

<http://j.cit/kmutnb.ac.th/>

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



DRIVEN BY



Indexed in
TCI



The Journal of Industrial Technology

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ ๑๖ ฉบับที่ ๓ ประจำปี ๒๕๖๓

VOLUME 16 | ISSUE 3 | 2020 | Focused on engineering and industrial technology

Published by College of Industrial Technology (CIT), KMUTNB

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ ๑๖ ฉบับที่ ๓ ประจำปี ๒๕๖๓

กองบรรณาธิการวารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

ที่ปรึกษา

ศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ เข้ายงจีน
รองศาสตราจารย์ ดร.สมิตร ส่งพิริยะกิจ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

บรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรรถพล แก้ววิลัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

รองบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญลือ สวัสดิ์มงคล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

กองบรรณาธิการ

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

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

กองบรรณาธิการนานาชาติ

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

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

หัวหน้าฝ่ายจัดการ

รองศาสตราจารย์ ดร.กัมปนาท เทียนน้อย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ฝ่ายจัดการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐศักดิ์ เตียวงศ์สมบัติ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปานทิพย์ บุญส่ง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ผู้จัดการวารสาร

นางสาวชลดา เชื้อประดิษฐ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

Editorial Board of The Journal of Industrial Technology

Advisory Board

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

Editor-in-Chief

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

Associate Editor

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

Editorial Board Members

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

International Editors

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

Head of Administrative Management

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

Administrative Management

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

Journal Manager

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

วัตถุประสงค์

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

ทั้งนี้ บทความจะผ่านขั้นตอนการประเมินเบื้องต้นถึงคุณภาพและขอบเขตของเนื้อหา ความถูกต้องของรูปแบบการเตรียมบทความ ความซ้ำซ้อน และการคัดลอกวรรณกรรม (Duplication and Plagiarism) โดยกองบรรณาธิการวารสารฯ จากนั้น บทความจะได้รับการประเมินคุณภาพทางวิชาการโดยผู้ทรงคุณวุฒิทางสาขาที่เกี่ยวข้องไม่น้อยกว่า 2 คน (Double-Blinded Peer Review) ซึ่งทั้งผู้นิพนธ์ (Author) และผู้ประเมิน (Reviewer) จะไม่ทราบข้อมูลรายชื่อของกันและกัน โดยบทความที่ผ่านการปรับปรุงตามผลการประเมินจะได้รับพิจารณาอนุมัติให้ตีพิมพ์บทความ ขั้นตอนสุดท้าย กองบรรณาธิการจะดำเนินการตรวจสอบบทความและพิสูจน์อักษรก่อนที่จะเผยแพร่บทความแบบออนไลน์ และจัดพิมพ์บทความทั้งหมดรวมเล่มเพื่อดำเนินการเผยแพร่ต่อไป

อนึ่ง ผลงานวิจัยและผลงานทางวิชาการที่ปรากฏเผยแพร่ในวารสารฯ เป็นความคิดเห็นอิสระของผู้แต่ง โดยผู้แต่งเป็นผู้รับผิดชอบต่อผลทางกฎหมายใด ๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นจากบทความเผยแพร่นั้น ซึ่งกองบรรณาธิการและคณะผู้จัดทำวารสารฯ ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป

กำหนดออกวารสาร

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

ผู้จัดพิมพ์

หน่วยวิจัยและส่งเสริมวิชาการ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ชั้น 3 อาคาร 63 เลขที่ 1518 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800 โทร. 02-555-2000 ต่อ 6615, Email: JIT.journal@gmail.com

Objectives

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

For publication, the submitted articles will be reviewed through a preliminary assessment process for the quality and scope of the content, duplication, and plagiarism by the editorial board and then evaluated for an academic quality by the double-blinded peer review from the experts in related fields. The authors and reviewers will not know each other's contact information. The high quality-reviewed manuscript will be considered to be accepted for publication. For the last step, the editorial board will verify and proofread the articles before online publishing and printing out all in the journal for further publication.

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

Publishing Schedule

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

Publisher

Research and Academic Supports Division College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Building 63, 3rd Floor, 1518, Pracharat 1 Road, Wongsawang, Bangsue, Bangkok, Thailand, 10800, Tel. +66 2 555-2000 ext. 6615, Email: JIT.journal@gmail.com

บทบรรณาธิการ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (ISSN Print: 1686-9869) ปีที่ 16 ฉบับที่ 3 ทางกองบรรณาธิการมีความยินดีที่จะเรียนให้ทุกท่านได้ทราบว่าวารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมได้รับการประเมินคุณภาพวารสารในด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (Thai Citation Index: TCI) ให้อยู่ในฐานข้อมูล TCI กลุ่มที่ 2 ในปี พ.ศ. 2563 – 2564

การดำเนินงานของวารสารฯ ฉบับนี้ ทางกองบรรณาธิการและคณะผู้จัดทำวารสารฯ ได้เพิ่มรูปแบบการเผยแพร่แบบออนไลน์ โดยทางวารสารฯ ได้รับอนุมัติหมายเลข ISSN Online: 2697-5548 ชื่อวารสาร The Journal of Industrial Technology เพื่อใช้สำหรับเผยแพร่บทความในรูปแบบออนไลน์ผ่านทางเว็บไซต์ ซึ่งจะทำให้วารสารฯ สามารถเผยแพร่บทความได้อย่างรวดเร็วมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ ทางวารสารฯ ได้ดำเนินการขอเลขรหัสทรัพยากรสารสนเทศดิจิทัลหรือดีโอไอ (Digital Object Identifier: DOI) ผ่านระบบ CrossRef และ Digital Object Identifier System ซึ่งจะช่วยให้สามารถสืบค้นข้อมูลบทความและผู้พิมพ์ด้วยระบบออนไลน์ได้ง่ายยิ่งขึ้น

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

ปัจจัยหลายประการที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อคุณภาพวารสารคือคุณภาพของบทความที่มีคุณค่าทางวิชาการเป็นที่ยอมรับ กระบวนการคัดกรองและการตรวจสอบที่มีมาตรฐาน โดยผู้ทรงคุณวุฒิเฉพาะทางข้อเสนอแนะที่ทรงคุณค่า รวมทั้ง การจัดการที่มีประสิทธิภาพเพื่อดำเนินการจัดพิมพ์และการเผยแพร่บทความให้เป็นไปตามระยะเวลาที่กำหนด ส่งผลให้วารสารฯ มีความน่าเชื่อถือและผ่านการรับรองของ TCI

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

บรรณาธิการ



สารบัญ

	หน้า
กองบรรณาธิการวารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (Editorial Board of The Journal of Industrial Technology)	A
วัตถุประสงค์ (Objectives)	C
บทบรรณาธิการ	E
บทความวิจัย	
อิทธิพลของเถ้านหินขนาดเต็มและบดละเอียดต่อกำลังอัดความพรุนและ การต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต Influence of Original and Ground Fly Ash on Compressive Strength, Porosity and Chloride Resistance of Concrete ชน ชำนาญกิจ สำเรง รักช้อน และ ปริญา จินดาประเสริฐ	1
การศึกษาศักยภาพของชีวมวลแห่น <i>Lemna minor</i> L. ในการผลิตพลังงานเชื้อเพลิงชีวภาพ A Potentially Study of Duckweed <i>Lemna minor</i> L. Biomass in Biofuel Production ประดินันท์ เอี่ยมสะอาด	16
การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร The Efficiency Comparison of Fuel Briquettes from Agricultural Wastes ชนิกานต์ ขำประไพ ณัชชา บุญถนอม ธัญชนก โรจนานนท์ และ จารุวรรณ วงศ์ทะเนตร	28
แนวทางการบริหารความเสี่ยงโครงการติดตั้งเฟอร์นิเจอร์สำเร็จรูปแบบประกอบ Guidelines for Risk Management of Knock Down Furniture Installation Project ภคินันท์ วิวัฒน์ภิญโญ และ กนกพร ศรีปฐมสวัสดิ์	39
การประยุกต์ใช้แผ่นทิวบ์เซตติลเลอร์ร่วมกับพอลิเมอร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการตกตะกอนในน้ำเสีย อุตสาหกรรมน้ำผลไม้ Tube Settler Application with Polymer for Sedimentation Efficiency in Beverage Industry Wastewater วัฒนา หงษ์ ศศิธร หาสิน และ วันัสพรรัตน์ สวัสดิ์	55



สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทความวิจัย (ต่อ)	
การพัฒนาจีโอโพลิเมอร์ความแข็งแรงสูงด้วยเถ้าชานอ้อยว่องไวสูง Development of High-Strength Geopolymers by High-Reactive Bagasse Ash กมลณ กิตติสยาม ธรรมรส บัณฑิตทองสุข อาศิรา ศรีรักษา ดวงฤดี ฉายสุวรรณ และ ชญานี ทิพย์เสมอ	66
การลดรูพรุนในเงินสีชมพูที่หล่อด้วยวิธีการหล่อแบบประณีต: กรณีศึกษาของบริษัทผลิตเครื่องประดับแห่งหนึ่ง Reduction of Porosity in Investment-Casted Pink Silver: A Case Study of A Jewelry Company นันทวัฒน์ อภิกรมกุล และ กรรณชัย กัลยาศิริ	80
Effect of Closing the Blade Tip on Downwind Thai Sail Windmill Teerawat Klabklay and Wikanda Sridech	90
บทความวิชาการ	
การจำแนกพฤติกรรมรีโอโลยีของวัสดุจากการทดสอบเฉือนเป็นรอบ Rheological Behavior Identification of Materials from Oscillatory Shear ชาญยุทธ โกลิตะวงษ์	103
ข้อมูลสำหรับผู้เขียนและการเตรียมต้นฉบับ (Authors Guideline and Manuscript Preparation)	S1
แบบฟอร์มนำส่งบทความ (Manuscript Submission Form)	S2
รายนามผู้ทรงคุณวุฒิตรวจและพิจารณาบทความ	S4



อิทธิพลของเก้าถ่านหินขนาดเดิมและบดละเอียด ต่อกำลังอัด ความพรุน และการต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต

ธน ชำนาญกิจ¹ สำเร็จ รักซ้อน^{1*} และ ปริญา จินดาประเสริฐ²

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

² ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน ภาควิชาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

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

วันที่รับบทความ: 5 พฤษภาคม 2563; วันที่ทบทวนบทความ: 9 กรกฎาคม 2563; วันที่ตอบรับบทความ: 3 สิงหาคม 2563

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 9 ธันวาคม 2563

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้เสนอการศึกษา กำลังอัด ความพรุน การต้านทานคลอไรด์ และการกัดกร่อนของคอนกรีตผสมเก้าถ่านหินที่มีความละเอียดแตกต่างกัน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 (CT) แทนที่ด้วยเก้าถ่านหินขนาดเดิม (FAO) เก้าถ่านหินบดละเอียดปานกลาง (GFAM) และเก้าถ่านหินบดละเอียดที่สุด (GFAP) ในปริมาณร้อยละ 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน งานวิจัยนี้ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่เท่ากับ 0.45 ใช้สารลดน้ำพิเศษสำหรับเพิ่มความสามารถทำงานได้ของคอนกรีต ผลการทดสอบพบว่า การใช้เก้าถ่านหินขนาดละเอียดที่สุด (GFAP) ส่งผลให้ความพรุนของคอนกรีตลดลงและค่ากำลังอัดสูงขึ้น การต้านทานคลอไรด์และการกัดกร่อนของคอนกรีตผสมเก้าถ่านหินขนาดเดิม (FAO) เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 (CT) เพียงอย่างเดียว

คำสำคัญ: กำลังอัด; การกัดกร่อน; คลอไรด์; คอนกรีต; ความพรุน; เก้าถ่านหิน



Influence of Original and Ground Fly Ash on Compressive Strength, Porosity and Chloride Resistance of Concrete

Thon Chamnankit¹ Sumrerng Rukzon^{1*} and Prinya Chindapasirt²

¹ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin

² Sustainable Infrastructure Research and Development Center, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University

* Corresponding author, E-mail: sumrerng.ruk@rmutr.ac.th

Received: 5 May 2020; Revised 9 July 2020; Accepted: 3 August 2020

Online Published: 9 December 2020

Abstract: This research presents a study of the compressive strength, porosity, resistance to chloride and corrosion of concrete containing fly ashes with different fineness. Ordinary Portland Cement Type I (CT) was partially replaced with original fly ash (FAO), ground medium fly ash (GFAM) and ground fine fly ash (GFAF) at the dosage levels of 20%, 30% and 40% by weight of cementitious materials. Water to binder ratio with a constant of 0.45 was used in this research. Superplasticizer (SP) was used to improve the workability of concrete. Test results found that the use of fine fly ash (GFAF) produced mixes of concrete with low porosity and good compressive strength. The resistance to chloride and corrosion of original fly ash (FAO) concrete increase in comparison with that of Ordinary Portland Cement Type I (CT).

Keywords: Compressive strength; Corrosion; Chloride, Concrete; Porosity; Fly ash



1. บทนำ

คอนกรีตเป็นวัสดุที่นิยมใช้ทำเป็นชิ้นส่วนของอาคาร ในการผลิตคอนกรีตนอกจากการออกแบบส่วนผสมให้ได้กำลังอัดตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการใช้งานแล้ว ต้องคำนึงถึงความทนทานของคอนกรีตเป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากหากคอนกรีตมีอายุการใช้งานที่น้อยเกิดการเสื่อมสภาพเร็วอาจส่งผลกระทบต่อการใช้งาน สิ้นเปลืองค่าดูแลบำรุงรักษา อย่างไรก็ตาม หากคอนกรีตมีความทนทานสูงและมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้นอีกทั้งเสื่อมสภาพช้าลงอาจส่งผลดีต่อการใช้งานในอาคารนั้นๆ ประหยัดค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษา โดยการเสื่อมสภาพของคอนกรีตขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมต่างๆ ในแต่ละภูมิภาค เช่น การแพร่กระจายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ และการแทรกซึมของคลอไรด์จะส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนและเกิดการหลุดร่อนของเหล็กเสริมคอนกรีต [1-4] ซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อผู้ใช้งานอาคารหรือโครงสร้างนั้นได้ ดังนั้น ในปัจจุบัน ความทนทานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นปัจจัยสำคัญที่นักวิจัยให้ความสนใจในการศึกษาอย่างต่อเนื่อง

การแทรกซึมคลอไรด์ คือสาเหตุหนึ่งซึ่งส่งผลกระทบต่อความคงทนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กกล่าวคือ เมื่อคลอไรด์แทรกซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตจนซึมผ่านไปยังระยะชั้นเคลือบหุ้มคอนกรีต (Covering) จนถึงชั้นเหล็กเสริมสะสมจนถึงค่าระดับที่วิกฤตจะทำให้เริ่มขบวนการกัดกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีตได้ [1, 2, 4] โดยเฉพาะโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในชายฝั่งทะเลอาจเกิดการกัดกร่อนและเสื่อมสภาพจากสาเหตุจากการทำลายจากการแทรกซึมของเกลือคลอไรด์ได้เร็วขึ้น

ที่ผ่านมานักวิจัยและผู้ผลิตคอนกรีตได้ศึกษาถึงการนำวัสดุปอซโซลานมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตโดยเฉพาะในด้านความทนทาน [1-4] วัสดุปอซโซลานที่นิยมใช้และมีอยู่ในประเทศไทยบางชนิด เช่น เถ้าแกลบ เถ้าก้นเตา เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ เถ้าขานอ้อย เถ้าปาล์มน้ำมัน และเถ้าถ่านหิน เป็นต้น วัสดุเหล่านี้นำมาใช้เป็นวัสดุประสานแทนที่ปูนซีเมนต์ในงานคอนกรีตได้ เนื่องจากมีองค์ประกอบทางเคมีหลัก คือ ซิลิกาและอลูมินาปนอยู่ในตัววัสดุปอซโซลาน องค์ประกอบทางเคมีดังกล่าวสามารถทำปฏิกิริยาเพิ่มเติมในคอนกรีตส่งผลให้ปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตให้ดีขึ้น [1-8] อย่างไรก็ตาม การนำวัสดุปอซโซลานไปใช้ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ต้องนำไปปรับปรุงขนาดของอนุภาคให้เล็กลงหรือให้มีความละเอียดที่สูงขึ้นด้วยการบดหรือแยกขนาด [5-7] เนื่องจากความละเอียดของวัสดุปอซโซลานส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานซึ่งเป็นปฏิกิริยาเพิ่มเติมระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำในคอนกรีต [5-7, 9] อย่างไรก็ตาม ในการบดวัสดุปอซโซลานอาจสิ้นเปลืองพลังงานและงบประมาณในการบดอาจส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตคอนกรีตงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการมุ่งเน้นพัฒนาการใช้เถ้าถ่านหินขนาดเดิมจากโรงไฟฟ้าที่ไม่ผ่านการปรับปรุงขนาด กล่าวคือ พยายามใช้เถ้าถ่านหินขนาดเดิมโดยไม่ผ่านการบดเพื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนและนำไปเปรียบเทียบกับเถ้าถ่านหินที่ผ่านการบด ศึกษาอิทธิพลความละเอียดของเถ้าถ่านหินขนาดเดิมและบดละเอียด ต่อกำลังอัด ความพรุน การแทรกซึม คลอไรด์ และการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต ทั้งนี้เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับ



การใช้งานจริงของถ้ำถ่านหินขนาดเดิมในคอนกรีตส่งผลให้ลดพลังงานและค่าใช้จ่ายในการบด สามารถใช้ถ้ำถ่านหินขนาดเดิมในงานคอนกรีตได้ทันทีโดยลดขั้นตอนการแยกขนาดหรือบดถ้ำถ่านหิน เป็นการต่อ ยอดการใช้วัสดุของทิ้งให้เกิดประโยชน์ เพิ่มมูลค่าของเสียที่ไม่มีมูลค่าให้มีมูลค่ามากขึ้น

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้ปูนซีเมนต์ ถ้ำถ่านหินเป็นวัสดุประสาน และใช้วัสดุมวลรวม และสารลดน้ำพิเศษ ดังนี้

2.1.1 งานวิจัยนี้ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เป็นวัสดุประสาน มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.14

2.1.2 ใช้วัสดุมวลรวมที่มีอยู่โดยทั่วไป ประกอบด้วยมวลรวมละเอียด (ทราย) ที่มีขนาดความละเอียด (F.M.) เท่ากับ 2.82 และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.60

2.1.3 ใช้มวลรวมหยาบ (หิน) ที่มีความละเอียด (F.M.) เท่ากับ 7.0 และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.74 ใช้ขนาดโตสุดของหินเท่ากับ 12.5 มิลลิเมตร เนื่องจากต้องการความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีต

โดยมวลรวมหยาบและละเอียดมีขนาดคละเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM [10,11]

2.1.4 ใช้สารลดน้ำพิเศษเพื่อควบคุมค่าการยุบตัวและความสามารถทำงานได้ของส่วนผสมคอนกรีตสด

2.1.5 งานวิจัยนี้ ใช้ถ้ำถ่านหินจากโรงไฟฟ้าในอำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ของประเทศไทย ใช้ถ้ำถ่านหินขนาดเดิมที่ได้จากโรงไฟฟ้าโดยตรง และ

ปรับปรุงขนาดความละเอียดด้วยการบดให้มีความละเอียดที่แตกต่างกันเพิ่มขึ้นอีก 2 ขนาด ดังนี้

1) ถ้ำถ่านหินขนาดเดิม (FAO) มีปริมาณสัดส่วนค้ำบบตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 30-40 โดยน้ำหนัก

2) ถ้ำถ่านหินบดให้มีความละเอียดปานกลาง (GFAM) โดยมีสัดส่วนค้ำบบตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ในปริมาณร้อยละ 15-20 โดยน้ำหนัก

3) ถ้ำถ่านหินบดให้มีความละเอียดที่สุด (GFAF) โดยมีสัดส่วนค้ำบบตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ในปริมาณร้อยละ 0-5 โดยน้ำหนัก

นำถ้ำถ่านหินทั้ง 3 ขนาด ไปใช้แทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

2.2 ส่วนผสมของคอนกรีต

ออกแบบส่วนผสมคอนกรีตโดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่เท่ากับ 0.45 ใช้วัสดุประสานคงที่เท่ากับ 450 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ส่วนผสมทุกส่วนผสมใช้สารลดน้ำพิเศษ เพื่อปรับความสามารถเทได้ของคอนกรีต โดยการศึกษาที่ใช้สารลดน้ำพิเศษชนิด FF โดยใช้ปริมาณที่เหมาะสมตามคำแนะนำของผู้ผลิต ทั้งนี้เพื่อหลีกเลี่ยงการแยกตัวของคอนกรีตหากใช้สารลดน้ำพิเศษในปริมาณที่มากเกินไป ควบคุมค่าการยุบตัวของคอนกรีตให้ได้เท่ากับ 50-100 มิลลิเมตร ส่วนวัสดุมวลรวมใช้ในปริมาณคงที่ในทุกส่วนผสมเพื่อผลของการวิเคราะห์ข้อมูล วัสดุประสานใช้ถ้ำถ่านหินที่มีความละเอียดแตกต่างกันประกอบไปด้วย OFA, GFAM และ GFAF แทนที่ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ชนิดที่ 1 ในปริมาณร้อยละ 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน



ใช้แบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 100 มิลลิเมตร สูงเท่ากับ 200 มิลลิเมตร ตามมาตรฐานของ ASTM C39 [12] ภายหลังก่อนกรีตในแบบหล่อคอนกรีต ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง $25 \pm 3^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นถอดแบบและ

นำตัวอย่างคอนกรีตบ่มในน้ำสะอาดจนครบอายุการทดสอบ เพื่อนำไปทดสอบ กำลังอัด ความพรุน การต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ ส่วนการกัดกร่อนของเหล็กเสริมคอนกรีตบ่มในน้ำกลั่น ส่วนผสมคอนกรีตแสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ส่วนผสมของคอนกรีต

Mix	W/B	Cement (CT)	Fly Ash			Fine Aggregate	Coarse Aggregate	Water	SP	Slump (mm)
			FAO	FAM	FAF					
			Mix Proportion (kg/m^3)							
CT	0.45	450	-	-	-	780	1180	202.5	1.60	50-100
20%FAO	0.45	360	90	-	-	780	1180	202.5	1.40	50-100
30%FAO	0.45	315	135	-	-	780	1180	202.5	1.35	50-100
40%FAO	0.45	270	180	-	-	780	1180	202.5	1.35	50-100
20%GFAM	0.45	360	-	90	-	780	1180	202.5	1.26	50-100
30%GFAM	0.45	315	-	135	-	780	1180	202.5	1.26	50-100
40%GFAM	0.45	270	-	180	-	780	1180	202.5	1.17	50-100
20%GFAP	0.45	360	-	-	90	780	1180	202.5	1.13	50-100
30%GFAP	0.45	315	-	-	135	780	1180	202.5	1.10	50-100
40%GFAP	0.45	270	-	-	180	780	1180	202.5	1.10	50-100

2.3 การทดสอบกำลังอัดและความพรุนของคอนกรีต

ในการทดสอบกำลังอัดและความพรุนของคอนกรีตใช้แบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 100 มิลลิเมตร สูงเท่ากับ 200 มิลลิเมตร ตามมาตรฐานของ ASTM C39 [12] ใช้ตัวอย่างการทดสอบคอนกรีตจำนวน 3 ก้อน เพื่อ

คำนวณหาค่าเฉลี่ยกำลังอัด โดยส่วนที่ค่ากำลังอัดแตกต่างจากก้อนอื่นๆ เกินร้อยละ 20 ไม่นำมาคิดหาค่าเฉลี่ยกำลังอัด

ส่วนการทดสอบความพรุนใช้การประยุกต์การทดสอบตามมาตรฐานของ ASTM C642 และ C1202 [13, 14] งานวิจัยนี้ทดสอบกำลังอัดและความพรุนที่อายุการทดสอบ 7 และ 28 วัน



2.4 การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์

การทดสอบการต้านทานคลอไรด์ใช้ตามมาตรฐานของ ASTM C1202 [14] ดังรูปที่ 1 ขนาดของตัวอย่างคอนกรีตใช้แบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 100 มิลลิเมตร และสูงเท่ากับ 200 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM C39 [12] ภายหลังหล่อคอนกรีต 24 ชั่วโมง ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 25 ± 3 °C จากนั้น ถอดแบบและบ่มในน้ำสะอาด เมื่อครบอายุทดสอบที่อายุ 7 และ 28 วัน ตัดตัวอย่างคอนกรีตที่บริเวณกึ่งกลางหรือที่ระยะ 100 มิลลิเมตร จากนั้นวัดขนาดก่อนตัวอย่างจากจุดกึ่งกลางให้มีความหนาแต่ละ 50 มิลลิเมตร ตัดแยกออกจากกันจำนวน 2 ชิ้น นำตัวอย่างที่ตัดเคลือบบริเวณผิวรอบๆ ด้วยอีพอกซีและทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จากนั้นทดสอบการอิมมิดีด้วยน้ำและทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์ ตามมาตรฐานของ ASTM C1202 [14] ที่อายุการทดสอบ 7 และ 28 วัน การคำนวณการซึมผ่านคลอไรด์ของคอนกรีตแสดงไว้ในสมการที่ (1) ส่วนในตารางที่ 2 แสดงค่ามาตรฐานการซึมผ่านคลอไรด์ของคอนกรีต

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + 2I_{90} + 2I_{120} + 2I_{150} + 2I_{180} + 2I_{210} + 2I_{240} + 2I_{270} + 2I_{300} + 2I_{330} + I_{360}) \quad (1)$$

เมื่อกำหนดให้

Q หมายถึง ผลรวมของประจุกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวอย่างทดสอบหน่วยเป็นคูลอมบ์ (Coulombs)

I_0 หมายถึง ค่ากระแสไฟฟ้าเริ่มต้นหลังจากให้แรงดันไฟฟ้าหน่วยเป็นแอมป์ (Amperes)

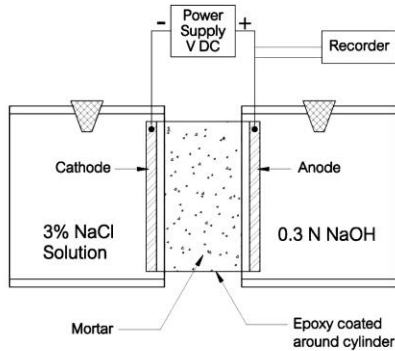
I_t หมายถึง ค่ากระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวอย่างที่ระยะเวลา t นาที

ตารางที่ 2 เกณฑ์มาตรฐานการซึมผ่านคลอไรด์ของคอนกรีตตามมาตรฐานของ ASTM C1202 [14]

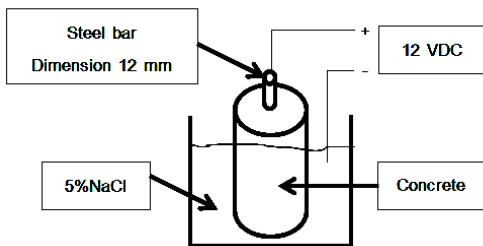
ผลรวมของประจุไฟฟ้า (Coulombs)	ระดับการซึมผ่านคลอไรด์
มากกว่า 4,000	การซึมผ่าน สูง
อยู่ระหว่าง 2,000–4,000	การซึมผ่าน ปานกลาง
อยู่ระหว่าง 1,000–2,000	การซึมผ่าน ต่ำ
อยู่ระหว่าง 100–1,000	การซึมผ่าน ต่ำมาก
น้อยกว่า 100	ไม่ซึมผ่าน

2.5 การทดสอบการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์

ใช้ตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 100 มิลลิเมตร และสูงเท่ากับ 200 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM C39 [12] นำเหล็กเสริมคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 12 มิลลิเมตร เสียบเข้าไปในบริเวณส่วนกลางของตัวอย่างคอนกรีต โดยพิจารณาระยะหุ้มคอนกรีตให้มวลรวมหยาบสามารถเทได้ วัดจากผิวล่างคอนกรีตถึงปลายล่างเหล็กเสริมเท่ากับ 2.5 เซนติเมตร ภายหลังถอดแบบตัวอย่าง 24 ชั่วโมง นำตัวอย่างแช่ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 7 และ 28 วัน จากนั้นนำมาทดสอบหาค่าความต้านทานการกัดกร่อนจากสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 และทำการเร่งการทดสอบโดยใช้แรงดันไฟฟ้า 12 VDC ตรวจสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบด้วยการดูระยะเวลาที่ทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวบันทึกค่าหน่วยเป็นชั่วโมง (Time of First Crack) ซึ่งมีงานวิจัยที่ผ่านมาได้ศึกษาวิธีการทดสอบด้วยวิธีนี้ [1, 2] การทดสอบการกัดกร่อนแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 1 การทดสอบการต้านทานคลอไรด์ [14]



รูปที่ 2 การทดสอบการกัดกร่อนแบบแรง [1, 2]

3. ผลการวิจัย

3.1 สมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

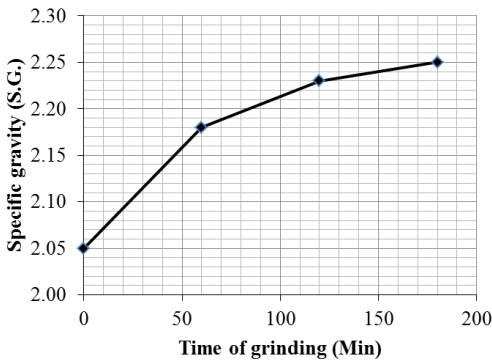
ในรูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ของระยะเวลาในการบดและความถ่วงจำเพาะของเม็ดถ่านหิน ในรูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการบดกับพื้นที่ผิวด้วยวิธีของเบลนของเม็ดถ่านหิน ผลทดสอบพบว่า เมื่อนำเม็ดถ่านหินขนาดเดิมบดเป็นเวลา 60, 120 และ 180 นาที ส่งผลให้ค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดถ่านหินเพิ่มเป็น 2.18, 2.24 และ 2.25 ในขณะที่เม็ดถ่านหินขนาดเดิมมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.05 และเมื่อบดเม็ดถ่านหินในเวลา 60, 120 และ 180 นาที พื้นที่ผิวหรือความละเอียดโดยวิธีของเบลนมีค่า

เท่ากับ 3,480-3,750 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ส่วนเม็ดถ่านหินขนาดเดิมมีพื้นที่ผิวเท่ากับ 3,200 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ดังแสดงในตารางที่ 3 การทดสอบชี้ให้เห็นว่า การปรับปรุงขนาดของเม็ดถ่านหินด้วยการบดให้มีขนาดลดลง ส่งผลให้ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดเพิ่มขึ้น [5] ในงานวิจัยนี้คัดเลือกขนาดความละเอียดของเม็ดถ่านหินสำหรับใช้เป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ จำนวน 3 ขนาด คือเม็ดถ่านหินขนาดเดิม (FAO) และเม็ดถ่านหินที่มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 3,480 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ใช้เป็นขนาดความละเอียดปานกลาง (GFAM) และใช้เม็ดถ่านหินที่มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 3,750 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ใช้เป็นขนาดความละเอียดที่สุด (GFAP) ในตารางที่ 3 และรูปที่ 5 แสดงสมบัติทางกายภาพและขนาดการกระจายตัว (Particle Size Distribution) ของเม็ดถ่านหินซึ่งพบว่า เม็ดถ่านหิน FAO, GFAM และ GFAP มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 30, 15 และ 5 ไมครอน ตามลำดับ ในตารางที่ 4 พบว่าองค์ประกอบทางเคมีของ CT มีค่า CaO เท่ากับร้อยละ 77.3, ส่วนค่า SiO₂, Al₂O₃ และ Fe₂O₃ เท่ากับร้อยละ 16.0, 1.3 และ 1.1 ตามลำดับ ในส่วนของเม็ดถ่านหิน พบว่า เม็ดถ่านหิน FAO GFAM และ GFAP มีผลรวมของ SiO₂+ Al₂O₃+ Fe₂O₃ เท่ากับร้อยละ 81.3, 81.4 และ 82.0 ตามลำดับ ซึ่งผลการวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าในการบดเม็ดถ่านหินไม่ส่งผลกระทบต่อองค์ประกอบทางเคมี [5, 7] และองค์ประกอบทางเคมีหลักของเม็ดถ่านหิน FAO, GFAM และ GFAP คือ ซิลิกาและอลูมินา

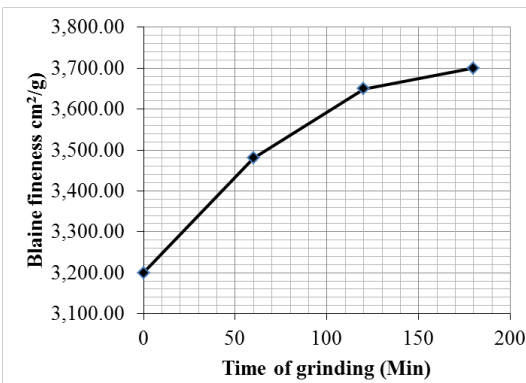
ส่วนในรูปที่ 6-8 แสดงภาพถ่ายขยายกำลังสูงของเม็ดถ่านหิน FAO, GFAM และ GFAP พบว่า เมื่อบด



เม็ดถ่านหิน ขนาดอนุภาคที่เล็กบางส่วนถูกบดไม่ สามารถบดได้ทั่วถึงและยังคงเป็นรูปทรงกลมอยู่ [7]



รูปที่ 3 ผลของระยะเวลาการบดต่อความถ่วงจำเพาะ



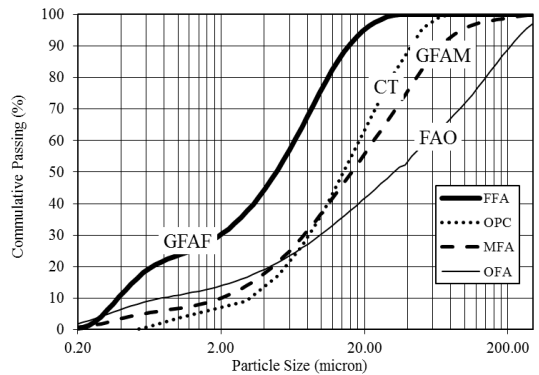
รูปที่ 4 ผลของระยะเวลาการบดต่อพื้นที่ผิวจำเพาะ

ตารางที่ 3 สมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ชนิดที่ 1 (CT) และเม็ดถ่านหิน FAO, GFAM และ GFAP

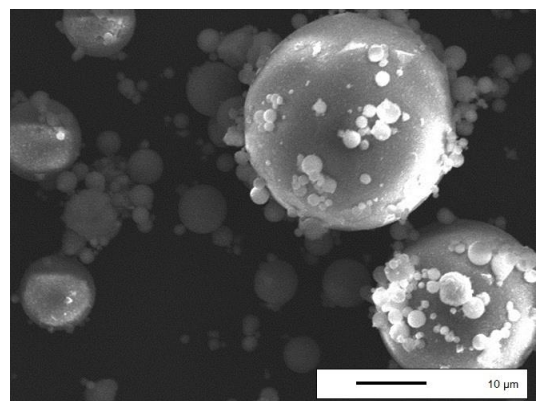
สมบัติทางกายภาพ	CT	FAO	GFAM	GFAP
Median particle size (µm), d ₅₀	14.00	32.00	16.00	5.00
Retained on a sieve No. 325 (%)	-	30-40	15-20	0-5
Specific Gravity	3.14	2.05	2.24	2.25
Blaine Fineness (cm ² /g)	3,400	3200	3480	3750

ตารางที่ 4 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เม็ดถ่านหิน FAO GFAM และ GFAP

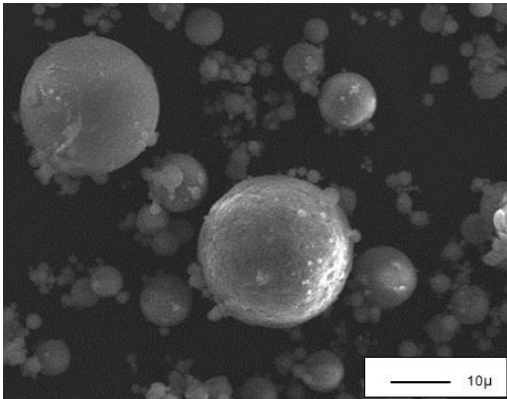
Oxides (%)	CT	FAO	GFAM	GFAP
SiO ₂	16.0	51.0	51.2	51.2
Al ₂ O ₃	1.3	28.0	27.8	28.2
Fe ₂ O ₃	1.1	2.3	2.4	2.6
CaO	77.3	2.3	2.4	2.4
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	-	81.3	81.4	82.0



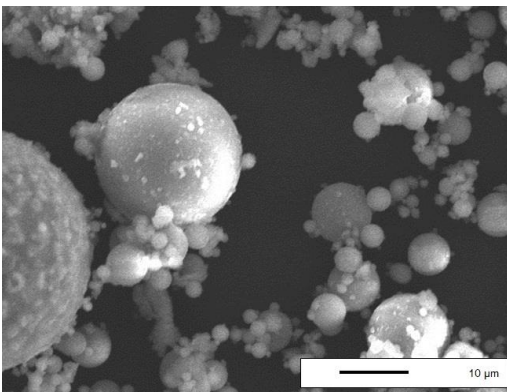
รูปที่ 5 Particle Size Distribution ของเม็ดถ่านหิน FAO, GFAM และ GFAP



รูปที่ 6 SEM Photograph ของเม็ดถ่านหิน FAO



รูปที่ 7 SEM photograph ของเม็ดถ่านหิน GFAM



รูปที่ 8 SEM photograph ของเม็ดถ่านหิน GFAP

3.2 ความต้องการสารลดน้ำพิเศษของคอนกรีต

ในตารางที่ 1 แสดงส่วนผสมของคอนกรีต ซึ่งส่วนผสมของคอนกรีตใช้สารลดน้ำพิเศษเพิ่มเติม เนื่องจากต้องการความสามารถทำงานได้โดยควบคุมที่ค่าการยุบตัวเท่ากับ 50-100 มิลลิเมตร ผลการทดสอบพบว่า เมื่อกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่เท่ากับ 0.45 และใช้น้ำเท่ากับ 202.5 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ส่งผลให้ส่วนผสมคอนกรีตต้องการสารลดน้ำพิเศษเพิ่มเติม การใช้เม็ดถ่านหิน

แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ส่งผลให้ส่วนผสมคอนกรีตต้องการสารลดน้ำพิเศษเพิ่มขึ้น เนื่องจากขนาดอนุภาคของเม็ดถ่านหินที่กลมตันและผ่านการบดให้มีความละเอียดให้มีขนาดอนุภาคลดลง ขนาดอนุภาคกลมตันดังกล่าวสามารถเข้าไปอุดรูพรองภายในเนื้อคอนกรีตทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นมากขึ้น [1, 5-7] ยกตัวอย่าง เช่น คอนกรีตที่ใช้เม็ดถ่านหินบดละเอียด GFAP แทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ต้องการสารลดน้ำพิเศษในปริมาณ 1.13, 1.10 และ 1.10 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ในขณะที่คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพียงอย่างเดียวหรือคอนกรีตควบคุมต้องการสารลดน้ำพิเศษในปริมาณเท่ากับ 1.60 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร การทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเม็ดถ่านหิน ส่งผลให้ความต้องการสารลดน้ำพิเศษในส่วนผสมคอนกรีตลดลง และเมื่อใช้เม็ดถ่านหินที่มีความละเอียดที่มากขึ้นส่งผลให้ลดปริมาณความต้องการสารลดน้ำพิเศษลง

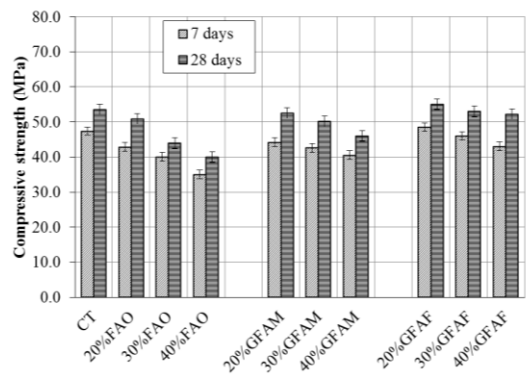
3.3 กำลังอัดของคอนกรีต

ในรูปที่ 9 และ 10 แสดงผลกระทบของปริมาณร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเม็ดถ่านหินและอิทธิพลของความละเอียดของเม็ดถ่านหิน OFA, GFAM และ GFAP ต่อกำลังอัดและดัชนีกำลังอัดของคอนกรีต ซึ่งพิจารณากำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 7 และ 28 วัน ผลการทดสอบพบว่า การใช้เม็ดถ่านหินขนาดเต็มและขนาดละเอียดปานกลางแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ส่งผลให้กำลังอัดลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม (CT) ในทุกส่วนผสม โดยทุกส่วนผสมมีค่าร้อยละกำลังอัดอยู่ในช่วง 74-98 ของ

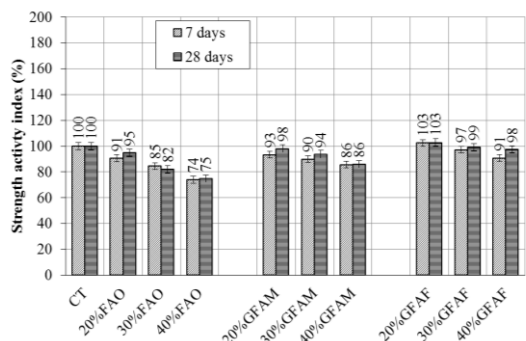


CT อย่างไรก็ตาม พบว่าการใช้เถ้าถ่านหินขนาดละเอียดที่สุดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุม กล่าวคือ ที่อายุการทดสอบ 7 และ 28 วัน คอนกรีต 20%GFAP มีค่าร้อยละกำลังอัดเท่ากับ 103 ของคอนกรีตควบคุม ในขณะที่คอนกรีต 30%GFAP และ 40%GFAP มีค่าร้อยละกำลังอัดเท่ากับ 97-99 ของคอนกรีตควบคุม คอนกรีตมีการพัฒนากำลังอัดตามอายุการทดสอบ กล่าวคือ ที่อายุการทดสอบ 28 วัน คอนกรีตมีกำลังอัดสูงกว่าที่อายุการทดสอบ 7 วัน เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่องของปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำและการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานเพิ่มเติมจากองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าถ่านหิน [9,15] การทดสอบครั้งนี้พบว่า การเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าถ่านหินส่งผลให้กำลังอัดลดลง ยกตัวอย่างเช่น ที่อายุการทดสอบ 28 วัน กำลังอัดของคอนกรีต 20%GFAP มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 55 MPa ในขณะที่คอนกรีต 30%GFAP และ 10%GFAP มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 53 และ 52 MPa ตามลำดับ การใช้เถ้าถ่านหินขนาดละเอียดที่สุดมีแนวโน้มค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินขนาดละเอียดปานกลางและขนาดเดิม ตามลำดับ เนื่องจาก ความละเอียดของวัสดุปอซโซลานซึ่งมีพื้นที่ผิวที่มาก ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้มากขึ้น [1, 5-7, 9, 15] ปริมาณของซิลิกาและอลูมินาในวัสดุปอซโซลานทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต เพิ่มความทึบแน่นให้กับคอนกรีตลดปริมาณโพรงในเนื้อคอนกรีต ส่งผลให้กำลังอัดมีค่าสูงขึ้น [1, 2, 5, 7, 15] อย่างไรก็ตาม ผล

การทดสอบพบว่า การใช้เถ้าถ่านหินขนาดเดิมแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีค่าดัชนีของกำลังอัดอยู่ในช่วงร้อยละ 74-95 ของคอนกรีตควบคุม เมื่อพิจารณาถึงการนำคอนกรีตไปใช้ในงานโครงสร้างแล้ว พบว่าสามารถใช้เถ้าถ่านหินขนาดเดิมแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณร้อยละ 20-30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ซึ่งมีดัชนีกำลังอัดอยู่ในช่วงร้อยละ 82-95 ของคอนกรีตควบคุม หรือมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 44-51 MPa ซึ่งมีกำลังอัดค่อนข้างสูงสำหรับการใช้งานในโครงสร้างคอนกรีตทั่วไปและคอนกรีตกำลังสูง



รูปที่ 9 กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 7 และ 28 วัน

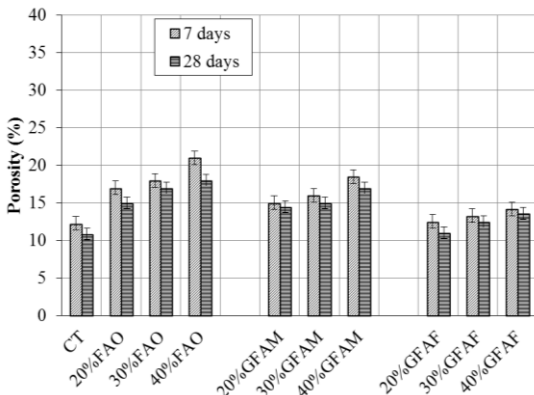


รูปที่ 10 ร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 7 และ 28



3.4 ความพรุนของคอนกรีต

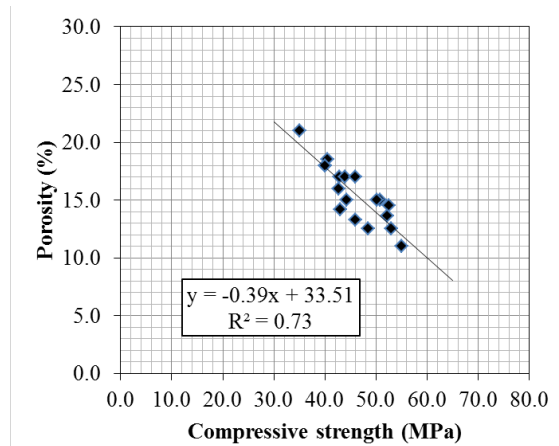
ในรูปที่ 11 แสดงผลการทดสอบความพรุนของคอนกรีตในทุกส่วนผสมที่อายุการทดสอบ 7 และ 28 วัน ผลการทดสอบครั้งนี้พบว่า การใช้เถ้าถ่านหินขนาดเดิมแทนที่ปูนซีเมนต์มีแนวโน้มส่งผลให้ความพรุนของคอนกรีตเพิ่มขึ้น เนื่องจาก ขนาดอนุภาคที่ยังมีขนาดใหญ่อยู่ของเถ้าถ่านหินอาจแทรกตัวเข้าไปอุดช่องว่างโพรงคอนกรีตได้น้อย อย่างไรก็ตาม การทดสอบนี้ชี้ให้เห็นว่า การใช้เถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดมากขึ้นหรือขนาดละเอียดที่สุด ส่งผลให้ความพรุนของคอนกรีตลดลง เนื่องจาก ขนาดอนุภาคที่เล็กของเถ้าถ่านหินสามารถแทรกตัวเข้าไปอุดโพรงภายในของคอนกรีตได้มากขึ้น



รูปที่ 11 ความพรุนของคอนกรีต

ในการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีต จึงควรพิจารณาถึงความพรุนของคอนกรีตเป็นสำคัญ ในรูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและความพรุนของคอนกรีต ซึ่งพบว่า เมื่อความพรุนของคอนกรีตลดลง ส่งผลให้กำลังอัดเพิ่มขึ้น [5] นอกจากนี้ ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่า ความพรุนของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงตามอายุของการทดสอบที่เพิ่มขึ้นด้วย

ดังรูปที่ 11 อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเฉพาะในส่วนของความพรุนรวม หรือ Total porosity เท่านั้น และจะได้ศึกษาในส่วนขนาดของโพรง (pore size) ต่อไป



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและความพรุนของคอนกรีต

3.5 การต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีต

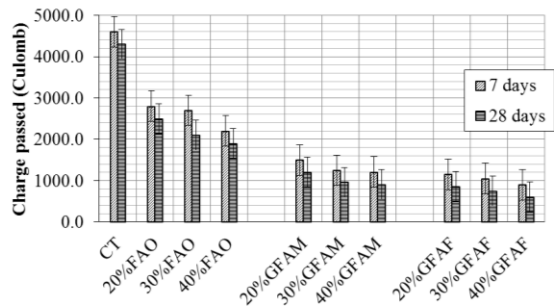
รูปที่ 13 แสดงผลการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดต่างกัน ที่อายุการทดสอบ 7 และ 28 วัน ผลการทดสอบพบว่า การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ส่งผลให้คอนกรีตต้านทานคลอไรด์ได้ดีในทุกส่วนผสม ยกตัวอย่าง เช่น คอนกรีต CT มีค่าการแทรกซึมผ่านคลอไรด์เท่ากับ 4,600 และ 4,300 คูลอมบ์ ที่อายุการทดสอบ 7 และ 28 วัน ตามลำดับ ในขณะที่คอนกรีต 20%FAO มีค่าการแทรกซึมผ่านคลอไรด์เท่ากับ 2,800 และ 2,500 คูลอมบ์ ที่อายุการทดสอบที่ 7 และ 28 วัน ตามลำดับ การเพิ่มอายุการทดสอบส่งผลให้การแทรกซึมคลอไรด์ลดลงตามไปด้วย กล่าวคือ คอนกรีต 40%FAO มีค่าการแทรกซึม



คลอไรด์เท่ากับ 2,200 และ 1,900 คูลอมม์ ที่อายุการทดสอบ 7 และ 28 วัน ตามลำดับ การแทนที่ แก้วถ่านหินในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้คอนกรีตสามารถต้านทานคลอไรด์ได้เพิ่มขึ้น ยกตัวอย่าง เช่น ที่อายุ 28 วัน คอนกรีต 20%FAO, 30%FAO และ 40%FAO มีค่าการแทรกซึมคลอไรด์เท่ากับ 2,500, 2,100 และ 1,900 คูลอมม์ เนื่องจากปริมาณของ ซิลิกาที่บรรจุอยู่ในวัสดุปอซโซลานสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์กลายเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งกระจายตัวและแทรกเข้าไปในโพรงของคอนกรีตและกลายเป็นผลึกเกลือ [1,2,4,15] ผลที่ได้คือผลึกเกลือดังกล่าวนี้จะเข้าไปอุดรูโพรงในคอนกรีตส่งผลให้ลดการซึมผ่านคลอไรด์และการใช้แก้วถ่านหินที่มีความละเอียดมากขึ้นส่งผลให้สามารถต้านทานคลอไรด์ได้ดีขึ้น เนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็กของแก้วถ่านหินและพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้มากขึ้น [1,2,4]

ในการใช้แก้วถ่านหินขนาดเต็ม (FAO) พบว่า ลดการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนหรือคอนกรีตควบคุม (CT) กล่าวคือ การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต 20%FAO, 30%FAO และ 40%FAO มีค่าอยู่ในช่วง 1,900-2,500 คูลอมม์ (ที่อายุ 7 และ 28 วัน) เมื่อพิจารณาที่อายุ 28 วัน พบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วย แก้วถ่านหินขนาดเต็มมีค่าการแทรกซึมคลอไรด์เท่ากับ 1,900 คูลอมม์ ซึ่งพิจารณาจากเกณฑ์มาตรฐานของ ASTM C1202 [14] อยู่ในระหว่างการแทรกซึมคลอไรด์ระดับต่ำ ในขณะที่คอนกรีตปูนซีเมนต์ล้วนมีการแทรกซึมคลอไรด์อยู่ในระดับสูงกว่า (ระดับสูง อยู่ในช่วงมากกว่า 4,000 คูลอมม์) ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึง

ชี้ให้เห็นว่า สามารถนำแก้วถ่านหินขนาดเต็มเป็นส่วนผสมคอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์เพื่อผลิตคอนกรีตในการใช้ต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดี



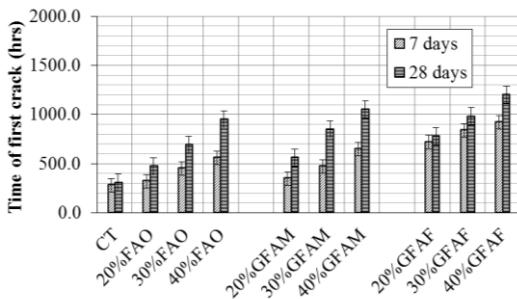
รูปที่ 13 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตด้วย ASTM C1202 [14] (Charge Passed)

3.6 การต้านทานการกัดกร่อน

ในรูปที่ 14 แสดงผลการวัดค่าการแตกร้าวของคอนกรีตเมื่อทดสอบแบบเร่งปฏิกิริยาการกัดกร่อนด้วยแรงดันไฟฟ้า หน่วยวัดเป็นชั่วโมง โดยพิจารณาจากการแตกร้าว (First of Crack) ผลการทดสอบมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกันกับผลการทดสอบคลอไรด์ซึ่งแตกต่างกันเพียงหน่วยการวัดค่าเท่านั้น ผลการทดสอบพบว่า ค่าการแตกร้าวของคอนกรีตควบคุมด้วยการใช้ปูนซีเมนต์ล้วนอยู่ที่ 305 ชั่วโมง ที่อายุการทดสอบ 28 วัน ในขณะที่คอนกรีตที่ผสมด้วยแก้วถ่านหินมีค่าการแตกร้าวอยู่ในช่วง 470-1,200 ชั่วโมง ที่อายุการทดสอบ 28 วัน ผลการทดสอบนี้ชี้ให้เห็นว่าการใช้แก้วถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ดี เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน [1, 15] การเพิ่มปริมาณการแทนที่แก้วถ่านหินส่งผลให้ต้านทานการกัดกร่อน



ได้ดีขึ้นและเมื่อใช้เถาถ่านหินที่มีความละเอียดมากขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาการแตกร้าวเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของซิลิกา สามารถยับยั้งอ็อกไซด์ของคลอไรด์ได้ดี [1, 2, 4, 15] อย่างไรก็ตาม ในการศึกษา พบว่าคอนกรีต 40%GFAF ที่อายุการทดสอบ 28 วัน เมื่อครบระยะเวลา 1,200 ชั่วโมง คอนกรีตยังไม่แตกร้าว และได้หยุดการทดสอบเพื่อวิเคราะห์ผลต่อไป แม้ว่าผลทดสอบจะแสดงให้เห็นว่า การใช้เถาถ่านหินที่มีความละเอียดที่สุดสามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ดีเมื่อเทียบกับขนาดที่หยาบกว่า อย่างไรก็ตาม ผลการทดสอบพบว่า การใช้เถาถ่านหินขนาดเดิมสามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ดีเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน ดังนั้นจึงเป็นทางเลือกที่ดีในการใช้เถาถ่านหินขนาดเดิมที่ไม่ปรับปรุงขนาดสำหรับผลิตคอนกรีต



รูปที่ 14 ระยะเวลาการแตกของคอนกรีตแบบเร่งการทดสอบการกัดกร่อน (Time of First Crack)

4. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาพัฒนาเถาถ่านหินเพื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อเพิ่มความทนทานของคอนกรีตครั้งนี้พบว่า เถาถ่านหินขนาดเดิมสามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณร้อยละ 20-30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ซึ่งมีดัชนีกำลังอัดอยู่ในช่วง

ร้อยละ 82-95 ของคอนกรีตควบคุม หรือมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 44-51 MPa ซึ่งมีกำลังอัดสำหรับการใช้งานในโครงสร้างคอนกรีตได้

การใช้เถาถ่านหินขนาดเดิม สามารถต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และต้านทานการกัดกร่อนได้ดีกว่าคอนกรีตที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์ล้วน (CT) การเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถาถ่านหินส่งผลให้คอนกรีตมีแนวโน้มต้านทานคลอไรด์และการกัดกร่อนได้เพิ่มขึ้น

การใช้เถาถ่านหินขนาดละเอียดมากขึ้น ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้น ลดความพรุน ต้านทานคลอไรด์และการต้านทานการกัดกร่อนได้เพิ่มขึ้น ในการออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตต้องคำนึงถึงความพรุนของคอนกรีต เนื่องจากเมื่อความพรุนของคอนกรีตมีค่าต่ำส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้นเนื่องจากผลของการทับแน่นของคอนกรีต

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับสนับสนุนสถานที่วิจัยจากสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ และได้รับสนับสนุนวัสดุวิจัยจากศูนย์วิจัยโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น

6. เอกสารอ้างอิง

[1] S. Rukzon and P. Chindaprasirt, Strength, Chloride Penetration and Corrosion Resistance of Ternary Blends of Portland Cement Self-compacting Concrete Containing Bagasse Ash and Rice Husk-bark Ash, Chiang Mai Journal of Sciences, 2018, 45(4), 863-1874.



- [2] S. Rukzon and P. Chindapasirt, Use of Ternary Blend of Portland Cement and Two Pozzolans to Improve Durability of High-Strength Concrete, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2014, 18(6), 1745-1752.
- [3] A. Sathonsaowapark, P. Chindapasirt and K. Pimraksa, Workability and Strength of Lignite Bottom Ash Geopolymer Mortar, *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 168, 44-50.
- [4] P. Chindapasirt, S. Rukzon and V. Sirivivatnanon, Resistance to Chloride Penetration of Blended Portland Cement Mortar Containing Palm Oil Fuel Ash, Rice Husk Ash and Fly Ash, *Construction and Building Materials*, 2008, 22(5), 932-938.
- [5] S. Rukzon, P. Chindapasirt and R. Mahacha, Effect of Grinding on Chemical and Physical Properties of Rice Husk Ash, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2009, 16(2), 242-247.
- [6] S. Rukzon and P. Chindapasirt, Strength and Carbonation Model of Rice Husk Ash Cement Mortar with Different Fineness, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2010, 22(3), 253-259.
- [7] S. Rukzon and P. Chindapasirt, Development of Classified Fly Ash as a Pozzolanic Material, *Journal of Applied Sciences*, 2008, 8(6), 1097-1102.
- [8] P. Chindapasirt and W. Chalee, Effect of Sodium Hydroxide Concentration on Chloride Penetration and Steel Corrosion of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete under Marine Site, *Construction and Building Materials*, 2014, 63, 303-310.
- [9] A.M. Neville, *Properties of Concrete*, 4th and Final Ed., Longman Group Limited., Malaysia, 1995.
- [10] ASTM C33, Standard Specification Concrete Aggregates, *Annual Book of ASTM Standards 04.02*, 2005, 10-20.
- [11] ASTM C136, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, *Annual Book of ASTM Standards 04.02*, 2005, 88-92.
- [12] ASTM C39, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, *Annual Book of ASTM Standards 04.02*, 2005, 21-27.
- [13] ASTM C642, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, *Annual Book of ASTM Standards 04.02*, 2005, 338-340.



บทความวิจัย

- [14] ASTM C1202, Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, Annual Book of ASTM Standard 04.02, 2001, 646-651.
- [15] S. Rukzon and P. Chindaprasirt, Utilization of Bagasse Ash in High-Strength Concrete, Materials and Design, 2012, 34, 45-50.



การศึกษาศักยภาพของชีวมวลแห่น *Lemna minor* L. ในการผลิตพลังงานเชื้อเพลิงชีวภาพ

ประดิษฐ์ เอี่ยมสะอาด*

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: pradinunt.e@aru.ac.th

วันที่รับบทความ: 4 กรกฎาคม 2563; วันที่ทบทวนบทความ: 24 สิงหาคม 2563; วันที่ตอบรับบทความ: 9 กันยายน 2563

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 9 ธันวาคม 2563

บทคัดย่อ: แห่นสายพันธุ์ *Lemna minor* L. เป็นพืชน้ำที่เจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว มีการสะสมแป้งปริมาณสูงและมีสัดส่วนของลิกนินเป็นองค์ประกอบต่ำจึงจัดเป็นชีวมวลที่เหมาะสมสำหรับการผลิตพลังงานชีวภาพ ในการวิจัยครั้งนี้ได้มีการศึกษาสัดส่วนองค์ประกอบเคมีกลุ่มลิกโนเซลลูโลสและปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ของตัวอย่างชีวมวลแห่น *Lemna minor* L. โดยศึกษาทั้งในตัวอย่างแห่นสดและแห่นอบแห้ง ผลการทดลองพบว่าตัวอย่างแห่นอบแห้งมีสัดส่วนของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสมากที่สุด ร้อยละ 29.18 และ 64.83 (น้ำหนักต่อน้ำหนัก) ตามลำดับ และยังพบว่าแห่นอบแห้งมีปริมาณลิกนินต่ำสุดที่ร้อยละ 5.75 (น้ำหนักต่อน้ำหนัก) เมื่อศึกษาประสิทธิภาพในการปรับสภาพชีวมวลแห่นด้วยวิธีการทางเคมีด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.05 0.1 และ 0.2 นอร์มัล ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส พบว่าชีวมวลแห่นอบแห้งให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงกว่าแห่นสดทั้งในการปรับสภาพด้วยสารละลายกรดและด่างทุกความเข้มข้น โดยเฉพาะการใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้น 0.05 นอร์มัล ซึ่งให้ผลผลิตน้ำตาลรีดิวซ์สูงสุดที่ 796.21 ± 0.91 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ต่ำที่สุด 200.04 ± 1.51 มิลลิกรัมต่อลิตร พบได้ในการปรับสภาพแห่นสดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 0.2 นอร์มัล อย่างไรก็ตามจากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลแห่นพบว่าแห่น *Lemna minor* L. สามารถพัฒนาให้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นสำหรับการผลิตพลังงานเชื้อเพลิงชีวภาพได้โดยอาศัยการพัฒนากระบวนการและเทคโนโลยีที่มีความเหมาะสมต่อไปในอนาคต

คำสำคัญ: แห่น; *Lemna minor* L.; องค์ประกอบลิกโนเซลลูโลส; การปรับสภาพชีวมวล; น้ำตาลรีดิวซ์



A Potentially Study of Duckweed *Lemna minor* L. Biomass in Biofuel Production

Pradinunt Eiamsa-ard*

Department of Environmental Science, Faculty of Science and Technology,
Phranakorn Si Ayutthaya Rajabhat University

* Corresponding author, E-mail: pradinunt.e@aru.ac.th

Received: 4 July 2020; Revised 24 August 2020; Accepted: 9 September 2020

Online Published: 9 December 2020

Abstract: Duckweed, *Lemna minor* L. is categorized as rapid growth aquatic plant with the ability to accumulate high proportion of starch content and significantly low lignin ratio. It could be, therefore, promising as a biomass feedstock for biofuel production. In this research, the lignocellulosic composition coupled with the reducing sugar concentration either in fresh or dried duckweed *Lemna minor* L. biomass was investigated. The results established the highest proportion of cellulose and hemi-cellulose composition was exclusively observed within dried duckweed biomass at 29.18 and 64.83% (w/w), respectively, meanwhile, the lowest level of lignin content at 5.75% (w/w). The chemical pretreatment of duckweed biomass was evaluated through 0.05, 0.1 and 0.2 N of H₂SO₄ and NaOH at 80°C. Within these experiments, the level of sugar concentration derived from dried duckweed biomass was higher compared to the fresh biomass. Especially, the highest reducing sugar at 796.21 ± 0.91 mg/l was released according to the treatment of dried duckweed biomass with 0.05 N H₂SO₄, whereas the lowest reducing sugar content was 200.04 ± 1.51 mg/l has been achieved after the treatment of fresh biomass with 0.2 N NaOH. However, the consecutively chemical composition analysis of duckweed *Lemna minor* L. biomass could be contributed to a substrate for biofuel energy production through the further appropriated variable technologies.

Keywords: Duckweed; *Lemna minor* L.; Lignocellulosic Composition; Biomass Pretreatment; Reducing Sugar



1. บทนำ

ปัจจุบันความต้องการใช้พลังงานทั่วโลกมีความต้องการสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของประชากร การขยายเขตเมืองและอุตสาหกรรม โดยมีพื้นฐานการผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นหลักและมีแนวโน้มที่จะหมดไปในอนาคตอันใกล้ [1] จึงนำไปสู่ความต้องการใช้พลังงานทางเลือกที่มีแนวโน้มสูงขึ้นทั่วโลก เพื่อลดการใช้พลังงานฟอสซิล และยังเป็นวิธีการสำคัญในการลดผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อม ดังเช่น การลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการใช้น้ำมันและถ่านหิน [2] หนึ่งในกลุ่มพลังงานทดแทนที่มีบทบาทสำคัญในปัจจุบัน ได้แก่ กลุ่มพลังงานเชื้อเพลิงชีวภาพ (Biofuel Energy) ที่มีการผลิตจากชีวมวลซึ่งเป็นวัตถุดิบที่พบมากในธรรมชาติ เช่น ไบโอเอทานอล (Bioethanol) ที่มีการผลิตจากผลิตผลทางการเกษตร เช่น อ้อย ข้าวโพดและมันสำปะหลัง เป็นต้น ซึ่งการนำพืชอาหารมาใช้ในการผลิตเอทานอลอาจส่งผลให้ราคาสินค้าปรับตัวสูงขึ้น และเกิดผลกระทบต่อผู้บริโภค [3, 4] ดังนั้นการพิจารณาเลือกวัตถุดิบในการผลิตพลังงานชีวภาพจากชีวมวลลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulosic Biomass) ชนิดอื่น ๆ จึงเป็นสิ่งที่จะต้องให้ความสนใจ ได้แก่ วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร หรือวัชพืช ซึ่งนอกจากจะเป็นการผลิตพลังงานทางเลือกจากวัสดุเศษเหลือแล้วยังเป็นวิธีการช่วยกำจัดวัชพืชที่มีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังพบว่าการผลิตพลังงานจากชีวมวลช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gas, GHG) นับได้ว่าเป็นแนวทางการผลิตพลังงานที่ยั่งยืน [5, 6] แต่อย่างไรก็ตามการพิจารณาเลือกชีวมวลที่จะนำมาใช้ในการผลิต

พลังงานชีวภาพยังคงมีความจำเป็นต้องวิเคราะห์องค์ประกอบที่สามารถใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ

แหวน *Lemna minor* L. เป็นสิ่งมีชีวิตกลุ่มพืชดอกชนิดใบเลี้ยงเดี่ยว ในวงศ์ Lemnaceae สามารถลอยน้ำได้จัดเป็นกลุ่มของวัชพืชน้ำ มักพบในแหล่งน้ำทั่วไปในประเทศเขตอบอุ่นและในเขตร้อน [7, 8] ลักษณะทั่วไปของแหวนที่น่าสนใจ เนื่องจากเป็นพืชน้ำที่เจริญได้รวดเร็วและสามารถพบได้ทั้งในแหล่งน้ำผิวดินทั่วไปและน้ำเสีย [9] และจากรายงานการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลแหวน พบว่าเป็นพืชที่มีการสะสมสารอินทรีย์ภายในเซลล์ทั้งกลุ่มไนโตรเจนและคาร์บอน อีกทั้งยังเป็นพืชที่มีการสะสมแป้งในปริมาณสูงอีกด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าแหวนเป็นชีวมวลที่มีการสะสมลิกนินในปริมาณต่ำ ซึ่งสัดส่วนของเซลลูโลสต่อลิกนินมีความสำคัญ เนื่องจากการย่อยสลายเซลลูโลสสามารถเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าลิกนิน ดังนั้นปริมาณเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการพิจารณาเลือกชีวมวล และยังคงพบว่ามีสัดส่วนลิกนินในเซลลูโลสมีผลต่อกระบวนการปรับสภาพชีวมวล (Pretreatment) เพื่อย่อยองค์ประกอบชนิดเซลลูโลสและลิกนินเซลลูโลส (Hydrolysis) ให้ได้เป็นผลิตภัณฑ์น้ำตาลรีดิวซ์ที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในกระบวนการหมักเพื่อผลิตพลังงานชีวภาพซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์มูลค่าสูงต่อไปในอนาคต [10-12]

ในงานวิจัยครั้งนี้ได้สนใจศึกษาซึ่งประสิทธิภาพของแหวน (*Lemna minor* L.) ที่เก็บตัวอย่างในมหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา โดยการวิเคราะห์องค์ประกอบกลุ่มลิกโนเซลลูโลส ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน เพื่อประเมิน

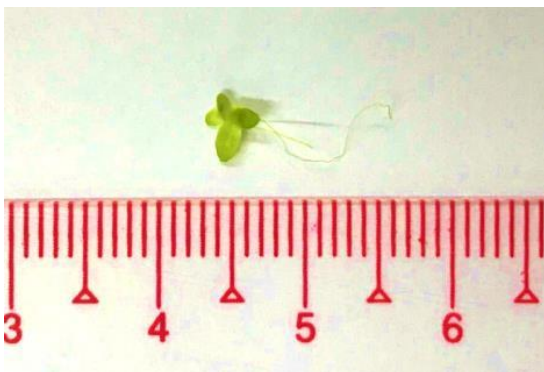


ศักยภาพในการเป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตพลังงานชีวภาพ โดยเฉพาะเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่เป็นสารในกลุ่มพอลิแซคคาไรด์ซึ่งเมื่อถูกย่อยจนได้โมเลกุลขนาดเล็กจะสามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการสังเคราะห์ทางชีวภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ [13, 14] โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ประเภทไบโอเอทานอลซึ่งจัดเป็นพลังงานเชื้อเพลิงที่มีความต้องการสูงขึ้นเป็นอย่างมากในปัจจุบัน

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

2.1 การเตรียมวัตถุดิบ

ตัวอย่างแหวน (*Lemna minor* L.) เก็บจากแหล่งน้ำในมหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา (รูปที่ 1) นำมาล้างด้วยน้ำสะอาด พักให้สะเด็ดน้ำแล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นบดตัวอย่างชีวมวลแหวนที่ผ่านการอบแห้งให้มีขนาดประมาณ 0.1 – 0.2 มิลลิเมตร



รูปที่ 1 ลักษณะทั่วไปของแหวน *Lemna minor* L. ที่เก็บในมหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา

2.2 การศึกษาองค์ประกอบลิกโนเซลลูโลสของชีวมวลแหวน

เตรียมตัวอย่างชีวมวลแหวน ทั้งชนิดแหวนสดและแหวนอบแห้ง เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณเซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemi-cellulose) และลิกนิน (Lignin) (ปรับปรุงจาก [15]) โดยการชั่งน้ำหนักตัวอย่างชีวมวล 0.50 กรัม (A) แล้วนำไปย่อยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 24 (น้ำหนักต่อปริมาตร) ปริมาตร 10 มิลลิลิตร เป็นเวลา 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำตัวอย่างไปกรองและล้างด้วย น้ำกลั่น 3 ครั้ง ก่อนนำไปอบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงชั่งน้ำหนัก (B) จากนั้นจึงนำตัวอย่างดังกล่าวไปย่อยด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ความเข้มข้นร้อยละ 72 (น้ำหนักต่อปริมาตร) ปริมาตร 4 มิลลิลิตร เป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วนำไปกรองและล้างด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้ง นำไปอบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนัก (C) ในขั้นตอนสุดท้าย นำตัวอย่างไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง พักให้เย็นที่อุณหภูมิห้องและชั่งน้ำหนัก (D) จากนั้นจึงคำนวณปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{ปริมาณเซลลูโลส} = B - C \quad (1)$$

$$\text{ปริมาณเฮมิเซลลูโลส} = A - B \quad (2)$$

$$\text{ปริมาณลิกนิน} = C - D \quad (3)$$

เมื่อ A = น้ำหนักตัวอย่างแหวนเริ่มต้น (A)

B = น้ำหนักตัวอย่างหลังการย่อยด้วยด่าง (B)

C = น้ำหนักตัวอย่างหลังการย่อยด้วยกรด (C)

D = น้ำหนักตัวอย่างหลังการเผา (D) (กรัม)



2.3 การปรับสภาพชีวมวลแห้งด้วยวิธีการทางเคมี

การปรับสภาพตัวอย่างชีวมวลแห้งในการทดลองครั้งนี้เลือกใช้วิธีการปรับสภาพด้วยวิธีทางเคมีร่วมกับการใช้ความร้อน โดยการใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.05, 0.1 และ 0.2 นอร์มัล ในอัตราส่วน 1 : 8 จากนั้นนำส่วนผสมระหว่างชีวมวลแห้งสดแห้งอบแห้งที่มีสารละลายกรดซัลฟิวริกและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Julabo, Germany) เป็นเวลา 60 นาที โดยเขย่าให้เข้ากันสม่ำเสมอทุก ๆ 10 นาที จนครบระยะเวลาของการปรับสภาพ (ปรับปรุงจาก [16]) ดำเนินการทดลอง 3 ซ้ำ และเมื่อครบระยะเวลาของการปรับสภาพจึงกรองแยกระหว่างสารละลายส่วนใสหรือเรียกว่า ไฮโดรไลเสท (Hydrolysate) ออกจากตะกอนชีวมวล แล้วนำไฮโดรไลเสทไปวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เป็นลำดับต่อไป

2.4 การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์

วิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์จากชีวมวลแห้งสดและอบแห้งที่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีการทางเคมีร่วมกับการใช้ความร้อนด้วยวิธี 3,5-Dinitro Salicylic Acid Method (DNS Method) ทำได้โดยนำไฮโดรไลเสทที่ได้จากการปรับสภาพชีวมวล ปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร และสารละลาย DNS (Sigma-Aldrich, USA) ปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดทดลอง ปิดฝาหลอดทดลอง และผสมสารละลายให้เป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นจึงป้อนสารละลายในอ่างน้ำควบคุม

อุณหภูมิที่ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เมื่อครบกำหนดเวลาจึงแช่หลอดทดลองลงในน้ำเย็นทันทีแล้วตั้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ก่อนนำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร (Metertech, Taiwan) [17, 18] ชุดควบคุม (Blank) เตรียมโดยใช้น้ำกลั่นแทนไฮโดรไลเสทจากการปรับสภาพ ชีวมวลแห้ง คำนวณค่ารีดิวซ์ที่ได้จากการปรับสภาพชีวมวลสามารถคำนวณได้จากการเปรียบเทียบค่าน้ำตาลรีดิวซ์จากกราฟมาตรฐานน้ำตาลกลูโคส (Glucose Standard Curve)

3. ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

3.1 การศึกษาองค์ประกอบลิกโนเซลลูโลสของชีวมวลแห้ง

ผลจากการวิเคราะห์องค์ประกอบลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulosic Biomass) ของชีวมวลแห้ง *Lemna minor* L. ที่เก็บตัวอย่างในมหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา ที่เตรียมตัวอย่างชนิดแห้งสดและอบแห้งประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบกลุ่มลิกโนเซลลูโลสของชีวมวลแห้ง

ชีวมวล	องค์ประกอบลิกโนเซลลูโลส (ร้อยละ)		
	เซลลูโลส	เฮมิเซลลูโลส	ลิกนิน
แห้งสด	19.22 ± 0.65	62.70 ± 0.97	12.11 ± 0.14
แห้งอบแห้ง	29.18 ± 0.41	64.83 ± 0.54	5.75 ± 0.51

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบลิกโนเซลลูโลสของแห้งสดและแห้งอบแห้งพบว่า เมื่อชีวมวลผ่าน



การอบแห้งโดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส อาจมีผลให้ปริมาณของลิกนินลดลง เนื่องจากความร้อนที่ได้รับทำให้โครงสร้างของชั้นผนังเซลล์แทนถูกทำลาย มีผลให้ลิกนินทำปฏิกิริยากับตัวทำละลายมากขึ้น [19] จึงทำให้สัดส่วนของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในภาพรวมของแหวนอบแห้งสูงกว่าที่วิเคราะห์ได้ในชีวมวลแห้งสดซึ่งองค์ประกอบส่วนของเซลลูโลสและลิกโนเซลลูโลสเป็นวัตถุดิบที่สำคัญที่สามารถเปลี่ยนรูปให้เป็นน้ำตาลสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ (Fermentable Sugar) ทั้งยังพบว่าปริมาณลิกนินที่พบในสัดส่วนที่น้อยมากทั้งในแห้งสดและแหวนอบแห้ง ยังเป็นปัจจัยสำคัญปัจจัยหนึ่งในการพิจารณาเลือกแหวน *Lemna minor* L. เป็นวัตถุดิบในการผลิตพลังงานชีวภาพ เช่น ก๊าซชีวภาพ (Biogas) และไบโอเอทานอล (Bioethanol) เป็นต้น [4, 20-21] นอกจากนี้ยังมีรายงานวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาองค์ประกอบลิกโนเซลลูโลสของแหวนด้วยวิธี Van Soest Method ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ปริมาณเซลลูโลส ลิกโนเซลลูโลส และลิกนินของแหวน (ไม่ระบุชนิดพันธุ์) พบว่าสัดส่วนขององค์ประกอบทั้งสามชนิดที่วิเคราะห์ได้นั้นมีสัดส่วนของลิกนินในปริมาณต่ำที่สุดที่ร้อยละ 12.0 ในขณะที่องค์ประกอบที่มากที่สุดได้แก่ เซลลูโลส ที่ร้อยละ 55.2 ตามด้วยเฮมิเซลลูโลสที่พบว่ามีอยู่ประมาณร้อยละ 32.6 เมื่อนำตัวอย่างแหวนไปใช้เป็นวัตถุดิบร่วมกับมูลวัวในอัตราส่วน 90 : 10 พบว่าให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพ 305 มิลลิลิตร ซึ่งน้อยกว่าการใช้มูลวัวเพียงอย่างเดียวที่ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพสูงถึง 11,620 มิลลิลิตร [22] อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุดิบชนิดอื่น เช่น มูลสัตว์ การผลิตพลังงานเชื้อเพลิงชีวภาพจากชีวมวลแหวนใช้เวลาหมักนานกว่า

ทั้งนี้เนื่องจากชีวมวลส่วนใหญ่จะมีเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบจำเป็นต้องมีกระบวนการย่อยและเปลี่ยนเป็นแหล่งพลังงานสำหรับจุลินทรีย์ เช่น กลุ่มสร้างก๊าซมีเทน (Methanogenic Bacteria) [23] ซึ่งต่างจากมูลสัตว์ที่มีแหล่งของสารอาหารที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการสังเคราะห์ก๊าซมีเทน (Methanogenesis) ในสัดส่วนที่เพียงพอแล้ว [24] และเมื่อพิจารณาการนำชีวมวลแหวนไปใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตไบโอเอทานอล พบว่ามีรายงานการใช้แหวนสายพันธุ์ *Landoltia punctata* เป็นซับสเตรตสำหรับการผลิตไบโอเอทานอล ซึ่งเป็นผลจากการศึกษาพบว่า แหวนเป็นพืชที่มีการสะสมแป้งในปริมาณสูงถึงร้อยละ 75 (ของน้ำหนักเซลล์) [25] และยังพบรายงานวิจัยที่พบว่าเมื่อมีการปรับสภาวะการเพาะเลี้ยงแหวนให้เจริญในสภาวะจำกัดสารอาหาร และให้แสงเป็นช่วงเวลานานขึ้น จะมีผลให้แหวนสายพันธุ์ *Spirodela polyrrhiza* สามารถสะสมแป้งได้เพิ่มขึ้นถึง 3 เท่า [26] ในขณะที่เดียวกันยังมีการศึกษาแนวทางการส่งเสริมให้แหวนสายพันธุ์ *S. polyrrhiza* มีการสะสมแป้งปริมาณสูงโดยการกระตุ้นด้วยฮอร์โมนพืชชนิด Abscisic Acid ซึ่งมีผลต่อการทำงานของเอนไซม์ Soluble Starch Synthase (SSS) และ Starch Branching Enzyme (SBE) เป็นผลให้แหวนสามารถสะสมแป้งได้สูงถึงร้อยละ 35.3 ของน้ำหนักเซลล์แห้ง [27]

จากการศึกษารายงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นนั้นพบว่าองค์ประกอบในกลุ่มคาร์โบไฮเดรต ซึ่งประกอบด้วย แป้ง เฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลส นับเป็นองค์ประกอบสำคัญที่สนับสนุนให้แหวนเป็นชีวมวลที่ได้รับความสนใจในการเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูงขึ้นและเป็นที่ต้องการใช้ในปัจจุบัน ทั้งยัง



พบว่าการที่เหนืมีความสามารถในการสะสมแป้งได้ในปริมาณสูงจัดได้ว่าเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตพลังงานชีวภาพ ซึ่งนอกจากจะช่วยลดขั้นตอนและค่าใช้จ่ายในการปรับสภาพชีวมวล (Pretreatment) แล้ว ยังเป็นการเพิ่มทางเลือกในการทดแทนชีวมวลบางชนิดที่จำเป็นต้องใช้พื้นที่และระยะเวลาในการเพาะปลูกเพื่อให้ได้ชีวมวลปริมาณมากพอสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ [28-29] แต่อย่างไรก็ตามอุปสรรคเกี่ยวกับการผลิตสารในกลุ่มพลังงานชีวภาพจากชีวมวลชนิดนี้ยังคงเป็นประเด็นสำคัญที่ต้องการการพัฒนาต่อไป ตัวอย่างเช่น การพิจารณาเลือกใช้การปรับสภาพด้วยวิธีการทางชีวภาพโดยการใช้เอนไซม์เพคตินเนส (Pectinase) ช่วยในการย่อยชีวมวล เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์น้ำตาลรีดิวซ์ที่เพียงพอสำหรับกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ เป็นต้น [30]

3.2 การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์

การปรับสภาพชีวมวลแห้งทั้งชนิดแห้งสด และแห้งอบแห้งเป็นกระบวนการย่อยหรือการทำลายโครงสร้างลิกโนเซลลูโลสและกำจัดลิกนิน เพื่อให้เกิดการย่อยเซลลูโลสให้ดีขึ้นและมีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งผลที่ได้คือน้ำตาลกลูโคสหรือน้ำตาลในกลุ่มน้ำตาลรีดิวซ์ (Reducing Sugar) [31] ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้วิธีการปรับสภาพด้วยวิธีการทางเคมีควบคู่กับการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส โดยการใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกและสารละลายไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.05, 0.1 และ 0.2 นอร์มัล ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์พบว่า ชีวมวลแห้งชนิดอบแห้งให้ปริมาณน้ำตาล

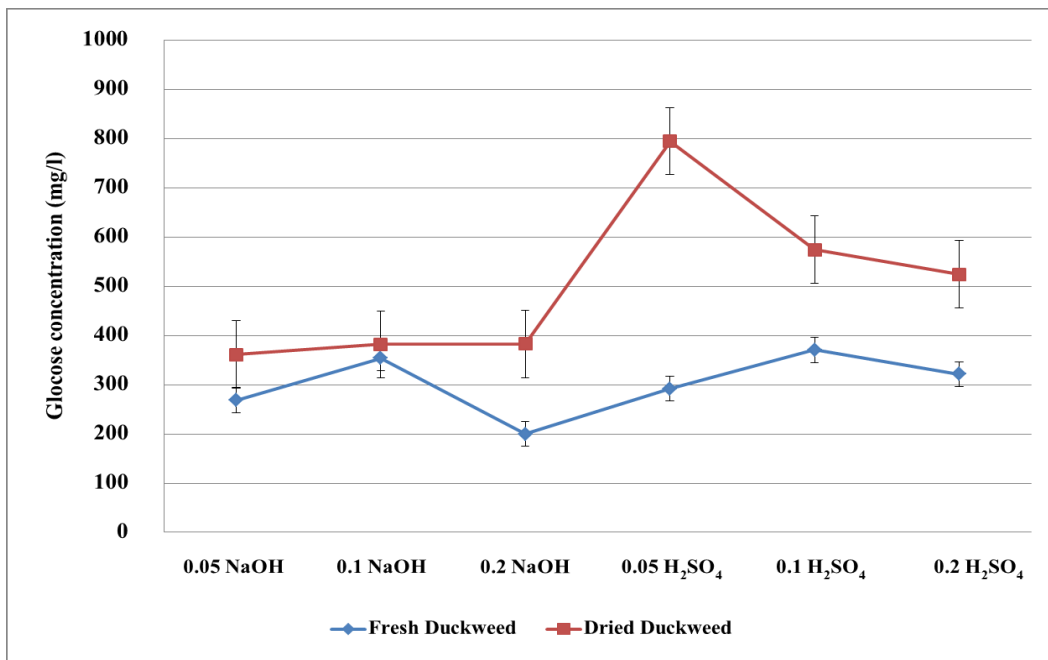
กลูโคสสูงกว่าแห้งสดทั้งในการปรับสภาพด้วยสารละลายกรดและต่างทุกความเข้มข้น เนื่องจากความร้อนที่ใช้ในการปรับสภาพตัวอย่างมีผลทำลายโครงสร้างผนังเซลล์ และโครงสร้างที่ซับซ้อนของลิกโนเซลลูโลส ทำให้สารกลุ่มพอลิแซคคาไรด์ ได้แก่ เซลลูโลส ลิกโนเซลลูโลส รวมทั้งแป้งที่เป็นองค์ประกอบภายในเซลล์สามารถทำปฏิกิริยากับตัวทำละลายและเปลี่ยนเป็นน้ำตาลรีดิวซ์ได้มากกว่าการใช้ชีวมวลแห้งสด [32] นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกมีประสิทธิภาพในการปรับสภาพตัวอย่างและให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงกว่าการใช้สารละลายต่าง โดยเฉพาะการใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้น 0.05 นอร์มัล ในการปรับสภาพแห้งอบแห้งให้ผลผลิตน้ำตาลรีดิวซ์สูงสุดที่ 796.21 ± 0.91 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่การปรับสภาพตัวอย่างแห้งสดให้ค่าน้ำตาลรีดิวซ์สูงสุดที่ 370.67 ± 1.16 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อปรับสภาพด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล (รูปที่ 2) จากผลการทดลองพบว่าการใช้สารละลายกรดมีประสิทธิภาพในการปรับสภาพตัวอย่างชีวมวลกลุ่มลิกโนเซลลูโลสเนื่องจากกรดซัลฟิวริกมีคุณสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการทำลายพันธะไกลโคซิดิก (Glycosidic Linkages) ทำให้เกิดการสะสมผลิตภัณฑ์กลุ่มพอลิแซคคาไรด์และจะมีประสิทธิภาพดีขึ้นเมื่อถูกกระตุ้นด้วยความร้อน [33] ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่พบในตัวอย่างแห้ง นอกจากจะเกิดจากการย่อยโครงสร้างเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสแล้วนั้น ยังพบว่าเป็นชีวมวลที่มีการสะสมพอลิแซคคาไรด์ปริมาณสูงซึ่งเมื่อผ่านกระบวนการย่อยหรือการปรับสภาพ ทำให้อัตราน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิด ดังรายงานวิจัยของ



Zhao *et al.* [34] พบว่าองค์ประกอบในกลุ่มคาร์โบไฮเดรตโดยเฉพาะคาร์โบไฮเดรตโมเลกุลเดี่ยว (Mono Saccharides) ของแหนสายพันธุ์ *L. minor* มีสัดส่วนสูงถึงร้อยละ 51.2 ของน้ำหนักเซลล์แห้ง แสดงให้เห็นว่าแหนเป็นชีวมวลที่เหมาะสมในการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์กลุ่มพลังงานเชื้อเพลิงชีวภาพเป็นอย่างดี โดยจากการศึกษาพบว่าเมื่อวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลในเซลล์แหน *L. minor* ที่ผ่านการทำแห้งสุญญากาศแบบแช่เยือกแข็ง ผลิตภัณฑ์น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่พบในปริมาณสูงสุด ได้แก่ น้ำตาลกลูโคส (331 กรัมต่อกิโลกรัม) นอกจากนี้ยังมีรายงานวิจัยที่ศึกษากระบวนการปรับสภาพชีวมวล

แหน *L. minor* ร่วมกับการใช้เอนไซม์ Cellulase และ β -Glucosidase เพื่อเตรียมสารตั้งต้นสำหรับการผลิตไบโอเอทานอลจากยีสต์ ซึ่งพบว่าสามารถสังเคราะห์ไบโอเอทานอลได้สูงถึงร้อยละ 80 เมื่อมีความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่เหมาะสม [34-35]

จากผลการวิเคราะห์น้ำตาลรีดิวซ์ที่พบในตัวอย่างแหนที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้จึงเป็นการเพิ่มแนวทางการใช้วัตถุดิบชีวมวลทางเลือกสำหรับการผลิตพลังงานชีวภาพ โดยเฉพาะกลุ่มเชื้อเพลิงชีวภาพที่ต้องอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ในการเปลี่ยนน้ำตาลรีดิวซ์



รูปที่ 2 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้จากการปรับสภาพตัวอย่างชีวมวลแห้งทั้งชนิดสดและอบแห้งด้วยการใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกและสารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์ (Fresh Duckweed = ตัวอย่างชีวมวลแห้งสด และ Dried Duckweed = ตัวอย่างชีวมวลแห้งอบแห้ง)



4. สรุปผลการทดลอง

การศึกษาในครั้งนี้เป็นการศึกษาศักยภาพของ แหนซึ่งเป็นชีวมวลประเภทหนึ่ง เพื่อนำมาใช้เป็น วัตถุดิบสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์มูลค่าสูง โดยเฉพาะ พลังงานเชื้อเพลิงชีวภาพที่กำลังมีบทบาทสำคัญเป็น อย่างมากต่อสถานการณ์โลกในปัจจุบัน เนื่องจาก แหน เป็นพืชน้ำที่มีอัตราการเจริญอย่างรวดเร็ว ใช้พื้นที่ น้อยในการเพาะเลี้ยง และจากการศึกษาในครั้งนี้ยัง พบว่า แหนมีสัดส่วนขององค์ประกอบทางเคมีชนิด เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสมากกว่าลิกนิน ซึ่งเป็น ปัจจัยสำคัญที่สนับสนุนให้การเปลี่ยนพอลิแซคคาไรด์ กลุ่มนี้ไปเป็นน้ำตาลสามารถทำได้ง่าย ไม่ต้องการ วิธีการที่ซับซ้อน ซึ่งผลจากการศึกษาปริมาณน้ำตาล ริดิวซ์ในชีวมวลแห้งทั้งชนิดสดและอบแห้ง พบว่า การใช้ชีวมวลแห้งชนิดอบแห้งเป็นวิธีการที่ช่วยให้ ได้ผลิตภัณฑ์น้ำตาลริดิวซ์ปริมาณสูงกว่าการใช้ แหนสด แต่อย่างไรก็ตามในการพิจารณาใช้ แหนเป็นวัตถุดิบ สำหรับกระบวนการหมักยังคงจำเป็นต้องมีการปรับ สภาพของตัวอย่าง แหน และเมื่อมีการใช้สารเคมี ทั้งสารละลายกรดและสารละลายต่าง จำเป็นต้องมี ขั้นตอนในการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง ให้เหมาะสม ต่อการเจริญของจุลินทรีย์ที่เป็นปัจจัยสำคัญใน การเปลี่ยนวัตถุดิบให้เป็นผลิตภัณฑ์มูลค่าสูง โดยเฉพาะกลุ่มพลังงานชีวภาพ และยังพบว่า การ ชะล้างสารละลายกรดและสารละลายต่างที่ใช้ในการ ปรับสภาพอาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นในการพิจารณาเลือกใช้ แหนเป็นชีวมวลตั้งต้น สำหรับการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจำเป็นต้องมี การศึกษาสายพันธุ์และสภาวะการเพาะเลี้ยงที่ เหมาะสม เพื่อนำไปสู่การพัฒนาให้เป็นวัตถุดิบหลัก

ในการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ เป็นแนวทางสำคัญใน การลดค่าใช้จ่าย และสามารถแข่งขันกับการผลิต เชื้อเพลิงปิโตรเคมี จากผลการทดลองในครั้งนี้ นอกจากจะเป็นการศึกษาวัตถุดิบทางเลือกที่เหมาะสม มีต้นทุนการผลิตต่ำแล้ว ยังเป็นวิธีการที่ช่วยควบคุม อัตราการแพร่กระจายของวัชพืชน้ำได้อย่างมี ประสิทธิภาพอีกทางหนึ่งด้วย

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Nahar and S.A. Sunny, Duckweed-based Clean Energy Production Dynamics (Ethanol and Biogas) and Phyto-remediation Potential in Bangladesh, *Modeling Earth Systems and Environment*, 2020, 6, 1-11.
- [2] F. Martins, C. Felgueiras, M. Smitkova and N. Caetano, Analysis of Fossil Fuel Energy Consumption and Environmental Impacts in European Countries, *Energies*, 2019, 12(6), 964, 1-11., doi:10.3390/en12060964.
- [3] M.A. Perea-Moreno, E. Samerón-Manzano and A.-J. Perea-Moreno, Biomass as Renewable Energy: Worldwide Research Trends, *Sustainability*, 2019, 11(3), 863, 1-19., doi: 10.3390/su11030863
- [4] T. Fujita, E. Nakao, M. Takeuchi, A. Tanimura, *et al.*, Characterization of Starch-Accumulating Duckweeds, *Wolffia globosa*, as Renewable Carbon Source for Bioethanol Production, *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 2016, 6, 123–127.



- [5] R. Chandra, H. Takeuchi and T. Hasegawa, Methane Production from Lignocellulosic Agricultural Crop Wastes: A Review in Context to Second Generation of Biofuel Production, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(3), 1462-1476.
- [6] J. Akhtar and N.A.S. Amin, A Review on Process Conditions for Optimum Bio-oil Yield in Hydrothermal Liquefaction of Biomass, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(3), 1615-1624.
- [7] J. Xu, H. Zhao, A.M. Stomp and J.J. Cheng, The Production of Duckweed as a Source of Biofuels, *Biofuels*, 2012, 3(5), 589-601.
- [8] J. Xu and G. Shen, Growing Duckweed in Swine Wastewater for Nutrient Recovery and Biomass Production, *Bioresource Technology*, 2011, 102(2), 848-853.
- [9] C. Yu, C. Sun, L. Yu, M. Zhu, H. Xu, J. Zhao, Y. Ma and G. Zhou, Comparative Analysis of Duckweed Cultivation With Sewage Water and SH Media for Production of Fuel Ethanol, *PLoS One*, 2014, 9(12), e115023, 1-15.
doi:10.1371/journal.pone.0115023.
- [10] Y. Xiao, Y. Fang, Y. Jin, G. Zhang, and H. Zhao, Culturing Duckweed in the Field for Starch Accumulation, *Industrial Crops and Products*, 2013, 48, 183-190.
- [11] R. Verma and S. Suthar, Bioenergy Potential of Duckweed (*Lemna gibba* L.) Biomass, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2016, 38(15), 2231-2237.
- [12] E.I. Iatrou, E. Kora and A.S. Stasinakis, Investigation of Biomass Production, Crude Protein and Starch Content in Laboratory Wastewater Treatment Systems Planted with *Lemna minor* and *Lemna gibba*, *Environmental Technology*, 2019, 40(20), 2649-2656.
- [13] J.B. Binder and R.T. Raines, Simple Chemical Transformation of Lignocellulosic Biomass into Furans for Fuels and Chemicals, *Journal of the American Chemical Society*, 2009, 131(5), 1979-1985.
- [14] F. Xu, Y.C. Shi and D. Wang, Enhanced Production of Glucose and Xylose with Partial Dissolution of Corn Stover in Ionic Liquid, 1-Ethyl-3-methylimidazolium Acetate, *Bioresource Technology*, 2012, 114, 720-724.
- [15] P. Serechodchawong and K. Sangkharak, The production of biodiesel and ethanol from pressed coconut, *Thaksin University Journal*, 2014, 17(3), 103-110. (in Thai)



- [16] B.T.N. Thi, L.H.V. Thanh, T.N.P. Lan, N.T.D. Thuy and Y.H. Ju, Comparison of Some Pretreatment Methods on Cellulose Recovery from Water Hyacinth (*Eichhornia Crassipe*), Journal of Clean Energy Technologies, 2017, 5(4), 274-279.
- [17] A.V. Gusakov, E.G. Kondratyeva and A.P. Sinitsyn, Comparison of Two Methods for Assaying Reducing Sugars in the Determination of Carbohydrase Activities, International Journal of Analytical Chemistry, 2011, 283658, 1-4., doi:10.1155/2011/283658.
- [18] G.L. Miller, Use of Dinitrosalicylic Acid Reagent for Determination of Reducing Sugar, Analytical Chemistry, 1959, 31(3), 426-428.
- [19] L.R.F. Souto, I.F. da Silva, J.L. Ninow, S.R.A. Collins, A. Elliston and K.W. Waldron, Effect of Hydrothermal Pre-treatment on Duckweed (*Landoltia punctata*) Biomass for Simultaneous Saccharification and Fermentation Process, Biomass and Bioenergy, 2019, 127, 105259.
- [20] T.T.T. Cu, T.X. Nguyen, J.M. Triolo, L. Pedersen, V.D. Le, P.D. Le and S.G. Sommer, Biogas Production from Vietnamese Animal Manure, Plant Residues and Organic Waste: Influence of Biomass Composition on Methane Yield, Asian Australasian Journal of Animal Sciences, 2015, 28(2), 280-289.
- [21] R. Ramaraj and Y. Unpaprom, Effect of Temperature on the Performance of Biogas Production from Duckweed, Chemistry Research Journal, 2016, 1(1), 58-66.
- [22] D. Yadav, L. Barbora, D. Bora, S. Mitra, L. Rangan, and P. Mahanta, An Assessment of Duckweed as a Potential Lignocellulosic Feedstock for Biogas Production, International Biodeterioration & Biodegradation, 2017, 119, 253-259.
- [23] V. Facchin, C. Cavinato, F. Fatone, P. Pavan, F. Cecchi and D. Bolzonella, Effect of Trace Element Supplementation on the Mesophilic Anaerobic Digestion of Food Wastes in Batch Trials: The Influence of Inoculum Origin, Biochemical Engineering Journal, 2013, 70, 71-77.
- [24] M. Seppälä, V. Pyykkönen, A. Väisänen and J. Rintala, Biomethane Production from Maize and Liquid Cow Manure - Effect of Share of Maize, Post methanation Potential and Digestate Characteristics, Fuel, 2013, 107, 209-216.
- [25] J.J. Cheng and A.M. Stomp, Growing Duckweed to Recover Nutrients from Wastewaters and for Production of Fuel Ethanol and Animal Feed, CLEAN – Soil, Air, Water, 2009, 37(1), 17 – 26.



- [26] W. Cui and J.J. Cheng, Growing Duckweed for Biofuel Production: A Review, *Plant Biology*, 2014, 17(1), 16-23.
- [27] X. Wang, W. Cui, W. Hu and C. Feng, Abscisic Acid-Induced Starch Accumulation in Bioenergy Crop Duckweed *Spirodela polyrrhiza*, *BioEnergy Research*, 2017, 10, 417-426.
- [28] N. Mosier, C. Wyman, B. Dale, R. Elander, Y.Y. Lee, M. Holtzapple and M. Ladisch, Features of Promising Technologies for Pretreatment of Lignocellulosic Biomass, *Bioresource Technology*, 2005, 96(6), 673-686.
- [29] K. Sander and G.S. Murthy, Life Cycle Analysis of Algae Biodiesel, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2010, 15, 704-714.
- [30] Q. Chen, Y. Jin, G., Zhang, Y. Fang, Y. Xiao and H. Zhao, Improving Production of Bioethanol from Duckweed (*Landoltia punctata*) by Pectinase Pretreatment, *Energies*, 2012, 5(8), 3019-3032.
- [31] A.P. Dadi, S. Varanasi and C.A. Schall, Enhancement of Cellulose Saccharification Kinetics Using an Ionic Liquid Pretreatment Step, *Biotechnology and Bioengineering*, 2006, 95(5), 904-910.
- [32] V.B. Barua and A.S. Kalamdhad, Effect of Various Types of Thermal Pretreatment Techniques on the Hydrolysis, Compositional Analysis and Characterization of Water Hyacinth, *Bioresource Technology*, 2017, 227, 147–154.
- [33] N.N. Deshavath, M. Mohan, V.D. Veeranki, V.V. Goud, S.R. Pinnamaneni and T. Benarjee, Dilute Acid Pretreatment of Sorghum Biomass to Maximize the Hemicellulose Hydrolysis with Minimized Levels of Fermentative Inhibitors for Bioethanol Production, *3 Biotech*, 2017, 7(2), 139, 1-12., doi: 10.1007/s13205-017-0752-3.
- [34] X. Zhao, G.K. Moates, N. Wellner, S.R.A. Collins, M.J. Coleman and K.W. Waldron, Chemical Characterisation and Analysis of the Cell Wall Polysaccharides of Duckweed (*Lemna minor*), *Carbohydrate Polymers*, 2014, 111, 410–418.
- [35] X. Zhao, G.K. Moates, A. Elliston, D.R. Wilson, M.J. Coleman and K.W. Waldron, Simultaneous Saccharification and Fermentation of Steam Exploded Duckweed: Improvement of the Ethanol Yield by Increasing Yeast Titre, *Bioresource Technology*, 2015, 194, 263–269.



การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากวัสดุเหลือใช้

ทางการเกษตร

ชนิกานต์ ขำประไพ ณิชชา บุญถนอม ธิษชนก โรจนานนท์ และ จารุวรรณ วงศ์ทะเลทร *

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม, คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์, มหาวิทยาลัยมหิดล

*ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: jaruwan.won@mahidol.ac.th

วันที่รับบทความ: 1 กรกฎาคม 2563; วันที่ทบทวนบทความ: 18 สิงหาคม 2563; วันที่ตอบรับบทความ: 19 กันยายน 2563

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 12 ธันวาคม 2563

บทคัดย่อ: การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรหลายชนิด ทำการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรกับตัวประสาน และเปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ดำเนินการทดลองโดยวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ได้แก่ กากอ้อย (BG) ชี้อ้อยยางพารา (WS) ชังข้าวโพด (CC) ฟางข้าว (RS) ใบไม้ยางพารา (LP) และเศษไม้ยางพารา (RC) ผสมกับตะกอนแป้งมันสำปะหลังแห้ง (CS) เสมือนเป็นตัวประสาน ที่อัตราส่วนของ 0.25:0.75, 0.50:0.50 และ 0.75:0.25 กิโลกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และขึ้นรูปเชื้อเพลิงอัดแท่งด้วยกระบวนการอัดเย็น จากนั้นศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของเชื้อเพลิงอัดแท่งคือ ค่าความร้อน ปริมาณความชื้น และปริมาณเถ้า และคุณสมบัติทางกายภาพคือ ความหนาแน่นและดัชนีแตกร้าว รวมทั้งประสิทธิภาพการใช้งานของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ผลการศึกษาพบว่า เชื้อเพลิงอัดแท่งของเศษไม้ยางพาราผสมกับตะกอนแป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วน 0.50:0.50 เป็นเชื้อเพลิงทางเลือกที่มีประสิทธิภาพสูงสุด (ค่าความร้อน 4,136.9728 แคลอรีต่อกรัม ปริมาณความชื้นและปริมาณเถ้า 7.33 และ 5.33 ร้อยละโดยน้ำหนัก ตามลำดับ ความหนาแน่น 0.47 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร และดัชนีแตกร้าว 0.78) และสามารถประยุกต์เป็นแนวทางของการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรสำหรับใช้เป็นแหล่งพลังงานทางเลือกของชุมชน

คำสำคัญ: เชื้อเพลิงอัดแท่ง; วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร; ตะกอนแป้งมันสำปะหลัง



The Efficiency Comparison of Fuel Briquettes from Agricultural Wastes

Chanikan Kumpapai Nutcha Boonthanom Thanchanok Rodjananon and
Jaruwan Wongthanate *

Environmental Science and Technology, Faculty of Environment and Resource Studies, Mahidol University

*Corresponding Author, E-mail: jaruwan.won@mahidol.ac.th

Received: 1 July 2563; Revised 18 August 2563; Accepted: 19 September 2563

Online Published: 12 December 2020

Abstract: The objectives of this research were to study the feasibility of fuel briquettes from various types of agricultural wastes, to study the optimal ratios of agricultural wastes and binder and to compare the efficiency of chemical and physical properties on fuel briquettes from agricultural wastes. The experiment was conducted by the agricultural wastes such as bagasse (BG), rubber wood sawdust (WS), corn cobs (CC), rice straw (RS), leaves of para rubber (LP) and rubber wood chips (RC) that were mixed with dry cassava starch sediment (CS) as a binder at the ratios of 0.25:0.75, 0.50:0.50 and 0.75:0.25 kg:kg, respectively. Also, the fuel briquettes were formed by a cold pressed process. Then, study of chemical properties of fuel briquettes were heating value, moisture content, and ash content and their physical properties were density and drop shatter test including performance of fuel briquettes from agricultural wastes. Results showed that the fuel briquette from rubber wood chips mixed with cassava starch sediment was at 0.50:0.50 was the most effective alternative fuel (heating value was 4,136.9728 cal/g, moisture content and ash content was 7.33 and 5.33 % w/w respectively, density of 0.47 g/cm³ and drop shatter of 0.78) and it can be applied as a guideline of fuel briquettes from agricultural wastes for using alternative energy source in community.

Keyword: Fuel briquette; Agricultural waste; Cassava starch sediment



1. บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยมีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งพลังงานถือเป็นปัจจัยสำคัญในการดำรงชีวิต ทุกภาคส่วนทั้งภาคการคมนาคมขนส่ง ภาคอุตสาหกรรม ภาคการเกษตร และภาคครัวเรือนมีความต้องการใช้พลังงานเพิ่มขึ้น แต่ด้วยทรัพยากรพลังงานที่มีอย่างจำกัด ทำให้เกิดการขาดแคลนพลังงาน ทุกหน่วยงานจึงมีการจัดทำมาตรการแผนพัฒนา รวมไปถึงมีการสนับสนุนให้ใช้พลังงานทางเลือก และการหาแหล่งพลังงานทดแทน ซึ่งเป็นพลังงานที่ไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และเป็นแหล่งพลังงานที่มีอยู่ในท้องถิ่น [1]

เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม มีศักยภาพในการผลิตพืชผลทางการเกษตร โดยผลพลอยได้ที่ได้จากผลผลิตทางการเกษตร คือ ชีวมวลหรือวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ในอดีตชีวมวลส่วนใหญ่จะถูกทิ้งเป็นปุ๋ยอินทรีย์หรือกำจัดโดยการเผาทำลาย เป็นการสร้างมลพิษให้กับสิ่งแวดล้อม แต่อันที่จริงแล้ว ชีวมวลเหล่านี้มีสมบัติในการเป็นเชื้อเพลิงอย่างดีและให้ค่าพลังงานความร้อนในระดับที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ชีวมวลจึงเป็นเป้าหมายสำคัญที่ถูกพิจารณาเพื่อเป็นทางเลือกของแหล่งพลังงานใหม่ การใช้ประโยชน์จากพลังงานชีวมวล [2] แต่ผู้ใช้ส่วนใหญ่จะนำชีวมวลมาใช้ทันที โดยไม่ผ่านกระบวนการแปรรูปอื่น ซึ่งลักษณะของการใช้ชีวมวลมาเป็นเชื้อเพลิงรูปแบบนี้มักจะเกิดปัญหาเกี่ยวกับการใช้หลายประการ ได้แก่ ปัญหาความชื้น ถ้าชีวมวลมีปริมาณความชื้นของชีวมวลมากจะต้องใช้ปริมาณของชีวมวลมาก เนื่องจากความร้อนส่วนหนึ่งของชีวมวลถูก

ใช้ไปกับการระเหยน้ำออก ปัญหาการจัดเก็บชีวมวลส่วนมากจะมีขนาดใหญ่ทำให้ต้องเปลืองพื้นที่สำหรับการจัดเก็บ ปัญหาการขนส่ง หากชีวมวลมีขนาดใหญ่ น้ำหนักจะมาก รวมทั้งรูปร่างของชีวมวลอาจมีความยาวและขนาดแตกต่างกันทำให้ขนย้ายได้น้อย ส่งผลให้สิ้นเปลืองเวลาการขนส่งเป็นอย่างมาก และปัญหาการออกแบบห้องเผาไหม้ ปัญหาของการใช้ชีวมวลมาเป็นเชื้อเพลิงดังที่กล่าวมาข้างต้นสามารถแก้ปัญหาได้โดยการอัดแท่ง โดยการอัดแท่งจะทำให้โดยนำชีวมวลที่ผ่านการลดขนาดจนเป็นผงละเอียดมาอัดขึ้นรูปเป็นแท่งด้วยเครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิงแท่ง ซึ่งการอัดแท่งนี้จะช่วยลดปริมาตรชีวมวลให้เล็กลงได้เพื่อช่วยลดพื้นที่ของการจัดเก็บเชื้อเพลิงและจำนวนเที่ยวของการขนส่งเคลื่อนย้ายอีกด้วย [3]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวความคิดในการนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่ต้องเป็นขยะ มาทำให้เกิดประโยชน์ โดยมีการนำของเสียจากโรงงานแปรรูปมันสำปะหลัง คือ ตะกอนแป้งมันสำปะหลังมาเป็นตัวประสานกับวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ซึ่งจะช่วยลดปัญหาการจัดการขยะ ลดปัญหามลพิษสิ่งแวดล้อม ลดปัญหาการขาดแคลนพลังงาน ลดปัญหาการใช้พื้นที่และถ่านไม้จากธรรมชาติ โดยมีวัตถุประสงค์การวิจัยดังนี้ 1) เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง 2) เพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรกับตัวประสานของการผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง และ 3) เพื่อเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพและเคมีของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร



2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

2.1 การเตรียมวัตถุดิบและตัวประสาน

การนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ได้แก่ กากอ้อย ขี้เลื่อยยางพารา ชังข้าวโพด ฟางข้าว ใบไม้ยางพารา และเศษไม้ยางพารา ตากแดดเป็นเวลา 3-5 วัน และนำไปบดให้มีขนาดประมาณ 2 มิลลิเมตร โดยใช้เครื่อง Hammer mill ขนาด 3 แรงม้า แล้วทำการชั่งน้ำหนักแห้ง ส่วนตัวประสานใช้ตะกอนแป้งมันสำปะหลังมาจากโรงงานอุตสาหกรรมการเกษตรในจังหวัดนครปฐม ซึ่งมีคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ ดังนี้ pH 4.12, TS 126.31 g/L, VS 125.32 g/L, COD 24 g/L, TOC 2.55 g/L, TNK 0.92 g/L และ C/N ratio 2.77 โดยทำการตักตะกอนแป้งจากถังตักตะกอนแป้งจำนวน 4 ถัง ปริมาณถังละ 5 กิโลกรัม จากนั้นนำมาบดเป็นผงและทำการแผ่กระจายตากแดดเป็นเวลา 5 วัน แล้วจึงเก็บรักษาไว้ในที่แห้ง

2.2 วิธีการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยในระดับห้องปฏิบัติการ โดยมีรายละเอียดดังนี้

การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร โดยนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ได้แก่ กากอ้อย ขี้เลื่อยยางพารา ชังข้าวโพด ใบยางพารา ฟางข้าว และเศษไม้ยางพารา ผสมกับตัวประสานของตะกอนแป้งมันสำปะหลังแห้ง 3 อัตราส่วน ได้แก่ 0.75:0.25, 0.50:0.50 และ 0.25:0.75 กิโลกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งอัตราส่วน 0.75:0.25 แสดงถึงอัตราส่วนที่มีวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่มากกว่าตัวประสาน อัตราส่วน 0.50:0.50 แสดงถึงอัตราส่วนที่มีวัสดุเหลือใช้เท่ากับตัวประสาน และอัตราส่วน 0.25:0.75 แสดงถึงอัตราส่วนที่มีวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่น้อยกว่า

ตัวประสาน และเชื้อเพลิงอัดแท่งอัตราส่วนเหล่านี้ มีคุณสมบัติทางเคมีค่าใกล้เคียงกับมาตรฐานของผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่ง [4] จากนั้นทำการผสมในอัตราส่วนต่างๆ ด้วยเครื่องผสมขนาด 3 แรงม้า จากนั้นนำไปขึ้นรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง โดยกระบวนการอัดเย็นด้วยเครื่องขึ้นรูปเชื้อเพลิงอัดแท่งแบบสกรูขนาด 5 แรงม้า และทำการตัดเชื้อเพลิงอัดแท่งเป็นแท่งขนาด 6-12 เซนติเมตร นำไปตากแดดให้แห้งเป็นเวลา 3-5 วัน แล้วจึงทำการชั่งน้ำหนักเชื้อเพลิงอัดแท่งดังกล่าว

2.2.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากวัสดุทางการเกษตร

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของเชื้อเพลิงอัดแท่งวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM (American Society for Testing and Materials) โดยดำเนินการทดลองชุดละ 3 ซ้ำ ดังนี้

1. ค่าความร้อนเชื้อเพลิง (Heating Value)

การวิเคราะห์ค่าความร้อนเชื้อเพลิงอัดแท่งจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ทำตามมาตรฐาน ASTM D5865 [5] โดยใช้เครื่องวิเคราะห์พลังงานความร้อน (Bomb Calorimeter) ซึ่งนำตัวอย่างของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรไปทำการอัดเม็ดและชั่งน้ำหนัก ใส่ในถ้วยใส่ตัวอย่าง จับลวดขดเป็นรูปตัวยู โดยให้ลวดสัมผัสกับตัวอย่างเท่านั้น จากนั้นนำไปใส่ลงในลูกบอมม์และอัดก๊าซออกซิเจนความดันประมาณ 30 บรรยากาศ หลังจากนั้นนำไปวางในถังบรรจุบอมม์และเติมน้ำกลั่น 2 ลิตร ลงในถังดำเนินการจุดระเบิดเข้ากับตัวบอมม์ และจึงบันทึกผล



2. ปริมาณความชื้น (Moisture content)

การวิเคราะห์ปริมาณความชื้นของตัวอย่างเชื้อเพลิงอัดแท่งจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ทำตามมาตรฐาน ASTM D3173 [6] โดยนำด้วยกระเบื้องที่สะอาดไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำไปใส่ในโถดูดความชื้น 15 นาที และใส่ตัวอย่างประมาณ 1 กรัม ในด้วยกระเบื้อง แล้วทำการชั่งน้ำหนัก (W_1) และนำเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ประมาณ 1 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องในโถดูดความชื้น 15 นาที และนำไปชั่งน้ำหนัก (W_2) จากนั้นคำนวณปริมาณความชื้นโดยใช้สูตร [6] ดังนี้

$$M = (W_1 - W_2) / W * 100 \quad (1)$$

โดยที่ M คือ ร้อยละของปริมาณความชื้น

W_1 คือ น้ำหนักถ้วยและตัวอย่างก่อนอบ (กรัม)

W_2 คือ น้ำหนักถ้วยและตัวอย่างหลังอบ (กรัม)

W คือ น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)

3. ปริมาณเถ้า (Ash Content)

การวิเคราะห์ปริมาณความชื้นของตัวอย่างเชื้อเพลิงอัดแท่งจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ทำตามมาตรฐาน ASTM D3174 [7] โดยนำด้วยกระเบื้องที่สะอาดไปเผาในเตาเผาเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปใส่ในโถดูดความชื้น 15 นาที และใส่ตัวอย่างประมาณ 1 กรัม ในด้วยกระเบื้อง แล้วทำการชั่งน้ำหนัก (W_3) และนำไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 2 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องในโถดูดความชื้น 15 นาที และนำไปชั่งน้ำหนัก (W_4) จากนั้นคำนวณปริมาณเถ้าโดยใช้สูตร [7] ดังนี้

$$M = (W_3 - W_4) / W * 100 \quad (2)$$

โดยที่ M คือ ร้อยละของปริมาณความชื้น

W_3 คือ น้ำหนักถ้วยและตัวอย่างก่อนเผา (กรัม)

W_4 คือ น้ำหนักถ้วยและตัวอย่างหลังเผา (กรัม)

W คือ น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)

2.2.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากวัสดุทางการเกษตร

1. การทดสอบดัดขึ้นแตกกร้าว (Drop Shatter Test)

การทดสอบโดยนำก้อนเชื้อเพลิงอัดแท่งจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรใส่ถุงพลาสติก ปลดออกจากที่สูง 2 เมตร ลงสู่พื้นคอนกรีต จากนั้นนำก้อนเชื้อเพลิงอัดแท่งส่วนที่เหลือดังกล่าวไปชั่งน้ำหนัก และใช้สูตรการวิเคราะห์ดัดขึ้นแตกกร้าว [8] ดังนี้

$$R = W / W_f \quad (3)$$

โดยที่ R คือ ดัดขึ้นแตกกร้าว W คือ น้ำหนักก่อนทดสอบ (กิโลกรัม) และ W_f คือ น้ำหนักหลังทดสอบ (กิโลกรัม)

2. ความหนาแน่น (Density)

การทดสอบโดยนำก้อนเชื้อเพลิงอัดแท่งจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรชั่งน้ำหนัก และวัดปริมาตรของก้อนเชื้อเพลิงอัดแท่งดังกล่าว จากนั้นนำไปคำนวณจากสูตรการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่น [8] ดังนี้

$$P = M / V \quad (4)$$

โดยที่ P คือ ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงอัดแท่ง (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) M คือ มวลของเชื้อเพลิงอัดแท่ง (กรัม) และ V คือ ปริมาตรของเชื้อเพลิงอัดแท่ง (ลูกบาศก์เซนติเมตร)



2.2.3 การทดสอบการใช้งาน

การจุดติดไฟการนำเชื้อเพลิงอัดแท่งจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรแต่ละอัตราส่วนที่ขึ้นรูปได้ดีไปเผา และดำเนินการจับเวลา แล้วจึงทำการเปรียบเทียบระยะเวลาการติดไฟในชุดการทดลอง โดยนำเชื้อเพลิงอัดแท่งจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรปริมาณ 200 กรัม มาจุดไฟให้ติด การตม้น้ำในหม้อน้ำให้เดือดปริมาตร 0.7 ลิตร และจดบันทึกระยะเวลาตั้งแต่เมื่อเชื้อเพลิงอัดแท่งเริ่มติดไฟจนกระทั่งไฟดับ

การทดสอบระยะเวลาการเกิดควันโดยการนำเชื้อเพลิงอัดแท่งจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรแต่ละอัตราส่วนที่ขึ้นรูปได้ดีไปเผา และดำเนินการจับเวลา แล้วจึงทำการเปรียบเทียบระยะเวลาการเกิดควัน โดยนำเชื้อเพลิงอัดแท่งแต่ละอัตราส่วนมาจุดไฟให้ติดทำการจับเวลาและจดบันทึกระยะเวลาตั้งแต่เกิดควันจนกระทั่งควันหมด

3. ผลการวิจัย

3.1 สมบัติของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร

จากผลการศึกษาคูณสมบัติทางเคมีของเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ผลิตจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ได้แก่ กากอ้อย (BG) ชี้อย่างพารา (WS) ชังข้าวโพด (CC) ไบโม่อย่างพารา (LP) ฟางข้าว (RS) และเศษไม้ อย่างพารา (RC) พบว่าปริมาณความชื้นของวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรร้อยละ 6.00 - 8.33 โดยน้ำหนัก และปริมาณแฉะร้อยละ 2.67 - 12.67 โดยน้ำหนัก ส่วนค่าความร้อนเชื้อเพลิงอยู่ในช่วง 2,876.11 - 4,210.40 แคลอรีต่อกรัม ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับผลงานวิจัยที่ผ่านมาของเชื้อเพลิงอัด

แท่งจากเปลือกสับปะรดซึ่งมีค่าความชื้นร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก ค่าปริมาณแฉะร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก และค่าความร้อนเชื้อเพลิง 3,920.41 แคลอรีต่อกรัม [9] และผลงานวิจัยของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากเมล็ดผสมเปลือก ลำไยมีค่าปริมาณความชื้น 7.93 ร้อยละฐานแห้ง ค่าปริมาณแฉะ 88.48 ร้อยละฐานแห้ง และค่าความร้อนเชื้อเพลิง 3,788.26 แคลอรีต่อกรัม [10] ดังนั้นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรดังกล่าวข้างต้นมีความเป็นไปได้ในการนำไปผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง

3.2 อัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรกับตัวประสานในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง

จากการศึกษาเชื้อเพลิงอัดแท่งจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรกับตะกอนแป้งมันสำปะหลังในอัตราส่วน 0.25:0.75, 0.50:0.50 และ 0.75:0.25 กิโลกรัมต่อกิโลกรัม พบว่า เชื้อเพลิงอัดแท่งจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรสามารถขึ้นรูปได้เกือบทุกชนิด ยกเว้นเชื้อเพลิงอัดแท่งของ RS:CS ที่อัตราส่วน 0.75:0.25 ซึ่งไม่สามารถขึ้นรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งได้ สำหรับเชื้อเพลิงอัดแท่งจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่สามารถขึ้นรูปได้ คือ BG:CS, RC:CS และ RS:CS ที่อัตราส่วน 0.25:0.75, 0.50:0.50 ส่วนการขึ้นรูปของ WS:CS, LP:CS สามารถขึ้นรูปได้ทุกอัตราส่วน และการขึ้นรูปของ CC:CS ที่อัตราส่วน 0.25:0.75 ทั้งนี้อัตราส่วนที่สามารถขึ้นรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ดีที่สุดจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรแต่ละชนิด คือ อัตราส่วนที่ 0.50:0.50 ของ WS:CS (รูปที่ 1) RC:CS (รูปที่ 2) และ LP:CS (รูปที่ 3) และอัตราส่วนที่ 0.25:0.75 ของ BG:CS (รูปที่ 4) CC:CS (รูปที่ 5) และ RS:CS (รูปที่ 6) ตามลำดับ



ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางเคมีของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร

ชนิดวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร	ปริมาณความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ปริมาณเถ้า (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ค่าความร้อนเชื้อเพลิง (แคลอรี/กรัม)
กากอ้อย	8.33	2.67	2,876.11
ขี้เลื่อยยางพารา	7.50	4.33	4,210.40
ขังข้าวโพด	8.33	2.67	4,038.30
ใบไม้ยางพารา	6.00	12.67	4,156.66
ฟางข้าว	7.67	12.33	3,673.33
เศษไม้ยางพารา	7.00	2.67	4,122.27



รูปที่ 1 WS:CS
(0.50:0.50)



รูปที่ 2 RC:CS
(0.50:0.50)



รูปที่ 3 LP:CS
(0.50:0.50)



รูปที่ 4 BG:CS
(0.25:0.75)



รูปที่ 5 CC:CS
(0.25:0.75)



รูปที่ 6 RS:CS
(0.25:0.75)

ดังนั้นอัตราส่วนระหว่างวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรต่อตัวประสานที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งคืออัตราส่วนที่ 0.25:0.75 และ 0.50:0.50 ในขณะที่อัตราส่วน 0.75:0.25 สามารถขึ้นรูปได้ แต่มีขนาดและความแข็งแรงไม่ได้ตามมาตรฐานของงานวิจัยนี้ และการที่อัตราส่วน 0.25:0.75 และ 0.50:0.50 ขึ้นรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งได้ดี เนื่องจากอัตราส่วนของตัวประสานมากกว่าหรือเท่ากับวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ทำให้เชื้อเพลิงอัดแท่งจับตัวกันได้ดี ส่งผลให้สามารถขึ้นรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งได้ดีมากขึ้น โดยสามารถขึ้นรูปเป็นทรงกระบอก มีความแข็งแรงพื้นผิวเรียบสม่ำเสมอ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร และความยาวประมาณ 6-12 เซนติเมตร ซึ่งมีความสอดคล้องและใกล้เคียงกับผลงานวิจัยที่ผ่านมาของการนำเปลือกทุเรียนและเปลือกมังคุดมาใช้ประโยชน์ในรูปเชื้อเพลิงอัดแท่งซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร และความยาว 12 เซนติเมตร [11]

3.3 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร

คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของเชื้อเพลิงอัดแท่งที่สามารถขึ้นรูปได้ดีจากอัตราส่วนระหว่างวัสดุ



เหลือใช้ทางการเกษตรแต่ละชนิดกับตัวประสานพบว่า ค่าปริมาณความชื้นร้อยละ 7.33 - 8.67 โดยน้ำหนัก ค่าปริมาณแถ้าร้อยละ 1.67 - 8.67 โดยน้ำหนัก ค่าความร้อนเชื้อเพลิง 3,705.67- 4,136.97 แคลอรีต่อกรัม ค่าความหนาแน่น 0.46 - 0.68 กรัมต่อลูกบาศก์ เซนติเมตร และค่าดัชนีแตกร้า 0.76 - 0.98 ดังแสดงในตารางที่ 2

นอกจากนี้ยังพบว่า เชื้อเพลิงอัดแท่งที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด คือ เชื้อเพลิงอัดแท่งขึ้นรูปของ RC:CS ที่อัตราส่วน 0.50:0.50 เนื่องจากมีค่าปริมาณความชื้นร้อยละ 7.33 โดยน้ำหนัก และค่าปริมาณแถ้าร้อยละ 5.33 โดยน้ำหนัก อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่ง [12] และมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านไม้หุงต้ม [13] ตามลำดับ ซึ่งได้ระบุค่ามาตรฐานของค่าปริมาณความชื้นและค่าปริมาณแถ้าไม่เกินร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก อย่างไรก็ตามพบว่ามีค่าความร้อนเชื้อเพลิง 4,136.79 แคลอรี

ต่อกรัม ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานของผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่ง [12] ซึ่งระบุค่าความร้อนเชื้อเพลิงไว้ไม่น้อยกว่า 5,000 แคลอรีต่อกรัม ทั้งนี้อาจเกิดจากเชื้อเพลิงอัดแท่งในการศึกษาครั้งนี้ไม่ได้ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) ทำให้มีปริมาณสารระเหยคงเหลืออยู่ในเชื้อเพลิงอัดแท่งและความร้อนเชื้อเพลิงต่ำ เมื่อเทียบกับมาตรฐานของผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่ง ซึ่งผลการศึกษางานวิจัยครั้งนี้ การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจาก RC:CS (0.50:0.50) มีประสิทธิภาพดีที่สุด และมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยอื่นๆ (ตารางที่ 2) โดยเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ผลิตจากผักตบชวาผสมกับตะกอนแป้งมันสำปะหลัง(WH:CS) ที่อัตราส่วน 50:50 โดยน้ำหนักเปือก [4] พบว่า มีค่าความร้อนเชื้อเพลิงสูงกว่า ปริมาณความชื้นและปริมาณแถ้าต่ำกว่า ซึ่งถือได้ว่าเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งที่มีประสิทธิภาพดี

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ขึ้นรูปได้ดีของวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรแต่ละชนิดกับตัวประสาน

เชื้อเพลิงอัดแท่ง	อัตรา ส่วน (kg:kg)	ปริมาณความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ปริมาณแถ้า (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ค่าความร้อนเชื้อเพลิง (แคลอรี/กรัม)	ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์ เซนติเมตร)	ดัชนีแตกร้า	อ้างอิง
WS:CS	0.50:0.50	8.67	2.00	3,976.95	0.68	0.85	งานวิจัยนี้
RC:CS	0.50:0.50	7.33	5.33	4,136.97	0.47	0.78	งานวิจัยนี้
LP:CS	0.50:0.50	8.00	8.67	4,026.47	0.57	0.98	งานวิจัยนี้
BG:CS	0.25:0.75	8.33	1.67	3,705.67	0.49	0.97	งานวิจัยนี้
CC:CS	0.25:0.75	8.33	2.33	3,834.43	0.55	0.76	งานวิจัยนี้
RS:CS	0.25:0.75	8.00	4.33	3,837.32	0.46	0.97	งานวิจัยนี้
WH:CS	50:50 (โดยน้ำหนักเปือก)	7.74	10.90	3,484.71	-	-	[4]



ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ขึ้นรูปได้ดีของวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรแต่ละชนิดกับตัวประสาน (ต่อ)

เชื้อเพลิงอัดแท่ง	อัตราส่วน (kg:kg)	ปริมาณความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ปริมาณเถ้า (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ค่าความร้อนเชื้อเพลิง (แคลอรี/กรัม)	ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	ดัชนีแตกกร้าว	อ้างอิง
ไบยูคาลิปตัสผสม	50:50	-	-	-	1.09	0.72	[14]
ใบยางพารา	(กรัม:กรัม)	-	-	-	-	-	-
เชื้อเพลิงอัดแท่ง	-	-	-	-	-	0.5 - 1	[11]
ขุยมะพร้าวผสมกับแกลบ	1:2 (โดยน้ำหนัก)	-	-	4,043	1.52	0.99	[15]

สำหรับผลค่าดัชนีแตกกร้าว 0.78 มีค่าสูงกว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ผลิตจากไบยูคาลิปตัสผสมใบยางพาราในอัตราส่วน 50:50 กรัมต่อกรัม ที่มีค่าดัชนีแตกกร้าวเท่ากับ 0.72 [14] ทั้งนี้ค่าดัชนีแตกกร้าวควรอยู่ระหว่าง 0.5-1.0 [11] และค่าความหนาแน่นเท่ากับ 0.47 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งต่ำกว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งของประเทศบังคลาเทศที่ผลิตจากขุยมะพร้าวผสมกับแกลบในอัตราส่วน 1:2 พบมีค่าความหนาแน่น 1.52 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร [15] ทั้งนี้ อาจเนื่องจากอัตราส่วนของตัวประสานที่มีปริมาณสูงขึ้น จะช่วยให้วัสดุของเชื้อเพลิงอัดแท่งยึดเกาะกันได้ดี และอาจส่งผลให้ค่าความหนาแน่นมากขึ้นด้วย

อย่างไรก็ตามผลการวิจัยครั้งนี้ยังพบว่า เชื้อเพลิงอัดแท่งที่มีค่าความร้อนสูงสุด 4,165.01 แคลอรีต่อกรัม ของเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ผลิตจาก LP:CS (0.75:0.25) ค่าปริมาณความชื้นต่ำสุดร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก ของเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ผลิตจาก LP:CS (0.25:0.75) ค่าปริมาณเถ้าต่ำสุดร้อยละ 1.67 โดย

น้ำหนัก ของเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ผลิตจาก BG:CS (0.25:0.75) เชื้อเพลิงอัดแท่งจาก LP:CS (0.25:0.75) มีค่าความหนาแน่นสูงสุด 0.73 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และเชื้อเพลิงอัดแท่งจาก WS:CS (0.25:0.75) มีค่าดัชนีแตกกร้าวสูงสุด 0.99 แต่ผลการศึกษาของเชื้อเพลิงอัดแท่งข้างต้นดังกล่าวไม่ได้มีประสิทธิภาพดี เนื่องจากบางอัตราส่วนขึ้นรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งได้ไม่ดี นอกจากนี้คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพยังไม่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

ดังนั้นเชื้อเพลิงอัดแท่งที่มีประสิทธิภาพดีในการใช้งาน ควรีปริมาณเถ้าต่ำ และค่าความร้อนเชื้อเพลิงความหนาแน่น และดัชนีการแตกกร้าวมาก จากผลการทดสอบการใช้งานของเชื้อเพลิงอัดแท่งที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด คือ RC:CS ที่อัตราส่วน 0.50:0.50 พบว่า ระยะเวลาติดไฟนาน 23 นาที อยู่ในเกณฑ์ที่ดี และระยะเวลาเกิดควัน 15 นาที ซึ่งเป็นระยะเวลาเกิดควันน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับชุดทดลองของเชื้อเพลิงอัดแท่งในการศึกษาครั้งนี้ และมีปริมาณเถ้าที่เกิดจากการเผาไหม้น้อยด้วย จึงสรุปได้ว่าคุณสมบัติ



ทางกายภาพและเคมีของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมีผลต่อประสิทธิภาพการใช้งานของเชื้อเพลิงอัดแท่ง

4. สรุปผลงานวิจัย

การนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งซึ่งอาจถือเป็นอีกหนึ่งพลังงานทางเลือกที่จะช่วยลดปัญหาการกำจัดของเสียทางการเกษตรและอาจส่งผลกระทบต่อระบบสิ่งแวดล้อมซึ่งเป็นการนำของเสียมาเปลี่ยนเป็นพลังงานและการใช้ทรัพยากรให้เกิดประโยชน์สูงสุดอีกด้วยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ได้แก่ กากอ้อย ชี้เลี้ยง ยางพารา ชังข้าวโพด ฟางข้าว ใบยางพารา และเศษไม้ยางพารา สามารถนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งได้

2. วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรของเศษไม้ยางพารา ผสมกับ ตะกอนแป้งมัน (WS:CS) ที่อัตราส่วน 0.50:0.50 สามารถขึ้นรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งได้ดีที่สุด เนื่องจากสามารถขึ้นรูปเป็นรูปทรงกระบอก มีความแข็งแรง และพื้นผิวสม่ำเสมอ

3. คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีมีผลต่อประสิทธิภาพของเชื้อเพลิงอัดแท่ง ซึ่งผลิตจากอัตราส่วนระหว่างวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรกับตะกอนแป้งมันสำหรับหลังมีดังนี้ ค่าความร้อนเชื้อเพลิงสูงสุด 4,165.01 แคลอรีต่อกรัม (LP:CS 0.75:0.25) ค่าปริมาณความชื้นต่ำสุดร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก (LP:CS 0.25:0.75) ค่าปริมาณเถ้าต่ำสุดร้อยละ 1.67 โดยน้ำหนัก (BG:CS 0.25:0.75) ค่าความหนาแน่นสูงสุด 0.73 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (LP:CS 0.25:0.75) และดัชนีแตกกร้าวสูงสุด 0.99 (WS:CS 0.25:0.75)

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากคณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Tantisattayakul, S. Phongkasem, P. Phooyar and P. Taibangury, Community-Based Renewable Energy from Biomass Briquettes Fuel from Coconut Leaf, Thai Journal of Science and Technology, 2015, 23(3), 418-431. (in Thai)
- [2] <http://webkc.dede.go.th/testmax/sites/default/files/energy%20biomass.pdf>. (Accessed on 15 June 2020)
- [3] http://elib.dede.go.th/mm-data/Bib15106_finalreport.pdf. (Accessed on 15 June 2020)
- [4] N. Photong and J. Wongthanate, Biofuel Production from Bio-Waste by Biological and Physical Conversion Processes, Waste Management and Research, 2020, 38(1), 69-77.
- [5] ASTM Standard D5865, Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.
- [6] ASTM Standard D3173, Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.



- [7] ASTM Standard D3174, Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.
- [8] N. Tanpaiboonkul and T. Budnumpetch, Molding and Binding Method on Properties of Fuel from Water Hyacinth, Veridian E-Journal, Science and Technology Silpakorn University, 2016, 3 (6), 86-100. (in Thai)
- [9] R. Garcia, C. Pizarro, A. Gutiérrez Lavín and L. Julio Bueno, Characterization of Spanish biomass wastes for energy use, Bioresource Technology, 2012, 103, 249 - 258.
- [10] L. Wattanachira, A. Thanyacharoen, N. Laa pan, and V. Chatchavarn, Development of Biobriquettes from Mixed Rice-straw and Longan Waste Residues, Journal of Research and Development Rajamangala University of Technology Lanna, 2016, 39(2), 239-255. (in Thai)
- [11] A. Ussawarujikulchai, C. Semsayun, N. Prapakdee, N. Pieamsuwansiri and N. Chuchat, Utilization of Durian and mango-steen Peels as Briquette Fuel, 49th Kasetsart University Annual Conference, Proceeding, 2011, 162-168. (in Thai)
- [12] Thai Industrial Standards Institute (TISI), Ministry of Industry. Thai Community Product Standards Charcoal Bar TCPS number 238/2547, 2004. (in Thai)
- [13] Thai Industrial Standards Institute (TISI), Ministry of Industry, Ministry of Industry, Thai Community Product Standards Wood Charcoal for Cooking TCPs 657/2547, 2004.
- [14] S. Sunthararuk, D. Makmon and W. Wongmalee, The Development of Charcoal Fuel Briquettes from Eucalyptus Leaves and Brasiliensis Leaves, 2nd National and International Research Conference 2018, Proceeding, 2018, 339-348. (in Thai)
- [15] K. Saha, M. Hossain, R. Ali, and M. Alam, Feasibility Study of Coconut Coir Dust Briquette, Journal of the Bangladesh Agricultural University, 2014, 12(2), 369-376.



แนวทางการบริหารความเสี่ยงโครงการติดตั้งเฟอร์นิเจอร์สำเร็จรูป แบบประกอบ

ภคพันธ์ วิวัฒน์ภิญโญ* และ กนกพร ศรีปฐมสวัสดิ์

ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
พระนครเหนือ

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: pakanun.w@gmail.com

วันที่รับบทความ: 1 กรกฎาคม 2563; วันที่ทบทวนบทความ: 17 สิงหาคม 2563; วันที่ตอบรับบทความ: 17 กันยายน 2563
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 12 ธันวาคม 2563

บทคัดย่อ: งานวิจัยฉบับนี้ได้จัดทำแนวทางการบริหารความเสี่ยงของโครงการติดตั้งเฟอร์นิเจอร์สำเร็จรูปแบบประกอบตามมาตรฐาน Australian/New Zealand Standard 4360 (AS/NZS 4360) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ความเสี่ยงและนำเสนอแผนควบคุมที่ช่วยในการบรรเทาความเสี่ยงที่เกิดขึ้น เนื่องจากในอดีตที่ผ่านมาทางบริษัทมักพบปัญหาโครงการล่าช้ากว่าแผนงานโดยคิดเป็น 67% จากโครงการทั้งหมด 27 โครงการในระยะเวลา 5 ปี (2014-2018) ส่งผลให้ทางบริษัทสูญเสียทรัพยากรและค่าใช้จ่ายต่าง ๆ คิดเป็นมูลค่าโดยประมาณ 30,000,000 บาท ผลที่ได้จากระบบความเสี่ยงและประเมินความเสี่ยงพบว่ามีความเสี่ยงที่อาจทำให้การดำเนินงานโครงการล่าช้าอยู่ 8 ความเสี่ยง โดยแบ่งออกเป็นความเสี่ยงภายใน 6 ความเสี่ยง และความเสี่ยงภายนอก 2 ความเสี่ยง จากนั้นผู้วิจัยจึงนำความเสี่ยงภายในที่ได้ไปวิเคราะห์สาเหตุที่แท้จริงของความเสี่ยงด้วยวิธีการวิเคราะห์แขนงความบกพร่อง (Fault Tree Analysis : FTA) และนำสาเหตุที่ได้ไปจัดทำแผนควบคุมความเสี่ยงโดยจัดทำได้ทั้งหมด 15 แผน จากนั้นจึงนำแผนที่ได้ไปทำแบบประเมินค่าดัชนีความสอดคล้อง (Index of Item-Objective Congruence : IOC) เพื่อพิจารณาถึงความสามารถในการลดโอกาสเกิดและความรุนแรงของแผนควบคุม ผลจากการประเมินพบว่ามีความเสี่ยงที่ระดับคะแนนเกิน 0.5 จำนวน 14 แผนซึ่งคิดเป็น 93% จากแผนทั้งหมด จึงสรุปได้ว่าแผนควบคุมความเสี่ยงที่จัดทำขึ้นสามารถนำไปเป็นต้นแบบ และประยุกต์ใช้ในการบริหารโครงการอื่น ๆ ของบริษัทให้มีความเป็นมาตรฐานในด้านคุณภาพ และเวลายิ่งขึ้น

คำสำคัญ: การบริหารความเสี่ยง; การบริหารความเสี่ยงโครงการ; เฟอร์นิเจอร์สำเร็จรูปแบบประกอบ; การวิเคราะห์แขนงความบกพร่อง; ค่าดัชนีความสอดคล้อง



Guidelines for Risk Management of Knock Down Furniture Installation Project

Pakanun Wiwatpinyo* and Kanokporn Sripathomswat

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

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

Received: 1 July 2020; Revised 17 August 2020; Accepted: 17 September 2020

Online Published: 12 December 2020

Abstract: This study has conducted guidelines for risk management plan for knock down furniture installation project in accordance with Australian/New Zealand Standard 4360 (AS/NZS 4360). The objectives of this study are to analyze the related risks and to provide risk control plan for mitigating the risks of the project. In the past, the company often encountered project delays later than the plan, which the delayed projects are equal to 67% of the total 27 projects within last 5 years (2014-2018), which led to loss of the company's resources and expenses of 30,000,000 baht. There are 8 potential delays in project operations that are derived from identifying risks and assessing risks, which can be divided into 6 internal risks and 2 external risks. The root causes of the internal risks were analyzed by using the Fault Tree Analysis (FTA) method. There are 15 risk control plans that were created from those root causes. The Index of Item-Objective Congruence (IOC) was conducted to consider the ability to reduce the likelihood and consequence of those 15 risk control plans. The IOC evaluation shows that there are 14 risk control plans (93% of the total plans) which their scores are higher than 0.5. It can be concluded that the risk control plans that were created from this study can be used as a model and can be used in other projects of the company.

Keywords: Risk management; Project risk management; Knock down furniture; Fault tree analysis; Index of item-objective congruence



1. บทนำ

การขยายตัวของธุรกิจอสังหาริมทรัพย์ในประเทศไทยมีการเติบโตเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง มีโครงการบ้านพักอาศัย และคอนโดมิเนียมขยายตัวเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้ธุรกิจการออกแบบและตกแต่งรวมถึงธุรกิจเฟอร์นิเจอร์เจริญเติบโตตามไปด้วย

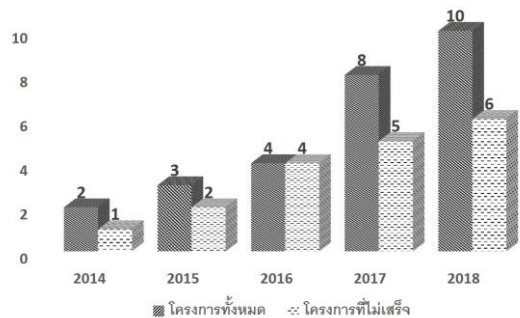
ธุรกิจเฟอร์นิเจอร์เป็นหนึ่งในธุรกิจที่มีการแข่งขันสูงในปัจจุบัน โดยบริษัทที่ดำเนินธุรกิจประเภทนี้ส่วนใหญ่นั้นจะเน้นขายงานโครงการเป็นหลัก ซึ่งมีความจำเป็นที่จะต้องมีการบริหารจัดการทรัพยากรให้เหมาะสม เพื่อให้องค์กรสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และป้องกันการสูญเสียที่จะเกิดขึ้นในด้านต่าง ๆ เช่น เวลา คุณภาพ หรือค่าใช้จ่าย

งานวิจัยนี้ดำเนินการในบริษัทแห่งหนึ่งในธุรกิจเฟอร์นิเจอร์ โดยบริษัทดำเนินธุรกิจแบบครบวงจรตั้งแต่นำเข้าสินค้าจากสหภาพยุโรปและสหรัฐอเมริกา รวมถึงบริการออกแบบและติดตั้ง โดยโครงการที่เลือกมาทำการศึกษาคือโครงการติดตั้งชุดครัว ตัวอย่างดังรูปที่ 1 ซึ่งเป็นสินค้าที่มียอดขายสูงที่สุดในบริษัท จากการศึกษาปัญหาพบว่าบริษัทมีโครงการที่ไม่สามารถเสร็จตามแผนจำนวนมากโดยคิดเป็น 67% จากโครงการทั้งหมด 27 โครงการในระยะเวลา 5 ปี ดังรูปที่ 2 ส่งผลให้ทางบริษัทเสียค่าใช้จ่ายต่าง ๆ เพิ่มขึ้นทั้งที่เป็นตัวเงินและไม่เป็นตัวเงินซึ่งคิดเป็นมูลค่าประมาณ 30,000,000 บาทโดยประเมินจาก 5% ของยอดขายในแต่ละโครงการที่ไม่เสร็จตามแผนงาน ดังตารางที่ 1 ทางผู้วิจัยจึงนำเสนอการบริหารความเสี่ยงเพื่อพัฒนาระบบการทำงานของบริษัทและลดความเสี่ยงที่จะทำให้เกิดความสูญเสียในด้านต่าง ๆ

ขอบเขตของการศึกษานี้จึงนำเสนอการบริหารความเสี่ยงของโครงการติดตั้งเฟอร์นิเจอร์ประเภทชุดครัว โดยใช้มาตรฐานการบริหารความเสี่ยงของ Australian/New Zealand Standard 4360 (AS/NZS 4360) ซึ่งเป็นมาตรฐานที่งานวิจัยด้านการบริหารความเสี่ยงโครงการนิยมใช้และเป็นมาตรฐานที่ได้รับการยอมรับในระดับสากลว่ามีประสิทธิภาพในการบริหารโครงการ โดยมีขั้นตอนการดำเนินงาน 7 ขั้นตอนดังนี้ (1) กำหนดกรอบการบริหารความเสี่ยง (2) การระบุความเสี่ยง (3) การวิเคราะห์ความเสี่ยง (4) การประเมินความเสี่ยง (5) การจัดการความเสี่ยง (6) การติดตามและการตรวจสอบ (7) การประชาสัมพันธ์และปรึกษาผู้เชี่ยวชาญ



รูปที่ 1 ตัวอย่างสินค้าประเภทชุดครัว



รูปที่ 2 จำนวนโครงการที่ไม่เสร็จตามแผนงาน



ตารางที่ 1 ค่าใช้จ่ายและค่าเสียโอกาสทางการเงินโดยประมาณ

ปีที่	ค่าใช้จ่ายและค่าเสียโอกาสทางการเงิน (บาท)
2014	1,500,000
2015	5,100,000
2016	10,000,000
2017	4,500,000
2018	8,500,000

2. วิธีการวิจัย

2.1 ศึกษาข้อมูลเบื้องต้นของโครงการกรณีศึกษา

จากการศึกษาข้อมูลเบื้องต้นของบริษัทพบว่าโครงการติดตั้งเฟอร์นิเจอร์ชุดครัวมีขั้นตอนกระบวนการดำเนินงานโดยแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ 1.ช่วงก่อนเริ่มดำเนินงานมีขั้นตอนหลัก ๆ เช่น การออกแบบและเสนอราคา 2.ช่วงระหว่างดำเนินงานเป็นช่วงที่นำสินค้าเข้าไปติดตั้งที่โครงการ และ 3.ช่วงหลังการดำเนินงานจะเป็นช่วงสุดท้ายคือการจัดทำเอกสารต่าง ๆ เพื่อสิ้นสุดโครงการ ดังแสดงในรูปแบบที่ 3

2.2 ดำเนินการบริหารความเสี่ยง

2.2.1 ศึกษาการวางกรอบการบริหารความเสี่ยง

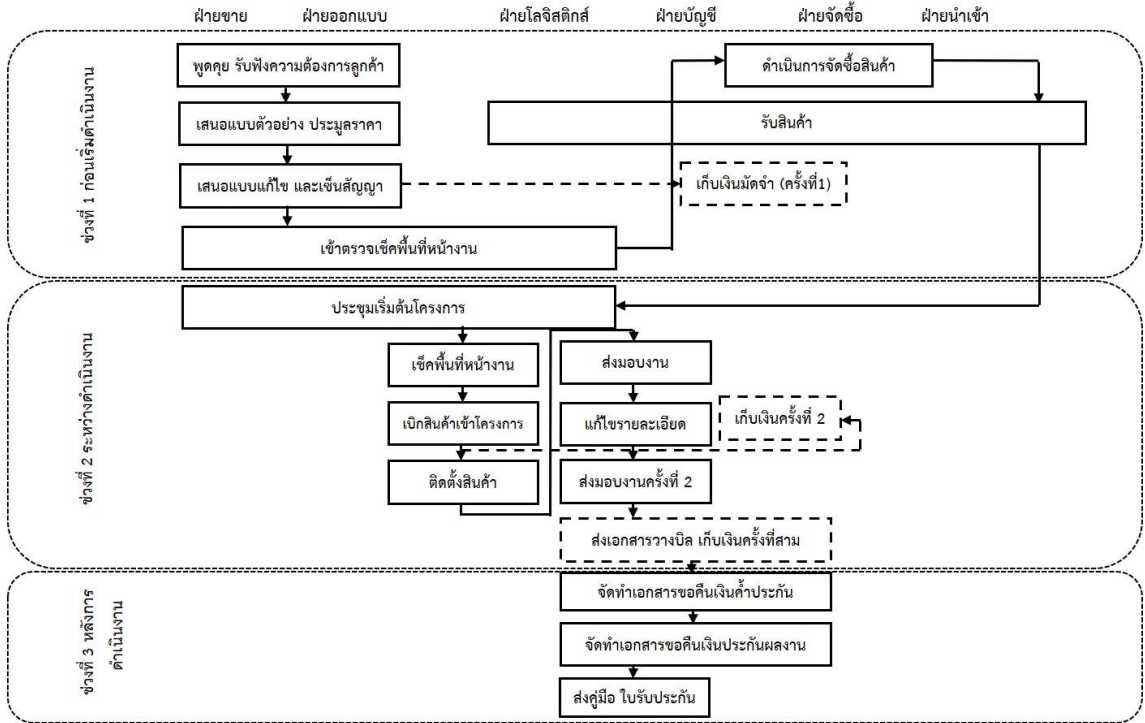
ทางผู้วิจัยได้ทำการรวบรวมแนวทางการบริหารความเสี่ยงที่งานวิจัยนิยมใช้จากทั้งหมด 13 งาน [1-13] พบว่ามีการใช้มาตรฐานการบริหารความเสี่ยง Australian/New Zealand Standard 4360 (AS/NZS 4360) เป็นแนวทางทั้งหมด 3 งาน [1, 3, 4] ซึ่งเป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบริหารความเสี่ยง

โครงการ โดยเฉพาะงานวิจัยของ [1] ซึ่งกล่าวถึงการบริหารความเสี่ยงของโครงการออกแบบตกแต่งภายใน ซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกับงานวิจัยนี้ ในส่วนของงานวิจัยที่เหลือเป็นการใช้แนวทางอื่น ๆ ที่ไม่ซ้ำกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จะเลือกแนวทางการบริหารความเสี่ยงของมาตรฐาน AS/NZS 4360 เป็นแนวทางในการดำเนินงาน

Thidarat Ponpai [14] ได้แนะนำแนวทางของการบริหารความเสี่ยงโครงการก่อสร้างในประเทศไทยไว้ว่าให้พิจารณาระบุความเสี่ยงจากกิจกรรมตามโครงสร้างการดำเนินงาน (Organization) หรือตามกระบวนการทำงาน (Process) จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบริหารความเสี่ยงโครงการก่อสร้างและโครงการด้านอื่น ๆ ทั้งหมด 14 งาน [1, 5, 7-10, 13, 15-18] พบว่ามีภาระระบุความเสี่ยงจากกระบวนการทำงานทั้งหมด 8 งานวิจัย ได้แก่ [1-5, 15-17] โดยเฉพาะงานวิจัยของ [1] ที่มีความคล้ายคลึงกับงานวิจัยนี้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จะทำการระบุความเสี่ยงโดยพิจารณาตามกระบวนการทำงานของโครงการ

2.2.2 การระบุความเสี่ยง

ความเสี่ยงโดยปกติแล้วจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ความเสี่ยงภายใน และความเสี่ยงภายนอก โดยในการระบุความเสี่ยงนั้นควรพิจารณาว่าเหตุการณ์ใด ๆ ในแต่ละกระบวนการทำงานที่จะส่งผลให้การดำเนินงานของโครงการไม่สามารถดำเนินได้อย่างปกติ หรือไม่บรรลุเป้าหมายที่ตั้งไว้ การระบุความเสี่ยงสามารถทำได้ด้วยหลากหลายวิธี โดยงานวิจัยของ [19] ได้ทำการสรุปเครื่องมือหรือ



รูปที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานโครงการ

เทคนิคที่นิยมใช้ในการระบุความเสี่ยงไว้หลายวิธี อาทิเช่น การสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญ (Interview with Experts) การวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบ(Failure Modes and Effects Analysis : FMEA) การวิเคราะห์แผนผังความบกพร่อง (Fault Tree Analysis or Event Tree Analysis : FTA/ETA) การใช้แบบสอบถามและการสัมภาษณ์ (Questionnaires and interview)

โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการระบุความเสี่ยงภายในโดยการรวบรวมความเสี่ยงจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ด้านการบริหารความเสี่ยงโครงการก่อสร้างและโครงการด้านอื่น ๆ จำนวน 10 งานวิจัย

[1, 2, 4, 5, 8, 9, 13, 15, 17, 18] ถึงอย่างนั้นการรวบรวมความเสี่ยงจากงานวิจัยที่ผ่านมาบ้าง บ้างก็เสี่ยงอาจไม่ได้เกิดกับโครงการติดตั้งเฟอร์นิเจอร์ หรือมีบางปัจจัยที่เกิดขึ้นแต่ไม่พบในงานวิจัยที่ผ่านมา ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการสัมภาษณ์ผู้ที่เกี่ยวข้องในโครงการเพิ่มเติม 10 ท่าน เพื่อนำข้อมูลทั้ง 2 ส่วน มาจัดทำแบบประเมินค่าดัชนีความสอดคล้องระหว่างข้อคำถามกับวัตถุประสงค์ (Index of Objective Item Congruence : IOC) เพื่อยืนยันความถูกต้องเชิงวิชาการและรับทราบถึงความเสี่ยงที่เหมาะสมกับโครงการกรณีศึกษา เช่นเดียวกับ [15] ที่ได้ทำการรวบรวมปัจจัยเสี่ยงที่ส่งผลกระทบต่อ



บริหารความเสี่ยงของโครงการก่อสร้างจากการทบทวนวรรณกรรม และนำปัจจัยที่ได้มาทำแบบสอบถาม IOC เพื่อตรวจสอบความถูกต้องเชิงเนื้อหาจากผู้เชี่ยวชาญ 5 ท่าน

$$IOC = \sum R/N \quad (1)$$

โดย IOC คือ ค่าดัชนีความสอดคล้องระหว่างข้อคำถามกับวัตถุประสงค์

$\sum R$ คือ ผลรวมของคะแนนจากการพิจารณาจากผู้เชี่ยวชาญ

N คือ จำนวนผู้เชี่ยวชาญ

จากการรวบรวมความเสี่ยงจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 10 งาน และสัมภาษณ์ผู้ที่เกี่ยวข้องในโครงการทั้งหมด 10 ท่าน พบว่ามีความเสี่ยงจำนวนมาก ทางผู้วิจัยจึงได้รวมความเสี่ยงที่คล้ายกันในแต่ละแหล่งที่มาให้เป็นข้อเดียวกัน โดยแบ่งออกเป็นความเสี่ยงจากงานวิจัย 44 ข้อ และความเสี่ยงจากการสัมภาษณ์ 59 ข้อ รวมทั้งหมด 103 ข้อ หลังจากนั้นจึงนำความเสี่ยงที่ได้ไปทำแบบประเมิน IOC โดยให้ผู้ทรงคุณวุฒิที่มีประสบการณ์ในโครงการติดตั้งเพอร์นิเจอร์สำเร็จรูปแบบประกอบ หรือในด้านการก่อสร้างมากกว่า 10 ปี จำนวน 3 ท่านเป็นผู้ประเมิน โดยแบ่งเป็นผู้บริหารระดับสูงในบริษัท 2 ท่าน และอาจารย์ทางด้านวิศวกรรมโยธา 1 ท่าน ผลจากแบบประเมิน IOC พบว่าเหลือความเสี่ยงภายในที่มีระดับคะแนนระหว่าง 0.5-1.0 ซึ่งเป็นค่าระดับคะแนนที่มีความเหมาะสมที่สามารถนำข้อคำถามไปใช้ได้ [14] ตามหลักการของ IOC ทั้งหมด 63 ข้อดังตารางที่ 2 โดยแบ่งเป็นความเสี่ยงจากงานวิจัยในข้อที่ 1-29

และความเสี่ยงจากการสัมภาษณ์ผู้ที่เกี่ยวข้องในข้อที่ 30-63 ในส่วนของความเสี่ยงภายนอกจะทำการสัมภาษณ์ผู้บริหารระดับสูงในบริษัทเพื่อระบุความเสี่ยง โดยไม่มีการจัดทำแบบประเมิน IOC เพิ่มเติม หลังจากการระบุ เนื่องจากเป็นการสัมภาษณ์จากผู้บริหารระดับสูง ซึ่งถือเป็นผู้ทรงคุณวุฒิที่มีประสบการณ์แล้ว ผลจากการสัมภาษณ์ทำให้ได้ความเสี่ยงภายนอกทั้งหมด 12 ข้อ ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 2 ความเสี่ยงภายใน

ข้อ	ความเสี่ยง	IOC
1	พนักงานขาดทักษะ หรือความรู้ในการทำงาน ไม่เพียงพอ	1
2	บุคลากรมีจำนวนไม่เพียงพอ / ขาดแคลน แรงงานที่มีทักษะ	1
3	ผู้จัดการโครงการ / ผู้ควบคุมงานขาดทักษะ หรือความรู้ของการบริหารโครงการ	1
4	หน้าที่ความรับผิดชอบของผู้ที่เกี่ยวข้องไม่ชัดเจน	0.67
5	วางแผนการดำเนินงานผิดพลาด	1
6	ส่งมอบงานให้ลูกค้าล่าช้า	1
7	ฝ่ายที่เกี่ยวข้องแจ้งรายการวัสดุ อุปกรณ์ที่ต้องการใช้ล่าช้า	0.67
8	การเบิกจ่ายเงินให้ผู้เกี่ยวข้องล่าช้า	1
9	พนักงานทำงานผิดพลาด	0.67
10	ประมาณการสั่งซื้อวัสดุผิดพลาด	0.67
11	แผนการดำเนินงานไม่สอดคล้องกับโครงการ	0.67
12	ผลงานไม่ตรงตามความต้องการลูกค้า	0.67
13	ตรวจสอบพื้นที่หน้างานผิดพลาด	1
14	วัสดุเสียหายในระหว่างขนานส่ง	0.67
15	เกิดความขัดแย้งระหว่างข้อมูลในแบบและโครงสร้างเดิม	0.67
16	ต้นทุนในการดำเนินงานเกินกว่าประมาณการ	0.67
17	การสื่อสารระหว่างผู้เกี่ยวข้องในโครงการผิดพลาด	1



ตารางที่ 2 ความเสี่ยงภายใน (ต่อ)

ข้อ	ความเสี่ยง	IOC
18	ความไม่ชัดเจนของอำนาจหน้าที่ในการตัดสินใจ	0.67
19	การขาดทักษะในการสื่อสารภาษาอังกฤษ	0.67
20	ผลงานไม่ได้มาตรฐาน	0.67
21	งานที่ได้ไม่เป็นไปตามแบบ	0.67
22	พื้นที่ทำงานไม่พร้อม / ไม่สามารถติดตั้งได้	0.67
23	เกิดอุบัติเหตุขึ้นในขั้นตอนการทำงาน	0.67
24	การไม่ให้ความสำคัญต่อความปลอดภัยในการก่อสร้างของผู้รับจ้าง	1
25	เครื่องมือ วัสดุ อุปกรณ์ถูกขโมยที่ไซต์งาน	0.67
26	การทุจริต	0.67
27	การรับงานหลายโครงการของผู้รับจ้าง	0.67
28	การทิ้งงานของผู้รับจ้าง	1
29	ความไม่ชัดเจน และปัญหาเกี่ยวกับข้อสัญญาและเงื่อนไข	1
30	พนักงานฝ่ายบัญชีไม่เข้าใจในขั้นตอน	0.67
31	ฝ่ายออกแบบจัดทำแบบไม่เสร็จตามเวลานัดหมาย	0.67
32	ฝ่ายขายจัดทำเอกสารยื่นประมูลล่าช้า	0.67
33	ฝ่ายออกแบบจัดทำแบบแก้ไขไม่เสร็จตามเวลานัดหมาย	0.67
34	ฝ่ายบัญชีได้รับใบส่งข้อล่าช้า / ไม่ครบถ้วน	0.67
35	ฝ่ายจัดซื้อได้รับข้อมูลล่าช้า / ไม่ครบถ้วน	0.67
36	ฝ่ายนำเข้าจัดทำเอกสารล่าช้า	0.67
37	จองเรือรับสินค้าไม่ทัน / เต็ม	0.67
38	ส่งเอกสารให้ตัวแทนล่าช้า	0.67
39	ฝ่ายบัญชีได้รับเอกสารล่าช้า ไม่ครบถ้วน	0.67
40	วางบิลเกินรอบ	0.67
41	จัดทำใบเสนอราคาผิดพลาด	0.67
42	ตรวจจำนวนสินค้าผิดพลาด	0.67
43	สินค้าเสียหายระหว่างจัดเก็บ	1
44	สินค้าเสียหายระหว่างขนส่ง	1
45	เบิกสินค้าไม่ตรงตามเอกสาร	0.67
46	วิธีการทำงานไม่เหมาะสม	0.67
47	ข้อมูลในเอกสารส่งสินค้าไม่ครบถ้วน	1
48	พนักงานทำสินค้าเสียหาย	1

ตารางที่ 2 ความเสี่ยงภายใน (ต่อ)

ข้อ	ความเสี่ยง	IOC
49	วางแผนการเก็บงานผิดพลาด	0.67
50	ขาดแคลนอุปกรณ์ในการเก็บงาน	0.67
51	พนักงานจัดทำเอกสารผิดพลาด	0.67
52	พนักงานส่งเอกสารทำเอกสารสูญหาย	1
53	จัดทำแบบไม่ตรงตามความต้องการลูกค้า	1
54	ลูกค้าชำระเงินมัดจำล่าช้า	1
55	ไม่ได้รับเช็คตามกำหนด	1
56	รับข้อมูลจากลูกค้าผิดพลาด ไม่ครบถ้วน	1
57	แจ้งข้อมูลกับฝ่ายออกแบบผิดพลาด ไม่ครบถ้วน	1
58	ผู้ประสานงานได้รับข้อมูลโครงการไม่ครบ	1
59	ฝ่ายขายแจ้งข้อมูลไม่ครบถ้วน	1
60	บรรทุกน้ำหนักเกินกฎหมายกำหนด	0.67
61	พนักงานทำผิดกฎที่ไซต์งาน	0.67
62	พื้นที่ของคลังไม่พอในการจัดเก็บสินค้า	0.67
63	พาเลท / ชั้นวางไม่พอ	0.67

ตารางที่ 3 ความเสี่ยงภายนอก

ข้อ	ความเสี่ยง
1	โครงการลูกค้าไม่ได้รับการอนุมัติให้ดำเนินการต่อ
2	คู่แข่งทางการค้า
3	ความผันผวนของอัตราแลกเปลี่ยนเงินต่างประเทศ
4	นโยบายภาครัฐที่เกี่ยวข้องกับการนำเข้าสินค้าจากต่างประเทศ
5	อัตราดอกเบี้ยธนาคาร
6	การกีดกันทางการค้า
7	สภาพอากาศ
8	ความล่าช้าในการขนส่งจากต่างประเทศ
9	สินค้าเสียหายระหว่างขนส่งจากต่างประเทศ
10	ความล่าช้าของผู้รับเหมาก่อสร้าง
11	บริษัทลูกค้าขาดสภาพคล่องทางการเงิน
12	ค่าปรับจากโครงการ



2.2.3 การวิเคราะห์ความเสี่ยง

การวิเคราะห์ความเสี่ยง คือการประเมินระดับคะแนนเพื่อรับทราบถึงระดับความรุนแรงและโอกาสในการเกิดความเสี่ยง จากนั้นจะนำไปจัดลำดับเพื่อพิจารณาถึงระดับความเสี่ยงที่เกิดขึ้นเพื่อนำไปใช้พิจารณาในการจัดทำแผนควบคุมความเสี่ยง โดยจะจัดทำแผนควบคุมเฉพาะความเสี่ยงที่มีระดับปานกลางขึ้นไปตามแนวทางของ AS/NZS 4360 โดยมีเกณฑ์ในการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4 และตารางที่ 5

ในงานวิจัยนี้จะใช้แบบสอบถามในการเก็บข้อมูลวิเคราะห์ความเสี่ยง โดยให้ผู้ที่เกี่ยวข้องในโครงการทั้ง 10 ท่านกลุ่มเดียวกันกับที่ระบุความเสี่ยงเป็นผู้วิเคราะห์ระดับคะแนน

ตารางที่ 4 ระดับคะแนนโอกาสที่จะเกิดความเสี่ยง

ระดับ	โอกาสเกิด	คำอธิบาย
1	น้อยมาก	4-5 ปีต่อครั้ง
2	น้อย	1-3 ปีต่อครั้ง
3	ปานกลาง	7-12 เดือนต่อครั้ง แต่ไม่เกิน 5 ครั้งต่อปี
4	สูง	1-6 เดือนต่อครั้ง
5	สูงมาก	1 เดือนต่อครั้งหรือมากกว่า

ที่มา: AS/NZS 4360 Standard [20]

2.2.4 การประเมินความเสี่ยง

หลังจากที่ผู้ที่เกี่ยวข้องทำการวิเคราะห์ระดับคะแนนของแต่ละความเสี่ยงแล้ว จะนำคะแนนที่ได้ทั้ง 2 ส่วนมาเปรียบเทียบในตารางการจัดลำดับความสำคัญ ดังตารางที่ 6 และตารางที่ 7 โดยจะคัดเลือกเฉพาะความเสี่ยงที่มีระดับคะแนนปานกลางขึ้นไปตามแนวทางของ AS/NZS 4360 ไปจัดทำแผนควบคุม

ตารางที่ 5 ระดับคะแนนความรุนแรงของความเสี่ยง

ระดับ	ความรุนแรง	คำอธิบาย
1	น้อยมาก	- สูญเสียทางการเงินน้อยมาก (ประมาณไม่เกิน 10,000 บาท) - ไม่ทำให้การดำเนินงานติดขัด - ไม่มีการได้รับบาดเจ็บ
2	น้อย	- สูญเสียทางการเงินปานกลาง (ประมาณ 10,001-100,000 บาท) - การดำเนินงานติดขัดเล็กน้อย - มีการบาดเจ็บเล็กน้อย
3	ปานกลาง	- สูญเสียทางการเงินค่อนข้างมาก (ประมาณ 100,001-500,000 บาท) - การดำเนินงานชะงัก ลำช้า - มีการบาดเจ็บ โดยต้องได้รับการรักษาทางการแพทย์
4	สูง	- สูญเสียทางการเงินมาก (ประมาณ 500,001-1,000,000 บาท) - ไม่สามารถดำเนินงานได้ - มีการบาดเจ็บอย่างกว้างขวาง ต้องหยุดการทำงาน
5	สูงมาก	- สูญเสียทางการเงินมหาศาล (มากกว่า 1,000,000 บาท) - ไม่สามารถดำเนินงานได้ ต้องหยุดการทำงานมากกว่า 1 เดือน - มีการเสียชีวิต

ที่มา: AS/NZS 4360 Standard [20]

ตารางที่ 6 ตารางเปรียบเทียบระดับความสำคัญ

โอกาสเกิด	ความรุนแรง				
	1	2	3	4	5
1	L	L	M	H	H
2	L	L	M	H	E
3	L	M	H	E	E
4	M	H	H	E	E
5	H	H	E	E	E

ที่มา: AS/NZS 4360 Standard [20]



ตารางที่ 7 ความหมายของระดับคะแนนความสำคัญ

ระดับ	คำอธิบาย
L ต่ำ	ความเสี่ยงอยู่ในระดับต่ำ จัดตามขั้นตอนปกติ
M ปานกลาง	ความเสี่ยงอยู่ในระดับกลาง ต้องระบุมความรับผิดชอบในการจัดการ
H สูง	ความเสี่ยงอยู่ในระดับสูง จำเป็นต้องมีการจัดการ
E สูงมาก	ความเสี่ยงอยู่ในระดับสูงมาก ต้องจัดการทันที

ที่มา: AS/NZS 4360 Standard [20]

โดยหลังจากเปรียบเทียบลำดับความสำคัญและจัดระดับความเสี่ยงแล้วนั้น พบว่ามีความเสี่ยงภายในที่อยู่ในระดับปานกลางขึ้นไป 6 ข้อ และมีความเสี่ยงภายนอกที่อยู่ในระดับปานกลางขึ้นไป 2 ข้อ ดังตารางที่ 8 และตารางที่ 9

2.2.5 การจัดการความเสี่ยง

การจัดการความเสี่ยงมีเป้าหมายในการบรรเทาความเสี่ยงให้มีระดับลดลง โดยในการจัดทำแผนควบคุม จำเป็นต้องรู้สาเหตุที่แท้จริงของการเกิดความเสี่ยงนั้น ๆ ก่อน เพื่อที่จะได้แก้ไขปัญหานั้นเกิดขึ้นอย่างถูกต้อง โดยการวิเคราะห์สาเหตุนั้นสามารถทำได้โดยหลายวิธีดังตารางที่ 10

ในส่วนของการเสี่ยงภายนอกนั้น สาเหตุของความเสียหายเกิดจากอิทธิพลจากภายนอก มักอยู่นอกเหนือการควบคุมขององค์กร โดยปกติแล้วไม่สามารถที่จะสร้างแผนควบคุมความเสี่ยงได้ แต่จะกระทำโดยการหาวิธีรับมือหรือแนวทางที่เหมาะสม โดยทางผู้วิจัยจะทำการขอคำแนะนำจากการสัมภาษณ์ผู้บริหารระดับสูงในบริษัทเพื่อกำหนดแนวทาง

ตารางที่ 8 ระดับความสำคัญของความเสี่ยงภายใน

ข้อ	ความเสี่ยง	C	L	ระดับ
1(55)	ไม่ได้รับเช็คตามกำหนด	4	3	สูงมาก
2(9)	พนักงานทำงานผิดพลาด	3	3	สูง
3(10)	ประมาณการสั่งซื้อวัสดุผิดพลาด	3	3	สูง
4(14)	วัสดุเสียหายในระหว่าง การขนส่ง	3	3	สูง
5(22)	พื้นที่ทำงานไม่พร้อม / ไม่สามารถติดตั้งได้	3	3	สูง
6(54)	ลูกค้าชำระเงินมัดจำล่าช้า	3	3	สูง

C=ความรุนแรง; L=โอกาสที่จะเกิด

ตารางที่ 9 ระดับความสำคัญของความเสี่ยงภายนอก

ข้อ	ความเสี่ยง	C	L	ระดับ
1(8)	ความล่าช้าในการขนส่ง จากต่างประเทศ	3	3	สูง
2(10)	ความล่าช้าของ ผู้รับเหมาก่อสร้าง	3	4	สูง

C=ความรุนแรง; L=โอกาสที่จะเกิด

ตารางที่ 10 เครื่องมือหรือเทคนิคในการวิเคราะห์สาเหตุ

เครื่องมือหรือเทคนิค	แหล่งที่มา
Failure Modes and Effects Analysis (FMEA)	[1], [2], [3], [4], [5], [10], [11], [12], [13],
Fault Tree Analysis or Event Tree Analysis	[21], [22],
Why-Why Analysis	[1-5, 10-13,22];
Cause and Effect Diagram	[1, 5, 10]

โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้การวิเคราะห์แผนความบกพร่อง (Fault Tree Analysis : FTA) ซึ่งเป็นวิธีที่ทำให้สามารถมองเห็นถึงความเกี่ยวโยงที่จะ



นำไปสู่เหตุการณ์ที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้น [1] โดยมีสัญลักษณ์ในการวิเคราะห์ดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ FTA

ประเภท	สัญลักษณ์	ชื่อ	คำอธิบาย
Event Symbol		Fault Event	เหตุการณ์ย่อยที่ส่งผลให้เกิดเหตุการณ์อื่นต่อเนื่องไป ต้องถูกทำการวิเคราะห์อีก
		Basic Event	เหตุการณ์ย่อยที่เกิดขึ้นได้ตามปกติ เห็นสาเหตุชัดเจนแล้ว ไม่ต้องทำการวิเคราะห์ต่อ
		Un developed Event	เหตุการณ์ย่อยที่ข้อมูลสนับสนุนไม่เพียงพอ ไม่ต้องการวิเคราะห์ต่อ
		External Event	เหตุการณ์ภายนอกหรือปัจจัยภายนอกที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดเหตุการณ์ต่าง ๆ
		Tree Event	ให้เขียนเพื่ออ้างถึงเหตุการณ์หนึ่งที่อยู่เบื้องก้านอื่นของแผนภูมิซึ่งเป็นเหตุการณ์ที่เหมือนกัน
Logic Gate		Or Gate	แสดงความสัมพันธ์ว่าเหตุการณ์จะเกิดขึ้นได้จากสาเหตุใดสาเหตุหนึ่ง
		And Gate	แสดงความสัมพันธ์ว่าเหตุการณ์จะเกิดขึ้นได้จากสาเหตุทุก ๆ สาเหตุเกิดขึ้นพร้อมกัน
		Inhibit Gate	แสดงกรณีเหตุการณ์ใดจะเกิดขึ้นได้ต่อเมื่อมีเงื่อนไขส่งเสริม เช่น อุณหภูมิ

ที่มา: Varaporn [2]

ก่อนที่จะวิเคราะห์หาสาเหตุของความเสียหายจำเป็นต้องทำการวิเคราะห์ผลกระทบต่อการดำเนินงานของแต่ละความเสี่ยงก่อน เพื่อที่จะได้

เข้าใจว่าในแต่ละความเสี่ยงส่งผลกระทบต่ออะไรบ้างที่จะทำให้การดำเนินงานติดขัด หรือไม่สามารถเสร็จสิ้นตามแผนงานได้ ดังตารางที่ 12 หลังจากนั้นผู้วิจัยได้ประชุมกับแผนกที่เกี่ยวข้องเพื่อทำการวิเคราะห์หาสาเหตุของความเสียหายโดยใช้แผนผัง FTA ดังตัวอย่างในรูปที่ 4

หลังจากที่ได้วิเคราะห์สาเหตุของร่วมกับแผนกที่เกี่ยวข้องแล้ว ขั้นตอนถัดไปคือการสร้างแผนควบคุม จากมาตรฐาน AZ/NZS 4360 ได้กำหนดแนวทางในการจัดการความเสี่ยงไว้ทั้งหมด 5 แนวทางคือ

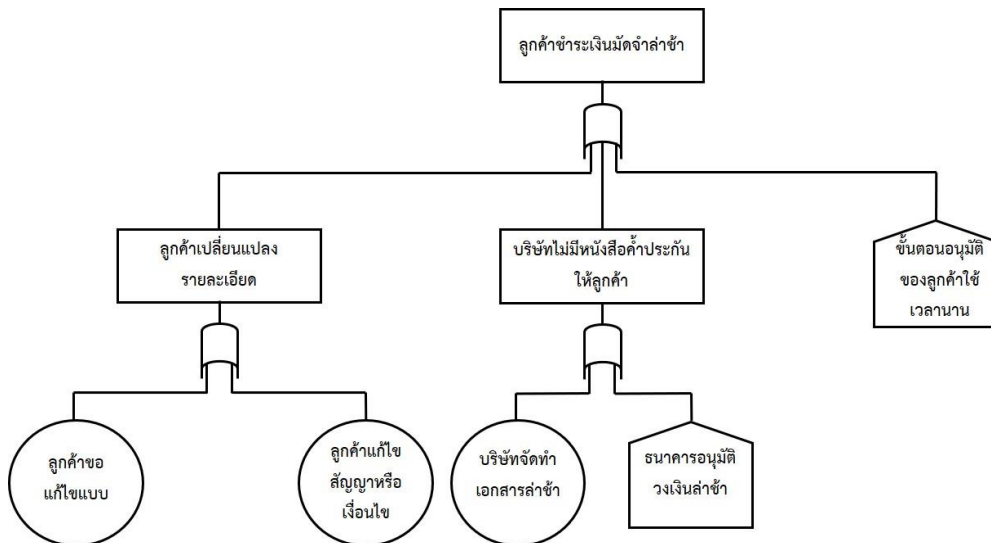
1. การหลีกเลี่ยงความเสี่ยง
2. การลดโอกาสในเกิดความเสี่ยง
3. การลดระดับความรุนแรงของความเสี่ยง
4. การแบ่งปันหรือโอนย้ายความเสี่ยง
5. การคงความเสี่ยงไว้

ผู้วิจัยได้จัดประชุมกับแผนกที่เกี่ยวข้องอีกครั้งเพื่อสร้างแผนควบคุมความเสี่ยง จากการวิเคราะห์ร่วมกับแผนกที่เกี่ยวข้องสามารถจัดทำแผนควบคุมความเสี่ยงได้ทั้งหมด 15 แผน ดังตารางที่ 13 ถึงอย่างนั้นเพื่อความมั่นใจว่าแผนควบคุมความเสี่ยงจะสามารถช่วยบรรเทาโอกาสเกิดและความรุนแรงของความเสี่ยงได้ ผู้วิจัยจึงจัดทำแผนภาพแสดงถึงความเชื่อมโยงระหว่างแผนควบคุม สาเหตุและความเสี่ยงเพื่อให้ผู้ที่เกี่ยวข้องในโครงการ 10 ท่านกลุ่มเดียวกับที่ระบุและประเมินความเสี่ยงพิจารณาถึงความสอดคล้องระหว่างแผนควบคุมและความเสี่ยง ดังรูปที่ 5 โดยใช้แบบประเมิน IOC

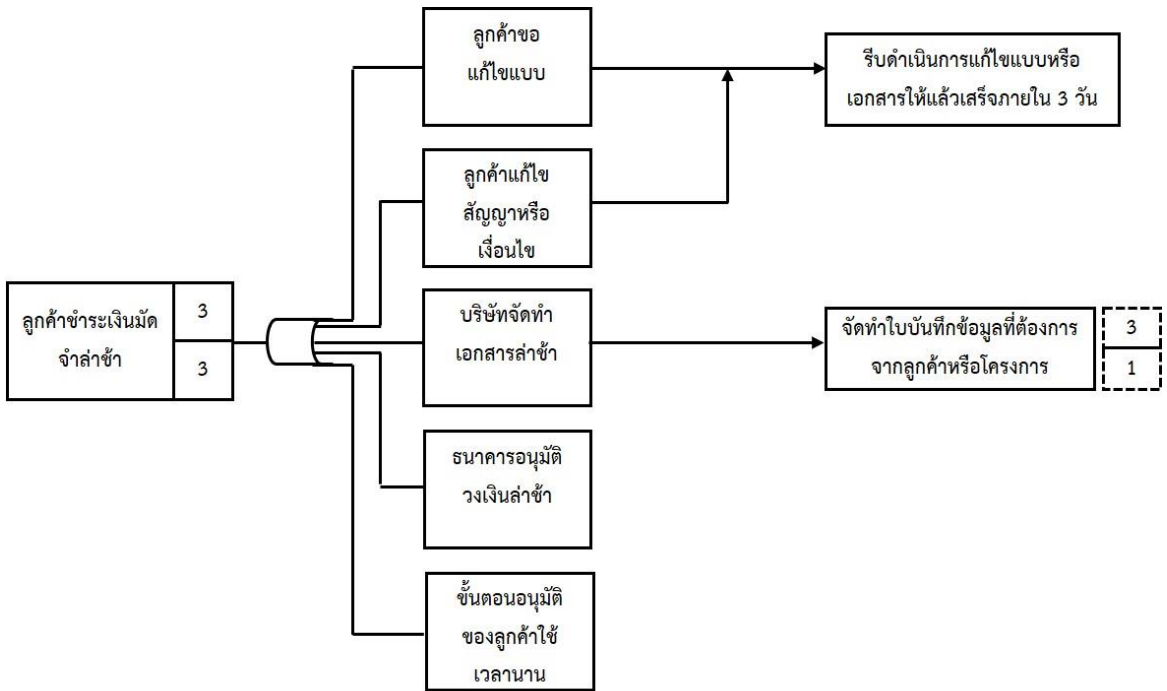


ตารางที่ 12 ผลกระทบที่เกิดจากความเสี่ยงภายใน

ข้อ	ความเสี่ยง	ผลกระทบต่อการดำเนินงาน
1(55)	ไม่ได้รับเช็คตามกำหนด	ฝ่ายติดตั้งไม่สามารถเบิกสินค้าในรอบต่อไปเพื่อนำไปติดตั้งได้ ตามนโยบายของบริษัทส่งผลให้การติดตั้งไม่เสร็จตามแผนงานที่ตั้งไว้
2(9)	พนักงานทำงานผิดพลาด	ส่งผลให้การทำงานติดขัด ล่าช้า หรือมีการแก้ไขหลายครั้ง
3(10)	ประมาณการสั่งซื้อวัสดุผิดพลาด	ได้รับสินค้าล่าช้าส่งผลให้การติดตั้งหรือการทำงานไม่เป็นไปตามที่ตกลงกับลูกค้าหรือตามกำหนดการณ์ที่ตั้งไว้
4(14)	วัสดุเสียหายในระหว่างการขนส่ง	ส่งผลให้การติดตั้งชะงัก ไม่สามารถดำเนินการต่อได้ เนื่องจากต้องรอสินค้าเคลมที่ส่งมาจากต่างประเทศ ทำให้การติดตั้งไม่เป็นไปตามแผนที่ตั้งไว้
5(22)	พื้นที่หน้างานไม่พร้อม / ไม่สามารถติดตั้งได้	ส่งผลให้การติดตั้งชะงัก หรือไม่เสร็จตามแผน เนื่องจากต้องรอทางผู้รับเหมาก่อสร้างทำการแก้ไขพื้นที่หรือส่งมอบพื้นที่
6(54)	ลูกค้าชำระเงินมัดจำล่าช้า	ส่งผลให้ฝ่ายจัดซื้อสั่งสินค้าล่าช้าตามนโยบายของบริษัท ทำให้สินค้ามาถึงไม่ทันตามที่ตกลงกับลูกค้าหรือกำหนดการณ์ที่ตั้งไว้



รูปที่ 4 ตัวอย่างการวิเคราะห์แผนผัง FTA ของความเสี่ยงลูกค้าชำระเงินมัดจำล่าช้า



รูปที่ 5 ตัวอย่างแผนภาพแสดงความเชื่อมโยงระหว่างความเสี่ยงและแผนควบคุม

ตารางที่ 13 แผนควบคุมความเสี่ยงภายใน

ข้อ	แผนควบคุม	ควบคุมความเสี่ยง
1	จัดทำใบตรวจสอบพื้นที่หน้างาน	พื้นที่หน้างานไม่พร้อม / ไม่สามารถติดตั้งได้
2	กำหนดให้ตรวจสอบก่อนส่งสินค้า 3 วัน	พื้นที่หน้างานไม่พร้อม / ไม่สามารถติดตั้งได้
3	จัดทำกระดานหรือบันทึกช่วยจำ	พื้นที่หน้างานไม่พร้อม / ไม่สามารถติดตั้งได้
4	กำหนดจำนวนพนักงานขนส่งและติดตั้งกับจำนวนสินค้าให้เหมาะสม	วัสดุเสียหายในระหว่างการขนส่ง
5	จัดอบรมวิธีการปฏิบัติงานพนักงานขนส่งและติดตั้ง	วัสดุเสียหายในระหว่างการขนส่ง
6	รับดำเนินการแก้ไขงานให้แล้วเสร็จภายใน 1 วัน	ไม่ได้รับเช็คตามกำหนด
7	จัดทำใบบันทึกข้อมูลที่ต้องการ	พนักงานทำงานผิดพลาด
8	จัดทำแผนบำรุงรักษาอุปกรณ์	พนักงานทำงานผิดพลาด
9	กำหนดจุดสั่งซื้อในแต่ละครั้งและการสั่งซื้อแบบประหยัด	พนักงานทำงานผิดพลาด, ประมาทการสั่งซื้อวัสดุผิดพลาด



ตารางที่ 13 แผนควบคุมความเสี่ยงภายใน (ต่อ)

ข้อ	แผนควบคุม	ควบคุมความเสี่ยง
10	ออกมาตรการลงโทษให้เหมาะสม	พนักงานทำงานผิดพลาด, วัสดุเสียหายในระหว่างการขนส่ง
11	จัดทำคู่มือการปฏิบัติงาน	พนักงานทำงานผิดพลาด, ประสิทธิภาพสั่งซื้อวัสดุผิดพลาด
12	จัดการอบรมสำหรับพนักงาน	พนักงานทำงานผิดพลาด
13	จัดทำทะเบียนประวัติทรัพย์สินและแผนการเปลี่ยนถ่าย	พนักงานทำงานผิดพลาด
14	รีบดำเนินการแก้ไขแบบหรือเอกสารให้แล้วเสร็จภายใน 3 วัน	ลูกค้าชำระเงินมัดจำล่าช้า
15	จัดทำใบบันทึกข้อมูลที่ต้องการจากลูกค้าหรือโครงการ	ลูกค้าชำระเงินมัดจำล่าช้า

3. ผลการวิจัย

ผลจากการประเมินความสอดคล้องของแผนควบคุมกับความเสี่ยง พบว่ามีแผนควบคุมที่มีระดับคะแนนความสอดคล้องเกิน 0.5 หรือสามารถนำไปใช้ได้ 14 แผนจากทั้งหมด 15 แผนซึ่งคิดเป็น 93% ดังตารางที่ 14 ซึ่งหมายความว่าแผนควบคุมที่จัดทำขึ้นมีความน่าจะเป็นในการลดโอกาสที่จะเกิด และลดความรุนแรงได้ สามารถนำไปเป็นต้นแบบในการประยุกต์ใช้ในโครงการถัดไปของบริษัท ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในส่วนของความเสี่ยงภายนอก ทางผู้วิจัยได้ทำการขอคำแนะนำจากผู้บริหารระดับสูงของบริษัท โดยไม่มีการประเมินความสอดคล้องของแนวทางเพิ่มเติม หลังจากการสัมภาษณ์ เนื่องจากได้ทำการสัมภาษณ์ผู้บริหารระดับสูงซึ่งถือว่าเป็นผู้ทรงคุณวุฒิที่มีประสบการณ์แล้ว โดยสามารถสรุปเป็นแนวทางในการรับมือความเสี่ยงดังนี้

1. แนวทางการรับมือความเสี่ยงความล่าช้าในการขนส่งจากต่างประเทศ จากคำแนะนำจากผู้บริหารสรุปได้ว่าทางฝ่ายนำเข้าควรทำการศึกษาข้อมูลเพิ่มเติมของบริษัทผู้ส่งของ (Forwarder) บริษัทขนส่ง (Shipping) เพื่อประกอบการตัดสินใจในการเลือกใช้บริการและ ควรมีการประเมินผลเป็นประจำทุก ๆ 6 เดือน ถึงอย่างนั้นการศึกษาข้อมูลบริษัทหรือการประเมินผลก็อาจจะไม่ทำให้การคัดเลือกมีประสิทธิภาพเนื่องจากอาจเกิดเหตุการณ์ที่อยู่เหนือการควบคุม เช่น การล้มละลาย หรืออุบัติเหตุ เป็นต้น
2. แนวทางการรับมือความเสี่ยงความล่าช้าของผู้รับเหมาก่อสร้าง จากคำแนะนำจากผู้บริหารสรุปได้ว่าทางเจ้าหน้าที่ประสานงานโครงการต้องสรุปสถานะการติดตั้งของบริษัท รูปภาพพื้นที่ที่ไม่พร้อมติดตั้ง และเหตุผลของความล่าช้าที่ไม่ได้เกิดจากการดำเนินงานของบริษัทในทุก ๆ สัปดาห์ให้กับทางโครงการเพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในภายหลังหากมีการแจ้งปรับค่าใช้จ่ายที่เกิดจากความล่าช้าของผู้รับเหมาในโครงการ



ตารางที่ 14 ผลคะแนนการประเมิน IOC

ข้อ	แผนควบคุมความเสี่ยง	IOC	สรุปผล
1	จัดทำใบตรวจสอบพื้นที่ทำงาน	0.8	ใช้ได้
2	กำหนดให้ตรวจสอบก่อนส่งสินค้า 3 วัน	0.9	ใช้ได้
3	จัดทำกระดานหรือบันทึกรายงาน	0.9	ใช้ได้
4	กำหนดจำนวนพนักงานขนส่งและติดตั้งกับจำนวนสินค้าให้เหมาะสม	0.5	ใช้ได้
5	จัดอบรมวิธีการปฏิบัติงานพนักงานขนส่งและติดตั้ง	0.8	ใช้ได้
6	รีบดำเนินการแก้ไขงานให้แล้วเสร็จภายใน 1 วัน	0.9	ใช้ได้
7	จัดทำใบบันทึกข้อมูลที่ต้องการ	1	ใช้ได้
8	จัดทำแผนบำรุงรักษาอุปกรณ์	1	ใช้ได้
9	กำหนดจุดสั่งซื้อในแต่ละครั้งและการสั่งซื้อแบบประหยัด	0.7	ใช้ได้
10	ออกมาตรการลงโทษให้เหมาะสม	0.7	ใช้ได้
11	จัดทำคู่มือการปฏิบัติงาน	1	ใช้ได้
12	จัดการอบรมสำหรับพนักงาน	0.6	ใช้ได้
13	จัดทำทะเบียนประวัติทรัพย์สินและแผนการเปลี่ยนถ่าย	0.8	ใช้ได้
14	รีบดำเนินการแก้ไขแบบหรือเอกสารให้แล้วเสร็จภายใน 3 วัน	0.3	ใช้ไม่ได้
15	จัดทำใบบันทึกข้อมูลที่ต้องการจากลูกค้าหรือโครงการ	0.6	ใช้ได้

4. สรุปและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ ดำเนินการศึกษากิจการบริหารความเสี่ยงตามมาตรฐาน AZ/NZS 4360 ในโครงการติดตั้งเพอร์นิเจอร์สำเร็จรูปแบบประกอบ โดยเลือกโครงการกรณีศึกษา คือ โครงการติดตั้งชุดครัว

จากการดำเนินงานตามมาตรฐานการบริหารความเสี่ยง 4 ขั้นตอน พบว่ามีความเสี่ยงภายในที่อยู่ในระดับที่ต้องควบคุมทั้งหมด 6 ความเสี่ยง ได้แก่

1. ไม่ได้รับเช็คตามกำหนด
2. พนักงานทำงานผิดพลาด
3. ประมาณการสั่งซื้อวัสดุผิดพลาด
4. วัสดุเสียหายในระหว่างการขนส่ง
5. พื้นที่ทำงานไม่พร้อม / ไม่สามารถติดตั้งได้
6. ลูกค้าย่ำระเงินมัดจำล่าช้าและมีความเสี่ยง

ภายนอกที่อยู่ในระดับที่ต้องควบคุมทั้งหมด 2 ความเสี่ยง ได้แก่

1. ความล่าช้าในการขนส่งจากต่างประเทศ
2. ความล่าช้าของผู้รับเหมาก่อสร้าง

หลังจากนั้นได้ใช้เทคนิค FTA ในการวิเคราะห์หาสาเหตุที่แท้จริง เพื่อนำไปสร้างแผนควบคุมเพื่อบรรเทาความเสี่ยงภายในให้อยู่ในระดับที่ลดลง ซึ่งได้แผนควบคุมความเสี่ยงภายในทั้งหมด 15 แผน

เนื่องจากในระยะเวลาที่จัดทำแผนควบคุมแล้วเสร็จ ทางบริษัทกรณีศึกษาฯ ยังไม่มีโครงการที่กำลังดำเนินงานหรือใกล้ที่จะเริ่มดำเนินงาน ทางผู้วิจัยจึงนำแผนควบคุมที่ได้ไปทำแบบประเมิน IOC เพื่อพิจารณาความสอดคล้องและความสามารถในการลดโอกาสที่จะเกิดและความรุนแรงของแผนควบคุม ผลจากการประเมิน IOC พบว่ามีแผนควบคุมที่มีระดับคะแนนอยู่ในช่วง 0.5-1.0 จำนวน 14 แผน โดยแผนที่



มีระดับคะแนนต่ำกว่า 0.5 คือแผนควบคุมริบดำเนินการแก้ไขแบบหรือเอกสารให้แล้วเสร็จภายใน 3 วันซึ่งมีผู้ประเมินไม่แน่ใจทั้งหมด 5 ท่าน ไม่เห็นด้วย 1 ท่าน

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าแผนควบคุมที่จัดทำขึ้นจำนวน 14 แผนเหมาะสมสำหรับนำไปเป็นต้นแบบเพื่อบริหารความเสี่ยงโครงการติดตั้งเฟอร์นิเจอร์สำเร็จรูปแบบประกอบในโครงการถัดไปของบริษัทกรณีศึกษาต่อไปได้

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Rakfuekfon, Risk Management of Interior Design Project, Thesis, Chulalongkorn University, Thailand. 2009. (in Thai)
- [2] V. Asanprakit, Risk Management for The Project of Advisability and Installation Information System, Thesis, Chulalongkorn University, Thailand. 2004. (in Thai)
- [3] J. Boonprasert, Project Risk Management Analysis for The Event Project, Thesis, Chulalongkorn University, Thailand. 2007. (in Thai)
- [4] N. Kiatsakulpong, Risk Management for Phenol Plant Construction Project, Thesis, Chulalongkorn University, Thailand. 2009. (in Thai)
- [5] N. Grueneberger, Risk Management for Prefabricated Classical Thai House Construction Project, Thesis, Chulalongkorn University, Thailand. 2009.
- [6] B. Phinijkarnwatkul, Risk Allocation and Risk Analysis of Engineering, Procurement and Construction (EPC) Contract for Power Plant Projects, Thesis, Chulalongkorn University, Thailand. 2011. (in Thai)
- [7] B. Suwannung, A Study of Risk Factors Affecting The Construction Projects of Petrochemical Industry: An Owners' Perspective, Thesis, Burapha University, Thailand. 2016. (in Thai)
- [8] C. Charoenpanich, Risk Analysis in Residential Condominium Construction, Independent Study, Thammasat University, Thailand. 2012. (in Thai)
- [9] S. Wangpakklang, A Study and Risk Analysis of High-Rise Buildings in Pattaya, Independent Study, Suranaree University of Technology, Thailand. 2012. (in Thai)
- [10] V. Tangpraprutgul, Project Risk Management in Massive Construction Project, Thesis, Chulalongkorn University, Thailand. 2009.
- [11] R. Atthapanth, Risk Management in Aeronautical Radio of Thailand, Thesis, Chulalongkorn University, Thailand. 2008. (in Thai)
- [12] N. Chindamat, Risk Management for Computer and Internet using in Enterprise Case Study of a Hospital, Thesis, Chulalongkorn University, Thailand. 2007. (in Thai)



- [13] A. Intho, Project Risk Management of Establishing an Aircraft Maintenance Center, Thesis, Chulalongkorn University, Thailand. 2009. (in Thai)
- [14] T. Ponpai, Risk Management Framework for Construction Projects in Thailand, Thesis, Chulalongkorn University, Thailand. 2008. (in Thai)
- [15] V. Mangnormake, P. Charnwasununth and P. Aksorn, Risk Identification and Analysis of Airport Construction Project in Lao PDR Case Study: Nongkhang Airport Construction Project, KCU Research Journal, 2017, 17(4), 36-48. (in Thai)
- [16] P. Szymanski, Risk Management in Construction Projects, Procedia Engineering, 2017, 208, 174-182.
- [17] L.Y. Shen, Project Risk Management in Hong Kong, International Journal of Project Management, 1997, 15(2), 101-105.
- [18] N.N. Hlaing, D. Singh, R.L.K. Tiong and M. Ehrlich, Perceptions of Singapore Construction Contractors on Construction Risk Identification, Journal of Financial Management of Property and Construction, 2008, 13(2), 85-95.
- [19] L.H. Rodrigues-da-Silva and J.A. Crispim, The Project Risk Management Process, A Preliminary Study, Procedia Technology, 2014, 16, 943-949.
- [20] AS/NZS 4360:2004, Risk Management, Standards Australia International, 2007.
- [21] S. Pongprot, Reducing the Risk of Prisoners Escaping in Food Transporting Process, Thesis, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Thailand. 2018. (in Thai)
- [22] T. Amornpetchakul, Risk Management System Development in Suppliers Division, Office of Planning and Finance, Thesis, Chulalongkorn University, Thailand. 2004. (in Thai)



การประยุกต์ใช้แผ่นทิวบ์เซตเทิลเลอร์ร่วมกับพอลิเมอร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการตกตะกอนในน้ำเสียอุตสาหกรรมน้ำผลไม้

วัฒนา หงษ์ ศศิธร หาสิน และ วันัสพรรัตน์ สวัสดิ์*

สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการสิ่งแวดล้อม, วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการ, มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์

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

วันที่รับบทความ: 16 กรกฎาคม 2563; วันที่ทบทวนบทความ: 17 สิงหาคม 2563; วันที่ตอบรับบทความ: 18 กันยายน 2563
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 9 ธันวาคม 2563

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้แผ่นทิวบ์เซตเทิลเลอร์ร่วมกับการใช้ Cationic Polymer เพื่อนำไปเพิ่มประสิทธิภาพในการตกตะกอนในระบบบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมน้ำผลไม้ จากผลการดำเนินงานวิจัยพบว่าแผ่นทิวบ์เซตเทิลเลอร์และพอลิเมอร์สามารถลดค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำ ค่าความขุ่นในน้ำ และการลดค่าความสกปรกในรูปซีโอดีตามลำดับ ซึ่งค่าซีโอดีเหลือเพียง 27 mg L^{-1} โดยประสิทธิภาพการบำบัดคิดเป็นร้อยละ 96 เปรียบเทียบก่อนและหลังการติดตั้งแผ่นทิวบ์เซตเทิลเลอร์ นอกจากนี้ในส่วนของ การกำจัดปริมาณของแข็งทั้งหมดพบว่า ปริมาณของแข็งทั้งหมดมีค่า $1,000 \text{ mg L}^{-1}$ นอกจากนี้ค่าความขุ่นที่ออกจากบ่อตกตะกอนหลังติดตั้งแผ่นทิวบ์เซตเทิลเลอร์ ร่วมกับ Cationic Polymer พบว่าลดลงจากค่าเริ่มต้น 90 NTU เหลือเพียง 3 NTU ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแผ่นทิวบ์เซตเทิลเลอร์สามารถลดปริมาณของแข็ง ค่าความขุ่น และตะกอนค่าซีโอดีได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ดังนั้นจากผลการวิจัยการใช้แผ่นทิวบ์เซตเทิลเลอร์เข้ามามีส่วนช่วยในการกักตะกอนภายในบ่อตกตะกอนถือเป็นสิ่งที่น่าสนใจ และควรมีการต่อยอดเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ เพื่อทำให้คุณภาพของน้ำเสียเพิ่มขึ้น และสามารถหมุนเวียนใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมต่อไป

คำสำคัญ: แผ่นทิวบ์เซตเทิลเลอร์; การตกตะกอน; น้ำเสียอุตสาหกรรมน้ำผลไม้; การบำบัดน้ำเสีย



Tube Settler Application with Polymer for Sedimentation Efficiency in Beverage Industry Wastewater

Wattana Hongsri Sasitorn Hasin and Vanatpornratt Sawasdee *

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

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

Received: 16 July 2020; Revised 17 August 2020; Accepted: 18 September 2020

Online Published: 9 December 2020

Abstract: This research aims to tube settler application and cationic polymer for sedimentation efficiency in wastewater treatment in beverage industry wastewater. The result of this research was found that tube settler and polymer application can reduce total solids, turbidity, and COD, respectively. The COD after sedimentation with Tube Settler was presented 27 mg L^{-1} . The efficiency of wastewater treatment was 96% when comparing before and after tube settler utilization. Moreover, the total solid removal was reduced to $1,000 \text{ mg L}^{-1}$. Turbidity removal after tube settler and the cationic polymer was reduced from 90 NTU to 3 NTU. Tube Settler can be effectively reduced total solids, turbidity, and COD, respectively. Therefore, this research was tube settler and polymer application that was obtained the reducing of sediment in the sedimentation tank that was interesting. Finally, this research can be continuing to be applied within other industries for wastewater treatment efficiency increasing and can be circulated in industry.

Keywords: Tube Settler; Sedimentation; Beverage Industry Wastewater; Wastewater Treatment

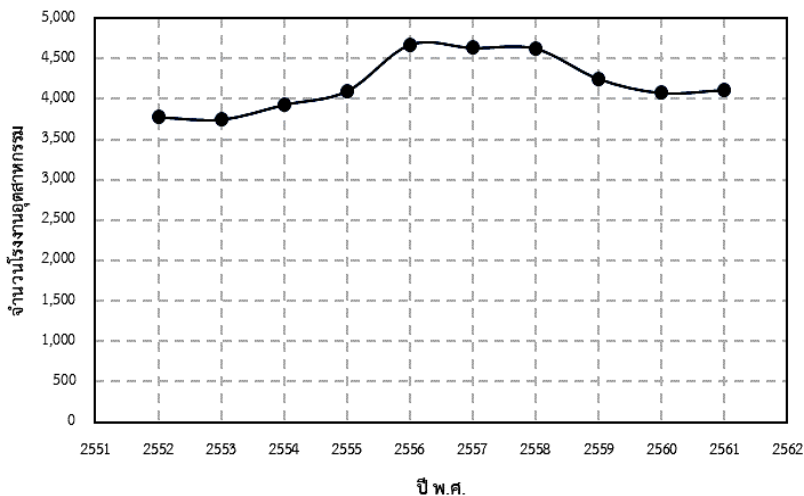


1. บทนำ

ปัจจุบันมีการขยายตัวของอุตสาหกรรมในประเทศไทยเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมอาหาร ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ ของแข็งแขวนลอยสูง ซึ่งมากกว่า 90% ของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียจะเกิดขึ้นในกระบวนการผลิต [1] ซึ่งกระบวนการบำบัดน้ำเสียนั้นสามารถแบ่งได้เป็น กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางกายภาพ ทางเคมี และทางชีวภาพ ซึ่งในแต่ละกระบวนการมีความสามารถในการบำบัดน้ำเสียที่แตกต่างกัน ในการบำบัดน้ำเสียทางกายภาพนั้น ใช้ในการกำจัดของแข็งชิ้นใหญ่ที่ติดมากับน้ำเสีย โดยสามารถกำจัดก่อนเข้าระบบการบำบัดทางเคมี และทางชีวภาพ อีกทั้งยังป้องกันไม่ให้เกิดเศษขยะของแข็งที่มีขนาดใหญ่เข้ามาทำลายระบบบำบัดทางเคมี และชีวภาพได้อีกด้วย อย่างไรก็ตามในการเลือกระบบบำบัดน้ำเสียนั้น ควรเลือกให้เหมาะสมกับลักษณะของน้ำเสีย เพื่อให้การบำบัดน้ำเสียมีประสิทธิภาพสูงสุด

จากรูปที่ 1 แสดงให้เห็นถึงสถิติของการเติบโตของโรงงานอุตสาหกรรมในประเทศไทย [2] จากแนวโน้มแสดงให้เห็นว่ามีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสีย ทำให้น้ำเสียที่ผ่านกระบวนการบำบัดนั้น สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้มากขึ้น จึงถือได้ว่าเป็นการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่ามากที่สุด

การวิเคราะห์หาค่าความสกปรกของน้ำสามารถวิเคราะห์ได้หลายวิธี โดยวิธีที่นิยมและได้ผลอย่างรวดเร็วแม่นยำ คือการวิเคราะห์ค่าซีโอดี เป็นการวิเคราะห์หาปริมาณออกซิเจนที่ต้องการในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ในน้ำเสีย เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาสุดท้ายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ นอกจากนี้การหาค่าของแข็งทั้งหมดที่ปนเปื้อนในน้ำนั้นยังสามารถหาได้โดยนำตัวอย่างน้ำไปอบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส การวิเคราะห์ค่าเหล่านี้สามารถนำไปสู่การพิจารณาการหาวิธีเพิ่มประสิทธิภาพการตกตะกอนและลดค่าซีโอดีต่อไป [3]



รูปที่ 1 สถิติโรงงานอุตสาหกรรมปี 2552-2561 [2]



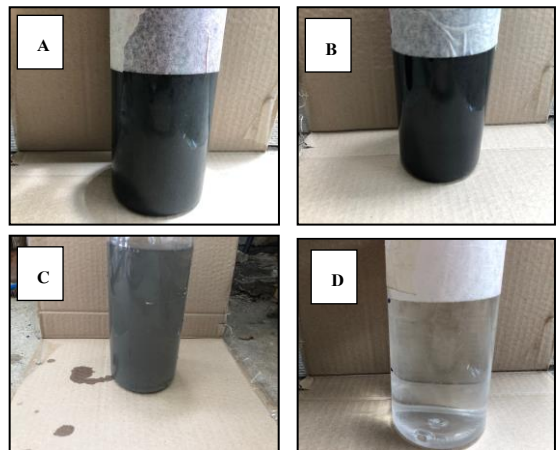
การเพิ่มประสิทธิภาพระบบบำบัดน้ำเสียที่มีความเหมาะสมและยังไม่เพิ่มปริมาณการใช้สารเคมี คือการใช้เทคนิคทางกายภาพ คือ การประยุกต์ใช้แผ่นทิวบ์เซตเทิลเลอร์ในระบบบำบัดน้ำเสีย ซึ่งโดยทั่วไปนั้นแผ่นทิวบ์เซตเทิลเลอร์จะใช้ในระบบการผลิตน้ำประปา โดยการติดตั้งแผ่นทิวบ์เซตเทิลเลอร์ในถังตกตะกอน ระบบผลิตน้ำประปาจะช่วยให้อนุภาคของตะกอนที่มีความเร็วในการตกตะกอนต่ำกว่า V_0 (อัตราน้ำล้นผิว) ถูกกำจัดได้มากขึ้น เพราะตะกอนไม่จำเป็นต้องตกถึงพื้นถึงอย่างแท้จริง ซึ่งเทคนิคนี้จึงสามารถนำมาใช้จนถึงตกตะกอนของระบบบำบัดน้ำเสีย [4-6] เป็นตัวช่วยตกตะกอน อีกทั้งยังช่วยในการลดค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด ค่าบีโอดี รวมถึงค่าซีโอดี [7, 8] และสามารถรองรับปริมาณน้ำเสียที่เพิ่มขึ้นสำหรับโรงงานที่มีพื้นที่จำกัด และลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบบำบัดน้ำเสียเพิ่มขึ้น ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจการใช้แผ่นทิวบ์เซตเทิลเลอร์ในบ่อบอกตะกอนของระบบบำบัดน้ำเสีย สำหรับอุตสาหกรรมน้ำผลไม้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ และรองรับปริมาณน้ำเสียที่เพิ่มขึ้นต่อไป

2. อุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย

2.1 พื้นที่และการเก็บตัวอย่างน้ำเสีย

พื้นที่เก็บตัวอย่างน้ำเสียสำหรับงานวิจัยนี้ได้จากบริษัท ไทยอกริ ฟู้ด จำกัด เป็นโรงงานผลิตผลิตภัณฑ์อาหาร เครื่องดื่ม อาหารสำเร็จรูป น้ำเสียมีลักษณะทางกายภาพเป็นน้ำที่มีสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ ความขุ่นและสารแขวนลอยสูง อีกทั้งยังมีตะกอนสีน้ำตาลเข้ม

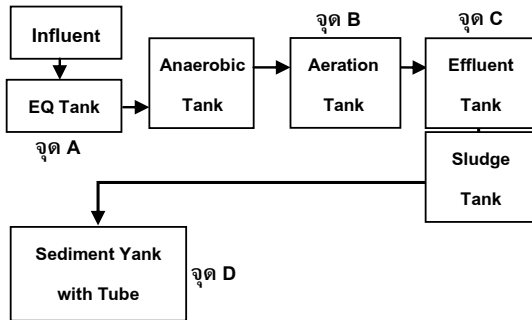
ในการเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานนั้นจะเลือกเก็บทั้งหมด 4 จุดเก็บตัวอย่าง คือ บริเวณบ่อบอก บ่อเติมอากาศ บ่อบอกก่อนปล่อยน้ำหลังการบำบัดออกสู่สิ่งแวดล้อม และบ่อบอกตะกอนที่ติดตั้งแผ่นทิวบ์เซตเทิลเลอร์ โดยรูปที่ 2 จะแสดงถึงลักษณะของน้ำเสียที่เก็บมาจากระบบบำบัด โดยรูปที่ 2A จะเป็นน้ำเสียบริเวณบ่อบอกก่อนเข้าระบบ ในรูปที่ 2B ตัวอย่างน้ำบริเวณบ่อเติมอากาศ รูปที่ 2C ตัวอย่างน้ำบริเวณบ่อบอกก่อนปล่อยน้ำหลังการบำบัดออกสู่สิ่งแวดล้อม และในรูปที่ 2D ตัวอย่างน้ำบริเวณบ่อบอกตะกอนที่ติดตั้งแผ่นทิวบ์เซตเทิลเลอร์ และได้เอกรมระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานแสดงดังรูปที่ 3 โดยระบบบำบัดมีระยะเวลาเก็บกักของน้ำเสีย (hydraulic retention time: HRT) มีค่า 33.5 ชั่วโมง ค่าอัตราการไหล 150 ลบ.ม.ต่อชั่วโมง



รูปที่ 2 ลักษณะน้ำเสียที่เก็บมาจากระบบบำบัดที่บริเวณต่างๆ: (A) บริเวณบ่อบอกก่อนเข้าระบบ (B) บริเวณบ่อเติมอากาศ (C) บริเวณบ่อบอกก่อนปล่อยน้ำหลังการบำบัดออกสู่สิ่งแวดล้อม (D) บริเวณบ่อบอกตะกอนที่ติดตั้งแผ่นทิวบ์เซตเทิลเลอร์



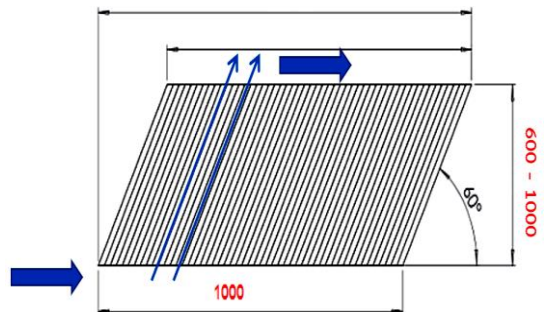
อย่างไรก็ตาม ในระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงาน นอกจากจะติดตั้งแผ่นทิวบ์เซตเทิลเลอร์เพื่อช่วยในการกักตะกอน ยังมีการเติมพอลิเมอร์ที่จุด A ดังรูปที่ 3 เพื่อช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบอีกด้วย



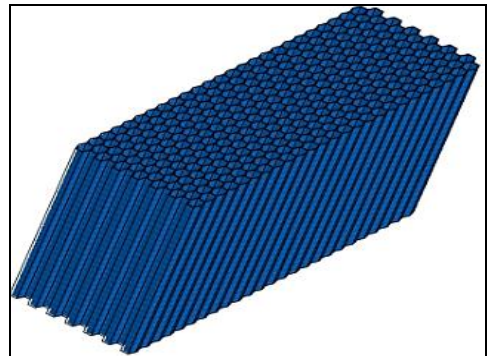
รูปที่ 3 ไลอะแกรมระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงาน

2.2 แผ่นทิวบ์เซตเทิลเลอร์ (Tube Settler)

แผ่นทิวบ์เซตเทิลเลอร์ทำจากวัสดุพีวีซี โพลีไวนิลคลอไรด์ (Polyvinylchloride: PVC) รูปร่างเป็นแผ่นลอนๆ คล้ายหลังคาที่มีขนาด กว้างคูณยาวที่ 55 x 120 เซนติเมตร นำมาตัดขอบหัวท้ายตามความยาวให้ได้ตามขนาดที่ต้องการที่มุม 60 องศา ก่อนนำไปประกอบให้เป็นก้อนลูกบาศก์ให้ได้ขนาดที่ 55 x 100 x 100 เซนติเมตร โดยแผ่นจะเอียงทำมุม 60 องศา (รูปที่ 4) เพื่อให้การตกตะกอนมีประสิทธิภาพมากที่สุด พื้นผิวแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือพื้นผิวเรียบจะเป็นด้านที่รับน้ำหนักระบายซึ่งอยู่ด้านล่าง และพื้นผิวขรุขระสำหรับบริเวณที่เร่งจัดตัวของตะกอนซึ่งอยู่ด้านบน เมื่อรวมตะกอนได้น้ำหนัก จะทำให้ตะกอนตกลงสู่ด้านล่าง น้ำส่วนใสจะไหลสวนทางกับตะกอนตามช่องหลอดครึ่งฝั่งของแผ่นทิวบ์เซตเทิลเลอร์ [9] ดังรูปที่ 5 และ 6 โดยจะถูกติดตั้งในจุด D ขนาดบ่อ 288 ลบ.ม. ดังรูปที่ 3



รูปที่ 4 ลักษณะทิศทางการไหลของน้ำเสียผ่านแผ่นทิวบ์เซตเทิลเลอร์



รูปที่ 5 ลักษณะแผ่นทิวบ์เซตเทิลเลอร์ที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 6 ลักษณะแผ่นทิวบ์เซตเทิลเลอร์ที่ประกอบแล้ว มีช่องหรือรูหลอดคล้ายรังผึ้ง



น้ำที่ผ่านแผ่นทิวบ์เซ็ดเทิลเลอร์ที่สามารถช่วยกักตะกอนทางกายภาพนั้น จะไหลเข้าช่องรางรอบๆ ขอบบ่อไหลรวมเข้าที่ท่อส่งน้ำใสไปยังถังพักน้ำใสเพื่อนำไปใช้กิจกรรมภายในโรงงานอุตสาหกรรมต่อไป

2.3 พอลิเมอร์ประจุบวก

พอลิเมอร์ประจุบวก (Cationic Polymer) ทำหน้าที่รวมตะกอน ถือเป็นการบำบัดทางเคมี ในการสร้างรวมตะกอน ซึ่งสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการตกตะกอน [3] โดยปริมาณการเติม Cationic Polymer คือ 50 กิโลกรัมต่อวัน ที่จุด A (รูปที่ 3)

2.4 วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยเป็นการทดสอบประสิทธิภาพของการประยุกต์ใช้แผ่นทิวบ์เซ็ดเทิลเลอร์ เพื่อให้การบำบัดน้ำเสียมีประสิทธิภาพ และยังสามารถนำน้ำวนกลับมาใช้ใหม่ได้อีกด้วย โดยการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพการบำบัดแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การติดตามพารามิเตอร์ในระบบและวิธีวิเคราะห์ก่อนและหลังการประยุกต์ใช้แผ่นทิวบ์เซ็ดเทิลเลอร์

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์
pH	pH Meter
Turbidity	Turbidity Meter
Total solid	Total Solid 103-105 °C
COD	Close Reflux Method

ตามวิธีมาตรฐาน Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater [10] โดยการติดตามพารามิเตอร์นั้นเมื่อวิเคราะห์ตัวอย่างแล้ว

จึงนำมาเข้าสู่ตรรกาคำนวณเพื่อหาค่าของปริมาณของแข็งทั้งหมด และค่าซีโอดี ดังสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ

$$TS = \{(A-B) \times 1000\} / C \quad (1)$$

เมื่อ TS = ปริมาณของแข็งทั้งหมด (มิลลิกรัม/ลิตร)

A = น้ำหนักของตัวอย่างและซามระเหย, (มิลลิกรัม)

B = น้ำหนักของซามระเหย, มิลลิกรัม

C = ปริมาตรน้ำตัวอย่างที่ใช้, มิลลิลิตร

$$\text{ซีโอดี} = \frac{\text{ปริมาณซีโอดี (มิลลิกรัม)} \times 100}{\text{ปริมาณตรตัวอย่างน้ำ (มิลลิลิตร)}} \quad (2)$$

ใช้วิธีรีฟลักซ์ปิดแบบเทียบสี โดยที่ ปริมาณซีโอดี (มก.) ได้จากการคำนวณจากค่าการดูดกลืนแสงที่ค่าความยาวคลื่น 600 nm และกราฟมาตรฐาน

3. ผลการดำเนินงานวิจัย

จากการดำเนินการวิจัยในการประยุกต์ใช้แผ่นทิวบ์เซ็ดเทิลเลอร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการตกตะกอนในน้ำเสียอุตสาหกรรมน้ำผลไม้ นั้น พบว่าแผ่นทิวบ์เซ็ดเทิลเลอร์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการตกตะกอนทำให้น้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดใสขึ้น และสามารถนำมาหมุนเวียนใช้ในโรงงานได้ นำไปสู่การลดใช้ทรัพยากรน้ำภายในโรงงาน

3.1 ค่าความเป็นกรดต่าง

จากการตรวจวัดค่าความเป็นกรดต่างในระบบพบว่าในบ่อพักก่อนเข้าระบบบำบัดดังรูปที่ 3 มีค่าความเป็นกรดต่าง 4.00 ซึ่งเป็นน้ำเสียที่มีค่าความเป็นกรดสูงเนื่องจากภายในกระบวนการผลิตมีทั้งในส่วนการล้าง



ทำความสะอาดวัตถุดิบ การสกัดน้ำผลไม้ รวมถึงการปรับปรุงกลิ่นและรสชาติ ทำให้ค่าความเป็นกรดสูง อย่างไรก็ตามค่าความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมสำหรับระบบบำบัดน้ำเสียโดยทั่วไปควรมีค่า 6.5-7.5 ดังนั้นเมื่อเข้าสู่ระบบเติมอากาศจึงมีการปรับค่าความเป็นกรดต่างร่วมด้วย ทำให้ค่าความเป็นกรดต่างมีค่า 6.81-6.86 โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เพื่อให้กลุ่มจุลินทรีย์ในบ่อเติมอากาศทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด [11] แต่อย่างไรก็ตามยังไม่สามารถดำเนินการกักตะกอนและลดค่าซีโอดีได้ (บ่อเติมอากาศ) ทำให้เมื่อปล่อยน้ำเสียออกจากระบบทำให้เกิดปัญหาค่าความสกปรกของน้ำเสียที่ออกจากระบบไม่ได้ตามที่มาตรฐานกำหนด จึงมีการนำแผ่นทิวบ์เซตเทิลเลอร์มาช่วยในระบบร่วมกับการใช้พอลิเมอร์ (Cationic Polymer) ทำให้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัด เพิ่มความสามารถในการรองรับปริมาณน้ำเสียที่เพิ่มขึ้นจากกระบวนการผลิต รวมถึงยังสามารถลดปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำเสียได้อีกด้วย

3.2 ค่าความขุ่น (Turbidity)

การวิเคราะห์ค่าความขุ่นในบ่อดกตะกอนนั้นเป็นการวิเคราะห์ความสามารถของน้ำที่สกัดกันหรือดูดซับปริมาณแสงที่ส่องผ่าน ซึ่งสิ่งที่ทำให้เกิดความขุ่นในน้ำเสียคือสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ ซึ่งก่อนการติดตั้งแผ่นทิวบ์เซตเทิลเลอร์พบว่ามีความขุ่นอยู่ที่ 90 NTU เนื่องด้วยบ่อบำบัดก่อนเข้าบ่อดกตะกอนเป็นบ่อบำบัดแบบใช้อากาศแบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge) ทำให้ตะกอนจุลินทรีย์ สารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์บางส่วนหลุดปะปนออกมากับน้ำเสียที่

ผ่านการบำบัดแล้ว เมื่อมาถึงบ่อดกตะกอนจึงไม่สามารถดกตะกอนน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเมื่อมีการติดตั้งแผ่นทิวบ์เซตเทิลเลอร์ร่วมกับการใช้พอลิเมอร์ (Cationic Polymer) ทำให้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดกตะกอน พบว่ามีค่าความขุ่นลดลงเหลือเพียง 3 NTU จากผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าแผ่นทิวบ์เซตเทิลเลอร์สามารถช่วยลดค่าความขุ่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อนำประสิทธิภาพการลดความขุ่นของแผ่นทิวบ์เซตเทิลเลอร์เปรียบเทียบกับผลการลดความขุ่นของแผ่นทิวบ์เซตเทิลเลอร์ประสิทธิภาพในการลดค่าความขุ่นของแผ่นทิวบ์เซตเทิลเลอร์นั้นมีประสิทธิภาพมากกว่า โดยพิจารณาจากค่าความขุ่นหลังการบำบัดจากวิธีทางชีวภาพโดยใช้ *Pleurotus ostreatus* พบว่ามีค่า 42.44 NTU [12] แต่ในส่วนค่าความขุ่นที่ผ่านการบำบัดจาก แผ่นทิวบ์เซตเทิลเลอร์มีค่า 3 NTU ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 งานวิจัยเปรียบเทียบการกำจัดความขุ่น

วิธีการกำจัดความขุ่น	ค่าความขุ่นหลังการกำจัด	% Turbidity removal	งานวิจัย (อ้างอิง)
วิธีทางชีวภาพโดยใช้ <i>Pleurotus Ostreatus</i>	42.44 NTU	84%	[12]
FeCl ₃ -Induced Crude Extract (FCE)	3.44 NTU	95.6%	[13]
After Treatment with Al ³⁺	8.1 NTU	80%	[15]
แผ่นทิวบ์เซตเทิลเลอร์ร่วมกับพอลิเมอร์	3 NTU	96%	งานวิจัยนี้

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจากงานวิจัยอื่นๆที่ต้องการลดค่าความขุ่นในน้ำโดยใช้ FeCl₃-Induced



Crude Extract (FCE) ซึ่งถือเป็น Biocoagulant พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นมีค่าใกล้เคียงกัน [13] นอกจากนี้การใช้สารโคแอกกูแลนต์ธรรมชาติ ยังสามารถลดค่าความขุ่นในน้ำได้ [14] โดยการเปรียบเทียบงานวิจัยที่เกี่ยวข้องแสดงดังตารางที่ 2

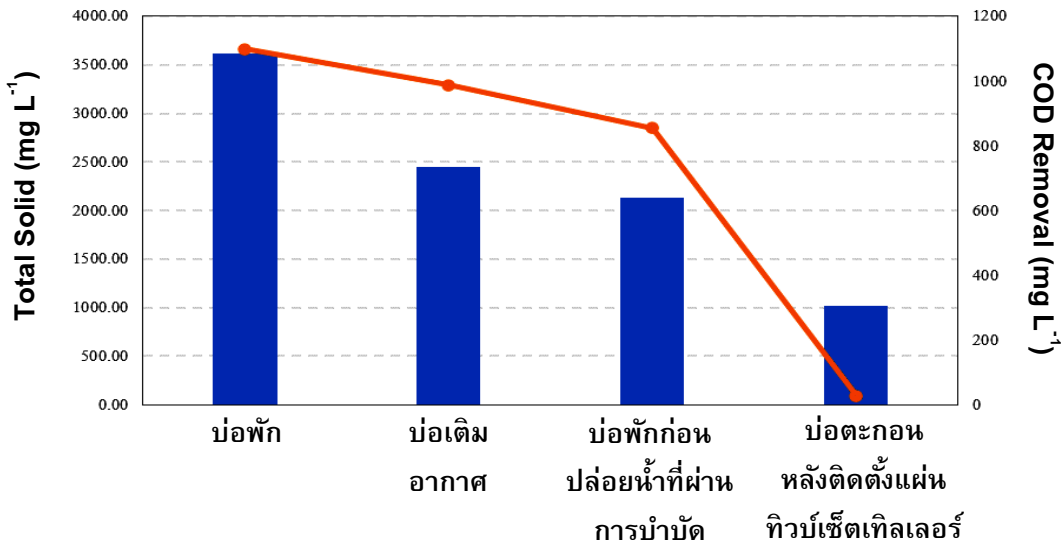
3.3 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมด และค่าซีโอดีก่อนและหลังการใช้แผ่นทิวบ์เซ็ดเทิลเลอร์

เมื่อพิจารณาปริมาณของแข็งทั้งหมดในบ่อพัก ซึ่งเป็นบ่อที่รองรับน้ำเสียจากกระบวนการผลิตก่อนเข้าสู่ระบบบำบัดแบบใช้อากาศ พบว่ามีค่าของแข็งทั้งหมด (Total Solid) $3,600 \text{ mg L}^{-1}$ (รูปที่ 6) จากนั้นจะสูบน้ำเสียจากบ่อพักเข้าสู่ระบบบำบัดแบบใช้อากาศ เพื่อให้ตะกอนจุลินทรีย์ทำปฏิกิริยาชีวเคมีเพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ทำให้สามารถกำจัดสิ่งสกปรกในน้ำเสียได้ ตะกอนจุลินทรีย์ภายในบ่อบำบัดแบบใช้อากาศซึ่งเป็นแบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge) นั้นจะถูกเลี้ยงให้อยู่ในช่วง Log Growth Phase ซึ่งเป็นช่วงที่ตะกอนจุลินทรีย์เพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็ว รวมไปถึงลักษณะของตะกอนจุลินทรีย์ในระบบจะมีลักษณะเป็นตะกอนรูปหวีเข็ม (Pin Floc) [11] จึงทำให้ตะกอนเร่งตกตะกอนได้ไม่ดีในถังตกตะกอน เป็นผลทำให้น้ำเสียที่ออกจากระบบยังมีลักษณะขุ่น เนื่องจากมีตะกอนจุลินทรีย์หลุดปะปนออกมากับน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว อีกทั้งยังมีสารอินทรีย์ปะปนอยู่ในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วอีกด้วย ทำให้น้ำยังมีค่าซีโอดี และมีความขุ่นสูง โดยน้ำเสียที่ถูกผสมระหว่างน้ำเสียกับตะกอนจุลินทรีย์ เรียกว่า Mixed Liquor โดยจากการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งทั้งหมดพบว่ามีค่า $2,400 \text{ mg L}^{-1}$ อย่างไรก็ตาม Mixed Liquor ที่ออกจากบ่อเติมอากาศยังมีตะกอน ซึ่งส่วนหนึ่งเป็น

ตะกอนจุลินทรีย์ เนื่องจากจุลินทรีย์ในบ่อบำบัดแบบใช้อากาศจะย่อยสลายสารอินทรีย์ และเพิ่มจำนวนมากขึ้น ทำให้ตะกอนยังมีปริมาณมากจึงจำเป็นต้องนำน้ำที่ออกจากบ่อเติมอากาศเข้าสู่บ่อตกตะกอน เพื่อให้ปริมาณตะกอน หรือของแข็งทั้งหมดจมลงสู่ก้นบ่อก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยส่วนหนึ่งของตะกอนที่จมลงสู่ก้นบ่อจะถูกสูบกลับเข้าบ่อเติมอากาศเพื่อรักษาปริมาณของตะกอนจุลินทรีย์ให้คงที่ และยังคงกำจัดตะกอนส่วนเกินในบ่อทิ้งด้วย [3, 16]

เมื่อ Mixed Liquor (จากบ่อบำบัดแบบใช้อากาศ) ผ่านเข้าบ่อตกตะกอนที่ยังไม่ได้ติดตั้งแผ่นทิวบ์เซ็ดเทิลเลอร์ จะสามารถลดปริมาณของแข็งทั้งหมดได้ 300 mg L^{-1} ดังนั้นจึงยังทำให้ปริมาณของแข็งทั้งหมดยังอยู่ในช่วงมากกว่า $2,000 \text{ mg L}^{-1}$ จากนั้นเมื่อดำเนินการทดลองติดตั้งแผ่นทิวบ์เซ็ดเทิลเลอร์ร่วมกับการใช้ร่วมกับการใช้พอลิเมอร์ (Cationic Polymer) พบว่าปริมาณของแข็งทั้งหมดมีค่า $1,000 \text{ mg L}^{-1}$ ซึ่งสามารถลดปริมาณของแข็ง และตะกอนได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

ดังนั้นเมื่อพิจารณาการตกตะกอนก่อนและหลังการติดตั้งแผ่นทิวบ์เซ็ดเทิลเลอร์ พบว่าสามารถลดปริมาณของแข็งทั้งหมดได้จากเดิมมากกว่า 50% นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงค่าซีโอดีในระบบพบว่าในบ่อตกตะกอนก่อนการติดตั้งแผ่นทิวบ์เซ็ดเทิลเลอร์สามารถลดค่าซีโอดีได้เพียง 13% ซึ่งเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเทียบกับบ่อตกตะกอนหลังการติดตั้งแผ่นทิวบ์เซ็ดเทิลเลอร์ พบว่าสามารถลดค่าซีโอดีจาก 850 mg L^{-1} เหลือเพียง 27 mg L^{-1} ซึ่งถือเป็นค่าที่สามารถปล่อยน้ำออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ และเมื่อคิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีมีค่าถึง 96%



รูปที่ 6 แสดงปริมาณการกำจัดของแข็งทั้งหมด (กราฟแท่ง) และค่าซีโอดีก่อนและหลัง (กราฟเส้น) การใช้แผ่นทิวบ์เซตเทิลเลอร์

4. สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

จากการประยุกต์ใช้แผ่นทิวบ์เซตเทิลเลอร์ร่วมกับการใช้พอลิเมอร์ในการเพิ่มประสิทธิภาพการตกตะกอน ในงานวิจัยพบว่าเมื่อนำแผ่นทิวบ์เซตเทิลเลอร์มาติดตั้งเพิ่มเติมนอกเหนือจากการใช้พอลิเมอร์ในการตกตะกอนนั้น สามารถช่วยลดค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำได้ รวมถึงการลดค่าความสกปรกในรูปซีโอดีได้ ดังงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [7,8] ซึ่งค่าซีโอดีจากค่าเริ่มต้น 850 mg L⁻¹ เหลือเพียง 27 mg L⁻¹ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานการควบคุมคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม พบว่าค่าซีโอดีมีค่าไม่เกินมาตรฐาน คือ 120 mg L⁻¹ นอกจากนี้ในส่วนของผลการกำจัดปริมาณของแข็งทั้งหมดพบว่าปริมาณของแข็งทั้งหมด มีค่า 1,000 mg L⁻¹ นอกจากนี้ค่าความขุ่นที่ออกจากบ่อตกตะกอนหลัง

ติดตั้งแผ่นทิวบ์เซตเทิลเลอร์ พบว่าลดลงเหลือเพียง 3 NTU จากค่าเริ่มต้น 90 NTU ประสิทธิภาพของการลดความขุ่นคิดเป็น 96% ค่าปริมาณของแข็งทั้งหมด และค่าความขุ่นนั้นยังส่งผลต่อค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ (Total Dissolved Solid: TDS) ดังนั้นเมื่อค่าความขุ่น และปริมาณของแข็งทั้งหมดลดลง จึงทำให้ค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ลดลงเช่นกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแผ่นทิวบ์เซตเทิลเลอร์สามารถลดปริมาณของแข็ง และตะกอนได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ดังนั้นการใช้แผ่นทิวบ์เซตเทิลเลอร์เข้ามามีส่วนช่วยในการตกตะกอนภายในบ่อตกตะกอนถือเป็นสิ่งที่น่าสนใจ และควรมีการต่อยอดเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ เพื่อให้คุณภาพของน้ำเสียเพิ่มขึ้น และสามารถหมุนเวียนใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อลดค่าใช้จ่ายการใช้ทรัพยากรทางน้ำต่อไป



5. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Obasi and O. Agwu, Bioremoval of Heavy Metals from a Nigerian Brewery Wastewater by Bacterial Application, Food and Applied Bioscience Journal, 2017, 5(3), 165–175.
- [2] <http://statbbi.nso.go.th/staticreport/page/sector/th/12.aspx>. (Accessed on 08 July 2020) (in Thai)
- [3] S. Sirianuntapiboon, Wastewater Treatment System, 2nd ed., Top Publishing Co., Ltd, Thailand, 2014. (in Thai)
- [4] T. Vangpaisal, Water Supply Engineering, 2nd ed., Chulalongkorn University Press, Thailand, 2014. (in Thai)
- [5] A. Faraji, G. Asadollahfardi and A. Shevidi, A Pilot Study for the Application of One-and Two-Stage Tube Settlers as a Secondary Clarifier for Wastewater Treatment, International Journal of Civil Engineering, 2013, 11(4), 272-280.
- [6] P. Painmanakul, Unit Processes for Environmental Engineering, 1st ed., Chulalongkorn University Press, Thailand, 2014. (in Thai)
- [7] A. Gurjar, M. Bhorkar, A.G. Bhole and P. Baitule, Performance Study of Tube Settlers Module, International Journal of Engineering Research and Application, 2017, 7(3), 52-55.
- [8] A. Faraji, G. Asadollahfardi and A. Shevidi, A Pilot Study for the Application of One-and Two-Stage Tube Settlers Secondary Clarifier for Wastewater Treatment, International Journal of Civil Engineering, 2013, 11(4), 272-280.
- [9] S. Al-Dulaimi and G. Racoviteanu, Efficiency of Tube Settler on Removal of Coagulation Particles, E3S Web of Conferences, 2019, 85, 07012, 1-12.
- [10] American Public Health Association-American Water Works Association-Water Pollution Control Federation (APHA-AWWA-WPCF), Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th Ed., APHA, Washington DC, USA, 2000.
- [11] K. Choekatwatana, Microbiology for Scientists and Environmental Engineering, 1st ed., Chulalongkorn University Press, Thailand, 2018. (in Thai)
- [12] A. Pardede, M.A. Budihardjo and Purwono, The Removal of Turbidity and TSS of the Domestic Wastewater by Coagulation-Flocculation Process Involving Oyster Mushroom as Biocoagulant, E3S Web of Conferences, 2018, 31, 05007, 1-4.



- [13] B. Ramavandi, Treatment of Water Turbidity and Bacteria by using a Coagulant Extracted from Plantage Ovata, Water Resource and Industry, 2014, 6, 36-50.
- [14] Md. Asrafuzzaman, A.N.M. Fakhruddin and Md. A. Hossain, Reduction of Turbidity of Water using Locally Available Natural Coagulants, International Scholarly Research Network, 2011, 632189, 1-6.
- [15] P. Romphophak, Turbidity Removal by Solid Contact Clarifier with Sludge Recirculation, Master Thesis, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Thailand, 2013.
- [16] B.R. Gonçaves, W.B. Neto, A.E.H. Machado and A.G. Trovó, Biodiesel Wastewater Treatment by Coagulation-Flocculation: Evaluation and Optimization of Operational Parameters, Journal of the Brazilian Chemical Society, 2017, 28(5), 800-807.



การพัฒนาจีโอโพลิเมอร์ความแข็งแรงสูงด้วยเถ้าชานอ้อยวงไวสูง

ภคมน กิตติสยาม¹ ธรรมรส ปันทองสุข¹ อาคิรา ศรีคชา¹ ดวงฤดี ฉายสุวรรณ¹ และ
ชญานี ทิพยเสมอ^{2*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

² ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมการเชื่อม, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
พระนครเหนือ

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

วันที่รับบทความ: 5 ตุลาคม 2563; วันที่ทบทวนบทความ: 2 พฤศจิกายน 2563; วันที่ตอบรับบทความ: 9 พฤศจิกายน 2563

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 9 ธันวาคม 2563

บทคัดย่อ: จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุชนิดใหม่ที่มีสมบัติคล้ายคลึงกับปูนซีเมนต์ จึงมักถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการก่อสร้างเนื่องจากมีกำลังรับแรงอัดสูง โดยจีโอโพลิเมอร์ผลิตมาจากวัสดุอะลูมิเนียมซิลิเกตที่เรียกว่าวัสดุปอชโซลาน เช่น เมตาเคโอลิน เถ้าลอย เถ้าชานอ้อย และเถ้าแกลบ ผสมกับสารละลายอัลคาไลที่มีความเป็นด่างสูงเพื่อเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน แต่ในการนำเอาซีเถ้าจากการเกษตร มาใช้นั้นมีข้อจำกัดอยู่ที่ความวงไวในการทำปฏิกิริยา หากวัสดุปอชโซลานมีความวงไวในการทำปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันต่ำจะทำให้กำลังรับแรงอัดช่วงต้นของชิ้นงานมีค่าน้อยเช่นเดียวกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่ทำให้เถ้าชานอ้อยมีความวงไวสูงต่อการทำปฏิกิริยาโดยการนำเถ้าชานอ้อยไปแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และเกิดเป็นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดซิลิกาสูง (Silica-rich (SR)-NaOH) ในงานวิจัยนี้ใช้วัสดุปอชโซลานอัตราส่วนระหว่างเมตาเคโอลินต่อเถ้าชานอ้อยที่ 80:20 และอัตราส่วนปอชโซลานต่อสารละลายอัลคาไลเท่ากับ 1:1 ปริมาณเถ้าชานอ้อยแตกต่างกันที่ 0, 20 และ 50 เปอร์เซ็นต์ ผสมเข้ากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์ ได้เป็นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดซิลิกาสูง จากนั้นทดสอบสมบัติทางเคมี ได้แก่ การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่องฟูเรียรทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และความสามารถในการละลายของด่าง จากผลการทดสอบพบว่าการใช้ SR-NaOH ที่ผสมเถ้าชานอ้อย 50 เปอร์เซ็นต์ จะมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุด โดยมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าชิ้นงานที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เชิงพาณิชย์มากกว่า 2 เท่า ที่อายุบ่ม 7 วันและมากกว่า 3.5 เท่าที่อายุบ่ม 28 วัน

คำสำคัญ: จีโอโพลิเมอร์ชนิดเมตาเคโอลิน; เถ้าชานอ้อยวงไวสูง; ความแข็งแรงรับแรง; สารละลายโซเดียมซิลิเกต; สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดซิลิกาสูง



Development of High-Strength Geopolymers by High-Reactive Bagasse Ash

Pakamon Kittisayarm¹ Thammaros Pantongsuk¹ Akera Srikhacha¹,
Duangrudee Chaysuwan¹ and Chayanee Tippayasam^{2*}

¹ Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

² Department of Welding Engineering Technology, College of Industrial Technology,
King Mongkut's University of Technology North Bangkok

* Corresponding author, E-mail: chayanee.t@cit.kmutnb.ac.th

Received: 5 October 2020; Revised 2 November 2020; Accepted: 9 January 2020

Online Published: 9 December 2020

Abstract: Geopolymer is a new material whose properties are similar to cement. Therefore, it is often used in the construction industry due to its high compressive strength. Geopolymers are made from aluminosilicate materials called pozzolanic materials such as metakaolin, fly ash, bagasse ash and rice husk ash mixed with a high alkali solution to occur geopolymerization, however, the agricultural ashes have limited reactivity. Since the pozzolanic materials had low reactivity for geopolymerization, the early compressive strength of geopolymer was low as well. Therefore, this research aimed to prepare the high-reactive bagasse ash by soaking the ash in sodium hydroxide solution to transform into silica-rich sodium hydroxide (SR-NaOH). In this study, the ratio of metakaolin and bagasse ash was 80:20 and the ratio of solid to alkali liquid was 1:1. The quantity of bagasse ash for SR-NaOH was varied as 0, 20 and 50%, mixed with 10M NaOH. The chemical properties were characterized including the functional group analysis by FTIR, the chemical compositions by XRD and the alkalinity test. From the results, it was found that the usage of SR-NaOH with 50 percent of bagasse ash presented the highest compressive strength which was 2 times at 7 day age and 3.5 times at 28 day age higher than that of commercial NaOH.

Keywords: Metakaolin-based geopolymer; High-reactive bagasse ash; Compressive strength; Sodium silicate solution; Silica-rich sodium hydroxide



1. บทนำ

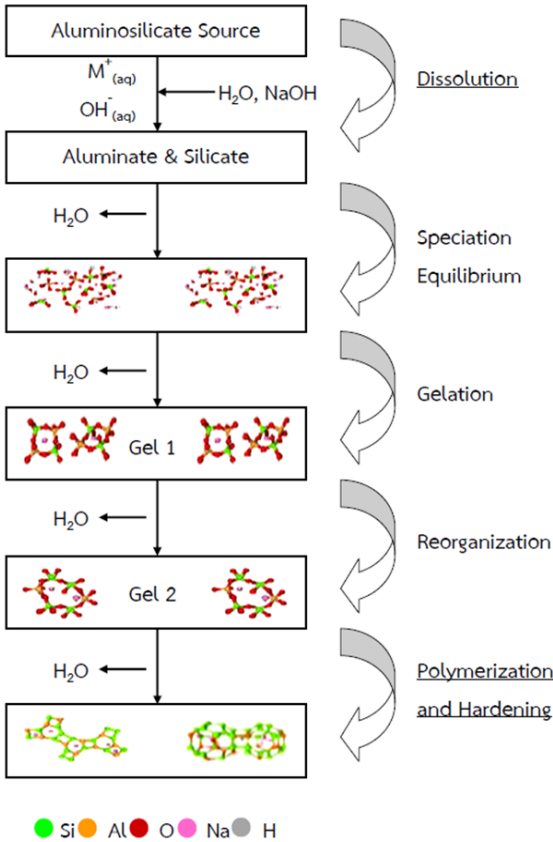
ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ถือเป็นวัสดุหลักที่ใช้งานก่อสร้างนิยมใช้กันแพร่หลายเนื่องจากมีความแข็งแรงสูง ทนทาน มีอายุการใช้งานสูง [1] เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์นั้นค่อนข้างสูงมากโดยใช้อุณหภูมิสูงถึง 1,400–1,600 องศาเซลเซียส [2] ส่งผลให้มีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) [3-4] ในปริมาณที่สูงก่อให้เกิดเป็นภาวะโลกร้อน (Global Warming) [5] ดังนั้นเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม [6, 7] Robert Mccaffrey ได้นำเสนอ 3 แนวทางการลดการปลดปล่อย CO_2 จากโรงงานปูนซีเมนต์ ได้แก่ (1) ลดปริมาณวัสดุที่ต้องผ่านกระบวนการเผาในปูนซีเมนต์ (2) ลดการใช้ซีเมนต์ และ (3) ลดสิ่งปลูกสร้างจากซีเมนต์ ดังนั้นเพื่อลดการใช้ปูนซีเมนต์ Dr. Joseph Davidovits [8, 9] ได้เสนอวัสดุจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุทางเลือกเพื่อใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ [10]

จีโอโพลิเมอร์ [11] คือวัสดุที่มีส่วนประกอบของอะลูมิเนียมซิลิเกตที่มีโครงสร้าง 3 มิติแบบอสัณฐาน (Amorphous) ประกอบด้วยวัสดุปอซโซลาน [12] (Pozzolanic materials) มีส่วนประกอบหลักของซิลิกา (SiO_2) กับอะลูมินา (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลัก [13] เช่น เมตาเคโอลิน (Metakaolin) และ วัสดุที่เหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและการเกษตร เช่น เถ้าลอย (Fly ash) เถ้าชานอ้อย (Bagasse ash) และ เถ้าแกลบ (Rice husk ash) ที่ถูกทำให้แตกตัวด้วยสารละลายอัลคาไลหรือสารละลายที่เป็นด่างสูง [14] เช่น สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือโพแทสเซียม-

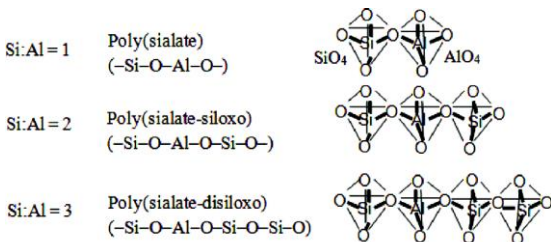
ซิลิเกต (K_2SiO_3) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ทำปฏิกิริyajีโอโพลิเมอไรเซชัน (Geopolymerization)

จีโอโพลิเมอร์เกิดจากปฏิกิริyajีโอโพลิเมอไรเซชัน โดยสามารถแบ่งปฏิกิริyajีโอโพลิเมอไรเซชันได้ 2 ชั้น [15-17] คือ (1) การชะละลาย (Dissolution) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกตผสมกับสารละลายมีความเป็นด่างสูง ได้เป็นอะลูมิเนต และซิลิเกตทรงหน่วยสี่หน้าที่เกิดโคออร์ดิเนตแบบสี่เขนกับออกซิเจน (O) ซึ่งกระจายตัวและจัดเรียงตัวใหม่ในลักษณะของเจล และ (2) การทำปฏิกิริยาควมนั้น (Condensation & Chain polymerization) ซึ่งเกิดการรวมตัวกันของผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาเบื้องต้น กลายเป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ขึ้น และปลดปล่อยโมเลกุลของน้ำออกมาในช่วงต้นจะได้หน่วยที่กึ่งเสถียร (Meta-stable) ที่มีปริมาณอะลูมิเนียม (Aluminium; Al) สูง เมื่อเกิดปฏิกิริยามากขึ้นจะเปลี่ยนเป็นหน่วยที่มีซิลิกอน (Silicon; Si) มากขึ้น ดังรูปที่ 1 ซึ่งได้แก่ พอลิเซียเลต (Polysialate; PS), พอลิเซียเลตไซลอกโซ (Polysialate Siloxo; PSS) และพอลิเซียเลต ไดไซลอกโซ (Polysialate Disiloxo; PSDS) ดังรูปที่ 2 จากนั้นทำปฏิกิริยาหลุกโซ่ทำให้โมเลกุลเชื่อมขวางกันมากขึ้นในลักษณะโพลิเมอร์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากปฏิกิริยาจึงมีความหนาแน่นขึ้น ทำให้เกิดโครงสร้างรับแรงได้ กลไกการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอไรเซชัน

การต่อสายโซ่โมเลกุลจะแสดงอัตราส่วน $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่แตกต่างกันโดย $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$ เป็นปัจจัยสำคัญทางด้านองค์ประกอบทางเคมีที่จะส่งผลต่อสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ จากงานวิจัยของ De Silva, Sagoe-Crenstil, & Sirivivatnanon [18] ศึกษาการเกิด



รูปที่ 1 แบบจำลองกลไกการเกิดปฏิกิริยาของ จีโอโพลิเมโรเซชัน [16]



รูปที่ 2 รูปแบบพื้นฐานของจีโอโพลิเมอร์ [17]

ปฏิกิริยาในช่วงต้นของจีโอโพลิเมอร์ โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมระหว่างเมตาเคโอลินต่อสารละลายอัลคาไล โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโมลาร์ของ $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$ บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง เพื่อทดสอบระยะเวลาการก่อตัว พบว่าการเพิ่มอัตราส่วน $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$ มีผลทำให้ระยะเวลาก่อตัวนานขึ้น ลักษณะการพัฒนาที่กำลังช่วงต้น พบว่าการเพิ่มอัตราส่วน $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$ ไปจนถึง 3.4-3.8 ส่งผลให้ได้กำลังดีที่สุดที่สุดและ จากงานวิจัยของ Zhang, Sun, & Li [19] ทำการศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนโมลาร์ของ $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$ ของเคโอลิน พบว่ามีอัตราส่วนโมลาร์น้อยกว่าเมตาเคโอลิน นอกจากนี้ อัตราส่วนระหว่าง Si ต่อ Al เป็นตัวแยกการใช้งานในประเภทต่างๆ แสดงดังตารางที่ 1 [20]

ตารางที่ 1 อัตราส่วนความเข้มข้นของ Si ต่อ Al และการนำไปใช้งานของจีโอโพลิเมอร์จากเมตาเคโอลิน

Si : Al	การนำไปใช้งาน
1:1	อิฐ เซรามิก และวัสดุกันไฟ
2:1	ซีเมนต์ คอนกรีต และวัสดุกักเก็บกัมมันตรังสี และสารพิษ
3:1	วัสดุกันไฟ กันความร้อน อุปกรณ์สำหรับงานหล่อ และเครื่องมือต่างๆ
> 3:1	วัสดุกันรั่ว
20-35:1	วัสดุกันไฟ และกันความร้อน

ดังนั้นในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มกำลังรับแรงอัดในระยะต้นของจีโอโพลิเมอร์ด้วยการเพิ่มปริมาณซิลิกา ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อให้เกิดเป็นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดซิลิกาสูงเป็นการเร่งปฏิกิริยาจีโอโพลิเมโรเซชัน จากการนำเข้าชานอ้อยที่มีปริมาณซิลิกาสูงแต่มี



ความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำให้เถ้าชานอ้อย อยู่ในสภาพที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยามากขึ้นพร้อมทำปฏิกิริยาให้เกิดจีโอโพลิเมอร์ไฮดรอกไซด์ที่มีกำลังรับแรงกดอัดสูงในเวลารวดเร็วตลอดจนสามารถพัฒนาเป็นวัสดุนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย/ทดลอง

2.1 การเตรียมวัสดุปอชโซลาน

วัสดุปอชโซลานที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ เมตาเคโอลินและเถ้าชานอ้อยในอัตราส่วน 80:20 โดยดินขาว (Kaolin) ได้รับมาจากบริษัท มินเนอร์ล รีซอร์สเซส ดีเวลลอปเม้นท์ จำกัด จังหวัดระนอง นำมาเผาที่อุณหภูมิ 600 °C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง โดยใช้ อัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ 10 °C ต่อนาที เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างจาก Kaolin ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$) เป็นโครงสร้าง Metakaolin ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) [21] โดยขนาดผ่านตะแกรงขนาด 325 เมช ร้อยละ 90 ส่วนเถ้าชานอ้อย (Bagasse ash; BA) ได้มาจากโรงงานน้ำตาลจังหวัดชลบุรี นำเถ้าชานอ้อยไปบดเป็นเวลา 10 ชั่วโมง แล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 325 เมช (≤ 45 ไมโครเมตร)

2.2 การเตรียมสารละลายไฮดรอกไซด์ชนิดซิลิกาสูง (Silica-rich Sodium Hydroxide; SR-NaOH)

เตรียมสารละลายไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 โมลาร์ (10 M NaOH) ในขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มล. จากไฮดรอกไซด์ 400 กรัม

ทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำมาใช้ผสมกับเถ้าชานอ้อยละเอียดในปริมาณที่แตกต่างกันได้แก่ 0, 20 และ 50 wt% ของวัสดุปอชโซลาน เพื่อให้เถ้าชานอ้อยถูกชะละลายและว่องไวต่อการทำปฏิกิริยามากขึ้น

2.3 การเตรียมจีโอโพลิเมอร์เพสต์

จีโอโพลิเมอร์เพสต์ (Geopolymer Paste) เตรียมโดยใช้เมตาเคโอลิน:เถ้าชานอ้อย ในอัตราส่วน 80:20 ผสมจนเป็นเนื้อเดียวกันในเครื่องผสม เติมน้ำละลายอัลคาไลในอัตราส่วนปอชโซลาน:สารละลายอัลคาไลเท่ากับ 1:1 โดยเริ่มจากผสมสารละลาย SR-NaOH ผสมให้เข้ากับวัสดุปอชโซลาน จากนั้นจึงผสม Na_2SiO_3 ผสมจนเป็นเนื้อเดียวกัน โดยที่สารละลายอัลคาไลเตรียมจาก SR-NaOH : Na_2SiO_3 เท่ากับ 1:1 จากนั้นเทจีโอโพลิเมอร์เพสต์ใส่แม่พิมพ์อะคริลิกทรงลูกบาศก์ขนาด 25 x 25 x 25 มม³ ห่อด้วยฟิล์มพลาสติกที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นชิ้นงานจะถูกบ่มไว้ที่อุณหภูมิห้องจนครบอายุบ่มเพื่อทำการทดสอบอัตราส่วนผสมแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

Mixture	Pozzolanic Materials (wt%)		BA in SR-NaOH (wt% of Pozzolanic)	Alkali Solutions (wt%)	
	MK	BA		SR-NaOH	Na_2SiO_3
	BA0	80	20	0	50
BA20	80	20	20	50	50
BA50	80	20	50	50	50



2.4 การวิเคราะห์และทดสอบ

2.4.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุพอลิโพรพิลีน

วิเคราะห์ปริมาณออกไซด์ (Oxide) ของเมตาเคโอลินและแก้วซันอ้อยด้วยเครื่องวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมี (X-ray Fluorescence; XRF) (Horiba, XGT-5200, Japan) เพื่อนำมาคำนวณหาอัตราส่วนระหว่างซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม (Si:Al) และโซเดียมต่ออะลูมิเนียม (Na:Al) และวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer, XRD) (X'pert, Philips, Netherlands) เพื่อยืนยันองค์ประกอบของวัสดุ

2.4.2 วิเคราะห์สมบัติของจีโอโพลีเมอร์เพสต์

วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer; FT-IR) โดยการบดชิ้นงานจีโอโพลีเมอร์ด้วยโกรบดสาร (Agate mortar) ให้ละเอียดและมีการกระจายตัวสม่ำเสมอแล้วนำเข้าเครื่อง FT-IR

วิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยบดชิ้นงาน จีโอโพลีเมอร์ให้ละเอียดและมีการกระจายตัวสม่ำเสมอเพื่อเข้าเครื่อง XRD อัดผงงานลงใน Holder ให้แน่น วิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD โดยใช้พารามิเตอร์ดังนี้ กระแสไฟฟ้า 35 mA ความต่างศักย์ 40 kV, Step Size 0.02°, Time per Step 0.4 s, Scan Range 5° – 80° มุม 2θ และใช้ระยะเวลาสแกน 45 นาที

ทดสอบกำลังรับแรงอัดของชิ้นงานจีโอโพลีเมอร์เพสต์ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C109 [22] ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine, UTM (Hounsfield, H50KS, England) ขนาดชิ้นงาน 25 x 25 x 25 มม³ ที่อายุบ่ม 7, 14 และ 28 วัน โดยใช้ชิ้นงานทดสอบที่มีอายุบ่มเท่ากันจำนวน 4 ตัวอย่างต่อ 1 สูตร

การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water absorption) ความหนาแน่นรวม (Bulk density) และ ความพรุนตัวปรากฏ (Apparent porosity) โดยทดสอบจากชิ้นงานที่มีอายุบ่ม 28 วัน ขนาดชิ้นงาน 25 x 25 x 25 มม³ จำนวนสูตรละ 4 ชิ้น โดยอบชิ้นงานในเตาอบที่มีอุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปชั่งน้ำหนักแห้ง และนำไปแช่น้ำ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักในน้ำและในอากาศ ตามมาตรฐาน ASTM C642-13 [23]

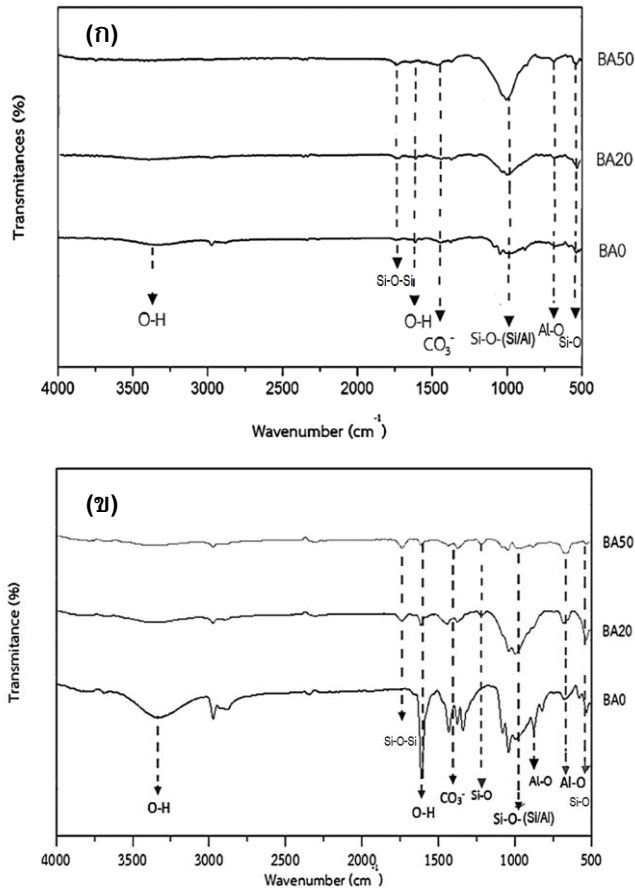
ทดสอบความสามารถในการชะละลายความเป็นต่าง [24] โดยการนำจีโอโพลีเมอร์เพสต์อายุ 28 วัน ขนาด 25 x 25 x 25 มม³. ไปแช่น้ำปริมาณ 225 mL เป็นระยะเวลา 15 นาที จากนั้นวัดค่า pH ที่ได้ และนับจำนวนครั้งของการชะจนกว่าค่า pH ของจีโอโพลีเมอร์เพสต์มีค่าเท่ากับ 7 เพื่อทดสอบความสามารถในการชะละลายความเป็นต่างของจีโอโพลีเมอร์เพสต์

3. ผลการวิจัย/ทดลองและการอภิปรายผล

3.1 ผลวิเคราะห์ของวัสดุพอลิโพรพิลีน

3.1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุพอลิโพรพิลีน

ตารางที่ 3 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุพอลิโพรพิลีนจากการวิเคราะห์ด้วย XRF พบว่า เมตาเคโอลินและแก้วซันอ้อยมีปริมาณซิลิกา 53.39 และ 68.61% และมีอะลูมินา 43.98 และ 5.67% ซึ่งเมตาเคโอลินและแก้วซันอ้อยมีอัตราส่วน Si /Al 1.21 และ 12.10 ตามลำดับ ซึ่งการผลติจีโอโพลีเมอร์ที่มีความแข็งแรงสูงนั้นค่า Si/Al ควรอยู่ที่ 2-3 ทั้งเมตาเคโอลินและแก้วซันอ้อยในงานวิจัยนี้จึงไม่เหมาะสมที่จะใช้เป็นวัสดุหลักในการผลิตจีโอโพลีเมอร์



รูปที่ 4 หมู่ฟังก์ชันของจีโอโพลิเมอร์เฟสดีที่อายุบ่ม (ก) 7 วัน และ (ข) 28 วัน

พบหมู่ฟังก์ชัน C-O เกิดจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง Na และ CO₂ ในอากาศ เกิดเป็น Na₂CO₃ พบได้ชัดเจนในสเปกตร BA0 ที่ช่วงเลขคลื่น 1030-900 cm⁻¹ เริ่มพบพีคของ Si-O-(Si/Al) ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่เกิดจากปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชัน ที่ช่วงเลขคลื่น 980-950 cm⁻¹ ในสเปกตร BA0 และ BA20 ซึ่งจะเห็นการจับตัวของหมู่ฟังก์ชัน Si-O-(Si/Al) ชัดเจนมากที่อายุ 28 วัน ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ให้ความแข็งแรงในจีโอโพลิเมอร์ [25] พบหมู่ฟังก์ชัน Si-O และ Al-O ที่ช่วง

เลขคลื่น 545-520 cm⁻¹ พบ Si-O ในโครงสร้างจีโอโพลิเมอร์ ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของวัตถุดิบตั้งต้นจากการพิจารณาหมู่ฟังก์ชันที่อายุบ่มช่วงต้นพบว่าชิ้นงาน BA0 ที่ใช้ NaOH แบบไม่ผสมเก้าชานอ้อยมีปรากฏของหมู่ O-H ที่ 3440 cm⁻¹ ซึ่งเป็น by-product จากการเกิด Si-O-Al ซึ่งเป็นเฟสที่ไม่เสถียรของจีโอโพลิเมอร์ ในขณะที่ชิ้นงาน BA20 และ BA50 ที่มีการใส่เก้าชานอ้อย 20 และ 50% ไม่พบ O-H แต่พบ Si-O-(Si/Al) แทน

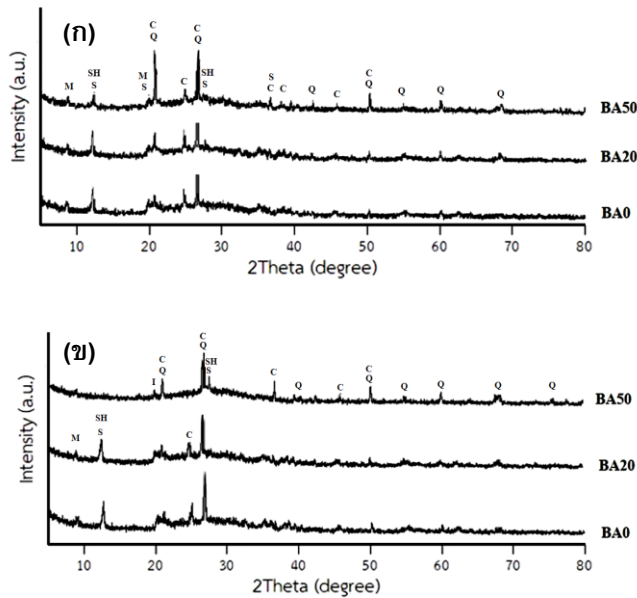


ในอายุบ่ม 28 วัน (รูปที่ 4 (ข)) พบว่าชั้นงานสูตร BA0 เกิดพีคของ O-H น้อยลงที่เลขคลื่น 3440 cm^{-1} และ 1670 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันของน้ำภายในโครงสร้างจีโอโพลิเมอร์ และเกิดพีคของ Si-O-(Si/Al) ที่เลขคลื่น 980-950 cm^{-1} ซึ่งเป็นโครงสร้างหลักที่ทำให้ความแข็งแรงในจีโอโพลิเมอร์ โดยจะเกิดพีคของ Si-O-(Si/Al) ชัดเจนในสูตรที่เพิ่มเก้าชานอ้อย 50% (BA50) ซึ่งสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงรับแรงกดอัดที่มีค่าสูงเช่นกัน นอกจากนี้พบพีคของ Si-O ในช่วง 545-520 cm^{-1} สูตร BA0 ที่ใช้ NaOH เกรดเชิงพาณิชย์ ทำให้มีความเข้มข้นของ Na ที่มากกว่าสูตรอื่นจึงแสดงผลของหมู่ฟังก์ชัน ในรูปแบบที่คล้ายกัน

กับจีโอโพลิเมอร์ที่ใช้สารละลายอัลคาไล เฉพาะ NaOH ในการขึ้นรูป [26]

3.2.3 องค์ประกอบทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

จากรูปที่ 5 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของจีโอโพลิเมอร์เพสต์เปรียบเทียบอายุบ่ม (ก) 7 วัน และ (ข) 28 วัน ตามลำดับ พบว่าทุกสูตรเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชัน ซึ่งยืนยันได้จากการพบพีค Sodium Aluminium Silicate และ Sodium Aluminium Silicate Hydrate ที่อายุบ่ม 7 วัน ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์หลักของปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชันเมื่อเข้าถึงอายุบ่ม 28 วันพีคของ Sodium Aluminium Silicate ได้ลดลง หรือหายไป



S = Sodium Aluminium Silicate ($\text{Na}_6\text{Al}_6\text{Si}_{10}\text{O}_{32}$, 01-074-1787), Q = Quartz (SiO_2 , 01-089-8934), C = Calcium Silicate Hydrate ($\text{Ca}_2(\text{SiO}_3\text{OH})\text{OH}$, 00-006-0286), SH = Sodium Aluminium Silicate Hydrate ($\text{Na}_3 \cdot 6\text{Al}_3 \cdot 6\text{Si}_{12} \cdot 4\text{O}_{32} \cdot 14\text{H}_2\text{O}$, 00-044-0052), M = MuscoviteT ($(\text{K},\text{Na})(\text{Al},\text{Mg},\text{Fe})_2(\text{Si}_{3.1}\text{Al}_{0.9})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), I = Iron Oxide (Fe_2O_3 , 00-016-0895)

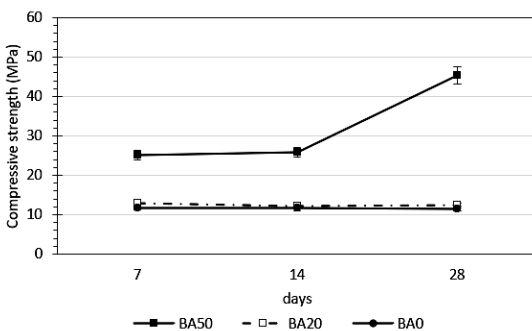
รูปที่ 5 ผลการวิเคราะห์ XRD ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุบ่ม (ก) 7 และ (ข) 28 วัน



เนื่องจากจีโอโพลิเมอร์มีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐาน จึงเป็นตัวยืนยันว่าจีโอโพลิเมอร์นั้นทำปฏิกิริยา สมบูรณ์ อีกทั้งมีการเกิด แคลเซียมซลิเกตไฮเดรต (C-S-H) เป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันซึ่งเป็น โครงสร้างที่ให้ความแข็งแรงในปูนซีเมนต์และพบว่า เกิดขึ้นในจีโอโพลิเมอร์ส่งผลให้จีโอโพลิเมอร์มีค่า ความแข็งแรงรับแรงกดอัดสูงขึ้นที่อายุบ่ม 28 วัน

3.2.4 ค่ากำลังรับแรงอัด

จากรูปที่ 6 เมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งแรง รับแรงกดอัดของชิ้นงานจีโอโพลิเมอร์ที่ไม่เพิ่มและ เพิ่มเถ้าขานอ้อย (0, 20 และ 50%) พบว่าที่อายุบ่ม 7 และ 28 วัน การเติมเถ้าขานอ้อย 20% (BA20) ไม่ ส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งแรงแต่เมื่อเพิ่มถึง 50% (BA50) สามารถเพิ่มความแข็งแรงมากกว่า 2 เท่า โดยสูตร BA50 มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดคือ 45.38 MPa เนื่องจากสัดส่วน Si:Al กับ Na:Al ที่เหมาะสม ต่อการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันโดย BA50 ให้กำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ 28 วัน ซึ่งสอดคล้องกับผล ของ FTIR

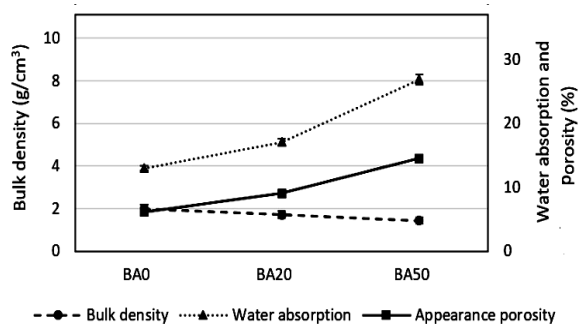


รูปที่ 6 ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่อายุบ่ม 7, 14, และ 28 วัน

3.2.5 การดูดซึมน้ำ ความพรุนปรากฏ และความหนาแน่นรวม

ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพ พบว่า การ ดูดซึมน้ำ ความพรุนปรากฏ และความหนาแน่นรวม ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุ 28 วัน แสดงในรูปที่ 7 ความหนาแน่นรวมของจีโอโพลิเมอร์เพสต์อยู่ในช่วง 1.43-1.98 g/cm³ ความหนาแน่นขึ้นอยู่กับปริมาณการ เพิ่มเถ้าขานอ้อยของสารละลาย SR-NaOH โดยจะ ส่งผลให้ความหนาแน่นของชิ้นงานลดลง ความพรุน ปรากฏอยู่ในช่วง 6.15-14.49% ซึ่งมีแนวโน้มตรงกัน ข้ามกับความหนาแน่นรวม

BA50 ปรากฏความพรุนสูงที่สุดเนื่องจากเถ้า ขานอ้อยมีความพรุนตัวภายในโครงสร้างส่งผลให้การ เพิ่มเถ้าขานอ้อยในปริมาณมากขึ้นงานจีโอโพลิเมอร์ เพสต์จึงมีความพรุนปรากฏที่สูงเช่นเดียวกับการดูด ซึมน้ำอยู่ในช่วง 12.98-26.90% ซึ่งมีแนวโน้มเดียวกัน กับความพรุนปรากฏ ชิ้นงานยังมีความพรุนปรากฏ มากยิ่งดูดซึมน้ำสูง



รูปที่ 7 การดูดซึมน้ำ ความพรุนปรากฏ และความ หนาแน่นรวม ที่อายุบ่ม 28 วัน



3.2.6 ความสามารถในการละลายของต่าง

จากการทดสอบความสามารถในการละลายของต่างค่า pH เริ่มต้นของชิ้นงานจีโอโพลีเมอร์เพสต์มีค่าอยู่ในช่วง 10.0-11.5 แต่เมื่อผ่านการชะด้วยน้ำจนค่า pH เข้าใกล้ความเป็นกลาง (pH = 7) เห็นได้ว่าชิ้นงานจีโอโพลีเมอร์สูตรที่เพิ่มเถ้าชานอ้อย 20% และ 50% ใช้จำนวนครั้งในการชะน้อยกว่าชิ้นงานจีโอโพลีเมอร์ที่ไม่เพิ่มเถ้าชานอ้อย สูตร BA0 BA20 และ BA50 มีจำนวนครั้งที่ใช้ในการชะเพื่อให้ค่าความเป็นกรด-ด่างเข้าใกล้ความเป็นกลาง มีค่าเท่ากับ 14 10 และ 10 ครั้ง ตามลำดับ เนื่องจากสูตรที่ไม่ได้เพิ่มเถ้าชานอ้อย ส่งผลให้มีสารละลายไฮดรอกไซด์จากการทำปฏิกิริยาเหลือในระบบ ทำให้มีค่าความเป็นด่างที่สูงกว่า จึงจำเป็นต้องใช้น้ำชะเป็นจำนวนครั้งมากกว่า สูตรที่มีการเติมเถ้าชานอ้อยในไฮดรอกไซด์ที่ถูกใช้ทำปฏิกิริยากับเถ้าชานอ้อยที่เพิ่มเข้าไป

4. สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มความว่องไวในการทำปฏิกิริยาจีโอโพลีเมอร์โรเซชันของเถ้าชานอ้อยโดยการผสมเถ้าชานอ้อยในสารละลายไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10 โมลาร์ โดยจากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าเถ้าชานอ้อยที่แช่สารละลาย NaOH จนอยู่ในสภาวะ SR- NaOH ช่วยเพิ่มความแข็งแรงระยะต้นแก่จีโอโพลีเมอร์โดยจากการทดสอบ FTIR และ XRD แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาจีโอโพลีเมอร์โรเซชันเกิดขึ้นที่อายุบ่ม 7 วันโดยในชิ้นงาน BA0 จะยังพบ O-H ที่เป็นน้ำซึ่งเป็น by-product จากการเกิด Poly (Sialate) (Si-O-Al-O) ซึ่งเป็นเฟสที่ให้ความ

ความแข็งแรงเบื้องต้นแต่มีความเสถียรภาพต่ำในขณะที่ BA20 และ BA50 พบ O-H ในปริมาณที่น้อย แต่พบ Poly (Sialate-siloso) (Si-O-Al-O-Si-O) ซึ่งมักพบที่อายุบ่มช่วงท้ายและเป็นความแข็งแรงที่ยั่งยืนจึงสามารถสรุปได้ว่าการแช่ BA ใน NaOH ช่วยให้ BA มีความว่องไวและเพิ่มความแข็งแรงในระยะต้นรวมถึงเร่งการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลีเมอร์โรเซชัน

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบ คุณสถาบันวิจัยและพัฒนา แห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (KURDI) และคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์สำหรับทุนวิจัยและทุนการศึกษา และงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือในการจัดหาพื้นที่วิเคราะห์และห้องปฏิบัติการ รวมถึงขอขอบคุณโครงการฝึกอบรมเชิงปฏิบัติการเขียนผลงานวิจัยและบทความวิชาการเพื่อตีพิมพ์เผยแพร่ซึ่งจัดโดยวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือมา ณ ที่นี้ด้วย วัสดุในงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเมตาเคโอลินจากบริษัทมินเนอรัล รีซอร์สเซส ดีเวลลอปเม้นท์ จำกัด และเถ้าชานอ้อยจากบริษัทน้ำตาล นิวกว้างสุนท์ลี จำกัด

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] P.C. Aitcin, Cements of Yesterday and Today: Concrete of Tomorrow, Cement and Concrete research, 2000, 30(9), 1349-1359.



- [2] E. Benhelal, G. Zahedi, E. Shamsaei and A. Bahadori, Global Strategies and Potentials to Curb CO₂ Emissions in Cement Industry, *Journal of Cleaner Production*, 2013, 51, 142-161.
- [3] A. Akbar, F. Farooq, M. Shafique, F. Aslam, R. Alyousaf and H. Abduljabbar, Sugarcane Bagasse Ash-Based Engineered Geopolymer Mortar Incorporating Propylene Fibers, *Journal of Building Engineering*, 2020, 33, 101492.
- [4] C.L. Wong, K.H. Mo, U.J. Alengaram and S.P. Yap, Mechanical Strength and Permeation Properties of High Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Containing Recycled Brick Powder, *Journal of Building Engineering*, 2020, 32, 101655.
- [5] J. Davidovits, Properties of Geopolymer Cements, *Scientific Research Institute on Binders and Materials*, 1994, 1, 131-149.
- [6] R. McCaffrey, Climate Change and the Cement Industry, *Global Cement and Lime Magazine*, 2002, Environmental Special Issue, 15-19.
- [7] P.K. Mehta, Greening of the Concrete Industry for Sustainable Development, *Concrete International*, 2002, 24, 23-28.
- [8] J. Davidovits, Global Warming Impact on the Cement and Aggregates Industries, *World Resource Review*, 1994, 6(2), 263-278.
- [9] J. Davidovits, Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 1991, 37(8), 1633-1656.
- [10] C. Tippayasam, C. Leonelli, and D. Chaysuwan, Effect of Agricultural Wastes with Fly Ash on Strength of Geopolymers, *Suranaree Journal of Science and Technology*, 2014, 21(1), 1-7.
- [11] C. Tippayasam, S. Sutikulsombat, E. Kamseu, R. Rosa, P. Thavorniti, P. Chindaprasirt, C. Leonelli, G. Heness and D. Chaysuwan, In Vitro Surface Reaction in SBF of A Non-Crystalline Aluminosilicate (Geopolymer) Material, *Journal of the Australian Ceramic Society*, 2019, 55(1), 11-17.
- [12] Y.M. Liew, H. Kamarudin, A.M. Mustafa Al Bakri, M. Bnhussain, M. Luqman, I. Khairul Nizar, C.M. Ruzaidi and C.Y. Heah, Optimization of Solids-to-Liquid and Alkali Activator Ratios of Calcined Kaolin Geopolymeric Powder, *Construction and Building Materials*, 2012, 37, 440-451.



- [13] C. Tippayasam, P. Boonanunwong, J. Calvez, P. Thavorniti, P. Chindaprasirt, and D. Chaysuwan, Effect of Porosity and Pore Size on Microstructures and Mechanical Properties of Metakaolin Blended with $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and PLA as Porous Geopolymers, *Key Engineering Materials*, 2016, 690, 276-281.
- [14] C. Tippayasam, P. Balyore, P. Thavorniti, E. Kamseu, C. Leonelli, P. Chindaprasirt and D. Chaysuwan, Potassium Alkali Concentration and Heat Treatment Affected Metakaolin-Based Geopolymer, *Construction and Building Materials*, 2016, 104, 293-297.
- [15] A. Fernandez-Jimenez, A. Palermo and M. Criado, Microstructure Development of Alkali-Activated Fly Ash Cement a Descriptive Model, *Cement and Concrete Research*, 2004, 35, 1204-1209.
- [16] A.M. Hameed, R.R. Rawdhan and S.A. Al-Mishhadani, Effect of Various Factors on the Manufacturing of Geopolymer Mortar, *Archives of Science*, 2017, 1(3), 1-8.
- [17] S. M. Kabir, U. J. Alengaram, M. Z. Jumaat, A. Sharmin and A. Islam, Influence of Molarity and Chemical Composition on the Development of Compressive Strength in POFA Based Geopolymer Mortar, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015, 647071, 1-15.
- [18] Y. S. Zhang, W. Sun and J. Z. Li, Hydration Process of Interfacial Transition in Potassium Polysialate (K-PSDS) Geopolymer Concrete, *Magazine of Concrete Research*, 2005, 57(1), 33-38.
- [19] P. De Silva, K. Sagoe-Crenstil, and V. Sirivivatnanon, Kinetics of geopolymerization: role of Al_2O_3 and SiO_2 , *Cement and Concrete Research*, 2007, 37(4), 512-518.
- [20] N. Fifinatasha, M.M.A.B. Abdullah, C.M.R. Ghazali, K. Hussin, M. Binhussain, and A.V. Sandu, Comparison Characterization of Geopolymer Source Materials for Coating Application, *Applied Mechanics and Materials*, 2015, 754, 664-670.
- [21] C. Tippayasam, P. Keawpapasson, P. Thavorniti, T. Panyathanmaporn, C. Leonelli, and D. Chaysuwan, Effect of Thai Kaolin on Properties of Agricultural Ash Blended Geopolymers, *Construction and Building Materials*, 2014, 53, 455-459.
- [22] ASTM C109, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), 2016.
- [23] ASTM C642-13, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, 2013.



- [24] C. Tippayasam, S. Sutikulsombat, J. Paramee, C. Leonelli, and D. Chaysuwan, Development of Geopolymer Mortar from Metakaolin Blended with Agricultural and Industrial Wastes, *Key Engineering Materials*, 2018, 766, 305-310.
- [25] S. Kumar and R. Kumar, Mechanical activation of fly ash: Effect on Reaction, Structure and Properties of Resulting Geopolymer, *Ceramics International*, 2011, 37(2), 533-541.
- [26] D. A. Runyut, S. Robert, I. Ismail, R. Ahmadi, N. A. S. B. Abdul Samat, Microstructure and Mechanical Characterization of Alkali-Activated Palm Oil Fuel Ash, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2018, 30(7), 04018119.



การลดรูพรุนในเงินสีชมพูที่หล่อด้วยวิธีการหล่อแบบประณีต: กรณีศึกษาของบริษัทผลิตเครื่องประดับแห่งหนึ่ง

न्हันวัฒน์ อภิกมลกุล และ กรรณชัย กัลยาศิริ*

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: kkkannac@kmitl.ac.th

วันที่รับบทความ: 2 กันยายน 2563; วันที่ทบทวนบทความ: 16 พฤศจิกายน 2563; วันที่ตอบรับบทความ: 25 พฤศจิกายน 2563
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 9 ธันวาคม 2563

บทคัดย่อ: เนื่องจากการผลิตชิ้นงานเครื่องประดับจากเงินสีชมพูด้วยวิธีการหล่อแบบประณีต (Investment Casting) ของบริษัทกรณีศึกษาพบปัญหาคุณภาพชิ้นงานมากที่สุดในรูปแบบของรูพรุนจากการหดตัว (Shrinkage Porosity) ถึง 56% งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการลดข้อบกพร่องดังกล่าวโดยทำการศึกษาตัวแปรในการหล่อที่มีอิทธิพลต่อการเกิดรูพรุน เพื่อหาเงื่อนไขการหล่อที่เหมาะสมของการหล่อเงินสีชมพูด้วยวิธีการหล่อแบบประณีต ซึ่งมีตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ อุณหภูมิอบเบ้า (Flask Temperature) และอุณหภูมิหล่อ (Casting Temperature) และมีตัวแปรตอบสนอง คือ เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่การเกิดรูพรุน โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองชนิดแฟคทอเรียลแบบเต็มจำนวน (Full Factorial Design) 3^k และพบว่าการใช้อุณหภูมิอบเบ้า $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ กับอุณหภูมิหล่อ $1030\text{ }^{\circ}\text{C}$ หรือการใช้อุณหภูมิอบเบ้า $480\text{ }^{\circ}\text{C}$ กับอุณหภูมิหล่อ $1060\text{ }^{\circ}\text{C}$ ทำให้มีเปอร์เซ็นต์ของการเกิดรูพรุนน้อยกว่าเงื่อนไขการผลิตอื่น ๆ และเมื่อนำเงื่อนไขดังกล่าวมาใช้ในกระบวนการผลิตจริงทำให้ข้อบกพร่องลดลงจากเดิมโดยเฉลี่ย 29.5%

คำสำคัญ: การหล่อแบบประณีต; รูพรุน; เงินสีชมพู; การออกแบบการทดลอง



Reduction of Porosity in Investment-Casted Pink Silver: A Case Study of A Jewelry Company

Nanthawat Apikamolkul and Kannachai Kanlayasiri*

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology
Ladkrabang

* Corresponding author, E-mail: kkkannac@kmitl.ac.th

Received: 2 September 2020; Revised 16 November 2020; Accepted: 25 November 2020

Online Published: 9 December 2020

Abstract: Shrinkage porosity was a major defect found up to 56% in an investment-casted pink silver of the case study company. This research was aimed to reduce the defect by using experimental designs with full factorial design 3^k strategy to study the influential casting factors and to find the optimal casting conditions. The casting factors included flask temperature and casting temperature while the response variable was the percentage of porosity area. Results showed that using the flask temperature at 600 °C with the casting temperature at 1030 °C or using the flask temperature at 480 °C with the casting temperature at 1060 °C provided the minimum percentage of shrinkage porosities. These optimal casting conditions reduced the percentage of defects by 29.5% on average.

Keywords: Investment Casting; Porosity; Pink Silver; Design of Experiments



1. บทนำ

อุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับนับเป็นอุตสาหกรรมที่สร้างชื่อเสียงให้กับประเทศไทยมาเป็นเวลานาน และได้มีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว เนื่องจากประเทศไทยมีแหล่งวัตถุดิบที่อุดมสมบูรณ์ ทำให้อุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับกลายเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจของประเทศไทยเป็นอย่างมาก จากข้อมูลการส่งออกของกระทรวงพาณิชย์พบว่า อัญมณีและเครื่องประดับเป็นสินค้าส่งออกที่สำคัญอันดับที่ 3 คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 4.74 ของสินค้าส่งออกโดยรวมของไทยในปี พ.ศ. 2561 นำรายได้เข้าสู่ประเทศไทยเป็นจำนวน 3.83 แสนล้านบาท [1] อีกทั้งยังเป็นอุตสาหกรรมที่ก่อให้เกิดการจ้างแรงงานเป็นจำนวนมาก เนื่องจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมยังต้องใช้ความประณีตความละเอียดอ่อนของมนุษย์ซึ่งเครื่องจักรยังไม่สามารถทดแทนได้ [2] ในปัจจุบันอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับต้องเผชิญกับอุปสรรคทางการค้าและการแข่งขันที่เพิ่มมากขึ้นทั้งในด้านราคาและคุณภาพ เนื่องจากอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นสถานประกอบการขนาดกลางและขนาดเล็ก (SMEs) กระบวนการผลิตยังต้องใช้ทักษะและความชำนาญของผู้ปฏิบัติงานมาก ทำให้อุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับส่วนใหญ่ยังขาดประสิทธิภาพในการผลิต [3]

ในปี 2562 ทางบริษัทกรณีศึกษาได้มีการผลิตชิ้นงานโดยใช้เงินสีชมพู (Pink Silver) ในการผลิตชิ้นงานที่มีมากกว่าสิบล้านชิ้น เมื่อคิดจากยอดการผลิตในช่วงเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2561 ถึงเดือน

มิถุนายน พ.ศ. 2562 ซึ่งเงินสีชมพูมีส่วนประกอบ 3 ชนิด คือ เงิน (Ag) ทองแดง (Cu) และสังกะสี (Zn) โดยมีส่วนผสมของเงินเท่ากับ 94.73% ทองแดง 4.02% และสังกะสี 1.25% โดยน้ำหนัก ในการศึกษาที่มุ่งเน้นไปที่กระบวนการหล่อแบบประณีต (Investment Casting) เนื่องจากเป็นกระบวนการที่มักจะส่งผลให้เกิดของเสียในกระบวนการผลิต ซึ่งในการผลิตชิ้นงานโดยใช้เงินสีชมพูมักจะพบความบกพร่องแบบรูพรุนจากการหดตัว (Shrinkage Porosity) เนื่องจากการเทโลหะเหลวลงในเบ้าปูน ในระหว่างที่โลหะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็งและเย็นตัวสู่อุณหภูมิห้อง เนื้อโลหะจะเกิดการแข็งตัวและหดตัวส่งผลต่อการหดตัวของโลหะเหลว จึงเกิดรูพรุนขึ้นบริเวณผิวชิ้นงานตรงทางเข้าของโลหะเหลวไปยังโพรงแบบ (Mold Cavity) และเมื่อทำการขัดแต่งผิวชิ้นงานจะปรากฏรูพรุนขึ้นมา ส่งผลให้ต้องนำชิ้นงานที่ตรวจพบรูพรุนไปซ่อมแซม ทำให้เกิดการดำเนินงานที่ช้าชอนและการค้างของงานในกระบวนการผลิต ซึ่งเป็นการกระทำที่สูญเสียเปล่าและส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น ปัจจุบันพบชิ้นงานเสียเนื่องจากปัญหา รูพรุนมากที่สุดชิ้นงานเสียทั้งหมด (134,367 ชิ้น จาก 240,236 ชิ้น) หรือคิดเป็น 56% ของชิ้นงานเสียทั้งหมด

Verran *et. al.* [4] ได้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial Design) ในการลดรูพรุน (Porosity) ในการหล่ออลูมิเนียมผสม Al12Si1.3Cu ที่ผ่านการหล่อชนิด (Die Casting) ทำให้ทราบถึงตัวแปรที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อปริมาณรูพรุน และได้เงื่อนไขที่ดีที่สุดที่ทำให้เกิดรูพรุนในปริมาณที่น้อยที่สุด Grosselle *et. al.* [5] ได้ใช้



วิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลในการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการหล่อฉีดที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติทางกลของชิ้นงานหล่ออลูมิเนียมผสม Al-Si-Cu-Mg ซึ่งทำให้ทราบตัวแปรในการหล่อที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อโครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติทางกล Kittur *et al.* [6] ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลร่วมกับพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology) ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในการหล่อฉีดกับปริมาณรูพรุน ความแข็ง และความหยาบผิวของชิ้นงานอลูมิเนียมผสม ทำให้สามารถทำนายคุณสมบัติของชิ้นงานหล่อได้ Dabade and Bhedasgaonkar [7] ได้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ (Taguchi Method) เพื่อลดความบกพร่องในการหล่อขึ้นส่วนรถยนต์โดยใช้แม่แบบทราย (Sand Mold) ทำให้ได้เงื่อนไขที่ดีที่สุดสำหรับการหล่อ ซึ่งเมื่อนำไปใช้จริงแล้วสามารถลดปริมาณชิ้นงานเสียจาก 10% เหลือ 3.6% Xuedan *et al.* [8] ได้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ เพื่อเลือกหาเงื่อนไขในการหล่อที่ดีที่สุด เพื่อลดความบกพร่องในชิ้นงานหล่อเหล็กกล้า ซึ่งสามารถลดปริมาณความบกพร่องได้จริง Asensio-Lozano *et al.* [9] ได้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วน (Fractional Factorial Design) ร่วมกับเยทอัลกอริทึม (Yate's algorithm) ในการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรและหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการหล่อเหวี่ยงชิ้นงานเหล็กหล่อเพื่อให้ได้สัดส่วนเชิงปริมาตรและรูปร่างของกราฟไฟท์ที่เหมาะสม Zheng and Simard [10] ได้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลในการศึกษาตัวแปรในการหล่อแบบฉีดกึ่งแข็ง (Semi-

Solid Die Casting) ของชิ้นงานอลูมิเนียมผสมเกรด AA6061 เพื่อลดรอยแตก (Crack) ในชิ้นงาน ซึ่งสามารถลดรอยแตกที่เกิดขึ้นในชิ้นงานได้ Ali [11] ได้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองชนิดแฟคทอเรียลแบบเต็มจำนวน (Full Factorial Design) ในการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการหล่อเหวี่ยง (Centrifugal Casting) ที่มีต่อคุณสมบัติทางกลของชิ้นงานหล่ออลูมิเนียมผสม Al-Si ซึ่งทำให้ทราบตัวแปรในการหล่อที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญและความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเหล่านั้นกับคุณสมบัติทางกลของชิ้นงาน Hanizam *et al.* [12] ได้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการการหล่อกวน (Stir Casting) ที่มีต่อคุณสมบัติทางกลของชิ้นงานอลูมิเนียมผสมเกรด A356 โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ และได้เงื่อนไขที่ดีที่สุดของการหล่อที่ทำให้ได้คุณสมบัติทางกลของชิ้นงานดีขึ้น ดังนั้นจะเห็นได้ว่าวิธีการออกแบบการทดลองแบบต่างๆสามารถนำมาใช้แก้ปัญหาในงานหล่อวิธีต่างๆได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ทางบริษัทกรณีศึกษาและผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะลดรูพรุนบริเวณผิวชิ้นงานตรงทางเข้าโพรงแบบของโลหะเหลวในการหล่อเงินสีชมพูที่ผ่านการหล่อแบบประณีต โดยทำการศึกษาตัวแปรในการหล่อที่มีอิทธิพลต่อการเกิดรูพรุน เพื่อหาเงื่อนไขการหล่อที่เหมาะสมของการหล่อเงินสีชมพูด้วยวิธีการหล่อแบบประณีต ซึ่งตัวแปรที่ทำการศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิอบเบ้า (Flask Temperature) และอุณหภูมิหล่อ (Casting Temperature) และมีตัวแปรตอบสนอง คือ เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่การเกิดรูพรุน โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองชนิดแฟคทอเรียลแบบเต็มจำนวน (Full Factorial Design) 3^k



2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในกระบวนการผลิตเครื่องประดับส่วนใหญ่ในปัจจุบันจะเป็นการหล่อแบบประณีต โดยก่อนการออกแบบการทดลองทางผู้วิจัยได้ศึกษาปัจจัยที่อาจจะมีผลต่อการเกิดข้อบกพร่องแบบรูพรุนจากการหดตัว ซึ่งจากการทดลองของทางบริษัทและประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงาน รวมทั้งการเก็บข้อมูลเชิงสถิติของบริษัทโดยผู้เชี่ยวชาญทางโลหวิทยา คาดว่าปัจจัยที่อาจจะมีผลต่อการเกิดข้อบกพร่องแบบรูพรุนดังกล่าวในกระบวนการหล่อแบบประณีตมี 2 ปัจจัย คือ อุณหภูมิอบเบ้า และอุณหภูมิหล่อ ซึ่งในการหล่อแบบประณีตจะต้องนำเบ้าปูนที่ภายในเป็นต้นเทียนอบด้วยความร้อน เพื่อละลายเทียนต้นแบบในเบ้าปูนออกให้เป็นโพรง สำหรับรองรับโลหะเหลวเมื่อหล่อชิ้นงาน และให้ความร้อนแก่เบ้าปูนเพื่อให้อุณหภูมิระหว่างเบ้าปูนกับโลหะเหลวไม่แตกต่างกันมาก ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้อบเบ้าปูนนี้เรียกว่า อุณหภูมิอบเบ้า ส่วนอุณหภูมิหล่อ หมายถึง อุณหภูมิของโลหะเหลวในขณะที่อยู่ในเตาหลอมก่อนที่จะเทโลหะเหลวเข้าสู่เบ้าปูน

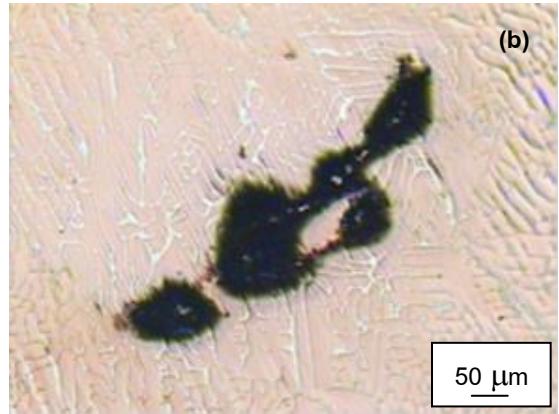
ดังนั้นปัจจัยในการหล่อที่จะทำการศึกษานงานวิจัยนี้ คือ อุณหภูมิอบเบ้า และอุณหภูมิหล่อ โดยศึกษาปัจจัยทั้งสองที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 3 ระดับ ซึ่งเป็นระดับอุณหภูมิที่เลือกจากประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงานของบริษัทในการหล่อเงินสีชมพูในรูปแบบต่างๆ รวมทั้งต้องคำนึงถึงการใช้พื้นที่ในเตาอบเบ้า ที่จะต้องสามารถบรรจุเบ้าของการผลิตชิ้นงานอื่นๆ เข้าไปอบได้พร้อมๆ กัน ในขณะที่การเลือกอุณหภูมิหล่อก็จะต้องคำนึงถึงการนำเงินสีชมพูในเตาหลอมนั้นไปใช้หล่อชิ้นงานชนิดอื่นพร้อมๆ กัน เช่นเดียวกัน โดยที่อุณหภูมิหลอมเหลวของเงินสีชมพู

มีค่าประมาณ 930 °C ดังนั้นอุณหภูมิหล่อจึงต้องมีค่ามากกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของเงินสีชมพู สำหรับวิธีการออกแบบการทดลองที่ใช้ คือ การออกแบบการทดลองชนิดแฟคทอเรียลแบบเต็มจำนวน 3^k เมื่อ k คือ จำนวนปัจจัยที่ทำการศึกษา โดยปัจจัย สัญลักษณ์ และระดับของปัจจัย แสดงดังตารางที่ 1 และในการทดลองนี้ได้ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ดังนั้นจำนวนการทดลองทั้งหมดเท่ากับ $3^2 \times 3$ หรือ 27 การทดลอง และเป็นการทดลองแบบสุ่ม (Randomization)

ตารางที่ 1 ปัจจัย สัญลักษณ์ และระดับของปัจจัย

ปัจจัย	ระดับของปัจจัย (°C)		
อุณหภูมิอบเบ้า (A)	480	540	600
อุณหภูมิหล่อ (B)	1020	1030	1060

ในการตรวจสอบการเกิดรูพรุนจะทำการตรวจสอบบริเวณทางโลหะเหลวเข้าโพรงแบบ เนื่องจากเป็นบริเวณที่พบรูพรุนบ่อยที่สุดในชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 1 (a) โดยทำการตัดชิ้นงานบริเวณดังกล่าวแล้วทำการขัดชิ้นงานตามวิธีการเตรียมชิ้นงานทางโลหวิทยา และนำชิ้นงานไปถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงสีขาว (Optical Microscope) ที่กำลังขยาย 10 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 1 (b) แล้วทำการวัดพื้นที่ของการเกิดรูพรุนด้วยโปรแกรม ImageJ และคำนวณเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่การเกิดรูพรุน (พื้นที่หน้าตัดของรูพรุนทั้งหมดเทียบกับพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานในภาพ) ซึ่งจะใช้เป็นตัวแปรตอบสนอง (Response) ในการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในการหล่อที่มีต่อการเกิดรูพรุน ชิ้นงานที่ถือว่าเป็นของเสีย คือ ชิ้นงานที่มีพื้นที่รูพรุนใหญ่กว่า $50 \mu\text{m}^2$



รูปที่ 1 ตัวอย่างชิ้นงานที่พบข้อบกพร่องแบบรูพรุน (a) รูพรุนบริเวณทางเข้าโพรงแบบของโลหะเหลว (b) ภาพขยายของรูพรุน

3. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

อุณหภูมิอบเบ้า อุณหภูมิหล่อ และเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่การเกิดรูพรุนที่ได้จาก 27 การทดลอง ตามการออกแบบการทดลองชนิดแฟคทอเรียลแบบเต็มจำนวน 3^k จะถูกนำไปวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) เพื่อหาปัจจัยในการหล่อที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเกิดรูพรุนในชิ้นงาน

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบเต็มจำนวนโดยใช้ ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($\alpha = 0.05$) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 2 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 85.13% และมีค่า R^2 (adj) เท่ากับ 78.52% ซึ่งแสดงว่า ตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ ANOVA นี้สามารถอธิบายความผันแปรของตัวแปรตอบสนองได้ดี และจากการวิเคราะห์พบว่า มีปัจจัยหลัก (Main Effect) คือ อุณหภูมิอบเบ้า (A) มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่การเกิดรูพรุน (p -value < 0.05)

ถึงแม้ว่าอุณหภูมิหล่อ (B) ไม่ได้มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญโดยตรงต่อเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่การเกิดรูพรุน (p -value > 0.05) แต่เนื่องจากอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างปัจจัยหลักทั้งสอง ($A*B$) มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่การเกิดรูพรุน (p -value < 0.05) ดังนั้นจึงยังต้องพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิหล่อไปพร้อมๆ กับอิทธิพลของอุณหภูมิอบเบ้า

รูปที่ 2 (a) แสดงการพล็อตของส่วนเหลือ (Residual) ของเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่การเกิดรูพรุน เพื่อตรวจสอบสมมติฐานของ ANOVA คือ ส่วนเหลือมีการกระจายตัวแบบปกติ ส่วนเหลือไม่มีรูปแบบกับค่าประมาณ (Fitted Value) และส่วนเหลือมีความเป็นอิสระต่อกัน ซึ่งจากการตรวจสอบสมมติฐานถึงแม้ว่าฮิสโตแกรม (Histogram) ของส่วนเหลือจะไม่แสดงการกระจายตัวแบบปกติอย่างชัดเจน เนื่องจากจำนวนข้อมูลมีค่อนข้างน้อยเพียง 27 ข้อมูล แต่เมื่อวิเคราะห์ด้วยกราฟความน่าจะเป็นปกติ

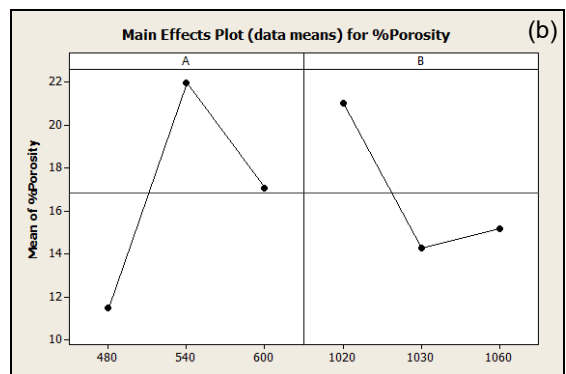
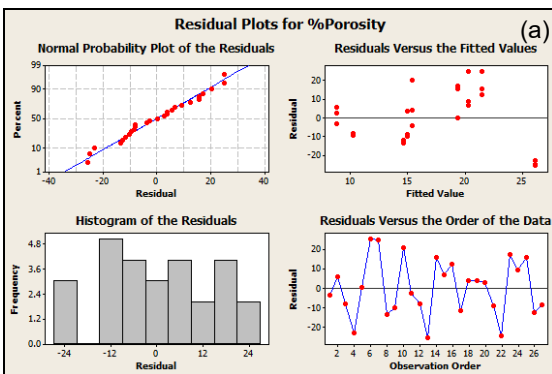


(Normal Probability Plot) พบว่าส่วนเหลือมีการกระจายตัวแบบปกติ เนื่องจากจุดส่วนใหญ่อยู่บนแนวเส้นตรงของกราฟ นอกจากนี้ส่วนเหลือไม่มีรูปแบบกับค่าประมาณ โดยพบว่าส่วนเหลือมีการกระจายแบบสุ่มรอบ ๆ ค่าเฉลี่ยศูนย์และไม่มีรูปแบบ และส่วนเหลือมีความเป็นอิสระต่อกัน โดยตรวจสอบจากกราฟลำดับของค่าสังเกต (Observation Order) พบว่าส่วนเหลือเกิดแบบสุ่มรอบ ๆ ค่าเฉลี่ยศูนย์ ดังนั้นเมื่อไม่พบ

การละเมิดสมมติฐานของ ANOVA การวิเคราะห์นี้จึงมีความเชื่อถือได้ ในรูปที่ 2(b) แสดงกราฟปัจจัยหลัก (Main Effects Plot) ของเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่การเกิดรูพรุน ซึ่งในกรณีนี้จำเป็นต้องพิจารณาร่วมกับกราฟอันตรกิริยา (Interaction Plots) ของปัจจัยหลักทั้งสอง เนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยหลักทั้งสอง (A*B) มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่การเกิดรูพรุนดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

ตารางที่ 2 ตาราง ANOVA ของผลการทดลอง

Source	DF	Adj. SS	Adj. MS	F	p-value
A	2	495.49	247.74	4.77	0.022
B	2	239.11	119.55	2.30	0.129
A*B	4	4612.44	1153.11	22.22	<0.001
Error	18	933.93	51.88		
Total	26	6280.96			



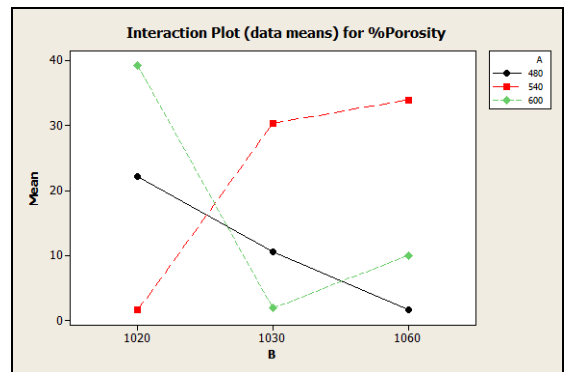
รูปที่ 2 (a) การพล็อตส่วนเหลือเพื่อตรวจสอบสมมติฐาน ANOVA (b) กราฟปัจจัยหลักของเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่การเกิดรูพรุน



จากกราฟอันตรกิริยา (Interaction Plots) ในรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่า ถ้าใช้อุณหภูมิอบเบ้าที่ 480 °C กับอุณหภูมิหล่อที่ 1060 °C หรือ ใช้อุณหภูมิอบเบ้าที่ 540 °C กับอุณหภูมิหล่อที่ 1020 °C หรือ ใช้อุณหภูมิอบเบ้าที่ 600 °C กับอุณหภูมิหล่อที่ 1030 °C จะให้เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่การเกิดรูพรุนต่ำ อย่างไรก็ตามในการวิจัยครั้งนี้ ชิ้นงานที่ทำการผลิตเป็นชิ้นงานที่มีรายละเอียดมาก หากใช้อุณหภูมิหล่อที่ 1020 °C จะทำให้ชิ้นงานโลหะเหลวเกิดการแข็งตัวก่อนที่จะไหลเข้าไปเต็มโพรงแบบ เนื่องจากอุณหภูมิหลอมเหลวของเงินสีชมพูมีค่าประมาณ 930 °C การใช้อุณหภูมิหล่อที่ 1020 °C จึงเป็นอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวเพียง 90 °C ซึ่งอาจไม่เพียงพอที่จะชดเชยกับการสูญเสียความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นในระหว่างการไหลของโลหะเหลว ทำให้โลหะเหลวเกิดการแข็งตัวขึ้นมาก่อนที่จะบรรจุได้เต็มโพรงแบบ ประกอบกับช่องปล่อยโลหะเหลว (Sprue) ไม่สามารถปล่อยโลหะเหลวเข้าไปในโพรงแบบได้ในระหว่างที่ชิ้นงานกำลังแข็งตัว ทำให้เกิดเป็นความบกพร่องแบบชิ้นงานไม่เต็ม (Misrun) ซึ่งทำให้ชิ้นงานนั้นเป็นชิ้นงานเสียโดยทันทีและไม่สามารถซ่อมแซมได้ จึงทำให้การใช้อุณหภูมิอบเบ้าที่ 540 °C ร่วมกับอุณหภูมิหล่อที่ 1020 °C ไม่สามารถใช้ในการผลิตชิ้นงานได้จริง ถึงแม้ว่าจะเป็นเงื่อนไขการหล่อที่สามารถลดรูพรุนเนื่องจากการหดตัวบริเวณทางเข้าโพรงแบบได้ดีก็ตาม ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงใช้ได้เฉพาะอุณหภูมิอบเบ้าที่ 480 °C กับอุณหภูมิหล่อที่ 1060 °C หรืออุณหภูมิอบเบ้าที่ 600 °C กับอุณหภูมิหล่อที่ 1030 °C

นอกจากนี้ รูพรุนเนื่องจากการหดตัวอาจจะเกิดขึ้นเนื่องมาจากมีชิ้นงานจำนวนมากที่ต่ออยู่กับช่องปล่อย

โลหะเหลว ทำให้ชิ้นงานแต่ละชิ้นวางตัวใกล้กันมากเกินไป ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนออกจากชิ้นงานเกิดขึ้นได้ช้า ซึ่งจะทำให้มีโอกาสเกิดรูพรุนเนื่องจากการหดตัวได้มากขึ้น ในกรณีของบริษัทกรณีศึกษายังพบว่า รูพรุนที่เกิดขึ้นมีตำแหน่งการเกิดที่ซ้ำๆกัน ดังนั้นอีกสาเหตุหนึ่งที่อาจทำให้เกิดรูพรุนเนื่องจากการหดตัว คือ ปริมาณของโลหะเหลวที่ไหลเข้าโพรงแบบมีไม่เพียงพอ [13]



รูปที่ 3 กราฟอันตรกิริยาระหว่าง (A) อุณหภูมิอบเบ้า และ (B) อุณหภูมิหล่อ

บริษัทกรณีศึกษาได้ทำการยืนยันผลการทดลองด้วยการนำอุณหภูมิอบเบ้า และอุณหภูมิหล่อที่ทำให้เกิดเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่การเกิดรูพรุนน้อยที่สุดมาใช้ในการผลิตจริงเป็นระยะเวลา 2 เดือน โดยใช้อุณหภูมิอบเบ้าที่ 480 °C กับอุณหภูมิหล่อที่ 1060 °C หรืออุณหภูมิอบเบ้าที่ 600 °C กับอุณหภูมิหล่อที่ 1030 °C ซึ่งจากผลผลิตด้วยเงื่อนไขดังกล่าวพบว่า สามารถลดของเสียได้จริง โดยของเสียลดลงจาก 56% ในเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2562 เหลือ 25% และ 28% ในเดือนกันยายน และตุลาคม ตามลำดับ โดยทั่วไปแล้วการแก้ปัญหาข้อบกพร่องในงานหล่อเป็นการแก้ปัญหาที่



ทำได้ยากและต้องใช้ประสบการณ์เป็นอย่างมาก แต่ งานวิจัยจากกรณีศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า การใช้วิธีการออกแบบการทดลองสามารถแก้ปัญหา ข้อบกพร่องในงานหล่อได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่ จำเป็นต้องทำการปรับเปลี่ยนการออกแบบช่องปล่อย โลหะเหลวของบริษัทกรณีศึกษา

อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าผลการวิจัยนี้สามารถนำไป ลดของเสียที่เกิดขึ้นได้ค่อนข้างมาก แต่เปอร์เซ็นต์การ เกิดของเสียก็ยังอยู่ในเกณฑ์สูง เนื่องจากผู้วิจัยไม่ได้ ทำการหาเงื่อนไขในการหล่อด้วยวิธีการหาค่าที่ เหมาะสมที่สุด (Optimization Techniques) เพราะมี ข้อจำกัดของทางบริษัทกรณีศึกษาในการปรับตั้ง อุณหภูมิเตาอบและเตาหลอมที่ไม่สามารถปรับตั้งได้ อย่างอิสระตามที่ผู้วิจัยต้องการ ดังนั้นถ้าสามารถทำ การปรับตั้งอุณหภูมิเตาอบและเตาหลอมได้อย่างอิสระ ควรมีการหาเงื่อนไขในการหล่อด้วยวิธีการหาค่าที่ เหมาะสมที่สุด และคาดว่าจะได้เงื่อนไขในการหล่อที่ สามารถลดปริมาณของเสียได้มากกว่านี้

4. สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

เนื่องจากการผลิตชิ้นงานเครื่องประดับจากเงินสี ชมพูของบริษัทกรณีศึกษาพบปัญหาการเกิดรูพรุน ของชิ้นงานจากการหล่อแบบประณีตบริเวณทางเข้า ของโลหะเหลว จากการศึกษาพบว่า

1. อุณหภูมิอบเบ้าและอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิ อบเบ้ากับอุณหภูมิหล่อมีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อ การเกิดรูพรุนบริเวณทางเข้าของโลหะเหลวของ ชิ้นงาน

2. อุณหภูมิอบเบ้าที่ 480 °C กับอุณหภูมิหล่อที่ 1060 °C หรือ อุณหภูมิอบเบ้าที่ 600 °C กับอุณหภูมิ

หล่อที่ 1030 °C เป็นเงื่อนไขการหล่อที่เหมาะสมของ การหล่อเงินสีชมพูด้วยวิธีประณีต เพื่อลดการเกิดรูพรุน

3. หลังจากได้นำอุณหภูมิอบเบ้าที่ 480 °C กับ อุณหภูมิหล่อที่ 1060 °C หรือ อุณหภูมิอบเบ้าที่ 600 °C กับอุณหภูมิหล่อที่ 1030 °C มาใช้ในการผลิตจริง สามารถลดของเสียลงจากเดิมได้โดยเฉลี่ย 29.5 %

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับความอนุเคราะห์ ในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับตรวจสอบ ปริมาณรูพรุนในงานวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] <http://www2.ops3.moc.go.th/> (Accessed on 28 September 2020)
- [2] W. Mingvanich, Strategies to Increase Competitiveness in the Gem and Jewelry Industry, Department of Export Promotion, Ministry of Commerce, 2003. (in Thai).
- [3] S. Yamkate, Export Problems with Gems and Jewelry of Thailand's Gem and Jewelry Export Business, Independent Study, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand. 2012. (in Thai).
- [4] G.O. Verran, R.P.K. Mendes, and L.V.O.D. Valentina, DOE Applied to Optimization of Aluminum Alloy Die Castings, Journal of Materials Processing Technology, 2008, 200 (1–3), 120–125.



- [5] F. Grosselle, G. Timelli, and F. Bonollo, DOE Applied to Microstructural and Mechanical Properties of Al-Si-Cu-Mg Casting Alloys for Automotive Applications, *Materials Science and Engineering: A*, 2010, 527(15), 3536–3545.
- [6] J.K. Kittur, T.V. Herwadkar, and M.B. Parappagoudar, Modeling and Analysis of the Pressure Die Casting Using Response Surface Methodology, *AIP Conference Proceedings*, 2010, 1298, 735–741.
- [7] U.A. Dabade and R.C. Bhedasgaonkar, Casting Defect Analysis Using Design of Experiments (DoE) and Computer Aided Casting Simulation Technique, *Procedia CIRP*, 2013, 7, 616–621.
- [8] G. Xuedan, L. Dunming, Z. Jianxin, and S. Xu, DOE Applied to Optimization of Steel Casting, *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 251, 360–365.
- [9] J. Asensio-Lozano, J.F. Álvarez-Antolín, A. González-Pociño, and B. del Río-López, Optimization of Graphite Morphology in Mottled Nihard Cast Irons Inoculated with FeB and Manufactured by Centrifugal Casting, *Metals*, 2018, 8(5), 293.
- [10] C.Q. Zheng and A. Simard, Optimization of Casting Parameters on an Improved AA6061 Aluminum Alloy for Semi-Solid Die Casting, *SAE Technical Papers*, 2010, 2010-01-0225, 1-12.
- [11] S.M. Ali, The Effect of Reinforced SiC on the Mechanical Properties of the Fabricated Hypoeutectic Al-Si Alloy by Centrifugal Casting, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2019, 22(4), 1125–1135.
- [12] H. Hanizam, M. S. Salleh, M. Z. Omar, and A. B. Sulong, Optimisation of Mechanical Stir Casting Parameters for Fabrication of Carbon Nanotubes-Aluminium Alloy Composite Through Taguchi Method, *Journal of Materials Research and Technology*, 2019, 8(2), 2223–2231.
- [13] M.P. Groover, *Groover's Principles of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems*, Global edition, John Wiley & Sons, Singapore, 2017.



Effect of Closing the Blade Tip on Downwind Thai Sail Windmill

Teerawat Klaklay^{1*} and Wikanda Sridech²

¹ Department of Power Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 1518 Pracharad I Rd., Bangsue, Bangkok 10800, Thailand

² Research Centre for Combustion and Alternative Energy (CTAE), Science and Technology Research Institute, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 1518 Pracharad I Rd., Bangsue, Bangkok 10800, Thailand

* Corresponding author, E-mail: teerawat.k@cit.kmutnb.ac.th

Received: 20 July 2020; Revised 29 July 2020; Accepted: 21 August 2020

Online Published: 9 December 2020

Abstract: Thai sail windmill has been a traditional wind turbine of Thailand, which is a type of horizontal axis wind turbine and now used for pumping the seawater into the salt farms widely in the Samut-Songkhram province for the sea salt production. Currently, the efficiency of the conventional Thai sail windmill is typically quite low that is only approximately 10 percent. Actually, the efficiency of wind turbines depends on many parameters such as blade shape, pitch angle, solidity, wind speed, tip loss, etc. However, this study focused on the tip loss reduction by using technique of closing the blade tip in order to be a guideline for enhancing efficiency. The objective of this study was to investigate the effect of employing technique of closing the blade tip on the efficiency of Thai sail windmill in the fashion of downwind rotor. For experiments, the small scale of 4-blade and 6-blade rotor in the pattern of downwind Thai sail windmill was built and used as a prototype to experiment by using the tow testing method. As a result, the use of technique of closing the blade tip could help the 4-blade rotor increase maximum efficiency from 17 percent into 22 percent at the tip speed ratio of 2.2 and help the 6-blade rotor increase maximum efficiency from 25 percent into 35 percent at the tip speed ratio of 2.0.

Keywords: Thai sail windmill; Wind turbine efficiency; Downwind rotor; Closing the blade tip



1. Introduction

Conventional Thai sail windmill (CTSW) has been used widely in Samut Songkhram province for pumping the seawater into the salt farms for sea salt production. The CTSW is a kind of a horizontal axis wind turbine, which is a lift type. Referring to Mukhia [1] reports, the actual rotor size of CTSW was about 6-8 meters with 6 blades in triangular shape made of either canvas or woven mat. The tip side area of the CTSW blades was larger than the root side area as showing in Fig.1 [2, 3]. Due to the big size at the tip blades, the tip loss could be happened enormously and inevitably; which leads to that the CTSW had low efficiency. Ronnakorn [4] reported that the average efficiency of the CTSW was only about 10 percent. However, if able to reduce the tip loss at the blade tip, the efficiency of the CTSW could be improved.



Fig.1 Conventional Thai sail windmill [2, 3]

In recent years, Teerawat *et al.* [5] improved the CTSW to have more efficiency in terms of finding the optimum tip pitch angle including the changing rotor from an upwind type into a downwind type, which was the so-called “downwind Thai sail windmill (DTSW)” as shown in Fig.2 to take advantages in being a passive yaw control similar to the experiment of Kress *et al.* [6]. The optimum tip pitch angle of DTSW was in the range of 5-10 degrees. Spera [7] described the method for wind turbine testing that there were three main techniques able to perform as follows: (i) wind tunnel testing, (ii) tow testing, and (iii) field testing. This study used the tow testing method. The tow testing was the technique that was to install the prototype on a moving vehicle, such as a pick-up truck, that was moving at a constant speed. For example, this technique was also performed in the study of Maughmer [8] and Song [9].



Fig.2 Downwind Thai sail windmill [3]

For this research, the rotors were consisted of two manners, namely 4-blade, and 6-blade rotor in the fashion of DTSW but scale down the rotor diameter from 8.0 meters into 1.0 meter in order to be more suitable and practical to experiment. The tip pitch angle was used by the two angles, namely 5 and 10 degrees due to being the range of optimum pitch angle referring to the previous study [5]. This article focused on the reduction of the tip loss, especially for DTSW. This study aimed to investigate the effect of employing technique of closing the blade tip on DTSW efficiency to be a guideline for enhancing efficiency.



Fig.3 Tip pitch angle setting [3]

2. Materials and Methods

2.1 Basic Information of the CTSW

The actual rotor size of CTSW was about 6-8 meters placed in the upwind position. The manner of blades was the triangular shape made

of either canvas or woven mat; whereby the blades were located on that the bigger side was placed at the rim of the rotor. The tip pitch angle was typically in the range of about 5-20 degrees as showing in Fig.3. The solidity of the rotor was in the range of approximately 15-60 percent [4]; whereby the solidity meant that the ratio between the projected area of all blades and the swept area of rotor.



Fig.4 The opened-tip DTSW on the 4-blade rotor

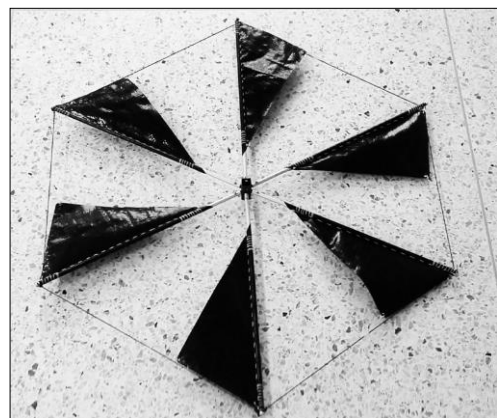


Fig.5 The opened-tip DTSW on the 6-blade rotor

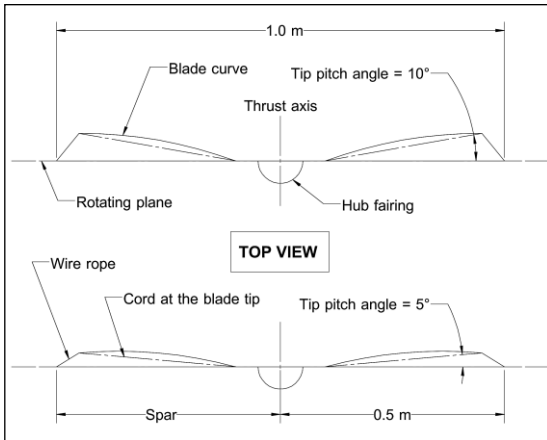


Fig.6 Tip pitch angle setting

2.2 Prototype and Closing the Blade Tip

The DTSW, which was developed from the CTSW, had the blade tip opened independently off the rotor rim (Opened-tip DTSW) as showing in Fig.4 and Fig.5, which the optimum tip pitch angle was in the range of approximate 5-10 degrees. In the top view, Fig.6 presented the relation of the tip pitch angle of the DTSW between the rotor plane and the cord line at the blade tip. With this appearance, the blade tip would affect the wind turbine to create enormously the tip loss especially at the blade tip that was large and long as explained by Prandtl [10]. This was the reason why the efficiency of CTSW including the opened-tip DTSW was quite low. Consequently, the technique of closing the blade tip was implemented for this study to help reducing the tip loss so that the efficiency of DTSW might be enhanced. The technique of

closing the blade tip was to extend the blade tip area to the rotor rim of DTSW and sew tightly together with setting the required tip pitch angle as showing in Fig.7 and Fig.8.

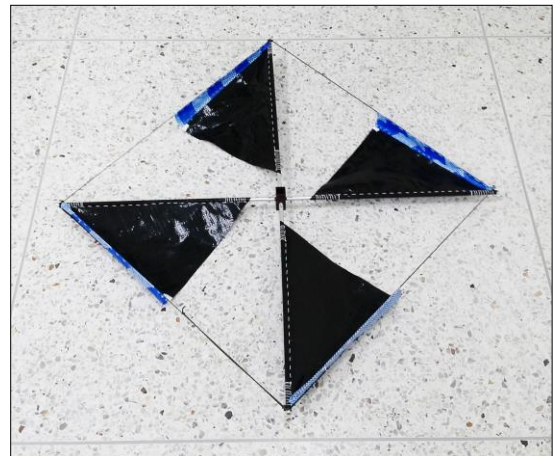


Fig.7 The 4-blade rotor by using the technique of closing the blade tip (Closed-tip DTSW)



Fig.8 The 6-blade rotor by using the technique of closing the blade tip (Closed-tip DTSW)



The prototype was fabricated by scaling down from 6-8 meters into 1.0 meter. The rotor was built in only two manners, namely 4-blade and 6-blade rotor with the same solidity of about 28 percent. The tip pitch angle was employed only two optimum angles, namely 5 and 10 degrees as mentioned by a previous study [5]. The rotor orientation of the prototype was placed in the downwind position, which was called the downwind Thai sail windmill (DTSW), to take advantage of being passive yaw controlled. The 4-blade and 6-blade rotor with the opened-tip DTSW and the blades using the technique of closing the blade tip (Closed-tip DTSW) were used as prototypes for the experiment in order to

investigate the effect of the use of technique of closing the blade tip on DTSW efficiency.

2.3 Testing Procedure

Referring to that the tow testing was one effective method able to use for wind turbine testing as explained by Spera [7]. Thus, it was performed in this study owing to the suitable and available tools and equipment. This method was to equip the prototype on a moving vehicle such as a pick-up truck moving at a constant speed. Similar experiments for wind turbine testing were performed and reported by Maughmer [8] and Song [9]. However, it should be noted that the vehicle speed was actually the same as inlet wind velocity by wind tunnel testing method;



Fig.9 Carbon steel rack, prototypes, and measurement accessories installation: tension spring, optical rotational speed sensor, and anemometer [3]



which the prototype was stationary in the test section. For this study, the carbon steel racks were installed on a pick-up truck to facilitate in fastening the prototypes and all measurement accessories such as tension spring, optical rotational speed sensor, and anemometer. The rotor was installed 2.5 meters away from a vehicle's roof to avoid the turbulent disturbance or wake from the boundary layer effect as reported by Hucho *et al.* [11]. The anemometer was placed in front of the rotor plane about 1.0 meter. The tested velocity was approximate 20 kilometers per hour.

The procedure of the tow testing method was as follows;

1) Install completely a carbon steel rack, prototypes, and all measurement accessories on a pick-up truck as showing in Fig.9 and Fig.10.

2) Examine the interference from the local wind at that time; whereby the pick-up truck could start moving only if the local wind did not exceed 5 percent from the tested speed in order to avoid the non-uniform flow of tested velocity of air from the local wind interference.

3) Move the pick-up truck forward with a constant speed of 20 kilometers per hour to tow the prototype on the route, which must be straight and must not be sloping as showing in Fig.11.

4) Give the rotor shaft the more resistance load by adjusting the turnbuckle screw to measure the

torque and rotor speed happening as showing in Fig.9.

5) Measure the F1 and F2 by tension springs and measure the rotor speed by optical rotating speed sensor as showing in Fig.9 when the system was fully in steady-state.



Fig.10 Prototype on the pick-up truck



Fig.11 Straight route for the tow testing



6) Provide more the resistance load and measure the F_1 , F_2 , and the rotor speed again as the previous step until the rotor speed stops rotating.

3. Theory

3.1 Tip Loss

The tip loss was a thing that was inevitably happened in all types of horizontal axis wind turbine due to having the finite span of wind turbine blades and having the rotating blades as explained by Branlard *et al.* [12]. The tip loss mainly occurred at the tip of the blade span or the blade tip. This tip loss caused a part of lift force, torque, and gained power that was created by wind turbine blades to decrease enormously. The tip loss was the dimensionless coefficient, which was in the range between 0-1. For example, the tip loss factor that was equal to 0.9 meant that the wind turbine power was lost 10 percent from the mechanical power that should be totally deserved 100 percent. Presently, there were many the tip loss models used for the wind turbine simulation especially by the blade element momentum theory (BEM) [2, 13, 14]; such as Glauert's BEM, Vortex Code, and New BEM Code [12] as showing in Fig.12. For Fig.12, it was obvious that the tip loss was mainly happened in the area of the blade tip especially

in the range of $r/R=0.8-1.0$ as showing that the tip loss was decreased rapidly.

Even though the tip loss was a thing that could not eliminate totally, it could be reduced by using some auxiliary devices; such as tip fins [15, 16], winglets [17], shroud [18], etc. For this study, the technique of closing the blade tip was performed to reduce the tip loss for the DTSW.

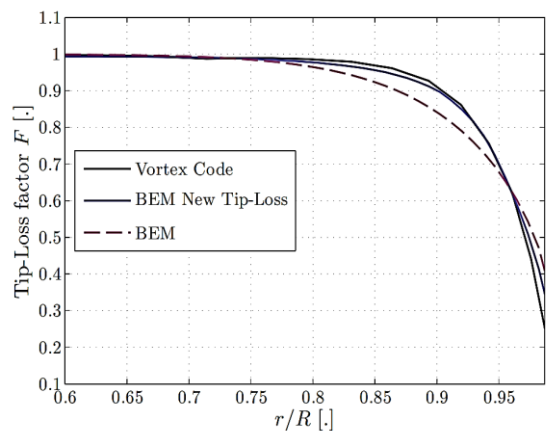


Fig.12 Tip loss factor from Glauert's BEM, Vortex Code, and New BEM Code [12]

3.2 Wind Turbine Efficiency

Mostly, the wind turbine efficiency would be presented in terms of power coefficient (C_p), which is the dimensionless parameter. The C_p was the ratio between the gained power from the wind turbine (P_t); which was a mechanical power or shaft power, and the wind power (P_w). Consequently, the power coefficient of the wind turbine could be expressed as Eq. (1) [19].

$$C_p = \frac{P_t}{P_w} = \frac{T \cdot \omega}{0.5 \rho \pi R^2 U_0^3} \quad (1)$$

where T was the shaft torque (N·m), which was converted from the aerodynamic loads: lift and drag of the wind turbine blades. ρ was the density of air (kg/m³). R was the rotor radius of the wind turbine (m). U_0 was the wind velocity (m/s). ω was the angular velocity of the rotor (rad/s), which could be calculated by Eq.(2) [19].

$$\omega = \frac{2\pi N}{60} \quad (2)$$

where N was the rotor speed (RPM). However, it should be noted that the wind turbine efficiency could be explained in terms of the power coefficient multiplied by 100 percent as presented in Eq.(3).

$$\eta_{tb} = C_p \times 100\% \quad (3)$$

whereby η_{tb} was the wind turbine efficiency, which was the energy conversion efficiencies [20]. According to the free body diagram of the torque acting on the pulley that was equipped on the rotor shaft of the prototype as showing in Fig. 13, the shaft torque could be measured by using the equilibrium of forces and torques; which is the basic principle of mechanics (Newton's first law of motion).

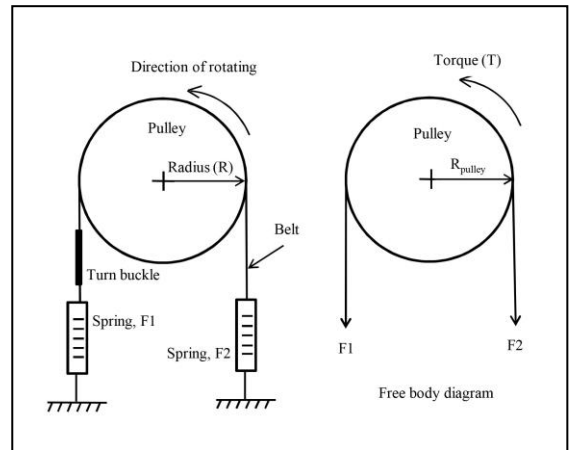


Fig.13 Free body diagram of the torque acting on the pulley [3]

When the system is in equilibrium, the sum of all forces and the sum of all torques acting on the system must be zero. Hence, the shaft torque could be shown in Eq.(4) [5].

$$T = R_p (F_2 - F_1) \quad (4)$$

where R_p was the radius of pulley. F_1 and F_2 were the forces acting on the tension springs as showing in the free body diagram. Tip speed ratio (λ) was the ratio between the tangent velocity at the blade tip and the wind velocity, which could be presented in Eq.(5) [19].

$$\lambda = \frac{\omega R}{U_0} \quad (5)$$

where R represented the radius of the blade tip. It should be noted that the power coefficient and the tip speed ratio would be dimensionless.

4. Results and Discussion

When all prototypes were completely tested by the tow testing method with a tested speed of 20 kilometers per hour, the results showed that;

Fig.14 showed the comparison between the opened-tip and the closed-tip rotor of DTSW of the 4-blade rotor at the tip pitch setting of 5 degrees and. It was obvious that the closed-tip rotor provided maximum efficiency more than the opened-tip rotor. The closed-tip rotor had the utmost efficiency of about 22 percent at the optimum tip speed ratio of 2.2; while the opened-tip had 17 percent at the tip speed ratio of 2.0. Hence, the efficiency could be enhanced 5 percent, which was considered fairly high. In addition, it should be noted that; mostly, the stall was occurred at the lower tip speed ratio (the left side of the curve) due to a very high angle of attack. Thus, the C_p for this area could not measure because the rotor would stop rotating immediately.

Fig.15 showed the comparison between the opened-tip and the closed-tip rotor of DTSW of the 4-blade rotor at the tip pitch setting of 10 degrees. Like the 5 degree of tip pitch angle, the closed-tip rotor provided maximum efficiency more than the opened-tip rotor. The closed-tip rotor had the utmost efficiency of approximately 22 percent at the optimum tip speed ratio of about 2.0; while the opened-tip rotor had only

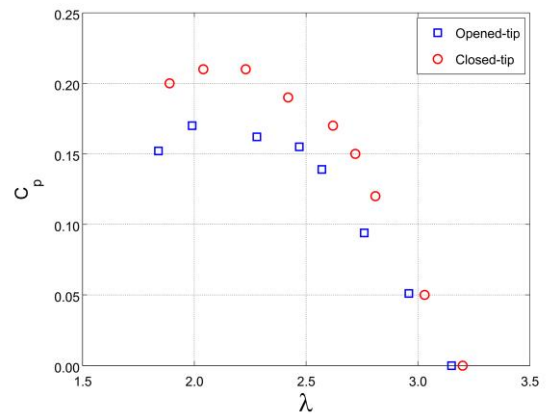


Fig. 14 Experimental results of the 4-blade rotor at the tip pitch of 5 degrees in the fashion of opened-tip and closed-tip DTSW

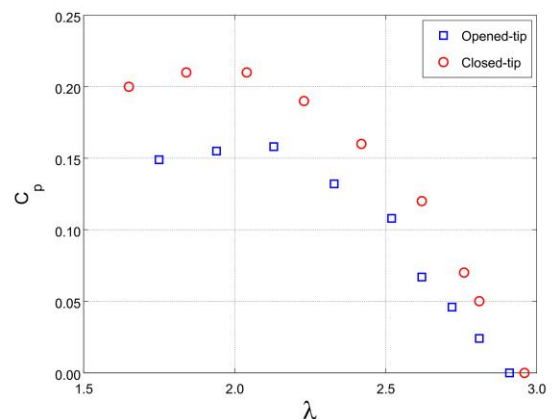


Fig. 15 Experimental results of the 4-blade rotor at the tip pitch of 10 degrees in the fashion of opened-tip and closed-tip DTSW

16 percent at the optimum tip speed ratio of 2.0. It can be seen that; the maximum efficiency obtained by the tip pitch angle of 10 degrees was not very different from 5 degrees.

Fig.16 illustrated the comparing results of the 6-blade rotor at the tip pitch setting of 5 degrees between the opened-tip and the closed-tip rotor of DTSW. It was apparent that the closed-tip rotor could provide the utmost efficiency more than the opened-tip rotor including more than the rotor in the fashion of 4-blade DTSW. The closed-tip rotor with the 6-blade manner could provide the maximum efficiency of approximately 28 percent at the optimum tip speed ratio of about 2.7; while the opened-tip rotor had the utmost efficiency only about 22 percent at the optimum tip speed ratio of 2.7. Thus, it can be seen that; the efficiency could be augmented by approximately 6 percent from the opened-tip rotor and increased approximately 6 percent from the 4-blade rotor together with the use of closing the blade tip technique at the tip pitch angle of 5 degrees.

Fig.17 illustrated the comparing results of the 6-blade rotor at the tip pitch setting of 10 degrees between the opened-tip and the closed-tip rotor of DTSW. It was very clear that the closed-tip rotor could provide the utmost efficiency more than the opened-tip rotor tremendously. the closed-tip rotor had maximum efficiency of approximately 35 percent at the optimum tip speed ratio of approximately 2; while the opened-tip rotor had a maximum efficiency of about 25 percent at the optimum tip speed ratio of about 2.2. Consequently, it was obviously that; when

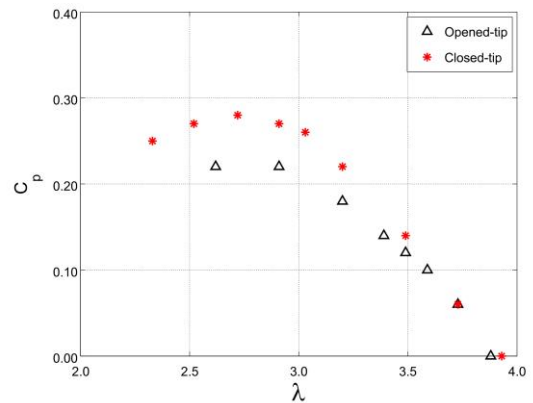


Fig. 16 Experimental results of the 6-blade rotor at the tip pitch of 5 degrees in the fashion of opened-tip and closed-tip DTSW

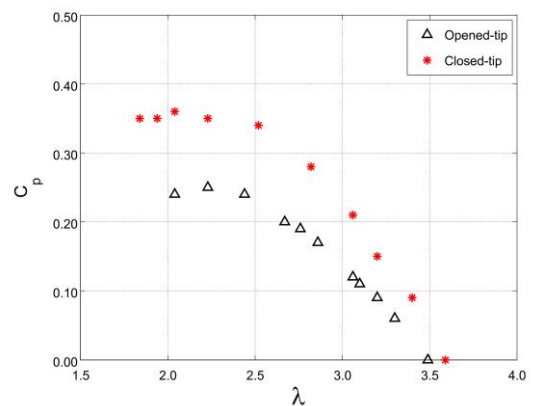


Fig. 17 Experimental results of the 6-blade rotor at the tip pitch of 10 degrees in the fashion of opened-tip and closed-tip DTSW

employing the technique of closing the blade tip for the 6-blade rotor for DTSW, the efficiency could be enhanced approximate 10 percent from the conventionally opened-tip rotor, which was considered as relatively high. Additionally,



if comparing with the closed-tip rotor for the 4-blade rotor, the efficiency could be enhanced approximate 13 percent.

5. Conclusions

This study aimed to investigate the effect of employing the technique of closing the blade tip on the efficiency of the downwind Thai sail windmill to be a guideline for enhancing efficiency. The results showed that;

The 4-blade rotor which was using the technique of closing the blade tip provided maximum efficiency of approximately 22 percent at the tip pitch angle of both 5 and 10 degrees at the optimum tip speed ratio of about 2.2. Thus, the efficiency increased 5 percent from the opened-tip rotor.

The 6-blade DTSW which was using the technique of closing the blade tip provided maximum efficiency of 35 percent at the tip pitch angle of 10 degrees at the optimum tip speed ratio of 2.0. So, the efficiency increased 10 percent from the opened-tip rotor, which was considered relatively high. Additionally, if comparing the closed-tip rotor for the 4-blade rotor, the efficiency was enhanced 13 percent. the 6-blade rotor for DTSW which was using the technique of closing the blade tip provided maximum efficiency more than the 4-blade rotor because this technique was able to help DTSW

to change a part of the tip loss into the power gain simultaneously, which was considered as a double benefit in efficiency enhancement. Consequently, with the higher number of blades, the total torque would be more obtained as a result of the number of blades as showing in the equation of $T = B \int_{root}^{tip} dF_T r$ [19]; whereby B was the number of blades and dF_T was the differential relative force in tangent direction at any radius from the blade root to tip.

6. Acknowledgments

The authors acknowledge the financial support from King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand and Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand.

7. References

- [1] P. Mukhia, Performance and Aerodynamic Analysis of The Thai Four Bladed Wooden Rotor Coupled to A Ladder Pump, Master Thesis, Asian Institute of Technology, Thailand. 1981.
- [2] T. Klabklay, W. Sridech and T. Chitsomboon, Blade Element Momentum Theory for Estimating Efficiency of Thai sail windmill, The journal of industrial Technology, 2019, 15(3), 93-103. (in Thai).



- [3] T. Klaklay and T. Chitsomboon, Efficiency of Upwind and Downwind Thai Sail Windmill, *Journal of Engineering and Science Research*, 2017, 1(2), 1-6.
- [4] R. Thepwoong, Design Improvements of Thai Sail Windmill for Water Pumping, Ph.D. Thesis, School of Civil Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin. 2013.
- [5] T. Klaklay, Optimum Pitch Angle of Downwind Thai Sail Windmill for Maximum Annual Energy Production, *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 2017, 40(6), 1473-1478.
- [6] C. Kress, N. Chokani and R.S. Abhari, Downwind Wind turbine Yaw Stability and Performance, *Renewable Energy*, 2015, 83, 1157-1165.
- [7] A.D. Spera, *Wind Turbine Technology: Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering*, 2nd ed., ASME Press, NY, USA, 1998.
- [8] M.D. Maughmer, Optimization and Characteristics of a Sailwing Windmill Rotor, Final Report/AMS Report No. 1297, Princeton University, New Jersey, USA, 1976.
- [9] Q. Song, Design, Fabrication and Testing of A New Small Wind Turbine Blade, Master Thesis, The University of Guelpe, Ontario, Canada, 2012.
- [10] L. Prandtl and A. Betz, Vier Abhandlungen zur Hydrodynamik und Aerodynamik, *Göttinger Nachr*, Göttingen, 1927, 88–92.
- [11] W.H. Hucho and G. Sovran, Aerodynamics of Road Vehicles, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1993, 25, 485-537.
- [12] E. Branlard, K. Dixon and M. Gaunaa, Vortex Methods to Answer the Need for Improved Understanding and Modeling of Tip-Loss Factor, *IET Renewable Power Generation*, 2013, 7(4), 311-320.
- [13] T. Klaklay and T. Chitsomboon (2015) Prediction of Thai Sail Windmill Performance by A Blade Element Momentum Theory, The 29th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand, Proceedings, 713-717. (in Thai).
- [14] J.L. Tangler, and J.D. Kocurek, Wind Turbine Post-Stall Airfoil Performance Characteristics Guidelines for Blade-element Momentum Methods, Technical Report NREL/CP-500-36900, National Renewable Energy Laboratory, Colorado. 2005.



- [15] P.D. Fleming and S.D. Probert, Power Augmentation of Cheap, Sail-Type, Horizontal-Axis Wind-Turbines, *Applied Energy*, 1982, 12(1), 53-70.
- [16] P.D. Fleming, S.D. Probert and S. Arithoppah, Design Optimisation of Cheap Power-Augmentation Devices for a Flexible-Sail, Horizontal-Axis Wind-Turbine, *Applied Energy*, 1984, 17(3), 169-180.
- [17] J. Johansen and N.N. Sorensen, Aerodynamic Investigation of Winglets on Wind Turbine Blades Using CFD, Riso Report Riso-R-1543(EN), Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark, 2006.
- [18] P.D. Fleming and S.D. Probert, Design and Performance of A Small Shrouded Cretan Wind Wheel, *Applied Energy*, 1982, 10(2), 121-139.
- [19] J.F. Manwell, J.G. McGowan and A.L. Rogers, *Wind Energy Explained*, 2nd ed., John Wiley & Son, UK, 2009.
- [20] Y.A. Cengel, M.A. Boles and M. Kanoglu, *Thermodynamics: An Engineering Approach*, 9th ed., McGrawHill Education, NY, USA, 2019.



การจำแนกพฤติกรรมรีโอโลยีของวัสดุจากการทดสอบเฉือนเป็นรอบ

ชาญยุทธ โกลิตะวงษ์*

ศูนย์วิจัยพอลิเมอร์, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ, คณะวิศวกรรมศาสตร์,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

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

วันที่รับบทความ: 2 กันยายน 2563; วันที่ทบทวนบทความ: 20 ตุลาคม 2563; วันที่ตอบรับบทความ: 9 พฤศจิกายน 2563

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 12 ธันวาคม 2563

บทคัดย่อ: วัตถุประสงค์ของบทความนี้ต้องการจำแนกพฤติกรรมของวัสดุ และสมบัติรีโอโลยีที่ได้จากการทดสอบแบบเฉือนเป็นรอบ (Oscillatory Shear) ซึ่งเป็นการทดสอบที่ได้รับการยอมรับในแวดวงวิชาการ ในการใช้เป็นเครื่องมือในการจำแนกวัสดุ ในบทความนี้จะใช้ตัวแปรตามประกาศสมาคมรีโอโลยีแห่งสหรัฐอเมริกา (Society of Rheology, SOR) ที่มีการแบ่งการทดสอบแบบเฉือนเป็นรอบที่ความเครียดต่ำ (Small Amplitude Oscillatory Shear, SAOS) ที่มีเลขไร้มิติไวส์เซนเบิร์กต่ำ $Wi \equiv \lambda \dot{\gamma}_0 \leq 1$ ที่ซึ่งความเค้นเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นกับความเครียด และการทดสอบแบบเฉือนเป็นรอบที่ความเครียดสูง (Large Amplitude Oscillatory Shear, LAOS) $Wi > 1$ ซึ่งความเค้นจะเขียนอยู่ในรูปของอนุกรมคำตอบของฟูรีเยร์ (Fourier Series Solutions) ที่จะประกอบไปด้วยชุดคำตอบหลายชุดรวมกัน การทดสอบแบบเฉือนเป็นรอบ (Oscillatory Shear) สามารถเขียนวิเคราะห์ในรูปแบบสมการเชิงซ้อนได้ ทำให้สะดวกในการศึกษาพฤติกรรมของพอลิเมอร์เหลวที่มีการรับแรงทางกลแบบพลวัต (Dynamic Mechanical Load) ได้ดี และเป็นที่ยอมรับในแวดวงวิชาการ ในการทดสอบเพื่อจำแนกพฤติกรรมของวัสดุและสมบัติทางรีโอโลยีโดยใช้ฟังก์ชันโวลต์บนแผนภาพพิพคิน

คำสำคัญ: การทดสอบแบบเฉือนเป็นรอบ; การจำแนกพฤติกรรมรีโอโลยีของวัสดุ; ฟังก์ชันโวลต์; แผนภาพพิพคิน



Rheological Behavior Identification of Materials from Oscillatory Shear

Chanyut Kolitawong*

Rheology Research Center, Department of Mechanical and Aerospace Engineering,
Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

* Corresponding author, E-mail: chanyut.k@eng.kmutnb.ac.th

Received: 2 September 2020; Revised 20 October 2020; Accepted: 9 November 2020

Online Published: 12 December 2020

Abstract: The objective of this article is to report how to identify the rheological behavior of a material from oscillatory shear testing which is a widely used method. This article uses official functions announced by the Society of Rheology (SOR) to acquaint those researchers. An oscillatory shear flow can be classified by its shear strain. For small shear strain, *i.e.* at small Weissenberg number $Wi \equiv \lambda \dot{\gamma}_0 \leq 1$, the flow is called small amplitude oscillatory shear, SAOS in which the stress in the fluid is a linear function of the shear strain. However, for large shear strain, $Wi > 1$, such flow can be classified as a large amplitude oscillatory shear, LAOS, flow where the shear stress can be described by Fourier series of the shear strain. Lastly, any oscillatory flow can be written in complex functions, which very useful for dynamic mechanical analysis. Up until now, Ewoldt grid on Pipkin diagram is the most widely used method for researchers to classify material behaviors.

Keywords: Oscillatory shear; Rheological behavior identification; Ewoldt grid; Pipkin diagram



1. บทนำ

การทดสอบสมบัติทางรีโอโลยีสำหรับวัสดุที่อยู่ในสถานะที่เป็นของไหลที่มีความหนืดสูง ๆ (Highly Viscous Fluid) เช่น พลาสติกหรือยางที่ยังไม่คงรูป (Uncured Elastomers) หรือเป็นสารละลายพอลิเมอร์ (Polymer Solutions) เช่น เลือด น้ำเหลือง หรือสบูเหลวและแชมพูสระผม เป็นต้น ในขณะที่กระบวนการผลิตชิ้นส่วนพลาสติก เช่น กระบวนการอัดรีด กระบวนการฉีด และกระบวนการอัดขึ้นรูป พอลิเมอร์เหลวที่อยู่ในกระบวนการผลิตเหล่านี้ส่วนใหญ่จะมีการไหลแบบเฉือนที่อุณหภูมิสูง ๆ เนื่องจากความหนืดของพอลิเมอร์จะต่ำลง ทำให้สมบัติของวัสดุจะค่อนข้างเป็นของไหล (Liquids) หรือของไหลเหนียวหนืด (Viscoelastic Fluids) ทำให้สามารถขึ้นรูปได้ตามที่ต้องการ จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน (τ_{21}) และความอัตราเครียดเฉือน ($\dot{\gamma}_{21}$) ที่แสดงในสมการที่ (1)

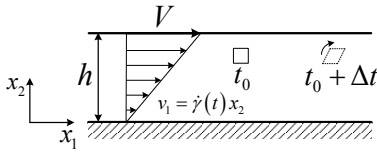
$$\tau_{21} = -\eta(\dot{\gamma})\dot{\gamma}_{21} \quad (1)$$

เมื่อ η คือความหนืดของของไหลชนิดนอนนิวโทเนียน โดย η เป็นฟังก์ชันของสเกลาร์คงตัวของอัตราเครียดเฉือน (Scalar Invariants of Strain Rate) ซึ่งเป็นค่าคงที่ โดยค่าสเกลาร์ฟังก์ชันของอัตราความเครียดเฉือน $\dot{\gamma}$ และการเฉือนอย่างง่ายสำหรับวัสดุพอลิเมอร์เหลวที่แสดงในรูปที่ 1 วัสดุพอลิเมอร์เหลวจะอยู่ระหว่างแผ่นประกบคู่ ถ้าระยะระหว่างแผ่นประกบน้อยมาก ๆ ทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและอัตราเครียดเป็นแบบเชิงเส้นตามสมการที่ (1)

ในขณะที่การทดสอบยืดดึงโดยมากจะใช้ทดสอบวัสดุที่มีความหนืดสูง ๆ (Highly Viscous Materials)

หรือวัสดุหนืดยืดหยุ่นมาก ๆ (Viscoelastic Materials) เช่น ในกระบวนการหลอมปั่นเส้นใย (Fiber Spinning) พอลิเมอร์ในสถานะดึงยืดขณะที่พอลิเมอร์มีสมบัติเหนียวหนืดซึ่งมีอุณหภูมิต่ำลงมา และกำลังจะเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็ง เป็นต้น การทดสอบเพื่อหาความหนืดยืดดึงยังเป็นเรื่องใหม่ในศาสตร์รีโอโลยี และมีการศึกษากันอยู่ในวงจำกัดพอสมควร เนื่องจากการทดสอบหาความหนืดยืดดึงจะต้องใช้เครื่องมือเฉพาะและการวัดกระทำได้ยากกว่าการทดสอบหาความหนืดแบบเฉือน ในบทความนี้จะไม่กล่าวถึงการทดสอบสำหรับวัสดุพอลิเมอร์ที่มีสมบัติยืดหยุ่นสูง ๆ (Highly Elastic or Hyper-Elastic Solids) [1, 2] เช่น ยางคงรูป (Cured Elastomers) [3] หรือพลาสติกที่อยู่ในสถานะของแข็ง (Solid Polymers) และวัสดุพอลิเมอร์ที่ไม่ได้เป็นสารเนื้อเดียว (Anisotropic Materials) เช่น วัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิต (Polymer Composite Materials), พลาสติกผสมเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ เป็นต้น [4]

การทดสอบสมบัติทางรีโอโลยีของพอลิเมอร์จากเครื่องมือวัดสมบัติทางรีโอโลยี เช่น รีโอมิเตอร์แบบกรวยและแผ่น (Cone and Plate Rheometer) รีโอมิเตอร์แบบแผ่นประกบ (Plate and Plate Rheometer) และเครื่องวิเคราะห์เชิงกลพลวัต (Dynamic Mechanical Analyzer, DMA) ส่วนใหญ่จะทดสอบจากการไหลแบบเฉือนผ่านแผ่นประกบคู่ที่มีระยะระหว่างแผ่นประกบน้อย ๆ (h) และทำการเลื่อนแผ่นประกบบนด้วยความเร็วคงที่ V ดังแสดงในรูปที่ 1 ทำให้มีความเร็วในเนื้อวัสดุที่ทดสอบด้วยการไหลแบบเฉือนเป็นไปตามสมการที่ (2)



รูปที่ 1 แสดงการไหลแบบเฉือนอย่างง่าย (Simple Shear Flow) ที่ไหลในทิศทาง x_1

$$\vec{v} = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{pmatrix}_{123} = \begin{pmatrix} \dot{\gamma}(t)x_2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}_{123} \quad (2)$$

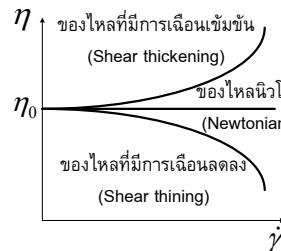
เมื่อ v_1 , v_2 และ v_3 คือความเร็วของวัสดุในทิศทาง x_1 , x_2 และ x_3 ตามลำดับ ในทางทฤษฎีแล้วเราสามารถควบคุมความเค้นที่แผ่นประกบด้านหนึ่งแล้ววัดอัตราเครียดที่แผ่นประกบอีกด้าน หรือในทางกลับกันเราสามารถควบคุมอัตราเครียดแล้ววัดความเค้นก็ได้ ถึงแม้ว่าทั้ง 2 วิธีมีข้อดี-ข้อเสียที่แตกต่างกัน [5] แต่การควบคุมความเค้นแล้ววัดอัตราเครียดทำได้ยากกว่าเนื่องจากผลของความเฉื่อย (Inertia Effects) [6] จึงทำให้อุปกรณ์ทดสอบสมบัติทางรีโอโลยีของพอลิเมอร์เหลวส่วนใหญ่จะควบคุมอัตราเครียดและวัดความเค้นเป็นหลัก จากรูปที่สำหรับการควบคุมอัตราเครียดที่แผ่นประกบบนที่มีระยะ h น้อย ๆ

$$\dot{\gamma}_{21} = \frac{\Delta v_1}{\Delta x_2} = \frac{v_1|_{x_2=h} - v_1|_{x_2=0}}{h} \quad (3)$$

จากสมการที่ (3) จะเห็นได้ว่าการควบคุมอัตราเครียดในของเหลวจะกระทำได้โดยการควบคุมความเร็วที่แผ่นประกบบน $v_1|_{x_2=h}$

โดยเห็นได้ว่าพฤติกรรมการไหลด้วยการเฉือนอย่างง่าย (Simple Shear Flow) จะมีความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราเครียดเฉือน $\mu = -\tau_{yx}/\dot{\gamma}_{yx}$ เรียกว่าของไหลนิวโทเนียน ในขณะที่ความสัมพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้นระหว่างความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือน $\eta(\dot{\gamma}) = -\tau_{yx}/\dot{\gamma}_{yx}$ เรียกว่าของไหลนอนนิวโทเนียน หากค่าความหนืดลดลงเมื่ออัตราเครียดเฉือนเพิ่มขึ้น วัสดุจะเป็นของไหลที่มีการเฉือนลดลง (Shear Thinning Fluid) ในทางกลับกัน ถ้าค่าความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราเครียดเฉือนเพิ่มขึ้น จะเป็นของไหลที่มีการเฉือนเข้มข้น (Shear Thickening Fluid) และถ้าค่าความหนืดไม่เปลี่ยนไปตามอัตราเครียดเฉือน ก็จะเป็นวัสดุนิวโทเนียน ดังแสดงในรูปที่ 2 [7]

ในที่นี้อัตราส่วนระหว่างความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือน $\tau_{yx}/\dot{\gamma}_{yx}$ จะเป็นค่าความหนืดปรากฏ (Apparent Viscosity) ที่สามารถหาได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ ด้วยการทดสอบการไหลอย่างง่ายแบบเฉือนคงตัว และสามารถหาค่าความหนืดที่ความเครียดเฉือนเป็นศูนย์ $\eta(0) = \eta_0$ ได้จากการประมาณค่าความหนืดที่อัตราความเครียดเฉือนต่ำ ๆ เข้าไปหาค่าความหนืดที่อัตราความเครียดเฉือนเป็นศูนย์



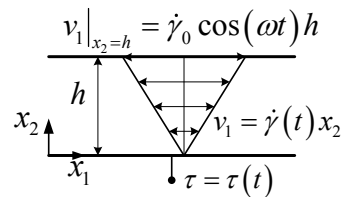
รูปที่ 2 ความหนืดปรากฏของวัสดุของไหลที่มีการเฉือนลดลง นิวโทเนียน และของไหลที่มีการเฉือนเข้มข้น



ในทางปฏิบัติวัสดุที่ถูกเค้นคงตัว และทำให้เกิดความเครียดสูง ๆ ได้อย่างง่ายดายด้วยแรงเค้นต่ำ ๆ จะถูกเรียกว่า “ของไหล” (Fluids) นั้นหมายความว่า การเค้นถูกกระทำด้วยระยะเวลาสั้น ๆ และของไหลสามารถสลายพลังงาน (Energy Dissipation) ที่เกิดจากแรงเค้นนั้นออกไปจากวัสดุได้อย่างง่ายดายด้วยการเคลื่อนที่ไปอย่างถาวร หรืออาจกล่าวได้ว่าแรงภายนอกสามารถเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของวัสดุได้อย่างง่ายดาย ยกตัวอย่างเช่น การไหลของน้ำฝนบนหลังคาลงสู่พื้นดินจะเกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาแค่ไม่กี่วินาทีเท่านั้น ในทางกลับกัน วัสดุที่ถูกเค้นคงตัวและทำให้เกิดความเครียดสูง ๆ ได้ยาก จะถูกเรียกว่า “ก้อนของแข็ง” (Bulky Solids) ถ้าแรงเค้นไม่มากพอ การทำให้เกิดความเครียดสูง ๆ นั้นอาจจะต้องใช้เวลานานในการสลายพลังงานที่เกิดจากแรงเค้นนั้นออกไปจากวัสดุด้วยการเสียรูปไปอย่างถาวร ยกตัวอย่างเช่น ภูเขาหินจะมีการเก็บสะสมพลังงานไปเรื่อย ๆ และใช้เวลานานเป็นล้าน ๆ ปี กว่าที่จะถูกมนุษย์สังเกตเห็นได้ว่ามีารเสียรูปไปจากเดิม เราเรียกเวลาที่วัสดุใช้ในการคลายพลังงานออกไปนี้ว่า “เวลาผ่อนคลาย” (Relaxation Time, λ)

เนื่องจากวัสดุทุกชนิดสามารถนิยามได้ด้วยเวลาผ่อนคลาย λ ด้วยเหตุนี้ในศาสตร์รีโอโลยีจะมอง “วัตถุทุกชนิดเป็นของไหล ขึ้นอยู่กับระยะเวลาสังเกตการณ์” ไม่ได้ขึ้นอยู่กับสถานะของวัสดุว่าเป็นของแข็งหรือของเหลว วัตถุประสงค์ของบทความนี้จะทำการแจกแจงพฤติกรรมของไหลของวัสดุเพื่อการเลือกใช้สมการแสดงพฤติกรรมได้อย่างเหมาะสม ด้วยการทดสอบเค้นเป็นรอบ (Oscillatory Shear Test) บทความจะเริ่มด้วยการแนะนำสมบัติรีโอโลยี จากการ

ทดสอบเค้นเป็นรอบที่ความเครียดต่ำ และความเครียดสูง โดยทางสมาคมรีโอโลยีแห่งสหรัฐอเมริกา (Society of Rheology, SOR) ได้ตั้งคณะกรรมการทำความตกลงร่วมกันในการใช้สมบัติรีโอโลยีที่ได้จากการทดสอบแบบเค้นเป็นรอบ [8] รวมทั้งกำหนดฟังก์ชันทางรีโอโลยีของวัสดุในการทดสอบเค้นเป็นรอบ (Oscillatory Shear) และได้ประกาศให้กับนักวิจัยที่ทำงานทางด้านรีโอโลยีได้ใช้ตัวแปรและสมบัติรีโอโลยีที่ได้จากการทดสอบในทิศทางเดียวกัน [9, 10] และในตอนท้ายจะกล่าวถึงการจำแนกพฤติกรรมของวัสดุโดยใช้ฟังก์ชันโวลด์บนแผนภาพพิพคิน จากการทดสอบเค้นเป็นรอบ และแสดงตัวอย่างการจำแนกพฤติกรรมของไหลที่ไม่เป็นเชิงเส้นของกาวแซนเทนละลายในน้ำ 0.2% บนแผนภาพพิพคิน



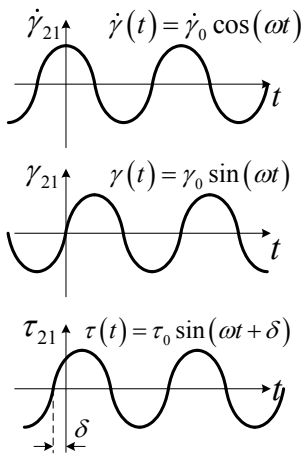
รูปที่ 3 แสดงการทดสอบสมบัติทางรีโอโลยีแบบเค้นเป็นรอบ ที่ควบคุมข้อมูลเข้า (Input) ด้วยอัตราเค้นคงตัว $\dot{\gamma}_0$ ตามช่วงเวลาที่ต้องการ

2. การทดสอบเค้นเป็นรอบ

การทดสอบเค้นเป็นรอบ (Oscillatory Shear Test) เป็นการควบคุมความเร็วที่แผ่นประกบบน $v_1|_{x_2=h}$ ให้เคลื่อนที่เป็นรอบด้วยความถี่ ω แล้ววัดความเค้นที่แผ่นประกบล่าง ($x_2 = 0$) รูปที่ 3 แสดงการทดสอบเพื่อหาสมบัติทางรีโอโลยีแบบเค้นเป็นรอบ



ปกติแล้วการทดสอบจะควบคุมข้อมูลเข้า (Input) ด้วยอัตราเครียดเฉือนคงตัว $\dot{\gamma}_0$ ที่ช่วงเวลาที่ต้องการ ในที่นี่จะเห็นได้ว่าควบคุมข้อมูลเข้า (Input) ด้วยการเลื่อนแผ่นประกบบน ($x_2 = h$) และวัดความเครียดเฉือนที่ของไหลกระทำกับแผ่นประกบล่าง ($x_2 = 0$) ยกเว้นการทดสอบการคืบที่ควบคุมข้อมูลเข้า (Input) ด้วยความเค้นเฉือนคงที่ τ_0 และวัดอัตราเครียดเฉือนที่เป็นฟังก์ชันของเวลา $\dot{\gamma}(t)$



รูปที่ 4 กราฟแสดงการควบคุมข้อมูลเข้า-ออก (Input and Output) ในการทดลองแบบควบคุมอัตราเครียดเฉือนคงตัว $\dot{\gamma}_0$ ที่ช่วงเวลาที่ต้องการของการทดสอบการเฉือนเป็นรอบที่ความเครียดต่ำ

รูปที่ 4 กราฟแสดงการควบคุมข้อมูลเข้า-ออก (Input and Output) ในการทดลองแบบควบคุมอัตราเครียดเฉือนคงตัว $\dot{\gamma}_0$ ที่ช่วงเวลาที่ต้องการของการทดสอบการเฉือนเป็นรอบแสดงในรูปที่ 3 เมื่อ δ เป็นระยะเฟสที่แตกต่างกันระหว่างข้อมูลเข้าและออกปกติแล้ว $\delta = 0$ สำหรับวัสดุยืดหยุ่นสมบูรณ์ และ $\delta = \pi/2$ สำหรับของไหลนิวโทเนียน และ

$0 < \delta < \pi/2$ สำหรับวัสดุวิโคอีลาสติก สมการความเร็วของวัสดุระหว่างแผ่นประกบในการไหลแบบเฉือนเป็นรอบ จะแสดงได้ด้วยสมการที่ (2) โดยอัตราเครียดคือ (รูปที่ 3 และรูปที่ 4)

$$\dot{\gamma}(t) = \dot{\gamma}_{21} = \dot{\gamma}_0 \cos \omega t \quad (4)$$

เมื่อ $\omega = 1/T$ เป็นความถี่กวาด (Frequency Sweep) ที่มีหน่วยเป็นรอบต่อวินาที (Hz) และ T เป็นคาบเวลาในการเคลื่อนที่ครบหนึ่งรอบ มีหน่วยเป็นวินาที $\dot{\gamma}_0$ เป็นขนาดของอัตราเครียด (Strain rate amplitude) ซึ่งมีความเครียดคือ

$$\gamma_{21}(0, t) = \int_0^t \dot{\gamma}_0 \cos \omega t' dt' = \dot{\gamma}_0 \sin \omega t \quad (5)$$

เมื่อ γ_0 เป็นขนาดของความเครียด (Strain Amplitude) มีค่าเป็นบวก (+) เสมอ และมีความสัมพันธ์กับขนาดของอัตราเครียดคือ

$$\dot{\gamma}_0 = \omega \gamma_0 \quad (6)$$

ซึ่งเป็นการทำให้ของเหลวที่อยู่ระหว่างแผ่นประกบคู่เคลื่อนที่ไป-มาเป็นรอบตามอัตราเครียดที่ได้รับจากแผ่นประกบบน การกำหนดลักษณะของสมการความเค้นตอบสนองที่จะเกิดที่แผ่นประกบล่างว่าจะมีรูปแบบใดได้จากการเปรียบเทียบแรงยืดหยุ่น (Elastic Force) กับแรงหนืด (Viscous Force) เรียกว่า “เลขไร้มิติไวซ์เซนเบิร์ก” (Weissenberg Number, Wi) [11]

$$Wi = \lambda \dot{\gamma}_0 = \lambda \omega \gamma_0 \quad (7)$$

เมื่อ “แรงยืดหยุ่น” คือแรงที่ใช้ในการคืนตัวของวัสดุ และ “แรงหนืด” คือแรงเสียดทานระหว่างโมเลกุลของไหล ถ้า $Wi \equiv \lambda \omega \gamma_0 \leq 1$ จะเป็นการเฉือนเป็นรอบที่



ความเค้นต่ำ (Small Amplitude Oscillatory Shear, SAOS) สมการความเค้นจะแสดงพฤติกรรมหยุ่นหนืดเชิงเส้นกับความเครียด (Linear Viscoelastic Behavior) แต่ถ้า $Wi \equiv \lambda \omega \dot{\gamma}_0 > 1$ จะเป็นการทดสอบเฉือนเป็นรอบที่ความเค้นสูง (Large Amplitude Oscillatory Shear, LAOS) [12] สมการความเค้นจะไม่เป็นเชิงเส้นกับความเครียด (Nonlinear Viscoelastic Behavior) [13, 14] ความเค้นจะเขียนอยู่ในรูปอนุกรมค่าตอบของฟูรีเยร์ (Fourier Series Solutions) ที่จะประกอบไปด้วยชุดค่าตอบหลาย ๆ ชุดรวมกัน [15, 16] และจากนิยามสมบัติรีโอโลยีในการไหลแบบเฉือน กำหนดให้สัมประสิทธิ์ผลต่างความเค้นตั้งฉากลำดับที่หนึ่ง (First Normal Stress Difference Coefficient) Ψ_1 คือ

$$\Psi_1(\dot{\gamma}) = -\frac{N_1}{\dot{\gamma}_0^2} = -\frac{\tau_{11} - \tau_{22}}{\dot{\gamma}_0^2} \quad (8)$$

และค่าสัมประสิทธิ์ผลต่างความเค้นตั้งฉากลำดับที่สอง (Second Normal Stress Difference Coefficient) Ψ_2

$$\Psi_2(\dot{\gamma}) = -\frac{N_2}{\dot{\gamma}_0^2} = -\frac{\tau_{22} - \tau_{33}}{\dot{\gamma}_0^2} \quad (8)$$

เมื่อ τ_{11} เป็นความเค้นแนวทแยงที่เกิดในทิศทางการไหลหลัก (ซึ่งในที่นี้คือ x_1) τ_{22} เป็นความเค้นแนวทแยงที่เกิดในทิศทางที่มีเกรเดียนต์ของความเร็ว ซึ่งในที่นี้คือ x_2 และ τ_{33} เป็นความเค้นแนวทแยงที่เกิดขึ้นในทิศทางที่ไม่อยู่บนระนาบของความเร็วและเกรเดียนต์ของความเร็ว (ซึ่งในที่นี้คือ x_3) และความหนืดปรากฏ คือ

$$\eta(\dot{\gamma}) = -\frac{\tau_{21}}{\dot{\gamma}_0} \quad (9)$$

โดย $\dot{\gamma}_0$ มีค่าได้ทั้งบวก (+) และลบ (-) ขึ้นอยู่กับทิศทางการไหลและการตั้งระบบแกน สำหรับการไหลแบบนิวโทเนียนความหนืดจะเป็นค่าคงที่ $\eta = \mu$ และ $\Psi_1 = \Psi_2 = 0$ แต่สำหรับของไหลพอลิเมอร์ $\eta = \eta(\dot{\gamma})$ และ $\Psi_1 = \Psi_1(\dot{\gamma})$ มีค่าเป็นบวก (+) และ $\Psi_2 = \Psi_2(\dot{\gamma})$ มีค่าเป็นลบ (-)

2.1 ความเครียดต่ำ

ที่ความเครียด $\dot{\gamma}_0$ คงที่ใด ๆ สมการที่ (6) แสดงให้เห็นว่าการทดสอบการไหลแบบเฉือนเป็นรอบที่มีความเครียดต่ำ (Small Amplitude Oscillatory Shear Flow, SAOS) สมการความเค้นยังสามารถตามอัตราเครียดทันแต่อาจจะมียะเฟสที่แตกต่างกัน (Phase Difference) ระหว่างความเค้นและความเครียด δ อยู่บ้าง ดังนั้นสมการความเค้นจะเป็นเชิงเส้นกับความเครียด (Linear Viscoelastic Behavior) และความเค้นที่ของเหลวส่งให้แผ่นประกบคู่ที่อยู่ด้านล่างจะมีค่าเท่ากับ [17]

$$-\tau_{21} = \tau_0 \sin(\omega t + \delta) \quad (10)$$

โดย δ เป็นระยะเฟสที่แตกต่างกัน (Phase Difference) ระหว่างความเค้นและความเครียด และ τ_0 เป็นขนาดของความเค้นตอบสนอง (Stress Response Amplitude) ซึ่งควรจะเป็นค่าคงที่และมีความสัมพันธ์กับขนาดอัตราเครียด $\dot{\gamma}_0$ ในสมการที่ (6) ด้วยการใช้เอกลักษณ์ทางตรีโกณมิติ สมการที่ (10) สามารถเขียนอยู่ในรูป

$$-\tau_{21} = (\tau_0 \cos \delta) \sin \omega t + (\tau_0 \sin \delta) \cos \omega t \quad (11)$$

จะเห็นว่าความเค้นที่เกิดจากการทดสอบเฉือนเป็นรอบในสมการที่ (11) สามารถเขียนอยู่ในรูปของ



บทความวิชาการ

$\cos \omega t$ ซึ่งอินเฟสกับอัตราเครียดแสดงในสมการที่ (4) จะบ่งถึงสมบัติของเหลวนิวโทเนียน (Newtonian Fluid) และ $\sin \omega t$ ซึ่งอินเฟสกับความเครียดแสดงในสมการที่ (5) จะบ่งถึงสมบัติของความยืดหยุ่น (Elastic Solid) ดังนั้นการทดสอบเฉือนเป็นรอบจะสามารถเขียนให้อยู่ในรูป

$$-\frac{\tau_{21}}{\gamma_0} = G'(\omega) \sin \omega t + G''(\omega) \cos \omega t \quad (12)$$

เมื่อ

$$G'(\omega) = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \cos \delta \quad (13)$$

$$G''(\omega) = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \sin \delta \quad (14)$$

โดย G' คือมอดูลัสกักเก็บ (Storage Modulus) และ G'' คือมอดูลัสสูญเสีย (Loss Modulus) จะเห็นได้ว่าการทดสอบเฉือนเป็นรอบ สามารถวัดได้ทั้งพฤติกรรมความยืดหยุ่นและพฤติกรรมของเหลวออกมาได้พร้อมกัน สมการที่ (13) และ (14) สามารถหาค่าระยะเฟสที่แตกต่างระหว่างความเค้นและความเครียดได้คือ

$$\tan \delta = \frac{G''}{G'} \quad (15)$$

จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (6) แทนลงในสมการที่ (11) ทำให้สามารถเขียนในอีกรูปแบบได้คือ

$$-\frac{\tau_{21}}{\dot{\gamma}_0} = \eta'' \sin \omega t + \eta' \cos \omega t \quad (16)$$

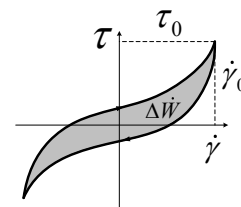
โดย

$$G'(\omega) = \omega \eta''(\omega) \quad (17)$$

$$G''(\omega) = \omega \eta'(\omega) \quad (18)$$

เนื่องจาก η' จะมีค่าเท่ากับความหนืดนิวโทเนียน μ เมื่อ $G' = 0$ ทำให้เราเรียก η' ว่าความหนืดพลวัต

(Dynamic Viscosity) ในขณะที่ η'' มิได้มีชื่อเรียกอย่างเป็นทางการเนื่องจากเมื่อ $G'' = 0$ วัสดุที่วัดจะมีสมบัติยืดหยุ่นสมบูรณ์ (Purely Elastic) นั่นคือ $G' = G$ สำหรับวัสดุชนิดยืดหยุ่น (Viscoelastic Materials) จะมีทั้ง $G'(\omega)$ และ $G''(\omega)$ [18] ในขณะที่ยืดหยุ่นเป็นรอบ จะเกิดในชุดค่าตอบคู่เท่านั้น (Even Harmonics) ทำให้ยังเป็นที่ยกเถียงกันว่าอาจจะไม่สามารถตรวจวัดค่าผลต่างความเค้นลำดับที่ 1 และ 2 ใน SAOS ได้ และยังไม่มีกรณีการนิยามตัวแปรผลต่างความเค้นลำดับที่ 1 และ 2 ใน SAOS อย่างเป็นทางการ [8] แต่อย่างไรก็ตามได้มีนักวิจัยบางท่าน [12, 19, 20] ได้ประมาณการผลต่างความเค้นลำดับที่ 1 และ 2 ใน SAOS ไว้แต่จะไม่กล่าวถึงในที่นี้



รูปที่ 5 แสดงวงรอบฮิสเทอรีซิสในการทดสอบเฉือนเป็นรอบเป็นกำลังงานที่สูญเสียต่อหน่วยพื้นที่ เนื่องจากวัสดุมีสมบัติหนืดยืดหยุ่น

ในขณะที่การพล็อตระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราเครียดเฉือนในการทดสอบเฉือนเป็นรอบจะเกิดวงรอบฮิสเทอรีซิส (Hysteresis Loop) ดังแสดงในรูปที่ ซึ่งเป็นกำลังงานที่สูญเสียต่อหน่วยพื้นที่ถ้าวัสดุมีสมบัติหนืดยืดหยุ่น (Viscoelastic Property) นั่นคือ

$$\Delta \dot{W} = \oint \tau d\dot{\gamma} \quad (19)$$



สมการที่ (19) แสดงให้เห็นว่าวัสดุที่ยืดหยุ่นสมบูรณ์เท่านั้นที่จะไม่เกิดวงรอบฮีสเทอรีซิส นั่นคือจะต้องใช้แรงเฉือนและปล่อยกลับที่เท่ากันที่อัตราเฉือนเดียวกัน การพล็อตระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราเฉือน หรือความเค้นเฉือนและความเฉือนเฉือนแสดงในรูปที่ นี้มีชื่อเรียกสั้น ๆ ว่า “แผนภาพลิสซาชูส์” (Lissajous Curves) หรือถ้าจะให้ถูกต้องเรียกว่า “แผนภาพลิสซาชูส์-โบว์ดิชส์” (Lissajous-Bowditch Curves)

2.2 ความเครียดสูง

ที่ความเครียด γ_0 คงที่ใด ๆ สมการที่ (6) แสดงให้เห็นว่าการทดสอบการไหลแบบเฉือนเป็นรอบที่มีความเครียดสูง (Large Amplitude Oscillatory Shear Flow, LAOS) สมการความเค้นจะไม่สามารถตามความเครียดทัน ดังนั้นสมการความเค้นจะไม่เป็นเชิงเส้นกับความเครียด (Nonlinear Viscoelastic Behavior) ซึ่งความเค้นจะเขียนอยู่ในรูปอนุกรมคำตอบของฟูรีเยร์ (Fourier Series Solutions) ที่จะประกอบไปด้วยชุดคำตอบ n ชุด (Higher Harmonics, n) รวมกันนั้นคือ [6]

$$-\tau_{21} = \sum_{\substack{n=1 \\ \text{odd}}}^{\infty} \tau_{0,n} \sin(\omega_n t + \delta_n) \quad (20)$$

เมื่อ $\omega_n = n\omega$, δ_n เป็นระยะเฟสที่แตกต่างกัน (Phase Difference) ระหว่างความเค้นและความเครียดในฮาร์โมนิกส์ที่ n และ $\tau_{0,n}$ เป็นขนาดของความเค้นตอบสนอง (Stress Response Amplitude) ในฮาร์โมนิกส์ที่ n ซึ่งควรจะเป็นค่าคงที่และมีความสัมพันธ์กับขนาดอัตราเฉือน $\dot{\gamma}_0$ ณ ฮาร์โมนิกส์ที่ n ใด ๆ จัดรูปใหม่ด้วยการใช้เอกลักษณ์

ทางตรีโกณมิติและหารตลอดด้วยขนาดความเครียด $\gamma_0 = \dot{\gamma}_0/\omega$ ในสมการที่ (6) ดังนั้น [21, 22]

$$-\frac{\tau_{21}(t, \dot{\gamma}_0)}{\gamma_0} = \sum_{\substack{n=1 \\ \text{odd}}}^{\infty} G'_n \sin \omega_n t + G''_n \cos \omega_n t \quad (21)$$

เมื่อ

$$G'_n(\omega, \gamma_0) = \frac{\tau_{0,n}}{\gamma_0} \cos \delta_n \quad (22)$$

$$G''_n(\omega, \gamma_0) = \frac{\tau_{0,n}}{\gamma_0} \sin \delta_n \quad (23)$$

หรือเขียนอยู่ในรูปของขนาดอัตราเฉือน $\dot{\gamma}_0$ คือ [12, 13]

$$-\frac{\tau_{21}(t, \dot{\gamma}_0)}{\dot{\gamma}_0} = \sum_{\substack{n=1 \\ \text{odd}}}^{\infty} \eta''_n \sin \omega_n t + \eta'_n \cos \omega_n t \quad (24)$$

และมีผลต่างความเค้นลำดับที่ 1 และ 2 คือ [14]

$$-\frac{N_1(t, \dot{\gamma}_0)}{\dot{\gamma}_0^2} = \sum_{\substack{n=1 \\ \text{even}}}^{\infty} \Psi'_{1,n} \sin \omega_n t + \Psi'_{1,n} \cos \omega_n t \quad (25)$$

$$-\frac{N_2(t, \dot{\gamma}_0)}{\dot{\gamma}_0^2} = \sum_{\substack{n=1 \\ \text{even}}}^{\infty} \Psi''_{2,n} \sin \omega_n t + \Psi''_{2,n} \cos \omega_n t \quad (26)$$

โดยค่าสัมประสิทธิ์ของฟูรีเยร์ (η'_n, η''_n) , (G'_n, G''_n) , $(\Psi'_{1,n}, \Psi''_{1,n})$ และ $(\Psi'_{2,n}, \Psi''_{2,n})$ เป็นจำนวนจริงและ (η'_n, η''_n) สัมพันธ์กับ (G'_n, G''_n) โดย

$$G'_n(\omega, \gamma_0) = \omega \eta''_n(\omega, \gamma_0) \quad (27)$$

$$G''_n(\omega, \gamma_0) = \omega \eta'_n(\omega, \gamma_0) \quad (28)$$

จะเห็นได้ว่าเมื่อ $n=1$ สมการใน LAOS จะลดรูปเป็น SAOS กล่าวคือความเค้นเฉือนในสมการที่ (21) และ (24) ของ LAOS จะลดรูปเป็นสมการที่ (12) และ (16) ใน SAOS ตามลำดับ ส่วนผลต่างความเค้นลำดับที่ 1 และ 2 จะหาได้ใน LAOS เท่านั้นเนื่องจากผลต่าง



ความเค้นลำดับที่ 1 และ 2 ในการไหลแบบเฉือนเป็นรอบจะเกิดในชุดคำตอบคู่เท่านั้น (Even Harmonics) ในทำนองเดียวกัน (G'_n, G''_n) ในสมการที่ (27) และ (28) ของ LAOS ก็จะมีผลรูปเป็นสมการที่ (17) และ (18) ของ SAOS ตามลำดับ

3. ฟังก์ชันเชิงซ้อนในการเฉือนเป็นรอบ

เนื่องจากการทดสอบแบบเฉือนเป็นรอบมักจะเขียนอยู่ในรูปอนุกรมคำตอบของฟูรีเยร์ (Fourier Series Solutions) ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการคำนวณเราสามารถเขียนอัตราเคียดอยู่ในรูปของฟังก์ชันเชิงซ้อนโดย

$$\dot{\gamma}_{21}^*(t) = \dot{\gamma}_0 \exp(i\omega t) \quad (29)$$

และมีความเคียดคือ

$$\gamma_{21}^*(0, t) = \int_{-\infty}^t \dot{\gamma}_{21}^* dt' \quad (30)$$

เมื่อแทนค่าอัตราเคียดเชิงซ้อนจากสมการที่ (29) ลงในสมการที่ (30) จะได้

$$\gamma_{21}^*(0, t) = -i\dot{\gamma}_0 \exp(i\omega t) \quad (31)$$

เมื่อความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของอัตราเคียด $\dot{\gamma}_0$ และขนาดความเคียด γ_0 เป็นไปตามสมการที่ (6) จากสูตรของออยเลอร์ (Euler Formula) [23] อัตราเคียดในสมการที่ (4) และความเคียดในสมการที่ (5) มีความสัมพันธ์กับอัตราเคียดในสมการที่ (29) และความเคียดในสมการที่ (30) ที่เขียนอยู่ในรูปฟังก์ชันเชิงซ้อนดังนี้คือ [24]

$$\dot{\gamma}_{21}(t) = \Re\{\dot{\gamma}_0 \exp(i\omega t)\} = \dot{\gamma}_0 \cos \omega t \quad (32)$$

และ

$$\gamma_{21}(0, t) = \Re\{-i\dot{\gamma}_0 \exp(i\omega t)\} = \dot{\gamma}_0 \sin \omega t \quad (33)$$

3.1 ความเคียดต่ำ

ความเค้นใน SAOS ที่เขียนอยู่ในรูปฟังก์ชันเชิงซ้อนหาได้จากสมการที่ (10) โดยสัมพันธ์กับความเค้นที่เขียนในรูปของฟังก์ชันเชิงซ้อนคือ

$$-\tau_{21}^* = -i\tau_0 \exp(i(\omega t + \delta)) \quad (34)$$

โดยเมื่อ

$$-\tau_{21} = \Re\{-\tau_{21}^*\} \quad (35)$$

แทนค่าสมการที่ (34) ลงในสมการที่ (35) จะได้

$$-\tau_{21} = \tau_0 \sin(\omega t + \delta) \quad (36)$$

ดังนั้นมอดูลัสเชิงซ้อน (Complex Modulus, G^*) สำหรับ SAOS หาได้จาก

$$G^*(\omega) \equiv -\frac{\tau_{21}^*}{\dot{\gamma}_{21}^*} = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}_0} (\cos \delta + i \sin \delta) \quad (37)$$

และ

$$G^*(\omega) = G'(\omega) + iG''(\omega) \quad (38)$$

และขนาดของมอดูลัสเชิงซ้อน (Magnitude of Complex Modulus, $|G^*|$) คือ [23]

$$G_d \equiv |G^*| = \sqrt{G'^2 + G''^2} = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}_0} \quad (39)$$

โดย $G'(\omega)$ และ $G''(\omega)$ นิยามในสมการที่ (13) และ (14) ในทำนองเดียวกันความหนืดเชิงซ้อน (Complex Viscosity, η^*) สามารถหาได้จาก

$$\eta^*(\omega) \equiv -\frac{\tau_{21}^*}{i\omega\dot{\gamma}_{21}^*} = \frac{\tau_0}{i\omega\dot{\gamma}_0} (\cos \delta + i \sin \delta) \quad (40)$$

และ

$$\eta^*(\omega) = \eta'(\omega) - i\eta''(\omega) \quad (41)$$



และมีค่าความหนืดเชิงซ้อนสัมบูรณ์ (Magnitude of Complex Viscosity, $|\eta^*|$)

$$|\eta^*| = \sqrt{\eta'^2 + \eta''^2} \quad (42)$$

เมื่อ $\eta''(\omega)$ และ $\eta'(\omega)$ นิยามในสมการที่ (17) และ (18) ตามลำดับ [25] ฟังก์ชันเชิงซ้อนที่สำคัญอีกตัวคือ คอมเพลกซ์เชิงซ้อน (Complex Compliance, J^*) ซึ่งนิยามว่าเป็นส่วนกลับของ G^* นั่นคือ

$$J^*(\omega) \equiv -\frac{\gamma_{21}^*}{\tau_{21}^*} = \frac{\gamma_0}{\tau_0} (\cos \delta - i \sin \delta) \quad (43)$$

และ

$$J^*(\omega) = J'(\omega) - iJ''(\omega) \quad (44)$$

และมีขนาดของคอมเพลกซ์เชิงซ้อนสัมบูรณ์ (Magnitude of Complex Compliance, $|J^*|$) คือ

$$|J^*| = \sqrt{J'^2 + J''^2} \quad (45)$$

ฟังก์ชันเชิงซ้อนจะใช้มากในการทดสอบแบบพลวัตสำหรับหาสมบัติหนืดยืดหยุ่น [6] คอมเพลกซ์เชิงซ้อน (Complex Compliance, J^*) จะเกิดจากการควบคุมความเค้นและวัดอัตราเครียดที่คำนวณด้วยฟังก์ชันเชิงซ้อนซึ่งสามารถดูรายละเอียดได้จาก [26]

3.2 ความเครียดสูง

ฟังก์ชันเชิงซ้อนของการทดสอบแบบ LAOS ก็ สามารถหาได้จากวิธีที่คล้าย ๆ กันแต่จะปรากฏชุดฮาร์โมนิกส์ (Higher Harmonics, n) บนสมบัตินิวโพลีด้วย โดยถ้านขนาดของความเครียดสูง (Large Amplitude Oscillatory Shear, LAOS) นั่นคือมีขนาดความเครียด γ_0 สูง และ/หรือมีความถี่ ω สูง สมการความเค้นจะไม่สามารถตามความเครียดทัน ดังนั้น

สมการความเค้นจะไม่เป็นเชิงเส้นกับอัตราเครียด (Nonlinear Viscoelastic Behavior) ซึ่งความเค้นจะเขียนอยู่ในรูปอนุกรมคำตอบของฟูรีเยร์ (Fourier Series Solutions) ที่จะประกอบไปด้วยชุดคำตอบ n ชุด (Higher Harmonics) รวมกันนั่นคือ

$$-\tau_{21}^* = -\sum_{\substack{n=1 \\ \text{odd}}}^{\infty} i\tau_{0,n} \exp(i(\omega_n t + \delta_n)) \quad (46)$$

เมื่อ

$$-\tau_{21} = \mathcal{O}\{-\tau_{21}^*\} \quad (47)$$

แทนค่าสมการที่ (46) ลงในสมการที่ (47) จะได้

$$-\tau_{21} = \sum_{\substack{n=1 \\ \text{odd}}}^{\infty} \tau_{0,n} \sin(\omega_n t + \delta_n) \quad (48)$$

ซึ่งมอดูลัสเชิงซ้อน (Complex Modulus, G_n^*) สำหรับ LAOS นิยามโดย

$$G_n^*(\omega, \gamma_0) \equiv -\frac{\tau_{21}^*}{\gamma_{21}^*} \quad (49)$$

แทนค่าสมการที่ (31) และสมการที่ (46) ลงในสมการที่ (49) จะได้

$$G_n^*(\omega, \gamma_0) = \frac{\tau_{0,n}}{\gamma_0} (\cos \delta_n + i \sin \delta_n) \quad (50)$$

หรือสามารถเขียนในรูปจำนวนเชิงซ้อนในอีกรูปคือ

$$G_n^*(\omega, \gamma_0) = G_n'(\omega, \gamma_0) + iG_n''(\omega, \gamma_0) \quad (51)$$

เมื่อ $G_n'(\omega, \gamma_0)$ และ $G_n''(\omega, \gamma_0)$ นิยามในสมการที่ (22) และ (23) และมีขนาดของมอดูลัสเชิงซ้อนสัมบูรณ์ (Magnitude of Complex Modulus, $|G_n^*|$) คือ

$$|G_n^*| = \sqrt{G_n'^2 + G_n''^2} \quad (52)$$



ในการทำงานเดียวกันความหนืดเชิงซ้อน (Complex Viscosity, η_n^*) สามารถหาได้จาก

$$\eta_n^*(\omega, \gamma_0) \equiv -\frac{\tau_{21}^*}{\dot{\gamma}_{21}^*} \quad (53)$$

แทนค่าสมการที่ (29) และสมการที่ (46) ลงในสมการที่ (53) จะได้

$$\eta_n^*(\omega, \gamma_0) = \frac{\tau_{0,n}}{i\omega\gamma_0} (\cos \delta_n + i \sin \delta_n) \quad (54)$$

และสมการที่ (54) สามารถเขียนในรูปจำนวนเชิงซ้อนในอีกรูปคือ

$$\eta_n^*(\omega, \gamma_0) = \eta_n'(\omega, \gamma_0) - i\eta_n''(\omega, \gamma_0) \quad (55)$$

และมีค่าความหนืดเชิงซ้อนสัมบูรณ์ (Magnitude of Complex Viscosity, $|\eta_n^*|$)

$$|\eta_n^*| = \sqrt{\eta_n'^2 + \eta_n''^2} \quad (56)$$

เมื่อ $\eta_n'(\omega, \gamma_0)$ และ $\eta_n''(\omega, \gamma_0)$ นิยามในสมการที่ (27) และ (28) ตามลำดับ ฟังก์ชันเชิงซ้อนที่สำคัญอีกตัวคือคอมพลีแชนซ์เชิงซ้อน (Complex Compliance, J_n^*) ซึ่งนิยามว่าเป็นส่วนกลับของ G_n^* นั่นคือ

$$J_n^*(\omega, \gamma_0) \equiv -\frac{\gamma_{21}^*}{\tau_{21}^*} \quad (57)$$

แทนค่าสมการที่ (31) และสมการที่ (46) ลงในสมการที่ (57) จะได้

$$J_n^*(\omega, \gamma_0) = \frac{\gamma_0}{\tau_{0,n}} (\cos \delta_n - i \sin \delta_n) \quad (58)$$

หรือสามารถเขียนในรูปจำนวนเชิงซ้อนในอีกรูปคือ

$$J_n^*(\omega, \gamma_0) = J_n'(\omega, \gamma_0) - iJ_n''(\omega, \gamma_0) \quad (59)$$

และมีขนาดของคอมพลีแชนซ์เชิงซ้อนสัมบูรณ์ (Magnitude of Complex Compliance, $|J_n^*|$) คือ

$$|J_n^*| = \sqrt{J_n'^2 + J_n''^2} \quad (60)$$

เนื่องจากการศึกษาและวิจัยทางด้าน LAOS ยังคงเป็นเรื่องใหม่ในวงการนักการศึกษาโพลีเมอร์ในปัจจุบัน ดังนั้นการใช้งานตัวแปรต่าง ๆ ใน LAOS จึงยังไม่มีประกาศออกมาอย่างเป็นทางการเหมือน SAOS [8] และจะเห็นการนิยามตัวแปรที่แตกต่างกันไปบ้างในแต่ละที่ [6, 12-14]

4. การจำแนกพฤติกรรมของวัสดุ

เนื่องจากพฤติกรรมการไหลจะขึ้นอยู่กับระยะเวลาสังเกตการณ์ ดังนั้นการวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลจะทำได้ง่าย ๆ โดยพิจารณาการไหลที่ถูกเฉือนเป็นรอบ ในการทดสอบเฉือนเป็นรอบจะมีอินพุตของอัตราเฉือนเป็นรอบตามสมการที่ (4) และมีความเครียดเฉือนเป็นรอบที่สอดคล้องกัน (Orthogonal Strain) ตามสมการที่ (5) และมีความเค้นตอบสนองตามสมการที่ (21) ที่เขียนอยู่ในรูปของ (G_n', G_n'') หรือมีความเค้นตอบสนองตามสมการที่ (24) ที่เขียนอยู่ในรูปของ (η_n', η_n'') โดยความเค้นตอบสนองสมการที่ (21) และ (24) สามารถลดรูปเป็นสมการที่ (12) และ (16) ได้ที่ $n=1$

ดังที่กล่าวไปแล้วว่าพฤติกรรมของวัสดุจะขึ้นอยู่กับช่วงระยะเวลาสังเกตการณ์ ซึ่งในที่นี้สามารถกำหนดได้โดย “เลขไร้มิติเดบอร์ลา” (Deborah Number, De) [11]

$$De = \frac{\lambda}{T} = \lambda\omega \quad (61)$$

เมื่อ λ คือเวลาผ่อนคลายของวัสดุ T เป็นคาบเวลาอ้างอิง (Characteristic Time) ที่แรงภายนอกกระทำกับวัตถุ มีหน่วยเป็นวินาที เช่น เวลาที่ใช้ในการผลิต และ $\omega = 1/T$ เป็นความถี่กวาด (Frequency Sweep) ที่มีหน่วยเป็นรอบต่อวินาที (Hz) โดยทั่วไปแล้ววัสดุ



คล้ายของเหลว (Liquid-like Material) จะมีเวลาผ่อนคลายต่ำ ($\lambda \rightarrow 0$) และวัสดุคล้ายของแข็ง (Solid-like Material) จะมีเวลาผ่อนคลายสูง ($\lambda \rightarrow \infty$) ที่อัตราเครียดและคาบเวลาอ้างอิงเดียวกัน โดยคาบเวลาอ้างอิง T จะเป็นระยะเวลาที่ใช้ในการทำให้วัสดุเกิดการเสียรูป กล่าวคือที่อัตราเครียดเท่า ๆ กัน วัสดุคล้ายของเหลวจะมีคาบเวลาอ้างอิงสูง (หรือมีความถี่ต่ำ) ในขณะที่วัสดุคล้ายของแข็งที่มีความยืดหยุ่นสูง (Elastic Materials) จะมีคาบเวลาอ้างอิงต่ำ (หรือมีความถี่สูง) ดังนั้นการประยุกต์ใช้งานของทฤษฎีในบทนี้สามารถนำไปใช้ได้ทั้งวัสดุที่เป็นของเหลวหนืด (Viscous Fluids) ที่มี $De \rightarrow 0$ และของแข็งยืดหยุ่น (Elastic Solids) ที่มี $De \rightarrow \infty$ ดังแสดงในรูปแบบที่ 1

$Wi = \lambda \dot{\gamma}_0$	Viscometric flow	Non-linear viscoelastic region	Non-linear elasticity
	Newtonian behavior	Linear viscoelastic region	Linear elasticity
			Yield point
		$De = \lambda \omega$	

รูปที่ 1 ภาพประยุกต์ไดอะแกรมของพิพคิน แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขไร้มิติไวส์เซนเบิร์กและเลขไร้มิติเดเบอร์ลา

พิพคิน (Pipkin, [27]) ได้เสนอแนวคิดของความสัมพันธ์ระหว่างเลขไร้มิติไวส์เซนเบิร์กและเลขไร้มิติเดเบอร์ลาไว้ในรูปที่ 1 เมื่อเลขไร้มิติไวส์เซนเบิร์กถูกนิยามไว้ในสมการที่ (7) โดยในการเฉือนเป็นรอบอัตราเครียดเฉือนคงตัว $\dot{\gamma}_0$ มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับความเครียดเฉือนดังสมการที่ (6) ดังนั้นบนพื้นฐานที่

เวลาผ่อนคลาย λ และความถี่กวาด ω มีค่าคงที่ แกนแนวตั้งของไดอะแกรมพิพคิน (Pipkin Diagram) ที่แสดงด้วยเลขไร้มิติไวส์เซนเบิร์กเปรียบได้ว่าเป็นขนาดความเครียด γ_0 ของวัสดุในการทดสอบเฉือนเป็นรอบนั่นเอง

ถ้าพิจารณาบนพื้นฐานที่เวลาผ่อนคลาย λ และความถี่กวาด ω มีค่าคงที่ เมื่อขนาดความเครียด γ_0 ต่ำ ๆ วัสดุที่ถูกเฉือนเป็นรอบจะเกิดการเสียรูปน้อยมาก ซึ่งเป็นบริเวณที่มี $Wi \rightarrow 0$ และถ้า $De \rightarrow \infty$ ซึ่งอยู่ทางด้านขวาล่างของไดอะแกรม พฤติกรรมการไหลของวัสดุจะเป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elasticity) ซึ่งจะเห็นได้ว่าเวลาตอบสนองของวัสดุที่ความถี่สูง $\omega \rightarrow \infty$ จะมีคาบเวลา T ต่ำ นั่นคือเวลาในการสังเกตการณ์ไม่เพียงพอที่จะเห็นการคลายความเค้นของวัสดุ กล่าวคือช่วงเวลาสั้น ๆ ที่ใช้ในการทำให้วัสดุเสียรูป มีค่าน้อยกว่าช่วงเวลาคลายความเค้น λ ของวัสดุ ซึ่งเป็นสมบัติของวัสดุยืดหยุ่นเชิงเส้น เช่น เหล็กและโลหะทั่ว ๆ หรือแม้แต่การตอบสนองของวัสดุผสมต่อการกระแทก [28] ที่ได้รับแรงไม่เกินค่าความเค้นคราก แต่ถ้าวัสดุยืดหยุ่นเหล่านี้ได้รับแรงจนมีการเสียรูปสูงขึ้นจนเกินค่าความเค้นคราก วัสดุจะเกิดการเสียรูปอย่างถาวร และมีพฤติกรรมการเสียรูปไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Elasticity) หรือบางครั้งเรียกว่า “การเสียรูปถาวร” (Plastic Deformation)

ย้อนกลับมาพิจารณาบริเวณที่มี $Wi \rightarrow 0$ และ $De \rightarrow 0$ ซึ่งอยู่บริเวณมุมซ้ายล่างของไดอะแกรม พฤติกรรมการไหลของวัสดุจะเป็นแบบนิวโทเนียนตลอดช่วงแนวตั้งของไดอะแกรม ในบริเวณนี้จะมีค่าความถี่กวาดต่ำ $\omega \rightarrow 0$ ซึ่งจะตรงกับการ

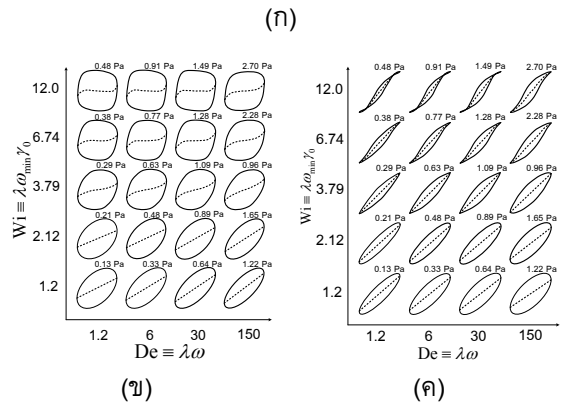
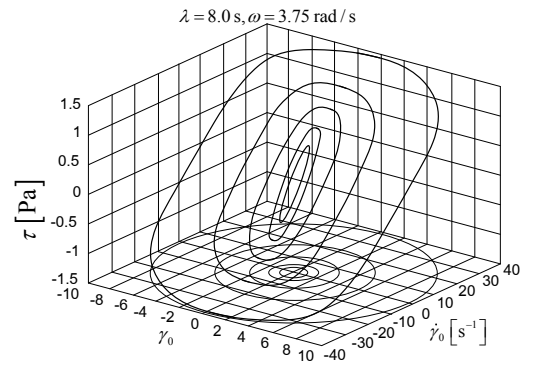


ทดสอบเงื่อนไขคงตัว ดังนั้นพฤติกรรมการไหลของวัสดุที่มีความเครียดสูง ๆ $\gamma_0 \rightarrow \infty$ กล่าวคือ $Wi \rightarrow \infty$ และ $De \rightarrow 0$ จะเป็นการไหลแบบวิสโคเมตริก (Viscometric Flow) ที่ค่าความหนืดจะไม่เป็นเชิงเส้นกับอัตราเครียดอีกต่อไป ดังนั้นพฤติกรรมการไหลของวัสดุในช่วงนี้จึงเหมาะสมกับการแสดงพฤติกรรมคล้ายนิวโทเนียน ตัวอย่างการไหลของของไหลที่มีพฤติกรรมวิสโคเมตริก เช่น พอลิเมอร์หลอมเหลวที่ไหลอยู่ในท่อหรือช่องแคบในกระบวนการผลิต และพฤติกรรมของพอลิเมอร์หลอมเหลวหรือสารละลายพอลิเมอร์ ในการทดสอบเงื่อนไขคงตัวของรีโอมิเตอร์แบบแคปิลลารี หรือในรีโอมิเตอร์แบบกรวยและแผ่น เป็นต้น

บริเวณที่มี $Wi \rightarrow 0$ และ $0 \leq De \leq \infty$ ซึ่งอยู่ส่วนล่างของไดอะแกรมและมีพฤติกรรมการไหลอยู่ระหว่างนิวโทเนียนและยืดหยุ่นเชิงเส้น วัสดุจะมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นหนืดเชิงเส้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ความเครียดต่ำ ๆ $\gamma_0 \rightarrow 0$ ความหนืดที่อัตราเฉือนเป็นศูนย์สามารถหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟของค่ามอดูลัสยืดหยุ่นหนืดเชิงเส้น $G(t)$ ในขณะที่บริเวณด้านบนของไดอะแกรมในบริเวณ $Wi \rightarrow \infty$ และ $0 \leq De \leq \infty$ จะเป็นช่วงที่วัสดุมีพฤติกรรมยืดหยุ่นหนืดไม่เป็นเชิงเส้น

ต่อมาอีโวลด์และทีมงาน (Ewoldt, et al. [29, 30]) ได้นำเสนอแนวทางการบ่งชี้พฤติกรรมของวัสดุบนไดอะแกรมของพิพคินผ่านแผนภาพลิสซาจูส์ (Lissajous Curves) ที่ได้จากการทดสอบวัสดุแบบเฉือนเป็นรอบดังแสดงในรูปที่ 2 พิกัดของอีโวลด์ (Ewoldt grid) บนไดอะแกรมของพิพคินผ่านแผนภาพลิสซาจูส์ ของกาวแซนเทนละลายในน้ำ 0.2% (0.2

wt.% Xanthan Gum Solution) จัดเรียงบนไดอะแกรมของพิพคินบนโดเมนของ (De, Wi) (ก) รูป 3 มิติของแผนภาพลิสซาจูส์ (ข) แผนภาพลิสซาจูส์บนโดเมน (γ_0, τ) และ (ค) แผนภาพลิสซาจูส์บนโดเมน $(\dot{\gamma}_0, \tau)$ จัดเรียงบนไดอะแกรมของพิพคินในโดเมน (De, Wi) โดย $\omega_{min} = 0.15 \text{ rad/s}$ และค่าของ τ_{max} แสดงไว้บนแต่ละลูปของแผนภาพลิสซาจูส์จะสังเกตเห็นได้ว่าโดเมนของพิกัดอีโวลด์จะเป็นเพียงหน้าต่างเล็ก ๆ บนไดอะแกรมของพิพคินในช่วงที่สนใจ



รูปที่ 2 พิกัดของอีโวลด์บนไดอะแกรมของพิพคินผ่านแผนภาพลิสซาจูส์ของกาวแซนเทนละลายในน้ำ 0.2%



จากพิกัดของอีโวลต์บนไดอะแกรมของฟิสิกินผ่านแผนภาพลิสซาชูส์ อีโวลต์แนะนำให้ปรับสมการอินพุตของอัตราเงื่อนไขเป็นรอบในสมการที่ (4) และความเครียดเงื่อนไขในสมการ (5) ดังนี้

$$y(t) \equiv \frac{\dot{\gamma}(t)}{\dot{\gamma}_0} = \cos \omega t \quad (62)$$

$$x(t) \equiv \frac{\gamma(t)}{\gamma_0} = \sin \omega t \quad (63)$$

และสามารถจัดรูปสมการตอบสนองของการเงื่อนไขเป็นรอบในสมการที่ (21) และสมการที่ (24) เป็น

$$-\frac{\tau_{21}}{\tau_{\max}} = \frac{\dot{\gamma}_0}{\tau_{\max}} \sum_{\substack{n=1 \\ \text{odd}}}^{\infty} G'_n \sin \omega_n t + G''_n \cos \omega_n t \quad (64)$$

และ

$$-\frac{\tau_{21}}{\tau_{\max}} = \frac{\dot{\gamma}_0}{\tau_{\max}} \sum_{\substack{n=1 \\ \text{odd}}}^{\infty} \eta'_n \sin \omega_n t + \eta''_n \cos \omega_n t \quad (65)$$

และนิยาม

$$-\frac{\tau'}{\tau_{\max}} \equiv \frac{\dot{\gamma}_0}{\tau_{\max}} \sum_{\substack{n=1 \\ \text{odd}}}^{\infty} G'_n(\omega, \gamma_0) \sin \omega_n t \quad (66)$$

และ

$$-\frac{\tau''}{\tau_{\max}} = \frac{\dot{\gamma}_0}{\tau_{\max}} \sum_{\substack{n=1 \\ \text{odd}}}^{\infty} G''_n(\omega, \gamma_0) \cos \omega_n t \quad (67)$$

เมื่อ τ_{\max} คือ ค่าความเค้นตอบสนองสูงสุด ซึ่งในที่นี้ใช้เป็นค่าอ้างอิงดังแสดงในรูปที่ 3 ต่อมาอีโวลต์เสนอแนวคิดว่าจะแจกแจงสมการตอบสนองของการเงื่อนไขเป็นรอบอยู่ในรูปของ (G'_n, G''_n) อย่างในสมการที่ (64) หรือเขียนอยู่ในรูปของ (η'_n, η''_n) อย่างในสมการที่ (65) ให้เขียนอยู่ในรูป

$$-\frac{\tau'(x)}{\tau_{\max}} \equiv \frac{\dot{\gamma}_0}{\tau_{\max}} \sum_{n \text{ odd}} e_n(\omega, \gamma_0) T_n(x) \quad (68)$$

$$-\frac{\tau''(y)}{\tau_{\max}} \equiv \frac{\dot{\gamma}_0}{\tau_{\max}} \sum_{n \text{ odd}} v_n(\omega, \gamma_0) T_n(y) \quad (69)$$

เมื่อ $e_n(\omega, \gamma_0)$ คือ สัมประสิทธิ์เชบีเชฟยืดหยุ่น (Elastic Chebyshev Coefficients) $v_n(\omega, \gamma_0)$ คือ สัมประสิทธิ์เชบีเชฟข้นหนืด (Viscous Chebyshev Coefficients) และ $T_n(x)$ คือ พอลิโนเมียลชนิดที่ 1 ของเชบีเชฟลำดับที่ n (n -th-order Chebyshev Polynomial of The First Kind) นิยามโดย

$$T_{n+1}(x) = 2xT_n(x) - T_{n-1}(x) \quad (70)$$

และมีความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกัน (Orthogonal Relation) คือ [31, 32]

$$T_n(\cos \theta) = \cos(n\theta) \quad (71)$$

และความจริงที่ว่า $\sin \theta = \cos(\pi/2 - \theta)$ ทำให้สมการที่ (71) สามารถเขียนอยู่ในรูปของ $\sin \theta$ ได้คือ

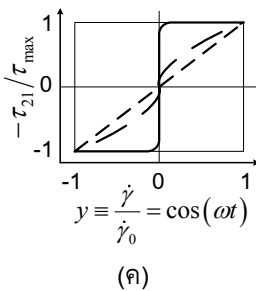
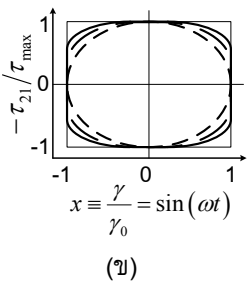
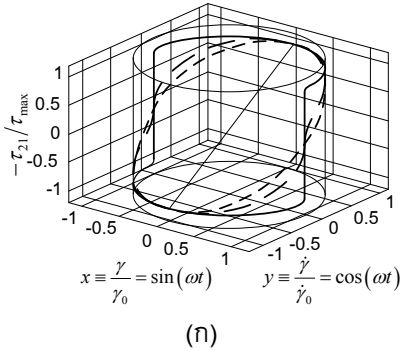
$$T_n(\sin \theta) = \begin{cases} \sin(n\theta)(-1)^{(n-1)/2} & n : \text{odd} \\ \cos(n\theta)(-1)^{n/2} & n : \text{even} \end{cases} \quad (72)$$

รูปที่ 3 แสดงตัวอย่างแผนภาพลิสซาชูส์ที่ถูกปรับโดเมนตามสมการที่ (62) - (65) แล้ว

จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (71) - (72) ทำให้สรุปความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์เชบีเชฟและสัมประสิทธิ์ฟูรีเยร์ได้คือ

$$e_n = G'_n(-1)^{(n-1)/2} \quad n : \text{odd} \quad (73)$$

$$v_n = \frac{G''_n}{\omega} = \eta'_n \quad n : \text{odd} \quad (74)$$



รูปที่ 3 ตัวอย่างแผนภาพลิสซาจ็ูส์ที่ถูกปรับโดเมนแล้ว (ก) รูป 3 มิติ (ข) บนโดเมน $(x, -\tau_{21}/\tau_{max})$ (ค) บนโดเมน $(y, -\tau_{21}/\tau_{max})$

เพื่อที่จะบ่งชี้พฤติกรรมของวัสดุ อีโวลด์นิยามมอดูลัสความเครียดต่ำสุด (Minimum-strain Modulus) G'_M และมอดูลัสความเครียดสูงสุด (Large-strain Modulus) G'_L

$$G'_M \equiv \left. \frac{d\tau}{d\gamma} \right|_{\gamma=0} = \sum_{n \text{ odd}} nG'_n = e_1 - 3e_3 + \dots \quad (75)$$

$$G'_L \equiv \left. \frac{\tau}{\gamma} \right|_{\gamma=\pm\gamma_0} = \sum_{n \text{ odd}} G'_n (-1)^{(n-1)/2} = e_1 + e_3 + \dots \quad (76)$$

เมื่อมอดูลัสความเครียดต่ำสุด G'_M เป็นความชันของกราฟในแผนภาพลิสซาจ็ูส์ ที่ตำแหน่ง $\gamma_0 = 0$ และมอดูลัสความเครียดสูงสุด G'_L เป็นเส้นตรงที่ลากจากจุดกำเนิดไปยังจุดที่ความเครียดสูงสุด เมื่อ

$G'_M = G'_L = G'_1 = G'(\omega)$ ใน SAOS และ G'_1 คือ มอดูลัสความเครียดที่ $n=1$ ใน LAOS ซึ่งอยู่ในโดเมนของวัสดุวิสโคอีลาสติกเชิงเส้น ในทำนองเดียวกัน ความชันหนึ่งพลวัตที่อัตราเครียดต่ำสุด (Minimum-rate dynamic viscosity) η'_M และความชันหนึ่งพลวัตที่อัตราเครียดสูงสุด (Large-rate dynamic viscosity) η'_L นิยามโดย

$$\eta'_M \equiv \left. \frac{d\tau}{d\dot{\gamma}} \right|_{\dot{\gamma}=0} = \sum_{n \text{ odd}} \frac{n}{\omega} G'_n (-1)^{(n-1)/2} = \nu_1 - 3\nu_3 + \dots \quad (77)$$

$$\eta'_L \equiv \left. \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \right|_{\dot{\gamma}=\pm\dot{\gamma}_0} = \sum_{n \text{ odd}} \frac{G''_n}{\omega} = \nu_1 + \nu_3 + \dots \quad (78)$$

เมื่อ $\eta'_M = \eta'_L = \eta'_1 = \eta'(\omega)$ ใน SAOS ซึ่งอยู่ในโดเมนของวัสดุวิสโคอีลาสติกเชิงเส้น และ η'_1 คือความชันหนึ่งพลวัตที่ $n=1$ ใน LAOS และนิยามดัชนีบ่งชี้ความไม่เป็นเชิงเส้น (Index of Nonlinearity) แบบอัตราความเครียดเข้มข้น (Strain-stiffening Ratio) คือ

$$S \equiv \frac{G'_L - G'_M}{G'_L} = \frac{4e_3 + \dots}{e_1 + e_3 + \dots} \quad (79)$$

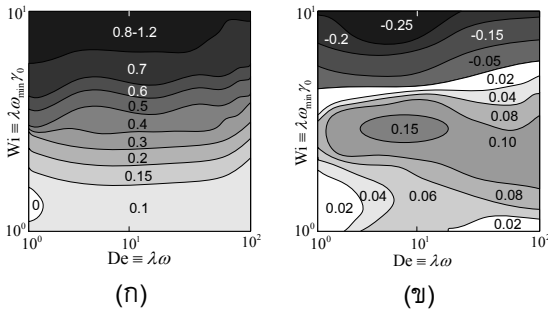
เมื่อ $S=0$ แสดงว่าวัสดุมีการตอบสนองแบบอีลาสติกเชิงเส้น (Linear Elastic Response) $S > 0$ บ่งชี้ว่าวัสดุมีความเค้นเพิ่มขึ้นตามความเครียด (Strain Stiffening) และ $S < 0$ บ่งชี้ว่าวัสดุมีความเค้นลดลงเมื่อความเครียดเพิ่มขึ้น (Strain Softening) และนิยามดัชนีบ่งชี้ความไม่เป็นเชิงเส้นแบบอัตราความเค้นเข้มข้น (Shear-thickening Ratio) คือ

$$T \equiv \frac{\eta'_L - \eta'_M}{\eta'_L} = \frac{4\nu_3 + \dots}{\nu_1 + \nu_3 + \dots} \quad (80)$$



บทความวิชาการ

เมื่อ $T = 0$ แสดงว่าวัสดุมีการตอบสนองแบบความหนืดเชิงเส้น (Linear Viscous Response) $T > 0$ บ่งชี้ว่าวัสดุมีความเค้นเพิ่มขึ้นตามอัตราเครียด (Shear thickening) และ $T < 0$ บ่งชี้ว่าวัสดุมีความเค้นลดลงเมื่ออัตราเครียดเพิ่มขึ้น (Shear Thinning) ดังรูปที่ 4 แสดงเส้นเค้าโครง (Contour) ของดัชนีบ่งชี้ความไม่เป็นเชิงเส้นบนไดอะแกรมของพิพคินในโดเมน (De, Wi) ของกาวแซนเทนละลายในน้ำ 0.2% ที่แสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 4 เส้นเค้าโครงดัชนีบ่งชี้ความไม่เป็นเชิงเส้นบนไดอะแกรมของพิพคินในโดเมน (De, Wi) (ก) อัตราความเครียดเข้มข้น S และ (ข) อัตราความเค้นเข้มข้น T ของกาวแซนเทนละลายในน้ำ 0.2%

รูปที่ 4 (ก) แสดงให้เห็นว่ากาวแซนเทนละลายในน้ำ 0.2% มีพฤติกรรมตอบสนองแบบอีลาสติกเชิงเส้น (Linear Elastic Response) ที่ $De \ll 1$ และ $Wi \ll 1$ (มุมล่างด้านซ้ายของแผนภาพที่ $S \approx 0$) และแสดงพฤติกรรมที่ความเค้นไม่เป็นเชิงเส้นกับความเครียดในส่วนที่เหลือของแผนภาพ กล่าวคือพฤติกรรมที่เหลือทั้งหมดวัสดุจะมีความเค้นเพิ่มขึ้นตามความเครียด (Strain Stiffening) โดยไม่มีพฤติกรรมความเค้นลดลงเมื่อความเครียดเพิ่มขึ้นเลย (No

Strain Softening) ในขณะที่รูปที่ 4 (ข) แสดงให้เห็นว่ากาวแซนเทนละลายในน้ำ 0.2% มีพฤติกรรมความเค้นลดลงเมื่ออัตราเครียดเพิ่มขึ้น (Shear Thinning) ในช่วงบนของแผนภาพ ในขณะที่ $Wi \approx 7-8$ วัสดุจะมีดัชนีบ่งชี้ความไม่เป็นเชิงเส้นแบบอัตราความเค้นเข้มข้น $T \approx 0$ ซึ่งจะแสดงพฤติกรรมการตอบสนองแบบความหนืดเชิงเส้น (Linear Viscous Response) และแสดงพฤติกรรมความเค้นเพิ่มขึ้นตามอัตราเครียด (Shear thickening) ในช่วงที่ $Wi < 7$ ตลอดช่วงของ De ที่ใช้ในการทดสอบ

ถึงแม้ว่าช่วงทดสอบของกาวแซนเทนละลายในน้ำ 0.2% ในตัวอย่างนี้จะมีโดเมน (De, Wi) อยู่แค่ในช่วง $1 \leq De \leq 10$ และ $1 \leq Wi \leq 10$ ซึ่งเป็นช่วงที่ไม่กว้างมากนัก อาจจะเนื่องมาจากข้อจำกัดของเครื่องมือวัด หรืออาจจะในช่วงที่ใช้งานกาวแซนเทนละลายในน้ำ 0.2% แต่อย่างไรก็ตามวิธีการจำแนกพฤติกรรมการไหลของวัสดุด้วยแผนภาพของพิพคินและพิกัดของอีโวลด์ ที่ได้จากการทดสอบเฉือนเป็นรอบ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการบ่งชี้พฤติกรรมของวัสดุอื่น ๆ ได้ด้วย

นอกจากนี้แล้ววิธีการจำแนกพฤติกรรมการไหลของวัสดุด้วยแผนภาพของพิพคิน และพิกัดของอีโวลด์ ที่ได้จากการทดสอบเฉือนยังอาจจะนำไปทำนายความไม่เป็นเชิงเส้นของวัสดุที่ขึ้นอยู่กับเวลา (Aging) และอุณหภูมิได้อีกด้วย ถ้าค่าอัตราความเครียดเข้มข้นของวัสดุ $S(t, \theta)$ และอัตราความเค้นเข้มข้นของวัสดุ $T(t, \theta)$ เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับเวลา t และอุณหภูมิ θ



5. บทสรุป

การทดสอบแบบเฉือนเป็นรอบ (Oscillatory Shear) สามารถแบ่งออกเป็นการทดสอบแบบเฉือนเป็นรอบที่ความเครียดต่ำ (SAOS) $Wi \equiv \lambda \dot{\gamma}_0 = \lambda \omega \gamma_0 \leq 1$ ที่ซึ่งความเค้นเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นกับความเครียด และการทดสอบแบบเฉือนเป็นรอบที่ความเครียดสูง (LAOS) $Wi \equiv \lambda \dot{\gamma}_0 = \lambda \omega \gamma_0 > 1$ ที่ซึ่งความเค้นจะเขียนอยู่ในรูปของอนุกรมค่าตอบของฟูรีเยร์ (Fourier Series Solutions) ที่จะประกอบไปด้วยชุดคำตอบหลาย ๆ ชุดรวมกัน โดยตัวแปรในการทดสอบแบบเฉือนเป็นรอบ (Oscillatory Shear) ในบทความนี้ใช้ตามประกาศสมาคมรีโอโลยีแห่งสหรัฐอเมริกา และกล่าวถึงการทดสอบแบบเฉือนเป็นรอบที่เขียนอยู่ในรูปสมการเชิงซ้อนเพื่อใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของพอลิเมอร์เหลวที่มีการรับแรงทางกลแบบพลวัต (Dynamic Mechanical Load) และในช่วงท้ายของบทความ ได้กล่าวถึงการจำแนกพฤติกรรมของกาวแซนเทนละลายในน้ำ 0.2% ผ่านแผนภาพของพิพคิน และพิกัดของอีโวลด์ ที่ได้จากการทดสอบเฉือนเป็นรอบ แสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมส่วนใหญ่ของกาวแซนเทนละลายในน้ำ 0.2% จะมีความเค้นไม่เป็นเชิงเส้นกับความเครียด ยกเว้นช่วงที่ $De \ll 1$ และ $Wi \ll 1$ ซึ่งสอดคล้องกับนิยามของความไม่เป็นเชิงเส้น ระหว่างความเค้นและความเครียด ในการทดสอบเฉือนเป็นรอบที่ความเค้นสูง (Large Amplitude Oscillatory Shear, LAOS) ที่กำหนดไว้ว่า $Wi \equiv \lambda \omega \gamma_0 > 1$ และในขณะเดียวกันความเค้นจะไม่เป็นเชิงเส้นกับอัตราเครียดด้วยยกเว้นช่วง $Wi \ll 7-8$

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Wangchai, Finite Element Analysis of Heat Generation in Particle Filled Natural Rubber Vulcanizates During Cyclic Deformation, Master Thesis, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok, Thailand. 2005. (in Thai)
- [2] S. Wangchai, C. Kolutawong, and A. Chaikittiratna, Finite Element Simulation for Heat Built-up in Vulcanized Natural Rubber Subjected to Dynamic Load, The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 2008, 18(3), 49-61. (in Thai).
- [3] S. Wangchai, C. Kolutawong, and A. Chaikittiratna, Finite Element Analysis of Heat Generation in Particle Filled Natural rubber Vulcanizates During Cyclic Deformation, The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 2011, 21(1), 754-762. (in Thai).
- [4] I.M. Ward and J. Sweeney, An Introduction to The Mechanical Properties of Solid Polymers, Chapter 7, 2nd ed., John Wiley & Sons, Ltd., West Sussex, UK, 2004.
- [5] W. Gleisler, Rate- or Stress-Controlled Rheometry, Chapter 12, Rheological Measurement, 2nd ed., Chapman and Hall, London & New York, USA, 1998, p.357-391.



- [6] K.S. Cho, *Viscoelasticity of Polymers: Theory and Numerical Algorithms*, Section 2.3, Chapter 5 and Chapter 11, Springer Series in Materials Science Vol. 241, Springer, Dordrecht. 2016.
- [7] C. Saengow, A.J. Giacomin, P.H. Gilbert and C. Kolitawong, Reflections on Inflections, *Korea-Australia Rheology Journal*, 2015, 27(4), 267-285.
- [8] Ad Hoc Committee on Official Nomenclature and Symbols, Official Symbols and Nomenclature of the Society of Rheology, *Journal of Rheology*, 2013, 57, 1047.
- [9] J.M. Dealy, Official Nomenclature for Material Functions Describing the Response of a Viscoelastic Fluid to Various Shearing and Extensional Deformations, *Journal of Rheology*, 1984, 28, 181.
- [10] J.M. Dealy, Official Nomenclature for Material Functions Describing the Response of a Viscoelastic Fluid to Various Shearing and Extensional Deformations, *Journal of Rheology*, 1995, 39, 253.
- [11] R.J. Poole, The Deborah and Weissenberg Numbers, *The British Society of Rheology, Rheology Bulletin*, 2012, 53(2), 32-39.
- [12] C. Saengow, A.J. Giacomin, and C. Kolitawong, Exact Analytical Solution for Large-Amplitude Oscillatory Shear Flow From Oldroyd 8-Constant Framework: Shear Stress, *Physics of Fluids*, 2017, 29(4), 043101.
- [13] C. Saengow and A.J. Giacomin Exact Solutions for Oscillatory Shear Sweep Behaviors of Complex Fluids from Oldroyd 8-Constant Framework, *Physics of Fluids*, 2018, 30, 030703.
- [14] P. Pongthong, C. Saengow, A.J. Giacomin, C. Kolitawong, D.M. Merger, and M. Wilhelm, Padé Approximation for Normal Stress Differences in Large-Amplitude Oscillatory Shear Flow, *Physics of Fluids*, 2018, 30(4), 040910.
- [15] J.M. Dealy, and K.F. Wissbrun, *Melt Rheology and its Role in Plastics Processing: Theory and Applications*, Section 5.7, Van Nostrand Reinhold, New York. 1990.
- [16] A.J. Giacomin and J.M. Dealy, Using large-amplitude oscillatory shear, Chapter 11, *Rheological Measurement*, 2nd ed., Chapman and Hall, London & New York, 1998, p.327-356.



- [17] C. Kolitawong, Local Shear Stress Transduction in Sliding Plate Rheometry, Section 4.2, Ph.D. Dissertation, The University of Wisconsin-Madison, USA. 2002.
- [18] J.D. Ferry, Viscoelastic properties of polymers, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., NY, USA, 1970.
- [19] J.G. Nam, K. Hyun, K.H. Ahn and S.J. Lee, Phase Angle of the First Normal Stress Difference in Oscillatory Shear Flow, Korea-Australia Rheology Journal, 2010, 22(4), 247-258.
- [20] C. Saengow and A.J. Giacomin, Normal Stress Differences from Oldroyd 8-Constant Framework: Exact Analytical Solution For Large-Amplitude Oscillatory Shear Flow, Physics of Fluids, 2017, 29, 121601.
- [21] C. Saengow, A.J. Giacomin, C. Kolitawong Exact Analytical Solution for Large-Amplitude Oscillatory Shear Flow, Macromolecular Theory and Simulations, 2015, 24(4), 352-392.
- [22] A.J. Giacomin, C Saengow, M Guay, C Kolitawong, Padé Approximants for Large-Amplitude Oscillatory Shear Flow, Rheologica Acta, 2015, 54, 679-693.
- [23] F.B. Hildebrand, Advanced calculus for applications, Chapter 10, 2nd ed., Prantice-Hall, Inc., NJ, USA. 1976.
- [24] F.A. Morrison, Understanding Rheology, Section 5.2.2.6, Oxford University Press, NY, USA, 2001.
- [25] [1] A.J. Giacomin and R.B. Bird, Erratum: Official Nomenclature of The Society of Rheology: $-\eta''$, Journal of Rheology, 2011, 55(4), 921-923.
- [26] G. Marin, Oscillatory Rheometry, Chapter 1, Rheological Measurement, 2nd ed., Chapman and Hall, London & New York, 1998, p.3-46.
- [27] A.C. Pipkin, Lectures in Viscoelastic Theory, Springer-Verlag, NY, USA, 1972.
- [28] N. Eiamnipon, P. Nimdum, J. Renard and C. Kolitawong, (2012) Low Velocity Impact Responses and Impact-Induced Damages on Steel Cord-Rubber Composite, ECCM-15th European Conference on Composite Materials, Proceedings, 1-6.
- [29] R.H. Ewoldt, A.E. Hosoi and G.H. McKinley, New Measures for Characterizing Nonlinear Viscoelasticity in Large Amplitude Oscillatory Shear, Journal of Rheology, 2008, 52, 1427.
- [30] R.H. Ewoldt, P. Winter, J. Maxey and G.H. McKinley, Large Amplitude Oscillatory Shear of Pseudoplastic and Elastoviscoplastic Materials, Rheologica Acta, 2010, 49, 191-212.



[31] M. Abramowitz and I. A. Stegun, Handbook of Mathematical Functions, National Bureau of Standards, Applied Math. Series No. 55, U.S. Govt. Printing Office, Washington, D.C, USA, 1964, p.776.

[32] M. Abramowitz and I. A. Stegun, Handbook of Mathematical Functions, 9th printing, Dover, NY, USA, 1972, p.776.



ข้อมูลสำหรับผู้เขียนและการเตรียมต้นฉบับ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมตีพิมพ์ปีละ 3 ฉบับ โดยวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ บทความที่พิจารณาตีพิมพ์ต้องไม่เคยตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารใดมาก่อน และไม่อยู่ในระหว่างพิจารณาของวารสารอื่น เรื่องที่ตีพิมพ์จะต้องได้รับการกลั่นกรองจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาที่เกี่ยวข้องอย่างน้อย 2 ท่าน แบบปกปิดข้อมูล (Double-Blind Peer-Review) และได้รับความเห็นชอบจากบรรณาธิการวารสารฯ

บทความต้องมีความยาวไม่น้อยกว่า 5 หน้ากระดาษ B5 หรือไม่น้อยกว่า 2500 คำ โดยนับคำด้วยคำสั่ง word count ใน MS Word (ไม่เกิน 15 หน้ากระดาษ) บทความประกอบด้วยชื่อเรื่อง ชื่อผู้เขียน สถานที่ทำงาน การติดต่อผู้เขียน บทคัดย่อ และคำสำคัญ (3 - 5 คำ) โดยเนื้อหาตั้งกล่าวทั้งหมดต้องจัดเตรียมในรูปแบบภาษาไทย 1 หน้ากระดาษ และภาษาอังกฤษ 1 หน้ากระดาษ

เนื้อเรื่องของบทความวิจัยประกอบด้วย 5 - 6 ส่วน คือ (1) บทนำ (2) วิธีการดำเนินงานวิจัย/ทดลอง (3) ผลการวิจัย/ทดลองและการอภิปรายผล (4) บทสรุป (5) กิตติกรรมประกาศ (ถ้ามี) และ (6) เอกสารอ้างอิง

สำหรับเนื้อเรื่องของบทความวิชาการให้เตรียมเป็นบทความที่เรียบเรียงเนื้อหาจากหนังสือ งานวิจัย ประสบการณ์ หรือเรื่องแปล เพื่อเผยแพร่ความรู้ในสาขาต่างๆ หรือแสดงข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์มีคุณค่าทางวิชาการ โดยองค์ประกอบของบทความวิชาการอาจคล้ายคลึงกับบทความวิจัย แต่ไม่มีเนื้อหาของการดำเนินงานวิจัยและผลการวิจัย ซึ่งผู้เขียนสามารถกำหนดได้เองตามความเหมาะสมของบทความวิชาการ

ผู้เขียนบทความสามารถดาวน์โหลดรูปแบบบทความสำเร็จรูปและแบบฟอร์มนำส่งบทความได้จากเว็บไซต์ของวารสาร (<http://j.cit.kmutnb.ac.th>)

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 at least two people in their relevant fields (Double-Blind Peer Review), and must be approved by the editor.

The length of the manuscript is not less than 5 pages in B5 paper size or no less than 2500 words using a word count command of MS Word (up to 15 pages). The first page of the manuscript should contain the full title, author's name(s), affiliation, contact address of correspondence, abstract and keywords (3 – 5 words).

The content of the research article consists of 5 - 6 parts, arranged in the following details; (1) introduction (2) experimental procedure (3) results and discussion (4) conclusion (5) acknowledgement (if any) and (6) references.

For review or academic article, the contents may prepare from text book, research experiences, or translation for publishing knowledge in various fields or provide useful and valuable comments. The main contents may contain a similar section to the research article but without sections of the experimental and results. The topic and content can be specified by the author as appropriate for the article.

The author can download manuscript templates and submission form in the journal's homepage (<http://j.cit.kmutnb.ac.th>)



แบบฟอร์มนำส่งบทความ

1. ชื่อบทความวิจัย/บทความวิชาการ

ภาษาไทย

ภาษาอังกฤษ

2. ประเภทบทความ บทความวิจัย บทความวิชาการ

3. ชื่อ-สกุลเจ้าของบทความ หรือผู้แทนส่งบทความ

4. สถานที่ติดต่อเจ้าของบทความหรือผู้แทนส่งบทความ

ที่อยู่

โทรศัพท์

โทรสาร

E-mail

5. รายชื่อและที่อยู่ของผู้ร่วมบทความ (สามารถเพิ่มรายชื่อได้ในเอกสารแนบเพิ่มเติม)

ชื่อ-สกุล (ภาษาไทย ตัวบรรจง)	ชื่อ-สกุล (ภาษาอังกฤษ ตัวบรรจง)	หน่วยงาน	โทรศัพท์	E-mail

6. เสนอรายชื่อผู้ประเมิน

1. โทรศัพท์

E-mail

2. โทรศัพท์

E-mail

3. โทรศัพท์

E-mail

7. การรับรองบทความ

 ขอรับรองว่าบทความต้นฉบับนี้ยังไม่เคยได้รับการเผยแพร่และตีพิมพ์ในวารสารอื่นใดมาก่อน

เจ้าของบทความ (ลงชื่อ)

8. แบบฟอร์มนี้ข้าพเจ้าได้แนบต้นฉบับบทความดังรายการต่อไปนี้ครบถ้วนแล้ว

 ส่งบทความทางระบบออนไลน์ที่เว็บไซต์ <http://ojs.kmutnb.ac.th/index.php/jointech/index> ส่งบทความทางไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ ที่ e-mail: JIT.journal@gmail.com ส่งบทความด้วยตัวเอง หรือทางไปรษณีย์

ขอรับรองว่าข้อความดังกล่าวข้างต้นเป็นจริงทุกประการ

ลงชื่อ เจ้าของบทความ หรือผู้แทนส่งบทความ

()

วันที่ เดือน พ.ศ.



Manuscript Submission Form

1. Title

2. Type of manuscript Research Article Academic Article (Review)

3. Corresponding Author Name

4. Affiliation

Tel. Fax E-mail

5. List of co-author(s) and address

Name	Affiliation	Telephone	E-mail

6. Suggested reviews (Author must suggest the reviewer at least three people in the field of research presented in manuscript including name, organization, contact address and e-mail)

1. Tel. Email

2. Tel. Email

3. Tel. Email

7. Manuscript's certification

I certify that this manuscript has not been accepted nor submitted for publication elsewhere.

Corresponding's author name (Signature)

8. Together with this form, I (we) have been attached other documents included :

Manuscript submission by system online at <http://ojs.kmutnb.ac.th/index.php/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



รายนามผู้ทรงคุณวุฒิตรวจและพิจารณาบทความ
วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
ปีที่ 16 ฉบับที่ 3 - ฉบับที่ 3 พ.ศ. 2563

- | | |
|--|--|
| 1. รองศาสตราจารย์ ดร.ปิตินันต์ กร้ามาตร | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 2. รองศาสตราจารย์ วาที่ พ.ต.ดร.อิทธิพร ศิริสวัสดิ์ | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 3. รองศาสตราจารย์ ดร.จอมภพ แวศักดิ์ | มหาวิทยาลัยทักษิณ |
| 4. รองศาสตราจารย์ ดร.สุวรรณา กิจผาติ บุญตานนท์ | มหาวิทยาลัยมหิดล |
| 5. รองศาสตราจารย์ ดร.เฉลิม เรืองวิริยะชัย | มหาวิทยาลัยขอนแก่น |
| 6. รองศาสตราจารย์ ดร.สมเจตน์ พันธ์พันธ์ | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 7. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยะ รัตตะออง | มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา |
| 8. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันสพรธรรม์ สวัสดิ์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 9. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพจน์ มีถม | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 10. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันสพรธรรม์ สวัสดิ์ | มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ |
| 11. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพงษ์ โอทอง | มหาวิทยาลัยทักษิณ |
| 12. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปัญญาพร วงศ์วิทยากุล | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 13. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จักรินทร์ กลั่นเงิน | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา |
| 14. อาจารย์ ดร.พรสวรรค์ ทองใบ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา |
| 15. อาจารย์ ดร.ณัฐรัตน์ สุขเกษม | มหาวิทยาลัยแม่โจ้ |
| 16. อาจารย์ ดร.วิษณุฤทธิ์ งามสะอาด | มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย |
| 17. อาจารย์ ดร.ปรารถนา ประชาอนุรักษ์ | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 18. อาจารย์ ดร.อำพล วงศ์ษา | มหาวิทยาลัยขอนแก่น |
| 19. อาจารย์ ดร.รัตมี แสงศิริมงคลยิ่ง | มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร |
| 20. อาจารย์ ดร.สุธารัตน์ หมั่นมี | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
(วิทยาเขต ระยอง) |

The Journal of Industrial Technology

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ ๑๖ ฉบับที่ ๓ ประจำปี ๒๕๖๓

บทความ (Articles)

- Research Article: T. Chamnankit, S. Rukzon, and P. Chindapasirt, Influence of Original and Ground Fly ash on Compressive Strength, Porosity and Chloride Resistance of Concrete, The Journal of Industrial Technology, 2020, 16(3), 1-15. (In Thai)
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2020.12.001
- Research Article: P. Eiamsa-ard, A Potentially Study of Duckweed Lemna minor L. Biomass in Biofuel Production, The Journal of Industrial Technology, 2020, 16(3), 16-27. (In Thai)
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2020.12.002
- Research Article: C. Kumpapai, N. Boonthanom, T. Rodjananon and J. Wongthanate, The Efficiency Comparison of Fuel Briquettes from Agricultural Wastes, The Journal of Industrial Technology, 2020, 16(3), 28-38. (In Thai)
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2020.12.003
- Research Article: P. Wiwatpinyo and K. Sripathomswat, Guidelines for Risk Management of Knock Down Furniture Installation Project, The Journal of Industrial Technology, 2020, 16(3), 39-54. (In Thai)
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2020.12.004
- Research Article: W. Hongsri, S. Hasin and V. Sawasdee, Tube Settler Application with Polymer for Sedimentation Efficiency in Beverage Industry Wastewater, The Journal of Industrial Technology, 2020, 16(3), 55-65. (In Thai)
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2020.12.005
- Research Article: P. Kittisayarm, T. Pantongsuk, A. Srikhacha, D. Chaysuwan and C. Tippayasam, Development of High-Strength Geopolymers by High-Reactive Bagasse Ash, The Journal of Industrial Technology, 2020, 16(3), 66-79. (In Thai)
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2020.12.006
- Research Article: N. Apikamolkul and K. Kanlayasiri, Reduction of Porosity in Investment-Casted Pink Silver: A Case Study of A Jewelry Company, The Journal of Industrial Technology, 2020, 16(3), 80-89. (In Thai)
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2020.12.007
- Research Article: T. Klabbklay and W. Sridech, Effect of Closing the Blade Tip on Downwind Thai Sail Windmill, The Journal of Industrial Technology, 2020, 16(3), 90-102.
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2020.12.008
- Academic Article: C. Kolutawong, Rheological Behavior Identification of Materials from Oscillatory Shear, The Journal of Industrial Technology, 2020, 16(3), 103-123. (In Thai)
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2020.12.009