastic waste as partially fineaggregate replacement, The 27th National Civil Engineering Conference, Proceeding, 2022, 1-6. (in Thai).

[6] R. Khamput, K. Somna,T. Tochai and R. Somna, Using plastic waste from the curtain assembly plant as an ingredient in concrete for plant pots, The 27th National Civil Engineering Conference, Proceeding, 2022, 1-7. (in Thai).

[7] P, Khamput, S, Haruehansapong, W, Sittigool, T, Prasertsri, P, Yoddumrong and P. Sanit-in, Development of paving interlocking block from plastic bottle wastes with dust stone, The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 2024, 34(3), 1-13. (in Thai).

[8] C. Yaibok, P, Suwanno and P. Jitpetchkan, Properties of asphaltic concrete mixed with marine debris, The 27th National Civil Engineering Conference, Proceeding, 2022, 1-9. (in Thai).

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.003

[9] H.L.C. Soares, P.K.G. Choueri and A.R. Santos, Feasibility study of the use of concrete blocks produced from plastic marine garbage for use in civil construction, Environmental Science and Pollution Research, 2024, 31(19), 28418-28427.

[10] R. Kunthawatwong, L. Sylisomchanh, S. Pangdaeng, A. Wongsa, V. Sata, P. Sukontasukkul and P. Chindaprasirt, Recycled non-biodegradable polyethylene terephthalate waste as fine aggregate in fly ash geopolymer and cement mortars, Construction and Building Materials, 2022, 328, 127084.

[11] E.A. Ohemeng and S.O. Ekolu, Strength prediction model for cement mortar made with waste LDPE plastic as fine aggregate, Journal of Sustainable Cement-Based Materials, 2019, 8(4), 228-243.

[12] M. Hacini, A.S. Benosman, N. Kazi Tani, M. Mouli, Y. Senhadji, A. Badache and N. Latroch, Utilization and assessment of recycled polyethylene terephthalate strapping bands as lightweight aggregates in Eco-efficient composite mortars, Construction and Building Materials, 2021, 270, 121427.

[13] M.J. Islam, M.S. Meherier and A.K.M.R. Islam, Effects of waste PET as coarse aggregate on the fresh and harden properties of concrete, Construction and Building Materials, 2016, 125, 946-951.

[14] S. Suntararak, T, Sorson and P, Jeawram, The utilization of stone dust as cement substitution with mixed plastic to develop an environmentally friendly paving block product, The 18th Ubon Ratchathani University Research Conference (UBRC): Green-Growth-Gate, 2023, Proceeding, 180-188. (in Thai).

[15] D. Marks, M.A. Miller and S. Vassanadumrongdee, Closing the loop or widening the gap? The unequal politics of Thailand's circular economy in addressing marine plastic pollution, Journal of Cleaner Production, 2023, 391, 136218.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.004

บทความวิจัย

การจำแนกโควิด 19 จากภาพ CT Scan ด้วยการเรียนรู้แบบรวมกลุ่ม

พงษ์ศธร เชิดสม*

งานวิชาการและวิจัย, คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: pongche@kku.ac.th

วันที่รับบทความ: 8 มีนาคม 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 19 พฤษภาคม 2568; วันที่ตอบรับบทความ: 6 มิถุนายน 2568
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 19 สิงหาคม 2568

บทคัดย่อ: การระบาดใหญ่ของเชื้อไวรัสโควิด 19 ได้เน้นย้ำถึงความจำเป็นอย่างยิ่งในการพัฒนาเครื่องมือวินิจฉัยที่มีประสิทธิภาพซึ่งสามารถช่วยบุคลากรทางการแพทย์ในการประเมินผู้ป่วยได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำมากยิ่งขึ้น งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาแบบจำลองสำหรับการจำแนกเชื้อไวรัสโควิด 19 จากภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ทรวงอก (CT Scan) ด้วยเทคนิคการเรียนรู้แบบรวมกลุ่ม (Ensemble Method) ด้วยชุดข้อมูล COVID-19 Radiography จำนวน 7,232 ภาพ แบ่งเป็นเชื้อโควิด 3,616 ภาพ ไม่มีเชื้อโควิด 3,616 ภาพ แบ่งชุดข้อมูลสำหรับการทดลองเป็นชุดสำหรับเรียนรู้ร้อยละ 70 (Training Set) จำนวน 2,531 ภาพ ชุดสำหรับการตรวจสอบการเรียนรู้ร้อยละ 20 (Validation set) จำนวน 723 ภาพ ชุดสำหรับการทดสอบการเรียนรู้ร้อยละ 10 (Test set) 362 ภาพ และใช้ร่วมเทคนิคการแบ่งข้อมูล (K-Fold Cross Validation) จำนวน 5 ชุด (K=5) การทดลองได้แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม กลุ่มที่ 1 ใช้แบบจำลองที่ได้รับความนิยม 38 แบบจำลอง เลือกแบบจำลองที่ได้รับค่าความถูกต้อง (Accuracy) มากที่สุด 3 ลำดับนำไปใช้กับกลุ่มการทดลองที่ 2 และ 3 กลุ่มที่ 2 เชื่อมแบบจำลองโดยใช้เทคนิค Bagging ร่วมกับชุดข้อมูล 5 ชุด จำนวน 3 รูปแบบการทดลอง กลุ่มที่ 3 เชื่อมแบบจำลองโดยใช้เทคนิค Bagging โดยใช้แบบจำลองที่มีค่าความถูกต้องมากที่สุดในแต่ละแบบจำลอง จำนวน 2 รูปแบบการทดลอง พบว่าการทดลองในกลุ่มที่ 3 แบบจำลอง MobileNet ร่วมกับ DenseNet121 มีค่าความถูกต้องร้อยละ 99.30 เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองพื้นฐานในกลุ่มที่ 1 มีค่าความถูกต้องร้อยละ 97.23 พบว่ามีค่าความถูกต้องที่สูงขึ้นร้อยละ 2.07

คำสำคัญ: การจำแนกโควิด 19; ภาพเอกซเรย์ CT Scan; เทคนิคการเรียนรู้แบบรวมกลุ่ม; โครงข่ายประสาทเทียม

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.004

บทความวิจัย

Classification of COVID-19 from Chest CT Images Using Ensemble Techniques

Pongsathorn Chedsom*

Academic Affairs and Research, Faculty of Architecture, Khon Kaen University

* Corresponding author, E-mail: pongche@kku.ac.th

Received: 8 March 2025; Revised: 19 May 2025; Accepted: 6 June 2025
Online Published: 19 August 2025

Abstract: The COVID-19 pandemic has emphasized the critical need for effective diagnostic tools that can assist medical personnel in evaluating patients more rapidly and accurately. This research presents the development of a model for classifying COVID-19 from chest computed tomography (CT) scans using ensemble learning methods. The study utilized the COVID-19 Radiography dataset containing 7,232 images, evenly divided between 3,616 COVID-19 positive images and 3,616 COVID-19 negative images. The dataset was split data to a training set (70%, 2,531 images), a validation set (20%, 723 images), and a test set (10%, 362 images), with 5-fold cross-validation (K=5). The experimental methodology was divided into three groups: Group 1 involved testing 38 popular deep learning models and selecting the three highest-accuracy models for further experimentation. Group 2 combined these models using bagging techniques across the five cross-validation data folds in three different experimental configurations. Group 3 utilized bagging to combine the highest-performing versions of each selected model in two experimental configurations. The results show that the experiment group 3 using MobileNet and DenseNet121 together achieved an accuracy of 99.30%, compared to the baseline model in group 1 with an accuracy of 97.23%, which is 2.07% higher.

Keywords: Classification of COVID-19; Chest CT scan; Ensemble Techniques; Deep Learning

ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.004

บทความวิจัย

1. บทนำ

การระบาดใหญ่ของเชื้อไวรัส COVID-19 ส่งผลกระทบต่อระบบสาธารณสุข เศรษฐกิจ และสังคมทั่วโลกอย่างรุนแรง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกลุ่มประชากรที่มีความเสี่ยงสูง [1] เช่น ผู้สูงอายุ ผู้มีโรคประจำตัว และบุคลากรทางการแพทย์ แม้จะมีงานวิจัยจำนวนมากเกี่ยวกับเชื้อไวรัส COVID-19 เพื่อตอบสนองต่อความต่อการในหลาย ๆ ปัจจัยรวมทั้งการการรักษา การคัดกรอกหาเชื้อไวรัสโดยกระบวนการต่าง ๆ

ปัจจุบันมีการพัฒนาแบบจำลองหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพิ่มมากขึ้นปัจจุบันการใช้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) ในทางการแพทย์ได้รับความนิยมมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะโครงข่ายประสาทเทียมเชิงลึก (Convolutional Neural Networks: CNN) กำลังปฏิวัติวงการแพทย์ด้วยความสามารถในการวิเคราะห์ภาพทางการแพทย์ได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำสูงทำให้การวินิจฉัยโรคเบื้องต้นหรือการวินิจฉัยโดยละเอียดเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

การนำเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์มาใช้ช่วยให้แพทย์ตรวจพบความผิดปกติหรือแนวโน้มของโรคได้ตั้งแต่ระยะเริ่มต้น สามารถเพิ่มโอกาสในการรักษาที่ประสบความสำเร็จและยกระดับคุณภาพชีวิตของผู้ป่วยมากยิ่งขึ้นการจำแนกประเภทของเชื้อไวรัส COVID-19 จากภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ (CT) ของทรวงอกโดยใช้แบบการเรียนรู้แบบกลุ่ม(Ensemble) เป็นความก้าวหน้าในด้านการถ่ายภาพทางการแพทย์และปัญญาประดิษฐ์ เนื่องจากการระบาดใหญ่ของ COVID-19 จำเป็นต้องมีวิธีการวินิจฉัยที่รวดเร็วและแม่นยำเทคนิคการเรียนรู้แบบกลุ่มจึงเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการปรับปรุงความถูกต้องและประสิทธิภาพของการตรวจจำแนกเชื้อไวรัส COVID-19 โดยการใช้ประโยชน์จากแบบจำลอง (Model) หรืออัลกอริทึมหลายตัวในการวิเคราะห์ภาพ CT Scan จากภาพทรวงอกซึ่งแบบจำลองหรืออัลกอริทึมนี้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการจำแนกและพยากรณ์เชื้อไวรัสเบื้องต้น ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับการวินิจฉัยและรักษารวดเร็วยิ่งขึ้นเทคนิคการเรียนรู้แบบกลุ่มแบ่งออกเป็น 3 ประเภทหลัก ๆ ได้แก่ แบ็กกิ้ง (Bagging) บูสติ้ง (Boosting) และสแตกกิ้ง (Stacking) รวมการทำงานของแบบจำลองและของอัลกอริทึมต่างๆ เข้าด้วยกันเพื่อให้ได้ผลลัพธ์จากการพยากรณ์ที่มีความน่าเชื่อถือและมีความเสถียรมากขึ้นเมื่อเทียบกับแบบจำลองเดียวในบริบทของ COVID-19 ได้แสดงให้เห็นว่าวิธีการแบบกลุ่มนั้นสามารถแก้ไขปัญหา เช่น ความไม่สมดุลของข้อมูล (Data Imbalance) ซึ่งเกิดจากการที่ตัวอย่างของโรคหรือความผิดปกติมักมีจำนวนน้อยกว่าตัวอย่างปกติอย่างมากและมิติข้อมูลสูง (High Dimensionality) โดยภาพทางการแพทย์มีความละเอียดสูง เช่น ภาพ CT scan หรือ MRI ที่มีขนาดหลายพิกเซลในแต่ละมิติหรือภาพสามมิติทำให้มีพารามิเตอร์จำนวนมากที่ต้องนำมาใช้ในการเรียนรู้ของแบบจำลอง (Training) ซึ่งปัจจุบันการนำเทคโนโลยีปัญหาประดิษฐ์มาใช้เกิดขึ้นอย่างเผยหลายมากยิ่งขึ้นการวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อการจำแนกเชื้อไวรัส COVID-19 จากภาพ CT Scan โดยใช้เทคนิคการเรียนรู้แบบรวมกลุ่มเพื่อให้ประสิทธิภาพในการจำแนกมากยิ่งขึ้นอีกทั้งยังเป็นการลดความเสี่ยงในการตัดสินใจของแบบจำลองเดียวกระจายความเสี่ยงและเพิ่มความมั่นใจในการจำแนกโรคของแบบจำลอง

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.004

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎี

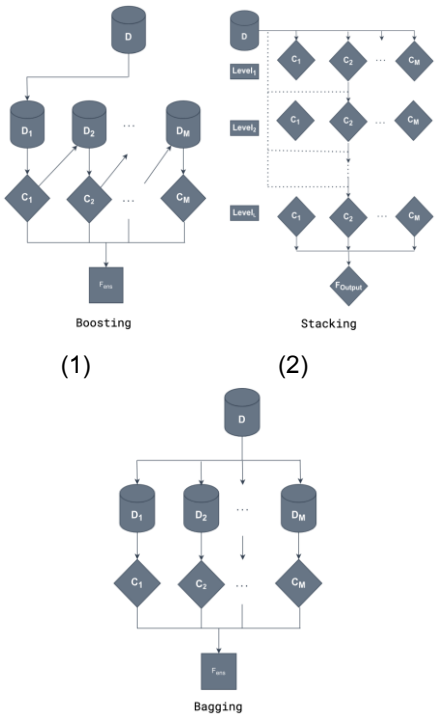
2.1.1 เทคนิคการเรียนรู้แบบรวมกลุ่ม

เทคนิคการเรียนรู้แบบรวมกลุ่ม (Ensemble Method) เป็นเทคนิคในการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) ที่ใช้การรวมผลลัพธ์จากการพยากรณ์ของแบบจำลองหลาย ๆ ตัว (Weak Learners) เพื่อสร้างแบบจำลองที่มีความแม่นยำที่ดีขึ้น (Strong Learner) หลักการพื้นฐานของการเรียนรู้แบบรวมกลุ่มคือการที่แบบจำลองแต่ละตัวอาจมีข้อผิดพลาดที่แตกต่างกัน โดยใช้การรวมผลลัพธ์ของแบบจำลองเหล่านั้นเข้าด้วยกันจะช่วยลดข้อผิดพลาดและเพิ่มความน่าเชื่อถือในการพยากรณ์ผลลัพธ์ซึ่งมีความแม่นยำสูงกว่าการใช้แบบจำลองเดี่ยว [2]

2.1.2 รูปแบบเทคนิคการเรียนรู้แบบรวมกลุ่ม

การแบ่งเทคนิคการเรียนรู้แบบกลุ่มสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทหลัก ๆ ได้แก่

Boosting เป็นเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องที่มุ่งเน้นการพัฒนาแบบจำลองที่อ่อนแอ (Weak Learner) ให้กลายเป็นแบบจำลองที่แข็งแกร่ง (Strong Learner) โดยการฝึกโมเดลแบบตามลำดับ (Sequentially) แบบจำลองใหม่แต่ละตัวจะถูกฝึกสอนเพื่อแก้ไขข้อผิดพลาดของแบบจำลองก่อนหน้า โดยให้ความสำคัญกับข้อมูลที่ถูกจำแนกผิดในรอบก่อนหน้ามากขึ้น การปรับน้ำหนักของข้อมูลในลักษณะนี้ช่วยให้กลุ่มโมเดลเรียนรู้จากข้อผิดพลาดของตนเอง ส่งผลให้ได้โมเดลสุดท้ายที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น อัลกอริทึม Boosting ที่ได้รับความนิยม ได้แก่ AdaBoost และ Gradient Boosting ดังแสดงในรูปที่ 1 (1) [2, 3]



รูปที่ 1 รูปแบบเทคนิคการเรียนรู้แบบรวมกลุ่ม 3 ประเภท Boosting (1) Stacking (2) Bagging (3) [2]

Stacking หรือ Stacked Generalization เป็นเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องที่แตกต่างจาก Bagging และ Boosting โดยอนุญาตให้ใช้แบบจำลองที่มีความหลากหลาย (Diverse Algorithms) แทนที่จะใช้เพียงแบบจำลองประเภทเดียวกันในเทคนิคแบบจำลองตั้งต้น (Base Models) จะถูกฝึกสอนบนชุดข้อมูลฝึกสอน จากนั้นโมเดลเมตา (Meta-Learner) จะถูกฝึกสอนบนผลลัพธ์การทำนายของโมเดลฐาน เพื่อรวมผลลัพธ์การทำนายเหล่านั้นให้เหมาะสมที่สุด ความยืดหยุ่นนี้มักจะนำไปสู่ประสิทธิภาพของแบบจำลองที่ดีขึ้นโดยใช้ประโยชน์จากจุดแข็งของอัลกอริทึมการเรียนรู้ที่หลากหลาย ดังแสดงในรูปที่ 1 (2) [2, 4]

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.004

Bagging (Bootstrap Aggregating) เป็นเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องที่ช่วยลดความแปรปรวน (Variance) ของแบบจำลอง โดยสร้างแบบจำลองย่อยหลาย ๆ ตัว ขึ้นมาจากชุดข้อมูลฝึกสอนที่สุ่มเลือกแบบมีการแทนที่ (With Replacement) ซึ่งหมายความว่าข้อมูลบางส่วนอาจถูกเลือกซ้ำหลายครั้ง ขณะที่บางส่วนอาจไม่ได้ถูกเลือกเลย หลังจากฝึกสอนโมเดลย่อยแล้ว ผลลัพธ์การทำนายของแต่ละโมเดลจะถูกรวมเข้าด้วยกัน โดยทั่วไปจะใช้การหาค่าเฉลี่ยสำหรับงานถดถอย (Regression) และการโหวตเสียงข้างมากสำหรับงานจำแนกประเภท (Classification) ตัวอย่างที่รู้จักกันดีของเทคนิค Bagging คือ Random Forest Algorithm ดังแสดงในรูปที่ 1 (3) [2, 5] จุดเด่นและข้อดีของ Ensemble Learning เป็นการเพิ่มความแม่นยำในการทำนายผลที่ให้ดีมากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังช่วยลดทั้ง Bias (ความลำเอียงในการทำนาย) และ Variance (ความแปรปรวนของการทำนาย) ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญในการสร้างโมเดล Machine Learning และช่วยลดความเสี่ยงที่จะเกิด Overfitting (โมเดลจำข้อมูลฝึกมากเกินไป) หรือ Underfitting (โมเดลไม่สามารถจับรูปแบบของข้อมูลได้) และเพิ่มความสามารถในการจัดการกับข้อมูลที่ซับซ้อน สามารถค้นหาและเรียนรู้ความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนของข้อมูลได้ดีกว่าการเลือกใช้แบบจำลองเดียว รวมทั้งการเรียนรู้แบบรวมกลุ่มสามารถจัดการกับข้อมูลที่มีสัญญาณรบกวน (Noise) หรือข้อมูลที่ขาดหายไป (Missing Data) ได้ดี เนื่องจากข้อผิดพลาดจากโมเดลหนึ่งอาจถูกชดเชยด้วยโมเดลอื่น

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Chaurasia et. al. [6] นำเสนอวิธีการใหม่ในการตรวจจับโรค COVID-19 โดยใช้เทคนิค Ensemble Learning ร่วมกับการปรับปรุงคุณภาพภาพถ่ายเอกซเรย์ทรวงอกโดยใช้เทคนิคการปรับปรุงภาพ 2 วิธี คือ CLAHE และ BCET เพื่อเพิ่มคุณภาพของภาพเอกซเรย์ทรวงอกและพัฒนาโมเดล Ensemble Learning โดยรวมโมเดล CNN หลายตัวเข้าด้วยกัน ได้แก่ Inception V3 , ResNet50, Xception และ VGG16 ทำการจำแนกภาพเป็น 3 ประเภท คือ ปกติ, ติดเชื้อ COVID-19 และปอดบวม ทดสอบกับชุดข้อมูลขนาดใหญ่ที่มีภาพ 7,045 ภาพ ผลการทดสอบพบว่าการใช้ CLAHE และ BCET ร่วมกันช่วยเพิ่มความแม่นยำได้อย่างมีนัยสำคัญ และแบบจำลอง DSENetk (Xception + ResNet50) ให้ความแม่นยำสูงสุดที่ 95% มีประสิทธิภาพดีกว่าการใช้แบบจำลองเดี่ยวและวิธีการอื่นๆ ที่มีอยู่เดิม

Chandrika et. al. [7] พัฒนาแบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึกสำหรับการวินิจฉัยโรค COVID-19 จากภาพเอกซเรย์ทรวงอก ใช้ชุดข้อมูลภาพเอกซเรย์ทรวงอกจำนวน 16,000 ภาพ ประกอบด้วยทั้งผู้ป่วย COVID-19 และผู้ที่ไม่ได้ติดเชื้อ ใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน (CNN) ที่ผ่านการเรียนรู้มาก่อนจำนวน 4 แบบจำลอง นำผลลัพธ์จากทั้ง 4 แบบจำลองมารวมกันด้วยเทคนิคการเรียนรู้แบบรวมกลุ่ม (Ensemble Learning) ใช้เทคนิคการเพิ่มข้อมูล (Data Augmentation) เพื่อปรับปรุงความสามารถในการทำนายของแบบจำลอง แบ่งการจำแนกเป็น 5 ประเภท (แบคทีเรีย, ติดเชื้อ COVID-19, ไม่ติดเชื้อ COVID-19, ฝ้าขาวในปอดและไวรัส) มีความความแม่นยำร้อยละ 97.30 การจำแนก 3 ประเภท (ติดเชื้อ COVID-19, ไม่ติดเชื้อ COVID-19 และสุขภาพดี) มีความแม่นยำร้อยละ 98.20 การจำแนก 2 ประเภท (ติดเชื้อ COVID-19, ไม่ติดเชื้อ COVID-19) มีความแม่นยำร้อยละ 97.60

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.004

Geroski et. al. [8] พัฒนาวิธีการจำแนกความรุนแรงของ COVID-19 จากภาพเอกซเรย์ทรวงอก โดยใช้เทคนิคการถ่ายโอนการเรียนรู้ (Transfer Learning) กับโครงข่าย DenseNet121 จำแนกความรุนแรงของ COVID-19 เป็น 4 ระดับ เล็กน้อย ปานกลาง รุนแรง และวิกฤต ทดสอบการใช้น้ำหนักเริ่มต้น (Initial Weights) 3 แบบ ได้แก่ ImageNet น้ำหนักจากการเรียนรู้ภาพทั่วไป CheXNeXt น้ำหนักจากการเรียนรู้ภาพโรคปอดต่าง ๆ (ไม่รวม COVID-19) DeepCOVID-XR น้ำหนักจากการเรียนรู้ภาพ COVID-19 โดยเฉพาะ พบว่า ImageNet ให้ผลแย่ที่สุด (ค่าเฉลี่ย AUC = 0.700) DeepCOVID-XR ให้ผลดีขึ้น (ค่าเฉลี่ย AUC = 0.774) ให้ผลดีที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ (ค่าเฉลี่ย AUC = 0.917) เมื่อรวมระดับ รุนแรง และวิกฤตเข้าด้วยกันพบว่า ImageNet ได้ค่า AUC เพิ่มเป็น 0.867 CheX-NeXt ได้ค่า AUC เพิ่มเป็น 0.900 DeepCOVID-XR ได้ค่า AUC เพิ่มเป็น 0.974 จากการทดลองการใช้น้ำหนักเริ่มต้นที่มีลักษณะใกล้เคียงกับชุดข้อมูลใหม่ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าโดยเฉพาะในกรณีที่มีชุดข้อมูลขนาดเล็กและไม่สมดุล

Kumar et. al. [9] ได้พัฒนาแบบจำลองในการจำแนกโรค COVID-19 จากภาพเอกซเรย์ทรวงอกโดยใช้เทคนิค Machine Learning (ML) และ Transfer Learning (TL) ใช้ชุดข้อมูล COVID-Xray-5k ขนาดภาพ 224 X 224 ในการทดลอง ใช้ Gaussian blur เพื่อจัดการความเบลอ-ชัดและใช้เทคนิค CLAHE เพื่อปรับปรุงความคมชัดและความสว่างของภาพ แบ่งสัดส่วนของชุดข้อมูลออกเป็น 3 รูปแบบได้แก่ 80:20, 75:25 และ 70:30 พบกว่าแบบจำลอง Efficient-VGG16 (สถาปัตยกรรม EfficientNet-B0 และ VGG16) ที่ใช้เทคนิค Ensemble ได้ค่าความแม่นยำร้อยละ 99.46 และการแบ่งชุดข้อมูล 80:20 ได้ผลค่าความแม่นยำที่ดีที่สุด Asif et. al. [10] ได้นำเสนอแบบจำลอง LSWE (Lightweight Stacked Ensemble) เป็นแบบจำลองแบบ Stacked Ensemble ที่รวมแบบจำลอง MobileNet และ Lightweight CNN เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการจัดประเภทโดยมี MLP (Multi-Layer Perceptron) เป็นการเรียนรู้จากการเรียนรู้ (Meta-learner) โดยใช้ชุดข้อมูล 3 ชุดข้อมูล ขนาด 224 X 224 และเพิ่มข้อมูลโดยใช้เทคนิคการเพิ่มข้อมูล (Data Augmentation)ชุดข้อมูลที่ 1 แบ่งออกเป็น 3 ประเภทได้แก่ ติดเชื้อโควิด ไม่ติดเชื้อโควิด ปอดบวม พบว่าแบบจำลองที่นำเสนอ (LSWE) มีความแม่นยำร้อยละ 96.40 ชุดข้อมูลที่ 2 แบ่งออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่ ติดเชื้อโควิด ไม่ติดเชื้อโควิด วัณโรค ปอดบวม พบว่าแบบจำลองที่นำเสนอ (LSWE) มีความแม่นยำร้อยละ 97.90 ชุดข้อมูลที่ 3 ติดเชื้อโควิด ไม่ติดเชื้อโควิด พบว่าแบบจำลองที่นำเสนอ (LSWE) มีความแม่นยำร้อยละ 98.30 ทั้งสามชุดข้อมูลแบบจำลองที่นำเสนอ (LSWE) ให้ประสิทธิภาพและมีความแม่นยำมากที่สุด

Wang et. al. [11] งานวิจัยนี้นำเสนอแบบจำลองวินิจฉัย โควิด-19 จากภาพถ่ายเอกซเรย์ทรวงอกโดยใช้เครือข่ายน้ำหนักเบา (Lightweight Network) MobileNetV3 ที่ได้รับการปรับปรุงเพิ่มเติมด้วยโครงสร้าง Dense Block และ Layer สำหรับลดขนาดและจำนวนช่อง (Transition Layer) เพื่อลดจำนวนพารามิเตอร์ของแบบจำลอง นอกจากนี้ยังประยุกต์ใช้ loss แบบ label smoothing เพื่อแก้ปัญหาความเหมือนหรือคล้ายคลึงระหว่างข้อมูลแต่ละประเภทผลการทดลองพบว่ามีค่าความถูกต้องร้อยละ 98.71 และมีจำนวนพารามิเตอร์ 5.94 ล้านพารามิเตอร์ (ลดจำนวนพารามิเตอร์ได้สูงสุดถึง 5 เท่าเมื่อเทียบกับ Inception-V3 ที่ใช้ 24 ล้านพารามิเตอร์)

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.004

3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 เครื่องมือและซอฟต์แวร์ในการทดลอง

- GPU: Nvidia RTX 4070 SUPER (12GB)
- CPU: Intel Core i9-13900KS
- RAM: 32GB
- Operation System: Ubuntu 22.04 LTS
- Deep Learning Framework: Keras (TensorFlow)
- Programming Language: Python

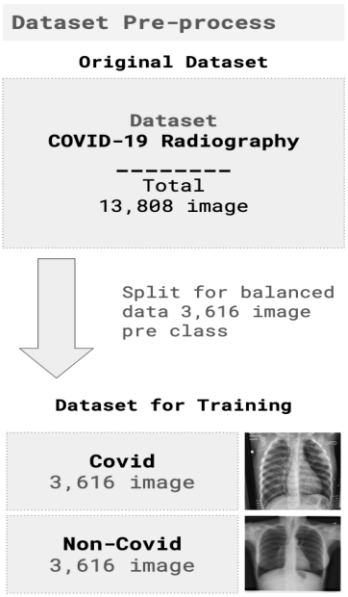
3.2 การเตรียมข้อมูลและจัดการชุดข้อมูล

3.2.1 ชุดข้อมูล

การทดลองได้นำชุดข้อมูล COVID-19 Radiography [12] มาใช้ในกระบวนการพัฒนาแบบจำลองซึ่งชุดข้อมูลประกอบไปด้วยภาพจาก CT Scan จำนวน 13,803 ภาพ (เฉพาะ 2 ประเภท มีเชื้อโควิด 3,616 ภาพและไม่มีเชื้อ 10,192 ภาพ) นำมาแบ่งเพื่อสร้างแบบจำลองโดยใช้จำนวนประเภทที่มีน้อยที่สุดเป็นตัวกำหนด คือมีเชื้อโควิด 3,616 ภาพ ไม่มีเชื้อโควิด 3,616 ภาพ (สุ่มคัดเลือกจาก 10,192 ภาพ) และในการทดลองได้ใช้ข้อมูลที่ทั้งสองกลุ่มข้อมูลที่เท่ากัน คือ 1,252 ภาพ ดังแสดงในรูปที่ 2 และภาพตัวอย่างชุดข้อมูลในรูปที่ 3

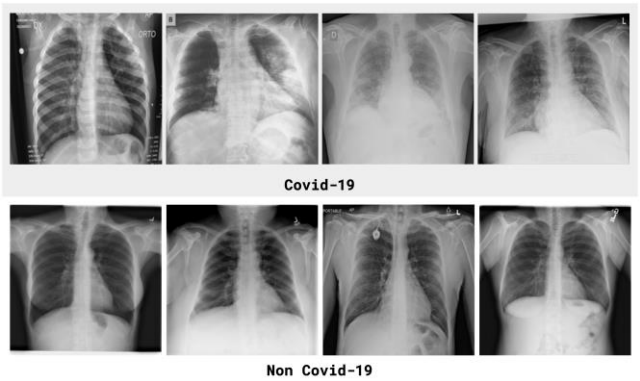
3.2.2 การเตรียมชุดข้อมูล

การแบ่งชุดข้อมูลสำหรับการทดลองแบ่งเป็น 70:20:10 ชุดข้อมูลสำหรับการเรียนรู้ (Training Set) 70% สำหรับชุดข้อมูลการประเมิน (Validation Set) 20% และชุดข้อมูลสำหรับการทดสอบ (Test Set) 10% และใช้เทคนิคการแบ่งข้อมูลด้วย K-Fold Cross Validation (K=5) [1] มาใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพแบบจำลองและเพื่อให้ข้อมูลในการพัฒนาแบบจำลองกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ช่วยให้การประเมินค่าความถูกต้อง (Accuracy) หรือค่าความผิดพลาด (Error) ของโมเดลมีความสอดคล้องกับข้อมูลทั้งหมด ไม่อิงกับ Train/Test ชุดเดียวและทำให้การประเมินจะมาจากค่าเฉลี่ยของแต่ละ Fold ลดโอกาสที่จะเกิดกรณีผลลัพธ์ผิดปกติจากการแบ่งข้อมูลแบบสุ่มครั้งเดียวดังแสดงในรูปที่ 4 รูปแบบการแบ่งข้อมูลด้วยเทคนิค K-Fold Cross Validation. (K = 5) และการแบ่งข้อมูลในการพัฒนาแบบจำลองในการวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 5

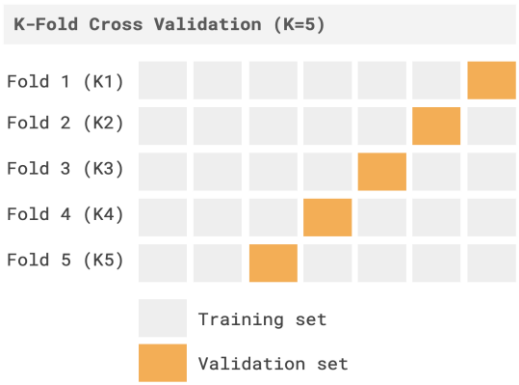


รูปที่ 2 การเตรียมชุดข้อมูลสำหรับการพัฒนาแบบจำลอง

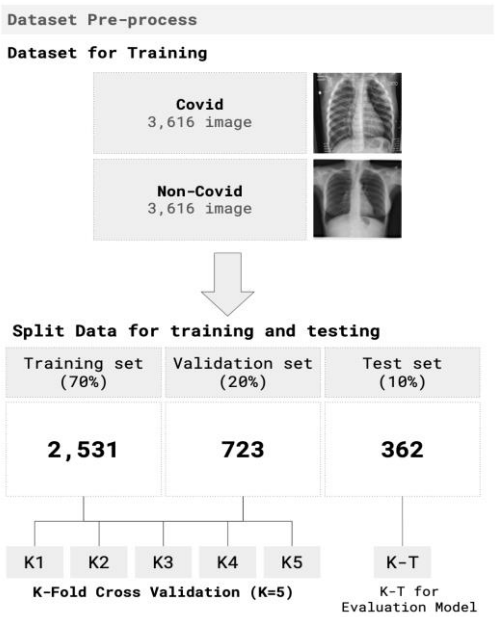
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.004



รูปที่ 3 ตัวอย่างชุดข้อมูล ภาพติดเชื้อโควิด 19 (บน) ภาพไม่ติดเชื้อโควิด 19 (ล่าง) [11]



รูปที่ 4 รูปแบบการแบ่งข้อมูลด้วยเทคนิค K-Fold Cross Validation. (K = 5)



รูปที่ 5 การแบ่งข้อมูลของชุดข้อมูลในการพัฒนาแบบจำลอง

3.3 การประเมินประสิทธิภาพแบบจำลอง

3.3.1 การวัดค่าความถูกต้อง (Accuracy)

การวัดประสิทธิภาพของการเรียนรู้แบบจำลองได้ใช้การวัดค่าความถูกต้อง (Accuracy) ความถูกต้องระหว่างสิ่งที่ทำนายกับสิ่งที่เกิดขึ้นจริงโดยมีสมการในการคำนวณดังนี้ [1] [13]

$$\text{Accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (1)$$

โดย TP คือค่าที่พยากรณ์ถูกต้องเชิงบวก
TN คือค่าที่พยากรณ์ถูกต้องเชิงลบ
FP คือค่าที่พยากรณ์ผิดพลาดเชิงบวก
FN คือค่าที่พยากรณ์ผิดพลาดเชิงลบ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.004

3.3.2 การวัดความสูญเสีย (Loss Function)

ฟังก์ชันที่ใช้ในการวัด "ความผิดพลาด" หรือ "ความแตกต่าง" ระหว่างค่าที่โมเดลทำนายได้กับค่าจริง ในการฝึกแบบจำลองทาง Machine Learning หรือ Deep Learning เน้นไปที่การลดค่า Loss Function ให้น้อยที่สุด เป็นการทำให้แบบจำลองมีความแม่นยำในการทำนายมากยิ่งขึ้น [1, 13]

3.4 พารามิเตอร์พื้นฐาน (Hyper-Parameters)

ในการทดลองได้กำหนดพารามิเตอร์พื้นฐานเพื่อให้สภาพแวดล้อมมีสภาวะที่เหมือนกันได้แก่

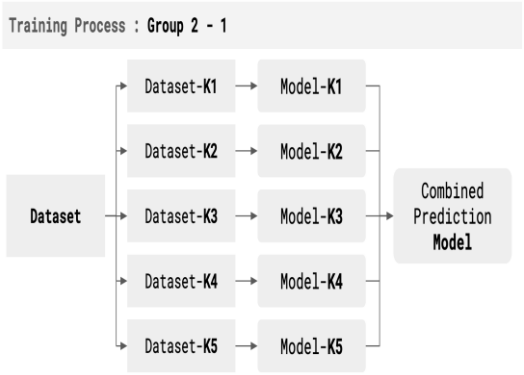
- Batch size 32
- Learning rate 0.001 (ค่าพื้นฐานของ Adam optimizer) [10]
- Epoch 15
- Optimizer Adam [13, 14]

3.5 การออกแบบการทดลอง

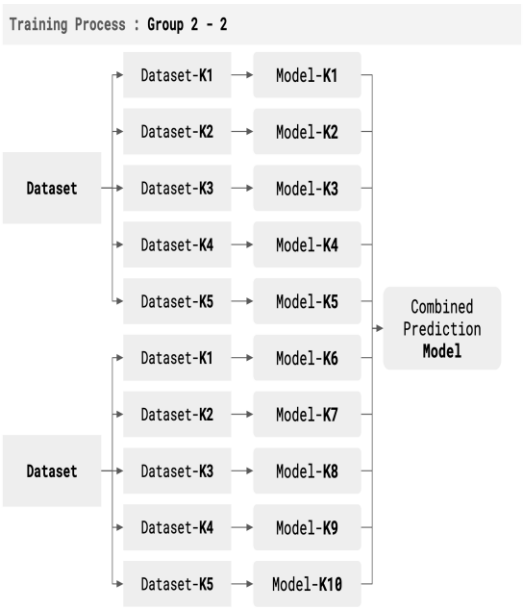
การทดลองแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม กลุ่มที่ 1 สร้างแบบจำลองพื้นฐานจาก keras 38 แบบจำลองที่ได้รับความนิยมดังแสดงในตารางที่ 1 กับชุดข้อมูล COVID-19 Radiography [12] และนำแบบลองที่ได้ค่าความถูกต้องมากที่สุด 3 ลำดับไปใช้ในการทดลองกลุ่มที่ 2 และ 3

กลุ่มที่ 2 ทดลองด้วยวิธีการเชื่อมต่อแบบจำลองโดยใช้เทคนิค Bagging (Bootstrap Aggregating) ร่วมกับชุดข้อมูล 5 ชุด ดังแสดงในรูปที่ 11 ขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองในการวิจัย แบ่งออกเป็น

- รูปแบบที่ 1 ทดลอง 1 แบบจำลอง กระบวนการทดลองดังแสดงในรูปที่ 6
- รูปแบบที่ 2 ทดลองจับคู่ 2 แบบจำลอง กระบวนการทดลองดังแสดงในรูปที่ 7
- รูปแบบที่ 3 ทดลองจับคู่ 3 แบบจำลอง กระบวนการทดลองดังแสดงในรูปที่ 8

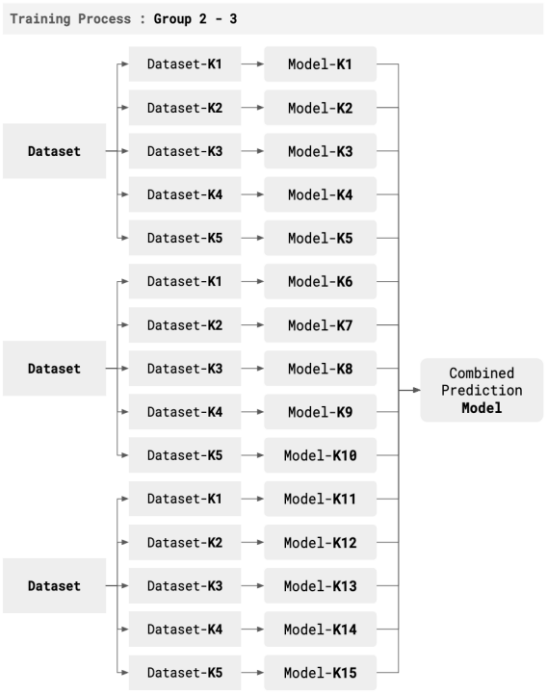


รูปที่ 6 การทดลองกลุ่มที่ 1



รูปที่ 7 การทดลองกลุ่มที่ 2 รูปแบบที่ 2

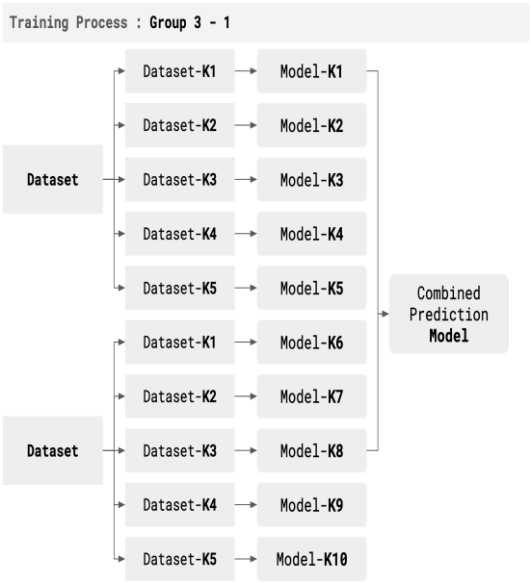
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.004



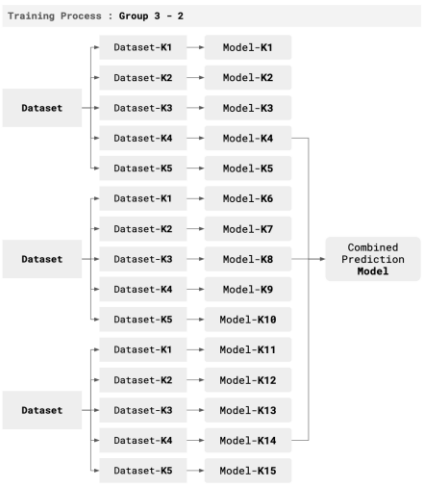
รูปที่ 8 การทดลองกลุ่มที่ 2 รูปแบบที่ 3

กลุ่มที่ 3 ทดลองในลักษณะเดียวกับกลุ่มการทดลองที่ 2 ทดลองด้วยวิธีการเชื่อมต่อแบบจำลองโดยใช้เทคนิค Bagging (Bootstrap Aggregating) และใช้แบบจำลองที่มีค่าความถูกต้องมากที่สุดในแต่ละแบบจำลองจับคู่การทดแบ่งออกเป็น

- รูปแบบที่ 1 ทดลองจับคู่ 2 แบบจำลอง กระบวนการทดลองดังแสดงในรูปที่ 9
- รูปแบบที่ 2 ทดลองจับคู่ 3 แบบจำลอง กระบวนการทดลองดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 9 การทดลองกลุ่มที่ 3 รูปแบบที่ 1

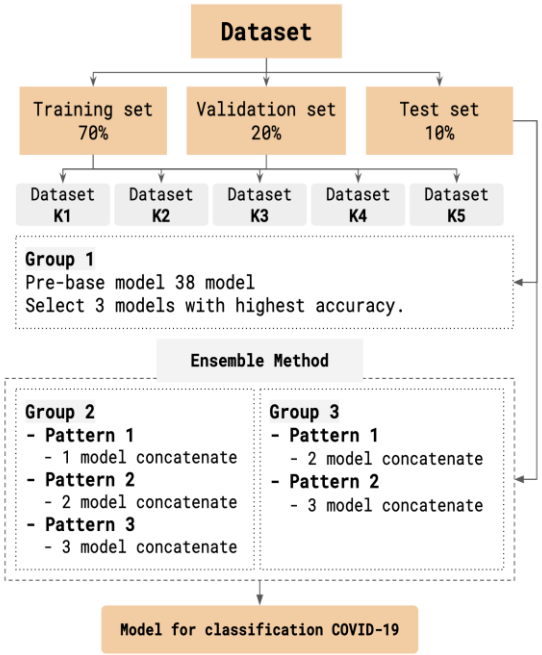


รูปที่ 10 การทดลองกลุ่มที่ 3 รูปแบบที่ 2

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.004

ตารางที่ 1 แบบจำลองที่ได้รับความนิยม 38 แบบจำลองจาก Keras

แบบจำลอง (Model)	ขนาด (MB)
VGG16	528
VGG19	549
MobileNet	16
Xception	88
ConvNeXtTiny	109.42
ResNet50V2	98
MobileNetV2	14
ResNet50	98
EfficientNetB0	29
EfficientNetV2B0	29
EfficientNetV2B1	34
ConvNeXtLarge	755.07
ConvNeXtXLarge	1310
ConvNeXtSmall	192.29
EfficientNetB1	31
ConvNeXtBase	338.58
EfficientNetB2	36
InceptionV3	92
EfficientNetV2B2	42
ResNet101V2	171
ResNet101	171
EfficientNetB3	48
EfficientNetV2B3	59
DenseNet121	33
EfficientNetB4	75
EfficientNetV2S	88
ResNet152V2	232
ResNet152	232
EfficientNetB5	118
DenseNet169	57
EfficientNetB6	166
NASNetMobile	23
DenseNet201	80
EfficientNetV2M	220
EfficientNetB7	256
InceptionResNetV2	215
NASNetLarge	343
EfficientNetV2L	479



รูปที่ 11 ขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองในการวิจัย

4. ผลการดำเนินการวิจัย

การทดลองแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม กลุ่มที่ 1 สร้างแบบจำลองพื้นฐานจากแบบจำลองที่ได้รับความนิยม 38 แบบจำลองพบว่าแบบจำลองที่มีค่าความถูกต้อง 3 อันดับมากที่สุด ได้แก่ VGG16, MobileNet, DenseNet121 และนำไปใช้ในกลุ่มการทดลองที่ 2 และกลุ่มการทดลองที่ 3 รวมทั้งได้นำเทคนิค K-Fold Cross Validation มาใช้ในการทดสอบแบบจำลองทั้ง 3 กลุ่มการทดลอง

- แบบจำลอง VGG16 มีค่าความถูกต้องร้อยละ 97.23 และค่าความสูญเสียร้อยละ 0.11
- แบบจำลอง MobileNet มีค่าความถูกต้องร้อยละ 96.96 และค่าความสูญเสียร้อยละ 0.34
- แบบจำลอง DenseNet121 มีค่าความถูกต้องร้อยละ 95.99 และค่าความสูญเสียร้อยละ 0.1

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.004

ตารางที่ 2 ผลการทดลองกลุ่มการทดลองที่ 1

ลำดับ (No.)	การทดลอง (Model)	ความถูกต้อง (Accuracy)
1	VGG16	97.23
2	MobileNet	96.96
3	DenseNet121	95.99

กลุ่มที่ 2 จับคู่การทดลองใช้แบบจำลอง 3 แบบจำลองจากกลุ่มการทดลองที่ 1 โดยใช้เทคนิค Bagging (Bootstrap Aggregating) ร่วมกับชุดข้อมูล 5 ชุด จำนวน 3 รูปแบบการทดลอง

- รูปแบบที่ 1 ทดลอง 1 แบบจำลองพบว่า
  - แบบจำลอง MobileNet มีค่าความถูกต้องร้อยละ 96.96
  - แบบจำลอง VGG16 มีค่าความถูกต้องร้อยละ 92.12
  - แบบจำลอง DenseNet121 มีค่าความถูกต้องร้อยละ 48.06
- รูปแบบที่ 2 จับคู่ 2 แบบจำลองพบว่า
  - แบบจำลอง VGG16 ร่วมกับ MobileNet มีค่าความถูกต้องร้อยละ 49.30
  - แบบจำลอง MobileNet ร่วมกับ DenseNet121 มีค่าความถูกต้องร้อยละ 49.03
  - แบบจำลอง VGG16 ร่วมกับ DenseNet121 มีค่าความถูกต้องร้อยละ 43.23
- รูปแบบที่ 3 จับคู่ 3 แบบจำลองพบว่า
  - แบบจำลอง VGG16 ร่วมกับ MobileNet และ DenseNet121 มีค่าความถูกต้องร้อยละ 52.20

ตารางที่ 3 ผลการทดลองกลุ่มการทดลองที่ 2

ลำดับ (No.)	การทดลอง (Model)	ความถูกต้อง (Accuracy)
1	MobileNet	96.96
2	VGG16	92.12
3	DenseNet121	48.06
4	VGG16 + MobileNet	49.30
5	MobileNet + DenseNet121	49.03
6	VGG16 + DenseNet121	43.23
7	VGG16 + MobileNet + DenseNet121	52.20

กลุ่มที่ 3 จับคู่การทดลองใช้แบบจำลอง 3 แบบจำลองจากกลุ่มการทดลองที่ 1 โดยใช้เทคนิค Bagging (Bootstrap Aggregating) และใช้แบบจำลองที่มีค่าความถูกต้องมากที่สุดในแต่ละรูปแบบจากกลุ่มการทดลองที่ 2 จำนวน 2 รูปแบบการทดลอง

- รูปแบบที่ 1 จับคู่ 2 แบบจำลองพบว่า
  - แบบจำลอง VGG16 ร่วมกับ MobileNet มีค่าความถูกต้องร้อยละ 49.30
  - แบบจำลอง VGG16 ร่วมกับ DenseNet121 มีค่าความถูกต้องร้อยละ 50.00
  - แบบจำลอง MobileNet ร่วมกับ DenseNet121 มีค่าความถูกต้องร้อยละ 99.30
- รูปแบบที่ 2 จับคู่ 3 แบบจำลองพบว่า
  - แบบจำลอง VGG16 ร่วมกับ MobileNet และ DenseNet121 มีค่าความถูกต้องร้อยละ 42.54

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.004

ตารางที่ 4 ผลการทดลองกลุ่มการทดลองที่ 3

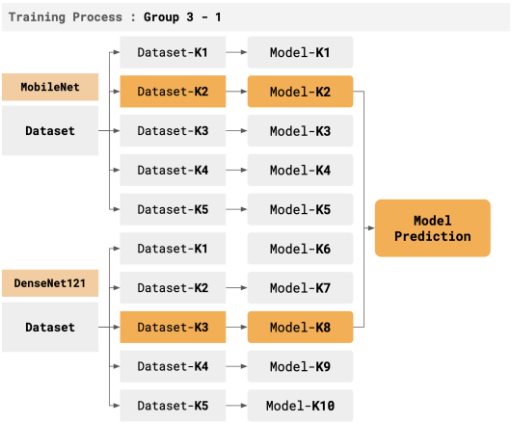
ลำดับ (No.)	การทดลอง (Model)	ความถูกต้อง (Accuracy)
1	MobileNet + DenseNet121	99.30
2	VGG16 + DenseNet121	50.00
3	VGG16 + MobileNet	49.86
4	VGG16 + MobileNet + DenseNet121	42.54

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองในตารางที่ 5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าจำนวนพารามิเตอร์และเวลาในการเรียนรู้ของแบบจำลองไม่มีความสัมพันธ์กันและแบบจำลองที่มีความซับซ้อนไม่สามารถให้ผลที่ดีตามจำนวนพารามิเตอร์ได้เช่นการทดลองที่ 11 ในตารางที่ 5 มีพารามิเตอร์ 10.36 ล้านตัว ให้ค่าความถูกต้องที่ดีที่สุดเทียบกับการทดลองที่ 10 มีพารมิเตอร์ 125.33 ล้านตัวและเมื่อเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการเรียนรู้ของแบบจำลองและจำนวนพารามิเตอร์แสดงให้เห็นว่ามีความสอดคล้องกันเมื่อมีจำนวนพารามิเตอร์ที่มากขึ้นเวลาที่ใช้ในการเรียนรู้ของแบบจำลองก็มากขึ้นตามไปด้วยเช่น การทดลองที่ 10 มีพารามิเตอร์มากที่สุด 125.53 ล้านตัว ใช้เวลามากที่สุด 24.20 นาทีในขณะที่การทดลองที่ 2 มีพารามิเตอร์น้อยที่สุด 3.28 ล้านตัว ใช้เวลาน้อยที่สุด 1.70 นาที และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างเวลาและค่าความถูกต้องไม่มีความสัมพันธ์กันกับแสดงให้เห็นการว่าเลือกแบบจำลองหรือโครงสร้างของแบบจำลองขึ้นหรือเทคนิคในการทดลองอยู่กับลักษณะของข้อมูลที่ใช้ในการเรียนรู้รวมทั้งทรัพยากรและเวลา

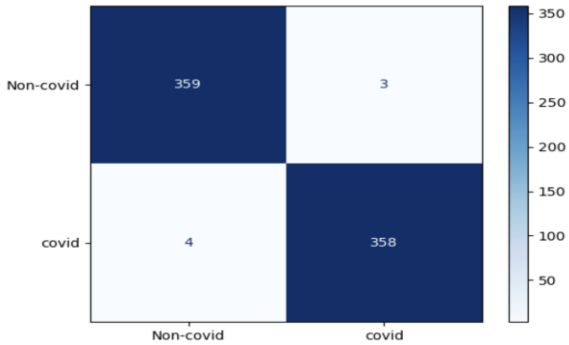
จากการทดลองทั้ง 3 กลุ่มการทดลองพบว่ากลุ่มการทดลองที่ 3 รูปแบบที่ 1 จับคู่ 2 แบบจำลองดังแสดงในรูปที่ 12 ได้แก่แบบจำลอง MobileNet [15] ร่วมกับ DenseNet121 [16] มีค่าความถูกต้องร้อยละ 99.30 และแสดง Confusion matrix ในการจำแนกในรูปที่ 13 ซึ่งแบบจำลองสามารถจำแนกภาพไม่ติดเชื้อโควิด 19 (Non-covid) ได้อย่างถูกต้องจำนวน 359 ภาพ (TN = 359) โดยมีข้อผิดพลาดในการจำแนกว่าติดเชื้อโควิด 19 (covid) เพียง 3 ภาพ (FP = 3) และแบบจำลองมีความสามารถในการจำแนกติดเชื้อโควิด 19 (covid) ได้อย่างถูกต้องจำนวน 358 ภาพ (TP = 358) มีข้อผิดพลาดในการจำแนกว่าไม่ติดเชื้อโควิด 19 (Non-covid) จำนวน 4 ภาพ (FN = 4)

เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองในแต่ละกลุ่มพบว่าแบบจำลองกลุ่มที่ 2 รูปแบบที่ 1 แบบจำลอง MobileNet และ VGG16 ให้ค่าความถูกต้องมากที่สุดมากกว่าร้อยละ 90.00 ซึ่งแตกต่างจากแบบจำลอง DenseNet121 ให้ค่าความถูกต้องไม่ถึงร้อยละ 50 แต่เมื่อนำแบบจำลอง MobileNet ร่วมกับแบบจำลอง DenseNet121 ในกลุ่มการทดลองที่ 3 รูปแบบที่ 1 พบว่าให้ค่าความถูกต้องเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการเลือกแบบจำลองร่วมกับชุดข้อมูลที่ให้ค่าความถูกต้องมากที่สุดดังแสดงรูปแบบการพัฒนาในรูปที่ 12 ซึ่งแตกต่างจากการทดลองกลุ่มที่ 2 ที่นำทุกแบบจำลองจากชุดข้อมูลทั้ง 5 ชุดข้อมูลการรวมกัน และได้แสดงผลการเปรียบเทียบค่าความถูกต้องในรูปที่ 14 โดยเฉลี่ยค่าความถูกต้องคือร้อยละ 61.14

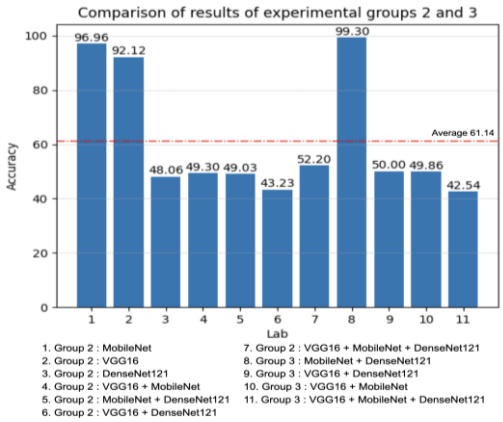
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.004



รูปที่ 12 รูปแบบการพัฒนาแบบจำลองที่มีค่าความถูกต้องมากที่สุด MobileNet ร่วมกับ DenseNet121 (กลุ่มการทดลองที่ 3 รูปแบบที่ 1)



รูปที่ 13 Confusion matrix แบบจำลองกลุ่มที่ 3 MobileNet + DenseNet121 ที่มีค่าความถูกต้องมากที่สุด



รูปที่ 14 กราฟแสดงผลลัพธ์ค่าความถูกต้องกลุ่มทดลองที่ 2 และกลุ่มทดลองที่ 3

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.004

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบผลการทดลองกลุ่มการทดลองที่ 1 - 3

ลำดับ (No.)	การทดลอง (Model)	ความถูกต้อง (Accuracy)	เวลา/นาที (Time)	พารามิเตอร์ (Parameter)
กลุ่มการทดลองที่ 1				
1	VGG16	97.23	02.55	14,739,777
2	MobileNet	96.96	01.70	3,279,041
3	DenseNet121	95.99	01.78	7,087,681
กลุ่มการทดลองที่ 2				
4	MobileNet	96.96	12.40	16,395,211
5	VGG16	92.12	03.23	73,698,891
6	DenseNet121	48.06	08.41	35,438,411
7	VGG16 + MobileNet	49.30	15.25	90,094,101
8	MobileNet + DenseNet121	49.03	20.41	51,833,621
9	VGG16 + DenseNet121	43.23	11.45	109,137,301
10	VGG16 + MobileNet + DenseNet121	52.20	24.20	125,532,511
กลุ่มการทดลองที่ 3				
11	MobileNet + DenseNet121	99.30	03.16	10,366,725
12	VGG16 + DenseNet121	50.00	04.19	21,827,461
13	VGG16 + MobileNet	49.86	02.22	18,018,821
14	VGG16 + MobileNet + DenseNet121	42.54	04.49	25,106,503

5. สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองเพื่อพัฒนาแบบจำลองสำหรับการจำแนกโควิด 19 จากภาพ CT Scan โดยใช้การเรียนรู้แบบรวมกลุ่มเทคนิคBagging (Bootstrap Aggregating) พบว่าแบบจำลอง MobileNet ร่วมกับ DenseNet121 ให้ค่าความถูกต้องมากที่สุดความถูกต้องร้อยละ 99.30 เหมาะกับบุคลากรทางการแพทย์ที่เกี่ยวข้องกับการตรวจหาโรคโควิด 19 จากภาพ CT Scan ช่วยให้สามารถวิเคราะห์และวินิจฉัยผู้ป่วยได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ลดความผิดพลาด มีความสะดวกรวดเร็วในการเข้ารับบริการของผู้ป่วย เพิ่มโอกาสการเข้ารักษาได้อย่างรวดเร็วมากยิ่งขึ้น

6. เอกสารอ้างอิง

[1] M.M. Hossain, Md.A.A. Walid, S.M.S. Galib, M.M. Azad, W. Rahman, AS.M. Shafi and M.M. Rahman, COVID-19 detection from chest CT images using optimized deep features and ensemble classification, Systems and Soft Computing, 2024, 6, 200077.

[2] M.A. Ganaie, M. Hu, A.K. Malik, K. Tanveer and P.N. Suganthan, Ensemble deep learning: A review, Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2022, 115, 105-151.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.004

[3] H.-C. Kim, S. Pang, H.-M. Je, D. Kim and S.-Y. Bang, Support vector machine ensemble with bagging, Pattern Recognition with Support Vector Machines, 2002, 397-408.

[4] M. LesBlanc and R. Tibshirani, Combining estimates in regression and classification, Journal of the American Statistical Association, 1996, 91(436), 1641-1650.

[3] L. Breiman, Bagging predictors, Machine learning, 1997, 24, 123-140.

[6] S. Chaurasia, A.K. Gupta, P.P. Tiwari, A. Smirti and M. Jangid, DSENetk: An efficient deep stacking ensemble approach for COVID-19 induced pneumonia prediction using radiograph images, SN Computer Science, 2025, 6, 68.

[7] G.N. Chandrika, R. Chowdhury, P. Kumar, K. Sangamithrai, E. Glory and M.D. Saranya, Ensemble learning based convolutional neural network – depth fire for detecting COVID-19 in chest X-Ray images, Journal of Electronics Electromedical Engineering, and Medical Informatics, 2024, 7(1), 47-55.

[8] T. Geroski, V. Rankovic, O. Pavic, L. Dasic, M. Petrovic, D. Milovanovic and N. Filipovic, Enhancing COVID-19 disease severity classification through advanced transfer learning techniques and optimal weight initialization schemes, Biomedical Signal Processing and Control, 2025, 100, Part C, 107103.

[9] S. Kumar and H. Kumar, Efficient-VGG16: A novel ensemble method for the classification of COVID-19 X-ray images in contrast to machine and transfer learning, Procedia Computer Science, 2024, 235, 1289-1299.

[10] S. Asif, M. Zhao, F. Tang and Y. Zhu, LWSE: a lightweight stacked ensemble model for accurate detection of multiple chest infectious diseases including COVID-19, Multimedia Tools and Applications, 2024, 83(8), 23967-24003.

[11] S. Wang, J. Ren and X. Guo, A high-accuracy lightweight network model for X-ray image diagnosis: A case study of COVID detection, PLoS ONE, 2024, 19(6), e0303049.

[12] https://www.kaggle.com/datasets/tawsifurr-ahman/covid19-radiography-database/. (Accessed on 10 January 2025)

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.004

[13] P. Chedsom and W. Kanarkard, Analysis of student engagement in online classroom using convolutional neural networks (CNN), ECTI Transaction on Application Research and Development, 2023, 3(3), 39-52. (in Thai)

[14] D.P. Kingma and J. Ba, Adam: A method for stochastic optimization, The 3rd International Conference for Learning Representations, Proceeding, 2015.

[15] A.G. Howard, M. Zhu, B. Chen, D. Kalenichenko, W. Wang, T. Weyand M. Andreetto and H. Adam, Mobilenets: Efficient convolutional neural networks for mobile vision applications, arXiv, 2017, 1704.04861.

[16] G. Huang, Z. Liu, L. Maaten and Q. Weinberger, Densely connected convolutional networks, IEEE conference on computer vision and pattern recognition, Proceedings, 2017, 4700-4708.

บทความวิจัย

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.005

การออกแบบและพัฒนาเครื่องมือสอบเทียบมาตรฐานสำหรับเครื่องวัดระนาบชนิดมีระดับน้ำ

วิศรุต คงสกุล[1] และ ฤภูวัลย์ จันทรสา[2*]

[1] ศูนย์สอบเทียบเครื่องมือวัดสำหรับอุตสาหกรรม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา
[2] ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา
[*] ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: ruephuwc@eng.buu.ac.th

วันที่รับบทความ: 9 มกราคม 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 6 มิถุนายน 2568; วันที่ตอบรับบทความ: 11 มิถุนายน 2568
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 19 สิงหาคม 2568

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาเครื่องมือมาตรฐานสำหรับใช้สอบเทียบเครื่องมือวัดระนาบชนิดมีระดับน้ำที่มีประสิทธิภาพในการใช้งานและใช้ขอรับการรับรองความสามารถห้องปฏิบัติการ ISO/IEC 17025 : 2017 ในขอบข่ายการสอบเทียบระดับน้ำได้ งานวิจัยเริ่มต้นจากการเก็บรวบรวมความต้องการการใช้งานเครื่องมือสอบเทียบฯ ของบุคลากรในห้องปฏิบัติการสอบเทียบจำนวน 30 คน โดยการสัมภาษณ์และการตอบแบบสอบถาม เทคนิคการกระจายหน้าที่เชิงคุณภาพ (QFD) ได้ถูกนำมาประยุกต์เพื่อถ่ายทอดความต้องการสู่ข้อกำหนดเชิงเทคนิคของเครื่องมือสอบเทียบฯ ขั้นตอนต่อมาได้ออกแบบแนวคิดทางเลือกของเครื่องมือสอบเทียบฯ จำนวน 3 แนวคิดและได้คัดเลือกแนวคิดที่ดีที่สุดด้วยเทคนิคการให้คะแนนแนวคิด (Concept Scoring) จากนั้นได้ปรับปรุงแนวคิดสุดท้ายตามคำแนะนำจากผู้เชี่ยวชาญด้านการสอบเทียบและด้านวิศวกรรม ก่อนนำมาสร้างเป็นเครื่องมือสอบเทียบต้นแบบ(Prototype) มีชื่อเรียกว่า Precision Bar การทดสอบเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างเครื่องมือสอบเทียบฯ เก่าที่เคยใช้งานอยู่กับเครื่องมือสอบเทียบฯ ที่พัฒนาขึ้นในการศึกษาครั้งนี้ ได้ผลดังนี้ (1) เวลาที่ใช้ในการสอบเทียบลดลงจากเดิม 120 นาที เป็น 52 นาที คิดเป็นลดลง 57%, (2) สามารถสอบเทียบระดับน้ำได้ตามมาตรฐาน JIS B 7510 : 1993 เหมือนกัน (3) น้ำหนักของเครื่องมือสอบเทียบฯ ลดลงจากเดิม 25 กิโลกรัม เป็น 2 กิโลกรัม (4) เครื่องมือสอบเทียบฯ สามารถปรับพื้นเอียงเล็กสุด 1 ช่องสเกล 0.02 มิลลิเมตร/เมตร ได้ และ (5) กำไรต่อการสอบเทียบระดับน้ำเพิ่มขึ้นจาก 200 บาทเป็น 600 บาท นอกจากนี้เครื่องมือสอบเทียบใหม่ยังมีความสามารถในการสอบเทียบได้ทัดเทียมกับเครื่องมือสอบเทียบมาตรฐานที่นำเข้าจากต่างประเทศและมีราคาถูกกว่าถึง 110,000 บาท หรือคิดเป็นราคาที่ลดลง 73%

คำสำคัญ: การสอบเทียบ; เครื่องวัดระนาบชนิดมีระดับน้ำ; เทคนิคการกระจายหน้าที่เชิงคุณภาพ; มาตรฐาน ISO/IEC 17025 : 2017

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.005

บทความวิจัย

Design and Development of Standard Calibrator for Horizontal Sprit Level

Wissarut Kongsagul[1] and Ruephuwan Chantrasa[2*]

[1] Calibration Center for Industry, Faculty of Engineering, Burapha University

[2] Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University

[*] Corresponding author, E-mail: ruephuwc@eng.buu.ac.th

Received: 9 January 2025; Revised: 6 June 2025; Accepted: 11 June 2025
Online Published: 19 August 2025

Abstract: The objective of this research is to design and develop a standard calibrator for a horizontal spirit level that is efficient and can be used to obtain the laboratory accreditation ISO/IEC17025: 2017 in the scope of spirit level calibration. The research began with collecting needs for using the calibrator of 30 people in the calibration laboratory by face-to-face interviews and questionnaires. Quality Function Deployment (QFD) was then applied to translate these needs into technical requirements of the calibrator. The next step was to generate 3 design concepts of the calibrator, and the most prominent one was then selected using the concept scoring technique. Subsequently, the selected design concept was finally revised based on recommendations from calibration and engineering experts before developing the prototype, which was called the Precision Bar. A comparative test of performance between the previously used calibrator and the one developed in this study showed the following results; (1) Calibration time has been reduced from 120 minutes to 52 minutes, (2) Spirit levels can be calibrated according to the same JIS B 7510: 1993 standard, (3)The weight of the calibrator has been reduced from 25 kg to only 2 kg, (4) The floor slope of the calibrator can be adjusted as small as 0.02 mm/m per one scale, and (5) Profit from calibration service increased from 200 baht to 600 baht. Moreover, the new calibrator also has the same calibration capability as the standard calibrator imported from abroad, and its cost was 110,000 baht lower, or 73% price reduction.

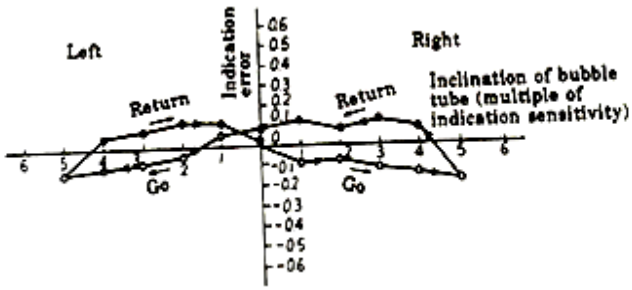
Keywords: Calibration; Horizontal spirit level; Quality Function Deployment (QFD); ISO/IEC 17025: 2017

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.005

1. บทนำ

การสอบเทียบเครื่องมือวัด (Calibration) เป็นกระบวนการตรวจสอบความถูกต้องและความแม่นยำของเครื่องมือวัด โดยการวัดเปรียบเทียบกับเครื่องมือมาตรฐานซึ่งมีความละเอียดถูกต้องสูงมากกว่า เพื่อให้เครื่องมือวัดที่จะนำไปใช้งานมีผลการวัดที่ถูกต้องแม่นยำ เกิดความเป็นธรรมเชิงพาณิชย์เป็นที่ยอมรับได้ในระดับสากล [1-3] และสอดคล้องกับหลักการมาตรวิทยาที่ระบุไว้ในพระราชบัญญัติพัฒนาระบบมาตรวิทยาแห่งชาติ พ.ศ. 2559 ดังนั้นการสอบเทียบเครื่องมือวัดจึงเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมการผลิตเป็นอย่างมาก เพราะจะช่วยให้เกิดการตรวจสอบและสร้างความมั่นใจได้ว่าผลการวัดที่ได้จากเครื่องมือวัดนั้นจะมีความถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือ เพราะการสอบเทียบเครื่องมือวัดนั้นจะส่งผลกระทบต่อทั้งประสิทธิภาพ ความปลอดภัย การบำรุงรักษา ความยั่งยืนของโรงงาน รวมไปถึงคุณภาพของสินค้าและผลิตภัณฑ์ได้โดยตรง [4] ศูนย์สอบเทียบเครื่องมือวัดสำหรับอุตสาหกรรมมหาวิทยาลัยบูรพา (CIB-BUU) เป็นหน่วยงานภาครัฐที่มีการให้บริการดังนี้ (1) สอบเทียบเครื่องมือวัดทั้งด้านมิติและด้านมวล (2) วัดชิ้นงานตามแบบ GD&T และ (3) จัดฝึกอบรมด้านการวัดและการสอบเทียบ [5] โดยมีลูกค้าที่เข้ามาใช้บริการหลัก คือโรงงานอุตสาหกรรมในเขตพื้นที่ภาคตะวันออกและระเบียงเศรษฐกิจพิเศษ EEC ในปัจจุบัน CIB-BUU เป็นห้องปฏิบัติการสอบเทียบที่ได้รับการรับรองความสามารถห้องปฏิบัติการสอบเทียบตามมาตรฐาน ISO/IEC 17025: 2017 [6] แล้วจำนวนทั้งสิ้น 29 เครื่องมือ และมีแผนงานที่จะขยายขีดความสามารถในการสอบเทียบให้เพิ่มขึ้น รวมไปถึงการสอบเทียบเครื่องวัดระนาบชนิดมีระดับน้ำ (Horizontal Spirit Level) หรือที่เรียกว่าระดับน้ำ อ้างอิงวิธีการสอบเทียบระดับน้ำตามมาตรฐาน JIS B 7510: 1993 [7] สามารถแสดงการเคลื่อนที่ของลูกน้ำภายในท่อ (Bubble Tube) ได้ตามกราฟรูปที่ 1 ในการสอบเทียบต้องวัดความเอียงของพื้นที่วางระดับน้ำทั้งทางขวามือและทางซ้ายมือโดยการเคลื่อนที่ของลูกน้ำในทิศทางไปและกลับทั้ง 2 ด้าน เครื่องมือสอบเทียบฯที่ CIB-BUU ใช้งานอยู่ในปัจจุบันเรียกว่าเครื่อง Level Tester แสดงดังรูปที่ 2 มีลักษณะการทำงานคล้ายกับเครื่อง Angle Generator คือต้องปรับระดับความเอียงของพื้นที่วางระดับน้ำให้ได้ระดับก่อนแล้วจึงปรับค่าความเอียงของพื้น อ่านค่าความเอียงของพื้นด้วย Digital Indicator จำนวน 3 เครื่อง วัดหน่วยเป็น mm ใช้โปรแกรม MS Excel คำนวณหาค่าความเอียงของพื้นในหน่วย mm/m คำนวณค่าความคลาดเคลื่อนที่ระดับน้ำอ่านได้กับความเอียงของพื้นจริง โดยเครื่อง Level Tester มีข้อจำกัดการใช้งานได้แก่ (1) ใช้เวลาในการสอบเทียบระดับน้ำนานส่งผลให้ต้นทุนดำเนินการสูง (2) วิธีปรับระดับความเอียงของพื้นทำได้ยากและมีโอกาสเกิดความคลาดเคลื่อนมาก และ (3) เครื่องมีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมากทำให้เคลื่อนย้ายลำบากเป็นต้น ดังนั้น CIB-BUU จึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาเครื่องมือมาตรฐานสำหรับสอบเทียบระดับน้ำขึ้นใหม่ ออกแบบให้มีประสิทธิภาพในการสอบเทียบที่สูงขึ้น เพื่อนำมาทดแทนเครื่องมือสอบเทียบฯ เครื่องเก่า และใช้สำหรับขอการรับรองความสามารถห้องปฏิบัติการตามมาตรฐาน ISO/IEC17025: 2017 ต่อไป

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.005



รูปที่ 1 การสอบเทียบระดับน้ำ JIS B 7510 [8]

รูปที่ 2 เครื่องมือสอบเทียบฯ Level Tester ที่ CIB-BUU ใช้งานในปัจจุบัน

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

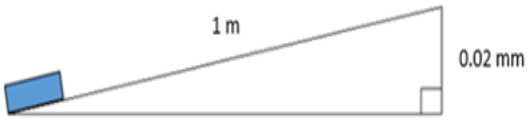
2.1 เครื่องมือวัดระนาบชนิดมีระดับน้ำ

เครื่องมือสำหรับวัดระดับความเอียงของพื้นชนิดมีฟองอากาศอยู่ในท่อหรือที่นิยมเรียกว่าระดับน้ำ เป็นเครื่องมือที่สามารถอ่านค่าความเอียงของพื้นได้ในหน่วยวัด mm/m นิยมใช้กันมากในโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากให้ผลการวัดที่มีความถูกต้องสูง มีความละเอียดของผลการวัดมากกว่าระดับน้ำที่ใช้งานทั่วไปที่แสดงผลการวัดเพียงบอกว่าพื้นเอียงไปทางขวาหรือเอียงไปทางซ้ายเท่านั้น โดยเครื่องวัดระดับน้ำชนิดนี้จะมีลักษณะดังรูปที่ 3

รูปที่ 3 เครื่องวัดระนาบชนิดมีระดับน้ำ

สำหรับวิธีการอ่านค่าความเอียงของพื้นด้วยระดับน้ำจะวัดจากจำนวนช่องที่ฟองอากาศลอยผ่าน โดยฟองอากาศจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่มีพื้นเอียงสูงกว่าอีกด้านเสมอ เช่น ถ้าระดับน้ำมีฟองอากาศลอยไปทางขวามือ 1 ช่องสเกล ถ้า 1 ช่องสเกลมีค่า 0.02 mm/m จะหมายความว่าพื้นทางด้านขวาของระดับน้ำจะเอียงสูงกว่าด้านซ้าย 0.02 mm ที่ปลายความยาว 1 m ดังรูปที่ 4

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.005



รูปที่ 4 พื้นด้านขวาเอียงขึ้น 0.02 mm/m

2.2 การพัฒนาผลิตภัณฑ์

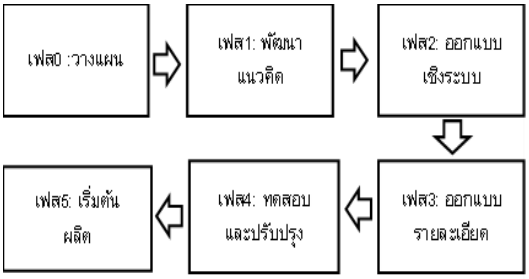
การพัฒนาผลิตภัณฑ์ (Product Development) เป็นกระบวนการวิเคราะห์อย่างเป็นระบบ เริ่มต้นด้วยการกำหนดโอกาสของโครงการพัฒนาผลิตภัณฑ์และสิ้นสุดลงที่การผลิตและการส่งมอบผลิตภัณฑ์ให้กับลูกค้า กระบวนการพัฒนาผลิตภัณฑ์ประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 6 ขั้นตอน ดังรูปที่ 5

เฟส 0: การวางแผน เป็นขั้นตอนเริ่มต้นก่อนที่โครงการพัฒนาผลิตภัณฑ์จะถูกอนุมัติและเริ่มดำเนินการ ขั้นตอนนี้จะเป็นการกำหนดโอกาส การประเมินสถานการณ์ด้านเทคโนโลยีและการตลาด

เฟส 1: การพัฒนาแนวคิด เป็นขั้นตอนของการเก็บรวบรวมข้อมูลความต้องการ การกำหนดคุณลักษณะเชิงเทคนิคของผลิตภัณฑ์ การสร้างแนวคิดและคัดเลือกแนวคิดที่เหมาะสม

เฟส 2: การออกแบบเชิงระบบ เป็นขั้นตอนในการกำหนดสถาปัตยกรรมผลิตภัณฑ์ การออกแบบระบบย่อย โดยแสดงในลักษณะของรูปทรงเรขาคณิตของผลิตภัณฑ์

เฟส 3: การออกแบบรายละเอียด เป็นการออกแบบในรายละเอียดทางเทคนิคของชิ้นส่วนต่างๆ ของผลิตภัณฑ์ นิยมแสดงในรูปของพิมพ์เขียวเพื่อใช้ในการผลิตและการจัดซื้อชิ้นส่วน



รูปที่ 5 กระบวนการพัฒนาผลิตภัณฑ์ [8]

เฟส 4: การทดสอบและการปรับปรุง เป็นขั้นตอนในการสร้างผลิตภัณฑ์ต้นแบบ (Prototype) เพื่อทดสอบรูปลักษณ์ และการใช้งานของผลิตภัณฑ์ว่าเป็นไปตามที่กำหนดไว้หรือไม่

เฟส 5: การเริ่มต้นผลิต เป็นขั้นตอนในการทดลองผลิตผลิตภัณฑ์ด้วยกระบวนการผลิตที่กำหนดขึ้นและการฝึกพนักงานก่อนที่จะทำการผลิตจริงในปริมาณมาก [8]

2.3 เทคนิคการกระจายหน้าที่เชิงคุณภาพ

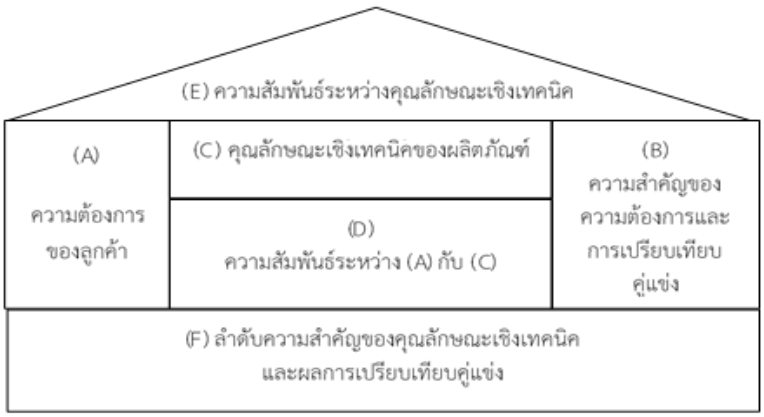
เทคนิคการกระจายหน้าที่เชิงคุณภาพ (Quality Function Deployment: QFD) เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการศึกษาความต้องการของลูกค้าและสามารถถ่ายทอดความต้องการให้เป็นคุณลักษณะเชิงเทคนิคของผลิตภัณฑ์และงานบริการได้ QFD สามารถดำเนินการด้วยการสร้างเป็นบ้านคุณภาพ (House of Quality) ซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญ 6 ส่วน ดังรูปที่ 6 การสร้างบ้านคุณภาพจะเริ่มต้นจากส่วน A ซึ่งเป็นการเก็บรวบรวมและกำหนดความต้องการของลูกค้า ส่วน B เป็นการประเมินความสำคัญและความพึงพอใจของลูกค้าตลอดจนความพึงพอใจของผลิตภัณฑ์คู่แข่งขัน เพื่อคำนวณค่าคะแนนดิบ ในส่วน C จะกำหนดคุณลักษณะ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.005

เชิงเทคนิคของผลิตภัณฑ์ที่สอดคล้องกับความต้องการลูกค้าแต่ละข้อ ในส่วน D เป็นการประเมินความสัมพันธ์ระหว่างส่วน A และ C ด้วยสเกล 0,1,3,9 ในส่วน E เป็นการประเมินความสัมพันธ์ระหว่างคุณลักษณะเชิงเทคนิค ว่ามีความสัมพันธ์ในเชิงบวกหรือเชิงลบต่อกัน ในส่วน F เป็นการคำนวณค่าคะแนนความสำคัญของคุณลักษณะเชิงเทคนิคหรือเรียกว่าค่าอิทธิพล โดยคุณลักษณะเชิงเทคนิคที่มีค่าอิทธิพลสูง หมายถึงมีอิทธิพลต่อความพึงพอใจของลูกค้ามาก ซึ่งในการออกแบบผลิตภัณฑ์ควรให้ความสำคัญต่อคุณลักษณะเชิงเทคนิคเหล่านี้ [10]

QFD นับเป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์และได้นำไปประยุกต์อย่างแพร่หลายในการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์และสิ่งประดิษฐ์เชิงวิศวกรรม ดังที่ปรากฏในงานวิจัยหลายฉบับ เช่น การประยุกต์ QFD แบบ 2 เมตริกซ์ในการออกแบบผลิตภัณฑ์ชุดโต๊ะเก้าอี้เรียน [11] การบูรณาการ QFD และการยศาสตร์ในการออกแบบเครื่องเลื่อยกระบอกไม้ไผ่ [12] การพัฒนาเครื่องย่อยเศษกิ่งไม้ไบไม้โดยประยุกต์กระบวนการออกแบบผลิตภัณฑ์ร่วมกับ QFD [13] สำหรับการประยุกต์ QFD ในการออกแบบเครื่องมือสอบเทียบนั้น วิศรุต [14] ได้ประยุกต์ QFD เป็นเครื่องมือหลักในงานวิจัยเพื่อออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์จับยึดสำหรับการสอบเทียบไขควงวัดแรงบิดตามมาตรฐาน ISO 6789: 2003 (E)

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นประยุกต์ทฤษฎีกระบวนการพัฒนาผลิตภัณฑ์ในการดำเนินการออกแบบและพัฒนาเครื่องมือสอบเทียบระดับน้ำ ตั้งแต่เฟสที่ 1 การพัฒนาแนวคิดจนถึงเฟสที่ 4 การทดสอบและการปรับปรุง เพื่อสร้างความมั่นใจว่ามีการดำเนินการที่เป็นระบบ ครบถ้วนและตรวจสอบได้ และประยุกต์หลักการ QFD เป็นแนวทางในการเก็บรวบรวมข้อมูลความต้องการและการกำหนดคุณลักษณะเชิงเทคนิคฯ สร้างความมั่นใจว่าเครื่องมือสอบเทียบฯ ที่พัฒนาขึ้นสามารถแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นจากการใช้งานเครื่องเดิม ตอบสนองต่อความต้องการและนำมาใช้ในการสอบเทียบระดับน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 6 บ้านคุณภาพ [9]

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.005

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินการวิจัยประกอบด้วย 6 ขั้นตอน มีรายละเอียดดังนี้

3.1 รวบรวมข้อมูลความต้องการเกี่ยวกับเครื่องมือสอบเทียบฯ

ขั้นตอนแรกของงานวิจัยเป็นการเก็บรวบรวมข้อมูลความต้องการและปัญหาของเครื่องมือสอบเทียบฯ ที่ CIB-BUU ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน โดยข้อมูลความต้องการที่รวบรวมได้จะถูกนำมาจัดกลุ่มเป็นความต้องการหลักด้วย Affinity Diagram ทำให้ได้เป็นความต้องการหลักของเครื่องมือสอบเทียบฯจำนวน 13 ข้อ

ความต้องการทั้ง 13 ข้อนี้ได้นำมาสร้างเป็นข้อคำถามในแบบสอบถามปลายปิดเพื่อสำรวจระดับความสำคัญและระดับความพึงพอใจ ด้วยระดับคะแนน 1-5 ตาม Likert สเกล โดยกำหนดกลุ่มตัวอย่างเป็นบุคลากรผู้ปฏิบัติงานและมีประสบการณ์ในการสอบเทียบระดับน้ำจำนวน 30 คน ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 กลุ่มตัวอย่างในการสำรวจระดับความสำคัญของความต้องการ

หน่วยงาน	จำนวน (คน)
สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ	5
ห้องปฏิบัติการสอบเทียบได้การรับรอง 17025	10
ห้องปฏิบัติการสอบเทียบไม่ได้การรับรอง 17025	10
บริษัทขายเครื่องมือวัด	5
รวม	30

โดยการสำรวจนี้ได้ใช้รูปแบบเป็นแบบสอบถาม Online ด้วย Google Form พร้อมทั้งมีการสัมภาษณ์เพิ่มเติมประกอบด้วย ผลการสำรวจระดับความสำคัญของความต้องการเรียงลำดับคะแนนจากมากไปน้อยดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการสำรวจความต้องการของเครื่องมือมาตรฐานฯ

ลำดับ	ความต้องการ	ความสำคัญ
1	สอบเทียบระดับน้ำได้ทั้ง 2 ฝั่ง ตามมาตรฐาน JIS B 7510: 1993	4.95
2	สามารถปรับความละเอียดเล็กสุด 1 ช่องสเกล 0.02 mm/m ได้	4.80
3	ใช้เวลาในการสอบเทียบระดับน้ำไม่นาน	4.76
4	เครื่องมือมาตรฐานฯมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา เคลื่อนย้ายสะดวก	4.75
5	ค่าใช้จ่ายในการนำเครื่องมือมาตรฐานฯไปสอบเทียบไม่สูง	4.60
6	เครื่องมือมาตรฐานฯมีราคาถูก	4.51
7	มีค่าความไม่แน่นอนในการวัดต่ำ	4.40
8	แยกเฉพาะเครื่องมือวัดความสูงไปสอบเทียบ ไม่ต้องส่งทั้งเครื่อง	4.25
9	สามารถแสดงหน่วยวัด mm/m ขณะสอบเทียบได้	4.22
10	ทำจากวัสดุที่แข็งแรง ทนทาน บำรุงรักษาง่าย	4.20
11	ปรับพื้นเอียงง่าย ไม่เกิดความเมื่อยล้าขณะสอบเทียบ	4.15
12	มีไฟส่องสว่างช่วยในการอ่านขีดสเกล	3.90
13	ลดข้อผิดพลาดในการถ่ายโอนข้อมูลเพื่อนำไปออกใบ Certificate	3.85

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.005

จากตารางที่ 2 ความต้องการที่ได้คะแนนความสำคัญสูงสุด 3 อันดับแรกที่เครื่องมือมาตรฐานจะต้องทำให้ได้คือ (1) ต้องสามารถสอบเทียบระดับน้ำได้ทั้ง 2 ฝั่งตามมาตรฐาน JIS B 7510: 1993 คือลูกน้ำจะต้องลอยได้ทั้งทางด้านขวามือและทางด้านซ้ายมือโดยการวางระดับน้ำไว้ในตำแหน่งเดิม ไม่ต้องหมุนระดับน้ำ 180° แล้วมาเสียเวลาในการเซตระดับน้ำใหม่ (2) สามารถปรับความละเอียดเล็กสุด 1 ช่องสเกล 0.02 mm/m ได้ เพื่อให้มีขีดความสามารถในการสอบเทียบระดับน้ำให้ครอบคลุมระดับน้ำที่มีความละเอียดสูงได้ (3) ใช้เวลาในการสอบเทียบระดับน้ำไม่นาน ควรจะใช้ตัวปรับความสูงที่สามารถปรับละเอียดได้ง่ายจะช่วยลดเวลา และลดต้นทุนการดำเนินงานสอบเทียบของห้องปฏิบัติการลงได้

3.2 ประยุกต์ QFD เพื่อกำหนดคุณลักษณะเชิงเทคนิคของเครื่องมือสอบเทียบฯ

ขั้นตอนนี้เป็นการประยุกต์เทคนิค QFD เพื่อกำหนดและจัดลำดับความสำคัญของคุณลักษณะเชิงเทคนิค เพื่อจะนำไปเป็นแนวทางในการออกแบบเครื่องมือมาตรฐานการสอบเทียบระดับน้ำต่อไป การประยุกต์ QFD จะแสดงในรูปของบ้านคุณภาพ (House of Quality) ดังรูปที่ 7 ในส่วน A ของบ้านคุณภาพแสดงความต้องการ 13 ข้อ ส่วน B ประกอบด้วย B1 และ B2 เป็นคะแนนความสำคัญและความพึงพอใจซึ่งได้มาจากการสำรวจความต้องการ B3 เป็นคะแนนจุดมุ่งหมายกำหนดโดย CIB-BUU ซึ่งจะมีค่าอย่างน้อยเท่ากับความพึงพอใจหรือสูงกว่าเพื่อเป็นแรงบันดาลใจที่จะให้บรรลุค่าเป้าหมายนี้ B4 เป็นอัตราส่วนการปรับปรุง ซึ่งเกิดจากการคำนวณสัดส่วนของ B3:B2 สำหรับ B5 เป็นค่าจุดขายซึ่งกำหนดโดย BIE-BUU B6 เป็นการคำนวณคะแนนดิบ มีการคำนวณแสดงดังสมการที่ (1)

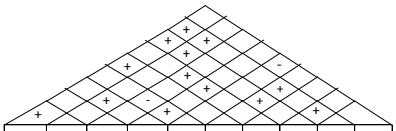
$$B6 = B1 \times B4 \times B5 \quad (1)$$

ส่วน C ของบ้านคุณภาพแสดงถึงคุณลักษณะเชิงเทคนิคของเครื่องมือสอบเทียบฯ และค่าเป้าหมาย โดยที่ค่าเป้าหมายนี้กำหนดขึ้นจากการเทียบเคียง (Benchmarking) ข้อมูลการปฏิบัติงานของห้องปฏิบัติการสอบเทียบอื่น แล้วพิจารณากำหนดเป็นค่าเป้าหมายที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบเครื่องมือสอบเทียบฯ ที่จะพัฒนาขึ้นใช้งานที่ CIB-BUU ผลของบ้านคุณภาพได้คุณลักษณะเชิงเทคนิคของเครื่องมือสอบเทียบฯ จำนวน 10 ข้อ เรียงลำดับตามคะแนนค่าน้ำหนักได้ดังตารางที่ 3 โดยคุณลักษณะเชิงเทคนิคที่มีคะแนนค่าน้ำหนักสูงสุด ได้แก่ เวลาที่ใช้ในการสอบเทียบไม่เกิน 60 นาที ลำดับที่ 2 ได้แก่ สอบเทียบได้ตามมาตรฐาน JIS B 7510 : 1993 และลำดับที่ 3 ได้แก่ น้ำหนักของเครื่องมือสอบเทียบฯ ไม่เกิน 5 กิโลกรัม

ตารางที่ 3 ลำดับความสำคัญและค่าเป้าหมายของคุณลักษณะเชิงเทคนิคเครื่องมือสอบเทียบฯ

ลำดับ	คุณลักษณะเชิงเทคนิค	ค่าเป้าหมาย
1	เวลาที่ใช้ในการสอบเทียบ	ไม่เกิน 60 นาที
2	สอบเทียบได้ตามมาตรฐาน JIS B 7510 : 1993	ทำได้ (Yes)
3	น้ำหนักของเครื่องมือมาตรฐาน	ไม่เกิน 5 kg
4	กำไรต่อการสอบเทียบระดับน้ำ 1 เครื่อง	มากกว่า 500 บาท
5	ราคาเครื่องมือมาตรฐาน	ไม่เกิน 50,000 บาท
6	ใช้วัสดุที่แข็งแรงไม่เกิดสนิม	ทำได้ (Yes)
7	แยกเฉพาะตัวสร้างความสูงไปสอบเทียบได้	ทำได้ (Yes)
8	ปรับพื้นเอียงเล็กสุด 1 ช่องสเกล	ทำได้ (Yes)
9	ค่าความไม่แน่นอนในการวัด	น้อยกว่า 0.0030 mm/m
10	แสดงหน่วยวัด mm/m	ทำได้ (Yes)

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.005



			C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10								
ทิศทางการพัฒนา			O	↓	↓	↑	↓	↓	O	O	O	O								
ค่าเป้าหมาย			ได้ (yes)	≤ 60 นาที	≤ 5 กิโลกรัม	≥ 500 บาท	≤ 50,000 บาท	< 0.0030 mm/m	ได้ (yes)	ได้ (yes)	ได้ (yes)	ได้ (yes)								
		คุณลักษณะเชิงเทคนิค	สอบเทียบได้ตามมาตรฐาน JIS B 7510 : 1993	เวลาที่ใช้ในการตอบสนองระดับน้ำ	น้ำหนักของเครื่องมือมาตรฐาน	ค่าใช้จ่ายในการสอบเทียบระดับน้ำ 1 เครื่อง	ราคาเครื่องมือมาตรฐาน	ค่าความไม่แน่นอนในการวัด	แยกเฉพาะเครื่องวัดความสูงไปสอบเทียบได้	แสดงหน่วยวัด mm/m ขณะสอบเทียบได้	ปรับพื้นเยื้องศูนย์แรง ไม่เกิดเสียน	ใช้วัสดุที่แข็งแรง ไม่เกิดสนิม	คะแนนความสำคัญ	คะแนนความพึงพอใจ	จุดปุ่มหมาย	อัตราส่วนการปรับปรุง	จุดสนใจ	คะแนนรวม	คะแนนผลิตภัณฑ์ปกติ	อันดับที่
ลำดับ	ความต้องการ	Imp.	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
1	สอบเทียบระดับน้ำได้ทั้ง 2 ผิ้ง ตาม JIS B 7510 : 1993	4.95	9										4.95	4.5	4.9	1.09	1.5	8.09	9.43	3
2	สามารถปรับความละเอียดเล็กสุด 1 ช่องสเกล 0.02 mm/m ได้	4.80	3	3							3		4.80	4.5	4.8	1.07	1.5	7.68	8.96	6
3	ใช้เวลาในการสอบเทียบระดับน้ำไม่นาน	4.76		9									4.78	4.1	4.8	1.17	1.5	8.39	9.79	2
4	เครื่องมือมาตรฐานฯมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา เคลื่อนย้ายสะดวก	4.75			9				3			3	4.75	3.5	4.6	1.31	1.5	9.36	10.93	1
5	ค่าใช้จ่ายในการนำเครื่องมือมาตรฐานฯไปสอบเทียบไม่สูง	4.60				9							4.60	4.0	4.6	1.15	1.5	7.94	9.26	4
6	เครื่องมือมาตรฐานฯมีราคาถูก	4.51					9						4.51	3.5	4	1.14	1.5	7.73	9.02	5
7	มีค่าความไม่แน่นอนในการวัดต่ำ	4.40						9					4.40	4.5	4.5	1.00	1.2	5.28	6.16	8
8	แยกเฉพาะเครื่องมือวัดความสูงไปสอบเทียบ ไม่ต้องส่งทั้งเครื่อง	4.25				3			9				4.25	4.2	4.3	1.02	1.2	5.22	6.09	9
9	สามารถแสดงหน่วยวัด mm/m ขณะสอบเทียบได้	4.22								9			4.22	4.5	4.5	1.00	1.2	5.06	5.91	12
10	ทำจากวัสดุที่แข็งแรง ทนทาน บำรุงรักษาง่าย	4.20										9	4.20	4.5	4.5	1.00	1.5	6.30	7.35	7
11	ปรับพื้นเยื้องง่าย ไม่เกิดความเมื่อยล้าขณะสอบเทียบ	4.15			3						9		4.15	4.0	4.1	1.03	1.2	5.10	5.96	11
12	มีไฟส่องสว่างช่วยในการอ่านขีดสเกล	3.90		3			3						3.90	3.8	4.0	1.05	1.2	4.93	6.08	10
13	ลดข้อผิดพลาดในการถ่ายโอนข้อมูลเพื่อนำไปออกใบ Certificate	3.85	3					3		3			3.85	4.0	4.0	1.00	1.2	4.62	5.39	13
ค่าน้ำหนักคุณลักษณะเชิงเทคนิค			127.95	133.26	116.20	101.60	99.41	71.62	87.61	69.35	80.48	98.93								
ค่าน้ำหนักคุณลักษณะเชิงเทคนิคปกติ			13.0	13.5	11.8	10.3	10.1	7.3	8.9	7.0	8.2	10.0								
ลำดับความสำคัญ			2	1	3	4	5	9	7	10	8	6								

รูปที่ 7 บ้านคุณภาพของเครื่องมือสอบเทียบมาตรฐานสำหรับเครื่องวัดระนาบชนิดมีระดับน้ำ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.005

3.3 การออกแบบและคัดเลือกแนวคิดของเครื่องมือสอบเทียบฯ

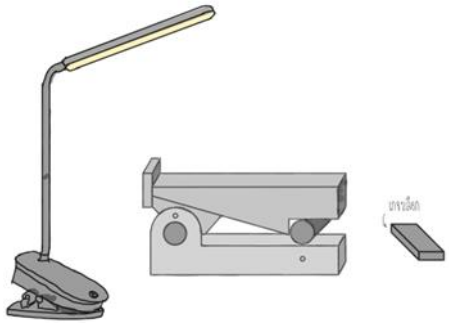
ขั้นตอนนี้เป็นการออกแบบแนวคิดทางเลือก (Concept Design) ของเครื่องมือสอบเทียบฯ โดยเริ่มจากการพิจารณาคุณลักษณะเชิงเทคนิคและค่าเป้าหมาย 10 ข้อ ที่ได้จากบ้านคุณภาพ จัดให้เป็นองค์ประกอบหลักทางกายภาพของเครื่องมือสอบเทียบฯ และกำหนดวิธีการที่จะนำมาใช้สำหรับแต่ละองค์ประกอบหลัก ตัวอย่างเช่น คุณลักษณะเชิงเทคนิค 3 ข้อ ได้แก่ (1) เวลาที่ใช้ในการสอบเทียบ (2) สอบเทียบได้ตามมาตรฐาน JIS B 7510 : 1993 (3) ปรับพื้นเอียงเล็กสุด 1 ช่องสเกล พิจารณาจัดได้เป็นองค์ประกอบหลัก คือ วิธีการสร้างพื้นเอียง และกำหนดวิธีการ ไว้ 3 ข้อ ได้แก่ (1) ใช้ Gauge Block (2) ใช้ Digital Micrometer Head (3) ใช้เกลียวละเอียดปรับระดับ เป็นต้น ผลการดำเนินการได้องค์ประกอบหลัก 4 ข้อ ได้แก่ (1) วิธีการสร้างพื้นเอียง (2) ชนิดเครื่องมือที่ส่งไปสอบเทียบ (3) วัสดุที่ใช้ทำตัวเครื่องฯ (4) วิธีการอ่านค่าหน่วยวัด แสดงดังตารางที่ 4

การกำหนดแนวคิดทางเลือกของเครื่องมือสอบเทียบฯ ได้ประยุกต์ใช้เทคนิค Concept Combination Table โดยการจับคู่ระหว่างวิธีการของแต่ละองค์ประกอบหลักให้เกิดเป็นแนวคิดทางเลือกแต่ละแบบขึ้น โดยจะพิจารณาจากความเป็นไปได้และความเหมาะสมในทางปฏิบัติและให้เกิดแนวคิดที่แตกต่างกัน งานวิจัยได้แนวคิดทางเลือกของเครื่องมือสอบเทียบฯ จำนวน 3 แบบ รายละเอียดดังตารางที่ 4 ภาพร่างแนวคิดทั้ง 3 แบบ ดังรูปที่ 8-10

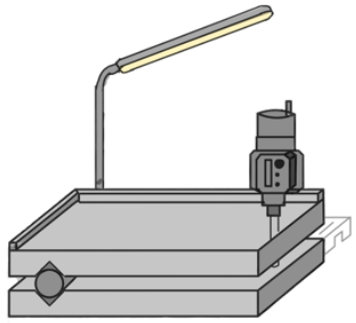
ตารางที่ 4 องค์ประกอบหลักและแนวคิดของเครื่องมือสอบเทียบฯ

แนวคิดที่	วิธีการสร้างพื้นเอียง	ชนิดเครื่องมือฯที่ส่งไปสอบเทียบ	วัสดุที่ใช้ทำตัวเครื่องฯ	วิธีการอ่านค่าหน่วยวัด mm/m
1	ใช้ Gauge Block	Gauge Block	ทองเหลือง	มีค่าคงที่ตามขนาดของ Gauge Block
2	ใช้ Digital Micrometer Head	Digital Micrometer Head	สแตนเลส สตีล	อ่านค่าจาก Excel โดยใช้สูตรคำนวณ
3	ใช้เกลียวละเอียดปรับระดับ	Electronic Inclinometer	อลูมิเนียม	อ่านค่าจากเครื่องมือมาตรฐาน

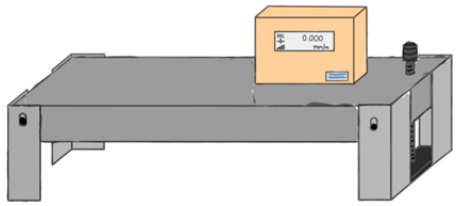
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.005



รูปที่ 8 ภาพร่างแนวคิดเครื่องมือฯ แบบที่ 1



รูปที่ 9 ภาพร่างแนวคิดเครื่องมือฯ แบบที่ 2



รูปที่ 10 ภาพร่างแนวคิดเครื่องมือฯ แบบที่ 3

แนวคิดทางเลือกทั้ง 3 แบบจะถูกประเมินคัดเลือกแนวคิดที่ดีที่สุด โดยใช้วิธีการให้คะแนนแนวคิด (Concept Scoring) ด้วยการกำหนดปัจจัยในการคัดเลือกจากความต้องการเครื่องมือฯ ทั้ง 13 ข้อ แสดงดังตารางที่ 2 และใช้ค่าน้ำหนัก (Weight) จากคะแนนดิบปกติตามผลที่คำนวณได้จากบ้านคุณภาพ ประเมินโดยบุคลากรของ CIB-BUU ใช้ระดับคะแนน 1-5 Likert สเกล

ผลการประเมินคัดเลือกแนวคิดเรียงลำดับตามคะแนนมากไปน้อย ได้แก่ แนวคิดที่ 2 ได้ 437.11 คะแนน, แนวคิดที่ 1 ได้ 429.07 คะแนน, และแนวคิดที่ 3 ได้ 425.04 คะแนน งานวิจัยนี้จึงเลือกแนวคิดที่ 2 เป็นแนวคิดสำหรับเครื่องมือสอบเทียบฯ ซึ่งคุณสมบัติและความสามารถที่สำคัญ ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 คุณสมบัติและความสามารถของเครื่องมือสอบเทียบฯแนวคิดที่ 2

คุณสมบัติ	ความสามารถ
สอบเทียบได้ตาม JIS B 7510: 1993	ทำได้
วิธีปรับความเอียงของพื้น	ใช้ Digital Micrometer Head
เครื่องมือมาตรฐานที่ใช้อ่านค่าความสูง/ส่งไปสอบเทียบ	Digital Micrometer Head / 0.001 mm
วัสดุที่ใช้	สแตนเลส สตีล
วิธีอ่านค่าหน่วย mm/m	บันทึกผลการวัดและใช้ Excel คำนวน
ขนาด	300 mm x 150 mm
ราคาประเมิน	50,000 บาท
วิธีสอบเทียบระดับน้ำ	อ่านค่าจากระดับน้ำและจดบันทึกค่าความเอียงของพื้นจากเครื่องมือมาตรฐาน

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.005

แนวคิดที่ 2 นี้ได้รับคำแนะนำสำหรับการปรับปรุงโดยผู้เชี่ยวชาญด้านการสอบเทียบ และผู้เชี่ยวชาญด้านวิศวกรรม โดยผู้เชี่ยวชาญด้านการสอบเทียบได้แนะนำให้ปรับปรุงเครื่องมือมาตรฐานฯ ให้มีลักษณะคล้ายกับ Sine Bar โดยการเซตค่าเริ่มต้น (Reference Line) ที่โต๊ะระดับ Surface Plate จะสามารถทำให้เครื่องมือมาตรฐานมีขนาดเล็กลง และไม่จำเป็นต้องมีฐานรองได้ และผู้เชี่ยวชาญด้านวิศวกรรมได้แนะนำให้ใช้วัสดุที่เป็นอลูมิเนียมเกรด 1100 ที่มีคุณสมบัติทางเคมีที่โดดเด่นคือทนต่อการกัดกร่อน และมีความเหนียวดีเยี่ยมสามารถตัดขึ้นรูปได้ง่าย, มีน้ำหนักเบา และยังรับน้ำหนักของระดับน้ำได้โดยที่ฐานวางไม่เกิดการแอ่นตัว

4. ผลการวิจัย

4.1 การสร้างต้นแบบเครื่องมือมาตรฐานฯ

4.1.1 การออกแบบและสร้าง

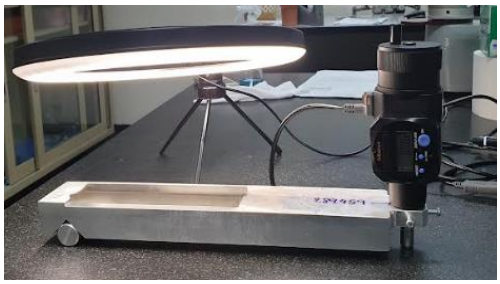
ทำการออกแบบเครื่องมือมาตรฐานสำหรับสอบเทียบระดับน้ำ เครื่องใหม่เรียกว่า Precision Bar ประกอบด้วย

1. Precision Bar
2. Digital Micrometer Head
3. สายส่งสัญญานผลการวัดไปคอมพิวเตอร์
4. ไฟส่งสว่าง

ประกอบรวมกันตามรูปที่ 11 โดยการปฏิบัติงานต้องวางบนโต๊ะหิน (Surface Plate) และใช้โต๊ะหินในการเซตค่าอ้างอิง(Reference Line) ของระดับน้ำก่อนดำเนินการสอบเทียบ

4.1.2 การวัดขนาดและทดสอบการแอ่นตัว

ทำการวัดขนาด Precision Bar ด้วยเครื่อง CMM เพื่อตรวจสอบขนาดตามพิกัดเผื่อที่กำหนด เพราะถ้า Precision Bar มีขนาดเกินค่า Tolerance จะส่งผลกระทบต่อความเอียงของพื้นที่วางระดับน้ำ และจะส่งผลกระทบต่อค่าความถูกต้องของผลการสอบเทียบได้ สามารถแสดงลักษณะการวัด Precision Bar ด้วยเครื่อง CMM ได้ดังรูปที่ 12 แสดงค่าพิกัดเผื่อและผลการวัดของ Precision Bar ที่ได้จากเครื่อง CMM ดังตารางที่ 6



รูปที่ 11 เครื่องมือมาตรฐาน Precision Bar

รูปที่ 12 การวัด Precision Bar ด้วยเครื่อง CMM

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.005

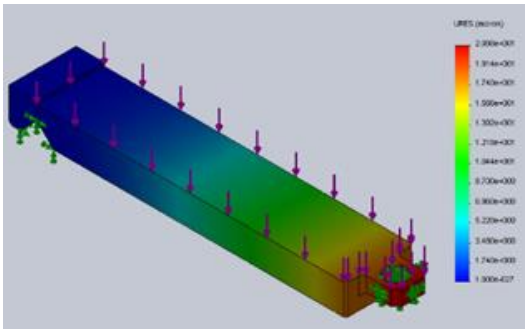
ตารางที่ 6 ผลการวัด Precision Bar

ตำแหน่งที่วัด	พิกัดเผื่อ	ผลการวัด	เกณฑ์
ความเรียบของฐาน	02 ± 0.005 mm	0.016 mm	ผ่าน
ความยาวของฐาน	290 ± 10 mm	284.459 mm	ผ่าน

ทำการตรวจสอบการแอ่นตัวของ Precision Bar โดยวิธีการจำลอง(Simulation) ด้วยโปรแกรม Solidworks ได้ผลการทดสอบการแอ่นตัวสูงสุด 0.0014 mm เมื่อโหลดน้ำหนักขนาด 5 kg ไว้บน Precision Bar โดยค่าการแอ่นตัวสูงสุดที่ยอมรับได้ไม่ควรเกิน 0.002 mm แสดงภาพการ Simulation ได้ดังรูปที่ 13 สังเกตได้ว่าจุดที่รับโหลดมากที่สุดคือบริเวณที่จับยึด Digital Micrometer Head จึงจำเป็นต้องใช้น็อตมากถึง 3 ตัวเพื่อช่วยกระจายแรง และ Precision Bar ไม่ควรยาวเกิน 290 mm ถ้าใช้วัสดุที่เป็นอลูมิเนียมเกรด 1100 เพราะถ้ายาวกว่านี้จะทำให้ Precision Bar มีการแอ่นตัวมากกว่า 0.002 mm

4.2 เปรียบเทียบผลการวัดระหว่างห้องปฏิบัติการ

ทำการประกอบ Precision Bar เข้ากับ Digital Micrometer Head วางบนโต๊ะระดับภายในสภาวะแวดล้อมที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 20±2° C และความชื้นสัมพัทธ์ 55±15 %RH ซึ่งเป็นสภาวะแวดล้อมของห้องปฏิบัติการสอบเทียบด้านมิติ เพื่อทำการสอบเทียบระดับน้ำตามวิธีการมาตรฐาน JIS B 7510: 1993 สามารถแสดงภาพการสอบเทียบระดับน้ำด้วย Precision Bar ได้ดังรูปที่ 14



รูปที่ 13 ภาพจำลองการแอ่นตัวของ Precision Bar

รูปที่ 14 ใช้ Precision Bar สอบเทียบระดับน้ำ

ได้ผลการสอบเทียบระดับน้ำ Serial No : PL-150-01 ช่วงการวัด 0-0.08 mm/m ตามใบรายงานผล CIB24-DC-47014 ดังนี้ ผลการสอบเทียบทางขวามือ 0.081 mm/m และทางซ้ายมือ 0.083 mm/m และมีค่าความไม่แน่นอนในการวัด 0.013 mm/m โดย Precision Bar มีค่าความไม่แน่นอน 0.0027 mm/m มาจากการประเมินโอกาสผิดพลาดที่จะเกิดขึ้นของ Precision Bar และประเมินออกมาเป็นค่าความไม่แน่นอน อ้างอิงวิธีการประเมินค่าความไม่แน่นอนตาม JCGM100: 2008 [15]

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.005

เพื่อเป็นการยืนยันถึงความถูกต้องของผลการสอบเทียบ ทางผู้วิจัยจึงได้ใช้ระดับน้ำตัวเดียวกันทำการเปรียบเทียบผลการวัดระหว่างห้องปฏิบัติการ เพื่อหาค่า EN ratio สามารถหาค่าได้ตามสมการที่ 2

$$EN\ ratio = \frac{X\ lab - X\ ref}{\sqrt{U_{lab}^2 + U_{ref}^2}} \quad (2)$$

เมื่อ X lab คือ ผลจาก Precision Bar
X ref คือ ผลจากห้องปฏิบัติการมาตรฐาน
U lab คือ ค่าความไม่แน่นอนจาก Precision Bar
U ref คือ ค่าความไม่แน่นอนจากห้องปฏิบัติการ

โดยค่า EN ratio จะต้องมีค่าน้อยกว่า 1 อ้างอิงตามมาตรฐาน ISO/IEC17043 : 2010 [16] จึงจะสามารถยอมรับผลการสอบเทียบได้ ผลการสอบเทียบจากห้องปฏิบัติการมาตรฐานตามใบรายงานผล S0-09100100/24 ได้ผลการสอบเทียบทางขวามือ 0.076 mm/m และทางซ้ายมือ 0.082 mm/m และมีค่าความไม่แน่นอนในการวัด 0.0051 mm/m พบว่าค่า EN ration ที่ได้มีค่าสูงสุดคือ 0.36 ซึ่งน้อยกว่า 1 แสดงว่าผลการสอบเทียบระดับน้ำด้วย Precision Bar ให้ผลการวัดอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

ทำการขึ้นทะเบียนเครื่องมือมาตรฐาน Precision Bar ในเอกสารระบบคุณภาพ FR-EQM-01 เพื่อใช้เป็นเครื่องมือมาตรฐานในการสอบเทียบระดับน้ำภายในศูนย์สอบเทียบฯ และใช้ขอการรับรองความสามารถห้องปฏิบัติการตามมาตรฐาน ISO/IEC17025 : 2017 ในขอบข่ายการสอบเทียบระดับน้ำ

4.3 การประเมินประสิทธิภาพของเครื่องมือสอลเทียบฯ ตามข้อกำหนด ISO/IEC 17025: 2017

การประเมินประสิทธิภาพและความสามารถในการปฏิบัติงานระหว่างเครื่องมือสอบเทียบฯ เครื่องเก่ากับเครื่องใหม่ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ จำนวน 10 ข้อ พบว่าเครื่องมือสอบเทียบฯเครื่องใหม่ได้รับผลการประเมินที่ดีกว่าในทุกหัวข้อ ได้ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ผลการประเมินประสิทธิภาพระหว่างเครื่องมือสอบเทียบฯ เก่าและใหม่

ลำดับ	หัวข้อ	เครื่องมือเครื่องเก่า	เครื่องมือพัฒนาใหม่
1	เวลาที่ใช้ในการสอบเทียบ	120 นาที	52 นาที
2	สอบเทียบได้ตาม JIS B 7510	ทำได้	ทำได้
3	น้ำหนักของเครื่องมือมาตรฐาน	25 kg	2 kg
4	ปรับพื้นเอียงละเอียดสุด 0.02 mm/m	ทำไม่ได้	ทำได้
5	กำไรต่อการสอบเทียบระดับน้ำ 1 เครื่อง	200 บาท	600 บาท
6	ราคาเครื่องมือมาตรฐาน	90,000 บาท	40,000 บาท
7	เครื่องมือมาตรฐานต้องรับน้ำหนักของระดับน้ำได้ไม่แอ่นตัว	ทำจากเหล็กทาสี	ทำจากอลูมิเนียม
8	ค่าความไม่แน่นอนของเครื่องมือมาตรฐาน	0.0041 mm/m	0.0027 mm/m

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.005

ตารางที่ 7 (ต่อ)

ลำดับ	หัวข้อ	เครื่องมือเครื่องเก่า	เครื่องมือพัฒนาใหม่
9	ส่งเครื่องมือมาตรฐานไปสอบเทียบกับห้องปฏิบัติการที่ได้การรับรอง ISO/IEC17025	มหาวิทยาลัยบูรพาสอบเทียบเองไม่ได้	มหาวิทยาลัยบูรพาสอบเทียบเองได้
10	แสดงหน่วยวัด mm/m ระหว่างการสอบเทียบ	ทำไม่ได้	ทำได้

4.4 พิจารณาคุณสมบัติของเครื่องมือสอบเทียบฯ ตามข้อกำหนด ISO/IEC 17025: 2017

เครื่องมือสอบเทียบฯ ที่ออกแบบและพัฒนาขึ้นใหม่สำหรับสอบเทียบระดับน้ำเพื่อใช้ขอการรับรองความสามารถห้องปฏิบัติการ ISO/IEC17025 จะต้องมีคุณสมบัติสอดคล้องตามข้อกำหนดดังนี้

ข้อที่ 6.4 เครื่องมือ (Equipment) เครื่องมือมาตรฐานต้องมีความสามารถดีกว่าระดับน้ำอย่างน้อย 3 เท่า พบว่าเครื่องมือมาตรฐาน Precision Bar มีค่าความไม่แน่นอน 0.0027 mm/m ระดับน้ำมีค่าความไม่แน่นอนในการวัด 0.013 mm/m แสดงว่า Precision Bar มีความสามารถดีกว่าระดับน้ำถึง 4.8 เท่า

ข้อที่ 6.5 การสอบกลับได้ทางมาตรวิทยา (Metrological Traceability) เครื่องมือมาตรฐานต้องสามารถสอบกลับไปยังมาตรฐานการวัดแห่งชาติหรือ SI Unit ได้ สามารถแสดงหลักฐานการสอบกลับได้จากรายงานผลการสอบเทียบของ Digital Micrometer Head ที่สอบเทียบมาจากห้องปฏิบัติการมาตรฐานที่ได้การรับรอง ISO/EIC17025: 2017 ตามใบรายงานผลการสอบเทียบเลขที่ CIB23-DC-43005

ข้อที่ 7.2 การเลือก การทวนสอบ และการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธี (Selection, Verification and Validation of Methods) เครื่องมือมาตรฐาน Precision Bar จะต้องสามารถสอบเทียบระดับน้ำได้ตามวิธีการมาตรฐาน JIS B 7510: 1993 ที่ได้ระบุไว้ว่าต้องสอบเทียบระดับน้ำในการเคลื่อนที่ทั้งทางขวามือ และทางซ้ายมือในทิศทางไปและกลับตลอดช่วงการวัด

ข้อที่ 7.3 ความมั่นใจในความใช้ได้ของผล (Ensuring the Validity of Results) สามารถแสดงได้จากค่า EN ratio จากการเปรียบเทียบผลการวัดระหว่างห้องปฏิบัติการพบว่าค่า EN ratio มากสุดมีค่า 0.36 ซึ่งน้อยกว่า 1 แสดงว่าเครื่องมือมาตรฐาน Precision Bar สามารถสอบเทียบระดับน้ำได้

4.5 ประเมินต้นทุนเครื่องมือมาตรฐานเครื่องใหม่

โดยงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสมัยใหม่เข้ามาช่วยในการสอบเทียบทำให้ Precision Bar สามารถลดเวลาสอบเทียบลงเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือมาตรฐานเครื่องเก่าถึง 68 นาที คิดเป็น 57% และเครื่องมือมาตรฐานเครื่องใหม่ Precision Bar ยังมีความสามารถในการสอบเทียบระดับน้ำได้ทัดเทียมกับเครื่องมือมาตรฐานที่นำเข้าจากต่างประเทศซึ่งมีราคาประมาณ 150,000 บาท โดยเครื่องมือมาตรฐานเครื่องใหม่มีราคา 40,000 บาทถูกกว่าถึง 110,000 บาท คิดเป็น 73%

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.005

5. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบและพัฒนาเครื่องมือมาตรฐานสำหรับสอบเทียบระดับน้ำขึ้นใหม่ ทดแทนเครื่องเดิมซึ่งเคยใช้งานอยู่ที่ CIB-BUU การดำเนินการวิจัยได้ประยุกต์กระบวนการพัฒนาผลิตภัณฑ์และ QFD เพื่อให้มั่นใจว่าเครื่องมือสอบเทียบฯ ที่พัฒนาขึ้นใหม่สามารถปรับปรุงแก้ไขปัญหาที่เคยเกิดขึ้นในเครื่องเดิม ตอบสนองต่อความต้องการการใช้งาน นำมาใช้ในการสอบเทียบระดับน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยบทสรุปของงานวิจัยสามารถดำเนินการได้ตรงตามวัตถุประสงค์ดังนี้

1. สามารถออกแบบและพัฒนาเครื่องมือสอบเทียบมาตรฐานรูปแบบใหม่สำหรับใช้สอบเทียบระดับน้ำ เรียกว่า Precision Bar ที่มีความสามารถในการสอบเทียบระดับน้ำได้ผลทัดเทียมกับเครื่องมือมาตรฐานที่นำเข้าจากต่างประเทศแต่ใช้เวลาในการสอบเทียบน้อยกว่า และมีราคาที่ถูกกว่า

2. เครื่องมือมาตรฐานที่ออกแบบและพัฒนาขึ้นใหม่ Precision Bar ยังมีคุณสมบัติของเครื่องมือมาตรฐานสอดคล้องตามข้อกำหนด ISO/IEC17025: 2017 ได้ทั้ง 4 ข้อ จึงสามารถใช้เป็นเครื่องมือมาตรฐานในการสอบเทียบระดับน้ำ และใช้ขอการรับรองความสามารถห้องปฏิบัติการสอบเทียบในขอบข่ายการสอบเทียบระดับน้ำต่อไปได้

ข้อเสนอแนะในการพัฒนาเครื่องมือสอบเทียบระดับน้ำให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นในอนาคต สามารถกระทำได้โดยปรับขนาดความยาวของ Precision Bar ให้มีความยาวเพิ่มขึ้นเป็น 350 mm เพื่อจะได้ใช้สอบเทียบเครื่องมือที่ยาวสุด 300 mm ได้ โดยจะต้องเปลี่ยนวัสดุจากอะลูมิเนียมเกรด 1100 เป็น สแตนเลส สตีล SUS304 ความหนา 12 mm และใช้น๊อตก้างปลา M4 จำนวน 3 ตัวในการจับยึด Digital Micrometer Head กับ Precision Bar เพื่อลดผลกระทบจากการแอ่นตัวของ Precision Bar ให้มีค่าไม่เกิน 0.002 mm

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยบูรพาที่ได้มอบทุนสนับสนุนงานวิจัยสำหรับบุคลากร นำไปพัฒนากระบวนการปฏิบัติงานประจำสู่งานวิจัย (Routine to Research : R2R) จากแหล่งเงิน กองทุนวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยบูรพา สัญญาเลขที่ R2R05/2565

7. เอกสารอ้างอิง

[1] A. Chareansuk, and S. Sawatarree, Introduction of metrology by National Institute of Metrology (Thailand), 1st Ed., National Institute of Metrology (Thailand), Pathumthani, Thailand, 2005. (in Thai)

[2] W. Kongsakul, C. Sukmak, and M. Charoenkun, Design and development of smart dial gauge tester, The conference of Industrial Engineering Network (IE Network 2019), Proceeding, 2019, 562-566. (in Thai)

[3] W. Kongsakul, Design and development of standard instrument for calibration steel ruler with according to reference method JIS B 7516: 2005, The conference of Industrial Engineering Network (IE Network 2024), Proceeding, 2024, 8-13. (in Thai)

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.005

[4] https://www.cal-laboratoty.com/Article/Why calibrate instrument- How important / (Accessed on 7 January 2025) (in Thai)

[5] https://www.cib-buu.com/17454134 /About us_ (Accessed on 16 March 2024)

[6] TISI 17025 – 2561, Laboratory Accreditation, Thai Industrial Standards Institute (TISI), 2017. (in Thai)

[7] Japanese Standard Association, JIS Handbook Mechanical Instrumentation JIS B 7510: 1993, 2012.

[8] K.T. Ulrich, and S.D. Eppinger, Product design and development, 5th Ed., McGraw-Hill, New York, USA 2012.

[9] M. Sasananan, Product design for creating innovative and reverse engineering, 2nd Ed., Thammasat University Press, Bangkok, Thailand, 2007. (in Thai)

[10] L. Cohen, Quality function deployment how to make QFD work for you, Addison-Wesley, MA, USA, 1995.

[11] T. Pirom, S. Rawangwong, A. Thongkamkaew and C. Hutyee, Design and development product the kindergarten classroom furniture with rubber wood using quality function deployment, The journal of Industrial Technology, 2019, 15(3), 77-92. (in Thai)

[12] S. Jitman, T. Chaibankud, P. Jamsai, B. Ariyajunya, R. Sukhasem and R. Chantrasa, Development of bamboo tube sawing machine by ergonomics and quality function deployment, Engineering Journal Chiang Mai University, 2021, 28(2), 100-115. (in Thai)

[13] R. Chantrasa, T. Pedyod, C. Phontree and S. Chantasee, Development of garden waste shredder machine using quality function deployment, The Conference of Industrial Engineering Network (IE Network 2023), Proceeding, 2023, 299-306. (in Thai)

[14] W. Kongsagul, Design and development of fixture for calibration of torque screwdriver in accordance with ISO 6789: 2003(E) using quality function deployment technique, Thai Industrial Engineering Network Journal, 2018, 4(1), 24-33. (in Thai)

[15] JCGM100: 2008, Guide to the expression of uncertainty in measurement, Joint Committee for Guides in Metrology, 2008.

[16] ISO/IEC 17043: 2010, General Requirement for Proficiency Testing, International Organization for Standardization, 2010.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.006

บทความวิจัย

การพัฒนาสมบัติการทนความร้อนของอิฐจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยและดินขาวเผาโดยการเติมเถ้าชานอ้อย

พิสิทธิ์ ทิพยเสม[1] และ ไพจิตร ผาวัน[1*]

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยศรีปทุม

[*] ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: paijit.pa@spu.ac.th

วันที่รับบทความ: 25 มีนาคม 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 4 มิถุนายน 2568; วันที่ตอบรับบทความ: 13 มิถุนายน 2568
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 19 สิงหาคม 2568

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการพัฒนาอิฐจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยผสมดินขาวเผาและเถ้าชานอ้อยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการป้องกันความร้อน โดยศึกษาผลของการแทนที่เถ้าลอยด้วยเถ้าชานอ้อยในอัตราส่วนร้อยละ 0 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ต่อคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกล ได้แก่ กำลังรับแรงอัด ความหนาแน่น ความพรุน การดูดซึมน้ำ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน และความสามารถในการต้านทานความร้อนสูง ผลการวิจัยพบว่าการเพิ่มปริมาณเถ้าชานอ้อยส่งผลให้ค่าการนำความร้อนลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยสูตร BA30 มีค่าการนำความร้อนลดลงมากที่สุดถึง 41.1% (0.277 W/m·K) ขณะที่กำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าชานอ้อย โดยที่อายุ 28 วัน สูตร BA0 BA10 BA20 และ BA30 มีค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ย 14.23 13.29 8.53 และ 9.18 MPa ตามลำดับ ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาคุณสมบัติโดยรวมพบว่าสูตร BA10 มีความเหมาะสมที่สุดโดยมีกำลังอัดสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน มอก.77-2565 ถึง 32.9% ค่าการนำความร้อนลดลง 12.8% มีความทนทานต่อความร้อนสูงสุด โดยรักษากำลังไว้ได้ 18.7% ที่อุณหภูมิ 1000°C การวิเคราะห์ต้นทุนพบว่าอิฐจีโอโพลิเมอร์มีต้นทุนประมาณ 4 บาทต่อก้อน ทั้งยังมีค่าการนำความร้อนต่ำกว่าอิฐมอญและอิฐบล็อกทั่วไปกว่า 40% และสามารถทนไฟได้นานกว่า 4 ชั่วโมง แสดงถึงคุณสมบัติในการป้องกันความร้อนที่เหนือกว่าอย่างชัดเจน

คำสำคัญ: อิฐจีโอโพลิเมอร์; เถ้าลอยผสมดินขาวเผา; เถ้าชานอ้อย; วัสดุก่อสร้างยั่งยืน

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.006

บทความวิจัย

Development of Heat Resistance Properties of Geopolymer Bricks from Fly Ash and Metakaolin by Bagasse Ash Addition

Pisit Tippayasem[1] and Paijit Pawan[1 *]

[1] Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Sripatum University

[*] Corresponding author, E-mail: paijit.pa@spu.ac.th

Received: 25 March 2025; Revised: 4 June 2025; Accepted: 13 June 2025
Online Published: 19 August 2025

Abstract: This research aimed to develop geopolymer bricks using fly ash blended with metakaolin and bagasse ash to enhance thermal insulation properties. The study examined the effects of replacing fly ash with bagasse ash at proportions of 0%, 10%, 20%, and 30% by weight on the physical and mechanical properties, including compressive strength, density, porosity, water absorption, thermal conductivity coefficient, and high-temperature resistance. The results showed that increasing the bagasse ash content significantly reduced thermal conductivity, with the BA30 formulation achieving the greatest reduction of 41.1% (0.277 W/m·K). Meanwhile, compressive strength tended to decrease with increasing bagasse ash content. At 28 days, formulations BA0, BA10, BA20, and BA30 exhibited average compressive strengths of 14.23, 13.29, 8.53, and 9.18 MPa, respectively. Overall, the BA10 formulation was found to be optimal, with compressive strength exceeding the TIS 77-2565 standard by 32.9%, thermal conductivity reduced by 12.8%, and maximum heat resistance, retaining 18.7% of its strength at 1000°C. Cost analysis revealed that geopolymer bricks cost approximately 4 baht per unit. It also exhibited thermal conductivity values over 40% lower than those of conventional clay and concrete bricks, and withstood fire exposure for more than 4 hours, clearly demonstrating superior thermal insulation performance.

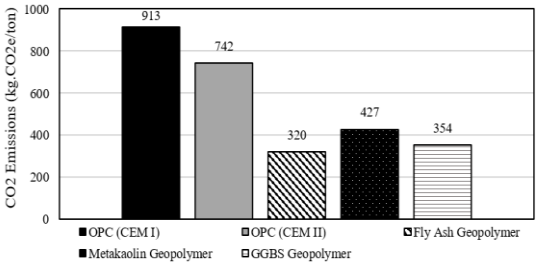
Keywords: Geopolymer Bricks; Fly ash mixed with metakaolin; Bagasse ash; Sustainable construction materials

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.006

1. บทนำ

อุตสาหกรรมการก่อสร้างนับเป็นหนึ่งในภาคส่วนที่บริโภคพลังงานและปล่อยก๊าซเรือนกระจกในปริมาณมหาศาล โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตคอนกรีต ก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ประมาณ 1 ton.CO_2e ต่อการผลิตปูนซีเมนต์ 1 ตัน [1] ด้วยเหตุนี้ จึงมีการพัฒนาวัสดุทางเลือกชนิดใหม่ที่ปล่อย CO_2 ต่ำ หนึ่งในนั้นคือ “จีโอโพลิเมอร์” ซึ่งเป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดใหม่ที่ไม่ใช้ปูนซีเมนต์ สังเคราะห์ได้จากวัสดุที่มีซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น เถ้าลอย (Fly Ash) เถ้าชานอ้อย (Bagasse Ash) หรือดินขาวเผา (Metakaolin) โดยทำปฏิกิริยากับสารละลายด่าง ซึ่งประกอบไปด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide: NaOH) และโซเดียมซิลิเกต (Sodium Silicate: Na_2SiO_3) [2] และสามารถลดการปล่อย CO_2 ได้ถึง 80% เมื่อเทียบกับคอนกรีตทั่วไป [3-5] ด้วยเหตุนี้ การพัฒนา “อิฐจีโอ-โพลิเมอร์” จึงได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นในฐานะวัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

แม้ว่าอิฐจีโอโพลิเมอร์จะมีข้อดีหลายประการ แต่ยังมีข้อจำกัดที่ต้องพัฒนาปรับปรุง เช่น จากการศึกษาของ Ibrahim et al. [6] พบว่าอิฐจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยยังมีความหนาแน่นสูง และอิฐจีโอโพลิเมอร์จากเศษอิฐดินเผาของ El Naggar et al. [7] ที่มีค่าการนำความร้อนที่สูงกว่าอิฐมวลเบา การใช้เถ้าชานอ้อยเป็นส่วนผสมเพิ่มในจีโอโพลิเมอร์จึงมีความน่าสนใจ เนื่องจากมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลักในปริมาณสูง (60-75%) อีกทั้ง มีโครงสร้างที่มีความพรุนสูง ซึ่งอาจช่วยลดความหนาแน่นและค่าการนำความร้อนของวัสดุได้



รูปที่ 1 CO_{2e} ระหว่างจีโอโพลิเมอร์กับปูนซีเมนต์ทั่วไป [3-5]

นอกจากนี้ ในประเทศไทยมีเถ้าชานอ้อยเกิดขึ้นปีละประมาณ 0.6 ล้านตัน [8] การนำมาใช้เป็นวัสดุในอิฐจีโอโพลิเมอร์จึงเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งและลดปัญหาสิ่งแวดล้อมไปพร้อมกัน ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาอิฐจีโอโพลิเมอร์ให้มีคุณสมบัติด้านการป้องกันความร้อนที่ดีขึ้น โดยใช้เถ้าลอย เถ้าชานอ้อย และดินขาวเผาเป็นวัตถุดิบหลัก โดยมีวัตถุประสงค์ของงานวิจัยประกอบด้วย 1) เพื่อศึกษาผลของปริมาณเถ้าชานอ้อยต่อค่าการนำความร้อนและกำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์ 2) เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพในการป้องกันความร้อนของอิฐจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมเถ้าลอยกับดินขาวเผาโดยใช้เถ้าชานอ้อย และ 3) เพื่อเปรียบเทียบความคุ้มค่าในการผลิตอิฐจีโอโพลิเมอร์ที่ใช้เถ้าลอยผสมดินขาวเผาและเถ้าชานอ้อยกับอิฐทั่วไปชนิดอื่นๆ

2. ขั้นตอนการทดลอง

การศึกษานี้ได้ดำเนินการทดลองอย่างเป็นระบบตามขั้นตอนต่างๆ โดยครอบคลุมทั้งการเตรียมและการวิเคราะห์ปอซโซลานตั้งต้น การสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกล และการวิเคราะห์ความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.006

2.1 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุในการทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการศึกษานี้ประกอบด้วยเถ้าลอย (FA) Class F (โรงงานไฟฟ้า จ.ระยอง ประเทศไทย) และเถ้าชานอ้อย (BA) ที่ได้จากโรงงานน้ำตาลในภาคกลางของประเทศไทย นอกจากนี้ยังใช้ดินขาวเผา (MK) ซึ่งได้จากดินขาวจังหวัดระนอง ประเทศไทย เป็นวัตถุดิบหลักในการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ วัสดุทั้งสามชนิดถูกบดจนมีขนาดอนุภาคผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (45 ไมโครเมตร)

สารละลายอัลคาไลน์ที่ใช้ประกอบด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ชนิดที่ 2 (Na_2O 15.35%, SiO_2 33.3% และ H_2O 51.81%)

วัสดุเพิ่มเติมที่ใช้เป็นมวลรวมได้แก่ทรายแม่น้ำซึ่งถูกนำมาร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 16 (1.18 มิลลิเมตร)

2.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์วัสดุตั้งต้น

2.2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุตั้งต้น ดำเนินการด้วยเทคนิค X-ray Fluorescence (XRF) ตามมาตรฐาน ASTM C114 เพื่อประเมินปริมาณออกไซด์หลัก ได้แก่ SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ตามเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C618 ผลการวิเคราะห์ตามตารางที่ 1 พบว่า เถ้าลอยและดินขาวเผามีผลรวมของออกไซด์ทั้งสามสูงถึง 91.66% และ 94.69% ตามลำดับ แสดงถึงศักยภาพที่ดีในการเป็นวัสดุหลักสำหรับการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ ส่วนเถ้าชานอ้อย แม้มีปริมาณซิลิกาสูงแต่มีอะลูมินาอยู่ในระดับต่ำ จึงไม่เหมาะสมที่จะใช้เป็นวัสดุตั้งต้นหลัก แต่สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุเสริม ผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเฉพาะได้

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุตั้งต้น (% โดยน้ำหนัก)

องค์ประกอบ	เถ้าลอย	เถ้าชานอ้อย	ดินขาวเผา
SiO_2	67.50	63.10	53.52
Al_2O_3	20.04	2.91	39.76
Fe_2O_3	4.12	2.07	1.41
CaO	1.40	2.49	0.06
MgO	0.53	1.97	0.15
SO_3	0.26	0.20	0.03
Na_2O	0.30	0.20	0.04
K_2O	1.14	2.45	2.34
P_2O_5	0.36	1.72	0.03
TiO_2	1.28	0.21	0.06
MnO	0.05	0.21	0.07
ZrO_2	0.07	0.02	-
BaO	0.06	0.05	-
SrO	0.07	0.02	-
Rb_2O	-	-	0.08
ZnO	0.02	-	-
LOI	2.81	22.30	2.46

ทั้งนี้อัตราส่วนระหว่าง SiO_2 ต่อ Al_2O_3 ยังเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อโครงสร้างภายในและสมบัติเชิงวิศวกรรมของจีโอโพลิเมอร์ โดยควรมีอัตราส่วน Si/Al อยู่ในช่วง 1.5–2.5 ตามงานวิจัยของ Wang et al. [9] เพื่อให้ได้โครงสร้างเจลที่มีความเสถียร และในกรณีที่ต้องการความทนทานต่ออุณหภูมิสูง ควรมีอัตราส่วนใกล้เคียง 3 ตามแนวคิดของ Davidovits (1994) [1] โดยเถ้าลอยที่มีอัตราส่วน SiO_2/Al_2O_3 ประมาณ 3.37 จึงมีความเหมาะสมอย่างยิ่งต่อการสังเคราะห์วัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่ทนความร้อนสูง เนื่องจากมีปริมาณอะลูมินาเพียงพอที่จะทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาและเชื่อมโยงโครงสร้างเจลอย่างมีประสิทธิภาพ ส่วนดินขาวเผาที่มีอัตราส่วนต่ำเพียง 1.34 ทำให้เหมาะสำหรับ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.006

ปรับสมดุล Si/Al ในระบบ เพื่อลดอัตราส่วนลงให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม

ในทางตรงกันข้าม เถ้าชานอ้อยที่มีอัตราส่วน SiO_2/Al_2O_3 สูงถึง 21.68 ซึ่งเกินช่วงที่เหมาะสมอย่างมีนัยสำคัญ จัดอยู่ในกลุ่มวัสดุที่มีซิลิกาสูง (High-silica Material) ที่ส่งผลให้มีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยา (Reactivity) ต่ำกว่าวัสดุปอซโซลานอื่น เนื่องจากกลไกการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ โครงสร้าง Si-O-Al จะก่อตัวขึ้นในลำดับแรก เนื่องจาก Al^{3+} มีประจุที่สูงกว่าและสามารถเหนี่ยวนำการเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายกว่า Si^{4+} ส่วนพันธะ Si-O-Si จะเกิดในลำดับถัดไป เนื่องจากต้องใช้พลังงานกระตุ้นสูงกว่า ทำให้การสลายโครงสร้างซิลิเกตและการก่อตัวของเจลจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer Gel Formation) เกิดขึ้นได้ช้า ส่งผลให้ต้องใช้เวลานานกว่าในการบ่มแข็งและอาจได้กำลังอัดต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุที่มีอัตราส่วน Si/Al ในช่วงที่เหมาะสม

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าจะไม่เหมาะแก่การใช้เป็นวัตถุดิบหลักเดี่ยว แต่เมื่อใช้ร่วมกับวัสดุปอซโซลานอื่นในสัดส่วนที่เหมาะสม จะช่วยเพิ่มปริมาณซิลิกาในระบบและเสริมสมบัติเฉพาะบางประการของจีโอโพลิเมอร์ โดยเฉพาะในด้านการลดความหนาแน่น ซึ่งส่งผลดีต่อสมบัติการเป็นฉนวนความร้อน ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาวัสดุก่อสร้างสมรรถนะสูงได้

2.2.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ด้วยเทคนิค X-ray Diffraction (XRD) โดยใช้ CuK_α Radiation (ที่ความต่างศักย์ 40 kV และกระแส 35 mA) ตั้งค่า Step Size ที่ 0.02° พร้อมเวลาต่อหนึ่ง Step ที่ 0.4 วินาที ภายใต้ช่วงการสแกน 5°- 80° ตามมาตรฐาน ASTM C1365 แสดงดังรูปที่ 2

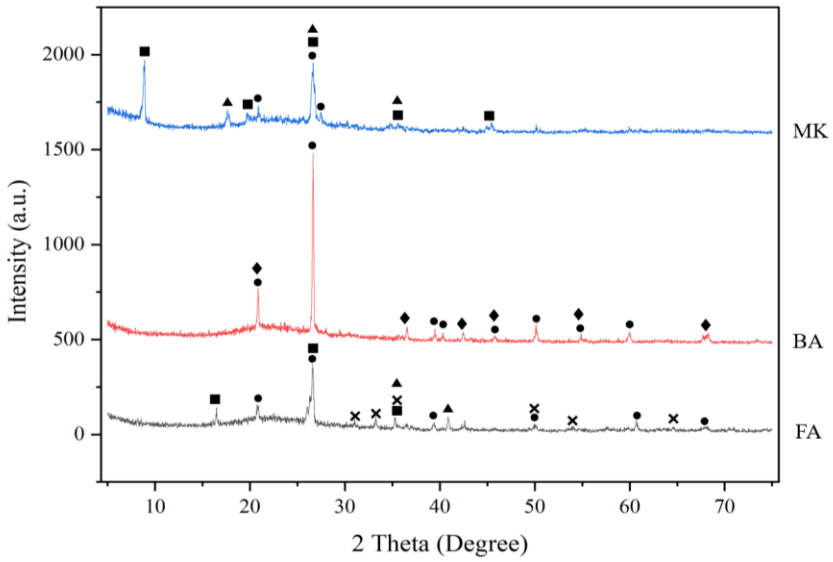
ผลวิเคราะห์ XRD แสดงความแตกต่างของโครงสร้างวัสดุตั้งต้น โดยเถ้าลอยมีลักษณะอสัณฐานสูง สังเกตจาก Broad Hump ในช่วง 2θ ระหว่าง 15-35° ซึ่งเอื้อต่อการเกิดปฏิกิริยา เถ้าชานอ้อยมีโครงสร้างผลึกสูง โดยมีพีคของควอตซ์และคริสโตบาไลต์ที่ชัดเจน ส่วนดินขาวเผามีลักษณะโครงสร้างกึ่งอสัณฐานผสมกับโครงสร้างผลึก ความแตกต่างนี้ส่งผลโดยตรงต่อความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับสารละลายด่าง

2.2.3 การวิเคราะห์ลักษณะทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ตามมาตรฐาน ASTM C1723 ร่วมกับ Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX) แสดงดังในรูปที่ 3 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วย SEM แสดงความแตกต่างทางกายภาพที่ชัดเจน โดยเถ้าลอยมีอนุภาครูปร่างค่อนข้างกลม (Spherical Shape) ซึ่งช่วยให้มอร์ตาร์ไหลตัวได้ดี และเพิ่มความหนาแน่นของวัสดุ เถ้าชานอ้อยมีโครงสร้างรูพรุนสูง อนุภาคไม่สม่ำเสมอ และมีพื้นผิวขรุขระ ส่วนดินขาวเผามีโครงสร้างเป็นแผ่นบางซ้อนทับกัน (Platelet) มีขนาดอนุภาคเล็ก (<2 μm) ซึ่งเอื้อต่อการละลายของอะลูมินาและซิลิกาในสารละลายด่าง ลักษณะเฉพาะเหล่านี้มีอิทธิพลโดยตรงต่อคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ที่ได้

2.3 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง

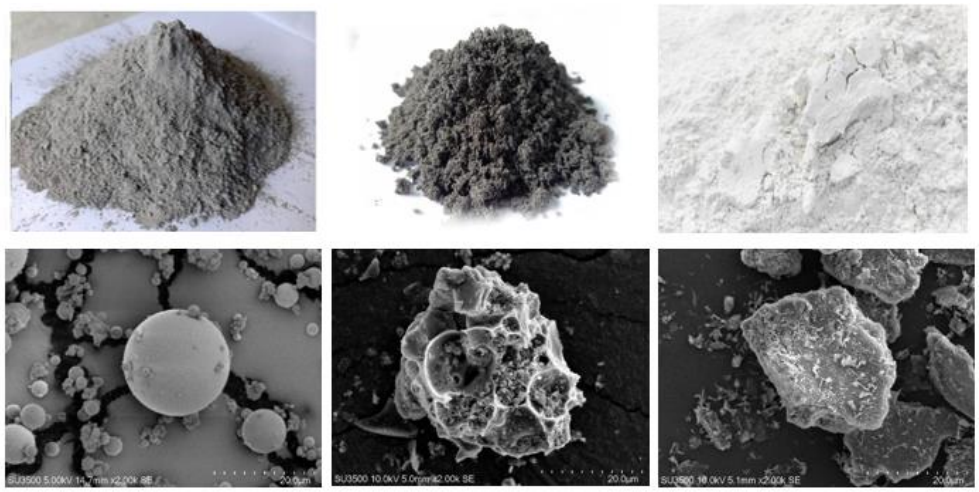
การศึกษานี้กำหนดสัดส่วนผสมโดยใช้ปริมาณเถ้าชานอ้อยแตกต่างกันที่ 0% 10% 20% และ 30% โดยน้ำหนัก เพื่อแทนที่เถ้าลอย และมีการกำหนดใช้รหัสสูตรผสมเป็น BA0 BA10 BA20 และ BA30 ตามลำดับ ทั้งนี้ในทุกสูตรได้กำหนดให้ใช้ดินขาวเผาปริมาณคงที่ 20% ของวัสดุปอซโซลานทั้งหมด โดยมีรายละเอียดสัดส่วนการผสม SiO_2/Al_2O_3 แสดงดังตารางที่ 2

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.006



หมายเหตุ: ● = Quartz (SiO_2, JCPDS 01-089-8934), ■ = Muscovite ($KAl_2 \cdot AlSi_3O_{10} \cdot OH_2$, JCPDS 00-007-0025), ▲ = Mullite ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$, JCPDS 00-001-1059), ✖ = Hematite (Fe_2O_3, JCPDS 00-001-1053), ♦ = Cristobalite (SiO_2, JCPDS 00-003-0257)

รูปที่ 2 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเถ้าลอย เถ้าชานอ้อย และดินขาวเผา



(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 3 โครงสร้างจุลภาค ของ (ก) เถ้าลอย (ข) เถ้าชานอ้อย และ (ค) ดินขาวเผา ที่กำลังขยาย 2000 เท่า

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.006

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์จากเถ้าลอยและดินขาวเผาผสมกับเถ้าชานอ้อย

Mix	FA (g)	BA (g)	MK (g)	NaOH 10M (g)	Na_2SiO_3 (g)	Sand (g)	SiO_2: Al_2O_3
BA0 (Control)	500	0	100	300	300	1,200	2.34
BA10	450	50	100	300	300	1,200	2.58
BA20	400	100	100	300	300	1,200	2.85
BA30	350	150	100	300	300	1,200	3.16

ก่อนการผสม เถ้าชานอ้อยจะถูกกระตุ้นให้ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาด้วยการแช่ในสารละลาย NaOH 10 โมลาร์ ตามวิธีการของ Kittisayarm et al. [10] โดยเป็นกระบวนการสลายโครงสร้างซิลิเกตอสัณฐาน ที่ทำให้เกิดไอออน $Si(OH)_4$ และ $Al(OH)_4^-$ บนพื้นผิว ซึ่งเป็นขั้นตอนที่จำเป็นสำหรับการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ที่มีประสิทธิภาพ จากนั้นจึงผสมกับวัสดุปอซโซลานอื่นๆ แล้วค่อยเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่ทำหน้าที่เสริมปริมาณซิลิกาในระบบ อันเป็นองค์ประกอบหลักในการกระตุ้นโครงสร้างเจลชนิด N-A-S-H (Sodium Alumino-Silicate Hydrate gel) ของจีโอโพลิเมอร์ จากนั้นผสมให้เข้ากันดีแล้วจึงเติมทราย สุดท้ายนำส่วนผสมเทลงในแบบหล่อขนาด 2.5×2.5×2.5 ซม^3. (สำหรับทดสอบกำลังอัด) และขนาด 15×15×2.5 ซม^3. (สำหรับทดสอบค่าการนำความร้อน) เขย่าแบบหล่อเพื่อไล่ฟองอากาศ บ่มที่อุณหภูมิห้อง (25±2°C) เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นถอดแบบ และบ่มต่อจนถึงอายุทดสอบที่ 7 และ 28 วัน โดยเตรียมตัวอย่าง 3 ชิ้นต่อสูตรผสม และอายุทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C109

2.4 ขั้นตอนการทดสอบคุณสมบัติ

การทดสอบกำลังรับแรงอัดดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C109 โดยใช้ตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 2.5×2.5×2.5 ซม^3 ที่อายุ 7 และ 28 วัน ด้วยอัตราการให้แรงกด 1.4 kN/s ส่วนการทดสอบความหนาแน่น ความพรุน และการดูดซึมน้ำเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C642 ที่อายุ 28 วัน

ในด้านการทดสอบความสามารถในการต้านทานความร้อนสูงดำเนินการตามแนวทางของ RILEM TC 129-MHT โดยให้ความร้อนแก่ตัวอย่างที่อุณหภูมิ 500°C 800°C และ 1000°C ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 2°C/นาที และคงอุณหภูมิไว้ 2 ชั่วโมง การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนดำเนินการโดยใช้วิธี Guarded Hot Plate ตามมาตรฐาน ASTM C177 กับตัวอย่างแผ่นสี่เหลี่ยมขนาด 15×15×2.5 ซม^3. ที่อายุ 28 วัน โดยตั้งค่าความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างด้านร้อนและด้านเย็นที่ 20°C

ส่วนโครงสร้างจุลภาคของตัวอย่างถูกวิเคราะห์ด้วย SEM/EDX ทั้งก่อนและหลังการให้ความร้อน เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงภายในโครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์ที่สัดส่วนผสมต่างๆ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.006

2.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์สัดส่วนผสมที่เหมาะสม

การวิเคราะห์หาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมใช้วิธี การวิเคราะห์ดัชนีประสิทธิภาพ (Performance Index: PI) [11] โดยกำหนดตัวแปรควบคุม ได้แก่ ความเข้มข้น NaOH 10 โมลาร์, อัตราส่วน Na_2SiO_3/NaOH 1:1, อุณหภูมิบ่มที่อุณหภูมิห้อง และอายุทดสอบ 7 และ 28 วัน ตัวแปรต้น คือ ปริมาณเถ้าชานอ้อย 0% 10% 20% และ 30% ส่วนตัวแปรตาม ได้แก่ กำลังรับแรงอัด ค่าการนำความร้อน และความหนาแน่น ส่วนเกณฑ์การประเมินกำหนดให้กำลังอัดต้องไม่ต่ำกว่า 10.0 MPa (ตาม มอก.77-2565) และค่าการนำความร้อนควรลดลงอย่างน้อย 10% เทียบกับสูตรควบคุม

ดัชนีประสิทธิภาพ (PI) คำนวณโดยใช้สมการที่ 1:

$$PI = w_1(fc_{,req}/fc) + w_2(\lambda_{ref}/\lambda) + w_3(\rho_{ref}/\rho) \quad (1)$$

เมื่อ w_x = ค่าถ่วงน้ำหนัก (0.4, 0.4, 0.2)
fc = กำลังอัดที่ทดสอบได้
$fc_{,req}$ = กำลังอัดตามมาตรฐาน
λ = ค่าการนำความร้อนที่ทดสอบได้
λ_{ref} = ค่าการนำความร้อนสูตรควบคุม
ρ = ความหนาแน่นที่ทดสอบได้
ρ_{ref} = ความหนาแน่นของสูตรควบคุม

2.6 ขั้นตอนการวิเคราะห์ความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน

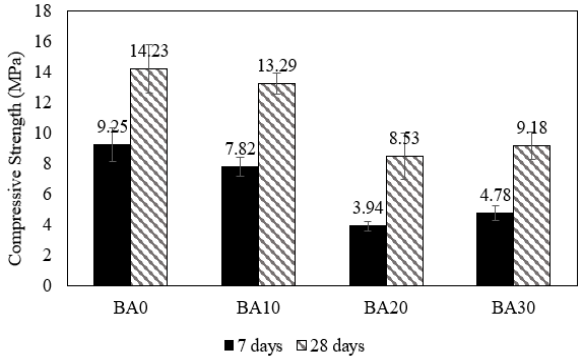
สูตรผสมที่ให้ผลการทดสอบดีที่สุดถูกนำมาขึ้นรูปเป็นอิฐจีโอโพลิเมอร์ขนาด 14×4×6.5 เซนติเมตร ตามมาตรฐาน มอก.77-2565 และทดสอบความปลอดภัยในการนำไปใช้งาน โดยการทดสอบพฤติกรรมการปลดปล่อยความเป็นด่าง (Alkalinity Leaching) ตามมาตรฐาน AS/NZS 4456.10 ส่วนการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ดำเนินการโดยคำนวณต้นทุนการผลิตต่อหน่วย (บาทต่อก้อน) และต่อหน่วยพื้นที่ (บาทต่อตารางเมตร) เปรียบเทียบกับอิฐชนิดอื่นในท้องตลาด ได้แก่ อิฐมอญ อิฐบล็อก และอิฐมวลเบา โดยพิจารณาทั้งด้านต้นทุน สมบัติทางกายภาพ สมบัติด้านการป้องกันความร้อน และความสามารถในการทนไฟ

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

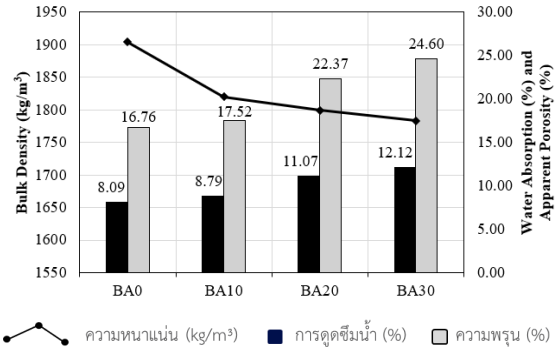
3.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่อายุ 7 และ 28 วัน แสดงในรูปที่ 4 ผลการทดสอบแสดงแนวโน้มที่ชัดเจนว่าการเพิ่มปริมาณเถ้าชานอ้อยส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดลง โดยที่อายุ 28 วัน สูตร BA0, BA10, BA20 และ BA30 มีค่ากำลังอัดเฉลี่ย 14.23, 13.29, 8.53 และ 9.18 MPa ตามลำดับ เฉพาะสูตร BA0 และ BA10 เท่านั้นที่มีกำลังอัดสูงกว่าเกณฑ์ขั้นต่ำตามมาตรฐาน มอก.77-2565 (10.0 MPa) ทั้งนี้การลดลงของกำลังอัดเกิดจากหลายปัจจัย ได้แก่ (1) การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วน Si/Al ในระบบเมื่อเพิ่มเถ้าชานอ้อยที่มี SiO_2/Al_2O_3 สูง (2) ความแตกต่างของลักษณะทางกายภาพระหว่างเถ้าชานอ้อยและเถ้าลอย รวมถึงการกระจายขนาดอนุภาค พื้นผิวจำเพาะ และความสามารถในการดูดซับ ส่งผลให้การสร้างเนื้อเยื่อของจีโอโพลิเมอร์ไม่เหมาะสมเท่าที่ควร และ (3) โครงสร้างแบบผลึกสูงของเถ้าชานอ้อยส่งผลให้มีอัตราการละลายของซิลิกาและอะลูมินาในสารละลายด่างต่ำกว่าเถ้าลอยที่มีโครงสร้างอสัณฐานสูง ทำให้การสร้างเจลจีโอโพลิเมอร์เกิดขึ้นช้าและไม่สมบูรณ์ ตามงานวิจัยของ Fernández-Jiménez et al. [12] ที่ระบุว่าวัสดุที่มีโครงสร้างอสัณฐานสูงเกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่า

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.006



รูปที่ 4 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์หลังบ่มที่อายุ 7 วัน และ 28 วัน



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น ความพรุน และการดูดซึมน้ำกับปริมาณเถ้าชานอ้อย

3.2 ผลการทดสอบความหนาแน่น ความพรุน และการดูดซึมน้ำ

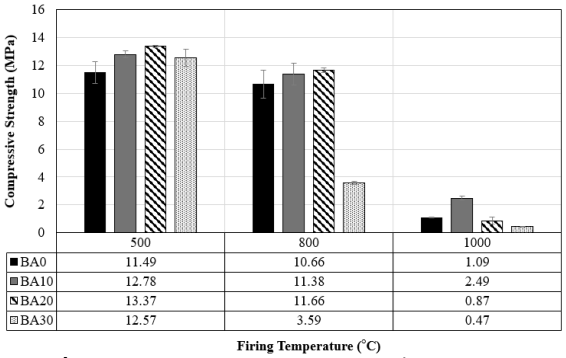
ผลการทดสอบที่อายุ 28 วัน (รูปที่ 5) แสดงความสัมพันธ์แบบแปรผกผันระหว่างความหนาแน่นกับความพรุนและการดูดซึมน้ำ โดยการเพิ่มปริมาณเถ้าชานอ้อยส่งผลให้ความหนาแน่นลดลงเป็น 1,820 1,800 และ 1,780 kg/m³ สำหรับสูตร BA10 BA20 และ BA30 ตามลำดับ ในขณะที่การดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเป็น 8.79% 11.07% และ 12.12% ตามลำดับ

ปรากฏการณ์นี้เกิดจากคุณลักษณะเฉพาะของเถ้าชานอ้อยที่มีรูพรุนสูง ส่งผลให้เกิดช่องว่างในโครงสร้างมากขึ้น และปริมาณของสารที่สลายไปจากการเผาไหม้ (Loss on Ignition: LOI) ที่สูงถึง 22.30% ยังเป็นตัวบ่งชี้ถึงปริมาณสารอินทรีย์และคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ ซึ่งจะสลายตัวระหว่างกระบวนการแข็งตัวของจีโอโพลิเมอร์ ส่งผลทำให้ช่วยลดความหนาแน่นและเพิ่มความพรุน

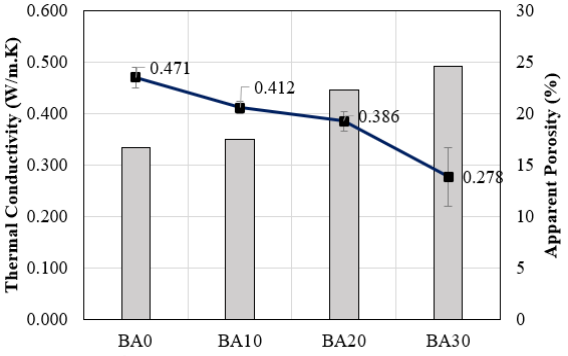
3.3 ผลการทดสอบความสามารถในการต้านทานความร้อน

ผลการทดสอบความต้านทานความร้อน (รูปที่ 6) พบว่าตัวอย่างทุกสูตรสามารถทนอุณหภูมิถึง 1000°C โดยไม่เกิดการแตกร้าวรุนแรง แม้กำลังอัดจะลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ที่น่าสนใจคือสูตร BA20 และ BA30 แสดงการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดที่อุณหภูมิ 500°C อย่างมีนัยสำคัญ (+56.7% และ +37.0% ตามลำดับ) ซึ่งแตกต่างจาก BA0 และ BA10 ที่มีกำลังลดลงตามพฤติกรรมปกติของวัสดุเมื่อได้รับความร้อน การเพิ่มขึ้นของกำลังนี้คาดว่าเกิดจากกลไกสำคัญ 2 ประการ ได้แก่ (1) การเผาผลึกทางความร้อน (Thermal Crystallization) ของซิลิเกตในเถ้าชานอ้อยที่เปลี่ยนโครงสร้างจากซิลิกาอสัณฐาน (Amorphous Silica) เป็นโครงสร้างผลึก (Crystalline) เช่น ควอตซ์ และคริสโตบาไลต์ ตามงานวิจัยของ Zhang et al. [13] และ (2) การเผาเชื่อมของอนุภาค (Particle Sintering) ที่ก่อให้เกิดการยึดเกาะระหว่างอนุภาคดีขึ้น โดยกลไกเหล่านี้จะเกิดขึ้นได้เมื่อมีปริมาณเถ้าชานอ้อยเพียงพอ (≥20%) ที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งของซิลิกาอิสระสำหรับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่อุณหภูมิ 500°C ในขณะที่สูตร BA10 มีปริมาณเถ้าชานอ้อยไม่เพียงพอที่จะเกิดกลไกดังกล่าว จึงแสดงพฤติกรรมการลดลงของกำลังเช่นเดียวกับ BA0

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.006



รูปที่ 6 ค่ากำลังรับแรงอัดหลังการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 7 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

หลังการเผาที่อุณหภูมิสูงเกิน 800°C สูตร BA20 และ BA30 เกิดการพองตัวคล้ายฟองน้ำ ซึ่งอธิบายได้ด้วยทฤษฎี Viscous Sintering โดย Fernández-Jiménez et al. [12] ที่อธิบายไว้ว่า ณ อุณหภูมิสูงกว่า 800°C ซิลิเกตในจีโอโพลิเมอร์จะเริ่มหลอมเหลวและเกิดการเผาผลึก โดยเฉพาะในสูตรที่มีสัดส่วนปริมาณซิลิกาสูง จะเกิดพันธะ Si-O-Si แทนพันธะ Al-O-Si ทำให้โครงสร้างใกล้เคียงกับแก้ว ดังนั้นสูตร BA10 จึงเป็นสูตรที่แสดงเสถียรภาพที่ดีที่สุดหลังการเผาที่อุณหภูมิสูง โดยสามารถรักษากำลังไว้ได้สูงกว่าสูตรอื่น

3.4 ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (รูปที่ 7) แสดงถึงประสิทธิภาพของเถ้าชานอ้อยในการลดการนำความร้อน โดยค่าการนำความร้อนลดลงจาก 0.471 W/m·K ในสูตรควบคุม เหลือ 0.411 0.386 และ 0.277 W/m·K สำหรับสูตร BA10 BA20 และ BA30 ตามลำดับ คิดเป็นการลดลง 12.8% 18.1% และ 41.1% ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการเพิ่มขึ้นของความพรุน ทั้งนี้สูตร BA30 มีค่าการนำความร้อนใกล้เคียงกับอิฐมวลเบา AAC (0.16-0.28 W/m·K) และต่ำกว่าอิฐมอญและอิฐบล็อกทั่วไป (0.8-0.9 W/m·K) อย่างมีนัยสำคัญ

3.5 ผลการวิเคราะห์สัดส่วนผสมที่เหมาะสม

ผลการวิเคราะห์ดัชนีประสิทธิภาพ (PI) โดยให้ค่าถ่วงน้ำหนักแก่กำลังรับแรงอัด ค่าการนำความร้อน และความหนาแน่น ในสัดส่วน 0.4 0.4 และ 0.2 ตามลำดับ (ตารางที่ 3) พบว่าสูตร BA30 มีค่า PI สูงสุดที่ 1.26 แสดงถึงความสมดุลระหว่างคุณสมบัติทั้งสาม แต่อย่างไรก็ตาม ยังต้องพิจารณาระหว่างคุณสมบัติด้านการป้องกันความร้อนและคุณสมบัติเชิงกลอื่นๆ ด้วย

เมื่อพิจารณาปัจจัยด้านกำลังอัดที่ต้องผ่านเกณฑ์มาตรฐานและความทนทานต่อความร้อน สูตร BA10 มีความเหมาะสมมากที่สุด โดยมี PI ที่ดี (1.20) มีกำลังอัดสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานถึง 32.9% ค่าการนำความร้อนลดลง 12.8% และมีความทนทานต่อความร้อนสูง โดยรักษากำลังไว้ได้ 18.7% ที่อุณหภูมิ 1000°C

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคหลังผ่านการให้ความร้อน (รูปที่ 8) ยืนยันว่าสูตร BA10 มีเสถียรภาพที่ดีที่สุด โดยแสดงให้เห็นถึงการกระจายรูพรุนที่เหมาะสม โดยมีรูพรุนขนาดเล็ก (1-8 μm) กระจายเท่าๆ กัน ซึ่งช่วยรักษาความแข็งแรงและป้องกันการแตกร้าวแม้ที่อุณหภูมิสูง ในขณะที่สูตร BA20 และ BA30 มีรูพรุนขนาดใหญ่ที่เชื่อมต่อกัน (15-50+ μm) ซึ่งสร้างเส้นทาง

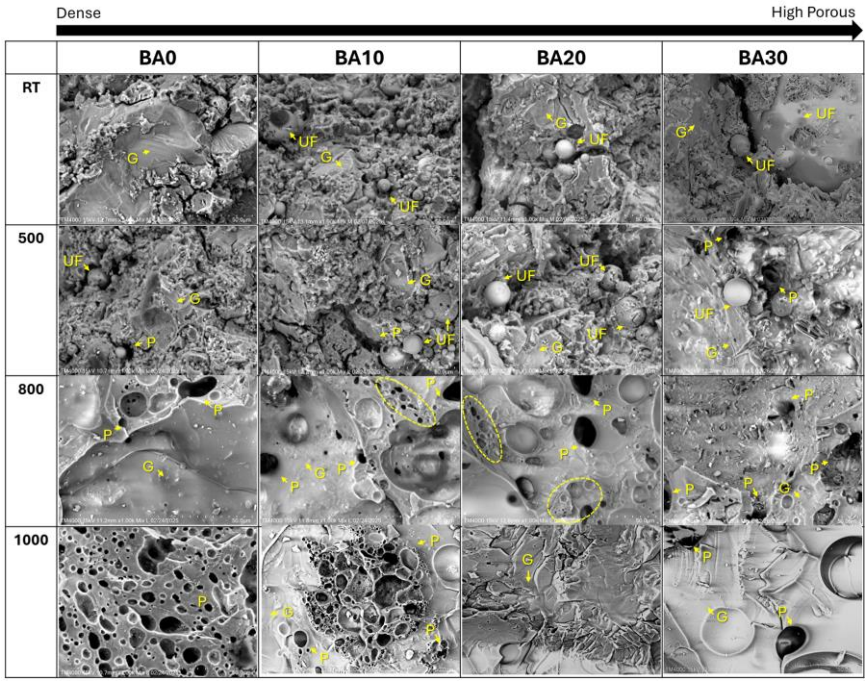
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.006

การแตกร้าวและลดความแข็งแรงของโครงสร้าง ประกอบกับการเกิดเฟสแก้ว (Glassy Phase) ที่มากเกินไป จากการหลอมตัวของซิลิกาที่อุณหภูมิสูง ซึ่งเมื่อเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วจะทำให้โครงสร้างมีความเปราะสูง ส่งผลให้เกิดจุดอ่อนทางโครงสร้าง โดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคเหล่านี้สอดคล้องกับผลการทดสอบที่พบว่า BA10 สามารถรักษากำลังอัด ไว้ได้ 18.7% ที่อุณหภูมิ 1000°C ขณะที่ BA20 และ BA30 มีการสูญเสียกำลังอัดมากกว่า

ตารางที่ 3 ดัชนีประสิทธิภาพของสูตรผสมต่างๆ

เถ้าชานอ้อย (%)	กำลังอัด (MPa)	ค่าการนำความร้อน (W/m·K)	ความหนาแน่น (kg/m³)	ดัชนีประสิทธิภาพ
	$w_1 = 0.4$	$w_2 = 0.4$	$w_3 = 0.2$	
0%	14.23 (1.42)	0.471 (1.00)	1900 (1.00)	1.17
10%	13.29 (1.33)	0.411 (1.14)	1820 (1.04)	1.20
20%	8.53 (0.85)	0.386 (1.22)	1800 (1.05)	1.04
30%	9.18 (0.92)	0.277 (1.70)	1780 (1.07)	1.26

หมายเหตุ: ค่าในวงเล็บคือค่าที่ Normalize แล้ว



Remarks: G = Geopolymer gel, UF = Unreacted fly ash, P = Pore

รูปที่ 8 โครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์หลังผ่านการให้ความร้อน ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.006

3.4 ผลการวิเคราะห์ที่เหมาะสมในการนำไปใช้งาน

ผลการทดสอบคุณสมบัติของอิฐจีโอโพลิเมอร์สูตร BA10 (ตารางที่ 4) แสดงว่าผ่านเกณฑ์มาตรฐาน มอก. 77-2565 ทุกด้าน โดยมีค่าความต้านแรงอัดเฉลี่ย 13.29 MPa (สูงกว่าเกณฑ์ขั้นต่ำ 32.9%) และค่าการดูดซึมน้ำเฉลี่ยเพียง 8.79% (ต่ำกว่าเกณฑ์มาก)ผลการทดสอบพฤติกรรมการปลดปล่อยความเป็นด่างของอิฐจีโอโพลิเมอร์สูตร BA10 พบว่าค่า pH ของน้ำกลั่นที่ใช้แช่ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญจาก 11.70 ในวันแรก เหลือ 10.92 ในวันที่ 9 โดยพบว่าในช่วง 7 วันแรก ค่า pH ลดลงอย่างชัดเจนก่อนที่อัตราการลดลงจะชะลอตัวในช่วงปลายของการทดสอบ แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มที่จะเข้าสู่ภาวะสมดุลทางเคมีของวัสดุ โดยพฤติกรรมดังกล่าวเป็นผลจากการชะล้างของสารด่างตกค้างที่ลดลงตามเวลา ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าอิฐจีโอโพลิเมอร์สูตรดังกล่าวจะมีเสถียรภาพทางเคมีเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป และมีศักยภาพในการนำไปใช้งานเป็นวัสดุก่อสร้างได้อย่างปลอดภัยโดยไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อผู้ใช้งานหรือสิ่งแวดล้อม

การวิเคราะห์ต้นทุนและการเปรียบเทียบคุณสมบัติกับอิฐชนิดอื่น แสดงได้ดังตารางที่ 5 โดยพบว่าอิฐจีโอ-โพลิเมอร์สูตร BA10 มีต้นทุนในการผลิตเฉลี่ยประมาณ 4 บาทต่อก้อน โดยมีคุณสมบัติด้านการป้องกันความร้อนที่ดีกว่าอิฐมอญและอิฐบล็อกอย่างชัดเจน (ค่าการนำความร้อน 0.411 W/m·K เทียบกับ 0.700-0.900 W/m·K) ในด้านกำลังรับแรงอัด อิฐสูตร BA10 มีค่าอยู่ที่ 13.29 MPa ซึ่งมีประสิทธิภาพดีใกล้เคียงกับอิฐมอญ (15.0 MPa) และดีกว่าอิฐบล็อก (11.0 MPa) และอิฐมวลเบา (7.0 MPa) ส่วนการดูดซึมน้ำของอิฐสูตร BA10 พบว่ามีค่าอยู่ที่ 8.79% ซึ่งเหมาะสำหรับการใช้งานในสภาพแวดล้อมที่ต้องการความทนทานสูง รวมทั้งมีความสามารถในการทนไฟได้นานกว่า 4 ชั่วโมง เทียบกับอิฐมอญ (2 ชั่วโมง) และอิฐมวลเบา (4 ชั่วโมง) ทั้งนี้แม้จะมีคุณสมบัติทางเทคนิคที่เหนือกว่า แต่เพื่อประเมินศักยภาพในการนำไปใช้งานในเชิงพาณิชย์อย่างครอบคลุม การวิเคราะห์ SWOT จึงมีความจำเป็น

จากการวิเคราะห์ SWOT พบจุดแข็งสำคัญของอิฐจีโอโพลิเมอร์ คือคุณสมบัติด้านการป้องกันความร้อนที่ดี มีค่ากำลังรับแรงอัดสูง และปล่อย CO_2 ในกระบวนการผลิตต่ำ จุดอ่อนคือต้นทุนที่สูงกว่าอิฐทั่วไปและยังไม่เป็นที่รู้จักในท้องตลาด ส่วนด้านโอกาส อิฐจีโอโพลิเมอร์มีความสอดคล้องกับแนวโน้มความต้องการของตลาดวัสดุก่อสร้างที่ให้ความสำคัญกับความยั่งยืนและการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ขณะที่อุปสรรคสำคัญของการพัฒนาวัสดุดังกล่าว คือ การแข่งขันกับผลิตภัณฑ์เดิมที่มีต้นทุนต่ำและเป็นที่ยอมรับในตลาดมาอย่างยาวนาน ตลอดจนข้อจำกัดด้านมาตรฐานและข้อกำหนดทางวิศวกรรมที่ยังไม่คลอบคลุมวัสดุทางเลือกประเภทจีโอโพลิเมอร์

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของจีโอโพลิเมอร์เทียบกับ มอก.77-2565

สมบัติ	มอก.77-2565	อิฐ BA10
ความต้านทานแรงอัดเฉลี่ย (MPa)	10.0 - 21.0	**13.29 ± 0.7**
ความต้านทานแรงอัดแต่ละก้อน (MPa)	9.0 - 17.0	**12.59 - 14.0**
การดูดซึมน้ำเฉลี่ย (%)	17.0 - 22.0	**8.79 ± 1.2**
ความหนาแน่นเชิงปริมาตร (kg/m³)	-	**1,820 ± 44**

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.006

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบราคาและคุณสมบัติของอิฐชนิดต่างๆ

ปัจจัย	อิฐสูตร BA10	อิฐมอญ	อิฐบล็อก	อิฐมวลเบา
ราคา (บาท/ก้อน)	4	1.5-2.2	5.5-7.0	23-28
ความหนาแน่นเฉลี่ย (kg/m³)	1,820	1,900	2,000	1,000
ค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ย (MPa)	13.29	15.0	11.0	7.0
การดูดซึมน้ำเฉลี่ย (%)	8.79	20.0	8.0	15.0
ค่าการนำความร้อน (W/m·K)	0.411	0.700	0.900	0.280
ความสามารถต้านทานไฟ (ชั่วโมง)	>4	2	1	4
จำนวนก้อน/ตร.ม.	134-178	134	12.5	8.3
ราคาต่อตารางเมตร	536-712	201-295	69-88	191-232

4. สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้มุ่งพัฒนาจีโอโพลิเมอร์ที่มีประสิทธิภาพในการป้องกันความร้อนโดยใช้เถ้าชานอ้อยเป็นวัสดุเสริมในจีโอโพลิเมอร์ที่ทำจากเถ้าลอยผสมกับดินขาวเผา ผลการวิจัยพบความสัมพันธ์ที่ชัดเจนระหว่างปริมาณเถ้าชานอ้อยกับคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ โดยการเพิ่มปริมาณเถ้าชานอ้อยจาก 0% เป็น 30% ส่งผลให้ค่าการนำความร้อนลดลงอย่างมีนัยสำคัญถึง 41.1% ขณะที่ความหนาแน่นลดลงและความพรุนเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม กำลังอัดมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณเถ้าชานอ้อยที่เพิ่มขึ้น ยกเว้นในสูตร BA30 ที่มีกำลังอัดสูงกว่า BA20 เล็กน้อย

จากการวิเคราะห์ดัชนีประสิทธิภาพและปัจจัยทางวิศวกรรม พบว่าอิฐจีโอโพลิเมอร์สูตร BA10 เป็นสูตรที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากสามารถลดค่าการนำความร้อนลง 12.8% เมื่อเทียบกับสูตรควบคุม ขณะที่ยังรักษากำลังอัดให้สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน มอก.77-2565 ถึง 32.9% นอกจากนี้ ยังมีค่าการดูดซึมน้ำเพียง 8.79% และมีความทนทานต่อความร้อนสูงโดยรักษากำลังไว้ได้ 18.7% ที่อุณหภูมิ 1000°C ซึ่งเหนือกว่าวัสดุก่อสร้างทั่วไปอย่างมีนัยสำคัญ

การวิเคราะห์ต้นทุนและเปรียบเทียบคุณสมบัติ พบว่า อิฐจีโอโพลิเมอร์สูตร BA10 มีต้นทุนประมาณ 4 บาทต่อก้อน แม้จะมีต้นทุนต่อตารางเมตรสูงกว่าอิฐชนิดอื่น แต่มีคุณสมบัติด้านการป้องกันความร้อนที่ดีกว่าอย่างชัดเจน (ค่าการนำความร้อน 0.411 W/m·K เทียบกับ 0.700-0.900 W/m·K ของอิฐมอญและอิฐบล็อก) มีความแข็งแรงสูงกว่าอิฐมวลเบา (กำลังรับแรงอัดที่ 13.29 MPa เทียบกับ 7 MPa) และมีความทนไฟสูงกว่า 4 ชั่วโมง เทียบกับอิฐมอญ (2 ชั่วโมง) และ อิฐบล็อก (1 ชั่วโมง)

นอกจากนี้ ยังพบว่าที่อุณหภูมิ 500°C อิฐสูตรที่มีเถ้าชานอ้อยสูงมีแนวโน้มเพิ่มกำลังอัดซึ่งเกิดจากการเผาผลึก (Sintering) โดยเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจาก Semi-crystalline เป็น Crystalline อย่างสมบูรณ์

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นศักยภาพของอิฐจีโอ-โพลิเมอร์ในการเป็นวัสดุก่อสร้างที่ทนความร้อน มีความแข็งแรง และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมโดยช่วยลดการปล่อย CO_2 จากปูนซีเมนต์ได้อย่างยั่งยืน

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.006

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณบริษัท ทอรัส พอซโซลานซ์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เถ้าลอยสำหรับใช้ในงานวิจัย และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม ศูนย์วิจัยพัฒนาวัสดุวิศวกรรม ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมการเชื่อม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองเพื่อให้งานวิจัยครั้งนี้เสร็จสมบูรณ์ด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

[1] J. Davidovits, Properties of geopolymer cements, The 1st International Conference on Alkaline Cements and Concretes, Proceedings, 1994, 131-149.

[2] C. Tippayasam, P. Keawpapasson, P. Thavorniti, T. Panyathanmaporn, C. Leonelli and D. Chaysuwan, Effect of Thai kaolin on properties of agricultural ash blended geopolymers, Construction and Building Materials, 2014, 53, 455-459.

[3] P. Cong, R. Du, H. Gao and Z. Chen, Comparison and assessment of carbon dioxide emissions between alkali-activated materials and OPC cement concrete, Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2024, 11(5), 918-938.

[4] J. Zhang, S. Fernando, D.W. Law, C. Gunasekara, S. Setunge, M. Sandanayake and G. Zhang, Life cycle assessment for geopolymer concrete bricks using brown coal fly ash, Sustainability, 2023, 15(9), 7718.

[5] L.K. Turner and F.G. Collins, Carbon dioxide equivalent (CO_2-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete, Construction and Building Materials, 2013, 43, 125-130.

[6] W. M. W. Ibrahim, M. M. A. B. Abdullah, K. Hussin, A. A. Kadir, and R. Ahmad, Technological properties of fly ash-based lightweight geopolymer brick, Lecture Notes in Civil Engineering, 2021, 129, 25-50.

[7] K.A.M. El Naggar, M.M. Abd El-Razik, M. Kuku, M. Arishi, I.M. Maafa, A. Yousef and E.M. Abdel Hamid, Performance of geopolymer insulation bricks synthesized from industrial waste, Minerals, 2024, 14(10), 977.

[8] S. Siriruekratana and N. Supakata, Development of geopolymer bricks from synergistic use of bagasse ash and concrete residue as an alternative for industrial waste management, Naresuan University Journal of Science and Technology, 2017, 25(4), 69-78.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.006

[9] Y. Wang, X. Liu, W. Zhang, Z. Li, Y. Zhang, Y. Li, and Y. Ren, Effects of Si/Al ratio on the efflorescence and properties of fly ash based geopolymer, Journal of Cleaner Production, 2020, 244(3), 118852.

[10] P. Kittisayarm, T. Pantongsuk, A. Srikhacha, D. Chaysuwan and C. Tippayasam, Development of high-strength geopolymers by high-reactive bagasse ash, The Journal of Industrial Technology, 2020, 16(3), 66-79. (in Thai)

[11] R.S. Kaplan and D.P. Norton, The balanced scorecard: Measures that drive performance, Harvard Business Review, 2005, 83(7-8), 172.

[12] A. Fernández-Jiménez, A. Palomo and M. Criado, Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: A descriptive model, Cement and Concrete Research, 2005, 35(6), 1204-1209.

[13] H.Y. Zhang, V.R. Kodur, B. Wu, L. Cao and F. Wang, Thermal behavior and mechanical properties of geopolymer mortar after exposure to elevated temperatures, Construction and Building Materials, 2016, 109, 17-24.

บทความวิจัย

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.007

คอนกรีตบล็อกกลวงกันความร้อนมวลรวมกากเถ้าปาล์มน้ำมันผสมหน้ากากอนามัยและหน้ากาก KF94

ปรีชา สะแลแม กฤติยอา อ่องวุฒิวัตน์ และ อาบีเด็ง ฮาวา*

หน่วยวิจัยโครงสร้างพื้นฐานและนวัตกรรมวัสดุ, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์,
มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: abideng.hawa@gmail.com; dr.abideng@pnu.ac.th

วันที่รับบทความ: 23 มกราคม 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 17 มิถุนายน 2568; วันที่ตอบรับบทความ: 26 มิถุนายน 2568
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 19 สิงหาคม 2568

บทคัดย่อ: การศึกษานี้มีเป้าหมายของการนำวัสดุเหลือทิ้งมาค้นหาส่วนผสมที่เหมาะสมในการประยุกต์เป็นคอนกรีตบล็อกกลวงกันความร้อน โดยใช้มวลรวมกากเถ้าปาล์มน้ำมันและแทนที่บางส่วนด้วยหน้ากากอนามัยและหน้ากาก KF94 ในอัตราส่วนผสมร้อยละ 0, 2, 4 และ 6 โดยน้ำหนักของกากเถ้าปาล์มน้ำมัน ทำการทดสอบกำลังอัด ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ ความต้านทานไฟฟ้า และโครงสร้างระดับจุลภาค ของตัวอย่างซีเมนต์มอร์ต้าร์ และทดสอบความสามารถในการกันความร้อนในรูปของคอนกรีตบล็อกกลวงขนาด 70x190x390 มิลลิเมตร ผลการทดสอบพบว่าการผสมหน้ากากอนามัยและหน้ากาก KF94 ส่งผลให้กำลังอัดและความหนาแน่นลดลง เมื่อทำการทดสอบตัวอย่างหล่อเป็นคอนกรีตบล็อกกลวง พบว่าคอนกรีตบล็อกกลวงมวลรวมกากเถ้าปาล์มน้ำมันสามารถกันความร้อนได้ดีกว่าคอนกรีตบล็อกกลวงที่มีจำหน่ายในท้องตลาดอย่างชัดเจน และเมื่อผสมหน้ากากอนามัยและหน้า KF94 ประสิทธิภาพกันความร้อนเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย ดังนั้นคอนกรีตบล็อกกลวงมวลรวมกากเถ้าปาล์มน้ำมันผสมหน้ากากอนามัยและหน้ากาก KF94 สามารถใช้เป็นแนวทางนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตคอนกรีตบล็อกกลวงที่ไม่รับน้ำหนักและมีสมบัติเพิ่มเติมในการกันความร้อนได้

คำสำคัญ: กากเถ้าปาล์มน้ำมัน; หน้ากากอนามัย; หน้ากาก KF94; คอนกรีตบล็อกกลวง

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.007

บทความวิจัย

Thermal Insulation Hollow Concrete Blocks using Palm Oil Clinker Containing Surgical Face Masks and KF94 Masks as Aggregate

Preecha Salaemae, Krittiya Ongwuttiwat and Abideng Hawa*

Infrastructure and Materials Innovation Research Unit, Department of Civil Engineering,
Faculty of Engineering, Princess of Naradhiwas University

* Corresponding author, E-mail: abideng.hawa@gmail.com, dr.abideng@pnu.ac.th

Received: 23 January 2025; Revised 17 June 2025; Accepted: 26 June 2025
Online Published: 19 August 2025

Abstract: This study aimed to utilize waste materials to identify suitable compositions for developing thermally insulating hollow concrete blocks. The research incorporated palm oil clinker aggregates as the base material, partially replaced by surgical face masks and KF94 masks at substitution rates of 0%, 2%, 4%, and 6% by weight of the palm oil clinker. This study evaluated the compressive strength, density, water absorption, electrical resistivity, and microstructure of cement mortar specimens. Additionally, the thermal insulation performance was assessed using 70x190x390 millimeters hollow concrete blocks. The experimental results indicated that incorporating the surgical face and KF94 masks reduced the compressive strength and density. However, when tested in hollow concrete block form, palm oil clinker aggregate blocks demonstrated significantly superior thermal insulation compared to commercially available hollow concrete blocks. Furthermore, the inclusion of surgical face and KF94 masks slightly enhanced the thermal insulation performance. In conclusion, hollow concrete blocks composed of palm oil clinker aggregates blended with surgical face masks and KF94 masks present a viable approach for manufacturing nonloadbearing hollow concrete blocks with enhanced thermal insulation properties.

Keywords: Palm oil clinker; Surgical face masks; KF94 masks; Hollow concrete blocks

บทความวิจัย

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.007

1. บทนำ

การกำจัดวัสดุที่ใช้แล้วที่มีปริมาณมากและยังเป็นวัสดุที่สามารถส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมอย่างรุนแรงนั้น การนำกลับมาใช้ใหม่น่าจะเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาวัสดุเหลือทิ้งหลายชนิดได้ถูกนำกลับมาใช้ใหม่ในการผสมเข้าไปในมอร์ต้าร์หรือคอนกรีตเพื่อใช้เป็นมวลรวม เช่น พลาสติก และเศษคอนกรีตเหลือทิ้ง เป็นต้น ซึ่งเป็นการช่วยลดปริมาณของเหลือทิ้งในสิ่งแวดล้อมได้อีกทางหนึ่ง โดยยังสามารถรักษาสมบัติของคอนกรีตให้อยู่ในเกณฑ์ที่สามารถใช้งานได้ นอกจากนั้นยังสามารถเพิ่มสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดียิ่งขึ้น

จากสถานการณ์การระบาดของโรคโควิด-19 ที่ผ่านมาพบว่า มีหน้ากากอนามัยที่ใช้แล้วถูกทิ้งเป็นจำนวนมาก โดยทั่วไปแล้วการผลิตหน้ากากอนามัยแบบใช้แล้วทิ้งนั้นต้องใช้พอลิเมอร์เป็นส่วนประกอบ ซึ่งจะมีผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม และโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อไหลลงสู่ทะเล เมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่งทำให้เกิดไมโครพลาสติกจากการย่อยสลายของหน้ากากอนามัยเหล่านี้ การที่หน้ากากอนามัยถูกผลิตและใช้งานมากขึ้นนี้เป็นการเพิ่มความเสี่ยงต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมีนัยสำคัญ ในส่วนของหน้ากาก KF94 เข้ามาแทนที่หน้ากากอนามัย หน้ากาก KF94 สามมารถป้องกันฝุ่น PM2.5 ได้ถึงร้อยละ 94 ได้รับมาตรฐานจากองค์กรความปลอดภัยและชีวอนามัยแห่งสาธารณรัฐเกาหลี ในขณะที่ฝุ่นขนาดมากว่า 3 ไมครอน สามารถป้องกันได้ร้อยละ 100 ในขณะที่ละอองไอ จาม มีละอองขนาดใหญ่ กว่า 3 ไมครอน [1] จึงทำให้ได้รับความนิยม

ในทางวิชาการและอุตสาหกรรมก่อสร้างได้ให้ความสนใจในการใช้เส้นใยในงานคอนกรีตและวัสดุซ่อมแซม เนื่องจากทำให้สมบัติด้านการรับแรงดึงและแรงดัดดีกว่าคอนกรีตปกติที่ไม่มีการผสมเส้นใย เช่นเดียวกันกับการผสมเส้นใยจากหน้ากากอนามัย Lynch และคณะ [2] ที่แสดงให้เห็นว่าเส้นใยหน้ากากอนามัยสามารถเพิ่มค่ากำลังอัดของคอนกรีตได้เป็นอย่างดี และในการศึกษาของ Thoudam และคณะ [3] ถึงการใช้เส้นใยหน้ากากอนามัยผสมเข้าไปในคอนกรีตบล็อก พบว่าคอนกรีตบล็อกสามารถรับแรงอัดและแรงดัดได้ดีขึ้นเมื่อผสมเส้นใยหน้ากากอนามัยมากขึ้น อย่างไรก็ตาม นักวิจัยได้มีการศึกษาการนำหน้ากากอนามัยผสมซีเมนต์มอร์ต้าร์ เตรียมหน้ากากอนามัยโดยการตัดเป็นชิ้นขนาดกว้าง 5 มิลลิเมตร ยาว 10 มิลลิเมตร และ 5 มิลลิเมตร ยาว 20 มิลลิเมตร จากการศึกษาพบว่าเมื่อแทนที่หน้ากากอนามัยเพิ่มมากขึ้นมีผลทำให้กำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้าร์ลดลง แต่กำลังดัดมีค่ามากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของขนาดหน้ากากอนามัยพบว่าหน้ากากอนามัยที่มีขนาดยาวรับแรงอัดและแรงดัดได้น้อยกว่าหน้ากากอนามัยขนาดที่สั้นกว่า [4] Aziz และคณะ [5] ใช้หน้ากากอนามัยขนาดกว้าง 5 มิลลิเมตร ยาว 20 มิลลิเมตร และ 5 มิลลิเมตร ยาว 40 มิลลิเมตร ผสมในคอนกรีตและพบว่าการใช้หน้ากากอนามัยทั้งสองขนาดมีผลให้กำลังอัดลดลงเมื่อเพิ่มหน้ากาก

กากเถ้าปาล์มน้ำมัน (Palm Oil Clinker) เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันและโรงไฟฟ้าชีวมวล พบมากในพื้นที่ที่มีการปลูกปาล์มจำนวนมาก โดยเฉพาะทางภาคใต้ของประเทศไทย กากเถ้าปาล์มน้ำมันหลังจากผ่านกระบวนการเผาไหม้ออกมาพร้อม

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.007

เถ้าปาล์มน้ำมัน (Palm Oil Ash) ด้วยสมบัติที่มีน้ำหนักเบาและเป็นวัสดุเหลือทิ้ง ทั้งยังสร้างปัญหาทางสิ่งแวดล้อมในบริเวณที่มีการทิ้งรอบ ๆ อุตสาหกรรม ทำให้นักวิจัยมีการศึกษาการนำกากเถ้าปาล์มกลับมาใช้ประโยชน์ทางด้านงานก่อสร้าง คอนกรีตบล็อกกลวง (Hollow concrete blocks) แบ่งเป็น 2 ชนิด 1. คอนกรีตบล็อกกลวงรับน้ำหนัก (Hollow loadbearing concrete blocks) มาตรฐาน มอก. 57-2560 [6] 2. คอนกรีตบล็อกกลวงไม่รับน้ำหนัก (Hollow nonloadbearing concrete blocks) มาตรฐาน มอก. 58-2560 [7] โดยกำหนดกำหนดความสามารถรับแรงอัดเฉลี่ยได้ไม่น้อยกว่า 13.8 เมกะพาสคัล และ 4.14 เมกะพาสคัล ตามลำดับ นอกจากนั้นมาตรฐาน มอก. ยังพิจารณาถึงความหนาแน่น มิติของก้อนตัวอย่าง เป็นต้น

ในการศึกษาครั้งนี้จะเป็นการใช้กากเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นมวลรวมผสมด้วยหน้ากากอนามัยและหน้ากาก KF94 โดยศึกษาถึงอิทธิพลของหน้ากากทั้งสองต่อ กำลังอัด ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ ความต้านทานไฟฟ้า ความสามารถในการกันความร้อนเมื่อทำการหล่อเป็นคอนกรีตบล็อกกลวง และศึกษาการโครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์มอร์ต้าร์ เพื่อศึกษาถึงแนวทางความเป็นไปได้ในการนำวัสดุเหลือทิ้งและขยะมาประยุกต์ใช้เป็นคอนกรีตบล็อกกลวงกันความร้อน ซึ่งการศึกษาครั้งนี้เน้นสมบัติด้านความสามารถในการกันความร้อนของคอนกรีตบล็อกกลวงเป็นหลัก

2. วิธีดำเนินงานวิจัย

2.1 วัสดุ

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีจำหน่ายตามท้องตลาดจะมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบทางเคมีหลัก มีสีเทาเข้ม มีลักษณะเป็นเหลี่ยม และรูปร่างไม่แน่นอน มีสมบัติการยึดประสานที่ดีเมื่อได้ผสมกับน้ำ

กากเถ้าปาล์มน้ำมันที่ใช้ในการศึกษานี้ เป็นกากเถ้าปาล์มน้ำมันที่ได้จากโรงงานในนิคมอุตสาหกรรมบาเจาะ จังหวัดนราธิวาส กากเถ้าปาล์มน้ำมันหลังจากการเผาไหม้ทะลายปาล์ม กะลาปาล์ม และเปลือกปาล์ม ปะปนออกมาพร้อมเถ้าปาล์มน้ำมัน นำมาอบแห้งด้วยตู้อบที่อุณหภูมิ 100±5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมาร่อนผ่านตะแกรงเพื่อแยกกากเถ้าปาล์มและเถ้าปาล์ม นำกากเถ้าปาล์มที่ผ่านการแยกไปล้างน้ำสะอาด แล้วนำกากเถ้าปาล์มน้ำมันไปตากแดดให้แห้งแล้วนำไปเก็บไว้ในถังพลาสติก สมบัติของกากเถ้าปาล์มน้ำมันดังแสดงในตารางที่ 1 มีค่าความถ่วงจำเพาะ 1.89 น้อยกว่าทรายแม่น้ำปกติทั่วไป แต่มีการดูดซึมน้ำสูงถึงร้อยละ 5.20 และมีความหนาแน่น 730 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร นับว่าเป็นสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งเพื่อประยุกต์เป็นวัสดุก่อผนัง ซึ่งจะทำให้ผนังมีน้ำหนักเบาส่งผลการรับน้ำหนักต่อโครงสร้างอาคาร เมื่อทำการวิเคราะห์โดยการสุ่มกากเถ้าปาล์มน้ำมันทดสอบจำนวน 3 ครั้ง การกระจายขนาดของกากเถ้าปาล์มน้ำมันส่วนใหญ่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C33/C33M [8] ที่จัดเป็นมวลรวมละเอียดดังรูปที่ 1

บทความวิจัย

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.007

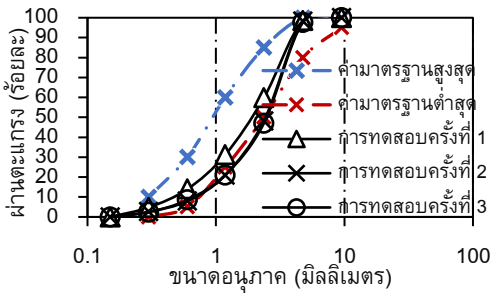
ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพของกากเถ้าปาล์มน้ำมัน หน้ากากอนามัย และหน้ากาก KF94

สมบัติ	กากเถ้าปาล์มน้ำมัน	หน้ากากอนามัย	หน้ากาก KF94
ความถ่วงจำเพาะ	1.89	-	-
การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)	5.20	5.91	6.20
ความหนาแน่นหลวม (กก./ลบ.ม.)	675	-	-
ความหนาอัดแน่น (กก./ลบ.ม.)	730	-	-

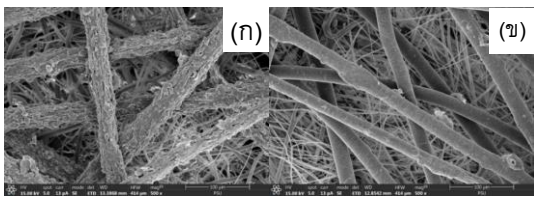
หน้ากากอนามัย (Surgical Face Mask) และหน้ากาก KF94 ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ เป็นหน้ากากอนามัยที่ผ่านการใช้งาน นำหน้ากากอนามัยไปตากแดด 1 วัน จากนั้นนำเข้าอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นทำการเอาสายคล้องและเหล็กออกจากหน้ากาก ต่อด้วยตัดหน้ากากให้ได้ขนาด 5x5 มิลลิเมตร เพื่อใช้ในการผสม โดยการแทนที่กากเถ้าปาล์มน้ำมันโดยน้ำหนัก ซึ่งหน้ากากอนามัยและหน้ากาก KF94 ผลิตจากวัสดุเส้นใยพอลิโพรพีลีน Polypropylene สมบัติทางกายภาพของหน้ากากอนามัยและหน้ากาก KF94 ดังแสดงในตารางที่ 1 ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของหน้ากากทั้งสองแสดงดังรูปที่ 2 โดยรูปที่ 2(ก) ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของหน้ากากอนามัยของแผ่นชั้นนอก (3 ชั้น) มีลักษณะเส้นใยขนาดใหญ่และมีผิวขรุขระ ในขณะที่เส้นชั้นในจะมีขนาดเล็กและ มีผิวเรียบ ซึ่งมีความแตกต่างกับลักษณะจุลภาคของหน้ากาก KF94 ที่เส้นชั้นนอกมีผิวลักษณะราบเรียบเช่นเดียวกันกับเส้นชั้นในดังรูปที่ 2 (ข)

2.2 ส่วนผสมและการเตรียมตัวอย่าง

การเตรียมตัวอย่างซีเมนต์มอร์ต้าร์ตามอัตราส่วนผสมดังตารางที่ 2 ใช้อัตราส่วนซีเมนต์ต่อมวลรวมละเอียด 1:2.75 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.7 โดยน้ำหนัก และเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมของ



รูปที่ 1 การกระจายขนาดคละของกากเถ้าปาล์มน้ำมัน



รูปที่ 2 ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของหน้ากาก (ก) หน้ากากอนามัย และ (ข) หน้ากาก KF94

หน้ากากอนามัยและหน้ากาก KF94 ที่ใช้การแทนที่กากเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 0, 2, 4 และ 6 โดยน้ำหนัก ผสมซีเมนต์มอร์ต้าร์ด้วยเครื่องผสมมอร์ต้าร์จากนั้นเทเข้าแบบหล่อขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M [9] วางไว้ที่อุณหภูมิห้อง 30±2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงแกะแบบก้อนตัวอย่างแล้วนำไปบ่มอากาศจนครบอายุ 1, 7 และ 28 วัน สำหรับการทดสอบกำลังอัดประลัย

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.007

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมซีเมนต์มอร์ต้าร์

สัญลักษณ์	วัสดุผสมซีเมนต์มอร์ต้าร์ (กรัม)				
	ซีเมนต์	กากเถ้าปาล์มน้ำมัน	หน้ากากอนามัย	หน้ากาก KF94	น้ำ
CT	100	275	0	-	70
2SF	100	269.5	5.5	-	70
4SF	100	265	11	-	70
6SF	100	258.8	16.5	-	70
2KF	100	269.5	-	5.5	70
4KF	100	264	-	11	70
6KF	100	258.5	-	16.5	70

เมื่อได้ข้อมูลการทดสอบกำลังอัดประลัยทั้งหมด ทำการเลือกอัตราส่วนผสมที่ให้กำลังอัดที่สูง เมื่อผสมหน้ากากอนามัยและหน้ากาก KF94 มาหล่อเป็นคอนกรีตบล็อกกลวงขนาด 70x190x390 มิลลิเมตร เท่ากันกับขนาดคอนกรีตบล็อกกลวงที่มีจำหน่ายตามท้องตลาด เพื่อการทดสอบความสามารถในการกันความร้อนเทียบกับคอนกรีตบล็อกกลวงทั่วไป

2.3 การทดสอบ

การทดสอบกำลังอัดตัวอย่างซีเมนต์มอร์ต้าร์หลังจากแกะแบบหล่อที่ผ่านการหล่ออยู่ในแบบ 24 ชั่วโมง ก้อนตัวอย่างจะถูกบ่มต่อที่อุณหภูมิห้อง (30±2 องศาเซลเซียส) ถึงอายุ 1, 7 และ 28 วัน เมื่อครบอายุบ่มนำไปทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M [9] ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine การทดสอบการดูดซึมน้ำใช้ก้อนตัวอย่างขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร ที่ผ่านการบ่มอากาศที่อุณหภูมิห้องอายุ 28 วัน เริ่มจากการนำก้อนตัวอย่างไปชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำไปแช่น้ำเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วยกก้อนตัวอย่าง ขึ้นมาเช็ดผิวให้แห้งก่อนนำไปชั่งน้ำหนัก หลังจากนั้นนำตัวอย่างแช่น้ำต่ออีก 5 ชั่วโมง รวมเป็น 6 ชั่วโมง ทำต่อเนื่องที่อายุ 12 และ 24 ชั่วโมง โดยรวมระยะเวลาแช่ก่อนหน้า นำค่าที่ได้มาคำนวณปริมาณการดูดซึมน้ำดังสมการที่ (1)

$$\left(\frac{W_x - W_{28}}{W_{28}}\right) x100 \quad (1)$$

W_{28} = น้ำหนักก่อนแช่น้ำ

W_x = น้ำหนักหลังแช่น้ำที่แต่ละอายุ

การทดสอบความต้านทานไฟฟ้าใช้ตัวอย่างซีเมนต์มอร์ต้าร์ขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร ทดสอบตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องที่ผ่านการบ่ม 28 วัน ใช้เครื่อง UNI-T รุ่น UT210D โดยการใช้หัวจี้ที่ผิวของซีเมนต์มอร์ต้าร์ 2 ด้าน ที่ตรงกันข้ามและอยู่ในแนวเดียวกัน เป็นเวลา 2 นาที ดังรูปที่ 3 นำค่าที่ได้ไปคูณกับความหนาของก้อนตัวอย่างดังสมการที่ (2)

$$\rho = R \times L \quad (2)$$

ρ = ความต้านทานไฟฟ้า (เมกะโอร์ม-เซนติเมตร)
R = ความต้านทานไฟฟ้า (เมกะโอร์ม) ค่าจากเครื่อง
L = ความหนาตัวอย่าง (เซนติเมตร)

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.007

การทดสอบความสามารถในการกันความร้อนในลักษณะเดียวกันกับการทดสอบของ Salaemae และคณะ [10] ใช้ตัวอย่างขนาด 70x190x390 มิลลิเมตร ขนาดเดียวกันกับคอนกรีตบล็อกกลวงที่มีจำหน่ายในท้องตลาด โดยทำการทดสอบในกล่องโฟมดังแสดงรูปที่ 4 ทำการติดตั้งเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ 5 ตำแหน่ง เพื่อทำการวัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละตำแหน่งในแต่ละช่วงเวลา เป็นเวลา 5 ชั่วโมง คอนกรีตบล็อกกลวงกันความร้อนมวลรวมกากเถ้าปาล์มน้ำมันมีลักษณะดังรูปที่ 5

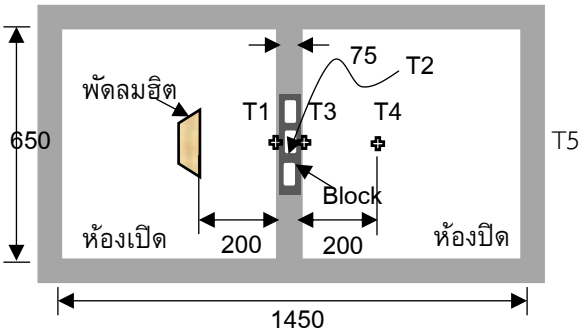
การวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์มอร์ต้าร์ ถ่ายรูปด้วยเครื่องถ่ายรูปอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) รุ่น JSM 5800 ทั้งหน้ากากอนามัยและซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่อายุ 28 วัน โดยใช้เศษตัวอย่างที่แตกหลังจากกดทดสอบกำลังอัด

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

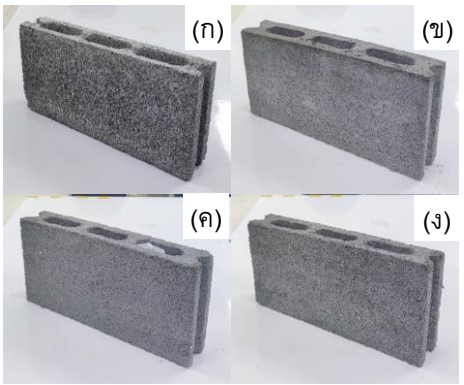
3.1 กำลังอัดซีเมนต์มอร์ต้าร์

รูปที่ 6 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้าร์ผสมหน้ากากอนามัยและหน้ากาก KF94 แทนที่กากเถ้าปาล์มน้ำมัน (POC) ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 2, 4 และ 6 โดยน้ำหนัก (CT, 2SF, 4SF, 6SF, 2KF, 4KF และ 6KF) ดังตารางที่ 2 ผลการทดสอบการแทนที่ด้วยหน้ากากอนามัยดังรูปที่ 6(ก) พบว่าเมื่อผสมหน้ากากอนามัยค่ากำลังอัดมีค่าลดลงอย่างชัดเจน เนื่องจากการผสมหน้ากากอนามัยที่ไม่มีความแข็งในตัวมันเองเมื่อเทียบกับกากเถ้าปาล์มน้ำมัน จึงมีผลให้ซีเมนต์มอร์ต้าร์สามารถรับแรงได้น้อย และด้วยลักษณะทางกายรูปของหน้ากากอนามัยที่ได้ผ่าน

รูปที่ 3 การทดสอบความต้านทานไฟฟ้า

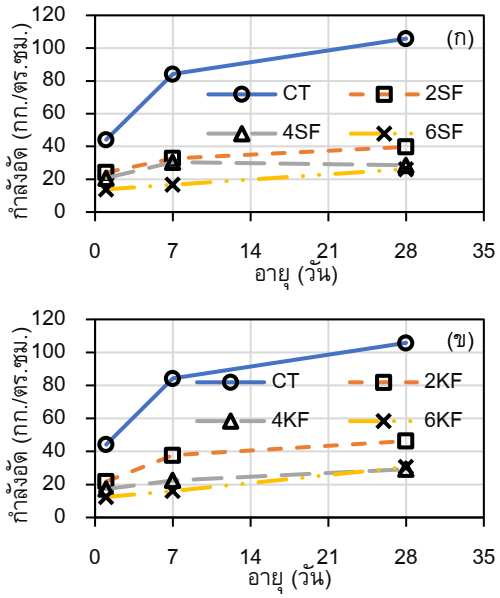


รูปที่ 4 การวางตำแหน่งเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและชุดทดสอบกันความร้อนคอนกรีตบล็อกกลวง



รูปที่ 5 ลักษณะทางกายภาพคอนกรีตบล็อกกลวง (ก) ทั่วไป (ข) CT (ค) 2SF และ (ง) 2KF

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.007



รูปที่ 6 กำลังอัดซีเมนต์มอร์ต้าร์ (ก) ผสมหน้ากากอนามัย และ (ข) ผสมหน้ากาก KF94

การตัดให้ได้ขนาด 5x5 มิลลิเมตร นับว่าเป็นมวลรวมที่มีลักษณะแบนอย่างชัดเจน และเป็นที่น่าสังเกตว่าซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่ผสมหน้ากากอนามัยมีลักษณะที่แห้งในระหว่างการผสม ซึ่งจะแตกต่างกับซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่ไม่มีการผสมหน้ากากอนามัย เนื้อมอร์ต้าร์มีความชุ่มเปียกทำให้ซีเมนต์เพสต์สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นทำให้เกิดการแข็งตัวและมีการยึดเกาะระหว่างมวลรวมทำให้ได้กำลังอัดที่สูง แต่ด้วยการใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์สูงถึง 0.7 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ซีเมนต์มอร์ต้าร์ควบคุม (CT) มีค่ากำลังอัดไม่สูง การผสมหน้ากากอนามัยเข้าไปทำให้เกิดการดูดซึมน้ำมากขึ้น จากที่มวลรวมกากเถ้าปาล์มน้ำมันสามารถดูดซึมปริมาณมาก เมื่อผสมหน้ากากอนามัยส่งผลให้เกิดการดูดซึมน้ำมากยิ่งขึ้นไปอีกจากหน้ากากที่มีการดูดซึมน้ำสูง ดังตารางที่ 1 เมื่อเกิดการดูดซึมน้ำมากขึ้นในระหว่างการผสมส่งให้เนื้อซีเมนต์มอร์ต้าร์แห้ง ด้วยน้ำในซีเมนต์ถูกดูดจากกากเถ้าปาล์มน้ำมันและหน้ากากอนามัยนั้น ทำให้ซีเมนต์ขาดน้ำในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นส่งผลให้กำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้าร์ผสมหน้ากากอนามัยมีกำลังลดลงในทุกอัตราส่วน และเป็นที่น่าสังเกตว่าซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่ผสมหน้ากากอนามัยค่ากำลังอัดมีการพัฒนาเล็กน้อยจาก 1 วัน ถึง 28 วัน โดยเฉพาะจาก 7 วัน ถึง 28 วัน เช่นเดียวกันกับซีเมนต์มอร์ต้าร์ผสมหน้ากาก KF94 ดังรูปที่ 6(ข) ค่ากำลังอัดที่ได้มีลักษณะคล้ายกันกับซีเมนต์มอร์ต้าร์ผสมหน้ากากอนามัย Miah และคณะ [11] รายงานว่าการผสมหน้ากากอนามัยในซีเมนต์มอร์ต้าร์ทำให้กำลังอัดลดลง เนื่องจากมอร์ต้าร์ที่ผสมหน้ากากอนามัยจะเพิ่มรูโพรงให้มากยิ่งขึ้นมีผลโดยตรงต่อกำลังอัด Ghoniem และคณะ [12] กล่าวว่าเมื่อมีการผสมหน้ากากอนามัยจะส่งผลให้กำลังอัดคอนกรีตลดลงร้อยละ 34 และกำลังดึงผ่าซีกลดลงร้อยละ 24 จากตัวอย่างการศึกษาที่ผ่านมาจะมีผลเป็นไปในลักษณะเดียวกันกับการศึกษาครั้งนี้

3.2 ความหนาแน่น

ความหนาแน่นซีเมนต์มอร์ต้าร์ผสมหน้ากากอนามัยและหน้ากาก KF94 ได้แสดงในรูปที่ 7 เป็นการทดสอบที่อายุ 28 วัน ของก้อนตัวอย่างที่บ่มอากาศ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการผสมหน้ากากอนามัยและหน้ากาก KF94 ส่งผลให้ความหนาแน่นซีเมนต์มอร์ต้าร์ลดลง ปริมาณหน้ากากมากขึ้นความหนาแน่นลดลงมากขึ้น เนื่องจากหน้ากากทั้งสองมีค่าความถ่วงจำเพาะน้อยกว่ากากเถ้าปาล์มน้ำมัน นอกจากนั้นการผสม

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.007

หน้ากากยังมีผลทำให้ก้อนตัวอย่างมีรูโพรงเพิ่มมากขึ้น [11] ด้วยนี้จึงส่งผลให้ตัวอย่างที่ผสมหน้าอนามัยหรือหน้ากาก KF94 มีค่าความหนาแน่นน้อยกว่าตัวอย่าง CT และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างหน้ากากอนามัยและหน้ากาก KF94 พบว่าความหนาแน่นของซีเมนต์มอร์ต้าร์ผสมหน้ากาก KF94 มีค่าน้อยกว่าตัวอย่างที่ผสมหน้ากากอนามัย เป็นไปได้ว่าลักษณะทางกายภาพของหน้ากาก KF94 มีความหนามากกว่าหน้ากากอนามัยอย่างชัดเจน มีผลทำให้เกิดรูโพรงและช่องว่างระหว่างกากเถ้าปาล์มน้ำมันได้มากกว่า ซึ่งมีความสัมพันธ์กับผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ กล่าวคือตัวอย่างที่มีการผสมหน้ากาก KF94 มีการดูดซึมน้ำมากกว่าตัวอย่างที่ผสมหน้ากากอนามัย อย่างไรก็ตามซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่ใช้มวลรวมกากเถ้าปาล์มน้ำมันมีค่าน้อย เนื่องจากลักษณะทางกายภาพที่มีรูโพรงทำให้มีน้ำหนักน้อย Win และคณะ [4] พบว่าการเพิ่มปริมาณหน้ากากอนามัยมีผลให้ความหนาแน่นลดลง โดยให้เหตุผลว่าเกิดจากค่าความถ่วงจำเพาะที่มีค่าน้อยกว่ามวลรวม หากพิจารณาจากโครงสร้างระดับจุลภาคในรูปที่ 13 แสดงอย่างชัดเจนว่ามอร์ต้าร์ที่ผสมหน้ากากอนามัยและหน้ากาก KF94 เนื้อภายในมอร์ต้าร์มีรูโพรงและความไม่เป็นเนื้อเดียวกันมากกว่ามอร์ต้าร์ที่ไม่มีการผสมหน้ากาก และด้วยการใช้กากเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นมวลรวมหลักทำให้ความหนาแน่นน้อยกว่าซีเมนต์มอร์ต้าร์ปกติที่ใช้ทรายแม่น้ำ

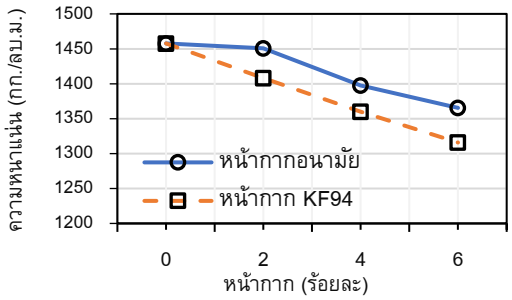
3.3 การดูดซึมน้ำ

การทดสอบการดูดซึมน้ำใช้ตัวอย่างขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร โดยการบ่มอากาศที่อุณหภูมิห้อง (30±2 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 28 วัน ผลการทดสอบพบว่าการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อระยะเวลาบ่มน้ำมากขึ้นในทุกอัตราส่วนผสม เนื่องจากระยะเวลาแช่น้ำยิ่งนานทำให้ก้อนตัวอย่างมีเวลาในการดูดซึมน้ำมากขึ้น ซึ่งมีลักษณะเป็นไปในทิศทางเดียวกันทั้งการผสมหน้ากากอนามัยและหน้ากาก KF94 ดังรูปที่ 8 เมื่อพิจารณาจากผลของปริมาณหน้ากากอนามัยพบว่า การเพิ่มปริมาณหน้ากากอนามัยมากขึ้นทำให้ค่าการดูดซึมน้ำยิ่งมากขึ้น โดยเฉพาะเมื่อใช้หน้ากากอนามัยร้อยละ 6 การดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นร้อยละ 66.5 ที่การแช่น้ำ 24 ชั่วโมง เช่นเดียวกันกับอย่างที่ผสมหน้ากาก KF94 การดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นร้อยละ 81.6 การเพิ่มขึ้นของค่าการดูดซึมน้ำเมื่อเพิ่มปริมาณหน้ากาก เนื่องจากหน้ากากทั้งสองมีค่าการดูดซึมน้ำมากกว่ากากเถ้าปาล์มน้ำมันดังตารางที่ 1 การดูดซึมน้ำที่มากขึ้นยังสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาค ที่แสดงให้เห็นว่าการผสมหน้ากากอนามัยและหน้ากาก KF94 ยังส่งผลให้เนื้อซีเมนต์มอร์ต้าร์มีรูโพรงมากขึ้น เนื้อมอร์ต้าร์ไม่มีความเป็นเนื้อเดียวกันเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ผสมหน้ากาก ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำมีลักษณะเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการศึกษาของ Win และคณะ [4] ที่พบว่าการเพิ่มปริมาณหน้ากากอนามัยจะเพิ่มความพรุนและการดูดซึมน้ำมากขึ้น และยังพบอีกว่าหน้ากากอนามัยที่มีขนาดใหญ่กว่ามีผลทำให้การดูดซึมน้ำมากกว่า Ajam และคณะ [13] พบว่าซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่ผสมหน้ากากอนามัยทำให้น้ำไหลผ่านเนื้อมอร์ต้าร์ได้มากขึ้น

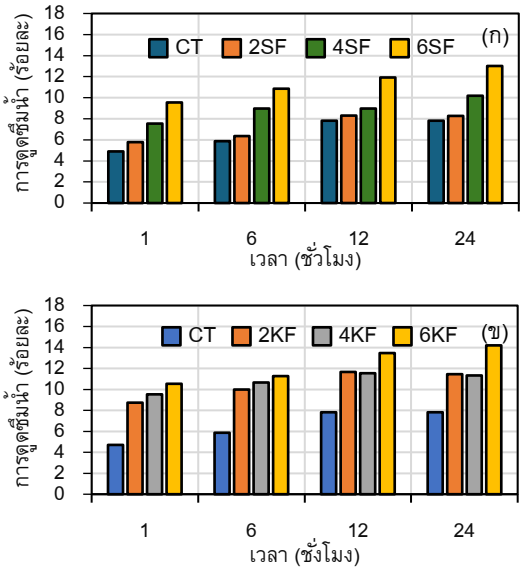
3.4 ความต้านทานไฟฟ้า

ความต้านทานไฟฟ้าของซีเมนต์มอร์ต้าร์ดังรูปที่ 9 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนเมื่อเพิ่มปริมาณหน้ากากอนามัยและหน้ากาก KF94 ค่าความต้านไฟฟ้ามีค่า

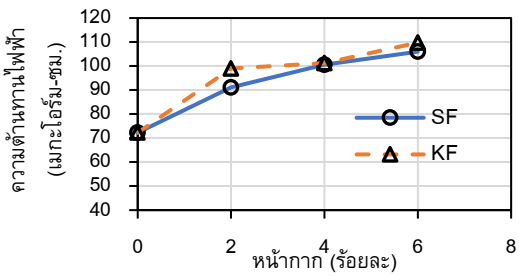
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.007



รูปที่ 7 ความหนาแน่นซีเมนต์มอร์ต้าร์



รูปที่ 8 ค่าการดูดซึมน้ำซีเมนต์มอร์ต้าร์ (ก) ผสมหน้ากากอนามัย และ (ข) ผสมหน้ากาก KF94



รูปที่ 9 ค่าความต้านทานไฟฟ้าซีเมนต์มอร์ต้าร์

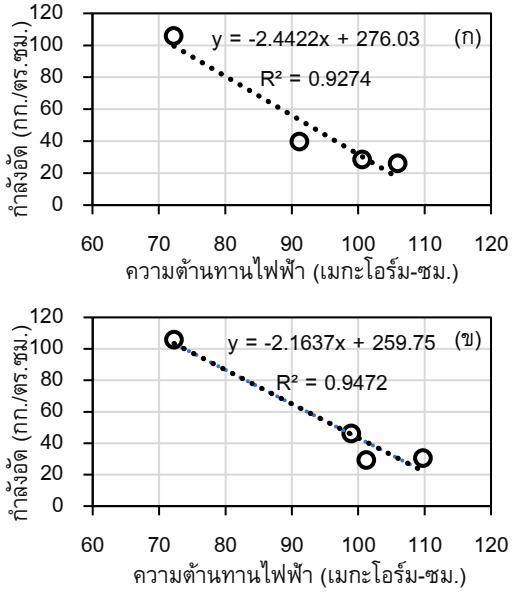
เพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะเมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างที่ผสมหน้ากากร้อยละ 2 (2SF และ 2KF) กับตัวอย่างที่ไม่ผสมหน้ากาก พบว่าเมื่อผสมหน้ากากอนามัยร้อยละ 2 ความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นร้อยละ 26.18 และเมื่อผสมหน้ากาก KF94 ร้อยละ 2 ค่าความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นร้อยละ 36.96 การเพิ่มขึ้นของความต้านทานไฟฟ้าเมื่อผสมหน้ากากทั้งสองพบว่าได้สร้างความพรุนของซีเมนต์มอร์ต้าร์จากการแทรกตัวของหน้ากากระหว่างซีเมนต์เพสต์ด้วยกันและระว่างซีเมนต์เพสต์กับมวลรวม ความพรุนและความไม่เป็นเนื้อเดียวสามารถยืนยันจากการวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคดังรูปที่ 13 ยิ่งไปกว่านั้นวัสดุหน้ากากอนามัยและหน้ากาก KF94 จะเป็นพอลิโพรไพลีน Polypropylene ซึ่งเป็นผ้าใยสังเคราะห์ที่ไม่ผ่านการถักทอสามารถต้านทานไฟฟ้าได้ดี Horsakulthai [14] ได้แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่มีความพรุนสูงค่าความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

3.5 ความสัมพันธ์ของกำลังอัดกับความต้านทานไฟฟ้า

ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของค่ากำลังอัดและค่าความต้านทานไฟฟ้าของซีเมนต์มอร์ต้าร์ผสมหน้ากากที่มีกากเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นมวลรวมละเอียดดังรูปที่ 10 รูปที่ 10(ก) แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดต่อการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้ามอร์ต้าร์ที่อัตราส่วนหน้ากากอนามัยแตกต่างกัน ในขณะที่รูปที่ 10(ข) เปลี่ยนเป็นการใช้หน้ากาก KF94 แทนที่กากเถ้าปาล์มน้ำมัน ในทั้งสองกรณี กำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้าร์มีความสัมพันธ์เชิงลบกับความ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.007

ต้านทานไฟฟ้าดังรูปที่ 10(ก) และ 10(ข) เมื่อความต้านไฟฟ้าเพิ่มขึ้นกำลังอัดจะมีค่าลดลง ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นถูกประมาณด้วยค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่สูง (R^2) เท่ากับ 0.9274 และ 0.9472 สำหรับตัวอย่างที่ผสมหน้ากากอนามัยและหน้ากาก KF94 ตามลำดับ ความสัมพันธ์ของความต้านทานไฟฟ้าและกำลังอัด สามารถใช้ในการคาดการณ์คุณสมบัติหนึ่งจากอีกคุณสมบัติหนึ่งได้



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ของความต้านทานไฟฟ้ากับกำลังอัด (ก) หน้ากากอนามัย และ(ข) หน้ากาก KF94

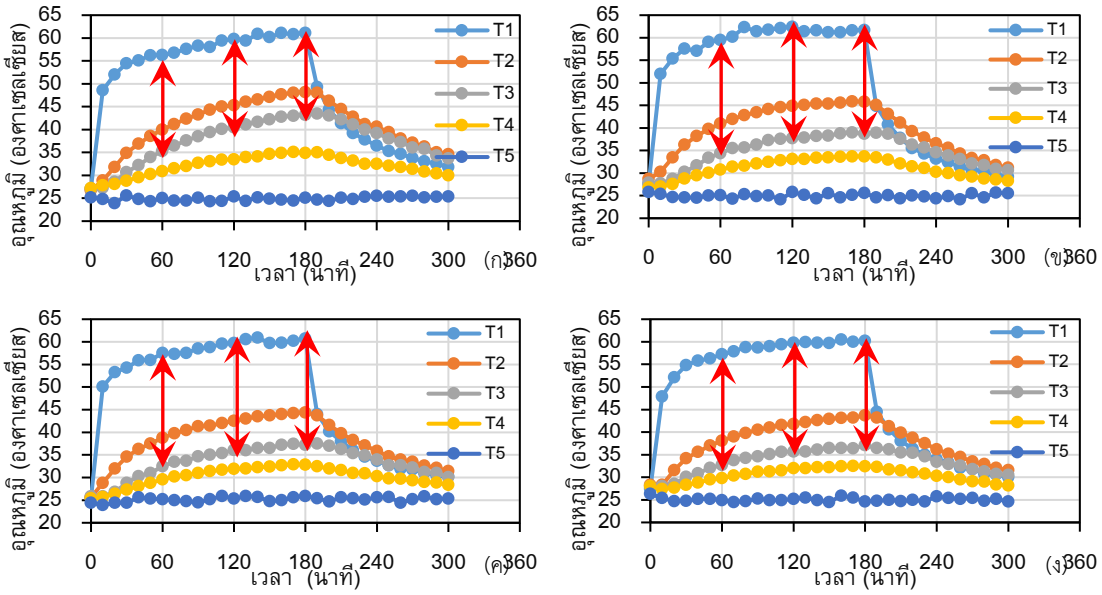
3.6 ความสามารถกันความร้อน

การทดสอบความสามารถกันความของคอนกรีตบล็อกกลวงจากการศึกษาครั้งนี้ ใช้ตัวอย่างขนาดเดียวกันกับตัวอย่างคอนกรีตบล็อกกลวงที่มีจำหน่ายในท้องตลาดที่มีขนาด 70×190×390 มิลลิเมตร 3 ช่องว่างอากาศ ผลการทดสอบดังแสดงดังรูปที่ 11 เมื่อพิจารณาเส้นการกระจายตัวของอุณหภูมิของคอนกรีตบล็อกกลวงทั่วไปดังรูปที่ 11(ก) พบว่าเมื่อให้ความร้อนที่ตำแหน่งผิวคอนกรีตบล็อกกลวง T1 (ผิวด้านที่รับความร้อน) ความร้อนจะเพิ่มขึ้นในอัตราที่เร็วในช่วง 1 ชั่วโมง แรก แล้วค่อย ๆ เพิ่มขึ้นในอัตราที่ช้าไปจนถึง 3 ชั่วโมง ในขณะที่คอนกรีตบล็อกกลวงที่ใช้มวลรวมเถ้าปาล์มน้ำมันอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิจะเกิดขึ้นที่ชั่วโมงแรก หลังจากนั้นอุณหภูมิเริ่มคงที่ แต่คอนกรีตบล็อกกลวงที่ผสมหน้ากากอนามัยและหน้ากาก KF94 อุณหภูมิเริ่มคงที่หลังจากสองชั่วโมงผ่านไป เป็นไปได้ว่าการผสมหน้ากากทั้งสองชนิดทำให้คอนกรีตบล็อกกลวงมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ และเมื่อพิจารณาถึงความแตกต่างของอุณหภูมิของผิวคอนกรีตบล็อกกลวงทั้งสองด้าน คือด้านที่รับความร้อน (T1) และด้านตรงกันข้าม (T3) พบว่าคอนกรีตบล็อกกลวงทั่วไปมีช่วงความต่างที่แคบกว่าคอนกรีตบล็อกกลวงมวลรวมกากเถ้าปาล์มน้ำมันอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่าการใช้มวลรวมกากเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีรูโพรงจำนวนมากสามารถป้องกันความร้อนได้ดีกว่าคอนกรีตบล็อกกลวงทั่วไปที่ใช้หินเกล็ดเป็นมวลรวมซึ่งเป็นมวลรวมที่มีความหนาแน่นสูง ไม่มีรูโพรงทำให้ความร้อนสามารถไหลผ่านได้ดี นอกจากนั้นยังพบอีกว่าระหว่างช่องว่างของคอนกรีตบล็อกกลวง (T2) กับผิวด้านเย็น (T3) เส้นกราฟของคอนกรีตบล็อกกลวงทั่วไปมีความแคบ แสดงถึงความสามารถในการกันความร้อนได้น้อย ในขณะที่ผลการทดสอบของคอนกรีตบล็อกกลวงมวลรวมกากเถ้าปาล์มน้ำมันกราฟทั้งสองเส้นมีระยะห่างกันอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับคอนกรีตบล็อกกลวงทั่วไป จากการทดสอบของ Singh และคณะ [15] พบว่าการทำให้ก้อนตัวอย่างมี

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.007

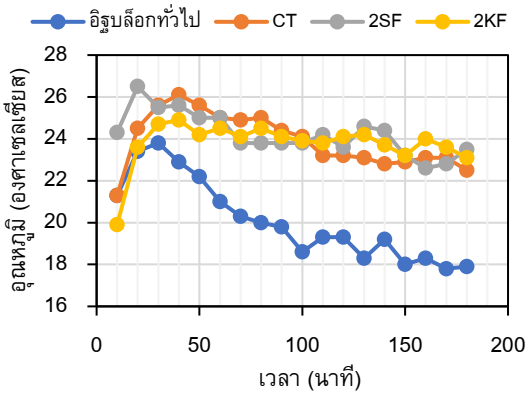
รูโพรงปริมาณมากขึ้นจะส่งผลให้การนำความร้อนลดลง หลังจากหยุดให้ความร้อนที่ผิวเมื่อเวลาผ่านไป 3 ชั่วโมง พบว่าที่ผิวด้านร้อน (T1) อุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็วในทุกตัวอย่างทดสอบเนื่องจากที่ตำแหน่ง T1 จะสัมผัสกับอุณหภูมิห้อง ในขณะที่ตำแหน่งอื่น ๆ อุณหภูมิลดลงอย่างช้า ๆ

รูปที่ 12 แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างในความสามารถกันความร้อนของคอนกรีตบล็อกกลวงทั่วไปและอิฐบล็อกมวลรวมกากเถ้าปาล์มน้ำมัน คอนกรีตบล็อกกลวงทั่วไปเมื่อได้รับความร้อนเป็นเวลา 40 นาที ความสามารถในการกันความร้อนลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับคอนกรีตบล็อกกลวง และลดลงอย่างรวดเร็วไปจนถึง 100 นาที หลังจากนั้นความสามารถในการกันความร้อนเริ่มคงที่ ในขณะที่ตัวอย่าง CT, 2SF และ 2KF ความสามารถในการกันความร้อนลดลงอย่างช้า ๆ ตั้งเวลา 40 นาที ความแตกต่างของความร้อนที่ผิวตำแหน่งร้อน (T1) มีอุณหภูมิลดลง (กันความร้อนได้น้อย) เมื่อเทียบกับผิวคอนกรีตบล็อกกลวงด้านตรงข้าม (T3) นั้นแสดงให้พิจารณาระหว่างคอนกรีตบล็อกกลวงมวลรวมกากเถ้าปาล์มน้ำมันด้วยกัน พบว่าการผสมหน้ากากอนามัยและหน้ากาก KF94 สามารถกันความร้อนได้ดีขึ้นเล็กน้อยเมื่อเวลาผ่านไป 100 นาที ดังนั้นในการศึกษาความสามารถกันความร้อนของคอนกรีตบล็อกกลวงสามารถแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่ามวลรวมกากเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความพรุนสูง มีผลกระทบต่อความสามารถกันความร้อนได้มาก ในขณะที่หน้ากากอนามัยและหน้า KF94 ส่งผลกระทบเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 11 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแต่ละตำแหน่ง (ก) คอนกรีตบล็อกกลวงทั่วไป (ข) CT (ค) 2SF และ (ง) 2KF

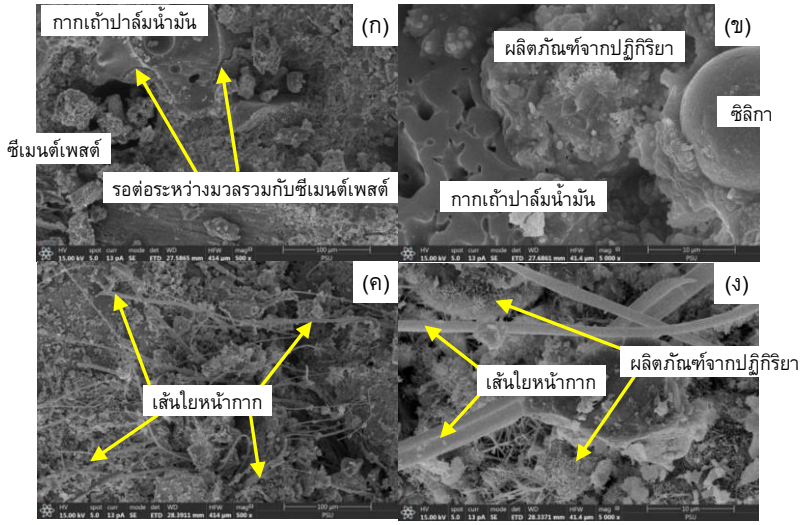
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.007



รูปที่ 12 อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงระหว่าง T1 และ T3

3.7 โครงสร้างระดับจุลภาพ

การวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคของตัวอย่างมอร์ต้าร์ ใช้ชิ้นส่วนตัวอย่างที่แตกหักหลังจากการทดสอบกำลังอัดที่ 28 วัน โดยทำการวิเคราะห์โครงสร้างที่กำลังขยาย 500 เท่า และ 5,000 เท่า ดังรูปที่ 13 รูปกำลังขยายสูงแสดงถึงภาพรวมของเนื้อในของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ไม่ผสมหน้ากาก (รูปที่ 13(ก)) แสดงให้เห็นซีเมนต์เพสต์ และกากเถ้าปาล์มน้ำมัน และยังสามารถแสดงให้เห็นความเป็นเนื้อเดียวกันของมอร์ต้าร์ กล่าวคือ เนื้อมีความทึบแน่น มีรูโพรงของซีเมนต์เพสต์เล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำดังรูปที่ 7 และ รูปที่ 8ตามลำดับ ในขณะเดียวกันจะเห็นรูโพรงอย่างชัดเจนจำนวนหนึ่งในรูปที่ 13(ข) ที่เกิดจากมวลรวมกากเถ้าปาล์มน้ำมัน รูปที่ 13(ข) แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนของผลิตภัณฑ์หลังจากเกิดปฏิกิริยาแสดงการยึดเกาะที่ดีระหว่างกากเถ้าปาล์มน้ำมันกับซีเมนต์เพสต์ อย่างไรก็ตามเมื่อซีเมนต์มอร์ต้าร์มีการผสมหน้ากากอนามัย เมื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคแล้วพบว่า ตัวอย่างมอร์ต้าร์โดยภาพรวมมีชิ้นส่วนคล้ายเกล็ดบริเวณผิวเป็นจำนวนมาก ซึ่งแสดงถึงความไม่เป็นเนื้อเดียวกันอย่างชัดเจน



รูปที่ 13 โครงสร้างระดับจุลภาคซีเมนต์มอร์ต้าร์ (ก) CT 200x (ข) CT 5000x (ค) 2SF 200x และ (ง) 2SF 5000x

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.007

ดังรูปที่ 12(ค) และยังพบอีกว่าเส้นใยหน้ากากอนามัยไม่มีการยึดหน่วงกับซีเมนต์เพสต์ สิ่งเหล่านี้นั้นสามารถอธิบายได้เป็นอย่างดีถึงผลกระทบด้านลบต่อกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้าร์ ผิวของเส้นใยหน้ากากแทบไม่มีซีเมนต์เข้ามายึดหน่วง โดยการศึกษาครั้งนี้มีความสอดคล้องกับการทดสอบของ Win และ คณะ [4] ที่มีการใช้หน้ากากอนามัยผสมซีเมนต์มอร์ต้าร์ในอัตราส่วนต่าง ๆ

4. สรุปผล

หน้ากากอนามัยและหน้ากาก KF94 ที่ผ่านการตัดให้มีขนาดเล็ก เมื่อนำมาผสมกับมวลรวมกากเถ้าปาล์มน้ำมันบางส่วนในซีเมนต์มอร์ต้าร์ ถึงแม้ว่าค่ากำลังอัดที่ได้มีค่าน้อยแต่ยังสามารถประยุกต์ใช้เป็นวัสดุที่ไม่ต้องรับแรงเช่น ผนัง คอนกรีตบล็อกกลวง เป็นต้น

1. การใช้หน้ากากอนามัยและหน้ากาก KF94 ส่งผลให้ค่ากำลังอัดซีเมนต์มอร์ต้าร์มีค่าลดลงทั้งสองโดยกำลังอัดที่อายุ 28 วันอยู่ในช่วง 26.2-39.7 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร สำหรับการผสมหน้ากากอนามัยร้อยละ 2-6 โดยน้ำหนัก ในขณะที่การใช้หน้ากาก KF94 กำลังอัดที่ได้อยู่ในช่วง 29.2-46.3 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

2. ความหนาแน่นของซีเมนต์มอร์ต้าร์มวลรวมกากเถ้าปาล์มมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มหน้ากากทั้งสองชนิด อย่างไรก็ตามค่าความหนาแน่นที่ลดลงในอัตราส่วนน้อยเมื่อเทียบกับกำลังอัด

3. การเพิ่มขึ้นของหน้ากากอนามัยและหน้ากาก KF94 ทำให้การดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน และเมื่อแช่น้ำนานขึ้นการดูดซึมน้ำยิ่งมากขึ้น

4. ความต้านทานไฟฟ้าของซีเมนต์มอร์ต้าร์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณหน้ากากอนามัยและหน้ากาก KF94 มากขึ้น ซึ่งจะมีความสัมพันธ์ที่ชัดเจนกับค่ากำลังอัด กล่าวคือ เมื่อความต้านทานไฟฟ้ามากขึ้นค่ากำลังอัดซีเมนต์มอร์ต้าร์ลดลง

5. คอนกรีตบล็อกกลวงมวลรวมกากเถ้าปาล์มน้ำมันผสมหน้ากากอนามัยและหน้ากาก KF94 สามารถให้เห็นถึงความสามารถในการกันความร้อน (อุณหภูมิ) ได้ดีกว่าคอนกรีตบล็อกกลวงทั่วไปที่มีจำหน่ายในท้องตลาดอย่างชัดเจน ในขณะที่คอนกรีตบล็อกกลวงผสมหน้ากากอนามัยและหน้ากาก KF94 ร้อยละ 2 เมื่อให้ความร้อนเป็นเวลา 100 นาที ขึ้นไป พบว่าสามารถกันความร้อนได้ดีกว่าคอนกรีตบล็อกกลวงไม่ผสมหน้ากาก

6. การวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนถึงเส้นใยหน้ากากเป็นตัวยับยั้งการยึดหน่วงระหว่างซีเมนต์เพสต์กับกากเถ้าปาล์มน้ำมัน ส่งผลให้มอร์ต้าร์ไม่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน และทำให้เกิดโพรงมากขึ้น ซึ่งมีผลโดยตรงต่อการลดลงของกำลังอัด

จากผลการทดสอบสมบัติซีเมนต์มอร์ต้าร์มวลรวมกากเถ้าปาล์มน้ำมันและหน้ากากอนามัยและหน้ากาก KF94 ถึงแม้ว่าค่ากำลังอัดที่ได้มีค่าไม่สูงมากนัก แต่มีความหนาแน่นต่ำและมีความสามารถในการกันความร้อนได้ดี และยิ่งไปกว่านั้นมวลรวมเป็นวัสดุเหลือทิ้งทั้งหมด มวลรวมกากเถ้าปาล์มน้ำมันจากโรงไฟฟ้าชีวมวล และหน้ากากอนามัยและหน้ากาก KF94 วัสดุเหลือทิ้งจากการใช้งานในชีวิตประจำวัน การใช้วัสดุเหล่านี้นั้นจะเป็นการช่วยลดปริมาณขยะได้อีกทางหนึ่ง

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.007

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว) ให้การสนับสนุนทุนวิจัย ขอขอบคุณหน่วยวิจัยโครงสร้างพื้นฐานและนวัตกรรมวัสดุ และสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ ให้การสนับสนุนเครื่องมืออุปกรณ์ในการทำวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

[1] https://www.tcc.or.th/tcc_media/maskkf94-infographic-3/ (Accessed on 8th June 2025)

[2] S.K. Lynch, M. Saberian, J. Li, R. Poychand and G. Zhang, Preliminary evaluation of the feasibility of using polypropylene fibres from COVID-19 single-use face masks to improve the mechanical properties of concrete, Journal of Cleaner Production, 2021, 296, 126460.

[3] K. Thoudam, N. Hossiney, S.L. Kumar, J. Alex, A. Bhakikar and A. Fathima, Assessing performance of alkali-activated bricks incorporated with processed surgical masks, Journal of Materials Research and Technology, 2023, 25, 6432-6445.

[4] T.T. Win, P. Jongvivatsakul, T. Jirawattanasomkul, L. Prasittisopin and S. Likitlersuang, Use of polypropylene fibers extracted from recycled surgical face masks in cement mortar, Construction and Building Materials, 2023, 391, 131845.

[5] M.T. Aziz, M.S.S. Hossain, M.A. Hasan and M.A. Mohiuddin, Utilization of face masks and ladle furnace slag in concrete: Insights from experimental study, Cleaner Engineering and Technology, 2023, 100653.

[6] TIS 57-2560, Hollow Loadbearing Concrete Masonry Unit, 2560. (in Thai)

[7] TIS 58-2560, Hollow Non-loadbearing Concrete Masonry Unit, 2560. (in Thai)

[8] ASTM C33/C33M-23, Standard Specification for Concrete Aggregates, 2023.

[9] ASTM C109/C109M-21, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens), 2021.

[10] P. Salaemae, A. Abdulmatin, W. Prachasaree and A. Hawa, Enhancing geopolymer mortars: The role of surgical face masks in modifying mechanical andthermal propertie, Engineering and Applied Science Research, 2025, 52(1), 1-16.

[11] M.D.J. Miah, J. Pei, H. Kim, R. Sharma, J.G. Jang and J. Ahn, Property assessment of an eco-friendly mortar reinforced with recycled mask fiber derived from COVID-19 single-use face masks, Journal of Building Engineering, 2023, 66, 105885.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.007

[12] A.G. Ghoniem, L.A. Nour, M. Zelenáková, E. Dolníková, D. Katunský and M.H. El-Feky, Axial compressive and cyclic lateral behavior of a structural masonry prism constructed from crushed COVID-19 face masks concrete bricks, Engineering Reports, 2024, e12895.

[13] L. Ajam, A. Trabelsi and Z. Kammoun, Valorisation of face mask waste in mortar, Innovative Infrastructure Solutions, 2022, 7, 130.

[14] V. Horsakulthai, Effect of recycled concrete powder on strength, electrical resistivity, and water absorption of self-compacting mortars, Case Studies in Construction Material, 2021, 15, e00725.

[15] R.J. Singh, A. Raut, A.L. Murmu and M. Jameel, Influence of Glass Powder Incorporated Foamed Geopolymer Blocks on Thermal and Energy Analysis of Building Envelope, Journal of Building Engineering, 2021, 43, 102520.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.008

บทความวิจัย

การปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตในกระบวนการผลิตเพลทคอยล์ร้อน

สุชาดี ธำรงสุข*

ภาควิชาการบริหารอุตสาหกรรมการผลิตและบริการ, คณะพัฒนาธุรกิจและอุตสาหกรรม,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: suchadee.t@bid.kmutnb.ac.th

วันที่รับบทความ: 29 เมษายน 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 25 มิถุนายน 2568; วันที่ตอบรับบทความ: 28 มิถุนายน 2568
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 19 สิงหาคม 2568

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพกระบวนการผลิตเพลทคอยล์ร้อน โดยปัญหาที่พบคือ ชิ้นงานผลิตไม่ทันเวลาและไม่ตรงตามแผน กระบวนการวิจัยเริ่มจากการศึกษากระบวนการทำงานของหน่วยงานผลิตเพลทคอยล์ร้อน จากนั้นวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาด้วยหลักการระดมสมอง และแผนผังสาเหตุและผล จากการศึกษาพบว่าขั้นตอนการลบคมครีบชิ้นงานทำให้เกิดความล่าช้า จึงนำหลักการ ECRS ใช้การขจัดขั้นตอนการลบคมชิ้นงาน จากการปรับปรุงค่าช่องว่างของดาย (Die Clearance) เพื่อให้มีความเหมาะสมกับขนาดความหนาของชนิดวัตถุดิบ มาใช้ในการปรับปรุงกระบวนการพับเพลทด้านข้างคอยล์เพื่อลดความสูญเปล่า หลังการปรับปรุง พบว่าชิ้นงานไม่เกิดครีบ (Burr) ที่ขอบชิ้นงาน ทำให้ลดขั้นตอนและเวลาการทำงานของชิ้นส่วนโครงพัดลมจากเดิม 2,630.58 วินาที หลังปรับปรุง 1,363.81 วินาที หรือคิดเป็นร้อยละ 48.16 และชิ้นส่วนเพลทด้านซ้าย-ขวาจากเดิม 3,769.96 วินาที หลังปรับปรุงเหลือ 1,886.62 วินาที หรือคิดเป็นร้อยละ 49.96 นอกจากนั้นยังสามารถผลิตชิ้นส่วนโครงพัดลมเพิ่มขึ้นจากเดิมเฉลี่ย 170 ชิ้นต่อวัน หลังปรับปรุงเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 295 ชิ้นต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 73.53 และชิ้นส่วนเพลทด้านซ้ายขวาจากเดิมเฉลี่ย 213 ชิ้นต่อวัน หลังปรับปรุงเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 427 ชิ้นต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 100.00

คำสำคัญ: การปรับปรุงประสิทธิภาพในกระบวนการผลิต; กระบวนการผลิตเพลทคอยล์ร้อน; แผนผังสาเหตุและผล; ECRS; ระยะช่องว่างของแม่พิมพ์

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.008

บทความวิจัย

Improving Production Efficiency in Hot Coil Plate Production Process

Suchadee Tumrongsuk*

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: suchadee.t@bid.kmutnb.ac.th

Received: 29 April 2025; Revised 25 June 2025; Accepted: 28 June 2025

Online Published: 19 August 2025

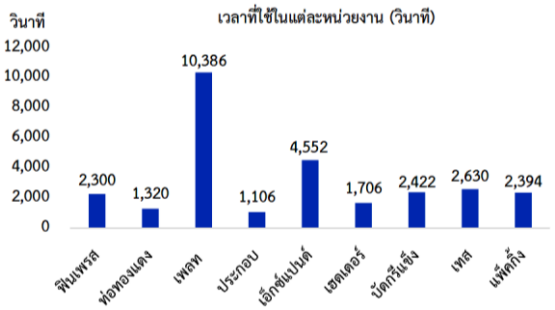
Abstract: This research aimed to improve the production efficiency of hot coil plates. The main problems identified were production delays and deviation from the planned schedule. The study began with an analysis of the hot coil plate production process, followed by brainstorming and the use of a cause-and-effect diagram to identify the root causes. It was found that the deburring process caused significant delays. The ECRS principle was applied, specifically by eliminating the deburring step through the adjustment of die clearance to suit the thickness of the material type, in order to improve the edge folding process and reduce waste. After the improvement, burr formation at the workpiece edge was eliminated, leading to the removal of unnecessary steps and a reduction in processing time. The processing time for the fan frame component was reduced from 2,630.58 seconds to 1,363.81 seconds, a reduction of 48.16 percent. For the left and right plate components, the time was reduced from 3,769.96 seconds to 1,886.62 seconds, a reduction of 49.96 percent. Additionally, the average daily production of fan frame components increased from 170 to 295 units, an increase of 73.53 percent, and the left and right plate components increased from 213 to 427 units per day, an increase of 100.00 percent.

Keywords: Improving Efficiency in the Production Process; Hot Coil Plate Production Process; Cause and Effect Diagram; ECRS, Die Clearance

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.008

1. บทนำ

อุตสาหกรรมทำความเย็นเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญต่อประเทศ และมีบทบาทอย่างมากในชีวิตประจำวัน เนื่องจากเราอาศัยเครื่องทำความเย็นในที่พักอาศัยรวมถึงอาคาร เพื่อให้บุคลากรหรือพนักงานทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ แม้กระทั่งสินค้าบางอย่างของธุรกิจที่ยังมีความจำเป็นต้องใช้เครื่องทำความเย็น เพื่อเก็บรักษาคุณภาพของสินค้า ปัจจุบันที่มีความเจริญก้าวหน้าด้านเทคโนโลยี มีการคิดค้น พัฒนาสิ่งอำนวยความสะดวกต่าง ๆ และยังสามารถตอบสนองต่อความต้องการให้กับมนุษย์ เมื่อความต้องการมากขึ้น ธุรกิจประเภทเดียวกันได้ก่อตั้งขึ้นมากมาย มีการแข่งขันทางด้านราคา ด้านเทคโนโลยี ด้านคุณภาพ ซึ่งส่งผลให้กับผู้บริโภคได้มีตัวเลือกในการตัดสินใจเลือกซื้อมากขึ้น เช่นเดียวกับธุรกิจผลิตคอยล์ (ส่วนประกอบหลักของเครื่องปรับอากาศและเครื่องทำความเย็น) ที่จะต้องไม่หยุดพัฒนา เพื่อให้ได้สินค้าที่มีคุณภาพ โดยต้องควบคุมกระบวนการผลิตให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ทั้งในด้านของการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน ด้านเวลา เพื่อให้ส่งมอบสินค้าได้ทันเวลาที่กำหนดและด้านคุณภาพ โดยการควบคุมกระบวนการผลิตให้มีประสิทธิภาพจะช่วยลดต้นทุนในการผลิต แต่คงคุณภาพเท่าเดิม หรือเพิ่มขึ้น ทำให้สามารถตอบสนองความต้องการ และสร้างความพึงพอใจให้กับลูกค้าได้มากยิ่งขึ้น บริษัทกรณีศึกษาเป็นบริษัทผู้ผลิตคอยล์ (ส่วนประกอบหลักของเครื่องปรับอากาศ และเครื่องทำความเย็น) ซึ่งมีสายการผลิตกระบวนการผลิตคอยล์ทั้งหมด 9 หน่วยงาน ได้แก่ หน่วยงานที่ทำการขึ้นรูปฟิน



รูปที่ 1 เวลาการทำงานของแต่ละหน่วยงาน

หน่วยงานที่ทำการตัดท่อทองแดง, หน่วยงานที่ขึ้นรูปเพลท, หน่วยงานประกอบคอยล์, หน่วยงานเอ็กซ์แปนด์, หน่วยงานที่ทำการตัด ดัด และเจาะท่อเฮดเดอร์, หน่วยงานบัดกรีแข็ง, หน่วยงานเทส และหน่วยงานแพ็คกิ้ง ผู้วิจัยจึงได้ทำการเก็บข้อมูลเวลาในการทำงานของแต่ละหน่วยงาน เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตให้ดียิ่งขึ้น สามารถสรุปข้อมูลได้ ดังรูปที่ 1

จากรูปที่ 1 จะเห็นได้ว่า กระบวนการผลิตของหน่วยงานผลิตเพลท (Plate) ใช้ระยะเวลาผลิตเท่ากับ 10,386 วินาที ซึ่งใช้ระยะเวลาในการผลิตสูงที่สุดจากหน่วยงานทั้งหมด ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษารูปแบบของการผลิตชิ้นส่วนเพลทด้านข้างคอยล์ที่ใช้กับผลิตภัณฑ์คอยล์ของบริษัท คือ แบบคอยล์โครงพัดลม ประกอบด้วย 2 ชิ้นส่วน คือ 1) ชิ้นส่วนโครงพัดลม และ 2) ชิ้นส่วนเพลทด้านซ้าย-ขวา จากการศึกษาพบว่ากระบวนการพับเพลทด้านข้างคอยล์ของทั้งสองชิ้นส่วนยังมีประสิทธิภาพไม่เป็นไปตามเป้าหมาย ส่งผลให้ปริมาณการผลิตไม่ตรงตามแผนที่วางไว้ ดังแสดงในตารางที่ 1 และพบว่ามีความล่าช้าเกิดขึ้นในงาน จึงจำเป็นต้องได้รับการปรับปรุงตามตารางที่ 3 และ 4

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.008

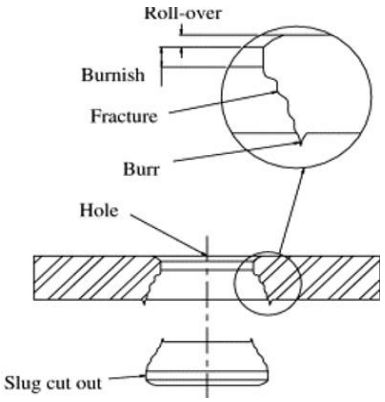
ตารางที่ 1 เปรียบเทียบแผนการผลิตชิ้นส่วนโครงพัดลมและชิ้นส่วนเพลทด้านซ้าย-ขวา

ชิ้นส่วนโครงพัดลม	ปี2567		
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.
แผนการผลิตต่อวัน (ชิ้น)	200	200	200
จำนวนที่ผลิตได้เฉลี่ยต่อวัน (ชิ้น)	175	178	177
จำนวนที่ผลิตได้เฉลี่ยต่อเดือน (ชิ้น)	4,550	4,860	4,248
ชิ้นส่วนเพลทด้านซ้าย-ขวา	**ปี2567**		
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.
แผนการผลิตต่อวัน (ชิ้น)	400	400	400
จำนวนที่ผลิตได้เฉลี่ยต่อวัน (ชิ้น)	248	235	240
จำนวนที่ผลิตได้เฉลี่ยต่อเดือน (ชิ้น)	6,448	6,348	5,760

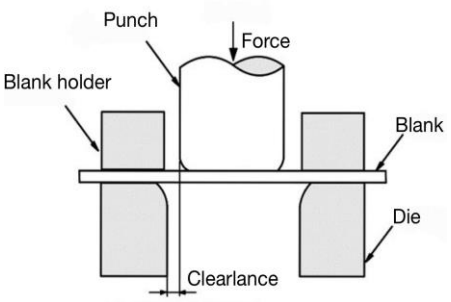
จากตารางที่ 1 พบว่าประสิทธิภาพการผลิตยังไม่เป็นไปตามเป้าหมาย ผู้วิจัยจึงให้ความสำคัญกับการปรับปรุงกระบวนการในหน่วยงานผลิตเพลท โดยเน้นที่ขั้นตอนการพับเพลทด้านข้างคอยล์ ซึ่งพบว่ามีกิจกรรมที่ไม่เกิดมูลค่าและเกิดความสูญเปล่า เช่น การเจียรขอบชิ้นงานก่อนพับ เพื่อขจัดความคมหรือครีบ (Burr) บนขอบของทั้งสองชิ้นส่วน ดังแสดงในรูปที่ 2

จากรูปที่ 2 แสดงลักษณะของชิ้นงานที่เกิดครีบเกิดจากการเลือกใช้ค่าช่องว่างที่ไม่เหมาะสมของคมตัดแม่พิมพ์ในกระบวนการขึ้นรูปเพลทด้านข้างคอยล์ของทั้ง 2 ชิ้นส่วน ดังรูปที่ 3

จากรูปที่ 3 กระบวนการขึ้นรูปเพลทด้านข้างคอยล์จะใช้เครื่องจักรที่ประกอบไปด้วยแม่พิมพ์ 2 ส่วน คือ พันช์ (Punch) กับดาย (Die) ซึ่งลักษณะของดายจะมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของพันช์ เพื่อให้พันช์สามารถทำหน้าที่กดชิ้นงานลงไปในตัวดายได้พอดี ทำให้แผ่นชิ้นงานฉีกขาดออกจากกัน ส่วนดายเป็นแม่พิมพ์ที่ทำหน้าที่ตัดเนื้อโลหะส่วนที่ไม่ต้องการออกไป ซึ่งการ



รูปที่ 2 ลักษณะชิ้นงานที่เกิดครีบจากการใช้ระยะช่องว่างคมตัดไม่เหมาะสม (Kim, Han, & Lee [1])



รูปที่ 3 กระบวนการขึ้นรูปเพลทด้านข้างคอยล์

ฉีกขาดของโลหะจะขึ้นอยู่กับระยะช่องว่าง (Clearance) ของคมตัดระหว่างพันช์กับดาย และมีผลต่อการตัดชิ้นงานของแม่พิมพ์มาก ถ้าระยะช่องว่างไม่เหมาะสมจะทำให้ผลิตชิ้นงานออกมาไม่ได้ขนาดตามที่ต้องการผิวของชิ้นงานที่ถูกตัดไม่เรียบเนียน ทำให้พนักงานต้องทำการเจียรลบคมครีบที่ขอบชิ้นงานทุกครั้ง ซึ่งทำงานได้ไม่ต่อเนื่องส่งผลให้กระบวนการพับเพลทด้านข้างคอยล์เกิดความล่าช้าซึ่งขนาดของดายจะเปลี่ยนขนาดตามค่าช่องว่างดาย (Die Clearance) เสมอในการเลือกค่าช่องว่างดายจะขึ้นอยู่กับความหนาของชนิดวัตถุดิบที่

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.008

ใช้ขึ้นรูปชิ้นงาน ปัจจุบันทางกรณีศึกษามีการใช้ชนิดของวัตถุดิบที่ขึ้นรูปชิ้นส่วนโครงพัดลม และชิ้นส่วนเพลทด้านซ้าย-ขวาเหมือนกัน คือ เหล็กชุบสังกะสี (Mild Steel) โดยมีค่าช่องว่างดาย (Die Clearance) ที่ใช้ตัดขอบเพลทด้านข้างคอยล์ของทั้ง 2 ชิ้นส่วน ในปัจจุบัน ดังตารางที่ 2

จากตารางที่ 2 เนื่องจากวัตถุดิบหลักเป็น เหล็กชุบสังกะสี (Mild Steel) สำหรับการขึ้นรูปชิ้นส่วน โดยอ้างอิงข้อมูลค่าช่องว่างของแม่พิมพ์จากแหล่งอุตสาหกรรมมาตรฐาน [2,3] ซึ่งแสดงในรูปของร้อยละของความหนาแผ่นโลหะ (% Total Clearance) แทนการใช้หน่วยมิลลิเมตรโดยตรง ทั้งนี้เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับแผ่นโลหะที่มีความหนาต่างกันได้อย่างยืดหยุ่นและแม่นยำ

จากปัญหาที่พบในกระบวนการผลิต ผู้วิจัยได้กำหนดแนวทางในการขจัดขั้นตอนการลบคมชิ้นงาน โดยมุ่งเน้นการปรับปรุงค่าช่องว่างของดาย (Die Clearance) ให้เหมาะสมกับขนาดความหนาของวัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปเพลทด้านข้างคอยล์ของทั้งสองชิ้นส่วน โดยอ้างอิงวิธีการคำนวณค่าช่องว่างจากคู่มือ Thick Turret Tooling Solutions [4] เพื่อให้ได้ขนาดของดายที่เหมาะสมและลดการเกิดครีบ (Burr) ที่ขอบชิ้นงาน ทั้งนี้ได้นำเทคนิคการคำนวณค่าช่องว่างของแม่พิมพ์ร่วมกับหลักการ ECRS (Eliminate, Combine, Rearrange, Simplify) มาประยุกต์ร่วมกันในการแก้ปัญหา โดยมีวัตถุประสงค์ ดังนี้

1. เพื่อศึกษากระบวนการผลิตเพลทด้านข้างคอยล์รูปแบบโครงพัดลม

2. เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตเพลทด้านข้างคอยล์รูปแบบคอยล์โครงพัดลม

ตารางที่ 2 ขนาดของดาย และค่าช่องว่างก่อนปรับปรุง

ชิ้นส่วนของเพลทด้านข้างคอยล์	ชนิดของวัตถุดิบ	ความหนาของวัตถุดิบ (mm)	ค่าช่องว่างของดาย (mm)	รูปแบบและขนาดของเพลทด้านข้างคอยล์ (mm)
โครงพัดลม	เหล็กชุบสังกะสี	0.55	0.25	Rectangle 5.11 x 50.11
				Rectangle 3.11 x 30.11
				Rectangle 5.11 x 100.11
เพลทด้านซ้าย-ขวา	เหล็กชุบสังกะสี	0.90	0.30	Rectangle 5.18 x 50.18
				Rectangle 3.18 x 30.18
				Rectangle 5.18 x 100.18

2. วิธีการวิจัย

2.1 ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องเพื่อศึกษา และหาสาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้น

ผู้วิจัยได้ศึกษากระบวนการทำงานของหน่วยงานผลิตเพลทด้านข้างคอยล์มี 3 กระบวนการ คือ 1) กระบวนการเขียนโปรแกรม CNC 2) กระบวนการขึ้นรูปเพลทด้านข้างคอยล์ และ 3) กระบวนการพับเพลทด้านข้างคอยล์ ซึ่งผู้วิจัยได้มุ่งเน้นการปรับปรุงกระบวนการพับเพลทด้านข้างคอยล์รูปแบบคอยล์โครงพัดลมมี 2 ชิ้นส่วน คือ 1) ชิ้นส่วนโครงพัดลม และ 2) ชิ้นส่วนเพลทด้านซ้าย-ขวา เนื่องจากเป็นกระบวนการที่เกิดความล่าช้า และส่งผลให้ผลิตชิ้นงานได้ไม่ตรงตามแผน

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.008

2.2 เก็บรวบรวมข้อมูลงานย่อยของทั้ง 2 ชิ้นส่วนก่อนปรับปรุง โดยทำการจับเวลาโดยตรง เพื่อหาค่าเฉลี่ยเบื้องต้น ในการจับเวลาจะอ้างอิงตามทฤษฎีของ Maytag ถ้าวัฏจักรในแต่ละงานย่อยสั้นกว่า 2 นาที ให้จับเวลามา 10 ค่า และถ้าวัฏจักรในแต่ละงานย่อยยาวกว่า 2 นาที ให้จับเวลามา 5 ค่า [5] จากนั้นทำการหารอบการจับเวลาที่เหมาะสม และนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาเวลามาตรฐานก่อนปรับปรุง

ผู้วิจัยได้จับเวลามาทั้งหมด 10 ค่า เพื่อนำมาคำนวณหารอบการจับเวลาที่เหมาะสม จากสมการ

$$\text{จำนวนรอบการจับเวลา} = \frac{R}{\bar{X}} \quad (1)$$

$$\text{หา R จากสมการ} \quad R = H - L \quad (2)$$

โดย H คือ ค่ามากสุดของข้อมูล

L คือ ค่าต่ำที่สุดของข้อมูล

จากนั้นนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบหารอบการจับเวลาที่เหมาะสมจากตาราง Maytag พบว่า จำนวนรอบในการจับเวลาทั้งหมด 10 ครั้ง มีค่าสัมประสิทธิ์คลาดเคลื่อน (Error Allowance) อยู่ภายในเกณฑ์ที่กำหนด ±5% และระดับความเชื่อมั่น 95% จึงถือว่าเพียงพอและเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้วิเคราะห์เวลาในการทำงานได้อย่างน่าเชื่อถือ โดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มจำนวนรอบการวัดเพิ่มเติม ดังแสดงในตารางที่ 3

2.2.1 ชิ้นส่วนโครงพัดลม

จากตารางที่ 3 เป็นค่ารวมของเวลาเฉลี่ยในแต่ละขั้นตอนงานของชิ้นส่วนโครงพัดลมก่อนการปรับปรุง ซึ่งถือเป็นค่าเวลาเฉลี่ยที่สังเกตได้ (Selected Time: ST) ทั้งสิ้นรวมเป็น 2,369.89 วินาที ตามหลักการวิเคราะห์เวลา จะต้องมีการปรับค่าตาม

ตารางที่ 3 เวลาเฉลี่ยงานย่อย ชิ้นส่วนโครงพัดลมก่อนปรับปรุง

ขั้นตอน	งานย่อย	เวลาเฉลี่ย (วินาที)
1	เดินนำโครงพัดลมที่ขึ้นรูปเสร็จไปทำการลบคม	21.92
2	ลบคมขอบชิ้นงาน	739.75
3	เดินนำโครงพัดลมไปที่เครื่องพับ	9.12
4	ดูแบบงาน	128.99
5	ปรับตั้งเครื่องพับ	155.92
6	เปลี่ยนขนาดของมีดพับ	342.81
7	พับชิ้นงาน	759.16
8	ตรวจสอบชิ้นงาน	76.48
9	เขียนใบงาน	135.74
รวม (วินาที)		**2,369.89**

ประสิทธิภาพของผู้ปฏิบัติงาน โดยใช้ค่าความสามารถ (Rating Factor: RF) เพื่อให้ได้เวลาปกติ คำนวณดังสมการที่ (3)

$$\text{เวลาปกติรวม (NT)} = ST \times RF \quad (3)$$

โดย ST คือ เวลาเฉลี่ยที่ได้จากการสังเกตหรือจับเวลาในการทำงานแต่ละรอบ แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย

RF คือ ค่าปรับความสามารถของผู้ปฏิบัติงาน ซึ่งสะท้อนถึงระดับทักษะ ความคล่องตัว และประสิทธิภาพในการทำงาน

จากการประเมินค่าความสามารถของผู้ปฏิบัติงาน พบว่า RF = 1.00 (หรือ 100%) เนื่องจากเป็นผู้ปฏิบัติงานที่มีทักษะในระดับมาตรฐาน เวลาปกติรวม

เวลาปกติ (NT) = 2,369.89×1.00 = 2,369.89 วินาที

$$\text{เวลามาตรฐาน} = \text{เวลาปกติรวม (NT)} + \text{เวลาเผื่อ} \quad (4)$$

$$\text{เวลาเผื่อ 11\%} = 2{,}369.89 \times \frac{11}{100} = 260.69 \text{ วินาที}$$

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.008

เมื่อนำค่าเวลาทั้งหมดรวมกับเวลาเผื่อ 11% จะได้เวลามาตรฐาน = 2,369.89 + 260.69 ดังนั้นจะได้เวลามาตรฐาน 2,630.58 วินาที

2.2.2 ชิ้นส่วนเพลทด้านซ้าย-ขวา

จากตารางที่ 4 หลังจากจับเวลาเพื่อนำมาคำนวณหารอบการจับเวลาที่เหมาะสม และนำข้อมูลเพื่อหาเวลามาตรฐาน คำนวณตามสมการ (3),(4) จะได้เวลามาตรฐานก่อนปรับปรุงของชิ้นส่วนเพลทด้านซ้าย-ขวา 3,769.96 วินาที

2.3 วิเคราะห์สาเหตุปัญหา

2.3.1 คัดเลือกปัญหาโดยใช้แผนภูมิพาเรโต บันทึกการจับเวลาของกระบวนการพับเพลทด้านข้างคอยล์ก่อนปรับปรุงของชิ้นส่วนโครงพัดลม และชิ้นส่วนเพลทด้านซ้าย-ขวา เพื่อคัดเลือกงานย่อยที่ทำให้เกิดความล่าช้า ดังรูปที่ 4

จากรูปที่ 4 ขั้นตอนพับชิ้นงาน และขั้นตอนลบคมขอบชิ้นงาน รวมเวลาที่ใช้ในการผลิตที่เกิดจาก 2 สาเหตุนี้ คิดเป็นร้อยละ 63.5 และทั้งสองขั้นตอนใช้เวลาเฉลี่ยมากที่สุด 1,498.91 วินาที

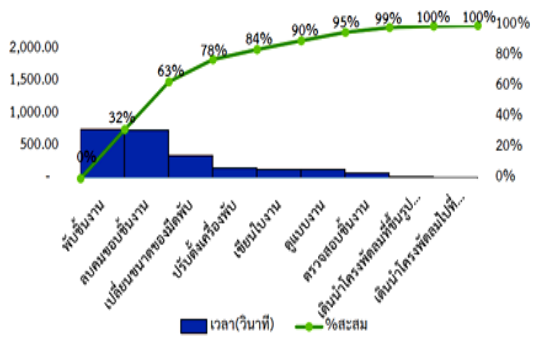
2.3.2 คัดเลือกปัญหาของเพลทด้านซ้าย-ขวา

นำเวลาของกระบวนการเพลทด้านซ้าย-ขวา มาจัดลำดับกิจกรรมตามเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในแต่ละขั้นตอน โดยเรียงลำดับจากกิจกรรมที่ใช้เวลามากที่สุดไปยังน้อยที่สุด เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบการประเมินกระบวนการทำงาน ดังรูปที่ 5

จากรูปที่ 5 ขั้นตอนพับชิ้นงาน และขั้นตอนลบคมขอบชิ้นงาน รวมเวลาที่ใช้การผลิต ที่เกิดจาก 2 สาเหตุนี้ คิดเป็นร้อยละ 65.5 และทั้งสองขั้นตอนใช้เวลาเฉลี่ยมากที่สุด 2,224.64 วินาที

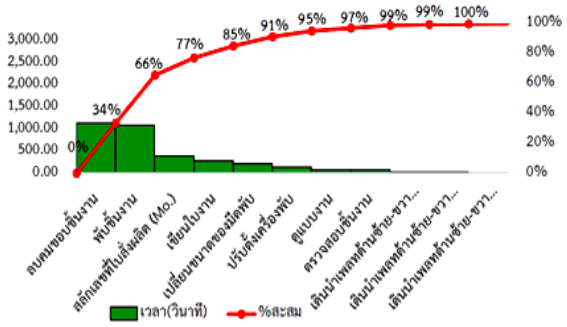
ตารางที่ 4 เวลาเฉลี่ยงานย่อย ชิ้นส่วนเพลทด้านซ้าย-ขวา ก่อนปรับปรุง

ขั้นตอน	งานย่อย	เวลาเฉลี่ย (วินาที)
1	เดินนำเพลทด้านซ้าย-ขวาที่ขึ้นรูปเสร็จไปทำการลบคม	20.80
2	ลบคมขอบชิ้นงาน	1,139.36
3	เดินนำเพลทด้านซ้าย-ขวาไปที่เครื่องพินแสตมป์	6.28
4	สลักเลขที่ใบสั่งผลิต (Mo.)	394.62
5	เดินนำเพลทด้านซ้าย-ขวา ไปที่เครื่องพับ	15.96
6	ดูแบบงาน	63.87
7	ปรับตั้งเครื่องพับ	132.94
8	เปลี่ยนขนาดของมีดพับ	205.88
9	พับชิ้นงาน	1,085.28
10.	ตรวจสอบชิ้นงาน	60.64
11.	เขียนใบงาน	270.73
	รวม (วินาที)	**3,396.36**



รูปที่ 4 ความล่าช้าของงานย่อยกระบวนการพับเพลทด้านข้างคอยล์ ชิ้นส่วนโครงพัดลม

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.008



รูปที่ 5 ความล่าช้าของงานย่อยกระบวนการพับเพลทด้านข้างคอยล์ ชิ้นส่วนเพลทด้านซ้าย-ขวา

2.3.3 การระดมความคิด (Brainstorming)

ผู้วิจัยได้พิจารณาถึงสาเหตุที่ทำให้เกิดเวลาอันสูญเปล่าจากขั้นตอนการลบคมของชิ้นส่วนโครงพัดลมและชิ้นส่วนเพลทด้านซ้าย-ขวา ในรูปแบบของการแสดงความคิดเห็นร่วมกัน โดยการระดมความคิดกับผู้ที่เกี่ยวข้องในหน่วยงานผลิตเพลทด้านข้างคอยล์ ได้แก่ หัวหน้าหน่วยงานผลิต พนักงานควบคุมเครื่องจักร สรุปปัญหา และแนวทางแก้ไขได้ ดังตารางที่ 5

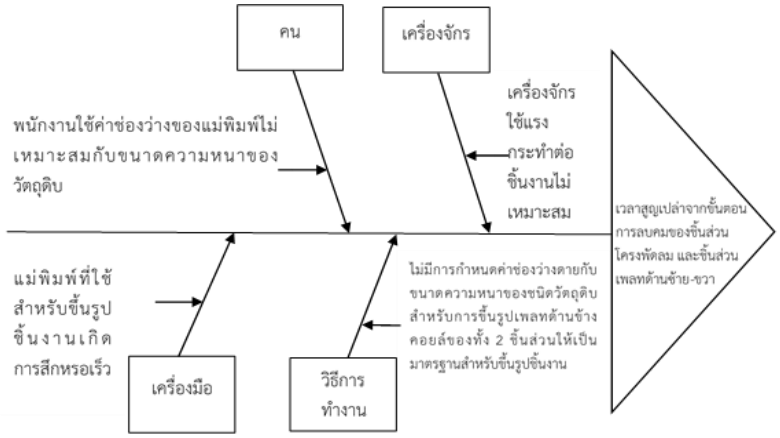
2.3.4 วิเคราะห์สาเหตุของปัญหาใช้ผังแสดงเหตุและผล (Cause and Effect Diagram)

จากการระดมสมองร่วมกับผู้ที่เกี่ยวข้อง ผู้วิจัยได้รวบรวมและจำแนกปัจจัยที่ส่งผลต่อปัญหาให้อยู่ในรูปแบบของ 4M1E และนำเสนอในรูปแบบผังแสดงสาเหตุและผลดังรูปที่ 6

ตารางที่ 5 สรุปสาเหตุของปัญหาของปัญหา และแนวทางในการแก้ไข

ปัจจัย	สาเหตุ	ผลที่เกิดขึ้น	แนวทางแก้ไข
พนักงาน	พนักงานใช้ค่าช่องว่างดายไม่เหมาะสมกับขนาดความหนาของชนิดวัตถุดิบที่ใช้ในการขึ้นรูปของทั้ง 2 ชิ้นส่วน	ชิ้นรูปชิ้นงานแล้วเกิดครีบ (Burr) ที่ขอบชิ้นงาน ทำให้ต้องเพิ่มขั้นตอนลบคม เสียเวลาและแรงงาน	ผู้วิจัยได้กำหนดค่าช่องว่างของดายใหม่ให้เหมาะสมกับความหนาและชนิดของวัสดุ ซึ่งเป็นการปรับปรุงด้านเครื่องมือ (Tooling) ที่ช่วยให้เครื่องจักร (Machine) ขึ้นรูปได้แม่นยำ ลดการเกิดครีบ ส่งผลให้พนักงาน (Man) ไม่ต้องเสียเวลาในการลบคมชิ้นงาน ลดขั้นตอนและเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวม
เครื่องจักร	เครื่องจักรใช้แรงกระทำต่อชิ้นงานไม่เหมาะสมกับวัสดุ	ชิ้นงานเกิดครีบ และเกิดปัญหาในการพับ ทำให้คุณภาพงานลดลงและมีโอกาสเกิดของเสีย	
เครื่องมือ	แม่พิมพ์ที่ใช้สำหรับขึ้นรูปชิ้นงานเกิดการสึกหรอเร็ว	คุณภาพการขึ้นรูปชิ้นงานลดลง เกิดครีบง่ายและแม่พิมพ์มีอายุการใช้งานสั้น ต้องซ่อมหรือเปลี่ยนบ่อย	
วิธีการ	ไม่มีการกำหนดค่าช่องว่างดายกับความหนาของวัสดุให้เป็นมาตรฐาน	ความไม่สม่ำเสมอในการขึ้นรูปชิ้นงาน และเกิดครีบมากหรือน้อยต่างกันในแต่ละล็อตงาน	ทำการทดสอบชิ้นงานที่ได้จากการทำงานของแม่พิมพ์ขนาดใหม่ เพื่อกำหนดเป็นมาตรฐาน

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.008



รูปที่ 6 วิเคราะห์สาเหตุของปัญหาโดยใช้ผังก้างปลา

จากตารางที่ 5 โดยสรุปพบปัญหาที่มาจากสาเหตุการเลือกใช้ค่าช่องว่างดาย (Die Clearance) ไม่เหมาะสมกับขนาดความหนาของชนิดวัตถุดิบสำหรับขึ้นรูปเพลทด้านข้างคอยล์ของทั้ง 2 ชิ้นส่วน เมื่อขึ้นรูปชิ้นงานออกมา ขอบชิ้นงานจึงไม่เรียบเนียน หรือเกิดครีบ (Burr) ที่ขอบชิ้นงาน จึงทำให้เกิดกิจกรรมที่ไม่เกิดประโยชน์ และเวลาอันสูญเปล่าเกิดขึ้น ส่งผลให้กระบวนการผลิตเกิดความล่าช้า

2.4 ออกแบบวิธีการปรับปรุง

หลังจากการศึกษา และวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นของทั้ง 2 ชิ้นส่วนศึกษานำหลักการลดความสูญเปล่า ECRS มาประยุกต์ใช้ [6,7] เพื่อลดเวลาอันสูญเปล่านั้น และเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตได้ยิ่งขึ้น ผู้วิจัยเลือกใช้ E หรือการกำจัด (Eliminate) มาปรับใช้ตามความเหมาะสม

1) งานที่สามารถขจัดออกไปได้ (Eliminate) กระบวนการพับเพลทด้านข้างคอยล์ของชิ้นส่วนโครงพัดลม และชิ้นส่วนเพลทด้านซ้าย-ขวา จะมีขั้นตอนในการทำงานที่คล้ายกัน แต่ต่างกันเพียงขั้นตอนเดียว คือ ชิ้นส่วนเพลทด้านซ้าย-ขวา จะมีขั้นตอนการสลักเลขที่ใบสั่งผลิตลงไปบนชิ้นงาน ผู้วิจัยจึงเลือกใช้วิธีการปรับปรุงกระบวนการทำงานของทั้ง 2 ชิ้นส่วน เป็นวิธีการเดียวกัน โดยก่อนทำการเริ่มพับชิ้นงาน พนักงานจะนำชิ้นงานมาทำการเจียรขอบชิ้นงานของทั้ง 2 ชิ้นส่วนทุกชิ้น เพื่อลบความคม หรือครีบ (Burr) ที่ขอบชิ้นงาน หลังผ่านการขึ้นรูปแล้ว ซึ่งเป็นกิจกรรมที่เปล่าประโยชน์ และเกิดเวลาอันสูญเปล่าเนื่องจากชิ้นงานที่เกิดครีบ (Burr) เกิดจากการเลือกใช้ค่าช่องว่างที่ไม่เหมาะสมของคมตัดแม่พิมพ์ จากการขึ้นรูปเพลทด้านข้างคอยล์ของทั้ง 2 ชิ้นส่วน เนื่องจากทางบริษัทกรณีศึกษาใช้ค่าช่องว่างดายไม่เหมาะสมกับวัตถุดิบที่ใช้ขึ้นรูปชิ้นงาน โดยปัจจุบันไม่ได้มีการกำหนดหลักการตั้งค่าช่องว่างของดาย (Die Clearance) ไว้อย่างชัดเจน ซึ่งก่อให้เกิดครีบ (Burr) บนชิ้นงาน ทำให้เครื่องจักรเพิ่มแรงที่มากระทำต่อพันช์กับดาย ส่งผลให้แม่พิมพ์สึกหรอเร็วกว่าปกติ และเมื่อทำการขึ้นรูปชิ้นงาน ผิวของชิ้นงานที่ถูกตัดไม่เรียบเนียน เกิดความคมที่ขอบชิ้นงาน ผู้วิจัยจึงทำการปรับปรุงค่าช่องว่างของดาย

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.008

เพื่อหาค่าช่องว่างดายที่เหมาะสมกับขนาดความหนาของชนิดวัตถุดิบที่ใช้สำหรับขึ้นรูปเพลทด้านข้างคอยล์ของทั้ง 2 ชิ้นส่วน และไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการเจียรลบคมอีกต่อไป

จากตารางที่ 6 แสดงตัวอย่างการเจียรลบคม ผู้วิจัยได้ทำการปรับปรุงค่าช่องว่างของดาย (Die Clearance) ขึ้นใหม่ โดยปรับปรุงเฉพาะแม่พิมพ์ที่ใช้ตัดขอบชิ้นงาน เนื่องจากพนักงานเจียรลบคมครีบเฉพาะขอบชิ้นงานของทั้ง 2 ชิ้นส่วนเท่านั้น และทำการคำนวณค่าช่องว่างของดายที่เหมาะสมกับขนาดความหนาของชนิดวัตถุดิบที่ใช้สำหรับขึ้นรูปเพลทด้านข้างคอยล์ของทั้ง 2 ชิ้นส่วน อ้างอิงตามสมการคำนวณของคู่มือของ Thick Turret Tooling Solutions [4] ดังตารางที่ 7

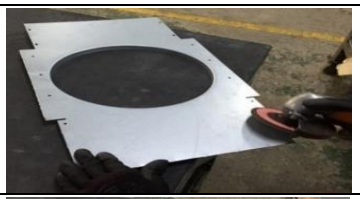
จากตารางที่ 7 ผู้วิจัยเลือกค่าช่องว่างของแม่พิมพ์ประเภท Mild Steel ที่ Maximum คือ 20% เพื่อให้ครอบคลุมกับวัตถุดิบทุกขนาด จากนั้นทำการคำนวณหาค่าช่องว่างของพันช์กับดายที่เหมาะสม ดังสมการที่ (5)

$$\text{Clearance} = \text{Material Thickness} \times 20\% \quad (5)$$

โดยที่ Clearance คือ ค่าช่องว่างของดาย
Material Thickness คือ ขนาดความหนาของชนิดวัตถุดิบที่ใช้ (เหล็กชุบสังกะสี)

หลังจากการคำนวณค่าช่องว่างของดาย (Die Clearance) จากขนาดความหนาของชนิดวัตถุดิบที่ใช้ขึ้นรูปแล้วจะได้ค่าช่องว่างดายชุดใหม่ ดังตารางที่ 8

ตารางที่ 6 ตัวอย่างการเจียรลบคมชิ้นงาน

ชิ้นส่วนเพลทด้านข้างคอยล์	ภาพประกอบ
โครงพัดลม	
เพลทด้านซ้าย-ขวา	

ตารางที่ 7 การเลือกค่าช่องว่างของแม่พิมพ์

Die Clearance Selection Information			
	% Total Clearance		
Material	**Minimum**	**Best**	**Maximum**
copper,1/2 Hard	8%	12%	16%
Brass,1/2 Hard	6%	11%	16%
Mild Steel	10%	15%	20%
Steel 0.50C	12%	18%	24%
Aluminum, Soft	5%	10%	15%
Stainless Steel	15%	20%	25%

หลังจากทำการแก้ไขปัญหาการเกิดครีบที่ขอบชิ้นงานด้วยการปรับเปลี่ยนขนาดของตัวดายที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานตามค่าช่องว่างของดาย (Die Clearance) ที่คำนวณใหม่แล้ว และผ่านการยอมรับจากทางบริษัทแล้ว ซึ่งส่งผลให้พนักงานไม่ต้องเจียรลบคมครีบที่ขอบชิ้นงานแล้วทำให้พนักงานที่เคยทำการเจียรชิ้นงานเกิดการว่างงาน ทางบริษัทจึงให้นำพนักงานมาปฏิบัติงานในขั้นตอนการพับชิ้นงานจากเครื่องจักรที่เพิ่มเข้ามาใหม่ เพื่อเป็นการช่วยเพิ่มกำลังในการผลิต และทำให้สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.008

ตารางที่ 8 ขนาดของดาย และค่าช่องว่างหลังปรับปรุง

ชิ้นส่วนของเพลทด้านข้างคอยล์	ชนิดของวัตถุดิบ	ขนาดความหนาของชนิดวัตถุดิบ (mm)	ค่าช่องว่างดาย (mm)	ขนาดของสำหรับตัดของเพลทด้านข้างคอยล์ (mm)
โครงพัดลม	เหล็กชุบสังกะสี	0.55	0.11	Rectangle 5.11 x 50.11
				Rectangle 3.11 x 30.11
				Rectangle 5.11 x 100.11
เพลทด้านซ้าย-ขวา	เหล็กชุบสังกะสี	0.9	0.18	Rectangle 5.18 x 50.18
				Rectangle 3.18 x 30.18
				Rectangle 5.18 x 100.18

ตารางที่ 9 เปรียบเทียบชิ้นงานก่อนและหลังปรับปรุง

ชิ้นส่วนเพลทด้านข้างคอยล์	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง
โครงพัดลม		
เพลทด้านซ้าย-ขวา		

3. ผลการทดลอง

จากการที่ผู้วิจัยนำหลักการลดความสูญเปล่ามาประยุกต์ใช้ โดยใช้หลักการ E (Eliminate) เพื่อขจัดขั้นตอนการลบคมชิ้นงานของทั้ง 2 ชิ้นส่วน โดยการปรับปรุงค่าช่องว่างของดาย (Die Clearance) ขึ้นใหม่แล้ว ผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบชิ้นงานหลังการขึ้นรูปทุก ๆ 15 วัน พบว่า พนักงานไม่ต้องทำการเจียรลบคมขอบชิ้นงานอีกต่อไป และขอบชิ้นงานไม่เกิดครีบ (Burr) โดยเฉพาะบริเวณขอบด้านนอกของชิ้นส่วนโครงพัดลมและเพลทด้านซ้าย–ขวา ซึ่งเป็นจุดที่เคยเกิดครีบเป็นประจำก่อนการปรับปรุง ผลลัพธ์ดังกล่าวทำให้หลังเสร็จกระบวนการขึ้นรูป พนักงานสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องมากขึ้น โดยพนักงานที่เคยทำการเจียรลบคมชิ้นงานสามารถเข้ามาช่วยในขั้นตอนการพับชิ้นงานแทน ส่งผลให้สามารถเพิ่มกำลังในการผลิต และช่วยให้ได้ปริมาณการผลิตเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 9

หลังการปรับปรุงผู้วิจัยเก็บรวบรวมข้อมูลงานย่อยของทั้ง 2 ชิ้นส่วน โดยอ้างอิงตามทฤษฎีของ Maytag และนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาเวลามาตรฐาน

3.1 ชิ้นส่วนโครงพัดลม

จากตารางที่ 10 แสดงผลการดำเนินงานปรับปรุงของชิ้นส่วนโครงพัดลม โดยพบว่าเวลามาตรฐาน (Standard Time) ก่อนการปรับปรุงอยู่ที่ 2,630.58 วินาที และหลังการปรับปรุงสามารถนำชุดข้อมูลมาคำนวณหาเวลามาตรฐานหลังปรับปรุง คำนวณตามสมการ (3),(4) ที่ค่าเผื่อ 11% จะได้เวลามาตรฐานหลังปรับปรุงของชิ้นส่วนเพลทด้านซ้าย-ขวา 1,363.81 วินาที ซึ่งค่าดังกล่าวได้จากการคำนวณตามหลัก Time Study โดยนำเวลาเฉลี่ยของแต่ละขั้นตอน (จากการจับเวลา) มาปรับด้วย

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.008

ค่าความสามารถของผู้ปฏิบัติงาน (Rating Factor) และเวลาเผื่อ (Allowance)

จากการคำนวณในตารางที่ 11 แสดงให้เห็นว่ารอบเวลาการผลิตชิ้นส่วนโครงพัดลมก่อนการปรับปรุงอยู่ที่ 2,369.89 วินาทีต่อรอบ ลดลงเหลือ 1,363.81 วินาทีต่อรอบ ซึ่งคิดเป็นการลดเวลาลง 1,266.77 วินาที หรือลดลงร้อยละ 48.16 โดยในการทำงาน 1 รอบ จะสามารถผลิตชิ้นส่วนโครงพัดลมได้ 14 ชิ้น จากการใช้แผ่นเหล็กชุบสังกะสีขนาด 4 × 8 ฟุต จำนวน 1 แผ่น ดังนั้นหากคิดในช่วงเวลาทำงาน 8 ชั่วโมง (28,800 วินาที) จะสามารถผลิตได้

ก่อนปรับปรุง = 28,800 / 2,630.58
≈ 12.15 รอบ×14 = 170 ชิ้น

หลังปรับปรุง = 28,800 / 1,363.81
≈ 21.12 รอบ×14 = 295 ชิ้น

ส่งผลให้ปริมาณการผลิตเพิ่มขึ้น 125 ชิ้น หรือคิดเป็นร้อยละ 73.53 เมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการปรับปรุง

3.2 ชิ้นส่วนเพลทด้านซ้าย-ขวา

ตารางที่ 12 แสดงผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของชิ้นส่วนเพลทด้านซ้าย–ขวาก่อนและหลังการปรับปรุง พบว่า ก่อนการปรับปรุงมีเวลามาตรฐานรวม เท่ากับ 3,769.96 วินาที และหลังการปรับปรุงสามารถนำชุดข้อมูลมาคำนวณหาเวลามาตรฐาน คำนวณตามสมการ (3),(4) ที่ค่าเผื่อ 11% จะได้เวลามาตรฐานหลังปรับปรุงเท่ากับ 1,886.62 วินาที

จากตารางที่ 13 แสดงผลการเปรียบเทียบจำนวนชิ้นส่วนเพลทด้านซ้าย–ขวาที่สามารถผลิตได้ภายในระยะเวลา 8 ชั่วโมงก่อนและหลังการปรับปรุง โดยใช้หลักการคำนวณเดียวกับตารางที่ 11 คือ คำนวณจากเวลามาตรฐานต่อรอบงานที่ได้จากการศึกษาแล้วเทียบกับเวลาทำงาน 8 ชั่วโมง (28,800 วินาที) โดยในแต่ละรอบสามารถผลิตชิ้นส่วนได้ 28 ชิ้น จะสามารถผลิตได้ก่อนปรับปรุง 213 ชิ้น หลังปรับปรุง 427 ชิ้น ส่งผลให้สามารถเพิ่มปริมาณการผลิตได้ 214 ชิ้น หรือคิดเป็นร้อยละ 100.00 เพิ่มขึ้นจากเดิมอย่างชัดเจน สะท้อนให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่ดีขึ้นจากการปรับปรุงกระบวนการ

ตารางที่ 10 เวลาเฉลี่ยงานย่อย ชิ้นส่วนโครงพัดลมหลังปรับปรุง

ขั้นตอน	งานย่อย	เวลาเฉลี่ย (วินาที)
1	เดินนำโครงพัดลมไปที่เครื่องพับ	9.20
2	ดูแบบงาน	127.74
3	ปรับตั้งเครื่องพับ	157.00
4	เปลี่ยนขนาดของมีดพับ	342.43
5	พับชิ้นงาน	381.07
6	ตรวจสอบชิ้นงาน	76.49
7	เขียนใบงาน	134.73
รวม (วินาที)		**1,228.66**

ตารางที่ 11 เปรียบเทียบปริมาณชิ้นส่วนโครงพัดลมก่อนและหลังปรับปรุง

โครงพัดลม	เวลามาตรฐานต่อรอบ	ปริมาณชิ้นงาน /8ชั่วโมง
ก่อนปรับปรุง	2,630.58 วินาที	170 ชิ้น
หลังปรับปรุง	1,363.81 วินาที	295 ชิ้น
ผลต่าง	ลดลง 1,266.77 วินาที หรือ 48.16%	เพิ่มขึ้น 125 ชิ้น หรือ 73.53%

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.008

ตารางที่ 12 เวลาเฉลี่ยงานย่อย ชิ้นส่วนเพลทด้านซ้าย-ขวา หลังปรับปรุง

ขั้นตอน	งานย่อย	เวลาเฉลี่ย (วินาที)
1	เดินนำเพลทด้านซ้าย-ขวาที่ขึ้นรูปเสร็จไปที่เครื่องพิมแสตมป์	6.72
2	สลักเลขที่ใบสั่งผลิต (Mo.)	394.68
3	เดินนำเพลทด้านซ้าย-ขวาไปที่เครื่องพับ	15.08
4	ดูแบบงาน	62.82
5	ปรับตั้งเครื่องพับ	132.43
6	เปลี่ยนขนาดของมีดพับ	208.21
7	พับชิ้นงาน	548.61
8	ตรวจสอบชิ้นงาน	60.40
9	เขียนใบงาน	270.71
	รวม (วินาที)	**1,699.66**

ตารางที่ 13 เปรียบเทียบปริมาณชิ้นส่วนเพลทด้านซ้าย-ขวาก่อนและหลังปรับปรุง

เพลทด้านซ้าย-ขวา	เวลามาตรฐานต่อรอบ	ปริมาณชิ้นงาน / 8ชั่วโมง
ก่อนปรับปรุง	3,769.96 วินาที	213 ชิ้น
หลังปรับปรุง	1,886.62 วินาที	427 ชิ้น
ผลต่าง	ลดลง 1,883.34 วินาที หรือ 49.96%	เพิ่มขึ้น 214 ชิ้น หรือ เพิ่มขึ้น 100.00%

ผลการปรับปรุงในครั้งนี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของบุษพร, สุรนันท์ชัย และชุติมา [8, 9] ที่นำหลักการ ECRS มาใช้ในการปรับปรุงกระบวนการทำงาน โดยมุ่งลดขั้นตอนและระยะเวลาที่ไม่จำเป็นในสายการผลิต ส่งผลให้สามารถดำเนินงานได้อย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น นอกจากนี้งานวิจัยของวิชญุตร์และคณะ [10] ซึ่งประยุกต์ใช้แนวคิด ECRS ในอุตสาหกรรมเสื้อผ้าสำเร็จรูป ยังแสดงให้เห็นถึงการลดขั้นตอนการผลิตและระยะเวลาการทำงานเฉลี่ยลงอย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่เรืองระวี [11] รายงานว่าการประยุกต์ใช้แนวคิดดังกล่าวสามารถลดความซ้ำซ้อน เพิ่มความคล่องตัว และยกระดับประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตโดยรวมได้อย่างชัดเจน

ในด้านการเพิ่มประสิทธิภาพระบบการผลิต ผลการศึกษานี้ยังมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของอำนาจและสินลภชัย [12] ซึ่งได้ออกแบบแม่พิมพ์ใหม่ในกระบวนการขึ้นรูปชิ้นส่วนโลหะในอุตสาหกรรมยานยนต์ โดยใช้แนวทางการลดขั้นตอนที่ไม่จำเป็นในสายการผลิต เพื่อยกระดับความต่อเนื่องและประสิทธิภาพของระบบ เช่นเดียวกับงานของวศินและอัมพร [13] ที่ศึกษาการปรับปรุงกระบวนการผลิตโลหะแผ่น โดยประยุกต์ใช้ ECRS ร่วมกับการออกแบบแม่พิมพ์ให้เหมาะสมกับวัสดุและแรงเฉือน ส่งผลให้กระบวนการผลิตสามารถดำเนินไปได้อย่างต่อเนื่องมากขึ้น และเพิ่มจำนวนชิ้นงานต่อรอบได้อย่างเป็นรูปธรรม

4. บทสรุป

จากการศึกษากระบวนการผลิตเพลทด้านข้างคอยล์รูปแบบคอยล์โครงพัดลม และการลดความสูญเปล่าในกระบวนการผลิต เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตให้ดียิ่งขึ้น ผู้วิจัยได้ศึกษากระบวนการผลิตเพลทด้านข้าง

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.008

คอยล์ และได้เล็งเห็นถึงปัญหาของกระบวนการพับเพลทด้านข้างคอยล์ที่เกิดความล่าช้า ทำให้ปริมาณการผลิตไม่ตรงตามแผนงานที่ตั้งไว้ จึงได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลเพื่อนำมาวิเคราะห์ปัญหา และหาสาเหตุ จากนั้นทำการแก้ไขปัญหา โดยผู้วิจัยได้สรุปผลการดำเนินงานออกเป็น 3 ด้าน

1) ด้านกระบวนการทำงาน หลังจากการปรับปรุงกระบวนการพับเพลทด้านข้างคอยล์ของชิ้นส่วนโครงพัดลมและชิ้นส่วนเพลทด้านซ้าย-ขวา ผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้หลักการ ECRS ในการปรับปรุงกระบวนการ โดยขจัดขั้นตอนการลบคมชิ้นงาน จากการปรับปรุงค่าช่องว่างของดาย (Die Clearance) เพื่อให้มีความเหมาะสมกับขนาดความหนาของชนิดวัตถุดิบที่ใช้ขึ้นรูปเพลทด้านข้างคอยล์ของชิ้นส่วนโครงพัดลม และชิ้นส่วนเพลทด้านซ้าย-ขวา และเพื่อให้พนักงานสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง เมื่อทำการปรับปรุงแล้ว พบว่าขั้นตอนการทำงานลดลงจริง พนักงานไม่ต้องทำการลบคมชิ้นงาน และขอบชิ้นงานไม่เกิดครีบ (Burr) หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการขึ้นรูป พนักงานเดิมที่มีหน้าที่เจียรลบคมจึงสามารถเปลี่ยนไปทำงานในขั้นตอนการพับชิ้นงานแทน ซึ่งช่วยเพิ่มกำลังในการผลิต

2) ด้านเวลาในการทำงาน จากการปรับปรุงส่งผลให้กระบวนการพับเพลทด้านข้างคอยล์มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ซึ่งสามารถลดระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการพับเพลทด้านข้างคอยล์ของชิ้นส่วนโครงพัดลม และชิ้นส่วนเพลทด้านซ้าย-ขวา โดยชิ้นส่วนโครงพัดลมจากเดิมก่อนปรับปรุงเฉลี่ยอยู่ที่ 2,630.58 วินาที ผลหลังปรับปรุงเฉลี่ยอยู่ที่ 1,363.81 วินาที หรือคิดเป็นร้อยละ 48.16 และกระบวนการพับเพลทด้านข้างคอยล์กรณีชิ้นส่วนเพลทด้านซ้าย-ขวา ก่อนปรับปรุงเฉลี่ยอยู่ที่ 3,769.96 วินาที

3) ด้านประสิทธิภาพในการผลิตและผลกระทบทางด้านเศรษฐศาสตร์ จากการปรับปรุงทำให้ประสิทธิภาพการผลิตเพิ่มมากขึ้น ดังตารางที่ 14 – 15

ตารางที่ 14 เปรียบเทียบก่อน และหลังปรับปรุงชิ้นส่วนโครงพัดลมหน่วยงานเพลท

เพลทโครงพัดลม	ก่อนการปรับปรุง			หลังการปรับปรุง		
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
แผนต่อวัน (ชิ้น)	200	200	200	200	200	200
ผลิตต่อวัน (ชิ้น)	175	178	177	330	329	320

ตารางที่ 15 เปรียบเทียบก่อน และหลังปรับปรุงชิ้นส่วนเพลทด้านซ้าย-ขวา

ชิ้นส่วนเพลทด้านซ้าย-ขวา	ก่อนการปรับปรุง			หลังการปรับปรุง		
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
แผนการผลิตต่อวัน (ชิ้น)	400	400	400	400	400	400
จำนวนที่ผลิตได้เฉลี่ยต่อวัน (ชิ้น)	248	235	240	470	462	476

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.008

จากตารางที่ 14 และ 15 พบว่า จำนวนการผลิตชิ้นส่วนโครงพัดลม และชิ้นส่วนเพลทด้านซ้าย–ขวา ก่อนการปรับปรุง ยังไม่สามารถบรรลุเป้าหมายตามแผนการผลิตที่กำหนดไว้ ซึ่งอยู่ที่ 200 ชิ้น และ 400 ชิ้นตามลำดับ อย่างไรก็ตาม หลังจากการปรับปรุงกระบวนการของหน่วยงานผลิตเพลทด้านข้างคอยล์ ส่งผลให้สามารถผลิตได้ตามเป้าหมายที่กำหนด และยังช่วยลดระยะเวลาการทำงานโดยรวมในแต่ละหน่วยงาน

โดยสรุปได้ว่า หลังการปรับปรุงเวลาในการผลิตของหน่วยงานเพลทด้านข้างคอยล์นั้น ลดลงจากเดิม 10,386 วินาที เป็น 7,870.43 วินาที ลดจากเดิม 2,515.57 วินาที หรือ คิดเป็นร้อยละ 24.21 ในด้านผลกระทบทางเศรษฐศาสตร์ การตัดขั้นตอน “การลบคมชิ้นงาน” ซึ่งแต่เดิมเป็นกิจกรรมที่ใช้เวลาในการดำเนินงานค่อนข้างสูง (ประมาณ 700–1,100 วินาทีต่อรอบ) ออกไป ส่งผลให้สามารถจัดสรรกำลังแรงงานไปสนับสนุนกระบวนการพับเพลทได้โดยตรง ลดภาระงานซ้ำซ้อน และเพิ่มอัตราการใช้ประโยชน์แรงงาน (Labor Utilization Rate) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้จากข้อมูลหลังการปรับปรุงพบว่า จำนวนชิ้นส่วนโครงพัดลมและเพลทด้านซ้าย-ขวา ที่ผลิตในระยะเวลาเท่าเดิมเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งสะท้อนถึงการเพิ่มผลิตภาพต่อแรงงาน (Labor Productivity) ส่งผลให้ต้นทุนเฉลี่ยต่อหน่วย (Average Cost per Unit) ลดลง และทำให้เกิดกำไรต่อหน่วยเพิ่มขึ้น

5. ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

5.1 ควรมีการทดสอบค่าช่องว่างของแม่พิมพ์กับวัสดุประเภทอื่น ๆ เช่น สแตนเลส หรืออลูมิเนียม เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของชนิดวัสดุกับปริมาณครีบที่เกิดขึ้น

5.2 แนะนำศึกษาผลกระทบของค่าช่องว่างแม่พิมพ์ต่ออายุการใช้งานของแม่พิมพ์ในระยะยาว เพื่อประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในระดับองค์กร

6. เอกสารอ้างอิง

[1] S.S.Kim, C. S. Han and Y.-S. Lee, Development of a new burr-free hydro-mechanical punching, Journal of Materials Processing Technology, 2005, 162–163, 524-529.

[2] https://www.daytonlamina.com/technical-articles/article-detail/new-look-die-clearance. (Accessed on 25 April 2025)

[3] https://moellerpunch.com/how-to-determine-punch-and-die-clearance. (Accessed on 25 April 2025)

[4] https://myaccount.wilsontool.com/medias/Die-Clearance.pdf (Accessed on 25 April 2025)

[5] R. Karnchanapunyakom, Industrial work study, Top Publishing, Bangkok, Thailand. 2009.

[6] https://www.creativesafetysupply.com/glossary/ecrs. (Accessed on 27 April 2025)

[7] T. Ohno, Toyota production system: Beyond large-scale production, Productivity Press, Portland, OR, USA, 1988.

[8] B. Boonsuk, Applying value stream mapping and the ECRS principle to reduce waste in the distribution process, Journal of Industrial Engineering and Logistics, 2025, 8(1), 45-55.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.008

[9] S. Nakawong, C. Udomphon, Application of lean management techniques and ergonomic principles to improve manual assembly processes, Engineering Journal, 2023, 30(2), 29-43.

[10] W. Ngamsaad, P. Naksidee, N. Ingprasert, Applying the ECRS principle to improve garment manufacturing processes, The 9th National Conference on Science and Technology, Nakhon Pathom Rajabhat University, Proceeding, 2023.

[11] R. Singh, Improving production efficiency using the ECRS principle: A case study in the plastic parts industry, The Journal of Industrial Technology, 2023, 19(1), 45-52.

[12] A. Amonlak and S. Wattanasathien, Efficiency improvement using concurrent engineering and ECRS technique: A case study in a small automotive parts manufacturer, Thai Industrial Engineering Network Journal, 2019, 5(1), 21-27.

[13] W. Patanachai and A. Intarasophon, Improvement of sheet metal production process using the ECRS principle and shear die design, Journal of Industrial Engineering, 2022, 29(2), 35-43.

บทความวิจัย

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.009

การหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียในน้ำผิวดินโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบไฮโดรไดนามิกส์คาวิเตชั่นด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง

ธนกฤต นนท์ชนะ[1] นพรัตน์ อมัติรัตน์[2] กุลเชษฐ์ เพียรทอง[3] และ อิทธิพล วรพันธ์[4*]

[1] สาขาวิชาระบบราง, คณะระบบรางและการขนส่ง, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

[2] สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานและการปรับอากาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

[3] ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

[4] สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

[*] ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: ittipon.wo@rmuti.ac.th

วันที่รับบทความ: 7 มกราคม 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 26 มิถุนายน 2568; วันที่ตอบรับบทความ: 1 กรกฎาคม 2568
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 20 สิงหาคม 2568

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียในน้ำผิวดินโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบไฮโดรไดนามิกส์คาวิเตชั่นเป็นตัวช่วย วิธีพื้นผิวตอบสนองถูกนำมาใช้สำหรับการวิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปรต่อปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมด ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ ระยะเวลาในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรีย จำนวนรูและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูบนแผ่นออริฟิซ จากผลการทดลองพบว่าคาวิเตชั่นที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์สามารถช่วยลดปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการลดลงของปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดอย่างมีนัยสำคัญคือระยะเวลาในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรีย จำนวนรูและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูบนแผ่นออริฟิซ ทั้งนี้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้สามารถทำนายปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดได้ดีด้วยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.9462 และสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียคือระยะเวลาในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรีย 89.33 นาที จำนวนรูบนแผ่นออริฟิซ 5 รู และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูบนแผ่นออริฟิซ 3 มิลลิเมตรทำให้ปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดในน้ำผิวดินลดลงจาก 200 ซีเอฟยู/ 100 มิลลิลิตรเหลือ 0 ซีเอฟยู/ 100 มิลลิลิตร

คำสำคัญ: โคลิฟอร์มแบคทีเรีย; วิธีพื้นผิวตอบสนอง; แผ่นออริฟิซแบบหลายรู; ถังปฏิกรณ์แบบไฮโดรไดนามิกส์คาวิเตชั่น

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.009

บทความวิจัย

Optimization of Coliform Bacteria Removal in Surface Water using a Hydrodynamic Cavitation Reactor with the Response Surface Methodology

Thanakrit Nonchana[1] Nopparat Amattirat[2] Kulachate Pianthong[3] and Ittipon Worapun[4*]

[1] Department of Railway Systems, Faculty of Railway Systems and Transportation, Rajamangala University of Technology Isan
[2] Department of Energy and Air Conditioning Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan
[3] Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubonratchathani University
[4] Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan
[*] Corresponding Author, E-mail: ittipon.wo@rmuti.ac.th

Received: 7 January 2025; Revised: 26 June 2025; Accepted: 1 July 2025
Online Published: 20 August 2025

Abstract: This research aims to determine the optimal conditions for eliminating coliform bacteria in surface water using a hydrodynamic cavitation reactor. The response surface methodology was employed to analyze the influence of variables on the amount of total coliform bacteria. The studied variables included the duration of coliform bacteria removal, the number of holes, and the diameter of the holes on the orifice plate. The experimental results showed that the cavitation occurring within the reactor effectively reduced the amount of total coliform bacteria. The key variables significantly affecting the reduction of total coliform bacteria were the duration of removal, the number of holes, and the diameter of the holes on the orifice plate. The developed mathematical model was found to predict the amount of total coliform bacteria with high accuracy, with a coefficient of determination (R^2) of 0.9462. The optimal conditions for eliminating coliform bacteria were determined to be a removal duration of 89.33 minutes, an orifice plate with 5 holes, and a hole diameter of 3 mm. Under these conditions, the amount of total coliform bacteria in surface water was reduced from 200 CFU/100 ml to 0 CFU/100 ml.

Keywords: Coliform bacteria; Response surface methodology; Multi-hole Orifice plates; Hydrodynamics cavitation react

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.009

1. บทนำ

ความมั่นคงด้านทรัพยากรน้ำถือเป็นหนึ่งในความท้าทายระดับโลกที่สำคัญยิ่ง การเพิ่มขึ้นของประชากรและการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมได้สร้างความต้องการน้ำปริมาณมหาศาลต่อแหล่งน้ำจืด โดยเฉพาะแหล่งน้ำผิวดิน เช่น แม่น้ำและทะเลสาบ ซึ่งมีความเปราะบางสูงต่อการปนเปื้อนทางจุลชีววิทยา อันเป็นความเสี่ยงโดยตรงต่อสุขภาพของประชาชน การปนเปื้อนแบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์ม (Coliform Bacteria) และโดยเฉพาะอย่างยิ่ง *Escherichia coli (E. coli)* ในแหล่งน้ำ เป็นดัชนีชี้วัดที่ชัดเจนถึงการปนเปื้อนจากสิ่งปฏิกูล ซึ่งบ่งชี้ถึงความเป็นไปได้ที่จะมีเชื้อก่อโรคอื่นๆ ปะปนอยู่ด้วยและอาจนำไปสู่การระบาดของโรคทางเดินอาหารที่รุนแรงได้ เพื่อรับมือกับความท้าทายนี้ กระบวนการฆ่าเชื้อ (Disinfection) จึงเป็นหัวใจสำคัญของระบบการผลิตน้ำประปาและการบำบัดน้ำเสีย วิธีการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุดคือการใช้คลอรีน เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงและต้นทุนต่ำ อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของคลอรีนกลับมาพร้อมกับข้อเสียที่น่ากังวลหลายประการ ประการสำคัญที่สุดคือ เมื่อคลอรีนทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ตามธรรมชาติในน้ำ ก่อให้เกิดผลผลิตพลอยได้จากการฆ่าเชื้อ (Disinfection By-products, DBPs) โดยกลุ่มที่เป็นที่รู้จักและน่ากังวลมากที่สุดคือไตรฮาโลมีเทน (THMs) และกรดฮาโลอะซิติก (HAAs) ซึ่งสารประกอบเหล่านี้ถูกจัดว่าเป็นสารที่อาจก่อให้เกิดโรคมะเร็งในมนุษย์หากได้รับอย่างต่อเนื่อง [1,2] นอกจากนี้การใช้คลอรีนยังอาจส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศและอาจไม่สามารถกำจัดจุลินทรีย์บางชนิดที่มีความทนทานสูงได้

ด้วยข้อจำกัดเหล่านี้การแสวงหาเทคโนโลยีการบำบัดน้ำทางเลือกที่มีประสิทธิภาพสูง ปลอดภัยและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง โดยกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation Processes: AOPs) และไฮโดรไดนามิกส์คาวิเตชั่น (Hydrodynamic Cavitation, HC) มีความน่าสนใจในฐานะเทคโนโลยีที่อาศัยหลักการทางกล โดยไม่ต้องเติมสารเคมีใดๆ เพิ่ม ปรากฏการณ์ HC เกิดขึ้นเมื่อของเหลวไหลผ่านส่วนคอด เช่น แผ่นออริฟิซ (Orifice Plate) ด้วยความเร็วสูงทำให้ความดันลดลงต่ำกว่าความดันไอของของเหลว เกิดเป็นฟองไอขนาดเล็กจำนวนมหาศาล เมื่อฟองเหล่านี้เคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่มีความดันสูงขึ้น จะเกิดการยุบตัวลงอย่างรุนแรงและฉับพลัน [3] การยุบตัวนี้ปลดปล่อยพลังงานมหาศาลออกมาเฉพาะจุด สร้างกลไกการทำลายเซลล์จุลินทรีย์ที่ทรงพลังทั้งทางกายภาพและเคมีพร้อมกัน กลไกทางกายภาพประกอบด้วยแรงเฉือนรุนแรงที่ทำลายผนังเซลล์ ประกอบกับการเกิดจุดอุณหภูมิสูง (Hot Spots) ที่อุณหภูมิสูงถึง 3,000–5,000 K และคลื่นกระแทก (Shock Waves) ที่ความดันสูงกว่า 1,000 บาร์ ในขณะเดียวกันสภาวะนี้ยังก่อให้เกิดกลไกทางเคมีคือการแตกตัวของโมเลกุลน้ำ (H_2O) กลายเป็นอนุมูลอิสระ (Free Radicals) โดยเฉพาะอนุมูลไฮดรอกซิล (OH•) ซึ่งเป็นสารออกซิไดซ์ที่รุนแรง สามารถทำลายองค์ประกอบสำคัญของเซลล์ได้อย่างรวดเร็ว [4]

ถึงแม้ว่างานวิจัยที่ผ่านมาได้พิสูจน์ศักยภาพของ HC ในการกำจัดจุลินทรีย์ โดยมุ่งเน้นศึกษาผลของตัวแปรเชิงการทำงาน เช่น ความดันและระยะเวลาในการบำบัด [3-6] แต่การศึกษาจำนวนมากยังคงใช้วิธีการ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.009

ทดลองแบบดั้งเดิมคือการปรับเปลี่ยนตัวแปรทีละค่า (One Variable at a Time) ซึ่งมีข้อจำกัดสำคัญคือไม่สามารถอธิบายผลกระทบเชิงอันตรกิริยา (Interaction Effect) ระหว่างตัวแปรต่างๆ ได้ ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งในกระบวนการที่ซับซ้อนเช่นนี้ [7,8] เพื่อก้าวข้ามข้อจำกัดดังกล่าว วิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) จึงเป็นเครื่องมือทางสถิติและการออกแบบการทดลองที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรกับผลลัพธ์ของกระบวนการ และช่วยในการค้นหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Conditions) ได้อย่างแม่นยำและรวดเร็ว [9] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้ RSM ร่วมกับการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบไฮโดรไดนามิกส์คาวิเตชั่น โดยจะศึกษาอิทธิพลร่วมของตัวแปรสำคัญ 3 ตัว ได้แก่ ระยะเวลาในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรีย (T) จำนวนรูบนแผ่นออริฟิซ (N) และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูบนแผ่นออริฟิซ (D) พร้อมทั้งพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายและปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการให้สูงสุด

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

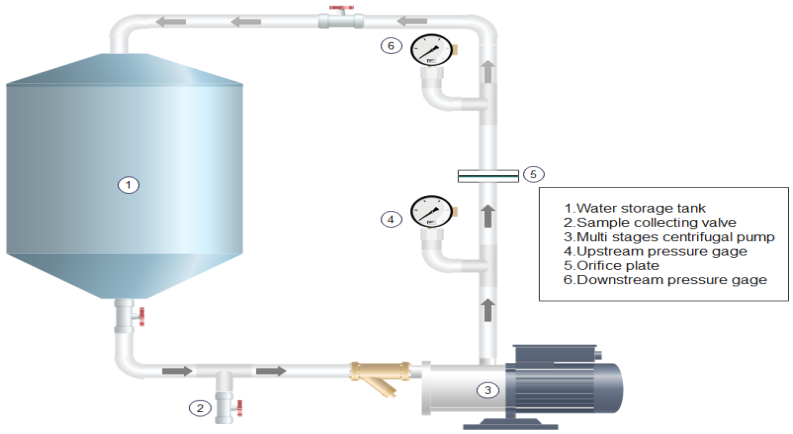
2.1 ชุดทดลองถังปฏิกรณ์แบบไฮโดรไดนามิกคาวิเตชั่น

งานวิจัยนี้อาศัยปรากฏการณ์ไฮโดรไดนามิกส์คาวิเตชั่นเพื่อกำจัดเชื้อโรคในน้ำ โดยเลือกใช้แผ่นออริฟิซเป็นอุปกรณ์เหนี่ยวนำคาวิเตชั่นภายในถังปฏิกรณ์ ชุดทดลองที่ใช้ (ดังรูปที่ 1) ประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก ได้แก่ ถังพักน้ำสเตนเลส (SUS 304) ขนาด 50 ลิตร และปั๊มน้ำแรงดันสูง (Vertical Multi-stage, 0.75 kW) ซึ่งทำหน้าที่เพิ่มแรงดันให้น้ำสูงสุดถึง 0.8 เมกะปาสคาล ก่อนส่งเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ ส่วนสำคัญของถังปฏิกรณ์คือท่อสำหรับติดตั้งแผ่นออริฟิซแบบหลายรู (ดังรูปที่ 2) ซึ่งทำจากเหล็กสแตนเลสมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 29 มิลลิเมตร แผ่นออริฟิซนี้เป็นหัวใจสำคัญในการสร้างคาวิเตชั่น ชุดทดลองยังมีวาล์วเก็บตัวอย่างน้ำ และเกจวัดความดันทั้งทางด้านเข้าและทางออกเพื่อควบคุมและตรวจสอบสภาวะการทดลอง เพื่อให้แน่ใจว่าชุดทดลองสามารถสร้างคาวิเตชั่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ คณะผู้วิจัยได้ทำการคำนวณหาค่า "เลขคาวิเตชั่น" (Cavitation Number) ซึ่งเป็นตัวเลขไร้มิติที่บ่งชี้ถึงความรุนแรงของปรากฏการณ์ โดยคำนวณจากความสัมพันธ์ตามสมการที่ (1) เพื่อยืนยันว่าสภาวะการทดลองเอื้อต่อการเกิดคาวิเตชั่นที่รุนแรงสำหรับการบำบัดน้ำ

$$\sigma = \frac{P_u - P_d}{P_d - P_v} \quad (1)$$

โดยที่ σ คือเลขคาวิเตชั่น, P_u คือความดันทางเข้าแผ่นออริฟิซ, P_d คือความดันทางออกจากแผ่นออริฟิซและ P_v คือความดันไอของน้ำ จากการคำนวณหาเลขคาวิเตชั่นตามสมการที่ 1 พบว่าชุดทดลองที่ใช้แผ่นออริฟิซแบบต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2 สามารถสร้างปรากฏการณ์คาวิเตชั่นได้แผ่นออริฟิซแต่ละแบบให้เลขคาวิเตชั่นอยู่ในช่วง 0.6-1.9 ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์คาวิเตชั่นที่รุนแรง ทั้งนี้ค่าเลขคาวิเตชั่น 0.2-0.8 จะให้ประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับการฆ่าเชื้อโรคในน้ำผิวดิน [10]

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.009



รูปที่ 1 แผนผังแสดงรายละเอียดของชุดทดลองถังปฏิกรณ์แบบไฮโดรไดนามิกส์คาวิเตชั่น

(ก) (ข). (ค)

รูปที่ 2 ลักษณะของแผ่นออริฟิซแบบหลายรูที่ใช้ในงานวิจัยนี้:
(ก) แผ่นออริฟิซแบบ 3 รู (ข) แผ่นออริฟิซแบบ 4 รู และ (ค) แผ่นออริฟิซแบบ 5 รู

2.2 น้ำทิ้งผิวดินที่ใช้ในการทดลอง

น้ำผิวดินที่ใช้สำหรับการทดลองในงานวิจัยนี้เป็นน้ำผิวดินที่ได้มาจากน้ำทิ้งจากโรงอาหารกลางของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จังหวัดนครราชสีมา ที่ปล่อยลงสู่บ่อบำบัดน้ำเสียของมหาวิทยาลัย ในส่วนของการเก็บตัวอย่างน้ำสำหรับวิเคราะห์หาปริมาณเชื้อโคลิฟอร์มทั้งหมดเริ่มต้นนั้นจะใช้วิธีการเก็บตัวอย่างแบบจุด (Grab Sampling) โดยจุดเก็บตัวอย่างในระบบบำบัดน้ำเสียคือจุดก่อนปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ทั้งนี้ สามารถหาค่าปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดเริ่มต้นได้เท่ากับ 200 ซีเอฟยู/100 มิลลิลิตร

2.3 การออกแบบการทดลอง

งานวิจัยนี้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken ซึ่งทำให้สามารถหาเงื่อนไขของการทดลองทั้งหมด (n) ได้จากสมการที่ (2)

$$n=2k(k-1)+c_o \qquad (2)$$

เมื่อกำหนดให้ค่า k คือ จำนวนของตัวแปรที่ทำการศึกษาและ c_o คือ จำนวนจุดศูนย์กลาง (Center Point) จากสมการที่ (2) งานวิจัยนี้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken ซึ่งกำหนดให้มีเงื่อนไขการทดลองทั้งหมด 17 การทดลอง

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.009

โดยใช้โปรแกรม Design-Expert® version 13 เป็นเครื่องมือในการออกแบบและวิเคราะห์ผลด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology: RSM) วัตถุประสงค์หลักของ RSM คือเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ หาสภาวะที่เหมาะสมและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรีย ตัวแปรอิสระที่ทำการศึกษาซึ่งคัดเลือกจากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง มี 3 ตัวแปร ได้แก่ ระยะเวลาในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรีย (T) จำนวนรูบนแผ่นออริฟิซ (N) และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูบนแผ่นออริฟิซ (D) ส่วนผลตอบสนองที่สนใจคือปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดในน้ำ ตัวแปรแต่ละตัวถูกกำหนดไว้ 3 ระดับ คือ ระดับต่ำ (-1), กลาง (0), และสูง (+1) โดยมีช่วงการศึกษาดังนี้ระยะเวลาในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรีย 30-90 นาที จำนวนรูบนแผ่นออริฟิซ 3-5 รู และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูบนแผ่นออริฟิซ 2-4 มิลลิเมตร ซึ่งระดับและช่วงของค่าเหล่านี้อ้างอิงมาจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยรายละเอียดสรุปในตารางที่ 1

2.4 วิธีการทดลอง

การทดลองดำเนินการโดยใช้ชุดทดลอง (รูปที่ 1) ตามเงื่อนไขทั้ง 17 รูปแบบที่ได้จากการออกแบบการทดลอง (ตารางที่ 2) ในแต่ละการทดลอง จะเริ่มต้นด้วยการบรรจุน้ำทิ้งตัวอย่าง 20 ลิตรลงในถังพักน้ำ จากนั้นปรับค่าตัวแปร ได้แก่ ระยะเวลาในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรีย จำนวนรูบนแผ่นออริฟิซและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูบนแผ่นออริฟิซให้ตรงตามเงื่อนไขที่กำหนดเมื่อตั้งค่าตัวแปรแล้วทำการเปิดปั๊มน้ำแรงดันสูงและควบคุมความดันทางด้านเข้าให้มีค่าคงที่ที่ 0.8 เมกะ-ปาสคาล ตลอดการทดลอง เมื่อครบตามเงื่อนไขของแต่ละการทดลอง จะมีการทำซ้ำอีก 2 ครั้ง รวมเป็นการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำต่อหนึ่งเงื่อนไข จากนั้นจึงเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมด ค่าที่ได้จากทั้งสามซ้ำจะถูกนำมาคำนวณเป็นค่าเฉลี่ยเพื่อใช้เป็นผลตอบสนองสำหรับการวิเคราะห์ทางสถิติต่อไป

ตารางที่ 1 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้

ตัวแปร	หน่วย	ระดับ		
		-1 (ต่ำ)	**0 (กลาง)**	**+1 (สูง)**
ระยะเวลาในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรีย (T)	นาที	30	60	90
จำนวนรูบนแผ่นออริฟิซ (N)	รู	3	4	5
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูบนแผ่นออริฟิซ (D)	มิลลิเมตร	2	3	4

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.009

ตารางที่ 2 แสดงเงื่อนไขของการทดลองและค่าปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมด (ค่าผลตอบสนอง)

ลำดับการทดลอง	ตัวแปร			ปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมด (ซีเอฟยู/100 มิลลิลิตร)
	ระยะเวลาในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรีย (นาที)	จำนวนรูบนแผ่นออริฟิซ (รู)	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูบนแผ่นออริฟิซ (มิลลิเมตร)	
1	60	4	3	14.33
2	60	4	3	15.33
3	90	3	3	4.67
4	60	4	3	13.67
5	90	4	4	2.00
6	60	5	4	3.67
7	60	4	3	17.00
8	90	5	3	1.33
9	60	3	4	17.33
10	30	4	2	21.67
11	30	4	4	12.67
12	60	4	3	15.67
13	60	3	2	29.00
14	30	5	3	9.33
15	60	5	2	5.67
16	90	4	2	3.67
17	30	3	3	23.33

2.5 การวิเคราะห์ทางสถิติ

ข้อมูลผลการทดลองของค่าผลตอบสนอง (ปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรีย) ที่ได้จากตารางที่ 2 จะถูกนำมาวิเคราะห์โดยใช้สมการพหุนามอันดับสอง (Second Order Polynomial Equation) ดังแสดงตามสมการที่ (3)

$$Y=\beta_0+\sum_{i=1}^{k}\beta_i X_i+\sum_{i=1}^{k}\beta_{ii}X_i^2+\sum_{i>j}^{k}\sum_{j}^{k}\beta_{ij}X_iX_j \qquad (3)$$

เมื่อกำหนดให้ค่า Y คือผลตอบสนองที่ทำการศึกษา (ปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรีย) β_0, β_i, β_{ii} และ β_{ij} คือ ค่าคงที่ ค่าสัมประสิทธิ์ของพจน์ตัวแปรกำลังหนึ่ง ค่าสัมประสิทธิ์ของพจน์ตัวแปรกำลังสองและค่าสัมประสิทธิ์ของพจน์ตัวแปรร่วม ตามลำดับ โดยที่ X_i และ X_j คือ ค่าตัวแปรอิสระและ k คือ จำนวนตัวแปรอิสระที่ทำการศึกษา

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.009

สำหรับการวิเคราะห์ค่าทางสถิติของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะใช้การทดสอบค่าความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) โดยพิจารณาที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ส่วนค่าความเหมาะสมและความพอเพียงของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2) และค่านัยสำคัญทางสถิติของแต่ละพจน์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นพิจารณาจากการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient) ในส่วนของการวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสมของแต่ละตัวแปรที่ทำการศึกษาใช้วิธีการแก้ปัญหาจากการแก้สมการถดถอยและวิเคราะห์ด้วยกราฟพื้นผิวตอบสนอง

2.6 การหาค่าปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดในน้ำ

การหาค่าปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดในน้ำผิวดินจะใช้วิธีการนับจำนวนโคโลนีสีที่ปรากฏจากชุดตรวจสอบแบบสำเร็จรูป Compact Dry EC for *E.coli* / Coliform ของบริษัท ออสคอน จำกัด ซึ่งชุดตรวจสอบฯ มีลักษณะเป็นจานอาหารเลี้ยงเชื้อสำเร็จรูปสำหรับตรวจเชื้ออีโคไลน์ (E.coli) และโคลิฟอร์ม (Coliform) ประกอบไปด้วยอาหารเลี้ยงเชื้อแบบ Selective ที่มีการเติม Chromogenic enzyme substrate 2 ชนิดคือ (1) X-Glue ที่ทำปฏิกิริยากับเอนไซม์ β-glucuronidase ทำให้โคโลนีอีโคไลน์เป็นสีน้ำเงินและ (2) Magenta-GAL ที่ทำปฏิกิริยากับเอนไซม์ β-galactosidase ทำให้โคโลนีโคลิฟอร์มเป็นสีม่วง โดยมีขั้นตอนในการวัดค่าปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดในน้ำผิวดินจะเริ่มจากการปิเปตน้ำตัวอย่างปริมาตร 1 มิลลิลิตรแล้วหยดลงตรงกลางของจานอาหารเลี้ยงเชื้อ จากนั้นปิดฝาจานอาหารเลี้ยงเชื้อแล้วนำเข้าสู่ตู้บ่มเพื่อทำการบ่มเชื้อที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ทำการนับจำนวนโคโลนีที่ปรากฏบนด้านหลังของจานเพาะเชื้อ โดยโคโลนีที่มีสีม่วงบ่งชี้ถึงการมีอยู่ของโคลิฟอร์มแบคทีเรีย อย่างไรก็ตามการหาค่าปริมาณโคลิฟอร์มโดยวิธีนี้ (ชุดตรวจสอบ Compact Dry EC) เมื่อเทียบกับวิธีมาตรฐาน AOAC Official Method 966.24 ในการนับจำนวนอีโคไลน์และโคลิฟอร์มแบคทีเรียพบว่า Compact Dry EC มีความคลาดเคลื่อนจากวิธีมาตรฐานประมาณ 7% ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้สำหรับการใช้งานในห้องปฏิบัติการ สำหรับการใช้งานกับน้ำ (CFU/100mL) ความคลาดเคลื่อนจะอยู่ในช่วง 5-15% ขึ้นอยู่กับระดับความเข้มข้นของเชื้อ [11]

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

3.1 ตัวแบบจำลองและสมการถดถอย

จากผลการทดลองที่ได้ตามตารางที่ 2 เมื่อนำมาวิเคราะห์เพื่อเลือกตัวแบบจำลองที่เหมาะสมจะได้ผลการวิเคราะห์ในรูปผลสรุปทางสถิติของแบบจำลอง (Model Summary Statistic) ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3 ทั้งนี้ การยืนยันว่ารูปแบบสมการใดเป็นรูปแบบสมการที่เหมาะสมจะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) โดยพบว่าตัวแบบจำลองกำลังสาม (Cubic) มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงที่สุดคือเท่ากับ 0.9937 รองลงมาก็คือตัวแบบจำลองกำลังสอง (Quadratic) มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.9462 จากที่ได้กล่าวมาจะเห็นได้ว่าตัวแบบจำลองกำลังสามเป็นรูปแบบสมการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับงานวิจัยนี้ แต่หากพิจารณาที่หมายเหตุ (Remark) จะพบว่ามีการแจ้งเตือนการเป็นคู่แฝดแฝง (Aliased)

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.009

หมายความว่าการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken ที่เลือกใช้มีจำนวนของการทดลองไม่เพียงพอที่ทำให้เกิดตัวแบบจำลองกำลังสามได้ดังนั้นจึงเลือกตัวแบบจำลองกำลังสองเป็นตัวแบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้สำหรับการทำนายค่าปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดในน้ำผิวดิน ทั้งนี้จากผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 2 เราสามารถนำผลการทดลองดังกล่าวมาเขียนเป็นสมการถดถอยสำหรับแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรที่ทำการศึกษากับค่าผลตอบสนองโดยได้รูปแบบของสมการถดถอยที่เหมาะสมดังแสดงตามสมการที่ (4)

$$Y = 15.20 - 6.92T - 6.79N - 3.04D - 4.72T^2 \qquad (4)$$

3.2 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน

การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนเพื่อประเมินความน่าเชื่อถือและความเหมาะสมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้น (สมการที่ 4) ได้มีการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยมีผลดังแสดงในตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์พบว่าแบบจำลองที่ได้มีความสำคัญอย่างยิ่งทางสถิติ โดยมีค่า p-value เท่ากับ 0.0012 ซึ่งบ่งชี้ว่าตัวแปรที่ใช้ศึกษามีอิทธิพลต่อผลการทดลองจริง คุณภาพของแบบจำลองได้รับการยืนยันด้วยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ที่สูงถึง 0.9462 ซึ่งหมายความว่าแบบจำลองสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลที่ได้จากการทดลองได้ถึง 94.62% ส่วนอีก 5.38% เป็นผลจากปัจจัยอื่นที่ควบคุมไม่ได้ นอกจากนี้ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่มีการปรับแก้ (Adj. R^2) ก็มีค่าสูงถึง 0.8761 ซึ่งเป็นการยืนยันความเหมาะสมของแบบจำลองเช่นกัน อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์พบว่าค่าความสมรูปของสมการ (Lack of Fit) มีนัยสำคัญทางสถิติ (p-value = 0.0244) ซึ่งบ่งชี้ว่าอาจมีความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ซับซ้อนกว่าที่แบบจำลองกำลังสองนี้จะสามารถอธิบายได้ทั้งหมด แต่เนื่องจากค่า R^2 ที่สูงมากแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองยังคงมีความสามารถในการทำนายผลได้ดีเยี่ยมและเป็นที่ยอมรับได้สำหรับการประยุกต์ใช้งานจริง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจทำนาย (Pred. R^2) อยู่ที่ 0.229 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ โดยสรุปแม้จะมีประเด็นเรื่อง Lack of fit แต่ด้วยค่า R^2 และ Adj. R^2 ที่สูงทำให้สามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้มีความน่าเชื่อถือและเป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์ อย่างไรก็ตามผู้ใช้งานควรคำนึงถึงข้อจำกัดคือไม่ควรนำแบบจำลองไปใช้ทำนายผลนอกช่วงของตัวแปรที่ทำการทดลองและควรพิจารณาถึงความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้น

3.3 การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการถดถอย

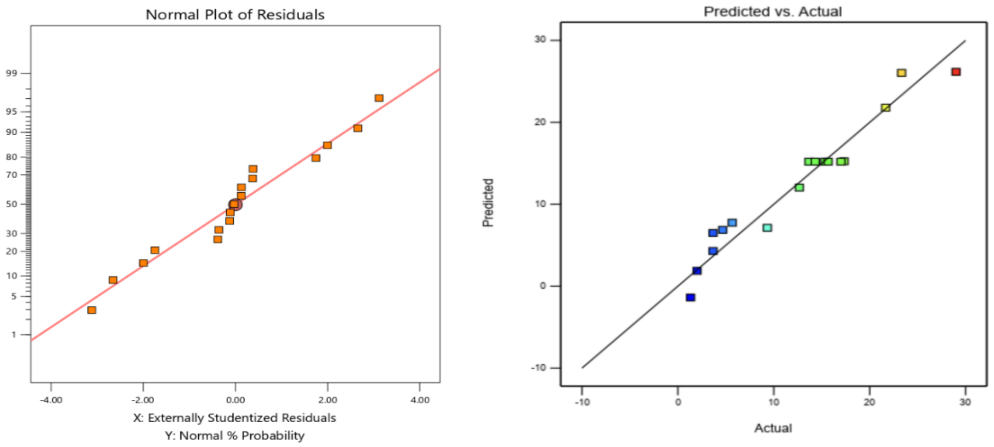
สำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้มีการประเมินอิทธิพลของตัวแปรอิสระแต่ละตัวผ่านการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการถดถอย โดยพิจารณาจากค่า p-value ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ตารางที่ 5) ผลการวิเคราะห์พบว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ต่อการลดลงของโคลิฟอร์มแบคทีเรีย ได้แก่ พจน์เชิงเส้นของระยะเวลาในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรีย (T) จำนวนรูบนแผ่นออริฟิซ (N) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูบนแผ่นออริฟิซ (D) และพจน์กำลังสองของระยะเวลาในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรีย (T^2) ในขณะที่พจน์อิทธิพล

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.009

ร่วมและพจน์กำลังสองของตัวแปรอื่นไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนี้ได้มีการตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองผ่านกราฟวินิจฉัยในรูปที่ 3 โดยกราฟความน่าจะเป็นปกติของส่วนตกค้าง (รูปที่ 3 ก) แสดงข้อมูลที่กระจายตัวบนแนวเส้นตรง ซึ่งยืนยันว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติและไม่มีความผิดพลาดอย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองจริงและค่าที่ทำนายโดยแบบจำลอง (รูปที่ 3 ข) แสดงให้เห็นว่าจุดข้อมูลมีการเกาะกลุ่มใกล้กับเส้นทแยงมุมเป็นอย่างดี สิ่งนี้บ่งชี้ว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีความสามารถในการทำนายผลได้อย่างแม่นยำ ซึ่งสอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ที่สูงถึง 0.9462 ดังนั้นการวิเคราะห์ทั้งหมดจึงเป็นการยืนยันว่าแบบจำลองมีความน่าเชื่อถือและเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งาน

3.4 อิทธิพลของตัวแปรต่อค่าปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมด

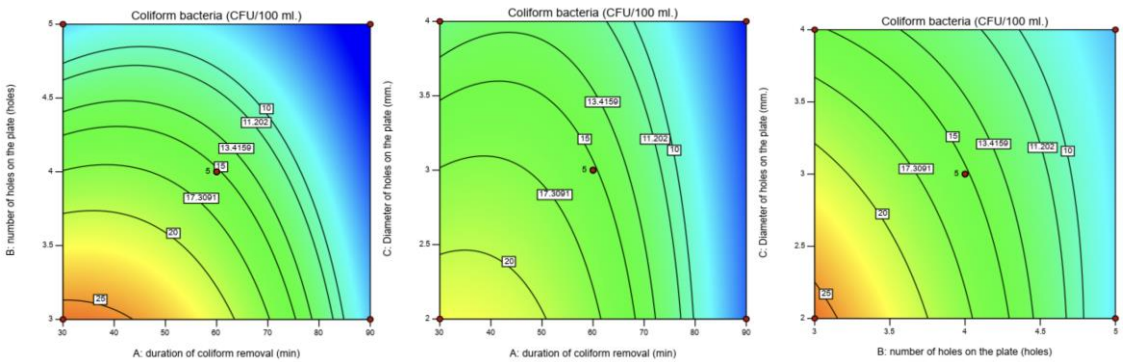
จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้นดังแสดงในสมการที่ (4) สามารถนำมาพล็อตเป็นกราฟในรูป Contour เพื่ออธิบายถึงอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อค่าปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดได้ดังแสดงตาม รูปที่ 4 (ก-ค) เมื่อเราพิจารณาที่รูปที่ 4 (ก) ซึ่งเป็นกราฟแสดงอิทธิพลของระยะเวลาในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียและจำนวนรูบนแผ่นออริฟิซต่อปริมาณโคลิ-ฟอร์มแบคทีเรียโดยได้กำหนดให้ระดับของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูบนแผ่นออริฟิซอยู่ที่ระดับกลาง คือ 3 มิลลิเมตร ในเบื้องต้นพบว่าระยะเวลาในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียและจำนวนรูบนแผ่นออริฟิซมีอิทธิพลอย่างมากต่อค่าปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดในน้ำผิวดินดังจะเห็นได้จากค่า P-value ของตัวแปรทั้งสองมีค่าเท่ากับ 0.0002 และ 0.0003 ตามลำดับ



(ก) (ข)

รูปที่ 3 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความน่าจะเป็นปกติกับส่วนตกค้าง และ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนาย

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.009



(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 4 (ก) อิทธิพลของระยะเวลาในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียและจำนวนรูบนแผ่นออริฟิซ (ข) อิทธิพลของระยะเวลาในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูบนแผ่นออริฟิซ และ (ค) อิทธิพลของจำนวนรูบนแผ่นออริฟิซและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูบนแผ่นออริฟิซ

ทั้งนี้เมื่อใช้ระยะเวลาในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียนานขึ้นจะทำให้ค่าปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดลดลงอย่างเห็นได้ชัด เช่นเดียวกันกับจำนวนรูบนแผ่นออริฟิซ ทั้งนี้เมื่อพิจารณาที่ระดับของตัวแปรทั้งสองที่ค่าสูง ๆ จะให้ค่าปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดที่มีค่าต่ำ โดยค่าปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดที่มีค่าน้อยสุดเท่ากับ 1.33 ซีเอฟยู/ 100 มิลลิลิตรที่ระยะเวลาในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรีย 90 นาทีและจำนวนรูบนแผ่นออริฟิซ 5 รู เมื่อพิจารณารูปที่ 4 (ข) เป็นกราฟแสดงอิทธิพลของค่าระยะเวลาในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูบนแผ่นออริฟิซต่อปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมด โดยกำหนดให้ระดับของจำนวนรูบนแผ่นออริฟิซอยู่ที่ระดับกลางคือ 4 รูพบว่าเมื่อใช้ระยะเวลาในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียนานขึ้นจะทำให้ปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดในน้ำผิวดินลดลงอย่างต่อเนื่องและเมื่อเราพิจารณาที่ค่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูบนแผ่นออริฟิซก็จะมีลักษณะของแนวโน้มที่คล้ายกันกับระยะเวลาในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรีย กล่าวคือถ้าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูบนแผ่นออริฟิซมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดในน้ำผิวดินลดลงอย่างต่อเนื่องเช่นกัน เมื่อพิจารณารูปที่ 4 (ค) เป็นกราฟแสดงอิทธิพลของจำนวนรูบนแผ่นออริฟิซและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูบนแผ่นออริฟิซต่อปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมด โดยกำหนดให้ระดับของระยะเวลาในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียอยู่ที่ระดับกลางคือ 60 นาทีพบว่าจำนวนรูบนแผ่นออริฟิซและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูบนแผ่นออริฟิซมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดในน้ำผิวดินลดลงเช่นกัน

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.009

3.5 สภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดเชื้อโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดในน้ำผิวดิน

จากการคำนวณโดยใช้สมการถดถอยที่พัฒนาขึ้นเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดพบว่าค่าที่ดีที่สุดตามทฤษฎีคือ ระยะเวลาในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรีย 89.33 นาที จำนวนรูบนแผ่นออริฟิซ 4.911 รู และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูบนแผ่นออริฟิซ 2.867 มิลลิเมตร ซึ่งคาดว่าจะลดปริมาณแบคทีเรียเหลือ 0 ซีเอฟยู/100 มิลลิลิตรด้วยค่าความพึงพอใจ (Desirability) เท่ากับ 1.000 อย่างไรก็ตามเนื่องจากค่าจำนวนรูและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูบนแผ่นออริฟิซเป็นเลขทศนิยม ซึ่งไม่สามารถนำไปใช้ได้จริง จึงมีการปรับค่าเพื่อให้ง่ายต่อการประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติ โดยกำหนดสภาวะที่เหมาะสมใหม่เป็น ระยะเวลาในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรีย 89.33 นาที จำนวนรูบนแผ่นออริฟิซ 5 รู และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูบนแผ่นออริฟิซ 3 มิลลิเมตร

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์หารูปแบบสมการที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดในน้ำผิวดิน

Source	Standard Derivative	R^2	Adj. R^2	Pred. R^2	Remark
Linear	4.14	0.7874	0.7389	0.5977	Suggested
2FI	3.97	0.8495	0.7593	0.4049	
Quadratic	2.84	0.9462	0.8761	0.2290	Suggested
Cubic	1.28	0.9937	0.9978		Aliased

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (ANOVA) ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Source	Sum of square	df	Mean square	F-value	p-value
Model	992.23	9	110.25	13.67	0.0012
Residual	56.47	7	50.47		
Lack of fit	49.90	3	16.63		0.0244
Pure error	6.58	4	1.64	10.12	
Corrected total	1048.70	16			

C.V. = 22.96%, R^2 = 0.9462, Adj. R^2 = 0.8769, Pred. R^2 = 0.229

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการถดถอย

Source	Coefficients	Standard error	p-value
intercept	15.20	1.27	
T	-6.92	1.00	0.0002
N	-6.79	1.00	0.0003
D	-3.04	1.00	0.0199
T^2	-4.72	1.38	0.0112

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.009

ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายภายใต้สภาวะที่เหมาะสมที่สุด

ค่าสภาวะที่เหมาะสมของตัวแปร		ปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมด (ซีเอฟยูต่อ 100 มิลลิลิตร)		ค่าอคติ[1] (Bias)
		ค่าที่ได้จากการทดลอง	ค่าที่ได้จากการทำนาย	
ระยะเวลาในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรีย (นาที)	89.33	0	0	0
จำนวนรูบนแผ่นออริฟิซ (รู)	5			
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูบนแผ่นออริฟิซ (มิลลิเมตร)	3			

ค่าอคติ หาได้จาก [(ค่าที่ได้จาการทำนาย - ค่าที่ได้จากการทดลอง)/ค่าที่ได้จากการทำนาย]×100

3.6 การยืนยันผลแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดในน้ำผิวดินจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แล้ว จึงได้นำสภาวะที่เหมาะสมของตัวแปรต่าง ๆ มาทำการทดลองจริง ทั้งนี้เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นว่าสามารถนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวมาใช้ในการทำนายค่าปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดได้หรือไม่ โดยมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 6 จากผลการทดลองเพื่อยืนยันผลพบว่าค่าปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดที่ได้จาการทดลองมีค่าเท่ากับ 0 ซีเอฟยู/ 100 มิลลิลิตร ซึ่งเป็นค่าเดียวกันกับค่าปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียที่ได้จากการทำนาย ทำให้ค่าอคติ (Bias) มีค่าเป็นร้อยละ 0 จึงเป็นการยืนยันว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดในน้ำผิวดินที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความน่าเชื่อถือและอนุมานได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นมีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ทำนายค่าปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดในน้ำผิวดินต่อไป

4. สรุปผลการวิจัย

จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าวิธีพื้นผิวตอบสนองสามารถนำมาประยุกต์ใช้สำหรับสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของตัวแปรในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดในน้ำผิวดินได้เป็นอย่างดี ทั้งนี้จากการวิเคราะห์ค่าทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติเท่ากับ 0.05 พบว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดในน้ำผิวดินอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ ระยะเวลาในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรีย จำนวนรูและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูบนแผ่นออริฟิซ จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้นมาได้สภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดในน้ำผิวดินคือที่ระยะเวลาในการกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรีย 89.33 นาที จำนวนรูบนแผ่นออริฟิซ 5 รู และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูบนแผ่นออริฟิซ 3 มิลลิเมตร จากสภาวะที่เหมาะสมดังกล่าวสามารถกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดในน้ำผิวดินได้จนหมด กล่าวคือจากปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดเริ่มต้นในน้ำทิ้ง 200 ซีเอฟยู/100 มิลลิลิตรก่อนเริ่มทดลองจนเหลือ 0 ซีเอฟยู/100 มิลลิลิตร หลังจากทำการทดลอง

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.009

ตามสภาวะที่เหมาะสมแล้วเพื่อตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายผลพบว่าปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดที่ได้จากการทำนายกับค่าที่ได้จากการทดลองจริงมีค่าเท่ากันซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้สามารถทำนายค่าปริมาณโคลิฟอร์มแบคทีเรียทั้งหมดได้ตรงกับผลการทดลองจริงและเป็นการยืนยันได้ว่าสามารถที่จะนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นไปใช้งานจริงได้ต่อไป

5. เอกสารอ้างอิง

[1] N. Parveen, S. Chowdhury and S. Goel, Environmental impacts of the widespread use of chlorine-based disinfectants during the COVID-19 pandemic, Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29, 85742-85760.

[2] A. Ahmed, T. Noonari, H. Magsi and D. A. Mahar, Risk assessment of total and faecal coliform bacteria from drinking water supply of badin city, Pakistan, Journal of Environmental Professionals Sri Lanka, 2013, 2(2), 52-64.

[3] M. Sivakumar and A. B. Pandit, Wastewater treatment: a novel energy efficient hydrodynamic cavitational technique, Ultrasonics Sonochemistry, 2002, 9(3), 123-131.

[4] S.S. Save, A.B. Pandit and J.B. Joshi, Use of hydrodynamic cavitation for large scale microbial cell disruption, Ultrasonics-Sonochemistry, 1997, 36(4), 259-264.

[5] E. Karamah, F. Amalia, R. Ghaudenson and S. Bismo, Disinfection of escherichia coli bacteria using combination of ozonation and hydrodynamic cavitation method with venturi injector, International Journal on Advanced Science Engineering and Information Technology, 2018, 8(3), 811-817.

[6] E. Burzio, F.Bersani, G.C.A. Caridi, R. Vesipa, L. Ridolfi and C. Manes, Water disinfection by orifice-induced hydrodynamic cavitation, Ultrasonics-Sonochemistry, 2020, 60, 104740.

[7] S. Charoenrat, Y. Pookamnerd and S. Prasomthong, Consideration of the optimizing condition in welding hardfacing on wear resistance with hot-wire gas tungsten arc welding process by response surface methodology (RSM), The Journal of Industrial Technology, 2021, 17(2), 87 – 102. (in Thai)

[8] P. Peasura and P. Laophasit, Mathematic model by response surface methodology and artificial neural network for predict result of tensile shear and nugget size of zinc coated steel JIS G3313 welded by resistance spot welding, The Journal of Industrial Technology, 2019, 15(3), 42-60. (in Thai)

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.009

[9] I. Worapun, C. Chooppava and C. Thinvongpituk, Optimal conditions of friction welding process for AISI 1015 steel using response surface methodology, KKU Research Journal, 2013, 18(6), 909-924. (in Thai)

[10] I. Worapun and A. Boonjaei, The study effect of orifice plates on intensifies degree of cavitation phenomenon inside hydrodynamic cavitation reactor, The Journal of Industrial Technology, 2020, 16(1), 78-92. (in Thai)

[11] H. Kodaka, S. Mizuochi, H. Teramura, T. Nirazuka, D. Goins. J. Odumaru and Y. Kobubo, Comparison of the compact dry EC with the most probable number method (AOAC Official Method 966.24) for enumeration of escherichia coli and coliform bacteria in raw meats, Journal of AOAC International, 2006, 89(1), 100-114.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.010

บทความวิจัย

สายอากาศพื้นผิวอภิวัสดุจัดเรียงกระแสแถวลำดับสำหรับเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สายจากการสื่อสาร 5G

คมกฤช บุญยิ่ง[1*] ภัทรวดี บุญยิ่ง[2] และ คมยุทธ ไชยวงษ์[3]

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

[2] คณะวิทยาศาสตร์การกีฬาและสุขภาพ, มหาวิทยาลัยการกีฬาแห่งชาติ

[3] สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์, คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย

[*] ผู้ประสานงานเผยแพร่ E-mail: komkris.boo@rmutr.ac.th

วันที่รับบทความ: 1 มีนาคม 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 14 กรกฎาคม 2568; วันที่ตอบรับบทความ: 16 กรกฎาคม 2568
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 20 สิงหาคม 2568

บทคัดย่อ: บทความนี้นำเสนอแนวทางใหม่ในการเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สายผ่านการใช้สายอากาศพื้นผิวอภิวัสดุและวงจรจัดเรียงกระแสที่ออกแบบมาในรูปแบบอาร์เรย์ขนาด 4×4 ประกอบด้วย สายอากาศ 16 ตัว และวงจรจัดเรียงกระแส 32 วงจร โดยมีจุดประสงค์เพื่อเก็บพลังงานไร้สายจากสถานีฐาน 5G ที่ความถี่ 2.6 GHz สายอากาศได้รับการออกแบบชนิดแขวนลอยพร้อมแผ่นแพร่กระจายคลื่นแบบวงกลม มีลักษณะโพลาไรซ์เชิงเส้นคู่ ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการรับคลื่นและเหมาะกับระบบ 5G สำหรับชั้นวางซ้อน หน่วยเซลล์ถูกสร้างในรูปแบบวงแหวนหกเหลี่ยมขนาด 3×3 ซึ่งช่วยเพื่อให้การแพร่กระจายคลื่นเป็นไปในลักษณะเจาะจงทิศทาง และให้ค่าอัตราขยายสูงกว่า 9 dBi สำหรับทั้งสองโพลาไรซ์ที่ความถี่ 2.6 GHz วงจรจัดเรียงกระแสเลือกใช้ไดโอดชอตต์กี้รุ่น SMS7360 ซึ่งมีประสิทธิภาพการแปลงกำลังงานเท่ากับ 26.7% และสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้สูงสุด 1.53 V เมื่อได้ระดับกำลังงานด้านเข้า 4 dBm และมีค่าความต้านทานเท่ากับ 3 kΩ จากการทดสอบสายอากาศพื้นผิวอภิวัสดุอาร์เรย์ 4×4 พบว่า การเชื่อมต่อวงจรแบบอนุกรมและแบบขนาน สามารถสร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้สูงสุดได้เท่ากับ 9.78 V และ 0.42 V ตามลำดับ โดยวัดจากด้านหลังของสายอากาศ 5G มีระยะ 3.5 เมตร งานวิจัยนี้แสดงถึงศักยภาพของสายอากาศพื้นผิวอภิวัสดุจัดเรียงกระแสแถวลำดับสำหรับเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สายอย่างมีประสิทธิภาพในระบบ 5G โดยเน้นค่าอัตราขยายสูงของสายอากาศและความสามารถการแปลงกำลังงานของวงจรจัดเรียงกระแส

คำสำคัญ: เก็บเกี่ยวพลังงาน; สายอากาศพื้นผิวอภิวัสดุ; วงจรจัดเรียงกระแส และการสื่อสาร 5G

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.010

บทความวิจัย

Metasurface Rectenna Array for Wireless Energy Harvesting from 5G Communications

Komkris Boonying[1*], Patharawadee Boonying[2] and Komyuth Chaiwong[3]

[1] Department of Telecommunication Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin

[2] Faculty of Sports Science and Health, Thailand National Sports University,

[3] Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Industrial Technology, Loei Rajabhat University

[*] Corresponding author, E-mail: komkris.boo@rmutr.ac.th

Received: 1 March 2025; Revised 14 July 2024; Accepted: 16 July 2025
Online Published: 20 August 2025

Abstract: This article introduces a novel approach to wireless energy harvesting using a metasurface antenna array and rectifier circuits, designed in a 4×4 array configuration consisting of 16 antennas and 32 rectifier circuits. The system is aimed at harvesting wireless energy from 5G base stations operating at a frequency of 2.6 GHz. The antennas are designed with a suspended structure and circular radiating plate, featuring dual-linear polarization to enhance signal reception and ensure compatibility with 5G systems. For the superstate layer, unit cells are arranged in a 3×3 hexagonal ring pattern, enabling unidirectional radiation and achieving a gain exceeding 9 dBi for both polarizations at the 2.6 GHz. The rectifier circuits utilize SMS736 Schottky diodes, offering a conversion efficiency of 26.7% and generating a maximum DC voltage of 1.53 V under an input power of 4 dBm with a load resistance of 3 kΩ. Experimental evaluation of the 4×4 metasurface antenna array revealed that series and parallel connections of the rectifier circuits produced maximum DC voltages of 9.78 V and 0.42 V, respectively, at a distance of 3.5 meters from the rear of the 5G antenna. This work demonstrates the potential of metasurface-based rectenna arrays for efficient wireless energy harvesting in 5G applications, highlighting their high gain performance and effective energy conversion capabilities.

Keywords: Energy harvesting; Metasurface antenna; Rectifying circuit and 5G communications

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.010

1. บทนำ

สายอากาศจัดเรียงกระแสเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในการเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สาย (Wireless Energy Harvesting: WEH) โดยทำหน้าที่แปลงกำลังงานของคลื่นความถี่วิทยุให้กลายเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและถูกชาร์จแก่แบตเตอร์รี่หรือถูกนำไปใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กต่างๆ [1-3] การเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สายมีพื้นฐานจากเทคโนโลยีการส่งผ่านกำลังงานไร้สาย (Wireless Power Transfer: WPT) ซึ่งเกิดขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ.1888 และหลังจากปี ค.ศ. 1891 นิโคลา เทสลา ได้ทำการแปลงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าให้กลายเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงได้สำเร็จครั้งแรกของโลก [4,5] ด้วยเทคโนโลยีการส่งผ่านกำลังงานไร้สายได้ถูกพัฒนาและถูกใช้งานในรูปแบบต่าง ๆ อาทิเช่น การส่งผ่านพลังงานแสงอาทิตย์บนสถานีฐานอวกาศ การส่งผ่านกำลังงานคลื่นไมโครเวฟในอวกาศ และเทคโนโลยีการระบุตัวตน เป็นต้น

โดยทั่วไป สายอากาศจัดเรียงกระแสประกอบไปด้วยสายอากาศภาครับและวงจรจัดเรียงกระแส วงจรดังกล่าวจะถูกประกอบด้วย ตัวเก็บประจุเชื่อมต่อไดโอดจัดเรียงกระแส วงจรกรองความถี่ต่ำ และความต้านทาน (Load Resistor) สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงกำลังงานสามารถทำได้หลากหลายเทคนิควิธี อาทิเช่น การออกแบบสายอากาศต่อลำดับแถว [6,7] การออกแบบวงจรจัดเรียงกระแสไฟฟ้าให้มีหลายวงจร หรือการเพิ่มกำลังงานความถี่วิทยุทางด้านขาเข้า [8,9] การแทรกวงจรตัดฮาโมนิคเข้าไปยังวงจรจัดเรียงกระแสไฟฟ้า [10] และการเลือกประเภทไดโอดเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขาออกสูงสุด เช่น ไดโอดตัวถัง SOT-23 ชนิดอนุกรมคู่ (Series Pair) จากผลจำลองการเปรียบเทียบเพื่อใช้ในการตัดสินใจเลือกใช้งานประกอบด้วยไดโอดเบอร์ SMS7630 HSMS282x HSMS285x และHSMS286x ตามลำดับ [11] จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า ไดโอดเบอร์ SMS7630 มีความไวต่อการรับกำลังงานต่ำๆ ได้ดีกว่าไดโอดเบอร์อื่นๆ และมีประสิทธิภาพการแปลงกำลังงานเป็นไฟฟ้ากระแสตรงได้ดีกว่าไดโอดเบอร์อื่นๆ แต่ในทางกลับกันจะให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงน้อยกว่าไดโอดเบอร์อื่นๆ แต่อย่างไรก็ตาม การเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สายจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ 5G (Sub-6 GHz) ที่ความถี่ 2.6 GHz กำลังงานที่แพร่กระจายออกมาจากสายอากาศมีระดับกำลังงานต่ำ ดังนั้น ไดโอดชอตต์กี้ SMS7630 จึงมีความสำคัญและได้ถูกเลือกใช้งานในบทความวิจัยนี้ และยังมีบทความวิจัยอื่นได้เลือกใช้ไดโอดชอตต์กี้ SMS7630 ร่วมกับการออกแบบสายอากาศ เช่น บทความนี้ได้ออกแบบสายอากาศเป็น 2 ชั้น โดยชั้นแรกเป็นชั้นบนสุดมีรูปลักษณะ 3 แขน ชั้นที่ 2 เป็นชั้นล่างสุดออกแบบให้เป็นร่องว่างรูปทรงดอกจิก วงจรจัดเรียงกระแสเลือกใช้ไดโอดชอตต์กี้ SMS7630 ผลทดสอบพบว่า มีประสิทธิภาพการแปลงกำลังงาน 43% โดยสามารถนำแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้ไปใช้งานกับอุปกรณ์เซนเซอร์ต่างๆ และ LED [12] คณะนักวิจัยได้ทำการออกแบบสายอากาศล้อคพิลิโอดิกบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่สามารถทำงานได้ถึง 4 ย่านความถี่ได้แก่ ย่าน FM GSM900 GSM1800 และ WIFI โดยใช้ไดโอดชอตต์กี้ SMS7630 ผลทดสอบพบว่ามีประสิทธิภาพการแปลงกำลังงานเท่ากับ 70.28%, 41.7%, 33.37% และ 27.69% ณ ความถี่ 89 MHz, 900 MHz, 1,800 MHz และ 2,400 MHz ที่ระดับกำลังงาน

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.010

-6 dBm และการทดสอบประสิทธิภาพการแปลงกำลังงานของสายอากาศนี้เท่ากับ 31.3% ที่ระดับกำลังงาน -15 dBm [13]

บทความวิจัยฉบับนี้นำเสนอสายอากาศพื้นผิวอภิวัสดุจัดเรียงกระแสแถวลำดับขนาด 4x4 จำนวน 16 ตัว และวงจรจัดเรียงกระแสจำนวน 32 วงจร เพื่อเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สายจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ 5G (2.6 GHz) การทดสอบได้อาศัยเครื่อง Anritsu MS2090 ต่อเข้ากับโพรบไอโซทรอปิค (Isotropic Probe) วัดในโหมดความเข้มข้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Field: EMF) โดยค่าที่วัดได้เป็นความหนาแน่นกำลังงาน (Power density) มีหน่วยเป็น W/cm^2 ซึ่งเครื่องที่ใช้ในการทดสอบดังกล่าวแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ และจะถูกนำไปเทียบกับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากการจัดเรียงกระแสของสายอากาศที่ได้นำเสนอ

2. สายอากาศพื้นผิวอภิวัสดุจัดเรียงกระแส

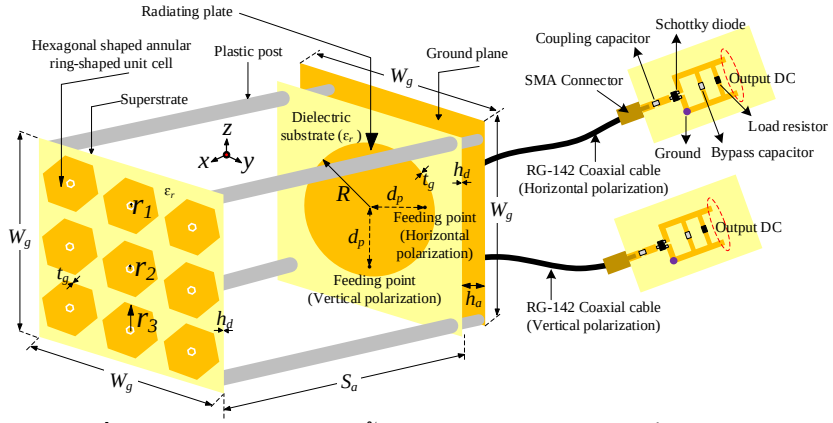
2.1 สายอากาศพื้นผิวอภิวัสดุ

สายอากาศที่ได้นำเสนอถูกจำลองผลด้วยโปรแกรม CST Studio Suit [14] และออกแบบโครงสร้างสายอากาศชนิดแขวนลอย (Suspended) [15] มีช่องว่างอากาศ (Air Gap: h_a) คั่นกลางระหว่างแผ่นแพร่กระจายคลื่น (Radiating Plate) และระนาบกราวด์ (Ground Plane) โดยโครงสร้างชนิดนี้มีอัตราขยายสูงกว่าสายอากาศโครงสร้างพื้นฐาน ในส่วนของแผ่นแพร่กระจายคลื่นออกแบบให้มีรูปร่างเป็นวงกลมพร้อมกระตุ้นสัญญาณโคแอคเชียล แบบโพลาไรซ์เชิงเส้นคู่ คือ โพลาไรซ์เชิงเส้นแนวตั้งและแนวนอน (Vertical and Horizontal Polarizations) โดยมีระยะจุดศูนย์กลางแผ่นแพร่กระจายคลื่นถึงจุดกระตุ้นสัญญาณ (d_p) ดังรูปที่ 1 สำหรับวัสดุแผ่นวงจรพิมพ์ที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศเป็นชนิดอีพ็อกซี่ (Epoxy) มีความสูงเป็น h_d มีความหนา (t_g) ของแผ่นทองแดงเท่ากับ 0.035 mm มีค่าไดอิเล็กตริกคงที่ (ε_r) เท่ากับ 3.2 และค่าการสูญเสียแทนเจนต์เท่ากับ 0.003 ตามลำดับ สำหรับชั้นวางซ้อน (Superstrate) ถูกวางเหนือสายอากาศชนิดแขวนลอยที่ได้กล่าวมาข้างต้น ประกอบด้วย หน่วยเซลล์ (Unit Ccell) มีขนาด 3x3 จำนวน 9 หน่วยเซลล์ แต่ละหน่วยเซลล์ออกแบบให้มีรูปร่างเป็นวงแหวนหกเหลี่ยม (Hexagonal Annular Ring-shaped) โดยมีรัศมีวงแหวนหกเหลี่ยมด้านใน (r_1) รัศมีร่องว่างวงแหวนหกเหลี่ยม (r_2) และรัศมีหกเหลี่ยมด้านนอก (r_3) นอกจากนี้ยังมีระยะห่างแต่ละหน่วยเซลล์คือ Suc และมีระยะห่างระหว่างสายอากาศชนิดแขวนลอยกับชั้นวางซ้อนเป็น S_a แสดงขนาดต่างๆ ดังตารางที่ 1

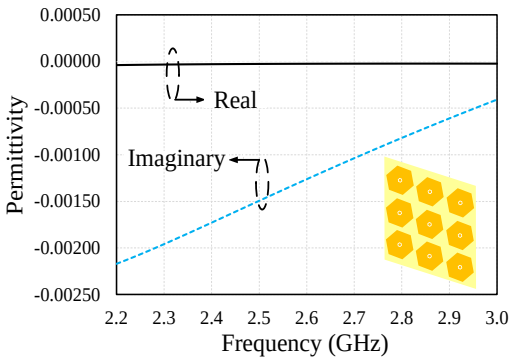
ตารางที่ 1 ขนาดและพารามิเตอร์ของสายอากาศพื้นผิวอภิวัสดุที่ได้นำเสนอความถี่ 2.6 GHz

พารามิเตอร์	ขนาด (มม.)	พารามิเตอร์	ขนาด (มม.)
W_g	80	R	28.62
h_d	1.6	r_1	1.26
h_a	6	r_2	1.96
d_p	18	r_3	11.24
S_a	100	S_{uc}	24.6

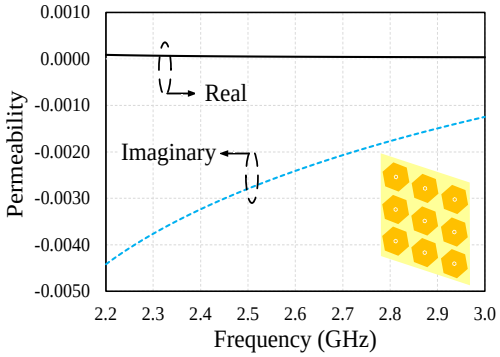
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.010



รูปที่ 1 โครงสร้างสายอากาศพื้นผิวอภิวัสดุจัดเรียงกระแสที่ได้นำเสนอ



รูปที่ 2 ผลจำลองค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของพื้นผิวอภิวัสดุ 3x3 ที่ได้นำเสนอ



รูปที่ 3 ผลจำลองค่าความซึมซาบแม่เหล็กของพื้นผิวอภิวัสดุ 3x3 ที่ได้นำเสนอ

ในส่วนของชั้นวางซ้อนที่ได้นำเสนอได้ออกแบบเป็นวัสดุดัชนีเป็นศูนย์ (Zero-index Materials: ZIMs) มีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (Permittivity: ε) และค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (Permeability: μ) เป็นศูนย์หรือเข้าใกล้ศูนย์ซึ่งเหมาะสมใช้ในงานเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สาย โดยพิสูจน์วัสดุดังกล่าวได้จากการจำลองผลดังรูปที่ 2 และ 3 ผลการจำลองค่าจริง (Real) ที่ความถี่ 2.6 GHz พบว่า มีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าความซึมซาบแม่เหล็ก เท่ากับ 0.00002 และ 0.00005 ตามลำดับ ในส่วนของผลการจำลองค่าจินตภาพ (Imaginary) ที่ความถี่ 2.6 GHz พบว่า มีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าและค่าความซึมซาบแม่เหล็กเท่ากับ -0.00125 และ -0.0024 ตามลำดับ

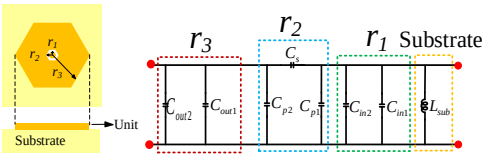
สำหรับวงจรสมมูลของหน่วยเซลล์ที่ได้นำเสนอถูกแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ประกอบด้วย 1) ส่วนของวัสดุฐานรองปราศจากระนาบกราวนด์แทนด้วยตัวเหนี่ยวนำ (L_{sub}) 2) รัศมีวงแหวนหกเหลี่ยมด้านใน (r_1) แทนด้วยตัวเก็บประจุ 2 ตัว (C_{in1} และ C_{in2}) 3) รัศมีร่องว่างวงแหวนหกเหลี่ยม (r_2) แทนด้วยตัวเก็บประจุ 3 ตัว (C_{p1}, C_{p2} และ C_s) และ 4) รัศมีหกเหลี่ยมด้าน

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.010

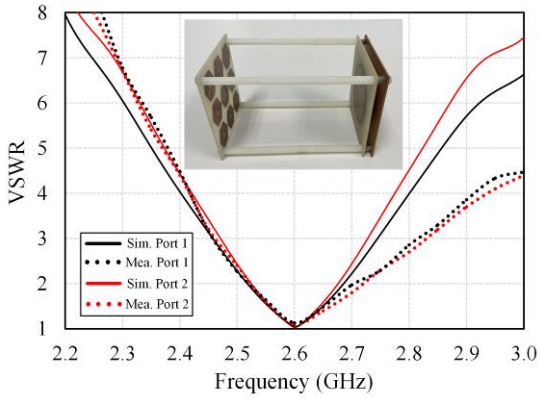
นอก (r_3) แทนด้วยตัวเก็บประจุ 2 ตัว (C_{out1} และ C_{out2}) โดยผลรวมของตัวเก็บประจุของ r_1 r_2 และ r_3 จะขนานกับตัวเหนี่ยวนำของวัสดุฐานรองจะเกิดเป็นวงจรรีโซเนเตอร์ (LC Resonator) ดังรูปที่ 4

รูปที่ 5 เป็นผลจำลองและผลทดสอบค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Voltage Standing Wave Ratio: VSWR) ของสายอากาศที่ได้นำเสนอ จากการจำลองผลพบว่า พอร์ตที่ 1 (Port 1) หรือโพลาไรซ์เชิงเส้นแนวตั้งครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 2.524-2.676 GHz และพอร์ตที่ 2 (Port 2) หรือโพลาไรซ์เชิงเส้นแนวนอนครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 2.518-2.686 GHz ด้วยเงื่อนไข VSWR $\leq$ 2 ในส่วนผลการทดสอบพบว่า พอร์ตที่ 1 ครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 2.57-2.72 GHz และพอร์ตที่ 2 ครอบคลุมความถี่ 2.56-2.71 GHz ที่ความถี่กลาง 2.6 GHz พอร์ตที่ 1 และ 2 มีค่า VSWR เท่ากับ 1.100 และ 1.135 ตามลำดับ รูปที่ 6 คือผลจำลองและผลทดสอบค่าประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Efficiency) ของโพลาไรซ์เชิงเส้นแนวตั้งและแนวนอน จากผลจำลองพบว่า โพลาไรซ์เชิงเส้นแนวตั้งและแนวนอน มีค่าประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่นเฉลี่ย (2.5-2.7 GHz) เท่ากับ 94.31 และ 93.31% และที่ความถี่กลาง 2.6 GHz มีค่าประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่นเท่ากับ 99% ทั้งสองโพลาไรซ์

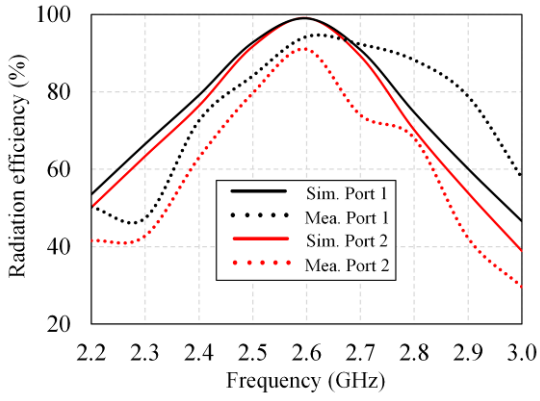
สำหรับในส่วนการทดสอบ ค่าประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่นเฉลี่ยโพลาไรซ์เชิงเส้นตั้งและแนวนอน พบว่า มีค่าประสิทธิภาพการแพร่กระจายกำลังงานเฉลี่ยโพลาไรซ์เชิงเส้นตั้งและแนวนอนเท่ากับ 90.25 และ 81.55% และที่ความถี่ 2.6 GHz มีค่าประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่นโพลาไรซ์เชิงเส้นแนวตั้งและแนวนอนเท่ากับ 94.28 และ 91.00% ตามลำดับ



รูปที่ 4 วงจรสมมูลของหนึ่งหน่วยเซลล์ที่ได้นำเสนอ

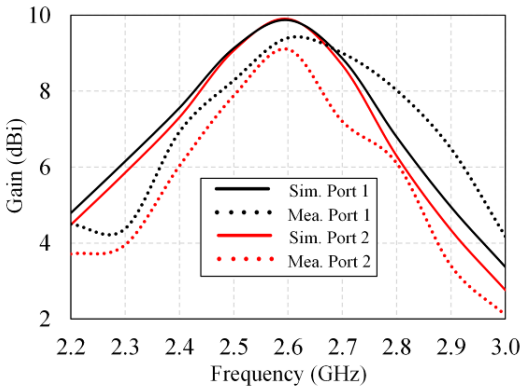


รูปที่ 5 ผลจำลองและผลทดสอบค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศพื้นผิวอภิวัสดุที่ได้นำเสนอ

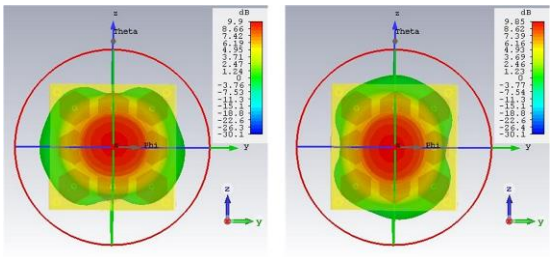


รูปที่ 6 ผลจำลองและผลทดสอบประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศพื้นผิวอภิวัสดุ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.010



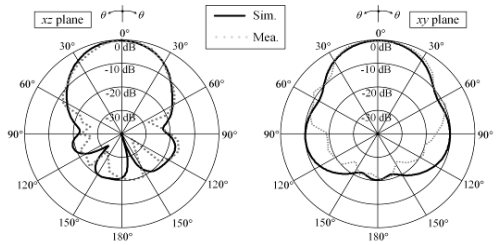
รูปที่ 7 ผลจำลองและผลทดสอบอัตราขยายของสายอากาศพื้นผิวอภิวัสดุที่ได้นำเสนอ



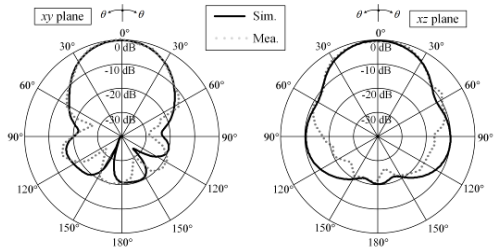
(ก) พอร์ตที่ 1 (ข) พอร์ตที่ 2

รูปที่ 8 ผลจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น 3 มิติของสายอากาศพื้นผิวอภิวัสดุที่ได้นำเสนอ

จากรูปที่ 7 เป็นผลจำลองและผลทดสอบอัตราขยาย (Gain) สายอากาศพื้นผิวอภิวัสดุที่ได้นำเสนอผลจำลองพบว่า มีค่าอัตราขยายสายอากาศเฉลี่ยของพอร์ตที่ 1 และ 2 เท่ากับ 9.29 และ 9.22 dBi ที่ความถี่กลางมีค่าอัตราขยายสายอากาศที่พอร์ต 1 และ 2 เท่ากับ 9.90 และ 9.85 dBi ดังรูปที่ 7 และ 8 ในส่วนการทดสอบอัตราขยายสายอากาศ พบว่ามีค่าอัตราขยายเฉลี่ยพอร์ตที่ 1 และ 2 เท่ากับ 8.89 และ 8.06 dBi และที่ความถี่กลางมีอัตราขยายสูงสุดเท่ากับ 9.40 และ 9.10 dBi ที่พอร์ต 1 และพอร์ต 2 ตามลำดับ



(ก) พอร์ตที่ 1 (โพลาไรซ์เชิงเส้นแนวตั้ง)



(ข) พอร์ตที่ 2 (โพลาไรซ์เชิงเส้นแนวนอน)

รูปที่ 9 ผลจำลองและผลทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ได้นำเสนอ

รูปที่ 9 เป็นผลจำลองและผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสายอากาศที่ได้นำเสนอทั้งสองพอร์ตบนระนาบ *xz* และ *xy* พบว่า ทั้งผลจำลองและผลทดสอบสายอากาศที่ได้นำเสนอนี้มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นชนิดเจาะจงทิศทาง (Uni-directional Radiation) ทั้งสองระนาบและทั้งโพลาไรซ์เชิงเส้นแนวตั้งและแนวนอน

2.2 วงจรจัดเรียงกระแส

จากรูปที่ 1 และ 10 แสดงโครงสร้างวงจรจัดเรียงกระแสที่ได้นำเสนอประกอบด้วย ตัวเก็บประจุคัปปลิ้งทำหน้าที่ป้องกันไฟฟ้ากระแสตรงไหลออกไปยังพอร์ตด้านขาเข้าหรือไหลเข้าไปยังฝั่งความถี่วิทยุ (RF) มีค่าเท่ากับ 100 pF ตัวเก็บประจุบายพาสทำหน้าที่ลดการกระเพื่อมและกรองแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เรียบ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.010

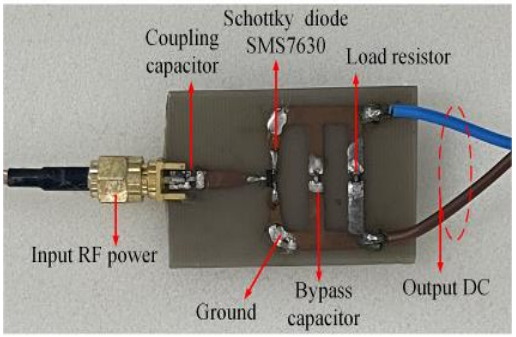
รวมถึงลดการเกิดฮาโมนิคระดับสูง มีค่าเท่ากับ 100 pF ไดโอดชอตต์กี้เบอร์ SMS7630 ชนิดอนุกรมคู่ มีตัวถังขนาด SOT-23 ทำหน้าที่แปลงกำลังงานให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและตัวต้านทานโหลดของวงจรมีค่าเท่ากับ 3 kΩ

วงจรจัดเรียงกระแสต้นแบบไม่ได้ใส่วงจรแมตชิ่ง ส่งผลทำให้ค่า S_{11} ที่ความถี่ 2.6 GHz มีค่าเท่ากับ -8.04 dB ดังรูปที่ 11

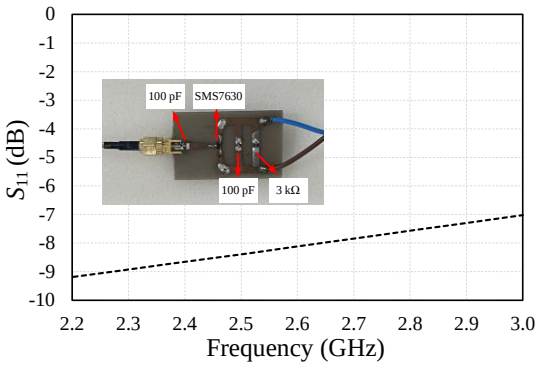
ส่วนการทดสอบวงจรจัดเรียงกระแสต้นแบบ ได้อาศัยเครื่องกำเนิดสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุยี่ห้อ Rohde & Schwarz รุ่น SMC100A ป้อนความถี่ 2.6 GHz และทำการปรับเปลี่ยนระดับกำลังงานความถี่วิทยุด้านขาเข้าตั้งแต่ -30 dBm ถึง 20 dBm ในส่วนทางด้านขาออกของวงจรใช้มัลติมิเตอร์ในการวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงดังรูปที่ 12 จากการทดสอบพบว่า มีแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสูงสุดเท่ากับ 1.75 V ที่ระดับกำลังงานขาเข้า 15 dBm แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงต่ำสุดเท่ากับ 0.01 V ที่ระดับกำลังงานขาเข้า -30 dBm และระดับกำลังงานขาเข้า 0 dBm จะให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเท่ากับ 0.94 V วงจรที่ได้นำเสนอพบว่า มีค่าประสิทธิภาพการแปลงสูงสุดเท่ากับ 26.7% ที่ระดับกำลังงาน 4 dBm และมีค่าประสิทธิภาพการแปลงเท่ากับ 10% มีระดับกำลังงานเท่ากับ -10 dBm ประสิทธิภาพการแปลงกำลังงานให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง [13] สามารถหาได้จากสมการที่ 1

$$\eta = \frac{V_{DC}^2}{P_{in} R_L} \times 100 \qquad (1)$$

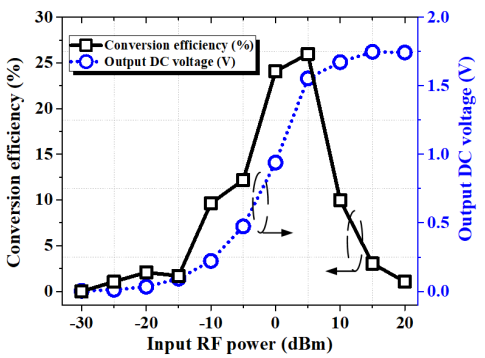
เมื่อ V_{DC} คือ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง P_{in} คือ ระดับกำลังงานขาเข้า และ R_L คือ ตัวต้านทานโหลดของวงจร



รูปที่ 10 โครงสร้างวงจรต้นแบบ



รูปที่ 11 ผลการทดสอบค่า S_{11} ของวงจรจัดเรียงกระแส



ผลทดสอบวงจร

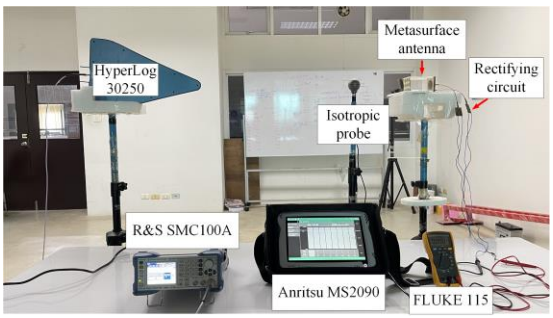
รูปที่ 12 วงจรจัดเรียงกระแสต้นแบบที่ได้นำเสนอ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.010

3. สายอากาศพื้นผิวอภิวัสดุจัดเรียงกระแสต้นแบบ

3.1 การทดสอบสายอากาศพื้นผิวอภิวัสดุจัดเรียงกระแส

สายอากาศพื้นผิวอภิวัสดุต่อเข้ากับวงจรจัดเรียงกระแสดังรูปที่ 1 ในส่วนการติดตั้งเพื่อใช้ในการทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ 1) ส่วนของภาคส่งใช้สายอากาศมาตรฐานล็อกพริลิโอดิก ยี่ห้อ AARONIA AG รุ่น HyperLOG 30250 ต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุยี่ห้อ Rohde & Schwarz รุ่น SMC100A และ 2) ส่วนของภาครับเป็นสายอากาศพื้นผิวอภิวัสดุจัดเรียงกระแสที่ได้นำเสนอและใช้มัลติมิเตอร์ยี่ห้อ FLUKE รุ่น 115 วัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านขาออกของวงจร ที่ความถี่ 2.6 GHz ได้ปรับเปลี่ยนระยะทางตั้งแต่ 0.5-2.5 m และทำการปรับเปลี่ยนระดับกำลังงานไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกมาจากสายอากาศที่เทียบกับสายอากาศไอโซโทรปิค (Effective Isotopically Radiated Power: EIRP) ตั้งแต่ระดับกำลังงาน -18.6 ถึง 16.4 dBm ดังรูปที่ 13



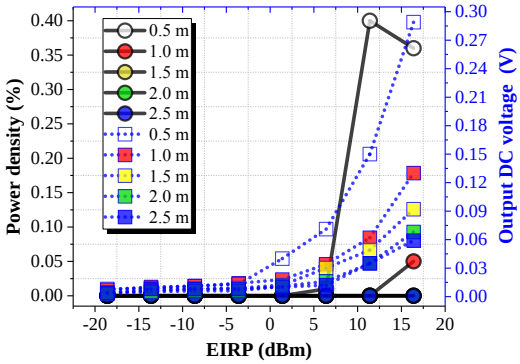
รูปที่ 13 การติดตั้งและการทดสอบสายอากาศพื้นผิวอภิวัสดุจัดเรียงกระแส

นอกจากนี้เครื่องวิเคราะห์คลื่นความถี่วิทยุ Anritsu MS2090 ถูกต่อเข้ากับโพรบไอโซทรอปิกใช้โหมดความเข้มข้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อวัดค่าความหนาแน่นกำลังงาน ซึ่งจะถูกเปรียบเทียบกับสายอากาศพื้นผิวอภิวัสดุจัดเรียงกระแสที่ได้นำเสนอในบทความวิจัยนี้ดังรูปที่ 13 โดยค่าความหนาแน่นกำลังงานมีความสัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงดังสมการที่ 2 และ 3

$$W_i = \frac{P_r}{A_{eff}} \tag{2}$$

$$A_{eff} = \frac{\lambda^2 D_o}{4\pi} = \frac{V_{DC}^2}{R_A W_i} \tag{3}$$

โดยที่ P_r คือ กำลังงานที่รับได้ (W) A_{eff} คือ พื้นที่ประสิทธิผลของสายอากาศ (m^2) และ R_A คือ ค่าความต้านทานสายอากาศ (Ω)



รูปที่ 14 ผลการทดสอบสายอากาศพื้นผิวอภิวัสดุจัดเรียงกระแสที่ความถี่ 2.6 GHz (โพลาไรซ์เชิงเส้นแนวตั้ง)

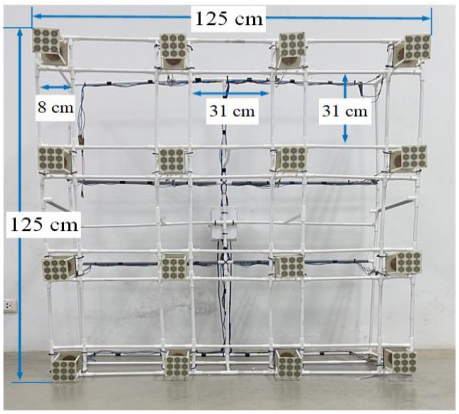
การทดสอบวัดค่าความหนาแน่นกำลังงานที่ความถี่ 2.6 GHz พบว่า ที่ระยะทาง 0.5 m เมื่อปรับเปลี่ยนกำลังงาน EIRP เท่ากับ 6.4, 11.4 และ 16.4 dBm

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.010

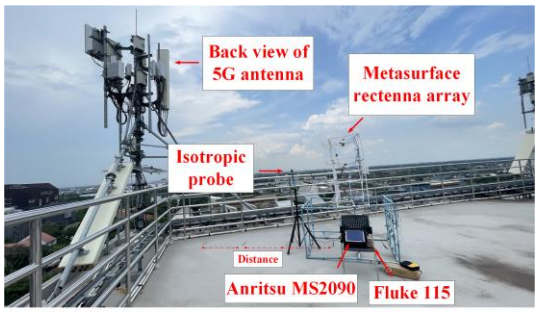
เครื่องวิเคราะห์คลื่นความถี่วิทยุ MS2090 วัดค่า ความหนาแน่นกำลังงานได้เท่ากับ 0.01, 0.40 และ 0.36% บนระยะทาง 1.0 m เมื่อปรับเปลี่ยนกำลังงาน EIRP เท่ากับ 6.4, 11.4 และ 16.4 dBm เครื่องวิเคราะห์คลื่นความถี่วิทยุ MS2090 วัดค่าความหนาแน่นกำลังงานได้เท่ากับ 0.00 และ 0.00% (ไม่สามารถอ่านค่าได้เนื่องจากมีระดับกำลังงานต่ำมาก) และ 0.05% ดังรูปที่ 14 สำหรับการทดสอบสายอากาศพื้นผิวอภิวัสดุจัดเรียงกระแสที่ได้นำเสนอที่ความถี่ 2.6 GHz ด้วยโพลาไรซ์เชิงเส้นแนวตั้ง โดยกำหนดระยะทางการทดสอบเท่ากับ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 2.5 m เมื่อกำลังงาน EIRP เท่ากับ -18.6 dBm จะให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านขาออกเท่ากับ และ 0.008 0.007 0.004 0.003 และ 0.004 V ตามลำดับ เมื่อระดับกำลังงาน EIRP เท่ากับ -3.6 dBm ให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทางด้านขาออกเท่ากับ 0.013 0.014 0.009 0.006 และ 0.008 V และเมื่อระดับกำลังงาน EIRP เท่ากับ 16.4 dBm จะให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเท่ากับ 0.289, 0.130, 0.092, 0.068 และ 0.059 V ตามลำดับ

3.2 การทดสอบสายอากาศพื้นผิวอภิวัสดุจัดเรียงกระแสแถวลำดับ 4x4 ต้นแบบ

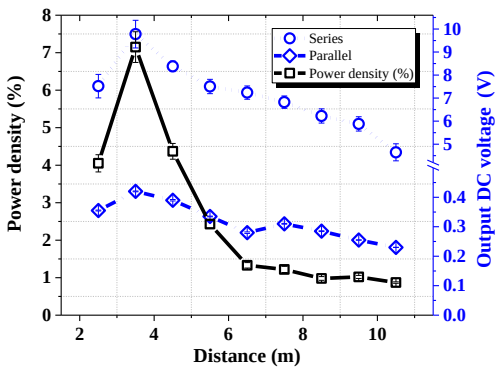
สายอากาศพื้นผิวอภิวัสดุจัดเรียงกระแสแถวลำดับ (Array) ขนาด 4x4 จำนวน 16 ตัว และมีโพลาไรซ์เชิงเส้นแนวตั้งและแนวนอนรวมกัน 32 โพลาไรซ์ถูกต่อเข้ากับวงจรจัดเรียงกระแสทั้งหมด 32 วงจร โดยโครงสร้างสายอากาศพื้นผิวอภิวัสดุจัดเรียงกระแสแถวลำดับมีขนาด 125x125 cm สายอากาศพื้นผิวอภิวัสดุจัดเรียงกระแสแต่ละตัววางห่างกัน 31 cm ดังรูปที่ 15 ในส่วนรูปที่ 16 (ก) เป็นการทดสอบวัดค่าความหนาแน่นกำลังงานที่แพร่กระจายกำลังงานออกจากด้านหลัง



รูปที่ 15 สายอากาศพื้นผิวอภิวัสดุจัดเรียงกระแสแถวลำดับต้นแบบ



(ก) การทดสอบเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สาย



(ข) ผลการทดสอบวัดค่าความหนาแน่นกำลังงานและผลการทดสอบการเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สาย

รูปที่ 16 การทดสอบและผลการทดสอบ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.010

สายอากาศ 5G ณ ชั้น 10 อาคารคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ต.ศาลายา อ.พุทธมณฑล จ. นครปฐม

จากการทดสอบพบว่า ระยะทางระหว่างด้านหลังสายอากาศ 5G กับโพรบไอโซทรอปิก ที่ระยะทาง 3.5 m มีค่าความหนาแน่นกำลังงานมากที่สุดเท่ากับ 7.15% และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: SD) เท่ากับ 0.41 สำหรับค่าความหนาแน่นกำลังงานน้อยที่สุด เท่ากับ 0.87% มีค่า SD เท่ากับ 0.02 ที่ระยะทาง 10.5 m ดังรูปที่ 16 (ข) ในส่วนการทดสอบเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สายจากด้านหลังของสายอากาศ 5G การทดสอบดังกล่าวได้ทำการปรับเปลี่ยนระยะทางการทดสอบตั้งแต่ 2.5-10.5 m และการทดสอบนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การต่อแบบอนุกรมและการต่อแบบขนาน การต่อแบบอนุกรมทั้ง 32 วงจร พบว่ามีแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมากที่สุด 9.78 V ที่ระยะทาง 3.5 m และการต่อแบบขนานทั้ง 32 วงจร พบว่า มีแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมากที่สุดเท่ากับ 0.42 V ที่ระยะทาง 3.5 m ดังรูปที่ 16 (ข)

4. สรุป

บทความฉบับนี้นำเสนอสายอากาศพื้นผิวอภิวัสดุจัดเรียงกระแสหรับเก็บเกี่ยวกำลังงานไร้สายจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ 5G ออกแบบให้มีขนาด 4x4 จำนวน 16 ตัว มีโพลาไรซ์เชิงเส้นแนวตั้งและแนวนอนรวมกัน 32 พอร์ต แต่ละพอร์ตจะถูกต่อเข้ากับวงจรจัดเรียงกระแสรวมกับ 32 วงจร ในการทดสอบได้อาศัยเครื่องวัดค่าความหนาแน่นกำลังงาน ที่ถูกปล่อยออกจากด้านหลังสายอากาศ 5G และใช้เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่วัดได้จากสายอากาศที่นำเสนอ ในการทดสอบ เมื่อทำการต่ออนุกรมทางด้านขาออกของวงจรจัดเรียงกระแสทั้ง 32 วงจร พบว่าให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมากที่สุดเท่ากับ 9.78 V มีค่าความหนาแน่นกำลังงานเท่ากับ 7.15% ที่ระยะทางห่างจากด้านหลังสายอากาศ 5G เท่ากับ 3.5 m แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้สามารถนำไปปะจุให้แก่แบตเตอรี่ขนาด 9 V หรือขับหลอด LED หรือนำไปเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กที่ใช้กระแสไฟฟ้าต่ำๆ ได้ สำหรับการทดสอบ เมื่อทำการต่อขนานทางด้านขาออกของวงจรจัดเรียงกระแสทั้ง 32 วงจร พบว่า ให้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมากที่สุดเท่ากับ 0.42 V มีค่าความหนาแน่นกำลังงานเท่ากับ 7.15% ที่ระยะทางห่างจากด้านหลังสายอากาศ 5G เท่ากับ 3.5 m ซึ่งแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้ดังกล่าวไม่สามารถนำไปใช้งานได้เนื่องจากมีแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่น้อยมาก

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนการดำเนินงานโดยสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ร่วมกับโครงการวิจัยมูลฐานมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ สัญญาเลขที่ FRB6710/2567 รหัสโครงการ 192856 โครงการวิจัย เรื่องการพัฒนาสายอากาศจัดเรียงกระแสสำหรับเก็บเกี่ยวพลังงานไร้สายจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ ปีงบประมาณ 2567

6. เอกสารอ้างอิง

[1] N. Shinohara, Development of rectenna with wireless communication system, The 5th European Conference on Antennas and Propagation, Proceedings, 2011, 3970-3973.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.010

[2] Z. Popović, S. Korhummel, S. Dunbar, R. Scheeler, A. Dolgov, R, Zane, E. Falkenstein and J. Hagerty, Scalable RF energy harvesting, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2014, 62(4), 1046-1056.

[3] S. Tsukamoto, N. Iizasa, K. Yoshitomi, R. Pokharel, K. Yoshida, R. Hattori, H. Kanaya and D. Kanemoto, Development of a rectenna for batteryless electronic paper, The IEEE Region 19 Conference, Proceedings, 2013 1-4.

[4] A.S. Marincic, Nikola tesla and the wireless transmission of energy, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982, PAS-101(10), 4064-4068.

[5] W.C. Brown, The history of power transmission by radio wave, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1984, 32(9), 1230-1242.

[6] N. Shinohara and H. Matsumoto, Experimental study of large rectenna array for microwave energy transmission, IEEE Transactions on Microwave Theory and Technique, 1998, 261-268.

[7] J.A. Hagerty and Z. Popovic, An experimental and theoretical characterization of broadband arbitrarily polarized rectenna array, IEEE International Microwave Symposium Digest, 2001, 46(3), 1855-1858.

[8] Y. H. Suh and K. Chang, A high-efficiency dual-frequency rectenna for 2.45 and 5.8-GHz wireless power transmission, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50(7), 1784-1789.

[9] A. Slavova and A.S. Omar, Wideband rectenna for energy recycling, IEEE Antenna and Propagation Society International Symposium, 2003, 954-957.

[10] J.H. Chou, D -B. Lin, K.-L. Weng and H.J. Li, All polarization receiving rectenna with harmonic rejection property for wireless power transmission, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62(10), 5242-5249.

[11] C. Phongcharoenpanich and K. Boonying, A 2.4-GHz dual polarized suspended square plate rectenna with inserted annular rectangular ring slot, International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2015, 26(2), 164-173.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.010

[12] D.H. Sadek, H.A. Shawkey and A.A. Zekry, Compact and high-efficiency rectenna for wireless power-harvesting applications, International Journal of Antennas and Propagation, 2021, 1109850.

[13] F. Khalid, W. Saeed, N. Shoaib, M. U. Khan and H. M. Cheema, Quad-band 3D rectenna array for ambient RF energy harvesting, International Journal of Antennas and Propagation, 2020, 7169846.

[14] CST® Microwave Studio, Research Base, 2020.

[15] K. Boonying and C. Phongcharoenpanich, Analysis and design of circularly polarized capacitively-fed planar suspended antenna for universal UHF RFID applications, Przeglad Elektrotechniczny, 2020, 96(1), 100-107.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.011

บทความวิจัย

การออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์ปัจจัยการปรับตั้งค่าเครื่องย่อยไนโตรเจน ที่มีผลต่อการเกิดของเสียของหลอดกลั่นไนโตรเจน

ยศวัจน์ ชีววรนนท์ตรี[1*] กฤดิธฤต ทองสิน[1] และ ปิยะ รนต์ละออง[2]

[1] สาขาวิชาการจัดการอุตสาหกรรม, คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา

[2] สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการโซ่อุปทาน, คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา

[*] ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: yossawat.ch@bsru.ac.th

วันที่รับบทความ: 26 มิถุนายน 2567; วันที่ทบทวนบทความ: 22 เมษายน 2568; วันที่ตอบรับบทความ: 16 กรกฎาคม 2568
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 20 สิงหาคม 2568

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดของเสียของหลอดกลั่นไนโตรเจนที่เกิดรอยร้าวจากการทดสอบหาปริมาณไนโตรเจน (Nitrogen) และโปรตีนหยาบ (Crude Protein) ในห้องปฏิบัติการ โรงงานกรณีศึกษา โดยใช้หลักการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (2^k Full Factorial Design) ในการศึกษาหาปัจจัยและระดับปัจจัยในการปรับตั้งค่าของเครื่องย่อยไนโตรเจน (Block Digestion Unit (Nitrogen)) ให้เหมาะสม สำหรับในการออกแบบการทดลองจะประกอบไปด้วย 3 ปัจจัยหลัก ได้แก่ อุณหภูมิ เวลาการเผา และเวลาการปรับสภาพความเย็น โดยการทดลองทำซ้ำ 3 ครั้ง รวมจำนวนทั้งสิ้น 24 การทดลอง ผลที่ได้จากการทดลองพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดรอยร้าวของหลอดทดลองอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% คืออุณภูมิ เวลาการเผา และเวลาปรับสภาพความเย็น และอันตรกิริยาระหว่างคู่ปัจจัย คือ อุณภูมิ กับ เวลาการเผา และ อุณภูมิ กับ เวลาปรับสภาพความเย็น จากนั้นจึงหาระดับปัจจัยในการปรับตั้งค่าของเครื่องย่อยไนโตรเจนที่เหมาะสม คือ อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียล เวลาการเผา 120 นาที และเวลาการปรับสภาพความเย็น 50 นาที หลังจากนั้นนำปัจจัยและระดับปัจจัยที่เหมาะสมไปเก็บข้อมูล เพื่อเปรียบเทียบผลข้อมูลก่อนและหลังการปรับปรุง พบว่าก่อนการปรับปรุงมีจำนวนของเสียที่เกิดรอยร้าว 359 หลอด และหลังการปรับปรุงมีจำนวนของเสียที่เกิดรอยร้าวลดลงเหลือ 7 หลอด ทำให้ของเสียลดลงจากเดิมคิดเป็นร้อยละ 98.05 และเมื่อนำมาเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้น พบว่าจำนวนของเสียก่อนการปรับปรุง 359 หลอด คิดเป็นเงิน 502,600 บาท ซึ่งต้นทุนต่อชิ้น เท่ากับ 1,400 บาท และหลังการปรับปรุง ลดลงเหลือ 7 หลอด คิดเป็นเงิน 9,800 บาท ดังนั้นสามารถลดค่าใช้จ่ายลง 492,800 บาท

คำสำคัญ: การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล; การลดของเสีย; หลอดกลั่นไนโตรเจน

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.011

บทความวิจัย

Design of Experiments to Analyze Factors for Block Digestion Affecting the Defect of Nitrogen Tubes

Yossawat Cheewaworanontree [1*] Kridtharit Thongsin [1] and Piya Rontlaong [2]

[1] Program in Industrial Management, Engineering and Industrial Technology, Bansomdejchaopraya Rajabhat University

[2] Program in Industrial Engineering and Supply Chain Management, Engineering and Industrial Technology, Bansomdejchaopraya Rajabhat University

[*] Corresponding author, E-mail: yossawat.ch@bsru.ac.th

Received: 26 June 2024; Revised 22 April 2025; Accepted: 16 July 2025
Online Published: 20 August 2025

Abstract: This research aims to reduce the waste of nitrogen tubes generated from testing for the quantities of Nitrogen and crude protein in laboratory settings of a case study factory, using 2^k Full Factorial Design. The study aims to identify factors and their levels in adjusting the settings of the Block Digestion machine appropriately. The experimental design comprises three main factors: temperature, burning time, and cooling time. The experiments were repeated three times, totaling 24 trials. The experimental results indicated that temperature, burning time, and cooling time had a statistically significant effect on the occurrence of cracks in the test tubes at the 95% confidence level. Moreover, significant interaction effects were observed between temperature and burning time, as well as between temperature and cooling time and the appropriate factors and levels for adjusting the settings of the Block Digestion machine are: temperature at 400 degrees celsius, burning time of 120 minutes, and cooling time of 50 minutes. Subsequently, the appropriate factors and levels were used to collect data for comparison before and after adjustment. It was found that before adjustment, there were 359 instances of tube damage, whereas after adjustment, the instances reduced to 7, resulting in a reduction of waste by 98.05%. When comparing the expenses incurred, it was found that before adjustment, the cost of the 359 damaged tubes amounted to 502,600 baht, with a unit cost of 1,400 baht per tube. After adjustment, with only 7 damaged tubes, the cost amounted to 9,800 baht, resulting in a reduction in expenses by 492,800 baht.

Keywords: Factorial design; reducing defect; digestion tube

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.011

บทความวิจัย

1. บทนำ

ในสถานการณ์ปัจจุบันธุรกิจอุตสาหกรรมทุกประเภทต่างมีการแข่งขันเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากผู้บริโภคมีความต้องการสินค้าที่หลากหลายในเวลาที่รวดเร็ว การเพิ่มอัตราการผลิตและการปรับปรุงการทำงานนั้นจึงเป็นหัวใจสำคัญของการอยู่รอดทางธุรกิจและการเติบโตทางอุตสาหกรรม เพื่อให้สามารถแข่งขันกับคู่แข่งรายอื่นๆ ได้ จึงจำเป็นต้องเตรียมพร้อมรับสถานการณ์ในอนาคต ผู้ประกอบการจึงมีความจำเป็นที่จะผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพเป็นไปตามความต้องการของลูกค้า โดยมีต้นทุนต่ำและมีประสิทธิภาพสูงสุด และเพื่อสร้างความความไว้วางใจ จึงต้องการยกระดับผลิตภัณฑ์ก่อนการส่งมอบให้แก่ผู้บริโภคเพื่อสร้างความพึงพอใจและไว้วางใจแก่ลูกค้า และสามารถที่จะแข่งขันกับคู่แข่งได้อีกด้วย อีกทั้งเพื่อต้องการลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการทดลองทางวิทยาศาสตร์ ที่ใช้พัฒนาผลิตภัณฑ์ที่มีประสิทธิภาพก่อนนำออกไปสู่ตลาดการค้าต่อไป [1] เพื่อเพิ่มโอกาสในการแข่งขันทางการตลาดให้มากขึ้น ทั้งทางด้านราคาและคุณภาพของสินค้า ตลอดจนความต้องการของลูกค้าที่เพิ่มสูงขึ้น จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานเพื่อลดต้นทุนการผลิตให้น้อยลง และเพื่อเพิ่มโอกาสด้านการแข่งขันให้มากขึ้น [2] สำหรับโรงงานกรณีศึกษา เป็นโรงงานที่ผลิตเกี่ยวกับอาหารสัตว์มีการคัดสรรวัตถุดิบที่มีคุณภาพ โดยวัตถุดิบหลักที่ใช้ในการผลิตอาหารสัตว์ ประกอบไปด้วย ข้าวโพด กากถั่วเหลือง ปลาป่น รำข้าว และส่วนประกอบวิตามินและแร่ธาตุอื่นๆ วัตถุดิบที่มีคุณภาพตามมาตรฐานที่ได้รับการรับรอง โดยบริษัทฯ ดำเนินนโยบายการจัดซื้อวัตถุดิบจากแหล่งผลิตในประเทศเป็นอันดับแรกเพื่อส่งเสริมผลผลิตจากเกษตรกรท้องถิ่นมาผลิตเป็นสูตรอาหารที่ตรงความต้องการตามด้านโภชนาการของสัตว์ อีกทั้งมีการใช้เทคโนโลยีที่ทันสมัยเข้ามาช่วยควบคุมคุณภาพและบริหารการจัดการด้านต่างๆ เช่น ห้องปฏิบัติการก็มีความจำเป็นที่ต้องมีการทดลองและตรวจสอบคุณภาพก่อนส่งออกอยู่เสมอ จากสภาพปัจจุบันปัญหาของโรงงานกรณีศึกษาพบว่า หลอดกลั่นไนโตรเจน (Digestion Tube) ที่ทำการทดสอบหาปริมาณไนโตรเจน (Nitrogen) และโปรตีนหยาบ (Crude Protein) ทางวิทยาศาสตร์ในห้องปฏิบัติการ มีจำนวนของเสียเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้ต้นทุนในการตรวจสอบมีปริมาณสูงเนื่องจากราคาของหลอดกลั่นไนโตรเจนมีราคาเท่ากับ 1,400 บาทต่อหน่วย เนื่องจากการใช้ค่าความร้อนของเครื่องย่อยไนโตรเจน (Block Digestion Unit (Nitrogen)) ที่ใช้อุณหภูมิสูง เวลาในการเผา และระยะเวลาปรับสภาพความเย็นของหลอดทดลองมีระยะเวลาที่ไม่เหมาะสม ส่งผลทำให้หลอดกลั่นไนโตรเจนที่ทำการทดสอบเกิดรอยร้าวและเสียหาย แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปริมาณหลอดกลั่นไนโตรเจนที่เสียหายที่เกิดจากกระบวนการทดลองทางวิทยาศาสตร์ในห้องปฏิบัติการในช่วงเดือนตุลาคม – ธันวาคม 2566

เดือน	จำนวนของเสีย (หลอด)	เปอร์เซ็นต์ของเสีย
ตุลาคม	96	26.74
พฤศจิกายน	118	32.87
ธันวาคม	145	40.39
รวม	359	100
เฉลี่ย	120	33.33

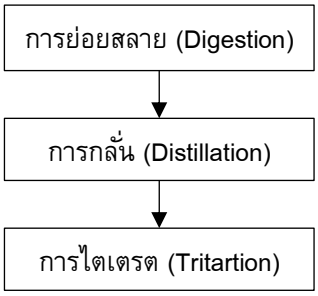
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.011

จากตารางที่ 1 พบว่าจำนวนของเสียจากหลอดกลั่นไนโตรเจนที่ทำการทดสอบหาปริมาณไนโตรเจน (Nitrogen) และโปรตีนหยาบ (Crude Protein) ทางวิทยาศาสตร์ในห้องปฏิบัติการมีปริมาณของเสียเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในแต่ละเดือนเท่ากับ 120 หลอด ซึ่งปริมาณของเสียส่งผลทำให้เกิดต้นทุนค่าใช้จ่ายในการทดสอบสูงขึ้น [3] ปัจจุบันการออกแบบการทดลองถูกนำมาใช้กันในการศึกษาเพื่อเพื่อวิเคราะห์ปัจจัย และหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสม เช่น [4] การศึกษาปัจจัยเพื่อลดต้นทุนผงเคมีในการผลิตผ้าเบรก โดยปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ ค่าความหนาแน่นผงเคมี ค่าแรงดัน เวลาอัดชิ้นงานต่อครั้ง และน้ำหนักผงเคมี โดยปัจจัยเหล่านี้มีผลกระทบต่อความหนาของชิ้นงาน ส่งผลทำให้ต้นทุนการผลิตสูง [5] การศึกษาปัจจัยระยะห่างใบมีด ระยะเหลื่อมใบมีด และความเร็วรอบมอเตอร์ ที่เหมาะสมเพื่อการปรับตั้งค่าเครื่องหั่นใบตะไคร้ [6] การลดของเสียในกระบวนการผลิตแบตเตอรี่รถจักรยานยนต์ โดยพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดของเสีย คือ แบตเตอรี่เย็บระเบิด เกิดจากปัจจัย ระยะกดหัว Tip แรงดันลม และกระแสไฟฟ้า [7] การลดการสูญเสียน้ำหนักในกระบวนการผลิตไส้พายสับปะรด โดยพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อการสูญเสียน้ำหนักไส้พายสับปะรด ได้แก่อุณหภูมิ และระยะเวลาในการกวนไส้พาย

จากงานวิจัยที่กล่าวมาพบว่าเทคนิคการออกแบบการทดลองมีความเหมาะสมกับการศึกษาระดับของปัจจัยที่มีความเหมาะสมต่อการผลิตผลิตภัณฑ์ให้ตรงตามคุณลักษณะที่กำหนด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ประยุกต์ใช้หลักการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง (Design and Analysis of Experiment: DOE) แบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (2^k Full Factorial Design) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม (Optimization) ของระดับของปัจจัยในปรับตั้งค่าเครื่องย่อยไนโตรเจน (Block Digestion Unit (Nitrogen)) ประกอบด้วยปัจจัยดังนี้ (1) อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) (2) เวลาการเผา (นาที) และ (3) เวลาปรับสภาพความเย็น (นาที) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการทดลองในห้องปฏิบัติการและลดจำนวนของเสียที่เกิดขึ้น [1] ที่ส่งผลให้เกิดของเสียประเภทรอยร้าวของหลอดกลั่นไนโตรเจนมีปริมาณต่ำที่สุด

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

การทดสอบหาปริมาณไนโตรเจน (Nitrogen) และโปรตีนหยาบ (Crude Protein) ของเครื่องย่อยไนโตรเจน (Block Digestion Unit (Nitrogen)) ในห้องปฏิบัติการโดยกระบวนการวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจน (Kjeldahl) ซึ่งเป็นกระบวนการวิเคราะห์ทางเคมีที่ใช้ในการหาปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในตัวอย่าง โดยเฉพาะใน สารอินทรีย์ เช่น อาหาร พืช ปุ๋ย หรือของเสียต่างๆ เพื่อใช้ในการคำนวณหาปริมาณ โปรตีน ซึ่งไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบสำคัญของโปรตีน โดยมีขั้นตอนดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขั้นตอนการทดสอบหาปริมาณไนโตรเจน (Nitrogen) และโปรตีนหยาบ (Crude Protein)

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.011

จากรูปที่ 1 อธิบายแต่ละขั้นตอนดังนี้ (1) การย่อยสลาย (Digestion) เป็นขั้นตอนแรกในกระบวนการ Kjeldahl เพื่อเปลี่ยนไนโตรเจนในรูปของโปรตีนให้กลายเป็นรูปแบบที่สามารถวัดได้ (แอมโมเนียมไอออน , NH_4^+) (2) การกลั่น (Distillation) เป็นขั้นตอนสำคัญในการแยกแอมโมเนีย (NH_3) ออกจากตัวอย่างเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจน และ (3) การไตเตรต (Titration) ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ใช้วัดปริมาณแอมโมเนีย (NH_3) ที่จับไว้ในกรดบอริก เพื่อคำนวณปริมาณ ไนโตรเจน (Nitrogen) และ โปรตีนหยาบ (Crude Protein) เพื่อให้สอดคล้องตรงกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยเรื่องการลดของเสียหลอดกลั่นไนโตรเจนที่เกิดขึ้นจากการทดสอบหาปริมาณไนโตรเจน (Nitrogen) และโปรตีนหยาบ (Crude Protein) โดยประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง โรงงานกรณีศึกษา ผู้วิจัยได้กำหนดขั้นตอนการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) โดยมีขั้นตอนดังนี้ [8]

2.1 การกำหนดปัญหา

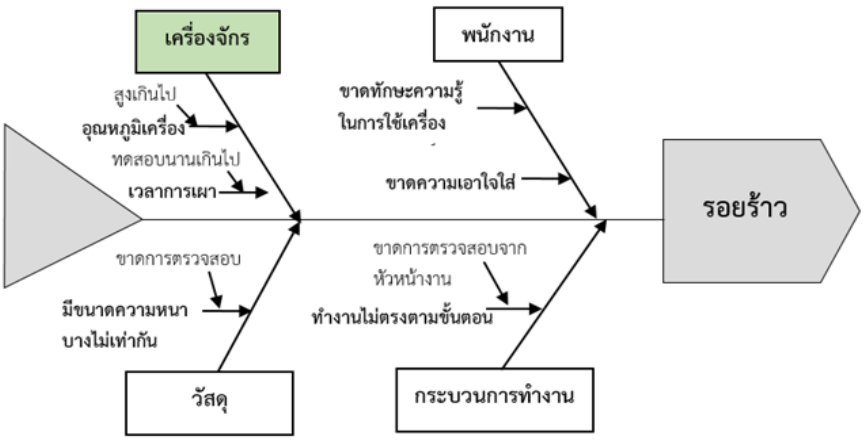
จากการศึกษาข้อมูลโรงงานกรณีศึกษา พบว่าจำนวนของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการทดลองทางวิทยาศาสตร์ในห้องปฏิบัติการเกิดจากการใช้ค่าความร้อนของเครื่องย่อยไนโตรเจน (Block Digestion Unit (Nitrogen)) ที่ใช้อุณหภูมิสูง และใช้เวลาในการเผาไม่เหมาะสม และระยะเวลาปรับสภาพความเย็นของหลอดทดลองมีระยะเวลาที่ไม่เหมาะสม ส่งผลทำให้หลอดกลั่นไนโตรเจนที่ทำการทดสอบเกิดเป็นรอยร้าวและเสียหายเป็นจำนวนมากแสดงดังรูปที่ 2 ส่งผลทำให้เกิดต้นทุนค่าใช้จ่ายในการทดสอบสูง

2.2 การกำหนดปัจจัย

จากแผนผังแสดงเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) ในการวิเคราะห์หาสาเหตุของหลอดกลั่นไนโตรเจนที่ทำการทดสอบเกิดการเป็นรอยร้าว ดังรูปที่ 2 พบว่า สาเหตุมาจากปัจจัยพนักงาน (Man) วัสดุ (Material) กระบวนการทำงาน (Method) และเครื่องจักร (Machine) แสดงดังรูปที่ 3 โดยพบว่าสาเหตุหลักมาจากเครื่องจักรที่มีการปรับตั้งค่าความร้อนของเครื่องย่อยไนโตรเจน (Block Digestion Unit (Nitrogen)) ที่ไม่เหมาะสมโดยใช้อุณหภูมิสูงและใช้เวลาในการทดสอบนานเกินไปทำให้เกิดการเป็นรอยร้าวและเสียหาย ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้ทำการระดมสมองกับผู้ที่เกี่ยวข้องในการปฏิบัติงานในห้องทดลอง โดยกำหนดปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการเป็นรอยร้าวของหลอดกลั่นไนโตรเจน ซึ่งสามารถสรุปปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิ เวลาการเผา และระยะเวลาการปรับสภาพความเย็นของหลอดกลั่นไนโตรเจน ซึ่งเป็นปัจจัยในการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเครื่องย่อยไนโตรเจน (Block Digestion Unit (Nitrogen))

รูปที่ 2 รอยร้าวจากการทดสอบของหลอดกลั่นไนโตรเจน

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.011



รูปที่ 3 ผังแสดงเหตุและผลในการวิเคราะห์หาสาเหตุรอยร้าวหลอดกลั่นไนโตรเจน

2.3 การออกแบบการทดลอง

สำหรับการออกแบบการทดลอง ผู้วิจัยได้ดำเนินการทดลองแก้ไขปัญหาโดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) เข้ามาประยุกต์เพื่อหาปัจจัยและระดับปัจจัยในการทดลองที่เหมาะสม ได้แก่ อุณหภูมิ เวลาการเผา และระยะเวลาการปรับสภาพความเย็น ซึ่งในการออกแบบการทดลองนี้ผู้วิจัยได้ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (2^k Full Factorial Design) โดยการทำซ้ำ 3 ครั้ง รวมจำนวนทั้งสิ้น 24 การทดลอง โดยการทดลองจะเป็นการทดลองแบบสุ่มซึ่งเป็นปัจจัยในการทดลอง [5] โดยแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ แสดงดังตารางที่ 2

การกำหนดรูปแบบการทดลอง ผู้วิจัยได้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (2^k Full Factorial Design) จากตารางที่ 2 สามารถทดลองจำนวนปัจจัยได้แก่ อุณหภูมิ 400 และ 420 องศาเซลเซียส เวลาการเผา 120 และ 150 นาที และ

ตารางที่ 2 ปัจจัยและระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย	สัญลักษณ์	ระดับปัจจัย	
		ต่ำ (-)	สูง (+)
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	A	400	420
เวลาการเผา (นาที)	B	120	150
เวลาการปรับสภาพความเย็น (นาที)	C	30	50

เวลาปรับสภาพความเย็น 30 และ 50 นาที โดยเป็นการกำหนดค่าแบบช่วงตามมาตรฐานของห้องปฏิบัติการสำหรับการปรับตั้งค่าเครื่องย่อยไนโตรเจน (Block Digestion Unit (Nitrogen)) โดยทำการทดลองซ้ำจำนวน 3 ครั้ง และผลลัพธ์ (Response) ที่ได้จากแต่ละรูปแบบการทดลองคือจำนวนของเสียที่เกิดขึ้น ทำให้มีจำนวนการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 24 การทดลอง โดยรูปแบบการทดลองเป็นแบบสุ่มแสดงดังตารางที่ 3

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.011

ตารางที่ 3 การสุ่มตัวอย่างและการออกแบบการทดลองที่ใช้ในการทดลอง

Standard Order	Run Order	ปัจจัย			Response
		อุณหภูมิ (องศาเซลเซียล)	เวลาการเผา (นาที)	เวลาการปรับสภาพความเย็น (นาที)	
6	1	420	120	50	0
5	2	400	120	50	7
23	3	400	150	50	8
20	4	420	150	30	4
12	5	420	150	30	4
2	6	420	120	30	9
4	7	420	150	30	12
14	8	420	120	50	4
19	9	400	150	30	1
13	10	400	120	50	4
24	11	420	150	50	4
18	12	420	120	30	14
7	13	400	150	50	3
21	14	400	120	50	2
8	15	420	150	50	7
11	16	400	150	30	7
3	17	400	150	30	5
22	18	420	120	50	0
16	19	420	150	50	3
9	20	400	120	30	0
15	21	400	150	50	6
10	22	420	120	30	9
1	23	400	120	30	11
17	24	400	120	30	5

2.4 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง

สำหรับในการวิเคราะห์ผลข้อมูลการทดลองทางผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยก่อนที่จะนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ความแปรปรวน ค่าส่วนตกค้าง (Residual) ของข้อมูลจากแบบจำลองการถดถอย โดยการตรวจสอบประกอบไปด้วยขั้นตอนทั้งหมด 3 ขั้นตอน ดังนี้

2.4.1 การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติของข้อมูล (Normal Distribute)

จากการพิจารณาแผนภาพแสดงการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง เพื่อตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติของข้อมูล พบว่าค่าส่วนตกค้างมีลักษณะการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง แสดงดังรูปที่ 4 และมีค่า P-value เท่ากับ 0.432 ซึ่งมากกว่าค่าระดับนัยสำคัญ จึงสรุปได้ว่ามีการแจกแจงแบบปกติ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.011

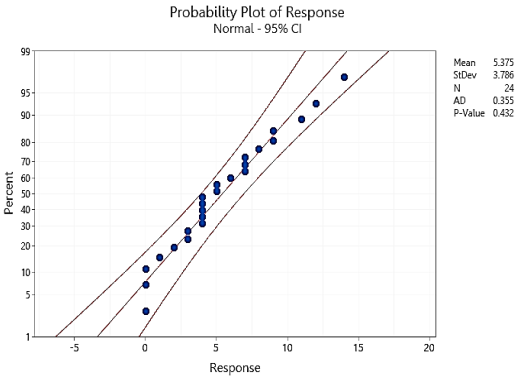
2.4.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Independently Distributed)

จากการพิจารณาแผนภาพแสดงการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างเทียบกับลำดับการทดลองเพื่อตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล พบว่าค่าส่วนตกค้างมีลักษณะการกระจายตัวเป็นรูปแบบอิสระแสดงดังรูปที่ 5 เนื่องจากการกระจายตัวไม่มีลักษณะเป็นแนวโน้มหรือมีรูปแบบที่แน่นอน จึงสรุปได้ว่าค่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน

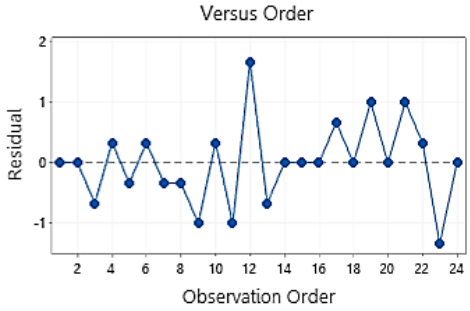
2.4.3 การตรวจสอบความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน (Constant Variance)

จากการพิจารณาแผนภาพแสดงการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างเทียบกับค่าของตัวแปรตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองการถดถอย (Fitted Value) เนื่องจากกราฟมีลักษณะการเรียงตัวกระจัดกระจายอยู่เหนือเส้นกลาง และการกระจายตัวไม่มีลักษณะที่เป็นรูปแบบหรือโครงสร้างใดๆ ที่แน่นอน จึงสรุปได้ว่าส่วนตกค้างมีเสถียรภาพของความแปรปรวนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ แสดงดังรูปที่ 6

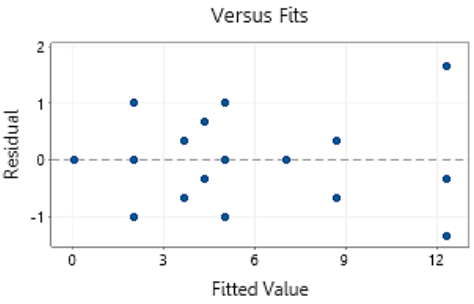
จากการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง แสดงดังรูปที่ 4, 5 และ 6 พบว่ารูปแบบของค่าส่วนตกค้างเป็นไปตามสมมติฐาน 3 ข้อ ได้แก่ ข้อมูลของค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ ค่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน และค่าความแปรปรวนมีเสถียรภาพ จึงกล่าวได้ว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอและมีความเป็นอิสระ สามารถนำข้อมูลนี้ไปทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนต่อไปได้



รูปที่ 4 แผนภาพแสดงการแจกแจงแบบปกติของค่าส่วนตกค้าง



รูปที่ 5 แผนภาพแสดงการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างเทียบกับลำดับการทดลอง



รูปที่ 6 แผนภาพการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างเทียบกับค่า Fitted Value

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.011

2.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA)

การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อทดสอบสมมติฐานทางสถิติในการทดลองที่มีปัจจัยที่ศึกษา 3 ปัจจัย คือ A, B และ C คือ

การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับอิทธิพลหลักของปัจจัย A คือ

$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = ... = \tau_a = 0$

$H_1 : \tau_i \neq 0$ อย่างน้อย 1 ค่า

การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับอิทธิพลหลักของปัจจัย B คือ

$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = ... = \beta_b = 0$

$H_1 : \beta_j \neq 0$ อย่างน้อย 1 ค่า

การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับอิทธิพลหลักของปัจจัย C คือ

$H_0 : \gamma_1 = \gamma_2 = ... = \gamma_c = 0$

$H_1 : \gamma_k \neq 0$ อย่างน้อย 1 ค่า

การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับอิทธิพลร่วมของปัจจัย A และ B คือ

$H_0 : (\tau\beta)_{ij} = 0; \forall i, j$

$H_1 : (\tau\beta)_{ij} \neq 0$ อย่างน้อย 1 ค่า

การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับอิทธิพลร่วมของปัจจัย A และ C คือ

$H_0 : (\tau\gamma)_{ik} = 0; \forall i, k$

$H_1 : (\tau\gamma)_{ik} \neq 0$ อย่างน้อย 1 ค่า

การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับอิทธิพลร่วมของปัจจัย B และ C คือ

$H_0 : (\beta\gamma)_{jk} = 0; \forall j, k$

$H_1 : (\beta\gamma)_{jk} \neq 0$ อย่างน้อย 1 ค่า

การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับอิทธิพลร่วมของปัจจัย A, B และ C คือ

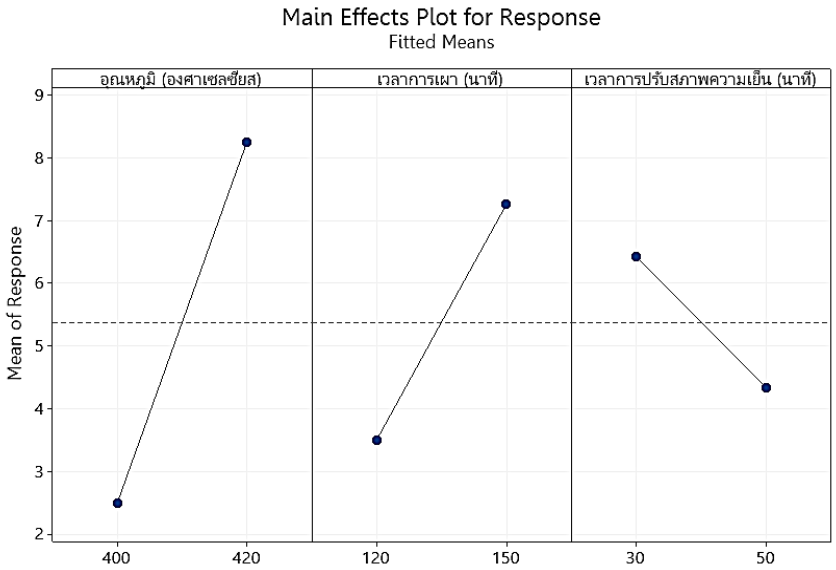
$H_0 : (\tau\beta\gamma)_{ijk} = 0; \forall i, j, k$

$H_1 : (\tau\beta\gamma)_{ijk} \neq 0$ อย่างน้อย 1 ค่า

จากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (2^k Full Factorial Design) แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน แสดงดังตารางที่ 4 พบว่าปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อรอยร้าวของหลอดกลั่นไนโตรเจน โดยผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรม Minitab Version 19 วิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อรอยร้าวของหลอดกลั่นไนโตรเจนอย่างมีนัยสำคัญ (P-value < 0.05) ได้แก่ อุณหภูมิ (องศาเซลเซียล) เวลาการเผา (นาที) และเวลาการปรับสภาพความเย็น (นาที) จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับ [9] สามารถแสดงเป็นแผนภาพของอิทธิพลหลัก (Main Effect) จากปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อผลลัพธ์ที่ทำให้เกิดรอยร้าวของหลอดกลั่นไนโตรเจน แสดงดังรูปที่ 7

จากรูปที่ 7 เมื่อพิจารณาปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อรอยร้าวของหลอดกลั่นไนโตรเจน พบว่า (1) อุณหภูมิ มีเส้นกราฟลักษณะชันขึ้น อธิบายได้ว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นส่งผลกระทบต่อการมีรอยร้าวของหลอดกลั่นไนโตรเจนมากขึ้นตามไปด้วย (2) เวลาการเผา มีเส้นกราฟลักษณะชันขึ้น อธิบายได้ว่าเมื่อเวลาการเผาเพิ่มขึ้นส่งผลกระทบต่อการมีรอยร้าวของหลอดกลั่นไนโตรเจนมากขึ้นตามไปด้วย และ (3) เวลาการปรับสภาพความเย็น มีเส้นกราฟลักษณะชันลงอธิบายได้ว่าเมื่อเวลาปรับสภาพความเย็นลดลงส่งผลกระทบต่อการมีรอยร้าวของหลอดกลั่นไนโตรเจนลดลงไปด้วย

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.011



รูปที่ 7 กราฟแสดงลักษณะอิทธิพลของปัจจัยหลัก

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลการทดลอง

Factorial Fit: Response versus อุณหภูมิ, เวลาการเผา, เวลาการปรับสภาพความเย็น

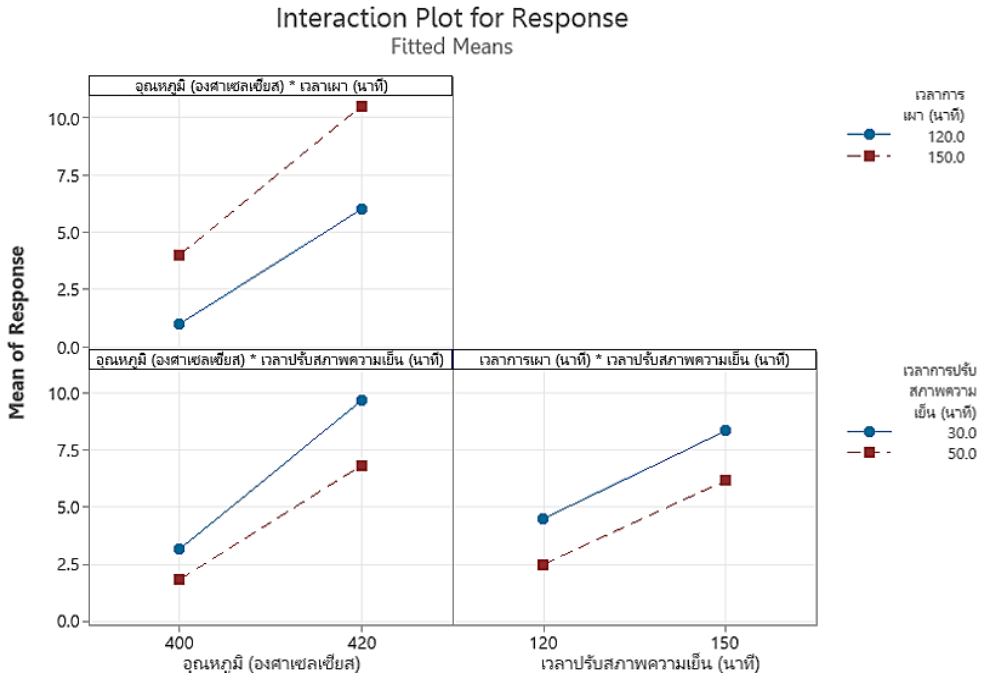
Estimated Effects and Coefficients for Response (Coded Units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียล)	5.750	2.875	0.167	17.25	0.000
เวลาการเผา (นาที)	3.750	1.875	0.167	11.25	0.000
เวลาการปรับสภาพความเย็น (นาที)	-2.083	-1.042	0.167	-6.25	0.000
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียล)*เวลาการเผา (นาที)	0.750	0.375	0.167	2.25	0.039
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียล)*เวลาการปรับสภาพความเย็น (นาที)	-0.750	-0.375	0.167	-2.25	0.039
เวลาการเผา (นาที)*เวลาการปรับสภาพความเย็น (นาที)	-0.083	-0.042	0.167	-0.25	0.806
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียล)*เวลาการเผา (นาที)*เวลาการปรับสภาพความเย็น (นาที)	-0.750	-0.375	0.167	-2.25	0.039
S = 0.81	R-Sq = 96.76%		R-Sq (adj) = 95.35%		

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.011

จากนั้นแสดงแผนภาพอิทธิพลร่วม (Interaction) ระหว่างปัจจัย แสดงดังรูปที่ 8

รูปที่ 8 สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลกระทบร่วม 3 ปัจจัย พบว่าปัจจัยอุณหภูมิ กับเวลาการเผา มีผลกระทบร่วมกัน (Interaction) คือมีผลต่อจำนวนรอยร้าวของหลอดกลั่นไนโตรเจนเพิ่มขึ้น สามารถอธิบายได้ว่า อุณหภูมิ กับเวลาการเผาร่วมกันทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคือจำนวนของเสียคือรอยร้าวจากหลอดทดลองเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากถ้ามีการปรับตั้งเครื่องย่อยไนโตรเจน (Block Digestion Unit (Nitrogen)) ที่ค่าอุณหภูมิต่ำ และเวลาการเผาต่ำ จะส่งผลให้จำนวนของเสียรอยร้าวของหลอดกลั่นอยู่ในระดับต่ำ และถ้าปรับตั้งเครื่องย่อยไนโตรเจนที่ค่าอุณหภูมิสูง และเวลาการเผาสูง จะส่งผลให้จำนวนของเสียรอยร้าวของหลอดกลั่นอยู่ในระดับสูง ในทำนองเดียวกันปัจจัยอุณหภูมิ กับเวลาปรับสภาพความเย็นมีผลกระทบร่วมกัน (Interaction) คือถ้ามีการปรับตั้งเครื่องย่อยไนโตรเจนที่ค่าอุณหภูมิต่ำ และเวลาการปรับสภาพความเย็นสูง จะส่งผลให้จำนวนของเสียรอยร้าวของหลอดกลั่นอยู่ในระดับต่ำ และถ้าการปรับตั้งเครื่องย่อยไนโตรเจนที่ค่าอุณหภูมิสูง และเวลาการปรับสภาพความเย็นต่ำ จะส่งผลให้จำนวนของเสียรอยร้าวของหลอดกลั่นอยู่ในระดับสูง ส่วนปัจจัยเวลาการเผา และเวลาปรับสภาพความเย็น ไม่มีผลกระทบร่วมกัน ส่วนทั้ง 3 ปัจจัย คือ อุณภูมิ เวลาการเผา และเวลาปรับสภาพความเย็นก็ไม่มีผลกระทบร่วมกัน



รูปที่ 8 กราฟแสดงลักษณะอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลกระทบร่วม

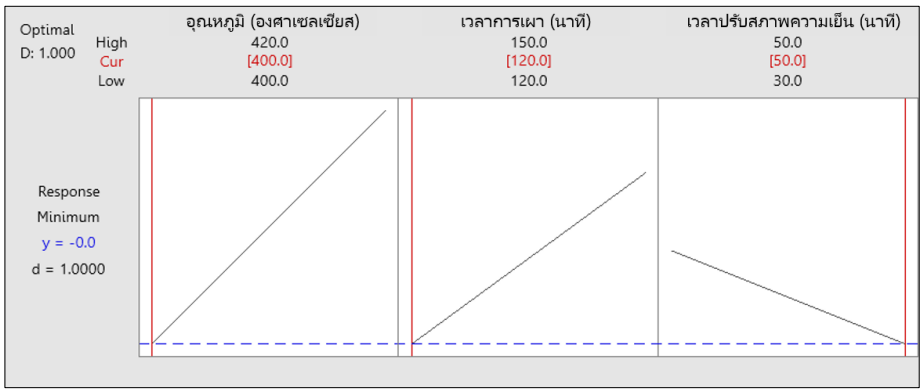
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.011

3. ผลการวิจัย

จากการศึกษาการลดของเสียหลอดกลั่นไนโตรเจนที่เกิดขึ้นจากการทดสอบหาปริมาณไนโตรเจน (Nitrogen) และโปรตีนหยาบ (Crude Protein) ในห้องปฏิบัติการ โดยศึกษากระบวนการหาปัจจัยและระดับปัจจัย ที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดของเสียรอยร้าว โดยการใช้หลักการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) เข้ามาประยุกต์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการทดลองในห้องปฏิบัติการและลดจำนวนของเสียที่เกิดขึ้น พบว่าอุณหภูมิ เวลาการเผา และระยะเวลาการปรับสภาพความเย็น มีค่า P-value < 0.05 จึงส่งผลกระทบต่อการเกิดรอยร้าวของหลอดกลั่นไนโตรเจนอย่างมีนัยสำคัญ และจากผลการทดลองการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัย โดยใช้ฟังก์ชั่น Response Optimization [10] ซึ่งเป็นฟังก์ชั่นที่ใช้หาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย และค่าวัดความพึงพอใจโดยรวบรวมผลตอบสนอง (Composite Desirability :D) จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0-1 ซึ่งหมายถึงถ้าค่า D ที่ได้ มีค่าเท่ากับ 1 หมายถึงว่า ผลตอบนั้นได้รับความพึงพอใจอย่างสมบูรณ์ [11] ผลจากการทดลองด้วยโปรแกรม Minitab Version 19 แสดงดังรูปที่ 9 และตารางที่ 5 ให้ค่าที่เหมาะสมในการปรับตั้งค่าเครื่องย่อยไนโตรเจนให้มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยเมื่อทำการตั้งค่าอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการเผา 120 นาที และระยะเวลาการปรับสภาพความเย็น 50 นาที ส่งผลให้ไม่เกิดของเสียที่เกิดจากรอยร้าวของหลอดทดลองขึ้นเลย

ตารางที่ 5 ค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยและระดับปัจจัยที่เหมาะสม

Response Optimization						
Parameters						
Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Import
	Minimize		0	14	1	1
Global Solution						
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) = 400						
เวลาการเผา (นาที) = 120						
ระยะเวลาการปรับสภาพความเย็น (นาที) = 50						
Predicted Response						
Response = 0.00000, Desirability = 1.00000						
Composite Desirability = 1.00000						



รูปที่ 9 ค่าที่เหมาะสมในการปรับตั้งเครื่องย่อยไนโตรเจน

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.011

จากตารางที่ 5 ค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยที่ได้รับความพึงพอใจอย่างสมบูรณ์ จากผลการทดลองการวิเคราะห์หาปัจจัยและระดับปัจจัยที่เหมาะสมในการปรับตั้งค่าเครื่องย่อยไนโตรเจนเพื่อลดของเสียหลอดกลั่นไนโตรเจนที่เกิดรอยร้าวจากการทดสอบหาปริมาณไนโตรเจน (Nitrogen) และโปรตีนหยาบ (Crude Protein) ในห้องปฏิบัติการ โรงงานกรณีศึกษา โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองเชิงแฟกเทอเรียลแบบสองระดับ (2^k Full Factorial Design) ซึ่งสามารถสรุปได้แสดงดังตารางที่ 6

จากตารางที่ 6 ผลการทดลองการวิเคราะห์หาปัจจัยและระดับปัจจัยที่เหมาะสม และเพื่อเป็นการยืนยันผลการวิจัยว่าสามารถลดของเสียหลอดกลั่นไนโตรเจนที่เกิดรอยร้าวจากการทดสอบหาปริมาณไนโตรเจน (Nitrogen) และโปรตีนหยาบ (Crude Protein) ในห้องปฏิบัติการโรงงานกรณีศึกษา ผู้วิจัยจึงทำการทดสอบและกำหนดค่าตามปัจจัยและระดับปัจจัยที่เหมาะสม (ค่าอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการเผา 120 นาที และระยะเวลาการปรับสภาพความเย็น 50 นาที) ในกระบวนการทดสอบหาปริมาณไนโตรเจน (Nitrogen) และโปรตีนหยาบ (Crude Protein) ในห้องปฏิบัติการ โรงงานกรณีศึกษา ระหว่างเดือนมกราคม – เดือนมีนาคม 2567 แสดงดังรูปที่ 10

จากนั้น นำข้อมูลจำนวนของเสียมาทำการเปรียบเทียบผลก่อนปรับปรุงและหลังการปรับปรุง [12] แสดงดังตารางที่ 7 ผลการเปรียบเทียบก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุง แสดงดังตารางที่ 8

ตารางที่ 6 ผลการทดลองการวิเคราะห์หาปัจจัยและระดับปัจจัยที่เหมาะสม

ปัจจัย	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียล)	420	400
เวลาการเผา (นาที)	150	120
ระยะเวลาการปรับสภาพความเย็น (นาที)	30	50

ตารางที่ 7 ข้อมูลของเสียหลังการปรับปรุง ระหว่างเดือนมกราคม - เดือนมีนาคม 2567

สาเหตุการเกิดของเสีย	จำนวนของเสียจากกระบวนการทดลองห้องปฏิบัติการ			
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	รวม
รอยร้าว	2	3	2	7

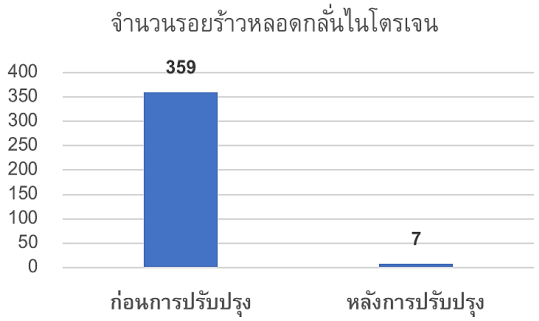
ตารางที่ 8 ผลการเปรียบเทียบของเสียก่อนและหลังการปรับปรุง

ประเภทของเสีย	จำนวนของเสีย (หลอด)	
	ก่อนการปรับปรุง	หลังการปรับปรุง
รอยร้าว	359	7

รูปที่ 10 ปรับตั้งค่าปัจจัยและระดับปัจจัยที่เหมาะสมของเครื่องย่อยไนโตรเจน

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.011

จากตารางที่ 8 พบว่าก่อนการปรับปรุงมีจำนวนของเสียที่เกิดรอยร้าว 359 หลอด และหลังการปรับปรุงมีจำนวนของเสียที่เกิดรอยร้าวลดลงเหลือ 7 หลอด ทำให้ของเสียลดลงจากเดิมคิดเป็นร้อยละ 98.05 และเมื่อนำมาเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้น พบว่าจำนวนของเสียก่อนการปรับปรุง 359 หลอด คิดเป็นเงิน 502,600 บาท ซึ่งต้นทุนต่อชิ้น ชิ้นละ 1,400 บาท และหลังการปรับปรุง ลดลงเหลือ 7 ชิ้น คิดเป็นเงิน 9,800 บาท ดังนั้นสามารถลดค่าใช้จ่ายลง 492,800 บาท แสดงดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 ผลการเปรียบเทียบจำนวนของเสียจากสาเหตุรอยร้าวก่อนและหลังการปรับปรุง

4. สรุปผล

จากการศึกษากระบวนการทดสอบหาปริมาณไนโตรเจน และโปรตีนหยาบในห้องปฏิบัติการโรงงานกรณีศึกษา โดยพบว่าก่อนการปรับปรุงมีจำนวนของเสียประเภทรอยร้าวของหลอดทดลองที่ใช้ในการทดสอบมีปริมาณ 359 หลอด หลังจากนั้นนำหลักการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ (2^k Full Factorial Design) มาประยุกต์ใช้ในการปรับปรุง โดยพบว่าปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อการเกิดรอยร้าวของหลดทดลองในห้องปฏิบัติการจากการทดสอบหาปริมาณไนโตรเจน และโปรตีน ที่ระดับความเชื่อมั่นทางสถิติ 95% ได้แก่ (1) อุณภูมิ (องศาเซลเซียล) (2) เวลาการเผา และ (3) เวลาปรับสภาพความเย็น จากนั้นทำการกำหนดระดับของปัจจัยในกระบวนการทดสอบจริง คือ อุณภูมิ 400 องศาเซลเซียล เวลาการเผา 120 นาที และเวลาปรับสภาพความเย็น 50 นาที ส่งผลให้ปริมาณรอยร้าวที่เกิดขึ้นของหลอดทดลองก่อนการปรับปรุงมีจำนวน 359 หลอด หลังการปรับปรุงลดลงเหลือ 7 หลอด ชิ้น คิดเป็นร้อยละ 98.05

5. ข้อเสนอแนะ

1. นำสถิติทางวิศวกรรมมาประยุกต์ในการออกแบบการทดลองให้เหมาะสมเพื่อให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความสอดคล้องกับปัญหาที่เกิดขึ้น

2. นำหลอดกลั่นไนโตรเจนชนิดอื่นมาทำการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบว่ามีการเกิดรอยร้าวหรือไม่ เพื่อเป็นแนวทางการเลือกใช้และการลดค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากการทดสอบ

3. เพิ่มระดับของปัจจัย (ค่ากลาง) ในการทดสอบเพื่อจะได้ผลการทดลองที่มีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้น

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Y. Cheewaworanontree, P. Rontlaong, K. Thongsin and T. Teekasap, Reducing waste in the clutch assembly pumping process case study: Automotive air compressor factory, The Journal of Industrial Technology, Suan Sunandha Rajabhat University, 2023, 11(2), 27-38. (in Thai)

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.011

[2] T. Thepchu, S. Rakkran, P. Sriwichian and J. Plongmai, Defect reduction in process for shampoo a design of engineering, Journal of Science and Technology, Sukhothai Thammathirat Open University, 2022, 2(1), 47-55. (in Thai)

[3] T. Sunarak, Defect reduction in the welding process of motocycle STAY R-L Parts, The Journal of Industrial Technology, Suan Sunandha Rajabhat University, 2018, 6(1), 6-15. (in Thai)

[4] S. Suwanauksorn and C. Pornsing, A Study of factors for chemical cost reduction in the brake pad manufacturing process, The Journal of Industrial Technology, 2021,17(1), 31-52. (in Thai)

[5] Y. Jantana and N. Rattanawai, Optimizing factors for lemongrass slicer using design of experiment, Science and Technology Nakhon Sawan Rajabhat University Journal, 2022, 14(19), 83-95. (in Thai)

[6] K. Noirach and P. Chutima, Defective reduction from welding splash in motorcycle battery production process, Research and Development Journal, 2014, 25(3), 55-61. (in Thai)

[7] P. Siri-O-Ran and J. Pummak, Weight loss reduction in pineapple pie production process, Thai Industrial Engineering Network Journal, 2022, 6(1), 48-53. (in Thai)

[8] D.C. Montgomery, Introduction to statistical quality control, 4th Edition, John Wiley and Sons, Inc., NJ, USA, 2002.

[9] B. Sao-siw and N. Sokul, Reducing defects in packaging by applying experimental results: A case study of a snack company, Industrial Technology Lampang Rajabhat University Journal, 2016, 9(2), 30-44. (in Thai)

[10] H. Su, H.M. Yao, H. Zeng, The optimization research of the multi-response problems based on the SUR. Pakistan Journal of Pharmaceutical Sciences, 2015, 28(2 Supplement), 731-737.

[11] A. Leenatham and P. Khemavuk, Process improvement of PTCA guide wire by using design of experiment, Srinakharinwirot University Engineering Journal, 2019, 14(2), 12-24. (in Thai)

[12] P. Parakawong Na Ayuthaya, A design of experiment to waste reduction injection process of electronic parts, Thesis, Silpakorn University, Thailand, 2018. (in Thai)

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.012

บทความวิจัย

ประเภทเส้นใยพลาสติกต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นส่วนขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

ธเนศ รัตนวิไล* พรนภา นุตบุตร อาริษา พรหมใหม่ และ นพณัฐ จาตุรนต์ลักษณ์

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: thanate.r@psu.ac.th

วันที่รับบทความ: 28 มกราคม 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 4 กรกฎาคม 2568; วันที่ตอบรับบทความ: 21 กรกฎาคม 2568
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 20 สิงหาคม 2568

บทคัดย่อ: กระบวนการผลิตชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง การขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติเป็นหนึ่งในกระบวนการผลิตที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในปัจจุบัน งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ ได้แก่ ประเภทของพลาสติก ABS, PLA และ PETG ความเร็วในการพิมพ์ ความหนาแน่นของการเติมชิ้นงาน ความหนาของผนังชิ้นงาน และความสูงของแต่ละชั้น ผลการทดสอบและเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ พบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบ ได้แก่ ประเภทของพลาสติก ความหนาของผนังชิ้นงาน ความสูงของแต่ละชั้น ความเร็วในการพิมพ์ และความหนาแน่นของการเติมชิ้นงาน ตามลำดับ โดยปัจจัยทั้งหมดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นส่งผลต่อค่าความแข็งแรงที่เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลแสดงปัจจัยในการพิมพ์ที่ให้ความแข็งแรงแก่ชิ้นงานมากที่สุดในพลาสติกทุกกลุ่มที่มีความหนาของผนังจำนวน 3 ชั้น ความเร็วในการพิมพ์ 30 มิลลิเมตรต่อวินาที ที่มีความหนาแน่นของการเติมชิ้นงาน 20% และความสูงแต่ละชั้นที่ 0.3 มิลลิเมตร ขณะที่พลาสติกที่ให้ความแข็งแรงมากที่สุดในงานวิจัยนี้ คือ PLA ซึ่งมีความแข็งแรงอัด แรงดึง และแรงดัดที่ 25.29, 20.84 และ 63.44 MPa ตามลำดับ

คำสำคัญ: เส้นพลาสติก; เครื่องพิมพ์ 3 มิติ; พารามิเตอร์กระบวนการพิมพ์; สมบัติเชิงกล; การวิเคราะห์เชิงสถิติ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.012

บทความวิจัย

Effect of Plastic Filament Type on Mechanical Properties of 3D-printed Parts

Thanate Ratanawilai*, Pornnapa Nuttabut, Arisa Prommai, and Noppanat Jaturonlux

Department of Industrial and Manufacturing Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University

* Corresponding author, E-mail: thanate.r@psu.ac.th

Received: 28 January 2025; Revised 4 July 2025; Accepted: 21 July 2025
Online Published: 20 August 2025

Abstract: The manufacturing process has been continuously improved in the industry. The 3D-printer has become one of the most widely used new techniques for manufacturing. This study aims to investigate how the mechanical characteristics of the test samples are affected by the 3D-printing parameters. Types of plastic (ABS, PLA, PETG), printing speed, infill density, shell thickness, and layer height are all printing parameters. In the test findings, the mechanical characteristics of samples made using 3D-printers are compared. It was found that the printing parameters, which are plastic type, shell thickness, layer height, printing speed, and Infill density, respectively had a significant effect on the mechanical properties. The mechanical strength increases when the printing parameters are increased. Furthermore, the findings indicate that the shell thickness 3 layers, printing speed 30 mm/s, Infill density 20%, and layer height 0.3 mm are the printing parameters that provide the best mechanical qualities for all kinds of plastics. PLA is the plastic that exhibits the best mechanical qualities in this study which the compressive, tensile, and bending strengths are 25.29, 20.84, and 63.44 MPa, respectively.

Keywords: Plastics filament; 3D-printer; Printing process parameters; Mechanical properties; Statistical analysis

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.012

บทความวิจัย

1. บทนำ

พลาสติกเป็นวัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่พบเห็นได้ทั่วไปในชีวิตประจำวัน นับว่ามีความสำคัญอย่างมากในการผลิตสินค้าต่าง ๆ โดยกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์จากพลาสติก สามารถทำได้หลากหลายวิธีตามลักษณะของชิ้นงาน เช่น การอัดร้อนขึ้นรูป การอัดรีดขึ้นรูปชิ้นงาน หรือการอัดฉีดขึ้นรูปชิ้นงาน [1,2] อย่างไรก็ตาม กระบวนการผลิตเหล่านี้ยังมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น เครื่องจักรและอุปกรณ์ที่มีราคาแพง และค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการผลิตมีราคาสูง การเปลี่ยนแปลงรูปแบบผลิตภัณฑ์จะส่งผลให้ต้นทุนการผลิตเพิ่มสูงขึ้นทั้งในส่วนของเครื่องจักร เครื่องมือ หรือแรงงาน ปัจจุบันกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์จากพลาสติกได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยหนึ่งในกระบวนการผลิตที่ได้รับความนิยมมากในปัจจุบัน คือ การผลิตแบบเพิ่มเนื้อ (Additive Manufacturing)

เครื่องพิมพ์สามมิติ (3D-printer) เป็นหนึ่งในเครื่องจักรที่มีการใช้เทคนิคกระบวนการผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุ โดยทำการฉีดเนื้อพลาสติกเป็นลำดับชั้นซ้อนทับกันจนออกมาเป็นชิ้นงานตามรูปแบบที่ได้ออกแบบไว้ โดยอาศัยการควบคุมการผลิตผ่านระบบแบบดิจิตอล [3] สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ในหลากหลายอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ ชิ้นส่วนวัสดุการบิน อวกาศ ชิ้นส่วนวัสดุอิเล็กทรอนิกส์และอุตสาหกรรมอื่น ๆ [4,5] เป็นต้น ชิ้นงานที่ผลิตจากเครื่องพิมพ์สามมิติเหมาะกับการสร้างชิ้นงานต้นแบบก่อนทำการผลิตจริง เนื่องจากมีขั้นตอนการผลิตที่ไม่ซับซ้อน ต้นทุนต่ำ สามารถเพิ่มความซับซ้อนของโครงสร้างให้ได้ชิ้นงานที่เหมาะกับการใช้งาน และสามารถเปลี่ยนแปลงรูปแบบได้ง่าย วัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปอาจแตกต่างกัน เช่น พลาสติก ผงฝุ่นหรือซีเมนต์ โดยยังคงใช้หลักการขึ้นรูปชิ้นงาน 3 มิติที่อาศัยหลักการสร้างชิ้นงานเป็นชั้น ๆ เช่นเดียวกัน [6]

ระบบการทำงานของเครื่องพิมพ์สามมิติมีหลายระบบแต่ที่พบแพร่หลายได้แก่ ระบบ Fused Deposition Modeling (FDM) หรือ Fused Filament Fabrication (FFF) [7] เครื่องพิมพ์สามมิติระบบ FFF เป็นเครื่องจักรที่ผลิตชิ้นงานจากวัสดุเส้นพลาสติก (Filament) ซึ่งมีหลากหลายประเภท ทั้งที่มีความแข็งแรงสูง เหนี่ยวนำไฟฟ้าได้ หรืออาจยืดหยุ่นเหมือนยาง ขึ้นกับความต้องการของผู้ใช้งาน เส้นพลาสติกที่มีการนำมาใช้งานกับเครื่องพิมพ์สามมิติระบบ FFF มากที่สุดมี 3 ประเภท ได้แก่ พลาสติกอะคริโลไนไตรล์บิวทาไดอีนสไตรีน (Acrylonitrile Butadiene Styrene; ABS) พลาสติกพอลิแลคติคแอซิด (Polylactic Acid; PLA) และพลาสติกพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตไกลคอล (Polyethylene Terephthalate glycol; PETG) นอกจากพลาสติกทั้ง 3 ชนิดแล้ว เครื่องพิมพ์สามมิติระบบ FFF ยังสามารถใช้งานกับพลาสติกกลุ่มเทอร์โมพลาสติก เช่น พอลิเอเธอร์อีเธอร์คีโตน (Polyether Ether ketone; PEEK) พอลิโพรไพลีน (Polypropylene; PP) เป็นต้น [8,9]

นอกจากประเภทของพลาสติกที่เป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อสมบัติของชิ้นงานแล้ว ปัจจัยการผลิต เช่น ความเร็วในการพิมพ์ชิ้นงาน (Printing Speed) ความหนาของผนังชิ้นงาน (Shell Thickness) ความหนาแน่นของการเติมชิ้นงาน (Infill Density) หรือความสูงของแต่ละชั้น (Layer Height) ก็เป็นอีกส่วนสำคัญที่ส่งผลต่อสมบัติ และคุณภาพของชิ้นงาน เช่น ความหนาของชั้นที่ 0.2 มิลลิเมตรและและทิศทาง การพิมพ์ตามแนวแรง

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.012

มีส่วนช่วยให้ความแข็งแรงดึงที่เพิ่มมากขึ้น [10] เช่นเดียวกันกับการเพิ่มปริมาณความหนาแน่นของการเติมชิ้นงาน มีส่วนช่วยให้ชิ้นงานรับแรงดึงได้ดีมากยิ่งขึ้น และลักษณะโครงสร้างภายในมีความสามารถรับแรงดึงได้ใกล้เคียงกัน [11] ทั้งในด้านของวัสดุผสมที่มีการเพิ่มเส้นใยเสริมแรง ปัจจัยด้านความเร็วในการพิมพ์ชิ้นงานยังคงส่งผลเช่นเดียวกัน กับวัสดุพลาสติก [12] นอกจากปัจจัยการพิมพ์ที่ส่งผลต่อสมบัติวัสดุ ปัจจัยการพิมพ์ยังคงส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงาน เช่น ความสูงของแต่ละชั้นช่วยให้ผนังชิ้นงานมีความเรียบมากยิ่งขึ้น (Surface and Roughness) การเปลี่ยนขนาดหัวฉีด (Nozzle) ให้เล็กลงสามารถเพิ่มความซับซ้อนโครงสร้างทั้งภายในและภายนอกของชิ้นงานได้ [13]

จากการทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมาพบว่างานวิจัยส่วนใหญ่เป็นการศึกษาปัจจัยเดี่ยวของการพิมพ์ขึ้นรูปที่ส่งผลต่อการผลิตชิ้นงาน แต่ยังขาดการศึกษาปัจจัยร่วม (Two-way Interaction) ที่มีผลกระทบต่อสมบัติของชิ้นงาน ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักในการศึกษาปัจจัยการพิมพ์ชิ้นงานด้วยการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2 ระดับ (2^K) ผ่านการวิเคราะห์ข้อมูลด้านความสัมพันธ์เชิงเส้นและปฏิสัมพันธ์สองทางที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน โดยมีปัจจัยในการศึกษา ได้แก่ ความเร็วในการพิมพ์ชิ้นงาน (30, 90 มิลลิเมตรต่อวินาที) ความหนาของผนังชิ้นงาน (1, 3 ชั้น) ความหนาแน่นของการเติมชิ้นงาน (10, 20 %) และความสูงของแต่ละชั้น (0.1, 0.3 มิลลิเมตร) นอกจากนี้ยังเลือกใช้วัสดุสำหรับการพิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงานที่แตกต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ เส้นพลาสติก (Filament) ABS, PLA และ PETG โดยใช้การทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นงานในการเปรียบเทียบชิ้นงาน ได้แก่ การทดสอบแรงอัด การทดสอบแรงดึงและการทดสอบแรงดัดในการวัดผล โดยผลการศึกษาทั้ง 5 ปัจจัย จะเป็นแนวทางที่จะสามารถระบุปัจจัยหลักของการพิมพ์ที่มีต่อสมบัติของชิ้นงานได้อย่างชัดเจนและเหมาะสมได้มากยิ่งขึ้น

2. วิธีดำเนินงานวิจัย

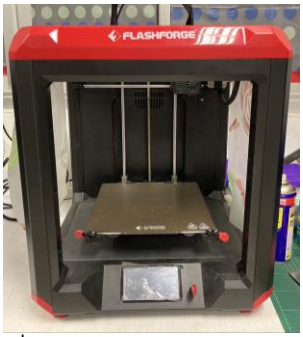
ในการศึกษาการขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติได้พิจารณาเลือกปัจจัยในการพิมพ์ชิ้นงานด้วยพลาสติก 3 ชนิด ได้แก่ ABS PLA และ PETG ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.75 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 1 จัดซื้อจากบริษัทฟาสต์โทเนอร์ จำกัด (กรุงเทพมหานคร) ทำการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2 ระดับ (2^K) โดยมีชุดปัจจัยการพิมพ์ชิ้นงาน 4 ปัจจัย ได้แก่ ความหนาของผนังชิ้นงาน ความเร็วในการพิมพ์ชิ้นงาน ความหนาแน่นของการเติมชิ้นงาน และความสูงของแต่ละชั้น แต่ละปัจจัยมี 3 ระดับดังแสดงในตารางที่ 1 โดยออกแบบการทดลองแต่ละชุดปัจจัยการพิมพ์ชิ้นงานดังตารางที่ 2 เพื่อขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ รุ่น FLASHFORGE FINDER 3.0 (รูปที่ 2) มีปัจจัยควบคุมการตั้งค่าเครื่องพิมพ์นอกเหนือจากปัจจัยที่ได้ศึกษา ได้แก่ หัวฉีดขนาด 0.4 มิลลิเมตร อุณหภูมิหัวฉีด 245, 195 และ 225 องศาเซลเซียส อุณหภูมิฐานรอง 110, 60 และ 80 องศาเซลเซียส สำหรับพลาสติก ABS PLA และ PETG ตามลำดับ ทำการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานและทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Instron universal testing machine 5582) ได้แก่ ความแข็งแรงอัด ความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงดัด

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.012

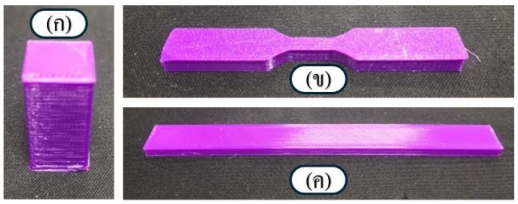
ตารางที่ 1 ปัจจัยและระดับที่ใช้ในการทดลอง

Factors	Level		
	Low	Medium	High
Printing speed (mm/s)	30	60	90
Shell thickness (line)	1	2	3
Infill density (%)	10	15	20
Layer height (mm)	0.1	0.2	0.3

รูปที่ 1 พลาสติก (Filament) 3 ประเภท



รูปที่ 2 เครื่องพิมพ์สามมิติ รุ่น FLASHFORGE FINDER 3.0



รูปที่ 3 ชิ้นงานทดสอบแรง (ก) อัด (ข) ดึง (ค) ดัด

ตารางที่ 2 การทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2 ระดับ (2^k)

Formulation	Shell Thickness	Printing Speed	Infill Density	Layer Height
Setting 1	1	30	10	0.1
Setting 2	1	30	10	0.3
Setting 3	1	30	20	0.1
Setting 4	1	30	20	0.3
Setting 5	1	90	10	0.1
Setting 6	1	90	10	0.3
Setting 7	1	90	20	0.1
Setting 8	1	90	20	0.3
Setting 9	2	60	15	0.2
Setting 10	3	30	10	0.1
Setting 11	3	30	10	0.3
Setting 12	3	30	20	0.1
Setting 13	3	30	20	0.3
Setting 14	3	90	10	0.1
Setting 15	3	90	10	0.3
Setting 16	3	90	20	0.1
Setting 17	3	90	20	0.3

โดยทำการทดสอบ 3 ซ้ำในแต่ละการทดสอบตามมาตราฐานการทดสอบความแข็งแรงอัด ASTM D695-15 ด้วยชิ้นงานปริซึมขนาด 12.7×25.4×12.7 มิลลิเมตร (กว้าง×ยาว×สูง) ดังแสดงในรูปที่ 3(ก) ใช้ความเร็วในการอัด 5 มิลลิเมตรต่อนาที [14] การทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638 ด้วยชิ้นงานประเภท Type V ขนาด 9.53×63.5×4 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3(ข) ใช้ความเร็วในการดึง 5 มิลลิเมตรต่อนาที [15] และการทดสอบแรงดัดงอแบบ 3 จุด ตามมาตรฐาน ASTM D790 โดยมีชิ้นงานขนาด 12.7×12.7×4 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3(ค) ทำการกดอัดด้วยความเร็ว 10 มิลลิเมตรต่อนาที [16]

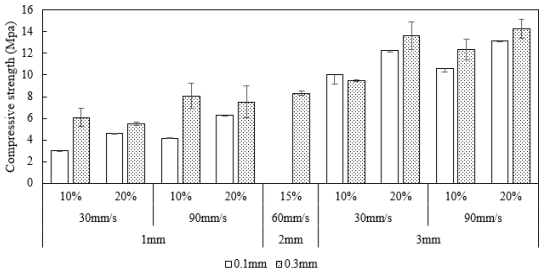
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.012

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

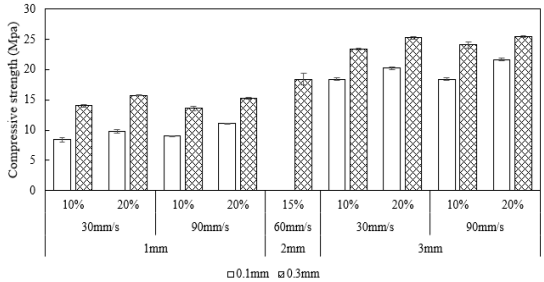
3.1 ผลการทดสอบความแข็งแรงอัด

ผลการทดสอบความแข็งแรงอัดของชิ้นทดสอบจากพลาสติก ABS PLA และ PETG ที่มีการตั้งค่าปัจจัยการพิมพ์ชิ้นงานทั้ง 17 ชุด ดังแสดงในรูปที่ 4-6 และตารางที่ 3-4 พบว่าความแข็งแรงอัดของพลาสติก ABS อยู่ในช่วง 2.99-14.24 MPa พลาสติก PLA อยู่ในช่วง 8.40-25.51 MPa และพลาสติก PETG อยู่ในช่วง 3.34-14.65 MPa โดยที่พลาสติก PLA ให้ค่าความแข็งแรงอัดสูงสุดในบรรดาพลาสติกทั้งสามชนิดที่ใช้ในการทดสอบ ผลการทดสอบของค่าความแข็งแรงอัดทำให้เห็นแนวโน้มจากปัจจัยในการพิมพ์ชิ้นงาน โดยค่าเฉลี่ยความแข็งแรงอัดแสดงให้เห็นจำนวนความหนาของผนังชิ้นงานเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงอัดเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากปริมาณของเนื้อวัสดุที่ผิวชิ้นงานที่สัมผัสต่อแรงที่กระทำต่อชิ้นงานเพิ่มมากขึ้นทำให้เนื้อวัสดุมีเนื้อชิ้นงานและปริมาณในการรับแรงเพิ่มมากยิ่งขึ้น

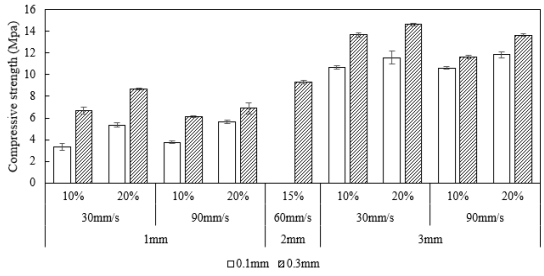
ในด้านปัจจัยความหนาแน่นของการเติมชิ้นงาน จะพบว่าเมื่อความหนาแน่นที่ค่า 10% มีค่าความแข็งแรงอัดที่น้อยกว่าความหนาแน่นที่ 20% เนื่องจากปริมาณความหนาแน่นของการเติมชิ้นงาน ที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลทำให้ชิ้นงานมีปริมาณเนื้อด้านในมากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลที่ทำให้ความหนาแน่นของการเติมชิ้นงานที่ 20% รับแรงอัดที่มากระทำต่อชิ้นงานได้ดีมากขึ้น ผลดังกล่าวมีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาซึ่งพบว่า การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของการเติมชิ้นงาน ส่งผลให้ค่าสมบัติแรงอัดของชิ้นงานทดสอบเพิ่มสูงขึ้น [14] ในขณะที่ปัจจัยความสูงของแต่ละชั้น ให้ผลการทดสอบไปในทิศทางตรงกันข้าม เมื่อค่าความสูงของแต่ละชั้นเพิ่มขึ้นค่าความแข็งแรงอัดเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากพฤติกรรมของวัสดุที่มีโครงสร้างแซนวิช โดยสามารถสังเกตุจากรอยแตกหักของชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 7 พบว่ามีการแตกหักแบบชั้นแยกออกจากกัน (Delamination Failure) เนื่องจากระยะห่างระหว่างชั้นที่ระยะ 0.3 มิลลิเมตร ส่งผลให้ระหว่างชั้นของชิ้นงานเชื่อมติดกันได้ไม่ดี ขณะที่ระยะห่าง 0.1 มิลลิเมตรช่วยให้



รูปที่ 4 ค่าความแข็งแรงอัดของพลาสติก ABS



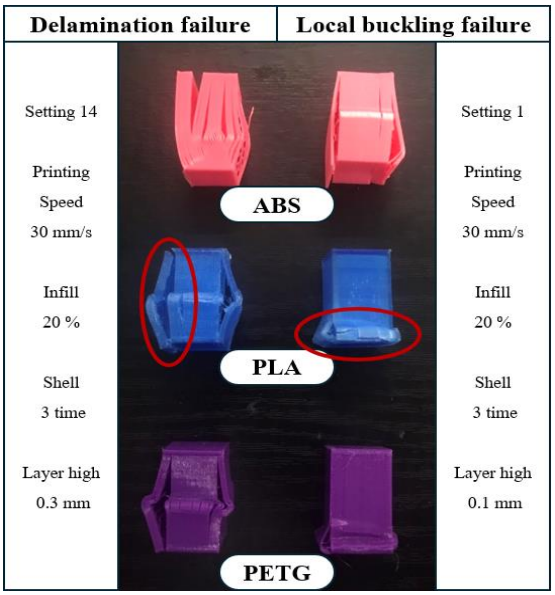
รูปที่ 5 ค่าความแข็งแรงอัดของพลาสติก PLA



รูปที่ 6 ค่าความแข็งแรงอัดของพลาสติก PETG

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.012

ระหว่างชั้นของชิ้นงานเชื่อมติดกันได้ดีจนเกือบเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) แต่เนื่องจากภายในชิ้นงานมีปริมาณความหนาแน่นภายในน้อย ทำให้เกิดการแตกหักแบบโก่งเดาะเฉพาะแห่ง (Local Buckling) ผนังไม่สามารถรับแรงได้อย่างเต็มที่ ด้วยสาเหตุนี้เลยทำให้ค่าความสูงของแต่ละชั้นที่ 0.3 มิลลิเมตรรับแรงอัดได้มากกว่าค่าความสูงชั้นที่ 0.1 มิลลิเมตร ในขณะที่ปัจจัยความเร็วในการพิมพ์ชิ้นงานให้ค่าแนวโน้มที่ไม่ชัดเจนมากนัก โดยแนวโน้มที่เกิดขึ้นกับพลาสติก ABS ให้แนวโน้มเช่นเดียวกันกับพลาสติก PLA และ PETG ที่พบว่าเมื่อค่าความเร็วในการพิมพ์ชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงจะส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงอัดเพียงเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 5 และ 6



รูปที่ 7 ลักษณะการแตกหักของชิ้นงานจากแรงอัด

เมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติของค่าความแข็งแรงอัด พบว่าปัจจัยในการพิมพ์ชิ้นงาน ความหนาของผนังชิ้นงาน (A) ความเร็วในการพิมพ์ชิ้นงาน (B) ความหนาแน่นของการเติมชิ้นงาน (C) และความสูงของแต่ละชั้น (D) มีผลต่อค่าความแข็งแรงอัดอย่างมีนัยสำคัญ (P-value < 0.05) ดังแสดงในตารางที่ 3 และ 4

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงอัด

Formulation	Compressive strength (MPa)		
	ABS	PLA	PETG
Setting 1	2.99^{I}	8.40^{J}	3.34^{H}
Setting 2	$6.08FG^{H}$	14.06^{G}	6.69^{F}
Setting 3	4.57^{HI}	9.79^{I}	5.36^{G}
Setting 4	$5.47G^{H}$	15.75^{F}	8.64^{E}
Setting 5	4.12^{HI}	9.02^{IJ}	3.74^{H}
Setting 6	8.05^{DEF}	13.61^{G}	6.14^{FG}
Setting 7	6.30^{FGH}	11.08^{H}	5.62^{G}
Setting 8	7.52^{EFG}	15.24^{F}	6.90^{F}
Setting 9	8.29^{CDEF}	18.42^{E}	9.33^{E}
Setting 10	10.04^{BCD}	18.42^{E}	10.68^{D}
Setting 11	9.50^{CDE}	23.43^{B}	13.67^{B}
Setting 12	12.24^{AB}	20.22^{D}	11.58^{C}
Setting 13	13.62^{A}	25.29^{A}	14.65^{A}
Setting 14	10.60^{BC}	18.41^{E}	10.62^{D}
Setting 15	12.34^{AB}	24.07^{B}	11.60^{C}
Setting 16	13.11^{A}	21.68^{C}	11.85^{C}
Setting 17	14.24^{A}	25.51^{A}	13.667^{B}

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.012

ตารางที่ 4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (ANOVA) ของค่าสมบัติทางกลของชิ้นทดสอบ

Source	DF	Compressive strength				Tensile strength				Flexural strength			
		Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	10	1550.35	155.04	543.91	0.000	509.41	50.94	69.0	0.000	4411.13	441.11	35.35	0.000
Linear	4	1545.98	386.49	1355.93	0.000	498.94	124.73	169.0	0.000	4315.18	1078.79	86.44	0.000
A	1	1202.05	1202.05	4217.12	0.000	304.19	304.19	412.2	0.000	687.43	687.43	55.08	0.000
B	1	1.98	1.98	6.95	0.012	20.01	20.01	27.1	0.000	0.01	0.01	0.00	0.978
C	1	42.98	42.98	150.79	0.000	1.28	1.28	1.7	0.195	129.92	129.92	10.41	0.003
D	1	298.96	298.96	1048.84	0.000	173.44	173.44	235.0	0.000	3497.81	3497.81	280.28	0.000
2-Way Interactions	6	4.38	0.73	2.56	0.036	10.47	1.746	2.3	0.049	95.95	15.99	1.28	0.290
AB	1	0.34	0.34	1.18	0.284	4.81	4.81	6.5	0.015	1.14	1.14	0.09	0.764
AC	1	0.49	0.49	1.71	0.199	0.19	0.19	0.2	0.609	0.76	0.76	0.06	0.806
AD	1	0.12	0.12	0.41	0.523	0.35	0.35	0.4	0.491	6.83	6.83	0.55	0.464
BC	1	0.51	0.51	1.78	0.191	0.18	0.18	0.2	0.622	24.35	24.35	1.95	0.171
BD	1	2.25	2.25	7.89	0.008	4.31	4.31	5.8	0.021	58.41	58.41	4.68	0.037
CD	1	0.68	0.68	2.38	0.132	0.61	0.61	0.8	0.366	4.45	4.45	0.36	0.554
Error	37	10.55	0.29			27.30	0.73			461.75	12.48		
Lack-of-Fit	5	3.04	0.61	2.59	0.045	5.16	1.03	1.4	0.219	119.01	23.80	2.22	0.076
Pure Error	32	7.51	0.23			22.13	0.69			342.74	10.71		
Total	47	1560.90				536.71				4872.88			

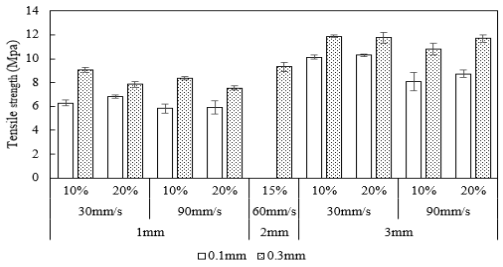
*A คือความหนาของผนังชิ้นงาน B คือความเร็วในการพิมพ์ชิ้นงาน C คือความหนาแน่นของการเติมชิ้นงาน และ D คือความสูงแต่ละชั้น

นอกจากนี้ยังพบว่าอิทธิพลร่วมระหว่างความเร็วในการพิมพ์และความสูงของแต่ละชั้น (BD) มีผลต่อค่าความแข็งแรงอัดอย่างมีนัยสำคัญด้วยเช่นกัน ส่วนอิทธิพลร่วมของปัจจัยอื่นๆ ไม่ส่งผลค่าความแข็งแรงอัดอย่างมีนัยสำคัญ จึงสรุปได้ว่าความเร็วในการพิมพ์และความสูงของแต่ละชั้นเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงอัดของชิ้นงาน เมื่อทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (ANOVA) โดยการแบ่งกลุ่มด้วยวิธี Fisher LSD Method ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่าการตั้งค่าปัจจัยการพิมพ์ชิ้นงานของพลาสติกทั้ง 3 ชนิดที่ให้ค่าความแข็งแรงอัดดีที่สุด คือ ปัจจัยการตั้งค่าชุดที่ 13 (Setting 13) โดยมีความหนาของผนังจำนวน 3 ชั้น ความเร็วในการพิมพ์ 30 มิลลิเมตรต่อวินาที ที่ความหนาแน่นของการเติมชิ้นงาน 20% และความสูงของแต่ละชั้นที่ 0.3 มิลลิเมตร โดยการตั้งค่าปัจจัยการพิมพ์ดังกล่าวจัดอยู่ในกลุ่มเอ (^{A}) ซึ่งหมายถึงกลุ่มที่มีค่าความแข็งแรงสูงสุดและให้ค่าความแข็งแรงอัดสูงสุดอีกด้วย ขณะที่กลุ่มเอช (^{H}) ให้ค่าความแข็งแรงน้อยที่สุด จึงสามารถกล่าวได้ว่า การตั้งค่าปัจจัยการพิมพ์ชุดที่ 13 (Setting 13) มีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานมากที่สุด

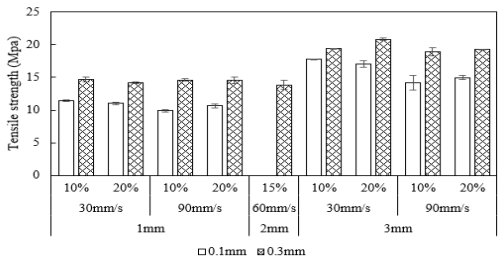
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.012

3.2 ผลการทดสอบความแข็งแรงดึง

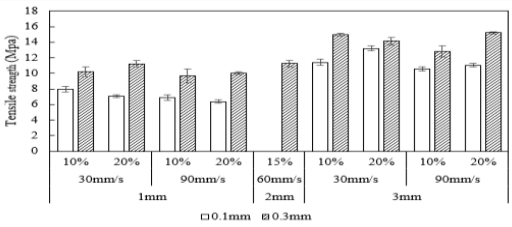
ผลการทดสอบผลการทดสอบความแข็งแรงดึงของชิ้นทดสอบจากพลาสติก ABS PLA และ PETG ดังแสดงในรูปที่ 8-10 และตารางที่ 4 และ 5 พบว่าค่าความแข็งแรงดึงของพลาสติก ABS อยู่ในช่วง 5.81-11.89 MPa พลาสติก PLA อยู่ในช่วง 9.91-20.84 MPa และพลาสติก PETG อยู่ในช่วง 6.38-15.23 MPa โดยพลาสติกกลุ่ม PLA ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงที่สุดในบรรดาพลาสติกทั้ง 3 ชนิดที่ใช้ในการทดสอบ



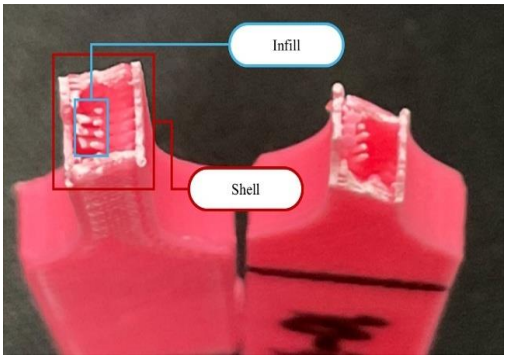
รูปที่ 8 ค่าความแข็งแรงดึงของพลาสติก ABS



รูปที่ 9 ค่าความแข็งแรงดึงของพลาสติก PLA



รูปที่ 10 ค่าความแข็งแรงดึงของพลาสติก PETG



รูปที่ 11 จุดแตกหักของชิ้นงานแรงดึง

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นแนวโน้มค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานทดสอบเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับค่าความแข็งแรงอัด เมื่อความหนาของผนังชิ้นงานมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งของแรงดึงเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ส่วนปัจจัยความสูงของแต่ละชั้นมีการเพิ่มขึ้นจาก 0.1 มิลลิเมตร เป็น 0.3 มิลลิเมตร พบว่าให้ค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นเช่นกัน ส่วนปัจจัยของความเร็วในการพิมพ์ชิ้นงานและความหนาแน่นของการเติมชิ้นงาน ไม่มีผลต่อค่าความแข็งแรงดึง ทั้งนี้เมื่อพิจารณาร่วมกับบริเวณที่เกิดความเสียหาย พบว่าบริเวณเกิดความเสียหายหลักจะเกิดขึ้นที่ผิวชิ้นงาน ขณะที่บริเวณเนื้อภายในชิ้นงาน เกิดการเสียหายที่น้อยกว่า โดยสามารถสังเกตุจากชิ้นงานหลังการทดสอบพบว่าจะเกิดรอยฉีกขาดบริเวณผนังภายนอกชิ้นงานมากกว่าบริเวณภายในเนื้อวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 11 เป็นผลจากการเคลื่อนที่หัวฉีดอย่างรวดเร็วส่งผลให้ระยะเวลาและปริมาณเนื้อวัสดุที่ฉีดออกจากหัวพิมพ์น้อย เป็นผลให้เนื้อวัสดุบริเวณผนังชิ้นงานซึ่งที่ทำหน้าที่ในการยึดเกาะระหว่างชั้นรับแรงได้น้อยลง เกิดการฉีกขาดและแตกหักได้ง่ายกว่าการเคลื่อนที่หัวฉีดช้าที่ทำให้มีปริมาณของวัสดุและมีระยะเวลาฉีดมากยิ่งขึ้น

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.012

นอกเหนือจากการวิเคราะห์แนวโน้มและลักษณะการแตกหักของชิ้นงาน การวิเคราะห์ผลทางสถิติ ดังแสดงในตารางที่ 4 พบว่าความหนาของผนังชิ้นงาน (A) ความเร็วในการพิมพ์ชิ้นงาน (B) และความสูงของแต่ละชั้น (D) ส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ (P-value < 0.05) ยกเว้นความหนาแน่นของการเติมชิ้นงาน (C) ที่ไม่ส่งผลกระทบจากผลการทดลองและการวิเคราะห์ทางสถิติเป็นข้อยืนยันปัจจัยการพิมพ์ชิ้นงานที่ส่งผลต่อความแข็งต่อแรงดึงได้แก่ ความหนาของผนังชิ้นงาน ความเร็วในการพิมพ์และความสูงของแต่ละชั้น ซึ่งผลการศึกษามีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่สรุปว่า ค่าความแข็งแรงดึงลดลงเมื่อความเร็วในพิมพ์ชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้น [16] ในด้านของปัจจัยปฏิสัมพันธ์สองทางพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญได้แก่ ความเร็วในการพิมพ์กับความหนาของผนังชิ้นงาน (AB) ที่ P-value = 0.015 และความเร็วในการพิมพ์กับความสูงของแต่ละชั้น (BD) ที่ P-value = 0.021 เป็นปัจจัยหลักเดียวกันที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงาน ได้แก่ ความเร็วในการพิมพ์ชิ้นงาน จึงสามารถสรุปได้ว่าความเร็วในการพิมพ์เป็นปัจจัยหลักที่มีผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงาน โดยมีปัจจัยความหนาของผนังชิ้นงานและความสูงของแต่ละชั้นเป็นอิทธิพลรอง เมื่อทำการแบ่งกลุ่มด้วย Fisher LSD Method ดังแสดงในตารางที่ 5 พบว่าการตั้งค่าปัจจัยการพิมพ์ชิ้นงานของพลาสติกทั้ง 3 ชนิดที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงที่สุด คือปัจจัยการตั้งค่าการพิมพ์ชุดที่ 13 (Setting 13) ซึ่งมีพลาสติก PLA และ ABS จัดอยู่ในกลุ่มเอ (^{A}) และพลาสติก PETG อยู่ในกลุ่มเอบี (^{AB})

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบความแข็งแรงดึงของพลาสติก ABS PLA และ PETG

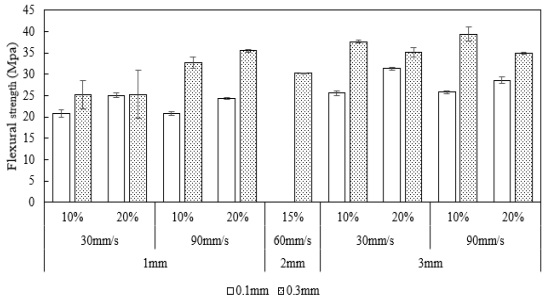
Formulation	Tensile strength (MPa)		
	ABS	PLA	PETG
Setting 1	6.29^{J}	11.48^{F}	7.97^{F}
Setting 2	9.08^{DEF}	14.66^{E}	10.23^{CDE}
Setting 3	6.83^{IJ}	11.04^{FG}	7.09^{FG}
Setting 4	7.85^{GHI}	15.19^{E}	11.23^{CD}
Setting 5	5.81^{J}	9.91^{G}	6.85^{FG}
Setting 6	8.34^{EFGH}	14.61^{E}	9.66^{E}
Setting 7	5.92^{J}	10.68^{FG}	6.38^{G}
Setting 8	7.54^{HI}	14.54^{E}	10.00^{DE}
Setting 9	9.31^{CDE}	13.86^{E}	11.26^{CD}
Setting 10	10.13^{BCD}	17.74^{CD}	11.41^{C}
Setting 11	11.88^{A}	19.42^{AB}	14.98^{A}
Setting 12	10.30^{BC}	17.04^{D}	13.21^{B}
Setting 13	11.77^{A}	20.84^{A}	14.15^{AB}
Setting 14	8.08^{FGH}	14.19^{E}	10.57^{CDE}
Setting 15	10.81^{AB}	18.93^{BC}	12.84^{B}
Setting 16	8.73^{EFG}	14.96^{E}	11.06^{CDE}
Setting 17	11.70^{A}	19.26^{B}	15.22^{A}

3.3 ผลการทดสอบแข็งแรงดัด

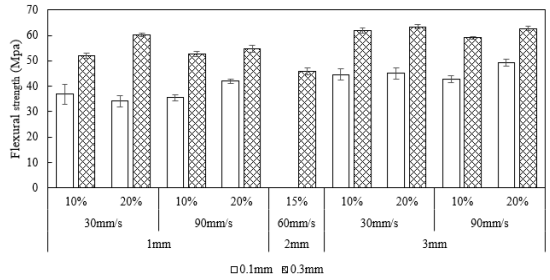
ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงดัดของชิ้นทดสอบจากพลาสติก ABS PLA และ PETG ดังแสดงในรูปที่ 12-14 และตารางที่ 4 และ 6 พบว่าค่าความแข็งแรงดัดของพลาสติก ABS อยู่ในช่วง 20.81-39.45 MPa พลาสติก PLA อยู่ในช่วง 34.13-63.44 MPa และพลาสติก PETG อยู่ในช่วง 21.23- 44.04 MPa โดยที่พลาสติกกลุ่ม PLA ให้ค่าความแข็งแรงดัดสูงที่สุดในบรรดาพลาสติก 3 ชนิดที่ใช้ในการทดสอบ ผลทดสอบค่าความแข็งแรงดัดมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับค่าความแข็งแรงดึง โดยพบว่าเมื่อความหนาของผนังชิ้นงานมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดัดเพิ่มมากขึ้นไปด้วย

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.012

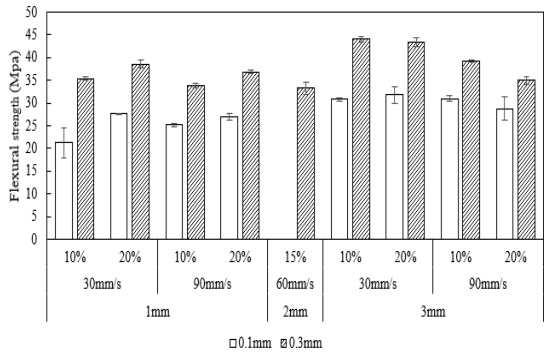
บทความวิจัย



รูปที่ 12 ค่าความแข็งแรงดัดของพลาสติก ABS



รูปที่ 13 ค่าความแข็งแรงดัดของพลาสติก PLA



รูปที่ 14 ค่าความแข็งแรงดัดของพลาสติก PETG

ด้านปัจจัยความสูงของแต่ละชั้น เมื่อเพิ่มสูงขึ้นจาก 0.1 มิลลิเมตร เป็น 0.3 มิลลิเมตร ส่งผลให้ค่าความแข็งของแรงดัดเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความเร็วในการพิมพ์ชิ้นงานและความหนาแน่นของการเติมชิ้นงาน ไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดัด ผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบความแข็งแรงดัดของพลาสติก ABS PETG และ PLA

Formulation	Flexural strength (MPa)		
	ABS	PETG	PLA
Setting 1	20.87^{H}	21.23^{K}	$36.88G^{H}$
Setting 2	25.14^{FGH}	35.39^{CDE}	52.09^{CD}
Setting 3	25.06^{FGH}	27.65^{HIJ}	34.13^{H}
Setting 4	25.32^{FGH}	38.59^{CD}	60.35^{A}
Setting 5	20.80^{H}	25.16^{JK}	35.47^{H}
Setting 6	32.78^{BCD}	33.80^{EFG}	52.6^{CD}
Setting 7	24.32^{GH}	27.05^{IJ}	41.99^{FG}
Setting 8	35.58^{ABC}	36.88^{CDE}	54.74^{BC}
Setting 9	30.28^{CDEF}	33.32^{EFG}	45.78^{EF}
Setting 10	25.57^{FGH}	30.83^{GHI}	44.62^{EF}
Setting 11	37.68^{AB}	44.03^{A}	61.88^{A}
Setting 12	31.38^{CDE}	31.8^{FGH}	45.02^{EF}
Setting 13	35.21^{ABC}	43.33^{AB}	63.44^{A}
Setting 14	25.84^{EFGH}	30.90^{GHI}	42.78^{F}
Setting 15	39.45^{A}	39.23^{BC}	59.03^{AB}
Setting 16	28.62^{DEFG}	28.73^{HIJ}	49.34^{DE}
Setting 17	34.90^{ABC}	34.94^{DEFG}	62.67^{A}

ความหนาของผนังชิ้นงาน (A) ความหนาแน่นของการเติมชิ้นงาน (C) และความสูงของแต่ละชั้น (D) มีผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงดัดอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในตารางที่ 6 ยกเว้นความเร็วในการพิมพ์ชิ้นงาน (B) ที่ส่งผลอย่างไม่มีนัยสำคัญต่อสมบัติชิ้นงาน สำหรับอิทธิพลร่วมระหว่างความเร็วในการพิมพ์และความสูงของแต่ละชั้น (BD) มีผลต่อค่าความแข็งแรงดัดอย่างมีนัยสำคัญ นอกเหนือจากนั้นอิทธิพลร่วมปัจจัยอื่นๆ ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดัดอย่างไม่มีนัยสำคัญ จึงสรุปได้ว่าปัจจัยความสูงของแต่ละชั้นในการพิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงานเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงดัด เมื่อพิจารณาร่วมกับบริเวณจุดแตกหักของชิ้นงานซึ่ง

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.012

เกิดขึ้นบริเวณฐานของชิ้นทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 15 จะเห็นได้ว่าบริเวณภายในได้รับความเค้นน้อย ขณะที่บริเวณของฐานชิ้นงานเป็นจุดที่รับความเค้นมากที่สุด จากรอยฉีดขาดสีขาว จากผลการศึกษาปัจจัยร่วมสรุปได้ว่า ความสูงของแต่ละชั้นที่เพิ่มมากขึ้นของฐานชิ้นงานอันเป็นผลจากปัจจัยการพิมพ์ด้านความสูงของแต่ละชั้น มีผลกระทบมากกว่าค่าความแข็งแรงดัดของชิ้นงานที่ได้รับจากเครื่องพิมพ์สามมิติ

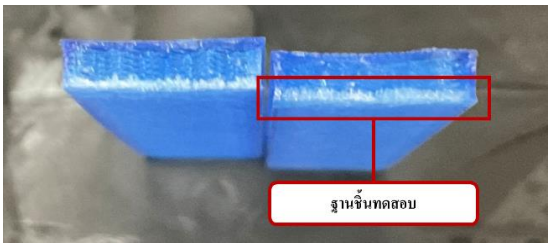
เมื่อทำการแบ่งกลุ่มข้อมูลด้วย Fisher LSD Method ดังแสดงในตารางที่ 4 พบว่าการตั้งค่าปัจจัยการพิมพ์ชิ้นงานของพลาสติกทั้ง 3 ชนิด ให้ค่าความแข็งแรงดัดเหมาะสมที่สุดจากการตั้งค่าปัจจัยที่ 11 (Setting 11) ซึ่งมีค่าความหนาของผนังจำนวน 3 ชั้น ความเร็วในการพิมพ์ 30 มิลลิเมตรต่อวินาที ที่ความหนาแน่นของการเติมชิ้นงาน 10% และ ความสูงของแต่ละชั้น ที่ 0.3 ซึ่งมีพลาสติก PLA และ PETG ถูกจะอยู่ในกลุ่มเอ (^{A}) และพลาสติก ABS ในกลุ่มเอบี (^{AB})

4. บทสรุป

ผลการศึกษาปัจจัยในการพิมพ์ชิ้นงานพลาสติก PLA, PETG และ ABS ด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติระบบ FFF พบว่า

1. สมบัติความแข็งแรงอัดของชิ้นงานได้รับอิทธิพลจากปัจจัยการพิมพ์ทุกปัจจัยอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีปัจจัยหลักคือความเร็วในการพิมพ์ชิ้นงานและความสูงของแต่ละชั้นเกิดปฏิสัมพันธ์สองทางอย่างมีนัยสำคัญ

2. ความหนาของผนังชิ้นงาน ความเร็วในการพิมพ์และความสูงของแต่ละชั้น มีผลต่อสมบัติความแข็งแรงดึงโดยมีความเร็วในการพิมพ์เป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อสมบัติความแข็งแรงดึง และมีปัจจัยความหนาของผนังชิ้นงานและความสูงของแต่ละชั้นมีอิทธิพลรอง



รูปที่ 15 จุดแตกหักของชิ้นงานแรงดัด

เนื่องจากชิ้นงานมีการรับแรงดึงมากที่สุดบริเวณผนังชิ้นงาน

3. ความหนาแน่นของการเติมชิ้นงาน และความสูงของแต่ละชั้น มีผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงดัด โดยมีปัจจัยความสูงของแต่ละชั้นเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงดัดของชิ้นงาน เป็นผลให้เกิดปฏิสัมพันธ์สองทางระหว่างความเร็วในการพิมพ์และความสูงของแต่ละชั้นอย่างมีนัยสำคัญ การแตกหักของชิ้นงานแสดงให้เห็นจุดรับแรงดัดมากที่สุดที่บริเวณฐานของชิ้นงาน

4. ความสูงของแต่ละชั้นเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อลักษณะโครงสร้างของชิ้นงานที่ได้รับจากเครื่องพิมพ์สามมิติ ที่ความสูง 0.3 มิลลิเมตร ชิ้นงานมีโครงสร้างแบบแซนวิชหรือลามิเนตที่จะมีพฤติกรรมการแตกหักในรูปแบบของการขาดแบบแยกชั้น ขณะที่ความสูง 0.1 มิลลิเมตรจะทำให้ชิ้นงานเข้าใกล้โครงสร้างวัสดุแบบเนื้อเดียวทำให้ชิ้นงานมีการแตกหักรูปแบบการโก่งเดาะเฉพาะแห่งซึ่งพฤติกรรมการแตกหักนี้มักจะเกิดขึ้นกับโครงสร้างวัสดุแบบเนื้อเดียวที่มีปริมาณเนื้อวัสดุภายในน้อย

5. ปัจจัยในการพิมพ์ชิ้นงานที่เหมาะสมได้แก่ ความหนาของผนังจำนวน 3 ชั้น ความเร็วในการพิมพ์ 30 มิลลิเมตรต่อวินาที ความหนาแน่นของการเติมชิ้นงาน 20% และความสูงของแต่ละชั้นที่ 0.3 มิลลิเมตร ให้ค่าความแข็งแรงอัดและแรงดึงดีที่สุด

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.012

ส่วนการพิมพ์ชิ้นงานที่ให้ค่าความแข็งแรงดัดได้ดีที่สุด คือชุดปัจจัยการพิมพ์ชิ้นงานที่ความหนาของผนังจำนวน 3 ชั้น ความเร็วในการพิมพ์ 30 มิลลิเมตรต่อวินาที ความหนาแน่นของการเติมชิ้นงาน 10% และความสูงของแต่ละชั้น ที่ 0.3 มิลลิเมตร

การศึกษาปัจจัยในสร้างชิ้นงานด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติระบบ FFF ยังคงมีปัจจัยอื่นที่ส่งผลต่อสมบัติของชิ้นงาน เช่น การลดระยะเวลาการพิมพ์ชิ้นงานแต่ยังคงได้ชิ้นงานที่มีความแข็งแรง อีกทั้งอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยที่กำลังมีการศึกษาอยู่ในปัจจุบัน แนวทางเหล่านี้ยังคงเป็นความท้าทายที่สำคัญต่อการศึกษากระบวนการผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุที่ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีสมบัติและคุณภาพชิ้นงานที่ดีและเหมาะสมต่อการใช้งาน

5. กิตติกรรมประกาศ

ผลงานนี้ได้รับการสนับสนุนและสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากกลุ่มวิจัยเทคโนโลยีไม้ยางพาราและการจัดการ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

6. เอกสารอ้างอิง

[1] G. Singh and A. Verma, A brief review on injection moulding manufacturing process, Materials Today Proceedings, 2017, 4(2), 1423-1433.

[2] M.S. Alam, J. Kaur, H. Khaira and K. Gupta, Extrusion and extruded products: Changes in quality attributes as affected by extrusion process parameters, A Review. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2016, 56(3), 445-473.

[3] F.A. Khan, H.K. Celik, O. Oral and A.E. Rennie, A short review on 4D printing, International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry, 2018, 2, 59-67.

[4] K. Pathak, R. Saikia, A. Das, D. Das, M.A. Islam, P. Pramanik, A. Parasar, P.P. Borthakur, P. Sarmah, M. Saikia and B. Borthakur, 3D printing in biomedicine: advancing personalized care through additive manufacturing, Exploration of Medicine, 2023, 4, 1135-67.

[5] H. Vieyra, J.M. Molina-Romero, J.d.D. Calderón-Nájera and A. Santana-Díaz, Engineering, recyclable, and biodegradable plastics in the automotive industry: A review, Polymers, 2022, 14, 3412.

[6] K.C. Datsiou, E. Saleh, F. Spirrett, R. Goodridge, I. Ashcroft and D. Eustice, Additive manufacturing of glass with laser powder bed fusion, Journal of the American Ceramic Society, 2019, 102(8), 4410-4414,

[7] A.S. Ramírez, R. D'Amato, F.B. Haro, M.I. Marcos and J.M.d. Agustín del Burgo, Composite material created by additive manufacturing techniques FFF and robocasting for the manufacture of medical parts, The 6th International Conference on Technological Ecosystems for Enhancing Multiculturality, Proceedings, 2018, 410-415.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.012

[8] C.A. Chatham, C.E. Zawaski, D.C. Bobbitt, R.B. Moore, T.E. Long and C.B. Williams, Semi-crystalline polymer blends for material extrusion additive manufacturing printability: a case study with poly (ethylene terephthalate) and polypropylene, Macromolecular Materials and Engineering. 2019, 304(5), 1800764.

[9] S. Ding, B. Zou, P. Wang and H. Ding, Effects of nozzle temperature and building orientation on mechanical properties and microstructure of PEEK and PEI printed by 3D-FDM. Polymer Testing, 2019, 78(1), 105948.

[10] M. Fernandez-Vicente, W. Calle, S. Ferrandiz and A. Conejero, Effect of infill parameters on tensile mechanical behavior in desktop 3D printing, 3D Printing and Additive Manufacturing, 2016, 3(3), 183-192.

[11] F. Saenz, C. Otarola, K. Valladares and J. Rojas, Influence of 3D printing settings on mechanical properties of ABS at room temperature and 77 K, Additive Manufacturing, 2021, 39, 101841.

[12] H. Dao, Y. Cheng, W. Ye, D Zhang, J. Li, Z. Miao and S. Rudykh, Effect of process parameters on tensile mechanical properties of 3D printing continuous carbon fiber-reinforced PLA composites, Materials, 2020, 13, 3850.

[13] B.V.d. Voorde, A. Katalagarianakis, S. Huysman, A. Toncheva, J.M. Raquez, I. Duretek, C. Holzer, L. Cardon, K.V. Bernaerts, D.V. Hemelrijck, L. Pyl and S.V. Vlierberghe, Effect of extrusion and fused filament fabrication processing parameters of recycled poly (ethylene terephthalate) on the crystallinity and mechanical properties, Additive Manufacturing, 2022, 50(1), 102518.

[14] S. Oudah, H. Al-Attraqchi, and N. Nassir, The effect of process parameters on the compression property of acrylonitrile butadiene styrene produced by 3D printer, Engineering and Technology Journal, 2022, 40(1), 189-194.

[15] S. Brischetto and R. Torre, Tensile and compressive behavior in the experimental tests for PLA specimens produced via fused deposition modelling technique, Journal of Composites Science, 2020, 4(3), 140.

[16] G. Pelin, C. E. Pelin, M. Botan, A. Stefan, G.C. Cristea and A.A.M. Panait, Thermo-mechanical properties of fused filament fabricated PLA at elevated temperatures, Incas Bulletin, 2023, 15(1), 59-70.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.013

บทความวิจัย

การพัฒนาชุดฝึกพีแอลซีด้วยระบบสมองกลฝังตัวอาดูโน่สำหรับควบคุมอุปกรณ์นิวแมติกส์ไฟฟ้า

สุรชัย นามพรมมา[1*] ราชัญ อุดมคำ[1] และ ไตรทศ แก้วเหง้า[2]

[1] สาขาวิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรมอุตสาหการ, คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

[2] สาขาวิชาครุศาสตร์เครื่องกล, คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

[*] ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: surachai.na@rmuti.ac.th

วันที่รับบทความ: 24 เมษายน 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 16 กรกฎาคม 2568; วันที่ตอบรับบทความ: 21 กรกฎาคม 2568
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 21 สิงหาคม 2568

บทคัดย่อ: การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและประเมินประสิทธิภาพชุดฝึกพีแอลซีด้วยระบบสมองกลฝังตัวอาดูโน่สำหรับควบคุมอุปกรณ์นิวแมติกส์ไฟฟ้า โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ดังนี้ (1) การสร้างเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย คือ ชุดฝึกพีแอลซีด้วยระบบสมองกลฝังตัวอาดูโน่สำหรับควบคุมอุปกรณ์นิวแมติกส์ไฟฟ้า (2) กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย คือ นักศึกษาหลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) โปรแกรมวิชาช่างกลโรงงาน คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ชั้นปีที่ 2 จำนวน 30 คน ด้วยวิธีการเลือกแบบเจาะจง (Purposive Sampling) (3) การเก็บข้อมูลเพื่อหาประสิทธิภาพของชุดฝึก เริ่มต้นจากการสอนใช้ชุดฝึกเพื่อให้กับผู้เรียนเกิดความเข้าใจและเรียนรู้การใช้งานชุดฝึกแล้วทำการสอบตามแบบทดสอบปฏิบัติของแต่ละหัวข้อและเมื่อครบทุกหัวข้อแล้วให้ทำการทดสอบด้วยแบบทดสอบปฏิบัติซ้ำอีกครั้ง จากนั้นนำคะแนนที่ได้จากการทดสอบระหว่างเรียนและการทดสอบหลังเรียนมาคำนวณหาประสิทธิภาพของชุดฝึก ผลการวิจัยพบว่าชุดฝึกพีแอลซีด้วยระบบสมองกลฝังตัวอาดูโน่สำหรับควบคุมอุปกรณ์นิวแมติกส์ไฟฟ้ามีประสิทธิภาพคิดเป็นร้อยละ 93

คำสำคัญ: ชุดฝึก; นิวแมติกส์ไฟฟ้า; อาดูโน่; ระบบสมองกลฝังตัว

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.013

บทความวิจัย

Development of the PLC Practical Set with the Arduino Embedded System for Electro-pneumatic Device Control

Surachai Nampromma[1*], Rachan Udomkham[1] and Thaitot Kaewngao [2]

[1] Department of Industrial Technical Education, Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Isan Khon Kaen Campus

[2] Department of Mechanical Technical Education, Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Isan Khon Kaen Campus

[*] Corresponding author, E-mail: surachai.na@rmuti.ac.th

Received: 24 April 2025; Revised 16 July 2025; Accepted: 21 July 2025
Online Published: 21 August 2025

Abstract: This experimental research has the objective of developing and evaluating the effectiveness of the PLC practical set with the Arduino embedded system for electro-pneumatic device control. The steps for carrying out the research are as follows: (1) Creation of the tools used in the study, which is an Arduino embedded system practical set using a ladder for electro-pneumatic device control. (2) The sampling groups used in the research were students in the Higher Vocational Certificate program in Machine Tool Technology, Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus, 2nd year, 30 students, using the Purposive Sampling method. (3) Data collection to determine the effectiveness of the practical set. Start by teaching the use of the practical set so that the learners can understand and learn to use the practical set according to each practice test topic and then test with the practice test again. Then, the scores obtained from the in-class practice test and the post-test practice were used to calculate the effectiveness of the practice practical set. The results of the research found that an Arduino-embedded system practical set using a ladder for electro-pneumatic device control was effective, accounting for 93 percent.

Keywords: Practical set; Electro-pneumatic; Arduino; Embedded system

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.013

บทความวิจัย

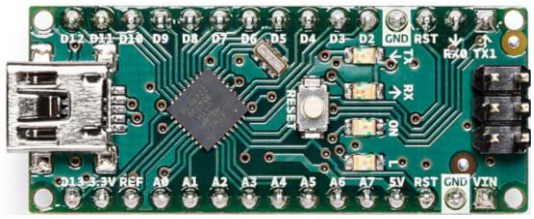
1. บทนำ

ระบบฝังตัวหรือสมองกลฝังตัว (Embedded System) คือ ระบบคอมพิวเตอร์ที่มีการประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์หรือระบบอื่นๆ ที่ไม่ใช่คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (PC) หรือเซิร์ฟเวอร์ (Server) ระบบสมองกลฝังตัวจะประกอบด้วยฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ที่ถูกออกแบบมาเพื่อประเมินและควบคุมอุปกรณ์ในระบบที่เฉพาะเจาะจง [1] ดังนั้นการพัฒนาและประยุกต์ใช้ระบบสมองกลฝังตัว จึงมีความสำคัญมากในงานอุตสาหกรรม ระบบสมองกลฝังตัวเป็นเทคโนโลยีที่ช่วยให้เราสามารถควบคุมอุปกรณ์ในสถานการณ์ที่มีความซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ การประยุกต์ใช้ระบบสมองกลฝังตัวในงานอุตสาหกรรมยังสามารถช่วยลดต้นทุนการผลิต ประหยัดพลังงาน และเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานในภาคอุตสาหกรรม ตัวอย่างของกระบวนการที่มีระบบสมองกลฝังตัวสำหรับการควบคุมเครื่องจักรและกระบวนการในงานอุตสาหกรรม เช่น การควบคุมเครื่องจักรอัตโนมัติในสายผลิต ระบบควบคุมแสงสว่างหรือระบบควบคุมการอ่านและเขียนข้อมูลในการผลิต [2,3] ระบบสมองกลฝังตัวมักมีการพัฒนาด้วยภาษาโปรแกรมที่เฉพาะเจาะจง เช่น C/C++ และมีเครื่องมือพัฒนา (Development tools) ที่เหมาะสมกับการสร้างและปรับแต่งระบบสมองกลฝังตัว รวมถึงระบบปฏิบัติการเฉพาะ (Real-Time Operating System, RTOS) ที่สามารถจัดการและจัดตารางงานในระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพอีกด้วย

เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things, IoT) เป็นเทคโนโลยีที่อาศัยฐานความรู้เกี่ยวกับระบบสมองกลฝังตัวและเป็นเทคโนโลยีที่กำลังได้รับความสนใจอย่างมากในปัจจุบัน โดยแนวคิดเรื่องการเชื่อมต่อสิ่งต่าง ๆ นี้ มีมาตั้งแต่ยุคต้นปี ค.ศ. 1980 แต่ยังไม่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย เนื่องจากความสามารถในการเชื่อมต่อเครือข่ายของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในขณะนั้นยังไม่เพียงพอ ต่างกับในปัจจุบันที่เราสามารถทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ มีปฏิสัมพันธ์และแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างกันได้โดยง่ายซึ่งเรียกอุปกรณ์เหล่านี้ว่า “อุปกรณ์ IoT” โดยองค์ประกอบพื้นฐานของสิ่งที่เรียกว่าอุปกรณ์ IoT จะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ฮาร์ดแวร์ (Hardware) และซอฟต์แวร์ (Software) ซึ่งนวัตกรรมทั่วไปนั้นอาจจะมีเพียงส่วนเดียว คือ ฮาร์ดแวร์หรือซอฟต์แวร์ก็ได้ แต่สำหรับนวัตกรรมที่สร้างด้วยระบบสมองกลฝังตัวจะต้องมีองค์ประกอบทั้งสองส่วน

อาดูโน่ (Arduino) เป็นระบบสมองกลฝังตัวที่มีการออกแบบมาเพื่อใช้งานในโปรเจกต์อิเล็กทรอนิกส์ โดยอาดูโน่จะมีฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อควบคุมและประมวลผลอุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งเป็นลักษณะของระบบสมองกลฝังตัว บอร์ดอาดูโน่ (รูปที่ 1) มีชิปเซ็ตของ Atmel AVR หรือ Microchip SAMD เป็นส่วนหนึ่งของฮาร์ดแวร์ในระบบสมองกลฝังตัว [4] มีการออกแบบเพื่อรองรับการทำงานในอุปกรณ์หรือโปรเจกต์ที่มีขนาดเล็กและมีความสามารถในการติดต่อควบคุมอุปกรณ์อื่น ๆ อาทิเช่น เซนเซอร์ มอเตอร์ หน้าจอ หลอดไฟแอลอีดี (LED) และอื่น ๆ [5] นอกจากนี้ Arduino IDE (Integrated Development Environment) ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการเขียนและอัปโหลดโปรแกรมลงบอร์ดอาดูโน่นั้นก็เป็นส่วนหนึ่งของซอฟต์แวร์ในระบบสมองกลฝังตัวเช่นกัน

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.013



รูปที่ 1 ระบบฝังตัวแบบอาดูโน่-บอร์ด รุ่น NANO

พีแอลซี (Programmable Logic Controller: PLC) [6] คือ อุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการในระบบอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการควบคุมเครื่องจักรและกระบวนการผลิตที่ซับซ้อน การใช้งาน พีแอลซีช่วยให้กระบวนการผลิตเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ [7] นอกจากนี้ยังมีความสามารถในการเก็บข้อมูล มีความยืดหยุ่นในการโปรแกรมและปรับแต่งตามความต้องการของระบบ รวมถึงการจัดเก็บประวัติเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต เพื่อการวิเคราะห์และการปรับปรุงในอนาคต โดยภาษาโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมพีแอลซี แบ่งออกได้หลายภาษาขึ้นอยู่กับความชำนาญของผู้พัฒนาโปรแกรมและความต้องการของระบบควบคุม แต่โดยทั่วไปภาษาแลดเดอร์ (Ladder Logic: LD) จะเป็นภาษาโปรแกรมที่ใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม เนื่องจากความคล้ายคลึงกับวงจรไฟฟ้า (Circuit Diagrams) โดยใช้สัญลักษณ์และตัวอักษรต่าง ๆ [8] เพื่อกำหนดเงื่อนไขและกระบวนการที่ต้องการควบคุม ซึ่งมีความเป็นมาตรฐานและเป็นภาษาโปรแกรมที่พบได้มากในงานอุตสาหกรรม

ระบบนิวแมติกส์หรือระบบลม (Pneumatic System) เป็นระบบที่ใช้ลมอัดเป็นแหล่งพลังงานในการควบคุมและขับเคลื่อนอุปกรณ์ในงานอุตสาหกรรม ระบบนิวแมติกส์มีความน่าเชื่อถือและมีประสิทธิภาพสูงในการทำงานในสภาวะที่ต้องการความรวดเร็วและความแม่นยำ ระบบนิวแมติกส์มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น อุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และอุตสาหกรรมอื่น ๆ [9,10] ที่ต้องการขับเคลื่อนอุปกรณ์และการควบคุมเครื่องจักรกลหรือหุ่นยนต์ รวมทั้งการปรับปรุงและพัฒนากระบวนการผลิตให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

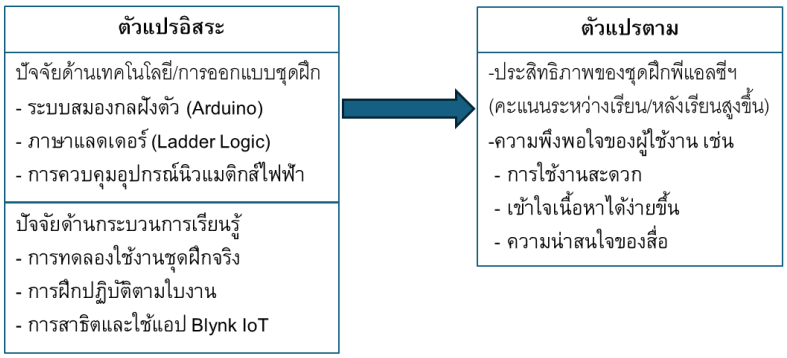
ดังนั้น คณะผู้วิจัยจึงมีแนวความคิดที่จะพัฒนาชุดฝึกโดยใช้บอร์ดอาดูโน่ (รูปที่ 1) ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์นิวแมติกส์ไฟฟ้าแต่การเขียนด้วยภาษาโปรแกรมที่เฉพาะเจาะจง (C/C++) ผ่านซอฟต์แวร์ Arduino IDE แล้วอัปโหลดลงบอร์ดอาดูโน่นั้นมีความยากและซับซ้อนในขั้นตอนการเขียนโค้ด (Coding) สำหรับผู้ที่ไม่มีความรู้ในการเขียนโปรแกรม และจะเป็นการง่ายกว่าถ้าการควบคุมอุปกรณ์ดังกล่าวสามารถเขียนเป็นภาษาแลดเดอร์แล้วอัปโหลดลงบอร์ดอาดูโน่ได้ ทั้งนี้ วัตถุประสงค์งานวิจัยเพื่อนำเอาระบบสมองกลฝังตัวมาพัฒนาเป็นชุดฝึกพีแอลซีจากบอร์ดอาดูโน่สำหรับควบคุมอุปกรณ์นิวแมติกส์ไฟฟ้าและยังเป็นการนำเอาเทคโนโลยีในปัจจุบันมาประยุกต์ใช้เพื่อพัฒนางานและนวัตกรรมสำหรับอุตสาหกรรมต่อไป

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) เพื่อพัฒนาชุดฝึกพีแอลซีด้วยระบบสมองกลฝังตัวอาดูโน่สำหรับควบคุมอุปกรณ์นิวแมติกส์ไฟฟ้าซึ่งมีกรอบแนวคิดการวิจัยและขั้นตอนการดำเนินงานดังต่อไปนี้

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.013

กรอบแนวคิดการวิจัย



รูปที่ 2 กรอบแนวคิดการวิจัยเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพชุดฝึกพีแอลซีด้วยระบบสมองกลฝังตัวอาดูโน่สำหรับควบคุมอุปกรณ์นิวแมติกส์ไฟฟ้า

2.1 การเตรียมอุปกรณ์ในงานวิจัย

2.1.1 ศึกษาข้อมูลไมโครคอนโทรลเลอร์แบบสมองกลฝังตัวที่เกี่ยวกับอาดูโน่เพื่อเข้าใจความสามารถและข้อจำกัดของเทคโนโลยีและเรียนรู้วิธีการใช้งานอาดูโน่ โดยศึกษาจากแหล่งข้อมูลต่างๆ เช่น เอกสาร คู่มือ หนังสือ ตำราและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อเป็นแนวทางในการนำอาดูโน่มาใช้สำหรับควบคุมอุปกรณ์นิวแมติกส์ไฟฟ้า

2.1.2 ออกแบบโครงสร้างและการจัดวางตำแหน่งอุปกรณ์ซึ่งรายการอุปกรณ์สำหรับการทดลองมีดังนี้

2.1 บอร์ดอาดูโน่ นาโน	1 ตัว
2.2 บอร์ด ESP8266	1 ตัว
2.3 รีเลย์ 24 VDC	4 ตัว
2.4 รีเลย์ 5 VDC	4 ตัว
2.5 ตัวต้านทาน 1 kΩ	5 ตัว
2.6 สวิตซ์แบบเลือกตำแหน่ง	1 ตัว
2.7 ไฟแสดงสถานะ 220 VAC	1 ตัว
2.8 อะแดปเตอร์แปลงไฟ 9 VDC	1 ตัว

2.1.3. ดำเนินการสร้างและติดตั้งอุปกรณ์ชุดฝึกพีแอลซีด้วยระบบสมองกลฝังตัวอาดูโน่สำหรับควบคุมอุปกรณ์นิวแมติกส์ไฟฟ้า โดยมีขั้นตอนดังนี้

(1) การกำหนดภาคอินพุตและภาคเอาพุต (Input/Output Phase) ของบอร์ดอาดูโน่-นาโน ต้องสัมพันธ์กับ Address ในโปรแกรม Open PLC Editor ได้แก่ Digital In มีขาอินพุต 2, 3, 4, 5, 6 ตรงกับ Address %IX0.0 - %IX0.4 ส่วน Digital Out มีขาเอาพุต 7, 8, 12, 13 ตรงกับAddress %QX0.0 - %QX0.3 และ Analog In มีขาอินพุต A0, A1, A2, A3, A4, A5 ตรงกับAddress %IW0.0 - %IW0.5 Analog Out มีขาเอาพุต 9, 10, 11 ตรงกับ Address %QW0.0 - %QW0.2 และยังมีโมดูลคำสั่ง Timer, Counter สำหรับใช้ควบคุมงานแบบต่างๆ อีกด้วย

ทั้งนี้ หากต้องการจำนวนภาคอินพุตและเอาพุตที่มากกว่านี้ก็สามารถเลือกบอร์ดชนิดอื่นๆ ซึ่งมีข้อมูลในเว็ปไซต์ของ Open PLC Editor โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้บอร์ดอาดูโน่-นาโนเพราะมีขนาดเล็กสามารถ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.013

ประกอบใส่กล่องร่วมกับอุปกรณ์อื่นๆ ได้สะดวกและจำนวนขาอินพุตและเอาพุตมีเพียงพอกับแบบทดสอบปฏิบัติการ

(2) การติดต่อระหว่างบอร์ดอาดูโน่-นาโน กับอุปกรณ์นิวแมติกส์ไฟฟ้า เช่น เซนเซอร์ ลิมิตสวิตซ์ ไฟฟ้าและโซลินอยด์ (Solenoid) จะใช้รีเลย์ (Relay) เป็นตัวรับ-ส่งสัญญาณ แต่อุปกรณ์นิวแมติกส์ไฟฟ้าใช้แรงดันไฟ 24 VDC ส่วนบอร์ดอาดูโน่-นาโน ใช้แรงดันไฟ 5 VDC ดังนั้น ภาคอินพุตจึงใช้รีเลย์ 24 VDC เมื่ออุปกรณ์นิวแมติกส์ไฟฟ้าส่งสัญญาณ (Trigger) มายังรีเลย์ 24 VDC ขาคอนแทค (Contact) เปลี่ยนสถานะแล้วดึงไฟ 5 VDC ส่งสัญญาณไปยังขาอินพุตของบอร์ดอาดูโน่-นาโน ตามข้อ 3.1 ส่วนภาคเอาพุตจะใช้รีเลย์ 5 VDC เมื่อบอร์ดอาดูโน่-นาโน ส่งสัญญาณ (Trigger) จากขาเอาพุต มายังรีเลย์ 5 VDC ขาคอนแทค (Contact) จะเปลี่ยนสถานะแล้วดึงไฟ 24 VDC ส่งสัญญาณไปยังโซลินอยด์ (Solenoid) ของอุปกรณ์นิว แมติกส์ ทั้งนี้ภาคอินพุตของบอร์ดอาดูโน่ต้องกำหนดสถานะให้กับขาอินพุตของบอร์ด เช่น HIGH, LOW หรือ 1, 0 เป็นต้น เพราะขณะที่ขาอินพุตยังลอยอยู่หรือไม่มีลอจิก HIGH, LOW ส่งเข้ามาจะเกิดสัญญานรบกวนซึ่งต้องแก้ไขด้วยการใช้ตัวต้านทาน (Resister) มาต่อคร่อมเพื่อทำวงจร Pull Down ตามรูปที่ 4 และรูปที่ 5

(3) บอร์ดอาดูโน่-นาโน จะใช้อะแดปเตอร์ (Adapter) 9 VDC ในการแปลงไฟฟ้าสำหรับใช้ในการทำงานของบอร์ดและงานวิจัยนี้ได้สร้างปุ่มสวิตซ์แบบออนไลน์จากบอร์ดESP8266 หรือ NodeMCU ที่สามารถสั่งการทำงานของอุปกรณ์นิวแมติกส์ไฟฟ้าผ่านคอมพิวเตอร์หรือโทรศัพท์มือถือได้เพื่อช่วยดึงดูดความสนใจของผู้เรียนให้กับชุดฝึกมากยิ่งขึ้น โดยมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

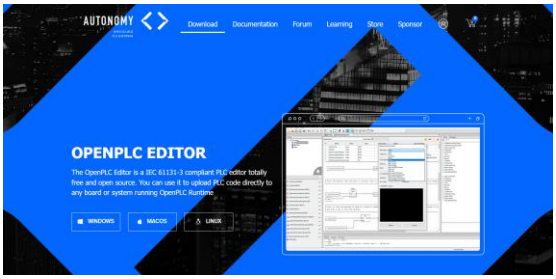
เริ่มต้นจากเขียนโค้ด (Coding) ด้วยโปรแกรม Arduino IDE แล้วอัปโหลดโค้ดลงในบอร์ด ESP8266 ซึ่งโค้ดที่เขียนจะควบคุมและสั่งการทำงานผ่านสัญญาณไวไฟ (Wi-Fi) ด้วยแอปพลิเคชั่น Blynk IoT สำหรับโทรศัพท์มือถือและเว็ปไซต์ https://blynk.io/ สำหรับคอมพิวเตอร์ จากนั้นต่อสาย(Wiring) จากขาเอาพุต D0 ของบอร์ดESP8266 เข้ากับขาอินพุต 6 ของบอร์ดอาดูโน่-นาโน สำหรับส่งสัญญาณ (Trigger) เพื่อเป็นปุ่มสตาร์ทแบบออนไลน์สั่งให้อุปกรณ์นิวแมติกส์ไฟฟ้าทำงาน ตามรูปที่ 6

ทั้งนี้การติดตั้งโปรแกรม Open PLC Editor สำหรับเขียนภาษาแลดเดอร์และอัปโหลดแลดเดอร์ลงในบอร์ดอาดูโน่เพื่อใช้ควบคุมอุปกรณ์นิวแมติกส์ไฟฟ้าหรือการเลือกใช้บอร์ดชนิดต่างๆ สามารถติดตั้งผ่านเว็ปไซต์ https://autonomylogic.com/download ตามรูปที่ 3

(4) สร้างแบบประเมินคุณภาพชุดฝึกสำหรับให้ผู้เชี่ยวชาญประเมิน โดยมีลักษณะเป็นแบบมาตราส่วนประมาณค่า 5 ระดับ ประกอบด้วย 4 ด้าน คือ (1) ด้านลักษณะกายภาพ (2) ด้านลักษณะการใช้งาน (3) ด้านการบำรุงรักษาและซ่อมแซมและ (4) ด้านความเหมาะสมด้านการนำไปใช้ในการเรียนการสอน

(5) ประเมินคุณภาพชุดฝึกพีแอลซีฯ โดยผู้เชี่ยวชาญที่มีประสบการณ์ด้านการสอนนิวแมติกส์ไฟฟ้า จำนวน 5 คน เพื่อประเมินคุณภาพของชุดฝึกพร้อมทั้งนำข้อมูลข้อเสนอแนะที่ได้จากผู้เชี่ยวชาญมาปรับปรุงชุดฝึกให้มีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้น โดยเกณฑ์ให้คะแนนแสดงตามตารางที่ 1

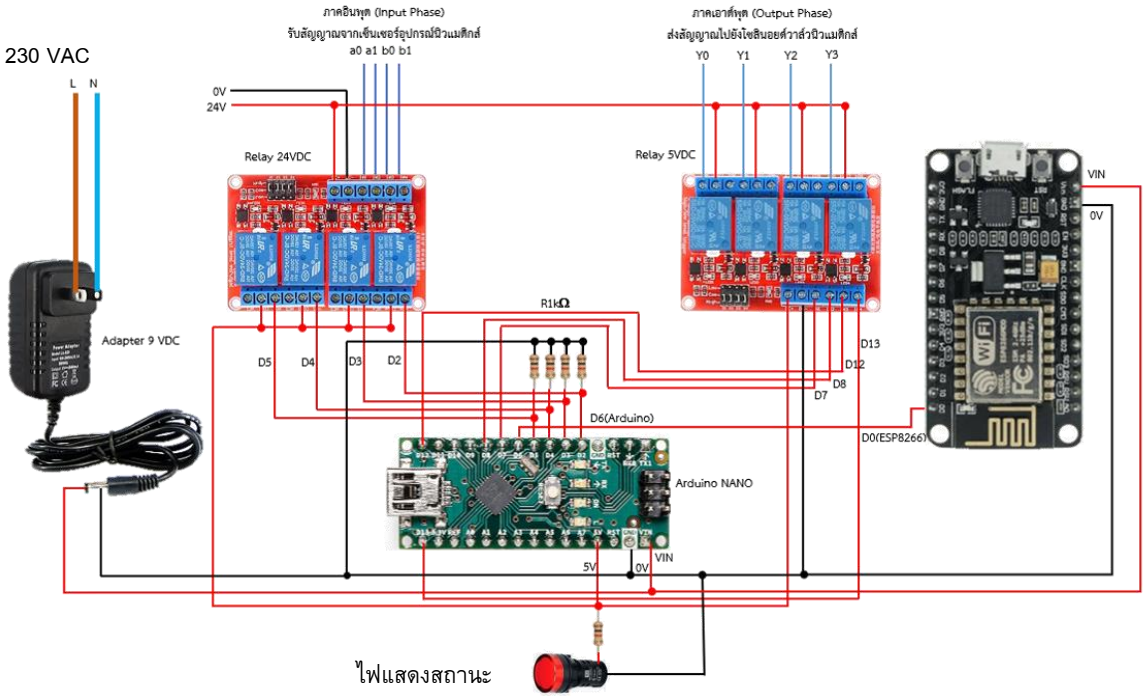
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.013



รูปที่ 3 เว็ปไซต์สำหรับการติดตั้งโปรแกรม Open PLC Editor และข้อมูลการเลือกใช้บอร์ดแบบต่าง ๆ

ตารางที่ 1 ระดับน้ำหนักการให้คะแนน

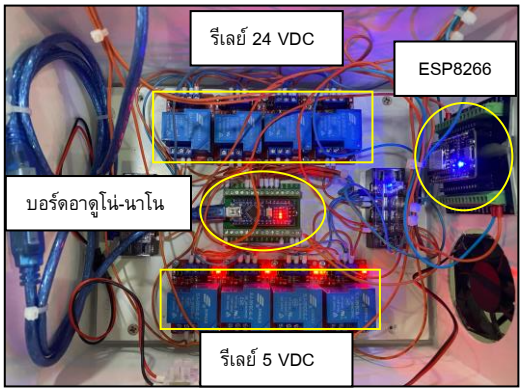
ค่าน้ำหนัก	คะแนนเฉลี่ย	ระดับความคิดเห็น
5	4.51-5.00	มากที่สุด
4	3.51-4.50	มาก
3	2.51-3.50	ปานกลาง
2	1.51-2.50	น้อย
1	1.00-1.50	น้อยที่สุด



รูปที่ 4 วงจรชุดฝึกพีแอลซีด้วยระบบสมองกลฝังตัวอาดูโน่สำหรับควบคุมอุปกรณ์นิวแมติกส์ไฟฟ้า

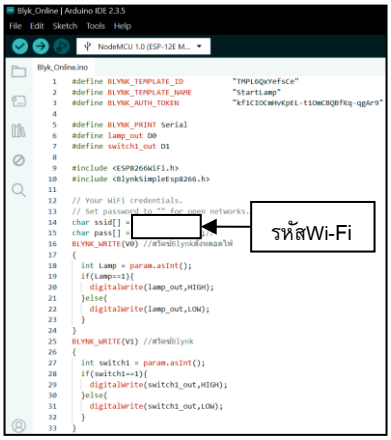
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.013

(a) Panel สำหรับต่ออุปกรณ์ภาคอินพุตและเอาพุต

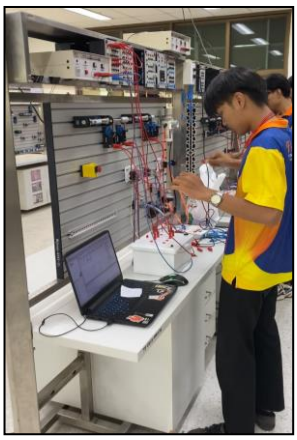


(b) การวางตำแหน่งอุปกรณ์และต่อวงจรชุดฝึกพีแอลซีฯ

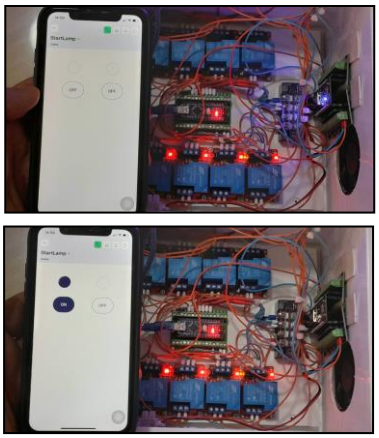
รูปที่ 5 การติดตั้งอุปกรณ์ชุดฝึกพีแอลซีด้วยระบบสมองกลฝังตัวอาดูโน่สำหรับควบคุมอุปกรณ์นิวแมติกส์ไฟฟ้า



(a)
การเขียนโค้ดสำหรับ
อัปโหลดลงบอร์ดESP8266



(b)
การทดลองใช้ชุดฝึกต่อกับ
อุปกรณ์นิวแมติกส์



(c)
การสั่งอุปกรณ์นิวแมติกส์ไฟฟ้าผ่าน
โทรศัพท์มือถือด้วยแอป Blynk IoT

รูปที่ 6 การเขียนโค้ด (Coding) และการอัปโหลดโค้ดลงในบอร์ด ESP8266 ที่ควบคุมและสั่งการทำงานผ่านสัญญาณไวไฟ (Wi-Fi) ด้วยแอปพลิเคชั่น Blynk IoT

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.013

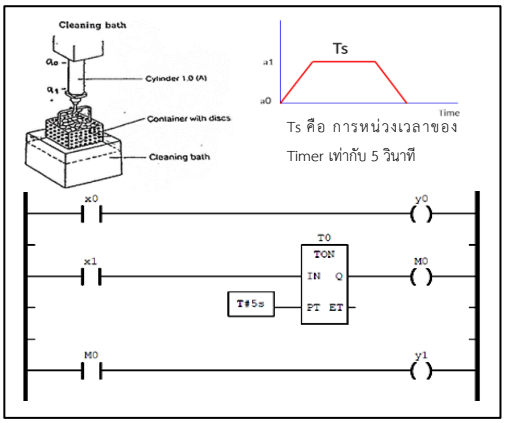
(6) ประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานต่อชุดฝึกพีแอลซีด้วยระบบสมองกลฝังตัวอาดูโน่สำหรับควบคุมอุปกรณ์นิวแมติกส์ไฟฟ้า โดยเป็นผู้มีประสบการณ์การทำงานหรือด้านการสอนเกี่ยวกับนิวแมติกส์ไฟฟ้า จำนวน 10 คน เพื่อเป็นข้อมูลในการพัฒนาชุดฝึกให้มีความเหมาะสมต่อการเรียนการสอนในรายวิชาต่อไป

2.2 ขั้นตอนการทดลอง

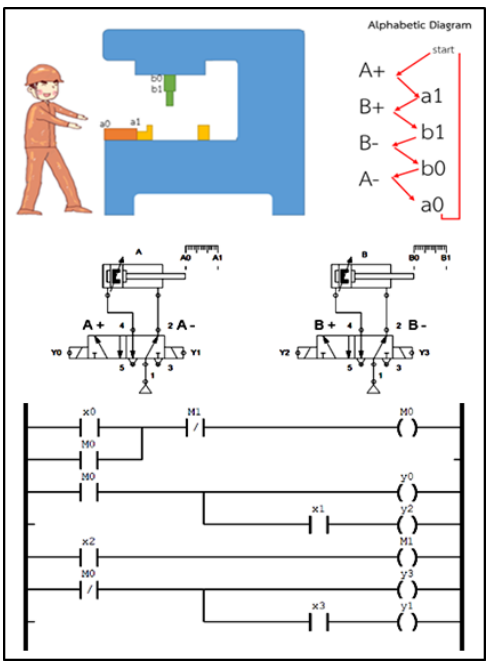
การทดสอบชุดฝึกพีแอลซีด้วยระบบสมองกลฝังตัวอาดูโน่สำหรับควบคุมอุปกรณ์นิวแมติกส์ไฟฟ้าจะเป็นการนำแบบทดสอบการควบคุมนิวแมติกส์ไฟฟ้าด้วยพีแอลซีในรายวิชานิวแมติกส์และไฮดรอลิกส์มาทำการเขียนวงจรแลดเดอร์และทดสอบการทำงานของชุดฝึก จากนั้นประเมินการทำงานของอุปกรณ์นิวแมติกส์ว่าตรงตามวัตถุประสงค์ของใบงานทดสอบหรือไม่ โดยมีรายละเอียดการดำเนินการ ดังนี้

1. แนะนำเกี่ยวกับการเรียนการสอนด้วยชุดฝึกพีแอลซีด้วยระบบสมองกลฝังตัวอาดูโน่สำหรับควบคุมอุปกรณ์นิวแมติกส์ไฟฟ้าเพื่อให้ผู้เรียนได้เข้าใจในการใช้งานชุดฝึกพีแอลซีฯ

2. ดำเนินการสอนด้วยชุดฝึกที่ได้สร้างขึ้นและเมื่อจบในแต่ละหัวข้องานให้ผู้เรียนฝึกปฏิบัติการในแต่ใบงานการทดลองโดยแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ (1) การทดสอบการควบคุมกระบอกลม 1 ตัว ได้แก่ วงจร Self-Holding, วงจรInter-Lock, วงจรTimerและวงจร Counter (2) การทดสอบการควบคุมกระบอกลม 2 ตัว ได้แก่ วงจร Sequence-Control, วงจร Self-Holding, วงจรInter-Lock, วงจร Timer และวงจร Counter



รูปที่ 7 ตัวอย่างแบบทดสอบการควบคุมกระบอกลม 1 ตัว ด้วยวงจร Timer



รูปที่ 8 ตัวอย่างแบบทดสอบการควบคุมกระบอกลม 2 ตัว ด้วยวงจร Sequence-Control

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.013

3. ทดสอบหลังเรียน (Post-test) เมื่อผู้เรียนได้ผ่านการเรียนครบทุกหัวข้องานแล้ว ให้ทำการทดสอบด้วยแบบทดสอบปฏิบัติการอีกครั้ง

4. นำผลคะแนนที่ได้จากการฝึกปฏิบัติการทดลองระหว่างเรียน และการทดสอบปฏิบัติการหลังเรียนมาวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เปอร์เซ็นต์ร้อยละเพื่อหาประสิทธิภาพของชุดฝึกต่อไป

3. ผลการวิจัย

1. ผลการประเมินคุณภาพของชุดฝึก โดยให้ผู้เชี่ยวชาญจำนวน 5 คน ประเมินคุณภาพของชุดฝึกตามตารางที่ 2 พบว่าชุดฝึกมีคุณภาพอยู่ในระดับมาก 1 ด้านและระดับมากที่สุด 3 ด้าน เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยเรียงตามลำดับเป็นรายด้าน ดังนี้ คือ ด้านการบำรุงรักษาและซ่อมแซม (ค่าเฉลี่ย 4.80, S.D.= 0.41) ด้านความเหมาะสมด้านการนำไปใช้ในการเรียนการสอน (ค่าเฉลี่ย 4.65, S.D.= 0.49) ด้านลักษณะการใช้งาน (ค่าเฉลี่ย 4.60, S.D.= 0.50) และด้านลักษณะทางกายภาพ (ค่าเฉลี่ย 4.10, S.D.= 0.72) จากนั้นทำการวิเคราะห์ CRV (Content Validity Ratio)

โดยการใช้ความรู้และเหตุผลในการประเมินคุณภาพของชุดฝึกพีแอลซีฯ จากผู้เชี่ยวชาญ (Panel of Experts) เป็นผู้พิจารณาซึ่งเป็นการหาความเที่ยงตรงเชิงเนื้อหา (Content Validity) และความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน (Usability) ตามสูตรดังนี้ [11]

$$\text{CVR} = \frac{2N_e}{\text{N}} - 1 \qquad (1)$$

เมื่อ

CVR	แทน คุณภาพเชิงเหตุผล
N_e	แทน จำนวนผู้เชี่ยวชาญที่ยอมรับ
N	แทน จำนวนผู้เชี่ยวชาญทั้งหมด

เมื่อให้ผู้เชี่ยวชาญประเมินชุดฝึกพีแอลซีด้วยระบบสมองกลฝังตัวอาดูโน่สำหรับควบคุมอุปกรณ์นิวแมติกส์ไฟฟ้า จำนวน 5 คน และแต่ละคนคำนวณเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้ คือ 4.59 4.59 4.65 4.29 และ4.59 ทั้งนี้ ค่าเฉลี่ยของผู้เชี่ยวชาญที่จะยอมรับต้องอยู่ในระดับมากขึ้นไป (3.50-5.00) เท่านั้น และเมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของผู้เชี่ยวชาญแต่ละคน พบว่าได้ค่าเฉลี่ยมากกว่า 3.50 ทุกคน ดังนั้น N_e จึงมีค่าเท่ากับ 5 แทนค่าในสูตร

$$\text{CVR} = \frac{2(5)}{5} - 1$$

$$\text{CVR} = 1.00$$

จากการแทนค่าตามสมการที่ (1) พบว่า ชุดฝึกพีแอลซีด้วยระบบสมองกลฝังตัวอาดูโน่สำหรับควบคุมอุปกรณ์นิวแมติกส์ไฟฟ้ามีคุณภาพเชิงเหตุผล (Rational Approach) จึงสามารถนำไปใช้งานได้ (โดยค่าที่คำนวณได้มากกว่าค่าการยอมรับขั้นต่ำที่กำหนดไว้คือ 0.99)

2. ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของชุดฝึกพีแอลซีด้วยระบบสมองกลฝังตัวอาดูโน่สำหรับควบคุมอุปกรณ์นิวแมติกส์ไฟฟ้า โดยนำไปทดลองใช้กับกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 30 คน ผลการวิเคราะห์ข้อมูล ตามตารางที่ 4 พบว่า คะแนนจากการทดสอบระหว่างเรียนของกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 30 คน ได้คะแนนเฉลี่ยเท่ากับ 85.37 คะแนน (S.D.เท่ากับ 2.11) คิดเป็นร้อยละ 85 ส่วนคะแนนทดสอบหลังเรียน ได้คะแนนเฉลี่ยเท่ากับ 92.83 คะแนน (S.D.เท่ากับ 2.43) คิดเป็นร้อยละ 93 และจากการทดสอบความแตกต่างของคะแนนสอบเฉลี่ยที่ใช้ชุดฝึกพีแอลซีฯ ด้วยการทดสอบแบบที-เทส (t-test)

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.013

จากโปรแกรมเอ็กเซล (Excel Programing) พบว่า คะแนนทดสอบเฉลี่ยหลังเรียนสูงกว่าคะแนนทดสอบเฉลี่ยระหว่างเรียนอย่างมีนัยสำคัญ [12]

ทั้งนี้ ได้ใช้วิธีการหาประสิทธิภาพเชิงประจักษ์ (Empirical Approach) ซึ่งจะพิจารณาประสิทธิภาพจากเปอร์เซ็นต์คะแนนการทำแบบทดสอบด้วยเกณฑ์ (E1/E2=80/80) โดย 80 ตัวแรก (E1) คือ นักเรียนทั้งหมดที่ทดสอบระหว่างเรียนได้คะแนนเฉลี่ยร้อยละ 80 คือประสิทธิภาพของกระบวนการส่วน 80 ตัวหลัง (E2) คือ นักเรียนทั้งหมดที่ทดสอบหลังเรียนได้คะแนนเฉลี่ยร้อยละ 80 ใช้สูตรดังนี้

$$E_1 = \frac{\frac{\sum x}{N} \times 100}{A} \quad (2)$$

$$E_2 = \frac{\frac{\sum x}{N} \times 100}{B} \quad (3)$$

เมื่อ

E1 แทน ประสิทธิภาพกระบวนการ

E2 แทน ประสิทธิภาพของผลลัพธ์

$\sum x$ แทน คะแนนรวมของแบบทดสอบ

N แทน จำนวนนักศึกษาทั้งหมด

A แทน คะแนนเต็มของแบบทดสอบระหว่างเรียน

B แทน คะแนนเต็มของแบบทดสอบหลังเรียน

เมื่อนำคะแนนทดสอบระหว่างเรียนและหลังเรียนมาคำนวณตามสูตรที่ (2)-(3) และกำหนดเกณฑ์ประสิทธิภาพไว้ที่ 80/80 พบว่าค่าE1 = 85.37 และE2 = 92.87 ซึ่งค่า (85.37/92.87) มากกว่าเกณฑ์ประสิทธิภาพ (80/80) แสดงว่า ชุดฝึกพีแอลซีด้วยระบบสมองกลฝังตัวอาดูโน่สำหรับควบคุมอุปกรณ์นิวแมติกส์ไฟฟ้ามีประสิทธิภาพเชิงประจักษ์สามารถนำไปใช้งานได้จริง

3. ผลการวิเคราะห์ความพึงพอใจของผู้ใช้งานต่อชุดฝึกพีแอลซีด้วยระบบสมองกลฝังตัวอาดูโน่สำหรับควบคุมอุปกรณ์นิวแมติกส์ไฟฟ้า ผลการวิเคราะห์ตามตารางที่ 3 พบว่าผู้ใช้งานมีความพึงพอใจโดยรวมอยู่ในระดับมากที่สุด (ค่าเฉลี่ย 4.51 S.D. = 0.57) เมื่อพิจารณาเรียงตามลำดับเป็นรายข้อดังนี้ คือ การเรียนด้วยชุดทดลองในลักษณะนี้ ช่วยให้เข้าใจเนื้อหาที่เรียน (ค่าเฉลี่ย 4.80, S.D. = 0.42) ชุดฝึกนี้สามารถใช้ฝึกเป็นรายบุคคลหรือเป็นกลุ่มได้ (ค่าเฉลี่ย 4.70, S.D. = 0.48) ชุดฝึกมีรูปร่างและขนาดมีความเหมาะสมต่อการใช้งาน และขั้นตอนการต่อใช้งานไม่ยุ่งยากซับซ้อน มีค่าเฉลี่ยเท่ากัน (ค่าเฉลี่ย 4.60, S.D. = 0.52) การใช้งานชุดทดลองและการปฏิบัติทำได้สะดวก (ค่าเฉลี่ย 4.50, S.D. = 0.53) การเรียนด้วยชุดฝึกนี้ มีความปลอดภัยในขณะปฏิบัติการทดลองและสามารถใช้ฝึกปฏิบัติได้ตามใบทดลองจริง มีค่าเฉลี่ยเท่ากัน (ค่าเฉลี่ย 4.40, S.D. = 0.52) และชุดฝึกมีการออกแบบได้เหมาะสมและกระตุ้นความสนใจ (ค่าเฉลี่ย 4.10, S.D. = 0.88)

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.013

ตารางที่ 2 ผลการประเมินคุณภาพของชุดฝึกพีแอลซีด้วยระบบสมองกลฝังตัวอาดูโน่สำหรับควบคุมอุปกรณ์นิวแมติกส์ไฟฟ้าโดยผู้เชี่ยวชาญ

หัวข้อ	ค่าเฉลี่ย	S.D.	ระดับคุณภาพ
ด้านลักษณะทางกายภาพ			
1. การออกแบบดึงดูดและเร้าความสนใจ	3.60	0.55	มาก
2. การออกแบบสามารถประกอบได้ง่าย	4.60	0.55	มากที่สุด
3. รูปร่างและขนาดมีความเหมาะสมต่อการใช้งาน	4.60	0.55	มากที่สุด
4. ชิ้นส่วนมีความแข็งแรงทนทาน	3.60	0.55	มาก
ค่าเฉลี่ยรวม	**4.10**	**0.72**	**มาก**
ด้านลักษณะการใช้งาน			
1. มีความคล่องตัวในการใช้งานและการปฏิบัติทำได้สะดวก	4.60	0.55	มากที่สุด
2. สามารถใช้ฝึกปฏิบัติได้ตามใบงานทดลอง	5.00	0.00	มากที่สุด
3. มีประสิทธิภาพในการทดลองและผลการทดลองถูกต้อง	4.40	0.55	มาก
4. การใช้งานสะดวกและปลอดภัยในขณะปฏิบัติการทดลอง	4.60	0.55	มากที่สุด
5. การเตรียมอุปกรณ์และการปฏิบัติทำได้ง่าย	4.40	0.55	มาก
ค่าเฉลี่ยรวม	**4.60**	**0.50**	**มากที่สุด**
ด้านการบำรุงรักษาและซ่อมแซม			
1. การบำรุงรักษาทำได้งาน สะดวกในการใช้และเก็บรักษา	4.60	0.55	มากที่สุด
2. การจัดหาอุปกรณ์เพื่อการซ่อมแซมทำได้สะดวก	4.80	0.45	มากที่สุด
3. วัสดุอุปกรณ์ที่นำมาเป็นชุดทดลองสามารถจัดหาได้สะดวก	5.00	0.00	มากที่สุด
4. การซ่อมแซมไม่ทำให้อุปกรณ์อื่นๆ เสียหาย	4.80	0.45	มากที่สุด
ค่าเฉลี่ยรวม	**4.80**	**0.41**	**มากที่สุด**
ด้านความเหมาะสมในการนำไปใช้สำหรับการเรียนการสอน			
1. พัฒนาผู้เรียนทั้งด้านความรู้และการฝึกปฏิบัติ	4.40	0.55	มาก
2. ลดเวลาในการปฏิบัติงานและเหมาะสมกับระดับผู้เรียน	4.60	0.55	มากที่สุด
3. ผู้เรียนมีโอกาสปฏิบัติและมีส่วนร่วมในการพัฒนาชุดทดลอง	4.60	0.55	มากที่สุด
4. สามารถใช้เรียนเป็นรายบุคคลหรือเป็นกลุ่มได้	5.00	0.00	มากที่สุด
ค่าเฉลี่ยรวม	**4.65**	**0.49**	**มากที่สุด**

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.013

ตารางที่ 3 ประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานต่อชุดฝึกพีแอลซีด้วยระบบสมองกลฝังตัวอาดูโน่สำหรับควบคุมอุปกรณ์นิวแมติกส์ไฟฟ้า

ข้อที่	รายการประเมิน	ค่าเฉลี่ย	S.D.	ระดับความพึงพอใจ
1	ชุดฝึกมีการออกแบบได้เหมาะสมและกระตุ้นความสนใจ	4.10	0.88	มาก
2	ชุดฝึกมีรูปร่างและขนาดมีความเหมาะสมต่อการใช้งาน	4.60	0.52	มากที่สุด
3	การใช้งานชุดฝึกและการปฏิบัติทำได้สะดวก	4.50	0.53	มาก
4	มีความปลอดภัยในขณะปฏิบัติการทดลอง	4.40	0.52	มาก
5	การเรียนด้วยชุดฝึกในลักษณะนี้ ช่วยให้เข้าใจเนื้อหาที่เรียน	4.80	0.42	มากที่สุด
6	สามารถใช้ฝึกปฏิบัติได้ตามใบทดลองจริง	4.40	0.52	มาก
7	ขั้นตอนการต่อใช้งานไม่ยุ่งยากซับซ้อน	4.60	0.52	มากที่สุด
8	ชุดฝึกนี้สามารถใช้ฝึกเป็นรายบุคคลหรือเป็นกลุ่มได้	4.70	0.48	มากที่สุด
	ค่าเฉลี่ยรวม	**4.51**	**0.57**	**มากที่สุด**

ตารางที่ 4 ผลคะแนนทดสอบระหว่างเรียนและหลังเรียนการใช้ชุดฝึกพีแอลซีฯ ด้วยโปรแกรมเอ็กเซล (Excel Programing)

การทดลอง	คะแนนทดสอบระหว่างเรียน	คะแนนทดสอบหลังเรียน
จำนวน (คน)	30	30
ค่าเฉลี่ย	85.37	92.83
S.D.	2.11	2.43
คะแนนเต็ม	100	100
ร้อยละ	85	93
t	-12.9569	
p-value	< 0.05	

4. อภิปรายผลและสรุปผลการวิจัย

1. ผลการประเมินคุณภาพชุดฝึกพีแอลซีด้วยระบบสมองกลฝังตัวอาดูโน่สำหรับควบคุมอุปกรณ์นิวแมติกส์ไฟฟ้า พบว่าอยู่ที่ระดับคุณภาพมากที่สุด ทั้งนี้เป็นเพราะว่าชุดฝึกที่สร้างขึ้นนี้ ได้ทำการทดสอบการทำงานและผ่านการตรวจสอบคุณภาพจากผู้เชี่ยวชาญด้านต่างๆ ซึ่งได้ผ่านการปรับปรุงแก้ไขตามคำแนะนำของผู้เชี่ยวชาญก่อนนำมาทดลองใช้จริง โดยมีเนื้อหาสาระครบถ้วน มีความกระชับและชัดเจน อีกทั้งผู้เรียนยังได้รับคำแนะนำวิธีการเรียนรู้จากผู้สอน ทำให้สามารถเรียนรู้ด้วยความเข้าใจถูกต้องตามขั้นตอน และนำไปใช้จัดการเรียนการสอนได้เป็นอย่างดี

2. ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของชุดฝึกพีแอลซีด้วยระบบสมองกลฝังตัวอาดูโน่สำหรับควบคุมอุปกรณ์นิวแมติกส์ไฟฟ้า พบว่าคะแนนทดสอบระหว่างเรียนค่อนข้างสูง คิดเป็นร้อยละ 85 ของคะแนนเต็ม เพราะอาจารย์ผู้สอนได้อธิบายและสาธิตวิธีการใช้ชุดฝึกให้กับผู้เรียนจนเกิดความเข้าใจก่อนเข้าปฏิบัติการทดสอบจริง ทั้งนี้คะแนนทดสอบหลังเรียนที่เพิ่มขึ้นมากกว่าคะแนนทดสอบระหว่างเรียน คิดเป็นร้อยละ 93 ของคะแนนเต็ม โดยมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) เท่ากับ 2.43 แสดงให้เห็นว่าคะแนนของผู้เรียนส่วนใหญ่อยู่ใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ย กล่าวคือมีความสม่ำเสมอในการเรียนรู้ที่ดี เพราะหลังจากการทดสอบระหว่างเรียนแล้ว อาจารย์ผู้สอนได้อธิบายถึงข้อผิดพลาดและคะแนนที่หักไป ตัวอย่างเช่น การเลือกใช้สีของสายไฟในการต่อวงจรนิว

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.013

แมติกส์ไฟฟ้าให้ถูกต้องหรือวิธีการถอดสายลมออกจากข้อต่อวาล์วที่ถูกต้องเพื่อไม่ทำให้วาล์วเกิดการชำรุดเสียหาย รวมถึงการต่อวงจรไฟฟ้าจะต้องปิดแหล่งจ่ายไฟหรือเพาเวอร์ซัพพลายก่อนทุกครั้ง ซึ่งเป็นพื้นฐานความปลอดภัยในการทำงาน เป็นต้น ทำให้ผู้เรียนจดจำและเกิดการเรียนรู้จากข้อผิดพลาดต่างๆ ส่งผลให้ผู้เรียนมีคะแนนทดสอบปฏิบัติหลังการเรียนเพิ่มขึ้น

3. ความพึงพอใจของผู้ใช้งานต่อชุดฝึกพีแอลซีด้วยระบบสมองกลฝังตัวอาดูโน่สำหรับควบคุมอุปกรณ์นิวแมติกส์ไฟฟ้า มีค่าเฉลี่ยอยู่ในระดับมากที่สุด โดยผลการประเมินความพึงพอใจที่มีค่าเฉลี่ยมากสุด คือ การเรียนด้วยชุดฝึกในลักษณะนี้ช่วยให้เข้าใจเนื้อหาที่เรียน (ค่าเฉลี่ย 4.80 S.D. = 0.42) เนื่องจากโปรแกรม Open PLC Editor สามารถจำลองการทำงานวงจรแลดเดอร์ได้ ทำให้เห็นภาพการทำงานของภาคอินพุตและภาคเอาพุตของวงจรแลดเดอร์และการที่นักศึกษาสามารถสั่งการทำงานของอุปกรณ์นิวแมติกส์ไฟฟ้าด้วยโทรศัพท์มือถือหรือคอมพิวเตอร์ผ่านสวิตซ์แบบออนไลน์ด้วยแอปพลิเคชั่น Blynk IoT ยังช่วยกระตุ้นความสนใจในการเรียนการสอน อีกทั้งผู้เรียนยังสามารถศึกษาเอกสารที่ใช้เป็นสื่อประกอบการสอนที่มีเนื้อหาเกี่ยวกับหัวข้อและใบงานแบบทดสอบก่อนเข้าเรียนได้เป็นอย่างดี

4. แบบประเมินที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ไม่ได้ทำการวิเคราะห์ดัชนีความสอดคล้อง (Index of Item Objective Congruence: IOC) เนื่องจากผู้วิจัยเพียงต้องการคำแนะนำและข้อเสนอแนะหรือความคิดเห็นบางส่วนเพื่อนำมาใช้ในการปรับปรุงชุดฝึกให้ดีขึ้นเท่านั้น ทั้งนี้หากมีการพัฒนาชุดฝึกครั้งถัดไปและกำหนดตัวชี้วัดสมรรถนะที่ชัดเจน จึงควรที่จะใช้ (IOC) มาวิเคราะห์แบบประเมินเพื่อความถูกต้องสอดคล้องกับสิ่งที่ต้องการวัดผลซึ่งเป็นคุณลักษณะที่สำคัญของแบบประเมินหรือแบบทดสอบต่อไป

5. ช่องว่างงานวิจัย (Research Gab) ในงานวิจัยครั้งนี้ พบว่า (1) กลุ่มตัวอย่างเป็นเพียงนักศึกษาระดับ ปวส. ช่างกลโรงงาน เท่านั้น ซึ่งควรทดสอบกับนักศึกษาระดับ ป.ตรี กลุ่มอุตสาหกรรมเพื่อศึกษาประสิทธิภาพชุดฝึกฯ ตามสายวิชาชีพและขยายผลไปยังบุคคลากรภาคอุตสาหกรรม (2) ระบบปัจจุบันใช้การควบคุมวงจรกระบอกลม 1–2 ตัว โดยใช้ Arduino Nano, ESP8266 และ Ladder อย่างง่าย ยังไม่ครอบคลุมเทคโนโลยีขนาดใหญ่ เช่น PLC หรือระบบสื่อสารอุตสาหกรรม IoT ขั้นสูง

6. ข้อเสนอแนะเชิงพัฒนาเพื่อการวิจัยในอนาคตมีดังนี้

6.1 พัฒนาคู่มือและสื่อการสอนแบบดิจิทัล เช่น วิดีโอสาธิต, คู่มือออนไลน์, หรือแบบฝึกหัดอินเทอร์แอคทีฟ เพื่อให้ผู้เรียนสามารถศึกษาด้วยตนเองทั้งก่อนและหลังเรียนได้สะดวกยิ่งขึ้น ลดการพึ่งพาครูผู้สอนและส่งเสริมการเรียนรู้แบบ Blended Learning

6.2 ขยายความสามารถของชุดทดลองให้รองรับระบบควบคุมที่ซับซ้อนยิ่งขึ้น โดยพัฒนาให้ชุดฝึกรองรับการควบคุมอุปกรณ์หลายชนิดพร้อมกัน เช่น เซนเซอร์ตรวจจับ, มอเตอร์ไฟฟ้า, หรือแขนกลอุตสาหกรรม รวมถึงรองรับการเขียนโปรแกรมควบคุมแบบลำดับเหตุการณ์ (Sequence Control) ที่ซับซ้อนมากขึ้น เพื่อฝึกให้นักศึกษามีทักษะใกล้เคียงกับงานในโรงงานจริง

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.013

6.3 เชื่อมต่อระบบกับเทคโนโลยี IoT และระบบเฝ้าระวังระยะไกล โดยเพิ่มฟังก์ชันการควบคุมและติดตามผลแบบออนไลน์ (Remote Monitoring) ผ่านเว็บหรือแอปพลิเคชันเพิ่มเติม เพื่อให้สามารถดูสถานะและสั่งการระบบระยะไกลได้จริง นำไปสู่การเรียนรู้แนวคิดของ Smart Factory และอุตสาหกรรม 4.0 ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ขอขอบคุณคณาจารย์โปรแกรมวิชาช่างกลโรงงานและสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ที่ให้คำปรึกษาตลอดจนสถานที่ในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

[1] A.S. Ismailov and Z.B. Jo'Rayev, Study of arduino microcontroller board, Science and Education, 2022, 3(3), 172-179.

[2] R. Escobar and C.A. Pérez Herrera, Low-cost USB interface for operant research using Arduino and Visual Basic, Journal of the Experimental Analysis of Behavior, 2015, 103(2), 427-435.

[3] H. Zheng, J. Duan, Y. Dong and Y. Liu, Real-time fire detection algorithms running on small embedded devices based on MobileNetV3 and YOLOv4, Fire Ecology, 2023, 19, 31.

[4] https://www.arduino.cc/en/hardware#nano-family. (Accessed on 25 March 2025)

[5] A. Al Fahim, M.M. Rahman, M.W. Hridoy and K.R. Uddin, Development of a PLC based automation cell for industry, Journal of Integrated and Advanced Engineering, 2023, 3(2), 87-100.

[6] S. Niauronis, OPENPLC hardware speed performance comparison, Professional Studies: Theory and Practice, 2023, 27(1), 65-71.

[7] P.C. Varma and G. Venkateswarlu, Automatic pneumatic power based object sorting system by using MITSUBISHI PLC, Journal of Science and Technology, 2015, 9, 91-97.

[8] K. Meshram, R. Mekhe, Y. Meshram, A. Meshram and Y. Narule, Home automation using arduino, International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology, 2022, 10(12), 948-951.

[9] J. Walker, T. Zidek, C. Harbel, S. Yoon, F.S. Strickland, S. Kumar and M. Shin, Soft robotics: A review of recent developments of pneumatic soft actuators, Actuators, 2020, 9(1), 3.

[10] M.L. Dezaki, S. Hatami, A. Zolfagharian and M. Bodaghi, A pneumatic conveyor robot for color detection and sorting, Cognitive Robotics, 2022, 2, 60-72.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.013

[11] S. Sukamolson, Various Methods to Find Content Validity of a Quantitative Research Tool and How to Choose the Appropriate Ones, Pasaa Paritat Journal, 2024, 39(1), 75-102. (in Thai)

[12] T. Chagpad and S.Duangbubpha, Development of Online Learning Material to Promote Decision-Making Ability in Morphine Administration in Clinical Simulation among the Third Year Nursing Students, Journal of Health and Nursing Education, 2023, 29(3), 1-18. (in Thai)

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.014

บทความวิจัย

การเพิ่มผลิตภาพและลดต้นทุนการขนถ่ายสินค้าด้วยการกำหนดเวลามาตรฐานและการศึกษาการเคลื่อนไหว: กรณีศึกษาธุรกิจบริการคลังสินค้า

สุกฤษฎิ์ ลิมโพธิ์ทอง[1*] และ คมกฤช ปิติฤกษ์[2]

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น

[2] ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

[*] ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: sugris.l@kkumail.com

วันที่รับบทความ: 8 เมษายน 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 15 กรกฎาคม 2568; วันที่ตอบรับบทความ: 24 กรกฎาคม 2568
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 21 สิงหาคม 2568

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มผลิตภาพและลดต้นทุนของกระบวนการขนถ่ายสินค้าในคลังสินค้าที่ให้บริการจัดเก็บเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ประเภทเบียร์และสุรา โดยใช้แนวคิดการศึกษาการทำงาน (Work Study) ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์เวลามาตรฐาน (Standard Time Analysis) และการศึกษาการเคลื่อนไหว (Motion Study) ครอบคลุม 7 งานย่อย ได้แก่ การขนสินค้าลงจากรถขนส่ง (Unloading), การตรวจสอบสินค้าขาเข้า (Inbound Checking), การจัดเก็บสินค้า (Put-Away), การหยิบสินค้า (Picking), การตีตรา (Stamping), การตรวจสอบสินค้าขาออก (Outbound Checking) และการขนสินค้าขึ้นรถขนส่ง (Loading) พร้อมการประยุกต์ใช้หลักการ ECRS (Eliminate, Combine, Rearrange, Simplify) และแนวคิดความสูญเปล่า 7 ประเภท เพื่อลดความสูญเปล่าในกระบวนการ และเพิ่มผลิตภาพ ผลการศึกษาพบว่า งาน Put-Away และ Stamping เป็นกิจกรรมคอขวดที่ใช้เวลาสูงกว่างานอื่นอย่างเห็นได้ชัด หลังการปรับปรุงพบว่าสามารถลดจำนวนรถยกได้ 4 คัน ลดจำนวนพนักงานได้ทั้งหมด 17 คน ส่งผลให้ลดต้นทุนได้มากกว่า 4.97 ล้านบาทต่อปี โดยยังสามารถรองรับปริมาณงานได้เท่าเดิม แสดงให้เห็นว่าการกำหนดเวลามาตรฐานและการจัดสรรทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพสามารถยกระดับการดำเนินงานของคลังสินค้าได้จริง งานวิจัยนี้จึงเหมาะสำหรับคลังสินค้าที่มีข้อจำกัดด้านงบประมาณ และต้องการแนวทางที่ประหยัด คุ้มค่า และนำไปประยุกต์ใช้ได้ทันที โดยไม่ต้องพึ่งพาระบบขนถ่ายสินค้าอัตโนมัติหรือเทคโนโลยีราคาแพง

คำสำคัญ: เวลามาตรฐาน; การศึกษาการเคลื่อนไหว; ผลิตภาพ; ต้นทุนการขนถ่ายสินค้า; การดำเนินงานคลังสินค้า

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.014

บทความวิจัย

Enhancing Productivity and Reducing Handling Cost through Standard Time and Motion Study: A Case Study of a Warehouse Service Business

Sugris Limphothong[1*] and Komkrit Pitiruek[2]

[1] Industrial Engineering Program, Faculty of Engineering, Khon Kaen University

[2] Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University

[*] Corresponding Author, E-mail: sugris.l@kkumail.com

Received: 8 April 2525; Revised: 15 July 2025; Accepted: 24 July 2025
Online Published: 21 August 2025

Abstract: This research aims to enhance productivity and reduce handling costs in a warehouse storing alcoholic beverages such as beer and spirits. The research applies Work Study concepts, including Standard Time Analysis and Motion Study, across seven subprocesses: unloading, inbound checking, put-away, picking, stamping, outbound checking, and loading. It also integrates ECRS principles (Eliminate, Combine, Rearrange, Simplify) and the concept of the seven types of waste to eliminate inefficiencies and improve labor productivity. The findings indicate that put-away and stamping were identified as bottleneck activities with noticeably higher time consumption than other tasks. After implementing improvements, the number of forklifts was reduced by four, and 17 personnel positions were eliminated, resulting in annual cost savings of over 4.97 million baht—without compromising the warehouse's service capacity. These results demonstrate that effective standard time setting and resource allocation can significantly improve warehouse operations. The proposed approach is practical for warehouses facing budget constraints and seeking cost-effective, immediately applicable solutions without relying on high-cost automation systems or advanced technologies.

Keywords: Standard Time; Motion Study; Productivity; Handling Cost; Warehouse Operations

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.014

1. บทนำ

อุตสาหกรรมโลจิสติกส์เป็นกลไกสำคัญในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจของประเทศไทย โดยรายงานโลจิสติกส์ประเทศไทย ปี 2566 ระบุว่า ต้นทุนคลังสินค้าคิดเป็น 6.4% ของ GDP รองจากต้นทุนขนส่งที่ 6.7% และสูงกว่าต้นทุนการบริหารโลจิสติกส์ที่ 1.0% ส่งผลให้ต้นทุนโลจิสติกส์รวมอยู่ที่ 14.1% ของ GDP [1] ซึ่งสูงกว่าค่าเฉลี่ยในเอเชียแปซิฟิกที่ 12.9% [2] และกลายเป็นอุปสรรคต่อขีดความสามารถในการแข่งขันของประเทศ ในระดับปฏิบัติการ ต้นทุนคลังสินค้าคิดเป็น 45.27% ของต้นทุนโลจิสติกส์ทั้งหมด [1] โดยเฉพาะต้นทุนการขนถ่ายสินค้า ซึ่งสูงถึง 65% ของต้นทุนคลังสินค้า [3] คลังกรณีศึกษานี้พบว่าต้นทุนขนถ่ายสินค้าสูงถึง 63% ของต้นทุนคลังสินค้า และมีผลิตภาพเพียง 12.97 พาเลท/ชั่วโมง สะท้อนถึงปัญหาการใช้แรงงานและรถยกอย่างไม่มีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้จึงมุ่งหาแนวทางเพิ่มผลิตภาพและลดต้นทุนขนถ่ายสินค้า โดยไม่ต้องพึ่งพาการลงทุนระบบอัตโนมัติราคาแพง

จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า Gopalan et al. [4] ได้ใช้ Time and Motion Study เพื่อวิเคราะห์เวลาทำงานและการเคลื่อนไหวของแรงงานและอุปกรณ์ในกระบวนการโลจิสติกส์ภายในโรงงาน เพื่อลดความสูญเปล่าและจัดสรรทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ ผลลัพธ์แสดงให้เห็นถึงการใช้แรงงานและเวลาได้คุ้มค่ามากขึ้น แนวทางดังกล่าวสะท้อนแนวคิดของผู้วิจัยในการเพิ่มผลิตภาพและลดต้นทุนด้วยเทคนิคง่าย ๆ ที่ไม่ต้องพึ่งเทคโนโลยีขั้นสูงในคลังสินค้า

การศึกษาของ Ahmad et al. [5] มุ่งเน้นการใช้เครื่องมือ ECRS เพื่อระบุและลดกิจกรรมที่ไม่เพิ่มคุณค่าในคลังสินค้า โดยสามารถลดความสูญเปล่าได้ถึง 25% และลดค่าแรงในจุดคอขวด ผลลัพธ์นี้สอดคล้องกับปัญหาที่พบในคลังสินค้าของผู้วิจัย และช่วยยืนยันแนวทางการจัดการจุดคอขวด เช่น การตรวจสอบและการตีตราสินค้า เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและลดต้นทุน

งานวิจัยของ Ivanov et al. [6] ได้ใช้ ECRS ควบคู่การวิเคราะห์เวลาและภาระงาน ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ 15% และลดเวลารอ 20% โดยจัดสรรทรัพยากรตามเวลามาตรฐาน ผมประยุกต์แนวคิดนี้ในรูปแบบ Forklift Pool และ Worker Pool เพื่อบริหารทรัพยากรระหว่างขาเข้าและขาออกให้มีความยืดหยุ่นมากขึ้น

จากข้อมูลดังกล่าว งานวิจัยนี้ขอเสนอการเพิ่มผลิตภาพและลดต้นทุนของกระบวนการขนถ่ายสินค้าในคลังสินค้าที่ให้บริการจัดเก็บเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ โดยมีวัตถุประสงค์หลักดังนี้ (1) เพื่อกำหนดเวลามาตรฐานให้ทุกงานย่อยของการขนถ่ายสินค้าขาเข้าและขาออก (2) เพื่อลดต้นทุนการขนถ่ายสินค้าโดยยังคงรองรับปริมาณงานได้เท่าเดิม และ (3) เพื่อเพิ่มผลิตภาพของการขนถ่ายสินค้าของคลังสินค้า

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

การวิจัยนี้มุ่งวิเคราะห์กระบวนการขนถ่ายสินค้าขาเข้าและขาออก ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.1 กระบวนการศึกษาประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก

2.1.1 กระบวนการขนถ่ายสินค้าขาเข้าประกอบด้วยงานย่อย Unloading, Inbound Checking, และ Put-Away

2.1.2 กระบวนการขนถ่ายสินค้าขาออกประกอบด้วยงานย่อย Picking, Stamping, Outbound Checking, และ Loading

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.014

2.2 กลุ่มตัวอย่าง

2.2.1 ขั้นตอนการคัดเลือกกลุ่มตัวอย่าง ตามเกณฑ์คุณสมบัติ ดังนี้

2.2.1.1 คุณสมบัติด้านประสบการณ์

- พนักงานต้องมีประสบการณ์ในตำแหน่งอย่างน้อย 2 ปี
- พนักงานขับรถยกต้องได้รับใบรับรองการควบคุมรถยกตามมาตรฐานความปลอดภัยมาแล้วไม่น้อยกว่า 2 ปี

2.2.1.2 คุณสมบัติด้านพฤติกรรมการทำงาน

- ปฏิบัติงานได้อย่างสม่ำเสมอ ไม่เร่งรีบหรือช้าจนเกินไป
- มีทัศนคติที่ดีต่องาน และสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.2.1.3 ความเข้าใจในวัตถุประสงค์ของการศึกษา

- เข้าใจวัตถุประสงค์ของการศึกษาเกี่ยวกับการกำหนด เวลามาตรฐาน
- แสดงความสมัครใจและให้ความร่วมมือในการเก็บข้อมูล เพื่อความแม่นยำและสามารถนำไปใช้ในการปรับปรุงงานได้จริง

2.2.2 จำนวนกลุ่มตัวอย่างที่ใช้จริง จากการคัดเลือกตามเกณฑ์ข้างต้น ได้กลุ่มตัวอย่างที่เข้าร่วมในการเก็บข้อมูลรวมทั้งสิ้น 12 คน ดังนี้

- พนักงานขับรถยก 6 คน ทำหน้าที่ Unloading, Put-Away, Picking, Loading
- พนักงานตรวจสอบสินค้าขาเข้าและขาออก 3 คน
- พนักงานตีตราสินค้า (Stamping) 3 คน

2.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยนี้

แบบฟอร์มต่างๆ และนาฬิกาจับเวลาเป็นเครื่องมือสำคัญในการเก็บข้อมูลภาคสนาม

2.4 ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์

ข้อมูลปัจจุบัน ดังแสดงในตารางที่ 1, 2 และ 3

ตารางที่ 1 เวลามาตรฐานและผลิตภาพของงานย่อยก่อนศึกษา ภายใต้ Utilization 100%

งานย่อย	ก่อนศึกษา	
	เวลามาตรฐาน (วินาที/พาเลท)	ผลิตภาพ (พาเลท/ชม.)
Unloading	53	67.92
Inbound Checking	60	60
Put-Away	85.4	42.15
Picking	127.5	28.24
Stamping	277.5	12.97
Outbound Checking	75	48
Loading	75	48

หมายเหตุ: Utilization = 100% หมายถึง การที่พนักงานหรือทรัพยากรถูกใช้งานอย่างเต็มประสิทธิภาพในทุกนาทีของเวลาทำงานที่กำหนด [7,8]

ตารางที่ 2 สรุปต้นทุนการขนถ่ายสินค้ารวมของคลังสินค้ากรณีศึกษา แยกตามประเภททรัพยากร

ประเภททรัพยากร	จำนวน	ต้นทุนรวม (บาท/ปี)
รถยก (Forklift) และค่าเชื้อเพลิง	22 คัน	20,671,204.31
พนักงานขับรถยก	22 คน	12,590,438.66
Inbound Checker	5 คน	3,484,407.38
Outbound Checker	8 คน	5,575,051.81
พนักงานตีตรา	37 คน	16,405,303.84
ต้นทุนขนถ่ายสินค้ารวม		58,726,406.00

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.014

ตารางที่ 3 ปริมาณสินค้าขาเข้าและขาออกเฉลี่ยรายชั่วโมงในคลังสินค้ากรณีศึกษา

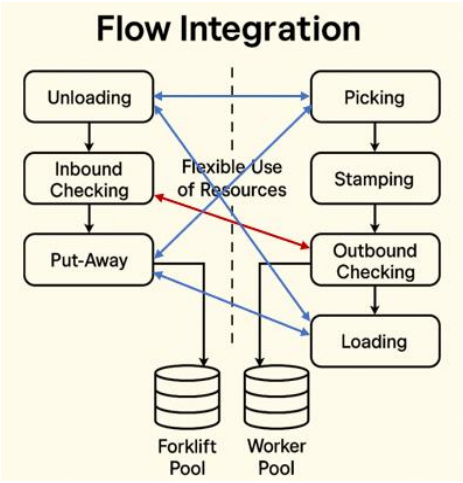
ช่วงเวลาปฏิบัติงาน	ปริมาณสินค้าขาเข้า (พาเลท)	ปริมาณสินค้าขาออก (พาเลท)
07:00-08:00	260	n/a
08:01-09:00	208	92
09:01-10:00	104	56
10:01-11:00	102	224
11:01-12:00	80	176
12:01-13:00	79	120
13:01-14:00	78	113
14:01-15:00	78	112
15:01-16:00	76	112
16:01-17:00	52	88
17:01-18:00	26	56
รวมทั้งหมด	1,143	1,149

ผู้วิจัยศึกษาข้อมูลปัจจุบันของคลังสินค้ากรณีศึกษา โดยวิเคราะห์ปัญหาเชิงระบบของการจัดการทรัพยากรขนถ่ายสินค้าระหว่างกระบวนการขาเข้าและขาออก ดังรายละเอียดแสดงใน ตารางที่ 1, ตารางที่ 2 และ ตารางที่ 3 รวมทั้งแผนการจัดสรรทรัพยากรที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

2.4.2 การวิเคราะห์กระบวนการ พบว่า ฝั่งขาเข้ามี 3 งานย่อย ได้แก่ Unloading, Inbound Checking, และ Put-Away ส่วนขาออกมี 4 งานย่อย ได้แก่ Picking, Stamping, Outbound Checking, และ Loading แม้จะมีความแตกต่างกันเชิงโครงสร้าง แต่การจัดสรรทรัพยากรถูกแยกออกจากกันโดยสิ้นเชิง (Silo Operations) ขาดการแบ่งปันทรัพยากร เช่น รถยกหรือพนักงานตรวจสอบสินค้า ทำให้บางช่วงเวลาฝั่งหนึ่งเกิดภาระงานสูงแต่ขาดทรัพยากร ขณะที่อีกฝั่งมีทรัพยากรเหลือใช้ นำไปสู่ต้นทุนที่ไม่จำเป็นและ ผลิตภาพต่ำกว่าศักยภาพจริง ผู้วิจัยเห็นว่า Flow Process Chart ไม่เพียงพอในการอธิบายการจัดสรรทรัพยากรข้ามกระบวนการ จึงเสนอแนวทาง Flexible Resource Integration โดยออกแบบระบบบริหารจัดการทรัพยากรแบบ Dynamic ที่สามารถปรับใช้รถยกและแรงงานข้ามฝั่งตามปริมาณงานในแต่ละช่วงเวลา เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากรและลดความสูญเปล่า [9,10] ดังภาพ Flow Integration Diagram ต่อไปนี้

ลูกศร 2 ทิศทางแสดงการไหลเวียนของทรัพยากรแบบยืดหยุ่นตามลักษณะงานที่มีความต้องการสูงในแต่ละช่วงเวลา ระหว่างงาน Inbound และ Outbound

นอกจากนี้ ผู้วิจัยยังได้ขยายขอบเขตของแนวคิด ECRS และ 7 Wastes จากระดับการวิเคราะห์ภายในกระบวนการ (micro-level) ไปสู่ระดับการจัดการทรัพยากรแบบระบบ (system-level management) คือ ระหว่างกระบวนการ หรือข้ามกระบวนการ (รูปที่ 1) ดังนี้



รูปที่ 1 ภาพการบูรณาการไหลของงาน

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.014

ECRS

- **Eliminate** ยกเลิกการกำหนดการใช้รถยกและพนักงานตรวจเช็คสินค้าเฉพาะกระบวนการ และให้รวมการใช้ทรัพยากรดังกล่าว เพื่อความยืดหยุ่น
- **Combine** รวมกำลังคนและรถยกจาก Inbound และ Outbound ให้สามารถสนับสนุนซึ่งกันและกัน
- **Rearrange** ปรับรูปแบบการทำงานจากแยกกระบวนการ เป็นการบริหารตาม Demand-based Scheduling
- **Simplify** แนวคิด “Forklift Pool” และ “Worker Pool” ช่วยรวมการวางแผนรถยกและพนักงานระหว่างงานขาเข้า–ขาออก แทนการแยกฝ่ายแบบเดิม ทำให้จัดสรรทรัพยากรได้ยืดหยุ่นตามปริมาณงาน ลดความซับซ้อนและเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมทรัพยากรโดยรวม

7 Wastes (เมื่อขยายแนวคิดสู่ระดับการจัดการระบบ)

- **Waiting** ในช่วงขาออกมีปริมาณงานต่ำ ลดเวลารอคอยของรถยกและพนักงานตรวจเช็คสินค้าขาออก โดยส่งไปช่วยทำงานขาเข้าในช่วงขาเข้า Peak ในทางกลับกัน ขาเข้าก็ส่งไปช่วยขาออก เพื่อลดเวลารอคอย
- **Motion** ลดการเคลื่อนไหวที่เกินความจำเป็นซึ่งเกิดจากการจัดการทรัพยากรที่ไม่มีประสิทธิภาพ แม้ดูเหมือนทำงานแต่ทรัพยากรอีกฝั่งกลับว่างเปล่า ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้ด้วยแนวทาง Cross-functional Allocation ที่เน้นความยืดหยุ่นในการใช้ทรัพยากรร่วมกัน [11,12]
- **Underutilized talent** แก้ปัญหาพนักงานหรือรถยกที่ไม่ได้ใช้งานในช่วงเวลามีงานน้อย โดยให้ไปช่วยกระบวนการที่ Peak
- **Overproduction / Inventory**:

ในคลังกรณีศึกษา ช่วง 7:00–9:00 น. ขาเข้างานแน่น รถยกและพนักงานขาเข้าไม่พอ ขณะเดียวกันขาออกไม่ค่อยมีงาน แต่รถยกและพนักงานก็ “อยู่เฉย” (ว่าง) ให้มองว่า “ทรัพยากรที่ว่าง” เป็น Inventory ที่ต้องหมุนเวียนใช้งานให้เร็ว วางแผน Flow Integration ให้รถยกจากขาออกมาช่วยขาเข้าชั่วคราว ปรับการจัดตารางทำงานและ Cross-Training เพื่อให้พนักงานตรวจสอบสินค้าสามารถสลับทำงานขาเข้าและขาออกได้

2.5 จับเวลาเบื้องต้น (N’) ของการทำงาน

เมื่อได้ค่า N’ ของแต่ละงานย่อยแล้ว นำไปคำนวณหาค่าต่างๆ [13] ดังนี้

2.5.1 จับเวลาเบื้องต้นของการทำงาน โดย

2.5.1.1 ถ้าวัฏจักรของงานย่อยสั้นกว่าหรือเท่ากับ 120 วินาที ให้จับเวลางานย่อยนั้นมา 10 ค่า ดังนี้

Unloading: **29**,**35**,31,29,35,35,31,34,35,32

Ib. Checking: **21**,**27**,24,26,27,24,26,27,27,24

Put-Away: **48**,**58**,53,56,50,50,49,54,49,49

Picking: **71,81**,72,73,72,78,79,77,71,78

Ob. Checking: **11**,**14**,11,12,14,11,13,14,12,14

Loading: **58,68**,58,58,64,67,61,61,61,66

2.5.1.2 ถ้าวัฏจักรงของงานย่อยยาวกว่า 120 วินาที ให้จับเวลางานย่อยนั้นมา 5 ค่า ดังนี้

Stamping: 123, 125, **125**, **114**, 124

2.5.2 หาค่าพิสัย (Range, R) ของเวลาเบื้องต้น (N’) จาก

$$R = H - L \quad (1)$$

เมื่อ H คือ ค่าเวลาสูงสุด และ L คือ ค่าเวลาต่ำสุด จากสมการ (1) ได้ค่า R ของทุกงานย่อย ดังนี้

Unloading: R=6, Ib. Checking: R=6, Put-Away: R=10, Picking: R=10, Stamping: R=11, Ob. Checking: R=3, Loading: R=10

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.014

2.5.3 คำนวณค่าเฉลี่ย ($\overline{X}$) จาก

$$\overline{X} = (H+L) \div 2 \qquad (2)$$

จากสมการ (2) หาค่า $\overline{X}$ ของทุกงานย่อย ได้ดังนี้ Unloading:$\overline{X}$=32,Ib.Checking:$\overline{X}$=24,Put-Away :$\overline{X}$=53,Picking:$\overline{X}$=76,Stamping:$\overline{X}$= 119.5,Ob. Checking:$\overline{X}$=12.5, Loading: $\overline{X}$=63

2.5.4 คำนวณหาค่า R/$\overline{X}$ ของทุกงานย่อย ได้ดังนี้ Unloading:R/$\overline{X}$=0.19,Ib.Checking:R/$\overline{X}$=0.25, Put-Away:R/$\overline{X}$=0.19,Picking:R/$\overline{X}$=0.13,Stamping:R/$\overline{X}$= 0.09,Ob.Checking:R/$\overline{X}$= 0.24,Loading:R/$\overline{X}$= 0.16

2.5.6 นำค่า R/$\overline{X}$ ของแต่ละงานย่อย ไปเปิดหาค่า N ในตารางที่ 4

จากการเปิดหาค่า N ในตารางที่ 4 ได้ค่า N ของแต่ละงานย่อยทั้งหมด และค่า N สูงสุด=11 จึงปัดขึ้นเป็นค่า N=20 นำมาใช้เป็นจำนวนครั้งที่เหมาะสมในการจับเวลาของทุกงานย่อย ค่า N ยิ่งมากยิ่งดี [13] และบันทึกค่าเวลาที่จับได้ทั้งหมด 20 ค่า (N=20) ของแต่ละงานย่อยลงในตารางที่ 6

2.6 การคำนวณหาเวลาปกติ

นำเวลาที่จับได้เฉลี่ย (Average Time, AT) คูณกับค่าความเร็ว การทำงานของพนักงาน (Rating Factor, RF) ดังสมการ (3)

$$NT = AT \times RF \qquad (3)$$

การประเมินค่า RF ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 4 จำนวนครั้งในการจับเวลาที่เหมาะสมที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และความคลาดเคลื่อน ±5% [13]

R/$\overline{X}$	ข้อมูลจากกลุ่ม 5	ข้อมูลจากกลุ่ม 10	R/$\overline{X}$	ข้อมูลจากกลุ่ม 5	ข้อมูลจากกลุ่ม 10	R/$\overline{X}$	ข้อมูลจากกลุ่ม 5	ข้อมูลจากกลุ่ม 10
0.10	3	2	0.42	52	30	0.74	162	93
0.12	4	2	0.44	57	33	0.76	171	98
0.14	6	3	0.46	63	36	0.78	180	103
0.16	8	4	0.48	68	39	0.80	190	108
0.18	10	6	0.50	74	42	0.82	199	113
0.20	12	7	0.52	80	46	0.84	209	119
0.22	14	8	0.54	86	49	0.86	218	125
0.24	17	10	0.56	93	53	0.88	229	131
0.26	20	11	0.58	100	57	0.90	239	138
0.28	23	13	0.60	107	61	0.92	250	143
0.30	27	15	0.62	114	65	0.94	261	149
0.32	30	17	0.64	121	69	0.96	273	156
0.34	34	20	0.66	129	74	0.98	284	162
0.36	38	22	0.68	137	78	1.00	296	169
0.38	43	24	0.70	145	83	n/a	n/a	n/a
0.40	47	27	0.72	153	88	n/a	n/a	n/a

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.014

ตารางที่ 5 การประเมินค่า RF ตามวิธีเวสติงเฮาส์ [14]

ทักษะการทำงาน	ความพยายาม	เงื่อนไขการทำงาน	ความสม่ำเสมอ
ดีเยี่ยมสุด	มากเกินไป	ดีเลิศ	สมบูรณ์
A1=+0.15	A1=+0.13	A=+0.06	A= +0.04
A2=+0.13	A2=+0.12		
ดีมาก	ดีมาก	ดีมาก	ดีมาก
B1=+0.11	B1=+0.10	B=+0.04	B= +0.03
B2=+0.08	B2=+0.08		
ดี	ดี	ดี	ดี
C1=+0.06	C1=+0.05	C=+0.02	C= +0.01
C2=+0.03	C2=+0.02		
ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง
D=0.00	D=0.00	D=0.00	D= 0.00
พอใช้	พอใช้	พอใช้	พอใช้
E1=-0.05	E1= -0.04	E= -0.03	E= -0.02
E2=-0.10	E2= -0.08		
แย่	แย่	แย่	แย่
F1= -0.16	F1= -0.12	F= -0.07	F= -0.04
F2= -0.22	F2= -0.17		

หมายเหตุ: พนง.ขับรถยก RF = 1.08 และพนง.ตรวจสอบสินค้าและพนง.ตีตรา RF=1.10 ตามแนวทางของ [8,10]

เมื่อได้ค่าเวลาปกติแล้ว นำไปคำนวณหาค่าเวลามาตรฐาน โดยนำเวลาปกติ และค่าเผื่อ (Allowance) ซึ่งค่าเผื่อความเมื่อยล้ารวมนี้ สรุปได้ ดังนี้

- พนักงานขับรถยกและตรวจสอบสินค้า มีช่วงเวลารอคอย จึงกำหนด AF=9% ซึ่งสอดคล้องกับ [8,10]
- สำหรับพนักงานตีตราสินค้า ต้องใช้กล้ามเนื้อยกกล่องเบียร์หนัก 6–8 กิโลกรัมทุกกล่อง ทำให้กล้ามเนื้อเกิดความเมื่อยล้าสูง จึงได้กำหนด AF=11% ตามแนวทางของ [8] ไปแทนลงในสมการที่ (4)

2.7 การคำนวณเวลามาตรฐาน

เวลามาตรฐาน (ST) = NT×100/(100-%AF) (4)

รายละเอียดและผลการคำนวณเวลามาตรฐานของแต่ละงานย่อยแสดงในตารางที่ 7

2.8 การคำนวณหาอัตรากำลังและจำนวนรถยกที่เหมาะสม

หลังจากได้เวลามาตรฐานของแต่ละงานย่อยครบแล้ว นำมาคำนวณหาอัตรากำลังและจำนวนรถยกที่เหมาะสม ด้วยสมการ (5), (6), และ (7) [10]

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.014

ตารางที่ 6 ผลการจับเวลา การประเมินอัตราความเร็วในการทำงาน (RF) และการคำนวณเวลาปกติ [13]

ใบบันทึกการจับเวลา														
กระบวนการ: ขนถ่ายสินค้าขาเข้า (ลำดับ 1-3) และขาออก (ลำดับ 4-7)		ประเภทสินค้า: เบียร์ 620									ว/ด/ป ที่บันทึก 3-26 กันยายน 2567			
วิธีการ: ปัจจุบัน ปรับปรุง		จำนวนสินค้าเต็มพาเลท: 75 กล่อง									ผู้จับเวลา: ……..			
งาน Unloading, Put-Away, Picking, และ Loading ใช้รถยก (Forklift) เป็นอุปกรณ์หลักในการเคลื่อนย้ายสินค้าทีละพาเลท งาน ib_check, ob_check เป็นงานตรวจเช็คข้อมูลบน PDA กับข้อมูลบนพาเลททีละพาเลท ไม่ได้ใช้แรงกายยกสินค้า งาน Stamping ยกสินค้าขึ้นมาทีละกล่องเพื่อตีตรา บนกล่องทุกใบทั้งหมด 75 กล่อง ต่อ พาเลท กล่องสินค้ามีน้ำหนักประมาณ 6-8 กก. ต่อ กล่อง									รายงานสถานที่ทำงาน: แสงสว่างเหมาะสม อากาศถ่ายเทสะดวก				
ลำดับ	งานย่อย	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Avg. Time (AT)	Rating Factor (RF)	NT= AT x RF
1	Unloading	29	35	31	29	35	35	31	34	35	32	32.20	108%	34.78
		34	32	29	35	35	34	29	29	29	32			
2	Inbound Checking	21	27	24	26	27	24	26	27	27	24	23.87	110%	26.26
		22	25	22	23	21	20	23	20	23	25			
3	Put-Away	48	58	53	56	50	50	49	54	49	49	53	108%	57.24
		58	56	50	58	56	58	55	53	52	48			
4	Picking	71	81	72	73	72	78	79	77	71	78	75	108%	81
		74	77	75	77	76	77	71	75	73	73			
5	Stamping	123	125	126	114	114	125	124	121	125	112	120.5	110%	132.55
		108	126	107	122	126	124	125	124	124	115			
6	Outbound Checking	11	14	11	12	14	11	13	14	12	14	12.7	110%	13.97
		13	11	13	13	12	13	11	14	14	14			
7	Loading	58	68	58	58	64	67	61	61	61	66	63.25	108%	68.31
		59	65	67	62	63	65	61	67	67	67			

หมายเหตุ:

RF มากกว่า 1 หมายถึง พนักงานทำงานได้เร็วกว่ามาตรฐานทั่วไป จึงต้องปรับเวลาที่จับได้ให้สูงขึ้น เพื่อให้สะท้อน ‘เวลาทำงานตามมาตรฐานของคนทั่วไป’ ได้อย่างยุติธรรม” หรือ ค่า RF มากกว่า 1 ใช้เพื่อชดเชยกรณีที่พนักงานทำงานได้เร็วกว่าค่าเฉลี่ยมาตรฐาน เพื่อให้เวลาปกติ ที่คำนวณได้สะท้อนระดับความสามารถทั่วไปของพนักงานปกติ ไม่ใช่พนักงานที่มีความชำนาญเป็นพิเศษ [8]

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.014

ตารางที่ 7 ผลการคำนวณเวลามาตรฐาน (ST) ของแต่ละงานย่อย (หน่วย:วินาที/พาเลท)

Unloading	$ST_{unloading}$ = 34.78×100/(100-9)=38.22
Inbound Checking	ST_{inb_check} = 26.26×100/(100-9)=28.86
Put-Away	ST_{put_away} = 57.24×100/(100-9)=62.90
Picking	ST_{pick} = 81×100/(100-9)=89
Stamping	ST_{stamp} = 132.55×100/(100-11)=148.93
Outbound Checking	ST_{ob_check} = 13.97×100/(100-9)=15.35
Loading	ST_{load} = 68.31×100/(100-9)=75.07

1. หาเวลามาตรฐานรวม (Total Standard Time) ที่ใช้จัดการกับปริมาณงานตามจริงรายชั่วโมงจากสมการ (5) ดังนี้

เวลามาตรฐานรวม = ปริมาณงานรายชั่วโมง × เวลามาตรฐาน (5)

2. คำนวณหาเวลาทำงานที่มีประสิทธิภาพ (Effective Working Time) ที่ใช้ต่อรถยก 1 คัน หรือต่อพนักงาน 1 คน หรือต่อ 1 ทีม ได้จากสมการที่ (6)

เวลาทำงานที่มีประสิทธิภาพ = 3,600 วินาที x % Utilization (6)

3. หาจำนวนทรัพยากรที่ต้องใช้ เช่น จำนวนรถยก หรือจำนวนพนักงาน หรือจำนวนทีมพนักงานที่ต้องใช้ ได้จากสมการที่ (7)

$$\text{จำนวนพนักงาน} = \frac{\text{เวลามาตรฐานรวม}}{\text{เวลาทำงานที่มีประสิทธิภาพ}} \quad (7)$$

หากผลลัพธ์มีค่าทศนิยม ไม่ว่าจะน้อยกว่า 5 หรือไม่ ให้ปัดขึ้นเป็นจำนวนเต็มเสมอ เนื่องจากการปัดลงอาจส่งผลกระทบเชิงลบต่อความสามารถในการให้บริการ ดังตัวอย่างแสดงวิธีการคำนวณ ต่อไปนี้

ตัวอย่าง การคำนวณหาอัตรากำลังของพนักงานขับรถยกและจำนวนรถยก กรณีงานย่อย Unloading ที่มีเวลามาตรฐาน = 38.22 วินาทีต่อพาเลท ภายใต้ Utilization = 85% โดยในช่วงเวลา 07:00-08:00 น. (1 ชั่วโมง) มีสินค้าขาเข้า 260 พาเลท

วิธีทำ

เวลามาตรฐานรวม = ปริมาณพาเลทรายชั่วโมง × ST
=260×38.22=9,937.2 วินาที

เวลาทำงานที่มีประสิทธิภาพ= 3,600 x % Utilization
= 3,600 X 0.85
= 3,060 วินาที ใน 1 ชั่วโมง

จำนวนรถยกที่ใช้ = 9,937.2 ÷ 3,060 = 3.25 คัน
ปัดขึ้น ทำให้จำนวนรถยกที่ใช้ = 4 คัน
จำนวนพนักงานขับรถยก = 4 คน

ในทำนองเดียวกัน สามารถคำนวณหาอัตรากำลังและจำนวนรถยกของแต่ละงานย่อยที่เหลือ ในแต่ละช่วงเวลา โดยผลการวิเคราะห์อัตรากำลังและจำนวนรถยกที่เหมาะสม ได้แสดงไว้ในตารางที่ 8 ดังนี้

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.014

ตารางที่ 8 การลดทรัพยากรและต้นทุนการขนถ่ายสินค้าภายใต้เวลามาตรฐานและ Utilization 85%*

ประเภททรัพยากร	ก่อนการศึกษา	หลังการศึกษา	รวมจำนวนที่ลดลง	ประหยัดค่าใช้จ่าย (บาท/เดือน)
รถยก	22 คัน	18 คัน	4 คัน	110,560.00
พนักงานขับรถยก	22 คน	18 คน	4 คน	67,340.00
Inbound Checker	5 คน	3 คน	2 คน	41,000.00
Outbound Checker	8 คน	1 คน	7 คน	143,500.00
พนักงานตีตรา	37 คน	33 คน	4 คน	52,172.00
จำนวนพนักงานทั้งหมด	72 คน	55 คน	17 คน	n/a
ประหยัดต้นทุนขนถ่ายสินค้าทั้งหมด (บาท/เดือน)				**414,572.00**

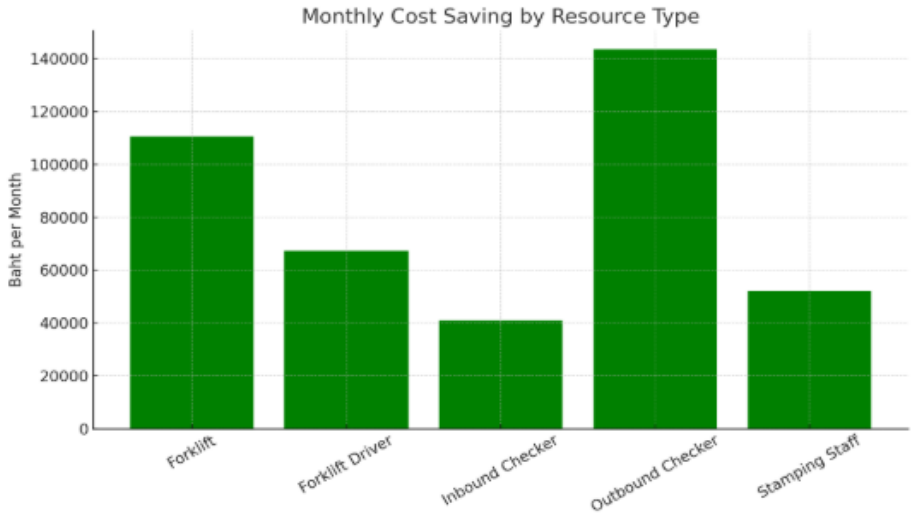
หมายเหตุ: ภายใต้ Utilization 85% หมายถึง การวางแผนให้ทรัพยากร เช่น พนักงานหรือรถยก ทำงานจริงในอัตรา 85% ของเวลาทั้งหมด โดยคงเวลาเผื่อ 15% สำหรับการพัก การรอ การจัดเตรียมอุปกรณ์ หรือการสื่อสารภายใน Utilization 85% ถือว่าเหมาะสมและเป็นที่ยอมรับในทางอุตสาหกรรม [10]

ผลการลดทรัพยากรและต้นทุนที่แสดงในตารางที่ 8 เป็นผลลัพธ์โดยตรงจากการประยุกต์ใช้แนวคิด ECRS และ 7 Wastes ร่วมกับ Flexible Resource Integration ซึ่งออกแบบระบบบริหารจัดการทรัพยากรแบบ *Dynamic* และสนับสนุนด้วยการกำหนด เวลามาตรฐานภายใต้ Utilization 85% ทำให้สามารถวิเคราะห์และจัดสรร อัตรากำลังคนและจำนวนรถยกอย่างแม่นยำ สอดคล้องกับปริมาณงานจริงในแต่ละช่วงเวลา การลดจำนวนพนักงานลง 17 คน และรถยก 4 คัน โดยไม่กระทบต่อคุณภาพบริการ ไม่เพียงสะท้อนถึง ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ (ลดต้นทุนได้ 414,572 บาท/เดือน หรือกว่า 4.97 ล้านบาท/ปี) แต่ยังแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของคลังสินค้าในการสร้างผลิตภาพใหม่โดยไม่ต้องพึ่งเทคโนโลยีราคาแพง ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับประเทศกำลังพัฒนา

ผลลัพธ์นี้พิสูจน์ว่าการจัดการ “คน + เวลา + ทรัพยากร” อย่างมีระบบ คือ คำตอบของการเพิ่มประสิทธิภาพที่ยั่งยืน

เพื่อให้เข้าใจง่ายขึ้น จึงนำข้อมูลจากตารางที่ 8 มาสร้างกราฟแสดงผลการประหยัดต้นทุนรายเดือนในแต่ละประเภททรัพยากรการขนถ่ายสินค้า (รูปที่ 2) ในชื่อ "Monthly Cost Saving by Resource Type" เพื่อให้เห็นภาพรวมของต้นทุนที่ลดลงในแต่ละประเภททรัพยากรได้ชัดเจนและเข้าใจง่าย

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.014



รูปที่ 2 กราฟแสดงผลการประหยัดต้นทุนรายเดือนในแต่ละประเภททรัพยากรการขนถ่ายสินค้า

รูปที่ 2 เป็นกราฟแสดงให้เห็นผลประหยัดต้นทุนรายเดือนจากการลดจำนวนการใช้ทรัพยากรในแต่ละประเภทอย่างเป็นรูปธรรม โดยใช้แนวทางการวิเคราะห์เวลามาตรฐาน ร่วมกับหลัก ECRS และการจัดการความสูญเปล่า 7 ประเภท ผลลัพธ์ชี้ให้เห็นว่าการจัดสรรแรงงานและทรัพยากรอย่างเหมาะสม โดยอ้างอิงจากความสามารถการทำงานจริง สามารถลดต้นทุนได้มากกว่า 4.97 ล้านบาทต่อปี ซึ่งเป็นทางเลือกที่คุ้มค่าและยั่งยืนสำหรับคลังสินค้าที่มีข้อจำกัดด้านงบประมาณ การลดจำนวนพนักงานลง 17 คน และรถยก 4 คัน โดยไม่กระทบต่อคุณภาพบริการ ไม่เพียงสะท้อนถึง ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ (ลดต้นทุนได้ 414,572 บาท/เดือน หรือกว่า 4.97 ล้านบาท/ปี) แต่ยังแสดงให้เห็นถึง ศักยภาพของคลังสินค้าในการสร้างผลิตภาพใหม่โดยไม่ต้องพึ่งเทคโนโลยีราคาแพง ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับประเทศกำลังพัฒนา

2.9 การคำนวณหาผลิตภาพ กระบวนการขนถ่ายสินค้าของคลังสินค้ากรณีศึกษา ประกอบด้วยงานย่อยทั้งหมด 7 งานย่อย โดยมีเวลามาตรฐาน ดังแสดงในตารางที่ 9

2.9.1 การคำนวณหาผลิตภาพของทั้ง 7 งานย่อย

คำนวณได้จากสมการ (8) [15] ภายใต้ Utilization 85% ดังนี้

ผลิตภาพ = เวลาทำงานที่มีประสิทธิภาพ÷ST

$$= 3{,}060 \div ST \quad (8)$$

ตัวอย่างเช่น การคำนวณหาผลิตภาพของงาน Unloading ที่มี ST=38.22 วินาทีต่อพาเลท จากสมการ (8)

ผลิตภาพ = 3,060 ÷ ST

ดังนั้น Unloading มี ผลิตภาพ = 3,060÷38.22

= 80.06 พาเลท/ชม.

ในทำนองเดียวกัน ผลิตภาพงานย่อยอื่นๆ สามารถคำนวณได้ในลักษณะเดียวกัน ผลการคำนวณแสดงในตารางที่ 9 ดังนี้

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.014

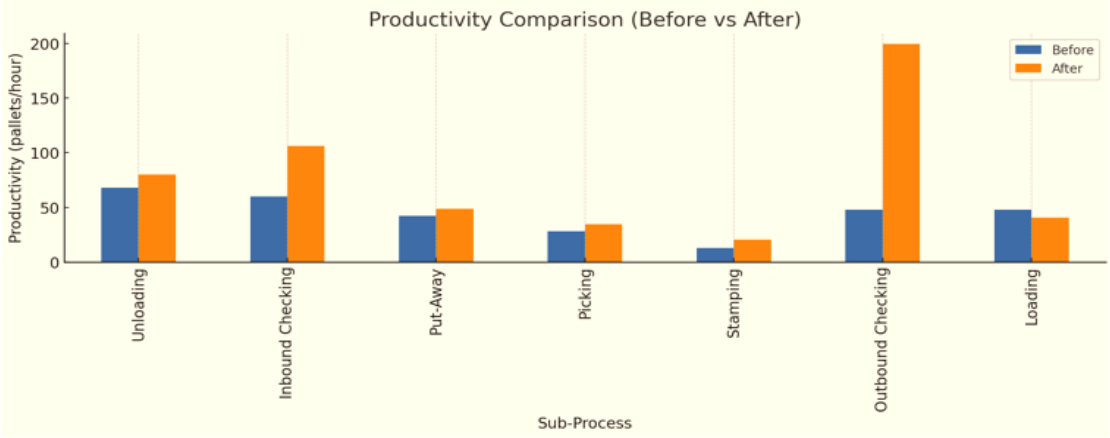
ตารางที่ 9 การเปรียบเทียบเวลามาตรฐานและผลิตภาพของงานย่อยก่อนศึกษา ภายใต้ Utilization 100% และ และหลังศึกษา ภายใต้ Utilization 85%

งานย่อย	ก่อนศึกษา		หลังศึกษา	
	เวลามาตรฐาน (วินาที/พาเลท)	ผลิตภาพ (พาเลท/ชั่วโมง)	เวลามาตรฐาน (วินาที/พาเลท)	ผลิตภาพ (พาเลท/ชั่วโมง)
Unloading	53	67.92	38.22	80.06
Inbound Checking	60	60	28.86	106.03
Put-Away	85.4	42.15	62.90	48.65
Picking	127.5	28.24	89	34.38
Stamping	277.5	12.97	148.93	20.55
Outbound Checking	75	48	15.35	199.35
Loading	75	48	75.07	40.76

จากตารางที่ 9 แสดงให้เห็นถึงผลของการปรับปรุงกระบวนการขนถ่ายสินค้าในคลังสินค้าโดยใช้แนวทาง Work Study ซึ่งครอบคลุมการกำหนดเวลามาตรฐานใหม่และการวิเคราะห์การเคลื่อนไหวที่ไม่จำเป็น ผลการศึกษาพบว่า เมื่อกำหนด Utilization ที่ 85% การปรับปรุงดังกล่าวสามารถลดระยะเวลาในการทำงานแต่ละกิจกรรมได้อย่างเห็นได้ชัด พร้อมกับเพิ่มผลิตภาพอย่างเด่นชัดในทุกกระบวนงานย่อย เช่น ในงาน Picking เวลามาตรฐานลดลงจาก 127.5 วินาทีต่อพาเลท เหลือเพียง 89 วินาทีต่อพาเลท ขณะที่ผลิตภาพเพิ่มขึ้นจาก 42.15 เป็น 48.65 พาเลทต่อชั่วโมง และงาน Outbound Checking ที่มักเกิดความล่าช้า ยังแสดงการเพิ่มผลิตภาพได้มากที่สุด จาก 48 เป็น 199.35 พาเลท/ชั่วโมง ซึ่งสะท้อนถึงการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการโดยไม่ต้องใช้เงินลงทุนจำนวนมาก ซึ่งสอดคล้องกับหลักการของแนวคิด ECRS ที่องค์กรชั้นนำในภาคโลจิสติกส์นำมาใช้อย่างกว้างขวาง [12] โดยรวมการปรับปรุงนี้แสดงให้เห็นถึงความคุ้มค่าในเชิงเวลาและต้นทุน รวมถึงความยืดหยุ่นของการใช้ทรัพยากรที่เหมาะสมยิ่งขึ้นในทุกกิจกรรมของกระบวนการขนถ่ายสินค้า

จากผลการวิเคราะห์ใน ตารางที่ 9 พบว่า การประยุกต์ใช้แนวทาง Work Study โดยใช้เทคนิค Time Study และ Motion Study สามารถลดเวลาทำงานมาตรฐานในแต่ละงานย่อยได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในขั้นตอน Put-Away และ Stamping ที่เดิมเป็นคอขวดของกระบวนการ ภายหลังการปรับปรุง พบว่า ผลิตภาพแรงงาน เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เช่น กรณี Put-Away ผลิตภาพเพิ่มจาก 42.15 เป็น 48.65 พาเลทต่อชั่วโมง และ Outbound Checking เพิ่มจาก 48 เป็น 199.35 พาเลทต่อชั่วโมง สะท้อนถึงการใช้ทรัพยากรได้คุ้มค่าและยืดหยุ่นมากขึ้น การวิเคราะห์นี้อยู่ภายใต้เงื่อนไข Utilization 85% ซึ่งสะท้อนสภาพการทำงานจริงมากกว่าการใช้งานเต็ม 100% ที่อาจไม่สอดคล้องกับภาคปฏิบัติ ข้อมูลจากตารางสามารถนำเสนอในรูปกราฟเปรียบเทียบผลิตภาพก่อนและหลังการปรับปรุง (รูปที่ 3) เพื่อให้เห็นแนวโน้มได้ชัดเจน และใช้สนับสนุนการตัดสินใจเชิงนโยบายหรือการจัดการได้อย่างมีประสิทธิภาพ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.014



รูปที่ 3 กราฟเปรียบเทียบผลิตภาพ (วินาทีต่อพาเลท) ของแต่ละงานย่อยก่อนและหลังการปรับปรุง

รูปที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบผลิตภาพก่อนและหลังการปรับปรุง โดยพบว่าทุกกิจกรรมสามารถเพิ่มผลิตภาพ (พาเลทต่อชั่วโมง) ได้อย่างต่อเนื่อง (ยกเว้น Loading) โดยเฉพาะงาน Outbound Checking ที่ผลิตภาพเพิ่มขึ้นมากกว่า 4 เท่า สะท้อนถึงการบริหารทรัพยากรที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยไม่ต้องเพิ่มกำลังคนหรืออุปกรณ์เพิ่มเติม ซึ่งสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยในการยกระดับผลิตภาพและลดต้นทุนโดยไม่พึ่งพาการลงทุนทางเทคโนโลยีที่มีค่าใช้จ่ายสูง

2.9.2 การคำนวณผลิตภาพรวมของกระบวนการ ขนถ่ายสินค้าขาเข้า ($Pdty_{inb_proc}$) พิจารณาจากงานย่อยที่มีผลิตภาพต่ำสุดจะเป็นคอขวด ซึ่งจำกัดความสามารถของขาเข้า ดังนั้น

$Pdty_{inb_proc}$= Min.{$Pdty_{unload}$,$Pdty_{inb_check}$,$Pdty_{put_away}$}
= Min.{80.06, 106.03, 48.65}
= 48.65 (pallets/hr.)

Put Away มีผลิตภาพต่ำสุด จึงเป็นคอขวดของขาเข้า

2.9.3 การคำนวณผลิตภาพรวมของกระบวนการขนถ่ายสินค้าขาออก ($Pdty_{ob_proc}$) พิจารณาจากงานย่อยที่มีผลิตภาพต่ำสุดจะเป็นคอขวด ซึ่งจำกัดความสามารถของขาออก ดังนั้น

$Pdty_{ob_proc}$=
Min.{$Pdty_{pick}$,$Pdty_{stamp}$,$Pdty_{ob_check}$,$Pdty_{load}$}
= Min. {34.38, 20.55, 199.35, 40.76}
= 20.55 pallets/hr.

Stamping มีผลิตภาพต่ำสุด จึงเป็นคอขวดของขาออก

2.9.4 การคำนวณผลิตภาพรวมของคลังสินค้า ($Pdty_{warehouse}$) พิจารณาจากกระบวนการที่มีผลิตภาพต่ำกว่าจะเป็นคอขวด ซึ่งจำกัดความสามารถของคลังสินค้า

$Pdty_{warehouse}$= Min. {$Pdty_{inb\text{-}proc}$,$Pdty_{ob_proc}$}
= Min. {48.65, 20.55}
= 20.55 (pallets/hr.)

กระบวนการขาออกมีผลิตภาพต่ำกว่าขาเข้า จึงเป็นคอขวดของคลังสินค้ากรณีศึกษา รายละเอียดผลิตภาพ ดังแสดงในตารางที่ 10

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.014

ตารางที่ 10 ผลิตภาพ 3 ระดับของกระบวนการขนถ่ายสินค้าในคลังสินค้ากรณีศึกษา

กระบวนการขนถ่ายสินค้า	Task	Productivity (Pallets/Hr.)		
		Task- Level	Process-Level	WH-Level
ขาเข้า	Unloading	80.06	48.65	20.55
	Inbound Checking	106.03		
	Put-Away	48.65		
ขาออก	Picking	34.38	20.55	
	Stamping	20.55		
	Outbound Checking	199.35		
	Loading	40.76		

จากข้อมูลในตารางที่ 10 แสดงผลระดับ Process-Level และระดับคลังสินค้า ดังนี้

- ระดับ Process-Level: กระบวนการขาเข้ามีผลิตภาพ=48.65 พาเลท/ชั่วโมง ส่วนขาออกที่มีผลิตภาพ=20.55 พาเลท/ชั่วโมง แสดงว่า ขาออก มีข้อจำกัดด้านประสิทธิภาพ ทำให้ต้องใช้เวลานานกว่า
- ระดับคลังสินค้า (WH-Level): มีผลิตภาพ = 20.55 พาเลท/ชั่วโมง ซึ่งเท่ากับผลิตภาพของกระบวนการขาออก ที่เป็นคอขวดหลักที่ควรต้องเร่งปรับปรุง

3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

การประยุกต์ใช้ Work Study ร่วมกับ Time และ Motion Study ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดำเนินงานในคลังสินค้า โดยเฉพาะในจุดคอขวดอย่าง Put-Away และ Stamping ที่สามารถลดเวลามาตรฐานและเพิ่มผลิตภาพได้อย่างชัดเจน สอดคล้องกับแนวคิดของ [4,8] ที่ชี้ว่าการศึกษางานสามารถเพิ่มผลิตภาพโดยไม่ต้องพึ่งเทคโนโลยีราคาแพง อีกทั้งแนวทางนี้ยังสนับสนุนหลักการ ECRS และแนวคิด Standard Work ขององค์กรชั้นนำ เช่น Toyota และ DHL [5,12] ซึ่งมุ่งเน้นการจัดการทรัพยากรอย่างยืดหยุ่นและยั่งยืน

3.1 ข้อจำกัดของงานวิจัย

แม้งานวิจัยนี้จะแสดงผลลัพธ์ด้านผลิตภาพและการลดต้นทุนได้อย่างชัดเจน แต่ยังมีข้อจำกัดเฉพาะคลังสินค้าเครื่องดื่มแบบ Full Pallet และวิธีเก็บข้อมูลด้วยการจับเวลาอาจก่อให้เกิดอคติ อีกทั้งยังไม่ครอบคลุมประเด็นคุณภาพชีวิตการทำงานและความพึงพอใจของพนักงาน ซึ่งควรศึกษาเพิ่มเติมในอนาคต

3.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

เพื่อเสริมความครอบคลุม งานวิจัยในอนาคตควรขยายไปยังคลังสินค้าประเภทอื่น และใช้เทคนิควัดงานอื่น ๆ เช่น Work Sampling หรือ MTM เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพ นอกจากนี้ ควรศึกษาผลกระทบด้านความ พึงพอใจของพนักงาน และประเมินผลในระยะยาว

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.014

4. บทสรุป

การวิจัยเริ่มจากการวิเคราะห์กระบวนการขนถ่ายสินค้า พบปัญหาทรัพยากรไม่สมดุลและเกิดคอขวดที่ Put-away และ Stamping จึงเสนอแนวทางปรับปรุงด้วย Flow Integration, ECRS และการกำหนดเวลามาตรฐาน เพื่อคำนวณอัตรากำลังและวิเคราะห์ผลิตภาพภายใต้ Utilization 85% ผลลัพธ์คือ ผลิตภาพเพิ่มสูงสุด 58.44% ลดรถยก 4 คัน พนักงาน 17 คน และลดต้นทุนได้กว่า 4.97 ล้านบาทต่อปี โดยไม่ต้องใช้เทคโนโลยีราคาแพง

5. เอกสารอ้างอิง

[1] https://www.nesdc.go.th/download/logistics/report/LogisticsReportEN.pdf (Accessed on 7 January 2025). (in Thai)

[2] https://www.ttbbank.com/th/newsroom/detail/ttba-transportation-jan-2025 (Accessed on 11 February 2025). (in Thai)

[3] https://asean.org/wp-content/uploads/2023/02/CHAPTER-04-WAREHOUSING-ACTIVITIES.pdf (Accessed on 09 June 2024).

[4] V. Gopalan, P. Jayaraman and M. Sundarakani, Improving internal logistics process by time and motion study: A case study, Procedia Computer Science, 2023, 218, 3171-3176.

[5] F. Ahmad, M.K. Hasan, S.J. Lee and M. Hussain, Waste identification and reduction using lean tools in warehouse: A case of beverage company, Journal of Industrial Engineering and Management, 2023, 16(1), 89-102.

[6] D. Ivanov, A. Dolgui and B. Sokolov, A practical application of lean methods for warehouse performance improvement, International Journal of Production Research, 2023, 61(2), 495-509.

[7] B.W. Niebel and A. Freivalds, Methods, standards, and work design, 13th Ed., McGraw-Hill Education, NY, USA, 2014, 379-415.

[8] R.M. Barnes, Motion and time study: Design and measurement of work, 7th Ed., John Wiley and Sons, NY, USA, 1980, 257-287.

[9] L.J. Krajewski, M.K. Malhotra and L.P. Ritzman, Operations management: Processes and supply chains, 12th Ed., Pearson, NJ, USA, 2019, 385-410.

[10] B.W. Niebel and A. Freivalds, Methods, standards, and work design, 11th Ed., McGraw-Hill, NY, USA, 2003, 481-520.

[11] T. Ohno, Toyota production system: Beyond large-scale production, Trans. G.M. Bodek, Productivity Press, OR, USA, 1988, 33-40.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.014

[12] J.K. Liker, The toyota way: 14 management principles from the world's greatest manufacturer, McGraw-Hill, NY, USA, 2004, 45–70.

[13] R. Kanchanapanyakom, Industrial work study, Rev. Ed., Top Publishing Co., Ltd., Bangkok, Thailand, 2019, 229-330. (in Thai)

[14] K. Sirikasemsuk, Work study and productivity improvement, SE-ED, Bangkok, Thailand, 2022, 257-297. (in Thai)

[15] M.P. Groover, Work systems and the methods, measurement, and management of work, 2nd Ed., Pearson, NY, USA, 2015, 60-75.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.015

บทความวิจัย

ประสิทธิภาพในการต้านทานความล้าของแผ่นพื้นคอนกรีตผสมยางรถยนต์เก่าบดละเอียดขนาดเสมือนจริง

ศุภณัฐชัย เขียวรอด[1] และ กิตติภูมิ รอดสิน[2*]

[1] ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

[2] ศูนย์วิจัยพลศาสตร์โครงสร้างและการจัดการเมือง (CESD), วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

[*] ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: kittipoom.r@cit.kmutnb.ac.th

วันที่รับบทความ: 3 เมษายน 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 21 กรกฎาคม 2568; วันที่ตอบรับบทความ: 30 กรกฎาคม 2568
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 22 สิงหาคม 2568

บทคัดย่อ: การแตกร้าวของพื้นสะพานคอนกรีตเป็นปัญหาที่ทำให้ต้องซ่อมแซมสะพานก่อนเวลาอันควร สาเหตุหลักเกิดจากพื้นสะพานรับแรงกระทำซ้ำไปมา ซึ่งทำให้เกิดความล้าและผลของความล้าทำให้พื้นสะพานแตกร้าวจนเกิดความเสียหาย การใช้เม็ดยางรถยนต์เก่าบดละเอียดเป็นส่วนผสมในคอนกรีตนั้นได้รับการพิสูจน์แล้วว่าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการลดการแตกร้าว งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อแก้ไขปัญหาการแตกร้าวเนื่องจากความล้าของพื้นสะพานคอนกรีต โดยมีการกำหนดตัวแปรของการทดลองให้ใกล้เคียงกับการใช้งานจริง และเปรียบเทียบผลการลดรอยแตกร้าวของพื้นคอนกรีต ขนาด 2.00 x 8.00 x 0.20 เมตร ที่ก่อสร้างด้วยคอนกรีตปกติและคอนกรีตผสมเม็ดยางรถยนต์เก่าบดละเอียดแทนที่ทรายร้อยละ 25 ของปริมาตรทราย โดยนำพื้นสะพานมาทดสอบในรูปแบบการรับแรงแบบสองทาง (Two Way Slab) จำนวน 8 ตัวอย่าง ตัวอย่างทดสอบแรกของคอนกรีตทั้ง 2 ประเภทถูกนำมาทดสอบความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของพื้นสะพานเป็นตัวอย่างที่ 1 และ 2 หลังจากนั้นจะทำการทดสอบความล้าโดยการให้แรงกระทำเป็น 40 55 และ 70 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงสูงสุดเป็นตัวอย่างที่ 3 ถึง 8 ตามลำดับเพื่อหาความสามารถของความต้านทานความล้าของการผสมเม็ดยางรถยนต์เพื่อลดรอยแตกร้าว การทดสอบจะนำรอยแตกร้าว 40 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ เทียบกับจำนวนรอบของแรงกระทำและอัตราส่วนแรงกระทำต่อกำลังรับน้ำหนักของพื้นสะพานเพื่อวิเคราะห์ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ในช่วงอัตราส่วนแรงกระทำต่อกำลังรับน้ำหนักของพื้นสะพานที่มีค่าน้อยกว่า 0.5 พื้นสะพาน CRC มีความสามารถในการต้านทานความล้าสูงกว่าพื้นสะพาน NC 93.08% และในช่วงอัตราส่วนแรงกระทำต่อกำลังรับน้ำหนักของพื้นสะพานที่มีค่ามากกว่า 0.5 พื้นสะพาน CRC มีค่าใกล้เคียงกับพื้นสะพาน NC

คำสำคัญ: ยางรถยนต์เก่าบดละเอียด; ความสามารถการต้านทานความล้า; การทดสอบความล้า; แผ่นพื้นคอนกรีต

บทความวิจัย

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.015

Fatigue Performance of Full-scale Crumb Rubber Concrete Slabs

Supanatchai Khieorod[1] and Kittipoom Rodsin[2*]

[1] Construction Engineering Technology, Department of Civil and Environmental Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

[2] Center of Excellence in Structural Dynamics and Urban Management (CESD), College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

[*] Corresponding author, E-mail: kittipoom.r@cit.kmutnb.ac.th

Received: 3 April 2025; Revised: 21 July 2025; Accepted: 30 July 2025
Online Published: 22 August 2025

Abstract: Cracking of concrete bridge decks is a significant issue that leads to premature maintenance and repair of bridges. The primary cause of this problem is the repeated loading applied to the bridge decks, which induces fatigue and eventually results in cracking and damage. The use of finely ground recycled rubber particles from waste tires as a concrete additive has been proven to be an effective method for reducing cracking. This research aims to address the problem of fatigue-induced cracking in concrete bridge decks. The experimental variables were designed to closely simulate real-life applications. The study compares the crack reduction performance of concrete bridge decks with dimensions of 2.00 x 8.00 x 0.20 meters, constructed using both conventional concrete and concrete incorporating finely ground recycled rubber particles, replacing 25% of the sand volume. A total of 8 specimens were tested under two-way slab loading conditions. The first specimens of each concrete type were subjected to static loading tests to determine the maximum load-bearing capacity (specimens 1 and 2). Subsequently, fatigue tests were conducted on specimens 3 through 8 by applying loads at 40% 55% and 70% of the maximum load capacity to evaluate the fatigue resistance provided by the rubberized concrete in reducing cracking. The fatigue performance was assessed by measuring the area of cracking equivalent to 40% of the total slab surface, comparing the number of load cycles and the load ratio relative to the ultimate load capacity of the slabs. The test results indicated that, in the range where the load ratio to the ultimate load capacity was less than 0.5, the CRC slabs exhibited 93.08% higher fatigue resistance compared to the NC slabs. In the range where the load ratio exceeded 0.5, the fatigue performance of CRC slabs was comparable to that of NC slabs.

Keywords: Crumb rubber concrete; Fatigue performance; Fatigue Test; Concrete slab

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.015

1. บทนำ

พื้นสะพานถือเป็นส่วนประกอบของโครงสร้างที่ได้รับแรงกระทำโดยตรงจากการจราจร และ บ่อยครั้งพื้นสะพานเกิดความเสียหายจากการใช้งานเป็นระยะเวลานาน ดังรูปที่ 1 ถึงแม้ขนาดของแรงกระทำมีขนาดน้อยกว่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ได้ออกแบบหรือเรียกว่าความล้า ซึ่งความเสียหายส่งผลกระทบโดยรวมต่อการรับน้ำหนักของโครงสร้างสะพานอันตรายต่อผู้ใช้ทางและเป็นภาระในการบำรุงรักษา

การแก้ไขปัญหาความล้าของพื้นสะพานสามารถทำได้โดยการเพิ่มกำลังรับน้ำหนักของโครงสร้าง เช่น การเพิ่มความหนาของพื้นสะพาน และ การเพิ่มจำนวนคานรองรับ วิธีดังกล่าวถึงแม้จะทำให้กำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างเพิ่มขึ้น แต่จะเป็นการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกคงที่ให้กับโครงสร้างเดิมโดยไม่จำเป็น

อีกหนึ่งทางเลือกที่ได้รับความสนใจคือการนำเม็ดยางรถยนต์เก่าบดละเอียดมาแทนที่ทรายในส่วนผสมคอนกรีต (Crumb Rubber Concrete, CRC) การแทนที่เม็ดยางเข้าไปในคอนกรีตสามารถช่วยเพิ่มความเหนียว (Toughness) ความสามารถในการดูดซับพลังงาน (Damping Ratio) ความทนทานต่อความล้า (Fatigue Resistance) และ ความสามารถในการต้านทานแรงกระแทก (Impact Resistance) [1,2] วิธีนี้จึงเหมาะกับการนำไปใช้ในงานคอนกรีตที่ต้องการความเหนียว และ ทนแรงกระแทกสูง เช่น พื้นกันกระแทก โครงสร้างที่ต้องการลดแรงสั่นสะเทือน หรือโครงสร้างที่ต้องรับแรงกระทำซ้ำ เช่น พื้นสะพาน เป็นต้น [3] การพัฒนาการของความเครียดซึ่งแสดงถึงความสามารถในการลดแรงเค้น (Stress) และ ภายใน

รูปที่ 1 ความเสียหายของพื้นสะพาน

(Internal Stress Development) ของ CRC นั้นต่ำกว่าคอนกรีตปกติ เมื่ออยู่ในสภาพแวดล้อมที่ต่างกัน CRC นั้นมีความสามารถในการคลายความเครียดที่เกิดจากอุณหภูมิได้ดีกว่าคอนกรีตปกติ [4] CRC สามารถช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อม จากขยะยางรถยนต์ ช่วยลดการใช้ทรัพยากรจากธรรมชาติ และ เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม [5]

ในปัจจุบันได้มีการศึกษาคุณสมบัติของ CRC เพื่อแก้ปัญหาด้านความล้าจำนวนมาก สำหรับงานทางเท้าได้มีการสังเกตลักษณะความเสียหายโดยใช้เม็ดยางแทนที่มวลรวม พบว่าการผสมเม็ดยางในคอนกรีตสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติด้านความล้า และ เพิ่มความสามารถในการดูดซับพลังงานจากแรงกระทำได้ดีขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการต้านทานความล้า และความสามารถในการลดการแตกร้าวเนื่องจากความล้าเพิ่มมากขึ้น [6] การประเมินสมรรถนะของ CRC ภายใต้แรงกระทำแบบความล้า โดยการใช้ขนาดของเม็ดยางที่

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.015

แตกต่างกัน และ นำมาแทนที่ทรายในปริมาณที่แตกต่างกัน พบว่าคอนกรีตผสมเม็ดยางนั้นสามารถช่วยลดการแตกร้าว และ เพิ่มความสามารถในการต้านทานความล้าได้ [7] ในทางกลับกัน ได้มีการศึกษาคุณสมบัติของ CRC โดยได้ทำการทดลองแทนที่มวลรวมละเอียดและ หยาบในคอนกรีตด้วยเม็ดยาง ในสัดส่วน 5% 7.5% และ 10% ทดสอบกำลังรับแรงอัด และ กำลังรับแรงดัด ของ CRC พบว่า ความสามารถในการรับแรงดัดเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเม็ดยาง แต่กำลังรับแรงอัดลดต่ำลงเรื่อยๆ เมื่อเพิ่มปริมาณของเม็ดยาง [8] เพื่อแก้ไขปัญหาจึงมีการศึกษาผลกระทบของการใช้เม็ดยางผสมในคอนกรีต โดยการผสมคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเม็ดยางในสัดส่วน 0%, 10% และ 20% หล่อแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กแบบรับแรงทางเดียวจำนวน 8 แผ่น นำมาทดสอบกำลังรับแรงดัดแบบ 4 จุด พบว่าการใช้ CRC ส่งผลให้กำลังอัด และ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตลดลง ปริมาณเม็ดยางที่สูงเกินไปส่งผลให้ความสามารถในการต้านทานความล้าลดลงเนื่องจากการยึดเกาะระหว่างเม็ดยาง และ ซีเมนต์เพสต์ลดลง [9] ด้วยเหตุนี้การศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของ CRC ที่ผ่านการปรับปรุงสภาพยึดเกาะระหว่างเม็ดยางกับเนื้อซีเมนต์ นำมาทดสอบกำลังอัด และ กำลังดัดตามมาตรฐาน ASTM พบว่าเมื่อแทนที่เม็ดยางในส่วนผสมคอนกรีต 25% สามารถเพิ่มกำลังรับแรงดัดได้ 22% และ สามารถดูดซับพลังงานมากขึ้น 9-28% เมื่อเทียบกับคอนกรีตปกติ [10] ความสามารถในการลดการแตกร้าวของโครงสร้าง CRC ทางจุลภาค พบว่าการใช้เม็ดยางรถยนต์เก่าบดละเอียดทำให้เกิดช่องว่างระหว่างเมทริกซ์ซีเมนต์ และ อนุภาคยาง ซึ่งช่วยป้องกันการแตกร้าวของโครงสร้างได้ดี [11] พฤติกรรมความล้าด้านแรงดัดของ CRC เมื่อแทนที่มวลรวมละเอียด 15% และ 20% ของปริมาตรทราย และ ทำการทดสอบความล้าภายใต้เครื่องทดสอบโดยใช้น้ำหนักกระทำที่ 0.9 0.85 0.80 0.75 0.70 และ 0.60 ของกำลังรับแรงสูงสุด ผลการทดสอบพบว่ากำลังต้านทานความล้าของ CRC นั้นเมื่อได้รับน้ำหนักกระทำซ้ำในระดับที่สูงขึ้น จะส่งผลให้ความสามารถในการต้านทานความล้าของ CRC นั้นมีค่าใกล้เคียงกับ NC มากขึ้นไปด้วย [12]

ในแง่ของโครงสร้างสะพานยังมีการศึกษาการใช้คอนกรีตผสมเม็ดยางอย่างจำกัด และ จำเป็นต้องมีความเข้าใจพฤติกรรมการรับน้ำหนัก พฤติกรรมความล้าของพื้นสะพาน โดยทั่วไปงานวิจัยที่ผ่านมาเน้นศึกษาผลการใช้งาน และ ประสิทธิภาพของ CRC ในบริบทของงานขนาดเล็ก แต่เมื่อนำไปใช้กับโครงสร้างสะพานจริงที่มีขนาดใหญ่อาจส่งผลให้พฤติกรรมเปลี่ยนแปลงไปจากห้องปฏิบัติการ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาความสามารถในการลดการแตกร้าวของพื้นสะพาน CRC และ พฤติกรรมของพื้นสะพาน CRC ขนาดเสมือนจริงเมื่อรับแรงกระทำแบบความล้าในระดับ 40% 55% และ 70% เพื่อให้การทดสอบสะท้อนพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกับการใช้งานจริงมากที่สุด [13]

2. ขั้นตอนการศึกษา

2.1 สมบัติวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

คอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ คอนกรีตปกติ (Normal Concrete: NC) และ คอนกรีตผสมเม็ดยางบดละเอียด (Crumb Rubber Concrete: CRC) โดยคอนกรีตปกติมีกำลังอัดเฉลี่ยที่

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.015

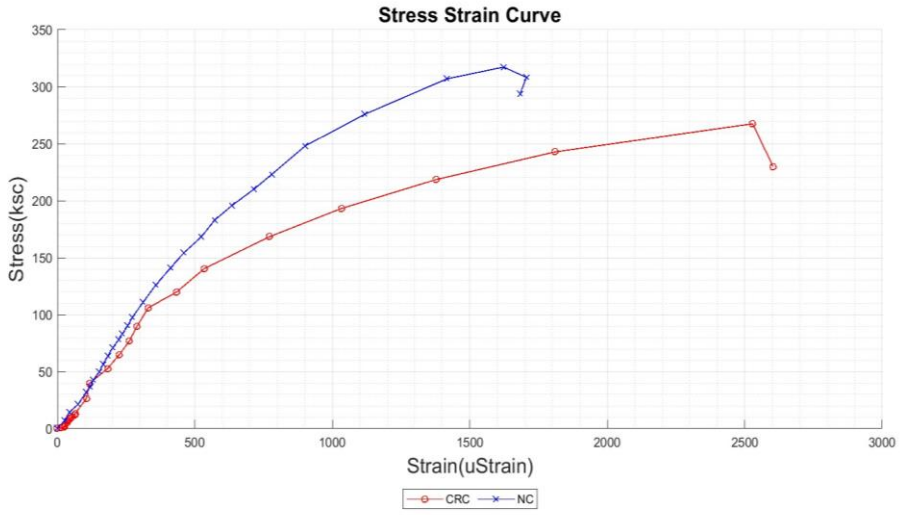
อายุ 28 วันเท่ากับ 320 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ค่าการไหลอยู่ที่ประมาณ 13.5 เซนติเมตร และ มีความหนาแน่นเฉลี่ยประมาณ 2,245 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ขณะที่ CRC มีกำลังอัดเฉลี่ยที่อายุ 28 วันเท่ากับ 270 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร มีค่าการไหลอยู่ที่ประมาณ 14.1 เซนติเมตร และ มีความหนาแน่นเฉลี่ยประมาณ 1,756 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ผลการทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตแสดงดังรูปที่ 2 สมบัติและแหล่งที่มาของวัสดุแสดงดังตารางที่ 1

2.2 อัตราส่วนของการผสมยาง

การศึกษานี้จะนำส่วนผสมคอนกรีตที่ได้ทำการออกแบบ นำมาแทนที่ทรายด้วยเม็ดยางบดละเอียดขนาดประมาณ 2 - 3 มิลลิเมตร (Coarse Crumb Rubber) เพื่อเพิ่มความสามารถในการต้านทานความล้าของคอนกรีต การนำเม็ดยางแทนที่ทรายในส่วนผสมคอนกรีตจะคิดเป็นเปอร์เซ็นต์จากปริมาตรของทรายทั้งหมด ซึ่งในการศึกษานี้ได้นำเม็ดยางบดละเอียดมาแทนที่ 25 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรทราย ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสม โดยอ้างอิงจากการศึกษาก่อนหน้า [14]

2.3 ตัวอย่างแผ่นพื้นสะพานที่ใช้ในการทดลอง

ตัวอย่างทดสอบแรกของคอนกรีตทั้ง 2 ประเภท ถูกนำมาทดสอบกำลังรับแรงของพื้นสะพานเป็นตัวอย่างที่ 1 และ 2 โดยกำลังรับแรงสูงสุดที่ได้จะนำมาใช้ในการออกแบบการทดสอบความล้า ซึ่งกำลังรับแรงสูงสุดของพื้นสะพานคอนกรีตปกติมีค่าเท่ากับ 55.62 ตัน และ พื้นสะพานคอนกรีตผสมเม็ดยางมีค่ากำลังรับแรงสูงสุดเท่ากับ 47.6 ตัน หลังจากนั้นจะทำการทดสอบความล้าโดยการให้แรงกระทำเป็น 40 55 และ 70 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงสูงสุดเป็นตัวอย่างที่ 3 ถึง 8 ของแผ่นพื้นที่ไม่ผสมยาง และ ผสมยางตามลำดับ ดังตารางที่ 2



รูปที่ 2 ผลการทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีต (Stress – Strain curve)

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.015

ตารางที่ 1 สมบัติและที่มาของวัสดุ

วัสดุ	สมบัติ	แหล่งที่มา
ปูนซีเมนต์	ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ได้มอก. 15 เล่ม 1-2555	บริษัท ทีพีไอ โพลีน จำกัด (มหาชน)
ทราย	ทรายหยาบผ่านการล้าง ได้มาตรฐาน มอก. 102-2514	บริษัท เค.จี.เทรดดิ้ง (ประเทศไทย) จำกัด
หิน	หินเบอร์ 1 ขนาด 3/4 ถึง 1 นิ้ว	
เม็ดยาง	ขนาด 2-3 มม. ความหนาแน่น 750 kg/m³	บริษัท เค.เค.ไอ. รีไซเคิล จำกัด
เหล็กเสริม	กำลังดึงขาด 4,338 kg/cm² ได้มอก. 20-2543	บริษัท ไทยสตีลโปรไฟล์ จำกัด

ตารางที่ 2 ตัวอย่างแผ่นพื้นที่ใช้ทดสอบความล้า

ตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์การผสมเม็ดยาง	เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงสูงสุด
3	-	40%
4	-	55%
5	-	70%
6	25%	40%
7	25%	55%
8	25%	70%

2.4 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

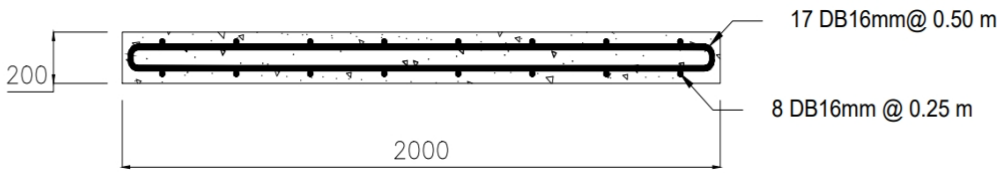
ในการศึกษาครั้งนี้ได้จัดเตรียมแผ่นพื้นคอนกรีต ขนาดกว้าง 2.00 เมตร ยาว 8.00 เมตร และ หนา 0.20 เมตร จำนวนทั้งสิ้น 8 ตัวอย่าง โดยแบ่งออกเป็น คอนกรีตปกติ (Normal Concrete: NC) จำนวน 4 ตัวอย่าง และ คอนกรีตผสมเม็ดยางรถยนต์เก่าบดละเอียด (Crumb Rubber Concrete: CRC) อีก 4 ตัวอย่าง ซึ่งในส่วนของ CRC มีการแทนที่มวลรวมละเอียด (ทราย) ด้วยเม็ดยางในอัตราร้อยละ 25 โดยปริมาตรของทราย การออกแบบส่วนผสมคอนกรีต และ รายละเอียดการเสริมเหล็กเป็นไปตามแบบมาตรฐานของสำนักสำรวจและออกแบบกรมทางหลวง เพื่อเพิ่มความสามารถในการรับแรงดึงของโครงสร้าง จึงได้ทำการเสริมเหล็กข้ออ้อย DB16 ในแนวยาว จำนวน 8 เส้น โดยเว้นระยะห่างเท่ากับ 0.25 เมตร และ เสริมเหล็กในแนวขวางจำนวน 17 เส้นที่ระยะห่าง 0.50 เมตร พร้อมเว้นระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก (Covering) เท่ากับ 2.5 เซนติเมตร ตามมาตรฐานที่ใช้ในงานสะพานคอนกรีต ก่อนการหล่อคอนกรีตได้ดำเนินการติดตั้งแบบหล่อ และ วางเหล็กเสริมตามแบบดังแสดงในรูปที่ 3 และรูปที่ 4 พร้อมตรวจสอบความมั่นคงของแบบ และ ความถูกต้องของตำแหน่งเหล็กเสริม จากนั้นผสมคอนกรีตตามอัตราส่วนที่ออกแบบไว้ โดยเฉพาะกลุ่ม CRC ได้มีการเตรียมเม็ด

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.015

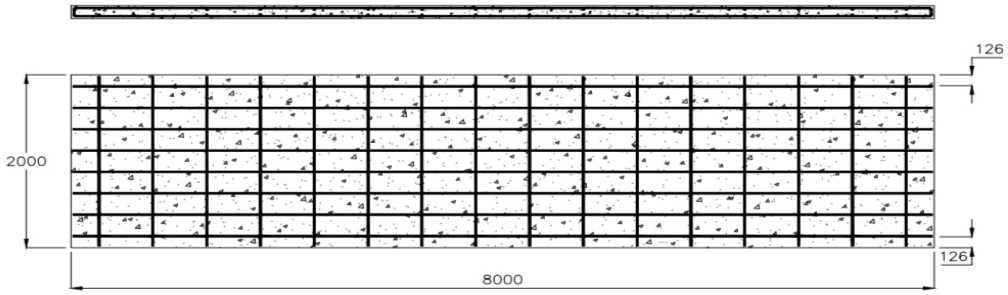
ยางขนาด 2 - 3 มิลลิเมตร และ นำมาแทนที่ทรายในอัตราร้อยละ 25 โดยปริมาตรของทราย คอนกรีตที่ผสมแล้วถูกเทลงในแบบหล่อ ใช้เครื่องสั่นเพื่อไล่อากาศออก และ อัดแน่นเนื้อคอนกรีตให้เต็มพื้นที่แบบอย่างสม่ำเสมอ หลังการหล่อคอนกรีตได้คลุมด้วยผ้าใบพลาสติก และ รดน้ำเพื่อบ่มคอนกรีตอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 7 วัน จากนั้นปล่อยให้คอนกรีตบ่มตัวในสภาวะอากาศปกติจนครบอายุ 28 วัน ก่อนเข้าสู่กระบวนการทดสอบ

2.5 ขั้นตอนการทดสอบ

การทดสอบพื้นสะพานจะกระทำภายใต้โครงเหล็กทดสอบดังแสดงในรูปที่ 5 พร้อมติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดแรง และ บันทึกค่าเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและ การเสียรูปของพื้นสะพาน โดยเริ่มจากการติดตั้งแผ่นพื้นสะพานเข้ากับโครงเหล็ก โดยการทดสอบจะนำพื้นสะพานวางลงบนคานทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 6 เพื่อจำลองการรับน้ำหนัก และ แรงเบรคจากล้อรถบรรทุก ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดแรง (Load Cell) คานเหล็กกระจายแรง (Transfer Beam) และ กระบอก ไฮดรอลิคเข้ากับโครงเหล็กทดสอบ และ ทำการทาสีขาวที่พื้นทดสอบเพื่อช่วยให้สามารถสังเกตุเห็นรอยแตกร้าวได้ชัดเจนขึ้น แล้วจึงเริ่มทำการทดสอบกำลังต้านทานความล้าของพื้นสะพานดำเนินการโดยให้แรงกระทำแบบวัฏจักร (Cyclic) ความถี่ประมาณ 0.67 – 1.70 รอบต่อวินาที (Hz) ที่กึ่งกลางแผ่นพื้นสะพานจำลอง ขนาดของแรงกระทำมี 3 ระดับ ได้แก่ 40% 55% และ 70% ของกำลังรับแรงสูงสุดของพื้นสะพาน ระหว่างการทดสอบได้ทำการบันทึกข้อมูล และ ภาพถ่ายท้องพื้นสะพานเพื่อนำมาคำนวณเปอร์เซ็นต์การแตกร้าว

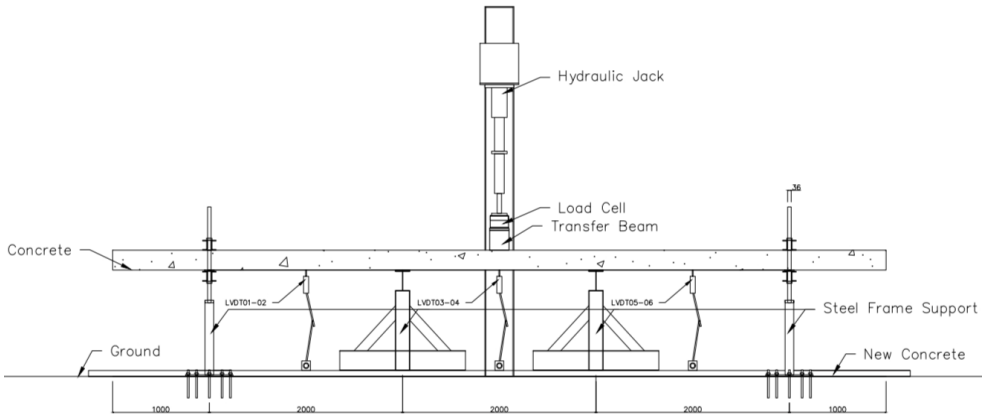


รูปที่ 3 รายละเอียดพื้นสะพานจำลอง



รูปที่ 4 รายละเอียดการเสริมเหล็กของพื้นสะพานจำลองความหนา 0.20 เมตร

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.015



รูปที่ 5 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดการเสียรูปของพื้นสะพานจำลอง

รูปที่ 6 การทดสอบกำลังรับแรงในห้องปฏิบัติการ

ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างตารางจำนวน 100 ช่อง เทียบกับจำนวนรอบของแรงกระทำ และ ในการศึกษานี้ได้เลือกใช้ เปอร์เซ็นต์รอยแตกร้าว 40% ของพื้นที่ท้องพื้นสะพานเป็นเกณฑ์สำหรับการประเมินพฤติกรรมความล้าของคอนกรีต เนื่องจากเป็นระดับความเสียหายที่ แสดงให้เห็นถึงการเสื่อมสภาพที่มีนัยสำคัญเชิงโครงสร้าง ซึ่งสามารถใช้เป็นตัวแทนของช่วงเปลี่ยนผ่านจากพฤติกรรมยืดหยุ่น (Elastic) ไปสู่ช่วงเสื่อมสภาพอย่างถาวร (Plastic Failure Tendency) ได้อย่างเหมาะสม โดยจากงานวิจัยที่ได้ศึกษามามีการใช้เกณฑ์ 30% ถึง 50% ของพื้นที่รอยร้าว เพื่อประเมินพฤติกรรมความล้าเช่นเดียวกัน ทั้งนี้ เกณฑ์ 40% จึงอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการประเมิน และ เปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัสดุในระดับที่สามารถแสดงพฤติกรรมแตกต่างได้อย่างชัดเจนโดยไม่ถึงขั้นวิกฤตจนเกิดความล้มเหลวโดยสมบูรณ์ และ นำเปอร์เซ็นต์การแตกร้าวที่ 40% ของพื้นที่ท้องพื้นสะพานมาวิเคราะห์ และ จัดทำเส้นโค้งความล้า (Fatigue Curve) เพื่อประเมินความสามารถในการต้านทานความล้าของพื้นสะพาน [15]

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.015

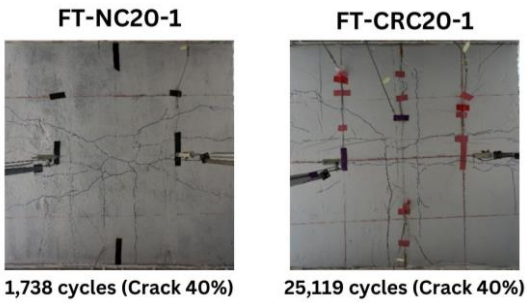
3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 พฤติกรรมการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ

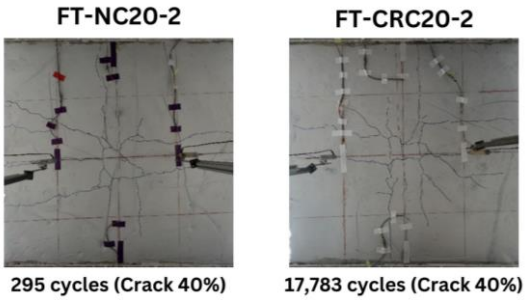
เพื่อนำเสนอผลการทดสอบพฤติกรรมความล้าของพื้นสะพานภายใต้แรงกระทำซ้ำอย่างชัดเจน ได้จัดทำ ตารางเปรียบเทียบแสดงดังตารางที่ 3 ที่ส่งผลให้เกิดรอยแตกร้าวคิดเป็น 40% ของพื้นที่ท้องพื้นสะพาน โดยเปรียบเทียบระหว่างพื้นสะพาน NC และ พื้นสะพาน CRC จากผลการทดสอบพบว่าพื้นสะพานCRC มีค่าต้านทานต่อแรงกระทำซ้ำในช่วง P/Pu = 0.4 สูงกว่าพื้น NC ถึง 13.5 เท่า (CRC = 25,119 รอบและ NC = 1,738 รอบ) แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการต้านทานความล้าที่ยอดเยี่ยมของ CRC ในช่วงแรงกระทำระดับต่ำ (P/Pu = 0.40–0.55) โดยสามารถรองรับจำนวนรอบได้มากกว่าหลายเท่าตัว ขณะที่ในช่วงแรงกระทำสูง (P/Pu = 0.70) พื้น CRC ยังคงแสดงความสามารถในการต้านทานความล้าได้ดีกว่าเล็กน้อย นอกจากนี้ได้มีการนำเสนอภาพความเสียหายของพื้นสะพานที่เกิดจากการทดสอบบริเวณกึ่งกลางพื้นสะพานจำลอง ขณะที่เกิดรอยแตกร้าว 40% เพื่อใช้ประกอบการวิเคราะห์ โดย แสดงให้เห็นถึงลักษณะการกระจายตัวของรอยร้าวในแต่ละระดับของแรงกระทำซ้ำแสดงดังรูปที่ 7 ถึง รูปที่ 9 ซึ่งพบว่ารอยแตกร้าวในพื้น CRC กระจายตัวละเอียด และต่อเนื่องมากกว่าใน NC ซึ่งเกิดรอยแตกร้าวที่เร็วกว่าที่จำนวนรอบน้อยกว่า สะท้อนถึงพฤติกรรมเชิงบวกของ CRC ต่อการใช้งานภายใต้สภาวะความล้า

ตารางที่ 3 ตารางเปรียบเทียบความล้าระหว่าง NC และ CRC

อัตราส่วนของแรงกระทำ (P/Pu)	พื้นสะพาน NC (รอบ)	พื้นสะพาน CRC (รอบ)
40%	1,738	25,119
55%	295	17,783
70%	16	25

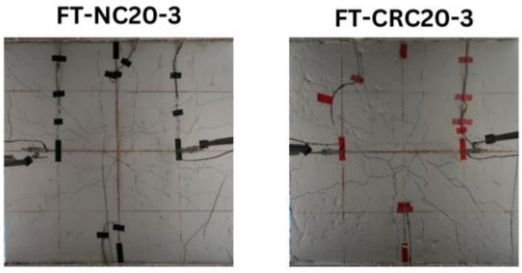


รูปที่ 7 ผลทดสอบพื้นสะพานเมื่อแรงกระทำซ้ำที่ 40%



รูปที่ 8 ผลทดสอบพื้นสะพานเมื่อแรงกระทำซ้ำที่ 55%

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.015

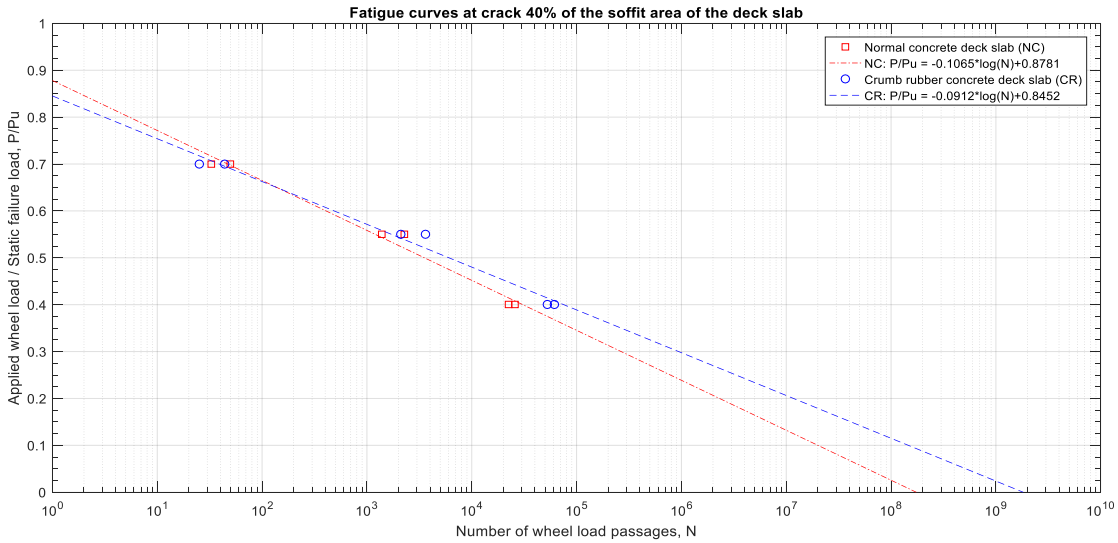


รูปที่ 9 ผลทดสอบพื้นสะพานเมื่อแรงกระทำซ้ำที่ 70%

3.2 การเปรียบเทียบความสามารถในการต้านทานความล้าของพื้นสะพาน

ในการวิเคราะห์ความล้าของโครงสร้างจำเป็นที่ต้องมีเส้นโค้งความล้า (Fatigue Curve) ของโครงสร้าง เส้นโค้งความล้าเป็นเส้นโค้งที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำต่อกำลังรับน้ำหนักของพื้นสะพาน (P/Pu) กับจำนวนรอบที่ทำให้โครงสร้างเกิดเปอร์เซ็นต์การแตกร้าว 40% ของพื้นที่ท้องพื้นสะพาน (N) ซึ่งเส้นโค้งความล้าสร้างมาจากการทดสอบโครงสร้างภายใต้แรงกระทำซ้ำขนาดคงที่ ที่ระดับแรงกระทำ 40% 55% และ 70% แสดงดังรูปที่ 10

รูปที่ 10 แสดงให้เห็นถึงเส้นแนวโน้มจำนวนรอบของแรงกระทำกับปริมาณรอยแตกร้าวที่ 40% ของพื้นที่ท้องพื้นสะพาน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการต้านทานความล้าของพื้นสะพาน CRC โดยเมื่อพื้นสะพานถูกกระทำด้วยอัตราส่วนแรงกระทำต่อกำลังรับน้ำหนักของพื้นสะพานที่มีค่าน้อยกว่า 0.5 (P/Pu < 0.5) จะทำให้พื้นสะพาน CRC มีความสามารถในการต้านทานความล้าสูงกว่าพื้นสะพาน NC และ เมื่อแรงกระทำต่อกำลังรับน้ำหนักของพื้นสะพานมีขนาดสูงขึ้น พื้นสะพาน CRC จะมีกำลังต้านทานความล้าใกล้เคียงกับพื้นสะพาน NC อย่างไรก็ตาม การทดสอบในครั้งนี้



รูปที่ 10 เส้นโค้งความล้า (Fatigue Curve)

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.015

มีความสอดคล้องกับสภาวะการใช้งานจริง เนื่องจากเป็นการทดสอบตัวอย่างขนาดใหญ่ที่มีลักษณะเสมือนจริง จึงไม่สามารถดำเนินการทดสอบในปริมาณมากได้ ส่งผลให้ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบด้านความล้าครอบคลุมเฉพาะบางกรณีศึกษาเท่านั้น ทั้งนี้ผลการทดสอบ ยังคงสะท้อนพฤติกรรมของโครงสร้างในภาพรวมได้อย่างเหมาะสมสำหรับใช้ในการวิเคราะห์ และ เปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงวิศวกรรมต่อไป

4. สรุปผลการทดลอง

ผลการทดสอบพบว่าแนวโน้มของเส้นโค้งความล้าที่ได้จากงานวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้า อย่างไรก็ตาม ค่าความต้านทานความล้าของคอนกรีตผสมเม็ดยางบดละเอียดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เนื่องจากมีการแทนที่เม็ดยางถึง 25% ของปริมาตรทราย ซึ่งสูงกว่างานวิจัยก่อนหน้าที่ใช้เพียง 15% ส่งผลให้พื้นสะพาน CRC มีค่าต้านทานความล้าที่สูงกว่า หรือใกล้เคียงกับ NC ในบางระดับของแรงกระทำซ้ำ โดยสามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังนี้

1. ช่วงแรงกระทำต่ำ (P/Pu < 0.5)

พื้นสะพาน CRC แสดงค่าต้านทานความล้าสูงกว่าพื้น NC อย่างชัดเจน โดยเฉลี่ย มากกว่า 93.08% ของจำนวนรอบที่ทนได้ก่อนเกิดรอยแตกร้าว 40% เช่น ที่ P/Pu = 0.4 NC แตกร้าวที่ 1,738 รอบ CRC แตกร้าวที่ 25,119 รอบ เพิ่มขึ้นกว่า 13.5 เท่า เนื่องจาก CRC มีโครงสร้างที่สามารถดูดซับพลังงาน และ ยืดหยุ่นได้ดีกว่า ทำให้รอยร้าวเกิดขึ้นช้ากว่า

2. ช่วงแรงกระทำสูง (P/Pu > 0.5)

พื้น CRC และ NC แสดงค่าความล้าใกล้เคียงกัน เช่น ที่ P/Pu = 0.7 NC แตกร้าวที่ 16 รอบ CRC แตกร้าวที่ 25 รอบ เนื่องจากแรงกระทำเริ่มต้นมีค่ามาก ทำให้เกิดรอยร้าวรุนแรงตั้งแต่รอบแรก ส่งผลให้ CRC ไม่สามารถแสดงคุณสมบัติยืดหยุ่นได้อย่างเต็มที่ในสภาพโหลดสูงแบบทันที (Quasi-static High Stress)

3. ข้อเสนอแนะการใช้งานในภาคสนาม

พื้นสะพาน CRC มีศักยภาพสูงสำหรับการใช้งานในพื้นที่ที่มี โหลดซ้ำจากการจราจรในระดับปานกลางถึงต่ำ เช่น สะพานในพื้นที่ชนบท หรือจุดเชื่อมถนนที่มีการเคลื่อนไหวต่อเนื่อง แต่ไม่ใช่จุดรับน้ำหนักจุดสูงสุด แนะนำให้ใช้งานกับสภาวะโหลดเฉลี่ย ไม่เกิน 50% ของกำลังรับน้ำหนักที่ออกแบบ ($P/Pu \leq 0.5$) เพื่อให้ CRC แสดงประสิทธิภาพสูงสุดด้านความล้า ทั้งนี้ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในด้านของการวิเคราะห์ความหนาของพื้นสะพาน และ จัดทำรายละเอียดการออกแบบเชิงไฟไนต์ เพื่อความเหมาะสมในการนำไปใช้ในงานจริง

5. ข้อจำกัดของการศึกษา

1. ผลการทดสอบขึ้นอยู่กับสัดส่วนเม็ดยางบดละเอียดขนาดเดียว (2–3 มม.) และ ปริมาณการแทนที่ 25% โดยไม่มีการเปรียบเทียบปริมาณการแทนที่เม็ดยางในระดับอื่นๆ เช่น 10% หรือ 15%

2. ขนาดของพื้นสะพานที่ใช้ในการทดสอบมีเพียงขนาดเดียว (ขนาดกว้าง 2.00 เมตร ยาว 8.00 เมตร และ หนา 0.20 เมตร)

6. ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยต่อยอด

1. ศึกษาผลของการแทนที่เม็ดยางใน หลายระดับ (เช่น 10% 15% 20% 25% และ 30%) เพื่อสร้างเส้นแนวโน้มทางวิศวกรรมที่แม่นยำยิ่งขึ้น

2. ศึกษาในด้านการวิเคราะห์ และ ออกแบบความหนาพื้นสะพาน โดยอาศัยข้อมูลเชิงพฤติกรรมความล้าที่ได้จากการศึกษา

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.015

3. ศึกษาในด้านการจัดทำรายละเอียดการออกแบบเชิงไฟไนต์ (Finite Element Detail) และการพัฒนาแบบจำลองการวิเคราะห์ให้ครบถ้วนตามหลักเกณฑ์ของมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง (Design code)

7. กิตติกรรมประกาศ

วิจัยนี้รับทุนสนับสนุนจาก วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือตามสัญญาเลขที่ CIT-2023-GRAD-26 จึงขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

8. เอกสารอ้างอิง

[1] J. Xu, Z. Yao, G. Yang and Q. Han, Research on crumb rubber concrete: From a multi-scale review, Construction and Building Materials, 2020, 232, 117282.

[2] R.A. Assaggaf, M.R. Ali, S.U. Al-Dulaijan and M. Maslehuddin, Properties of concrete with untreated and treated crumb rubber – A review, Journal of Materials Research and Technology, 2021, 11, 1753–1798.

[3] N.N. Gerges, C.A. Issa and S.A. Fawaz, Rubber concrete: Mechanical and dynamical properties, Case Studies in Construction Materials, 2018, 9, 00184.

[4] P. Baah, Cracking behavior of structural slab bridge decks, Thesis, The University of Akron, USA, 2014.

[5] R.A. Assaggaf, M. Maslehuddin, S.U. Al-Dulaijan, M.A. Al-Osta, M.R. Ali and M. Shameem, Cost-effective treatment of crumb rubber to improve the properties of crumb-rubber concrete, Case Studies in Construction Materials, 2022, 16, 00881.

[6] L. Feng, M. Liang-yu, N. Guo-Fang and L. Li-juan, Fatigue performance of rubber-modified recycled aggregate concrete (RRAC) for pavement, Construction and Building Materials, 2015, 95, 207-217.

[7] R. Pacheco-Torres, E. Cerro-Prada, F. Escolano and F. Varela, Fatigue performance of waste rubber concrete for rigid road pavements, Construction and Building Materials, 2018, 176, 530-548.

[8] A. Tayal, R. Garg, R. Singh, K. Arora and A. Sharma, Elastic crumb rubber concrete (ECRC)-I, International Journal of Engineering Research and Technology, 2019, 8(3), 216-219.

[9] J. Xie, Y. Zheng, Y. Guo, R. Ou, Z. Xie and L. Huang, Effects of crumb rubber aggregate on the static and fatigue performance of reinforced concrete slabs, Composite Structures, 2019, 228, 111371.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.08.015

[10] M. Alizadeh, M. R. Eftekhar, P. Asadi and D. Mostofinejad, Enhancing the mechanical properties of crumb rubber concrete through polypropylene mixing via a pre-mixing technique, Case Studies in Construction Materials, 2024, 23, 025690.

[11] X. Sun, S. Wu, J. Yang and R. Yang, Mechanical properties and crack resistance of crumb rubber modified cement-stabilized macadam, Construction and Building Materials, 2020, 250, 118708.

[12] N. Ganesan, J. Bharati Raj and A.P. Shashikala, Flexural fatigue behavior of self compacting rubberized concrete, Construction and Building Materials, 2013, 44, 7-14.

[13] G. Xue, H. Zhu, S. Xu and W. Dong, Fatigue performance and fatigue equation of crumb rubber concrete under freeze–thaw cycles, International Journal of Fatigue, 2023, 166, 107436.

[14] M. Liu, J. Lu, W. Jiang and P. Ming, Study on fatigue damage and fatigue crack propagation of rubber concrete, Journal of Building Engineering, 2022, 65, 105718.

[15] F. Liu, W. Zheng, L. Li, W. Feng and G. Ning, Mechanical and fatigue performance of rubber concrete, Construction and Building Materials, 2020, 231, 117118.

ISSN (online): 2697-5548

ข้อมูลสำหรับผู้เขียนและการเตรียมต้นฉบับ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมตีพิมพ์ปีละ 3 ฉบับ โดยวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ บทความที่พิจารณาตีพิมพ์ต้องไม่เคยตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารใดมาก่อน และไม่อยู่ในระหว่างการพิจารณาของวารสารอื่น เรื่องที่ตีพิมพ์จะต้องได้รับการกลั่นกรองจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาที่เกี่ยงข้องแบบปกปิดข้อมูล (Double-Blind Peer-Review) และได้รับความเห็นชอบจากบรรณาธิการวารสารฯ

บทความต้องมีความยาวไม่น้อยกว่า 5 หน้ากระดาษ B5 หรือไม่น้อยกว่า 2500 คำ โดยนับคำด้วยคำสั่ง word count ใน MS Word (ไม่ควรเกิน 15 หน้ากระดาษ) บทความประกอบด้วยชื่อเรื่อง ชื่อผู้เขียน สถานที่ทำงาน การติดต่อผู้เขียน บทคัดย่อและคำสำคัญ (3 - 5 คำ) โดยเนื้อหาดังกล่าวทั้งหมดต้องจัดเตรียมในรูปแบบภาษาไทย 1 หน้ากระดาษและภาษาอังกฤษ 1 หน้ากระดาษ

เนื้อเรื่องของบทความวิจัยประกอบด้วย 5 - 6 ส่วน คือ (1) บทนำ (2) วิธีการดำเนินงานวิจัย/ทดลอง (3) ผลการวิจัย/ทดลองและการอภิปรายผล (4) บทสรุป (5) กิตติกรรมประกาศ (ถ้ามี) และ (6) เอกสารอ้างอิง

สำหรับเนื้อเรื่องของบทความวิชาการให้เตรียมเป็นบทความที่เรียบเรียงเนื้อหาจากหนังสือ งานวิจัย ประสบการณ์ หรือเรื่องแปล เพื่อเผยแพร่ความรู้ในสาขาต่างๆ หรือแสดงข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์มีคุณค่าทางวิชาการ โดยองค์ประกอบของบทความวิชาการอาจคล้ายคลึงกับบทความวิจัย แต่ไม่มีเนื้อหาของการดำเนินงานวิจัยและผลการวิจัย ซึ่งผู้เขียนสามารถกำหนดได้เองตามความเหมาะสมของบทความวิชาการ

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

Authors Guideline and Manuscript Preparation

JIT is published tri-annually by College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All considered articles have not been published elsewhere and are not currently submitted for consideration in other journals. All articles are independently assessed by specialist in their relevant fields (Double-Blind Peer Review), and must be approved by the editor.

The length of the manuscript is not less than 5 pages in B5 paper size or not less than 2500 words using a word count of MS Word (should not exceed 15 pages). The first page of the manuscript should contain the full title, author's name(s), affiliation, contact address of correspondence, abstract and keywords (3–5 words).

The content of the research article consists of 5-6 parts, arranged in the following details; (1) introduction (2) experimental procedure (3) results and discussion (4) conclusion (5) acknowledgement (if any) and (6) references.

For review or academic article, the contents may prepare from text book, research experiences, or translation for publishing knowledge in various fields or provide useful and valuable comments. The main contents may contain a similar section to the research article but without sections of the experimental and results. The topic and content can be specified by the author as appropriate for the article.

The author can download manuscript templates and submission form in the journal's website: ojs.kmutnb.ac.th/index.php/joindtech.

ISSN (online): 2697-5548

Manuscript Submission Form

1. **Title** .....

2. **Type of manuscript** ☐ Research Article ☐ Academic Article (Review)

3. **Corresponding Author Name** .....

4. **Affiliation** .....

   Tel. ..... Fax ..... E-mail .....

5. **List of co-author(s) and address**

Name	Affiliation	Telephone	E-mail

6. **Suggested reviews** (Author must suggest the reviewer at least three people in the field of research presented in manuscript including name, organization, contact address and e-mail)

   1. ..... Tel ..... Email .....

   2. ..... Tel ..... Email .....

   3. ..... Tel ..... Email .....

7. **Manuscript's certification**

   ☐ **I** certify that this manuscript has not been accepted nor submitted for publication elsewhere.

   Corresponding's author name ..... (Signature)

8. **Together with this form, I (we) have been attached other documents included:**

   ☐ Manuscript submission by system online at http://ojs.kmutnb.ac.th/index.php/joindtech/index

   ☐ Manuscript submission by e-mail: JIT.journal@gmail.com

   ☐ Manuscript submission by self or post-mail

I hereby certify that the information above is true and accurate.

Signature ..... Corresponding author

( )

Date ..... Month ..... Year .....

ISSN (online): 2697-5548

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/joindtech/index

☐ ส่งบทความทางไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ ที่ e-mail: JIT.journal@gmail.com

☐ ส่งบทความด้วยตัวเอง หรือทางไปรษณีย์

ขอรับรองว่าข้อความดังกล่าวข้างต้นเป็นจริงทุกประการ

ลงชื่อ ..... เจ้าของบทความ หรือผู้แทนส่งบทความ

( )

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. .....

The Journal of

Industrial Technology

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ ๒๑ ฉบับที่ ๒ ประจำปี ๒๕๖๘

บทความ (Articles)

- Application of geographic information system for benzene impact analysis and spatial measure development in Bangkok metropolitan area, The Journal of Industrial Technology, 2025, 2(2), 1-15.
- The Production Process Improvement to Reduce Defect in Hamburger Buns by Applying DMAIC Technique: A Case Study of President Bakery Public Company Limited, The Journal of Industrial Technology, 2025, 21(2), 16-29.
- Physical and Mechanical Properties of Mortar Containing Marine Waste for Product Development, The Journal of Industrial Technology, 2025, 21(2), 30-41.
- Classification of COVID-19 from Chest CT Images Using Ensemble Techniques, The Journal of Industrial Technology, 2025, 21(2), 42-58.
- Design and Development of Standard Calibrator for Horizontal Sprit Level, The Journal of Industrial Technology, 2024, 21(2), 59-75.
- Development of Heat Resistance Properties of Geopolymer Bricks from Fly Ash and Metakaolin by Bagasse Ash Addition, The Journal of Industrial Technology, 2025, 21(2), 76-90.
- Thermal Insulation Hollow Concrete Blocks using Palm Oil Clinker Containing Surgical Face Masks and KF94 Masks as Aggregate, The Journal of Industrial Technology, 2025, 21(2), 91-106.
- Improving Production Efficiency in Hot Coil Plate Production Process, The Journal of Industrial Technology, 2025, 21(2), 107-122.
- Optimization of Coliform Bacteria Removal in Surface Water using a Hydrodynamic Cavitation Reactor with the Response Surface Methodology, The Journal of Industrial Technology, 2025, 21(2), 123-137.
- Metasurface Rectenna Array for Wireless Energy Harvesting from 5G Communications, The Journal of Industrial Technology, 2025, 21(2), 138-150.
- Design of Experiments to Analyze Factors for Block Digestion Affecting the Defect of Nitrogen Tubes, The Journal of Industrial Technology, 2025, 21(2), 151-165.
- Effect of Plastic Filament Type on Mechanical Properties of 3D-printed Parts, The Journal of Industrial Technology, 2025, 21(2), 166-179.
- Development of the PLC Practical Set with the Arduino Embedded System for Electro-pneumatic Device Control, The Journal of Industrial Technology, 2025, 21(2), 180-195.
- Enhancing Productivity and Reducing Handling Cost through Standard Time and Motion Study: A Case Study of a Warehouse Service Business , The Journal of Industrial Technology, 2025, 21(2), 196-212.
- Fatigue Performance of Full-scale Crumb Rubber Concrete Slabs, The Journal of Industrial Technology, 2025, 21(2), 213-225.

จัดพิมพ์โดย: หน่วยวิจัยและส่งเสริมวิชาการ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
1518 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
โทร. +66 2 555-2000 ต่อ 6615 Email JIT.journal@gmail.com