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 ๑ ประจำปี ๒๕๖๘

VOLUME 21 | ISSUE 1 | 2025 | Focused on engineering and industrial technology

Published by College of Industrial Technology (CIT), KMUTNB

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ ๒๑ ฉบับที่ ๑ ประจำปี ๒๕๖๘

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 1 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 A
(Editorial Board of The Journal of Industrial Technology)

วัตถุประสงค์ (Objectives) C

บทบรรณาธิการ E

บทความวิจัย

การประเมินอัตราการเกิดของเสียจากกิจกรรมในงานก่อสร้างอาคารสูงสำหรับการบรรลุเป้าหมายการก่อสร้างที่ยั่งยืน (Assessing Waste Generation Rate from Activities in High-Rise Building Construction for Achieving Sustainable Construction Goals) 1-14
Narararatchporn Nuansawan, Chayanid Witthayaphirom, Chart Chiemchaisri

The Design of Pressure Control System using PD Controller for Light Duty Electric Vehicle 15-26
Patiparn Intacharoen, Chaiyut Sumpavakup, Kokiat Aodsup, Soontorn Odngam

Mechanism of Reducing Local Flow Velocity Using Obstacle Trenches in Microfluidics 27-39
Teeraphat Kongsaktrakul, Alongkorn Pimpin, Ampol Kamnerdsook, Thammawit Suwannaphan

ผลของสารก่อผลึกต่อความพรุนและการดูดซึมน้ำในมอร์ต้าร์ (Effect of Crystalline Waterproofing Material on Porosity and Water Absorption in Mortar) 40-56
Thakdanai Kheaw-on, Suvimol Sujjavanich, Nantawat Khomwan, Paisan Kongkachuichay, Paisan Kongkachuichay, Prayath Nantasin

การพัฒนาซีเมนต์บอร์ดจากคอนกรีตผสมแกนกัญชงเสมือนมวลรวมละเอียด (Development of Cement Board from Concrete Mixed with Hemp Core as Fine Aggregate Substitute) 57-69
Mongkol Yutthaharn, Sattawat Haruehansapong, Narongdej Intaratchaiyakit, Yingyong Rungfah

การออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กแบบยื่นที่เหมาะสมด้วยอัลกอริทึมแบ่งครึ่งช่วง (Optimum Design of Reinforced Concrete Cantilever Stair Using Bisection Algorithm) 70-87
Kittisak Bannasarn, Alongkorn Lamom

สารบัญ (ต่อ)

บทความวิจัย (ต่อ) **หน้า**

การไพโรไลซิสขยะพลาสติกจากหลุมฝังกลบด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเหนี่ยวนำความร้อน 88-102
(Pyrolysis of Plastic Waste from Landfills Using Induction-Heating Reactor)
Kittiphon Phongsaku, Prangtip Rittichot Kaewpengkrow, Pongsakorn Kachapongkun

การผลิตแผ่นปูพื้นสนามจากเศษยางล้อรถยนต์และขยะพอลิสไตรีน 103-117
(Floor Mat produced from Tire Crumb Rubber and Polystyrene Wastes)
Wiboonpong Boriburana, Sarisa Prasertlum, Thanida Pholwongtrakul,
Somjate Patcharaphun

สมบัติของคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่ใช้ยางพาราเป็นส่วนผสม 118-134
(Properties of Glass Fiber Reinforced Concrete Using Rubber Latex as an Ingredient)
Nattakamol Kerdjangwat, Chuchai Sujivorakul

Impact of Cu-modified Activated Carbon on Natural Rubber Sheet's Mechanical Properties 135-145
Wiwat Jeungthanasirigool, Thana Chotchuangchutchaval, Nathapong Sukhawipat

Characteristics of Biochar Production Derived from Bamboo in a Drum Pyrolyzer 146-160
Thanet Unchaisri, Tanong Chayawattana, Jaruwan Poosri, Apinya Dechsatian,
Pawin Chaivatamaset

การศึกษาการตกตะกอนของอะลูมิเนียมหล่อผสมกึ่งของแข็ง เกรด 2024 ในการเชื่อมเสียดทาน 161-175
แบบกวน (Study Precipitation of Semi-Solid Cast 2024 Aluminium Alloy for
Friction Stir Welding)
Siriporn Khanthongkum, Somsak Siwadamrongpong, Angkarn Kamruan
Chonnawee Pukdeema

การพัฒนาระบบตรวจสอบความผิดปกติของอุปกรณ์ในชุดทดลองการผลิตไฟฟ้าแบบ 176-190
ไฮบริดด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม (Anomaly Detected System Development for
Hybrid Power Generation Experimental Set with Solar and Wind Energy)
Worrapol Koranuntachai, Chakrit Panpean, Phutanet Leesee, Puriput Suwanmanee,
Jeerawan Homjan, Issaraporn Amornsawatwattana

ISSN (online): 2697-5548

สารบัญ (ต่อ)

บทความวิจัย (ต่อ) **หน้า**

การออกแบบผลิตภัณฑ์ของเล่นสำหรับผู้สูงอายุจากวัสดุประกอบไม้พลาสติกด้วยวิศวกรรมคันเซ 191-207
(Product Design of Elderly Toy from Wood Plastic Composites with Kansei Engineering)
Thanate Ratanawilai, Nureehan Samaehadee, Wanida Denjak, Thipsukon Boonyaso

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.2025.04.001

บทความวิจัย

การประเมินอัตราการเกิดของเสียจากกิจกรรมในงานก่อสร้างอาคารสูงสำหรับการบรรลุเป้าหมายการก่อสร้างที่ยั่งยืน

ชญานิษฐ์ วิทยาภิรมย์[1] นรารัชต์พร นวลสวรรค์[2*] และ ชาติ เจียมไชยศรี[3]

[1] สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยรามคำแหง
[2] ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
[3] ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: Nararatchporn.n@cit.kmutnb.ac.th

วันที่รับบทความ: 4 พฤศจิกายน 2567: วันที่ทบทวนบทความ:18 ธันวาคม 2567: วันที่ตอบรับบทความ: 6 มกราคม 2568
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 21 เมษายน 2568

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์อัตราการเกิดของเสียจากการก่อสร้างอาคารสูงประเภทที่พักอาศัยสูง 8 ชั้น โดยศึกษาของเสียจากกิจกรรมงานโครงสร้างและงานสถาปัตยกรรม โดยภาพรวมพบว่าของเสียสามารถจำแนกได้เป็น 8 ประเภท ได้แก่ เศษคอนกรีต (50.5 %) เศษเหล็ก (25.5 %) เศษอิฐมวลเบา (12 %) เศษไม้แบบ (5.5 %) เศษกระเบื้อง (4.4 %) ขยะทั่วไป (1.6 %) บรรจุภัณฑ์หรือห่อวัสดุ (0.4 %) และ เศษพลาสติก PVC (0.1 %) ตามลำดับ โดยของเสียทั้งหมดมีปริมาณรวม 280 ตัน คิดเป็นอัตราการเกิดของเสียต่อพื้นที่ของอาคารที่ก่อสร้างประกอบด้วยเศษวัสดุของเสียหลักได้แก่ คอนกรีต (14.82 กก./ตร.ม.) เหล็ก (8.13 กก./ตร.ม.) อิฐ (3.82 กก./ตร.ม.) และไม้แบบ (1.76 กก./ตร.ม.) ตามลำดับ ส่วนงานสถาปัตยกรรมประกอบด้วยเศษกระเบื้อง (1.40 กก./ตร.ม.) ขยะมูลฝอยทั่วไป (0.51 กก./ตร.ม.) บรรจุภัณฑ์หรือห่อวัสดุ (0.13 กก./ตร.ม.) และ PVC (0.03 กก./ตร.ม.) ตามลำดับ กิจกรรมที่ก่อให้เกิดของเสียมากที่สุดในส่วนของงานโครงสร้าง ได้แก่ งานฐานราก รองลงมาได้แก่ คานยึดและผนังรับแรงเฉือน พื้นอัดแรงภายหลัง เสา งานก่ออิฐมวลเบา และงานก่อผนังทั่วไป ตามลำดับ สำหรับงานสถาปัตยกรรมกิจกรรมที่ก่อให้เกิดของเสียมาก ได้แก่ งานฝ้าเพดาน งานตกแต่งพื้น และงานติดตั้งสุขภัณฑ์/อุปกรณ์ ตามลำดับ งานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการวางแผนจัดการของเสียโดยให้ความสำคัญกับกิจกรรมในงานก่อสร้างเพื่อลดของเสียจากสถานที่ก่อสร้าง เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และส่งเสริมการก่อสร้างที่ยั่งยืน

คำสำคัญ: การจัดการของเสีย; อาคารสูง; ของเสียจากการก่อสร้าง; การจัดการอย่างยั่งยืน

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.001

บทความวิจัย

Assessing Waste Generation Rate from Activities in High-Rise Building Construction for Achieving Sustainable Construction Goals

Chayanid Witthayaphirom[1] Nararatchporn Nuansawan[2*] and Chart Chiemchaisri[3]

[1] Department of Environmental Science, Faculty of Science, Ramkhamhaeng University

[2] Department of Civil and Environmental Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

[3] Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

* Corresponding author, E-mail: Nararatchporn.n@cit.kmutnb.ac.th

Received: 4 November 2024; Revised: 18 December 2024; Accepted: 6 January 2025

Online Published: 21 April 2025

Abstract: This research aims to analyze the waste generation rate from constructing high-rise residential buildings with more than 8 floors. The study focuses on waste from structural and architectural activities. Overall, waste was classified into eight types: concrete debris (50.5%), scrap metals (25.5%), lightweight brick debris (12.0%), formwork timber debris (5.5%), tile debris (4.4%), general waste (1.6%), packaging or material wrappings (0.4%), and PVC waste (0.1%), totaling 280 tons of waste. The waste generation rate per unit area of construction building consists of the main waste components as follows: concrete debris (16.12 kg/m^2), scrap metals (8.13 kg/m^2), brick debris (3.82 kg/m^2), and formwork timber debris (1.76 kg/m^2). For architectural work, the waste includes tile debris (1.40 kg/m^2), general waste (0.51 kg/m^2), packaging (0.13 kg/m^2), and PVC waste (0.03 kg/m^2). The structural activities with higher waste generation are foundation work followed by tie beam and shear wall work, post-tension slab work, columns, lightweight brick wall construction, and general wall construction. For architectural work, high waste-generating activities are ceiling work, floor finishing, and sanitary fittings installation, respectively. This study highlights the importance of waste management planning, emphasizing construction activities to reduce waste produced at site thus minimize environmental impact and promote sustainable construction.

Keywords: Waste Management; High-Rise Building; Construction Waste; Sustainable Management

ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.001

บทความวิจัย

1. บทนำ

อุตสาหกรรมก่อสร้างมีบทบาทสำคัญในการพัฒนาเขตเมือง ซึ่งมีการขยายตัวของโครงการก่อสร้างอย่างรวดเร็ว [1] เพื่อรองรับความต้องการด้านที่อยู่อาศัย สถานประกอบการธุรกิจ และอุตสาหกรรม การก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานต่าง ๆ เช่น ถนน ทางระบายน้ำ ระบบขนส่งมวลชน มีบทบาทสำคัญต่อการตอบสนองต่อการเติบโตทางเศรษฐกิจ นอกจากนี้อาคารสูงประเภทที่พักอาศัยยังคงตอบสนองความต้องการที่อยู่อาศัยในเขตเมือง ส่งผลให้แนวโน้มธุรกิจรับเหมาก่อสร้างเติบโตตามมูลค่าการลงทุน โดยเฉพาะอาคารสูงและอาคารขนาดใหญ่ที่ได้รับการลงทุนมูลค่ามหาศาลอย่างต่อเนื่องจากภาครัฐและเอกชน การพัฒนาประเทศอย่างยั่งยืนจึงต้องให้ความสำคัญกับนโยบายระดับโลกโดยเฉพาะเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development Goals: SDGs) การวางแผนระบบการก่อสร้าง เป็นแนวทางสำคัญต่อการพัฒนาเมืองอย่างยั่งยืนและมีประสิทธิภาพ ตรงกับเป้าหมายที่ 11 ของ SDGs ซึ่งมุ่งเน้นการทำให้เมืองและการตั้งถิ่นฐานของมนุษย์ ครอบคลุมความปลอดภัย และยั่งยืน อย่างไรก็ตาม การเติบโตของอุตสาหกรรมก่อสร้างมีบทบาทสำคัญต่อเศรษฐกิจ การพัฒนาเมือง และมีประโยชน์หลายด้าน แต่กิจกรรมการก่อสร้างกลับก่อให้เกิดมลพิษด้านของเสียอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีสัดส่วนปริมาณที่เกิดขึ้น คิดเป็นร้อยละ 30% ของปริมาณของเสียทั้งหมดทั่วโลก [2] ซึ่งในสหรัฐอเมริกาพบว่าของเสียจากงานก่อสร้างมีปริมาณมากกว่าขยะมูลฝอยชุมชนถึง 2 เท่าในปี 2018 และส่งผลกระทบต่อสุขภาพ [3] โดยของเสียจากงานก่อสร้างและรื้อถอนมีการปล่อยคาร์บอนประมาณพันล้านตันต่อปี [4,5] โดยข้อตกลงปารีสเสนอให้จำกัดการเพิ่มของอุณหภูมิโลกเพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั่วโลกลง 50% ภายในปี 2573 [6] ทั้งนี้ของเสียจากก่อสร้างของประเทศไทยมีการผันแปรจากการวางแผนและพฤติกรรมของผู้รับเหมา โดยสาเหตุที่พบบ่อย ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงแบบและวัสดุที่ใช้ในกระบวนการก่อสร้างแต่ละขั้นตอนก่อให้เกิดของเสียในปริมาณมาก ส่วนใหญ่ของเสียที่เกิดจากกิจกรรมงานก่อสร้างจากงานโครงสร้างและงานสถาปัตยกรรม เช่น เศษอิฐ หิน ดิน ทราย คอนกรีต เศษไม้ โลหะต่าง ๆ เหล็ก กระป๋อง ตลอดจนกระดาษและพลาสติก ของเสียบางชนิดสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่บางชนิดไม่สามารถนำกลับมาใช้ได้ จึงเกิดค่าใช้จ่ายที่ไม่จำเป็นสำหรับการนำของเสียไปกำจัด เช่น ระบบฝังกลบอาจต้องรับกำจัดของเสียก่อสร้างถึงร้อยละ 30-40 ของพื้นที่ทั้งหมด จากการศึกษาของ Yeeprae et al. ระบุว่า อาจมีการกำจัดของเสียจากการก่อสร้างอย่างไม่ถูกต้องได้ถึงร้อยละ 85 ของปริมาณที่เกิดขึ้นทั้งหมด เช่น นำไปทิ้งในที่ว่างเปล่าหรือแม่น้ำ ลำคลอง หรือคิดเป็นปริมาณโดยเฉลี่ยวันละ 300 ตัน ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 0.5 ของปริมาณขยะมูลฝอยโดยรวมทั้งหมด [7] ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น การปนเปื้อนในดิน น้ำ อากาศ จากการกำจัด รวมถึงเกิดการสิ้นเปลืองทรัพยากร [8-10] จึงควรมีการพิจารณาจัดการของเสียดังกล่าวอย่างเหมาะสมเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม สุขภาพมนุษย์ รวมถึงส่งเสริมความมั่นคงของเมืองในระยะยาว การพัฒนากลยุทธ์การจัดการของเสียที่มีประสิทธิภาพจะช่วยส่งเสริมการเข้าสู่เป้าหมายการก่อสร้างยั่งยืน ซึ่งหมายถึงการทำงานก่อสร้างที่ให้ความสำคัญกับ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.001

สิ่งแวดล้อม ผ่านการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้การจัดการของเสียในกิจกรรมงานก่อสร้างอาคารสูงประเภทที่พักอาศัยเป็นเรื่องที่มีความสำคัญอย่างมาก โดยแนวทางจัดการของเสียที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด ได้แก่ การลดปริมาณการเกิดของเสียที่ป้องกันการเกิดตั้งแต่ต้นทางก่อนเข้าสู่กระบวนการ 3Rs (Reduce Reuse Recycle) เพื่อลดของเสียที่เกิดขึ้นจากแหล่งกำเนิด [11] อย่างไรก็ตาม การพัฒนาพื้นที่ก่อสร้างก่อให้เกิดปริมาณขยะจำนวนมากในพื้นที่ที่มีความหนาแน่นสูง ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของประชาชนหากไม่ได้รับการจัดการที่เหมาะสมและเป็นระบบอาจนำไปสู่ปัญหามลพิษ เช่น การปนเปื้อนในแหล่งน้ำ หรือการสะสมของขยะในที่สาธารณะ ทั้งนี้ในพื้นที่จังหวัดนนทบุรีและปทุมธานี ถือเป็นพื้นที่สำคัญที่มีการพัฒนาขยายตัวทางเศรษฐกิจและที่อยู่อาศัยอย่างรวดเร็ว มีลักษณะทางกายภาพและบริบทของพื้นที่มีความคล้ายคลึงกัน เช่น การใช้ที่ดิน ซึ่งเป็นแหล่งที่พักอาศัยและการเชื่อมต่อกับโครงสร้างพื้นฐานในเมือง รวมถึงข้อกำหนดด้านสัดส่วนพื้นที่ว่างต่อพื้นที่ใช้สอย (FAR: Floor Area Ratio) และ OSR (Open Space Ratio) มีความยืดหยุ่นกว่ากรุงเทพมหานคร จึงเป็นที่มาของพื้นที่ศึกษา

ดังนั้น งานวิจัยนี้สนใจศึกษาวิเคราะห์อัตราการเกิดของเสียจากกิจกรรมในงานก่อสร้างอาคารสูงประเภทที่พักอาศัย ต่อการวางแผนงานก่อสร้างในอนาคตให้เกิดการใช้วัสดุอย่างเหมาะสม คุ้มค่า ลดปริมาณของเสียจากการก่อสร้างอย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืน

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

2.1 พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ เป็นโครงการก่อสร้างอาคารสูงประเภทที่พักอาศัย สูง 8 ชั้น ที่มีขนาดใกล้เคียงกันในซึ่งมีความจำเพาะในส่วนของรูปแบบประเภทอาคารกรรมวิธีการก่อสร้าง การใช้อิฐก่อ ฐานราก tie beam งานพื้น flat slab เสา shear wall หรืองานพื้น post tension ขนาดพื้นที่รวมทุกชั้นเท่ากับ 9,000 ตารางเมตร และ 8,500 ตารางเมตร ตามลำดับ

2.2 ขั้นตอนวิเคราะห์ข้อมูล

งานวิจัยนี้ทำการศึกษากิจกรรมในงานก่อสร้างอาคารสูงประเภทที่พักอาศัย ดังนี้

2.2.1 วิเคราะห์ประเภทและอัตราการเกิดของเสียในงานก่อสร้าง

ทำการศึกษาตั้งแต่โครงการเริ่มก่อสร้าง จนงานแล้วเสร็จ ในจังหวัดนนทบุรี และปทุมธานี เป็นระยะเวลาทั้งสิ้น 221 วัน และ 245 วัน ซึ่งลักษณะของงานที่ก่อให้เกิดของเสีย แบ่งออกเป็นส่วนงานโครงสร้างหลัก ได้แก่ งานฐานราก งานพื้น งานบันได งานก่อผนัง งานฝ้าเพดาน งานระบบสุขาภิบาล และงานพื้นรอบอาคาร และส่วนงานสถาปัตยกรรม ได้แก่ งานสี งานตกแต่งผนังภายใน-ภายนอก งานตกแต่งพื้น งานตกแต่งบันได งานประตู-หน้าต่าง งานสุขภัณฑ์ งานระบบไฟฟ้าระบบส่องสว่าง โดยทำการวิเคราะห์โดยชั่งน้ำหนักของเสียที่เกิดขึ้นแต่ละกิจกรรมจากทั้งสองส่วนงาน ซึ่งลักษณะของเสียที่เกิดขึ้นจากการก่อสร้างอาคารพักอาศัยสูงในบริเวณอาคารก่อสร้างจังหวัดนนทบุรี และปทุมธานี แสดงดังรูปที่ 1 และ 2

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.001

ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบและปริมาณโดยการชั่งน้ำหนักของเสียตามประเภทในแต่ละกิจกรรมโดยบันทึกทุกสัปดาห์เพื่อหาอัตราการเกิด และสัดส่วนของเสีย แต่ละประเภทคิดเป็นร้อยละในของเสียทั้งหมดที่เกิดขึ้น

2.2.2 วิเคราะห์แนวทางในการจัดการของเสีย

ศึกษาแนวทางในการจัดการของเสียที่เกิดขึ้นในรายกิจกรรมงานก่อสร้างอาคารสูงตามกระบวนการ 3Rs (Reduce, Reuse, Recycle) เพื่อลดของเสียที่จะเกิดขึ้นตั้งแต่ขั้นวางแผนงานก่อสร้าง ตลอดกระบวนการก่อสร้าง

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

3.1 ประเภทของของเสียจากการก่อสร้างอาคารพักอาศัยสูง

จากการคัดแยกประเภทขยะและชั่งน้ำหนักของเสียที่เกิดจากการก่อสร้างอาคารสูงประเภทที่พักอาศัย ส่วนใหญ่ของเสียที่เกิดขึ้น ได้แก่ เศษคอนกรีต เศษอิฐ เศษเหล็ก และเศษกระเบื้อง ดังแสดงในรูปที่ 1 และ 2 ซึ่งสอดคล้องกับการรายงานของ Uyasatian and Ussawarujikulchai [12] โดยเมื่อพิจารณาประเภทขยะและร้อยละของของเสียที่เกิดขึ้นสามารถแบ่งได้ 8 ประเภทโดยเฉลี่ย ดังนี้ เศษคอนกรีต 50.51% เศษเหล็ก 25.48% เศษอิฐ 11.99% เศษไม้แบบ 5.51% เศษกระเบื้อง 4.39% ขยะมูลฝอย 1.60% บรรจุภัณฑ์/ห่อวัสดุ 0.42% และ เศษ PVC 0.10% ตามลำดับ (รูปที่ 3) ทั้งนี้เมื่อพิจารณาบัญชีรายการวัสดุ (BOQ) ของงานโครงสร้างหลักพบว่าปริมาณของคอนกรีตที่ใช้ทั้งโครงการมีปริมาณรวมทั้งสิ้น 4,250 ลูกบาศก์เมตร เหล็ก 725 ตัน ไม้แบบ 20,000 ตารางเมตร โดยสาเหตุ

รูปที่ 1 ลักษณะของเสียที่เกิดขึ้นบริเวณอาคารก่อสร้าง (จังหวัดนนทบุรี)

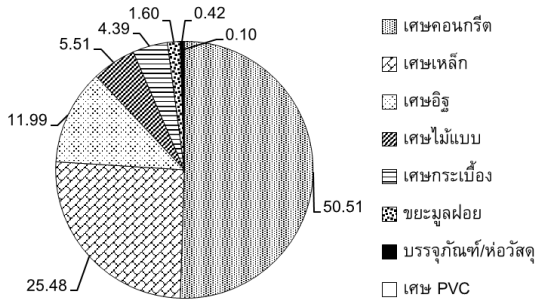
รูปที่ 2 ลักษณะของเสียที่เกิดขึ้นบริเวณอาคารก่อสร้าง (จังหวัดปทุมธานี)

ของการสูญเสียวัสดุ เกิดจากปัญหาหลักได้แก่ การขาดการวางแผนงานก่อสร้างที่เหมาะสม การเปลี่ยนแปลงแบบหน้างาน การขาดระบบการจัดการวัสดุ การเร่งรัดการปฏิบัติงานมากเกินไป คนงานขาดความเชี่ยวชาญในการทำงาน และการสื่อสารที่ไม่ชัดเจน เป็นต้น [7,13]

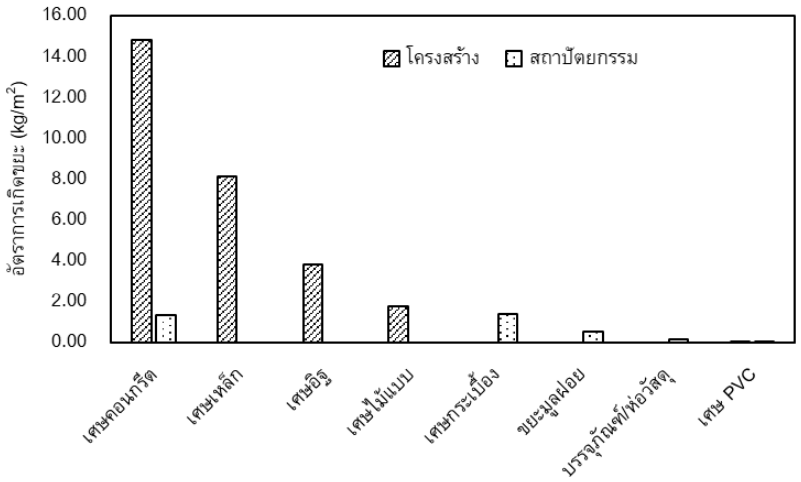
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.001

3.2 อัตราการเกิดของเสียจากการก่อสร้างอาคารสูง

การวิเคราะห์อัตราการเกิดของเสียต่อพื้นที่เท่ากับ 30.81 kg/m^2 (รูปที่ 4) เมื่อพิจารณาแบ่งตามลักษณะงานโครงสร้างและงานสถาปัตยกรรม พบว่าอัตราการเกิดของเสียในหน่วยกิโลกรัมต่อตารางเมตร (kg/m^2) ของงานโครงสร้าง ได้แก่ เศษคอนกรีต 14.82 kg/m^2 เศษเหล็ก 8.13 kg/m^2 เศษอิฐ 3.82 kg/m^2 และเศษไม้แบบ 1.76 kg/m^2 ตามลำดับ ขณะที่งานสถาปัตยกรรม เป็นเศษกระเบื้อง 140 kg/m^2 ขยะมูลฝอยทั่วไป 0.51 kg/m^2 บรรจุภัณฑ์/ห่อวัสดุ 0.13 kg/m^2 และเศษ PVC 0.03 kg/m^2 ตามลำดับ จากข้อมูลดังกล่าวพบว่าบริษัทรับเหมาก่อสร้างมีส่วนก่อให้เกิดของเสียจากงานก่อสร้างในปริมาณมากรวมถึงของเสียที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของแบบก่อสร้างที่ไม่ลงตัว ทำให้เป็นเศษยากต่อการนำไปใช้ใหม่อีกครั้ง [14] การเตรียมการและจัดการงานก่อสร้างที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพจึงมีส่วนสำคัญลดปริมาณของเสียเพื่อบรรลุเป้าหมายการก่อสร้างที่ยั่งยืน



รูปที่ 3 สัดส่วนร้อยละของของเสียอาคารสูงจังหวัดนนทบุรีและจังหวัดปทุมธานี



รูปที่ 4 อัตราการเกิดของเสียก่อสร้างอาคารพักอาศัยสูง

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.001

ตารางที่ 1 แสดงถึงการก่อสร้างอาคารสูงประเภทที่พักอาศัยแต่ละกิจกรรมมีผลต่ออัตราการเกิดของเสียแตกต่างกัน โดยกิจกรรมงานพื้นอัดแรงภายหลังและการขึ้นเสาชั้นที่ 2-8 ก่อให้เกิดเศษคอนกรีต (4.49 kg/m^2) และเศษไม้แบบ (0.98 kg/m^2) มากที่สุด ซึ่งการเทคอนกรีตลงในแบบ มีคอนกรีตบางส่วนที่ไหลล้นจากแบบ รวมถึงเศษไม้แบบจากการตัดไม้ตามขนาดเพื่อทำการเข้าแบบสำหรับเทคอนกรีต ซึ่งแต่ละงานจะมีขนาดที่แตกต่างกันและเหลือเศษไม้แบบมาก เศษอิฐ (3.51 kg/m^2) ส่วนมากเกิดจากกิจกรรมงานก่ออิฐมวลเบาผนังทั่วไป ในทางปฏิบัติมีการตัดอิฐเพื่อให้ใช้งานได้ตามขนาดจึงทำให้มีส่วนที่แตกหักไม่สามารถนำมาใช้ต่อได้ เศษกระเบื้อง (1.11 kg/m^2) เกิดจากกิจกรรมงานตกแต่งพื้น จากการตัดกระเบื้องที่ผิดพลาดไม่ได้ขนาดตามต้องการและแตกหัก ของเสียอื่น (0.23 kg/m^2) เกิดจากกิจกรรมงานฝ้าเพดาน บรรจุภัณฑ์/ห่อวัสดุ (0.03 kg/m^2) จากกิจกรรมงานตกแต่งพื้นและงานสุขภัณฑ์/อุปกรณ์ ทั้งนี้ของเสียประเภทบรรจุภัณฑ์/ห่อวัสดุเป็นกระดาษคราฟท์ ไม่สามารถนำไปใช้ต่อในกิจกรรมใดๆ ได้ และเศษ PVC (0.02 kg/m^2) เกิดจากกิจกรรมงานสุขภัณฑ์/อุปกรณ์ การตัด PVC ในแบบต่างๆ ผิดพลาดไม่ได้ขนาดตามต้องการ ทำให้เกิดของเสีย เนื่องจากบางส่วนนำไปใช้ต่อไม่ได้ การลดปริมาณของเสียดังกล่าวสามารถดำเนินการได้โดยพิจารณาปรับปรุงการก่อสร้างในแต่ละขั้นตอน [15] รวมถึงพิจารณาศักยภาพในการคัดแยกของเสียในพื้นที่ตามแนวคิด “สถานที่ก่อสร้างปลอดขยะ” [16] ทั้งนี้ผู้มีส่วนร่วมที่มีผลต่อการจัดการของเสียจากงานก่อสร้าง ได้แก่ ลูกค้า ผู้รับเหมาหลัก ผู้รับเหมาช่วง ผู้จำหน่ายสินค้าและบริษัทรับรีไซเคิลวัสดุ โดยมีปัจจัยต่างๆ ที่ต้องพิจารณา ได้แก่ มูลค่าของของเสียประเภทต่างๆ ศักยภาพในการคัดแยกของเสียในสถานที่ ประสบการณ์และทักษะของผู้ปฏิบัติงาน การจำหน่ายของเสีย และวิธีการรวบรวมและกำจัดของเสีย

3.3 แนวทางการจัดการของเสียจากการก่อสร้าง

แนวทางการจัดการขยะโครงการก่อสร้างอาคารสูงตามประเภทขยะกิจกรรมที่เกิดขึ้น เป็นกระบวนการสำคัญที่ช่วยลดปริมาณขยะ เพิ่มประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากร และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ดังนี้

3.3.1. ขยะโครงสร้างเกิดจากการก่อสร้าง

1. เศษวัสดุจากโครงสร้าง (Structural Waste) เช่น ฐานราก เสา คาน และพื้น ซึ่งมักประกอบด้วยวัสดุที่มีน้ำหนักมากและมีมูลค่าการรีไซเคิลสูง เช่น คอนกรีต เหล็ก เสา คาน และไม้แบบ

การจัดการ: เก็บรวบรวมและแยกเศษวัสดุที่ยังใช้งานได้ เช่น เหล็กเส้น คัดแยกเหล็กที่ยังคงสภาพดีและส่งต่อให้โรงงานรีไซเคิล นำเศษคอนกรีตไปใช้ถมที่หรือใช้เป็นวัสดุรองพื้นถนน และไม้แบบใช้ซ้ำในงานก่อสร้างอื่น หรือนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ เช่น ชิ้นส่วนเฟอร์นิเจอร์

2. ขยะจากวัสดุก่อสร้าง (Construction Materials Waste) เช่น อิฐ หิน ปูน กระเบื้อง

การจัดการ: เศษวัสดุที่ยังสมบูรณ์ เช่น กระเบื้องและอิฐ สามารถคัดแยกเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ขยะที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ได้ เช่น ปูนที่แข็งตัวแล้ว สามารถนำไปบดเพื่อใช้เป็นวัสดุพื้นฐานในงานอื่น ๆ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.001

ตารางที่ 1 อัตราการเกิดของเสีย (ในหน่วย กก.ต่อตร.ม.; kg/m^2) ในแต่ละกิจกรรมในการก่อสร้างอาคารสูง

ลำดับ	กิจกรรม	เศษคอนกรีต	เศษเหล็ก	เศษอิฐ	เศษไม้แบบ	เศษกระเบื้อง	ขยะมูลฝอย	บรรจุภัณฑ์/ห่อวัสดุ	เศษ PVC
	งานโครงสร้าง								
1	ฐานราก tie beam and shear wall ของชั้นใต้ดิน	3.60	3.59	-	0.44	-	-	-	-
2	งานพื้น flat slab เสา shear wall ของชั้นที่ 1	4.01	2.59	-	0.32	-	-	-	-
3	งานพื้น post tension และเสาของชั้นที่ 2-8	4.49	1.28	-	0.98	-	-	-	-
4	งานพื้นชั้นดาดฟ้า	1.34	0.07	-	-	-	-	-	-
5	งานบันไดของชั้นที่ 1 – ดาดฟ้า	-	0.07	-	0.02	-	-	-	0.01
6	งานโครงสร้างระบบสุขาภิบาล	-	-	-	-	-	-	-	-
7	งานพื้นรอบอาคาร	1.39	0.54	-	-	-	-	-	-
8	งานก่ออิฐมวลเบา ผนังทั่วไป	-	-	3.52	-	-	-	-	-
9	งานก่ออิฐมอญผนังห้องน้ำ	-	-	0.31	-	-	-	-	-
	งานสถาปัตยกรรม								
10	งานตกแต่งผนัง พื้น ห้องน้ำ	-	-	-	-	0.29	0.20	0.02	-
11	งานฉาบผนังภายใน ภายนอก	1.30	-	-	-	-	-	0.01	-
12	งานตกแต่งผนังนอกอาคาร	-	-	-	-	-	0.01	-	-
13	งานฝ้าเพดาน	-	-	-	-	-	0.23	0.02	-
14	งานตกแต่งพื้น	-	-	-	-	1.11	-	0.03	-
15	งานประตู-หน้าต่าง	-	-	-	-	-	-	-	-
16	งานทาสี	-	-	-	-	-	-	-	-
17	งานสุขภัณฑ์/อุปกรณ์	-	-	-	-	-	0.05	0.03	0.02
18	งานตกแต่งบันได	-	-	-	-	-	0.01	0.01	-
19	งานระบบไฟฟ้าและแสงสว่าง	-	-	-	-	-	0.02	0.01	-
	ปริมาณของเสียรวม (kg/m^2)	**16.12**	**8.13**	**3.82**	**1.76**	**1.40**	**0.51**	**0.13**	**0.03**

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.001

3. ขยะพลาสติกและวัสดุบรรจุภัณฑ์ (Plastic and Packaging Waste) เช่น ฟิล์มห่อสินค้า ถุงพลาสติก กล่องกระดาษ

การจัดการ: คัดแยกวัสดุที่รีไซเคิลได้ เช่น พลาสติกแข็งและกล่องกระดาษ ส่งไปรีไซเคิล ลดการใช้พลาสติกแบบใช้ครั้งเดียว โดยใช้วัสดุบรรจุภัณฑ์ที่ย่อยสลายได้

4. ขยะเศษอาหารและขยะทั่วไป (Organic and General Waste) เช่น เศษอาหารของคนงาน บรรจุภัณฑ์ใช้แล้ว

การจัดการ: ขยะอินทรีย์สามารถนำไปทำปุ๋ยหมัก ขยะทั่วไปที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ควรกำจัดโดยวิธีที่ปลอดภัย เช่น ฝังกลบ

3.3.2. ขยะสถาปัตยกรรม

ขยะสถาปัตยกรรมเกิดจากการตกแต่งภายในและการติดตั้งส่วนประกอบของอาคาร ขยะที่เกิดขึ้นส่วนงานนี้ เช่น กระเบื้องเซรามิก กระจก ไม้ วัสดุบุพื้นและผนัง การจัดการส่วนใหญ่เป็นการรีไซเคิลและการนำกลับมาใช้ใหม่ เช่น กระเบื้องเซรามิก: นำเศษกระเบื้องที่ไม่เสียหายมาใช้ซ้ำในงานตกแต่ง หรือบดเป็นวัสดุถม กระจก: คัดแยกและส่งให้โรงงานรีไซเคิลกระจก ไม้: ใช้ไม้เหลือใช้ในการทำผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์หรือพาเลทไม้ นอกจากนี้การบริจาควัสดุสถาปัตย์ที่ยังคงคุณภาพ เช่น ประตู หน้าต่าง และกระเบื้อง สามารถบริจาคให้กับองค์กรหรือชุมชนที่ต้องการ และการจัดการขยะที่ไม่สามารถรีไซเคิลได้ เช่น พรมและวัสดุบุผนัง ควรเลือกการกำจัดอย่างปลอดภัย เช่น การฝังกลบหรือเผาในโรงงานที่มีการจัดการมลพิษอย่างเหมาะสม

นอกจากนี้แนวทางระบบการจัดการของเสียในงานก่อสร้างอาคารสูงประเภทที่พักอาศัยควรได้รับการออกแบบให้ที่มีประสิทธิภาพและนำไปสู่เป้าหมายความยั่งยืน สามารถนำข้อแนะนำดังต่อไปนี้ในการปรับปรุงและพัฒนาระบบการจัดการของเสียในโครงการก่อสร้างอย่างเหมาะสม:

1. การลดการเกิดของเสียจากแหล่งกำเนิด (Reduce): ลดปริมาณเศษสิ่งก่อสร้างให้น้อยที่สุด โดยการใช้วัสดุคุณภาพดี การวางแผนงานก่อสร้างอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อลดการเกิดของเสียในโครงการขั้นตอนการวางแผน ออกแบบ การจัดซื้อ ก่อสร้าง ปรับปรุง รื้อถอน มีส่วนสำคัญ ดังตัวอย่างของกรณีศึกษา [17] ซึ่งได้ศึกษาแนวทางในการจัดการของเสียจากงานก่อสร้างและงานรื้อถอน

2. การเก็บรวบรวมของเสียในพื้นที่โครงการ โดยใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสม เช่น การใช้ระบบท่อระบายน้ำเสีย การใช้ภาชนะเก็บกักของเสียและการวางแผนการเคลื่อนย้ายและการจัดการของเสียอย่างเหมาะสม

3. การนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ (Reuse): การนำของเสียที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ในการก่อสร้างหรือในการใช้งานอื่นๆ เพื่อลดการเกิดของเสียและลดการใช้วัสดุใหม่ และลดต้นทุนในการจัดการของเสีย [10] โดยบูรณาการการจัดการของเสียจากงานก่อสร้างที่เกิดขึ้นเพื่อการกู้คืนทรัพยากรสู่การก่อสร้างแบบหมุนเวียน [18]

4. การรีไซเคิล (Recycle): โดยนำวัสดุในของเสียที่ยังมีคุณค่าทางเศรษฐกิจกลับมาใช้ใหม่ผ่านกระบวนการรีไซเคิล เช่น การนำเศษเหล็ก กระดาษ และพลาสติกกลับมาใช้ใหม่ โดยมีตัวอย่างการผลิตตะปู

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.001

จากเหล็กเหลือทิ้ง [19] ทั้งนี้ผลประโยชน์จากการรีไซเคิลในธุรกิจก่อสร้างอาจไม่ได้เกิดจากกำไรในรูปผลตอบแทนทางการเงินเพียงอย่างเดียว แต่รวมถึงการส่งผลต่อความเชื่อถือทางสังคมและความยั่งยืนขององค์กรด้วย อย่างไรก็ตามการดำเนินการรีไซเคิลอย่างเป็นรูปธรรมมักเกิดขึ้นได้ยากสำหรับผู้รับเหมารายเล็กทั่วไป [1]

5. การนำพลังงานกลับมาใช้ (Energy Recovery) โดยการเปลี่ยนขยะที่เผาไหม้ได้ เช่น เศษไม้ พลาสติก หรือกระดาษ เป็นพลังงานไฟฟ้าหรือพลังงานความร้อน ใช้เศษไม้เหลือจากการก่อสร้างเป็นเชื้อเพลิงในโรงงาน Waste-to-Energy (WTE)

6. การออกแบบเพื่อการลดขยะ (Design for Waste Minimization) โดยการใช้ระบบก่อสร้างแบบชิ้นส่วนสำเร็จรูปเพื่อลดการสูญเสียวัสดุในไซต์งาน (Modular Construction) และออกแบบโครงสร้างที่สามารถถอดประกอบและนำวัสดุกลับมาใช้ใหม่ได้เมื่อหมดอายุการใช้งาน (Design for Deconstruction)

7. การจัดการเชิงลอจิสติกส์ (Logistics Management) วางแผนการขนส่งวัสดุที่เหมาะสมเพื่อลดการสูญเสียระหว่างขนส่ง ใช้ระบบ Just-In-Time (JIT) เพื่อลดการเก็บสต็อกวัสดุที่อาจเสื่อมคุณภาพ

8. การจัดทำฐานข้อมูลของเสีย (Waste Inventory Management) โดยเก็บข้อมูลของเสียแต่ละประเภทเพื่อวางแผนการจัดการอย่างเป็นระบบใช้เทคโนโลยี IoT เพื่อติดตามปริมาณขยะและการจัดการในแบบเรียลไทม์

9. การนำกลับมาใช้ใหม่เชิงสร้างสรรค์ (Upcycling) แปรรูปวัสดุก่อสร้างเหลือใช้ให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ เช่น ใช้เศษคอนกรีตทำวัสดุทดแทนสำหรับถนน เศษไม้ นำมาทำเป็นเฟอร์นิเจอร์ เช่น โต๊ะ เก้าอี้ หรือของตกแต่ง ใช้ทำวัสดุปูพื้นหรืองานตกแต่งผนัง กระจกและกระเบื้อง บดเป็นวัสดุสำหรับตกแต่ง เช่น กระเบื้องโมเสก ใช้ในงานศิลปะหรือผลิตภัณฑ์แก้วใหม่ และวัสดุผสม (Composite Materials) นำไปใช้ในงานตกแต่งหรืองานออกแบบที่ไม่ต้องการคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมสูง การอัพไซเคิลขยะจากการก่อสร้างเป็นอีกหนึ่งวิธีที่ช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสนับสนุนเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) อย่างยั่งยืน

10. การลำเลียงของเสียไปยังสถานที่จัดการของเสียที่เหมาะสม เช่น การขนส่งเศษคอนกรีต เหล็ก และไม้จากไซต์ก่อสร้างไปยังศูนย์รีไซเคิลวัสดุก่อสร้าง ซึ่งศูนย์ดังกล่าวจะมีระบบคัดแยกและแปรรูปวัสดุต่างๆ สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ในงานก่อสร้างอื่นๆ ได้ เพื่อลดการกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสังคมในพื้นที่โครงการ

11. การสร้างความตระหนักรู้ในการจัดการของเสียในกิจกรรมก่อสร้าง เช่น การจัดอบรมให้กับคนงานก่อสร้างและผู้รับเหมาเกี่ยวกับการคัดแยกของเสียในสถานที่ก่อสร้าง โดยเน้นความสำคัญของการแยกขยะรีไซเคิล เช่น เหล็ก ไม้ และคอนกรีตแยกจากขยะที่ต้องทิ้งจริง ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการขยะ นอกจากนี้ การติดตั้งป้ายประชาสัมพันธ์ในพื้นที่ก่อสร้าง เพื่อเตือนให้ทุกคนในไซต์มีส่วนร่วมในการจัดการขยะอย่างถูกต้อง และการสอนให้ผู้เกี่ยวข้องเข้าใจถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสังคมจากการจัดการขยะที่ไม่ถูกวิธี ก็เป็นแนวทางในการสร้างความตระหนักที่มีประสิทธิภาพ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.001

การใช้แนวทางการจัดการของเสียจากการก่อสร้างที่มีประสิทธิภาพสามารถลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและมนุษย์ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการสนับสนุนการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development Goals - SDGs) ดังนี้:

1. ลดมลพิษทางอากาศ น้ำ และดิน (SDG 6: Clean Water and Sanitation) ในการจัดการขยะอย่างเหมาะสม เช่น การคัดแยกและการรีไซเคิล ช่วยลดการปล่อยสารพิษและฝุ่นละอองที่อาจเกิดจากการฝังกลบขยะก่อสร้างในที่เปิด การลดการเผาขยะช่วยลดการปล่อยก๊าซพิษ ทำให้ลดความเสี่ยงด้านสุขภาพและสิ่งแวดล้อม เช่น ป้องกันไม่ให้สารเคมีจากสีและโลหะหนักรั่วไหลลงสู่แหล่งน้ำหรือดิน

2. ลดปริมาณขยะที่ต้องกำจัดและสนับสนุนเศรษฐกิจหมุนเวียน (SDG 12: Responsible Consumption and Production) การนำวัสดุที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ เช่น คอนกรีต เหล็ก และไม้ ช่วยลดปริมาณขยะที่ต้องกำจัด ส่งเสริมการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพและสร้างเศรษฐกิจหมุนเวียน นอกจากนี้ยังช่วยลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติใหม่ ซึ่งสนับสนุนให้เกิดการบริโภคและผลิตอย่างรับผิดชอบ

3. ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและสนับสนุนการต่อสู้กับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (SDG 13: Climate Action) การรีไซเคิลและนำวัสดุกลับมาใช้ใหม่ในงานก่อสร้าง ช่วยลดการใช้พลังงานและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในกระบวนการผลิตวัสดุใหม่ เช่น การใช้คอนกรีตรีไซเคิลแทนการผลิตคอนกรีตใหม่จะช่วยลดการใช้ทรัพยากรและการปล่อยก๊าซคาร์บอน ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในการลดผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

(4) ส่งเสริมการใช้ทรัพยากรอย่างยั่งยืน (SDG 15: Life on Land) การจัดการของเสียจากก่อสร้างอย่างเหมาะสมช่วยลดการใช้พื้นที่ป่าและที่ดินเพื่อสร้างสถานที่กำจัดของเสียเพิ่มเติม การป้องกันการรั่วไหลของสารเคมีอันตรายจากของเสียจากการก่อสร้างสู่ธรรมชาติยังเป็นการรักษาความหลากหลายทางชีวภาพและลดความเสี่ยงต่อสิ่งมีชีวิตในระบบนิเวศด้วย

การจัดการของเสียจากการก่อสร้างอย่างมีประสิทธิภาพจึงมีส่วนสำคัญในการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์ รวมถึงยังสอดคล้องกับการบรรลุเป้าหมายด้านความยั่งยืนของ SDGs อีกหลายเป้าหมาย ซึ่งเป็นรากฐานในการพัฒนาที่ยั่งยืนอย่างแท้จริง

4. สรุปผลการวิจัย

การเกิดของเสียจากกิจกรรมงานก่อสร้างอาคารสูงประเภทที่พักอาศัย ส่วนใหญ่เกิดจากงานโครงสร้าง คิดเป็น 8.5 เท่าของงานสถาปัตยกรรม โดยเฉพาะเศษคอนกรีต เศษเหล็ก เศษอิฐ และเศษไม้แบบ ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการก่อสร้างที่ใช้วัสดุเหล่านี้ในปริมาณมาก นอกจากนี้ กิจกรรมที่ก่อให้เกิดของเสียมากที่สุดในงานโครงสร้าง ได้แก่ งานฐานรากคานยึด และผนังรับแรงเฉือนของชั้นใต้ดิน งานพื้น Post Tension และเสาของชั้นที่ 2-8 รวมถึงงานก่ออิฐมวลเบาผนังทั่วไป ก็เป็นอีกหนึ่งกิจกรรมที่ก่อให้เกิดของเสียในปริมาณสูง สำหรับงานสถาปัตยกรรม ของเสียส่วนใหญ่เกิดจากงานฝ้า เพดาน งานตกแต่งพื้น และงานติดตั้งสุขภัณฑ์/อุปกรณ์ จากการเก็บข้อมูลของโครงการที่ศึกษาพบว่ามีอัตราการเกิดของเสียในงานโครงสร้างและงานสถาปัตย์เท่ากับ 28.54 kg/m^2 และ 3.36 kg/m^2

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.001

ตามลำดับ ซึ่งควรต้องมีการจัดการของเสียดังกล่าวอย่างเหมาะสม พร้อมทั้งการบริหารงานก่อสร้างโดยมีการวางแผนที่ดี เช่น การออกแบบให้ใช้วัสดุอย่างคุ้มค่าโดยใช้เทคโนโลยีการออกแบบ BIM (Building Information Modeling) เพื่อคำนวณวัสดุที่จำเป็นและลดเศษเหลือทิ้ง หรือการวางแผนงานก่อสร้างอย่างเป็นขั้นตอนเพื่อลดการทำงานผิดพลาดและซ้ำซ้อน เช่น การวางตำแหน่งคาน เสา และผนังให้เหมาะสมตั้งแต่แบบโครงสร้าง เลือกใช้วัสดุสำเร็จรูป (Prefabrication): เช่น แผ่นพื้นสำเร็จหรือผนังคอนกรีตสำเร็จ เพื่อลดการตัดแต่งวัสดุในสถานที่ก่อสร้าง และการตรวจสอบคุณภาพวัสดุและงานก่อสร้าง: เพื่อลดของเสียที่เกิดจากวัสดุเสียหายหรือผิดมาตรฐาน เพื่อลดปริมาณขยะจากแหล่งกำเนิด และวัสดุอื่น ๆ ที่ยังสามารถใช้งานได้ควรนำกลับมาใช้ซ้ำ เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการกำจัด และหลีกเลี่ยงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น มลพิษทางน้ำ ดิน อากาศ และการจัดการของเสีย นอกจากนี้ยังเป็นการใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างเหมาะสมและคุ้มค่า

5. เอกสารอ้างอิง

[1] V. Min, K. Panuwatwanich and K. Matsumoto, Enhancing performance of construction waste management: Factor analysis from the building contractors' perspectives, Cleaner Waste Systems, 2024, 9, 100176.

[2] Z, Bao and W. Lu, Applicability of the environmental Kuznets curve to construction waste management: A panel analysis of 27 European economies, Resources, Conservation and Recycling, 2023, 188, 106667.

[3] S. Lee, H. Chang and J. Lee, Construction and demolition waste management and its impacts on the environment and human health: Moving forward sustainability enhancement, Sustainable Cities and Society, 2024, 115, 105855.

[4] H. Duan, T.R. Miller, G. Liu and V.W.Y. Tam, Construction debris becomes growing concern of growing cities, Waste Management, 2019, 83, 1–5.

[5] Y. Yi, J. Liu, M. C. Lavagnolo and A. Manzardo, Evaluating the carbon emission reduction in construction and demolition waste management in China, Energy and Buildings, 2024, 324, 114932.

[6] J. Soto-Paz, O. Arroyo, L.E. Torres-Guevara, B.A. Parra-Orobio and M. Casallas-Ojeda, The circular economy in the construction and demolition waste management: A comparative analysis in emerging and developed countries, Journal Building Engineering, 2023, 78, 107724.

[7] C. Yeeprae, T. Yomnak and T. Boonyaperm, Construction waste management for sustainable environment, Modern Management Journal, 2011, 9(1), 56–68. (in Thai)

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.001

[8] K. Kabirifar M. Mojtahedi, C.C. Wang and V.W.Y. Tam, Effective construction and demolition waste management assessment through waste management hierarchy; a case of Australian large construction companies, Journal of Cleaner Production, 2021, 312, 127790.

[9] S.Y. Kim, M.V. Nguyen and V.T.A. Luu, A performance evaluation framework for construction and demolition waste management: stakeholder perspectives, Engineering Construction and Architectural Management, 2020, 27(10), 3189-3213.

[10] N. Udawatta, J. Zuo, K. Chiveralls and G. Zillante, Improving waste management in construction projects: An Australian study. Resources, Conservation and Recycling, 2015, 101, 73-83.

[11] A.H. Assem and H. Karima, Material waste in the UAE construction industry: Main causes and minimization practices, Architectural Engineering and design management, 2011, 7(4), 221-235.

[12] U. Uyasatian and A. Ussawarujikulchai, Estimation of building-related C&D waste generation and composition in Bangkok, Environment and Natural Resources Journal, 2007, 5(2), 133-140. (in Thai).

[13] N. Pitchayapanya, Study of waste management from scraps construction materials in Miyake Seki Factory Project, SSRU Journal of Public Administration, 2018, 1(3), 35-48. (in Thai)

[14] S. Kittiwararat and P. Lertwattanaruk, Strategies for construction waste reduction in small residential buildings, Journal of Architectural/Planning Research and Studies, 2012, 9(2), 81-94. (in Thai)

[15] K. Doust, G. Battista and P. Rundle, Front-end construction waste minimization strategies, Australian Journal of Civil Engineering, 2020, 19(1), 1-11.

[16] W. Lu, Z. Bao, W.M.W. Lee, B. Chi and J. Wang, An analytical framework of “zero waste construction site”: Two case studies of Shenzhen, China, Waste Management, 2021, 121, 343-353.

[17] X. Zhao, R. Webber, P. Kalutara, W. Browne and J. Pienaar, Construction and demolition waste management in Australia: A mini-review, Waste Management and Research, 2022, 40(1), 34-46.

ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.001

[18] S.H. Ghaffar, M. Burman and N. Braimah, Pathways to circular construction: An integrated management of construction and demolition waste for resource recovery, Journal of Cleaner Production, 2020, 244, 118710.

[19] Z.T. Abdullah, A sustainable recycling approach for construction: A case of remanufacturing waste rebar into steel nails, Results in Engineering, 2024, 23, 102777.

บทความวิจัย

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.002

The Design of Pressure Control System using PD Controller for Light Duty Electric Vehicle

Patiparn Intacharoen[1], Chaiyut Sumpavakup[2], Kokiat Aodsup[3] and Soontorn Odngam[2*]

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

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

[3] Department of Electrical Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, Tak

[*] Corresponding author, E-mail: soontorn.o@cit.kmutnb.ac.th

Received: 7 November 2024; Revised: 20 December 2024; Accepted: 8 January 2025
Online Published: 22 April 2025

Abstract: This article describes a control method for braking oil pressure control based on a hydraulic brake control system for light-duty electric vehicles. This research aims to investigate and develop an automated braking system to lessen the possibility of accidents and also prevent frontal collisions of vehicles. In this study, a brake management system was designed with a PD controller and a linear motor actuator was chosen to control the brake oil pressure. System identification of the mathematical model is necessary to investigate the relationship between input and output responses in the linear model's range. In order to gain insight into the behavior of this system, a mathematical model was investigated and estimated, and the ideal values for the PD controller were determined as well. These estimated values were then utilized in an optimization process. Using the parameter estimation in the MATLAB Simulink, the control parameters, with the proportional gain value at 27.9606 and the derivative gain at 32.0490, were identified. The developed braking system implemented in a light-duty electric vehicle showed that it could effectively regulate the brake oil pressure using the prescribed parameter. The error value was not more than ±8 psi of the specified value. These findings highlight the potential of the system's applicability to extend to large vehicles further.

Keywords: Brake system; DC motor; System identification; PD controller

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.002

1. Introduction

Currently, the automotive industry plays a crucial and influential role in shaping human daily life due to the necessity of transportation for various commercial and daily activities. The increasing number of registered vehicles in Thailand from 2018 to 2021, as the Department of Land Transport reported, reflects a growth rate of 1.91% per year, reaching approximately one million vehicles annually. With the growing number of vehicles, there is a heightened awareness of the environmental and health impacts, leading to an increased interest in advanced and environmentally friendly technologies. Electric vehicles (EVs) have witnessed a significant surge in popularity compared to other vehicle types, driven by continuous advancements in contemporary and cutting-edge technologies [1]. The current focus on developing automated driving systems in modern vehicles aims to enhance user convenience and safety [2]. Safety systems have gained widespread popularity, especially considering the rising number of road accidents. According to accident data, there was an alarming increase in road fatalities in the first two quarters of 2023 compared to the previous year. One significant safety feature being developed and integrated into vehicles is the Automatic Emergency Braking (AEB) system [3].

Because cars play such an important function in daily life, the safety system is essential to reducing the number of people who die in land-based travel accidents. Given the high number of fatalities resulting from auto accidents, safety systems are essential for lowering incidences and boosting motorist trust. As a result, several automakers have invested a great deal of time and resources into creating safety features that reduce collisions and increase road user confidence [4-6].

The research presented above aims to contribute to the development of an AEB system, specifically for commercial electric vehicles with limited operational space. This research considers controlling the brake fluid pressure using a PD controller [7-9] by estimating and optimizing various direct current (DC) motor parameters. This involves approximating and optimizing the motor parameters to determine suitable control values. These control values will then be applied to regulate the hydraulic brake pressure at 200 psi. The experimental results will be used to analyze the system's performance and assess the effectiveness of this control strategy.

2. Brake System Design

A brake system design is a critical aspect in the automotive engineering domain, encompassing various components and technologies to ensure optimal vehicle safety and performance. The brake

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.002

system is fundamental for controlling and decelerating the vehicle, contributing significantly to overall road safety. Several factors influence the design of an effective brake system, including the vehicle's weight, speed, intended use, and environmental conditions. Engineers employ advanced technologies and materials to enhance braking efficiency, reduce stopping distances, and ensure consistent performance under varying circumstances.

The design of a brake system involves a comprehensive consideration of mechanical, hydraulic, and electronic components tailored to meet safety standards, vehicle specifications, and technological advancements. The continuous evolution of brake system design reflects the automotive industry's commitment to enhancing both vehicle performance and road safety.

From Fig. 1, in consideration of designing a brake system for a vehicle while the vehicle is in motion at any given speed, the braking action introduces a delay. This delay can be analyzed by categorizing the evaluation into three parts. Part 1 examines front-wheel braking, Part 2 addresses rear-wheel braking, and Part 3 investigates four-wheel braking.

Considering the braking force at the rear wheels:

$$F_F = W \cdot \left(\frac{\mu l \cos\theta}{b - \mu h} \right) \quad (1)$$

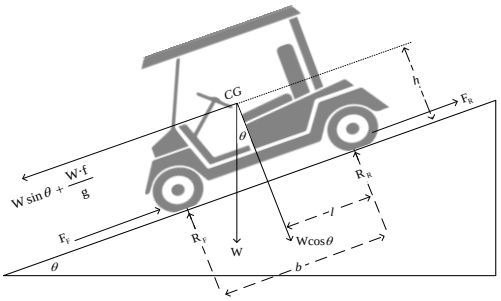


Fig. 1 Free body diagram of light-duty electric vehicle

Considering the braking force at the front wheels:

$$F_R = W \cdot \left(\frac{\cos\theta \cdot (b - l) \cdot \mu}{h\mu + b} \right) \quad (2)$$

Considering the braking force at the front wheels:

$$F_F + F_R = (\mu_F \cdot F_F) + (\mu_F \cdot F_R) \quad (3)$$

where R_F is the vertical reaction force between the road surface and the front wheels, R_R is the vertical reaction force between the road surface and the rear wheels, F_F is the braking force at the front wheels, W is the mass of the vehicle, $W \cdot f/g$ is the average force generated by wheel lockup, μ is the coefficient of friction between the vehicle's tires and the road, b is the wheelbase, h is the height distance between the road surface and the center of gravity (CG) point, l is the distance from the CG point to the center of the rear wheel.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.002

3. Control System Design

Light electric vehicles, such as electric golf carts and bikes, are in the place of most people using vehicles rather than cars and heavy electric vehicles. Basic safety considerations are important [10]. The researchers can then focus on the hydraulic braking system. Since brake pressure control has a significant impact on braking efficiency, it has the advantage of increasing the precision and speed of the system control response, and it is easy to sense when the brake system is in trouble [11]. In design research related to safety systems, some factors must be considered, such as the system's efficiency and speed of response. The selection of the PD controller necessitates an understanding of the technical characteristics of the motor, as its parameters may vary over time [12].

In designing the PD controller used for golf cart control, it is employed to regulate the operation of a DC motor [13-15]. The notable advantage lies in the ability to adjust the control bandwidth of the DC motor. The selection of the PD controller necessitates an understanding of the technical characteristics of the motor, as its parameters may vary over time depending on the usage scenario. The control system's objective is to precisely control the hydraulic brake pressure following the input signal and align the DC motor with a second-order system dynamic. The control system diagram of the pressure control system is shown in Fig. 2. A proportional-derivative (PD) control system with a transfer function $G_C(s)$ can be written as follows:

$$G_C(s) = K_p + K_d s \tag{4}$$

where K_p is a proportional component and K_d is a derivative component

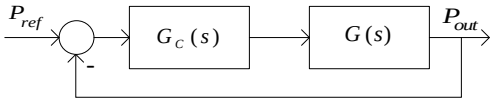


Fig. 2 Control system diagram of pressure control system

where P_{ref} is a pressure reference and P_{out} is a pressure output.

The design of the brake fluid pressure control system for light-duty electric vehicles has the position of the brake pedal control arranged, as shown in Fig. 3. The controller design can be divided into two parts: the design of the plant of the DC motor and the transfer function system.

3.1 Mathematical Model of the DC Motor

The mathematical model of the DC motor involves determining the parameters of the DC motor to facilitate the design of the control system. The gain value K is the sum of K_e and K_t [16], with the researcher knowing only the R of the DC motor. The parameters of the DC motor are shown in Table 1.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.002

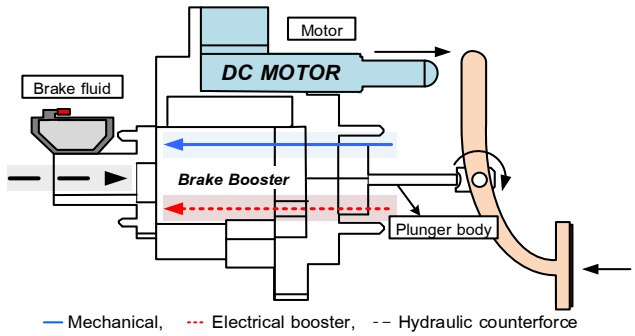


Fig. 3 Motor positioning for brake system oil pressure control

Table 1 Parameters of DC motor

Parameter	Value	Unit
R	10	Ω
Input voltage	24	Vdc
Load (Max)	500	N
Speed	13.5	mm/s
Stroke length	100	mm

This study focuses on exploring parameters for a DC motor intended to control the oil pressure in electric golf car brakes. The goal is to develop a safety system for users. Therefore, the analysis of the control system's performance is imperative to establish a mathematical model.

Fig. 4 displays the armature's electric equivalent circuit or DC motor model as well as the free-body schematic for the armature-controlled, separately excited DC motor [16].

MATLAB Simulink requires the development of a mathematical model to estimate parameters.

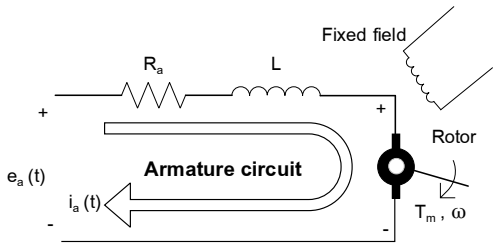


Fig. 4 DC motor model

The values of the variables will be simulated using the model. Through simulation in MATLAB Simulink, the researchers will enter the known electric resistance value into the model and determine the values of other parameters shown in Eq. (5):

$$G(s)=\frac{K}{(J\cdot L)S^3+(J\cdot R+b\cdot L)S^2+\left(K^2\cdot b\cdot R\right)S} \quad (5)$$

where J is a moment of inertia of the rotor, b is a motor viscous friction constant, K_e is the electromotive force constant, and K_t is a motor torque constant, R is an electric resistance and L is an electric inductance.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.002

System identification of the mathematical model is essential to investigate the relationship between input and output responses in the linear model's range. Given Eq. (5), the mathematical model of the system is Type 1. The PD controller is sufficient to control the system to meet the designed conditions with the knowledge of only one parameter, R, which is 10 ohms, the researchers need to estimate the values of other variables from the parameters in the equation. In the subsequent steps, these estimated values will be utilized in an optimization process to determine the PD controller using MATLAB Simulink program parameter estimation with Arduino uno R3 and MCT-HB-40A H-Bridge 10-30Vdc 40A. The parameters of the model are shown in Table 2.

Fig. 5 illustrates the pressure simulation responses of the system. It shows the pressure responses of the system with mathematical identification from the model compared to the experiment. By incrementally adjusting the hydraulic brake pressure in steps of 50 psi, starting from 50 psi to finishing at 200 psi, the method involved a systematic progression. This stepwise approach aimed to optimize and fine-tune the hydraulic brake pressure to achieve the desired performance or response in the system error 1.36%.

Table 2 Parameters of Mathematical Model

Parameter	Value	Unit
J	0.010178	$kg \cdot m^2$
K	0.40877	-
L	0.0039446	H
b	0.30469	$N \cdot m \cdot s$

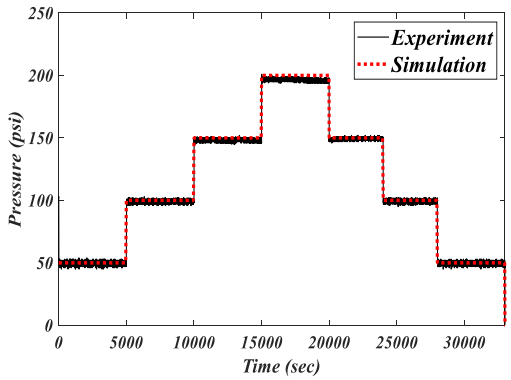


Fig. 5 Pressure simulation responses of the system

In designing the Mathematical Model for the DC Motor, the above-mentioned can be used to create a closed system control system diagram, as shown in Fig. 6.

3.2 Optimization of the PD Controller

The full dynamics, proportional control of the position error, and proportional control of the speed error are all included in the PD control with gravity compensation control algorithm [17]. P-Proportional and D-Derivative are the controllers that are the most widely used control algorithms, and the researcher chose P and D controllers for control of motor range [18], as shown in Fig. 7.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.002

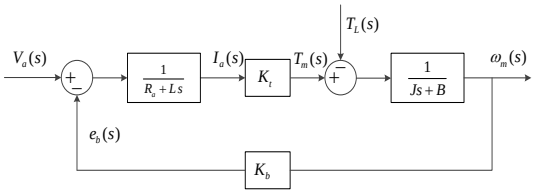


Fig. 6 Block diagram of the closed-loop speed control of the DC motor

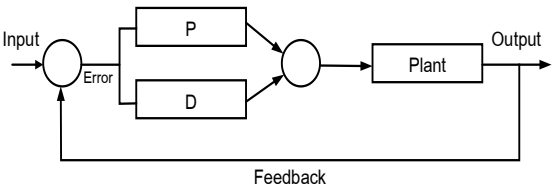


Fig. 7 The PD controller – non-interacting form schematic diagram

where V_a is the armature voltage, i_a is the armature current, ω_m is the rotation speed (rad/s), e_b is the back electromotive force voltage (V), T_m is the motor torque (N.m), K_b is the back electromotive force coefficient (V.s/rad), B is the coefficient of viscous friction (N.m.s/rad,) and T_d is the external load disturbance (N.m).

The destination of the control system design is to create a system that responds to the common inputs in a desired way. It is preferable to have a transient reaction that oscillates just enough but not too much. A desirable steady-state response is one that precisely tracks the desired output [19,20] since the mathematical model of the equation system used in the research is shown in Eq. (5) in Section 3.1. Steady-state error for types of input system is of the N = 1 system type or Type-1; the selected control system was the PD Controller type.

Since differentiating a noisy input leads to significant mistakes, the derivative term is not only undesirable but only roughly realizable. On the other hand, an analogous controller without differentiation is obtained if the output's derivative is monitored. Therefore, in practice, PD compensation is frequently possible. The specifications provided for the closed-loop system and the choice between a feedback controller determine how PD controllers are designed. Fig. 7 displays the system block diagram for a PD controller [19].

The parameters of the PD controller can be determined by using the signal constraints of the MATLAB Simulink program. Parameter and functional constraints limit the maximum overshoot by 10%, the rise time is 2 sec, the setting time is 4 sec, and the steady-state error is 5%. The result of this program is defined as shown in Table 3. The data in Table 3 was used in designing the optimized PD controller for controlling DC motors. This data can be used to create the control system diagram, as shown in Fig. 8.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.002

Table 3 Parameters of the PD controller

Parameter	Value
K_p	27.9606
K_d	32.0490

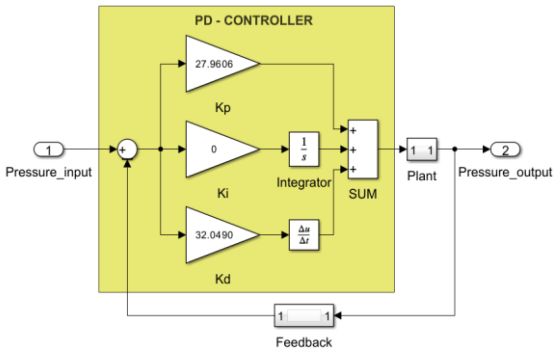


Fig. 8 PD controller diagram of pressure control

4. Experiments

Regarding the brake oil pressure control testing, the researcher separated the experiment into two stages: experimental setup and experimental and simulation results. The latter displayed the system setup along with the experimental steps and compared the experimental results using actual equipment with the setup results. The experimental assessment employed statistical data and the root mean square error (RMSE) approach to evaluate the error findings.

4.1 Experimental setup

This section covers the experimental setup and the control system's dynamic responses. The experimental setup shown in Fig. 9 used a 24 Vdc supply from the power source, which was directed

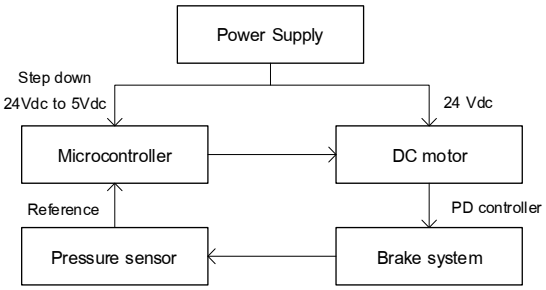


Fig. 9 Block diagram oil pressure control system

to both the DC motor and the microcontroller.A step-down converter was employed to reduce the voltage to 5 Vdc for operational purposes.

The DC motor was controlled by a PD controller to manage the braking system, and pressure readings from the brake fluid were obtained through a pressure sensor using WER 5 Vdc. The maximum pressure was 500 psi ±2% FS with a small output error. It had a complete surge voltage protection function.

4.2 Experimental and Simulation Results

The tests were divided into three experiments: constant, step, and harmonic pressure output. Constant pressure output is shown in Fig. 10. The comparison between simulation results and experimental data involved setting the constant value during the experiments at 100 psi. Additionally, the PD controller parameters were adjusted according to Table 3. The observed discrepancy with simulation between the simulated error and experimental error RMSE results was ±1.85 psi.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.002

Step pressure output is shown in Fig. 11. The simulation and experimental results comparison involved adjusting the step time from 0 s to 300 s, incrementing the final value by 50 psi at each step, and setting the sample time to 0.01 s. The observed discrepancy between the simulated and experimental error RMSE results is ±2.56 psi.

Harmonic pressure output is shown in Fig. 12. The comparison between the simulation and experimental by adjusting the settings with a sine wave amplitude of 75, a bias of 125, and a frequency of 0.125 rad/sec, the graph exhibits a minimum point at a brake pressure of 50 psi and a maximum point at 200 psi. The observed discrepancy between the simulated and experimental error RMSE results is ±7.89 psi.

The researchers used a PD controller, derived through optimization from the conducted trials, with K_p being 27.9606 and K_d being 32.0490, to regulate the hydraulic braking pressure for an electric golf cart. The brake pressure testing varied between 100 and 500 psi while maintaining a steady 20 km/h speed. That occurred to calculate the average stopping distance between the time the system went on and when the electric golf cart completely stopped.

Table 4 and Fig. 13 present the findings of the tests. From the results of the experiments of all three processes, namely constant, step, and harmonic, the responses with the maximum error values in order from the best to the worst were step > constant > harmonic

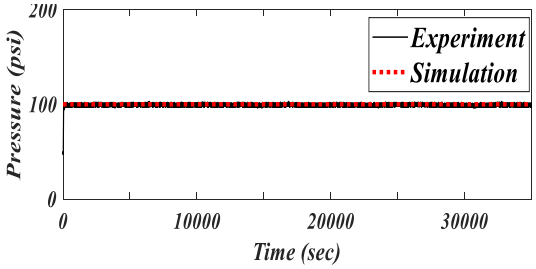


Fig.10 Constant pressure

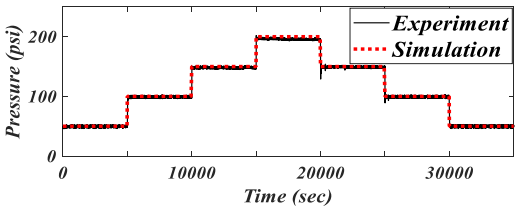


Fig. 11 Step pressure

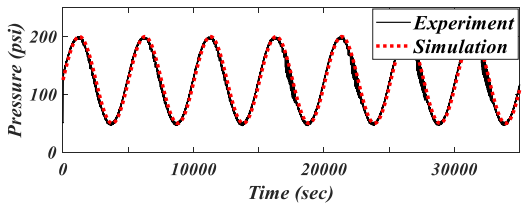


Fig. 12 Harmonic pressure

Table 4 Comparing the stopping distance of electric golf carts with the brake pressure used to control

Parameter (psi)	Distance (m)
100	31.43
200	18.23
300	12.25
400	6.76
500	6.57

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.002

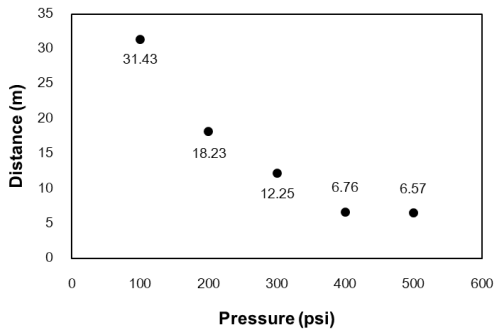


Fig. 13 Comparing the stopping distance

5. Conclusion

The research findings included a mathematical model for designing a PD controller for the braking system. The error value, when compared to the experiment, was 1.36%. This value was used to design a system controller capable of performing according to specified conditions. In the constant brake oil pressure experiment, there was an error of RMSE ± 1.85 psi or a maximum error of 1.85%. The step brake oil pressure experiment had an error of RMSE ± 2.56 psi or a maximum error of 1.28%, while the harmonic brake oil pressure experiment showed an error of RMSE ± 7.89 psi or a maximum error of 3.95%. The experiment measured the braking distance of the vehicle at a constant speed of 20 km/h, utilizing brake fluid pressures ranging from 100 to 500 psi; the average stopping distances were 31.43, 18.23, 12.25, 6.76, and 6.57 m, respectively.

Regarding this experiment, there is a future trend towards developing an automatic braking assistance system. This study suggests potential advancements in brake control technology, aiming to enhance the overall efficiency of braking systems. Also, this design could be applied to larger vehicles.

In the future, the researcher expects that the experiment of controlling brake fluid pressure with a PD controller will be further developed in research by taking the system control process and PD parameter values obtained from this research to test in real vehicles by adding distance measurement sensors. It will measure the distance of obstacles in front while the objects are stationary by observing the relationship between the distance of the objects and the brake fluid pressure controlled by the control system and test the objects while they are moving in front of the vehicle to test the system response speed to see if the maximum efficiency is satisfactory.

6. Acknowledgement

This research was funded by College of Industrial King Mongkut's University of Technology North Bangkok. (Contract no. CIT-2022-GRAD-17)

7. References

[1] https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023. (Accessed on 7 October 2024)

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.002

[2] A.M. Maria, M. Biagi and R. Cusani, Vehicular technologies - deployment and applications: Smart vehicles, technologies and main applications in vehicular ad hoc networks, IntechOpen., Rijeka, Croatia, 2013.

[3] K. Obeng, Injury severity, vehicle safety features, and intersection crashes, Traffic Injury Prevention, 2008, 9(3), 268–276.

[4] T.J. Chengula, J. Mwakalonge, G. Comert and S. Siuhi, Improving road safety with ensemble learning: Detecting driver anomalies using vehicle inbuilt cameras, Machine Learning with Applications, 2023, 14, 100510.

[5] M. Eskandari Torbaghan, M. Sasidharan, L. Reardon and L.C.W. Muchanga-Hvelplund, Understanding the potential of emerging digital technologies for improving road safety, Accident Analysis and Prevention, 2022, 166, 106543.

[6] S. Han, H.W. Kim and J.H. Leigh, Improvement of road safety management systems of local governments in Korea after evaluating related indicators, Accident Analysis and Prevention, 2023, 193, 107325.

[7] D.A. Lakhwani and D.M. Adhyaru, Performance comparison of PD, PI and LQR controller of autonomous under water vehicle, The Nirma University International Conference on Engineering (NUiCONE- India 2013), Proceeding, 2013, 1-6.

[8] A. Deka and S.R. Basiredd, Emergency braking control in 3D overhead cranes using a switching PD-fuzzy controller, The International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR-China 2023), Proceeding, 2023, 285-290.

[9] X. He, H. Cheng, Z. Liu, J. Yang and T. Huang, Comparative study on anti-lock braking control strategies based on heavy-duty multi-axle special vehicles, The 2021 IEEE 4th Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC-China 2021), Proceeding, 2021, 780-785.

[10] G. Subramaniam, K. Hari Adithyan, S. Gogul, D. Heera Sree and E. Kumaresan, Multi-model charger for light electric vehicles, The 2023 9th International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES-India 2023), Proceeding, 2023, 418-421.

[11] D. Pi, Q. Cheng, B. Xie, H. Wang and X. Wang, A novel pneumatic brake pressure control algorithm for regenerative braking system of electric commercial trucks, IEEE Access, 2019, 7, 83372-83383.

[12] F. Golnaraghi and B. C. Kuo, Automatic control systems, 10th Ed., McGraw-Hill Education., NY, USA, 2017

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.002

[13] X. Zhang, Design and implementation of fuzzy PID DC motor control system based on STM32, The 2023 IEEE International Conference on Control, Electronics and Computer Technology (ICCECT-China 2023), Proceeding, 2023, 1129-1131.

[14] Y.B. Koca, Y. Aslan and B. Gokce, Speed control based PID configuration of a DC motor for an unmanned agricultural vehicle, The 2021 8th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE-Turkey 2021), Proceeding, 2021, 117-120.

[15] S. Saengsri, S. Prawanta, S. Odngam and J. Srisertpol, PI-servo with state-D feedback and observer for magnetic stirrer machine, The 2017 International Conference on Circuits Devices and Systems (ICCDS-China 2017), Proceeding, 2017, 6–10.

[16] B. Joshi, R. Shrestha and R. Chaudhary, Modeling simulation and implementation of brushed DC motor speed control using optical incremental encoder feedback, The Proceedings of IOE graduate conference (IOE-Nepal 2014), Proceeding, 2014, 497-505.

[17] V. Prada-Jiménez, P.A. Niáo-Suaréz, E.A. Portilla-Flores and M.F. Mauledoux-Monroy, Tuning a PD+ controller by means of dynamic optimization in a mobile manipulator with coupled dynamics, IEEE Access, 2019, 7, 124712-124726.

[18] M. Sreejeth, R. Kumar, N. Tripathi and P. Garg, Tuning a PID controller using metaheuristic algorithms, 2023 The 8th International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES-India 2023), Proceeding, 2023, 276-282.

[19] M.S. Fadali and A. Visioli, Digital control engineering: Analysis and design, 3rd Ed., Elsevier Inc., Oxford, UK, 2009.

[20] B. Chi-wu and X. Ke-fei, Robust control of mobile manipulator service robot using torque compensation, 2009 International Conference on Information Technology and Computer Science (ITCS-Ukraine 2009), Proceeding, 2009, 69-72.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.003

บทความวิจัย

Mechanism of Reducing Local Flow Velocity Using Obstacle Trenches in Microfluidics

Teeraphat Kongsaktrakul[1], Alongkorn Pimpin[1], Ampol Kamnerdsook[2] and Thammawit Suwannaphan[2,3*]

[1] Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok

[2] Department of Mechanical Engineering Technology, College of Industrial Technology (CIT), King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok

[3] Center of Sustainable and Energy Engineering Materials, Department of Mechanical Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

[*] Corresponding author, E-mail: thammawit.s@cit.kmutnb.ac.th

Received: 1 October 2024; Revised: 15 January 2025; Accepted: 27 January 2025
Online Published: 22 April 2025

Abstract: Trapping efficiency in microwell technique is influenced by both microwell geometry and flow velocity. At higher flow velocity, microplastics tend to flow over microwells resulting in reduced trapping efficiency. Therefore, decreasing flow velocity to enhance trapping efficiency is important. This research introduces triangular obstacle trenches in front of the microwells to reduce local flow velocity leading to the improvement of trapping efficiency. The simulation results show that two mechanisms must occur concurrently to effectively reduce local flow velocity. They are the spreading of streamlines from the apex to the back of triangular trench, and the suitable recirculation inside the trench. In this study, the obstacle trench has dimensions of 600 μm on each side with a depth of 300 μm while the square microwell measured 1,000 μm on each side with a depth of 600 μm. The flow rate was at 0.3 ml/min. Experiments confirmed that the use of triangular obstacle trenches significantly enhanced trapping efficiency by 30 times compared to the case without trenches.

Keywords: Microfluidics; Microplastics; Obstacle trenches; Trapping; Microwells

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.003

1. Introduction

Microplastic contamination has been drawn a great concern as a serious global issue with tiny particles entering water supplies and human tissue. Recently, microplastics were found within bodies of human [1-2]. This finding sparked concerns about the potential harmful effects of microplastics to human health. In addition, microplastics can absorb [3], and carry toxic contaminants [4]. These toxic substances enter and then diffuse toxicities into living human's body resulting in detrimental effects on human health including nausea, irritation, diarrhea, vomiting and confusion [5]. Human may accidentally consume microplastics through food or water, and these particles can be found in bottled water, inhalation and dermal contact, especially from water sources [6]. For this, raising public awareness of microplastic contamination by detecting microplastics in water bodies is significantly important to quality of human's life and environments.

A number of techniques have been developed for microplastic detection, especially, for identifying small amount of microplastics within large sample volumes. These methods often demand interdisciplinary across various fields such as engineering, chemistry, biology and environment science as well as access to advanced equipment, specialized facilities and well-equipped laboratories. To address these challenges, microfluidic techniques have drawn significant interest in microplastic detection. Due to their versatility, microfluidic technologies have shown significant promise and growth, especially in water quality monitoring.

Trapping techniques are commonly used to capture small particles in large sample volumes for analysis through a light microscope. Among various techniques [7-11], microwell trapping technique [12] shows a great potential for trapping particles without the need for external forces. Moreover, it allows for the real-time detection of small amounts of microplastics in large sample volumes.

The principles of microwell trapping rely on the balance between two forces—gravitational force and hydrodynamic force. When the gravitational force is stronger than the hydrodynamic force, the particles are effectively dragged and trapped in microwells regardless of their shape. In contrast, when the hydrodynamic force is stronger than the gravitational force, particles are dragged out or floated over the microwells, reducing trapping efficiency [13-14].

In real-world application, a microwell trapping device can be directly installed in a water pipe to capture debris and contaminants, particularly microplastics from tap water. However, a high flow rate in a water pipe may possibly result in reducing trapping efficiency due to the strong of the hydrodynamic force as previously mentioned. To address this issue, it is important to reduce flow velocity locally in front of the microwells. Previously,

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.003

the technique to reduce flow velocity across the entire cross-section is preferred. However, it is not practical such as microplastics may stick on a pipe's surface. Moreover, the hydrodynamic force exerting on particles should be small before moving forward the microwell in order to enhance the possibility of trapping. Thus, a new method of reducing local flow velocity in front of the trapping microwells for improving microplastic trapping efficiency is proposed.

According to our previous studies, we proposed the use of array of triangle microwells for particle trapping. We observed that the microwells in the first row were unable to trap particles well while the second row successfully trapped most particles that passed through. This observation led us to explore how the first row of microwells influences the trapping efficiency of the second row. We believed that a local flow velocity reduction from the first-row of microwells responds to the increasing of trapping efficiency.

In this study, the triangular obstacle trenches are introduced in front of the microwells to reduce local flow velocity before microplastics are trapped. The principle behind the obstacle trenches is that as microplastics flow along the fluid flow stream and approach the obstacle trenches, they tend to be dragged into the trenches due to recirculation within the trenches. Once flowing into the trench, microplastics are eventually dragged out of the trenches. In this stage, as microplastics are dragged out of the trenches to the surface, microplastics tend to move slowly and roll on the surface at a lower speed. This slower movement allows them to be trapped easily in the next-row (microwells) as shown in Fig. 1. In addition, the trench will not introduce flow resistance as much as the other structures penetrating into the main flow.

The purpose of this research is to investigate the mechanism of obstacle trenches that reduces local flow velocity, and analyze key parameters that potentially effect the reduction in local flow velocity. The research also serves guideline for alternative trench designs to further reduce local flow velocity for enhancing the trapping efficiency.

2. Systematic concept

Based on our previous findings [13-14], we hypothesized that microplastics were dragged into the trench resulting in reducing both flow velocity and the distance from the surface as shown in Fig. 1.

In this research, an engineering program (COMSOL Multiphysics) is used to investigate the mechanism and key parameters that influence the reduction of local flow velocity. The governing equations for fluid flow in this model are derived from the Navier-Stokes equations, expressed as:

$$\rho(\partial u/\partial t) + \rho(u\cdot\nabla)u = -\nabla p + \mu\nabla^2 u$$

Here, ρ is the fluid density (998 kg/m^3, μ is the dynamic viscosity (0.001 Pa·s), u is the velocity field, and p is the pressure field. The fluid

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.003

flow behaves as Newtonian and is defined as laminar and incompressible. No slip condition is applied to the walls. The inlet's entrance is set to be fully developed at 0.3 ml/min while the outlet allows for no suppress backflow (Fig. 2).

To explore the effects of trench design on these parameters, three models of obstacle trenches—triangle, square and circle shape are simulated to investigate the effects on velocity and streamline after passing from them. We found that the triangular trench allowed only streamlines toward the apex moving into it. This would result in trapping of a smaller number of particles in the trench as showed in Fig. 3. Interestingly, the streamlines at the back also tended to move closer to the surface. For other designs including square and circular trenches, the streamlines at the front and the back remained the same distance from the surface with a large area of recirculation inside. Among these designs, the square trench provided the large recirculation. Consequently, it increased the higher possibility for trapping a larger number of microplastics.

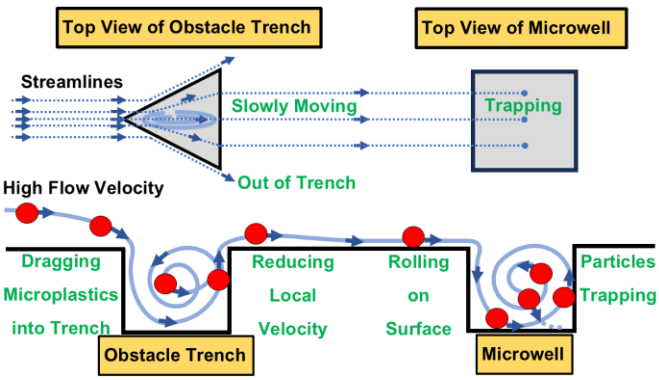


Fig. 1 Working principles of obstacle trench and microwells to enhance particle trapping inside the microwells

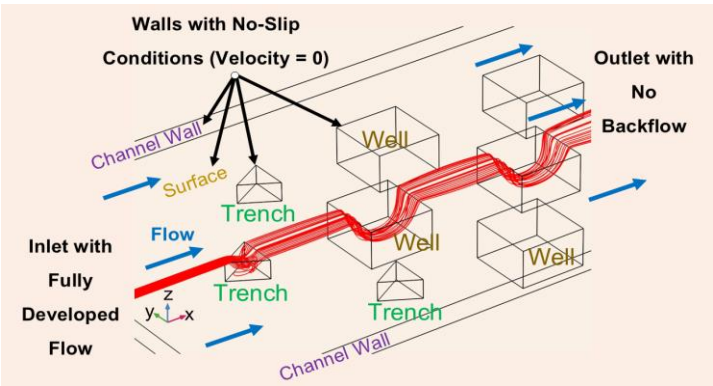


Fig. 2 Boundary condition setup for the model

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.003

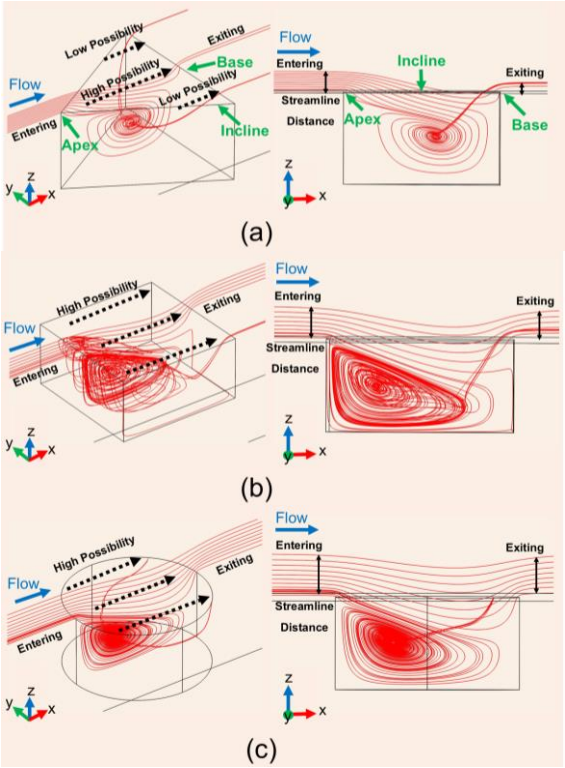


Fig. 3 Various designs of a trench showing the possibility for trapping and the distance of streamlines entering and exiting the trench (a) triangle (b) square and (c) circle

Based on the ability to reduce flow velocity, lower the distance of streamlines from the surface and create small recirculation inside, the triangular trench is chosen. Meanwhile, for the microwell, the square shape is chosen due to the large recirculation so that it has high possibility of particle trapping.

3. Proposed mechanism

We examined flow velocity and recirculation patterns in a 3D model through the equilateral triangular obstacle trench and square microwell. To ensure the accuracy of the flow velocity results, a mesh independence analysis was conducted by progressively refining the mesh until the flow velocity results reached stability. The mesh density on the obstacle trenches and microwells are customized with maximum and minimum element size of 30 and 0.3 μm with the total meshes of approximately 3×10^6 elements in this model.

We discovered that there were two important mechanisms that must occur concurrently to let streamlines into the obstacle trenches. The first thing was only the streamlines moving toward at the apex of triangular obstacle trench is allowed to move inside. Other streamlines that moved toward the inclined lines of triangle would not go into the trench. This is a unique flow pattern for a triangular trench [13-14].

Secondly, the streamlines moving toward the apex were recirculated whose strength was depended on the shape and depth of trench. If the trenches are too shallow, the recirculation will not occur. Therefore, the microplastics that are suspended in the flow will not being trapped but dragged out from the trenches (Fig. 4(a)). However, if the trenches are too deep, most microplastics will be trapped within the trenches instead (Fig. 4(c-d)).

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.003

For this, the depth of the triangular obstacle trenches should be deep enough to create sufficient recirculation to reduce local flow velocity instead of trapping microplastics. Therefore, the depth of trench is one of the crucial factors that can influent either reducing local flow velocity or trapping particles.

A. Depth and flow recirculation

To determine the appropriate depth, triangular trench of 600 μm in each side with four different trench depths were examined. The results showed that increasing the trench depth, the recirculation became larger. However, increasing depth beyond a certain depth, it had no effect on recirculation. Therefore, the trench depth should remain shallower than the critical depth.

According to the simulation, we found that the trench depth of shallower than about 300 μm did not generate recirculation (Fig. 4(a)) while a depth of about 300 μm was sufficient to induce strong recirculation (Fig. 4(b)). As the depth increased beyond 300 μm, recirculation became larger until it reached to 600 μm. At this depth, recirculation extended to the bottom of the trench (Fig. 4(c)). Beyond 600 μm depth, a large area of recirculation occurred but its size remained constant and no longer correlated with trench depth (Fig. 4(d)). Based on these findings, the trench depth was set at 300 μm about the half of the triangular trench side that was set at 600 μm.

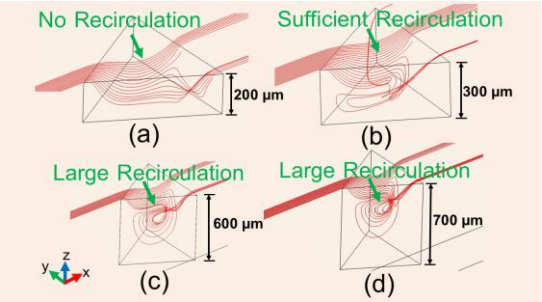


Fig. 4 Various depth for triangular obstacle trench at (a) 200, (b) 300, (c) 600 and (d) 700 μm

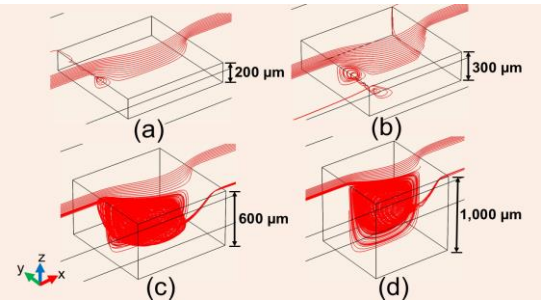


Fig. 5 Various depth for square microwells at (a) 200, (b) 300, (c) 600 and (d) 1,000 μm

Using same concept, a 1,000 μm square microwell with varying depths was simulated to study recirculation. At a depth of 200 μm, a small recirculation formed at the front of square microwell (Fig. 5(a)) and gradually increased as the microwell depth increased (Fig. 5(b)).

At a depth of 600 μm, streamlines became fully recirculated within the microwells (Fig. 5(c)). This suggests that the depth of 600 μm was the critical value for particle trapping, as it is equivalent to approximately the half of the length of the microwell's side. Once the depth surpassed

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.003

600 μm, the recirculation pattern remained unchanged, however, the recirculation zone continued to extended as the microwell depth increased (Fig. 5(d)).

B. Distance of streamlines from a surface

Furthermore, we analyzed the distance of the streamlines from the surface at the front and the back of the trench. The distance of streamlines entering the trench was determined by plotting streamlines at the center of the trench (apex) on the x-z plane. It was discovered that the streamlines were separated into three distinct distance regions. In the first region, streamlines were recirculated into the trench. In the second region, streamlines entered the trench but did not recirculate. However, in the third region and above, streamlines flowed over the trench as shown in Figs. 6.

To measure the distance and velocity of the streamlines at the front and the back of the trench, the farthest distance of the streamline from the bottom surface and its velocity magnitude in each region was measured. The results of the 1st region (Fig.6 (a)), showed that the distance entering the trench was approximately 45 μm at velocity of 2 mm/s. At the exit, the level of the streamline was reduced to approximately 20 μm at a velocity of about 1 mm/s. This suggests that the distance of the streamlines and the local velocity were about half decreased. At the back, most streamlines in the

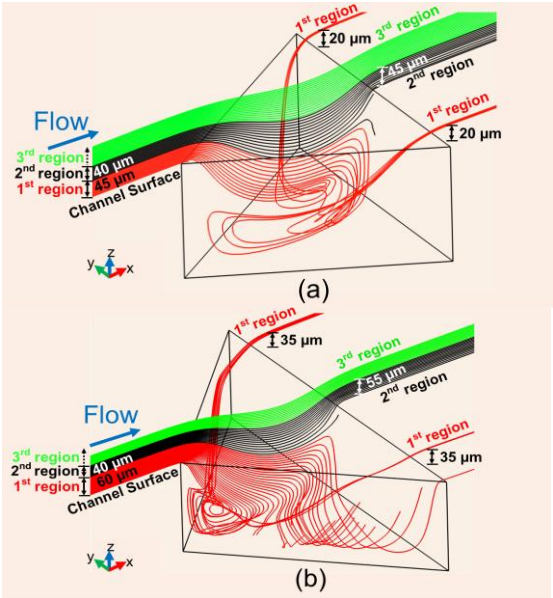


Fig. 6 Streamlines in three regions flowing toward (a) an equilateral and (b) right-angle triangular trench

1st region spread out from the apex to the corners of the triangular base.

In the 2nd region, most streamlines with the level between 45 to 85 μm from the surface were curved into the trench to the depth of 100 μm and then exited through the middle of the trench at a maximum distance of about 45 μm from the surface without recirculating. In the 3rd region, above the level of approximately 85 μm from the surface, all streamlines remained above the trench.

Furthermore, at the level of approximately 45 μm (1st region) from the surface, only streamlines within the region about 50 μm around its apex entered the trench. These streamlines expanded to

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.003

a width of about 500 μm at the back of the trench. This is a reason that flow velocity and the suspended particle's velocity would be locally reduced after passing the trench.

To investigate the reduction of local flow velocity with different designs, a right-angle trench was simulated and compared with the equilateral design. The right-angle trench was designed based on the equilateral design but increasing the apex angle from 60° to 90° while maintaining a constant triangle altitude (Fig. 6 (b)). The results indicate that both streamline level and velocity at the exit of the right-angle trench were reduced as well. Streamlines that were located at a longer distance from the surface were included in the 1st region when comparing to the equilateral case. In the 2nd region, entering streamline was approximately 60 μm above the surface. Regarding velocity, the entering and exiting streamline velocities were found to be similar for both designs.

The results suggest that the right-angle trench would enhance the recirculation of particles inside the trench more effectively than the equilateral trench as it pulls fluid from a farther distance into the trench. However, the reduction in velocity magnitude is comparable.

Furthermore, at the level of approximately 60 μm (1st region) from the surface, the streamlines entering and exiting the trench had the widths of about 80 and 1,000 μm which were wider than in the equilateral case.

To summarize how the triangular obstacle trench successfully reduces local flow velocity, Fig. 7 illustrated streamlines in the 1st region with the velocity contour. At the front of the triangular trench, microplastics are dragged (position 1) into the trench with the velocity decreasing. As can be seen, they then recirculate at the bottom (position 2) where the velocity significantly dropped. Microplastics continued flowing along the streamlines (position 3) and are eventually dragged from the back of the trench to the surface with the lower local flow velocity and moved closer to the surface (position 4).

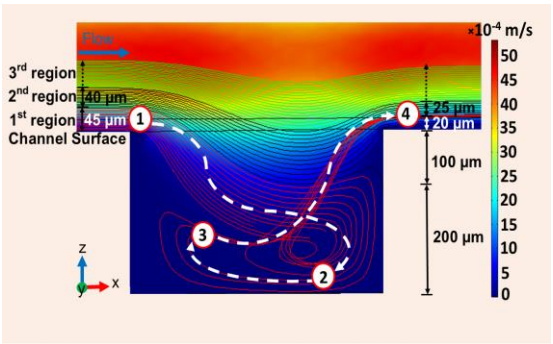


Fig. 7 Velocity contour with the possible particle movement at four positions

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.003

4. Prototype of obstacles and microwells

To evaluate the efficacy of obstacle trench, an experiment is conducted by introducing triangular obstacle trench in front of square microwells. The number of particles trapped in microwells then is counted to evaluate and compare the effectiveness of trapping.

A. Design of the system

The microfluidic system is fabricated using a polymer-casting technique. The microfluidic channel is designed in a chamber with 15 mm in width and 65 mm in length and 600 µm in height as shown in Fig. 8. One reason for extending the chamber's length is to ensure that the fluid flow from the inlet to the outlet is fully developed before reaching obstacle trenches.

The chamber's central region is divided into two sections. The first section is obstacle trenches which are designed in equilateral triangular shape with 600 µm in each side and 300 µm in depth (Fig. 9(a)). In contrast, the second design is a right triangle with a 90° apex angle and 300 µm in depth as demonstrated in Fig. 9(b). The second section is microwells which are designed in a square shape with 1,000 µm in each side and 600 µm in depth as showed in Fig. 9(c).

For the alignment, obstacle trenches and microwells are arranged in a chessboard pattern with six columns and three rows. This pattern is designed to minimize flow disturbance caused by

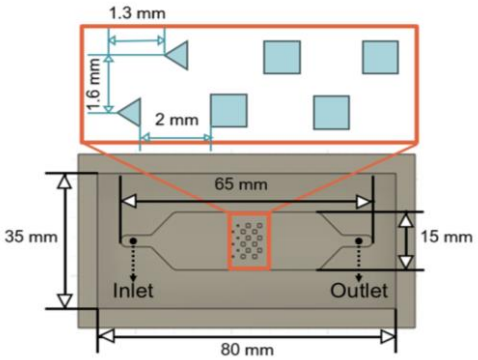


Fig. 8 Dimension of microfluidic device

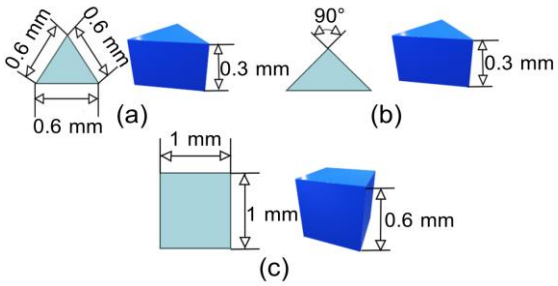


Fig. 9 Dimensions of (a) equilateral triangular trench (b) right-angle triangular trench and (c) square microwell

adjacent trench structures. The first row consists of triangular obstacle trenches while the 2nd and 3rd rows consist of square microwells. The distance from the apex of an obstacle to another is 1.6 mm while the distance from the base of a triangular obstacle trench to the leading edge of a microwell is 2 mm.

B. Fabrication and sample preparation

The mold for polymer casting is fabricated using a 3D resin printing technique. Polydimethylsiloxane (PDMS) are mixed together with a curing agent

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.003

(CAT-RG) in a 10:1 ratio. After that, vacuum pump is used to eliminate air bubbles from the mixture. Later, the mixture is carefully poured into the mold and then heated to harden leading to the formation of flow chamber and microwell part.

Both parts are then bonded together using the oxygen plasma to bond the upper part (flow chamber) to the bottom part (microwells) together to enclose these two parts as an assembled device. Finally, the assembled device is connected by microtubes (inlet and outlet). Fig. 10 demonstrates the actual microfluidic device and microplastics are trapped in a microwell.

For sample preparation, polystyrene beads of 10 μm diameter are suspended in deionized (DI) water. Several trials are examined to determine the optimal concentration of beads to achieve low level of uncertainty in experiments. Finally, the concentration was chosen at 5 x 10^4 particles/ml.

5. Experimental results

A microplastic suspension was introduced in microfluidic system at 0.3 ml/min for 10 minutes. The number of microplastics was counted using a light microscope and tally counter. To understand the effects of obstacle trenches on the trapping in microwells, three designs of trench models—equilateral, right-angle and no obstacle (control) trenches were examined repeatedly three times.

The system consisted of six obstacle trenches in the 1st row followed by six front-microwells in the

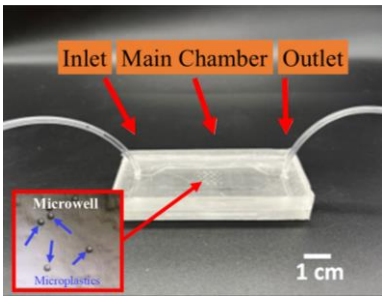


Fig. 10 Microfluidic device and microplastic beads of 10 μm trapped in wells

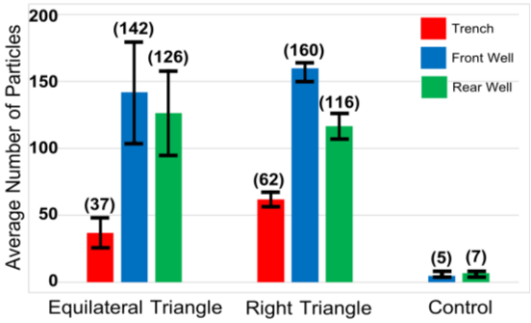


Fig. 11 The average number of microplastics trapped in three experimental cases

2nd row and six rear-microwells in the 3rd row. The total number of trapped microplastics in each row was counted and averaged to determine the trapping efficiency as shown in Fig.11.

According to the results of equilateral triangle, a small number of microplastics were trapped in the obstacle trenches averaging about 37±11 particles. In contrast, the majority of trapped microplastics were found in the front square microwells (2nd row) with an average of 142±37 particles and in the rear square microwells (3rd row) with an average of 126±32 particles.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.003

For the right-angle design, most microplastics were trapped in the front microwells (2nd row) and rear microwells (3rd row) averaging 160±4 and 116±10 particles, respectively while the obstacle trenches trapped a small number of particles with an average of 62±6 particles.

In control case, there was no obstacle trenches introduced in front of the microwells. A small number of microplastics in the front and rear microwells (2nd and 3rd) were comparably trapped. The number of microplastics in front microwells averaging 5±1 particles while the rear microwells averaging 7±1 particles were significant lower compared to the equilateral and right-angle trench design.

The results suggest that the amount of trapped microplastics in the microwells with the triangular obstacle trenches was about 30 times higher than in the control case. Furthermore, the right-angle trenches showed slightly higher particle trapping efficiency than the equilateral trenches.

According to the simulation and experimental results, the triangular trench demonstrated a reduction in local flow velocity, that would be able to enhance the trapping efficiency of microwells. Future research should focus on further improving the trench designs and developing their potential for industrial purposes and commercial applications. In addition, further studies could investigate alternative fabrication methods and examine how the sizes of particles influence trapping efficiency.

6. Conclusion

In this study, we proposed the mechanism for reducing flow velocity using triangular obstacle trenches in microfluidic systems demonstrating in both simulations and experiments. This velocity reduction is achieved through two key processes. Firstly, fluid flow is directed toward the apex trench and spread out at the back of the triangular trenches. Secondly, the trench must have an appropriate depth to generate sufficient recirculation, and avoid the trapping of particles inside the trench.

To validate the simulation, the experiments were conducted by comparing equilateral, right-angle trench to a control case. The experimental results showed that the use of triangular trench increased trapping efficiency by 30 times compared to the case without trenches. However, the trapping efficiency results between both designs were comparable, with no significant differences in the number of trapped microplastics.

Ultimately, we hope this study enhances the understanding of mechanisms and key parameters for reducing local flow velocity in the obstacle trenches as well as helping readers to appropriately select parameters for higher trapping efficiency.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.003

7. Acknowledgement

This work was financially supported by Thailand Toray Science Foundation. The authors would like to thank Kanit Singburana, Thatchanon Reawrunsangkul and Techin Vichainarong for the development of obstacle trench designs.

8. References

[1] N.S. Roslan, Y.Y. Lee, Y.S. Ibrahim, S.T. Anuar, K.M.K.K. Yusof, L.A. Lai and T. Brentnall, Detection of microplastics in human tissues and organs: A scoping review, Journal Of Global Health, 2024, 14, 04179.

[2] E. Dzierzynski, P.J. Gawlik, D. Puzniak, W. Flieger, K. Józwik, G. Teresinski, A. Forma, P. Wdowiak, J. Baj and J. Flieger, Microplastics in the Human Body: Exposure, Detection, and Risk of Carcinogenesis: A State-of-the-Art Review, Cancers, 2024, 16, 3703.

[3] F. Yu, Q. Qin, X. Zhanga and J. Ma, Characteristics and adsorption behavior of typical microplastics in long-term accelerated weathering simulation, Environmental Science: Processes and Impacts, 2024, 26, 882-890.

[4] N. Rafa, B. Ahmed, F. Zohora, J. Bakya, S. Ahmed, S.F. Ahmed, M. Mofijur, A.A. Chowdhury and F. Almomani, Microplastics as carriers of toxic pollutants: Source, transport, and toxicological effects, Environmental Pollution, 2023, 343, 123190.

[5] S. Abbasi, F. Moore and B. Keshavarzi, PET-microplastics as a vector for polycyclic aromatic Hydrocarbons in a simulated plant rhizosphere zone, Environmental Technology and Innovation, 2021, 21, 101370.

[6] E.C. Emenike, C.J. Okorie, T. Ojeyemi, A. Egbemhenghe, K.O. Iwuozor, O.D. Saliu, H.K. Okora and A.G. Adeniyi**,** From oceans to dinner plates: The impact of microplastics on human health, Heliyon, 2023, 9, 1, e20440.

[7] X. Chen, Z. Liang, D. Li, Y. Xiong, P. Xiong, Y. Guan, S. Hou, Y. Hu, S. Chen, G. Liu and Y. Tian, Microfluidic dielectrophoresis device for trapping, counting and detecting Shewanella oneidensis at the cell level, Biosensors and Bioelectronics, 2018, 99, 416–423.

[8] A. Munaz, M.J.A. Shiddiky and N.T. Nguyen, Recent advances and current challenges in magnetophoresis based micro magnetofluidics, Biomicrofluidics, 2018, 12(3), 031501.

[9] J.E. Molloy, K. Dholakia and M.J. Padgett, Optical tweezers in a new light, Journal of Modern Optics, 2003, 50(10), 1501-1507.

[10] D. Yin, G. Xu, M. Wang, M. Shen, T. Xu, X. Zhu and X. Shi, Effective cell trapping using PDMS microspheres in an acoustofluidic chip, Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2017, 157, 347–354.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.003

[11] V. Narayanamurthy, S. Nagarajan, A.Y.F. Khan, F. Samsuri and T.M. Sridhar, Microfluidic hydrodynamic trapping for single cell analysis: mechanisms, methods and application, Analytical Methods, 2017, 9, 3751-3772.

[12] J.Y. Park, M. Morgan, A.N. Sachs, J. Samorezov, R. Teller, Y. Shen, K.J. Pienta and S. Takayama, Single cell trapping in larger microwells capable of supporting cell spreading and proliferation, Microfluidics Nanofluidics, 2010, 8(2), 263-268.

[13] P. Yingprathanphon, T. Wongpakham, W. Srituravanich and A. Pimpin, Filling-and-Dragging Technique for particle entrapment using triangular microwell, Engineering Journal, 2020, 24(2), 63-74.

[14] T. Tongmanee, W. Srituravanich, A. Sailasuta, W. Sripumkhai, W. Jeamsaksiri, K. Morimoto, Y. Suzuki and A. Pimpin, Effects of the cell and triangular microwell size on the cell-trapping efficiency and specificity, Journal of Mechanical Science and Technology, 2019, 33, 5571-5580.

บทความวิจัย

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.004

ผลของสารก่อผลึกต่อความพรุนและการดูดซึมน้ำในมอร์ต้าร์

ทักษ์ดนัย เขียวอ่อน[1] สุวิมล สัจจวาณิชย์[1] นันทวัฒน์ ขมหวาน[2*] ไพศาล คงคาฉุยฉาย[3] ประเสริฐ สุวรรณวิทยา[1] และ ประหยัด นันทศีล[4]

[1] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
[2] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
[3] ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
[4] ภาควิชาวิทยาศาสตร์พื้นพิภพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
[*] ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: fengnwk@ku.ac.th

วันที่รับบทความ: 27 สิงหาคม 2567; วันที่ทบทวนบทความ: 3 มกราคม 2568; วันที่ตอบรับบทความ: 27 มกราคม 2568
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 22 เมษายน 2568

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้ศึกษาผลของการใช้สารก่อผลึก (CWPM) ทั้งชนิดสารผสมเพิ่ม (CM) และเคลือบผิว (CC) ในการลดความพรุนและการดูดซึมน้ำในมอร์ต้าร์ เพื่อพิจารณาการใช้ CWPM อย่างเหมาะสมจึงกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) ที่ 0.3 0.4 และ 0.6 การทดสอบ ได้แก่ ความพรุน การดูดซึมน้ำ และกำลังรับแรงอัด รวมถึงการตรวจสอบสารประกอบทางเคมีในตัวอย่างเพื่อยืนยันผลของ CWPM โดยปริมาณและวิธีการใช้ CWPM ปฏิบัติตามคำแนะนำของผู้ผลิต การทดสอบที่อายุ 40 วัน และหลังจากบ่มต่อในน้ำอีก 30 วัน ผลการศึกษาแสดงว่า CWPM ทั้งชนิด CM และ CC มีผลต่อความพรุนและการดูดซึมน้ำที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ แต่มีผลแตกต่างกันตาม W/C และชนิดของ CWPM โดย W/C ที่ต่ำในตัวอย่างที่ผสม CWPM ให้ผลการลดความพรุนและการดูดซึมน้ำที่ดีกว่ารวมถึงผลของกำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้น ส่วนผลการวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีพบว่าตัวอย่าง CWPM แสดงค่า Peak ของ $CaCO_3$ และ Ettringite (AFt) โดยเฉพาะอย่างยิ่งของ Calcium Aluminate Silicate Hydrates; C-A-S-H) ปรากฏเด่นชัดมากกว่าตัวอย่างควบคุม ผลการทดสอบสนับสนุนการปรับปรุงลักษณะเฉพาะให้ดีขึ้นทั้งในการบ่มระยะสั้นและยาว และยังส่งผลดียิ่งต่อสมบัติด้านความทึบน้ำและอัตราการดูดซึมของตัวอย่าง โดยเฉพาะเมื่อใช้ CWPM ชนิดผสมเพิ่มกับส่วนผสมที่มีค่า W/C ต่ำ (0.3) แต่การใช้ CWPM ชนิดเคลือบผิวกับส่วนผสมที่มี W/C ปานกลางถึงสูง (0.4-0.6) ให้ผลดีที่ชัดเจนกว่าส่วนผสมที่มีค่า W/C ต่ำ

คำสำคัญ: สารก่อผลึก; สมบัติของมอร์ต้าร์; กำลังรับแรงอัด; ความพรุน; การดูดซึมน้ำ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.004

บทความวิจัย

Effect of Crystalline Waterproofing Material on Porosity and Water Absorption in Mortar

Thakdanai Kheaw-on[1], Suvimol Sujjavanich[1], Nantawat Khomwan[2*], Paisan Kongkachuichay[3], Prasert Suwanvitaya[1]and Prayath Nantasin[4]

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

[2] Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University

[3] Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

[4] Department of Earth Sciences, Faculty of Science, Kasetsart University

[*] Corresponding author, E-mail: fengnwk@ku.ac.th

Received: 27 August 2024; Revised: 3 January 2025; Accepted: 27 January 2025
Online Published: 22 April 2025

Abstract: This research investigates the effect of crystalline waterproofing material (CWPM), namely mixing type (CM) and coating type (CC), on reducing porosity and water absorption in mortar. To determine the optimum use of CWPM in the mortar, tests were conducted at water-to-cement (W/C) ratios of 0.3, 0.4, and 0.6. Tests included porosity, water absorption and finally compressive strength, as well as investigating the chemical compounds in the samples to confirm the effects of using CWPM. The amount and applied method of CWPM as the manufacturer's suggestion were used to produce mortar samples, after 40 days all set was wet cured for 30 days before test. The results showed that CWPM both types of significantly reduced porosity and the consequent water absorption, but differently. The W/C and type dependent were clear. The lower W/C and mixing type yielded better porosity, water absorption and compressive strength, compared to the control samples. Both cementitious CWPM type samples showed the more pronounced peaks of $CaCO_3$ and Ettringite (AFt), especially calcium aluminate silicate hydrate (C-A-S-H), more clearly than the control samples. These results support the enhanced characteristics in both short-term and long-term curing, particularly by improving water resistance and reducing absorption rates. Specifically, the use of mixing-type CWPM with low to moderate W/C ratios (0.3 to 0.4) showed superior results, while coating-type CWPM was more effective with high W/C ratios (0.6) compared to lower W/C ratios.

Keywords: Crystalline waterproofing material; Mortar properties; Compressive strength; Porosity; Water absorption

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.004

1. บทนำ

ความคงทนของคอนกรีตมีผลต่อความปลอดภัย อายุการใช้งานและค่าบำรุงรักษาของโครงสร้างที่มีมูลค่าสูง ปัจจัยหลักหลายประการมีผลต่อความคงทนของโครงสร้างคอนกรีตได้แก่ วัสดุที่เลือกใช้ การออกแบบและการใช้งาน ตลอดจนสภาพแวดล้อม [1-3] โดยลักษณะเฉพาะหลักอย่างหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับความคงทนและสมบัติอื่นหลายประการของคอนกรีต คือ ความพรุนหรือปริมาณช่องว่างที่ต่อเนื่องในเนื้อคอนกรีตนั่นๆ ซึ่งเป็นช่องทางให้น้ำหรือของไหลอื่นนำพาสิ่งที่เป็นอันตรายเข้าสู่ภายในเนื้อคอนกรีตได้ง่าย การลดความพรุนในคอนกรีตลง รวมถึงการตัดความต่อเนื่องของรูพรุนเป็นสิ่งสำคัญที่มีผลกระทบสำคัญต่อความคงทนของคอนกรีต การลดความพรุนในคอนกรีตมักทำโดยการลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน การใช้วัสดุทึบน้ำ สารปอซโซลานและผลิตภัณฑ์กันซึมในชนิดสารผสมเพิ่มร่วมกันหรือบนพื้นผิวคอนกรีตโดยตรง [4, 5]

แนวทางหลักในการพัฒนาความคงทนของคอนกรีต 2 ทาง ได้แก่ การป้องกันจากภายนอก โดยการปรับปรุงพื้นผิวคอนกรีต และการทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำโดยตรง กรณีแรก ได้แก่ การเคลือบผิวคอนกรีตให้มีความทึบน้ำ (Surface Coating) การใช้สารแทรกซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตเพื่ออุดช่องว่าง (Sealer) และการเคลือบผิวทำให้คอนกรีตมีความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) [6] เช่น Polyurethane Epoxy Acrylic Polymer และ Chlorinated Rubber เป็นต้น อย่างไรก็ตาม หากชั้นเคลือบผิวเกิดความเสียหายหรือหลุดร่อน รวมถึงการเกิดข้อบกพร่องของชั้นเคลือบผิวตั้งแต่กระบวนการเคลือบผิวอาจทำให้ความชื้นหรือสารที่เป็นอันตรายสามารถซึมเข้าไปภายในคอนกรีตได้ [7, 8]

ส่วนกรณีหลังการทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นจากภายในเพิ่มขึ้นจะช่วยเพิ่มความต้านทานน้ำโดยเฉพาะการลดความพรุนในคอนกรีตลง [4] ในปัจจุบันเริ่มมีการใช้สารก่อผลึก (Crystalline Waterproofing Material หรือ CWPM) มากขึ้น สารนี้เป็นวัสดุอนินทรีย์ที่พัฒนาขึ้นเพื่อปรับปรุงคอนกรีตในระดับจุลภาค โดยสารก่อผลึกแทรกซึมเติมช่องว่างภายในทำให้ทึบแน่นขึ้น ป้องกันความชื้นหรือสารอันตรายเคลื่อนเข้าสู่คอนกรีตยากขึ้นและทนทานต่อการเสื่อมสภาพในสภาวะรุนแรงได้ดีขึ้น [9, 10] ส่วนประกอบหลักของสารกลุ่มนี้มักได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณร้อยละ 10 ถึง 50 ทรายซิลิกาประมาณร้อยละ 10 ถึง 40 และสารประกอบเคมีอื่นๆ ประมาณร้อยละ 30 ถึง 60 เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ มักให้ผลิตภัณฑ์หลักคือแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจล (Calcium Silicate Hydrate หรือ C-S-H gel) และแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate หรือ $CaCO_3$) ซึ่งเข้าไปเติมโพรงในระดับคาปิลลารีทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นขึ้น [11]

ในปัจจุบันมีการใช้งานสารก่อผลึกหลายชนิด เช่น กรณีโครงสร้างเก่า หรือคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว เช่น ผนังชั้นใต้ดินหรือการซ่อมถังน้ำจากปัญหาการแทรกซึมคลอไรด์ นิยมใช้การเคลือบผิวคอนกรีต ส่วนกรณีโครงสร้างใหม่ใช้การโรยหน้าคอนกรีตสดซึ่งง่ายในการติดตั้ง แต่ไม่เหมาะกับพื้นที่ขนาดใหญ่ที่ใช้เวลามากและประสิทธิภาพอาจด้อยลงจากการทำงาน หรือใช้การผสมวัสดุผงในคอนกรีตสดซึ่งให้ประสิทธิภาพสูงสุดจากสารก่อผลึกกระจายตัวได้ทั่วเนื้อคอนกรีต [12] ซึ่งทั้ง

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.004

ชนิดเคลือบผิวและผสมเพิ่มแสดงประสิทธิภาพในการลดความพรุนจนมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม และมีรายงานว่าคอนกรีตผสมสารก่อผลึกมีปริมาณความพรุนต่ำกว่าคอนกรีตเคลือบผิวเพียงเล็กน้อย [13] อย่างไรก็ตามปัจจัยศึกษาที่แตกต่างกันอาจมีผลให้ข้อมูลบางส่วนยังมีความขัดแย้งและไม่ชัดเจน เช่น Cappellesso et al. (2016) พบว่าคอนกรีตผสมสารก่อผลึกมีปริมาณความพรุนสูงกว่าคอนกรีตเคลือบผิว [11] เช่น มีผลแสดงว่าชนิดเคลือบผิวให้ผลแทรกซึมน้ำต่ำว่าชนิดที่ใช้ผสมคอนกรีตสดตลอดอายุการทดสอบ [12] ขณะที่งานวิจัยของ Khomwan et al. (2024) พบว่าคอนกรีตผสมสารก่อผลึกทุกปริมาณโดยน้ำหนักซีเมนต์ที่ใช้ (ร้อยละ 0.5 0.8 1 และ 2) มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำต่ำกว่าคอนกรีตเคลือบผิว [14] ก่อนหน้านั้นมีรายงานว่าการใช้สารก่อผลึกให้ผลเชิงลบเนื่องจากคอนกรีตผสมสารก่อผลึกมีการดูดซึมน้ำสูงกว่าตัวอย่างควบคุมทุกอายุและทุกสภาวะการบ่มที่ทดสอบ [15] วิธีการบ่มยังมีผลกระทบต่อการดูดซึมน้ำของคอนกรีตปกติและคอนกรีตที่เคลือบผิวต่างกัน งานวิจัยของ Rahman and Chamberlain [16] แสดงว่าการเคลือบผิวคอนกรีตแล้วบ่มตัวอย่างในสภาวะรุนแรงด้วยพัดลมไฟฟ้าเป่าโดยตรงมีผลให้คอนกรีตเคลือบผิวมีค่าการดูดซึมน้ำสูงกว่าตัวอย่างควบคุม ขณะที่การบ่มน้ำปกติคอนกรีตเคลือบผิวด้วยวัสดุสร้างผลึกดูดซึมน้ำต่ำกว่าตัวอย่างควบคุมทุกอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) เท่ากับ 0.44 และ 0.55 [17] นักวิจัยกลุ่มเดียวกันได้ศึกษาต่อโดยใช้สารก่อผลึกชนิดสารผสมเพิ่มและผันแปร W/C ในช่วง 0.32 ถึง 0.46 พบว่าคอนกรีตผสมสารก่อผลึกมีการดูดซึมน้ำต่ำอย่างชัดเจนเมื่อ W/C ต่ำ [18]

ผลการศึกษาที่ต่างกันเหล่านี้ ซึ่งมีความแตกต่างกันในรายละเอียดวัสดุและวิธีการที่ใช้ทำให้ยากที่จะสรุปได้ชัดเจน ดังนั้นเพื่อการใช้สารก่อผลึกที่เหมาะสม งานวิจัยนี้จึงศึกษาเปรียบเทียบผลของสารก่อผลึกทั้ง 2 ชนิด คือการเคลือบผิวและสารผสมเพิ่มที่ผสมคอนกรีตสดโดยตรงในสภาวะและอายุคล้ายคลึงกันต่อสมบัติพื้นฐานของมอร์ต้าร์ในด้านความพรุนและการดูดซึม รวมถึงกำลังรับแรงอัดซึ่งเป็นผลกระทบที่เกี่ยวเนื่องและตรวจสอบหาสารประกอบทางเคมีในชิ้นตัวอย่างในช่วงอัตราส่วน W/C จากต่ำไปสูง ได้แก่ 0.3 0.4 และ 0.6

2. วัสดุและการเตรียมตัวอย่าง

2.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

ในการศึกษานี้ใช้ตัวอย่างมอร์ต้าร์เพื่อลดความแปรปรวนจากมวลรวมหยาบในการศึกษาด้วยคอนกรีต โดยวัสดุที่ใช้ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 (C) ตามมาตรฐาน ASTM C150 ซึ่งเลือกใช้เนื่องจากมีคุณสมบัติที่คงที่ตามมาตรฐาน ช่วยลดความแปรปรวนของผลการทดสอบ เหมาะสำหรับศึกษาผลของสารก่อผลึกในด้านสมบัติเชิงโครงสร้าง เช่น ความพรุน การดูดซึมน้ำ และกำลังรับแรงอัด นอกจากนี้การใช้ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ยังช่วยให้ผลการทดสอบสามารถเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่แล้วเสร็จ ซึ่งใช้วัสดุหลากหลายประเภทและหลายระบบ รวมถึงการเปรียบเทียบผลกับงานวิจัยในระดับนานาชาติได้อย่างชัดเจน

สารก่อผลึก 2 ชนิด ได้แก่ ชนิดเคลือบผิว (CC) และชนิดผสมเพิ่ม (CM) ใช้มวลรวมเป็นทรายแม่น้ำทั่วไป (S) ความถ่วงจำเพาะ 2.49 และค่าการดูดซึมร้อยละ 0.76

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.004

2.2 การเตรียมตัวอย่าง

การเตรียมตัวอย่างใช้ส่วนอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทราย (C/S) 1 ต่อ 2 และ W/C เท่ากับ 0.3 0.4 และ 0.6 ใช้สารก่อผลึกจากผู้ผลิตเดียวกัน 2 ชนิด โดยเตรียมตัวอย่างตามคำแนะนำของผู้ผลิต คือ 1) ชนิดเคลือบผิว และ 2) ชนิดผสมเพิ่ม ซึ่งใช้ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนักปูนซีเมนต์

เมื่อตัวอย่างมอร์ต้าร์ล้วนบ่มในน้ำครบ 28 วัน เช็ดให้อยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้งและขัดเปิดผิวเพื่อให้สารก่อผลึกแทรกซึมได้ง่ายขึ้น แล้วจึงเคลือบผิวตัวอย่างมอร์ต้าร์ด้วยสารเคลือบที่ผสมอัตราส่วนสารก่อผลึกต่อน้ำเป็น 5 ต่อ 2 ส่วน โดยปริมาตร โดยใช้แปรงขนพลาสติกทาเคลือบบนผิวอย่างสม่ำเสมอจนทั่วชั้นเคลือบเมื่อแล้วเสร็จ มีความหนาประมาณ 1 มิลลิเมตร หลังจากนั้นบ่มชื้นตัวอย่างโดยพ่นละอองน้ำทั่วผิว 3 ครั้งต่อวัน นาน 12 วัน จนครบอายุ 40 วัน สำหรับตัวอย่างที่ผสมสารก่อผลึกนำไปบ่มในน้ำ จนมีอายุ 28 วัน และบ่มต่อด้วยวิธีการเดียวกับที่ใช้สำหรับตัวอย่างเคลือบผิวที่อายุ 28 วัน จนมีอายุครบ 40 วัน

3. วิธีการทดสอบ

3.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

ตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 50 x 50 x 50 มิลลิเมตร ใช้เพื่อทดสอบกำลังรับแรงอัดในภาวะอิ่มตัวผิวแห้งที่มีอายุและเงื่อนไขต่างๆ ด้วยเครื่องทดสอบขนาด 1000 กิโลนิวตัน ใช้ความเร็วในการทดสอบ 1350 นิวตันต่อวินาที ตามมาตรฐาน ASTM C109 [19] ทำการทดสอบตัวอย่างที่อายุ 40 วัน และหลังแช่น้ำอีก 30 วัน (อายุ 70 วัน)

3.2 การทดสอบหาความพรุน

ตัวอย่างมอร์ต้าร์รูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 100 x 100 x 100 มิลลิเมตร ใช้เพื่อทดสอบหาความพรุนโดยทดสอบที่อายุมอร์ต้าร์ 40 วัน และหลังแช่น้ำอีกครั้ง 30 วัน (อายุ 70 วัน) โดยอ้างอิงมาตรฐานการทดสอบหาดูดซึมน้ำและโพรงในคอนกรีต (ASTM C642) ซึ่งทำการอบตัวอย่างที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนชั่งน้ำหนัก และแช่ในน้ำเป็นเวลา 48 ชั่วโมง แล้วจึงชั่งน้ำหนักตัวอย่างอิ่มตัวผิวแห้งในน้ำและอากาศอีกครั้งเพื่อใช้ค่าต่างๆ คำนวณหาค่าโพรงในมอร์ต้าร์ [20]

3.3 การทดสอบหาการดูดซึมน้ำ

การทดสอบนี้ใช้ตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์เช่นเดียวกับการทดสอบกำลังรับแรงอัด ที่อายุมอร์ต้าร์ 40 วัน และหลังแช่น้ำอีกครั้ง 30 วัน เช่นเดียวกับการทดสอบหาความพรุน (มาตรฐาน RILEM Test No.11.4) [21] เตรียมตัวอย่างทดสอบโดยอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จนน้ำหนักคงที่ แล้วจึงติดตั้งหลอดแก้ว Rilem (Karsten tube) บนตัวอย่างและเติมน้ำกลั่นลงในหลอดแก้วจนถึงขีดระดับ 0 มิลลิลิตร ทำการบันทึกระดับน้ำที่ลดลงทุก 10 นาที จนถึง 60 นาที

3.4 การหาสารประกอบเคมี

การทดสอบหาสารประกอบทางเคมีเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer หรือ XRD) เพื่อตรวจหาชนิดโครงสร้างของผลึกที่เกิดขึ้นในผงที่เก็บจากตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาด 30 x 30 มิลลิเมตร อายุ 40 วัน ทั้งที่เคลือบผิวและผสมเพิ่ม

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.004

การเตรียมตัวอย่างก่อนตรวจสอบจะหยุดปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยแช่ตัวอย่างในสาร Absolute Alcohol 48 ชั่วโมงแล้วบดตัวอย่างให้ละเอียดจนร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 แล้วนำผงที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นาน 48 ชั่วโมง [22] และเก็บในถุงสุญญากาศก่อนนำไปตรวจสอบ (ใช้ตัวอย่างผง 5 กรัม)

4. ผลการศึกษา

4.1 กำลังรับแรงอัด

ผลทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์ดังรูปที่ 1 แสดงเป็นร้อยละกำลังรับแรงอัดทำให้ปกติ (Normalize) ของตัวอย่างที่อายุ 40 และ 70 วัน (NC40 และ NC70) โดยค่าจากการทดสอบของตัวอย่างควบคุม (CT) ที่ W/C เท่ากับ 0.3 0.4 และ 0.6 อายุ 40 วัน มีค่ากำลังรับแรงอัด 26.1 19.8 และ 14.0 เมกะปาสคาล ตามลำดับที่ W/C สูง นอกจากกำลังรับแรงอัดลดลง แล้วยังส่งผลต่อการเยิ้มน้ำ และมีช่องว่างในเนื้อมอร์ต้าร์สูงกว่าจากบริเวณที่มีน้ำส่วนเกินจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นขณะนั้น [5] เมื่อตัวอย่างอายุ 70 วัน กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่ W/C เท่ากับ 0.3 0.4 และ 0.6 มีค่าเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยคือ 26.4 20.0 และ 14.2 เมกะปาสคาล จากการบ่มที่มีผลต่อกำลังอัดตามปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่เกิดขึ้นต่อเนื่องแต่ช้าลงมากหลังจาก 28 วัน [23] จากผลงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า CWPM ช่วยเพิ่มความหนาแน่นและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตได้จากการพ่นละอองน้ำบ่มชื้นระยะสั้น 3 วัน โดยเป็นผลของความชื้นต่อปฏิกิริยาของสารก่อผลึก [24] งานวิจัยนี้จึงมุ่งหมายศึกษาและเปรียบเทียบอิทธิพลของ W/C และการบ่มน้ำที่สมบูรณ์และนานขึ้น (30 วัน) ต่อช่องว่างการดูดซึมน้ำและกำลังรับแรงอัด เมื่อใช้ CWPM ทั้ง 2 ชนิด

การใช้ CWPM ทั้ง 2 ชนิดและ W/C ที่แตกต่างกันมีผลต่อกำลังรับแรงอัดที่อายุต่างๆ ต่างกัน (NC40 และ NC70) โดยตัวอย่าง CM ที่ใช้ W/C ต่ำ เท่ากับ 0.3 มีกำลังรับแรงอัด (NC40) สูงกว่า CT ร้อยละ 10.0 และมีการพัฒนากำลังรับแรงอัด NC70 เพิ่มขึ้นจากที่อายุ 40 วัน เพียงเล็กน้อย (เมื่อคิดจากค่ากำลังรับแรงอัดจริงคือร้อยละ 2.5) แต่ผลกระทบของการเคลือบผิวต่ออัตราการพัฒนากำลังอัดไม่ชัดเจนนักแม้มีการบ่มที่สมบูรณ์ขึ้นและนานขึ้นสำหรับกลุ่ม W/C ต่ำ (ทั้ง W/C เท่ากับ 0.3 และ 0.4 ที่ NC40 เทียบกับ NC70) ขณะตัวอย่าง CC ที่มี W/C สูง (0.6) การบ่มที่สมบูรณ์และนานขึ้นมีผลต่อการพัฒนากำลังรับแรงอัดที่ชัดเจนมากขึ้นกว่าเมื่อใช้ W/C ต่ำ ทั้งนี้อาจอธิบายได้จากอิทธิพลของปริมาณและขนาดช่องว่าง เนื่องจากผลิตภัณฑ์จากสารก่อผลึกเข้าไปแทรกเติมช่องว่างในมอร์ต้าร์ทำให้มีความทึบแน่นขึ้นจึงส่งผลให้ตัวอย่างมีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้นตาม [24, 25] และอาจสรุปได้ว่าการใช้ W/C ต่ำถึงปานกลาง CWPM ชนิดผสมเพิ่มช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดได้ชัดเจนกว่าชนิดเคลือบผิวเมื่อพิจารณาจากค่ากำลังอัดจริงที่เพิ่มขึ้นจากการกระจายตัวของ CWPM ระหว่างการผสม [11, 26] แต่การเคลือบผิว ยังคงให้ผลดีที่มีค่า W/C สูง โดยช่วยเพิ่มค่ากำลังอัดได้มากขึ้นจากการแทรกซึมช่องว่างที่มีมากตามเวลาโดยเฉพาะสำหรับคอนกรีตเก่า [27]

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.004

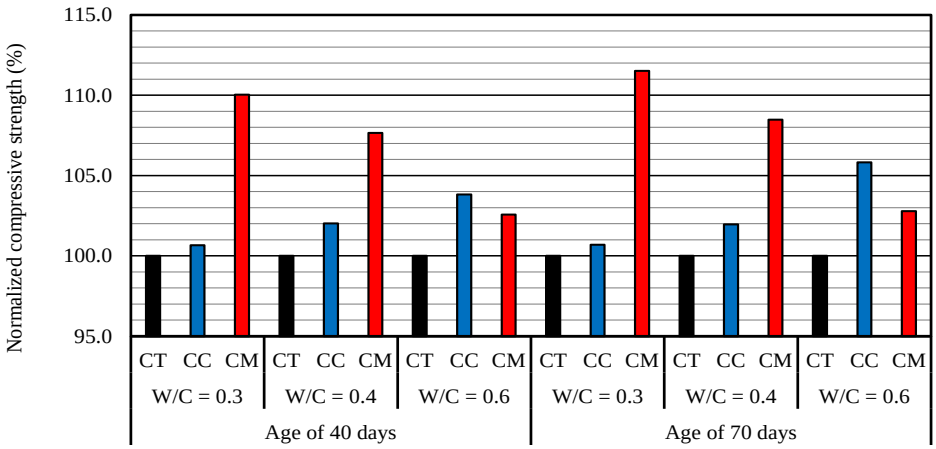
4.2 ความพรุน

การทดสอบความพรุนในมอร์ต้าร์แสดงผลเป็นร้อยละของความพรุนที่ซึมผ่านได้ทำให้ปกติ (Normalize) ในรูปที่ 2 โดยตัวอย่าง CT (W/C เท่ากับ 0.3 0.4 และ 0.6) อายุ 40 วัน (NC40) มีปริมาณความพรุนแท้จริงร้อยละ 26.1 31.4 และ 37.7 ซึ่งค่าเพิ่มขึ้นตาม W/C ที่สูงขึ้นและลดลงเล็กน้อย (ร้อยละ 1.4 ถึง 4.0) เมื่อบ่มต่อระยะสั้น 30 วัน (NC70) [5]

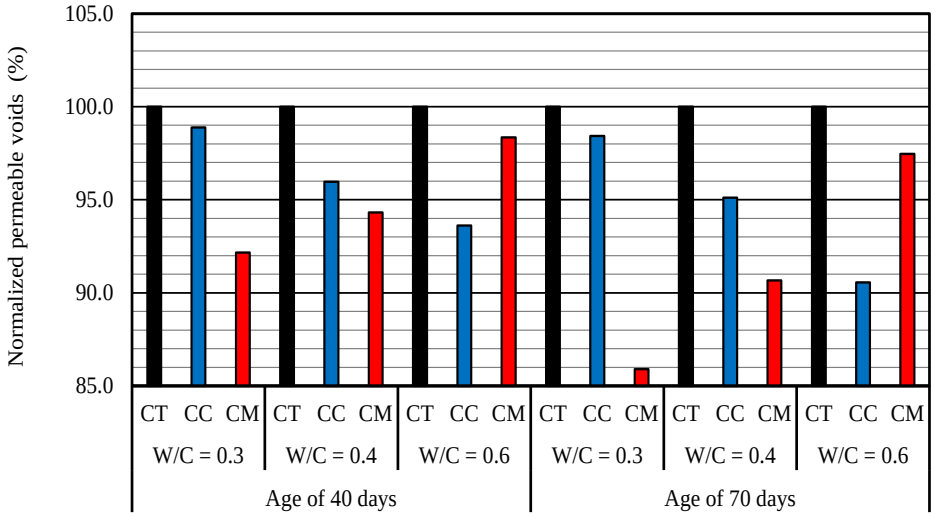
ตัวอย่าง CM ที่ W/C เท่ากับ 0.3 ที่อายุ 40 และ 70 วัน มีปริมาณความพรุนน้อยกว่า เมื่อเทียบกับตัวอย่าง CT เท่ากับร้อยละ 7.8 และ 14.1 และเมื่อW/C สูงขึ้นเป็น 0.4 ตัวอย่าง CM มีความพรุนน้อยกว่าตัวอย่าง CT เท่ากับร้อยละ 5.7 ถึง 9.3 และมีค่าใกล้เคียงกับตัวอย่าง CT เมื่อมี W/C เท่ากับ 0.6 แต่เมื่อบ่มนานขึ้น (CM ที่อายุ 40 และ 70 วัน มีปริมาณความพรุนน้อยกว่าตัวอย่าง CT เท่ากับร้อยละ 1.6 และ 2.5 ตามลำดับ

ผลการทดสอบตัวอย่างเคลือบผิวแตกต่างจากกรณีสารผสมเพิ่ม โดยตัวอย่าง CC ที่ W/C เท่ากับ 0.3 มีความพรุนใกล้เคียงกับ CT โดยมีปริมาณความพรุนต่ำกว่าเล็กน้อย (ร้อยละ 1.1 ถึง 1.6) (NC40 และ NC70) ขณะที่ W/C ที่สูงกว่า ได้แก่ 0.4 และ 0.6 ช่วยลดความพรุนชัดเจนขึ้นที่อายุการบ่มนานขึ้น (ร้อยละ 4.0 ถึง 4.9 และร้อยละ 6.4 ถึง 9.4 ตามลำดับ) ซึ่งการเคลือบผิวในตัวอย่าง W/C สูงช่วยลดความพรุนได้มากกว่าชนิดสารผสมเพิ่มเนื่องจากตัวอย่างเดิมมีความพรุนน้อยอยู่แล้วทั้งจากผลของ W/C ที่ต่ำ การแทรกของ CWPM และการเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องภายหลัง ขณะที่ตัวอย่างเคลือบผิวที่มี W/C สูงมีความพรุนเดิมภายในสูงเมื่อเคลือบผิวและบ่มทำให้ส่วนพื้นผิวตัวอย่างมีความพรุนลดลงจากผลของผลิตภัณฑ์ CWPM ที่เกิดปฏิกิริยาและค่อยๆ ซึมแทรกเข้าสู่ภายในจากการบ่มจากภายนอกอย่างต่อเนื่องและง่ายกว่าเมื่อช่องว่างมีขนาดใหญ่ โดยที่ช่องว่างที่มีลักษณะต่อเนื่องอาจแทรกเต็มทั้งหมดหรือบางส่วนจากการสร้างผลึกรูปทรงเข็มในรูพรุนที่เคยมีรายงานมาแล้ว [28] และยืนยันจากการวิเคราะห์สารประกอบจากการศึกษานี้ในหัวข้อ 4.4 และผลการศึกษานี้ยังบ่งชัดเจนว่าการบ่มที่นานขึ้นส่งผลต่อความพรุนที่ลดลงชัดเจนมากขึ้น ขณะที่ตัวอย่างที่ใช้ W/C ต่ำถึงปานกลางมีผลต่อการลดความพรุนน้อยกว่ามาก (ตัวเลขร้อยละความพรุนที่ลดลง NC40 และ NC70 สำหรับ W/C สูง และต่ำถึงปานกลาง ตามลำดับ มีค่าเท่ากับร้อยละ 6.4 ต่อร้อยละ 1.1 และ 4.0 (NC40) และมีค่าเท่ากับร้อยละ 9.4 ต่อร้อยละ 1.6 และ 4.9 (NC70)) ซึ่งต่างจาก CWPM ในลักษณะสารผสมเพิ่มที่ตัวอย่าง W/C ต่ำถึงปานกลาง มีผลต่อการลดความพรุนสูงกว่ามาก (ตัวเลขร้อยละความพรุนที่ลดลง NC40 และ NC70 สำหรับ W/C สูง และต่ำถึงปานกลาง ตามลำดับ มีค่าเท่ากับร้อยละ 1.6 ต่อร้อยละ 7.8 และ 5.7 (NC40) และมีค่าเท่ากับร้อยละ 2.5 ต่อร้อยละ 14.1 และ 9.3 (NC70) ผลการทดสอบบ่งชี้ว่า CWPM ต่อความพรุนมีประสิทธิภาพที่แตกต่างกันขึ้นกับชนิดและระยะเวลาการบ่ม โดยเฉพาะ CWPM ในชนิดผสมเพิ่มช่วยลดความพรุนได้ดีกว่าชนิดเคลือบผิว จากการกระจายตัวของ CWPM ตั้งแต่ขั้นตอนการผสมมอร์ต้าร์ ซึ่งมีรายงานการพบผลึกรูปเข็มจำนวนมากในรูพรุน เป็นผลให้มีความพรุนต่ำทั่วทั้งตัวอย่างที่ใช้ CWPM ชนิดผสมเพิ่ม ขณะที่ชนิดเคลือบผิวมีความพรุนต่ำและความทึบแน่นบริเวณชั้นเคลือบผิวและใกล้เคียงเท่านั้น [13, 29]

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.004



รูปที่ 1 ร้อยละกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าร์



รูปที่ 2 ร้อยละความพรุนในมอร์ต้าร์

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.004

4.3 การดูดซึมน้ำ

ผลค่าการดูดซึมน้ำจริงและค่าทำให้ปกติ (Normalize) ของตัวอย่างที่อายุ 40 และ 70 วัน (NC40 และ NC70) ของตัวอย่างแสดงในรูปที่ 3 และ 4 โดยตัวอย่าง CT ที่ W/C เท่ากับ 0.3 0.4 และ 0.6 อายุ 40 วัน มีการดูดซึมน้ำ เป็น 0.106 0.167 และ 0.399 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ ต่อมาเมื่อบ่มในน้ำต่อระยะสั้นจนอายุ 70 วัน พบว่าตัวอย่าง CT ที่ W/C เท่ากับ 0.3 0.4 และ 0.6 มีการดูดซึมน้ำลดลงเป็น 0.095 0.156 0.381 มิลลิลิตรต่อนาที หรือลดลงจากอายุ 40 วัน เป็นร้อยละ 10.5 6.3 และ 4.5 ตามลำดับ ซึ่งเป็นทิศทางเดียวกับความพรุน การบ่มนานขึ้นมีผลดีต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นอย่างต่อเนื่องลดขนาดช่องว่างลงและลดการดูดซึมน้ำลงชัดเจนโดยเฉพาะเมื่อใช้ W/C ต่ำ [5]

สำหรับตัวอย่างที่ใช้ CWPM ชนิดสารผสมเพิ่มช่วยลดการดูดซึมน้ำได้ดีในตัวอย่างทุก W/C และอายุการทดสอบ โดยตัวอย่าง CM ที่ W/C เท่ากับ 0.3 0.4 และ 0.6 มีค่าการดูดซึมน้อยกว่าตัวอย่าง CT ร้อยละ 22.0 22.3 และ 6.4 ตามลำดับ (อายุ 40 วัน) ต่อมาเมื่อบ่มนานขึ้นที่อายุ 70 วัน CM ที่ W/C ทั้ง 3 ค่า 0.3 0.4 และ 0.6 มีค่าการดูดซึมน้อยกว่าตัวอย่าง CT ค่าร้อยละ 25.7 23.5 และ 7.1 ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่าตัวอย่าง CM ที่ W/C ต่ำถึง ปานกลางช่วยลดการดูดซึมน้ำอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสอดคล้องกับรายงานอื่น [18, 30] แต่การศึกษานี้ยังพบอีกว่าการบ่มนานขึ้นมีผลดีต่อตัวอย่างที่มี W/C ต่ำถึงปานกลาง จากการทำปฏิกิริยาเพิ่มเติมของสารก่อผลึกกับ CH เพื่อสร้างผลิตภัณฑ์หลัก C-S-H และ $CaCO_3$ รวมถึงผลิตภัณฑ์อื่นอุดช่องว่างและรอยแตกเพิ่มขึ้น [9]

อย่างไรก็ตามการเคลือบผิวตัวอย่างด้วย CWPM ไม่เห็นผลชัดเจนต่อการดูดซึมน้ำมากนัก ตัวอย่าง CC ที่ W/C ต่ำ 0.3 อายุ 40 และ 70 วัน มีการดูดซึมน้ำมากกว่าตัวอย่าง CT (W/C เท่ากับ 0.3 ร้อยละ 3.7 และ 1.8) แต่ผลดีจากการเคลือบผิวเห็นชัดขึ้น เมื่อ W/C สูงขึ้นและมีการบ่มนานขึ้นจากค่าการดูดซึมลดลง (W/C เท่ากับ 0.4 และ 0.6 ที่อายุ 40 และ 70 วัน มีค่าเท่ากับร้อยละ 14.3 และ 16.4 และร้อยละ 17.0 และ 21.4 ตามลำดับ) ซึ่งมีการสันนิษฐานว่าในช่วงแรก CWPM ทำหน้าที่ดูดซับน้ำเพื่อทำการสร้างผลึกและหลังจากการก่อตัวของผลึกเกิดขึ้นทำให้อาจขับน้ำส่วนเกินจากการทำปฏิกิริยา [18] อย่างไรก็ตามตัวอย่างที่มี W/C ต่ำมีช่องว่างน้อยกว่าการแทรกซึมและการเกิดผลึกต้องใช้เวลาค่าการดูดซึมน้ำจึงค่อนข้างต่ำใกล้เคียงกับตัวอย่างปกติที่มีค่า W/C เดียวกันแม้เมื่อความชื้นขณะที่ตัวอย่าง CC ที่ W/C สูงขึ้น ช่องว่างมากขึ้นและขนาดใหญ่ขึ้น การซึมน้ำซึ่งมีผลต่อการสร้างผลึกทำได้ง่ายขึ้นและเห็นผลชัดเจนมากกว่า ซึ่งบ่งชี้ว่าการเคลือบผิวด้วยสารก่อผลึกทำให้ตัวอย่างมีความต้านทานการซึมผ่านน้ำเพิ่มขึ้นจากการก่อผลึกรูปทรงเข็มตามรูพรุนและในรอยแตกขนาดเล็กที่อาจมีอยู่ [14, 31]

ความเชื่อมโยงระหว่างกำลังรับแรงอัด ความพรุนและการดูดซึมน้ำของมอร์ต้าร์ที่ใช้ CWPM ที่มี W/C ต่างกันอาจอธิบายดังนี้

ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนกับกำลังรับแรงอัดบ่งชี้ว่าที่ W/C ต่ำ มอร์ต้าร์มีความพรุนน้อยที่สุด เมื่อใช้ CWPM ชนิดผสมเพิ่ม ซึ่งช่วยเติมเต็มช่องว่างขนาดเล็กในมอร์ต้าร์ ให้ทึบแน่นมากขึ้นส่งผลให้โครงสร้างแน่นขึ้นและกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับตัวอย่าง CT และ CC ส่วนกรณีที่ W/C สูง

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.004

มอร์ต้าร์มีความพรุนสูง การเคลือบผิวด้วย CWPM ช่วยลดความพรุนในบริเวณผิวได้อย่างชัดเจน ช่วงเวลาการบ่มชื้นที่ใช้ในการศึกษานี้อาจจำกัดประสิทธิภาพของความทึบแน่นที่เกิดขึ้นเฉพาะบริเวณผิวและพื้นที่ใกล้เคียงเท่านั้น ซึ่งแตกต่างจากกรณีการใช้ CWPM ชนิดผสมเพิ่มที่ช่วยให้ความทึบแน่นสม่ำเสมอในเนื้อวัสดุได้ดีกว่า อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่ W/C สูง ช่องว่างในเนื้อวัสดุยังคงมีอยู่มากและมีขนาดใหญ่ ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดโดยรวมของพื้นที่หน้าตัดไม่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน แม้ในช่วงหลังของการบ่มระยะยาว

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนกับการดูดซึมน้ำบ่งชี้ว่า W/C ต่ำถึงปานกลาง (0.3 ถึง 0.4) มีความพรุนที่ลดลงส่งผลให้การดูดซึมน้ำลดลง โดยเฉพาะตัวอย่างที่ใช้ CWPM ชนิดผสมเพิ่ม ซึ่งทำให้รูพรุนในเนื้อวัสดุเชื่อมต่อกันน้อยลงและลดช่องทางที่น้ำสามารถซึมผ่านได้ ขณะที่ W/C สูง พบว่าชนิดเคลือบผิวลดการดูดซึมน้ำในช่วงหลังการบ่มได้ดี โดยเฉพาะในตัวอย่างที่มีรูพรุนขนาดใหญ่

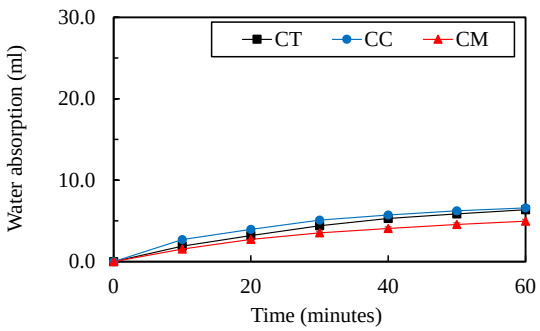
ดังนั้นการปรับใช้ CWPM ทั้งชนิดผสมเพิ่มและชนิดเคลือบผิวจึงควรพิจารณาจากค่า W/C และสมบัติที่ต้องการของมอร์ต้าร์ในการใช้งาน

4.4 สารประกอบทางเคมี

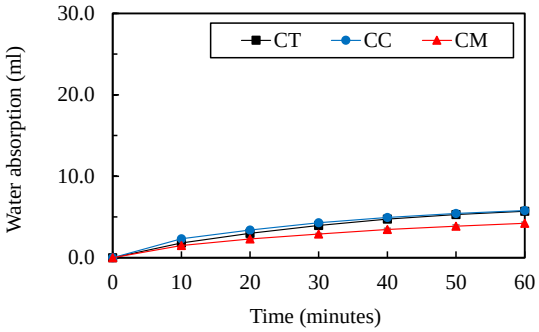
การวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีในมอร์ต้าร์อายุ 40 วัน ด้วยเทคนิค XRD ในรูปที่ 5 ไม่พบความแตกต่างของตำแหน่งความเข้มของจุดสูงสุด (Peak) สารหลักของตัวอย่าง CT และ CWPM ทั้งสองชนิด ซึ่งบ่งชี้ว่าทั้งตัวอย่าง CM และ CC ไม่ได้มีโครงสร้างผลึกหลักรูปแบบใหม่เกิดขึ้น นอกจากพบ Peak ของ Calcium Aluminate Silicate Hydrates (C-A-S-H) ที่ชัดเจน ซึ่งไม่พบจากตัวอย่าง CT และพบผลิตภัณฑ์หลักเช่นเดียวกับจากปฏิกิริยาไฮเดรชันซีเมนต์ ได้แก่ C-S-H Calcium Hydroxide (CH) $CaCO_3$ และ Calcium Sulfoaluminate (Ettringite หรือ AFt) ซึ่งเป็นการยืนยันผลงานวิจัยอื่นที่ชัดเจนมากขึ้นโดย Zhang et al. [32] วิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD แสดงให้เห็นว่าไม่มีการสร้างสารประกอบทางเคมีใหม่ แต่มีการปรับปรุงและเพิ่มปริมาณของสารประกอบทางเคมีที่มีอยู่เดิม เช่น C-S-H และ AFt ผ่านการเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันและสารประกอบทางเคมีของ CWPM

อย่างไรก็ตาม ตัวอย่างที่มี CWPM พบค่า Peak สูงสุดของ C-A-S-H ซึ่งมาจากการทำปฏิกิริยาของซีเมนต์และ CWPM ที่มีองค์ประกอบของด่าง [33] มีค่า Peak สูงสุดของ $CaCO_3$ และ AFt เด่นชัดมากกว่า CT และพบค่า Peak สูงสุดของ C-S-H ขณะที่ค่า Peak ของ CH ลดลงในทั้งในตัวอย่าง CM และ CC [34] แต่ในตัวอย่างที่ W/C ต่ำและปานกลาง (0.3 และ 0.4) การใช้สารก่อผลึกแสดง Peak ของ AFt ชัดเจนกว่าตัวอย่างที่ W/C สูง (0.6) ส่วนค่า Peak ของ CH ในตัวอย่างกลุ่มนี้ไม่ชัดเจนเหมือน CT ซึ่งอาจเป็นเพราะสารก่อผลึกทำปฏิกิริยากับ CH สร้างผลึกรูปทรงเข็มและผลิตภัณฑ์หลักที่ทำให้มอร์ต้าร์มีความแข็งแรง ได้แก่ C-S-H และ $CaCO_3$ [29, 31] ซึ่งผลิตภัณฑ์เหล่านี้ทำให้มอร์ต้าร์มีความทึบแน่นและปริมาณของรูพรุนลดลงจึงเป็นผลให้มอร์ต้าร์ CWPM มีการดูดซึมน้ำต่ำ

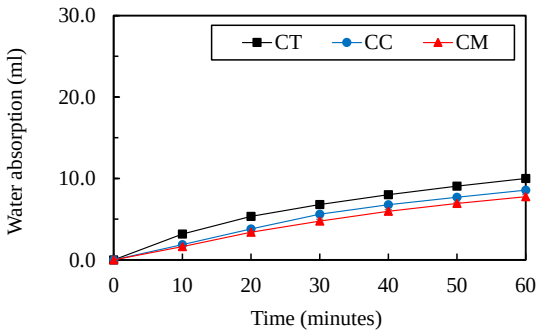
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.004



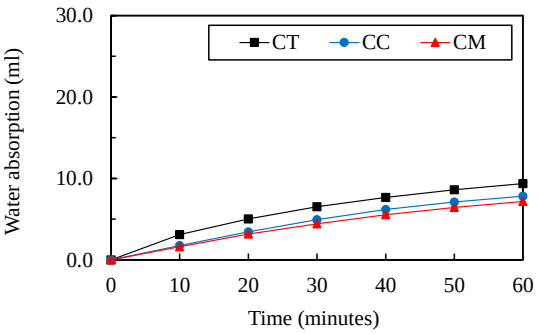
W/C = 0.3 อายุ 40 วัน



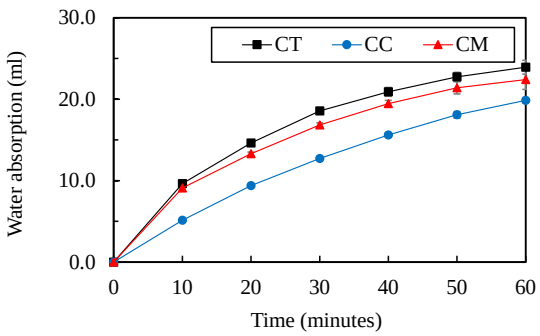
W/C = 0.3 อายุ 70 วัน



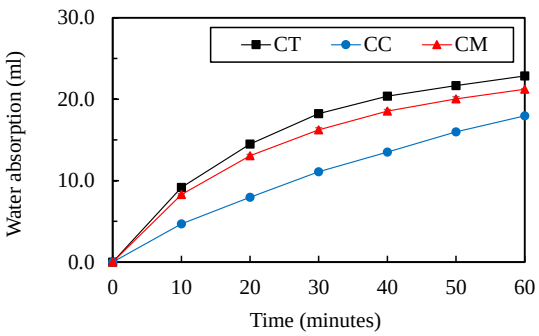
W/C = 0.4 อายุ 40 วัน



W/C = 0.4 อายุ 70 วัน



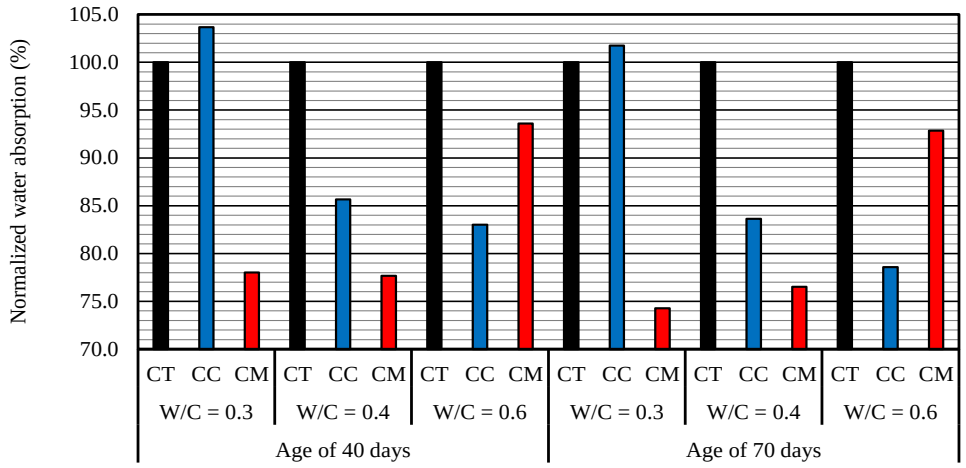
W/C = 0.6 อายุ 40 วัน



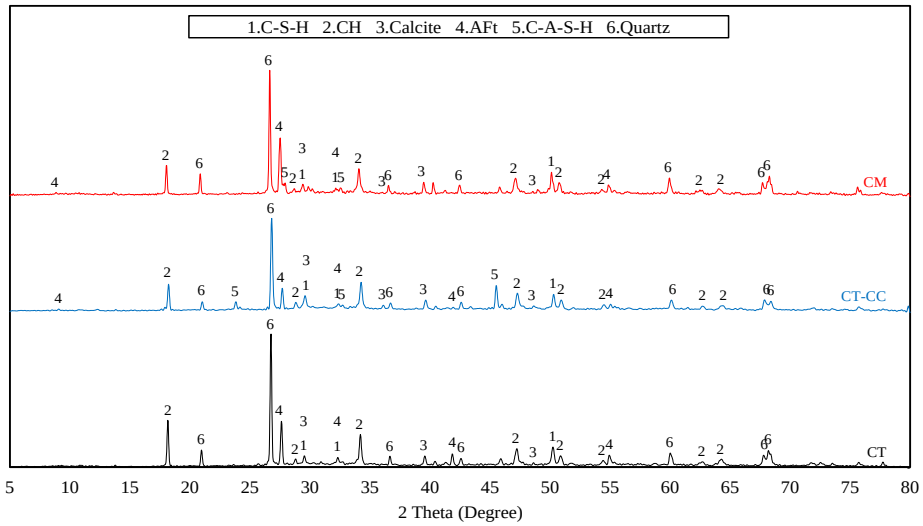
W/C = 0.6 อายุ 70 วัน

รูปที่ 3 การดูดซึมน้ำในมอร์ต้าร์

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.004



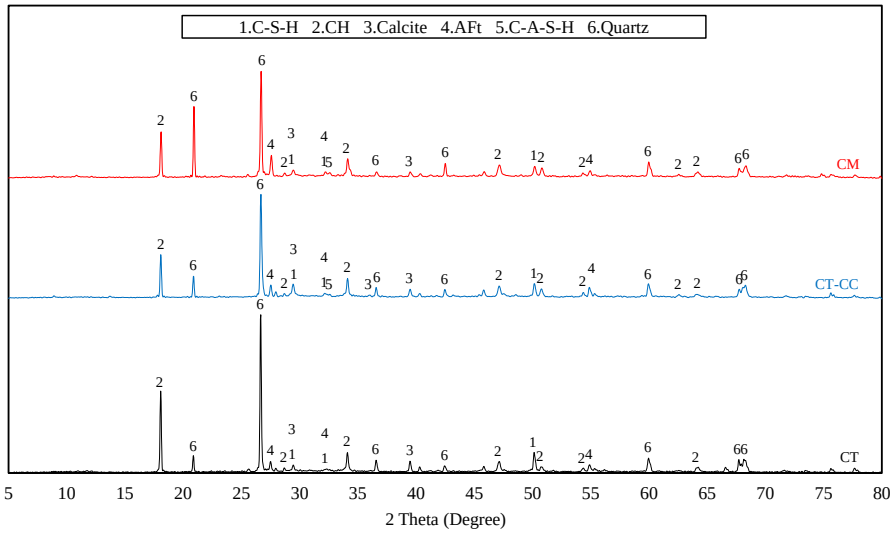
รูปที่ 4 ร้อยละการดูดซึมน้ำในมอร์ต้าร์



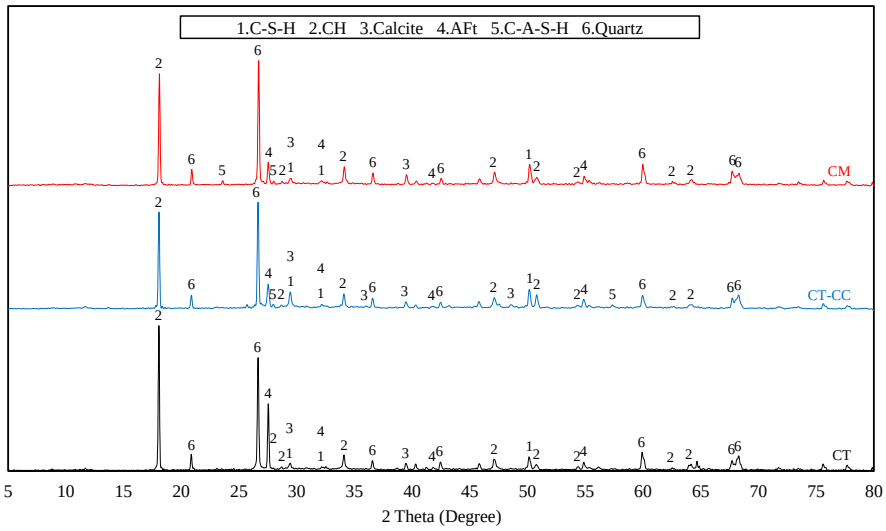
(ก) W/C เท่ากับ 0.3

รูปที่ 5 สารประกอบเคมีในมอร์ต้าร์

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.004



(ข) W/C เท่ากับ 0.4



(ค) W/C เท่ากับ 0.6

รูปที่ 5 (ต่อ)

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.004

5. สรุปผลการศึกษา

1. การใช้สารก่อผลึกชนิดผสมเพิ่มช่วยลดความพรุนได้ดีกว่าการเคลือบผิวในตัวอย่าง W/C ต่ำถึงปานกลาง ขณะที่ชนิดเคลือบผิวในตัวอย่าง W/C สูง ช่วยลดความพรุนได้ดีกว่าชนิดผสมเพิ่ม และการบ่มต่อในน้ำระยะสั้นทำให้ความพรุนลดลง

2. การใช้สารก่อผลึกชนิดผสมเพิ่มช่วยลดการดูดซึมน้ำได้ในตัวอย่างทุก W/C แต่มีผลเล็กน้อยกับตัวอย่าง W/C สูง ส่วนชนิดเคลือบผิวช่วยลดการดูดซึมน้ำได้ดีในตัวอย่าง W/C สูง ขณะตัวอย่างเคลือบผิว W/C ต่ำ มีการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่เมื่อบ่มตัวอย่างในน้ำระยะสั้นทำให้มีการดูดซึมน้ำลดลง

3. ผลของสารก่อผลึกส่งผลดีต่อสมบัติการทึบน้ำของคอนกรีตโดยเฉพาะเมื่อใช้สารก่อผลึกชนิดผสมเพิ่มร่วมกับตัวอย่างที่มี W/C ในช่วงต่ำถึงปานกลาง (0.3 ถึง 0.4) แต่การใช้สารก่อผลึกชนิดเคลือบผิวกับตัวอย่างที่ W/C สูง (0.6) ให้ผลดีที่ชัดเจนกว่าส่วนผสมที่มี W/C ต่ำ

4. ผลพลอยได้จากการเติมผลึกจากการใช้สารก่อผลึกช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัด โดยชนิดผสมเพิ่มช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดได้มากกว่าชนิดเคลือบผิว ซึ่งมีผลเฉพาะบริเวณใกล้ผิวยกเว้นตัวอย่าง W/C สูง ที่ชนิดเคลือบผิวช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดได้ดีกว่า รวมทั้งการบ่มตัวอย่างสารก่อผลึกในน้ำต่อช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดได้มากกว่าตัวอย่างควบคุม

5. ตัวอย่างสารก่อผลึกไม่พบโครงสร้างผลึกของสารประกอบทางเคมีใหม่ แต่ค่า Peak ของ $CaCO_3$ และ Ettringite โดยเฉพาะ C-A-S-H ปรากฏขึ้นเด่นชัดมากกว่าตัวอย่างควบคุม อีกทั้งการใช้สารก่อผลึกชนิดผสมเพิ่มและชนิดเคลือบผิวไม่พบความแตกต่างของโครงสร้างที่เกิดขึ้นในตัวอย่างในแต่ละ W/C อย่างไรก็ตามในตัวอย่าง W/C ต่ำถึงปานกลาง มีค่า Peak ของ C-S-H ชัดเจนมากกว่าตัวอย่างที่ W/C สูง

ข้อมูลเหล่านี้สนับสนุนการปรับปรุงลักษณะเฉพาะให้ดีขึ้นจากการใช้สารก่อผลึกทั้ง 2 ชนิด ในการบ่มระยะสั้นและระยะยาวยาว และยังส่งผลดีต่อสมบัติการทึบน้ำของตัวอย่างโดยมีผลแตกต่างกันตาม W/C และชนิดของสารก่อผลึก

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สนับสนุนทุนในการศึกษาวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

[1] D. Ribeiro, A. Sales, C. Sousa, F. Almeida, M. Cunha, M. Lourenço, and P. Helene, Corrosion in concrete structures: Theory, control and analysis methods, 1st Ed., Rio de Janeiro, Brazil, 2014.

[2] Subcommittee on concrete and materials, Durability of Concrete, Engineering Institute of Thailand under His Majesty the King's Patronage (EIT), 2000. (in Thai)

[3] EN 1990, Eurocode-Basis of structural design, Brussels, 2002.

[4] E. P. Kearsley, and P. J. Wainwright, Porosity and permeability of foamed concrete, Cement and Concrete Research, 2001, 31(5), 805-812.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.004

[5] A.M. Neville, Properties of concrete, Longman, London, 1995.

[6] B. Kerkhoff, Effects of substances on concrete and guide to protective treatments: Portland cement association, IL, 2007.

[7] A.A. Almusallam, F.M. Khan, S.U. Dulaijan, and O.S.B. Al-Amoudi, Effectiveness of surface coatings in improving concrete durability, Cement and Concrete Composites, 2003, 25(4), 473-481.

[8] M. Safiuddin, Concrete damage in field conditions and protective sealer and coating systems, Coatings, 2017, 7(7), 90.

[9] ACI 212.3R-10, Report on Chemical Admixtures, American Concrete Institute, MI, 2010.

[10] BS EN 934-2:2009, Admixtures For Concrete, Mortar and Grout-Part 2: Concrete Admixtures; Definitions, Requirements, Conformity, Marking and Labelling, British Standards Institution, London, 2009.

[11] V.G. Cappellesso, N. dos Santos Petry, D. C.C. Dal Molin, and A.B. Masuero, Use of crystalline waterproofing to reduce capillary porosity in concrete, Building Pathology and Rehabilitation, 2016, 1, 9.

[12] D. Yodmalai, R. Sahamitmongkol and S. Tangtermsirikul, The use of crystalline materials to improve the durability of concrete, TCA e-magazine, 2010, 9. (in Thai)

[13] S. Lim, and S. Kawashima, Mechanisms underlying crystalline waterproofing through microstructural and phase characterization, Journal of Materials in Civil Engineering, 2019, 31(9), 04019175.

[14] N. Khomwan, S. Sujjavanich and T. Kheaw-on, Effect of crystalline waterproofing materials on corrosion potential of steel in concrete, Innovative Infrastructure Solutions, 2024, 9, 12.

[15] M.J. Al-Kheetan, M.M. Rahman, and D.A. Chamberlain, Development of hydrophobic concrete by adding dua-crystalline admixture at mixing stage, Structural Concrete, 2018, 19(5), 1504-1511.

[16] M.M. Rahman and D.A. Chamberlain, Application of crystallising hydrophobic mineral and curing agent to fresh concrete, Construction and Building Materials, 2016, 127, 945-949.

[17] M.M. Rahman and D.A. Chamberlain, Performance of crystalline hydrophobic in wet concrete protection, Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, 29(6), 0401700.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.004

[18] M.J. Al-Kheetan, M.M. Rahman and D.A. Chamberlain, Optimum mix design for internally integrated concrete with crystallizing protective material, Journal of Materials in Civil Engineering, 2019, 31(7), 04019101.

[19] ASTM C109/C109M-20 ASTM, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens), ASTM International, PA, 2002.

[20] ASTM C642-97, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, ASTM International, PA 1997.

[21] RILEM Test No. II.4, Systems and Structures, Water Absorption Under Low Pressure (Pipe Method), European organization, Paris 1980.

[22] Z. D. Rong, W. Sun, H. J. Xiao and W. Wang, Effect of silica fume and fly ash on hydration and microstructure evolution of cement based composites at low water-binder ratios, Construction and Building Materials, 2014, 51, 446-450.

[23] I. Soroka, C.H. Jaegermann and A. Bentur, Short-term steam-curing and concrete later-age strength, Matériaux et Construction, 1978, 11(2), 93-96.

[24] T. Kheaw-on, N. Khomwan and S. Sujjavanich, The effect of crystalline waterproofing materials on accelerated corrosion of steel reinforcement in concrete, International Journal of Civil Engineering, 2021, 19, 699–716.

[25] T.L. Weng and A. Cheng, Influence of curing environment on concrete with crystalline admixture, Monatshefte für Chemie - Chemical Monthly, 2014, 145(1), 195-200.

[26] D. Yodmalai, Durability properties of concrete with crystalline materials, Thesis, Thammasat University, 2011.

[27] T. Kheaw-on, N. Khomwan and S. Sujjavanich, The effect of crystalline coatings defects of steel-corrosion in reinforced concrete, Journal of Thailand Concrete Association, 2018, 6, (2), 49-57.

[28] P. Azarsa, R. Gupta and A. Biparva, Inventive microstructural and durability investigation of cementitious composites involving crystalline waterproofing admixtures and portland limestone cement, Materials, 2020, 13(6), 1425.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.004

[29] B.-B Xiong, L. Gao, J.-G. Chen, X.-C. Lu, B. Tian, B.-F. Chen, and Y.-B. Li, Action mechanism for improving water impermeability of concrete surface based on deep penetrating sealer, Construction and Building Materials, 2022, 322, 126424.

[30] A. GojeviĆ, V. Ducman, I.N. Grubeša, A. BariČeviĆ and I.B. PeČur, The effect of crystalline waterproofing admixtures on the self-Healing and permeability of concrete, 2021, Materials, 14(8), 1860.

[31] L.W. Teng, R. Huang, J. Chen, A. Cheng, and H.M. Hsu, A study of crystalline mechanism of penetration sealer materials, Materials, 2014, 7(1), 399-412.

[32] Y. Zhang, Q. Wang, J. Chen, J. Tang, H. Zhou, W. Zhou, X. Chang and Y. Cheng, Preparation and performance study of active chemicals in cementitious capillary crystalline waterproofing materials, Case Studies in Construction Materials, 2024, 20, e02874.

[33] G. Li, X. Huang, J. Lin, X. Jiang and X. Zhang, Activated chemicals of cementitious capillary crystalline waterproofing materials and their self-healing behaviour, Construction and Building Materials, 2019, 200, 36-45.

[34] Y. Zhang, L. Zuo, J. Yang, X. Cai, Y. Zhao and X. Zeng, Effect of cementitious capillary crystalline waterproofing coating on the gas permeability of mortar, Structural Concrete, 2019, 20(5), 1763-1770.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.005

บทความวิจัย

การพัฒนาซีเมนต์บอร์ดจากคอนกรีตผสมแกนกัญชงเสมือนมวลรวมละเอียด

มงคล ยุทธหาร[1] ศตวรรษ หฤหรรษพงศ์[1*] ณรงค์เดช อินทรัตน์ชัยกิจ[1] และ ยิ่งยง รุ่งฟ้า[2]

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตอุเทนถวาย

[2] สาขาวิชาเทคโนโลยีการออกแบบผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตอุเทนถวาย

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

วันที่รับบทความ: 13 สิงหาคม 2567; วันที่ทบทวนบทความ: 3 มกราคม 2568; วันที่ตอบรับบทความ: 27 มกราคม 2568
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 22 เมษายน 2568

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาแผ่นซีเมนต์บอร์ดจากแกนกัญชงเสมือนมวลรวมละเอียดร่วมกับปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน โดยกำหนดอัตราส่วนทั้งหมด 5 อัตราส่วน ประกอบด้วยอัตราส่วนของปูนซีเมนต์ : ทราย : แกนกัญชง เท่ากับ 1 : 2 : 0.11, 1 : 2 : 0.12, 1 : 2 : 0.13, 1 : 2 : 0.14 และ 1 : 2 : 0.15 โดยน้ำหนัก ทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของแผ่นซีเมนต์บอร์ด ตามมาตรฐาน มอก. 878-2566 จากผลการทดสอบพบว่ามีค่าความหนาแน่นตั้งแต่ 1,752 ถึง 1,783 กก./ลบ.ม. ค่าความชื้นร้อยละ 2.37 ถึง 3.75 ส่วนค่ากำลังรับแรงดัดเท่ากับ 5.18 ถึง 6.81 กก./ตร.ซม. ที่อายุ 7 วัน และค่าความต้านทานของแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าเท่ากับ 0.11 ถึง 0.18 กก./ตร.ซม. ที่อายุ 7 วัน โดยอัตราความชื้นและการพองตัว มีค่าผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐาน มอก. 878-2566 ส่วนความหนาแน่น กำลังรับแรงดัด และแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า มีค่าต่ำกว่ามาตรฐานที่กำหนด เนื่องจากลักษณะกายภาพของแกนกัญชงมีความพรุน ซึ่งลดการยึดเกาะระหว่างปูนซีเมนต์และแกนกัญชง พื้นที่สัมผัสระหว่างซีเมนต์และแกนกัญชงลดลง ทำให้แรงดัดและแรงดึงตั้งฉากลดลงตามการเพิ่มของปริมาณแกนกัญชง

คำสำคัญ: แกนกัญชง; แผ่นซีเมนต์บอร์ด; สมบัติทางกายภาพ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.005

บทความวิจัย

Development of Cement Board from Concrete Mixed with Hemp Core as Fine Aggregate Substitute

Mongkol Yutthaharn[1], Sattawat Haruehansapong [1*], Narongdej Intaratchaiyakit[1] and Yingyong Rungfah[2]

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

[2] Division of Industrial Product Design Technology, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Tawan-ok (Uthenthawai Campus)

[*] Corresponding author, E-mail: sattawat_ha@rmutto.ac.th

Received: 13 August 2024; Revised: 3 January 2025; Accepted: 27 January 2025
Online Published: 22 April 2025

Abstract: This research focuses on the development of cement boards using hemp core as a fine aggregate substitute combined with cement as a binder. Five mix ratios were designed, consisting of cement: sand: hemp core ratios of 1 :2 :0.11, 1 :2 :0.12, 1 :2 :0.13, 1: 2: 0.14, and 1: 2: 0.15 by weight. The physical and mechanical properties of the cement boards were evaluated according to the Thai Industrial Standard (TIS) 878-2566. The results showed that the density of the boards ranged from 1,752 to 1,783 kg/m³, while the moisture content varied between 2.37% and 3.75%. The flexural strength was recorded at 5.18 to 6.81 kg/cm² at 7 days, and the tensile strength perpendicular to the surface ranged from 0.11 to 0.18 kg/cm² at 7 days. The moisture content and swelling values complied with the TIS 878-2566 standards. However, the density, flexural strength, and tensile strength perpendicular to the surface were below the specified requirements of the standard. This is attributed to the porous nature of the hemp core, which reduces the bonding between the cement and the hemp core. The decreased contact area between the cement matrix and the hemp core resulted in reduced flexural and tensile strength as the proportion of hemp core increased.

Keywords: Hemp Core; Cement Board; Physical Properties

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.005

บทความวิจัย

1. บทนำ

แผ่นซีเมนต์บอร์ดหรือไม้อัดซีเมนต์ เป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการก่อสร้างบ้านสำเร็จรูปและใช้เป็นส่วนประกอบของบ้านเรือน สามารถลดต้นทุนในการก่อสร้างลงได้ เนื่องจากนิยมนำมาใช้เป็นผนังแทนการก่ออิฐฉาบปูน ซึ่งแผ่นซีเมนต์บอร์ดมีกรรมวิธีการผลิตโดยใช้เส้นใยจากไม้แทนที่จะเป็นชิ้นไม้ แผ่นซีเมนต์บอร์ดแบ่งได้เป็น 3 ชนิด ได้แก่ 1. แผ่นเส้นไม้อัดซีเมนต์ หรือมีชื่อเรียกว่า Wood-Wood Board หรือ Wood-Wood Cement Slabs (W.W.S.) แผ่นฝอยไม้อัดซีเมนต์ชนิดใช้งานทั่วไป 2. แผ่นชิ้นไม้อัดซีเมนต์ (Cement-Bonded Particle-Boards) ชิ้นไม้สับ (Wood Chip) ที่ใช้เป็นวัตถุดิบ มีความหนาแน่น (Density) สูงสุด 1,250 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีมาตรฐาน มอก.878-2566 [1] แผ่นชิ้นไม้อัดซีเมนต์ความหนาแน่นสูง และ 3. แผ่นใยไม้อัดซีเมนต์ (Cement-Bonded Fiber Board) มีกรรมวิธีการผลิตเช่นเดียวกับแผ่นชิ้นไม้อัดซีเมนต์ แต่ใช้เส้นใยจากไม้แทนที่จะเป็นชิ้นไม้ ในปัจจุบันผลิตภัณฑ์แผ่นซีเมนต์บอร์ดจากเส้นใยไม้ ยังไม่มีมาตรฐานใดมากำหนดคุณภาพของวัสดุที่จะใช้ผลิต ทำให้เส้นใยชนิดอื่น ๆ เช่น ไม้ยูคาลิปตัส เส้นใยจากปาล์มน้ำมัน เถ้ากะลามะพร้าวและแกนกัญชง [2] อาจถูกนำมาใช้ในอนาคตเพื่อทดแทนเส้นใยที่ได้จากแร่ใยหิน (Asbestos) ที่สร้างมลพิษให้กับสภาพสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก [3]

ในประเทศไทย กัญชง (Hemp) จัดเป็นพืชเส้นใยที่มีสมบัติในด้านความยืดหยุ่น ความแข็งแรง และความทนทานสูงสามารถเจริญเติบโตได้ดีในสภาพแวดล้อมของประเทศไทย และปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงได้ดี ชาวเขาเผ่าต่าง ๆ ทางภาคเหนือจึงมีการใช้เส้นใยจากลำต้นของต้นกัญชงกันมาใช้เป็นเส้นใยทอผ้า จากการศึกษาพบว่าเส้นใยกัญชงเป็นเส้นใยที่มีคุณภาพสูง มีความยืดหยุ่น แข็งแรงและทนทาน สามารถใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตผ้าและกระดาษได้ดี มีคุณภาพดีกว่าเส้นใยจากฝ้ายและลินิน เมื่อเปรียบเทียบปริมาณเส้นใยจากการปลูกกัญชงกับการปลูกฝ้าย กัญชงจะให้ผลผลิตมากกว่าฝ้าย 2 ถึง 3 เท่า เส้นใยกัญชงจึงเริ่มมีบทบาทสำคัญในตลาดเส้นใยธรรมชาติและนอกเหนือจากเส้นใยแล้ว ส่วนอื่น ๆ ของกัญชง เช่น น้ำมันจากเมล็ดกัญชง (Hemp Seed Oil) ยังสามารถนำมาใช้ประโยชน์ทำเป็นอาหารเสริม เครื่องสำอาง น้ำมันหอมระเหย อย่างไรก็ตามหลังจากกระบวนการแปรรูปกัญชงแล้ว ยังเหลือส่วนที่ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ คือ ส่วนของลำต้นและแกนของต้นกัญชง ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 70 ถึง 80 ของผลผลิตทั้งหมดของต้นกัญชง [4] ดังนั้นผู้วิจัยจึงเล็งเห็นว่าควรที่จะนำแกนกัญชงนี้มาแปรรูปเพื่อเพิ่มมูลค่าและนำแกนกัญชงมาใช้ประโยชน์เพื่อลดความสูญเปล่าของวัสดุอย่างมีประสิทธิภาพ (Zero Waste) ซึ่งในต่างประเทศ [5] ได้นำส่วนที่เหลือดังกล่าวมาแปรรูปเป็นวัสดุก่อสร้างบ้านเรือน โดยเฉพาะการนำส่วนเหลือของกัญชงมาเป็นส่วนผสมหลักในการทำส่วนผสมในคอนกรีต [6] และเป็นวัสดุทดแทนไม้จากธรรมชาติ

ปัจจุบันการนำวัสดุผสมชีวภาพมาใช้ในส่วนผสมคอนกรีตจะต้องผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณสมบัติวัสดุเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสมรรถนะของเส้นใยธรรมชาติให้ดีขึ้นและเหมาะสมต่อการนำมาประยุกต์ใช้งาน เนื่องจากโดยธรรมชาติของเส้นใยธรรมชาติจะมีองค์ประกอบอื่น ๆ ที่นอกเหนือจากเส้นใย คือ เซลลูโลส (Celluloses) ลิกนิน (Lignin) เพกติน (Pectin) และ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.005

เฮมิเซลลูโลส (Hemicelluloses) ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้การยึดเกาะไม่ดี อันเป็นผลมาจากการที่วัสดุชีวภาพดูดซึมความชื้นเอาไว้ และส่งผลถึงสมบัติเชิงกลโดยรวมของวัสดุประสานให้ลดน้อยลงไปด้วย [7] และจากการศึกษาของ สมชายและคณะ [8] พบว่ามีศักยภาพในการนำเส้นใยธรรมชาติมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุประสานและยังสามารถป้องกันความเสียหายที่เกิดจากการทำลายของแมลงและถูกนำไปใช้ตกแต่งภายในอาคารเพื่อให้เกิดความสวยงาม ทดแทนการใช้ไม้ มีความปลอดภัยต่อผู้ใช้และสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพช่วยประหยัดพลังงานและลดขนาดน้ำหนักโครงสร้างของอาคารลงได้

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำแกนกัญชงมาเป็นวัสดุประสานที่มีสมบัติเป็นวัสดุที่น้ำหนักเบา ทนทานและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [9] โดยผลของการศึกษาจะเป็นประโยชน์อย่างมากที่สามารถพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ทดแทนไม้อัดที่สร้างมูลค่าเพิ่มและส่งเสริมการปลูกต้นกัญชงในอนาคตเพื่อนำมาเป็นวัสดุทางเลือกในด้านงานก่อสร้าง

2. วิธีการวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้วิจัย

2.1.1 วัสดุประสาน

ปูนซีเมนต์ (Cement) ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hybrid Cement) มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.94 และมีสมบัติตามมาตรฐาน มอก.2594 [10]

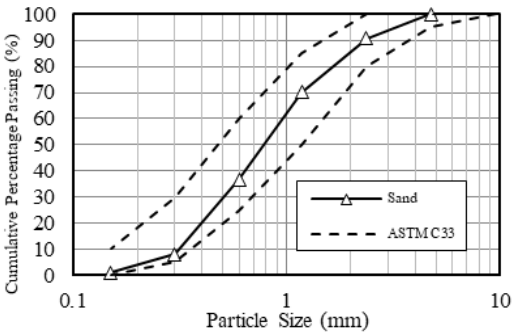
2.1.2 แกนกัญชง

แกนกัญชง (รูปที่ 1) จากสถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูงจากทางภาคเหนือของประเทศไทยและมีค่าความถ่วงจำเพาะ และความหนาแน่นอยู่ที่ 0.6 และ 120 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร [11] โดยนำมาร่อนผ่านตะแกรงขนาด 9.5 มิลลิเมตร (3/8 นิ้ว) แล้วใช้แกนกัญชงที่ขนาดค้างตะแกรงเบอร์ 4 ทำหน้าที่เสมือนมวลรวมละเอียด

2.1.3 มวลรวม

มวลรวมละเอียดที่ใช้เป็นทรายแม่น้ำมีขนาดผ่านตะแกรง เบอร์ 4 ซึ่งมีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 0.54 และค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.27 โดยขนาดคละของมวลรวมละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C33 [12] แสดงดังรูปที่ 2

รูปที่ 1 แกนกัญชงที่นำมาใช้เป็นส่วนผสมในงานวิจัย



รูปที่ 2 ขนาดคละของมวลรวมละเอียด

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.005

2.1.4 สารผสมเพิ่ม

สารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer) ที่นำมาใช้ คือ ADVA CAST 2727 เป็นสารประกอบโพลิเมอร์ (Polymer) ที่ออกแบบมาใช้กับงานที่ต้องการกำลังอัดสูงในช่วงต้น ให้ความสามารถในการไหลตัวได้ดี โดยทำการผสมที่ 1% ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ สารอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ [$Al_2(SO_4)_3$] และสารแคลเซียมซัลเฟต [$Ca(OH)_2$] นำมาใช้อัตราส่วน $Al_2(SO_4)_3$: $Ca(OH)_2$ = 21 : 42 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักของแกนเฮมพ์เพื่อเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติวัสดุแกนเฮมพ์ก่อนนำมาใช้ดังงานวิจัยของ Saksith และคณะ [2]

2.2 ส่วนผสมแผ่นซีเมนต์บอร์ด

ออกแบบส่วนผสมของแผ่นซีเมนต์บอร์ดจากแกนกัญชงร่วมกับปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน เพื่อใช้ในการขึ้นรูปและทดสอบหาอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้ประโยชน์ โดยได้ออกแบบจากอัตราส่วนของแผ่นซีเมนต์บอร์ดที่มีปริมาณแกนกัญชงมากที่สุด แล้วจึงได้ลดปริมาณของแกนกัญชงลง จนได้อัตราส่วนทั้งหมดรวม 5 อัตราส่วน ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของแผ่นซีเมนต์บอร์ดจากแกนกัญชง (โดยน้ำหนัก)

ตัวอย่าง	ปูน	ทราย	แกนกัญชง	น้ำ
H11	1	2	0.11	0.48
H12	1	2	0.12	0.48
H13	1	2	0.13	0.48
H14	1	2	0.14	0.48
H15	1	2	0.15	0.48

2.3 การเตรียมตัวอย่างการทดสอบ

ทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของแผ่นซีเมนต์บอร์ดตามมาตรฐาน มอก.878-2566 เรื่องแผ่นชิ้นไม้อัดซีเมนต์ : ความหนาแน่นสูง ในแต่ละอายุการทดสอบจะใช้ตัวอย่างจำนวน 3 ตัวอย่างเพื่อเป็นค่าเฉลี่ยในการทดสอบ ซึ่งสมบัติที่ต้องทดสอบตามมาตรฐาน มอก.878-2566 นี้ จะประกอบไปด้วย ความหนาแน่น, ความชื้น, การพองตัวเมื่อแช่น้ำ, ความต้านทานแรงดัด และความต้านทานแรงดึงตั้งฉากที่ผิวหน้า โดยขั้นตอนการขึ้นรูปแผ่นซีเมนต์บอร์ด ดังนี้

1. เตรียมแบบหล่ออะคริลิคแผ่นซีเมนต์บอร์ด โดยทาน้ำยาทาแบบที่แบบหล่ออะคริลิค ขนาด 30 × 30 × 1.5 เซนติเมตร
2. เตรียมส่วนผสมสำหรับแผ่นซีเมนต์บอร์ดจากการใช้แกนกัญชงร่วมกับปูนซีเมนต์ (OPC) เป็นวัสดุประสานตามการออกแบบ
3. ผสมส่วนผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องผสมคอนกรีต
4. นำส่วนผสมที่เข้ากันดีแล้วมาเทลงในแบบอะคริลิคเพื่อขึ้นรูปเป็นแผ่นซีเมนต์บอร์ด ที่อุณหภูมิปกติและทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จนแผ่นซีเมนต์บอร์ดแข็งตัว
5. นำแผ่นซีเมนต์บอร์ดจากแกนกัญชงที่ได้จากการถอดแบบอะคริลิคเรียบร้อยแล้ว ไปบ่มในอากาศเป็นระยะเวลาต่าง ๆ ได้แก่ 7 14 และ 28 วัน ตามลำดับและทำการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ต่อไป

2.4 วิธีการทดสอบสมบัติต่าง ๆ

2.4.1 ความหนาแน่น

ชั่งน้ำหนักของแผ่นซีเมนต์บอร์ดจากการใช้แกนกัญชงร่วมกับปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานและวัดขนาดความกว้าง ความยาวทั้ง 4 ตำแหน่งที่กำหนดบนแผ่นซีเมนต์บอร์ด แล้วหาค่าเฉลี่ยความหนาแน่น

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.005

2.4.2 ความชื้น

แผ่นซีเมนต์บอร์ดจากการใช้แกนกัญชงร่วมกับปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานที่ผ่านการทดสอบความหนาแน่นมาแล้ว นำมาเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 103±2 องศาเซลเซียส จนมีน้ำหนักคงที่ คือ น้ำหนักของแผ่นซีเมนต์บอร์ดที่ชั่ง 2 ครั้ง ห่างกัน 6 ชั่วโมง ต่างกันไม่เกินร้อยละ 0.1 แล้วปล่อยให้แผ่นซีเมนต์บอร์ดเย็นตัวลงและทำการชั่งน้ำหนักหาค่าเฉลี่ย

2.4.3 การพองตัวเมื่อแช่น้ำ

นำแผ่นซีเมนต์บอร์ดจากการใช้แกนกัญชงร่วมกับปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานมาวัดความหนาของแผ่นซีเมนต์บอร์ด 44 ตำแหน่ง แล้วหาค่าเฉลี่ยเป็นความหนาก่อนทำการแช่ในน้ำสะอาด โดยนำแผ่นซีเมนต์บอร์ดแช่ในน้ำสะอาดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำมาซับด้วยผ้าสะอาดและปล่อยเอาไว้ให้แห้งครบ 2 ชั่วโมง นำวัดความหนาหลังแช่น้ำและหาค่าเฉลี่ย

2.4.4 ความต้านทานแรงดัด

วางแผ่นซีเมนต์บอร์ดจากการใช้แกนกัญชงร่วมกับปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานบนแท่นรองรับของเครื่องกด โดยให้แรงกดกระทำบนจุดกึ่งกลางของแผ่นซีเมนต์บอร์ด โดยมีอัตราการเพิ่มแรงกดอย่างสม่ำเสมอและใช้เวลาตั้งแต่เริ่มกดจนกระทั่งแผ่นซีเมนต์บอร์ดแตกหักต้องไม่น้อยกว่า 30 วินาทีแต่ไม่เกิน 120 วินาที การหาค่าความต้านทางแรงดัดแสดงดังสมการที่ 1

2.4.5 ความต้านทานแรงดึงตั้งฉากที่ผิวหน้า

เตรียมแผ่นซีเมนต์บอร์ดจากการใช้แกนกัญชงร่วมกับปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน ขนาด 5×5 เซนติเมตร เพื่อติดกับแผ่นเหล็กเพลท ขนาด 5×5 เซนติเมตร ที่เชื่อมติดกับเหล็กข้ออ้อย DB 12 ความยาว 30 เซนติเมตร โดยใช้กาวสังเคราะห์อีพล็อกซี่ที่มีแรงยึดมากกว่าแรงยึดในตัวแผ่นซีเมนต์บอร์ดและนำไปเข้าเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine, UTM) ซึ่งจะให้แผ่นซีเมนต์บอร์ดแยกออกจากกันในชั้นไส้ อัตราการเพิ่มแรงดึงต้องสม่ำเสมอและใช้เวลาไม่น้อยกว่า 30 วินาทีแต่ไม่เกิน 120 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 3

รูปที่ 3 ทดสอบความต้านทานแรงดึงตั้งฉาก

$$f = \frac{3Wl}{2bf^2} \quad (1)$$

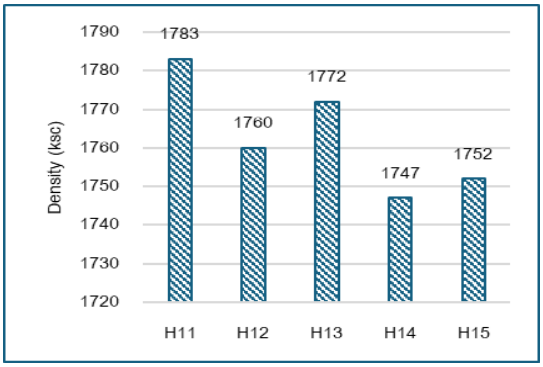
เมื่อ f คือ ความต้านแรงดัด เป็นเมกะพาสคัล
W คือ แรงกดสูงสุดที่ชิ้นทดสอบรับได้ เป็นนิวตัน
l คือ ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของแท่นรองรับ เป็นมิลลิเมตร
b คือ ความกว้างของชิ้นทดสอบ เป็นมิลลิเมตร
d คือ ความหนาเฉลี่ยของชิ้นทดสอบ เป็นมิลลิเมตร

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.005

3. ผลการทดสอบ

3.1 ความหนาแน่น

ค่าการทดสอบความหนาแน่นของแผ่นซีเมนต์บอร์ดจากการใช้แกนกัญชงร่วมกับปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน แสดงดังรูปที่ 4 ที่ตัวอย่าง H11 มีค่าความหนาแน่น 1,783 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งมีค่ามากกว่าที่มาตรฐาน มอก.878-2566 ได้กำหนดเอาไว้ พบว่าค่าความหนาแน่นของแผ่นซีเมนต์บอร์ดที่มีการผสมแกนกัญชง จะทำให้แผ่นซีเมนต์บอร์ดมีความหนาแน่นที่สูงขึ้น เมื่อเทียบกับมาตรฐาน มอก.878-2566 ที่กำหนดให้มีค่าระหว่าง 1,100 ถึง 1,300 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยมีความหนาแน่นสูงกว่าถึงเกือบ 1.3 เท่า จากที่มาตรฐานกำหนด ทั้งนี้เป็นเพราะความถ่วงจำเพาะของส่วนผสมที่ค่อนข้างสูง ได้แก่ ปูนซีเมนต์ เท่ากับ 2.94, ทราย เท่ากับ 2.67และแกนกัญชง เท่ากับ 0.6 แตกต่างจากแผ่นชิ้นไม้อัดซีเมนต์ทั่วไปที่มีส่วนผสมหลักเป็นชิ้นไม้ มีความถ่วงจำเพาะเพียง 0.6 ถึง 1.1 [13] จากงานวิจัยของ Ardanuy และคณะ [14] ได้ยืนยันถึงความหนาแน่นที่สูงขึ้นของวัสดุที่ผสมเส้นใยพืช โดยเฉพาะการใช้เส้นใยพืช เช่น เส้นใยจากเซลลูโลส หรือฟางข้าว [8] ในวัสดุซีเมนต์ที่ทำให้วัสดุมีความแข็งแรงและความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ส่วนผลแนวโน้มของค่าความหนาแน่นไม่ได้เป็นไปในทิศทางเดียวกันอันเป็นผลเนื่องมาจาก การกระจายตัวของแกนกัญชงในส่วนผสมอาจไม่สม่ำเสมอ ทำให้บางพื้นที่มีความหนาแน่นสูงกว่าหรือบางกว่าบริเวณอื่น ส่งผลให้ความหนาแน่นของแต่ละตัวอย่างตัวอย่างมีค่าแตกต่างกัน เพียงเล็กน้อยซึ่งอยู่ในช่วง 1,747 - 1,783 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

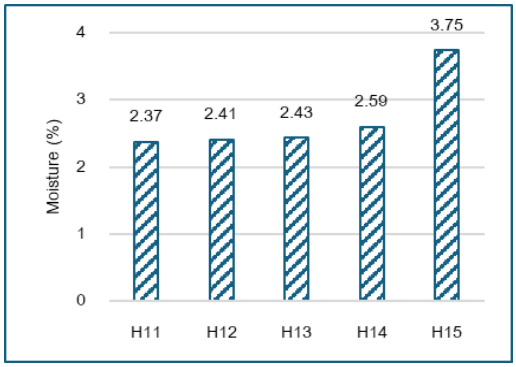


รูปที่ 4 ความหนาแน่นของแผ่นซีเมนต์บอร์ดจากการใช้แกนกัญชงร่วมกับปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน ที่อายุการบ่ม 28 วัน

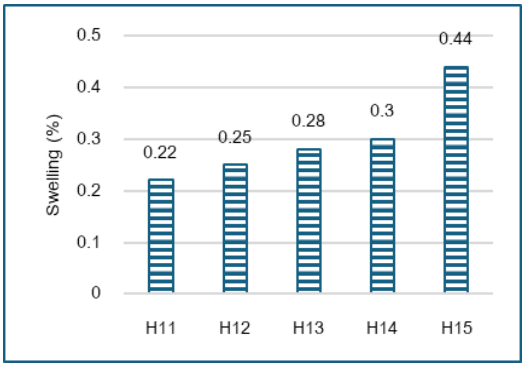
3.2 ความชื้น

รูปที่ 5 แสดงค่าความชื้นของแผ่นซีเมนต์บอร์ดจากการใช้แกนกัญชงร่วมกับปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน พบว่ามีค่าความชื้นอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 2.37 ถึง 3.75 ซึ่งเป็นค่าความชื้นที่มีค่าไม่มากนักและเป็นไปตามที่มาตรฐาน มอก.878-2566 ได้กำหนดเอาไว้ ระหว่างร้อยละ 9 ถึง 15 จากการทดสอบดังกล่าวสังเกตได้ว่าค่าความชื้นของแผ่นซีเมนต์บอร์ดจากการใช้แกนกัญชงร่วมกับปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเล็กน้อย จากปริมาณแกนกัญชงที่ผสมภายในแผ่นซีเมนต์บอร์ด เป็นผลมาจากลักษณะของแกนกัญชงที่มีรูพรุนอยู่บ้าง [15] ทำให้มีการสะสมความชื้นอยู่ภายในแผ่นซีเมนต์บอร์ด แต่ค่าความชื้นดังกล่าวยังมีค่าไม่สูงมากและใกล้เคียงกัน โดยมีค่าความชื้นเท่ากับร้อยละ 2.37 ที่อัตราส่วนแกนกัญชง 0.11 หากการเก็บตัวอย่างหรือการบ่มแผ่นซีเมนต์บอร์ดอยู่ในสภาพแวดล้อมที่ความชื้นสัมพัทธ์ที่แตกต่างกัน จะส่งผลต่อค่าความชื้นของตัวอย่างได้ส่งผลให้ความชื้นที่ได้มีค่าที่แตกต่างกัน [6]

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.005



รูปที่ 5 ความชื้นของแผ่นซีเมนต์บอร์ดจากการใช้แกนกัญชงร่วมกับปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน ที่อายุการ บ่ม 28 วัน



รูปที่ 6 การพองตัวเมื่อแช่น้ำของแผ่นซีเมนต์บอร์ดจากการใช้แกนกัญชงร่วมกับปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน ที่อายุการบ่ม 28 วัน

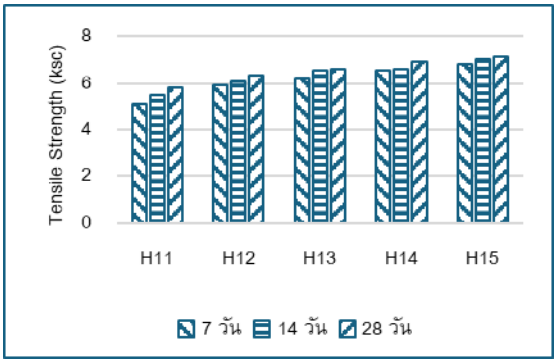
3.3 การพองตัวเมื่อแช่น้ำ

รูปที่ 6 แสดงผลลัพธ์ค่าการพองตัวทั้งหมดยังมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 0.22 ถึง 0.44 ตามมาตรฐาน มอก. 878-2566 โดยได้กำหนดเอาไว้ว่าจะต้องมีค่าการพองตัว ไม่เกินร้อยละ 2 จากผลการทดสอบการพองตัวเมื่อแช่น้ำของแผ่นซีเมนต์บอร์ดจากการใช้แกนกัญชงร่วมกับปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามปริมาณแกนกัญชงที่ผสมลงไป โดยมีค่าการพองตัวร้อยละ 0.22 ที่อัตราส่วนแกนกัญชง 0.11 ซึ่งเป็นค่าที่ผ่านตามมาตรฐาน มอก.878-2566 ทั้งนี้สมบัติด้านการพองตัวเมื่อแช่น้ำ ยังมีความสำคัญต่อการนำมาใช้เป็นผนังภายนอกอาคารที่ต้องสัมผัสกับฝนและความชื้นอย่างมาก [16] โดยจากการศึกษางานวิจัยของ Karimah และคณะ [17] แสดงให้เห็นว่า การใช้วัสดุชีวภาพ เช่น แกนกัญชง หรือ การใช้กากกะลามะพร้าว [3] มีผลในการลดการดูดซึมความชื้นและการพองตัวของซีเมนต์บอร์ด ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในงานวิจัยนี้

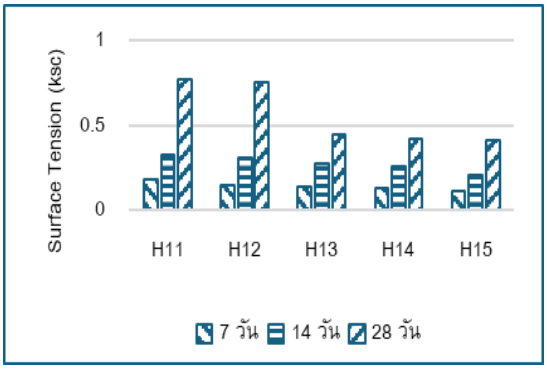
3.4 ความต้านทานแรงดัด

จากผลการทดสอบแผ่นซีเมนต์บอร์ดจากการใช้แกนกัญชงร่วมกับปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน แสดงดังรูปที่ 7 มีค่าการต้านทานแรงดัดเท่ากับ 5.18, 5.95, 6.24, 6.51 และ 6.81 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร สำหรับตัวอย่าง H11 H12 H13 H14 และ H15 ตามลำดับ ที่อายุ 7 14 และ 28 วัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแกนกัญชงที่ผสมไปมีส่วนทำให้ความต้านทานแรงดัดเพิ่มมากขึ้น ที่อายุ 7 14 และ 28 วัน ซึ่งเป็นผลมาจากแกนกัญชงที่มีหน้าที่เป็นมวลรวมในแผ่นซีเมนต์บอร์ดที่มีความยืดหยุ่นมากกว่ามวลรวมธรรมชาติทำให้รับแรงดัดได้มากกว่ามวลรวมปกติ [18] ปริมาณแกนกัญชงที่เพิ่มขึ้นในระดับที่เหมาะสมช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นของวัสดุ ทำให้แรงดัดเพิ่มขึ้นในช่วงแรก อย่างไรก็ตาม หากเพิ่มแกนกัญชงมากเกินไปอาจทำให้โครงสร้างวัสดุอ่อนแอลงและแรงดัดลดลงตามปริมาณกัญชงที่ใช้

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.005



รูปที่ 7 ความต้านทานแรงดัดของแผ่นซีเมนต์บอร์ดจากการใช้แกนกัญชงร่วมกับปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน ที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน



รูปที่ 8 ความต้านทานแรงดึงตั้งฉากที่ผิวหน้าของแผ่นซีเมนต์บอร์ดจากการใช้แกนกัญชงร่วมกับปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน ที่อายุการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน

3.5 ความต้านทานแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า

จากผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าของแผ่นซีเมนต์บอร์ดจากการใช้แกนกัญชงร่วมกับปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน แสดงดังรูปที่ 8 พบว่าปริมาณแกนกัญชงที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าลดลง ทั้งนี้เป็นผลมาจากแกนกัญชงมีรูพรุน เนื่องจากแกนกัญชงมีรูพรุน ซึ่งลดการยึดเกาะระหว่างปูนซีเมนต์และแกนกัญชง [19] อีกทั้งเมื่อรูพรุนเพิ่มขึ้น พื้นที่สัมผัสระหว่างซีเมนต์และแกนกัญชงลดลง ทำให้แรงดึงตั้งฉากต่ำลง ทำให้มีค่าต่ำกว่าตามมาตรฐาน มอก.878-2566 ที่กำหนดไว้ว่าต้องสูงกว่า 0.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร สอดคล้องกับงานวิจัยงานวิจัยของ Silva และคณะ [20] ได้สนับสนุนผลการทดลองนี้ โดยระบุว่าการใช้เส้นใยธรรมชาติในวัสดุซีเมนต์มีผลทำให้ความต้านทานแรงดึงลดลง เนื่องจากการยึดเกาะระหว่างเส้นใยและซีเมนต์ไม่ได้แข็งแรงเท่ากับวัสดุสังเคราะห์

3.6 ความคุ้มค่าและความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

ตารางที่ 2 แสดงต้นทุนรวมต่อหน่วยของแผ่นซีเมนต์บอร์ดที่ผลิตจากแกนกัญชงเพิ่มขึ้นตามปริมาณของแกนกัญชงที่ใช้ในแต่ละอัตราส่วน โดยตัวอย่าง H11 มีต้นทุนต่ำสุดที่ 135 บาทต่อหน่วย ขณะที่ตัวอย่าง H15 มีต้นทุนสูงสุดที่ 143 บาทต่อหน่วย ต้นทุนการผลิตของแผ่นซีเมนต์บอร์ดปกติจะอยู่ที่ประมาณ 130 บาทต่อหน่วย ซึ่งต่ำกว่าซีเมนต์บอร์ดจากแกนกัญชงเล็กน้อย ต้นทุนที่สูงขึ้นของแผ่นซีเมนต์บอร์ดจากแกนกัญชงเกิดจากการใช้วัตถุดิบที่มีราคาสูงกว่า เช่น แกนกัญชง ซึ่งมีต้นทุนสูงกว่าเส้นใยไม้หรือชิ้นไม้ที่ใช้ในซีเมนต์บอร์ดปกติ อย่างไรก็ตาม ต้นทุนของแกนกัญชงยังต่ำกว่าแร่ใยหิน (Asbestos) ที่ถูกเลิกใช้เนื่องจากผลกระทบด้านสุขภาพและสิ่งแวดล้อม [3]

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.005

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบต้นทุนและสมบัติระหว่างแผ่นซีเมนต์บอร์ดจากแกนกัญชงในอัตราส่วนต่าง ๆ และซีเมนต์บอร์ดปกติ

รายการเปรียบเทียบ	**H11**	**H12**	**H13**	**H14**	**H15**	**ซีเมนต์บอร์ดปกติ**
ต้นทุนปูนซีเมนต์ (บาท/หน่วย)	100	100	100	100	100	100
ต้นทุนแกนกัญชง (บาท/หน่วย)	20	22	24	26	28	0
ต้นทุนทราย (บาท/หน่วย)	10	10	10	10	10	10
ต้นทุนรวมวัตถุดิบ (บาท/หน่วย)	135	137	139	141	143	110
ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)	1,783	1,760	1,772	1,747	1,752	1,200
ความชื้น (%)	2.37	2.41	2.43	2.59	3.75	4
การพองตัวเมื่อแช่น้ำ (%)	0.22	0.25	0.28	0.30	0.44	2
ความต้านทานแรงดัด (กก./ตร.ซม.) ที่อายุ 7 วัน	5.18	5.95	6.24	6.51	6.81	9
ความต้านทานแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า (กก./ตร.ซม.) ที่อายุ 7 วัน	0.18	0.15	0.14	0.13	0.11	0.5
ความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม	สูง	สูง	สูง	สูง	สูง	ปานกลาง

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.005

จากผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบแผ่นซีเมนต์บอร์ดจากแกนกัญชงกับแผ่นซีเมนต์บอร์ดปกติในตารางที่ 2 พบว่า ตัวอย่าง H11 มีความคุ้มค่ามากที่สุดจากอัตราส่วนผสมตัวอย่าง H12 H13 H14 และ H15 เมื่อพิจารณาจากต้นทุนการผลิตและคุณสมบัติที่ได้การผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐาน มอก.878-2566 ในด้าน ความชื้นและการพองตัวเมื่อแช่น้ำ อีกทั้งแผ่นซีเมนต์บอร์ดจากแกนกัญชงในอัตราส่วนนี้ยังคงรักษาความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม การใช้แกนกัญชงช่วยลดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์และส่งเสริมการใช้วัสดุชีวภาพซึ่งเป็นทรัพยากรที่ยั่งยืนและปลอดภัยต่อสุขภาพ การศึกษาจาก Pavithra และคณะ [21] พบว่าการใช้เส้นใยธรรมชาติ เช่น ใยปาล์ม ใยมะพร้าว [3] หรือ ฟางข้าว [8] ในการพัฒนาซีเมนต์บอร์ดสามารถช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับอุตสาหกรรมวัสดุก่อสร้างในปัจจุบัน

4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาสมบัติของแผ่นซีเมนต์บอร์ดจากแกนกัญชงร่วมกับปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพื่อเป็นวัสดุก่อสร้างสามารถสรุปได้ ดังนี้

1. จากผลการทดสอบเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผลิตแผ่นซีเมนต์บอร์ดจากการใช้แกนกัญชงร่วมกับปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพื่อเป็นวัสดุก่อสร้างนั้น พบว่าตัวอย่าง H11 (ปูนซีเมนต์ : ทราย : แกนกัญชง = 1 : 2 : 0.11) เป็นอัตราส่วนผสมของแผ่นซีเมนต์บอร์ดจากแกนกัญชงที่เหมาะสมที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนผสมอื่นๆ ซึ่งปรากฏผลของความหนาแน่นสูงถึง 1,783 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และค่าความชื้นเพิ่มขึ้นร้อยละ 2.37 รวมไปถึงมีค่าการพองตัวเมื่อแช่น้ำมีค่าที่ต่ำถึง ร้อยละ 0.22 ส่วนค่ากำลังรับแรงดัด และแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าเท่ากับ 5.18 และ 0.18 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุ 7 วัน ตามลำดับ

2. ในส่วนสมบัติต่าง ๆ ของแผ่นซีเมนต์บอร์ดจากการใช้แกนกัญชงร่วมกับปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพื่อเป็นวัสดุก่อสร้าง ความหนาแน่นของแผ่นซีเมนต์บอร์ดที่ผลิตจากแกนกัญชงสูงกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ การพองตัวเมื่อแช่น้ำ และ ค่าความชื้น มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามปริมาณแกนกัญชงที่เพิ่มขึ้นโดยมีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีคุณสมบัติกันความชื้นที่ดี แรงดัด เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณแกนกัญชงในระดับที่เหมาะสม ส่วนแรงดึงตั้งฉาก ลดลงตามการเพิ่มของปริมาณแกนกัญชง เนื่องจากลักษณะรูพรุนของแกนกัญชงที่ลดการยึดเกาะระหว่างวัสดุ

3. แผ่นซีเมนต์บอร์ดจากแกนกัญชงในตัวอย่าง H11 เป็นตัวเลือกที่เหมาะสมที่สุดจากตัวอย่างที่ทดสอบทั้งหมดเมื่อพิจารณาจากความคุ้มค่าและคุณสมบัติทางกายภาพที่ได้ พบว่าปริมาณแกนกัญชงที่เหมาะสมสามารถนำไปพัฒนาสมบัติบางประการ แม้ต้นทุนการผลิตจะสูงกว่าซีเมนต์บอร์ดปกติเล็กน้อย แต่คุณสมบัติทางกายภาพและความสามารถในการทนความชื้นที่ดีกว่า ทำให้เป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในอุตสาหกรรมก่อสร้างที่ต้องการวัสดุที่มีประสิทธิภาพทนต่อความชื้นและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับเงินทุนอุดหนุนการวิจัยภายใต้แผนปฏิบัติการด้านวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม (ววน.) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2566 โครงการวิจัยพื้นฐาน กรอบการวิจัย “ระบบนิเวศสีเขียว” สัญญาทุน

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.005

เลขที่ น สกสว. 10/2566 และขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตอุเทนถวาย ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่และอุปกรณ์ในการทำวิจัยและส่งเสริมสนับสนุนในการทำวิจัยตลอดโครงการ

6. เอกสารอ้างอิง

[1] TIS 878-2566, Cement Bonded Particle Boards: High Density, 2023. (in Thai).

[2] S. Phantavee, T. Sinsiri, R. Somna, S. Akkaraikraisri and S. Khuptharat, Preliminary properties of concrete mixed with hemp core replacing coarse aggregate, The 12th Annual Concrete Technical Conference (ACC-Thailand 2017), Proceeding, 2017.

[3] P. Veeranukul and K. Suviro, Development of cement board sheets from coconut shell ash for energy and environmental conservation, Thesis, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Thailand, 2015.

[4] E. Small and D. Marcus, Hemp: A new crop with new uses for north America, 2nd Ed., ASHS Press Inc., VA, USA, 2002.

[5] T. Jami, S.R. Karade and L.P. Singh, A review of the properties of hemp concrete for green building applications, Journal of Cleaner Production, 2019, 239, 117852.

[6] S. Phantavee, Preliminary properties of concrete mixed with hemp core replacing coarse aggregate, The 12th Annual Concrete Technical Conference (ACC-Thailand 2017), Proceeding, 2017.

[7] W. Thamcharee, Biocomposite materials, Bio and Nano, 40, 34-37. (in Thai).

[8] S. Inthata and C. Khankham, Use of rice straw for the production of thermal insulating cement boards, Thesis, Mahasarakham Rajabhat University, Thailand, 2019.

[9] https://urbannext.net/hemp-concrete/ (Accessed on 9 April 2023)

[10] TIS 2594-2567, Hydraulic Cement, 2024. (in Thai).

[11] W. Kroehong and S. Haruehansapong, Mechanical properties, thermal conductivity, and microstructure of hemp concrete, Science and Engineering Connect, 2020, 43, 91-102. (in Thai).

[12] ASTM C33, Standard Specification for Concrete Aggregates, ASTM International, PA, 2018.

[13] A.A. Pablo, Wood cement boards from wood wastes and fast-growing plantation species for low-cost housing, The Philippine Lumberman, 1989, 35, 8-53.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.005

[14] M. Ardanuy, J. Claramunt, and R.D. Toledo Filho, Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research, Construction and Building Materials, 2015, 79, 115-128.

[15] T. Sinsiri, S. Phantavee and P. Ratchakham, Production process of hemp concrete from hemp core mixed with fly ash, National Science and Technology Development Agency (NSTDA), 2017. (in Thai).

[16] S. Inthata, S. Attachariyakul and R. Chirawich, Study on the selection of building materials for energy-efficient homes, The 2nd Thailand Energy Network Conference (ENETT-Thailand 2017), Proceeding, 2006, 90-99.

[17] A. Karimah, M. Ridho, S.S. Munawar, D.S. Ismadi, R. Damayanti, B. Subiyanto, W. Fatriasari and A. Fudholi, Biomass waste materials through extrusion-based additive manufacturing: A systematic literature review, Journal of Materials Research and Technology, 2021, 13, 2442-2458.

[18] T. Pakkunwarakit, P. Phuthipairoj, W. Unjittichai and P. Thithawipat, Thermal Resistance Efficiency of Building Insulation Material from Agricultural Waste, Journal of Architectural/Planning Research and Studies, 2006, 4, 3-13. (in Thai).

[19] S. Phantavee, Development of concrete using hemp core as coarse aggregate by improving the quality with aluminum sulfate and calcium hydroxide and the impact of fly ash on hemp concrete, Thesis, Suranaree University of Technology, Thailand, 2017.

[20] G. Silva, S. Kim, R. Aguilar and J. Nakamatsu, Natural fibers as reinforcement additives for geopolymers – A review of potential eco-friendly applications to the construction industry, Sustainable Materials and Technologies, 2020, 23, e00132.

[21] L. Chen, Z. Chen, Z. Xie, L. Wei, J. Hua, L. Huang and P.S. Yap, Recent developments on natural fiber concrete: A review of properties, sustainability, applications, barriers, and opportunities, Developments in the Built Environment, 2023, 16, 100255.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.006

บทความวิจัย

การออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กแบบยื่นที่เหมาะสมด้วยอัลกอริทึมแบ่งครึ่งช่วง

กิตติศักดิ์ บรรณสาร และ อลงกรณ์ ละม่อม*

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: alongkorn_lamom@msu.ac.th

วันที่รับบทความ: 30 สิงหาคม 2567; วันที่ทบทวนบทความ: 23 มกราคม 2568; วันที่ตอบรับบทความ: 29 มกราคม 2568
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 22 เมษายน 2568

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้เสนอการออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กแบบยื่นโดยใช้วิธีอัลกอริทึมแบ่งครึ่งช่วงตามวิธีหน่วยแรงใช้งานของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (มาตรฐาน วสท. 011007-19) ในการออกแบบด้วยอัลกอริทึมนี้ จะมีการประเมินราคารวมของบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กแบบยื่น โดยอิงจากราคาวัสดุก่อสร้างและค่าแรงงานในปัจจุบัน การทดสอบเปรียบเทียบระหว่างวิธีอัลกอริทึมแบ่งครึ่งช่วงกับวิธีฮิลไคลมิงอัลกอริทึม แบ่งเป็น 3 ตัวอย่าง ผลการศึกษาพบว่า ทั้งสองอัลกอริทึมสามารถค้นหาคำตอบที่เหมาะสมได้เหมือนกัน แต่ต่างกันในจำนวนรอบการทำงาน โดยวิธีอัลกอริทึมแบ่งครึ่งช่วงมีแนวโน้มการลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมได้อย่างมีประสิทธิภาพดีกว่าวิธีฮิลไคลมิงอัลกอริทึม โดยสามารถลดจำนวนรอบการทำงานได้มากกว่า คิดเป็นร้อยละ 57.30 64.23 และ 71.63 ตามลำดับ เมื่อทดสอบซ้ำ 30 ครั้ง พบว่ารอบการทำงานเฉลี่ยของวิธีอัลกอริทึมแบ่งครึ่งช่วงเร็วกว่าวิธีฮิลไคลมิงอัลกอริทึม ร้อยละ 28.56 42.94 และ 49.41 ตามลำดับ ดังนั้นวิธีอัลกอริทึมแบ่งครึ่งช่วงจึงสามารถนำมาใช้ในการออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กแบบยื่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: การออกแบบที่เหมาะสม; อัลกอริทึมแบ่งครึ่งช่วง; ฮิลไคลมิงอัลกอริทึม; บันไดคอนกรีตแบบยื่น

บทความวิจัย

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.006

Optimum Design of Reinforced Concrete Cantilever Stair Using Bisection Algorithm

Kittisak Bannasarn and Alongkorn Lamom*

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University

* Corresponding author, E-mail: alongkorn_lamom@msu.ac.th

Received: 30 August 2024; Revised: 23 January 2025; Accepted: 29 January 2025
Online Published: 22 April 2025

Abstract: This study proposes the design of a reinforced concrete cantilever stair using the Bisection Algorithm according to the Working Stress Design Method of the Engineering Institute of Thailand (EIT Standard 011007-19). In the design using this algorithm, the total cost of the cantilever stair will be estimated based on current construction material and labor prices. The experiment compared the performance of the Bisection Algorithm with the Hill Climbing Algorithm across three samples. The results indicated that both algorithms can find feasible solutions, but they differed in the number of iterations required. The Bisection Algorithm showed higher efficiency in converging to an optimal solution, reducing the number of iterations by 57.30, 64.23, and 71.63%, respectively, compared to the Hill Climbing Algorithm. In 30 repeated tests, the Bisection Algorithm was found to perform faster, reducing the average number of iterations by 28.56, 42.94, and 49.41%, respectively. Therefore, the Bisection Algorithm can be effectively applied in the design of reinforced concrete cantilever staircase.

Keywords: Optimum design; Bisection Algorithm; Hill Climbing Algorithm; Concrete Cantilever Stair

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.006

1. บทนำ

การออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กแบบยื่นเป็นความท้าทายทางวิศวกรรมที่สำคัญ เนื่องจากความซับซ้อนของพฤติกรรมโครงสร้างและขั้นตอนการออกแบบที่ต้องมีการคำนวณหลายขั้นตอน ในอดีตวิศวกรต้องใช้เวลานานในการคำนวณด้วยมือ ซึ่งเพิ่มโอกาสเกิดข้อผิดพลาดและทำให้การหาแบบที่ประหยัดเป็นไปได้ยาก อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันความก้าวหน้าในเทคโนโลยีการประมวลผลความเร็วสูงและการพัฒนาขั้นตอนวิธีเชิงคำนวณที่มีประสิทธิภาพได้เปิดโอกาสให้มีการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างได้อย่างแม่นยำและมีเหตุผลมากขึ้น [1] โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การประยุกต์ใช้อัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสม (Optimization Algorithm) ในการออกแบบโครงสร้างอาคาร ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย [2] ด้วยความสามารถในการทำงานแบบอัตโนมัติและรวดเร็ว ช่วยให้วิศวกรสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพ ลดเวลาในการออกแบบ และลดต้นทุนการก่อสร้างโดยรวม นำไปสู่การสร้างโครงสร้างที่มีประสิทธิภาพและประหยัดมากขึ้น [3]

ในปัจจุบันมีหลายงานวิจัยที่ศึกษาการออกแบบโครงสร้างอาคารอย่างเหมาะสม ด้วยการนำอัลกอริทึมมาช่วยในการคำนวณออกแบบโครงสร้างอาคารต่างๆ อาทิ Govindaraj และ Ramasamy [4] ประยุกต์ใช้เจเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm, GA) สำหรับการออกแบบรายละเอียดที่เหมาะสมที่สุดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กแบบต่อเนื่องตามข้อกำหนดมาตรฐานของอินเดีย และCheng [5] ได้นำเจเนติกอัลกอริทึมแบบลูกผสม (Hybrid Genetic Algorithm, GA) มาใช้ในการออกแบบสะพานโครงสร้างเหล็กแบบโค้ง ต่อมา Patchochai และคณะ [6] ได้ศึกษาการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงตามแนวแกนอย่างเหมาะสมด้วยอัลกอริทึมแบ่งครึ่งช่วง (Bisection Algorithm, BA) จากนั้น Tapown และคณะ [7] ใช้ฮิลไคลมิงอัลกอริทึม (Hill Climbing Algorithm, HCA) ซิมูเลเต็ดแอนนีลลิ่งอัลกอริทึม (Simulated Annealing Algorithm, SA) และเจเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm, GA) ออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ต่อมา Francisca และคณะ [8] ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของกำแพงกันดิน โดยใช้อัลกอริทึมฮาร์โมนีเซิร์ช (Harmony Search, HS) ซึ่งผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าความสามารถในการรองรับฐานรากของดินมีผลกระทบอย่างมากต่อต้นทุน จากนั้น Akin และ saka [9] ได้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้อัลกอริทึมฮาร์โมนีเซิร์ช (Harmony Search, HS) ต่อมา Chomchuen และ Lamom [10] ประยุกต์ใช้อัลกอริทึมแบ่งครึ่งช่วงสำหรับออกแบบหน้าตัดคานสะพานคอนกรีตอัดแรงที่เหมาะสม จากนั้น Tapown และ Cheerarot [11] นำการค้นหาแบบแมลงหวี่ (Fruit Fly Optimization, FOA) มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบที่เหมาะสมของฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็ก และ Azizi et al. [12] ได้นำวิธีฮาร์โมนีเสิร์ช (Tribe-Harmony Search, Tribe - HS) ออกแบบที่เหมาะสมที่สุดของโครงสร้างอาคารสูงและอาคารต่ำ ด้วยการพัฒนาขึ้นจากกระบวนการทางดนตรีในการค้นหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด และ Cui et al. [13] ได้ศึกษาวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพวางแนวเสาเข็มสำหรับท่าเทียบเรือ โดยใช้เจเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm, GA)

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.006

จากงานวิจัยที่ผ่านมา [4-13] แม้จะมีการใช้หลากหลายอัลกอริทึมในการออกแบบโครงสร้างอาคาร แต่ยังไม่มีการนำอัลกอริทึมแบ่งครึ่งช่วง (Bisection Algorithm, BA) มาออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กแบบยื่น งานวิจัยนี้จึงทดลองเปรียบเทียบการใช้อัลกอริทึมแบ่งครึ่งช่วง (BA) กับฮิลไคลมิงอัลกอริทึม (HCA) สำหรับการออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กแบบยื่น ตามวิธีหน่วยแรงใช้งาน (WSD) ของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย มาตรฐาน วสท. 011007-19 [14] โดยสร้างโปรแกรมออกแบบด้วย Microsoft Visual Basic 6.0 เพื่อหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดและศึกษาประสิทธิภาพของอัลกอริทึมแบ่งครึ่งช่วง

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

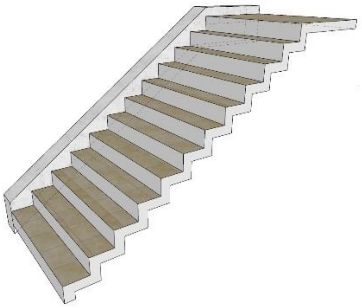
การวิจัยนี้นำเสนออัลกอริทึมแบ่งครึ่งช่วง (BA) สำหรับการออกแบบและคำนวณราคารวมของบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กแบบยื่น เพื่อให้ได้ราคารวมต่ำสุด โดยใช้โปรแกรม Microsoft Visual Basic 6.0 ในการพัฒนาเป็นโปรแกรมช่วยคำนวณและค้นหาคำตอบ การวิจัยใช้คอมพิวเตอร์ที่มีระบบปฏิบัติการ Microsoft Windows 10 หน่วยประมวลผล Intel Core i7-7700HQ RAM 12 GB และซอฟต์แวร์ Microsoft Visual Basic 6.0

2.1 บันไดคอนกรีตเสริมเหล็กแบบยื่น

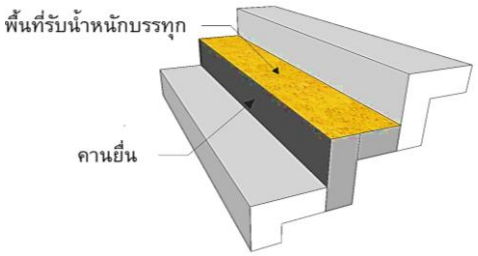
บันไดประเภทนี้ยื่นออกจากคานรองรับบันไดด้านเดียวอาจเป็นแบบท้องเรียบหรือพับผ้า แบบพับผ้านิยมมากกว่าเพราะมีน้ำหนักเบากว่าแบบท้องเรียบ ดังแสดงในรูปที่ 1

บันไดรูปแบบนี้ การรับแรงเหมือนคานยื่น ใช้เหล็กเสริมบนรับโมเมนต์ลบ การออกแบบใช้น้ำหนักบรรทุกเพียงขั้นเดียว ปลายเหล็กเสริมยื่นเข้าในคานรองรับให้ระยะฝังเพียงพอ มีโมเมนต์บิดถ่ายลงสู่คานรองรับ ต้องออกแบบเพื่อต้านทานโมเมนต์บิด น้ำหนักคานแต่ละขั้นคิดจากหน้าตัดรูปตัว L ดังแสดงในรูปที่ 2

รูปที่ 3 เป็นรูปแบบการเสริมเหล็กของบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กแบบยื่นที่มีความหนาพื้นบันไดเท่ากับ t ระยะยื่นเท่ากับ Lc เหล็กเสริมหลักจะเป็นเส้นอยู่บนสุดขนานกับแนวการยื่น เพื่อให้มีความลึกประสิทธิผลในการต้านทานโมเมนต์ดัดส่วนเหล็กเสริมยึดขั้นบันไดจะวางยึดเหล็กเสริมหลักและเหล็กเสริมล่างยึดมุมขั้นบันได

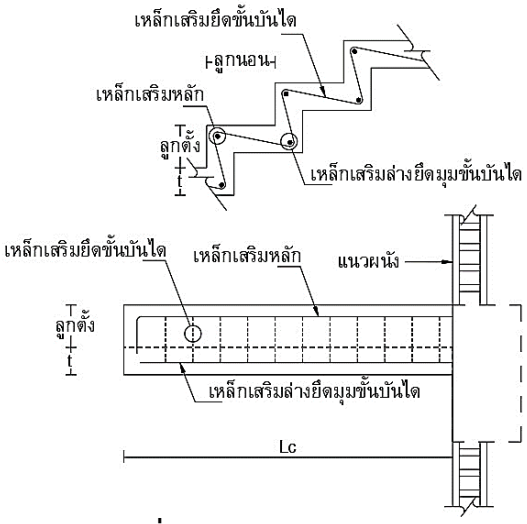


รูปที่ 1 รูปแบบบันได คสล.แบบยื่น



รูปที่ 2 พื้นที่รับน้ำหนักบรรทุก

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.006



รูปที่ 3 รูปแบบการเสริมเหล็ก

2.2 การตรวจสอบความแข็งแรงของหน้าตัด

การตรวจสอบความแข็งแรงของหน้าตัด เมื่อรับน้ำหนักบรรทุก ต้องมีการตรวจสอบความสามารถในการรับโมเมนต์ดัด แรงเฉือน และการแอ่นตัว ซึ่งจะต้องอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ [14,15] ประกอบด้วย

1) ตรวจสอบความสามารถในการรับโมเมนต์ดัดของหน้าตัดบันได โดยพิจารณา

$$M_c \geq M_{max} \quad (1)$$

2) ตรวจสอบปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดึง โดยพิจารณา

$$M_s \geq M_{max} \quad (2)$$

3) ตรวจสอบความสามารถในการรับแรงเฉือนของหน้าตัดบันได โดยพิจารณา

$$V_c \geq V_{max} \quad (3)$$

4) ตรวจสอบการแอ่นตัวสูงสุดเกิดขึ้นที่ปลายของบันไดยื่น โดยพิจารณา [16]

$$y_1 \geq \Delta_T \quad (4)$$

เมื่อ

M_c คือ โมเมนต์ต้านทานโดยคอนกรีต (กก.-ม.)
M_s คือ โมเมนต์ต้านทานโดยเหล็กเสริม (กก.-ม.)
M_{max} คือ โมเมนต์สูงสุดของบันได (กก.-ม.)
V_c คือ แรงเฉือนต้านทานโดยคอนกรีต (กก.)
V_{max} คือ แรงเฉือน ณ หน้าตัดวิกฤติ (กก.)
y_1 คือ ค่าการแอ่นตัวที่ยอมรับได้ (ซม.)
Δ_T คือ ค่าการแอ่นตัวสูงสุดที่เกิดขึ้น (ซม.)

2.3 สมการเป้าหมาย

สมการเป้าหมายของการศึกษานี้ คือ สมการที่ให้ผลรวมราคาวัสดุของบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กแบบยื่น ได้แก่ คอนกรีต เหล็กเสริมคอนกรีต และปริมาณแบบหล่อคอนกรีต รวมถึงค่าแรงงาน ทั้งหมดรวมกันแล้วต้องมีค่าน้อยที่สุด ดังสมการที่ 5

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.006

$$f(x) = \min \sum (V_c C_c + W_s C_s + A_F C_F) \quad (5)$$

เมื่อ

$f(x)$ คือ ราคารวมของบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กแบบยื่น (บาท)

V_c คือ ปริมาตรของคอนกรีต (ม.^{3})

C_c คือ ราคาของคอนกรีตรวมค่าแรงงาน (บาท/ม.^{3})

W_s คือ น้ำหนักรวมของเหล็กเสริม (กก.)

C_sคือ ราคาของเหล็กเสริมรวมค่าแรงงาน (บาท/กก.)

A_F คือ ปริมาณแบบหล่อคอนกรีต (ม.^{2})

C_F คือ ราคาของแบบหล่อคอนกรีตรวมค่าแรงงาน (บาท/ม.^{2})

ในงานวิจัยนี้ใช้ราคาวัสดุเฉพาะพื้นที่ สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามความเหมาะสม ราคาคอนกรีตใช้เป็นราคาคอนกรีตผสมเสร็จ ดังแสดงในตารางที่ 1 ราคาเหล็กเสริมคอนกรีตต่อหน่วย เป็นราคาเฉลี่ยจากแต่ละขนาดตามกำลังครากของเหล็กเสริมคอนกรีต ดังแสดงในตารางที่ 2 ราคาแบบหล่อคอนกรีต

ตารางที่ 1 ราคาคอนกรีตผสมเสร็จและค่าแรงงาน

คอนกรีตผสมเสร็จ (ทรงกระบอกมาตรฐาน)			
กำลังอัดประลัย, f_c' (กก./ซม.^{2})	**ราคา (บาท/ม.^{3})**	**ค่าแรงงาน (บาท/ม.^{3})**	**รวม (บาท/ม.^{3})**
180	1,960	391	2,351
210	2,000	391	2,391
240	2,040	391	2,431
280	2,120	391	2,511
300	2,160	391	2,551
320	2,200	391	2,591

หมายเหตุ: ค่าแรงงานสำหรับโครงสร้างและส่วนประกอบอาคารชั้นเดียว

ตารางที่ 2 ราคาเหล็กเสริมคอนกรีตและค่าแรงงาน

ชนิดเหล็กเสริมคอนกรีต	**ราคา (บาท/กก.)**	**ค่าแรงงาน (บาท/กก.)**	**รวม (บาท/กก.)**
เหล็กเส้นกลม SR24	29.23	4.10	33.33
เหล็กข้ออ้อย SD30	27.89	3.30	31.19

ตารางที่ 3 ราคาแบบหล่อคอนกรีตและค่าแรงงาน

	รายการ	**จำนวน**	**หน่วย**	**ราคา (บาท)**	**รวม (บาท)**
1	**ไม้กระบาก**	0.80	ลบ.ฟ.	590	472
2	**ไม้ยาง**	0.24	ลบ.ฟ.	650	156
3	**ตะปู**	0.20	กก	45	9
4	**ค่าแรงงาน**	1.00	ตร.ม.	133	133
รวมไม้แบบหล่อคอนกรีตเฉลี่ยใช้งาน 80 % (บาท/ม.^{2})					770

หมายเหตุ: ไม้กระบาก ขนาด 1” × 6” - 8” ยาว 2.5 – 6.00 เมตร
2. ไม้ยาง ขนาด $1\frac{1}{2}$” × 3” ยาว 2.50 – 6.00 เมตร

ดังแสดงในตารางที่ 3 [17] ทั้งหมดไม่รวมภาษีมูลค่าเพิ่ม จากสำนักงานพาณิชย์จังหวัดมหาสารคาม ประจำเดือนสิงหาคม 2565 [18] และค่าแรงงานตามบัญชีค่าแรงงาน/ดำเนินการสำหรับการถอดแบบคำนวณราคากลางงานก่อสร้าง [19]

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.006

2.4 ฮิลไคลมิงอัลกอริทึม

ฮิลไคลมิงอัลกอริทึม (Hill Climbing Algorithm, HCA) ถูกเสนอครั้งแรกในปี 1984 โดย Pearl [20] เป็นวิธีการค้นหาข้อมูลที่เหมือนการปีนเขาเพื่อหาทางไปยังยอดเขาโดยเร็วที่สุด อัลกอริทึมนี้ใช้การค้นหาเชิงฮิวริสติก (Heuristic Search) เช่นเดียวกับเจเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm) เพื่อแก้ปัญหาด้านความเหมาะสมหลายๆ ปัญหาอย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพในการหาค่าสูงสุดหรือต่ำสุด คล้ายการไต่ขึ้นและลงเขาในแนวดิ่ง

จากรูปที่ 4 เป็นขั้นตอนการหาคำตอบของฮิลไคลมิงอัลกอริทึม (HCA) มีขั้นตอนการทำงาน ดังนี้

1) กำหนดคำตอบเริ่มต้นตามวิธี HCA ด้วยพารามิเตอร์การออกแบบ เช่น ความสูง ช่วงเสา ความหนาคาน ระยะยื่น หน่วยแรงดึงที่ยอมให้ของเหล็กเสริม กำลังอัดประลัยของคอนกรีต น้ำหนักบรรทุกจร ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก รอบ และความหนาพื้นบันได

2) กำหนดสถานะเริ่มต้น คือความหนาพื้นบันได ขนาดและปริมาณเหล็กเสริม

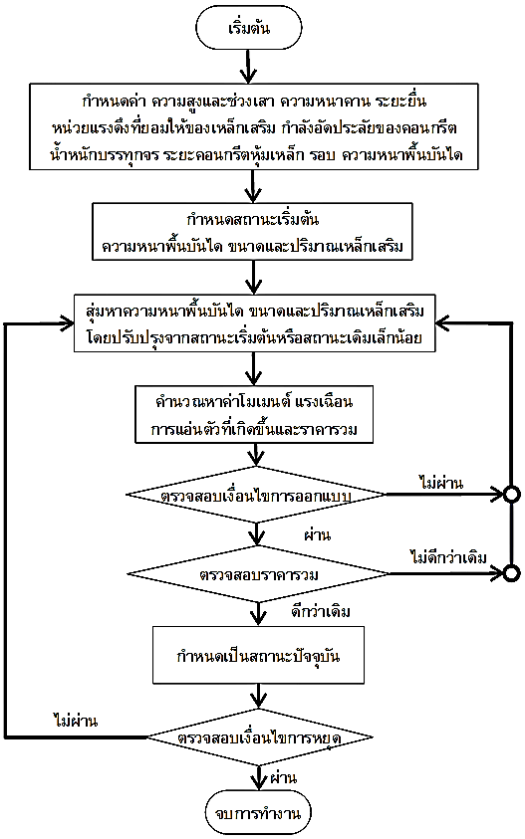
3) สร้างสถานะใหม่โดยปรับความหนาพื้นบันได ขนาดและปริมาณเหล็กเสริม เพิ่มหรือลดเพียงหนึ่งระดับ โดยไม่เกินจำนวนรอบที่กำหนดในขั้นตอนที่ 1

4) ตรวจสอบว่าสถานะใหม่ดีกว่าสถานะเดิมหรือไม่

5) หากไม่ใช่ ปฏิเสธสถานะใหม่และกลับไปทำขั้นตอนที่ 3

6) หากใช่ กำหนดสถานะใหม่เป็นสถานะปัจจุบัน

7) ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุด เมื่อครบค่าที่เหมาะสมกับการทดลองนี้ คือ 1,000 รอบ หากไม่เข้าเงื่อนไข ให้กลับไปทำขั้นตอนที่ 3



รูปที่ 4 ขั้นตอนการออกแบบด้วยการใช้ฮิลไคลมิงอัลกอริทึม (HCA)

2.5 อัลกอริทึมแบ่งครึ่งช่วง

อัลกอริทึมแบ่งครึ่งช่วง (Bisection Algorithm, BA) [21] เป็นการหารากของสมการ โดยวิธีการแบ่งครึ่งช่วง (Bisection Method) ตั้งอยู่บนหลักความจริงที่ว่า ฟังก์ชัน $f(x)$ จะมีเครื่องหมายตรงกันข้ามในขณะ x ที่มีค่าน้อยกว่าและมากกว่าค่าของราก x ที่แท้จริง

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.006

รูปที่ 5 แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชัน $f(x)$ จากการที่มีค่าเป็นลบที่ $x = x_L$ ซึ่งอยู่ทางด้านซ้าย (Left) ของราก $\bar{x}$ ไปเป็นค่าบวกที่ $x = x_R$ ทางด้านขวา (Right) ของราก $\bar{x}$ นั่นคือ สามารถสรุปได้ว่า หากราก $\bar{x}$ นั้นอยู่ระหว่าง x_L และ x_R ที่กำหนดให้แล้วถ้าฟังก์ชัน $f(x_L)$ และ $f(x_R)$ จะมีเครื่องหมายตรงข้ามกันเสมอ

จากรูปที่ 6 เป็นขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึมแบ่งครึ่งช่วง (BA) สรุปเป็นขั้นตอนการทำงานดังนี้

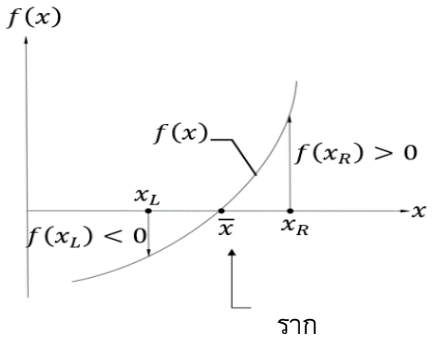
1) กำหนดความหนาสูงสุดและต่ำสุดของพื้นบันได เริ่มต้นด้วยการตั้งค่าความหนากึ่งกลางที่สูงมาก พร้อมทั้งตั้งค่าความหนาดีที่สุดเป็นความหนาสูงสุด

2) คำนวณความหนากึ่งกลางโดยแบ่งครึ่งระหว่างความหนาสูงสุดและต่ำสุด

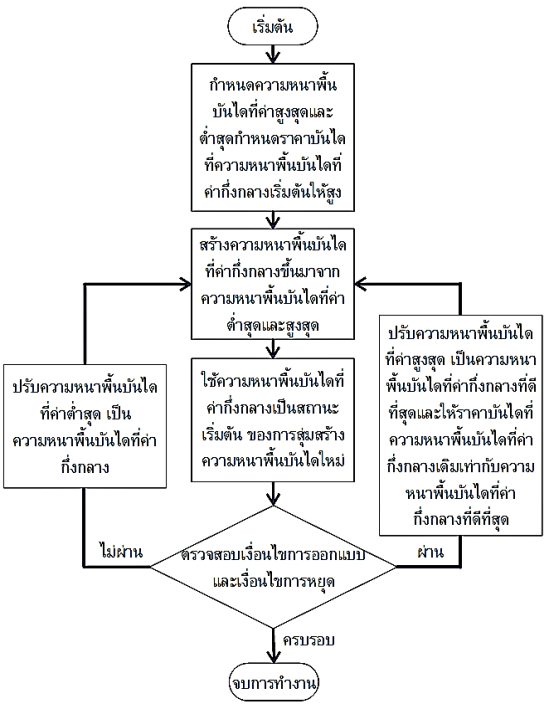
3) สุ่มความหนาใกล้เคียงค่ากึ่งกลางเพื่อสร้างความหนาพื้นบันไดใหม่ แล้วตรวจสอบว่ารับน้ำหนักบรรทุกได้โดยปลอดภัยและประหยัดกว่าความหนาดีที่สุดหรือไม่ หากดีกว่าบันทึกเป็นความหนาที่ดีที่สุด

4) เทียบราคาบันไดที่ความหนากึ่งกลางเดิมกับความหนาที่ดีที่สุด หากราคาถูกกว่า ให้ตั้งค่าความหนาสูงสุดและราคาความหนากึ่งกลางใหม่ตามความหนาที่ดีที่สุด หากไม่ใช่ให้ตั้งค่าความหนาต่ำสุดใหม่ตามความหนาที่ดีที่สุด แล้วทำซ้ำขั้นตอนที่ 2

5) หยุดการทำงานเมื่อครบรอบตามที่กำหนดไว้ สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ได้กำหนดจำนวนรอบการทำงาน 1,000 รอบ ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบนี้



รูปที่ 5 ขั้นตอนการออกแบบด้วยการใช้อัลกอริทึมแบ่งครึ่งช่วง (BA)



รูปที่ 6 ขั้นตอนการออกแบบด้วยการใช้อัลกอริทึมแบ่งครึ่งช่วง (BA)

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.006

2.6 ข้อจำกัดของอัลกอริทึม BA และ HCA

อัลกอริทึมแบ่งครึ่งช่วง (BA) และฮิลไคลมิงอัลกอริทึม (HCA) มีแนวโน้มที่จะติดอยู่ในจุดเหมาะสมเฉพาะที่ (Local Optimum) เนื่องจากการค้นหามุ่งเน้นเฉพาะบริเวณใกล้เคียงกับคำตอบปัจจุบันเท่านั้น ดังนั้น เมื่อพบจุดต่ำสุดหรือสูงสุดเฉพาะที่ อัลกอริทึมจะหยุด ซึ่งถือเป็นข้อจำกัดในการหาจุดเหมาะสมที่สุดเชิงรวม (Global Optimum) ในทางกลับกัน อัลกอริทึมบางประเภท เช่น อัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม (GA) มีจุดเด่นในการกระจายการค้นหาที่กว้าง ทำให้ลดโอกาสในการติดอยู่ในจุดเหมาะสมเฉพาะที่

อย่างไรก็ตาม อัลกอริทึมแบ่งครึ่งช่วงมีจุดเด่นในการลู่เข้าสู่คำตอบได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพโดยเฉพาะเมื่อปัญหามีขอบเขตที่ชัดเจนและไม่จำเป็นต้องใช้การสำรวจแบบสุ่มกระจาย ทั้งนี้เนื่องจากการค้นหาของอัลกอริทึมนี้มีความเป็นระบบและมุ่งเน้นในการหาคำตอบในพื้นที่ใกล้เคียงกับคำตอบปัจจุบัน ตัวอย่างเช่น การออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องการเลือกขนาดวัสดุจากค่าที่ใหญ่ไปหาเล็กเพื่อให้ผ่านเงื่อนไขที่กำหนด ซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้การกระจายตัวหรือการสำรวจที่ซับซ้อนเหมือนปัญหาประเภทอื่น ๆ เช่น การเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุด หรือการจัดตารางงาน

ดังนั้น อัลกอริทึมแบ่งครึ่งช่วงจึงเหมาะสำหรับการเลือกขนาดวัสดุในงานออกแบบโครงสร้าง หรือปัญหาเฉพาะทางที่คล้ายกัน แม้ว่าจะมีข้อจำกัดในการค้นหาเฉพาะบริเวณใกล้เคียง แต่จุดเด่นในการลดเวลาและทรัพยากรในการคำนวณยังคงทำให้อัลกอริทึมนี้เหมาะสมกับงานที่มีข้อกำหนดชัดเจนและมีความซับซ้อนต่ำ

2.7 ตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย

การวิจัยด้วยการทดสอบระบุค่าความสูงเสา 1.50 ม.ช่วงเสา 2.00 ม. กำลังอัดประลัยคอนกรีต 240 กก./ซม.^{2} หน่วยแรงที่ยอมให้ของเหล็กเสริม 3,000 กก./ซม.^{2} ระยะหุ้มคอนกรีต 2.00 ซม. เป็นค่าคงที่ สำหรับน้ำหนักบรรทุกจร และระยะยื่นกำหนดแตกต่างกันแบ่งเป็น 3 ตัวอย่าง คำนวณหาความหนาพื้นบันได และปริมาณเหล็กเสริมที่เหมาะสม เพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของอัลกอริทึม ในตัวอย่างที่แตกต่างกันสำหรับการค้นหาราคารวมต่ำสุด โดยโครงสร้างสามารถรับแรงแบกทานได้อย่างปลอดภัย งานวิจัยนี้จึงศึกษาตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัยตามตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ตัวอย่างทดสอบการออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กแบบยื่น

ที่	น้ำหนักบรรทุกจร (กก./ม.^{2})	ระยะยื่น (ม.)
1	300	2.50
2	400	3.00
3	500	3.50

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผลการทดสอบ

3.1 ตัวอย่างการทดสอบที่ 1

จากตารางที่ 4 ตัวอย่างที่ 1 กำหนดให้น้ำหนักบรรทุกจร 300 กก./ม.^{2} ระยะยื่น 2.50 ม. ได้ผลลัพธ์ในการออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กแบบยื่นด้วยวิธี BA และวิธี HCA ดังแสดงในตารางที่ 5

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.006

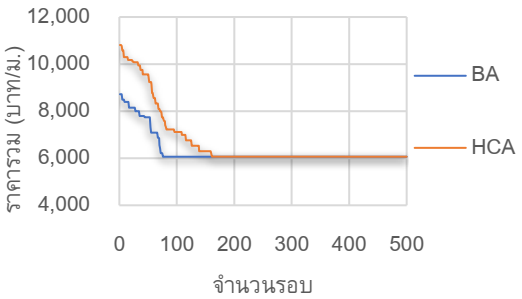
ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบผลการออกแบบด้วยวิธี BA กับวิธี HCA

รายการ	ตัวอย่างที่ 1	
	BA	**HCA**
พื้นหนา (ซม.)	12	12
ขนาดลูกตั้ง (ซม.)	16.67	16.67
ขนาดลูกนอน (ซม.)	25.00	25.00
เหล็กเสริมหลัก (ต่อ 1 ชั้น)	1-DB16	1-DB16
เหล็กเสริมยึดชั้นบันได	RB12 @0.25ม.	RB12 @0.25ม.
เหล็กเสริมล่างยึดมุมชั้นบันได	1-RB12	1-RB12
ราคารวม (บาท/ม.)	6,112.85	6,112.85
รอบคำตอบ (รอบ)	76	178
ร้อยละความแตกต่างรอบ	57.30	

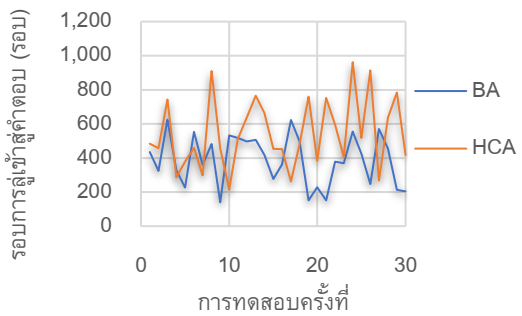
จากตารางที่ 5 เป็นการเปรียบเทียบผลการออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กแบบยื่นของตัวอย่างที่ 1 ด้วยวิธี BA กับวิธี HCA จากผลการศึกษาพบว่าการออกแบบด้วยวิธี BA มีประสิทธิภาพการลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมได้เร็วกว่าวิธี HCA โดยวิธี BA ใช้รอบคำตอบเพียง 76 รอบ ขณะที่วิธี HCA ใช้รอบคำตอบมากถึง 178 รอบ ร้อยละความแตกต่างรอบคิดเป็นร้อยละ 57.30

จากรูปที่ 7 การลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมสำหรับตัวอย่างที่ 1 หากพิจารณาจากเส้นกราฟระหว่างราคารวมและจำนวนรอบ พบว่าวิธี BA เส้นกราฟจะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเป็นการสุ่มขนาดหน้าตัดแบบแบ่งครึ่งช่วงจึงค้นหาคำตอบได้รวดเร็ว สำหรับวิธี HCA เส้นของกราฟมีแนวโน้มลดลงในทุกรอบของการทำงาน เนื่องจากเป็นการสุ่มขนาดหน้าตัดเพียงเล็กน้อย เมื่อนำทั้ง 2 วิธีมาเปรียบเทียบการทำงานที่รอบต่างๆ เส้นกราฟวิธี BA แสดงให้เห็นว่ามีการค้นหาคำตอบที่เหมาะสม ที่เร็วกว่าวิธี HCA

จากรูปที่ 8 ผลการทดสอบจำนวน 30 ครั้ง ของทั้งสองอัลกอริทึมสำหรับตัวอย่างที่ 1 พบว่าวิธี BA สามารถค้นหาคำตอบที่เหมาะสมได้เร็วกว่าวิธี HCA จำนวน 22 ครั้ง มีรอบการลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมเฉลี่ยเท่ากับ 388.37 รอบ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ ±146.60 การลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมเฉลี่ยทั้งสองอัลกอริทึมแตกต่างกันร้อยละ 28.56 ดังแสดงในตารางที่ 6



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างราคารวมกับจำนวนรอบตัวอย่างที่ 1



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบที่ใช้ในการทำงานกับการทดสอบแต่ละครั้ง ตัวอย่างที่ 1

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบจำนวน 30 ครั้ง ด้วยวิธี BA กับวิธี HCA ตัวอย่างที่ 1

อัลกอริทึม	BA	HCA
จำนวนรอบเฉลี่ย (รอบ)	388.37	543.63
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	±146.60	±207.01
ร้อยละความต่างรอบเฉลี่ย	28.56	

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.006

3.2 ตัวอย่างการทดสอบที่ 2

จากตารางที่ 4 ตัวอย่างที่ 2 กำหนดให้น้ำหนักบรรทุกจร 400 กก./ม.^{2} ระยะยื่น 3.00 ม. ได้ผลลัพธ์ในการออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กแบบยื่นด้วยวิธี BA และวิธี HCA ดังแสดงในตารางที่ 7

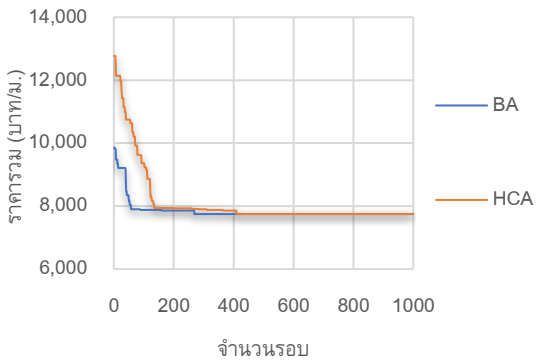
ตารางที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบผลการออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กแบบยื่น สำหรับตัวอย่างที่ 2 โดยใช้วิธี BA และวิธี HCA จากผลการศึกษา พบว่าวิธี BA สามารถลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสมได้อย่างรวดเร็วกว่า โดยใช้รอบการค้นหาเพียง 269 รอบ ขณะที่วิธี HCA ต้องใช้ถึง 752 รอบ คิดเป็นความแตกต่างถึงร้อยละ 64.23 ในรอบคำตอบ การเปรียบเทียบนี้ชี้ให้เห็นถึงประสิทธิภาพของวิธี BA ในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ

จากรูปที่ 9 แสดงให้เห็นถึงการลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมในตัวอย่างที่ 2 เมื่อพิจารณาจากกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างราคารวมและจำนวนรอบของการทำงาน พบว่าวิธี BA นั้นสามารถลดราคารวมลงได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากเป็นการแบ่งขนาดหน้าตัดแบบแบ่งครึ่งช่วง ทำให้สามารถค้นหาคำตอบได้อย่างรวดเร็ว ในขณะที่วิธี HCA มีแนวโน้มจะลดราคารวมลงในทุกๆ รอบของการทำงาน แม้จะใช้การสุ่มขนาดหน้าตัดเพียงเล็กน้อยก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกัน จะเห็นได้ว่ากราฟของวิธี BA แสดงถึงการค้นหาคำตอบที่เหมาะสม ที่เร็วกว่าอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับวิธี HCA

จากรูปที่ 10 แสดงผลการทดสอบจำนวน 30 ครั้ง สำหรับตัวอย่างที่ 2 พบว่าวิธี BA สามารถค้นหาคำตอบที่เหมาะสมได้เร็วกว่าวิธี HCA จำนวน 24 ครั้ง

ตารางที่ 7 การเปรียบเทียบผลการออกแบบด้วยวิธี BA กับวิธี HCA

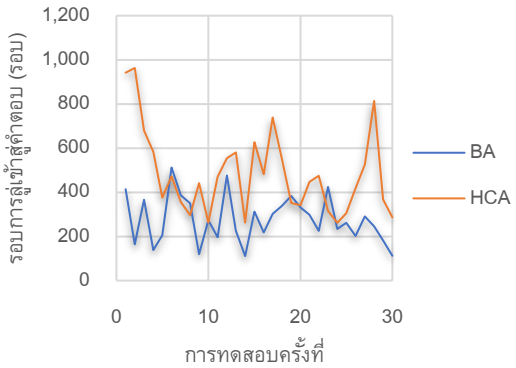
รายการ	ตัวอย่างที่ 2	
	BA	**HCA**
พื้นหนา (ซม.)	16	16
ขนาดลูกตั้ง (ซม.)	16.67	16.67
ขนาดลูกนอน (ซม.)	25.00	25.00
เหล็กเสริมหลัก (ต่อ 1 ขั้น)	3-DB12	3-DB12
เหล็กเสริมยึดขั้นบันได	RB12 @0.25ม.	RB12 @0.25ม.
เหล็กเสริมล่างยึดมุมขั้นบันได	1-RB12	1-RB12
ราคารวม (บาท/ม.)	7,797.39	7,797.39
รอบคำตอบ (รอบ)	269	752
ร้อยละความแตกต่างราคา	64.23	



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างราคารวมกับจำนวนรอบตัวอย่างที่ 2

โดยมีรอบเฉลี่ยในการลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมเท่ากับ 276.70 รอบ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 106.69 นอกจากนี้ การลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมเฉลี่ยของทั้งสองวิธีแตกต่างกันถึงร้อยละ 42.94 ดังแสดงในตารางที่ 8 แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพและความสม่ำเสมอของวิธี BA ที่เหนือกว่าวิธี HCA

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.006



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบที่ใช้ในการทำงานกับการทดสอบแต่ละครั้ง ตัวอย่างที่ 2

ตารางที่ 8 ผลการทดสอบจำนวน 30 ครั้ง ด้วยวิธี BA กับวิธี HCA ตัวอย่างที่ 2

อัลกอริทึม	BA	HCA
จำนวนรอบเฉลี่ย (รอบ)	276.70	484.97
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	±106.69	±192.14
ร้อยละความต่างรอบเฉลี่ย	42.94	

3.3 ตัวอย่างการทดสอบที่ 3

จากตารางที่ 4 ตัวอย่างที่ 3 กำหนดให้น้ำหนักบรรทุกจร 500 กก./ม.^{2} ระยะยื่น 3.50 ม. ได้ผลลัพธ์ในการออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กแบบยื่นด้วยวิธี BA และวิธี HCA ดังแสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบผลการออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กแบบยื่นสำหรับตัวอย่างที่ 3 โดยใช้วิธี BA และวิธี HCA ผลการศึกษาเผยให้เห็นว่าวิธี BA สามารถลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมได้เร็วกว่าวิธี HCA อย่างชัดเจน โดยใช้รอบการค้นหาเพียง 160 รอบ ในขณะที่วิธี HCA ต้องใช้รอบการค้นหาถึง 564 รอบ ความแตกต่างในการลู่เข้าสู่คำตอบคิดเป็นร้อยละ 71.63

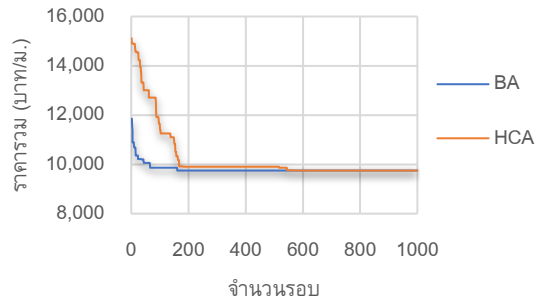
ตารางที่ 9 การเปรียบเทียบผลการออกแบบด้วยวิธี BA กับวิธี HCA

รายการ	ตัวอย่างที่ 3	
	BA	**HCA**
พื้นหนา (ซม.)	21	21
ขนาดลูกตั้ง (ซม.)	16.67	16.67
ขนาดลูกนอน (ซม.)	25.00	25.00
เหล็กเสริมหลัก (ต่อ 1 ขั้น)	4-DB12	4-DB12
เหล็กเสริมยึดขั้นบันได	RB12 @0.25ม.	RB12 @0.25ม.
เหล็กเสริมล่างยึดมุมขั้นบันได	1-RB12	1-RB12
ราคารวม (บาท/ม.)	9,798.61	9,798.61
รอบคำตอบ (รอบ)	160	564
ร้อยละความแตกต่างราคา	71.63	

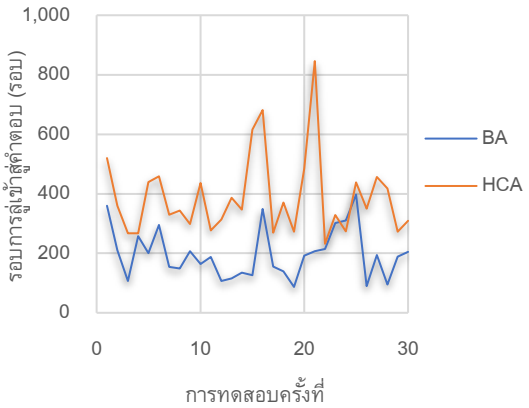
ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่เหนือกว่าของวิธี BA ในการหาคำตอบที่เหมาะสมได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพสูงกว่าวิธี HCA

รูปที่ 11 แสดงให้เห็นการลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมสำหรับตัวอย่างที่ 3 โดยการวิเคราะห์เส้นกราฟระหว่างราคารวมและจำนวนรอบ พบว่าวิธี BA ทำให้เส้นกราฟลดลงอย่างรวดเร็ว ด้วยการสุ่มขนาดหน้าตัดแบบแบ่งครึ่งช่วง ทำให้ค้นหาคำตอบได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ ส่วนวิธี HCA แม้จะมีแนวโน้มลดลงในทุกๆ รอบของการทำงาน แต่การสุ่มขนาดหน้าตัดเพียงเล็กน้อยทำให้การหาคำตอบช้าลง เมื่อเปรียบเทียบกราฟของทั้งสองวิธี จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าวิธี BA สามารถค้นหาคำตอบที่เหมาะสมได้เร็วกว่า HCA อย่างมีนัยสำคัญ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.006



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบที่ใช้ในการทำงานกับการทดสอบแต่ละครั้ง ตัวอย่างที่ 3



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบที่ใช้ในการทำงานกับการทดสอบแต่ละครั้ง ตัวอย่างที่ 3

รูปที่ 12 แสดงผลการทดสอบจำนวน 30 ครั้ง ของทั้งสองวิธีสำหรับตัวอย่างที่ 3 พบว่าวิธี BA มีความโดดเด่นในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสม โดยสามารถทำได้เร็วกว่าวิธี HCA ถึง 29 ครั้ง โดยมีจำนวนรอบเฉลี่ยในการลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมเท่ากับ 196.70 รอบ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ ±83.80 ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างสองวิธีคิดเป็น 49.41% ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่เหนือกว่าของวิธี BA อย่างชัดเจน ดังแสดงในตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ผลการทดสอบจำนวน 30 ครั้ง ด้วยวิธี BA กับวิธี HCA ตัวอย่างที่ 3

อัลกอริทึม	BA	HCA
จำนวนรอบเฉลี่ย (รอบ)	196.70	388.80
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	±83.80	±137.10
ร้อยละความต่างรอบเฉลี่ย	49.41	

ตารางที่ 11 ผลการทดสอบทางสถิติรอบการทำงานเฉลี่ย วิธี BA และ วิธี HCA เมื่อสุ่มตัวอย่างทดสอบจำนวน 10 ครั้ง จากทั้งหมด 30 ครั้ง

ผลการทดสอบทางสถิติ	ตัวอย่าง 1		ตัวอย่าง 2		ตัวอย่าง 3	
	BA	HCA	BA	HCA	BA	HCA
ค่าเฉลี่ย	362	601	282	473	225	378
ค่าต่ำสุด	140	407	112	263	107	267
ค่าสูงสุด	622	913	512	963	397	616
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	±174	±181	±140	±235	±96	±109
ค่าวิกฤติ	2.26		2.26		2.26	
t-test	3.96		2.38		3.07	
ผลทางสถิติ	ปฏิเสธ H_0		ปฏิเสธ H_0		ปฏิเสธ H_0	

ผลการทดสอบทางสถิติ t-test ของรอบการทำงานเฉลี่ยจากกลุ่มตัวอย่างของทั้งสองอัลกอริทึม เมื่อสุ่มตัวอย่างทดสอบจำนวน 10 ครั้ง จากทั้งหมด 30 ครั้ง ดังแสดงในตารางที่ 11 พบว่า ผลการทดสอบปฏิเสธสมมุติฐาน H_0 และยอมรับสมมุติฐานของ H_1 ในทั้ง 3 ตัวอย่างที่ แสดงว่ารอบการลู่เข้าสู่ค่าที่เหมาะสมกลุ่มตัวอย่างวิธี BA มีค่าน้อยกว่าวิธี HCA อย่างมีนัยสำคัญ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.006

ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 นอกจากนี้จากการวิเคราะห์ข้อมูลยังพบว่า การกำหนดความหนาเริ่มต้นที่สูงในวิธี BA ช่วยลดจำนวนรอบการคำนวณในกรณีของตัวอย่างที่มีแรงกระทำเพิ่มขึ้น เนื่องจากความหนาเริ่มต้นใกล้เคียงกับค่าที่เหมาะสมเมื่อเพิ่มน้ำหนักบรรทุกและระยะยื่น ซึ่งส่งผลให้ช่วงค้นหาแคบลงและฟังก์ชันสามารถลู่เข้าสู่คำตอบได้เร็วขึ้น

3.4 อภิปรายผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กแบบยื่นด้วยวิธี BA และวิธี HCA โดยกำหนดเงื่อนไขการออกแบบตามมาตรฐาน วสท. 011007-19 [14] เพื่อให้บันไดคอนกรีตเสริมเหล็กแบบยื่นมีราคารวมต่ำสุดแต่ยังคงมีความมั่นคงแข็งแรงและปลอดภัยต่อการใช้งาน เมื่อเปรียบเทียบการคำนวณในทั้ง 3 ตัวอย่าง พบว่า ทั้งสองอัลกอริทึมสามารถค้นหาคำตอบที่เหมาะสมได้เหมือนกัน แตกต่างกันเพียงจำนวนรอบของการทำงาน โดยบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กแบบยื่นที่ถูกออกแบบด้วยวิธี BA มีแนวโน้มการลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมได้รวดเร็วกว่าวิธี HCA ในทั้ง 3 ตัวอย่าง คิดเป็นร้อยละ 57.30 64.23 และ 71.63 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อทดสอบซ้ำจำนวน 30 ครั้ง พบว่ารอบการทำงานเฉลี่ยของประชากรวิธี BA มีรอบการทำงานที่เร็วกว่าวิธี HCA ร้อยละ 28.56 42.94 และ 49.41 ตามลำดับ นอกจากนี้ ผลการทดสอบทางสถิติ t-test ยังแสดงให้เห็นว่า วิธี BA มีรอบการทำงานเฉลี่ยที่น้อยกว่าวิธี HCA อย่างมีนัยสำคัญ ทั้ง 3 ตัวอย่าง ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

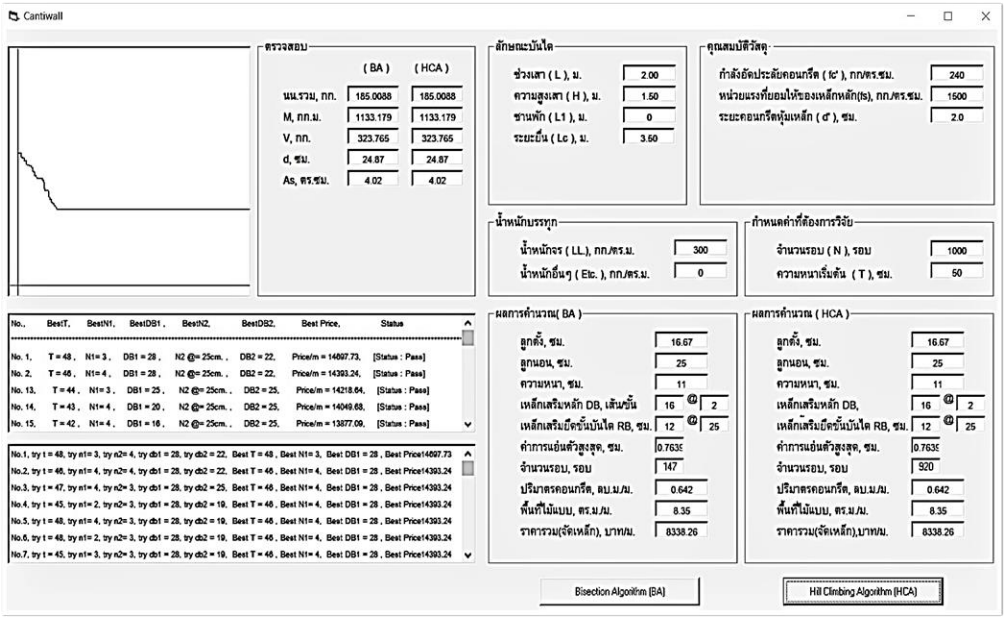
อย่างไรก็ตาม ทั้ง BA และ HCA มีข้อจำกัดในการใช้งานกับปัญหาที่มีจุดเหมาะสมเฉพาะที่ (Local Optimum) หลายจุด เนื่องจากอัลกอริทึมทั้งสองมีแนวโน้มที่จะหยุดการค้นหาเมื่อพบจุดดังกล่าว แทนที่จะหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Global Optimum) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้น วิธีการเหล่านี้จึงเหมาะสมสำหรับปัญหาที่มีจำนวนจุดเหมาะสมเฉพาะที่น้อย หรือในกรณีที่สามารถยอมรับคำตอบที่ใกล้เคียงกับคำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้ ตัวอย่างเช่น งานออกแบบโครงสร้างบางประเภท หรืองานที่มีลักษณะคล้ายกันกับงานวิจัยนี้

3.5 การพัฒนาโปรแกรมออกแบบอัตโนมัติ

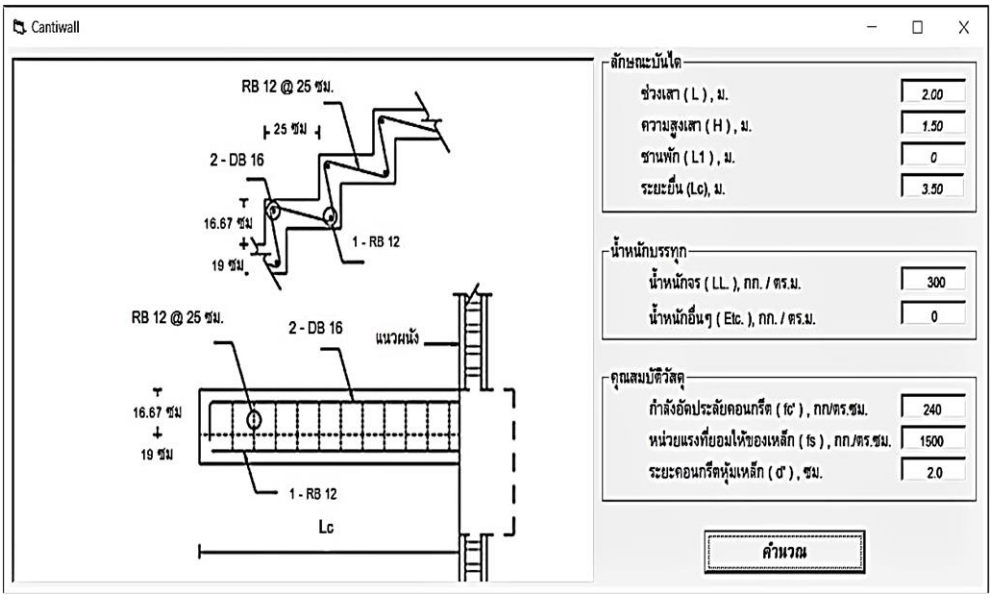
งานวิจัยนี้ได้พัฒนาโปรแกรมสำหรับการออกแบบบันไดยื่นคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยแบ่งออกเป็นสองส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนแรกเป็นการสร้างโปรแกรมต้นแบบเพื่อทดสอบและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานระหว่างฮิลไคลมิงอัลกอริทึมและอัลกอริทึมแบ่งครึ่งช่วง การทดสอบแสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึมแบ่งครึ่งช่วงสามารถลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมได้เร็วกว่าฮิลไคล-มิงอัลกอริทึม หน้าจอแสดงผลดังแสดงในรูปที่ 13

ส่วนที่สองของการพัฒนาเน้นการสร้างโปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้อัลกอริทึมแบ่งครึ่งช่วงเพียงอย่างเดียว เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานของโปรแกรม โดยให้การคำนวณเป็นไปโดยอัตโนมัติ สะดวก รวดเร็วและแม่นยำมากขึ้น หน้าจอแสดงผลของโปรแกรมสำเร็จรูปได้รับการปรับปรุงให้ใช้งานง่าย รองรับการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์การออกแบบได้อย่างยืดหยุ่น ช่วยให้การออกแบบบันไดยื่นคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 14

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.006



รูปที่ 13 หน้าจอแสดงผลโปรแกรมต้นแบบ



รูปที่ 14 หน้าจอแสดงผลโปรแกรมสำเร็จรูป

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.006

4. บทสรุป

ผลการวิจัยแสดงถึงความแตกต่างที่สำคัญระหว่างวิธี HCA และวิธี BA จากการกำหนดค่าเริ่มต้นที่เหมือนกัน โดยวิธี HCA ใช้การสุ่มค่าและสร้างคำตอบใหม่ที่ใกล้เคียงคำตอบเดิม จึงมีคำตอบที่ถูกสร้างมากทำให้ผลลัพธ์แปรปรวนสูง สะท้อนจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่สูงในการทดสอบ 30 ครั้ง ตรงกันข้ามวิธี BA ใช้การสุ่มค่าแล้วแบ่งครึ่งขอบเขตการค้นหา เพื่อลดพื้นที่การค้นหาและระบุช่วงที่มีคำตอบได้รวดเร็วกว่า มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ต่ำกว่า สรุปว่าวิธี BA มีประสิทธิภาพและความสม่ำเสมอในการหาคำตอบที่เหมาะสมกว่าวิธี HCA ในแง่ของการค้นหาคำตอบที่มีความรวดเร็ว

การทดลองใช้วิธี BA ในการออกแบบบันไดคอนกรีตเสริมเหล็กแบบยื่นเพื่อเปรียบเทียบกับวิธี HCA พบว่าวิธี BA มีประสิทธิภาพดีกว่า จึงแนะนำให้นำวิธี BA ไปใช้ออกแบบโครงสร้างอื่น เช่น คาน เสา หรือฐานรากคอนกรีตเสริมเหล็ก เพื่อประเมินประสิทธิภาพเพิ่มเติมและเพิ่มความมั่นใจในความปลอดภัยและประหยัดค่าใช้จ่าย

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ AI ที่ช่วยในการสืบค้นข้อมูล แปลภาษา ประมวลผล ตรวจสอบและจัดทำเอกสารเบื้องต้น รวมถึงห้องวิจัยคอนกรีตและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้การสนับสนุนในการวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

[1] A. Kaveh and S. Talatahari, Optimum design of skeletal structures using imperialist competitive algorithm, Computer and Structures, 2010, 88(21–22), 1220–1229.

[2] M.P. Saka, O. Hasançebi, and Z.W. Geem, Metaheuristics in structural optimization and discussions on harmony search algorithm, Swarm and Evolutionary Computation, 2016, 28, 88–97.

[3] V. Yepes, J.V. Martí, and T. García-Segura, Cost and CO_2 emission optimization of precast–prestressed concrete U-beam road bridges by a hybrid glowworm swarm algorithm, Automation in Construction, 2015, 49(Part A), 123–134.

[4] V. Govindaraj and J.V. Ramasamy, Optimum detailed design of reinforced concrete continuous beams using Genetic Algorithms, Computer and Structures, 2005, 84(1–2), 34–48.

[5] J. Cheng, Optimum design of steel truss arch bridges using a hybrid genetic algorithm, Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66(8–9), 1011–1017.

[6] S. Patchotichai, N. Jitrapinat, and A. Lamom, Optimum design of axial loaded reinforced concrete column using bisection algorithm, Ladkrabang Engineering Journal, 2011, 28(3). (in Thai)

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.006

[7] A. Tapown, A. Lamom, and R. Cheerarot, Optimal design of biaxial reinforced concrete rectangular column by heuristic algorithm, Thesis, Mahasarakham University, Thailand. 2012.

[8] M.M. Francisca, S. Tatiana, J.V. Jose, and Y. Victor, Optimization of buttressed earth-retaining walls using hybrid harmony search algorithms, Engineering Structures, 2017, 134, 205–216.

[9] A. Akin and M. P. Saka, Harmony search algorithm bases optimum detailed design of reinforced concrete plan frames subject to ACI 318–05 provisions, Computer and Structures, 2015, 147, 79–95.

[10] S. Chomchuen and A. Lamom, Optimum design of prestressed concrete plank girder using hill climbing algorithm, UBU Engineering Journal, 2021, 14(14), 129–140. (in Thai)

[11] A. Tapown and R. Cheerarot, Optimum design of reinforced concrete foundations by fruit fly optimization algorithm, The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 2021, 31(1), 16–24. (in Thai)

[12] M. Azizi, S. Talatahari, M. Basiri, and M.B. Shishehgarkhaneh, Optimal design of low- and high-rise building structures by Tribe-Harmony Search algorithm, Engineering Structures, 2022, 3, 100067.

[13] G.-C. Cui, T. Liang, G.-F. Han, and J. Ji, An optimization and adjustment method of pile orientation for a pile-supported wharf based on a genetic algorithm, Journal of Marine Engineering, 2022, 2022, 1–13.

[14] EIT Standard 011007–19, Building Code Requirements for Reinforced Concrete Working Stress Design Method, The Engineering Institute of Thailand Under H.M. The King's Patronage, Bangkok, Thailand. 2019

[15] C. Jarujinda, Reinforced concrete design, Bunloet Printing House, Bangkok, Thailand. 1999.

[16] V. Chorwichian, Reinforced concrete design (working stress design: WSD), P.S. Commercial Ltd, Bangkok, Thailand. 1999.

[17] Standard Building Construction Price Calculation Criteria, Announcement of the Committee on Standard Prices and Contractor Registration on Criteria and Methods for Determining Standard Construction Prices, 19 October 2017, Thailand, 2017.

[18] http://www.indexpr.moc.go.th/PRICEPRESENT/table_month_regionCsi.asp (Accessed on 10 August 2022).

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.006

[19] Guidelines, Practices, and Details for Quantity Takeoff and Calculation of Standard Construction Prices, Announcement on Criteria and Methods for Standard Construction Prices, 19 October 2017, Thailand. 2017.

[20] J. Pearl, Heuristic: Intelligent search strategies for computer problem solving, Reding, Addison-Wesley Publishing Co., MA, USA, 1984.

[21] P. Dachaompai and N. Vannasopark, Numerical methods in engineering, Chulalongkorn University Printing House, Bangkok, Thailand. 2017.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.007

บทความวิจัย

การไพโรไลซิสขยะพลาสติกจากหลุมฝังกลบด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเหนี่ยวนำความร้อน

กิตติภณ พงศ์สกุล[1] ปรางค์ทิพย์ ฤทธิโชติ แก้วเพ็งกรอ[2] และ พงศกร คชาพงศ์กุล[1*]

[1] วิทยาลัยพลังงานและสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืนรัตนโกสินทร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

[2] ภาควิชาเคมี, คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

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

วันที่รับบทความ: 5 สิงหาคม 2567; วันที่ทบทวนบทความ: 11 มกราคม 2568; วันที่ตอบรับบทความ: 31 มกราคม 2568
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 22 เมษายน 2568

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการไพโรไลซิสเพื่อจัดการขยะพลาสติกด้วยหลักการเหนี่ยวนำความร้อน โดยการใช้ขดลวดพันรอบกับวัสดุที่ถูกหุ้มฉนวนเพื่อให้เกิดความร้อนสำหรับกระบวนการไพโรไลซิสเพื่อจัดการขยะพลาสติกประเภท พอลิเอทิลีน (PE) ที่อุณหภูมิ 400-600 องศาเซลเซียส จากการทดสอบการไพโรไลซิสเพื่อจัดการขยะพลาสติกประเภท พอลิเอทิลีน (PE) ที่ผ่านการฝังกลบ จำนวน 1 กิโลกรัม พบว่าที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส จะได้น้ำมันมากที่สุดคือ 27.6 % ซึ่งมีค่าความร้อนสูงที่สุดถึง 41.33 เมกะจูลต่อกิโลกรัม และได้ปริมาณน้ำมันน้อยลงตามอุณหภูมิต่างๆ ตามลำดับ และที่ได้น้ำมันน้อยสุดคือที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ได้น้ำมันเพียง 18.2 % ส่วนการเทียบจากพลังงานที่ใช้ต่อปริมาณขยะพลาสติก (กิโลวัตต์ชั่วโมง/กิโลกรัม) มีค่าอยู่ในช่วง 9.60 -13.36 kWh/kg ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ใช้พลังงานสูงที่สุดในการสลายขยะพลาสติกเป็นน้ำมัน และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณการเกิดก๊าซ CO_2 ต่อปริมาณน้ำมันที่ได้พบว่า ที่มีปริมาณก๊าซ CO_2 (%โดยปริมาตร) 0.21 % อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีปริมาณก๊าซ CO_2 0.25 % ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และมีปริมาณก๊าซ CO2 0.20 % และที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ส่วนปริมาณการเกิดถ่านชาร์ต่อปริมาณน้ำมันที่ได้ ที่อุณหภูมิ 400-600 องศาเซลเซียส มีปริมาณผงถ่านชาร์เฉลี่ยอยู่ที่ 29 % ส่วนที่มากที่สุดที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ได้ผงถ่านชาร์ 39 % ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิในการทำกระบวนการไพโรไลซิสขยะพลาสติกที่ อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่ผลิตน้ำมันมีค่าความร้อนสูงที่สุดเหมาะสมในการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนในภาคอุตสาหกรรมต่อไป

คำสำคัญ: การเหนี่ยวนำทางความร้อน; กระบวนการไพโรไลซิส; ขยะพลาสติก

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.007

บทความวิจัย

Pyrolysis of Plastic Waste from Landfills Using Induction-Heating Reactor

KittiphonPhongsaku[1], Prangtip Rittichot Kaewpengkrow[2] and Pongsakorn Kachapongkun[1*]

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

[2] Department of Chemistry, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

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

Received: 5 August 2024; Revised: 11 January 2025; Accepted: 31 January 2025

Online Published: 22 April 2025

Abstract: This research studies the pyrolysis process to manage plastic waste by induction heating. The coil is wrapped around the insulated material to generate heat for the pyrolysis process to manage polyethylene (PE) plastic waste at a temperature of 400–600 ˚C. The result suggested that pyrolysis of plastic waste from landfills included polyethylene (PE), the amount of 1 kilogram was performed. It was found that the most pyrolysis oil was obtained at a temperature of 600 ˚C, which was 27.6 % to have the highest heat value of 41.33 MJ/kg, and the amount of oil was reduced according to various temperatures. The least amount of oil was obtained at a temperature of 400 ˚C only 18.2 % wt. In the comparison of the energy consumption to amount of plastic waste(kWh/Kg), it was in the range of 9.60-13.36 kWh/kg. It consumes the highest energy to degradation of plastic waste into oil at 600°C. It consumes the highest energy to break down plastic waste into oil. In addition, comparing the amount of CO_2 gas produced from the pyrolysis process, it was found that a quantity of CO_2 gas (% by volume) of 0.21% obtained from 400 ˚C, at a temperature of 500 ˚C there was a quantity of CO_2 gas of 0.25% , and at a temperature of 600 ˚C there was CO_2 gas of 0.20% . As for the amount of charcoal produced per amount of oil obtained, at a temperature of 400–600 ˚C, the average of amount for charcoal powder was 29% . The highest amount was at 400 ˚C, with 39% of char product. The results showed that the temperature for plastic waste pyrolysis at 600 ˚C produced the highest calorific value which is suitable for use as an alternative fuel in the industrial sector

Keywords: Induction heat; Pyrolysis process; Plastic waste

ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.007

บทความวิจัย

1. บทนำ

ประเทศไทยมีการบริโภคพลาสติกเท่ากับ 80.02 กิโลกรัมต่อคนต่อปี (0.22 กิโลกรัมต่อคนต่อวัน) [1] เป็นการใช้พลาสติกเพื่อผลิตบรรจุภัณฑ์ เท่ากับ 35.32 กิโลกรัมต่อคนต่อปี (0.10 กิโลกรัมต่อคนต่อวัน) ขยะพลาสติกเกิดขึ้นภาย หลังการบริโภค เท่ากับ 29.24 กิโลกรัมต่อคนต่อปี (0.08 กิโลกรัมต่อคนต่อวัน) [2] มีการนำขยะ พลาสติกกลับไปใช้ประโยชน์ประมาณ 5.91 กิโลกรัมต่อคนต่อปี (0.02 กิโลกรัมต่อคนต่อวัน) ส่วนที่เหลือตกค้างและก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม เท่ากับ 22.88 กิโลกรัมต่อคนต่อปี (0.06 กิโลกรัมต่อคนต่อวัน) และหลุดรอดสู่สิ่งแวดล้อม 0.45 กิโลกรัมต่อคนต่อปี (0.001 กิโลกรัมต่อ คนต่อวัน ซึ่งการบริโภคพลาสติกรวมภายในประเทศจำนวน 5.281 ล้านตัน สัดส่วนการใช้พลาสติกเพื่อผลิตบรรจุภัณฑ์ (Packaging) มีอยู่ประมาณ 2.331 ล้านตัน (41.4 %) ซึ่งเป็นการใช้งานระยะสั้นหรือใช้ครั้งเดียวทิ้ง (Single-Use Plastic: SUP) ซึ่งก่อให้เกิด ขยะมากที่สุด ได้แก่ ถุงร้อน ถุงเย็น ถุงหูหิ้ว หลอดพลาสติก โดยมีขยะพลาสติกเกิดขึ้นภายหลัง การบริโภคประมาณ 1.9ล้านตัน มีการนำขยะพลาสติกกลับไปใช้ประโยชน์ประมาณ 0.39 ล้านตัน (ร้อยละ 20.21) ส่วนที่เหลือ ตกค้างและก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม 1.51 ล้านตัน (ร้อยละ 78.24) และหลุดรอดสู่สิ่งแวดล้อม 0.03 ล้านตัน (ร้อยละ 1.55) ดังนั้นกรมควบคุมมลพิษจึงมีแนวทางการจัดการขยะพลาสติกของไทย พ.ศ. 2561-2573 [1] ถูกนำเสนอเพื่อเป็นเครื่องมือเชิงนโยบายของภาครัฐที่ต้องการกำหนดทิศทางการบริหารจัดการขยะพลาสติกภายในประเทศ โดยวางตำแหน่งทางยุทธศาสตร์ที่การจัดการวัสดุที่จะกลายเป็นขยะพลาสติกก่อนและภายหลังการบริโภคและการผลักดันให้เกิดการใช้ประโยชน์ขยะพลาสติกในห่วงโซ่อุปทาน

การจัดการขยะพลาสติกในประเทศไทยที่นิยมกันมีอยู่ด้วยกัน 4 วิธี [2] ได้แก่ 1. การฝังกลบ เป็นวิธีที่นำมาใช้กับพลาสติกที่ปนเปื้อน ไม่คุ้มกับต้นทุนในการจัดเก็บ ล้างทำความสะอาด อาทิ ถุงร้อน ถุงหูหิ้ว ฯลฯ โดยจะนำไปฝังกลบตามสถานที่กำจัดขยะมูลฝอยขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่สิ้นเปลืองงบประมาณในการจัดการ และถุงพลาสติกเหล่านี้ก็ย่อยสลายได้ยาก 2. การนำกลับมาใช้ใหม่ โดยผ่านกระบวนการรีไซเคิล และการใช้ซ้ำ แต่เนื่องจากมีขั้นตอนที่ยุ่งยาก และค่าใช้จ่ายสูง อีกทั้งต้องแยกพลาสติกที่ปนเปื้อนออกจากกัน ทำให้มีขยะพลาสติกเพียงบางส่วนเท่านั้นที่ถูกนำกลับมารีไซเคิล 3. การนำขยะพลาสติกมาผลิตเป็นเชื้อเพลิง Refuse Derived Fuel (RDF) เนื่องจากขยะพลาสติกเป็นขยะที่ให้ค่าความร้อนสูง ซึ่งในประเทศไทยมีการนำ RDF มาใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานผลิตปูนซีเมนต์รายใหญ่ และ 4. การเผา ซึ่งในประเทศไทยมีระบบเตาเผา 2 รูปแบบ คือ เตาเผาผลิตพลังงาน และเตาเผาทิ้ง ซึ่งการเผาที่ไม่ถูกต้องจะส่งผลให้เกิดสารพิษในชั้นบรรยากาศจากส่วนประกอบของพลาสติก และอาจนำไปสู่การปนเปื้อนลงแหล่งน้ำ ดิน รวมไปถึงปนเปื้อนในระบบห่วงโซ่อาหาร

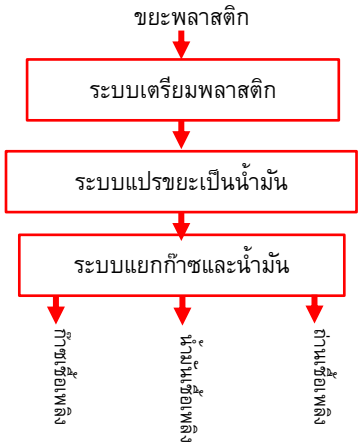
การกำจัดขยะพลาสติกด้วยวิธีการฝังกลบหรือการนำไปเผาทำลายล้วนแล้วจะส่งผลกระทบทางด้านลบต่อสภาพแวดล้อมได้โดยตรงต่อระบบนิเวศโดยทั่วไป ดังนั้น ในการแปรรูปขยะพลาสติกให้กลายเป็นพลังงานทดแทนในรูปแบบของก๊าซเชื้อเพลิงและน้ำมันเชื้อเพลิงได้ ด้วยกระบวนการที่เรียกว่ากระบวนการพีจีแอล

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.007

(PGL Process) โดยย่อมาจากกระบวนการย่อย 3 กระบวนการคือ กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis Process) กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification Process) และกระบวนการลิควิแฟรกชัน (Liquefaction Process) โดยทั้ง 3 กระบวนการมีรูปแบบของหลักการที่คล้ายคลึงกันก็คือ เป็นกระบวนการที่ให้ความร้อนแก่พลาสติก เพื่อเป็นการย่อยสลายโมเลกุลของพลาสติกนั้นให้มีขนาดเล็กลง โดยปราศจากออกซิเจนหรือมีออกซิเจนน้อย ซึ่งแต่ละกระบวนการผลิตนั้นจะมีรายละเอียดของกระบวนการที่มีสภาวะต่างๆ ที่แตกต่างกันออกไป [3-4]

เทคโนโลยีการผลิตน้ำมันจากขยะพลาสติกเป็นกระบวนการหลอมละลายพลาสติกด้วยความร้อนประมาณ 400-550 องศาเซลเซียส [3] ให้กลายเป็นของเหลวและเปลี่ยนสภาพเป็นแก๊สในถังปฏิกรณ์ ซึ่งไม่ใช้ออกซิเจน เมื่อแก๊สถูกทำให้เย็นลงพร้อมปรับสภาพของแก๊สแล้ว จะถูกส่งไปควบแน่นด้วยระบบหล่อเย็นจนเป็นน้ำมันเชื้อเพลิง ส่วนแก๊สที่ไม่ถูกกลั่นตัวจะถูกนำไปให้ความร้อนแก่หัวเผาแก๊สเพื่อให้ความร้อนแก่ตัวเอง [4] สำหรับเถ้าที่เกิดขึ้นด้านล่างของถังปฏิกรณ์ สามารถนำกลับมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในห้องเผาได้อีกดังแสดงในรูปที่ 1 [5]

หลักการผลิตน้ำมันจากขยะพลาสติกของเครื่องนี้ใช้เทคโนโลยีไพโรไลซิส (pyrolysis) [6] ซึ่งเป็นการให้ความร้อนกับขยะพลาสติกจนกลายเป็นผลิตภัณฑ์ก๊าซที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ในสภาวะปราศจากออกซิเจนโดยใช้ก๊าซไนโตรเจน เนื่องจากออกซิเจนจะทำให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้บางส่วน ส่งผลให้เกิดการสูญเสียก๊าซบางส่วนในกระบวนการไพโรไลซีล ซึ่งเป็นการลดผลผลิตน้ำมันสังเคราะห์ จากนั้นก๊าซที่ได้จะถูกนำมาควบแน่นที่อุณหภูมิห้อง ทำให้ก๊าซควบแน่น



รูปที่ 1 กระบวนการไพโรไลซิสขยะพลาสติก

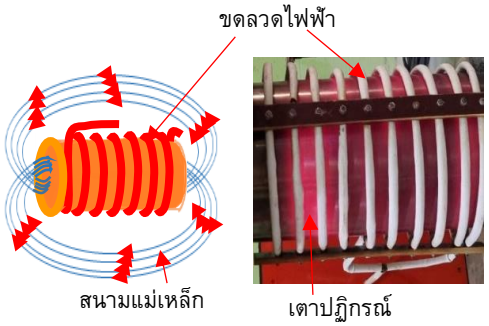
กลายเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลวหรือน้ำมัน และการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalysts) ช่วยปรับปรุงคุณภาพน้ำมัน โดยทำให้ได้ปริมาณน้ำมันเพิ่มมากขึ้น 1-2 % [6]

กระบวนการไพโรไลซิสด้วยการเหนี่ยวนำความร้อน เป็นกระบวนการให้ความร้อนวัตถุนำไฟฟ้า (โดยปกติจะเป็นโลหะ) โดยการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระแสไหลวน (หรือที่เรียกว่ากระแส Foucault) [7] ถูกสร้างขึ้นภายในโลหะและความต้านทานนำไปสู่ความร้อนของโลหะ การเหนี่ยวนำความร้อน เป็นรูปแบบของเครื่องทำความร้อนแบบไม่สัมผัส สำหรับวัสดุนำไฟฟ้า เมื่อไฟฟ้ากระแสสลับในขดลวดเหนี่ยวนำเกิดขึ้น สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แตกต่างกันจะถูกสร้างขึ้นรอบขดลวดหมุนเวียนในปัจจุบัน (เหนี่ยวนำกระแสไฟฟ้าไหลวนในปัจจุบัน) ถูกสร้างขึ้นในชิ้นงาน (วัสดุนำไฟฟ้า) ความร้อน ไหลกับความไวของวัสดุ เครื่องทำความร้อนเหนี่ยวนำ ประกอบด้วยขดลวดเหนี่ยวนำ (หรือแม่เหล็กไฟฟ้า) ซึ่งผ่านไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง (AC) จะถูกส่งผ่าน ความร้อนอาจถูกสร้างขึ้นโดย

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.007

การสูญเสียแม่เหล็ก hysteresis ในวัสดุที่มีการซึมผ่านสัมพัทธ์อย่างมีนัยสำคัญ ความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้นั้นขึ้นอยู่กับขนาดของวัตถุประเภทของวัสดุ

การเชื่อมต่อ (ระหว่างขดลวดงานและวัตถุที่ต้องให้ความร้อน) กระบวนการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ (รูปที่ 2) เป็นนวัตกรรมใหม่ในการให้ความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าการให้ความร้อนแบบขดลวดความร้อน แบบใช้แก๊ส และรูปแบบอื่นๆ [8] การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำอาศัยหลักการเหนี่ยวนำโดยการป้อนไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงให้กับขดลวดเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กไปเกี่ยวคล้องกับวัสดุที่เป็นสาร Ferromagnetic ทำให้เกิดการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนในวัสดุที่เป็นเส้นทางปิด และเกิดความร้อนขึ้นในที่สุด ปัจจุบันหลักการนี้ใช้ในการให้ความร้อนอุปกรณ์เช่น เตาแม่เหล็กไฟฟ้า กาต้มน้ำ เครื่องทำน้ำอุ่น เครื่องชุบแข็ง เครื่องหลอมพลาสติกและเครื่องหลอมแก้วเป็นต้น หลักการของ Induction Heat [9] คือ การเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กโดยการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในขดลวดเหนี่ยวนำ เมื่อมีวัตถุโลหะจำพวกเหล็ก ที่อยู่ภายในสนามเหนี่ยวนำนั้น โมเลกุลก็จะเกิดการสั่นสะเทือนจนเกิดความร้อนสูง ความร้อนที่เกิด จึงเกิดขึ้นโดยตรง หากนำมาประยุกต์ใช้ในการให้ความร้อนเพื่อหลอมพลาสติก ความสูญเสียจึงมีน้อยกว่า วิธีการให้ความร้อนจากขดลวดความร้อนแบบเดิมๆ ซึ่งจะต้องส่งผ่านความร้อนจากตัวขดลวดผ่านเข้าไปภายในท่อหลอมพลาสติกโดยอาศัยหลักการพาผ่านอากาศ และการนำความร้อนผ่านเนื้อเหล็กภายนอกสู่ภายใน ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานส่วนนี้ไป นวัตกรรมการให้ความร้อนระบบ Induction Heat [10] จะเป็นการทำให้ตัวท่อหลอมพลาสติกเกิดความร้อนขึ้นโดยตรง เสมือนเป็น



รูปที่ 2 หลักการทำงานของการให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำ

ฮีทเตอร์ ทำให้ประสิทธิภาพการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่า และ ลดการสูญเสียพลังงานอย่างยิ่ง การให้ความร้อนโดยการเหนี่ยวนำมีการใช้งานแพร่หลายในอุตสาหกรรมโลหะ โดยสามารถออกแบบสำหรับการให้ความร้อนในลักษณะต่างๆ ได้แก่ การให้ความร้อนแก่ชิ้นโลหะทั้งชิ้น การให้ความร้อนเฉพาะผิวโลหะ และการหลอมโลหะ ซึ่งทำให้สามารถประยุกต์ใช้ในกระบวนต่างๆ

ดังนั้นผู้วิจัยได้ให้ความสนใจในการกำจัดขยะพลาสติกประเภทพอลิเอทาลีน (PE) ที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ โดยเฉพาะขยะพลาสติกจากหลุมฝังกลบ ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสโดยการใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเหนี่ยวนำความร้อนด้วยไฟฟ้า [10] แทนการไพโรไลซีสแบบที่มีการใช้วิธีการให้ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงโดยตรง เพื่อลดมลพิษจากกระบวนเผาไหม้ดังกล่าว โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาองค์ประกอบทางกายภาพของน้ำมันที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส ได้แก่ปริมาณน้ำมันที่สกัดได้ และสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ ซึ่งการไพโรไลซิสโดยการใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเหนี่ยวนำความร้อนด้วยไฟฟ้านี้

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.007

จะลดปัญหาดังกล่าว ซึ่งกระบวนการไพโรไลซิสนี้ จะมีระบบของกระบวนการควบแน่นก๊าซร้อนที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิส ให้กลายเป็นของเหลวด้วยกระบวนการควบแน่นแบบสัมผัส (Contact Condenser) เนื่องจากการใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเหนี่ยวนำความร้อนสามารถควบคุมอุณหภูมิได้จะคงที่มากกว่าการใช้แบบการเผาไหม้ รวมถึงกระบวนการควบแน่นแบบสัมผัสได้อีกด้วย โดยทั่วไปกระบวนการไพโรไลซิส จะใช้เชื้อเพลิงในการให้ความร้อนในการผลิต ซึ่งจะแตกต่างจากการวิจัยนี้เนื่องจากการให้ความร้อนจะเป็นการใช้ไฟฟ้าเหนี่ยวนำให้เกิดความร้อน ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้คงที่ โดยการใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติในการผลิตและไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการเผาไหม่เชื้อเพลิงอีกด้วย โดยมี วัตถุประสงค์คือออกแบบกระบวนการนำขยะพลาสติกประเภทพอลิเอทิลีน (PE) โดยการใช้เครื่อง ปฏิกรณ์แบบเหนี่ยวนำความร้อนทางไฟฟ้า เพื่อผลิตเป็นน้ำมันด้วยวิธีการไพโรไลซิส

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 เครื่องมือและวิธีการวิจัย

2.1.1 วัตถุดิบ

การศึกษาเพื่อดำเนินการวิจัยนี้ได้นำขยะพลาสติกมาจากหลุมฝังกลบที่มีอายุการฝังกลบตั้งแต่ 3-5 ปี จำพวกพลาสติกพอลิเอทิลีน (PE) ที่ผ่านกระบวนการคัดแยกโลหะหนัก ล้างทำความสะอาดแล้วตากแดดจนมีความชื้น 0-5 % ซึ่งได้นำขยะพลาสติกพอลิเอทิลีน (PE) โดยผ่านเทคโนโลยีการคัดแยกและผลิตเชื้อเพลิงขยะ (Refuse Derived Fuel: RDF) จากศูนย์กำจัดขยะ อบจ. นนทบุรี ดังแสดงในรูปที่ 3 เพื่อทดลองการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสจากพลาสติกพอลิเอทิลีน (PE) ด้วยโดยการใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเหนี่ยวนำความร้อนทางไฟฟ้า เชื้อเพลิงขยะ RDF จากศูนย์กำจัดขยะ อบจ. นนทบุรี เมื่อนำขยะพลาสติกที่ผ่านกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงขยะ RDF แล้วนำมาแบ่งเป็นชิ้นเล็ก ๆ โดยมีขนาดความกว้างและความยาวประมาณ 10 × 10 เซนติเมตร จำนวน 1 กิโลกรัมต่อครั้ง เพื่อนำมาเข้าเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบเหนี่ยวนำความร้อน ของทุกรอบการทดลอง ซึ่งในการทดลองนี้จะนำการทดลองในแต่ละกรณี จำนวน 3 ครั้ง เพื่อหาความแน่นนอนที่เกิดขึ้นในการทดลอง

รูปที่ 3 ขยะพลาสติกที่ผ่านกระบวนการผลิต

2.1.2 การออกแบบและสร้างเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิส

ลักษณะของเตาหลอมขยะพลาสติแบบไพโรไลซิสด้วยเทคนิคการใช้เตาเหนี่ยวนำความร้อนที่ใช้สำหรับงานวิจัย ออกแบบสำหรับการทดสอบอุปกรณ์ โดยมี เส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซ็นติเมตร สูง 1.0 เมตร เตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิสสามารถกำจัดขยะพลาสติกจำนวน 1 กิโลกรัมต่อครั้ง ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของขยะพลาสติก ซึ่งการใช้งานต้องไม่ให้เกิดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม จึงมีการตรวจวัดแก๊สมลพิษที่เกิดขึ้น และมีไซโคลนดักจับอนุภาคฝุ่นระหว่างการเกิดปฏิกิริยา แก๊สผลิตภัณฑ์จะถูกควบแน่นเป็นน้ำมัน

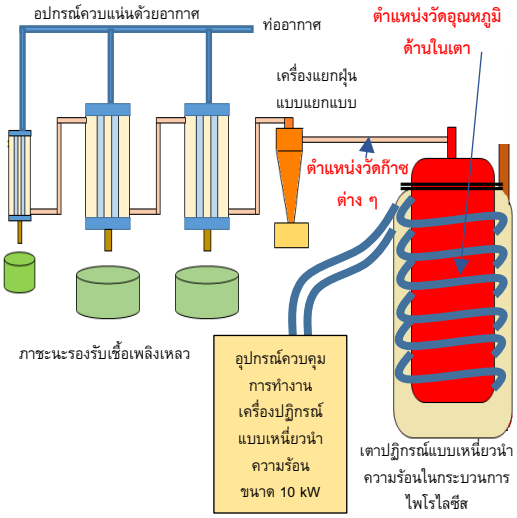
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.007

ด้วยชุดคอนเดนเซอร์ โดยมีลักษณะการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากการไพโรไลซิสขยะพลาสติกโดยการใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเหนี่ยวนำความร้อนดังแสดงในรูปที่ 4-5

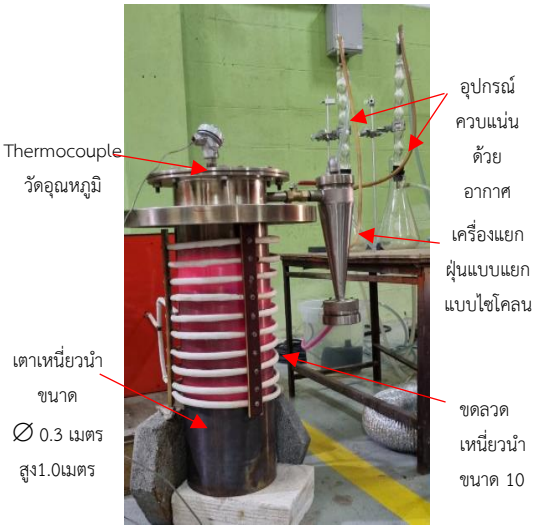
รูปที่ 4-5 แสดงการทำการเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสขยะพลาสติก ด้วยกำลังไฟฟ้าสูงสุด 10 kW ตัวเหนี่ยวนำทำด้วยพารามิเตอร์ต่อไปนี้:

1. เส้นผ่านศูนย์กลางเตา 30 เซ็นติเมตร สูง 1.0 เมตร
2. เส้นผ่าศูนย์กลางท่อ 10 มิลลิเมตร
3. เส้นผ่าศูนย์กลางของเกลียว 40 เซ็นติเมตร
4. จำนวนรอบของขดลวด 10 รอบ
5. ระยะห่างระหว่างรอบ 3 เซนติเมตร

ในการทำการทดลองจะใช้ขยะพลาสติก โดยทำการตรวจวัดกำลังไฟฟ้าที่ใช้ การวัดปริมาณน้ำมันที่ได้ การวัดปริมาณการเกิดก๊าซต่างๆ โดยใช้เครื่องมือวัด เครื่องวัดประสิทธิภาพการเผาไหม้และแก๊สมลพิษจากการเผาไหม้ Testo 350 ซึ่งสามารถวัดก๊าซ CO ได้จาก 0-1000 ppm ในความละเอียดที่ 1 ppm ก๊าซ ก๊าซ SO_2 ได้จาก 0-5,000 ppm ในความละเอียดที่ 1 ppm ก๊าซ NO_2 ได้จาก 0-500 ppm ในความละเอียดที่ 0.1 ppm ก๊าซ CO_2 ได้จาก 0 ถึง 50 Vol.% ความละเอียด 0.01 Vol.% และการวัดวิเคราะห์ค่าความร้อนของถ่านชาร์ และน้ำมันไพโรไลซิสจะใช้เครื่องวัดพลังงานความร้อน (Oxygen Bomb Calorimeter) รุ่น 6100



รูปที่ 4 แผนภาพเตาเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสขยะพลาสติก



รูปที่ 5 เตาเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสขยะพลาสติก

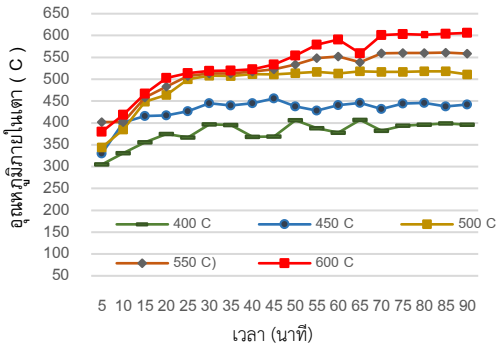
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.007

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

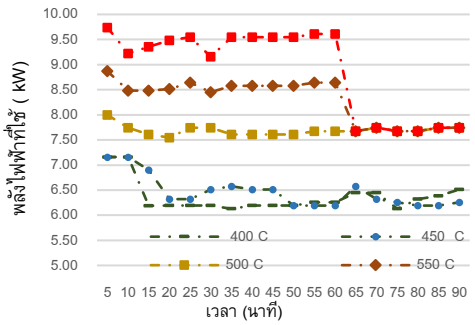
3.1 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณผลิตภัณฑ์น้ำมัน

การดำเนินการตรวจวัดเครื่องไพโรไลซิสโดยใช้เทคนิคการเหนี่ยวนำสำหรับกระบวนการไพโรไลซิสเพื่อจัดการขยะพลาสติก โดยการออกแบบสำหรับการทดสอบอุปกรณ์โดยใช้เทคนิคเตาเหนี่ยวนำความร้อน ซึ่งในการทดสอบการกำจัดขยะพลาสติกจะใช้จำนวน 1 กิโลกรัมต่อครั้ง โดยการทดสอบไพโรไลซิสเพื่อจัดการขยะพลาสติกประเภท พอลิเอทิลีน (PE) มาเพื่อผลิตเป็นน้ำมันด้วยวิธีการไพโรไลซิส และแต่ครั้งในการทดลองจะใช้เวลาในการทดลองจนสิ้นสุดปฏิกิริยา โดยจะมีการเก็บข้อมูลวัดแก๊สผลิตภัณฑ์ขณะที่ทำการทดลองในทุกๆ 5 นาที ที่อุณหภูมิ 400 450 500 550 และ 600 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาการควบคุมอุณหภูมิ และการใช้พลังไฟฟ้าในชุดอุปกรณ์เหนี่ยวนำแสดงในรูปที่ 6-7

รูปที่ 6-7 แสดงการเปรียบเทียบพลังไฟฟ้าที่ใช้กับอุณหภูมิในเตาเหนี่ยวนำในกระบวนการไพโรไลซิสพลาสติก 1 กิโลกรัม เพื่อให้ได้ปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิง พบว่า การนำพลาสติกที่ผ่านการสับย่อยให้มีขนาดประมาณ 1 ตารางนิ้ว จำนวน 1 กิโลกรัมเข้าไปในเตาเตาเหนี่ยวนำ อุณหภูมิที่ตั้งไว้ 400 องศาเซลเซียส พลังไฟฟ้าที่ใช้เฉลี่ย 6.4 kW ดังรูปที่ 5 หรือคิดเป็นพลังงานไฟฟ้า 9.5 kWh ตลอดกระบวนการ อุณหภูมิเฉลี่ยในเตา 355.4 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่ตั้งไว้ 450 องศาเซลเซียส พลังไฟฟ้าที่ใช้เฉลี่ย 6.5 kW หรือคิดเป็นพลังงานไฟฟ้า 9.7 kWh อุณหภูมิที่ตั้งไว้ 500 องศาเซลเซียส พลังไฟฟ้าที่ใช้เฉลี่ย 7.7 kW หรือคิดเป็นพลังงานไฟฟ้า 11.5 kWh ตลอดกระบวนการ อุณหภูมิเฉลี่ย 479 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่ตั้งไว้ 550 องศาเซลเซียส พลังไฟฟ้าที่ใช้เฉลี่ย 8.3 kW หรือคิดเป็นพลังงานไฟฟ้า 12.4 kWh และ อุณหภูมิที่ตั้งไว้ 600 องศาเซลเซียส พลังไฟฟ้าที่ใช้เฉลี่ย 8.9 kW หรือคิดเป็นพลังงานไฟฟ้า 13.3 kWh ตลอดกระบวนการและอุณหภูมิเฉลี่ย 537.7 องศาเซลเซียส ซึ่งในการใช้อุณหภูมิที่ 600 องศาเซลเซียส นั้นการทำอุณหภูมิให้สูงขึ้นนั้นจะช้ามาก ต้องใช้เวลาประมาณ 60 นาที



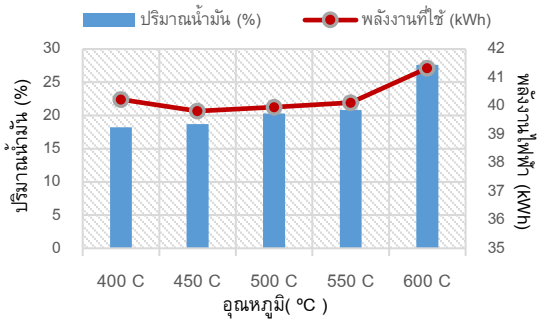
รูปที่ 6 การเปรียบเทียบอุณหภูมิในเตาเหนี่ยวนำในกระบวนการไพโรไลซิสพลาสติก 1 กิโลกรัม



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบพลังไฟฟ้าที่ใช้ในเตาเหนี่ยวนำในกระบวนการไพโรไลซิสพลาสติก 1 กิโลกรัมที่อุณหภูมิต่าง ๆ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.007

เมื่อนำการใช้พลังงานไฟฟ้ามาเปรียบเทียบกับการผลิตน้ำมันที่ได้นั้น จะเป็นการหาความเหมาะสมกับการใช้เทคนิคการเหนี่ยวนำสำหรับกระบวนการไพโรไลซิสเพื่อจัดการขยะพลาสติก ซึ่งปริมาณน้ำมันที่ได้เป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของพลาสติกที่ใช้ต่อน้ำหนักของน้ำมันที่ได้ แสดงดังรูปที่ 8

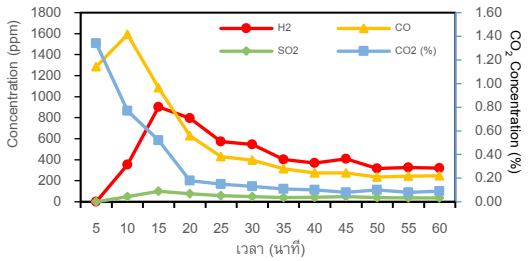


รูปที่ 8 ปริมาณน้ำมันและค่าความร้อนที่ผลิตได้และพลังงานที่ใช้จากการทดสอบกระบวนการไพโรไลซิสขยะพลาสติกที่อุณหภูมิต่างๆ

จากการทดสอบการไพโรไลซิสเพื่อจัดการขยะพลาสติกประเภท พอลิเอทิลีน (PE) จำนวน 1 กิโลกรัมต่อครั้ง ที่อุณหภูมิ 400 450 500 550 และ 600 องศาเซลเซียส พบว่าที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส จะได้น้ำมันมากที่สุดคือ 27.6 % และรองลงมาคือ 20.8 % ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส จะเห็นว่าได้ปริมาณน้ำมันน้อยลงตามอุณหภูมิต่างๆ ตามลำดับ และที่ได้น้ำมันน้อยสุดคือที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ได้น้ำมันเพียง 18.2 % จากการวิเคราะห์พบว่าที่อุณภูมิที่เหมาะสมที่สุดอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส โดยการเทียบจากพลังงานที่ใช้ต่อปริมาณขยะพลาสติกที่สลายตัวเป็นน้ำมัน (kWh/kg) พลังงานที่ใช้ต่อน้ำหนักขยะพลาสติกอยู่ในช่วง 9.60 -13.35 kWh/kg โดยที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ใช้พลังงานในการสายขยะพลาสติกเป็นน้ำมันสูงที่สุด อย่างไรก็ตามเป็นอุณหภูมิที่ผลิตน้ำมันได้ปริมาณมากและมีค่าความร้อนสูงที่สุดถึง 41.33 MJ/Kg

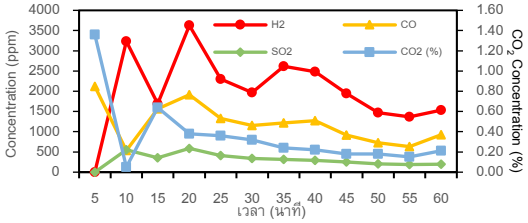
3.2 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์

จากการทดสอบนี้ผู้วิจัยได้ทำการตรวจวัดการเกิดก๊าซต่างๆ ระหว่างการทำกระบวนการไพโรไลซิสขยะพลาสติกที่ อุณหภูมิ 400 450 500 550 และ 600 องศาเซลเซียส เพื่อตรวจวัดปริมาณก๊าซ H_2, CO, CO_2 และ SO_2 ซึ่งรายละเอียดในการทดสอบนี้แสดงในรูปที่ 9-13 จากภาพที่ 9 เป็นผลการตรวจวัดการเกิดก๊าซต่างๆ ระหว่างการทำกระบวนการไพโรไลซิสขยะพลาสติกที่ อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมินี้จะเกิดก๊าซ CO มากในช่วงแรกของการเผาไหม้เมื่อเวลาผ่านไป 20 นาที ปริมาณจะลดลงเช่นเดียวกับก๊าซ CO_2, SO_2 และ H_2

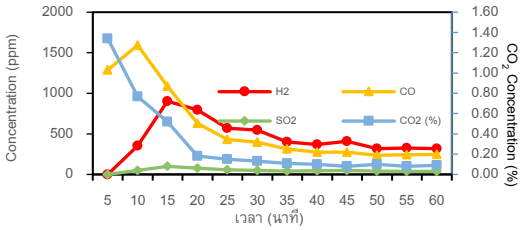


รูปที่ 9 การตรวจวัดการเกิดก๊าซต่างๆ ในกระบวนการไพโรไลซิสขยะพลาสติกที่อุณหภูมิ 400°C

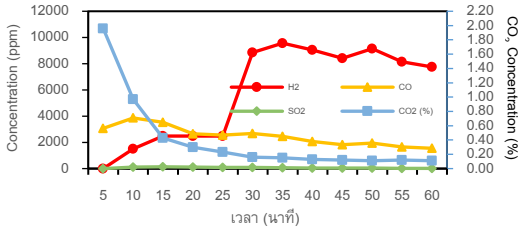
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.007



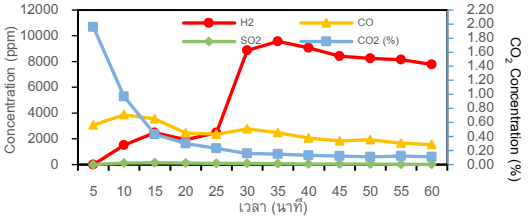
รูปที่ 10 การตรวจวัดการเกิดก๊าซต่างๆ ในกระบวนการไพโรไลซิสขยะพลาสติกที่อุณหภูมิ 450°C



รูปที่ 11 การตรวจวัดการเกิดก๊าซต่างๆ จากกระบวนการ ไพโรไลซิสขยะพลาสติกที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส



รูปที่ 12 การตรวจวัดการเกิดก๊าซต่างๆ จากกระบวนการไพโรไลซิสขยะพลาสติกที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส



รูปที่ 13 การตรวจวัดการเกิดก๊าซต่างๆ จากกระบวนการไพโรไลซิสขยะพลาสติกที่ อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

จากภาพที่ 10 เป็นผลการตรวจวัดการเกิดก๊าซต่างๆ ระหว่างการทำกระบวนการไพโรไลซิสขยะพลาสติกที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมินี้จะเกิดก๊าซ CO มากในช่วงแรกของการเผาไหม้เมื่อเวลาผ่านไป 20 นาที ปริมาณจะลดลง เช่นเดียวกับก๊าซ CO_2, SO_2 และ H_2 ซึ่งมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

จากภาพที่ 11 เป็นผลการตรวจวัดการเกิดก๊าซต่างๆ ระหว่างการทำกระบวนการไพโรไลซิสขยะพลาสติกที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมินี้จะเกิดก๊าซ CO มากขึ้นในช่วงแรกของการเผาไหม้เมื่อเวลาผ่านไป 45 นาที ปริมาณจะลดลง เช่นเดียวกับก๊าซ H_2 ส่วนก๊าซ CO_2 จะมีปริมาณที่มากในช่วงเริ่มต้นการเผาไหม้ และจะลดลงเมื่อเวลาผ่านไป 20 นาที

จากภาพที่ 12 เป็นผลการตรวจวัดการเกิดก๊าซต่างๆ ระหว่างการทำกระบวนการไพโรไลซิสขยะพลาสติกที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมินี้จะเกิดก๊าซ CO มากขึ้นในช่วงแรกของการเผาไหม้เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที ปริมาณจะลดลง เช่นเดียวกับก๊าซ H_2 ส่วนก๊าซ CO_2 จะมีปริมาณที่มากในช่วงเริ่มต้นการเผาไหม้ และจะลดลงเมื่อเวลาผ่านไป 35 นาที

จากภาพที่ 13 เป็นผลการตรวจวัดการเกิดก๊าซต่างๆ ระหว่างการทำกระบวนการไพโรไลซิสขยะพลาสติกที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่า

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.007

ที่อุณหภูมินี้จะเกิดก๊าซ CO น้อยกว่าการเผาไหม้ที่อุณหภูมิ 400 450 500 และ 550 องศาเซลเซียส ส่วนก๊าซ CO_2 จะมีปริมาณที่มากในช่วงเริ่มต้นการเผาไหม้ และจะลดลงเมื่อเวลาผ่านไป 20 นาที ซึ่งปริมาณจะลดลง เช่นเดียวกับก๊าซ SO_2 แต่ก๊าซ H_2 จะเกิดขึ้นมากในช่วง 30 นาที และจะลดลงในช่วงเวลา 55 นาที

ในกระบวนการไพโรไลซีสมีการใช้จะเห็นได้ว่าการเกิด CO นั้นมาจากการเผาไหม้และเกิดการสลายตัวของขยะพลาสติก จึงเกิดการแตกร้าวจากความร้อนในระบบที่ไม่มีการโฟล N_2 จึงมีออกซิเจนในเตาปฏิกรณ์บางส่วนทำปฏิกิริยากับคาร์บอนของพลาสติกที่สลายตัวทางความร้อน จึงเกิดผลิตภัณฑ์แก๊ส CO ซึ่งเป็นไปตามการแตกร้าวจากความร้อนดังความสัมพันธ์ของสมการที่ (1) – (3)

$$pCnHx - \longrightarrow qCmHy + rH \quad (1)$$

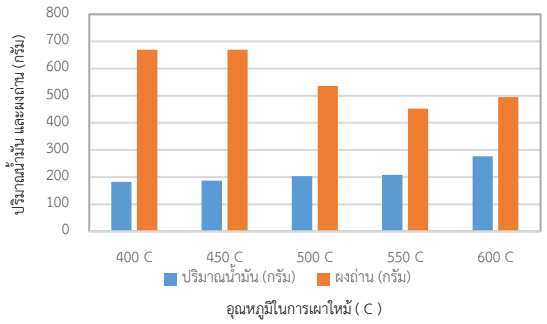
$$\text{Carbon formation: } CnHx - \longrightarrow nC + x/2H_2 \quad (2)$$

$$\text{Partial oxidation: } C + 1/2O_2 - \longrightarrow CO \quad (3)$$

3.3 ผลการวิเคราะห์การใช้พลังงานต่อผลิตภัณฑ์ไพโรไลซิส

จากผลการทดสอบที่ผ่านมาเมื่อทำการเปรียบเทียบกันระหว่างพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ไปกับปริมาณน้ำมันที่ได้ ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส จะได้ดัชนีการใช้พลังงานต่อหน่วยผลผลิตที่ดีที่สุด คือ 0.048 กิโลวัตต์/กรัม และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณการเกิดก๊าซ CO_2 ต่อปริมาณน้ำมันที่ได้พบว่า ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีดัชนีการเกิดก๊าซ CO_2 (%) ต่อปริมาณน้ำมัน (กรัม) 0.21 %/กรัม ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส มีดัชนีการเกิดก๊าซ CO_2 (%) ต่อปริมาณน้ำมัน (กรัม) 0.25 %/กรัม และที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส มีดัชนีการเกิดก๊าซ CO_2 (%) ต่อปริมาณน้ำมัน (กรัม) 0.20 %/กรัม จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิในการทำกระบวนการไพโรไลซิสขยะพลาสติกที่ อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุด เมื่อนำปริมาณน้ำมันที่ผลิตได้มาเทียบกับปริมาณผงถ่านที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสขยะพลาสติกที่ปริมาณ 1 กิโลกรัม ในระยะเวลา 90 นาที แสดงดังรูปที่ 14

จากรูปที่ 11 ปริมาณน้ำมันที่ผลิตได้มาเทียบกับปริมาณผงถ่านที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสขยะพลาสติกที่ปริมาณ 1 กิโลกรัม ในระยะเวลา 90 นาที จะเห็นได้ว่าดัชนีการเกิดผงถ่านต่อปริมาณน้ำมันที่ได้ ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส มีปริมาณการเกิดผงถ่านชาร์ในการทดสอบ 3 ครั้งร้อยละ 15-23 และที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสมีปริมาณผงถ่านน้อยที่สุด เนื่องจากพลาสติกสลายตัวได้ดีที่อุณหภูมินี้ ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ M. Z. H. Khan, และคณะ ได้วิจัยในปี 2016 [11] โดยศึกษาคุณลักษณะของน้ำมัน



รูปที่ 14 ปริมาณน้ำมันที่ผลิตได้มาเทียบกับปริมาณผงถ่านที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 400 450 500 550 และ 600 องศาเซลเซียส

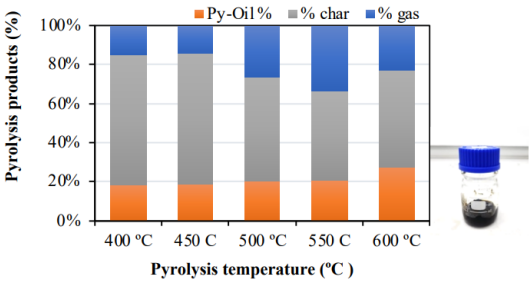
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.007

เชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกด้วยการไพโรไลซิส เพื่อผลิตน้ำมันไพโรไลซิส จากขยะพลาสติก โดยใช้โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง HDPE ในเครื่องปฏิกรณ์สแตนเลสในห้องปฏิบัติการที่ออกแบบเองเพื่อผลิตผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงที่มีประโยชน์ ของเสีย HDPE ถูกไพโรไลซ์อย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 330–490 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2-3 ชั่วโมง แต่งานวิจัยนี้พบว่าการใช้เทคนิคการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าสำหรับกระบวนการไพโรไลซิสเพื่อจัดการขยะพลาสติกจะเหมาะสมที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาน้อยกว่าเพียง 1.30 ชั่วโมง จากการศึกษาปริมาณของเชื้อเพลิงที่ผลิตได้พบว่า มีปริมาณถ่านชาร์ที่ค่อนข้างสูง ทั้งนี้เนื่องจากขยะพลาสติกที่นำมาใช้ในการศึกษามีการปนเปื้อนเศษดินจากการผ่านการฝังกลบเป็นระยะเวลานาน ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาค่าความร้อนของถ่านชาร์เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงแข็งทำแทนถ่านหินในเผาอุตสาหกรรมต่อไป ลักษณะของถ่านชาร์ที่ได้มีลักษณะเป็นก้อนและผงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ทดสอบ ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนและลักษณะของถ่านชาร์แสดงดัง ตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนของถ่านชาร์จากกระบวนการไพโรไลซิสขยะพลาสติก

อุณหภูมิ (°C)	ลักษณะถ่านชาร์	ค่าความร้อน (MJ/Kg)
400		14.28 ± 1.37
500		10.46 ± 2.15
600		9.85 ± 1.26

จากตารางที่ 1 จะเห็นว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นถ่านชาร์จะมีความเป็นผงละเอียดมากขึ้น เมื่อวิเคราะห์ค่าความร้อนพบว่าค่าความร้อนมีค่าลดลง เนื่องจากความร้อนทั่วถึงในระหว่างการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kaewpengkrow และคณะ (2012) ที่พบว่าถ่านชาร์จากกระบวนการไพโรไลซิสมีสมบัติทางความร้อนลดลงเมื่ออุณหภูมิไพโรไลซิสสูงขึ้น [12] อย่างไรก็ตามถ่านชาร์ที่เหลือจากกระบวนการมีค่าความร้อนที่เพียงพอในการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงแข็งให้กับเตาเผาอุตสาหกรรมได้ โดยที่เศษเถ่าที่ได้จากการเผาขยะพลาสติก 1 กิโลกรัมที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลา 90 นาที ดังแสดงในรูปที่ 15 ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสารประกอบที่มีประโยชน์หลักที่ได้จากการเพิ่มอุณหภูมิในการวิเคราะห์น้ำมันไพโรไลซิสด้วยเครื่องวัดแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์ (GC/MS) ที่เป็นสารอะโรมาติกและไฮโดรคาร์บอน (C5-C11 และ C12-C20) ซึ่งคาร์บอนเหล่านี้สามารถใช้แทนน้ำมันดีเซลหรือน้ำมันหนัก และใช้ทดแทนเชื้อเพลิงเหลวในภาคอุตสาหกรรมได้

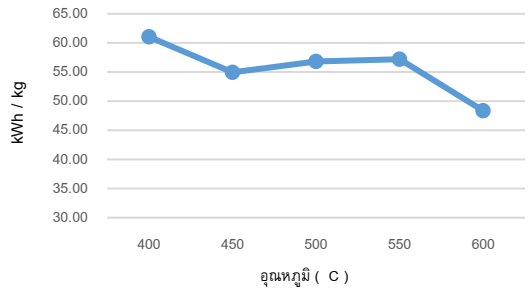


รูปที่ 15 ปริมาณน้ำมันที่ได้เทียบกับถ่านชาร์ที่ผลิตจากกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่างๆ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.007

จากรูปที่ 15 เป็นการเปรียบเทียบปริมาณน้ำมันที่ได้กับปริมาณเถ้าที่ผลิตได้จากการเผาขยะพลาสติก 1 กิโลกรัมเป็นเวลา 90 นาที ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ผลผลิตถ่านไม้ต่อปริมาณน้ำมันจะอยู่ระหว่าง 15 ถึง 23 % อย่างไรก็ตาม ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ผลผลิตเถ้าชาร์จะต่ำที่สุด ซึ่งบ่งชี้ถึงการสลายตัวของพลาสติกที่เหมาะสมที่สุดที่อุณหภูมินี้ ผลลัพธ์นี้สอดคล้องกับการศึกษาวิจัยที่ดำเนินการโดย Khan et al. (2016)

การเปรียบเทียบจากพลังงานที่ใช้ต่อปริมาณน้ำมันที่ได้ (kWh/kg) โดยที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส พลังงานที่ใช้ต่อปริมาณน้ำมันที่ได้ 61.06 kWh/kg อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส พลังงานที่ใช้ต่อปริมาณน้ำมันที่ได้ 56.82 kWh/kg และอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส พลังงานที่ใช้ต่อปริมาณน้ำมันที่ได้ 48.37 kWh/kg จะเห็นได้ว่าดัชนีการใช้พลังงานต่อหน่วยผลผลิต ของกระบวนการไพโรไลซิสเพื่อกำจัดขยะพลาสติกด้วยหลักการเหนี่ยวนำความร้อนนั้นจะมีการใช้พลังงานที่น้อยที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 16



รูปที่ 16 การเปรียบเทียบจากพลังงานที่ใช้ต่อปริมาณน้ำมันที่ได้ (kWh/kg)

จากรูปที่ 16 จะเห็นได้ว่า ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส จะมีดัชนีการใช้พลังงานต่อน้ำมันที่ได้มากที่สุด ส่วนที่อุณหภูมิ 450 500 และ 550 องศาเซลเซียส จะมีดัชนีการใช้พลังงานต่อน้ำมันที่ได้ใกล้เคียงกัน และน้อยที่สุดคือที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

4. บทสรุป

จากการทดสอบการไพโรไลซิสโดยการออกแบบเตาด้วยเทคนิคการเหนี่ยวนำทางความร้อน โดยการใช้ขดลวดมาพันรอบกับวัสดุที่ถูกหุ้มฉนวนเพื่อให้เกิดความร้อน สำหรับกระบวนการไพโรไลซิสเพื่อจัดการขยะพลาสติกประเภท พอลิเอทิลีน (PE) จำนวน 1 กิโลกรัมต่อครั้ง ที่อุณหภูมิ 400 450 500 550 และ 600 องศาเซลเซียส พบว่าที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส จะได้น้ำมันมากที่สุดคือ 276 กรัม และได้ปริมาณน้ำมันน้อยลงตามอุณหภูมิต่างๆ ตามลำดับ และที่ได้น้ำมันน้อยสุดคือที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ได้น้ำมันเพียง 123 กรัม จากการวิเคราะห์พบว่าที่อุณภูมิที่เหมาะสมที่สุดอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการใช้พลังงานในการผลิตน้ำมันน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับน้ำมันที่ได้

จากการทดสอบนี้ผู้วิจัยได้ทำการตรวจวัดการเกิดก๊าซต่างๆ ระหว่างการทำกระบวนการไพโรไลซิสขยะพลาสติกที่ อุณหภูมิ 400 450 500 550 และ 600 องศาเซลเซียส จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการไพโรไลซิสด้วยเตาปฏิกรณ์เหนี่ยวนำทางความร้อน ด้วยไฟฟ้าในการกำจัดขยะพลาสติกจากหลุมฝังกลบ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในเชิงอุตสาหกรรมได้อีกทางหนึ่ง

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.007

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่สนับสนุนวิจัยเครื่องมือวิเคราะห์ในงานวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

[1] W. Niyommaneerat, K. Suwanteep and O.Chavalparit, Sustainability indicators to achieve a circular economy: A case study of renewable energy and plastic waste recycling corporate social responsibility (CSR) projects in Thailand, Journal of Cleaner Production, 2023, 391, 136203.

[2] V. Kittithammavong, W. Khanitchaidecha and P. Thongsanit, CO_2 emissions from plastic consumption behaviors in Thailand, Sustainability, 2023, 15(16), 12135.

[3] X. Hu and M. Gholizadeh, Biomass pyrolysis: A review of the process development and challenges from initial researches up to the commercialisation stage, Journal of Energy Chemistry, 2019, 39, 109-143.

[4] J. Joo, E.E. Kwon and J. Lee, Achievements in pyrolysis process in E-waste management sector, Environmental Pollution, 2021, 287, 117621.

[5] Y.B. Sonawane, M.R. Shindikar and M.Y. Khaladkar , Use of catalyst in pyrolysis of polypropylene waste into liquid fuel, International Research Journal of Environment Sciences, 2015, 4(7), 24-28.

[6] A. Lopez-Urionabarrenechea, I. de Marco, B.M. Caballero, M.F. Laresgoiti and A. Adrados, Upgrading of chlorinated oils coming from pyrolysis of plastic waste, Fuel Processing Technology, 2015, 137, 229-239.

[7] A.K. Panda, R.K. Singh and D.K. Mishra, Thermolysis of waste plastics to liquid fuel: A suitable method for plastic waste management and manufacture of value added products—A world prospective, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(1), 233-248.

[8] S.O. Giwa and M. Sharifpur, Effects of uniform magnetic induction on heat transfer performance of aqueous hybrid ferrofluid in a rectangular cavity, Applied Thermal Engineering, 2020, 170, 115004.

[9] A. Vieweg, G. Ressel, P. Prevedel, P. Raninger, M. Panzenböck, S. Marsoner and R. Ebner, Differences to a conventional heat treatment process and optimization of its parameters, Materials Science and Engineering, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2016, 119, 012019.

[10] X. Cai, H.P. Wang and B. Wei, Migration dynamics for liquid/solid interface during levitation melting of metallic materials, International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 151, 1-11.

ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.007

[11] G. Lopez, M. Artetxe, M. Amutio, J. Bilbao, and M. Olazar, Thermochemical routes for the valorization of waste polyolefinic plastics to produce fuels and chemicals. A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, (2017). 73, 346-368.

[12] B. Lokahita, W. Kurniawan, M. Aziz and F. Takahashi, Py-GC-MS of refuse materials in waste to energy point of view, Energy Procedia, 2019, 158, 497-501.

[13] A.P. Caetani, L. Ferreira and D. Borenstein, Development of an integrated decision-making method for an oil refinery restructuring in Brazil, 2016, Energy, 111,197-210.

[14] M.N. Ishak, A.R. Abu Talib and M.Y. Harmin, Material selection and design analysis of multi-purpose disposable safety syringe, International Journal of Engineering and Technology, 2018, 7(4.13), 214-220.

[15] H. Dong, Y. Zhao, H. Yuan, X.Hu and Z. Yang, A simplified calculation method of heat source model for induction heating, Materials, 2019, 12(18), 2938.

[16] F. Hajabdollahi, K.N. Premnath and S. Malepati, Effects of the magnetic field on direct contact melting transport processes during rotation, Applied Mathematical Modelling, 2018, 61, 421-442.

[17] R. Dai, Y.Wu, J. Mostaghimi, L. Tang and M. Zeng, Characteristics and control mechanism of melting process under extra magnetic force fields, Applied Thermal Engineering, 2020, 167, 114704.

[18] U.P. Anaidhuno and C.O. Mgbemena, Development of an Electric induction furnace for heat treatment of ferrous and non-ferrous alloys, American Journal of Engineering Research, 2015, 4(5), 29-35.

[19] S. Fashu, M. Lototskyy, M.W. Davids, L. Pickering, V. Linkov, S. Tai, T. Renheng, X. Fangming, P.V. Fursikov, B.P. Tarasov, A review on crucibles for induction melting of titanium alloys, Materials and Design, 2020, 186, 108295.

[20] A. Fomin, M. Fomina, V. Koshuro, I. Rodionov, Composite metal oxide coatings on chromium-nickel stainless steel produced by induction heat treatment, Composite Structures, 2019, 229, 111451.

[21] A.P. Caetani, L.Ferreira and D. Borenstein, Development of an integrated decision-making method for an oil refinery restructuring in Brazil, Energy, 2016,111, 197-210.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.008

บทความวิจัย

การผลิตแผ่นปูพื้นสนามจากเศษยางล้อรถยนต์และขยะพอลิสไตรีน

วิบูลย์พงศ์ บริบูรณ์ สาริศา ประเสริฐล้ำ ฐานิดา พลวงศ์ตระกูล และ สมเจตน์ พัชรพันธ์*

ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: fengsjpc@ku.ac.th

วันที่รับบทความ: 31 ตุลาคม 2567; วันที่ทบทวนบทความ: 28 มกราคม 2568; วันที่ตอบรับบทความ: 31 มกราคม 2568
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 22 เมษายน 2568

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำขยะบรรจุภัณฑ์พลาสติกและโฟมพอลิสไตรีนมาใช้เป็นสารเชื่อมประสานสำหรับการผลิตแผ่นปูพื้นสนามจากเศษยางล้อรถยนต์ เพื่อทดแทนการใช้สารเชื่อมประสานที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ โดยทำการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างเศษยางล้อรถยนต์ต่อหินย่อย ปริมาณสารเชื่อมประสาน รวมถึงความหนาและความหนาแน่นของแผ่นปูพื้นสนามที่มีต่อสมบัติการต้านทานต่อแรงอัด สมบัติการต้านทานต่อแรงกระแทก และความสามารถในการซึมผ่านของน้ำ จากผลการทดสอบเบื้องต้น พบว่า ที่อัตราส่วนระหว่างเศษยางล้อรถยนต์ต่อหินย่อยเท่ากับ 75 ต่อ 25 เมื่อใช้ปริมาณสารเชื่อมประสานเท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ที่ความหนาแน่นของแผ่นปูพื้นสนามเท่ากับ 0.9 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ให้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด และแผ่นปูพื้นสนามที่ผลิตได้มีความสามารถในการซึมผ่านของน้ำได้ทุกกรณี นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังได้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Autodesk Fusion 360 ในการออกแบบและวิเคราะห์ความแข็งแรงของแผ่นปูพื้นสนาม เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริง อีกทั้งยังถูกนำมาใช้ในการออกแบบแผ่นปูพื้นสนามที่มีลักษณะแนวเสริมแรงในรูปแบบที่แตกต่างกัน จากผลการวิเคราะห์โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์แสดงให้เห็นว่า ผลการวิเคราะห์ที่ได้สอดคล้องกับผลการทดสอบจริง และจากผลการศึกษาแนวทางการออกแบบแนวเสริมแรงของแผ่นปูพื้นสนามที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด ขึ้นอยู่กับรูปแบบ ความกว้าง และความสูงของแนวเสริมแรงที่ใช้สำหรับแผ่นปูพื้นสนาม ผลสำเร็จเบื้องต้นที่ได้จากงานวิจัยนี้จะเป็นแนวทางที่สำคัญในการใช้ประโยชน์และลดปัญหาสิ่งแวดล้อมจากขยะพอลิสไตรีนและยางล้อรถยนต์ต่อไป

คำสำคัญ: ขยะพอลิสไตรีน; สารเชื่อมประสาน; เศษยางล้อรถยนต์; แผ่นปูพื้นสนาม; โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อการวิเคราะห์ทางวิศวกรรม

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.008

บทความวิจัย

Floor Mat produced from Tire Crumb Rubber and Polystyrene Wastes

Wiboonpong Boriburana, Sarisa Prasertlum, Thanida Pholwongtrakul and Somjate Patcharaphun*

Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

* Corresponding author, E-mail: fengsjpc@ku.ac.th

Received: 31 October 2024; Revised: 28 January 2025; Accepted: 31 January 2025
Online Published: 22 April 2025

Abstract: The objective of this work is to study the feasibility of using the disposal of polystyrene packaging plastic and foam as a binding agent for the floor mats, which is produced from recycled tire crumb rubber to replace commercial-grade binders. The influence of tire crumb rubber/aggregate ratio, binder content, bulk density, and product thickness on compressive strength, impact resistance, and water permeability are the main interesting factors. The preliminary results show that the best mechanical properties of tire crumb rubber floor mat can be obtained by using a crumb rubber/aggregate ratio of 75/25 mixed with 5.0 %V/V binder and the bulk density of floor mat is 0.9 g/cm^3. Considering the water permeability, all the tire crumb rubber mat floors produced in this work are water - permeable. In this work, the computer program Autodesk Fusion 360 is utilized to design and analyze the strength of floor mats, and a comparison between the numerical and experimental results is carried out. Moreover, the various designs of rib patterns are examined. Good agreements between numerical and experimental results are found. For design purposes, to gain the highest strength-to-weight ratio, it is suggested that the rib pattern, rib width (W), and rib height (H) are important factors. The success of this work shows the high feasibility of utilizing polystyrene waste as a binding material to reclaim plastic wastes and tire rubbers and to reduce environmental problems.

Keywords: Polystyrene waste; Binder; Tire crumb rubber; Floor mat; Computer aided engineering program

บทความวิจัย

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.008

1. บทนำ

ปัจจุบันผลิตภัณฑ์พลาสติกถูกผลิตออกมาใช้เป็นจำนวนมาก เนื่องจากมีน้ำหนักเบา มีความสะดวกในการใช้งานและมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่า เมื่อเทียบกับวัสดุประเภทอื่นๆ [1-2] อย่างไรก็ตามผลกระทบหรือปัญหาที่เกิดจากปริมาณการใช้พลาสติกที่เพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งขยะบรรจุภัณฑ์จากพลาสติกพอลิสไตรีน (Polystyrene, PS) ที่มีประมาณ 70% ของขยะพลาสติกทั้งหมดและขยะจากโฟม (Expanded Polystyrene, EPS) ที่มากกว่า 90% [3-5] เนื่องจากยังไม่มีการจัดการหรือกำจัดอย่างถูกวิธี รวมถึงใช้เวลาในการย่อยสลายหลายร้อยปี [6] จากผลการสำรวจแสดงให้เห็นว่าในปี พ.ศ. 2554 ประเทศไทยมีขยะพลาสติกมากถึง 2.7 ล้านตันต่อปี หรือประมาณ 7,000 ตันต่อวัน ซึ่งกระบวนการในการกำจัดขยะพลาสติกที่นิยมใช้กันทั่วไป คือ การเผาทำลายและการฝังกลบ ซึ่งส่งผลกระทบโดยตรงต่อสิ่งแวดล้อม ทั้งสภาพอากาศโดยเฉพาะอย่างยิ่งฝุ่น PM 2.5 และสภาพดินรวมถึงน้ำบาดาลซึ่งปนเปื้อนไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ นอกจากนี้ปัญหาขยะที่ค้างและอุดตันตามท่อระบายน้ำยังเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดน้ำท่วมขังตามเมืองหลวงที่สำคัญของประเทศ

ยางล้อรถเป็นขยะอีกประเภทหนึ่งที่พบเป็นจำนวนมาก เนื่องจากการขยายตัวอย่างรวดเร็วของอุตสาหกรรมยานยนต์ทั่วโลก ส่งผลให้ขยะยางล้อรถมีปริมาณสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง การจัดการกับขยะยางค่อนข้างยุ่งยาก เนื่องจากยางเป็นพอลิเมอร์ในกลุ่มเทอร์โมเซ็ต (Thermosets) ที่โมเลกุลเกิดการเชื่อมขวาง (Crosslink) ผ่านปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เซชั่น (Vulcanization) จึงไม่สามารถนำยางไปหลอมขึ้นรูปใหม่ได้ [7] อีกทั้งกระบวนการย่อยสลายยางตามธรรมชาติใช้เวลานานนับร้อยปี การจัดการหรือกำจัดขยะยางล้อรถด้วยวิธีการที่ไม่เหมาะสมก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม อุบัติภัยจากไฟไหม้ของกองขยะยางล้อรถ ซึ่งการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ทำให้เกิดสารไดออกซินและฝุ่นพิษที่เป็นอันตรายต่อคนและสิ่งแวดล้อม โดยทั่วไปการกำจัดขยะยางอย่างถูกวิธีต้องทำให้ขยะยางกลับมามีประโยชน์หรือใช้งานใหม่ได้อีกครั้ง อาจอยู่ในรูปของผลิตภัณฑ์เดิมหรือผลิตภัณฑ์ใหม่ก็ได้ ในทางปฏิบัติแล้วการรีไซเคิลขยะยางสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อื่นเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ การนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมบางประเภท และการนำไปผ่านกระบวนการย่อยสลายด้วยความร้อน (Pyrolysis) เพื่อให้ได้ส่วนประกอบดั้งเดิมของผลิตภัณฑ์นั้นกลับคืนมา [8-10] เป็นต้น

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าได้มีการนำวัสดุยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์รวมถึงขยะพลาสติกมาผลิตเป็นแผ่นปูพื้นสนาม ศุภชัย [11] ได้พัฒนาบล็อกยางปูพื้นที่ผลิตจากยางธรรมชาติและยาง EPDM (Ethylene Propylene Diene Rubber) เหลือทิ้งโดยใช้กระบวนการอัดขึ้นรูป บล็อกยางปูพื้นประกอบด้วยสองชั้น คือส่วนฐานรองรับซึ่งทำจากยางธรรมชาติชนิดยางสกิม (Skim Rubber) ผสมกับผงขี้เลื่อยไม้ยางพาราและใช้ยาง EPDM ซึ่งเหลือทิ้งจากฉนวนหุ้มท่อแอร์เป็นชั้นด้านบน จากผลการทดลองพบว่าสมบัติการดูดซับพลังงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนของยาง EPDM ในขณะที่สมบัติความต้านทานแรงฉีกขาด สมบัติการกระเด้งกระดอนของ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.008

บล็อกยางปูพื้นมีแนวโน้มลดลง วิหาร และ กิตติพงษ์ [12] ได้พัฒนาผลิตภัณฑ์กระเบื้องยางธรรมชาติผสมเศษผงขยะพลาสติก EVA (Ethylene Vinyl Acetate) ในปริมาณต่างๆ กัน ทำการบดผสมด้วยเครื่องบดแบบสองลูกกลิ้ง แล้วอัดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิ 150°C จากผลการทดสอบสมบัติตามมาตรฐาน ASTM พบว่ากระเบื้องยางธรรมชาติผสมผงพลาสติก EVA ในอัตราส่วน 10 phr (Part per Hundred Rubber) มีสมบัติที่เหมาะสมสำหรับนำไปปูพื้นผนังอาคาร เนื่องจากมีค่าความแข็ง ความต้านทานแรงดึง และความต้านทานการสึกหรอที่ดี ในขณะที่ความหนาแน่นและสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีค่าลดลง กิตติพงษ์ และ ประชุม [13] พัฒนาผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นผสมเศษขวดพลาสติกสีประเภทพอลิ-เอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) ที่เหลือทิ้งจากการบริโภคจากผลการดำเนินงาน สามารถสรุปได้ว่าขวดพลาสติก PET แบบสีและแบบใส มีสมบัติการต้านทานต่อแรงดึงใกล้เคียงกัน เมื่อนำไปบดย่อยเป็นเศษพลาสติกและผสมลงในคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นในปริมาณที่เหมาะสม จะช่วยลดการดูดซึมน้ำ ความหนาแน่น ความร้อนที่สะสมบนพื้นผิว ลดต้นทุนการผลิต ช่วยลดปัญหาขยะพลาสติก และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

เพื่อเป็นการลดปัญหาขยะพลาสติกพอลิสไตรีนและโฟมพอลิสไตรีน รวมถึงขยะจากยางล้อรถ ซึ่งเป็นวัสดุที่ย่อยสลายได้ยากและยังไม่ได้รับการกำจัดอย่างถูกวิธี ทางคณะผู้วิจัยจึงเลือกนำขยะบรรจุภัณฑ์พอลิสไตรีนและเศษยางรถยนต์ (Tire Crumb Rubber, TCR) มาผลิตเป็นแผ่นปูพื้นสนาม โดยใช้หินย่อย (Aggregate, Agg) เป็นวัสดุเสริมแรง (Reinforcing Material) เพื่อให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น โดยศึกษาความเป็นไปได้ในการนำขยะบรรจุภัณฑ์ PS และ EPS มาใช้เป็นสารเชื่อมประสาน (Binder) โดยวิธีการละลายในตัวทำละลายที่เหมาะสม เพื่อผลิตเป็นวัสดุคอมโพสิตระหว่างเศษยางล้อรถยนต์และหินย่อยสำหรับการผลิตแผ่นปูพื้นสนาม และได้ดำเนินการทดสอบสมบัติเชิงกลในด้านความสามารถในการรับแรงอัดและแรงกระแทก รวมถึงสมบัติการซึมผ่านของน้ำ (Water Permeability) เพื่อเป็นแนวทางในการใช้ประโยชน์จากขยะพลาสติกและโฟมจากพอลิสไตรีน รวมถึงเศษยางล้อรถยนต์ ในอนาคตต่อไป

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย

2.1 เศษยางล้อรถยนต์ที่ผ่านการบดย่อยและหินย่อย ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยเท่ากับ 4 และ 5 mm ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 1 (a) และ (b)

2.2 กล่องบรรจุภัณฑ์ PS และ EPS ดังรูปที่ 1 (c)

2.3 สารละลายโทลูอีน (Toluene) เกรดการค้าจากบริษัท Sense

2.4 เครื่อง Shredder รุ่น SA030 ของบริษัท Nissuikako และเครื่อง Powderizer รุ่น SM100 ของบริษัท Retsch

2.5 เครื่อง Viscometer รุ่น RV-2M ของบริษัท W&J Instrument สำหรับการทดสอบความหนืดของสารเชื่อมประสานที่ผลิตจากขยะ PS และ EPS เมื่อละลายในโทลูอีน

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.008

รูปที่ 1 (a) เศษยางล้อรถยนต์ที่ผ่านการบดย่อย (b) หินย่อย และ (c) บรรจุภัณฑ์ PS และ EPS

2.6 เครื่องอัดขึ้นรูปร้อน-เย็น ของบริษัท EN mach และแม่พิมพ์อัดขึ้นรูป ขนาด 126 x 126 mm ที่มีขนาดความหนา 15 25 และ 35 mm ตามลำดับ

2.7 เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) รุ่น H50KS ของบริษัท Hounsfield ใช้สำหรับการทดสอบสมบัติการต้านทานต่อแรงอัด (ASTM D695) ที่ความเร็วในการกด 1 mm/min กำหนดแรงกด (Compressive Force) ไม่เกิน 40,000 N จนแผ่นปูพื้นสนามเกิดความเสียหาย โดยใช้จำนวนแผ่นชิ้นงานสำหรับการทดสอบ 3 ตัวอย่างในแต่ละเงื่อนไข

2.8 เครื่อง Falling Mass Impact Tester รุ่น QC637 ของบริษัท Cometech สำหรับการทดสอบสมบัติการต้านทานต่อแรงกระแทก (ASTM D5628) ของแผ่นปูพื้นสนามที่ผลิตได้

2.9 การทดสอบความสามารถในการซึมผ่านน้ำของแผ่นปูพื้นสนาม โดยเติมน้ำในปริมาตรเท่ากับ 550 cm^3 ที่ด้านบนของแผ่นปูพื้นสนาม และจับเวลาจนกระทั่งน้ำได้ไหลซึมผ่านแผ่นปูพื้นสนามจนหมด

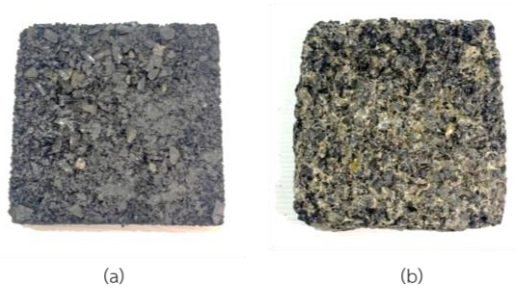
2.10 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Autodesk Fusion 360 สำหรับการออกแบบและวิเคราะห์ความแข็งแรงของแผ่นปูสนาม

การทดลองเริ่มจากการบดย่อยขยะบรรจุภัณฑ์พลาสติก PS และ EPS โดยใช้เครื่อง Shredder และ Powderizer เพื่อลดขนาดของขยะ PS และ EPS ดังแสดงในรูปที่ 2 (a) และ (b) นอกจากนี้เศษ PS ภายหลังจากผ่านการลดขนาดด้วยเครื่อง Shredder ซึ่งมีลักษณะเป็นเกล็ด (Flake) จะถูกนำไปบดย่อยให้เป็นผงโดยใช้เครื่อง Powderizer ดังแสดงในรูป 2 (c) เพื่อเพิ่มความสามารถในการละลายในสารละลายโทลูอีน จากนั้นนำผง PS และเศษ EPS ไปละลายในโทลูอีน ที่ความเข้มตั้งแต่ 0.1 ถึง 0.325 %W/V และทดสอบความหนืดโดยใช้เครื่อง Viscometer ที่ความเร็วรอบการหมุน 30 rpm จากผลการวิเคราะห์ พบว่า PS และ EPS ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 0.325 %W/V มีความหนืดประมาณ 1016 mPa.s ซึ่งเหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์แผ่นปูพื้นสนาม

ทำการอัดขึ้นรูปแผ่นปูพื้นสนามที่ใช้ PS และ EPS เป็นสารเชื่อมประสาน โดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูปร้อนที่อุณหภูมิเท่ากับ 120°C เป็นเวลา 20 min ภายใต้เงื่อนไขแบบต่างๆ (แสดงในตารางที่ 1) เพื่อระเหยโทลูอีนออก (จุดเดือดโทลูอีน 110°C) จากนั้นจึงนำชิ้นงานมาอัดขึ้นรูปเย็นที่อุณหภูมิ 25°C เป็นเวลา 15 min เพื่อให้สารเชื่อมประสานแข็งตัวก่อนนำออกจากแม่พิมพ์ รูปที่ 3 แสดงแผ่นปูพื้นสนามที่ผลิตได้จากสารเชื่อมประสาน PS และ EPS ตามลำดับ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.008

รูปที่ 2 (a) ขยะ PS (b) EPS ภายหลังผ่านการลดขนาดด้วยเครื่อง Shredder และ (c) PS ภายหลังจากการบดให้เป็นผงด้วยเครื่อง Powderizer

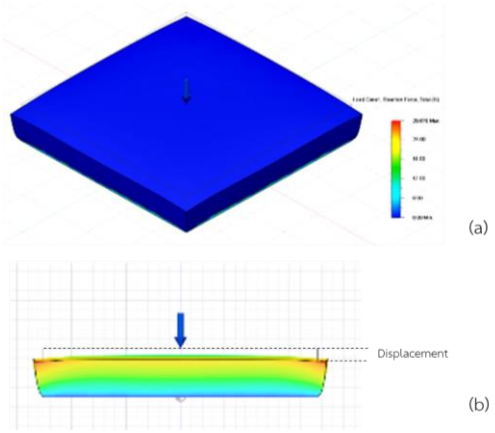


รูปที่ 3 แผ่นปูพื้นสนามที่ใช้สารเชื่อมประสานจาก (a) PS และ (b) EPS

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Autodesk Fusion 360 ถูกนำมาใช้ในการออกแบบแผ่นปูพื้นสนามขนาด 126x126 mm ที่ความหนา 15 25 และ 35 mm ตามลำดับ เพื่อวิเคราะห์ความแข็งแรงเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริงที่ได้โดยกำหนดให้แรงกระทำ (Load) คงที่เท่ากับ 40,000 N ผลการวิเคราะห์ที่ได้แสดงค่าแรงต้าน (Reaction force) และระยะยุบตัว (Displacement) ที่เกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4

ตารางที่ 1 เงื่อนไขในการผลิตแผ่นปูพื้นสนามที่ใช้ PS และ EPS เป็นสารเชื่อมประสาน

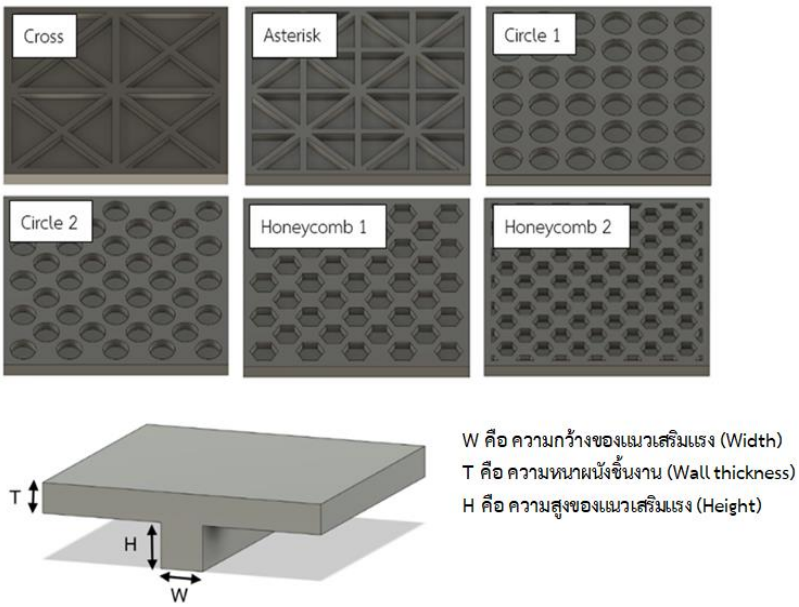
Parameter studies	
Binder (%V/V)	3 / 5 / 7
TCR: Agg (%V/V)	50:50 / 75:25 / 25:75
Thickness (mm)	15 / 25 / 35
Bulk density (g/cm^3)	0.50 / 0/70 / 0.90



รูปที่ 4 ผลการวิเคราะห์ Reaction force และ Displacement ที่ได้จากโปรแกรม Fusion 360

นอกจากนี้ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ยังถูกนำมาใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์ความแข็งแรงหรือระยะยุบตัวสูงสุด (Max Displacement) เมื่อเทียบกับน้ำหนักสำหรับแผ่นปูพื้นสนามขนาด 400x400 mm^2 ความหนา 25 mm ของแผ่นปูพื้นสนามที่มีลักษณะแนวเสริมแรงต่างๆ กัน ซึ่งได้แก่ รูปแบบกากบาท (Cross) รูปแบบดอกจัน (Asterisk) รูปแบบวงกลม (Circle) และรูปแบบรังผึ้ง (Honeycomb) ที่มีขนาดต่างๆ กัน ดังรูปที่ 5

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.008



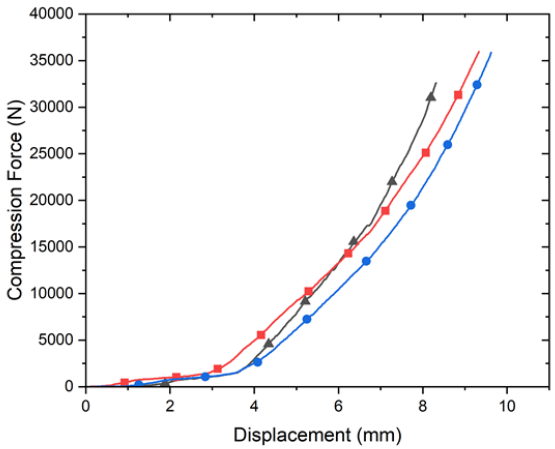
รูปที่ 5 ลักษณะแนวเสริมแรงแบบต่างๆ และสัดส่วนของ W T และ H ที่ใช้ในการออกแบบแนวเสริมแรง

ภายใต้เงื่อนไข W T และ H ต่างๆ กัน เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบผลิตภัณฑ์แผ่นปูพื้นสนามที่มีความสามารถในการรับแรงและน้ำหนักที่เหมาะสมต่อไป

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

3.1 ผลทดสอบสมบัติการต้านทานต่อแรงอัด

รูปที่ 6 แสดงตัวอย่างผลการทดสอบแรงอัด (Compressive Force) ซึ่งได้จากแผ่นปูพื้นสนามทั้ง 3 ตัวอย่าง ที่มีอัตราส่วนระหว่างเศษยางล้อรถยนต์ต่อหินย่อยที่ 50:50ที่ความหนาของแผ่นปูพื้นสนามเท่ากับ 15 mm และปริมาณสารเชื่อมประสาน PS ที่อัตราส่วน 5 %V/V โดยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและระยะยุบตัวที่เกิดขึ้น จากผลการทดสอบโดยทั่วไป พบว่าแรงที่ใช้ในการอัดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามระยะยุบตัวที่

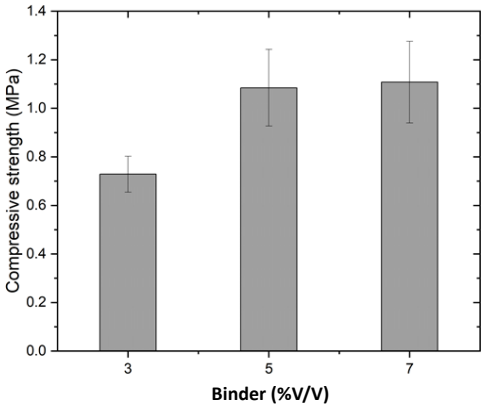


รูปที่ 6 ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดที่ใช้และระยะยุบตัวของแผ่นปูพื้นสนาม

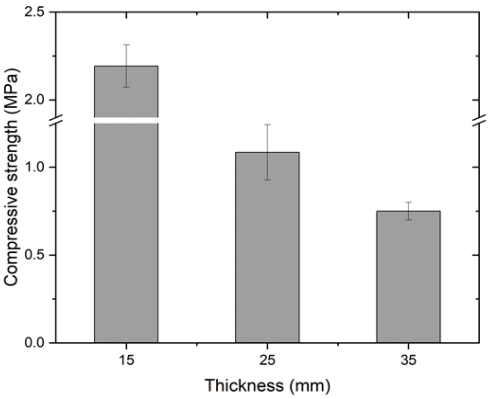
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.008

หากพิจารณาอิทธิพลของปริมาณสารเชื่อมประสาน PS ที่มีต่อสมบัติการต้านทานต่อแรงอัดของแผ่นปูพื้นสนามดังแสดงในรูปที่ 7 เมื่อใช้อัตราส่วนเศษยางล้อรถยนต์ต่อหินย่อยที่ 50:50 และความหนาของแผ่นปูพื้นสนามเท่ากับ 25 mm โดยเปรียบเทียบปริมาณสารเชื่อมประสานในอัตราส่วนเท่ากับ 3 5 และ 7 %V/V ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่าแผ่นปูพื้นสนามที่ผสมสารเชื่อมประสาน PS ในอัตราส่วน 3 %V/V ให้สมบัติการต้านทานต่อแรงอัดต่ำที่สุด เนื่องจากปริมาณสารเชื่อมประสานที่ไม่เพียงพอต่อการยึดเกาะ ในขณะที่แผ่นปูพื้นสนามที่ผสมสารเชื่อมประสานในอัตราส่วน 5 และ 7 %V/V ให้สมบัติการต้านทานต่อแรงอัดที่ไม่แตกต่างกัน รูปที่ 8 แสดงอิทธิพลของความหนาที่มีต่อสมบัติการต้านทานต่อแรงอัดของแผ่นปูพื้นสนาม เมื่อใช้อัตราส่วนเศษยางล้อรถยนต์ต่อหินย่อยที่ 50:50 และผสมสารเชื่อมประสาน PS ในอัตราส่วน 5 %V/V โดยทำการเปรียบเทียบที่ความหนาของแผ่นปูพื้นสนามเท่ากับ 15 25 และ 35 mm ตามลำดับ จากผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 8 พบว่าแผ่นปูพื้นสนามที่ความหนาเท่ากับ 15 mm มีความต้านทานต่อแรงอัดสูงที่สุด และแผ่นปูพื้นสนามที่ความหนาเท่ากับ 25 และ 35 mm มีความต้านทานต่อแรงอัดลดลงมาตามลำดับ

ผลการทดสอบสมบัติการต้านทานต่อแรงอัดของแผ่นปูพื้นสนามที่มีปริมาณสารเชื่อมประสาน PS ในอัตราส่วน 5 %V/V และความหนาของแผ่นปูพื้นสนามเท่ากับ 25 mm แสดงในรูปที่ 9 โดยทำการเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างเศษยางล้อรถยนต์ต่อหินย่อย (TCR:Agg) ที่ 25:75 50:50 และ 75:25 จากผลการทดสอบพบว่า เมื่ออัตราส่วนของเศษยางล้อรถยนต์



รูปที่ 7 สมบัติการต้านทานแรงอัดของแผ่นปูพื้นสนามที่ผสมสารเชื่อมประสาน PS ในปริมาณต่างๆ กัน



รูปที่ 8 สมบัติการต้านทานแรงอัดของแผ่นปูพื้นสนามที่มีความหนาต่างๆ กัน

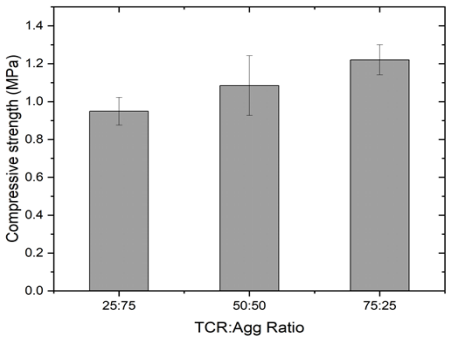
เพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีความต้านทานต่อแรงอัดเพิ่มสูงขึ้น โดยอัตราส่วนระหว่างเศษยางล้อรถยนต์ต่อหินย่อยที่ 75:25 มีสมบัติความต้านทานต่อแรงอัดที่สูงที่สุด ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากความเข้ากันได้ (Compatibility) ระหว่างเศษยาง หินย่อย และสารเชื่อมประสาน PS กล่าวคือ สารเชื่อมประสาน PS มีความเข้ากันได้กับเศษยางมากกว่าหินย่อย โดยพิจารณาจากค่า

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.008

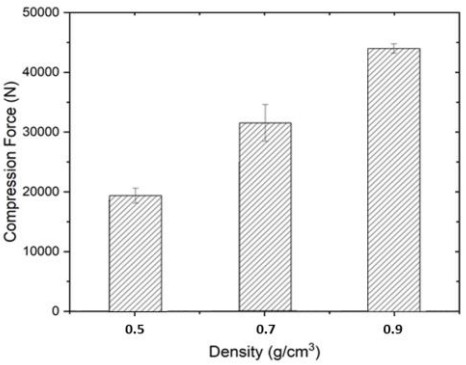
Surface Energy หรือ Polarity ที่ผิว [14] จึงส่งผลให้สารเชื่อมประสาน PS และเศษยางล้อสามารถยึดเกาะกัน (Adhesion) ได้ดี และสามารถส่งถ่ายแรงที่มากระทำ (Stress Transfer) ได้ดีกว่า

รูปที่ 10 แสดงผลการเปรียบเทียบสมบัติการต้านทานต่อแรงอัดของแผ่นปูพื้นสนามที่ผลิตจากสารเชื่อมประสาน PS และ EPS ในปริมาณ 5 %V/V อัตราส่วนเศษยางล้อรถยนต์ต่อหินย่อยที่ 75:25 และความหนาของแผ่นปูพื้นสนามเท่ากับ 25 mm จากผลการทดสอบพบว่า สมบัติการต้านทานต่อแรงอัดที่ได้จากสารเชื่อมประสานทั้ง 2 ชนิด มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม แผ่นปูพื้นสนามที่ผลิตจากสารเชื่อมประสาน EPS มีค่าต่ำกว่า PS เล็กน้อย ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากฟองอากาศที่อยู่ภายในสารเชื่อมประสานซึ่งมาจากรูพรุนภายในเม็ดโฟม EPS

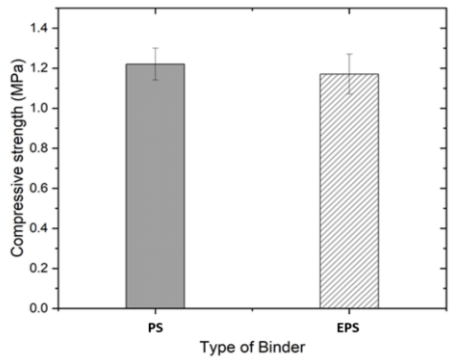
หากพิจารณาอิทธิพลของความหนาแน่นที่มีต่อสมบัติการต้านทานต่อแรงอัดของแผ่นปูพื้นสนามที่มีความหนา 25 mm เมื่อใช้อัตราส่วนระหว่างเศษยางล้อต่อหินย่อยเท่ากับ 75:25 และใช้ปริมาณสารเชื่อมประสาน 5 %V/V ที่ความหนาแน่น 0.5 0.7 และ 0.9 g/cm^3 จากผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 11 พบว่า สมบัติการต้านทานต่อแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามความหนาแน่น โดยเฉพาะอย่างยิ่งแผ่นปูพื้นสนามที่ความหนาแน่น 0.9 g/cm^3 ที่ให้สมบัติความต้านทานต่อแรงอัดสูงที่สุดและสามารถรับแรงอัดได้มากกว่า 40000 N หรือ 4 ตัน โดยยังไม่ได้รับความเสียหาย



รูปที่ 9 สมบัติการต้านทานแรงอัดของแผ่นปูพื้นสนามเมื่อใช้ TCR:Agg ต่างๆ กัน



รูปที่ 10 สมบัติการต้านทานต่อแรงอัดของแผ่นปูพื้นสนาม เมื่อใช้สารเชื่อมประสาน PS และ EPS

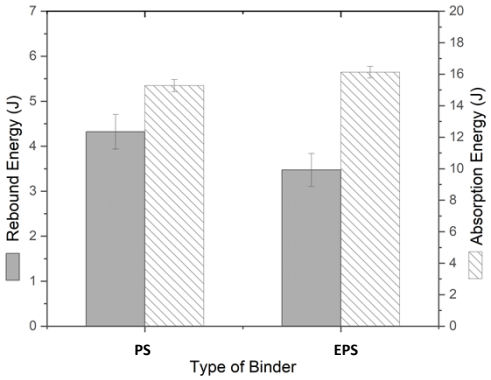


รูปที่ 11 ความสามารถในการรับแรงอัดของแผ่นปูพื้นสนาม ที่ความหนาแน่นต่างๆ กัน

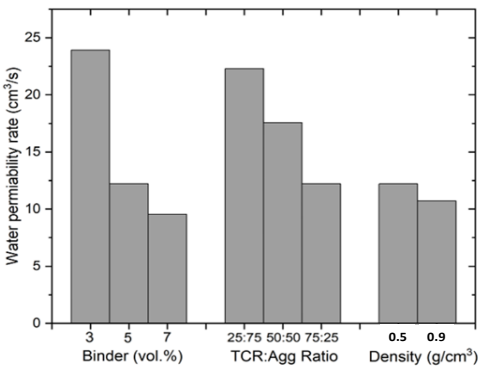
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.008

3.2 ผลทดสอบสมบัติการต้านทานต่อแรงกระแทก

ผลการทดสอบสมบัติการต้านทานต่อแรงกระแทกในรูปที่ 12 ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของพลังงานการกระเด้งกระดอน (Rebound energy) และการดูดซับพลังงาน (Absorption energy) ของแผ่นปูพื้นสนามที่อัตราส่วนเศษยางล้อรถยนต์ต่อหินย่อยเท่ากับ 75:25 และความหนาของแผ่นปูพื้นสนามเท่ากับ 25 mm เมื่อใช้สารเชื่อมประสานจาก PS และ EPS ในอัตราส่วนเท่ากับ 5 % V/V ที่ความหนาแน่น 0.5 0.7 และ 0.9 g/cm^3 ตามลำดับ โดยทำการทดสอบที่ความสูง 200 cm ใช้ลูกตุ้มเหล็กน้ำหนัก 1,000 g หรือที่พลังงานเท่ากับ 19.6 J ซึ่งเป็นพลังงานศักย์ที่สูงที่สุดของเครื่องทดสอบ จากผลการทดสอบพบว่า แผ่นปูพื้นสนามที่ใช้ PS และ EPS เป็นสารเชื่อมประสานที่ความหนาแน่นเท่ากับ 0.5 และ 0.7 g/cm^3 เกิดความเสียหายในทุกกรณี ในขณะที่แผ่นปูพื้นสนามที่ความหนาแน่นเท่ากับ 0.9 g/cm^3 ไม่เกิดความเสียหายแต่อย่างใด ดังนั้นทางคณะผู้วิจัยจึงทำการเปรียบเทียบแผ่นปูพื้นสนามที่ขึ้นรูปโดยใช้สารเชื่อมประสานจาก PS และ EPS ที่ความหนาแน่น 0.9 g/cm^3 เท่ากัน พบว่าแผ่นปูพื้นสนามที่ขึ้นรูปโดยใช้สารเชื่อมประสานจาก EPS มีความสามารถในการดูดซับพลังงานดีกว่าและมีสมบัติการกระเด้งกระดอนต่ำกว่าแผ่นปูพื้นสนามที่ใช้สารเชื่อมประสานจาก PS ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากรูพรุนที่เกิดจากฟองอากาศภายในเม็ด EPS ดังที่กล่าวไว้แล้วข้างต้น



รูปที่ 12 ผลการวิเคราะห์การกระเด้งกระดอนและการดูดซับพลังงานของแผ่นปูพื้นสนามที่ผลิตจากสารเชื่อมประสาน PS และ EPS



รูปที่ 13 ผลการวิเคราะห์อัตราการซึมผ่านน้ำของแผ่นปูพื้นสนามที่เงื่อนไขในการผลิตต่างๆ กัน

3.3 ผลการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านน้ำ

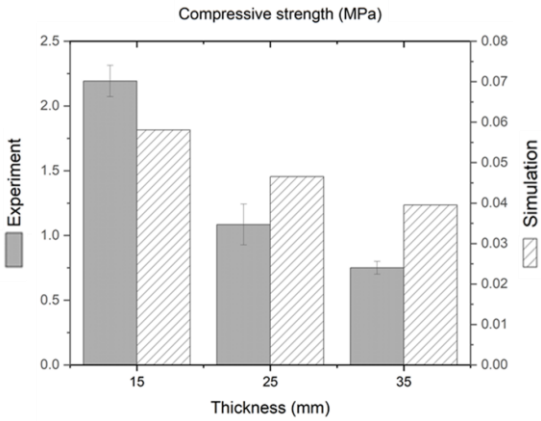
จากผลการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านของน้ำของแผ่นปูพื้นสนามที่ผลิตได้ ดังแสดงในรูปที่ 13 พบว่า น้ำสามารถซึมผ่านแผ่นปูพื้นสนามได้หมดในทุกกรณี โดยอัตราการซึมผ่านของน้ำมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้ปริมาณสารเชื่อมประสาน สัดส่วนของเศษยางล้อ และความหนาแน่นของแผ่นปูพื้นสนามเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้หากมีการใช้ขนาดของเศษยางล้อรถยนต์และ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.008

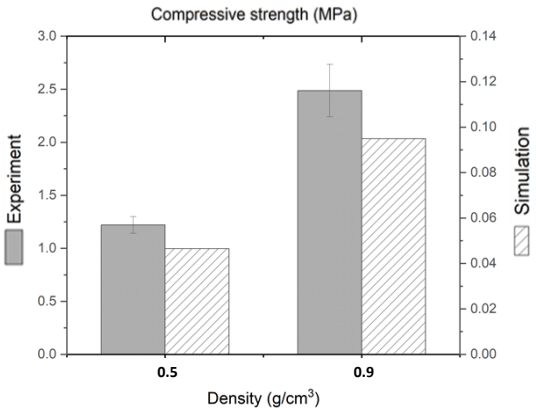
หินย่อยที่เล็กลงอาจส่งผลให้อัตราการซึมผ่านของน้ำที่ลดลงได้เช่นกัน

3.4 ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของแผ่นปูพื้นสนามโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

ผลการวิเคราะห์สมบัติการต้านทานต่อแรงอัดของแผ่นปูพื้นสนามที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เมื่อปรับเปลี่ยนความหนา และความหนาแน่นของแผ่นปูพื้นสนาม เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบจริงแสดงดังรูปที่ 14 และ 15 ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบพบว่า ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดสอบจริง กล่าวคือ การเพิ่มความหนาของแผ่นปูพื้นสนาม ส่งผลให้สมบัติการต้านทานต่อแรงอัดมีค่าลดลง ในขณะที่การเพิ่มความหนาแน่นของแผ่นปูพื้นสนามส่งผลให้สมบัติการต้านทานต่อแรงอัดมีค่าเพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 14 ผลการเปรียบเทียบสมบัติการต้านทานแรงอัดของแผ่นปูพื้นสนามที่ความหนาต่างๆ กัน ซึ่งได้จากผลการทดสอบจริงและโปรแกรมคอมพิวเตอร์



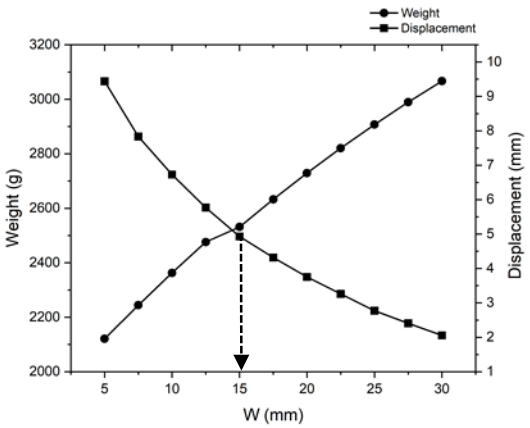
รูปที่ 15 ผลการเปรียบเทียบสมบัติการต้านทานแรงอัดของแผ่นปูพื้นสนามที่ความหนาแน่นต่างๆ กัน ซึ่งได้จากผลการทดสอบจริงและโปรแกรมคอมพิวเตอร์

อย่างไรก็ตามหากพิจารณาผลการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์พบว่าค่าที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ยังคงมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบจริง ทั้งนี้อาจมีสาเหตุเงื่อนไขในการทดสอบและการวิเคราะห์โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่แตกต่างกัน กล่าวคือการในการทดสอบจริงแผ่นปูพื้นสนามถูกอัดที่บริเวณผิวด้านบนด้วยความเร็วคงที่ (Constant speed) แล้วจึงทำการตรวจวัดแรงกระทำ (Force, F) ที่เกิดขึ้นจากชุด Load cell ด้านบนของเครื่อง UTM ในขณะที่การวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งทำการกดอัดที่บริเวณผิวด้านบนของแผ่นปูพื้นสนามด้วยแรงคงที่จนแผ่นปูพื้นสนามเกิดการยุบตัวลงไป แต่ไม่สามารถควบคุมความเร็วในการกดอัดได้ ซึ่งในความเป็นจริงนั้นวัสดุทุกชนิดมีสมบัติที่ขึ้นอยู่กับเวลา (Time-Dependent) [15] หรืออัตราการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ซึ่งหากใช้ความเร็วในการกดอัดที่สูงขึ้นค่าแรงที่ตรวจวัดได้จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน

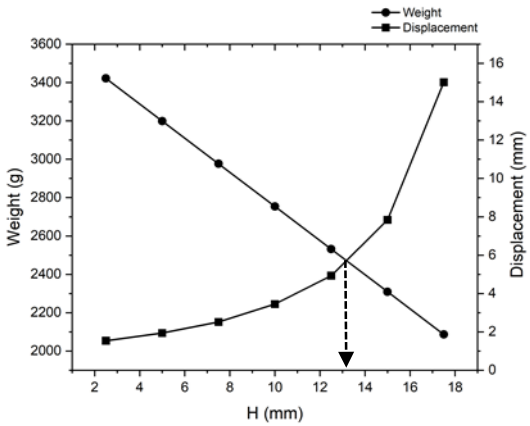
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.008

3.5 ผลการวิเคราะห์การออกแบบแผ่นปูพื้นสนามที่มีแนวเสริมแรงแบบต่าง ๆ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาปัจจัยด้านการออกแบบผลิตภัณฑ์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพทั้งในด้านความแข็งแรงรวมถึงน้ำหนักของแผ่นปูพื้นสนาม โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยออกแบบและวิเคราะห์ทางวิศวกรรมเพื่อศึกษาอิทธิพลของรูปแบบและขนาดแนวเสริมแรงแบบกากบาท (Cross) แบบดอกจัน (Asterisk) แบบวงกลม (Circle) แบบที่ 1 และ 2 และแบบรังผึ้ง (Honeycomb) แบบที่ 1 และ 2 ที่มีต่อระยะยุบตัวสูงสุดและน้ำหนัก สำหรับแผ่นปูพื้นสนามขนาด 400x400 mm ที่ความหนาเท่ากับ 25 mm ภายใต้เงื่อนไขความกว้างของแนวเสริมแรง (Width, W) ความหนาผนังของแผ่นปูพื้นสนาม (Thickness, T) และความสูงของแนวเสริมแรง (Height, H) โดยรูปที่ 16 และ 17 แสดงตัวอย่างผลการวิเคราะห์ระยะยุบตัวและน้ำหนักของแผ่นปูพื้นสนามที่ใช้รูปแบบแนวเสริมแรงแบบกากบาท โดยทำการกำหนดให้ T และ H คงที่เท่ากับ 12.5 mm และทำการปรับเปลี่ยนขนาดความกว้างของแนวเส้นเสริมแรงในช่วงระหว่าง 5 ถึง 30 mm แสดงดังรูปที่ 16 จากผลการวิเคราะห์พบว่าเมื่อเพิ่มขนาด W ทำให้น้ำหนักของแผ่นปูพื้นสนามมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ระยะยุบตัวมีแนวโน้มลดลง และเมื่อพิจารณาที่จุดตัดของกราฟทั้งสองเส้น พบว่าค่า W ที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 15 mm จากนั้นจึงนำค่า W=15 mm ไปใช้ในการปรับเปลี่ยนค่าความสูงของแนวเส้นเสริมแรง (Height, H) ในช่วงระหว่าง 2.5 ถึง 17.5 mm ดังแสดงในภาพที่ 17 ผลการวิเคราะห์พบว่าเมื่อ H เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้น้ำหนักของแผ่นปูพื้นสนามมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ระยะยุบตัวเพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยค่า H ที่เหมาะสม ซึ่งได้จากจุดตัดระหว่างกราฟทั้งสองเส้น คือ 13 mm



รูปที่ 16 ผลการวิเคราะห์ค่า W ของแนวเส้นเสริมแรงแบบกากบาทที่ให้ประสิทธิภาพในการเสริมแรงดีที่สุด



รูปที่ 17 ผลการวิเคราะห์ค่า H ของแนวเส้นเสริมแรงแบบกากบาทที่ให้ประสิทธิภาพในการเสริมแรงดีที่สุด

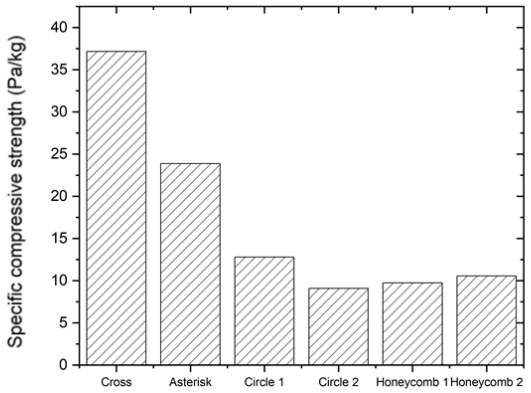
Compressive strength (MPa)

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.008

ตารางที่ 2 แสดงผลการวิเคราะห์ขนาดของแนวเส้นเสริมแรงแบบต่างๆ ที่ให้ประสิทธิภาพดีที่สุดเมื่อคำนึงถึงระยะยุบตัวเทียบกับน้ำหนักของแผ่นปูพื้นสนาม และเมื่อพิจารณาสมบัติการต้านทานแรงอัดต่อน้ำหนัก (Specific Compressive Strength) ของแผ่นปูพื้นสนามเมื่อใช้แนวเสริมแรงต่างๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ 18 ซึ่งวิเคราะห์ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่าแนวเสริมแรงแบบกากบาท ให้สมบัติการต้านทานต่อแรงอัดเมื่อเทียบกับน้ำหนักของแผ่นปูพื้นสนามที่ดีที่สุด

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ขนาดของแนวเส้นเสริมแรงแบบต่างๆ ที่ให้ประสิทธิภาพการเสริมแรงดีที่สุด

Patterns							
Cross		Asterisk		Circle		Honeycomb	
W (mm)	H (mm)	W (mm)	H (mm)	ϕ # 1 (mm)	ϕ # 2 (mm)	Side length # 1 (mm)	Side length # 2 (mm)
15.0	13.0	12.5	15.0	35.94	35.52	19.0	18.0



รูปที่ 18 ผลการวิเคราะห์สมบัติการต้านทานแรงอัดต่อน้ำหนักของแผ่นปูพื้นสนามที่มีแนวเสริมแรงแบบต่างๆ ซึ่งได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์

4. บทสรุป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำขยะบรรจุภัณฑ์พลาสติกและโฟมพอลิสไตรีน มาใช้เป็นสารเชื่อมประสานสำหรับการผลิตแผ่นปูพื้นจากเศษยางล้อรถยนต์ โดยใช้หินย่อยเป็นวัสดุเสริมแรง เพื่อทดแทนการใช้สารเชื่อมประสานที่มีใช้ในเชิงพาณิชย์ โดยได้ทำการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างเศษยางล้อรถยนต์ต่อหินย่อย และปริมาณสารเชื่อมประสาน รวมถึงความหนาและความหนาแน่นของแผ่นปูพื้นสนามที่มีต่อสมบัติการต้านทานต่อแรงอัด สมบัติการต้านทานต่อแรงกระแทก และความสามารถในการซึมผ่านของน้ำ จากผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ความหนาแผ่นปูพื้นสนามเท่ากับ 25 mm ที่อัตราส่วนระหว่างเศษยางล้อรถยนต์ต่อหินย่อยเท่ากับ 75:25 และปริมาณสารเชื่อมประสานร้อยละ 5 %V/V ให้ประสิทธิภาพโดยรวมเหมาะสมที่สุด

2. การเพิ่มความหนาแน่นให้กับแผ่นปูพื้นสนามที่เท่ากับ 0.9 g/cm^3 ส่งผลให้สมบัติการต้านทานต่อแรงอัดและแรงกระแทกเพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยสามารถรับแรงอัดได้มากถึง 4 ตัน โดยไม่เกิดความเสียหาย

3. แผ่นปูพื้นสนามที่ผลิตได้มีความสามารถในการซึมผ่านของน้ำได้ในทุกกรณี โดยอัตราการซึมผ่านของน้ำมีแนวโน้มลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณสารเชื่อมประสาน สัดส่วนของเศษยางล้อ และความหนาแน่น

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.008

ของแผ่นปูพื้นสนาม ทั้งนี้หากมีการใช้ขนาดของเศษยางล้อรถยนต์และหินย่อยที่เล็กลงอาจส่งผลให้อัตราการซึมผ่านของน้ำที่ลดลงได้เช่นกัน

4. ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Autodesk Fusion 360 แสดงให้เห็นว่าผลการวิเคราะห์ที่ได้สอดคล้องกับผลการทดสอบจริง กล่าวคือ การเพิ่มความหนาของแผ่นปูพื้นสนามส่งผลให้สมบัติการต้านทานต่อแรงอัดลดลง ในขณะที่การเพิ่มความหนาแน่น ส่งผลให้สมบัติการต้านทานต่อแรงอัดเพิ่มสูงขึ้น

5. จากผลการศึกษาการออกแบบแนวเสริมแรงของแผ่นปูพื้นสนาม พบว่า รูปแบบแนวเส้นเสริมแรงแบบกากบาท ให้ประสิทธิภาพการเสริมแรงที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับน้ำหนักของแผ่นปูพื้นสนาม ซึ่งแสดงให้เห็นถึงแนวทางในการออกแบบผลิตภัณฑ์แผ่นปูพื้นสนามที่มีน้ำหนักเบา ยังคงมีความสามารถในการรับแรงตามมาตรฐานอุตสาหกรรม และสามารถลดต้นทุนด้านวัสดุที่ใช้ในการผลิต

6. ผลสำเร็จของงานวิจัยนี้ จะเป็นแนวทางที่สำคัญในการใช้ประโยชน์จากขยะบรรจุภัณฑ์พลาสติกและโฟมพอลิสไตรีน รวมถึงเศษยางล้อรถยนต์ เพื่อการแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืนต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ทางคณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับทุนอุดหนุนและเครื่องมือในการทำวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

[1] J.A. Brydson, Plastics materials, 7th Ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, 1999.

[2] K.G. Budinski and M.K. Budinski, Engineering material: Properties and selection, 6th Ed., Prentice Hall International Inc., NJ, 1999.

[3] J. Maris, S. Bourdon, J.M. Brossard, L. Cauret, L. Fontaine and V. Montembault, Mechanical recycling: compatibilization of mixed thermoplastic wastes, Polymer Degradation and Stability, 2018, 147, 245-266.

[4] Z. Zhongkun, Z. Denghua, S. Wentao, W. Linlin, Z. Jianbo, M. Hui, C. Lu, Y. Baohuai, Q. Yusheng and W. Changming, Study on mechanical properties of expanded polystyrene, American Journal of Civil Engineering, 2018, 6(1), 11-15.

[5] A. Salisu and S. Maigari, Polystyrene and its recycling: A review, Materials Science and Technology Society of Nigeria (MSN) Kaduna State, Proceeding, 2021, 195-203.

[6] J. Scheirs, Polymer recycling: science, technology and applications, John Wiley and Sons, NY, 1998.

[7] J.E. Mark, B. Erman and F.R. Eirich, Science and Technology of Rubber, 2nd Ed., Academic Press, NY, 1994.

[8] H. Chittella, L.W. Yoon, S. Ramarad and Z.W. Lai, Rubber waste management: A review on

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.008

methods, mechanism, and prospects, Polymer Degradation and Stability, 2021, 194, 109761.

[9] A. Singh, S.N. Spak, E.A. Stone, J. Downard, R.L. Bullard, M. Pooley, P.A. Kostle, M.W. Mainprize, M.D. Wichman, T.M. Peters, D. Beardsley and C.O. Stanier, Uncontrolled combustion of shredded tires in a landfill—Part 2: population exposure, public health response, and an air quality index for urban fires, Atmospheric Environment, 2015, 104, 273–283.

[10] S. Ramarad, M. Khalid, C.T. Ratnam, A.L. Chuah and W. Rashmi, Waste tire rubber in polymer blends: A review on the evolution, properties and future, Progress in Materials Science, 2015, 72, 100-140.

[11] S. Kaewjang, Development of floor blocks from natural rubber and waste EPDM, Master's Thesis, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, 2009. (in Thai)

[12] W. Deepanya and K. Suweero, Development of low cost natural rubber floor tile mixed with fine ethylene vinyl acetate plastic waste, Thesis, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, 2018. (in Thai)

[13] K. Suweero and P. Khamput, Development of interlocking concrete paving block product mixed with colored polyethylene terephthalate plastic bottle from post-consumer waste, Journal of Engineering RMUTT, 2020, 18, 81-89. (in Thai)

[14] A.R. Tarrer and V. Wagh, The effect of the physical and chemical characteristics of the aggregate on bonding, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington DC, 1991.

[15] W.F. Smith, Principles of Materials Science and Engineering, 3rd Ed., McGraw-Hill series in Material Science and Engineering, NY, 1996.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.009

บทความวิจัย

สมบัติของคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่ใช้ยางพาราเป็นส่วนผสม

ณัฐกมล เกิดจังหวัด และ ชูชัย สุจิวรกุล*

ภาควิชาครุศาสตร์โยธา, คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: chuchai.suj@kmutt.ac.th

วันที่รับบทความ: 10 กรกฎาคม 2567; วันที่ทบทวนบทความ: 2 ธันวาคม 2567; วันที่ตอบรับบทความ: 5 กุมภาพันธ์ 2568
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 22 เมษายน 2568

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางกลของคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่ผสมด้วยยางพาราธรรมชาติ หรือยางพาราสังเคราะห์ สมบัติของคอนกรีตที่ศึกษาประกอบด้วย กำลังอัด การดูดซึมน้ำ และกำลังดัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้ว ตัวอย่างทดสอบกำลังอัดมีขนาด 50x50x50 mm เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C109 ส่วนตัวอย่างทดสอบกำลังดัดและการดูดซึมน้ำเป็นแผ่นบางคอนกรีตเสริมใยแก้วที่ได้จากการพ่นให้ได้ความหนาประมาณ 10 mm ตัวอย่างได้ถูกตัดให้มีขนาด 50x250 mm โดยตัวอย่างได้ทดสอบการดัดตามมาตรฐาน BS EN 1170-5:1998 ปริมาณสารลดแรงตึงผิวที่เหมาะสมสำหรับใช้ร่วมกับยางพาราธรรมชาติได้ถูกหาจากการทดลองผสมเพื่อหาความเข้ากันของส่วนผสม ตัวแปรหลักที่ทำการศึกษาประกอบด้วย ปริมาณเนื้อยางพาราธรรมชาติหรือเนื้อยางพาราสังเคราะห์ในอัตราส่วนร้อยละ 2 4 และ 6 แทนที่น้ำหนักปูนซีเมนต์ และอายุของตัวอย่างแผ่นบางคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่บ่มน้ำ 7 14 28 และ 56 วัน ผลการศึกษาพบว่า การใช้สารลดแรงตึงผิวที่ร้อยละ 1.0 ช่วยให้ยางพาราธรรมชาติผสมกับมอร์ตาร์ได้เข้ากันอย่างดีโดยไม่จับตัวเป็นก้อน การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยยางพาราธรรมชาติหรือยางพาราสังเคราะห์ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลง อย่างไรก็ดี การใช้ยางพาราธรรมชาติหรือยางพาราสังเคราะห์จะช่วยลดค่าการดูดซึมน้ำ โดยค่าการดูดซึมน้ำต่ำสุดเกิดขึ้นเมื่อใช้ปริมาณยางพาราธรรมชาติและยางพาราสังเคราะห์ที่ร้อยละ 2 นอกจากนี้ การใช้ยางพาราธรรมชาติหรือยางพาราสังเคราะห์ในตัวอย่างแผ่นบางจะทำให้หน่วยแรงดัดที่ขีดจำกัดสัดส่วนและหน่วยแรงดัดที่จุดแตกร้าวลดลงเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม แต่ค่าความเหนียวของตัวอย่างแผ่นบางมีแนวโน้มสูงกว่าตัวอย่างควบคุมเมื่อทำการบ่มน้ำในเวลานานขึ้น

คำสำคัญ: คอนกรีตเสริมเส้นใยแก้ว; แผ่นบาง; ยางพาราธรรมชาติ; ยางพาราสังเคราะห์

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.009

บทความวิจัย

Properties of Glass Fiber Reinforced Concrete Using Rubber Latex as an Ingredient

Nattakamol Kerdjangwat and Chuchai Sujivorakul*

Department of Civil Technology Education, Faculty of Industrial Education and Technology,
King Mongkut's University of Technology Thonburi
* Corresponding author, E-mail: chuchai.suj@kmutt.ac.th

Received: 10 July 2024; Revised: 2 December 2024; Accepted: 5 January 2025
Online Published: 22 April 2025

Abstract: This research is a study of the physical and mechanical properties of glass fiber-reinforced concrete (GRC) mixed with natural rubber latex or synthetic rubber latex. The properties studied include compressive strength, water absorption, and flexural strength of the concrete samples. The test samples for compressive strength had dimensions of 50x50x50 mm according to ASTM C109 standards. The test samples for flexural strength and water absorption were GRC thin plates prepared by spraying to a thickness of approximately 10 mm. Samples were cut into the dimension of 50x250 mm. All samples were tested under bending according to BS EN 1170-5:1998 standards. The appropriate amount of surfactant for use with natural rubber latex was determined through mixing trials to determine the compatibility of the ingredients. The main variables studied include: the amount of natural or synthetic rubber latex in the ratio of 2, 4, and 6 percent by weight of cement replacement. The samples were tested at different ages of 7, 14, 28 and 56 days after water curing. The test results found that using surfactant at 1.0 percent helped the natural rubber to mix well with the mortar without clumping. Replacing Portland cement with natural rubber latex or synthetic rubber latex tended to reduce the compressive strength of the mortar. However, the use of natural rubber latex or synthetic rubber latex would help to reduce water absorption. The lowest water absorption occurred when natural and synthetic rubber latex were used at 2 percent. In addition, the use of natural rubber latex or synthetic rubber latex in samples slightly decreased the stresses at limit of proportionality and modulus of rupture compared to the control sample. However, the toughness of the thin plate samples tended to be higher than those of the control samples when they were cured in water for a longer time.

Keywords: Glass fiber reinforced concrete; Thin plate; Natural rubber latex; Synthetic rubber latex

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.009

บทความวิจัย

1. บทนำ

คอนกรีตเสริมเส้นใยแก้ว (Glass Fiber Reinforced Concrete, GFRC) เป็นวัสดุที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เส้นใยแก้วชนิดทนด่าง ทรายละเอียด น้ำ และสารผสมเพิ่ม ในปัจจุบันคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วนิยมนำมาใช้ในการผลิตแผงสถาปัตยกรรมภายนอกอาคาร เนื่องจากมีน้ำหนักเบาและสามารถออกแบบให้มีรูปร่างที่หลากหลายได้ อย่างไรก็ตาม เมื่อแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่ถูกใช้งานภายนอกอาคารที่มีอายุมากขึ้นจะส่งผลให้กำลังดัดสูงสุด และความเหนียวมีค่าลดลง [1] ที่ผ่านมา การศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงคุณภาพของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วให้มีความทนทานมากขึ้นได้ดำเนินการโดยนำวัสดุและสารผสมเพิ่มอื่นมาใช้ในส่วนผสม N. Kabay และ B. Amed [2] ได้ใช้เถ้าลอย ตะกรันเหล็ก และ พอลิเมอร์ผสมในคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วโดยพบว่า การใช้วัสดุปอซโซลานและพอลิเมอร์ผสมในคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วช่วยปรับปรุงความสามารถในการทำงานของคอนกรีตสดและช่วยลดค่าการดูดซึมน้ำ C. Sujivorakul และคณะ [3] ได้นำเถ้าลอย เถ้าแกลบ หรือเถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อผลิตแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้ว โดยได้พบว่าตัวอย่างควบคุมและตัวอย่างที่ใช้เถ้าต่าง ๆ ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ให้หน่วยแรงดัดที่จุดขีดจำกัดสัดส่วน (Limit of Proportionality, LOP) เพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มในน้ำ ในขณะที่หน่วยแรงดัดที่จุดแตกร้าว (Modulus of Rupture, MOR) เพิ่มขึ้นในช่วง 28 วันแรกของการบ่มและเริ่มลดลงเล็กน้อยตามอายุการบ่มที่มากขึ้น การใช้ปริมาณเถ้าแต่ละชนิดไม่เกินอัตราร้อยละ 20 จะไม่กระทบต่อสมบัติทางกายภาพและทางกลของคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้ว และยังช่วยลดต้นทุนการผลิต A.J. Majumdar และคณะ [4] ใช้ยางสไตรีนบิวตาไดอีน (Styrene-Butadiene Rubber, SBR) ซึ่งเป็นยางพาราสังเคราะห์ที่มีสมบัติใกล้เคียงกับยางพาราธรรมชาติผสมในคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้ว โดยตัวอย่างคอนกรีตถูกเก็บไว้ในสามสภาพแวดล้อมที่ต่างกัน ได้แก่ ห้องควบคุมความชื้น แช่ตัวอย่างในน้ำ และในสภาพแวดล้อมตามธรรมชาติ ผลการทดสอบตัวอย่างที่อายุ 15 ปี พบว่าคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่อยู่ในห้องควบคุมความชื้นมีค่าความเหนียวลดลงเล็กน้อย ส่วนตัวอย่างคอนกรีตที่ถูกแช่อยู่ในน้ำสูญเสียความแข็งแรงมากกว่าตัวอย่างคอนกรีตในสภาพแวดล้อมอื่นอย่างมีนัยสำคัญ และตัวอย่างคอนกรีตที่อยู่ในสภาพแวดล้อมตามธรรมชาติมีอัตราการลดลงของความเหนียวในระยะยาวช้ากว่าตัวอย่างคอนกรีตที่บ่มด้วย วิธีอื่น S. Mebarkia และ C. Vipulanandan [5] ได้ศึกษาผลกระทบของปริมาณพอลิเมอร์และปริมาณเส้นใยแก้วต่อสมบัติของคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้ว โดยการทดสอบจะใช้ปริมาณพอลิเมอร์ตั้งแต่ร้อยละ 10 14 และ 18 โดยน้ำหนักรวมของคอนกรีต และใช้ปริมาณเส้นใยแก้วร้อยละ 2 3 และ 4 โดยน้ำหนักรวมของคอนกรีต ผลการทดสอบพบว่า การเพิ่มปริมาณเส้นใยแก้วจะเพิ่มความเหนียวและความเครียดที่จุดความเค้นดัดสูงสุด แต่จะลดมอดุลัสยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวร์ซอง โดยที่พอลิเมอร์ที่ร้อยละ 18 และเส้นใยแก้วที่ร้อยละ 4 เป็นปริมาณที่ให้ความเหนียวของคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วภายใต้แรงดัดสูงสุด

วัสดุยางพาราเป็นพืชเศรษฐกิจหลักที่ทำรายได้เข้าสู่ประเทศไทย โดยการส่งออกส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของวัตถุยางพาราดิบ ขณะที่การแปรรูป และใช้งานผลิตภัณฑ์ยางพาราภายในประเทศจะมีปริมาณน้อย

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.009

จึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ราคายางพาราภายในประเทศขาดเสถียรภาพ ส่งผลกระทบต่อทั้งเกษตรกรและผู้ที่เกี่ยวข้องในอุตสาหกรรมยางพาราทั้งระบบ นอกจากนี้มาตรการกระตุ้นให้เกิดการใช้ผลิตภัณฑ์ยางพาราในประเทศยังไม่เพียงพอและไม่เห็นผลเท่าที่ควร ควรเร่งส่งเสริมงานวิจัยเพื่อนำยางพาราไปใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ให้มากขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มปริมาณการใช้ยางพาราภายในประเทศเพื่อเพิ่มมูลค่าที่ยั่งยืนของยางพาราตลอดจนนำไปสู่พัฒนาผลิตภัณฑ์ยางพาราคุณภาพต่อไป ที่ผ่านมา ได้มีงานวิจัยหลากหลายที่เกี่ยวข้องกับการใช้ยางพาราในการปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีต P. Plangoen [6] ได้นำยางพาราธรรมชาติชนิดพรีวัลคาไนซ์มาผสมในมอร์ตาร์ในอัตราส่วนเนื้อยางต่อปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 5 10 และ 15 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ โดยได้พบว่าการรับแรงอัด แรงดัด และแรงดึงของมอร์ตาร์มีค่าน้อยกว่ามอร์ตาร์ที่ไม่ผสมยางพารา และ อัตราส่วนเนื้อยางต่อปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 5 ได้ให้ค่ากำลังอัด กำลังดัด และกำลังดึงสูงสุด ส่วนค่าการดูดซึมน้ำมีค่าต่ำสุด T. Yaowarat และ A. Suddeepong [7] ได้ศึกษากำลังอัดและกำลังดัดของคอนกรีตที่ผสมด้วยยางพาราธรรมชาติเพื่อใช้ในการก่อสร้างทางเท้า โดยส่วนผสมมีการแปรผันอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ และอัตราส่วนน้ำต่อเนื้อยางพารา จากการศึกษาได้พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมด้วยยางพารามีค่าลดลงเมื่อใช้ยางพาราหรือปริมาณน้ำเพิ่มมากขึ้น ขณะที่กำลังดัดของคอนกรีตสูงสุดเมื่อใช้อัตราส่วนของยางพาราต่อปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 0.58 นอกเหนือจากการนำยางพาราธรรมชาติไปใช้ในคอนกรีตเพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการแล้ว ยังได้มีงานวิจัยที่ได้ประยุกต์ใช้ยางพาราธรรมชาติกับวัสดุอื่น ๆ A. Buritatun และคณะ [8] ได้ใช้ยางพาราธรรมชาติในปริมาณที่เหมาะสมผสมกับดินซีเมนต์ และทำให้ดินสามารถยึดเกาะกันได้ดีขึ้น K. Zhong และคณะ [9] ได้ศึกษาการประสานกันและสมรรถนะทางกลของยางมะตอยที่ผสมยางพาราสังเคราะห์สำหรับทำผิวทางของถนน โดยได้พบว่ายางมะตอยที่ผสมยางพาราให้ความแข็งแรงมากขึ้น แต่ยังทำให้การไหลตัวของยางมะตอยลดลง

จากงานวิจัยที่ผ่านได้แสดงให้เห็นว่า การนำยางพารามาผสมกับคอนกรีตสามารถปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตให้มีความเหนียวมากขึ้น และยังช่วยลดการซึมผ่านของน้ำได้มากขึ้น งานวิจัยนี้ได้นำยางพาราธรรมชาติในประเทศไทย และยางพาราสังเคราะห์มาใช้ในส่วนผสมของคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้ว โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางกลของคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่ใช้ยางพาราธรรมชาติหรือใช้ยางพาราสังเคราะห์เป็นส่วนผสมในคอนกรีต ได้แก่ กำลังอัด การดูดซึมน้ำ กำลังและความเหนียวภายใต้แรงดัด โดยมีตัวแปรหลากหลายประกอบไปด้วย ปริมาณยางพาราธรรมชาติ ยางพาราสังเคราะห์ ปริมาณสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ และอายุการบ่มของตัวอย่างทดสอบ ผู้วิจัยหวังว่างานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาการใช้ยางพาราผสมในคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้ว โดยชิ้นตัวอย่างกรณีอุตสาหกรรมแผงสถาปัตยกรรมซึ่งส่วนใหญ่ใช้แผ่นบางที่ทำจากคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้ว ทั้งเป็นการส่งเสริมการใช้ยางพาราธรรมชาติซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศไทย

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.009

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย/ทดลอง

2.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
2. น้ำยางพาราธรรมชาติโดยมีปริมาณเนื้อยางร้อยละ 60
3. น้ำยางพาราสังเคราะห์ (Bonding agent and water proofing admixture) ยี่ห้อ SikaLatex เป็นของเหลวประเภทอิมัลชั่นของยางพาราสังเคราะห์ (Synthetic Rubber Emulsion) โดยปริมาณเนื้อยางพาราสังเคราะห์หลังจากอบแห้งเท่ากับร้อยละ 50
4. สารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer) ยี่ห้อ Sika รุ่น ViscoCrete-10
5. ทรายสะอาดมีขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 30 และค้างที่ตะแกรงเบอร์ 50 100 และ 200 เท่ากับ ร้อยละ 37 58 และ 5 ตามลำดับ
6. เส้นใยแก้ว ยี่ห้อ Cem–FIL Fibers
7. สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ (Nonionic Surfactants) ยี่ห้อ Plantacare 2000 UP

2.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์

ตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ใช้ในการทดสอบกำลังอัดเป็นรูปทรงลูกบาศก์มีขนาด 50 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM C109 [10] ทั้งหมด 13 ชุด โดย 1 ชุดมี 3 ตัวอย่าง ตัวอย่างควบคุมมอร์ตาร์มีอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ต่อทราย คือ 1 : 1 โดยมีเนื้อยางพาราธรรมชาติผสมในปริมาณที่แตกต่างกัน 3 ระดับ คือ ร้อยละ 2 4 และ 6 เทียบกับน้ำหนักวัสดุประสาน นอกจากนี้ สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุได้ถูกนำมาใช้ในส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ผสมยางพาราธรรมชาติ เนื่องจากการผสมน้ำยางพาราเข้ากับวัสดุประสานจะทำให้เกิดการจับตัวกันเป็นก้อน ดังนั้นจึงต้องมีการใส่สารลดแรงตึงผิวเข้าไปในส่วนผสมเพื่อให้น้ำยางพาราผสมเข้ากับวัสดุประสานได้ โดยได้ทดลองใช้ปริมาณสารลดแรงตึงผิวที่แตกต่างกัน 3 ระดับได้แก่ ร้อยละ 0.5 1.0 และ 1.5 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน เพื่อหาปริมาณสารลดแรงตึงผิวที่เหมาะสม ส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ในการวิจัยนี้ได้แสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์โดยน้ำหนัก

ตัวอย่าง	ปูนซีเมนต์	เนื้อยางในน้ำยางพาราธรรมชาติ	เนื้อยางในน้ำยางพาราสังเคราะห์	ทราย	สารลดน้ำพิเศษ	น้ำ	สารลดแรงตึงผิว	กำลังอัดที่อายุ 7 วันจากการทดสอบ [MPa]
Control	1	-		1	0.005	0.35	-	54.0
0.5P2*	0.98	0.02	-	1	0.005	0.35	0.005	48.1
0.5P4	0.96	0.04	-	1	0.005	0.35	0.005	47.8
0.5P6	0.94	0.06	-	1	0.005	0.35	0.005	39.7
1P2	0.98	0.02	-	1	0.005	0.35	0.010	48.0
1P4	0.96	0.04	-	1	0.005	0.35	0.010	46.0
1P6	0.94	0.06	-	1	0.005	0.35	0.010	39.0
1.5P2	0.98	0.02	-	1	0.005	0.35	0.015	46.0
1.5P4	0.96	0.04	-	1	0.005	0.35	0.015	40.1
1.5P6	0.94	0.06	-	1	0.005	0.35	0.015	36.0

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.009

ตารางที่ 1 สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์โดยน้ำหนัก (ต่อ)

S2**	0.98	-	0.02	1	0.005	0.35	-	50.0
S4	0.96	-	0.04	1	0.005	0.35	-	48.0
S6	0.94	-	0.06	1	0.005	0.35	-	47.0

หมายเหตุ: ปริมาณน้ำในตารางเป็นปริมาณที่รวมน้ำในน้ำยางพาราธรรมชาติ หรือน้ำในน้ำยางพาราสังเคราะห์แล้ว

* 0.5P2: ตัวเลขลำดับ 1 หมายถึง ร้อยละของสารลดแรงตึงผิวเทียบกับวัสดุประสาน ตัวอักษรลำดับที่ 2 หมายถึง เนื้อยางพาราธรรมชาติ และตัวเลขลำดับที่ 3 หมายถึง ร้อยละของเนื้อยางพาราธรรมชาติเทียบกับวัสดุประสาน

**S2: ตัวอักษรลำดับที่ 1 หมายถึง เนื้อยางพาราสังเคราะห์และตัวเลขลำดับที่ 2 หมายถึง ร้อยละของเนื้อยางพาราสังเคราะห์เทียบกับวัสดุประสาน

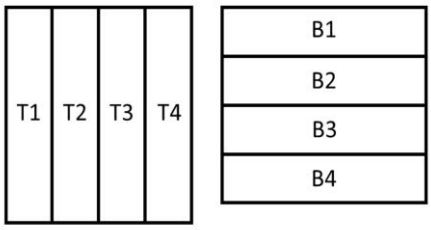
2.3 การเตรียมตัวอย่างแผ่นบางสำหรับทดสอบแรงดัด

จากการลองผสมมอร์ตาร์ที่ใช้ยางพาราธรรมชาติ พบว่า ปริมาณสารลดแรงตึงผิวที่เหมาะสมเพื่อช่วยให้ปูนซีเมนต์เข้ากันกับยางพาราธรรมชาติได้เป็นอย่างดี มีค่าเท่ากับร้อยละ 1.0 โดยเทียบกับน้ำหนักของวัสดุประสาน ดังนั้น ส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้เตรียมตัวอย่างแผ่นบางสำหรับทดสอบแรงดัดมีทั้งหมด 7 ส่วนผสม ได้แก่ Control 1P2 1P4 1P6 S2 S4 และ S6 โดยอัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์ได้แสดงในตารางที่ 1 ส่วนปริมาณเส้นใยแก้วที่ใช้คงที่ในทุกตัวอย่างเท่ากับร้อยละ 5 เทียบกับน้ำหนักรวมของส่วนผสมทั้งหมด การเตรียมตัวอย่างแผ่นบางคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วทั้งหมดจะใช้วิธีการพ่น (Spraying) โดยที่มอร์ตาร์จะผสมกับเส้นใยแก้วในระหว่างการพ่น ดังแสดงในรูปที่ 1 ตัวอย่างทดสอบจะถูกควบคุมให้มีความหนาคงที่เท่ากับ 10 มิลลิเมตร

รูปที่ 1 การเตรียมตัวอย่างแผ่นบางจะใช้วิธีการพ่น

2.4 การทดสอบแรงดัดของแผ่นคอนกรีตเสริมใยแก้ว

การทดสอบแรงดัดของแผ่นคอนกรีตเสริมใยแก้วจะใช้ขนาดตัวอย่างและวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน BS EN 1170-5 : 1998 [11] โดยตัวอย่างแผ่นบางจะถูกบ่มในน้ำที่อายุเท่ากับ 7 14 28 และ 56 วัน การทดสอบกำลังดัดเป็นการทดสอบแบบ 4 จุด (Four-Points Bending Tests) มีความยาวช่วง (Span) ของการทดสอบเท่ากับ 200 มิลลิเมตร การทดสอบตามมาตรฐานนี้จะใช้ตัวอย่างจำนวน 8 ตัวอย่างต่อหนึ่งชุดการทดสอบ โดยแบ่งแนวการตัดตัวอย่างทดสอบตามขนาดมาตรฐานในแนวยาวจำนวน 4 ตัวอย่าง และแนวขวางจำนวน 4 ตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยตัวอย่างมีขนาด กว้าง 50 มิลลิเมตร ยาว 250 มิลลิเมตร



รูปที่ 2 รูปแบบการตัดตัวอย่างคอนกรีตเสริมใยแก้วเพื่อใช้ในการทดสอบกำลังดัด

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.009

ตัวอย่างได้ถูกทดสอบทั้ง 2 ด้านของตัวอย่าง ทั้งด้านที่ติดกับแบบหล่อและด้านที่ทำการฟ่น โดยใช้ตัวอักษรย่อ คือ T และ B ซึ่งมีความหมายมาจากด้านบน (Top) และด้านล่าง (Bottom) นำผลที่ได้จากการทดสอบมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัดที่กระทำกับแผ่นตัวอย่างและระยะการโก่งตัวที่กึ่งกลางคาน จากนั้นคำนวณหาค่าต่าง ๆ ได้แก่ หน่วยแรงดัดที่จุดขีดจำกัดสัดส่วน (LOP) และที่จุดแตกร้าว (MOR) ซึ่งหาได้จากสมการที่ 1 และ 2 และค่าความเครียดที่ LOP และที่ MOR ซึ่งแสดงไว้ในสมการที่ 3 และ 4 [11] โดยตำแหน่งของ LOP และ MOR ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3

$$\sigma_{LOP} = \frac{F_{LOP} \times L}{b \times d^2} \quad (1)$$

$$\sigma_{MOR} = \frac{F_{MOR} \times L}{b \times d^2} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{LOP} = \frac{108}{23} \times \frac{\Delta_{LOP} \times d}{L^2} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{MOR} = \frac{108}{23} \times \frac{\Delta_{MOR} \times d}{L^2} \quad (4)$$

โดย σ_{MOR} คือ หน่วยแรงดัดที่จุดแตกร้าว (MPa) หรือมอดุลัสแตกร้าว

σ_{LOP} คือ หน่วยแรงดัดที่จุดขีดจำกัดสัดส่วน(MPa)

ε_{MOR} คือ ความเครียดที่จุดแตกร้าว

ε_{LOP} คือ ความเครียดที่จุดขีดจำกัดสัดส่วน

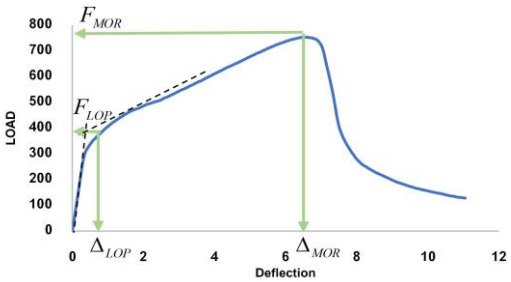
F_{MOR} คือ แรงที่จุดแตกร้าว (N)

F_{LOP} คือ แรงที่จุดขีดจำกัดสัดส่วน (N)

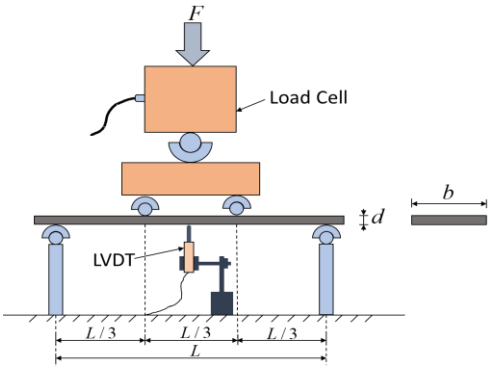
L คือ ความยาวช่วงของแผ่นตัวอย่าง (mm)

b คือ ความกว้างของแผ่นตัวอย่าง (mm)

d คือ ความหนาของแผ่นตัวอย่าง (mm)



รูปที่ 3 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัดกับการโก่งตัวที่กึ่งกลางคาน พร้อมแสดงตำแหน่งที่จุดขีดจำกัดสัดส่วนและที่จุดแตกร้าว



รูปที่ 4 การทดสอบการดัดแบบสี่จุด

2.5 การทดสอบการดูดซึมน้ำของแผ่นตัวอย่าง

การดูดซึมน้ำของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วได้ถูกทดสอบที่อายุการบ่มเท่ากับ 7 14 28 และ 56 วัน โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. วัดขนาดของตัวอย่างทั้งด้านกว้าง ด้านยาว และความหนาของแผ่นตัวอย่าง
2. แช่แผ่นตัวอย่างทดสอบในน้ำสะอาดอุณหภูมิปกติให้น้ำท่วมแผ่นทดสอบจมมิดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3. เมื่อครบ 24 ชั่วโมง นำแผ่นตัวอย่างทดสอบขึ้นจากน้ำ จากนั้น ซับน้ำที่ผิวของแผ่นตัวอย่างให้แห้ง แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก จะได้น้ำหนัก W'

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.009

4. ภายหลังการทดสอบแรงดัดเสร็จสิ้น นำแผ่นตัวอย่างไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105-110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำแผ่นตัวอย่างออกจากตู้อบแล้วทำการชั่งน้ำหนัก จะได้น้ำหนัก W_s

ค่าการดูดซึมสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 6

$$\frac{W' - W_s}{W_s} \text{ x } 100 \qquad (6)$$

โดย W' คือ น้ำหนักของคอนกรีตหลังจากแช่น้ำ (กรัม)

W_s คือ น้ำหนักของคอนกรีตหลังจากอบแห้ง (กรัม)

2.6 การหาค่าความเหนียว

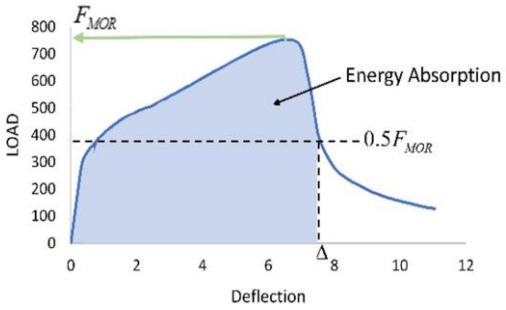
ค่าความเหนียว (Toughness) ของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วสามารถหาได้จากการคำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟของความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัดกับการโก่งตัวของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้ว โดยพื้นที่ใต้กราฟให้พิจารณาตั้งแต่จุดเริ่มต้นถึงจุดที่การโก่งตัวลดลงมาเหลือประมาณร้อยละ 50 ของค่าแรงดัดประลัย ตามที่แสดงในรูปที่ 5 [3]

3. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

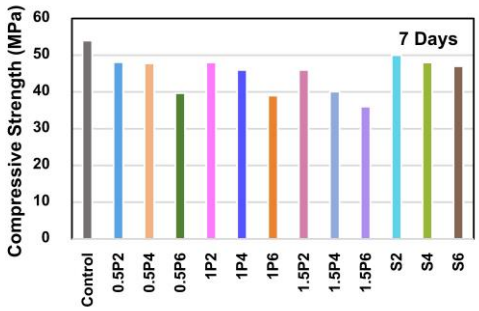
3.1 กำลังอัดของมอร์ตาร์

กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มียางพาราธรรมชาติ หรือยางพาราสังเคราะห์เป็นส่วนผสม ได้แสดงในรูปที่ 6 โดยพบว่า ตัวอย่างมอร์ตาร์ควบคุม มีค่ากำลังอัดสูงสุดที่อายุ 7 วัน เท่ากับ 54 MPa

โดยเมื่อมีการใช้ยางพาราธรรมชาติ หรือยางพาราสังเคราะห์ผสมในมอร์ตาร์ พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตจะมีค่าลดลงตามปริมาณการใช้ยางพาราธรรมชาติ หรือการใช้ยางพาราสังเคราะห์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ใช้ยางพาราธรรมชาติหรือใช้ยางพาราสังเคราะห์ผสมในอัตราร้อยละ 2 จะ



รูปที่ 5 การหาความเหนียวจากการทดสอบแรงดัด



รูปที่ 6 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 7 วัน โดยใช้ยางพาราแทนที่ปูนซีเมนต์ที่ปริมาณต่าง ๆ

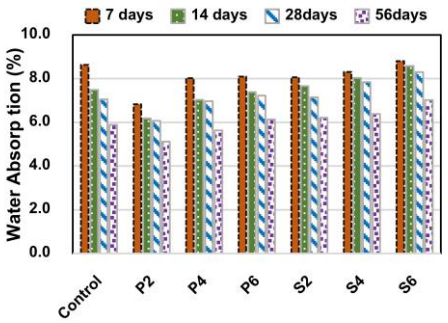
ให้ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์สูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ P. Plangoen [6] ที่ได้นำยางพาราชนิดพรีวัลคาไนซ์มาผสมในมอร์ตาร์ และได้พบว่าความสามารถในการรับแรงอัดของมอร์ตาร์มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ที่ไม่ผสมยางพารา เนื่องจากอัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ผสมยางพารามีปริมาณปูนซีเมนต์น้อยลง และยางพาราเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงน้อยกว่าซีเมนต์เพลส เมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยยางพาราจะทำให้กำลังอัดลดลง นอกจากนี้ จากการวิจัยนี้ ได้พบว่า การใช้สารลดแรงตึงผิวร่วมกับยางพาราธรรมชาติที่ร้อยละ 0.5 และ 1.0 ให้ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ใกล้เคียงกัน และ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.009

ให้ค่าสูงกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้สารลดแรงตึงผิวที่ร้อยละ 1.5 อย่างไรก็ดี เนื้อของมอร์ตาร์ที่ใส่สารลดแรงตึงผิวในปริมาณน้อยที่ร้อยละ 0.5 เกิดการจับตัวกันของยางพาราเป็นก้อนและไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ส่วนผสมของมอร์ตาร์นี้จึงไม่สามารถนำไปพ่นผ่านอุปกรณ์พ่น (Spraying Tool) เพื่อผลิตแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วได้ ดังนั้น ในการเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบแรงดัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้ว จึงเลือกใช้ส่วนผสมที่สามารถพ่นได้ดี โดยเลือกใช้ยางพาราร่วมกับสารลดแรงตึงผิวที่ร้อยละ 1

3.2 ผลการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้ว

เมื่ออายุมากขึ้นของคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่มีการใช้ยางพาราธรรมชาติ หรือยางพาราสังเคราะห์ จะช่วยให้ค่าการดูดซึมน้ำลดลง โดยตัวอย่างควบคุมมีค่าการดูดซึมน้ำมากที่สุดเท่ากับร้อยละ 8.63 ที่อายุ 7 วัน และมีค่าการดูดซึมน้ำลดลง เมื่อตัวอย่างมีอายุมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 ค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยยางพาราที่อายุการบ่มต่าง ๆ

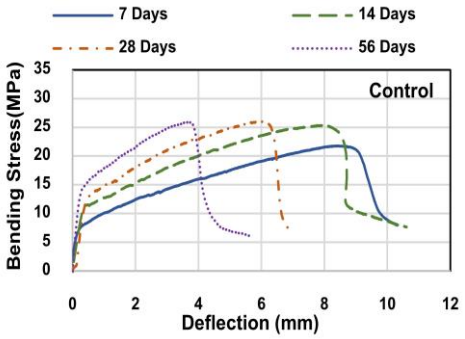
หากเปรียบเทียบการใช้ยางพาราธรรมชาติแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราแตกต่างกันจะพบว่า ปริมาณยางพาราธรรมชาติที่แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 2 4 และ 6 มีค่าการดูดซึมน้ำ ที่อายุ 7 วัน เท่ากับร้อยละ 6.83 8.03 และ 8.10 ตามลำดับ ผลที่ได้รับแสดงด้านลบเมื่อใช้ปริมาณยางพาราเพิ่มขึ้น โดยจะเห็นว่าการดูดซึมน้ำมีค่ามากขึ้น ในงานวิจัยนี้ ปริมาณยางพาราธรรมชาติที่มากกว่าร้อยละ 2 อาจเป็นปริมาณที่มากเกินไป ซึ่งสังเกตเห็นจากการผสมที่ยึดเกาะกันได้ไม่ดี ส่งผลทำให้เกิดช่องว่างภายในแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วมากขึ้น และทำให้เกิดการดูดซึมน้ำมากขึ้น นอกจากนี้ คอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่ใช้ยางพาราสังเคราะห์แทนที่ปูนซีเมนต์ที่มากกว่าร้อยละ 2 จะให้ค่าการดูดซึมน้ำมากขึ้นเช่นกัน อย่างไรก็ดี หากทำการเปรียบเทียบระหว่างยางพาราทั้ง 2 ชนิดที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยปริมาณและอายุที่เท่ากับพบว่า คอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่ใช้ยางพาราธรรมชาติเป็นส่วนผสมให้ค่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตน้อยกว่า ซึ่งผลวิจัยที่ได้รับสอดคล้องกับงานวิจัยของ P. Plangoen [6] ที่ได้พบว่า ยางพาราชนิดพรีวัลคาไนซ์ที่นำมาผสมในมอร์ตาร์ในอัตราส่วนเนื้อยางต่อปูนซีเมนต์ที่ใช้น้อยสุดในงานวิจัยได้ให้ค่าการดูดซึมน้ำต่ำสุด

3.3 ผลการทดสอบหน่วยแรงดัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้ว

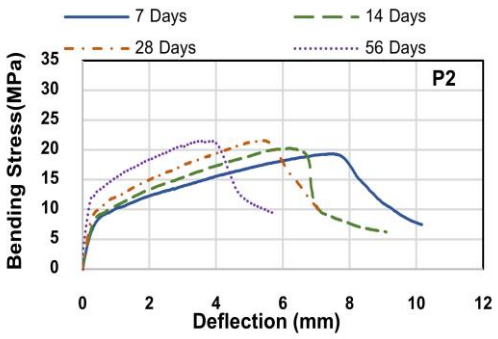
3.3.1 พฤติกรรมการดัดของแผ่นคอนกรีตเสริมใยแก้ว

จากรูปที่ 8 และ 9 แสดงตัวอย่างพฤติกรรมการดัดของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่เป็นตัวอย่างควบคุม (Control) และตัวอย่างที่ได้แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยยางพาราธรรมชาติที่ร้อยละ 2 (P2) ตามลำดับ โดยได้ทำการทดสอบที่อายุการบ่มน้ำ 7 14 28 และ 56 วัน พฤติกรรมการดัดของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วจะมี

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.009



รูปที่ 8 การเปรียบเทียบพฤติกรรมการดัดของแผ่นคอนกรีตเสริมใยแก้วควบคุมที่อายุการบ่มต่าง ๆ



รูปที่ 9 การเปรียบเทียบพฤติกรรมการดัดของแผ่นคอนกรีตเสริมใยแก้วที่มียางพาราธรรมชาติร้อยละ 2 ที่อายุการบ่มต่าง ๆ

ลักษณะในช่วงแรกเป็นเส้นตรงจนถึงจุดที่ความชันของกราฟเปลี่ยนไป (หรือจุด LOP) เมื่อคอนกรีตมีอายุการบ่มในน้ำมากขึ้นจะทำให้ค่าหน่วยแรงดัดที่ LOP สูงขึ้น หน่วยแรงดัดสูงสุดที่เกิดหลังจาก LOP หรือ หน่วยแรงดัดที่ MOR จะขึ้นกับปริมาณของเส้นใยแก้ว แรงยึดหน่วงระหว่างเส้นใยกับคอนกรีต และปัจจัยอื่น ๆ

จากผลการทดสอบแรงดัดได้พบว่า เมื่อทั้งคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วควบคุมและคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่ใช้ยางพาราธรรมชาติหรือยางพาราสังเคราะห์มีอายุการบ่มในน้ำยาวนานขึ้น หน่วยแรงดัดที่ LOP จะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้อย่างชัดเจน แต่การโก่งตัวที่ MOR ของแผ่นคอนกรีตเสริมใยแก้วจะมีแนวโน้มลดลง หรือมีความเหนียว (Ductility) ลดลงอย่างชัดเจน นอกจากนี้ ยังสังเกตเห็นว่า หน่วยแรงดัดที่ MOR ของคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่มียางพาราธรรมชาติหรือยางพาราสังเคราะห์เป็นส่วนผสมจะมีแนวโน้มคงที่เมื่ออายุการบ่มในน้ำมากกว่า 28 วัน ซึ่งแตกต่างจากคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่เป็นตัวอย่างควบคุมที่มีอัตราการลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน ทั้งนี้คาดว่าเกิดจากคราบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) แทรกตัวระหว่างเส้นใยของคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วควบคุมมากกว่าคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่ผสมยางพารา ทำให้การยึดเกาะกันระหว่างเส้นใยและคอนกรีตมีค่ามากกว่า ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของการวิบัติของเส้นใยแก้วจากการถอนเป็นการขาดด้วยแรงดึงซึ่งทำให้คอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วมีความเปราะ

3.3.2 หน่วยแรงดัดที่จุดขีดจำกัดสัดส่วน

ตารางที่ 2 แสดงค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของหน่วยแรงดัดที่ LOP และที่ MOR ที่ได้รับจากการทดสอบการดัดของตัวอย่างแผ่นบางคอนกรีตเสริมใยแก้วจำนวน 8 ชิ้น รูปที่ 10 ได้แสดงค่าหน่วยแรงดัดที่ LOP ของคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วควบคุมและคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่ใช้ยางพาราธรรมชาติหรือยางพาราสังเคราะห์แทนที่ปูนซีเมนต์ ที่ร้อยละ 2,4 และ 6 ซึ่งได้พบว่า คอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วทั้งที่เป็นตัวอย่างควบคุมและตัวอย่างที่ใช้ยางพาราธรรมชาติหรือยางพาราสังเคราะห์แทนที่ปูนซีเมนต์มีค่าหน่วยแรงดัดที่ LOP เพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มในน้ำที่มากขึ้น เนื่องจากหน่วยแรงดัดที่ LOP เป็นค่าที่สัมพันธ์กับการแตกร้าวแรกภายใต้แรงดัดของคอนกรีต โดยค่าหน่วยแรงดัดนี้จะสอดคล้องกับค่ากำลังอัดของคอนกรีต หากคอนกรีตมีการบ่มในน้ำนานขึ้น กำลังอัดรวมถึงกำลัง

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.009

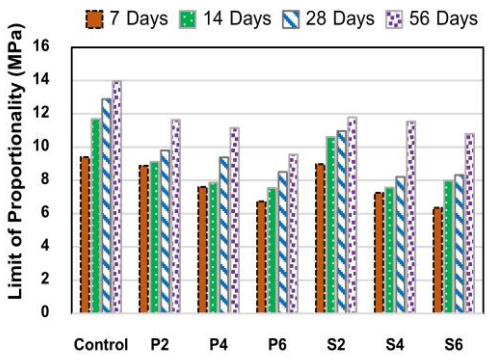
ดัดจะเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มตามที่ได้อธิบายไว้ในข้อ 3.1 ตัวอย่างเช่น ตัวอย่างควบคุมมีค่าหน่วยแรงดัดที่ LOP ต่ำที่สุดที่มีอายุ 7 วัน เท่ากับ 9.40 MPa และมีค่าหน่วยแรงดัดที่ LOP สูงสุดที่อายุ 56 วัน เท่ากับ 13.97 MPa หากพิจารณาปริมาณการใช้ยางพาราธรรมชาติ หรือยางพาราสังเคราะห์ในคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วจะพบว่า คอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่ใช้ยางพาราธรรมชาติ หรือยางพาราสังเคราะห์แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตรา ร้อยละ 2 จะให้ค่าหน่วยแรงดัดที่ LOP สูงสุด และมีค่าลดลงเมื่อมีการใช้ยางพาราในปริมาณมากขึ้น

3.3.3 หน่วยแรงดัดที่จุดแตกร้าว

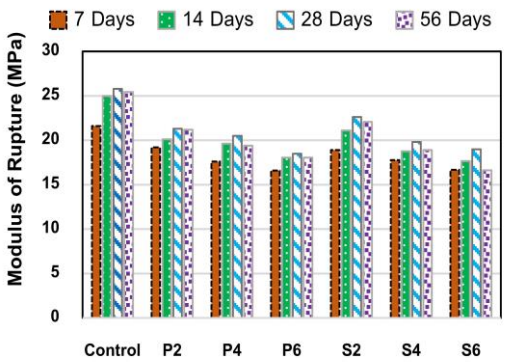
รูปที่ 11 แสดงค่าหน่วยแรงดัดที่ MOR ของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่ใช้ยางพาราธรรมชาติหรือยางพาราสังเคราะห์แทนที่ปูนซีเมนต์ ร้อยละ 2 4 และ 6 ซึ่งได้พบว่า ตัวอย่างควบคุมมีค่าหน่วยแรงดัดที่ MOR มากขึ้นเมื่ออายุการบ่มในน้ำเพิ่มขึ้นอย่างไรก็ตาม หน่วยแรงดัดที่อายุ 56 วัน มีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับหน่วยแรงดัดที่อายุ 28 วัน เมื่อนำตัวอย่างคอนกรีตเสริมใยแก้วที่บ่มน้ำ อายุ 56 วัน ไปส่องด้วย

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบหน่วยแรงดัดที่ LOP และหน่วยแรงดัดที่ MOR (ตัวเลขในวงเล็บ คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

ตัวอย่าง	ค่าหน่วยแรงดัดที่จุดขีดจำกัดสัดส่วน (MPa)				ค่าหน่วยแรงดัดที่จุดแตกร้าว (MPa)			
	7 days	14 days	28 days	56 days	7 days	14 days	28 days	56 days
Control	9.40(0.61)	11.70(0.81)	12.89(1.21)	13.97(1.41)	21.60(3.02)	25.00(3.52)	25.79(3.31)	25.45(2.92)
P2	8.87(1.03)	9.12(1.04)	9.80(1.03)	11.64(2.11)	19.2(2.61)	20.11(2.81)	21.30(3.04)	21.20(3.41)
P4	7.60(1.21)	7.86(1.23)	9.38(1.01)	11.15(2.81)	17.60 (3.01)	19.61(2.82)	20.5(2.42)	19.40(3.71)
P6	6.74(1.22)	7.54(0.62)	8.50(1.02)	9.55(2.62)	16.60 (3.02)	18.05(2.43)	18.50(2.61)	18.05(3.33)
S2	8.98(1.04)	10.61(1.10)	10.96(1.21)	11.80(1.91)	18.92(2.81)	21.10(2.42)	22.63(3.03)	22.08(3.27)
S4	7.25(0.82)	7.56(1.20)	8.21(1.04)	11.53(2.21)	17.7(2.81)	18.76(2.91)	19.82(2.31)	18.81(3.82)
S6	6.35(1.01)	7.97(1.31)	8.52(1.62)	10.80(2.51)	16.67(2.61)	17.66 (2.81)	19.00(3.01)	16.61(3.84)



รูปที่ 10 การเปรียบเทียบหน่วยแรงดัดที่ LOP



รูปที่ 11 การเปรียบเทียบหน่วยแรงดัดที่ MOR

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.009

กล้องจุลทรรศน์แบบ ส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ได้พบว่า เส้นใยแก้วยังมีผิวเรียบไม่ได้รับความเสียหายที่เกิดจากการกัดของด่างในคอนกรีต นอกจากนี้ สังเกตว่ามีคราบของ $Ca(OH)_2$ ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์เกาะติดอยู่ที่ผิวเส้นใย ดังรูปที่ 15 ถึง 17 โดย $Ca(OH)_2$ จะเข้าไปอุดช่องว่าง ทำให้เส้นใยแก้วเกิดการจับตัวกันแน่นขึ้น หรือมีแรงยึดหน่วง (Bond) ที่มากขึ้น ผลดังกล่าวอาจทำให้คอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วมีความเหนียวลดลง โดยการวิบัติอาจเปลี่ยนรูปแบบจากการถอนของเส้นใยไปเป็นแบบขาดภายใต้แรงดึง ซึ่งส่งผลให้เกิดการวิบัติแบบเปราะ (Embrittlement) ดังได้อธิบายไว้ในงานวิจัยของ C. Sujivorakul และคณะ [3] ที่พบว่าคราบของ $Ca(OH)_2$ ทำให้การยึดหน่วงระหว่างเส้นใยและคอนกรีตมากขึ้น ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของการวิบัติของเส้นใยแก้วเป็นแบบเปราะ นอกจากนี้ หน่วยแรงดัดที่ MOR ของตัวอย่างคอนกรีตเสริมใยแก้วที่ใช้ยางพารามีค่าน้อยกว่าตัวอย่างควบคุม เนื่องจากหน่วยแรงที่ MOR ของคอนกรีตเสริมใยแก้วจะมีความสัมพันธ์กับแรงยึดหน่วงระหว่างเส้นใยแก้วกับคอนกรีต โดยเมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยยางพาราซึ่งเป็นวัสดุที่มีความอ่อนตัวกว่าคอนกรีตอาจส่งผลให้การยึดหน่วงระหว่างเส้นใยแก้วกับยางพาราน้อยลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตล้วน

3.3.4 ค่าความเครียดของแผ่นคอนกรีตเสริมใยแก้วที่มียางพาราและยางพาราสังเคราะห์เป็นส่วนผสม

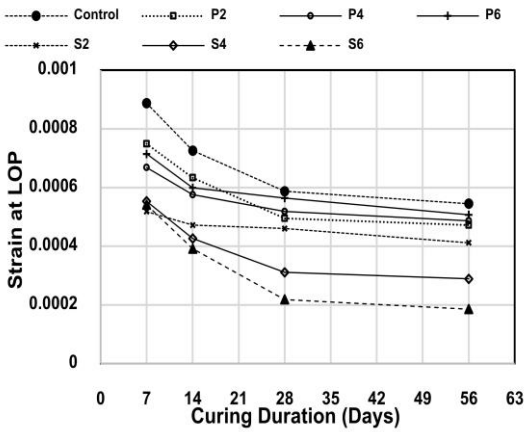
ตารางที่ 3 ได้สรุปค่าความเครียดที่ LOP และ MOR ของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้ว และรูปที่ 12 แสดงความเครียดที่ LOP โดยตัวอย่างควบคุมจะให้ค่าความเครียดที่ LOP มากที่สุดในทุกช่วงอายุ เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ผสมยางพารา จากการทดสอบได้พบว่าตัวอย่างที่ผสมยางพาราธรรมชาติจะให้ค่าความเครียดที่ LOP สูงกว่าตัวอย่างที่ผสมยางพาราสังเคราะห์ นอกจากนี้ การเพิ่มปริมาณยางพาราทั้งสองแบบจะทำให้ความเครียดที่จุด LOP มีแนวโน้มลดลง หากพิจารณาปัจจัยของอายุของการบ่มในน้ำจะพบว่าความเครียดที่จุด LOP ของแผ่นคอนกรีตเสริมใยแก้วในทุกตัวอย่างมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วที่อายุการบ่มระหว่าง 7 ถึง 28 วัน แต่อัตราการลดลงจะช้าลงเมื่ออายุการบ่มที่ 28 วันขึ้นไป รูปที่ 13 แสดงความเครียดที่ MOR ของแผ่นคอนกรีตเสริมใยแก้ว โดยตัวอย่างควบคุมมีค่าความเครียดที่ MOR มากกว่าตัวอย่างที่ใช้ยางพาราที่อายุการบ่มในน้ำระหว่าง 7 ถึง 28 วัน โดยมีค่าความเครียดลดลงอย่างรวดเร็วตามอายุการบ่มในน้ำ ส่วนตัวอย่างคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่ใช้ยางพาราธรรมชาติ หรือยางพาราสังเคราะห์ มีค่าความเครียดที่ MOR ลดลงอย่างต่อเนื่องเช่นกัน เมื่อมีอายุการบ่มในน้ำมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ค่าความเครียดที่ MOR ที่มีอัตราการลดลงค่อนข้างช้าเมื่ออายุการบ่มมากกว่า 28 วัน ดังเช่นสังเกตในผลของความเครียดที่ LOP ตารางที่ 3 ได้สรุปค่าความเครียดที่ LOP และ MOR ของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้ว และรูปที่ 12 แสดงความเครียดที่ LOP โดยตัวอย่างควบคุมจะให้ค่าความเครียดมากที่สุดในทุกช่วงอายุ เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ผสมยางพารา จากการทดสอบได้พบว่าตัวอย่างที่ผสมยางพาราธรรมชาติจะให้ค่าความเครียดที่ LOP สูงกว่าตัวอย่างที่ผสมยางพาราสังเคราะห์

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.009

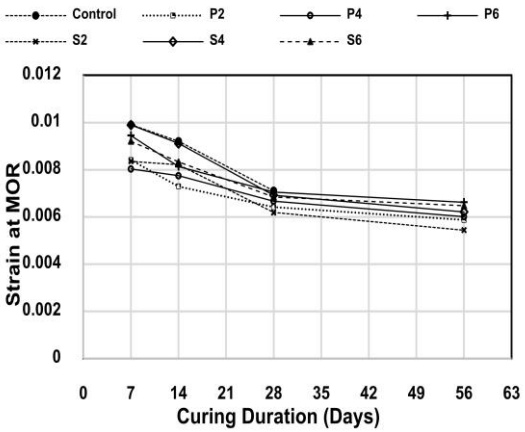
นอกจากนี้ การเพิ่มปริมาณยางพาราทั้งสองแบบจะทำให้ความเครียดที่ LOP มีแนวโน้มลดลง หากพิจารณาปัจจัยของอายุของการบ่มในน้ำจะพบว่า ความเครียดที่ LOP ของแผ่นคอนกรีตเสริมใยแก้วในทุกตัวอย่างมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วที่อายุการบ่มระหว่าง 7 ถึง 28 วัน แต่อัตราการลดลงจะช้าลงเมื่ออายุการบ่มที่ 28 วันขึ้น

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบความเครียดที่ LOP และความเครียดที่ MOR ของแผ่นคอนกรีตเสริมใยแก้ว

ตัวอย่าง	ค่าความเครียดที่จุดขีดจำกัดสัดส่วน LOP				ค่าความเครียดที่จุดแตกร้าว MOR			
	7 days	14 days	28 days	56 days	7 days	14 days	28 days	56 days
Control	0.000887	0.000726	0.000588	0.000545	0.009909	0.009206	0.007109	0.00698
P2	0.000749	0.000634	0.000495	0.000472	0.008411	0.007293	0.006418	0.00587
P4	0.000668	0.000576	0.000518	0.000487	0.008031	0.007743	0.006671	0.00601
P6	0.000714	0.000599	0.000565	0.000507	0.009448	0.008134	0.007051	0.00662
S2	0.000518	0.000472	0.000461	0.000412	0.008353	0.008215	0.006178	0.00544
S4	0.000553	0.000426	0.000311	0.000289	0.009897	0.009114	0.006925	0.00621
S6	0.000542	0.000392	0.000219	0.000186	0.009206	0.008333	0.006844	0.00647



รูปที่ 12 การเปรียบเทียบค่าความเครียดของแผ่นคอนกรีตเสริมใยแก้วที่ LOP ที่อายุการบ่ม 7 14 28 และ 56 วัน



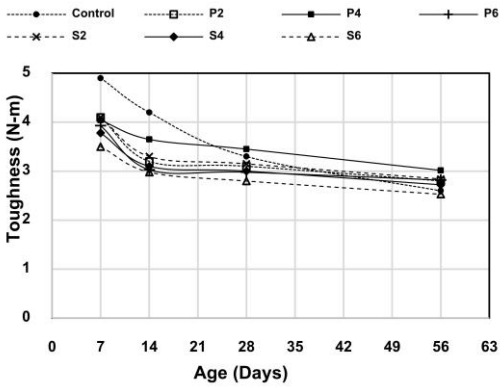
รูปที่ 13 การเปรียบเทียบค่าความเครียดของแผ่นคอนกรีตเสริมใยแก้วที่ MOR ที่อายุการบ่ม 7 14 28 และ 56 วัน

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.009

รูปที่ 13 แสดงความเครียดที่ MOR ของแผ่นคอนกรีตเสริมใยแก้ว โดยตัวอย่างควบคุมมีค่าความเครียดที่ MOR มากกว่าตัวอย่างที่ใช้ยางพาราที่อายุการบ่มในน้ำระหว่าง 7 ถึง 28 วัน โดยค่าความเครียดได้ลดลงอย่างรวดเร็วตามอายุการบ่มในน้ำ ส่วนตัวอย่างคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่ใช้ยางพาราธรรมชาติ หรือยางพาราสังเคราะห์ มีค่าความเครียดที่ MOR ลดลงอย่างต่อเนื่องเช่นกัน เมื่อมีอายุการบ่มในน้ำมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ค่าความเครียดที่ MOR ที่มีอัตราการลดลงค่อนข้างช้าเมื่ออายุการบ่มมากกว่า 28 วัน ดังเช่นสังเกตุในผลของความเครียดที่ LOP

3.3.5 ค่าความเหนียว (Toughness) ของแผ่นคอนกรีตเสริมใยแก้ว

ความเหนียวของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่ใช้ยางพาราธรรมชาติหรือยางพาราสังเคราะห์แทนที่ปูนซีเมนต์ ที่อายุการบ่ม 7 14 28 และ 56 วัน ได้แสดงในรูปที่ 14 ผลการศึกษาพบว่า ตัวอย่างควบคุมมีค่าความเหนียวลดลงอย่างรวดเร็วและต่อเนื่องจนถึงอายุการบ่มที่ 56 วัน โดยที่อายุการบ่ม 14 วันแรก ตัวอย่างควบคุมจะมีค่าความเหนียวสูงกว่าคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่ใช้ยางพาราธรรมชาติหรือยางพาราสังเคราะห์ แต่เมื่ออายุการบ่มมากกว่า 28 วัน แผ่นตัวอย่างควบคุมมีค่าความเหนียวต่ำกว่าบางตัวอย่างของคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่ใช้ยางพาราธรรมชาติหรือยางพาราสังเคราะห์ ทั้งนี้คาดว่าเกิดจากการใช้ยางพาราช่วยลดการจับตัวของคราบ $Ca(OH)_2$ ที่ผิวของเส้นใยแก้ว



รูปที่ 14 การเปรียบเทียบความเหนียวของแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้ว

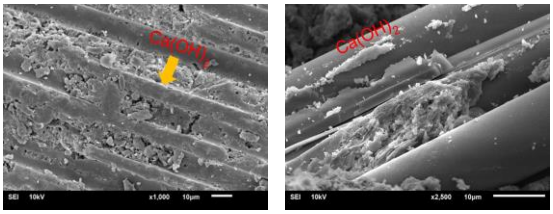
ในช่วงอายุ 14 วันแรกของการบ่มในน้ำ คอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่ใช้ยางพาราหรือยางพาราสังเคราะห์มีค่าความเหนียวลดลงอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อตัวอย่างมีอายุการบ่มในน้ำมากกว่า 14 วัน อัตราการลดลงของค่าความเหนียวจะมีค่าน้อยลงอย่างมาก ซึ่งสังเกตได้จากความชันของกราฟ โดยคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่ใช้ยางพาราธรรมชาติ ร้อยละ 4 ให้ค่าความเหนียวที่อายุระหว่าง 14 ถึง 56 วันสูงสุด เนื่องจากผลการทดสอบของตัวอย่างที่ใช้ยางพาราธรรมชาติร้อยละ 4 ได้แสดงพฤติกรรมการดัด โดยมีอัตราการลดลงของหน่วยแรงดัดหลังจากจุด MOR ช้ากว่าตัวอย่างอื่น ดังนั้นเมื่อคำนวณค่าพื้นที่ใต้กราฟเพื่อหาความเหนียวจึงทำให้ค่ามากกว่าตัวอย่างอื่น ผลที่ได้รับสอดคล้องกับงานวิจัยของ A. J. Majumdar และคณะ [4] ที่ได้ใช้ยางสไตรีนบิวตาไดอีนผสมในคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วและเก็บให้อยู่ในสภาพแวดล้อมตามธรรมชาติมีความเหนียวในระยะยาวลดลงตามอายุของการใช้งาน แต่มีอัตราการลดลงช้ากว่าตัวอย่างควบคุมที่ไม่ได้ผสมยางสไตรีนบิวตาไดอีน

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.009

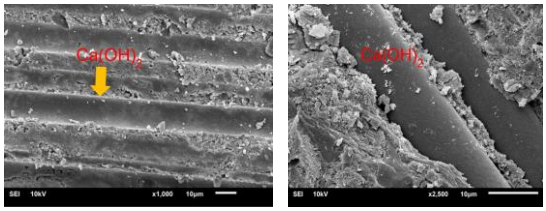
3.3.6 ภาพขยายคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

การขยายภาพของคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วดำเนินการโดยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด เพื่อดูการกัดกร่อนที่ผิวของเส้นใย การแทรกตัว และยึดหน่วงของ $Ca(OH)_2$ และเนื้อยางพารากับเส้นใยแก้ว โดยตัวอย่างที่นำไปทดสอบมีจำนวน 3 ตัวอย่าง ประกอบด้วย ตัวอย่างควบคุม ตัวอย่างที่ใช้ยางพาราธรรมชาติแทนที่ปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 2 และตัวอย่างที่ใช้ยางพาราสังเคราะห์แทนที่ปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 2 ที่ตัวอย่างทั้งหมดได้บ่มน้ำจนกระทั่งอายุ 56 วัน ผลที่ได้ได้แสดงได้ดังรูปที่ 15 ถึง 17

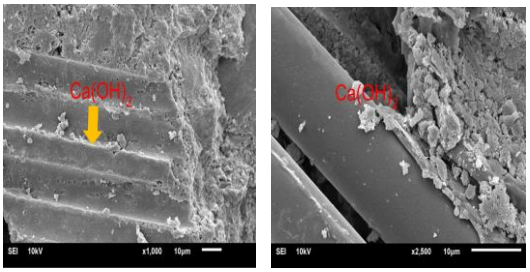
จากรูปที่ 15 สังเกตเห็นว่า ผิวเส้นใยแก้วในตัวอย่างควบคุมไม่ถูกกัดกร่อนจากความเป็นด่างของปูนซีเมนต์ และสังเกตเห็นคราบของ $Ca(OH)_2$ เกาะติดที่ผิวเส้นใยนอกจากนี้ ตัวอย่างที่มียางพาราธรรมชาติ และยางพาราสังเคราะห์เป็นส่วนผสมที่ร้อยละ 2 มีการยึดเกาะกันที่ผิวของเส้นใยมากกว่าตัวอย่างควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 16 และ 17 ตามลำดับ โดยการยึดเกาะที่มากขึ้นเกิดจาก $Ca(OH)_2$ และเนื้อยางพารา ซึ่งทำให้ช่องว่างในคอนกรีตลดลง สอดคล้องกับค่าการดูดซึมน้ำที่น้อยลงตามที่อธิบายไว้ในข้อที่ 3.2 นอกจากนี้ ได้พบว่า เส้นใยไม่ถูกกัดกร่อนจากจากความเป็นด่างของปูนซีเมนต์



รูปที่ 15 ภาพถ่ายของตัวอย่างควบคุม (บ่มน้ำ 56 วัน)



รูปที่ 16 ภาพถ่ายของตัวอย่างที่ใช้ยางพาราธรรมชาติร้อยละ 2 (บ่มน้ำ 56 วัน)



รูปที่ 17 ภาพถ่ายของตัวอย่างที่ใช้ยางพาราสังเคราะห์ร้อยละ 2 (บ่มน้ำ 56 วัน)

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางกล ได้แก่ กำลังอัด การดูดซึมน้ำ และกำลังดัดของคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่ใช้ยางพาราและยางพาราสังเคราะห์ โดยผลที่ได้จากการศึกษาสามารถสรุปได้ ดังต่อไปนี้

1. มอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยยางพาราหรือยางพาราสังเคราะห์มากขึ้นจะมีกำลังอัดลดลง โดยกำลังอัดมีค่าน้อยกว่าตัวอย่างควบคุมที่ไม่มีการแทนที่ด้วยยางพารา ซึ่งเกิดจากอัตราส่วนผสมที่มีปริมาณปูนซีเมนต์น้อยลงเมื่อมีการนำยางพาราที่มีกำลังอัดน้อยกว่ามาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.009

2. การดูดซึมน้ำของแผ่นบางที่ทำจากคอนกรีตเสริมใยแก้วมีแนวโน้มลดลงเมื่ออายุการบ่มน้ำมากขึ้น เนื่องจากความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่มากขึ้น นอกจากนี้ คอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่ถูกแทนที่ด้วยยางพาราหรือยางพาราสังเคราะห์จะมีค่าการดูดซึมน้ำน้อยกว่าตัวอย่างควบคุมเนื่องจากการแทรกตัวของเนื้อยางพาราที่เกิดขึ้นในช่องว่างของคอนกรีต

3. อายุของการบ่มน้ำมากขึ้นจะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงดัดที่ LOP ของทั้งตัวอย่างควบคุมและตัวอย่างแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่ใช้ยางพาราธรรมชาติหรือยางพาราสังเคราะห์ เนื่องจากหน่วยแรงดัดที่ LOP มีความสัมพันธ์โดยตรงกับกำลังอัดของคอนกรีต

4. ในช่วงอายุ 28 วันแรก หน่วยแรงดัดที่ MOR ของตัวอย่างควบคุมและตัวอย่างแผ่นคอนกรีตเสริมเส้นใยแก้วที่ใช้ยางพาราหรือยางพาราสังเคราะห์จะเพิ่มขึ้นตามอายุของการบ่มน้ำมากขึ้น อย่างไรก็ตามที่อายุ บ่มน้ำ 56 วัน หน่วยแรงดัดที่ MOR มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย

5. หน่วยแรงดัดที่ MOR ของตัวอย่างคอนกรีตเสริมใยแก้วที่ใช้ยางพารามีค่าน้อยกว่าตัวอย่างควบคุม

6. ความเครียดที่ LOP และ MOR ของตัวอย่างควบคุม และคอนกรีตเสริมใยแก้วที่ใช้ยางพารามีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่ออายุการบ่มในน้ำมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้ความเหนียวของคอนกรีตเสริมใยแก้วลดลง อย่างไรก็ดีการใช้ยางพาราธรรมชาติ หรือยางพาราสังเคราะห์ช่วยให้มีอัตราการลดลงของความเครียดและความเหนียวน้อยกว่าตัวอย่างควบคุม

5. เอกสารอ้างอิง

[1] ACI 544.1R-96, State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete, American Concrete Institute, MI, 2002.

[2] N. Kabay and B. Amed, Glass fiber–reinforced sprayed concrete: Physical, mechanical, and durability properties, Journal of Materials in Civil Engineering, 2021, 33(1), 04020396.

[3] C. Sujivorakul, C. Jaturapitakkul and A. Taotip, Utilization of fly ash, rice husk ash, and palm oil fuel ash in glass fiber–reinforced concrete, Journal of Materials in Civil Engineering, 2011, 23(9), 1281-1288.

[4] A.J. Majumdar, B. Singh and J.M. West, Properties of GRC modified by styrene-butadiene rubber latex, Journal of Composites for Construction, 1987, 61-64.

[5] S. Mebarkia and C. Vipulanandan, Compressive behavior of glass-fiber reinforced polymer concrete, Journal of Materials in Civil Engineering, 1992, 4, 91-105.

[6] P. Plangoen, The development of irrigation canal mix with rubber latex for farm irrigation system, KMUTT Research and Development Journal, 2016, 41(2), 211-223. (in Thai)

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.009

[7] T. Yaowarat, A. Suddeepong, M. Hoy, S. Horpibulsuk, T. Takaikaew, N. Vichitcholchai, A. Arulrajah and A. Chinkulkijniwat, Improvement of flexural strength of concrete pavements using natural rubber latex, Construction and Building Materials, 2021, 282, 122704.

[8] A. Buritatun, T. Takaikaew, S. Horpibulsuk, A. Udomchai, M. Hoy, N. Vichitcholchai and A. Arulrajah, Mechanical strength improvement of cement stabilized soil using natural rubber latex for pavement base applications, Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32(12), 04020372.

[9] K. Zhong, M. Sun, M. Zhang, Y. Qin and Y. Li, Interfacial and mechanical performance of grouted open-graded asphalt concrete with latex modified cement mortar, Construction and Building Materials, 2020, 234, 117394.

[10] ASTM C109/C109M-02, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), ASTM International, PA 2002.

[11] BS EN 1170-5, Precast concrete products-Test methods for glass-fiber reinforced cement: Part 5 measuring bending strength, Complete bending test method, British Standards Institution, London, 1998.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.010

บทความวิจัย

Impact of Cu-modified Activated Carbon on Natural Rubber Sheet's Mechanical Properties

Wiwat Jeungthanasirigool[1,3], Thana Chotchuangchutchaval[2,3] and Nathapong Sukhawipat[2,3*]

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

[2] Department of Mechanical Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

[3] Center of Sustainable Energy and Engineering Materials (SEEM), College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

[*] Corresponding author, E-mail: nathapong.s@cit.kmutnb.ac.th

Received: 24 July 2024; Revised: 18 December 2024; Accepted: 11 February 2025

Online Published: 22 April 2025

Abstract: This investigation evaluated the results of incorporating copper-modified activated carbon into natural rubber sheets on their electrical and mechanical characteristics. copper-modified activated carbon was added at various concentrations (5, 10, and 15 parts per hundred rubber), resulting in a notable enhancement in density as confirmed by scanning electron microscopy (SEM). However, the addition of copper-modified activated carbon led to a deterioration in several mechanical properties, including hardness, tensile strength, elongation at break, and rip strength, with the most significant decline observed in tensile strength. Atomic force microscopy (AFM) analysis revealed that copper-modified activated carbon addition in natural rubber sheets exhibited enhanced electrical properties compared to those containing only activated carbon. The findings suggest that these rubber sheets offer a promising balance between dielectric constants and mechanical durability, making them potential candidates for applications demanding flexible sensors and electrostatic discharge protection.

Keywords: Natural rubber, Cu-modified, activated carbon, tensile strength

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.010

1. Introduction

The electronics industry faces significant challenges due to static electricity, primarily caused by the buildup of electrostatic discharge (ESD). ESD can damage integrated circuits, disrupt control systems, and increase manufacturing costs [1, 2]. To combat this, ESD protection systems are used, often incorporating anti-static materials to prevent the buildup of static electricity and protect components and equipment. Rubber plays a key role in these systems, offering both flexibilities to cushion delicate parts and durability for robust surfaces [3, 4]. This study explores the use of rubber in ESD protection, emphasizing its unique balance of softness and strength in various applications.

Advancements in processing methods and the addition of various components have allowed natural rubber to be adapted to meet the specific needs of different industries. Carbon black (CB) powder, known for enhancing rubber properties, is one of the most commonly used additives. It enables manufacturers to customize the performance of rubber products [5]. When CB is added to rubber sheets in amounts greater than 15-30 phr, it creates conductive sheets. This conductivity comes from the formation of a conductive network within the rubber, where the increased filler content reduces the gaps, allowing electrons to move more easily and improving overall conductivity.

Several factors affect electrical conduction, including temperature and the properties of the filler material. As temperature increases, thermal expansion causes the polymer molecules and the conductive network to expand, resulting in a drop in conductivity. The size and surface area of the filler particles also play a crucial role in conductivity [6]. Evenly dispersing carbon particles throughout the rubber matrix significantly improves electrical conductivity compared to when the particles are clustered. Adding carbon nanotubes further enhances the conductivity by increasing the efficiency of the carbon particle network [7].

Activated carbon (Ac), known for its large surface area, is widely used in applications like water purification and air filtration [8]. To produce charcoal powder, the charcoal undergoes physical or chemical activation, which alters its surface to increase its surface area, making it more effective for different reactions [9, 10]. Therefore, this study explores the incorporation of copper-modified Ac into rubber sheets. The Cu-modified Ac is prepared through chemical solution reduction, with copper concentrations of 1% and 2% by weight. Rubber sheets containing 5 phr, 10 phr, and 15 phr of filler are then prepared and analyzed using SEM-EDX to examine the structure and distribution of Ac and

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.010

copper particles. The analysis focuses on how Cu modification affects the electrical conductivity of rubber sheets, along with its mechanical properties such as density, hardness, tensile strength, and elongation at break. The volume resistivity of the sheets is also measured. The aim is to understand how combining Ac with copper doping enhances both the structural and electrical properties of natural rubber composites.

2. Materials

In this study, natural rubber (STR5L) was selected as the polymer matrix, with a fixed concentration of 100 parts per hundred rubber (phr). The material was sourced from FAOT in Nakhon Sri Thammarat, Thailand, ensuring consistency in the base polymer used for experimentation. To facilitate the vulcanization process, stearic acid was incorporated as an activator at 1 phr, obtained from R.M.C. Supply Co., Ltd. in Nonthaburi, Thailand. Additionally, zinc oxide (ZnO), another essential activator, was introduced at 5 phr to enhance the crosslinking process, with the material supplied by Thai Lysaght Co., Ltd. in Pranakorn Si Ayutthaya, Thailand. To further optimize the rubber formulation, 2,2'-Dithiobis-(benzothiazole) (MBTs) was used as an accelerator at a concentration of 1 phr, procured from Siam Chemicals Co., Ltd. in Samutprakarn, Thailand. Sulfur (S) acting as a crucial role as a vulcanizing agent by promoting crosslink formation within the polymer network, was included at 2.5 phr, also provided by Siam Chemicals Co., Ltd. To modify and enhance the dielectric properties of the material, activated carbon (Ac) was introduced as a reinforcing filler at varying concentrations of 0 and 15 phr, with the material sourced from Carbokarn Co., Ltd. Furthermore, to further improve the electrical performance, copper was incorporated onto the activated carbon surface in weight percentages of 0, 1, and 2 wt%. This modification was synthesized by NAS Lab to enhance the composite's dielectric characteristics and overall material performance.

3. Experimental

3.1 Cu-Modified Ac Preparation

The process for creating copper-modified activated carbon (Cu-modified Ac) began by dissolved copper (II) acetate in distilled water at 80 °C and then allowed the solution to cool to room temperature by controlling the concentration of copper (0) of 2%wt. Activated carbon from Carbokarn Co., Ltd. was then mixed with distilled water using a magnetic stirrer. Next, the copper solution was added to this mixture, and hydrazine hydrate was carefully introduced. The mixture was reheated to 80 °C, and the resulting solution was filtered using a Buchner filter. Finally, the Cu-modified activated carbon was dried in an oven at 100 °C for 24 hours and then transferred to a desiccator to prevent moisture absorption before testing.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.010

3.2 Preparation of NR/ Cu-modified Ac composite

A two-roll mill (LRM-S-110/3E, Labtech Engineering Co., Ltd., Thailand) was operated at 60 °C and 60 rpm to compound natural rubber (NR) with other materials. Table 1 provides a summary of the ingredients used to form the NR/Ac-Cu composite. Mastication and compounding consisted the two steps in the composite preparation process. Initially, natural rubber was masticated in an internal mixer for roughly 10 minutes, followed by the addition of MBTs, stearic acid, ZnO, sulfur, and Ac-Cu for a further compounding phase of around half an hour. After completing the compounding process, the cure time (tc_{90}) and torque variations were assessed using a moving die rheometer (MDR). The rubber was then vulcanized through compression molding at 140 – 160 °C with an LP20-B machine, Labtech Engineering Co., Ltd.

4. Characterization

The rubber was subsequently vulcanized through compression molding at an approximate temperature range of 140 – 160 °C using a Labtech Engineering Co., Ltd. model LP20-B machine. Based on the identified cure time, NR composites were subsequently vulcanized through a compression molding process.

The hardness of the rubber composite sheet was assessed with a Shore hardness tester following ASTM D2240. Ten measurements were taken at different points, and the average hardness value was recorded.

To get to the point regarding tensile behavior—encompassing the modulus at 100% elongation, ultimate tensile strength, and elongation at break—a universal testing machine (Instron model 3365) was put through its paces. The evaluations took place at a crosshead speed of 500 mm/min, strictly in line with ASTM D412.

Table 1 Rubber compound recipe (in the unit of phr)

No	STR 5L	Stearic acid	Zinc Oxide	2,2'-Dithiobis-(benzothiazole) (MBTs)	Sulfur	Pure Ac	Cu-Modifier Ac
1	100	1	5	1	2.5	0	0
2	100	1	5	1	2.5	5	0
3	100	1	5	1	2.5	10	0
4	100	1	5	1	2.5	15	0
5	100	1	5	1	2.5	0	5
6	100	1	5	1	2.5	0	10
7	100	1	5	1	2.5	0	15

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.010

Scanning electron microscopy (SEM) was used to investigate the cross-sectional morphology of NR/Ac-Cu composites. Specimens prepared at extremely low temperatures in liquid nitrogen were examined with a JSM-6510LV SEM from JEOL, Japan. Observations were performed at a 500× enlargement ratio under reduced pressure with an accelerating voltage of 20 kV. Prior to this, specimens underwent gold sputter deposition. A network analyzer (Agilent Technology Model E5071C ENA series) operating over the frequency range of 0.5 to 3.0 GHz was applied to evaluate the dielectric characteristics.

For electrostatic force microscopy (EFM) analysis, the rubber samples underwent a thorough cleaning process before testing. This process included ultrasonic agitation in a detergent solution (Alconox) for 30 minutes, followed by an additional 30 minutes in deionized water to remove contaminants. After cleaning, the samples were dried using a nitrogen gas stream.

Following the cleaning procedure, the surface topography and electrostatic force of the samples were analyzed using the EFM mode of a Park NX-10 atomic force microscope. The analysis was conducted in a standard room environment using a non-contact mode probe (NSC36_B), which has a spring constant (k) of 1 N/m and a resonance frequency of 90 kHz. Simultaneous topographical and electrostatic force mappings were carried out at a scanning speed of 8 μm/s, with a sample bias of 0V and a set point distance of 4 nm from the surface under ambient conditions.

5. Results and Discussion

As part of the activated carbon (Ac) modification, copper (II) from copper acetate monohydrate was chemically reduced to elemental copper. A detailed analysis was performed to assess the porosity features of both unmodified and Cu-modified Ac, with particular emphasis on specific surface area, pore diameter, and pore size. At copper loadings of 0% and 2%, a marked drop in specific surface area was observed, falling from 1195 m^2/g to 1081 m^2/g. In a similar vein, the pore volume decreased from 0.49 cm^3/g to 0.44 cm^3/g, while the pore diameter shrank from approximately 1130 μm to 1080 μm. These declines suggest the deposition of copper particulates distributed on the activated carbon surface, leading to the overall reduction in these properties.

The findings suggest that copper particle growth occurred following the reduction of the copper precursor, confirming the successful modification of the activated carbon structure. As depicted in Fig. 1, SEM images were utilized to distinguish the morphological differences between unmodified and Cu-modified activated carbon. The results further verified the deposition of copper on the surface of activated carbon particles.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.010

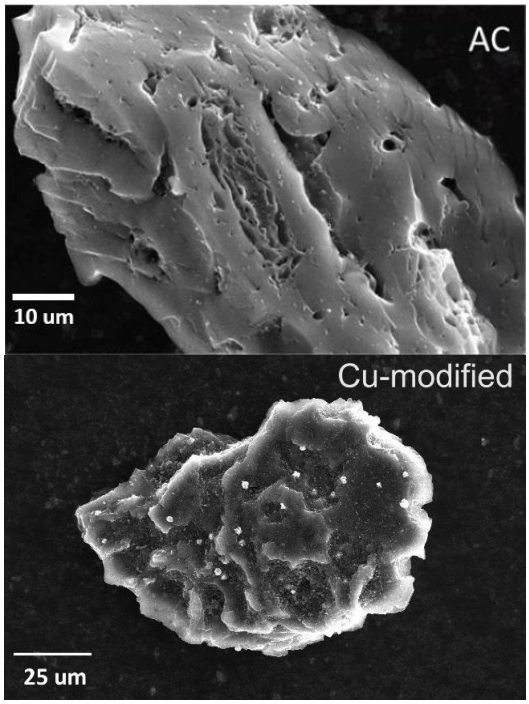


Fig. 1 SEM images of (top) pure activated carbon granule (down) Cu-modified activated carbon granule

Fig. 2 illustrates a consistent increase in density as the Ac content rises for both pure and Cu-modified samples. The Cu-modified Ac leads to slightly higher density levels at each content compared to pure Ac, suggesting that the addition of copper particles contributes to the overall mass per unit volume of the rubber composite. The density analysis showed an increase in density with the addition of Ac, as Ac has a higher density than rubber. However, the impact of Cu modification resulted in relatively minor differences in density.

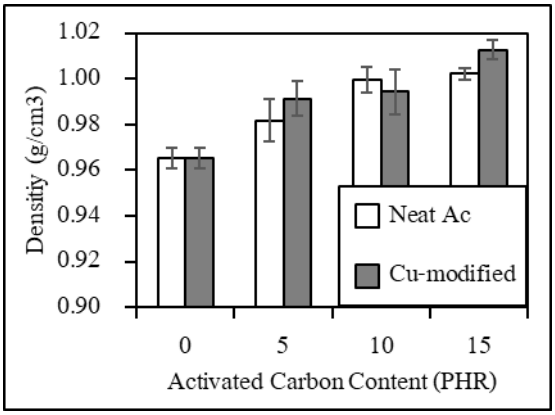


Fig. 2 The relation between Ac content and density in both pure (white) and Cu-modified Ac (grey)

Fig. 3 shows that the hardness of the rubber composite decreases as Ac content increases, with a more significant reduction in hardness for the pure Ac compared to the Cu-modified version. A decrease in hardness was observed with the addition of Ac, likely due to its interference with the rubber's crosslinking network, though Cu modification did not cause any significant changes. Notably, when the Ac content exceeded 10 phr, the expected continuous decrease in hardness was not seen, indicating that beyond 15 phr of Ac, the reduction in hardness might be less pronounced. This trend indicates that while Ac lowers the hardness, the copper modification helps maintain some of the hardness of rubber composite, likely due to differences in how the copper particles interact with the rubber matrix.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.010

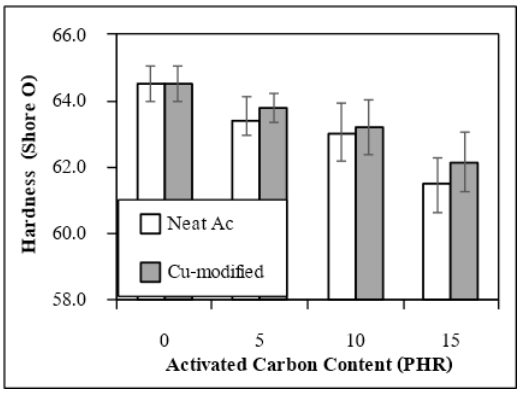


Fig. 3 Highlights correlation between Ac content and hardness in both pure (white) and Cu-modified Ac (grey)

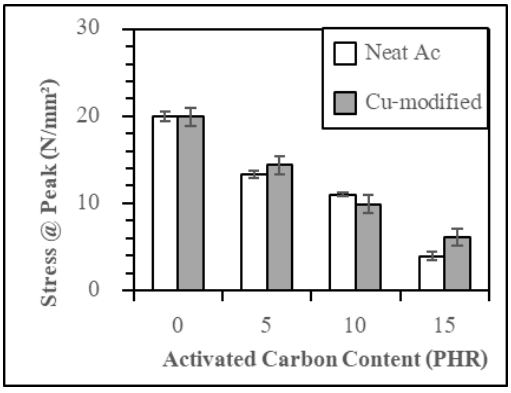


Fig. 4 Correlation Ac content and stress in both pure (white) and Cu-modified Ac (grey)

As illustrated in Fig. 4, the stress at peak results decreases with an increase in Ac content. This decline is less pronounced in the Cu-modified Ac, suggesting that the copper modification may enhance the rubber's strength and its ability to manage stress before failure. Since rubber sheets are commonly used as mats for tables or floors, it is important to establish clear testing parameters for stress and strain.

The stress trends align with the hardness results shown in Fig. 3, revealing a decrease that is inversely related to the amount of both pure and Cu-modified Ac. However, this trend does not match the strain characteristics depicted in Fig. 5, where the relationship between strain and Ac content shows only a slight reduction.

Interestingly, the rubber composite with 15 phr of Cu-modified Ac demonstrates a significant rebound, suggesting that an adequate amount of Cu-modified Ac can substantially influence the crosslinking process and improve various properties of the rubber composite sheet.

In Fig. 6, the electrical properties of the rubber composites was examined by using a network analyzer to measure the relative dielectric constant, also known as permittivity. The results show that adding Ac to the rubber compound increases its dielectric constant, which suggests an improved ability of the rubber structure to hold electrical charge. The upward trend in the graph for pure Ac may indicate a slight increase in electrical resistivity, highlighting that higher concentrations of Ac filler enhance the rubber sheet's resistivity.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.010

The electrostatic force measurements obtained using the atomic force microscope (AFM) indicated that rubber sheets containing Cu-modified Ac exhibited a higher average electrostatic force than those filled only with Ac, as illustrated in Fig. 7. This observation reinforces the earlier dielectric measurements, confirming that adding copper improves the rubber sheet's capacity to hold electrical charges. These findings are crucial for understanding the electrical and structural changes that take place in materials when activated carbon is incorporated during the manufacturing of natural rubber sheets.

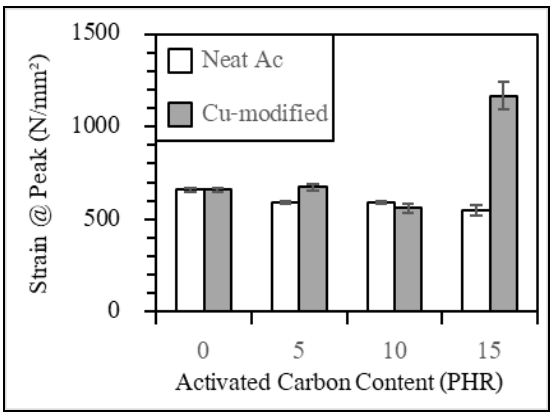


Fig. 5 Relates Ac content and strain in both pure (white) and Cu-modified Ac (grey)

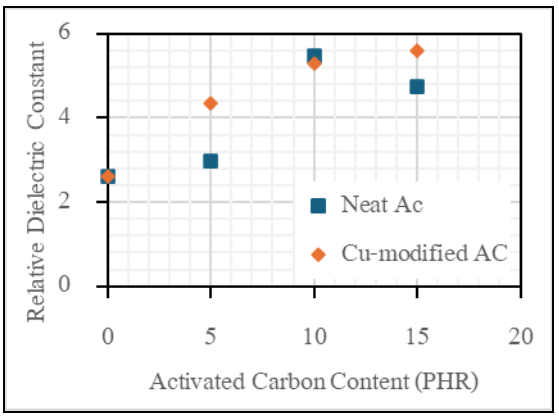


Fig. 6 Corelates between relative dielectric constant and Ac content in both pure (square) and Cu-modified Ac (diamond).

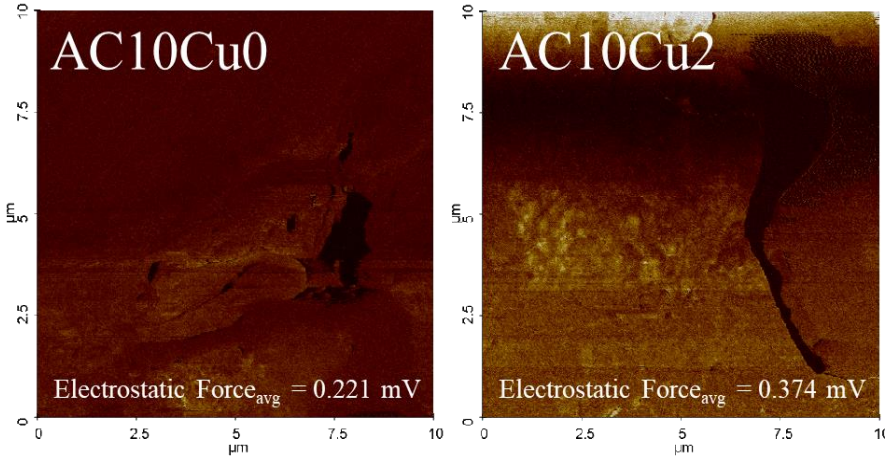


Fig. 7 Contains atomic force microscopy (AFM)

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.010

The enhanced dielectric properties of these rubber composites have significant implications for various applications, particularly in the field of dielectric materials. For instance, the improved charge-holding capacity makes these materials suitable for use in capacitors, which are essential components in electronic devices. The ability to accumulate electrical charges efficiently can lead to better energy storage solutions, improving the performance of devices ranging from small consumer electronics to larger power systems. Furthermore, these rubber sheets can be utilized in the development of flexible sensors and actuators, where their lightweight nature and enhanced electrical properties can contribute to better functionality and durability. Additionally, the modified rubber materials may find applications in electromagnetic interference (EMI) shielding, protecting sensitive electronic components from disruptive signals. Overall, the integration of Cu-modified activated carbon in natural rubber not only enhances its electrical properties but also opens up new avenues for innovative applications in the rapidly evolving field of dielectric materials.

5. Conclusion

This study successfully demonstrates the enhancement of the electrical and mechanical properties of natural rubber sheets through the incorporation of Cu-modified activated carbon. The results indicate that the addition of activated carbon significantly influences the density, hardness, and stress-strain behavior of the rubber composites. Notably, while increasing the content of activated carbon tends to decrease the rubber's ability to handle stress, the modification with copper provides a more gradual reduction in strength, suggesting that Cu plays a beneficial role in maintaining material integrity. Electrostatic force measurements and dielectric constant evaluations reveal that Cu-modified activated carbon substantially improves the charge-holding capacity of the rubber matrix, enhancing its electrical properties. These improvements have far-reaching implications for applications in dielectric materials, including capacitors, flexible sensors, and electromagnetic interference shielding. The findings highlight the potential of utilizing Cu-modified activated carbon in natural rubber to create advanced materials that meet the growing demand for efficient energy storage solutions and electronic components.

Overall, this research contributes valuable insights into the structural and electrical alterations of rubber composites, paving the way for future innovations in material design and application in various industries especially electrostatic discharge protection materials.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.010

6. Acknowledge

The author extends heartfelt gratitude and appreciation to King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Mahidol University, and Walailak University for their invaluable collaboration, which was essential in realizing this research. I would like to give special thanks to AFM analysis team Dr. Pongsakorn Kanjanaboos and Chaowaphat Seriwatanachai from School of Materials Science and Innovation, Faculty of Science, Mahidol University. I would like to convey sincere gratitude to Dr. Narongrit Sosa for supporting this research. Additionally, special thanks are thanks to Mr. Phakkhaphum Lethaisong for his crucial assistance during the characterization processes. His prompt and accurate techniques significantly contributed to the success and completeness of this project.

7. References

[1] M.N.O. Sadiku and C.M. Akujuobi, Electro-static discharge (ESD), IEEE Potentials, 2004, 23, 5, 39-41.

[2] J.A. Stuart, L.J. Turbini and J.C. Ammons, Investigation of electronic assembly design alternatives through production modeling of life cycle impacts, costs, and yield, IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part C, 1997, 20, 4, 317-326.

[3] J.M. Smallwood, The ESD control program handbook, John Wiley & Sons Ltd, NJ, 2020, 1-16.

[4] IEEE P62.42.2/D5, IEEE Draft Guide for the Application of Surge – Protective Components in Surge Protective Devices and Equipment Ports – Part 2 Metal – Oxide Varistors (MOVs), Institute of Electrical and Electronics Engineers, NJ, 2020.

[5] E. Farida, N. Bukit, E.M. Ginting and B.F. Bukit, The effect of carbon black composition in natural rubber compound, Case Studies in Thermal Engineering, 2019, 16, 100566.

[6] H. Xu, Y. H. Wu, D. Yang, J. Wang, and H. Xie, Study on theories and influence factors of PTC property in polymer-based conductive composites, Reviews on Advanced Materials Science, 2011, 27, 173-183.

[7] Y. Nakaramontri, S. Pichaiyut, S. Wisunthorn and C.Nakason, Hybrid carbon nanotubes and conductive carbon black in natural rubber composites to enhance electrical conductivity by reducing gaps separating carbon nanotube encapsulates, European Polymer Journal, 2017, 90, 467-484.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.010

[8] L.F. Gleysteen and G.H. Scheffler, Structure of activated carbons and adsorption from solution, Proceedings of the Fourth Conference on Carbon, University of Buffalo, Proceedings, 1960.

[9] C.Y. Chuah and A.M. Laziz, Review: Recent progress in synthesis and application of activated carbon for CO_2 capture, C, 2022, 8, 29.

[10] F. Rodríguez-Reinoso, Activated carbon and adsorption, Encyclopedia of materials: Science and technology, Elsevier Science Ltd., Amsterdam, 2001.

[11] N. Oinonen, C. Xu, B. Alldritt, F.F. Canova, F. Urtev, S. Cai, O. KrejČí, J. Kannala, P. Liljeroth and A.S. Foster, Electrostatic discovery atomic force microscopy, ACS Nano, 2022, 16, 89-97.

[12] Yi Yang, K.M. Mayer and J.H. Hafner, Quantitative membrane electro-statics with the atomic force microscope, Biophysical journal, 2007, 92, 6, 1966-1974.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.011

บทความวิจัย

Characteristics of Biochar Production Derived from Bamboo in a Drum Pyrolyzer

Thanet Unchaisri[1*], Tanong Chayawattana[2], Jaruwan Poosri[2], Apinya Dechsatian[2] and Pawin Chaivatamaset[1]

[1] Combustion Technology Research Laboratory, Pilot Plant Development and Training Institute, King Mongkut's University of Technology Thonburi

[2] Technical and Engineering System, Pilot Plant Development and Training Institute, King Mongkut's University of Technology Thonburi

[*] Corresponding author, E-mail: thanet.unc@mail.kmutt.ac.th

Received: 25 October 2024; Revised: 17 February 2025; Accepted: 19 February 2025
Online Published: 22 April 2025

Abstract: This study utilizes a drum pyrolyzer to investigate the production of biochar and wood vinegar from bamboo. Bamboo from Prachinburi province in Thailand was used in the experiment. Bamboo was heated to a temperature between 450 °C and 595 °C in a drum pyrolyzer (cylindrical shape). The yields of biochar, wood vinegar, and gaseous products following the pyrolysis process were at 34.6%, 16.6%, and 48.8%, respectively. Based on calculations using the yield of biochar and the heating values of both biochar and raw fuel, the pyrolyzer's energy conversion efficiency was at 44.6%. With moisture content dropping from 11.1% to 4.94%, volatile matter dropping from 78.0% to 39.2%, and fixed carbon rising from 19.8% to 52.4%, the resultant bamboo biochar displayed better properties than the raw material. Compared to the raw bamboo's 19.1 MJ/kg, the biochar's higher heating value (HHV) increased to 24.6 MJ/kg. During the pyrolysis process, the pH of the wood vinegar generated ranged from 2.85 to 3.18. Based on a one-year project timeline, the process showed economic potential with a monthly internal rate of return of 46.75% and a payback period of about two months.

Keywords: Bamboo; Biochar; Drum pyrolyzer; Pyrolysis

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.011

1. Introduction

Thailand is the primary source of commercial bamboo, with 91,746 rai (14,679.4 hectares) of planted area distributed throughout all regions. With 40,364 rai (6,458.2 hectares) under cultivation, the Eastern region is the greatest area for bamboo farming [1]. The biggest area of Tong bamboo cultivation at the provincial level is found in Prachinburi province, which covered 31,061 rai (4,969.8 hectares) in 2018, according to figures on bamboo cultivation from the Prachinburi Provincial Agricultural Office [1]. This displays how bamboo can be used in Thailand as a raw material for sustainable energy.

Thailand's domestic coal (lignite) output is about 3,379 ktoe [2]. To further fulfill its energy requirements, Thailand imports coal 13,406 ktoe. In the final stages, the nation uses 8,413 ktoe as energy from coal [2]. Because of its rapid growth rate, bamboo is consequently seen as an attractive crop for alternative energy. This is considered to be a raw material that can be processed into biochar for use as renewable energy and that can sustainably replace coal use.

The street food business, which was valued at 180 billion baht in 2022 and grew at a rate of about 2-3% from the year previously, presents potential for the use of plant-based biochar [3]. Thus, plant-based biochar has the potential to be used in these businesses as a fuel for grilling and cooking.

One of the thermal chemical conversion processes that takes place in low- or no-oxygen environments is pyrolysis. This involves heating a material to the point when the molecules breakdown into smaller ones. The end products of the pyrolysis process, which uses biomass to create biochar, are the solids, liquids, and gases that are created. The principal gases that are often produced are carbon monoxide (CO), hydrogen (H_2), and methane (CH_4). According to Basu [4], these gases have high heating values of 12.63 MJ/Nm^3, 12.74 MJ/Nm^3 and 39.82 MJ/Nm^3 [4] respectively. These gasses can therefore be employed again as energy sources.

In addition to being an energy source, products from the pyrolysis process of agricultural waste have been investigated for use as materials for soil improvement and to improve agricultural production. The application of 10 t/ha of corn cob biochar as a soil amendment in cassava farms was investigated by Frimpong et al. [5]. The result revealed that cassava yields in the field with only biochar addition were 11.85 kg/ha, a 71% increase, whereas yields in the field without biochar and fertilizer were 6.91 kg/ha. More recently, Luan et al. [6] investigated the application of 0.5%, 2%, and 5% biochar ratios in

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.011

soil for Chinese cabbage growth. According to the study, the dose of biochar given to Chinese cabbage plants increased their weight by 4.2% to 11.6% when compared to soil that lacked biochar. According to the abovementioned studies, biochar could improve agricultural yields and production and be a useful soil amendment.

The temperature of the reaction is an important factor that determines the amount and characteristics of biochar products that are produced by pyrolysis from biomass. According to the previous researches [7-9], temperatures typically used are between 300 °C and 750 °C. Kurimoto et al. [8] conducted a study on the production of biochar from bamboo in an electric furnace for three hours at temperatures between 300 °C and 800 °C. The study found that the amount of biochar produced, volatile matter content, hydrogen, and oxygen decreased with increasing temperature. The total carbon content, ash content, and fixed carbon content all increased at the same time.

This study is to investigate the method of making biochar from bamboo by utilizing a drum pyrolyzer that also produces wood vinegar in combination with a condensing unit. The study examines the qualities of the final products as well as the yield of solid and liquid products. Furthermore, this evaluates the process's financial viability by computing the payback period and taking into account potential applications for bamboo biochar, such as cooking and agricultural soil enhancement.

2. Apparatus and Experimental Procedure

2.1 Apparatus

This study examines the pyrolysis process used in a horizontal cylindrical reactor (also known as a drum pyrolyzer) to produce biochar from bamboo. The reactor is constructed from 5 mm thick steel sheet that has been rolled into a cylindrical shape with an internal diameter of 125 cm and a depth of 130 cm, as depicted in Fig. 1. A cooling tower is an additional component of the reactor that is used to contain the hot gas produced during the pyrolysis reaction. After cooling, the gas is recirculated to ignite and heat the reactor. Wood vinegar is the liquid that comes out of the condenser unit. Four steel pipes with a diameter of one inch each make up the internal cooling tower. Water cools the pipes at a steady 2.35 m^3/h flow. The reactor has two Type-K thermocouples installed: one is located inside the reaction chamber, while the other one measures the temperature of the cooled gas. The Testo 175-T3 data logger was used to record the temperatures every 10 seconds.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.011

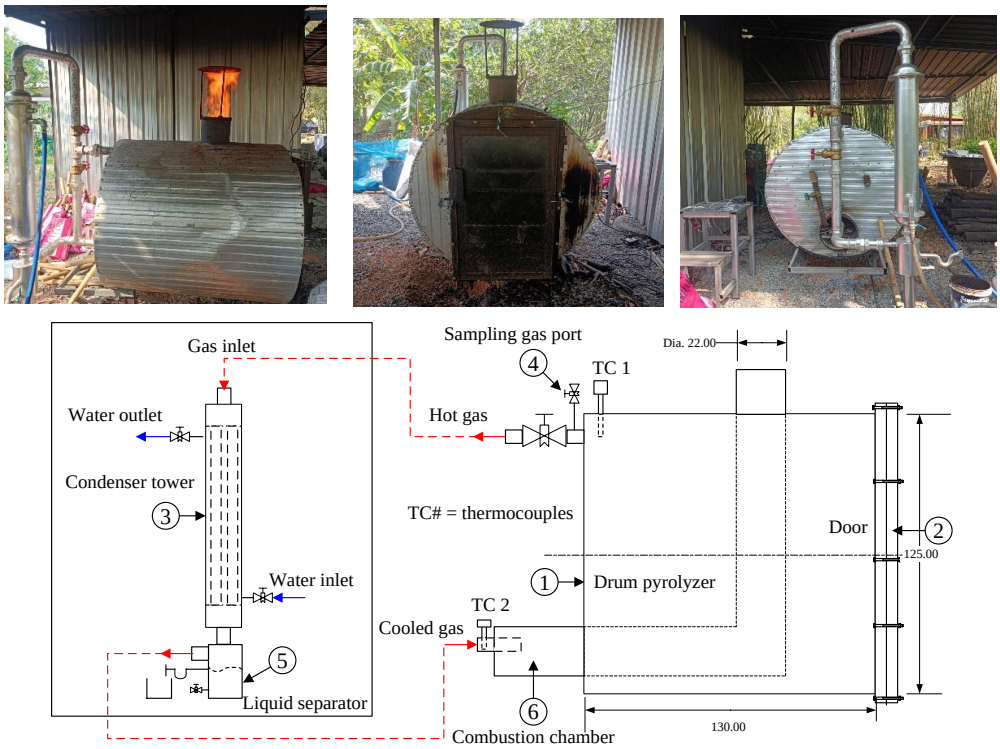


Fig. 1 Drum pyrolyzer and schematic diagram of the system

2.2 Experimental Procedure

In this study, the reactor was heated and pyrolysis processes were carried out using bamboo fuel. The bamboo (Thyrsostachys siamensis Gamble)utilized was grown in Prachinburi province and was around three years old.

Generally, the bamboo is 1-2 years old, its body is covered in sheaths; however, by the time it is 3 years old, these sheaths have decreased, making it simpler to cut and use for practical purposes.

The experiment started with the arrangement of bamboo pieces that were roughly 5 cm in diameter and 30 cm in length as shown in Fig. 2. Wood chips were used to start a fire in the reactor's fuel feed chamber at the bottom after it was fully loaded. After that, the reactor's temperature was raised by feeding it bamboo fuel. The pyrolysis reaction was started in the reactor by the bamboo within due to radiation and conduction of heat.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.011

Fig. 2 Bamboo and uploading to produce biochar

The TCPS 657-2547 [10] and the TCPS 658-2547 [11] standards, which are used as the standards for biochar used as fuel for cooking and grilling in Thailand, respectively, were compared to the properties of the bamboo biochar obtained, including moisture content (ASTM D 3173), ash content (ASTM D 3174), and volatile matter (ASTM D 3175).

The pyrolysis reaction produces three different products: gas (CO, H_2, CH_4), liquid (wood vinegar), and solid (biochar). Eq. (1) through Eq. (4) may be used to compute the solid and liquid yields as well as the reactor efficiency [12]. In gas composition analysis, there were three repetitions. The Agilent 990 Micro GC was applied to determine the composition of H_2, O_2, N_2, CH_4 and CO in the gas samples, which were collected using the 1-liter gas bag (SamplePro Flexfilm Bag) during the experiments. Furthermore, the pH of the liquid products produced by the reaction was measured with the Mettler Toledo (Seven Compact S220).

$$y_{char} = \frac{m_{char}}{m_{bio}} \quad (1)$$

$$\eta_{char} = y_{char} \times \left(\frac{HHV_{char}}{HHV_{bio}} \right) \quad (2)$$

$$Gaseous\ product = wt.\ of\ raw\ materials - wt.\ of\ solid\ and\ liquid\ products \quad (3)$$

$$HHV = 0.3536FC + 0.1559VM - 0.0078Ash \quad (4)$$

Where y_{char} is the biochar yield, -;
η_{char} is the pyrolyzer's efficiency, -;
m_{char} is the biochar dry mass, kg;
m_{bio} is the feedstock dry mass, kg;
HHV is the higher heating value, MJ/kg;
FC is the fixed carbon, wt % (as dry basis);
VM is the volatile matter, wt % (as dry basis);
Ash is the ash content, wt % (as dry basis).

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.011

3. Result and Discussion

3.1 Experimental Results

Biochar was made by placing 332 kg of bamboo inside a reactor. Temperature measurements were recorded inside the reactor and of the gas that passed through the cooling tower until the experiment ended as illustrated in Fig. 3, when the firewood was lit at the bottom of the reactor to produce heat. This was found that the reaction could divided into three stages based on the temperatures of the cooled gas and internal reactor:

Stage 1 Reactor heating (0–140 minutes): The temperature rose to 450 °C, while the gas that had cooled down was 87 °C. Gas products from the breakdown of volatile compounds started to occur at this early stage. In order to determine the gas composition and heating value, a sample of gas was taken at 76 minutes, as indicated in Table 1. At 28.3%, nitrogen made up the majority of the gas composition, and its high heating value (HHV) was 4.59 MJ/Nm^3. The high nitrogen content, which was most likely caused by remaining air in the reactor at the beginning, prevented the gas from igniting, though.

Stage 2 Pyrolysis process (140-334 minutes): The temperature varied between 450 °C and 595 °C, reaching its highest point at 277 minutes. Smoke at this stage revealed a significant amount of volatile compounds. Reduced quantities of nitrogen and oxygen were observed in a gas sample obtained at 180 minutes (reactor temperature 475 °C, cooled gas temperature 89 °C), whereas concentrations of gases that produce energy, such as CH_4, CO, and H_2, which have higher heating values (HHV) at 282,990 kJ/kg mol, 285,840 kJ/kg mol, and 890,360 kJ/kg mol, respectively. As a result, the HHV of cooled gas increased to 9.74 MJ/Nm^3, which decreased the requirement for bamboo (as the fuel for heating) input by allowing the gas to ignite and potentially sustain the heat of the reactor by itself.

The gaseous samples were collected during Stage 1 (76 minutes at 300°C) and Stage 2 (180 minutes at 475°C) of the experiment. Due to the bamboo contains 12–28% lignin and 31-46% cellulose [7, 8], and because of the different bond breakdown temperatures of these components during the pyrolysis process. Therefore, the gaseous samples were collected at each stage. For lignin and cellulose, the temperature ranges for bond breakdown are specifically 250°C to 500°C and 275°C to 350°C, respectively [4]. As a consequence, the more smoke was generated during Stage 2, which was at 475°C, indicating an increased probability that the bamboo's lignin and cellulose were breaking down.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.011

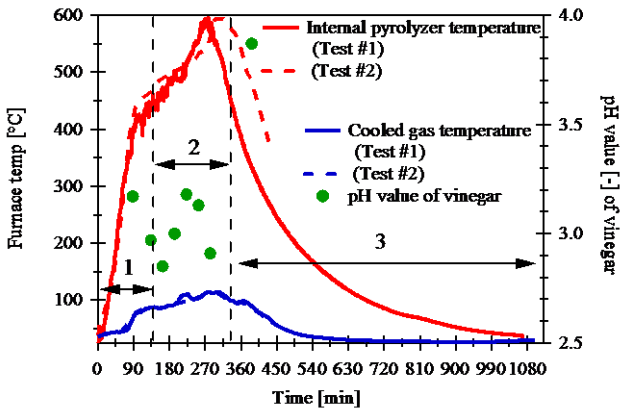


Fig. 3 Temperature profiles in the drum pyrolyzer and the cooled gas

Table 1 Gas compositions at different pyrolyzer temperatures

Time (min)	**76 (Stage 1)**	**180 (Stage 2)**
Internal pyrolyzer temp. (°C)	300	475
Cooled gas temp. (°C)	49	89
H_2 (vol. %)	3.66 ±0.25	11.36 ±0.82
O_2 (vol. %))	3.80 ±0.54	1.47 ±0.19
N_2 (vol. %))	28.34 ±3.20	4.48 ±0.65
CH_4 (vol. %).)	4.54 ±0.31	13.57 ±0.91
CO (% vol.)	21.56 ±1.87	29.86 ±1.76
HHV* (MJ/Nm^3)	4.59	9.74
	Non-ignited	Ignited

* HHV calculated according to Homdoung et al. [12]

Stage 3 Cool down (334-1060 minutes): After reaching a peak temperature of 595°C at 334 minutes, the temperature progressively declined to 451 °C as the pyrolysis reactions reduced and less volatile matter was released as smoke. As soon as the reactor's inside reached room temperature, the pyrolyzer was opened. To enable more examination, the bamboo biochar was taken out.

In the biochar production experiments, two tests were conducted (Test #1 and Test #2) with temperature results during the process shown in Fig. 3 . The temperature difference between the

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.011

reactor's internal temperature and the recirculating gas temperature (in the range of 100 °C - 595°C) between the two experiments varied from -9.1% to 9.8% and -12.9% to 0.3%, respectively. However, during the post-pyrolysis cooling period (Stage 3), in range of 375 - 430 minutes, the reactor's door used for bamboo loading and unloading began to deform due to prolonged heat exposure. This allowed air to continuously enter the reactor, causing the internal temperature to cool more rapidly. Nevertheless, the trends of both the reactor's internal temperature and recirculating gas temperature during the pyrolysis process period (Stage 1 and Stage 2) were similar and occurred within the same reaction range. As a result, Tables 1 and 2 present the results of the sample analysis and the discussion above using the data from the first experiment (Test #1).

Samples of wood vinegar that condensed from the condenser were collected during the experiment. Once the reactor's internal temperature reached 400 °C, sampling for the pH measurement started, and samples were taken every 30 to 45 minutes after that. The wood vinegar had a pH range of 2.85 to 3.18 when the reactor temperature was between 400 °C and 567 °C, according to the pH measurement data (as shown in Figure 3). The pH value increased to 3.87 when the reactor temperature dropped to 331 °C during the cooldown phase (Stage 3). The temperature of the pyrolysis reaction influences the liquid products that are produced; the temperature range between 450 °C and 600 °C yields the maximum liquid product yield [4]. Fig. 4 displays samples of biochar from the reactor and wood vinegar samples collected during the process. Wood vinegar has the potential to increase tomato (Solanum lycopersicum L.) yields when used properly. Tomato yield can be increased by 44–45% when wood vinegar, which has a pH of 3.09, is diluted with water at a ratio of 1:800 by volume and applied as a foliar spray and soil drench [13]. Furthermore, when sprayed in the field at a rate of 5,700 liters per hectare, wood vinegar with a pH of 3.3 can reduce weeds like perilla mint, Carolina geranium, and creeping woodsorrel by roughly 70–90% in just three days [14].

The current study used a drum pyrolyzer to examine the properties of bamboo and the products obtained from it. With a higher heating value (HHV) of 19.1 MJ/kg, the raw bamboo material had 11.1% moisture content, 78.0% volatile matter, 19.8% fixed carbon, and 2.2% ash content (as indicated in Table 2). When the bamboo was pyrolyzed at temperatures between 450 °C and 595 °C, significant changes in its characteristics were observed.

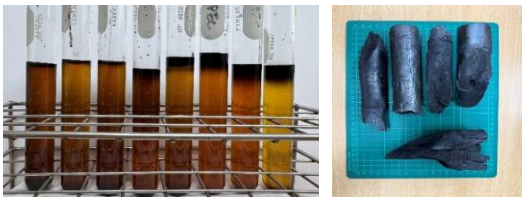


Fig. 4 Bamboo vinegar and bamboo biochar

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.011

The significant drop in moisture content from 11.1% to 4.94% suggests that the pyrolysis procedure effectively dehydrated the material. For the generated biochar to have better fuel quality and longer storage stability, this moisture content reduction is essential.

The volatile matter level of the raw bamboo dropped dramatically to 39.2% from 78.0% in the biochar. This reduction, which indicates the release of volatile organic molecules during pyrolysis and the resulting creation of a more carbon-rich substance, is expected and desirable. On the other hand, the fixed carbon content rose significantly from 19.8% to 52.4%, indicating that the biochar structure contains a significant amount of carbon. Given that increased heating value and better fuel quality are correlated with this rise in fixed carbon, it is very significant.

Compared to the raw bamboo (2.2%), the produced biochar (8.4%) had a higher ash percentage. This increase, which is frequently seen in pyrolysis processes, is explained by the concentration of inorganic materials rising as the volatilization of organic matter occurs. Following the TCPS 658/2547 standard, the biochar used in this study had a high enough ash content to be used for grilling. However, the result closely approximated the cooking-related TCPS 657/5247. In raw bamboo, the higher heating value (HHV) of the biochar improved to 24.6 MJ/kg from 19.1 MJ/kg, a 28.8% improvement. One of the main benefits of the pyrolysis process is the increase in energy density, which makes biochar a more effective fuel source.

The pyrolysis procedure produced 55 liters of liquid (vinegar) and 115 kg of biochar as product yields. These results translate into a gas yield of 48.8%, a liquid yield of 16.6%, and a biochar yield of 34.6%. Based on the equation (2), the energy conversion efficiency for this experiment was at 44.6. The raw bamboo's high volatile matter content (78.0%) is responsible for the high gas output. These volatiles are released and transformed into gaseous products during pyrolysis, which explains the significant gas percentage.

The 34.6% biochar yield derived from this study was less than that of the study of Jarawi and Jusoh [9] (50.2%), but the result was similar to that of Kurimoto et al. [8] (40.7%). Differences in the pyrolysis conditions and equipment design may be the cause of this variation.

The drum kiln employed in this study and by Jarawi and Jusoh [9] appeared to offer a good compromise between yield and biochar quality.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.011

Table 2 Properties of bamboo biochars at different temperatures

	Moisture (wt%)	VM** (wt%)	FC** (wt%)	Ash** (wt%)	HHV** (MJ/kg)	Biochar (yield, %)	References
Bamboo (Raw material)	11.1 ±0.25	78.0 ±0.20	19.8 ±0.17	2.2 ±0.04	19.1*	-	Present work
Biochars, Temperature (°C)							
450-595	4.94 ±0.37	39.2 ±3.73	52.4 ±3.81	8.4 ±0.08	24.6*	34.6	Present work
300-400	4.26	16.9	76.4	5.4	29.6*	- ***	[7]
400	4.80	22.3	75.2	2.5	30.0*	40.7	[8]
750	6.10	34.2	49.5	16.3	25.6	50.2	[9]
TCPS657/2547 for cooking	< 10	< 25	> 57	< 8	> 6000 kcal/g		[10]
TCPS658/2547 for grilling	< 8	< 8		< 3	> 7000 kcal/g		[11]

* HHV calculated according to Homduang et al. [12]

** Based on dry basis

*** Not specifie

Bamboo vinegar was produced with a liquid yield of 16.6% and may find use in other industries as well as agriculture. This moderate liquid yield indicates that a considerable amount of the volatile stuff is transformed into non-condensable gases, even though some condensable volatiles are obtained.

3.2 Economic Analysis

By producing both biochar and wood vinegar through the pyrolysis process, bamboo can be used as an alternative energy source. As such, the research includes an economic analysis to calculate the internal rate of return and payback period to make an investment decision.

Given that the reactor was constructed of rolled sheet metal, which can be harmed by excessive temperatures, the economic analysis's assumptions for the reactor's lifetime and project duration are one year. In the course of the project, the reactor operates twenty times a month and monthly repair fees apply. Not considered in the computation is the energy cost of employing a 0.37 kW water pump, which runs for just 6 hours every reactor cycle. Table 3 displays details of the costs required for the economic analysis.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.011

The method of calculating the internal rate of return is to find out the rate of return at which the Present Worth of Disbursements (PWD) and the Present Worth of Incomes (PWR) are equal, as indicated by Eq. (5) and Eq. (6) [15]. The process of trial and error and interpolation to calculate the rate of return and arrive at a rate of return (i).

$$netPW = 0 = PW_R - PW_D \quad (5)$$

$$P = F\left[\frac{1}{(1+i)^N}\right] \quad (6)$$

Where PW_R is the present worth of incomes, Baht;

PW_D is the present worth of disbursements, Baht;

P is the present worth, Baht;

F is the future worth, Baht;

i is the interest rate, %;

N is the number of compounding periods, 12 months.

Based on the costs and income listed in Table 3, an analysis of the cash flow generated by the project over a one-year period is presented in Table 4 and Fig. 5(a). As seen in Fig. 5(b), the project generates an internal rate of return of 46.75% each month when the net cash flow for each month is computed as present value and the internal rate of return can be determined using Eq. (5) and Eq. (6). Moreover, the project will start to recover its investment at the beginning of the third month, based on Table 4's cumulative cash flow. Investment in the production of biochar and wood vinegar from bamboo is feasible and interesting due to its high returns and short payback period, as can be seen from the internal rate of return and the payback period indicated.

The production cost for biochar and wood vinegar is 2,956 Baht per operation, divided into 1,998 Baht for biochar and 958 Baht for wood vinegar, based on the data as indicated in Table 3. When calculated as production costs, biochar and wood vinegar are at 17.4 Baht/kg and 17.4 Baht/liter respectively. This results in higher profits from selling wood vinegar compared to biochar. However, since wood vinegar still requires quality improvement processes and packaging, which are outside the assumptions of this research, the cost of wood vinegar may increase further.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.011

Table 3 Cost and revenue estimation for bamboo biochar using a drum pyrolyzer

Category	Estimation (Baht)	Description
Pyrolyzer drum	-100,000	1 unit/12 months
Condensor unit	-32,000	1 unit/12 months
Other materials	-10,000	1 unit/ 12 months
Labour	-400/person	2 persons/operation
Maintenance cost	-15,000	1 unit/month
Bamboo for heat resource	-2 Baht/kg	75 kg/operation
Bamboo for making biochar	-2 Baht/kg	332 kg/operation
Biochar	21 Baht/kg	115 kg/operation
Vinegar	60 Baht/litre	55 litre/operation
Salvage	5,000	1 unit/12 months

Table 4 Monthly cash flow for bamboo biochar production

End of month	Income (Baht)	Disbursement (Baht)	Balance (Baht)	Cumulative cash flow, (Baht)
0	0	-142,000	-142,000	-142,000
1	114,300	-47,280	67,020	-74,980
2	114,300	-47,280	67,020	-7,960
3	114,300	-47,280	67,020	59,060
4	114,300	-47,280	67,020	126,080
5	114,300	-47,280	67,020	193,100
6	114,300	-47,280	67,020	260,120
7	114,300	-47,280	67,020	327,140
8	114,300	-47,280	67,020	394,160
9	114,300	-47,280	67,020	461,180
10	114,300	-47,280	67,020	528,200
11	114,300	-47,280	67,020	595,220
12	119,300	-47,280	72,020	667,240

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.011

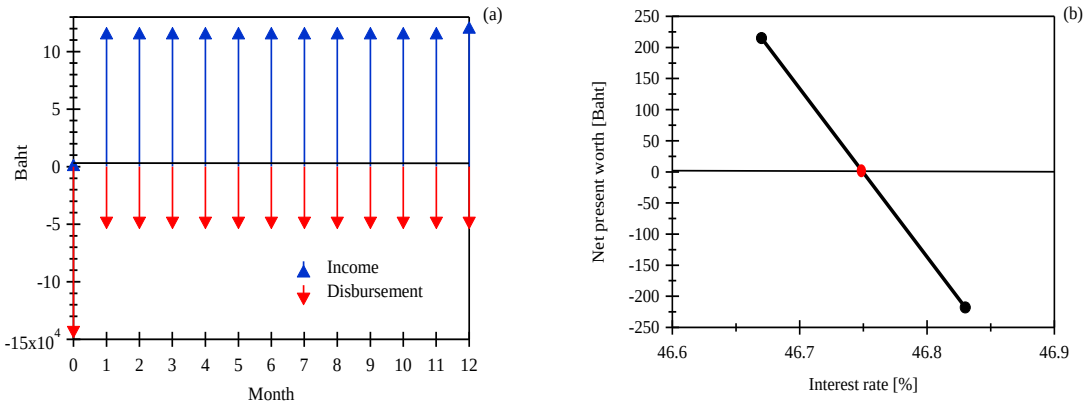


Fig. 5 Cash flow diagram for one year (a) and internal rate of return of the project (b)

For biochar, the selling price assumption used in this research is 21 baht/kg for wholesale, and profits can increase if retail sales are possible. On the market, biochar that can be utilized as an energy source prices between 35 and 45 Baht/kg. According to the costs involved in this study, producing biochar from bamboo in a drum pyrolyzer might be reasonably priced.

4. Conclusion

The present study concludes that the bamboo pyrolysis method, which applied a drum pyrolyzer, revealed an effective distribution of products and achieved a balance between the yields of liquid, gas, and biochar. The process yielded 34.6% biochar, 16% vinegar, and a noteworthy 48.8% gas while operating at temperatures between 450 °C and 595 °C. Energy recovery was made possible by the high gas production, which is linked to the high volatile matter content of the bamboo. When compared to raw bamboo, the resulting bamboo biochar had considerable improvements in fixed carbon content and heating value, displaying a heating value of 24.6 MJ/kg. Whereas this might not satisfy every strict standard for premium commercial biochar, this exhibits potential for a range of uses. With a monthly internal rate of return of 46.75% and a payback period of roughly two months based on a one-year project timetable, the procedure indicated potential from an economic standpoint. In order to further improve fixed carbon content and lower ash content and maybe achieve more exacting quality criteria for specific applications, future studies could concentrate on optimizing pyrolysis settings.

The steel reactor was found to have problems during the experiment, especially at the door where bamboo was loaded and bamboo charcoal was unloaded at the end of the operation. Temperatures

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.011

can rise to about 600°C during the pyrolysis process, and materials that are exposed to heat for long periods of time might deform and damage. Long-term exposure to high temperatures also caused holes to develop in the combustion chamber tube. As a result, different heat-resistant building materials, such stainless steel, need to be employed.

Thyrsostachys siamensis Gamble bamboo for 3 years old, which was utilized in this study. However, the age and species of bamboo could have an impact on the characteristics of charcoal, such as their ash content and heating value. Therefore, choosing a suitable species and age of bamboo to produce biochar could be considered.

5. Acknowledgement

The facilities and supplies utilized in this work were kindly provided by WONGPHAI Co., Ltd., to whom the authors are very thankful. We are extremely grateful that they allowed us to utilize the drum pyrolyzer to make the bamboo biochar.

6. References

[1] TEI, Bamboo value chain analysis in Thailand, Thailand Environment Institute, Bangkok, Thailand, 2021.

[2] https://pei.dede.go.th/no/dataset/energy-balance-of-thailand/resource/252e39fc-2f46-4570-8cad-42c3ec9a8187. (Accessed on 10 October 2024)

[3] https://marketeeronline.co/archives/247024. (in Thai) (Accessed on 10 October 2024)

[4] P. Basu, Biomass gasification and pyrolysis, 1st Ed., Elsevier, Burlington, MA, 2010.

[5] K.A. Frimpong, C.A. Phares, I. Boateng, E. Abban-Baidoo and L. Apuri, One-time application of biochar influenced crop yield across three cropping cycles on tropical sandy loam soil in Ghana, Heliyon, 2021, 7(2), e06267.

[6] J. Luan, Y. Fu, W. Tang, F. Yang, X. Li and Z. Yu, Impact of interaction between biochar and soil microorganisms on growth of chinese cabbage by increasing soil fertility, Applied Sciences, 2023, 13(23), 12545.

[7] S. Mahanim, I.W. Asma, J. Rafidah, E. Puad and H. Shaharuddin, Production of activated carbon from industrial bamboo wastes, Journal of Tropical Forrest Science, 2011, 23(4), 417-424.

[8] Y. Kurimoto, T. Kajimoto, F. Ozawa, Y. Inoue and A. Shibata, Chemical characteristic measurement of 13 commercial bamboo charcoals and comparisons to the standard bamboo charcoals prepared at temperatures from 300 °C to 800 °C, The Wood Carbonization Research Society, 2019, 16(1), 3-12.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.011

[9] N. Jarawi and I. Jusoh, Charcoal properties of Malaysian bamboo charcoal carbonized at 750 °C, BioResources, 2023, 18(3), 4413-4429.

[10] TCPS 657-2547, Wood Charcoal for Cooking, Thai Industrial Standards Institute (TISI), Bangkok, 2004. (in Thai).

[11] TCPS 658-2547, Wood Charcoal for Grilling, Thai Industrial Standards Institute (TISI), Bangkok, 2004. (in Thai).

[12] N. Homdoung, K. Sasujit, J. Uttharuan, T. Wongsiriamnuay and N. Tippayawong, Influence of torrefaction temperature and time on the yields and properties of torrefied biomass, Engineering and Applied Science Research, 2019, 46(2), 170-175.

[13] T. Mungkunkamchao, T. Kesmala, S. Pimratch, B. Toomsan and D. Jothityangkoon, Wood vinegar and fermented bioextracts: Natural products to enhance growth and yield of tomato (Solanum lycopersicum L.), Scientia Horticulturae, 2013, 154, 66-72.

[14] X. Liu, Y. Zhan, X. Li, Y. Li, X. Feng, M. Bagavathiannan, C. Zhang, M. Qu and J. Yu, The use of wood vinegar as a non-synthetic herbicide for control of broadleaf weeds, Industrial Crops and Products, 2021, 173, 114105.

[15] J.L. Riggs, D.D. Bedworth and S.U. Randhawa, Engineering economics, 4th Ed., McGraw-Hill, NY, 1996.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.012

บทความวิจัย

การศึกษาการตกตะกอนของอะลูมิเนียมหล่อผสมกึ่งของแข็ง เกรด 2024 ในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

สิริพร ขันทองคำ[1*] สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์[2] อังคาร คำเรือน[3] และ ชนวีร์ ภักดีใหม่[1]

[1] สาขาวิศวกรรมการผลิตและระบบอัตโนมัติ, คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ
[2] สาขาวิศวกรรมการผลิตอัตโนมัติและหุ่นยนต์, สำนักวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
[3] สาขาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรม, คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
[*] ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: siriporn.kh@cpru.ac.th

วันที่รับบทความ: 24 ตุลาคม 2567; วันที่ทบทวนบทความ: 20 มกราคม 2568; วันที่ตอบรับบทความ: 6 มีนาคม 2568
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 24 เมษายน 2568

บทคัดย่อ: วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาการตกตะกอนของอะลูมิเนียมหล่อผสมกึ่งของแข็ง เกรด 2024 ในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนด้วยหัวกวนแบบทรงกระบอกเรียบ ที่สภาวะการเชื่อมประกอบด้วย ความเร็วรอบในการหมุนกวน 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที ผลการวิจัยแสดงให้เห็นกลไกและผลของการตกตะกอนของงานเชื่อมในบริเวณต่าง ๆ ดังนี้ บริเวณเนื้อโลหะเดิม (BM) ประกอบด้วยตะกอนของเฟสจีพีโซน (GP Zone) และดิสโลเคชันเป็นส่วนใหญ่ และมี T-phase ($Al_{20}Cu_2Mn_3$) เล็กน้อย บริเวณพื้นที่กวน (SZ) ประกอบด้วยตะกอนของเฟส S′/ S (Al_2CuMg) เป็นส่วนใหญ่ และมี T-phase ขนาดใหญ่กว่าในบริเวณเนื้อโลหะเดิม และมีดิสโลเคชันกระจายในบริเวณอะลูมิเนียมเมตริกซ์ ซึ่งดิสโลเคชันเป็นเฟสที่ไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของตะกอนเฟส S′/ S ในขณะที่บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (TMAZ) ด้านรีทรีตติงไซด์ (RS) ประกอบด้วยตะกอนของเฟส GP Zone และมีตะกอนเฟส S′/ S เกิดขึ้นเล็กน้อย ด้านแอดวานซิงไซด์ (AS) ประกอบด้วยตะกอนเฟส S′/ S T-phase และดิสโลเคชัน ซึ่งผลจากการตกตะกอนส่งผลต่อสมบัติทางกลของชิ้นงาน โดยบริเวณรอยเชื่อมจะมีสมบัติทางกลที่ดีกว่าบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน เนื่องจากลักษณะและปริมาณเฟสพรีซิพิเตตที่ต่างกัน

คำสำคัญ: การเชื่อมเสียดทานแบบกวน; พรีซิพิเตต; ดิสโลเคชัน; จีพีโซน

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.012

บทความวิจัย

Study Precipitation of Semi-Solid Cast 2024 Aluminium Alloy for Friction Stir Welding

Siriporn Khanthongkum[1*], Somsak Siwadamrongpong[2], Angkarn Kamruan[3] and Chonnawee Pukdeema[1]

[1] Department of Manufacturing and Automation Engineering, Faculty of Arts and Science, Chaiyaphum Rajabhat University

[2] Department of Manufacturing Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

[3] Department of Industrial Management Engineering, Faculty of Industrial Technology, Nakhonratchasima Rajabhat University

[*] Corresponding author, E-mail: siriporn.kh@cpru.ac.th

Received: 24 October 2024; Revised: 20 January 2025; Accepted: 6 March 2025
Online Published: 24 April 2025

Abstract: The purpose of this research was to study precipitation in friction stir welded semi solid 2024 aluminium alloy (SSM Al2024). The shape of stir head is cylindrical was employed with 3 parameters which composed of rotational speed (790 rpm), welding speed (22 and 36 mm/min). The results showed that mechanism and effect of precipitated on welded in various areas. The region of base metal (BM) was illustrated the dispersion of precipitate GP zone in matrix obviously and eutectic phase was found dispersedly at grain boundary of globular alpha-aluminium grain (α-Al) and rod-T phase dispersed within the Al matrix. The region stir zone consists of precipitate S´/ S (Al_2CuMg) and rod-T phase ($Al_{20}Cu_2Mn_3$). While, region TMAZ of the RS and AS was GP zone, precipitate S´/ S, rod-T phase and dislocation. Effect of precipitation on mechanical properties wherewith difference between structure and volume.

Keywords: Friction Stir Welding; Precipitate; Dislocation; GP Zone

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.012

บทความวิจัย

1. บทนำ

โลหะผสมอะลูมิเนียม เป็นวัสดุที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เป็นอันดับสองรองจากเหล็ก เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่น เช่น น้ำหนักเบา ความหนาแน่นต่ำ แข็งแรงทนทาน ยืดตัวได้ง่าย ความเหนียวสูง ทนต่อการเกิดสนิมและการกัดกร่อน นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี สามารถปรับปรุงสมบัติทางกลด้วยกรรมวิธีทางความร้อนได้ และที่สำคัญคือไม่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตทั้งพืชและสัตว์ส่งผลให้โลหะผสมอะลูมิเนียมเป็นวัสดุหลักของการออกแบบเพื่อการนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ อุตสาหกรรมโครงสร้าง อุตสาหกรรมชิ้นส่วนอากาศยาน อุตสาหกรรมชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมแม่พิมพ์ รวมถึงชิ้นส่วนเครื่องจักรกล เนื่องจากเป็นวัสดุที่ขึ้นรูปได้หลายวิธี ง่ายต่อการแปรรูป กัดแต่งได้ง่าย และในบางกระบวนการผลิตจำเป็นต้องมีการขึ้นรูปด้วยวิธีการเชื่อม ทั้งแบบหลอมละลาย (Fusion Welding) และการเชื่อมในสภาวะของแข็ง (Solid State Welding) ซึ่งกระบวนการเชื่อมที่ค่อนข้างใหม่และได้รับความนิยมในการเชื่อม คือ การเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding; FSW) เป็นการเชื่อมในสถานะของแข็งที่ใช้พลังงานความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ งานเชื่อมจะมีอุณหภูมิสูงและมีการหมุนตัวของหัวกวน เรียกบริเวณนี้ว่าบริเวณแนวเชื่อม (Stir Zone; SZ) โครงสร้างจุลภาคมีขนาดเล็กจากการตกผลึก มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากเนื้อโลหะเดิม (Base Metal; BM) อย่างชัดเจน ซึ่งเกิดจากการกระทำของหัวกวนในสภาวะพลาสติกอย่างรุนแรง และการกระจายความร้อนจากแรงเสียดทานในกระบวนการเชื่อม ทำให้แนวเชื่อมมีการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างเนื่องจากมีการเปลี่ยนเฟส ส่งผลให้สมบัติทางกลเกิดการเปลี่ยนแปลง มีความแข็งแรงลดลงเนื่องจากผลกระทบทางด้านความร้อน (Heat Affected Zone; HAZ) เนื่องจากการกวนมีผลต่อเนื้อโลหะ และสมบัติทางกลของรอยเชื่อม

ดังนั้น หากต้องการควบคุมให้สมบัติทางกลของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนในโลหะผสมอะลูมิเนียมมีสมบัติทางกลของบริเวณแนวเชื่อม (Mechanical Properties of Joint) ให้ใกล้เคียงกับเนื้อวัสดุเดิมมากที่สุดนั้น จึงจำเป็นต้องศึกษากลไกที่ทำให้เกิดการตกตะกอนของโครงสร้างจุลภาคในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน แม้จะมีรายงานวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาปัจจัยหรือผลกระทบของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่มีผลต่อสมบัติทางกลของโลหะผสมอะลูมิเนียมอย่างกว้างขวาง แต่ลำดับการตกตะกอนของ SSM Al2024 ในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ยังมีน้อยเนื่องจากความซับซ้อนของเฟส และการเชื่อม FSW มีการเปลี่ยนแปลงของเฟสที่ซับซ้อน รวมถึงการกระจายและขนาดของเฟสในแต่ละบริเวณมีความแตกต่างกันอย่างมาก [1] งานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาการตกตะกอนของ SSM Al2024 หลังการเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยมีปัจจัยที่ศึกษาคือ ความเร็วรอบในการหมุน ความเร็วในการเดินเชื่อม และรูปทรงของหัวกวน ต่อการเกิดการตกตะกอน

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.012

2. วัสดุและอุปกรณ์ วิธีการวิจัย

2.1 วัสดุ

วัสดุชิ้นงานที่ใช้ในการวิจัย คือ โลหะผสมอะลูมิเนียมหล่อ เกรด Al2024 ชิ้นงานทดสอบหล่ออัดในสภาวะกึ่งของแข็งมีลักษณะเกรนแบบก้อนกลม (Globular Grain Structure) มีเฟสยูเทคติก (Eutectic Phase) อยู่บริเวณโดยรอบของขอบเกรน จากการขึ้นรูปในสถานะกึ่งของแข็งเริ่มจากการเกิดอนุภาคของของแข็งมีขนาดเล็กเกาะที่แท่งแกรไฟต์พรุน เมื่อเป่าแก๊สออกมาทางแท่งแกรไฟต์พรุนส่งผลให้อนุภาคของของแข็งดังกล่าวหลุดออกจากแท่งแกรไฟต์พรุนมาอยู่ในน้ำโลหะอะลูมิเนียมหลอมเหลวทำให้พื้นผิวบางส่วนของอนุภาคของของแข็งดังกล่าวนั้นมีการละลาย ส่งผลให้ขนาดอนุภาคของของแข็งมีความมนกลมขึ้นและมีรูปร่างของเกรนแบบ Equiaxed ทำให้เกรนมีลักษณะคล้ายเกรนก้อนกลม ส่วนผสมทางเคมีและโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน แสดงดังตารางที่ 1 และรูปที่ 1 ตามลำดับ

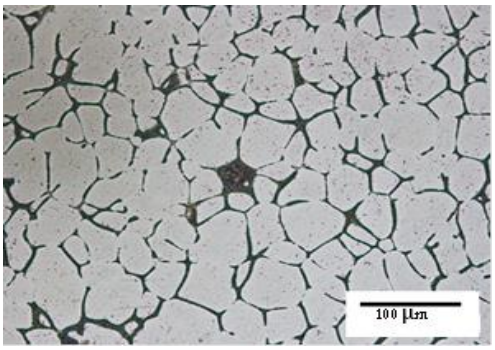
จากรูปที่ 1 พบว่าการเกิดนิวเคลียสของเฟส Al-α ขึ้นในอะลูมิเนียมเหลว เกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำลงทำให้เฟส Al-α โตขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิยูเทคติก (Eutectic Temperature) ของเหลวจะแข็งตัวและฟอร์มเป็นเฟสยูเทคติกที่ประกอบไปด้วยเฟส Al_2Cu/Al_2CuMg

2.2 การเตรียมงานเชื่อม

ในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนถูกเชื่อมด้วยเครื่องมิลลิง ยี่ห้อ Haven รุ่น XLW6332HIV โดยการนำชิ้นงานทดลองมาขึ้นรูปให้มีขนาดความกว้าง 50 มิลลิเมตร ความยาว 100 มิลลิเมตร และความหนา 4 มิลลิเมตร ภายหลังขึ้นรูปนำชิ้นงาน 2 ชิ้น มาเชื่อม

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมผสมหล่อแบบกึ่งของแข็งเกรด 2024

Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Al
5.09	1.67	0.63	0.4	0.33	0.04	Bal.



รูปที่ 1 โครงสร้างจุลภาคโลหะผสมอะลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง Al2024 [2]

ด้วยวิธีการวางแบบต่อชนโดยติดตั้งบนอุปกรณ์จับยึด (Jig & Fixture) ที่สามารถวัดแรงกดในขณะทำการเชื่อมได้ มีการติดตั้งโหลดเซลล์ (Load Cell) เพื่อวัดแรงกด โดยแรงกดเพิ่มสูงขึ้นเมื่อหัวกวนสัมผัสและเริ่มเดินแนวเชื่อมบนชิ้นงาน ทำให้เกิดแรงเสียดทานระหว่างพื้นผิวของบ่าหัวกวนกับชิ้นงาน ทำให้เกิดความร้อนภายในเนื้อวัสดุ ส่งผลให้วัสดุอยู่ในสภาวะพลาสติกและเกิดครีบด้านข้างของแนวเชื่อม

2.3 การทดลอง

การทดลองกำหนดให้มีพารามิเตอร์ของกระบวนการเชื่อม FSW เพื่อศึกษาการตกตะกอนของ SSM Al2024 เมื่อผ่านกระบวนการเชื่อม จำนวน 3 พารามิเตอร์ ประกอบด้วย ความเร็วรอบในการหมุนกวน ความเร็วในการเดินเชื่อม และรูปทรงของหัวกวน ดังตารางที่ 2

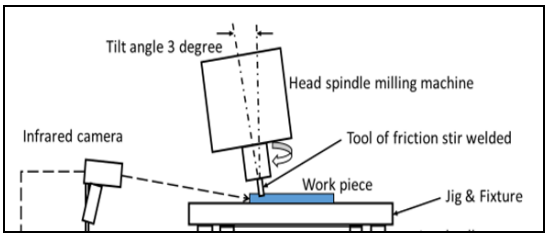
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.012

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของกระบวนการเชื่อม FSW

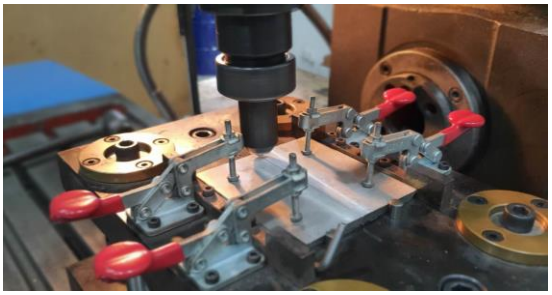
ปัจจัย	หน่วย	ระดับ
ความเร็วรอบในการหมุน	RPM	790
ความเร็วในการเดินเชื่อม	mm/min	22 36
รูปทรงหัวกวน	None	Cylinder
มุมเอียงหัวกวน	องศา	3

โดยในการทดลองเชื่อมเสียดทานแบบกวน กำหนดให้หัวกวนเป็นทรงกระบอกเรียบ บ่าของหัวกวนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร และกำหนดหัวกวนให้มีขนาด 5 มิลลิเมตร มีมุมเอียงหัวกวน 3 องศา ดังแสดงในรูปที่ 2

การทดลองในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนจะเชื่อมด้วยเครื่องกัดแนวตั้งเป็นเครื่องเชื่อมเสียดทานแบบกวน การปรับมุมเอียงเครื่องมือของหัวกดเชื่อมให้ตั้งมุมเครื่องมือเชื่อมเป็น 3 องศา กับชิ้นงานในแนวระนาบชิ้นงาน และทำการเชื่อมโดยกำหนดความเร็วในการหมุน 790 รอบต่อนาที และกำหนดความเร็วในการเดินเชื่อมที่ 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที โดยการเชื่อมในขั้นตอนแรกเริ่มจากการเปิดเครื่องกัดให้เครื่องมือเชื่อมหมุนตามพารามิเตอร์ในการทดลองลอยอยู่เหนือชิ้นงาน จากนั้นหมุนโต๊ะงานขึ้นให้เครื่องมือเชื่อมกดลงไปในเนื้อวัสดุ จนกระทั่งปลายของหัวกวนถูกสอดไปในระยะความลึก จนสัมผัสกับบ่ากวนเป็นระยะเวลา 120 วินาที จากนั้นความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานระหว่างเครื่องมือเชื่อมกับชิ้นงานจะทำให้วัสดุเกิดการอ่อนตัวในสภาวะพลาสติก เมื่อครบเวลาที่กำหนดก็เคลื่อนที่โต๊ะงานของเครื่องกัดแบบอัตโนมัติตามความเร็วเดินเชื่อมในการทดลอง เมื่อสิ้นสุดแนวเชื่อมให้หยุดการ



รูปที่ 2 มุมเอียง 3 องศาของหัวกวน



รูปที่ 3 เริ่มต้นการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

เคลื่อนที่ของโต๊ะงานและให้หมุนหัวกวนแช่อยู่บริเวณปลายแนวเชื่อมประมาณ 20 วินาที จากนั้นเลื่อนโต๊ะงานเครื่องกัดลงเพื่อให้หัวกวนลอยขึ้นออกจากรอยเชื่อม และนำชิ้นงานออกจากอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน ดังรูปที่ 3

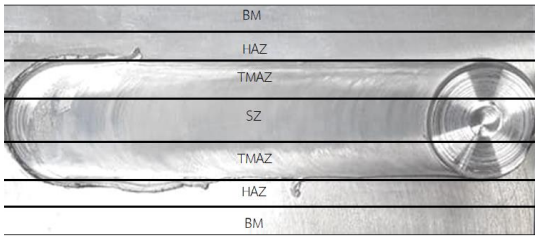
ในขณะเชื่อมเสียดทานแบบกวนมีการวัดแรงกด (Down Force) โดยติดตั้งโหลดเซลล์ (Load Cell) เข้ากับเครื่องกัดโลหะแบบแกนตั้งกึ่งอัตโนมัติในขณะทำการเชื่อม และบันทึกค่าตลอดการเชื่อม และติดตั้งกล้องบันทึกภาพรังสีความร้อน (Thermal Imaging Infrared Camera; IR) ยี่ห้อ FLIR รุ่น E50 เพื่อวัดอุณหภูมิ ที่ความถี่ในการบันทึกข้อมูล 30 ภาพต่อวินาที (fps) กล้องจะถูกติดตั้งไว้บนแท่นโต๊ะเครื่องกัด โดยมีระยะห่างจากชิ้นงานทดสอบบนอุปกรณ์จับยึด 40 มิลลิเมตร

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.012

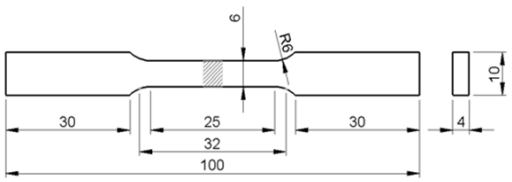
2.4 ตัวอย่างวิเคราะห์ทางโลหะวิทยา

ภายหลังการเชื่อมชิ้นงาน ชิ้นงานเชื่อมจะถูกนำไปตัดในแนวตั้งฉากกับแนวเชื่อม และนำไปขัดผิวด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180, 240, 360, 500, 800, 1000, 1200 และ 2400 และขัดผ้าสักหลาดโดยใช้ผงอะลูมิน่าขนาด 5 ไมครอน และนำไปถ่ายภาพโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (OM) ยี่ห้อ Olympus รุ่น LEXT 3D OSL4000 เพื่อตรวจสอบรูปร่างรอยเชื่อมและศึกษาโครงสร้างจุลภาคของบริเวณพื้นที่ส่วนต่าง ๆ และในส่วนของการศึกษาการตกตะกอนของชิ้นงานทดสอบในกระบวนการเชื่อมนั้น นำชิ้นงานภายหลังการเชื่อมตัดในแนวขนานกับแนวการเชื่อม พื้นที่หน้าตัดขนาด 4 x 4 มิลลิเมตร ประกอบด้วยพื้นที่ต่างๆ ดังนี้ พื้นที่แนวเชื่อม (SZ) พื้นที่ได้รับผลกระทบความร้อนทางกล (TMAZ) พื้นที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน (HAZ) และพื้นที่เนื้อโลหะเดิม (BM) ดังแสดงในรูปที่ 4

จากนั้น นำมากลึงให้เส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาด 3 มิลลิเมตร และนำมาตัดด้วยเครื่องตัดชิ้นงานละเอียดหนา 1 มิลลิเมตร และขัดด้วยกระดาษทรายและผงอะลูมิน่า จนกระทั่งเหลือความหนาที่ 50 ไมครอน ต่อด้วยการทำ Electro Polishing ด้วยเครื่อง Electro-polisher ยี่ห้อ Struer รุ่น Tenupol-3 โดยเตรียมสารละลายที่มีส่วนผสมของกรดไนตริก (HNO_3) 20% และเมทานอล (Methanol) 80% อุณหภูมิของสารละลายอยู่ระหว่าง -30 ถึง -20°C โดยการเติมไนโตรเจนเหลว และกำหนดให้ค่ากระแสไฟฟ้าเป็น 3-5 แอมแปร์ โวลต์มิเตอร์ 5 โวลต์ [3] ภายหลังการ Electro-Polishing นำไปดูโครงสร้างจุลภาคและการตกตะกอนของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน



รูปที่ 4 ตำแหน่งการตัดชิ้นงาน



รูปที่ 5 ชิ้นงานทดสอบความต้านทานแรงดึง มาตรฐาน ASTM-E8

(Transmission Electron Microscope; TEM) รุ่น FE-TEM/STEM: Thermo Scientific TALOS F200X

2.5 การทดสอบความต้านทานแรงดึง

ชิ้นงานที่นำไปทดสอบความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมถูกตัดตั้งฉากกับแนวเชื่อม โดยให้รอยเชื่อมอยู่บริเวณกึ่งกลางของชิ้นงาน ขนาดและรูปทรงของชิ้นทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM-E8 ดังรูปที่ 5

3. ผลการทดลอง

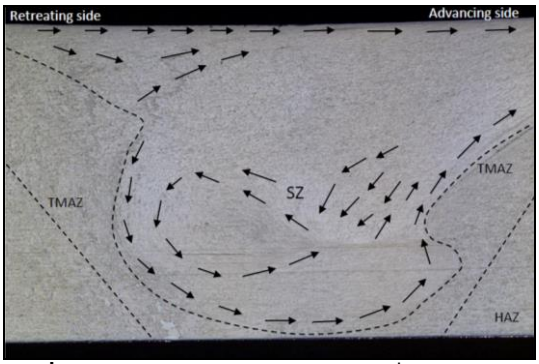
การศึกษาการตกตะกอนของอะลูมิเนียมหล่อผสมกึ่งของแข็ง เกรด 2024 โดยนำแนวเชื่อมที่ได้มาตรวจสอบลักษณะทางกายภาพและตรวจสอบการตกตะกอนในบริเวณต่าง ๆ ของแนวเชื่อม และทดสอบสมบัติทางกลด้วยการทดสอบความต้านทานแรงดึง จากการทดลองแสดงได้ดังนี้

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.012

3.1 โครงสร้างมหภาค

3.1.1 ลักษณะผิวด้านบนของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที

จากการทดลองพบว่า ผิวหน้าด้านบนของรอยเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อแบบกึ่งของแข็งเกรด 2024 ที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที ด้วยหัวกวนทรงกระบอกเรียบ ลักษณะทั่วไปของผิวภายนอก ที่ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 และ 36 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่า ที่ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตร เห็นแนวการหมุนของหัวกวนชัดเจน ไม่มีรอยแยกของแนวเชื่อม เกิดครีบทางด้านแอดวานซิงไซด์ (Advancing Side; AS) มากกว่าด้านรีทรีตติงไซด์ (Retreating Side; RS) เนื่องจากลักษณะทิศทางการไหลของเนื้อวัสดุไหลวนหมุนไปตามหัวกวน การเดินเชื่อมทำให้เนื้อวัสดุไหลอัดไปทางด้าน AS ในขณะที่ความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตร ผิวเรียบ ไม่มีรอยแยกของแนวเชื่อม และเกล็ดของผิวเชื่อมละเอียดมันวาวมากกว่าที่ความเร็วในการเดินเชื่อม 22 มิลลิเมตร เนื่องจากความร้อนจากการหมุนของหัวกวนสูงแต่ความเร็วในการเดินแนวเชื่อมช้ากว่าทำให้ผิวมีความเรียบน้อยกว่า และบริเวณจุดเริ่มต้นจะเกิดครีบบริเวณขอบด้านข้างของแนวเชื่อมมาก เนื่องจากใช้เวลาในการกดและแช่หัวกวนเพื่อสร้างความร้อน และเมื่อหัวกวนเคลื่อนที่จะเกิดครีบทางด้าน AS มากกว่าด้าน RS เล็กน้อย เนื่องจากลักษณะทิศทางการไหลของเนื้อวัสดุไหลวนหมุนไปตามหัวกวน การเดินแนวเชื่อมทำให้เนื้อวัสดุไหลอัดไปทางด้าน AS [1]



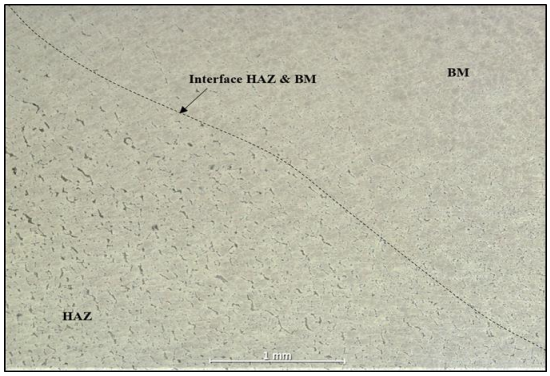
รูปที่ 6 โครงสร้างจุลภาคบริเวณแนวเชื่อม ความเร็วรอบในการหมุนกวน 790 รอบต่อนาที

เมื่อนำชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมมาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเชื่อมในบริเวณต่าง ๆ ประกอบด้วย พื้นที่แนวเชื่อม พื้นที่ได้รับผลกระทบความร้อนทางกล และพื้นที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน พบว่า รูปร่างของรอยเชื่อมเป็นลักษณะรูปอ่าง [4] สามารถสังเกตทิศทางการไหลของเนื้อวัสดุเป็นชั้นคล้ายกับหัวหอม ไม่มีข้อบกพร่องของรอยเชื่อม เนื้อเชื่อมมีความสมบูรณ์ เกรนมีขาดเล็กละเอียด ดังแสดงในรูปที่ 6

บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อน เป็นพื้นที่อยู่ระหว่างผลกระทบจากความร้อนทางกล และบริเวณพื้นที่เนื้อโลหะเดิมพบว่า โครงสร้างมีขนาดเกรนที่โตกว่าบริเวณเนื้อโลหะเดิม เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยสังเกตได้จากบริเวณขอบเกรนจะมีขนาดที่หนาขึ้นจนเห็นความแตกต่างขอบเขตของพื้นที่ได้ชัดเจนระหว่างบริเวณเนื้อโลหะเดิม และบริเวณพื้นที่รับผลกระทบจากความร้อน ดังรูปที่ 7

ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.012

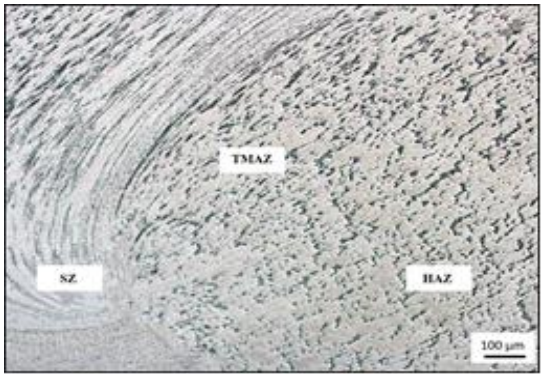
บทความวิจัย



รูปที่ 7 โครงสร้างจุลภาคบริเวณได้รับผลกระทบทางความร้อนกับบริเวณพื้นที่เนื้อโลหะเดิมที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 790 รอบต่อนาที

3.2 โครงสร้างทางโลหะวิทยา

โครงสร้างบริเวณเนื้อโลหะเดิม และบริเวณพื้นที่รับผลกระทบจากความร้อน เป็นพื้นที่ที่อยู่ระหว่างพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนทางกล และบริเวณพื้นที่เนื้อโลหะเดิม พบว่า บริเวณพื้นที่รับผลกระทบจากความร้อน โครงสร้างมีขนาดเกรนโตกว่าบริเวณเนื้อโลหะเดิม เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวน บริเวณพื้นที่รับผลกระทบจากความร้อนทางกลมีลักษณะโครงสร้างเป็น 2 ส่วน คือ ด้าน AS และด้าน RS โครงสร้างด้าน AS เกิดจากการกวนของหัวกวนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา โลหะที่อ่อนตัวไหลวนลู่ไปตามทิศทางการหมุนรอบหัวกวนทำให้เกิดโครงสร้างที่อยู่ระหว่างบริเวณพื้นที่กวน และพื้นที่รับผลกระทบทางความร้อน ขนาดเกรนประมาณ 50-60 ไมโครเมตร โดยลักษณะเกรนยาวรี ดังรูปที่ 8 และยืดตามทิศทางของหัวกวน โครงสร้างด้าน RS โครงสร้างมีลักษณะเป็นบริเวณแคบ ๆ



รูปที่ 8 โครงสร้างจุลภาคของบริเวณพื้นที่กระทบร้อนทางกลของรอยเชื่อมที่ 790 รอบต่อนาที

โครงสร้างบริเวณพื้นที่แนวเชื่อม เป็นบริเวณที่หัวกวนสัมผัสโดยตรง โดยโครงสร้างตรงกลางแนวเชื่อมจะมีโครงสร้างที่มีเกรนเล็กละเอียดและจะค่อย ๆ หยาบขึ้นไปจนถึงด้าน RS บริเวณพื้นที่ถูกกวนพบว่าทิศทางการไหลของวัสดุที่เห็นได้ชัดเจนมีลักษณะคล้ายเป็นวงแหวนที่หมุนวนจากทางด้าน RS ไปด้าน AS ส่งผลให้รูปร่างของโครงสร้างทางจุลภาคของรอยเชื่อมมีความแตกต่างจากบริเวณเนื้อพื้นเดิมของวัสดุอย่างชัดเจน โดยเกรนมีขนาดที่เล็กละเอียดมาก เนื่องจากบริเวณที่ถูกกวนมีอุณหภูมิที่สูงทำให้เกิดการตกผลึกใหม่และการเสียรูปแบบพลาสติก ทำให้เกรนมีขนาดเล็กประมาณ 3 ถึง 5 ไมโครเมตร โครงสร้างบริเวณนี้คาดว่าประกอบไปด้วยอนุภาคทองแดงและแมกนีเซียมผสมอยู่ในอลูมิเนียมเมตริกซ์กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วบริเวณพื้นที่ที่ถูกกวน เนื่องมาจากการเสียดทานระหว่างหัวกวนของเครื่องมือเชื่อมกับเนื้ออะลูมิเนียม ทำให้เกิดการแตกละเอียดของโครงสร้างเกรนแบบก้อนกลม และยูเทคติกเฟส ทำให้เนื้อที่ถูกกวนเกิดการประสานเข้ากันได้ดี บริเวณรอยเชื่อมและรูปร่างรอยเชื่อมมีความสมบูรณ์ ดังรูปที่ 9

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.012

รูปที่ 9 โครงสร้างจุลภาคของของรอยเชื่อมที่ 790 รอบต่อนาที

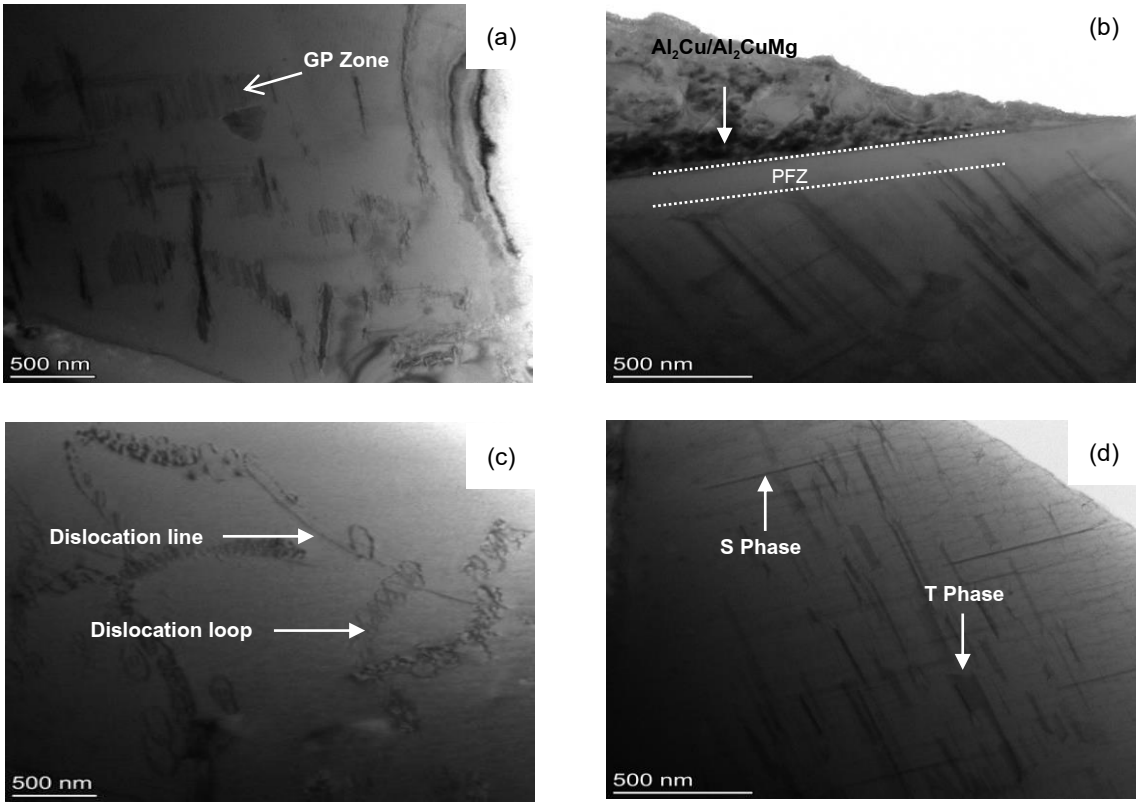
3.2.1 โครงสร้างจุลภาพของรอยเชื่อมที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)

โครงสร้างจุลภาคของงานเชื่อม ที่ผ่านการเชื่อมด้วยหัวกวนแบบทรงกระบอกเรียบ และมีความต้านทานแรงดึงสูงคือ ที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที เมื่อนำมาวิเคราะห์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ในบริเวณพื้นที่แนวเชื่อม บริเวณได้รับผลกระทบจากความร้อน บริเวณด้าน AS และบริเวณด้าน RS

บริเวณเนื้อโลหะเดิม (BM) จะประกอบด้วยพรีซิ-พิเตตที่เป็นเฟสจีพีโซน มีลักษณะเป็นแผ่น ความหนาประมาณ 4-6°A และกว้างประมาณ 80-100°A กระจายตัวในบริเวณที่เป็นเนื้ออะลูมิเนียมเมตริกซ์ (Al-Matrix) ดังแสดงในรูป 10(a) ในส่วนบริเวณขอบเกรนนั้นพบว่า มีเฟสยูเทคติกอยู่บริเวณโดยรอบของขอบเกรน [5] ซึ่งเฟสยูเทคติกประกอบไปด้วย Al_2Cu /Al_2CuMg และพบริเวณที่ไม่มีการตกตะกอนของพรีซิพิเตต (Precipitate Free Zone; PFZ) ซึ่งมีความกว้างประมาณ 150 นาโนเมตร จากระยะของขอบเกรน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย Y.Q. Chen และคณะ [6] ดังแสดงในรูป 10(b) และพบว่ามีดิสโลเคชัน (Dislocations) กระจายตัวอยู่หนาแน่นในอะลูมิเนียมเมตริกซ์มีทั้งชนิดดิสโลเคชันที่เป็นเส้น (Dislocation Line) และดิสโลเคชันที่เป็นวง (Dislocation Loop) ดังแสดงในรูป 10(c) และมีพรีซิพิเตตเฟส S (Al_2CuMg) ลักษณะเป็นแผ่นบาง (Needle) โดยมีความยาวประมาณ 120 นาโนเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 นาโนเมตร และมีเฟส T-phase ($Al_{20}Cu_2Mn_3$) ลักษณะเป็นแท่งกระจายในเนื้ออะลูมิเนียมเมตริกซ์ ขนาดใหญ่มากสุดที่ 350 นาโน-เมตร ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย I. Morozova และคณะ [1] ดังแสดงในรูป 10(d) บริเวณพื้นที่แนวเชื่อมเป็นบริเวณที่สัมผัสกับหัวกวนโดยตรง เมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) จะเห็นทิศทางของการกวนอย่างชัดเจนจากการวางตัวของดิสโลเคชัน ดังแสดงในรูปที่ 11(a) และพบเฟสพรีซิพิเตต S′/ S กระจายบริเวณเนื้ออะลูมิเนียมเมตริกซ์ ความยาวประมาณ 50 – 250 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 11(b)โดยจากภาพพบว่ามีขนาดไม่ยาวมากเนื่องจากได้รับผลกระทบจากการกวนของหัวกวนโดยตรงทำให้เกิดการแตกหักของพรีซิพิเตต โดยเฟสพรีซิพิเตต S′/ S เกิดจากความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 350°C จากการเชื่อมกวน ทำให้เฟสจีพีโซนเกิดการเปลี่ยนเฟสไปเป็นเฟสพรีซิพิเตต S′/ S กระจายตัวหนาแน่น และเป็นบริเวณที่มีปริมาณของเฟสดังกล่าวมากที่สุด โดยมีลักษณะเริ่มเป็นระแนง [7] แต่เนื่องจากเวลาที่อุณหภูมิคงที่ไม่นานพอที่จะทำให้

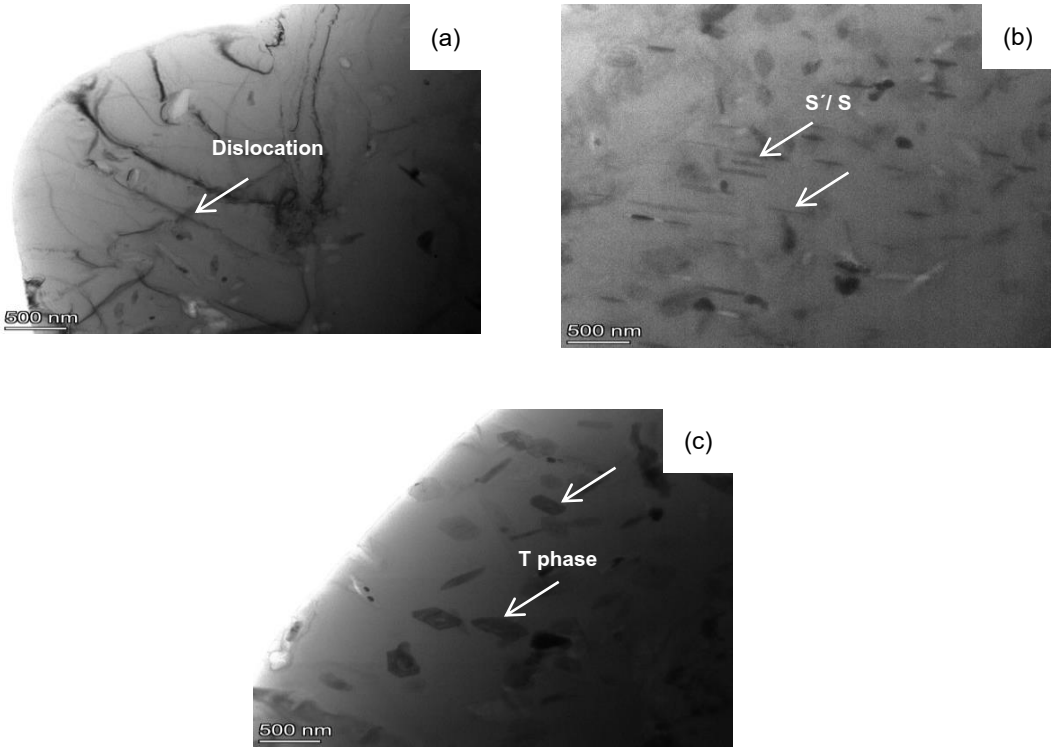
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.012

เกิดการเปลี่ยนเฟสได้ในปริมาณมาก และเฟสดังกล่าวสามารถเกิดพรีซิพิเตตย้อนกลับ (Re Precipitate) ไปเป็นเฟสจีพีโซนได้อีกครั้งเมื่ออยู่ในสภาวะบ่มแข็งธรรมชาติที่เวลาเหมาะสม (Natural Aging) [8] จึงยังคงพบพรีซิพิเตตเฟสจีพีโซนเหลืออยู่ และพบ T- phase กระจายตัวบริเวณขอบเกรน สอดคล้องกับงานวิจัยของ Peng Li และคณะ [8] ดังแสดงในรูปที่ 11(c) ลักษณะเป็นแท่งขนาดใหญ่เนื่องจากการรวมตัวของส่วนผสมทางเคมีในวัสดุ และพรีซิพิเตตดังกล่าว มีสมบัติด้านความแข็ง และเปราะ รวมทั้งเป็นอุปสรรคในการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน



รูปที่ 10 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านฟังชันก์ Bright-field (BF) ของเนื้อโลหะเดิม (BM): (a) GP Zone (b) Grain Boundary and Eutectic phase (c) Dislocation (d) S-phase และ T-phase

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.012



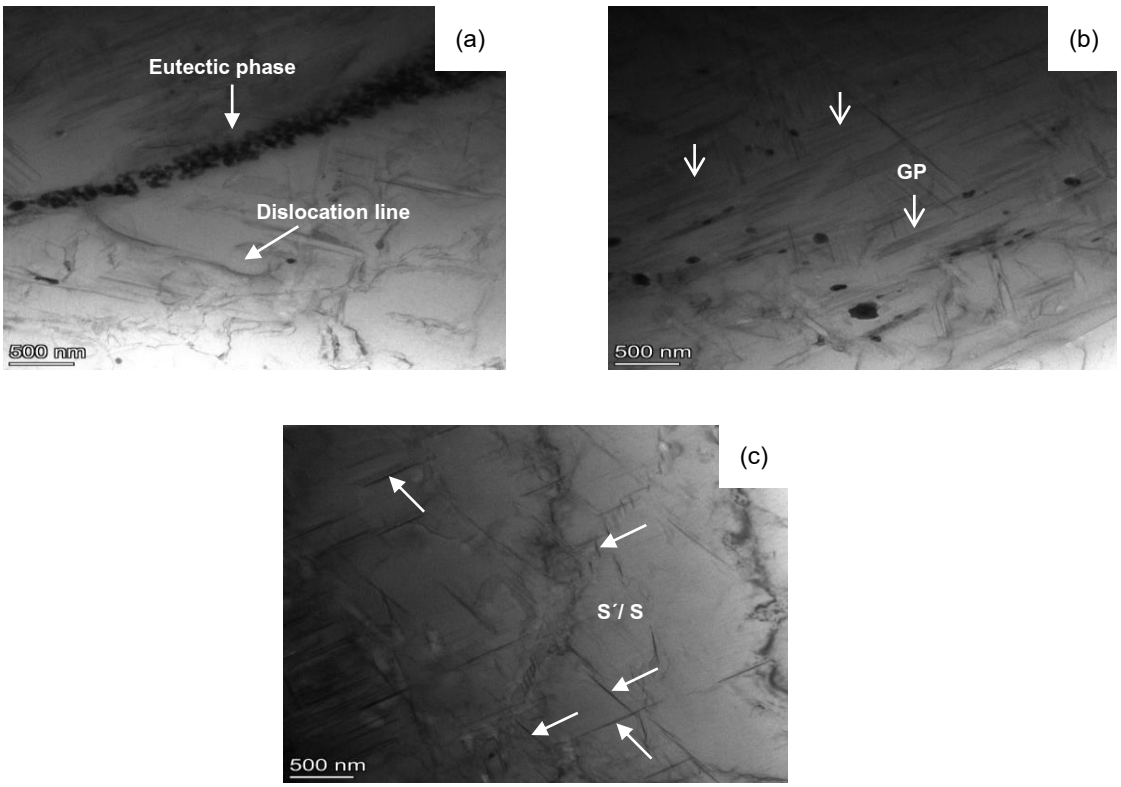
รูปที่ 11 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ฟังชันก์ Bright-field (BF) บริเวณรอยเชื่อม: (a) Dislocations (b) เฟสพรีซิพิเตต S´/ S และ (c) T-phase

บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนจากการเชื่อมเสียดทานด้าน RS เมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) พบเฟสพรีซิ-พิเตตที่เป็นเฟสจีพีโซน มีลักษณะเป็นแผ่นวางตัวซ้อนกัน กระจายทั่วทั้งอะลูมิเนียมเมตริกซ์ ดังแสดงในรูปที่ 12(b) และมีเฟสพรีซิพิเตต S´/ S เกิดขึ้นเล็กน้อยแต่มีขนาดใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 12(c) เนื่องจากอุณหภูมิจากการเชื่อมกวนในบริเวณดังกล่าวนั้นไม่สูงพอที่จะทำให้มีการเปลี่ยนเฟสจากพรีซิพิเตตจีพีโซนเป็น S´ ได้มากพอ เนื่องจากไม่ได้รับความร้อนจากการกวนโดยตรง และบางส่วนมีการเปลี่ยนไปเป็นเฟสพรีซิพิเตตจีพีโซน ซึ่งส่งผลให้สมบัติทางกลบริเวณดังกล่าวลดลง [7] และพบดิสโลเคชันกระจายอยู่ในบริเวณอะลูมิเนียมเมตริกซ์ ดังแสดงในรูปที่ 12(a) และพบทั้งดิสโลเคชันที่เป็นเส้นและเป็นวง ในขณะที่บริเวณขอบเกรนจะพบยูเทคติกเฟส

บริเวณที่ได้รับผลกระทบทางความร้อนจากการเชื่อมเสียดทานด้าน AS เมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) พบว่ามีการเกิดพรีซิพิเตต T-phase กระจายอยู่ในอะลูมิเนียมเมตริกซ์ดังแสดงในรูปที่ 13(a) และมี

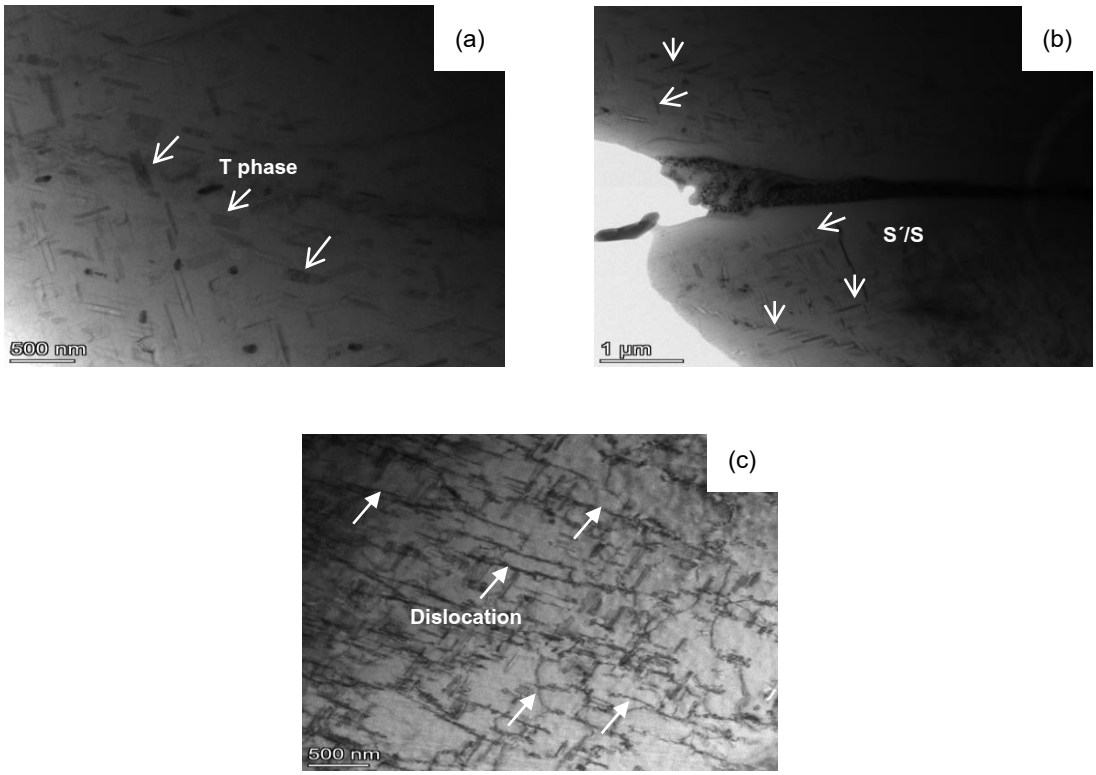
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.012

พรีซิพิเตตเฟส S′/ S ที่มีขนาดสั้นกว่าด้าน RS เนื่องจากทางด้าน AS ได้รับการกวนที่เป็นการกวนแบบทวนเข็มนาฬิกาทำให้อัดเนื้อวัสดุเข้าด้านในทำให้เกิดการแตกหักของพรีซิพิเตต โดยที่พรีซิพิเตตเฟส S′/ S กระจายตัวทั่วในบริเวณอะลูมิเนียมเมตริกซ์ และพบว่าบริเวณใกล้ขอบเกรนเกิด PFZ ดังแสดงในรูปที่ 13(b) ซึ่งมีการวางตัวเป็นระแนงและมีปริมาณที่มากกว่าทางด้าน RS อย่างชัดเจน และพบดิสโลเคชันที่ถูกขวางการเคลื่อนที่โดยพรีซิพิเตต เฟส S′/ S อย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 13(c)



รูปที่ 12 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ฟังชันก์ Bright-field (BF) บริเวณได้รับผลกระทบทางความร้อนจากการเชื่อมเสียดทานด้าน RS:
(a) Dislocations (b) เฟสพรีซิพิเตตจีพีโซน และ (c) เฟสพรีซิพิเตต S′

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.012

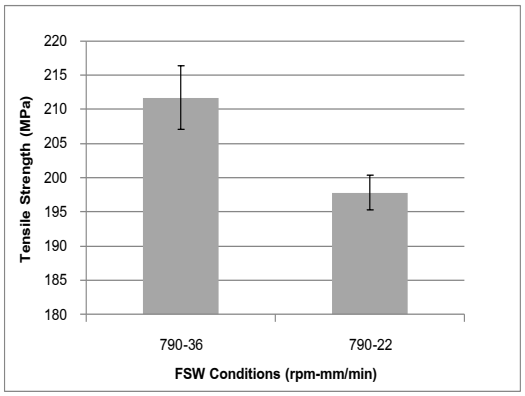


รูปที่ 13 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ฟังชันก์ Bright-field (BF) บริเวณได้รับผลกระทบทางความร้อนจากการเชื่อมเสียดทานทางด้าน AS: (a) T-phase (b) เฟสพรีซิพิเตต S´/S และ (c) ดิสโลเคชัน

3.3 ความต้านทานแรงดึง

ในการทดสอบความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM-E8 ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น AG-50KNX จากการทดสอบพบว่า ที่ความเร็วเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที ให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดเป็น 212 เมกะปาสคาล ดังแสดงในรูปที่ 14 และบริเวณที่เกิดการแตกหักนั้นชิ้นงานขาดออกจากกัน เกิดขึ้นบริเวณที่อยู่ถัดจากบริเวณรอยเชื่อมหรือบริเวณที่ถูกเครื่องมือกวนสัมผัสทางด้าน RS ซึ่งบริเวณนี้จะมีความแข็งแรงน้อยกว่าบริเวณพื้นที่อื่น ๆ ในแนวเชื่อม [9] ซึ่งมีความสอดคล้องกับโครงสร้างจุลภาคที่พบว่า บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนด้าน RS ประกอบด้วยตะกอนของเฟสจีพีโซน และมีตะกอนเฟส S´/ S ที่มีขนาดใหญ่และหยาบเกิดขึ้นเล็กน้อย จึงส่งผลให้บริเวณดังกล่าวมีความต้านทานแรงดึงน้อยกว่าบริเวณอื่นๆ เนื่องจากมีเฟสที่เป็นอุปสรรคในการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันน้อยเมื่อมีแรงมากระทำ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.012



รูปที่ 14 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึง ความเร็วรอบการหมุน 790 rpm ความเร็วเดินเชื่อม 22 และ 36 mm/min

4. บทสรุป

กลไกที่ทำให้เกิดความแข็งแรงของชิ้นงานเชื่อมเสียดทานแบบกวน เกิดจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากแรงเสียดทานในกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียม โดยการสร้างเฟสใหม่ คือ การตกตะกอนและการโตขึ้นของเฟสพรีซิพิเตตแบบต่าง ๆ รวมถึงการกระจายตัวของดิสโลเคชัน ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อสมบัติทางกลของชิ้นงาน

เมื่อนำโลหะผสมอะลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง SSM 2024 ไปเชื่อมเสียดทานแบบกวน และนำมาวิเคราะห์กลไกการเกิดความแข็งแรง ที่สภาวะการเชื่อมด้วยหัวกวนแบบทรงกระบอกเรียบ ที่ความเร็วรอบในการหมุนกวน 790 รอบต่อนาที ความเร็วในการเดินเชื่อม 36 มิลลิเมตรต่อนาที เมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ในแต่ละบริเวณ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. บริเวณเนื้อโลหะเดิม พบตะกอนเฟสพรีซิพิเตตจีพีโซน ซึ่งเป็นเฟสที่ไม่เสถียรและเปลี่ยนเฟสเมื่อได้รับพลังงานความร้อน สามารถเปลี่ยนเป็นเฟสลำดับถัดไปได้ และจะส่งผลให้สมบัติทางกลเพิ่มขึ้น และพบดิสโลเคชันเป็นส่วนใหญ่กระจายในอะลูมิเนียมเมตริกซ์และมี T-phase เล็กน้อย

2. บริเวณพื้นที่แนวเชื่อมพบตะกอนเฟส S′/ S ที่เปลี่ยนโครงสร้างจากเฟสพรีซิพิเตตจีพีโซน และมีขนาดเล็กกระจายในอะลูมิเนียมเมตริกซ์ มีการวางตัวในสองทิศทางที่ตัดขวางกัน การกระจายตัวของเฟสดังกล่าวส่งผลให้ความต้านทานแรงดึงสูงเนื่องจากเฟสดังกล่าวเป็นอุปสรรคในการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันเมื่อมีแรงมากระทำ ขนาดและปริมาณของเฟสแปรผันตรงกับสมบัติทางกลของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมเสียดทานแบบกวน [1] และมี T-phase ขนาดใหญ่กว่าในบริเวณเนื้อโลหะเดิม

3. บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อนด้าน RS พบตะกอนเฟสจีพีโซน และมีเฟส S′/ S เกิดขึ้นเล็กน้อย ส่งผลให้ความต้านทานแรงดึงบริเวณนี้น้อย เนื่องจากไม่มีอุปสรรคขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน ด้าน AS พบตะกอนเฟส S′/ S กระจายตัวมากกว่า ประกอบกับมี T-phase ส่งผลให้มีอุปสรรคในการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันมากกว่า

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม และสำนักพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ฝ่ายนักเรียนทุนรัฐบาลด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สนับสนุนเครื่องมือการทำวิจัยจากมหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.012

6. เอกสารอ้างอิง

[1] I. Morozova, A. Królicka, A. Obrosov, Y. Yang, N. Doynov, S. Weib and V. Michailov, Precipitation in impulse friction stir welded 2024 aluminium alloy, Materials Science and Engineering: A, 2022, 852, 143617.

[2] S. Khantongkum, Influence of two-step aging parameters on mechanical properties of semi-solid cast 2024 aluminium alloy, Thesis, Suranaree University of Technology, Thailand, 2020.

[3] Y.C. Lin, J.-J. Liu and J.-N. Chen, Material flow tracking for various tool geometries during the friction stir spot welding process, Journal of Materials Engineering and Performance, 2013, 22, 3674-3683.

[4] Z.Y. Ma, S.R. Sharma and S.R. Mishra, Effect of friction stir processing on the microstructure of cast A356 aluminum, Materials Science and Engineering: A, 2006, 433, 269-278.

[5] D. Wang, L. Zhan, J. Zhong, Z. Tang, Q. Zeng and K. Gan, Stress-level dependency of creep aging behavior for friction stir welded Al-Cu alloy, Journal of Central South University, 2022, 29, 3030-3053.

[6] Y.Q. Chen, S.P. Pan, S.W. Tang, W.H. Liu, C.P. Tang and F.Y. Xu, Formation mechanisms and evolution of precipitate-free zone at grain boundaries in an Al-Cu-Mg-Mn alloy during homogenization, Journal of Materials Science, 2016, 51, 7780-7792.

[7] A.A. Eliseev, S.V. Fortuna and M.A. Khimich, Effect of ultrasonic impact on the microhardness and microstructure of friction stir welded aluminum alloy 2024, Russian Physics Journal, 2024, 67, 932-939.

[8] P. Li, S. Wang, Y. Xia, X. Hao, Z. Lei and H. Dong, Inhomogeneous microstructure and mechanical properties of rotary friction welded AA2024 joints, Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9, 5749-5760.

[9] Y. Hu, H. Liu, H. Fujii, K. Ushioda, H. Araki, K. Sugita and K. Liu, Vacancy-induced θ' precipitation during ultrasonic-affected friction stir welding of Al-Cu alloy, Journal of Materials Science, 2020, 55, 14626-14641.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.013

บทความวิจัย

การพัฒนาระบบตรวจสอบความผิดปกติของอุปกรณ์ในชุดทดลองการผลิตไฟฟ้าแบบไฮบริดด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม

วรพล กออนันตชัย[1] ชาคริต ปานแป้น[1] ภูธเนศ หลีซี่[1] ภูริภัทร สุวรรณมณี[1]
จีรวรรณ หอมจันทร์[2] และ อิสราภรณ์ อมรสวัสดิ์วัฒนา[1*]

[1] ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือวัดและอิเล็กทรอนิกส์, คณะวิศวกรรมศาสตร์,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
[2] สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์, คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรม,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
[*] ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: issaraporn.a@eng.kmutnb.ac.th

วันที่รับบทความ: 6 มกราคม 2568; วันที่ทบทวนบทความ: 5 มีนาคม 2568; วันที่ตอบรับบทความ: 13 มีนาคม 2568
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 24 เมษายน 2568

บทคัดย่อ: บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างระบบตรวจสอบความผิดปกติของอุปกรณ์ในชุดทดลองการผลิตไฟฟ้าแบบไฮบริด ด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม โดยมีการออกแบบระบบควบคุมการผลิตไฟฟ้าแบบไฮบริดด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลมขนาด 80 วัตต์ โดยทำการตรวจสอบความผิดปกติของอุปกรณ์ภายในชุดทดลองด้วยวงจรทดสอบบอร์ดร่วมกับโปรแกรม Microsoft Visual Basic ซึ่งจะแสดงสถานะความผิดปกติของอุปกรณ์ที่มีการชำรุด ส่งผลให้ง่ายต่อการการซ่อมบำรุง ผลการทดสอบชุดทดลองดังกล่าวสามารถยืนยันได้ว่า ระบบตรวจสอบความผิดปกติของอุปกรณ์ในชุดทดลองการผลิตไฟฟ้าแบบไฮบริด ด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม สามารถใช้งานกับนำไปใช้งานกับโหลดทางไฟฟ้าได้ตามต้องการ นอกจากนี้ระบบตรวจสอบความผิดปกติของอุปกรณ์ยังสามารถตรวจสอบความผิดปกติของระบบได้อย่างมีประสิทธิผล โดยพิจารณาจากค่าที่วัดได้จากวงจรทดสอบบอร์ดในช่วง ±3% ของค่าอ้างอิงจากเครื่องมือวัดมาตรฐาน

คำสำคัญ: การผลิตไฟฟ้าแบบไฮบริด; พลังงานแสงอาทิตย์; พลังงานลม; การตรวจสอบความผิดปกติ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.013

บทความวิจัย

Anomaly Detected System Development for Hybrid Power Generation Experimental Set with Solar and Wind Energy

Worrapol Koranuntachai[1], Chakrit Panpean[1], Phutanet Leesee[1], Puriput Suwanmanee[1], Jeerawan Homjan[2] and Issaraporn Amornsawatwattana[1*]

[1] Department of Instrument and Electronic Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

[2] Department of Mechatronics Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

[*] Corresponding author, E-mail: issaraporn.a@eng.kmutnb.ac.th

Received: 6 January 2025; Revised: 5 March 2025; Accepted: 13 March 2025
Online Published: 24 April 2025

Abstract: This article aims to design and develop an advanced system for monitoring equipment malfunctions within an integrated solar and wind energy power generation experiment. The system is designed to control an 80-watt hybrid power generation system, combining solar and wind energy. Equipment malfunctions within the experimental setup are monitored through a sophisticated test circuit board in conjunction with Microsoft Visual Basic software, which displays the malfunction status of any damaged equipment, thereby facilitating maintenance procedures. The test results validate that the control and malfunction detection system for the hybrid solar and wind power generation setup can reliably operate with electrical loads as required. Moreover, the equipment monitoring system effectively detects system malfunctions, as verified by the measured values from the test circuit board, which fall within the reference range $\pm 3\%$ of standard measuring instruments.

Keywords: Hybrid Power Generation; Solar Energy; Wind Energy; Anomaly Detection System

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.013

1. บทนำ

พลังงานไฟฟ้าเป็นหนึ่งในปัจจัยที่สำคัญในการดำเนินชีวิตประจำวันของผู้คนตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันและในอนาคต อีกทั้งเป็นกำลังหลักในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจและสังคม ซึ่งการใช้พลังงานไฟฟ้าในประเทศไทยมีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ จากแนวทางขับเคลื่อนนโยบายการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของรัฐบาลทางด้านระบบขนส่ง [1] เช่น การเปลี่ยนรถโดยสารประจำทางจากเครื่องยนต์ดีเซลเป็นระบบขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า การสนับสนุนให้เปลี่ยนรถยนต์สันดาปภายในเป็นรถยนต์ไฟฟ้า และการลดภาษีรถยนต์ไฟฟ้า เป็นต้น การเพิ่มขึ้นของการใช้รถยนต์ไฟฟ้าจึงส่งผลโดยตรงต่อความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มมากยิ่งขึ้น เพื่อรองรับความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น จึงจำเป็นต้องผลิตไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม การผลิตไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน โรงไฟฟ้าถ่านหิน และโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ [2-4] ส่งผลโดยตรงต่อการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยเหตุนี้ การผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานสะอาดจึงเข้ามามีบทบาทที่สำคัญสำหรับการผลิตไฟฟ้าในยุคปัจจุบัน ซึ่งสามารถรองรับความต้องการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นและลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

กำลังการผลิตจากพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งส่วนใหญ่เป็นเทคโนโลยี solar photovoltaic (solar PV) มีการขยายตัวอย่างต่อเนื่องด้วยอัตราที่สูงถึงปีละ 29 % ขณะที่พลังงานลมขยายตัวที่ 14 % ต่อปี ทำให้ ณ ปี 2020 โลกมีกำลังการผลิตติดตั้งของโรงไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนรวมอยู่ที่ราว 1,600 จิกะวัตต์ ซึ่งเทียบเท่า 53 เท่าของความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุดของไทย โดยกว่า 90 % เป็นกำลังการผลิตจากแหล่งพลังงานแสงอาทิตย์ (46% ของกำลังการผลิตติดตั้งสะสม ณ ปี 2020) และลม (45%) และที่เหลือเป็นพลังงานหมุนเวียนอื่น ๆ เช่น พลังงานหมุนเวียนที่ต้องการการเผาไหม้อย่างเชื้อเพลิงชีวมวลและชีวภาพ (8%) และพลังงานความร้อนใต้พิภพ (1%) มูลค่าเงินลงทุนในพลังงานหมุนเวียนเพิ่มขึ้นปีละราว 3.7% และสถิติการใช้พลังงานในประเทศไทย ในปี 2024 อยู่ที่ 2646 พันล้านบาท เพิ่มขึ้นจากปีก่อนร้อยละ 3.9 โดยมูลค่าการใช้น้ำมันสำเร็จรูปซึ่งมีสัดส่วนมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 55 ของมูลค่าการใช้พลังงานทั้งหมด เพิ่มขึ้นร้อยละ 0.7 รองลงมาเป็นมูลค่าการใช้ไฟฟ้าซึ่งมีสัดส่วนร้อยละ 36 ของมูลค่าการใช้พลังงานทั้งหมด เพิ่มขึ้นร้อยละ 15.6 ในขณะที่มูลค่าการใช้ลิกไนต์/ถ่านหิน ลดลงร้อยละ 29.4 มูลค่าการใช้ก๊าซธรรมชาติลดลงร้อยละ 11.7 และมูลค่าการใช้พลังงานทดแทนลดลงร้อยละ 5.8 [5]

จากการทบทวนปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าในปี 2022 [6] ได้ออกแบบและพัฒนาเครื่องมือวัดความเร็วลมและพลังงานแสงอาทิตย์แบบพกพาให้ใช้งานกรณีที่ไม่มีแสงอาทิตย์เป็นเวลา 3 วัน เพื่อใช้เก็บข้อมูลความเร็วลม และพลังงานแสงอาทิตย์ และประเมินประสิทธิภาพของเครื่องมือวัดความเร็วลมและพลังงานแสงอาทิตย์แบบพกพา ผลจากการวิจัยพบว่าการเปรียบเทียบระหว่างค่าความเร็วลมจากเครื่องมือ Digital Anemometer และ Wind Transmitter สามารถเก็บข้อมูล และทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าพลังงานแสงอาทิตย์จากเครื่องมือ Tenmars TM-750และ Pyranometer สามารถเก็บข้อมูล และทำงานได้อย่างมี ประสิทธิภาพ,

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.013

ในปี 2013 [7] ได้สร้างชุดสาธิตการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยพลังงานทดแทนแบบผสมผสาน โดยใช้พลังงานทดแทน 3 ระบบ คือ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม และพลังงานน้ำ เพื่อเป็นสื่อการสอน มีผลการทดลองดังนี้ พลังงานแสงอาทิตย์ เมื่อความเข้มรังสีอาทิตย์สูงขึ้น พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะสูงขึ้น พลังงานน้ำ เมื่อความเร็วรอบของกังหันน้ำเพิ่มขึ้น พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากพลังงานน้ำจะสูงขึ้นด้วย และพลังงานลมเมื่อความเร็วรอบของกังหันลมเพิ่มขึ้น พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดพลังงานลมจะสูงขึ้นด้วย, และในปี 2014 [8] ได้สร้างอินเวอร์เตอร์รูปคลื่นไซน์ขนาด 500 วัตต์ เพื่อจ่ายไฟฟ้าให้เครื่องใช้ไฟฟ้าโดยใช้พลังงานทดแทน คือ พลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อศึกษาวงจรอินเวอร์เตอร์จากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ 50 เฮิรตซ์ รายละเอียดงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงกระบวนการออกแบบ และสร้างอินเวอร์เตอร์รูปคลื่นไซน์โดยเริ่มตั้งแต่การออกแบบการทำงานของ วงจรอินเวอร์เตอร์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ รูปคลื่นไซน์ จนถึงการทดสอบและสรุปผลการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยระบบพลังงานแสงอาทิตย์ ที่สามารถรับแรงดันด้านเข้าขนาด 12-24 โวลต์ ได้ จากเซลล์แสงอาทิตย์ และมีแรงดันด้านออกขนาด 220 โวลต์ 50 เฮิรตซ์ จะมีการทำงาน 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ วงจรพุช-พูลคอนเวอร์เตอร์ และวงจรอินเวอร์เตอร์ สามารถสรุปได้ดังนี้ พลังงานแสงอาทิตย์เมื่อความเข้มรังสีอาทิตย์สูงขึ้นพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จะสูงขึ้นซึ่งพลังงานไฟฟ้าที่ได้จะแปรผันตรงกับความเข้มแสง อินเวอร์เตอร์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ รูปคลื่นไซน์ ได้นำเอาพลังงานแสงอาทิตย์มาเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า ไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ จะเป็นไฟฟ้ากระแสตรง จากนั้นจะใช้แบตเตอรี่มาประจุเก็บไว้ เพื่อจ่ายให้วงจร พุช-พูลคอนเวอร์เตอร์ ทางคณะวิจัยจึงได้นำแนวคิด และหลักการมาประยุกต์ใช้งานกับบทความวิจัยนี้ โดยจุดเด่นของบทความนี้คือการสลับการทำงานระหว่างกังหันลมและเซลล์แสงอาทิตย์ ทำให้สามารถใช้งานพลังงานไฟฟ้าได้ทั้งกลางวันและกลางคืน โดยควบคุมการทำงานผ่านบอร์ด Arduino อีกทั้งยังมีซอฟต์แวร์ และวงจรตรวจสอบความผิดปกติของอุปกรณ์ภายในชุดทดลองการผลิตไฟฟ้าแบบไฮบริดด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม ซึ่งจะแสดงสถานะความผิดปกติของอุปกรณ์ที่มีการชำรุดทำให้ง่ายต่อการซ่อมแซม และการพัฒนาปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานในอนาคต

การผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ [9] และพลังงานลม [10] เป็นหนึ่งในทางเลือกของพลังงานพลังงานสะอาดที่นิยมใช้ในการผลิตไฟฟ้า แต่อย่างไรก็ตาม การผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลมมีระบบการแปลงผันและการจัดการพลังงานที่ซับซ้อน [11-12] หากเกิดความผิดพร่องในระบบไฟฟ้าหรืออุปกรณ์ทำงานผิดปกติ จะเป็นเรื่องยากในการตรวจสอบและซ่อมบำรุง ซึ่งจะต้องใช้ความชำนาญของผู้ปฏิบัติงานในการตรวจสอบ รวมถึงการซ่อมบำรุง ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงสร้างระบบตรวจสอบความผิดปกติของอุปกรณ์ภายในชุดทดลองการผลิตไฟฟ้าแบบไฮบริดด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม ซึ่งสามารถแสดงสถานะความผิดปกติของอุปกรณ์ในระบบผลิตไฟฟ้า โดยมีวัตถุประสงค์ในการลดระยะเวลา

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.013

การตรวจสอบอุปกรณ์ที่ชำรุดเมื่อเกิดความผิดพร่องในระบบผลิตไฟฟ้า และสามารถซ่อมบำรุงอุปกรณ์ที่ชำรุดได้อย่างถูกต้อง

การสร้างระบบตรวจสอบความผิดปกติของอุปกรณ์ในชุดทดลองการผลิตไฟฟ้าแบบไฮบริด ด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลมในงานวิจัยนี้ มีแนวคิดเริ่มต้นจากความต้องการใช้พลังงานสะอาดในการผลิตไฟฟ้าให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ที่มีความสามารถสูงสุดในการผลิตไฟฟ้าในช่วงเวลากลางวัน [13] และพลังงานลมที่มีความสามารถสูงสุดในการผลิตไฟฟ้าในช่วงเวลากลางคืน [14] จึงเป็นเหตุผลในการสร้างชุดทดลองการผลิตไฟฟ้าแบบไฮบริดด้วยพลังงานแสงอาทิตย์พลังงานลม ซึ่งสามารถรองรับการผลิตไฟฟ้าได้ทั้งในช่วงเวลากลางวันและเวลากลางคืน โดยมีระบบควบคุมการแปลงผันพลังงานไปเก็บสะสมที่แบตเตอรี่ เพื่อจ่ายไปยังโหลดที่ต้องการใช้งาน นอกจากนี้ ในชุดทดลองดังกล่าวมีระบบตรวจสอบความผิดพร่องในระบบไฟฟ้าและความผิดของอุปกรณ์ ซึ่งจะแสดงสถานะความผิดปกติของอุปกรณ์ที่มีการชำรุด ทำให้ง่ายในการตรวจสอบและซ่อมบำรุงระบบผลิตเป็นการเพิ่มสมรรถนะการผลิตไฟฟ้าและรองรับการใช้พลังงานไฟฟ้าอย่างคุ้มค่าในอนาคต

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

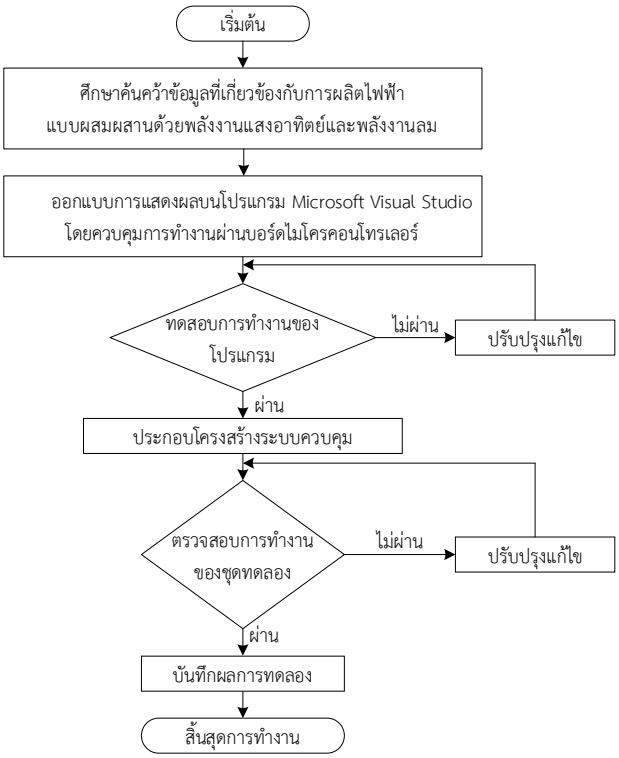
ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงภาพรวมของการดำเนินงานในแต่ละขั้นตอน เริ่มตั้งแต่ขั้นตอนการวางแผนการจัดเตรียมอุปกรณ์ต่าง ๆ ไปจนถึงการออกแบบชิ้นงานและการจัดทำชิ้นงาน โดยสามารถแสดงขั้นตอนและวิธีดำเนินการดังต่อไปนี้

2.1 ภาพรวมของงานวิจัย

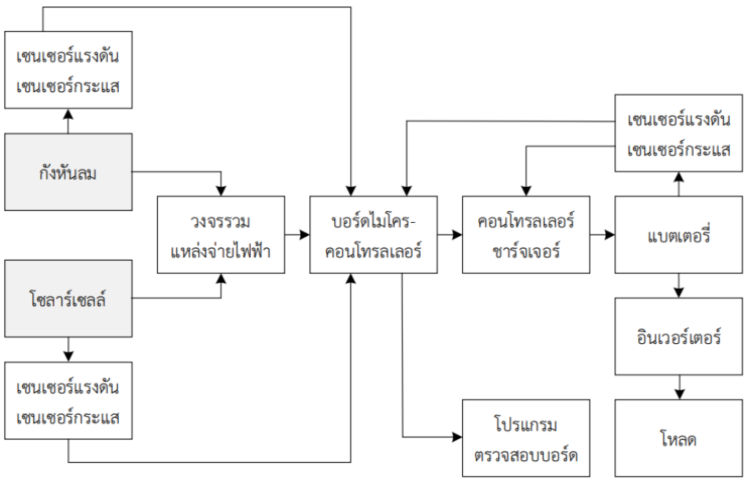
เริ่มต้นการทำวิจัยโดยการศึกษาข้อมูลหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ออกแบบอุปกรณ์ จัดซื้ออุปกรณ์และดำเนินจัดทำตัวชุดทดลอง ตรวจสอบการทำงานและแก้ไขข้อผิดพลาด และสรุปผล โดยสามารถเขียนแผนผังขั้นตอนการดำเนินงาน แสดงดังรูปที่ 1

โครงสร้างระบบตรวจสอบความผิดปกติของอุปกรณ์ในชุดทดลองการผลิตไฟฟ้าแบบไฮบริด ด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม แสดงได้ดังรูปที่ 2 โดยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า และกังหันลมทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานลมเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยมีเซนเซอร์แรงดันและเซนเซอร์กระแสไฟฟ้าสำหรับใช้ในการวัดค่าปริมาณทางไฟฟ้าที่ผลิตได้ โดยค่าที่ได้จากการวัดจะถูกส่งไปยังบอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์เพื่อประมวลผล และควบคุมการชาร์จพลังงานไฟฟ้าลงในแบตเตอรี่ นอกจากนี้บอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์จะส่งข้อมูลไปยังระบบตรวจสอบความผิดปกติของระบบผลิตไฟฟ้าเพื่อแสดงสถานะให้กับผู้ใช้งาน พลังงานที่ได้ประจุลงแบตเตอรี่จะถูกแปลงผันจากไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อจ่ายให้กับโหลดอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต้องการ โดยมีการตรวจวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้าทางฝั่งไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อส่งข้อมูลให้กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ สำหรับตรวจสอบสถานะการทำงานทางด้านเอาต์พุตที่จ่ายไปยังโหลดอุปกรณ์ไฟฟ้า การแสดงผลสถานะการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าแบบไฮบริด ดำเนินการบนโปรแกรม Microsoft Visual Studio

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.013



รูปที่ 1 แผนภาพขั้นตอนการดำเนินงาน



รูปที่ 2 โครงสร้างระบบตรวจสอบความผิดปกติของอุปกรณ์ในชุดทดลองการผลิตไฟฟ้าแบบไฮบริด
ด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.013

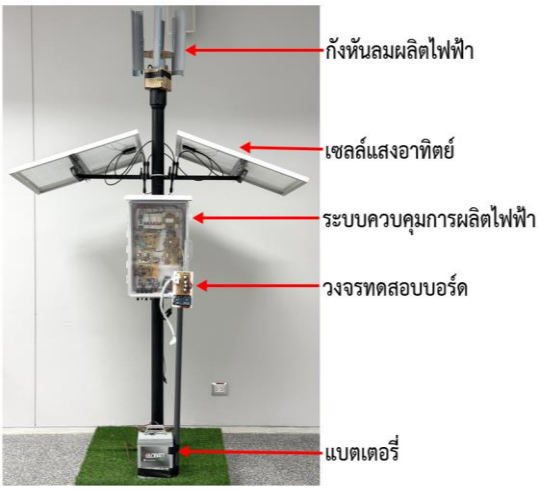
2.2 การออกแบบทางด้านระบบฮาร์ดแวร์

ส่วนประกอบทางด้านฮาร์ดแวร์ของชุดผลิตไฟฟ้าแบบไฮบริดด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลม แสดงได้ดังรูปที่ 3 ซึ่งประกอบด้วย กังหันลมผลิตไฟฟ้า เซลล์แสงอาทิตย์ ระบบควบคุมการผลิตไฟฟ้า วงจรทดสอบบอร์ด และแบตเตอรี่ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.2.1 กังหันลมผลิตไฟฟ้า

การสร้างกังหันลมผลิตไฟฟ้า จะใช้ท่อพลาสติกพีวีซีขนาด 2 นิ้ว ทำการตัดแบ่งครึ่งเพื่อเป็นใบพัดในแนวตั้ง จำนวน 6 ใบ ซึ่งทำให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางกังหัน (D) เท่ากับ 36 เซนติเมตร และมีความสูง (h) เท่ากับ 30 เซนติเมตร สำหรับการรับพลังงานจากลม โดยตัวแกนของในพัดจะต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง การออกแบบขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (P_{gen}) พิจารณาได้จากความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าของชุดผลิตไฟฟ้าแบบไฮบริด (P_{use}) ร่วมกับประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (η_{gen}) และประสิทธิภาพการแปลงผันพลังงานลมทางกล (η_{wind}) แสดงได้ดังสมการที่ (1) ซึ่งชุดผลิตไฟฟ้าแบบไฮบริดในงานวิจัยนี้มีความต้องการใช้พลังงาน 80 วัตต์ และพิจารณาประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง 70% และประสิทธิภาพการแปลงผันพลังงานลมทางกลเท่ากับ 60% [15] ดังนั้น จึงเลือกใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 180 วัตต์

$$P_{gen} = \frac{P_{use}}{\eta_{gen} \times \eta_{wind}} = \frac{80}{0.8 \times 0.6} = 166.67 \text{ W} \quad (1)$$



รูปที่ 3 ส่วนประกอบทางด้านฮาร์ดแวร์ชุดผลิตไฟฟ้าแบบไฮบริด

การเลือกขนาดท่อพลาสติกพีวีซี 2 นิ้ว ที่ทำการตัดแบ่งครึ่งเพื่อเป็นใบพัดในแนวตั้ง จำนวน 6 ใบ พิจารณาได้จากสมการที่ (2)

$$P_{wind} \geq P_{gen} = \frac{1}{2}\rho v^3 A \quad (2)$$

เมื่อ v คือ อัตราเร็วของลมประมาณเท่ากับ 10 m/s^2

ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศประมาณเท่ากับ 1.23 kg/m^3

A คือ พื้นที่กวาดอากาศประมาณเท่ากับ πDh

จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (2) สามารถยืนยันการออกใบพัดของการสร้างกังหันลมได้ดังสมการที่ (3)

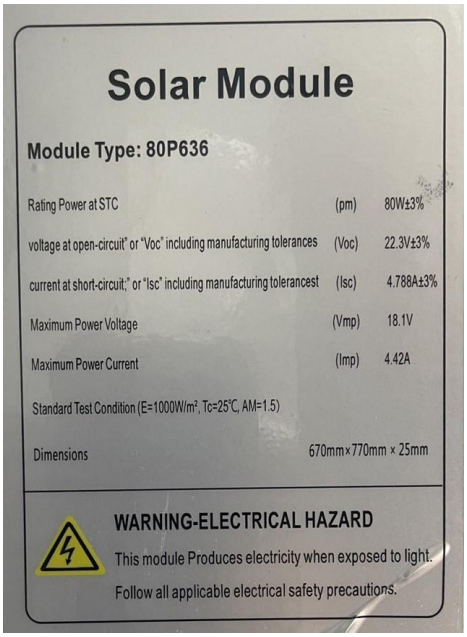
$$P_{wind} \geq P_{gen} = \frac{1}{2} \times 1.23 \times 10^3 \times \pi \times 0.36 \times 0.3 = 200 \text{ W} \quad (3)$$

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.013

2.2.2 เซลล์แสงอาทิตย์

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ถูกออกแบบให้ติดตั้งทำมุมเอียง 15 องศา เพื่อให้เซลล์แสงอาทิตย์สามารถรับแสงอาทิตย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ [16] การคำนวณขนาดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (P_{PV}) สำหรับนำมาสร้างชุดผลิตไฟฟ้าแบบไฮบริดที่มีความต้องการใช้พลังงาน 80 วัตต์ แสดงได้ดังสมการที่ (4) โดยพิจารณาการผลิตไฟฟ้า (PSH) 4.8 ชั่วโมงต่อวัน และประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า (η_{PV}) เท่ากับ 50% [17] ดังนั้นจึงเลือกใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ขนาด 80 วัตต์ จำนวน 2 แผง โดยรายละเอียดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ สามารถแสดงได้จากป้ายบอกพิกัด (name plate) แสดงดังรูปที่ 4

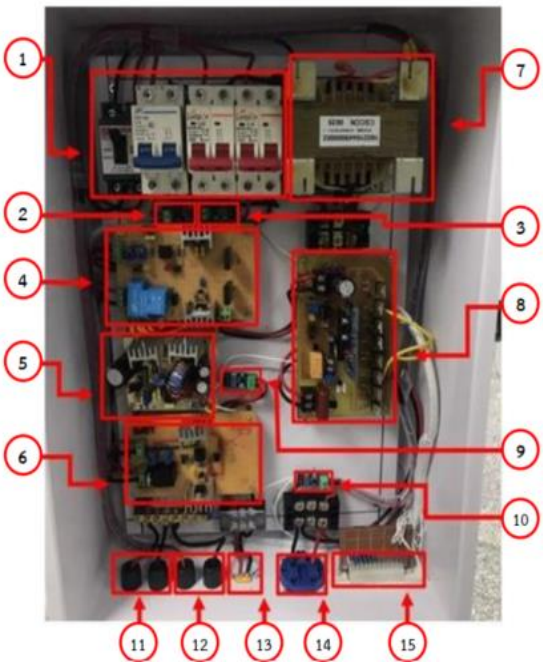
$$P_{PV} = \frac{P_{use}}{\eta_{PV}} = \frac{80}{0.5} = 160 \text{ W} \qquad (4)$$



รูปที่ 4 ป้ายบอกพิกัดแผงเซลล์แสงอาทิตย์

2.2.3 ระบบควบคุมการผลิตไฟฟ้า

ระบบควบคุมการผลิตไฟฟ้ามีส่วนประกอบที่สำคัญทั้งหมด 15 ส่วน แสดงได้ดังรูปที่ 5 ซึ่งประกอบด้วย เบรกเกอร์ (1) เซนเซอร์วัดกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ (2) เซนเซอร์วัดกระแสกังหันลม (3) วงจรรวมแหล่งจ่ายไฟฟ้า (4) วงจรแปลงผันแบบบัคก์ (5) วงจรตรวจสอบระดับแรงดันแบตเตอรี่ (6) หม้อแปลงความถี่ต่ำ (7) วงจรอินเวอร์เตอร์ (8) เซนเซอร์วัดกระแสแบตเตอรี่ (9) เซนเซอร์วัดกระแสโหลด (10) ขั้วรับพลังงานแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (11) ขั้วรับพลังงานจากกังหันลม (12) ขั้วรับพลังงานจากแบตเตอรี่ (13) ขั้วสำหรับต่อโหลด (14) ขั้วต่อสายสัญญาณไปยังวงจรทดสอบบอร์ด (15)

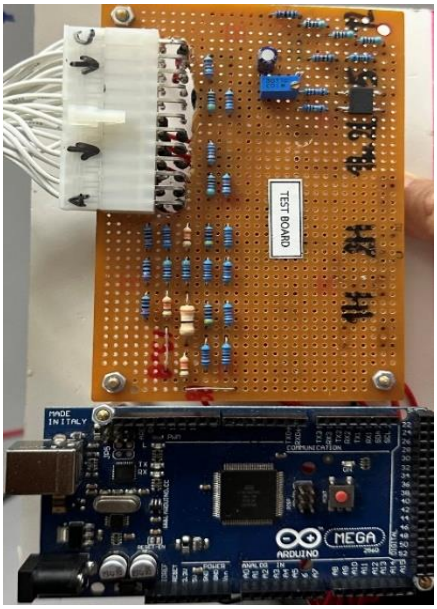


รูปที่ 5 ระบบควบคุมการผลิตไฟฟ้า

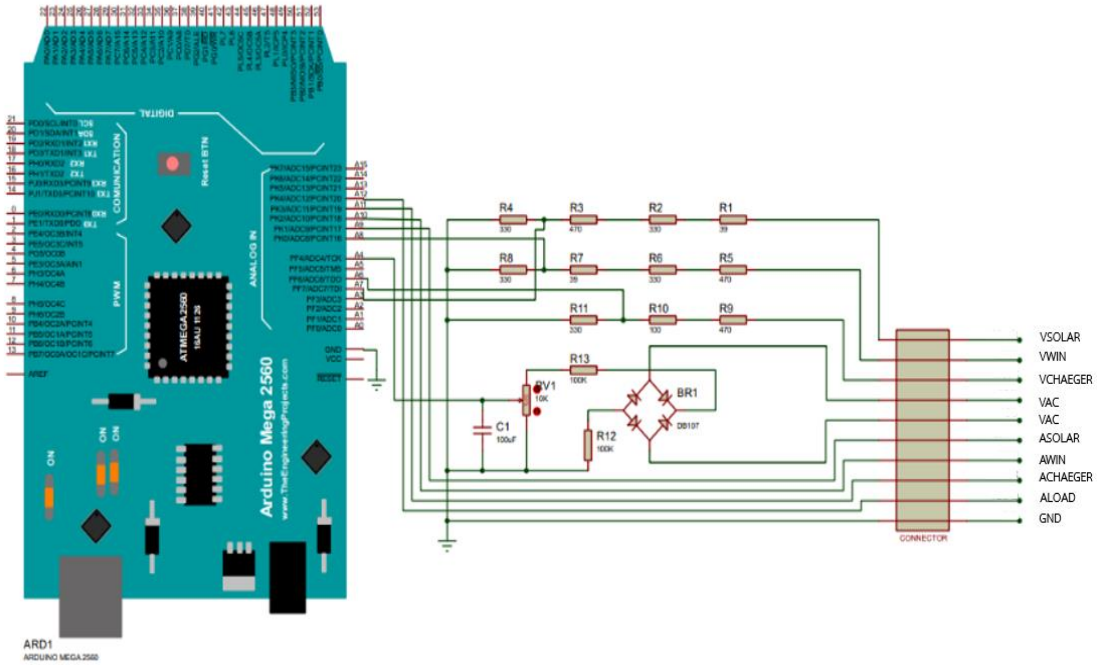
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.013

2.2.4 วงจรทดสอบบอร์ด

วงจรทดสอบบอร์ดเป็นวงจรที่ใช้สำหรับรับข้อมูลจากกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าจากระบบควบคุมการผลิตไฟฟ้าและทำการปรับระดับแรงดันให้เหมาะสม จากนั้นใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น Arduino Mega 2560 ทำการตรวจสอบสถานะการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้า สำหรับตรวจสอบความผิดปกติของอุปกรณ์ในระบบผลิตไฟฟ้าแบบไฮบริดที่พิจารณา นอกจากนี้ บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งข้อมูลไปแสดงผลไปยังโปรแกรม Microsoft Visual Studio โดยวงจรทดสอบบอร์ดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงได้ดังรูปที่ 6 และตำแหน่งจุดวัดต่างๆ ของบอร์ด ARDUINO แสดงได้ดังรูปที่ 7



รูปที่ 6 วงจรทดสอบบอร์ด



รูปที่ 7 ตำแหน่งจุดวัดต่างๆ ของบอร์ด ARDUINO

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.013

จากรูปที่ 7 แสดงจุดวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าภายในชุดทดลองดังกล่าวจะถูกส่งข้อมูลไปยังบอร์ด Arduino เพื่อทำการตรวจสอบค่าแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า จากนั้นส่งข้อมูลไปแสดงผลลัพธ์ที่โปรแกรม TESTBOARD

1. จุดวัดกระแสกังหันลม (Awin)
2. จุดวัดกระแสเซลล์แสงอาทิตย์ (Asolar)
3. จุดวัดแรงดันเซลล์แสงอาทิตย์ (Vsolar)
4. จุดวัดแรงดันกังหันลม (Vwin)
5. จุดวัดแรงดันชาร์จแบตเตอรี่ (Vcharge)
6. จุดวัดกระแสแบตเตอรี่ (Acharge)
7. จุดวัดกระแสโหลด (Aload)
8. จุดวัดแรงดันด้านเอาต์พุตกระแสสลับ (VAC)

จากรูปที่ 8 แสดงถึงการแจ้งเตือนถึงผู้ใช้งานกรณีที่เกิดความผิดปกติ ดังนี้

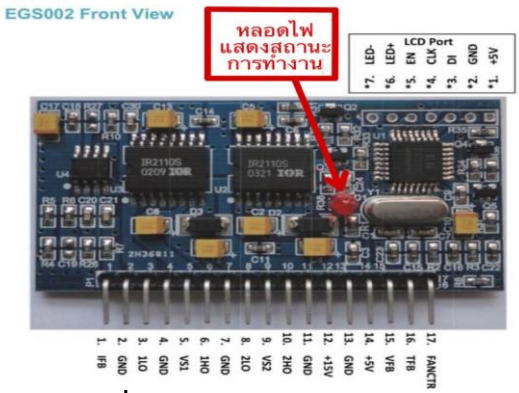
1. กระแสเกินพิกัด หลอดไฟจะกระพริบ 2 ครั้ง
2. แรงดันเกินพิกัด หลอดไฟจะกระพริบ 3 ครั้ง
3. แรงดันต่ำกว่าพิกัด หลอดไฟจะกระพริบ 4 ครั้ง
4. อุณหภูมิเกินพิกัด หลอดไฟจะกระพริบ 5 ครั้ง

โดยเมื่อระบบทำงานปกติหลอดไฟจะเปิดตลอดเวลา

2.2.5 แบตเตอรี่

แบตเตอรี่ที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อรองรับการใช้พลังงาน (P_{use}) 80 วัตต์ เป็นระยะเวลา (t_{use}) 3 ชั่วโมง และพิจารณาความลึกของการคายประจุ (DoD) ที่ 60% ดังนั้น จึงเลือกใช้แบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ 45 แอมป์แปร์-ชั่วโมง แสดงได้ดังสมการที่ (5)

$$Ah = \frac{P_{use} \times t_{use}}{V_{batt} \times DoD} = \frac{80 \times 3}{12 \times 0.6} = 33.33 \text{ Ah} \quad (5)$$



รูปที่ 8 การแจ้งเตือนความผิดปกติ

2.3 การออกแบบทางด้านซอฟต์แวร์

2.3.1 การเขียนโปรแกรมบน Arduino IDE

การเขียนโปรแกรมบน Arduino IDE มีจุดประสงค์เพื่อเป็นตัววัดแรงดันที่จุดตรวจสอบความผิดปกติของชุดทดลอง ซึ่งจะทำการอ่านค่าสัญญาณอนาล็อกที่ส่งมาจากวงจรตรวจสอบความผิดปกติของชุดทดลองที่เป็นไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าผลลัพธ์ในช่วง 0-1023 สามารถแปลงเป็นค่าแรงดันไฟฟ้า การเขียนโปรแกรมบน Arduino IDE มี ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดขาอินพุตสำหรับอ่านค่าสัญญาณแอนาล็อก

ขั้นตอนที่ 2 ประกาศชื่อตัวแปรเพื่อใช้เก็บค่าจากเซนเซอร์ แสดงค่าผลลัพธ์ และใช้ในการคำนวณหาค่าต่างๆในระบบตรวจสอบความผิดปกติของชุดทดลอง

ขั้นตอนที่ 3 สร้างฟังก์ชันเพื่อให้ง่ายต่อการเรียกใช้งานโดยที่แต่ละฟังก์ชันจะมีรูปแบบการทำงานที่ใกล้เคียงกันคือใช้คำสั่งวนซ้ำ For Loop เพื่อกำหนดให้อ่านค่าสัญญาณอนาล็อก 5 ครั้ง เนื่องจากในการอ่านค่าสัญญาณอนาล็อกแต่ละครั้งของ Arduino Mega 2560 นั้นอาจมีความผิดพลาดเกิดขึ้น

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.013

ขั้นตอนที่ 4 กำหนดลำดับการทำงานของแต่ละฟังก์ชันให้ทำงานอย่างเป็นระบบแบบวนซ้ำภายในคำสั่ง void loop และกำหนดอัตราความเร็วการสื่อสารพอร์ตอนุกรมด้วยความเร็ว 9600 บิตต่อวินาที รวมถึงกำหนดการหน่วงเวลา 10 วินาทีก่อนที่ระบบอื่นๆจะทำงานภายในคำสั่ง void setup

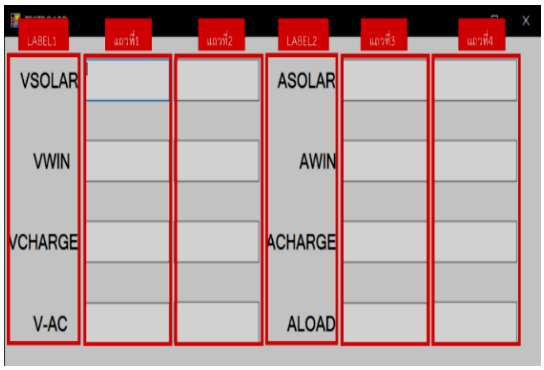
2.3.2 การเขียนโปรแกรม Microsoft Visual Studio

การเขียนโปรแกรมบนการเขียนโปรแกรม Microsoft Visual Studio มีจุดประสงค์เพื่อสร้างโปรแกรมแสดงผลการตรวจสอบความผิดปกติของชุดทดลอง ซึ่งเป็นส่วนติดต่อกับผู้ใช้งาน โดยจะนำค่าผลลัพธ์ที่ได้จาก Arduino Mega 2560 มาเปรียบเทียบกับเงื่อนไขการใช้งานว่ามีความผิดปกติเกิดขึ้นหรือไม่ แล้วระบบจะสรุปการทำงานแต่ละจุดตรวจสอบให้ผู้ใช้งานได้รับทราบ กรณีที่ระบบไม่มีความผิดปกติจะแสดงค่าผลลัพธ์ว่า Pass รวมถึงค่าแรงดันที่วัดได้ และกรณีที่ระบบมีความผิดปกติเกิดขึ้นจะแสดงค่าผลลัพธ์ว่า Fault รวมถึงค่าแรงดันที่วัดได้ การเขียนโปรแกรม Microsoft Visual Studio ใช้ภาษา Visual basic มีขั้นตอนทั้งหมดดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เลือก Control สำหรับแสดงผลลัพธ์ติดต่อกับผู้ใช้งาน และใช้ในการควบคุมการทำงานของระบบโดย Control ที่ใช้คือ TextBox ทั้งหมด 16 ช่อง โดยแถวที่ 1 และ 3 จะเปลี่ยน Name เป็น TxtA-TxH แถวที่ 2 และ 4 จะเปลี่ยน Name เป็น Txtest1- Txtest8 ตามลำดับ และ Lable ทั้งหมด 8 ช่อง โดยจะเปลี่ยน Text เป็น VSOLAR (แรงดันเซลล์แสงอาทิตย์), VWIN (แรงดันกังหันลม) ,VCHARGE (แรงดันชาร์จเจอร์), V-AC (แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต), ASOLAR (กระแสเซลล์แสงอาทิตย์), AWIN (กระแสกังหันลม), ACHARGE (กระแสชาร์จแบตเตอรี่), ALOAD (กระแสโหลด) ตามลำดับ แสดงได้ดังรูปที่ 9

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดการเชื่อมต่อระหว่าง Microsoft Visual Studio กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 โดยใช้คำสั่ง SerialPort1.Port Name เพื่อกำหนดชื่อพอร์ตที่ต้องการเชื่อมต่อรับส่งข้อมูลจากนั้นใช้คำสั่ง SerialPort1.BaudRate เพื่อกำหนดอัตราความเร็วการรับส่งข้อมูล ซึ่งต้องกำหนดให้ตรงกับความเร็วการรับส่งข้อมูลที่ Arduino Mega 2560 ใช้รับส่งข้อมูล

ขั้นตอนที่ 3 ใช้งานคำสั่ง SerialPort1_Data Received เพื่อรับข้อมูลจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 ข้อมูลที่ถูกส่งมาจะอยู่ในบรรทัดเดียวกันทั้งหมดดังนั้นจึงใช้คำสั่ง SerialPort1.Read Line เพื่ออ่านค่าข้อมูลทั้งบรรทัด และสร้างตัวแปรชนิด String คือ srt เพื่อเก็บค่าข้อมูลที่ถูกส่งมา จากนั้นกำหนดตัวแปรชนิด String array คือ a, b, c, d, e, f, g, h และคำสั่ง srt.Split(",") เพื่อแยกการเก็บข้อมูลไว้ในตัวแปร a, b, c, d, e, f, g และ h



รูปที่ 9 การแสดงผลลัพธ์สำหรับติดต่อกับผู้ใช้งาน

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.013

3. การทดลองและผลการทดลอง

3.1 การทดสอบการทำงานของวงจรแปลงผันแบบบัคก์

การทดสอบการทำงานของวงจรแปลงผันแบบบัคก์ ดำเนินการโดยการสร้างเงื่อนไขในการทำงาน ซึ่งจะใช้โหลดที่กำลังวัตต์แตกต่างกันสามระดับ โดยใช้หลอดไฟฟ้ากระแสตรงเป็นภาระทางไฟฟ้า โดยการทดลองจะทำการตรวจสอบระดับแรงดันไฟฟ้าขณะเริ่มทดลอง โดยตั้งค่าระดับแรงดันไฟฟ้าด้วยวงจรแปลงผันแบบบัคก์ที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ และระดับกระแสไฟฟ้าที่ 0 แอมแปร์ หลังจากนั้นทำการปรับระดับกระแสไฟฟ้าจนถึงระดับกระแสไฟฟ้าสูงสุดของโหลดแต่ละระดับ จากนั้นทำการเปรียบเทียบระดับแรงดันไฟฟ้าขณะเริ่มต้นทดลองเทียบกับระดับแรงดันไฟฟ้าที่กระแสไฟฟ้าสูงสุดเพื่อหาเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดผลาดของระดับแรงดันไฟฟ้าที่กำลังวัตต์แต่ละระดับ โดยโหลดที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

1) ขนาด 2 แอมแปร์ ใช้หลอดไฟหน้ารถจักรยานยนต์ขนาด 25 วัตต์ 1 หลอด

2) ขนาด 4 แอมแปร์ ใช้หลอดไฟหน้ารถจักรยานยนต์ขนาด 25 วัตต์ 2 หลอด

3) ขนาด 6 แอมแปร์ ใช้หลอดไฟหน้ารถจักรยานยนต์ขนาด 25 วัตต์ 2 หลอด และหลอดไฟ Led 9 วัตต์ 5 หลอด

ผลการทดลองการทำงานของวงจรแปลงผันแบบบัคก์ก์ ซึ่งผลการทดลองในตารางดังกล่าว แสดงให้เห็นว่า วงจรแปลงผันแบบบัคก์ สามารถทำงานได้ตามความต้องการของโหลดทางไฟฟ้า

ตารางที่ 1 ผลลัพธ์การทำงานของวงจรแปลงผันแบบบัคก์ ทดสอบครั้งที่ 1

กระแสโหลด (A)	เริ่มต้น		สูงสุด	
	แรงดัน (V)	กระแส (A)	แรงดัน (V)	กระแส (A)
2	12.0	0	11.9	1.9
4	12.0	0	12.0	3.5
6	12.0	0	11.2	5.2

ตารางที่ 2 ผลลัพธ์การทำงานของวงจรแปลงผันแบบบัคก์ ทดสอบครั้งที่ 2

กระแสโหลด (A)	เริ่มต้น		สูงสุด	
	แรงดัน (V)	กระแส (A)	แรงดัน (V)	กระแส (A)
2	12.0	0	12.1	1.8
4	12.0	0	11.9	3.6
6	12.0	0	11.2	5.3

ตารางที่ 3 ผลลัพธ์การทำงานของวงจรแปลงผันแบบบัคก์ ทดสอบครั้งที่ 3

กระแสโหลด (A)	เริ่มต้น		สูงสุด	
	แรงดัน (V)	กระแส (A)	แรงดัน (V)	กระแส (A)
2	12.0	0	12.0	1.7
4	12.0	0	11.8	3.4
6	12.0	0	11.2	5.4

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.013

3.2 การทดสอบระบบตรวจสอบความผิดปกติที่จุดทดสอบ

การทดลองนี้จะทำการทดสอบหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุดทดสอบของเซลล์แสงอาทิตย์และกังหันลม ซึ่งประกอบด้วย แรงดันเซลล์แสงอาทิตย์ (Vsolar) แรงดันการชาร์จ (Vcharge) กระแสเซลล์แสงอาทิตย์ (Asolar), กระแสแบตเตอรี่ (Abatt) กระแสโหลด (Aload) กระแสกังหันลม (Awind) และแรงดันกังหันลม (Vwind) โดยจะเปรียบเทียบการทำงานระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวงจรทดสอบบอร์ด (Check Board) และแรงดันที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องมือวัดมาตรฐาน (Digital Multimeter รุ่น Fluke 113) โดยการพิจารณาเงื่อนไขการชำรุดของอุปกรณ์ด้วยการเก็บค่าแรงดันและกระแสที่จุดทดสอบจากเครื่องมือวัดมาตรฐานในขณะการทำงานปกติของชุดทดสอบ ซึ่งค่าดังกล่าวจะถูกใช้เป็นค่าอ้างอิงให้กับการตรวจสอบการชำรุดของอุปกรณ์ โดยมีเงื่อนไขดังนี้

- เมื่อค่าที่วัดได้จากวงจรทดสอบบอร์ดมีค่าอยู่ในช่วง ±3% ของค่าอ้างอิงจากเครื่องมือวัดมาตรฐาน แสดงว่า ที่จุดทดสอบอุปกรณ์มีการทำงานเป็น “ปกติ”
- เมื่อค่าที่วัดได้จากวงจรทดสอบบอร์ดมีค่าเกินในช่วง ±3% ของค่าอ้างอิงจากเครื่องมือวัดมาตรฐาน แสดงว่า ที่จุดทดสอบอุปกรณ์มีการทำงานเป็น “ผิดปกติ” จึงประเมินว่าอุปกรณ์ที่จุดวัดดังกล่าว เกิดการชำรุด

ผลการทดสอบระบบตรวจสอบความผิดปกติที่จุดทดสอบแสดงได้ดังตารางที่ 5

จากผลการทดสอบในตารางที่ 5 แสดงให้เห็นชัดว่าการทำงานของชุดทดลองการผลิตไฟฟ้าแบบไฮบริดด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลมที่จุดทดสอบ

ตารางที่ 4 ผลลัพธ์การทำงานของวงจรแปลงผันแบบบัคก์ ค่าเฉลี่ย

กระแสโหลด (A)	เริ่มต้น		สูงสุด	
	แรงดัน (V)	กระแส (A)	แรงดัน (V)	กระแส (A)
2	12.0	0	12.0	1.8
4	12.0	0	11.9	3.5
6	12.0	0	11.2	5.3

ตารางที่ 5 ผลลัพธ์การตรวจสอบการทำงานของระบบตรวจสอบความผิดปกติ

จุดทดสอบ	Check Board (V)	DMM (V)	ค่าความผิดพลาด (%)	สถานะการทำงาน
Vsolar	15.92	15.98	0.38	Pass
Vcharge	13.87	13.90	0.22	Pass
Asolar	2.57	2.64	2.73	Pass
Abatt	2.57	2.50	2.76	Pass
Awin	**2.38**	**2.66**	**10.46**	**Fault**
Aload	2.53	2.50	1.16	Pass
Vwind	4.39	4.41	0.45	Pass

กระแสกังหันลม (Awind) มีการทำงานผิดปกติ ดังนั้นจึงต้องทำการแก้ไขอุปกรณ์ที่ชำรุดซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตกระแสไฟฟ้าของกังหันลม และทำการทดลองการตรวจสอบความแม่นยำของระบบตรวจสอบความผิดปกติของจุดทดสอบหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่จุดทดสอบของเซลล์แสงอาทิตย์ กังหันลม และเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าโดยจะเปรียบเทียบการทำงานระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากโปรแกรมทดสอบบอร์ดแรงดันที่ได้จากการวัดด้วยมัลติมิเตอร์เพื่อหาเปอร์เซ็นความผิดพลาด

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.013

4. สรุปผลการทดลอง

ระบบตรวจสอบความผิดปกติของอุปกรณ์ในชุดทดลองการผลิตไฟฟ้าแบบไฮบริด ด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลมที่ได้ออกแบบขึ้น สามารถรองรับการจ่ายโหลดทางไฟฟ้าได้ 80 วัตต์ ตามวัตถุประสงค์การออกแบบ นอกจากนี้วงจรทดสอบบอร์ดและโปรแกรมตรวจสอบความผิดปกติของอุปกรณ์ในชุดผลิตไฟฟ้าแบบไฮบริดยังสามารถให้สมรรถนะที่ดีในการตรวจสอบความผิดปกติของอุปกรณ์ โดยยืนยันได้จากผลการตรวจสอบในกรณีที่เกิดความผิดในอุปกรณ์ผลิตกระแสไฟฟ้าของกังหันได้อย่างมีประสิทธิผล

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือวัดและ อิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

6. เอกสารอ้างอิง

[1] X. Zhang, Z. Qu, Y. Zhang, X. Han and Y. Chai, Research on carbon emission reduction and carbon peaking strategies for power grid enterprises, 4th International Conference on Advanced Electrical and Energy Systems (AEES), Proceeding, 2003, 944–949.

[2] I. Purkayastha, and P.J. Savoie, Effect of harmonic on power measurement, IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 26(5), 944–949.

[3] K. Yamashita, R. Minami, T. Inoue, T. Ohno, H. Ichimiya and H. Kamei, A study on dynamic behavior of coal-fired thermal power plant during significant system frequency rise after system separation, IEEE Power and Energy Society General Meeting, Proceeding, 2011, 1–8.

[4] J.L. Márquez, M.G. Molina and J.M. Pacas, Dynamic modeling, simulation and control design of an advanced micro-hydro power plant for distributed generation applications, International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(1), 5772–5777.

[5] https://kc.dede.go.th/news-view.aspx?p. (Accessed on 1 March 2025)

[6] P. Khemmook and S. Thongsuk, Development and efficiency of portable wind speed and solar radiation, Journal of Industrial Technology and Innovation, 2022, 1(1), 24670.

[7] V. Malavech, The demonstration set of electrical generation with hybrid renewable energy system, Journal of Thaksin University, 2013, 16(3), 29–38. (in Thai)

[8] P. Kraisungnern and P. Chantachot, Sine wave inverter for solar cell, Project Report, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Thailand, 2014.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.013

[9] Y. Ying, E.J. Hu and R. Beebe, Solar aided regenerative rankine cycle, ASME 1997 International Joint Power Generation Conference, Proceeding, 1997, 555–560.

[10] V. Yaramasu, B. Wu, P.C. Sen, S. Kouro and M. Narimani, High-power wind energy conversion systems: State-of-the-art and emerging technologies, Proceedings of the IEEE, Proceeding, 2015, 740–788.

[11] H. Li, Y. Lei, Y. Geng, H. He, Q. Niu and K. Wang, A test methodology to verify reactive power support ability of wind turbines, 2022 IEEE 5th International Electrical and Energy Conference (CIEEC), Proceeding, 2022, 449–454.

[12] H. Tebibel, Wind turbine power system for hydrogen production and storage: Techno-economic analysis, International Conference on Wind Energy and Applications in Algeria (ICWEAA), Proceeding, 2018.

[13] S.S. Ghosh and P. Mukhija, Backstepping controller design for maximum power harvesting from solar-wind hybrid energy conversion system, 5th International Conference on Energy, Power and Environment: Towards Flexible Green Energy Technologies (ICEPE), Proceeding, 2023.

[14] R.V. Zaitsev, M.V. Kirichenko, G.S. Khrypunov, D.S. Prokopenko and L.V. Zaitseva, Development of hybrid solar generating module for high-efficiency solar energy station, 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Proceeding, 2017, 360–364.

[15] A.C. Bayeul-Lainé and G. Bois, Unsteady simulation of flow in micro vertical axis wind turbine, The International Symposium on Transport Phenomena, Proceeding, 2010, 1–8.

[16] T.N. Tamer and A. Khatib, Review of designing, Installing and evaluating standalone photovoltaic power systems, Journal of Applied Sciences, 2010, 10(13), 1212–1228.

[17] S. Yoomak, T. Patcharoen and A. Ngaopitakkul, Performance and economic evaluation of solar rooftop systems in different regions of Thailand, Sustainability, 2019, 11(23), 1–20.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.014

บทความวิจัย

การออกแบบผลิตภัณฑ์ของเล่นสำหรับผู้สูงอายุจากวัสดุประกอบไม้พลาสติกด้วยวิศวกรรมคันเซ

ธเนศ รัตนวิไล[1,2*] นูรีฮัน สาแมหาดี[1] วนิดา เด่นจักร[1] และ ทิพยสุคนธ์ บุญญโส[1]

[1] สาขาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

[2] ศูนย์วิจัยอุตสาหกรรมอัจฉริยะ, สาขาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

[*] ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: thanate.r@psu.ac.th

วันที่รับบทความ: 6 มิถุนายน 2567; วันที่ทบทวนบทความ: 6 กุมภาพันธ์ 2568; วันที่ตอบรับบทความ: 21 มีนาคม 2568
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 24 เมษายน 2568

บทคัดย่อ: จำนวนผู้สูงอายุที่ต้องเผชิญกับโรคอัลไซเมอร์เพิ่มมากขึ้น สามารถป้องกันได้ด้วยการบริหารสมองหรือเล่นเกมฝึกสมอง งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการออกแบบของเล่นที่ช่วยป้องกันโรคอัลไซเมอร์ในผู้สูงอายุ โดยนำวิศวกรรมคันเซมาใช้ในกระบวนการออกแบบผลิตภัณฑ์ ทำการรวบรวมข้อมูลจากผู้สูงอายุในจังหวัดสงขลา โดยใช้แบบสอบถาม 4 ฉบับ กับกลุ่มตัวอย่างจำนวน 58 ตัวอย่างจากการคำนวณขนาดตัวอย่างที่ระดับความเชื่อมั่น 90% ได้ ผลการวิจัยพบว่า คุณภาพ ลูกเล่น ความสวยงาม ความสบายตา เพลิดเพลิน ไม่ซับซ้อนและความปลอดภัย สามารถเข้าถึงการตอบสนองทางอารมณ์ของผู้สูงอายุที่มีต่อผลิตภัณฑ์ได้ นอกจากนี้ข้อมูลการวิเคราะห์ Signal-to-Noise และความแปรปรวน พบว่าคุณลักษณะสำคัญในการออกแบบผลิตภัณฑ์ประกอบด้วย พื้นผิวขรุขระ การเสริมทักษะเพื่อกระตุ้นการเคลื่อนไหวร่างกาย การเล่นคิดวิเคราะห์ น้ำหนักชิ้นส่วนน้อยกว่า 250 กรัม จำนวนผู้เล่น 1-2 คน ขนาดกลาง มุมโค้งมน สีสันสดใสและลวดลายเรียบง่าย เมื่อนำการวิจัยไปพัฒนาและขึ้นรูปต้นแบบผลิตภัณฑ์ตัวต่อจากวัสดุประกอบไม้พลาสติกด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ พบว่าได้รับความพึงพอใจจากผู้สูงอายุที่มีต่อผลิตภัณฑ์ 97.6% สะท้อนให้เห็นถึงความเหมาะสมในการตอบสนองต่อความต้องการของผู้สูงอายุ อีกทั้งนักออกแบบสามารถนำผลที่ได้ไปการออกแบบและพัฒนาของเล่นสำหรับผู้สูงอายุในรูปแบบที่หลากหลาย

คำสำคัญ: วิศวกรรมคันเซ; วิศวกรรมเชิงประสิทธิผล; ของเล่นสำหรับผู้สูงอายุ; อัลไซเมอร์; วัสดุประกอบไม้พลาสติก; เครื่องพิมพ์สามมิติ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.014

บทความวิจัย

Product Design of Elderly Toy from Wood Plastic Composites with Kansei Engineering

Thanate Ratanawilai[1,2*], Nureehan Samaehadee[1], Wanida Denjak[1] and Thipsukon Boonyaso[1]

[1] Department of Industrial and Manufacturing Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkhla University

[2] Smart Industry Research Center, Department of Industrial and Manufacturing Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University

[*] Corresponding author, E-mail: thanate.r@psu.ac.th

Received: 6 June 2024; Revised: 6 February 2025; Accepted: 21 March 2025
Online Published: 24 April 2025

Abstract: The number of elderly individuals facing Alzheimer's disease is increasing. Prevention can be achieved through various forms of brain exercises or brain training games designed specifically for the elderly. This has led to the idea of designing toys that aid in preventing Alzheimer's disease in the elderly, with Kansei engineering being applied in the product design process. Research data were collected from elderly people in Songkhla Province through a survey using four questionnaires, which calculated the sample size at a 90% confidence level, resulting in a total sample of 58 samples. The results found that feelings regarding quality, playfulness, aesthetics, visual comfort, enjoyment, simplicity, and safety allow access to the emotional responses of the elderly towards the product. Additionally, analysis of the Signal-to-Noise ratio and variance was conducted to identify important product characteristics for design. It was found that the design should prioritize features such as rugged surfaces, skill enhancement in stimulating physical movement, analytical play, components weighing less than 250 grams, 1-2 players, medium size, gentle curves, vibrant colors, and simple patterns. These findings led to the design of a prototype product manufactured using 3D printing technology with wood-plastic composite materials. Subsequently, consumer satisfaction analysis yielded a satisfaction rate of 97.6%, reflecting the appropriateness of responding to the needs of the elderly, and designers can use these findings to design and develop a variety of toys for the elderly.

Keywords: Kansei Engineering; Effective Engineering; Elderly Toy; Alzheimer's; Wood Plastic Composites; 3D Printing

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.014

1. บทนำ

จังหวัดสงขลามีพื้นที่ปลูกยางพารา จำนวน 2,224,165 ไร่ คิดสัดส่วนเป็นร้อยละ 15 ของ 14 จังหวัดภาคใต้ โดยปลูกมากเป็นอันดับ 2 ของประเทศสำหรับการแปรรูปอุตสาหกรรมยางพารา จังหวัดสงขลานับเป็นแหล่งแปรรูปไม้ยางพาราที่สำคัญ ทั้งในส่วนของโรงเลื่อย โรงเฟอร์นิเจอร์ และแผ่นใยไม้อัด ซึ่งในวิธีการแปรรูปไม้ยางพาราจะทำให้เกิดวัสดุเหลือใช้จากกระบวนการตัด การเลื่อยไม้และการขัด เป็นต้น ดังนั้นการนำเศษขี้เลื่อยและผงไม้ซึ่งเป็นเศษเหลือจากกระบวนการผลิตมาใช้ให้เกิดประโยชน์ เป็นการเพิ่มมูลค่าของเศษวัสดุให้สูงขึ้น โดยนำผงไม้เหลือใช้มาบดผสมกับเม็ดพลาสติกทำให้เกิดวัตถุดิบใหม่ขึ้น หรือที่เรียกว่า วัสดุเชิงประกอบไม้พลาสติก (Wood Plastic Composites; WPCs) ซึ่งวัสดุเชิงประกอบไม้พลาสติกสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย อาทิ เช่น ของตกแต่งบ้าน พื้นบ้าน ของเล่น เป็นต้น

ในปัจจุบันผู้สูงอายุในประเทศไทยมีจำนวนเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ประเทศเริ่มก้าวเข้าสู่สังคมผู้สูงอายุแบบเต็มขั้น โดยพบว่าขณะนี้ประชากรผู้สูงอายุในประเทศไทยมีอยู่ราว ๆ 12 ล้านคน แบ่งเป็นช่วงอายุ 60-69 ปี จำนวน 6.8 ล้านคน ช่วงอายุ 70-79 ปี มีจำนวน 3.5 ล้านคน และอายุ 80 ปีขึ้นไป จำนวน 1.7 ล้านคน ในขณะที่อัตราการเกิดและประชากรวัยเด็กกลับน้อยลงไปทุกๆ ปี [1] ในขณะเดียวกันผู้สูงอายุมักมีปัญหาเกี่ยวกับสุขภาพ โดยหนึ่งในนั้นคือ ปัญหาอัลไซเมอร์ ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของโรคสมองเสื่อมซึ่งพบมากขึ้นเรื่อย ๆ ในคนที่มีอายุตั้งแต่ 60 ปีขึ้นไป [2] โรคอัลไซเมอร์เกิดจากการตายของเซลล์สมอง ทำให้การทำงานของสมองเสื่อมถอยลง พบได้หลายสาเหตุ เช่น การเสื่อมตามวัย พันธุกรรม และการติดเชื้อในสมอง เป็นต้น ซึ่งการป้องกันไม่ให้เกิดโรคอัลไซเมอร์ทำได้หลายวิธี เช่น งานวิจัยของ Samieri *et. al.* [3] ที่ได้ศึกษาการป้องกันโรคอัลไซเมอร์ด้วยการปรับอาหารแบบประเภทเฉพาะตัว (Personalized Nutrition) ซึ่งเน้นการปรับอาหารที่เหมาะสมกับลักษณะทางชีวภาพและสภาพแวดล้อมของแต่ละบุคคล เพื่อลดความเสี่ยงที่จะเกิดโรคอัลไซเมอร์ หรือ Montero-Odasso *et. al.* [4] ค้นพบแนวทางการปรับปรุงสุขภาพหลายด้าน ที่รวมถึงการออกกำลังกาย การฝึกจิตใจ และการดูแลสุขภาพจิตเวช นอกเหนือจากนี้แล้วยังมีการป้องกันโรคด้วยการบริหารสมองผ่านเกมต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็น Pozzi *et. al.* [5] ที่ค้นพบว่าเกมกระดานช่วยชะลอการเสื่อมสภาพของสมองและปรับปรุงคุณภาพชีวิตในผู้สูงอายุ เกมแต่ละประเภทมีผลต่างกันในด้านต่างๆของการรับรู้ ส่วนหนึ่งอาจเกิดจากปัจจัยด้านหน้าที่และชีวภาพของสมอง ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการบริหารสมองจากการเล่นของเล่นหรือเกมฝึกสมองในรูปแบบต่างๆ เป็นวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจ ปัจจุบันผู้ผลิตของเล่นสำหรับผู้สูงอายุมีจำนวนน้อย ของเล่นที่ผลิตออกมามักมีลักษณะเป็นของเล่นที่สามารถเล่นได้ทุกช่วงวัยตั้งแต่อายุ 5-80 ปี โดยของเล่นสำหรับผู้สูงอายุเฉพาะยังไม่ตอบสนองความต้องการของผู้สูงอายุเท่าที่ควร ซึ่งลักษณะของเล่นส่วนใหญ่มักมีขนาดเล็กทำให้ยากต่อการมองเห็น และรูปร่างของเล่นบางประเภทมีลักษณะที่เป็นอันตราย สำหรับการผลิตของเล่นสำหรับผู้สูงอายุนั้นรูปแบบของเล่นควรง่ายต่อการใช้งาน ไม่ซับซ้อน มีขนาดตัวอักษรคำอธิบาย และบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมกับผู้สูงอายุ ซึ่งจะมีส่วนในการฟื้นฟูสมรรถภาพ พัฒนาทักษะการใช้สมอง กระตุ้นประสาทสัมผัส และช่วยยืดบริหาร

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.014

กล้ามเนื้อของผู้สูงอายุ ดังนั้นการออกแบบผลิตภัณฑ์ของเล่นสำหรับผู้สูงอายุร่วมกับการนำวัสดุเชิงประกอบไม้พลาสติกมาใช้ในการออกแบบและขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติจึงมีความสำคัญ นอกจากนี้เพื่อให้ผลิตภัณฑ์สามารถครองใจลูกค้าได้มากที่สุด จึงต้องคำนึงถึงกลยุทธ์เกี่ยวกับกระบวนการออกแบบพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่ตอบสนองความต้องการของลูกค้าเป็นสิ่งสำคัญ วิศวกรรมคันเซ (Kansei Engineering) เป็นอีกหนึ่งวิธีการพัฒนาผลิตภัณฑ์สำหรับกลุ่มผู้ผลิตที่ต้องการพัฒนาผลิตภัณฑ์ด้วยการแปลงความต้องการของผู้บริโภคออกมาเป็นคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่สอดคล้องกับความรู้สึกด้านต่าง ๆ เพื่อการออกแบบผลิตภัณฑ์แบบใหม่ได้อย่างเหมาะสมและตรงตามความต้องการเชิงอารมณ์ของผู้บริโภค [6] โดยในปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้วิศวกรรมคันเซในการพัฒนาผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับผู้สูงอายุที่แตกต่างกัน ไม่ว่าจะเป็นการออกแบบปฏิสัมพันธ์ของเทอร์มินอลแบบเคลื่อนที่สำหรับผู้สูงอายุของ Jing *et. al.* [7] คำนึงถึงการใช้งานให้มีความเหมาะสมสำหรับผู้สูงอายุ ทั้งปฏิสัมพันธ์ทางกายภาพและปฏิสัมพันธ์ทางอารมณ์ การออกแบบที่นั่งสำหรับผู้สูงอายุของ Xiong *et. al.* [8] ซึ่งค้นพบแนวทางการออกแบบผลิตภัณฑ์สำหรับผู้สูงอายุโดยใช้วิศวกรรมคันเซ เพื่อเชื่อมโยงอารมณ์และความต้องการของผู้ใช้กับการออกแบบผลิตภัณฑ์ในการสร้างผลิตภัณฑ์ที่ตอบสนองทั้งด้านการใช้งานและความรู้สึกทางอารมณ์ของผู้สูงอายุ การออกแบบเสื้อผ้าที่รวมฟังก์ชันป้องกันการตก เพื่อตอบสนองทั้งชีวิตประจำวันและความต้องการป้องกันการตกของผู้สูงอายุของ Wang *et. al.* [9] ซึ่งได้เสนอกลยุทธ์การออกแบบผลิตภัณฑ์โดยเน้นให้ตอบสนองต่อความต้องการในชีวิตประจำวันและการป้องกันการล้ม นอกจากนี้ในเชิงทางการแพทย์ งานวิจัยของ Li และ Li [10] ได้พัฒนาผลิตภัณฑ์ที่ออกแบบมาโดยเฉพาะสำหรับผู้ป่วยเบาหวานสูงอายุ โดยประยุกต์ใช้ฟังก์ชันคุณภาพและวิศวกรรมคันเซ สำหรับนำเสนอข้อมูลเชิงลึกสำหรับเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับการออกแบบผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์อัจฉริยะที่เน้นผู้สูงอายุเป็นศูนย์กลาง อีกทั้งในเชิงการออกแบบของเล่นมีงานวิจัยของ Boonyaso *et al.* [11] ได้นำแบบจำลองคาโนบูรณาการร่วมกับวิศวกรรมคันเซเพื่อระบุความชอบและอารมณ์ของผู้บริโภคที่ส่งผลต่อการซื้อของเล่นเด็กปฐมวัย จากการทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวข้องกับกลไกและวิธีป้องกันโรคอัลไซเมอร์ รวมถึงวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องวิศวกรรมคันเซในการออกแบบผลิตภัณฑ์สำหรับผู้สูงอายุ พบว่ายังไม่มีการนำวิศวกรรมคันเซไปใช้ในการออกแบบผลิตภัณฑ์ของเล่นสำหรับผู้สูงอายุที่สามารถช่วยป้องกันการเกิดโรคอัลไซเมอร์ ดังนั้นจึงเล็งเห็นว่าประเด็นนี้เป็นที่น่าสนใจและสำคัญ

การนำวิศวกรรมคันเซมาใช้ในการออกแบบผลิตภัณฑ์ของเล่นสำหรับผู้สูงอายุ อีกทั้งการนำผงไม้ยางพารามาใช้ให้เกิดประโยชน์โดยการผสมกับเม็ดพลาสติก เพื่อให้เกิดวัสดุไม้ประกอบพลาสติกสำหรับใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ จึงเป็นวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยเรื่องนี้ โดยประโยชน์ที่จะได้รับจากการวิจัยครั้งนี้ คือ ผลิตภัณฑ์ที่สามารถป้องกันการเกิดโรคอัลไซเมอร์ในผู้สูงอายุ โดยได้รับความพึงพอใจจากผู้บริโภคอย่างน้อย 70% และการนำเศษไม้เหลือใช้มาเพิ่มมูลค่าได้ อีกทั้งนักออกแบบสามารถนำผลความต้องการของลูกค้าไปออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ของเล่นสำหรับผู้สูงอายุในรูปแบบอื่น ๆ ได้

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.014

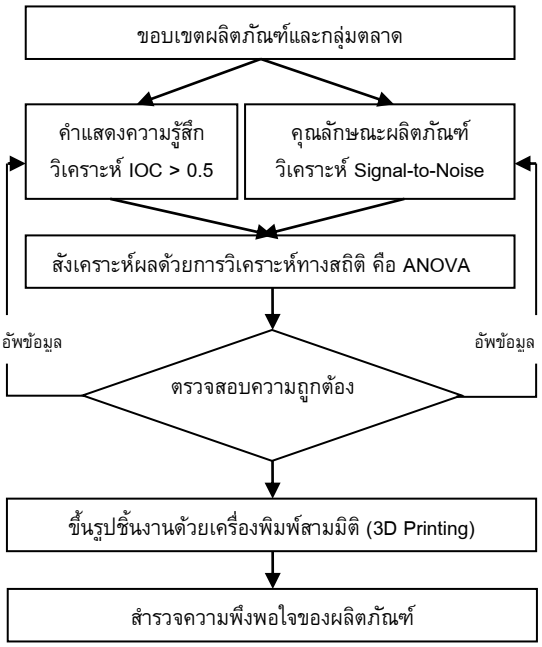
2. วิธีการศึกษา

ในการศึกษาแนวทางวิศวกรรมคันเซเพื่อการออกแบบผลิตภัณฑ์ของเล่นสำหรับผู้สูงอายุ เป็นวิธีการวิจัยผสมผสานระหว่างเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ โดยมีขั้นตอน (รูปที่ 1) และรายละเอียด ดังนี้

2.1 กำหนดขอบเขตผลิตภัณฑ์และกลุ่มตลาด สำหรับงานวิจัยเรื่องนี้ได้ศึกษาการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ของเล่นสำหรับผู้สูงอายุ โดยมีกลุ่มผู้ใช้งานผลิตภัณฑ์เป็นผู้สูงอายุ อายุตั้งแต่ 60 ปีขึ้นไป และกลุ่มผู้บริโภคเป้าหมายสำหรับการให้ข้อมูลเป็นกลุ่มผู้สูงอายุ กลุ่มเจ้าหน้าที่ดูแลผู้สูงอายุ และกลุ่มคนในครอบครัวที่ดูแลผู้สูงอายุภายในจังหวัดสงขลา การคัดเลือกกลุ่มตัวอย่างดำเนินการโดยวิธีการสุ่มตัวอย่างแบบชั้นภูมิ (Stratified Sampling) โดยการแบ่งประชากรออกเป็นชั้นตามปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ช่วงอายุ ระดับความสามารถในการดูแลตนเอง (ผู้สูงอายุที่ดูแลตนเองได้และผู้สูงอายุที่ต้องได้รับการดูแล) และจังหวัดที่อยู่อาศัย เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ครอบคลุมและสะท้อนความต้องการที่หลากหลาย

2.2 การกำหนดขอบเขตคำแสดงความรู้สึกเป็นการคัดเลือกคำแสดงความรู้สึกหรือคำคันเซที่จะใช้เชื่อมโยงกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ ซึ่งประกอบด้วย

2.2.1 การรวบรวมคำแสดงความรู้สึกหรือคำคันเซ ซึ่งในขั้นตอนนี้จะทำการรวบรวมคำที่สะท้อนอารมณ์และความรู้สึกของกลุ่มตัวอย่าง เพื่อพิจารณาผลตอบรับทางอารมณ์ (Emotional Responses) ของกลุ่มตัวอย่างจากหลายแหล่งข้อมูล เช่น สื่ออินเทอร์เน็ต ผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบและขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง



รูปที่ 1 แผนภาพขั้นตอนการวิจัย

2.2.2 จัดทำแบบสอบถามที่ 1 โดยนำคำแสดงความรู้สึกที่ได้จากการรวบรวมในขั้นตอนก่อนหน้านี้ ร่างแบบสอบถามที่ 1 กลุ่มผู้ประเมินเป็นผู้เชี่ยวชาญหรือผู้ที่มีประสบการณ์เกี่ยวกับผู้สูงอายุภายในจังหวัดสงขลา การเก็บข้อมูลเลือกใช้ระดับความเชื่อมั่นที่ 90% เนื่องจากเป็นการเลือกระดับที่เหมาะสมสำหรับผลการวิเคราะห์ที่มีความน่าเชื่อถือในระดับที่ยอมรับได้ โดยยังคงรักษาความสมดุลระหว่างความแม่นยำและความสามารถในการสรุปผล และเลือกใช้สมการไม่ทราบจำนวนประชากรของ W.G. Cochran [12] ดังสมการที่ 1

$$n = \frac{P(1-P)Z^2}{d^2} \quad (1)$$

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.014

เมื่อ n คือ จำนวนตัวอย่าง P คือสัดส่วนของประชากรที่ต้องการสุ่ม (กำหนด P = 0.30 เนื่องจากเหมาะสมในการสะท้อนการตอบสนองที่หลากหลายของกลุ่มตัวอย่าง) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lonescu *et. al.* [13] ที่กำหนดค่า P = 0.25 ซึ่งต่ำกว่า 0.5 Z คือ ระดับความมั่นใจที่กำหนดหรือระดับนัยสำคัญทางสถิติ โดย Z ที่ระดับนัยสำคัญ 0.10 เท่ากับ 1.65 (สอดคล้องกับความเชื่อมั่น 90%) d คือ สัดส่วนความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้เกิดขึ้น (สอดคล้องกับค่า Z ที่ระดับความเชื่อมั่นนั้นๆ) โดยระดับความเชื่อมั่น 90% สัดส่วนความคลาดเคลื่อน = 0.10

จากข้อกำหนด เมื่อแทนค่าในสมการที่ (1) ทำให้ได้ขนาดของกลุ่มตัวอย่างเท่ากับ 58 ตัวอย่าง โดยทำการลงพื้นที่เพื่อเก็บข้อมูลตามจำนวนกลุ่มตัวอย่างที่กำหนด แบบสอบถามที่ 1 ได้รับการประเมินคุณภาพเพื่อหาความเที่ยงตรงโดยวิธีค่าดัชนีความสอดคล้อง (Index of Item Objective Congruence; IOC) จากผู้เชี่ยวชาญจำนวน 3 ท่าน ซึ่งได้ค่า IOC เท่ากับ 0.83 สูงกว่าค่ามาตรฐาน 0.5 แสดงว่าแบบสอบถามมีความเที่ยงตรงและเหมาะสมสำหรับการสำรวจ จากนั้นนำแบบสอบถามไปทดสอบความน่าเชื่อถือ (Reliability Test) ด้วยการวิเคราะห์ค่า Cronbach's Alpha กับกลุ่มตัวอย่างจำลองจำนวน 30 ตัวอย่าง ซึ่งมีลักษณะเดียวกับกลุ่มตัวอย่างจริง พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.753 สูงกว่าค่ามาตรฐาน 0.7 แสดงว่าแบบสอบถามฉบับนี้มีความน่าเชื่อถือในการประเมิน

2.2.3 การแปลความหมายเพื่อกำหนดความรู้สึกที่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ของเล่นสำหรับผู้สูงอายุจากแบบสอบถามที่ 1 ได้ดำเนินการวิเคราะห์ความเที่ยงตรงโดยอ้างอิงหลักการวิเคราะห์ IOC ทั้งนี้ได้คัดเลือกคำแสดงความรู้สึกที่มีค่า IOC มากกว่า 0.5 เนื่องจากเป็นค่าที่แสดงถึงระดับความเที่ยงตรงและความน่าเชื่อถือที่ยอมรับได้ในการสื่อความรู้สึกของกลุ่มตัวอย่างต่อผลิตภัณฑ์ [6]

2.3 การกำหนดขอบเขตคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ ในขั้นตอนนี้เป็นการคัดเลือกคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่มีความสำคัญต่อความรู้สึกของผู้บริโภคในการออกแบบผลิตภัณฑ์ การกำหนดขอบเขตคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ประกอบด้วย

2.3.1 การรวบรวมคุณลักษณะผลิตภัณฑ์โดยพิจารณาจากผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติใกล้เคียง (Similar Products) จากหลายแหล่งข้อมูล เช่น สื่ออินเทอร์เน็ต ผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบและขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยได้มีการรวบรวมคุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลัก หมายถึง คุณสมบัติหรือลักษณะที่เป็นเอกลักษณ์และสำคัญที่สุดของผลิตภัณฑ์นั้น เช่น คุณภาพวัสดุที่ใช้ในการผลิต การออกแบบ คุณลักษณะการทำงาน เป็นต้น และรวบรวมคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย หมายถึง ลักษณะที่เฉพาะเจาะจงและเป็นลักษณะที่เล็กน้อยกว่าหรือเกี่ยวข้องกับคุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลัก

2.3.2 จัดทำแบบสอบถามที่ 2 ขั้นตอนนี้เป็นการนำคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการรวบรวมในขั้นตอนก่อนหน้านี้ไปทำการร่างแบบสอบถามที่ 2 ซึ่งกลุ่มผู้ประเมินเป็นกลุ่มผู้บริโภคเป้าหมาย โดยในการเก็บข้อมูลเลือกใช้ระดับความเชื่อมั่นที่ 90% เช่นเดียวกับแบบสอบถามที่ 1 ทำการลงพื้นที่เพื่อเก็บข้อมูลกลุ่มตัวอย่างโดยแบบสอบถามที่ 2 มีความน่าเชื่อถือของการวิเคราะห์ค่า Cronbach's Alpha ของแบบสอบถามอยู่ที่ 0.768 สูงกว่าค่ามาตรฐาน 0.7

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.014

แสดงว่า ข้อคำถามในแบบสอบถามที่ 2 มีความน่าเชื่อถือในการประเมิน

2.3.3 แปลความหมายจากแบบสอบถาม โดยแบบสอบถามที่ 2 ใช้การวิเคราะห์อัตราส่วน (Signal-to-Noise; S/N) ด้วยดยใช้วิธีการค่ายิ่งมากยิ่งดี (Larger-The-Better) [14] เพื่อจัดลำดับความสำคัญของคุณลักษณะย่อยของผลิตภัณฑ์ของเล่นสำหรับผู้สูงอายุ โดยคัดเลือกคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่มีค่ามากที่สุด ดังแสดงในสมการที่ 2 เมื่อ S/N คือ ผลการวิเคราะห์อัตราส่วน n คือ จำนวนกลุ่มตัวอย่าง y คือ ค่าที่วัดได้ของตัวแปรเป้าหมาย

$$\frac{S}{N} = -10\log\left(\sum\frac{1}{y^2}\right)/n \qquad (2)$$

2.4 การสังเคราะห์ นำข้อมูลจากผลการวิเคราะห์ของแบบสอบถามที่ 1 และ 2 เพื่อร่างแบบสอบถามที่ 3 ในการวิเคราะห์คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่สอดคล้องกับคำแสดงความรู้สึกของกลุ่มผู้บริโภคเป้าหมาย

2.4.1 จัดทำแบบสอบถามที่ 3 ซึ่งกลุ่มผู้ประเมินเป็นกลุ่มผู้บริโภคเป้าหมาย เก็บข้อมูลโดยเลือกใช้ระดับความเชื่อมั่นที่ 90% เช่นเดียวกับแบบสอบถามที่ 1 โดยใช้มาตราส่วนลิเคอร์ท (Likert Scale) ในการเก็บแบบสอบถามที่ 3 ซึ่งค่าการประเมินแบ่งออกเป็น 5 ระดับ ทำการลงพื้นที่เพื่อเก็บข้อมูลกลุ่มตัวอย่างโดยแบบสอบถามที่ 3 มีความน่าเชื่อถือของการวิเคราะห์ค่า Cronbach's Alpha ของแบบสอบถามที่ 0.968 สูงกว่าค่ามาตรฐาน 0.7 แสดงว่า ข้อคำถามในแบบสอบถามที่ 3 มีความน่าเชื่อถือในการประเมิน

2.4.2 แปลความหมายจากแบบสอบถาม โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) เพื่อหาคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่สอดคล้องกับคำแสดงความรู้สึกในแบบสอบถามที่ 1

2.5 การตรวจสอบความถูกต้องและการออกแบบผลิตภัณฑ์ต้องพิจารณาความสอดคล้องกับข้อกำหนดและผลลัพธ์ของคำแสดงความรู้สึกและคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ เริ่มต้นด้วยการนำต้นแบบที่ออกแบบมาตรวจสอบความสอดคล้องกับคำแสดงความรู้สึกและคุณลักษณะต่าง ๆ เช่น ขนาด รูปทรงและวัสดุ หากพบว่าผลิตภัณฑ์ไม่สามารถกระตุ้นอารมณ์หรือความรู้สึกที่ต้องการได้ จำเป็นต้องปรับปรุงคำแสดงความรู้สึกและคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ให้เหมาะสมกับกลุ่มผู้สูงอายุ เพื่อให้สามารถกระตุ้นอารมณ์หรือความรู้สึกที่ต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

2.6 ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ (3D Printing) โดยในการตั้งค่าตั้งอุณหภูมิหัวฉีด (Extruder Temperature) 200°C อุณหภูมิฐานพิมพ์ (Platform Temperature) 60°C ความหนาของแต่ละชั้น (Layer Height) 0.20 mm. ความเร็วฐานพิมพ์ (Base Print Speed) 50 mm/s และความเร็วของหัวฉีด (Travel Speed) 70 mm/s

2.7 จัดทำแบบสอบถามที่ 4 เพื่อสำรวจความพึงพอใจของผลิตภัณฑ์ของเล่นที่ช่วยในการป้องกันการเกิดโรคอัลไซเมอร์ในผู้สูงอายุโดยได้มีการนำของเล่นต้นแบบไปใช้ประกอบการเก็บความพึงพอใจ ซึ่งผู้ประเมินเป็นกลุ่มผู้บริโภคเป้าหมาย จากนั้นดำเนินการวิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.014

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

จากการจัดทำแบบสอบถามและรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับการออกแบบผลิตภัณฑ์ของเล่นสำหรับผู้สูงอายุจากวัสดุประกอบไม้พลาสติกด้วยแนวทางวิศวกรรมคันเซได้ผล ดังนี้

3.1 ผลการรวบรวมความต้องการเชิงอารมณ์ของกลุ่มผู้บริโภค (แบบสอบถามที่ 1)

นำผลการเก็บรวบรวมข้อมูลด้วยแบบสอบถามที่ 1 จากกลุ่มผู้บริโภคจำนวน 58 ท่าน มาวิเคราะห์หาค่าดัชนีความสอดคล้อง (IOC) เพื่อดำเนินการคัดเลือกคำแสดงความรู้สึก โดยกำหนดเกณฑ์การคัดเลือกคำแสดงความรู้สึกที่มีค่า IOC มากกว่า 0.5 เท่านั้นจึงจะผ่านเกณฑ์การคัดเลือก ดังนั้น ผลการวิเคราะห์ค่า IOC ของคำแสดงความรู้สึกที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์ของเล่นสำหรับผู้สูงอายุจำนวน 22 คำ ดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่า คำแสดงความรู้สึกที่มีค่า IOC มากกว่า 0.5 มีจำนวน 12 คำ และคำแสดงความรู้สึกที่มีค่า IOC น้อยกว่า 0.5 มีจำนวน 10 คำ

เนื่องจากค่า IOC มีคำแสดงความรู้สึกที่มากกว่า 0.5 จำนวนมาก จึงได้ดำเนินการใช้เทคนิคการระดมสมอง (Brainstorm) ร่วมกับผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบและการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ โดยอิงตามหลักการออกแบบที่เน้นการเลือกใช้คำที่มีความหมายใกล้เคียงหรือสอดคล้องกัน เพื่ออำนวยความสะดวกในการเก็บรวบรวมข้อมูลอย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ ผลการจัดเรียงคำใหม่สามารถแสดงดังตารางที่ 2 ดังนั้น คำแสดงความรู้สึกสำหรับแบบสอบถามที่ 3 มีทั้งหมด 7 คำ ประกอบด้วย คุณภาพ (Quality) มีลูกเล่น (Gimmicky) ความสวยงาม (Beautiful)

ตารางที่ 1 ผลการคำนวณค่าดัชนีความสอดคล้อง (IOC)

ประเภท	คำคันเซ	IOC
คุณภาพ	คุณภาพ	0.97
	ทนทาน	0.30
	พิถีพิถัน	0.10
รูปแบบ	น่าสนใจ	0.82
	มีสีสัน	0.78
	ความสบายตา	0.77
	ประทับใจ	0.75
	มีลูกเล่น	0.62
	สะดุดตา	0.45
	โดดเด่น	0.38
	กะทัดรัด	0.37
	สร้างสรรค์	0.35
	ความสวยงาม	0.33
	แปลกใหม่	0.12
	ดีไซน์เก๋	-0.32
	ทันสมัย	-0.33
คุณสมบัติ	ง่ายต่อการใช้งาน	1.00
	ปลอดภัย	1.00
	เพลิดเพลิน	0.95
	ไม่ซับซ้อน	0.95
	เหมาะสม	0.95
	สนุกสนาน	0.92

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.014

ความสบายตา (Visual Comfort) เพลิดเพลิน (Enjoy) ไม่ซับซ้อน (Uncomplicated) และปลอดภัย (Safe)

3.2 ผลการรวบรวมคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่สื่อถึงของเล่นสำหรับผู้สูงอายุ (แบบสอบถามที่ 2) นำผลการเก็บรวบรวมข้อมูลด้วยแบบสอบถามที่ 2 จากกลุ่มผู้บริโภคจำนวน 58 ท่านมาทำการวิเคราะห์

อัตราส่วน Signal-to-Noise (S/N Ratio) ดังสมการที่ 2 ข้างต้น S/N Ratio เป็นวิธีการทางสถิติเพื่อวัดประสิทธิภาพและจำแนกความสำคัญของข้อมูลในตารางที่ 3 ซึ่งเป็นข้อมูลองค์ประกอบคุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลักและคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย จากนั้นนำผลวิเคราะห์อัตราส่วน Signal-to-Noise มาจัดลำดับความสำคัญของคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย โดยใช้วิธีการค่ายิ่งมากยิ่งดี (Larger-the-better) ดังนั้น ผลการจัดลำดับความสำคัญที่มีค่ามากที่สุดในแต่ละคุณลักษณะผลิตภัณฑ์แสดงดังตารางที่ 4 พบว่าในการออกแบบควรให้ความสำคัญคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อยดังต่อไปนี้ ขนาดกลาง (15-30 cm.) (A1) ซึ่งหมายถึงขนาดภาพรวมเมื่อนำชิ้นส่วนของเล่นแต่ละชิ้นมาประกอบเข้าด้วยกัน มุมโค้งมน (B2)

พื้นผิวขรุขระ (C2) สีสันสดใส (D2) จำนวนผู้เล่น 1-2 คน (E1) การเล่นแบบคิดวิเคราะห์ (F3) ลวดลายเรียบง่าย (G1) น้ำหนักน้อยกว่า 250 กรัม (H1) และ การส่งเสริมด้านการเคลื่อนไหวร่างกาย (I3)

3.3 ผลวิเคราะห์คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่สอดคล้องกับคำแสดงความรู้สึก (แบบสอบถามที่ 3)

นำผลการเก็บรวบรวมข้อมูลด้วยแบบสอบถามที่ 3 จากผู้บริโภคจำนวน 58 ท่าน มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) หาคุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลักที่สอดคล้องกับคำแสดงความรู้สึกในแบบสอบถามที่ 1

ตารางที่ 2 การจัดเรียงถ้อยคำคันเซ (Kansei Words)

ประเภท	คำคันเซ (IOC>0.5)	การจัดเรียงถ้อยคำใหม่
คุณภาพ	คุณภาพ	คุณภาพ
รูปแบบ	มีลูกเล่น	มีลูกเล่น
	น่าสนใจ ประทับใจ มีสีสัน	ความสวยงาม
	ความสบายตา	ความสบายตา
คุณสมบัติ	เพลิดเพลิน สนุกสนาน	เพลิดเพลิน
	เหมาะสม ไม่ซับซ้อน ง่ายต่อการใช้งาน	ไม่ซับซ้อน
	ปลอดภัย	ปลอดภัย

เพื่อวิเคราะห์หาคุณลักษณะหลักที่มีความสำคัญต่อความรู้สึกของผู้บริโภค ทำการเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างคุณลักษณะหลักแต่ละตัวกับคำแสดงความรู้สึกทั้ง 7 คำ (คุณภาพ มีลูกเล่น ความสวยงาม ความสบายตา เพลิดเพลิน ไม่ซับซ้อน และปลอดภัย) ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ผ่านโปรแกรม SPSS ดังตารางที่ 5 จะเห็นได้ว่า คุณลักษณะหลักที่มีความสำคัญต่อผู้บริโภคสามารถเรียงตามลำดับได้ดังนี้ พื้นผิว (15.09%) การเสริมทักษะ (15.03%) ลักษณะการเล่น (14.94%) น้ำหนัก (13.73%) จำนวนผู้เล่น (12.68%) ขนาดของชิ้นส่วน (10.94%) รูปทรงของเล่น (8.41%) โทนสี (8.11%) และลวดลาย (1.07%) โดยคุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลักที่มีค่าอัตราส่วนการมีส่วนร่วม (%Contribution) สูงจะเป็นคุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลักที่มีความสำคัญต่อความรู้สึกของผู้บริโภคมากที่สุด

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.014

ตารางที่ 3 องค์ประกอบของคุณลักษณะผลิตภัณฑ์

องค์ประกอบ		คุณลักษณะผลิตภัณฑ์ย่อย	
A	ขนาด	A1	ขนาดกลาง (15 - 30 cm.)[1/]
		A2	ขนาดใหญ่ (>30 cm.)
B	รูปทรง	B1	ทรงกลม
		B2	มุมโค้งมน[1/]
C	พื้นผิว	C1	พื้นผิวเรียบ
		C2	พื้นผิวขรุขระ[1/]
D	โทนสี	D1	สีไม้ธรรมชาติ
		D2	สีสันสดใส[1/]
E	จำนวนผู้เล่น	E1	1-2คน[1/]
		E2	3-5 คน
		E3	มากกว่า 5 คน
F	ลักษณะการเล่น	F1	คิดเลข
		F2	ทักษะการใช้ภาษา
		F3	การคิดวิเคราะห์[1/]
		F4	การแก้ปัญหา
G	ลวดลาย	G1	ลวดลายเรียบง่าย[1/]
		G2	ลวดลายจังหวัดสงขลา
H	น้ำหนัก	H1	น้อยกว่า 250 กรัม[1/]
		H2	มากกว่า 250 กรัม
I	การเสริมทักษะ	I1	การคิดและการแก้ปัญหา
		I2	กระตุ้นการสังเกต
		I3	การเคลื่อนไหวร่างกาย[1/]
		I4	กระตุ้นบทสนทนา

[1/]คุณลักษณะผลิตภัณฑ์สำหรับเป็นแนวทางในการออกแบบ

ตารางที่ 4 ผลวิเคราะห์อัตราส่วน Signal-to-Noise

องค์ประกอบ	ระดับ 1	2	3	4	Differences
A	**9.19**	4.10			5.09
B	4.68	**9.55**			4.87
C	7.13	**7.33**			0.20
D	6.86	**9.94**			3.08
E	**8.27**	6.70	1.73		6.54
F	9.77	4.94	**10.47**	9.46	5.53
G	**9.03**	3.91			5.12
H	**10.61**	3.95			6.66
I	10.75	10.75	**10.99**	10.39	0.60

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่า ผลิตภัณฑ์ของเล่นสำหรับผู้สูงอายุสามารถนำคุณลักษณะผลิตภัณฑ์หลักที่มีความสำคัญต่อผู้บริโภคดังต่อไปนี้ พื้นผิวขรุขระ (C2) การเสริมทักษะเพื่อกระตุ้นการเคลื่อนไหวร่างกาย (I3) การเล่นคิดวิเคราะห์ (F3) น้ำหนักชิ้นส่วนน้อยกว่า 250 กรัม (H1) จำนวนผู้เล่น 1-2 คน (E1) ขนาดกลาง (A1) มุมโค้งมน (B2) สีสันสดใส (D2) และลวดลายเรียบง่าย (G1) ตามลำดับ มาออกแบบผลิตภัณฑ์ได้อย่างเหมาะสม เนื่องจากคุณลักษณะที่กล่าวมาข้างต้นล้วนมีผลต่อความรู้สึกของกลุ่มเป้าหมายในการเลือกซื้อผลิตภัณฑ์ของเล่นที่ช่วยป้องกันการเกิดโรคอัลไซเมอร์ในผู้สูงอายุ

3.4 การออกแบบผลิตภัณฑ์

3.4.1 ข้อกำหนดในการออกแบบผลิตภัณฑ์

จากการวิเคราะห์คำแสดงความรู้สึกและข้อกำหนดคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ได้รวบรวมจากกลุ่มผู้บริโภคเป้าหมาย เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่ออกแบบ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.014

สามารถตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภคมากที่สุด จึงออกแบบผลิตภัณฑ์ตามคุณลักษณะโดยเรียงลำดับตามความสำคัญมีรายละเอียด ดังนี้ (1) พื้นผิว พื้นผิวของของเล่นทำให้มีความขรุขระ เพื่อช่วยให้ผู้สูงอายุจับของเล่นได้ถนัดมือโดยไม่ลื่นไหลไปมา (2) การเสริมทักษะ ผลิตภัณฑ์จะมีการเสริมทักษะในด้านการเคลื่อนไหวของร่างกาย โดยใช้มือในการหยิบจับของเล่น (3) ลักษณะการเล่น ออกแบบผลิตภัณฑ์ที่ใช้ความคิดในการเล่น เนื่องจากการใช้ความคิดถือเป็นวิธีการในการป้องกันโรคอัลไซเมอร์ (4) น้ำหนักของของเล่น เนื่องจากผู้สูงอายุมีแรงในการหยิบจับน้อย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องออกแบบให้ผลิตภัณฑ์มีน้ำหนักเบาเพื่อให้ง่ายต่อการหยิบจับและไม่เป็นอันตรายต่อผู้เล่น (5) จำนวนผู้เล่น ออกแบบของเล่นให้มีผู้เล่นจำนวน 1-2 คน หรือมากกว่านั้น เพื่อสร้างเสริมการสื่อสารในผู้สูงอายุ และยังช่วยให้ผู้สูงอายุไม่ลืมวิธีในการพูด (6) ขนาดของของเล่น ออกแบบให้ของเล่นมีขนาดที่พอดีกับผู้สูงอายุ โดยขนาดไม่ใหญ่และเล็กจนเกินไป (7) รูปทรงของของเล่น ออกแบบให้มุมของเล่นมีความโค้งมน เพื่อป้องกันอันตรายในการเล่นต่อผู้เล่น (8) โทนสี ออกแบบให้มีสีสันสดใส เพื่อดึงดูดผู้เล่นให้มีความสนใจและอยากเล่นของเล่น และ(9) ลวดลาย ออกแบบให้มีความเรียบง่าย เพื่อความสบายตาขณะเล่น

3.4.2 ผลการเขียนแบบผลิตภัณฑ์

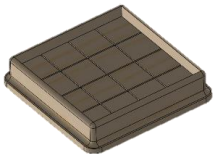
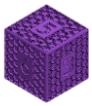
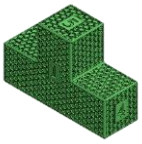
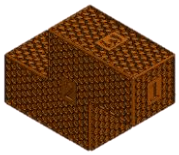
จากการสรุปข้อกำหนดการออกแบบผลิตภัณฑ์ การสังเกต และการสอบถามผู้สูงอายุพบว่าส่วนใหญ่มักนิยมเล่นเกมตัวต่อในโทรศัพท์มือถือ ดังนั้นจึงนำไปสู่การออกแบบเกมตัวต่อที่มีลักษณะจับถือได้ด้วยมือเพื่อเป็นการฝึกการเคลื่อนไหวและการคิดวิเคราะห์ โดยมีชิ้นส่วนตัวต่อ 6 รูปแบบ แต่ละด้านของชิ้นส่วนประกอบด้วยตัวเลข 1 ถึง 6 วิธีการเล่นคือทอยลูกเต๋า 2 ลูกเพื่อหารูปแบบของชิ้นส่วน และหาด้านในการวางโดยให้ตัวเลขหงายขึ้น จากนั้นวางชิ้นส่วนต่อขึ้นไปเรื่อย ๆ บนฐานที่มีช่องขนาด 4x4 โดยทำการเขียนแบบ 3 มิติด้วยโปรแกรม SolidWorks ซึ่งมีรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

องค์ประกอบ	ผลรวมกำลังสอง (Sum of Squares)	องศาอิสระ (df)	ผลรวมกำลังสองเฉลี่ย (Mean of Square)	%Contribution	อันดับ (Rank)
A ขนาด	21.42	6	3.57	10.94	6
B รูปทรง	16.47	6	2.75	8.41	7
C พื้นผิว	29.56	6	4.93	15.09	1
D โทนสี	15.89	6	2.65	8.11	8
E จำนวนผู้เล่น	24.83	6	4.14	12.68	5
F ลักษณะการเล่น	29.27	6	4.88	14.94	3
G ลวดลาย	2.09	6	0.35	1.07	9
H น้ำหนัก	26.90	6	4.48	13.73	4
I การเสริมทักษะ	29.44	6	4.91	15.03	2
Total	**195.87**			**100**	

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.014

ตารางที่ 6 รายละเอียดส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์

		
size : 14.5x14.5x3 ซม. weight : 144.2 กรัม	size : 2x2x2 ซม. weight : 6.9 กรัม	size : 2x2x2 ซม. weight : 6.8 กรัม
		
size : 2.5x2.5x2.5 ซม. weight : 6.2 กรัม	size: 5x5x5 ซม. weight ก : 37.5 กรัม	size : 2.5x7.5x5 ซม. weight : 21.1 กรัม
		
size : 2.5x2.5x7.5 ซม. weight : 16 กรัม	size : 2.5x5x7.5 ซม. weight : 21.2 กรัม	size : 2.5x7.5x5 ซม. weight : 21.2 กรัม

3.4.3 ผลการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์

เมื่อได้แบบผลิตภัณฑ์จากการเขียนแบบผ่านโปรแกรม SolidWorks จากนั้นทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้วัสดุประกอบไม้พลาสติกที่ได้จากการผสมผงไม้ยางพารากับเม็ดพลาสติกในการขึ้นรูป แสดงดังรูปที่ 2 เนื่องด้วยข้อกำหนดของคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ต้องออกแบบให้มีสีสันสดใส แต่วัสดุประกอบไม้พลาสติกในปัจจุบันยังไม่มีการทำให้วัสดุมีสี จึงทำการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ด้วยเส้นพลาสติกชีวภาพ (Polylactic Acid; PLA) ที่มีความหลากหลายของสี เพื่อเป็นตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่มีสีตามข้อกำหนด แสดงดังรูปที่ 3 อีกทั้งพลาสติกชีวภาพยังมีความใสและมีความเงาจึงเหมาะสำหรับงานแบบจำลอง (Model) และมีความแข็งแรง ใช้งานง่ายขึ้นรูปง่ายและเย็นตัวเร็ว

3.5 ผลการประเมินความพึงพอใจของกลุ่มตัวอย่างที่มีต่อผลิตภัณฑ์ของเล่นสำหรับผู้สูงอายุ (แบบสอบถามที่ 4)

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.014

หลังจากได้ทำการออกแบบผลิตภัณฑ์ของเล่นที่ช่วยในการป้องกันการเกิดโรคอัลไซเมอร์ในผู้สูงอายุ ผู้วิจัยได้จัดทำแบบสอบถามจำนวน 20 ข้อคำถาม แบ่งออกเป็น 3 หมวดหมู่ ทำการสอบถามผู้บริโภคจำนวน 58 ท่าน เพื่อให้ผู้บริโภคประเมินความพึงพอใจที่มีต่อผลิตภัณฑ์ โดยทำการวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยของแต่ละข้อคำถามและทำการหาเปอร์เซ็นต์ความพึงพอใจของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์ ซึ่งบทความนี้ตั้งเป้าหมายระดับความพึงพอใจที่ 70% จากผลการวิเคราะห์ความพึงพอใจของผู้บริโภคเมื่อได้ทดลองใช้ผลิตภัณฑ์อยู่ที่ 97.6% แสดงดังตารางที่ 7 ผลจากการประเมินความพึงพอใจของผู้บริโภคกลุ่มเป้าหมายมีความพึงพอใจในด้านความรู้สึกเกี่ยวกับคุณภาพ ความสวยงาม ความสบายตา ความเพลิดเพลิน ความปลอดภัย ด้านคุณลักษณะผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับน้ำหนักและลักษณะการเล่นโดยการใช้สมาธิเป็นลักษณะที่มีความสำคัญมากที่สุดในการป้องกันการเกิดโรคอัลไซเมอร์ ซึ่งผลความพึงพอใจของผู้บริโภคมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Rawangwong *et. al.* [15] กล่าวคือ การออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ พบว่าประเด็นด้านความสวยงามของผลิตภัณฑ์จะมีผลต่อความพึงพอใจของผู้บริโภคเป็นอันดับแรก

รูปที่ 2 ต้นแบบผลิตภัณฑ์ตัวต่อสำหรับผู้สูงอายุโดยวัสดุประกอบไม้พลาสติก (WPCs)

รูปที่ 3 ต้นแบบผลิตภัณฑ์ตัวต่อสำหรับผู้สูงอายุโดยเส้นพลาสติกชีวภาพ (PLA)

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.014

ตารางที่ 7 วิเคราะห์ความพึงพอใจของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์

ความพึงพอใจของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์			Average	S.D.
ด้านคำแสดงความรู้สึก	1	คุณภาพ (Quality)[2/]	5.00	0.00
	2	มีลูกเล่น (Gimmicky)	4.47	0.75
	3	ความสวยงาม (Beautiful)[2/]	5.00	0.00
	4	ความสบายตา (Visual Comfort)[2/]	5.00	0.00
	5	เพลิดเพลิน (Enjoy)[2/]	5.00	0.00
	6	ไม่ซับซ้อน (Uncomplicated)	4.97	0.18
	7	ปลอดภัย (Safe)[2/]	5.00	0.00
ด้านคุณลักษณะผลิตภัณฑ์	1	ของเล่นมีขนาดกลาง (A1)	4.95	0.22
	2	รูปทรงของของเล่นมีมุมโค้งมน (B2)	4.52	0.54
	3	พื้นผิวขรุขระ (C2)	4.70	0.50
	4	โทนสีสันสดใส (D2)	4.90	0.30
	5	จำนวนผู้เล่น 1-2 คน (E1)	4.87	0.34
	6	ลักษณะการเล่นใช้การคิดวิเคราะห์ (F3)	4.97	0.18
	7	ลวดลายเรียบง่าย (G1)	4.92	0.28
	8	น้ำหนักชิ้นส่วนน้อยกว่า 250 กรัม (H1)[2/]	5.00	0.00
	9	การเสริมทักษะเพื่อกระตุ้นการเคลื่อนไหวร่างกาย (I3)	4.63	0.64
ด้านการป้องกันโรคอัลไซเมอร์	1	ลักษณะการเล่นเกี่ยวข้องกับการใช้ความคิด	4.98	0.13
	2	ลักษณะการเล่นเกี่ยวข้องกับการใช้สมาธิ[2/]	5.00	0.00
	3	ลักษณะการเล่นเกี่ยวข้องกับการเคลื่อนไหวร่างกาย	4.65	0.61
	4	สีของเล่นดึงดูดความสนใจในการเล่น	4.98	0.13
เปอร์เซ็นต์ (%) ความพึงพอใจ			97.6%	

[2/]ความพึงพอใจที่สามารถตอบสนองความต้องการทางอารมณ์ของผู้บริโภคได้ดีที่สุด

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.014

5. สรุปผล

จากการเก็บรวบรวมข้อมูลของผู้สูงอายุที่มีอายุตั้งแต่ 60 ปีขึ้นไป ภายในจังหวัดสงขลาพบว่า คำแสดงความรู้สึกเกี่ยวกับของเล่นสำหรับผู้สูงอายุที่มีผลต่อผู้บริโภค ประกอบด้วย คุณภาพ มีลูกเล่น ความสวยงาม ความสบายตา เพลิดเพลิน ไม่ซับซ้อนและปลอดภัย ในส่วนของคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่สามารถอธิบายลักษณะของผลิตภัณฑ์ของเล่นที่ช่วยป้องกันการเกิดโรคอัลไซเมอร์ในผู้สูงอายุประกอบด้วยคุณลักษณะหลักดังนี้ ขนาดของเล่น รูปทรงของของเล่น พื้นผิว โทนสี จำนวนผู้เล่น ลักษณะการเล่น ลวดลาย น้ำหนัก และการเสริมทักษะ จากนั้นทำการวิเคราะห์อัตราส่วน Signal-to-Noise เพื่อหาคุณลักษณะย่อยสำหรับออกแบบผลิตภัณฑ์ของเล่น ซึ่งประกอบด้วย ขนาดกลาง (15-30 เซนติเมตร) มีมุมโค้งมน พื้นผิวขรุขระ สีสันสดใส จำนวนผู้เล่น 1-2 คน การเล่นคิดวิเคราะห์ ลวดลายเรียบง่าย น้ำหนักของชิ้นส่วนน้อยกว่า 250 กรัม มีการเสริมทักษะในด้านการกระตุ้นการเคลื่อนไหวของร่างกาย เมื่อได้ข้อกำหนดในการออกแบบผลิตภัณฑ์ในส่วนของคำแสดงความรู้สึกและคุณลักษณะผลิตภัณฑ์ จึงได้ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อหาคุณลักษณะหลักที่มีความสำคัญต่ออารมณ์ความรู้สึกของผู้บริโภค โดยในการออกแบบของเล่นที่ช่วยในการป้องกันการเกิดโรคอัลไซเมอร์ควรให้ความสำคัญต่อ พื้นผิวขรุขระ (C2) การเสริมทักษะการกระตุ้นการเคลื่อนไหวของร่างกาย (I3) การเล่นคิดวิเคราะห์ (F_3) น้ำหนักเบา (H1) จำนวนผู้เล่น 1-2 คน (E_1) ของเล่นมีขนาดกลาง (A1) รูปทรงของของเล่นมีมุมโค้งมน (B2) โทนสีสันสดใส (D2) และลวดลายเรียบง่าย (G1) ตามลำดับ นำไปสู่การออกแบบผลิตภัณฑ์ตัวต่อที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ (3D Printing) โดยใช้วัสดุประกอบไม้พลาสติกและพลาสติกชีวภาพ (PLA) จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ของเล่นที่ได้ไปลงพื้นที่เพื่อให้ผู้สูงอายุทดลองเล่นและประเมินความพึงพอใจที่มีต่อผลิตภัณฑ์ จากการวิเคราะห์ความพึงพอใจของผู้บริโภคจำนวน 60 ท่าน ค่าเปอร์เซ็นต์ความพึงพอใจต่อผลิตภัณฑ์อยู่ที่ 97.6% ซึ่งวิจัยเรื่องนี้ได้ตั้งเป้าหมายความพึงพอใจไว้ที่ 70% ดังนั้นจะเห็นวิจัยเรื่องนี้บรรลุตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้

6. เอกสารอ้างอิง

[1] S. Kumsachat, Health problems and health care among Thai elderly: Policy recommendations, Journal of Health Science, 2017, 26(6), 1156-1164. (in Thai)

[2] P. Komjakraphan, Caring for community-dwelling older adults having dementia: A concept of person-centred care, Journal of Thailand Nursing and Midwifery Council, 2019, 34(4), 5-18. (in Thai)

[3] C. Samieri, H.N. Yassine, D. Melo van Lent, S. Lefèvre-Arbogast, O. van de Rest, G.L. Bowman and N. Scarmeas, Personalized nutrition for dementia prevention, Alzheimer's and Dementia, 2022, 18(7), 1424-1437.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.014

[4] M. Montero-Odasso, G.Y. Zou, N. Kamkar, H.H. Feldman, S. Belleville, H. Chertkow, H.B. Nygaard, S. Son and M. Speechley, Multidomain trials to prevent dementia: addressing methodological challenges, Alzheimer's Research and Therapy, 2022, 14, 94.

[5] F.E. Pozzi, I. Appollonio, C. Ferrarese and L. Tremolizzo, Can traditional board games prevent or slow down cognitive impairment? A systematic review and meta-analysis, Journal of Alzheimer's Disease, 2023, 95(3) 829-845.

[6] S. Rawangwong, C. Homkhiew, S. Chantaramanee and P. Chumsri, Application of Kansei engineering techniques in the design and development of TV table furniture products from oil palm trunks, Ladkrabang Engineering Journal, 2022, 39(2), 13-26. (in Thai)

[7] Y. Jing, J. Ting and X. Jianbo, A study on interaction design of elderly mobile terminals based on Kansei engineering, International Conference on Robots and Intelligent System, 2016, 59-62.

[8] T. Xiong, Q. Shu, X. Li, Y. Fan and J. Qiu, Integrating Kansei engineering, analytic hierarchy process, and quality function development in elderly-oriented seating design, BioResources, 2024, 20, 465-481.

[9] M. Wang, N. Shaari, S.Z. Abidin and Y. He, Elderly clothing upgrading in product-service system design using extended Kansei engineering methodology, International Journal of Clothing Science and Technology, 2024, 36, 687-707.

[10] X. Li and H. Li, Age-appropriate design of domestic intelligent medical products: An example of smart blood glucose detector for the elderly with AHP-QFD Joint KE, Heliyon, 2024, 10(5), e27387.

[11] T. Boonyaso, T. Ratanawilai, K. Thongkaew and C. Teelakul, Classification of children's toy products in emotional design using an integration of Kano model and Kansei engineering, Songklanakarin Journal of Science and Technology, 2024, 46(2), 148-158.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2025.04.014

[12] S. Rawangwong, A.T. Kamnerdwam, C. Homkhiew, C. Laosat, C. Srivabut and T. Boonyaso, Application of quality function deployment techniques with Kansei engineering for the design and development of bags in the lygodium, RMUTL Engineering Journal, 2024, (9(1), 52-64.

[13] R.V. Lonescu, V.M. Antohi, M.L. Zlati, M.T. Iconomescu, A. Nechifor and S. Stanciu, Consumption of nutritive supplements during physical activities in Romania: A qualitative study, Food Science and Nutrition, 2022, 10, 3942-3954.

[14] T. Vichiraprasert and T. Kiatcharoenpol, A Study of experimental design with Shainin and Taguchi methods: A case study of aluminum riveting process, Naresuan University Engineering Journal, 2016, 11(1), 7-14.

[15] S. Rawangwong, C. Homkhiew, T. Pirom, J. Rodjananugoon and C. Laosat, Application of quality function development technique in combination with Kansei engineering in the design and development of ceramic tea set products, The Journal of Industrial Technology, 2022, 18(3), 29-46. (in Thai)

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 หน้ากระดาษ และภาษาอังกฤษ 1 หน้ากระดาษ

เนื้อเรื่องของบทความวิจัยประกอบด้วย 5 - 6 ส่วน คือ (1) บทนำ (2) วิธีการดำเนินงานวิจัย/ทดลอง (3) ผลการวิจัย/ทดลองและการอภิปรายผล (4) บทสรุป (5) กิตติกรรมประกาศ (ถ้ามี) และ (6) เอกสารอ้างอิง

สำหรับเนื้อเรื่องของบทความวิชาการให้เตรียมเป็นบทความที่เรียบเรียงเนื้อหาจากหนังสือ งานวิจัย ประสบการณ์ หรือเรื่องแปล เพื่อเผยแพร่ความรู้ในสาขาต่างๆ หรือแสดงข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์มีคุณค่าทางวิชาการ โดยองค์ประกอบของบทความวิชาการอาจคล้ายคลึงกับบทความวิจัย แต่ไม่มีเนื้อหาของการดำเนินงานวิจัยและผลการวิจัย ซึ่งผู้เขียนสามารถกำหนดได้เองตามความเหมาะสมของบทความวิชาการ

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

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. .....

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 .....

The Journal of

Industrial Technology

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ ๒๑ ฉบับที่ ๑ ประจำปี ๒๕๖๘

บทความ (Articles)

- Assessing Waste Generation Rate from Activities in High-Rise Building Construction for Achieving Sustainable Construction Goals, The Journal of Industrial Technology, 2025, 21(1), 1-14.
- The Design of Pressure Control System using PD Controller for Light Duty Electric Vehicle, The Journal of Industrial Technology, 2025, 21(1), 15-26.
- Mechanism of Reducing Local Flow Velocity Using Obstacle Trenches in Microfluidics, The Journal of Industrial Technology, 2025, 21(1), 27-39.
- Effect of Crystalline Waterproofing Material on Porosity and Water Absorption in Mortar, The Journal of Industrial Technology, 2025, 21(1), 40-56.
- Development of Cement Board from Concrete Mixed with Hemp Core as Fine Aggregate Substitute, The Journal of Industrial Technology, 2025, 21(1), 57-69.
- Optimum Design of Reinforced Concrete Cantilever Stair Using Bisection Algorithm, The Journal of Industrial Technology, 2025, 21(1), 70-87.
- Pyrolysis of Plastic Waste from Landfills Using Induction-Heating Reactor, The Journal of Industrial Technology, 2025, 21(1), 88-102.
- Floor Mat produced from Tire Crumb Rubber and Polystyrene Wastes, The Journal of Industrial Technology, 2025, 21(1), 103-117.
- Properties of Glass Fiber Reinforced Concrete Using Rubber Latex as an Ingredient, The Journal of Industrial Technology, 2025, 21(1), 118-134.
- Impact of Cu-modified Activated Carbon on Natural Rubber Sheet's Mechanical Properties, The Journal of Industrial Technology, 2025, 21(1), 135-145.
- Characteristics of Biochar Production Derived from Bamboo in a Drum Pyrolyzer, The Journal of Industrial Technology, 2025, 21(1), 146-160.
- Study Precipitation of Semi-Solid Cast 2024 Aluminium Alloy for Friction Stir Welding, The Journal of Industrial Technology, 2025, 21(1), 161-175.
- Anomaly Detected System Development for Hybrid Power Generation Experimental Set with Solar and Wind Energy, The Journal of Industrial Technology, 2025, 21(1), 176-190.
- Product Design of Elderly Toy from Wood Plastic Composites with Kansei Engineering, The Journal of Industrial Technology, 2025, 21(1), 191-207.

จัดพิมพ์โดย: หน่วยวิจัยและส่งเสริมวิชาการ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
1518 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
โทร. +66 2 555-2000 ต่อ 6615 Email JIT.journal@gmail.com