

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

SRINAKHARINWIROT ENGINEERING JOURNAL

ปีที่ 16 ฉบับที่ 2 เดือนพฤษภาคม - สิงหาคม พ.ศ. 2564



ISSN 1905 - 4548

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เป็นวารสารในศูนย์ข้อมูลดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (Thai – Journal Citation Index Centre: TCI) กลุ่มที่ 2 พ.ศ. 2563-2567 เลขมาตรฐานสากลประจำวารสาร 1905-4548 เพื่อเผยแพร่บทความวิจัยและบทความวิชาการ ด้านวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีวิศวกรรมเคมี วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมชีวการแพทย์ และสาขาใกล้เคียงอื่นๆ ทั้งในเชิงทฤษฎีและเชิงปฏิบัติ เป็นภาษาอังกฤษหรือภาษาไทยที่มีบทความภาษาอังกฤษ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ จึงกำหนดให้จัดทำโครงการจัดทำวารสารทางวิชาการขึ้น โดยจัดพิมพ์เป็นประจำทุกปีละ 3 ฉบับ ฉบับที่ 1 ช่วงเดือนมกราคม – เมษายน ฉบับที่ 2 ช่วงเดือนพฤษภาคม – สิงหาคม และฉบับที่ 3 ช่วงเดือนกันยายน – ธันวาคม ซึ่งบทความที่ได้รับการตีพิมพ์ทุกบทความจะผ่านการทบทวนโดยผู้ทรงคุณวุฒิอย่างน้อย 2 คนต่อบทความ (Peer-review) และประเมินบทความในลักษณะเป็นผู้ทรงคุณวุฒิที่ประเมินบทความไม่ทราบชื่อผู้แต่งและผู้แต่งไม่ทราบชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ หรือ Double Blinded review

วัตถุประสงค์

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (วศม) มีวัตถุประสงค์เพื่อคัดสรรและเผยแพร่บทความวิจัยและบทความวิชาการทางด้านวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีในสาขาวิศวกรรมเคมี วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมชีวการแพทย์ และสาขาใกล้เคียงอื่นๆ ทั้งในเชิงทฤษฎีและเชิงปฏิบัติ

เจ้าของ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

กองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

63 หมู่ 7 ตำบลองครักษ์ อำเภองครักษ์

จังหวัดนครนายก 26120

โทร. 0 2649 5000 ต่อ 27560

<http://eng.swu.ac.th> และ <https://www.tci-thaijo.org/index.php/sej>

อีเมล journalengswu@gmail.com

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ที่ปรึกษากองบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมภพ รอดอัมพร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติ สถาพรประสาธน์

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
รองคณบดีฝ่ายแผนและพัฒนา

รายนามคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ

ศาสตราจารย์ ดร.ทงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์ อัครเอกผาลิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.เอเดรียน อีแวน ฟลัด	สถาบันสิรินธรวิทยเมธี
ศาสตราจารย์ ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต)
ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์ จันทน์ไทย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร. พานิช วุฒิปุณษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ โสภางค์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.อริศม ฤกษ์บุตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
รองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย เปรมฤดีปริชาชาญ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงพรรณ กริชชาญชัย ศฤงคารินทร์	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต ชาลสิทธิ์ตระกูล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.เตือนใจ สมบูรณ์วิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร. ธนียา เกาศล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
รองศาสตราจารย์ ดร.ประจวบ กล่อมจิตร	มหาวิทยาลัยศิลปากร
รองศาสตราจารย์ ดร.วรงค์ ปวรจารย์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ยอดสุดใจ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

บรรณาธิการอำนวยการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิลดา หวังพานิช

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.ประชา บุญยานิชกุล

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล นาผล	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.จันจิรา จัปศิลป์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.นิลวรรณ ชุ่มฤทธิ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.ทิมพันธุ์ เจริญพงษ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

รองศาสตราจารย์ ดร.สุนิศา สุภาพ	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิพล ธาราธิ์เศรษฐ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประมวล ชูรัตน์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงษ์ คงประเสริฐ	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาคภูมิ ศรีรมรื่น	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
อาจารย์ ดร.สุธิดา ทีปรักษพันธ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
อาจารย์นาวิ รุจิรามพ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ศาสตราจารย์ ดร.ทนต์เกียรติ เกียรติศิริโรจน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์ อัครเอกคณาน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.เอเดรียน อีแวน พลัด	สถาบันสิริวิทยเมธี
ศาสตราจารย์ ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต)
ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์ จำนงไทย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.พานิช วุฒิพฤษ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ โสภาแดง	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.อริคม ฤกษ์บุตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
รองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย เปรมฤดีปรีชาชาญ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงพรรณ กริชชาญชัย ศฤงคารินทร์	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต ชาลธิ์รักษตระกูล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.เตือนใจ สมบูรณ์วิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.ธนิยา เกาศล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
รองศาสตราจารย์ ดร.ประจวบ กล่อมจิตร	มหาวิทยาลัยศิลปากร
รองศาสตราจารย์ ดร.วรงค์ ปวรอาจารย์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ยอดสุดใจ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผู้ช่วยบรรณาธิการ

นางสาวยุพาพร ประไพย์

บทบรรณาธิการ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ได้จัดพิมพ์ขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่ผลงานวิชาการ ผลงานวิจัย และแลกเปลี่ยนแนวคิด ความรู้ ความก้าวหน้าใหม่ ด้านวิศวกรรมศาสตร์อย่างต่อเนื่องมาเป็นระยะเวลากว่า 15 ปี โดยบทความทุกเรื่องได้ผ่านการพิจารณาถ้อยแถลงและประเมินคุณภาพตามกระบวนการจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้องจากหลายสถาบันการศึกษา ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ฉบับนี้ ได้นำเสนอบทความจำนวนทั้งสิ้น 9 บทความ เป็นบทความวิจัยจำนวน 8 บทความ และบทความวิชาการจำนวน 1 บทความ โดยบทความทั้งหมดเป็นผลงานวิจัยพื้นฐานและผลงานวิจัยประยุกต์ในสาขาต่างๆ ทางวิศวกรรมศาสตร์ จากสาขาวิศวกรรมเกษตร วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมโยธา และวิศวกรรมไฟฟ้า ซึ่งผลงานที่เผยแพร่ในครั้งนี้เป็นผลงานวิจัยที่มุ่งเน้นไปที่การประยุกต์ใช้งานและการแก้ปัญหาเชิงปฏิบัติการที่เข้ากับสถานการณ์ปัจจุบัน

กองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ หวังเป็นอย่างยิ่งว่า วารสารฉบับนี้จะเป็นเวทีทางวิชาการ ที่จะกระตุ้นการผลิตผลงานและแลกเปลี่ยนเรียนรู้ของนักวิจัย นักวิชาการและผู้อ่านทุกท่าน ทั้งนี้ เพื่อการมีส่วนร่วมในการสร้างสรรค์งานวิจัยอันจะเป็นการส่งเสริมการพัฒนาประเทศ ตามแนวนโยบายประเทศไทย 4.0 ในโอกาสนี้กองบรรณาธิการขอขอบคุณกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ในการประเมินบทความ ให้ความเห็นที่เป็นประโยชน์ และมีส่วนร่วมในการพัฒนาคุณภาพและมาตรฐานของวารสารฯ ฉบับนี้เสมอ สุดท้ายนี้หากมีข้อเสนอแนะประการใดทางกองบรรณาธิการฯ ยินดีรับฟังข้อเสนอแนะเพื่อการปรับปรุงและพัฒนาวารสารให้มีคุณภาพยิ่งขึ้น

รองศาสตราจารย์ ดร.ประชา บุญยานิชกุล

บรรณาธิการวารสาร

สารบัญ

บทความวิจัย

การเพิ่มศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากผักตบชวาโดยการให้ความร้อนจากแสงอาทิตย์และการหมักร่วม Enhancement of Biogas Production Potential of Water Hyacinth (Eichhornia Speciosa Kunth) using Integrated Solar Radiation and Co-Digestion ญาณิกา ฤกษ์มหาลิขิต เสฎฐา ศาสนันทน์	1
กำลังอัด การดูดซึมน้ำ และการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์ในระบบวัสดุประสานสามชนิดด้วยกาก แคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย Strength, Water Absorption and Chloride Penetration of Mortar in Ternary Blends System with Calcium Carbide Residue and Fly Ash ปณณวิชญ์ วงษ์สุวัตร สำเริง รักซ้อน ปริญญญา จินดาประเสริฐ	28
ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก Chloride Penetration Resistance of Concrete with Wet Fly Ash ทวีชัย สำราญวานิช ลีน่า ปริก	38
อิทธิพลของความแตกต่างของอุณหภูมิในการอบแห้งที่มีต่อสารหอม (2AP) ข้าวหอมปทุม Influence of drying operating temperature difference on aroma (2AP) of Thai Pathumthani Fragrant Rice สมพจน์ คำแก้ว	49
การยอมรับต่อการนำน้ำเสียหลังผ่านการบำบัดกลับมาใช้ใหม่ กรณีศึกษา มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์ Social Acceptance for Reclaimed Wastewater Use: A Case Study in Srinakharinwirot University Ongkharuk Campus ภัทราฯ เดชสุทธิกร สุธิดา ที่ปรึกษพันธ์ สุตา อิทธิสุภรณ์รัตน์	56
กำลังรับแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เส้นใยที่ใช้เศษแผ่นยิปซัมนำกลับมาใช้ใหม่แทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน Flexural Strength of Fiber-Cement Sheets using Recycled Gypsum Board as Partial Fine Aggregate Replacement บุราฉัตร กิตติกรจรัส นธ์ เหมะหมัด กฤติน เปี่ยมปรีชารัตน์ มนต์สิทธิ์ งามทรัพย์ อนุวัฒน์ อรรถไชยวุฒิ	68
ผลของมุมการติดตั้งมิเตอร์ไฟฟ้าที่มีต่อการวัดพลังงานไฟฟ้าของมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ ระบบ 1 เฟส The effect of installation angle on the electrical energy measurement of an induction type single phase kilowatt hour meter พิษณุกรณ์ พิมพ์อักษร อาคม แก้วระวัง สงวน บุญปัญญารักษ์	79

สารบัญ

การอบแห้งแป้งเท้ายายม่อมด้วยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์	94
Arrowroot Flour Drying Using Solar Drying Dome	
ศรีมา แจ้คำ กิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์ รินจง เสริมศรี	

บทความวิชาการ

ปัจจัยที่มีผลต่อความสำเร็จในการร่วมขนส่งของผู้ผลิตในการค้าปลีกสมัยใหม่	16
Key Success Factor for Manufacturer Joint Delivery System in Modern Trade	
ดวงพรรณ กริชชาญชัย มนสิชา ธนกาญจน์โรจน์ ศรีวิมล พันธุ์วงศ์ ปฎิพล เอี่ยมวัฒนศิลป์	
ศิริรัตน์ ศรีสกุลวรรณ	

**การเพิ่มศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากผักตบชวาโดยการให้ความร้อนจาก
แสงอาทิตย์และการหมักร่วม**
**Enhancement of Biogas Production Potential of Water Hyacinth
(Eichhornia Speciosa Kunth) using Integrated Solar Radiation
and Co-Digestion**

ญานิกา ฤกษ์มหาลิขิต^{1*} เสฏฐา ศาสนนันท์²

¹บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

²ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

Yanika Lerkmahalikhit ^{1*} Setta Sasananan²

¹Graduate School of Srinakharinwirot, Bangkok, 10110

²Department of Civil and Environment, Faculty of Engineering,
Srinakharinwirot, Ongkharak, Nakhon Nayok, 26120

*Corresponding author Email: yanikalerk9234@gmail.com

(Received: February 28, 2021; Accepted: June 16, 2021)

บทคัดย่อ

ผักตบชวา (Eichhornia Speciosa Kunth) สามารถก่อให้เกิดความเสียหายให้ระบบนิเวศในประเทศไทย จึงได้มีการนำผักตบชวามาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ อีกทางเลือกหนึ่งคือนำมาผลิตเป็นก๊าซชีวภาพ เนื่องจากผักตบชวามีเซลลูโลส ไนโตรเจน และสารอาหารที่จำเป็นต่อการหมัก ในการศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพโดยใช้แสงแดดหมักร่วมกับเศษอาหาร การวิจัยระดับปฏิบัติการหมักแบบกะ โดยอาศัยกลุ่มจุลินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน ที่อุณหภูมิห้อง ปรับสภาพผักตบชวากับแสงแดดระยะเวลา 40 วัน หมักร่วมกับเศษอาหาร แล้วจึงนำสัดส่วนในการทดลองแบบกะไปเดินระบบในถังปฏิกรณ์กวนต่อเนื่อง (Continuous flow Stirred-Tank Reactor, CSTR) ผลการศึกษาพบว่า การปรับสภาพด้วยแสงแดดและการย่อยอาหารร่วมกันสามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้ศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงถึง ร้อยละ 40 ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดของการผลิตก๊าซชีวภาพจากการวิจัยระหว่างผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพซึ่งเป็นวัสดุหมักหลักกับวัสดุหมักร่วม ที่อัตราส่วน 80:20 อัตราบรรจุภาชนะสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate, OLR) 2.5 กิโลกรัมของแข็งระเหยต่อลบ.ม.ต่อวัน และ ระยะเวลาพักเก็บ (HRT) 10 วัน

คำสำคัญ: ผักตบชวา เศษอาหาร การผลิตก๊าซชีวภาพ การปรับสภาพ ก๊าซมีเทน

ABSTRACT

Water hyacinth (Eichhornia Speciosa Kunth) causes ecological problems in Thailand. Various alternatives have been made to utilize its existence. One of the alternatives is biogas fuel because of its cellulose, nitrogen, essential nutrients, and high fermentation contents. This study aimed to

enhance the biogas production potential using integrated solar radiation and co-digestion with food waste. A series of laboratory experiments using biodigester was performed in batch anaerobic operation at room temperature. The pretreatment process was done in 40 days and co-digestion with food waste. The optimum condition from the batch scale experiment was selected into operation in the continuous flow stirred-tank reactor (CSTR). The result showed that solar radiation and co-digestion could enhance the biogas production potential up to 40 %. The best performance of biogas production from this research will be obtained if the co-digestion ratio is in 80:20 with treated water hyacinth as the main substrate, OLR 2.5 Kg VS/m³day and HRT in 10 days.

Keyword: Water Hyacinth, Food waste, Biogas, Methane, Pretreatment.

1. บทนำ

ก๊าซชีวภาพ (Biogas) เกิดจากกระบวนการหมัก เพื่อให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน (Anaerobic Digestion) แบบที่เรียกว่า เจริญเติบโตในสภาวะที่เหมาะสม และย่อยสลายสารอินทรีย์ เช่น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมัน เปลี่ยนสภาพเป็นก๊าซชีวภาพ องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ ประกอบด้วยก๊าซมีเทน (CH₄) ประมาณร้อยละ 50-75 มีคุณสมบัติเป็นก๊าซติดไฟ สามารถนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทนได้ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ประมาณร้อยละ 36-39 ส่วนที่เหลือเป็นก๊าซชนิดอื่นๆ เช่น ไฮโดรเจน (H₂) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S) ไนโตรเจน (N₂) และไอน้ำ ประมาณร้อยละ 1-3 ซึ่งเป็นก๊าซที่ไม่มีคุณสมบัติติดไฟได้ โดยคุณสมบัติต่างๆ ของก๊าซชีวภาพ จะขึ้นอยู่กับปริมาณของก๊าซมีเทน 1 ลูกบาศก์เมตร สามารถทดแทนแก๊สหุงต้มได้ประมาณ 0.46 กิโลกรัม หรือผลิตไฟฟ้าได้ประมาณ 2.086 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง [1]

การเลือกวัสดุหมักที่เหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพต้องคำนึงถึงองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุหมัก สามารถส่งผลถึงปริมาณและคุณภาพของก๊าซชีวภาพได้ วัสดุหมักในการผลิตก๊าซชีวภาพมีหลายประเภท เช่น วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร [2] ฟางข้าว [3] เศษผักผลไม้ [4] ผักตบชวา [5] ของเหลือจากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น ตะกอนดีแคเตอร์โรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม [6] กลี

เซอร์อลติบ [7] และทำการปรับธาตุอาหารโดยการหมักกับวัสดุหมักร่วม (Co-digestion) กับของเสียจากปศุสัตว์ เช่น มูลสัตว์ เนื่องจากมีเชื้อจุลินทรีย์จำนวนมากที่เหมาะสมต่อการผลิตแก๊สชีวภาพเช่น เศษอาหาร [8] ของเสียจากสัตว์ [9] ของเสียจากกระบวนการทางอุตสาหกรรม [10] ตะกอนของโรงบำบัดน้ำเสีย [11] เป็นต้น

ผักตบชวา ชื่อทางวิทยาศาสตร์ *Eichhornia Speciosa Kunth* ซึ่งเป็นวัชพืชน้ำมีความสามารถในการเจริญเติบโตและขยายพันธุ์เพิ่มจำนวนได้อย่างรวดเร็ว ชนิดหนึ่งซึ่งสร้างปัญหาให้กับคุณภาพน้ำ ก่อให้เกิดปัญหาระบบนิเวศ เช่น การเน่าเสียของแหล่งน้ำ ผักตบชวาเป็นพืชที่มีความขึ้นสูง องค์ประกอบเป็นสารอินทรีย์จำพวก คาร์โบไฮเดรต บริเวณใบของผักตบชวามีโปรตีนสูง ประกอบด้วยของแข็งระเหยได้ประมาณร้อยละ 80 ของน้ำหนักแห้ง และผักตบชวาปริมาณ 1 ไร่ สามารถให้ก๊าซมีเทนประมาณ 4,200 ลบ.ม.หรือทดแทน LPG ได้ประมาณ 2,100 กิโลกรัมต่อไร่ต่อปี [12]

วัสดุหมักจำพวกวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร พืช และ วัชพืช โครงสร้างภายในประกอบด้วย เซลลูโลส ประมาณร้อยละ 40-60 เฮมิเซลลูโลส ร้อยละ 20-30 และลิกนิน ร้อยละ 15-30 เป็นโครงสร้างประเภทเฮเทอโรโพลิเมอร์ เส้นตรง ไม่มีกิ่งก้าน ยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะไฮโดรเจน [13] ส่งผลต่อการเข้าถึงอาหารของจุลินทรีย์ในการผลิต

ก๊าซชีวภาพ ซึ่งการปรับสภาพจะทำลายคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุกลีโนเซลลูโลสส่งผลให้จุลินทรีย์สามารถเข้าถึงสารอินทรีย์ได้มากขึ้นเป็นการเร่งปฏิกิริยาในขั้นตอนไฮโดรไลซิส โดยการกำจัดลิกนิน และเฮมิเซลลูโลส ลดความเป็นผลึกของเซลลูโลส เพิ่มความพรุนของวัสดุหมัก เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ จากงานวิจัยที่ผ่านมา มีการปรับสภาพด้วยวิธีต่างๆ การปรับทางกายภาพ (Physical pretreatment) เช่น การบด ตัด [14] การปรับสภาพทางชีวภาพ (Biological Pretreatment) โดยใช้จุลินทรีย์ [15] การปรับสภาพทางเคมี (Chemical pretreatment) เช่น การใช้กรด-ด่าง [16] การปรับสภาพทางเคมีกายภาพ (Physical-chemical Pretreatment) การระเบิดด้วยไอน้ำ [17] การปรับสภาพด้วยคลื่นไมโครเวฟ [18] เป็นต้น การปรับสภาพดังกล่าวมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการเป็นจำนวนมาก อีกทั้งสามารถนำมาใช้ในภาคอุตสาหกรรมได้ยากเนื่องจากมีต้นทุนสูง ซึ่งการตากแสงแดดในงานวิจัยนี้สามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายในการปรับสภาพและไม่ซับซ้อนอีกด้วย

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพของผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแสงแดด หมักร่วมกับเศษอาหาร

2. ขั้นตอนการดำเนินงาน

2.1. การเตรียมวัสดุหมัก และการปรับสภาพ

ผักตบชวา จากแหล่งน้ำภายในมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์ ส่วนใบ และลำต้น นำมาปรับสภาพด้วยการหั่นให้มีขนาดเล็กลง และตากแสงแดดเป็นเวลา 40 วัน (กลับทุก 3 วัน) จากนั้นนำเข้าเครื่องบด นำเก็บในตู้ควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

เศษอาหาร (Food Waste) จากโรงอาหารภายในมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์ ทำการคัดแยกนำสิ่งปะปนออก เช่น ไม้เสียบลูกชิ้น ถูพลาสติก กระดุกแข็ง เป็นต้น แล้วจึงนำมาผ่านการปรับสภาพทางกายภาพโดยการบด เก็บรักษาในตู้ควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

เชื้อเริ่มต้น (Seed Natural Cultures) นำมาจากมูลสุกร และกากตะกอนจากบ่อหมักแบบปลั๊กโฟลว์ (plug flow digester) ในอัตราส่วนผสม มูลสัตว์แห้งหนัก 500 กรัม ต่อตะกอน 500 กรัม ผสมน้ำ 6 ลิตร กวนผสมให้เข้ากัน หมักร่วมกับผักตบชวาและเศษอาหาร ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาประมาณ 2 สัปดาห์

2.2. การวิเคราะห์ค่าคุณสมบัติทางเคมี

ทำการวิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติทางเคมีของวัสดุหมัก และเชื้อตั้งต้น ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ทุกวัน ค่าปริมาณของแข็ง (Total Solid; TS) และปริมาณของแข็งระเหยง่าย (Volatile Solid, VS) ค่าซีโอดี (Chemical oxygen demand, COD) ทุก 2 วัน ค่าปริมาณคาร์บอนทั้งหมด (Total Carbon, C) ไนโตรเจนทั้งหมด (Nitrogen, N) ค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile organic acids, VFA) ค่า อัล คาลินิตี (Alkalinity, Alk) ทุก 3 วัน ค่าปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (Biogas production) ทุกวัน และองค์ประกอบก๊าซมีเทนด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography, GC) ทุก 3 วัน ตรวจวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐานของ APHA AWWA, WEE (2005) และ AOAC (1995)

2.3. การเตรียมชุดทดลอง

การทดลองนี้แบ่งออกเป็น 2 ชุดการทดลอง โดยการทดลองชุดที่ 1 ศึกษาหาสัดส่วนที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ ชุดการทดลองที่ 2 ศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพในถังปฏิกรณ์กวนต่อเนื่องแบบไร้อากาศ (CSTR) แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตารางชุดการทดลอง

การทดลอง	วิธีทดลอง	วัสดุหมัก	อัตราส่วน
ชุดที่ 1	ศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมต่อการเกิดก๊าซชีวภาพด้วยวิธีแบบบักกะ (Batch)	1) ผักตบชวาปรับสภาพด้วยแสงแดดนาน 40 วัน 2) เศษอาหาร 3) เชื้อตั้งต้น	90:10 80:20 70:30

ตารางที่ 1 ตารางชุดการทดลอง (ต่อ)

การทดลอง	วิธีทดลอง	วัสดุหลัก	อัตราส่วน
ชุดที่ 2	ศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพในถังปฏิกรณ์กวนต่อเนื่องแบบไร้อากาศ (CSTR)	1) ผักตบชวาผ่านการปรับสภาพด้วยแสงแดดนาน 40 วัน + เศษอาหาร+เชื้อเริ่มต้น	80:20

2.3.1 ชุดการทดลองที่ 1 : ศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ แบบกะ (Batch)

การทดลองแบบกะ (Batch) ศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพระยะเวลา 40 วัน กับเศษอาหาร ต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ ทำการใส่หัวเชื้อเริ่มต้น ร้อยละ 30 ของปริมาตรทั้งหมด โดยใส่วัสดุหลัก แปรผันตามปัจจัยได้แก่ อัตราบรรจุภาชนะสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate, OLR) ระยะเวลากักเก็บ (HRT) และสัดส่วนวัสดุหลัก (ratio) ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตารางแปรผันปัจจัยที่เหมาะสมต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ

อัตราบรรจุภาชนะสารอินทรีย์ * (Kg VS/m ³ day)	ระยะเวลา กักเก็บ * (Day)	สัดส่วน * (WH 40 : FW)
1.5	10	90:10
2.0	20	80:20
2.5	30	70:30

OLR = อัตราบรรจุภาชนะสารอินทรีย์

HRT = ระยะเวลากักเก็บ

WH 40 = ผักตบชวาที่ตากแสงแดดนาน 40 วัน

*น้ำหนักแห้ง (กรัมของแข็งระเหยง่าย :กรัมของแข็งระเหยง่าย)

ปรับสภาพค่าความเป็นกรด-ด่างภายในให้เหมาะสมต่อจุลินทรีย์ในการผลิตก๊าซชีวภาพเจริญเติบโตได้ดีในช่วง 6.0-8.0 โดยใช้ กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ก่อนเริ่มดำเนินการทดลอง

ไล่อากาศ (Purge) ด้วยก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ประมาณ 3 นาที ติดตั้งเข้าชุดเขย่าและต่อกับชุดเก็บก๊าซชีวภาพแบบวิธีแทนที่น้ำ ดังแสดงรูปที่ 1 เขย่าด้วยอัตราเร็ว 110 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง จำนวน 2 ชุด

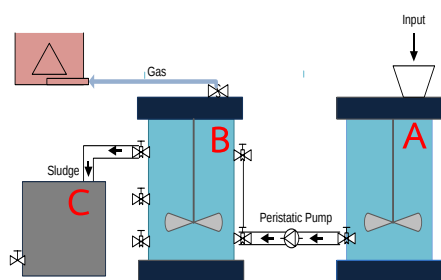


รูปที่ 1 ชุดทดลองหาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ

- ทำการตรวจวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่บันทึกผลค่าวัดปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (Biogas production) จนกว่าปริมาณก๊าซชีวภาพคงที่ และวัดค่าคุณสมบัติทางเคมีเมื่อสิ้นสุดการทดลอง

2.3.2 ชุดการทดลองที่ 2 : ศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพในถังปฏิกรณ์กวนต่อเนื่องแบบไร้อากาศ (CSTR)

นำผลจากชุดการทดลองที่ 1 ไปเดินระบบในถังปฏิกรณ์กวนต่อเนื่องแบบไร้อากาศ (Continuous flow Stirred-Tank Reactor, CSTR) แบบถังเดี่ยว ลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกทำจากท่อ PVC จำนวน 2 ถัง ถังแรกเป็นถังผสมเพื่อใส่สารอินทรีย์ และอีกถังเป็นถังหมัก มีปริมาตรรวม 17 ลิตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 นิ้ว ภายในติดตั้งใบพัดสำหรับกวนผสม ทำการกวนผสม 100 รอบต่อนาที ต่อกับเครื่องเก็บก๊าซโดยการแทนที่ด้วยน้ำเก็บตัวอย่างก๊าซ เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณมีเทน และวิเคราะห์ค่าทางเคมี เดินระบบอย่างต่อเนื่อง ที่อุณหภูมิห้อง แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ปฏิกรณ์กวนต่อเนื่อง Continuous flow
Stirred-Tank Reactor (CSTR)

2.4. การเดินระบบในปฏิกรณ์กวนต่อเนื่อง

2.4.1 ช่วงเริ่มระบบ

ใส่ปริมาณเชื้อตั้งต้น (Seed Culture) ร้อยละ 30 ของปริมาตรใช้จริง ปรับสภาพค่าความเป็นกรด-ด่างภายในให้เหมาะสมต่อจุลินทรีย์ในการผลิตก๊าซชีวภาพ เจริญเติบโตได้ดีในช่วง 6.0-8.0 โดยใช้กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เริ่มป้อนอัตราบรรทุกการสารอินทรีย์ ร้อยละ 20 40 60 และ 80 ของอัตราบรรทุกการสารอินทรีย์ที่กำหนด เพื่อปรับสภาพเชื้อตั้งต้นให้พร้อมต่อการเดินระบบ โดยมีการปรับเพิ่มแบบไล่ระดับ

2.4.2 ช่วงเดินระบบ

เริ่มเดินระบบถึงปฏิกิริยา A ป้อนอัตราบรรทุกการสารอินทรีย์ 2.5 กิโลกรัม ของแข็งระเหยง่าย ต่อลบ.ม.-วัน สัดส่วนระหว่าง ผักตบชวา และเศษอาหาร 80:20 (โดยปริมาตร) ปรับค่าความเป็นกรด-ด่างให้เหมาะสมต่อจุลินทรีย์ โดยมีประมาณ 6.0-8.0 วิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติทางเคมี

ถึงหมัก (ถึงปฏิกิริยา B) อัตราการผสม 100 รอบต่อนาที ให้เข้ากันเพื่อเพิ่มการสัมผัสของจุลินทรีย์กับสารอินทรีย์ให้ทั่วถึง ดำเนินการบันทึกผลปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม เก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพ และตัวอย่างน้ำในระบบเพื่อวัดค่าคุณสมบัติทางเคมี

ถึงตะกอน (ถึงปฏิกิริยา C) ดำเนินการเก็บตัวอย่างตะกอนวิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติทางเคมี เพื่อเปรียบเทียบหาประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งทั้งหมด ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่าย ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี และปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น

บันทึกผลการวิจัยทั้งปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม และวิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติต่างๆ จนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงตัวสามารถดูได้ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้จากในถังหมัก (ถึงปฏิกิริยา B) มีปริมาณน้อยลงและคงที่ ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมด ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งระเหยง่าย และประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี คำนวณหาปริมาณผลผลิตก๊าซมีเทน (Methane Yield)

3. ผลการวิจัยและการอภิปราย

3.1 คุณลักษณะของวัสดุหมัก

จากการวิจัยได้หาค่าองค์ประกอบทางเคมีของผักตบชวา พบว่ามีค่าความเป็นกรด-ด่าง อยู่ระหว่าง 6.8-7.2 ค่าปริมาณความชื้น (Moisture content, MC) ร้อยละ 65-70 ปริมาณของแข็งทั้งหมด อยู่ระหว่าง 1,051.1 – 1054.7 กรัมต่อลิตร และปริมาณของแข็งระเหยง่าย อยู่ระหว่าง 145.9 – 149.7 กรัมต่อลิตร และ ปริมาณซีโอดี อยู่ระหว่าง 1,447.3 – 1,816.7 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าองค์ประกอบทางเคมีของเศษอาหาร มีค่าความเป็นกรด-ด่าง อยู่ในช่วง 4.9 – 5.2 ค่าปริมาณความชื้น ร้อยละ 75-90 ปริมาณของแข็งทั้งหมด 100-180 กรัมต่อลิตร และปริมาณของแข็งแขวนลอย (Suspended solids, SS) 30 - 95 กรัมต่อลิตร ปริมาณซีโอดี (Chemical oxygen demand, COD) 6,400 - 12,800 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงได้ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับองค์ประกอบของธาตุอาหารของผักตบชวาและเศษอาหารเพิ่มเติมตามตารางที่ 3

ตารางที่ 3 องค์ประกอบธาตุอาหารของผักตบชวาและเศษอาหาร

	ผักตบชวา [19] [20] [21]	เศษอาหาร [22] [23] [24]
C (%)	31.5-39.8	48.0-49.8
H (%)	2.8-5.7	3.14-6.40
O (%)	28.1-34.9	37.6
N (%)	2.9-3.0	1.85-5.24

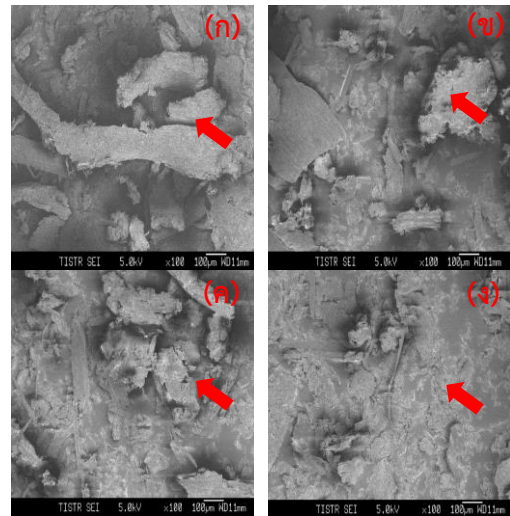
ระยะเวลาการตากแสงแดดที่เพิ่มมากขึ้น จากการศึกษาพบว่าโครงสร้างลิกนินที่ถูกทำลายจะส่งผลให้จุลินทรีย์สามารถเข้าถึงสารอาหารได้มากขึ้นเพิ่มการสัมผัสระหว่างจุลินทรีย์กับสารอาหารทำให้มีโอกาสเกิดก๊าซชีวภาพมากขึ้น [25] ซึ่งสอดคล้องจากการศึกษาการปรับสภาพผักตบชวาด้วยแสงแดดกับเศษอาหารโดยการหมักแบบกะ โดยการปรับสภาพผักตบชวาด้วยแสงแดดที่ระยะเวลา 40 วัน สามารถทำให้เกิดก๊าซชีวภาพได้ปริมาณมากที่สุด 61.43 มล.ต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย พบว่าค่าปริมาณของแข็งทั้งหมด และของแข็งระเหยง่าย มีปริมาณน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพ 10 วัน กับผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพ 40 วัน ถึง ร้อยละ 24 และร้อยละ 33 ตามลำดับ [26]



รูปที่ 4 ลักษณะของผักตบชวาทาก
หลังการปรับสภาพ

(ก) ผักตบชวาทากแดด 10 วัน , (ข) ผักตบชวาทากแดด 20 วัน
(ค) ผักตบชวาทากแดด 30 วัน , (ง) ผักตบชวาทากแดด 40 วัน

ลักษณะทางกายภาพของผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพระยะเวลา 40 วัน ลักษณะภายนอกเป็นสีน้ำตาลเข้มออกดำ และแห้งขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแสงแดดที่ 10 20 30 ตามลำดับดังรูปที่ 4 (ก-ง)



รูปที่ 5 ภาพโครงสร้างผักตบชวาทาก
หลังการปรับสภาพ

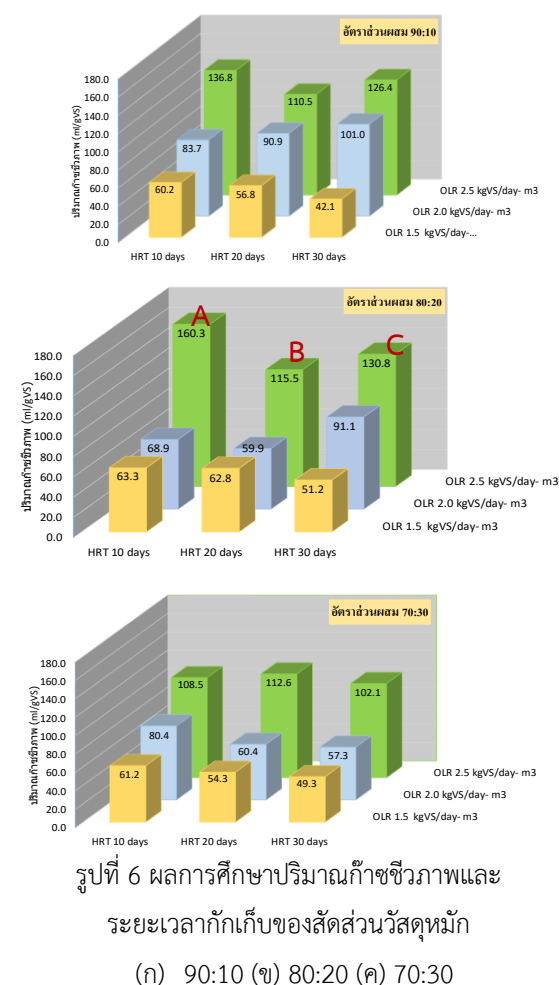
(ก) ผักตบชวาทากแดด 10 วัน , (ข) ผักตบชวาทากแดด 20 วัน
(ค) ผักตบชวาทากแดด 30 วัน , (ง) ผักตบชวาทากแดด 40 วัน

เมื่อทำการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) กำลังขยาย 100 เท่า จากรูปที่ 5 (ก-ง) พบว่าลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างภายในมีความแตกต่างกัน โดยเปรียบเทียบผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแสงแดด 10 20 และ 30 วัน กับผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแสงแดด 40 วัน พบว่าโครงสร้างเส้นใยภายในฉีกออกจากกันตาม

3.2 ผลการศึกษาชุดการทดลองที่ 1 : ศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ แบบกะ (Batch)

จากรูปที่ 6 (ก-ค) ได้ว่า สัดส่วนวัสดุหมัก 80:20 อัตราบรรจุทุกภาชนะสารอินทรีย์เข้าระบบ 2.5 กิโลกรัมของแข็งระเหยง่ายต่อลบ.ม.ต่อวัน ระยะเวลาพักเก็บ 10 วัน ได้ปริมาณก๊าซชีวภาพมากที่สุด 160.3 มล.ต่อกรัมของแข็ง รองลงมาคือ สัดส่วนวัสดุหมัก 90:10 อัตราบรรจุทุกภาชนะสารอินทรีย์เข้าระบบ 2.5 กิโลกรัมของแข็งระเหยง่ายต่อลบ.ม.ต่อวัน ระยะเวลาพักเก็บ 10 วัน ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ 136.8 มล.ต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย

ปีที่ 16 ฉบับที่ 2 เดือน พฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2564



จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำสกัดผักตบชวาแบบไร้อากาศ ในถังหมักขนาดปริมาตร 5 ลิตร ที่อัตราบรรทุกภาระสารอินทรีย์และระยะเวลาเก็บกักที่แตกต่างกัน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พบว่าค่าปริมาณก๊าซชีวภาพมากที่สุด 104.50 ลิตรต่อกิโลกรัมชีโอดีที่ถูกกำจัด อัตราบรรทุกภาระสารอินทรีย์ 1.6 กิโลกรัมชีโอดีต่อลบ.ม.ต่อวัน ที่ระยะเวลาเก็บกัก 10 วัน [27]

จากรูปที่ 6 (ข) สัดส่วนวัสดุหมัก 80:20 อัตราบรรทุกภาระสารอินทรีย์เข้าระบบ 2.5 กิโลกรัมของแข็งระเหยง่ายต่อลบ.ม.ต่อวัน เปรียบเทียบปริมาณก๊าซชีวภาพกับประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่าย พบว่ากราฟแท่ง A ก๊าซชีวภาพมากที่สุด 160.3 มล.ต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่ายร้อยละ 62 รองลงมา คือกราฟแท่ง C ก๊าซชีวภาพ 130.8

มล.ต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่าย ร้อยละ 59.5 และกราฟแท่ง B มีปริมาณก๊าซชีวภาพ 115.5 มล.ต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่าย ร้อยละ 51 นั้น

จะเห็นได้ว่าการกำจัดของแข็งระเหยง่ายมีผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ เนื่องจากของแข็งระเหยง่ายสามารถเปลี่ยนเป็นสารอาหารให้กับจุลินทรีย์เพื่อนำไปผลิตก๊าซชีวภาพได้ง่าย หากจุลินทรีย์ได้รับปริมาณอาหารที่สามารถนำไปใช้เป็นพลังงานในการผลิตก๊าซชีวภาพนอกจากนี้ สัดส่วนของวัสดุหมักในการผลิตก๊าซชีวภาพมีความสำคัญต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ นอกจากเป็นสารอาหารให้จุลินทรีย์ในการนำไปใช้แล้วในการผลิตก๊าซชีวภาพ สร้างเซลล์ใหม่ให้จุลินทรีย์ในระบบ แล้วยังเป็นการปรับธาตุอาหารให้เหมาะสมอีกด้วย

ผู้วิจัยจึงเลือกนำสัดส่วนวัสดุหมัก 80:20 อัตราบรรทุกภาระสารอินทรีย์เข้าระบบ 2.5 กิโลกรัมของแข็งระเหยง่ายต่อลบ.ม.ต่อวัน ระยะเวลาเก็บกัก 10 วัน ซึ่งได้ปริมาณก๊าซชีวภาพสูงสุด เพื่อศึกษาหาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพชีวภาพของผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพในถังปฏิกรณ์กวนต่อเนื่องแบบไร้อากาศ (CSTR) ต่อไป

3.3 ผลการศึกษาชุดการทดลองที่ 2 : ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพในถังปฏิกรณ์กวนต่อเนื่องแบบไร้อากาศ (CSTR)

จากการวิจัยพบว่า จากรูปที่ 7 แสดงปริมาณการกำจัดของแข็ง และปริมาณการกำจัดของแข็งระเหยง่ายตลอดการวิจัย อยู่ในช่วงร้อยละ 10.5 ถึง 48.2 และ ร้อยละ 11.6 ถึง 65.8 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งสูงสุด และประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่ายสูงสุด ร้อยละ 44.1 และ 65.8 ในวันที่ 57 และ 45 ของการวิจัย ค่าปริมาณก๊าซชีวภาพ 1.30 และ 2.27 ลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย ค่าปริมาณก๊าซมีเทน ร้อยละ 45.51 และ 63.5 โดยปริมาตร ค่าปริมาณของแข็ง และของแข็งระเหยง่ายในระบบบอกถึงปริมาณของแข็ง และการกระจายตัวของสารอินทรีย์ในระบบ ถ้าปริมาณของแข็งมีมากเกินไปทำให้

การกระจายตัวไม่ทั่วถึงจุลินทรีย์สัมผัสอาหารไม่ทั่วถึง ปริมาณก๊าซชีวภาพก็จะเกิดได้น้อยลง หลังจากแบคทีเรียที่เรียกกลุ่มสร้างกรดได้ย่อยของแข็งแล้วนั้น ของแข็งระเหยง่ายคืออาหารที่เมทาโนเจนใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพต่อไป และแสดงผลจากประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งและของแข็งระเหยง่ายในรูปแบบร้อยละเพื่อดูประสิทธิภาพการกำจัดต่อปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น ซึ่งปริมาณการกำจัดของแข็ง และปริมาณของแข็งระเหยง่ายที่ยอมรับได้อยู่ในช่วง ร้อยละ 60-90 [1]

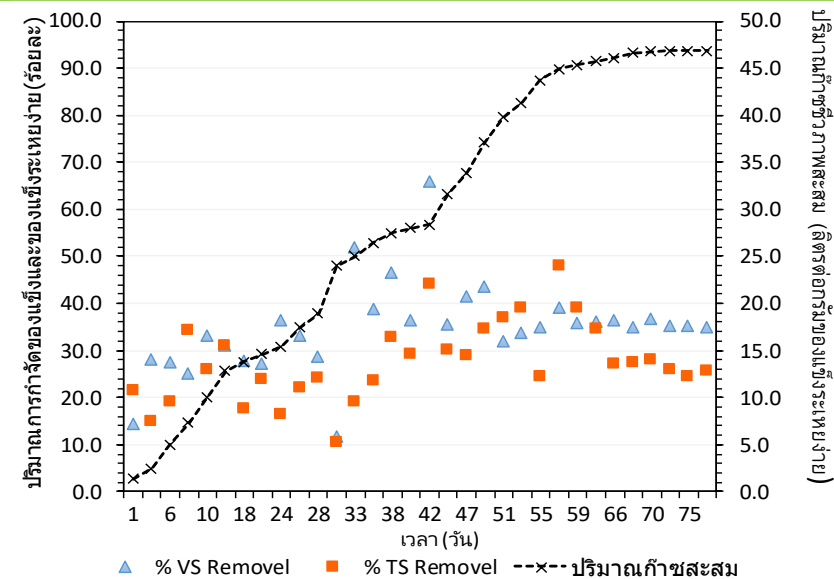
สังเกต จากรูปที่ 7 ในงานวิจัยช่วงแรกของการเดินระบบจุลินทรีย์ยังไม่สามารถสัมผัสหรือย่อยอาหารได้อย่างเต็มที่ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งและของแข็งระเหยง่ายการกำจัดน้อย ต่อมาจุลินทรีย์เริ่ม

ปรับตัวกับปริมาณอาหารที่ได้รับ และระบบมีการกวนผสมเพื่อให้จุลินทรีย์ได้สัมผัสอาหารอย่างทั่วถึงทำให้เมทาโนเจนได้รับอาหารอย่างทั่วถึงมากขึ้นจนมาถึงช่วงสภาวะคงตัวเมทาโนเจนผลิตก๊าซชีวภาพได้น้อยลง ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งและของแข็งระเหยง่าย

มีปริมาณลดลงจนคงที่ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งและของแข็งระเหยง่าย มีแนวโน้มของกราฟไปในทิศทางเดียวกันกับค่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี

เนื่องจากเป็นพารามิเตอร์ที่แสดงถึงปริมาณอาหาร และการใช้อาหารของจุลินทรีย์ในการเปลี่ยนไปเป็นก๊าซมีเทน ซึ่งเป็นองค์ประกอบในก๊าซชีวภาพต่อไป

อัตราส่วนผสม 80:20 OLR 2.5 kgVS/day-m³ HRT 10 days



รูปที่ 7 กราฟแสดงค่าประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็ง และของแข็งระเหยง่ายในระบบ
กับปริมาณก๊าซชีวภาพ

จากการศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับปริมาณของแข็งที่ส่งผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ ในถังปฏิกิริยาแบบไร้อากาศ 50 ลิตร โดยมีปริมาณของแข็งร้อยละ 2.6 4.6 6.2 7.4 9.2 12.3 และ 18.4 ตามลำดับ ระยะเวลา 90 วัน เกิดก๊าซชีวภาพ 115.7 122.33 172.34 137.99 184.09 186.28 และ 54.87 มิลลิลิตรต่อกรัม ของแข็งระเหยง่าย

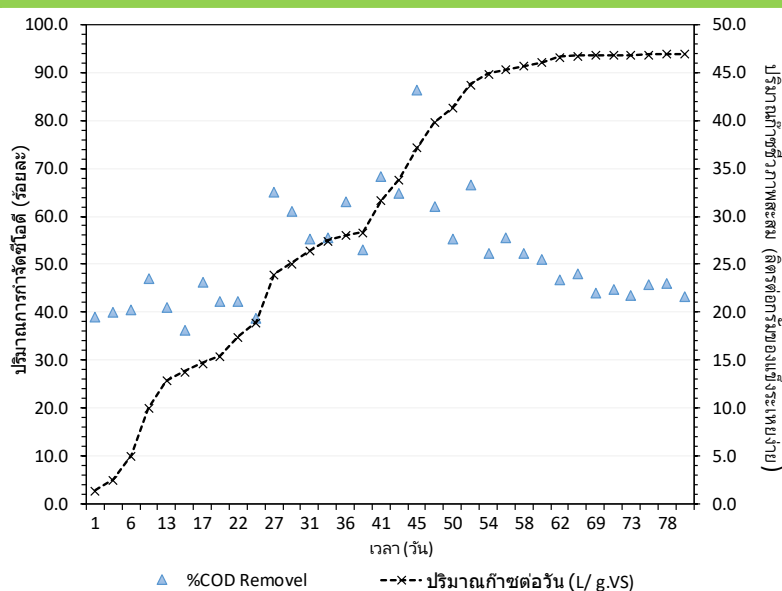
พบว่าปริมาณของแข็งมีผลต่อปริมาณการสะสมกรดในระบบซึ่งส่งผลโดยตรงกับการเกิดก๊าซชีวภาพ [3] และจากการศึกษางานวิจัยการผลิตก๊าซชีวภาพจากจะเห็นได้ว่าปริมาณของแข็งทั้งหมดและของแข็งที่จุลินทรีย์ มูลไก่ และหญ้าเนเปียร์ ในถังหมักแบบขั้นตอนเดียว จากเริ่มแรกมีค่าปริมาณของแข็งทั้งหมด และปริมาณของแข็งระเหย

ง่าย 24,610 และ 17,440 มก.ต่อลิตร เมื่อสิ้นสุดระบบมีค่าปริมาณของแข็งทั้งหมด และปริมาณของแข็งระเหยง่าย 10,377 และ 4,209 มก.ต่อลิตร ประสิทธิภาพการกำจัดปริมาณของแข็งและของแข็งระเหยง่ายร้อยละ 57.8 และ 75.8 สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงสุดถึง 23 ลิตรต่อวัน และประกอบด้วยก๊าซมีเทน ร้อยละ 74.5 [4]

จากรูปที่ 8 ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีในช่วงร้อยละ 39 ถึง 86.5 ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีสูงสุด มีค่าร้อยละ 86.5 ในวันที่ 45 ของการวิจัย ปริมาณก๊าซชีวภาพ 2.27 ลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย

และปริมาณก๊าซมีเทน ร้อยละ 63.5 โดยปริมาตร ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีเป็นพารามิเตอร์มีความสำคัญอีกพารามิเตอร์สามารถบอกถึงประสิทธิภาพการทำงานของระบบ ส่งผลต่อความสามารถในการเกิดก๊าซมีเทน ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในก๊าซชีวภาพ จุลินทรีย์ได้ย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อนำไปผลิตเป็นก๊าซมีเทนต่อไป หากระบบมีค่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีในร้อยละที่สูง ปริมาณก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพมีโอกาสเกิดขึ้นสูงด้วยค่ายอมรับได้อยู่ในช่วง ร้อยละ 5-85 [1]

อัตราส่วนผสม 80:20 OLR 2.5 kgVS/day-m³ HRT 10 days



รูปที่ 8 กราฟแสดงค่าประสิทธิภาพซีโอดีในระบบกับปริมาณก๊าซชีวภาพ

ในช่วงแรกของการป้อนอัตราบรรทุกภาระสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบมีการเปลี่ยนแปลงจุลินทรีย์ยังไม่สามารถทำงานได้เต็มประสิทธิภาพส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่าช่วงอื่นในระบบ เข้าสู่ต่อมาจุลินทรีย์ทำงานได้ดีขึ้นส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีเพิ่มมากขึ้น ถึงช่วงระบบเริ่มเข้าสู่สภาวะคงตัวค่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีจะลดลงอีกครั้งหนึ่งซึ่งสอดคล้องกับปริมาณก๊าซชีวภาพที่แนวโน้มลดลงจนคงที่ หากมีอัตราบรรทุกภาระสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบมากเกินไป ระบบเกิดการสะสม

กรดสามารถส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี ค่าความเป็นกรด-ด่าง อัตราส่วนระหว่างกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อคาร์บอนเดมกเกินไปสามารถส่งผลต่อเกิดก๊าซชีวภาพได้หรืออาจทำให้ระบบล้มเหลวได้

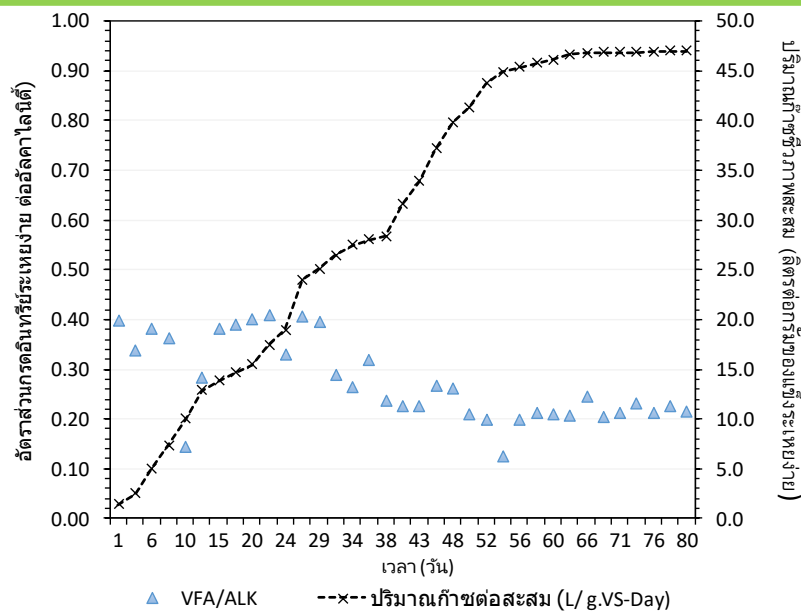
จากการศึกษางานวิจัยได้ศึกษาการหมุนเวียนของน้ำเสียในถังหมักไร้ออกซิเจนที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี และการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานสุรา เริ่มให้ค่าซีโอดี 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 0.25 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ระยะเวลาพักเก็บ 20 วัน โดยทำการเปลี่ยน

อัตราส่วนการหมุนเวียนเข้าระบบที่อัตราไหลเข้าต่ออัตราไหลเวียนกลับ เท่ากับ 1:5 1:10 1:15 และ 1:20 ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีเฉลี่ย ร้อยละ 41 57 62 72 และ 75 ตามลำดับ อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อซีโอดีที่ถูกกำจัด 0.10 0.12 0.21 0.37 และ 0.48 ลิตรต่อกรัม ซีโอดีที่ถูกกำจัด ก๊าซมีเทน ร้อยละ 45.14 53.96 52.23 54.23 และ 55.43 ตามลำดับ ต่อมาเพิ่มอัตราการระบายรุกรานอินทรีย์จากเป็น 0.5 และ 1.0 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ทำให้ค่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ร้อยละ 77 และ 76 ตามลำดับ อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ 2,961 และ 3,391 มิลลิลิตรต่อวัน อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อซีโอดีที่ถูกกำจัด 0.36 และ 0.21 ลิตรต่อกรัมซีโอดีที่ถูกกำจัด ก๊าซมีเทน ร้อยละ 64.24 และ 53.87 ตามลำดับ [28] หากเพิ่มอัตราการระบายรุกรานอินทรีย์ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้น และปริมาณร้อยละของก๊าซมีเทนที่เพิ่มขึ้น อาจสรุปได้ว่าค่าประสิทธิภาพในการกำจัด

ซีโอดีมีผลโดยตรงกับปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น

จากงานวิจัย รูปที่ 9 แสดงค่าอัตราส่วนระหว่างกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อคาร์บอนในการเดินระบบตลอดการวิจัย มีค่าอยู่ระหว่าง 0.15-0.42 อัตราส่วนระหว่างกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อคาร์บอน (VFA/ALK) เป็นค่าพารามิเตอร์บ่งบอกการทำงานของแบคทีเรียทั้ง 2 กลุ่ม ได้แก่ แบคทีเรียกลุ่มสร้างกรด และแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน และค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) จะแสดงถึงความต้องการการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่าง หรือเรียกว่าปริมาณบัฟเฟอร์ ในการเดินระบบนั้น การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง ขึ้นอยู่กับการสะสมตัวของกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (VFA) ซึ่งเป็นผลผลิตจากกลุ่มแบคทีเรียสร้างกรด เพื่อไปเป็นอาหารให้กลุ่มแบคทีเรียสร้างมีเทน เพราะฉะนั้นเราจะสามารถดูเสถียรภาพในระบบ และความสามารถในการควบคุมการเดินระบบได้ในรูปของอัตราส่วนระหว่างกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อคาร์บอน ซึ่งควรมีค่าไม่เกิน 0.8 [30]

อัตราส่วนผสม 80:20 OLR 2.5 kgVS/day-m³ HRT 10 days



รูปที่ 9 กราฟแสดงอัตราส่วนระหว่าง VFA/ALK กับปริมาณก๊าซชีวภาพ

ในช่วงแรกของระบบ กรดอินทรีย์ระเหยง่ายถูกเปลี่ยนไปเป็นอาหารของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน

(Methanogen) ในการสร้างก๊าซชีวภาพ ส่งผลให้ค่าอัตราส่วนระหว่างกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อคาร์บอนมี

ปริมาณเพิ่มขึ้น ต่อมาค่าอัตราส่วนระหว่างกรดอินทรีย์
ระเหยง่ายต่อคาร์บอนเดิมมีปริมาณลดลง แบบที่เรียทั้ง 2
กลุ่ม มีการทำงานร่วมกันได้ดีสอดคล้องกับค่าปริมาณก๊าซ
ชีวภาพที่เพิ่มขึ้น และสามารถสังเกตจากค่าความเป็นกรด
เป็นด่างคงที่ (อยู่ในช่วง 7.0-7.5) แสดงว่าระบบมีปริมาณ
บัฟเฟอร์เพียงพอต่อการเดินระบบ ในช่วงสุดท้ายเข้าสู่ช่วง
สภาวะคงที่ ค่าอัตราส่วนระหว่างกรดอินทรีย์ระเหยง่าย
ต่อคาร์บอนเดิมเริ่มลดลงจนคงที่ สอดคล้องกับค่าก๊าซ
ชีวภาพที่เกิดขึ้นเริ่มเข้าสู่ช่วงสภาวะคงที่ (Steady State)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ศึกษาการไหลของถังเอเอสบี
อาร์ ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี และอัตราการ
เกิดก๊าซมีเทน จำนวน 3 ถัง (ถัง A B และ C) มีปริมาตร
23 ลิตร โดยใช้กากสำจากโรงงานผลิตสุรา พบว่า
อัตราส่วนปริมาณกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างทั้งหมด
(VFA/ALK) มีค่า 0.44 0.31 และ 0.70 ตามลำดับมีค่า
ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีร้อยละ 68.6 74.0 และ 62.5
และได้ค่าปริมาณก๊าซมีเทนจำเพาะ 0.051 0.086 และ
0.402 ลิตรปริมาณมีเทนต่อกรัมซีโอดีเข้า จะเห็นได้ว่าถัง
ปฏิกรณ์ B ที่มีค่าอัตราส่วนปริมาณกรดไขมันระเหยต่อ
สภาพต่างทั้งหมด น้อยกว่า 0.4 [29] ซึ่งแสดงว่าระบบมี
ความสามารถในการรักษาปริมาณบัฟเฟอร์เพียงพอต่อ
การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชได้

ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน
เป็นกระบวนการในการเปลี่ยนสารอินทรีย์ไปเป็นก๊าซชีวภาพ
ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน โดยใช้จุลินทรีย์ในการย่อย
สลายซึ่งก๊าซมีเทนองค์ประกอบหลักของก๊าซชีวภาพ
ประมาณร้อยละ 50-70 และมีก๊าซอื่นๆ ประกอบไปด้วย
คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ประมาณร้อยละ 36-
39 และก๊าซอื่นๆ ประมาณร้อยละ 1-3 (อาทิเช่น H_2 H_2S
 N_2 และไอน้ำ) [30] คุณสมบัติของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจึง
ขึ้นอยู่กับปริมาณมีเทน ซึ่งการจะผลิตก๊าซชีวภาพที่ได้
ปริมาณก๊าซมีเทนมากนั้นต้องอาศัยหลากหลายปัจจัยที่
เกี่ยวข้อง เพื่อให้ได้สภาวะที่เหมาะสมที่จุลินทรีย์ในการ
ผลิตก๊าซชีวภาพ จากการวิจัยในครั้งนี้พบว่าปริมาณก๊าซ
ชีวภาพมีค่าองค์ประกอบก๊าซมีเทนมากที่สุดในวันที่ 4

ของการเดินระบบ ปริมาณมีเทนร้อยละ 63.51 จากรูปที่
8 ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี และค่าประสิทธิภาพ
ในการกำจัดของแข็ง และรูปที่ 7 ของแข็งระเหยง่ายใน
ระบบ จะเห็นได้ว่าหากระบบมีค่าประสิทธิภาพในการ
กำจัดซีโอดีสูงที่สุด และค่าประสิทธิภาพในการกำจัด
ของแข็งระเหยง่ายในระบบ สูงสุดในวันที่ 45 มีค่าร้อยละ
86.5 และ 65.8 ตามลำดับ สอดคล้องกับปริมาณก๊าซ
มีเทนสูงสุดปริมาณของการวิจัย ซึ่งเป็นปริมาณที่มากพอที่
สามารถติดไฟได้ ค่าอัตราการผลิตก๊าซมีเทนของจุลินทรีย์
(Specific Methane Yield) 0.195 ลิตรของก๊าซชีวภาพ
ต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย โดยมีค่าประสิทธิภาพการ
กำจัดของแข็งระเหยง่ายเฉลี่ยตลอดการวิจัยอยู่ที่ร้อยละ
34.68

4. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการศึกษาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมต่อการเกิด
ก๊าซชีวภาพแบบกะ สัดส่วนที่มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม
สูงสุด คือ ชุดการทดลองอัตราบรรทุกาหารสารอินทรีย์
2.5 กิโลกรัมของแข็งระเหยง่าย ต่อลบ.ม.ต่อวัน สัดส่วน
วัสดุหมัก 80:20 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม 158.9, 152.5
และ 130.8 มล.ต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย ตามลำดับ ซึ่ง
สอดคล้องกับประสิทธิภาพการกำจัดของแข็ง ร้อยละ 74.1
68.6 และ 72.0 ตามลำดับ และประสิทธิภาพการกำจัด
ของแข็งระเหยง่าย ร้อยละ 79.6 81.9 และ 74.2
ตามลำดับ แต่เนื่องจากชุดการทดลองมีระยะเวลาเก็บ
แตกต่างกัน 10 20 และ 30 วัน ตามลำดับ ซึ่งอาจส่งผล
ต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ เนื่องจาก
ระยะเวลาเก็บที่นานไปส่งผลต่อปริมาณอาหารของ
จุลินทรีย์ไม่เพียงพอต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ ทำให้ปริมาณ
ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นน้อยลง จะเห็นว่าระยะเวลากักเก็บ
เป็นอีกปัจจัยที่สามารถส่งผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ และ
ค่าวิเคราะห์ทางเคมี และปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมา
วิเคราะห์สหสัมพันธ์ (Correlation Analysis) เพื่อศึกษา
ความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรว่ามีความสัมพันธ์มาก
น้อยเพียงใดกับค่าก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น จากตารางที่ 4

แสดงค่าความสัมพันธ์ของก๊าซชีวภาพกับพารามิเตอร์ต่างๆ จะเห็นได้ว่า ความสัมพันธ์มีนัยสำคัญที่ระดับ 0.01 ทั้ง 5 พารามิเตอร์ และมีค่าความเชื่อมโยงกันความสัมพันธ์เป็นบวกเปรียบเทียบค่าได้มากใน 4 ตัวแปรแรก จะเห็นได้ว่าค่าพารามิเตอร์ต่างๆ มีความสัมพันธ์กับการเกิดก๊าซชีวภาพจริงทั้งในการทดลอง และการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์

ตารางที่ 4 แสดงค่าความสัมพันธ์ของก๊าซชีวภาพกับพารามิเตอร์ต่างๆ

Correlations		
Biogas		
Parameter	r	P-Value
pH	.781**	0.000
%COD Removel	.728**	0.000
% TS Removel	.746**	0.000
% VS Removel	.730**	0.000
VFA/ALK	.562**	0.002

** . Correlation is significant at the 0.01 level

* . Correlation is significant at the 0.05 level.

จากการศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพในถังปฏิกรณ์กวนต่อเนื่องแบบไร้อากาศ (CSTR) นำสัดส่วนจากชุดการทดลองแบบกะ เพื่อหาประสิทธิภาพของผักตบชวาผ่านการปรับสภาพ หมักร่วมกับเศษอาหาร ในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด ที่อัตราบรรทุกภาระสารอินทรีย์ 2.5 กิโลกรัมของแข็งระเหยง่ายต่อลบ.ม.-วัน สัดส่วนวัสดุหมัก 80:20 ระยะเวลาพักเก็บ 10 วัน ตลอดการวิจัยมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมตลอดการวิจัย 50.90 ลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย ปริมาณก๊าซชีวภาพสูงสุดอยู่ในวันที่ 45 ของการทดลอง 2.27 ลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย มีปริมาณก๊าซมีเทน ร้อยละ 63.51 โดยปริมาตร ค่าอัตราการผลิตก๊าซมีเทนของจุลินทรีย์ (Specific Methane Yield) 0.067 ลิตรของก๊าซชีวภาพต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย มีค่าความเป็นกรด-ด่างในระบบ 7.35 ค่า

ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ร้อยละ 86.5 ค่าประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่าย ร้อยละ 44.1 ค่าประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่าย ร้อยละ 65.8 ค่าอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน 41.98 และค่าอัตราส่วนระหว่างกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อคาร์บอน 0.27 จะเห็นได้ว่าวันที่เกิดปริมาณก๊าซชีวภาพสูงสุด และมีค่าปริมาณก๊าซมีเทนมากที่สุดอยู่ในช่วงการเดินระบบอาจเนื่องจากระบบได้มีการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุดในช่วงนั้นสังเกตได้จากค่าพารามิเตอร์ต่างๆในระบบที่มีค่าสอดคล้องกับปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น อีกทั้งปริมาณก๊าซมีเทนยังมีปริมาณมากพอที่จะจุดไฟติด

จากศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องของศักยภาพการย่อยสลายของผักตบชวา ร่วมกับน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตยีสต์สกัด ในถังหมักแบบถังเดี่ยว แบบไม่ต้องการออกซิเจน โดยใช้ถังหมักขนาด 20 ลิตร โดยใช้ผักตบชวาส่วนของลำต้นผักตบชวาสับละเอียดอัตราส่วน (ผักตบชวา:น้ำเสีย) ที่อัตราส่วน 4:1 2:1 1:1 0:1 1:0 และ 1:2 อุณหภูมิที่ 35 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 50 วัน พบว่าอัตราส่วน 2:1 ให้ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมเฉลี่ย 4.05 ลิตร อัตราการเกิดก๊าซมีเทนเฉลี่ย ร้อยละ 50.3 ในวันที่ 50 ค่าอัตราการผลิตก๊าซมีเทนของจุลินทรีย์ (Specific Methane Yield) อยู่ในช่วง 0.009-0.194 ลบ.ม.ของก๊าซมีเทนต่อกรัมซีโอดี ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี อยู่ในช่วงร้อยละ 20.78-72.71 [1] และจากศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องของการหมักร่วมระหว่างผักตบชวาผ่านการปรับสภาพด้วยด่าง และมูลแกะ โดยอัตราส่วนผสม 6 อัตราส่วน อุณหภูมิ 30-37 องศาเซลเซียส ปริมาณของแข็งในการหมัก ร้อยละ 8 ระยะเวลาพักเก็บ 60 วัน พบว่าอัตราส่วนที่ดีที่สุด 4:12.01:83.90 (ผักตบชวา:มูลแกะ:น้ำ) ปริมาณก๊าซชีวภาพสูงสุด 0.36 ลิตรต่อกรัม ของแข็งระเหยง่าย ปริมาณก๊าซมีเทน ร้อยละ 60.84 คาร์บอนไดออกไซด์ ร้อยละ 21.53 ก๊าซอื่นๆ 17.83 [31] ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าผักตบชวาเป็นวัสดุที่สามารถนำมาเป็นวัสดุหมักในการผลิตก๊าซชีวภาพ แต่ควรมีกระบวนการปรับสภาพก่อนนำมาใช้งานเนื่องจากผักตบชวามีโครงสร้างลิกนินที่

จุลินทรีย์ย่อยสลายได้ยากอีกทั้งควรปรับค่าอัตราส่วนให้เหมาะสมต่อธาตุอาหารแก่จุลินทรีย์ในการเกิดก๊าซชีวภาพ และก๊าซมีเทน ในงานวิจัยนี้เลือกการใช้แสงแดดเพื่อเป็นการลดพลังงานที่ใช้ในการปรับสภาพด้วยความร้อนวิธีอื่น และลดค่าใช้จ่ายในการปรับสภาพด้วยสารเคมี หรือ จุลินทรีย์ต่างๆ โดยเลือกใช้วัสดุหมัก (ผักตบชวา และเศษอาหาร) ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและขยะอินทรีย์ เพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดหรือจัดการในมหาวิทยาลัย

5. กิตติกรรมประกาศ

ในการวิจัยนี้ขอขอบคุณ อาจารย์ เจ้าหน้าที่ ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อมในการให้คำปรึกษาช่วยเหลือในการวิจัย เชื่อมั่นได้ความอนุเคราะห์จาก พารมหนูชื่นสุข อำเภองครักษ์ เครื่องเข้าชุดทดลองที่ 1 ได้ความอนุเคราะห์ต้นแบบมาจากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรเวศน์ เครื่องเข้าชุดทดลองที่ 2 ได้ความอนุเคราะห์ต้นแบบมาจาก คุณสมพร เครืออนุกร

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Development and Investment in Renewable Energy Manual Series 5 Biogas Energy, Department of Alternative Energy Development and Efficiency Ministry of Energy, Bangkok, TH, 2018.

[2] N. Paepatung, A. Nopharatana and W. Songkasiri, "Bio-Methane Potential of Biological Solid Materials and Agricultural," *Asian Journal on Energy and Environment*, vol. 10, no. 01, pp. 19-27, Jan. 2009.

[3] B. Budiyo, I.N. Widiasa, S. Johari and S. Sunarso, "The Influence of Total Solid Contents on Biogas Yield from Cattle Manure Using Rumen Fluid Inoculum," *Energy*

Research Journal, vol. 1, no. 01, pp. 6-11, Jun. 2010.

- [4] C. Khunpakdee, K. Khuanmar and S. Yodthongdee, "Development of the Biogas Production System from a Co-digestion of Inoculums Chicken Manure and Napier grass in Covered Lagoon with Circulating," in *The National and International Graduate Research Conference*, Khon Kaen, 2017, pp.445-455.
- [5] C. Kitjettanee and T. Hudakorn, "Biogas Production from Water of Water-hyacinth Leaf and Patiole co-digestion with Microorganism under Mesophilic and Thermophilic Condition," M. S thesis, Engineering and Industrial Technology, Silpakorn Univ., Thailand, 2018.
- [6] N. Sohgratok, "Biogas Production from Decanter Cake of Plam Oil Mill with Waste water from Frozen Seafood Industry," M. S thesis, Dept. Env. Eng., Prince of Songkla Univ., Thailand, 2013.
- [7] P. Wassanamongkon, "Biogas Production from Pig Manure and Crude Glycerol," M. S thesis, Dept. Env. Eng., Prince of Songkla Univ., Thailand, 2014.
- [8] C. Zhang, H. Su, J. Baeyens and T. Tan, "Reviewing the Anaerobic digestion of food waste for biogas production," *Renewable and Sustainable Energy Review*, vol. 38, pp. 383-392, Oct. 2014.
- [9] K. Aboudi, C. J. Álvarez-Gallego and L. Romero-García, "Biomethanization of sugar beet byproduct by semi-continuous single digestion and co-digestion with cow

- manure,” *Bioresource Technology*, vol. 200, pp. 311–319, Jan. 2016.
- [10] M. Budych-Gorzna, M. Smoczynski and P. Oleskowicz-Popiel, “Enhancement of biogas production at the municipal wastewater treatment plant by co-digestion with poultry industry waste,” *Applied Energy*, vol. 161, pp. 387–394, Jan. 2016.
- [11] C. Li, P. Champagne and B.C. Anderson, “Enhanced biogas production from anaerobic co-digestion of municipal wastewater treatment sludge and fat, oil and grease (FOG) by a modified two-stage thermophilic digester system with selected thermochemical pre-treatment,” *Renewable Energy*, vol. 83, pp. 474-482, Nov. 2015.
- [12] T. Sansawang, H. Pungrakame, T. Hutakorn and P. Ausuparut, “Study of The Effect for Biochemical Methane Potential Using Water Hyacinth with Wastewater from Yeast Extract,” in *The 10th Walailak Research National Conf.*, Nakhon Si Thammarat, 2019, pp.1-8.
- [13] R. Pawongrat, “Pretreatment processes for enhancing the efficiency of ethanol production from lignocellulosic agricultural wastes,” *Veridian E-Journal Science and Technology Silpakorn University*, vol. 02, no. 01, pp.143-157, May-Jul. 2015.
- [14] P. Sungkasudi, P. Rachdawong and C. Nuengjamnong, “Physical Pretreatment of Water Hyacinth for Biogas Production,” *Thai Environmental Engineering Journal*, vol. 30, no. 2, pp. 9-18, May - August 2017.
- [15] L. Panpan, H. Chao, L. Gang, D. Pan, L. Mingming, G. Zan and J. Youzhou, “Biological pretreatment of corn straw for enhancing degradation efficiency and biogas production,” *Bioengineered*, vol. 11, no. 01, pp. 251-260, 2020.
- [16] C. Kobkam, “Development of the Biogas Production System from a Co-digestion of Inoculums Chicken Manure and Napier grass in Covered Lagoon with Circulating,” *KMUTNB Int. J. Apply Sci. Technol.*, vol. 11, no. 04, pp.247-256, Jul. 2018.
- [17] A. Bauer, J. Lizasoain, F. Theuretzbacher, J. W. Agger, M. Rincón, S. Menardo and S.J Horn, “Steam explosion pretreatment for enhancing biogas production of late harvested hay,” *Bioresource Technology*, vol. 166, pp. 403–410, Aug. 2014.
- [18] Z. Sapci, “The effect of microwave pretreatment on biogas production from agricultural straws,” *Bioresource Technology*, vol. 128, pp. 487–494. Sep.2012.
- [19] N. Paepatung, A. Nopharatana and W. Songkasiri, “Bio-methane potential of biological solid materials and agricultural wastes,” *Asian Journal on Energy and Environment*, vol. 10, no. 01, pp. 19–27.
- [20] J. L. Varanasi, S. Kumari and D. Das, “Improvement of energy recovery from water hyacinth by using integrated system,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 3, pp. 1303–1318, Nov. 2018.
- [21] V. P. Rathod et al., “Biogas production from water hyacinth in the batch type anaerobic

- digester,” *Mater. Today*, vol. 5, no. 11, pp. 23346–23350, May 2018.
- [22] K. Hussaro, J. Intanin and S. Teekasap, “Biogas production from food waste and vegetable waste for the sakaew temple community anghong province Thailand,” *GMSARN International Journal*, vol. 11, pp. 82-89, 2017.
- [23] N. Curry and P. Pillay, “Biogas prediction and design of a food waste to energy system for the urban environment,” *Renew. Energy*, vol. 41, pp. 200–209, Oct. 2012.
- [24] B. Deepanraj, V. Sivasubramanian, and S. Jayaraj, “Effect of substrate pretreatment on biogas production through anaerobic digestion of food waste,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 42, pp. 26522–26528, Jun. 2017.
- [25] K. P. A. Rangsuriyachai, “Evaluation of biogas production potential from combination of food waste with Pre-treatment of Napier grass by NaOH,” in *The 25 th National Convention on Civil Engineering*, Chonburi, pp. ENV03-1-6, 2020.
- [26] Y. Lerkmahalikhit and S. Sasananan, “Production of Biogas from Digestion Water Hyacinth Pretreatment with Food waste for Alternative Energy,” in *The 23 th National Convention on Civil Engineering*, Nakhon Nayok, pp. 1-5, 2018.
- [27] K. Thuanthong, P. Banjerdgig, S. Distnaree and S. SuchatLeungprasert, “Biogas Production from Water Hyacinth Extract,” *Thai Environmental Engineering Journal*, vol. 32, no. 1, pp. 43-49, May - August 2018.
- [28] U. Nakaparkorn, “Effect of internal recycle in anaerobic digester on biogas production from slop wastewater,” M. S thesis, Dept. Environ. Eng., Chulalongkorn Univ., Thailand, 2008.
- [29] R. Tipo, P. Pholchan, “Effects of down-flow to up-flow width ratios on efficiency of ABR treating distillery slop,” in the 13th KU-KPS Conference, Nakhon Pathom,. 2016, pp. 295-302.
- [30] Practical manuals on design, production Quality control and use of biogas for industrial plants, Safety Technology Bureau Department of Industrial Works., TH, 2009.
- [31] J. H. Patil, M. A. L. AntonyRaj, B. B. Shankar, M. K. Shetty and B. P. P. Kumar, “Anaerobic co-digestion of water hyacinth and sheep waste,” *Energy Procedia*, vol. 52, pp. 572–578, Dec. 2014.

ปัจจัยที่มีผลต่อความสำเร็จในการร่วมขนส่งของผู้ผลิตในการค้าปลีกสมัยใหม่

Key Success Factor for Manufacturer Joint Delivery System in Modern Trade

ดวงพรรณ กริชชาญชัย^{1*} มนสิชา ธนกาญจนโรจน์¹ ศรีวิมล พันธุ์วงศ์¹
ปฏิพล เอี่ยมวัฒนศิลป์¹ ศิริรัตน์ ศรีสกุลวรรณ²

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยมหิดล

²ศูนย์การจัดการโลจิสติกส์และโซ่อุปทานสุขภาพ มหาวิทยาลัยมหิดล

Duangpun Kritchanchai^{1*}, Monsicha Thanakanjanaroj¹, Sriwimon Phanwongsa¹,

Patipon Iamwattanasin¹ Sirirat Srisakunwan²

¹ Faculty of Industrial Engineering, Mahidol University

² Centre of Logistics Management and Healthcare Supply Chain (LogHealth), Mahidol University

* Corresponding author Email: duangpun.skr@mahidol.edu

(Received: February 6, 2020 ; Accepted: June 23, 2021)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อความสำเร็จในการร่วมขนส่งของผู้ผลิต สำหรับธุรกิจค้าปลีกสมัยใหม่และเพื่อประเมินทางเลือกที่เหมาะสมที่สุดสำหรับผู้ผลิตในการร่วมขนส่ง โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาร่วมขนส่งในมุมมองของผู้ผลิตเพียงอย่างเดียว ทั้งนี้ ในการร่วมขนส่งจะประสบผลสำเร็จได้ จะต้องทำการศึกษาและพิจารณาปัจจัยเกี่ยวกับการขนส่งในด้านต้นทุน ความน่าเชื่อถือ การดำเนินงาน ความยืดหยุ่น และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยใช้กระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น (AHP) ในการเปรียบเทียบปัจจัยและให้ค่าน้ำหนักความสำคัญของแต่ละปัจจัย รวมทั้งทำแบบสอบถามเพื่อให้ผู้ผลิตให้คะแนนปัจจัยและประเมินทางเลือกในการร่วมขนส่งที่เหมาะสมในประเทศไทย จากการเก็บรวบรวมข้อมูลแบบสอบถามของผู้เชี่ยวชาญที่สนใจในการร่วมขนส่งพบว่าปัจจัยที่ผู้ประกอบการให้ความสำคัญมากที่สุดอันดับที่หนึ่ง คือ ปัจจัยด้านความน่าเชื่อถือ เรื่อง คุณภาพสินค้าไม่เสียหายหรือสูญหายตลอดการขนส่ง และผลสรุปของการประเมินทางเลือก พบว่า การใช้ Hub เป็นจุดศูนย์รวมสินค้าที่ขนส่งมาจากผู้ผลิตเองในแต่ละราย คือทางเลือกที่ผู้ประกอบการเห็นว่าเหมาะสมที่สุดในการร่วมขนส่งสำหรับธุรกิจค้าปลีกสมัยใหม่

คำสำคัญ: ธุรกิจค้าปลีกสมัยใหม่ ระบบร่วมขนส่ง ปัจจัยแห่งความสำเร็จ กระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น

ABSTRACT

This research aims to find factors that affect the success of the manufacturer's transportation. For modern retail businesses and to evaluate the most suitable alternatives for manufacturers to participate in transportation. We solely study Joint Delivery System from the perspective of producers alone. Thus, to reach the goal of the project, we need to study five factors that relate to transportation process which are capital, credibility, operating process, flexibility, and environmental effects by using Analysis Hierarchy Process (AHP) to compare and value each factor respectively. We also provide questionnaire to experts and producers of different companies to give marks on each factor and evaluate options for the most appropriate delivery system to adopt in Thailand. The results of questionnaire done by experts and producers who are interested in Joint Delivery System (JDS) producers and companies all agree that the use of hub as a storage center for goods is the most suitable option for Joint Delivery System today.

Keyword: Modern Retail Business, Key Success Factor, Joint Delivery System, Analysis Hierarchy Process (AHP).

1. บทนำ

ในปัจจุบันธุรกิจค้าปลีกสมัยใหม่ (Modern Trade) มีการเติบโตขึ้นอย่างรวดเร็ว เห็นได้จากในช่วง 2-3 ปีที่ผ่านมา ที่มีการขยายสาขาของธุรกิจประเภทนี้เป็นจำนวนมาก ส่งผลให้เกิดการขนส่งสินค้าจากศูนย์กระจายสินค้าไปยังร้านค้าสาขาที่เพิ่มขึ้น และทำให้โรงงานผู้ผลิตต้องขนส่งสินค้าไปยังศูนย์กระจายสินค้าเพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งจากรายงานปริมาณการจราจรบนทางหลวงปี 2560 ของกรมทางหลวง [1] พบว่ารถบรรทุกขนส่งสินค้าทั้งขาเข้า – ขาออก มีปริมาณไม่น้อยไปกว่ารถยนต์ส่วนบุคคล

ในการศึกษาโซ่อุปทานของอุตสาหกรรมค้าปลีกสมัยใหม่พบว่า การจัดการโลจิสติกส์จากศูนย์กระจายสินค้าไปยังร้านค้าสาขาเป็นโซ่อุปทานแบบปิด กล่าวคือเป็นการจัดการโดยแต่ละองค์กรนั้นๆ อยู่แล้ว ไม่สามารถเข้าไปจัดการแก้ไขหรือปรับปรุงได้ จึงมาพิจารณาโซ่อุปทานการขนส่งจากโรงงานผู้ผลิตไปยังศูนย์กระจายสินค้า พบว่าผู้ผลิตแต่ละรายจะต้องทำการขนส่งผลิตภัณฑ์ของตนไปยังศูนย์กระจายสินค้าเอง นั่นหมายความว่าหากมีผู้ผลิตจำนวน 100 ราย จะทำให้มีรถขนส่งสินค้า จำนวน 100 คัน จุดนี้จึงเป็นปัญหาที่สามารถเข้าไปจัดการแก้ไขความแออัดของปริมาณรถขนส่งได้ โดยมีแนวคิดมุ่งเน้นไปที่การร่วมขนส่งของโรงงานผู้ผลิต หรือ Joint Delivery System (JDS) ในมุมมองของผู้ผลิต โดยการรวบรวมการขนส่งจากหลายๆ โรงงานเพื่อส่งไปยังศูนย์กระจายสินค้าในคราวเดียวกัน

ในการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อความสำเร็จในการร่วมขนส่งของผู้ผลิต สำหรับธุรกิจค้าปลีกสมัยใหม่ และเพื่อประเมินทางเลือกที่เหมาะสมที่สุดสำหรับผู้ผลิตในการร่วมขนส่ง และใช้กระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น (AHP) ในการเปรียบเทียบปัจจัยและให้ค่าน้ำหนักความสำคัญของแต่ละปัจจัย เพื่อประเมินทางเลือกในการร่วมขนส่งที่เหมาะสมตามมุมมองของผู้ผลิตในประเทศไทย

2. บทคัดย่อและคำสำคัญ

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยศูนย์การจัดการโลจิสติกส์และโซ่อุปทานสุขภาพ มหาวิทยาลัยมหิดล [2] ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับข้อมูลระบบโลจิสติกส์กรุงเทพมหานครและปริมณฑล

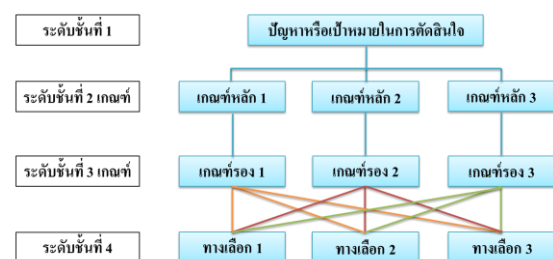
เบื้องต้นเพื่อเตรียมความพร้อมการเป็นมหานครแห่งเอเชีย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาระบบโลจิสติกส์การไหลของสินค้า (Material Flow) รวมถึงระบบคมนาคมขนส่งปัจจุบันในเขตกรุงเทพฯและปริมณฑล ได้ทำการสำรวจข้อมูล และสัมภาษณ์เชิงลึกผู้เชี่ยวชาญที่เกี่ยวข้อง (Expert Interviews) ในแต่ละจังหวัด โดยจัดทำแบบประเมินเกี่ยวกับระบบโลจิสติกส์ที่พัฒนาขึ้น ซึ่งผลการประเมินพบว่า ภาคเอกชนบางส่วนเห็นด้วยกับผลในด้านที่ 1 Logistics Infrastructure & Management ในด้านการเกิดแนวคิดเกี่ยวกับการบริหารจัดการแบบการร่วมขนส่ง การศึกษานี้จึงได้นำแนวคิดนี้มาเป็นเป้าหมายของการดำเนินการในงานวิจัย เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความสำเร็จของการร่วมขนส่งและทางเลือกที่เหมาะสมในการร่วมขนส่ง โดยได้ทำการศึกษาและค้นคว้ารายละเอียดเกี่ยวกับปัจจัยหรือเกณฑ์ในด้านการขนส่งจากงานวิจัยและเอกสารวิชาการต่าง ๆ เพื่อเป็นแนวทางในการกำหนดปัจจัยที่มีผลต่อการร่วมขนส่งของผู้ผลิต ประกอบไปด้วย งานวิจัยของ กันต์ธมน สุขกระจ่าง [3] ได้ศึกษาและรวบรวมปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจในการเลือกใช้ผู้ให้บริการขนส่งของผลิตภัณฑ์สิ่งทอ ปิยะกรณ์ สุนทรวัฒน์ [4] ศึกษาปัจจัยในการคัดเลือกผู้ประกอบการขนส่งสินค้าอุปโภคบริโภคด้วยรถบรรทุกภายในพื้นที่กรุงเทพฯ-ปริมณฑลและพื้นที่ต่างจังหวัด นิธิเดช คูหาทองสัมฤทธิ์ [5] ได้ทำการเสนอแนวคิดและปัจจัยในการเลือกเส้นทางการขนส่งสินค้าทางถนนที่เหมาะสม ปิติ ปิติเพิ่มพูน [6] ได้ทำการศึกษาปัจจัยเชิงปริมาณและปัจจัยเชิงคุณภาพสำหรับการตัดสินใจมีรถขนส่งของตนเอง เศกสรรค์ ตันตระกูล [7] ได้ทำการประยุกต์ใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์มาใช้ในการประเมินทางเลือกสำหรับการขนส่งผลิตภัณฑ์หลักด้วยรถบรรทุกระหว่างการลงทุนเองกับการจ้างภายนอก ในเขตกรุงเทพฯ-ปริมณฑล และภาคตะวันออกของประเทศไทย โดยทำการศึกษารวบรวมปัจจัยรวมถึงให้คะแนนความสำคัญกับแต่ละปัจจัย และสุระ พราหมณ์รักษา และกมลชนก สุทธิวานฤพภูมิ [8] ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการศึกษาตัดสินใจเลือกรูปแบบการขนส่งสำหรับกลุ่มสินค้าอะไหล่ยานยนต์ เพื่อประเมินทางเลือกของการขนส่งที่สามารถตอบสนองต่อความต้องการได้ดีที่สุด งานวิจัยของ Min Qu, Suihuai Yu and Mingjiu Yu [9] ได้ทำการรวบรวมและเลือกปัจจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อเปรียบเทียบและให้

ค่าน้ำหนัก ในการหาแนวทางที่ดีขึ้นของการประเมินการใช้รถร่วมกันในประเทศจีน Frans Cuijssen, Martine Cools and Wout Dullaert [10] ได้นำเสนอผลการสำรวจเกี่ยวกับประโยชน์และอุปสรรคสำคัญที่อาจเกิดขึ้นจากความร่วมมือในแนวนอนทางด้านโลจิสติกส์ มุ่งเน้นที่การเพิ่มผลผลิต เช่น การใช้ประโยชน์จากความรู้ของรถยนต์ให้เหมาะสม ลดระยะทางที่ว่างเปล่า และลดค่าใช้จ่ายของกิจกรรมที่ไม่ใช่ธุรกิจหลัก R. Leitner, F.Meizer, M. Prochazka and W.Sihn [11] ได้ทำการออกแบบแนวความคิดด้านองค์กรของความร่วมมือด้านโลจิสติกส์ในแนวนอน โดยคำนึงถึงความหลากหลายของปัจจัยที่มีอิทธิพลและพารามิเตอร์ เพื่อกำหนดความเป็นไปได้ต่างๆ ในด้านการขนส่งทางแนวนอนสำหรับแต่ละบริษัท การระบุการออกแบบและการดำเนินงานของความร่วมมือที่ดีที่สุดสำหรับพันธมิตรเครือข่าย และวิธีการที่แตกต่างกันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการรวมความร่วมมือสำหรับผู้ส่ง Nicolas Danloup, Hamid Allaoui, Gilles Goncalves [12] ได้ทำการปรับปรุงประสิทธิภาพของซัพพลายเชนในการจัดการความร่วมมือระหว่างผู้ส่งสินค้าในการขนส่งที่ไม่เต็มคันรถ และนำเสนอแบบจำลองไปยังกลุ่มซัพพลายเออร์ โดยเพิ่มฮับ 2 จุด ระหว่างซัพพลายเออร์และลูกค้าเพื่อลดระยะทางการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และทำการจัดเก็บจากหลายบริษัท เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของอัตราการบรรจุของรถบรรทุก โดยมีการพิจารณาระยะทาง และปริมาณผลิตภัณฑ์ที่จะจัดส่ง และงานวิจัยของ H. Manier, M.-A. Manier and Z. Al Chami [13] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการทำงานร่วมกันของผู้ส่งสินค้า และนำเสนอแบบจำลองในการแก้ไขปัญหาการรับและการส่งมอบที่มีหน้าต่างเวลาหลายเวลา ซึ่งมีวัตถุประสงค์ในการลดค่าใช้จ่ายทั้งหมด นอกจากนี้การร่วมขนส่งจำเป็นต้องศึกษารูปแบบในการขนส่งและการกำหนดรูปแบบทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับการร่วมขนส่งในอุตสาหกรรมค้าปลีก งานวิจัยของ Han Wool HONG and Kwang Sup SHIN [14] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการปรับโครงสร้างและหมุนเวียนของธุรกิจรับและจัดส่งพัสดุ เนื่องจากปัญหาการแข่งขันที่สูง ทำให้คุณภาพและความสามารถในการทำกำไรลดลง และทำให้เกิดปัญหาการจราจรติดขัดในพื้นที่เขตเมือง รวมไปถึงปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม จึงได้ทำการพัฒนารูปแบบการบูรณาการบริการระหว่างบริษัทจัดส่งพัสดุที่มากกว่าสองแห่งในพื้นที่บริการเดียวกัน โดยเสนอแนวทางในการออกแบบและกำหนดเส้นทางสำหรับการจัดส่ง โดยใช้วิธีการ K-Means clustering และวิธีการกำหนดเส้นทางยานพาหนะ

(VRP) ที่ช่วยลดความแออัดของจราจรและปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการขนส่งของบริษัทจัดส่งพัสดุในเขตเมือง และในงานวิจัยของ Manuel Ostermeier and Alexander Hubner [15] ได้กล่าวถึงปัญหาการเลือกใช้เส้นทางและปัญหาการเลือกใช้นายพาหนะช่องเดียวและหลายช่องสำหรับธุรกิจร้านขายของชำ จากที่ผู้ค้าปลีกได้ใช้นายพาหนะช่องเดียว และขนส่งเฉพาะกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่มีอุณหภูมิเฉพาะเจาะจงเพียงประเภทเดียว ขณะนี้ผู้ค้าปลีกมีทางเลือกในการใช้รถอเนกประสงค์ เนื่องจากความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่มีอุณหภูมิต่างกันสามารถขนย้ายร่วมกันได้ โดยการจัดสรรและแยกพื้นที่โหลดภายในรถเป็นช่องแยกกันตามอุณหภูมิ ทำให้สามารถจัดส่งผลิตภัณฑ์หลากหลายประเภทให้กับลูกค้าได้ในเวลาเดียวกัน

2.2 กระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น (AHP)

กระบวนการวิเคราะห์เชิงตามลำดับชั้น (Analytic Hierarchy Process : AHP) ได้ถูกคิดค้นและพัฒนาขึ้นเมื่อปลายปี ค.ศ. 1970 โดย ศาสตราจารย์ Thomas L. Saaty (โทมัส ซาตตี้) เป็นกระบวนการตัดสินใจที่มีประสิทธิภาพใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุดในโลก และเป็นกระบวนการที่ช่วยในการตัดสินใจในประเด็นของปัญหาที่มีความซับซ้อนให้มีความง่ายขึ้นและจัดแจงให้อยู่ในรูปของแผนภูมิลำดับชั้น เพื่อนำข้อมูลที่ได้จากความคิดเห็นของผู้ตัดสินใจ มาวิเคราะห์หาบทสรุปของแนวทางเลือกที่เหมาะสม เป็นกระบวนการช่วยในการตัดสินใจโดยอาศัยหลักการของการตัดสินใจแบบพหุเกณฑ์ (Multiple-Criteria Decision- Making) โดยมีขั้นตอนกระบวนการต่างๆ เช่น การจัดโครงสร้างลำดับชั้นของการตัดสินใจ โดยแผนภูมิแบ่งออกเป็นหลายระดับชั้นขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของปัญหา โดยแต่ละชั้นจะประกอบด้วยกลุ่มของเกณฑ์ต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนภูมิของแต่ละระดับชั้น

รวมไปถึงการเปรียบเทียบเกณฑ์ต่างๆ เป็นการเปรียบเทียบรายคู่ (Pair wise comparison) ซึ่งเป็นการ

เปรียบเทียบเพื่อกำหนดค่าน้ำหนักความสำคัญระหว่างเกณฑ์เป็นคู่ ๆ ในการเปรียบเทียบคู่เกณฑ์ ผู้ทำการวินิจฉัยจะต้องทราบว่าปัจจัยที่ทำการพิจารณานั้น มีความสำคัญ มีการส่งผล มีอิทธิพล หรือมีประโยชน์มากกว่าเกณฑ์ปัจจัยอื่นที่ถูกนำมาเปรียบเทียบในระดับใด และมีการหาค่าน้ำหนักเกณฑ์ โดยคำนวณออกมาใน

รูปแบบของตัวเลข ซึ่งจะนำตัวเลขจากค่าน้ำหนักที่ได้จากผู้วินิจฉัยนั้นมาคำนวณหาความสำคัญและวิเคราะห์ตามลำดับชั้น รวมทั้งวิเคราะห์หาค่าน้ำหนักของเกณฑ์การประเมินค่าอัตราความสอดคล้องกันของเหตุผล (Consistency Ratio: C.R.) และค่าดัชนีความสอดคล้อง (Consistency Index: C.I.) โดยค่าดัชนีเชิงวัดความสอดคล้องเชิงสุ่ม (Random Consistency Index : R.I.) โดยที่ค่า R.I. เป็นค่าที่ขึ้นกับขนาดของเมทริกซ์ตั้งแต่ 1x1 จนถึง 10x10 ซึ่งมีผลดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าดัชนีความสอดคล้องตามขนาดของเมทริกซ์ คำนวณอัตราส่วนความสอดคล้อง (Consistency Ratio)

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R.I.	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

3. วิธีการวิจัย

จากงานวิจัยของศูนย์การจัดการโลจิสติกส์และโซ่อุปทานสุขภาพ มหาวิทยาลัยมหิดล [2] ซึ่งผลสรุปมีการสนับสนุนและส่งเสริมให้เกิดการร่วมขนส่งเกิดขึ้น ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงได้นำมาดำเนินการวิจัยต่อ รวมถึงได้นิยามการร่วมขนส่งไว้ดังนี้ การร่วมขนส่ง (Joint Delivery System : JDS) เป็นแนวคิดในการรวบรวมสินค้าจากโรงงานผู้ผลิตหลายๆโรงงาน และเป็นความร่วมมือกับผู้ให้บริการขนส่งทำหน้าที่ในการรวบรวมและจัดส่งสินค้า โดยใช้ศูนย์รวบรวมและกระจายสินค้าหรือเรียกว่า Hub โดยเกิดเป็นการบริหารจัดการพื้นที่ภายในร่วมกัน เพื่อจัดสรรให้การขนส่งเป็นแบบเต็มคัน (Full Truck Load : FTL) ซึ่งระบบบริหารจัดการแบบ JDS จะช่วยลดต้นทุนการขนส่งสินค้า จำนวนยานพาหนะ จำนวนคนขับ ปรับปรุง/พัฒนาสภาพแวดล้อม ลดความแออัดบนท้องถนน ลดการเกิดอุบัติเหตุ และจะทำให้สามารถลดต้นทุนทางโลจิสติกส์ลงไปได้อย่างมาก

3.1 วิเคราะห์และกำหนดปัจจัยที่สำคัญในการร่วมขนส่ง

ผู้ดำเนินการวิจัยได้ทำการศึกษาและค้นคว้ารายละเอียดเกี่ยวกับปัจจัยจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง เพื่อ

เป็นแนวทางในการกำหนดปัจจัยที่มีผลต่อความสำเร็จในการร่วมขนส่งของผู้ผลิต พบว่าปัจจัยที่เกี่ยวข้องเป็นปัจจัยที่มีการกล่าวถึงเป็นจำนวนมากในทุกเอกสารวิชาการที่ได้ทำการศึกษา ซึ่งประกอบด้วยปัจจัยหลักและปัจจัยรองดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2 ปัจจัยหลักและปัจจัยรองที่ใช้ในการวิเคราะห์

ปัจจัยหลัก	ปัจจัยรอง
1. ต้นทุน	- ต้นทุนคงที่ [3-6], [8-13]
	- ต้นทุนผันแปร [9-10], [13]
2. ความน่าเชื่อถือ	- จำนวนรถที่เพียงพอต่อการขนส่ง [4],[7-9], [13]
	- คุณภาพสินค้าไม่เสียหายหรือสูญหายตลอดการขนส่ง [3-5], [7]
3. การดำเนินงาน	- ความตรงต่อเวลาในการรับส่งสินค้า [4],[6-7], [13]
	- ความรวดเร็วของเวลาในการขนส่ง [4-5], [8]
4. ความยืดหยุ่น	- ความสามารถในการจัดเส้นทาง [5-6], [8]
	- ปริมาณสินค้าที่ทำการขนส่ง [10-13]
5. สิ่งแวดล้อม	- การลดมลพิษทางอากาศและเสียง [9], [12]
	- การลดความแออัดของรถขนส่งบนท้องถนน [9], [11-12]

จากตารางที่ 2 สามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังนี้

1) ด้านต้นทุน ประกอบด้วย

- ต้นทุนคงที่ คือ ต้นทุนที่ผู้ผลิตจะต้องเสียในการร่วมขนส่งโดยไม่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณการขนส่ง ไม่ว่าจะมีการขนส่งเกิดขึ้นก็ตาม เช่น ค่าใช้จ่ายแรกเริ่มในการร่วมขนส่ง ค่าเช่าพื้นที่ในกรณีที่มี Hub เป็นศูนย์กลางในการขนส่ง ซึ่งอาจเสียค่าใช้จ่ายแตกต่างกันขึ้นอยู่กับรูปแบบในการขนส่ง

- ต้นทุนผันแปร คือ ต้นทุนหรือค่าใช้จ่ายที่ผู้ผลิตจะต้องเสีย โดยจะเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณการขนส่ง ถ้าหากมีความถี่ในการขนส่งเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ต้นทุนชนิดนี้มากขึ้นตามไปด้วย เช่น ค่าบริการรายเดือนในการร่วม

ขนส่ง หรือในกรณีที่มีการขนส่งเกินกว่าข้อกำหนดหรือเงื่อนไขเริ่มต้นจะต้องมีการเสียค่าใช้จ่ายเพิ่ม

2) ด้านความน่าเชื่อถือ ประกอบด้วย

- จำนวนรถที่เพียงพอต่อการขนส่ง หมายถึง ปริมาณหรือจำนวนรถที่จัดเตรียมไว้สำหรับการขนส่งร่วมกัน มีความเพียงพอต่อความต้องการในการส่งสินค้าของผู้ผลิต ภายในช่วงเวลาที่กำหนด

- คุณภาพสินค้าไม่เสียหายหรือสูญหายตลอดการขนส่ง คือ สินค้ายังคงสภาพเดิมตั้งแต่จุดเริ่มต้นไปจนถึงปลายทาง โดยไม่มีการบุบ ฉีกขาด ร้าว หรือแตกหัก ไม่ว่าจะระหว่างการขนส่งหรือการพักสินค้าที่ Hub รวมถึงไม่เกิดการสูญหายของสินค้าด้วย

3) ด้านการดำเนินงาน ประกอบด้วย

- ความตรงต่อเวลาในการรับ - ส่งสินค้า หมายถึง สินค้าที่ทำการขนส่งไปนั้น 3PL จะต้องมีการจัดการให้ถึงที่หมายได้ตามกำหนดเวลา ไม่ล่าช้า และไม่ก่อให้เกิดความเสียหายจากความล่าช้าในการขนส่งร่วมกัน

- ความรวดเร็วของเวลาในการขนส่งในที่นี้ คือ การจัดส่งสินค้าจากต้นทางไปยังผู้รับปลายทาง โดย 3PL ต้องดำเนินการได้อย่างรวดเร็วมากที่สุด

4) ด้านความยืดหยุ่น ประกอบด้วย

- ความสามารถในการจัดเส้นทาง หมายถึง ในกรณีที่เกิดเหตุการณ์ไม่คาดคิด เช่น จราจรติดขัดเป็นพิเศษ อุบัติเหตุตามท้องถนน 3PL สามารถปรับเปลี่ยนเส้นทางและใช้เส้นทางอื่นที่นำไปสู่จุดหมายปลายทางได้เช่นเดียวกัน

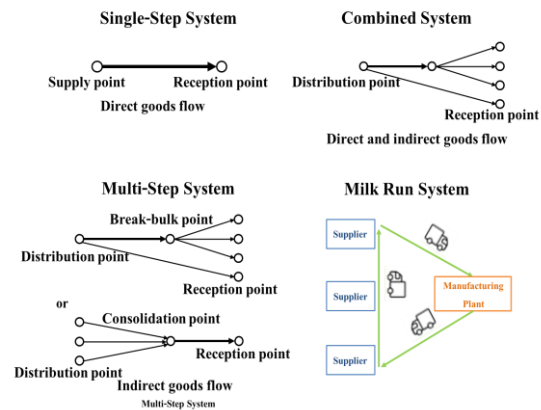
- ความยืดหยุ่นของปริมาณสินค้าที่ทำการขนส่ง ในที่นี้ คือ ในเวลาปกติผู้ผลิตแต่ละรายจะมีจำนวนสินค้าที่ต้องทำการขนส่งในระดับที่ไม่เบี่ยงเบนไปจากปกติมากนัก แต่หากในช่วงที่สินค้ามีความต้องการสูงขึ้น หรือในช่วงเทศกาลที่ทำให้ได้รับความนิยมเป็นพิเศษ 3PL ก็สามารถรองรับปริมาณสินค้าที่ขนส่งร่วมกันได้

5) ด้านสิ่งแวดล้อม ประกอบด้วย

- การลดมลพิษทางอากาศและเสียง หมายถึง การขนส่งร่วมกันของโรงงานผู้ผลิตสามารถลดปริมาณมลพิษในอากาศ อาทิเช่น คาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากยานพาหนะ และช่วยลดการเกิดเสียงรบกวนจากการขนส่งด้วยรถบรรทุกที่มีขนาดใหญ่และบ่อยจนเกินไป โดยการลดมลพิษเหล่านี้จะมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับรูปแบบทางเลือกในการร่วมขนส่ง

- การลดความแออัดของรถขนส่งบนท้องถนน คือ ปริมาณรถขนส่งไม่ว่าจะเป็นรถขนส่งแบบ 4 ล้อ 6 ล้อ 10

ล้อ หรือรถบรรทุกขนาดใหญ่ ที่มีปริมาณลดลงจากการร่วมขนส่งของผู้ผลิต โดยเฉพาะบริเวณกรุงเทพฯ และปริมณฑล ซึ่งปัจจัยนี้ก็ขึ้นกับรูปแบบทางเลือกในการร่วมขนส่งเช่นเดียวกัน



รูปที่ 2 ลักษณะของการเชื่อมโยงระหว่าง Node และ Link ของระบบการขนส่งในเขตเมือง

3.2 วิเคราะห์และกำหนดทางเลือกสำหรับการร่วมขนส่งในมุมมองของผู้ผลิต

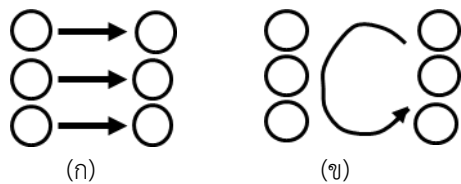
ในขั้นตอนนี้ได้ศึกษารูปแบบลักษณะของการเชื่อมโยงระหว่าง Node และ Link [16] พบว่ามีได้หลายรูปแบบที่แตกต่างกันออกไปตามความต้องการของการบริหารจัดการโซ่อุปทาน เช่นในระบบการขนส่งในเขตเมือง มีรูปแบบ Node และ Link หลายลักษณะดังรูปที่ 2

จากรูปที่ 2 จึงได้ทำการวิเคราะห์รูปแบบการขนส่งในอุตสาหกรรมค้าปลีกที่เป็นไปได้ทั้งหมด 10 รูปแบบ ซึ่งแบ่งเป็นกรณีที่มีการขนส่งช่วงเดียวและการขนส่งสองช่วงดังนี้

กรณีการขนส่งช่วงเดียว : จากผู้ประกอบการหรือจุดเริ่มต้นไปยังศูนย์กระจายสินค้าโดยตรง โดยประยุกต์รูปแบบ Single-Step System และ Milk Run System ได้เป็น 2 รูปแบบ คือ

Single-Step System คือ ระบบที่โรงงานผู้ผลิตทำการผลิตสินค้าและขนส่งไปยังศูนย์กระจายสินค้าเองโดยตรง ซึ่งเป็นรูปแบบหรือสภาพปัจจุบันในอุตสาหกรรมค้าปลีก

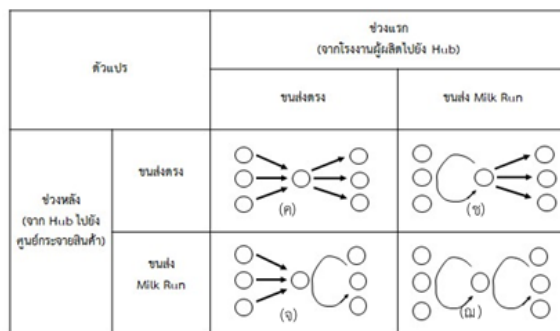
- Milk Run System คือ ระบบที่ร่วมขนส่งโดย ผู้ให้บริการขนส่ง หรือ 3PL ทำหน้าที่ในการรับสินค้าจากโรงงานผู้ผลิตมากกว่า 1 ราย และขนส่งสินค้าไปยังศูนย์กระจายสินค้า ซึ่งโรงงานผู้ผลิตจะทำหน้าที่ผลิตสินค้าเพียงอย่างเดียว



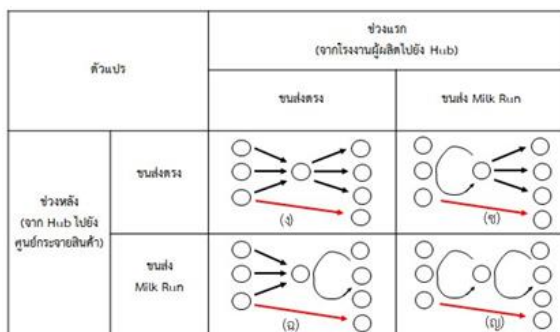
รูปที่ 3 รูปแบบการขนส่ง 1 ช่วง

กรณีที่มีการขนส่ง 2 ช่วง คือ มี Hub อยู่ระหว่างโรงงานผู้ผลิตและศูนย์กระจายสินค้า จะสามารถประยุกต์ Combined System, Multi-Step System และ Milk Run System ได้ทั้งหมด 8 รูปแบบ ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 รูปแบบ Multi Step System ของการขนส่งโดยใช้ Hub



ตารางที่ 4 รูปแบบ Combined System ของการขนส่งโดยใช้ Hub



สำหรับรูปแบบของ Joint Delivery System (JDS) เพื่อใช้เป็นทางเลือกในการร่วมขนส่งของการศึกษานี้ ได้คัดเลือกเฉพาะทางเลือกการร่วมขนส่งในมุมมองของผู้ผลิตเท่านั้น โดยพิจารณาและตัดรูปแบบที่ซ้ำซ้อนออกดังนี้

1) เนื่องจากรูป (ก) เป็นรูปแบบหรือสภาพปัจจุบันของอุตสาหกรรมค้าปลีก

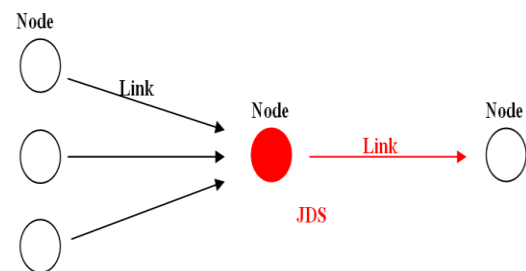
2) เนื่องจากรูป (ง)(ฉ)(ข)(ญ) ทั้ง 4 รูปแบบนี้มีความซ้ำซ้อนกับรูปแบบด้านซ้ายหรือรูป (ค)(จ)(ข)(ฉ) กล่าวได้

ว่ามีรูปแบบการขนส่ง (เส้นสีแดง) เป็นดังสภาพปัจจุบันของอุตสาหกรรมค้าปลีกซึ่งตรงกับรูปแบบในข้อ 1)

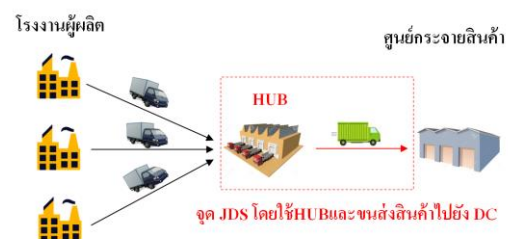
3) งานวิจัยนี้มีขอบเขตที่ทำการศึกษาเพียงแค่มุมมองของผู้ผลิต ในกรณีที่มีการขนส่ง 2 ช่วง จะสนใจแค่รูปแบบการขนส่งในช่วงแรกเท่านั้น โดยการขนส่งในช่วงหลัง คือ จาก Hub ไปยังศูนย์กระจายสินค้า จะเป็นการจัดการของผู้ให้บริการขนส่ง (3PL) ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงรวมรูปแบบ (ค) และ (จ) เข้าด้วยกัน ซึ่งมีรูปแบบการขนส่งในช่วงแรกเหมือนกัน คือ ผู้ผลิตขนส่งสินค้าเองในแต่ละรายไปยัง Hub และรวมรูปแบบในรูป (ข) และ (ฉ) เข้าด้วยกัน ซึ่งมีรูปแบบการขนส่งในช่วงแรกเหมือนกัน คือ ผู้ให้บริการขนส่ง หรือ 3PL จะเป็นผู้รับและขนส่งสินค้าจากโรงงานผู้ผลิตในลักษณะ Milk Run System ไปยัง Hub

จากเงื่อนไขทั้งหมดดังกล่าว ทางผู้วิจัยจึงได้นำเสนอเป็นแบบจำลอง (Model) ของ Joint Delivery System (JDS) เพื่อใช้เป็นทางเลือกในการร่วมขนส่งของผู้ผลิต เป็นจำนวน 3 รูปแบบ ดังนี้

ทางเลือกที่ 1 เป็นการนำรูปแบบ (ค) และ (จ) ในตารางที่ 3 มาประยุกต์เป็นการร่วมขนส่งโดยใช้ Hub เป็นจุดศูนย์รวมสินค้า โดยผู้ผลิตแต่ละรายส่งสินค้ามาไว้ที่ Hub เพื่อให้ 3PL จัดส่งไปยังศูนย์กระจายสินค้าต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 4 และ 5

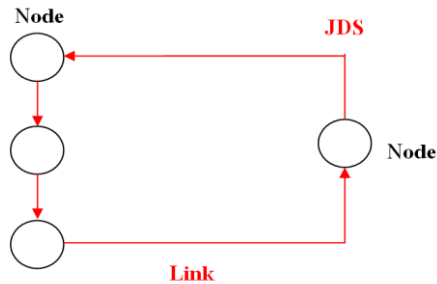


รูปที่ 4 แบบจำลอง Node และ Link ของการร่วมขนส่ง รูปแบบที่ 1



รูปที่ 5 การร่วมขนส่งทางเลือกที่ 1

ทางเลือกที่ 2 ได้นำรูปแบบในรูปที่ 2 (ข) มาประยุกต์ใช้ในการร่วมขนส่ง (JDS) เป็นการร่วมขนส่งโดยใช้รถร่วมกัน ซึ่ง 3PL จะทำการรับสินค้าจากผู้ผลิตบริเวณใกล้เคียงกันส่งไปยังศูนย์กระจายสินค้า ดังแสดงในรูปที่ 6 และ 7

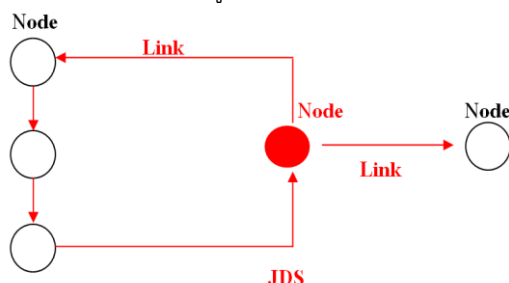


รูปที่ 6 แบบจำลอง Node และ Link
ของการร่วมขนส่ง รูปแบบที่ 2

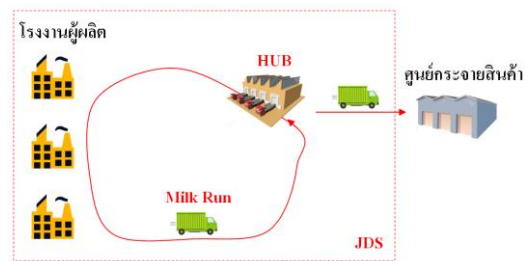


รูปที่ 7 การร่วมขนส่งทางเลือกที่ 2

ทางเลือกที่ 3 ได้นำรูปแบบใน (ข) และ (ฅ) ในตารางที่ 3 มาประยุกต์ใช้ในการร่วมขนส่ง (JDS) โดยใช้รถขนส่งร่วมกันเพื่อรับและเก็บรวบรวมสินค้าจากผู้ผลิตและใช้ Hub เป็นจุดศูนย์รวมสินค้าเพื่อนำสินค้าทั้งหมดจัดส่งไปยังศูนย์กระจายสินค้า ซึ่งจะถูกลดและบริหารจัดการโดย 3PL ทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 8 และ 9



รูปที่ 8 แบบจำลอง Node และ Link
ของการร่วมขนส่ง รูปแบบที่ 3



รูปที่ 9 การร่วมขนส่งทางเลือกที่ 3

3.3 การจัดกระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น

(AHP) ในการร่วมขนส่งของผู้ผลิต

ในขั้นตอนนี้เป็น การประยุกต์ใช้กระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้นเพื่อสร้างรูปแบบโครงสร้างให้อยู่ในรูปของแผนภูมิลำดับชั้น ซึ่งประกอบไปด้วย

ระดับชั้นที่ 1 เป้าหมายในการตัดสินใจ ซึ่งในงานวิจัยนี้คือการตัดสินใจร่วมขนส่งของผู้ผลิต

ระดับชั้นที่ 2 ปัจจัยหลักในการร่วมขนส่ง

ระดับชั้นที่ 3 ปัจจัยรอง

ระดับชั้นที่ 4 รูปแบบทางเลือกในการร่วมขนส่งของผู้ผลิต ทั้งสิ้น 3 ทางเลือก

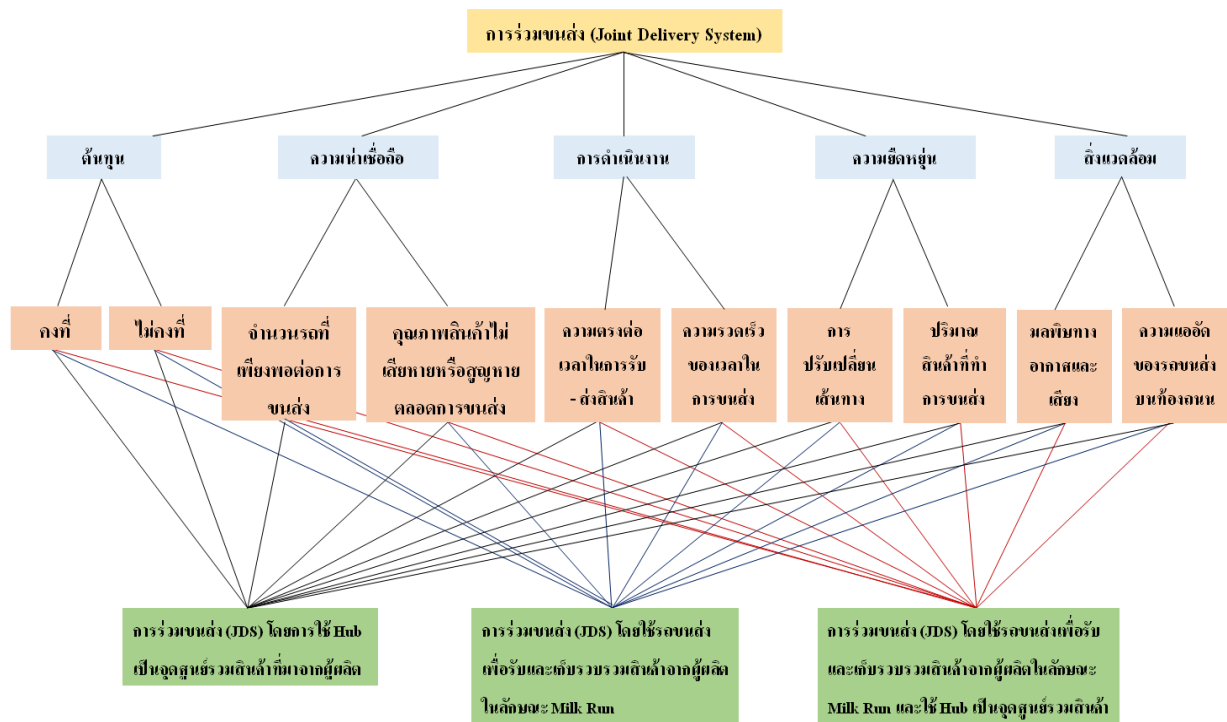
โดยสามารถจัดให้อยู่ในรูปแบบของแผนภูมิลำดับชั้นของกระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้นได้ดังแสดงในรูปที่ 10

3.4 การออกแบบสอบถาม

จัดทำแบบสอบถามเป็น 2 ชุด คือ ชุดที่ 1 การเปรียบเทียบความสำคัญของปัจจัย และ ชุดที่ 2 การเปรียบเทียบรูปแบบทางเลือกที่เหมาะสม ซึ่งจัดทำเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ ชุดเอกสาร และ Google Form จากนั้นนำแบบสอบถามในรูปแบบชุดเอกสารจัดส่งผ่านทางไปรษณีย์และรูปแบบ Google Form จัดส่งผ่านทางไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (E-Mail) ให้แก่ผู้ประกอบการที่ประกอบธุรกิจ SMEs บริเวณกรุงเทพฯ และปริมณฑล ที่ผลิตสินค้าอุปโภค บริโภค ส่งเข้าจำหน่ายในธุรกิจ Modern Trade จำนวน 80 บริษัท โดยมีช่องทางตอบกลับแบบสอบถามให้กับผู้ประกอบการ 3 ช่องทาง ได้แก่ ส่งกลับผ่านทางไปรษณีย์ สแกนและส่งผ่านทางไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (E-Mail) และตอบกลับผ่าน Google Form

3.5 การคำนวณค่าน้ำหนักของปัจจัยโดยใช้กระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น (AHP) และการประเมินทางเลือก

จากการเก็บรวบรวมข้อมูลจากแบบสอบถาม ทางผู้วิจัยได้นำผลหรือคะแนนมาคำนวณได้ดังนี้



รูปที่ 10 แผนภูมิกระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับขั้นในการตัดสินใจร่วมขนส่ง

การคำนวณปัจจัย คำนวณโดยใช้ กระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับขั้น (Analysis Hierarchy Process หรือ AHP) โดยใช้โปรแกรม Super Decision วิเคราะห์และคำนวณค่าน้ำหนักของผู้เชี่ยวชาญแต่ละท่าน รวมทั้งใช้ Microsoft Excel สรุปค่าน้ำหนักของปัจจัย

การคำนวณทางเลือก มีวิธีการคำนวณดังนี้

- 1) แปลงลำดับที่ได้จากแบบสอบถามเป็นคะแนน โดยใช้เกณฑ์ ดังนี้ อันดับ 1 ได้ 3 คะแนน อันดับ 2 ได้ 2 คะแนน และอันดับ 3 ได้ 1 คะแนน
- 2) แปลงคะแนนที่ได้เป็นร้อยละหรือเปอร์เซ็นต์ของอันดับทางเลือก โดยคิดจาก (คะแนนที่ได้/คะแนนเต็ม) x100
- 3) นำค่าน้ำหนักปัจจัยคูณกับร้อยละหรือเปอร์เซ็นต์ทางเลือก จะได้เป็นค่าน้ำหนักของทางเลือก

4. ผลการวิจัย

เมื่อได้ผลการตอบแบบสอบถามจากผู้เชี่ยวชาญทั้ง 9 ท่าน พบว่ามีผู้เชี่ยวชาญ 7 ท่านที่สนใจในการร่วมขนส่ง เนื่องจากเห็นว่าสามารถช่วยลดค่าใช้จ่าย ลดระยะเวลาในการขนส่ง และช่วยประหยัดต้นทุนในกรณีที่มีการขนส่งไม่เต็มคันรถลงได้ สำหรับผู้เชี่ยวชาญที่ไม่สนใจในการร่วมขนส่งอีก 2 ท่าน ให้เหตุผลว่าทางบริษัทมีรถขนส่งเป็นของ

ตนเองครอบคลุมอยู่แล้ว ซึ่งสามารถขนส่งสินค้าได้ตามปกติ ทำให้ไม่สนใจที่จะทำการร่วมขนส่งนี้

นอกจากนี้เมื่อนำคะแนนจากผู้เชี่ยวชาญแต่ละท่านที่สนใจร่วมขนส่งมาคำนวณหาค่าน้ำหนักปัจจัยและทางเลือกที่เหมาะสม ทำให้ทราบว่าปัจจัยใดที่ส่งผลต่อความสำเร็จในการร่วมขนส่งสำหรับผู้ผลิมากที่สุด และทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับการร่วมขนส่ง โดยได้ผลสรุปดังนี้

4.1 สรุปผลด้านปัจจัย

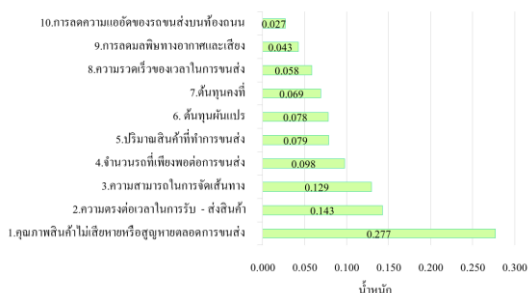
จากการรวบรวมผลของค่าน้ำหนักความสำคัญของแต่ละปัจจัยจากผู้เชี่ยวชาญทั้ง 7 ท่าน และนำมาหาค่าเฉลี่ยผลรวมน้ำหนัก จะได้ค่าเฉลี่ยผลรวมน้ำหนักของปัจจัยจากผู้เชี่ยวชาญทุกท่าน โดยปัจจัยที่ผู้เชี่ยวชาญให้ความสำคัญมากที่สุดสามอันดับแรก คือ

อันดับ 1 ด้านคุณภาพสินค้าไม่เสียหายหรือสูญหาย ตลอดการขนส่ง ร้อยละ 27.7

อันดับ 2 ด้านความตรงต่อเวลาในการรับ-ส่งสินค้า ร้อยละ 14.3

อันดับ 3 ด้านความสามารถในการจัดเส้นทาง ร้อยละ 12.9

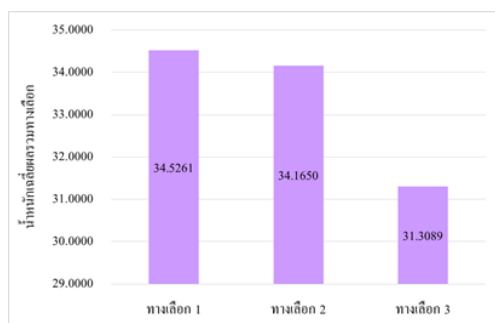
และปัจจัยอันดับอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 11 กราฟอันดับค่าเฉลี่ยผลรวมน้ำหนักของปัจจัย

4.2 สรุปผลด้านทางเลือก

จากการรวบรวมค่าน้ำหนักทางเลือกจากผู้เชี่ยวชาญทั้ง 7 ท่าน เพื่อนำมาหาค่าน้ำหนักเฉลี่ยผลรวมทางเลือกแต่ละทาง ผลสรุปพบว่า ทางเลือกที่ 1 เป็นทางเลือกที่ผู้เชี่ยวชาญเล็งเห็นว่ามีความเหมาะสมที่สุดหากมีการร่วมขนส่งเกิดขึ้น โดยมีคะแนนของค่าน้ำหนักเฉลี่ยรวมมากที่สุดเท่ากับ 34.5261 อันดับรองลงมา คือ ทางเลือกที่ 2 และ 3 ตามลำดับ ซึ่งสามารถแสดงผลของอันดับทางเลือกได้ในรูปที่ 12



รูปที่ 12 กราฟแสดงผลค่าน้ำหนักเฉลี่ยรวมของทางเลือก

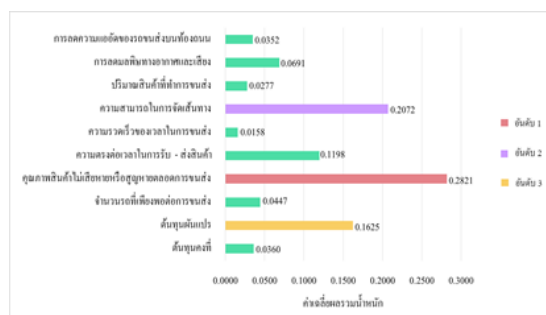
จากรูปที่ 12 แม้ทางเลือกที่ 1 จะเป็นทางเลือกที่ผู้เชี่ยวชาญเห็นว่าเหมาะสมที่สุด แต่เนื่องจากคะแนนของทางเลือกที่ 1 และ 2 แตกต่างกันเพียง 0.3611 เท่านั้น ซึ่งถือว่ามีความใกล้เคียงกัน จึงไม่สามารถสรุปผลของทางเลือกที่สำคัญที่สุดได้อย่างเด็ดขาดและชัดเจน จึงมีความต้องการที่จะวิเคราะห์ผลเพิ่มเติมต่อไป

4.3 วิเคราะห์ผลการวิจัย

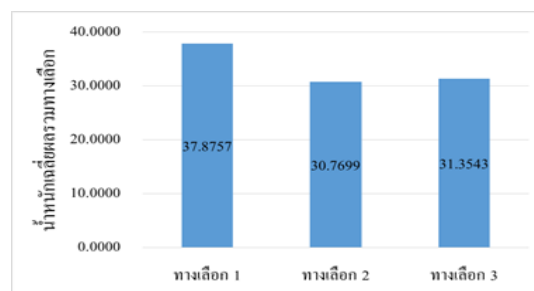
เนื่องจากผลด้านทางเลือกที่เหมาะสมในหัวข้อก่อนหน้านี้มีความใกล้เคียงกันระหว่างทางเลือกที่ 1 และ 2 จึงทำการวิเคราะห์ผลเพิ่มเติมจากข้อมูลที่ได้ในแบบสอบถามพบว่าบริษัทที่มีโครงสร้างหรือรูปแบบการขนส่งที่แตกต่างกัน จะให้ความสำคัญปัจจัยและทางเลือกในการร่วมขนส่งที่แตกต่างกันด้วย โดยสามารถแยกกรณีศึกษาได้เป็นดังนี้

กรณีที่ 1 บริษัทมีรถขนส่งเป็นของตนเองและขนส่งเต็มคันรถ

ข้อมูลจากผู้เชี่ยวชาญที่ตอบแบบสอบถามพบว่ามีผู้เชี่ยวชาญทั้งหมด 3 ท่าน ที่มีรถขนส่งเป็นของตนเองและขนส่งเต็มคันรถ ทางผู้วิจัยจึงนำผลของผู้เชี่ยวชาญทั้ง 3 ท่าน มาคำนวณหาปัจจัยและทางเลือกเฉพาะกรณี ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าผู้เชี่ยวชาญให้ความสำคัญกับปัจจัยด้านคุณภาพสินค้าไม่เสียหายหรือสูญหายตลอดการขนส่งมากที่สุดดังแสดงในรูปที่ 13 และทางเลือกที่ 1 การร่วมขนส่งโดยใช้ Hub เป็นจุดศูนย์รวมสินค้า โดยผู้ผลิตแต่ละรายส่งสินค้ามาไว้ที่ Hub เพื่อให้ 3PL จัดส่งไปยังศูนย์กระจายสินค้าเป็นทางเลือกที่เหมาะสมที่สุดในกรณีนี้ ดังแสดงในรูปที่ 14



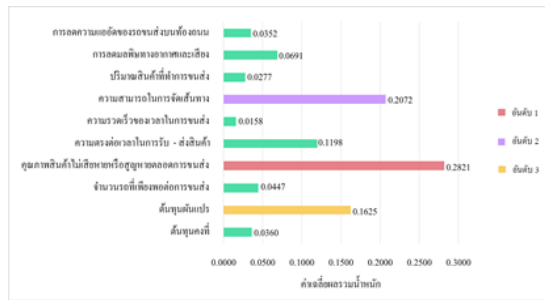
รูปที่ 13 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยน้ำหนักของปัจจัยในกรณีที่ 1



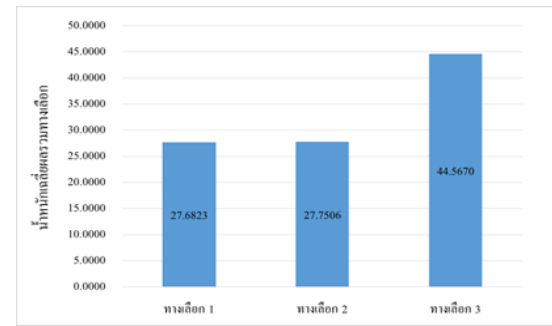
รูปที่ 14 กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยน้ำหนักของทางเลือกในกรณีที่ 1

กรณีที่ 2 บริษัทมีรถขนส่งเป็นของตนเองแต่ขนส่งไม่เต็มคันรถ

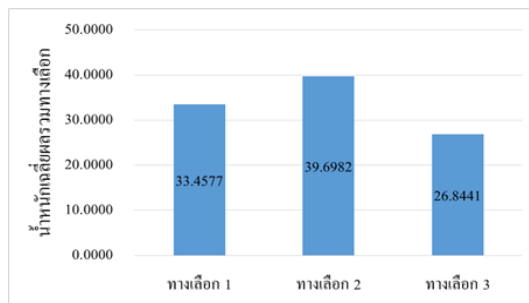
จากผลสำรวจจะมีผู้เชี่ยวชาญทั้งหมด 3 ท่าน ที่มีรถขนส่งเป็นของตนเองแต่ขนส่งไม่เต็มคันรถ ซึ่งให้ความสำคัญกับปัจจัย อันดับอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 15 และทางเลือกที่ผู้เชี่ยวชาญคิดว่าเหมาะสมคือ ทางเลือกที่ 2 การร่วมขนส่งโดยใช้รถร่วมกัน ซึ่ง 3PL จะทำการรับสินค้าจากผู้ผลิตบริเวณใกล้เคียงกันส่งไปยังศูนย์กระจายสินค้า ดังแสดงในรูปที่ 16



รูปที่ 15 กราฟเปรียบเทียบค่าเสียหายน้ำหนักรวมของปัจจัยในกรณีที่ 2



รูปที่ 18 กราฟเปรียบเทียบค่าเสียหายน้ำหนักรวมของทางเลือกในกรณีที่ 3



รูปที่ 16 กราฟเปรียบเทียบค่าเสียหายน้ำหนักรวมของทางเลือกในกรณีที่ 2

กรณีที่ 3 : บริษัทไม่มีรถขนส่งเป็นของตนเอง
จากผลการสำรวจมีผู้เชี่ยวชาญ 1 ท่าน ที่ไม่มีรถขนส่งเป็นของตนเอง และใช้บริการผู้ให้บริการการขนส่ง โดยมีทั้งขนส่งแบบเต็มคันรถและไม่เต็มคันรถ ในกรณีนี้ผู้เชี่ยวชาญให้ความสำคัญกับปัจจัยด้านความตรงต่อเวลาในการรับ-ส่งสินค้ามากที่สุด และปัจจัยอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 17 รวมถึงทางเลือกที่ 3 การร่วมขนส่งโดยใช้รถขนส่งเพื่อรับและเก็บรวบรวมสินค้าจากผู้ผลิตและใช้ Hub เป็นจุดศูนย์รวมสินค้าเพื่อนำสินค้าทั้งหมดจัดส่งไปยังศูนย์กระจายสินค้า ซึ่งจะถูกลงดูแลและบริหารจัดการโดย 3PL ทั้งหมด เป็นทางเลือกที่เหมาะสมที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 18



รูปที่ 17 กราฟเปรียบเทียบค่าเสียหายน้ำหนักรวมของปัจจัยในกรณีที่ 3

5. สรุปผลการวิจัย

จากการวิจัยปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความร่วมมือของผู้ผลิต ผลที่ได้พบว่าปัจจัยด้านความน่าเชื่อถือในเรื่องคุณภาพสินค้าไม่เสียหายหรือสูญหายตลอดการขนส่งมีค่าน้ำหนักเฉลี่ยคิดเป็น 27.7% ซึ่งมากกว่าปัจจัยอื่นๆอย่างเห็นได้ชัด รองลงมาเป็นความตรงต่อเวลาในการรับ-ส่งสินค้า 14.3% และความสามารถในการจัดส่งสินค้า 12.9% สำหรับปัจจัยที่มีค่าน้ำหนักเฉลี่ยน้อยที่สุด คือ ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม โดยที่การลดมลพิษทางอากาศและเสียงมีค่าน้ำหนักเฉลี่ยอยู่ที่ 4.3% การลดความแออัดของรถขนส่งบนท้องถนนอยู่ที่ 2.7% แสดงให้เห็นว่าปัจจัยที่มีความเกี่ยวข้องโดยตรงต่อสินค้าถือว่าสำคัญที่สุด แต่นอกจากปัจจัยเหล่านี้แล้วยังมีปัจจัยอื่นๆ อีกที่มีผลต่อการร่วมขนส่งของผู้ผลิตด้วย ไม่ว่าจะเป็นด้านต้นทุน ด้านการดำเนินงานด้านความยืดหยุ่น และด้านสิ่งแวดล้อม ซึ่งผลของปัจจัยด้านต่างๆ เหล่านี้ มีค่าน้ำหนักเฉลี่ยที่ไม่แตกต่างกันมากนัก อาจขึ้นกับสถานการณ์ในขณะนั้น บริบทขององค์กร หรือความเห็นของผู้ตอบแบบสอบถามเอง

สำหรับทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับการร่วมขนส่งในมุมมองของผู้ผลิต ผลสรุปภาพรวมที่ได้คือทางเลือกที่ 1 การร่วมขนส่งโดยใช้ Hub เป็นจุดศูนย์รวมสินค้า โดยผู้ผลิตแต่ละรายส่งสินค้ามาไว้ที่ Hub เพื่อให้ 3PL จัดส่งไปยังศูนย์กระจายสินค้า เป็นทางเลือกที่ผู้เชี่ยวชาญให้ค่าน้ำหนักเฉลี่ยมากที่สุด แต่ทางเลือกที่ 2 และทางเลือกที่ 3 ก็เป็นทางเลือกที่น่าสนใจและสามารถประยุกต์ใช้ในการร่วมขนส่งได้เช่นกัน รวมทั้งหากมีการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมในบริบทของแต่ละบริษัท และในมุมมองอื่นที่นอกเหนือจากมุมมองของผู้ผลิต เช่น มุมมองของผู้ให้บริการขนส่ง มุมมองของลูกค้า หรือมุมมองของศูนย์โลจิสติกส์ ผลที่ได้ทั้งทางด้านปัจจัยและด้านทางเลือกอาจแตกต่างกันไปตามแต่ละมุมมอง

6. ข้อเสนอแนะ

สำหรับประเทศไทยการร่วมขนส่งของผู้ผลิต หรือ Joint Delivery System เป็นโครงการที่น่าสนใจในการริเริ่มดำเนินการ และสามารถประยุกต์ทางเลือกที่ได้นำเสนอไปก่อนหน้านี้ในการร่วมขนส่งได้หากมีการร่วมขนส่งเกิดขึ้นจริง โดยไม่จำเป็นต้องยึดเอาทางเลือกใดทางเลือกหนึ่งเพียงทางเลือกเดียว เพื่อให้การร่วมขนส่งของผู้ผลิตมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้อาจต้องอาศัยความร่วมมือจากภาครัฐเพื่อช่วยเป็นตัวกลางในการส่งเสริมและริเริ่มดำเนินการกิจกรรมต่างๆ เช่น การประชุมกับองค์กรที่เกี่ยวข้องเพื่อหารือ ทั้งการนำเสนอประเด็นหรือโครงการอื่นๆที่เกี่ยวข้องและร่วมกันแสดงความคิดเห็น เป็นต้น รวมถึงรัฐควรกระตุ้นให้ผู้ประกอบการเล็งเห็นความสำคัญของปัญหาการจราจรและความหนาแน่นของรถขนส่งภายในประเทศอย่างเข้มงวด รวมทั้งควรพิจารณาและแสดงให้เห็นถึงประโยชน์ที่ทุกภาคส่วนภายในประเทศไทยจะได้รับ ตั้งแต่องค์กรขนาดเล็กไปจนถึงองค์กรขนาดใหญ่ เพื่อส่งเสริมความร่วมมือ และสามารถดำเนินโครงการได้โดยสำเร็จ

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Bureau of Highway Safety, "Quantity of Traffic on Highway 2017 report", Department of Highways, Ministry of Transport, 2017.
- [2] D. Singkarin, "The Preliminary Study of Logistics System in Bangkok and Perimeter Region for becoming the City of Asia." Centre of Logistics Management and Healthcare Supply Chain (Loghealth), (The Thailand Research Fund), 2018.
- [3] K. Sukkrajang, "The Application of An Analytic Hierarchy Process of the Decision Process for Selection of 3rd Party Logistics Service Provider in the Textile Industry" *Industrial Technology Lampang Rajabhat University*, Vol.8, no.1, 2015.
- [4] P. Soontronwut, "Factors in Selecting Consumer Goods Truck Carriers" Thesis for the Degree of Master of Engineering Program, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 2010.
- [5] N. Koothongsumrit, "Optimization Route Selecting by Multi-Criteria Decision Making Analysis" *Phanakorn Rajabhat Research Journal*, Vol.8, no.1, 2017.
- [6] P. Pitiphormphoon, "AN Analytical Hierarchy Process for Private Fleet Ownership Decision" Thesis for the Degree of Master of Science Program, Graduate School Chulalongkorn University, 2007.
- [7] S. Tantrakul, "Application of AHP Technique in Evaluating Steel Products Transportation" Thesis for the Degree of Master of Science Program, Graduate School Chulalongkorn University, 2007.
- [8] S. Pramaksa and K. Suthiwartnarueput, "Evaluation of Transportation Alternatives for Automotive Products" *WMS Journal of Management Walailak University*, Vol.3, no.1, 2014.
- [9] M. Qu, S. Yu, M. Yu, "An improved approach to evaluate car sharing options" *Ecological Indicators*, PP.686-702, 2017.
- [10] F. Crujssen, M. Cools and W. Dullaert, "Horizontal cooperation in logistics: Opportunities and impediments" *Transportation Research Part E*, PP.129-142, 2017.
- [11] R. Leitner, F. Meizer, M. Prochazka and W. Sihn, "Structural concepts for horizontal cooperation to increase efficiency in logistics", *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, PP.332-337, 2011.
- [12] D. Nicolas, "Collaborative Transportation to Improve Sustainability" A Case Study, 2015.
- [13] H. Manier, M.-A. Manier and Z. Al Chami. "Shippers' collaboration in city logistics", *IFAC-PapersOnLine*. PP.1880-1885, 2016.
- [14] H.W. HONG and K.S. SHIN, "A Study on the Restructuring and Cavitation of the Data-based Pick-up and Delivery Business", *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, Vol.34, no.1, PP43-50, 2018.

- [15] O. Manuel and H. Alexander, "Vehicle selection for a multi-compartment vehicle routing problem", *European Journal of Operational Research*, Vol.269, no.2, PP.682-694, 2018.
- [16] S. Jansuwan, "City Logistics Development" Planning Approach, Office of Transport and Traffic Policy and Planning, 2017.

กำลังอัด การดูดซึมน้ำ และการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์ในระบบวัสดุประสาน สามชนิดด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย

Strength, Water Absorption and Chloride Penetration of Mortar in Ternary Blends System with Calcium Carbide Residue and Fly Ash

บุญยวัจน์ วงษ์สวัสดิ์ สำเร็จ รักซ้อน* และ ปริญา จินดาประเสริฐ

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ นครปฐม 73130

ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยขอนแก่น 40002

Punyawat Wongwasuwat Sumrerng Rukzon* and Prinya Chindaprasit

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering,

Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Nakhonphatom 73130

Sustainable Infrastructure Research and Development Center, Department of Civil Engineering,

Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen

*Corresponding author Email: sumrerng.ruk@rmutr.ac.th

(Received: March 26, 2021; Accepted: June 13, 2021)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาการผสมกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (GCCB) และเถ้าลอย (GFFA) เป็นวัสดุประสานผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 (CT) ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยในปริมาณร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน นอกจากนี้ ในงานนี้ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ เถ้าลอย และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 ผสมรวมกันเป็นวัสดุประสานสามชนิดสำหรับผลิตมอร์ตาร์ สำหรับระบบวัสดุประสานสามชนิดใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยในปริมาณร้อยละ 15 รวมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในปริมาณร้อยละ 5, เถ้าลอยในปริมาณร้อยละ 15 รวมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในปริมาณร้อยละ 15 และใช้เถ้าลอยในปริมาณร้อยละ 15 รวมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในปริมาณร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานใช้คงที่เท่ากับ 0.48 และใช้ค่าทดสอบการไหลของมอร์ตาร์เท่ากับร้อยละ 105-115 ด้วยสารลดน้ำพิเศษ ศึกษาการดูดซึมน้ำ และการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์ ผลการทดสอบพบว่า การใช้เถ้าลอยในปริมาณร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถผลิตส่วนผสมมอร์ตาร์ได้กำลังอัดที่ดี มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยในปริมาณร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีค่ากำลังอัดอยู่ในช่วงร้อยละ 78-96 ของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 อย่างไรก็ตาม การดูดซึมน้ำ และการแทรกซึมคลอไรด์ ของมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยในปริมาณร้อยละ 15 รวมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในปริมาณร้อยละ 5, เถ้าลอยในปริมาณร้อยละ 15 รวมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในปริมาณร้อยละ 15 และใช้เถ้าลอยในปริมาณร้อยละ 15 รวมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในปริมาณร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีค่าสูงเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าลอยในปริมาณร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

คำสำคัญ: กำลังอัด กากแคลเซียมคาร์ไบด์ เถ้าลอย ระบบวัสดุประสานสามชนิด

ABSTRACT

This research presents to develop ground calcium carbide residue (GCCB) and ground fine fly ash (GFFA) as a cementitious material for blend Portland cement type 1 (CT). CT was partially replaced at 15% of GFFA by weight of cementitious materials. In addition, GCCB, GFFA and CT were used as a ternary blends system in producing mortar. For ternary blends system, CT was partially replaced at 15% of GFFA blend with GCCB at the dosage levels of 5%, at 15% GFFA blend with GCCB at the dosage levels of 15% and at 15% of GFFA blends with GCCB at the dosage levels of 25% by weight of cementitious materials. The ratio of water to cementitious material (W/B) was used constant at 0.48 and the flow test of mortar was also kept between 105-115% with superplasticizer. Compressive strength, water absorption and chloride penetration were investigated. Test results found that the use of 15% of GFFA produced mixes of mortar with good compressive strength. Compressive strength of 15% of GFFA is high at 78-96% in comparison with the CT mortar mixes. However, the water absorption and chloride penetration of mortar with 15% of GFFA+5% of GCCB, 15% of GFFA+15% of GCCB and 15% of GFFA+25% of GCCB mortar is high in comparison with the mortar mixes at 15% of GFFA by weight of cementitious materials.

Keyword: Compressive strength, Calcium carbide residue, Coal fly ash, Ternary blends system.

1. บทนำ

เป็นที่ทราบโดยทั่วไปว่า ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุหลักในการผลิตคอนกรีตและมอร์ตาร์ ในส่วนของคอนกรีตใช้ปูนซีเมนต์ผสมรวมกับน้ำ มวลรวม (ทรายและหิน) เกิดเป็นก้อนแข็งรับกำลังอัดได้ดีและใช้เป็นโครงสร้างอาคาร ส่วนมอร์ตาร์ ใช้ปูนซีเมนต์ผสมรวมกับน้ำและทราย เพื่อเป็นวัสดุก่อ ฉาบ และซ่อมแซม ในการผลิตปูนซีเมนต์อาจส่งผลกระทบต่อทรัพยากรธรรมชาติ กล่าวคือ วัสดุที่ใช้ผลิตปูนซีเมนต์ล้วนได้จากธรรมชาติ เช่น ไข่แร่หิน ต่างๆ ในการเผา ซึ่งอาจหมดไปและลดน้อยลงจากธรรมชาติ อีกทั้งอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ ดังนั้น ปัจจุบันผู้ผลิตคอนกรีตและนักวิจัยพยายามศึกษาถึงการลดต้นทุนการผลิตคอนกรีตด้วยการลดการใช้ปูนซีเมนต์และให้ความสนใจการใช้วัสดุเหลือทิ้งจากผลพลอยได้อุตสาหกรรมมาพัฒนาเป็นวัสดุซีเมนต์ในงานคอนกรีต วัสดุเหลือทิ้งหรือวัสดุรองทิ้งจากผลพลอยได้อุตสาหกรรมที่มีในประเทศไทย เช่น เถ้าก้นเตา และเถ้าลอย ซึ่งได้จาก

กระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าเพื่อใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม [1]-[3]

เถ้าลอย หรือ Fly ash เป็นวัสดุเหลือทิ้งที่ผู้ผลิตคอนกรีตและนักวิจัยได้ศึกษาและพัฒนานำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อผลิตเป็นมอร์ตาร์และคอนกรีตในงานก่อสร้าง [2], [3] อย่างไรก็ตาม ในประเทศไทย พบว่ายังมีวัสดุเหลือทิ้งจากผลพลอยได้บางชนิด ซึ่งอาจนำมาใช้สำหรับเป็นวัสดุก่อสร้างได้เช่นเดียวกันกับเถ้าก้นเตา และเถ้าลอย เช่น กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium Carbide Residue)

กากแคลเซียมคาร์ไบด์ (Calcium Carbide Residue) เป็นวัสดุผลพลอยได้และเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตก๊าซอะเซทิลีนสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมสำหรับการการตัดเหล็ก และเชื่อมโลหะ สำหรับในประเทศไทยพบว่ามีแนวโน้มในการใช้ก๊าซอะเซทิลีนในโรงงานอุตสาหกรรมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากผลของการเติบโตทางเศรษฐกิจของไทย ส่งผลให้เกิดการการ

ขยายตัวของกาซึก๊าซดังกล่าวในภาคอุตสาหกรรมมากขึ้นจึงส่งผลให้มีกากแคลเซียมคาร์ไบด์ซึ่งเป็นผลพลอยและเป็นวัสดุเหลือทิ้งเพิ่มขึ้น กากแคลเซียมคาร์ไบด์ซึ่งไม่ได้ประโยชน์และส่วนใหญ่จะถูกนำมาทิ้งกองรวมกันไว้ในปริมาณที่มากขึ้น และอาจเกิดปัญหาทางสภาพแวดล้อมในพื้นที่นั้นๆ ได้ หรืออาจกำจัดด้วยการฝังกลบลงไปในใต้ดิน กากแคลเซียมคาร์ไบด์มีคุณสมบัติความเป็นด่างสูงมาก เมื่อฝังกลบอาจส่งผลให้ดินในพื้นที่บริเวณนั้นเสียและใช้เพาะปลูกไม่ได้ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์มุ่งเน้นศึกษาและพัฒนาเพื่อใช้ประโยชน์โดยตรงจากกากแคลเซียมคาร์ไบด์สำหรับใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง โดยนำกากแคลเซียมคาร์ไบด์ที่มีความละเอียด จากนั้นนำไปผสมรวมกับเถ้าลอยบดเพื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในระบบวัสดุประสานสามชนิด สำหรับใช้ผลิตเป็นซีเมนต์มอร์ตาร์ ศึกษาสมบัติทางกายภาพ เช่น ความต้องการสารลดน้ำพิเศษ กำลังอัด การดูดซึมน้ำ และการต้านทานคลอไรด์

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

วัสดุที่ใช้ในการศึกษานี้ ใช้วัสดุประสานประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 มีค่าความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 3.14 ใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าในโรงงานผลิตกระดาษ ตำบลวังขนาย อำเภอดำรงวิทยะ จังหวัดกาญจนบุรี ส่วนกากแคลเซียมคาร์ไบด์ได้จากโรงงานผลิตก๊าซอะเซทิลีน จังหวัดสมุทรสาคร ของประเทศไทย

กากแคลเซียมคาร์ไบด์บดให้ความละเอียด (GCCB) มีปริมาณสัดส่วนค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 10-15 โดยน้ำหนัก เถ้าลอยบดละเอียด (GFFA) มีปริมาณสัดส่วนค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 10-15 โดยน้ำหนัก ใช้ทรายเป็นวัสดุมวลรวมละเอียด โดยเป็นทรายสำหรับงานโครงสร้างที่มีอยู่โดยทั่วไป มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.55 และใช้สารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizer, SP) เพื่อปรับค่าการไหลและความสามารถในการทำงานได้ของส่วนผสมมอร์ตาร์

2.2 ส่วนผสมของมอร์ตาร์และการบ่ม

ส่วนผสมมอร์ตาร์ใช้อัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1:2.75 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานใช้คงที่เท่ากับ 0.48 ใช้สารลดน้ำพิเศษเพื่อปรับค่าการไหลและความสามารถในการทำงานได้

การศึกษานี้ใช้ ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 (CT) แทนที่ด้วยเถ้าลอยบด (GFFA) ในปริมาณร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน นอกจากนั้น ในระบบวัสดุประสานสามชนิดใช้ GFFA แทนที่ในปริมาณร้อยละ 15 รวมกับ GCCB ในปริมาณร้อยละ 5 (15F+5C), ใช้ GFFA ในปริมาณร้อยละ 15 รวมกับ GCCB ในปริมาณร้อยละ 15 (15F+15C) และ ใช้ GFFA ในปริมาณร้อยละ 15 รวมกับ GCCB ในปริมาณร้อยละ 25 (20F+25C) โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ จากนั้น ใช้สัดส่วนการแทนที่ดังกล่าวนี้หาปริมาณความต้องการน้ำของมอร์ตาร์ ใช้สารลดน้ำพิเศษเพื่อควบคุมค่าการไหลแก่กับร้อยละ 105-115 ด้วยโต๊ะทดสอบค่าการไหลตามมาตรฐานของ ASTM C230 [4] ภายหลังจากหล่อส่วนผสมของมอร์ตาร์ในแบบหล่อ ทิ้งไว้ที่ห้องปฏิบัติการที่สามารถควบคุมอุณหภูมิห้องได้ที่ $25 \pm 3^{\circ}\text{C}$ จนกระทั่งครบอายุการทดสอบ จากนั้นนำไปทดสอบกำลังอัด การดูดซึมน้ำ และการต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ ในตารางที่ 1 แสดงส่วนผสมของมอร์ตาร์ในระบบวัสดุประสานสามชนิด

ตารางที่ 1 ส่วนผสมของมอร์ตาร์ (% by weight)

Sample ID	W/B	Cement (CT)	Sand	GFFA	GCCB	Flow (%)	SP
CT	0.48	100	275	-	-	111	0.69
15F	0.48	85	275	15	-	110	0.14
15F+5C	0.48	80	275	15	5	111	0.22
15F+15C	0.48	70	275	15	15	115	0.31
15F+25C	0.48	60	275	15	25	110	0.65

2.3 การทดสอบกำลังอัด

ทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์โดยใช้แบบหล่อมอร์ตาร์ทรงลูกบาศก์ขนาด $50 \times 50 \times 50$ ลูกบาศก์มิลลิเมตร ตามมาตรฐานของ ASTM C109 [5] ภายหลังจากการหล่อส่วนผสมของมอร์ตาร์ในแบบหล่อทิ้งไว้ที่ห้องปฏิบัติการที่สามารถควบคุมอุณหภูมิห้องได้ที่ 25 ± 3 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้น ถอดแบบและนำมอร์ตาร์บ่มในน้ำสะอาด ทดสอบกำลังอัดที่อายุการทดสอบ 7, 28 และ 90 วัน โดยใช้ก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์เพื่อทดสอบจำนวน 3 ก้อน เพื่อหาค่าเฉลี่ยกำลังอัด

2.4 การทดสอบการดูดซึมน้ำ

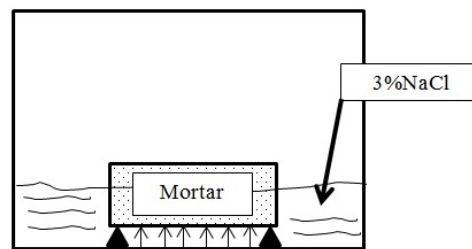
ทดสอบการทดสอบการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์โดยใช้แบบหล่อมอร์ตาร์ทรงลูกบาศก์ขนาด $50 \times 50 \times 50$ ลูกบาศก์มิลลิเมตร โดยประยุกต์ใช้การทดสอบตามมาตรฐานของ ASTM C642 [6] กล่าวคือ ภายหลังจากการหล่อส่วนผสมของมอร์ตาร์ในแบบหล่อและทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเท่ากับ 25 ± 3 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้น ดำเนินการถอดแบบและนำตัวอย่างมอร์ตาร์บ่มในน้ำสะอาด ทดสอบการดูดซึมน้ำที่อายุการทดสอบ 7, 28 และ 90 วัน โดยใช้ก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์เพื่อทดสอบจำนวน 3 ก้อน เพื่อหาค่าเฉลี่ย เช่นเดียวกับการทดสอบกำลังอัด

2.5 การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์

การทดสอบนี้ใช้แบบหล่อที่เป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สูงเท่ากับ 200 มิลลิเมตร ตามมาตรฐานของ ASTM C39 [7] หลังถอดแบบหล่อที่เวลา 24 ชั่วโมง นำแท่งมอร์ตาร์แบ่งครึ่งที่กลางช่วงระยะ 100 มิลลิเมตร ตัดด้วยเครื่องตัดคอนกรีตให้ได้ 2 ชิ้น โดยวัดจากจุดกลางออกทั้ง 2 ด้าน โดยให้หนาขึ้นละ 50 มิลลิเมตร

นำมอร์ตาร์ที่ได้จากการตัด ทั้ง 2 ชิ้น ไปเคลือบผิวโดยรอบด้วยอีพอกซี (Epoxy) และเคลือบปิดด้านผิวหน้ามอร์ตาร์ 1 ด้าน ทิ้งไว้เพียง 1 ด้าน นำด้านหน้าที่ไม่ได้เคลือบอีพอกซีคว่ำลงวางไว้ให้สัมผัสในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ปริมาณความเข้มข้นเท่ากับร้อยละ 3 (3%NaCl)

กล่าวคือ ให้ด้านที่ไม่ได้เคลือบผิว ลอยสูงสัมผัสกับสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ในการทดสอบนี้ให้ระดับของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ห่างจากผิวด้านล่างของตัวอย่างมอร์ตาร์เป็นระยะ 1 เซนติเมตร ซึ่งรูปการทดสอบแสดงไว้ในรูปที่ 1 ทั้งนี้เพื่อควบคุมให้คลอไรด์ซึมผ่านด้านเดียว และนำไปตรวจสอบค่าความลึกของการซึมผ่านหน่วยเป็นมิลลิเมตร ฉีดพ่นด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท (Indicator) เพื่อตรวจสอบความลึกคลอไรด์ ต่อไป



รูปที่ 1 การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแช่ในสารละลาย 3% NaCl

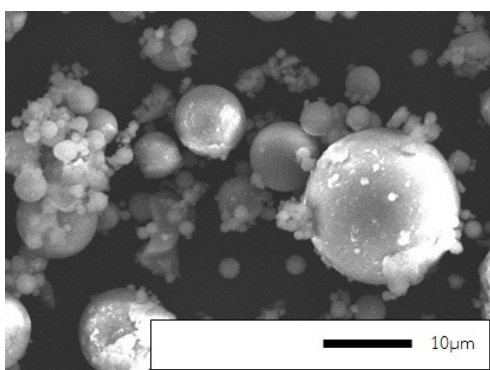
3. ผลการทดสอบ

3.1 สมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยและกากแคลเซียมคาร์ไบด์

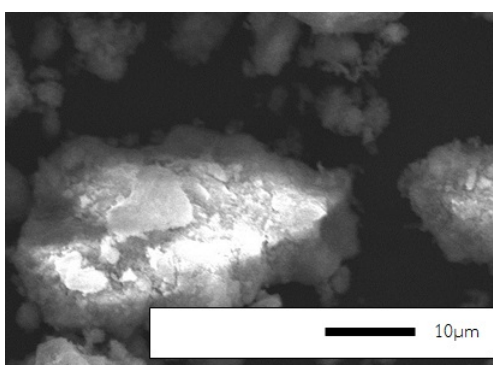
ตารางที่ 2 แสดงสมบัติพื้นฐานของเถ้าลอยและกากแคลเซียมคาร์ไบด์บด โดยการบดวัสดุปอซโซลานทั้ง 2 ชนิด ด้วยเครื่องบดวัสดุปอซโซลาน ให้มีสัดส่วนค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ในปริมาณร้อยละ 10-15 โดยน้ำหนัก และนำไปหาความถ่วงจำเพาะและพื้นที่ผิวจำเพาะโดยวิธีของเบลน ผลการทดสอบพบว่า เถ้าลอยและกากแคลเซียมคาร์ไบด์บด มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.24 และ 2.43 และมีพื้นที่ผิวจำเพาะโดยวิธีของเบลนเท่ากับ 3,740 และ 3,900 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ส่วนรูปที่ 2 และ 3 แสดงภาพขยายกำลังสูง (SEM photograph) ของเถ้าลอยบด (GFFA) และ กากแคลเซียมคาร์ไบด์บด (GCCB) ซึ่งพบว่า เถ้าลอยแม้ว่าจะผ่านการบด แต่ขนาดอนุภาคที่เล็กมากซึ่งถูกบดไม่สามารถบดได้ทั่วถึง ส่งผลให้รูปร่างยังคงเป็นรูปทรงกลมตันขนาดเล็กอยู่ ขณะที่กากแคลเซียมคาร์ไบด์บดมีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมไม่แน่นอน [8], [9]

ตารางที่ 2 สมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยและกากแคลเซียมคาร์ไบด์

สมบัติทางกายภาพ	เถ้าลอยบด (GFFA)	กากแคลเซียมคาร์ไบด์บด (GCCB)
Retained on a sieve No. 325 (%)	10-15	10-15
Specific Gravity	2.24	2.43
Blaine Fineness (cm ² /gm) - ตารางเซนติเมตรต่อกรัม	3,740	3,900



รูปที่ 2 SEM photograph ของเถ้าลอย GFFA



รูปที่ 3 SEM photograph ของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ GCCB

3.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยและกากแคลเซียมคาร์ไบด์

เมื่อบดเถ้าลอยและกากแคลเซียมคาร์ไบด์ให้มีความละเอียด จากนั้นนำไปหาองค์ประกอบหลักทางเคมี ซึ่ง

ในตารางที่ 3 แสดงผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมี โดยพบว่า เถ้าลอยบด (GFFA) มีปริมาณของ CaO เท่ากับร้อยละ 12.0 มีปริมาณของ SiO₂ เท่ากับ ร้อยละ 28.4 มีปริมาณของ Al₂O₃ และ Fe₂O₃ เท่ากับร้อยละ 23.7 และ 6.58 ตามลำดับ เถ้าลอยบด มีผลรวมของ SiO₂, Al₂O₃ และ Fe₂O₃ เท่ากับร้อยละ 73.08 ซึ่งตามมาตรฐานของ ASTM C618 [10] จัดอยู่ในประเภท CLASS F ส่วนกากแคลเซียมคาร์ไบด์บด (GCCB) มีปริมาณของ CaO เท่ากับร้อยละ 95.0 มีปริมาณของ SiO₂ เท่ากับร้อยละ 1.4 มีปริมาณของ Al₂O₃ และ Fe₂O₃ เท่ากับร้อยละ 1.38 และ 1.5 ตามลำดับ

ผลการทดสอบนี้ มุ่งเน้นในการใช้ประโยชน์จากองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย คือ ซิลิกา (SiO₂) เพื่อผลของปฏิกิริยาปอซโซลาน ขณะที่องค์ประกอบทางเคมีของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ คือ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ใช้เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการพัฒนาด้านกำลังอัดและความทนทานต่อการต้านทานคลอไรด์ของมอร์ตาร์

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยและกากแคลเซียมคาร์ไบด์

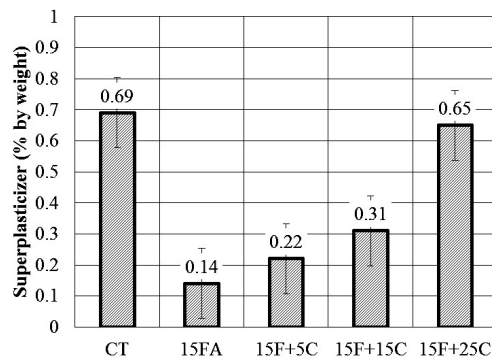
Oxides	% Oxides ของ GFFA	% Oxides ของ GCCB
SiO ₂	42.8	1.4
Al ₂ O ₃	23.7	1.3
Fe ₂ O ₃	6.58	1.5
CaO	12.0	95.0

3.3 ความต้องการสารลดน้ำพิเศษของมอร์ตาร์

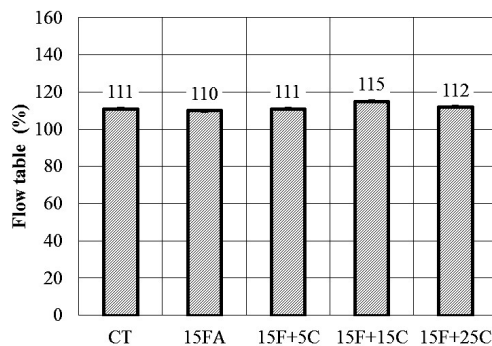
ผลการทดสอบปริมาณความต้องการสารลดน้ำพิเศษและค่าการไหลแผ่ของส่วนผสมมอร์ตาร์ แสดงไว้ในรูปที่ 4 และ 5 ผลการทดสอบพบว่า ค่าการไหลแผ่มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 110-115 และปริมาณความต้องการสารลดน้ำพิเศษอยู่ในช่วงร้อยละ 0.14-0.69 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน การใช้เถ้าลอยบดผสมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์บดแทนที่ปูนซีเมนต์ มีแนวโน้มส่งผลให้ค่าการไหลแผ่

เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการใช้เถ้าลอยเพียงอย่างเดียว เนื่องจากเถ้าลอยแม้ว่าการบดส่งผลให้รูปร่างเป็นเหลี่ยมเป็นมุม แต่บางอนุภาคที่มีขนาดเล็กยังคงเป็นทรงกลมตัน ส่งผลให้ส่วนมอร์ตาร์ยังมีความไหลลื่น [8]-[11]

ส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 ด้วยเถ้าลอยบดรวมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์บดพบว่า ความต้องการสารลดน้ำพิเศษมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ด้วย GCCB ในทุกส่วนผสม เนื่องจากขนาดอนุภาคของกากแคลเซียมคาร์ไบด์แม้ว่าผ่านการบดแต่ในตัวอย่างยังมีความพรุนอยู่บ้าง อีกทั้งรูปร่างที่เป็นเหลี่ยมมุมจากการบด อาจแทรกตัวเข้าไปในโพรงของมอร์ตาร์ได้ยาก กล่าวคือ อาจไม่ไหลลื่นและเกิดการขัดตัวกันเองของอนุภาคจึงเกิดเป็นโพรง ดังนั้น ความต้องการสารลดน้ำพิเศษในการทำงานจึงเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ควรตรวจสอบและติดตามผลในด้านของโครงสร้างระดับจุลภาค ต่อไป



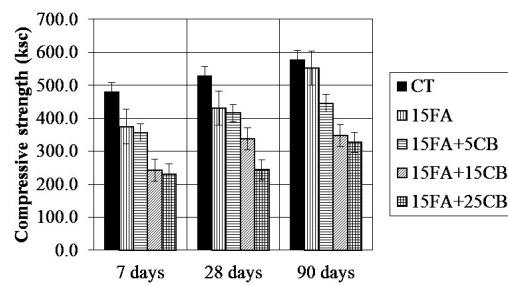
รูปที่ 4 ปริมาณความต้องการสารลดน้ำพิเศษของส่วนผสมมอร์ตาร์



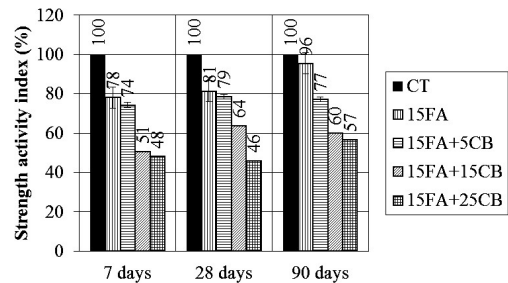
รูปที่ 5 ค่าการไหลแผ่ของส่วนผสมมอร์ตาร์

3.4 กำลังอัดของมอร์ตาร์

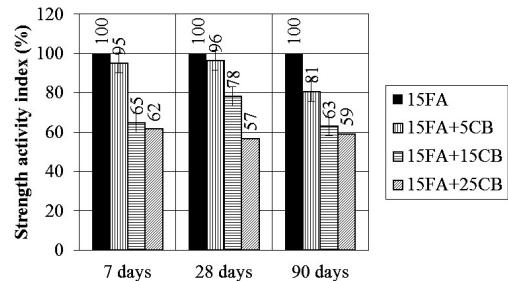
ในรูปที่ 6, 7 และ 8 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน ตามลำดับ กำลังอัดของมอร์ตาร์พัฒนาตามอายุการทดสอบ กล่าวคือ กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 90 วัน มีค่าสูงตามด้วยกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 28 และ 7 วัน ตามลำดับ



รูปที่ 6 กำลังอัดของมอร์ตาร์



รูปที่ 7 ร้อยละกำลังอัดของมอร์ตาร์เทียบกับ CT



รูปที่ 8 ร้อยละกำลังอัดของมอร์ตาร์เทียบกับ 15FA

การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์บดผสมรวมกับ เถ้าลอยบด พบว่า มีค่ากำลังอัดต่ำในทุกส่วนผสมเมื่อเทียบกับ

มอร์ตาร์ CT และ 15FA ส่วนการแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบต์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นกำลังอัดมีแนวโน้มลดลงตามไปด้วยเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ 15FA เมื่อพิจารณาร้อยละกำลังอัด พบว่า ที่อายุ 7 วัน มอร์ตาร์มีค่าร้อยละกำลังอัดต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุม (CT) ในทุกส่วนผสม โดยมีค่าร้อยละกำลังอัดอยู่ที่ร้อยละ 48-78 ของมอร์ตาร์ควบคุม และที่อายุ 7 วัน มอร์ตาร์มีค่าร้อยละกำลังอัดต่ำกว่ามอร์ตาร์ 15FA ในทุกส่วนผสม โดยมีค่าร้อยละกำลังอัดอยู่ที่ร้อยละ 62-95 ที่อายุ 28 และ 90 วัน พบว่า ในทุกส่วนผสมของมอร์ตาร์มีค่าร้อยละกำลังอัดอยู่ในช่วงร้อยละ 46-96 ของมอร์ตาร์ CT และอยู่ในช่วงร้อยละ 57-96 ของมอร์ตาร์ 15FA

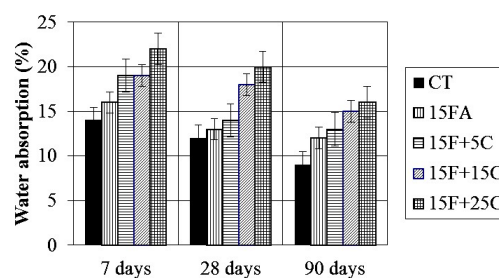
มอร์ตาร์มีการพัฒนากำลังอัดดีขึ้นที่อายุ 28 วัน และ 90 วัน กล่าวคือ ที่อายุ 28 วัน มอร์ตาร์มีค่าร้อยละกำลังอัดอยู่ในช่วงร้อยละ 46-81 ของมอร์ตาร์ CT ยกตัวอย่างเช่น มอร์ตาร์ 15FA และ 15F+5C มีค่า ร้อยละกำลังอัดที่ร้อยละ 79-81 ของ CT ซึ่งมากกว่า ร้อยละ 75 ของมอร์ตาร์ควบคุม โดยพิจารณามาตรฐานของ ASTM C618 [10] เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบต์ในปริมาณร้อยละ 15 และ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ร้อยละกำลังอัดมีค่าเท่ากับร้อยละ 46 และ 64 ของมอร์ตาร์ CT ตามลำดับ

ที่อายุการทดสอบที่ 28 พบว่า การแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบต์ในปริมาณร้อยละ 5, 15 และ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ร้อยละกำลังอัดมีค่าเท่ากับร้อยละ 57, 78 และ 96 ของมอร์ตาร์ 15FA ตามลำดับ ส่วนที่อายุการทดสอบที่ 90 วัน พบว่า มอร์ตาร์ 15F+5C มีค่าร้อยละกำลังอัดที่ร้อยละ 96 ของ CT ซึ่งมากกว่า ร้อยละ 75 ของมอร์ตาร์ควบคุม [10] ในขณะที่การแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบต์ในปริมาณร้อยละ 5, 15 และ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ร้อยละกำลังอัดมีค่าเท่ากับร้อยละ 50, 60 และ 77 ของมอร์ตาร์ CT ตามลำดับ การแทนที่กากแคลเซียมคาร์ไบต์ในปริมาณร้อยละ 5, 15 และ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ร้อยละกำลังอัดมีค่าเท่ากับร้อยละ 59, 63 และ 81 ของมอร์ตาร์ 15FA ตามลำดับ

การที่กำลังอัดของมอร์ตาร์มีการพัฒนาเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าลอยบดร้อยละ 15 รวมกับกากแคลเซียมคาร์ไบต์บดในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (มีค่าร้อยละ 77-79 ของ CT และมีค่าร้อยละ 81-96 ของ 15FA) เนื่องจากการเกี่ยวพันกันของวัสดุทั้งสอง และองค์ประกอบทางเคมีของซิลิกาในเถ้าลอยบดส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานเพิ่มเติมจากปฏิกิริยาไฮเดรชันซึ่งได้จากปูนซีเมนต์และกากแคลเซียมคาร์ไบต์กับน้ำ [8]-[10] และเถ้าลอยขนาดเล็กสามารถแทรกตัวได้ดีส่งผลให้พื้นที่ผิวที่มากสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม การทดสอบพบว่า มอร์ตาร์มีกำลังอัดลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของกากแคลเซียมคาร์ไบต์บด เนื่องจาก การคงที่ของปริมาณเถ้าลอยและปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของซิลิกาในเถ้าลอยมีปริมาณเท่าเดิม ส่วนปริมาณแคลเซียมออกไซด์ในกากแคลเซียมคาร์ไบต์ผลที่ได้แคลเซียมไฮดรอกไซด์เช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ไม่ได้ทำปฏิกิริยาใดกับปูนซีเมนต์ [8]-[10] จึงอาจไม่ส่งผลต่อปฏิกิริยาปอซโซลานเพิ่ม และรูปร่างที่เป็นเหลี่ยมมุมของกากแคลเซียมคาร์ไบต์อาจไปขัดกันเองในส่วนผสมจึงไม่สามารถแทรกตัวในโพรงให้มอร์ตาร์มีความทึบแน่นได้

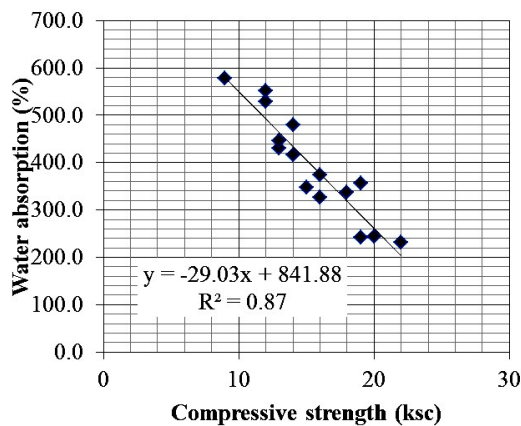
3.5 การดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์

ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์แสดงไว้ในรูปที่ 9 ผลการทดสอบพบว่า การใช้เถ้าลอยบดผสมรวมกับกากแคลเซียมคาร์ไบต์แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำสูงขึ้นในทุกส่วนผสม ในขณะที่ค่าการดูดซึมน้ำต่ำลงเมื่อเพิ่มอายุการทดสอบ



รูปที่ 9 การดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์

การใช้เถ้าลอยในปริมาณร้อยละ 15 รวมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์บดปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (15F+5C) มีค่าการซึมน้ำต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ 15F+15C และ 15F+25C การใช้เถ้าลอยในปริมาณร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีค่าการดูดซึมน้ำต่ำสุดเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ 15F+15C และ 15F+25C เนื่องจากองค์ประกอบของซิลิกาในเถ้าลอยสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มเติมเพิ่มความทึบแน่น [12] แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของกากแคลเซียมคาร์ไบด์บดในส่วนผสมองค์ประกอบของแคลเซียมออกไซด์ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ปกติเหมือนปูนซีเมนต์ แต่ส่วนของอนุภาคที่เป็นเหลี่ยมมุมของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ไม่สามารถเข้าไปแทรกตัวในโพรงมอร์ตาร์ได้ดีเนื่องจากการขัดกันเองของอนุภาค จึงส่งผลให้ความทึบแน่นของมอร์ตาร์ลดลง [8], [9] ในรูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์ พบว่า เมื่อออกแบบส่วนผสมของมอร์ตาร์ให้มีการดูดซึมน้ำต่ำส่งผลให้กำลังอัดสูงขึ้น [13] ดังนั้น การดูดซึมน้ำมีความสำคัญต่อการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์



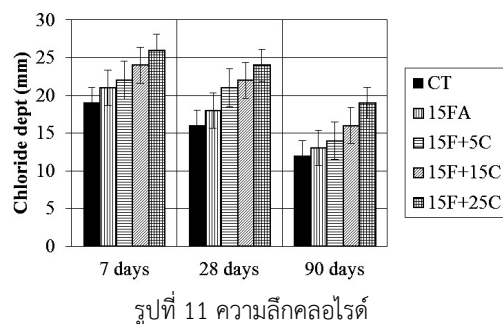
รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับการดูดซึมน้ำของมอร์ตาร์

3.6 การแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์

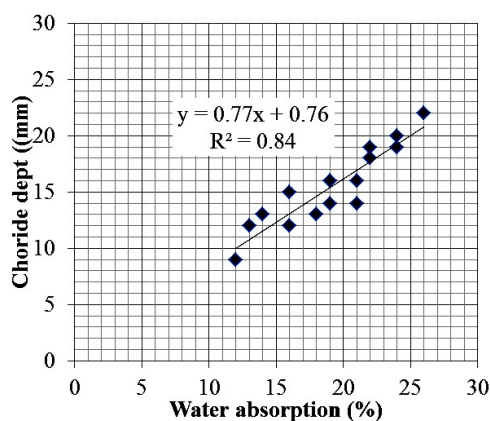
การทดสอบการแทรกซึมไม่สามารถทำได้วิธีมาตรฐาน ASTM C1202 [14] ได้ เนื่องจากมอร์ตาร์มีกำลังอัดที่สูงมาก และเกิดความร้อนในเซลล์ทดสอบที่

ใส่สารละลายทดสอบมากเกินไป ส่งผลให้แผ่นตะแกรงสำหรับทดสอบไหม้และเกิดการขาดเป็นช่องโหว่ จึงหยุดการทดสอบ และทดสอบแบบเร่งด้วยการแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 เป็นเวลา 60 วัน และวัดความลึกคลอไรด์ รูปการทดสอบแบบเร่งด้วยการแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์แสดงไว้ในรูปที่ 1 ผลการทดสอบแสดงไว้ในรูปที่ 11 ซึ่งพบว่า การใช้เถ้าลอยบดผสมรวมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์บด มีค่าความลึกของคลอไรด์สูงกว่ามอร์ตาร์ CT และ 15FA การเพิ่มอายุการทดสอบส่งผลให้ความลึกคลอไรด์ลดลง เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานสร้างความทึบแน่นและลดการแทรกซึมผ่านการศึกษานี้ ชี้ให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มกากแคลเซียมคาร์ไบด์บดในส่วนผสม ส่งผลให้เพิ่มความลึกคลอไรด์ เนื่องจากองค์ประกอบเคมีของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ไม่มีผลต่อปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ [8]-[11] และขนาดอนุภาคที่เป็นเหลี่ยมมุม และมีปริมาณที่มากในส่วนผสมจะเข้าไปขัดกันเอง ส่งผลให้เกิดช่องว่างและรูพรุน ดังนั้น คลอไรด์จึงสามารถซึมผ่านเข้าไปได้ ดังนั้น ปริมาณโพรงในมอร์ตาร์อาจส่งผลต่อการดูดซึมน้ำเช่นเดียวกับการซึมผ่านคลอไรด์ โดยในรูปที่ 12 พบว่า เมื่อการดูดซึมผ่านน้ำในส่วนผสมมอร์ตาร์มีค่ามาก จึงส่งผลให้การแทรกซึมคลอไรด์สูงขึ้นตามไปด้วย ดังนั้น ในการออกแบบส่วนผสมมอร์ตาร์จึงต้องพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซึมน้ำและการแทรกซึมคลอไรด์

อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ เมื่อพิจารณาถึงผลของกำลังอัดพบว่าการใช้เถ้าลอยบดผสมรวมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์บดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (ใช้ GFFA ในปริมาณร้อยละ 15 และ GCCB ในปริมาณร้อยละ 5) ส่งผลให้ค่ากำลังอัดสูงที่อายุ 28 และ 90 วัน หรือมีค่าร้อยละกำลังอัดร้อยละ 77-79 ของมอร์ตาร์ CT และ ค่าร้อยละกำลังอัดร้อยละ 78-81 ของมอร์ตาร์ 15FA อย่างไรก็ตาม การศึกษาครั้งต่อไปจะได้ศึกษาวิธีการทดลองด้วยวิธีการเร่งการทดสอบแบบอื่นๆ เช่น Rapid chloride migration เป็นต้น



รูปที่ 11 ความลึกคลอไรด์



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซึมน้ำกับความลึกคลอไรด์

4. สรุปผลการทดสอบ

การศึกษาพัฒนาเถ้าลอยบดผสมรวมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์บดเพื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 บางส่วน พบว่า ความต้องการสารลดน้ำพิเศษในส่วนผสมของมอร์ตาร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์บด การใช้เถ้าลอยบดผสมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์บดแทนที่ปูนซีเมนต์ มีแนวโน้มส่งผลให้ค่าการไหลแผ่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการใช้เถ้าลอยเพียงอย่างเดียว การใช้เถ้าลอยบดผสมรวมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์บดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (ใช้ GFFA ในปริมาณร้อยละ 15 และ GCCB ในปริมาณร้อยละ 5) ส่งผลให้ค่ากำลังอัดสูงที่อายุ 28 และ 90 วัน หรือมีค่าร้อยละกำลังอัดร้อยละ 77-79 ของมอร์ตาร์ CT และ ค่าร้อยละกำลังอัดร้อยละ 78-81 ของมอร์ตาร์ 15FA การใช้

เถ้าลอยบดผสมรวมกับกากแคลเซียมคาร์ไบด์บดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำและความลึกคลอไรด์สูงขึ้นในส่วนผสม ในขณะที่ค่าการดูดซึมน้ำและความลึกคลอไรด์ต่ำลงเมื่อเพิ่มอายุการทดสอบ

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับสนับสนุนทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ และศูนย์วิจัยโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Sathonsaowapark, P. Chindapasirt and K. Pimraksa, "Workability and strength of lignite bottom ash geopolymer mortar," *J. Harz. Mater.*, vol. 168, pp. 44-50, 2009.
- [2] 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," *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, no.5, pp. 932- 938, 2008.
- [3] 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," *Constr. Build. Mater.*, vol. 63, pp. 303-310, 2014.
- [4] ASTM C230, "Standard Specification for Flow Table for use in Tests of Hydraulic Cement," *Annual Book of ASTM Standard.*, vol. 04.01, pp. 206- 211, 2005.
- [5] ASTM C109, "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in or [50 mm] Cube

- Specimens),” Annual Book of ASTM Standards., Vol. 04.01, pp. 76- 81, 2005.
- [6] ASTM C642, “Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete,” Annual Book of ASTM Standards., vol. 04.02, pp. 338-340, 2005.
- [7] ASTM C39, “Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens,” Annual Book of ASTM Standards., vol. 04.02, 21-27, 2005.
- [8] P. Krammart and S. Tangtermsirikul, “Properties of cement made by partially replacing cement raw materials with municipal solid waste ashes and calcium carbide waste,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 18, pp. 579-583, 2004.
- [9] N. Makaratat, C. Jaturapitakkul and T. Laosamathikul, “Effects of Calcium Carbide Residue–Fly Ash Binder on Mechanical Properties of Concrete,” *J. Mater. Civil Eng.*, vol. 22, no. 11, pp. 1164-1170, 2010.
- [10] ASTM C618. “Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete,” Annual Book of ASTM Standard., vol. 04.02, pp. 323-325, 2005.
- [11] K. Somna, C. Jaturapitakkul and P. Kajitvichyanukul, “Microstructure of Calcium Carbide Residue–Ground fine fly ash Paste,” *J. Mater. Civil Eng.*, vol. 23, no. 3, pp. 298-304, 2010.
- [12] A.M. Neville, “*Properties of concrete*,” 4 th and Final Edition, Malaysia: Longman Group Limited, 1995.
- [13] 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 J. Sci.*, vol. 45, no. 4, pp. 863-1874, 2018.
- [14] ASTM C1202, “Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration,” Annual Book of ASTM Standard., vol. 04.02, pp. 646-651, 2001.

ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก Chloride Penetration Resistance of Concrete with Wet Fly Ash

ทวีชัย สำราญวานิช^{1*} ลีน่า ปรัก²

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จังหวัดชลบุรี 20131

²ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12120

Taweechai Sumranwanich^{1*} Lyna Prak²

¹Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University, Chonburi, 20131

²Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology
Thanyaburi, Pathum Thani, 12120

*Corresponding author Email: twc@buu.ac.th

(Received: November 9, 2020; Accepted: July 12, 2021)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย โดยเถ้าลอยถูกใช้แทนที่วัสดุประสานบางส่วนทั้งในรูปแบบเถ้าลอยเปียกและเถ้าลอยแห้งที่อัตราส่วนแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 20, 40 และ 60 และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ 0.60 โดยการทำให้เถ้าลอยเปียกใช้อัตราส่วนน้ำต่อเถ้าลอย 0.60 ผสมเข้ากันแล้วบ่มไว้เป็นระยะเวลา 30 วัน ก่อนนำไปผสมในคอนกรีต ทำการทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมดและกำลังอัดคอนกรีต จากผลการทดลองพบว่าการใช้เถ้าลอยเปียกและเถ้าลอยแห้งแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 40 ทำให้คอนกรีตมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงที่สุด ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกสูงกว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้ง กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกและเถ้าลอยแห้งร้อยละ 20 สูงกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน และกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกมีแนวโน้มสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยแห้ง

คำสำคัญ: ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ กำลังอัด เถ้าลอย เถ้าลอยเปียก คอนกรีต

ABSTRACT

This research aims to study the chloride penetration resistance and compressive strength of concrete containing fly ash (FA). The fly ash was used as a partially replacement material of binder in the form of wet fly ash (WFA) and dry fly ash (DFA) at the percentage replacement of 20%, 40% and 60%. The water to binder ratio (w/b) was kept at the ratios of 0.50 and 0.60. To produce the WFA, FA was mixed with the water at the water to FA ratio (w/f) of 0.60, then cured for 30 days before used in the mixing of concrete. The rapid chloride penetration resistance, bulk chloride diffusion resistance and compressive strength of the concrete with WFA and DFA were conducted. From the experimental results, it was found that chloride penetration resistance of concrete containing WFA and DFA with the

percentage replacement of 40% was the highest. The chloride penetration resistance of concrete with WFA was higher than that with DFA. The compressive strength of concrete containing WFA and DFA with the percentage replacement of 20% was higher than cement-only concrete. The compressive strength of concrete with WFA was higher than that with DFA.

Keyword: chloride penetration resistance, compressive strength, fly ash, wet fly ash, concrete.

1. บทนำ

โดยทั่วไปเถ้าลอย (Fly ash) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จาก โรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินถูกนำมาใช้ในหลายรูปแบบ ตัวอย่างเช่น การใช้เป็นวัสดุเติมในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์ การใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในงานคอนกรีต เป็นต้น ซึ่งการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในงานคอนกรีตเนื่องด้วยเหตุผลสองประการคือ ประการแรกเนื่องจากเถ้าลอยมีออกไซด์ของซิลิกา อะลูมินาและเหล็ก ซึ่งออกไซด์เหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ดีและเพิ่มกำลังอัดคอนกรีตและความคงทนให้สูงขึ้น โดยเฉพาะเมื่อใช้เถ้าลอยที่มีคุณภาพดีและในปริมาณที่เหมาะสม ประการที่สองเนื่องจากเถ้าลอยมีอนุภาคที่ค่อนข้างเล็กและส่วนใหญ่เป็นเม็ดกลมเมื่อผสมในคอนกรีตเถ้าลอยจะเข้าไปอุดช่องว่างเล็กๆ ระหว่างปูนซีเมนต์และหินหรือทรายทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นขึ้น [1] อย่างไรก็ตาม เถ้าลอยที่เกิดขึ้นไม่ได้ถูกนำมาใช้ทั้งหมด เนื่องจากปริมาณเถ้าลอยที่เกิดขึ้นในบางช่วงไม่ตรงกับความต้องการใช้งาน จึงทำให้มีปริมาณเถ้าลอยมากเกินไปกว่าความต้องการ ดังนั้น เถ้าลอยส่วนที่เกินความต้องการใช้ไม่ได้ถูกจัดเก็บรักษาไว้ในโกดังหรือสถานที่เก็บที่ดี โดยถูกขนย้ายไปเททิ้งบริเวณใกล้ๆ โรงไฟฟ้าซึ่งในขั้นตอนการเททิ้งนั้นเถ้าลอยจะถูกให้ความชื้นประมาณ 15-20% กลายเป็นเถ้าลอยเปียก (Wet fly ash) เพื่อป้องกันไม่ให้อนุภาคเถ้าลอยฟุ้งกระจายไปในอากาศ นอกจากนี้ การเก็บเถ้าลอยทิ้งไว้ในที่แจ้งเถ้าลอยต้องสัมผัสกับความชื้นจากสภาพแวดล้อมและน้ำฝนยังทำให้เถ้าลอยอยู่ในสภาพเปียกมากขึ้นอาจมีความชื้นถึง 60% ซึ่งเถ้าลอยเปียกเหล่านี้อาจถูกนำกลับมาใช้ใหม่ในช่วงที่มี

ปริมาณความต้องการใช้เถ้าลอยสูง ดังนั้นสถานที่เก็บเถ้าลอยเปียกนี้ควรมีการจัดการที่เหมาะสมที่สามารถพร้อมนำมาใช้งานได้ ทั้งนี้หากสามารถนำเถ้าลอยที่ถูกกองทิ้งไว้กลับมาใช้ได้ก็จะช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้อย่างมาก อีกทั้งยังเพิ่มมูลค่าให้กับเถ้าลอยเปียกที่ถูกกองเป็นวัสดุเหลือทิ้งได้ [2]

ตามมาตรฐาน ASTM 618-19 [3] ได้จำแนกชั้นคุณภาพของเถ้าลอยเป็นสองชนิดคือ เถ้าลอยชั้นคุณภาพ F (Class F fly ash) หรือเถ้าลอยที่มีแคลเซียมออกไซด์ต่ำกว่าร้อยละ 18 (Low CaO content) และมีผลรวมออกไซด์ของซิลิกา อะลูมินาและเหล็กมากกว่าร้อยละ 50 และเถ้าลอยชั้นคุณภาพ C (Class C fly ash) หรือเถ้าลอยที่มีแคลเซียมออกไซด์สูงกว่าร้อยละ 18 (High CaO content) และมีผลรวมออกไซด์ของซิลิกา อะลูมินาและเหล็กมากกว่าร้อยละ 50 เช่นกัน ซึ่งเถ้าลอยชั้นคุณภาพ C นั้นจะมีคุณสมบัติประสาน (Cementitious properties) ด้วย กล่าวคือหากอยู่ในสภาวะเปียกเถ้าลอยชนิดนี้สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำได้กลายเป็นของแข็ง หากต้องการนำมาใช้ในงานคอนกรีตต้องผ่านกระบวนการทำให้แห้งและบดก่อน [4] ซึ่งต้องเสียค่าใช้จ่ายสูง จึงไม่คุ้มค่า นอกจากนี้เถ้าลอยที่แข็งตัวแล้วทำให้สูญเสียคุณสมบัติความเป็นวัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic properties) บางส่วนไป ดังนั้น การใช้เถ้าลอยเปียกที่มีปริมาณ CaO สูงจึงเป็นไปได้ยากในทางปฏิบัติ ในทางกลับกันการใช้เถ้าลอยเปียกที่มีปริมาณ CaO ต่ำยังมีความเป็นไปได้ในการนำมาใช้ในงานคอนกรีต [5], [6] อย่างไรก็ตามในปัจจุบันข้อมูลการศึกษาวิจัยการใช้ประโยชน์เถ้าลอยเปียกในงานคอนกรีตยังมีจำนวนน้อยและไม่เพียงพอ

จากที่มาของปัญหาดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาคุณสมบัติความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกเปรียบเทียบกับคอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้ง โดยเถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษาเป็นเถ้าลอยที่มีปริมาณ CaO ต่ำ

2. วิธีการศึกษา

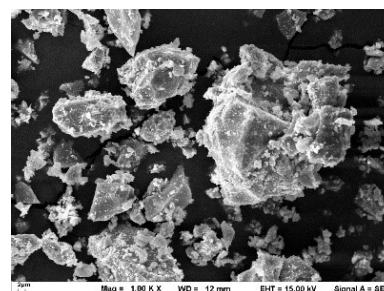
2.1 วัสดุและส่วนผสมที่ใช้

ในการศึกษานี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland cement type I, OPC1) เป็นวัสดุประสานหลัก รูปร่างอนุภาคของปูนซีเมนต์แสดงไว้ในรูปที่ 1 ใช้เถ้าลอยระยอง (Fly ash from BLCP power plant, FA-BLCP) แทนที่วัสดุประสานบางส่วน โดยรูปร่างอนุภาคของเถ้าลอยระยองแสดงไว้ในรูปที่ 2 ซึ่งพบว่าเถ้าลอยระยองมีรูปร่างกลมและไม่แน่นอนปนกันไป นอกจากนี้ยังมีความพรุนด้วย สำหรับองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยระยองแสดงไว้ในตารางที่ 1 โดยพบว่า มีผลรวมปริมาณออกไซด์ของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 มากกว่าร้อยละ 50 และมีปริมาณ CaO น้อยกว่าร้อยละ 18 อยู่ในชั้นคุณภาพ F ตามมาตรฐาน ASTM C618-19 ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานที่ร้อยละ 20, 40 และ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ทั้งในรูปที่เป็นเถ้าลอยแห้ง (Dry fly ash, DFA) และเถ้าลอยเปียก (Wet fly ash, WFA) การเตรียมเถ้าลอยเปียกทำโดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อเถ้าลอย (w/f) 0.60 โดยน้ำหนัก ผสมให้เข้ากันแล้วบรรจุในถุงพลาสติกปิดผนึกให้แน่นเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำ จากนั้นเก็บไว้ในถังพลาสติกปิดฝาเป็นเวลา 30 วัน ก่อนนำไปใช้ ทั้งนี้การใช้อัตราส่วนน้ำต่อเถ้าลอย 0.60 ก็เพื่อให้เถ้าลอยเปียกอยู่ในสถานะของสารผสมกึ่งเหลว (Slurry) ซึ่งสะดวกในการนำไปใช้ผสมคอนกรีต จากผลการศึกษาของ Nguyen et al. (2018) [2] พบว่าระดับความชื้นของเถ้าลอยเปียกไม่มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตแต่อย่างใด แต่ระดับความชื้นของเถ้าลอยเปียกส่งผลต่อการยุบตัวของคอนกรีตสด โดยเมื่อปริมาณความชื้นของเถ้าลอยเปียกสูงขึ้นการยุบตัวของคอนกรีตสดก็มากขึ้น

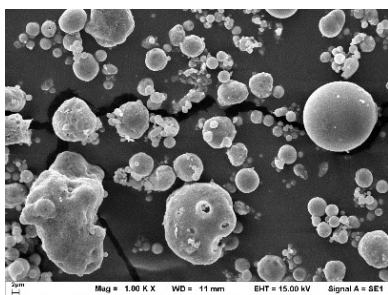
สำหรับมวลรวมที่ใช้ผสมคอนกรีตนั้น มวลรวมละเอียด (Sand) ใช้ทรายแม่น้ำที่มีความถ่วงจำเพาะ 2.60 และโมดูลัสความละเอียด 3.10 ส่วนมวลรวมหยาบ (Rock) ใช้หินปูนย่อยที่มีขนาดโตสุด 19 มิลลิเมตร และมีความถ่วงจำเพาะ 2.70

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าลอยระยอง

Chemical composition (%)	OPC1	FA (BLCP)
SiO_2	19.51	64.45
Al_2O_3	4.97	20.58
Fe_2O_3	3.78	3.76
CaO	65.38	2.55
MgO	1.08	0.97
SO_3	2.16	0.18
LOI	2.27	4.01
Na_2O	0.01	0.43
K_2O	0.44	1.51
TiO_2	-	1.04
P_2O_5	-	0.16
Physical properties		
Blaine fineness (cm^2/g)	3,200	3,463
Specific gravity	3.14	2.18



รูปที่ 1 ภาพขยาย (SEM) รูปร่างอนุภาคของปูนซีเมนต์



รูปที่ 2 ภาพขยาย (SEM) รูปร่างอนุภาคของเถ้าลอย

2.2 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีต

ใช้แบบหล่อตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร สำหรับการ

ทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งและการแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมด ในขณะที่การทดสอบกำลังอัดคอนกรีตใช้แบบหล่อตัวอย่างขนาด $10 \times 10 \times 10$ เซนติเมตร³ โดยทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตตามส่วนผสมที่แสดงไว้ในตารางที่ 2 ซึ่งใช้อัตราส่วนเถ้าลอยต่อวัสดุประสาน (f/b) ที่ 0.20, 0.40 และ 0.60 และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ที่ 0.50 และ 0.60 ทำการถอดแบบภายหลังหล่อตัวอย่าง 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำตัวอย่างไปบ่มในน้ำจนครบตามระยะเวลาที่กำหนดที่ 28, 56 และ 91 วัน ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้

Mix id.	w/b	f/b	Mix proportion of concrete (kg/m ³)					
			OPC1	WFA	DFA	Water	Sand (SSD)	Rock (SSD)
I50	0.50	0.00	404	-	-	202	761	965
I50WFA20		0.20	312	125	-	148	761	965
I50DFA20			312	-	78	195	761	965
I50WFA40		0.40	227	242	-	98	761	965
I50DFA40			227	-	151	189	761	965
I50WFA60		0.60	147	352	-	51	761	965
I50DFA60			147	-	220	183	761	965
I60	0.60	0.00	360	-	-	216	761	965
I60WFA20		0.20	279	110	-	169	761	965
I60DFA20			279	-	70	210	761	965
I60WFA40		0.40	204	214	-	125	761	965
I60DFA40			204	-	136	204	761	965
I60WFA60		0.60	132	307	-	89	761	965
I60DFA60			132	-	198	198	761	965

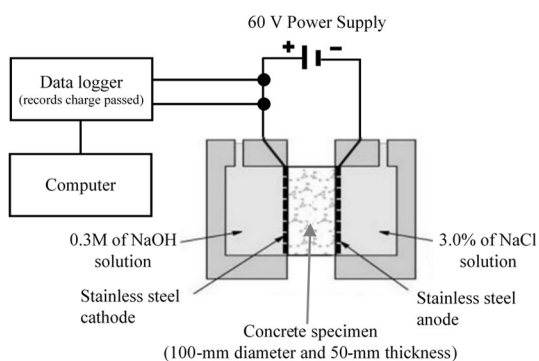
หมายเหตุ : I หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, WFA หมายถึง เถ้าลอยเปียก, DFA หมายถึง เถ้าลอยแห้ง, I50WFA20 หมายถึง คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักและแทนที่วัสดุประสานบางส่วนด้วยเถ้าลอยเปียกร้อยละ 20

2.3 ความต้านทานคลอไรด์แบบเร่งของคอนกรีต

การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง (Rapid chloride penetration test, RCPT) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1202 [7] ซึ่งเป็นการหาปริมาณประจุ

ไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่าน (Charge passed) โพรงช่องว่างภายในคอนกรีตที่อิ่มตัวด้วยน้ำ โดยในการศึกษานี้ได้ทำการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งภายหลังที่ตัวอย่างบ่มน้ำครบตามระยะเวลาที่กำหนดที่ 28, 56 และ

91 วัน โดยเมื่อตัวอย่างครบกำหนด ก็นำตัวอย่างขึ้นมาตัดให้เป็นแผ่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร หนา 5 เซนติเมตร แล้วนำตัวอย่างคอนกรีตไปประกอบเข้ากับเซลล์ทดสอบ จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 0.3M ที่ขั้วบวก (Anode) และสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้น 3.0% ที่ขั้วลบ (Cathode) จากนั้นเริ่มให้ค่าศักย์ไฟฟ้า 60 V DC คร่อมตัวอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยมีรายละเอียดการตั้งค่าเครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งผลที่ได้แสดงด้วยปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีต มีหน่วยเป็นคูลอมป์ (Coulomb)

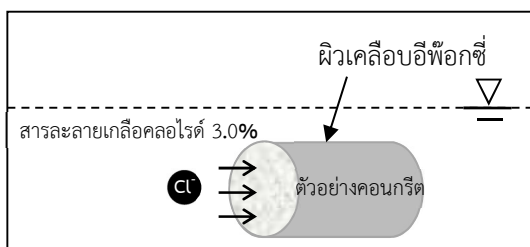


(ก) การตั้งค่าเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดสอบ

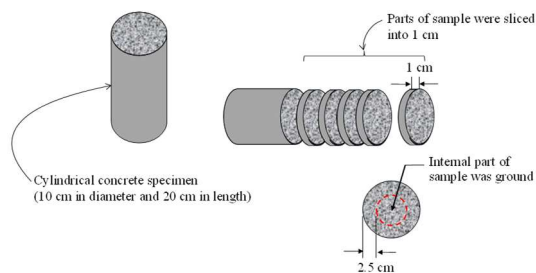


(ข) การทดสอบตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ

รูปที่ 3 การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรง



รูปที่ 4 การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมด



รูปที่ 5 การตัดและเตรียมผงดตัวอย่างคอนกรีตในการหาปริมาณคลอไรด์ที่แต่ละระดับความลึก

2.4 การแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมดของคอนกรีต

การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมด (Bulk chloride diffusion test) ของคอนกรีตอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C1556 [8] ใช้ตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร บ่มในน้ำเป็นระยะเวลา 28 วัน แล้วจึงนำตัวอย่างขึ้นจากน้ำทิ้งไว้ให้แห้งในอากาศ จากนั้นทำการเคลือบผิวของตัวอย่างด้วยอีพ็อกซีเพื่อป้องกันไม่ให้เกลือคลอไรด์แทรกซึมเข้าไป แต่ยกเว้นด้านปลายไว้ด้านหนึ่งดังแสดงในรูปที่ 4 เพื่อให้เกลือคลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าไปในตัวอย่างในทิศทางเดียว หลังจากอีพ็อกซีแข็งตัวแล้วจึงนำตัวอย่างไปแช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์เข้มข้น 3.0% เป็นระยะเวลา 28, 56 และ 91 วัน ตามลำดับ โดยอุณหภูมิตลอดช่วงการทดสอบอยู่ที่ $30^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ เมื่อตัวอย่างครบระยะเวลาเผชิญคลอไรด์แล้วจึงนำตัวอย่างออกจากสารละลายเกลือคลอไรด์ทิ้งไว้ให้แห้งในอากาศ แล้วนำตัวอย่างไปตัดเป็นแผ่นหนาชั้นละ 1 เซนติเมตรตามความลึกจากผิวหน้าด้านที่ไม่ทาอีพ็อกซี (ด้านที่เผชิญคลอไรด์) จากนั้นนำแผ่นตัวอย่างที่ตัดไปบดเป็นผงและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 โดยในการบดตัวอย่างจะเลือกเฉพาะบริเวณส่วนกลางของแผ่นตัวอย่าง เพื่อหลีกเลี่ยงเกลือคลอไรด์ที่อาจแทรกซึมจากด้านข้างได้ รายละเอียดการตัดและเตรียมผงดตัวอย่างแสดงไว้ในรูปที่ 5 จากนั้นนำผงดตัวอย่างไปทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Acid-soluble chloride content) ในคอนกรีตตามมาตรฐาน

ASTM C1152 [9] และนำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณหาสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ (D_a) ของคอนกรีต จากสมการคำตอบกฎข้อที่สองของฟิกค์ (Fick's second law of diffusion equation) ดังสมการที่ 1

$$C(x,t) = C_i + (C_s - C_i) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_a t}} \right) \right] \quad (1)$$

โดยที่ $C(x,t)$ คือปริมาณคลอไรด์ที่ความลึก x ภายหลังเผชิญคลอไรด์เป็นระยะเวลา t (%) โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน), C_i คือปริมาณคลอไรด์เริ่มต้นในคอนกรีต (%) โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน), C_s คือปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าคอนกรีต (%) โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน), erf คือเออเรอร์ฟังก์ชัน, D_a คือสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ (ตารางเซนติเมตร/ปี), x คือความลึกจากผิวหน้า (เซนติเมตร) และ t คือระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ (ปี)

2.5 กำลังอัดของคอนกรีต

การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตใช้ตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด $10 \times 10 \times 10$ เซนติเมตร³ ตามมาตรฐาน BS 1881-116 [10] โดยทำการทดสอบกำลังอัดภายหลังตัวอย่างคอนกรีตถูกบ่มน้ำจนครบตามกำหนดระยะเวลา 28, 56 และ 91 วัน ตามลำดับ

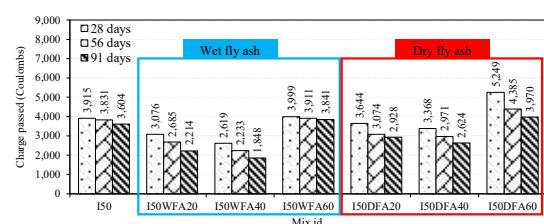
3. ผลการทดลองและอภิปราย

3.1 การแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง

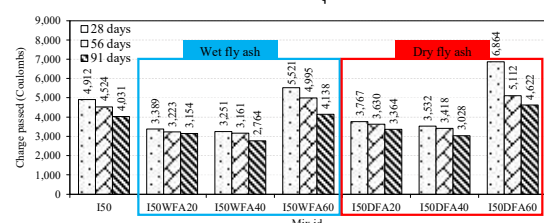
ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตสามารถพิจารณาได้จากปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีตในหน่วยคูลอมป์ โดยหากปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนผ่านคอนกรีตยิ่งต่ำ หมายถึงคอนกรีตยิ่งมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดี

จากรูปที่ 6 พบว่า ปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก (WFA) และคอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้ง (DFA) ร้อยละ 20 และ 40 ต่ำกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน โดยปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานในปริมาณสูงขึ้นถึงร้อยละ 40 เนื่องจากเถ้า

ลอยสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับ Ca(OH)_2 ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้เกิด C-S-H และ C-A-H เพิ่มขึ้น อีกทั้งอนุภาคเถ้าลอยบางส่วนสามารถเข้าไปเติมเต็มโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตได้ (Filler effect) ส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบแน่นมากขึ้น โดยคอนกรีตที่มีการใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 40 นั้นมีปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านต่ำที่สุด หรือมีความสามารถด้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีที่สุด อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานสูงถึงร้อยละ 60 กลับทำให้ปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านสูงกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน เนื่องจากปริมาณของปูนซีเมนต์ที่น้อยลงทำให้ผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง (Dilution effect) ปฏิกิริยาปอซโซลานิกจึงเกิดได้น้อยลงไปด้วย นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลกระทบของระยะเวลาบ่มพบว่า ปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตลดลงหรือความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาบ่มนานขึ้นจาก 28, 56 และ 91 วัน ตามลำดับ เนื่องจากระยะเวลาบ่มที่นานขึ้น ทำให้การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิกเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องและสมบูรณ์มากขึ้น ทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นมากขึ้น ปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตได้จึงน้อยลง



(ก) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50



(ข) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

รูปที่ 6 ปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก (WFA) และเถ้าลอยแห้ง (DFA)

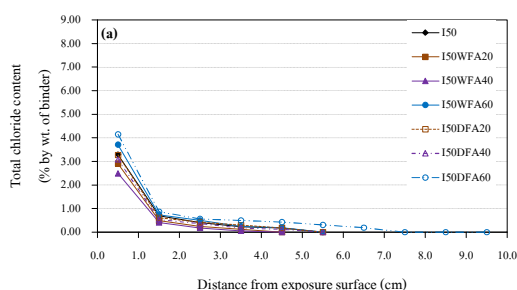
เมื่อพิจารณาผลกระทบของการใช้เถ้าลอยเปียกและเถ้าลอยแห้งจากรูปที่ 6 พบว่า ปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยเปียกต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแห้ง อาจเนื่องมาจากเมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาวะแข็งตัวแล้ว ความชื้นที่อยู่กับอนุภาคเถ้าลอยช่วยให้เถ้าลอยสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ดียิ่งขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบแน่นมากขึ้น ความพรุนลดน้อยลง คอนกรีตจึงมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีขึ้น (ปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านลดลง) อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) จากรูปที่ 6 พบว่า ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตลดลง (ปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านเพิ่มขึ้น) เมื่อ w/b สูงขึ้น เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้ w/b สูงขึ้นทำให้มีปริมาณน้ำอิสระมากขึ้นส่งผลให้คอนกรีตมีความพรุนที่เกิดจากน้ำอิสระเหล่านั้นสูงขึ้นตามไปด้วย ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ประจุไฟฟ้าสามารถเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตตามโพรงช่องว่างได้ง่ายขึ้น

3.2 การแทรกซึมคลอไรด์แบบแบบแพร่ทั้งหมด

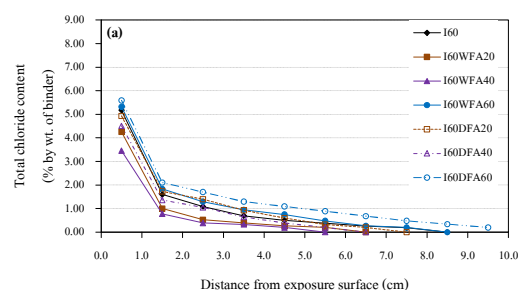
รูปที่ 7 แสดงปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride content) ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกและเถ้าลอยแห้งภายหลังเผชิญคลอไรด์เป็นระยะเวลา 28, 56 และ 91 วัน โดยพบว่า ค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกและคอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้งร้อยละ 20 และ 40 ต่ำกว่าของคอนกรีตซีเมนต์ล้วน ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานใน

ปริมาณสูงขึ้นถึงร้อยละ 40 เนื่องจากเถ้าลอยสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ทำให้เกิด C-S-H และ C-A-H ซึ่งช่วยให้คอนกรีตทึบแน่นขึ้นและช่วยเพิ่มความสามารถยึดจับคลอไรด์ในคอนกรีตให้สูงขึ้นด้วย [11]-[13] อีกทั้งอนุภาคเถ้าลอยบางส่วนสามารถเข้าไปเติมเต็มโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีต ส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบแน่นมากขึ้น คลอไรด์จึงแทรกซึมเข้าไปได้ยาก โดยการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 ให้ค่าปริมาณการแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดต่ำที่สุด อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานสูงถึงร้อยละ 60 ส่งผลให้ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดมีแนวโน้มสูงกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน เนื่องจากปริมาณของปูนซีเมนต์ที่น้อยลงทำให้ผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง ปฏิกิริยาปอซโซลานิกจึงเกิดได้น้อยลงไปด้วย

เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) จากรูปที่ 7 (ก) และ (ข) พบว่า ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตสูงขึ้น เมื่อ w/b สูงขึ้น เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้ w/b สูงขึ้นทำให้มีปริมาณน้ำอิสระมากขึ้นส่งผลทำคอนกรีตมีความพรุนที่เกิดจากน้ำอิสระสูงขึ้นตามไปด้วย จึงเป็นเหตุทำให้ไอออนคลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีตผ่านตามโพรงช่องว่างภายในคอนกรีตได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ เมื่อคอนกรีตเผชิญคลอไรด์เป็นระยะเวลานานขึ้น (จาก 28, 56 และ 91 วัน) ทำให้ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตตามระดับความลึกต่างๆ เพิ่มขึ้นตามด้วย



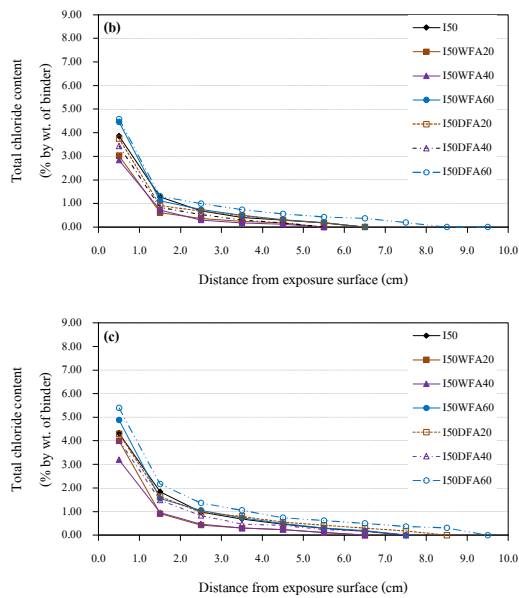
(ก) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50



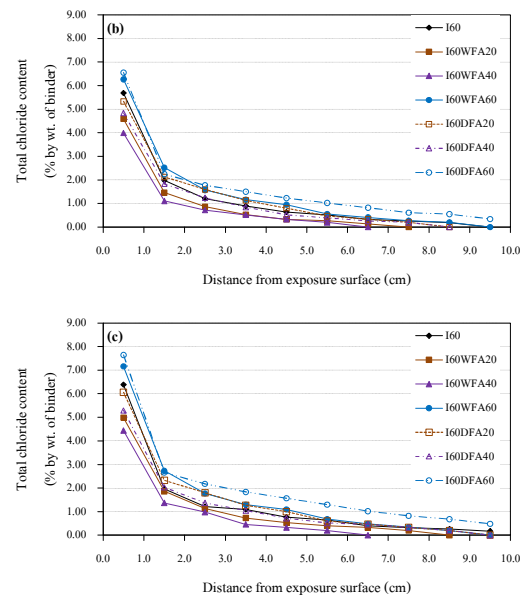
(ข) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

รูปที่ 7 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก (WFA) และเถ้าลอยแห้ง (DFA): (a) ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 วัน; (b) ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 56 วัน และ (c) ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 91 วัน

ปีที่ 16 ฉบับที่ 2 เดือน พฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2564

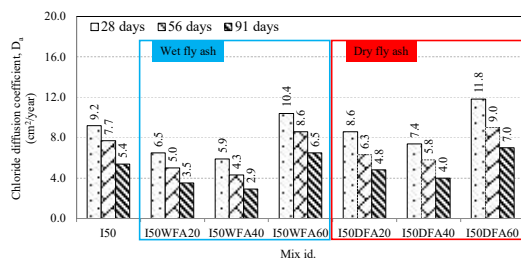


(ก) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

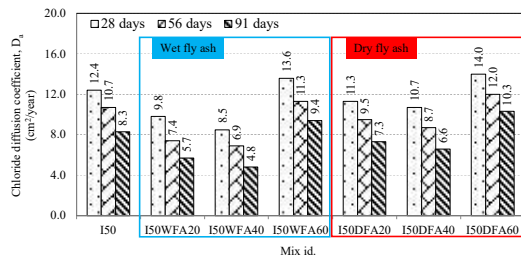


(ข) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

รูปที่ 7 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก (WFA) และเถ้าลอยแห้ง (DFA): (a) ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 วัน; (b) ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 56 วัน และ (c) ที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 91 วัน (ต่อ)



(ก) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50



(ข) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

รูปที่ 8 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก (WFA) และเถ้าลอยแห้ง (DFA)

เพื่อให้การพิจารณาผลกระทบของการใช้เถ้าลอยเปียกและเถ้าลอยแห้งมีความชัดเจนมากยิ่งขึ้น การพิจารณาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต

จึงถูกนำเสนอในรูปแบบของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ (D_a) ของคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 8

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 8 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกและคอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้งร้อยละ 20 และ 40 ต่ำกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน โดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยลดลงเมื่อใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานในปริมาณสูงขึ้นถึงร้อยละ 40 ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกระหว่างเถ้าลอยกับ Ca(OH)_2 ที่ช่วยเพิ่มความสามารถยึดจับคลอไรด์และความทึบแน่นในคอนกรีตให้สูงขึ้น รวมถึงอนุภาคเถ้าลอยบางส่วนสามารถเติมเต็มโพรงช่องว่างภายในคอนกรีต อีออนคลอไรด์จึงแทรกซึมเข้าไปได้ยาก โดยการแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 40 ให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ต่ำที่สุด อย่างไรก็ตาม สำหรับคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานสูงถึงร้อยละ 60 กลับทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์สูงกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน เนื่องจากปริมาณของปูนซีเมนต์ที่น้อยลงทำให้ผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิกลดลง อีออนคลอไรด์จึงแทรกซึมเข้า

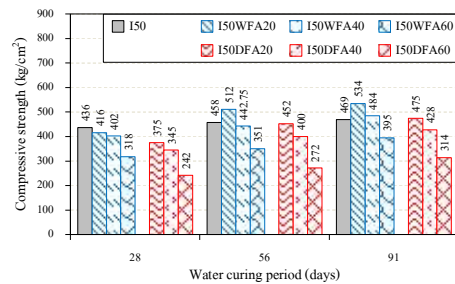
ไปในคอนกรีตได้ง่าย อย่างไรก็ตามเมื่อคอนกรีตมีระยะเวลาเผชิญคลอไรด์นานขึ้นจาก 28, 56 และ 91 วัน ทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตลดลง

จากรูปที่ 8 เมื่อพิจารณาผลกระทบของการใช้เถ้าลอยเปียกและเถ้าลอยแห้งพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยเปียกนั้นต่ำกว่าของคอนกรีตที่แทนที่ใช้เถ้าลอยแห้ง อาจเนื่องจากความชื้นที่อยู่กับอนุภาคเถ้าลอยช่วยให้เถ้าลอยทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ดีขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตมีความแข็งแรงมากขึ้น อีกทั้งยังช่วยเพิ่มความสามารถยึดจับคลอไรด์ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตจึงลดลง อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตสูงขึ้น เมื่อ w/b สูงขึ้น เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้ w/b สูงขึ้นทำให้มีปริมาณน้ำอิสระมากขึ้นส่งผลทำคอนกรีตมีความพรุนมากขึ้นเป็นเหตุทำให้ไอออนคลอไรด์สามารถเคลื่อนที่ผ่านไปตามโพรงช่องว่างเหล่านั้นได้ง่ายขึ้น

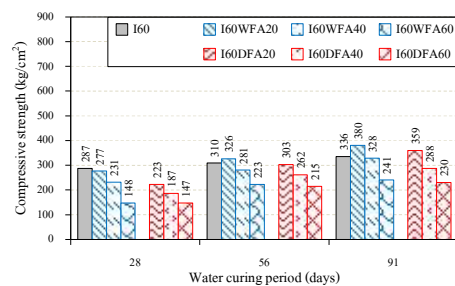
3.3 กำลังอัด

จากรูปที่ 9 ซึ่งแสดงกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกและเถ้าลอยแห้งพบว่า กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย (ทั้งเถ้าลอยเปียกและเถ้าลอยแห้ง) ลดลงเมื่อใช้เถ้าลอยในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น (เพิ่มจากร้อยละ 20 ถึง 60) เมื่อพิจารณาที่อายุบ่มน้ำ 28 วัน กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยเปียกและคอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้งต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนทุกส่วนผสม อย่างไรก็ตาม เมื่ออายุบ่มน้ำเพิ่มขึ้น กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกและคอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้งร้อยละ 20 สูงกว่าของคอนกรีตซีเมนต์ล้วน แต่เมื่อเพิ่มปริมาณการใช้เถ้าลอยเป็นร้อยละ 40 และ 60 กำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มต่ำกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน ยกเว้นคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกร้อยละ 40 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) 0.50 พบว่า กำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่เพิ่มสูงกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วนเนื่องจากเถ้าลอยทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับ Ca(OH)_2 ได้สารประกอบ C-S-H และ C-

A-H ซึ่งมีเป็นสารยึดประสาน อย่างไรก็ตามหากใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานในปริมาณสูงขึ้น ส่งผลกระทบต่อปริมาณของ Ca(OH)_2 กล่าวคือ เมื่อปูนซีเมนต์น้อยลง Ca(OH)_2 ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันก็น้อยลง [14]-[17] ทำให้สารประกอบที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกระหว่างเถ้าลอยกับ Ca(OH)_2 ลดลงด้วย



(ก) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50



(ข) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60

รูปที่ 9 กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก (WFA) และเถ้าลอยแห้ง (DFA)

เมื่อพิจารณาผลกระทบของการใช้เถ้าลอยเปียกและเถ้าลอยแห้งจากรูปที่ 9 พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยเปียกมีแนวโน้มสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแห้งในทุกๆ อัตราส่วนแทนที่วัสดุประสาน อาจเนื่องจากความชื้นที่อยู่กับอนุภาคเถ้าลอยสามารถช่วยให้เถ้าลอยทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ดีขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตมีความแข็งแรงมากขึ้น นอกจากนี้การใช้เถ้าลอยเปียกผสมคอนกรีตทำให้เกิดการผสมสองครั้ง (Double mixing) ของน้ำในส่วนผสมคอนกรีต แบ่งเป็น 1) น้ำที่ผสมกับเถ้าลอย และ 2) น้ำที่ผสมกับส่วนผสมคอนกรีต ซีเมนต์เฟสของเถ้าลอยเปียกจึงสามารถจับยึดกับมวลรวมได้ดี ทำให้เกิดความ

แข็งแรงบริเวณรอยต่อระหว่างเฟสกับมวลรวม (Interfacial transition zone, ITZ) กำลังอัดจึงสูงขึ้น [2] อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาผลกระทบของ w/b พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตลดลงเมื่อ w/b สูงขึ้น เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้ w/b สูงขึ้นทำให้มีปริมาณน้ำอิสระมากขึ้นส่งผลทำคอนกรีตมีความพรุนมากขึ้น

4. สรุปผล

จากผลการศึกษาการใช้เถ้าลอยเปียกและเถ้าลอยแห้งแทนที่บางส่วนของวัสดุประสานในคอนกรีตในด้านความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีต สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงของคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 และ 40 สูงกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วนและคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 60 คอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงสูงกว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้งอย่างชัดเจน คอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงสูงที่สุด

2. สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 และ 40 ต่ำกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วนและคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 60 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกต่ำกว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้งอย่างเห็นได้ชัด โดยที่สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 มีค่าต่ำที่สุด

3. กำลังอัดของคอนกรีตลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการใช้เถ้าลอยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 20 ให้กำลังอัดของคอนกรีตในระยะยาวสูงกว่าคอนกรีตซีเมนต์ล้วน นอกจากนี้ กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกสูงกว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้งอย่างชัดเจน

4. ความสามารถต้านทานคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียกสูงกว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยแห้งเนื่องจากความชื้นที่อยู่กับอนุภาคเถ้าลอยเปียกช่วยให้เถ้าลอยสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ดียิ่งขึ้น รวมทั้ง

จากผลการผสมสองครั้ง (Double mixing) ของน้ำทำให้ซีเมนต์เฟสยึดจับมวลรวมได้แข็งแรงขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยมหาวิทยาลัยบูรพา สัญญาเลขที่ 157/2560 และการสนับสนุนจากหน่วยวิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษาบูรพา (BCONTEC) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] W. Saengsoy, T. B. T. Nguyen, and S. Tangtermsirikul, "A study on basic properties of mortar made with wet fly ash," in *proc. of the 6th Int. Conf. of ACF*, Seoul, Korea, 2014, pp. 949-955.
- [2] T. B. T. Nguyen, W. Saengsoy and S. Tangtermsirikul, "Effect of initial moisture of wet fly ash on the workability and compressive strength of mortar and concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 183, pp. 408-416, September 2018.
- [3] American Society for Testing and Materials, ASTM C618-19, Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.
- [4] R. Cheerarot and C. Jaturapitakkul, "A study of disposed fly ash from landfill to replace Portland cement," *Wast. Manag.*, vol. 24(7), pp. 701-709, March 2004.
- [5] S. A. Haldive and A. R. Kambekar, "Experimental study on combined effect of fly ash and pond ash on strength and

- durability of concrete,” *Int. J. Sci. Eng. Res.*, vol. 4(5), pp. 81–86, May 2013.
- [6] B. Andrew and P. G. Aceves, “The use of non-commercial fly ash in roller compacted concrete structures,” in *World of Coal Ash Conf.*, Denver, CO, USA, 2011, pp. 1-4.
- [7] American Society for Testing Materials, ASTM 1202-97, Standard test method for electrical indication of concrete’s ability to resist chloride ion penetration, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2004.
- [8] American Society for Testing and Materials, ASTM 1556, Standard test method for determining the apparent chloride diffusion coefficient of cementitious mixtures by bulk diffusion, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2004.
- [9] American Society for Testing and Materials, ASTM C1152, Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2004.
- [10] British Standard, BS 1881-116, Method for determination of compressive strength of concrete cubes, 1983.
- [11] T. Sumranwanich and S. Tangtermsirikul, “A model for predicting time-dependent chloride binding capacity of cement-fly ash cementitious system,” *Mat. Struct.*, vol. 37(6), pp. 387–396, July 2004.
- [12] J. Liu, G. Ou, Q. Qiu, X. Chen, J. Hong and F. Xing, “Chloride transport and microstructure of concrete with/without fly ash under atmospheric chloride condition,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 146, pp. 493–501, August 2017.
- [13] L. Prak, T. Sumranwanich and S. Tangtermsirikul, “Time-dependent model for predicting chloride binding capacity of concrete with crystalline material,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 33(2), pp. 04020473, February 2021.
- [14] I. Sirisawat, W. Saengsoy, L. Baingam, P. Krammart and S. Tangtermsirikul, “Durability and testing of mortar with interground fly ash and limestone cements in sulfate solutions,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 64, pp. 39-46, August 2014.
- [15] J. Feng, J. Sun and P. Yan, “The influence of ground fly ash on cement hydration and mechanical property of mortar,” *Adv. Civ. Eng.*, vol. 2018, pp. 1–7, May 2018.
- [16] L. Wang, K. Uji and A. Ueno, “Evaluation on reaction efficiency coefficient of fly ash based on threshold value of effective replacement ratio,” *Cement Sci. Con. Tech.*, vol. 71(1), pp. 645–652, March 2018.
- [17] L. Prak and T. Sumranwanich, “Chloride binding capacity and water absorption of mortar containing fly ash, limestone powder, and expansive additive,” *J. Eng. RMUTT*, vol. 18(2), pp. 133-144, December 2020.

อิทธิพลของความแตกต่างของอุณหภูมิในการอบแห้งที่มีต่อสารหอม (2AP) ข้าวหอมปทุม Influence of drying operating temperature difference on aroma (2AP) of Thai Pathumthani Fragrant Rice

สมพจน์ คำแก้ว

ห้องปฏิบัติการนวัตกรรมวิศวกรรมอบแห้งทางการเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

เลขที่ 1 หมู่ที่ 6 ตำบลกำแพงแสน อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

Sompot Khomkaew

Drying-Agri-Innovation Engineering Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus,

1 M.6 Kamphaeng Saen District, Nakhon Pathom 73140, Thailand.

Email: Sku18me@gmail.com

(Received: November 17, 2020; Accepted: July 12, 2021)

บทคัดย่อ

การศึกษาหาปริมาณการสูญเสียสารหอมของข้าวหอมปทุมในกระบวนการลดความชื้นโดยคำนวณจากค่าสารหอมของข้าวเปลือกที่ผ่านการลดความชื้นมีปริมาณลดลงไปมากน้อยเท่าใด จากค่าสารหอมในข้าวเปลือกหอมปทุมที่ผ่านกระบวนการอบแห้งแบบหมุนเวียนขนาดเล็ก ทำการเก็บตัวอย่างทุก 2 ชั่วโมง ในหนึ่งรอบการทำงาน 12 ชั่วโมง พบว่าค่าเฉลี่ยค่าสารหอมมีค่าเท่ากับ 3.26 ไมโครกรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 39 องศาเซลเซียส เนื่องด้วยข้าวหอมปทุมจะมีค่าสารหอมค่อนข้างน้อย แต่เมื่อทำการลดความชื้นข้าวเปลือกหอมปทุมด้วยเครื่องอบแห้งลมร้อนทำให้ค่าความชื้นของข้าวเปลือกอยู่ที่ร้อยละ 18 มีปริมาณสารหอมอยู่ระหว่าง 2.08-3.72 ไมโครกรัมต่อกรัม และมีค่าเฉลี่ยสารหอมมีค่าเท่ากับ 2.69 ไมโครกรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 53 องศาเซลเซียส ซึ่งปริมาณสารหอมที่สูญเสียไปคิดเป็นร้อยละ 17.08 ± 12.43 ไมโครกรัมต่อกรัม ดังนั้นจะเห็นได้ว่าในกระบวนการลดความชื้นข้าวเปลือกสดทำให้เกิดการสูญเสียปริมาณสารหอมจึงเป็นสาเหตุทำให้กลิ่นสารหอมของข้าวลดลง

คำสำคัญ: อบแห้ง ระบบหมุนเวียน สารหอม ข้าวหอมปทุม

ABSTRACT

The study to quantify the loss of aroma substances 2-Acetyl-1-Pyrroline (2AP) of Thai Pathumthani Fragrant Rice in the dehumidification process was calculated from how much the aroma content 2-Acetyl-1-Pyrroline of dehumidified paddy was reduced from the aroma substance value 2 -Acetyl-1-Pyrroline (2AP) in the aroma paddy. By

recirculation batch drying process samples were collected every 2 hr in a 12 hr work cycle. 2-Acetyl-1-Pyrroline (2AP) = 3.26 $\mu\text{g/g}$ at temperature 39⁰C due to the relatively lightly aroma content 2-Acetyl-1-Pyrroline (2AP), but when reducing the moisture content of the aroma paddy with a hot air dryer, the moisture content of the paddy at 18% is found. The aroma substance 2-Acetyl-1-Pyrroline (2AP) was between 2.08-3.72 $\mu\text{g/g}$ and the aroma mean 2-Acetyl-1-Pyrroline (2AP) = 2.69 $\mu\text{g/g}$ at temperature 53⁰C. 17.08 $\pm$ 12.43 $\mu\text{g/g}$ Therefore, it can be seen that in the process of dehumidification, paddy causes a loss of aroma content 2-Acetyl-1-Pyrroline (2AP), which causes a decrease in the aroma of rice.

Keywords: Drying, Recirculation, Aroma, Thai Pathumthani Fragrant Rice

1. บทนำ

สารหอม 2-Acetyl-1-Pyrroline (2AP) โดยเฉลี่ยของโรงสีขนาดกลางสูงกว่าโรงสีขนาดเล็กและขนาดใหญ่ (2.08, 1.93 และ 1.89 $\mu\text{g/g}$) กระบวนการลดความชื้นข้าวเปลือกสดของโรงสี ใช้วิธีการอบด้วยลมร้อนโดยทั่วไปใช้หลักการเดียวกัน คือ ใช้ลมร้อนที่มีอุณหภูมิ 80-100⁰C ขึ้นอยู่กับความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกแล้วเป่าลมร้อนผ่านข้าวเปลือกที่อุณหภูมิตู้ที่ 1 อุณหภูมิ 80⁰C ตู้ที่ 2 อุณหภูมิ 75⁰C ตู้ที่ 3 ใช้อุณหภูมิ 65⁰C และตู้ที่ 4 ใช้อุณหภูมิ 55⁰C หรือบางโรงสีอาจใช้อุณหภูมิ ตู้ที่ 1 90⁰C ตู้ที่ 2 ใช้อุณหภูมิ 85⁰C ตู้ที่ 3 ใช้อุณหภูมิ 80⁰C ตู้ที่ 4 ใช้อุณหภูมิ 70⁰C ตู้ที่ 5 ใช้อุณหภูมิ 60⁰C และตู้ที่ 6 ใช้อุณหภูมิ 50⁰C อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งจะควบคุมจากอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกสุดท้ายไม่ให้เกิน 40⁰C และเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดเป็นการใช้อุณหภูมิในการอบแห้งที่สูงๆ เกิน 100⁰C แต่ใช้เวลาน้อยเพื่อให้ความชื้นข้าวเปลือกลดลงมาระดับหนึ่งแล้วพักไว้ให้กับข้าวเปลือกมีความชื้นสูงเกิน 30% หรือปริมาณข้าวเปลือกสดมีเป็นจำนวนมากที่ต้องการลดความชื้นลงให้เหลือประมาณ 20-24% ทำให้ยืดอายุของข้าวเปลือกและชะลอความเสียหายของข้าวเปลือก

โรงสีบางแห่งนำข้าวเปลือกไปตากแดดเพื่อลดความชื้น หลังจากนั้นจะเข้าเครื่องอบแห้งทำให้สารหอมในข้าวได้แก่ สาร 2-Acetyl-1-Pyrroline (2AP) ระเหยออกมากับกระบวนการอบแห้ง[1] สารหอม 2-Acetyl-1-Pyrroline (2AP) สามารถพบได้ในส่วนต่างๆ ของข้าวนอกจากเมล็ดข้าว เช่น ยอดอ่อน ราก เปลือกและใบ [2][3] ในการสกัดสารระเหยจากข้าวกล้องขาวดอกมะลิ 105 แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วย GC-MS พบสาร 2-Acetyl-1-Pyrroline (2AP) และสารอื่นๆ มากกว่า 100 ชนิด ต่อมาได้พัฒนาวิธีการสกัดด้วยสารละลายกรดโดยไม่ใช้ความร้อน พบว่าสามารถวิเคราะห์สาร 2-Acetyl-1-Pyrroline (2AP) ในตัวอย่างข้าวปริมาณน้อยๆ [4]

เมื่ออัตราการป้อนข้าวเปลือกเท่ากับ 4,821 kg/hr สามารถลดความชื้นข้าวเปลือกจาก 28% หรือ 23% ของฐานแห้ง โดยสิ้นเปลืองกำลังไฟฟ้าและน้ำมันดีเซล 9,646 watt และ 17.6 L/hr และสิ้นเปลืองพลังงานปฏิกิริยาจำเพาะ 6.15 MJ/kg_{Water} ที่ระเหย สำหรับการลดความชื้นโดยเทคนิคการทำให้ไหลบนฐานการสั่นที่กำลังการผลิตและความชื้นเริ่มต้นเท่ากันแต่ใช้ความเร็วอากาศลมร้อนเท่ากับ 1.5 m/s ที่สภาวะเงื่อนไขการลดความชื้น

ที่เหมาะสมที่สุด คืออุณหภูมิอากาศร้อนเท่ากับ 143⁰C กรณีลดความชื้นโดยเทคนิคการทำให้ไหลที่ไม่มีการสั่น [5] โดยการใช้เครื่องอบแห้งในระดับห้องปฏิบัติการ มีการเวียนลมร้อนที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่มีปริมาณ 80% สุ่มเก็บตัวอย่างข้าวเปลือกในห้องอบแห้งประมาณ 25g ทุกๆ 30s

ในการวิเคราะห์ค่าความชื้นของข้าวเปลือกตามมาตรฐาน ASAE (1989) พบว่าการลดลงของความชื้นจะแปรผันตามอุณหภูมิของลมร้อนที่อุณหภูมิลมร้อนสูงการลดลงของความชื้นจะมากกว่ากรณีที่อุณหภูมิต่ำ โดยมีลักษณะการลดลงเป็นไปในแนวทางทำงานเดียวกัน [6] ในการลดความชื้นด้วยอุณหภูมิสูงมีผลให้ปริมาณสารหอมระเหย 2-Acetyl-1-Pyrroline (2AP) ลดลง [7] ในทางกลับกันกลับไม่พบความแตกต่างในคุณภาพความหอมของข้าวเมื่ออุณหภูมิในการลดความชื้นอยู่ระหว่าง 18-60⁰C ซึ่งการลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยอุณหภูมิสูง 54.3⁰C ที่ 21.9% RH เปรียบเทียบกับอุณหภูมิต่ำ 33⁰C ที่ 67.8% RH ไม่มีผลต่อความหอมของข้าวสุกก่อนทำการเก็บรักษา [8] ในการลดความชื้นในเมล็ดด้วยอุณหภูมิต่ำ 3 วิธีคือการตากแดด การปรับสภาพอากาศ (modified air at 30-40⁰C) และการใช้อากาศร้อน (hot air at 40, 50 and 70⁰C) [9] จะให้ปริมาณสารหอมระเหย 2-Acetyl-1-Pyrroline (2AP) สูง [10] ตรงข้ามปริมาณสารหอมระเหย 2-Acetyl-1-Pyrroline (2AP) มีแนวโน้มสูงขึ้นตามอุณหภูมิที่ใช้ในการลดความชื้นเมล็ดข้าวระหว่างช่วง 100-150⁰C [11] การประเมินสภาพการใช้เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบต่างๆ ของโรงสีในประเทศไทย จากการสำรวจพบว่าใช้เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกที่นิยมใช้มากที่สุดคือแบบ LSU 64.4% มีกำลังการผลิตรวม 79.3% โดยใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงในการอบแห้ง ข้าวเปลือกที่ใช้มีความชื้นทุกระดับ รองลงมาเป็นเครื่องอบแห้งแบบ Recirculating Batch drying 20.6% ใช้ อ บ แ ห้ ง ข้าวเปลือกในช่วงความชื้น 20-30 (%wb) เมื่อกำลังการผลิตมากกว่า 100 ตันต่อวัน พบว่าเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดได้รับความพึงพอใจมากที่สุดรองมาเป็น LSU, Cross Flow และ Recirculating Batch drying และได้

ทดสอบสมรรถนะระบบอบแห้งข้าวเปลือกที่ใช้ระบบฟลูอิดไดซ์เบดร่วมกับแบบไหลคลุกเคล้า (LSU) เพื่อประเมินสภาพการใช้เครื่องอบแห้งข้าวเปลือก โดยใช้ร่วมกับเครื่องเป่าลมเย็น จากผลการทดสอบพบว่าข้าวเปลือกที่ผ่านอบแห้งด้วยฟลูอิดไดซ์เบด มีคุณภาพที่อยู่ตามเกณฑ์มาตรฐาน เมื่อนำผ่านเครื่องอบแห้งแบบ LSU พบว่าคุณภาพที่ได้ลดลงและพลังงานที่ใช้เพิ่มขึ้นซึ่งปัจจัยหลักที่มีผลต่อการใช้พลังงานคือความชื้นเริ่มต้นและค่าใช้จ่ายในการอบแห้งอยู่ในช่วง 0.70-0.96 Baht/kgWater_{evap}[12]

จากการทดลองอบแห้งทั้ง 3 แบบ พบว่าอุณหภูมิทำงานอยู่ที่ 30-40 ⁰C ซึ่งเครื่องอบแห้งแบบ LSU และแบบ RBD มีอุณหภูมิการทำงานไม่เกิน 70 ⁰C และถูกนำมาทำการวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณสารหอมแบบเทคนิค Headspace Gas chromatography หลังจากผ่านการอบแห้งทั้ง 3 แบบ ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการทดลองหาปริมาณสูญเสีย 2AP (μg/g) การลดความชื้น 3 แบบ

ข้าวหอม ปทุม (RICE)	ตากแดด (SUN)	เครื่อง อบแห้ง (LSU)	เครื่องอบแห้ง หมุนเวียน (RBD)
1	3.09	2.70	1.46
2	3.63	3.46	2.17
3	3.20	2.65	1.82
4	3.36	1.25	2.14
5	3.25	2.72	2.27
6	2.82	2.16	1.30
7	2.85	2.31	2.70
8	3.55	3.39	2.67
9	3.56	3.21	2.02
10	3.08	2.68	2.17

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การวิเคราะห์องค์ประกอบสารหอมในข้าวเปลือกด้วยเทคนิค Headspace Comprehensive Two-Dimensional Gas Chromatography Time -of-Flight

Mass Spectrometry (HS-GC×GC-TOFMS) ใน การเตรียมตัวอย่างบดตัวอย่างให้เป็นแป้งข้าวด้วยเครื่อง TissueLyser II จากนั้นนำซังตัวอย่างแป้งข้าวปริมาณ 1 g ใส่ขวดที่ปิดสนิท และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อให้กลิ่นระเหยจนถึงจุดสมดุลอย่างน้อย 12 hr จากนั้นนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบความหอมด้วยเครื่อง Headspace Comprehensive Two - Dimensional Gas Chromatography with Time-of-Flight Mass Spectrometer (HS-GC×GC-TOFMS, LECO) [13]

ปริมาณความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet basis, wb) คืออัตราส่วนของปริมาณความชื้นหรือน้ำในวัสดุต่อปริมาณวัสดุรวม โดยคิดวัสดุประกอบไปด้วยสองส่วนหลัก คือ ความชื้นและมวลแห้งจากสมการที่ (1) และ (2) ได้ดังนี้ [14]

$$M_w = \frac{\text{Mass of moisture}}{\text{Mass of material}} \quad (1)$$

$$M_w = \frac{W_w}{W} = \frac{W - W_d}{W} \quad (2)$$

เมื่อ

M_w คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก

W คือ มวลของวัสดุ (g)

W_w คือ มวลของความชื้นหรือปริมาณน้ำในวัสดุ (g)

W_d คือ มวลแห้งของวัสดุ (g)

ความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry basis, db) คืออัตราส่วนของปริมาณความชื้นในวัสดุต่อปริมาณแห้งในวัสดุแสดงจากสมการที่ (3) และ (4) ได้ดังนี้ [14]

$$M_d = \frac{\text{Mass of moisture}}{\text{Mass of dry solid}} \quad (3)$$

$$M_d = \frac{W_w}{W_d} = \frac{W - W_d}{W_d} \quad (4)$$

เมื่อ

M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง

ปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้งนิยมใช้วิเคราะห์ทางทฤษฎี นิยมเปรียบเทียบค่าความชื้นบนค่าคงที่ คือ W_d พิจารณาที่ระบบอุณหอากาศจะได้ว่าปริมาณความร้อนที่อากาศได้รับจากระบบอุณหอากาศมีค่าเท่ากับผลต่างของเอนทัลปีกระแสอากาศที่เข้าจากสมการที่ (5) ได้ดังนี้ [14]

$$Q_a = M_a (C_a + C_v H_1) (T_2 - T_1) t \quad (5)$$

เมื่อ

Q_a คือปริมาณความร้อนที่อากาศได้รับ (kJ)

M_a คืออัตราการไหลเชิงมวลอากาศแห้ง (kg dry air/h)

H_1 คืออัตราส่วนความชื้นอากาศ (kg water/kg dry air)

C_a คือความร้อนจำเพาะอากาศแห้ง (kJ/kg dry air°C)

C_v คือความร้อนจำเพาะของไอน้ำ (kJ/kg water°C)

T_1 คืออุณหภูมิอากาศก่อนเข้าเครื่องอุณหอากาศ (°C)

T_2 คืออุณหภูมิอากาศออกจากเครื่องอุณหอากาศ (°C)

t คือเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (hr)

การหาปริมาณความร้อนของเครื่องอุณหอากาศก็คือการใช้ Psychometrics เมื่อทำการพิจารณาที่ห้องอบแห้งเราจะสามารถหาปริมาณความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำ ออกจากวัสดุจากสมการที่ (6) ได้ดังนี้ [14]

$$Q_{\text{evap}} = W_d (M_i - M_f) h_{fg} \quad (6)$$

เมื่อ

Q_{evap} คือ ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำ (kJ)

T_d คือ มวลแห้งของวัสดุ (kg)

M_i คือ ความชื้นวัสดุก่อนอบแห้ง

M_f คือ ความชื้นวัสดุหลังอบแห้ง

h_{fg} คือ ค่าความร้อนแฝงของน้ำ (kJ/kg)

จะทำให้อุณหภูมิของวัสดุอบแห้งมีอุณหภูมิสูงขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้นไปสู่อุณหภูมิสุดท้ายที่ออกจากเครื่องอบแห้งโดยปริมาณความร้อนนี้จากสมการที่ (7) ได้ดังนี้ [14]

$$Q_s = W_d C_{pd} (M_{p2} - T_{p1}) + W_d C_{pw} (T_{p2} - T_{p1}) M_i \quad (7)$$

เมื่อ

Q_s คือ ปริมาณความร้อนการเพิ่มอุณหภูมิวัสดุ (kJ)

C_{pd} คือ ความร้อนจำเพาะของวัสดุแห้ง (kJ/kg °C)

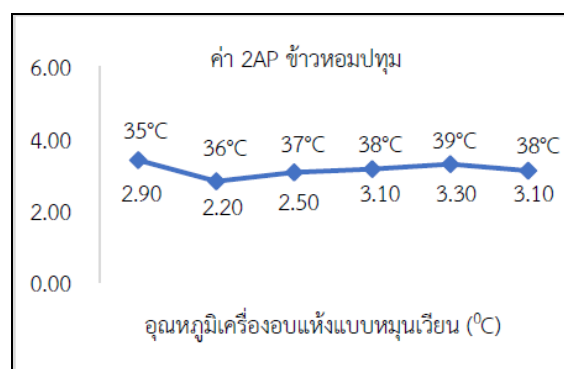
C_{pw} คือ ความร้อนจำเพาะของน้ำ (kJ/kg °C)

T_{p1} คือ อุณหภูมิวัสดุก่อนอบแห้ง (°C)

T_{p2} คือ อุณหภูมิวัสดุหลังอบแห้ง (°C)

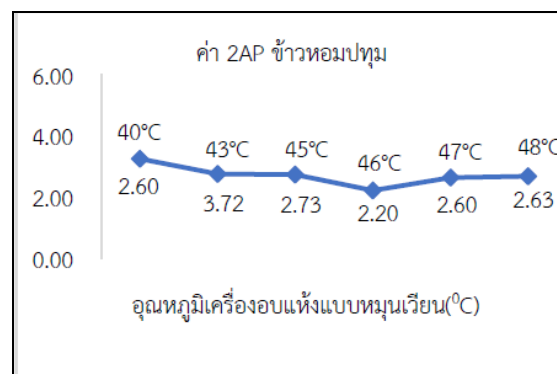
3. ผลการทดลอง

สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณสารหอม 2-Acetyl-1-Pyrroline (2AP) ด้วยวิธี Headspace Gas Chromatography อุณหภูมิทำงานของเครื่องอบแห้งแบบหมุนเวียนเริ่มต้น 35°C และอุณหภูมิสุดท้าย 38°C ข้าวเปลือกมีปริมาณความชื้น 18% เก็บตัวอย่างทุก 2 hr ในหนึ่งรอบการทำงาน 12 hr ปริมาณสารหอม 2-Acetyl-1-Pyrroline (2AP) ที่ตรวจวิเคราะห์ได้จึงเป็นค่าจากการลดความชื้นด้วยวิธีลมร้อน พบว่ามีปริมาณสารหอม 2-Acetyl-1-Pyrroline (2AP) อยู่ระหว่าง 2.90-3.10 µg/g ความแตกต่างของอุณหภูมิมีผลต่อโครงสร้างโมเลกุลของปริมาณสารหอม 2-Acetyl-1-Pyrroline (2AP) ในข้าวหอมปทุมที่จะอยู่ในสภาวะสมดุลที่ปลดปล่อยปริมาณสารหอมออกมาจากสภาวะที่ได้รับความร้อนภายนอก ตามรูปที่ 1



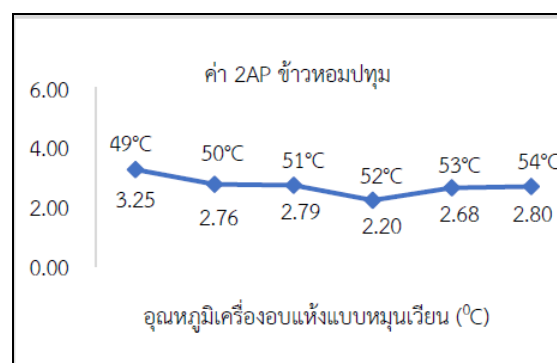
รูปที่ 1 ปริมาณ 2AP (Y) กับอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 35°C (X)

สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณสารหอม 2-Acetyl-1-Pyrroline (2AP) ด้วยวิธี Headspace Gas Chromatography อุณหภูมิทำงานของเครื่องอบแห้งแบบหมุนเวียนเริ่มต้น 40°C และอุณหภูมิสุดท้าย 48°C พบว่ามีปริมาณสารหอม 2-Acetyl-1-Pyrroline (2AP) อยู่ระหว่าง 2.60-2.63 µg/g ตามรูปที่ 2



รูปที่ 2 ปริมาณ 2AP (Y) กับอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 40°C (X)

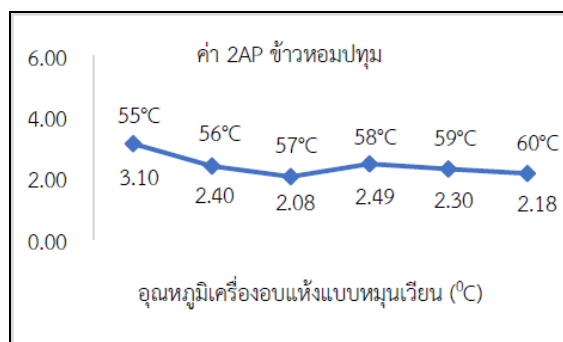
สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณสารหอม 2-Acetyl-1-Pyrroline (2AP) ด้วยวิธี Headspace Gas Chromatography อุณหภูมิทำงานของเครื่องอบแห้งแบบหมุนเวียนเริ่มต้น 49°C และอุณหภูมิสุดท้าย 54°C พบว่ามีปริมาณสารหอม 2-Acetyl-1-Pyrroline (2AP) อยู่ระหว่าง 3.25-2.80 µg/g ตามรูปที่ 3



รูปที่ 3 ปริมาณ 2AP (Y) กับอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 49°C (X)

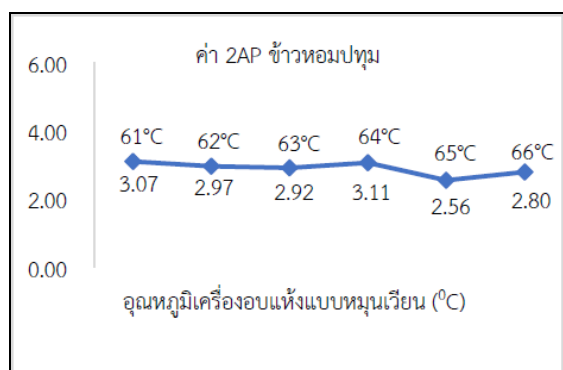
สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณสารหอม 2-Acetyl-1-Pyrroline (2AP) ด้วยวิธี Headspace Gas Chromatography อุณหภูมิทำงานของเครื่องอบแห้ง

แบบหมุนเวียนเริ่มต้น 55°C และอุณหภูมิสุดท้าย 60°C พบว่ามีปริมาณสารหอม 2-Acetyl-1-Pyrroline (2AP) อยู่ระหว่าง 3.10-2.18 $\mu\text{g/g}$ ตามรูปที่ 4



รูปที่ 4 ปริมาณ 2AP (Y) กับอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 55°C (X)

สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณสารหอม 2-Acetyl-1-Pyrroline (2AP) ด้วยวิธี Headspace Gas Chromatography อุณหภูมิทำงานของเครื่องอบแห้งแบบหมุนเวียนเริ่มต้น 61°C และอุณหภูมิสุดท้าย 66°C พบว่ามีปริมาณสารหอม 2-Acetyl-1-Pyrroline (2AP) อยู่ระหว่าง 3.07-2.80 $\mu\text{g/g}$ ตามรูปที่ 5



รูปที่ 5 ปริมาณ 2AP (Y) กับอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 61°C (X)

4. สรุป

สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณสารหอม 2-Acetyl-1-Pyrroline (2AP) ด้วยวิธี Headspace Gas Chromatography พบว่าตัวอย่างข้าวเปลือกที่สุ่มเก็บมาทั้งหมด 6 ตัวอย่างจากการสุ่มตัวอย่างข้าวเปลือกที่มีความชื้น 18% ที่นำมาวิเคราะห์ในกรรมวิธีการสูญเสีย

ความหอมของข้าวหอมปทุม ในกระบวนการลดความชื้น ข้าวเปลือกแบบหมุนเวียนขนาดเล็ก พบว่าปริมาณสารหอม 2-Acetyl-1-Pyrroline (2AP) ที่ตรวจวิเคราะห์ได้ จึงเป็นค่าจากการลดความชื้นด้วยวิธี Control ปริมาณสารหอมหลังผ่านกระบวนการอบแห้งมีปริมาณค่าสารหอม 2-Acetyl-1-Pyrroline (2AP) น้อยสุดอยู่ระหว่าง 2.08 $\mu\text{g/g}$ ที่อุณหภูมิ 57°C และมีปริมาณมากที่สุด 3.72 $\mu\text{g/g}$ ที่อุณหภูมิ 43°C จะเห็นว่าบางสภาวะการใช้ อุณหภูมิสูงจะทำให้ปริมาณสาร 2-Acetyl-1-Pyrroline (2AP) มีการระเหยไปกับสภาพแวดล้อมทำให้ตรวจสอบได้ ปริมาณน้อยจำเป็นจะต้องใช้อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้งที่จะทำให้โครงสร้างโมเลกุลของสารหอม 2-Acetyl-1-Pyrroline (2AP) อยู่ในสภาวะสมดุลที่จะปลดปล่อยปริมาณ 2-Acetyl-1-Pyrroline (2AP) ตามปัจจัยทั้งสามองค์ประกอบ เวลา อุณหภูมิและความชื้นที่เหมาะสมของพันธุ์ข้าวแต่ละชนิด

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) และกรมการข้าว กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ที่สนับสนุนทุนวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] R. G. Buttery, L. C. Ling, B. O. Juliano and J. G. Turnbaugh, "Cooked Rice Aroma and 2-Acetyl-1-pyrroline", *J. Agric. Food Chem.*, vol.31, no.4, pp. 823-826, 1983.
- [2] T. Yoshihashi, T. H. Nguyen and N. Kabaru, "Area dependency of 2-acetyl-1-pyrroline content in an aromatic rice variety Khao Dawk Mali 105", *Agricultural Sciences (IIRCAS)*, vol. 38, no.2, pp. 105-109, 2004.
- [3] P. Suksaranjit, "Application of gas chromatography-mass spectrometry in the study of volatile and aroma compounds in leaves and

- grains of Khao Dawk Mali 105 rice”, Master of Science, Chaingmai University, Thailand, 2002.
- [4] S. Mahatheeranont, S. Keawsaard and K. Dumri, “Quantification of the rice aroma compound 2-acetyl-1-pyrroline in uncooked Khao Dawk Mali 105 brown rice”, *J. Agric. Food Chem.*, vol. 49, pp. 773-779, 2001
- [5] S. Kolwong, “Study of reducing the high initial moisture content of wet paddy using a small-scale low-cost pneumatic conveying dryer as a first stage dryer”, M.Eng. dissertation, Dept. Mech. Eng., Kmutt Unvi., Thonburi, Thailand, 2014.
- [6] C. Nimmol and S. Devahastin, “Development and study of paddy dehydration process using an impinging stream dryer with recirculating hot-air system”, The Thailand Research Fund, TRF. Tech. Rep.RDG5450042, Aug. 2014.
- [7] T. Itani, M. Tamaki, Y. Hayata, T. Fushimi and K. Hashizume, “Variation of 2-Acetyl-1-Pyrroline Concentration in Aromatic Rice Grains Collected in the Same Region in Japan and Factors effecting Its Concentration”, *J-STAGE home/Plant production Science*, vol.7, pp. 178-183, 2004.
- [8] E. T. Champagne, K. L. Bett-Garber, B. T. Vinyard, B. D. Webb, A. M. McClung, F. E. Barton, B. G. Lyon, K. Moldenhauer, S. Linscombe and D. Koheway, “Effect of drying conditions final moisture content and degree of milling on rice flavor”, *Cereal Chem.*, vol.74, pp. 566-570, 1997.
- [9] S. Wongpornchai, K. Dumri, S. Jongkaew-wattana and B. Siri, “Effects of drying methods and storage time on the aroma and milling quality of rice (*Oryza sativa* L.) cv.Khao Dawk Mali 105”, *Food Chemistry*, vol. 87, pp. 407-414, 2004.
- [10] P. goufo, M. duan, S. wongpornchai, X. Tang, “Some factors affecting the concentration of the aroma compound 2-acetyl-1-pyrroline in two fragrant rice cultivars grown in South China”, *Front. Agric.*, vol. 4, no.1, pp. 1-9, 2010.
- [11] P. Goufo, M. Duan, S. Wongpornchai, X. Tang, “Comparative Study of Effects of Drying Methods and Storage Conditions on Aroma and Quality Attributes of Thai Jasmine Rice”, *Front. Agric.*, vol. 4, no.1, pp. 1-9, 2010.
- [12] A. Artnaseaw, P. Kwakong and M. Ulla Thabuoat, “Effect temperature for breakage and savour of jasmine rice by LSU dryer”, in *International Conference on Applied Sciences, Engineering, Technology & Management*, Khonkaen University, Khonkaen, Thailand, 2013.
- [13] M. Calingacion, L. Fang, L. Quiatchon-Baeza, R. Mumm, A. Riedel, R. D. Hall and M. Fitzgerald, “Delving deeper into technological innovations to understand differences in rice quality”, *Rice*, pp. 8-6, 2015.
- [14] S. Soponronnarit, “Drying of grains” in *Energy Management Technology*, King Mongkuts University of Technology, Graduate School, 1997, pp. 144-163.

การยอมรับต่อการนำน้ำเสียหลังผ่านการบำบัดกลับมาใช้ใหม่ กรณีศึกษา

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์

Social Acceptance for Reclaimed Wastewater Use: A Case Study in Srinakharinwirot University Ongkharuk Campus

ภัทรา เดชสุทธิกร¹ สุธิดา ทิพย์รักษ์พันธุ์^{1*} สุดา อธิติสุนทรรัตน์²

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

² ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อม กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม คลองหลวง ปทุมธานี

Patcha Datesuttikorn¹ Suthida Theepharakasapan^{1*} Suda Ittisupomrat²

¹Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot
University, Nakorn Nayok 26120, Thailand

²Environmental Research and Training Centre, Department of Environmental Quality Promotion
Technopolis, Khlong Luang, Pathumthani, Thailand.

*Corresponding author Email: Suthidat@sg.swu.ac.th

(Received: January 7, 2021; Accepted: July 12, 2021)

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการยอมรับของประชาชนในพื้นที่มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์ ต่อการนำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วกลับมาใช้ใหม่ในภาคประชาชนและการเกษตร การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงสำรวจ โดยใช้แบบสอบถามเป็นเครื่องมือในการเก็บรวบรวมข้อมูลจากนิสิต บุคลากร และบุคคลที่ประกอบอาชีพอื่น ๆ ภายในมหาวิทยาลัย จำนวนทั้งสิ้น 420 ตัวอย่าง แบบสอบถามที่สมบูรณ์ที่นำมาใช้ในการวิจัยมีทั้งสิ้น 420 ฉบับ คิดเป็น 100% ของจำนวนแบบสอบถามทั้งหมด ผลการวิจัยในภาพรวมแสดงให้เห็นว่า ผู้บริโภคให้ความสำคัญกับการผ่านการรับรองมาตรฐาน การปราศจากการปนเปื้อนเชื้อจุลินทรีย์ เชื้อก่อโรค และสารเคมีตกค้าง ตามลำดับ นอกจากนี้กิจกรรมการใช้น้ำส่งผลต่อการยอมรับของประชาชน โดยมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องได้แก่ เพศ อาชีพ และพื้นฐานการรับรู้ รับทราบ ของประชาชน ผู้วิจัยหวังว่าจะสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการกำหนดกลยุทธ์ทางการตลาด และการพัฒนาเทคโนโลยีให้สอดคล้องกับความต้องการของผู้บริโภคเพื่อให้เกิดการจัดการที่ดียิ่งขึ้นไป

คำสำคัญ: มหาวิทยาลัยสีเขียว น้ำทิ้งอาคาร การบำบัดน้ำเสีย การนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ การยอมรับของประชาชน

ABSTRACT

This article aims to study people's acceptance in the Srinakharinwirot University Ongkharuk campus towards the recycling of treated wastewater in the public and agricultural sectors. This research is survey research. The questionnaire was used as a tool to collect information from students, staff, and the general public. Within Ongkharuk campus, there were 420 samples of the complete questionnaires used in this research. There were 420 questions, accounting for 100% of the total

number of questionnaires. The overall research results were found that consumers pay more attention to quality standards. The absence of contamination of microorganisms, pathogens, and chemical residues are respectively influent to the people perception. Also, water use activities affect the tolerance of the people. The related factors are gender, occupation, and the baseline of public perception. We hope that this knowledge can provide a guideline in formulating marketing strategies. And the development of technology following the needs of consumers in order to have better management.

Keyword: Green University, Sewage, Wastewater Treatment, Wastewater Recycling, Social Acceptance.

1. บทนำ

ปัจจุบันวิกฤตภัยแล้งและปัญหาขาดแคลนน้ำเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นในหลายประเทศทั่วโลกโดยเฉพาะในประเทศที่กำลังพัฒนา เนื่องมาจากการขยายตัวทางเศรษฐกิจและการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากร ความต้องการน้ำของภาคอุตสาหกรรมมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นทำให้การอุปโภคบริโภคมีอย่างจำกัด บางครั้งถึงขั้นไม่มีน้ำต้นทุนเพื่อผลิตทำน้ำประปา นอกจากนั้นปัญหามลพิษทางน้ำทวีความรุนแรงขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยเฉพาะในเขตชุมชนและเขตอุตสาหกรรม ทำให้การแสวงหาแหล่งน้ำสะอาดเพื่อการใช้ประโยชน์ในชุมชนและเพื่อการเกษตรทำได้ยากขึ้น

การนำน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่ (Wastewater Recycling / Reclaiming) เป็นกระบวนการนำน้ำทิ้ง (Sewage) ที่ผ่านการบำบัดจากครัวเรือน อุตสาหกรรมหรือกิจกรรมใด ๆ มาผ่านกระบวนการบำบัดน้ำเสียขั้นสูง ซึ่งอาจมีการผสมผสานระหว่างกระบวนการทางกายภาพ กระบวนการทางเคมี และ/หรือกระบวนการทางชีวภาพร่วมกัน เพื่อช่วยการบำบัดจนกระทั่งได้น้ำสะอาดที่สามารถนำมาใช้ในกิจกรรมต่าง ๆ ได้อย่างเหมาะสมและปลอดภัยต่อผู้ใช้น้ำ โดยหลักคิดดังกล่าวอาศัยหลักการที่ว่า เมื่อชุมชนมีความต้องการเกินกว่าความสามารถในการให้น้ำของแหล่งน้ำธรรมชาติ น้ำเสียที่ได้รับการบำบัดและปรับปรุงคุณภาพแล้วอย่างเหมาะสมและสามารถเป็นแหล่งน้ำทดแทนที่ใกล้ชิดและประหยัด

ที่สุด ปัจจุบันหลายประเทศได้หันมาสนใจในการนำน้ำที่ผ่านการบำบัดกลับมาใช้ประโยชน์ทั้งทางตรงและทางอ้อม ได้แก่ สหรัฐอเมริกา [1], [2] ยุโรป [3] ออสเตรเลีย [4] สิงคโปร์ [5] ญี่ปุ่น [6]–[8] จีน [9] เป็นต้น โดยการนำน้ำมาใช้ประโยชน์ประกอบด้วยกิจกรรมทั้งในภาคการเกษตรและภาคประชาชน เช่น การปรับปรุงภูมิทัศน์ การใช้ในการกักขังโครก ระบบดับเพลิง ใช้ทำความสะอาดพื้น หรือใช้ล้างรถ เป็นต้น

ประเทศไทยได้ดำเนินโครงการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการนำน้ำเสียขั้นสูงเพื่อการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งได้รับความร่วมมือของผู้เชี่ยวชาญในหลายภาคส่วนทั้งภายในและต่างประเทศ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเทคโนโลยีที่เหมาะสมในการนำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วกลับมาใช้ใหม่ในพื้นที่เขตร้อน อย่างไรก็ตามแม้ว่าเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียจะมีประสิทธิภาพเพียงใด แต่ผลตอบรับในปัจจุบัน พบว่า การนำน้ำเสียที่บำบัดแล้วกลับมาใช้ในภาคการเกษตรยังได้รับการยอมรับเพียงบางส่วนเท่านั้นและไม่ได้รับการยอมรับอย่างสิ้นเชิงในการนำกลับมาใช้ใหม่ในภาคประชาชน ดังนั้นเพื่อให้ได้แนวทางในการพัฒนาเทคโนโลยีให้สอดคล้องกับความต้องการของผู้บริโภค และกำหนดนโยบายด้านการบริหารจัดการน้ำในภาคส่วนต่าง ๆ จึงจำเป็นที่จะต้องศึกษาพฤติกรรมการใช้น้ำ การยอมรับ รวมทั้งทัศนคติของผู้บริโภคต่อน้ำเสียที่บำบัดแล้วและต้องการนำกลับมาใช้ใหม่ เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการประกอบการวางแผนใน

การกำหนดทิศทางการพัฒนาองค์ความรู้ด้านการบำบัดน้ำเสียเพื่อการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ในอนาคตต่อไป

การศึกษาการยอมรับและทัศนคติของประชาชนต่อการนำน้ำเสียที่บำบัดแล้วกลับมาใช้ใหม่มีการดำเนินการในหลายประเทศ ได้แก่ สหรัฐอเมริกา [1] ออสเตรเลีย [10] แอฟริกา [11] และประเทศอิสราเอล [12] ผลการสำรวจในประเทศอิสราเอล จากกิจกรรมการนำน้ำเสียที่บำบัดแล้วกลับมาใช้ใหม่ จำนวน 21 กิจกรรม พบว่าระดับการสัมผัสระหว่างประชาชนและน้ำส่งผลต่อการยอมรับการใช้น้ำเสียหลังการบำบัด โดยประชาชนร้อยละ 95 ให้การยอมรับในกิจกรรมที่ระดับการสัมผัสร่างกายในระดับกลาง ถึงระดับต่ำ ได้แก่ การชลประทาน การตกแต่งอาคารสถานที่ และมีเพียงร้อยละ 15 ที่ยอมรับกิจกรรมการใช้น้ำที่มีการสัมผัสร่างกายระดับสูง เช่น การประกอบอาหาร การดื่ม เป็นต้น

สำหรับประเทศไทย กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อมสำรวจการยอมรับของประชาชนต่อน้ำเสีย 2 ประเภท คือ ประเภทที่หนึ่งเป็นน้ำเสียจากกิจกรรมต่าง ๆ ในครัวเรือน ได้แก่ การชำระล้างร่างกาย ซักผ้า ทำอาหาร โดยไม่รวมน้ำเสียจากส้วม ประเภทที่สองเป็นน้ำเสียทั้งหมด ที่รวมถึงน้ำเสียจากส้วมด้วย (Blackwater) พบว่าประชาชนส่วนใหญ่ให้การยอมรับการนำน้ำเสียประเภท Greywater ที่ผ่านการบำบัดแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ ถึงร้อยละ 83 ในขณะที่การยอมรับน้ำเสียประเภท Blackwater (หมายความว่ารวมถึงน้ำเสียจากส้วม) ที่ผ่านการบำบัดแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ เพียงแค่ร้อยละ 56 เท่านั้น โดยกิจกรรมของการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่นั้นแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับระดับการสัมผัสของน้ำต่อร่างกายมนุษย์ [13]

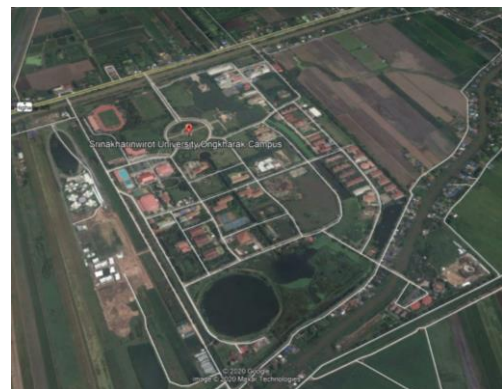
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องค์กรฯ ดำเนินการนโยบายมหาวิทยาลัยสีเขียว (Green university) ได้มีแนวคิดริเริ่มการบำบัดน้ำเสียจากอาคารหอพักนิสิตหอพักบุคลากรภายในมหาวิทยาลัย และนำกลับมาใช้ใหม่ในภาคส่วนต่าง ๆ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการยอมรับของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียภายในมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องค์กรฯ ต่อการนำน้ำเสียที่ผ่านบำบัดแล้ว

กลับมาใช้ใหม่ การศึกษาวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงปริมาณ (Quantitative Research Method) ซึ่งมีแบบสอบถามเป็นเครื่องมือในการรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีทางสถิติ ข้อมูลที่ได้สามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานประกอบการวางแผนต่อยอดการวิจัยพัฒนาและลงทุนด้านเทคโนโลยีการนำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบบำบัดน้ำเสียขั้นสูงสำหรับนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ต่อไป

2. วิธีการดำเนินงาน

2.1 พื้นที่ศึกษา

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องค์กรฯ มีเนื้อที่ของส่วนมหาวิทยาลัยประมาณ 947 ไร่ และโรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องค์กรฯ ประมาณ 206 ไร่ รวมทั้งสิ้น 1153 ไร่ ดังแสดงในรูปที่ 1 ภายในพื้นที่ของมหาวิทยาลัยประกอบด้วยกลุ่มอาคารกว่า 30 อาคาร ได้แก่ อาคารเรียน อาคารสำนักงาน อาคารปฏิบัติการ ศูนย์กีฬา โรงอาหาร ศูนย์การแพทย์ คลินิกพิเศษ หอพักบุคลากร และหอพักนิสิต เป็นต้น



รูปที่ 1 มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องค์กรฯ

2.2 ประชากร กลุ่มตัวอย่าง และการสุ่มตัวอย่าง

จากการรวบรวมโดยศูนย์พัฒนาสภาพกายภาพ ระบุว่า ในปีการศึกษา 2561 มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องค์กรฯ มีจำนวนนิสิตทั้งสิ้น 6,787 คน เป็นนิสิตที่พักอาศัยภายในหอพักมหาวิทยาลัยฯ จำนวน 5,434 คน (ร้อยละ 80.1) และนิสิตบางส่วนพักอาศัยในหอเอกชนภายนอกมหาวิทยาลัย (ร้อยละ 19.9) ภายในศูนย์องค์กรฯ

มีบุคลากรประจำในส่วนงานต่าง ๆ จำนวนทั้งสิ้น 889 คน นอกจากนี้ จากการสำรวจประชาชนที่มาใช้บริการศูนย์การแพทย์ฯ พบว่ามีผู้มาใช้บริการเฉลี่ย 4,000 คนต่อวัน การศึกษาการยอมรับในครั้งนี้ กลุ่มตัวอย่าง หมายถึงกลุ่มผู้อาจมีส่วนได้ส่วนเสียสำหรับการใช้น้ำหลังการบำบัด ได้แก่ นิสิต บุคลากรของมหาวิทยาลัย และอาชีพอื่น ๆ ภายในมหาวิทยาลัย โดยกำหนดขนาดของตัวอย่างจากสมการของ Taro Yamane (ปี 1967) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังแสดงในสมการที่ (1) สามารถคำนวณกลุ่มตัวอย่างจากจำนวนประชากร 7,676 คน จะได้ตัวแทนประชากร ต้องมีจำนวนไม่น้อยกว่า 381 คน

$$n = \frac{N}{1 + N(e)^2} \quad (1)$$

เมื่อ e ความคลาดเคลื่อนของการเลือกตัวอย่าง
 n ขนาดของประชากร
 N ขนาดของตัวอย่าง

การสุ่มตัวอย่างใช้วิธีการสุ่มตัวอย่างแบบง่าย (Sample Random Sampling) ร่วมกับวิธีการสุ่มตัวอย่างแบบโควตา (Quota Sampling) เพื่อให้จำนวนตัวอย่างครอบคลุมกลุ่มผู้มีส่วนได้ส่วนเสียทุกภาคส่วนของมหาวิทยาลัย เกณฑ์การแบ่งกลุ่มมีการแบ่งกลุ่มตาม เพศ อายุ อาชีพ (นิสิต บุคลากร และบุคคลทั่วไป) นอกจากนี้ ได้แบ่งกลุ่มย่อยของแต่ละอาชีพ เพื่อการวิเคราะห์ข้อมูลได้อย่างชัดเจนมากยิ่งขึ้น ดังนี้ นิสิต แบ่งตามกลุ่มสายการศึกษา (วิทยาศาสตร์ – เทคโนโลยี การแพทย์ – สาธารณสุข และสายศึกษาทั่วไป) บุคลากร แบ่งตามกลุ่มสายปฏิบัติงาน (สายวิชาการ และสายสนับสนุน)

2.3 การออกแบบแบบสอบถาม

เครื่องมือที่ใช้เก็บข้อมูลสำหรับงานวิจัยครั้งนี้ เป็นแบบสอบถามปลายปิด (Close-ended Questionnaire) และเพื่อให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย จึงแบ่งการศึกษาออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1. ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม และส่วนที่ 2. การวิเคราะห์

ข้อมูลการรับรู้ของกลุ่มตัวอย่าง ส่วนที่ 3. การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกและการตัดสินใจใช้น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วสำหรับประกอบกิจกรรมต่าง ๆ ในชีวิตประจำวัน และส่วนที่ 4. การวิเคราะห์การยอมรับการนำน้ำเสียกลับมาใช้ประกอบกิจกรรมต่าง ๆ ในชีวิตประจำวัน แบบสอบถามได้รับการประเมินความสอดคล้องกับกรอบแนวคิดจากผู้เชี่ยวชาญด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม วิเคราะห์หาค่าดัชนีความสอดคล้อง (Item Objective Congruency : IOC) โดยใช้สมการที่ (2) และเพื่อให้แน่ใจว่าผู้ตอบแบบสอบถามจะมีความเข้าใจตรงกัน และตอบคำถามได้เป็นจริงทุกข้อ รวมทั้งข้อคำถามมีความเที่ยงทางสถิติ โดยได้ทดลองนำไปเก็บข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างในมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องค์กรฯ จำนวน 20 คน นำมาวิเคราะห์ความเที่ยงของแบบสอบถามโดยใช้สถิติและพิจารณาจากค่าที่ได้

$$IOC = \frac{\sum R}{N} \quad (2)$$

เมื่อ IOC : ดัชนีความสอดคล้อง
 $\sum R$: ผลรวมคะแนนของผู้เชี่ยวชาญ
 N : จำนวนผู้เชี่ยวชาญ

สัมประสิทธิ์แอลฟาของครอนบาค (Cronbach's Alpha Coefficient) ของคำถามในแต่ละด้าน พบว่าแบบสอบถามมีค่าความเที่ยงของตัวแปร เท่ากับ 0.8519 – 0.9822 อยู่ในเกณฑ์ ดี ถึง ดีมาก สามารถนำผลลัพธ์จากแบบสอบถามไปวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไปได้

2.4 วิธีการเก็บรวบรวมข้อมูล

ผู้วิจัยได้เก็บข้อมูลจากแหล่งข้อมูลปฐมภูมิ (Primary Data) โดยแจกแบบสอบถามตามกลุ่มตัวอย่างจำนวน 450 ตัวอย่าง จากนั้นตรวจสอบความถูกต้องสมบูรณ์ของแบบสอบถาม เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลตามขั้นตอนต่อไป จากการแจกแบบสอบถามให้กับกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 420 ตัวอย่าง มีผู้ตอบกลับร้อยละ 93.3 ของจำนวนแบบสอบถามทั้งหมด รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ร้อยละของผู้ตอบแบบสอบถาม (n = 420)

ตัวแปรและเกณฑ์การแบ่งกลุ่ม		ร้อยละ
เพศ	ชาย	38.0
	หญิง	62.0
อายุ	ต่ำกว่า 18 ปี	13.3
	18 – 24 ปี	62.9
	25 – 34 ปี	6.7
	35 – 44 ปี	9.5
	45 – 54 ปี	3.8
	55 ปีขึ้นไป	3.8
อาชีพ	นิสิต	59.0
	บุคลากรของ มศว	21.0
	อาชีพอื่น ๆ	20.0
คณะ / วิทยาลัย (นิสิต)	วิทยาศาสตร์ - เทคโนโลยี	32.3
	การแพทย์ - สาธารณสุข	37.1
	ศึกษาทั่วไป	30.6
สายการ	บุคลากรสายวิชาการ	45.0
ปฏิบัติงาน (บุคลากร)	บุคลากรสายสนับสนุน	55.0
อาชีพอื่น ๆ	ข้าราชการ ลูกจ้างของ รัฐ/พนักงานรัฐวิสาหกิจ	9.5
	พนักงาน/ลูกจ้างเอกชน รายเดือน	4.8
	พนักงาน/ลูกจ้างเอกชน รายวัน	0.0
	ค้าขาย/ประกอบธุรกิจ ส่วนตัว	4.8
	เกษตรกร	0.0
	รับจ้างทั่วไป	0.0
	แม่บ้าน/พ่อบ้าน	0.0
	นักเรียน/นักศึกษา	80.9
	กรรมกร	0.0
	ขับรถรับจ้าง (มอเตอร์ไซด์ รับจ้าง รถตู้ แท็กซี่)	0.0
	อื่น ๆ	0.0

2.5 การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีทางสถิติ

ข้อมูลที่ได้จากแบบสอบถามจะถูกวิเคราะห์และนำเสนอในรูปแบบสถิติเชิงพรรณนา การวิเคราะห์ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถามอยู่ในรูปของค่าแจกแจงความถี่ (Frequency) ค่าร้อยละ (Percentage) การวิเคราะห์ความคิดเห็นเกี่ยวกับการเลือกใช้น้ำ จะอยู่ในรูปของค่าเฉลี่ย (Mean) และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard of Deviation) นำไปสรุปผลในรูปแบบของตารางและแผนภาพแสดงผลข้อมูลประกอบคำบรรยายสำหรับประเด็นด้านการยอมรับ เป็นการประเมินโดยการให้คะแนนในระดับ 5 4 3 2 1 โดยเรียงจาก ยอมรับมาก ยอมรับ เฉย ๆ ไม่ยอมรับ และไม่ยอมรับเด็ดขาดตามลำดับ สถิติที่ใช้เปรียบเทียบการยอมรับการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ในกิจกรรมต่าง ๆ จำแนกตามเพศ คือ การทดสอบที (t-test) สำหรับ independent จำแนกตามอายุ อาชีพ คณะ และสายการปฏิบัติงาน คือ การทดสอบความแปรปรวนทางเดียว (one-way ANOVA) ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

3. ผลการทดสอบ

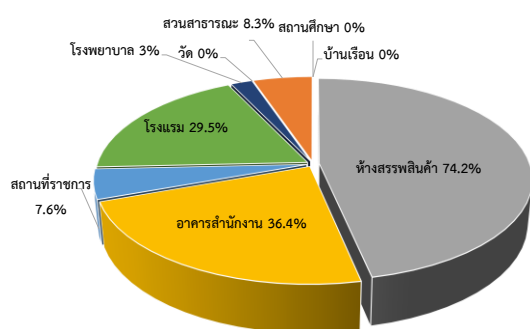
3.1 การรับรู้สถานการณ์น้ำเสีย การบำบัดน้ำเสีย และการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่

จากการสำรวจและวิเคราะห์ข้อมูล พบว่า กลุ่มตัวอย่างในมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องค์กรฯ รับทราบสถานการณ์น้ำเสียและการบำบัดน้ำเสียในพื้นที่ศึกษา มีค่าการรับรู้เฉลี่ยเท่ากับ 2.10 ± 0.62 ซึ่งอยู่ในระดับปานกลาง และรับทราบเกี่ยวกับกระบวนการบำบัดน้ำเสีย มีค่าการรับรู้เฉลี่ยเท่ากับ 1.71 ± 0.74 ซึ่งอยู่ในระดับปานกลางเช่นกัน สัดส่วนร้อยละของประชากรต่อการรับรู้สถานการณ์น้ำเสีย การบำบัดน้ำเสียและนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ ได้แสดงในตารางที่ 2 เมื่อพิจารณาประสบการณ์การพบเห็นการบำบัดน้ำเสียเพื่อนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ พบว่ากลุ่มตัวอย่างร้อยละ 62.8 เคยพบเห็นการบำบัดน้ำเสียเพื่อนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ โดยพบมากที่สุดในห้างสรรพสินค้า 196 คน หรือคิดเป็นร้อยละ 74.2 ของผู้ที่เคยมีประสบการณ์การเคยพบเห็นระบบ

บำบัดน้ำเสียเพื่อนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ทั้งหมด รองลงมา เป็นอาคารสำนักงานและโรงแรม จำนวน 96 คน และ 78 คน คิดเป็นร้อยละ 36 และ 29 ตามลำดับ ดังแสดงในรูป ที่ 2 ซึ่งการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่เริ่มมีการนำมาใช้ในธุรกิจ ประเภทห้างสรรพสินค้าโดยบำบัดน้ำเสียเพื่อนำกลับมาใช้ ในการกดชักโครก นอกจากนี้ธุรกิจการท่องเที่ยว เช่น โรงแรม รีสอร์ท ที่มีการบำบัดน้ำเสียและนำกลับมาใช้รด น้ำต้นไม้ และตกแต่งสวน เป็นต้น

ตารางที่ 2 สัดส่วนการรับรู้สถานการณ์น้ำเสีย การบำบัด น้ำเสีย และนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ของกลุ่มตัวอย่าง

การรับรู้	เกณฑ์การ แบ่งกลุ่ม	ร้อยละ
ผู้ตอบแบบสอบถามทราบ	ทราบเป็นอย่างดี	24.8
สถานการณ์น้ำเสียและการ บำบัดน้ำเสียในพื้นที่ศึกษา	ทราบบ้างเล็กน้อย	60.0
	ไม่เคยทราบ	15.2
ผู้ตอบแบบสอบถามมีความรู้	มาก	9.5
เกี่ยวกับกระบวนการต่าง ๆ	ปานกลาง	50.5
ในการบำบัดน้ำเสีย	น้อย	40.0
ผู้ตอบแบบสอบถามทราบ	ทราบเป็นอย่างดี	18.1
เกี่ยวกับการบำบัดน้ำเสียเพื่อ	ทราบบ้างเล็กน้อย	71.4
การนำน้ำกลับมาใช้ใหม่มาก	ไม่เคยทราบ	10.5
น้อยเพียงใด		
ผู้ตอบแบบสอบถามมี	เคย	62.8
ประสบการณ์การพบเห็นการ	ไม่เคย	37.1
บำบัดน้ำเสียเพื่อนำน้ำกลับมา		
ใช้ใหม่หรือไม่		



รูปที่ 2 สัดส่วนร้อยละของสถานที่ที่กลุ่มตัวอย่างเคยพบการบำบัดน้ำเสียเพื่อนำน้ำกลับมาใช้ใหม่

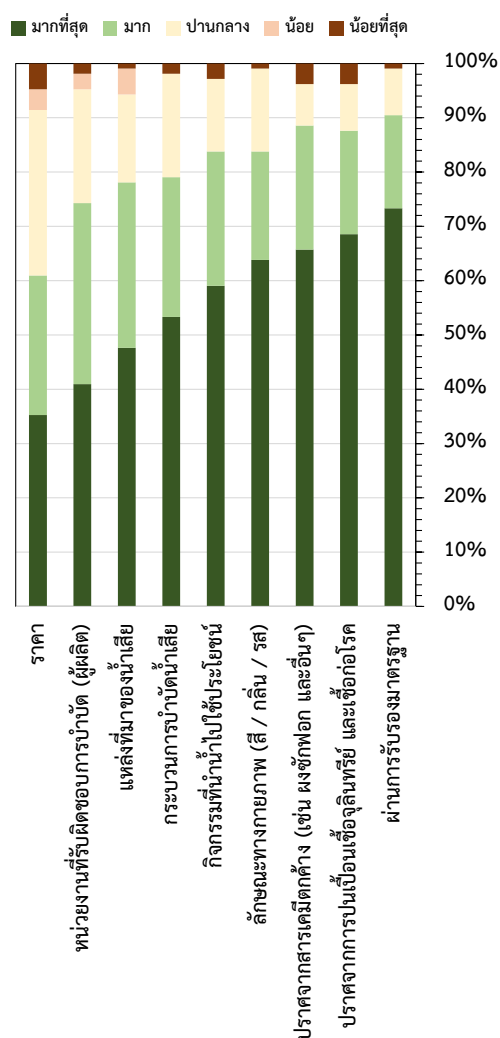
3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกและการตัดสินใจใช้น้ำเสียที่ผ่านการบำบัด

จากการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อการตัดสินใจใช้น้ำที่ผ่านการบำบัดพบว่า ผู้ตอบแบบสอบถาม เห็นด้วยกับการผ่านการรับรองมาตรฐานเป็นปัจจัยที่มีผล ต่อการตัดสินใจสูงสุด มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.62 รองลงมาคือ การปราศจากการปนเปื้อนเชื้อจุลินทรีย์และเชื้อก่อโรค การปราศจากสารเคมีตกค้าง ลักษณะทางกายภาพ (สี / กลิ่น / รส) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.49 4.47 และ 4.35 ตามลำดับ ปัจจัยดังกล่าวแสดงถึงคุณภาพของน้ำหลังการ บำบัด สำหรับการรับรองมาตรฐานเป็นการเพิ่มความ เชื่อมั่นให้แก่ผู้ใช้ว่าจะได้ใช้น้ำที่สะอาดและปลอดภัย ทั้งนี้กิจกรรมการใช้น้ำถือเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญ รองลงมาจากคุณภาพน้ำหลังการบำบัด มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.27 ในขณะที่ราคาเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญน้อยที่สุดเมื่อ เปรียบเทียบกับปัจจัยด้านอื่น ๆ โดยมีค่าเฉลี่ย 3.83 ดังแสดง ในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของ ปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกใช้น้ำที่ผ่านการบำบัด

ตัวแปร	ค่าเฉลี่ย และ ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ระดับ ความ คิดเห็น
แหล่งที่มาของน้ำเสีย	4.19 ± 0.94	มาก
หน่วยงานที่รับผิดชอบการ บำบัด (ผู้ผลิต)	4.09 ± 0.95	มาก
กระบวนการบำบัดน้ำเสีย	4.46 ± 0.82	มากที่สุด
ลักษณะทางกายภาพ (สี / กลิ่น / รส)	4.35 ± 0.92	มากที่สุด
ปราศจากสารเคมีตกค้าง (เช่น สารซักล้าง สารย้อมย้อมผ้าที่เรื้อ และอื่น ๆ)	4.47 ± 0.93	มากที่สุด
ปราศจากการปนเปื้อน เชื้อจุลินทรีย์และเชื้อก่อโรค	4.49 ± 0.94	มากที่สุด
ผ่านการรับรองมาตรฐาน	4.62 ± 0.72	มากที่สุด
กิจกรรมที่นำไปใช้ประโยชน์	4.27 ± 0.90	มากที่สุด
ราคา	3.83 ± 1.10	มาก

สำหรับสัดส่วนของผู้ตอบแบบสอบถามต่อการปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกใช้น้ำในแต่ละด้านได้แสดงในรูปที่ 3 ซึ่งการผ่านการรับรองมาตรฐานมีจำนวนผู้ตอบแบบสอบถามเห็นด้วยมากที่สุด (ร้อยละ 73) ในขณะที่ราคาของน้ำหลังการบำบัดเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญน้อยที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับรายงานวิจัยหลายชิ้น ที่ระบุว่าระดับการสัมผัสต่อร่างกายเป็นปัจจัยลำดับต้นๆ ต่อการยอมรับ กล่าวคือ มีแนวโน้มของการยอมรับที่ลดลงเมื่อมีระดับการสัมผัสต่อร่างกายเพิ่มขึ้น ตามมาด้วยคุณภาพของน้ำที่อาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพของผู้บริโภค [14]



รูปที่ 3 ร้อยละของปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจใช้น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วสำหรับประกอบกิจกรรมในชีวิตประจำวัน

3.3 การยอมรับการนำน้ำเสียกลับมาใช้ประกอบกิจกรรมในชีวิตประจำวัน

เนื่องจากกิจกรรมการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการตัดสินใจใช้น้ำของประชาชน ดังนั้นหัวข้อนี้จึงนำเสนอให้เห็นถึงการยอมรับในกิจกรรมต่าง ๆ แบ่งเป็นกิจกรรมในภาคประชาชน (ใช้สำหรับดื่ม ใช้ประกอบอาหาร ใช้ชำระล้างร่างกาย ใช้ซักผ้า ใช้ทำความสะอาดพื้น ใช้ล้างรถ ใช้กดชักโครก) และกิจกรรมในภาคการเกษตร (รดน้ำพืชดอก ใช้ตกแต่งสวนสาธารณะ ใช้รดน้ำผักสดกินใบ ใช้รดน้ำพืชกินส่วนหัว และใช้เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ) ค่าระดับการยอมรับแสดงดังตารางที่ 4 พบว่าค่าการยอมรับเพื่อการใช้ล้างรถยนต์ และเพื่อการตกแต่งสวนมีค่าการยอมรับอยู่ในระดับ “มากที่สุด” สำหรับกิจกรรมที่มีระดับการยอมรับ “น้อย” ได้แก่ การใช้ดื่ม และการใช้ประกอบอาหาร

ตารางที่ 4 ระดับความคิดเห็นของการยอมรับการนำน้ำเสียที่บำบัดแล้วกลับมาใช้ใหม่ในกิจกรรมต่าง ๆ

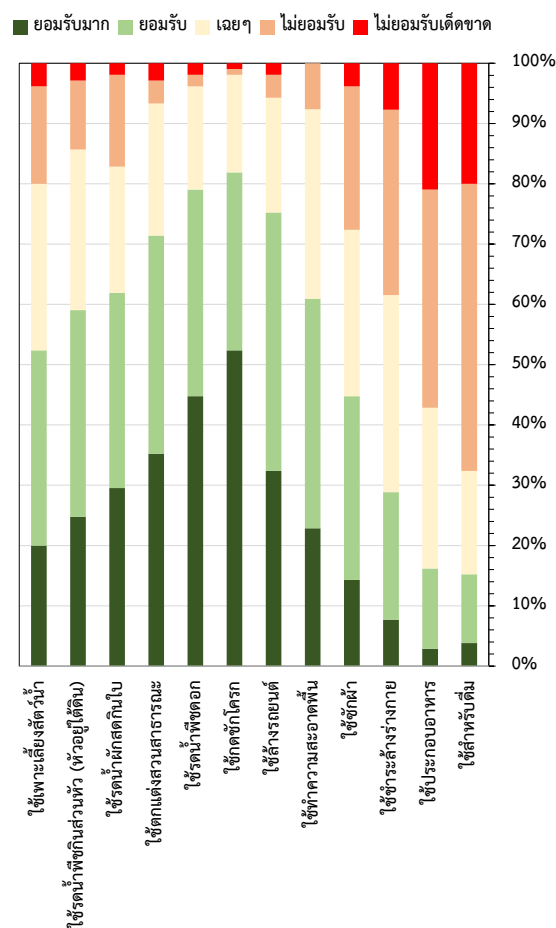
กิจกรรม	ค่าเฉลี่ย และ ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	ระดับ ความ คิดเห็น
ใช้ดื่ม	2.31 ± 1.04	น้อย
ใช้ประกอบอาหาร	2.41 ± 1.05	น้อย
ใช้ชำระล้างร่างกาย	2.90 ± 1.06	ปานกลาง
ใช้ซักผ้า	3.28 ± 1.09	ปานกลาง
ใช้การกดชักโครก	4.00 ± 0.92	มาก
ใช้ล้างรถยนต์	4.31 ± 0.84	มากที่สุด
ใช้ทำความสะอาดพื้น	3.76 ± 0.89	มาก
ใช้รดน้ำผักสดกินใบ	3.72 ± 1.10	มาก
ใช้รดน้ำพืชกินส่วนหัว	3.70 ± 1.04	มาก
ใช้รดน้ำพืชดอก	4.18 ± 0.91	มาก
ใช้สำรองเพื่อดับเพลิง	3.97 ± 0.99	มาก
ใช้ตกแต่งสวนสาธารณะ	4.30 ± 0.84	มากที่สุด
ใช้เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ	3.49 ± 1.10	มาก

สำหรับสัดส่วนของผู้ตอบแบบสอบถาม แสดงในรูปที่ 4 พบว่า การใช้ น้ำกดฉีดโครกเป็นกิจกรรมที่ผู้ตอบแบบสอบถามยอมรับมากที่สุด โดยมีผู้ยอมรับจำนวน 220 คน คิดเป็นร้อยละ 52.4 รองลงมาคือ ใช้ล้างรถยนต์ ใช้ทำความสะอาดพื้น ใช้ซักผ้า ใช้ประกอบอาหาร และใช้สำหรับดื่ม โดยมีผู้ยอมรับจำนวน 136 96 60 32 12 และ 16 คน คิดเป็นร้อยละ 32.4 22.8 14.8 7.6 2.8 และ 3.8 ตามลำดับ ผลการศึกษาชี้ให้เห็นถึงความกังวลของผู้ตอบแบบสอบถามต่อคุณภาพน้ำ กิจกรรมการใช้น้ำที่มีการสัมผัสต่อร่างกายน้อยกว่าจะได้รับการยอมรับมากกว่า กิจกรรมที่มีการสัมผัสน้ำมากหรือกิจกรรมที่มีการใช้น้ำเพื่อการบริโภค เช่น การประกอบอาหาร และการดื่มสำหรับการกดชักโครก แม้ว่าอาจมีการสัมผัสมากกว่าบางกิจกรรม เช่น การใช้ล้างรถยนต์ และใช้ล้างทำความสะอาดพื้น อาจเนื่องมาจากผู้ตอบแบบสอบถามมีการรับรู้รับทราบ การใช้ประโยชน์ในรูปแบบดังกล่าวจากสถานที่อื่นมาก่อน จึงทำให้มีการยอมรับกิจกรรมดังกล่าวยิ่งขึ้น

การวิเคราะห์การยอมรับการนำน้ำเสียที่บำบัดแล้วกลับมาใช้ใหม่ในชีวิตประจำวันในภาคการเกษตร พบว่า กิจกรรมที่ได้รับการยอมรับสูงที่สุด คือ ใช้รดน้ำพืชดอก รองลงมาเป็นการใช้น้ำหลังการบำบัดเพื่อตกแต่งสวน ใช้กับพืชที่นำมารับประทาน สังเกตได้ว่าการสัมผัสเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการยอมรับการใช้น้ำในภาคการเกษตร เช่นเดียวกับในภาคประชาชน อีกทั้งผู้ตอบแบบสอบถามมีความกังวลต่อการสะสมของความสกปรก หรือสารพิษตกค้างที่ไม่สามารถบำบัดออกจากน้ำเสียได้ ส่งผลให้การยอมรับในผักกินใบ สูงกว่าการยอมรับน้ำที่นำมารดน้ำพืชกินหัว และการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ตามลำดับ

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม ได้แก่ เพศ อายุ อาชีพ คณะ และสายปฏิบัติงาน และผลของการยอมรับการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ เป็นการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติเชิงอนุมาน (Inferential Statistic) เพื่อทดสอบสมมติฐาน พบว่า เพศมีความสัมพันธ์ต่อการยอมรับการนำน้ำเสียกลับมาใช้ในกิจกรรมในชีวิตประจำวัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่

ระดับ 0.01 และ 0.05 โดยเพศชายมีการยอมรับต่อกิจกรรมการนำน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่มากกว่าเพศหญิง (คำถาม น้ำบำบัดหรือยัง) ที่มีค่าเฉลี่ย 3.72 และ 3.52 ตามลำดับ (ตารางที่ 5)



รูปที่ 4 ร้อยละของกลุ่มตัวอย่างต่อการยอมรับการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ในกิจกรรมต่าง ๆ

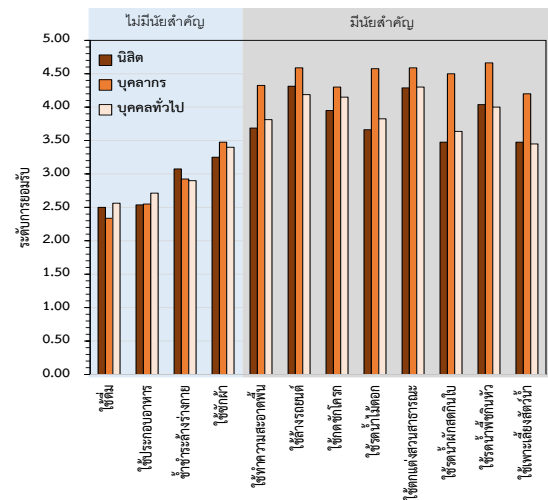
ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบการยอมรับการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ในกิจกรรมต่าง ๆ จำแนกตามเพศ

Levene's Test for Equality of Variances		เพศ	$\bar{X}$	S.D.	t	df	Sig.
F	Sig.						
2.6	0.02	ชาย	3.72	1.53	1.64	4147	0.00
		หญิง	3.52	1.41			

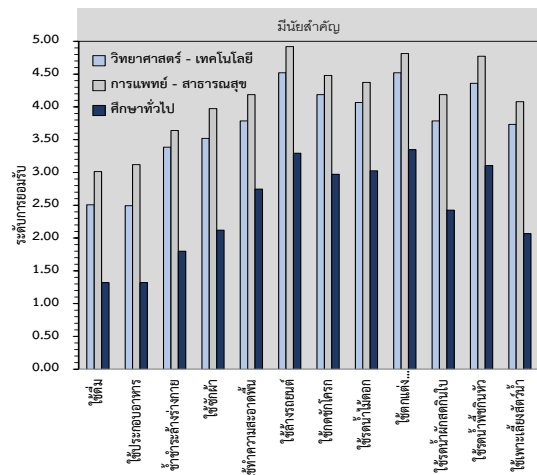
*มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

การเปรียบเทียบการยอมรับในกิจกรรมต่าง ๆ จำแนกตาม อาชีพ คณะ และสายการปฏิบัติงานแตกต่างกัน พบว่า ผู้ตอบแบบสอบถามที่มีอาชีพต่างกัน (นิสิต บุคลากรและอาชีพอื่น ๆ) มีการศึกษาอยู่ในคณะหรือสาย การศึกษาที่แตกต่างกัน (วิทยาศาสตร์ – เทคโนโลยี สาย การแพทย์-สาธารณสุข และศึกษาทั่วไป) และสาย ปฏิบัติงานที่แตกต่างกัน (บุคลากรในสายวิชาการ และ บุคลากรสายสนับสนุน) มีการตัดสินใจยอมรับการใช้น้ำที่ ผ่านการบำบัดกิจกรรมต่าง ๆ แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ทางสถิติที่ระดับ 0.05 ดังแสดงในรูปที่ 5 ถึงรูปที่ 7

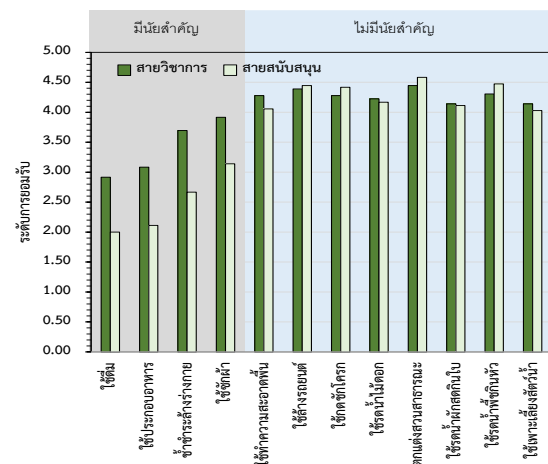
การเปรียบเทียบการยอมรับจำแนกตามอาชีพ พบว่า กิจกรรมที่มีการสัมผัสร่างกายมากหรือมีการเข้าสู่ร่างกาย ได้แก่ การดื่ม การประกอบอาหาร การชำระล้างร่างกาย และการซักผ้า นิสิต บุคลากร และอาชีพอื่น ๆ มีค่าการ ยอมรับแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ทั้งนี้กิจกรรมอื่น ๆ ที่มีการสัมผัสร่างกายน้อยกว่าโดยเริ่มจากการใช้น้ำทำ ความสะอาดพื้นเป็นต้นไป พบว่านิสิต บุคลากร และอาชีพ อื่น ๆ มีการยอมรับที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับ 0.05 โดยบุคลากรจะให้การยอมรับการใช้น้ำใน กิจกรรมดังกล่าวมากกว่านิสิตและอาชีพอื่น ๆ ดังแสดงใน รูปที่ 5 สำหรับการเปรียบเทียบจำแนกตามกลุ่มตามคณะ / วิทยาลัย (นิสิต) พบว่า นิสิตจากทั้ง 3 สายการศึกษามี การยอมรับการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่แตกต่างกันอย่างมี นัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 จากรูปที่ 6 เห็นได้ว่า นิสิตในสาขาการแพทย์-สาธารณสุข และสาขา วิทยาศาสตร์ – เทคโนโลยี ยอมรับการนำน้ำกลับมาใช้ ใหม่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับ นิสิตจากคณะในสาขาศึกษาทั่วไป พบว่าสองกลุ่มแรกมี ระดับการยอมรับที่แตกต่างจากกลุ่มที่ 3 อย่างมีนัยสำคัญ ทางสถิติที่ระดับ 0.05 และการเปรียบเทียบการยอมรับ การนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ในกิจกรรมต่าง ๆ จำแนกตามสาย ปฏิบัติงานของบุคลากรตามที่แสดงในรูปที่ 7 การ วิเคราะห์ทางสถิติ พบว่า กิจกรรมที่มีการสัมผัสร่างกาย มากกว่าหรือกิจกรรมที่มีการเข้าสู่ร่างกาย ได้แก่ การดื่ม การประกอบอาหาร การชำระล้างร่างกาย และการซักผ้า



รูปที่ 5 การเปรียบเทียบการยอมรับการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ในกิจกรรมต่าง ๆ จำแนกตามอาชีพ



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบการยอมรับการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ในกิจกรรมต่าง ๆ จำแนกตามคณะ / วิทยาลัย (นิสิต)



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบการยอมรับการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ในกิจกรรมต่าง ๆ จำแนกสายปฏิบัติงาน (บุคลากร)

มีค่าการยอมรับที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 โดยบุคลากรสายวิชาการให้การยอมรับการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ในกิจกรรมที่มีการสัมผัสร่างกายสูง (การดื่ม การประกอบอาหาร การชำระล้างร่างกาย การซักผ้า) มากกว่าบุคลากรสายปฏิบัติงาน ในขณะที่กิจกรรมอื่น ๆ มีการยอมรับที่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ

จากผลการสำรวจและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถามต่อการยอมรับการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ แสดงให้เห็นว่าประสบการณ์และองค์ความรู้ของผู้ตอบแบบสอบถามมีผลต่อการยอมรับการใช้น้ำ โดยบุคลากรซึ่งอยู่ในช่วงอายุ 30 – 60 ปี ย่อมมีองค์ความรู้และประสบการณ์สูงกว่านิสิตซึ่งส่งผลต่อการยอมรับที่มากกว่าเช่นกัน ในขณะที่บุคลากรสายวิชาการซึ่งมีองค์ความรู้และประสบการณ์มากกว่าจะให้การยอมรับต่อการใช้น้ำมากกว่าบุคลากรในสายปฏิบัติการเมื่อพิจารณาที่นิสิต นิสิตในสายการแพทย์-สาธารณสุข ซึ่งมีองค์ความรู้ด้านวิทยาศาสตร์สุขภาพและการป้องกันการปนเปื้อนเชื้อก่อโรคและสารเคมีที่มากับน้ำเป็นอย่างดี และนิสิตในสาขาวิทยาศาสตร์-เทคโนโลยี ซึ่งมีองค์ความรู้ในด้านการพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียที่มีคุณภาพมากกว่า นิสิตในสายศึกษาทั่วไปซึ่งไม่เคยทราบหรือมีองค์ความรู้ดังกล่าวมาก่อน จึงปฏิเสธการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่เนื่องจากติดภาพลักษณ์ของน้ำเสียก่อนการบำบัด

หลายปีที่ผ่านมา งานวิจัยหลายชิ้นได้ศึกษาเพื่ออธิบายปัจจัยที่ส่งผลต่อการยอมรับการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ มีรายงานว่าประชากรเพศหญิงและประชากรที่มีอายุน้อยมีแนวโน้มกังวลต่อการนำน้ำเสียหลังการบำบัดกลับมาใช้ใหม่และส่งผลให้มีการยอมรับน้อยกว่าประชากรเพศชาย ทั้งนี้กลุ่มคนที่มีอายุสูงขึ้นจะมีระดับการยอมรับเพิ่มขึ้น [15] นอกจากนี้มีการศึกษาพบว่าระดับความรู้หรือระดับการศึกษา มีผลต่อการยอมรับการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ โดยกลุ่มที่มีการศึกษาสูงกว่าจะให้การยอมรับที่มากกว่า [16] ซึ่งสอดคล้องเป็นไปในแนวทางเดียวกันกับผลการสำรวจการยอมรับภายในมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องค์กรฯ

4. สรุป

ผลการวิจัยในภาพรวมแสดงให้เห็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการยอมรับการนำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดเพื่อนำกลับมาใช้ประโยชน์ในภาคประชาชนและภาคเกษตรกรรม พบว่าคุณภาพน้ำเป็นปัจจัยสำคัญที่สุด โดยต้องไม่ส่งผลต่อสุขภาพของผู้ใช้น้ำ ทั้งนี้การผ่านการรับรองมาตรฐานสามารถสร้างความเชื่อมั่นต่อการยอมรับเพิ่มขึ้นได้ กิจกรรมการนำน้ำกลับไปใช้ใหม่มีความสัมพันธ์กับการสัมผัสร่างกายของผู้บริโภค โดยการนำน้ำเพื่อการกดชักโครกและใช้รดน้ำไม้ดอกเป็นกิจกรรมที่ได้รับการยอมรับสูงสุด ปัจจัยทั่วไปของบุคคลซึ่งสัมพันธ์กับองค์ความรู้และประสบการณ์ของผู้ตอบแบบสอบถาม ส่งผลต่อการยอมรับการนำน้ำที่ใช้แล้วมาบำบัดและนำกลับมาใช้ใหม่อย่างมีนัยสำคัญ ปัจจัยทั่วไปของบุคคลซึ่งสัมพันธ์เพศ ระดับองค์ความรู้ของผู้ตอบแบบสอบถาม ส่งผลต่อการยอมรับการนำน้ำที่ใช้แล้วมาบำบัดและนำกลับมาใช้ใหม่อย่างมีนัยสำคัญ

จากข้อมูลดังกล่าว สามารถใช้เป็นแนวทางให้กับหน่วยงานที่มีแนวคิดริเริ่มการบำบัดน้ำเสียเพื่อการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ กล่าวคือนอกจากการมุ่งเน้นด้านเทคโนโลยีเพื่อบำบัดน้ำเสียที่มีคุณภาพสูง และสามารถนำไปใช้อุปโภคอย่างปลอดภัยแล้ว การประชาสัมพันธ์และสร้างองค์ความรู้ให้แก่ประชาชนหรือผู้มีส่วนได้ส่วนเสียนั้นมีความสำคัญต่อการกำหนดทิศทางและการประสบความสำเร็จของโครงการในระยะยาว

5. ข้อเสนอแนะ

มีการควรต่อยอดเป็นรูปแบบการวิจัยเชิงคุณภาพจากการสอบถามบุคคลในกลุ่ม (focus group) เพื่อให้ได้มาถึงความคิดเห็น ความเชื่อ หรือทัศนคติ หรือแนวคิดเพิ่มขึ้น อีกทั้งควรนำข้อมูลวิจัยจากพื้นที่ต่าง ๆ มาวิเคราะห์เพื่อทราบถึงปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้องกับความแตกต่างหรือเหมือนกันของประชากรในสถานศึกษาดังกล่าว เพื่อเป็นข้อมูลให้หน่วยงานที่รับผิดชอบสามารถกำหนดแนวทางการดำเนินโครงการการบำบัดน้ำเสียเพื่อการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยเรื่อง การพัฒนารูปแบบการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่โดยใช้ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบมีเมมเบรนสำหรับภาคชุมชนและเกษตรกรรม ซึ่งได้รับอุดหนุนจากทุนงบประมาณแผ่นดินประจำปีงบประมาณ 2561 – 2562 และขอบคุณส่วนพัฒนาความยั่งยืน มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องค์กรฯ ที่สนับสนุนข้อมูลสภาพทางกายภาพของมหาวิทยาลัย ข้อมูลนิสิต และบุคลากร และขอบคุณนิสิตระดับปริญญาตรีสำหรับการช่วยเก็บรวบรวมข้อมูลแบบสอบถาม

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] K. J. Ormerod, S. Redman, and S. Kelley, “Public perceptions of potable water reuse, regional growth, and water resources management in the Reno-Sparks area of northern Nevada, USA,” *City Environ. Interact.*, vol. 2, pp. 1–10, 2019.
- [2] C. E. Scruggs and B. M. Thomson, “Opportunities and Challenges for Direct Potable Water Reuse in Arid Inland Communities,” *J. Water Resour. Plan. Manag.*, vol. 143, no. 10, pp. 1–9, 2017.
- [3] E. Mesa-Pérez and J. Berbel, “Analysis of barriers and opportunities for reclaimed wastewater use for agriculture in Europe,” *Water (Switzerland)*, vol. 12, no. 2308, pp. 1–14, 2020.
- [4] E. A. Gardner, “Some examples of water recycling in Australian urban environments: A step towards environmental sustainability,” *Water Sci. Technol. Water Supply*, vol. 3, no. 4, pp. 21–31, 2003.
- [5] H. Lee and T. P. Tan, “Singapore’s

experience with reclaimed water: NEWater,” *Water Reuse Policies Potable Use*, pp. 112–122, 2018.

- [6] T. Asano, M. Maeda, and M. Takaki, “Wastewater reclamation and reuse in Japan: overview and implementation examples,” *Water Sci. Technol.*, vol. 34, no. 11, pp. 219–226, 1996.
- [7] M. Ogoshi, Y. Suzuki, and T. Asano, “Water reuse in Japan,” *Water Sci. Technol.*, vol. 43, no. 10, pp. 17–23, 2001.
- [8] L. S. Gaulke, “On-site wastewater treatment and reuses in Japan,” *Proc. Inst. Civ. Eng. Water Manag.*, vol. 159, no. 2, pp. 103–109, 2006.
- [9] Z. Zhu and J. Dou, “Current status of reclaimed water in china: An overview,” *J. Water Reuse Desalin.*, vol. 8, no. 3, pp. 293–307, 2018.
- [10] A. Hurlimann and J. McKay, “Urban Australians using recycled water for domestic non-potable use-An evaluation of the attributes price, saltiness, colour and odour using conjoint analysis,” *J. Environ. Manage.*, vol. 83, no. 1, pp. 93–104, 2007.
- [11] J. R. Adewumi, A. A. Ilemobade and J. E. Van Zyl, “Treated wastewater reuse in South Africa: Overview, potential and challenges,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 55, no. 2, pp. 221–231, 2010.
- [12] E. Friedler, O. Lahav, H. Jizhaki and T. Lahav, “Study of urban population attitudes towards various wastewater reuse options: Israel as a case study,” *J.*

- Environ. Manage.*, vol. 81, no. 4, pp. 360–370, 2006.
- [13] S. Jiawkok, S. Ittisupornrat, C. Charudacha, and J. Nakajima, “The potential for decentralized reclamation and reuse of household greywater in peri-urban areas of Bangkok,” *Water Environ. J.*, vol. 27, no. 2, pp. 229–237, 2013.
- [14] T. W. Hartley, “Public perception and participation in water reuse,” *Desalination*, vol. 187, no. 1–3, pp. 115–126, 2006.
- [15] V. Aitken, S. Bell, S. Hills and L. Rees, “Public acceptability of indirect potable water reuse in the south-east of England,” *Water Sci. Technol. Water Supply*, vol. 14, no. 5, pp. 875–885, 2014.
- [16] L. Garcia-Cuerva, E. Z. Berglund and A. R. Binder, “Public perceptions of water shortages, conservation behaviors, and support for water reuse in the U. S.,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 113, pp. 106–115, 2016.

กำลังรับแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เส้นใยที่ใช้เศษแผ่นยิปซัมนำกลับมาใช้ใหม่แทนที่มวลรวม ละเอียดบางส่วน

Flexural Strength of Fiber-Cement Sheets using Recycled Gypsum Board as Partial Fine Aggregate Replacement

บุราฉัตร กิตติกรจรัส นุช เหมะหมัด กฤติน เปี่ยมปรีชารัตน์ มนต์สิทธิ์ งามทรัพย์ อนุวัฒน์ อรรถไชยวุฒิ*

กลุ่มวิจัยนวัตกรรมโครงสร้างพื้นฐานและการจัดการก่อสร้าง

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

ชลบุรี 20230

Burachat Kittikornjarus Nuh Raomat Monsit Ngamsub Krittin Piampricharat

Anuwat Attachaiyawuth*

The Innovation in Infrastructure and Construction Management Research Group

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering at Sriracha,

Kasetsart University Sriracha Campus, Chonburi, 20230

*Corresponding author Email: anuwat@eng.src.ku.ac.th

(Received: January 22, 2021; Accepted: July 12, 2021)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอผลกระทบของการนำเศษแผ่นยิปซัมนำกลับมาใช้ใหม่แทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนในมอร์ตาร์เพื่อผลิตเป็นแผ่นซีเมนต์เส้นใยตามมาตรฐาน มอก. 1427-2540 กระเบื้องซีเมนต์เส้นใยแผ่นเรียบ ผลการวิจัยระบุว่าสามารถแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเศษแผ่นยิปซัมได้ถึง 0.20 ต่อปริมาตรมอร์ตาร์ซึ่งทำให้มอร์ตาร์มีค่าโมดูลัสแตกร้าวเท่ากับ 4.03, 4.41 และ 4.42 เมกะปาสคาล เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) เท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานกระเบื้องซีเมนต์เส้นใยแผ่นเรียบชนิดที่ 1 ที่มีค่าโมดูลัสแตกร้าวไม่น้อยกว่า 4 เมกะปาสคาล อย่างไรก็ตามมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของเศษแผ่นยิปซัมนำกลับมาใช้ใหม่ไม่สามารถป้องกันการซึมผ่านน้ำได้ ทำให้จัดอยู่ในกระเบื้องซีเมนต์เส้นใยประเภท A และ B คือสามารถใช้ได้ภายในหรือภายนอกโดยไม่ถูกแสงแดดและ/หรือน้ำโดยตรงเท่านั้น

คำสำคัญ: เศษแผ่นยิปซัม มวลรวมละเอียด มอร์ตาร์ โมดูลัสแตกร้าว กระเบื้องซีเมนต์เส้นใย

ABSTRACT

This paper presents the effects of partial fine aggregate replacement by recycled gypsum board in mortar for producing fiber-cement sheets conformed to TIS 1427-2540 Fiber-cement sheets: Flat sheets. The results showed that fine aggregate volume could be replaced by recycled gypsum board up to 0.20 by mortar volume which affected the tested modulus of rupture of 4.03, 4.41 and 4.42 MPa with water to cement ratio (W/C) of 0.40, 0.45 and 0.50, respectively. Those mortars passed the standard of fiber-cement sheets type 1 with the modulus of rupture higher than 4 MPa. However, mortar with recycled gypsum board could not protect water penetration. Therefore, those mortars

were put in fiber-cement sheets type A and B that could be used indoor or outdoor without directly facing sunlight and water.

Keyword: Recycled gypsum board, fine aggregate, mortar, modulus of rupture, fiber-cement sheet.

1. บทนำ

ปัจจุบันแผ่นยิปซัมบอร์ดได้รับความนิยมและถูกใช้งานกันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมก่อสร้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการตกแต่งภายใน เช่น การใช้แผ่นยิปซัมบอร์ดทำเป็นผนังกันห้องหรือฝ้าเพดานเพราะมีคุณสมบัติทนต่อความร้อนและไฟได้ดี ป้องกันเสียง มีน้ำหนักเบา อีกทั้งยังสามารถติดตั้งได้อย่างรวดเร็วทำให้ประหยัดเวลาในการก่อสร้างได้มาก มีความสวยงามรวมไปถึงสามารถใช้งานได้ทั้งภายนอกและภายใน อย่างไรก็ตามแผ่นยิปซัมบอร์ดถูกผลิตโดยมีขนาดตามมาตรฐาน มอก.219-2552 [1] ซึ่งในการใช้งานจริงต้องมีการตัดชิ้นงานเพื่อให้เหมาะสมกับขนาดที่ต้องใช้งานตามหน้างานจริงทำให้เกิดเศษแผ่นยิปซัมบอร์ดที่ไม่สามารถใช้งานได้ ทำให้เกิดขยะจากการก่อสร้าง รวมไปถึงในการรื้อถอนโครงสร้างต่างๆ จากการใช้งานยิปซัมที่หลากหลายตามการใช้งานอย่างที่กำลังไปข้างต้น ทำให้เกิดเศษแผ่นยิปซัมทั้งแบบที่เหลือใช้และแบบที่เป็นขยะจากการก่อสร้างจำนวนมาก โดยเฉพาะยิปซัมเหล่านี้มีปริมาณมากถึง 20 ตันต่อปีต่อบริษัท กรรมวิธีในการกำจัดเศษยิปซัมบอร์ดมีวิธีหลักๆ อยู่สองวิธีด้วยกันคือการฝังกลบและการนำมาเข้าสู่กระบวนการหลอมเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน โดยวิธีการฝังกลบต้องใช้พื้นที่มากและขยะอาจจะได้รับการปนเปื้อน รวมถึงแผ่นยิปซัมอาจจะทำปฏิกิริยากับขยะอินทรีย์และเมื่อสัมผัสกับความชื้นที่ภาวะออกซิเจนต่ำจะเกิดเป็นแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ แก๊สชนิดนี้ส่งผลกระทบต่อร่างกายมนุษย์ทำให้ผู้ที่สูดดมหรือสัมผัส เกิดการระคายเคืองดวงตาและระบบทางเดินหายใจ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อชีวิตผู้คนโดยรอบพื้นที่ฝังกลบอย่างมาก และอีกวิธีหนึ่งคือการกำจัดแผ่นยิปซัมโดยการนำไปหลอมเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ โดยต้องใช้อุณหภูมิประมาณ 150

องศาเซลเซียสเพื่อให้ยิปซัมแปลงสภาพกลายเป็นสภาวะหลอมเหลวและเข้าสู่กระบวนการผลิตแผ่นยิปซัมบอร์ดอีกครั้ง ซึ่งต้องใช้ค่าใช้จ่ายในกระบวนการสูงมาก

ที่ผ่านมาได้มีการศึกษาการนำยิปซัมสังเคราะห์หลายรูปแบบมาผสมกับมอร์ตาร์โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.9 มีกำลังรับแรงอัดสูงสุดเท่ากับ 148.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อใช้ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน มีค่าการดูดกลืนน้ำร้อยละ 9.6 มีค่าความหนาแน่น 1,983 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร [2] นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาการใช้อัตราส่วนยิปซัมต่อปูนซีเมนต์ที่แตกต่างกันต่อความชื้นเหลวและระยะเวลาการก่อตัวของมอร์ตาร์ [3] พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณยิปซัมลงในคอนกรีตส่งผลให้ความชื้นเหลวลดลงเนื่องจากยิปซัมมีสมบัติการดูดน้ำสูงและมีระยะเวลาการก่อตัวเร็วขึ้น มีการศึกษาผลกระทบของยิปซัมสังเคราะห์ต่อสมบัติของมอร์ตาร์ที่จะนำไปใช้สำหรับอิฐประดับ [4, 6] ตามมาตรฐาน มอก.168-2546 [6] พบว่าอัตราส่วนปูนซีเมนต์:ทราย:ยิปซัมสังเคราะห์ที่เหมาะสมคือ 1:2:4 ร่วมกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 1.50 ทำให้มอร์ตาร์มีกำลังรับแรงอัดประลัย ที่อายุการบ่ม 28 วัน เท่ากับ 6.48 เมกะปาสคาล และมีค่าการดูดซึมน้ำสูงสุดเท่ากับ 10.31 เปอร์เซ็นต์ โดยการบ่ม 5 ชั่วโมง ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อิฐประดับ มอก. 168-2546 [6] จากนั้นผสมมอร์ตาร์ด้วยอัตราส่วนผสมดังกล่าวมาผลิตเป็นคอนกรีตบล็อกปูถนน ขนาด 190 x 90 x 65 มม. พบว่าคอนกรีตบล็อกปูถนนผสมยิปซัมสังเคราะห์มีกำลังรับแรงอัดประลัยเท่ากับ 5.39 เมกะปาสคาล ที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่าการดูดซึมน้ำสูงสุดจากการบ่ม 5 ชั่วโมง เท่ากับ 14.62 เปอร์เซ็นต์ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ อิฐประดับ มอก. 168-2546 ชั้นคุณภาพ ก.

จากปัญหาที่กล่าวมาทั้งหมดข้างต้นผู้วิจัยได้ตระหนักถึงปัญหาการเกิดมลภาวะต่างๆจากเศษขยะยิปซัม ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาการนำเศษยิปซำนากลับมาใช้ใหม่เป็นส่วนผสมของมอร์ตาร์โดยใช้แทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน เพื่อนำไปพัฒนาเป็นแผ่นซีเมนต์เส้นใยสำหรับงานสถาปัตยกรรมต่อไป ทำให้สามารถลดปริมาณขยะจากเศษแผ่นยิปซัมบอร์ดได้ เกิดการใช้งานขยะจากแผ่นยิปซัมบอร์ดมากขึ้น สามารถช่วยลดปัญหาต่างๆทางด้านสิ่งแวดล้อมได้ และได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

2. ระเบียบวิธีวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดสอบสมบัติของมอร์ตาร์ที่แทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนด้วยเศษยิปซัมบอร์ดนำกลับมาใช้ใหม่ โดยมีเป้าหมายนำไปผลิตเป็นแผ่นซีเมนต์เส้นใย ตามมาตรฐาน มอก.1427-2540 กระเบื้องซีเมนต์เส้นใยแผ่นเรียบ [7] ซึ่งใช้สำหรับงานตกแต่งผนัง ฝ้าเพดาน หรือรั้ว เป็นต้น โดยมีสมบัติสำคัญ 2 ประการที่จำเป็นต้องทดสอบคือ โมดูลัสแตกร้าวและการซึมผ่านน้ำ โดยสามารถจำแนกประเภทของแผ่นซีเมนต์เส้นใยได้ตามโมดูลัสแตกร้าวได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตารางมาตรฐานการทดสอบโมดูลัสแตกร้าวของแผ่นซีเมนต์เส้นใย [7]

ชนิด	โมดูลัสแตกร้าว			
	ประเภท A และ B		ประเภท C	
	ค่าเฉลี่ยไม่น้อยกว่า	ตามแนวนอนเส้นใยไม่น้อยกว่า	ค่าเฉลี่ยไม่น้อยกว่า	ตามแนวนอนเส้นใยไม่น้อยกว่า
1	4	2.8	4	2.8
2	7	4.9	7	4.9
3	13	9.1	10	7.0
4	18	12.6	16	11.2
5	24	16.8	22	15.4

*หน่วยเป็นเมกะปาสคาล

ประเภท A คือแผ่นซีเมนต์เส้นใยที่นำไปใช้ภายนอกได้ โดยถูกแสงแดดและ/หรือน้ำโดยตรง

ประเภท B คือแผ่นซีเมนต์เส้นใยที่นำไปใช้ภายนอกได้ โดยไม่ถูกแสงแดดและ/หรือน้ำโดยตรง

ประเภท C คือแผ่นซีเมนต์เส้นใยที่นำไปใช้ภายในโดยไม่ถูกแสงแดดและ/หรือน้ำโดยตรง

โดยหากแผ่นซีเมนต์เส้นใยเกิดการซึมผ่านของน้ำ จะถูกจัดอยู่ในประเภท B และ C คือสามารถนำไปใช้ภายนอกและภายในได้ โดยไม่ถูกแสงแดดและ/หรือน้ำโดยตรง

2.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถหาได้ทั่วไปในประเทศไทย โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน มอก. เล่ม 15-2555 เป็นวัสดุประสาน มวลรวมละเอียดใช้ทรายแม่น้ำขนาดไม่เกิน 4.75 มิลลิเมตร น้ำประปาทั่วไป และเศษแผ่นยิปซำนากลับมาใช้ใหม่ที่ได้

จากโรงงานซึ่งผ่านการย่อยขนาดเรียบร้อยแล้ว องค์ประกอบหลักเป็นแผ่นกระดาษขนาด 5-15 มิลลิเมตร และมีผงยิปซัมประมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ลักษณะเศษแผ่นยิปซำนากลับมาใช้ใหม่แสดงดังรูปที่ 1 และสมบัติของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยแสดงดังตารางที่ 2



รูปที่ 1 เศษแผ่นยิปซัมนำกลับมาใช้ใหม่จากโรงงาน

ตารางที่ 2 สมบัติของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุ	สมบัติที่สำคัญ
วัสดุประสาน	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ความถ่วงจำเพาะ 3.15 ตามมาตรฐาน มอก. เล่ม 15-2555
มวลรวมละเอียด	ทรายแม่น้ำขนาดไม่เกิน 4.75 มม. ความถ่วงจำเพาะ 2.64
เศษแผ่นยิปซัม	กระดาศขนาด 5-15 มม. ความถ่วงจำเพาะ 1.02
น้ำ	น้ำประปาทั่วไป

2.2 อัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์

อัตราส่วนผสมมอร์ตาร์แสดงดังตารางที่ 3 โดยทุกส่วนผสมมีอัตราส่วนมวลรวมต่อมอร์ตาร์ร้อยละ 50 (s/m 0.50) โดยปริมาตร อัตราส่วนเศษแผ่นยิปซัมนำกลับมาใช้ใหม่ร้อยละ 0.10, 0.20 และ 0.30 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ร้อยละ 0.40, 0.45, 0.50, 0.55 และ 0.60 โดยน้ำหนัก หากพิจารณาปริมาณวัสดุที่ใช้ในแต่ละส่วนผสมต่อมอร์ตาร์ 1 ลูกบาศก์เมตรสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4

2.3 ขั้นตอนการผสมและหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์

มอร์ตาร์ทุกส่วนผสมถูกผสมโดยขั้นตอนที่เหมือนกันทุกประการ เริ่มจากการเตรียมเศษแผ่นยิปซัมนำกลับมาใช้ใหม่โดยการเติมน้ำปริมาณเท่ากับน้ำหนักของเศษแผ่นยิปซัมเพื่อลดปริมาณการดูดซึมน้ำลงเนื่องจาก

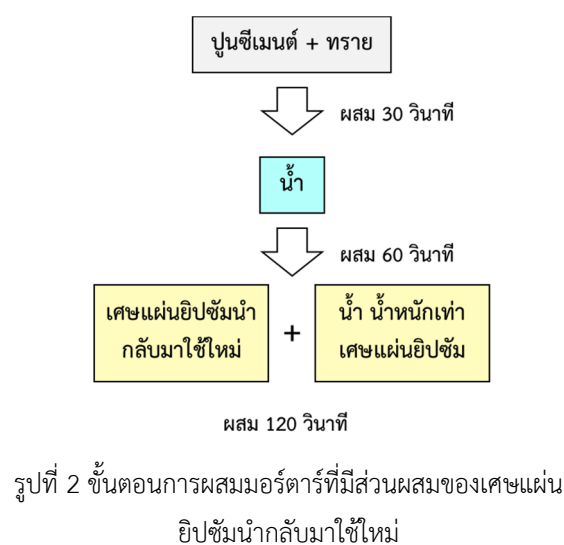
องค์ประกอบหลักของเศษแผ่นยิปซัมเป็นกระดาศซึ่งมีอัตราการดูดซึมน้ำสูง จากนั้นเริ่มขั้นตอนการผสมจากวัสดุแห้งโดยเทปูนซีเมนต์และทรายลงในเครื่องผสมคอนกรีตชนิดแรงเฉือน (Pan type) ขนาด 100 ลิตร เปิดเครื่องผสมเป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นเทน้ำที่ซึ่งเตรียมไว้ตามอัตราส่วนผสมและผสมเป็นเวลา 60 วินาที สุดท้ายเทเศษแผ่นยิปซัมที่เตรียมไว้ลงในเครื่องผสมและผสมเป็นเวลา 120 วินาที แล้วจึงนำส่วนผสมไปหล่อเข้าแบบต่อไป ขั้นตอนการผสมมอร์ตาร์แสดงดังรูปที่ 2

ตารางที่ 3 อัตราส่วนผสมมอร์ตาร์

ส่วนผสม	อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C)	อัตราส่วนทรายต่อมอร์ตาร์ (s/m)	อัตราส่วนเศษแผ่นยิปซัมต่อมอร์ตาร์ (g/m)
1	0.60	0.50	0.00
2		0.40	0.10
3		0.30	0.20
4		0.20	0.30
5	0.55	0.50	0.00
6		0.40	0.10
7		0.30	0.20
8		0.20	0.30
9	0.50	0.50	0.00
10		0.40	0.10
11		0.30	0.20
12		0.20	0.30
13	0.45	0.50	0.00
14		0.40	0.10
15		0.30	0.20
16		0.20	0.30
17	0.40	0.50	0.00
18		0.40	0.10
19		0.30	0.20
20		0.20	0.30

ตารางที่ 4 อัตราส่วนผสมมอร์ตาร์คิดต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร

ส่วนผสม	อัตราส่วนผสม			
	ปูนซีเมนต์ (กก)	น้ำ (กก)	ทราย (กก)	เศษแผ่นยิปซัม (กก)
1	696.9	278.8	1300.0	0.0
2	696.9	278.8	1040.0	102.0
3	696.9	278.8	780.0	204.0
4	696.9	278.8	520.0	306.0
5	651.5	293.2	1300.0	0.0
6	651.5	293.2	1040.0	102.0
7	651.5	293.2	780.0	204.0
8	651.5	293.2	520.0	306.0
9	611.7	305.8	1300.0	0.0
10	611.7	305.8	1040.0	102.0
11	611.7	305.8	780.0	204.0
12	611.7	305.8	520.0	306.0
13	576.4	317.0	1300.0	0.0
14	576.4	317.0	1040.0	102.0
15	576.4	317.0	780.0	204.0
16	576.4	317.0	520.0	306.0
17	545.0	327.0	1300.0	0.0
18	545.0	327.0	1040.0	102.0
19	545.0	327.0	780.0	204.0
20	545.0	327.0	520.0	306.0



เมื่อผสมมอร์ตาร์เรียบร้อยแล้วตามขั้นตอนแล้ว มอร์ตาร์ถูกเทลงในแบบหล่อขนาดกว้าง x ยาว x หนา เท่ากับ $600 \times 600 \times 25$ มม. แสดงดังรูปที่ 3 (ก) และบีบอัดด้วยแผ่นเหล็กเพื่อให้ความหนามีค่าเท่ากับ 25 มม. แสดงดังรูปที่ 3 (ข) ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงแล้วจึงแกะตัวอย่างออกจากแบบหล่อ ตัดตัวอย่างแบ่งออกเป็น 2 ชิ้นแสดงดังรูปที่ 4 โดยชิ้นที่ 1 นำไปบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 14 วัน ตามมาตรฐาน มอก. [7] จากนั้นนำไปตัดให้มีขนาดเท่ากับ กว้าง x ยาว x หนา เท่ากับ $100 \times 150 \times 25$ มม. เพื่อทดสอบโมดูลัสแตกร้าวต่อไป ชิ้นที่ 2 นำไปบ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วัน เพื่อศึกษากรณีที่บ่มด้วยความชื้นเหมือน

คอนกรีต จากนั้นตัดให้มีขนาดเท่ากับชิ้นที่ 1 และนำไปทดสอบโมดูลัสแตกร้าวต่อไป



(ก) มอร์ตาร์ในแบบหล่อขนาด 600 x 600 x 25 มม.



(ข) ปีบอัดมอร์ตาร์ด้วยแผ่นเหล็ก

รูปที่ 3 เศษแผ่นยิปซัมนำกลับมาใช้ใหม่จากโรงงาน



รูปที่ 4 ชิ้นตัวอย่างถูกแบ่งออกเป็น 2 ชิ้น

2.4 การทดสอบโมดูลัสแตกร้าว (Modulus of rupture)

มอร์ตาร์ที่ผสมเศษแผ่นยิปซัมสำหรับทดสอบโมดูลัสแตกร้าวมีขนาดเท่ากับ 100 x 150 x 25 มม. โดยทดสอบทั้งหมด 5 ตัวอย่างต่อ 1 ส่วนผสม เพื่อให้มีความน่าเชื่อถือมากขึ้น ลักษณะการติดตั้งตัวอย่างมอร์ตาร์สำหรับทดสอบโมดูลัสแตกร้าวแสดงดังรูปที่ 5 การทดสอบดำเนินไป

จนกว่าชิ้นตัวอย่างจะแตกหักโดยมีอัตราการให้น้ำหนักคงที่ให้ชิ้นตัวอย่างแตกหักภายใน 10-30 วินาที [7]



รูปที่ 5 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบโมดูลัสแตกร้าว

โมดูลัสแตกร้าวของแผ่นซีเมนต์เส้นใยสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 1

$$\text{Modulus of rupture} = 3F_L/2be^2 \quad (1)$$

เมื่อ F คือแรงกดแตกหัก หน่วยเป็นนิวตัน
 L คือระยะห่างระหว่างศูนย์กลางแท่นรองรับ หน่วยเป็นมิลลิเมตร
 b คือความกว้างชิ้นทดสอบหน่วยเป็นมิลลิเมตร
 e คือค่าเฉลี่ยความหนาชิ้นทดสอบตามแนวการแตกหัก หน่วยเป็นมิลลิเมตร

2.5 การทดสอบการซึมน้ำ

การทดสอบการซึมน้ำเป็นอีกหนึ่งสมบัติที่จำเป็นต้องทดสอบเพื่อจำแนกประเภทการใช้งานของแผ่นซีเมนต์เส้นใยได้ ลักษณะการทดสอบการซึมน้ำแสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ลักษณะการทดสอบการซึมน้ำ

แผ่นซีเมนต์เส้นใยถูกทดสอบการซึมน้ำเมื่อตัวอย่างถูกบ่มในอากาศครบ 14 วัน โดยนำแผ่นซีเมนต์เส้นใยวางในอุณหภูมิห้อง จากนั้นติดตั้งกรอบความสูง 25 มม. รอบขึ้นตัวอย่างด้วยวัสดุทึบน้ำ จากนั้นเติมน้ำลงในกรอบจนน้ำมีความสูงจากแผ่นซีเมนต์เส้นใยประมาณ 20 มม. ทั้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วสังเกตว่ามีน้ำซึมไปจนถึงอีกด้านของขึ้นตัวอย่างหรือไม่ แสดงดังรูปที่ 6

3. ผลทดสอบและการอภิปรายผล

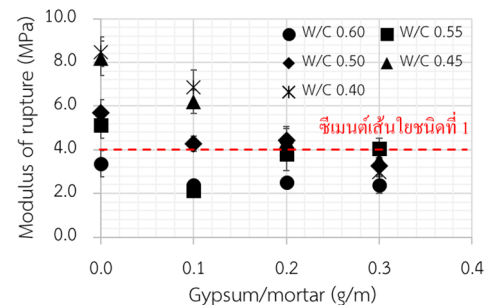
3.1 ผลทดสอบโมดูลัสแตกร้าว

โมดูลัสแตกร้าวของมอร์ตาร์แทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนด้วยเศษแผ่นยิปซัมนำกลับมาใช้ใหม่เพื่อผลิตเป็นแผ่นซีเมนต์เส้นใยที่บ่มอากาศ 14 วันและบ่มในน้ำ 28 แสดงดังรูปที่ 7 และ 8 ตามลำดับ พบว่าโมดูลัสแตกร้าวลดลงอย่างมีนัยยะสำคัญในทุกส่วนผสมที่มี W/C ต่างกัน เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเศษแผ่นยิปซัม นอกจากนี้ยังพบว่าค่าโมดูลัสแตกร้าวแปรผันตรงกับอัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์โดยมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของอนุวัฒน์และคณะ ซึ่งระบุว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเศษแผ่นยิปซัมบด [8] และสอดคล้องกับงานวิจัยที่ใช้ผงยิปซัมจากแผ่นยิปซัมเป็นวัสดุประสาน [9]

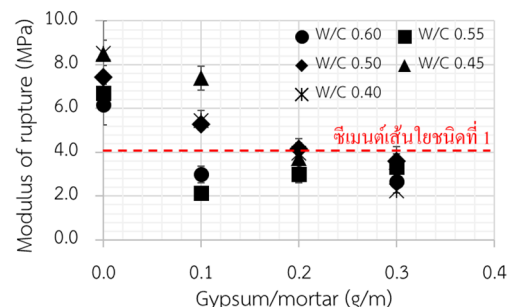
เมื่อพิจารณาชั้นคุณภาพของแผ่นซีเมนต์เส้นใยตาม มอก. 1427-2540 ชนิดที่ 2 ซึ่งต้องมีค่าโมดูลัสแตกร้าวไม่น้อยกว่า 7 MPa พบว่าส่วนผสมที่มีการแทนที่ด้วยเศษแผ่นยิปซัมและมีค่าโมดูลัสแตกร้าวมากกว่า 7 MPa มีเพียงส่วนผสมเดียวเท่านั้นคือมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์ 0.45 อัตราส่วนเศษแผ่นยิปซัมต่อมอร์ตาร์ 0.10 และบ่มในน้ำซึ่งมีโมดูลัสแตกร้าวเท่ากับ 7.39 MPa ดังนั้นเพื่อเพิ่มปริมาณการใช้เศษแผ่นยิปซัม ผู้วิจัยจึงได้มุ่งเน้นไปที่ชนิดที่ 1 ที่มีโมดูลัสแตกร้าวไม่น้อย 4 MPa

เมื่อพิจารณาโมดูลัสแตกร้าวของแผ่นซีเมนต์เส้นใยชนิดที่ 1 ตาม มอก. 1427-2540 แล้วพบว่ามอร์ตาร์ส่วนผสมที่ผ่านเกณฑ์ อัตราส่วนส่วนผสมที่ผ่านเกณฑ์และค่าโมดูลัสแตกร้าวจากการทดสอบของมอร์ตาร์ที่บ่มอากาศ

14 วัน และบ่มน้ำ 28 วันแสดงดังตารางที่ 5 และ 6 ตามลำดับ ค่าโมดูลัสแตกร้าวของมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนเศษแผ่นยิปซัมต่อมอร์ตาร์เท่ากับ 0.3 มีค่าน้อยกว่า 4 MPa ในทุกส่วนผสมซึ่งมีปริมาณเศษกระดาษจากเศษแผ่นยิปซัมมากเกินไป เห็นได้ชัดว่าสามารถแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเศษแผ่นยิปซัมได้ไม่เกิน 0.20 โดยปริมาตร มอร์ตาร์สำหรับการบ่มทั้ง 2 กรณี โดยหากพิจารณาปริมาณการแทนที่ที่มากที่สุดเท่ากับ 0.20 ส่วนผสมที่ผ่านเกณฑ์แผ่นซีเมนต์เส้นใยชนิดที่ 1 ที่บ่มด้วยอากาศ 14 วันคือส่วนผสมที่มีอัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.50, 0.45 และ 0.40 โดยมีค่าโมดูลัสแตกร้าวเท่ากับ 4.42, 4.41 และ 4.03 ตามลำดับ กรณีอัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.40 นั้นมีค่าโมดูลัสแตกร่วมน้อยกว่ามอร์ตาร์ที่มีค่า W/C สูงกว่าเนื่องจากปริมาณน้ำไม่เพียงพอต่อการทำให้ตัวอย่างเข้าแบบได้ดี ทำให้เกิดช่องว่างขึ้นในมอร์ตาร์ส่งผลให้มีค่าโมดูลัสแตกร้าวต่ำกว่าส่วนผสมที่มีค่า W/C 0.45 และ 0.50



รูปที่ 7 โมดูลัสแตกร้าวของมอร์ตาร์ที่บ่มในอากาศ 14 วัน



รูปที่ 8 โมดูลัสแตกร้าวของมอร์ตาร์ที่บ่มในน้ำ 28 วัน

สำหรับกรณีมอร์ตาร์บ่มในน้ำ 28 วันนั้น มีเพียงส่วนผสมเดียวที่แทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเศษแผ่นยิปซัม 0.20 โดยปริมาตร ที่ผ่านเกณฑ์แผ่นซีเมนต์เส้นใยชนิดที่ 1

คือมอร์ตาร์ที่มีค่า W/C เท่ากับ 0.50 โดยมีค่าโมดูลัสแตกร้าวเท่ากับ 4.16 MPa ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการบ่มอากาศ 14 วัน

ตารางที่ 5 โมดูลัสแตกร้าวของมอร์ตาร์บ่มอากาศ 14 วันที่ผ่านเกณฑ์ชนิดที่ 1

อัตราส่วนน้ำ ต่อปูนซีเมนต์ (W/C)	อัตราส่วนเศษแผ่น ยิปซัมต่อมอร์ตาร์ (g/m)	โมดูลัส แตกร้าว (MPa)
0.50	0.10	4.28
	0.20	4.42
0.45	0.10	6.19
	0.20	4.41
0.40	0.10	6.87
	0.20	4.03

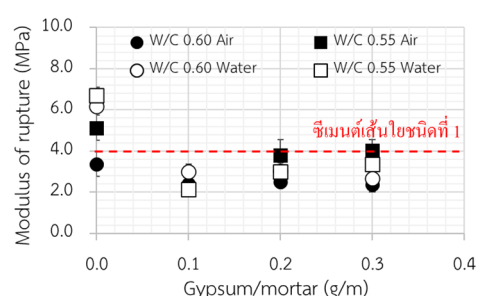
ตารางที่ 6 โมดูลัสแตกร้าวของมอร์ตาร์บ่มน้ำ 28 วัน ที่ผ่านเกณฑ์ชนิดที่ 1

อัตราส่วนน้ำ ต่อปูนซีเมนต์ (W/C)	อัตราส่วนเศษแผ่น ยิปซัมต่อมอร์ตาร์ (g/m)	โมดูลัส แตกร้าว (MPa)
0.50	0.10	5.28
	0.20	4.16
0.45	0.10	7.39
0.40	0.10	5.47

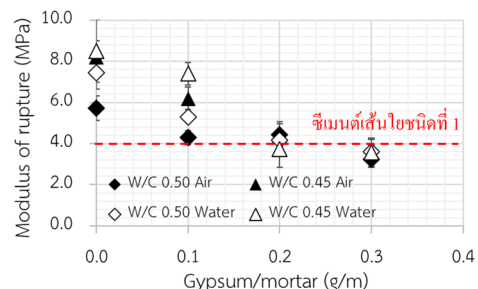
3.2 เปรียบเทียบการบ่มที่แตกต่างกัน

รูปที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบค่าโมดูลัสแตกร้าวระหว่างมอร์ตาร์ที่บ่มอากาศ 14 วันและบ่มน้ำ 28 วัน โดยรูปที่ 8 (ก) เปรียบเทียบมอร์ตาร์ที่มีค่า W/C 0.55-0.60, รูปที่ 8 (ข) เปรียบเทียบมอร์ตาร์ที่มีค่า W/C 0.45-0.50 และรูปที่ 8 (ค) เปรียบเทียบมอร์ตาร์ที่มีค่า W/C เท่ากับ 0.40 ในทางทฤษฎีการบ่มในน้ำช่วยให้มอร์ตาร์พัฒนากำลังได้ดีกว่าบ่มในอากาศซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 8 ในกรณีที่ไม่มีเศษแผ่นยิปซัมเป็นส่วนผสม (g/m 0.0) อย่างไรก็ตามเมื่อมอร์ตาร์มีส่วนผสม

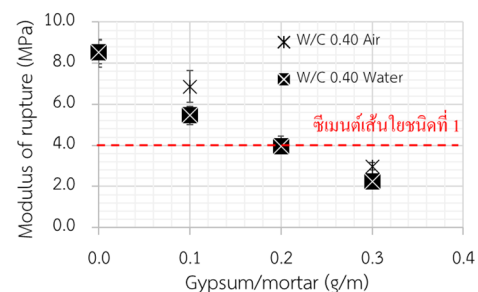
ของเศษแผ่นยิปซัมนำกลับมาใช้ใหม่การบ่มในน้ำอาจทำให้มอร์ตาร์มีความชื้นจากการที่กระดาษดูดซึมน้ำมากเกินไประหว่างการบ่มทำให้มอร์ตาร์มีกำลังน้อยกว่าที่คาดการณ์ ซึ่งพบได้ในกรณีที่มอร์ตาร์มีปริมาณเศษแผ่นยิปซัมสูง (g/m 0.2-0.3) ร่วมกับมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์สูง (W/C 0.55-0.60) แสดงดังรูปที่ 8 (ข) เนื่องจากมอร์ตาร์มีปริมาณน้ำมากทำให้เกิดรุกรานภายในปริมาณมาก น้ำจึงซึมเข้าชั้นตัวอย่างได้ง่ายและไปสะสมอยู่ในส่วนผสมที่เป็นกระดาษภายใน



(ก) เปรียบเทียบค่าโมดูลัสแตกร้าวของมอร์ตาร์ที่มี W/C 0.55 และ 0.60 เมื่อบ่มต่างกัน



(ข) เปรียบเทียบค่าโมดูลัสแตกร้าวของมอร์ตาร์ที่มี W/C 0.45 และ 0.50 เมื่อบ่มต่างกัน



(ค) เปรียบเทียบค่าโมดูลัสแตกร้าวของมอร์ตาร์ที่มี W/C 0.40 เมื่อบ่มต่างกัน

รูปที่ 9 เปรียบเทียบโมดูลัสแตกร้าวของมอร์ตาร์ที่บ่มต่างกัน

ขณะที่มอร์ตาร์ที่มีค่า W/C เท่ากับ 0.40 ค่าโมดูลัสแตกร้าวที่แตกต่างกันเนื่องจากการบ่มมีความแตกต่างกันค่อนข้างน้อยเนื่องจากมอร์ตาร์มีความทึบน้ำสูงทำให้ปริมาณน้ำที่ซึมเข้าตัวอย่างน้อยกว่าส่วนผสมที่มี W/C มากกว่า 0.40 อย่างไรก็ตามพบว่ามอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนเศษแผ่นยิปซัมต่อมอร์ตาร์เท่ากับ 0.1 นั้นมอร์ตาร์ที่บ่มอากาศมีค่าโมดูลัสแตกร้าวเท่ากับ 6.87 MPa ขณะที่มอร์ตาร์บ่มน้ำมีค่าโมดูลัสแตกร้าวเท่ากับ 5.47 MPa

3.3 ผลทดสอบการซึมผ่าน

มอร์ตาร์ทั้ง 20 ส่วนผสมถูกทดสอบการซึมผ่านน้ำตามขั้นตอนที่อธิบายในหัวข้อ 2.5 ผลการทดสอบพบว่าทุกตัวอย่างมีการซึมผ่านของน้ำทะลุไปอีกด้านของชิ้นตัวอย่าง แม้ว่าบางส่วนผสมจะไม่มีส่วนผสมเศษแผ่นยิปซำนั่นส่วนผสมทั้งหมดนี้ไม่สามารถนำไปผลิตเป็นแผ่นซีเมนต์เส้นใยที่นำไปใช้ภายนอกโดยถูกแสงแดดและ/หรือน้ำโดยตรงได้ (ประเภท A) แต่สามารถนำไปใช้ภายนอกโดยไม่ถูกแสงแดดและ/หรือน้ำโดยตรงได้ (ประเภท B) หรือนำไปใช้น้ำไปใช้ภายในโดยไม่ถูกแสงแดดและ/หรือน้ำโดยตรงได้ (ประเภท C) อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องพิจารณาโมดูลัสแตกร้าวของแต่ละส่วนผสมร่วมด้วยในการนำไปผลิตใช้งานจริง ลักษณะชิ้นตัวอย่างหลังผ่านการทดสอบการซึมผ่านน้ำแสดงดังรูปที่ 10 การนำเศษแผ่นยิปซามากลับมาใช้ใหม่มีความคุ้มค่าทางเทคนิค สามารถใช้เป็นผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้างได้ [10,11,12,13,14,15,16,17,18]



รูปที่ 10 ตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ผ่านการทดสอบการซึมผ่านน้ำ

4. สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัยที่ได้จากการทดสอบโมดูลัสแตกร้าวและการซึมผ่านของมอร์ตาร์ที่แทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนด้วยเศษแผ่นยิปซามากลับมาใช้ใหม่เพื่อผลิตเป็นแผ่นซีเมนต์เส้นใยทั้งหมด 20 ตัวอย่าง สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้;

1. เศษแผ่นยิปซามากลับมาใช้ใหม่สามารถนำไปแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนในมอร์ตาร์เพื่อผลิตเป็นแผ่นซีเมนต์เส้นใยได้ โดยสามารถแทนที่ได้มากที่สุดเท่ากับ 0.20 โดยปริมาตรมอร์ตาร์ และต้องมีปริมาณน้ำเพียงพอโดยมีค่า W/C เท่ากับ 0.40-0.50 ซึ่งทำให้แผ่นซีเมนต์เส้นใยมีค่าโมดูลัสแตกร้าวอยู่ในช่วง 4.03-4.42 MPa แบบบ่มในอากาศ ซึ่งผ่านมาตรฐาน มอก. 1427-2540 เป็นแผ่นซีเมนต์เส้นใยชนิดที่ 1
2. ค่าโมดูลัสแตกร้าวของมอร์ตาร์มีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยยะสำคัญตามปริมาณเศษแผ่นยิปซัมที่เพิ่มขึ้นในส่วนผสมเนื่องจากเศษแผ่นยิปซามีลักษณะเป็นกระดาดส่งผลให้มอร์ตาร์มีความแข็งแรงลดลง
3. มอร์ตาร์ที่บ่มด้วยน้ำสามารถพัฒนากำลังได้ดีกว่ามอร์ตาร์ที่บ่มด้วยอากาศในกรณีที่มีปริมาณเศษแผ่นยิปซำน้อย (0.10 โดยปริมาตร) หรือไม่ผสมเศษแผ่นยิปซัม อย่างไรก็ตามการบ่มด้วยน้ำอาจทำให้โมดูลัสแตกร้าวของมอร์ตาร์ที่มีเศษแผ่นยิปซัมปริมาณมาก (0.20-0.30) มีค่าน้อยกว่าการบ่มด้วยอากาศเนื่องจากการบ่มด้วยน้ำทำให้น้ำซึมเข้าตัวอย่างได้มากทำให้กระดาดในมอร์ตาร์มีความชื้นสูง ส่งผลให้ค่าโมดูลัสแตกร้าวมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างที่บ่มในอากาศ

4. มอร์ตาร์ที่แทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วนด้วยเศษแผ่นยิปซามากลับมาใช้ใหม่สามารถนำไปผลิตเป็นแผ่นซีเมนต์เส้นใยชนิดที่ 1 ตาม มอก. 1427-2540 ได้ด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับใช้ภายในหรือภายนอกโดยไม่ถูกแสงแดดและ/หรือน้ำโดยตรงเท่านั้น (ประเภท B หรือ C) เนื่องจากทุกส่วนผสมไม่สามารถต้านทานการซึมผ่านน้ำได้

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณบริษัท ไทยผลิตภัณฑ์ยิปซัม จำกัด (มหาชน) ที่ได้สนับสนุนเศษแผ่นยิปซัมที่จำเป็นสำหรับการทดสอบในงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชาที่สนับสนุนทุนวิจัยแบบบูรณาการ ประจำปีงบประมาณ 2563 ไว้ ณ โอกาสนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] TIS Standard for Gypsum Plasterboard, TIS Standard 219-2552, 2009.
- [2] A. Kongsitthanakorn, P. Sangkakit and W. Damparnat, "A Study on Possibility of Using Synthesis Gypsum for Paving Blocks," Bachelor's dissertation, College of Industrial Technology, KMUTNB, 2003.
- [3] J. Sriwichai, S. Chareonsukkho, A. Chaiyasith, S. Kongsomsaksiri and N. Yamoth, "Effects of Synthesis Gypsum in Concrete," Bachelor's dissertation, College of Industrial Technology, KMUTNB, 2005.
- [4] T. Cholatarn, T. Klubprasith, W. Permrith, S. Kongsomsaksiri and N. Yamoth, "Effects of Water Content on Paving Concrete Blocks Made with Synthesis Gypsum," Bachelor's dissertation, College of Industrial Technology, KMUTNB, 2004.
- [5] N. Noochaya, W. Wisutchanon, S. Piyo, S. Kongsomsaksiri and N. Yamoth, "A Development of Paving Concrete Blocks Made with Synthesis Gypsum," Bachelor's dissertation, College of Industrial Technology, KMUTNB, 2004.
- [6] TIS Standard for Facing Bricks, TIS Standard 168-2545, 2003.
- [7] TIS Standard for Fiber-Cement Sheets, TIS Standard 1427-2540, 1997.
- [8] A. Attachaiyawuth, C. Ngamthanachot and C. Vivatvanavong, "Effects of Compressive Strength of Mortar using Recycled Gypsum as Partial Replacement Material," *KMUTT Research and Development*, vol. 3, pp. 247-262, Jul. 2019.
- [9] WRAP (Waste & Resources Action Programme) (2009, August 5). Recycled Gypsum in Concrete Construction Product Applications [Online] Available: <http://www.warp.org.uk/construction>
- [10] A. Erbs, A. Nagalli, K. Q. de Carvalho, V. Mymrin, F. Hermes Passig and W. Mazer, "Properties of recycled gypsum from gypsum plasterboards and commercial gypsum throughout recycling cycles," *Journal of Cleaner Production*, vol. 183, pp. 1314-1322, 2018.
- [11] D.A. Kontogeorgos and M.A. Founti, "A generalized methodology for the definition of reactive porous materials physical properties: Prediction of gypsum board properties," *Construction and Building Materials*, vol. 48, pp. 804-813, 2013.
- [12] J. Zhang, X. Guan, X. Song, H. Hou, Z. Yang and J. Zhu, "Preparation and properties of gypsum based energy storage materials with capric acid-palmitic acid/expanded perlite composite PCM," *Energy and Buildings*, vol. 92, pp. 155-160, 2015.
- [13] S. Sair, B. Mandili, M. Taqi and A. El Bouari "Development of a new eco-friendly composite material based on gypsum

reinforced with a mixture of cork fibre and cardboard waste for building thermal insulation,” *Composites Communications*, vol. 16, pp. 20-24, 2019.

- [14] T. Raghavendra and B.C. Udayashankar, “Engineering properties of controlled low strength materials using flyash and waste gypsum wall boards,” *Construction and Building Materials*, vol. 101, pp. 548-557, 2015.
- [15] H. Liang and J. Li, “The influence of hydration and swelling properties of gypsum on the preparation of lightweight brick using water supply reservoir sediment,” *Construction and Building Materials*, vol. 94, pp. 691-700, 2015.
- [16] M. Garg, A.K. Minocha and N. Jain, “Environment hazard mitigation of waste gypsum and chalk: Use in construction materials,” *Construction and Building Materials*, vol. 25, pp. 944-949, 2011.
- [17] Q. L. Yu and H. J. H. Brouwers, “Development of a self-compacting gypsum-based lightweight composite,” *Cement and Concrete Composites*, vol. 34, pp. 1033-1043, 2012.
- [18] P. Sormunen and T. Kärki, “Recycled construction and demolition waste as a possible source of materials for composite manufacturing,” *Journal of Building Engineering*, vol. 24, 100472, pp. 1-14, 2019.

ผลของมุมการติดตั้งมิเตอร์ไฟฟ้าที่มีต่อการวัดพลังงานไฟฟ้าของมิเตอร์ไฟฟ้าแบบ เหนี่ยวนำ ระบบ 1 เฟส

The effect of installation angle on the electrical energy measurement of an induction type single phase kilowatt hour meter

พิชณุกรณ์ พิมพอักษร¹ อาคม แก้วระวัง^{2*} สงวน บุญปัญญารักษ์²

¹สาขาวิศวกรรมพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ขอนแก่น 40002

²สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ขอนแก่น 40002

Pissanukorn Pimaksorn¹ Arkom Kaewrawang^{2*} Sa-Nguan Boonpanyarak²

¹Department of Energy Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University,
Khon Kaen, 40002

²Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University,
Khon Kaen, 40002

*Corresponding author Email: arkom.kaewrawang@gmail.com

(Received: March 21, 2021; Accepted: July 12, 2021)

บทคัดย่อ

ปัจจุบันมิเตอร์ไฟฟ้าถูกติดตั้งในลักษณะคว่ำหน้าและเอียงข้างบ่อยครั้ง อาจเป็นสาเหตุความผิดพลาดของมิเตอร์ไฟฟ้า วัดอุปสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อหาผลของมุมการติดตั้งมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ ระบบ 1 เฟส ที่มีต่อการวัดค่าการใช้พลังงานไฟฟ้า งานวิจัยนี้ใช้มิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำที่มีขนาดพิกัดกระแสไฟฟ้า 5(15) แอมแปร์ ระบบ 1 เฟส และปรับมุมการติดตั้งในลักษณะคว่ำหน้าและเอียงข้างปรับครั้งละ 5 องศา จาก 0 ถึง 90 องศา โดยป้อนพลังงานไฟฟ้าคงที่แล้ววัดผลการทดลอง พบว่าเมื่อมีการติดตั้งในลักษณะคว่ำหน้าและเอียงข้างมากขึ้น ทำให้มิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำหมุนช้าขึ้นตามไปด้วย ถึงแม้ว่าจะมีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่ต่างกันแต่พลังงานไฟฟ้ายังเท่าเดิม ผลการทดลองที่ได้ก็จะไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่ผลกระทบของมุมมองการติดตั้งมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำจะมีมากขึ้นหากมีการใช้กระแสไฟฟ้าที่น้อยลง และหากคุณภาพของมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำต่ำ ผลกระทบของมุมที่ติดตั้งมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำก็จะสูงขึ้นด้วยเช่นกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นข้อมูลที่สำคัญในการพิจารณาปรับปรุงกระบวนการปฏิบัติงานเพื่อให้เกิดความเป็นธรรมในการซื้อ-ขาย พลังงานไฟฟ้าระหว่างการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและผู้ใช้ไฟฟ้า และเป็นข้อมูลสำคัญในการออกนโยบายเพื่อลดค่าสูญเสียพลังงานไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

คำสำคัญ: มิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ มุมการติดตั้งมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ ความคลาดเคลื่อนของมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ

ABSTRACT

Nowadays, a kilowatt hour meter is often installed in a tilted manner. It may cause the error of kilowatt hour meter. The objective of this research is to investigate the effect of installation angle

on the electrical energy measurement of the single phase kilowatt hour meter. This research was carried out with an induction type kilowatt hour meter with a rated current of 5(15) A single phase and adjusted the installation angle in the face down and sideways by adjusted 5° increment from 0° to 90° by constant electric energy. The results were found that if installation angle are increase, the turntable of the induction type kilowatt hour meter will be more slowly even though there are different power factor values but the electric energy remains the same. The results obtained were not significantly different. But, the effect of installation angle of the induction type kilowatt hour meter will be more if current and quality of the induction type kilowatt hour meter is low. Therefore, this research will be important information in considering the improvement of the operating process in order to achieve fairness in buying-selling electricity between Provincial Electricity Authority and electricity (PEA) users and it is for policy to reduce the electricity loss of PEA.

Keywords: Induction type kilowatt hour meter, Installation angle of induction type kilowatt hour meter, Error of an induction type kilowatt hour meter.

1. บทนำ

การให้บริการและจำหน่ายพลังงานไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) [1] จะวัดค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าที่จำหน่ายผ่านมิเตอร์ไฟฟ้า [2] เมื่อมิเตอร์ไฟฟ้าทำการวัดค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าไม่เที่ยงตรง ทำให้เกิดหน่วยสูญเสียพลังงานไฟฟ้ามากขึ้นตามค่าความคลาดเคลื่อน (% error) ของมิเตอร์ไฟฟ้า ก่อให้เกิดการสูญเสียรายได้ เมื่อรวมกันทั้งประเทศ ทำให้เกิดการสูญเสียรายได้เป็นจำนวนมหาศาล โดยค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคยอมรับได้อยู่ระหว่างร้อยละ -2.5 ถึงร้อยละ +2.5 [3] แต่สภาพการใช้งานมิเตอร์ไฟฟ้าจริงนั้น ถูกติดตั้งในสภาพแวดล้อมที่ต่างกันไปตามแต่ละพื้นที่ และมีหลายปัจจัยที่ทำให้มิเตอร์ไฟฟ้าวัดค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าไม่เที่ยงตรง เช่น ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ อุณหภูมิ [4] อีกทั้งความผิดเพี้ยนของกระแสไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้า (harmonics) ที่มาจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ด้านผู้ใช้ไฟฟ้า [5], [6] หรือแม้กระทั่งแรงของสนามแม่เหล็กจากภายนอกก็ส่งผลกระทบต่อมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำให้ทำงานคลาดเคลื่อนได้เช่นกัน [7] และบางครั้งภายหลังจากการติดตั้งมิเตอร์ไฟฟ้าไปแล้วนั้น มีปัจจัยทางกายภาพต่างๆ ที่เป็นสาเหตุให้มิเตอร์ไฟฟ้า

แบบเหนี่ยวนำมีการติดตั้งที่ไม่เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด [8], [9] กล่าวคืออาจอยู่ในลักษณะที่คว่ำหน้าหรือเอียงข้าง ซึ่งมีเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำที่ติดตั้งอยู่ในลักษณะคว่ำหน้าหรือเอียงข้างเป็นลักษณะการติดตั้งทางกายภาพที่ไม่เหมาะสม อาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำได้

ในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์และหาผลกระทบของมุมเอียงในการติดตั้งมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำต่อการวัดค่าการใช้พลังงานไฟฟ้า เพื่อเป็นข้อมูลสำคัญในการหาปัจจัยของความคลาดเคลื่อนในการวัดพลังงานไฟฟ้าของมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ เมื่อพบความสัมพันธ์ระหว่างมุมมองในการติดตั้งมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำและเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนในการวัดค่าการใช้พลังงานไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กันอย่างน้อยก็สำคัญจะเป็นประโยชน์ในการตระหนักถึงความสำคัญในการติดตั้งมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำและเป็นแนวทางการปฏิบัติงาน รวมทั้งเป็นข้อมูลสำคัญต่อการร่างนโยบายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เพื่อให้เกิดความเป็นธรรมในการซื้อ-ขาย พลังงานไฟฟ้า ระหว่างการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและผู้ใช้ไฟฟ้า

2. หลักการทำงานของมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ

มิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ คือเครื่องมือที่ใช้ในวัดกำลังไฟฟ้าทั้งหมดที่ส่งหรือใช้ไปในเวลาหนึ่ง ใช้ได้สำหรับระบบไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) เท่านั้น ดังสมการที่ 1

$$W = \int_0^t v(t)i(t) dt \quad (1)$$

โดย $v(t)$ คือ แรงดันไฟฟ้า หน่วยเป็น โวลต์

$i(t)$ คือ กระแสไฟฟ้า หน่วยเป็น แอมแปร์

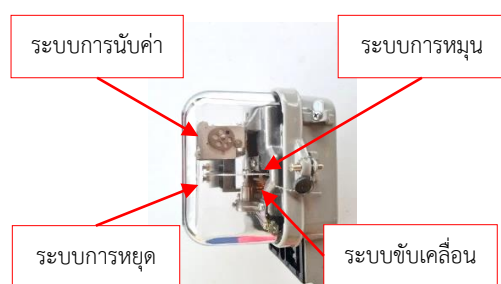
t คือ เวลา หน่วยเป็น วินาที

W คือ พลังงานไฟฟ้า หน่วยเป็น จูลหรือวัตต์วินาที แต่ในเชิงพาณิชย์พลังงานไฟฟ้ามีหน่วยเป็นกิโลวัตต์ ชั่วโมง

โครงสร้างของมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ ประกอบด้วย 4 ส่วนสำคัญคือ ระบบขับเคลื่อน (driving system) ระบบการหมุน (moving system) ระบบการหยุด (braking system) และระบบการนับค่า (registering system) ดังรูปที่ 1



(ก) ลักษณะด้านหน้าของมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ



(ข) ลักษณะด้านข้างของมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ
รูปที่ 1 ลักษณะของมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ

โดยมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำมีหลักการทำงาน คืองานอะลูมิเนียมที่หมุนเกิดจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดแรงดันและขดลวดกระแส สร้างสนามแม่เหล็กให้งานอะลูมิเนียมที่อยู่ระหว่างขดลวดทั้งสองนี้ ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เกิดขึ้นกับงานอะลูมิเนียม ทำให้เกิดแรงผลักให้งานอะลูมิเนียมหมุน และขับเฟืองชุดตัวเลขแสดงการใช้พลังงานไฟฟ้า

3. อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

3.1 เตรียมอุปกรณ์ในการวิจัย

3.1.1 มิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำขนาดพิกัดกระแสไฟฟ้า 5(15) แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ ระบบ 1 เฟส ชั้น 2

3.1.2 แท่นทดลองที่สามารถปรับองศาการติดตั้งมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำได้ โดยสามารถปรับมุมการติดตั้งในลักษณะคว่ำหน้าได้ไม่น้อยกว่า 90 องศา และสามารถปรับมุมการติดตั้งในลักษณะเอียงข้างได้ไม่น้อยกว่า 90 องศา เพื่อใช้จำลองสภาวะการติดตั้งในลักษณะมุมคว่ำหน้า (θ) และมุมเอียงข้าง (α) 0 – 90 องศา ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แท่นทดลองที่สามารถปรับองศาการติดตั้งมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำได้
และเอียงข้าง (α) ได้

3.1.3 โหลดไฟฟ้าเทียม ใช้หลอดไฟฟ้าชนิดเผาไส้ 200 วัตต์ จำนวน 2 หลอด 100 วัตต์ จำนวน 1 หลอด

และ 60 วัตต์ จำนวน 1 หลอด จะได้ค่ากระแสไฟฟ้าประมาณ 2.6 แอมแปร์ ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเป็น 0.978 ใช้หลอดไฟฟ้าชนิดเผาไส้ 200 วัตต์ จำนวน 5 หลอด และ 100 วัตต์ จำนวน 1 หลอด จะได้ค่ากระแสไฟฟ้าประมาณ 5 แอมแปร์ ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเป็น 0.991 ใช้หลอดไฟฟ้าชนิดเผาไส้ 200 วัตต์ จำนวน 8 หลอด 60 วัตต์ จำนวน 1 หลอด จะได้ค่ากระแสไฟฟ้าประมาณ 7.6 แอมแปร์ ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเป็น 0.996 ใช้ชุดหลอดฟลูออเรสเซนต์ 18 วัตต์ จำนวน 12 ชุด หลอดเผาไส้ 100 วัตต์ จำนวน 1 หลอด 60 วัตต์ จำนวน 1 หลอด LED 12 วัตต์ จำนวน 2 หลอด 15 วัตต์ จำนวน 1 หลอด จะได้ค่ากระแสไฟฟ้าประมาณ 4.4 แอมแปร์ ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเป็น 0.578

3.1.4 เครื่องรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ โดยรับแรงดันไฟฟ้าด้านเข้า 154 โวลต์ ถึง 264 โวลต์ แรงดันไฟฟ้าด้านออก 220 โวลต์ ± 1 เปอร์เซ็นต์

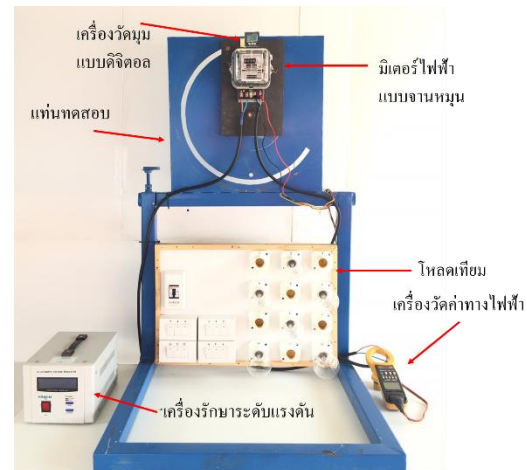
3.1.5 เครื่องวัดองศาแบบดิจิทัล

3.1.6 เครื่องวัดค่าทางไฟฟ้า Clamp-On Power Meter ที่ความถี่ 45 – 66 เฮิร์ต ค่าความเที่ยงตรงของการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า คือ $\pm 1.0 \% \text{rdg.} \pm 3 \text{ dgt.}$ และค่าความเที่ยงตรงของการวัดค่ากระแสไฟฟ้า คือ $\pm 1.3 \% \text{rdg.} \pm 3 \text{ dgt.}$ ความเที่ยงตรงของการวัดค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power factor) คือ $\pm 3^\circ \pm 2 \text{ dgt}$

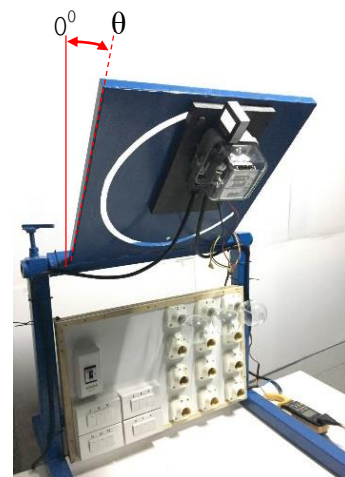
3.1.7 เครื่องจับเวลาและเครื่องนับรอบ

3.2 วิธีการทำวิจัย

ติดตั้งมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำขนาดพิกัดกระแสไฟฟ้า 5(15) แอมแปร์ เข้ากับแท่นทดลองโดยติดตั้งไว้ที่ตำแหน่งมุมคว่ำหน้า (θ) 0 องศา มุมเอียงข้าง (α) 0 องศา ต่อแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าผ่านเครื่องรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ 220 โวลต์ จากนั้นต่อโหลดเทียมเข้ากับมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำฝั่งขาออก โดยใช้เครื่องมือวัดค่าทางไฟฟ้าวัดค่ากระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า โดยลักษณะการจัดเตรียมอุปกรณ์และการติดตั้งอุปกรณ์ ดังรูปที่ 3



(ก) ส่วนประกอบในการเตรียมการทดลอง



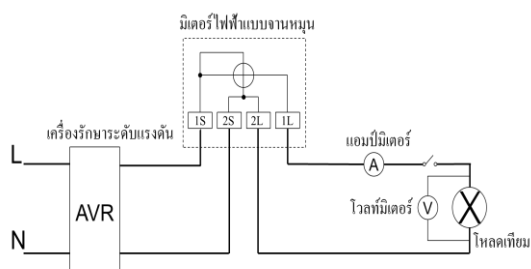
(ข) ลักษณะมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำทำมุมคว่ำหน้า (θ)



(ค) ลักษณะมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำทำมุมเอียงข้าง (α)

รูปที่ 3 ลักษณะของการจัดเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

จากนั้นทำการทดลองและเก็บค่าทางไฟฟ้าไปคำนวณเป็นค่าพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องมือวัดต่อไป โดยมีการต่อวงจรทางไฟฟ้า ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ไดอะแกรมการต่อวงจรไฟฟ้าของงานวิจัย

แล้วทำการทดลองโดยจ่ายไฟฟ้าทางด้านแหล่งจ่ายผ่านมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำไปยังโหลดการใช้ไฟฟ้าที่ตั้งค่าไว้แล้ว จากนั้นทำการนับรอบการหมุนของจานหมุนในมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ โดยที่จานหมุนของมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำจะมีแถบสีดำเพื่อใช้ในการนับรอบเมื่อแถบสีดำของจานหมุนของมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำหมุนกลับมาตำแหน่งเดิมคือการครบรอบ 1 รอบ ซึ่งในการทดลองนี้ใช้จำนวนรอบในการทดลอง 150 รอบ ซึ่งเป็นจำนวนรอบที่ทำการทดลองในสภาวะการติดตั้งมุมคว่ำหน้า (θ) และมุมเอียงข้าง (α) 0 องศา แล้วเกิดค่าความผิดพลาดจากผู้ทดลองน้อยที่สุดดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบการหมุนของมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำกับค่าความผิดพลาดจากผู้วิจัยในสภาวะการติดตั้งมุมคว่ำหน้า (θ) และมุมเอียงข้าง (α) 0 องศา

จำนวนรอบ การหมุน (รอบ)	เวลา (วินาที) ครั้งที่ 1	เวลา (วินาที) ครั้งที่ 2	เวลา (วินาที) ครั้งที่ 3	เฉลี่ยเวลา (วินาที)	E _{หมุน} (Wh)	E _{วัด} (Wh)	%error
25	68.60	68.97	68.19	68.59	20.83	20.77	0.31
50	138.02	137.85	137.90	137.92	41.67	41.76	0.23
100	274.03	274.76	274.73	274.51	83.33	83.12	0.25
150	412.95	412.31	411.75	412.34	125.00	124.86	0.11
200	550.64	549.61	548.75	549.67	166.67	166.44	0.13
250	687.90	686.81	685.84	686.85	208.33	207.98	0.17
300	825.08	824.02	822.58	823.89	250.00	249.48	0.21
350	962.41	960.71	959.88	961.00	291.67	291.00	0.23
400	1099.95	1097.15	1096.85	1097.98	333.33	332.48	0.26
450	1237.08	1234.17	1233.90	1235.05	375.00	373.98	0.27
500	1374.24	1372.00	1371.03	1372.42	416.67	415.58	0.26
550	1511.44	1508.65	1508.08	1509.39	458.33	457.05	0.28
600	1648.73	1645.27	1645.15	1646.38	500.00	498.53	0.29
650	1785.76	1782.13	1782.43	1783.44	541.67	540.04	0.30
700	1922.71	1919.41	1919.72	1920.61	583.33	581.57	0.30
750	2059.82	2056.82	2056.94	2057.86	625.00	623.13	0.30
800	2196.57	2193.80	2194.03	2194.80	666.67	664.60	0.31
850	2334.04	2330.67	2331.26	2331.99	708.33	706.14	0.31

ตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำกับค่าความผิดพลาดจากผู้ทดลองในสถานะการติดตั้งมุมคว่ำหน้า (θ) และมุมเอียงข้าง (α) 0 องศา (ต่อ)

จำนวนรอบ การหมุน (รอบ)	เวลา (วินาที) ครั้งที่ 1	เวลา (วินาที) ครั้งที่ 2	เวลา (วินาที) ครั้งที่ 3	เฉลี่ยเวลา (วินาที)	$E_{\text{หมุน}}$ (Wh)	$E_{\text{วัด}}$ (Wh)	%error
900	2472.10	2467.55	2468.12	2469.26	750.00	747.70	0.31
950	2609.63	2604.68	2604.78	2606.36	791.67	789.22	0.31
1000	2746.73	2741.75	2741.77	2743.42	833.33	830.72	0.31
1050	2883.92	2879.23	2878.77	2880.64	875.00	872.27	0.31
1100	3021.64	3017.08	3015.91	3018.21	916.67	913.93	0.30
1150	3159.63	3154.84	3152.72	3155.73	958.33	955.57	0.29
1200	3296.95	3291.74	3289.77	3292.82	1000.00	997.08	0.29

หมายเหตุ : ตัวพิมพ์หนาในตาราง คือ จำนวนรอบที่ใช้ทดลอง ที่ทำให้ได้ค่า %error น้อยที่สุด

จากนั้นบันทึกเวลาที่ได้จากการจับเวลาการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ จำนวน 150 รอบ และทำการทดลองซ้ำ 3 รอบ เพื่อหาค่าเฉลี่ยของเวลา แล้วทำการคำนวณและเปรียบเทียบระหว่างค่าพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องมือวัดตามสมการที่ (2) และค่าพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากมอเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำตามสมการที่ (3) เพื่อหาความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการติดตั้ง ตามสมการที่ (4) ซึ่งเป็นวิธีเดียวกันกับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคใช้หาความคลาดเคลื่อนของมอเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ [10] โดยทำการทดลองดังกล่าวข้างต้นแต่ปรับตำแหน่งการติดตั้งมุมคว่ำหน้า (θ) และมุมเอียงข้าง (α) จากมุมคว่ำหน้า (θ) และมุมเอียงข้าง (α) 0 องศา ไปจนถึง มุมคว่ำหน้า (θ) และมุมเอียงข้าง (α) 90 องศา เพื่อหาผลกระทบของมุมการติดตั้งมอเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำต่อการวัดค่าการใช้พลังงานไฟฟ้า ซึ่งหากพิจารณาเงื่อนไขการทดลองทางไฟฟ้า ค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้ต้องอยู่ระหว่างร้อยละ -2.0 ถึงร้อยละ +2.0 ตามข้อกำหนดของ มอก. 2336-2552 [11] ซึ่งการทดลองจะแบ่งออกเป็น 4 รูปแบบคือ

1. ทำการทดลองโดยคงที่กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า 0.991 โดยปรับมุมองศาการคว่ำหน้า (θ) และมุมเอียงข้าง (α) ที่

ละ 5 องศา โดยเริ่มจาก 0 – 90 องศา เพื่อดูแนวโน้มผลกระทบของมุมองศาการติดตั้งมอเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำอย่างละเอียด

2. ทำการทดลองโดยใช้กระแสไฟฟ้า 2.6 และ 7.6 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ ตามขั้นตอนที่กล่าวข้างต้น โดยปรับมุมองศาการคว่ำหน้า (θ) และมุมเอียงข้าง (α) ที่ละ 15 องศา โดยเริ่มจาก 0 – 90 องศา เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบของมุมองศาการติดตั้งมอเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ ที่เกิดจากผลของกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป

3. ทำการทดลองโดยให้พลังงานไฟฟ้าคงที่ ประมาณ 125 วัตต์ชั่วโมง แต่ปรับค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าให้มีค่าแตกต่างกัน คือ 0.991 และ 0.578 โดยปรับมุมองศาการคว่ำหน้า (θ) และมุมเอียงข้าง (α) ที่ละ 15 องศา โดยเริ่มจาก 0 – 90 องศา เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบของมุมองศาการติดตั้งของมอเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ ที่เกิดจากผลของค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป

4. ทำการทดลองโดยคงที่กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า 0.991 โดยปรับมุมองศาการคว่ำหน้า (θ) และมุมเอียงข้าง (α) ที่ละ 15 องศา โดยเริ่มจาก 0 – 90 องศา แต่ใช้ผลิตภัณฑ์ที่

มีเครื่องหมายการค้า (ยี่ห้อ) ที่แตกต่างกัน เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบของมุมมองการติดตั้งมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ ที่เกิดจากคุณภาพของมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำของแต่ละผลิตภัณฑ์

3.3 สมการที่ใช้ในการคำนวณ

สมการที่ใช้คำนวณในงานวิจัย มีดังนี้

$$W_{\text{วัด}} = \frac{V \times I \times \cos\theta \times t}{3,600} \quad (2)$$

โดย $W_{\text{วัด}}$ คือ พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องมือวัด หน่วยเป็น วัตต์ชั่วโมง

V คือ แรงดันไฟฟ้า หน่วยเป็น โวลต์

I คือ กระแสไฟฟ้า หน่วยเป็น แอมแปร์

$\cos\theta$ คือ ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

t คือ เวลา หน่วยเป็น วินาที

$$W_{\text{ทฤษฎี}} = \frac{N \times 1,000}{n} \quad (3)$$

โดย $W_{\text{ทฤษฎี}}$ คือ พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากมิเตอร์ไฟฟ้าแบบจานหมุน หน่วยเป็น วัตต์ชั่วโมง

N คือ จำนวนรอบในการหมุนของจานหมุนของเครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า หน่วยเป็น รอบ

n คือ จำนวนรอบต่อหนึ่งหน่วยการใช้ไฟฟ้า เป็นค่าคงที่ หน่วยเป็น รอบต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง

$$\%error = \left| \left(\frac{W_{\text{ทฤษฎี}}}{W_{\text{วัด}}} - 1 \right) \right| \times 100 \quad (4)$$

โดย %error คือ ความคลาดเคลื่อนของการทำงานของมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ หน่วยเป็น ร้อยละ

$W_{\text{ทฤษฎี}}$ คือ พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ หน่วยเป็น วัตต์ชั่วโมง

$W_{\text{วัด}}$ คือ พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องมือวัด หน่วยเป็น วัตต์ชั่วโมง

4. ผลและอภิปรายผลการวิจัย

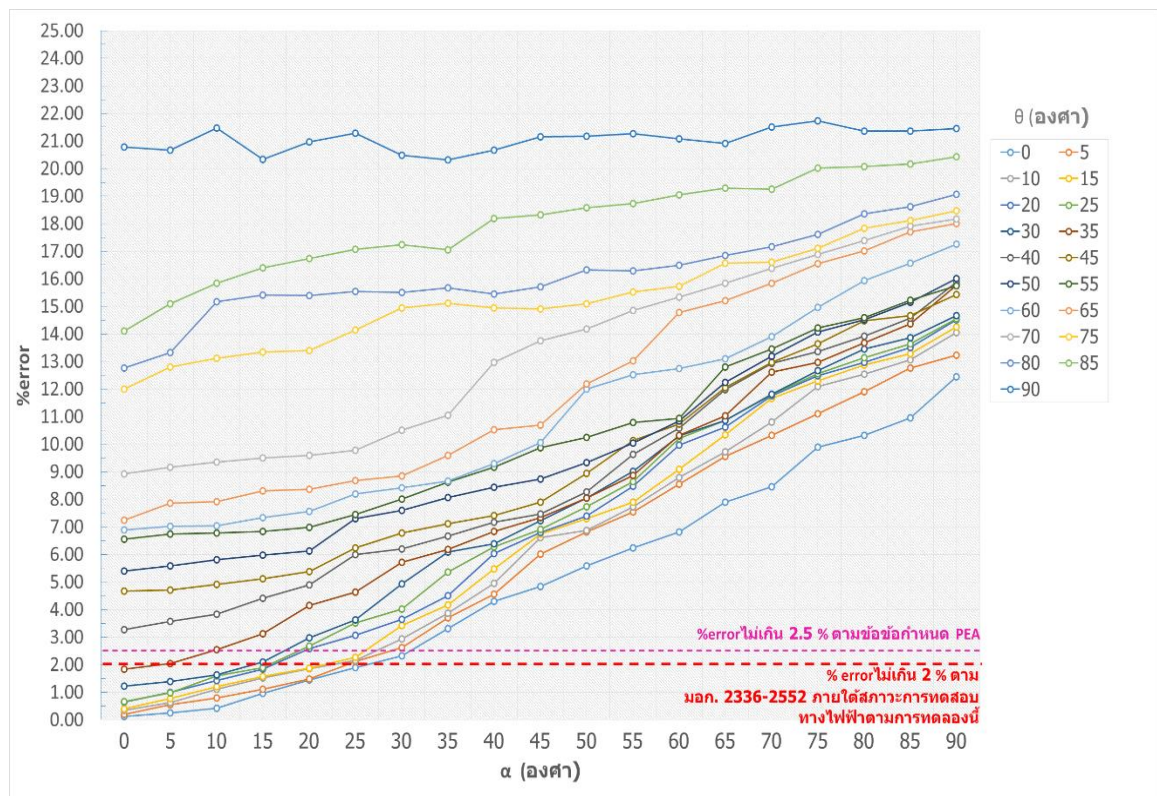
จากการทดลองการทำงานของมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำขนาดพิกัดกระแสไฟฟ้า 5(15) แอมแปร์ ตามการทดลองรูปแบบที่ 1 พบว่าหากมุมติดตั้งมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำคว่ำหน้าด้วยมุมคงที่ (θ คงที่) และปรับมุมเอียงข้าง (α) ให้เพิ่มมากขึ้นก็จะทำให้มิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำทำงานคลาดเคลื่อนมากขึ้น ในทำนองเดียวกัน หากมุมติดตั้งมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำเอียงข้างด้วยมุมคงที่ (α คงที่) และปรับมุมคว่ำหน้า (θ) ให้เพิ่มมากขึ้นก็จะทำให้มิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำทำงานคลาดเคลื่อนมากขึ้นเช่นกัน ดังรูปที่ 5

กล่าวคือเมื่อติดตั้งมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำให้มุมคว่ำหน้า (θ) คงที่ที่ 0 องศา และปรับมุมเอียงข้าง (α) ให้เพิ่มมากขึ้นจาก 0 องศา ถึง 90 องศา ภายใต้สภาวะทดลองค่าทางไฟฟ้าคงที่ มิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำจะทำงานโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเกิน มาตรฐานที่กำหนด ที่มุมเอียงข้าง (α) 30 องศาเป็นต้นไป

เมื่อติดตั้งมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำให้มุมคว่ำหน้า (θ) คงที่ที่ 5 องศา และปรับมุมเอียงข้าง (α) ให้เพิ่มมากขึ้นจาก 0 องศา ถึง 90 องศา ภายใต้สภาวะทดลองค่าทางไฟฟ้าคงที่ มิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำจะทำงานโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเกิน มาตรฐานที่กำหนด ที่มุมเอียงข้าง (α) 25 องศาเป็นต้นไป

เมื่อติดตั้งมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำให้มุมคว่ำหน้า (θ) คงที่ที่ 10 องศา และปรับมุมเอียงข้าง (α) ให้เพิ่มมากขึ้นจาก 0 องศา ถึง 90 องศา ภายใต้สภาวะทดลองค่าทางไฟฟ้าคงที่ มิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำจะทำงานโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเกิน มาตรฐานที่กำหนด ที่มุมเอียงข้าง (α) 25 องศาเป็นต้นไป

เมื่อติดตั้งมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำให้มุมคว่ำหน้า (θ) คงที่ที่ 15 องศา และปรับมุมเอียงข้าง (α) ให้เพิ่มมากขึ้นจาก 0 องศา ถึง 90 องศา ภายใต้สภาวะทดลองค่าทางไฟฟ้าคงที่ มิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำจะทำงานโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเกิน มาตรฐานที่กำหนด ที่มุมเอียงข้าง (α) 25 องศาเป็นต้นไป



รูปที่ 5 ความคลาดเคลื่อนของมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำที่เพิ่มขึ้น ตามมุมติดตั้งคว่ำหน้า (θ) – มุมเอียงข้าง (α) ที่เพิ่มขึ้น

เมื่อติดตั้งมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำให้มุมคว่ำหน้า (θ) คงที่ที่ 20 องศา และปรับมุมเอียงข้าง (α) ให้เพิ่มมากขึ้นจาก 0 องศา ถึง 90 องศา ภายใต้สภาวะทดลองค่าทางไฟฟ้าคงที่ มิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำจะทำงานโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเกิน มาตรฐานที่กำหนด ที่มุมเอียงข้าง (α) 20 องศาเป็นต้นไป

เมื่อติดตั้งมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำให้มุมคว่ำหน้า (θ) คงที่ที่ 25 องศา และปรับมุมเอียงข้าง (α) ให้เพิ่มมากขึ้นจาก 0 องศา ถึง 90 องศา ภายใต้สภาวะทดลองค่าทางไฟฟ้าคงที่ มิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำจะทำงานโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเกิน มาตรฐานที่กำหนด ที่มุมเอียงข้าง (α) 20 องศาเป็นต้นไป

เมื่อติดตั้งมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำให้มุมคว่ำหน้า (θ) คงที่ที่ 30 องศา และปรับมุมเอียงข้าง (α) ให้เพิ่มมากขึ้นจาก 0 องศา ถึง 90 องศา ภายใต้สภาวะทดลองค่าทาง

ไฟฟ้าคงที่ มิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำจะทำงานโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเกิน มาตรฐานที่กำหนด ที่มุมเอียงข้าง (α) 15 องศาเป็นต้นไป

เมื่อติดตั้งมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำให้มุมคว่ำหน้า (θ) คงที่ที่ 35 องศา และปรับมุมเอียงข้าง (α) ให้เพิ่มมากขึ้นจาก 0 องศา ถึง 90 องศา ภายใต้สภาวะทดลองค่าทางไฟฟ้าคงที่ มิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำจะทำงานโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเกิน มาตรฐานที่กำหนด ที่มุมเอียงข้าง (α) 5 องศาเป็นต้นไป

และเมื่อติดตั้งมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำให้มุมคว่ำหน้า (θ) ตั้งแต่ 35 องศาเป็นต้นไป ภายใต้สภาวะทดลองค่าทางไฟฟ้าคงที่ มิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำจะทำงานโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเกิน มาตรฐานที่กำหนด ทุกมุมองศาการเอียงข้าง (α) ดังแสดงในตารางที่ 2 และตารางที่ 3

ตารางที่ 2 ค่า %error ของมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำเมื่อติดตั้งในมุมคว่ำหน้า (θ) 0 - 90 องศา และมุมเอียงข้าง (α) 0 - 40 องศา ที่แรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ ตัวประกอบกำลัง 0.991

มุม		α (องศา)								
		0	5	10	15	20	25	30	35	40
θ (องศา)	0	0.12	0.26	0.42	0.96	1.44	1.89	2.32	3.31	4.29
	5	0.19	0.55	0.79	1.11	1.47	2.12	2.62	3.70	4.55
	10	0.34	0.63	1.11	1.52	1.86	2.15	2.93	3.86	4.94
	15	0.41	0.77	1.20	1.58	1.87	2.27	3.42	4.16	5.47
	20	0.64	1.00	1.43	1.84	2.58	3.06	3.65	4.49	6.03
	25	0.67	1.06	1.60	1.89	2.67	3.52	4.02	5.36	6.27
	30	1.21	1.39	1.64	2.09	2.97	3.63	4.93	6.09	6.39
	35	1.83	2.04	2.54	3.12	4.14	4.63	5.71	6.18	6.84
	40	3.27	3.57	3.83	4.42	4.90	5.99	6.20	6.66	7.17
	45	4.67	4.70	4.91	5.11	5.38	6.24	6.77	7.11	7.42
	50	5.40	5.58	5.81	5.97	6.13	7.30	7.59	8.06	8.43
	55	6.55	6.74	6.78	6.83	6.98	7.44	8.01	8.62	9.17
	60	6.89	7.02	7.03	7.33	7.56	8.20	8.42	8.66	9.30
	65	7.24	7.87	7.91	8.31	8.36	8.69	8.84	9.59	10.52
	70	8.92	9.16	9.35	9.49	9.59	9.78	10.51	11.04	12.97
	75	11.99	12.81	13.12	13.34	13.39	14.14	14.95	15.12	14.95
	80	12.76	13.32	15.16	15.42	15.39	15.55	15.50	15.68	15.45
	85	14.11	15.10	15.84	16.39	16.74	17.06	17.23	17.04	18.19
	90	20.78	20.66	21.47	20.33	20.97	21.29	20.48	20.31	20.67

หมายเหตุ : 1. ตัวพิมพ์สีน้ำเงินในตารางบ่งบอกถึงค่า %error ที่เกินร้อยละ 2 ภายใต้สภาวะการทดสอบแรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ ตัวประกอบกำลัง 0.991 ตามข้อกำหนดของ มอก. 2336-2552 [11]

2. ตัวพิมพ์หนาในตารางบ่งบอกถึงค่า %error ที่ไม่เกินร้อยละ 2 ภายใต้สภาวะการทดสอบแรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ ตัวประกอบกำลัง 0.991 ตามข้อกำหนดของ มอก. 2336-2552 [11]

ตารางที่ 3 ค่า %error ของมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำเมื่อติดตั้งในมุมคว่ำหน้า (θ) 0 - 90 องศา และมุมเอียงข้าง (α) 45 - 90 องศา ที่แรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ ตัวประกอบกำลัง 0.991

มุม	α (องศา)									
	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
θ (องศา)	0	4.83	5.59	6.23	6.82	7.90	8.45	9.89	10.31	12.44
	5	6.02	6.82	7.54	8.55	9.55	10.32	11.10	11.91	13.22

ตารางที่ 3 ค่า %error ของมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำเมื่อติดตั้งในมุมคว่ำหน้า (θ) 0 - 90 องศา และมุมเอียงข้าง (α) 45 - 90 องศา ที่แรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ ตัวประกอบกำลัง 0.991 (ต่อ)

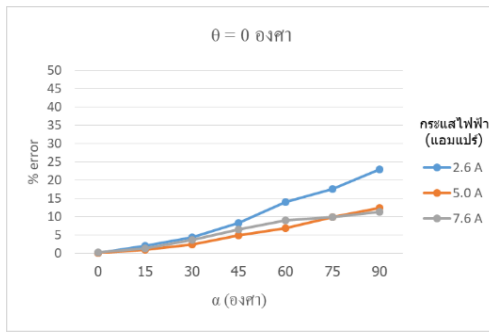
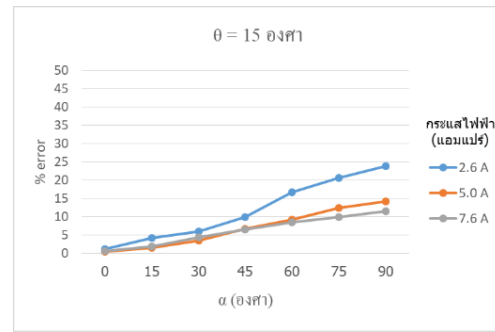
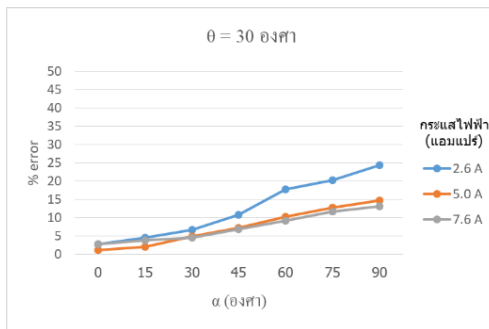
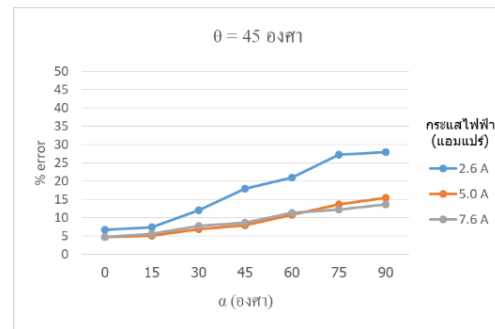
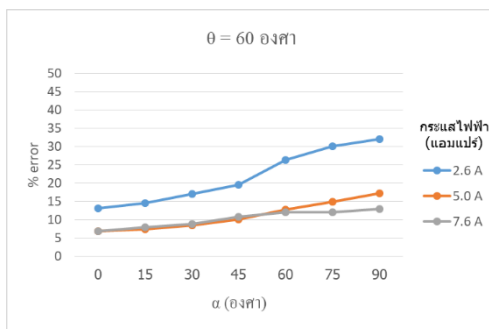
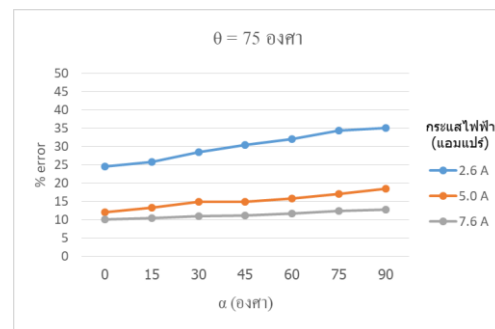
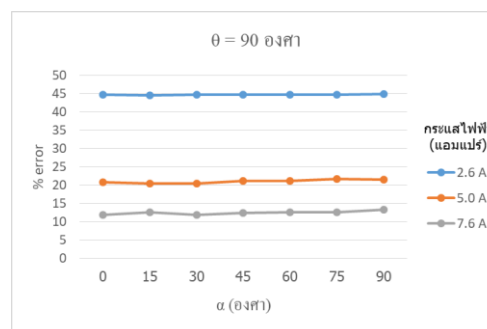
มุม		α (องศา)									
		45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
θ (องศา)	10	6.61	6.86	7.73	8.79	9.72	10.80	12.09	12.54	13.07	14.06
	15	6.75	7.30	7.90	9.10	10.34	11.67	12.30	12.87	13.28	14.25
	20	6.79	7.39	8.47	9.97	10.62	11.75	12.49	12.96	13.51	14.52
	25	6.91	7.73	8.64	10.21	10.85	11.79	12.55	13.13	13.64	14.55
	30	7.23	8.04	9.02	10.30	10.86	11.81	12.67	13.46	13.86	14.66
	35	7.34	8.04	8.86	10.32	11.03	12.61	12.96	13.68	14.36	15.77
	40	7.47	8.27	9.64	10.58	11.98	12.94	13.35	13.92	14.58	15.87
	45	7.90	8.94	10.13	10.74	12.05	12.97	13.64	14.48	14.67	15.42
	50	8.73	9.33	10.03	10.84	12.24	13.19	14.08	14.52	15.14	16.00
	55	9.87	10.25	10.79	10.93	12.80	13.45	14.22	14.59	15.23	15.55
	60	10.06	12.00	12.52	12.74	13.10	13.89	14.95	15.93	16.57	17.26
	65	10.69	12.19	13.02	14.77	15.21	15.83	16.55	17.01	17.70	18.00
	70	13.75	14.19	14.84	15.34	15.83	16.37	16.88	17.38	17.91	18.17
	75	14.90	15.08	15.52	15.72	16.56	16.61	17.11	17.82	18.12	18.46
	80	15.71	16.32	16.29	16.49	16.84	17.17	17.62	18.36	18.61	19.07
	85	18.32	18.57	18.73	19.05	19.29	19.25	20.02	20.07	20.17	20.42
	90	21.15	21.18	21.26	21.07	20.90	21.50	21.73	21.36	21.35	21.44

หมายเหตุ : 1. ตัวพิมพ์สีน้ำเงินในตารางบ่งบอกถึงค่า %error ที่เกินร้อยละ 2 ภายใต้สภาวะการทดลองแรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ ตัวประกอบกำลัง 0.991 ตามข้อกำหนดของ มอก. 2336-2552 [11]

เมื่อทำการทดลองตามรูปแบบที่ 2 โดยใช้กระแสไฟฟ้าที่ทดลองแตกต่างกัน คือ 2.6, 5 และ 7.6 แอมแปร์ จะส่งผลให้ค่าพลังงานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ ดังสมการที่ 2 ซึ่งผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า เมื่อใช้กระแสไฟฟ้าทดลองที่ 2.6 แอมแปร์ (ต่ำกว่าค่ากระแสไฟฟ้าปกติของมิเตอร์ไฟฟ้า 5(15) แอมแปร์) ค่าความคลาดเคลื่อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามมุมทดลองคว่ำหน้า (θ) และมุมเอียงข้าง (α) ที่เพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มที่ค่าความคลาดเคลื่อนสูงกว่ากระแสไฟฟ้าทดลองที่ 5 และ

7.6 แอมแปร์ เมื่อมุมทดลองคว่ำหน้า (θ) และมุมเอียงข้าง (α) เพิ่มขึ้น และเมื่อทดลองที่กระแสไฟฟ้า 7.6 แอมแปร์ (เป็นค่ากระแสไฟฟ้าที่อยู่ระหว่างค่ากระแสปกติมิเตอร์ไฟฟ้า 5(15) แอมแปร์) ค่าความคลาดเคลื่อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามมุมทดลองคว่ำหน้า (θ) และมุมเอียงข้าง (α) ที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่มีแนวโน้มที่ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำกว่ากระแสไฟฟ้าทดลองที่ 2.6 และ 5 แอมแปร์ เมื่อมุมทดลองคว่ำหน้า (θ) และมุมเอียงข้าง (α) เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 6

ปีที่ 16 ฉบับที่ 2 เดือน พฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2564

(ก) คว่ำหน้า (θ) 0 องศา(ข) คว่ำหน้า (θ) 15 องศา(ค) คว่ำหน้า (θ) 30 องศา(ง) คว่ำหน้า (θ) 45 องศา(จ) คว่ำหน้า (θ) 60 องศา(ฉ) คว่ำหน้า (θ) 75 องศา(ช) คว่ำหน้า (θ) 90 องศา

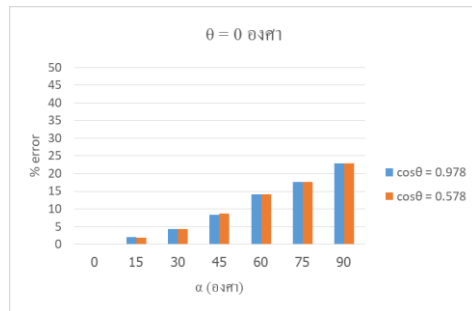
รูปที่ 6 เปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของมิเตอร์ไฟฟ้า เมื่อทดลองที่กระแสไฟฟ้าต่างกัน

เมื่อทำการทดลองตามรูปแบบที่ 3 โดยกำหนดให้ค่าพลังงานไฟฟ้าคงที่ที่ 125 วัตต์ชั่วโมง แต่ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า ($\cos\phi$) ต่างกัน คือ 0.991 และ 0.578 แล้ว

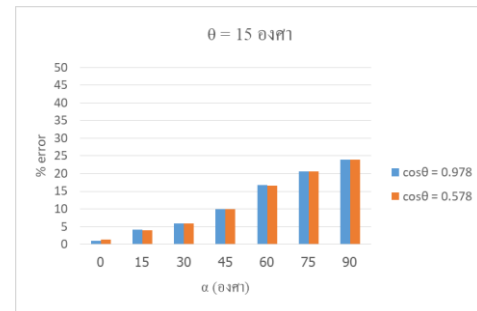
ทำการปรับตั้งมุมทดลองคว่ำหน้า (θ) และมุมเอียงข้าง (α) เพิ่มขึ้น พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดค่าพลังงานไฟฟ้าของมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำมีแนวโน้ม

สูงขึ้นตามมุมทดลองคว่ำหน้า (θ) และมุมเอียงข้าง (α) ที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน แต่ค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้ในแต่ละ

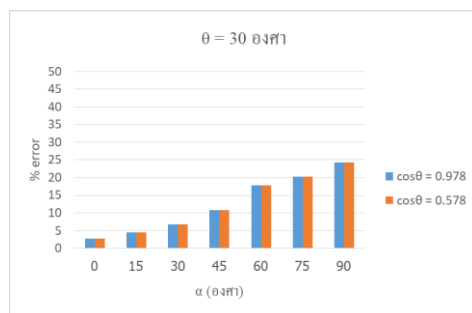
ละมุมทดลอง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังรูปที่ 7



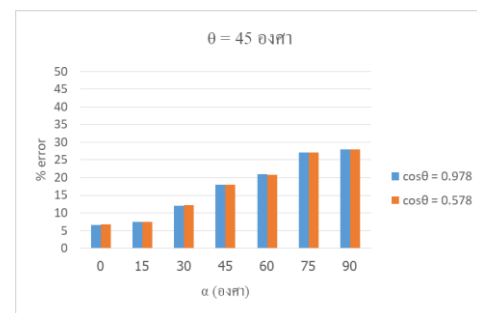
(ก) คว่ำหน้า (θ) 0 องศา



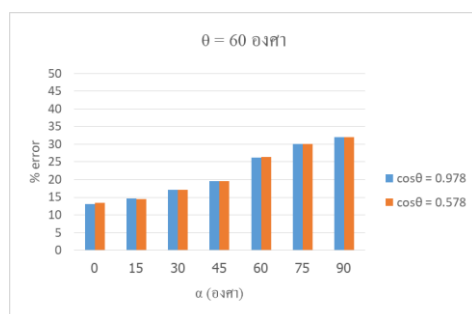
(ข) คว่ำหน้า (θ) 15 องศา



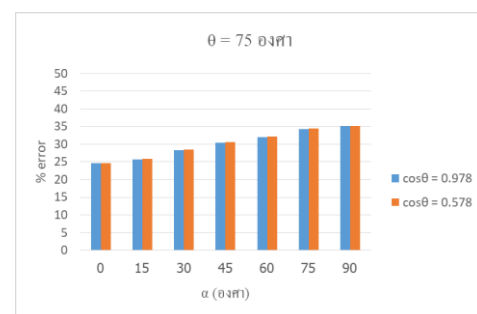
(ค) คว่ำหน้า (θ) 30 องศา



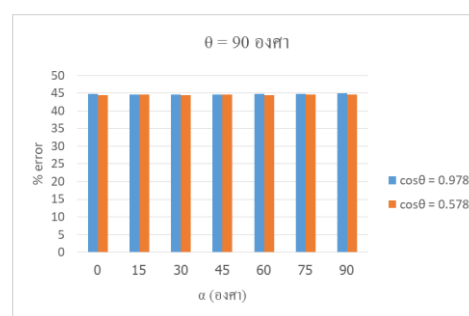
(ง) คว่ำหน้า (θ) 45 องศา



(จ) คว่ำหน้า (θ) 60 องศา



(ฉ) คว่ำหน้า (θ) 75 องศา



(ช) คว่ำหน้า (θ) 90 องศา

รูปที่ 7 เปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อน เมื่อพลังงานไฟฟ้าคงที่ แต่ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าต่างกัน

เมื่อทำการทดลองกับมอเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำตาม
รูปแบบที่ 4 ในสภาวะคงที่ทางไฟฟ้า คือ กระแสไฟฟ้า 5

แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ และค่าตัวประกอบ
กำลังทางไฟฟ้า 0.991 แต่เครื่องหมายการค้า (ยี่ห้อ)

แตกต่างกัน ซึ่งได้ทดลองกับ 3 ยี่ห้อ ซึ่งผลทดลองพบว่า ความคลาดเคลื่อนที่น้อยกว่าผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพต่ำ เมื่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์มีผลต่อค่าความคลาดเคลื่อนในการ มุมทดลองคว่ำหน้า (θ) และมุมเอียงข้าง (α) เพิ่มขึ้น ดังวัดพลังงานไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ กล่าวคือ ตารางที่ 4 ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูงจะมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่า

ตารางที่ 4 ค่า %error ของมอเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำของแต่ละผลิตภัณฑ์เมื่อติดตั้งในมุมคว่ำหน้า (θ) และมุมเอียงข้าง (α) ที่แรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ ตัวประกอบกำลัง 0.991

θ (องศา)	เครื่องหมายการค้า (ยี่ห้อ)	α (องศา)						
		0	15	30	45	60	75	90
0	ผลิตภัณฑ์ A	0.12	0.96	2.32	4.83	6.82	9.89	12.44
	ผลิตภัณฑ์ B	0.65	2.88	4.70	9.16	16.68	22.13	ไม่หมุน
	ผลิตภัณฑ์ C	0.54	0.06	3.14	7.31	12.34	16.35	18.12
15	ผลิตภัณฑ์ A	0.41	1.58	3.42	6.75	9.10	12.30	14.25
	ผลิตภัณฑ์ B	1.94	3.51	5.30	14.67	19.32	29.88	ไม่หมุน
	ผลิตภัณฑ์ C	0.68	0.58	3.28	7.89	12.39	17.29	18.00
30	ผลิตภัณฑ์ A	1.21	2.09	4.93	7.23	10.30	12.67	14.66
	ผลิตภัณฑ์ B	3.34	4.60	8.85	15.94	22.04	30.01	ไม่หมุน
	ผลิตภัณฑ์ C	0.03	1.68	3.34	8.14	13.20	17.35	18.29
45	ผลิตภัณฑ์ A	4.67	5.11	6.77	7.90	10.74	13.64	15.42
	ผลิตภัณฑ์ B	4.75	6.31	12.49	20.93	27.70	29.88	ไม่หมุน
	ผลิตภัณฑ์ C	0.58	2.04	6.06	9.49	13.54	17.92	18.34
60	ผลิตภัณฑ์ A	6.89	7.33	8.42	10.06	12.74	14.95	17.26
	ผลิตภัณฑ์ B	10.24	11.63	13.88	16.29	19.52	21.97	ไม่หมุน
	ผลิตภัณฑ์ C	ไม่หมุน	ไม่หมุน	ไม่หมุน	ไม่หมุน	ไม่หมุน	ไม่หมุน	ไม่หมุน
75	ผลิตภัณฑ์ A	11.99	13.34	14.95	14.90	15.72	17.11	18.46
	ผลิตภัณฑ์ B	18.84	18.82	21.94	22.38	21.74	ไม่หมุน	ไม่หมุน
	ผลิตภัณฑ์ C	ไม่หมุน	ไม่หมุน	ไม่หมุน	ไม่หมุน	ไม่หมุน	ไม่หมุน	ไม่หมุน
90	ผลิตภัณฑ์ A	20.78	20.33	20.48	21.15	21.07	21.73	21.44
	ผลิตภัณฑ์ B	ไม่หมุน	ไม่หมุน	ไม่หมุน	ไม่หมุน	ไม่หมุน	ไม่หมุน	ไม่หมุน
	ผลิตภัณฑ์ C	ไม่หมุน	ไม่หมุน	ไม่หมุน	ไม่หมุน	ไม่หมุน	ไม่หมุน	ไม่หมุน

หมายเหตุ : ผลิตภัณฑ์ A ได้รับเครื่องหมาย มอก. และมีราคาที่สูงกว่าผลิตภัณฑ์ B และ C
ผลิตภัณฑ์ B ได้รับเครื่องหมาย มอก. ที่ราคาถูกกว่าผลิตภัณฑ์ A
ผลิตภัณฑ์ C ไม่ได้รับเครื่องหมาย มอก. และมีราคาถูกใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ B

ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยการติดตั้งมิเตอร์ชนิดจานหมุนเพื่อความเหมาะสม [12] โดยพบว่ามุมเอียงของการติดตั้งเครื่องวัดพลังงานไฟฟ้าส่งผลให้มิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ ขนาดพิกัด 15(45) แอมแปร์ และ 30(100) แอมแปร์ มีความคลาดเคลื่อนในการวัดค่าพลังงานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นตามองศาการเอียงที่มากขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลมาจากแรงเสียดทานที่เพิ่มขึ้นของจุดหมุนเนื่องจากแรงโน้มถ่วงตามมุมมองการติดตั้งที่มากขึ้น [13] หรืออาจเป็นผลมาจากลักษณะโครงสร้างกายภาพภายในมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำที่มีลักษณะเป็นฟันเฟือง ขั้วต่อกันไปเรื่อยๆ จากฟันเฟืองของจานหมุนไปยังฟันเฟืองที่ใช้ขับเคลื่อนการอ่านหน่วยการใช้พลังงานไฟฟ้า ดังนั้นเมื่อการติดตั้งมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำในลักษณะที่มีมุมคว่ำหน้าหรือเอียงข้าง อาจทำให้มุมกดของฟันเฟืองเปลี่ยนแปลงไป การขบกันของฟันเฟืองไม่อยู่ในตำแหน่งที่ควรจะเป็นตามมุมมองที่เปลี่ยนไป ทำให้เกิดกำลังความสูญเสียจากการไหลของฟันเฟือง [13, 14] ทำให้มิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำอ่านค่าหน่วยการใช้พลังงานไฟฟ้าคลาดเคลื่อนไปจากปกติตามผลการทดลองดังกล่าวข้างต้น

5. สรุป

ผลการทดลองนี้สรุปได้ว่าหากการติดตั้งมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำอยู่ในลักษณะที่มีการคว่ำหน้าหรือเอียงข้าง จะส่งผลให้มิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำขนาดพิกัด 5(15) แอมแปร์ ระบบ 1 เฟส วัดค่าพลังงานไฟฟ้าคลาดเคลื่อนไปจากปกติ โดยความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจะมีค่ามากขึ้นตามองศาของมุมคว่ำหน้าหรือมุมเอียงข้างที่มากขึ้น ซึ่งกล่าวได้ว่าจะทำให้มิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำหมุนช้ามากขึ้นนั่นเอง และพบว่าถ้ามีการบ่อนพลังงานไฟฟ้าที่คงที่ให้กับมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ ถึงแม้ว่าค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจะไม่เท่ากัน ก็จะไม่ส่งผลมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำมีค่าคลาดเคลื่อนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่ผลกระทบของมุมมองการติดตั้งมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำจะมากขึ้นเมื่อมีการใช้กระแสไฟฟ้าที่น้อยลง

และหากใช้มิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำคุณภาพต่ำ ผลกระทบของมุมมองการติดตั้งมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำก็จะสูงขึ้นด้วยเช่นกัน ซึ่งจากผลการทดลองในครั้งนี้ยังชี้ให้เห็นว่าในการติดตั้งมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ ขนาดพิกัด 5(15) แอมแปร์ ระบบ 1 เฟส ควรจะมีมุมมองการติดตั้งมุมคว่ำหน้าและมุมเอียงข้างน้อยกว่า 15 องศา

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และมหาวิทยาลัยขอนแก่น บิดา มารดาของผู้วิจัย ที่ให้การสนับสนุนการทำวิจัย สถานที่ อุปกรณ์และทุนในการทำวิจัยในครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Enterprise Planning Division. (2021 Mar) . Provincial Electricity Authority – PEA [Online]. Available: <https://www.pea.co.th>
- [2] Provincial Electricity Authority, Regulation on method of watthour meter, 2019.
- [3] Provincial Electricity Authority, *Manual of watthour meter verification*, PEA NE1, 2018.
- [4] A. Kradkram, " Factors affecting the amount of the power meter damage: A case study of the Provincial Electricity Authority, Bang Pa-in District," M. S. thesis, Dept. M. B. A. , Rajamangala Univ. of Technology Thanyaburi, Thailand, 2017.
- [5] A. A. Hossam-Eldin and R. M. Hasan, "Study of the effect of harmonics on measurments of the energy meters," in *2006 Eleventh International Middle East Power Systems Conference*, El-Minia, Egypt, 2006, pp. 547-550.
- [6] A. Haas, J. Niitsoo, P. Taklaja and I. Palu, " Analysis of electricity meters under

- distorted load conditions," in *2012 Electric Power Quality and Supply Reliability*, Tartu, Estonia, 2012, pp. 1-4.
- [7] H. D. Stryczewska, R. Goleman, M. Pietras and T. Giżewski, "Evaluation of the damages in three-phase watt-hour induction meters after external high magnetic field exposition," in *2017 International Conference on Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection with Seminar Applications of Superconductors (ELMECO & AoS)*, Naleczow, Poland, 2017, pp. 1-4.
- [8] Provincial Electricity Authority, Standard of PEA for 3-5 A 1-Ø 220 V Meter installation on 8 m concrete pole, Assembly No. 0524, 1983.
- [9] Provincial Electricity Authority, Standard of PEA for 3-15 A 1-Ø 220 V Meter installation on 8 m concrete pole (Cu service entrance cable), Assembly No. 0524 A, 1998.
- [10] Provincial Electricity Authority, Watthour meter regulation and defensive measure infraction of electricity consumption, 2016.
- [11] TIS 2336- 2552, Electricity metering equipment (ac) - particular requirements - electromechanical meters for active energy (class 0.5 , 1 and 2), 2009.
- [12] P. Rodkumneud, P. Srimee, W. Puppor and K. Hongsombut, "Installation of a turntable type meter for proper use," *Industrial Technology Journal Surindra Rajabhat University*, vol. 5, no. 1, pp. 1-7, June 2020.
- [13] C. Ratanasumawong, P. Asawapichayachot, S. Phongsupasamit, H. Houjoh and S. Matsumura, "Estimation of sliding loss in a parallel-axis gear pair," *Journal of advanced mechanical design system and manufacturing*, vol. 6, No. 1, pp. 88-103, 2012.
- [14] P. Asawapichayachot, "Improvement of a mathematical model and experiment for estimation of sliding loss in helical gear transmission," M.S. thesis, Dept. Mach. Eng., Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand, 2011.

การอบแห้งแป้งท้าวยายม่อมด้วยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ Arrowroot Flour Drying Using Solar Drying Dome

ศรีมา แจ้คำ^{1*} กิตติศักดิ์ วิตินันท์¹ รินจง เสริมศรี²

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก 43 ม.6 ต.บางพระ อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20110

²วิสาหกิจชุมชนบ้านมาบหม้อ 26/3 ม.7 ต.บ้านปึก อ.เมือง จ.ชลบุรี 20130

Srima Jaekhom^{1*} Kittisak Witinantakit¹ Rinjong Sermsri²

¹Energy Technology Department, School of Engineering and Innovation,

Rajamangala University of Technology Tawan-ok

43 Moo 6 Bangpra Subdistrict, Sriracha District, Choburi 20110

²Ban Map Mo Community Enterprise Group

26/3 Moo 7 Ban Puek Subdistrict, Muang District, Choburi 20130

*Corresponding author Email: srima_j@hotmail.com

(Received: April 15, 2021; Accepted: July 7, 2021)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นโครงการวิจัยและนวัตกรรมเพื่อถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่ชุมชนฐานราก ทำการทดลองอบแห้งแป้งท้าวยายม่อมด้วยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์เปรียบเทียบกับวิธีการตากแดดแบบดั้งเดิม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง คุณภาพด้านสี ปริมาณน้ำอิสระ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมเพื่อทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้ง ทำการอบแห้งแป้งท้าวยายม่อมจากความชื้นเริ่มต้นประมาณร้อยละ 80 มาตรฐานแห้งจนเหลือความชื้นสุดท้ายประมาณร้อยละ 15 มาตรฐานแห้ง จากผลการทดลองพบว่า การอบแห้งโดยใช้โรงเรือนพลังงานแสงอาทิตย์มีอัตราการอบแห้งสูงกว่าวิธีการตากแดดแบบธรรมชาติ สามารถอบแห้งได้เร็วกว่าประมาณ 2-4 ชั่วโมง คุณภาพด้านสีอยู่ในเกณฑ์ที่ดี ยอมรับได้ สำหรับปริมาณน้ำอิสระของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งด้วยโรงเรือนพลังงานแสงอาทิตย์อยู่ในช่วง 0.478-0.493 ส่วนการตากแดดอยู่ในช่วง 0.495-0.548 ซึ่งให้ค่าไม่เกิน 0.6 ถือว่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของอาหารแห้งที่สามารถเก็บรักษาได้ทั้ง 2 วิธีการ นอกจากนี้สามารถอบแห้งเอมพิริคัลของเวอร์มาและคณะ สามารถให้ผลการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งแป้งท้าวยายม่อมได้ดีที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงสุด รากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยและผลรวมกำลังสองความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุด

คำสำคัญ: แป้งท้าวยายม่อม โรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ABSTRACT

This article was a research and innovation project to transfer technology to the founding community. This research was to drying arrowroot flour with solar drying dome compared with traditional sun exposure drying method. The objective of this research was to study of drying kinetic, color quality, water activity and to develop empirical mathematical modeling for predicting drying

kinetic. The research was conducted by initial moisture of arrowroot flour at about 80% d.b. (dry basis) and was dried until final moisture at about 15% d.b. The results found that drying rate of arrowroot flour by solar drying dome is higher than by traditional sun exposure method. Arrowroot flour dried by solar drying dome is achieved faster than traditional sun exposure about 2-4 hours. Color quality is good and acceptable. The water activity of dried arrowroot by solar drying dome was approximately 0.478-0.493 while the sun exposure was about 0.495-0.548 with water activity within 0.6, which is the standard of dry food storage, in both methods. In addition, the Verma et al.'s empirical equation of mathematical modeling is the best equation for predicting of drying kinetic of arrowroot flour which the highest coefficient of determination, the lowest root mean square error and sum of squared error.

Keyword: Arrowroot flour, solar drying dome, mathematical modeling.

1. บทนำ

เท้ายายม่อม (Arrowroot) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์คือ *Tacca leontopetaloides* เป็นพืชล้มลุกที่มีอายุหลายปี จัดเป็นพืชในวงศ์ Taccaceae ซึ่งเป็นวงศ์เดียวกันกับต้นกลอย มีเขตกระจายพันธุ์อยู่ในแถบแอฟริกา เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ หมู่เกาะแปซิฟิก และออสเตรเลีย มักเจริญเติบโตอยู่ได้ร่มไม้ในป่าดิบแล้ง ป่าผลัดใบ หรือตามป่าชายหาด ในประเทศไทยสามารถพบได้มากบริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคใต้ [1] แป้งที่ได้จากหัวเท้ายายม่อมสามารถนำไปใช้ประกอบในอาหารคาวหวานและทำขนมได้หลายชนิด ซึ่งมีคุณสมบัติทำให้อาหารมีความเหนียวและใสเป็นมันวาวดีกว่าแป้งที่ได้จากมันสำปะหลัง จึงมักนิยมผสมแป้งเท้ายายม่อมลงไปในแป้งชนิดต่างๆ เช่น แป้งข้าวเจ้า แป้งข้าวเหนียว แป้งข้าวโพด แป้งถั่วเขียว แป้งเผือก แป้งสาลี และแป้งมันสำปะหลัง เป็นต้น [2]

ในส่วนของภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย วิสาหกิจชุมชนบ้านมาบหม้อ ตำบลบ้านปึก จังหวัดชลบุรี เกษตรกรนิยมปลูกต้นเท้ายายม่อมค่อนข้างมากเพื่อการจำหน่ายและการประกอบอาหารบางส่วน วิธีการทำแป้งเท้ายายม่อมแบบพื้นบ้านนั้น จะต้องอบแห้งแป้งเท้ายายม่อมเป็นขั้นตอนสุดท้ายในการผลิต ซึ่งทางชุมชนใช้วิธีการตากแดด โดยต้องใช้เวลาอบแห้งนานประมาณ 4-5 วัน ขึ้นอยู่กับความชื้นของรังสีแสงอาทิตย์ และผลิตภัณฑ์ต้องสัมผัสกับฝุ่นละอองต่างๆ ในอากาศ เชื้อ

แบคทีเรียที่ตาเปล่ามองไม่เห็น เวลาฝนตกหรือไม่มีแสงแดดการเก็บรักษาก็ค่อนข้างยุ่งยาก เนื่องจากจะเกิดความเสียหายกับผลิตภัณฑ์ ดังนั้นทางชุมชนจึงมีความต้องการที่จะลดระยะเวลาในการอบแห้งลง โดยที่ไม่เพิ่มค่าใช้จ่ายในกระบวนการทำแห้งดังกล่าวมากนัก กระบวนการทำแห้งแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันไปเช่น การอบแห้งโดยใช้รังสีอินฟราเรดภายใต้สภาวะสุญญากาศ [3] และการอบแห้งแบบบีบความร้อน [4] เหมาะกับผลิตภัณฑ์ที่ไวต่อความร้อน แต่มีการสิ้นเปลืองพลังงานค่อนข้างสูง การอบแห้งระบบไอน้ำร้อนยวดยิ่ง เหมาะกับผลิตภัณฑ์จำพวกเนื้อสัตว์หรืออาหารทะเล เนื่องจากสามารถใช้ความร้อนสูงในการอบแห้งได้ [5] แต่ก็มีการใช้พลังงานค่อนข้างสูงเช่นกัน สำหรับการประยุกต์ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในระบบอบแห้งนั้นมีต้นทุนที่ค่อนข้างต่ำ และเป็นทางเลือกที่เหมาะสมกับเกษตรกรทั่วไปเนื่องจากระบบการทำงานไม่ซับซ้อน

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์นั้น ได้มีการศึกษาการอบแห้งปลานิลด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกพบว่าสามารถลดความชื้นปลานิลจาก 80.0% w.b. (wet basis; มาตรฐานเปียก) จนเหลือ 25.8% w.b. สามารถลดความชื้นได้มากกว่าการตากแดดธรรมดาถึง 6.2% w.b. นอกจากนี้ยังพบว่าลักษณะของการเตรียมปลานิลส่งผลต่อค่าความชื้นและค่าวอเตอร์แอกทิวิตี แต่ไม่ส่งผล

ต่อค่าสีของผลิตภัณฑ์อบแห้งให้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ [6] การศึกษาประสิทธิภาพโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับความร้อนเสริมจากอินฟราเรดสำหรับการอบแห้งมะเขือเทศราชินีแช่แข็ง พบว่าระบบความร้อนเสริมมีค่าประสิทธิภาพทางความร้อนสูงกว่าโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ และมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำกว่าโดยเฉลี่ย 29.74% ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่า คือ 2 วัน ในขณะที่การอบแห้งด้วยระบบโรงเรือนและการตากแดดใช้เวลา 3 และ 6 วัน ตามลำดับ [7] การใช้โรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับเครื่องอบลมร้อนแบบชั้นวาง โดยใช้ก๊าซหุงต้มเป็นเชื้อเพลิง พบว่าการนำพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์มาใช้ในการทำแห้งถือว่าเป็นพลังงานสะอาดและประหยัดพลังงานเมื่อเทียบกับการใช้ LPG เพียงอย่างเดียว การใช้ระบบผสมผสานนี้สามารถแก้ปัญหาระยะเวลาในการอบแห้งได้กรณีที่แสงแดดไม่เพียงพอ [8] นอกจากนี้ยังมีการสร้างเครื่องอบแห้งโรงเรือนแสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ใช้โพลีคาร์บอเนต โดยทำการอบพริก กลัวย และกาแฟ ทดลองอบกลัวย 1,000 กิโลกรัม ความชื้นเริ่มต้น 70% w.b. ใช้เวลา 5 วัน เทียบกับการใช้แสงอาทิตย์จะใช้ระยะเวลา 7 วัน ภายใต้สภาวะที่ใกล้เคียงกัน ทดลองอบพริก 300 กิโลกรัม ที่ความชื้นเริ่มต้น 75% w.b. ใช้เวลา 3 วัน เปรียบเทียบกับธรรมชาติจะใช้ระยะเวลา 5 วัน อบเมล็ดกาแฟ 200 กิโลกรัม ที่ความชื้นเริ่มต้น 55% w.b. ใช้เวลา 2 วัน โดยธรรมชาติจะใช้ระยะเวลา 4 วัน นอกจากนี้การอบแห้งโดยใช้โรงเรือนพลังงานแสงอาทิตย์สามารถป้องกันแมลง สัตว์ต่างๆ รวมถึงฝนได้ ทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ค่อนข้างดี ระยะเวลาการคืนทุนประมาณ 2.5 ปี [9]

งานวิจัยนี้ทางชุมชนเป็นผู้กำหนดโจทย์ เพื่อช่วยแก้ปัญหาและยกระดับคุณภาพชีวิตของชุมชน เพื่อให้ตรงตามความต้องการ และสอดคล้องกับกรอบยุทธศาสตร์ชาติระยะ 20 ปี (พ.ศ. 2560-2579) ตลอดจนนโยบายประเทศไทย 4.0 และยุทธศาสตร์จังหวัด เพื่อให้สามารถขับเคลื่อนประเทศไปสู่เป้าหมายเดียวกันได้ ดังนั้นใน

งานวิจัยนี้ จะทำการทดลองอบแห้งแบ่งทำยายม่อมโดยใช้โรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีระบบโซลาร์เซลล์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าใช้กับพัดลมดูดความชื้น ซึ่งถือว่าเป็นเทคโนโลยีที่สามารถตอบโจทย์ของกลุ่มเกษตรกรข้างต้นได้ดี เนื่องจากใช้งานง่าย สะดวกต่อการบำรุงรักษาและไม่เพิ่มต้นทุนทางด้านการผลิตให้กับเกษตรกร โดยทำการศึกษาอัตราการอบแห้ง สี ปริมาณน้ำอิสระ และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง โดยทำการเปรียบเทียบกับการทำแห้งแบบตากแดดโดยธรรมชาติและหวังว่าเทคโนโลยีนี้จะเป็นทางเลือกใหม่ในการอบแห้งของชุมชนและสามารถประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์อื่นได้ต่อไป

2. อุปกรณ์เครื่องมือและวิธีการทดลอง

2.1 เครื่องอบแห้งโรงเรือนพลังงานแสงอาทิตย์

โรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ดังรูปที่ 1 มีขนาด 1.04x1.25 เมตร ครอบด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนตใส แผ่นพื้นปูด้วยไม้อัดแข็งขนาด 1.5 เซนติเมตรและปิดทับด้วยแผ่นสแตนเลสหนา 0.5 มิลลิเมตร ติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ขนาด 20 W เพื่อใช้กับพัดลม DC ขนาด 3 นิ้ว ที่ติดตั้งไว้ด้านหลังโรงเรือนจำนวน 2 ตัว สำหรับใช้ดึงความชื้นออกจากระบบ ซึ่งปัจจัยการทำงานของพัดลมจะขึ้นอยู่กับความชื้นของรังสีอาทิตย์เป็นหลัก ถ้าความชื้นมากจะส่งผลให้อัตราการอบแห้งสูงซึ่งก็จะสอดคล้องกับพัดลมที่หมุนเร็วขึ้นเพื่อดึงความชื้นออกไป ด้านหน้ามีช่องให้อากาศเข้าขนาด 8x20 เซนติเมตร จำนวน 2 ช่อง มีตะแกรงลวดปิดเพื่อป้องกันแมลง ความจุในการอบแห้งได้ครั้งละ 20 กิโลกรัม และลักษณะสำคัญอีกอย่างหนึ่งของโรงเรือนนี้คือ ติดล้อแบบล็อกได้ขนาด 2 นิ้ว ที่ฐานของโรงเรือนจำนวน 4 ตัว ทำให้สามารถเคลื่อนย้ายหรือเคลื่อนที่โรงเรือนได้สะดวก เหมาะกับการใช้งานในชุมชน เพราะบางช่วงอาจมีการบังเงาในแต่ละเวลา มีการเก็บค่าปริมาณความชื้นรังสีอาทิตย์ด้วยเครื่อง Pyranometer ยี่ห้อ Kipp & Zonen รุ่น CMP11 ช่วงการใช้งาน -40°C ถึง 80°C ความคลาดเคลื่อน <1% วัดค่าอุณหภูมิด้วยสายเทอร์โมคัปเปิล type K ร่วมกับ Data Logger ยี่ห้อ

GRAPHTEC รุ่น midi Logger GL800 ความเร็วการบันทึกผลอยู่ที่ 100 ms ถึง 1 hr ค่าความถูกต้อง $\pm 1^{\circ}\text{C}$ วัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ด้วย Testo 610 ความแม่นยำ $\pm 2.5\% \text{RH}$ และชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งแบบดิจิทัลยี่ห้อ Sartorius รุ่น CP224S ความละเอียด 0.001 กรัม ทำการทดลอง ณ บ้านนาบหม้อ ตำบลบ้านปึก อำเภอเมืองชลบุรี พิกัดละติจูด $13^{\circ}18'38.6''\text{N}$ และลองจิจูด $100^{\circ}55'25.5''\text{E}$



รูปที่ 1 โรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

2.2 วิธีการทดลอง

ในการทดลองอบแห้งแป้งเต้ายายม่อมด้วยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีขั้นตอนการเตรียมผลิตภัณฑ์ดังนี้ 1) ปลอกเปลือกหัวเต้ายายม่อมออก และแช่ทิ้งไว้ในน้ำสะอาด 2) นำมาใส่เครื่องบดให้ละเอียดเพื่อกรองเอาน้ำแป้ง 3) แขน้ำทิ้งไว้และเททิ้งหลายๆ รอบจนได้เนื้อแป้งตกผลึกเป็นสีขาว ดังแสดงในรูปที่ 2 และ 4) นำใส่ถาดทึบเพื่อเข้าสู่กระบวนการอบแห้ง โดยใช้โรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์และการตากแดดโดยธรรมชาติ



รูปที่ 2 ลักษณะหัวเต้ายายม่อมและน้ำแป้ง

การทดลองการอบแห้งนี้ได้ใช้ตัวอย่างครั้งละ 20 กิโลกรัม โดยนำเข้าโรงเรือนอบแห้งและตากแดดอย่างละ 10 กิโลกรัม ทดลองทั้งหมด 2 ครั้ง โดยนำตัวอย่างบางส่วนเอาไปชั่งน้ำหนักและนำไปอบแห้งในตู้อบแห้งแบบลมร้อน เพื่อเป็นข้อมูลในการความค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ตามมาตรฐาน AOAC [10] จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ไปทำการอบแห้งโดยใช้โรงเรือนอบแห้งแสงอาทิตย์และนำไปตากแดดเพื่อทำการเปรียบเทียบกัน ทำการทดลองตั้งแต่วันที่ 8.00 น. ถึง 17.00 น. ทำการบันทึกน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ทุกๆ 30 นาที อบแห้งแป้งเต้ายายม่อมจากความชื้นเริ่มต้นประมาณ 80% d.b. จนได้ความชื้นสุดท้ายประมาณ 15% d.b. จากนั้นนำผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งไปวิเคราะห์คุณภาพในลำดับต่อไป

2.3 การหาความชื้นของผลิตภัณฑ์

การหาความชื้นของแป้งเต้ายายม่อม สามารถทำได้โดยนำแป้งเต้ายายม่อมไปอบแห้งในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง [10] เพื่อหาน้ำหนักแห้งของแป้งเต้ายายม่อม แล้วนำค่าได้ไปคำนวณหาปริมาณความชื้น (Moisture content) ได้จากสมการที่ (1) [3]

$$MC = \frac{w - d}{w} \quad (1)$$

เมื่อ MC คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (d.b.)

w คือ น้ำหนักเปียกของแป้งเต้ายายม่อม (g)

d คือ น้ำหนักแห้งของแป้งเต้ายายม่อม (g)

อัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio) คือ สัดส่วนของปริมาณน้ำที่ยังเหลืออยู่ภายในวัสดุที่กำลังอบแห้งกับปริมาณน้ำทั้งหมดที่อยู่ในวัสดุก่อนอบแห้ง [11] สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2) [3]

$$MR = \frac{M_t - M_{eq}}{M_i - M_{eq}} \quad (2)$$

หรือ
$$MR = \frac{M_t}{M_i} \quad (3)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น (decimal)

M_t คือ ความชื้นที่เวลาใดๆ (d.b.)

M_i คือ ความชื้นเริ่มต้น (d.b.)

M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล (d.b.)

ความชื้นสมดุลของวัสดุมีค่าน้อยกว่าความชื้นเริ่มต้นและความชื้นที่เวลาใดๆ ของวัสดุค่อนข้างมาก ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ สามารถหาอัตราส่วนความชื้นได้ดังสมการที่ (3) [3]

2.4 การทดสอบคุณภาพด้านสี

ทดสอบคุณภาพด้านสีของแป้งเท้ายายม่อม ด้วยเครื่อง Spectrophotometer ยี่ห้อ KONICA MINOLTA รุ่น CM-3500d ใช้แสง Daylight ที่ 6,500 K ค่าความละเอียด 0.01 เป็นการทดสอบสีแบบ L a b และจะนำค่าสีของผลิตภัณฑ์หลังจากอบแห้งด้วยโรงเรือนพลังงานแสงอาทิตย์เปรียบเทียบกับสีของผลิตภัณฑ์จากการตากแดดตามธรรมชาติ โดยให้สีของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการตากแดดเป็นสีมาตรฐานที่ชุมชนยอมรับอยู่แล้ว [12] เพื่อดูว่าผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งโดยใช้โรงเรือนมีค่า ΔE แตกต่างกับการตากแดดมากน้อยเพียงใด ตามสมการที่ (4)

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \quad (4)$$

โดยที่ ΔE คือ ความแตกต่างของสีโดยรวม ΔL คือ ความแตกต่างของความสว่าง Δa คือ ความแตกต่างของความเป็นสีแดงถึงสีเขียว และ Δb คือ ความแตกต่างของความเป็นสีเหลืองถึงสีน้ำเงิน

2.5 การทดสอบค่าปริมาณน้ำอิสระ

ปริมาณน้ำอิสระหรือแอกทิวิตีของน้ำ (water activity, a_w) เป็นค่าที่แสดงระดับความชื้นที่มีผลต่อการเจริญของจุลินทรีย์ ซึ่งมีความสำคัญต่ออายุการเก็บรักษาและความปลอดภัยของอาหาร [13] มีค่าตั้งแต่ 0-1 สำหรับแป้งเท้ายายม่อมที่ผ่านการอบแห้งจัดอยู่ในประเภทอาหารแห้งซึ่งต้องมีค่าปริมาณน้ำอิสระไม่เกิน 0.6 โดยจะทำการทดสอบทั้งผลิตภัณฑ์ที่ตากแดดตามธรรมชาติและที่ผ่านการอบแห้งจากโรงเรือนพลังงาน

แสงอาทิตย์ โดยใช้เครื่องวัดค่าปริมาณน้ำอิสระ ยี่ห้อ Aqua lab รุ่น Series 3 TE ค่าความละเอียด 0.001

2.6 แบบจำลองเอมพิริคัล

แบบจำลองอบแห้งชิ้นบางหรือแบบจำลองเอมพิริคัลเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีรูปแบบการวิเคราะห์ที่ง่าย นิยมใช้วิเคราะห์การถ่ายเทมวลเพื่อทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของอาหารหรือวัสดุทางการเกษตรในช่วงเวลาที่อบแห้ง โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกแบบจำลองเอมพิริคัลที่ใช้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความชื้นของแป้งเท้ายายม่อมจำนวน 5 สมการ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แบบจำลองเอมพิริคัล [3, 11, 14, 15]

No.	Model name	Model equation
1	Newton	$MR = \exp(-kt)$
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$
3	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
4	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$
5	Verma et al.	$MR = a \exp(-kt) + (1-a)\exp(-gt)$

* a c g k และ n คือ ค่าคงที่ของการอบแห้ง และ t คือ เวลาในการอบแห้ง (ชั่วโมง)

การวิเคราะห์หาค่าคงที่ของสมการเอมพิริคัลในตารางที่ 1 จะใช้ข้อมูลความชื้นของแป้งเท้ายายม่อมจากการทดลอง นำไปวิเคราะห์สมการโดยใช้วิธีถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear regression) ซึ่งแบบจำลองที่ใช้ทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นของแป้งเท้ายายม่อมได้ดีที่สุดจะพิจารณาจากค่าทางสถิติ 3 ค่า คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) สูงที่สุด ผลรวมกำลังสองความคลาดเคลื่อน (Sum of squared error, SSE) และรากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMSE) ต่ำที่สุด [3, 11, 14] ดังสมการที่ (5)-(7)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - \overline{MR}_{exp})^2} \quad (5)$$

ปีที่ 16 ฉบับที่ 2 เดือน พฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2564

$$SSE = \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2 \quad (6)$$

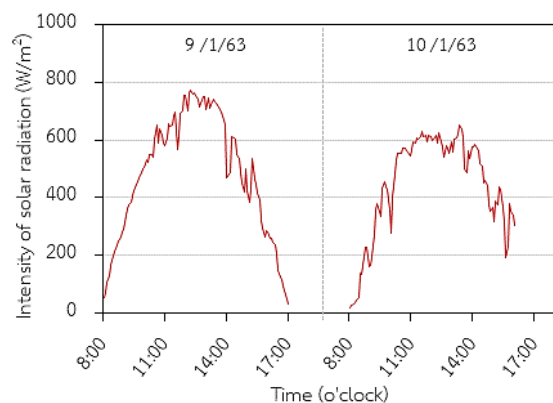
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2 \right]} \quad (7)$$

เมื่อ $MR_{exp,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นจากการทดลอง (decimal)

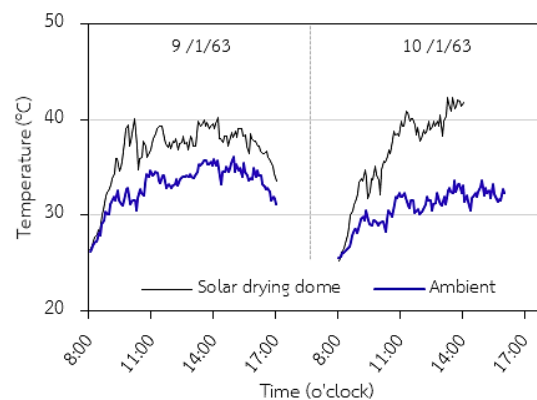
$MR_{pre,i}$ คือ อัตราส่วนความชื้นที่คำนวณได้จาก สมการเอมพิริคัล (decimal)

$\overline{MR}_{exp}$ คือ อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยของการ ทดลอง (decimal)

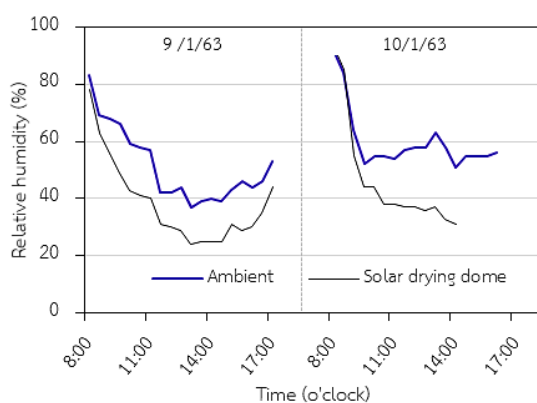
N คือ จำนวนข้อมูลในการทดลอง



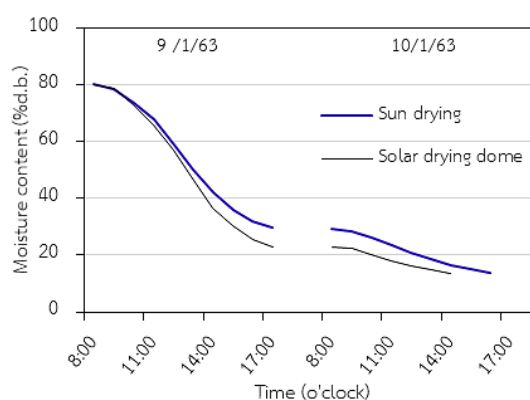
(ก) ความเข้มรังสีอาทิตย์



(ข) อุณหภูมิภายในโรงเรือนกับสิ่งแวดล้อม



(ค) ความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนและสิ่งแวดล้อม



(ง) การเปลี่ยนแปลงความชื้นของแป้งเท้ายายม่อม

3. ผลการทดลอง

3.1 จลนพลศาสตร์การอบแห้งแป้งเท้ายายม่อม

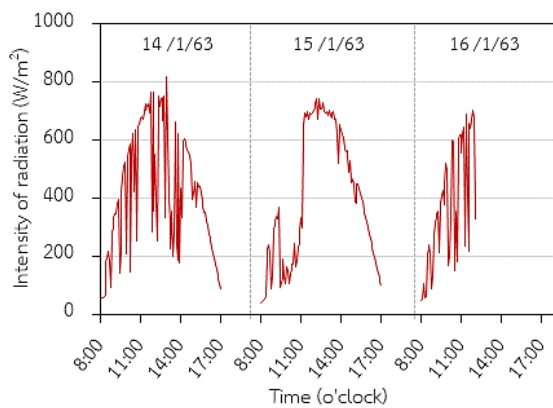
การทดลองนี้จะอบแห้งแป้งเท้ายายม่อมจนได้ความชื้นสุดท้ายประมาณ 15% d.b. โดยทดลองครั้งที่ 1 ในวันที่ 9-10 มกราคม 2563 ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์จะมีค่าสูงสุดในช่วงเวลา 10.00-14.00 น. ดังรูปที่ 3 (ก) โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 447.21 W/m² และให้ผลที่สอดคล้องกับอุณหภูมิภายในโรงเรือนอบแห้งและการตากแดดที่มีค่าสูงสุดในช่วงเวลาดังกล่าว โดยเฉลี่ย คือ 37°C และ 31°C ตามลำดับ ดังรูปที่ 3 (ข) ส่วนความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีค่าต่ำกว่าการตากแดด ดังรูปที่ 3 (ค)

รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลง ความเข้มรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความชื้นของแป้งเท้ายายม่อมที่อบแห้งโดยโรงเรือนพลังงานแสงอาทิตย์และการตากแดด ในวันที่ 9-10 มกราคม 2563

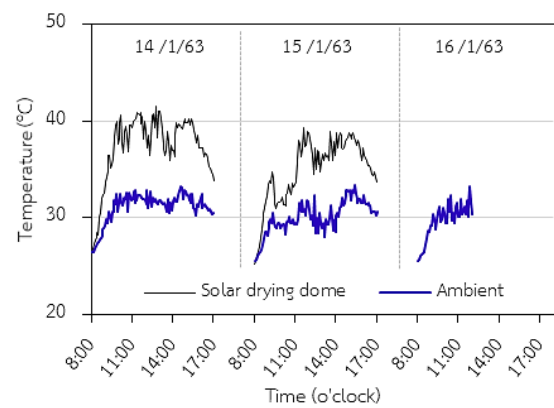
เนื่องจากมีอุณหภูมิอบแห้งที่สูงกว่าและมีพัดลมจากโซลาร์เซลล์ช่วยดึงความชื้นออกสู่ภายนอก ซึ่งจะส่งผลให้มีการลดความชื้นได้ดีกว่าการตากแดด ส่วนอัตราการลดความชื้นนั้นพบว่า ความชื้นจะลดลงตามระยะเวลาอบแห้งตามรูปที่ 3 (ง) โดยช่วงแรกของการอบแห้งความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเป็นช่วงที่ผลึกภัณฑ์ยังมีความชื้นสูง หลังจากนั้นจะค่อยๆ ลดลงจนเกือบคงที่ เมื่อพิจารณาจากเส้นกราฟการอบแห้งแบ่งทำยายม่อมด้วยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ใช้เวลา 14 ชั่วโมง การอบแห้งแบบดั้งเดิมคือการตากแดดตามธรรมชาติใช้เวลา 16 ชั่วโมง เนื่องจากอุณหภูมิภายในห้องอบแห้งสูงกว่าบรรยากาศภายนอกและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่า จึงส่งผลให้ระยะเวลา

การอบแห้งเร็วกว่าการตากแดดแบบธรรมชาติ และการอบแห้งทั้ง 2 วิธี ใช้เวลาไม่เกิน 2 วัน

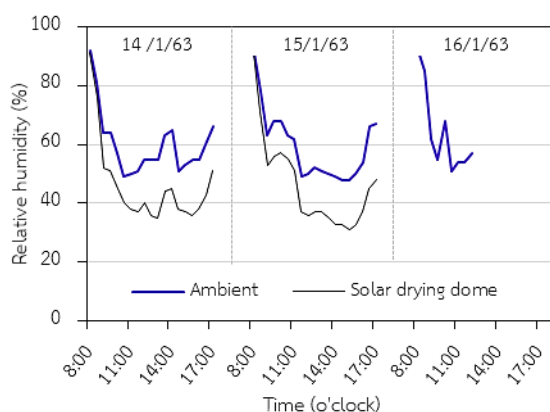
การทดลองครั้งที่สองในวันที่ 14-16 มกราคม 2563 ความเข้มของรังสีอาทิตย์มีค่าสูงสุดเฉลี่ยในช่วงเวลา 11.00-14.00 น. โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 409.32 W/m^2 แต่ค่าความเข้มของรังสีอาทิตย์ค่อนข้างจะแกว่งมาก ดังรูปที่ 4 (ก) เนื่องจากช่วงเวลาดังกล่าวท้องฟ้าปิดเป็นบางช่วง อุณหภูมิภายในโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ยังคงสูงกว่าการตากแดดโดยเฉลี่ยที่ 36.2°C และ 30.6°C ตามลำดับ ดังรูปที่ 4 (ข) ความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ต่ำกว่าการตากแดดดังรูปที่ 4 (ค) แสดงว่ายังมีความสามารถในการลดความชื้นได้ดีกว่าการตากแดด



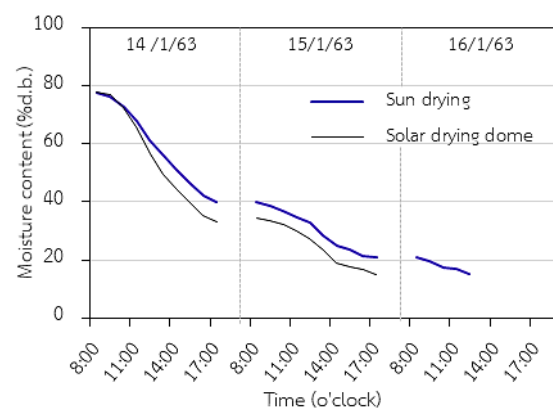
(ก) ความเข้มรังสีอาทิตย์



(ข) อุณหภูมิภายในโรงเรือนกับสิ่งแวดล้อม



(ค) ความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนและสิ่งแวดล้อม



(ง) การเปลี่ยนแปลงความชื้นของแป้งทำยายม่อม

รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงความเข้มรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความชื้นของแป้งทำยายม่อมที่อบแห้งโดยโรงเรือนพลังงานแสงอาทิตย์และการตากแดด ในวันที่ 14-16 มกราคม 2563

สำหรับอัตราการลดความชื้น พบว่า ความชื้นจะลดลงตามระยะเวลาอบแห้งตามรูปที่ 4 (ง) แต่เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองครั้งแรกจะเห็นว่าใช้ระยะเวลายาวนานกว่า เนื่องจากการทดลองครั้งแรกนั้นค่าความเข้มข้นสีอาทิตย์ค่อนข้างจะน้อยกว่าและมีความเข้มข้นที่สูงกว่านั่นเอง แต่อย่างไรก็ตาม การอบแห้งแบ่งทำยายม่อมด้วยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งแบบตากแดด ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองครั้งแรกเช่นกัน โดยใช้เวลา 18 ชั่วโมง และ 22 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าครั้งนี้นักอบแห้งโดยใช้โรงเรือนแสงอาทิตย์ใช้เวลา 2 วัน แต่การตากแดดจำเป็นต้องตากแห้งเพิ่มอีกในวันที่ 3 เพื่อให้ได้ความชื้นสุดท้ายที่ประมาณ 15% d.b.

3.2 คุณภาพด้านสีของแบ่งทำยายม่อม

ค่าสีของแบ่งทำยายม่อมหลังการอบแห้งด้วยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ พบว่า มีค่าความสว่างอยู่ในช่วง 77.21-78.61 ค่าสีแดงอยู่ในช่วง 0.63-1.47 และค่าสีเหลืองอยู่ในช่วง 2.26-3.58 ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สีของแบ่งทำยายม่อมหลังอบแห้ง

Method	L	a	b	ΔE
9/1/63 - 10/1/63				
Sun drying	77.32±2.08	1.64±0.06 ^a	4.12±0.12 ^a	N/A
Solar drying dome	78.61±1.37	1.47±0.13 ^b	3.58±0.27 ^b	1.76±0.01
14/1/63 - 16/1/63				
Sun drying	78.03±2.31	0.73±0.18 ^c	2.51±0.24 ^c	N/A
Solar drying dome	77.21±0.58	0.63±0.10 ^c	2.26±0.23 ^c	1.89±1.09

a-c means in the same column with different superscripts are significantly different ($p<0.05$) and ns mean that the data not statistically significant ($p>0.05$).

ในการทดลองครั้งที่ 1 จะเห็นได้ว่าค่าสีแดง a และค่าสีเหลือง b จะมีความแตกต่างกับสีของแบ่งทำยายม่อมที่ได้จากการตากแดด แต่การทดลองครั้งที่ 2 ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนค่าความแตกต่างของสีโดยรวม (ΔE) ค่อนข้างน้อย คือ 1.76 และ 1.89 ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วแบ่งทำยายม่อมจะมีความสว่าง (L)

ค่อนข้างมากเป็นหลักซึ่งอยู่ในโทนสีขาว ซึ่งการทดลองทั้งสองครั้งในการอบแห้งทั้งสองวิธีไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) จึงสรุปได้ว่าการใช้โรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ไม่ส่งผลกระทบต่อทางด้านคุณภาพสีโดยเฉพาะความสว่างของผลิตภัณฑ์ และอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้เมื่อเทียบกับการตากแดดแบบวิธีดั้งเดิม ดังรูปที่ 5



(ก) ตากแดด (ข) โรงเรือนแสงอาทิตย์

รูปที่ 5 แบ่งทำยายม่อมหลังการอบแห้งด้วยการตากแดดและโรงเรือนพลังงานแสงอาทิตย์

3.3 ปริมาณน้ำอิสระ (Water activity, a_w)

แบ่งทำยายม่อมที่อบแห้งด้วยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีค่าปริมาณน้ำอิสระอยู่ในช่วง 0.478-0.493 สำหรับการตากแดดแบบธรรมชาติอยู่ในช่วง 0.495-0.548 ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ปริมาณน้ำอิสระของแบ่งทำยายม่อม

Date	Method	a_w
9/1/63-10/1/63	Sun drying	0.548±0.002 ^a
	Solar drying dome	0.478±0.001 ^c
14/1/63-16/1/63	Sun drying	0.495±0.005 ^b
	Solar drying dome	0.493±0.002 ^b

a-c means in the same column with different superscripts are significantly different ($p<0.05$).

ในการทดลองครั้งที่ 1 ปริมาณน้ำอิสระจะมีความแตกต่างกันในเชิงสถิติ แต่การทดลองครั้งที่ 2 พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) แต่โดยรวมแล้วไม่มีตัวอย่างใดที่มีค่าปริมาณน้ำอิสระเกินค่าที่กำหนด

คือ 0.6 ดังนั้น แป้งเท้ายายม่อมที่ผ่านการอบแห้งทั้งสองวิธี สามารถเก็บรักษาได้ตามมาตรฐาน แต่การเก็บรักษาควรมีการป้องกันความชื้นจากภายนอกด้วย เนื่องจากอาหารประเภทแป้งจะสามารถดูดซับความชื้นจากบรรยากาศได้ค่อนข้างรวดเร็ว

3.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอมพิริคัล

ผลการวิเคราะห์ค่าคงที่ของสมการเอมพิริคัลในตารางที่ 1 และค่าทางสถิติของสมการที่ 5-7 ในการทำนายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของแป้ง

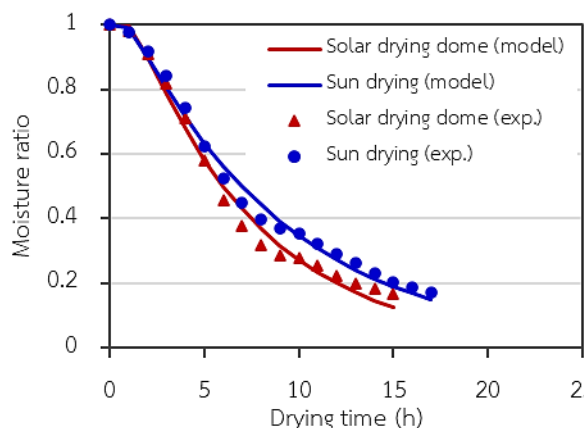
เท้ายายม่อมที่อบแห้งด้วยโรงเรือนพลังงานแสงอาทิตย์ และการตากแดดตามธรรมชาติได้ผลดังตารางที่ 4 และตารางที่ 5 ตามลำดับ ซึ่งพบว่า แบบจำลองของ Newton ทำนายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของแป้งเท้ายายม่อมได้ห่างจากผลการทดลองมากที่สุดหรือมีความคลาดเคลื่อนมากที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ต่ำที่สุด ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) และผลรวมกำลังสองความคลาดเคลื่อน (SSE) สูงที่สุด

ตารางที่ 4 ค่าคงที่ของแบบจำลองเอมพิริคัลในการอบแห้งแป้งเท้ายายม่อมด้วยโรงเรือนพลังงานแสงอาทิตย์

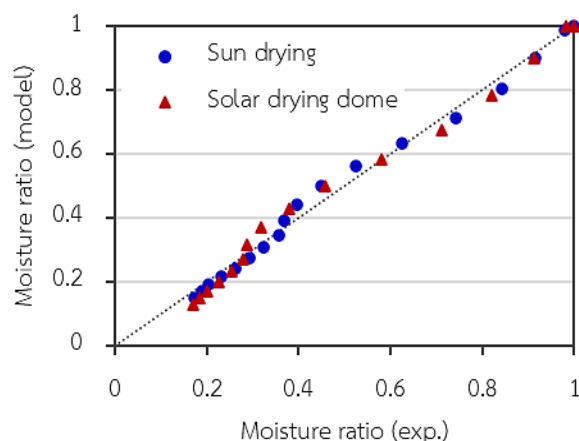
Date	Model	Constant	R^2	RMSE	SSE
9-10 Jan 2020	Newton	k = 0.11924	0.95609	0.06155	0.06062
	Page	k = 0.06553 n = 1.29193	0.97739	0.04417	0.03121
	Henderson and Pabis	a = 1.10073 k = 0.13331	0.97305	0.04822	0.03720
	Logarithmic	a = 1.13676 k = 0.12250 c = -0.04462	0.97358	0.04775	0.03648
	Verma et al.	a = -0.25018 k = 1.22637 g = 0.15252	0.98859	0.03137	0.01575
14-16 Jan 2020	Newton	k = 0.08667	0.97774	0.03858	0.02828
	Page	k = 0.06804 n = 1.10681	0.98159	0.03509	0.02339
	Henderson and Pabis	a = 1.05262 k = 0.09284	0.98396	0.03274	0.02037
	Logarithmic	a = 1.03016 k = 0.09773 c = 0.02698	0.98400	0.03271	0.02032
	Verma et al.	a = -0.08376 k = 24.76830 g = 0.09646	0.98743	0.02899	0.01597

ตารางที่ 5 ค่าคงที่ของแบบจำลองเอมพิริคัลในการอบแห้งแป้งเท้ายายม่อมด้วยการตากแดด

Date	Model	Constant	R^2	RMSE	SSE
9-10 Jan 2020	Newton	k = 0.10127	0.97213	0.04639	0.03873
	Page	k = 0.06547 n = 1.19829	0.98376	0.03542	0.02258
	Henderson and Pabis	a = 1.07864 k = 0.11096	0.98364	0.03555	0.02274
	Logarithmic	a = 1.09267 k = 0.10733 c = -0.01726	0.98371	0.03547	0.02265
	Verma et al.	a = -0.15662 k = 1.50214 g = 0.12017	0.99180	0.02516	0.01139
14-16 Jan 2020	Newton	k = 0.07031	0.98831	0.02749	0.01738
	Page	k = 0.04968 n = 1.14892	0.99275	0.02166	0.01079
	Henderson and Pabis	a = 1.04923 k = 0.07565	0.99402	0.01966	0.00889
	Logarithmic	a = 1.11378 k = 0.06757 c = -0.07159	0.99364	0.02028	0.00946
	Verma et al.	a = -0.07898 k = 2.09203 g = 0.07880	0.99640	0.01527	0.00536

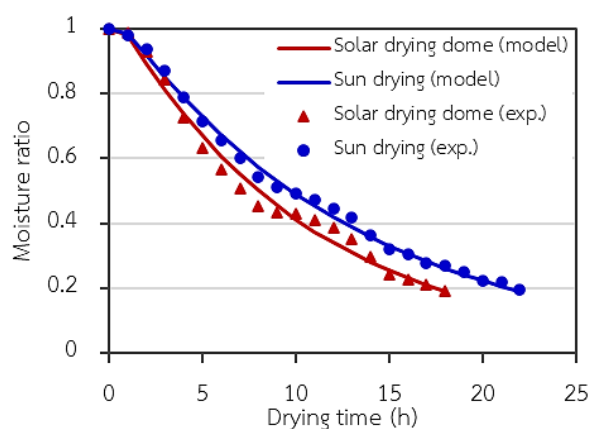


(ก) เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้น

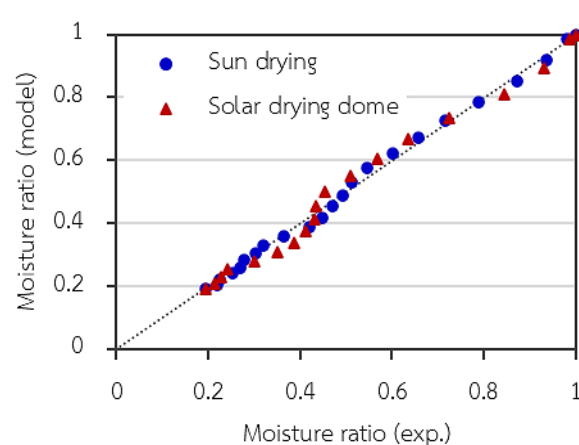


(ข) ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้น

รูปที่ 6 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นและความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นแป้งเท้ายายม่อม ระหว่างแบบจำลองของ Verma et al. กับการทดลอง ในวันที่ 9-10 มกราคม 2563



(ก) เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้น



(ข) ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้น

รูปที่ 7 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นและความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นแป้งเท้ายายม่อม ระหว่างแบบจำลองของ Verma et al. กับการทดลอง ในวันที่ 14-16 มกราคม 2563

ส่วนแบบจำลองของ Page, Henderson and Pabis และ Logarithmic สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของแป้งเท้ายายม่อมได้ดีพอสมควร โดยให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยและผลรวมกำลังสองความคลาดเคลื่อนดีกว่าแบบจำลองของ Newton ขณะที่แบบจำลองของ Verma et al. สามารถทำนายการ

เปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของแป้งเท้ายายม่อมที่อบแห้งด้วยโรงเรือนพลังงานแสงอาทิตย์ได้ใกล้เคียงกับการทดลองที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจอยู่ในช่วง 0.98743-0.98859 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.02899-0.03137 และผลรวมกำลังสองความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0.01575-0.01597 และแบบจำลองของ Verma et al.

สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของแป้งเท้ายายม่อมที่อบแห้งด้วยการตากแดดตามธรรมชาติได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองที่สุดเช่นกัน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจอยู่ในช่วง 0.99180-0.99640 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.01527-0.02516 และผลรวมกำลังสองความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0.00536-0.01139 ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 6 (ก) และรูปที่ 7 (ก) ที่แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นที่คำนวณได้จากสมการของ Verma et al. ให้ผลการทำนายใกล้เคียงกับผลการทดลอง นอกจากนี้เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นจากผลการทดลองและผลการทำนายจากแบบจำลองของ Verma et al. ดังแสดงในรูปที่ 6 (ข) และรูปที่ 7 (ข) พบว่า ส่วนใหญ่ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นเกาะกลุ่มกันอยู่ในแนวเส้นตรงความลาดชัน 45 องศา ดังนั้นแบบจำลองของ Verma et al. สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นของแป้งเท้ายายม่อมจากการอบแห้งทั้งสองวิธีการได้ดีที่สุด

4. สรุป

การอบแห้งแป้งเท้ายายม่อมโดยใช้โรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ในการเปรียบเทียบกับวิธีการตากแดดแบบดั้งเดิมนั้นพบว่า ในปริมาณความชื้นของแสงอาทิตย์ที่เท่ากัน ณ เวลาต่าง ๆ นั้น การใช้โรงเรือนแสงอาทิตย์ให้อัตราการอบแห้งที่สูงกว่า เนื่องจากอุณหภูมิภายในโรงเรือนจะสูงกว่าการตากแดดโดยเฉลี่ยที่ 6°C โดยการทดสอบครั้งแรกใช้เวลา 14 ชั่วโมง และ 16 ชั่วโมงตามลำดับ ลดระยะเวลาในการอบแห้งได้ 2 ชั่วโมงสำหรับการอบแห้งครั้งที่ 2 ใช้เวลา 18 ชั่วโมงและ 22 ชั่วโมงตามลำดับ สามารถลดระยะเวลาได้ 4 ชั่วโมง คุณภาพด้านสีของผลิตภัณฑ์อยู่ในเกณฑ์ที่ดีและยอมรับได้ ปริมาณน้ำอิสระที่อยู่ในเกณฑ์เป็นไปตามมาตรฐานของอาหารแห้งคือ ไม่เกิน 0.6 นั้นแสดงให้เห็นว่าการใช้โรงเรือนอบแห้งให้ผลทางเวลาและคุณภาพในเกณฑ์ที่ดี อีกทั้งยังสามารถป้องกันฝุ่นละออง แมลงต่างๆ และยัง

ยับยั้งความเสียหายให้กับแป้งเท้ายายม่อมในกรณีฝนตกได้ นอกจากนี้ยังพบว่า สมการเอมพิริคัลของ Verma et al. สามารถทำนายผลการอบแห้งแป้งเท้ายายม่อมด้วยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์และการตากแดดได้ดีที่สุด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจอยู่ในช่วง 0.98743-0.99640 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) อยู่ในช่วง 0.01527-0.03137 และผลรวมกำลังสองความคลาดเคลื่อน (SSE) อยู่ในช่วง 0.00536-0.01597

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) ในโครงการวิจัยและนวัตกรรมเพื่อถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่ชุมชนฐานราก วิชาสหกิจชุมชนบ้านปึกชลบุรี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ที่สนับสนุนงานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Mahidol University Foundation, "Arrowroot," Herbal Encyclopedia Isaan Medicine, vol. 4, Bangkok: Amarin Printing & Publishing Public, pp. 212, 2000.
- [2] Puechkaset. (2019, Nov. 10). Properties and planting arrowroots [Online]. Available: [https:// Puechkaset.com/ arrowroot/](https://Puechkaset.com/arrowroot/)
- [3] K. Witinantakit, N. Uengkimbuan and S. Rungsawang, "Mathematical modeling of shiitake mushroom drying using infrared-vacuum technique," *SWU Engineering Journal*, vol. 14, no. 3, pp. 1-13, Sep.-Dec. 2019.
- [4] C. Borompichaichartkul, K. Luengsode, N. Chinprahast and S. Devahastin, "Improving quality of macadamia nut (*Macadamia*

- integrifolia) through the use of hybrid drying process,” *Journal of Food Engineering*, vol. 93, no. 3, pp. 348-353, Aug. 2009.
- [5] S. Jaekhom and K. Witinantakit, “Drying kinetics of chicken using superheated steam technique,” *Kasem Bundit Engineering Journal*, vol. 9, no. 3, pp. 201-217, Sep.-Dec. 2019.
- [6] P. Pontecha and S. Cansee, “Tilapia Nilotica drying with solar greenhouse dryer,” *Thai Society of Agricultural Engineering Journal*, vol. 26, no. 2, pp. 58-64, Jul.-Dec. 2020.
- [7] T. Ongprasert and K. Jitjack, “A study of solar greenhouse drying in association with infrared heater for dehydration cherry tomatoes,” *Kasem Bundit Engineering Journal*, vol. 10, no. 3, pp. 62-83, Sep.-Dec. 2020.
- [8] W. Arekornchee, S. Pathaveerat, V. Thepent, A. Chaochote, U. Thanee and A. Senanarong, “Study on using solar greenhouse combined with tray dryer for vegetable and fruit drying,” *Thai Society of Agricultural Engineering Journal*, vol. 22, no. 1, pp. 39-45, Jan.-Jun. 2016.
- [9] S. Janjai , P. Intawee , J. Kaewkiewa, C. Sritus and V. Khamvongsa, “A large-scale solar greenhouse dryer using polycarbonate cover: Modeling and testing in a tropical environment of Lao People’s Democratic Republic,” *Renewable Energy*, vol. 36, no. 3, pp. 1053-1062, Mar. 2011.
- [10] AOAC. Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists. 17th ed. Maryland: Gaithersburg, 2000.
- [11] W. Jeentada, J. Jareanjit and P. Tippracha, “Drying experiment of rubber sheet using solar dryer with solar collector installed on top wall of the dryer,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 29, no. 1, pp. 23-33, Jan.-Mar. 2019.
- [12] S. Janjai, *Solar Drying Technology*, Nakhon Pathom: Phetkasem Printing Group, 2017.
- [13] P.P. Lewicki, “Water as the determinant of food engineering properties. A review,” *Journal of Food Engineering*, vol. 61, no. 4, pp. 483-495, Mar. 2004.
- [14] K. Witinantakit and S. Jaekhom, “Mathematical modeling of combined infrared and vacuum drying of galangals,” *Kasem Bundit Engineering Journal*, vol. 9, no. 3, pp. 29-44, Sep.-Dec. 2019.
- [15] L.R. Verma, R.A. Bucklin, J.B. Endan, F.T. Wratten, “Effects of drying air parameters on rice drying models,” *Trans. ASAE*, vol. 28, no. 1, pp. 296-301, Jan. 1985.

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิ (Reader)

ต้นฉบับบทความวิจัยที่ตีพิมพ์วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีที่ 16 ฉบับที่ 2 (เดือนพฤษภาคม - สิงหาคม พ.ศ. 2564) ได้รับการตรวจสอบแก้ไขจากผู้ทรงคุณวุฒิดังรายนามต่อไปนี้

- | | |
|---|---|
| 1. รองศาสตราจารย์ ว่าที่พันตรี ดร.อิทธิพร ศิริสวัสดิ์ | ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติ สถาพรประสาน | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 3. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มานะ สรรพกิจทิพากร | ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 4. รองศาสตราจารย์ รุ่งเรือง กาลศิริศิลป์ | ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 5. รองศาสตราจารย์ ดร.สมิตร ส่งพิริยะกิจ | ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม
คณะวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 6. รองศาสตราจารย์ ดร.เตือนใจ สมบูรณ์วิวัฒน์ | ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| 7. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพล สุกุลหลง | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา |
| 8. อาจารย์ ดร.วรินทร์ บุญยะโรจน์ | สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร |
| 9. อาจารย์ ดร.วศัญญา มีศรีสุข | สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม |
| 10. ดร.สิริลักษณ์ ประเสริฐกุลศักดิ์ | สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ |
| 11. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันฐณพงษ์ คงแก้ว | ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ |
| 12. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษฏางค์ ศุกระมูล | สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล
คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ |
| 13. อาจารย์ ดร.สุรารัตน์ หมั่นมี | คณะวิทยาศาสตร์ พลังงานและสิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 14. ศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ยอดสุดใจ | ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิ (Reader)

ต้นฉบับบทความวิจัยที่ตีพิมพ์วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีที่ 16 ฉบับที่ 2 (เดือนพฤษภาคม - สิงหาคม พ.ศ. 2564) ได้รับการตรวจสอบแก้ไขจากผู้ทรงคุณวุฒิดังรายนามต่อไปนี้

- | | |
|---|--|
| 15. อาจารย์ ดร.ว่าที่ร้อยตรีศักดาวุฒิ บุญคุ้ม | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก |
| 16. รองศาสตราจารย์ ดร.ธนิยา เกาศล | ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ |
| 17. อาจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ ธนศรีสถิตย์ | ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 18. อาจารย์ ดร.จิตกร กนกนัยการ | สาขาวิศวกรรมเครื่องกลและยานยนต์
คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |

คำแนะนำสำหรับผู้เขียนบทความลงตีพิมพ์
วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒจัดพิมพ์ปีละ 3 ฉบับ ฉบับที่ 1 ช่วงเดือนมกราคม – เมษายน ฉบับที่ 2 ช่วงเดือนพฤษภาคม – สิงหาคม และฉบับที่ 3 ช่วงเดือนกันยายน – ธันวาคม โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะให้เป็นการรวบรวมผลงานทางวิชาการและงานวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ซึ่งบทความที่ได้รับการตีพิมพ์ทุกบทความจะผ่านความการพิจารณาและความเห็นชอบจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาที่เกี่ยวข้องและสงวนสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พุทธศักราช 2521 และเผยแพร่แบบออนไลน์ทั่วประเทศ

1. การเตรียมต้นฉบับ

- 1) เป็นบทความวิจัย หรือบทความวิชาการ ที่มีความยาวไม่ควรน้อยกว่า 7 หน้า และไม่ควรเกิน 10 หน้า กระดาษ A4 พิมพ์ห่างจากขอบกระดาษด้านซ้าย 1.25 นิ้ว ด้านอื่น ๆ 1 นิ้ว
- 2) เป็นบทความที่ไม่ได้อยู่ระหว่างการพิจารณาตีพิมพ์ของสื่อสิ่งพิมพ์อื่น ๆ และไม่เคยได้รับการตีพิมพ์ในวารสารใด ๆ มาก่อน
- 3) ต้องไม่มีการละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่น ไม่มีการลอกเลียน หรือตัดทอนผลงานวิจัยของผู้อื่นโดยที่ไม่ได้รับอนุญาตและมีการอ้างอิงที่เหมาะสม
- 4) ชนิดและขนาดตัวอักษร ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษให้ใช้ตัวอักษร TH Sarabun New ซึ่งขนาดตัวอักษร มีรายละเอียดดังนี้
 - 6.1) ชื่อบทความ ใช้ตัวอักษรขนาด 18 pt. ตัวหนา
 - 6.2) ชื่อ-สกุลผู้เขียนบทความ ใช้ตัวอักษรขนาด 14 pt. ตัวปกติ
 - 6.3) หัวข้อหลัก ใช้ตัวอักษรขนาด 14 pt. ตัวหนา
 - 6.4) หัวข้อรอง ใช้ตัวอักษรขนาด 14 pt. ตัวเอียง
 - 6.5) เนื้อเรื่องในหัวข้อหลักและหัวข้อรอง ใช้ตัวอักษรขนาด 14 pt. ตัวปกติ
 - 6.6) เนื้อเรื่องในตาราง ใช้ตัวอักษรขนาด 14 pt. ตัวปกติ

รูปแบบการเขียนบทความ ควรมีหัวข้อเรียงเรียงตามลำดับดังต่อไปนี้

ชื่อเรื่อง ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ โดยมีข้อความที่กระชับ ได้ใจความ และบ่งบอกบทความได้อย่างชัดเจน

ชื่อผู้เขียน ให้ระบุชื่อ นามสกุล ตำแหน่ง หน่วยงานและที่อยู่ของผู้เขียนทุกคน โดยหากบทความเป็นภาษาไทยให้ระบุชื่อผู้เขียนเฉพาะภาษาไทยเท่านั้น

บทคัดย่อ บทคัดย่อต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ

คำสำคัญ (Keyword) คำสืบค้นที่เกี่ยวข้องกับบทความ ต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ

บทนำ กล่าวถึงความสำคัญของปัญหาและภูมิหลังของการวิจัย รวมไปถึงวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ตัวเนื้อหา อธิบายถึงอุปกรณ์ หรือวิธีการที่ใช้ในการวิจัย บรรยายผล และวิจารณ์ผล สามารถแตกออกเป็นหลายหัวข้อได้

สรุป บรรยายถึงบทสรุปของงานวิจัย

กิตติกรรมประกาศ ขอขอบคุณสนับสนุน หรือบุคคล (ถ้ามี)

เอกสารอ้างอิง ให้เขียนเอกสารอ้างอิงโดยใช้วิธีเรียงตามลำดับก่อนหลังที่พบในบทความ ในรูปแบบตัวเลขในวงเล็บเหลี่ยม สำหรับรูปแบบการพิมพ์รายการเอกสารอ้างอิง ใช้รูปแบบ IEEE ดังรายละเอียดและตัวอย่างในไฟล์แม่แบบ (template) ซึ่งดาวน์โหลดได้ที่ <http://eng.swu.ac.th/re.html>

2. วิธีการส่งบทความ

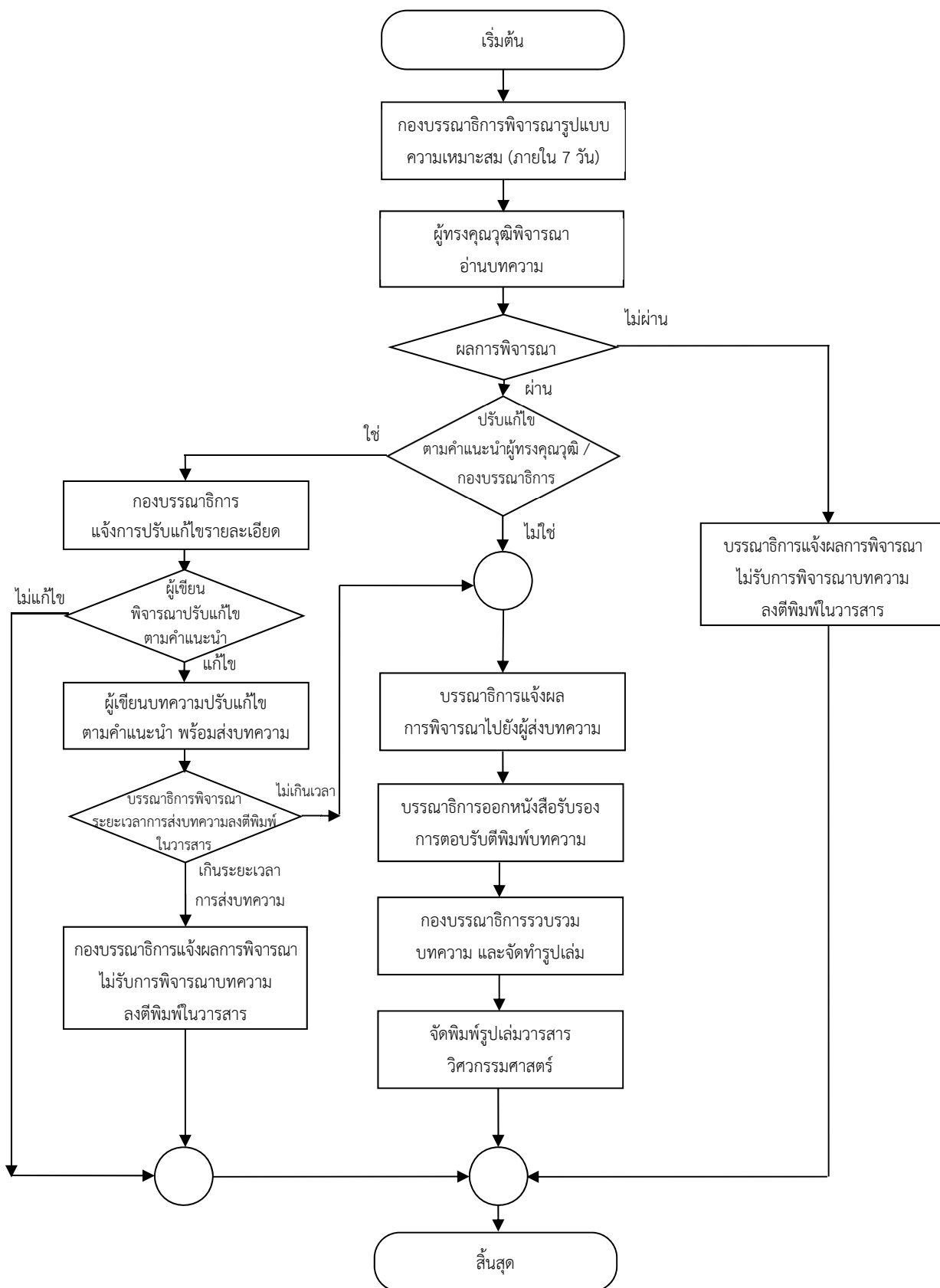
- 1) ส่งต้นฉบับบทความ ไฟล์ Microsoft Word และ pdf พร้อมแนบไฟล์สแกนแบบเสนอผลงานวิชาการเพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
- 2) ส่งไฟล์ต้นฉบับทางออนไลน์ที่
<https://www.tci-thaijo.org/index.php/sej/login>
- 3) ดูข้อมูลวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒเพิ่มเติม และดาวน์โหลดแบบฟอร์มประกอบการส่งบทความ ได้ที่ <http://eng.swu.ac.th/re.html>

3. ขั้นตอนการประเมินบทความ

การประเมินบทความวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ มีขั้นตอนดังนี้

- 1) การทบทวนโดยผู้รู้เสมอ (peer review) โดยผู้ทรงคุณวุฒิตั้งน้อยสองคนในสาขาที่เกี่ยวข้องแบบอำพรางฝ่ายเดียว (double-blind)
- 2) การเขียนตอบข้อซักถามและการแก้ไขปรับปรุงต้นฉบับตามข้อคิดเห็น (comments) ของผู้ทรงคุณวุฒิ โดยผู้เขียน และการพิจารณาอีกครั้งโดยผู้ทรงคุณวุฒิคนเดิม หากผู้ทรงคุณวุฒิได้แจ้งความประสงค์ขอพิจารณาอีกครั้งไว้
- 3) การประชุมกองบรรณาธิการเพื่อพิจารณาผลการทบทวนโดยผู้รู้เสมอจากผู้ทรงคุณวุฒิ และการแก้ไขปรับปรุงต้นฉบับ เพื่อตัดสินใจว่าจะตอบรับหรือไม่ในขั้นสุดท้าย
- 4) สำหรับบทความที่ได้รับการตอบรับ กองบรรณาธิการจะพิจารณาความถูกต้องของรูปแบบเพื่อแจ้งผู้เขียนแก้ไข
- 5) บรรณาธิการออกหนังสือรับรองการเผยแพร่ให้ผู้เขียน โดยมอบไว้กับผู้เขียนหลัก

ขั้นตอนการพิจารณาผลงานเพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารคณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ





คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

เลขที่ 63 หมู่ 7 ถนนรังสิต - นครนายก

อำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายก 26120

โทร 0 2649 5000 ต่อ 27560 27070

โทรสาร 0 3739 5527

<http://eng.swu.ac.th>

บทความวิจัย

- การเพิ่มศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากผักตบชวาโดยการให้ความร้อนจากแสงอาทิตย์และการหมักร่วม
Enhancement of Biogas Production Potential of Water Hyacinth (Eichhornia Speciosa Kunth) using Integrated Solar Radiation and Co-Digestion
ญาณิกา อุทกขมาลิต เสฏฐา ศาสนนันท์
- กำลังอัด การดูดซึมน้ำ และการแทรกซึมคลอไรด์ของมอร์ตาร์ในระบบวัสดุประสานสามชนิดด้วยกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าลอย
Strength, Water Absorption and Chloride Penetration of Mortar in Ternary Blends System with Calcium Carbide Residue and Fly Ash
ปยุตต์ วัฒนวิจิตร วังษ์สุวดี สำเริง รักซ้อน ปริญา จินดาประเสริฐ
- ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเปียก
Chloride Penetration Resistance of Concrete with Wet Fly Ash
ทวีชัย สำราญวานิช ลีน่า ปริก
- อิทธิพลของความแตกต่างของอุณหภูมิในการอบแห้งที่มีต่อสารหอม (2AP) ข้าวหอมปทุม
Influence of drying operating temperature difference on aroma (2AP) of Thai Pathumthani Fragrant Rice
สมพจน์ คำแก้ว
- การยอมรับต่อการนำน้ำเสียหลังผ่านการบำบัดกลับมาใช้ใหม่ กรณีศึกษา มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์
Social Acceptance for Reclaimed Wastewater Use: A Case Study in Srinakharinwirot University Ongkharuk Campus
ภัทรา เตชสุทธีกร สุจิตา ที่ปรึกษพันธ์ สุตา อิทธิสุภรณ์รัตน์
- กำลังรับแรงดัดของแผ่นซีเมนต์เส้นใยที่ใช้เศษแผ่นยิปซัมนำกลับมาใช้ใหม่แทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน
Flexural Strength of Fiber-Cement Sheets using Recycled Gypsum Board as Partial Fine Aggregate Replacement
บุรฉัตร กิตติกรจรัส นุช เหมะหมัด กฤติน เปี่ยมปรีชารัตน์ มนต์สิทธิ์ งามทรัพย์ อนุวัฒน์ อรรถไชยวุฒิ
- ผลของการติดตั้งมิเตอร์ไฟฟ้าที่มีต่อการวัดพลังงานไฟฟ้าของมิเตอร์ไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ ระบบ 1 เฟส
The effect of installation angle on the electrical energy measurement of an induction type single phase kilowatt hour meter
พิเชษฐกรณ์ พิมพ์อักษร อาคม แก้วระวีง สวงน บุญปัญญารักษ์
- การอบแห้งแป้งท้าวยายม่อมด้วยโรงเรือนอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์
Arrowroot Flour Drying Using Solar Drying Dome 94
ศรียา แก้วคำ กิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์ รินจง เสริมศรี

บทความวิชาการ

ปัจจัยที่มีผลต่อความสำเร็จในการร่วมขนส่งของผู้ผลิตในการค้าปลีกสมัยใหม่

Key Success Factor for Manufacturer Joint Delivery System in Modern Trade

ดวงพรรณ กริชชาอุทัย มนสิชา ธนกาญจน์โรจน์ ศรีวิมล พันธุ์วงศ์ ปฎิพล เอี่ยมวัฒนศิลป์ ศิริรัตน์ ศรีสกุลวรรณ