

การเพิ่มประสิทธิภาพการบำรุงรักษากระบวนการพ่นสีฝุ่นในโรงงานผลิตผ้าเบรก Efficiency Improvement for Powder Coating Process in Brake Lining Factory โดย : ประเสริฐ บุญรอด และประจวบ กล่อมจิตร	หน้า 1
การใช้เศษต้นมันสำปะหลังเป็นมวลรวมน้ำหนักเบาสำหรับผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อกแก้วกลบชนิดรับน้ำหนัก Using Cassava Pit Waste as Light Weight Aggregate for Hollow Load Bearing Concrete Masonry Mixed with Rice Husk Ash Product โดย : กิตติพันธ์ บุญโตสตรระกุล กิตติพงษ์ สุวิโร และปราโมทย์ วีรานุกูล	13
การใช้ประโยชน์จากเศษถนนยางมะตอยเก่าสำหรับผลิตภัณฑ์แผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้น Utilization of Old Asphalt Road Waste to Produce Concrete Flooring Tile Product โดย : วิหาร ตีปัญญา และกิตติพงษ์ สุวิโร	23
การคัดเลือกเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่เหมาะสมจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรโดยใช้เทคนิคประสิทธิภาพแบบไขว้ Selection of the Suitable Biomass Fuel Briquettes Generated from Agricultural Waste Using DEA-Cross-efficiency โดย : วรณรพ ชันธิรัตน์ นรงค์ วิชาผา อนุชา ศรีบุรัมย์ และอุทัย ธารพศรี	33
การตรวจจับการล้มสำหรับผู้สูงอายุและจำแนกข้อมูลกิจกรรมการเคลื่อนไหวด้วยอัลกอริทึม Weighted k-Nearest neighbor บนระบบฝังตัวแบบพกพาที่ใช้ IoT Fall Detection for Elderly and Data Classification Movement Activity Using Weighted K-Nearest neighbor Algorithm on a IoT-based Portable Embedded System โดย : ชัยวุฒิ วุทธิสิทธิ์	45
การประยุกต์ใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการหาความเหมาะสมในการเชื่อมพื้ดาดฟ้าเรือขนส่งสินค้า Application of Artificial Neural Network Model for Optimization in Main Deck Cargo Ship Welding โดย : ปรัชญา เพ็ญสุระ และภาสพิชญ์ ชูใจ	57
การพัฒนาแผ่นกระเบื้องหลังคาจากเส้นใยทะลายปาล์มและต้นธูปฤาษีเพื่อชุมชน Development of Roof Tiles Made from Palm Fibers and Typha Angustifolia L Fibers for Communities โดย : นิตยา พัดเกาะ กิตติศักดิ์ บัวศรี และประยูร สุรินทร์	69
การพัฒนาผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นผสมเศษขวดพลาสติกสีประเภทพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลตที่เหลือทิ้งจากการบริโภค Development of Interlocking Concrete Paving Block Product Mixed with Colored Polyethylene Terephthalate Plastic Bottle from Post-Consumer Waste โดย : กิตติพงษ์ สุวิโร และประชุม คำพุด	81

การวิเคราะห์ความสามารถที่สังเกตได้ในการประมาณค่าสถานะสำหรับระบบไฟฟ้าด้วยขั้นตอนวิธี เชิงพันธุกรรม Analysis of Observability of Power System State Estimation using Genetic Algorithm Technique โดย : ศศิพร ผลไพศาลศักดิ์ ระดมบุญ ทักษนา ยุทธนา คงจีน และกฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์	91
การวิเคราะห์คุณลักษณะและประสิทธิภาพการกำจัดสีของเถ้าลอยที่มีการผสมตัวเร่งปฏิกิริยา เชิงแสงไททาเนียมไดออกไซด์ Characterizations and Its Efficiency on Dye removal of Fly Ash Mixed with Titanium Dioxide Photocatalyst โดย : บุญยาพร สงขนาม อำพล วงศ์ษา วันชัย สะตะ และกิติโรจน์ หวันตาหลา	101
การศึกษาเปรียบเทียบสมบัติโลหะเชื่อมพอกแข็งบนเหล็กกล้ารางรถไฟเกรด 900 ด้วยลวดหุ้มฟลักซ์ H450R และ E120-18G Comparative Study of Hard-facing Weld Metal Properties on Grade 900 Railway Steel using H450R and E120-18G SMAW Electrodes โดย : ธงชัย เครือผือ	111
การศึกษาและทดสอบชุดคัดขนาดเมล็ดบัวหลวง Study and Testing of Lotus Seeds Sizing Unit โดย : จตุรงค์ ลังกาพินธุ์ สุนัน ปานสาคร รุ่งเรือง กาลศิริศิลป์ เกรียงไกร แซมสีม่วง มรกต ภูคำทอง และพิเชฐ สุวรรณวิจิตร	121
การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยการปรับจูนแบบคลุมเครือสำหรับควบคุมอัตราเร็วรอบ เครื่องยนต์แก๊ซลิ้น Design of Fuzzy Tuned PID Controller for Speed Control of a Gasoline Engine โดย : เอกณรงค์ ไชยงค์	131
เครื่องสีข้าวขนาดเล็กสำหรับใช้ในครัวเรือนควบคุมโดย Arduino Uno R3 Small Rice Milling Machine for Using in Household Controlled by Arduino Uno R3 โดย : สุรินทร์ แหวมงาม ศศิวรรณ อินทรวงศ์ ภูวดล วัฒนารุ่งเรือง และณัฐวุฒิ หอมสิน	143
พอลิโพรพิลีนและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นผนังสองชั้นในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน ขั้นตอนเดียวที่อัตราความเร็วรอบการหมุนสูง Polypropylene and Linear Low-Density Polyethylene Two-Layered in Single-Step Rotational Molding at the High-Speed Rotating โดย : เอกตินัย จันทรศรี จิตาภา กรมสุริยศักดิ์ จักรภัทร ปรีดาวัฒน์ และณรงค์ชัย โอเจริญ	153
Investigation of Chloride Penetration and Steel Corrosion in Repaired Concrete after Exposure to Marine Environment of Thailand By : Lyna Prak and Taweechai Sumranwanich	165



วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏธนบุรี

คณะกรรมการจัดทำวารสาร วิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏธนบุรี

คณะกรรมการที่ปรึกษา

อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ
คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

กองบรรณาธิการ

ศ.ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ
รศ.ดร.สุธี อักษรกิตติ
รศ.ดร.เข้มชัย เหมะจันทร์
รศ.ดร.ศิริวรรณ ศรีสรณ์
รศ.ดร.กัณวรัช พลุประชัย
รศ.ดร.ธำรงรัตน์ มุ่งเจริญ
รศ.ณรงค์ บวบทอง
ผศ.ดร.สมเจตน์ พันธ์พันธ์
ผศ.ดร.ปฐมทัศน์ จิระเดชะ
ผศ.ดร.อังคณา พันธุ์หล่อ
ดร.ชัชวาลย์ สุรัสวดี
ผศ.ดร.ศิวกร อ่างทอง
รศ.ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์
ผศ.ดร.จักรี ศรีนนท์ฉัตร
ผศ.สมศักดิ์ แก่นทอง
ผศ.ดร.สุนมาลย์ เนียมกลาง
ผศ.ดร.ธรรมศักดิ์ โรจน์วิรุฬห์
ผศ.ชวลิต แสงสวัสดิ์

ศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
คณะกรรมการบริหาร มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)
วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต
52/14 ถ.พหลโยธิน 45 แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
33 ซอยอุดมสุข แขวงบางนา เขตบางนา กรุงเทพฯ 10260

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

ดร.ปรกช สิริสุวัฒน์

เลขานุการ

นางสาวอมรรัตน์ ยิ้มอยู่

ผู้ช่วยเลขานุการ

นายอัศชนะ คูเจริญไพบูลย์

ผู้ดูแลระบบงานเทคโนโลยีสารสนเทศ

นายพัฒนร์พี สุนันทพจน์



Journal of Engineering, RMUTT

Editorial Board Members

Consultant Board Members

President of Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Vice President of Academic Affairs
Dean, Faculty of Engineering

Editorial Board

Prof.Dr.Narongrit Sombatsompop	Thai-Journal Citation Index (TCI)
Assoc.Prof.Dr.Sutee Auksonkitt	School of Aviation Eastern Asia University
Assoc.Prof.Dr.Khemchai Hemachandra	Faculty of Science Chulalongkorn University
Assoc.Prof.Dr.Siriwan Srisorrachatr	Faculty of Engineering Srinakharinwirot University
Assoc.Prof.Dr.Ganwarich Pluphrach	Faculty of Engineering Srinakharinwirot University
Assoc.Prof.Dr.Thumrongrat Mungcharoen	Faculty of Engineering, Kasetsart University
Assoc.Prof.Narong Buabthong	Faculty of Engineering Thammasat University
Asst.Prof.Dr.Somjate Patcharaphun	Faculty of Engineering, Kasetsart University
Asst.Prof.Dr.Pathomthat Chiradeja	Faculty of Engineering Srinakharinwirot University
Asst.Prof.Dr.Ankana Punlor	College of Engineering Rangsit University
Dr.Chadchawarn Surussavadee	52/14 Phaholyothin 45 Rd., Ladyao, Chatuchak, Bangkok 10900
Asst.Prof.Dr.Sivakorn Angthong	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Assoc.Prof.Dr.Krischonme Bhumkittipich	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Jakkree Srinonchat	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Somsak Kanthong	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Sumonman Niamlang	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Thammasak Rojviroon	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Chavalit Sangswasd	33 Soi Udomsuk 28 BangNa District Bangkok 10260

Editor in Chief

Dr.Porakoch Sirisuwan

Secretary

Miss Amonrat Yimyoo

Assistant Secretary

Mr.Uschana Koojarenphaiboon

System Administrator

Mr.Patrapee Sunantapot



วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏธนบุรี

บทบรรณาธิการ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏธนบุรี ฉบับนี้เป็นการตีพิมพ์ปีที่ 18 ฉบับที่ 1 ประจำเดือนมกราคม ถึง เดือน มิถุนายน ปีพุทธศักราช 2563 จำนวนบทความตีพิมพ์ 16 บทความ เพื่อคงคุณภาพในการเผยแพร่ผลงานทางวิชาการวารสารจึงได้มีการปรับเปลี่ยนและเพิ่มเติมสาระสำคัญของวารสารหลายๆ ด้าน อาทิเช่น ได้เปลี่ยนแปลงเลข ISSN ให้มีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้นจาก ISSN 1685-5280 เป็น ISSN 2730-2148 มีการเพิ่มเติมข้อกำหนดบทบาทหน้าที่จริยธรรมการตีพิมพ์ทั้งในส่วนบรรณาธิการวารสาร (Editor) ผู้นิพนธ์ (Author) และผู้ประเมินบทความ (Reviewer) โดยวารสารยังคงมุ่งมั่นที่จะเป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสู่สาธารณชนอย่างเสมอมา

ถึงแม้ว่าในช่วงระยะเวลาที่ผ่านมาตั้งแต่ช่วงต้นปี พ.ศ 2563 ประเทศไทยได้ประสบปัญหาในระดับโลกในสถานการณ์การแพร่ระบาดของโรคโควิด – 19 จนถึงปัจจุบัน แม้สถานการณ์การระบาดของโรคนี้ในประเทศไทยจะคลี่คลายไปด้วยดีและมีการผ่อนคลายมาตรการป้องกันต่าง ๆ มากขึ้น แต่การระบาดนี้ส่งผลกระทบต่อทุกด้าน สุขภาพ เศรษฐกิจ และสังคมต่อบุคคลทุกระดับชั้น รวมถึงผลกระทบทางด้านการศึกษา และ ด้านการวิจัยต่างๆ ที่มีการปรับเปลี่ยนให้ใช้เทคโนโลยี และสนับสนุนให้มีการพัฒนานวัตกรรมที่ช่วยป้องกันการแพร่ระบาดของโรคโควิด – 19 มากยิ่งขึ้น

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏธนบุรี หวังเป็นอย่างยิ่งว่าสถานการณ์การแพร่ระบาดนี้จะผ่านพ้นไปได้โดยเร็ววัน และขอภาวนาให้ทุกๆ ท่านมีสุขภาพ พลานามัยที่แข็งแรง ปราศจากโรคภัยต่างๆ สามารถก้าวข้ามวิกฤตนี้ไปได้ด้วยดี

กองบรรณาธิการ

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิผู้พิจารณาบทความ

รศ.จิราภรณ์ เบญจประกายรัตน์	คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ในพระบรมราชูปถัมภ์
รศ.ดร.พีระวุฒิ สุวรรณจันทร์	คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.ณัฐดนัย ตัณฑวิรุฬห์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน
รศ.ดร.สมเจตน์ พิชร์พันธ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
รศ.ดร.วันชัย ยอดสุดใจ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
รศ.ตรีเนตร ยิ่งสัมพันธ์เจริญ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.พันธุ์พงษ์ คงพันธุ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.ภาณุ ประทุมทรัพย์รัตน์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.สุรัตน์ ตรียานพงศ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.ปิติกานต์ กร้ามาตร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.มนูศักดิ์ จานทอง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ.ดร.จตุรงค์ ลังกาพินธุ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ.ดร.รุ่งเรือง กาลศิริศิลป์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.ณัฐชา เพ็ชรยิ้ม	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ.ดร.เกรียงไกร แซ่มสีม่วง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.พศยน นินทนางศา	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.นชิรัตน์ ราชบุรี	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ.ดร.นเรศ อินตะวงศ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา วิทยาเขตภาคพายัพ
ผศ.ดร.จุไรวัลย์ รัตนะพิสิฐ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รศ.ดร.ปานมนัส ศิริสมบุญ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.ณัฐพงศ์ ดำรงวิริยะนุภาพ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา
ผศ.ดร.ประกาศ เมืองจันทร์บุรี	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผศ.ดร.อังคณา พันธุ์หล่อ	วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต
รศ.ดร.อดิศักดิ์ กาญจนหฤทัย	วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต
ผศ.ดร.ภัควัฒน์ แสนเจริญ	สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

Peer Reviews

Assoc.Prof.Jiraporn Benjaphragairat	Faculty of Industrial Technology, Valaya Alongkorn Rajabhat University Under The Royal Patronage
Assoc.Prof.Dr.Peerawut Suwanjan	Faculty of Industria Education and Technology King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Asst.Prof.Dr.Natdanai Tantawiroon	Faculty of Engineering Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus
Assoc.Prof.Dr.Somjate Patcharaphun	Faculty of Engineering Kasetsart University
Assoc.Prof.Dr.Wanchai Yodsudjai	Faculty of Engineering Kasetsart University
Assoc.Prof.Trinet Yingsampangcharoen	Faculty of Engineering King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Asst.Prof.Dr.Panpong Komgpan	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Panu Pratumnopharat	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Surat Triwanapong	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Pradya Prempraneerach	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Pitisan Krammart	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Manusak Janthong	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Assoc.Prof.Dr.Jaturoung Lungapin	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Assoc.Prof.Dr.Roongruang Kalsirisilp	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Kittipong Kimapong	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Nattacha Phetyim	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Assoc.Prof.Dr.Grianggai Samseemoung	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Prusayon Nintanavongsa	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Nachirat Rachburee	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Naret Intawong	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Lanna
Asst.Prof.Dr.Juraivan Ratanapisit	Faculty of Engineering, Prince of Songkla University
Assoc.Prof.Dr.Panmanas Sirisomboon	Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Assoc.Prof.Dr.Nattapong Damrongwiriyanupap	Faculty of Engineering Phayao University
Asst.Prof.Dr.Prapas Muangjunburee	Faculty of Engineering Prince of Songkla University
Asst.Prof.Dr.Ankana Punlor	College of Engineering Rangsit University
Assoc.Prof.Dr.Adirak Kanchanaharuthai	College of Engineering Rangsit University
Asst.Prof.Dr.Pakawat Sancharoen	Sirindhorn International Institute of Technology

การเพิ่มประสิทธิภาพการบำรุงรักษา กระบวนการพ่นสีฝุ่นในโรงงานผลิตผ้าเบรก

ประเสริฐ บุญรอด^{1*} และประจวบ กล่อมจิตร²
boonrod_p2@su.ac.th^{1*}, klomjit_p@su.ac.th²

^{1*, 2} ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

Received	: 18-Feb-2020
Revised	: 19-Mar-2020
Accepted	: 20-Apr-2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจัดทำแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันของเครื่องพ่นสีฝุ่นเพื่อเพิ่มเวลาเฉลี่ยระหว่างการเสียหายหรือ MTBF (Mean time between failures) ของบริษัทผลิตผ้าเบรกแห่งหนึ่ง จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่า มีแนวโน้มของระยะเวลาเฉลี่ยระหว่างการเสียหายที่เครื่องจักรใช้งานลดลงในช่วงต้นปี 2562 ตั้งแต่เดือนมกราคม-มิถุนายน มีค่าเฉลี่ยระหว่างการเสียหายหรือ MTBF เท่ากับ 146 ชั่วโมงต่อเดือน จึงนำหลัก TPM หรือการบำรุงรักษาเชิงทวีผลโดยรวม (Total Productive Maintenance) มาปรับใช้ด้วยกัน 4 สาขาหลักได้แก่ 1.การปรับปรุงเฉพาะเรื่อง (Specific Improvement) 2.การบำรุงรักษาด้วยตนเอง (Autonomous Maintenance) 3.การบำรุงรักษาตามแบบแผน (Planned Maintenance) และ 4.การศึกษาและฝึกอบรม (Education/Training) ทำให้เครื่องจักรมีประสิทธิภาพมากขึ้นได้ หลังจากการปรับปรุงพบว่า ค่าเวลาเฉลี่ยระหว่างการเสียหาย หรือ MTBF มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตั้งแต่เดือนกรกฎาคม-พฤศจิกายน โดยก่อนปรับปรุงค่าเฉลี่ยเท่ากับ 146 ชั่วโมง/เดือน หลังปรับปรุงค่าเฉลี่ยเท่ากับ 165 ชั่วโมง/เดือน หรือเพิ่มขึ้น 13 %

คำสำคัญ: การบำรุงรักษาเชิงป้องกัน การบำรุงรักษาเชิงทวีผลโดยรวม เวลาเฉลี่ยระหว่างการเสียหาย เวลาเฉลี่ยในการซ่อมแซม

Efficiency Improvement for Powder Coating Process in Brake Lining Factory

Prasert Boonrod^{1*} and Prachuab Klomjit²
boonrod_p2@su.ac.th^{1*}, klomjit_p@su.ac.th²

^{1*, 2} Department of Industrial Engineering and Management, Graduate School, Silpakorn University

Received	: 18-Feb-2020
Revised	: 19-Mar-2020
Accepted	: 20-Apr-2020

Abstract

The purpose of this research was developing preventive maintenance plan for Powder Coating machine to increase the mean time between failures or MTBF of the Brake Lining Factory. From the initial study, it found that the values of mean time between failures tended to decrease. In the beginning of the year 2019 from January – June the mean time between failures was 146 hours per month. Thus, applied Total Productive Maintenance or TPM together with 4 pillars as follows 1. Specific Improvement 2. Autonomous Maintenance 3. Planned Maintenance and 4. Education/ Training. That could make the machine more efficient. The results showed in values of the mean time between failures. The trend was increasing in July - November, before improvement the average to 146 hours per month. After improvement, the average was 165 hours per month or an increase of 13%

Keywords: Preventive Maintenance, Total Productive Maintenance, Mean time between failures, Mean time to repair

1. บทนำ

ปัจจุบันมีการสนับสนุนการผลิตรถยนต์และชิ้นส่วนยานยนต์แบบใช้วิศวกรรมและเทคโนโลยีมากขึ้น มีแนวโน้มผลักดันให้มีการผลิตรถยนต์ขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้าในประเทศอาจกลายเป็นโอกาสสำหรับธุรกิจใหม่ๆ เพื่อให้สามารถรับมือกับการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ทำให้ผู้ประกอบการควรพัฒนาและปรับปรุงเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานให้มากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะด้านความพร้อมของเครื่องจักรในการผลิตการลดเวลาขัดข้องของเครื่องจักร (Break down) โดยใช้หลัก TPM หรือการบำรุงรักษาเชิงทวิผลโดยรวม (Total Productive Maintenance) หมายถึง ระบบการบำรุงรักษาที่ครอบคลุมตลอดช่วงอายุอุปกรณ์ นับตั้งแต่การวางแผน การผลิต การบำรุงรักษา และอื่นๆ โดยอาศัยความร่วมมือจากพนักงานทุกคน ตั้งแต่ฝ่ายบริหารระดับสูงจนถึงพนักงานหน้างาน ซึ่งหลักการในการทำ TPM มีขั้นตอน 8 ขั้นตอน หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า “8 เสาหลักของ TPM (8 Pillars of TPM)” ได้แก่ เสาหลักที่ 1 การปรับปรุงเฉพาะเรื่อง (Specific Improvement) เสาหลักที่ 2 การดูแลรักษาด้วยตนเอง (Autonomous Maintenance) เสาหลักที่ 3 การบำรุงรักษาตามแผนงาน (Planned Maintenance) เสาหลักที่ 4 การให้การศึกษาและฝึกอบรม (Education and Training) เสาหลักที่ 5 การรักษาคุณภาพ (Quality Maintenance) เสาหลักที่ 6 การควบคุมขั้นต้น (Initial Control) เสาหลักที่ 7 ความปลอดภัยและสิ่งแวดล้อม (Safety and Environment) เสาหลักที่ 8 การเพิ่มประสิทธิภาพการบริหาร (Efficient Administration)

ซึ่งได้นักวิจัยหลายท่านได้ศึกษาและนำหลัก TPM หรือการบำรุงรักษาเชิงทวิผลโดยรวม (Total Productive Maintenance) มาเพิ่มประสิทธิภาพการบำรุงรักษาในกระบวนการผลิต ดังนี้ ได้มีการจัดทำแผนบำรุงรักษาเครื่องจักรเชิงป้องกันในอุตสาหกรรมรีเลย์พบว่าหลังปรับปรุงค่าเวลาเฉลี่ยในการซ่อมแซม หรือ MTTR ลดลงและอัตราการชำรุดลดลง [1] มีการศึกษาปัจจัยของความสำเร็จ (Critical Success Factor) ในการประยุกต์ใช้กิจกรรมการบำรุงรักษาที่ทุกคนมีส่วนร่วม หรือ TPM ทำให้ทราบถึงลำดับความสำคัญของปัจจัยแห่งความสำเร็จ [2] รวมถึงมีงานวิจัยที่มุ่งลดเวลาสูญเสียที่เกิดจากปัญหาการขัดข้องและความเสียหายของเครื่องจักร ผลจากการปรับปรุงพบว่า ค่า

ความพร้อมการใช้งานเครื่องจักรและค่าเวลาเฉลี่ยระหว่างการเสียหายเพิ่มขึ้น [3] นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ปรับปรุงประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องจักรที่สำคัญในกระบวนการผลิตอาหารทะเลแปรรูปที่บรรจุในภาชนะปิดสนิท ซึ่งสามารถเพิ่มค่าการวัดประสิทธิภาพโดยรวม หรือ OEE (Overall Equipment Effectiveness) และค่าเวลาเฉลี่ยระหว่างการเสียหาย [4] และยังมีงานวิจัยเกี่ยวกับการปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องจักรกรณีศึกษาสถานีบริการก๊าซธรรมชาติ ผลการปรับปรุงพบว่า เครื่องจักรมีค่าประสิทธิภาพโดยรวมและค่าอัตราการใช้งานเครื่องจักรเพิ่มขึ้น [5]

บริษัท กรณิศศึกษาเป็นผู้ผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ ได้แก่ ดิสก์เบรกและดรัมเบรก ดังรูปที่ 1 และ 2 ซึ่งในกระบวนการผลิตดิสก์เบรกมีขั้นตอนการผลิตสูงทำให้เครื่องจักรมีความสำคัญกับกระบวนการผลิตเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะกระบวนการพ่นสีฝุ่นซึ่งมีเครื่องพ่นสีเป็นเครื่องจักรหลักและมีเพียงเครื่องเดียวในสายการผลิตจึงได้มีการศึกษาข้อมูลการซ่อมแซมเครื่องจักรพบว่า มีปัญหาการขัดข้องของเครื่องจักรอยู่บ่อยครั้งทำให้ค่าเฉลี่ยระหว่างการเสียหายหรือ MTBF มีแนวโน้มลดลงในปี 2561 จนถึงต้นปี 2562 ซึ่งอาจจะเกิดจากขาดประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาเครื่องจักร



รูปที่ 1 ผลิตภัณฑ์ดิสก์เบรก

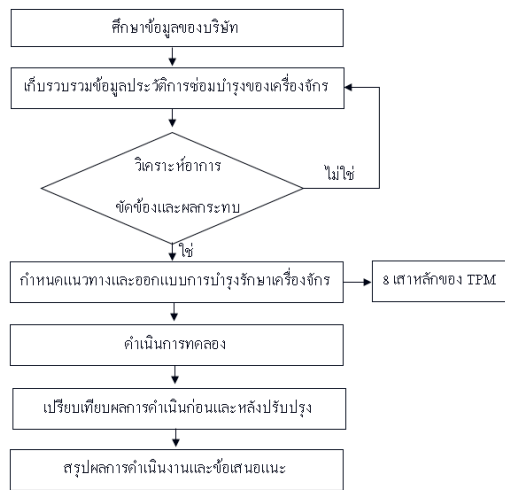


รูปที่ 2 ผลิตภัณฑ์ดรัมเบรก

ซึ่งงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มเวลาเฉลี่ยระหว่างการเสียหายของเครื่องพ่นสีดิสก์เบรกโดยใช้หลักการบำรุงรักษาเชิงทวิผลโดยรวม หรือ TPM

2. วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้นำระเบียบวิธีทางวิทยาศาสตร์ซึ่งประกอบด้วย 5 ขั้นตอน ได้แก่ 1) การสังเกตและการตั้งปัญหา 2) การตั้งสมมติฐาน 3) การศึกษาค้นคว้าและรวบรวมข้อมูล 4) การทดลองเพื่อตรวจสอบสมมติฐาน 5) การสรุปผล โดยได้นำวิธีการดังกล่าวมาประยุกต์ใช้หาแนวทางแก้ไขปัญหามาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำรุงรักษาของเครื่องจักรในกระบวนการผลิตโดยมีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังนี้



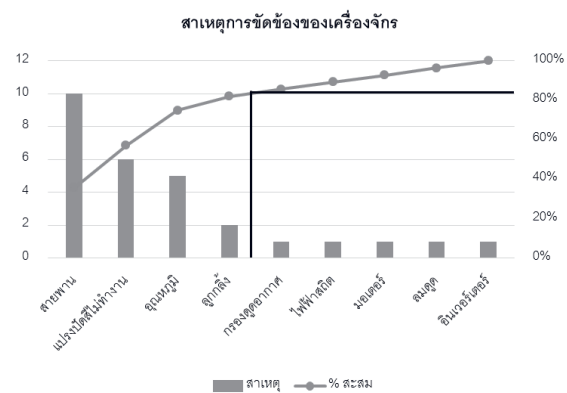
รูปที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

2.1 ศึกษาข้อมูลบริษัทเพื่อการเลือกงานในการศึกษาวิจัยโดยพิจารณาจากกระบวนการผลิตที่มียอดการผลิตสูงซึ่งได้แก่ กระบวนการผลิตดีสก์เบรก ทำให้เครื่องจักรมีความสำคัญกับกระบวนการผลิตเป็นอย่างมากโดยเฉพาะเครื่องพ่นสีดีสก์เบรกซึ่งเป็นเครื่องจักรหลักที่มีเพียงเครื่องเดียวในกระบวนการผลิตจึงควรพบปัญหาการขัดข้องของเครื่องจักรให้น้อยที่สุด

2.2 เก็บรวบรวมประวัติการซ่อมบำรุงของสาเหตุการขัดข้องดังตารางที่ 1 และรูปที่ 4 และเวลาในการซ่อมแซมเครื่องจักรแต่ละสาเหตุดังตารางที่ 2 และรูปที่ 5 เพื่อเป็นฐานข้อมูลสำหรับนำมาวิเคราะห์หาอาการผิดปกติซึ่งจะนำมาเพื่อการแก้ไขปัญหาการขัดข้องของเครื่องจักร

ตารางที่ 1 ข้อมูลสาเหตุการขัดข้องของเครื่องจักร

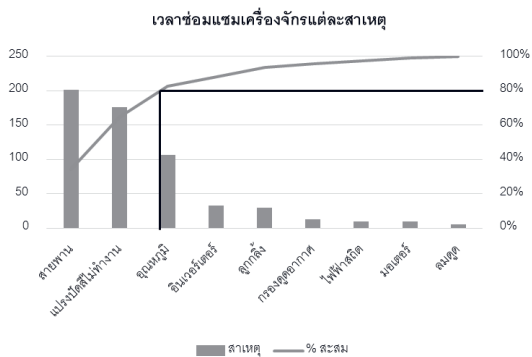
ลำดับ	สาเหตุ	จำนวน (ครั้ง)
1	สายพาน	10
2	แปรงขัดสีไม่ทำงาน	6
3	อุณหภูมิ	5
4	ลูกกลิ้ง	2
5	กรองดูดอากาศ	1
6	ไฟฟ้าสถิต	1
7	มอเตอร์	1
8	ลมดูด	1
9	อินเวอร์เตอร์	1
รวม (ครั้ง)		28



รูปที่ 4 สาเหตุการขัดข้องของเครื่องจักร

ตารางที่ 2 ข้อมูลเวลาซ่อมแซมเครื่องจักรแต่ละสาเหตุ

ลำดับ	สาเหตุ	เวลา (นาที)
1	สายพาน	201
2	แปรงขัดสีไม่ทำงาน	176
3	อุณหภูมิ	107
4	อินเวอร์เตอร์	33
5	ลูกกลิ้ง	30
6	กรองดูดอากาศ	13
7	ไฟฟ้าสถิต	10
8	มอเตอร์	10
9	ลมดูด	5
เวลารวม (นาที)		585

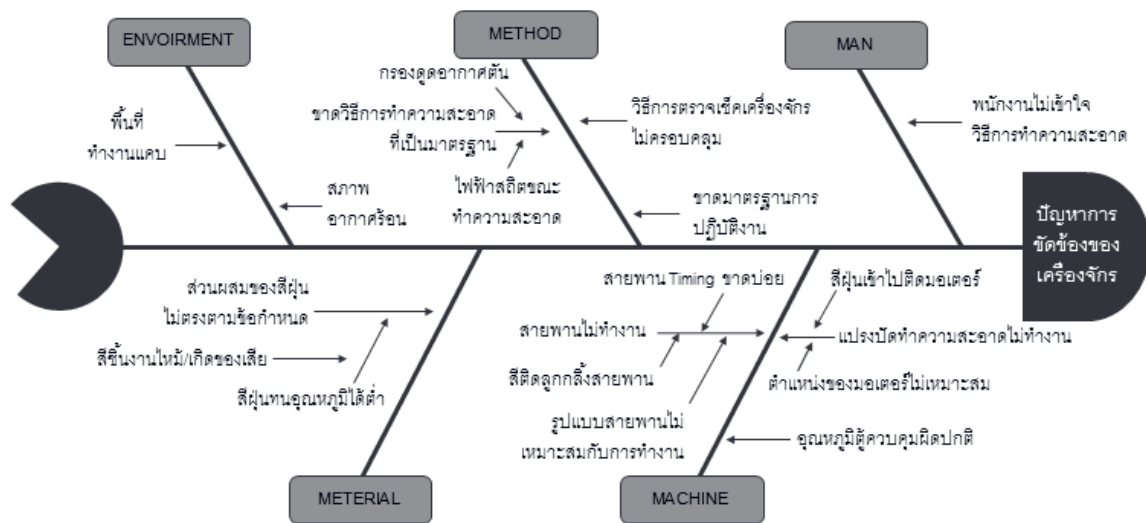


รูปที่ 5 เวลาซ่อมแซมของเครื่องจักรแต่ละสาเหตุ

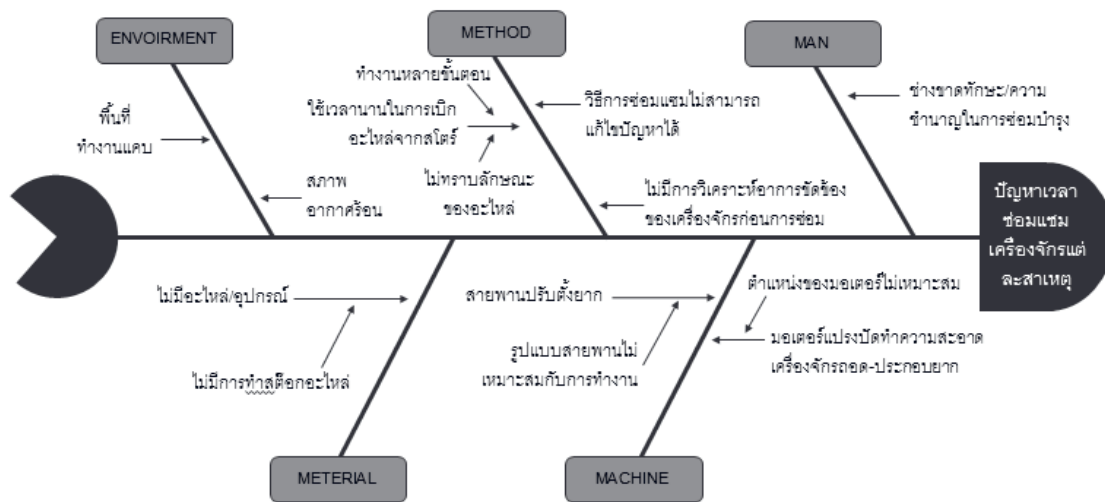
2.3 วิเคราะห์อาการขัดข้องและผลกระทบเพื่อหาสาเหตุที่แท้จริงของอาการขัดข้องของเครื่องฟั่น สัตว์บกพร้อมทั้งวิเคราะห์แนวทางแก้ไขและจัดทำแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันเพื่อเพิ่มเวลาเฉลี่ยระหว่างการเสียหายของเครื่องจักรส่งผลให้เครื่องจักรมีความพร้อมสำหรับการผลิตโดยแบ่งหัวข้อปัญหาออกเป็น 2 หัวข้อ ได้แก่ ปัญหาการขัดข้องของเครื่องจักร และปัญหาเวลาซ่อมแซมเครื่องจักรแต่ละสาเหตุ

โดยในรูปที่ 6 ได้นำแผนภูมิเหตุและผลมาใช้ในการหาสาเหตุของปัญหาการขัดข้องของเครื่องจักร ซึ่งทำการแยกปัญหาที่พบโดยแบ่งตามหัวข้อดังนี้คือ Man Machine Material Method Environment สำหรับปัญหาที่พบในส่วนของ Man คือ พนักงานไม่เข้าใจวิธีการทำความสะอาดเครื่องจักร สำหรับปัญหาที่พบในส่วนของ Machine คือ สายพานไม่ทำงาน แปร่ง ปิดทำความสะอาดไม่ทำงานและอุณหภูมิตัวควบคุมผิดปกติ สำหรับปัญหาในส่วนของ Method คือ ขาดวิธีการทำความสะอาดที่เป็นมาตรฐาน วิธีการตรวจเช็คเครื่องจักรไม่ครอบคลุมและขาดมาตรฐานการปฏิบัติงาน สำหรับปัญหาในส่วนของ Material คือ ส่วนผสมของสีฝุ่นไม่ตรงตามข้อกำหนด สำหรับปัญหาในส่วนของ Environment คือ พื้นที่ทำงานแคบและสภาพอากาศร้อน หลังจากทำการแยกปัญหาแล้วจึงวิเคราะห์หาสาเหตุของแต่ละปัญหาเพื่อนำมาดำเนินการแก้ไข

จากนั้นในรูปที่ 7 ได้นำแผนภูมิเหตุและผลมาใช้ในการหาสาเหตุของปัญหาเวลาซ่อมแซมเครื่องจักรแต่ละสาเหตุโดยแยกปัญหาที่พบแบ่งตามหัวข้อ เช่นเดียวกับปัญหาการขัดข้องของเครื่องจักร สำหรับปัญหาที่พบในส่วนของ Man คือ ช่างขาดทักษะ/ความชำนาญในการซ่อมบำรุง สำหรับปัญหาในส่วนของ Machine คือ สายพานปรับตั้งยากและมอเตอร์แปร่งปิดทำความสะอาดเครื่องจักรถอด-ประกอบยาก สำหรับปัญหาในส่วนของ Method คือ ใช้เวลานานในการเบิกอะไหล่จากสต็อก วิธีการซ่อมแซมไม่สามารถแก้ไขปัญหาได้และไม่มีการวิเคราะห์อาการขัดข้องของเครื่องจักรก่อนการซ่อม สำหรับปัญหาที่พบในส่วนของ Material คือ ไม่มีอะไหล่/อุปกรณ์ สำหรับปัญหาในส่วนของ Environment คือ พื้นที่ทำงานแคบและสภาพอากาศร้อน หลังจากนั้นวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุของแต่ละปัญหาเพื่อนำปัญหาที่ส่งผลกระทบมากมาดำเนินการแก้ไข



รูปที่ 6 แผนภูมิเหตุและผลในการหาสาเหตุของปัญหาการขัดข้องของเครื่องจักร



รูปที่ 7 แผนภูมิเหตุและผลในการหาสาเหตุของปัญหาเวลาซ่อมแซมเครื่องจักรแต่ละสาเหตุ

2.4 เลือกหัวข้อในการปรับปรุงโดยคัดเลือกจากหัวข้อที่มีผลกระทบมากที่สุดและมีความเป็นไปได้ในการนำมาปรับปรุงโดยพิจารณาระดับความพร้อมของแนวทางการแก้ปัญหาจาก 3 หัวข้อ ได้แก่

- 1) ด้านผลลัพธ์ที่จะเกิดขึ้นหลังจากปรับปรุงแก้ไขปัญหา (Impact)
- 2) ด้านงบประมาณที่ใช้ในการดำเนินการ (Economics)

3) ด้านเทคนิคที่นำมาใช้มีความเป็นไปได้สำหรับแก้ไขปรับปรุง (Technique)

ซึ่งจากการพิจารณาคัดเลือกปัญหาและการระดมสมองเพื่อหาแนวทางในการแก้ไขปัญหาภายใต้แนวคิดของ Deming Cycle หรือ PDAC ได้แก่ 1) Plan คือ การวางแผน 2) DO คือ การปฏิบัติตามแผน 3) Check คือ การตรวจสอบ 4) Act คือ การปรับปรุงการดำเนินการอย่างเหมาะสม หรือ การจัดทำมาตรฐานใหม่ ร่วมกับแนวคิด Kaizen ซึ่งเป็นแนวคิดที่

นำมาใช้ในการบริหารจัดการอย่างมีประสิทธิภาพ โดยมุ่งเน้นที่การมีส่วนร่วมของพนักงานทุกคน ร่วมกัน แสวงหาแนวทางใหม่ๆ เพื่อปรับปรุงวิธีการทำงานและ สภาพแวดล้อมในการทำงานให้ดีขึ้นอยู่เสมอ หัวใจ สำคัญอยู่ที่ต้องมีการปรับปรุงอย่างต่อเนื่องไม่มีที่สิ้นสุด (Continuous Improvement) ซึ่งถือเป็นพื้นฐานของ การยกระดับคุณภาพ โดยสามารถสรุปปัญหาและแนว ทางการแก้ไขปัญหาดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ปัญหาและแนวทางการแก้ไขปัญหา

สาเหตุ/ปัญหา	แนวทางการแก้ไขปัญหา
1. สายพานไม่ทำงาน เนื่องจากรูปแบบสายพาน ไม่เหมาะสมกับการ ทำงาน	1. ออกแบบสายพานใหม่ ให้เหมาะสมกับการ ทำงาน
2. แปร่งปิดทำความสะอาด ไม่ทำงานเนื่องจาก ตำแหน่งของมอเตอร์ไม่ เหมาะสม	2. ย้ายตำแหน่งของ มอเตอร์ให้เหมาะสมเพื่อ ไม่ให้ฝุ่นเข้าไปติด
3. ไม่มีอะไหล่/อุปกรณ์ เนื่องจากไม่มีการสำรอง อะไหล่	3. สำรองอะไหล่ที่จำเป็น และสำรองอะไหล่
4. วิธีการตรวจเช็ค เครื่องจักรไม่ครอบคลุม	4. พิจารณาวิธีการ ตรวจเช็คเครื่องจักรใหม่ พร้อมทั้งจัดทำแผนการ บำรุงรักษา
5. พนักงานไม่เข้าใจ วิธีการทำความสะอาด เครื่องจักร	5. จัดทำและอบรม Work Instructions (WI) การ ทำความสะอาดเครื่องจักร
6. ขาดวิธีการทำความสะอาด ที่เป็นมาตรฐานทำ ให้เครื่องจักรอากาศตัน	6. จัดทำและอบรม Work Instructions (WI) การ ทำความสะอาดเครื่องจักร
7. ขาดทักษะ/ความ ขำนาญในการซ่อมบำรุง	7. อบรมให้ความรู้เพื่อ เพิ่มทักษะในการซ่อม บำรุง
8. วิธีการซ่อมแซมไม่ สามารถแก้ไขปัญหาได้	8. ระดมสมองเพื่อ วิเคราะห์หาการขัดข้อง ร่วมกันก่อนการซ่อม

ตารางที่ 3 ปัญหาและแนวทางการแก้ไขปัญหา (ต่อ)

สาเหตุ/ปัญหา	แนวทางการแก้ไขปัญหา
9. ไม่มีการวิเคราะห์ อาการขัดข้องของ เครื่องจักรก่อนการซ่อม	9. ระดมสมองเพื่อ วิเคราะห์หาการขัดข้อง ร่วมกันก่อนการซ่อม
10. ขาดมาตรฐานการ ปฏิบัติงาน	10. จัดทำและอบรม Work Instructions (WI) การปฏิบัติงาน

จากนั้นนำแนวทางการแก้ไขปัญหามาพิจารณา ระดับความพร้อมของแนวทางการแก้ปัญหาเพื่อจัด ลำดับความสำคัญของปัญหาเพื่อให้สามารถแก้ไข ปัญหาได้ตรงประเด็นดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การพิจารณาระดับความพร้อมของแนว ทางการแก้ปัญหา

แนวทางการ แก้ไขปัญหา	ระดับความพร้อมของแนวทาง ในการแก้ไขปัญหา			
	Impact (1)	Economic (2)	Technique (3)	รวมคะแนน (4)=(1)*(2)*(3)
แนวทางที่ 1	3	3	3	27
แนวทางที่ 2	3	3	3	27
แนวทางที่ 3	3	2	3	18
แนวทางที่ 4	3	2	3	18
แนวทางที่ 5	3	1	3	9
แนวทางที่ 6	3	1	3	9
แนวทางที่ 7	3	1	3	9
แนวทางที่ 8	3	1	3	9
แนวทางที่ 9	3	1	3	9
แนวทางที่ 10	3	1	3	9

หมายเหตุ การพิจารณาระดับความพร้อมของแนวทาง ในการแก้ไขปัญหา โดยให้คะแนน มาก =3 กลาง = 2 และน้อย = 1 ในแต่ละหัวข้อ

จากนั้นจัดกลุ่มของแนวทางการแก้ไขปัญหามาพิเคราะห์หลักการบำรุงรักษาที่ผลแบบทุกคนมีส่วนร่วมมาพิจารณาซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ 4 เสาหลัก ได้แก่

เสาหลักที่ 1 การปรับปรุงเฉพาะเรื่อง (Specific Improvement)

เสาหลักที่ 2 การดูแลรักษาด้วยตนเอง (Autonomous Maintenance)

เสาหลักที่ 3 การบำรุงรักษาตามแผนงาน (Planned Maintenance)

เสาหลักที่ 4 การให้การศึกษาและฝึกอบรม (Education and Training)

โดยการจัดกลุ่มของแนวทางการแก้ไขปัญหามาแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การจัดกลุ่มของปัญหาตามหลักของ TPM

แนวทางการแก้ไข ปัญหา	ประเภท
แนวทางที่ 1	การปรับปรุงเฉพาะเรื่อง
แนวทางที่ 2	
แนวทางที่ 3	การบำรุงรักษาตามแผน
แนวทางที่ 4	
แนวทางที่ 5	การบำรุงรักษาด้วยตนเอง
แนวทางที่ 6	
แนวทางที่ 7	การศึกษาและฝึกอบรม
แนวทางที่ 8	
แนวทางที่ 9	
แนวทางที่ 10	

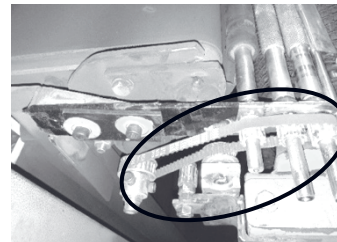
3. ผลการศึกษา

หลังจากคัดเลือกปัญหาและกำหนดแนวทางแก้ไขปัญหานั้นได้ดำเนินการแก้ไขปัญหามาโดยผลการศึกษาสรุปตามหัวข้อได้ดังนี้

3.1 การปรับปรุงเฉพาะเรื่อง (Specific Improvement) กำหนดหัวข้อการปรับปรุง 2 หัวข้อได้แก่

1) ออกแบบสายพานใหม่ให้เหมาะสมกับการทำงาน จากการสำรวจปัญหาพบสายพานไทร่มึงรับภาระหนักทำให้สายพานขาดบ่อย จึงได้ออกแบบสายพานใหม่ให้เหมาะสมกับการทำงาน หลังการปรับปรุงปัญหาที่พบคือ น้ำหนักชิ้นงานที่มากทำให้

ลูกปืนเพลาดก ส่งผลให้เพลาลื่นเสียโครงสร้างจนชำรุด จึงแก้ปัญหาโดยการเพิ่มความแข็งแรงของเพลาส่งผลให้ใช้งานได้ปกติดังรูปที่ 8 และรูปที่ 9

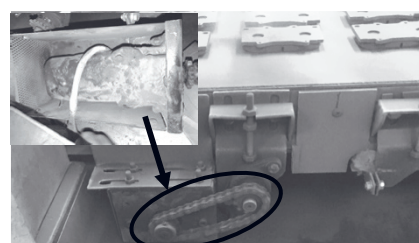


รูปที่ 8 สายพานก่อนปรับปรุง

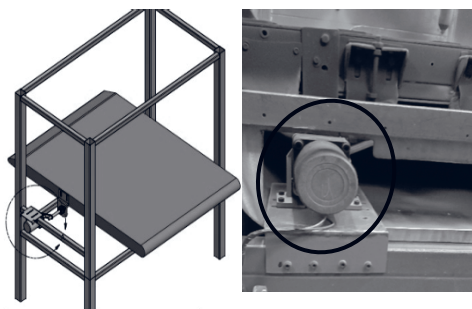


รูปที่ 9 สายพานหลังปรับปรุง

2) ย้ายตำแหน่งของมอเตอร์ให้เหมาะสมเพื่อไม่ให้ฝุ่นเข้าไปติด จากการสำรวจพบปัญหามอเตอร์แปร่งบิดทำความสะอาดสายพานมีสะเก็ดจำนวนมากส่งผลให้มอเตอร์ระบายความร้อนไม่ได้ นำไปสู่การเสียหายของมอเตอร์จึงออกแบบได้ย้ายตำแหน่งมอเตอร์ออกมานอกบริเวณห้องพ่น เพื่อป้องกันสะเก็ดและสามารถระบายความร้อนได้ดีขึ้น ดังรูปที่ 10 และรูปที่ 11



รูปที่ 10 มอเตอร์ก่อนปรับปรุง



รูปที่ 11 มอเตอร์หลังปรับปรุง

3.2 การบำรุงรักษาด้วยตนเอง (Autonomous Maintenance) กำหนดหัวข้อการปรับปรุง 3 หัวข้อ ได้แก่

- 1) จัดทำและอบรม Work Instructions (WI) การทำความสะอาดตู้พ่นสีดีสก์เบรก
- 2) จัดทำและอบรม Work Instructions (WI) การทำความสะอาดหัวพ่นสี
- 3) จัดทำและอบรม Work Instructions (WI) การทำความสะอาดถังพ่นสี

หลังการจัดทำและอบรมคู่มือการปฏิบัติงานพบว่าพนักงานมีความเข้าใจในการทำงานกับเครื่องจักร และสามารถดูแลรักษาเครื่องพ่นสีเบื้องต้นได้

3.3 การบำรุงรักษาตามแบบแผน (Planned Maintenance) กำหนดหัวข้อการปรับปรุง 4 หัวข้อ ได้แก่

- 1) การตรวจเช็คและการบำรุงรักษาเครื่องจักร ได้ออกแบบใบตรวจเช็คเครื่องจักรโดยพิจารณาจากคู่มือเครื่องจักร ประวัติการซ่อมบำรุงและอายุการทำงานของชิ้นส่วนต่าง ๆ สำหรับการดำเนินการตรวจเช็คเครื่องจักร ดังตารางที่ 6

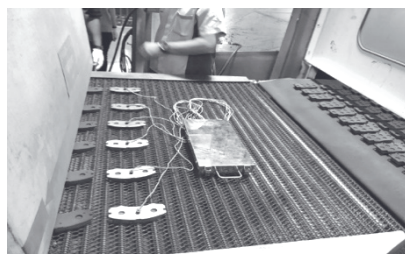
ตารางที่ 6 การตรวจเช็คและการบำรุงรักษาเครื่องจักร

ลำดับ	รายการการบำรุงรักษา
ระยะเวลาการตรวจสอบ 7 วัน	
1	ตรวจเช็คน้ำมันหล่อลื่นโซ่ลำเลียงตู้บดสีดีสเบรก(น้ำมันทนความร้อน)
2	ตรวจเช็คสภาพกวดขันน็อตข้อต่อสายฮีตเตอร์และวัดค่าความต้านทาน
3	ทำความสะอาดแผ่นกรองบริเวณระบบระบายความร้อน

ตารางที่ 6 การตรวจเช็คและการบำรุงรักษาเครื่องจักร (ต่อ)

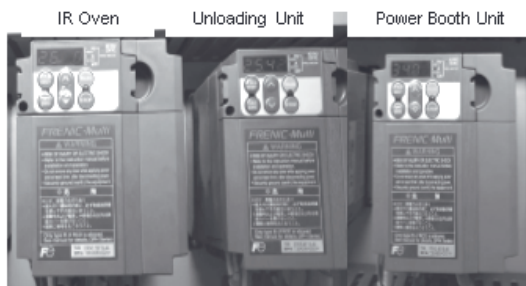
ลำดับ	รายการการบำรุงรักษา
ระยะเวลาการตรวจสอบ 1 เดือน	
4	ตรวจเช็คสภาพและความตึงของสายพานลำเลียงห้องพ่นสี
5	ตรวจเช็คสภาพและความตึงของสายพานขับป็นพ่นสี
6	ตรวจเช็คสภาพและความตึงของสายพานอบสี
7	ตรวจเช็คสภาพและความตึงของสายพานลำเลียงหลังตู้บดสี
8	ตรวจเช็คสภาพมอเตอร์ลำเลียงห้องพ่นสี
9	ตรวจเช็คสภาพมอเตอร์ขับป็นพ่นสี
10	ตรวจเช็คสภาพมอเตอร์สายพานอบสี
11	ตรวจเช็คสภาพมอเตอร์ทำความเย็นตู้บดสี
12	ตรวจเช็คสภาพมอเตอร์ลำเลียงหลังตู้บดสี
13	ตรวจเช็คสภาพและการติดตั้งสายดิน
14	ตรวจเช็คสภาพและความตึงของโซ่และสายพานลำเลียงชิ้นงาน
15	ตรวจเช็คสภาพคานรองรับสายพาน
ระยะเวลาการตรวจสอบ 3 เดือน	
16	อัดจารบีลูกปืนและสกรูปรับตั้งสายพาน
ระยะเวลาการตรวจสอบ 1 ปี	
17	เปลี่ยนถ่ายน้ำมันเฟืองทดรอบ
18	เปลี่ยนกรองสี
19	ตรวจเช็คกระแสของมอเตอร์และกวดขันนอตข้อต่อสายไฟ

- 2) การทวนสอบอุณหภูมิเพื่อกำหนดเป็นมาตรฐาน ได้ทวนสอบอุณหภูมิด้วยเครื่องวัดและเก็บข้อมูลอุณหภูมิ (Temperature Data Logger) จากนั้นนำมาวิเคราะห์และจัดทำรายงานเพื่อเป็นมาตรฐานในการสวนสอบอุณหภูมิดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 การทดสอบอุณหภูมิ

3) การกำหนดค่าควบคุมโปรแกรมเครื่องพ่นสีดีสก์เบรก เพื่อให้เครื่องจักรมีมาตรฐานในการทำงาน และเพื่อตรวจสอบความผิดปกติของเครื่องจักรหากไม่สามารถทำได้ตามโปรแกรมการทำงานที่ตั้งค่าไว้ดังรูปที่ 13 และรูปที่ 14



รูปที่ 13 อุปกรณ์อ่านค่าความเร็วสายพานในตัวควบคุม



รูปที่ 14 หน้าจอแสดงค่าโปรแกรมการพ่นสี

4) สำรองอะไหล่ที่จำเป็นและสำรองอะไหล่เพื่อเตรียมความพร้อมของอะไหล่หากมีเหตุขัดข้องของเครื่องจักรเพื่อลดความล่าช้าเนื่องจากไม่มีอะไหล่สำรองทำให้เครื่องจักรพร้อมสำหรับการผลิต

3.4 การศึกษาและฝึกอบรม (Education/ Training) กำหนดหัวข้อการปรับปรุง 2 หัวข้อได้แก่

1) จัดทำและอบรม Work Instructions (WI) การปฏิบัติงาน

2) อบรมให้ความรู้เพื่อเพิ่มทักษะในการซ่อมบำรุง

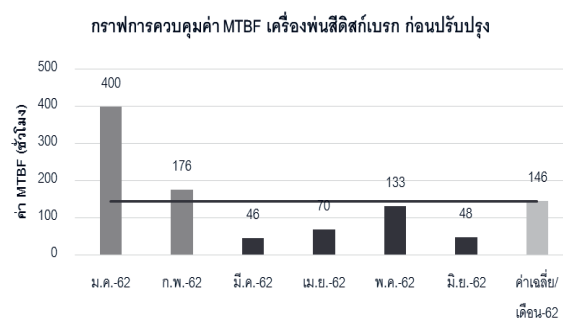
ได้จัดทำคู่มือในการปฏิบัติงานและอบรมให้ความรู้กับช่างซ่อมบำรุงเพื่อเพิ่มทักษะในการซ่อมแซมเครื่องจักรเพื่อให้สามารถแก้ไขปัญหาการขัดข้องของเครื่องจักรได้อย่างรวดเร็วดังรูปที่ 15



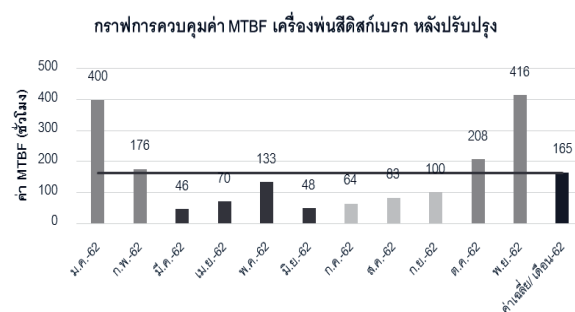
รูปที่ 15 อบรมให้ความรู้ช่างซ่อมบำรุง

4. สรุปผล

หลังจากการปรับปรุงพบว่า ค่าเวลาเฉลี่ยระหว่างการเสียหาย หรือ MTBF (Mean time between failures) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในเดือนกรกฎาคม-พฤศจิกายน ในปี 2562 หลังจากการนำหลัก TPM หรือการบำรุงรักษาเชิงทวิผลโดยรวม (Total Productive Maintenance) มาปรับใช้กับเครื่องพ่นสีดีสก์เบรก ทำให้เครื่องจักรมีประสิทธิภาพมากขึ้นได้ ก่อนปรับปรุงค่าเฉลี่ยเท่ากับ 146 ชั่วโมง/เดือน หลังปรับปรุงค่าเฉลี่ยเท่ากับ 165 ชั่วโมง/เดือน หรือเพิ่มขึ้น 13 % ดังรูปที่ 16 และ รูปที่ 17

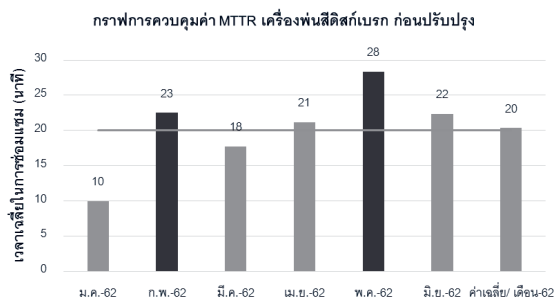


รูปที่ 16 การควบคุมค่า MTBF ก่อนปรับปรุง

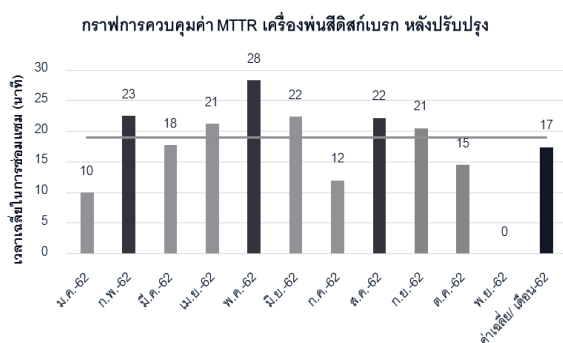


รูปที่ 17 กราฟการควบคุมค่า MTBF หลังปรับปรุง

อีกทั้งค่าเวลาเฉลี่ยในการซ่อมแซม หรือ MTTR (Mean Time to Repair) มีแนวโน้มลดลงในเดือน กรกฎาคม-พฤศจิกายน ในปี 2562 ทำให้สามารถลดเวลาในการซ่อมแซมเครื่องจักรได้ ก่อนปรับปรุง ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 20 นาที/ครั้ง หลังปรับปรุงค่าเฉลี่ยเท่ากับ 17 นาที/ครั้ง หรือลดลง 15% ดังรูปที่ 18 และ 19



รูปที่ 18 กราฟการควบคุมค่า MTTR ก่อนปรับปรุง



รูปที่ 19 กราฟการควบคุมค่า MTTR หลังปรับปรุง

จากผลการวิจัยในครั้งนี้ทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องพ่นสีดีสก์เบรกมีความพร้อมสำหรับการรองรับการผลิตมากขึ้นด้วยการนำหลักการบำรุงรักษาเชิงทวิผลโดยรวม (Total Productive Maintenance) ประยุกต์ใช้ซึ่งสามารถขยายผลไปยังเครื่องจักรเครื่องอื่นๆ ได้อีกด้วย

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณ ผู้บริหาร และทีมช่างซ่อมบำรุง บริษัท กรณศึกษา ในการให้โอกาสผู้วิจัยเข้าไปศึกษาและทำวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Rungruang K. Preventive maintenance planning for Industrial relay machinery [master's thesis]. Bangkok: Dhurakij Pundit University; 2009. (in Thai)
- [2] Jitharn Y. Study of critical success factors for TPM implementation in JIPM Award Winners [master's thesis]. Pathumthani: Thammasat University; 2010. (in Thai)
- [3] Promsen T. The condition base maintenance productivity improvement in the sample beverage factory [master's thesis]. Nakhon Pathom: Silpakorn University; 2013. (in Thai)
- [4] Monpraneet P, Waiyagan K. Improvement of overall equipment effectiveness of the machines in seafood. Thai Industrial Engineering Network Journal. 2012;(1):2102-8. (in Thai)
- [5] Kuntong T. Machine efficiency improvement in a naturalgas service station [master's thesis]. Pathumthani: Tammasat University; 2015. (in Thai)

การใช้เศษต้นมันสำปะหลังเป็นมวลรวมน้ำหนักเบาสำหรับ ผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อกแก้วเคลือบชนิดรับน้ำหนัก

กิตติพันธ์ บุญโตสิตรกุล^{1*} กิตติพงษ์ สุวิโร² และปราโมทย์ วีรานุกุล³
kittiphan.b@rmutp.ac.th^{1*}, kittipong.s@en.rmutt.ac.th², pramot.w@rmutp.ac.th³

^{1,3} สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

² ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Received	: 9-Mar-2020
Revised	: 2-Apr-2020
Accepted	: 8-May-2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาคอนกรีตบล็อกแก้วเคลือบผสมเศษต้นมันสำปะหลัง ใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1: แก้วเคลือบ: หินฝุ่น: สารลดน้ำประเภท A: น้ำประปา เท่ากับ 0.7: 0.3: 10: 0.02: 0.6 โดยน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมด แทนที่หินฝุ่นด้วยเศษต้นมันสำปะหลังในปริมาณร้อยละ 0, 1, 3, 6, 9 และ 12 โดยน้ำหนักของหินฝุ่น ขึ้นรูปตัวอย่างคอนกรีตบล็อกทั้ง 6 อัตราส่วนด้วยขั้นตอนการผลิตเช่นเดียวกับคอนกรีตบล็อกทั่วไป ทดสอบสมบัติตามมาตรฐาน มอก.57-2533 จากผลการทดสอบ พบว่า อัตราส่วนคอนกรีตบล็อกแก้วเคลือบผสมเศษต้นมันสำปะหลังที่ดีที่สุด คือ อัตราส่วนที่แทนที่หินฝุ่นด้วยเศษต้นมันสำปะหลังในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักของหินฝุ่น ซึ่งปริมาณเศษต้นมันสำปะหลังที่เหมาะสม สามารถลดความหนาแน่นหรือน้ำหนักต่อก้อนให้ต่ำลงได้ และช่วยเพิ่มความแข็งแรงทนทานป้องกันความร่อน เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตบล็อกทั่วไป อย่างไรก็ตาม การผสมปริมาณเศษต้นมันสำปะหลังที่มากเกินไป มีผลทำให้การดูดกลืนน้ำเพิ่มขึ้น และความต้านทานแรงอัดลดลง

คำสำคัญ: เศษต้นมันสำปะหลัง คอนกรีตบล็อก มวลรวมน้ำหนักเบา

Using Cassava Pit Waste as Light Weight Aggregate for Hollow Load Bearing Concrete Masonry Mixed with Rice Husk Ash Product

Kittiphan Boontositrakul ^{1*} Kittipong Suweero ² Pramot Weeranukul ³
kittiphan.b@rmutp.ac.th ^{1*}, kittipong.s@en.rmutt.ac.th ², pramot.w@rmutp.ac.th ³

^{1,3} Department of Industrial Engineering, Faculty of Industrial Education, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon

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

Received	: 9-Mar-2020
Revised	: 2-Apr-2020
Accepted	: 8-May-2020

Abstract

This research aims to develop the rice husk ash concrete blocks mixed with cassava pit waste. The mixing ratio among Portland cement type1: rice husk ash: quarry dust: water reducer type A: tap water that included 0.7: 0.3: 10: 0.02: 0.6 by weight of admixtures. The quarry dust was replaced by cassava pit waste in 0%, 1%, 3%, 6%, 9% and 12 % by weight of quarry dust. The 6 mixing ratios of concrete block samples were casted same as the ordinary concrete blocks and were tested the properties according to the TIS.57-1990 standard. From the results, the best proportion of concrete block mixed with coconut shell ash is 3% replacement of cassava pit waste. The proper ratios of cassava pit waste can decrease the density or weight and increase the thermal insulation of concrete blocks. However, the over amounts of cassava pit waste can increase the water absorption and decrease the compressive strength properties of concrete blocks.

Keywords: cassava pit waste, concrete block, lightweight aggregate

1. บทนำ

ต้นมันสำปะหลัง (Cassava Pit) และเถ้าแกลบ (Rice Husk Ash) เป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีอยู่มากในหลายพื้นที่ของประเทศไทย โดยต้นมันสำปะหลังได้จากการขุดหัวมันสำปะหลังขึ้นมาจากดิน แล้วจึงตัดส่วนที่เป็นต้นมันสำปะหลังออก แม้ว่าจะมีการนำต้นมันสำปะหลังบางส่วนไปใช้เพาะปลูกในฤดูกาลถัดไป แต่ก็ใช้ในปริมาณเพียงร้อยละ 5 ของปริมาณต้นมันสำปะหลังเหลือทิ้งทั้งหมด จึงมีต้นมันสำปะหลังเหลือทิ้งมากกว่า 6 แสนตันต่อปี [1] ส่วนเถ้าแกลบเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการสีข้าวเปลือก และการนำเปลือกข้าวหรือแกลบไปเผาเพื่อให้พลังงาน มีปริมาณประมาณ 4.6 ล้านตันต่อปี [2] วัสดุเหลือทิ้งทั้ง 2 ชนิดนี้ เป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำ และเป็นฉนวนป้องกันความร้อนที่ดี เมื่อนำมาผสมลงในวัสดุก่อสร้างจะช่วยลดน้ำหนัก ตลอดจนพัฒนาคุณสมบัติของวัสดุก่อสร้างได้ โดยเฉพาะเถ้าแกลบซึ่งเป็นวัสดุจำพวกวัสดุพอสโซลาน (Pozzolan Material) เมื่อผสมร่วมกับปูนซีเมนต์จะช่วยเพิ่มความต้านทานแรงอัดให้กับวัสดุที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์หรือคอนกรีตได้กว่าร้อยละ 10 [3] เมื่อนำมาผสมในคอนกรีตบล็อกชนิดรับน้ำหนัก (Hollow Load Bearing Concrete Masonry) ซึ่งใช้สำหรับก่อผนังภายนอกหรือภายในอาคาร โครงสร้างทั่วไป และโครงสร้างพิเศษ [4] ซึ่งคำนวณให้ผนังคอนกรีตบล็อกต้องรับน้ำหนัก เช่น ผนังอาคารรถไฟใต้ดิน MRT ผนังอาคารผู้โดยสาร สนามบินสุวรรณภูมิ ผนังอาคารกำเนิดไฟฟ้า และเขื่อนน้ำเทิน ประเทศลาว เป็นต้น จะช่วยพัฒนาคอนกรีตบล็อกชนิดรับน้ำหนักให้น้ำหนักเบาเทียบเท่าคอนกรีตบล็อกชนิดไม่รับน้ำหนัก แต่มีคุณสมบัติด้านความแข็งแรงและความทนทานที่ดีกว่าคอนกรีตบล็อกชนิดไม่รับน้ำหนักทั่วไป งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อกรับน้ำหนักประเภทไม่ควบคุมความชื้นตามมาตรฐาน มอก.57-2533 ที่มีส่วนผสมของต้นมันสำปะหลังและเถ้าแกลบ

2. วัสดุและอุปกรณ์

วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 หินปูนหรือหินฝุ่น ขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 4 หรือ 4.75 มิลลิเมตร ต้นมันสำปะหลังเหลือทิ้ง (รูปที่ 1) เถ้าแกลบ ขนาดผ่าน

ตะแกรงเบอร์ 325 หรือ 44 ไมโครเมตร (รูปที่ 2) สารเคมีผสมเพิ่มชนิดสารลดน้ำ ประเภท A น้ำประปา เครื่องผสมคอนกรีต เครื่องย่อยเศษไม้ พร้อมตะแกรงเบอร์ 4 หรือ 4.75 มิลลิเมตร (รูปที่ 3) เครื่องอัดคอนกรีตบล็อกแบบสั่นเขย่า พร้อมแบบหล่อคอนกรีตบล็อก ขนาด $7 \times 19 \times 39$ เซนติเมตร (รูปที่ 4) ตะแกรงคัดขนาด เครื่องชั่งน้ำหนัก ชุดทดสอบหาค่าความหนาแน่น ความชื้น และการดูดกลืนน้ำ เครื่องทดสอบเบรกประสงค์ (Universal Testing Machine) และเครื่องทดสอบสัมประสิทธิ์การนำความร้อน



รูปที่ 1 เศษต้นมันสำปะหลังที่นำไปใช้ในการวิจัย



รูปที่ 2 การร่อนเถ้าแกลบผ่านตะแกรง



รูปที่ 3 เครื่องย่อยเศษไม้



รูปที่ 4 เครื่องอัดคอนกรีตบล็อกแบบสั่นเขย่า

3. การออกแบบส่วนผสม

ออกแบบอัตราส่วนผสมของตัวอย่างคอนกรีตบล็อกรับน้ำหนักประเภทไม่ควบคุมความชื้น ประกอบด้วย อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ต่อเถ้ากลบ ต่อหินปูน ต่อสารเคมีผสมเพิ่มประเภท A ต่อน้ำประปา เท่ากับ 0.7: 0.3: 10: 0.02: 0.6 โดยน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมด แล้วทำการแทนที่หินปูนด้วยเศษต้นมันสำปะหลังในปริมาณร้อยละ 0, 1, 3, 6, 9 และ 12 โดยน้ำหนักของหินปูน รวม 6 อัตราส่วน ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตบล็อกโดยน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมด

อัตราส่วน	ปูนซีเมนต์	เถ้ากลบ	หินปูน	ต้นมันสำปะหลัง	สารเคมีผสมเพิ่ม	น้ำ
C0	0.7	0.3	10	0	0.02	0.6
C0.1	0.7	0.3	9.9	0.1	0.02	0.6
C0.3	0.7	0.3	9.7	0.3	0.02	0.6
C0.6	0.7	0.3	9.4	0.6	0.02	0.6
C0.9	0.7	0.3	9.1	0.9	0.02	0.6
C1.2	0.7	0.3	8.8	1.2	0.02	0.6

4. การขึ้นรูปตัวอย่างคอนกรีตบล็อก

เริ่มจากย่อยต้นมันสำปะหลังให้ละเอียดผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ด้วยเครื่องย่อยเศษไม้ (รูปที่ 3 และ 5) ทำการผสมน้ำประปาและสารเคมีผสมเพิ่มประเภท A ให้เข้ากัน จากนั้นผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้ากลบ หินปูน เศษต้นมันสำปะหลังย่อยละเอียด และน้ำประปาที่ผสมสารเคมีผสมเพิ่มแล้ว ให้เข้ากัน ด้วยเครื่องผสมคอนกรีต แล้วนำส่วนผสมที่ผสมเข้ากันดีแล้ว มาใส่เครื่องอัดคอนกรีตบล็อกแบบสั่นเขย่า และอัดขึ้นรูปเป็นคอนกรีตบล็อกเถ้ากลบผสมเศษต้นมันสำปะหลัง (รูปที่ 6 และ 7) ทำการบ่มคอนกรีตบล็อกที่ได้ด้วยการพรมน้ำให้ชุ่ม และห่อด้วยพลาสติก เพื่อเก็บความชื้น เป็นระยะเวลาตามที่แต่ละการทดสอบกำหนด



รูปที่ 5 เศษต้นมันสำปะหลังที่ผ่านการย่อยแล้ว



รูปที่ 6 การนำส่วนผสมเข้าเครื่องอัดและเขย่า



รูปที่ 7 คอนกรีตบล็อกที่อัดขึ้นรูปแล้ว

5. การทดสอบคุณสมบัติของตัวอย่างคอนกรีตบล็อก

ทดสอบสมบัติของคอนกรีตบล็อกเถ้าแกลบผสมเศษต้นมันสำปะหลัง ตามมาตรฐาน มอก.57-2533 เรื่องคอนกรีตบล็อกรับน้ำหนัก ประเภทไม่ควบคุมความชื้น [4] และการทดสอบอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง โดยแต่ละการทดสอบจะใช้จำนวนตัวอย่าง 5 ตัวอย่างต่อการทดสอบ และนำมาคำนวณเป็นค่าเฉลี่ย ซึ่งการทดสอบได้แก่ ลักษณะทั่วไป ความหนาแน่น การดูดกลืนน้ำ ความต้านทานแรงอัด (รูปที่ 8) สัมประสิทธิ์การนำความร้อนรวม และการนำไปใช้งานจริง



รูปที่ 8 การทดสอบความต้านทานแรงอัด

6. ผลการดำเนินงานวิจัย

ผลการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตบล็อกเถ้าแกลบผสมเศษต้นมันสำปะหลัง ทั้ง 6 อัตราส่วนสามารถสรุปแบ่งตามการทดสอบได้ ดังนี้

6.1 ลักษณะโดยทั่วไป

ในส่วนลักษณะโดยทั่วไปของคอนกรีตบล็อกเถ้าแกลบผสมเศษต้นมันสำปะหลังทั้งหมดเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน มอก.57-2533 พบว่าคอนกรีตบล็อกเถ้าแกลบผสมเศษต้นมันสำปะหลังทุกอัตราส่วน มีลักษณะสมบูรณ์ ไม่มีรอยบิ่นหรือร้าว และผิวของคอนกรีตบล็อกทั้งหมดมีความหยาบพอสมควรเหมาะกับการจับยึดของปูนฉาบหรือปูนแต่งตรงตามที่มาตรฐานคอนกรีตบล็อกรับน้ำหนักกำหนด (มอก.57-2533) [4]

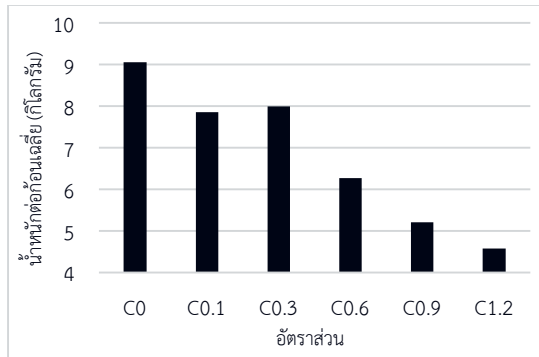


รูปที่ 9 ลักษณะพื้นผิวของคอนกรีตบล็อกเถ้าแกลบผสมเศษต้นมันสำปะหลัง

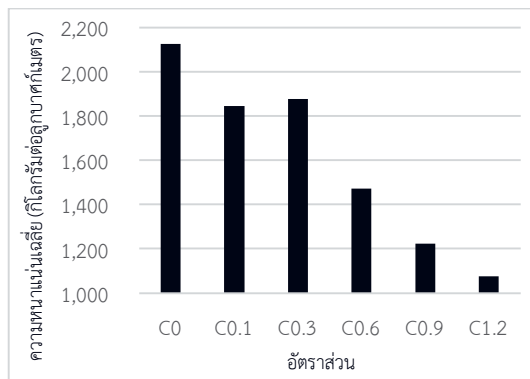
6.2 ความหนาแน่น

ผลการทดสอบน้ำหนักเฉลี่ย 5 ก้อน และความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกเถ้าแกลบผสมเศษต้นมันสำปะหลังในรูปที่ 10 และ 11 พบว่า คอนกรีตบล็อกเถ้าแกลบที่ผสมเศษต้นมันสำปะหลังทุกอัตราส่วนมีน้ำหนักต่อก้อนอยู่ระหว่าง 4.58 – 7.86 กิโลกรัม (1,074.76 - 1,844.89 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ซึ่งเบากว่าคอนกรีตบล็อกเถ้าแกลบที่ไม่ผสมเศษต้นมันสำปะหลัง (อัตราส่วน C0) ที่มีน้ำหนัก 9.057 กิโลกรัมต่อก้อน (2,125.58 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) โดยเมื่อผสมเศษต้นมันสำปะหลังในปริมาณมากจะทำให้คอนกรีตบล็อกมีน้ำหนักเบากว่าคอนกรีตบล็อกที่ผสมเศษต้นมันสำปะหลังปริมาณน้อย กล่าวคือ คอนกรีตบล็อกที่ไม่ผสมเศษต้นมันสำปะหลังอัตราส่วน C0 มีค่าความหนาแน่นสูงสุด รองลงมาคือ คอนกรีตบล็อกเถ้าแกลบผสมเศษต้นมันสำปะหลังอัตราส่วน C0.1 C0.3 C0.6 C0.9 และ C1.2 มีค่าความหนาแน่นต่ำที่สุด ตามลำดับ จากความหนาแน่นดังกล่าวจะเห็น

ว่า คอนกรีตบล็อกแก้วผสมเศษตะกั่วสำหรับน้ำปะหลังทั้งหมดมีแนวโน้มต่ำกว่าคอนกรีตและคอนกรีตบล็อกทั่วไป (คอนกรีตทั่วไป 2,400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และคอนกรีตบล็อกทั่วไป 1,900 – 2,100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) [5] ซึ่งเป็นผลมาจากลักษณะของเศษตะกั่วสำหรับน้ำปะหลังที่มีช่องว่างภายในเนื้อจำนวนมาก [1, 6]



รูปที่ 10 ผลการทดสอบน้ำหนักที่ดูดกลืนของคอนกรีตบล็อกแก้วผสมเศษตะกั่วสำหรับน้ำปะหลัง

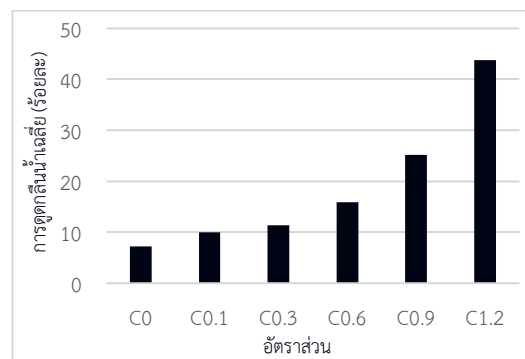


รูปที่ 11 ผลการทดสอบความหนาแน่นของคอนกรีตบล็อกแก้วผสมเศษตะกั่วสำหรับน้ำปะหลัง

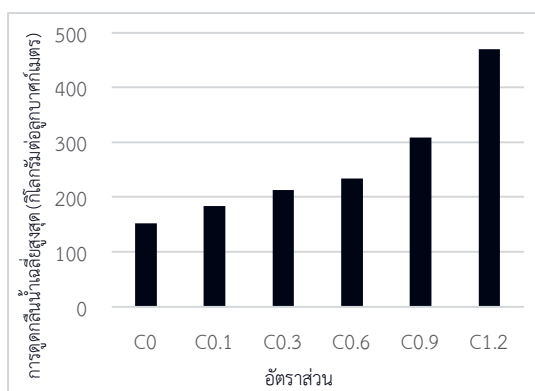
6.3 การดูดกลืนน้ำ

จากค่าการดูดกลืนน้ำของคอนกรีตบล็อกทั้งที่ผสมและไม่ผสมเศษตะกั่วสำหรับน้ำปะหลังในรูปที่ 12 พบว่า ปริมาณเศษตะกั่วสำหรับน้ำปะหลังมีผลต่อการดูดกลืนน้ำของคอนกรีตบล็อก โดยคอนกรีตบล็อกแก้วผสมเศษตะกั่วสำหรับน้ำปะหลังในปริมาณมาก จะมีค่าการดูดกลืนน้ำสูงกว่าคอนกรีตบล็อกที่มีปริมาณเศษตะกั่วสำหรับน้ำปะหลังน้อย โดยคอนกรีตบล็อกที่ผสมเศษตะกั่วสำหรับน้ำปะหลังมากที่สุดหรืออัตราส่วน C1.2 มีค่าการดูดกลืนน้ำสูงที่สุด รองลงมาคือ คอนกรีตบล็อกที่ผสม

เศษตะกั่วสำหรับน้ำปะหลังอัตราส่วน C0.9 C0.6 C0.3 C0.1 และคอนกรีตบล็อกที่ไม่ผสมเศษตะกั่วสำหรับน้ำปะหลังอัตราส่วน C0 มีค่าการดูดกลืนน้ำต่ำที่สุด ตามลำดับเป็นผลมาจากลักษณะของเศษตะกั่วสำหรับน้ำปะหลังที่มีความพรุนสูง [1] จะทำให้เกิดการดูดกลืนน้ำเข้าไปในเนื้อเศษตะกั่วสำหรับน้ำปะหลังได้ง่าย ซึ่งเป็นลักษณะเช่นเดียวกับการผสมเส้นใยธรรมชาติชนิดอื่นๆ [6-8] ทั้งนี้ เมื่อเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนน้ำกับมาตรฐาน มอก.57-2533 เรื่องคอนกรีตบล็อกไม่รับน้ำหนัก ซึ่งกำหนดค่าการดูดกลืนน้ำสูงสุดเป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร [4] ดังรูปที่ 13 พบว่า อัตราส่วน C0 C0.1 และ C0.6 สามารถผ่านค่าการดูดกลืนน้ำได้ทุกชั้นคุณภาพ (ชั้น ก ข และ ค) ส่วนอัตราส่วน C0.3 สามารถผ่านค่าการดูดกลืนน้ำ ชั้นคุณภาพ ข และ ค และอัตราส่วน C0.9 และ C1.2 สามารถผ่านค่าการดูดกลืนน้ำ ชั้นคุณภาพ ค (ไม่มีการกำหนดค่าการดูดกลืนน้ำสูงสุด) [4] ทั้งนี้การดูดกลืนน้ำเป็นสมบัติของคอนกรีตบล็อกที่แสดงถึงความสามารถในการก่อ-ฉาบของคอนกรีตบล็อก โดยคอนกรีตบล็อกที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ในงานก่อสร้างอาคารควรมีค่าการดูดกลืนน้ำที่ต่ำ เนื่องจากคอนกรีตบล็อกที่มีค่าการดูดกลืนน้ำสูง จะมีผลต่อปัญหาการแตกร้าวของปูนก่อ-ฉาบ เพราะการสูญเสียจากปูนมอร์ตาร์ (ปูนซีเมนต์ ผสมทราย และน้ำ) ไปยังคอนกรีตบล็อกมาก ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) ของปูนซีเมนต์ และน้ำไม่สมบูรณ์ เกิดเป็นรอยร้าวตั้งแต่ขนาดเล็กที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ไปจนถึงรอยร้าวขนาดใหญ่ที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า [3]



รูปที่ 12 ผลการทดสอบการดูดกลืนน้ำของคอนกรีตบล็อกแก้วผสมเศษตะกั่วสำหรับน้ำปะหลัง

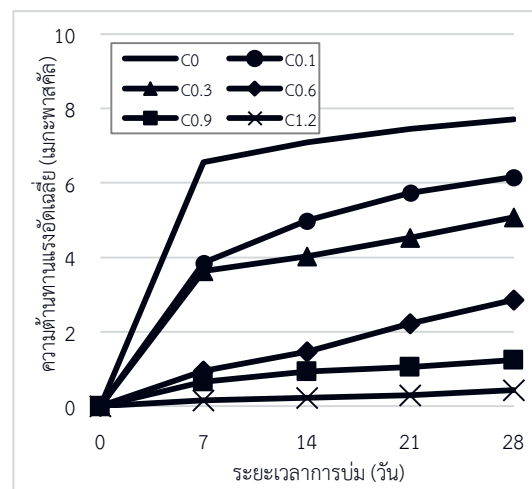


รูปที่ 13 ผลการทดสอบการดูดกลืนน้ำสูงสุดของ
คอนกรีตบล็อกแก้วกลบผสมเศษต้นมันสำปะหลัง

6.4 ความต้านทานแรงอัด

จากผลการทดสอบความต้านทานแรงอัดของคอนกรีตบล็อกแก้วกลบผสมเศษต้นมันสำปะหลังทุกอัตราส่วน สามารถสรุปได้ ดังรูปที่ 14 พบว่า แรงอัดเฉลี่ยและความต้านทานแรงอัดของคอนกรีตบล็อกที่ไม่ผสมเศษต้นมันสำปะหลังอัตราส่วน C0 มีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือ คอนกรีตบล็อกแก้วกลบผสมเศษต้นมันสำปะหลังอัตราส่วน C0.1 C0.3 C0.6 C0.9 และ C1.2 มีค่าแรงอัดเฉลี่ยและความต้านทานแรงอัดต่ำที่สุดตามลำดับ จากผลการทดสอบดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่า ปริมาณของเศษต้นมันสำปะหลังที่เพิ่มมากขึ้น มีผลทำให้ความต้านทานแรงอัดลดลง ทั้งนี้ เป็นผลมาจากลักษณะของเศษต้นมันสำปะหลังที่มีช่องว่างภายในเนื้อค่อนข้างมาก เมื่อผสมลงในคอนกรีตบล็อกจึงทำให้พื้นที่รับแรงอัดของคอนกรีตบล็อกลดลง [1-3] นอกจากนี้ เศษต้นมันสำปะหลังที่ผสมลงไปเนื้อคอนกรีตบล็อก ยังมีความแข็งแรงต่ำกว่าหินปูนหรือปูนซีเมนต์ เมื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงอัดของคอนกรีตบล็อกแก้วกลบผสมเศษต้นมันสำปะหลังตามมาตรฐาน มอก.57-2533 ที่ กำหนดให้ความต้านทานแรงอัดเฉลี่ยของคอนกรีตบล็อก ชั้นคุณภาพ ค ต้องไม่ต่ำกว่า 4.0 เมกะพาสคัล หรือประมาณ 40 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และเมื่อเฉลี่ย 5 ก้อน ต้องไม่ต่ำกว่า 5.0 เมกะพาสคัล หรือประมาณ 50 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร [4] พบว่า คอนกรีตบล็อกที่ไม่ผสมเศษต้นมันสำปะหลัง (อัตราส่วน C0) และคอนกรีตบล็อกแก้วกลบผสมเศษต้นมันสำปะหลังในอัตราส่วน C0.1 และ C0.3 เป็นอัตราส่วนที่สามารถผ่านค่าตามที่

มาตรฐานกำหนดได้ โดยคอนกรีตบล็อกที่ไม่ผสมเศษต้นมันสำปะหลังจะผ่านค่ามาตรฐานที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วันขึ้นไป คอนกรีตบล็อกแก้วกลบผสมเศษต้นมันสำปะหลังในอัตราส่วน C0.1 จะผ่านค่ามาตรฐานที่ระยะเวลาการบ่ม 14 วันขึ้นไป และคอนกรีตบล็อกแก้วกลบผสมเศษต้นมันสำปะหลังในอัตราส่วน C0.3 จะผ่านค่ามาตรฐานที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วันขึ้นไป

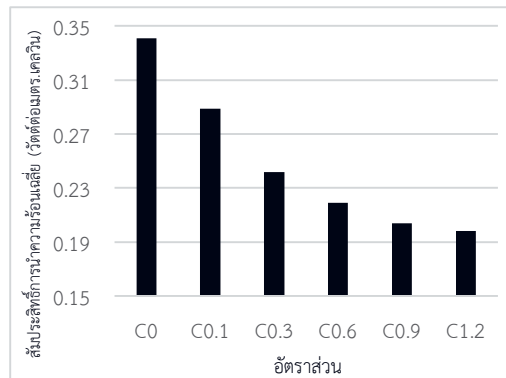


รูปที่ 14 ผลการทดสอบความต้านทานแรงอัดของ
คอนกรีตบล็อกแก้วกลบผสมเศษต้นมันสำปะหลัง

6.5 สัมประสิทธิ์การนำความร้อน

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (K) เป็นคุณสมบัติที่แสดงถึงความสามารถในการเป็นฉนวนป้องกันความร้อนของวัสดุต่างๆ โดยวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำจะเป็นฉนวนป้องกันความร้อนที่ดีกว่าวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูง [9] ทั้งนี้ ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตบล็อกที่ผสมและไม่ผสมเศษต้นมันสำปะหลัง สามารถสรุปได้ ดังรูปที่ 15 พบว่า เศษต้นมันสำปะหลังที่ผสมลงในคอนกรีตบล็อกมีผลต่อการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน หรือมีคุณสมบัติเป็นฉนวนป้องกันความร้อนที่ดีขึ้น เนื่องจากเศษต้นมันสำปะหลังเป็นวัสดุที่มีความพรุนของเนื้อหรือช่องว่างจำนวนมาก ซึ่งเป็นลักษณะของวัสดุที่มีความเป็นฉนวนป้องกันความร้อนที่ดี [1, 6-8, 10] โดยคอนกรีตบล็อกแก้วกลบผสมเศษต้นมันสำปะหลังอัตราส่วน C1.2 ซึ่งมีปริมาณเศษต้นมันสำปะหลังมากที่สุด เป็นคอนกรีตบล็อกที่มีสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำที่สุด

รองลงมาคือ อัตราส่วน C0.9 C0.6 C0.3 C0.1 และ อัตราส่วน C0 ซึ่งไม่มีเศษดินมันสำปะหลัง เป็น คอนกรีตบล็อกที่มีสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงที่สุด ตามลำดับ



รูปที่ 15 ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตบล็อกเถ้าแกลบผสมเศษดินมันสำปะหลัง

6.6 การใช้งานจริง

จากการคัดเลือกคอนกรีตบล็อกเถ้าแกลบผสมเศษดินมันสำปะหลังอัตราส่วน C0.3 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่มีคุณสมบัติผ่านตามาตรฐาน มอก.57-2533 เรื่องคอนกรีตบล็อกรับน้ำหนัก ชั้นคุณภาพ 1-ค ใช้สำหรับกำแพงภายนอก ทั้งต่ำกว่าและเหนือระดับดิน โดยต้องมีการป้องกันความเสียหายเนื่องจากลมฟ้าอากาศและใช้ทั่วไปสำหรับกำแพงภายใน [4] นำมาทดลองก่อสร้างเป็นผนังอาคารขนาด 2.5 x 2.5 เมตร สูง 2.5 เมตร พร้อมทั้งใช้ปูนก่อทั่วไป เก็บข้อมูลการก่อสร้างทุกขั้นตอน พร้อมทั้งพิจารณาการแตกร้าวของปูนก่อที่ก่อลงบนคอนกรีตบล็อกเถ้าแกลบผสมเศษดินมันสำปะหลัง ดังรูปที่ 16 และ 17 พบว่า คอนกรีตบล็อกเถ้าแกลบผสมเศษดินมันสำปะหลัง สามารถใช้ก่อเป็นผนังอาคารได้เช่นเดียวกับคอนกรีตบล็อกทั่วไปในท้องตลาด โดยไม่มีการแตกร้าว และสามารถหุบบแบ่งเป็นก้อนขนาดเล็กได้ตามต้องการ ซึ่งข้อดีของคอนกรีตบล็อกเถ้าแกลบผสมเศษดินมันสำปะหลัง คือ ความหนาแน่นหรือน้ำหนักต่อก้อนที่เบาว่าคอนกรีตบล็อกปกติ ร้อยละ 11.11 และสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ลดลง ร้อยละ 29.03 โดยที่การดูดกลืนน้ำ และความต้านทานแรงอัดที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วันขึ้นไป ยังคงผ่านตามที่มาตรฐานกำหนด



รูปที่ 16 การทดลองก่อผนังอาคารด้วยคอนกรีตบล็อกเถ้าแกลบผสมเศษดินมันสำปะหลัง



รูปที่ 17 ผนังอาคารที่ก่อด้วยคอนกรีตบล็อกเถ้าแกลบผสมเศษดินมันสำปะหลัง

7. สรุปผล และข้อเสนอแนะ

จากผลการพัฒนาผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อกรับน้ำหนักประเภทไม่ควบคุมความชื้นที่มีส่วนผสมของเศษดินมันสำปะหลังตามมาตรฐาน มอก.57-2533 พบว่า เศษดินมันสำปะหลัง สามารถใช้เป็นมวลรวมแทนที่หินปูนได้ โดยการเพิ่มปริมาณเศษดินมันสำปะหลังจะทำให้ค่าความหนาแน่นหรือน้ำหนักต่อก้อนลดลง ความเป็นฉนวนป้องกันความร้อนดีขึ้น ในขณะที่ค่าการดูดกลืนน้ำและความต้านทานแรงอัดเฉพาะบางอัตราส่วนยังคงผ่านมาตรฐานได้ สำหรับกระบวนการผลิตคอนกรีตบล็อกเถ้าแกลบผสมเศษดินมันสำปะหลัง สามารถใช้ขั้นตอนการผลิตและเครื่องจักรได้เช่นเดียวกับคอนกรีตบล็อกทั่วไป แต่จะมีขั้นตอนการย่อยและคัดขนาดของเศษดินมันสำปะหลังเพิ่มเติมเข้ามา ทั้งนี้อัตราส่วนของเศษดินมันสำปะหลังที่เหมาะสมในการผลิตคอนกรีตบล็อก คือ อัตราส่วน

C0.3 ที่ใช้ปริมาณเศษดินมันสำปะหลังแทนที่หินฝุ่น ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักของหินฝุ่น ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่มี ปริมาณของเศษดินมันสำปะหลังสูงที่สุด ในขณะที่ยังมี คุณสมบัติผ่านตามที่มาตรฐาน มอก.57-2533 กำหนด และสามารถใช้ก่อสร้างเป็นผนังได้เช่นเดียวกับคอนกรีต บล็อกทั่วไปโดยไม่มีปัญหาการแตกร้าว พื้นผิวยึดเกาะ กับปูนมอร์ตาร์ได้ดี และสามารถทุบแบ่งเป็นก้อนขนาดเล็กได้ตามต้องการ ในการศึกษาวิจัยต่อไป ควรมีการ พัฒนาคอนกรีตบล็อกให้มีค่าการดูดกลืนน้ำต่ำลง และ มีความต้านทานแรงอัดสูงขึ้น เพื่อให้สามารถผ่านตามที่ มาตรฐาน มอก.57-2533 เรื่องคอนกรีตบล็อกรับ น้ำหนัก ประเภทควบคุมความชื้น และชั้นคุณภาพที่สูง กว่าชั้น 1-ค ได้ นอกจากนี้ยังควรมีการศึกษาถึงความ คงทนของคอนกรีตบล็อกถ้าผสมเศษดินมัน สำปะหลังเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นซีเมนต์ที่มี การใช้เศษไม้ต่างๆ เป็นส่วนผสมเช่นกัน

8. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณ แผ่นดินมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ประจำปี 2561 ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] Choosit P, Kudngaongarm P, Suweero K. Particle boards made from cassava pit wastes mixed with cement. *Journal of Community Development and Life Quality*. 2016; 4(3): 339-49. (in Thai)
- [2] Weeranukul P, Suweero K. Development of cement boards from coconut shell ash for energy and environment conservation. *KKU Engineering Journal*. 2016; 43(S1): 173-75. (in Thai)
- [3] Jindaprasert P, Jaturapitakkul C. Cement, pozzolan, and concrete. 7th ed. Bangkok: ACI Partners with Thailand Concrete Association; 2012. (in Thai)
- [4] Thai Industrial Standards Institute (TISI). Thai industrial standard no.5 7-1990: hollow load-bearing concrete masonry units. Bangkok: Thai Industrial Standards Institute; 1990. (in Thai)
- [5] Weeranukul P, Suweero K, Weeranukul I. Utilization of vesicular basalt fragment as aggregate in cement board for knockdown building wall. *Journal of Engineering, RMUTT*. 2019; 17(1): 15-24. (in Thai)
- [6] Faherty KF, Williamson TG. Wood engineering and construction handbook. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, Inc.; 1995.
- [7] Weeranukul P, Suweero K, Weeranukul I. Coconut coir ceiling board product with thermal insulation property. *Journal of Engineering, RMUTT*. 2018; 16(2): 129-38. (in Thai)
- [8] Bledzki AK, Gassan J. Composites reinforced with cellulose based fibers. *Progress in Polymer Science*. 1999; 24: 221-74.
- [9] American Society for Testing and Materials (ASTM). Standard test method for steady-state heat flux measurements and thermal transmission properties by means of the guarded-hot-plate apparatus (ASTM C177). Philadelphia: ASTM International; 2010.
- [10] Pakunworakij T, Puthipiroj P, Oonjittichai W, Tisavipat P. Thermal resistance efficiency of building insulation material from agricultural waste. *Journal of Architectural /Planning Research and Studies*. 2006; 3(4): 119-26. (in Thai)

การใช้ประโยชน์จากเศษถนนยางมะตอยเก่าสำหรับผลิตภัณฑ์แผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้น

วิหาร ดิปัญญา¹ และกิตติพงษ์ สุวิโร^{2*}
wiharn.d@rmutp.ac.th¹, kittipong.s@en.rmutt.ac.th^{2*}

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

^{2*} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Received	: 9-Mar-2020
Revised	: 9-Apr-2020
Accepted	: 8-May-2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์แผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นจากเศษถนนยางมะตอยเก่า ออกแบบอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1 ต่อทรายหยาบ ต่อสารลดน้ำประเภท A ต่อน้ำประปา เท่ากับ 1: 5: 0.02: 0.4 โดยน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมด ทำการแทนที่ทรายหยาบด้วยเศษถนนยางมะตอยเก่า เท่ากับ ร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40, และ 50 โดยน้ำหนักทรายหยาบ รวมเป็น 6 อัตราส่วนผสม ขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้น และทดสอบคุณสมบัติตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเรื่องกระเบื้องคอนกรีตปูพื้น (มอก.378-2531) จากผลการทดสอบ พบว่า การแทนที่ทรายหยาบด้วยเศษถนนยางมะตอยเก่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนักทรายหยาบ เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด ทั้งนี้ปริมาณที่เพิ่มขึ้นของเศษถนนยางมะตอยเก่าในแผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นจะส่งผลต่อการลดลงของค่าการดูดซึมน้ำและสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ในขณะที่ความหนาแน่นและความต้านทานแรงดัดมีค่าใกล้เคียงกับแผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นที่ไม่ผสมเศษถนนยางมะตอยเก่า โดยแผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นผสมเศษถนนยางมะตอยเก่าที่พัฒนาสามารถใช้งานได้เช่นเดียวกับแผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นทั่วไปในท้องตลาด

คำสำคัญ: แผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้น เศษถนนยางมะตอยเก่า สัมประสิทธิ์การนำความร้อน

Utilization of Old Asphalt Road Waste to Produce Concrete Flooring Tile Product

Wiharn Deepanya¹ Kittipong Suweero^{2*}
wiharn.d@rmutp.ac.th¹, kittipong.s@en.rmutt.ac.th^{2*}

¹ Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon

^{2*} Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Received	: 9-Mar-2020
Revised	: 9-Apr-2020
Accepted	: 8-May-2020

Abstract

The objective of this research is to develop the concrete flooring tile product from old asphalt road waste. The mixing ratio of Portland cement type1: coarse sand: water reducer type A: tap water was equaled to 1: 5: 0.02: 0.4 by weight of admixtures. The coarse sand was replaced by the old asphalt road waste in 0%, 10%, 20%, 30%, 40% and 50% by weight of coarse sand. The 6 mixing ratios of concrete flooring tiles were casted with the compressive machine and were tested the properties according to the TIS.378-1988 standard (concrete flooring tiles). From the results, they were found that the 50% replacement of old asphalt road waste was the proper ratio of concrete flooring tile. The increasing of old asphalt road waste in concrete flooring tile effected to decrease the water absorption and thermal conductivity properties. In term of the density and bending strength properties, there were not many differences when compared to the concrete flooring tile without old asphalt road waste. In conclusion, the developed concrete flooring tile product from old asphalt road waste can use as same as the common concrete flooring tile product in market.

Keywords: concrete flooring tile, old asphalt road waste, thermal conductivity

1. บทนำ

ถนนยางมะตอย (Asphalt Road) ที่ใช้ยางมะตอยเกรด AC 60/70 เป็นประเภทถนนที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในประเทศไทย เนื่องจากมีต้นทุนต่ำ ใช้ระยะเวลาก่อสร้างสั้น และบำรุงรักษาง่าย แต่ถนนประเภทนี้มักเกิดความเสียหายได้ง่ายจากน้ำหนักบรรทุกที่มากเกินไปเกินกำหนดและภูมิอากาศที่ร้อน จึงต้องมีการบูรณะซ่อมแซมถนนดังกล่าวให้มีสภาพดีอยู่เสมอ [1] โดยจะต้องทำการขุดรื้อผิวถนนยางมะตอยเดิมออก จากนั้นจึงทำผิวถนนยางมะตอยใหม่ ส่วนผิวทางเดิมหรือเศษถนนยางมะตอยเก่าจะถูกทิ้งไว้ข้างทางเป็นกองขนาดใหญ่ ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมดังรูปที่ 1 ปัจจุบันมีการนำเศษถนนยางมะตอยเก่ามารีไซเคิล โดยนำมาผสมรวมกับแอสฟัลต์อิมัลชันหรือยางมะตอยชนิดน้ำ (Asphalt Emulsion) แล้วทำการลาดยางในที่แบบเย็น (Cold In-place Recycling) อย่างไรก็ตามการใช้แอสฟัลต์อิมัลชันยังคงมีข้อจำกัดที่ต้องคำนึงถึงอยู่หลายประการ โดยเฉพาะการบ่มตัว กล่าวคือก่อนที่จะมีการบดอัดต้องมีการระเหยน้ำไปให้มากที่สุด สภาพภูมิอากาศจึงมีผลมากกับงานประเภทนี้ หากมีความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศมาก หมอกกลง หรือฝนตกก็จะส่งผลกระทบต่ออัตราการระเหยของน้ำ [2-3] และการรีไซเคิลที่ไม่สามารถทำได้ นอกจากนี้ปริมาณการผสมเศษถนนยางมะตอยเก่าก็ยังไม่สามารถนำมาใช้รีไซเคิลได้ทั้งหมด และเศษถนนยางมะตอยเก่าที่ขุดขึ้นมาก็มีปริมาณยางมะตอยปะปนอยู่มากทำให้ยากต่อการนำไปใช้ประโยชน์อย่างอื่น หากต้องการแยกส่วนที่เป็นยางมะตอยก็ต้องใช้พลังงานมากเพื่อละลายยางมะตอยออกจากมวลรวมที่ถูกเคลือบผิวอยู่ จากปริมาณเศษถนนยางมะตอยเก่าที่เพิ่มมากขึ้น การวิจัยเพื่อนำเศษถนนยางมะตอยเก่ามาใช้ประโยชน์จึงมีความสำคัญและจำเป็นเร่งด่วน จากการศึกษาคุณสมบัติของเศษถนนยางมะตอยเก่าเบื้องต้นพบว่า เศษยางมะตอยดังกล่าวสามารถผสมเข้ากับปูนซีเมนต์เพื่อใช้ทดแทนที่มวลรวมได้ดี [2] แต่ด้วยปัญหาด้านปริมาณน้ำมันที่อยู่ในเศษถนนยางมะตอยเก่า วัสดุก่อสร้างที่จะใช้เศษถนนยางมะตอยนี้จึงควรจะเป็นวัสดุก่อสร้างที่ใช้ภายนอกอาคารอย่างแผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้น เนื่องจากจะไม่มีปัญหาด้านไอระเหยของน้ำมันที่อาจจะระเหยได้ รวมทั้งความยืดหยุ่นและความทึบน้ำของยางมะตอยที่ติดอยู่กับมวลรวม (หินปูน) จะช่วยแทรกอยู่ภายในเนื้อของกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นเพื่อลดการซึมผ่านของ

น้ำที่อาจกัดเซาะพื้นหรือชั้นดินภายใต้แผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นให้เกิดหลุม และกระเบื้องที่ปูพื้นก็จะเกิดการทรุดหรือแตกหักได้ง่าย งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์แผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นจากเศษถนนยางมะตอยเก่า ซึ่งเป็นการนำเศษวัสดุเหลือทิ้งที่ยากต่อการรีไซเคิลไปประยุกต์ใช้ในเชิงพาณิชย์ สร้างประโยชน์ต่อสังคม ใช้ต้นทุนในการผลิตต่ำ และช่วยรักษาสภาพแวดล้อม



รูปที่ 1 เศษยางมะตอยเก่าที่กองรวมกันรอการกำจัด



รูปที่ 2 ลักษณะและขนาดของเศษยางมะตอยที่ขุดจากถนนเก่า

2. วัสดุและอุปกรณ์

วัสดุและอุปกรณ์ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เศษถนนยางมะตอยเก่า ขนาดผ่านตะแกรง 3/8 นิ้ว (ทำมาจากหินปูน (Limestone) ผสมยางมะตอยเกรด AC 60/70) ทราบหายาบ สารเคมีผสมเพิ่มชนิดสารลดน้ำประเภท A น้ำประปา เครื่องผสมคอนกรีต เครื่องอัดแผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นแบบสั่นเขย่า พร้อมแบบหล่อกระเบื้อง

คอนกรีตปูพื้นขนาด 30x30x5 เซนติเมตร (รูปที่ 3) เครื่องย่อยหินพร้อมตะแกรงคัดขนาด (รูปที่ 4) ตะแกรงคัดขนาด เครื่องชั่งน้ำหนัก ชุดทดสอบหาค่าความหนาแน่น ความชื้น และการดูดซึมน้ำ เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine; UTM) และเครื่องทดสอบสัมประสิทธิ์การนำความร้อน



รูปที่ 3 เครื่องอัดกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นแบบสั่นเขย่า



รูปที่ 4 เครื่องย่อยหินพร้อมตะแกรงคัดขนาด

3. การออกแบบส่วนผสม

ออกแบบอัตราส่วนผสมของแผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นผสมเศษถนนยางมะตอยเก่า ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทรายหยาบ สารลดน้ำประเภท A และน้ำประปา เท่ากับ 1: 5: 0.02: 0.4 โดยน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมด แล้วจึงแทนที่ทรายด้วยเศษถนนยางมะตอยเก่าในปริมาณเพิ่มขึ้น อัตราร้อยละ 10 ตั้งแต่ร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 จนกระทั่งแผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นมีพื้นผิวหยาบ ไม่เรียบ หรือเกิดช่องว่างบริเวณผิวหน้ามาก เมื่อแทนที่เศษถนนยางมะตอยเก่าตั้งแต่ร้อยละ 60 ขึ้นไป ซึ่งไม่เป็นไปตามมาตรฐาน มอก.378-2531 เรื่องกระเบื้องคอนกรีต

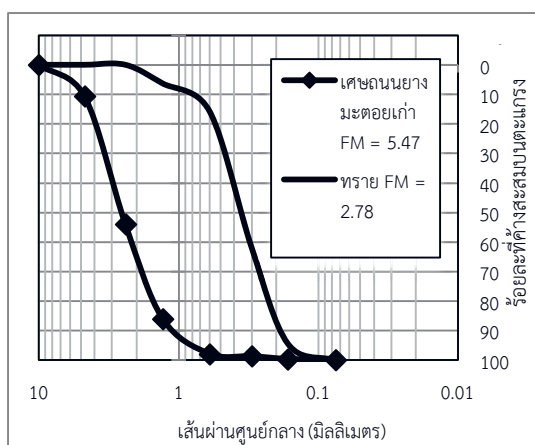
ปูพื้น [4] ในคุณสมบัติด้านลักษณะทั่วไป จึงได้อัตราส่วนผสมที่ใช้ในการวิจัยจำนวน 6 อัตราส่วน ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของแผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นผสมเศษถนนยางมะตอยเก่าโดยน้ำหนัก

อัตราส่วน	ปูนซีเมนต์	ทรายหยาบ	เศษยางมะตอย	สารลดน้ำ	น้ำ
A0	1	5.0	0.0	0.02	0.4
A0.5	1	4.5	0.5	0.02	0.4
A1	1	4.0	1.0	0.02	0.4
A1.5	1	3.5	1.5	0.02	0.4
A2	1	3.0	2.0	0.02	0.4
A2.5	1	2.5	2.5	0.02	0.4

4. การขึ้นรูปตัวอย่าง

เริ่มจากนำเศษถนนยางมะตอยเก่ามาบดย่อยผ่านตะแกรงเบอร์ 3/8 นิ้ว ด้วยเครื่องย่อยหินพร้อมตะแกรงคัดขนาด แล้วจึงหาค่าพิภักต์ความละเอียด (Fineness Modulus; FM) เพื่อเปรียบเทียบกับทราย ดังรูปที่ 5 จากนั้นตวงส่วนผสมของแผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นจากเศษถนนยางมะตอยเหลือทิ้งตามที่ออกแบบในตารางที่ 1 แล้วจึงผสมสารเคมีผสมเพิ่มชนิดสารลดน้ำประเภท A เข้ากับน้ำประปา ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท1 ทรายหยาบ เศษถนนยางมะตอยเหลือทิ้ง และน้ำประปาที่ผสมสารลดน้ำแล้วให้เข้ากันด้วยเครื่องผสมคอนกรีตดังรูปที่ 6 เตรียมแบบหล่อที่ติดตั้งอยู่กับเครื่องอัดแผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นแบบสั่นเขย่าโดยการทาน้ำมันหล่อลื่น จากนั้นเทส่วนผสมทั้งหมดลงในแบบหล่อ และขึ้นรูปแผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นผสมเศษถนนยางมะตอยเก่าด้วยเครื่องอัดแผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นแบบสั่นเขย่า ดังรูปที่ 7 และบ่มแผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นผสมเศษถนนยางมะตอยเก่าในอากาศตามระยะเวลาที่กำหนด ได้แก่ 7, 14, 21 และ 28 วัน ก่อนนำไปทดสอบ



รูปที่ 5 พิกัดความละเอียดของเศษถนนยางมะตอยเก่า และทราย



รูปที่ 6 การผสมส่วนผสมในเครื่องผสมคอนกรีต



รูปที่ 7 การอัดขึ้นรูปแผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้น

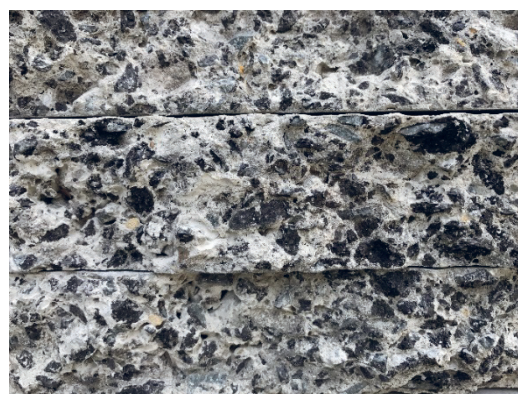
5. การทดสอบคุณสมบัติของตัวอย่าง

ทดสอบคุณสมบัติของแผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นผสมเศษถนนยางมะตอยเก่า ตามมาตรฐาน มอก. 378-2531 เรื่องกระเบื้องคอนกรีตปูพื้น [4] และมาตรฐานอื่นที่เกี่ยวข้อง โดยใช้จำนวนตัวอย่าง 5 ตัวอย่างต่อการทดสอบ ประกอบด้วยลักษณะทั่วไป

ความหนาแน่น ความต้านทานแรงดัดตามขวาง (รูปที่ 8 และ 9) การดูดซึมน้ำ การทดสอบสัมประสิทธิ์การนำความร้อนตามมาตรฐาน ASTM C177 [5] และการใช้งานจริง



รูปที่ 8 การทดสอบความต้านทานแรงดัดตามขวาง



รูปที่ 9 แผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นผสมเศษถนนยางมะตอยเก่าอัตราส่วน A2.5 ที่วิบัติจากแรงดัด

6. ผลการดำเนินงานวิจัย

จากการทดสอบคุณสมบัติของแผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นผสมเศษถนนยางมะตอยเก่าตามมาตรฐาน มอก.378-2531 เรื่องกระเบื้องคอนกรีตปูพื้น [4] และมาตรฐานอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง สามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังต่อไปนี้

6.1 ลักษณะทั่วไป

ผลการทดสอบลักษณะทั่วไปของแผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นผสมเศษถนนยางมะตอยเก่าทั้ง 6 อัตราส่วน โดยการตรวจพินิจความหนา ความเรียบสม่ำเสมอ ไม่แตกร้าว และความฉากของขอบ พบว่าแผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นทั้งหมดมีลักษณะทั่วไปผ่าน

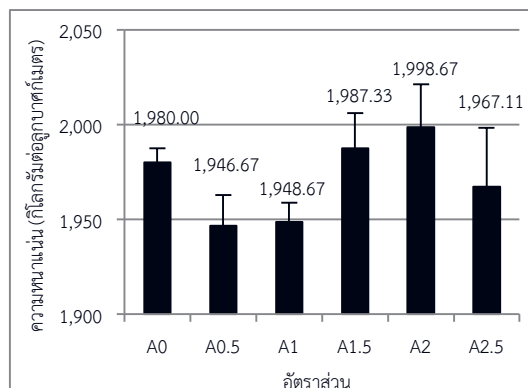
ตามที่มาตรฐาน มอก.378-2531 เรื่องกระเบื้องคอนกรีตปูพื้น [4] กำหนด (รูปที่ 10) ซึ่งเป็นผลมาจากการควบคุมอัตราส่วนการแทนที่ทรายด้วยเศษถนนยางมะตอยที่ออกแบบไม่ให้มากเกินไปกว่าอัตราส่วน A2.5 (ใช้เศษถนนยางมะตอยเก่าแทนที่ทรายหยาบไม่เกินร้อยละ 50) เนื่องจากจะทำให้ผิวหน้าไม่เรียบ และขอบไม่ได้นაკ



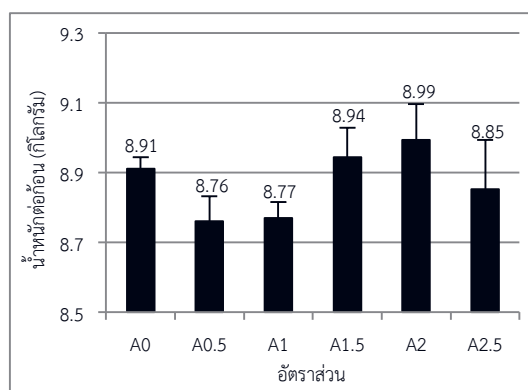
รูปที่ 10 การตรวจพินิจลักษณะทั่วไปของแผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นผสมเศษถนนยางมะตอยเก่า

6.2 ความหนาแน่น

ความหนาแน่นของแผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นผสมเศษถนนยางมะตอยเก่าเป็นคุณสมบัติที่แสดงถึงน้ำหนักของแผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้น โดยแผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นที่มีความหนาแน่นสูงจะมีน้ำหนักมาก และแผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นที่มีความหนาแน่นต่ำก็จะมีน้ำหนักน้อย ซึ่งผลการทดสอบความหนาแน่นของแผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นผสมเศษถนนยางมะตอยเก่าในรูปที่ 11 และ 12 พบว่าแผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นทั้ง 6 อัตราส่วน มีค่าความหนาแน่นหรือน้ำหนักต่อก้อนใกล้เคียงกันในทุกอัตราส่วน เป็นผลมาจากทรายและหินปูน (มวลรวมหลักในเศษถนนยางมะตอยเก่า) เป็นวัสดุที่มีค่าความหนาแน่นแตกต่างกันไม่มาก โดยทรายมีค่าความหนาแน่น 1,450 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และหินปูนมีค่าความหนาแน่น 1,105 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร [6-7] ทั้งนี้ความหนาแน่นของแผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นผสมเศษถนนยางมะตอยเก่าทุกอัตราส่วน มีค่าความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 1,946.67 ถึง 1,998.67 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งต่ำกว่าความหนาแน่นของคอนกรีตที่มีค่าสูงที่สุดประมาณ 2,400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร [7]



รูปที่ 11 ความหนาแน่นของแผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นผสมเศษถนนยางมะตอยเก่า

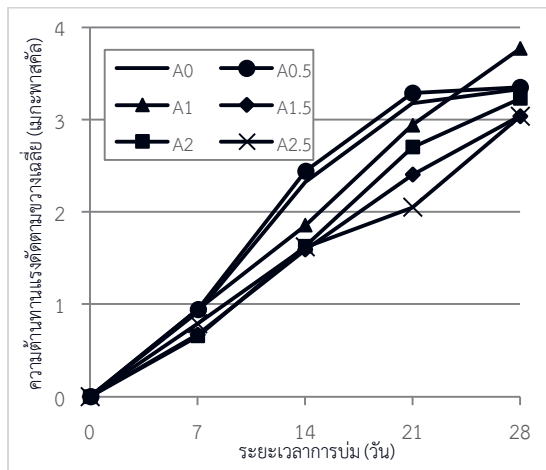


รูปที่ 12 น้ำหนักต่อก้อนของแผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นผสมเศษถนนยางมะตอยเก่า

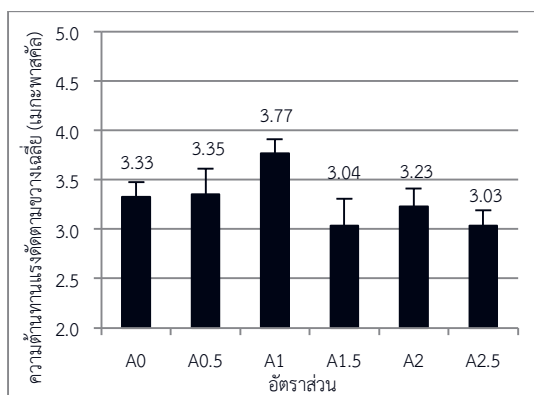
6.3 ความต้านทานแรงดัดตามขวาง

ผลการทดสอบความต้านทานแรงดัดตามขวางหรือความต้านทานแรงดัดของแผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นผสมเศษถนนยางมะตอยเก่า ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเรื่องกระเบื้องคอนกรีตปูพื้น (มอก.378-2531) [4] ในรูปที่ 13 และ 14 พบว่า แผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นทั้งที่ผสมและไม่ผสมเศษถนนยางมะตอยเก่าทั้ง 6 อัตราส่วน มีค่าความต้านทานแรงดัดที่ใกล้เคียงกัน และทั้งหมดมีค่าผ่านตามมาตรฐาน ซึ่งกำหนดให้ค่าความต้านทานแรงดัดตามขวางของกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นแต่ละแผ่นต้องไม่น้อยกว่า 2.5 เมกะพาสคัล และค่าเฉลี่ยรวมของทุกแผ่นต้องไม่น้อยกว่า 3 เมกะพาสคัล แสดงว่าเศษถนนยางมะตอยเก่าสามารถใช้เป็นมวลรวมในผลิตภัณฑ์กระเบื้องคอนกรีตปูพื้นได้ดีใกล้เคียงกับทรายที่เป็นมวลรวมที่นิยมใช้ทั่วไปในผลิตภัณฑ์นี้ อย่างไรก็ตามหาก

พิจารณาจากผลการทดสอบโดยละเอียดจะเห็นว่า กระเบื้องคอนกรีตปูพื้นผสมเศษถนนยางมะตอยเก่า อัตราส่วน A1 เป็นอัตราส่วนที่มีค่าความต้านทานแรงดัดสูงที่สุดกรณีที่บ่มนาน 28 วัน รองลงมาคือ อัตราส่วน A0.5, A0 (อัตราส่วนที่ไม่ผสมเศษถนนยางมะตอยเก่า), A2, A1.5, และอัตราส่วน A2.5 เป็นอัตราส่วนที่มีค่าความต้านทานแรงดัดต่ำที่สุดตามลำดับ ทั้งนี้อัตราส่วน A2.5 มีค่าความต้านทานแรงดัดสูงกว่า 3 เมกะพาสคัลเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าการแทนที่ทรายด้วยเศษถนนยางมะตอยเก่าในอัตราส่วนดังกล่าวเป็นอัตราส่วนที่มีปริมาณเศษถนนยางมะตอยเก่ามากที่สุดที่กระเบื้องคอนกรีตปูพื้นจะผ่านมาตรฐานได้เช่นเดียวกับผลการทดสอบลักษณะทั่วไป



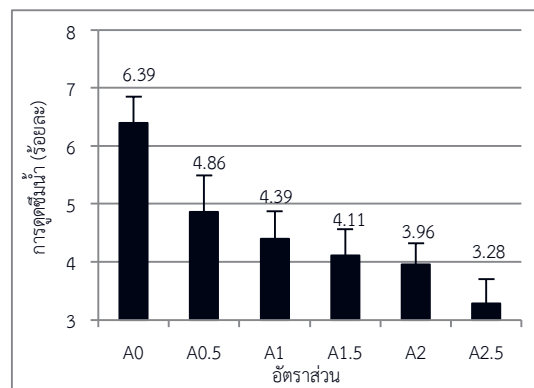
รูปที่ 13 ความต้านทานแรงดัดตามช่วงเวลาของแผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นผสมเศษถนนยางมะตอยเก่าที่ระยะเวลาการบ่มต่างๆ



รูปที่ 14 ความต้านทานแรงดัดตามช่วงเวลาของแผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นผสมเศษถนนยางมะตอยเก่าที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน

6.4 การดูดซึมน้ำ

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเรื่อง กระเบื้องคอนกรีตปูพื้น (มอก.378-2531) กำหนดให้ค่าการดูดซึมน้ำของกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นแต่ละแผ่นต้องไม่เกินร้อยละ 10 [4] โดยผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของแผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นทั้งที่ผสมและไม่ผสมเศษถนนยางมะตอยเก่าในรูปที่ 15 พบว่า ค่าการดูดซึมน้ำของแผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นทั้งหมด สามารถผ่านตามที่มาตรฐานกำหนด โดยกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นผสมเศษถนนยางมะตอยเก่าอัตราส่วน A2.5 เป็นอัตราส่วนที่มีค่าการดูดซึมน้ำต่ำที่สุด รองลงมาคือ อัตราส่วน A2 A1.5 A1 A0.5 และกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นที่ไม่ผสมเศษถนนยางมะตอยเก่าอัตราส่วน A0 เป็นอัตราส่วนที่มีค่าการดูดซึมน้ำสูงที่สุด ตามลำดับ ทั้งนี้เห็นได้ว่าเศษถนนยางมะตอยเก่าสามารถช่วยลดค่าการดูดซึมน้ำให้กับกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นได้ดี ซึ่งเป็นผลมาจากยางมะตอยเป็นวัสดุที่มีความทึบน้ำ ทำให้เมื่อแทรกเข้าไปในเนื้อกระเบื้องคอนกรีตจึงช่วยลดการดูดซึมน้ำได้ดังกล่าว [3, 8]

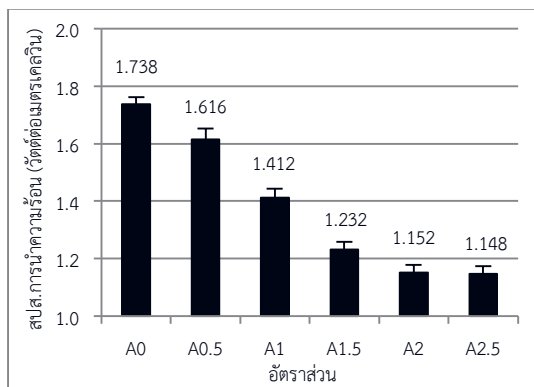


รูปที่ 15 การดูดซึมน้ำของแผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นผสมเศษถนนยางมะตอยเก่า

6.5 สัมประสิทธิ์การนำความร้อน

ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์การนำความร้อนหรือสภาพการนำความร้อนของแผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นทั้งที่ผสมและไม่ผสมเศษถนนยางมะตอยเก่าในรูปที่ 16 สามารถสรุปได้ว่า แผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นผสมเศษถนนยางมะตอยเก่าในปริมาณมากที่สุด หรืออัตราส่วน A2.5 เป็นอัตราส่วนที่มีสัมประสิทธิ์การนำความร้อนหรือสภาพนำความร้อนต่ำที่สุด รองลงมาคือ อัตราส่วน A2 A1.5 A1 A0.5 และแผ่นกระเบื้อง

คอนกรีตปูพื้นที่ไม่ผสมเศษถนนยางมะตอยเก่า (A0) เป็นอัตราส่วนที่มีสัมประสิทธิ์การนำความร้อนหรือสภาพนำความร้อนสูงที่สุด โดยแผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำจะเป็นวัสดุที่เป็นฉนวนป้องกันความร้อนดีกว่าแผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูง [5] ทั้งนี้เป็นผลมาจากความเป็นฉนวนป้องกันความร้อนที่ดีของยางมะตอย (ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของยางมะตอยมีค่าต่ำ 0.75 วัตต์ต่อเมตร.เคลวิน) [9]



รูปที่ 16 สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นผสมเศษถนนยางมะตอยเก่า

6.6 การใช้งานจริง

จากการพิจารณาคุณสมบัติของแผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นผสมเศษถนนยางมะตอยเก่า ทำให้เลือกแผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นผสมเศษถนนยางมะตอยเก่าอัตราส่วน A2.5 มาใช้ในการทดสอบการใช้งานจริง โดยทำการปูพื้นบริเวณรอบอาคารทดสอบ เพื่อสังเกตความแตกต่างในการใช้งานของแผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นที่พัฒนาขึ้นมา ในรูปที่ 17 พบว่าแผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นผสมเศษถนนยางมะตอยเก่าอัตราส่วน A2.5 สามารถใช้งานได้เช่นเดียวกับแผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นทั่วไปในท้องตลาด โดยมีพื้นผิวที่เรียบและมีคุณสมบัติตามมาตรฐาน มอก.378-2531 เรื่องกระเบื้องคอนกรีตปูพื้น



รูปที่ 17 การนำแผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นผสมเศษถนนยางมะตอยเก่าไปใช้งานจริง

7. สรุปผล และข้อเสนอแนะ

จากผลการพัฒนาต้นแบบผลิตภัณฑ์แผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นที่ใช้เศษถนนยางมะตอยเก่าเป็นมวลรวมแทนที่ทราย สามารถสรุปได้ว่า แผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นผสมเศษถนนยางมะตอยเก่า สามารถขึ้นรูปได้ด้วยวิธีการอัดและสั่นเขย่าโดยใช้เครื่องจักรทั่วไปที่มีราคาไม่สูง ซึ่งอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผลิตแผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นผสมเศษถนนยางมะตอยเก่า คือ อัตราส่วน A2.5 (ใช้เศษถนนยางมะตอยเก่าแทนที่ทรายหยาบร้อยละ 50) เนื่องจากเป็นอัตราส่วนที่ทำให้แผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นผสมเศษถนนยางมะตอยเก่าที่มีสมบัติผ่านตามที่มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเรื่องกระเบื้องคอนกรีตปูพื้น (มอก.378-2531) กำหนด และเป็นอัตราส่วนที่ใช้เศษถนนยางมะตอยเก่าในปริมาณมากที่สุดด้วย ทั้งนี้อัตราส่วนดังกล่าวจะทำให้แผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นมีความหนาแน่น 1,967.11 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าการดูดซึมน้ำ ร้อยละ 3.28 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน 1.148 วัตต์ต่อเมตร.เคลวิน และค่าความต้านทานแรงดัดตามขวาง 3.03 เมกะพาสคัล ซึ่งปริมาณเศษถนนยางมะตอยเก่าที่ผสมลงในแผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นแทนที่ทรายจะช่วยลดการดูดซึมน้ำและลดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ในขณะที่ความหนาแน่นและความต้านทานแรงดัดมีค่าใกล้เคียงกับแผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นที่ไม่ผสมเศษถนนยางมะตอยเก่า นอกจากนี้แผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นผสมเศษถนนยางมะตอยเก่ายังสามารถใช้งานได้เช่นเดียวกับแผ่นกระเบื้องคอนกรีตปูพื้นทั่วไปในการศึกษาต่อไปควรพัฒนาแผ่นกระเบื้องคอนกรีต

ปูพื้นผสมเศษถนนยางมะตอยเก่าให้มีผิวหน้าที่สวยงาม และโดดเด่นมากขึ้น เพื่อให้สามารถแข่งขันและเป็นทางเลือกของผลิตภัณฑ์ปูพื้นสำหรับตกแต่งอาคารได้ดียิ่งขึ้น

8. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณแผ่นดินมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ประจำปี 2561 ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] Department of Highway. 2543. Design manual of asphalt road: asphalt institute method vol.8 (1970). Bangkok: Department of Highway; 2000. (in Thai)
- [2] Katekaew S. Improvement of subbase with emulsion for recycling the cold mix asphalt road. Bangkok: TIPCO Asphalt Public Company Limited; 2008. (in Thai)
- [3] Department of Rural Roads. Rural roads standard (RRS.215 – 2557): standard of aggregates for cold mixed asphalt. Bangkok: Department of Rural Roads; 2014. (in Thai)
- [4] Thai Industrial Standards Institute (TISI). Thai industrial standard no.378-1988: concrete floor tile. Bangkok: Thai Industrial Standards Institute; 1988. (in Thai)
- [5] American Society for Testing and Materials (ASTM). Standard test method for steady-state heat flux measurements and thermal transmission properties by means of the guarded-hot-plate apparatus (ASTM C177). Philadelphia: ASTM International; 2010.
- [6] Weeranukul P, Suweero K, Weeranukul I. Utilization of vesicular basalt fragment as aggregate in cement board for knockdown building wall. Journal of Engineering, RMUTT. 2019; 17(1): 15-24. (in Thai)

- [7] Jindaprasert P, Jaturapitakkul C. Cement, pozzolan, and concrete. 7th ed. Bangkok: ACI Partners with Thailand Concrete Association; 2012. (in Thai)
- [8] TIPCO Asphalt Public Company Limited. Fundamental of asphalt and application. Bangkok: TIPCO Asphalt Public Company Limited; 2007. (in Thai)
- [9] Young HD. Hyper Physics. University Physics. Boston: Addison Wesley; 1992.

การคัดเลือกเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่เหมาะสมจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรโดยใช้เทคนิคประสิทธิภาพแบบไขว้

วรรณรพ ชันธิรัตน์¹, นรงค์ วิชาพา^{2*}, อนุชา ศรีบุญรัมย์³ และอุทัย ธารพศรี⁴
Wanrop.kh@ksu.ac.th¹, Narong.wi@ksu.ac.th^{2*}, Anucha.sr@ksu.ac.th³, Uthai.th@ksu.ac.th⁴

¹⁻⁴ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

Received : 2-Oct-2019
Revised : 7-Jan-2020
Accepted : 9-Jan-2020

บทคัดย่อ

แนวคิดในการนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งเป็นหัวข้อที่น่าสนใจ อย่างไรก็ตามการอัดแท่งแต่ละชนิดควรถูกพิจารณาคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องหลายอย่างพร้อม ๆ กัน โดยในงานวิจัยนี้ถ่านอัดแท่งจากวัสดุทางการเกษตรจำนวน 7 ชนิด ได้ถูกประเมินประสิทธิภาพและเรียงลำดับความสำคัญ ลำดับแรกถ่านอัดแท่งแต่ละชนิดวัสดุจะถูกนำไปทดสอบคุณสมบัติที่สำคัญ ได้แก่ ค่าความร้อน ปริมาณคาร์บอนคงตัว ปริมาณความชื้น และปริมาณเถ้า หลังจากนั้นการวิเคราะห์การล้อมกรอบข้อมูล (Data Envelopment Analysis; DEA) จะถูกใช้สำหรับคำนวณประสิทธิภาพของแต่ละวัสดุ สุดท้ายถ่านอัดแท่งแต่ละชนิดจะถูกประเมินความสำคัญโดยใช้เทคนิคประสิทธิภาพแบบไขว้ (DEA Cross - Efficiency) ผลการศึกษาพบว่าชี้เลื้อย และกะลามะพร้าว เป็นพลังงานทางเลือกที่มีประสิทธิภาพ (ค่าคะแนนประสิทธิภาพเท่ากับ 1) โดยเรียงลำดับความสำคัญได้ดังนี้ กะลามะพร้าว ชี้เลื้อย กากอ้อย กากอ้อย กากอ้อย กากอ้อย และ ผักตบชวา ตามลำดับ

คำสำคัญ: การวิเคราะห์การล้อมกรอบข้อมูล ถ่านอัดแท่ง ประสิทธิภาพแบบไขว้ วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร

Selection of the Suitable Biomass Fuel Briquettes Generated from Agricultural Waste Using DEA-Cross-efficiency

Wanrop Khanthirat¹, Narong Wichapa^{2*}, Anucha Sriburum³ and Uthai Tarnpornsi⁴
wanrop.kh@ksu.ac.th¹, narong.wi@ksu.ac.th^{2*}, anucha.sr@ksu.ac.th³, Uthai.th@ksu.ac.th⁴

¹⁻⁴ Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University

Received	: 2-Oct-2019
Revised	: 7-Jan-2020
Accepted	: 9-Jan-2020

Abstract

The idea of using the residues of agricultural materials for processing into fuel briquettes is an interesting issue. However, each fuel briquette must be considered several properties simultaneously. In this paper, the fuel briquettes from seven agricultural materials were evaluated the efficiency score and ranking. Firstly, the fuel briquettes were tested the properties, including the heating value, fixed carbon, moisture content and ash. After that, Data Environment Analysis (DEA) was used to evaluate as the efficiency scores of each agricultural material. Finally, each fuel briquette was evaluated using DEA Cross-Efficiency. The results show that the efficiency scores of sawdust and coconut shell are efficient (Efficiency Score =1). The ranking for suitable agricultural materials were sawdust, coconut shell, bagasse, cattail, rice husk, sensitive plant and water hyacinth respectively.

Keywords: Data Environment Analysis, Fuel Briquette, DEA Cross- Efficiency, Agricultural Waste

1. บทนำ

ในปัจจุบันอัตราการใช้พลังงานของประเทศไทย เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทุกปี อย่างไรก็ตามแหล่งพลังงานในประเทศไทยกลับมีอัตราการผลิตไม่เพียงพอ กับความต้องการ ด้วยเหตุนี้ประเทศไทยจึงต้องนำเข้า พลังงานจากต่างประเทศเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทุกปี ใน 2 เดือนแรกของปี 2562 ประเทศไทยมีการใช้พลังงาน ขั้นสุดท้าย มีปริมาณ 14,820 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ เพิ่มขึ้นจากช่วงเดียวกันของปีก่อน ร้อยละ 4.8 คิดเป็น มูลค่ากว่า 210,879 ล้านบาท และมีการนำเข้าพลังงาน คิดเป็นมูลค่ากว่า 172,873 ล้านบาท โดยในช่วงสอง เดือนแรกของปี 2562 ประเทศไทยมีการใช้พลังงาน ทดแทน 2,866 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ หรือเพิ่มขึ้น ร้อยละ 28.1 จากช่วงเดียวกันของปีก่อน [1] การใช้ พลังงานทดแทนจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรจึงเป็น แนวทางหนึ่งในการแก้ปัญหาการขาดแคลนพลังงาน ของประเทศได้ [2] ยิ่งไปกว่านั้นการนำวัสดุเหลือใช้ทาง การเกษตรมาทำให้เกิดประโยชน์ยังเป็นการแก้ปัญหา การกำจัดของเสียจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรอีก รูปแบบหนึ่งด้วย สอดคล้องกับแผนพัฒนาพลังงาน ทดแทนและพลังงานทางเลือกที่สนับสนุนในการใช้ พลังงานจากชีวมวลเพิ่มขึ้น [3] นอกจากนี้พลังงานจาก ชีวมวลเป็นพลังงานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถแปรรูปวัสดุเป็นแท่งเชื้อเพลิงใช้สำหรับ ประกอบอาหารได้โดยตรง ดังนั้นพลังงานชีวมวลจาก วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรจึงเป็นแหล่งพลังงานที่ เหมาะสมต่อการพัฒนาที่ยั่งยืน ด้วยเหตุนี้วัสดุเหลือใช้ ทางการเกษตรจึงถูกนำมาแปรรูปเพื่อเป็นเชื้อเพลิงชี วมวลอัดแท่ง ดังแสดงในวรรณกรรม [4], [5], [6], [7] ซึ่ง เชื้อเพลิงเหล่านี้นสามารถนำมาแปรรูปเป็นถ่านอัดแท่ง ที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทน ฟืนไม้ได้เป็นอย่างดี

การนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาแปรรูป เป็นถ่านอัดแท่งจากวัสดุ 7 ชนิด ได้แก่ กากอ้อย กากอ้อย ฤๅษี ผักตบชวา แกลบ กะลามะพร้าว ชี้อ้อย และ ไมยราบ มาทดสอบหาค่าคุณสมบัติของวัสดุที่สำคัญ สำหรับการแปรรูปเป็นแท่งเชื้อเพลิง โดยวัสดุเหลือใช้ ทางการเกษตรเหล่านี้เป็นวัสดุที่พบในท้องถิ่นและส่วน ใหญ่จะไม่ถูกนำมาแปรรูปเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ ดังนั้น การนำวัสดุทางการเกษตรเหล่านี้มาทดลองเพื่อ ตรวจสอบคุณสมบัติที่สำคัญสำหรับเป็นเชื้อเพลิง ทดแทนพลังงานความร้อนจากถ่านไม้ ซึ่งคุณสมบัติที่

สำคัญ ได้แก่ ค่าความร้อน ถ่านคงตัว ความชื้น และ ปริมาณเถ้า โดยแท่งเชื้อเพลิงหรือถ่านอัดแท่งนี้จะช่วย ประหยัดค่าใช้จ่ายในการซื้อเชื้อเพลิงจากท้องตลาด ลด ปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม สามารถนำวัสดุเหลือใช้ทาง การเกษตรมาแปรรูปเพื่อเพิ่มมูลค่า เกิดประโยชน์ต่อ ชุมชนหรือท้องถิ่น และสิ่งสำคัญประการหนึ่งคือ เชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งถือว่าเป็นพลังงานทางเลือกที่มี ความยั่งยืน

ปัญหาแบบหลายเกณฑ์ (Multi-Criteria Decision Making problem, MCDM problem) สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท [8] ได้แก่ ปัญหาการ ตัดสินใจแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Decision Making problem, MODM) และปัญหาการ ตัดสินใจแบบหลายคุณลักษณะ (Multi-Attribute Decision Making problem, MADM) ในการพิจารณา คัดเลือกวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการนำมาแปรรูปเป็น ถ่านอัดแท่งเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนถ่านไม้ นั้น จะต้องพิจารณาคุณสมบัติหรือปัจจัยที่เกี่ยวข้องหลาย ปัจจัย ได้แก่ ค่าความร้อน ถ่านคงตัว ความชื้น และ ปริมาณเถ้า ปัญหานี้จึงเป็นปัญหาการตัดสินใจแบบ หลายคุณลักษณะ หรือ MADM เนื่องจากมีปัจจัยที่ เกี่ยวข้องหลายประการ และมีทางเลือกหลายทางเลือก ที่ต้องพิจารณาไปพร้อม ๆ กัน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ หาทางเลือกที่เหมาะสมที่สุด แม้ว่าจะมีวิธีการในการ แก้ปัญหา MADM หลากหลายวิธี เช่น AHP [9], [10] TOPSIS [11], [12] และ DEA [13] อย่างไรก็ตาม เทคนิค DEA เป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมในการวัด ประสิทธิภาพของหน่วยผลิต (Decision Making Units, DMUs) ที่มีหลายหน่วยผลิต โดยใช้ข้อมูลปัจจัยนำเข้า และปัจจัยผลผลิต (Inputs and outputs) ที่มีหลาย ปัจจัยได้ [13], [14], [15] โดยไม่ต้องกำหนดน้ำหนัก ให้กับปัจจัยนำเข้าและปัจจัยผลผลิต ยิ่งไปกว่านั้น ข้อมูลของแต่ละปัจจัยที่มีหน่วยต่างกันไม่จำเป็นต้องทำ การนอร์มอลไลซ์ ข้อมูล ทำให้ง่ายต่อการวัด ประสิทธิภาพของหน่วยผลิตที่มีจำนวนมาก ปัจจัย ผลผลิตหลายปัจจัย และปัจจัยนำเข้าหลายปัจจัย พร้อม ๆ กันได้ อย่างไรก็ตามข้อด้อย (Drawback) ที่ สำคัญของ DEA คือไม่สามารถเรียงลำดับความสำคัญ (Ranking) ของหน่วยผลิตทั้งหมดได้หากมีหน่วยผลิตที่ มีประสิทธิภาพ (คะแนนประสิทธิภาพเท่ากับ 1) จำนวนมากกว่าหนึ่งหน่วยผลิต ด้วยเหตุนี้จึงมีนักวิจัย จำนวนมากได้นำเสนอวิธีเรียงลำดับความสำคัญของ

หน่วยผลิตเพื่อเอาชนะข้อด้อยนี้ จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าเทคนิคประสิทธิภาพแบบไขว้ (DEA Cross-Efficiency) เป็นหนึ่งในวิธีเรียงลำดับความสำคัญที่ได้รับความนิยมสูงและถูกนำไปประยุกต์ใช้กับงานวิจัยในหลายสาขา เช่น [16], [17], [18]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอการประยุกต์ใช้ DEA สำหรับประเมินประสิทธิภาพของวัสดุทางการเกษตร และ DEA จะถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการเรียงลำดับความสำคัญของวัสดุ เพื่อประเมินและเรียงลำดับความสำคัญของวัสดุทางการเกษตรที่เหมาะสมสำหรับการนำมาแปรรูปเป็นถ่านอัดแท่ง เริ่มจากการนำวัสดุที่เหลือใช้ทางการเกษตรมาแปรรูปเป็นถ่านอัดแท่ง จากนั้นนำถ่านอัดแท่งจากวัสดุทางการเกษตรชนิดต่าง ๆ มาทดสอบหาคุณสมบัติที่จำเป็นสำหรับการเป็นเชื้อเพลิงหุงต้ม โดยคุณสมบัติหรือปัจจัยที่สำคัญจะต้องถูกนำมาพิจารณา ได้แก่ ค่าความร้อนคาร์บอนคงตัว ความชื้น และปริมาณเถ้า จากนั้นนำข้อมูลคุณสมบัติที่ได้เหล่านี้มาคำนวณหาค่าคะแนนประสิทธิภาพโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์การล้อมกรอบข้อมูล หรือ DEA ขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นการจัดเรียงลำดับความสำคัญของวัสดุสำหรับการแปรรูปเป็นถ่านอัดแท่ง โดยใช้เทคนิค DEA Cross-Efficiency

2. ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1. การวิเคราะห์การล้อมกรอบข้อมูลแบบประสิทธิภาพไขว้

แนวคิดของเทคนิค DEA ได้ถูกนำเสนอโดย Farrell ในปี 1957 [19] อย่างไรก็ตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเทคนิค DEA ได้ถูกนำเสนอในภายหลังโดย Charnes, Cooper and Rhodes [14] โดยเรียกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ว่า DEA ซึ่งเป็นเทคนิคการวัดประสิทธิภาพเชิงสัมพัทธ์ (Relative Efficiency) โดยการเปรียบเทียบค่าคะแนนประสิทธิภาพที่คำนวณได้ในแต่ละหน่วยผลิตกับค่าที่ได้จากหน่วยผลิตที่ดีที่สุด (Best Practice) หรืออาจกล่าวได้ว่าหน่วยผลิตนั้นเป็นหน่วยผลิตที่อยู่ในระดับแนวหน้า (Frontier) หรือหน่วยผลิตที่มีประสิทธิภาพ (Efficiency) ส่วนหน่วยผลิตอื่นๆ จะมีประสิทธิภาพที่ต่ำกว่า (Inefficiency)

โดยทั่วไปหน่วยผลิตที่มีประสิทธิภาพจะมีค่าคะแนนประสิทธิภาพ (Efficiency Score) เท่ากับ 1 ในส่วนหน่วยผลิตที่มีค่าคะแนนประสิทธิภาพน้อยกว่า 1

จะเป็นหน่วยผลิตที่ไม่มีคุณภาพ จากอดีตจนถึงปัจจุบันเทคนิค DEA ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้กับงานวิจัยหลากหลายสาขาดังแสดงในวรรณกรรม [20], [21], [22] นอกจากนี้เทคนิค DEA ยังสามารถนำมาใช้เป็นเครื่องมือช่วยในการตัดสินใจแบบหลายคุณลักษณะ หรือ MADM [23], [24] โดยทางเลือก (Alternatives) ตามมุมมองของเทคนิค MADM จะถูกมองเป็นหน่วยผลิต หรือ DMUs ในเทคนิค DEA ส่วนปัจจัย (Criteria) ในเครื่องมือ MADM จะถูกมองเป็นปัจจัยนำเข้าหรือปัจจัยผลผลิต (Inputs or outputs) ซึ่งเทคนิค DEA ได้รับความนิยมเป็นอย่างสูงในงานวิจัยหลากหลายสาขา เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ ดังนี้ [25], [26]: (1) สามารถประเมินประสิทธิภาพหน่วยผลิตที่มีปัจจัยนำเข้าและปัจจัยผลผลิตหลายปัจจัยได้ (2) ไม่จำเป็นต้องมีการนอร์มอลไลซ์ข้อมูลก่อนการคำนวณ (3) ไม่จำเป็นต้องกำหนดน้ำหนักความสำคัญของแต่ละปัจจัยเนื่องจากเทคนิค DEA สามารถให้ค่าน้ำหนักความสำคัญเองได้ โดยในปัจจุบัน DEA ยังคงได้รับความนิยมในการนำมาใช้ในการวัดประสิทธิภาพของหน่วยผลิตหรือองค์กรหลากหลายสาขา และยังคงมีการพัฒนา DEA ในรูปแบบต่างๆ สำหรับการแก้ปัญหาตามธรรมชาติหรือตามลักษณะของปัญหาที่เกิดขึ้นจริง เนื่องจากข้อด้อยของเทคนิค DEA คือไม่สามารถเรียงลำดับความสำคัญของหน่วยผลิตทั้งหมด หากจำนวนหน่วยผลิตที่มีประสิทธิภาพมีจำนวนมากกว่าหนึ่งหน่วย ดังนั้นเพื่อที่จะเอาชนะข้อด้อยนี้ นักวิจัยจำนวนหนึ่งได้นำเสนอเทคนิคประสิทธิภาพแบบไขว้ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมอย่างสูง [27], [28] สำหรับเรียงลำดับความสำคัญของหน่วยผลิตทั้งหมดได้

2.2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตถ่านอัดแท่งจากวัสดุทางการเกษตร

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่ามีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากวัสดุทางการเกษตรหลายชนิด เช่น

รุ่งโรจน์ พุทธิสกุล [29] ได้แปรรูปวัสดุจากกะลามะพร้าว และถ่านเห้จ้ามันสำปะหลัง เป็นถ่านอัดแท่ง ผลการทดสอบคุณสมบัติทางความร้อนของถ่านอัดแท่งเท่ากับ 5,003 cal/g ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน มผช.238/2547 โดยมีต้นทุนการผลิตถ่านอัดแท่งเท่ากับ 5.35 บาท/กิโลกรัม และกำลังการผลิต 400 กิโลกรัม/วัน ระยะเวลาการคืนทุนประมาณ 1.4 ปี

เอกลักษณ์ กิติภักตร์ถาวร [5] ได้ศึกษากานอัดแท่งจากชีวมวลและตะกอนเปียกอุตสาหกรรมผลิตเอทานอล ผลการทดลองพบว่ากานอัดแท่งจากตะกอนเปียกผสมร่วมกับกะลามะพร้าวให้ค่าความร้อนสูงสุด รองลงมา ได้แก่เปลือกมังคุด และเปลือกทุเรียน ตามลำดับ โดยอัตราส่วนผสมของกานอัดแท่งจากตะกอนเปียกผสมร่วมกับชีวมวลในอัตราส่วน 5:5 เป็นอัตราส่วนที่กานอัดแท่งมีคุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงดีที่สุด มีความคุ้มค่าในการลงทุนสูง และสามารถคืนทุนในระยะเวลาอันสั้น จากผลการวิจัยนี้สามารถนำไปส่งเสริมและพัฒนาการนำวัสดุของเสียเหลือทิ้งจากการผลิตและการบริโภคทางการเกษตรนำมาใช้ประโยชน์อย่างคุ้มค่าและเป็นอีกหนึ่งทางที่ช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมได้อีกทางหนึ่ง

แม้ว่าจะมีงานวิจัยอีกจำนวนมาก เช่น นริศ ชุตสว่าง [30] และ ปัญจรัตน์ โจลานันท์ [31] ได้นำเสนอการแปรรูปวัสดุทางการเกษตรเป็นกานอัดแท่ง แต่ยังไม่มีการวิจัยใดที่นำเสนอวิธีการวัดประสิทธิภาพของกานอัดแท่งที่ผลิตขึ้น เนื่องจากมีหลายปัจจัยที่ต้องพิจารณาไปพร้อม ๆ กัน ทั้งปัจจัยนำเข้า (Inputs) และปัจจัยผลผลิต (Outputs) รวมถึงวัดประสิทธิภาพของกานอัดแท่งแต่ละชนิดหรือเรียกว่าหน่วยผลิต (Decision Making Unit, DMUs) ซึ่งวิธีวัดประสิทธิภาพของหน่วยผลิตจะมีความซับซ้อนเนื่องจากจำนวนปัจจัยผลผลิต และปัจจัยนำเข้า มีหลายปัจจัยที่ต้องใช้ในการคำนวณ ซึ่งเป็นข้อด้อยอย่างหนึ่งของงานวิจัยในด้านนี้ และเป็นอุปสรรคในการพัฒนาเพื่อต่อยอดการผลิตเชิงพาณิชย์ที่ยั่งยืนได้ การวัดประสิทธิภาพของกานอัดแท่งแต่ละชนิดจึงเป็นจุดเริ่มต้นที่สำคัญที่จะนำไปสู่การปรับปรุงหรือพัฒนาการผลิตกานอัดแท่งให้มีประสิทธิภาพสูงสุด เพื่อเป็นประโยชน์ต่อหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ทั้งภาครัฐ ภาคเอกชน และผู้บริโภคต่อไป

เนื้อหาในส่วนที่เหลือของบทความนี้จะประกอบด้วย วิธีการดำเนินการวิจัย ผลการศึกษา และสรุปผล ตามลำดับ

3. วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการประเมินประสิทธิภาพของกานอัดแท่งจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร โดยอาศัยข้อมูลการทดสอบคุณสมบัติกานอัดแท่งจากวัสดุเหลือใช้ในการเกษตรทั้ง 7 ชนิด โดยขั้นตอนการวิจัยจะแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

3.1. การอัดแท่งเชื้อเพลิง

ในงานวิจัยนี้เทคนิคการอัดแท่งเชื้อเพลิงจะใช้วิธีอัดเย็น โดยใช้แบริ่งน้ำมันสำหรับเป็นตัวประสานเนื่องจากแบริ่งน้ำมันสำหรับเป็นตัวประสานที่มีค่าความร้อนสูงและสามารถยึดเกาะวัสดุให้เป็นเนื้อเดียวและเพิ่มคุณสมบัติทางกายภาพได้ดี ขั้นตอนการอัดแท่งเชื้อเพลิงเป็นดังต่อไปนี้

เตรียมวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่มีอยู่ในท้องถิ่นจำนวน 7 ชนิด เพื่อเป็นส่วนผสมหลักในการผลิตกานอัดแท่ง โดยรายละเอียดของวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่ถูกคัดเลือกเพื่อการศึกษาในครั้งนี้ ได้แก่ กากอ้อย กากธูปฤๅษี ผักตบชวา แกลบ กะลามะพร้าว ชี้เลื้อย และไมยราบ จากนั้นเผาชีวมวลทั้ง 7 ชนิด เพื่อเตรียมผงกานสำหรับนำมาใช้เป็นวัสดุหลักของกานอัดแท่ง โดยกานที่ได้จากการเผาจะถูกนำมาบดให้ละเอียดเป็นผงกานเตรียมไว้

ขั้นตอนต่อมาเป็นการเตรียมตัวประสานรายละเอียดดังนี้ เตรียมน้ำแบริ่งน้ำมันสำหรับและน้ำผสมกันในอัตราส่วนโดยปริมาตร 1:3 มาให้ความร้อนและกวนจนมีลักษณะเหนียวข้น จนได้ลักษณะของน้ำแบริ่งน้ำมันสำหรับที่สามารถเป็นตัวประสานในกระบวนการแปรรูปเย็น (Cold Press Process) ได้

จากนั้นเป็นกระบวนการแปรรูปผงกานชีวมวลเป็นกานอัดแท่งโดยจะใช้การแปรรูปเย็นโดยเครื่องอัดกานแบบเกลียวอัด ซึ่งมีส่วนผสมที่สำคัญได้แก่ วัสดุดิบ แบริ่งน้ำมันสำหรับ และน้ำ ในอัตราส่วนโดยปริมาตร 6:1:3 จากนั้นนำวัสดุผสมมาอัดเป็นกานอัดแท่งรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 52 มิลลิเมตร และตัดแท่งเชื้อเพลิงให้มีความยาวประมาณ 80 มิลลิเมตร จำนวนตัวอย่างละ 5 แท่ง จากนั้นนำกานอัดแท่งไปวางบนพื้นปูนซีเมนต์ในที่กลางแจ้ง โดยอาศัยความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์โดยตรง ในการตากแดดจะดำเนินการในช่วงเช้าจนถึงตอนเย็น หากไม่มีแสงแดดก็นำพลาสติกคลุม เพื่อป้องกันความชื้นจากสภาพอากาศ โดยจะใช้เวลาตากแดดประมาณ 7 วัน จึงเก็บใส่ภาชนะอย่างมิดชิด เพื่อนำไปทดสอบ ค่าความร้อน (Heating Value) ความชื้น (Moisture Content) ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) และปริมาณเถ้า (Ash) ดังนี้

1) หาค่าความร้อนตามมาตรฐาน ASTM D 5865 โดยใช้เครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์

2) วัดความชื้นตามมาตรฐาน ASTM D3173

3) หาปริมาณคาร์บอนคงตัว ตามมาตรฐาน ASTM D 3172

4) หาปริมาณเถ้า ตามมาตรฐาน ASTM D 3174

3.2. การวัดประสิทธิภาพของถ่านอัดแท่งโดยใช้เทคนิค DEA

โดยทั่วไปการวัดประสิทธิภาพเชิงเปรียบเทียบ (Relative efficiency, Re) ของหน่วยผลิตสามารถประเมินได้ดังนี้

$$Re = \frac{\sum_{j=1}^n u_r \cdot Y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_i \cdot X_{ij}} \quad (1)$$

i เป็นดัชนีของปัจจัยนำเข้า $i = 1, 2, \dots, m$

r เป็นดัชนีของผลผลิต $r = 1, 2, \dots, R$

j เป็นดัชนีของหน่วยผลิต $j = 1, 2, \dots, n$

โดยที่ X_{ij} คือ จำนวนของปัจจัยนำเข้าที่ i ของหน่วยผลิต j

Y_{rj} คือ จำนวนของผลผลิตที่ r ของหน่วยผลิต j

u_r คือ ตัวถ่วงน้ำหนักของผลผลิต r

v_i คือ ตัวถ่วงน้ำหนักของปัจจัยนำเข้า i

Charnes, Cooper and Rhodes [14] ใช้หลักการทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า การโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming, LP) ซึ่งเทคนิคหรือวิธีการนี้ไม่ต้องการกำหนดรูปแบบของฟังก์ชัน โดยเทคนิคนี้สามารถวัดประสิทธิภาพของหน่วยผลิตที่มีปัจจัยการผลิตและผลผลิตหลายชนิด (Multiple inputs and outputs) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เขาสร้างขึ้นจะเป็นการพิจารณาทางด้านปัจจัยนำเข้า (Input-Oriented) และมีลักษณะของผลตอบแทนคงที่ (Constant Returns to Scale: CRS) ซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ DEA-CCR-I ได้ดังนี้

$$Min = \sum_{i=1}^m v_i \cdot x_{io} \quad (2)$$

$$\sum_{r=1}^s y_{ro} \cdot u_r = 1 \quad (3)$$

$$\sum_{r=1}^s y_{rj} \cdot u_r - \sum_{i=1}^m v_i \cdot x_{ij} \leq 0; \quad \forall j \quad (4)$$

$$v_i, u_r \geq 0; \quad \forall i, \forall r \quad (5)$$

3.3. การเรียงลำดับความสำคัญของถ่านอัดแท่งโดยใช้เทคนิค DEA Cross-Efficiency

เนื่องจากข้อด้อยของเทคนิค DEA คือไม่สามารถเรียงลำดับความสำคัญของหน่วยผลิตถ้าหน่วยผลิตมีค่าคะแนนประสิทธิภาพเท่ากับ 1 มากกว่าหนึ่งหน่วยผลิต วิธีการหนึ่งที่ได้รับคามนิยมนำมาประยุกต์ใช้เพื่อที่จะเรียงลำดับความสำคัญของหน่วยผลิต คือ เทคนิค DEA Cross – Efficiency ซึ่งเป็นวิธีการที่พัฒนาขึ้นครั้งแรกในปี 1986 โดย Sexton et al. และได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้อีกครั้งในปี 1994 โดย Doyle และ Green [32] โดยทั่วไปการคำนวณค่าประสิทธิภาพไขว้ โดยใช้เทคนิค DEA Cross – Efficiency ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน ดังนี้

(1) คำนวณค่าคะแนนประสิทธิภาพโดยใช้เทคนิค DEA ดังสมการที่ (2) ถึง (5) จะได้ค่าถ่วงน้ำหนักของปัจจัยนำเข้า และปัจจัยผลผลิตที่เหมาะสม เช่น พิจารณา DMU_d ดังนั้น ค่าคะแนนประสิทธิภาพแบบไขว้ของ DMU_j หน่วยดังกล่าว สามารถคำนวณได้จาก

(2) คำนวณประสิทธิภาพแบบไขว้ระหว่าง DMU_j และ DMU_d จาก

$$E_{dj} = \frac{\sum_{r=1}^R u_{rd}^* \cdot y_{rj}}{\sum_{i=1}^I v_{id}^* \cdot x_{ij}}, \quad (6)$$

$$d, j = 1, 2, 3, \dots, n; d \neq j$$

จากนั้นทำการหาค่าเฉลี่ยตลอด DMU_j จะได้ผลลัพธ์คือค่าคะแนนประสิทธิภาพไขว้ (Cross Efficiency) สำหรับ DMU_j ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$\bar{E}_j = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n E_{dj} \quad (7)$$

จากนั้นเรียงลำดับความสำคัญโดยใช้ค่าคะแนนประสิทธิภาพแบบไขว้ ($\bar{E}_j$) ค่าคะแนนประสิทธิภาพสูงกว่ามีลำดับความสำคัญดีกว่า

4. ผลการศึกษา

4.1. ผลการแปรรูปวัสดุเป็นถ่านอัดแท่ง

จากการพิจารณาด้วยสายตา (Visual Inspection) พบว่าลักษณะของถ่านอัดแท่งที่ได้เป็น

แท่งที่มีความแน่น ความเหนียว และสามารถคงรูปอยู่
ได้ สัมผัสด้วยมือไม่แตกออกจากกัน ดังแสดงในรูปที่ 1



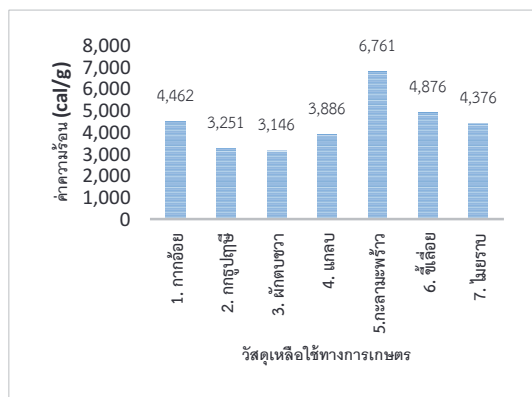
รูปที่ 1 ตัวอย่างถ่านอัดแท่ง

จากนั้นนำถ่านอัดแท่งที่ได้ไปทดสอบ
คุณสมบัติที่สำคัญสำหรับการเป็นเชื้อเพลิงสำหรับหุง
ต้ม โดยผลการทดสอบคุณสมบัติ ดังนี้

1) ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนของวัสดุแต่ละชนิดโดยใช้บอมบ์แคลอรีมิเตอร์ ถ่านอัดแท่งจากวัสดุแต่ละชนิดจะถูกทดสอบซ้ำ 5 ครั้ง จากนั้นหาค่าเฉลี่ยของค่าความร้อนแต่ละชนิด ดังแสดงในตารางที่ 1 และรูปที่ 2

ตารางที่ 1 ค่าความร้อนของถ่านอัดแท่ง (cal/g)

ชนิดของวัสดุ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
1. กากอ้อย	4,596	4,508	4,434	4,344	4,427	4,462
2. กากรูปฤๅษี	3,222	3,236	3,320	3,214	3,265	3,251
3. ผักตบชวา	3,188	3,147	3,157	3,118	3,122	3,146
4. แกลบ	3,996	3,812	3,908	3,782	3,931	3,886
5. กะลามะพร้าว	6,814	6,637	6,815	6,778	6,762	6,761
6. ชีเลื้อย	4,918	4,848	4,850	4,890	4,875	4,876
7. ไมยราบ	4,478	4,338	4,313	4,374	4,376	4,376



รูปที่ 2 การเปรียบเทียบค่าความร้อนของวัสดุ

จากผลการทดลองดังตารางที่ 1 และรูปที่ 2 พบว่าถ่านอัดแท่งจากกะลามะพร้าวให้ค่าความร้อนสูงสุด รองลงมาคือถ่านอัดแท่งจากชีเลื้อย ซึ่งมีค่าความร้อน 6,761 และ 4,876 Cal/g ตามลำดับ ค่าความร้อนที่ได้อยู่ในระดับที่สูงกว่าฟืนไม้ซึ่งมีค่าความร้อนประมาณ 3,820 Cal/g

2) ผลการวิเคราะห์คาร์บอนคงตัวพบว่า ถ่านอัดแท่งที่มีค่าสูง จะทำให้ระยะเวลาในการเผาไหม้ยาวนานขึ้น โดยผลการทดลองแสดงในตารางที่ 2

3) ผลการวิเคราะห์ปริมาณความชื้น พบว่าชีเลื้อยให้ค่าความชื้นต่ำสุด (4.45 %) แต่ไมยราบจะให้ค่าความชื้นสูงสุด (10.2 %) ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของถ่านอัดแท่งในงานวิจัยนี้เทียบกับ วรรณกรรมของ รุ่งโรจน์ พุทธิสกุล [29] กรมโรงงานอุตสาหกรรม –คู่มือแนวทางและเกณฑ์คุณสมบัติของเสียเพื่อการแปรรูปเป็นแท่งเชื้อเพลิงและบล็อกประสาน [33] และผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุชีวมวลโดยห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีพลังงาน ฝ่ายวิจัยพลังงานและสิ่งแวดล้อม สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย[34] พบว่าค่าของปัจจัยที่ทดสอบแต่ละค่ามีความสอดคล้อง/ใกล้เคียง กับงานวิจัยนี้

4.2. ผลการคำนวณประสิทธิภาพของถ่านอัดแท่งโดยใช้เทคนิค DEA

การวัดประสิทธิภาพของถ่านอัดแท่งจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ตามวิธีการ DEA ดังแสดงในหัวข้อวิธีดำเนินการวิจัยนั้น กำหนด DMU1 คือถ่านอัดแท่งจากกากอ้อย DMU2 คือถ่านอัดแท่งจากกากรูปฤๅษี DMU3 คือถ่านอัดแท่งจากผักตบชวา DMU4 คือถ่านอัดแท่งจากแกลบ DMU5 คือถ่านอัดแท่งจากกะลามะพร้าว DMU6 คือถ่านอัดแท่งจากชีเลื้อย DMU7 คือถ่านอัดแท่งจากไมยราบ โดยกำหนดปัจจัยนำเข้า (Inputs) ได้แก่ ความชื้น (X_{1j}) และปริมาณถ่าน (X_{2j}) สำหรับปัจจัยผลผลิต (Outputs) ได้แก่ ค่าความร้อน (Y_{1j}) และคาร์บอนคงตัว (Y_{2j}) จากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากผลการทดสอบในตารางที่ 4 มาคำนวณค่าคะแนนประสิทธิภาพโดยใช้เทคนิค DEA ดังแสดงในสมการที่ (2) ถึง (5) โดยตัวแบบทางคณิตศาสตร์ DEA ที่นำเสนอในหัวข้อวิธีดำเนินการวิจัย จะถูกนำไปประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ LINGO ซึ่งผลการคำนวณคะแนนประสิทธิภาพของถ่านอัดแท่งแต่ละชนิดดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ปัจจัยและคะแนนประสิทธิภาพของถ่านอัดแท่ง

ชนิดของวัสดุ	ความชื้น (%)	เถ้า (%)	ความร้อน (Cal/g)	ถ่านคงตัว (%)	ประสิทธิภาพ
1. กากอ้อย (DMU1)	6.4	8.81	4,462	17.66	0.6463
2. กากอ้อย (DMU2)	6.15	24.61	3,251	14.50	0.4900
3. ผักตบชวา (DMU3)	6.74	25.67	3,146	14.75	0.4327
4. แกลบ (DMU4)	7.5	21.01	3,886	17.3	0.4803
5. กะลามะพร้าว (DMU5)	6.9	3.4	6,761	72.7	1.0000
6. ชี้อ้อย (DMU6)	4.45	1.45	4,876	27.4	1.0000
7. ไมยราบ (DMU7)	10.2	3.87	4,376	24.77	0.3980

ตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่าถ่านอัดแท่งที่ทำจากกะลามะพร้าวและชี้อ้อยเป็นถ่านอัดแท่งที่มีประสิทธิภาพ (ค่าคะแนนประสิทธิภาพเท่ากับ 1) ส่วนวัสดุหรือหน่วยผลิตอื่นไม่มีประสิทธิภาพ (ค่าคะแนนประสิทธิภาพน้อยกว่า 1) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าถ่านอัดแท่งจากกะลามะพร้าว และถ่านอัดแท่งจากชี้อ้อย เป็นถ่านอัดแท่งที่มีความเหมาะสมสำหรับนำมาแปรรูปเป็นถ่านอัดแท่งเมื่อพิจารณาจากปัจจัยค่าความร้อน การคงตัวของคาร์บอน ความชื้น และปริมาณเถ้า อย่างไรก็ตามเมื่อหน่วยผลิตมีค่าคะแนนประสิทธิภาพเท่ากับ 1 มากกว่าหนึ่งหน่วยผลิต จะไม่สามารถเรียงลำดับได้ว่าหน่วยผลิตใดมีความเหมาะสมมากกว่า ในกรณีนี้ถ่านอัดแท่งจากกะลามะพร้าว และถ่านอัดแท่งจากชี้อ้อยมีค่าคะแนนประสิทธิภาพเท่ากับ 1 จึงไม่สามารถเรียงลำดับความสำคัญของถ่านอัดแท่งทั้งสองได้ ดังนั้นเทคนิค DEA Cross-efficiency จึงถูกนำมาใช้เพื่อเรียงลำดับความสำคัญของหน่วยผลิตทั้งหมด โดยผลการคำนวณคะแนนประสิทธิภาพแบบไขว้เพื่อเรียงลำดับความสำคัญของหน่วยผลิต ดังแสดงในหัวข้อถัดไป

4.3. ผลการคำนวณคะแนนประสิทธิภาพแบบไขว้ของถ่านอัดแท่งโดยใช้เทคนิค DEA Cross-Efficiency

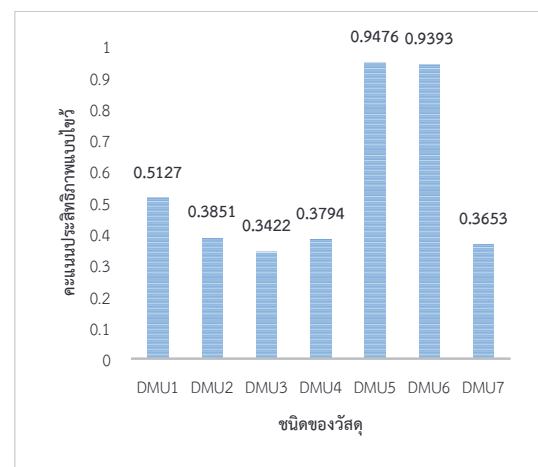
ผลการคำนวณค่าถ่วงน้ำหนักของปัจจัยนำเข้า และค่าถ่วงน้ำหนักของปัจจัยผลผลิตโดยใช้เทคนิค DEA ดังแสดงในตารางที่ 3 จากนั้นคำนวณค่าคะแนนประสิทธิภาพแบบไขว้โดยใช้เทคนิค DEA Cross-Efficiency โดยใช้สมการที่ (6) และ สมการที่ (7) ผลการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 4 และรูปที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าถ่วงน้ำหนักของปัจจัยนำเข้าและปัจจัย

วัสดุ (DMU)	u_1	u_2	v_1	v_2
DMU1	0.15625	0.00000	0.0001105542	0.00000
DMU2	0.1626016	0.000000	0.0001150483	0.000000
DMU3	0.1483680	0.000000	0.0001049773	0.000000
DMU4	0.1333333	0.000000	0.00009433962	0.000000
DMU5	0.1449275	0.000000	0.000000	0.01375516
DMU6	0.2898551	0.000000	0.0002050861	0.000000
DMU7	0.000000	0.2583979	0.00001871179	0.01034446

ตารางที่ 4 ค่าคะแนนประสิทธิภาพแบบไขว้ ($\bar{E}_j$)

ของแต่ละวัสดุ	DMU1	DMU2	DMU3	DMU4	DMU5	DMU6	DMU7
1	0.493	0.374	0.330	0.367	0.693	1.000	0.304
2	0.493	0.374	0.330	0.367	0.693	1.000	0.304
3	0.493	0.374	0.330	0.367	0.693	1.000	0.304
4	0.493	0.374	0.330	0.367	0.693	1.000	0.304
5	0.262	0.224	0.208	0.219	1.000	0.754	0.230
6	0.493	0.374	0.330	0.367	0.693	1.000	0.304
7	0.117	0.033	0.032	0.046	1.000	1.000	0.338
$\bar{E}_j$	0.5127	0.3851	0.3422	0.3794	0.9476	0.9393	0.3653



รูปที่ 3 ประสิทธิภาพแบบไขว้ของถ่านอัดแท่ง

จากตารางที่ 4 และรูปที่ 3 แสดงค่าคะแนนประสิทธิภาพแบบไขว้ ($\bar{E}$) ของแต่ละวัสดุ โดยที่ค่าคะแนนประสิทธิภาพที่มีค่าสูงกว่าจะมีลำดับความสำคัญที่ดีกว่า ซึ่งสามารถเรียงลำดับความสำคัญได้ดังนี้ กะลามะพร้าว ($\bar{E} = 0.9476$) ชี้อ้อย ($\bar{E} = 0.9393$) กากอ้อย ($\bar{E} = 0.5127$) กากอ้อย (DMU2) ($\bar{E} = 0.3851$) แกลบ ($\bar{E} = 0.3794$) ไมยราบ ($\bar{E} = 0.3653$) และผักตบชวา ($\bar{E} = 0.3422$) ตามลำดับ โดยที่ค่าคะแนนประสิทธิภาพแบบไขว้ที่สูงกว่าหมายความว่า

ว่าถ่านอัดแท่งชนิดนี้มีความเหมาะสมในการเป็นเชื้อเพลิงที่ดีกว่า

5. สรุปผล

การศึกษาสมบัติของถ่านอัดแท่งจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาแปรรูปเป็นถ่านอัดแท่งสำหรับนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในครัวเรือน ขั้นตอนแรกจะเริ่มจากการเลือกวัสดุที่มีในท้องถิ่น จากนั้นเตรียมวัสดุทั้ง 7 ชนิดโดยการเผาและบดเป็นผง ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการผสมผงถ่านและตัวประสาน (น้ำและแป้งมันสำปะหลัง) จากนั้นทำการอัดโดยการแปรรูปเย็น ผลการทดสอบประสิทธิภาพของถ่านอัดแท่งโดยใช้เทคนิค DEA พบว่าถ่านอัดแท่งจากกะลามะพร้าวและซีลี้อยู่เป็นถ่านอัดแท่งที่มีประสิทธิภาพ (ค่าคะแนนประสิทธิภาพเท่ากับ 1) เมื่อพิจารณาจากปัจจัยที่เกี่ยวข้องได้แก่ ค่าความร้อน การคงตัวของคาร์บอน ความชื้น และปริมาณเถ้า นอกจากนี้ผลการเรียงลำดับความสำคัญโดยใช้เทคนิค DEA Cross-Efficiency แสดงให้เห็น กะลามะพร้าว ($\bar{E} = 0.9476$) และ ซีลี้อยู่ ($\bar{E} = 0.9393$) มีความเหมาะสมสำหรับการแปรรูปเป็นถ่านอัดแท่ง ตามลำดับ โดยที่ค่าคะแนนประสิทธิภาพแบบไขว้ที่สูงกว่าหมายความว่าถ่านอัดแท่งชนิดนี้มีความเหมาะสมในการเป็นเชื้อเพลิงที่ดีกว่า

สำหรับการวิจัยในอนาคต ผู้วิจัยเสนอแนะให้เพิ่มปัจจัยที่เกี่ยวข้องที่ไม่ได้พิจารณาในงานวิจัยนี้ เช่น ต้นทุนการผลิต ปริมาณวัตถุดิบที่มีในท้องถิ่น และความหนาแน่น หรืออาจพิจารณาวัสดุอื่น ๆ มาทำการประเมินประสิทธิภาพของถ่านอัดแท่งที่สร้างขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของถ่านอัดแท่งสำหรับการใช้เป็นเชื้อเพลิงแก่ครัวเรือนต่อไป นอกจากนี้วิธีการที่นำเสนอสามารถประยุกต์ใช้กับปัญหาการตัดสินใจแบบหลายคุณลักษณะ หรือปัญหาที่มีความซับซ้อนอื่น ๆ ได้

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณผู้ประเมินบทความที่ให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ให้ต้นฉบับมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น และผู้เขียนขอขอบคุณบุคลากรในสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ งานวิจัยนี้สำเร็จลงไปด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Department of Alternative Energy Development and Efficiency. Energy situation in Thailand 2018 [internet]. [cited 2018 Mar 26]. Available from: http://www.dede.go.th/download/state_61/Frontpagejan_nov60. (In Thai)
- [2] Tantisattayakul T, Phongkasem S, Phooyar P, Taibangury P. Community-based renewable energy from biomass briquettes fuel from coconut leaf. Thai Science and Technology Journal. 2015; 23 (3): 418-31. (In Thai)
- [3] Department of Alternative Energy Development and Efficiency. The potential of biomass materials in Thailand 2018 [internet]. [cited 2018 Mar 26]. Available from: http://www.dede.go.th/dede/index.php?option=com_content&view=article&id=130:2010-05-07-08-10-57 & catid = 58&Itemid=68. (In Thai)
- [4] Wongsaroj K, Sawadsev T, Prathinthong N, Wongsrivej P. Biomass briquette production from Jatropa. KCU Engineering Journal. 2011; 38 (1): 65-72. (In Thai)
- [5] Kitipattaworn A, Reubroycharoen P, Uttamaprakorn W. Briquette fuel from co-production of ethanol industrial wet cake and biomass. Journal of Energy Research. 2013; 10 (3): 43-56. (In Thai)
- [6] Wattanachira L, Laapan N, Chatchavarn V, Thanyacharoen A. Development of bio briquettes from mixed rice-straw and longan waste residues. KMUTT Research and Development Journal. 2016; 39 (2): 239 – 54. (In Thai)
- [7] Punin W. Development of briquette fuel from co-production of corn cob charcoal and low-grade coal lignite rejects. Burapha Science Journal. 2018; 23 (1): 146 – 63. (In Thai)

- [8] Kumar A, Sah B, Singh AR., Denga Y, He X, Kumar P, Bansal R.C. A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017; 69 (1): 596–609.
- [9] Liberatore MJ, Nydick RL. The analytic hierarchy process in medical and health care decision making: a literature review. *European Journal of Operational Research*. 2008; 189 (1): 194–207.
- [10] Kittiyakajon M. Learning resources improvement project prioritization: an application of analytic hierarchy process method. *Journal of Engineering, RMUTT*. 2019; 17 (1): 25–9. (In Thai)
- [11] Bilbao-Terol A, Arenas-Parra M, Cañal-Fernández V, Antomil-Ibias J. Using TOPSIS for assessing the sustainability of government bond funds. *Omega*. 2014; 49 (1): 1 – 17.
- [12] Wichapa N, Khokhajaikiat P. A hybrid multi-criteria analysis model for solving the facility location–allocation problem: a case study of infectious waste disposal. *Journal of Engineering and Technological Sciences*. 2018; 50 (5): 698-718.
- [13] Wichapa N, Chumpol A, Sudsuansee T. Using the hybrid DEA-TOPSIS technique for selecting the suitable biomass materials for processing into fuel briquettes. *The Journal of Industrial Technology*. 2019; 15 (1): 63-80. (In Thai)
- [14] Charnes A, Cooper WW, Rhodes E. Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research*. 1978; 2 (6): 429-44.
- [15] Karasakal E, Aker P. A multi-criteria sorting approach based on data envelopment analysis for R&D project selection problem. *Omega*. 2017; 73 (1): 79-92.
- [16] Falagario M, Sciancalepore F, Costantino N, Pietroforte R. Using a DEA-cross efficiency approach in public procurement tenders. *European Journal of Operational Research*. 2012; 218 (2): 523-29.
- [17] Lim S, Oh KW, Zhu J. Use of DEA cross-efficiency evaluation in portfolio selection: an application to Korean stock market. *European Journal of Operational Research*. 2014; 236 (1): 361-68.
- [18] Liu X, Chu J, Yin P, Sun J. DEA cross-efficiency evaluation considering undesirable output and ranking priority: a case study of eco-efficiency analysis of coal-fired power plants. *Journal of Cleaner Production*. 2017; 142 (2): 877-85.
- [19] Farrell, MJ. The measurement of productive efficiency. *Journal of the Royal Statistical Society*. 1957; 120(3): 253-90.
- [20] Khushalani J, and Ozcan YA. Are hospitals producing quality care efficiently? An analysis using dynamic network data Envelopment analysis (DEA). *Socio-Economic Planning Sciences*. 2017; 60(1): 15-23.
- [21] Ennen D, Batool I. Airport efficiency in Pakistan - a data envelopment analysis with weight restrictions. *Journal of Air Transport Management*. 2018; 69 (1): 205-12.
- [22] Fazlollahi A, Franke U. Measuring the impact of enterprise integration on firm performance using data envelopment analysis. *International Journal of Production Economics*. 2018; 200 (1): 119-29.

- [23] Farahani RZ, SteadieSeifi M, Asgari N. Review article multiple criteria facility location problems: a survey. *Applied Mathematical Modelling*. 2010; 34 (1): 1689-709.
- [24] Wichapa N, Khokhajaikiat P. Selection of the best laptop for educational purposes using hybrid decision making technique. *RMTSV Research Journal*. 2018; 10 (3): 368-84.
- [25] Fan Y, Bai B, Qiao Q, Kang P, Zhang Y, Guo J. Study on eco-efficiency of industrial parks in China based on data envelopment analysis. *Journal of Environmental Management*. 2017; 192(1): 107-15.
- [26] Wang CN, Nguyen XT, Wang YH. Automobile industry strategic alliance partner selection: the application of a hybrid DEA and Grey theory model. *Sustainability*. 2016; 8 (2): 1-18.
- [27] Ang S, Chen M, Yang F. Group cross-efficiency evaluation in data envelopment analysis: an application to Taiwan hotels. *Computers & Industrial Engineering*. 2018; 125 (1): 190-99.
- [28] Wang YM, Chin KS, Lou Y. Cross-efficiency evaluation based on ideal and anti-ideal decision making units. *Expert Systems with Applications*. 2011; 38 (8): 10312-10319.
- [29] Phutteesakul RR, Suwakantakul A, Kucharrat A. The Production of charcoal briquette by coconut shell and cassava rhizome. *Journal of Industrial Education*. 2010; 4(2): 18-28. (In Thai)
- [30] Chutsawang N. Charcoal briquette from durian husk in Tombol Kwuanhuk community enterprise, Khlung, Chanthaburi [Dissertation of Master of Engineering in Engineering Management]. Chanthaburi: Rambhai Barni Rajabhat University; 2013. (In Thai)
- [31] Jolanun B, Phutharukchat A, Khamtui C. Community-based renewable energy from mimosa pigra L. charcoal briquettes. *KKU Research Journal*. 2011; 16 (1): 20-31. (In Thai)
- [32] Doyle J, Green R. Data envelopment analysis and multiple criteria decision making. *Omega*. 1993; 21(6): 713-15.
- [33] Department of Industrial Works. The manual of guidelines and criteria for processing into fuel briquettes and interlocking blocks [internet]. [cited 2019 Oct 1]. Available from: http://webintra.diw.go.th/iwmb/form/iwd040_%E0%B8%9C%E0%B8%99%E0%B8%A7%E0%B8%81%20%E0%B8%87_%E0%B8%84%E0%B8%B9%E0%B9%88%E0%B8%A1%E0%B8%B7%E0%B8%AD%E0%B8%99%E0%B8%B3%E0%B8%A3%E0%B9%88%E0%B8%AD%E0%B8%87. (In Thai)
- [34] Thailand Institute of Scientific and Technological Research. Analysis of biomass properties [internet]. [cited 2019 Oct 1] Available from: <http://www.charcoal.snmcenter.com/charcoalthai/hot.php>. (In Thai)

การตรวจจับการล้มสำหรับผู้สูงอายุและจำแนกข้อมูลกิจกรรมการเคลื่อนไหวด้วยอัลกอริทึม Weighted k-Nearest neighbor บนระบบฝังตัวแบบพกพาที่ใช้ IoT

ชัยวุฒิ วุทธิสิทธิ์^{1*}
chaiwut.w@ubru.ac.th^{1*}

^{1*} สาขาวิชาเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี

Received	: 25-Jul-2019
Revised	: 9-Oct-2019
Accepted	: 30-Oct-2019

บทคัดย่อ

การตรวจจับการล้มในผู้สูงอายุเป็นหัวข้อการวิจัยที่มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องซึ่งจะต้องมีการเฝ้าดูแลทางด้านสุขภาพของผู้สูงอายุอย่างใกล้ชิด การเฝ้าติดตามกิจกรรมการเคลื่อนไหวและตรวจจับการล้มที่ถูกต้องจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อหลีกเลี่ยงอันตรายที่จะเกิดขึ้นกับผู้สูงอายุ ในบทความวิจัยนี้จึงได้พัฒนาอุปกรณ์ตรวจจับการล้มและจำแนกข้อมูลกิจกรรมการเคลื่อนไหวของผู้สูงอายุโดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของทุกสรรพสิ่ง เพื่อให้บุคลากรทางการแพทย์สามารถติดตามผู้สูงอายุที่มีความเสี่ยงที่จะเกิดการล้ม ร่วมกับการทำนายเหตุการณ์โอกาสที่จะเกิดการล้มด้วยวิธี Weight K-Nearest Neighbor และรายงานกิจกรรมการเคลื่อนไหวของผู้สูงอายุและตรวจจับการล้มผ่านเว็บของผู้ให้บริการคลาวด์ IoT รวมถึงการส่งข้อมูลเพื่อแจ้งเตือนการล้มไปยังบุคลากรทางการแพทย์ จากการทดสอบอุปกรณ์ตรวจจับการล้มและติดตามกิจกรรมการเคลื่อนไหวของผู้สูงอายุ พบว่าอุปกรณ์สามารถตรวจจับการล้มและแสดงผลการทำนายเหตุการณ์แนวโน้มที่จะเกิดการล้มได้ โดยผลการประเมินประสิทธิภาพการตรวจจับการล้มพบว่ามีค่าความถูกต้อง 85.80% และค่าความแม่นยำ 92.48% ในส่วนผลการทำนายแนวโน้มโอกาสที่จะเกิดการล้มจากกิจกรรมการเคลื่อนไหว โดยสามารถจำแนกข้อมูลผู้ที่มีความเสี่ยงที่จะเกิดการล้มด้วยค่าความไวเฉลี่ย 90.91% และผู้ที่ไม่มีความเสี่ยงที่จะเกิดการล้มด้วยค่าจำเพาะเฉลี่ย 98.98% บทความวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นให้เป็นอุปกรณ์ช่วยเหลือเบื้องต้นในภาวะฉุกเฉินที่บุคลากรทางการแพทย์จะสามารถใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงควบคู่กับการวินิจฉัยการล้มของผู้สูงอายุในลำดับต่อไปได้อย่างเหมาะสม

คำสำคัญ: การตรวจจับการล้ม ผู้สูงอายุ กิจกรรมการเคลื่อนไหว อินเทอร์เน็ตของทุกสรรพสิ่ง

Fall Detection for Elderly and Data Classification Movement Activity Using Weighted K-Nearest neighbor Algorithm on a IoT-based Portable Embedded System

Chaiwut Wuttisit^{1*}
chaiwut.w@ubru.ac.th^{1*}

^{1*} Computer Technology Program, Faculty of Industrial Technology, Ubon Ratchathani Rajabhat University

Received	: 25-Jul-2019
Revised	: 9-Oct-2019
Accepted	: 30-Oct-2019

Abstract

Detection of falls in the elderly is a continuously developing research topic that requires close monitoring of the health of the elderly. Monitoring the movement activities and detecting the correct fall is, therefore, necessary to avoid the dangers that occur to the elderly. In this paper, we developed a device for detecting falls and classifying the activities of the elderly by using the Internet of Things. The aforementioned allows medical personnel to be able to track the elderly who are at risk of falling together with predicting the likelihood of falling by the Weight K-Nearest Neighbor method. This system reports the elderly movement activity and detects the falling through the website of IoT cloud provider, including sending crash notification information to healthcare professionals. From testing the fall detection device and tracking the movement activities of the elderly, the device can detect the fall and show the prediction of the occurrence of the fall. The results of the fall detection performance showed that the accuracy of 85.80% and the accuracy of 92.48% in the prediction of the likelihood of falling due to the movement activities. It can classify data of people who are at risk of falling with an average sensitivity of 90.91% and people without the risk of falling with a specific average of 98.98%. In case of an emergency, the medical personnel can use this information as a reference in association with the proper diagnosis of falls in the elderly.

Keywords: fall detection, elderly, movement activity, internet of things.

1. บทนำ

จากประมาณการแนวโน้มของจำนวนประชากรประเทศไทย [1] ระหว่างปี พ.ศ. 2553 ถึง 2583 พบว่าประชากรที่เป็นผู้สูงอายุมีจำนวนเพิ่มสูงขึ้น และปัญหาหลักที่ตามมาอย่างเห็นได้ชัด คือ กลุ่มผู้สูงอายุตั้งแต่ 60 ปี ขึ้นไป บางรายไม่สามารถดูแลตัวเองได้ และจำเป็นต้องได้รับการดูแลอย่างใกล้ชิดจากลูกหลานหรือบุคลากรทางการแพทย์ แต่ในช่วงเวลาผู้สูงอายุไม่ได้รับการดูแลอย่างทั่วถึง หรือในกรณีที่บุคลากรทางการแพทย์มีอยู่อย่างจำกัด จึงไม่เพียงพอต่อการดูแลอย่างใกล้ชิด

การล้มของผู้สูงอายุ [2] เกิดจากหลายสาเหตุ เช่น การป่วยแล้วเกิดอุบัติเหตุเป็นลมแล้วล้ม อุบัติเหตุจากการลื่นสะดุดล้ม หรือการล้มจากระดับหนึ่งไปสู่อีกระดับหนึ่ง เช่น จากการปีน ตกบันได และตกจากเตียง โดยอุบัติเหตุที่เกี่ยวข้องกับการล้มมักเกิดในบริเวณที่ผู้สูงอายุอยู่เพียงลำพัง และหากเกิดการล้มขึ้น ผู้สูงอายุจะไม่สามารถได้รับการช่วยเหลือในขณะนั้นได้

การติดตามด้านสุขภาพของผู้สูงอายุอย่างต่อเนื่อง โดยใช้เทคโนโลยีเข้ามาช่วยในการตัดสินใจเบื้องต้นจะทำให้การเตรียมการภาวะฉุกเฉินสำหรับแพทย์ผู้ให้บริการได้ทราบถึงอาการการล้มของผู้สูงอายุแต่ละรายได้ เช่น การใช้เทคโนโลยีเซนเซอร์ [3] เพื่อตรวจสอบสภาพแวดล้อมที่จะเป็นอันตรายต่อผู้สูงอายุ การใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things หรือ IoT) และระบบฝังตัว (Embedded System) [4] รวมไปถึงการวิเคราะห์และจำแนกข้อมูลเพื่อช่วยในการตรวจวินิจฉัยทางการแพทย์ โดยใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning Technique) [3,5] เพื่อช่วยในกระบวนการทำนายความเสี่ยงหรือโอกาสที่จะเกิดอันตรายกับผู้สูงอายุได้ เช่น การพัฒนาเทคโนโลยีด้านการแพทย์เพื่อเฝ้าระวังผู้สูงอายุหากมีการล้มภายในห้องน้ำ [6] การพัฒนาอุปกรณ์รับส่งสัญญาณติดตั้งไว้ที่ตัวผู้สูงอายุแบบพกพา [7] ด้วยเทคโนโลยีโครงข่ายเซนเซอร์ไร้สาย และการใช้ระบบตรวจจับการล้มด้วยการวัดความเร่ง [8] และการหมุนโดยมีการแจ้งเตือนและบอกพิกัดตำแหน่งเป็นต้น

ในบทความวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการตรวจจับการล้มในผู้สูงอายุด้วยวิธีการจำแนกข้อมูลโดยใช้อัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่อง ด้วยอัลกอริทึมแบบการถ่วงน้ำหนัก K-Nearest Neighbor (Weighted K-Nearest Neighbor หรือ Weighted k-NN) เป็นหนึ่งในเทคนิคการเรียนรู้แบบมีผู้ฝึกฝน (Supervised Learning) เพื่อช่วยในการทำนายผลช่วยในการตัดสินใจเฝ้าระวังแจ้งเตือนการล้ม บนระบบฝังตัวที่ใช้

เทคโนโลยี IoT ซึ่งระบบจะคอยตรวจจับการล้มและติดตามกิจกรรมการเคลื่อนไหวของผู้สูงอายุ ด้วยหลักการพื้นฐานของ K-Nearest Neighbor จะต้องหาค่าที่ใกล้เคียงกับค่า K มากที่สุด ทำให้การสรุปการทำนายโอกาสที่จะเกิดการล้มต้องมีความแม่นยำ จึงได้มีการนำเสนอวิธีการให้คะแนนถ่วงน้ำหนัก (Weighted Voting) โดยในบทความวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการ Weighted k-NN เป็นอัลกอริทึมที่ใช้ทำนายแนวโน้มโอกาสที่จะเกิดการล้ม ผู้วิจัยเล็งเห็นว่ามีความเหมาะสมในการที่จะช่วยทำนายโอกาสที่จะเกิดการล้มในเบื้องต้นให้มีความถูกต้องมากขึ้น รวมถึงการทำงานร่วมกับเทคโนโลยี IoT โดยใช้บอร์ด ESP32 ในการประมวลผล ซึ่งจะแสดงผลการทำนายและแจ้งเตือนโอกาสที่จะเกิดการล้มผ่าน IoT Dashboard ในช่วงเวลาที่ผู้สูงอายุมีการติดอุปกรณ์สวมใส่ โดยในอุปกรณ์เซนเซอร์ที่ใช้ในการตรวจจับการล้มจะใช้โมดูล GY-521 เป็นโมดูลวัดความเร่ง โดยตัวเซนเซอร์จะตรวจสอบการเคลื่อนไหวที่มีการกระแทกรุนแรงและฉับพลัน รวมถึงมีการแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชัน LINE (Line Notify) ในกรณีขอความช่วยเหลือเพื่อให้บุคลากรทางการแพทย์ได้รับข้อมูลการแจ้งเตือนที่จะสามารถช่วยเหลือได้ทันทั่วทั้งที่

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ทางผู้วิจัยได้ทบทวนวรรณกรรมและศึกษาเพิ่มเติมในด้านการตรวจจับการล้มของผู้สูงอายุ โดยงานวิจัย [9] จะเป็นการศึกษาแนวโน้มของการพัฒนางานวิจัยด้านการป้องกันการล้มของผู้สูงอายุ แต่งานวิจัยดังกล่าวยังไม่มีการหาทางป้องกันและคำแนะนำในการเฝ้าติดตาม ต่อมาได้มีนักวิจัย [10] พัฒนาระบบอุปกรณ์อัจฉริยะโดยมีการตรวจจับการล้มและแจ้งเตือน โดยระบบดังกล่าวจะมีการแจ้งเตือนทันทีเมื่อมีการล้ม หากอยู่ในระดับที่มีการแจ้งเตือนและไม่สามารถหยุดการแจ้งเตือนได้ เทคนิคการใช้ Distance Weighted k-NN โดย [11] ได้ถูกนำมาใช้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพการจัดกลุ่มเพื่อแก้ปัญหากรณีที่ค่า K มีช่วงกว้าง แต่คะแนนการถ่วงน้ำหนัก ดังกล่าวจะมีความเหมาะสมในกรณีที่ค่า K มีระยะทางสั้น ๆ เทคนิคนี้ยังได้นักวิจัย [12] นำมาพัฒนาการจำแนกวัตถุที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงของ Newton ด้วยวิธี Weighted k-NN และยังมีผู้ที่พัฒนาระบบการส่ง SMS [13] เพื่อแจ้งเตือนข้อมูลที่ได้จากการตรวจจับการล้มด้วย GSM Module ร่วมกับการบอกพิกัดตำแหน่งของผู้สูงอายุที่มีเหตุการณ์ของการล้ม ซึ่งระบบดังกล่าวยังได้มีการนำเสนอแนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพให้มีความถูกต้องมากขึ้น

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องผู้วิจัยสังเกตเห็นความสำคัญที่จะนำเสนออัลกอริทึม Weighted k-NN ร่วมกับระบบฝังตัวเพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ทางด้านการเรียนรู้ของเครื่องให้มีกระบวนการคิดวิเคราะห์ที่มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

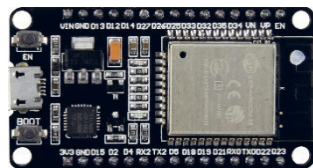
3. อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

หัวข้อนี้จะอธิบายถึงอุปกรณ์ที่สำคัญในการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจจับการล้ม รวมถึงวิธีดำเนินการวิจัยโดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 อุปกรณ์

3.1.1 บอร์ดประมวลผล ESP32

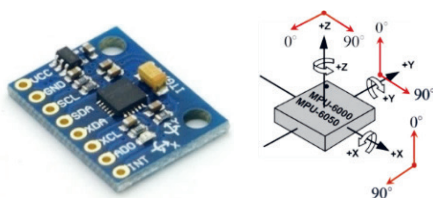
บทความวิจัยนี้ได้ออกแบบระบบ โดยใช้บอร์ด ESP32 [14] เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 32-bit มีความเร็ว 2.4MHz สามารถติดตั้ง Package ที่ใช้กับ Arduino IDE [15] ได้ โดยใช้โปรแกรม Git [16] ในการติดตั้ง Package ESP32 ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะบอร์ด ESP32 Dev Kit V1.0

3.1.2 โมดูล GY-521

โมดูลเซนเซอร์วัดความเร่งรุ่น GY-521 ใช้ชิพ MPU-6050 [17] ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 โมดูลเซนเซอร์ GY-521

3.2 วิธีการวิจัย

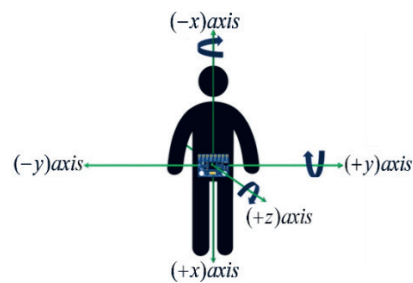
3.2.1 การรับค่าจากเซนเซอร์

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการนำข้อมูลจากเซนเซอร์ GY-521 ซึ่งถือว่าเป็นหัวใจสำคัญที่ใช้ตรวจสอบเมื่อเซนเซอร์มีการเคลื่อนไหว เพื่อตรวจจับการล้มของผู้สูงอายุ มีชีพวัดประมวลผล MPU-6050 ประกอบด้วย เซนเซอร์วัดความเร่ง

(Acceleration-sensor) จำนวน 3 แกน และเซนเซอร์แบบไจโรสโคป (Gyroscope-sensor) จำนวน 3 แกน เชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ I²C ซึ่งในบทความวิจัยนี้จะพิจารณาจากค่าความเร่งตามแนวแกน x (A_x^n) ค่าความเร่งตามแนวแกน y (A_y^n) และค่าความเร่งตามแนวแกน z (A_z^n) ค่าที่ได้จะมีความเร่งเชิงเส้นเทียบกับแรงโน้มถ่วง g กำหนดให้เป็นค่าเวกเตอร์ขนาดสัญญาณรวม (Sum Magnitude Vector แทนด้วย smv) [18] ดังสมการที่ (1)

$$smv^2 = |A_x^n|^2 + |A_y^n|^2 + |A_z^n|^2 \quad (1)$$

โดยกำหนดให้ $smv^2 = [A_x^n, A_y^n, A_z^n]$ เป็นผลรวมทางเวกเตอร์ค่าความเร่ง ซึ่งการติดอุปกรณ์เซนเซอร์จะมีการวางตำแหน่งดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ตำแหน่งการวางเซนเซอร์ที่ติดไว้กับร่างกายมนุษย์

3.2.2 การเก็บรวบรวมข้อมูล

ในขั้นตอนนี้จะเลือกพิจารณาเงื่อนไขในการตัดสินใจทำนายโอกาสที่จะเกิดการล้ม โดยจะนำเสนอเฉพาะการใช้ข้อมูลค่าความเร่งเชิงเส้นที่ได้จากเซนเซอร์ ซึ่งข้อมูลอาทิที่ได้จะนำมาคำนวณเป็นค่าความเร่งสัมบูรณ์ (Absolute Value) จากกิจกรรมการเคลื่อนไหวและรูปแบบการล้ม รวมทั้งหมด 7 รูปแบบ คือ การนั่งปกติ การเดิน การยืนโน้มตัวไปข้างหน้าหรือหลัง การล้มไปข้างหน้า การล้มไปข้างหลัง การล้มไปข้างซ้าย และการล้มขวา โดยทั้ง 7 รูปแบบ แทนด้วย 7 คลาส (Class) จากค่าสัญญาณของตัวเซนเซอร์ ที่แตกต่างกัน ซึ่งนำมาใช้ในการวิเคราะห์โดยการสังเกตข้อมูลที่เปลี่ยนแปลงไปจากองค์ประกอบของเซนเซอร์วัดความเร่ง ตามแนวแกน x , แกน y และแกน z เพื่อนำมาเป็นชุดข้อมูลฝึก (Training Data Set) 70 ข้อมูล โดยสุ่มมาแต่ละรูปแบบ รูปแบบละ 10 ข้อมูล

ในบทความวิจัยนี้จะเลือกใช้ค่า $K=1$ เนื่องมาจากการทำงานของระบบฝังตัวเป็นแบบเวลาจริงซึ่งจะใช้ข้อมูลที่อ่านจากเซนเซอร์ ณ เวลาปัจจุบันมาเปรียบเทียบกับ ค่าที่น้อยที่สุด ที่มีความใกล้เคียงกันมากที่สุด คือ $K=1$ จึงไม่มีการนำค่า K อื่น ๆ ที่เกิดขึ้นของกิจกรรมการเคลื่อนไหว เพราะเมื่อร่างกายมีการเคลื่อนไหว ค่า K จะมีการขยับไม่เท่ากันและเกิดการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา หากนำมาพิจารณาด้วย K ที่มีจำนวนชุดเพิ่มขึ้นจะทำให้การตรวจสอบเงื่อนไขการแจ้งเตือนนานขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงเลือกใช้ ค่า $K=1$ คือ 1 ชุด ข้อมูลจากเซนเซอร์ที่อ่านได้เพื่อให้มีการตรวจสอบเงื่อนไขการแจ้งเตือนการล้มได้เร็วขึ้น ทุก ๆ 0.05 วินาที

3.2.3 การสกัดคุณลักษณะ

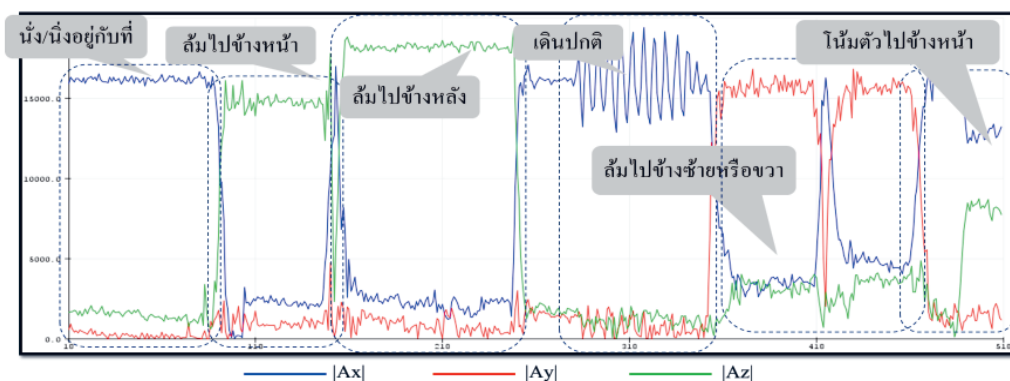
ขั้นตอนของการสกัดคุณลักษณะจะใช้เซนเซอร์ GY-521 ซึ่งมีการทำงานเป็นตัววัดความเร่งเชิงเส้น ประกอบด้วย A_x , A_y และ A_z ในบทความวิจัยนี้จะมุ่งเน้นในการใช้ค่าความเร่งเชิงเส้น โดยมีการคำนวณผลรวมค่าความเร่งเชิงเส้น [17] ดังสมการที่ 2

$$A_{smv} \geq |A| = \sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2} \quad (2)$$

โดยที่ A_{smv} ถูกใช้เป็นค่าอ้างอิงของเงื่อนไขการแจ้งเตือนเมื่อมีการกระแทกหรือแทนการล้มของผู้สูงอายุ เมื่อค่าดังกล่าวมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับผลรวมค่าความเร่งสัมบูรณ์ ที่กำหนดไว้มีค่าความเร่งสูงเพียงพอที่มีผลทำให้เกิดภาวะของการล้ม ซึ่งแบ่งการทำงานเป็น 3 ระดับ โดยระดับที่หนึ่งผู้สูงอายุมีการเคลื่อนไหวที่มีการกระแทกเป็นผลทำให้เกิดค่าความเร่งที่สูงขึ้น จะมีการแจ้งเตือนไปยังบุคลากรทางการแพทย์ ให้รู้ว่าคุณสูงอายุได้รับการกระแทกหรืออาจจะมีการล้ม จากนั้นจะเข้าสู่การแจ้งเตือนระดับที่ 2 ผู้สูงอายุหากยังสามารถช่วยเหลือตัวเองได้ โดยสามารถกดปุ่มสวิตช์เพื่อยืนยันว่าไม่ได้มีการล้มจริงหรือปลอดภัย และในระดับที่ 3 คือกรณีที่ผู้สูงอายุไม่สามารถช่วยเหลือตัวเองได้ จะมีการส่งข้อมูลการแจ้งเตือนอีกครั้งเป็นการขอความช่วยเหลือโดยมีคุณลักษณะกราฟ ดังรูปที่ 4 และการเคลื่อนไหวรูปแบบต่าง ๆ ดังรูปที่ 5



รูปที่ 4 กราฟสัญญาณที่ได้จากการตรวจจับการล้ม 3 ระดับ



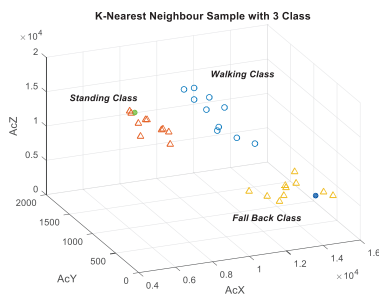
รูปที่ 5 กราฟสัญญาณเอ้าท์พุทที่ได้จากกิจกรรมการเคลื่อนไหว ที่อ่านได้จากเซนเซอร์ทั้ง 3 แกน

3.2.4 การจำแนกข้อมูล

ในบทความวิจัยนี้จะเริ่มต้นพิจารณาการคำนวณความใกล้เคียงกันมากที่สุด [5] คือ การใช้หลักการเปรียบเทียบข้อมูลที่สนใจกับข้อมูลใน Class ว่ามีความคล้ายคลึงกันมากน้อยเพียงใดโดยข้อมูลที่สนใจ หากตกอยู่ใน Class ของข้อมูลนั้นมากที่สุด ระบบจะให้คำตอบของข้อมูลใน Class นั้น และใช้เทคนิค Weighted k-NN ซึ่งเป็นเป้าหมายหลักในบทความวิจัยนี้ โดยใช้การคำนวณ Euclidean Distance [5] ดังสมการที่ 3

$$d(k, r) = \sum_{r=1}^{10} |A_{[x,y,z]i, test} - A_{[x,y,z]j, train}| \quad (3)$$

โดยที่ r แทนด้วยจำนวน Record จากการคำนวณทั้ง 70 ข้อมูล ของจำนวน k ค่าที่ได้จากชุดข้อมูลที่ได้จากการฝึกฝน $A_{[x,y,z]j, train}$ และข้อมูลทดสอบ $A_{[x,y,z]i, test}$ ของค่าความเร่ง โดยตัวอย่างของการแยกรูปแบบ ข้อมูลที่มีจำนวน 3 คลาส และทดลองการสุ่ม 2 ข้อมูล โดยข้อมูลการสุ่มครั้งที่ 1 ข้อมูลนี้ไปตกอยู่ในคลาสของการยืน Standing Class และการสุ่มครั้งที่ 2 ข้อมูลนี้ไปตกอยู่ใน Class ของการล้มไปข้างหลัง Fall Back Class ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 การสุ่ม 2 ข้อมูลทดสอบ จำนวน 3 คลาส

การทำนายแนวโน้มและโอกาสที่จะเกิดการล้มสามารถคำนวณได้จากหลักการ Weighted K-Nearest Neighbor [5] หลังจากได้ผลการคำนวณ Euclidean Distance โดยค่าแต่ละ Weighted มีค่าสูงสุดเป็น 1 ซึ่งมีรูปแบบการคำนวณ ดังสมการต่อไปนี้ จะได้ว่า

$$w_{kNN_i} = \left\{ \frac{d(k, r)_{avg_max} - d(k, r)_{dist(i,j)}}{d(k, r)_{avg_max} - d(k, r)_{avg_min}} \right\} \quad (4)$$

เมื่อ $d(k, r)_{avg_max} \neq d(k, r)_{avg_min}$ และ

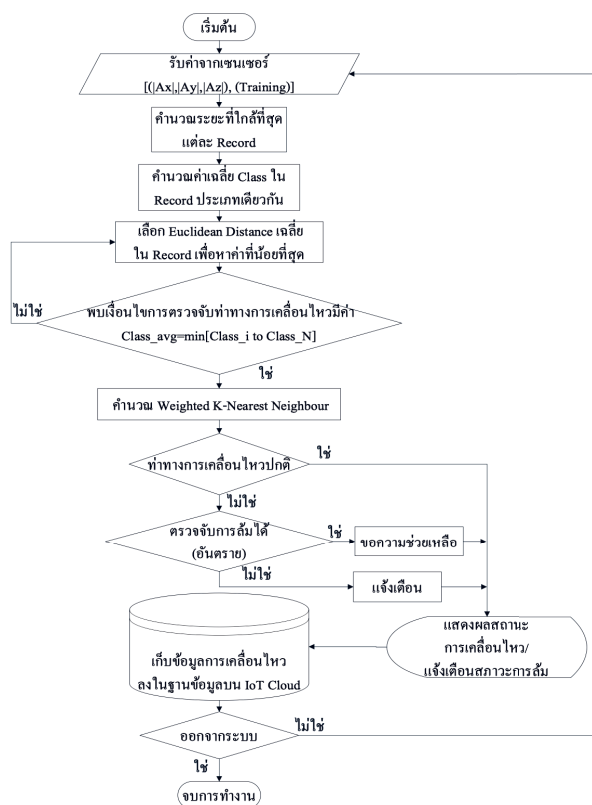
$$w_{kNN_i} = 1 \quad (5)$$

เมื่อ $d(k, r)_{avg_max} = d(k, r)_{avg_min}$

จากสมการที่ 4 และ 5 เป็นสมการการให้คะแนนถ่วงน้ำหนัก โดยผลการคำนวณจะแบ่งเป็น 2 กรณี โดยสมการที่ 4 เป็นกรณีที่ค่าระยะห่างเฉลี่ยสูงสุดไม่เท่ากับค่าระยะห่างเฉลี่ยต่ำสุดให้ผลเป็นค่าใด ๆ และในสมการที่ 5 เป็นกรณีที่ค่าระยะห่างเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับค่าระยะห่างเฉลี่ยต่ำสุด w_{kNN_i} จะมีค่าเป็น 1 นั่นคือ เื่อนไขที่สนใจ ในการทำนาย หากผลรวมของกิจกรรมการเคลื่อนไหวมีความเสี่ยงหรือแนวโน้มที่จะเกิดการล้มมีค่าสูงกว่าการเคลื่อนไหวที่ปลอดภัย จะให้ค่าเป็น 1

3.2.5 ขั้นตอนการตรวจจับการล้ม

ขั้นตอนการดำเนินงานจะอธิบายถึงกระบวนการทำงานของระบบตรวจจับการล้มและติดตามกิจกรรมการเคลื่อนไหวเพื่อทำนายเหตุการณ์ที่มีโอกาสที่จะเกิดการล้ม โดยใช้หลักการ Weight k-NN ซึ่งมีขั้นตอนดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ผังงานการทำงานของระบบตรวจจับการล้มและจำแนกข้อมูลกิจกรรมการเคลื่อนไหว

จากรูปที่ 7 เป็นผังงานการไหลข้อมูลการทำงานของระบบตรวจจับการล้มด้วยวิธีการจำแนกข้อมูลการเคลื่อนไหว และใช้ Weighted k-NN มาช่วยในการตัดสินใจหรือทำนายโอกาสที่จะเกิดการล้ม การแสดงสถานะกิจกรรมการเคลื่อนไหวของผู้สูงอายุและจะถูกเก็บลงในฐานข้อมูลบน IoT โดยในส่วนที่สองจะเป็นการแจ้งเตือนและขอความช่วยเหลือผ่านแอปพลิเคชัน LINE ทำให้บุคลากรทางการแพทย์ใช้ข้อมูลทั้งสองส่วนในการวิเคราะห์เพื่อเตรียมการช่วยเหลือหรือเฝ้าติดตามผู้สูงอายุได้

3.2.6 การประเมินประสิทธิภาพ

ในการประเมินประสิทธิภาพระบบตรวจจับการล้มจะใช้แบบจำลอง Confusion Matrix [5] ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แบบจำลองการประเมินประสิทธิภาพ

ค่าทดสอบ	ค่าทำนายเหตุการณ์	
	Positive	Negative
Positive	True Positive	False Positive
Negative	False Negative	True Negative

จากตาราง 1 ได้กำหนดเงื่อนไขการจำแนกออกเป็น 4 กรณี โดยที่

True Positive (TP) คือ การล้มที่เกิดขึ้นจริงและอุปกรณ์ตรวจจับได้ว่าการล้มจริง

False Positive (FP) คือ การล้มที่ไม่ได้เกิดขึ้นจริง แต่อุปกรณ์ตรวจจับได้ว่าการล้มจริง

False Negative (FN) คือ การล้มที่เกิดขึ้นจริง แต่อุปกรณ์ตรวจจับไม่ได้ว่าการล้มจริง

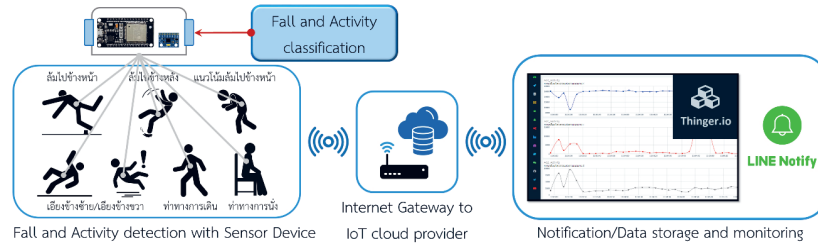
True Negative (TN) คือ การล้มที่ไม่ได้เกิดขึ้นจริงและอุปกรณ์ตรวจจับได้ว่าไม่มีการล้มจริง

การประเมินประสิทธิภาพการจำแนกข้อมูลที่มีการตรวจจับการล้มของผู้สูงอายุประกอบด้วย ค่าความไว (Sensitivity) คือ อัตราส่วนของจำนวนพยากรณ์ที่มีผลเป็นบวกที่ทำนายถูกต้องต่อจำนวนเหตุการณ์ที่สนใจมีผลเป็นบวก ค่าความจำเพาะ (Specificity) คือ อัตราส่วนของจำนวนพยากรณ์ที่มีผลเป็นลบที่ทำนายถูกต้องต่อจำนวนเหตุการณ์ที่สนใจมีผลเป็นลบ

ตัวสถิติ 2 ค่า คือ ค่าความไวและค่าความจำเพาะสามารถนำมาคำนวณหาค่าความถูกต้อง (Accuracy) และค่าความแม่นยำ (Precision) จากเงื่อนไขการจำแนกค่าจริงและเท็จทั้ง 4 กรณี จะนำมาใช้ในการประเมินหาประสิทธิภาพการตรวจจับการล้ม

4. ภาพรวมของระบบตรวจจับการล้ม

ภาพรวมของระบบตรวจจับการล้มของผู้สูงอายุ และจำแนกข้อมูลกิจกรรมการเคลื่อนไหวโดยใช้อัลกอริทึม k-



รูปที่ 8 ภาพรวมของระบบตรวจจับการล้มและจำแนกข้อมูลการเคลื่อนไหวด้วย Weighted k-NN

จากรูปที่ 8 เป็นภาพรวมการทำงานของระบบโดยแบ่งการทำงานออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนของระบบฝังตัวซึ่งประกอบด้วยเซนเซอร์ตรวจจับการล้มและในการประมวลโปรแกรมจะใช้อัลกอริทึม Weighted k-NN สำหรับจำแนกข้อมูลกิจกรรมการเคลื่อนไหวและทำนายแนวโน้มที่จะเกิดการล้ม ส่วนของการเชื่อมต่อกับโครงข่าย Internet gateway กับบอร์ดระบบฝังตัว และส่วนสุดท้ายคือส่วนของการแจ้งเตือนไปยังบุคลากรทางการแพทย์ โดยผ่านผู้ให้บริการ IoT ซึ่งมีการเก็บข้อมูลกิจกรรมการเคลื่อนไหวของผู้สูงอายุและแสดงผลการทำงานผ่านทาง Dashboard

5. ผลการวิจัย

หัวข้อนี้จะอธิบายถึงรายละเอียดของการทดลองและผลการทดลอง โดยเริ่มต้นจากการเตรียมอุปกรณ์ตรวจจับการล้ม ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ลักษณะอุปกรณ์ตรวจจับการล้ม

NN แบบ Weighted k-Nearest Neighbor ซึ่งสามารถสรุปภาพรวมการทำงานของระบบโดยมีลักษณะดังรูปที่ 8

การใส่ในสายคาดเอวแสดงไว้ดังรูปที่ 10

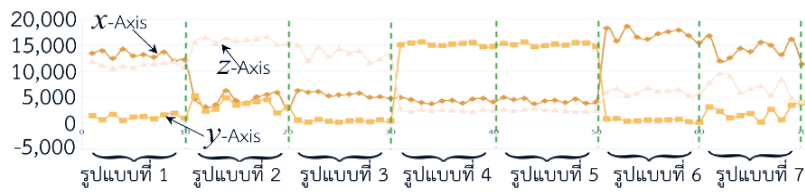


รูปที่ 10 การเตรียมอุปกรณ์ใส่ในสายคาดเอว

ในส่วนของการทดลองและผลการทดลอง ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกจะเป็นลักษณะการจำแนกข้อมูลกิจกรรมการเคลื่อนไหว ด้วย K-Nearest Neighbor ส่วนที่สองจะเป็น ผลการทำนายเหตุการณ์โอกาสที่จะเกิดการล้มด้วย Weighted k-NN โดยมีรายละเอียด ดังนี้

5.1 การจำแนกข้อมูลกิจกรรมการเคลื่อนไหว

โดยใช้เวลาในการทดสอบ 10 วินาที ต่อการทำกิจกรรมการเคลื่อนไหวทั้ง 7 รูปแบบ โดยหน่วยเวลาในการประมวลผลผลอ่านค่าจากเซนเซอร์ทุก ๆ 0.05 วินาที ต่อ 1 ข้อมูล ดังนั้น ถ้าใช้เวลาในการเก็บข้อมูลที่อ่านได้จากเซนเซอร์ใน 10 วินาที จะมีข้อมูลทั้งหมด $10/0.05 = 200$ ข้อมูล โดยรูปแบบที่ 1 จำลองการยืนแบบโน้มไปข้างหน้าหรือเอนไปข้างหลัง 10 วินาที รูปแบบที่ 2 จำลองการล้มหงายไปข้างหลัง 10 วินาที รูปแบบที่ 3 จำลองการล้มไปข้างหน้า 10 วินาที รูปแบบที่ 4 จำลองการล้มไปข้างซ้าย/เอียงซ้าย 10 วินาที รูปแบบที่ 5 จำลองการล้มไปข้างขวา/เอียงขวา 10 วินาที (รูปแบบที่ 4 และ 5 จะใช้ข้อมูลกลุ่มชุดเดียวกัน) รูปแบบที่ 6 จำลองการนั่งหรือยืนนิ่ง 10 วินาที และรูปแบบที่ 7 จำลองการเดิน 10 วินาที โดยจะทำการสุ่มข้อมูลมาจากแต่ละกิจกรรมการเคลื่อนไหวรูปแบบละ 10 ข้อมูล จาก 200 ข้อมูล เป็น 70 ข้อมูล ทั้ง 7 รูปแบบ กิจกรรมการเคลื่อนไหว โดยมีข้อมูลดังรูปที่ 11



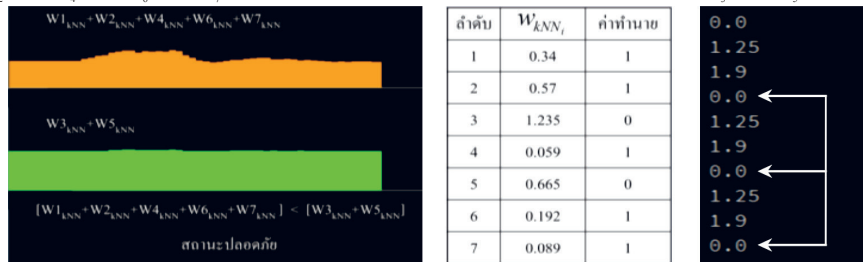
รูปที่ 11 ลักษณะของชุดข้อมูลฝึก 70 ข้อมูล ทั้ง 7 รูปแบบกิจกรรมการเคลื่อนไหว

จากรูปที่ 11 เป็นกราฟรูปแบบของข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์ ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลความเร่งตามแนวแกน x ข้อมูลความเร่งตามแนวแกน y และข้อมูลความเร่งตามแนวแกน z กิจกรรมการเคลื่อนไหวอย่างละ 10 ข้อมูล ซึ่งจะเห็นข้อมูล ข้อมูลดังกล่าว คือ ชุดข้อมูลฝึก เพื่อนำมาคำนวณกับข้อมูลทดสอบที่รับเข้ามาจากเซนเซอร์แบบเวลาจริงจากกิจกรรมการเคลื่อนไหวและการล้มของผู้สูงอายุ

5.2 ผลการทำนายเหตุการณ์โอกาสที่จะเกิดการล้มด้วย Weighted k-NN

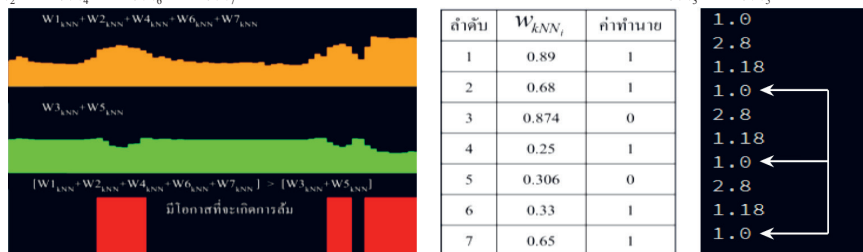
การคำนวณการให้คะแนนถ่วงน้ำหนัก แบบ Weighted k-NN มีลักษณะการทำงาน 2 ลักษณะ คือ การทำงานกรณีที่ผู้สูงอายุมีสถานะปลอดภัยและกรณีที่ผู้สูงอายุมีการเคลื่อนไหวที่มีแนวโน้มโอกาสที่จะเกิดการล้ม โดยทั้ง 2 รูปแบบ มีผลการคำนวณดังรูปที่ 12 และรูปที่ 13 ตามลำดับ

$$(w_{kNN_1} + w_{kNN_2} + w_{kNN_4} + w_{kNN_6} + w_{kNN_7} : 0.34 + 0.57 + 0.059 + 0.192 + 0.089 = 1.25) < (w_{kNN_3} + w_{kNN_5} : 1.235 + 0.665 = 1.9)$$



รูปที่ 12 การคำนวณค่าน้ำหนักที่มีลักษณะการยืนในสถานะที่ปลอดภัย

$$(w_{kNN_1} + w_{kNN_2} + w_{kNN_4} + w_{kNN_6} + w_{kNN_7} : 0.89 + 0.68 + 0.25 + 0.33 + 0.65 = 2.8) > (w_{kNN_3} + w_{kNN_5} : 0.874 + 0.306 = 1.18)$$



รูปที่ 13 การคำนวณค่าน้ำหนักที่มีลักษณะการยืนที่มีโอกาสจะล้มไปข้างหน้าหรือหลัง

จากรูปที่ 12 จะเป็นผลการทดสอบลักษณะของการยืนที่ยังไม่มีความเสี่ยงที่จะเกิดการล้มหรืออยู่ในสถานะที่ปลอดภัยซึ่งจะเห็นว่า ค่าน้ำหนัก $w_{3kNN} + w_{5kNN}$ จะมีค่าสูงกว่า $w_{1kNN} + w_{2kNN} + w_{4kNN} + w_{6kNN} + w_{7kNN}$ ซึ่งเป็นเหตุการณ์ที่ถูกกำหนดให้มีสถานะปลอดภัย (มีค่าเป็น 0 ตามรูปที่ลูกศรสีขาวชี้) ส่วนรูปที่ 13 จะเป็นผลการทดสอบลักษณะของการยืนที่มีความเสี่ยงที่จะเกิดการล้มหรืออยู่ในสถานะที่ไม่

ปลอดภัยซึ่งจะเห็นว่าค่าน้ำหนัก $w_{1kNN} + w_{2kNN} + w_{4kNN} + w_{6kNN} + w_{7kNN}$ จะมีค่าสูงกว่า $w_{3kNN} + w_{5kNN}$ ซึ่งเป็นเหตุการณ์ที่ถูกกำหนดให้มีความเสี่ยงหรือโอกาสที่จะเกิดการล้ม (มีค่าเป็น 1 ตามรูปที่ลูกศรสีขาวชี้) โดยจากรูปที่ 12 และ 13 ด้านขวามือ แสดงผลการทำงานแบบเวลาจริงของค่าผลรวม w_{kNN_i} และผลทำนาย 0 หรือ 1 ผ่าน Serial Monitor

6. การประเมินประสิทธิภาพ

การประเมินประสิทธิภาพได้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ การประเมินประสิทธิภาพของการตรวจจับการล้มด้วยระบบฝังตัว การประเมินประสิทธิภาพการทำนายเหตุการณ์ที่มีโอกาสที่จะเกิดการล้มจากการจำแนกข้อมูลกิจกรรมการเคลื่อนไหวด้วยวิธี Weight k-NN และการประเมินค่าความถูกต้องของเวลาที่ใช้ในการแจ้งเตือนการล้มโดยอ้างอิงจากเวลาที่กำหนดในระบบฝังตัว

6.1 การประเมินประสิทธิภาพการตรวจจับการล้ม

ในหัวข้อนี้จะประเมินประสิทธิภาพการตรวจจับการล้มจาก 4 รูปแบบ โดยทดสอบการล้มจำนวน 5 รอบ รอบละ 50 ครั้ง ทั้งหมด 250 ครั้ง โดยตัวประเมินประสิทธิภาพที่สำคัญ คือ ค่าความถูกต้องและค่าความแม่นยำของการตรวจจับการล้มของระบบ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การประเมินประสิทธิภาพการตรวจจับการล้ม

การประเมิน	TP.	FP.	FN.	TN.	Sensitivity	Specificity	Accuracy	Precision
ล้มไปข้างหน้า	152	13	29	56	83.98%	81.16%	83.20%	92.12%
ล้มไปข้างหลัง	129	13	32	76	80.12%	85.39%	82.00%	90.85%
ล้มไปข้างซ้าย	162	11	18	59	90.00%	84.29%	88.40%	93.64%
ล้มไปข้างขวา	167	12	14	57	92.27%	82.61%	89.60%	93.30%

จากตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่าค่าความถูกต้องและค่าความแม่นยำของการตรวจจับการล้มล้มไปข้างหน้าและล้มไปข้างขวาซึ่งอยู่ในตำแหน่งหมุนตามแนวแกน Z มีความเร่งสะสมได้เร็วกว่าจึงสามารถตรวจจับการล้มซึ่งมีค่าความถูกต้องและค่าความแม่นยำสูงกว่ารูปแบบอื่น อยู่ที่ 88.40%, 93.64% และ 89.60%, 93.30% ตามลำดับ จากผลการประเมินประสิทธิภาพด้วยค่าความถูกต้องและค่าความแม่นยำสามารถวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นได้ว่า ค่าความแม่นยำของอุปกรณ์ตรวจจับการล้มบนระบบฝังตัวมีการทำงานช้าที่ใกล้เคียงกันทำให้มีความแม่นยำสูง และค่าความถูกต้องในการตรวจจับการล้มมีความสัมพันธ์กับค่าความเร่งที่ได้จากเซนเซอร์สามารถทำงานได้ถูกต้อง

6.2 การประเมินประสิทธิภาพการทำนาย

เหตุการณ์ที่มีโอกาสจะเกิดการล้ม

ในหัวข้อนี้จะประเมินประสิทธิภาพโดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 จะเป็นกลุ่มผู้ทดสอบจำลองกิจกรรมการเคลื่อนไหวที่มีความเสี่ยงที่จะเกิดการล้ม และกลุ่มที่ 2 จะเป็นกลุ่มผู้ทดสอบจำลองกิจกรรมการเคลื่อนไหวปกติ โดยเลือกรูปแบบของกิจกรรมการเคลื่อนไหวที่มีความเสี่ยงที่จะเกิดการล้มมา 4 รูปแบบ คือ รูปแบบที่ 1 การยืนมีการโน้มตัวไปข้างหน้า/เอนไปข้างหลัง รูปแบบที่ 4 การล้มไปข้างซ้ายและรูปแบบที่ 5 การล้มไปข้างขวา และรูปแบบที่ 7 การเดินปกติ โดยมีจำนวนผู้ทดสอบทั้งหมด 12 คน ดังตารางที่ 3 และตารางที่ 4 ตามลำดับ

ตารางที่ 3 การประเมินประสิทธิภาพทำนายเหตุการณ์ที่มีความเสี่ยงที่จะเกิดการล้ม

รูปแบบกิจกรรมการเคลื่อนไหวต่อจำนวนผู้ทดสอบ	Sensitivity	Specificity
รูปแบบที่ 1 (ค่าเฉลี่ยจากผู้ทดสอบคนที่ 1 ถึง คนที่ 3)	91.99%	88.82%
รูปแบบที่ 4 (ค่าเฉลี่ยจากผู้ทดสอบคนที่ 4 ถึง คนที่ 6)	89.66%	89.22%
รูปแบบที่ 5 (ค่าเฉลี่ยจากผู้ทดสอบคนที่ 7 ถึง คนที่ 9)	89.84%	90.07%
รูปแบบที่ 7 (ค่าเฉลี่ยจากผู้ทดสอบคนที่ 10 ถึง คนที่ 12)	92.14%	81.74%

ตารางที่ 4 การประเมินประสิทธิภาพทำนายเหตุการณ์ที่ไม่มีความเสี่ยงที่จะเกิดการล้ม

รูปแบบกิจกรรมการเคลื่อนไหวต่อจำนวนผู้ทดสอบ	Sensitivity	Specificity
รูปแบบที่ 1 (ค่าเฉลี่ยจากผู้ทดสอบคนที่ 1 ถึง คนที่ 3)	80.87%	99.03%
รูปแบบที่ 4 (ค่าเฉลี่ยจากผู้ทดสอบคนที่ 4 ถึง คนที่ 6)	85.24%	99.14%
รูปแบบที่ 5 (ค่าเฉลี่ยจากผู้ทดสอบคนที่ 7 ถึง คนที่ 9)	91.23%	99.15%
รูปแบบที่ 7 (ค่าเฉลี่ยจากผู้ทดสอบคนที่ 10 ถึง คนที่ 12)	86.43%	98.60%

เมื่อวิเคราะห์ผลการทดลองจากตารางที่ 3 การทำนายโอกาสที่จะเกิดการล้มหรือมีความเสี่ยงที่จะเกิดการล้ม โดยกลุ่มทดลองที่มีความเสี่ยงที่จะเกิดการล้มเมื่อพิจารณาจากค่าความไวรูปแบบการเคลื่อนไหวที่ 1,4 และ 7 มีความไวเกิดขึ้นที่สูงกว่าค่าจำเพาะ นั่นคือ สามารถทำนายโอกาสที่จะเกิดการล้มได้ถูกต้อง ส่วนการวิเคราะห์ผลการทดลองในตารางที่ 4 ค่าความจำเพาะจะมีค่าสูงกว่าค่าความไวทั้ง 4 รูปแบบ นั่นคือ สามารถทำนายโอกาสที่จะไม่เกิดความเสียหายหรือปลอดภัยได้ถูกต้อง

6.3 การประเมินประสิทธิภาพการแจ้งเตือน

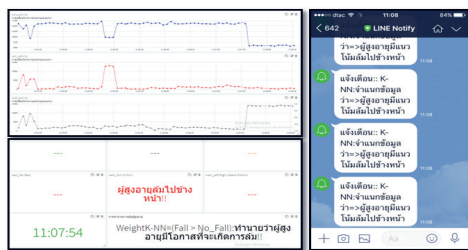
หัวข้อนี้จะประเมินประสิทธิภาพการแจ้งเตือนการล้ม โดยวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือ (Reliability) จากการทดลองด้วยเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน กำหนดให้ เวลาการส่งข้อมูลบนระบบฝังตัวเป็นเวลาอ้างอิงจริง 1.5 วินาทีแทนด้วย T_{system} เทียบกับเวลาที่มีการส่งข้อมูลการแจ้งเตือนเป็นเวลาที่ใช้ทดสอบได้ T_{test} ซึ่งมีการคำนวณตามสมการที่ 6

$$\%error = \frac{|T_{test} - T_{system}|}{T_{system}} \times 100 \quad (6)$$

โดยพิจารณาจาก 4 รูปแบบของกิจกรรมการเคลื่อนไหวที่ทำให้เกิดการล้ม คือ การล้มไปข้างหน้า การล้มไปข้างหลัง การล้มไปข้างซ้ายและการล้มไปข้างขวา รูปแบบละ 10 ครั้ง โดยได้ค่าเฉลี่ยรวมเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 20.69% และค่าความถูกต้องของเวลาที่ใช้ในการแจ้งเตือนอยู่ที่ 79.31% ซึ่งผู้รับข้อมูลแจ้งเตือนสามารถเข้าช่วยเหลือผู้สูงอายุได้ทันเวลา

7. การแสดงผล

ขั้นตอนการแสดงผลสำหรับบุคลากรทางการแพทย์ที่จะได้รับข้อมูลจากการเฝ้าติดตาม และสามารถเรียกดูข้อมูลแบบเวลาจริง โดยมีลักษณะของส่วนแสดงผลดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 สถานะกิจกรรมการเคลื่อนไหวของผู้สูงอายุและมีการแจ้งเตือนการล้ม

จากรูปที่ 14 เป็นการแสดงข้อมูลการเคลื่อนไหวของผู้สูงอายุ ที่ได้จากการทำนายโอกาสที่จะเกิดการล้มด้วย Weight k-NN กรณีที่ผู้สูงอายุมีการเคลื่อนไหวและมีการแจ้งเตือนว่าล้มไปข้างหน้า พร้อมกับระบบจะมีการส่งข้อความแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชัน LINE

8. สรุปและอภิปรายผล

การตรวจจับการล้มในผู้สูงอายุและจำแนกข้อมูลกิจกรรมการเคลื่อนไหวโดยใช้วิธี Weighted k-NN เพื่อทำนายความเสี่ยงที่จะเกิดการล้ม ซึ่งมุ่งเน้นในการนำเสนอการประเมินประสิทธิภาพ 2 ลักษณะ คือ การประเมินประสิทธิภาพการตรวจจับการล้มพบว่าสามารถนำไปใช้ในการตรวจจับการล้มได้ และการประเมินประสิทธิภาพทำนายเหตุการณ์ที่จะเกิดการล้มด้วย Weighted k-NN พบว่าสามารถจำแนกข้อมูลการเคลื่อนไหวทั้งในส่วนผู้ที่มีความเสี่ยงและผู้ที่ไม่มีความเสี่ยงที่จะเกิดการล้มได้ถูกต้อง บทความวิจัยนี้เป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้งานสำหรับบุคลากรทางการแพทย์ที่ต้องนำข้อมูลย้อนหลังมาช่วยในการวินิจฉัยการล้มของผู้สูงอายุแต่ละรายได้

9. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณบุคลากรงานส่งเสริมสุขภาพและเวชศาสตร์ชุมชน อำเภอเลิงนกทา จังหวัดยโสธร ขอขอบคุณบริษัท วินสัชพลาย จำกัด ในการให้คำแนะนำด้านอุปกรณ์ ทำให้บทความวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

10. เอกสารอ้างอิง

- [1] Department of the Interior. Population in thailand 2017 (with information number of provinces, districts, villages) [Internet]. 2017 [cited 2019 March12];Available from: [http://www.zcooby.com/2017-thailand-information-number- statistics/ \(in Thai\)](http://www.zcooby.com/2017-thailand-information-number- statistics/ (in Thai))
- [2] Kitomprayoonkun V. Falling and prevention. association of rehabilitation medicine thailand [Internet]. 2009 [cited 2019 March 26]. Available from:[http://rehabmed.or.th/assoc/as_thai/news_detail.php?news_id=232 \(in Thai\)](http://rehabmed.or.th/assoc/as_thai/news_detail.php?news_id=232 (in Thai))

- [3] Hwang K, Chen M. Big-data analytics for cloud, IoT and cognitive computing. John Wiley & Sons; 2017 Aug 14.
- [4] Ashok M, Varma PS, Sundari MR. IoT based monitoring and control system for home automation. International Journal of Engineering Technology Science and Research (IJETSR). 2017 Nov;4(11).
- [5] Kubat M. An introduction to machine learning. Cham, Switzerland :Springer International Publishing;2017 Sep 2.
- [6] Chotavanich T. Embedded systems for detecting falling whilebathing camera that maintains privacy. Master of Engineering Thesis, University of Electrical Engineering Rajabhat Songkhla, 2012.(in Thai)
- [7] Lamsamran P. Tracking system elderly using a wireless network [Internet]. 2016 [cited 2019 April 23]. Available from : [http:// digital_ collect, lib. buu.ac.th/ dcms / files / 55910292.pdf](http://digital_collect.lib.buu.ac.th/files/55910292.pdf).
- [8] Natthawin V. Arduino based fall detection and alert system. Bachelor of Engineering (Hons) (Electrical and Electronic) University Technology. Petronas Malaysia; 2016.
- [9] El-Bendary N, Tan Q, Pivot FC, Lam A. Fall detection and prevention for the elderly : a review of trends and challenges. International Journal on Smart Sensing & Intelligent Systems. 2013 Jun 1;6(3).
- [10] He J, Hu C, Wang X. A smart device enabled system for autonomous fall detection and alert. International Journal of Distributed Sensor Networks. 2016 Feb17;12(2):2308183.
- [11] Li P, Gou J, Yang H. The distance-weighted k-nearest centroid neighbor classification. J. Intell. Inf. Hiding Multimedia Sig. Process. 2017;8(3):611-22.
- [12] Aguilera J, González LC, Montes-y-Gómez M, Rosso P. A new weighted k-nearest neighbor algorithm based on newton's gravitational force. In: Iberoamerican Congress on Pattern Recognition 2018 Nov 19(pp. 305-313). Springer, Cham.
- [13] Abisoye BO, Kolo JG, Jimoh NO, Abisoye OA, Ajao LA. Development of an sms-based wearable fall detection system.
- [14] Venus Supply Company Limited. Esp-wroom32 WiFi serial transceiver module [Internet]. [cited 2019 May 30] Copyright ThaiEasyElec.com (in Thai)
- [15] Arduino CC. Arduino introduction. Arduino, [Online]. Available : [http ://arduino.cc /en /guide /introduction](http://arduino.cc/en/guide/introduction). 2015 Aug.
- [16] RobotSiam Channel. Installation arduino core for esp32 WiFi chip [Internet].2017 [cited 2019 March 3]. Available from : [https:// robotsiam. blogspot .com/ 2017/09/arduino-core-foresp32. html](https://robotsiam.blogspot.com/2017/09/arduino-core-foresp32.html) (in Thai)
- [17] Commanrone Electronics for you. Use of gy521 mpu6050 [Internet]. [cited 2019 May 20] Accessible from:[http://comman-dronestore.com/learning/gy521_001 .php](http://comman-dronestore.com/learning/gy521_001.php) (in Thai)
- [18] Dziak D, Jachimczyk B, Kulesza W. IoT-based information system for healthcare application: design methodology approach. Applied Sciences. 2017 Jun 8;7(6):596.

การประยุกต์ใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการหาความเหมาะสมในการเชื่อมพื้น ดาดฟ้าเรือขนส่งสินค้า

ปรัชญา เพียสุระ^{1*} และภาสพิชญ์ ชูใจ²
prachya.pea@kmutt.ac.th^{1*}, pasapitch.chu@kmutt.ac.th²

^{1*} ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

² ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

Received : 4-Sep-2019
Revised : 28-Oct-2019
Accepted : 30-Oct-2019

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการหาความเหมาะสมในการเชื่อมพื้นดาดฟ้าเรือขนส่งสินค้าด้วยกระบวนการเชื่อมใต้ฟลักซ์ในเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง เกรด ASTM A131 EH36 โดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการทำนายค่าความเค้นแรงดึงด้วยเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียม ชนิดการแพร่ค่าย้อนกลับ ลักษณะการเรียนรู้แบบมีผู้สอน มีปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และความเร็วในการเชื่อม หลังจากทำการเชื่อมได้มีการทดสอบค่าความเค้นแรงดึง การตัดโค้ง การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และการสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม ด้วยวิธีฝึกสอนอัลกอริทึมการเรียนรู้แบบเลเวนเบิร์ก-มาร์ค ฟังก์ชันปรับการเรียนรู้ ชนิดการเคลื่อนลงตามความชัน และชนิดการเคลื่อนลงตามความชันด้วยโมเมนต์ รูปแบบฟังก์ชันการกระตุ้น ในงานวิจัยได้ใช้ฟังก์ชันลอก-ซิกมอยด์สำหรับชั้นนำเข้า ฟังก์ชันแทน-ซิกมอยด์สำหรับชั้นซ่อนที่ 1 และชั้นซ่อนที่ 2 ฟังก์ชันเพียวรีนสำหรับชั้นผลลัพธ์ ผลการวิจัยพบว่าแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมในการทำนายค่าความเค้นแรงดึง ประกอบด้วยนิวรอนในชั้นอินพุต 3 นิวรอน นิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 จำนวน 8 นิวรอน นิวรอนในชั้นซ่อนที่ 2 จำนวน 10 นิวรอน และนิวรอนในชั้นแสดงผล 1 นิวรอน (3-8-10-1) ชนิดของฟังก์ชันปรับการเรียนรู้ชนิดการเคลื่อนลงตามความชัน มีค่าเฉลี่ยผิดพลาดกำลังสองที่ 0.000106 มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ 0.99947 สภาวะการเชื่อมที่เหมาะสมที่ได้จากการทำนายจากแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม ที่กระแสไฟฟ้า 340 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้า 26 โวลต์ และความเร็วที่ใช้ในการเชื่อม 20 เซนติเมตรต่อนาที

คำสำคัญ: แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม พื้นดาดฟ้าเรือ เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง กระบวนการเชื่อมใต้ฟลักซ์

Application of Artificial Neural Network Model for Optimization in Main Deck Cargo Ship Welding

Prachya Peasura^{1*} and Pasapitch Chuja²
prachya.pea@kmutt.ac.th^{1*}, pasapitch.chu@kmutt.ac.th²

^{1*} Department of Production Technology Education, Faculty of Industrial Technology Education, King Mongkut's University of Technology Thonburi

² Department of Electrical Technology Education, Faculty of Industrial Technology Education, King Mongkut's University of Technology Thonburi

Received	: 4-Sep-2019
Revised	: 28-Oct-2019
Accepted	: 30-Oct-2019

Abstract

This research proposes the optimization of main deck cargo ship welding with submerge arc welding process (SAW) in high strength steel ASTM A131 EH36 grade. The mathematic modeling for tensile strength predicting was based on the artificial neural networks (ANN) with back-propagation learning algorithm and supervised learning. The SAW process parameters were studied the welding current, voltage and travel speed. The resulting SAW welding specimens were examined using tensile strength tests, bending tests which were observed microstructure with scanning electron microscopy (SEM) and determine a suitable mathematic model. The Levenberg-Marquart training algorithm was also train for weight and bias network. The two learning function, including learning gradient descent (Leamgd) and learning gradient descent with momentum (Leamgdm) were used in ANN model. The activation function of log-sigmoid for input layer, tan-sigmoid for hidden layer of 1 and 2, purelin for output layer was assigned. The research results reveal that using a ANN model with the proposed mathematical model, which represents 3 neurons for the input 8 neurons for layer 1 layer 2 for 10 neurons and 1 neuron for output layer (3-8-10-1) with learning function of Leamgd. The mean square error (MSE) of ANN model is 0.000106 and the coefficient of determination (R^2) is 0.99947. The optimum from ANN model were welding current of 340 amperes, 26 volts, and 20 centimeter/minute travel speed.

Keywords: Artificial Neural Network Model, Main Deck Ship, High Strength Steel, Submerge Arc Welding Process

1. บทนำ

อุตสาหกรรมท่อเรือเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจ มีความเชื่อมโยงกับอุตสาหกรรมต่อเนื่อง ธุรกิจที่เกี่ยวข้องโดยตรงได้แก่ ธุรกิจการขนส่งทางน้ำ ประเทศไทยพึ่งพาการค้าระหว่างประเทศเป็นหลัก ปริมาณการค้าระหว่างประเทศอาศัยการขนส่งทางน้ำ ดังนั้น อุตสาหกรรมท่อเรือและซ่อมเรือจึงเป็นอุตสาหกรรมที่สนับสนุนกิจการเดินเรือขนส่งให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ตลาดอุตสาหกรรมและซ่อมเรือในประเทศไทยเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวาง งานในอุตสาหกรรมท่อเรือแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คืองานท่อเรือใหม่และงานซ่อมเรือเก่า ซึ่งอุตสาหกรรมงานเชื่อมมีบทบาทอย่างมากในอุตสาหกรรมท่อเรือ [1]

การเพิ่มขึ้นของการใช้เรือขนส่งสินค้าในประเทศไทย และต่างประเทศส่งผลให้ปริมาณเรือที่เข้ามาต่อเรือและซ่อมแซมมีมากขึ้นด้วย โดยสินค้าที่นิยมใช้การขนส่งทางน้ำ คือน้ำมันและแก๊ส สำหรับพื้นดาดฟ้าเรือ(Main Deck) มีการผลิตจากเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง เนื่องจากต้องการความทนทานต่อแรงที่มากกระทำทางกล เนื่องจากบริเวณดังกล่าวติดกับถังบรรจุสินค้า (Cargo Tank) [1] เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง เกรด ASTM A131 EH36 เป็นเหล็กกล้าที่นิยมใช้ในการเชื่อมเรือขนส่งสินค้า เนื่องจากมีความแข็งแรงสูง ความสามารถในการเชื่อมดี กระบวนการเชื่อมที่นิยมใช้ คือ กระบวนการเชื่อมได้ฟลักซ์ เนื่องจากเป็นกระบวนการเชื่อมแบบอัตโนมัติจึงช่วยลดระยะเวลาในการเชื่อม มีการหลอมละลายลึกสูง เหมาะสำหรับการเชื่อมเหล็กแผ่นหนา สำหรับปัญหาที่พบในกระบวนการเชื่อม คือ การบิดงอของชิ้นงาน [2] มีสาเหตุมาจากหลายปัจจัย ได้แก่ ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเชื่อม การกระจายตัวของอุณหภูมิที่เกิดจากการเชื่อม ลักษณะรอยต่อของชิ้นงาน โดยถ้าวัสดุเชื่อมในสถานะที่ไม่เหมาะสมดังกล่าวจะทำให้ วัสดุมีความเค้นสูงจนเกินจุดคราก ทำให้วัสดุมีการบิดงออย่างถาวร และเกิดความเค้นตกค้าง [2] ในแนวเชื่อม ความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมในระหว่างการต่อเรือเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้น เพราะความเค้นตกค้างเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการแตกหัก และทำให้เพิ่มการโก่งเดาะ ที่เกิดขึ้นในการเชื่อมเรือ รายงานวิจัยของ L. H. S. Barbosa et al. [3] ได้ศึกษาปริมาณความร้อนที่ส่งผลกระทบต่อการแตกหักในการเชื่อมได้ฟลักซ์โดยผลวิจัยได้บ่งบอกว่าเมื่อปริมาณความร้อนเข้าในชิ้นงานสูงส่งผลให้ชิ้นงานเชื่อมมีโอกาสในการเกิดการแตกหักสูง เช่นเดียวกับ L. Pavel et al. [4] ได้ศึกษาเกี่ยวกับวัสดุที่ใช้ในการเชื่อมเรือด้วยกระบวนการเชื่อมได้ฟลักซ์ พบว่าปริมาณความร้อนของการเชื่อมส่งผลให้ธาตุผสมเช่น อลูมิเนียม ไททาเนียม ไนโอเบียม ตกลึกเป็นเฟสที่สองสามารถป้องกันการ

ขยายตัวของเกรนได้ รายงานวิจัยของ T. Messias et al. [5] ได้ศึกษาความสามารถในการเชื่อมของวัสดุ ASTM A131 ที่เชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์คได้ฟลักซ์ R. Youmin et al. [6] รายงานผลการเชื่อมเรือด้วยเลเซอร์ในวัสดุ EH36 พบว่าปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นในการเชื่อมส่งผลกระทบต่อเกิดการโครงสร้างจุลภาค และความเค้นตกค้างในวัสดุ X. R. Li et al. [7] ได้รายงานผลการศึกษาคอมพิวเตอร์การหลอมละลายลึกในการเชื่อมได้ฟลักซ์ของกระแสไฟฟ้าส่งผลกระทบต่อการหลอมละลายลึกมากที่สุด C. Emy et al. [8] ได้ทำนายอายุการแตกหักเนื่องจากความล้าของการเชื่อมชิ้นส่วนเรือพบว่าพารามิเตอร์ในการเชื่อมมีส่วนสำคัญสำหรับอายุการใช้งานของชิ้นส่วนต่างๆ เช่นเดียวกับรายงานวิจัยของ L. Li et al. [9] พบว่าบริเวณโครงสร้างที่เกิดความเสียหายจากการสั่นสะเทือนเป็นบริเวณการเชื่อมที่เกิดความเค้นตกค้างสูงส่งผลให้ส่งผลให้เกิดการแตกหัก ดังนั้นจะต้องทำการออกแบบพารามิเตอร์ในการเชื่อมให้เหมาะสมเพื่อลดปัญหาจากการเกิดความเค้นตกค้างขณะทำการเชื่อม

แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network, ANN) ได้มีการประยุกต์ใช้สำหรับการเชื่อมในหลายกระบวนการ ในการพยากรณ์ข้อมูล เช่น ค่าความแข็ง ค่าความเค้นแรงดึง ขนาดรอยเชื่อม เป็นต้น รายงานวิจัยของ K. Zhang et al. [10] ได้สร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมในการเชื่อมเลเซอร์แบบเดิมลวดเชื่อม A. Bagchi et al. [11] ได้สร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม และหาความเหมาะสมในการเชื่อม Hastelloy C-276 ด้วยการเชื่อมเลเซอร์ A. Sarka et al. [12] ได้เปรียบเทียบแบบจำลองแบบมัลติเพิลรีเกรสชัน และแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมในการพยากรณ์ลักษณะของรอยเชื่อมและความกว้างของเขตอิทธิพลความร้อนในการเชื่อมเหล็กกล้า L. Yu et al. [13] ได้ออกแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายค่าความเค้นแรงดึงในบริเวณเขตอิทธิพลความร้อนของเหล็กกล้าผสมต่ำด้วยการเชื่อมเลเซอร์ รายงานการวิจัยของ D. Zhao et al. [14] ได้ ออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลและสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายค่าความเค้นแรงดึงในการเชื่อมความต้านทานชนิดจุด จากรายงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการประยุกต์ใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายค่าความเค้นแรงดึง ลักษณะรอยเชื่อม ความเค้นตกค้าง เป็นต้น ในวัสดุประเภทอื่น เช่น อลูมิเนียม เหล็กกล้าคาร์บอน นิกเกิลเบสซูเปอร์อัลลอยด์และกระบวนการเชื่อมอื่น ยังไม่ได้มีงานวิจัยที่ได้ประยุกต์ใช้งานสำหรับการเชื่อมได้ฟลักซ์ ใน เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง ASTM A131 EH36

งานวิจัยและปัญหาที่ผ่านพบว่าปัญหาที่เกิดขึ้นสำหรับการเชื่อมเรือเกิดจากความเค้นตกค้างที่เกิดจากสภาวะในการเชื่อมที่ไม่เหมาะสม โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณเขตอิทธิพลความร้อน (Heat Affected Zone, HAZ) เนื่องจากบริเวณดังกล่าวมีสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคที่แตกต่างจากบริเวณรอยเชื่อม (Weld Metal) และบริเวณชิ้นงาน (Base Metal) ผลกระทบจากการได้รับความร้อนขณะทำการเชื่อมส่งผลให้ความเหนียว บริเวณเขตอิทธิพลความร้อนลดลงทำให้มีโอกาสเกิดการแตกร้าวได้ง่าย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ประยุกต์ใช้วิธีการโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายค่าความเค้นแรงดึง โดยนำออกแบบการทดลองสถิติแบบ 2^3 แฟกทอเรียล มาประยุกต์ใช้ในการสร้างข้อมูลเพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จากนั้นหาความเหมาะสมในงานเชื่อม โดยการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค การทดสอบดัดโค้ง อีกทั้งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถนำไปทำนายค่าความเค้นแรงดึง และข้อมูลที่ได้จากการวิจัยนำไปใช้กำหนดการบันทึกการรับรองคุณภาพกระบวนการเชื่อม (Procedure Qualification Test Record, PQR) และข้อกำหนดรายละเอียดงานเชื่อม (Welding Procedure Specification) ให้รอยเชื่อมเชื่อมมีคุณภาพ มีสมบัติทางกล โครงสร้างจุลภาคที่มีความเหมาะสมในการใช้งาน ลดต้นทุนในการจัดทำข้อกำหนดรายละเอียดงานเชื่อมต่อไป

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 วัสดุและการเตรียมชิ้นงานในการวิจัย

วัสดุที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ เหล็กกล้าความแข็งแรงสูง เกรด ASTM A131 EH36 ซึ่งเป็นเหล็กกล้าที่นิยมใช้ในงานโครงสร้างเรือ ความหนา 6 มิลลิเมตร มีส่วนผสมทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 1 การเตรียมชิ้นงานก่อนทำการเชื่อมนำเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงมาตัดให้ได้ชิ้นงานทดสอบขนาด 75 x 200 x 6 มิลลิเมตร ทำการบาร่องวี (V-Joint) มุม 60 องศา ผิวหน้าของรอยขอบชิ้นงานส่วนฐาน (Root Face) 2 มิลลิเมตร ระยะเว้น (Root Opening) 2 มิลลิเมตร

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุ ASTM A131 EH36 (Weight %)

C	Mn	Si	P	S
0.18	1.51	0.49	0.030	0.028

2.2 กระบวนการเชื่อม

การดำเนินการวิจัยได้ใช้กระบวนการเชื่อมใต้ฟลักซ์ (Submerged Arc Welding : SAW) โดยมีข้อกำหนด

ในการเชื่อมดังนี้ ท่าเชื่อม (Position) ทำราบ (Flat Position) เชื่อมด้วยกระแสไฟฟ้า (Polarity) ชนิดกระแสตรงขั้วบวก (DCEP) ลวดเชื่อมชนิด F7A2-EM12K (0.14%C, 1.12%Mn, 0.31%Si, Weight %) เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.00 มิลลิเมตร ระยะยื่นอิเล็กโทรด (Electrode Extension) 15 มิลลิเมตร ระยะอาร์ค (Arc Length) 2 มิลลิเมตร มุมอิเล็กโทรด (Electrode Angle) 90 องศา โดยใช้ทองแดงเป็นแผ่นรองหลัง (Backing Bar)

2.3 การออกแบบการทดลองแฟกทอเรียล

การเตรียมข้อมูลสำหรับการสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม ได้ใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล รูปแบบ 2^3 โดยรูปแบบการทดลองนี้ได้กำหนดปัจจัยหลัก 3 ปัจจัย ได้แก่ กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และความเร็วที่ใช้ในการเชื่อม แต่ละปัจจัยแบ่งออกเป็น 2 ระดับ แฟกทอเรียล คือ ระดับสูงและระดับต่ำ [15] เนื่องจากการศึกษาข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง รวมถึงมาตรฐานการเชื่อมต่างๆ ได้มีการระบุช่วงของปัจจัยที่จะส่งผลให้สมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาค ดังแสดงในตารางที่ 2 การดำเนินการวิจัยในแต่ละสิ่งทดลอง (Treatment) ทำการทดลองเชื่อม 3 ครั้ง แบบสุ่ม ดังนั้นมีจำนวนชิ้นงานเชื่อมทั้งหมด 24 ชิ้น

ตารางที่ 2 การออกแบบการทดลอง

ปัจจัย	สัญลักษณ์	ต่ำ	สูง	หน่วย
กระแสไฟฟ้า	X_1	320	340	แอมแปร์
แรงดันไฟฟ้า	X_2	24	26	โวลต์
ความเร็วในการเชื่อม	X_3	20	22	เซนติเมตรต่อนาที

2.4 การทดสอบสมบัติทางกล

หลังจากการเชื่อมตามรูปแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลแล้ว ชิ้นงานเชื่อมทั้ง 24 ชิ้นนำมาทำการทดสอบค่าความเค้นแรงดึง โดยมีการเตรียมชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E8 [16] ทำการกัดชิ้นงาน และเจียรตรงส่วนโค้งของชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐานกำหนด นำชิ้นงานไปทำการทดสอบแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง โดยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Tester) ด้วยความเร็วในการดึง 50 มิลลิเมตรต่อนาที เพื่อที่นำค่าความเค้นแรงดึงที่ได้จากการทดสอบนำมาสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม จากนั้นทำการเชื่อมชิ้นงานมีสภาวะการเชื่อมที่เหมาะสม และทำการทดสอบการดัดโค้ง โดยทำการเตรียมชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM E290 – 14 ขนาดความกว้าง 40 มิลลิเมตร ยาว 150 มิลลิเมตร จากนั้นทำการเจียรผิวรอยหน้ารอยเชื่อมและรอยร้าวให้เรียบ และทำการทดสอบการ

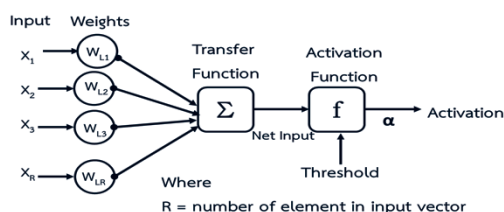
ตัดโค้งเพื่อตรวจสอบความสมบูรณ์บริเวณผิวยาวราก (Root Bend) และผิวหน้ารอยเชื่อม(Face Bend)

2.5 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

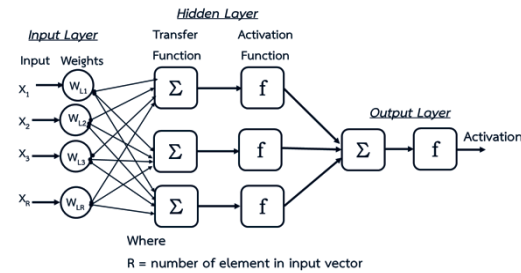
การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานโดยนำชิ้นงานมาขัดด้วยกระดาษทรายแบบสายพาน เพื่อปรับผิวหน้าชิ้นทดสอบและทำการขัดกระดาษทรายเบอร์ 180 ถึงเบอร์ 1200 จากนั้นนำชิ้นงานด้วยเครื่องขัดผิวมันโดยใช้สารขัดผิวอลูมิน่า 1 ไมครอน นำชิ้นงานมากัดขึ้นรอย (Etching) โดยใช้กรดไนตริก 2 มิลลิลิตร และเมทานอล 98 มิลลิลิตร จากนั้นถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง และการวัดเปอร์เซ็นต์ของโครงสร้างเฟอร์ไรต์และเพิร์ลไลต์ ทำการวัดด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค(Image analyzer) ใช้โปรแกรม Leica MW โดยการถ่ายภาพบริเวณเขตอิทธิพลความร้อน การถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเชื่อมบริเวณเขตอิทธิพลความร้อน และการวิเคราะห์การแตกหักของวัสดุ

3. การพัฒนาแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network, ANN) เป็นการคำนวณเลียนแบบการทำงานของระบบสมองมนุษย์ เพื่อใช้ประโยชน์ในการพยากรณ์ข้อมูลโครงข่ายประสาทเทียมประกอบด้วยเซลล์ประสาท (Neural) ซึ่งจำลองมาจากการทำงานของระบบสมองมนุษย์ โดยใช้ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function, f) ค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight, w) และค่าไบแอส(Bias, b) เป็นเครื่องมือจำลองคุณสมบัติของเซลล์ประสาท โครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทได้แก่ โครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียว (Single Layer Neural Network) ดังแสดงในรูปที่ 1 และโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น (Multi-Layer Neural Network) ดังแสดงในรูปที่ 2 ประกอบไปด้วยชั้นนำเข้า(Input Layer) ชั้นซ่อน(Hidden Layer) และชั้นแสดงผล(Output Layer)

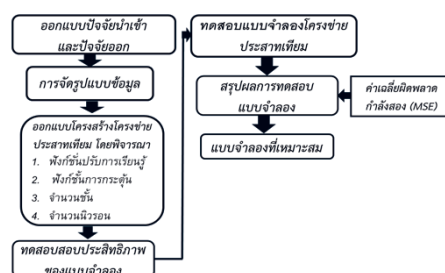


รูปที่ 1 โครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียว



รูปที่ 2 โครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โครงข่ายประสาทเทียม ในงานวิจัยได้เลือกแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมชนิดการแพร่ค่าย้อนกลับ ลักษณะการเรียนรู้แบบมีผู้สอน มีปัจจัยนำเข้า 3 ปัจจัย ได้แก่ กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และความเร็วในการเชื่อม จากนั้นทำการออกแบบทดลองแบบแฟคทอเรียล รูปแบบ 2^3 ปัจจัยส่งออก คือ ค่าความเค้นแรงดึง จากนั้นทำการออกแบบโครงสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม โดยพิจารณาจาก 4 องค์ประกอบได้แก่ ฟังก์ชันปรับการเรียนรู้ ฟังก์ชันการกระตุ้น จำนวนชั้น และจำนวนนิวรอน จากนั้นทำการทดสอบแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม ตรวจสอบประสิทธิภาพแบบจำลอง สรุปผลการทดสอบแบบจำลอง และทำการเลือกแบบจำลองที่ดีที่สุดจากค่าความผิดพลาดกำลังสอง(Mean Square Error, MSE) แผนผังการดำเนินการสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม แสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 แผนผังการดำเนินการสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

3.1 การออกแบบปัจจัยนำเข้าและปัจจัยส่งออก

ข้อมูลสำหรับการสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม เป็นข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล รูปแบบ 2^3 โดยมีปัจจัยนำเข้า (Input) 3 ปัจจัย ได้แก่ กระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และความเร็วที่ใช้ในการเชื่อม ปัจจัยส่งออก (Output Layer) 1 ปัจจัย ได้แก่ ค่าความเค้นแรงดึง จำนวนข้อมูลทั้งหมด 24 ค่า

3.2 การจัดรูปแบบข้อมูลในการสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

การจัดรูปแบบข้อมูลสำหรับการฝึกสอน(Training) และทดสอบ(Test) จากค่าที่ได้จากการทดสอบค่าความเค้นแรงดึงตามรูปแบบการทดลองแฟคทอเรียล เนื่องจากข้อมูลที่ได้แต่ละสิ่งทดลอง (Treatment) มีความแตกต่างกันซึ่งจำทำให้การสร้างแบบจำลองเกิดความคลาดเคลื่อนมากจึงมีความจำเป็นต้องหาค่าต่ำสุด และสูงสุดของกลุ่มข้อมูล จากนั้นทำการลดทอนขนาดของข้อมูลให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการนำไปฝึกสอน และทดลองจากจำนวนรอบในการวนซ้ำ (Epoch)=1,000 โดยแปลงข้อมูลให้มีค่าระหว่าง 0-1 โดยใช้สมการ (1)

$$Y = \frac{Y_i - Y_{\min}}{Y_{\max} - Y_{\min}} \quad (1)$$

ภายหลังจากข้อมูลได้ดำเนินการฝึกสอนและทดสอบ ได้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมแล้วข้อมูลที่ได้จะต้องถูกแปลงค่ากลับเป็นค่าจริงจากสมการที่ (2)

$$Y = [Y_i(Y_{\max} - Y_{\min}) + Y_{\min}] \quad (2)$$

โดยที่ Y คือ ข้อมูลที่ได้รับการแปลงค่า

Y_i คือ ข้อมูลการทดลองที่ i

$Y_{\min}$ คือ ข้อมูลการทดลองที่มีค่าน้อยที่สุด

$Y_{\max}$ คือ ข้อมูลการทดลองที่มีค่ามากที่สุด

3.3 การออกแบบโครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียม

การออกแบบโครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมฝึกสอนด้วยอัลกอริทึมการเรียนรู้แบบเลเวนเบิร์ก-มาร์ควิตซ์ (Levenberg-Maquartm Algorithm) ฟังก์ชันปรับการเรียนรู้ (Learning Function) ชนิดการเคลื่อนลงตามความชัน (Learning Gradient Descent, Learngd) และชนิดการเคลื่อนลงตามความชันด้วยโมเมนตัม (Learning Gradient Descent with Momentum, Learngdm) รูปแบบฟังก์ชันการกระตุ้น(Activate Function) ในงานวิจัยได้ใช้ฟังก์ชันลอจิสติกมอยด์(log-sigmoid) สำหรับชั้นนำเข้า ฟังก์ชันแทนซิกมอยด์(tan-sigmoid) สำหรับชั้นซ่อนที่ 1 และชั้นซ่อนที่ 2 และฟังก์ชันเพียวรีน(purelin) สำหรับชั้นผลลัพธ์(Output layer) เพื่อที่จะได้ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดน้อยที่สุด(Mean Square Error, MSE) สำหรับฟังก์ชันการถ่วงน้ำหนักในแต่ละชั้นสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3)-(5)

$$a = \text{Logsig}(n) = \frac{1}{1 + e^{-n}} \quad (3)$$

$$a = \text{Tansig}(n) = \frac{2}{1 + e^{-2n}} - 1 \quad (4)$$

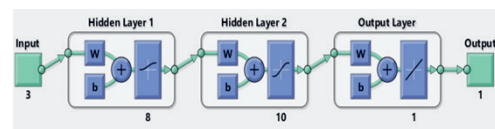
$$a = \text{Purelin}(n) \quad (5)$$

งานวิจัยได้ออกแบบโครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมโดยทั้งรูปแบบที่มีชั้นซ่อนเดียว และสองชั้นซ่อน มีการปรับเปลี่ยนฟังก์ชันปรับการเรียนรู้ทั้งสองรูปแบบ โดยมีรูปแบบการทดลองโครงข่ายประสาทเทียมทั้งสิ้น 16 รูปแบบ ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงค่าเฉลี่ยความผิดพลาดของโครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมทั้ง 16 รูปแบบ

No. Neuron	MSE	
	Learngd	Learngdm
3-4-1	0.071686	0.054746
3-6-1	0.071687	0.067328
3-8-1	0.000113	0.000452
3-10-1	0.000119	0.000763
3-8-4-1	0.081263	0.000543
3-8-6-1	0.000165	0.000875
3-8-8-1	0.000110	0.000231
3-8-10-1	<u>0.000106</u>	0.000176

การเลือกโครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมจะพิจารณาจากค่าเฉลี่ยผิดพลาดกำลังสอง (MSE) ที่น้อยที่สุด จากตารางที่ 3 พบว่าโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมสำหรับการทำนายค่าความเค้นแรงดึง คือ 3-8-10-1 ประกอบด้วยนิวรอนในชั้นอินพุต 3 นิวรอน นิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 จำนวน 8 นิวรอน นิวรอนในชั้นซ่อนที่ 2 จำนวน 10 นิวรอน และนิวรอนในชั้นแสดงผล 1 นิวรอน อยู่ในฟังก์ชันปรับการเรียนรู้ (Learning Function) ชนิดการเคลื่อนลงตามความชัน (Learngd) มีค่าเฉลี่ยผิดพลาดกำลังสองเท่ากับ 0.000106 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสม แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 โครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียมของการทำนายค่าความเค้นแรงดึง

3.4 การทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

การทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมจะพิจารณาจากค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ดังแสดงในสมการ (6) และ (7)

โดยที่ ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (MSE)

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^N (T_i - A_i)^2}{N} \quad (6)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (T_i - A_i)^2}{\sum_{i=1}^N (T_i - A)^2} \quad (7)$$

โดย T คือ ผลลัพธ์เป้าหมาย A คือ ผลลัพธ์ที่ได้จากการทำนาย และ N คือ จำนวนข้อมูล

4. ผลการทดลองและอภิปรายผล

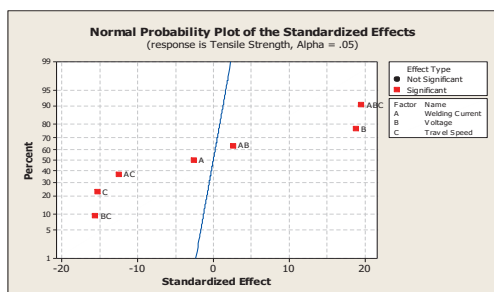
4.1 การวิเคราะห์ ค่าความเค้นแรงดึงจากแฟคทอเรียล

ชิ้นงานที่ได้หลังจากการเชื่อมตามการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล นำไปทดสอบค่าความเค้นแรงดึง ซึ่งการทดสอบค่าความเค้นแรงดึงโดยใช้แรงดึงดึงวัสดุอย่างช้าๆ ทำให้วัสดุแตกออกจนกระทั่งชิ้นทดสอบขาด แล้วบันทึกความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นดึงกับความเครียด และเป็นข้อกำหนดการเชื่อมที่จะต้องมีการทดสอบหลังจากการเชื่อม เพื่อเป็นข้อมูลในการพิจารณาถึงความเหมาะสมของสภาวะการเชื่อม จากนั้นนำผลการทดสอบมาทำการวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบความปกติของข้อมูล วิเคราะห์หือทธิพลของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความเค้นแรงดึง โดยมีผลการวิจัยดังนี้

ตารางที่ 4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความเค้นแรงดึง

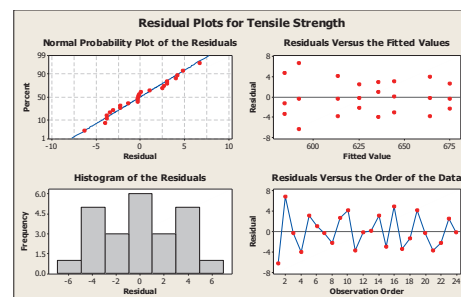
Source	DF	Seq. SS	Adj. SS	Adj. MS	F	P
Main Effects	3	9482.3	9482.35	3160.78	198.01	0.000
Interaction	3	6480.1	6480.05	2160.02	135.32	0.00
Residual Error	16	255.4	255.40	15.96		
Pure Error	1	255.4	255.40	15.96		
Total	23	22313.9				

$R^2 = 98.86\%$ $R^2(\text{adj.}) = 98.35\%$



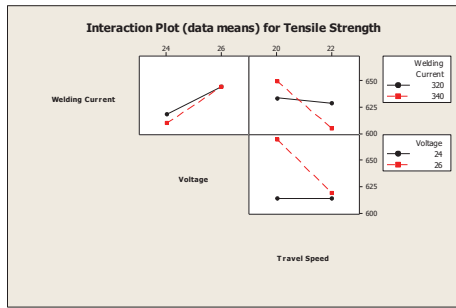
รูปที่ 5 การแจกแจงความปกติของอิทธิพลปัจจัย

ตารางที่ 4 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความเค้นแรงดึง พบว่าปัจจัยที่ทำการวิจัยได้แก่ กระแสไฟฟ้า(A) แรงดันไฟฟ้า(B) และความเร็วในการเชื่อม(C) ส่งผลกระทบท่วมต่อค่าความเค้นแรงดึงของชิ้นงาน มีค่า P-Value = 0.000 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยแสดงในรูปที่ 5 พบว่าทุกปัจจัยทั้งปัจจัยหลัก(A, B, C) ปัจจัยร่วม(AB, AC, BC, ABC) มีผลกระทบต่อค่าความเค้นแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญ ทุกปัจจัย มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงาน $R^2(\text{adj.}) = 98.35\%$ ความเป็นไปได้ของการพยากรณ์เมื่อนำปัจจัยทั้งหมดมารวมกันมีความน่าเชื่อถือในการพยากรณ์



รูปที่ 6 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง เพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องของข้อมูลหลังจากการทดลอง ดังรูปที่ 6 พบว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability Plot of the Residuals) ข้อมูลจากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับเส้นแจกแจงแบบปกติ ค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลพิจารณาได้จากฮิสโตแกรม (Histogram of the Residuals) พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวเป็นรูปทรงแบบปกติจึงทำให้ประมาณได้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติ สำหรับแผนภูมิการกระจายเทียบกับค่าประมาณ (Residuals Versus the Fitted Values) พบว่ารูปแบบการกระจายตัวของค่าความผิดพลาดไม่ได้มีลักษณะแบบกรวยปลายเปิด หรือรูปแบบลำโพงจึงถือว่าการกระจายตัวแบบปกติ แผนภูมิการกระจาย(Residuals Versus the Order of the Data) เป็นการตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) ของค่าความคลาดเคลื่อน พบว่าการกระจายตัวของค่าความคลาดเคลื่อนมีรูปแบบที่เป็นอิสระ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอนแสดงให้เห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนมีความเป็นอิสระต่อกัน (Independent) [17] ดังนั้นข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือได้

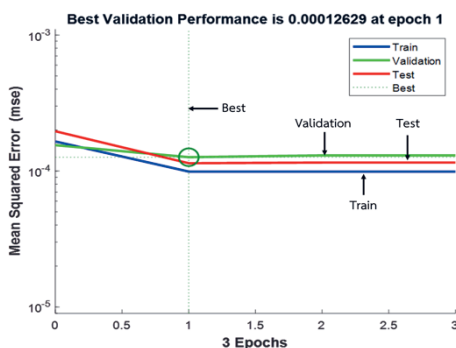


รูปที่ 7 ผลกระทบร่วมของปัจจัยกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และความเร็วที่ใช้ในการเชื่อม

จากรูปที่ 7 เมื่อพิจารณาถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความเค้นแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญ คือ ค่ากระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า และความเร็วในการเดินแนว พบว่าระดับปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด ที่กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อม 340 แอมแปร์ แรงดันที่ใช้ในการเชื่อม 26 โวลต์ และความเร็วในการเดินแนวเชื่อม 20 เซนติเมตรต่อนาที

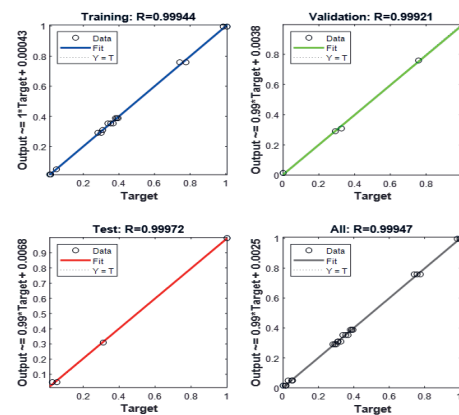
4.2 การวิเคราะห์แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

การพยากรณ์ค่าความเค้นแรงดึงที่มีความถูกต้องและแม่นยำสูงมีความจำเป็นอย่างมากสำหรับงานเชื่อมติดท่อเรือขนส่งสินค้า เพื่อที่จะได้ค่าความเค้นแรงดึงที่เหมาะสมในการใช้งาน การรับแรงสถิตยที่จะกระทำกับรอยเชื่อมไม่ให้เกิดความเสียหาย แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่มีประสิทธิภาพการพยากรณ์ค่าความเค้นแรงดึง ประกอบด้วยจำนวนนิวรอนในชั้นอินพุต 3 นิวรอน จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 1 จำนวน 8 นิวรอน จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนที่ 2 จำนวน 10 นิวรอน และจำนวนนิวรอนในชั้นแสดงผล 1 นิวรอน (3-8-10-1) ชนิดของฟังก์ชันปรับการเรียนรู้ ที่เหมาะสมของแบบจำลอง คือ ชนิดการเคลื่อนลงตามความชัน (Leamgd) ซึ่งส่งผลให้มีค่าเฉลี่ยผิดพลาดกำลังสองน้อยที่สุด เท่ากับ 0.000106 โดยใช้วิธีการเรียนรู้แบบเลเวนเบิร์ก-มาร์ควิตซ์ รูปแบบฟังก์ชันการกระตุ้น คือ ลอก-ซิกมอยด์ สำหรับชั้นนำเข้า ฟังก์ชันแทน-ซิกมอยด์ สำหรับชั้นซ่อนทั้งสองชั้น และฟังก์ชันเพียวรีนสำหรับชั้นผลลัพธ์



รูปที่ 8 ประสิทธิภาพการตรวจสอบความถูกต้องและค่าเฉลี่ยผิดพลาดกำลังสอง

จากรูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสองสามขั้นตอน คือ การฝึกสอน (Train) การตรวจสอบ (Validation) และทดสอบ (Test) ความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองของโครงข่ายประสาทเทียมมีค่ามากเริ่มต้นและลดลงต่อเนื่อง กระบวนการฝึกสอนการเรียนรู้จะดำเนินต่อไปตามลำดับจนกว่าตัวแบบจะไปถึงตำแหน่งที่การฝึกสอนจะช่วยลดการผิดพลาดซ้ำของโครงข่ายประสาทเทียม การตรวจสอบความถูกต้องของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดจะช่วยหลีกเลี่ยงปัญหาแบบจำลองจดจำรูปแบบของข้อมูลฝึกสอนมากเกินไป (Over Fitting) ทำให้ไม่สามารถทำนายข้อมูลอื่นได้ ประสิทธิภาพการตรวจสอบที่ดีที่สุด(Best) เกิดขึ้นที่รอบในการวนซ้ำ (Epoch) ที่ 1 และหลังจากเกิดข้อผิดพลาดซ้ำ 2 ครั้ง กระบวนการจะหยุดที่ รอบในการวนซ้ำ ที่ 3 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของกระบวนการเรียนรู้ การตรวจสอบ และการทดสอบของชุดข้อมูลมีประสิทธิภาพสูง



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ของผลลัพธ์เป้าหมายและผลลัพธ์ที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม

จากรูปที่ 9 ความสัมพันธ์ของผลลัพธ์เป้าหมายผลลัพธ์ที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม แบบจำลองจากโครงข่ายประสาทเทียม มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสำหรับการทดสอบที่ 0.99944 สัมประสิทธิ์การตัดสินใจสำหรับการตรวจสอบที่ 0.99921 สัมประสิทธิ์การตัดสินใจสำหรับการทดสอบที่ 0.99972 และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจรวมของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่ 0.99947 โดยมีความชันเท่ากับ 0.99 และตัดแกน y ที่ 0.0025 มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนที่ 0.000106 ซึ่งมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนที่ต่ำที่สุด

จากผลการวิจัยสรุปได้ว่าแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมเป็นเชิงเส้นแสดงถึงความแม่นยำของแบบจำลอง โดยโครงข่ายประสาทเทียมสามารถแก้ปัญหาการเกิดแบบจำลองจดจำรูปแบบของข้อมูลฝึกสอนมากเกินไป ทำให้ไม่สามารถทำนายข้อมูลอื่นได้ ถึงแม้ว่าการแบ่งข้อมูลใน

การฝึกสอน แต่ทุกข้อมูลสามารถได้รับการฝึกสอนทั้งหมด ดังนั้นข้อมูลจำนวน 24 การทดลอง จึงมีความเพียงพอในการสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมในการพยากรณ์ค่าความเค้นแรงดึงในการเชื่อมตาดฟ้าเรือขนส่งสินค้า ได้อย่างมีประสิทธิภาพและแม่นยำ

4.3 การวิเคราะห์หาความเหมาะสมในการเชื่อม

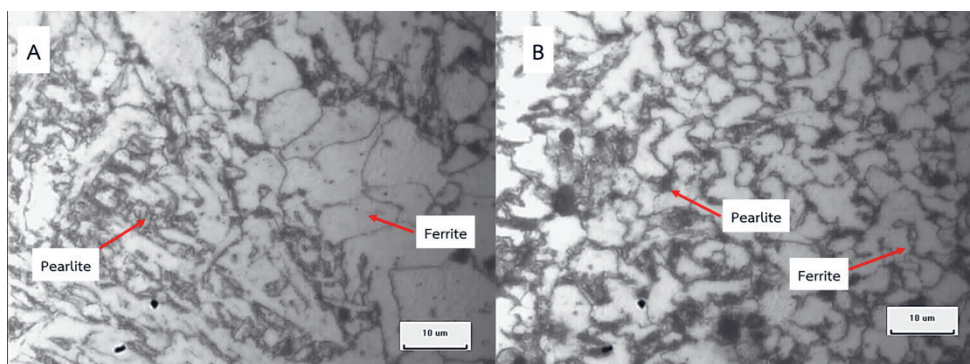
การพิจารณาถึงความเหมาะสมในการเชื่อมตาดฟ้าเรือขนส่งสินค้าด้วยเหล็กกล้า ASTM A131 EH36 เพื่อจัดทำข้อกำหนดรายละเอียดงานเชื่อม (WPS) ให้เป็นไปตามข้อกำหนดการออกแบบ การสร้าง และการตรวจสอบ ในการเชื่อมประกอบโครงสร้างเรือ จากผลการเชื่อมและการทดสอบค่าความเค้นแรงดึงทั้ง 24 ชิ้นงาน รวมถึงการวิเคราะห์จากวิธีการแฟกทอเรียล และวิธีการโครงข่ายประสาทเทียม พบว่าที่กระแสไฟฟ้า 340 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้า 26 โวลต์ และความเร็วที่ใช้ในการเชื่อม 20 เซนติเมตรต่อนาที มีค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดที่ 663.25 เมกะปาสคาล แต่ในการพิจารณา

ถึงความเหมาะสมจะพิจารณาจากค่าความเค้นแรงดึงเพียงอย่างเดียวไม่ได้จะต้องพิจารณาจากโครงสร้างจุลภาค รวมถึงการทดสอบการดัดโค้ง (Bend Test) ดังนั้นในงานวิจัยจึงทำการยืนยันผลการทดลองอีกครั้งโดยทำการทดลองเชื่อม 3 ชิ้นงาน เพื่อทำการทดสอบค่าความเค้นแรงดึง การทดสอบการดัดโค้ง และการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค ผลการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

4.3.1 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

เปรียบเทียบกับค่าความเค้นแรงดึง

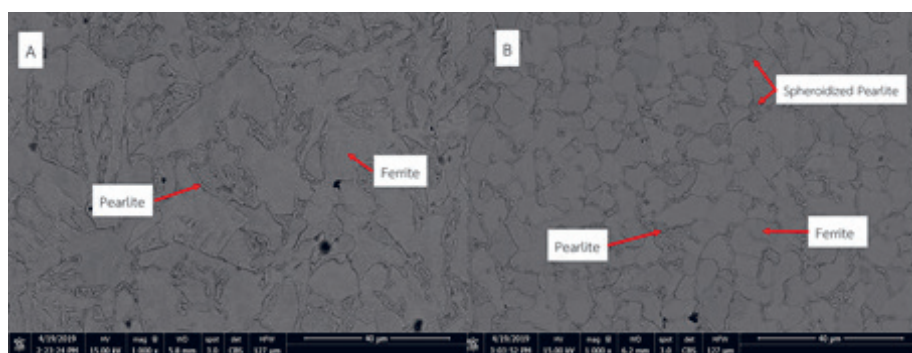
ชิ้นงานหลังจากการเชื่อมจะนำมาทำการเตรียมชิ้นงานเพื่อการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด บริเวณเขตอิทธิพลความร้อน (Heat Affected Zone, HAZ) เนื่องจากบริเวณดังกล่าวมีความแข็งแรงน้อยที่สุด และทุกชิ้นเกิดการขาดบริเวณเขตอิทธิพลความร้อน



รูปที่ 10 โครงสร้างจุลภาคบริเวณเขตอิทธิพลความร้อน (A) 320 แอมแปร์ 24 โวลต์ และ 22 ซม/นาที (B) 340 แอมแปร์ 26 โวลต์ 20 ซม/นาที กระแสไฟ แรงดันไฟฟ้า และความเร็วในการเชื่อม ตามลำดับ

รูปที่ 10 แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณเขตอิทธิพลความร้อนพบว่าโครงสร้างจุลภาคเป็นโครงสร้างเฟอร์ไรท์ที่เป็นเฟสพื้น และโครงสร้างเพิร์ลไลต์ จากรูปที่ 10(A) เชื่อมด้วยกระแสไฟ 320 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้า 24 โวลต์ และความเร็วในการเชื่อม 22 เซนติเมตรต่อนาที เป็นสภาวะการเชื่อมที่มีค่าความเค้นแรงดึงต่ำสุดที่ 582.32 เมกะปาสคาล เนื่องจากมีปริมาณความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานปริมาณน้อยมีลักษณะของโครงสร้างพื้นเป็นเฟอร์ไรท์ มีเพิร์ลไลต์ที่หายาก ขนาดเกรนใหญ่ พบว่ามีปริมาณของเพิร์ลไลต์ที่ 36.48 % สำหรับสภาวะการ

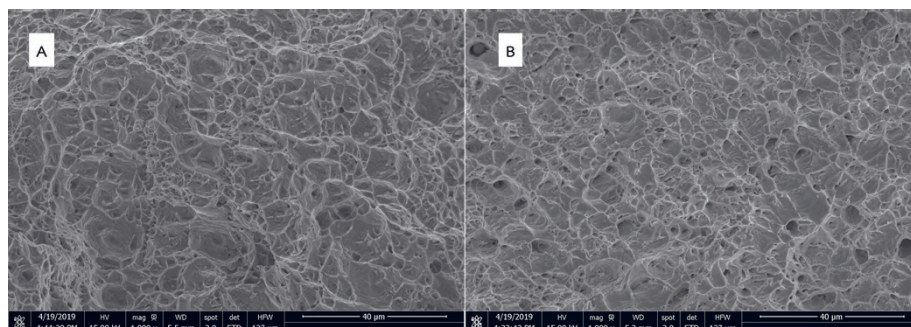
เชื่อมดังรูปที่ 10(B) เชื่อมด้วยกระแสไฟ 340 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้า 26 โวลต์ และความเร็วในการเชื่อม 20 เซนติเมตรต่อนาที เป็นชิ้นงานเชื่อมที่มีค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด เนื่องจากปริมาณความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานเพียงพอทำให้อัตราการเย็นตัวสูง ทำให้โครงสร้างพื้นเป็นเฟอร์ไรท์ และเพิร์ลไลต์ที่ละเอียด ขนาดเกรนละเอียด [18] มีปริมาณของเพิร์ลไลต์ในชิ้นงานที่ 57.83% จึงส่งผลให้มีค่าความแข็งแรงสูง



รูปที่ 11 โครงสร้างจุลภาคบริเวณเขตอิทธิพลความร้อน (A) 320 แอมแปร์ 24 โวลต์ และ 22 ซม/นาที่ (B) 340 แอมแปร์ 26 โวลต์ 20 ซม/นาที่ กระแสไฟ แรงดันไฟฟ้า และความเร็วในการเชื่อม ตามลำดับ

รูปที่ 11 แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณเขตอิทธิพลความร้อนของชิ้นงานเชื่อมพบโครงสร้างเฟอร์ไรท์ และเพิร์ลไลต์ จากรูปที่ 11(A) เชื่อมด้วยกระแสไฟ 320 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้า 24 โวลต์ และความเร็วในการเชื่อม 22 เซนติเมตรต่อนาที แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างลักษณะของเพิร์ลไลต์หยาบมีขนาดใหญ่ ลักษณะของเกรนหยาบ เนื่องจากชิ้นงานเชื่อมมีสภาวะการเชื่อมที่มีปริมาณความร้อนเข้าไปในชิ้นงานปริมาณน้อยส่งผลให้การเรียงตัวของเพิร์ลไลต์ไม่สมบูรณ์ส่งผลให้เพิร์ลไลต์หยาบและเกรนหยาบ มีผลให้ชิ้นงานมีสมบัติทางกลที่ลดลงซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Weijun H. [19] ดังนั้นชิ้นงานเชื่อมสภาวะนี้จึงมีค่าความเค้นแรงดึง และค่าความแข็งแรงน้อยที่สุด

สำหรับชิ้นงานที่มีค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด ดังรูป 11(B) เชื่อมด้วยกระแสไฟ 340 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้า 26 โวลต์ และความเร็วในการเชื่อม 20 เซนติเมตรต่อนาที พบว่ามีโครงสร้างจุลภาคเพิร์ลไลต์ละเอียด เกรนมีความละเอียด มีการกระจายตัวกันอย่างหนาแน่น รวมถึงการเกิดเพิร์ลไลต์ในลักษณะกลม (Spheroidized Pearlite) เนื่องจากสภาวะการเชื่อมที่เหมาะสมปริมาณความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานที่เพียงพอทำให้อัตราการเย็นตัวสูงส่งผลให้เพิร์ลไลต์สามารถเกิดได้อย่างหนาแน่นละเอียด และเพิร์ลไลต์บางส่วนรวมตัวกันในลักษณะกลม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sergey G.[20] และ Minwoo K. [21] ส่งผลทำให้วัสดุมีสมบัติทางกลที่ดีขึ้น



รูปที่ 12 ลักษณะการแตกหักที่ถ่ายภาพด้วย SEM (A) 320 แอมแปร์ 24 โวลต์ และ 22 ซม/นาที่ (B) 340 แอมแปร์ 26 โวลต์ 20 ซม/นาที่ กระแสไฟ แรงดันไฟฟ้า และความเร็วในการเชื่อม ตามลำดับ

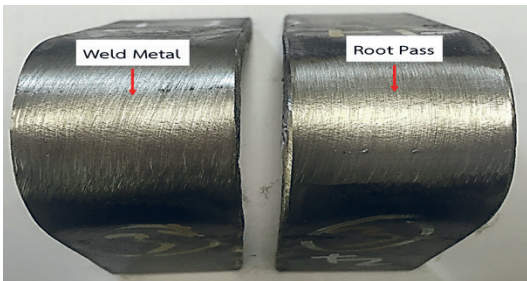
ชิ้นงานเชื่อมภายหลังจากการทดสอบค่าความเค้นแรงดึง นำมาวิเคราะห์ลักษณะของรอยแตกด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด บริเวณรอยแตกหักหลังจากการทดสอบแรงดึง จากรูปที่ 12 พบว่าการเชื่อมทั้งสองสภาวะเป็นการแตกหักแบบเหนียว (Ductile Fracture) พบว่ามีช่องว่างขนาดเล็กที่เริ่มก่อตัวขึ้นบริเวณของรอยแตกมีลักษณะเป็นร่องหลุม (Dimple) การรวมของช่องว่างขนาดเล็กเหล่านี้จึงนำไปสู่การเกิดความเสียหาย ดังรูป 12(A) เชื่อมด้วยกระแสไฟ 320 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้า 24 โวลต์ และความเร็วในการเชื่อม 22

เซนติเมตรต่อนาที สภาวะการเชื่อมดังกล่าวมีค่าความเค้นแรงดึงต่ำสุดมีร่องหลุม ปริมาณน้อยส่งผลให้มีความแข็งแรงน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะการเชื่อม ดังรูป 12(B) เชื่อมด้วยกระแสไฟ 340 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้า 26 โวลต์ และความเร็วในการเชื่อม 20 เซนติเมตรต่อนาที พบร่องหลุมขนาดเล็ก และปริมาณมากซึ่งเป็นลักษณะการแตกหักแบบเหนียวที่มีค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด สอดคล้องกับงานวิจัยของ M. Saadat et al. [22]

4.3.2 ผลการทดสอบการดัดโค้ง

(Bending Test)

การเชื่อมชิ้นงานในสภาวะที่มีค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดที่ กระแสไฟฟ้า 340 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้า 26 โวลต์ และ ความเร็วที่ใช้ในการเชื่อม 20 เซนติเมตรต่อนาที งานวิจัยได้ ทำการเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบการดัดโค้งเพื่อการ ตรวจสอบผิวหน้ารอยเชื่อม(Face Bend) และรอยรอยเชื่อม ราก (Root Bend) เพื่อตรวจสอบรอยแตกร้าว รอยยุบ โดยมี ผลการทดลองดังต่อไปนี้



รูปที่ 13 ชิ้นงานทดสอบการดัดโค้งบริเวณผิวหน้ารอยเชื่อม และรอยรากของชิ้นงานเชื่อม

รูปที่ 13 แสดงผลการทดสอบดัดโค้งผิวหน้ารอยเชื่อม และรอยรากของชิ้นงานเชื่อม ไม่พบรอยแตก หรือรอยยุบ บริเวณที่ทำการทดสอบการดัดโค้ง ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า สภาวะการเชื่อมที่เหมาะสมที่ได้จากการทำนายจาก แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม ที่กระแสไฟฟ้า 340 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้า 26 โวลต์ และความเร็วที่ใช้ในการ เชื่อม 20 เซนติเมตรต่อนาที เป็นสภาวะการเชื่อมที่เหมาะสม สำหรับการเชื่อมผนังถังบรรจุสินค้าของเรือด้วยกระบวนการ เชื่อมได้ฟลักซ์ สำหรับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง ASTM A131 EH36 สามารถนำมาระบุในข้อกำหนดกระบวนการ เชื่อมได้ต่อไป

5. สรุปผลการทดลอง

1. สภาวะการเชื่อมที่เหมาะสมที่ได้จากการทำนาย จากแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม ที่กระแสไฟฟ้า 340 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้า 26 โวลต์ และความเร็วที่ใช้ในการเชื่อม 20 เซนติเมตรต่อนาที เป็นสภาวะการเชื่อมที่เหมาะสมสำหรับ การเชื่อมผนังถังบรรจุสินค้าของเรือด้วยกระบวนการเชื่อมได้ฟลักซ์ สำหรับเหล็กกล้าความแข็งแรงสูง ASTM A131 EH36

2. แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่มี ประสิทธิภาพสำหรับการทำนายค่าความเค้นแรงดึง ประกอบด้วยจำนวนนิวรอนในชั้นอินพุต 3 นิวรอน จำนวน นิวรอนในชั้นฮอนที่ 1 จำนวน 8 นิวรอน จำนวนนิวรอนในชั้น ฮอนที่ 2 จำนวน 10 นิวรอน และจำนวนนิวรอนในชั้นแสดงผล 1 นิวรอน (3-8-10-1) ชนิดของฟังก์ชันปรับการเรียนรู้

ที่เหมาะสมของแบบจำลอง คือ ชนิดการเคลื่อนลงตามความ ชัน (Learned) มีค่าเฉลี่ยผิดพลาดกำลังสอง เท่ากับ 0.000106

3. สภาวะการเชื่อมที่มีความเหมาะสมมีโครงสร้าง จุลภาคเพิร์ลไลต์ละเอียด เกิดเพิร์ลไลต์ในลักษณะกลม เกรน มีความละเอียด เนื่องจากสภาวะการเชื่อมที่เหมาะสมปริมาณ ความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานที่เพียงพอทำให้อัตราการเย็นตัวสูงส่งผล ให้เพิร์ลไลต์สามารถเกิดได้อย่างหนาแน่นละเอียด และเพิร์ล ไลต์บางส่วนรวมตัวกันในลักษณะกลมส่งผลให้ชิ้นงานเชื่อมมี ความแข็งแรงสูง

4. การทดสอบการดัดโค้งไม่พบรอยแตก รอยยุบ ทั้ง ผิวหน้ารอยเชื่อม รอยราก และบริเวณเขตอิทธิพลความร้อน

6. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements)

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ที่ได้สนับสนุนทุนการทำวิจัย จากงบประมาณการประจำปี งบประมาณ 2561 ขอขอบพระคุณ บริษัท เอเซีย มารีน เซอร์วิส จำกัด(มหาชน) ในการสนับสนุนข้อมูลทางเทคนิค รวมถึงสถานที่ในการจัดทำวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Wanchai M, Sumalee S, Suphattra I, Sompong S, Pramuan B, et al. Integrated development of shipbuilding and ship repairing industry: Executive summary. Transportation Institute, Chulalongkorn University. 2007 (in Thai)
- [2] Tanawat S, Vithaya R, Kittichai S. Submerged arc welding process and ship building industry. The Journal of Welding Institute of Thailand. 2016; 2(1):30-5. (in Thai)
- [3] Luiz H. S. B., Paulo J. M., Leonardo B. G. and Ariel R. A. Fatigue crack growth rates on the weld metal of high heat input submerged arc welding International, Journal of Fatigue 2019; 119: 43–51.
- [4] Layus P, Kah P, Khlusova E, Orlov V. Study of the sensitivity of high-strength cold-resistant shipbuilding steels to thermal cycle of arc welding. International Journal of Mechanical and Materials Engineering. 2018; 13(3):1-9.
- [5] Tadeu M, Donizete B, Wagner D. F, Leonardo D. O. T, Ronaldo C. J. Assessment of the weldability of EH36 TMCP shipbuilding steel welded by high heat

- input submerged arc welding, *Welding International*. 2017; 31(3): 184-95.
- [6] Rong Y, Mi G, Xu J, Huang Y, Wang C. Laser penetration welding of ship steel EH36: A new heat source and application to predict residual stress considering martensite phase transformation, *Marine Structure*. 2018; 61: 256-67.
- [7] X. R. Li, Y. M. Zhang, L. Kvidahl. Penetration depth monitoring and control in submerged arc welding, *Welding Research*. 2013; 92: 48-56.
- [8] Carole E, David T, Jean-Yves C, Manuel K. Fatigue life prediction of welded ship detail, *Marine Structures*, 2012;25(1): 13-32.
- [9] Liangbi L, Xiaomei G, Shaolong S, Wenjie W, Zhengquan W. et al. Effects of welding residual stresses on the vibration fatigue life of a ship's shock absorption support, *Ocean Engineering*. 2018; 170: 237-45.
- [10] Ke Z, Yixin C, Jian Z, Jian H, Xinhua T. Adaptive filling modeling of butt joints using genetic algorithm and neural network for laser welding with filler wire. *Journal of Manufacturing Processes*. 2017; 30: 553-61.
- [11] A. Bagchi, S. Saravanan, G. Shanthos Kumar, G. Murugan, K. Raghukandan. Numerical simulation and optimization in pulsed Nd: YAG laser welding of Hastelloy C-276 through Taguchi method and artificial neural network. *Optik*. 2017;146: 80-9.
- [12] A. Sarka, P. Dey, R. N. Rai, S. C. Saha. A comparative study of multiple regression analysis and back propagation neural network approaches on plain carbon steel in submerged-arc welding. *Sadhana*, 2016; 41(5): 549-59.
- [13] L. Yu, K. Saida, S. Hirano, N. Chigusa, M. Mochizuki, K. Nishimoto. Application of neural network-based hardness prediction method to HAZ of A533B steel produced by laser temper bead welding. *Welding in the World*, 2017; 61(3): 483-98.
- [14] D. Zhao, D. Ren, K. Zhao, S. Pan, X. Guo. Effect of welding parameters on tensile strength of ultrasonic spot welded joints of aluminum to steel by experimentation and artificial neural network. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017; 30: 63-74.
- [15] R.H. Myers, D.C Montgomery. Response surface methodology process and product optimization using designed experiments, 2 ed., USA: John Wiley and Sons: New Jersey; 2002.
- [16] American Society for Testing and Materials. ASTM E8 / E8M - 16a Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. American Society for Testing and Materials: Pennsylvania; 2013.
- [17] Montgomery DC., Design and Analysis of Experiments. USA: John Wiley and son publishing, New York New; 2005.
- [18] M.S. Kaiser. Effect of heat input on the weld metal toughness of chromium-molybdenum steel, *International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials Metallurgical Engineering*. 2013;7: 33-5.
- [19] Weijun H, Yongjian Z, Xiaoli Z, Na X, Fang zhong H. High cycle fatigue behaviour of V-Microalloyed medium carbon steels: A comparison between bainitic and ferritic-pearlitic microstructures, *International Journal of Fatigue*. 2016; 91: 232-41.
- [20] Sergey G, Eva A, Maksim Z, Rudolf K, Ulrich P. Effect of spheroidization annealing on pearlite banding, *Materials Science Forum*, 2019; 949: 40-7.
- [21] Minwoo K, Minsu J, Hyongjik L, Young-K. Microstructural evolution during austenitization and quenching of a 5% Cr work roll, *Materials Transactions*, 2012;53(11): 1915-21.
- [22] M. Saadat, A. K. E. Nobarzad, M. Jahazi. On the hot cracking of HSLA steel welds: role of epitaxial growth and HAZ grain size. *Journal of Manufacturing Processes*. 2019; 41: 242-51.

การพัฒนาแผ่นกระเบื้องหลังคาจากเส้นใยทะเลลายปาล์มและต้นรูปฤษี เพื่อชุมชน

นิตยา พัดเกาะ^{1*}, กิตติศักดิ์ บัวศรี² และประยูร สุรินทร์³
nittayapadkoh@gmail.com^{1*}, me._ie._Eng.55@hotmail.com², Prayoon99@gmail.com³

^{1*} สาขาการจัดการผังเมือง คณะศิลปกรรมและออกแบบอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

² แผนกวิชาช่างเทคนิคพื้นฐาน วิทยาลัยสารพัดช่างกาญจนบุรี

³ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

Received : 8-Aug-2019

Revised : 4-Sep-2019

Accepted : 9-Oct-2019

บทคัดย่อ

การผลิตแผ่นกระเบื้องหลังคาจากเส้นใยทะเลลายปาล์มและต้นรูปฤษีเพื่อชุมชน โดยใช้กาวสังเคราะห์ไอโซไซยาเนตเรซิน (pMDI) ปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำหน้าที่เป็นสารยึดติด มีความหนาแน่นของแผ่นกระเบื้องหลังคาที่กำหนด 600 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และขนาดของแผ่น 300X320X15 มิลลิเมตร การทดสอบสมบัติเชิงกายภาพ พบว่า ค่าความหนาแน่น ปริมาณความชื้น การดูดซึม การไม่รั่วซึม น้ำ การพองตัวทางความหนา และสมบัติเชิงกล ค่าความต้านทานมอดูลัสการแตกร้าว ความต้านทานมอดูลัสยืดหยุ่น และความแข็งแรงการกระแทก ที่ใช้กาวสังเคราะห์ไอโซไซยาเนตเรซิน ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ให้สมบัติที่ดีกว่า สามารถทดสอบทุกสภาวะอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของ TIS 876-2547, TIS 535-2556, JIS A 5908-2003 และ ASTM D 256-06a และสมบัติเชิงความร้อน ค่าการนำความร้อนและความต้านทานความร้อน ทดสอบตามมาตรฐานของ ASTM C 177-2010 พบว่า การใช้กาวสังเคราะห์ไอโซไซยาเนตเรซิน ที่ปริมาณสารยึดติด 5 เปอร์เซ็นต์มีค่าการนำความร้อนที่ดีกว่า ส่วนความต้านทานความร้อน กระเบื้องหลังคาจากเส้นใยทะเลลายปาล์มที่ใช้กาวสังเคราะห์ไอโซไซยาเนตเรซิน ที่ปริมาณสารยึดติด 10 เปอร์เซ็นต์ มีค่าความต้านทานความร้อนที่ดีกว่า ซึ่งสามารถนำแผ่นกระเบื้องหลังคาจากงานวิจัยไปใช้เป็นวัสดุก่อสร้างและวัสดุทดแทนแผ่นกระเบื้องหลังคาจากซีเมนต์ไยหินได้

คำสำคัญ: เส้นใยทะเลลายปาล์ม เส้นใยต้นรูปฤษี สมบัติเชิงกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติเชิงความร้อน

Development of Roof Tiles Made from Palm Fibers and Typha Angustifolia L Fibers for Communities

Nittaya padkoh^{1*}, Kittisak, Buasri² and Prayoon Surin³
nittayapadkoh@gmail.com^{1*}, me._ie._Eng.55@hotmail.com², Prayoon99@gmail.com³

^{1*}Department of Urban Planning and Management, Faculty of Fine Art And Industrial Design,
Rajamangala University of Technology Isan

²Departments of Basic Training, Karnchanaburi polytechnic College

³Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Pathumwan Institute of Technology

Received	: 8-Aug-2019
Revised	: 4-Sep-2019
Accepted	: 9-Oct-2019

Abstract

The production of roof tiles from palm fiber and typha angustifolia L fibers for local communities : synthetic adhesive isocyanate resin (pMDI), volume 5% and 10% by weight was used as a binder with the density of the designated roof tiles 600 kg / m³ and the size of the sheets 300X320X15 mm. Physical properties tests showed the density value, moisture content, absorption, water tightness, Inflating and thickness. Mechanical properties: modulus of rupture resistance, elastic modulus resistance modulus and impact strength which used synthetic isocyanate resin 10% by weight to give better properties. The physical and mechanical properties within the standard criteria of TIS 876-2547, TIS 535-2556, JIS A 5908-2003 and ASTM D 256-06a. Thermal properties thermal conductivity and heat resistance were tested according to the standards of ASTM C 177-2010. It was found that using synthetic adhesive isocyanate resin where the adhesive content was 5% had better thermal conductivity while the synthetic adhesive isocyanates resin with 10% adhesives had better heat resistance. From the study, the roof titles can be used as construction and renewable materials instead of the ones from asbestos cement.

Keywords: Palm Fibers, Typha angustifolia L Fibers, Physical properties, Mechanical properties, Thermal properties.

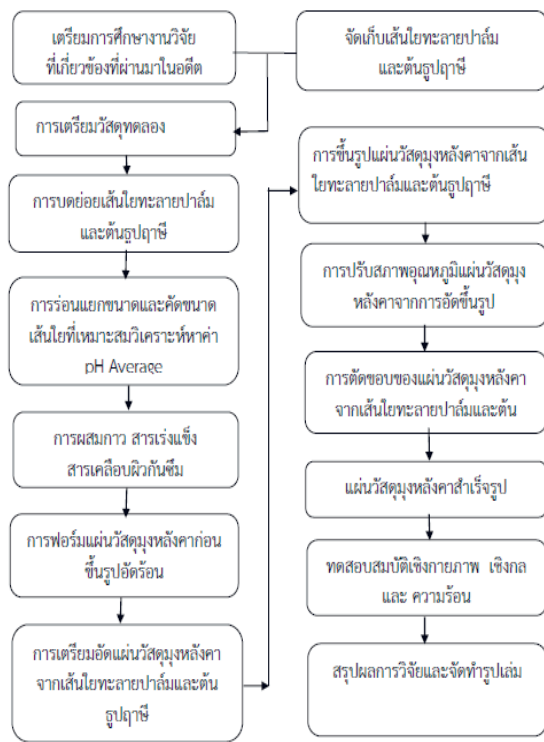
1. บทนำ

ในปัจจุบันวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ที่ทิ้งแล้วเป็นอีกหนึ่งทางเลือกในอุตสาหกรรมวัสดุในงานก่อสร้าง ที่สามารถนำมาแปรรูปเพื่อเพิ่มมูลค่า [1] ในแต่ละปีจะมีผลพลอยได้จากผลผลิตทางการเกษตร หรือวัสดุเหลือทิ้งทางเกษตรกรรม เช่น ฟางข้าว แกลบ กากอ้อย กาก ใบ ทะลายปาล์ม เป็นต้น ปริมาณของวัสดุชีวมวลที่เหลือทิ้งในแต่ละปีขึ้นกับผลผลิตการเกษตร ในส่วนของปาล์มน้ำมัน อุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มมีแนวโน้มของอัตราเติบโตที่สูงขึ้นในแต่ละปีเนื่องจากความต้องการนำไปใช้ผลิตน้ำมันไบโอดีเซล ปัจจุบันประเทศไทยมีผลผลิตน้ำมันปาล์มประมาณ 5 ล้านตันต่อปี ซึ่งเศษวัสดุเหลือทิ้งที่สำคัญคือ กากใบปาล์ม กะลาปาล์ม ทะลายเปล่า และหางปาล์ม โดยกากใบปาล์มมี ปริมาณ 50,000ตัน กะลาปาล์มมีปริมาณเหลือ 100,000 ตันในแต่ละปี ส่วนทะลายปาล์มมีปริมาณเหลือ 400,000 ตัน และหางปาล์มเป็นเศษวัสดุที่เหลือทิ้งที่มีปริมาณมากที่สุดและมีการนำกลับไปใช้งานน้อยที่สุด ซึ่งในแต่ละปีจะมีเหลือประมาณ 6.5 ล้านตัน [2] ส่วนคุณสมบัติของเส้นใยทะลายปาล์ม มีความแข็งแรงและความเหนียว ขนาดของรูพรุนที่ผิวเส้นใยปาล์มมีค่าเฉลี่ยเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 0.07 องค์กรประกอบทางเคมีเส้นใยปาล์ม เซลลูโลส 36.7 เปอร์เซ็นต์, และมีเฮมิเซลลูโลส 35.8 เปอร์เซ็นต์ ลิกนิน 18.6 เปอร์เซ็นต์ [3] วัสดุเหลือทิ้งอีกประเภทได้แก่ ต้นธูปฤๅษี(*Typha angustifolia*) เป็นวัชพืชที่พบมากในพื้นที่ทั่วไป ซึ่งเมื่อต้นธูปฤๅษีเจริญขึ้นในแหล่งน้ำตื้นอย่างมากมาย ปัญหาที่ตามมา ได้แก่ เรื่องการใช้สอยที่ดินทำกิน เนื่องจากต้นธูปฤๅษีสามารถเจริญเติบโตและแพร่พันธุ์ได้รวดเร็ว กินพื้นที่กว้างในเวลาเพียงไม่กี่เดือน และแย่งธาตุอาหารที่จำเป็นในดินไป ทำให้ไม่สามารถทำการเพาะปลูกได้ดีเท่าที่ควร แต่ข้อดีของต้นธูปฤๅษีก็คือ มีเส้นใยมากถึงร้อยละ 40 มีความชื้นของเส้นใย 8.9 เปอร์เซ็นต์ ลิกนิน 9.6 เปอร์เซ็นต์ เซลลูโลส 63 เปอร์เซ็นต์ และมีเฮมิเซลลูโลส 8.7 เปอร์เซ็นต์ โดยเส้นใยที่ได้จะมีสีขาวหรือสีน้ำตาลอ่อน [4] ดังนั้นจากองค์ประกอบของวัสดุเส้นใยทั้งสองชนิด ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะนำเส้นใยทะลายปาล์มและเส้นใยต้นธูปฤๅษีมาขึ้นรูปเป็นกระเบื้องหลังคา เพื่อศึกษาสมบัติและเปรียบเทียบปริมาณของสารยึดติด ทั้งนี้กระเบื้องหลังคาของประเทศไทย มีหลายประเภทตามวัสดุที่ใช้

ผลิตขึ้น ทำให้ผู้ใช้งานรวมไปถึงสถาปนิก สามารถเลือกใช้ ประเภทของกระเบื้องหลังคาที่ตรงกับการใช้งานและราคาที่เหมาะสมได้ สำหรับอาคารพักอาศัยผู้มีรายได้น้อย และมีต้นทุนที่ต่ำ เหมาะสมกับการนำวัสดุที่ทำมาจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาเลือกใช้ [5] การพัฒนาแผ่นกระเบื้องหลังคาจากเส้นใยทะลายปาล์มและต้นธูปฤๅษีเพื่อชุมชน เป็นงานวิจัยที่จัดทำขึ้นเพื่อมุ่งเน้นถึงการนำวัชพืชและวัสดุเหลือทิ้งในท้องถิ่นมาทำให้เกิดประโยชน์ มาเป็นวัตถุดิบโดยการนำมาผสมกับกาวสังเคราะห์ และขึ้นรูปแผ่นกระเบื้องหลังคา ทั้งนี้เพื่อช่วยส่งเสริมการสร้างแผ่นหลังคาผลิตภัณฑ์ใหม่ ให้กับอุตสาหกรรมการก่อสร้าง พร้อมกับการช่วยประหยัดและทำให้เกิดประโยชน์ จากเศษวัสดุทรัพยากรธรรมชาติได้ [6]

2.วิธีการทดลอง

การพัฒนาแผ่นกระเบื้องหลังคาจากเส้นใยทะลายปาล์มและต้นธูปฤๅษีเพื่อชุมชนครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาค้นคว้าข้อมูลต่างๆ จากเอกสาร ตำราและงานวิจัย ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งประกอบด้วย สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง และวิธีการดำเนินการวิจัย วิธีการทดสอบสมบัติเชิงกายภาพ เชิงกล และเชิงความร้อน โดยมีวิธีดำเนินการวิจัยดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขั้นตอนการขึ้นรูปแผ่นกระเบื้องหลังคาจากเส้นใยทะลายปาล์มและต้นธูปฤๅษี

2.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สารเร่งแข็งที่ใช้ผสมในกาวยได้แก่ สารแอมโมเนียมซัลเฟต (Ammonium sulfate) ที่ใช้ร่วมกับกาวสังเคราะห์ โพลีไอโซไซยาเนตเรซิน (4-4'diphenylmethane diisocyanate :pMDI) (Hardener) ช่วยให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาแข็งตัวของกาวยให้เร็วขึ้นลดระยะเวลาในการอัดร้อนให้สั้นลง และสารเคลือบผิวกันซึม (sizing agent) ช่วยลดการดูดซึมน้ำ [1]

2.2 วัสดุและอุปกรณ์ในการวิจัย

แม่พิมพ์กระเบื้องหลังคาชนิดเหลี่ยม ขนาด 30×32 เซนติเมตร กรอบไม้ฟอร์มแผ่น ขนาด 400×400 มิลลิเมตร เวอร์เนียร์คาลิเปอร์แบบดิจิตอล สามารถวัดละเอียดได้ 3 ตำแหน่ง ไมโครมิเตอร์ สามารถวัดได้ละเอียด 0.01 มิลลิเมตรและ เครื่องชั่งน้ำหนัก สามารถวัดได้ละเอียด 0.001 กรัม โดยการทดลองในงานวิจัยนี้ วัสดุที่ใช้เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรได้ใช้ทะลายปาล์มเปล่าจากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม อำเภอมะนัง จังหวัดสงขลา ดังรูปที่ 2 และต้นธูปฤๅษี จากตำบลบ้านโพธิ์ อำเภอมือง จังหวัดนครราชสีมา ดังรูปที่ 3



รูปที่ 2 ลักษณะทางกายภาพทะลายปาล์ม



รูปที่ 3 ลักษณะทางกายภาพต้นธูปฤๅษี

2.3 ขั้นตอนการทดลอง

เส้นใยทะลายปาล์ม(Palm Fibers)นำทะลายปาล์มที่ยังไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงสมบัติทางเคมีผ่านกระบวนการบดจากการผลิตในโรงงาน เป็นเส้นใยที่ผ่านกระบวนการแช่สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 4 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนของสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ ชนิดเกล็ดเกรดอุตสาหกรรมที่ 0.5 กิโลกรัม ต่อน้ำ 100 ลิตร โดยมีเส้นใยปาล์ม 50 กิโลกรัม โดยน้ำหนักเส้นใยปาล์มแห้ง เพื่อต้องการชะล้างน้ำมันที่ติดบริเวณเส้นใยปาล์มแล้วล้างด้วยน้ำให้สะอาด หลังจากนั้นนำมาตากให้แห้งโดยมีความชื้นของเส้นใย 25 เปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 เส้นใยทะเลสาบปาล์มที่ผ่านการบดย่อย

เส้นใยต้นธูปฤๅษี (*Typha angustifolia* L) คัดเลือกต้นธูปฤๅษีที่มีขนาดลำต้น 2-3 เซนติเมตร โดยวัดจากโคนของลำต้นต้นประมาณ 70-100 เซนติเมตร ส่วนบริเวณปลายของต้นธูปฤๅษีตัดออก เพราะไม่มีเส้นใย แล้วนำไปตากให้แห้ง โดยมีความชื้นของต้นธูปฤๅษี ประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักเส้นใยต้นธูปฤๅษีแห้ง นำเส้นใยทะเลสาบปาล์มและเส้นใยต้นธูปฤๅษีมาบดย่อย โดยใช้เครื่องสำหรับบดย่อย (Hammer Mill) ให้มีขนาดเล็กโดยใช้เครื่องบดแล้วร่อนแยกขนาด ใช้เครื่อง (Screening) ผ่านตะแกรง (เมช) 40 ให้มีผ่านการบดเส้นใยและการคัดขนาดเส้นใยโดยผ่านอุปกรณ์ร่อนแยกขนาด ดังรูปที่ 5

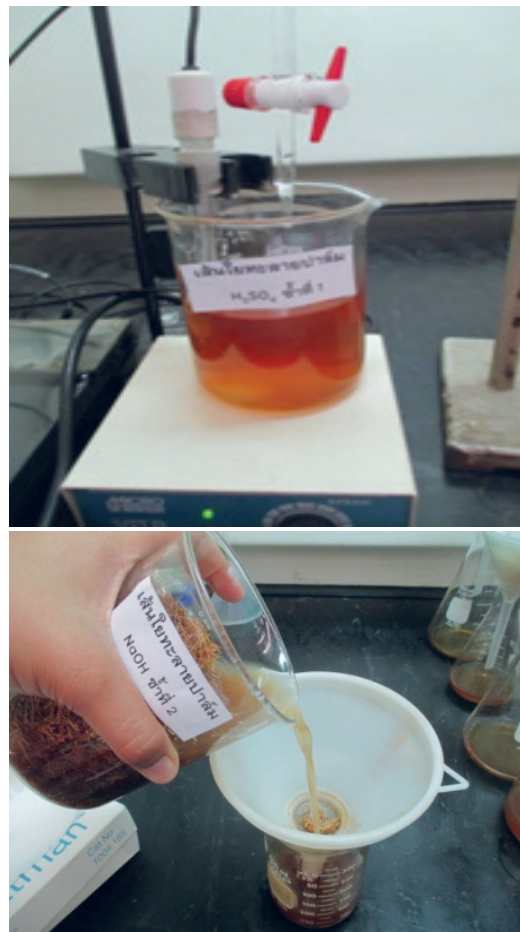


รูปที่ 5 เส้นใยต้นธูปฤๅษีที่ผ่านการบดย่อย

เส้นใยทะเลสาบปาล์ม ที่ใช้ในการทำแผ่นกระเบื้องหลังคา มีขนาดความกว้างประมาณ 0.81 มิลลิเมตร ความยาวประมาณ 10.03 มิลลิเมตร และความหนา 0.37 มิลลิเมตร มีปริมาณมากที่สุดถึง 28.79 เปอร์เซ็นต์และมีสัดส่วนความเปรี้ยว 27.42 เท่า ส่วนเส้นใยที่ใช้ในการทำ

แผ่นกระเบื้องหลังคาต้นธูปฤๅษี มีขนาดความกว้างประมาณ 0.72 มิลลิเมตร ความยาวประมาณ 5.41 มิลลิเมตร และความหนา 0.22 มิลลิเมตร มีปริมาณมากที่สุดถึง 39.60 เปอร์เซ็นต์และมีสัดส่วนความเปรี้ยว 24.77 เท่า

การหาค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) โดยนำชิ้นวัสดุเมช 40 จำนวน 30 กรัม ที่ได้แช่กวนในน้ำกลั่น ปริมาตร 400 มิลลิตร ใช้เวลา 30 นาที และกรองเอาแต่สารละลาย นำสารละลายที่ได้ไปหาค่าความเป็นกรดเป็นด่าง ค่าการฟ่อนความเป็นกรด (acid buffering capacity) ค่าการฟ่อนความเป็นด่าง (alkaline buffering capacity) และการฟ่อนความเป็นกรดเป็นด่าง (acid-alkaline buffering capacity) โดยการฟ่อนความเป็นกรดให้ pH ของสารละลายที่ 3.50 ด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกเจือจาง และการฟ่อนความเป็นด่างให้ pH ของสารละลายที่ 7.00 ด้วยสารละลายที่โซเดียมไฮดรอกไซด์เจือจาง ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 การทดสอบความเป็นกรดเป็นด่างและการฟ่อนค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH)

การผลิตแผ่นกระเบื้องหลังคาจากเส้นใยทะเลลายปาล์มและต้นรูปฤๅษี โดยน้ำหนักเส้นใยแห้งโดยมี ความหนาแน่นของแผ่นที่ผลิต 600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรและขนาดของแผ่น 30×32 มิลลิเมตร ความหนา 15 มิลลิเมตร, ความชื้นของเส้นใยทะเลลายปาล์มและต้นรูปฤๅษี ก่อนผสมกาว 3-5 เปอร์เซ็นต์และหลังผสม 10-12 เปอร์เซ็นต์สารยึดติดที่ใช้ คือกาวสังเคราะห์ไอโซไซยาเนตเรซิน ปริมาณที่ใช้ 5 เปอร์เซ็นต์และ10 เปอร์เซ็นต์โดยมีส่วนผสมปริมาณสารพาราฟินอีมีลชั้นที่ 1 เปอร์เซ็นต์ และสารเร่งแข็งที่ 2 เปอร์เซ็นต์ ลงไปในกระบวนการพ่นสารยึดติด, อัตราส่วนผสมในการขึ้นรูปแผ่นกระเบื้องหลังคาโดยมีเส้นใยทะเลลายปาล์มและเส้นใยต้นรูปฤๅษี 95 เปอร์เซ็นต์ต่อกาวสังเคราะห์ไอโซไซยาเนตเรซิน 5 เปอร์เซ็นต์และเส้นใยทะเลลายปาล์มและเส้นใยต้นรูปฤๅษี 90 เปอร์เซ็นต์ต่อกาวสังเคราะห์ไอโซไซยาเนตเรซิน 10 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักเส้นใยแห้ง, การขึ้นรูปแผ่นกระเบื้องหลังคาจากเส้นใยทะเลลายปาล์มและต้นรูปฤๅษี ใช้เส้นใยทะเลลายปาล์มและต้นรูปฤๅษีที่ผ่านกระบวนการโรงแรงในกรอบไม่ในการฟอร์มแผ่นลงในแม่พิมพ์ที่เป็นรูปกระเบื้องหลังคาชนิดทรงเหลี่ยม แล้วนำเข้ามาติดตั้งกับเครื่องอัดร้อนโดยมีชุดเครื่องอัดไฮดรอลิก อุณหภูมิในการอัดร้อน 120 องศาเซลเซียส แรงแรงในการอัดร้อน 150 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และระยะเวลาการอัดร้อน คือ 15 นาที เป็นขบวนการวิธีอัดร้อน(hot pressing) โดยชุดเครื่องอัดไฮดรอลิก หลังจากอัดร้อนแล้ว นำแผ่นที่ได้ไปปรับสภาพความชื้นที่อุณหภูมิของห้องประมาณ 24 ชั่วโมง เพื่อให้ปริมาณความชื้นและอุณหภูมิกระจายสม่ำเสมอทั่วกัน หลังจากปรับอุณหภูมิแผ่นแล้วนำไปตัดขอบออกทั้ง 4 ด้าน ด้านละ 2.5 เซนติเมตรสำหรับตัดขึ้นทดสอบในการทดลองให้ได้ขนาดตามชิ้นงานที่นำไปทดสอบสมบัติต่างๆ ด้วยเครื่องเลื่อยเพื่อให้ได้ขนาด และนำไปทดสอบสมบัติเชิงกายภาพ [7] [8] [9] ทดสอบสมบัติเชิงกล [7] [9] [10] และทดสอบสมบัติเชิงความร้อน [11] ตามมาตรฐาน

การพัฒนาแผ่นกระเบื้องหลังคาจากเส้นใยทะเลลายปาล์มและต้นรูปฤๅษี เพื่อชุมชนครั้งนี้ประกอบด้วย ปริมาณสารยึดติด ทดสอบสมบัติเชิงกายภาพ เชิงกล และเชิงความร้อน ผู้วิจัยได้ทำการขึ้นรูปตัวอย่างเป็นแผ่นกระเบื้องหลังคา ตามกระบวนการที่ได้กล่าวไว้ โดยใช้สารยึดติดชนิดเกรดอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นกาวสังเคราะห์ไอโซไซยาเนตเรซิน ที่ปริมาณ 5

เปอร์เซ็นต์และ10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเส้นใยแห้ง แล้วนำตัวอย่างที่ได้จากการขึ้นรูปมาทดสอบโดยอาศัยวิธีการทดสอบตาม ตามมาตรฐาน มอก. 876-2547 [7] มอก.535-2556 [8] JIS A 5908-2003 (8 type) [9] ASTM C 177-10 [10] และ ASTM D 256-2006a [11]

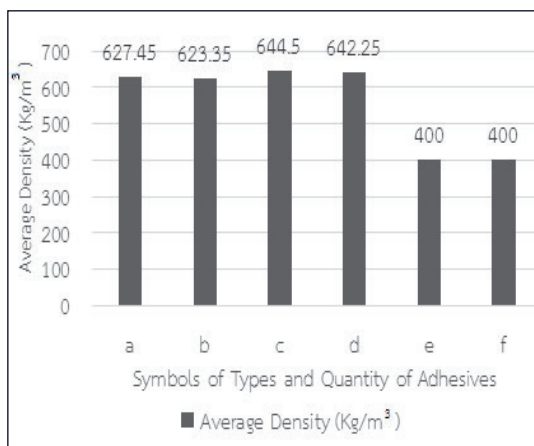
ตารางที่1 รายละเอียดของการทดสอบกระเบื้องหลังคา

ประเภทและปริมาณของสารยึดติด (%)	ชนิดของวัสดุ	ค่าเฉลี่ยความหนาแน่น (kg/m ³)	อัตราส่วนเส้นใย (%)	สัญลักษณ์
กาวไอโซไซยาเนต pMDI.5	เส้นใยทะเลลายปาล์ม	627.45	95	a
กาวไอโซไซยาเนต pMDI.5	เส้นใยต้นรูปฤๅษี	623.35	95	b
กาวไอโซไซยาเนต pMDI.10	เส้นใยทะเลลายปาล์ม	644.50	90	c
กาวไอโซไซยาเนต pMDI.10	เส้นใยต้นรูปฤๅษี	642.25	90	d
มอก.876-2547	มอก.แผ่นขึ้นไม้อัดชนิดราบ	400-900		e (ค่ามาตรฐาน)
JIS A 5908:2003 (8 type)		400-900		f (ค่ามาตรฐาน)

3.ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

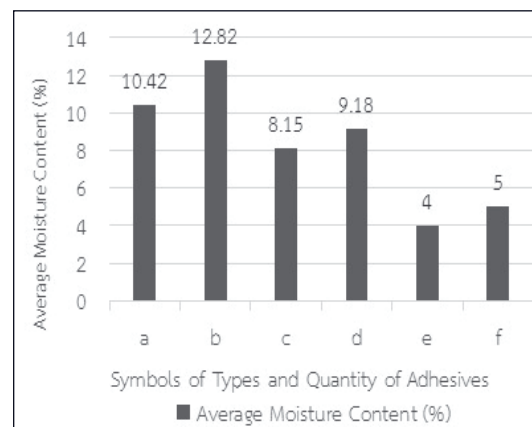
3.1 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกายภาพ

การวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกายภาพ (Physical properties) การพัฒนาแผ่นกระเบื้องหลังคาจากเส้นใยทะเลลายปาล์มและต้นรูปฤๅษีเพื่อชุมชน ที่นำมาขึ้นรูปเป็นแผ่นกระเบื้องหลังคาแล้วนำมาทดสอบค่าความหนาแน่น (Density)[7][8] [9] ปริมาณความชื้น (moisture content) การดูดซึมน้ำที่ 2 และ 24 ชั่วโมง (Water absorption) การไม่รั่วซึม น้ำที่ 2 ชั่วโมง[7] [8] [9] และการพองตัวทางความหนาที่ 2 และ 24 ชั่วโมง (Thickness swelling) อาศัยการทดสอบตามมาตรฐาน มอก. 876-2547 แผ่นขึ้นไม้อัดชนิดอัดราบ [7] มอก. 535-2556 กระเบื้องคอนกรีตมุงหลังคา [8] และ JIS A 5908 – 2003 (8 type) [9]



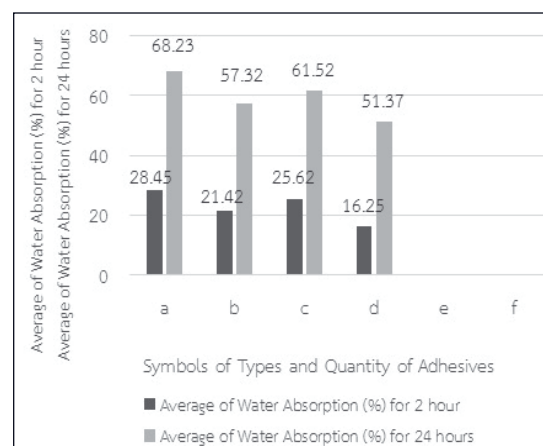
รูปที่ 7 ค่าเฉลี่ยความหนาแน่น [7] [8] [9]

รูปที่ 7 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่น ปริมาณสารยึดติดที่ใช้ 5 เปอร์เซ็นต์ และ 10 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักแห้ง ของกาวสังเคราะห์ไฮโซไซยาเนตเรซิน จากการทดลอง พบว่า ค่าความหนาแน่นของแผ่นกระเบื้องหลังคาปริมาณสารยึดติดที่ใช้ 5 เปอร์เซ็นต์ และ 10 เปอร์เซ็นต์พบว่า ที่ใช้กาวสังเคราะห์ไฮโซไซยาเนตเรซิน ที่ปริมาณสารยึดติด 5 เปอร์เซ็นต์ ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของแผ่นที่ได้ 627.45 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรและ 623.35 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สามารถผ่านเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนดค่าความหนาแน่นไว้ คือ 400-900 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ แผ่นกระเบื้องหลังคาจากเส้นใยทะเลลายปาล์มและต้นธูปฤๅษี ที่ใช้กาวสังเคราะห์ไฮโซไซยาเนตเรซิน ที่ปริมาณสารยึดติด 10 เปอร์เซ็นต์ ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของแผ่นที่ได้ 644.50 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรและ 642.25 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สามารถผ่านเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนดค่าความหนาแน่นไว้ คือ 400-900 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร



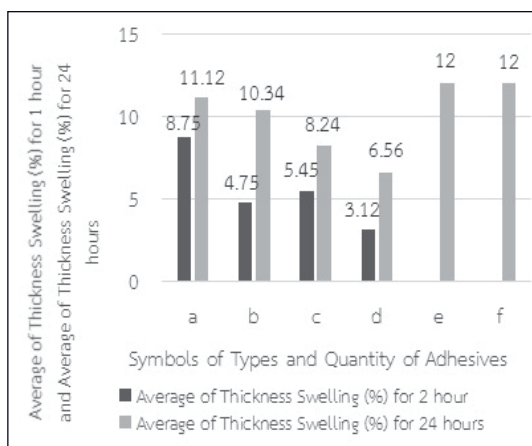
รูปที่ 8 ค่าเฉลี่ยปริมาณความชื้น [7] [8] [9]

รูปที่ 8 แสดงค่าปริมาณความชื้นของแผ่นกระเบื้อง พบว่าที่ใช้กาวสังเคราะห์ไฮโซไซยาเนตเรซิน ที่ปริมาณสารยึดติด 5 เปอร์เซ็นต์ค่าปริมาณความชื้นเฉลี่ยของแผ่นที่ได้ 10.42 เปอร์เซ็นต์และ 12.82 เปอร์เซ็นต์สามารถผ่านเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนดค่าปริมาณความชื้นที่ 4-13 เปอร์เซ็นต์และ 5-13 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแผ่นกระเบื้องหลังคาจากเส้นใยทะเลลายปาล์มและต้นธูปฤๅษี ที่ใช้กาวสังเคราะห์ไฮโซไซยาเนตเรซิน ที่ปริมาณสารยึดติด 10 เปอร์เซ็นต์ ค่าปริมาณความชื้นเฉลี่ยของแผ่นที่ได้ 8.15 เปอร์เซ็นต์และ 9.18 เปอร์เซ็นต์ สามารถผ่านเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนดค่าปริมาณความชื้นที่ 4-13 เปอร์เซ็นต์ และ 5-13 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 9 ค่าเฉลี่ยการดูดซึมน้ำที่ 2 และ 24 ชั่วโมง [7] [8] [9]

รูปที่ 9 แสดงค่าการดูดซึมน้ำที่ 2 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมงของแผ่นกระเบื้อง พบว่า ที่ใช้กาวสังเคราะห์ไอโซไซยานาเตเรซิน ที่ปริมาณสารยึดติด 5 เปอร์เซ็นต์ ค่าการดูดซึมน้ำที่ 2 ชั่วโมงเฉลี่ยของแผ่นที่ได้ 28.45 เปอร์เซ็นต์ และ 21.42 เปอร์เซ็นต์ และ 25.62 เปอร์เซ็นต์ และ 16.25 เปอร์เซ็นต์ ไม่มีเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด และแผ่นกระเบื้องหลังจากเส้นใยทะเลลายปาล์มและต้นรูปฤๅษี ที่ใช้กาวสังเคราะห์ไอโซไซยานาเตเรซิน ที่ปริมาณสารยึดติด 10 เปอร์เซ็นต์ ค่าการดูดซึมน้ำที่ 24 ชั่วโมงเฉลี่ยของแผ่นที่ได้ 68.23 เปอร์เซ็นต์ และ 57.32 เปอร์เซ็นต์ และที่ 24 ชั่วโมงเฉลี่ยของแผ่นที่ได้ 61.52 เปอร์เซ็นต์ และ 51.37 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 10 ค่าเฉลี่ยการพองตัวทางความหนาที่ 2 และ 24 ชั่วโมง [7] [8] [9]

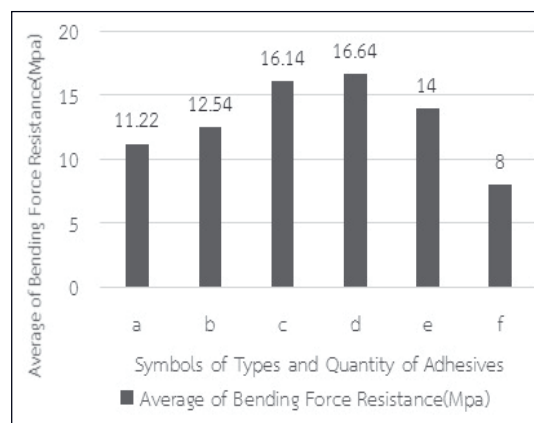
รูปที่ 10 แสดงค่าการพองตัวทางความหนาที่ 2 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมงของแผ่นกระเบื้อง พบว่า แผ่นกระเบื้องหลังจากเส้นใยทะเลลายปาล์มและต้นรูปฤๅษี ที่ใช้กาวสังเคราะห์ไอโซไซยานาเตเรซิน ที่ 5 เปอร์เซ็นต์ มีค่าการพองตัวทางความหนาที่ 2 ชั่วโมง เฉลี่ยของแผ่นที่ได้ 8.75 เปอร์เซ็นต์ และ 4.75 เปอร์เซ็นต์ และ ที่ใช้กาวสังเคราะห์ไอโซไซยานาเตเรซิน ที่ 10 เปอร์เซ็นต์ มีเฉลี่ยของแผ่นที่ได้ 5.45 เปอร์เซ็นต์ และ 3.12 เปอร์เซ็นต์ สามารถผ่านเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด และมีค่าการพองตัวทางความหนาที่ 24 ชั่วโมง เฉลี่ยของแผ่นที่ได้ 11.12 เปอร์เซ็นต์ และ 10.34 เปอร์เซ็นต์ และที่เฉลี่ยของแผ่นที่ได้ 8.24 เปอร์เซ็นต์ และ 6.56 เปอร์เซ็นต์ สามารถผ่านค่ามาตรฐานที่กำหนดค่าการ

พองตัวทางความหนาที่ 24 ชั่วโมงที่ไม่เกิน 12 เปอร์เซ็นต์

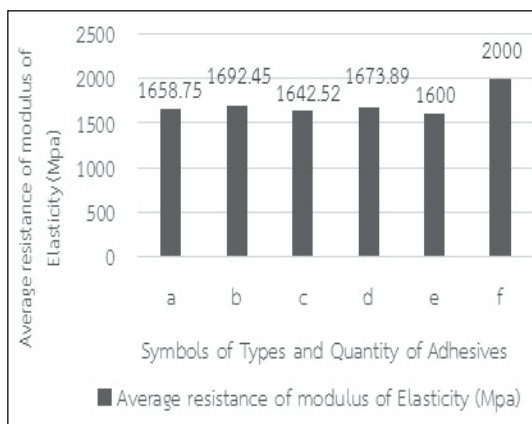
ค่าการไม่รั่วซึมน้ำของแผ่นกระเบื้องหลังคาที่ใช้กาวสังเคราะห์ไอโซไซยานาเตเรซินที่ปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์และ 10 เปอร์เซ็นต์แผ่นกระเบื้องที่ใช้วัสดุเส้นใยทะเลลายปาล์มและเส้นใยต้นรูปฤๅษี เมื่อครบ 2 ชั่วโมง ให้ตรวจสอบผิวด้านล่างของแผ่นกระเบื้องตัวอย่างไม่มีหยดน้ำที่ผิวด้านล่างของแผ่นกระเบื้องตัวอย่างแสดงให้เห็นว่าแผ่นกระเบื้องหลังจากเส้นใยทะเลลายปาล์มและต้นรูปฤๅษีสามารถผ่านมาตรฐานที่กำหนด

3.2 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล

การวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) ประกอบด้วย ค่าความต้านทานมอดูลัสแตกร้าวและมอดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of rupture and elasticity) [7] [9] [10] ค่าความแข็งแรงการกระแทก (Impact strength) [7] [9] [10] อาศัยการทดสอบตามมาตรฐาน มอก. 876-2547 แผ่นขึ้นไม้อัดชนิดอัดราบ [7] และ JIS A 5908 – 2003(8type) Japanese standard association [9] ASTM D 256 – 06a [10]

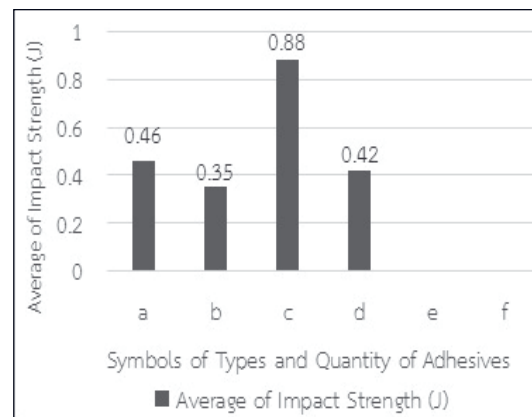


รูปที่ 11 ค่าเฉลี่ยความต้านทานมอดูลัสแตกร้าว [7] [9] [10]



รูปที่ 12 ค่าเฉลี่ยมอดูลัสยืดหยุ่น [7] [9] [10]

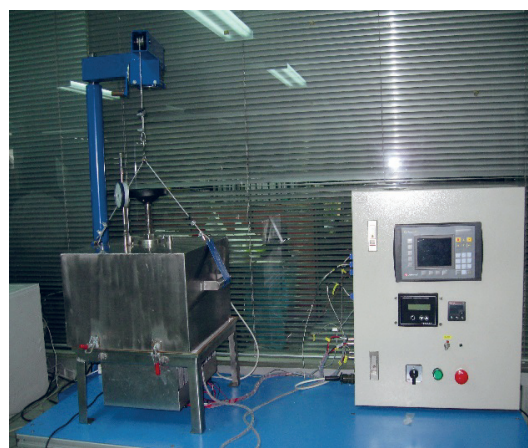
รูปที่ 11 และ 12 แสดงค่าความสัมพันธ์ความต้านทานมอดูลัสแตกร้าวและมอดูลัสยืดหยุ่น และค่าความแข็งแรงการกระแทก กับปริมาณสารยึดติดของแผ่นกระเบื้องหลังคาจากเส้นใยทะเลลายปาล์มและต้นรูปฤๅษีโดยใช้น้ำหนักแห้ง ที่ปริมาณสารยึดติดกาวสังเคราะห์ไอโซไซยาเนตเรซิน 5 เปอร์เซ็นต์ และ 10 เปอร์เซ็นต์ พบว่า ค่าความต้านทานมอดูลัสแตกร้าวและความต้านทานมอดูลัสยืดหยุ่นของแผ่น พบว่า ที่ใช้กาวสังเคราะห์ไอโซไซยาเนตเรซินที่ 5 เปอร์เซ็นต์ มีค่าความต้านมอดูลัสแตกร้าวเฉลี่ยของแผ่นที่ได้ 11.22 เมกะปาสคาล และ 12.54 เมกะปาสคาล สามารถผ่านเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด และค่าความต้านทานมอดูลัสยืดหยุ่นเฉลี่ยของแผ่นที่ได้ 1,658.75 เมกะปาสคาล และ 1,692.45 เมกะปาสคาล สามารถผ่านค่ามาตรฐานที่กำหนด และที่ใช้กาวสังเคราะห์ไอโซไซยาเนตเรซินที่ 10 เปอร์เซ็นต์มีค่าความต้านทานมอดูลัสแตกร้าวเฉลี่ยของแผ่นที่ได้ 14.45 เมกะปาสคาล และ 14.45 เมกะปาสคาล และค่าความต้านทานมอดูลัสยืดหยุ่นเฉลี่ยของแผ่นที่ได้ 1,642.52 เมกะปาสคาล และ 1,673.89 เมกะปาสคาล สามารถผ่านค่ามาตรฐานที่กำหนด



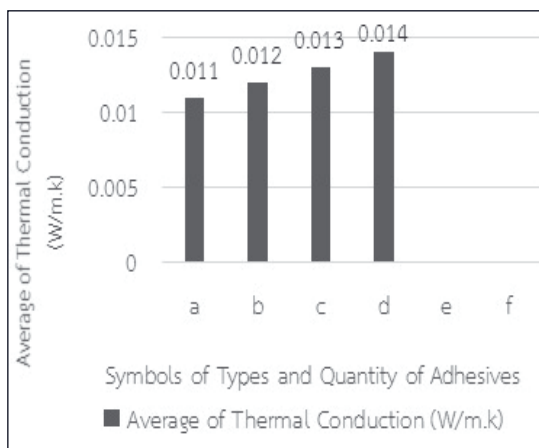
รูปที่ 13 ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงการกระแทก [7] [9] [10]

รูปที่ 13 แสดงค่าความแข็งแรงการกระแทกพบว่า ที่ใช้กาวสังเคราะห์ไอโซไซยาเนตเรซินที่ปริมาณสารยึดติด 5 เปอร์เซ็นต์ มีค่าความแข็งแรงการกระแทกเฉลี่ยของแผ่นที่ได้ 0.46 จูล์ และ 0.35 จูล์ และที่ใช้กาวสังเคราะห์ไอโซไซยาเนตเรซินที่ปริมาณสารยึดติด 10 เปอร์เซ็นต์ มีค่าความแข็งแรงการกระแทกเฉลี่ยของแผ่นที่ได้ 0.88 จูล์ และ 0.42 จูล์

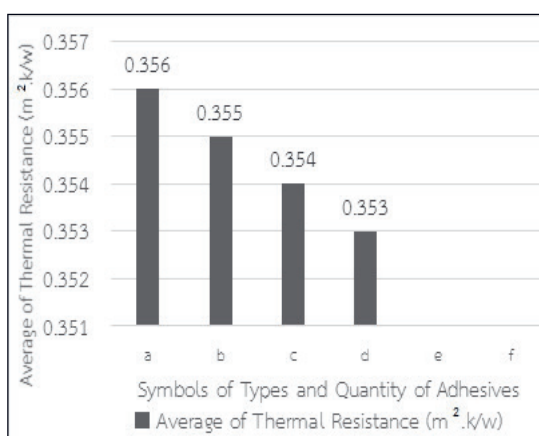
3.3 การทดสอบสมบัติเชิงความร้อน Thermal Analysis โดยใช้เครื่อง Thermogravimetric Analysis (TGA) ดังรูปที่ 14 เป็นกระบวนการวัดค่าการนำความร้อนและค่าความต้านทานความร้อน และชิ้นส่วนที่ตัดนำไปทดสอบขนาด 300 มิลลิเมตร x 300 มิลลิเมตร โดยได้ทำการทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C 177-2010 [11]



รูปที่ 14 เครื่องทดสอบค่าการนำความร้อนและค่าความต้านทานความร้อน รุ่น TC-48-20



รูปที่ 15 ค่าเฉลี่ยการนำความร้อน[11]



รูปที่ 16 ค่าเฉลี่ยความต้านทานความร้อน[11]

รูปที่15และ16 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำความร้อนและความต้านทานความร้อนกับประเภทและปริมาณสารยึดติดของแผ่นกระเบื้องหลังคาจากเส้นใยทะเลลายปาล์มและต้นรูปฤๅษี โดยน้ำหนักแห้ง ผลการทดลองพบว่า ชนิดและปริมาณสารยึดติดที่ใช้กาวสังเคราะห์ไอโซไซยาเนตเรซิน 5 เปอร์เซ็นต์ และ10 เปอร์เซ็นต์ ค่าการนำความร้อนและความต้านทานความร้อน พบว่า ที่ใช้กาวสังเคราะห์ไอโซไซยาเนตเรซินที่ปริมาณสารยึดติด 5เปอร์เซ็นต์ มีค่าการนำความร้อนเฉลี่ยของแผ่นที่ได้ 0.011 วัตต์ต่อเมตร-เคลวินและ 0.012 วัตต์ต่อเมตร-เคลวินและความต้านทานความร้อนเฉลี่ยของแผ่นที่ได้ 0.356 ตารางเมตร-เคลวินต่อวัตต์ และ 0.355 ตารางเมตร-เคลวินต่อวัตต์ และที่ใช้กาวสังเคราะห์ไอโซไซยาเนตเรซินที่ปริมาณสารยึดติด 10 เปอร์เซ็นต์มีค่าการนำความร้อนเฉลี่ยของแผ่นที่ได้ 0.013 วัตต์ต่อเมตร-เคลวินและ 0.014 วัตต์

ต่อเมตร-เคลวินและความต้านทานความร้อนเฉลี่ยของแผ่นที่ได้ 0.354 ตารางเมตร-เคลวินต่อวัตต์ และ 0.353 ตารางเมตร-เคลวินต่อวัตต์

4.สรุปผลการทดลอง

การผลิตแผ่นกระเบื้องหลังคาจากเส้นใยทะเลลายปาล์มและต้นรูปฤๅษี สามารถพัฒนาผลิตภัณฑ์แผ่นกระเบื้องหลังคาที่มีคุณสมบัติเชิงกายภาพ เชิงกล และเชิงความร้อน ที่สามารถใช้งานได้จริง และได้ผ่านตามการทดสอบคุณสมบัติตามมาตรฐาน มอก.876-2547 [7] มอก. 535-2556 [8] JIS A 5908-2003 (8 type) [9] ASTM C 177-10 [10] และ ASTM D 256-2006a [11] โดยความเด่นของกระเบื้องหลังคาจากเศษวัสดุทางธรรมชาติเส้นใยทะเลลายปาล์มและเส้นใยจากต้นรูปฤๅษี มีความเด่นในเรื่องสมบัติเชิงความร้อน พบว่าค่าการนำความร้อนและค่าความต้านทานความร้อน อยู่ในเกณฑ์ที่สามารถกันความร้อนเข้าสู่ตัวอาคารได้ แต่หากมีการใช้คู่กับฉนวนกันความร้อนย่อมส่งผลต่อประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานในอาคารได้ดีขึ้น [12] ดังนั้นหากนำผลิตภัณฑ์นี้ไปประยุกต์ใช้เป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถนำไปต่อยอด ทางงานอุตสาหกรรมการก่อสร้างได้ จัดได้ว่าเป็นวัสดุอีกทางเลือกหนึ่ง ที่จะทำให้ราคาต้นทุนต่ำลง จากการเลือกใช้เศษวัสดุ ที่มีราคาถูกและหาได้ง่าย [13] [14] รวมถึงเป็นการสร้างวัฒนธรรมของการพึ่งพาตนเอง โดยอาศัยองค์ความรู้ผสมผสานกับเทคโนโลยีเข้าด้วยกัน เพื่อเป็นการบูรณาการท้องถิ่นและพัฒนาวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรให้มีมูลค่าเพิ่มขึ้น [14]



รูปที่ 17 ผลิตภัณฑ์กระเบื้องหลังคาจากเส้นใยทะเลลายปาล์มและเส้นใยจากต้นรูปฤๅษี

5.กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้เป็นส่วนหนึ่งของการวิจัยเรื่อง การพัฒนาแผ่นกระเบื้องหลังคาจากเส้นใยทะลายปาล์ม และต้นอ้อยเพื่อชุมชน ผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ให้ทุนสนับสนุน ด้วยทุนงบประมาณแผ่นดิน ร่วมกับมหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ประจำปีงบประมาณ 2561 และคุณวรรณ อุ่นจิตติชัย นักวิชาการ 8 ว. ผู้ที่กรุณา ให้แนวคิดคำปรึกษาและอำนวยความสะดวกต่อการ ทำงานวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Oonjittichai W. Wood Substituted. Biocomposites. Forest research and development bureau. Wood Development division. 2012 (in Thai)
- [2] Center of fuels and energy from Biomass, Biomass potential in thailand. Department of chemical technology [Internet]. Chulalongkorn University; 2016[cited 2019 Sep 16] .available from: <http://www.iscisaraburee.sc.chula.ac.th/2017/index.php/2016/06/06/i-sink-under-the-weight-of-the-splendour/>
- [3] Anantaratanachai S, Rampeung Jaroenyot. Product of typha paper of automatic machine. department of Industrial engineering. Faculty of engineering and Architecture. Rajamangala University of technology suvarnabhumi. 2013 (in Thai)
- [4] Shinoj S, Visvanathan R, Panigraphi, S, Koch Ubabu M. Oil palm fiber (OPF) and its composites: A Review. Industrial crops and product. 2011;33:7-22 (in Thai)
- [5] Suntijitto A. Influence of cellulose fiber on mechanical and thermal properties of fiber cement roof sheets in hot-humid climate. Department of Architecture. Faculty of Architecture and planning. Thammasat University. 2011 (in Thai)
- [6] Padkoh N. Investigation of tile roofs properties of natural fibers from pineapple leaf fibers and maize husk fiber. Srinakharinwirot Engineering Journal. 2017; 12 (1):11-9 (in Thai)
- [7] Thailand Industrial Standards Institute. Flat pressed particleboards. TIS. 876-2547. Ministry of Industry. 2004:1-17 (in Thai)
- [8] Thailand Industrial Standards Institute. Concrete roof tiles. TIS. 535-2556. Ministry of Industry. 2013:1-14 (in Thai)
- [9] Japanese Standards Association particleboard, JIS A 5908-2003. Japanese industrial standard. Tokyo, Hobbunsha Co.Ltd. 2003:23
- [10] American Society for testing and materials. ASTM D 256 – 06a Standard test methods for determining the izod pendulum impact resistance of plastics. In 1990 Annual book of ASTM Standards. philadelphia ASTM. 2006;8(1):57-73
- [11] American Society for testing and materials. ,ASTM C 177-10 Standard test method for Steady-State heat flux measurements and thermal transmission properties by means of the guarded-hot-plate apparatus. In annual book of ASTM Standards, MD,U.S.A. 2010;04(6): 21-32
- [12] Jarunjaruphat N, Salinee. The particleboard manufacturing from Agricultural wast. The Journal of KMUTNB. 2018;28 (2): 469-76 (in Thai)
- [13] Thongsri K, Parmotmuang M. The study and development of contemporary product decoration for real wood identity in thailand. Rajamangala University of technology Phra nakhon. Architecture and design. 2015 (in Thai)

- [14] Padkoh N. The production and study property of insulation wall light board from bagasse fiber for using in architecture work. Journal of Engineering RMUTT.2015;13(2):11-20 (in Thai)

การพัฒนาผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นผสมเศษขวดพลาสติกสี ประเภทพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่เหลือทิ้งจากการบริโภค

กิตติพงษ์ สุวีโร^{1*}, และประชุม คำพุ่ม²
kittipong.s@en.rmutt.ac.th^{1*}, prachoom.k@en.rmutt.ac.th²

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Received	: 2-Oct-2019
Revised	: 28-Oct-2019
Accepted	: 17-Dec-2019

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นผสมเศษขวดพลาสติกสีประเภทพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) ที่เหลือทิ้งจากการบริโภค ออกแบบอัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท1: มวลรวม (ทรายละเอียด และหินฝุ่น) เท่ากับ 1: 3 โดยน้ำหนัก และแทนที่มวลรวมด้วยเศษขวดพลาสติกสี (ฝาขวด ขวด และฉลากฟิล์มหัด) ในปริมาณเพิ่มขึ้น ร้อยละ 5 ของน้ำหนักมวลรวมต่ออัตราส่วน เริ่มจากไม่มีการแทนที่จนกระทั่งมีการแทนที่ด้วยเศษขวดพลาสติกสีมากที่สุดร้อยละ 20 ของน้ำหนักมวลรวม รวม 5 อัตราส่วน ได้แก่ อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท1: มวลรวม: เศษขวดพลาสติกสีเท่ากับ 1: 3: 0, 1: 2.85: 0.15, 1: 2.7: 0.3, 1: 2.55: 0.45 และ 1: 2.4: 0.6 โดยน้ำหนัก กำหนดอัตราส่วนทรายละเอียดต่อหินฝุ่น เท่ากับ 0.67 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) เท่ากับ 0.5 โดยน้ำหนัก บดย่อยเศษขวดพลาสติกสีผ่านตะแกรงที่มีขนาดช่องเปิด 10 มิลลิเมตร และนำมาผสมกับส่วนผสมตามที่ต้องการโดยใช้เครื่องผสมคอนกรีต จากนั้นอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัด ทดสอบคุณสมบัติตามมาตรฐาน มอก. 827-2531 และคุณสมบัติอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง ผลการทดสอบที่อายุการบ่ม 28 วัน พบว่า อัตราส่วน 1: 2.85: 0.15 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด โดยสามารถผ่านมาตรฐาน มอก.827-2531 ได้ ทั้งนี้ เศษขวดพลาสติกสีที่ผสมลงในคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นในปริมาณที่เหมาะสม จะส่งผลต่อการดูดซึมน้ำ ความหนาแน่น ความร้อนที่สะสมบนพื้นผิว และต้นทุนการผลิตที่ลดลง คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นที่พัฒนานี้ สามารถนำเศษขวดพลาสติกสีมาใช้ผลิตเป็นวัสดุปูพื้นที่มีความแข็งแรง และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ: คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น ขวดพลาสติกสี พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต ไมโครพลาสติก

Development of Interlocking Concrete Paving Block Product Mixed with Colored Polyethylene Terephthalate Plastic Bottle from Post-Consumer Waste

Kittipong Suweero^{1*} Prachoom Khamput²
kittipong.s@en.rmutt.ac.th^{1*}, prachoom.k@en.rmutt.ac.th²

^{1,2} Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Received	: 2-Oct-2019
Revised	: 28-Oct-2019
Accepted	: 17-Dec-2019

Abstract

This research aims to develop the interlocking concrete paving block product mixed with colored polyethylene terephthalate (PET) plastic bottle from post-consumer waste. The mix ratios were designed by using the ratio of Portland cement type1: aggregates (fine sand, and quarry dust) that equal to 1: 3 by weight. And the colored PET plastic bottle (bottle cap, bottle, and label) was used instead of the aggregates in 5 % of aggregate weight per ratio which the 20% of replacement was the maximum replacement ratio. The 5 mix ratios of Portland cement type1: aggregates: colored PET plastic bottle included 1: 3: 0, 1: 2.85: 0.15, 1: 2.7: 0.3, 1: 2.55: 0.45, and 1: 2.4: 0.6 by weight. Assumed the fine sand to quarry dust ratio equal to 0.67 by weight and the water to cement ratio (W/C) equal to 0.5 by weight. The colored plastic bottle wastes were grinded through the sieve (10 mm of opening) and putted into the admixtures. The concrete mixer and compression machine were the instruments to produce the interlocking concrete paving blocks. The properties of interlocking concrete paving blocks were tested with the TIS. 827-1988 standard and related standards. According to the results at 28 days of curing, the 1: 2.85: 0.15 was the most suitable ratio of interlocking concrete paving blocks which passed the TIS.827-1988 standard. The proper amount of colored plastic bottle wastes can reduce the water absorption, density, surface temperature, and production cost of the interlocking concrete paving blocks. The developed interlocking concrete paving blocks can apply the colored plastic bottle wastes to use as the paving blocks with good strength and environment conservation.

Keywords: interlocking concrete paving block, colored plastic bottle, polyethylene terephthalate, micro plastic

1. บทนำ

ขยะพลาสติก เป็นขยะที่มีปริมาณมากถึง 2 ล้านตันต่อปี ขยะดังกล่าวมีการนำกลับมารีไซเคิลเพียงปีละ 5 แสนตัน [1] ซึ่งหนึ่งในขยะพลาสติกที่ไม่นิยมนำมารีไซเคิลและเป็นปัญหามากที่สุด คือ ขยะจำพวกภาชนะหรือขวดบรรจุเครื่องดื่มที่ผลิตจากพลาสติกพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene Terephthalate; PET) โดยเฉพาะขวดพลาสติกที่มีการผสมสี (รูปที่ 1) เนื่องจากขยะพลาสติกที่มีการผสมสีจะต้องใช้ต้นทุนในการรีไซเคิลที่สูงและใช้งานได้ไม่หลากหลายเท่าขวดพลาสติกชนิดอื่นๆ ทำให้ขยะพลาสติกเหล่านี้ไม่เป็นที่ต้องการของร้านรับซื้อของเก่า และชุมชนก็จะไม่เก็บ จึงกลายเป็นขยะที่ต้องนำไปกำจัด ทั้งนี้หากพลาสติกดังกล่าวไม่ถูกนำไปรีไซเคิลอย่างถูกวิธีและมีการสัมผัสรังสียูวี จะทำให้พลาสติกเกิดการเสื่อมสภาพและกลายเป็นไมโครพลาสติก (Micro Plastic) หรือเศษพลาสติกที่มีขนาดเล็กกว่า 5 มิลลิเมตร ไปจนถึงเศษพลาสติกที่มีขนาดเล็กมากจนไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า ซึ่งส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม และเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตต่างๆ จากการหายใจและห่วงโซ่อาหาร เช่น ปลากินแพลงก์ตอนที่ไม่มีไมโครพลาสติกเข้าไป และมนุษย์ก็กินปลานั้น เป็นต้น [1]



รูปที่ 1 ขยะขวดพลาสติกสีประเภท PET

ขวดพลาสติกสีบรรจุเครื่องดื่มที่เหลือทิ้งประกอบด้วย ตัวขวดพลาสติกที่ผลิตจากพลาสติก PET ฝาขวดที่ผลิตจากพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene; HDPE) และฉลากฟิล์มหัดที่ผลิตจากพลาสติกพอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl Chloride; PVC) ซึ่งแต่ละส่วนคิดเป็นสัดส่วนดังตารางที่ 1 วัสดุเหล่านี้เป็นพลาสติกที่มี

น้ำหนักเบา และสามารถย่อยให้มีขนาดเล็กได้ง่ายด้วยเครื่องบดย่อยพลาสติก

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบของขวดพลาสติกสี

ส่วนประกอบ	น้ำหนัก (กรัม)	น้ำหนัก (ร้อยละ)
ขวด	17.16	81.17
ฝาขวด	2.13	10.08
ฉลากฟิล์มหัด	1.85	8.75
รวม	21.14	100.00

คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น เป็นวัสดุก่อสร้างหรือวัสดุตกแต่งพื้นอาคารที่ได้รับความนิยมจากอุตสาหกรรมก่อสร้างและอสังหาริมทรัพย์ วัสดุนี้นี้สามารถผลิตได้ทั่วไปโดยวิสาหกิจชุมชน และมีราคาจำหน่ายสูงเมื่อเทียบกับวัสดุก่อสร้างจำพวกผนังอาคารอื่นๆ คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นเป็นวัสดุที่มีปัญหาด้านน้ำหนักต่อก่อนที่มาก ทำให้มีค่าการขนส่งที่สูง เนื้อคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นมีการดูดซึมน้ำและการสะสมของอุณหภูมิบนผิวหน้าที่สูง ทำให้อาคารเกิดคราบสกปรกและความร้อนสะสม [2]

เมื่อพิจารณาปัญหาของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นและคุณสมบัติของขยะขวดพลาสติกพบว่า ขยะพลาสติกเป็นวัสดุที่มีความเป็นไปได้ที่จะประยุกต์ใช้แทนที่มวลรวมเพื่อพัฒนาคุณสมบัติของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นให้น้ำหนักต่อก่อน การดูดซึมน้ำ และการสะสมอุณหภูมิบนผิวหน้าที่ลดลง นอกจากนี้การนำพลาสติกไปใช้แทนที่มวลรวมในคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น จะช่วยลดปัญหาขยะพลาสติกที่กลายเป็นไมโครพลาสติกได้อย่างยั่งยืน และใช้เป็นพื้นฐานในการพัฒนาต่อยอดเป็นคอนกรีตผสมพลาสติกสำหรับงานอื่นๆ ต่อไป

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นผสมเศษขยะขวดพลาสติกสีประเภทพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตที่เหลือทิ้งจากการบริโภคที่บดย่อยเป็นมวลรวมน้ำหนักเบาทดแทนมวลรวมบางส่วน

2. วัสดุและอุปกรณ์

วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ ขวดพลาสติกสีประเภท PET ขวดพลาสติกใสประเภท PET ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทรายละเอียด ฝุ่น

หินปูนหรือหินฝุ่น น้ำประปา เครื่องบดพลาสติกพร้อม ตะแกรงขนาดช่องเปิด 10 มิลลิเมตร (รูปที่ 2) เครื่องโม่ผสมคอนกรีต เครื่องอัดคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น แบบสันเขี้ยวพร้อมแบบหล่อขนาด 29.5 x 29.5 x 6 เซนติเมตร (รูปที่ 3) เครื่องทดสอบเบร็กประสงค์ (Universal Testing Machine; UTM) ยี่ห้อ Chun Yen รุ่น CY-6040A12 ชีตความสามารถประยุกต์แรง สูงสุด 100 ตัน อุปกรณ์ตัดแผ่นพลาสติก เวอร์เนียร์คาลิเปอร์ ตู้อบไฟฟ้า ตะแกรงคัดขนาดมวลรวม ตามมาตรฐาน ASTM C136 [3] แปรงทองเหลือง และ เครื่องอินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์ ยี่ห้อ UNI-T รุ่น UT300S กำหนดค่าการแผ่รังสี (Emissivity) เท่ากับ 0.95



รูปที่ 2 เครื่องบดพลาสติก



รูปที่ 3 เครื่องอัดคอนกรีตบล็อกแบบสันเขี้ยว

3. การออกแบบส่วนผสม

ออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นตามมาตรฐาน มอก.827-2531 เรื่อง คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น [4] โดยใช้อัตราส่วน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท1: มวลรวม (ทรายละเอียด และหินฝุ่น) เท่ากับ 1: 3 โดยน้ำหนัก กำหนดให้อัตราส่วนทรายละเอียดต่อหินฝุ่น เท่ากับ

0.67 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) เท่ากับ 0.5 โดยน้ำหนัก จากนั้นแทนที่มวลรวมด้วยเศษ ขวดพลาสติกสี (ฝาขวด ขวด และฉลากฟิล์มหัด) เพิ่มขึ้น ร้อยละ 5 ของน้ำหนักมวลรวมต่ออัตราส่วน เริ่มตั้งแต่ไม่มีส่วนผสมของเศษขวดพลาสติกสี (อัตราส่วน PET0) มีการแทนที่เศษขวดพลาสติกสีร้อยละ 5 (อัตราส่วน PET5) มีการแทนที่เศษขวดพลาสติกสีร้อยละ 10 (อัตราส่วน PET10) มีการแทนที่เศษขวดพลาสติกสีร้อยละ 15 (อัตราส่วน PET15) จนกระทั่งมีการแทนที่เศษ ขวดพลาสติกสีร้อยละ 20 (อัตราส่วน PET20) ซึ่งเป็น ปริมาณเศษขวดพลาสติกสีที่ไม่สามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ ได้ รวมทั้งสิ้น 5 อัตราส่วน ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นผสมเศษขยะขวดพลาสติกสีโดยน้ำหนัก

อัตราส่วน	ปูน	ทราย	หิน ฝุ่น	พลาสติก สี	น้ำ
PET0	1	1.2	1.8	0	0.5
PET5	1	1.14	1.71	0.15	0.5
PET10	1	1.08	1.62	0.3	0.5
PET15	1	1.02	1.53	0.45	0.5
PET20	1	0.96	1.44	0.6	0.5

4. การเตรียมและบดย่อยเศษพลาสติกสี

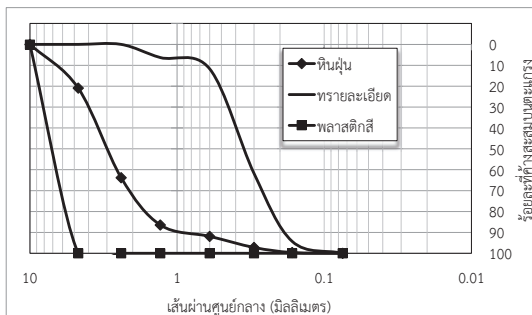
เตรียมเศษพลาสติกสี โดยนำขวดพลาสติกสี ทั้งขวด โดยไม่มีการแยกฝาขวด และแผ่นฟิล์มหัด มา บดด้วยเครื่องบดย่อยพลาสติกที่มีการติดตั้งตะแกรง ขนาดรู 10 มิลลิเมตร เพื่อให้เศษขวดพลาสติกสีมีขนาด ไม่เล็กกว่า 5 มิลลิเมตร (หากเศษขวดพลาสติกสีมีขนาด เล็กกว่า 5 มิลลิเมตร จะกลายเป็นไมโครพลาสติก) ดัง รูปที่ 4 จากนั้นจึงล้างทำความสะอาดเศษขวดพลาสติก ที่ย่อยแล้วด้วยน้ำประปา พร้อมหาโมดูลัสความ ละเอียด (Fineness Modulus) ตามมาตรฐาน ASTM C136 [3] เพื่อเปรียบเทียบกับขนาดของมวลรวมอื่น ซึ่ง ผลจากการหาขนาดคละของมวลรวมต่างๆ สามารถ สรุปได้ว่า มวลรวมหยาบ (หินฝุ่น) มีค่าโมดูลัสความ ละเอียดเท่ากับ 6.29 มวลรวมละเอียด (ทรายละเอียด) มีโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.74 และเศษพลาสติกสี มีโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 8.00 ดังรูปที่ 5 กล่าวคือ เศษพลาสติกสีเป็นวัสดุที่มีขนาดคละใหญ่ที่สุด รองลงมาคือ หินฝุ่น และทรายละเอียด เป็นวัสดุที่มี ขนาดคละเล็กที่สุด ตามลำดับ



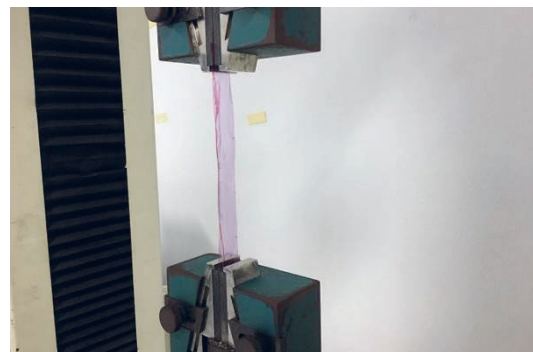
รูปที่ 4 ขยะขวดพลาสติกสีประเภท PET ที่ย่อยแล้ว



รูปที่ 6 คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นผสมเศษขยะขวดพลาสติกสีที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแบบสั่นเขย่า



รูปที่ 5 ขนาดคละของมวลรวมหยาบ (หินฝุ่น) มวลรวมละเอียด (ทรายละเอียด) และเศษพลาสติกสี



รูปที่ 7 การทดสอบความต้านทานแรงดึงของ ชิ้นพลาสติกสี ขนาด 17x1.5 เซนติเมตร

5. การขึ้นรูปต้นแบบผลิตภัณฑ์

เริ่มจากการตรวจสอบส่วนผสมของวัสดุปูพื้นตามที ออกแบบ แล้วนำส่วนผสมทั้งหมดใส่โม้ผสมคอนกรีต และผสมส่วนผสมทั้งหมดให้เข้ากัน จากนั้นนำส่วนผสม ที่ผสมเข้ากันดีแล้วมาอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดคอนกรีต บล็อกประสานปูพื้นแบบสั่นเขย่าที่มีแบบหล่อขนาด เท่ากับ 29.5x29.5x6 เซนติเมตร ตามมาตรฐาน มอก. 827-2531 เรื่องคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น [4] ถอด แบบคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นผสมเศษขยะขวด พลาสติกสี (รูปที่ 6) และนำไปบ่มด้วยการพรมน้ำและ หุ้มด้วยแผ่นพลาสติก ตามระยะเวลาที่กำหนด คือ 7, 14, 21 และ 28 วัน ก่อนนำไปทดสอบ

6. การทดสอบคุณสมบัติของเศษพลาสติกสีและสี

นำขวดพลาสติกสีและสีมาตัดเป็นชิ้น ทดสอบ ขนาด 17x1.5 เซนติเมตร โดยใช้จำนวนชิ้น พลาสติกสี จำนวน 5 ชิ้น และชิ้นพลาสติกสี จำนวน 5 ชิ้น จากนั้นวัดหาขนาดของชิ้นพลาสติก และนำชิ้น พลาสติกมาเข้าเครื่องทดสอบความต้านทานแรงดึง หรือเครื่อง UTM (รูปที่ 7) ตามมาตรฐาน ASTM D882 [3]

7. การทดสอบคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์

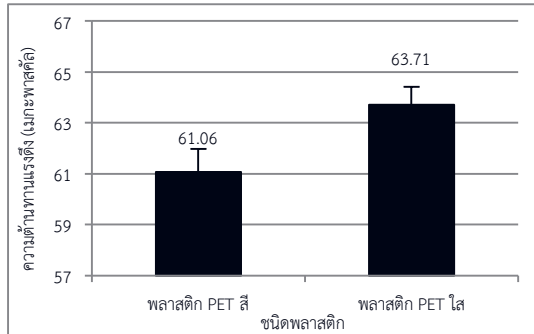
ทดสอบผลิตภัณฑ์คอนกรีตบล็อกประสานปู พื้นผสมเศษขยะขวดพลาสติกสี ตามมาตรฐาน มอก. 827-2531 เรื่องคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น [4] ประกอบด้วย ลักษณะโดยทั่วไปที่อายุการบ่ม 28 วัน ความได้ฉากที่อายุการบ่ม 28 วัน ความต้านทานแรงอัด ที่อายุการบ่ม 7, 14, 21 และ 28 วัน พร้อมทั้งมีการ ทดสอบเพิ่มเติม ได้แก่ ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ และอุณหภูมิสะสมบนผิวหน้าด้วยเครื่องอินฟาเรด เทอร์โมมิเตอร์ โดยใช้จำนวนตัวอย่างในการทดสอบ 10 ตัวอย่างต่อหนึ่งอัตราส่วนต่อการทดสอบ นอกจากนี้ยัง มีการวิเคราะห์หาต้นทุนการผลิตของวัสดุปูพื้นผสม พลาสติกสีในแต่ละอัตราส่วน

8. ผลการวิจัย

ผลการทดสอบสมบัติของผลิตภัณฑ์วัสดุปูพื้น ผสมพลาสติกสี ตามมาตรฐาน มอก.827-2531 เรื่องคอนกรีต บล็อกประสานปูพื้น [4] และอื่นๆ สามารถสรุปได้ ดังนี้

8.1. ความต้านทานแรงดึงของขวดพลาสติก

จากการทดสอบความต้านทานแรงดึงของขวดพลาสติกสีและใส สามารถสรุปผลได้ ดังนี้



รูปที่ 8 ความต้านทานแรงดึงของขวดพลาสติก

จากรูปที่ 8 พบว่า ขวดพลาสติก PET ทั้งแบบสีและใส มีค่าความต้านทานแรงดึงที่ใกล้เคียงกัน โดยขวดพลาสติก PET แบบสี มีค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ย 61.06 เมกะพาสคัล และแบบใส มีค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ย 63.71 เมกะพาสคัล

8.2 ลักษณะทั่วไปและความได้ฉากของวัสดุพื้นผสมเศษขวดพลาสติกสี

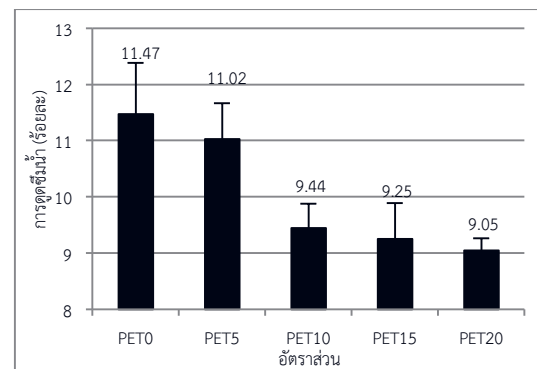
จากผลการพิจารณาลักษณะทั่วไปและความได้ฉากของวัสดุพื้นผสมพลาสติกสีในตารางที่ 3 และมาตรฐาน มอก.827-2531 ที่กำหนดให้บล็อกประสานพื้นต้องมีเนื้อแน่น ไม่ร้าว และมีความเบี่ยงเบนของความได้ฉากไม่เกิน 2 มิลลิเมตร [4] พบว่า วัสดุพื้นที่ไม่ผสมพลาสติกสี และวัสดุพื้นผสมพลาสติกสีอัตราส่วน PET5 (ดังอัตราส่วนในตารางที่ 2) เป็นวัสดุพื้นที่สามารถผ่านตามมาตรฐานดังกล่าว เนื่องจากการผสมพลาสติกสีที่มีขนาดใกล้เคียงกันมากๆ ลงในวัสดุพื้น มีผลทำให้เนื้อของวัสดุพื้นที่มีปริมาณเศษพลาสติกในปริมาณที่มากเกินไปหรือมากกว่าอัตราส่วน PET5 จะมีช่องว่างเกิดขึ้นและเนื้อไม่แน่น [5] นอกจากนี้ การผสมพลาสติกสีที่มาก ยังส่งผลต่อการพองตัวและพื้นผิวของบล็อกที่ไม่ได้ฉากภายหลังจากการอัดขึ้นรูปส่วนผสมเป็นวัสดุพื้น

ตารางที่ 3 ลักษณะโดยทั่วไปและความได้ฉากของวัสดุพื้นผสมพลาสติกสีที่อายุการบ่ม 28 วัน

อัตราส่วน	ลักษณะทั่วไป	ความเบี่ยงเบนของความได้ฉาก (มิลลิเมตร)
PET0	สมบูรณ์	0
PET5	สมบูรณ์และเห็นเศษพลาสติก	1.12
PET10	ขรุขระและเห็นเศษพลาสติก	1.27
PET15	ขรุขระและเห็นเศษพลาสติก	1.54
PET20	บิ่นง่าย ขรุขระ และเห็นเศษพลาสติก	2.21

8.3 การดูดซึมน้ำของวัสดุพื้นผสมเศษขวดพลาสติกสี

จากการทดสอบการดูดซึมน้ำของวัสดุพื้นผสมพลาสติกสี สามารถสรุปผลได้ดังรูปที่ 9

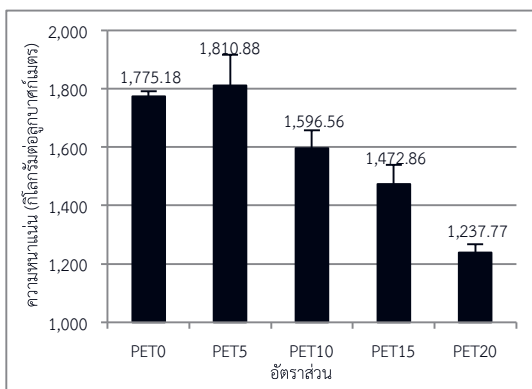


รูปที่ 9 การดูดซึมน้ำของวัสดุพื้นผสมพลาสติกสี ที่อายุการบ่ม 28 วัน

จากรูปที่ 9 พบว่า วัสดุพื้นที่มีส่วนผสมของพลาสติกที่มากจะมีการดูดซึมน้ำต่ำกว่าวัสดุพื้นที่มีส่วนผสมของพลาสติกน้อย โดยวัสดุพื้นที่ไม่ผสมพลาสติกสี (อัตราส่วน PET0) มีค่าการดูดซึมน้ำสูงที่สุด รองลงมาคือ อัตราส่วน PET5 PET10 PET15 และ PET20 เป็นอัตราส่วนที่มีการดูดซึมน้ำต่ำที่สุดตามลำดับ ทั้งนี้ เป็นผลมาจากพลาสติกสีเป็นวัสดุที่บิ่นน้ำเมื่อเปรียบเทียบกับมวลรวมอื่นในส่วนผสม จึงทำให้ค่าการดูดซึมน้ำลดลงดังกล่าว [6]

8.4 ความหนาแน่นของวัสดุพื้ผสมเศษขวดพลาสติก

จากผลการทดสอบความหนาแน่นของวัสดุพื้ผสมพลาสติกสีในรูปที่ 10 พบว่า วัสดุพื้ที่ไม่มีส่วนผสมของเศษพลาสติก (อัตราส่วนPET0) เป็นอัตราส่วนที่มีความหนาแน่นสูงสุด เท่ากับ 1,775.18 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร รองลงมาคือ วัสดุพื้ที่ผสมพลาสติกอัตราส่วน PET5 เท่ากับ 1,691.04 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วน PET10 เท่ากับ 1,596.56 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วน PET15 เท่ากับ 1,472.86 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และอัตราส่วน PET20 จะมีความหนาแน่นต่ำที่สุด เท่ากับ 1,237.77 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากพลาสติกที่ผสมมีความหนาแน่นต่ำคือประมาณ 1,380 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และช่องว่างระหว่างพลาสติกสี มวลรวม และวัสดุเชื่อมประสาน [5, 7]

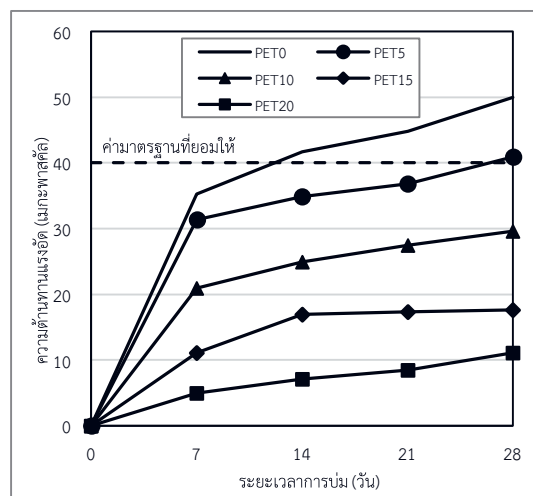


รูปที่ 10 ความหนาแน่นของวัสดุพื้ผสมพลาสติกสี ที่อายุการบ่ม 28 วัน

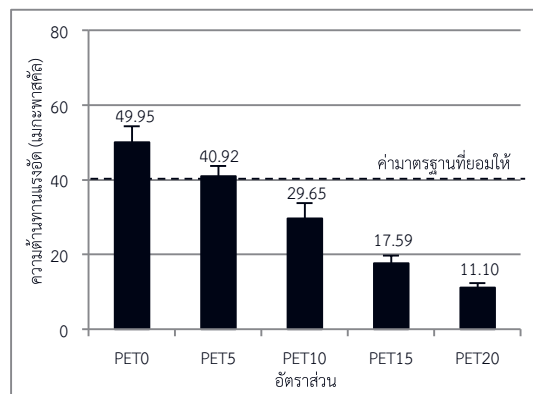
8.5 ความต้านทานแรงอัดของวัสดุพื้ผสมเศษขวดพลาสติก

จากรูปที่ 11 และ 12 แสดงผลการทดสอบการความต้านทานแรงอัดของวัสดุพื้ พบว่า ความต้านทานแรงอัดของบล็อกพื้มีแนวโน้มลดลง เมื่อมีการผสมพลาสติกสีเพิ่มมากขึ้น โดยที่วัสดุพื้ที่ไม่มีผสมพลาสติก (อัตราส่วนPET0) จะมีค่าความต้านทานแรงอัดเฉลี่ยสูงสุด เท่ากับ 49.95 เมกะพาสคัล รองลงมาคือวัสดุพื้ที่ผสมพลาสติกอัตราส่วน PET5 เท่ากับ 40.92 เมกะพาสคัล อัตราส่วน PET10 เท่ากับ 29.65 เมกะพาสคัล อัตราส่วน PET15 เท่ากับ 17.59 เมกะพาสคัล และอัตราส่วน PET20 เป็นวัสดุพื้ที่มีค่าความต้านทานแรงอัดเฉลี่ยต่ำ

ที่สุด เท่ากับ 11.10 เมกะพาสคัล ตามลำดับ ทั้งนี้ เป็นผลมาจากพลาสติกเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นมากกว่ามวลรวมอื่นๆ ในส่วนผสม ทำให้เมื่อต้องรับแรงพลาสติกจะเกิดการยืดหยุ่นและไม่สามารถรับแรงดังกล่าวได้ และความต้านทานแรงอัดของวัสดุพื้จึงลดลง [5, 8] เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน มอก.827-2531 เรื่องคอนกรีตบล็อกประสานพื้ พบว่า วัสดุพื้ที่ไม่มีผสมพลาสติกสี และวัสดุพื้ที่ผสมพลาสติกสีอัตราส่วน PET5 มีค่าความต้านทานแรงอัด ที่อายุการบ่ม 28 วัน ผ่านตามข้อกำหนด หรือมีค่าความต้านทานแรงอัดเฉลี่ยเกินกว่า 40 เมกะพาสคัล และความต้านทานแรงอัดแต่ละก้อนเกินกว่า 35 เมกะพาสคัล [4]



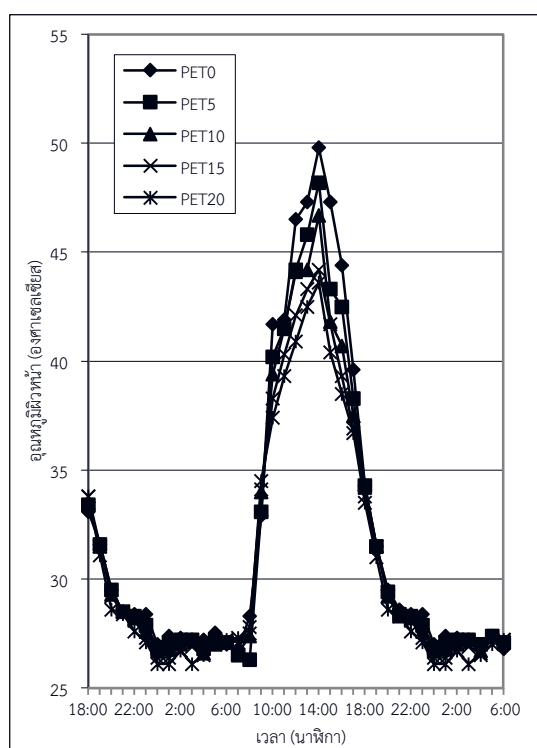
รูปที่ 11 ความต้านทานแรงอัดของวัสดุพื้ผสมพลาสติกสี ที่อายุการบ่มต่างๆ



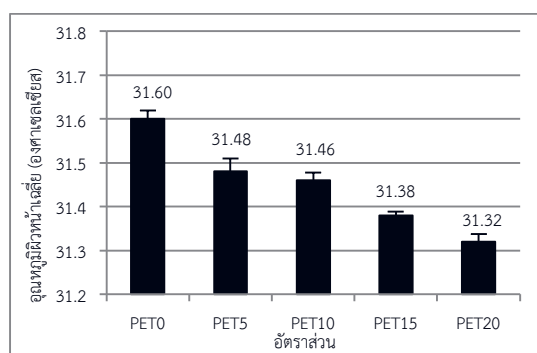
รูปที่ 12 ความต้านทานแรงอัดของวัสดุพื้ผสมพลาสติกสี ที่อายุการบ่ม 28 วัน

8.6 อุณหภูมิผิวหน้าของวัสดุปูพื้นผสมเศษขวดพลาสติก

การทดสอบอุณหภูมิผิวหน้าของวัสดุปูพื้น เป็นการนำวัสดุปูพื้นทั้งที่ผสมและไม่ผสมพลาสติกสีมาวางกลางแจ้ง และทำการวัดอุณหภูมิผิวหน้าทุก 1 ชั่วโมง รวมเป็นระยะเวลา 36 ชั่วโมงติดต่อกัน ใช้เครื่องอินฟราเรดเทอร์มิเตอร์วัดอุณหภูมิผิวหน้า จำนวน 5 จุด ตั้งแต่วันที่ 7 กุมภาพันธ์ 2562 เวลา 16:00 น. ถึงวันที่ 9 กุมภาพันธ์ 2562 เวลา 06:00 น. โดยสามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังรูปที่ 13 และ 14



รูปที่ 13 อุณหภูมิผิวหน้าของวัสดุปูพื้นผสมพลาสติกสี ที่อายุการบ่ม 28 วัน ณ เวลาต่างๆ



รูปที่ 14 อุณหภูมิผิวหน้าเฉลี่ยของวัสดุปูพื้นผสมพลาสติกสี ที่อายุการบ่ม 28 วัน

จากรูปที่ 13 และ 14 พบว่า เศษพลาสติกที่ผสมลงในวัสดุปูพื้นมีผลต่ออุณหภูมิผิวหน้า โดยวัสดุปูพื้นที่ไม่ผสมพลาสติกสี (อัตราส่วนPET0) มีอุณหภูมิผิวหน้าเฉลี่ยสูงสุด เท่ากับ 31.6 องศาเซลเซียส รองลงมาคือ วัสดุปูพื้นที่มีผสมพลาสติกอัตราส่วน PET5 มีค่าอุณหภูมิผิวหน้าเฉลี่ย เท่ากับ 31.48 องศาเซลเซียส วัสดุปูพื้นอัตราส่วน PET10 มีค่าอุณหภูมิผิวหน้าเฉลี่ย เท่ากับ 31.46 องศาเซลเซียส วัสดุปูพื้นอัตราส่วน PET15 มีค่าอุณหภูมิผิวหน้าเฉลี่ย เท่ากับ 31.38 องศาเซลเซียส และวัสดุปูพื้นอัตราส่วน PET20 เป็นอัตราส่วนที่มีค่าอุณหภูมิผิวหน้าต่ำที่สุด เท่ากับ 31.32 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ผลการทดสอบอุณหภูมิผิวหน้าของวัสดุปูพื้น นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาตามช่วงเวลาจะเห็นได้ว่า วัสดุปูพื้นผสมพลาสติกสีที่มีความหนาแน่นน้อยจะมีอุณหภูมิผิวหน้าที่สูงกว่าวัสดุปูพื้นผสมพลาสติกสีที่มีความหนาแน่นมากในช่วงเวลากลางวัน และวัสดุปูพื้นผสมพลาสติกสีที่มีความหนาแน่นน้อยจะมีอุณหภูมิผิวหน้าน้อยกว่าวัสดุปูพื้นผสมพลาสติกสีที่มีความหนาแน่นมากในช่วงเวลากลางคืน [2, 9]

8.7 ต้นทุนการผลิตของวัสดุปูพื้นผสมเศษขวดพลาสติก

ผลการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตของวัสดุปูพื้นผสมพลาสติกสีในส่วนของค่าส่วนผสม ไม่รวมค่า น้ำประปา ค่าการย่อยพลาสติก และค่าการขึ้นรูป โดยกำหนดราคาปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1 เท่ากับ 2,194 บาทต่อ 1,000 กิโลกรัม ราคาหินฝุ่น เท่ากับ 300 บาทต่อ 1,529.2 กิโลกรัม และราคาทราย เท่ากับ 478.33 บาทต่อลูกบาศก์เมตร [10] พบว่า วัสดุปูพื้นที่ไม่มีส่วนผสมของพลาสติก (อัตราส่วน PET0) มีต้นทุนส่วนผสมสูงสุดคือ 3.04 บาท รองลงมาคือ วัสดุปูพื้นที่มีส่วนผสมของพลาสติกอัตราส่วน PET5 เท่ากับ 2.98 บาท อัตราส่วน PET10 เท่ากับ 2.63 บาท อัตราส่วน PET15 เท่ากับ 2.49 บาท และอัตราส่วน PET20 มีต้นทุนส่วนผสมต่ำที่สุด เท่ากับ 2.25 บาท ตามลำดับ สรุปได้ว่า วัสดุปูพื้นที่มีการผสมพลาสติกสี ในปริมาณมาก จะมีผลช่วยให้ต้นทุนส่วนผสมของวัสดุปูพื้นลดลง

9. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากผลการดำเนินงาน สามารถสรุปได้ว่า ขวดพลาสติก PET แบบสีและแบบใส มีค่าความต้านทานแรงดึงที่ใกล้เคียงกัน เมื่อนำไปบดย่อยเป็นเศษพลาสติกและผสมลงในคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นในปริมาณที่เหมาะสม จะช่วยลดการดูดซึมน้ำ ความหนาแน่น ความร้อนที่สะสมบนพื้นผิว และต้นทุนการผลิต ส่วนการนำคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นผสมเศษขวดพลาสติกสีที่พัฒนาทั้ง 5 อัตราส่วน ไปทดสอบคุณสมบัติตามมาตรฐาน มอก.827-2531 เรื่อง คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น พบว่า วัสดุปูพื้นผสมพลาสติกสีอัตราส่วน PET5 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด เพราะมีคุณสมบัติตามที่มาตรฐานกำหนด โดยมีเนื้อแน่น ไม่ร้าว ได้ฉลาก มีค่าความต้านทานแรงอัดเฉลี่ย 40.92 เมกะพาสคัล การดูดซึมน้ำ ร้อยละ 11.02 ความหนาแน่น 1,691.04 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อุณหภูมิผิวหน้าเฉลี่ยต่ำ และมีต้นทุน 2.98 บาทต่อก่อน ทั้งนี้วัสดุปูพื้นที่ได้เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรง และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ช่วยลดปัญหาขยะพลาสติก โดยเฉพาะไมโครพลาสติกได้ดี

10. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม (สกสว.) รหัสโครงการ ABCRMUTT61A07 โดยความเห็นในรายงานผลการวิจัยเป็นของผู้รับทุน ผู้ให้ทุนไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป

11. เอกสารอ้างอิง

- [1] Environmental Research Institute (ERI). Micro plastics [Internet]. 2018 [cited 2018 Dec 10]. Available from: http://www.eric.chula.ac.th/download/z_waste/Thon.pdf. (in Thai)
- [2] Khamput P, Suweero K. Development of paving block for reducing the exterior surface temperature. Proceedings of the 16th National Convention on Civil Engineering; 2011 May 18-20; Chonburi, Thailand. Bangkok: Mahidol University; 2011. (in Thai)
- [3] American Society for Testing and Materials (ASTM). Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia: ASTM; 2014.
- [4] Thai Industrial Standards Institute (TISI). Thai industrial standard no.827-1988: interlocking concrete paving block. Bangkok: Thai Industrial Standards Institute; 1988. (in Thai)
- [5] Jindaprasert P, Jaturapitakkul C. Cement, pozzolan, and concrete. 7th ed. Bangkok: ACI Partners with Thailand Concrete Association; 2012. (in Thai)
- [6] Edenbaum J. Plastics additives and modifiers handbook. 1st ed. New York: Van Nostrand Reinhold; 1992.
- [7] Weeranukul P, Suweero K, Weeranukul I. Utilization of vesicular basalt fragment as aggregate in cement board for knockdown building wall. Journal of Engineering, RMUTT. 2019; 17(1): 15-24. (in Thai)
- [8] Chawakitchareon P, Nualswan N. Utilization of paper label waste for making interlocking concrete paving block by using limestone powder-cement as binder. The Journal of KMUTNB. 2012; 22(1): 99-106. (in Thai)
- [9] Arunee N. A study of surface temperature in relation to the mass, color intensity and texture of outdoor paving materials [master's thesis]. Bangkok: Chulalongkorn University; 1995. (in Thai)
- [10] Ministry of Commerce (MOC). Economic and trade indices database (ETID) [Internet]. 2019 [cited 2019 Mar 25]. Available from: http://www.indexpr.moc.go.th/price_present/tablecsi_month_region.asp?ddmonth=03&DDYear=2562&DDProvince=10&B1=%B5%A1%C5%A7. (in Thai)

การวิเคราะห์ความสามารถที่สังเกตได้ในการประมาณค่าสถานะ สำหรับระบบไฟฟ้าด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

ศศิพร ผลไพศาลศักดิ์¹ ระดมบุญ ทักขนา² ยุทธนา คงจีน³ และกฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์^{4*}
sasiporn_p@mail.rmutt.ac.th¹, radomboon_t@mail.rmutt.ac.th², yuttana.ko@rmuti.ac.th³,
krischonme.b@en.rmutt.ac.th^{4*}

^{1,2,4*} ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

³ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

Received	: 15-Jan-2020
Revised	: 11-Feb-2020
Accepted	: 11-Mar-2020

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์ความสามารถที่สังเกตได้ในการประมาณค่าสถานะของเครื่องมือวัดสำหรับระบบไฟฟ้าด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม โดยการนำการประมาณค่าสถานะมาใช้แก้ไขปัญหาค่าข้อมูลที่ขาดหายไปในการวัดของเครื่องมือวัดและปัญหาการติดตั้งเครื่องมือวัดในทุกบัส เป้าหมายหลักคือการหาค่าจำนวนให้ได้น้อยที่สุดและตำแหน่งการติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องมือวัดสำหรับระบบไฟฟ้า นอกจากการศึกษาค่าสถานะของเครื่องมือวัดด้วยวิธีเชิงพันธุกรรม ในการหาจำนวนและตำแหน่งการติดตั้งของเครื่องมือวัดในระบบไฟฟ้าแล้ว ยังได้มีการศึกษาการวิเคราะห์ความสามารถที่สังเกตได้ เพื่อนำมาใช้ในการหาตัวแปรที่ส่งผลต่อสมการเครื่องมือวัด โดยศึกษาบนพื้นฐานระบบมาตรฐาน IEEE 14 บัส แทนระบบไฟฟ้า จากการศึกษาบนพื้นฐานระบบมาตรฐาน IEEE 14 บัส ผลการทดสอบพบว่า การจำลองการติดตั้งเครื่องมือวัดในระบบไฟฟ้า ที่มีจำนวนเครื่องมือวัดทั้งหมด 122 ตัว เมื่อทำการติดตั้งเครื่องมือวัดด้วยวิธีเชิงพันธุกรรม ทำให้สามารถลดจำนวนของเครื่องมือวัดลงเหลือ 56 ตัว และเมื่อทำการวิเคราะห์เฉพาะเครื่องมือวัดอัตโนมัติ AMR ในระบบไฟฟ้าที่มีจำนวนทั้งหมด 42 ตัว โดยใช้วิธีเชิงพันธุกรรม ผลที่ได้พบว่าสามารถลดจำนวนของเครื่องมือวัดอัตโนมัติเหลือ 13 ตัว และระบบการวัดไฟฟ้าก็ยังสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: ความสามารถที่สังเกตได้ การประมาณค่าสถานะ เทคนิควิธีเชิงพันธุกรรม

Analysis of Observability of Power System State Estimation using Genetic Algorithm Technique

Sasiporn Pholpaisansak¹, Radomboon Thaksana², Yuttana Kongjeen³, and Krischonme Bhumkittipich^{4*}
sasiporn_p@mail.rmutt.ac.th¹, radomboob_t@mail.rmutt.ac.th², yuttana.ko@rmuti.ac.th³,
krischonme.b@en.rmutt.ac.th^{4*}

^{1,2,4*}Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

³Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan

Received	: 15-Jan-2020
Revised	: 11-Feb-2020
Accepted	: 11-Mar-2020

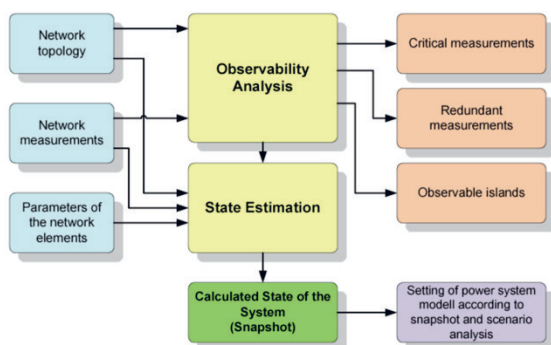
Abstract

This paper presents an analysis of observability in state estimation of instruments for electrical systems using genetic algorithm technique. This proposed algorithm can be solved for preventing the instruments from the measurement data missing in electrical power systems, and for installing the instruments in all bus standards. The goal of this research focuses on the minimum number of instruments and their most appropriate locations for electrical systems. Besides the state estimation of instruments by using genetic algorithm technique to find the minimum number of instruments and their most appropriate locations, the analysis of observability can be used to find the variables affecting the instrumentation equations. This is experimented on the basis of the IEEE 14 bus standard instead of the electrical system. The simulation results found that the instruments in electrical systems had a total of 122 sets, but after installing the instruments using a genetic algorithm technique, the number of instruments decreased by 56 sets. Also, the technique was used with the AMR instruments in electrical systems with a total of 42 set, the instruments decreased by 13 sets. The decreased number of instruments could function efficiently.

Keywords: observability, state estimation, genetic algorithm technique

1. บทนำ

การบริหารจัดการระบบโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ (Smart grid) ในอนาคตจะเข้ามามีบทบาทอย่างยิ่งต่อการบริหารจัดการพลังงานไฟฟ้าโดยรวมของระบบจำหน่ายไฟฟ้า ระบบผลิตไฟฟ้า ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า และยังมีกระแสเทคโนโลยีของโลกในการสื่อสารแบบไร้พรมแดน การเฝ้าติดตามผลการใช้พลังงานไฟฟ้าแบบทันเวลา (Real time) ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ระบบการวัดพลังงานไฟฟ้าของระบบไฟฟ้านั้นมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการบริหารจัดการพลังงานไฟฟ้า เมื่อเกิดปัญหาเกี่ยวกับระบบเครื่องวัดนั้น เช่น อ่านค่าผิดพลาด การชำรุดเสียหาย เป็นต้น ซึ่งเป็นผลทำให้ระบบเครื่องวัดไม่สามารถประมาณค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าในช่วงที่เครื่องวัดเกิดปัญหาขึ้นได้ เมื่อเกิดปัญหาเหล่านี้เกิดขึ้นส่วนใหญ่แล้วจะมีการจัดการโดยใช้วิธีหลักการนำค่าตัวประกอบโหนดของเครื่องวัดที่เกิดปัญหาดังกล่าวมาทำการเฉลี่ยค่าตัวประกอบโหนด ทำให้เกิดปัญหาที่เป็นภาระต่อผู้ใช้งานไฟฟ้าที่ต้องยอมรับในเงื่อนไขของหลักการดังกล่าว ที่ค่าของการใช้พลังงานไฟฟ้านั้นอาจจะไม่ใกล้เคียงกับค่าของความเป็นจริง หรือ การไฟฟ้า อาจเป็นฝ่ายที่เสียเปรียบในการคำนวณค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าดังกล่าวได้ และอาจส่งผลทำให้ความน่าเชื่อถือของระบบเครื่องวัดลดน้อยลงได้



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ความสามารถที่สังเกตได้และการประมาณค่าสถานะ [1]

รูปที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการวิเคราะห์ความสามารถที่สังเกตได้และการประมาณค่าสถานะของระบบไฟฟ้าเพื่อทำการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าที่ต้องการ ดังนั้นการวิเคราะห์ความสามารถที่สังเกตได้โดยการใช้เทคนิคการประมาณค่าสถานะนั้นจึงมี

ความสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่งต่อการบริหารจัดการการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยภาพรวม เทคนิคการประมาณค่าสถานะมีการนำมาประยุกต์ใช้ในหลายด้านในปัจจุบัน และเริ่มกลับมาได้รับความนิยมอีกครั้งในการประยุกต์ใช้การประมาณค่าช่วงสภาวะทรานเซียนต์ (Transient State Estimation, TSE) [2] และงานอื่น ๆ ที่เป็นในลักษณะการควบคุมแบบทันเวลา (Dynamic State Estimation, DSE) [3] และค่าใช้จ่ายของจำนวนเครื่องมือวัดทั้งหมดในระบบ การมีเครื่องมือวัดที่เหมาะสมกับระบบไฟฟ้าก็เป็นอีกเงื่อนไขหนึ่งในทางเศรษฐศาสตร์ที่ต้องพิจารณา ในด้านภาระค่าใช้จ่ายและความเหมาะสมต่อจำนวนของเครื่องมือวัด ที่ไม่เกินความเป็นจริง ซึ่งการลดจำนวนเครื่องมือวัดในระบบโดยการใช้เทคนิคการหาค่าตัวแปรสถานะและเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมก็ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลาย [4]

บทความนี้จึงนำเสนอหลักการประยุกต์เบื้องต้นของวิธีการประมาณค่าสถานะ (State Estimation, SE) และจัดเตรียมนำไปใช้งานในสนามจริงโดยทำการศึกษาจากพื้นฐานระบบมาตรฐาน IEEE 14 บัส แทนระบบไฟฟ้า โดยนำเสนอโปรแกรมประมาณค่าสถานะของระบบไฟฟ้า โดยส่วนแรกจะอธิบายวิธีการประมาณค่าสถานะ วิธีการหาค่าตอบของการประมาณค่าสถานะ การหาตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดโดยวิธีการเชิงพันธุกรรม ผลการทดสอบการติดตั้งเครื่องมือวัดด้วยวิธีการเชิงพันธุกรรม สรุปและอภิปรายผล

2. วิธีการประมาณค่าสถานะ

การประมาณค่าสถานะนั้นเป็นการประมาณค่าตัวแปรที่ไม่สามารถทราบค่าได้ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งที่ทำมาเพื่อสามารถวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้า ซึ่งระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ในปัจจุบันมีการเชื่อมต่อเข้าด้วยกันทำให้ระบบนั้นมีความซับซ้อนมากขึ้น การประมาณค่าสถานะนั้นจึงเป็นตัวช่วยอย่างหนึ่งที่สามารถช่วยวิเคราะห์ระบบที่มีความซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ระบบนั้น จำเป็นต้องมีการพิจารณาข้อมูลจากการวัด โดยทั่วไปข้อมูลที่ได้จากการวัดจะเป็นข้อมูลของ ขนาดแรงดันที่บัส กำลังไฟฟ้าที่บัส และมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่บัส โดยตัวแปรสถานะเหล่านี้จะที่ถูกนำมาประมาณค่าสถานะของระบบไฟฟ้ากำลัง การหาค่าการประมาณ

สถานะ เพื่อที่จะให้ได้ค่าที่เป็นจริงมากที่สุด โดยนำไปใช้เป็นฐานข้อมูลในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อที่จะทำให้ระบบกำลังมีเสถียรภาพมากและมีประสิทธิภาพมากที่สุด ซึ่งสมการการประมาณค่าสถานะระบบไฟฟ้ากำลังที่ไม่เป็นเชิงเส้นสามารถเขียนได้เป็น [5]

$$z = h(x) + \varepsilon \quad (1)$$

เมื่อ Z คือ เวกเตอร์ของการวัด
 x คือ เวกเตอร์ตัวแปรของสถานะ
 $h(x)$ คือ ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น
 ε คือ เวกเตอร์ผิดพลาดของการวัด
 ซึ่งในระบบไฟฟ้ากำลัง จะมีตัวแปรสถานะ คือ ขนาดและมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าบัส (V และ δ) ที่ถูกประมาณค่าจำนวน $2N-1$ ตัวแปร ซึ่งตัวแปรสถานะและค่าที่วัดได้เขียนสมการได้ดังนี้ ขนาดแรงดันไฟฟ้าบัสที่วัดได้ V_i^{meas} จะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและค่าผิดพลาดในการวัด และเขียนสมการได้

$$V_i^{meas} = V_i + \varepsilon V_i \quad (2)$$

เมื่อ i คือ บัสที่พิจารณา
 εV_i คือ ค่าแรงดันที่ผิดพลาดของการวัด
 V_i^{meas} คือ ค่าที่วัดได้จากบัส i
 กำลังไฟฟ้าที่บัสจะมีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ของ สายส่งไฟฟ้าและหม้อแปลงไฟฟ้าที่เชื่อมโยงกับบัสนั้น ๆ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าสามารถเขียนสมการได้เป็น

$$[\bar{Y}][\bar{V}] = [\bar{I}] \quad (3)$$

เมื่อ $\bar{Y} = Y \angle \theta$ คือ เมทริกซ์แอดมิตแตนซ์ของระบบ
 $\bar{V} = V \angle \theta$ คือ เมทริกซ์เฟสเซอร์ของแรงดันไฟฟ้า
 และ $\bar{I} = I \angle \theta$ คือ เมทริกซ์เฟสเซอร์ของกระแสไฟฟ้า
 ซึ่งกำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนคำนวณได้จากสมการ

$$S = VI^* = P + jQ \quad (4)$$

และได้สมการของกำลังไฟฟ้าที่บัส i เป็น

$$P_i = \sum_{j=1}^i V_i V_j V_{ij} \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (5)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^i V_i V_j V_{ij} \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (6)$$

ดังนั้นสมการของการวัดที่บัส i จึงเขียนได้เป็น

$$P_i^{meas} = \sum_{j=1}^i V_i V_j V_{ij} \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) + \varepsilon P_i \quad (7)$$

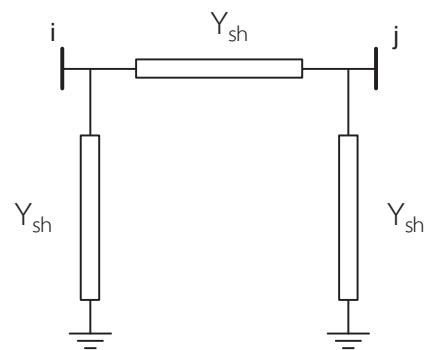
$$Q_i^{meas} = \sum_{j=1}^i V_i V_j V_{ij} \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) + \varepsilon Q_i \quad (8)$$

เมื่อ P_i^{meas} คือ กำลังไฟฟ้าจริงที่บัส
 iQ_i^{meas} คือ กำลังไฟฟ้าเสมือนที่บัส
 iV_i คือ ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัส
 iV_n คือ ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัส
 nY_{in} คือ ขนาดแอดมิตแตนซ์ระหว่างบัส i และบัส n
 εP_i คือ ค่าผิดพลาดที่วัดกำลังไฟฟ้าจริงที่บัส
 $i\varepsilon Q_i$ คือ ค่าผิดพลาดที่วัดกำลังไฟฟ้าเสมือนที่บัส
 $i\delta_n$ คือ มุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่บัส
 $n\delta_i$ คือ มุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่บัส
 $i\theta_{in}$ คือ มุมเฟสของแอดมิตแตนซ์ระหว่างบัส i
 nN คือ จำนวนบัสทั้งหมด

รูปที่ 2 แสดงแบบจำลองสายส่งไฟฟ้าซึ่งแทนด้วยวงจรสมมูล แบบ π จากรูปสามารถเขียนสมการของกระแสที่ไหลจากบัส i ไปยังบัส j ได้ดังนี้

$$I_{ij} = Y_{sh} V_i + Y_{se} (V_i - V_j) \quad (9)$$

ซึ่งกำลังไฟฟ้าเชิงซ้อนคำนวณการไหลจากบัส i ไปบัส j ได้จากสมการ



รูปที่ 2 แบบจำลองสายส่งแบบ π [6]

$$S_{ij} = V_i I_{ij} = P_{ij} + jQ_{ij} \quad (10)$$

ซึ่งจะได้สมการของกำลังไฟฟ้าที่ไหลจากบัส i ไปยังบัส j ได้ดังนี้

$$P_{ij} = V_i^2 [Y_{se} \cos \theta_{se} + Y_{sh} \cos \theta_{sh}] - V_i V_j Y_{se} \cos(\theta_{se} - \delta_i - \delta_j) \quad (11)$$

$$Q_{ij} = -V_i^2 [Y_{se} \sin \theta_{se} + Y_{sh} \sin \theta_{sh}] - V_i V_j Y_{se} \sin(\theta_{se} - \delta_i - \delta_j) \quad (12)$$

สมการการวัดของกำลังไฟฟ้าที่ไหลระหว่างบัส i และบัส j จะได้สมการที่ (13) และ (14)

$$P_{ij}^{meas} = V_i^2 [Y_{se} \cos \theta_{se} + Y_{sh} \cos \theta_{sh}] - V_i V_j Y_{se} \cos(\theta_{se} - \delta_i - \delta_j) + \varepsilon P_{ij} \quad (13)$$

$$Q_{ij}^{meas} = -V_i^2 [Y_{se} \sin \theta_{se} + Y_{sh} \sin \theta_{sh}] - V_i V_j Y_{se} \sin(\theta_{se} - \delta_i - \delta_j) + \varepsilon Q_{ij} \quad (14)$$

เมื่อ P_{ij}^{meas} คือกำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลระหว่างบัส i ไปบัส j

Q_{ij}^{meas} คือกำลังไฟฟ้าเสมือนที่ไหลระหว่างบัส i ไปบัส j

Y_{se} คือขนาดแอดมิตแตนซ์อนุกรมระหว่างบัส i ไปบัส j

Y_{sh} คือ ขนาดแอดมิตแตนซ์ขนาน

θ_{se} คือ มุมเฟสของแอดมิตแตนซ์อนุกรม

θ_{sh} คือ มุมเฟสของแอดมิตแตนซ์ขนาน

δ_i คือ มุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่บัส i

δ_j คือ มุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่บัส j

หากเครื่องมือวัดถูกติดตั้งที่ทุก ๆ 3 บัสและสายส่งทั้งหมดในระบบไฟฟ้ากำลังสมการการวัดที่เป็นไปได้ทั้งหมดของแรงดันไฟฟ้าที่บัสและกำลังที่ไหลในสายส่ง(ทุกๆบัสและทุกสายส่ง) จะต้องถูกจัดรูปสมการที่ (14) เพื่อนำไปใช้ในการประมาณค่าสถานะ อย่างไรก็ตามการติดตั้งเครื่องมือวัดที่ทุกตำแหน่งที่เป็นไปได้จะต้องลงทุนสูง อีกทั้งยังเป็นการติดตั้งเครื่องมือวัดที่มากเกินไปจนความจำเป็นทั้งนี้เพราะสมการการวัดเพียง $2n-1$ สมการ ก็เพียงพอต่อการประมาณค่าตัวแปรสถานะแรงดันบัสทั้งหมดแล้ว [7]

3. วิธีการหาคำตอบของการประมาณค่าสถานะ

การประมาณสถานะโดยส่วนมากจะใช้ค่าจากเครื่องมือวัดที่มากกว่าหนึ่งค่าเพื่อที่จะหาค่าสถานะของการประมาณสถานะได้ จากสมการที่ (1) เป็นค่าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดหลายค่า ซึ่งจะดูตัวแปรที่มีผลต่อการวิเคราะห์ในระบบ ซึ่งจะได้สมการดังนี้

$$\min J(X) = \sum_{i=1}^{Nm} \left[\frac{(Z_i - f_i(X))^2}{\sigma_i^2} \right] \quad (15)$$

เมื่อ $J(x)$ คือ ผลที่เหลือจากการวัด

i คือ ลำดับการวัด

N_m คือ จำนวนการวัด

σ_i^2 คือ ค่าแปรปรวนที่บัส i

i การประมาณสถานะจำนวนตัวแปรสถานะ N_s ตัว จะต้องอาศัยค่าจากการวัด และ N_m ค่า ซึ่งจะได้สมการดังนี้

$$\min J(x_1, x_2, \dots, x_{N_s}) = \sum_{i=1}^{Nm} \left[\frac{(Z_i - f_i(x_1, x_2, \dots, x_{N_s}))^2}{\sigma_i^2} \right] \quad (16)$$

โดยทั่วไปตัวแปรสถานะจะมีจำนวนมากกว่าหนึ่ง ดังนั้นจะต้องจัดให้อยู่ในรูปที่ง่ายในการวิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งสามารถจัดให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ดังนี้

$$f_i(x) = f_i(x_1, x_2, \dots, x_{N_s}) \quad (17)$$

$$f(x) = \begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \\ \vdots \\ f_{N_m}(x) \end{bmatrix} = h(x) \quad (18)$$

เมื่อ $h(x)$ คือ เมทริกซ์ค่าสัมประสิทธิ์ของเมตริก $f(x)$

h_{iN_s} คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชัน $f(x)$

N_m คือ จำนวนครั้งของการวัด

N_s คือ ตัวแปรสถานะที่ไม่ทราบค่าที่ต้องประมาณค่า

$$Z = \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ \vdots \\ Z_3 \end{bmatrix} \quad (19)$$

เมื่อ Z คือ เมทริกซ์ของค่าที่วัดจากสมการที่ (19) จัดให้อยู่ในรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

$$J(x) = [z - f(x)]^T R^{-1} [z - f(x)] \quad (20)$$

$$R = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{N_m}^2 \end{bmatrix} \quad (21)$$

แทนสมการที่ (20) ลงในสมการที่ (21) จะได้สมการใหม่ดังนี้

$$\min [z - h(x)]^T R^{-1} [z - h(x)] \quad (22)$$

จากสมการ (22) R คือ ค่าความผิดพลาดจากการวัด (Measurement Covariance) โดยให้ R เป็นเมทริกซ์หนึ่ง หน่วย ซึ่งสามารถหาคำตอบโดยการทำซ้ำจากสมการดังนี้

$$\Delta x = G^{-1} H^T (x^k) R^{-1} [z - h(x^k)] \quad (23)$$

เมื่อ $G = H^T (x^k) R^{-1} H(x^k) \quad (24)$

ซึ่งการหาคำตอบของ x รอบใหม่เป็น

$$x^{k+1} = x^k + \Delta x \quad (25)$$

เมื่อ H คือ จาโคเบียนเมตริก
 $H(x^k)$ คือ เมตริกจาโคเบียนของ $h(x^k)$
 G คือ Gain Matrix
 k คือ จำนวนรอบการวนซ้ำ
 x^k คือ คำตอบของ x ในรอบที่ k

ในการประมาณค่าสถานะใด ๆ ความถูกต้องของการประมาณค่าจะขึ้นอยู่กับเพียงพอของข้อมูลระหว่างจำนวนตัวแปรสถานะที่ต้องการประมาณค่า (N_s) กับจำนวนข้อมูลที่วัดได้จากเครื่องมือวัด (N_m) หากจำนวนข้อมูลทั้งสองมีความเพียงพอต่อการวิเคราะห์ จะส่งผลให้การวิเคราะห์มีความถูกต้องแม่นยำ แต่ถ้าจำนวนข้อมูลทั้งสองนั้นไม่เพียงพอต่อการวิเคราะห์ จะทำให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่ผิดพลาดซึ่งส่งผลโดยตรงกับการประมาณค่าสถานะ สามารถแบ่งการตรวจสอบความเพียงพอได้ 3 กรณี ดังนี้

จากวิธีการหาค่าของการประมาณสถานะในระบบไฟฟ้า ฟังก์ชันจะมีผลเป็นอย่างมากสำหรับการคำนวณหาค่าที่ออกมาได้ เพราะฟังก์ชัน เป็นสมการการวัด ซึ่งได้มาจากการวางตำแหน่งของเครื่องวัดในระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งในระบบของการวัดที่ดีจะช่วยให้ได้ค่าของการประมาณสถานะและค่าจริงของระบบไฟฟ้ากำลังที่ได้มามีค่าเท่ากันหรือใกล้เคียงกัน [8]

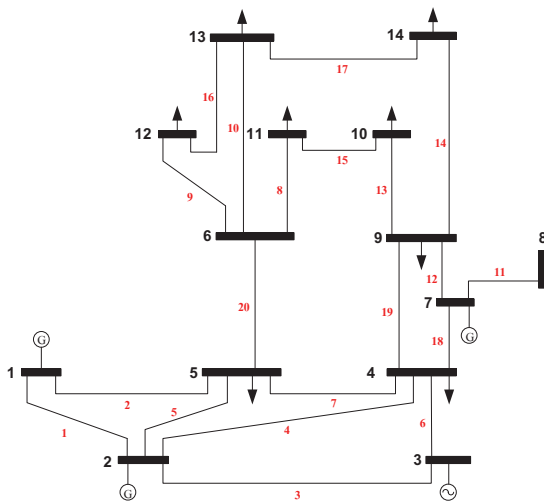
ตารางที่ 1 ความเพียงพอของข้อมูลระหว่างจำนวนตัวแปรสถานะที่ต้องการประมาณค่า (N_s) กับจำนวนข้อมูลที่วัดได้จากเครื่องมือวัด (N_m)

เงื่อนไข	ผลที่ได้
1. ($N_s < N_m$)	มีข้อมูลที่วัดได้จากเครื่องมือวัด จำนวนมากเกินความจำเป็น ดังนั้นหากเครื่องวัดบางตัวเสียจะส่งผลถึงความถูกต้องในการประมาณค่าได้
2. ($N_s = N_m$)	การวัดผลในการประมาณค่าสำหรับกรณีนี้จะดีที่สุด เนื่องจากจำนวนของข้อมูลนั้นมีจำนวนที่เพียงพอต่อการประมาณค่าสถานะ
3. ($N_s > N_m$)	มีจำนวนข้อมูลที่ไม่เพียงพอต่อการประมาณค่าสถานะ ส่งผลจากการประมาณค่าจะแย่ที่สุด ผลที่ได้จะมีความผิดพลาดสูง

4. การหาตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดด้วยวิธีการเชิงพันธุกรรม

บทความนี้เป็นการประมาณค่าสถานะของเครื่องมือวัดสำหรับระบบไฟฟ้า ซึ่งในบทนี้จะเป็นการนำเอาโปรแกรม MATLAB มาประมาณค่าสถานะของระบบไฟฟ้า IEEE 14 บัส และจะทำการวิเคราะห์ผลกระทบที่สามารถเกิดขึ้นได้ที่มีผลต่อการประมาณค่าสถานะของเครื่องมือสำหรับระบบไฟฟ้า เช่น การชำรุด การสูญเสียและการอ่านข้อมูลที่ผิดพลาดของเครื่องมือวัดในระบบไฟฟ้า ด้วยเทคนิควิธีเชิงพันธุกรรมในการกำหนดตำแหน่งเครื่องมือวัด [9]

ระบบที่ได้นำมาใช้ในการทำบทความ คือ ระบบของ IEEE 14 บัส ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยการนำข้อมูลต่างๆ ของระบบไฟฟ้ามาใช้ในการเขียนโปรแกรมใน MATLAB เพื่อหาค่าประมาณสถานะของเครื่องมือวัด ซึ่งมีขั้นตอนการทำงานดังนี้



รูปที่ 3 ระบบทดสอบ IEEE 14 บัส

การหาตำแหน่งการติดตั้งเครื่องวัดโดยใช้วิธีเทคนิคเชิงพันธุกรรมในการสุ่มเลือกหาบัสที่เหมาะสมที่สุดที่สามารถวัดค่าพารามิเตอร์ได้มีประสิทธิภาพดีที่สุดโดยจะมีค่าที่ใช้เป็นค่าพารามิเตอร์คือจำนวนบัสข้อมูลการเชื่อมต่อระหว่างบัสของสายส่งกำลังไฟฟ้าโดยไม่พิจารณาการต่อโหลดที่บัส หรือ ประเภทของโหลด เงื่อนไขที่ใช้ในการติดตั้งเครื่องมือวัดในระบบไฟฟ้า ต้องพิจารณาทุกตำแหน่งที่สามารถติดตั้งเครื่องมือวัดได้แทนจำนวนเครื่องมือวัดทั้งหมดที่ติดตั้งในระบบไฟฟ้า

$$\text{เครื่องมือวัดแรงดันที่โนด} = N \text{ ตำแหน่ง} \quad (26)$$

$$\text{เครื่องมือวัดกระแสเข้าสู่โนด} = N \text{ ตำแหน่ง} \quad (27)$$

เมื่อพิจารณาเครื่องมือวัดกระแสไหลในสายส่งไฟฟ้า ตำแหน่งที่สามารถติดตั้งได้ในระบบ คือทุกสายส่งไฟฟ้าที่เชื่อมต่อระหว่างบัส (L) แต่เนื่องจากสายส่งไฟฟ้าที่พิจารณาเป็นแบบ π ทำให้กระแสที่ไหลในสายส่งต้นทางและปลายทางมีค่าไม่เท่ากันดังนั้นจำนวนเครื่องมือวัดที่สามารถติดตั้งได้จึงสามารถติดตั้งได้ 2 ตำแหน่งคือที่ต้นทางและปลายทางสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (28)

$$\text{เครื่องมือวัดกระแสไหลในสาย} = 2L \text{ ตำแหน่ง} \quad (28)$$

จากสมการที่ (26) ถึง สมการที่ (28) สามารถแสดงจำนวนที่สามารถติดตั้งเครื่องมือวัดในระบบได้ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (29) ดังนี้

$$\text{จำนวนเครื่องมือวัด } M = 2N + 2L \quad (29)$$

การกำหนดฟังก์ชันต้องมีความสอดคล้องกับปัญหาที่ต้องพิจารณา โดยเป้าหมายของการประมาณค่านี้ต้องการค่าที่ต่ำที่สุดของจำนวนที่ติดตั้งของเครื่องมือวัดโดยมีเงื่อนไขที่ต้องพิจารณาคือการติดตั้งในตำแหน่งที่ดีที่สุดและต้องไม่มีมิเตอร์วิกฤตติดตั้งในระบบไฟฟ้า ดังสมการที่ (30)

$$\text{fitness} = (n - \text{rank}(\mathbf{H})) + \text{Abs.}((n+1) - M) + (CM \times n) \quad (30)$$

โดยที่ M คือ จำนวนเครื่องมือวัด n คือ จำนวนตัวแปรสถานะหรือจำนวนบัสในระบบไฟฟ้าที่พิจารณา H คือ เมทริกซ์การวัดที่สร้างขึ้นจากเครื่องมือวัดที่ติดตั้งในระบบ CM คือ มิเตอร์วิกฤต ซึ่งวิธีการดำเนินการของวิธีการเชิงพันธุกรรม GA ได้แสดงลำดับขั้นตอนของการทำงานในการทำการเลือกหาตำแหน่งของบัสที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพมากที่สุด สำหรับการติดตั้งเครื่องมือในระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อที่จะให้การวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ครอบคลุมการวัดทุกตำแหน่ง

กำหนดค่าพารามิเตอร์ของเทคนิควิธีเชิงพันธุกรรม โดยใช้พื้นฐานแทนค่าเครื่องมือวัดด้วยเลขฐานสองเพื่อใช้ในการกำหนดตำแหน่งที่จะติดตั้งเครื่องมือวัดจากนั้นก็กำหนดตำแหน่งของการติดตั้งเครื่องมือวัดจำนวนในตำแหน่งของบัสที่ต้องการ คือ

ขั้นตอนที่ 1 รับข้อมูลบัสของแบบจำลองของระบบไฟฟ้าที่ต้องการพิจารณา

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดตำแหน่งที่สามารถติดตั้งเครื่องมือวัดในระบบ ตามสมการที่ (29)

ขั้นตอนที่ 3 กำหนดค่าเริ่มต้นของประชากร ด้วยขนาดประชากร pop=25 รอบการค้นหาคำตอบ gens=50 มีการปรับเปลี่ยนยีนภายในโครโมโซมเดียวกันด้วยความน่าจะเป็นเท่ากับ mu= 0.02

ขั้นตอนที่ 4 ทำการสุ่มสร้างประชากรเริ่มต้นที่จำนวนเท่ากับ $2N + 2L$ โดยแทนเครื่องมือวัดแต่ละตำแหน่งด้วย “0” คือไม่ได้มีการ

ติดตั้งเครื่องมือวัด และ “1” คือมีการติดตั้งเครื่องมือวัด

ขั้นตอนที่ 5 ทำการคำนวณหาค่าฟิตเนสฟังก์ชัน

ขั้นตอนที่ 6 เลือกโครโมโซมต้นแบบจากรุ่นต้นฉบับหรือรุ่นพ่อแม่ ใช้ความน่าจะเป็นในการพิจารณาจากค่าที่ได้จากฟิตเนสฟังก์ชัน

ขั้นตอนที่ 7 เมื่อจำนวนรอบของการคำนวณและการคัดเลือกมีค่ามากกว่าค่าที่กำหนดไว้ และใช้วิธีเชิงพันธุกรรม ดำเนินการคัดเลือกสายพันธุ์ การครอสโอเวอร์ และการมิวเทชันแล้วดำเนินการปรับปรุงข้อมูลไปเรื่อยๆ จนกว่าจะได้ค่าที่เหมาะสม

ขั้นตอนที่ 8 จบการทำงาน

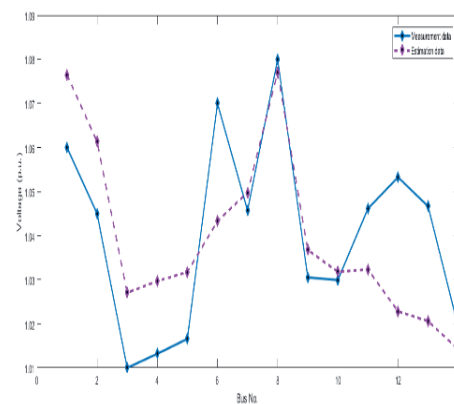
5. ผลการทดสอบการติดตั้งเครื่องมือวัดด้วยวิธีการเชิงพันธุกรรม

การวิเคราะห์ความสามารถที่สังเกตได้และการหายไปของเครื่องมือวัดโดยใช้เทคนิคการประมาณค่าสถานะนั้นได้ทำการจำลอง ด้วยระบบทดสอบมาตรฐาน IEEE14 บัส โดยเครื่องมือวัดที่ติดตั้งในระบบไฟฟ้าสามารถกำหนดชนิดเครื่องมือวัดประกอบไปด้วยเครื่องมือวัดขนาดแรงดันไฟฟ้าที่บัส (V) เครื่องวัดกำลังไฟฟ้าเข้าสู่บัส (P_i, Q_i) เครื่องวัดกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสาย (P_{ij}, Q_{ij}) ตามลำดับ เมื่อได้พิจารณาค่า MAPE ที่ดีที่สุดแล้ว คือ 1.3624 หลังจากนั้นก็ได้ทำการจำลองกรณีศึกษาทั้งหมด 10 กรณีและได้ทำการติดตั้งเครื่องมือวัดไปในแต่ละตำแหน่งเพื่อให้สามารถวัดค่าพารามิเตอร์ในระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพที่สุด

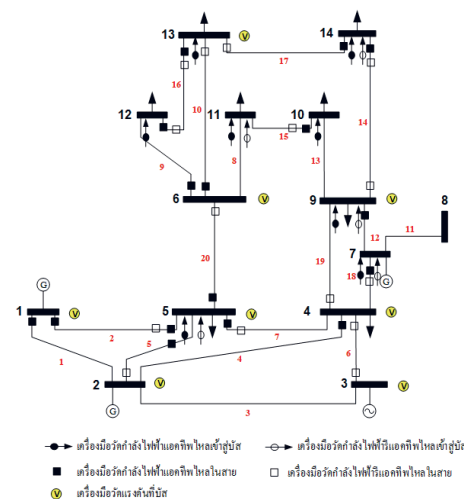
จากตารางที่ 2 ทำการจำลองทั้งหมด 10 กรณี โดยทำการติดตั้งเครื่องมือวัดทั้งหมด ด้วยวิธีการเชิงพันธุกรรมในการติดตั้งมิเตอร์แต่ละตำแหน่ง แสดงให้เห็นว่าการติดตั้งเครื่องมือวัดด้วยวิธีเชิงพันธุกรรมสามารถลดจำนวนที่ติดตั้งเครื่องมือลงไปในระบบไฟฟ้าได้และยังสามารถมีค่าประสิทธิภาพดีที่สุดเมื่อเทียบกับจำนวนเครื่องมือวัดทั้งระบบได้

ตารางที่ 2 การทดสอบการติดตั้งเครื่องมือวัดในระบบไฟฟ้า

กรณี	จำนวนเครื่องมือวัด					ผลรวม
	V	P_i	Q_i	P_{ij}	Q_{ij}	
1	8	8	6	21	24	67
2	8	4	10	19	16	57
3	9	7	6	23	19	64
4	5	9	9	19	18	60
5	8	9	5	17	17	56
6	8	8	8	19	19	62
7	12	7	6	21	17	63
8	9	4	8	23	19	63
9	6	10	9	19	23	67
10	8	10	8	25	20	71



รูปที่ 4 กรณีศึกษาที่ 5 จำนวนมิเตอร์ 56 ตัว



จากการศึกษาทั้งหมด 10 กรณี จะพบว่าในกรณีที่ 5 ในตารางที่ 2 เครื่องมือวัดที่สามารถติดตั้งได้ในระบบไฟฟ้าโดยมีจำนวนน้อยที่สุดนั้น อยู่ที่ 56 ตัวจากระบบทั้งหมด 122 ตัว ซึ่งค่าแรงดันแต่ละบัสจากการประมาณค่าเทียบกับการวัดค่าจริงนั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ค่าแรงดันนี้ไม่ได้พิจารณาமிเตอร์วิกฤตและมิเตอร์อ่านค่าผิดพลาด จากผลการประมาณการเบื้องต้นจากเครื่องมือวัดที่ติดตั้งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานจริงและต้องเพิ่มการพิจารณาความเหมาะสมในเครื่องมือวัดแต่ละชนิดประกอบการออกแบบของกรณีที่ 5 ดังรูปที่ 4 และจากรูปที่ 5 ได้ทำการติดตั้งเครื่องมือวัดแต่ละประเภทไปในระบบพื้นฐาน IEEE 14 บัส เพื่อได้แสดงให้เห็นถึงตำแหน่งของเครื่องมือที่ติดตั้งในแต่ละตำแหน่งที่สามารถวัดค่าพารามิเตอร์ของระบบได้อย่างครบถ้วน

6. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอวิธีการประมาณค่าสถานะของระบบไฟฟ้ากำลังโดยการจำลองบนระบบ IEEE 14 บัสแทนระบบไฟฟ้าโดยใช้เทคนิควิธีการเชิงพันธุกรรม เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการระบุตำแหน่งจุดติดตั้งเครื่องมือวัดที่เหมาะสมในระบบไฟฟ้า และทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้า เทคนิควิธีการประมาณค่าสถานะได้นำมาใช้ในการประมาณค่าที่ยังไม่ทราบค่าโดยอาศัยข้อมูลพื้นฐานเพียงบางส่วน ทำให้ไม่ต้องวัดค่าต่าง ๆ ทั้งหมด เช่น ขนาดของแรงดันที่บัส กำลังไฟฟ้าที่บัส และกำลังไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง สำหรับข้อดีของการประมาณค่าสถานะคือ เมื่อข้อมูลที่ได้จากการวัดเกิดข้อผิดพลาด การสูญหายของข้อมูลบางส่วน เมื่อใช้วิธีการประมาณค่าสถานะจะสามารถทราบถึงค่าที่ประมาณที่ดีที่สุดได้ นอกจากนี้วิธีการประมาณค่าสถานะยังอาจตรวจจับและบ่งชี้ว่าเครื่องมือวัดตัวใดที่มีปัญหาในระบบไฟฟ้าที่ไม่สามารถอ่านข้อมูลได้อย่างถูกต้อง การที่จะให้คำตอบจากการประมาณค่าสถานะให้ได้ค่าใกล้เคียงกับค่าจริงในระบบ IEEE 14 บัสจะต้องมีการปรับปรุงระบบการวัดให้จำนวนข้อมูลที่ได้จากการวัดมีค่าเท่ากับจำนวนตัวแปรสถานะ เนื่องจากจำนวนครั้งของการวัดมีจำนวนที่เพียงพอต่อการประมาณค่าสถานะ และควรมีการปรับปรุงระบบของการวัด โดยเลือกการวางตำแหน่งของเครื่องมือวัดให้เหมาะสมและปริมาณของเครื่องมือวัดที่พอเพียงต่อการ

วัดค่าพารามิเตอร์ ซึ่งจากวิธีการเชิงพันธุกรรมจะเป็นตัวดำเนินการสุ่มเลือกหาตำแหน่งของบัสที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการติดตั้งเครื่องมือวัดซึ่งจากวิธีดำเนินการของวิธีการพันธุกรรมสามารถที่จะลดจำนวนของการติดตั้งเครื่องมือวัดจำนวน 56 ตัว แทนที่จะติดตั้งเครื่องมือวัด 122 ตัว และถ้าพิจารณาเฉพาะเครื่องมือวัดอัตโนมัติ AMR สามารถลดเครื่องมือวัดลงได้เหลือ 13 ตัว จากทั้งหมด 42 ตัว ซึ่งตำแหน่งที่ทำการติดตั้งเครื่องมือวัดแต่ละบัสก็แสดงให้เห็นไว้ในการทดลองการติดตั้งแล้วผลที่ได้สามารถที่จะวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในระบบได้ ซึ่งจากวิธีการเชิงพันธุกรรม ที่ใช้ในการระบุตำแหน่งของการติดตั้งเครื่องมือวัด เป็นวิธีการที่ดีที่ช่วยลดจำนวนเครื่องมือวัดลงได้มากและยังมีประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับการวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้า

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Molina-Moreno I, Medina-Rios A, Cisneros-Magania R, Anaya-Lara O. A methodology for transient state estimation based on numerical derivatives optimal monitoring and filtered measurements. IEEE Transactions on Power Delivery. 2017 9 Aug. 33(4):1-8.
- [2] Abur A. Observability and dynamic state estimation. Proceeding of IEEE Power and Energy Society General Meeting; 2015 July. p.1-5.
- [3] Kongjeen Y, Inrawong P, Buayai K, Kerdchuen T. Key cutting algorithm application to measurement placement for power system state estimation. energy Procedia. 2013. 34:142-47.
- [4] Kumar A, Das B. Genetic algorithm-based meter placement for static estimation of harmonic sources. IEEE Transactions on Power Delivery. 2005 May. 20(2): 1088-96.
- [5] Kerdchuen T, Ongsakul W, Boonchaim P. Improving of measurement system for state estimation. EECON30: Proceeding of Electrical Engineering Conference.

- 2007 Oct 25-26. Felix Riverkwai, Kanchanaburi. p. 1-4. (in Thai)
- [6] D'Antona G, Muscas C, Sulis S. State estimation for the localization of harmonic sources in electric distribution systems. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2009 June. 58(5): 1462-70.
 - [7] Asprou M, Kyriakides E, Albu M. The effect of variable weights in a WLS state. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2014 June. 63(6):1484-95.
 - [8] Ghiocel S G, Chow J H, Stefopoulos G, Fardanesh B, Maragal D, Bertagnolli D B. Phasor measurement based state estimation for synchro phasor data quality improvement and power transfer interface monitoring. IEEE Transactions on Power System. 2014 March. 29(2): 881-8.
 - [9] Qin J. A new optimization algorithms and Its application key cutting algorithms. GSIS2009: Proceeding of 2009 IEEE International Conference on Gray Systems and Intelligent Services. 2009 Nov 10-12. Nanjing, China. p. 1-6.

การวิเคราะห์คุณลักษณะและประสิทธิภาพการกำจัดสีของเถ้าลอยที่มีการผสมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงไททาเนียมไดออกไซด์

บุญยาพร สงขนาม¹, อำพล วงศ์ษา², วันชัย สะตะ³, กิติโรจน์ หวันตาหลา^{4*}
boonyarporn.s@gmail.com¹, ampowo@kku.ac.th², vancsa@kku.ac.th³, kitirote@kku.ac.th^{4*}

^{1,4*} ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

² ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

^{3,4*} ศูนย์การจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย มหาวิทยาลัยขอนแก่น

⁴ ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย (ศสอ.) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Received	: 4-Nov-2019
Revised	: 4-Dec-2019
Accepted	: 9-Jan-2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการเจือตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (TiO₂-P25) สัดส่วน 0% 5% 10% และ 15% โดยน้ำหนักในเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าถ่านหินแม่เมาะ (x%TiO₂/FA) ด้วยวิธีการผสมเชิงกล เพื่อนำไปผลิตเป็นจีโอพอลิเมอร์ตัวอย่างผสมถูกวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยาดัวยเทคนิค X-ray diffraction (XRD), N₂ adsorption-desorption และ UV-vis diffuse reflectance spectroscopy (UV-DRS) และศึกษาประสิทธิภาพในการย่อยสลายสีของรีแอคทีฟเรด 120 (RR120) ภายใต้รังสีอัลตราไวโอเล็ต ผลการทดลองพบว่าเมื่อปริมาณของตัวเร่ง TiO₂-P25 เพิ่มขึ้น ความสูงของอนุภาคและรูพรุนเพิ่มขึ้น และพื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุนมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ค่าช่องว่างพลังงานของตัวอย่างผสมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงที่เพิ่มขึ้นเช่นกันจาก 2.46 ไปเป็น 3.05 eV สำหรับการศึกษาการย่อยสลายของสีของรีแอคทีฟเรด 120 ได้ทำการศึกษาการย่อยสลายสีของรีแอคทีฟเรด 120 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 ppm ค่า pH เท่ากับ 6 ผลพบว่าการย่อยสลายของสีของรีแอคทีฟเรด 120 นาฬิกาของตัวอย่างผสม 0% 5% 10% และ 15% มีค่าเท่ากับ 28.78% 51.23% 72.65% และ 82.74% ตามลำดับ แต่ตัวเร่ง TiO₂-P25 สามารถย่อยสลายสีของรีแอคทีฟเรด 120 ได้ 99.76% ผลการทดลองสามารถยืนยันได้ว่าเมื่อนำตัวอย่างผสมเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าถ่านหินแม่เมาะกับตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง (TiO₂-P25) เป็นวัสดุตั้งต้นไปผลิตเป็นจีโอพอลิเมอร์จะมีความสามารถในการย่อยสลายสีของรีแอคทีฟเรด 120 ได้

คำสำคัญ: เถ้าลอย ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง ไททาเนียมไดออกไซด์ การย่อยสลายสีของรีแอคทีฟเรด 120

Characterizations and Its Efficiency on Dye Removal of Fly ash Mixed with Titanium Dioxide Photocatalyst

Boonyarporn Songkanam¹, Ampol Wongsat², Vanchai Sata³, Kitirote Wantala^{4*}
boonyarporn.s@gmail.com¹, ampowo@kku.ac.th², vancsa@kku.ac.th³, kitirote@kku.ac.th^{4*}

^{1,4*} Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University

² Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University

^{3,4*} Research Center for Environmental and Hazardous Substance Management (EHSM), Khon Kaen University

⁴ Center of Excellence on Hazardous Substance Management (HSM), Chulalongkorn University

Received	: 4-Nov-2019
Revised	: 4-Dec-2019
Accepted	: 9-Jan-2020

Abstract

The aim of this work was to mix titanium dioxide (TiO₂-P25) photocatalyst in contents 0%, 5%, 10% and 15% by weight with coal fly ash from Mae-Moh coal power plant (x%TiO₂/FA) mixed by mechanical method for depolluting geo-polymer production. The mixed samples were characterized by X-ray diffraction (XRD), N₂ adsorption-desorption, and UV-vis diffuse reflectance spectroscopy (UV-DRS) and studied the Reactive red 120 (RR120) dye degradation efficiency under UV irradiation. The results were found that the crystallinity of anatase and rutile phases increased with increasing TiO₂-P25 contents. The specific surface area and pore size increased as well. In addition, the energy band-gap of mixed samples increased from 2.46 to 3.05 eV with increasing photocatalyst contents. Dye degradation studies were tested at initial RR120 concentration 20 ppm and pH 6. The results were found that at 120 min of reaction time, the percent removal of 0%, 5%, 10% and 15% samples were 28.78%, 51.23%, 72.65% and 82.74%, respectively. However, TiO₂-P25 photocatalyst can degrade dye about 99.76%. This research can confirm that the mixed samples between coal fly ash from Mae-Moh coal power plant and TiO₂ can be used as raw material to produce depolluting geo-polymer for dye degradation.

Keywords: fly ash, photocatalysis, titanium dioxide, dye degradation

1. บทนำ

ในปัจจุบันสีย้อมถูกใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมสิ่งทอเพื่อให้สีเหล่านั้นมีความสวยงาม แต่พบว่าในอุตสาหกรรมสิ่งทอนั้นมีปริมาณการใช้น้ำเป็นจำนวนมาก จากประกาศของกรมควบคุมมลพิษ กำหนดค่ามาตรฐานจากน้ำทิ้งจากกระบวนการฟอกย้อมน้ำที่ใช้มีค่า BOD ไม่เกิน 60 มิลลิกรัมต่อลิตร [1] หากปล่อยน้ำที่ค่าเกินมาตรฐานลงสู่แหล่งน้ำจะส่งผลเสียต่อระบบนิเวศ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการบำบัดน้ำเสียเหล่านั้นก่อนปล่อยออกสู่ระบบนิเวศ การบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากสีย้อมนั้นสามารถทำได้หลากหลายวิธี ด้วยเทคโนโลยีทางกายภาพและทางเคมี เช่น การตกตะกอน [2] การแลกเปลี่ยนประจุ [3] การดูดซับด้วยผงถ่าน [4] การบำบัดทางชีววิทยา [5] เทคโนโลยีเยื่อแผ่น [6] และนาโนฟิลเตรชัน [7] นอกจากนี้ยังนิยมใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากมีคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยามีความเสถียรและราคาถูก Gupta และคณะ ได้ศึกษาการย่อยสลายของสีย้อมเอโซ (Azo dye) โดยใช้ TiO_2 ภายใต้รังสีอัลตราไวโอเลต พบว่าสามารถย่อยสลายสีย้อมได้ 38% ภายในเวลา 100 นาที [8] แต่ผลการศึกษาข้างต้นเห็นได้ว่าการใช้ TiO_2 เพียงอย่างเดียวนั้นเกิดการย่อยสลายได้เพียงเล็กน้อยและยังมีข้อจำกัดในแยกตัวเร่งปฏิกิริยานำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ ดังนั้นจึงมีงานวิจัยที่ได้ศึกษาการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงลงในตัวรองรับเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสีย Shavisi และคณะ ทำการศึกษาการย่อยสลายของแอมโมเนียของน้ำเสียที่มาจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี โดยการเติม TiO_2 ลงในเม็ดดินเหนียวเผาผลาญและทำปฏิกิริยาภายใต้แสงอาทิตย์ พบว่าสามารถกำจัดแอมโมเนียได้ถึง 89% [9] Zhao และคณะ ศึกษาการย่อยสลายของสีเมทิลินบลูโดยใช้แกรฟีนที่มีการเติมของ TiO_2 ในสัดส่วนที่แตกต่างกัน โดยทำการศึกษาสัดส่วนของแกรฟีนต่อ TiO_2 ที่ 1:2 1:3 1:4 และทำปฏิกิริยาภายใต้รังสีอัลตราไวโอเลต พบว่าสัดส่วนแกรฟีนต่อ TiO_2 ที่ 1:3 สามารถย่อยสลายสีย้อมเมทิลินบลูได้ 88% ภายในเวลาน้อยกว่า 100 นาที [10] และ Zhang และคณะ ศึกษาการย่อยสลายสีเมทิลออเรนจ์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่มีสัดส่วนการเติมของ TiO_2 ที่ 0-10% โดยน้ำหนัก พบว่าการเติม TiO_2 ลงในถ่านกัมมันต์ที่ 10% สามารถย่อยสลายเมทิลออเรนจ์ได้ถึง 88.4% [11]

งานวิจัยข้างต้นพบว่าเมื่อมีการเติม TiO_2 บนตัวรองรับทำให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสูงขึ้น นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่นำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้เป็นตัวรองรับ เช่น แก้วลอย [12] ซีโอไลต์ [13] แกลบ [14] เป็นต้น ข้อมูลของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย พบว่า แก้วลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ของถ่านหินลิกไนต์ มีปริมาณถึง 6,000 ตันต่อวัน [15] โดยส่วนใหญ่แล้วแก้วลอยนั้นถูกนำไปใช้ประโยชน์ในทางด้านวิศวกรรมเพื่อใช้แทนที่ในก่อสร้างโดยใช้คอนกรีตแล้วนั้นยังพบว่าแก้วลอยสามารถนำมาใช้เป็นตัวรองรับเพื่อใช้ในการบำบัดมลพิษ งานวิจัยของ Ökte และคณะ ที่ศึกษาการกำจัดเมทิลออเรนจ์โดยมีการสังเคราะห์ ZnO แบบ in situ บนแก้วลอย พบว่าสามารถย่อยสลายสีเมทิลออเรนจ์ได้ถึง 70% [16] Visa และคณะ ได้ทำการสังเคราะห์วัสดุคอมโพสิตของแก้วลอยและ TiO_2 โดยใช้วิธีการ mild hydrothermal เพื่อใช้ในการกำจัดสารละลายที่ประกอบไปด้วยโลหะหนัก (Cu^{2+}) และสีย้อมเมทิลออเรนจ์ พบว่าการกำจัดของ Cu^{2+} และเมทิลออเรนจ์มีค่าสูงสุดที่ 85% และ 25% ที่เวลา 350 นาที ตามลำดับ [17] Shi และคณะ ได้ศึกษาการย่อยสลายของฟีนอลด้วยวิธีการย่อยสลายด้วยแสงโดยใช้ TiO_2/FA ที่สังเคราะห์ด้วยวิธี sol-gel adsorption พบว่าเมื่อทำปฏิกิริยาโดยใช้ TiO_2/FA ภายใต้รังสีอัลตราไวโอเลต สามารถย่อยสลายฟีนอลได้ 96% [18] Saud และคณะ ได้ศึกษาการกำจัดสีย้อมเมทิลินบลูโดยใช้เส้นใยนาโน FA/TiO_2 ในการกำจัดของสีเมทิลินบลู สามารถสลายสีย้อมได้ทั้งหมดที่เวลา 120 นาทีเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เส้นใย TiO_2 เพียงอย่างเดียวที่สามารถสลายสีย้อมได้เพียง 70% [19] ซึ่งเป็นผลมาจากการดูดซับสีย้อมบนแก้วลอยและความสามารถในการทำปฏิกิริยาเชิงแสงของ TiO_2 การศึกษาข้างต้นจะเห็นได้ว่าเมื่อมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงร่วมกับแก้วลอยโดยการสังเคราะห์ด้วยวิธีต่างๆ สามารถช่วยในการบำบัดน้ำเสีย แต่เนื่องจากการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่ยุ่งยาก สังเคราะห์ที่อุณหภูมิสูงและใช้เวลานาน ยังพบว่าปริมาณของ TiO_2 ที่เติมลงในตัวรองรับที่แตกต่างกันนั้นมีผลต่อการบำบัด นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ได้นำ TiO_2 มาประยุกต์ใช้กับซีเมนต์ จีโอพอลิเมอร์ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและพบว่ายังสามารถย่อยสลายมลพิษได้ ยกตัวอย่าง Ganji และคณะ ได้ทำการศึกษากำจัดสีย้อมโดยใช้ซีเมนต์ที่มีการเติม TiO_2 ในปริมาณ 1% 5% และ 10% โดย

น้ำหนัก ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสี
ย้อมเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของ TiO_2 เพิ่มขึ้น [20] และ
Strini และคณะ ได้ทำการศึกษการย่อยสลายไนตริก
ออกไซด์ด้วยจีโอพอลิเมอร์ที่ผลิตจากเถ้าลอยและดิน
ขาวเผาโดยการเติม TiO_2 ในปริมาณ 3% โดยน้ำหนัก
ผลการศึกษาพบว่าจีโอพอลิเมอร์เถ้าลอยนั้นมีอัตรา
การย่อยสลายมากกว่าจีโอพอลิเมอร์ดินขาวเผา
[21] ยิ่งไปกว่านั้น Yang และคณะ ศึกษาการย่อยสลาย
สีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้จีโอพอลิเมอร์ที่มีปริมาณ TiO_2
10% โดยน้ำหนัก ภายใต้รังสีอัลตราไวโอเลต ผล
การศึกษาพบว่าจีโอพอลิเมอร์ที่มีการเติม TiO_2
สามารถย่อยสลายสีย้อมได้ภายในเวลา 50 นาที [22]
ผลข้างต้นแสดงให้เห็นได้ว่าการผสมตัวเร่งปฏิกิริยาเชิง
แสงในจีโอพอลิเมอร์ที่ผลิตจากเถ้าลอยมีความสามารถ
ในการย่อยสลายมลพิษได้

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อเตรียมวัสดุ
ตั้งต้นในการผลิตจีโอพอลิเมอร์ โดยศึกษาการย่อย
สลายสีย้อมโดยใช้เถ้าลอยที่มีสัดส่วนของ TiO_2 -P25 ที่
0% 5% 10% และ 15% โดยน้ำหนัก ด้วยวิธีการผสม
เชิงกล โดยใช้เครื่องบดแบบลูกบอลและใช้สารละลายสี
ย้อม RR120 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 ppm ค่า pH
เท่ากับ 6 ภายใต้รังสีอัลตราไวโอเลต โดยตัวเร่ง
ปฏิกิริยาได้นำไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและ
เคมีโดยเครื่อง X-Ray diffractometer, N_2 adsorption-
desorption, UV-vis diffuse reflectance spectros-
copy และวิเคราะห์ความเข้มข้นของสีย้อมหลังทำ
ปฏิกิริยาภายใต้รังสีอัลตราไวโอเลต ด้วยเครื่อง UV-vis
spectrophotometer ซึ่งการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา
โดยใช้เครื่องบดแบบลูกบอลเป็นวิธีง่ายและสะดวก ใน
อนาคตจะสามารถนำไปสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จาก
เถ้าลอยซึ่งมีคุณสมบัติในการย่อยสลายมลพิษได้อีกด้วย

2. วิธีการวิจัย

2.1 สารเคมี

เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าถ่านหินแม่เมาะ จังหวัด
ลำปาง ประเทศไทย, Degussa P-25 (anatase 80%,
rutile 20%) (Aeroxide* TiO_2 -P25, Evonik, Japan),
สีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 (RR120) (Sigma life
science, India), HCl 37% (RCI Labscan
limited, india), NaOH (Loba chemie pvt.ltd,
India), น้ำปราศจากไอออน

2.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาและการ วิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยผสมเถ้าลอย
และ TiO_2 -P25 ที่สัดส่วน 0% 5% 10% และ 15%
โดยน้ำหนัก ทำการผสมโดยใช้เครื่องบดแบบลูกบอล
เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นนำไปวิเคราะห์โครงสร้าง
ของผลึกด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD, D8
Advance, Bruker BioSpin AG) ที่แรงดันไฟฟ้า 45 kV
และกระแสไฟฟ้า 40 mA โดยใช้ช่วง $2\theta = 10^\circ - 70^\circ$ ที่
ความยาวคลื่น $\lambda = 0.1514$ นาโนเมตร วิเคราะห์พื้นที่
ผิวและขนาดของรูพรุนด้วย N_2 adsorption-
desorption (ASAP2460, Micromeritics, USA) โดย
พื้นที่ผิวนำมาคำนวณจากวิธีของ Bräuer Emmett and
Teller (BET) และการกระจายตัวของขนาดรูพรุน
คำนวณจาก Barrett-Joyner-Halenda (BJH) วิเคราะห์
หาช่องว่างพลังงาน (E_g) ด้วยความสัมพันธ์ Tauc's
plot โดยใช้เทคนิค UV-vis diffuse reflectance
spectroscopy (UV-DRs, UV-3101PC, Shimadzu,
Japan) ในช่วงความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตร โดย
ใช้ BaSO_4 เป็นข้อมูลอ้างอิง

2.3 การทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัด ของสี RR120

การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดของ
สารละลายสีย้อม RR120 ที่สารละลายมีความเข้มข้น
20 ppm โดยปรับค่าความเป็นกรดต่างด้วย 0.1 M
HCl และ 0.1 M NaOH จนค่าความเป็นกรดต่างของ
สารละลายมีค่า pH เท่ากับ 6 และใช้ปริมาณของ
 TiO_2 -P25 ที่ 0.1 กรัม เท่ากันทุกชุดการทดลอง (TiO_2 -
P25 0.1 กรัม 5% TiO_2 /FA 2 กรัม 10% TiO_2 /FA 1
กรัม และ 15% TiO_2 /FA 0.67 กรัม) และเถ้าลอยที่
ไม่ได้ผสม TiO_2 -P25 ปริมาณ 2 กรัม ในสารละลายสี
ย้อม 500 มิลลิลิตร จากนั้นกวนผสมกันด้วยความเร็ว
350 รอบต่อนาทีในที่มีดเป็นเวลา 30 นาทีเพื่อให้เกิด
สภาวะสมดุลของการดูดซับและทำปฏิกิริยาภายใต้รังสี
อัลตราไวโอเลต (TL 18W, Philips) จำนวน 3 หลอด
เก็บตัวอย่างที่เวลา 0 10 20 30 45 60 90 และ 120
นาที ในปริมาตร 5 มิลลิลิตรและกรองด้วยตัวกรอง
ไนลอน 0.45 ไมครอนเมตร วิเคราะห์หาความเข้มข้นของ
RR120 ด้วย UV-vis spectrophotometer (SPECORD
200, Analytik Jena, Germany) โดยใช้ความยาวคลื่น

300–700 นาโนเมตร โดยการคำนวณการย่อยสลายของสีย้อมคำนวณได้จากสมการ

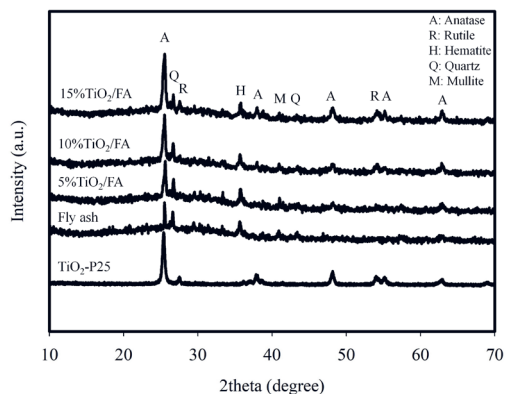
$$\% \text{ Removal} = \left(\frac{C_0 - C_t}{C_0} \right) \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี RR120 (mg/L),
 C_t คือ ความเข้มข้นของสีที่เวลาใดๆ (mg/L)

3. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

3.1 ผลวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยา

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยเครื่อง XRD ของตัวเร่ง TiO_2 -P25 และเถ้าลอยที่มีสัดส่วนของ TiO_2 -P25 ที่ 0% 5% 10% และ 15% โดยน้ำหนัก แสดงในรูปที่ 1 ผลการวิเคราะห์พบว่าโครงสร้างผลึกส่วนใหญ่ของเถ้าลอยนั้นประกอบไปด้วย Quartz (SiO_2) ($2\theta = 21.76^\circ, 43.3^\circ$), Hematite (Fe_2O_3) ($2\theta = 35.64^\circ$), Mullite (alumino silicate) ($2\theta = 40.84^\circ$) ตามลำดับ [23] และโครงสร้างผลึกของ TiO_2 พบอานาเทสเฟสที่ตำแหน่ง $2\theta = 25.4, 37.9, 48.2, 55.1, 62.87^\circ$ และรูไทน์เฟสที่ตำแหน่ง $2\theta = 27.4, 54.1^\circ$ ตามลำดับ [24]

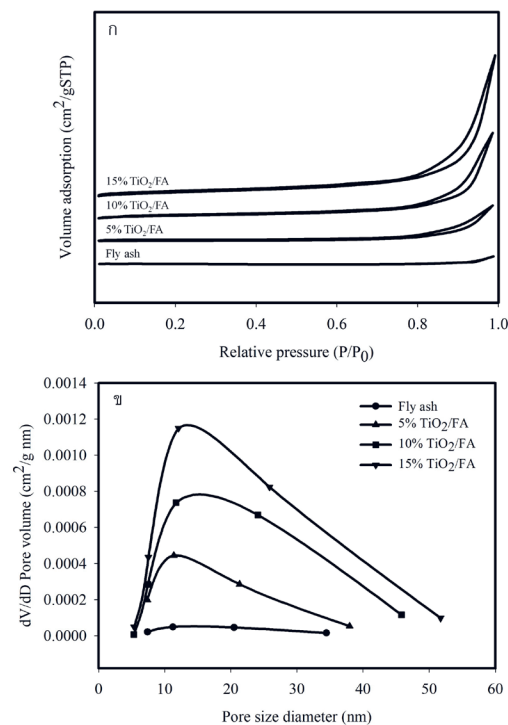


รูปที่ 1 โครงสร้างผลึกของ P25 และตัวอย่างผสม

ผลการวิเคราะห์เถ้าลอยที่มีสัดส่วนของ TiO_2 -P25 ที่ 0% 5% 10% และ 15% โดยน้ำหนัก พบว่า อานาเทสและรูไทน์เฟสมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีปริมาณของ TiO_2 -P25 ที่มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zuo และคณะที่พบว่าเมื่อมีการเติมของ TiO_2 ในไดอะทอมไมต์ อานาเทสเฟสในไดอะทอมไมต์จะสูงขึ้น [25] นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นได้ว่าถึงแม้มีการเพิ่มสัดส่วนของ TiO_2 -P25 ที่มีอยู่ในเถ้าลอยจะทำให้

มีอานาเทสและรูไทน์เฟสสูงขึ้นแต่โครงสร้างผลึกของเถ้าลอยนั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลง บ่งชี้ว่าการผสมของเถ้าลอยและ TiO_2 -P25 โดยใช้วิธีแบบลูกบอลนั้นไม่มีการทำลายโครงสร้างผลึกเดิมของเถ้าลอยและการผสมของเถ้าลอยและ TiO_2 -P25 ทำให้เกิดการกระจายตัวของ TiO_2 -P25 อย่างสม่ำเสมอ

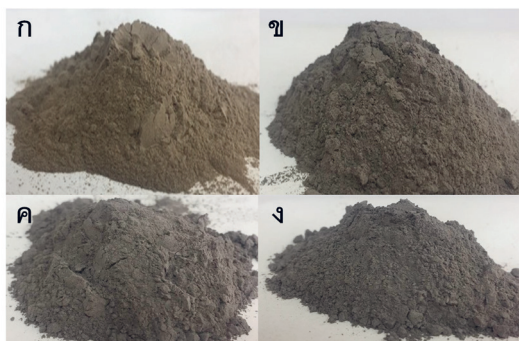
การวิเคราะห์พื้นผิวและปริมาณรูพรุนด้วยสมการ BET ของเถ้าลอยที่มีสัดส่วน 0% 5% 10% และ 15% ของ TiO_2 -P25 ตามลำดับ แสดงในรูปที่ 2ก ผลการวิเคราะห์พบว่าเถ้าลอยจัดเป็นไอโซเทอมการดูดซับ IUPAC ประเภทที่ 2 ซึ่งเป็นประเภทที่ไม่มีรูพรุน [16] และเถ้าลอยที่มีสัดส่วนของ TiO_2 -P25 จัดเป็นไอโซเทอมการดูดซับ IUPAC ประเภทที่ 4 hysteresis loop อยู่ในความดันสัมพัทธ์ (P/P_0) ในช่วง 0.8-1.0 นั้นมีการดูดซับเพิ่มขึ้นซึ่งการเพิ่มขึ้นของความดันสัมพัทธ์ในช่วงนี้นั้นแสดงให้เห็นว่ารูพรุนที่อยู่ในวัสดุส่วนใหญ่เป็นรูพรุนประเภทเมโซพอร์ส (mesoporous) [26]



รูปที่ 2 ก) N_2 Adsorption-Desorption Isotherm
 ข) การกระจายตัวของรูพรุน

โดยพื้นที่ผิวของเถ้าลอยที่มีปริมาณของ TiO_2 -P25 0% 5% 10% และ 15% โดยน้ำหนักมีค่า 0.5 2.0 6.0 และ $8.0 \text{ m}^2/\text{g}$ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อปริมาณของ TiO_2 -P25 เพิ่มขึ้นทำให้การกระจายตัวของขนาดรู

พูนและปริมาตรของรูพูนเพิ่มขึ้น ดังแสดงใน รูปที่ 2 ข และตารางที่ 1 ซึ่งเป็นผลมาจากพื้นที่ผิวของ $\text{TiO}_2\text{-P25}$ ที่สูงกว่าเถ้าลอย

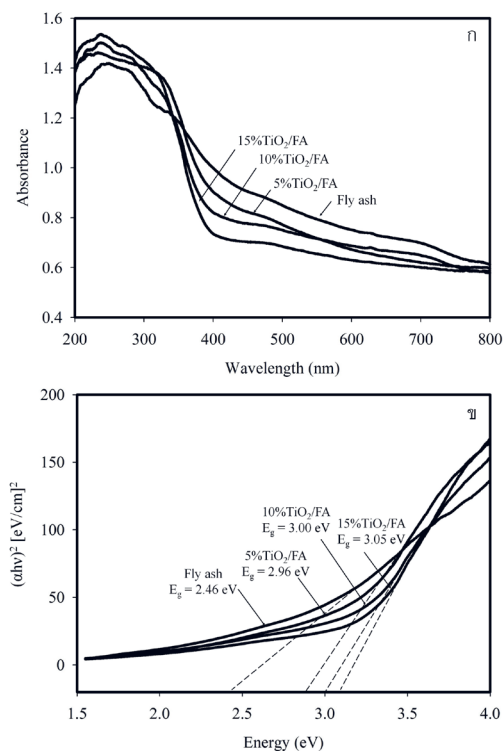


รูปที่ 3 ตัวอย่างของ ก) Fly ash
ข) 5% $\text{TiO}_2\text{/FA}$ ค) 10% $\text{TiO}_2\text{/FA}$
และ ง) 15% $\text{TiO}_2\text{/FA}$

ตารางที่ 1 พื้นที่ผิว ขนาดรูพูนเฉลี่ยและปริมาตร
รูพูนทั้งหมดของเถ้าลอย $\text{TiO}_2\text{-P25}$ และตัวอย่างผสม

Sample	Surface area (m^2/g)	Average pore diameter (nm)	Total pore volume (cm^3/g)
$\text{TiO}_2\text{-P25}$	49.0	-	-
Fly ash	0.5	10.90	0.0013
5% $\text{TiO}_2\text{/FA}$	2.0	15.02	0.0087
10% $\text{TiO}_2\text{/FA}$	6.0	13.15	0.0191
15% $\text{TiO}_2\text{/FA}$	8.0	13.09	0.0260

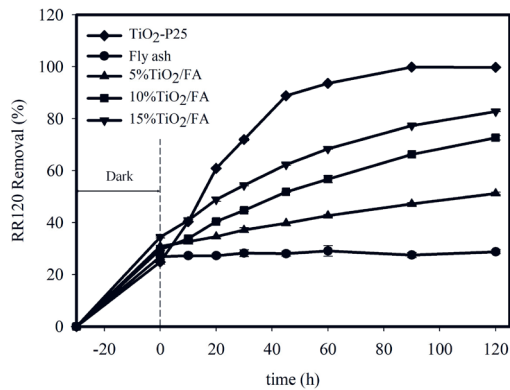
ดังนั้นสามารถอธิบายได้ว่าการกระจายอย่างสม่ำเสมอของ $\text{TiO}_2\text{-P25}$ ในเถ้าลอยทำให้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพูนทั้งหมดของตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งส่งผลต่อปฏิกิริยาในการย่อยสลายของสีย้อม



รูปที่ 4 ก) UV-vis absorption spectra
ข) ค่าช่องว่างพลังงาน ของตัวอย่างผสม

ผล UV-vis diffuse reflectance spectra ของเถ้าลอยที่มีสัดส่วนของ $\text{TiO}_2\text{-P25}$ 0% 5% 10% และ 15% โดยน้ำหนัก ในช่วงความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตร แสดงในรูปที่ 4ก พบว่าการดูดกลืนแสงของเถ้าลอยที่มีสัดส่วนของ $\text{TiO}_2\text{-P25}$ อยู่ในช่วงของรังสีอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งช่องว่างของพลังงานประเมินโดยความสัมพันธ์ของ Tauc's plot ซึ่งช่องว่างของพลังงานสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ และ $h\nu$ [27] แสดงในรูปที่ 4ข พบว่าช่องว่างพลังงานมีค่า 2.46 2.96 3.00 และ 3.05 eV ตามลำดับ สังเกตเห็นได้ว่าช่องว่างของพลังงานของเถ้าลอยที่มีสัดส่วนของ $\text{TiO}_2\text{-P25}$ สูงขึ้นจะมีค่าเข้าใกล้ค่าช่องว่างพลังงานของอนาเทสเฟสซึ่งมีค่า 3.20 eV บ่งชี้ได้ว่าการมีอยู่ของ $\text{TiO}_2\text{-P25}$ ทำให้ค่าช่องว่างพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้น

3.2 ประสิทธิภาพการย่อยสลายสี RR120 ภายใต้รังสีอัลตราไวโอเลต



รูปที่ 5 การย่อยสลายของสี RR120 และเวลาที่ทำปฏิกิริยา

ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารละลายสี RR120 ที่ pH เท่ากับ 6 ภายใต้รังสีอัลตราไวโอเลต โดย TiO₂-P25 และเถ้าลอยที่มีสัดส่วนของ TiO₂-P25 0% 5% 10% และ 15% โดยน้ำหนัก แสดงในรูปที่ 5 ผลการทดลองการดูดซับในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที จะเห็นได้ว่าเถ้าลอยที่มีสัดส่วนของ TiO₂-P25 สามารถดูดซับสารละลายสี RR120 ได้มากกว่าเถ้าลอย ซึ่งสอดคล้องกับผลของ N₂ adsorption-desorption ที่พบว่าเมื่อมีปริมาณของ TiO₂-P25 เพิ่มขึ้น ทำให้พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งแสดงถึงความสามารถในการดูดซับบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งเป็นผลต่อการทำปฏิกิริยา อ้างถึงผลของ Djellabi และคณะ ที่พบว่าความสามารถในการดูดซับของวัสดุเป็นส่วนช่วยในการเกิดปฏิกิริยาเชิงแสง [28] และพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสี RR120 ของเถ้าลอยนั้นคงที่หลังจากกระบวนการดูดซับในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที โดยมีค่าการดูดซับที่ 26.93% และหลังจากการทำปฏิกิริยาภายใต้รังสีอัลตราไวโอเลต ที่เวลา 120 นาทีพบว่าประสิทธิภาพในการย่อยสลายสี RR120 มีค่า 28.78% สังเกตว่าไม่พบการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเถ้าลอยนั้นไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาเชิงแสง ในขณะที่เถ้าลอยที่มีสัดส่วนของ TiO₂-P25 5% 10% และ 15% มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสี RR120 เพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาสูงขึ้น และเมื่อทำปฏิกิริยาภายใต้รังสีอัลตราไวโอเลตเป็นเวลา 120 นาที ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสี RR120 มีค่า 51.23% 72.65% และ 82.74% ตามลำดับ นอกจากนี้ยังได้ทำ

การย่อยสลายสี RR120 โดยใช้ TiO₂-P25 เปรียบเทียบกับเถ้าลอยที่ผสม TiO₂-P25 ในทุกสัดส่วนพบว่าผลการดูดซับสี RR120 ในช่วง 30 นาที ในที่มีตัวเร่ง TiO₂-P25 มีความสามารถในการดูดซับสี RR120 ที่ต่ำที่สุด เนื่องจากมีขนาดรูพรุนที่เล็กและปริมาณของรูพรุนมีค่าน้อยมากจนไม่สามารถคำนวณค่าได้ แต่หลังทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 120 นาที TiO₂-P25 สามารถกำจัดสี RR120 ได้ 99.76% ซึ่งมีความมากกว่าการกำจัดของ 15%TiO₂/FA ประมาณ 17% เป็นผลจากการย่อยสลายสี RR120 ที่ใช้เถ้าลอยที่มีปริมาณ TiO₂-P25 15% โดยน้ำหนัก ใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยามากกว่า TiO₂-P25 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่รายงานว่า การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจำนวนมากเกินไปส่งผลเสียต่อการเกิดปฏิกิริยาเชิงแสง เนื่องจากปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากเกินไปจะทำให้การเจาะผ่านของแสงทำได้ยากยิ่งขึ้น [29] นอกจากนี้ยังพบว่าอาจเกิดการรวมตัวกัน [30-31] ของตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลให้ประสิทธิภาพของการย่อยสลายสี RR120 ต่ำลง

ผลการทดลองการย่อยสลายของสี RR120 ด้วยเถ้าลอยที่ไม่มีการเจือของ TiO₂-P25 และมีการเจือ TiO₂-P25 ในสัดส่วน 5% 10% และ 15% โดยน้ำหนัก สามารถยืนยันได้ว่าการเจือ TiO₂-P25 ในเถ้าลอยมีความสามารถในการย่อยสลายมลพิษได้ ซึ่งจะมีความสามารถในการกำจัดมลพิษเมื่อนำไปสังเคราะห์เป็นจีโอพอลิเมอร์

4. สรุป

งานวิจัยนี้สามารถผสม TiO₂-P25 ลงในเถ้าลอย ผลการศึกษาพบว่าเมื่อปริมาณของ TiO₂-P25 มากขึ้น ทำให้ความสูงของอนุภาคและรูโหนดเพิ่มขึ้นบ่งชี้ให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสงมีการกระจายตัวกันอย่างสม่ำเสมอ และในการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและการกระจายตัวของรูพรุนของเถ้าลอยพบว่ามีความหนาแน่นสูงขึ้นด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ยังพบว่าค่าช่องว่างพลังงานของเถ้าลอยที่มีสัดส่วนของ TiO₂-P25 เพิ่มขึ้น เคลื่อนเข้าใกล้ค่าช่องว่างพลังงานของอนุภาคผลการศึกษาปฏิกิริยาเชิงแสงที่ทดสอบการกำจัดสี RR120 พบว่าการย่อยสลายของสี RR120 โดยใช้เถ้าลอยที่มีสัดส่วน 15%TiO₂/FA สามารถกำจัดสี RR120 ได้ 82.74% ผลการทดลองสามารถยืนยันได้ว่าตัวอย่างผสมมีความสามารถในการย่อยสลายสี RR120 ได้ ดังนั้นงานวิจัยต่อไปจะทำการศึกษาการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ที่มีความสามารถในการกำจัดมลพิษ โดยจะดำเนินการ

ศึกษาผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการบ่มของจีโอพอลิเมอร์ที่มีผลต่อความสามารถกำจัดสีย้อม

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่นและศูนย์จัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย มหาวิทยาลัยขอนแก่นที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Department pollution control. [Internet]. 2019[cite 2019 sep 26]; Available from: http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water04.html
- [2] Teh CY, Budiman PM, Shak KPY, Wu TY. Recent advancement of coagulation-flocculation and Its application in wastewater treatment. *Ind Eng Chem Res*. 2016;55(16):4363–89.
- [3] Modroga C, Miron AR, Orbuliet OD, Costache C, Apostol G. Ion exchange processes on weak acid resins for wastewater containing copper ions treatment. *Environ Eng Manag J*. 2018;14(2):449–54.
- [4] Lu L, Huang Z, Rau GH, Ren ZJ. Microbial electrolytic carbon capture for carbon negative and energy positive wastewater treatment. *Environ Sci Technol*. 2015;49(13):8193–201.
- [5] Abdel-Kader AM. Studying the efficiency of grey water treatment by using rotating biological contactors system. *J King Saud Univ - Eng Sci*. 2013;25(2):89–95.
- [6] Das R, Ali ME, Hamid SBA, Ramakrishna S, Chowdhury ZZ. Carbon nanotube membranes for water purification: A bright future in water desalination. *Desalination*. 2014;336(1):97–109.
- [7] Han Y, Xu Z, Gao C. Ultrathin graphene nanofiltration membrane for water purification. *Adv Funct Mater*. 2013; 23(29):3693–700.
- [8] Gupta VK, Jain R, Mittal A, Saleh TA, Nayak A, Agarwal S, et al. Photocatalytic degradation of toxic dye amaranth on TiO_2/UV in aqueous suspensions. *Mater Sci Eng C*. 2012;32(1):12–7.
- [9] Shavisi Y, Sharifnia S, Hosseini SN, Khadivi MA. Application of TiO_2 /perlite photocatalysis for degradation of ammonia in wastewater. *J Ind Eng Chem*. 2014;20(1):278–83.
- [10] Zhao D, Sheng G, Chen C, Wang X. Enhanced photocatalytic degradation of methylene blue under visible irradiation on graphene@ TiO_2 dye destructure. *Appl Catal B Environ*. 2012;111–112:303–8.
- [11] Zhang Z, Xu Y, Ma X, Li F, Liu D, Chen Z, et al. Microwave degradation of methyl orange dye in aqueous solution in the presence of nano- TiO_2 supported activated carbon (supported- $\text{TiO}_2/\text{AC}/\text{MW}$). *J Hazard Mater*. 2012;209–210: 271–7.
- [12] Duta A, Visa M. Simultaneous removal of two industrial dyes by adsorption and photocatalysis on a fly-ash- TiO_2 composite. *J Photochem Photobiol A Chem*. 2015;306:21–30.
- [13] Al-Harbi LM, Kosa SA, Abd El Maksod IH, Hegazy EZ. The photocatalytic activity of TiO_2 -zeolite composite for degradation of dye using synthetic UV and Jeddah sunlight. *J Nanomater*. 2015;1–7.
- [14] Fatimah I, Said A, Hasanah UA. Preparation of TiO_2 - SiO_2 using rice husk ash as silica source and the kinetics study as photocatalyst in methyl violet decolorization. *Bull Chem React Eng Catal*. 2015;10(1):43–9.
- [15] Electricity generating authority of Thailand [Internet]. 2019[cite 2019 sep 26]; Available from :<http://maemoh.egat.com/index.php?>

- option=com_content&view=article&id=89:sarat1&catid=89&Itemid=435.
- [16] Ökte AN, Karamanis D, Tuncel D. Dual functionality of TiO₂-flyash nanocomposites: Water vapor adsorption and photocatalysis. *Catal Today*. 2014;230:205–13.
- [17] Visa M, Isac L, Duta A. New fly ash TiO₂ composite for the sustainable treatment of wastewater with complex pollutants load. *Appl Surf Sci*. 2015;339(1):62–8.
- [18] Shi Z, Yao S, Sui C. Application of fly ash supported titanium dioxide for phenol photodegradation in aqueous solution. *Catal Sci Technol*. 2011;1(5):817–22.
- [19] Saud PS, Pant B, Park M, Chae SH, Park SJ, Ei-Newehy M, et al. Preparation and photocatalytic activity of fly ash incorporated TiO₂ nanofibers for effective removal of organic pollutants. *Ceram Int*. 2015;41(1):1771–7.
- [20] Ganji N, Allahverdi A, Naeimpour F, Mahinroosta M. Photocatalytic effect of nano-TiO₂ loaded cement on dye decolorization and *Escherichia coli* inactivation under UV irradiation. *Res Chem Intermed*. 2016;42(6):5395–412.
- [21] Strini A, Roviello G, Ricciotti L, Ferone C, Messina F, Schiavi L, et al. TiO₂-based photocatalytic geopolymers for nitric oxide degradation. *Materials (Basel)*. 2016;9(7):1–13.
- [22] Versus T, Calcination TA. Geopolymer-TiO₂ Nanocomposites for Photocatalysis: Synthesis by One-Step Adding Treatment Versus Two-Step Acidification Calcination. *Mineral* 2019;9:658–64.
- [23] Banerjee S, Sharma GC, Chattopadhyaya MC, Sharma YC. Kinetic and equilibrium modeling for the adsorptive removal of methylene blue from aqueous solutions on of activated fly ash (AFSH). *J Environ Chem Eng*. 2014;2(3):1870–80.
- [24] M Ramazani, M Farahmandjou TF. Effect of Nitric acid on Particle Morphology of the Nano-TiO₂. *Int J Nanosci Nanotechnol*. 2015;11(2):115–22.
- [25] Zuo R, Du G, Zhang W, Liu L, Liu Y, Mei L, et al. Photocatalytic degradation of methylene blue using TiO₂ impregnated diatomite. *Adv Mater Sci Eng*. 2014;1-7.
- [26] Suwannaruang T, Kidkhunthod P, Chanlek N, Soontaranon S, Wantala K. High anatase purity of nitrogen-doped TiO₂ nanorice particles for the photocatalytic treatment activity of pharmaceutical wastewater. *Appl Surf Sci*. 2019;478(October 2018):1–14.
- [27] Pant B, Ojha GP, Kim HY, Park M, Park SJ. Fly-ash-incorporated electrospun zinc oxide nanofibers: Potential material for environmental remediation. *Environ Pollut*. 2019;245:163–72.
- [28] Djellabi R, Ghorab MF, Cerrato G, Morandi S, Gatto S, Oldani V, et al. Photoactive TiO₂-montmorillonite composite for degradation of organic dyes in water. *J Photochem Photobiol A Chem*. 2015;295:57–63.
- [29] Bel Hadjltaief H, Ben Zina M, Galvez ME, Da Costa P. Photocatalytic degradation of methyl green dye in aqueous solution over natural clay-supported ZnO-TiO₂ catalysts. *J Photochem Photobiol A Chem*. 2016;315:25–33.
- [30] Li ZD, Wang HL, Wei XN, Liu XY, Yang YF, Jiang WF. Preparation and photocatalytic performance of magnetic Fe₃O₄@TiO₂ core-shell microspheres supported by silica aerogels from industrial fly ash. *J Alloys Compd*. 2016;659:240–7.
- [31] Wang HL, Qi HP, Wei XN, Liu XY, Jiang WF. Photocatalytic activity of TiO₂ supported SiO₂-Al₂O₃ aerogels prepared from industrial fly ash. *Cuihua Xuebao/Chinese J Catal*. 2016;37(11):2025–33.

การศึกษาเปรียบเทียบสมบัติโลหะเชื่อมพอกแข็งบนเหล็กกล้าแรงไฟ เกรด 900 ด้วยลวดหุ้มฟลักซ์ H450R และ E120-18G

ธงชัย เครือผือ^{1*}

Thongchai010426@Gmail.com

^{1*} สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิต คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์

Received	: 4-Nov-2019
Revised	: 8-Jan-2020
Accepted	: 9-Jan-2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติโลหะเชื่อมพอกแข็งบนเหล็กกล้าแรงไฟเกรด 900 ด้วยลวดหุ้มฟลักซ์ 2 ชนิด คือ ลวดเชื่อมชนิด H450R และชนิด E120-18G ผลจากการทดลองเชื่อมด้วยลวดเชื่อมชนิด H 450R ตรวจสอบด้วยน้ำยาแทรกซึม พบว่า มีรอยแตกบริเวณผิวหน้ารอยเชื่อมความยาวประมาณ 1-3 มิลลิเมตร ซึ่งรอยแตกเกิดขึ้นบริเวณจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดรอยเชื่อม และจากการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมชนิด E120-18G รอยเชื่อมมีลักษณะสมบูรณ์ อีกทั้งโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อม (WZ) จากการเชื่อมด้วยลวดเชื่อม H450R เกิดรอยแตกร้าวและโพรงอากาศขนาดความกว้างเฉลี่ย 50-600 ไมครอน และโครงสร้างบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อน (HAZ) เป็นมาร์เทนไซต์แบบเข็มซึ่งมีลักษณะเปราะและแข็ง จึงสามารถสรุปได้ว่าการเชื่อมด้วยลวดเชื่อม H450R ไม่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมพอกผิวแข็งแรงไฟเกรด 900 อย่างไรก็ตามจากการเชื่อมด้วยลวดเชื่อม E120-18G ไม่พบรอยแตกร้าวหรือโพรงอากาศในรอยเชื่อม และมีลักษณะโครงสร้างแบบเฟอร์ไรต์ผสมกับโครงสร้างแบบเบนไนต์ ซึ่งส่งผลให้มีความต้านทานแรงดึงและการรับแรงสั่นสะเทือนได้ดี

คำสำคัญ: แรงไฟเกรด 900 การเชื่อมพอกแข็ง ลวดเชื่อม H450R และลวดเชื่อม E120-18M

Comparative Study of Hard-facing Weld Metal Properties on Grade 900 Railway Steel using H450R and E120-18G SMAW Electrodes

Thongchai Khruaphue^{1*}
Thongchai010426@Gmail.com^{1*}

^{1*} Program in Production Technology, Faculty of Agricultural and Industrial Technology, Phetchabun Rajabhat University

Received	: 4-Nov-2019
Revised	: 8-Jan-2020
Accepted	: 9-Jan-2020

Abstract

This research aimed to comparative study of hard-facing weld metal properties that were produce on grade 900 Railway Steel using H450R and E120-18G SMAW Electrodes. The experimental results were as following. The penetration test results showed that the cracks with 1-3 mm in length were clearly found on the welding surface at the start and finish point on the weld bead surface. However, the crack could not be found when the penetration test was conducted on the welding bead surface of the hard-facing weld metal that produced by E120-18G SMAW electrode. Microstructure of a welding zone (WZ) showed the crack and pore that was about 50-600 micron in length was found when H450R electrode was applied. Furthermore, the sound weld metal could be produced when E120-18G electrode was applied and showed the existence of pearlite and bainite phases in the weld which implied to indicate high tensile strength and vibration absorption.

Keywords: 900 Grade Railway, Hard-facing Welding, Electrode Types H450R, E120-18G.

1. บทนำ

ปัจจุบันนี้ระบบการขนส่งทางบกภายในประเทศมีความสำคัญเป็นอย่างมาก แต่ที่กำลังได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง คือ ระบบการขนส่งทางรางหรือทางรถไฟ ซึ่งเป็นระบบการขนส่งหลักเกี่ยวกับเครื่องอุปโภคบริโภคที่จำเป็นกับมนุษย์ทั้งประเทศ และอื่นๆ ระบบการขนส่งด้วยรถไฟมีข้อดี คือ ขนส่งได้ครั้งละจำนวนมากๆ มีความปลอดภัย ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย [1,2] อย่างไรก็ตามจากความนิยมใช้รถไฟในการขนส่งก็มีปัญหาตามมาเช่นกัน ซึ่งเป็นปัญหาในเรื่องของน้ำหนักตัวรถไฟรวมกับน้ำหนักในการบรรทุกสิ่งของ น้ำหนักที่มหาศาลนี้ส่งผลกระทบต่อรางรถไฟจากการลงพื้นที่ที่สอบถามกองบำรุงทางเขตขอนแก่น การรถไฟแห่งประเทศไทย พบว่า ผิวหน้ารางรถไฟมีลักษณะของการสึกหรอ ซึ่งเกิดจากการเสียดสีระหว่างล้อรถไฟกับผิวหน้ารางในขณะการเบรคและการออกตัวของรถไฟ [3,4] ด้วยน้ำหนักที่มากนี้ทำให้ตัวของรถไฟต้องใช้แรงฉุดลากที่มากทำให้เกิดการเสียดสีบริเวณผิวหน้ารางรถไฟจนเกิดเป็นรอยสึกหรอ [5] มีความยาวจากการวัดโดยเฉลี่ยประมาณ 5-8 เซนติเมตร ลึกประมาณ 2-4 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 1 (วงรี) ซึ่งรอยสึกหรอนี้หากไม่ทำการซ่อมแซมเมื่อใช้งานไปนานๆ จะเกิดการแตกร้าวจากการสั่นสะเทือนขณะรถไฟวิ่งผ่านซ้ำๆ จนนำไปสู่การเปลี่ยนรางรถไฟใหม่ซึ่งทำให้มีค่าใช้จ่ายสูง และต้องใช้เวลาในการสั่งซื้อรางรถไฟเป็นเวลานาน

การเชื่อมพอกผิวแข็งเป็นอีกหนึ่งวิธีที่ช่วยในการซ่อมแซม [6] ซึ่งประหยัดค่าใช้จ่ายมากกว่าการเปลี่ยนรางรถไฟใหม่ งานวิจัยนี้นำเอากระบวนการเชื่อมด้วยลวดหุ้มฟลักซ์มาใช้ในการทดลอง [7] เป็นกระบวนการเชื่อมโดยใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ไม่มีความซับซ้อน ราคาไม่แพง เครื่องเชื่อมมีลักษณะเล็กเหมาะสำหรับงานภาคสนาม สามารถเชื่อมวัสดุได้หลากหลายประเภท อย่างไรก็ตามการเลือกใช้ลวดเชื่อมที่เหมาะสมมีความสำคัญเป็นอย่างมาก เนื่องจากธาตุที่ผสมในลวดเชื่อมจะส่งผลโดยตรงกับเหล็กกล้ารางรถไฟหลังจากการเชื่อม ซึ่งรางรถไฟนี้มีส่วนผสมของธาตุคาร์บอนและธาตุแมงกานีสเป็นจำนวนมาก [7,8] ต้องพึงระวังในการเชื่อมเพราะความร้อนที่สะสมในระหว่างการเชื่อมอาจส่งผลให้รอยเชื่อมเกิดการแตกร้าว [4] ดังนั้นจึงควรพิจารณาเลือกลวดเชื่อมจากสมบัติของลวดเชื่อมให้ใกล้เคียงกับสมบัติรางรถไฟใน

งานวิจัยนี้นำเอาลวดเชื่อมประเภทเหล็กกล้ามาใช้ในการทดลอง ซึ่งจะเป็นการเปรียบเทียบความสามารถในการเชื่อมรางรถไฟของลวดเชื่อม 2 ชนิด คือ ลวดเชื่อมเหล็กกล้าทนแรงดึงสูง E120-18G มีความสามารถในการทนต่อแรงกระแทกและลวดเชื่อมเหล็กกล้าพอกผิวแข็ง H450R มีความสามารถในการทนต่อแรงดึงสูง



รูปที่ 1 รอยสึกหรอบนผิวหน้ารางรถไฟ

2. วัสดุและวิธีการ (Materials and Methods)

วัสดุที่ใช้ในการทดลองเชื่อม ได้รับความอนุเคราะห์จากกองบำรุงทางเขตขอนแก่น การรถไฟแห่งประเทศไทย เป็นรางรถไฟที่ประเทศไทยใช้ในปัจจุบันเกรด 900 ตามมาตรฐาน UIC 1986 [9,10] ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 1 ค่าความต้านทานแรงดึง 880-1,030 N/mm² และมีค่าความแข็งในบริเวณผิวหน้าราง 276-328 HV [4,10,11]

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีรางรถไฟ (wt. %).

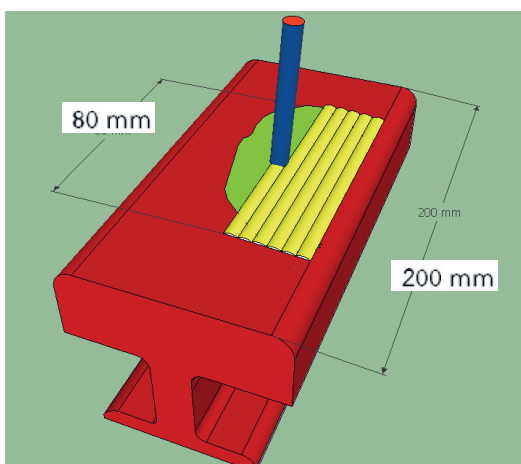
ส่วนผสม	C	Si	Mn	P	S
เกรด 900	0.60 — 0.80	0.10 — 0.50	0.80 — 1.30	≤0.04	≤0.04

งานวิจัยนี้ทดลองโดยใช้ลวดเชื่อมตามมาตรฐาน AWS ชนิด E120-18G ซึ่งให้ค่า ความแข็งของรอยเชื่อมหลังการเชื่อม 301 HV และลวดเชื่อมชนิด H450R ที่ค่าความแข็งของรอยเชื่อมหลังการเชื่อม 442 HV [1] ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 2 ทำการตัดชิ้นงานทดลองเชื่อมขนาดความยาว 20 เซนติเมตร เชื่อมเรียงแนว 1 ชั้น ระยะเกยแต่ละแนวเชื่อมประมาณ 1/3 ดังรูปที่ 2 ทดลองเชื่อม 3 ซ้ำ จำนวน 6 ชิ้น

ตารางที่ 2 ส่วนผสมทางเคมีลวดเชื่อม (wt. %).

ส่วนผสม	C	Si	Mn	Mo	Cr
H450R	0.20	0.20	0.70	1.00	4.00
E120-18G	0.08	0.44	1.40	0.42	0.25

งานวิจัยนี้ทำการเชื่อมโดยช่างเชื่อมที่ผ่านการทดสอบมาตรฐานฝีมือแรงงานแห่งชาติระดับ 1 ใช้กระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ ซึ่งเป็นกระบวนการเชื่อมอาร์ก จากอิเล็กตรอนขั้วลบ (-) โหลดเข้าหาขั้วบวก (+) ทำให้เกิดการอาร์กกระหว่างผิวชิ้นงานกับปลายลวดเชื่อมเกิดเป็นบ่อหลอม อุณหภูมิประมาณ 1,100 ถึง 1,500 องศาเซลเซียส [12] ลวดเชื่อมหลอมละลายเติมเนื้อโลหะผสมกับผิวหน้ารางรถไฟ ดังรูป 2 เชื่อมเรียงแนว เต็มรอยสักห่อ (จากการวัดโดยเฉลี่ย 5-8 เซนติเมตร และลึกประมาณ 2-4 มิลลิเมตร) ใช้กระแสไฟเชื่อม 130 แอมป์ [1] ชนิดกระแส DCEP ลวดเชื่อมขนาด 3.2 มิลลิเมตร ก่อนทำการเชื่อมอุ่นชิ้นงานที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที [13] ด้วยแก๊สออกซิเจน-อะเซทิลีน (เปลวไฟคาร์บูไรซิง) เพื่อให้ความร้อนกระจายอย่างสม่ำเสมอในบริเวณผิวหน้ารางรถไฟ ทำการวัดอุณหภูมิด้วยเครื่องตรวจสอบแบบอินฟราเรดชนิด K



รูปที่ 2 แบบจำลองการเชื่อมพอกแข็งบนเหล็กกล้ารางรถไฟ

หลังจากทำการเชื่อมแต่งผิวหน้าให้เรียบเสมอผิวรางด้วยการเจียรไน, ตรวจสอบผิวหน้ารอยเชื่อมด้วยน้ำยาแทรกซึม (PT) ตามมาตรฐาน ISO 3452 ตรวจสอบโครงสร้างมหภาค (Macrostructure) ด้วยกล้องถ่ายภาพ ดิจิทัล และทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ด้วยกล้องจุลทรรศน์ แบบใช้แสง (Optical microscope) ซึ่งการเตรียมชิ้นงานตรวจสอบโครงสร้างโดยการขัดเตรียมผิวด้วยเครื่องขัดผิวโลหะ ใช้กระดาษทรายเบอร์ 150-1,200 หลังจากนั้นทำการขัดผิวหน้าบนผ้าสักหลาด ซึ่งมีผงขัดอะลูมินาผสมกับน้ำ ผงอะลูมินาใช้ความละเอียด 1 ไมครอน และผ่านการกัดด้วยกรด (ประกอบด้วยกรดไนตริก 5% แอลกอฮอล์ 20%) [2] เป็นเวลาประมาณ 3 ถึง 5 วินาที เป่าให้แห้งด้วยลมร้อน หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ผลเพื่อตรวจสอบหาข้อบกพร่องในบริเวณรอยเชื่อม (WZ) และบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อน (HAZ)

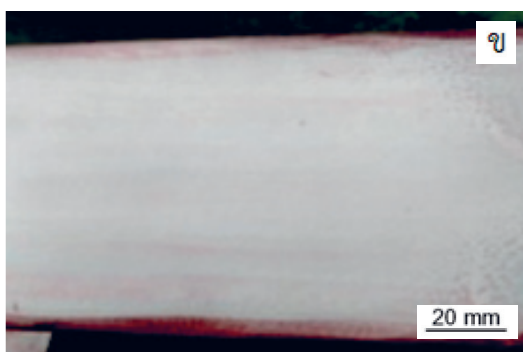
3. ผลการศึกษา (Results)

3.1 การตรวจสอบรอยเชื่อมด้วยน้ำยาแทรกซึม (PT)

น้ำยาแทรกซึมมีความสามารถในการแทรกซึมเข้าในรอยแตกที่มีขนาดเล็กมากในระดับไมครอนซึ่งมองไม่เห็นด้วยตาเปล่า โดยจากการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมชนิด H450R พบรอยแตกบริเวณผิวหน้ารอยเชื่อมดังรูปที่ 3ก. (วงรี) มีความยาวโดยเฉลี่ย 1-3 มิลลิเมตร ซึ่งรอยแตกเกิดขึ้นจากการหดตัวของเนื้อเชื่อมบริเวณจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดรอยเชื่อม และจากการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมชนิด E120-18G ดังรูปที่ 3ข. รอยเชื่อมมีลักษณะสมบูรณ์ ไม่พบรอยแตกร้าวหรือไม่มีโพรงอากาศเกิดขึ้นบนผิวหน้ารอยเชื่อม



ก. ลวดเชื่อมชนิด H450R



ข. ลวดเชื่อมชนิด E120-18G

รูปที่ 3 การตรวจสอบรอยเชื่อมด้วยน้ำยา
แทรกซึม (PT)



ก. ลวดเชื่อมชนิด H450R

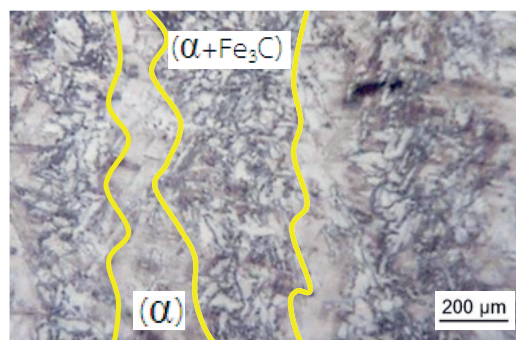


ข. ลวดเชื่อมชนิด E120-18G

รูปที่ 4 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค

3.2 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค

โครงสร้างมหภาค ดังรูปที่ 4ก. และ รูปที่ 4 ข. จากการเชื่อมด้วยลวดเชื่อม E120-18G ทั้งในบริเวณรอยเชื่อม (WZ) และบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อน (HAZ) มีลักษณะของการเชื่อมลวดเชื่อม 18 มิลลิเมตร ซึ่งมากกว่าจากการเชื่อมด้วยลวดเชื่อม H450R ที่มีการเชื่อมลวดเชื่อม 10 มิลลิเมตร เนื่องจากอิทธิพลของธาตุคาร์บอนที่มากจะส่งผลต่อการเย็นตัวของรอยเชื่อมอย่างรวดเร็ว ทำให้มีการเชื่อมลวดที่น้อยตามไปด้วย [14] ความสามารถในการเชื่อมที่ดีทำให้รอยเชื่อมมีความแข็งแรงและทนต่อการสึกหรอ อย่างไรก็ตามจากการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมทั้ง 2 ชนิด ไม่พบรอยแตกร้าวหรือโพรงอากาศด้วยตาเปล่า

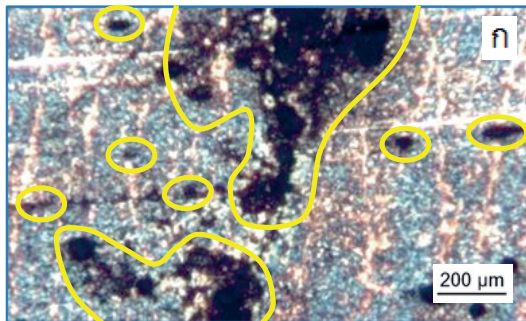


รูปที่ 5 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อโลหะเดิม (BM)

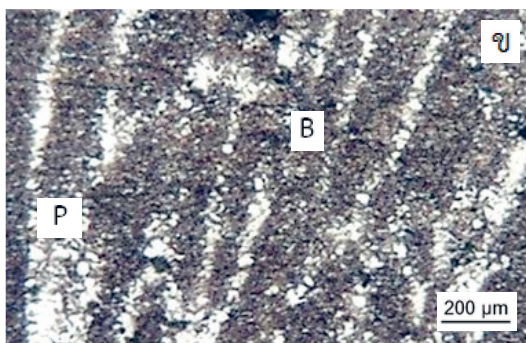
3.3 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อโลหะเดิม ของเหล็กกล้าแรงรถไฟเกรด 900 ดังรูปที่ 5 ประกอบไปด้วยโครงสร้างแบบเพิร์ลไลต์ ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$) ประมาณร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก (สีดำสลับสีขาว) ซึ่งใช้วิธีการลากเส้นตัดผ่าน (Intercept Method) ตามมาตรฐาน ASTM บริเวณที่เป็นสีขาว คือ เฟสเฟอร์ไรต์ (α) และสีดำ คือ เฟสซีเมนไทต์ (Fe_3C) [14,15] โครงสร้างราง

รถไฟชนิดนี้ มีสมบัติทางกลด้านความแข็งแรงและความต้านทานแรงดึงสูงมาก และมีความสามารถในการเชื่อมต่อที่ดี [9]



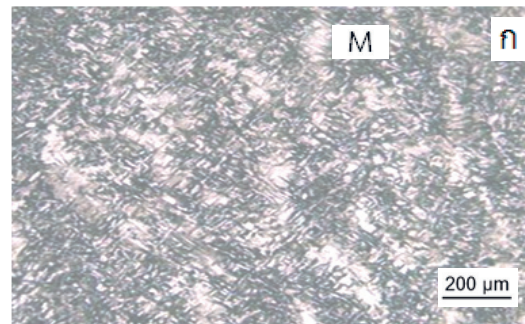
ก. ลวดเชื่อมชนิด H450R



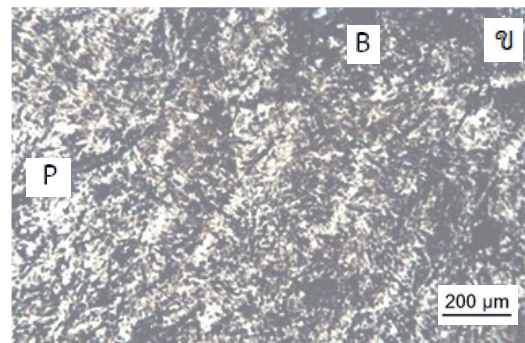
ข. ลวดเชื่อมชนิด E120-18G

รูปที่ 6 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อม (WZ)

โครงสร้างจุลภาคบริเวณรอยเชื่อม (WZ) มีลักษณะหยาบซึ่งประกอบไปด้วยโครงสร้างแบบเพิร์ลไลต์ (Pearlite: P) ที่เกิดจากการเย็นตัวอย่างช้าๆ ผสมกับโครงสร้างแบบเบนไนต์ (Bainite: B) ที่มีบางส่วนเย็นตัวอย่างรวดเร็ว การเชื่อมด้วยลวดเชื่อม H450R เกิดรอยแตกกว้างเฉลี่ย 50-600 ไมครอน และเกิดโพรงอากาศขนาดเฉลี่ย 20-50 ไมครอน ดังรูปที่ 6ก. จึงสามารถสรุปได้ว่าการเชื่อมด้วยลวดเชื่อม H450R ไม่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมพอกผิวเชิงรางรถไฟเกรด 900 และจากการเชื่อมด้วยลวดเชื่อม E120-18G ไม่พบรอยแตกหรือโพรงอากาศเกิดขึ้นบนผิวหน้ารอยเชื่อม ดังรูปที่ 6ข.



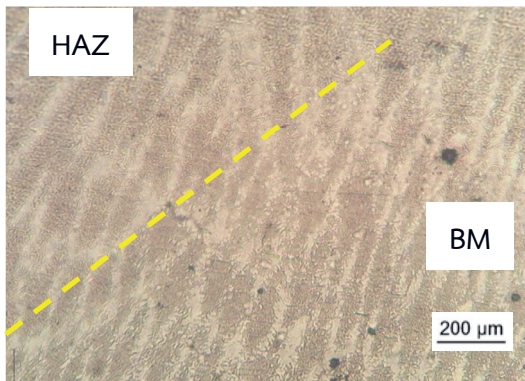
ก. ลวดเชื่อมชนิด H450R



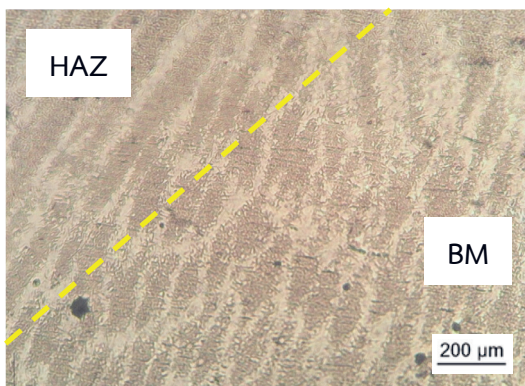
ข. ลวดเชื่อมชนิด E120-18G

รูปที่ 7 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อน (HAZ)

โครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อน (HAZ) จากการเชื่อมด้วย ลวดเชื่อมทั้ง 2 ชนิดประกอบไปด้วยเฟส เพอร์ไรต์ (สีขาว) ผสมกับโครงสร้างแบบ มาร์เทนไซต์ (สีดำ) กระจายสม่ำเสมอ ซึ่งเป็นผลมาจากบริเวณนี้มีลักษณะการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว และจากการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมชนิด H450R ดังรูปที่ 7ก. มีลักษณะของโครงสร้างแบบมาร์เทนไซต์แบบเข็มเกิดขึ้นมากกว่าการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมชนิด E120-18G ซึ่งโครงสร้างมาร์เทนไซต์แบบเข็มนี้นี้ทำให้ค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ส่งผลให้เหล็กรางรถไฟเสี่ยงต่อการแตกหักหลังจากการเชื่อมเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างจุลภาคที่ทำการเชื่อมด้วยลวดเชื่อม E120-18G ดังรูปที่ 7ข. พบลักษณะโครงสร้างแบบเพิร์ลไลต์ผสมกับโครงสร้างแบบเบนไนต์ ส่งผลให้มีความต้านทานแรงดึงและการรับแรงล้นสะท้อน ได้ดีกว่า [1]



รูปที่ 8 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคบริเวณ ที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อน (HAZ) กับบริเวณรอยเชื่อม (WZ) ของลวดเชื่อม H450R



รูปที่ 9 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคบริเวณ ที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อน (HAZ) กับบริเวณรอยเชื่อม (WZ) ของลวดเชื่อม E120-18G

รูปที่ 8 และ 9 แสดงโครงสร้างจุลภาคบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อน (HAZ) กับบริเวณรอยเชื่อม (WZ) จากการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมทั้ง 2 ชนิด ประกอบไปด้วยเฟส เฟอร์ไรต์ (สีขาว) ผสมกับโครงสร้างแบบ มาร์เทนไซต์ (สีดำ) กระจายสม่ำเสมอ [1] ซึ่งเป็นลักษณะของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากเกรนหยาบบริเวณเนื้อโลหะเดิมเป็นเกรนละเอียดในบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อน อย่างไรก็ตามการตรวจสอบ พบว่า การเชื่อมด้วยลวดเชื่อมชนิด E120-18G เกิดเป็นโครงสร้างแบบเพิร์ลไลต์ ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$) ผสมกับโครงสร้างแบบเบนไนต์ ซึ่งส่งผลให้บริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากความร้อนของลวดเชื่อมแบบ E120-18G

มีค่าความต้านทานแรงดึงและการรับแรงสั่นสะเทือนได้ดีกว่าจากการเชื่อมด้วยลวดเชื่อม H450R ที่มีโครงสร้างแบบมาร์เทนไซต์แบบเข็ม [2]

4. วิจัยรณผล (Discussion)

การเชื่อมพอกผิวแข็งด้วยลวดเชื่อม แต่ละชนิดให้สมบัติรอยเชื่อมที่แตกต่างกัน ส่งผลต่อโครงสร้างทางโลหวิทยาและสมบัติทางกลในรอยเชื่อม [14] โดยเฉพาะธาตุผสมใน ลวดเชื่อม เช่น คาร์บอน ซิลิกอน และแมงกานีส ทำให้คุณสมบัติของเหล็ก ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$) เปลี่ยนเป็นเหล็กคาร์ไบด์ (Fe_3C) จากความร้อนการเชื่อม [5,14] เหล็กจึงมีลักษณะที่แข็งมากขึ้น และเป็นสาเหตุของการสะสมความเค้นตกค้างในรอยเชื่อม [15] ทำให้รอยเชื่อมแตกร้าจากการหดตัว รอยแตกรัสนี้ส่งผลต่อการสั่นสะเทือนขณะรถไฟวิ่งผ่านในลักษณะของความล้า (Fatigue) จนขยายเป็นรอยแตกตลอดหน้าตัดรางรถไฟ [2,16] ดังพบได้จากการตรวจสอบพบรอยแตกร้าวบริเวณผิวหน้าแนวเชื่อมด้วยการตรวจสอบด้วยน้ำยาแทรกซึม นอกจากนั้นการเกิดการแตกร้าวที่ตำแหน่งเหล่านี้เกิดขึ้นได้เนื่องจากอัตรา การเย็นตัวที่เร็วเกินไปของโลหะเชื่อมที่เกิดขึ้นภายใต้ ปริมาณฟลักซ์ที่น้อย และในบริเวณจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดรอยเชื่อม [4] เป็นสาเหตุมาจากบริเวณดังกล่าวมีฟลักซ์ ปกคลุมหลังจากการอาร์กเชื่อมน้อย ทำให้บริเวณดังกล่าวมีลักษณะการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว [13,17] เนื่องจากฟลักซ์ที่หุ้มลวดเชื่อม H450R มีลักษณะบางกว่าลวดเชื่อม E120-18G

การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคปัจจัยที่ทำให้เกิดรอยแตกและโพรงอากาศ จากการเชื่อมด้วยลวดเชื่อม H450R เกิดจากปริมาณของธาตุคาร์บอนในลวดเชื่อมที่มีอยู่มากถึงร้อยละ 0.20 โดยน้ำหนัก ซึ่งเมื่อธาตุคาร์บอนหลอมละลายเข้ากับรอยเชื่อมทำให้รอยเชื่อมมีพฤติกรรมการเย็นตัวที่รวดเร็ว [14] อีกทั้งมีปริมาณของไฮโดรเจนสะสมมากเกิดความเค้นตกค้างในรอยเชื่อมระหว่างการเย็นตัว [8,17] นอกจากนั้นการเกิดการแตกร้าวที่ตำแหน่งนี้สามารถเกิดขึ้นได้เนื่องจากอัตราการเย็นตัวที่เร็วเกินไปของโลหะเชื่อม ขณะที่ลวดเชื่อม E120-18G มีปริมาณธาตุคาร์บอนเพียงร้อยละ 0.08 โดยน้ำหนัก

5. สรุปผล (Conclusion)

งานวิจัยนี้ได้เลือกลวดเชื่อมชนิด H450R และลวดเชื่อมชนิด E120-18G เพื่อเปรียบเทียบให้เห็นถึงความสามารถในการเชื่อมพอกผิวแข็งรางรถไฟเกรด 900 จากกระบวนการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ รอยแตกที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมชนิด H450R ซึ่งมีปริมาณคาร์บอนผสมอยู่มาก ถึงร้อยละ 0.20 โดยน้ำหนัก เมื่อธาตุคาร์บอนหลอมละลายเข้า กับรอยเชื่อมทำให้รอยเชื่อมมีพฤติกรรมการเย็นตัวที่ รวดเร็ว ในขณะที่ลวดเชื่อม E120-18G มีปริมาณธาตุ คาร์บอนเพียงร้อยละ 0.08 โดยน้ำหนัก ซึ่งส่งผลน้อย มากในกระบวนการทางความร้อนหลังจากการเชื่อม อีกทั้งการเย็นตัวอย่างช้าๆ ก่อให้เกิดโครงสร้างแบบ เฟอร์ไรต์ผสมกับโครงสร้างแบบเบนไนต์ในรอยเชื่อม พอกแข็งบนเหล็กกล้ารางรถไฟ

6. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements)

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณาจารย์สาขาวิชาเทคโนโลยีการ ผลิต คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยี อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ ที่ สนับสนุนงบประมาณ และสาขาวิชาวิศวกรรมการ เชื่อม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น ที่ให้ การสนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์ในการดำเนินงาน วิจัย รวมไปถึงขอขอบคุณนายพิชัย วัฒนศรีมงคล วิศวกรกำกับการกองบำรุงทางเขตขอนแก่น การรถไฟ แห่งประเทศไทย และ ผศ.ดร.ประภาศ เมืองจันทร์บุรี ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรม ศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ช่วยเหลือในด้าน ข้อมูลความรู้เกี่ยวกับรางรถไฟและวัสดุ รางรถไฟใน งานวิจัยนี้

7. เอกสารอ้างอิง (References)

[1] Chanpahol A. The Study of metallurgy structure of 5 0 -pound sized of railway hard surfacing welding by shielded metal arc welding process. KKU RESEARCH JOURNAL (GRADUATE STUDIES). 2019; 19(3): 28-35. (in Thai).

[2] Kenchi Reddy KM, Jayadeva CT. Abrasive wear behavior of hardfaced fe-cr-c alloy and mild steel under two body

conditions. Global Journal of Engineering Science and Researches. 2015; 2(4): 32-40. (in India).

[3] Sladojevic B, et al. New requirements for the quality of steel rails. Association of Metallurgical Engineers of Serbia. 2011; 17(4): 213-9.

[4] Byeong-Choo C, Young-Jin L. Railway vehicle wheel restoration by submerged arc welding and its characterization. Advanced Railroad Vehicle Division. Korea Railroad Research Institute. 2019; 1(25): 1-11. (in Korea).

[5] Kenchi Reddy KM, Jayadeva CT, Sreenivasan A. The effects of welding parameters on abrasive wear resistance for hardfacing alloys. Sri Krishna Institute of Technology. 2014; 3(4): 6-12. (in India).

[6] Chowda Reddy C, Kenchi Reddy KM, Jayadeva CT, Satish MS, Chandrashekar KM. Some studies on shielded metal arc welding hardfacing on mildsteel. Sri Krishna Institute of Technology. 2018; 7(7): 241-5. (in India).

[7] Morcillo M, De La Fuente D, Díaz I, Cano H. Atmospheric corrosion of mild steel. Revista De Metalurgia. 2011; 47(5): 426-44.

[8] Syahida N, et al. Influence of heat input on carbon steel microstructure. Advanced Materials Research Cluster. Universiti Malaysia Kelantan. Jeli. 2017; 12(8): 2689-97. (in Malaysia).

[9] UIC 860 Technical specification for the supply of rails. 9th ed. International Union of Railways. 2008. (in France).

[10] Vitez I, Krumes D, Vitez B, UIC- Recommendations for the USE of Rail Steel Grades. 2005; 44(2): 137-40.

[11] Markisha LI, Poznyakov VD, Gajvoronsky AA, Berdinkova EN, Alekseenko TA. Structure and properties of railway

- wheel surface after restoration surfacing and service loadin. Paton Weld. 2015; (5-6): 96-100.
- [12] Sloderbach Z, Pajak J. Determination of ranges of components of heat affected zone including changes of structure. Archives of Metallurgy and Materials. 2015; 60(4): 2607-12.
- [13] Fydrych D, Rogalski G. Effect of shielded-electrode wet welding conditions on diffusion hydrogen content in deposited metal. Welding International. 2011; 3: 166-71.
- [14] Buchanan VE, Shipway PH, McCartney DG. Microstructure and abrasive wear behavior of shielded metal arc welding hard-facings used in the sugarcane industry. University of Technology, Jamaica, West Indies. Wear 263. 2007; 99-110.
- [15] Nasir NSM, Razab MKAA, Mamat S, Ahmad MI. Review on welding residual stress. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016; 11(9): 6166-75.
- [16] Kenchi reddy KM, Jayadeva CT. A study on microstructure and abrasive wear behavior of Fe-Cr-C based hard facing alloys deposited by smaw processes. 2014; 3: 344-9.
- [17] Fydrych D, Labanowski J, Rogalski G. Weldability of high strength steels in wet welding conditions. Gdansk University of Technology. Poland. 2013; 20: 67-73.

การศึกษาและทดสอบชุดคัตขนาดเมล็ดบัวหลวง

จตุรงค์ ลังกาพินธุ์^{1*} สุนัน ปานสาคร² รุ่งเรือง กาลศิริศิลป์³ เกียรติกร แคมสิม่วง⁴

มรกต ภูค่างอง⁵ และ พิเชฐ สุวรรณวิจิตร⁶

jaturong.l@en.rmutt.ac.th^{1*}, sunan.p@en.rmutt.ac.th², Roongruang.k@en.rmutt.ac.th³,

grianggai.s@en.rmutt.ac.th⁴, leaw44@yahoo.com⁵, j.jaturong2517@gmail.com⁶

^{1*-6} ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Received	: 19-Mar-2019
Revised	: 30-Apr-2019
Accepted	: 5-Jun-2019

บทคัดย่อ

ชุดคัตขนาดเมล็ดบัวหลวงถูกสร้างขึ้นเพื่อศึกษาและทดสอบหาหลักการทำงานที่มีแนวโน้มเหมาะสมที่สุดใน การคัตขนาดเมล็ดบัวหลวงสำหรับการออกแบบเครื่องคัตขนาดเมล็ดบัวหลวง ชุดทดสอบประกอบด้วย โครงสร้างหลัก ชุดคัตขนาด ถังป้อนเมล็ด ระบบส่งกำลัง และใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 1 แรงม้า เป็นต้นกำลัง หลักการทำงานของ เครื่องเริ่มจากผู้ทำงานป้อนเมล็ดบัวหลวงลงในช่องป้อนเมล็ดบัวหลวงเข้าทางด้านบนของเครื่อง หลังจากนั้นเมล็ดบัว หลองจะไหลเข้าสู่ชุดคัตขนาดที่ประกอบด้วยตะแกรงโยก 3 ชั้น ที่สามารถคัตขนาดเมล็ดบัวได้ 3 ขนาด และเมล็ดบัว หลองที่ผ่านการคัตขนาดจะไหลสู่ช่องทางออกต่างๆ ทางด้านหน้าเครื่อง จากการทดสอบโดยใช้ช่องป้อน 3 ขนาด และ ใช้ความเร็วรอบของเพลาขับเคลื่อนชุดคัตขนาด 115, 125 และ 135 รอบต่อนาที ตามลำดับ พบว่าชุดคัตขนาดเมล็ดบัวหลวง สามารถทำงานได้ดีที่สุดที่ช่องป้อนขนาดกลาง (5x5 เซนติเมตร²) และความเร็วของเพลาขับเคลื่อน 115 รอบต่อนาที มีความสามารถในการทำงาน 118.5 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ความแม่นยำในการคัตขนาด 89.8% ไม่มีเมล็ดบัวหลวง เสียหาย และใช้พลังงานไฟฟ้า 0.61 กิโลวัตต์-ชั่วโมง

คำสำคัญ: การออกแบบ เครื่องคัตขนาด เมล็ดบัวหลวง บัวหลวง

Study and Testing of Lotus Seeds Sizing Unit

Jaturong Langkapin^{1*} Sunan Parnsakhorn² Roongruang Kalsirisilp³
Grianggai samseemoung⁴ Marukod Pookamkong⁵ and Pichet Suwanwijit⁶
jaturong.l@en.rmutt.ac.th^{1*}, sunan.p@en.rmutt.ac.th², Roongruang.k@en.rmutt.ac.th³,
grianggai.s@en.rmutt.ac.th⁴, leaw44@yahoo.com⁵, j.jaturong2517@gmail.com⁶

¹⁻⁶ Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Received	: 19-Mar-2019
Revised	: 30-Apr-2019
Accepted	: 5-Jun-2019

Abstract

The lotus seeds sizing unit was fabricated to study and testing of factors affecting the grading of lotus seeds for designing the lotus seeds sizing machine. The testing unit consists of the main frame, the seeds sizing unit, the hopper, the power transmission unit, and a 1 hp electric motor, which was used as a prime mover. In the operation, the lotus seeds were fed manually into feeding chute at the top of the machine, then these were falls through the seed sizing unit, met a set of 3 flat sieves that serves to grading in 3 sizes, then after sizing the seeds were released through outlet chute at in front of the machine. The prototype has been tested for 3 sizes of feeding, and at the cam shaft speed of 115, 125 and 135 rpm, respectively indicated that the optimal performance was achieved when the machine was operated at cam shaft speed 115 rpm, using medium size of feeding (5x5 cm²). The working capacity was 118.5 kg/hour, percentage of grading was found to be 89.8% with no percentage of damaged seeds. It consumed 0.61 kW-hour of energy.

Keywords: design, sizing machine, lotus seed, lotus

1. บทนำ

ลูกบัวหรือเมล็ดบัวคือส่วนเมล็ดที่อยู่ในฝักบัวหลวง มีลักษณะกลมรี เนื้อในสีขาวอมเหลือง เมล็ดบัวสดมีวิตามินซีสูง ส่วนเมล็ดบัวแห้งมีส่วนประกอบหลักเป็นคาร์โบไฮเดรตกว่าร้อยละ 60 มีโปรตีนสูงเช่นเดียวกับถั่วเหลือง ลูกเดือย และข้าวฟ่าง นอกจากนั้นยังมีฟอสฟอรัส เหล็ก และมีแคลเซียมสูงในตำราแพทย์แผนจีน เมล็ดบัวมีฤทธิ์เป็นกลาง ช่วยบำรุงเลือด บำรุงหัวใจ รวมถึงอวัยวะภายในร่างกาย ช่วยบำรุงข้อ [1, 2] ภาครัฐได้สนับสนุนให้ปลูกบัวหลวงเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีน้ำท่วมขังไม่สามารถปลูกพืชชนิดอื่นได้ เนื่องจากบัวหลวงสามารถเจริญเติบโตได้ดีในทุกพื้นที่ของประเทศไทย [3] เกษตรกรจำนวนมากในหลายจังหวัดได้เปลี่ยนมายึดการปลูกบัวเป็นอาชีพหลักแทนการปลูกข้าว เนื่องจากปัจจุบันการทำนาข้าวประสบปัญหาทั้งในเรื่องการขาดน้ำ และราคาข้าวไม่แน่นอน นาบัวจึงเป็นทางเลือกใหม่ทางหนึ่งที่มีความเหมาะสมกับพื้นที่นาข้าว อีกทั้งนาบวยังสามารถดูแลรักษาง่ายกว่านาข้าว มีโรคและแมลงรบกวนน้อย ใช้น้ำน้อยกว่า สามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตทั้งในรูปดอกตูมและเก็บเมล็ด ซึ่งผลผลิตทั้งสองรูปแบบนี้ยังเป็นที่ต้องการของทั้งในประเทศและต่างประเทศ [3, 4, 5]

ปัจจุบันมีหลายจังหวัดได้นำเมล็ดบัวหลวงไปแปรรูปเป็นสินค้าโอท็อป เช่น วิสาหกิจชุมชนกลุ่มสตรีบึงสีไฟ อ.เมือง จ.พิจิตร ผลิต “เมล็ดบัวอบกรอบ” บรรจุกล่องพลาสติกและดีบัวแคปซูลจำหน่ายเป็นสินค้าโอท็อป ซึ่งมียอดจำหน่ายแต่ละปีกว่า 1.2 ล้านบาท [6]

เมล็ดบัวหลวงที่จะนำไปแปรรูปในปัจจุบันเริ่มจากการคัดแยกเมล็ดบัวที่มีขนาดเล็กออก แคะเปลือกโดยใช้มีด และลอกเยื่อจนได้เมล็ดบัวสีขาว ซึ่งขั้นตอนการทำงานดังกล่าวยังใช้แรงงานคนเป็นหลัก ทำให้ต้องใช้เวลาในการเตรียมเมล็ดบัวเพื่อการแปรรูปสูง อีกทั้งในประเทศไทยยังไม่มีเครื่องทุ่นแรงสำหรับใช้ในกระบวนการแปรรูปเมล็ดบัวหลวง ส่วนเครื่องทุ่นแรงที่มีใช้ในต่างประเทศ เช่นในประเทศจีนนั้นไม่เหมาะที่จะนำมาใช้กับเมล็ดบัวพันธุ์ที่นิยมปลูกในประเทศไทยเนื่องจากเมล็ดบัวหลวงมีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกัน และราคานำเข้าค่อนข้างแพง จึงได้มีการวิจัยและพัฒนาเครื่องแคะและลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวง [7, 8] รวมทั้งเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดบัวหลวงขึ้น [9, 10] เพื่อใช้งานในประเทศ ซึ่งเครื่องต้นแบบดังกล่าวที่ได้วิจัยมีเปอร์เซ็นต์ในการแคะและการกะเทาะเมล็ดบัวหลวงระหว่าง 79.8 - 81.0% จะเห็น

ว่าเครื่องต้นแบบไม่สามารถแคะหรือกะเทาะเปลือกเมล็ดบัวได้ประมาณ 20% เนื่องจากเมล็ดบัวกลุ่มนี้มีขนาดเล็กกว่าเมล็ดบัวกลุ่มที่แคะหรือกะเทาะได้สมบูรณ์ ซึ่งกรณีของเครื่องแคะเมล็ดบัวหลวงต้องทำการปรับตั้งระยะใบมีดของเครื่องให้เล็กลงจึงจะสามารถแคะเปลือกของเมล็ดบัวดังกล่าวได้ ส่วนเครื่องกะเทาะเปลือกก็ต้องปรับตั้งระยะของลูกกะเทาะให้เล็กลงเช่นกันทำให้เสียเวลาในการทำงาน ถ้ามีการคัดขนาดเมล็ดบัวหลวงก่อนป้อนเข้าเครื่องจะทำให้เครื่องดังกล่าวมีประสิทธิภาพการทำงานสูงขึ้น

ดังนั้นเพื่อเพิ่มศักยภาพการผลิตผลิตภัณฑ์สินค้าโอท็อปของวิสาหกิจชุมชนให้สูงขึ้น จึงได้ทำการวิจัยเพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการออกแบบและสร้างเครื่องคัดขนาดเมล็ดบัวหลวงเพื่อลดเวลาการทำงานในขั้นตอนการคัดขนาดเมล็ดบัวหลวงในกระบวนการแปรรูปเมล็ดบัวหลวง

2. อุปกรณ์และวิธีการ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างชุดทดสอบการคัดขนาดเมล็ดบัวหลวงสำหรับศึกษาค่าที่เหมาะสมในการออกแบบเครื่องคัดขนาดเมล็ดบัวหลวงที่ปลูกในประเทศไทย ซึ่งมีระเบียบวิธีการวิจัย ดังนี้

2.1 ศึกษาข้อมูลที่เป็นต่อการออกแบบ

2.1.1 ศึกษาปัญหาและวิธีการแคะเปลือกเมล็ดบัวหลวง

วัตถุประสงค์เพื่อให้ทราบถึงปัญหาและวิธีการแคะเปลือกเมล็ดบัวหลวงของเกษตรกรในปัจจุบัน เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับออกแบบและเปรียบเทียบการทำงานระหว่างเครื่องคัดขนาดเมล็ดบัวหลวงให้สอดคล้องกับวิธีที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน จากการสัมภาษณ์กลุ่มแม่บ้านบึงสีไฟ อ.เมือง จ.พิจิตร ได้ผลการศึกษาดังนี้

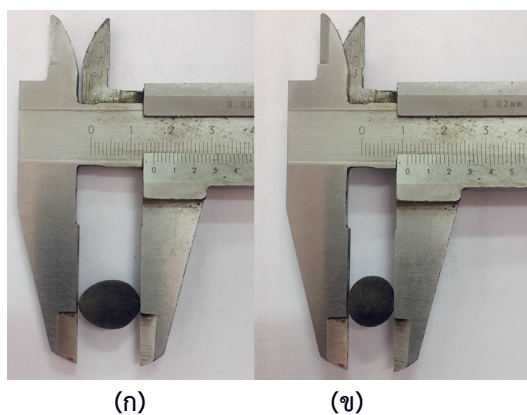
- แรงงานในกระบวนการผลิตมาจากแรงงานในกลุ่มสหกรณ์ในชุมชนซึ่งมีสมาชิก 30 คน หรือหมู่บ้านใกล้เคียง ซึ่งในปัจจุบันจำนวนแรงงานมีจำนวนลดลง
- ค่าจ้างแรงงานสำหรับคัดแยกเมล็ดบัว การแคะและลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวง 10 บาทต่อกิโลกรัม
- ปริมาณคัดแยกเมล็ดบัว การแคะและลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวงในแต่ละวันประมาณ 24-36 กิโลกรัม (ทำงานไม่เกิน 8 ชั่วโมง) โดยขึ้นอยู่กับความชำนาญในการทำงานของแรงงานแต่ละคน

- ปัญหาที่พบในขั้นตอนคัดแยกเมล็ดบัว การแกะและลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวง คือ ความล่าช้าในการทำงาน ความไม่ปลอดภัยในการทำงาน เช่น เกิดอุบัติเหตุจากมีดบาด [7, 8]

2.1.2 ลักษณะทางกายภาพของเมล็ดบัวหลวง

การศึกษาในขั้นตอนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้ข้อมูลลักษณะทางกายภาพของเมล็ดบัวหลวงสำหรับการใช้ในการออกแบบชุดทดสอบและเครื่องต้นแบบ ได้แก่ ความยาว (ก) และเส้นผ่านศูนย์กลาง (ข) ของเมล็ดบัวหลวง ดังรูปที่ 1 และความชื้นของเมล็ดบัวหลวงแห้ง (การหาความชื้นจะหาตามวิธีของ ASAE [11]) โดยเมล็ดบัวหลวงที่ใช้ศึกษาเป็นเมล็ดบัวหลวงแห้งที่เก็บจากบึงสีไฟ อ.เมือง จ.พิจิตร จากการสุ่มวัดขนาดเมล็ดบัวหลวงแห้งจำนวน 200 เมล็ด ด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ ได้เส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 11.2-12.7 mm มีค่าเฉลี่ย 11.8 ± 0.29 mm ความยาวระหว่าง 15.0-18.3 mm ค่าเฉลี่ย 16.1 ± 0.5 mm และความชื้นของเมล็ดบัว 7.5% w.b.

จากการวิเคราะห์หาค่าความถี่ของเส้นผ่านศูนย์กลางของเมล็ดบัวหลวงแห้ง โดยแบ่งขนาดของเมล็ดบัวออกเป็น 3 กลุ่ม คือ เมล็ดบัวขนาดเล็ก (เส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 11.5 mm) ขนาดกลาง (เส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 11.5-12.0 mm) และขนาดใหญ่ (เส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 12.0 mm) พบว่าเมล็ดบัวหลวงอยู่ในกลุ่ม ขนาดเล็ก ขนาดกลาง และขนาดใหญ่ เท่ากับ 11, 65 และ 24% ตามลำดับ โดยจะใช้ขนาดทั้ง 3 กลุ่มนี้กำหนดขนาดของรูตะแกรงของชุดคัดขนาด



รูปที่ 1 ความยาว (ก) และเส้นผ่านศูนย์กลาง (ข) ของเมล็ดบัวหลวง

2.2 ออกแบบและสร้างชุดทดสอบการคัดขนาดเมล็ดบัวหลวง

ชุดทดสอบการคัดขนาดเมล็ดบัวหลวงได้ออกแบบและสร้างขึ้นโดยใช้ข้อมูลที่เป็นต่อการออกแบบแล้ว ยังได้ประยุกต์ใช้ความรู้และหลักการออกแบบเครื่องจักรกลและเครื่องจักรกลเกษตร [12, 13, 14] รวมทั้งโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบและเขียนแบบ [15] ซึ่งมีส่วนประกอบหลักดังรูปที่ 2 (ก) คือ โครงสร้างหลัก ชุดคัดขนาด ถังป้อนเมล็ด ระบบส่งกำลัง และใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 1 แรงม้า เป็นต้นกำลัง มีรายละเอียด ดังนี้

โครงสร้างหลัก ใช้สำหรับติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ของเครื่องต้นแบบ มีขนาด 600x1,152x900 มิลลิเมตร (กว้างxยาวxสูง) สร้างจากเหล็กฉากขนาด 40x40 มิลลิเมตร หนา 4 มิลลิเมตร เชื่อมประกอบกันเป็นโครงสร้าง โดยอุปกรณ์ส่วนใหญ่ถูกยึดเข้ากับโครงสร้างด้วยนอตและสกรู

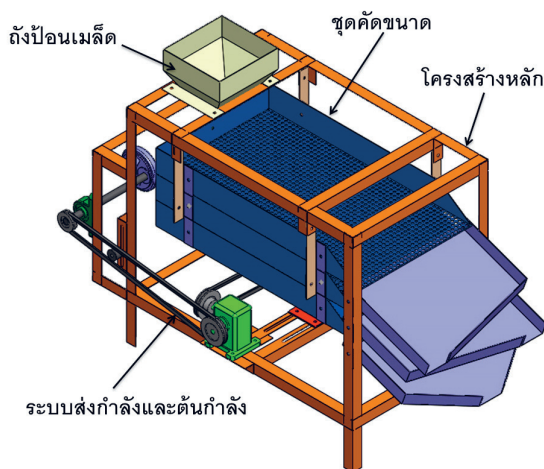
ชุดคัดขนาดเมล็ดบัวหลวง ทำหน้าที่คัดขนาดเมล็ดบัวหลวงออกเป็น 3 ขนาด สร้างจากตะแกรงเหล็ก (เจาะรูกลม) และเหล็กแผ่นหนา 2 มิลลิเมตร ประกอบด้วยตะแกรง 2 ชั้น ตะแกรงชั้นบนสุดรูตะแกรงขนาด 12 มิลลิเมตร (ใช้คัดขนาดเมล็ดบัวที่มีขนาดใหญ่กว่า 12 มิลลิเมตร) ตะแกรงชั้นกลางมีขนาดรู 11.5 มิลลิเมตร (ใช้คัดขนาดเมล็ดบัวที่มีขนาดระหว่าง 11.5-12 มิลลิเมตร) ส่วนชั้นสุดท้ายจะเป็นถาดรองรับเมล็ดที่มีขนาดเล็กกว่า 11.5 มิลลิเมตร ชุดตะแกรงมีขนาด 500x900 มิลลิเมตร (กว้างxยาว) ติดตั้งกับโครงสร้างหลักโดยไม่มีความลาดเอียง ใช้ลูกเบี้ยวเยื้องศูนย์เป็นอุปกรณ์ควบคุมการเคลื่อนที่โยกไปกลับของชุดคัดขนาด และใช้ชุดลูกเบี้ยวขนาดเล็กติดตั้งที่ด้านล่างของชุดคัดขนาด เพื่อให้ตะแกรงคัดขนาดเกิดการสั่นสะเทือนป้องกันไม่ให้เมล็ดบัวหลวงที่มีขนาดพอดีกับรูตะแกรงเข้าไปติดกับรูตะแกรง

ถังป้อนเมล็ดถูกออกแบบให้มีปริมาตรบรรจุเมล็ดบัวหลวงขั้นต่ำ 5 กิโลกรัม สร้างจากเหล็กแผ่นหนา 2 มิลลิเมตร เชื่อมประกอบกันมีลักษณะดังรูปที่ 2 ช่องทางออกของถังป้อนเมล็ดที่ป้อนเมล็ดบัวเข้าสู่ชุดคัดขนาด สามารถปรับขนาดช่องป้อนได้ 3 ระดับ คือ ขนาดเล็ก (5×3 เซนติเมตร²) ขนาดกลาง (5×5 เซนติเมตร²) และขนาดใหญ่ (5×10 เซนติเมตร²)

ระบบส่งกำลัง การส่งกำลังไปยังส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่องต้นแบบ เช่น ลูกเบี้ยวเยื้องศูนย์ จะใช้

พูลเลย์และสายพาน เนื่องจากออกแบบง่าย ไม่เกิดเสียงดังขณะทำงาน และราคาถูก

หลักการทำงานของเครื่องเริ่มจากผู้ทำงานป้อนเมล็ดบัวหลวงลงในถังป้อนเมล็ดบัวหลวงเข้าทางด้านบนของเครื่อง หลังจากนั้นเมล็ดบัวหลวงจะไหลเข้าสู่ชุดคัดขนาดที่ประกอบด้วยตะแกรงโยก 3 ชั้น ที่สามารถคัดขนาดเมล็ดบัวได้ 3 ขนาด และเมล็ดบัวหลวงที่ผ่านการคัดขนาดจะไหลสู่ช่องทางออกต่างๆ ทางด้านหน้าเครื่อง เพื่อให้เมล็ดบัวหลวงไหลออกมาสู่ภาชนะที่รองรับ ซึ่งเครื่องต้นแบบที่สร้างเสร็จแสดงดังรูปที่ 2(ข)



ก) แบบเครื่องต้นแบบเขียนด้วยโปรแกรมด้าน CAD



ข) ชุดทดสอบการคัดขนาดเมล็ดบัวหลวง

รูปที่ 2 แบบและชุดทดสอบการคัดขนาดเมล็ดบัวหลวง

2.3 ทดสอบและประเมินสมรรถนะชุด

ทดสอบ

ชุดทดสอบการคัดขนาดเมล็ดบัวหลวงได้ถูกทดสอบและประเมินสมรรถนะในการทำงาน รวมทั้งความแม่นยำในการคัดขนาดเมล็ดบัวหลวง โดยใช้ความแม่นยำในการคัดขนาด ความสามารถในการทำงานจริง เปอร์เซ็นต์ความเสียหายของเมล็ด และการใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นค่าชี้ผลการศึกษา ซึ่งคำนวณได้จากสมการ ดังนี้

1) ความแม่นยำในการคัดขนาด (%)

$$\frac{\text{น้ำหนักของเมล็ดบัวหลวงที่มีขนาดถูกต้องหลังการคัด}}{\text{น้ำหนักของเมล็ดบัวหลวงตามขนาดที่กำหนดทั้งหมด}} \times 100 \quad (1)$$

2) ความสามารถในการทำงานจริง (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)

$$\frac{\text{น้ำหนักของเมล็ดบัวหลวงที่คัดได้}}{\text{เวลาในการทำงานทั้งหมด}} \times 100 \quad (2)$$

3) เปอร์เซ็นต์ความเสียหายของเมล็ด (%)

$$\frac{\text{น้ำหนักของเมล็ดบัวหลวงที่เสียหาย}}{\text{น้ำหนักของเมล็ดบัวหลวงทั้งหมด}} \times 100 \quad (3)$$

4) การสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า (kW-hr)

$$= \frac{IVt}{1000} \quad (4)$$

เมื่อ I = กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

V = แรงเคลื่อนไฟฟ้า (โวลต์)

t = เวลา (ชั่วโมง)

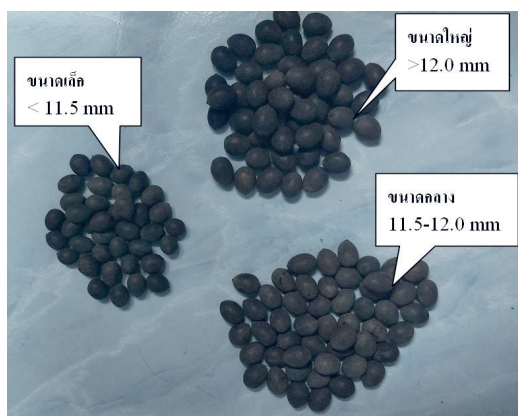
จากการทดสอบเบื้องต้นพบว่าต้องเดินเครื่องที่ความเร็วรอบของเพลาลูกเบี้ยวน้อยกว่า 135 รอบต่อนาที ซึ่งถ้าความเร็วของเพลาลูกเบี้ยวสูงกว่านี้เมล็ดบัวหลวงจะไหลเคลื่อนที่เร็วทำให้ความแม่นยำในการคัดขนาดลดลง ดังนั้นปัจจัยที่ทำการศึกษามี 2 ปัจจัย คือ ขนาดช่องป้อน 3 ระดับ คือ ขนาดเล็ก (5x3 เซนติเมตร²) ขนาดกลาง (5x5 เซนติเมตร²) และขนาดใหญ่ (5x10 เซนติเมตร²) เข้าสู่ชุดตะแกรงคัดขนาด และความเร็วของเพลาลูกเบี้ยว 3 ระดับ คือ 115, 125 และ 135 รอบต่อนาที

การทดสอบใช้เมล็ดบัวหลวงพันธุ์พุ่มตลอดการทดสอบ โดยแต่ละการทดสอบใช้เมล็ดบัวหลวง 3 กิโลกรัม ป้อนลงในถังป้อนอย่างต่อเนื่อง ประกอบด้วยเมล็ดบัวหลวงที่มีขนาดใหญ่กว่า 12.0 มิลลิเมตร ขนาดระหว่าง 11.5-12.0 มิลลิเมตร และขนาดเล็กกว่า 11.5 มิลลิเมตร อย่างละ 1 กิโลกรัม ผสมรวมกัน และบันทึกเวลาที่ใช้ในการทำงานทั้งหมด กระแสไฟฟ้า น้ำหนัก

เมล็ดบัวที่ไหลออกมาจากช่องทางออกต่างๆ น้ำหนักเมล็ดบัวที่ปนกับเมล็ดบัวขนาดอื่น และน้ำหนักเมล็ดบัวที่เสียหาย เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณค่าชี้ผลการศึกษา และวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS เวอร์ชัน 20 ที่ระดับความแตกต่างทางสถิติ 95% (One-way analysis of variance (ANOVA)) และทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตามวิธีของ Duncan New's Multiple Range Test (DMRT)

3. ผลการวิจัย

ในการทดสอบสมรรถนะการทำงานของชุดคัดขนาดเมล็ดบัวหลวง เครื่องสามารถคัดขนาดเมล็ดบัวหลวงได้ 3 ขนาด แสดงดังรูปที่ 3 คือ ขนาดใหญ่กว่า 12.0 มิลลิเมตร ขนาดระหว่าง 11.5-12.0 มิลลิเมตร และขนาดเล็กกว่า 11.5 โดยการทดสอบไม่พบเมล็ดบัวหลวงที่แตกเสียหายหลังจากการทดสอบ



รูปที่ 3 เมล็ดบัวหลวงหลังการทดสอบ

ซึ่งผลการทดสอบชุดคัดขนาดเมล็ดบัวหลวงที่ขนาดช่องป้อนและความเร็วของเพลาลูกเบี้ยวต่างๆ จะนำเสนอตามค่าชี้ผลการศึกษา ดังนี้

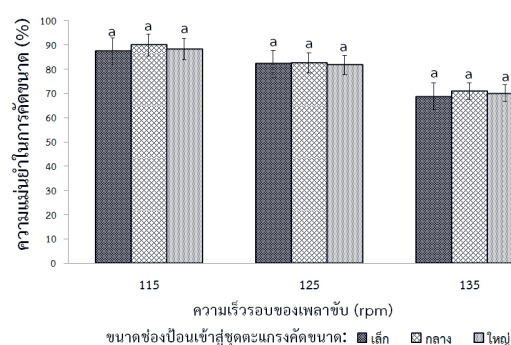
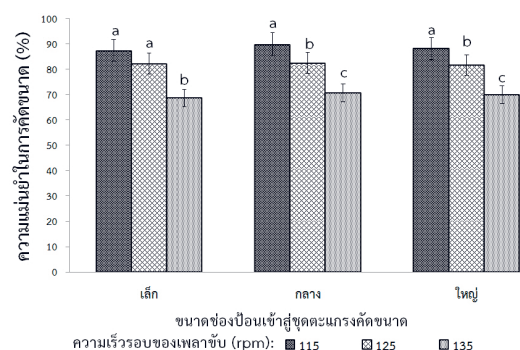
3.1 ความแม่นยำในการคัดขนาด

จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าความแม่นยำในการคัดขนาดเมล็ดบัวหลวงมีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ในการทดสอบโดยใช้ความเร็วของเพลาลูกเบี้ยวต่างๆ ของแต่ละกลุ่มขนาดช่องป้อน และไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติในการทดสอบโดยใช้ขนาดช่องป้อนต่างๆ ของแต่ละกลุ่มความเร็วของเพลาลูกเบี้ยว ดังรูปที่ 4

จากผลการทดสอบชุดคัดขนาดเมล็ดบัวหลวงดังรูปที่ 4 ที่ขนาดช่องป้อน ขนาดเล็ก ขนาดกลาง และขนาดใหญ่ โดยกำหนดความเร็วของเพลาลูกเบี้ยว 115, 125 และ 135 รอบต่อนาที ตามลำดับ พบว่ามีค่าความแม่นยำในการคัดขนาดระหว่าง 68.7- 89.8% จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มความเร็วรอบของเพลาลูกเบี้ยวขึ้น ความแม่นยำในการคัดขนาดเมล็ดบัวหลวงจะลดลงในทุกๆ ขนาดของช่องป้อน เนื่องจากเมล็ดบัวหลวงจะไหลเคลื่อนที่เร็วขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วรอบทำให้ความแม่นยำในการคัดขนาดลดลงนั่นเอง

ส่วนในกรณีที่ทดสอบโดยใช้ความเร็วรอบในกลุ่มเดียวกัน พบว่าขนาดของช่องป้อนต่างๆ ไม่มีผลต่อความแม่นยำในการคัดขนาดเมล็ดบัวหลวง

จากผลการทดลองชุดทดสอบสามารถคัดขนาดเมล็ดบัวหลวงได้ดีที่สุดที่ช่องป้อนขนาดกลาง (5x5 เซนติเมตร²) และความเร็วของเพลาลูกเบี้ยว 115 รอบต่อนาที มีความแม่นยำในการคัดขนาด 89.8%



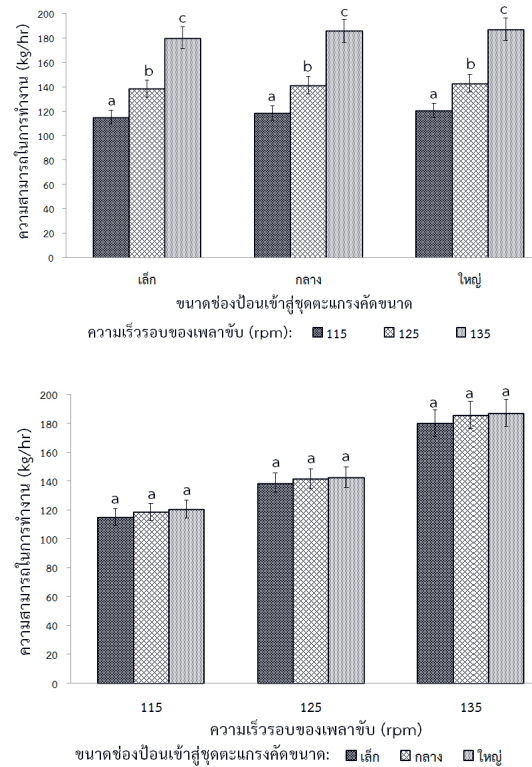
รูปที่ 4 ความแม่นยำในการคัดขนาดเมล็ดบัวหลวงที่ขนาดช่องป้อนและความเร็วของเพลาลูกเบี้ยวต่างๆ (abc อักษรที่แตกต่างกันในแต่ละชุดการทดสอบแสดงว่าความแม่นยำในการคัดขนาดมีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05)

3.2 ความสามารถในการทำงานของเครื่อง

จากการวิเคราะห์ทางสถิติดังรูปที่ 5 พบว่าความสามารถในการทำงานมีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ในการทดสอบโดยใช้ความเร็วของเพลาลูกเบี้ยวต่างๆ ของแต่ละขนาดช่องป้อน และไม่มี ความแตกต่างทางสถิติในการทดสอบโดยใช้ขนาดช่องป้อนต่างๆ ของแต่ละกลุ่มความเร็วของเพลาลูกเบี้ยว

จากผลการทดลองโดยใช้ขนาดช่องป้อน และความเร็วของเพลาลูกเบี้ยวต่างๆ ดังรูปที่ 5 พบว่าความสามารถในการทำงานมีค่าระหว่าง 115.2- 187.2 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ซึ่งความสามารถในการทำงานจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วรอบของเพลาลูกเบี้ยวในทุกๆ ขนาดของช่องป้อน เนื่องจากเมล็ดบัวหลวงจะไหลเคลื่อนที่เร็วขึ้นทำให้เมล็ดบัวเคลื่อนที่เข้าสู่ตะแกรงคัดในปริมาณมากขึ้นและเร็วขึ้น แต่ความแม่นยำในการคัดขนาดก็จะลดลงดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ส่วนในกรณีที่ทดสอบโดยใช้ความเร็วรอบในกลุ่มเดียวกัน พบว่าขนาดของช่องป้อนต่างๆ ไม่มีผลต่อความสามารถในการทำงานเช่นเดียวกับความแม่นยำในการคัดขนาด เมล็ดบัวหลวง

จากผลการทดลองชุดทดสอบสามารถคัดขนาด เมล็ดบัวหลวงได้แม่นยำที่สุด (89.8%) ที่ช่องป้อนขนาดกลาง (5x5 เซนติเมตร²) และความเร็วของเพลาลูกเบี้ยว 115 รอบต่อนาที มีความสามารถในการทำงาน 118.5 กิโลกรัมต่อชั่วโมง หรือคิดเป็น 948.0 กิโลกรัมต่อวัน (1 วันทำงาน 8 ชั่วโมง) ซึ่งคณะวิจัยจะได้นำค่านี้ไปใช้ในการศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะการทำงานกับเครื่องคัดขนาดเมล็ดบัวหลวงแบบอื่นๆ ต่อไป เช่น เครื่องคัดแบบตะแกรงทรงกระบอกหมุน และเครื่องคัดขนาดแบบลูกกลิ้งคู่ เป็นต้น

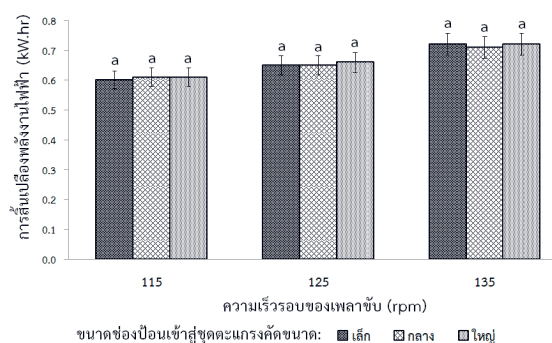
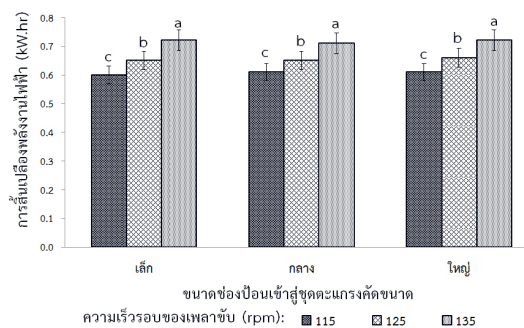


รูปที่ 5 ความสามารถในการทำงานที่ขนาดช่องป้อนและความเร็วของเพลาลูกเบี้ยวต่างๆ (^{abc} อักษรที่แตกต่างกันในแต่ละชุดการทดสอบแสดงความสามารถในการทำงานมีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05)

3.3 การสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า

จากการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่าการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้ามีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ในการทดสอบโดยใช้ความเร็วของเพลาลูกเบี้ยวต่างๆ ของแต่ละขนาดช่องป้อน และไม่มี ความแตกต่างทางสถิติในการทดสอบโดยใช้ขนาดช่องป้อนต่างๆ ของแต่ละกลุ่มความเร็วของเพลาลูกเบี้ยว ดังรูปที่ 6

จากผลการทดสอบดังรูปที่ 6 พบว่าช่วงความเร็วที่ใช้ขับเคลื่อนคัดขนาดเมล็ดบัวหลวง มีการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามความเร็วการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ามีค่าระหว่าง 0.60-0.72 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ซึ่งจะนำค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าของมอเตอร์ขับเคลื่อนความเร็วของเพลาลูกเบี้ยว 115 รอบต่อนาที เท้ากับ 0.61 กิโลวัตต์-ชั่วโมง เปรียบเทียบกับเครื่องคัดขนาดเมล็ดบัวหลวงแบบอื่นๆ ต่อไป



รูปที่ 6 การสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าที่ขนาดช่องป้อนและความเร็วของเพลาลูกเบี้ยวต่างๆ (^{abc}อักษรที่แตกต่างกันในแต่ละชุดการทดสอบแสดงว่าการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้ามีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05)

4. สรุปผลการทดลอง

จากการทดสอบสมรรถนะชุดคัดขนาดเมล็ดบัวหลวงโดยใช้ค่าชี้ผลการศึกษา คือ เปอร์เซ็นต์ความแม่นยำในการคัดขนาด เปอร์เซ็นต์ความเสียหายความสามารถในการทำงาน และการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า พบว่าชุดทดสอบสามารถคัดขนาดเมล็ดบัวหลวงได้ดีที่สุดที่ช่องป้อนขนาดกลาง (5x5 เซนติเมตร²) และความเร็วของเพลาลูกเบี้ยว 115 รอบต่อนาที มีความแม่นยำในการคัดขนาด 89.8% ไม่มีเมล็ดบัวหลวงเสียหาย ความสามารถในการทำงาน 118.5 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และใช้พลังงานไฟฟ้า 0.61 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ซึ่งค่าที่ได้จากการศึกษานี้สามารถนำไปใช้เปรียบเทียบสมรรถนะการทำงานกับเครื่องคัดขนาดเมล็ดบัวหลวงแบบอื่นๆ ที่คณะวิจัยจะได้ศึกษาเพิ่มเติมเพื่อให้ได้เครื่องคัดขนาดเมล็ดบัวหลวงที่เหมาะสมที่สุดสำหรับใช้ทดแทนแรงงานคนได้ในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากงบประมาณรายจ่ายประจำปี 2562 ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี โดยคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) รวมทั้งภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่สนับสนุนสถานที่และอุปกรณ์ในการทดสอบต่างๆ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Jolly R S. Benefits of the lotus plant [Internet]. Mumbai. 2018 October- [cited 2019 January 25]; Available from: <https://caloriebee.com/nutrition/Health-Benefits-Of-Lotus-Roots-Or-Stem-Seeds-Leaves-And-Flowers>.
- [2] Suksawat W. 7 benefits of Thai grains [Internet]. Bangkok. 2017 Jun- [cited 2018 April 23]; Available from: <http://www.tnews.co.th/contents>.
- [3] Lotus production situation [Internet]. Bangkok. Department of Agriculture Extension. [updated 2017 May 16; cited 2018 Jul 9]. Available from: <http://www.doae.go.th/LIBRARY/>.
- [4] Suwannaro T. Lotus farming. Extension and Training Office. Bangkok: Kasetsart University; 2007.
- [5] Mueangsuk S. Lotus farming in Bueng Kan [Internet]. Bangkok, kaosod Online. 2016 Feb- [cited 2016 Feb 15]. Available from: https://www.kaosod.co.th/view_newsonline.php?newsid.
- [6] Vijitwittayapong P. 2552. Lotus seeds product of Phichit [Internet]. Bangkok, Matichon Online. 2013 Jun- [cited 2013 Feb 13]. Available from: http://www.matichon.co.th/matichon/view_news.
- [7] Langkapin J, Parnsakhorn S, Kalsirisilp R, Prorod M, Khotpromsrt N. Study and testing of a lotus seed peeling machine. Journal of Engineering RMUTT. 2018;1:35-42. (in Thai)

- [8] Langkapin J, Parnsakhorn S, Kalsirisilp R, Samseemoung G, Ngmanil P, Juey T. Design and fabrication of a lotus seed membrane peeling machine. Journal of Engineering RMUTT. 2019;1:127-37. (in Thai)
- [9] Langkapin J, Sunan Parnsakhorn S, Akarakulthon P. Development of a dry lotus seed sheller, Thai Society of Agricultural Engineering Journal. 2015; 1:38-44. (in Thai)
- [10] Langkapin J, Parnsakhorn S, Kalsirisilp R, Sangsawang S. Development of a dried lotus seed sheller, Research Journal RMUTT, 2018;2:11-22. (in Thai)
- [11] Anon. Moisture measurement. ASAE Standard S 410, Agricultural Engineers handbook. 1983; pp. 329-30.
- [12] Langkapin J. Theory of agricultural machines. 1 st ed. Bangkok: Triple Education Co., Ltd; 2015. (in Thai)
- [13] Krutz, G, Thomson, L and Claar, P. Design of agricultural machinery. 1st ed. New York: John Wiley and Sons, 1994.
- [14] Shigley J.E. and Mischke C.R. Mechanical engineering design. 5th ed, USA: McGraw-Hill Book Company; 1989.
- [15] Langkapin J. Solidworks. 3 nd. Bangkok: Triple Education Co., Ltd; 2018. (in Thai)

การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยการปรับจูนแบบคลุ่มเครือ สำหรับควบคุมอัตราเร็วรอบเครื่องยนต์แก๊สโซลีน

เอกณรงค์ ใจยงค์^{1*}
akenarong@rsu.ac.th^{1*}

^{1*} ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต

Received	: 11-Oct-2019
Revised	: 23-Jan-2020
Accepted	: 11-Feb-2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ออกแบบตัวควบคุมสำหรับควบคุมอัตราเร็วรอบเครื่องยนต์แก๊สโซลีน ตัวควบคุมที่นำเสนอเป็นตัวควบคุมพีซีลอจิกแบบพีไอดีที่สามารถปรับค่าเกนตัวควบคุมได้ โดยอินพุตของตัวควบคุมมีสองตัวคือ ค่าความคลาดเคลื่อน และค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของความคลาดเคลื่อน เอาต์พุตของตัวควบคุมคือเกน K_p , K_i และ K_d กฎการควบคุมถูกสร้างจากเงื่อนไขทางภาษาจำนวน 25 กฎ งานวิจัยอาศัยแบบจำลองเครื่องยนต์และพารามิเตอร์เครื่องยนต์แก๊สโซลีนของ Crossley และ Cook ในการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB สมรรถนะของตัวควบคุมที่นำเสนอถูกเปรียบเทียบกับตัวควบคุมพีซีลอจิกแบบพีไอ ตัวควบคุมพีไอดี และตัวควบคุมพีไอ ผลการจำลองตัวควบคุมที่นำเสนอสามารถติดตามสัญญาณอ้างอิงได้เร็วที่สุดในเวลา 1.46 วินาทีโดยไม่พบค่าพุ่งเกิน และสามารถกำจัดการรบกวนจากการเบรคภายในเวลา 2.35 วินาที

คำสำคัญ: เครื่องยนต์แก๊สโซลีน ตัวควบคุมพีซีลอจิกแบบพีไอดี

Design of Fuzzy Tuned PID Controller for Speed Control of a Gasoline Engine

Akenarong Jaiyong^{1*}
akenarong@rsu.ac.th^{1*}

^{1*} Department of Mechanical Engineering, College of Engineering, Rangsit University

Received	: 11-Oct-2019
Revised	: 23-Jan-2020
Accepted	: 11-Feb-2020

Abstract

The objective of this research was to design a controller for speed control of a gasoline engine. The proposed control scheme was a fuzzy PID controller with adaptive gains. It had two inputs, the error and the rate of change of error. The controller outputs were K_p , K_i and K_d gains. The control rules were created from 25 linguistic conditions. In this research, the Crossley and Cook's gasoline engine models and the corresponding parameters were employed by using MATLAB program. Performance of the proposed controller was compared with that of the fuzzy PI controller, PID controller, and PI controller. It appeared from simulations that the output of the proposed controller could reach a constant speed reference input as the fastest at 1.46 seconds, with no overshoot. The breaking disturbance was rejected within 2.35 seconds.

Keywords: gasoline engine, fuzzy PID controller.

1. บทนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีระบบควบคุมยานยนต์มีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว หลายเทคโนโลยีถูกพัฒนาเป็นระบบควบคุมพื้นฐานในรถ เช่น ระบบควบคุมอัตราเร็วรอบเดินเบา ระบบควบคุมอัตราเร็วรถคงที่ (vehicle cruise speed control) ระบบรักษาเสถียรภาพการทรงตัวของรถ ระบบควบคุมเหล่านี้ล้วนมีความสัมพันธ์ต่ออัตราเร็วรอบเครื่องยนต์ และแรงบิดทั้งสิ้น

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์เป็นสิ่งที่ได้รับความสนใจสำหรับการวิจัยเพื่อวัตถุประสงค์ที่หลากหลาย เช่น งานวิจัย[1] อธิบายการประมาณแบบจำลองเชิงเส้นและการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบเครื่องยนต์ที่ไม่ต่อเนื่องงานวิจัย[2] อธิบายพลศาสตร์ของเครื่องยนต์ที่ถูกประมาณเป็นแบบจำลองเชิงเส้น งานวิจัย[3] นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์สันดาปภายในพร้อมวาล์วแปรผันและเพลาลูกเบี้ยว ระบบอื่นๆของเครื่องยนต์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นถูกอธิบายใน[4] ซึ่งแบบจำลองเหล่านี้มีความเกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์ทางกายภาพหลายตัวแปร โดยทั่วไปสิ่งเหล่านี้มาจากการทดลองและการวัดในห้องปฏิบัติการ พารามิเตอร์เหล่านี้เช่น ประสิทธิภาพและค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการไหล และพารามิเตอร์การประมาณระบบเชิงเส้นสำหรับส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่องยนต์ ในปี ค.ศ. 1991 Crossley และ Cook [2], [5-6] ได้อธิบายระบบเครื่องยนต์ที่ไม่ต่อเนื่องและนำเสนอแบบจำลองเครื่องยนต์สันดาปภายใน 4 จังหวะ โดยผลการจำลองถูกยืนยันด้วยผลการทดลองจากไดนาโมมิเตอร์

สำหรับการควบคุมอัตราเร็วรอบเดินเบา ในปี ค.ศ. 1769 [7] เจมส์ วัตต์ ได้ประดิษฐ์เครื่องจักรไอน้ำสามารถควบคุมอัตราเร็วรอบเครื่องจักรจากระบบทางกล โดยออกแบบมวลเฉื่อยทรงกลมหมุนรอบเพลตามอัตราเร็วรอบเครื่อง กรณีสถาพรเร็วรอบสูง มวลเฉื่อยจะเคลื่อนที่กดแหวนสปริงที่สวมในเพล และส่งกำลังกดลิ้นลดอัตราการไหลของไอน้ำ ทำให้อัตราเร็วรอบเครื่องจักรไอน้ำลดลง สำหรับเครื่องยนต์งานวิจัย[8] อธิบายการควบคุมแบบ Sliding mode ควบคุมตำแหน่งลิ้นปีกผีเสื้อเครื่องยนต์ นอกจากนั้นการออกแบบตัวควบคุมได้ถูกนำเสนอหลายวิธี เช่น งานวิจัย [9] Rout MK และคณะ ใช้เทคนิคการวางโพลออกแบบตัวควบคุมพีไอดี (Proportion – Integral –

Derivative Controller: PID) สำหรับระบบควบคุมอัตราเร็วเครื่องยนต์ การเลือกใช้ตัวควบคุมดังกล่าวมีข้อดีที่ความยืดหยุ่นในการปรับเกนตัวควบคุมโดยไม่ต้องทราบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ แต่ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ได้นั้นก็ไม่สามารถนำไปใช้ในการควบคุมตำแหน่งลิ้นปีกผีเสื้อได้ทันที ซึ่งในทางปฏิบัติจะปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมอย่างละเอียดภายหลัง

สำหรับการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมพีไอดี ข้างต้นจะอาศัยผู้มีประสบการณ์สังเกตผลตอบสนองของการปรับเกนตัวควบคุม ซึ่งภายหลังถูกสร้างเป็นกฎที่มีความคลุมเครือและอาศัยคณิตศาสตร์สร้างความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันอินพุตและเกนตัวควบคุมพีไอดี การปรับเกนตัวควบคุมถูกนำเสนอเช่นตัวควบคุมแบบ Fuzzy Logic [10-11] Optimal Fuzzy PID [12] Fuzzy Adaptive PID [13] และ Fuzzy Self-tuning PID [14] เป็นต้น

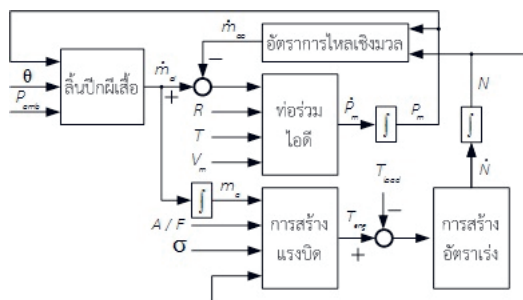
งานวิจัยดังกล่าวถูกใช้ในการปรับแต่งตัวควบคุมพีไอดี โดยมีจุดประสงค์ออกแบบตัวควบคุมที่สามารถรักษาอัตราเร็วรอบเดินเบาในขณะรถรับแรงบิดรบกวนจากการทำงานของเครื่องยนต์ ซึ่งต่อมาแนวคิดดังกล่าวถูกพัฒนาเป็นระบบรักษาอัตราเร็วของตัวรถคงที่

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดีด้วยการปรับจูนแบบคลุมเครือสำหรับควบคุมอัตราเร็วรอบเครื่องยนต์แก๊โซลีน โดยอาศัยข้อมูลจากแบบจำลองเครื่องยนต์ Crossley และ Cook [2], [5-6] สมรรถนะการติดตามสัญญาณอ้างอิง และการกำจัดแรงบิดรบกวนที่เพลาลูกเบี้ยวของตัวควบคุมที่ออกแบบจะถูกเปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุมแบบพีซีลอสจิกและตัวควบคุมพีไอดีแบบพื้นฐาน

2.แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์แก๊โซลีน

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สร้างแบบจำลองระบบเครื่องยนต์ อาศัยหลักการพื้นฐานทางอุณหพลศาสตร์ กลศาสตร์ของไหล และกลศาสตร์วัสดุ หลักการเหล่านี้มีความสัมพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้น ถูกนำเสนอด้วยสมการเชิงซ้อนและค่าพารามิเตอร์ของระบบที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา การทำงานเครื่องยนต์สันดาปภายในสี่จังหวะเริ่มจากเมื่อลิ้นไอดีอยู่ในตำแหน่งเปิดลิ้นไอดีอยู่ในตำแหน่งปิด ลูกสูบจะดูดของไหลซึ่งเป็นส่วนผสมของอากาศและน้ำมันผ่าน

ลิ้นปีกผีเสื้อผ่านท่อร่วมไอดีเข้าสู่ห้องเผาไหม้ จากนั้นลิ้นไอดีจะปิดลูกสูบจะเคลื่อนที่อัดของไหลดังกล่าว เมื่อมีสัญญาณจุดระเบิด การสันดาปจะเกิดขึ้นและสร้างแรงบิดส่งกำลังมายังเพลาข้อเหวี่ยง จากนั้นลิ้นไอดีจะเปิดระบายไอดีและเริ่มจังหวะดูดอีกครั้ง การทำงานระบบเครื่องยนต์ดังกล่าว สามารถอธิบายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของลิ้นปีกผีเสื้อ (Throttle) ท่อร่วมไอดี (Intake manifold) อัตราการไหลเชิงมวล (Mass flow rate) จังหวะอัดอากาศผสมน้ำมัน (Compression stroke) และการสร้างแรงบิดและอัตราเร่ง (Torque generation and acceleration) ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์

2.1 ลิ้นปีกผีเสื้อ

อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่เข้าสู่ท่อร่วมไอดี $\dot{m}_{ai}$ เป็นผลคูณของฟังก์ชันตำแหน่งเชิงมุมของลิ้นปีกผีเสื้อ $f(\theta)$ และฟังก์ชันความดันท่อร่วมไอดี $g(P_m)$ ดังสมการที่ 1

$$\dot{m}_{ai} = f(\theta)g(P_m) \quad (1)$$

$$f(\theta) = 2.821 - 0.05231\theta + 0.10299\theta^2 - 0.00063\theta^3$$

เมื่อ

θ คือ ตำแหน่งเชิงมุมของลิ้นปีกผีเสื้อ [deg]

P_m คือ ความดันท่อร่วมไอดี [bar]

P_{amb} คือ ความดันสถานะนิ่ง [bar]

ฟังก์ชันความดันท่อร่วมไอดีมีความสัมพันธ์กับความดันสถานะนิ่งโดย

$$g(P_m) = \begin{cases} 1, & P_m \leq \frac{P_{amb}}{2} \\ \frac{2}{P_{amb}} \sqrt{P_m P_{amb} - P_m^2}, & \frac{P_{amb}}{2} \leq P_m \leq P_{amb} \\ -\frac{2}{P_m} \sqrt{P_m P_{amb} - P_{amb}^2}, & P_{amb} \leq P_m \leq 2P_{amb} \\ -1, & P_m \geq 2P_{amb} \end{cases}$$

2.2 ท่อร่วมไอดี

จากกฎของแก๊สในอุดมคติแบบจำลองท่อร่วมไอดีถูกแสดงเป็นสมการอนุพันธ์เทียบเวลา เมื่อไม่มีระบบหมุนเวียนไอดี (Exhaust Gas Recirculation: EGR) อัตราการเปลี่ยนแปลงความดันท่อร่วมไอดี $\dot{P}_m$ จึงเป็นผลต่างระหว่างค่าเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ผสมน้ำมันก่อนและหลังท่อร่วมไอดีดังสมการที่ 2

$$\dot{P}_m = K_m (\dot{m}_{ai} - \dot{m}_{ao}) \quad (2)$$

เมื่อ

$$K_m = RT/V_m$$

R คือ ค่าคงที่ของแก๊สอุดมคติ [J/kg.K]

T คือ อุณหภูมิท่อร่วมไอดี [K]

V_m คือ ปริมาตรท่อร่วมไอดี [m^3]

$\dot{m}_{ao}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลอากาศผสมน้ำมันหลังท่อร่วมไอดี [g/s]

K_m คือ ค่าคงที่อัตราการไหลเชิงมวลของท่อร่วมไอดี

2.3 อัตราการไหลเชิงมวล

อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศผสมน้ำมันหลังท่อร่วมไอดีถูกอธิบายด้วยความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วรอบเครื่องยนต์ N ในหน่วย [rad/s] และความดันท่อร่วมไอดีดังสมการที่ 3

$$\dot{m}_{ao} = -0.366 + 0.08979NP_m \quad (3)$$

$$-0.0337NP_m^2 + 0.0001N^2P_m$$

2.4 จังหวะอัด

การทำงานของเครื่องยนต์สันดาปภายใน 4 จังหวะ ในหนึ่งรอบการทำงานจะทำให้เพลาค้อเหวี่ยง หมุน 2 รอบ หรือ 720 องศา ทุกๆ การหมุน 180 องศา แบบจำลองเครื่องยนต์ที่นำเสนอตั้งรูปที่ 2 จะสร้างสัญญาณจาก Valve timing กำหนดจังหวะการดูด อัด ระเบิด และคาย ในช่วงจังหวะดูด สัญญาณที่สร้างข้างต้นจะหยุดการทำงานของตัวอินทิเกรเตอร์ และเริ่มแปลงอัตราการไหลเชิงมวลของไหลเป็นมวลอากาศที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้รอบใหม่ จังหวะการอัดเป็น จังหวะที่ 2 เริ่มการทำงานเมื่อลูกสูบเคลื่อนสู่ศูนย์ตายล่าง (Bottom Dead Center: BDC) ลิ้นไอดีและไอเสีย ถูกปิด ลูกสูบจะอัดส่วนผสมของอากาศและน้ำมันจน ลูกสูบอยู่ในตำแหน่งศูนย์ตายบน (Top Dead Center: TDC) ช่วงนี้แบบจำลองเครื่องยนต์จะหน่วงเวลาจนกว่า จะมีสัญญาณกำหนดจังหวะอีกครั้ง จังหวะระเบิดจะ เริ่มก่อนที่ลูกสูบเคลื่อนสู่ TDC เล็กน้อย การสันดาปจะ เกิดขึ้นและส่งกำลังทางกลขับเพลาค้อเหวี่ยง

2.5 การสร้างแรงบิดและอัตราเร่ง

องค์ประกอบสุดท้ายของแบบจำลองคือ การสร้างแรงบิดและอัตราเร่งของเครื่องยนต์ แรงบิดใน สมการที่ 4 เป็นฟังก์ชันของมวลอากาศในห้องเผาไหม้ อัตราส่วนผสมของอากาศกับน้ำมัน องศาการจุดระเบิด ล่วงหน้า และความเร็วรอบเครื่องยนต์

$$T_{eng} = -181.3 + 379.36m_a + 21.91(A/F) - 0.85(A/F)^2 + 0.26\sigma - 0.0028\sigma^2 + 0.027N - 0.000107N^2 + 0.00048N\sigma + 2.55\sigma m_a - 0.05\sigma^2 m_a \quad (4)$$

เมื่อ

m_a คือ มวลอากาศในห้องเผาไหม้ [g]

σ คือ องศาจุดระเบิดล่วงหน้า [deg]

T_{eng} คือ แรงบิดเครื่องยนต์ [N.m]

A/F คือ อัตราส่วนผสมอากาศและน้ำมัน

โดยอาศัยกฎของนิวตัน-ออยเลอร์สามารถ อธิบายอัตราเร่งเชิงมุมของเครื่องยนต์ ดังสมการที่ 5

$$J\dot{N} = T_{eng} - T_{load} \quad (5)$$

เมื่อ

T_{load} คือ ภาระแรงบิดเครื่องยนต์ [N.m]

$\dot{N}$ คือ อัตราเร่งเชิงมุมเครื่องยนต์ [rad/s²]

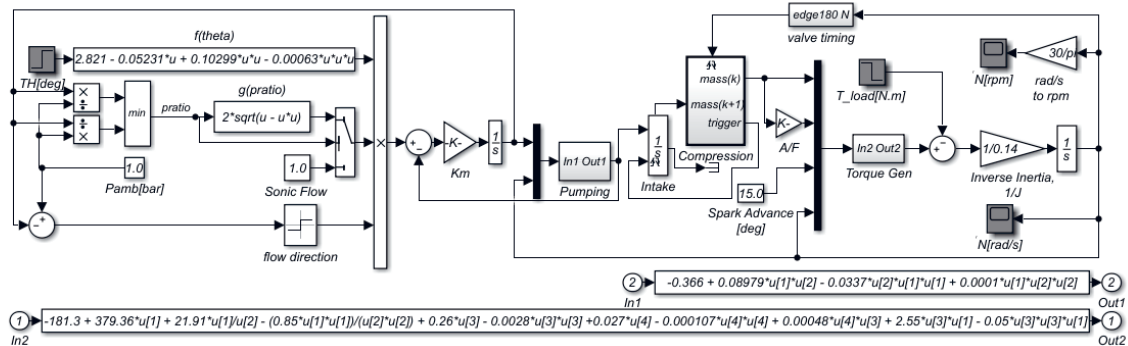
J คือ โมเมนต์ความเฉื่อยเครื่องยนต์ [kg.m²]

3. การจำลองผลตอบสนองวงเปิด

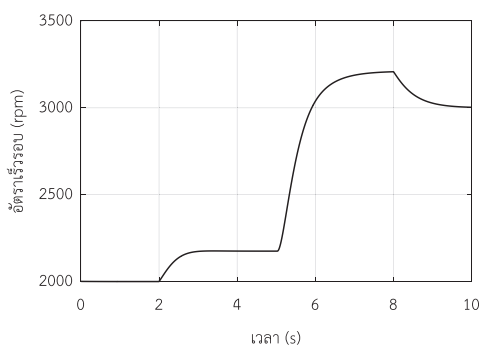
โดยอาศัยค่าพารามิเตอร์ตารางที่ 1 [5-6] สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องยนต์ด้วย โปรแกรม MATLAB Simulink ตั้งรูปที่ 2 เมื่อ TH[deg] คือตำแหน่งเชิงมุมของลิ้นปีกผีเสื้อ N[rpm] คืออัตราเร็ว รอบเครื่องยนต์จากการวัด พบว่าผลตอบสนองวงเปิดของ อัตราเร็วรอบของเครื่องยนต์จะแปรผันตามตำแหน่ง การเปิดของลิ้นปีกผีเสื้อ และหากมีการเปลี่ยนแปลง ภาระแรงบิดที่เพลาค้อ T_{load} [N.m] ก็ส่งผลต่อ อัตราเร็วรอบเครื่องยนต์ตั้งรูปที่ 3

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์แบบจำลองเครื่องยนต์

พารามิเตอร์	ค่า [หน่วย]
θ	8.97 [deg] , $t < 5$ s 11.93 [deg] , $t \geq 5$ s
T_{load}	25 [N.m] , $t \leq 2$ s 20 [N.m] , $2 < t < 8$ s 25 [N.m] , $t \geq 8$ s
P_{amb} , J	1.0 [bar], 0.14 [kg.m ²]
σ , A/F	15.0 [deg], 1/14.6
K_m	0.41328



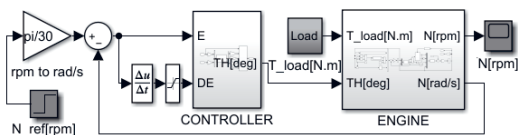
รูปที่ 2 แบบจำลองเครื่องยนต์ด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink



รูปที่ 3 ผลตอบสนองวงเปิด

4. การออกแบบระบบควบคุม

ระบบควบคุมอัตราเร็วรอบเครื่องยนต์ในงานวิจัยนี้ถูกแสดงดังรูปที่ 4 ประกอบด้วย อินพุตอัตราเร็วอ้างอิง $N_{ref}[rpm]$ เอาต์พุตอัตราเร็วจากการวัด $N[rpm]$ ตัวควบคุม และแบบจำลองเครื่องยนต์ ตัวควบคุมที่นำเสนอเป็นตัวควบคุมพีซีลอจิก อินพุตของตัวควบคุมมีสองตัวคือ ค่าความคลาดเคลื่อน E และค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความคลาดเคลื่อน DE ส่วนเอาต์พุตของตัวควบคุม คือ ค่าตำแหน่งเข็มมุลิ้นปีกผีเสื้อ



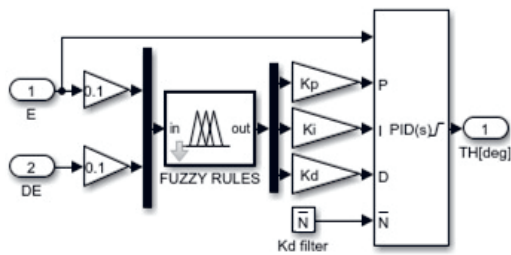
รูปที่ 4 ระบบควบคุมอัตราเร็วรอบเครื่องยนต์

ตัวควบคุมที่นำเสนอเป็นตัวควบคุมพีซีลอจิกแบบพีโอที และพีซีลอจิกแบบพีโอ การควบคุมเริ่มจากการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นของตัวควบคุมพีโอทีที่ทำให้ผลตอบสนองสามารถติดตามอัตราเร็วรอบอ้างอิงโดยไม่พบค่าพุ่งเกิน ตัวควบคุมพีซีลอจิกจะรับค่า E และ DE เพื่อคำนวณเกณฑ์ตัวควบคุมพีโอทีค่าใหม่ตามกฎการควบคุมที่ออกแบบ เกณฑ์ตัวควบคุมที่เปลี่ยนแปลงจะถูกป้อนเป็นอินพุตให้เกณฑ์ตัวควบคุมพีโอทีชุดเดิม ตัวควบคุมพีโอทีและตัวควบคุมพีโอทีโครงสร้างแบบขนานสามารถอธิบายดังสมการที่ 6 และสมการที่ 7

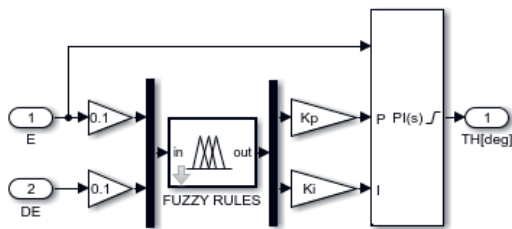
$$PID(S) = K_p + \frac{K_i}{S} + \frac{K_d \bar{N} S}{(S + \bar{N})} \quad (6)$$

$$PI(S) = K_p + \frac{K_i}{S} \quad (7)$$

กำหนดให้ $\bar{N}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์วงจรกรองความถี่ เมื่อปรับเกณฑ์อินพุตเริ่มต้นของตัวควบคุมพีซีลอจิก ค่า E และ DE เป็น 0.1 ตัวควบคุมพีซีลอจิกแบบพีโอทีและพีซีลอจิกแบบพีโอที่นำเสนอถูกแสดงดังรูปที่ 5 และ รูปที่ 6 ตามลำดับ



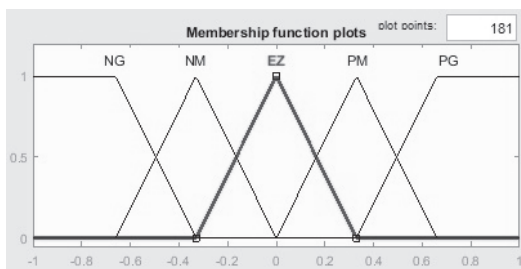
รูปที่ 5 ตัวควบคุมฟuzzyลอจิกแบบพีไอดี



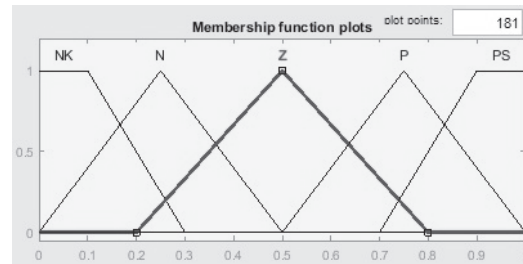
รูปที่ 6 ตัวควบคุมฟuzzyลอจิกแบบพีไอ

การคำนวณแกนตัวควบคุมพีไอดีด้วยการปรับ
จูนแบบคลุมเครืออธิบายจากขั้นตอนการประมวลผลตัว
ควบคุมฟuzzyลอจิกดังนี้

1) การแปลงอินพุตดั้งเดิมเป็นอินพุตแบบฟuzzy
ซี (Fuzzification) โดยฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ
อินพุต E และ DE มีสมาชิก 5 ตัวคือ NG NM EZ PM
และ PG ช่วงฟuzzyเซตมีค่าระหว่าง -1 ถึง 1 ดังรูปที่ 7
ส่วนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของเอาต์พุตแกนตัวควบคุม
 K_p , K_i และ K_d มีสมาชิก 5 ตัวคือ NK N Z P และ PS
ช่วงฟuzzyเซตมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 แสดงดังรูปที่ 8



รูปที่ 7 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกอินพุต
E และ DE



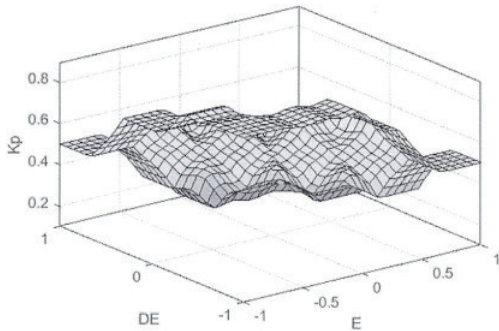
รูปที่ 8 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเอาต์พุต
 K_p , K_i และ K_d

2) การตีความ (Fuzzy Inference) เป็นส่วน
ที่ตรวจสอบฟuzzyอินพุตและสร้างฟuzzyเอาต์พุตที่สอดคล้อง
กับกฎการควบคุมแต่ละกฎซึ่งถูกแสดงด้วย
เงื่อนไขทางภาษาดังตารางที่ 2 เช่น ถ้า E=NG และ
DE=EZ แล้ว $K_p=P$, $K_i=N$, $K_d=NK$ จากนั้นฟuzzyเอาต์พุต
แต่ละกฎจะถูกสรุปรวมกันเป็นฟuzzyเอาต์พุตค่าเดียว
สำหรับกฎการควบคุมของตัวควบคุมฟuzzy $[K_p, K_i, K_d]^T$
มีทั้งหมด 25 กฎแสดงดังนี้

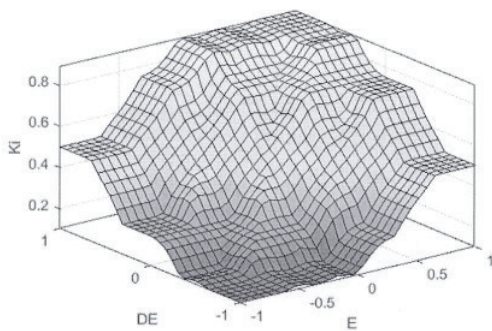
ตารางที่ 2 กฎการควบคุมแบบฟuzzy

E/DE	NG	NM	EZ	PM	PG
NG	PS NK PS	PS NK N	P N NK	P N N	Z Z PS
NM	PS NK Z	P N N	P N N	Z Z N	N P Z
EZ	PS NK Z	P N N	Z Z N	N P N	NK PS Z
PM	P N Z	Z Z Z	N P Z	N P Z	NK PS Z
PG	Z Z PS	N P P	N P P	NK PS P	NK PS PS

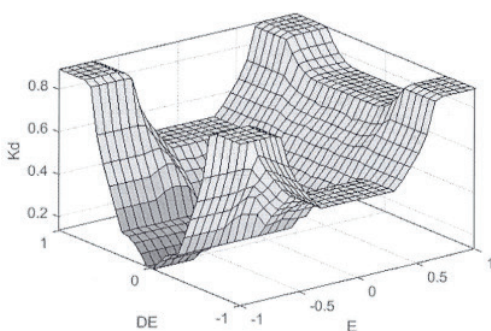
3) การแปลงค่าเอาต์พุตฟัซซีเป็นค่าปกติ (Defuzzification) เป็นขั้นตอนสุดท้ายโดยจะเปลี่ยนข้อสรุปของฟัซซีเอาต์พุตข้างต้น ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ เช่นวิธีการหาจุดศูนย์ถ่วง (Center of gravity) เพื่อคำนวณค่าเกน K_p , K_i และ K_d ที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งเกนดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับอินพุต E และ DE ดังรูปที่ 9 รูปที่ 10 และรูปที่ 11 ตามลำดับ



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างเกนตัวควบคุม K_p กับอินพุตที่เปลี่ยนแปลงของ E และ DE



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างเกนตัวควบคุม K_i กับอินพุตที่เปลี่ยนแปลงของ E และ DE



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างเกนตัวควบคุม K_d กับอินพุตที่เปลี่ยนแปลงของ E และ DE

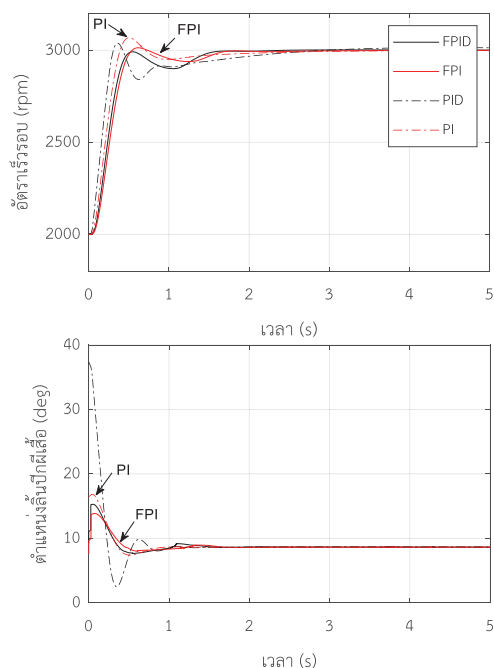
การปรับจูนเกนตัวควบคุมพีไอดีข้างต้นเป็นการปรับจูนแบบอัตโนมัติ เมื่อกำหนดค่าเริ่มต้นของสัมประสิทธิ์จริงกรองความถี่ของตัวควบคุมพีไอดีเป็น 2 ค่าเริ่มต้นของเกนตัวควบคุม K_p , K_i และ K_d ถูกปรับจูนด้วยวิธีสังเกตผลตอบสนองจากการจำลองควบคุมอัตราเร็วรอบเครื่องยนต์ด้วยตัวควบคุมฟัซซีลอจิกแบบพีไอดี ที่สามารถติดตามอัตราเร็วรอบอ้างอิงโดยไม่พบค่าพุ่งเกิน ซึ่งผลจากการจำลองเกนตัวควบคุมพีไอดีมีค่าเป็น 0.14 0.15 และ 0.009 ตามลำดับ

5. การจำลองและผลการจำลอง

เนื้อหาในส่วนนี้กล่าวถึงผลการจำลองควบคุมอัตราเร็วรอบเครื่องยนต์ การจำลองอาศัยโปรแกรม MATLAB Simulink สร้างระบบควบคุมอัตราเร็วรอบเครื่องยนต์ดังรูปที่ 4 สมรรถนะของตัวควบคุมฟัซซีลอจิกถูกเปรียบเทียบกับตัวควบคุมพีไอดีแบบพื้นฐาน โดยกำหนดให้เกนตัวควบคุม K_p , K_i และ K_d ทั้งสองชุดมีค่าเท่ากัน ผู้วิจัยโปรแกรมตัวควบคุมเป็นตัวควบคุมฟัซซีลอจิกแบบพีไอดี (FPID) ตัวควบคุมฟัซซีลอจิกแบบพีไอ (FPI) ตัวควบคุมพีไอดี และตัวควบคุมพีไอ การจำลองแบ่งเป็นสามส่วน ส่วนแรกกล่าวถึงการควบคุมระบบวงปิดเมื่อกำหนดให้อัตราเร็วรอบอ้างอิงเป็นสัญญาณขั้นบันได ส่วนที่สองทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมเมื่อมีการเปลี่ยนอัตราเร็วรอบอ้างอิงอย่างฉับพลัน ส่วนที่สามเป็นการทดสอบความสามารถของตัวควบคุม ในการกำจัดภาระรบกวนจากการเบรคคังที่

ผลตอบสนองวงปิดเมื่อกำหนดให้อัตราเร็วรอบอ้างอิงเป็นสัญญาณแบบขั้นบันได

การจำลองเริ่มจากควบคุมอัตราเร็วรอบคังที่ 2,000 rpm หลังจากนั้นเพิ่มอัตราเร็วรอบอ้างอิงอย่างฉับพลันเป็น 3,000 rpm โดยปราศจากภาระแรงบิดรบกวน ผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดแสดงดังรูปที่ 12 สมรรถนะของตัวควบคุมที่สอดคล้องแสดงดังตารางที่ 3 เมื่อกำหนดให้ตำแหน่งลิ้นปีกผีเสื้อเป็นสัญญาณควบคุมของระบบ ผลการจำลองพบว่าสัญญาณควบคุมของตัวควบคุมทั้งหมดมีค่าคงตัวที่ 8.62 deg ในช่วงแรกพบสัญญาณควบคุมมีอัตราเร่งมากและมีค่าสูงสุดจากนั้นกลับตัวต่ำกว่าค่าคงตัวแล้วเข้าสู่ค่าคงตัวในวินาทีที่ 1



รูปที่ 12 ผลตอบสนองเมื่ออัตราเร็วรอบอ้างอิงเป็นสัญญาณขั้นบันได

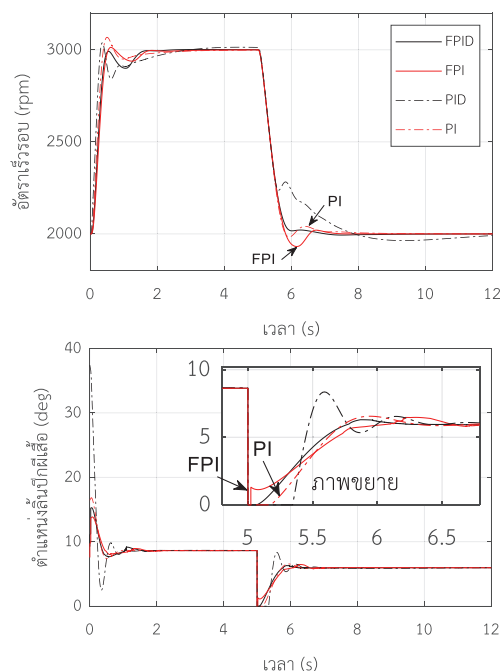
ตารางที่ 3 สมรรถนะตัวควบคุม

ตัวควบคุม	$t_r(10-90\%)$ [s]	$t_s(\pm 2\%)$ [s]	t_p [s]	P_o [%]
FPID	0.286	1.460	NA	NA
FPI	0.307	1.578	0.607	1.3
PID	0.201	2.290	0.362	3.8
PI	0.245	1.800	0.513	6.8

เมื่อเปรียบเทียบสัญญาณควบคุมของตัวควบคุมแบบพื้นฐานกับตัวควบคุมฟัซซีลอจิกพบว่าตัวควบคุมแบบพื้นฐานสร้างสัญญาณควบคุมในช่วงเริ่มต้นสูงกว่าตัวควบคุมฟัซซีลอจิก ทำให้ผลตอบสนองอัตราเร็วรอบมีเวลาไต่ขึ้นที่น้อยกว่าและเกิดค่าพุ่งเกิน (overshoot) ที่สูงกว่าตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก เมื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมฟัซซีลอจิกแบบพีโอดีกับฟัซซีลอจิกแบบพีไอ พบว่าตัวควบคุมฟัซซีลอจิกแบบพีโอดีเข้าสู่ค่าอ้างอิงโดยไม่พบค่าพุ่งเกินภายในเวลา 1.46 วินาที ในขณะที่ตัวควบคุมฟัซซีลอจิกแบบพีไอเข้าสู่ค่าอ้างอิงช้ากว่า และมีค่าพุ่งเกิน 1.3 % ที่เวลา 0.607 วินาที

ผลตอบสนองเมื่อเปลี่ยนอัตราเร็วรอบอ้างอิงอย่างฉับพลัน

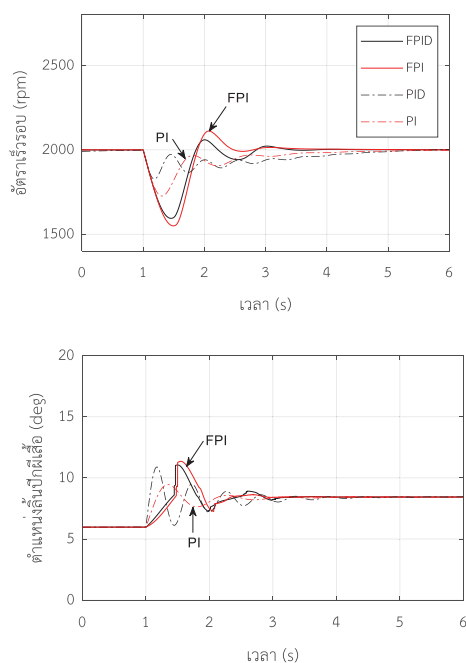
การทดลองเมื่อเปลี่ยนอัตราเร็วรอบอ้างอิงอย่างฉับพลัน มีวัตถุประสงค์ทดสอบความสามารถติดตามอัตราเร็วรอบอ้างอิง โดยจำลองควบคุมอัตราเร็วรอบคงที่ที่ 3,000 rpm จากนั้นเปลี่ยนเป็น 2,000 rpm ที่เวลา 5 วินาที ผลการจำลองดังรูปที่ 13 พบว่าสัญญาณควบคุมทุกตัวได้ลดลงในตำแหน่งปิดสุด จากนั้นจึงค่อยๆ ไต่ขึ้นจนถึงค่าคงตัวที่ 5.97 deg เมื่อสังเกตอัตราเร็วรอบพบว่าตัวควบคุมฟัซซีลอจิกแบบพีโอดีสามารถติดตามสัญญาณอ้างอิงใหม่โดยไม่พบค่าพุ่งต่ำ (undershoot) และเข้าสู่ค่าอ้างอิงใหม่ภายในเวลา 2 วินาที



รูปที่ 13 ผลตอบสนองเมื่อเปลี่ยนอัตราเร็วรอบอ้างอิงอย่างฉับพลัน

ผลตอบสนองเมื่อมีการรบกวนระบบ

การทดลองหัวข้อนี้กล่าวถึงการทดสอบสมรรถนะการกำจัดสัญญาณรบกวนเนื่องจากการเบรคคงที่ ขั้นตอนการจำลองเริ่มจากควบคุมอัตราเร็วรอบคงที่ที่ 2,000 rpm ในช่วงวินาทีที่ 1 เพิ่มภาระแรงบิดเครื่องยนต์เป็น 20 N.m คงที่



รูปที่ 14 ผลตอบสนองเมื่อมีการรบกวนเนื่องจากการเบรคคองที่

ผลการจำลองปรากฏดังรูปที่ 14 พบว่าเมื่อระบบถูกรบกวน ช่วงเริ่มต้นสัญญาณควบคุมของตัวควบคุมพีไอดีจะเพิ่มสูงและพบการแกว่งรอบค่าคงตัวมากกว่าตัวควบคุมพีไอ ส่วนตัวควบคุมฟuzzyลอจิกพบว่าสัญญาณควบคุมจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนถึงวินาทีที่ 1.5 จากนั้นจะเพิ่มสูงอย่างรวดเร็ว โดยตัวควบคุมฟuzzyลอจิกแบบพีไอดีสร้างสัญญาณควบคุมสูงสุดที่ 11 deg ซึ่งต่ำกว่าฟuzzyลอจิกแบบพีไอเล็กน้อย ผลจากสัญญาณควบคุมข้างต้นจึงทำให้ตัวควบคุมแบบพื้นฐานสามารถลดผลการรบกวนจากภาระแรงบิดในช่วงเริ่มต้นได้ดีกว่าตัวควบคุมแบบฟuzzyลอจิก แต่จะใช้เวลาเข้าสู่ค่าอ้างอิงนานกว่า โดยพบว่าตัวควบคุมฟuzzyลอจิกแบบพีไอดี ฟuzzyลอจิกแบบพีไอ พีไอดี พีไอ ใช้เวลาในการกำจัดสัญญาณรบกวน 2.35 3.45 4.65 4.17 วินาที และผลการรบกวนทำให้อัตราเร็วรอบลดลงต่ำสุดจากอัตราเร็วอ้างอิง 400 450 170 270 rpm ตามลำดับ

6. สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอการปรับจูนตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีแบบคลุมเครือสำหรับควบคุมอัตราเร็วรอบเครื่องยนต์แก๊ซอลีน โดยอาศัยแบบจำลองและพารามิเตอร์เครื่องยนต์ของ Crossley และ Cook ตัวควบคุมที่นำเสนอคือตัวควบคุมฟuzzyลอจิกแบบพีไอดี สมรรถนะของตัวควบคุมถูกยืนยันจากผลการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB เปรียบเทียบกับสมรรถนะของตัวควบคุมฟuzzyลอจิกแบบพีไอ พีไอดี และพีไอ ผลการจำลองพบว่าตัวควบคุมที่นำเสนอสามารถติดตามสัญญาณอ้างอิงได้เร็วที่สุดใช้เวลา 1.46 วินาที โดยไม่พบค่าพุ่งเกิน และสามารถกำจัดสัญญาณรบกวนจากการเบรคภายใน 2.35 วินาที

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Radhi RM, Hussien EQ. Controller modelling and design of rotational speed for internal combustion engine. Thi-Qar Univ J Eng Sci. 2013;4(2):1–13.
- [2] Rohit M, Rohit K. Modelling and simulation of spark ignition engines. Int J Adv Res Technol. 2014;3(5):55–93.
- [3] AHMED FS. Modeling, simulation and control of the air-path of an internal combustion engine [Internet]. Université de Technologie de Belfort-Montbéliard; 2014. Available from: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01002113>
- [4] Isermann R. General combustion engine models. In: Engine modeling and control: modeling and electronic management of internal combustion engines. New York: Springer; 2014. p. 133–266.
- [5] Crossley PR, Cook JA. A nonlinear engine model for drivetrain system development. In: International Conference on Control 1991 Control '91 [Internet]. Edinburgh, UK: IET; 1991. p. 921–5. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=98573>

- [6] Quinn S, Grace A, Barnard P, Michaels L, Aldrich BI. Engine model. In: Using simulink and stateflow ® tm in automotive applications abstract [Internet]. Massachusetts, USA: The Math Works Inc.; 1998. p. 8–17. Available from: <https://www.computoolable.nl/AuM5.pdf>
- [7] Spear B. James Watt: The steam engine and the commercialization of patents. World Pat Inf. 2008 Mar;30(1):53–8.
- [8] Choi S-B, Hedrick JK. Robust throttle control of automotive engines: theory and experiment. ASME J Dyn Syst Meas Control [Internet]. 1996;118:92–8. Available from: http://www.asme.org/terms/Terms_Use.cfm
- [9] Rout MK, Sain D, Swain SK, Mishra S K. PID controller design for cruise control system using genetic algorithm. In: 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT). Chennai, India: IEEE; 2016. p. 4170–4.
- [10] Gritli W, Gharsallaoui H, Benrejeb M. PID-type fuzzy scaling factors tuning using genetic algorithm and simulink design optimization for electronic throttle valve. In: International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT). St. Julian's, Malta: IEEE; 2016. p. 216–21.
- [11] Tran TA, Haidara G. A research on marine diesel engine speed controller by fuzzy logic control theory based on experimental investigation. J Mech Eng Res Dev. 2019;42(2):18–26.
- [12] Chao C-T, Sutarna N, Chiou J-S, Wang C-J. An optimal fuzzy PID controller design based on conventional PID control and nonlinear factors. Appl Sci. 2019;9(6).
- [13] Linjing H, Yuezhen W. Design and simulate the idle speed control system based on fuzzy adaptive. In: Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC). Chongqing, China: IEEE; 2015. p. 714–7.
- [14] Mu H, Li X, Tang J. Study with fuzzy self-turning PID controller on idle speed controlling of automobile. In: 2017 Chinese Automation Congress (CAC). Jinan, China: IEEE; 2017. p. 5755–9.

เครื่องสีข้าวขนาดเล็กสำหรับใช้ในครัวเรือนควบคุมโดย Arduino Uno R3

สุรินทร์ แหงมงาม^{1*}, ศศิวรรณ อินทรวงศ์², ภูวดล วัฒนารุ่งเรือง³ และณัฐภูมิ หอมสิน⁴
surin.n@en.rmutt.ac.th^{1*}, sasiwanin@rmutt.ac.th², jamepuvadol@gmail.com³,
nuttavutboss@gmail.com⁴

^{1,3,4} ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

² สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Received	: 17-Oct-2019
Revised	: 20-Jan-2020
Accepted	: 23-Jan-2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างเครื่องสีข้าวแบบลูกกลิ้งขนาดเล็กสำหรับใช้ในครัวเรือนที่ควบคุมการทำงานโดยใช้ Arduino Uno R3 ซึ่งเครื่องสีข้าวที่นำเสนอมีขนาดเล็ก เคลื่อนย้ายได้ง่าย และสามารถสีข้าวได้ทั้งข้าวกล้องและข้าวขาว ในการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องสีข้าว ได้ทำการทดสอบสีข้าวและหาความเร็วรอบที่เหมาะสมกับการสีข้าวกล้องและข้าวขาว หากำลังไฟฟ้าและเวลาที่ใช้ในการสีข้าวของพันธุ์ข้าว 7 สายพันธุ์ ได้แก่ หอมมะลิ 105, ปทุมธานี 1, กข 31, กข 41, กข 57, กข 61, กข 6 (ข้าวเหนียว) ผลการทดสอบการสีข้าวกล้องและข้าวขาวได้ข้าวกล้องและข้าวขาวเฉลี่ย ร้อยละ 74.95 และ ร้อยละ 59.86 ตามลำดับ โดยความเร็วรอบของมอเตอร์ที่เหมาะสมกับการสีข้าวกล้องและข้าวขาวอยู่ที่ประมาณ 349.78 รอบต่อนาที และ 2278.5 รอบต่อนาที ตามลำดับ ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่ใช้ในการสีข้าวกล้องและข้าวขาวอยู่ที่ประมาณ 143 W และ 227 W ตามลำดับ และค่าเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการสีข้าวกล้องและข้าวขาวอยู่ที่ประมาณ 9 นาทีต่อปริมาณข้าวเปลือก 0.5 กิโลกรัม และ 20 นาทีต่อปริมาณข้าวเปลือก 0.5 กิโลกรัม ตามลำดับ

คำสำคัญ: เครื่องสีข้าวขนาดเล็ก ข้าวกล้อง ข้าวขาว ครัวเรือน ลูกกลิ้งยาง

Small Rice Milling Machine for Using in Household Controlled by Arduino Uno R3

Surin Ngaemngam^{1*}, Sasiwan Intarawong², Puvadol Watthanakornrungruang³, Nuttavut Homsin⁴
surin.n@en.rmutt.ac.th^{1*}, sasiwanin@rmutt.ac.th², jamepuvadol@gmail.com³,
nuttavutboss@gmail.com⁴

^{1,3,4} Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

² Institute of Research and Development, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Received	: 17-Oct-2019
Revised	: 20-Jan-2020
Accepted	: 23-Jan-2020

Abstract

Purposes of this research are to design and to build a small rice milling machine for using in the household that is controlled by Arduino Uno R3. This proposed machine is small size and easy to transport. It can be used for milling both white rice and brown rice. The performance test of this machine was tested by milling paddy rice and conducted the suitable speed of motor, electric power and time consumption for milling of seven species of rice namely Hom Mali 105, Pathumthani 1, KorKhor 31, KorKhor 41, KorKhor 57, KorKhor 61 and KorKhor 6 (sticky rice). It was found that the average percentages of brown rice and white rice of seven species of rice after milling are 74.95 % and 59.86 % respectively. The suitable average speed of the motor for milling brown rice and white rice is about 349.78 rpm and 2278.5 rpm respectively. The average electric power consumption for milling brown rice and white rice is about 143 W and 227 W respectively and the average time consumption for milling brown rice and white rice is about 9 minutes per 0.5 kilograms of paddy rice and 20 minutes per 0.5 kilograms of paddy rice respectively.

Keywords: small rice milling machine, white rice, brown rice, household, rubber roller

1. บทนำ

ที่ผ่านมา มีนักวิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษา และสร้างเครื่องสีข้าวสำหรับใช้ในชุมชน ซึ่งเป็นประโยชน์ ต่อชาวบ้านที่อาศัยอยู่ในชุมชน ที่จะได้ข้าวที่มีคุณภาพดี และปลอดภัย เช่น สุวัฒน์ สงวนเขี้ยว และคณะ [1] ได้ออกแบบและสร้างเครื่องสีข้าวขนาดเล็ก โดยได้นำเอา วิชาการทางด้านเทคโนโลยีไปใช้ เพื่อพัฒนางานด้าน เกษตร ประกอบด้วยการนำเอาชุดกะเทาะเปลือกข้าว ชุด แยกแกลบ และชุดขัดสีข้าวรวมเข้าไว้ด้วยกันภายใน เครื่องเดียว สามารถสีข้าวเปลือกให้เป็นข้าวกล้อง หรือ ข้าวขาวได้ แต่มีปัญหาเรื่องการฟุ้งกระจายของแกลบที่ ปะปนมากับข้าวขาว พงศ์สรวง ฉายากุล [2] ได้พัฒนา เครื่องสี ข้าวกล้องสำหรับใช้ในครัวเรือน โดย เปรียบเทียบกระบวนการในการสีข้าวสองระบบ คือ ระบบใช้แรงเสียดทานในการกะเทาะเปลือก และ ระบบ ใช้แรงเหวี่ยงในการกะเทาะเปลือก และทำการทดสอบ ประสิทธิภาพของเครื่องโดยการสีข้าว หาปริมาณข้าว กล้องที่สีได้ แต่เครื่องที่นำเสนอนี้สีได้เฉพาะข้าวกล้อง เท่านั้น สุรสิทธิ์ ช่อวงศ์ [3] เสนอการสร้างเครื่องสีข้าว กล้อง โดยใช้มอเตอร์เป็นต้นกำลังพร้อมกับใช้ลูกกลิ้ง 3 ลูกหมุนในความเร็วที่ต่างกันทำการกะเทาะเปลือกข้าว ออกและมีชุดดูดแยกเอาแกลบออกไป แต่เครื่องที่ นำเสนอจะทำการสีได้เฉพาะข้าวกล้อง ไม่สามารถสีข้าว ขาวได้ อภิรักษ์ ใจกว้าง และคณะ [4] ได้ทำการออกแบบ และสร้างเครื่องสีข้าวกล้องชุมชนชนิดลูกยางคู่เพื่อใช้ ใน การสีข้าวกล้องในชุมชน และทดสอบสมรรถนะของเครื่อง สีข้าวกล้องชุมชนชนิดลูกยางคู่ ผลการวิจัยพบว่า เครื่องสี ข้าวกล้องชุมชนชนิดลูกยางคู่จะมีอัตราการผลิตปริมาณ ข้าวกล้อง และข้าวเต็มเมล็ดปานกลางและมีปริมาณ แกลบต่ำ ซึ่งเครื่องที่นำเสนอจะทำการสีได้เฉพาะข้าว กล้องเท่านั้น เช่นกัน สุรินทร์ แหงมงาม และคณะ [5] นำเสนอเครื่องสีข้าวขนาดเล็กสำหรับใช้ใน ครัวเรือน ที่ ควบคุมการทำงานโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F887 ซึ่งเครื่องสีข้าวที่นำเสนอนี้สามารถสีได้ทั้ง ข้าวกล้องและข้าวขาว สามารถตั้งเวลาการสีข้าวได้ จาก การศึกษาเครื่องสีข้าวขนาดเล็กที่สร้างขึ้นมานั้น พบว่า ข้าวสารที่ได้จากการสียังมีการแตกหัก มีการปะปนของ ข้าวเปลือกมากกับข้าวสาร มีเสียงที่ดังเวลาเครื่องทำงาน เครื่องมีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมาก

งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการพัฒนาเครื่องสีข้าว ขนาดเล็กสำหรับใช้ในครัวเรือน ที่ควบคุมระบบการ ทำงานด้วยบอร์ด Arduino Uno R3 โดยใช้ชุดกะเทาะ

เปลือกที่ใช้หลักการเสียดทานของลูกยางในการสีข้าว กล้อง ใช้ชุดกะเทาะเปลือกที่ใช้หลักการลูกกลิ้งหมุนใน ปลอกเหล็กในการ สีข้าวขาว เปลี่ยนจากโซ่เป็นสายพาน เพื่อลดความดังของเสียง นำอลูมิเนียมโพรไฟล์มาทำเป็น โครงสร้างเพื่อให้มีรูปลักษณะที่ทันสมัยและน้ำหนักเบา ลดจำนวนมอเตอร์เพื่อให้ประหยัดไฟมากขึ้น มีการ ทำงานของอุปกรณ์ระบายข้าวที่สมบูรณ์มากขึ้น มีพัดลม เป่าแกลบและที่รองรับแกลบที่ถูกเป่าออกมา

2. ทฤษฎีและข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับการสีข้าว

กรรมวิธีการสีข้าว [6] เป็นกระบวนการในการ กะเทาะเปลือกออกจากข้าวเปลือก เพื่อให้ได้ข้าวสำหรับ การบริโภค ซึ่งกระบวนการสีข้าวอาจใช้เครื่องทุ่นแรง ง่ายๆ เช่น ครกตำข้าว ไปจนถึงการใช้เครื่องจักรที่ทันสมัย ในการสีข้าว การใช้เครื่องจักรในการสีข้าว จำเป็นต้อง ออกแบบให้มีความเหมาะสมในด้าน ปริมาณข้าวสารที่ได้ จากกระบวนการสีรวมทั้งคุณภาพของข้าวสาร จะขึ้นอยู่กับ ชนิดและประเภทของเครื่องจักรที่ใช้ในโรงสีข้าว ลักษณะการทำงานของโรงสีที่ดีจะประกอบด้วย 1) สี ข้าวเปลือกได้ปริมาณข้าวสารสูง 2) ข้าวสารที่ได้มี คุณภาพสูง มีความสูญเสียข้าวเปลือกน้อย และ 3) ค่าใช้จ่ายในการสีข้าวต่ำ

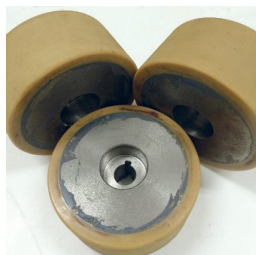
2.2 ทฤษฎีหลักการกะเทาะข้าว เปลือก

การกะเทาะข้าวเปลือก [6] โดยให้เกิดความ เสียหายน้อยที่สุดต่อเนื้อเยื่อส่วนที่เป็นรำ และไม่ทำให้ เมล็ดข้าวเปลือกเกิดการแตกหัก จะขึ้นอยู่กับ การ ออกแบบเครื่อง การบำรุงรักษา และการปรับแต่ง เครื่องจักรรวมทั้งคุณสมบัติของข้าวก่อนที่จะกะเทาะ เช่น การแตกร้าวภายในเมล็ด ซึ่งเป็นผลมาจากการเก็บเกี่ยวที่ ล่าช้า หรือการเก็บรักษาเมล็ดข้าวเปลือกไม่ดี การ ออกแบบเครื่องกะเทาะในปัจจุบันสามารถแบ่งแยกได้ ออกเป็น 3 ลักษณะได้แก่ 1) อาศัยแรงกดและแรงเฉือน ทำให้แกลบหลุดออกจากเมล็ดข้าวเปลือก 2) อาศัยแรง เหวี่ยงกระทบ ทำให้แกลบหลุด เนื่องจากการกระทบกับ ผิวสัมผัสที่เป็นพื้นยาง 3) อาศัยแรงเสียดทาน ที่เกิดขึ้นที่ ผิวสัมผัส ทำให้แกลบหลุดจากข้าวเปลือก

2.3 เครื่องสีข้าวแบบลูกกลิ้งยาง

วัตถุประสงค์ของการใช้ลูกกลิ้งยาง คือ เพื่อทำ การแยกข้าวออกจากข้าวเปลือก หลักการในการคัดแยก คือ อาศัยคุณสมบัติของหลักการแรงเสียดทานจาก หน้าสัมผัสผิวยาง และการควบคุมระยะช่องว่างและ

ความเร็วมอเตอร์ให้เหมาะสม การกะเทาะเปลือกข้าว และขัดข้าวให้ขาวด้วยลูกยาง [7] มีหลักการทำงาน 3 ขั้นตอน คือ 1) โดยลำเลียงข้าวเปลือก ลงสู่หน้า ลูกกลิ้งยาง โดยใช้การควบคุมมอเตอร์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ให้ความเร็วในการปล่อยข้าวสัมพันธ์กัน ที่กับความเร็วในการหมุน 2) การกะเทาะเปลือก โดยใช้ ลูกกลิ้งยาง 2 ลูก หมุนเข้าหากันด้วยความเร็วที่แตกต่างกันโดยอาศัยแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของเปลือก ข้าวและลูกยาง 3) การขัดข้าวขาวใช้หลักการเช่นเดียวกับการกะเทาะเปลือกข้าวโดยใช้ลูกกลิ้งยาง 1 ลูก และ ยังคงอาศัยหลักการแรงเสียดทานเช่นเดิม



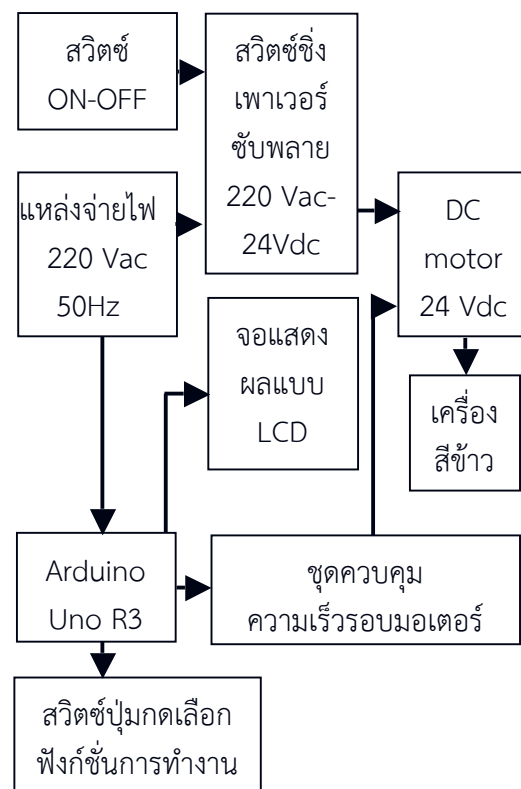
รูปที่ 1 ลูกกลิ้งยางที่ใช้ในเครื่องสีข้าว

3. การออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบ

ในการพัฒนาเครื่องสีข้าวขนาดเล็กสำหรับใช้ในครัวเรือน ได้มีการออกแบบโดยแบ่งออกเป็นส่วนหลัก ๆ ได้แก่ การออกแบบชุดควบคุมการทำงาน และการออกแบบโครงสร้าง

3.1 ชุดควบคุมการทำงาน

โดยแผนผังการควบคุมการทำงานของเครื่องสีข้าว แสดงดังรูปที่ 2 ซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้า กระแสสลับ 1 เฟส 220 V 50 Hz ซึ่งจะจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับสวิตช์ซึ่งขับพลาาย และอินเวอร์เตอร์ ซึ่ง สวิตช์ซึ่งขับพลาาย จะแปลงแรงดันจาก 220 Vac เป็น 24 Vdc เพื่อจ่ายให้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ขนาด 350 W 24 Vdc ในส่วนของ Arduino จะทำหน้าที่ควบคุมชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ปรับความเร็วรอบของ ลูกกลิ้งและแสดงผลผ่านทางหน้าจอ LCD และมีสวิตซ์ ทาหน้าที่ เปิด/ปิด เครื่องสีข้าว



รูปที่ 2 แผนผังการเชื่อมต่ออุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมการทำงานของเครื่องสีข้าว

3.2 การออกแบบและคำนวณหาขนาดของมอเตอร์

สำหรับการคำนวณหาขนาดของมอเตอร์ที่ใช้เป็นชุดกำลังขับเคลื่อนลูกยางกะเทาะเปลือก สามารถหาได้จากสมการที่ 1

$$P = \frac{2\pi \times T_s \times N}{60} \quad (1)$$

โดยที่ P คือ ขนาดของมอเตอร์ขับเคลื่อนลูกยาง (W)

T_s คือ แรงบิดที่เพลาของมอเตอร์ (N-m)

N คือ ความเร็วรอบของลูกยาง (rpm)

แรงบิดทั้งหมดที่เพลาของมอเตอร์ (T_s) สามารถหาได้จากสมการที่ 2

$$T_s = \frac{16T_r}{\pi D^3} \quad (2)$$

โดยที่ T_r คือ แรงบิดชุดลูกยางสีข้าว (N-m)

F คือ แรง (N)

D คือ รัศมีของล้อสีข้าว (mm.)

การหาแรงบิดชุดลูกยางสีข้าว (T_r) สามารถหาได้จากสมการที่ 3

$$T_r = F \times r \quad (3)$$

โดยที่ F คือ แรงที่ใช้ในการกะเทาะเปลือก

ข้าว (N)

R คือ รัศมีของลูกยาง (mm.)

แรงเฉือนที่ใช้กะเทาะเปลือกข้าว (F) สามารถหาได้จากสมการที่ 4

$$F = \tau \cdot A \quad (4)$$

โดยที่ τ คือ แรงเฉือนที่ใช้กะเทาะเปลือก

ข้าว (N/mm²)

A คือ พื้นที่ของเมล็ดข้าวที่ถูกเฉือน (mm²)

ขนาดพื้นที่ของเมล็ดข้าวที่ถูกเฉือน (A) สามารถหาได้จากสมการที่ 5

$$A = \frac{2}{3} \times b \times l \quad (5)$$

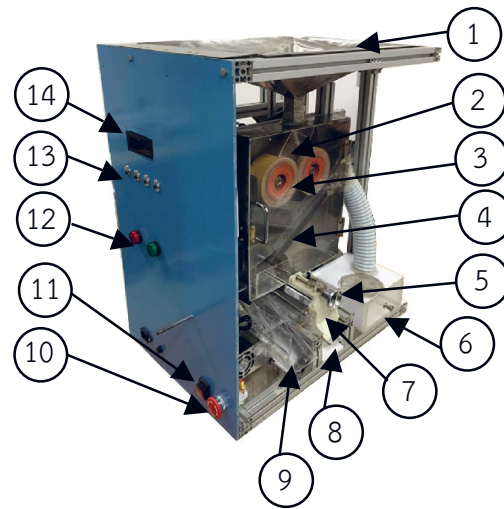
โดยที่ l คือ ความยาวของเมล็ดข้าว (mm.)

b คือ ความโตของเมล็ดข้าว (mm.)

จากการคำนวณหาขนาดมอเตอร์ ในงานวิจัยนี้ มอเตอร์ที่เหมาะสมกับการนำมาใช้งานเป็นชุดต้นกำลังของเครื่องสีข้าวนั้น จึงได้เลือกใช้เป็นมอเตอร์เกียร์ทดรอบ ขนาด 350 W 24 Vdc

3.3 โครงสร้างโดยรวมของเครื่องสีข้าวขนาดเล็กสำหรับใช้ในครัวเรือน

เครื่องสีข้าวขนาดเล็กสำหรับใช้ในครัวเรือน ควบคุมด้วย Arduino Uno R3 แสดงดังรูปที่ 3

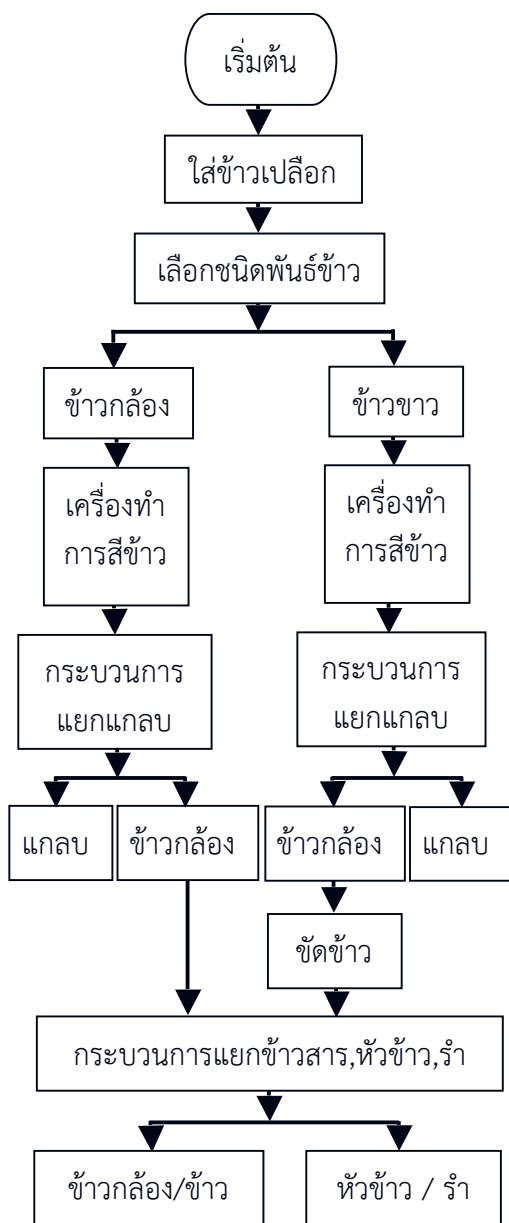


- | | |
|-------------------------------|-------------------------|
| 1. ช่องใส่ข้าว | 2. ชุดระบายข้าว |
| 3. ลูกยางกะเทาะ | 4. ทางลำเลียงข้าว |
| 5. ตัวปรับระดับความยาวของข้าว | |
| 6. ช่องรับแกลบ | 7. ชุดขัดข้าว |
| 8. ช่องรับรำ | 9. ทางออกข้าวกล้อง |
| 10. สวิตช์ฉุกเฉิน | 11. ปุ่มเปิด-ปิดเครื่อง |
| 12. LED แสดงผล | 13. จอ LCD และปุ่มกด |

รูปที่ 3 เครื่องสีข้าวขนาดเล็กสำหรับใช้ในครัวเรือน ควบคุมด้วย Arduino Uno R3

4. การทดสอบและผลการทดสอบ

ในการทดสอบหาประสิทธิภาพของเครื่องจะทำการทดสอบสีข้าวทั้ง 7 สายพันธุ์ โดยแยกเป็นการทดสอบการสีข้าวกล้อง 10 ครั้ง และทดสอบการสีข้าวขาว 10 ครั้ง ของข้าวแต่ละสายพันธุ์ โดยทำการทดสอบสีข้าวสายพันธุ์ละ 0.5 กิโลกรัม โดยทำการเก็บปริมาณข้าวกล้องและข้าวขาวที่ได้จากการสีข้าว ความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ใช้ในการสีข้าว ปริมาณแกลบและรำ ปริมาณการสูญเสีย และค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการสีข้าว ทั้งข้าวกล้องและข้าวขาว ซึ่งขั้นตอนการทดสอบแลผลการทดสอบมีดังต่อไปนี้ ขั้นตอนการทดสอบการใช้เครื่องสีข้าว แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ขั้นตอนการทำงานของเครื่องสีข้าวขนาดเล็ก
สำหรับใช้ในครัวเรือน

ผลการทดสอบการสีข้าวของข้าวทั้ง 7 สายพันธุ์ ได้ผลการทดสอบมีรายละเอียดดังนี้

ข้าวพันธุ์หอมมะลิ 105 ปริมาณข้าวกล้องที่สีได้นั้นมีค่าประมาณร้อยละ 70.53 ปริมาณแกลบมีค่าประมาณร้อยละ 28.94 ปริมาณการสูญเสียมีค่าประมาณร้อยละ 0.53 และปริมาณข้าวขาวมีค่าประมาณร้อยละ 54.66 แกลบและรำข้าวมีค่าประมาณร้อยละ 43.88 ปริมาณการสูญเสียมีค่าประมาณร้อยละ 1.46 ความเร็วรอบของมอเตอร์ขับเคลื่อนในการสีข้าวกล้องขณะทำการสีจะอยู่ที่ประมาณ

338.08 รอบต่อนาที และความเร็วรอบของมอเตอร์ขับเคลื่อนในการสีข้าวขาวขณะทำการสีจะอยู่ที่ประมาณ 2309.5 รอบต่อนาที

ข้าวพันธุ์ ปทุมธานี 1 ปริมาณข้าวกล้องที่สีได้นั้นมีค่าประมาณร้อยละ 74.66 แกลบมีค่าประมาณร้อยละ 25.26 ปริมาณการสูญเสียมีค่าประมาณร้อยละ 0.08 และปริมาณข้าวขาวมีค่าประมาณร้อยละ 57.33 ปริมาณแกลบและรำข้าวมีค่าประมาณร้อยละ 42.34 ปริมาณการสูญเสียมีค่าประมาณร้อยละ 0.33 ความเร็วรอบของมอเตอร์ขับเคลื่อนในการสีข้าวกล้องขณะทำการสีจะอยู่ที่ประมาณ 346.55 รอบต่อนาที และความเร็วรอบของมอเตอร์ขับเคลื่อนในการสีข้าวขาวขณะทำการสีจะอยู่ที่ประมาณ 2279 รอบต่อนาที

ข้าวพันธุ์ กข 31 ปริมาณข้าวกล้องที่สีได้นั้นมีค่าประมาณร้อยละ 75.93 ปริมาณแกลบมีค่าประมาณร้อยละ 23.54 ปริมาณการสูญเสียมีค่าประมาณร้อยละ 0.53 และปริมาณข้าวขาวมีค่าประมาณร้อยละ 62.06 ปริมาณแกลบและรำข้าวมีค่าประมาณร้อยละ 36.88 ปริมาณการสูญเสียมีค่าประมาณร้อยละ 1.06 ความเร็วรอบของมอเตอร์ขับเคลื่อนในการสีข้าวกล้องขณะทำการสีจะอยู่ที่ประมาณ 342.01 รอบต่อนาที และความเร็วรอบของมอเตอร์ขับเคลื่อนในการสีข้าวขาวขณะทำการสีจะอยู่ที่ประมาณ 2231 รอบต่อนาที

ข้าวพันธุ์ กข 41 ปริมาณข้าวกล้องที่สีได้นั้นมีค่าประมาณร้อยละ 77 ปริมาณแกลบมีค่าประมาณร้อยละ 22.47 ปริมาณการสูญเสียมีค่าประมาณร้อยละ 0.53 และปริมาณข้าวขาวมีค่าประมาณร้อยละ 61.2 ปริมาณแกลบและรำข้าวมีค่าประมาณร้อยละ 37.47 ปริมาณการสูญเสียมีค่าประมาณร้อยละ 1.33 ความเร็วรอบของมอเตอร์ขับเคลื่อนในการสีข้าวกล้องขณะทำการสีจะอยู่ที่ประมาณ 401.91 รอบต่อนาที และความเร็วรอบของมอเตอร์ขับเคลื่อนในการสีข้าวขาวขณะทำการสีจะอยู่ที่ประมาณ 2259 รอบต่อนาที

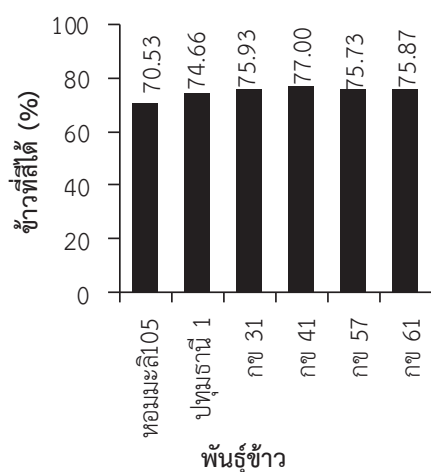
ข้าวพันธุ์ กข 57 ปริมาณข้าวกล้องที่สีได้นั้นมีค่าประมาณร้อยละ 75.73 ปริมาณแกลบมีค่าประมาณร้อยละ 24.01 ปริมาณการสูญเสียมีค่าประมาณร้อยละ 0.26 และปริมาณข้าวขาวมีค่าประมาณร้อยละ 65.10 ปริมาณแกลบและรำข้าวมีค่าประมาณร้อยละ 34.50 ปริมาณการสูญเสียมีค่าประมาณร้อยละ 0.4 ความเร็วรอบของมอเตอร์ขับเคลื่อนในการสีข้าวกล้องขณะทำการสีจะอยู่ที่ประมาณ 345.83 รอบต่อนาที และความเร็วรอบของมอเตอร์ขับเคลื่อนในการสีข้าวขาวขณะทำการสีจะอยู่ที่ประมาณ 2291 รอบต่อนาที

ข้าวพันธุ์ กข 61 ปริมาณข้าวกล้องที่สีได้นั้นมีค่าประมาณร้อยละ 75.87 ปริมาณแกลบมีค่าประมาณร้อยละ 23.66 ปริมาณการสูญเสียมีค่าประมาณร้อยละ 0.47 และปริมาณข้าวขาวมีค่าประมาณร้อยละ 63.90 ปริมาณแกลบและรำข้าวมีค่าประมาณร้อยละ 35.90 ปริมาณการสูญเสียมีค่าประมาณร้อยละ 0.2 ความเร็วรอบของมอเตอร์ขับเคลื่อนในการสีข้าวกล้องขณะทำการสีจะอยู่ที่ประมาณ 324.34 รอบต่อนาที และความเร็วรอบของมอเตอร์ขับเคลื่อนในการสีข้าวขาวขณะทำการสีจะอยู่ที่ประมาณ 2320 รอบต่อนาที

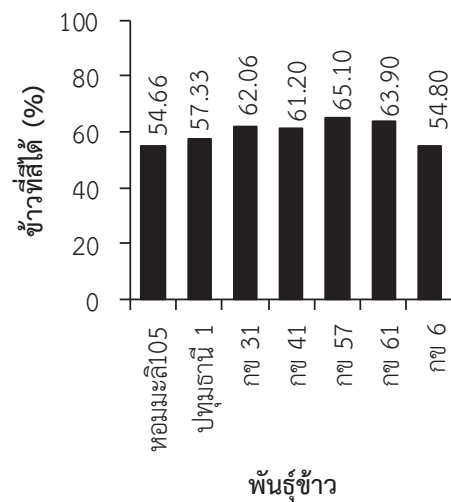
ข้าวพันธุ์ กข 6 ปริมาณข้าวขาวจะอยู่ที่ประมาณร้อยละ 54.80 แกลบและรำข้าวจะอยู่ที่ประมาณร้อยละ 44.27 ปริมาณการสูญเสียมีค่าประมาณร้อยละ 0.93 ความเร็วรอบของมอเตอร์ขับเคลื่อนในการสีข้าวขาวขณะทำการสีจะอยู่ที่ประมาณ 367.21 รอบต่อนาที และความเร็วรอบของมอเตอร์ขับเคลื่อนในการสีข้าวขาวขณะทำการสีจะอยู่ที่ประมาณ 2260 รอบต่อนาที

จากผลการทดสอบการสีข้าวทั้งข้าวกล้องและข้าวขาวของข้าวทั้ง 7 สายพันธุ์ดังกล่าวข้างต้นสามารถนำค่าเฉลี่ยปริมาณข้าวกล้องและข้าวขาวที่ได้จากการสีข้าว ความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ใช้ในการสีข้าว ปริมาณแกลบและรำ ปริมาณการสูญเสีย และค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการสีข้าวทั้งข้าวกล้องและข้าวขาว มาแสดงในรูปที่ 5 ถึงรูปที่ 11

ค่าเฉลี่ยปริมาณของข้าวกล้องและข้าวขาวที่สีได้แสดงดังรูปที่ 5 และ รูปที่ 6 ตามลำดับ โดยคิดจากปริมาณข้าวเปลือก 0.5 กิโลกรัมมีค่าเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์

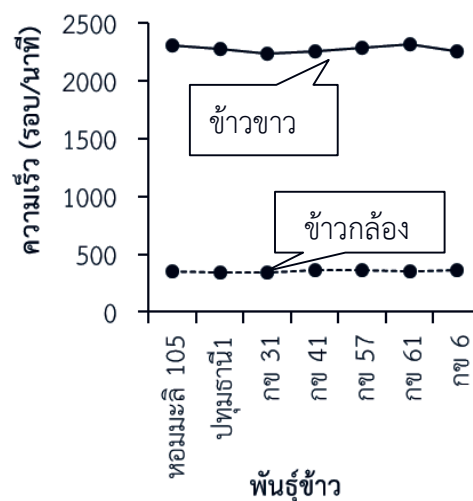


รูปที่ 5 ค่าเฉลี่ยปริมาณข้าวกล้องที่ได้จากเครื่องสีข้าวของข้าวแต่ละสายพันธุ์



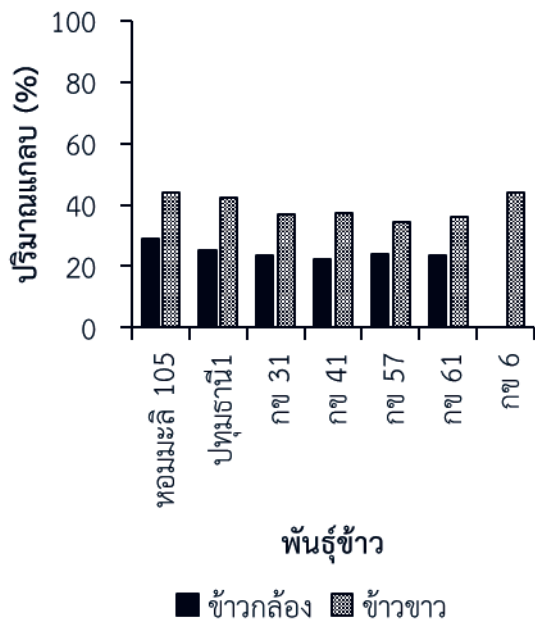
รูปที่ 6 ค่าเฉลี่ยปริมาณข้าวขาวที่ได้จากเครื่องสีข้าวของข้าวแต่ละสายพันธุ์

ค่าความเร็วเฉลี่ยของมอเตอร์ที่ใช้ในการสีข้าวทั้งข้าวกล้องและข้าวขาวแสดงดังรูปที่ 7



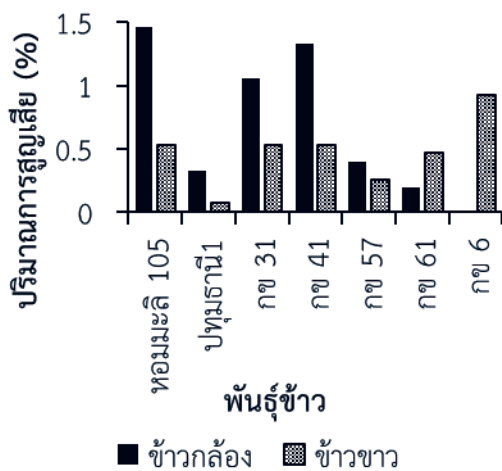
รูปที่ 7 ค่าความเร็วเฉลี่ยที่ใช้ในการสีข้าวทั้งข้าวกล้องและข้าวขาวของข้าวแต่ละสายพันธุ์

ค่าเฉลี่ยปริมาณแกลบที่ได้จากการสีข้าวทั้งข้าวกล้องและข้าวขาวแสดงดังรูปที่ 8 โดยคิดจากปริมาณข้าวเปลือก 0.5 กิโลกรัมมีค่าเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์



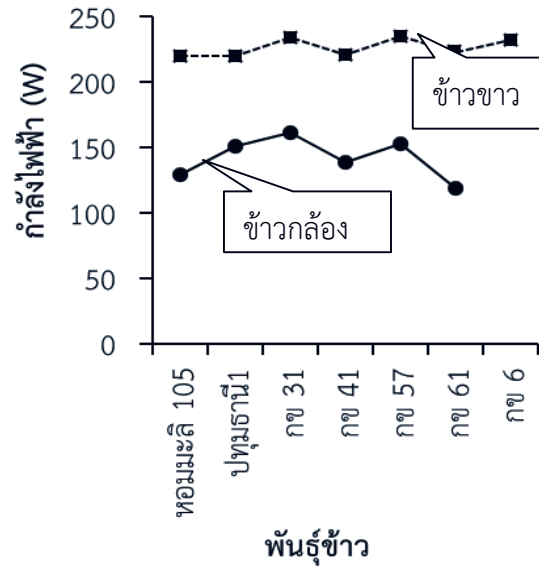
รูปที่ 8 ค่าเฉลี่ยปริมาณแกลบที่ได้จากการสีข้าวกล้อง และข้าวขาวของข้าวแต่ละสายพันธุ์

ค่าเฉลี่ยปริมาณการสูญเสียจากการสีข้าวทั้ง ข้าวกล้องและข้าวขาวแสดงดังรูปที่ 9 โดยคิดจาก ปริมาณข้าวเปลือก 0.5 กิโลกรัม มีค่าเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์



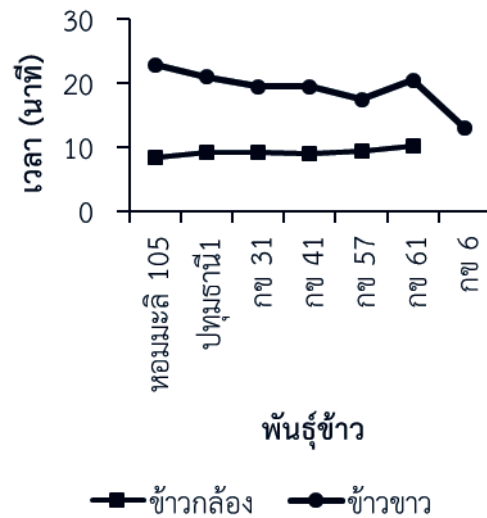
รูปที่ 9 ค่าเฉลี่ยปริมาณการสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการสี ข้าวทั้งข้าวกล้องและข้าวขาว

ค่าเฉลี่ยการใช้กำลังไฟฟ้าในการสีข้าวทั้งข้าว กล้องและข้าวขาวแสดงดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 ค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการสีข้าวกล้องและข้าว ขาวของข้าวแต่ละสายพันธุ์

เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการสีข้าวทั้งข้าวกล้องและ ข้าวขาวของข้าวแต่ละสายพันธุ์แสดงดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการสีข้าวกล้อง และข้าวขาว (ต่อปริมาณข้าวเปลือก 0.5 กิโลกรัม)

5. การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบสีข้าวทั้งข้าวกล้องและข้าวขาวของข้าวทั้ง 7 สายพันธุ์ พบว่าปริมาณเฉลี่ยของข้าวกล้องและข้าวขาวที่สีได้มีค่าประมาณร้อยละ 74.95 และ ร้อยละ 59.86 ตามลำดับ ความเร็วรอบเฉลี่ยที่เหมาะสมกับการสีข้าวกล้องและข้าวขาวอยู่ที่ประมาณ 349.78 รอบต่อนาที และ 2278.5 รอบต่อนาที ตามลำดับ กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่ใช้ในการสีข้าวกล้องและข้าวขาวอยู่ที่ประมาณ 143 W และ 227 W ตามลำดับ และเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการสีข้าวกล้องและข้าวขาวอยู่ที่ประมาณ 9 นาทีต่อปริมาณข้าวเปลือก 0.5 กิโลกรัม และ 20 นาทีต่อปริมาณข้าวเปลือก 0.5 กิโลกรัม ตามลำดับ

6. สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาเครื่องสีข้าวขนาดเล็กสำหรับใช้ในครัวเรือน ที่ควบคุมการทำงานด้วยบอร์ด Arduino Uno R3 โดยสามารถสีข้าวได้ทั้งข้าวกล้องและข้าวขาว และยังลดขนาดของเครื่องสีข้าวให้เล็กลงจากเดิมแต่ยังคงไว้ซึ่งประสิทธิภาพในการสีข้าว ลดจำนวนมอเตอร์ลงจากเดิม ทำให้การใช้กำลังไฟฟ้าลดลง และมีการเปลี่ยนจากโซ่มาเป็นสายพานทำให้ลดเสียงขณะทำงานลง

เนื่องจากเครื่องสีข้าวขนาดเล็กสำหรับใช้ในครัวเรือนเครื่องนี้เป็นเครื่องต้นแบบดังนั้นเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป ทางคณะผู้วิจัยขอเสนอแนะแนวทางการพัฒนาดังต่อไปนี้

6.1 ควรมีการปรับปรุงในส่วนของการระบายข้าวเปลือกเพื่อให้ข้าวเปลือกไหลลงมายังระบบการกะเทาะเปลือกสะดวกและมีปริมาณที่เหมาะสมกับความเร็วยรอบของมอเตอร์ชุดขับเคลื่อน

6.2 ควรมีการปรับปรุงในส่วนของการลำเลียงข้าวที่ได้หลังจากผ่านการสีแล้วมายังช่องเก็บข้าวเพื่อให้ข้าวไหลได้สะดวกไม่ติดขัด

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นโดยได้รับการสนับสนุนจากเงินงบประมาณ ประจำปี 2562 จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ โครงการวิจัยนี้ดำเนินการและสำเร็จไปได้ด้วยดี ทั้งนี้เนื่องจากการได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน รวมถึงหน่วยงานต่าง ๆ

ทางคณะผู้วิจัยขอขอบคุณ นายภูวดล วัฒนารุ่งเรือง นายณัฐภูมิ หอมสิน นักศึกษาจากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ช่วยในการหาข้อมูลต่าง ๆ ที่ใช้ในการทำวิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำงานวิจัยในครั้งนี้

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Suwat S, Sampan K, and Nipon C. 2544. Small rice milling machine [master's thesis]. Faculty of Engineering: King Mongkut's University of Technology North Bangkok; 2001. (in Thai)
- [2] Surasit C. Construction of a brown Rice polishing machine. Princess of Naradhiwas University Journal. 2010; 2(1): 133-43. (in Thai)
- [3] Pongsuang C. Design and development of brown rice milling machine for household use [master's thesis] Faculty of Engineering: Chiang Mai University; 2014. (in Thai)
- [4] Apinan J, Somboon S, Tanaporn M. Invention and testing of Community brown rice milling machine with double rubber rollers. Rajabhat Maha Sarakham University Journal. 2010; 4(2): 9-15. (in Thai)
- [5] Anawin K, Poomjai L. Development of small rice milling machine for using in household [Bachelor's thesis] Faculty of Engineering: Rajamangala University Of Technology Thanyaburi; 2016 (in Thai)
- [6] Chiwbang D. Small brown rice milling machine [Bachelor's thesis]. Faculty of Technical Education: Raja-mangala Institute of Technology; 2016 (in Thai)

- [7] Kalsirisilp R. Machine for rice milling
[Internet] 2015 September 15. Available
from <http://www.arda.or.th> (in Thai)

พอลิโพรพิลีนและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นผนังสองชั้นในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนขึ้นตอนเดียวที่อัตราความเร็วรอบการหมุนสูง

เอกตินัย จันทรศรี^{1*} จิตาภา กรมสุริยศักดิ์² จักรภัทร ปรีดาวัฒน์³ และ ณรงค์ชัย โอเจริญ⁴
Ektinai.j@mail.rmutk.ac.th^{1*} 1158104520767@mail.rmutt.ac.th² 1158104730374@mail.rmutt.ac.th³
narongchi.o@en.rmutt.ac.th⁴

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเคมีสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

²⁻⁴ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Received	: 19-Mar-2020
Revised	: 23-Apr-2020
Accepted	: 12-May-2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ผนังสองชั้นในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนขึ้นตอนเดียวที่อัตราความเร็วรอบการหมุนสูง โดยใช้พอลิโพรพิลีน (PP) ที่มีขนาดและลักษณะรูปร่างของอนุภาคต่างกันร่วมกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) ที่มีลักษณะอนุภาคเป็นผง ทำการผสมที่อัตราส่วน 50 ต่อ 50 ด้วยวิธีการผสมแบบแห้งแล้วขึ้นรูปด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบหมุนชนิดแนวแกนเดียวที่ความเร็วในการหมุน 60 รอบต่อนาที ซึ่งในระหว่างการขึ้นรูป อุณหภูมิภายในแม่พิมพ์และพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอนุภาคจะถูกสังเกตและบันทึกการเปลี่ยนแปลง ผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นชัดเจนว่าการขึ้นรูปที่ความเร็วรอบการหมุนสูงสามารถทำให้ชิ้นงานเกิดการแยกชั้นได้ในทุกกรณี พื้นผิวชิ้นงานทั้งด้านในและด้านนอกมีความขรุขระลดลง และชิ้นงานมีค่ามอดูลัสเริ่มต้นเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการขึ้นรูปที่อัตราความเร็วรอบการหมุนต่ำ ยกเว้นในกรณีของ PP ที่มีลักษณะรูปร่างกลมและมีขนาดใหญ่กว่า LLDPE 3 เท่า

คำสำคัญ: กระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนขึ้นตอนเดียว พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น พอลิโพรพิลีน

Polypropylene and Linear Low-Density Polyethylene Two-Layered in Single-Step Rotational Molding at the High-Speed Rotating

Ektinai Jansri^{1*}, Jidapa Kromsuriyasak², Jakkphat Preedawat³
and Narongchai O-Charoen⁴

Ektinai.j@mail.rmutk.ac.th^{1*}, 1158104520767@mail.rmutt.ac.th², 1158104730374@mail.rmutt.ac.th³,
narongchi.o@en.rmutt.ac.th⁴

¹Department of Textile Chemical Engineering, Faculty of Textile Industry, Rajamangala University of Technology
Krungthep,

²⁻⁴Department of Materials and Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of
Technology Thanyaburi,

Received	: 19-Mar-2020
Revised	: 23-Apr-2020
Accepted	: 12-May-2020

Abstract

The objective of this research has studied the molding of two-layered products in one-step rotational molding process at high-speed rotation. In this research, polypropylene (PP) with different sizes and shapes of particles were used to mixed with linear low-density polyethylene (LLDPE) with powder particles, using the single-axis rotation machine for molding, mixing by dry blend method at 50:50 ratios, the rotational speed at 60 rpm, during molding the temperature change within the mold and the particles movement behavior was observed and recorded. The results show clearly that high-speed rotation can cause the sample to be separated as two-layered in all cases, the surface roughness both inside and outside has reduced, and the sample had higher an initial modulus when compared to low-speed rotation except in the case of PP with round shape and 3 times larger than LLDPE

Key Words: One-step rotational molding, Linear Low-Density Polyethylene, Polypropylene,

1. บทนำ

การขึ้นรูปพลาสติกแบบหมุน (Rotational molding or Roto-molding) เป็นกระบวนการผลิตเทอร์โมพลาสติกที่มีขั้นตอนไม่ยุ่งยาก เครื่องจักรมีราคาไม่แพง สามารถผลิตชิ้นงานที่มีลักษณะกลวงขนาดใหญ่ เช่น ถังเก็บน้ำ ถังบำบัดน้ำเสีย เรือคายัค ก่อ่งใส่น้ำแข็ง ของเล่นเด็กกลางแจ้ง และชิ้นส่วนยานยนต์ เป็นต้น [1,2] ข้อดีของกระบวนการนี้มีหลายประการ เช่น ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความสมมาตรและไม่มีความเค้นตกค้าง, ชิ้นงานมีผิวเรียบ แม้พิมพ์ราคาไม่แพง และสามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ผนังหลายชั้นได้ โดยทั่วไปผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการนี้มากกว่า 85% ผลิตจากพอลิเอทิลีน โดยเฉพาะอย่างยิ่งพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear Low-Density Polyethylene, LLDPE) ในรูปของอนุภาคผง [3,4] พอลิเมอร์ชนิดนี้มีสมบัติที่โดดเด่นหลายอย่าง เช่น สามารถลดขนาดเป็นผงได้ง่าย หลอมรวมเป็นเนื้อเดียวกัน ในสภาวะแรงเฉือนเป็นศูนย์ได้ดี [5] มีความแข็งแรงสูง ยืดหยุ่นได้ดี ทนต่อสารเคมี และทนต่อสภาพแวดล้อม เป็นต้น

แต่อย่างไรก็ตามพอลิเมอร์ชนิดนี้มีข้อเสียคือ ไม่สามารถใช้งานผลิตภัณฑ์ในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงและมีความดันได้เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ที่มีอุณหภูมิการโก่งตัวต่ำ (Low heat distortion) และมีสมบัติความแข็งเกร็งต่ำ (Low stiffness) ทำให้มีการคงรูปไม่ดี จากข้อเสียดังกล่าว ทำให้นักวิจัยหลายคนสนใจที่จะศึกษาการปรับปรุง LLDPE เพื่อให้สมบัติดังกล่าวดีขึ้น โดยการใช้พอลิเมอร์ชนิดพอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) มาผสม เนื่องจากเป็นพลาสติกที่ใช้กันแพร่หลายมากที่สุดในโลก มีความหลากหลายในการขึ้นรูป มีราคาถูก และมีคุณสมบัติที่โดดเด่นมากมาย เช่น ทนต่อแรงกระแทก ทนความร้อน มีความแข็งแรงสูง ทนต่อรอยขีดข่วน ทนต่อสารเคมี และที่สำคัญพอลิโพรพิลีนเป็นพอลิเมอร์ในกลุ่มของพอลิโอเลฟิน เช่นเดียวกับพอลิเอทิลีน

วิธีการขึ้นรูปชิ้นงานผนังหลายชั้นด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุน โดยทั่วไปสามารถทำได้โดยการเรียงลำดับการใส่วัสดุลงในแม่พิมพ์ ซึ่งมีหลายเทคนิคที่นิยมใช้ เช่น การใช้อุปกรณ์พิเศษที่เรียกว่ากล่องแบบเลื่อน (drop-box) เทคนิคการใช้ถุงเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic bag) หรือแม้แต่เทคนิคการเปิดแม่พิมพ์ ในระหว่างขั้นตอนการให้ความร้อนเพื่อเติมวัสดุที่ต้องการให้เป็นผนังชั้นในลงแม่พิมพ์ [6-8] เทคนิคที่กล่าวมาข้างต้น แม้จะมีหลักการไม่ซับซ้อนแต่ต้องใช้อุปกรณ์ที่มีราคาแพง ต้องใช้พื้นที่บนแม่พิมพ์สำหรับการติดตั้ง และบางเทคนิคต้องหยุดการทำงานในระหว่างขึ้นรูปซึ่งทำให้เวลาในการ

ผลิตนานขึ้น อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ [9, 10, 11] อธิบายไว้ว่าการขึ้นรูปชิ้นงานผนังสองชั้นไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์พิเศษหรือขั้นตอนที่ซับซ้อน เพียงแค่พิจารณาคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ เช่น จุดหลอมเหลว ลักษณะการไหลขนาด และรูปร่างของอนุภาคก็สามารถผลิตชิ้นงานผนังสองชั้นได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ [12] ที่แสดงให้เห็นว่าการขึ้นรูป PP/LLDPE สองชั้นในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนขั้นตอนเดียวสามารถขึ้นรูปได้ โดยใช้อุณหภูมิ LLDPE ที่มีขนาดเล็กกว่า PP ประมาณ 3 เท่า, ใช้ PP ที่มีรูปร่างค่อนข้างกลมและใช้ความเร็วรอบการหมุน 7 รอบต่อนาที ซึ่งความชัดเจนของการแยกชั้นจะขึ้นอยู่กับรูปแบบการแยกตัวของอนุภาคหรือความสามารถในการแทรกตัวผ่านช่องว่างระหว่างอนุภาคไปยังพื้นผิวแม่พิมพ์ของอนุภาคขนาดเล็ก ด้วยเหตุนี้ทำให้เกิดประเด็นที่น่าสนใจอีกข้อคือ การเพิ่มความเร็วรอบการหมุนอาจทำให้รูปแบบการแยกอนุภาคในขณะที่เป็นของแข็งเกิดการเปลี่ยนแปลงและทำให้ชิ้นงานแยกเป็นสองชั้นได้

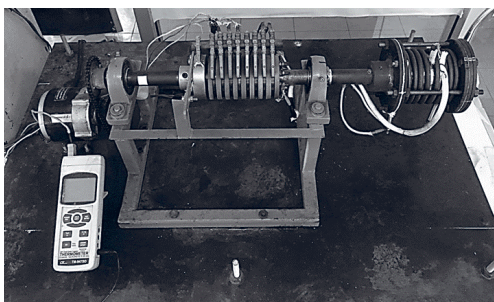
ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ ศึกษาการขึ้นรูป PP/LLDPE สองชั้นในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนขั้นตอนเดียวที่อัตราความเร็วรอบการหมุนสูง เพื่อช่วยเพิ่มทางเลือกสำหรับการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ผนังหลายชั้นในกระบวนการขึ้นรูปแบบหมุนที่มีขั้นตอนที่ง่ายและไม่ซับซ้อน

2. วัสดุและอุปกรณ์

ในงานวิจัยนี้จะใช้วัสดุสามชนิดคือ พอลิพรอพิลีนชนิดโพลิเมอไรซ์ (PPH) เกรด 1100NK จากบริษัท IRPC พอลิพรอพิลีนชนิดโคพอลิเมอร์ (PPC) เกรด EP549H จากบริษัท HMC และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) เกรด M3204RU จากบริษัท SCG chemical มีอัตราการไหล 11, 11 และ 4 กรัม/10 นาทีตามลำดับ โดยก่อนการขึ้นรูปวัสดุทั้งหมดจะถูกผสมกับสีด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่เพื่อให้ง่ายต่อการสังเกตปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในระหว่างขึ้นรูป; อัตราส่วนผสมสีเท่ากับ 1% โดยน้ำหนัก โดย LLDPE จะถูกผสมด้วยสีเหลือง, PPH ผสมด้วยสีแดง และ PPC ผสมด้วยสีเขียวตามลำดับ หลังจากนั้นเพื่อควบคุมคุณภาพของวัสดุให้ใกล้เคียงกับเชิงการค้า LLDPE จะถูกลดขนาดด้วยเครื่องบดแบบไม่ สำหรับ PP สองชนิดที่แตกต่างกันถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้เนื่องจากต้องการให้อนุภาคภายหลังจากการลดขนาดมีลักษณะรูปร่างที่ต่างกัน ซึ่ง PP ทั้งสองชนิดจะถูกลดขนาดด้วยเครื่องบดแบบใบมีดและควบคุมขนาดอนุภาคโดยการกำหนดระยะเวลาและปริมาณของวัสดุที่ 300 กรัมต่อ 15 นาที

3. ขั้นตอนและวิธีการขึ้นรูปชิ้นงาน

งานวิจัยนี้จะใช้เครื่องขึ้นรูปแบบหมุนชนิดแนวแกนเดียว (The Axial powder flow apparatus) ซึ่งถูกสร้างขึ้นมาโดยเฉพาะ ดังแสดงรูปที่ 1 เพื่อศึกษาปรากฏการณ์ต่างๆที่เกิดขึ้น ณ เวลาจริงในระหว่างการขึ้นรูป โดยในการขึ้นรูปแต่ละครั้งจะใช้ผงพลาสติกน้ำหนัก 48 กรัม เพื่อให้ได้ตัวอย่างที่มีความหนาประมาณ 3 มิลลิเมตร ใช้อัตราส่วนการผสมระหว่าง PP และ LLDPE เท่ากับ 50:50 (%wt), ความเร็วในการหมุนแม่พิมพ์ที่ 60 รอบต่อนาที, และอุณหภูมิในการขึ้นรูปจะถูกตั้งไว้ที่ 190 °C เมื่ออุณหภูมิอากาศภายในแม่พิมพ์สูงถึง 190 °C ระบบจะหยุดให้ความร้อน แล้วเริ่มขั้นตอนการหล่อเย็นโดยแม่พิมพ์จะถูกหล่อเย็นจนกระทั่งอุณหภูมิลดลงถึงอุณหภูมิคงรูปของพอลิเมอร์ จากนั้นชิ้นงานจะถูกถอดออกจากแม่พิมพ์



รูปที่ 1 เครื่องขึ้นรูปแบบหมุนชนิดแนวแกนเดียว

4. การทดสอบลักษณะและสมบัติของชิ้นงาน

ความหนาแน่นมวลรวม (bulk density) และอัตราการไหลแห้ง (Dry flow rate) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1895-96, อัตราส่วน Hausner (Hausner ratio) ใช้ทดสอบเพื่ออธิบายความสามารถในการเคลื่อนที่ของอนุภาคขณะเป็นของแข็ง, สมบัติการหลอมไหลของเหลว (Melt flow index) จะถูกทดสอบด้วยเครื่อง CEAST® Modular Melt Flow Indexer (รุ่น 8331) ตามมาตรฐาน ASTM D1238, ชุดกล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัลพร้อมด้วยแผ่นให้ความร้อนและซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ ImageJ ถูกใช้เพื่อตรวจสอบอัตราหลอมรวมเป็นเนื้อเดียวกันของวัสดุ (Sintering rate), การทดสอบสมบัติทางความร้อนใช้เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ NETZSCH (รุ่น DSC 200 F3) โดยใช้ช่วงอุณหภูมิ 30-200 °C อัตราการให้ความร้อนและอัตราการระบายความร้อนที่ 10 °C ต่อนาที และ 5 °C ต่อนาที ตามลำดับ การทดสอบนี้ใช้เพื่อระบุการแยกชั้นและความเข้ากันได้ของตัวอย่าง, กล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัลกำลังขยาย

600 เท่าทำงานร่วมกับซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ ImageJ ในฟังก์ชันวิเคราะห์ความขรุขระของพื้นผิวเพื่อตรวจสอบความหยาบของผิวชิ้นงาน, และสมบัติเชิงกลจะถูกทดสอบในฟังก์ชันของการรับแรงอัด (Compression test)

5. สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

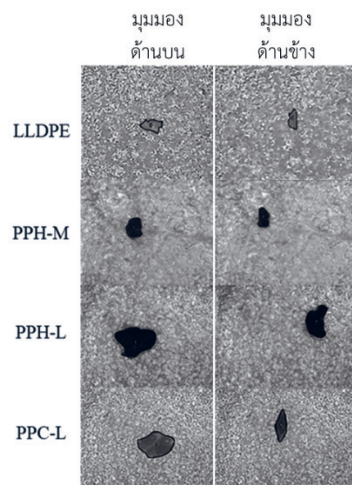
5.1 สมบัติและลักษณะของอนุภาคหลังการลดขนาด

ความหนาแน่นมวลรวมและอัตราการไหลแบบแห้งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการแพ้ตัวและการเคลื่อนที่ของอนุภาค ลักษณะรูปร่างของอนุภาคในรูปที่ 2 แสดงให้เห็นว่า LLDPE, PPH-L และ PPH-M มีรูปทรงอนุภาคสมมาตรและมีลักษณะค่อนข้างกลมกว่าในกรณีของ PPC-L ที่ไม่สมมาตรและมีลักษณะแบนซึ่งสอดคล้องกับค่าความกลมเฉลี่ยที่แสดงในตารางที่ 1 โดยจะเห็นได้ว่าอนุภาคที่มีความสมมาตรหรือค่อนข้างกลมจะมีค่าความกลมเฉลี่ยเข้าใกล้ 1 ทั้งมุมมองด้านบนและด้านล่าง สำหรับผลการทดสอบสมบัติของอนุภาคแสดงในตารางที่ 1 ในกรณีของ PPH-L มีค่าความหนาแน่นมวลรวมสูงสุดตามด้วย PPH-M, PPC-L และ LLDPE ตามลำดับ ในกรณีของพอลิเมอร์ผสม PPH-L/LLDPE มีความหนาแน่นมวลรวมสูงกว่าและมีอัตราการไหลแบบแห้งเร็วกว่า PPH-M/LLDPE และ PPC-L/LLDPE ตามลำดับ จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า LLDPE ช่วยเพิ่มความหนาแน่นมวลรวมและอัตราการไหลแบบแห้งของ PP ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้เกี่ยวข้องโดยตรงกับการกระจายตัวของขนาดอนุภาค ซึ่งการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของความหนาแน่นรวมของอนุภาคจะขึ้นอยู่กับขนาดและการกระจายขนาดอนุภาคที่เหมาะสม [3] สำหรับอัตราการไหลแบบแห้งของอนุภาคนั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะรูปร่างของอนุภาค โดยการลดลงของอนุภาคที่มีรูปร่างผิดปกติ (ไม่กลม) จะทำให้อัตราการไหลแบบแห้งของอนุภาคเพิ่มขึ้นหรือไหลได้เร็วขึ้น

อัตราส่วน Hausner เป็นวิธีทดสอบที่แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพหรือความสามารถในการเคลื่อนที่ของอนุภาคผ่านช่องว่าง ผลของการทดสอบที่แสดงในช่วง 1.12 ถึง 1.18 หมายถึงอนุภาคมีความสามารถในการเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างสูง อนุภาคที่มีความสามารถในการเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างปานกลางจะแสดงผลอยู่ในช่วง 1.19 ถึง 1.25 และอนุภาคที่มีความสามารถในการเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างต่ำจะแสดงผลในช่วง 1.35-1.45 [13] ผลการทดสอบในตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่าในกรณีของ PPH-L, PPH-M และ PPC-L อนุภาคมีความสามารถในการเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างสูง ในขณะที่ LLDPE อนุภาคมีความสามารถในการเคลื่อนที่ผ่านช่องว่าง

ปานกลาง ในกรณีของพอลิเมอร์ผสม PPH-L/LLDPE อนุภาคมีความสามารถในการเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างสูง ขณะที่กรณีของทั้ง PPH-M/LLDPE และ PPC-L/LLDPE อนุภาคมีความสามารถในการเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างปานกลาง จาก

ผลทดสอบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า LLDPE ที่มีอนุภาคขนาดเล็กเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างระหว่างอนุภาคของ PPH-L ได้ดีกว่า PPH-M และ PPC-L เนื่องจากอนุภาค PP-H มีขนาดใหญ่กว่า PPH-M และมีรูปทรงค่อนข้างกลมมากกว่า PPC-L



รูปที่ 2. ลักษณะรูปร่างอนุภาคหลังการลดขนาด

ตารางที่ 1 สมบัติของอนุภาค

วัสดุ	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (ไมครอน)	ค่าเฉลี่ยความกลมอนุภาค		ความหนาแน่นมวลรวม (กรัม/ลบ. ซม.)	อัตราการใช้ไฮดรอลิก (วินาที)	อัตรา Hausner	ดัชนีการไหล (กรัม/10 นาที) ¹
		มุมมองด้านบน	มุมมองด้านข้าง				
LLDPE	368	0.67	0.53	0.33	9.49	1.19	4.10
PPH-M	758	0.66	0.66	0.35	11.97	1.16	5.15
PPH-L	1,421	0.75	0.73	0.38	10.78	1.14	5.08
PPC-L	1,471	0.73	0.56	0.34	21.30	1.16	5.91
PPH-M/LLDPE	-	-	-	0.38	10.91	1.19	5.72
PPH-L/LLDPE	-	-	-	0.39	10.70	1.17	5.41
PPC-L/LLDPE	-	-	-	0.37	10.88	1.22	5.64

¹ ทดสอบภายหลังจากการผสมสีและใช้สภาวะทดสอบที่อุณหภูมิ 190°C.

5.2 ผลทดสอบค่าดัชนีการไหล

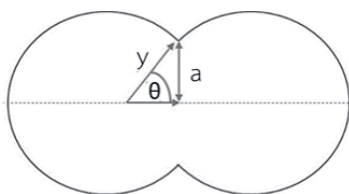
การทดสอบดัชนีการไหลในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบสมบัติการไหลของวัสดุหลังจากการผสมสี โดยวัสดุทั้งหมดจะถูกทดสอบที่อุณหภูมิเดียวกัน อ้างอิงจากมาตรฐานการทดสอบ ASTM D638 ซึ่ง

ค่าดัชนีการไหลก่อนการผสมสีของ LLDPE มีค่าเท่ากับ 4 กรัม/10 นาที PPH และ PPC มีค่าเท่ากับ 5 กรัม/10 นาที เมื่อนำผลที่ได้ก่อนและหลังผสมสีมาเปรียบเทียบพบว่า LLDPE หลังจากผ่านการผสมสีมีสมบัติการไหลไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะที่ PPH-L, PPH-M และ PPC-L หลังจาก

การผสมมีค่าดัชนีการหลอมไหลเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากการเสื่อมสภาพทางความร้อนเชิงกลและปฏิกิริยาเทอร์โมออกซิไดซ์ในขั้นตอนการขึ้นรูป โดยทั่วไปแล้วสมบัติการหลอมไหลของพอลิเมอร์ที่ผ่านการให้ความร้อนมากกว่าหนึ่งครั้งจะทำให้สายโซ่โมเลกุลเกิดการขาด หรือเกิดการเชื่อมขวางของสายโซ่โมเลกุล เป็นสาเหตุให้สมบัติการไหลของพอลิเมอร์เปลี่ยนแปลง [14-17] ในกรณีของพอลิเมอร์ผสม PPH-L/LLDPE, PPH-M/LLDPE และ PPC-L/LLDPE พบว่าค่าดัชนีการหลอมไหลเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ LLDPE ซึ่งแสดงให้เห็นว่า PP ช่วยปรับปรุงสมบัติการหลอมไหลของ LLDPE

5.3 ผลทดสอบอัตราการหลอมรวมเป็นเนื้อเดียวกันของอนุภาค

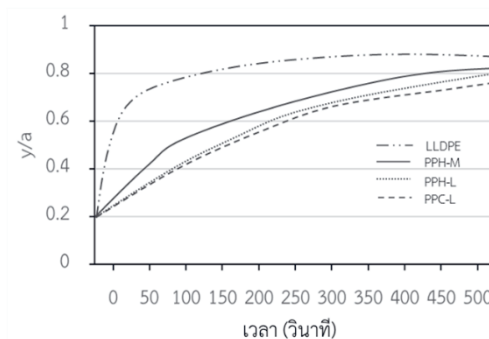
การทดสอบนี้มีบทบาทสำคัญในการคาดคะเนระยะเวลาการให้ความร้อนในการขึ้นรูปและการควบคุมคุณภาพของชิ้นงาน โดยเครื่องทดสอบประกอบด้วยกล้องดิจิทัลที่มีกำลังขยายสูงสุด 600 เท่า พร้อมด้วยแผ่นความร้อนและเครื่องบันทึกข้อมูลอุณหภูมิ การทดลองจะใช้อนุภาคสองอนุภาคที่มีลักษณะรูปร่างและขนาดใกล้เคียงกันวางไว้บนแผ่นความร้อนโดยให้หน้าสัมผัสของอนุภาคอยู่ชิดกัน จากนั้นให้ความร้อนอย่างคงที่ และเมื่อแผ่นความร้อนทำงาน กล้องไม่โครสโคปแบบดิจิทัลและเครื่องบันทึกข้อมูลอุณหภูมิจะเริ่มทำงานพร้อมกัน ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบจะถูกบันทึกวิดีโอและข้อมูลทั้งหมดจะถูกนำมาวิเคราะห์เพื่ออัตราการหลอมรวมเป็นเนื้อเดียวกันของอนุภาค โดยการหาอัตราส่วนระหว่าง y/a ; โดยที่ y คือความยาวของจุดเชื่อมต่อระหว่างสองอนุภาคและ a คือรัศมีเฉลี่ยของอนุภาค ซึ่งหากอัตราส่วนระหว่าง y/a เข้าใกล้ 1 หมายความว่าอนุภาคทั้งสองรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันสมบูรณ์ [18] (ดังแสดงในรูปที่ 3)



รูปที่ 3 ลักษณะการหลอมรวมเป็นเนื้อเดียวกันของอนุภาค

ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่า LLDPE ที่มีขนาดอนุภาคเล็กที่สุดและมีจุดหลอมเหลวต่ำจะมีอัตราการหลอมเป็นเนื้อเดียวกันสูงที่สุดตามด้วย PP ที่มี

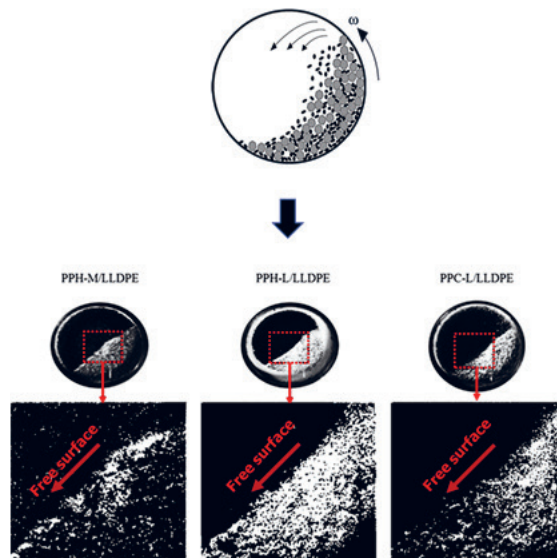
อนุภาคขนาดเล็กและ PP ที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ตามลำดับ ผลการทดสอบดังกล่าวแสดงให้เห็นชัดเจนว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะสามารถหลอมรวมเป็นเนื้อเดียวกันได้เร็วกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตามการทดสอบในงานวิจัยนี้ต้องการแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของขนาดอนุภาคต่อการหลอมรวมกันเท่านั้น ซึ่งในความเป็นจริงแล้วยังมีตัวแปรอีกมากที่มีผลต่อการทดสอบ เช่น ค่าดัชนีการไหลหลอมเหลวหรือค่าความหนืดและความแข็งแรงของพอลิเมอร์ขณะหลอมเหลว เป็นต้น [4,19]



รูปที่ 4 อัตราการหลอมรวมเป็นเนื้อเดียวกันของอนุภาค

5.4 รูปแบบการแยกตัวของอนุภาคที่ความเร็วรอบในการหมุนสูง

ผลการเปรียบเทียบรูปแบบการแยกตัวของอนุภาคของ PPH-L/LLDPE, PPH-M/LLDPE และ PPC-L/LLDPE ที่ความเร็วรอบการหมุนสูงพบว่ามีรูปแบบการแยกตัวของอนุภาคคล้ายกัน ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยที่อนุภาค LLDPE ที่มีขนาดอนุภาคเล็ก ส่วนใหญ่จะปรากฏที่บริเวณผิวการไหล (Free surface) เป็นผลมาจากการหมุนด้วยความเร็วรอบสูงทำให้อนุภาคขนาดเล็กสามารถเอาชนะแรงเสียดทานและถูกเหวี่ยงม้วนขึ้นไปอยู่บริเวณผิวการไหล ซึ่งจากรูปแบบการแยกตัวของอนุภาคที่เกิดขึ้นทำให้สามารถคาดเดาได้ว่ามีความเป็นไปได้สูงที่จะสามารถขึ้นรูปชิ้นงานผนังสองชั้นได้

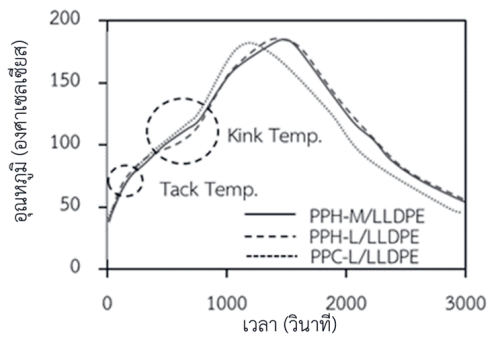


รูปที่ 5 รูปแบบการแยกตัวของอนุภาคที่ความเร็วในการหมุน 60 รอบต่อนาที

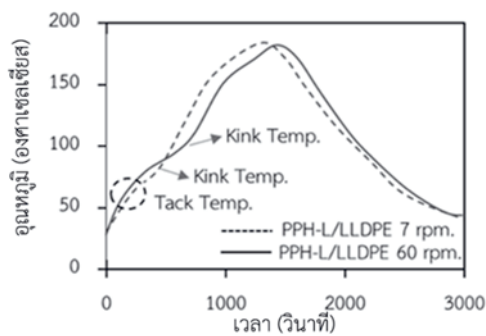
5.5 รูปแบบอัตราความร้อนภายในแม่พิมพ์

อัตราความร้อนภายในแม่พิมพ์แสดงในรูปที่ 6, ในกรณีของ PPH-L/LLDPE, PPH-M/LLDPE และ PPC-L/LLDPE พบว่ามีอุณหภูมิที่อนุภาคเริ่มเคลือบผิวแม่พิมพ์ (Tack temperature) และอุณหภูมิที่อนุภาคเคลือบแม่พิมพ์สมบูรณ์ (Kink temperature) ใกล้เคียงกันประมาณ 50 °C และ 110 °C ตามลำดับ นอกจากนี้ ลักษณะรูปแบบของกราฟอัตราความร้อนภายในแม่พิมพ์ที่เกิดขึ้นแสดงให้เห็นว่าทุกกรณีของมีรูปแบบคล้ายกันทั้ง 3 กรณี โดยปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้ว่าการใช้ความเร็วรอบในการหมุนสูงจะทำให้รูปแบบการแยกตัวของอนุภาคในขณะที่เป็นของแข็งเกิดการเปลี่ยนแปลง อนุภาค LLDPE ที่มีขนาดเล็กถูกแรงเหวี่ยงทำให้สามารถเอาชนะแรงเสียดทานและแทรกตัวไปยังผิวแม่พิมพ์ได้ง่าย. การก่อตัวของชั้นความหนาพอลิเมอร์หลอมเหลวเริ่มต้นเมื่อให้ความร้อนกับแม่พิมพ์ อนุภาค LLDPE ที่มีขนาดเล็ก จุดหลอมเหลวต่ำ และอยู่ใกล้กับผนังแม่พิมพ์จะถูกหลอมละลายเคลือบบนพื้นผิวแม่พิมพ์ได้ก่อน ในขณะที่อนุภาค PP ที่มีขนาดใหญ่ จุดหลอมเหลวสูงและอยู่ห่างผนังแม่พิมพ์จะยังไม่ละลายและส่วนใหญ่ยังคงหมุนอยู่ แต่ก็ยังมีอนุภาคบางส่วนถูกยึดตรึงไว้โดย LLDPE หลอมเหลว โดยความหนาของ ชั้น LLDPE หลอมเหลวที่ก่อตัวเป็นผนังชั้นนอกจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นและความร้อนจะถ่ายเทเข้าไปยังภายในแม่พิมพ์อย่างช้าๆ จนกระทั่งอนุภาค PP ที่กึ่งอยู่ได้รับความร้อนเพียงพอ จะค่อยๆ

หลอมละลายและเคลือบบนชั้น LLDPE หลอมเหลวกลายเป็นผนังชั้นใน. การพิจารณาอิทธิพลของความเร็วรอบการหมุนที่มีต่ออัตราความร้อนภายในแม่พิมพ์จะใช้กรณีของ PPH-L/LLDPE ในการเปรียบเทียบเนื่องจากงานวิจัย [12] ก่อนหน้านี้แสดงให้เห็นว่าในกรณีของ PPH-L/LLDPE ที่ความเร็วในการหมุน 7 รอบต่อนาที สามารถขึ้นรูปเป็นผนังสองชั้นได้อย่างชัดเจน ผลการเปรียบเทียบในรูปที่ 7 พบว่าการหมุนด้วยความเร็วรอบสูงจะมีอัตราความร้อนภายในจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก เนื่องจากอนุภาคจะสัมผัสกับพื้นผิวของแม่พิมพ์ในช่วงเวลาสั้นๆ ทำให้การถ่ายเทความร้อนจากแม่พิมพ์ไปยังอนุภาคและอนุภาคต่ออนุภาคข้างล่างส่งผลให้การสร้างชั้นความหนาของพอลิเมอร์หลอมเหลวข้างล่างด้วยและด้วยเหตุนี้ทำให้การหมุนด้วยความเร็วรอบสูงจะมีจุดอุณหภูมิที่อนุภาคเกาะแม่พิมพ์สมบูรณ์สูงกว่าการหมุนด้วยความเร็วรอบต่ำ



รูปที่ 6 อุณหภูมิภายในแม่พิมพ์ที่ความเร็วในการหมุน 60 รอบต่อนาที



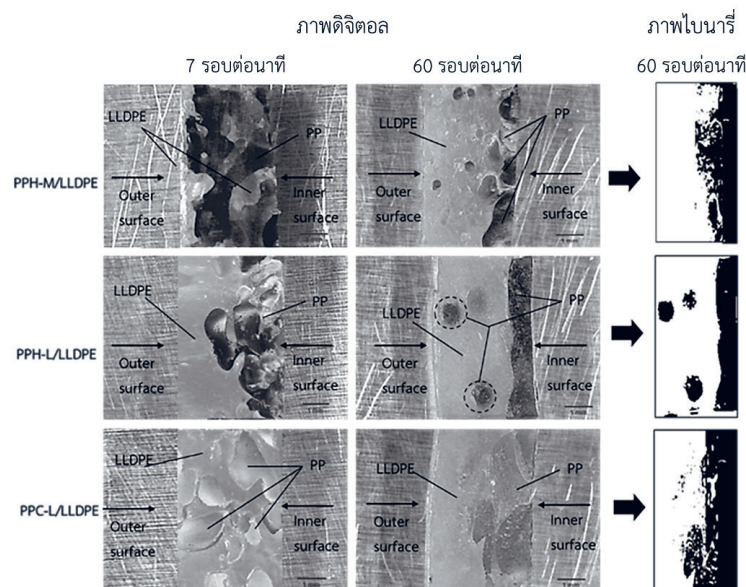
รูปที่ 7 อุณหภูมิภายในแม่พิมพ์ที่ความเร็วในการหมุน 7 และ 60 รอบต่อนาที

5.6 ผลการตรวจสอบการแยกชั้น

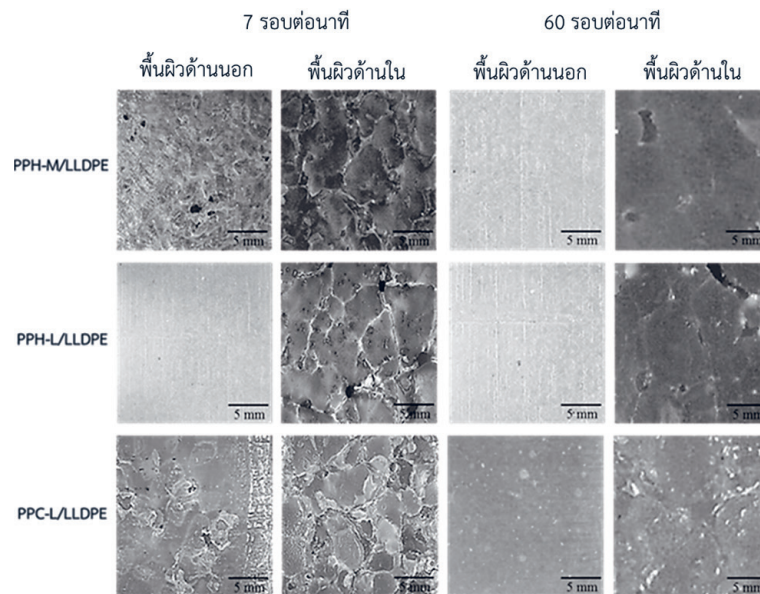
การตรวจสอบการแยกชั้นของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลพบว่าเมื่อความเร็วรอบการหมุนเพิ่มขึ้น ชิ้นงานตัวอย่างที่ขึ้นรูปได้มีการแยกเป็นสองชั้นชัดเจนขึ้นดังแสดงในรูปที่ 8 การแยกชั้นที่ชัดเจนเกิดจากอนุภาค LLDPE ที่มีขนาดเล็กสามารถเอาชนะแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคทำให้สามารถแทรกตัวไปยังผิวแม่พิมพ์ได้ง่าย

5.7 ผลการตรวจสอบความเรียบของผิวชิ้นงาน

ในการตรวจสอบนี้ ตัวอย่างทดสอบจะถูกตัดจากจุดกึ่งกลางของชิ้นงานทรงกระบอกและบันทึกภาพพื้นผิวด้านในและด้านนอกด้วยกล้องดิจิทัลกำลังขยายสูง ภาพที่บันทึกได้แสดงในรูปที่ 9 หลังจากนั้นใช้โปรแกรมการวิเคราะห์ภาพ ImageJ ในฟังก์ชัน 'surf' เพื่อแสดงค่าเฉลี่ยของความขรุขระพื้นผิว และผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 2 พบว่าชิ้นงานทั้งผิวด้านในและผิวด้านนอกมีค่าเฉลี่ยของความขรุขระลดลงเมื่อความเร็วในการหมุนเพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากเกิดแรงเฉือนเพิ่มขึ้นทำให้อนุภาคหลอมละลายเป็นเนื้อเดียวกันได้เร็ว



รูปที่ 8 ภาพตัดขวางชิ้นงานพอลิเมอร์ผสม



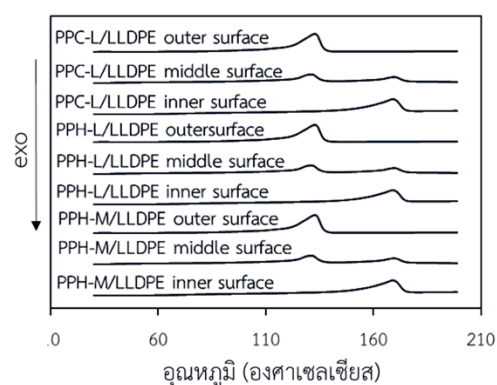
รูปที่ 9 ความขรุขระของผิวชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมที่ความเร็วในการหมุน 7 และ 60 รอบต่อนาที

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยความขรุขระของพื้นผิว

วัสดุ	ค่าเฉลี่ยความขรุขระ (ไมครอน)			
	ความเร็วในการหมุน 7 รอบต่อนาที		ความเร็วในการหมุน 60 รอบต่อนาที	
	พื้นผิวด้านใน	พื้นผิวด้านนอก	พื้นผิวด้านใน	พื้นผิวด้านนอก
PPH-M/LLDPE	19.33	16.10	12.13	5.20
PPH-L/LLDPE	23.41	11.50	13.91	6.63
PPC-L/LLDPE	25.01	14.04	19.11	6.69

5.8 ผลการทดสอบสมบัติเชิงความร้อน

การทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบความเข้ากันได้และการกระจายตัวของพอลิเมอร์บนพื้นผิวชิ้นงานทดสอบ ตัวอย่างชิ้นทดสอบจะถูกตัดออกจากชิ้นงานทรงกระบอกในตำแหน่งเดียวกันทุกครั้ง จากนั้นแยกตัวอย่างชิ้นทดสอบออกเป็นพื้นผิวด้านใน (inner surface) กลาง (middle surface) และด้านนอก (Outer surface) ซึ่งบริเวณพื้นผิวตรงกลางใช้สำหรับตรวจสอบความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์



รูปที่ 10 DSC เทอร์โมแกรมพอลิเมอร์ผสม

ผลทดสอบแสดงในรูปที่ 10 เมื่อพิจารณาความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมพบว่า ทุกกรณีมีจุดอุณหภูมิหลอมเหลวสองตำแหน่งซึ่งหมายความว่า PP และ LLDPE ไม่รวมเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน ตำแหน่งแรกที

แสดงช่วงอุณหภูมิต่ำคือ LLDPE และตำแหน่งสองที่แสดงช่วงอุณหภูมิสูงคือ PP การกระจายตัวของพอลิเมอร์บนพื้นผิวทั้งด้านในและด้านนอกชิ้นงานถูกใช้เพื่อพิจารณาการแยกเป็นสองชั้นของชิ้นงาน ผลทดสอบแสดงให้เห็นว่าทุกกรณีของพอลิเมอร์ผสมแสดงจุดอุณหภูมิหลอมเหลวที่พื้นผิวด้านในและด้านนอก ด้านละ 1 ตำแหน่งซึ่งหมายความว่า PP และ LLDPE มีการแยกเป็นสองชั้น โดยที่ PP เป็นพื้นผิวด้านในและ LLDPE เป็นพื้นผิวด้านนอก

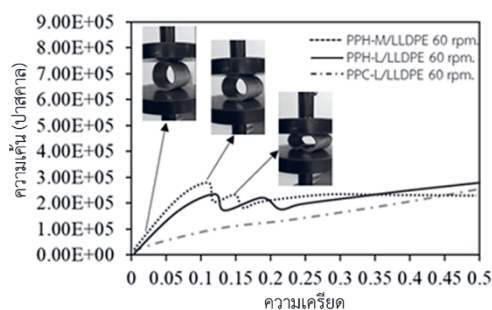
5.9 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล

การทดสอบสมบัติเชิงกลในงานนี้จะใช้การทดสอบแบบอัด เนื่องจากชิ้นงานที่ขึ้นรูปได้ มีลักษณะรูปทรงเป็นกระบอกกลวง มีเส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน 60 มม. ความยาว 50 มม. และความหนา 3 มม. ใช้ความเร็วในการอัด 10 มม./นาที่และใช้โหลด 1 กิโลนิวตัน การทดสอบนี้ส่วนมากจะใช้ค่าโมดูลัสเริ่มต้นในการรายงานผลการทดสอบ[20] ผลของโมดูลัสแรงอัดแสดงในตารางที่ 3 และลักษณะการเสียรูปแสดงในรูปที่ 11 พบว่าโมดูลัสแรงอัดของ PPH-M/LLDPE มีค่าสูงสุดตามด้วย PPH-L/LLDPE และ PPC-L/LLDPE ที่ 13.77, 11.94 และ 5.13 ปาสคาล ตามลำดับ จากความสัมพันธ์ของเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดแสดงให้เห็นว่ากรณีของ PPC-L/LLDPE มีลักษณะการเสียรูปแบบเหนียว

ในขณะที่ ทั้ง PPH-L/LLDPE และ PPH-M/LLDPE แสดงลักษณะการเสียรูปแบบผสมทั้งเปราะและเหนียว ซึ่งจากการสังเกตพบว่าการเสียรูปในช่วงแรกเกิดจาก PPH ที่เป็นผนังชั้นในเกิดรอยร้าวขนาดเล็กและเมื่อรอยร้าวดังกล่าวขยายตัวชิ้นงานจะรับแรงอัดได้น้อยลงแต่ก็ยังสามารถรับแรงอัดได้อย่างต่อเนื่องเพราะผนังชั้นนอกที่เป็น LLDPE ที่มีความยืดหยุ่นสูงจะช่วยคงรูปไม่ให้ชิ้นงานแตกหักในทันทีทันใด นอกจากนี้จากการสังเกตตำแหน่งของการเกิดรอยร้าวขนาดเล็กที่ปรากฏบนชิ้นงานพบว่าในกรณีของ PPH-M/LLDPE และ PPH-L/LLDPE รอยร้าวจะเริ่มจากบริเวณส่วนที่สัมผัสกับแผ่นกดด้านล่างและด้านบนของเครื่องทดสอบก่อน หลังจากนั้นจะเกิดบริเวณส่วนด้านข้างในแนวตั้งฉากกับทิศทางของแรงอัดตามลำดับ ด้วยเหตุนี้กราฟจึงแสดงลักษณะการเสียรูปมากกว่าหนึ่งครั้ง เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของความเร็วในการหมุนพบว่าโมดูลัสแรงอัดทั้ง PPH-M/LLDPE และ PPC-L/LLDPE เพิ่มขึ้นตามความเร็วการหมุนที่เพิ่มขึ้นซึ่งจะเป็นผลมาจากการแยกเป็นสองชั้นของชิ้นงาน ในขณะที่กรณีของ PPH-L/LLDPE มีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อความเร็วรอบในการหมุนเพิ่มขึ้นซึ่งอาจเกิดจากการกระจายความหนาของพอลิเมอร์ที่ก่อตัวเป็นผนังชั้นนอกและผนังชั้นในของชิ้นงานไม่สม่ำเสมอ

ตารางที่ 3 ค่าความต้านทานแรงอัด

วัสดุ	ค่าความต้านทานแรงอัด	
	ความเร็วในการหมุน 7 รอบต่อนาที	ความเร็วในการหมุน 60 รอบต่อนาที
PPH-M/LLDPE	7.34 ±1.35	14.37 ±1.16
PPH-L/LLDPE	13.91 ±1.41	10.91 ±1.32
PPC-L/LLDPE	3.03 ±0.81	6.03 ±1.22



รูปที่ 11 เส้นโค้งความเค้น-ความเร็วการหมุนของโพลิเมอร์ผสมที่ความเร็วในการหมุนที่ 60 รอบต่อนาที

6. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การใช้ความเร็วในการหมุนที่ 60 รอบต่อนาทีสามารถทำให้ชิ้นงาน PP/LLDPE เกิดการแยกชั้นได้ในทุกกรณี โดยที่ประสิทธิภาพหรือความชัดเจนในการแยกชั้นจะขึ้นอยู่กับความสามารถของ LLDPE ที่เคลื่อนที่ผ่านช่องว่างระหว่างอนุภาค PP โดยปัจจัยที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาค LLDPE คือรูปร่างและขนาดของอนุภาค PP โดยอนุภาค PP ที่มีขนาดใหญ่กว่า LLDPE ประมาณ 3 เท่าและมีรูปร่างค่อนข้างกลมจะทำให้อนุภาค LLDPE เคลื่อนที่ผ่านได้ง่ายเพราะมีแรงเสียดทานน้อยกว่า PP ที่มีรูปร่างไม่กลมหรือมีรูปร่างกลมแต่ขนาดเล็ก นอกจากนี้ความเร็วในการหมุนที่เพิ่มขึ้นยังทำให้ผนังชิ้นงานมีความเรียบมากขึ้นและทำให้ค่าโมดูลัสเริ่มต้นของชิ้นงานสูงขึ้นอีกด้วย แต่อย่างไรก็ตามแม้ว่าการเพิ่มความเร็วในการหมุนจะทำให้สามารถขึ้นรูปชิ้นงานผนังสองชั้นได้ แต่ควรจำไว้ว่าการเพิ่มความเร็วในการหมุนอาจจะทำให้รูปแบบการแยกอนุภาคไม่เสถียรส่งผลให้สัดส่วนของเนื้อโพลิเมอร์ที่ก่อตัวเป็นผนังชั้นนอกและผนังชั้นในมีความแปรปรวน ซึ่งอาจทำให้ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานลดลงดังในกรณีของ PPH-L/LLDPE ที่มีค่าโมดูลัสเริ่มต้นลดลงเมื่อเทียบกับความเร็วในการหมุนต่ำ

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากโครงการวิจัยท้าทายไทย กลุ่มเรื่องนวัตกรรมเพื่อการพัฒนาเชิงพื้นที่ประจำปี 2560 สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย สัญญาเลขที่ ABCRMUTT60B06

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Iwakura K, Ohta Y, Chen CH, White J. Experimental investigation of rotational molding and the characterization of rotationally molded polyethylene-parts. International Polymer Processing. 1989; 4(3):163-71.
- [2] Qin L, Ding Y-M, Zhu G-C, Yu H-C, Yang W-M. Heat flow analysis and efficiency optimization of rotational molding equipment for large plastic products. International Polymer Processing. 2015;30(2):194-201.
- [3] Crawford RJ, Crawford RJ, Throne JL. Rotational molding technology: William Andrew; 2001.
- [4] Kulikov O, Hornung K, Wagner M. Novel processing additives for rotational molding of polyethylene. International Polymer Processing. 2009;24(5):452-62.
- [5] Ramkumar P, Kulkarni D, Chaudhari V. Parametric and mechanical characterization of linear low density polyethylene (LLDPE) using rotational moulding technology. Sadhana. 2014;39(3):625-35.
- [6] Liu SJ, Yang CH. Rotational molding of two-layered polyethylene foams. Advances in Polymer Technology: Journal of the Polymer Processing Institute. 2001;20(2):108-15.
- [7] Barhoumi N, Lamnawar K, Maazouz A, Jaziri M, Abdelhedi R. Reactive rotational molding process of PP/ PA6 bilayer systems: experimental investigations. International Journal of Material Forming. 2008;1(1):671-4.
- [8] Löhner M, Drummer D. Characterization of layer built- up and inter- layer boundaries in rotational molding of multi-material parts in dependency of

- the filling strategy. *Journal of Polymer Engineering*. 2017;37(4):411-20.
- [9] Pop- Iliev R, Rizvi GM, Park CB. The importance of timely polymer sintering while processing polypropylene foams in rotational molding. *Polymer Engineering & Science*. 2003;43(1): 40-54.
- [10] Greco A, Maffezzoli A. Powder- shape analysis and sintering behavior of high- density polyethylene powders for rotational molding. *Journal of applied polymer science*. 2004;92(1): 449-60.
- [11] Olinek J, Anand C, Bellehumeur C. Experimental study on the flow and deposition of powder particles in rotational molding. *Polymer Engineering & Science*. 2005;45(1):62-73.
- [12] Jansri E, Narongchai O. Polypropylene / polyethylene two-layered by one-step rotational molding. *Journal of Polymer Engineering*. 2018;38(7):685-94.
- [13] Spence A, Crawford R. The effect of processing variables on the formation and removal of bubbles in rotationally molded products. *Polymer Engineering & Science*. 1996;36(7):993-1009.
- [14] Chaudhary BI, Takacs E, Vlachopoulos J. Processing enhancers for rotational molding of polyethylene. *Polymer Engineering & Science*. 2001;41(10): 1731-42.
- [15] Da Costa HM, Ramos VD, De Oliveira MG. Degradation of polypropylene (PP) during multiple extrusions: Thermal analysis, mechanical properties and analysis of variance. *Polymer Testing*. 2007;26(5):676-84.
- [16] Da Costa, H. M, Ramos, V. D, De Oliveira, M. G. (2007). Degradation of polypropylene (PP) during multiple extrusions Thermal analysis, mechanical properties and analysis of variance. *Polymer Testing*, 26(5), 676-84.
- [17] Jin H, Gonzalez- Gutierrez J, Oblak P, Zupančič B, Emri I. The effect of extensive mechanical recycling on the properties of low density polyethylene. *Polymer degradation and stability*. 2012;97(11):2262-72.
- [18] Chaudhary BI, Takacs E, Vlachopoulos J. Processing enhancers for rotational molding of polyethylene. *Polymer Engineering & Science*. 2001;41(10):1731-42.
- [19] Sharma T, Mahanwar P, Bambole V. Study of modified polypropylene for rotational moulding applications. *International Journal of Plastics Technology*. 2009; 13(1):83.
- [20] Rosato DV, Schott NR, Rosato MG. *Plastics Institute of America Plastics Engineering, Manufacturing & Data Handbook: Springer Science & Business Media; 2001.*

Investigation of Chloride Penetration and Steel Corrosion in Repaired Concrete after Exposure to Marine Environment of Thailand

Lyna Prak¹ and Taweechai Sumranwanich^{2*}
lyna_plnce@hotmail.com¹, twc@buu.ac.th^{2*}

^{1, 2*} Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University

Received	: 17-Apr-2020
Revised	: 30-Apr-2020
Accepted	: 8-May-2020

Abstract

This paper aims to investigate the chloride penetration and the steel corrosion in the repaired concrete specimen after exposure to the marine environment of Thailand. The repaired concrete specimen was made in the laboratory and then exposed to the tidal zone of the marine site. There were two parts in the repaired concrete specimen, which were original concrete (OC) and replaced concrete (RC). Cement-only concrete and fly-ash concrete with water to binder ratio (w/b) of 0.65 were used for making the OC, while the RC was produced from fly-ash concrete with w/b of 0.55. The binder replacement by fly ash was employed at 30% and 50%. From the experimental results, it was found that types of concrete in the OC and RC significantly affected the chloride penetration and steel corrosion in the repaired concrete specimen. Chloride penetration resistance of the repaired concrete specimen that the RC made from fly-ash concrete with 50% of FA was higher than that from fly-ash concrete with 30% of FA, while the steel corrosion level was also lower. In addition, the availability of the initial chloride in the OC influenced the chloride penetration profile and steel corrosion level in the RC.

Keywords: repaired concrete, chloride penetration, steel corrosion, marine, Thailand

1. Introduction

Reinforced concrete is one of the most common construction materials widely used all over the world. However, because it is a porous and heterogeneous composite material, it is often susceptible to damage and deterioration from various physical and chemical factors [1-3]. The corrosion of embedded steel in concrete is one of the major causes of premature deterioration of reinforced concrete structures, leading to structural failure. In general, the corrosion of the embedded steel in concrete can commence with several phenomena such as carbonation, sulfate attack, alkali-silica reaction, acid attack, and so on. However, chloride-induced corrosion is one of the significant deterioration mechanisms of reinforced concrete structures that are subjected to chloride in the marine environment [4-6]. The corrosion process occurs after the concentration of chloride accumulated in concrete near the surface of reinforcement reaches the threshold level with the presence of moisture and oxygen. When steel corrodes, concrete cracking may occur, which reduces the bond strength between concrete and reinforcing steel as well as accelerates future corrosion rate [7]. The corrosion of reinforcement adversely affects the safety and serviceability of the concrete structures and hence shortens their service life; this results in the needs of massive budgets for repairs or maintenance activities to prolong the service life of the concrete structures [8, 9]. To enhance structural integrity, the structure is required an appropriate maintenance or repair strategy. It is needed not only for the existing structures but also for the newly built structures. There are many rehabilitation techniques available to restore the deteriorated concrete structures from the steel corrosion.

In this paper, the performance of the repair material type for concrete cover of the structure was investigated to measure the chloride penetration and steel corrosion after repair work. Types of concrete in the structure before the repair were also studied. The chloride penetration and steel corrosion in the repaired concrete specimens exposed to the marine environment for one year was evaluated. The chloride penetration profiles were compared for the chloride penetration resistance of specimens. The steel corrosion levels were investigated by weight loss of steel.

2. Experimental program

2.1 Materials and mix proportions

Experiments were done to evaluate the effect of the concrete type, which used in the original concrete (OC) and replaced concrete (RC) on the chloride penetration of repaired concrete specimens. Portland cement type I (OPC) was used as a primary binder of the mix proportion, while Mae Moh fly ash (FA) was employed as a partial replacement of the binder. The maximum particle size of coarse aggregate (Rock) was 19 mm, and the fineness modulus of fine aggregate (Sand) was 3.10. The chemical compositions and physical properties of the binder were summarized in Table 1. The mix proportions of concrete were listed in Table 2. The FA was used to replace binder at the ratios (f/b) of 0.30 and 0.50. Water to binder ratio (w/b) was 0.55 for the RC and 0.65 for the OC. The high w/b of OC represented the poor quality of old concrete structure, and the low w/b of RC represented the high quality of material in the repair of damaged structure from chloride-induced corrosion.

Table 1 Chemical compositions and physical properties of cement and fly ash

Chemical compositions (%)	Binder types	
	OPC	FA
Silicon oxide (SiO ₂)	19.51	40.49
Aluminum oxide (Al ₂ O ₃)	4.97	22.42
Iron oxide (Fe ₂ O ₃)	3.78	13.64
Calcium oxide (CaO)	65.38	13.63
Magnesium oxide (MgO)	1.08	2.93
Sulfur trioxide (SO ₃)	2.16	1.92
Sodium oxide (Na ₂ O)	0.01	0.89
Potassium oxide (K ₂ O)	0.44	2.28
Free lime	0.79	-
Loss on ignition (LOI)	2.27	0.47
Physical properties		
Blaine fineness (cm ² /g)	3,550	2,836
Specific gravity	3.15	2.29

2.2 Specimen preparation

The cube specimens with a dimension of 20x20x20 cm were cast for evaluating chloride penetration resistance under the marine environment. The details of the specimen preparation were illustrated in Figure 1. There were two parts in the cube specimen, of which the original concrete part with 16-cm depth and the replaced concrete part with 4-cm thickness (see Figure 1a). Cube specimens were cast in steel molds and compacted by using a vibrating table. For the OC contaminated with chloride, the 0.35% (%by weight of binder) of initial chloride was added into the OC during the concrete mixing. The round bar with 1.2 cm in diameter

(RB12) and 5 cm in length was embedded in the specimen with the 2-cm covering depth in the RC part at the middle of the 20-cm width (see Figure 1b) for assessing the steel corrosion level in the RC part. The reason for embedding the steel inside the RC part is to simulate the real repair work that the removal of the original concrete exceeds the position of the outer reinforcing steel in the reinforced concrete structure is required. The RC was poured after the OC about six hours. This time lag was done to prevent the contamination between RC part and OC part during casting. An example of the repaired concrete specimen preparation was presented in Fig. 2. After 24 hours, the specimens were removed from the molds and wrapped by plastic sheets for self-curing. After six days of curing, all sides of the specimen were coated by epoxy, except one end surface, in order to allow one-dimensional chloride penetration, as seen in Figure 1a. Then, specimens were left in the laboratory for three days to allow the full set of epoxy coating. After that, the specimens were exposed to the marine site. The site was located on the eastern shoreline of Thailand (Thailand gulf) in Tambon Ang-Sila, Amphoe Muang, Chonburi Province. The specimens were put in the tidal zone of the marine environment for one-year exposure. The specimens exposed to the cyclic wetting and drying periods. The drying period was nearly the same as the wetting period, which was about 12 hours each in a day.

Table 2 Mix proportion of concrete

No.	Mix id.	w/b	Cement (kg/m ³)	Fly ash (kg/m ³)	Water (kg/m ³)	Sand (SSD) (kg/m ³)	Rock (SSD) (kg/m ³)	Initial chloride content (% by wt. of binder)
1	C350W65	0.65	350	-	228	734	970	-
2	C350FA30W65		245	105	228	730	964	-
3	C350W65-CL		350	-	228	734	970	0.35
4	C350FA30W65-CL		245	105	228	730	964	0.35
Replaced concrete (RC)								
5	C350FA30W55	0.55	245	105	192	770	1,017	-
6	C350FA50W55		175	175	192	768	1,015	-

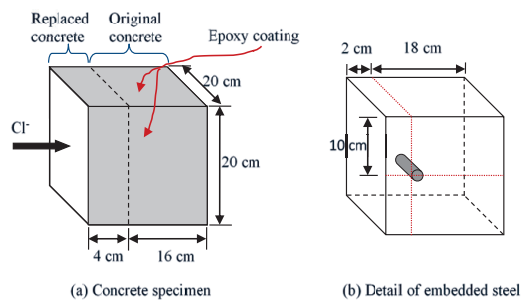


Figure 1 Schematic diagram of cube specimen and embedded steel

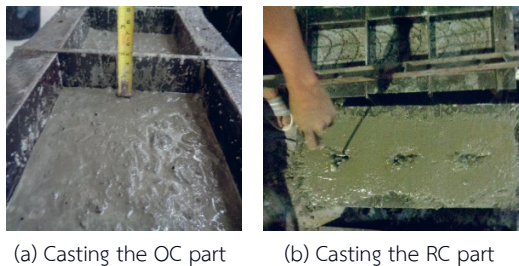


Figure 2 Specimen preparation

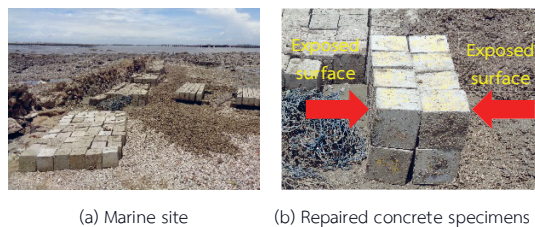


Figure 3 Specimens in marine site

2.3 Investigation of chloride content and steel corrosion

After one year of marine exposure, the specimens were collected from the marine site and moved to the laboratory for investigating the chloride penetration and steel corrosion.

The 5-cm diameter concrete sample was cored from the exposed surface (uncoated surface) of the specimen by using the coring machine in order to determine the chloride penetration profile in concrete. The cored sample was sliced into disc samples at every 1-cm thickness from the exposed surface up to the depth of 10 centimeters. Then, the disc samples were ground into powder, which passed sieve No.20. The method to determine the total chloride content of concrete was followed by the ASTM C1152 (Acid-soluble chloride) [10]. Then, the remaining cube specimen was broken down to pick the embedded steel in the concrete. The steel corrosion level was measured by the determination of the weight loss of steel, followed by the ASTM G1 [11].

3. Experimental results and discussion

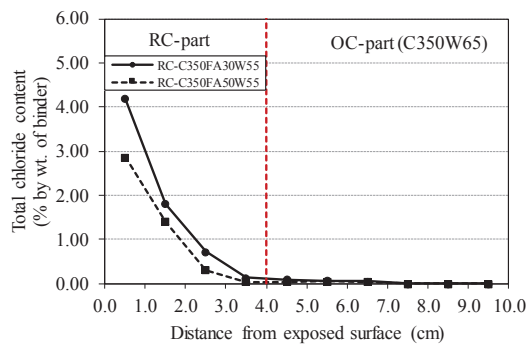
3.1 Chloride penetration profile

Chloride penetration profiles presented chloride penetration resistance of concrete, as shown in Figures 4 to 9.

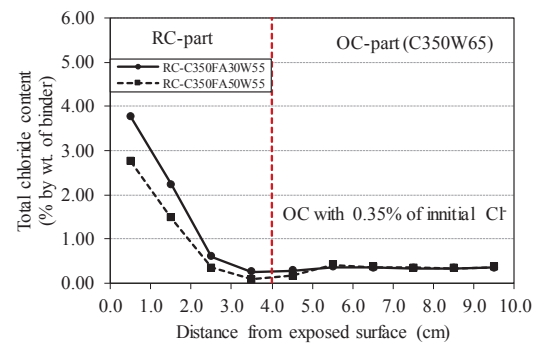
Figures 4 and 5 illustrate the effect of the replaced concrete (RC) type on the chloride

penetration profile of the repaired concrete specimen without and with initial chloride, respectively. It was noted that the RC type significantly affects chloride penetration of concrete. The chloride penetration of the repaired concrete specimen that the RC made from concrete containing 50% of FA (C350FA50W55) was lower than the one made from concrete containing 30% of FA (C350FA30W55). The decrease was due

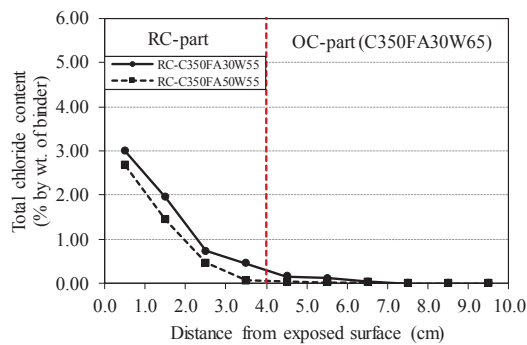
to the more pozzolanic reaction between FA and Ca(OH)_2 forming more pozzolanic products (C-S-H and C-A-H). These products make finer pore of paste, resulting in low chloride penetration. Furthermore, the filler effect of concrete with a higher amount of FA makes the concrete denser. This performance can be seen in both cases without and with initial chlorides in the OC parts.



(a) OC made from cement-only concrete

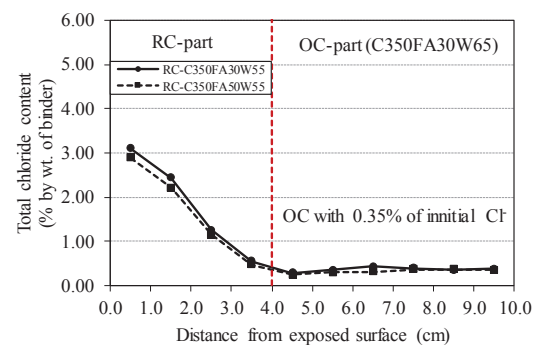


(a) OC made from cement-only concrete



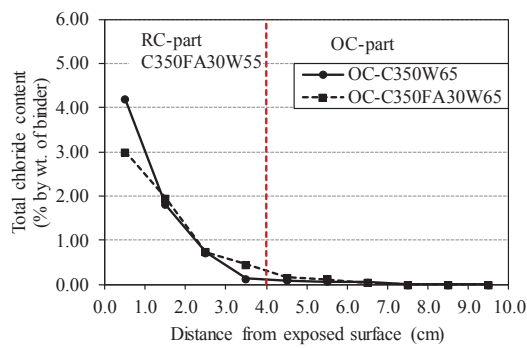
(b) OC made from concrete with 30% of FA

Figure 4 Chloride penetration profile of concrete with different RC type
(No initial Cl^- in OC)

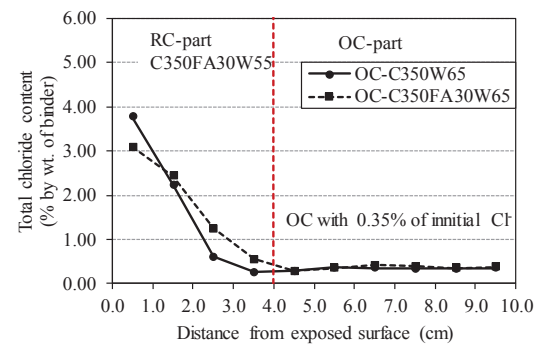


(b) OC made from concrete with 30% of FA

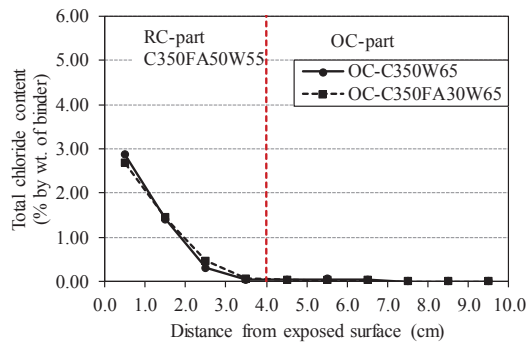
Figure 5 Chloride penetration profile of concrete with different RC type
(0.35% initial Cl^- in OC)



(a) RC made from concrete with 30% of FA



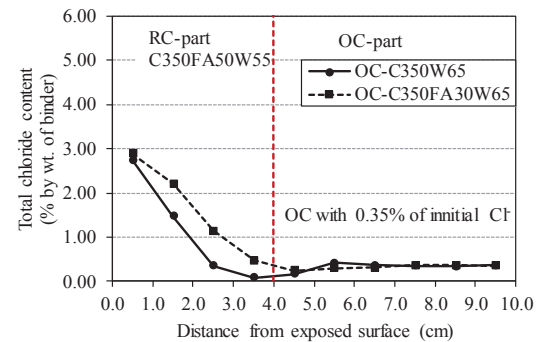
(a) RC made from concrete with 30% of FA



(b) RC made from concrete with 50% of FA

Figure 6 Chloride penetration profile of concrete with different OC type (No initial Cl^- in OC)

Figures 6 and 7 show the effect of the original concrete (OC) type on the chloride penetration profile of the repaired concrete specimen without and with initial chloride, respectively. It indicates that the OC type also affected chloride penetration in the concrete. When RC was the same fly-ash concrete, the chloride penetration of concrete with the OC made from fly-ash concrete was lower in OC part and higher in RC part than that one made from cement-only concrete. It was clearly observed in the condition of having the initial chloride in OC part. The reason was the denser of fly-ash concrete in the OC part prevented the chloride



(b) RC made from concrete with 50% of FA

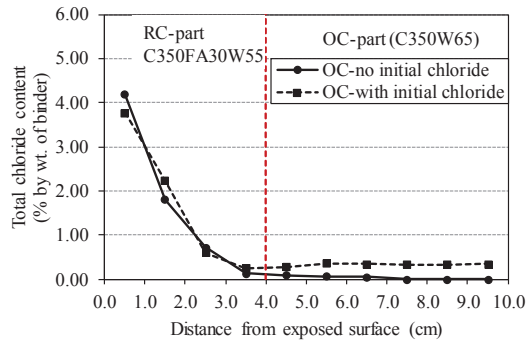
Figure 7 Chloride penetration profile concrete with different OC type (0.35% initial Cl^- in OC)

ions penetrating inside, resulting in higher accumulation of chloride ions in the RC part.

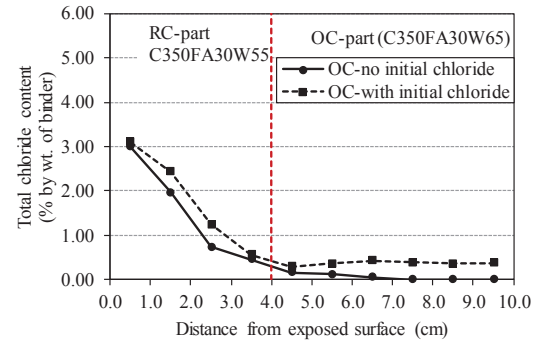
Figures 8 and 9 show the effect of initial chloride in the OC made from cement-only concrete and fly-ash concrete on the chloride penetration profile in the RC part. In Figure 8, the chloride penetration profiles in the RC part were nearly equal for both without and with initial chlorides in the OC parts. These chlorides were mostly from chloride ions penetrating from the seawater outside concrete. Very few chloride ions can move from the OC cement-only concretes. While, the chloride penetration profiles in the RC part were significantly different for without and

with initial chlorides in the OC parts, as seen in Fig. 9. A large number of chloride ions moved out from the OC parts with initial chlorides. The large amount of chloride was due to the short curing

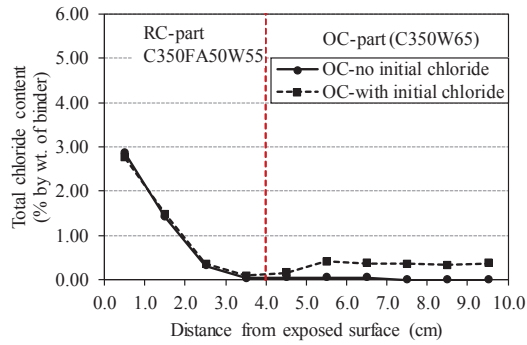
time of 7 days considerably affected the pozzolanic reaction in OC fly-ash concrete, resulting in more diffusion of chloride ions.



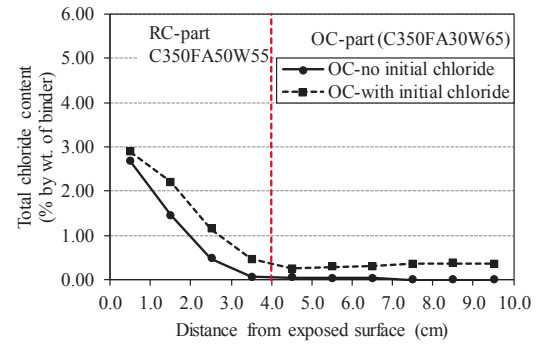
(a) RC made from concrete with 30% of FA



(a) RC made from concrete with 30% of FA



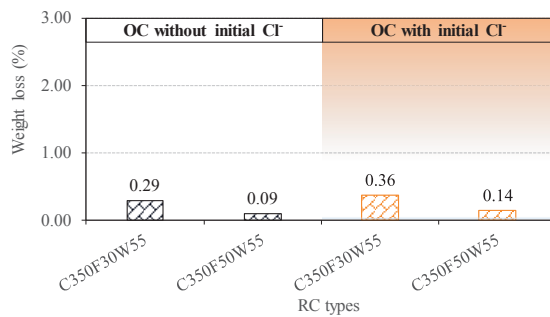
(b) RC made from concrete with 50% of FA



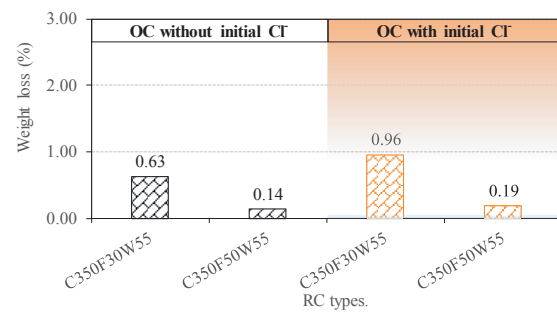
(b) RC made from concrete with 50% of FA

Figure 8 Chloride penetration profile of concrete with cement-only concrete in OC part

Figure 9 Chloride penetration profile of concrete with fly-ash concrete in OC part



(a) OC made from cement-only concrete (C350W65)



(b) OC made from concrete with 30% of FA (C350FA30W65)

Figure 10 Weight loss of embedded steel in concrete

3.2 Corrosion of embedded steel

The corrosion levels of embedded steels in concrete after exposure to the marine environment were presented in terms of the percentage of weight loss. Figure 10 indicates that the weight loss of steel with initial chloride in concrete was higher than that without initial chloride in concrete. The use of a higher binder replacement by FA in RC resulted in a lower weight loss of steel. This result was because the chloride penetration resistance of concrete with a high content of FA was better than that with a low content of FA, as seen by Figures 4 and 5. However, after the steel corrosion initiation, the steel corrosion level mainly depended upon the chloride concentration in concrete around the steel surface. Higher chloride content resulted in higher steel corrosion. In addition, the OC with FA had higher weight loss than OC with cement-only concrete. The high steel corrosion was due to the incorporation of FA in the OC provided microstructure densification and lower chloride diffusivity, leading to higher accumulation of chloride ions in the RC part and higher weight loss of steel.

4. Conclusions

Based on the experimental results obtained in this investigation, the following conclusions can be drawn:

1. The type of concrete in the OC and the RC significantly affected the chloride penetration and steel corrosion in the repaired concrete specimen. The availability of the initial chloride in the OC also influenced the chloride penetration profile and steel corrosion level in the RC.

2. The chloride penetration resistance of the repaired concrete specimen that the RC made from fly-ash concrete with 50% of FA was higher than that from fly-ash concrete with 30% of FA.

3. The chloride penetration resistance of the repaired concrete specimen that the OC made from fly-ash concrete with 30% of FA was lower than that from cement-only concrete at a short curing time of 7 days.

4. The chloride penetration profile in the RC with initial chloride in the OC tended to be higher than that without initial chloride in the OC.

5. The steel corrosion level in the repaired concrete specimen that RC made from fly-ash concrete with 50% of FA was lower than that RC made from fly-ash concrete with 30% of FA. Besides, the steel corrosion level in the repaired concrete specimen with OC containing initial chloride was higher than that OC without initial chloride.

5. Acknowledgments

The authors gratefully acknowledge the scholarship provided by the Faculty of Engineering, Burapha University for the Ph.D. degree's study of the first author. We also would like to thank the research grant from Burapha University (grant number 63/2556) and the research supports from the Burapha Construction and Maintenance Technology Research Unit (BCONTEC), Faculty of Engineering, Burapha University and the Center of Excellence in Material Science, Construction and Maintenance Technology, Sirindhorn International Institute of Technology, Thammasat University.

6. References

- [1] Zhang MH, Gjorv OE. Effect of silica fume on pore structure and chloride diffusivity of low porosity cement pastes. *Cement and Concrete Research*. 1991; 21(6): 1006-14.
- [2] Chen SC, Huang R, Hsu HM, Zou SY, Teng LW. Evaluation of penetration depth and protective effectiveness of concrete-penetrating sealer materials. *Journal of Marine Science and Technology*. 2016; 24(2): 244-9.
- [3] Prak L, Sumranwanich T, Tangtermsirikul S. A study on chloride profiles of concrete repaired with fly ash concrete and crystalline material. The 7th International Conference of Asian Concrete Federation, “Sustainable Concrete for Now and the Future”, 30 Oct – 02 Nov, 2016, Hanoi, Vietnam, www.acf2016.vn
- [4] Pérez BM, Zibara H, Hooton RD, Thomas MD A. A study of the effect of chloride binding on service life predictions. *Cement and Concrete Research*. 2000; 30: 1215–23.
- [5] Florea MVA, Brouwers HJH. Modelling of chloride binding related to hydration products in slag-blended cements. *Construction and Building Materials*. 2014; 64: 421–30.
- [6] Arttamart S, Sumranwanich T. Compressive strength and chloride penetration resistance of concrete with fly ash, limestone powder and partial replacement of fine aggregate by bottom ash. *Journal of Engineering, RMUTT*. 2019; 2(2): 113-25.
- [7] Oh BH, Kim KH, Jang BS. Critical corrosion amount to cause cracking of reinforced concrete structures. *Materials Journal*. 2009; 106(4): 333-9.
- [8] Boddy A, Brntz E, Thomas MDA, Hooton RD. An overview and sensitivity study of a multimechanistic chloride transport model. *Cem. Con*. 1999; 29(6): 827–37.
- [9] De Weerd K, Colombo A, Coppola L, Justnes H, Geiker MR. Impact of the associated cation on chloride binding of Portland cement paste. *Cem. Con*. 2015; 68: 196–202.
- [10] American Society for Testing and Materials. ASTM C1152. Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete. *Annual Book of ASTM Standards*. 2003; Vol. 4.04
- [11] American Society for Testing and Materials. ASTM G1, Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluation Corrosion Test Specimens. *Annual Book of ASTM Standards*. 2003; Vol. 03.02.

รูปแบบบทความสำหรับ วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมนคลธัญบุรี

ปรกช สิริสุวณณ^{1*}, สุมณมณลย์ เนียมหลาง² และกุลยา สาริชีวิน³
porakoch.s@en.rmutt.ac.th^{1*}, sumonman.n@en.rmutt.ac.th², kullaya.s@en.rmutt.ac.th³

^{1*} ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

² ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

³ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวเกี่ยวกับรูปแบบและวิธีการส่งบทความเพื่อเสนอต่อกองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมนคลธัญบุรี ผู้ส่งบทความต้องยึดรูปแบบตามบทความนี้อย่างเคร่งครัด บทความใดที่มีรูปแบบไม่ถูกต้องจะถูกลงส่งคืนเพื่อทำการแก้ไขก่อนนำส่งผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ หากไม่ทำการแก้ไขให้ถูกต้องกองบรรณาธิการจะทำการตัดสินใจการส่งบทความนี้ ทั้งนี้บทคัดย่อต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ แต่ละภาษาควรมีเพียงย่อหน้าเดียว และมีความยาวไม่เกิน 300 คำ

คำสำคัญ: วิธีการส่งบทความ รูปแบบบทความ ขนาดตัวอักษร รูปแบบตัวอักษร การเว้นบรรทัด

Manuscript Preparation Guidelines for the Papers Submitted to Journal of Engineering, RMUTT

Porakoch Sirisuwan^{1*}, Sumonman Niamlang² and Kullaya Saricheewin³
porakoch.s@en.rmutt.ac.th^{1*}, sumonman.n@en.rmutt.ac.th², kullaya.s@en.rmutt.ac.th³

^{1*} Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

² Department of Materials and Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of
Technology Thanyaburi

³ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Abstract

This article describes a submission procedure and a format of the manuscript for the Journal of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi (JERMUTT). Authors are required to strictly follow the guideline provided here, otherwise, the manuscript will be returned for proper correction before to be reviewed by two referees who are specialists in that fields. If not completed on this step your manuscript will be rejected and cannot be considered again. So that an abstract should have had only one paragraph. Both Thai and English abstracts are required the length of all should not exceed 300 words.

Keywords: submission procedure, manuscript format, font size, font style and blank line

1. ข้อกำหนดทั่วไป

บทความต้องประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ตามลำดับต่อไปนี้ คือ

1. ชื่อเรื่อง/บทความ (Title)
2. ชื่อผู้เขียน/อีเมล (Author, E-mail)
3. ที่อยู่ผู้เขียน (Affiliation)
4. บทคัดย่อ (Abstract)
5. คำสำคัญ (Keywords)
6. บทนำ (Introduction)
7. เนื้อหา (Text)
8. สรุป (Conclusion)
9. กิตติกรรมประกาศ (ถ้ามี) (Acknowledgements)
10. เอกสารอ้างอิง (References)

2. คำแนะนำในการเขียนและพิมพ์

คำแนะนำทั่วไป

2.1. ชื่อเรื่อง/บทความ (Title) มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ควรสั้นและกระชับแต่ครอบคลุมสาระทั้งเรื่องสื่อความหมายชัดเจนไม่ควรใช้คำย่อ และวางกึ่งกลางหน้ากระดาษ

2.2. ชื่อผู้เขียนหลัก (Corresponding Author) และผู้เขียนร่วม (Co-Author) มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ใส่หมายเลขลำดับ (ตัวยก) เรียงตามลำดับความสำคัญ โดยใส่เครื่องหมายดอกจัน (*) ผู้เขียนหลักถัดจากหมายเลขลำดับ (ตัวยก)

2.2.1 E-mail ผู้เขียน เรียงตามลำดับชื่อผู้เขียนและ ใส่เครื่องหมาย (*) ถัดจากหมายเลขลำดับ (ตัวยก) ของผู้เขียนหลัก

2.3. ที่อยู่ผู้เขียน (Affiliation) มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ไม่ต้องระบุตำแหน่งวิชาการ หรือสถานะของนักศึกษาใดๆ ทั้งสิ้น

2.4. บทย่อกัด (Abstract) เป็นการสรุปประเด็นเนื้อหาที่เป็นแก่นสำคัญนั้นประเด็นสำคัญของงาน ที่ต้องการนำเสนอจริงๆ ควรเขียนให้สั้น และกระชับ

2.5. คำสำคัญ (Keywords) ให้ระบุไม่เกิน 3-5 คำ

2.6. บทนำ (Introduction) ส่วนนำจะเป็นส่วนที่ผู้เขียนจูงใจให้ผู้อ่านเกิดความสนใจในเรื่องนั้นๆ วัตถุประสงค์ของงานวิจัย และข้อมูลทางวิชาการ

2.7. เนื้อหา (Text) บทความที่เสนอจะต้องพิมพ์เป็นภาษาไทย หรือภาษาอังกฤษ ตามรูปแบบที่กำหนด ซึ่งพร้อมที่จะนำไปถ่ายเพลท เพื่อพิมพ์ออฟเซตได้ทันที

การพิมพ์ให้พิมพ์ลงบนกระดาษ A4 โดยพิมพ์เป็น 2 คอลัมน์ตามรูปแบบบทความนี้ ขนาดของคอลัมน์เป็นไปตามที่กำหนด จะต้องพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์เลเซอร์ที่มีความละเอียดไม่น้อยกว่า 300 dpi.

ให้พิมพ์โดยไม่เว้นบรรทัด เมื่อจะขึ้นหัวข้อใหม่ให้เว้นบรรทัด 1 บรรทัด และจะต้องพิมพ์ให้เต็มคอลัมน์ก่อนที่จะขึ้นคอลัมน์ใหม่ หรือขึ้นหน้าใหม่ ห้ามเว้นที่เหลือไว้ว่างเปล่า

การลำดับหัวข้อในส่วนเนื้อหาของเนื้อเรื่องนี้ ให้ใส่เลขกำกับโดยให้บทนำเป็นหัวข้อหมายเลข 1 และหากมีการแบ่งหัวข้อย่อย ก็ใช้เลขระบบบทนิยกับหัวข้อย่อย เช่น 1.1 เป็นต้น

ตารางที่ 1 การตั้งค่าหน้ากระดาษ

ระยะขอบ	เซนติเมตร
บน (Top)	3
ล่าง (Bottom)	2
ซ้าย (Left)	3
ขวา (Right)	3
ระยะห่างคอลัมน์	1

ตารางที่ 2 ขนาดตัวอักษรและการเว้นระยะ
พิมพ์บทความภาษาไทยและภาษาอังกฤษด้วยตัวอักษรแบบ
“TH SarabunPSK”

รายการ	ขนาด	ตำแหน่ง	ลักษณะ
ชื่อเรื่อง	18	กึ่งกลาง	ตัวหนา
ชื่อ ผู้เขียน อีเมล	14	กึ่งกลาง	ปกติ
ที่อยู่ผู้เขียน	12	ชิดซ้าย	ปกติ
บทย่อคัด	14	ชิดซ้าย	ปกติ
ชื่อ หัวข้อ , หัวข้อย่อย	14	ชิดซ้าย	ตัวหนา
เนื้อความ	14	กระจาย แบบไทย	ปกติ
สมการต่างๆ	14	กึ่งกลาง	ตัวเอียง
คำบรรยาย ประกอบรูป และตาราง	14	กึ่งกลาง	ปกติ

ให้จัดเนื้อเรื่องในแต่ละบรรทัดเรียงชิดซ้าย
และขวาอย่างสวยงาม เยื้องบรรทัดแรกของย่อหน้า ใช้
1 แท็บ หรือ 0.5 นิ้ว

2.7.1 การจัดทำรูปภาพ

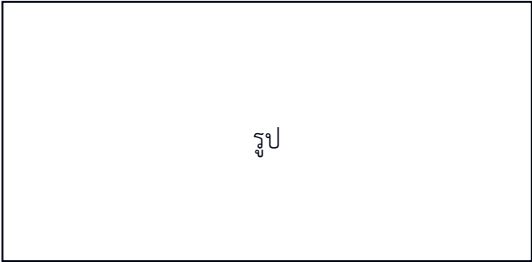
รูปภาพจะต้องมีความกว้างไม่เกิน 70 มม.
เพื่อให้ลงในหนึ่งคอลัมน์ได้ หรือกรณีจำเป็นจริงๆ เพื่อ
รักษารายละเอียดในภาพ อาจยอมให้มีความกว้างได้
เต็มหน้ากระดาษ(กว้าง 150 มม.)

ตัวอักษรทั้งหมดในภาพจะต้องมีขนาดใหญ่
สามารถอ่านได้สะดวก

รูปภาพทุกรูปจะต้องมีหมายเลข และคำ
บรรยายใต้ภาพ

คำบรรยายใต้ภาพห้ามใช้คำว่า “แสดง”
เช่น ห้ามเขียนว่า “รูปที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง
..” ที่ถูกต้องควรเป็น “รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่าง..”

ตัวอย่าง



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่าง....

รูปลายเส้นจะต้องเป็นเส้นหมึกดำ ส่วนรูป
ถ่ายควรจะเป็นรูปขาวดำที่มีความคมชัด รูปสีอนุโลมให้
ใช้ได้ รูปภาพควรจะมีรายละเอียดเท่าที่จำเป็นเท่านั้น
เช่น ภาพถ่ายรูปคลื่นจากออสซิลโลสโคปที่ปรากฏให้
เป็นเฉพาะจอภาพ เป็นต้น และเพื่อความสวยงามให้
เว้นบรรทัดเหนือรูปภาพ 1 บรรทัดและเว้นใต้คำบรรยาย 1
บรรทัด

2.7.2 การเขียนสมการ

สมการทุกสมการจะต้องมีหมายเลขกำกับอยู่
ภายในวงเล็บและเรียงลำดับที่ถูกต้อง *ควรใช้ตัว
พยัญชนะเอียง*แสดงถึงพารามิเตอร์หรือตัวแปรใน
สมการ ตำแหน่งของหมายเลขสมการจะต้องอยู่ชิดขอบ
ด้านขวาของคอลัมน์ เว้นหนึ่งบรรทัดก่อนเขียนสมการ
และเว้นหนึ่งบรรทัดหลังเขียนสมการ จัดให้สมการอยู่
ตรงกลางคอลัมน์ ดังตัวอย่างนี้

$$a + b = c \qquad (1)$$

เริ่มเขียนคำอธิบายตั้งแต่บรรทัดนี้

2.7.3 การจัดการทำตาราง

ตัวอักษรในตารางจะต้องไม่เล็กกว่าตัวอักษร
ในเนื้อเรื่อง ควรตีเส้นกรอบตารางด้วยหมึกดำให้ชัดเจน

ตารางทุกตารางจะต้องมีหมายเลข และคำ
บรรยายกำกับเหนือตาราง หมายเลขกำกับและคำ
บรรยายนี้รวมกันแล้วควรมีความยาวไม่เกิน 2 บรรทัด
คำบรรยายเหนือตารางห้ามใช้คำว่า “แสดง” เช่นเดียวกับกรณีรูปภาพ

เพื่อความสวยงามให้เว้นบรรทัดเหนือตาราง 1 บรรทัด และเว้นบรรทัดใต้คำบรรยายรูปภาพ 1 บรรทัด

2.7.4 ความยาวของบทความ

เมื่อรวมทุกส่วนแล้ว บทความไม่ควรจะมีความยาวน้อยกว่า 8 หน้า และยาวไม่เกิน 12 หน้า กระดาษ A4

2.7.5 กรณีบทความภาษาอังกฤษ

ผู้พิมพ์บทความเป็นภาษาอังกฤษ กรุณาดูคำแนะนำ วิธีการพิมพ์บทความภาษาอังกฤษที่แนบมาด้วย

2.7.6 การส่งบทความ

ผู้เขียนสามารถส่งต้นฉบับ ทางเว็บไซต์ออนไลน์ ของวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชชมงคลธัญบุรี www.engineer.mutt.ac.th/journal/



โดยต้องทำการลงทะเบียนเพื่อสมัครสมาชิกวารสารและนำส่งวารสารต้นฉบับในรูปแบบไฟล์

- Word
- PDF

กรุณาจัดส่ง แบบฟอร์มยืนยันการส่งบทความทางวิชาการ เพื่อลงตีพิมพ์ใน วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชชมงคลธัญบุรี มายัง อีเมล enjournal@en.mutt.ac.th หรือจัดส่งไปรษณีย์มายังกองบรรณาธิการ วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชชมงคลธัญบุรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชชมงคลธัญบุรี 39 หมู่ 1 ถ.รังสิต-นครนายก ต.คลองหลวง อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110” จึงจะถือว่า การส่งวารสารนั้นเสร็จสมบูรณ์

หากขั้นตอนการนำส่งวารสารทั้ง 2 ขั้นตอน คือ การส่งวารสารทางเว็บไซต์ออนไลน์ และการนำส่งแบบฟอร์มยืนยันการส่งบทความมายังอีเมล enjournal@en.mutt.ac.th ไม่ครบถ้วนทั้ง 2 ขั้นตอน บทความนั้นจะถูกส่งคืน และไม่สามารถผ่านการพิจารณาได้

3. สรุป (Conclusion)

ผู้เขียนบทความกรุณาตรวจสอบบทความอย่างรอบคอบโดยใช้เวลาอย่างเพียงพอก่อนส่งให้คณะกรรมการพิจารณา จะทำให้บทความของท่านมีคุณภาพสูง ผ่านการพิจารณาได้ง่ายขึ้น และหากไม่มีการแก้ไขบทความกลับภายในระยะเวลา 3 เดือน หลังจากได้รับบทความกลับคืน บทความนั้นจะถูกยกเลิกการพิจารณาโดยอัตโนมัติ และไม่รับพิจารณาบทความใดๆ ของผู้เขียนนั้น เป็นระยะเวลา 1 ปี นับตั้งแต่วันครบกำหนดการส่งบทความกลับคืน

4. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements)

ขอขอบคุณข้อมูลจาก TCI และผู้เขียนบทความทุกท่านที่ให้ความร่วมมือรักษาระเบียบการเขียนบทความอย่างเคร่งครัด

5. เอกสารอ้างอิง (References)

การอ้างอิงเอกสารใช้ระบบ (Vancouver Style) เรียงตามลำดับ 1,2,3 ตามการใช้งาน โดยใช้ตัวเลขของเอกสารอ้างอิงไว้ในวงเล็บ เช่น [1] เป็นต้น แล้วรวบรวมไปเขียนอ้างอิง ตามรูปแบบวารสารกำหนด

ในการเขียนเอกสารอ้างอิงผู้เขียนต้องเขียนเป็นภาษาอังกฤษ ในกรณีแหล่งข้อมูลที่ใช้อ้างอิงมาจากแหล่งอ้างอิงภาษาไทย เช่น ตำราไทย วารสารไทย เป็นต้น ให้แปลเป็นภาษาอังกฤษ แล้ววงเล็บด้านท้ายชื่อภาษาต้น เช่น (in Thai) ทั้งนี้ผู้เขียนบทความควรใช้แหล่งอ้างอิงที่ได้รับการยอมรับกันตามเกณฑ์สากล

ตัวอย่าง (Example)

- [1] Kalsirisilp R, Nadpakdee A, Langkapin J. Performance evaluation of sugarcane grab loader. Journal of Engineering, RMUTT. 2018;16(1):1-12. (in Thai)

ตัวอย่างการเขียนเอกสารอ้างอิง

(เครื่องหมายหมายถึง เว้นวรรค 1 ระยะ)

รูปแบบบทความวารสาร

(Articles in Journals)

- [2] Author.\Article Title.\Journal Title.\Year of Publication;Volume(Issue Number): Pagintion.

ตัวอย่าง(Example)

- [3] Nanthasamroeng N. Application of center of risk gravity in the location analysis for a sitting of emergency medical service vehicles. Journal of Engineering RMUTT. 2011;2:21-29. (in Thai)
- [4] Halpern SD, Ubel PA, Caplan AL. Solid-organ transplantation in HIV-infected patients. N Engl J Med. 2002 Jul 25;347(4):284-7.

รูปแบบหนังสือและเอกสารเฉพาะเรื่อง (Books and Other Monographs)

- [5] Author.\Title.\Edition.\ Place of Publication:
\Publisher;\Year of Publication.
- [6] Author.\Title\[dissertation or master's thesis].
\ Place of Publication: \ University;\
Year of Publication.

ตัวอย่าง(Example)

- [7] Murray PR, RoawnrhL KS, Kobayashi GS, Pfaller MA. Medical microbiology. 4th ed. St.Louis: Mosby; 2002.
- [8] Borkowski MM. Infant sleep and feeding: a telephone survey of Hispanic Americans [dissertation]. Mount Pleasant (MI): Central Michigan University; 2002.

รูปแบบสื่ออิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Material)

- [9] Author.\ Article Title.\ Journal Title.\[Internet].
\Year of Publication\[cited YYYYMMDD] ;
Volume(Issue Number):page numbers.
\Availability From:\URL

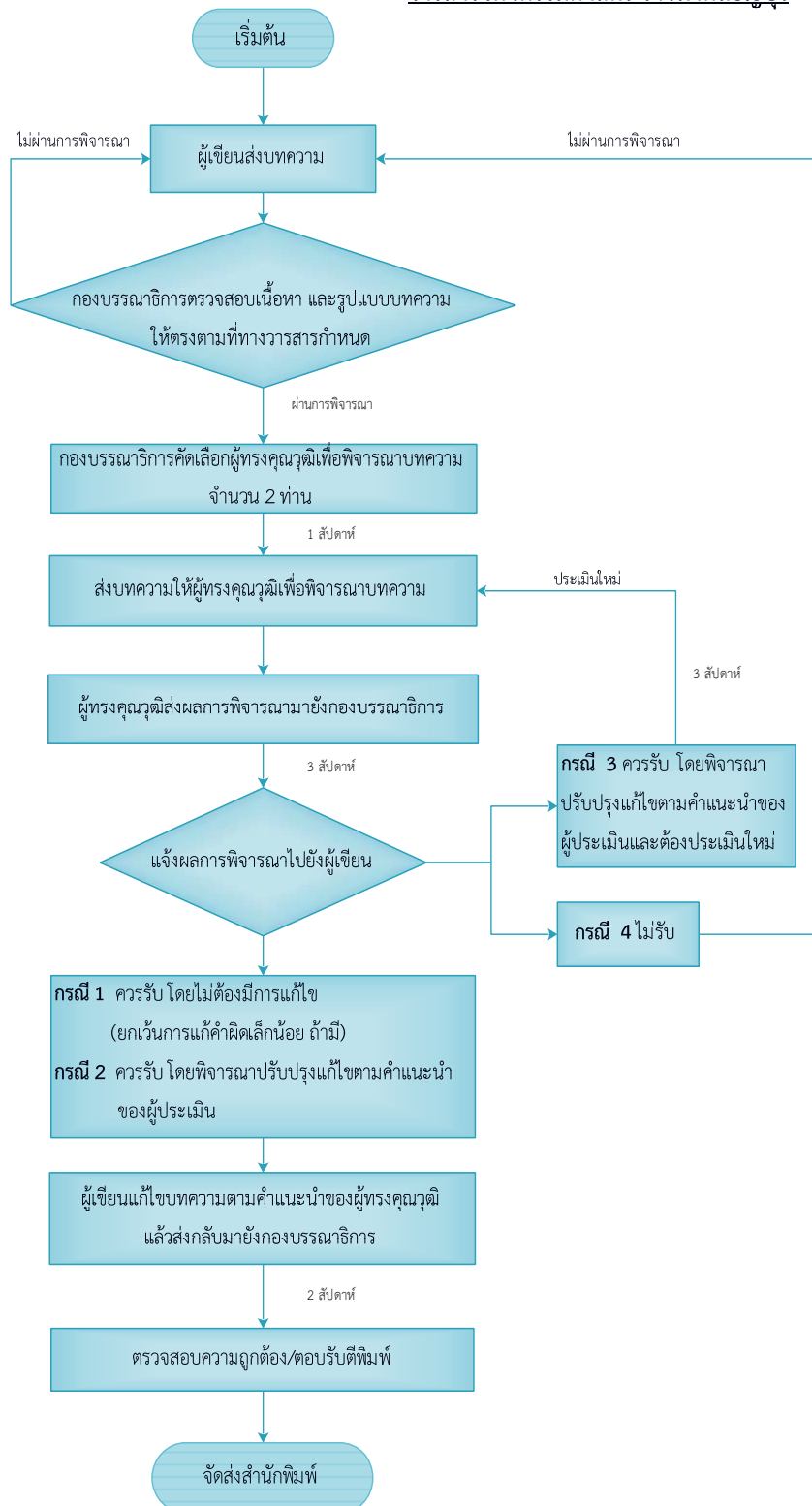
ตัวอย่าง(Example)

- [10] Siriprasert R. Model development for health screening system in prachinburi province. Journal of Health Science [Internet]. 2010 [cited 2011 Fed 25];19 (3) : 409-21. Available from:http://pubnet.moph.go.th/pubnet2/e_doc.php?id=2593 (in Thai)

- [11] Abood S. Quality improvement initiative in nursing homes: the ANA acts in an advisory role. Am J Nurs [Internet]. 2002 Jun [cited 2002 Aug 12];102 (6): [about 1 p.]. Available from : <http://www.nursingworld.org /AJN/2002/june/Wawatch.htmArticle>

สามารถดาวน์โหลดรูปแบบบทความ Template ในรูปแบบ Word และคู่มือการอ้างอิงระบบ (Vancouver Style) ได้ที่
<https://drive.google.com/drive/folders/1jPxtFBwme1UTtRwHH3HEfFuVZXsIOPV>

**ขั้นตอนการตีพิมพ์ลง
วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏวชิรบุรี**



ในกรณีที่ 2 และ 3 หลังจากบทความผ่านการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิแล้ว ผู้เขียนควรพิจารณาแก้ไขและส่งบทความกลับมาในระยะเวลาที่กำหนดหากล่าช้าเกิน 90 วัน (นับจากวันแจ้งแก้ไข) กองบรรณาธิการขอแจ้งไม่รับพิจารณาบทความโดยอัตโนมัติ และผู้เขียนไม่สามารถส่งบทความเข้าสู่ระบบได้เป็น ระยะเวลา 1 ปี (เนื่องจากมีผลต่อค่าใช้จ่ายในการประเมินบทความ และขาดความต่อเนื่องในการพิจารณาบทความจากผู้ทรงคุณวุฒิฯ)

หมายเหตุ : รวมระยะเวลาโดยประมาณ 90 วัน หากไม่มีการแก้ไขใดๆเพิ่มเติม



สมาชิกเลขที่

ใบสมัครสมาชิกวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏบรภูมิ

วันที่สมัคร

ข้าพเจ้า นาย/นาง/นางสาว สกุล อาชีพ

ที่อยู่ (สำหรับจัดส่งวารสาร) เลขที่ ถนน แขวง/ตำบล

เขต/อำเภอ จังหวัด รหัสไปรษณีย์

โทรศัพท์..... โทรสาร e-mail

มีความประสงค์สมัครเป็นสมาชิก

อัตราค่าสมาชิก

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏบรภูมิ ปี	1 ปี 2 ฉบับ 120 บาท (สำหรับบุคคลทั่วไป)
	80 บาท (สำหรับนักศึกษา)
ต่ออายุสมาชิก ปี	1 ปี 2 ฉบับ 120 บาท (สำหรับบุคคลทั่วไป)
	80 บาท (สำหรับนักศึกษา)

พร้อมกันนี้ได้ส่งค่าสมาชิก จำนวน บาท

จำนวนเงินตัวอักษร

ชำระเงินโดยวิธี

ธนาคาร สังกัด

ตัวแลกเงินไปรษณีย์ สังกัด

โอนเงินเข้าบัญชีธนาคาร..... ชื่อบัญชี เลขที่บัญชี

- หมายเหตุ
1. กรุณาส่งสำเนาใบเข้าบัญชี (pay-in-slip) หรือโทรสารมายังสำนักงานคณะวิศวกรรมศาสตร์ พร้อมเขียน ชื่อ - นามสกุล และหมายเลขสมาชิก (ถ้ามี)
 2. นักศึกษาที่สมัครทางไปรษณีย์ กรุณาส่งสำเนาบัตรประจำตัวนักศึกษาแนบมาด้วย

ลงชื่อ ผู้สมัคร

(.....)

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏบรภูมิ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชภัฏบรภูมิ

39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

โทรศัพท์ 0-2549-3493 โทรสาร 0-2549-3479 www.engineer.rmUTT.ac.th/journal e-mail: enjournal@en.rmUTT.ac.th

แบบฟอร์มการส่งบทความทางวิชาการ
เพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมนคลัญบุรี

ข้าพเจ้า ☐ นาย ☐ นาง ☐ นางสาว ☐ อื่นๆ (โปรดระบุ)

ชื่อ-สกุล

(ภาษาอังกฤษ)

ตำแหน่งทางวิชาการ (โปรดระบุ) ☐ ศาสตราจารย์ ☐ รองศาสตราจารย์ ☐ ผู้ช่วยศาสตราจารย์

☐ อาจารย์ ☐ อื่นๆ (โปรดระบุ)

ที่อยู่ (ที่ติดต่อได้)

โทรศัพท์ที่ทำงาน.....โทรศัพท์มือถือ.....

โทรสาร.....อีเมล.....

มีความประสงค์ขอส่งบทความ เรื่อง:

ชื่อบทความ (ภาษาไทย)

ชื่อบทความ (ภาษาอังกฤษ)

การตรวจสอบ

☐ ทำการลงทะเบียน และ ส่งวารสารต้นฉบับใน เว็บไซต์

www.engineer.rmutt.ac.th/journal/ หรือ

<http://journal.engineer.rmutt.ac.th/enjournal/> เรียบร้อยแล้ว

วันที่ ส่งวารสารต้นฉบับ เข้าสู่ระบบออนไลน์

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า บทความนี้เป็นผลงานของข้าพเจ้าและผู้ร่วมงานตามชื่อที่ระบุไว้ในบทความจริง และบทความนี้ไม่เคยลงตีพิมพ์ในวารสารใดมาก่อน และข้าพเจ้าจะไม่นำส่งบทความนี้ไปพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารอื่นภายใน 60 วัน นับจากวันที่ข้าพเจ้าส่งบทความ

ลงนาม.....

(.....)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

TECHNICAL ARTICLE FORM
FOR PUBLISHING ON JOURNAL OF ENGINEERING, RMUTT

Title ☐ Mr. ☐ Ms. ☐ Others (Please specify)
Name-Surnames.....
Academic Positions (Please specify) ☐ Professor ☐ Associate Professor ☐ Assistant Professor
☐ Lecturer ☐ Others (Please specify).....
Address (for Contact).....
.....
.....
Office Phone Number.....Mobile Phone Number.....
Fax Number.....E-mail.....
Name of Article:.....
.....
.....

Submission Checklist ☐ Already register and submit the manuscripts on
www.engineer.rmutt.ac.th/journal/ or
http://journal.engineer.rmutt.ac.th/enjournal/
The days of Online Submission

I promise this article belongs to me and co-authors as the name indicated in the article. In addition, this article has not been previously published on another journal. Furthermore, I will not submit this article on another journal within 60 days from the day of my submission on the JOURNAL OF ENGINEERING, RMUTT.

Sign.....
(.....)
...../...../.....

