



วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏนครปฐม Journal of Engineering, RMUTT

ปีที่ 16 ฉบับที่ 2 เดือน กรกฎาคม – ธันวาคม 2561

www.engineer.rmutt.ac.th/journal ISSN 1685-5280

การศึกษาการหมักปุ๋ยจากเศษอินทรีย์ด้วยวิธีการเติมอากาศร่วมกับการใช้ครูดเอนไซม์ Study of Organic Waste Composting with Aeration and Use of Crude Enzyme • ฐนียา ธงชัยสุริยชัย และกุลยา สาริณีวัน	1
สมบัติของเส้นด้ายฝ้ายที่ลงแป้งด้วยแป้งสาเก Properties of Cotton Yarn Sized with Sago Starch • บินทลันต์ ชวัญข้าว วิชุดา จันทรประภาณนท์ และศิริวรรณ ศรีธรรมรงค์	13
กลไกการเพิ่มประสิทธิภาพของเลเซอร์สแกนเนอร์ที่ใช้สร้างพื้นผิวในสามมิติ Performance Enhancement Mechanism of Laser Scanner for 3D Surface Reconstruction • ธนพงษ์ อรุณพันธ์ และปรัชญา เปรมปราณีรัตน์	23
การแยกกลีเซอรอลออกจากไบโอดีเซลโดยใช้เทคโนโลยีเมมเบรน Glycerol Separation from Biodiesel by Membrane Technology • สุดปรารถนา ทิราติ ปวีณา พลัดพราก ยรรยง สุขคล้าย วรินทร์ดา อภิมานะ และจุไรวัลย์ รัตนพิสิฐ	37
การบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา Ag-TiO ₂ Color Removal from Synthetic Wastewater by Photocatalytic Process with Ag-TiO ₂ Catalyst • ธรรมศักดิ์ โรจน์วิรุฬห์ สัญญา สิริวิทยาภรณ์ อรรถกร โรจน์วิรุฬห์ และกษกร สุระนาเวรัตน์	47
การประเมินความเสียหายของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แผ่นดินไหวด้วยข้อกำหนด FEMA 356 และ มยพ.1303-57 Evaluation of Reinforced Concrete Building under Seismic Forces by Guideline of FEMA 356 and DPT.1303-57 • สุรน รุ่งเรือง และวิศวินทร์ อัครปัญญาร	59
การประยุกต์ใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ในการคัดเลือกโครงการปรับปรุงคุณภาพเพื่อลดของเสีย: กรณีศึกษา กระบวนการผลิตถังบรรจุอากาศ Application of Analytic Hierarchy Process to Select Quality Improvement for Defect Reduction Projects: A Case Study of Air Tank Manufacturer • มงคล กิตติญาณชกร	71
การพัฒนากระเบื้องยางธรรมชาติผสมเศษขยะพลาสติกเอทิลีนไวนิลอะซิเตทแบบละเอียด Development of Low Cost Natural Rubber Floor Tile Mixed with Fine Ethylene Vinyl Acetate Plastic Waste • วิฑาร ติปัญญา และกิตติพงษ์ สุวิโร	85
การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ และพิกัดของโหลด สำหรับติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ Analysis of the Relationship between Solar Power and Rated Load for Installation of Stand-Alone PV System • ไพโรจน์ ทองประศรี	95
การสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงจากหม้อแปลงพลาสม่าแบบสำเร็จรูป High Voltage Power Supply from Commercial Flyback Transformer • อาทิตย์ ยาวุฒม์ และพิสิษฐ์ วัฒนสินศิริ	107
การออกแบบและสร้างเครื่องแกะเมล็ดกระบอกแบบต่อเนื่อง Design and Fabrication of Continuous Type Barking Dear'S Mango Nut Sheller • รุ่งเรือง กาลศิริศิลป์ วุฒิชัย ชาวสวนแพ และจตุรงค์ ลังกาพันธ์	119
ผลิตภัณฑ์ฝ้าเพดานผสมขี้เถ้าที่มีสมบัติความเป็นฉนวนป้องกันความร้อน Coconut Coir Ceiling Board Product with Thermal Insulation Property • ปราโมทย์ ธีรานุกูล กิตติพงษ์ สุวิโร และอภิส ธีรานุกูล	129
สมบัติด้านความคงทนของมอร์ตาร์ และคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด Durability Properties of Mortars and Concrete Containing Strength Enhancing Mineral Admixture • ปิตินันท์ กรามารัตน รัตนกุล มณีรัตน์ ปานเทพ จุลนิพัทธ์พงษ์ จันตารัตน์ มณีเจริญ และสมนึก ตั้งเต็มสิริกุล	139
อิทธิพลของรูปร่างใบตัด จำนวนใบตัด และทิศทางในการเติมต่อเศษการตัดทางปาล์มของเครื่องตัดทางปาล์มใบตัด Effect of Blade Geometries, Blade Amount, and Feed Direction on Palm Cutting Chip of Orbital Cutting Blade Palm Chopping Machine • ไพบุลย์ แยมเพื่อน ปราโมทย์ พูนนายน วรญา วัฒนจิตศิริ สุรัตน์ รัตนพนธ์ และกิตติพงษ์ กิมะพงศ์	151
การหาค่าสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของสมุนไพร Determination of Physical and Thermal Properties of Herbal Compress Ball • สมหมาย ศรีชัยยาพร โสภิตา ตั้งคนานนท์ กัลยาณี นิยมสัณย์ กรองแก้ว กวีลประภา และณัฐกมล ศรีสุข	163
การวิเคราะห์ความเสี่ยงโซ่อุปทานโดยวิธีวัดความสามารถในการแข่งขันของวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม : กรณีศึกษาโรงงานฉีดพลาสติก An Analysis of Supply Chain Risk Management (SCRM) in Competitiveness Indicators : A Case study of Injection Plastics Factory • ปฐมพงษ์ ทอมศรี เลิศเลขา ศรีรัตน์ และกฤษดา พิเศษบุญ	173

การศึกษาการหมักปุ๋ยจากเศษอินทรีย์วัตถุด้วยการเติมอากาศร่วมกับการใช้ครูดเอนไซม์ Study of Organic Waste Composting with Aeration and Use of Crude Enzyme โดย : ฐนียา รัชชีสุริยะชัย และกุลยา สาริชีวิน	หน้า 1
สมบัติของเส้นด้ายฝ้ายที่ลงแป้งด้วยแป้งสาคุ Properties of Cotton Yarn Sized with Sago Starch โดย : บินทสันต์ ขวัญข้าว วิชุดา จันทรประภานนท์ และศิริวรรณ ศรีธรรมรงค์	13
กลไกการเพิ่มประสิทธิภาพของเลเซอร์สแกนเนอร์ที่ใช้สร้างพื้นผิวในสามมิติ Performance Enhancement Mechanism of Laser Scanner for 3D Surface Reconstruction โดย : ธนพงษ์ อุตพันธุ์ และปรัชญา เปรมปราณีรัชต์	23
การแยกกลีเซอรอลออกจากไบโอดีเซลโดยใช้เทคโนโลยีเมมเบรน Glycerol Separation from Biodiesel by Membrane Technology โดย : สุตปรารณา ธีราติ ปวีณา พลัดพราก ยรรยง สุขคล้าย วีรินทร์ดา อัมมานะ และจุไรวัลย์ รัตนะพิสิฐ	37
การบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิตกร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา Ag-TiO ₂ Color Removal from Synthetic Wastewater by Photocatalytic Process with Ag-TiO ₂ Catalyst โดย : ธรรมศักดิ์ โรจน์วิรุฬห์ สัญญา สิริวิทยาปรกรณ์ อรรวรรณ โรจน์วิรุฬห์ และกชกร สุรเนาวรัตน์	47
การประเมินความเสียหายของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แผ่นดินไหวด้วยข้อกำหนด FEMA 356 และ มยผ.1303-57 Evaluation of Reinforced Concrete Building under Seismic Forces by Guideline of FEMA 356 and DPT.1303-57 โดย : สุธน รุ่งเรือง และวิศวินทร์ อัครปัญญาธร	59
การประยุกต์ใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ในการคัดเลือกโครงการปรับปรุงคุณภาพเพื่อลดของเสีย: กรณีศึกษา กระบวนการผลิตถังบรรจุอากาศ Application of Analytic Hierarchy Process to Select Quality Improvement for Defect Reduction Projects: A Case Study of Air Tank Manufacturer โดย : มงคล กิตติญาณขจร	71
การพัฒนากระเบื้องยางธรรมชาติผสมเศษขยะพลาสติกเอทิลีนไวน์ลอะซิเตทแบบละเอียด Development of Low Cost Natural Rubber Floor Tile Mixed with Fine Ethylene Vinyl Acetate Plastic Waste โดย : วิหาร ติปัญญา และกิตติพงษ์ สุวีโร	85
การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ และพิกัดของโหลดสำหรับติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ Analysis of the Relationship between Solar Power and Rated Load for Installation of Stand-Alone PV System โดย : ไพโรจน์ ทองประศรี	95

การสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงจากหม้อแปลงฟลายแบคสำเร็จรูป High Voltage Power Supply from Commercial Flyback Transformer โดย : อาทิตย์ ยาวุฒิ และพิสิษฐ์ วัฒนสินธุ์	หน้า 107
การออกแบบและสร้างเครื่องกะเทาะเมล็ดกระบกแบบต่อเนื่อง Design and Fabrication of Continuous Type Barking Dear'S Mango Nut Sheller โดย : รุ่งเรือง กาลศิริศิลป์ วุฒิชัย ชาวสวนแพ และจตุรงค์ ลังกาพินธุ์	119
ผลิตภัณฑ์แผ่นฝ้าเพดานผสมขุยมะพร้าวที่มีสมบัติความเป็นฉนวนป้องกันความร้อน Coconut Coir Ceiling Board Product with Thermal Insulation Property โดย : ปราโมทย์ วีรานุกูล กิตติพงษ์ สุวีโร และอิทธิ วีรานุกูล	129
สมบัติด้านความคงทนของมอร์ตาร์ และคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด Durability Properties of Mortars and Concrete Containing Strength Enhancing Mineral Admixture โดย : ปิตินันต์ กร้ามาตร ธนฤต มณีรัตน์ ปานเทพ จุลนิพิฐวงษ์ จินดารัตน์ มณีเจริญ และสมนึก ตั้งเต็มสิริกุล	139
อิทธิพลของรูปร่างใบตัด จำนวนใบตัด และทิศทางการเติมต่อเศษการตัดทางปาล์มของเครื่องตัดทางปาล์มใบตั้ง Effect of Blade Geometries, Blade Amount, and Feed Direction on Palm Cutting Chip of Orbital Cutting Blade Palm Chopping Machine โดย : ไพบุลย์ แยมเผื่อน ปราโมทย์ พูนนายน วรญา วัฒนจิตสิริ สุรัตน์ ตรัณนพวงศ์ และกิตติพงษ์ กิมะพงศ์	151
Determination of Physical and Thermal Properties of Herbal Compress Ball โดย : สมหมาย ตรีชัยยาพร โสภิตา ตั้งคนานนท์ กัลยาณี นิยมสัตย์ กรองแก้ว ถวิลประภา และณัฐกุล ศรีสุข	163
การวิเคราะห์ความเสี่ยงโซ่อุปทานโดยชี้วัดความสามารถในการแข่งขันของวิสาหกิจขนาดกลาง และขนาดย่อม : กรณีศึกษาโรงงานฉีดพลาสติก An Analysis of Supply Chain Risk Management (SCRM) in Competitiveness Indicators : A Case study of Injection Plastics Factory โดย : ปฐมพงษ์ หอมศรี เลิศเลขา ศรีรัตนะ และกฤษดา พิศลยบุตร	173



วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏธนบุรี

คณะกรรมการจัดทำวารสาร วิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏธนบุรี

คณะกรรมการที่ปรึกษา

อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ
คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

กองบรรณาธิการ

ศ.(พิเศษ) อัจฉราพร ไคละสุต
ศ.ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ
รศ.ดร.สุธี อักษรกิตติ
รศ.ดร.เข้มชัย เหมะจันทร์
รศ.ดร.ศิริวรรณ ศรีสรณ์
รศ.ดร.กัณวรัช พลุประสิทธิ์
รศ.ดร.ธารรัตน์ มุ่งเจริญ
รศ.ณรงค์ บวบทอง
ผศ.ดร.สมเจตน์ พิชร์พันธ์
ผศ.ดร.ปฐมทัศน์ จิระเดชะ
ผศ.ดร.อังคณา พันธุ์หล่อ
ดร.ชัชวาลย์ สุรัสวดี
ผศ.ดร.ศิวกร อ่างทอง
รศ.ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักติพิชญ์
ผศ.ดร.จักรี ครีรินทร์ฉัตร
ผศ.สมศักดิ์ แก่นทอง
ดร.สุนนมาลย์ เนียมกลาง

166 ซ.อาคารสงเคราะห์ ถ.พิชัย เขตดุสิต กรุงเทพฯ 10300
ศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
คณะกรรมการ มหาววิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย
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

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

ดร.ปรกช ลิธิสุวัฒน์

เลขานุการ

นางสาวอมรรรัตน์ ยิ้มอยู่

ผู้ช่วยเลขานุการ

นายอัศชนะ คูเจริญไพบุลย์

ผู้ดูแลระบบงานเทคโนโลยีสารสนเทศ

นายพัฒนพงศ์ 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

Adj.Prof.Atcharaporn Sailasuta	166 Soi Akhansongkhro, Pichai Rd., Dusit, Bangkok, Thailand 10300
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
Dr.Sumonman Niamlang	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Editor in Chief

Dr.Porakoch Sirisuwan

Secretary

Miss.Amonrat Yimyoo

Assistant Secretary

Mr.Uschana Koojarenphaiboon

System administrator

Mr.Patrapee Sunantapot



วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏบรียบุรี

บรรณาธิการ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ราชภัฏบรียบุรี ปีที่ 16 ฉบับที่ 2 เดือน กรกฎาคม ถึง ธันวาคม พ.ศ. 2561 นี้ ได้มีการพัฒนาและปรับปรุงรูปแบบของวารสารหลายส่วนด้วยกัน ทั้งในการเพิ่มบทความนำเสนอผลงานวิจัยในรูปแบบเล่มจากเดิมจำนวน 8 บทความ เป็น 16 บทความ และมีการปรับปรุงแบบให้รองรับเข้าสู่ฐานข้อมูลภูมิภาคอาเซียน ASEAN Citation Index (ACI) ที่เป็นฐานข้อมูลกลางสำหรับรวบรวมผลงานตีพิมพ์และการอ้างอิงจากวารสารของประเทศสมาชิกอาเซียนร่วมกัน

และขอแสดงความเสียใจต่อการสูญเสีย ศาสตราจารย์ (พิเศษ) อัจฉราพร ไชยะสุต ที่ได้ถึงแก่อนิจกรรมอย่างสงบ ท่านเป็นผู้กรุณาให้เกียรติเป็นคณะกรรมการกองบรรณาธิการ วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏบรียบุรี มาตั้งแต่จัดทำวารสารฉบับแรก เมื่อปี พ.ศ. 2545

ท้ายนี้ กองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ราชภัฏบรียบุรี ขอขอบพระคุณผู้เขียนบทความทุกท่านที่มีความสนใจในการตีพิมพ์ผลงานในวารสารฯ ฉบับนี้ และขอขอบพระคุณผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความที่ให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะ ต่างๆ แก่ผู้เขียนบทความเพื่อนำไปปรับปรุงผลงานให้มีคุณภาพมากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังส่งเสริมให้วารสารฯ คงคุณภาพอยู่ในวารสารกลุ่ม ที่ 1 จากการประเมินคุณภาพวารสารวิชาการในฐานข้อมูล TCI สืบเนื่องต่อไป

กองบรรณาธิการ

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิผู้พิจารณาบทความ

รศ.ดร.วันชัย ธิวัณนิจ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.เข้มชัย เหมะจันทร์	คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.อุษา แสงวัฒนาโรจน์	คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.สิริวรรณ กิตติเนาวรัตน์	คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.ชิดชนก มีใจเชื้อ	คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ผศ.ดร.ทวีชัย สำราญวานิช	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
ผศ.ดร.อาทิตย์ โสตรโยม	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม
รศ.ดร.จงจิณต์ ผลประเสริฐ	คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
ผศ.ดร.อังคณา พันธุ์หล่อ	วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต
รศ.วิชัย ฉัตรทินวัฒน์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผศ.ดร.ธีระพงษ์ ว่องรัตนไพศาล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผศ.ศิวะ อัจฉริยวิริยะ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผศ.ดร.พนมกร ขาวทอง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร.อิสริย์ ธรรมชาติบุญโรจน์	อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.บรรยงค์ รุ่งเรืองด้วยบุญ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
รศ.ดร.เจียรนัย เล็กอุทัย	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
รศ.ดร.สัญญา มิตรเอม	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
ดร.ฉันทเศรษฐ์ เศรษฐบุตร	สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รศ.ดร.กัณวีรัช พูลประชาญ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)
รศ.ดร.ศิริวรรณ ศรีสรณ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)
รศ.ดร.เวทิน ปิยรัตน์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)
ผศ.ดร.นำคุณ ศรีสนิท	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)
ผศ.ดร.ปฐมทัศน์ จิระเดชะ	สถาบันยุทธศาสตร์ทางปัญญาและวิจัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผศ.ดร.วิชากร จารุศิริ	คณะพัฒนธรรมสิ่งแวดล้อมและการท่องเที่ยวเชิงนิเวศ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ดร.สาธิต พุทธชัยงค์	อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผศ.ดร.ปทุมทิพย์ ปราบพาล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ดร.ประเทืองทิพย์ ปานบำรุง	คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ศ.ดร.ก้องกิติ พุสสวัสดิ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
รศ.ดร.เพ็ญจิตร์ ศรีนพคุณ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
รศ.วัชรินทร์ วิทยกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
รศ.ดร.ธำรงรัตน์ มุ่งเจริญ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
ผศ.ดร.สมเจตน์ พิชร์พันธ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
รศ.ดร.ทวีศักดิ์ ปิติคุณพงศ์สุข	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
ผศ.สุชาติ เหลืองประเสริฐ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
รศ.ภัชราภรณ์ สุวรรณวิทยา	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
ผศ.ดร.อนุสิทธิ์ ณะพิมพ์เมธา	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
รศ.สิริ ชัยเสรี	คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
รศ.ดร.วรารุช วุฒินิชย์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน
รศ.ดร.ธัญญา นิยมภา	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน
รศ.ดร.ทศพล พรพรม	คณะเกษตรกำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน
รศ.ดร.วิบูลย์ ชื่นแขก	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

รศ.ดร.สมิตรี ส่งพิริยะกิจ
รศ.สมเกียรติ จงประสิทธิ์พร
ผศ.ดร.กานต์ พนาศุภมัสตุ
รศ.ดร.วรรณวิทย์ แท้มทอง
รศ.ดร.ปานมนัส ศิริสมบุรณ์
รศ.ดร.ขวลิต เบญจางคประเสริฐ
รศ.ดร.กนก เจนจิระพงศ์เวช
รศ.ดร.อิสระชัย งามหรุ
รศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ
ผศ.มิ่ง โลกิจแสงทอง
ดร.ภพ จันทร์เจริญสุข
ศ.ดร.วราวุฒิ ครูส่ง
ศ.ดร.ณรงศ์ฤทธิ์ สมบัติสมภาพ
รศ.ดร.มานะ อมรภิจำรุ่ง
ผศ.ดร.นริส ประทินทอง
ผศ.ดร.ธนิต สวัสดิ์เสวี
ศ.ดร.โกสินทร์ จ่านงไทย
รศ.ดร.วิโรจน์ บุญอำนวยวิทยา
รศ.พรเกษม จงประดิษฐ์
ผศ.ดร.สมโพธิ อยู่ไว
ผศ.ดร.ทวิช พูลเงิน
ผศ.ดร.สุทัศน์ ลีลาทวิวัฒน์
ดร.ศิรินทร ทองแสง
ผศ.ดร.วีรชาติ ตั้งจิรภัทร
รศ.ดร.รุ่งเรือง กาลศิริศิลป์
รศ.ดร.ชัยยุทธ ช่างสาร
รศ.ดร.ณฐา คุปต์ขุเชียร
รศ.ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์
รศ.ดร.จตุรงค์ ลังกาพินธุ์
รศ.มานพ ต้นตระกูลบัณฑิตย์
รศ.ธีระพงษ์ ไชยเฉลิมวงศ์
รศ.สุจิระ ขอจิตต์เมตต์
รศ.ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง
ผศ.ดร.ศิวกร อ่างทอง
ผศ.ดร.วันชัย ทรัพย์สิงห์
ผศ.ดร.สมชัย หิรัญโรตม
ผศ.ดร.บิตศานต์ กร้ามาตร
ผศ.ดร.สมหมาย ผิวสอาด
ผศ.ดร.สมหมาย ตริยไชยาพร
ผศ.ดร.อำนวย เรืองวารี
ผศ.ดร.ไพฑูรย์ กิติสุนทร
ผศ.ดร.สมนึก สังข์หนู
ผศ.ดร.สมประสงค์ ภาษาประเทศ
ผศ.ดร.อภิชาติ สนธิสมบัติ

[illegible]

ผศ.ดร.สุนัน ปานสาคร
ผศ.ดร.จักรี ศรีนนท์ฉัตร
ผศ.ดร.สุรินทร์ แห่งมงาม
ผศ.ดร.จิรวัดน์ คชสาร
ผศ.ดร.อภินันท์ วัลภา
ผศ.ดร.ไพฑูรย์ รักเหลือ
ผศ.ดร.ศุภวิทย์ ลวณะสกล
ผศ.ดร.พุทธรพล ทองอินทร์ดำ
ผศ.ดร.บุญยฤทธิ์ ประสาทแก้ว
ผศ.สุรัตน์ ตริยวนพงศ์
ผศ.ดร.จินดารัตน์ มณีเจริญ
ผศ.ดร.วีระศักดิ์ ละอองจันทร์
ผศ.ดร.มนูศักดิ์ จานทอง
ผศ.ดร.ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์
ผศ.ดร.ระพี กาญจนะ
ผศ.ดร.ศุภสิทธิ์ พงศ์ศิweiseสถิตย์
ดร.มานิช รุจิการ
ดร.ฐนียา รังษีสุริยะชัย
ดร.จตุพล ตั้งปกาศิต
ดร.ฉัตรชัย ศุภพิทักษ์สกุล
ดร.กุลยา สารชีวิน
ดร.บุญชัย ผึ้งไผ่งาม
อาจารย์วีระพงษ์ ครูส่ง
ผศ.ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์
ดร.กุลชาติ จุลเพ็ญ
ผศ.ศิริชัย แดงเอม
ผศ.ดร.ศิริชัย ต่อสกุล
ผศ.ดร.ฉันททิพ สกุลเขมฤทัย
ผศ.ดร.เจริญ เจริญชัย
ดร.นิธวัฒน์ ชูสกุล
ดร.สนธยา ทองอรุณศรี
ดร.นเรศ อินตะวงค์
ผศ.ดร.เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย
รศ.ดร.ยุทธิชัย บรรเทึงจิตร
ดร.ประธาน วงศ์ศรีเวช
รศ.จิราภรณ์ เบญจประกายรัตน์
ดร.ชาญยุทธ กอดสุนันท์กุล
รศ.ดร.สมใจ ขจรชีพพันธุ์งาม
รศ.ดร.ดนุพล ตันนโยภาส
ดร.วิวัฒน์ พัวพัฒนานนท์
รศ.ดร.พันธุ์ดา พุฒิไพโรจน์
รศ.ณรงค์ บวบทอง
รศ.ดร.ณรงค์ อยู่ถนอม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา วิทยาเขตภาคพายัพ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีแห่งสุวรรณภูมิ
ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์แห่งชาติ (สวทช)
คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์
คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร
นักวิชาการอิสระ
นักวิชาการอิสระ

Peer Reviews

Assoc.Prof.Dr.Vanchai Rijiravanich	Faculty of Engineering Chulalongkorn University
Assoc.Prof.Dr.Khemchai Hemachandra	Faculty of Science Chulalongkorn University
Asst.Prof.Dr.Usa Sangwatanaroj	Faculty of Science Chulalongkorn University
Asst.Prof.Dr.Siriwan Kittinaovarat	Faculty of Science Chulalongkorn University
Asst.Prof.Dr.Chidchanok Meechaisue	Faculty of Science Ramkhamhaeng University
Asst.Prof.Dr.Taweechai Sumranwanich	Faculty of Engineering Burapha University
Asst.Prof.Dr.Arthit Sodeyome	Faculty of Engineering Siam University
Assoc.Prof.Dr.Chongchin Polprasert	Faculty of Public Health Mahidol University
Asst.Prof.Dr.Ankana Punlor	College of Engineering Rangsit University
Assoc.Prof.Dr.Wichai Chattinnawat	Faculty of Engineering Chiang Mai University
Asst.Prof.Dr.Theeraphong Wongratanaphisan	Faculty of Engineering Chiang Mai University
Asst.Prof.Siva Achariyaviriya	Faculty of Engineering Chiang Mai University
Asst.Prof.Dr.Panomkorn Kwakhong	Faculty of Engineering Khon Kaen University
Assoc.Prof.Dr.Issaree Hunsacharoonroj	President Rajamangala University of Technology Rattanakosin
Asst.Prof.Dr.Bunyong Rungroungdouyboon	Faculty of Engineering Thammasat University
Assoc.Prof.Dr.Jearranai Lekuthai	Faculty of Science and Technology Thammasat University
Assoc.Prof.Dr.Sanya Mitaim	Faculty of Engineering Thammasat University
Dr.Thunyaseth Sethaput	Sirindhorn International Institute of Technology
Assoc.Prof.Dr.Ganwarich Pluphrach	Faculty of Engineering Srinakharinwirot University
Assoc.Prof.Dr.Siriwan Srisorrachatr	Faculty of Engineering Srinakharinwirot University
Assoc.Prof.Dr.Wekin Piyarat	Faculty of Engineering Srinakharinwirot University
Asst.Prof.Dr.Namkhun Srisanit	Faculty of Engineering Srinakharinwirot University
Asst.Prof.Dr.Pathomthat Chiradeja	Strategic Wisdom and Research Institute Srinakharinwirot University
Asst.Prof.Dr.Witchakorn Charusiri	Faculty of Environmental Culture and Ecotourism Srinakharinwirot University
Dr.Sathit Puttachaiyong	President Rajamangala University of Technology Krungthep
Asst.Prof.Dr.Pathumthip Prabphane.	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Krungthep
Dr.Pratuangtip Panbumrung	Faculty of Textile Industry Rajamangala University of Technology Krungthep
Prof.Dr.Kongkitti Phusavat	Faculty of Engineering Kasetsart University
Assoc.Prof.Dr.Penjit Srinophakun	Faculty of Engineering Kasetsart University
Assoc.Prof.Watcharin Witayakul	Faculty of Engineering Kasetsart University
Assoc.Prof.Dr.Thumrongrat Mungcharoen	Faculty of Engineering Kasetsart University
Asst.Prof.Dr.Somjate Patcharaphun	Faculty of Engineering Kasetsart University

Assoc.Prof.Dr.Thaweesak Pitikhunpongsuk	Faculty of Engineering, Kasetsart University
Asst.Prof.Suchat Leungprasert	Faculty of Engineering, Kasetsart University
Assoc.Prof.Patcharaporn Suwanvitaya	Faculty of Engineering, Kasetsart University
Asst.Prof.Dr.Anusith Thanapimmetha	Faculty of Engineering, Kasetsart University
Assoc.Prof.Siree Chaiseri	Faculty of Agro-Industry Kasetsart University
Assoc.Prof.Dr.Varawoot Vudhivanich	Faculty of Engineering Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus
Assoc.Prof.Dr.Tanya Niyamapa	Faculty of Engineering Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus
Assoc.Prof.Dr.Tosapon Pornprom	Faculty of Agriculture at Kamphaeng Saen
Assoc.Prof.Dr.Viboon Chunkag	Faculty of Engineering King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Assoc.Prof.Dr.Smith Songpiriyakij	Faculty of Engineering King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Assoc.Prof.Dr.Somkiat Jongprasithporn	Faculty of Engineering King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Asst.Prof.Dr.Karn Panasupamussadu	Faculty of Engineering King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Assoc.Prof.Dr.Wannawit Taemthong	Faculty of Engineering King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Assoc.Prof.Dr.Panmanas Sirisomboon	Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Assoc.Prof.Dr.Chawalit Benjangkaprasert	Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Assoc.Prof.Dr.Kanok Janchitrapongvej	Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Assoc.Prof.Dr.Issarachai Ngamroo	Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Assoc.Prof.Dr.Vijit Kinnares	Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Asst.Prof.Ming Lokitsangtong	Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Dr.Phop Chancharoensook	Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Prof.Dr.Warawut Krusong	Faculty of Agro-Industry King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Prof.Dr.Narongrit Sombatsompop	School of Energy Environment and Materials King Mongkut's University of Technology Thonburi
Assoc.Prof.Dr.Mana Amornkitbamrung	School of Energy Environment and Materials King Mongkut's University of Technology Thonburi
Asst.Prof.Dr.Naris Pratinthong	School of Energy Environment and Materials King Mongkut's University of Technology Thonburi

Asst.Prof.Dr.Thanit Swasdisevi	School of Energy Environment and Materials King Mongkut's University of Technology Thonburi
Prof.Dr.Kosin Chamnongthai	Faculty of Engineering King Mongkut's University of Technology Thonburi
Assoc.Prof.Dr.Virote Boonamnuyvitaya	Faculty of Engineering King Mongkut's University of Technology Thonburi
Assoc.Prof.Pornkasem Jongpradist	Faculty of Engineering King Mongkut's University of Technology Thonburi
Asst.Prof.Dr.sompote Youwai	Faculty of Engineering King Mongkut's University of Technology Thonburi
Asst.Prof.Dr.tawich Pulngern	Faculty of Engineering King Mongkut's University of Technology Thonburi
Asst.Prof.Dr.sutat Leelataviwat	Faculty Of Engineering King Mongkut's University of Technology Thonburi
Dr.Sirinthorn Thongsang	Faculty of Engineering King Mongkut's University of Technology Thonburi
Asst.Prof.Dr.Weerachart Tangchirapat	Faculty of Engineering King Mongkut's University of Technology Thonburi
Assoc.Prof.Dr.Roongruang Kalsirisilp	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Assoc.Prof.Dr.Chaiyoo Changsarn	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Assoc.Prof.Dr.Natha Kuptasthien	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Assoc.Prof.Dr.Krischonme Bhumkittipich	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Assoc.Prof.Dr.Jaturong Langkapin	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Assoc.Prof.Manop Tantrabandit	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Assoc.Prof.Tirapong Chaichalermvong	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Assoc.Prof.Sujira Khojitmate	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Assoc.Prof.Dr.Boonyang Plangklang	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Sivakorn Angthong	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Wanchai Subsingha	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Somchai Hiranvarodom	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Asst.Prof.Dr.Pitisan Krammart	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Sommai Pivsaart	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Sommai Trichaiyaporn	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Amnoiy Ruengwaree	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Paitoon Kitisuntorn	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Somnuk Sungnoo	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Somprasong Parsapratet	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Apichart Sonthisombat	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Sunan Parnsakhorn	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Jakkree Srinonchat	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Surin Ngaemngam	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Chirawat Kotchasarn	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Apinan Soottitantawat	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Paitoon Rakluea	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Suphawit Lawanasakon	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Puttapon Thongindum	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Boonrit Prasartkaew	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Surat Triwanapong	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Jindarat Maneecharoen	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Werasak Raongjant	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Manusak Janthong	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Asst.Prof.Dr.Pradya Prempraneerach	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Rapee Kanchana	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Supasit Pongsiwasathit	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Dr.Manoch Rujipakorn	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Dr.Thaneeya Rangseesuriyachai	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Dr.Jatupon Prasansin	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Dr.Chatchai Suppitaksakul	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Dr.Kullaya Sarichewin	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Dr.Boonchai Phungpaingam	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Mr.Weeraphong Krusong	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Kittipong Kimapong	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Dr.Kunlachart Junlapen	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Sirichai Dangeam	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Sirichai Torsakul	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Chuntip Sakulkhaemaruethai	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Charoen Charoenchai	Faculty of Home Economics Technology Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Dr.Nithiwatthn Choosakul	Faculty of Science and Technology Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Dr.Sontaya Tongaroonsri	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Lanna Tak
Dr.Naret Intawong	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Lanna
Asst.Prof.Dr.Griengsak Kaewkulchai	Faculty of Engineering Ubonratchathani University
Assoc.Prof.Dr.Yuthachai Bunternghit	Faculty of Engineering Suvarnabhumi Institute of Technology
Dr.Pratarn Wongsarivej	National Nanotechnology Center National Science and Technology Development Agency

Assoc.Prof.Jiraporn Benjaphragairat	Faculty of Industrial Technology, Valaya Alongkorn Rajabhat University Under The Royal Patronage
Dr.Chanyud Kritsunankul	Faculty of Agriculture, Natural Resources and Environment Naresuan University
Assoc.Prof.Dr.Somjai Kajorncheappunngam	Faculty of Engineering, Khon Kaen University
Assoc.Prof.Dr.Danupon Tonnayopas	Faculty of Engineering Prince of Songkla University
Dr.Wiwat Puatatsananon	Faculty of Engineering Ubonratchathani University
Assoc.Prof.Dr.Pantuda Puthipiroj	Faculty of Architecture Silpakorn University
Assoc.Prof.Narong Buabthong	Independent Academician
Assoc.Prof.Dr.Narong Yoothanom	Independent Academician

การศึกษาการหมักปุ๋ยจากเศษอินทรีย์วัตถุด้วยการเติมอากาศ ร่วมกับการใช้ครูดเอนไซม์

Study of Organic Waste Composting with Aeration and Use of Crude Enzyme

ฐนียา รังษีสุริยชัย^{1*} และกุลยา สาริชีวิน²

Thaneeya Rangseesuriyachai^{1*} Kullaya Saricheewin²
thaneeya.r@en.rmutt.ac.th^{1*}, kullaya.s@en.rmutt.ac.th²

¹⁻² ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

¹⁻² Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Received: January 31, 2017
Revised: November 30, 2017
Accepted: December 20, 2017

บทคัดย่อ

การศึกษาการหมักปุ๋ยจากเศษอินทรีย์วัตถุด้วยการเติมอากาศร่วมกับการใช้ครูดเอนไซม์ ได้แก่ ครูดเอนไซม์จากเชื้อเดี่ยว *Trichoderma reesei* และเชื้อผสมระหว่าง *Trichoderma reesei* และ *Saccharomyces cerevisiae* โดยศึกษาคุณลักษณะที่ได้จากการหมักปุ๋ยที่มีการเติมครูดเอนไซม์ผงทั้งสองแบบเปรียบเทียบกัน โดยการแปรเปลี่ยนปริมาณครูดเอนไซม์ที่เติมและปรับเวลาการเติมอากาศที่ 24 ชม. และเปิด-ปิด สลับกัน 6 ชม. จากผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิในระหว่างการหมักของถังทั้ง 8 ถัง มีอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกัน คืออยู่ในช่วงระหว่าง 28-41 องศาเซลเซียส ซึ่งถือว่าเป็นอุณหภูมิในช่วง Mesophilic ความชื้นในถังหมักปุ๋ยมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 47-90 ซึ่งความชื้นสูงจะเกิดในช่วงต้นของการทดลองทำให้การหมักเกิดช้าในช่วงแรกเมื่อสิ้นสุดการทดลองค่าความเป็นกรด-ด่าง อยู่ในช่วง 8-9 และฟอสฟอรัสอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 0.66-1.05 ในด้านคุณลักษณะของปุ๋ยหมักในเรื่องของธาตุอาหาร N, P, K เกือบทุกถังมีค่าเป็นไปตามมาตรฐานปุ๋ยหมัก ค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของปุ๋ยหมักมีเฉพาะถังที่ 1 (มีการเติมอากาศ 24 ชั่วโมง เติมครูดเอนไซม์ 180 กรัม) ที่มีค่าเป็นไปตามมาตรฐานคือ 20:1 ถังที่ 2-8 มีค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนประมาณ 30:1 โดยเมื่อพิจารณารูปแบบการเติมอากาศที่ดีที่สุดคือมีการเติมอากาศตลอด 24 ชั่วโมง และถังที่ดีที่สุดคือ ถังที่ 1 ซึ่งมีวัสดุหมักร่วมกับครูดเอนไซม์ผงจากเชื้อเดี่ยวโดยมีการเติมอากาศ 24 ชั่วโมงร่วมกับการเติมครูดเอนไซม์ 180 กรัม

คำสำคัญ: ครูดเอนไซม์, เศษอินทรีย์, ปุ๋ยหมัก, ถังเติมอากาศ

Abstract

The study of organic waste composting with aeration and by adding crude enzyme powder from *Trichoderma reesei* and mixed-type between *Trichoderma reesei* and *Saccharomyces cerevisiae* was conducted to compare the characteristics of compost using 24 hours operated and periodically every 6 hours operated aerator combined with the different amounts of crude enzyme. The results showed that the temperature during the experimental process is in the range of 28-41 °C which is usually called mesophilic phase. The moisture content ranged between 47-90% of which the higher humidity occurred at the beginning caused the slow process of fermentation. At the end of the experiment, pH was found in the range of 8-9 and phosphorus contained in the compost was in the range between 0.66 to 1.05%. The characteristics of the fertilizer nutrients N, P, K, in almost compost crates met the requirements nutrients for standard compost. Carbon to Nitrogen ratio (C/N ratio) of crate no.1 (24 hrs. operated aerator with 180g *Trichoderma reesei* added) is the only crate that met the standard composting with C/N of 20:1. The C/N ratio of crates no.2-8 were approximately 30:1. By considering the aeration patterns, the 24 hrs. operated aerator was considered the best condition for this study and a crate no.1 (24 hrs. operated aerator with 180g *Trichoderma reesei* added) demonstrated the best results to satisfy the standard compost.

Keywords: crude enzyme, organic waste, compost, aeration bin.

1. บทนำ

ขยะได้กลายมาเป็นปัญหาสำคัญระดับชาติ อันเนื่องมาจากจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้นและมีการอุปโภคบริโภคในแต่ละวันเป็นจำนวนมาก จากการสำรวจข้อมูลของกรมควบคุมมลพิษ พบว่าในปี 2558 มีปริมาณขยะมูลฝอยทั้งสิ้น 26.85 ล้านตัน โดยมีขยะมูลฝอยที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์ได้ทั้งสิ้น 4.94 ล้านตัน หรือคิดเป็นร้อยละ 18 ของปริมาณขยะมูลฝอยทั้งหมด [1] โดยขยะมูลฝอยที่นำมาใช้ประโยชน์ได้นั้นส่วนใหญ่คือขยะมูลฝอยประเภทขยะอินทรีย์วัตถุ เศษอาหาร และเศษผักผลไม้ ซึ่งขยะมูลฝอยเหล่านี้ถ้านำไปกำจัดด้วยการนำไปฝังกลบหรือการเผาจะทำให้เป็นภาระค่าใช้จ่ายในการกำจัดเป็นมูลค่าสูง จากคุณสมบัติของความชื้นที่มีมาก รวมถึงเสียคุณสมบัติของประโยชน์เนื่องจากขยะมูลฝอยเหล่านี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อได้หลายรูปแบบ รูปแบบหนึ่งที่เป็นทางเลือกที่นิยมในการนำขยะอินทรีย์เหล่านี้ไปใช้ ได้แก่ การนำไปทำปุ๋ยหมัก เนื่องจากขยะอินทรีย์สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติและมีเสถียรภาพโดยเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ผลิตภัณฑ์สุดท้ายของกระบวนการนี้คือปุ๋ยหมักซึ่งเป็นวัตถุดิบที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทางการเกษตร มีความเหมาะสมกับประเทศไทยเนื่องจากเป็นประเทศเกษตรกรรม ทำให้ลดการนำเข้าของปุ๋ยเคมีที่ทำลายดิน

ในการทำปุ๋ยหมักการย่อยสลายปุ๋ยหมักเกิดขึ้นได้จากกระบวนการย่อยสลาย 3 ระยะ โดยในขั้นแรกเกิดได้จากแมลงหรือสิ่งมีชีวิตขนาดใหญ่ซึ่งย่อยสลายสารอินทรีย์ให้มีขนาดเล็ก จากนั้นกลุ่มจุลินทรีย์ในดิน ได้แก่ แบคทีเรีย เชื้อราและยีสต์ จะทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ขนาดเล็กต่อจนเกิดระยะที่สามเมื่อกองปุ๋ยมีความร้อนเกิดขึ้นและจุลินทรีย์ในกลุ่มเทอร์โมฟิลิกจะเข้ามาย่อยสลายต่อจนเกิดเสถียรภาพกลายเป็นปุ๋ยหมักโดยสมบูรณ์ [2] โดยงานวิจัยส่วนใหญ่ที่เกี่ยวข้องกับการทำปุ๋ยหมักจะใช้จุลินทรีย์ที่มาจากมูลสัตว์เป็นหลัก โดยการใช้มูลสัตว์ในการทำปุ๋ยหมักมีมานานแล้ว เนื่องจากมูลสัตว์เป็นตัวเร่ง

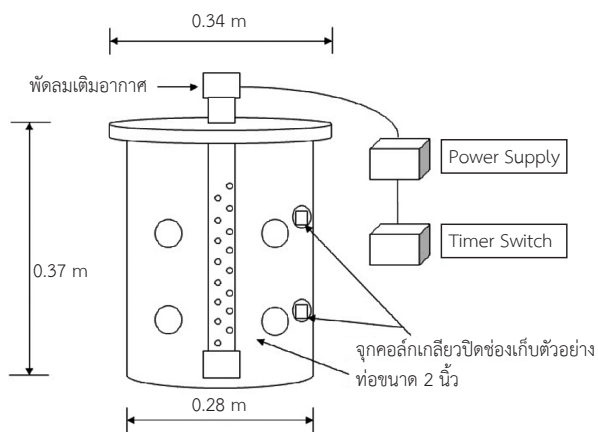
อัตราการย่อยสลายเศษพืชภายในกองปุ๋ยให้เร็วขึ้น และเป็นแหล่งไนโตรเจนและแหล่งจุลินทรีย์ของกองปุ๋ย มูลสัตว์ที่นิยมใช้ในการหมักปุ๋ยได้แก่ มูลวัว มูลไก่ มูลสุกร อย่างไรก็ตาม การทำปุ๋ยหมักยังมีจุลินทรีย์ประเภทอื่นที่อาจไม่ได้อยู่ในมูลสัตว์จำพวกนี้ อาจมีส่วนช่วยในการหมักปุ๋ยให้ได้คุณภาพที่ดีขึ้นหรือเร็วขึ้น เช่น เชื้อรา ยีสต์ เป็นต้น โดยจากการศึกษา งานวิจัยพบว่าเชื้อราและยีสต์มีส่วนช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพการหมักเอทานอลและการหมักปุ๋ย [3-5] นอกจากนี้การหมักด้วยวิธีตามธรรมชาตินั้นต้องใช้ระยะเวลาในการหมักค่อนข้างนานและใช้พื้นที่มาก ดังนั้นการเติมอากาศจึงเป็นวิธีการที่ช่วยให้การหมักเร็วขึ้นและไม่มีการเหม็นอีกด้วย [6-7]

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณลักษณะของปุ๋ยหมัก ที่เกิดขึ้นจากการหมักปุ๋ยด้วยเศษอินทรีย์วัตถุโดยการเพิ่มครูดอเมโซมฟงสองชนิดคือจากเชื้อเดี่ยว *Trichoderma reesei* และเชื้อผสมระหว่าง *Trichoderma reesei* และ *Saccharomyces cerevisiae* รวมถึงเพื่อเปรียบเทียบรูปแบบการเติมอากาศในถังหมักที่แตกต่างกัน เพื่อเป็นการพัฒนาเป็นถังหมักปุ๋ยในครัวเรือนต่อไปในอนาคต

2. วิธีดำเนินงานวิจัย

2.1. อุปกรณ์และเครื่องมือ

ถังหมักที่ใช้ในการทดลองมีทั้งหมด 8 ถัง ทำจากพลาสติกที่บิสต้าโดยมีปริมาตรทั้งสิ้นประมาณ 37 ลิตร ทำการเจาะรูเพื่อระบายอากาศและตรงกลางถังได้เจาะเพื่อใส่ท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว เจาะรูรอบและด้านบนได้ติดตั้งพัดลมเป่าอากาศไว้ ด้านข้างได้ทำการเจาะรูไว้เพื่อเก็บตัวอย่าง ดังแสดงลักษณะถังหมักตามรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะของถังหมักปุ๋ย

ถังหมักทั้งหมด 8 ถังได้ทำการใส่วัสดุหมักที่ประกอบไปด้วยเศษผักผลไม้ เศษอาหาร ใบไม้แห้ง และปุ๋ยคอก และได้มีการเติมครูดเอนไซม์ผง 2 ชนิดด้วยกัน ได้แก่ เชื้อเดี่ยว *Trichoderma reesei* (T) และเชื้อผสมระหว่าง *Trichoderma reesei* และ *Saccharomyces cerevisiae* (TY) โดยในการเติมครูดเอนไซม์แต่ละชนิดจะมีการแปรเปลี่ยนปริมาณของครูดเอนไซม์ด้วย คือ 180 กรัม และ 360 กรัม ตามลำดับ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

ถังที่ 1 วัสดุหมักร่วมกับครูดเอนไซม์ผงจากเชื้อเดี่ยวโดยมีการเติมอากาศ 24 ชั่วโมง เติมครูดเอนไซม์ 180 กรัม, T1(24)

ถังที่ 2 วัสดุหมักร่วมกับครูดเอนไซม์ผงจากเชื้อเดี่ยวโดยมีการเติมอากาศ 24 ชั่วโมง เติมครูดเอนไซม์ 360 กรัม, T2(24)

ถังที่ 3 วัสดุหมักร่วมกับครูดเอนไซม์ผงจากเชื้อเดี่ยวโดยมีการเติมอากาศสลับเปิด-ปิดทุกๆ 6 ชั่วโมง เติมครูดเอนไซม์ 180 กรัม, T1(6)

ถังที่ 4 วัสดุหมักร่วมกับครูดเอนไซม์ผงจากเชื้อเดี่ยวโดยมีการเติมอากาศสลับเปิด-ปิดทุกๆ 6 ชั่วโมง เติมครูดเอนไซม์ 360 กรัม, T2(6)

ถังที่ 5 วัสดุหมักร่วมกับครูดเอนไซม์ผงจากเชื้อผสมโดยมีการเติมอากาศ 24 ชั่วโมง เติมครูดเอนไซม์ 180 กรัม, TY1(24)

ถังที่ 6 วัสดุหมักร่วมกับครูดเอนไซม์ผงจากเชื้อผสมโดยมีการเติมอากาศ 24 ชั่วโมง เติมครูดเอนไซม์ 360 กรัม, TY2(24)

ถังที่ 7 วัสดุหมักร่วมกับครูดเอนไซม์ผงจากเชื้อผสมโดยมีการเติมอากาศสลับเปิด-ปิดทุกๆ 6 ชั่วโมง เติมครูดเอนไซม์ 180 กรัม TY1(6)

ถังที่ 8 วัสดุหมักร่วมกับครูดเอนไซม์ผงจากเชื้อผสมโดยมีการเติมอากาศสลับเปิด-ปิดทุกๆ 6 ชั่วโมง เติมครูดเอนไซม์ 360 กรัม TY2(6)

2.2. ขั้นตอนการทดลอง

1) ทำการเพาะครูดเอนไซม์จากเชื้อเดี่ยว *Trichoderma reesei* และเชื้อผสมระหว่าง *Trichoderma reesei* และ *Saccharomyces cerevisiae* ให้ได้ปริมาณเพียงพอตามที่ต้องการโดยทำการเพาะเชื้อแล้วทำการคลุกผสมกับกากมะพร้าวแห้ง

2) ทำการรวบรวมเศษอาหาร เศษผักผลไม้ จากตลาดและร้านค้า เพื่อใช้เป็นวัสดุในการหมักปุ๋ย จากนั้นทำการคัดแยกมูลฝอย ซึ่งไม่สามารถย่อยสลายได้ออกก่อนนำไปหมัก เช่น พลาสติก โฟม ยาง กระดูก เป็นต้น

3) นำเศษผักผลไม้ เศษอาหาร ใบไม้แห้ง และปุ๋ยคอกไปหาร้อยละของคาร์บอน ร้อยละของไนโตรเจน อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน และค่าความชื้น เพื่อคำนวณหาปริมาณของเศษอาหาร เศษผักผลไม้ ใบไม้แห้ง และปุ๋ยคอก ที่ใช้ในการหมักปุ๋ย โดยทำการหมักด้วยอัตราส่วนผสมของเศษผักผลไม้ต่อเศษอาหารต่อใบไม้แห้งต่อปุ๋ยคอกเท่ากับ 2:1:1:1 ตามลำดับ และหาค่าคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) เริ่มต้นของวัสดุหมักแต่ละชนิด ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าคาร์บอนต่อไนโตรเจนของวัสดุหมัก

วัสดุหมัก	ค่าคาร์บอนต่อไนโตรเจน
เศษอาหาร	51.10
เศษผักผลไม้	32.18
ใบไม้แห้ง	75.26
ปุ๋ยคอก	58.03

4) นำส่วนผสมต่างๆ ลงหมักในถังหมัก และขณะทำการหมักจะทำการวัดอุณหภูมิของอากาศภายในถังและอุณหภูมิของอากาศภายนอกถังหมักโดยใช้เทอร์โมมิเตอร์ ทุกๆ วัน วัดความชื้นของวัสดุหมักในถังหมักจำลองทุกสัปดาห์ตลอดระยะเวลาการทดลอง ซึ่งทดสอบได้โดยการบีบวัสดุหมักและการทดลองตามวิธีตามตารางที่ 2

5) เก็บตัวอย่างสัปดาห์ละ 1 ครั้งตลอดระยะเวลาการหมัก โดยการสุ่มเก็บเป็นจุดทั้งถังตามช่องเก็บตัวอย่างในรูปที่ 1 คือช่วงล่างของถัง ตรงกึ่งกลางและช่วงบน จุดละ 3 ตัวอย่าง แล้วนำตัวอย่างของทุกจุดมาคละเคล้ากัน เพื่อเป็นตัวแทนตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ ซึ่งใช้น้ำหนักประมาณ 500 กรัม แล้วนำไปใส่ภาชนะสุญญากาศเพื่อนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (อ้างอิงวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM) แล้วนำไปวิเคราะห์หาค่าความชื้น ค่าความเป็นกรด-ด่าง และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) และทำการตรวจวิเคราะห์ฟอสฟอรัสด้วยวิธีการเก็บตัวอย่างดังกล่าว 2 สัปดาห์ต่อครั้ง

6) กำหนดระยะเวลาในการหมัก 49 วัน โดยพิจารณาปุ๋ยหมักที่เสร็จสมบูรณ์จากอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) รวมถึงดูจากลักษณะทางกายภาพของวัสดุหมัก ได้แก่ สี ลักษณะของวัสดุหมัก กลิ่น และความร้อนในกองปุ๋ย ที่เป็นไปตามทฤษฎีถือได้ว่าเป็นการสิ้นสุดการทดลองได้ [2] จึงสุ่มตัวอย่างปุ๋ยหมักที่ได้ในแต่ละถัง นำมาเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อวิเคราะห์หาค่าคาร์บอน, ไนโตรเจน, โพแทสเซียม และฟอสฟอรัส เพื่อศึกษาคุณลักษณะโดยทั่วไปของปุ๋ยหมัก

2.3. วิธีการวิเคราะห์

พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์วัสดุหมักและปุ๋ยหมัก เป็นไปตามคู่มือวิธีวิเคราะห์ปุ๋ยอินทรีย์ ของกรมวิชาการเกษตร [8] (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 2 วิธีการวิเคราะห์ตัวอย่างในแต่ละพารามิเตอร์ [8]

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์
อุณหภูมิ	Thermometer
ค่าความชื้น	Oven-drying method
ค่าความเป็นกรด-ด่าง	pH meter
คาร์บอนทั้งหมด	Walkley-Black method
ไนโตรเจนทั้งหมด	Kjeldahl method
ฟอสฟอรัสทั้งหมด (P ₂ O ₅)	Spectrophotometric Molybdovanadophosphate method

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 อุณหภูมิ

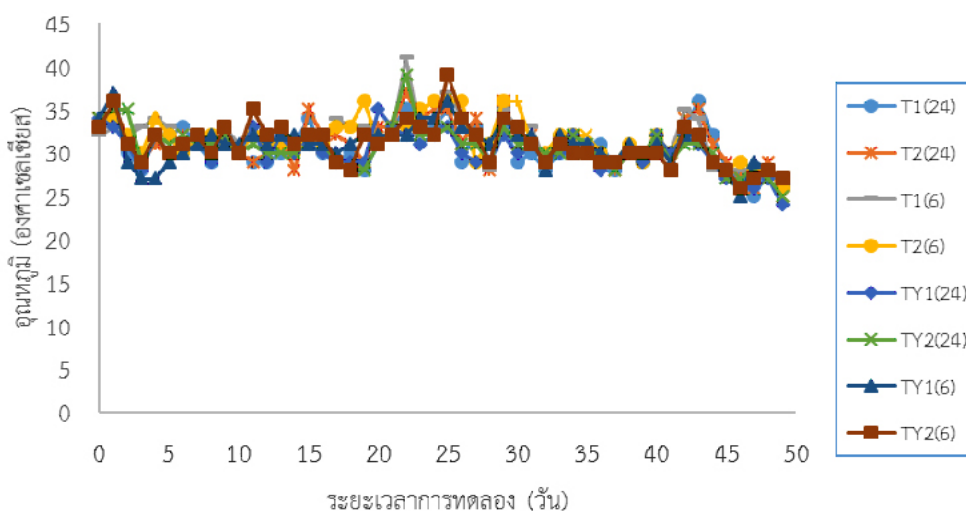
อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญในการตรวจสอบกระบวนการหมักปุ๋ยและสามารถบอกถึงอัตราการย่อยสลายภายในถัง อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นภายในกองหมักเป็นผลของความร้อนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์แต่ละประเภท [8] ผลการทดลองระหว่างอุณหภูมิและระยะเวลาในการหมักปุ๋ยพบว่าอุณหภูมิในแต่ละถังหมักมีอุณหภูมิค่อนข้างต่ำ และแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิแต่ละถังนั้นมีความใกล้เคียงกัน โดยอุณหภูมิตลอดระยะเวลาการทดลองของถังที่ 1 ถึง ถังที่ 8 มีค่าอยู่ในช่วง 28-36, 28-37, 28-41, 28-36, 28-33, 27-39, 28-37 และ 28-39 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ดังแสดงอุณหภูมิตลอดระยะเวลาการทดลองในรูปที่ 2 เห็นได้ว่าอุณหภูมิมีการเพิ่มสูงขึ้นในช่วง 2-3 วันแรก อันเนื่องมาจากการเป่าอากาศและการมีท่อเป่าอากาศอยู่ตรงกึ่งกลางของถังทำให้อากาศหมุนเวียนเข้าไปในถังและเร่งกระบวนการหมัก [9] หลังจากนั้นอุณหภูมิมีแนวโน้มคงที่ตลอดช่วงการทดลอง ยกเว้นในช่วงระยะเวลาการหมักผ่านไปประมาณ 22 วัน พบว่าอุณหภูมิมีการสูงขึ้นโดยส่วนใหญ่ อันเนื่องมาจากในช่วงก่อนวันดังกล่าวได้ทำการพลิกกลับกองปุ๋ยทำให้วัสดุหมักเกิดการคลุกผสมในส่วนของวัสดุหมักที่ยัง

ไม่เกิดการย่อยสลาย ทำให้เกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายเกิดขึ้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิกับอัตราส่วนการลดลงของ C/N ratio มีความสอดคล้องกัน [7]

3.2 ความชื้น

ความชื้นเป็นปัจจัยที่สำคัญอีกตัวหนึ่งในการหมักปุ๋ยเพื่อใช้ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ ทั้งนี้เนื่องจากน้ำจะถูกใช้ในกระบวนการดูดซึมสารอาหารและกระบวนการขับถ่ายของเสียของจุลินทรีย์โดยปกติจะควบคุมความชื้นในกองปุ๋ยไว้ในช่วงร้อยละ 40-65 [2] อย่างไรก็ตามการหมักด้วยวัสดุต่างๆ กันก็ควรมีความเหมาะสมในการควบคุมความชื้นที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะอาหารควรปรับการ

ควบคุมความชื้นให้ได้ประมาณร้อยละ 60 หรือวัสดุหมักบางประมาณ เช่น เศษผักผลไม้อาจสามารถควบคุมความชื้นได้ถึงร้อยละ 70-80 [10-11] อย่างไรก็ตามไม่ควรมีความชื้นต่ำเกินไปถึงแม้ว่าจุลินทรีย์มีการย่อยสลายได้เมื่อความชื้นเพียงร้อยละ 12-15 แต่การย่อยสลายอินทรีย์สารในสภาพดังกล่าวจะช้ามากใช้เวลานานกว่าปกติ ในทางตรงกันข้ามหากความชื้นสูงเกินร้อยละ 70 ปริมาณความชื้นส่วนเกินจะเป็นตัวขัดขวางการระบายอากาศภายในกองปุ๋ยหมักเกิดสภาพขาดอากาศหรือการหมักแบบไม่ใช้อากาศได้โดยง่าย [2] จากการทดลองความชื้นในการหมักปุ๋ยแต่ละถังสามารถอธิบายได้ดังตารางที่ 3



รูปที่ 2 อุณหภูมิกับระยะเวลาในการทดลอง

ตารางที่ 3 ผลการทดลองค่าช่วงความชื้นตลอดระยะเวลาการทำปุ๋ยหมัก

ระยะเวลา ทดลอง (วัน)	ความชื้น (ร้อยละ)							
	ถังที่ 1	ถังที่ 2	ถังที่ 3	ถังที่ 4	ถังที่ 5	ถังที่ 6	ถังที่ 7	ถังที่ 8
เริ่มต้น	81	85	79	73	86	80	82	84
7	82	82	81	80	85	79	78	82
14	78	77	79	77	77	72	73	74
21	79	63	75	74	62	69	64	69
28	75	64	74	73	66	58	68	68
35	69	67	65	59	62	66	63	60
42	54	58	53	56	54	52	50	49
49	45	43	50	48	43	41	42	44

จากตารางที่ 3 พบว่าในวันเริ่มต้นการทดลอง ความชื้นของวัสดุหมักมีค่าสูงอยู่ในช่วงร้อยละ 80-86 เนื่องจากวัสดุหมักที่นำมาทดลองเป็นพวกเศษอาหาร และผักผลไม้ซึ่งเป็นวัสดุอินทรีย์ที่มีความชื้นสูง จะสังเกตได้จากบริเวณด้านล่างของถังจะมีน้ำขัง เมื่อสุ่มตัวอย่างมาตรวจวิเคราะห์ในบริเวณกันดั้มมีลักษณะเป็นโคลน การที่ในถังปุ๋ยหมักมีความชื้นสูงจะส่งผลต่อระยะเวลาการหมักที่นานขึ้น อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าหลังจากการทดลองผ่านไป 14 วัน ความชื้นเริ่มน้อยกว่าร้อยละ 80 ในทุกถังและมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งอยู่ในช่วงร้อยละ 40-50 ซึ่งเป็นความชื้นที่เหมาะสมของการเกิดปุ๋ยหมักที่สมบูรณ์ [10] โดยการลดความชื้นในถังหมักปุ๋ยสามารถทำได้โดยการพลิกกลับกองปุ๋ยให้เกิดการกระจายความชื้นออกไป ซึ่งเป็นวิธีแก้ไขปัญหาคความชื้นสูงในกองปุ๋ยวิธีหนึ่ง รวมถึงการเติมอากาศให้หมักอากาศหมุนเวียนภายในถังหมัก [2]

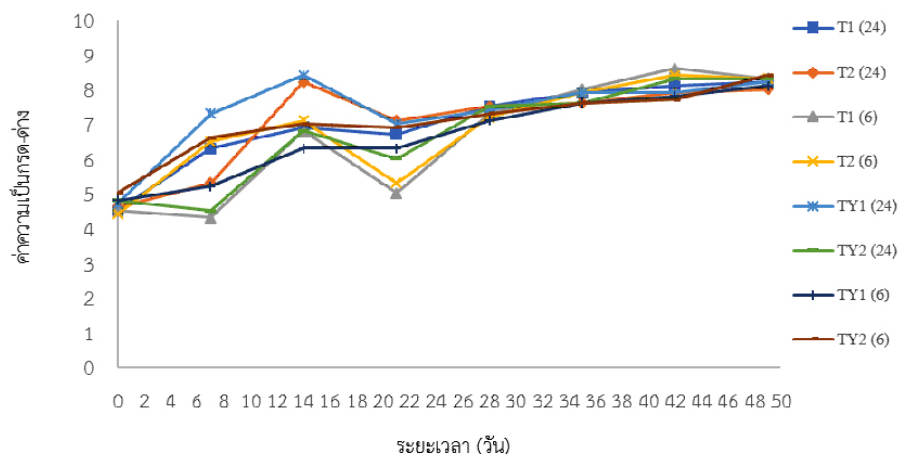
3.3 ค่าความเป็นกรด-ด่าง

ค่าความเป็นกรด-ด่าง คือ ค่าที่บอกถึงความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน (H^+) ที่มีความสัมพันธ์ต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ โดยเป็นการแสดงถึงสภาพความเป็นกรดหรือเป็นด่างในปุ๋ยหมัก การหมักปุ๋ยไม่ควรต่ำกว่า 5.5 และไม่เกิน 9 อันเป็นช่วงที่จุลินทรีย์และราสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ดีจากการทดลองซึ่งแสดงในรูปที่ 3 พบว่าในช่วงเริ่มต้นการทดลองถึงที่ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 และ 8 มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 4.5, 4.6, 4.5, 4.4, 4.7,

4.7, 4.8, และ 5 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าในการเริ่มต้นของการหมักจะมีสภาพเป็นกรดอันเนื่องมาจากวัสดุหมักที่ใช้เป็นจำพวกเศษผักผลไม้ทำให้มีสภาพเป็นกรด ในช่วง 21 วันแรกของการทดลองนั้นค่าความเป็นกรด-ด่างมีแนวโน้มที่สูงขึ้นโดยจะเริ่มสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนในการเริ่มสัปดาห์ที่ 4 (วันที่ 28) โดยถึงที่ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 และ 8 มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 6.9, 8.2, 6.8, 7.1, 8.4, 6.8, 6.3 และ 7 ตามลำดับ และเริ่มมีค่าคงที่โดยในสัปดาห์สุดท้ายของการทดลองค่าความเป็นกรด-ด่างของถังที่ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 และ 8 มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เฉลี่ยอยู่ที่ 8.1, 7.9, 8.6, 8.4, 7.9, 8.3, 7.8 และ 7.7 ตามลำดับ ซึ่งเริ่มเข้าสู่ช่วงระยะเสถียรของการหมัก จะพบว่าค่า pH ของระบบมีค่าที่ค่อนข้างเป็นกลาง คือ pH มีค่าเท่ากับ 7 – 8 ดังแสดงรูปแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่างในรูปที่ 2

3.4 ค่าคาร์บอน

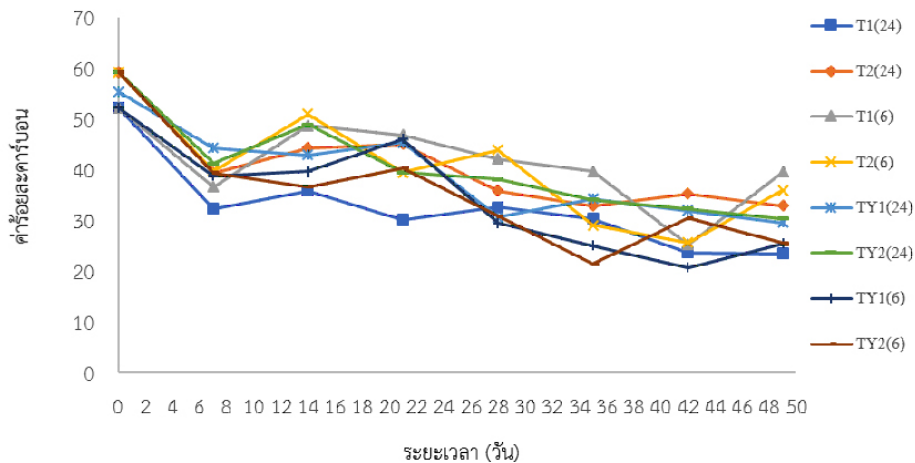
ค่าคาร์บอนที่มีอยู่ในสารอินทรีย์มีความสำคัญต่อกระบวนการทำปุ๋ยหมักเพราะจุลินทรีย์จะย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อนำเอาคาร์บอนไปใช้สร้างองค์ประกอบของเซลล์ในการเจริญเติบโต ซึ่งจะเติบโตช้าหรือเร็วขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุอาหารอื่น ๆ ด้วยว่ามีเพียงพอหรือไม่ จากการทดลองค่าคาร์บอนเริ่มต้นและสิ้นสุดการหมักในแต่ละถัง คาร์บอนเริ่มต้นมีค่าประมาณร้อยละ 52-60 โดยค่าคาร์บอนของทุกถังมีแนวโน้มลดลงดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 3 ค่าความเป็นกรด-ด่างกับระยะเวลาในการทดลอง

จากรูปที่ 4 จะเห็นว่าแนวโน้มค่าคาร์บอน จะเริ่มคงที่หลังจากระยะเวลาการทดลองผ่านไป 28 วัน แสดงให้เห็นถึงอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ลดลง ซึ่งพิจารณาได้ว่าวัสดุหมักเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลง เป็นปุ๋ยแล้ว [7] โดยค่าร้อยละคาร์บอนเริ่มต้นถึงที่ 1-8 เท่ากับ 52.14, 59.23, 52.14, 59.23, 55.32, 59.23, 52.14 และ 59.23 ตามลำดับ และเมื่อสิ้นสุด

การทดลองร้อยละคาร์บอนของถังที่ 1-8 ลดลงเหลือ 23.38, 32.86, 39.48, 35.84, 29.48, 30.26, 25.32 และ 25.45 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาการลดลงของ คาร์บอนในถังหมักที่เติมครูดอมโซมโซ่เดี่ยวมี แนวโน้มการลดลงของคาร์บอนมากกว่าการเติม ครูดอมโซมโซ่จากเชื้อผสม



รูปที่ 4 ร้อยละคาร์บอนกับระยะเวลาในการทดลอง

3.5 ค่าไนโตรเจน

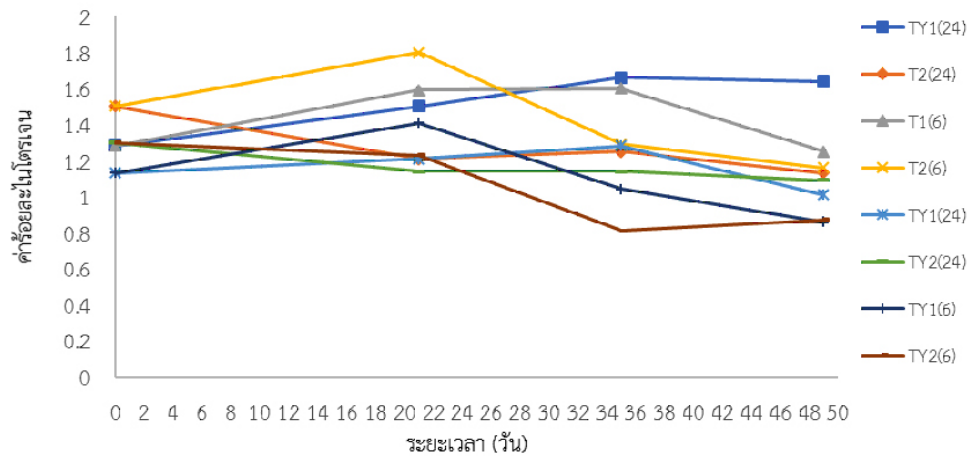
ไนโตรเจนเป็นธาตุอาหารที่จุลินทรีย์ต้องการ ในปริมาณมากเพื่อใช้ในการเจริญเติบโต เนื่องจาก ส่วนประกอบของเซลล์จุลินทรีย์ส่วนใหญ่เป็นพวก โปรตีนและกรดนิวคลีอิกซึ่งมีไนโตรเจนเป็นองค์ ประกอบที่สำคัญ แต่ในทางกลับกันในการหมักปุ๋ย การมีไนโตรเจนมากเกินไปก็เป็นสิ่งไม่ดี เพราะอาจ จะทำให้เกิดอันตรายต่อจุลินทรีย์ เนื่องจากไนโตรเจน ในรูปแอมโมเนียเป็นพิษต่อจุลินทรีย์อย่างมาก [12] และไนโตรเจนไม่ควรน้อยกว่า ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก [8] เนื่องจากในกระบวนการที่จุลินทรีย์ย่อยสลายสาร อินทรีย์ มีความต้องการใช้ปริมาณธาตุไนโตรเจนเป็น องค์ประกอบช่วยในการย่อยสลายด้วย (จุลินทรีย์จะ ย่อยสลายคาร์บอนขึ้นกับตามปริมาณไนโตรเจนที่มี ให้ใช้) [10]

จากการทดลองหาค่าร้อยละไนโตรเจน เริ่มต้นของถังที่ 1-8 มีค่าเท่ากับ 1.28, 1.5, 1.28,

1.5, 1.13, 1.3, 1.13 และ 1.3 ตามลำดับ และร้อยละ ไนโตรเจนเมื่อสิ้นสุดการทดลองของถังที่ 1-8 มีค่า ร้อยละ 1.64, 1.13, 1.25, 1.16, 1.01, 1.09, 0.86 และ 0.87 ตามลำดับ รูปที่ 5 แสดงร้อยละไนโตรเจน ตลอดระยะเวลาการทดลอง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าปริมาณไนโตรเจนมีแนวโน้มลดลง ซึ่งอ้างอิง จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าสาเหตุที่ไนโตรเจนมีการ สูญเสียในกระบวนการหมักปุ๋ยมาจากการระเหยไป อย่างรวดเร็วของแอมโมเนีย (NH₃-volatilization) ซึ่งเป็นผลมาจากคุณลักษณะของวัสดุหมักเริ่มต้น และ ผลของกระบวนการเติมอากาศ ความชื้น และอุณหภูมิ อันเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการสูญเสียของ ไนโตรเจน อีกทั้งยังค้นพบว่า pH ที่ค่อนข้างสูง (pH > 8) ยังช่วยกระตุ้นการปล่อยปล่อยของแอมโมเนียด้วย เช่นกัน ในขณะที่การทำให้ pH ต่ำ (ประมาณ 5.8-6.6) ช่วยรักษาระดับปริมาณไนโตรเจนในกองปุ๋ยได้มากขึ้น [12] นอกจากนี้ปริมาณการเติมอากาศจะส่งผลกระทบ

ต่อไนโตรเจนโดยพบว่าถ้ามีการเพิ่มปริมาณอากาศมากขึ้นจะส่งผลให้เกิดการสูญเสียไนโตรเจนเพิ่มขึ้น เนื่องจากการช่วยเร่งให้เกิดปฏิกิริยาทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปแอมโมเนียจากสถานะของเหลวกลายเป็น

ก๊าซแอมโมเนียได้ง่ายขึ้น โดยปัจจัยปริมาณและช่วงระยะเวลาในการเติมอากาศนั้นจะส่งผลต่อเสถียรภาพของการหมักมากที่สุด [13]



รูปที่ 5 ร้อยละไนโตรเจนกับระยะเวลาในการทดลอง

3.6 อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน

คาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) เป็นตัวชี้วัดที่สำคัญสำหรับการทำปุ๋ยหมัก โดย C/N ratio ในการเริ่มต้นหมักทำปุ๋ยตามทฤษฎีมีค่าอยู่ระหว่าง 25-30 หรือในทางปฏิบัติอาจจะมีค่าได้ถึง 35-45 ซึ่งถ้าค่า C/N ratio สูงขึ้นก็จะทำให้ระยะเวลาในการหมักนานขึ้นด้วย [8, 10] ถ้าการผสมวัสดุหมักที่มีปริมาณไนโตรเจนไม่เพียงพอหรือค่อนข้างต่ำจะทำให้ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนค่อนข้างสูงอาจส่งผลให้อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์เป็นไปอย่างช้าๆ และค่อนข้างต่ำ เนื่องจากจุลินทรีย์ขาดแคลนไนโตรเจนสำหรับการเจริญเติบโต ในทางกลับกัน หากวัสดุหมักมีค่า C/N ค่อนข้างต่ำ หมายความว่าระบบการหมัก

มีปริมาณไนโตรเจนที่เกินพอจะส่งผลให้การเจริญเติบโต และการย่อยสลายของจุลินทรีย์เป็นไปอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้การที่มีปริมาณไนโตรเจนมากเกินไป อาจอยู่ในรูปของก๊าซแอมโมเนียที่ระเหย ขณะเดียวกันปริมาณแอมโมเนียที่เข้มข้นอาจมีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ได้เช่นกัน [10]

จากการทดลองพบว่าค่าคาร์บอนต่อไนโตรเจนในการหมักเริ่มต้นและสิ้นสุดของกระบวนการหมักของแต่ละถังมีค่าดังตารางที่ 4 ซึ่งจะเห็นว่าค่าคาร์บอนต่อไนโตรเจนอยู่ที่ 1-8 มีค่าลดลง โดยถังที่ 1 มีค่าคาร์บอนต่อไนโตรเจนน้อยที่สุด และถังที่ 2-8 มีค่าประมาณช่วง 28-32 ซึ่งยังคงมากกว่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนตามมาตรฐานปุ๋ยหมัก

ตารางที่ 4 ค่าคาร์บอนต่อไนโตรเจนเริ่มต้นและสิ้นสุดการหมัก

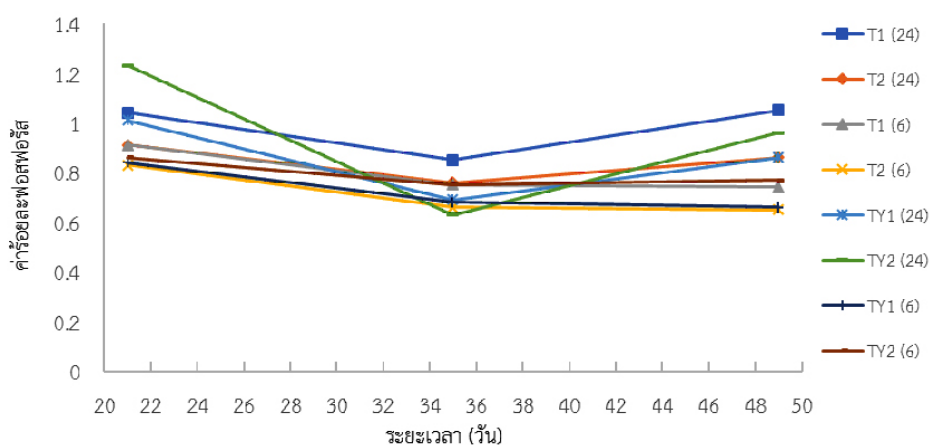
เวลา	ค่าคาร์บอนต่อไนโตรเจน							
	ถังที่ 1	ถังที่ 2	ถังที่ 3	ถังที่ 4	ถังที่ 5	ถังที่ 6	ถังที่ 7	ถังที่ 8
เริ่มต้น	40.73	39.47	35.23	43.55	48.96	45.56	46.14	45.56
สิ้นสุด	14.19	29.08	31.58	30.90	29.14	27.85	29.60	29.36

3.7. ค่าฟอสฟอรัส

ฟอสฟอรัสในสารอินทรีย์มีความสำคัญต่อกระบวนการหมักเช่นเดียวกับไนโตรเจน ฟอสฟอรัสคือปริมาณสารอาหารที่จุลินทรีย์ใช้ในกองปุ๋ยหมัก ซึ่งใช้ในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ปริมาณฟอสฟอรัสของกองปุ๋ยหมักจะอยู่ในรูปของไดฟอสฟอรัสเพนเตออกไซด์ (P_2O_5) ปกติแล้วมาตรฐานคุณภาพปุ๋ยหมักจะมีปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (P_2O_5) ไม่น้อยกว่าร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก [2, 14] ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 6 พบว่าในช่วงเริ่มต้นการหมักถึงที่ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 และ 8 มีค่าร้อยละของฟอสฟอรัสเท่ากับ 1.04, 0.91, 0.91, 0.83, 1.01, 1.23, 0.84 และ 0.86 ตามลำดับ และในช่วงสิ้นสุดการหมักถึงที่ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 และ 8 มีค่าร้อยละฟอสฟอรัสเท่ากับ 1.05, 0.86, 0.74, 0.65, 0.86, 0.96, 0.66 และ 0.77 ตามลำดับ ค่าฟอสฟอรัสในทุก ๆ ถังนั้นมีแนวโน้มที่ลดลง เนื่องจากจุลินทรีย์มีการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยใช้ฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารเพื่อช่วยในการเจริญเติบโต และในช่วงสิ้นสุดการหมักปริมาณฟอสฟอรัสที่เหลืออยู่ค่อนข้างเป็นไปตามทฤษฎี คือไม่น้อยกว่าร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก

3.8 คุณสมบัติของปุ๋ยหมัก

เมื่อครบระยะเวลาการทดลองทั้งสิ้น 49 วัน ได้นำตัวอย่างปุ๋ยในถังหมักทั้งหมดมาทำการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพที่สังเกตเห็นคือขนาดของวัสดุหมักถูกย่อยสลายมีขนาดเล็กลง มีสีดำปนน้ำตาล และมีกลิ่นคล้ายกลิ่นดิน ไม่มีส่วนที่มีสภาพเหมือนเศษอาหาร ใบไม้ อีกต่อไป ค่าตัวชี้วัดมาตรฐานที่ใช้กำหนดสภาพของปุ๋ยหมัก ว่าแปรสภาพได้ดีแล้วหรือไม่ คือค่า C:N ratio โดยปกติถ้าปุ๋ยหมักมีค่า C/N ratio ประมาณ 26-35 ถือว่าสามารถนำปุ๋ยหมักดังกล่าวไปใช้ได้ แต่ถ้าค่า C:N ratio ต่ำกว่า 20:1 ถือว่าปุ๋ยหมักมีคุณภาพดีตามมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ แต่ในทางปฏิบัติการใช้ปุ๋ยหมักที่มีค่า C:N ratio สูงกว่านี้ไปบ้างเล็กน้อยก็มิได้เกิดผลเสียหายแก่พืชเพียงแต่คุณสมบัติในการเป็นสารปรับปรุงดินอาจด้อยคุณภาพลงไปบ้างเท่านั้น [10, 15] รวมถึงธาตุอาหารหลักอื่นๆ ก็เป็นปัจจัยที่ต้องพิจารณา ซึ่งการพิจารณาคุณลักษณะของปุ๋ยหมักตามเกณฑ์นั้นจะมีหลายพารามิเตอร์ซึ่งอาจเป็นไปได้ยากในการทดลอง ดังนั้นจึงอาจสรุปพารามิเตอร์หลักๆ ของตัวอย่างปุ๋ยทั้ง 8 ถังดังตารางที่ 5



รูปที่ 6 ร้อยละฟอสฟอรัสกับระยะเวลาในการทดลอง

ตารางที่ 5 ค่าพารามิเตอร์ของปุ๋ยหมักเมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของปุ๋ยหมัก

พารามิเตอร์ (ร้อยละ)	ถังที่ 1	ถังที่ 2	ถังที่ 3	ถังที่ 4	ถังที่ 5	ถังที่ 6	ถังที่ 7	ถังที่ 8	ค่ามาตรฐาน [9]
ค่าไนโตรเจนทั้งหมด (Total Nitrogen)	1.64	1.13	1.25	1.16	1.01	1.09	0.86	0.87	ไม่น้อยกว่า ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก
ค่าคาร์บอน (Carbon)	23.28	32.86	39.48	35.84	29.48	30.26	25.32	25.45	-
ค่าคาร์บอนต่อ ไนโตรเจน (C/N ratio)	14.19	29.08	31.58	30.90	29.14	27.85	29.60	29.36	ไม่เกิน 20:1
ค่าฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total Phosphorus) (P_2O_5)	1.05	0.86	0.74	0.65	0.47	0.50	0.58	0.42	ไม่น้อยกว่า ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก
ค่าโพแทสเซียมทั้งหมด (Total Potassium) (K_2O)	4.69	3.91	5.32	4.84	3.85	4.79	3.33	3.71	ไม่น้อยกว่า ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก
ความชื้น (Moisture content)	31	37	26	27	45.39	29.67	25.20	34.45	ไม่เกินร้อยละ 40-70 โดยน้ำหนัก
ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	8.1	7.9	8.6	8.4	7.9	8.3	7.8	7.7	5.5 - 8.5

3.9. รูปแบบการเติมอากาศที่เหมาะสม

เมื่อพิจารณารูปแบบการเติมอากาศจะเห็นได้ว่าทั้งการทดลองที่มีการใช้ครูดเอนไซม์ผงจากเชื้อเดี่ยว *Trichoderma reesei* และการใช้ครูดเอนไซม์ผงจากเชื้อผสมระหว่าง *Trichoderma reesei* และ *Saccharomyces cerevisiae* รูปแบบการเติมอากาศที่ดีที่สุดคือมีการเติมอากาศตลอด 24 ชั่วโมง ส่วนการพิจารณาปริมาณครูดเอนไซม์ที่เหมาะสมนั้นพบว่าสำหรับการใช้ครูดเอนไซม์ผงจากเชื้อเดี่ยว *Trichoderma reesei* ปริมาณครูดเอนไซม์ที่เหมาะสมจะเท่ากับ 180 กรัม ส่วนการใช้ครูดเอนไซม์ผงจากเชื้อผสมระหว่าง *Trichoderma reesei* และ *Saccharo-*

myces cerevisiae ปริมาณครูดเอนไซม์ที่เหมาะสมจะเท่ากับ 360 กรัม ซึ่งแตกต่างกัน โดยจากการศึกษานั้นอาจเกิดจากปริมาณของครูดเอนไซม์ที่น้อยเกินไป จึงทำให้ผลการทดลองที่ออกมานั้นไม่ชัดเจนมากนัก อย่างไรก็ตามถ้าพิจารณาทั้งรูปแบบการเติมอากาศและปริมาณครูดเอนไซม์และชนิดของครูดเอนไซม์ที่มีผลการทดลองดีที่สุด คือ ถังที่ 1 ซึ่งมีวัสดุหมักร่วมกับครูดเอนไซม์ผงจากเชื้อเดี่ยวโดยมีการเติมอากาศ 24 ชั่วโมง เติมครูดเอนไซม์ 180 กรัม เนื่องจากเชื้อเดี่ยวซึ่งอยู่ในตระกูลราและเชื้อผสมซึ่งได้แก่เชื้อราผสมกับยีสต์นั้น มีความสามารถในการย่อยสลายพวกกลีกินิน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส โดยใช้กระบวนการทางเอนไซม์

ทำการย่อยสลายภายนอกเซลล์โดยใช้ระบบระบบไฮโดรไลติกซึ่งผลิตไฮโดรเจนออกมาเป็นกระบวนการในการย่อยสลายโพลีแซคคาไรด์และกระบวนการย่อยสลายของลิกนิน [16] ทำให้สามารถเร่งกระบวนการย่อยสลายและลดระยะเวลาการเป็นปุ๋ยหมักได้ดี โดยเฉพาะวัสดุที่มาจากเศษพืช หย้า ไม้ หรือจำพวกขยะมูลฝอยจากชุมชน [17] เนื่องจากในกระบวนการหมักนั้นจะมีค่าความเป็นกรดต่ำมาก แต่ยีสต์สามารถเจริญเติบโตได้ดีในสภาพที่เป็นกรดสูงระหว่าง 4.0–4.5 ซึ่งยีสต์ส่วนใหญ่จะเติบโตไม่ดีในสภาพที่เป็นด่าง [18]

4. บทสรุปและข้อเสนอแนะ

ข้อสรุปและข้อเสนอแนะเพื่อการประยุกต์ใช้ถังหมักปุ๋ยนี้ในการเป็นต้นแบบในครัวเรือนแสดงดังนี้

1) ในการทดลองนี้มีการควบคุมอุณหภูมิ ความชื้น ความเป็นกรด-ด่าง ซึ่งในทุก ๆ การทดลองมีค่าอยู่ในช่วงควบคุม ยกเว้นอุณหภูมิที่ต่ำเกินไปอยู่ในช่วง Mesophilic เท่านั้น และระหว่างการทดลองได้ทำการตรวจสอบค่า C/N และ ฟอสฟอรัส ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า C/N มีค่าลดลงแต่ในบางถังอาจจะมีค่าสูงกว่า 20:1 ส่วนฟอสฟอรัสนั้นมีค่ามากกว่าร้อยละ 0.5 รวมถึงปุ๋ยหมักมีลักษณะการหมักที่สมบูรณ์และมีค่าคุณลักษณะที่ดี การหมักที่เติมครูดเอนไซม์แบบเดี่ยวที่การเติมอากาศ 24 ชม. ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุด

2) ควรมีการปรับปรุงการระบายน้ำเสียที่ก้นถังหมักปุ๋ยให้ดีขึ้นและเนื่องจากการศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาให้ได้ต้นแบบของถังหมัก ในการทดลองครั้งต่อไปจึงควรจัดหาอุปกรณ์การเติมอากาศที่มีความทนทานและมีกำลังที่มากกว่าเพื่อยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ รวมถึงปรับปรุงการกระจายอากาศให้ทั่วถึงกันถึง

3) จากการทดลองใช้ถังหมักที่เป็นการเติมอากาศจะเห็นว่าสามารถทำปุ๋ยหมักในระยะเวลาประมาณไม่เกิน 2 เดือนและได้ปุ๋ยซึ่งมีคุณภาพ โดยในการเติมครูดเอนไซม์จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการหมักให้ดียิ่งขึ้น ทั้งนี้อาจควรเพิ่มปริมาณของครูดเอนไซม์ลงไปในส่วนที่มากขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่ได้ให้โอกาสและให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดินประจำปี 2557 ทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Pollution Control Department. Action Plan “Thailand Free of Garbage” according to the “public” guidelines for a year (2016-2017) [Internet]. 2016 [cited 2017 Jan 1]: [about 1 p.]. Available from: <http://infofile.pcd.go.th/waste/ThaiPlans%20without%20Waste.pdf?CFID=2929130&CFTOKEN=49324635> (in Thai)
- [2] Srisatit T. Municipal Solid Waste Management Engineering. 1st ed. Bangkok: The Engineering Institute of Thailand under H.M. The King's Patronage; 2015. (in Thai)
- [3] Siwarasak P, Yaowalak T, Jutarat N, Nirun J, Tom M. Crude Enzyme Powder Utilization for Ethanol Fermentation from Pineapple Skins. 7th Conference On Energy Network of Thailand. 2011 May 3-5:13-8. (in Thai)
- [4] Siwarasak P, Pajantagate P, Prasertlertart K. Use of Trichoderma reesei RT-P1 Crude Enzyme Power for Ethanol Fermentation of Sweet Sorghum Fresh Stalks. Bioresource Technology. 2012; 107:200-4.

- [5] Zhang L, Sun X. Effects of Earthworm Casts and Zeolite on the Two-Stage Composting of Green Waste. *Waste Management*. 2015;39: 119-29.
- [6] Karnchanawang S, Suriyanon N. 2011. Household Organic Waste Composting using Bins with different types of passive aeration. *Resource, Conservation and Recycling*. 2011;55: 548-53.
- [7] Saricheewin K, Rangseesuriyachai T. Composting of Organic Waste Using Aeration Tank. *Journal of Engineering, RMUTT*. 2016;14(1):25-34. (in Thai)
- [8] Department of Agriculture. Manual of Organic Fertilizer Analysis. 1st ed. Bangkok: Department of Agriculture; 2008. (in Thai)
- [9] Manu, M.K., Kumar, R., Garg, A.. 2017. Performance Assessment of Improved Composting System for Food Waste with Varying Aeration and Use of Microbial Inoculum. *Bioresource Technology*. 2017;234: 167-77.
- [10] Osotsa Y, Wongmaneeroj A, Hongprayun C. Fertilizer for Sustainable Agriculture. 2nd ed. Bangkok: Kasetsart University Press; 2011. (in Thai)
- [11] Gaur A.C., Sadasivan K.U., Mathur R.S., Magu S.P. Role of Mesophilic Fungi in Composting. *Agricultural Waste*. 1982; 4:453-60.
- [12] Martins O., Dewes T. Loss of nitrogenous compounds during composting of animal wastes. *Bioresource Technology*. 1992;42: 103-11.
- [13] Land Development Department. Operational Guide: Plant, Fertilizer and Soil Analysis Processes [Internet]. 2010 [cited 2017 Sep 16]: [about 1 p.]. Available from: <http://www.ddd.go.th/PMQA/2553/Manual/OSD-07.pdf> (in Thai)
- [14] Chanchampee P. Thermophilic Composting of Food Waste and Farm Residue by Rotary Drum [dissertation]. Chiangmai: Chiangmai University; 1998. (in Thai)
- [15] Sánchez C. Lignocellulosic Residues: Biodegradation and Bioconversion by Fungi. *Biotechnology Advance*. 2009; 27:185-94.
- [16] Mohammad N., Zahaagir Alam Md., Nassereldeen A.K., Amimul, A. Effective Composting of Oil Palm Industrial Waste by Filamentous: A review. *Resources Conservation and Recycling*. 2012;58:69-78.
- [17] Zhisheng Y, Hongxun, Z. Ethanol Fermentation of Acid-Hydrolyzed Cellulosic Pyrolysate with *Saccharomyces cerevisiae*. *Bioresource Technology*. 2004;93: 199-204.
- [18] Rui G., Guoxue L., Tao J., and et al. Effect of aeration rate, C/N ratio and moisture content on the stability and maturity of compost. *Bioresource Technology*. 2012;112:171-78.

สมบัติของเส้นด้ายฝ้ายที่ลงแป้งด้วยแป้งสาคุ

Properties of Cotton Yarn Sized with Sago Starch

บิณฑสันต์ ขวัญข้าว^{1*} วิชดา จันทร์ประภานนท์² และศิริวรรณ ศรีธรรมรงค์³

Bintasan Kwankhao^{1*} Wichuda Chanprapanon² Siriwan Srithummarong³

bintasan.k@en.rmutt.ac.th^{1*}, wichuda.c@en.rmutt.ac.th², siriwun_s@rmutt.ac.th³

^{1*} ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

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

² ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

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

³ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

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

Received: March 22, 2018

Revised: June 25, 2018

Accepted: August 20, 2018

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้และภาวะที่เหมาะสมในการใช้แป้งสาคุ เพื่อลงแป้งเส้นด้ายฝ้าย รวมทั้งเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพ ของเส้นด้ายฝ้ายที่ลงแป้งด้วยแป้งสาคุ แป้งมันสำปะหลัง และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ โดยนำเส้นด้ายฝ้ายเบอร์ 32 Ne มาลงแป้งโดยใช้ 1) แป้งสาคุ 2) แป้งสาคุผสมแป้งพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 3) แป้งมันสำปะหลัง 4) แป้งมันสำปะหลังผสมแป้งพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 5) แป้งพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ โดยใช้น้ำหนักสารลงแป้งต่อน้ำ 500 มิลลิลิตร เส้นด้ายฝ้าย 120 หลาเพื่อลงแป้งแต่ละสูตร ทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพของเส้นด้ายทั้งก่อนและหลังลงแป้ง ผลการวิจัย พบว่าการลงแป้งด้วยแป้งสาคุ 50 กรัม และแป้งสาคุ 25 กรัม ผสมแป้งพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 25 กรัม ใช้เวลาในการกวนแป้ง นานที่สุด มีค่าร้อยละความเข้มข้นสูงสุด มีร้อยละแป้งติดไปกับเส้นด้ายมากที่สุด และเส้นด้ายมีสมบัติความคงทนต่อการขัดถู ดีที่สุด การลงแป้งด้วยแป้งสาคุ 20 กรัม มีสมบัติการยืดตัวก่อนขาดของเส้นด้ายสูงที่สุด การลงแป้งด้วยแป้งสาคุ 50 กรัม มีสมบัติ การเก็บขนของเส้นด้ายดีที่สุด และเส้นด้ายที่ลงแป้งสาคุ 25 กรัม ผสมแป้งพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 25 กรัม มีความแข็งแรงต่อ แรงดึงของเส้นด้ายสูงที่สุด

คำสำคัญ: เส้นด้ายฝ้าย การลงแป้งเส้นด้าย แป้งสาคุ

Abstract

The objective of this research was to study possibilities and appropriate conditions of sizing cotton yarn with sago starch. To attain this objective, physical properties of cotton yarn sized with different ratios of sago starch, tapioca starch, and poly (vinyl alcohol) (PVA) were compared. In this study, various size were prepared, consisting of : 1) sago starch; 2) a mixture of sago starch and PVA; 3) tapioca starch; 4) a

mixture of tapioca starch and PVA; and 5) PVA in 500 ml of water for sizing 120 yards of cotton yarn (32Ne). The physical properties of the cotton yarn were tested both before and after sizing with each sizing agent. According to the study, it was found that 50 g of sago starch and the mixture of 25 g of sago starch and 25 g of PVA needed the longest stirring time, the highest concentration of sizing agent and provide the highest percentage of sized pick up on cotton yarn, and the highest abrasion resistance of yarn. The cotton yarn sized with 20 g of sago starch showed the highest elongation at break. The lowest value of hairiness was shown after sizing the cotton yarn with 50 g of sago starch. Moreover, the cotton yarn sized with the mixture of 25 g of sago starch and 25 g of PVA exhibited the highest tensile strength.

Keywords: cotton yarn, yarn sizing, sago starch.

1. บทนำ

ต้นสาकुที่พบโดยส่วนใหญ่ในประเทศไทยเป็นชนิด *Metroxylon sagus* Rottb. ซึ่งชนิดดังกล่าวขึ้นกระจายอยู่ในภาคใต้ โดยกระจายตั้งแต่อำเภอจังหวัดชุมพร นครศรีธรรมราช ตรัง พัทลุง และสงขลา เป็นต้น สำหรับการแปรรูปหรือใช้ประโยชน์จากต้นสาकु จะทำโดย สกัดเอาแป้งจากส่วนของลำต้น โดยเลือกต้นที่กำลังออกดอก หรือต้นที่มีความสมบูรณ์ ซึ่งส่วนใหญ่มักจะเลือกต้นสาकुที่มีอายุมาก เนื่องจากต้นสาकु ยิ่งอายุมาก ใส้ในลำต้นก็จะยิ่งมีแป้งเพิ่มขึ้น และตัดแบ่งเป็นท่อนๆ แขน้ำไว้ เพื่อรักษาคุณภาพแป้งให้อยู่ในสภาพที่ดีได้นานขึ้น และจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงจากปฏิกิริยาเคมี หลังจากนั้นทำการตากเปลือกนอกออก เลือกเอาแต่ใส้ในตอนกลาง ๆ ของลำต้นแล้วผ่าเป็นชิ้นเล็กๆ และนำไปดโดยใช้เครื่องมือบด จากนั้นนำไปผสมน้ำแล้วทำการแยกแป้งออกโดยการบด ปีบ และนำมากรองเอาแป้ง การใช้อุปกรณ์ในการกรองที่แตกต่างกันจะให้แป้งที่มีคุณภาพต่าง ๆ กัน จากนั้นนำแป้งที่แยกได้ มาตากแดดให้แห้ง ก็จะได้แป้งสาकु [1]

ยศวัต ตั้งฐานานุศักดิ์ ได้ศึกษาคุณลักษณะของเส้นด้ายที่ลงแป้งโดยใช้แป้งมันสำปะหลังดัดแปรแบบออกซิเดชัน ทำการทดลองโดยนำเส้นด้ายฝ้ายเบอร์ 40 Ne มาลงแป้งเส้นด้ายด้วยสูตรการลงแป้งที่มีเพียงแป้งดัดแปรแบบออกซิเดชัน 60 กรัม จากนั้นเพิ่มปริมาณแป้งดัดแปรแบบออกซิเดชันครั้งละ 20 กรัม ไปจนกระทั่งถึง 300 กรัม กำหนดให้ปริมาณน้ำคงที่เท่ากับ 1 ลิตร เป็นจำนวน 13 สูตร ทำการเปรียบเทียบผลการลงแป้งด้วยสารลงแป้งสูตรแป้งดัดแปรแบบออกซิเดชันกับสูตรแป้งดิบที่มีสารช่วย คือ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ อะคริลิก และสารหล่อลื่น ที่มีต่อสมบัติของเส้นด้ายและผืนผ้า โดยใช้สภาวะในการลงแป้งและการอบแห้งที่เหมือนกัน จากการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณแป้งดัดแปรแบบออกซิเดชันไปจนกระทั่งถึง 180 กรัม ต่อน้ำ 1 ลิตร สามารถที่จะทำให้เส้นด้ายมีสมบัติที่ดีเทียบเท่ากับสูตรแป้งดิบ สมบัติของผืนผ้าที่ทอมาจากเส้นด้ายยืนที่ผ่านการลงแป้งทั้ง 2 สูตร มีค่าที่ใกล้เคียงกัน ผืนผ้าที่ใช้เส้นด้ายยืนสูตรแป้งดัดแปรแบบออกซิเดชันอาจจะมีค่าที่ต่ำกว่าเพียงเล็กน้อย สามารถที่จะสรุปได้ว่า เส้นด้ายยืนที่ลงแป้ง

ด้วยแป้งดัดแปรแบบออกซิเดชันเพียงอย่างเดียว 180 กรัม ต่อ น้ำ 1 ลิตร สามารถที่จะนำมาใช้เพื่อทอเป็นผืนผ้าได้และมีสมบัติที่ดีไม่ด้อยไปกว่าการใช้เส้นด้ายยืกลงแป้งด้วยสูตรแป้งดิบที่มีสารช่วยคือ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ อะคริลิก และสารหล่อลื่น ซึ่ง น้ำแป้งมันสำปะหลังดัดแปรสามารถที่จะทำการบำบัดได้ง่าย เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และสามารถลดต้นทุนสารเคมีในกระบวนการลงแป้งเส้นด้ายยืกลงได้ [4]

วัชร จอมชัยและคณะ ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลเส้นด้ายฝ้ายด้วยสารลงแป้งชนิดต่างๆ เป็นการนำวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการลงแป้งเส้นด้ายในโรงทอได้แก่ แป้งมันสำปะหลัง พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ สารโซเดียมซัลเฟต มาทำการลงแป้งเส้นด้ายตามอัตราส่วนที่กำหนดเปอร์เซ็นต์ size pick up 10, 12 และ 14 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเส้นด้ายที่ทำการลงแป้งได้ใช้เส้นด้ายฝ้ายเบอร์ 28, 40 และ 45Ne จากนั้นนำเส้นด้ายไปทดสอบสมบัติเชิงกล เพื่อเปรียบเทียบในแต่ละสูตรว่าสูตรไหนที่ทำให้เส้นด้ายมีสมบัติเชิงกลดีที่สุด จากการทดลองพบว่าสูตรที่ 4 (ประกอบด้วยแป้งมันสำปะหลัง 85 กรัม ผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 25 กรัม ต่อน้ำ 1 ลิตร) และสูตรที่ 7 (ประกอบด้วยแป้งมันสำปะหลัง 110 กรัม ผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 20 กรัม ต่อน้ำ 1 ลิตร) สามารถทำให้เส้นด้ายมีความแข็งแรง (yarn strength) และการยืดตัว (elongation) สูงที่สุด ส่วนสารลงแป้งสูตรที่ 5 ทำให้เส้นด้ายคงทนต่อการขัดถูมากที่สุด (yarn abrasion) [5]

แป้งสาकुจะนิยมนำมาทำเป็นอาหาร ขนม อาหารสัตว์ แป้งสาकुจะอยู่ในรูปของคาร์โบไฮเดรตที่บริสุทธิ์ที่สุดชนิดหนึ่งที่ย่อยง่าย และมีความเหนียวมากเมื่อโดนน้ำหรือต้มที่อุณหภูมิสูงจะไม่เหลวเป็นแป้ง

เปียกง่าย ๆ เหมือนแป้งมัน แป้งสาकुคงตัวได้นานกว่าแป้งอื่นๆ ดังนั้นแป้งสาकुจึงเป็นที่นิยมกว่าแป้งชนิดอื่นๆ [2-3]

การสาไย (carding) เป็นหัวใจของการปั่นด้าย การลงแป้งก็มีฐานะเดียวกับการสาไยเมื่อเราพูดถึงการทอผ้า ในระหว่างการทอผ้านั้นเส้นด้ายยืกลงจะต้องรับแรงกระทำใน 2 ลักษณะคือ แรงดึงเส้นด้ายอันเนื่องมาจากความตึงของการเปิด-ปิดตะกอ การกระทบหน้าผ้าและแรงที่เกิดจากการเสียดสีจากตะกอ, ฟันหรี, แผ่นเบรก และการขัดสีระหว่างเส้นด้ายยืกลงด้วยกันเอง ด้วยแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นนี้ยังมีมากขึ้นอีกเมื่อทอผ้าเนื้อแน่น และใช้เครื่องทอผ้าสมัยใหม่ที่มีอัตราเร็ว ดังนั้นเพื่อป้องกันมิให้เส้นด้ายยืกลงสึกหรอหรือขาดบ่อย ในขณะที่ทอผ้าเนื่องจากทนแรงดึงไม่ไหวจึงจำต้องมีการลงแป้งเส้นด้ายยืกลง ซึ่งการลงแป้งเส้นด้ายยืกลงเป็นหัวใจสำคัญที่สุดของการทอผ้า เพราะปริมาณและคุณภาพของผ้าที่ทอได้ขึ้นอยู่กับสมบัติ และคุณลักษณะของเส้นด้ายที่นำมาทอซึ่งจะเกี่ยวโยงประสิทธิภาพของเครื่องทอและการเลือกใช้สารลงแป้งที่เหมาะสมกับงาน ในการลงแป้งนี้ด้ายยืกลงในบีม จะถูกดึงคล้อยออกเพื่อลงแป้งและทำให้แห้ง จากนั้นก็จะม้วนด้ายใหญ่ขนาดที่ใช้กับเครื่องทอ [6]

ปัจจุบันนี้โรงงานสามารถผลิตเส้นด้ายยืกลงเพื่อใช้ในการทอผ้าได้หลายชนิด เส้นด้ายยืกลงทุกชนิดก่อนที่จะนำไปทอจะต้องลงแป้งก่อนทั้งนั้น เส้นด้ายยืลงผสมระหว่างยีสั่งเคราะห์ชนิดต่างๆ และใยธรรมชาติ จะทำให้การลงแป้งยากขึ้นไปอีก เพราะเส้นใยที่ผสมกันอยู่นั้นมีสมบัติแตกต่างกัน บางโรงงานที่ทอผ้าด้วยเส้นด้ายยืลงสั่งเคราะห์ล้วนๆ สามารถลงแป้งเส้นด้ายยืลงระหว่างการม้วนด้ายจากลูกด้าย (package) มาเข้า

sectional beam เลย์ทั้งนี้เพื่อขจัดปัญหาการเกิดไฟฟ้าสถิตระหว่างเส้นด้ายย่นเข้าม้วนด้ายใหญ่ การถ่ายเส้นด้ายย่นจาก sectional beam เข้า loom beam และลงแป่งไปด้วยพร้อมๆ กันนี้เรียกว่า slashing และเครื่องจักรที่ใช้ในการนี้เรียกว่า slasher [7]

จากสมบัติของแป่งสาคุในข้างต้น ทางคณะผู้วิจัย จึงมีแนวความคิดที่จะนำแป่งสาคุมาใช้ในการสิ่งทอ โดยนำแป่งสาคุมาใช้ทดลองลงแป่งเส้นด้ายฝ้าย เพื่อเพิ่มทางเลือกสำหรับแป่งที่ใช้ในกระบวนการลงแป่งและเปรียบเทียบสมบัติของเส้นด้ายที่ลงแป่งสาคุกับเส้นด้ายที่ลงแป่งด้วยแป่งมันสำปะหลังและแป่งที่ใช้ในอุตสาหกรรม อีกทั้งเป็นการเพิ่มมูลค่าให้แป่งสาคุอีกด้วย

2. วิธีการทดลอง

เตรียมสารลงแป่งด้ายย่นสูตรต่างๆ เพื่อหาสูตรที่เหมาะสมในการลงแป่งด้ายย่น หลังจากนั้นนำเส้นด้ายฝ้ายเบอร์ 32 Ne มาลงแป่งสาคุที่ไม่ใช้สารช่วยหรือสารหล่อลื่นด้วยเครื่องลงแป่งเส้นด้ายขนาดทดลอง ยี่ห้อ Jiang Yin Tong Yuan Textile รุ่น GA392 Electronic Single Yarn Sizing Machine โดยใช้อัตราส่วนของสารลงแป่งที่ใช้ในการทดลอง รายละเอียดตามตารางที่ 1 แป่งสาคุตั้งแต่ 5 กรัม (SK5) ถึง 50 กรัม (SK50) แป่งสาคุผสมแป่งพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ใช้ในอุตสาหกรรม (PVA) ในอัตราส่วน 1:1 น้ำหนักรวมตั้งแต่ 5 กรัม (SKP5) ถึง 50 กรัม (SKP50) แป่งมันสำปะหลังที่ไม่ใช้สารหล่อลื่น 30 กรัม (T30) แป่งมันสำปะหลังผสมกับแป่งพอลิไวนิล

แอลกอฮอล์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมในอัตราส่วน 1:1 น้ำหนักรวม 30 กรัม (TP30) และแป่งพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม 30 กรัม (WF) โดยในการลงแป่งจะควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในอ่างลงแป่งที่ 80–90 องศาเซลเซียสและเมื่อเส้นด้ายผ่านการลงแป่งแล้ว เส้นด้ายจะถูกอบด้วยเครื่องอบความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นด้ายทั้งก่อนและหลังลงแป่งด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) รุ่น JSM-6510 บริษัท JEOL (Japan) เพื่อดูลักษณะพื้นผิวของเส้นด้ายการเก็บขนบนเส้นด้าย ทั้งนี้เส้นด้ายที่ผ่านการลงแป่งจะถูกทดสอบความคงทนต่อการขัดถูของเส้นด้าย โดยทดสอบตามมาตรฐาน JIS L 1095-2010 โดยใช้เครื่อง Abrasion Tester ยี่ห้อ Asano รวมถึงการทดสอบความแข็งแรงและการยืดตัวของเส้นด้ายทั้งก่อนและหลังลงแป่งโดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 2256-2010 โดยใช้เครื่อง Tensile Strength Tester ยี่ห้อ Instron รุ่น 5569 นอกจากนี้ได้วิเคราะห์หาร้อยละของแป่งที่ติดบนเส้นด้ายตามสูตร

$$\%size\ pick\ up = \%SC \times WPU \quad (1)$$

กำหนดให้

$$\%size\ pick\ up = \text{ร้อยละของแป่งที่ติดบนเส้นด้าย}$$

$$WPU\ (Wet\ pick\ up) = \text{อัตราส่วนแป่งติดไปกับเส้นด้ายเมื่อยังไม่อบแห้ง}$$

$$\%SC\ (\%size\ concentration) = \text{ร้อยละความเข้มข้นในเนื้อสารในน้ำแป่ง}$$

ตารางที่ 1 อัตราส่วนของสารลงแป้งที่ใช้ในการทดลอง
หน่วยเป็นกรัม (ต่อน้ำ 500 มิลลิลิตร)

สูตร	แป้งมัน สำปะหลัง	แป้งสาคู	พอลิไวนิล แอลกอฮอล์
WF			30
T30	30		
TP30	15		15
SK5		5	
SK10		10	
SK15		15	
SK20		20	
SK25		25	
SK30		30	
SK35		35	
SK40		40	
SK45		45	
SK50		50	
SKP5		2.5	2.5
SKP10		5	5
SKP15		7.5	7.5
SKP20		10	10
SKP25		12.5	12.5
SKP30		15	15
SKP35		17.5	17.5
SKP40		20	20
SKP45		22.5	22.5
SKP50		25	25

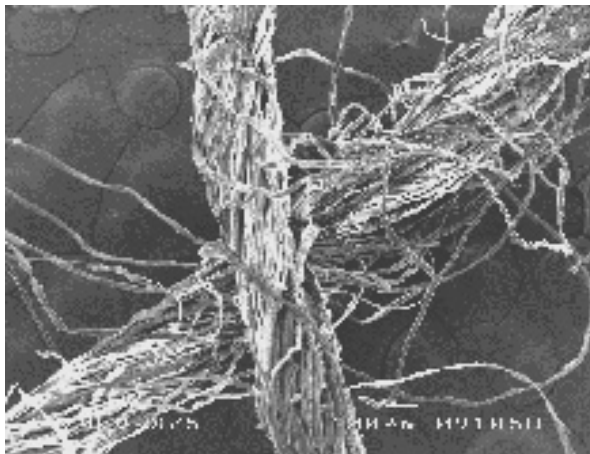
3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

จากการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้แป้ง
สาकुมาลงแป้งเส้นด้ายฝ้าย ได้ทดลองลงแป้งเส้นด้าย
ตามสูตรที่กำหนดและได้ทดสอบสมบัติของเส้นด้าย
ในด้านความคงทนต่อการขัดถู ความแข็งแรงและการ
ยืดตัวรวมถึงการบันทึกสัณฐานวิทยาของเส้นด้ายที่
ผ่านการลงแป้งเพื่อดูการเกิดขนของเส้นด้ายที่ผ่าน
การลงแป้งเปรียบเทียบกับเส้นด้ายที่ไม่ผ่านการลงแป้ง
ผลการทดลองและผลการทดสอบเป็นดังนี้

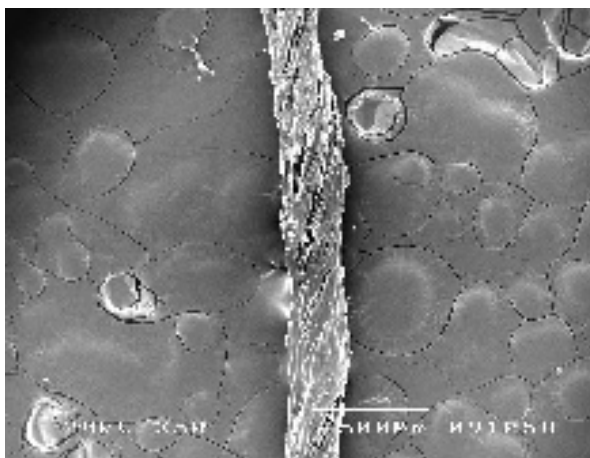
3.1 สัณฐานวิทยาของเส้นด้ายที่ผ่านการลงแป้ง

ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของเส้นด้าย
ด้วยเครื่อง SEM (scanning electron microscope)
เส้นด้ายก่อนลงแป้ง (รูปที่1) มีเส้นใยโผล่ออกจาก
ผิวเส้นด้ายเป็นจำนวนมาก เมื่อนำเส้นด้ายมาผ่านการ
ลงแป้งตามสูตรที่ทำการทดลอง พบว่าเส้นด้ายที่
ลงแป้งสาคู 10 กรัม และ 20 กรัม ยังมีเส้นใยโผล่ออก
จากเส้นด้ายมาก เนื่องจากมีร้อยละของแป้งที่ติดบน
เส้นด้ายเพียง 0.15 และ 0.23 ตามลำดับ แต่เส้นด้าย
ที่ลงแป้งสาคู 30 กรัม, 40 กรัม และ 50 กรัม จะมีค่า
ร้อยละของแป้งที่ติดบนเส้นด้าย 0.5 , 0.6 และ 0.75
ตามลำดับ เมื่อเส้นด้ายมีร้อยละของแป้งที่ติดบน
เส้นด้ายเพิ่มมากขึ้นจะทำให้เส้นใยโผล่ออกจากเส้น
ด้ายน้อยลง (รูปที่2) เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเส้นด้าย
ที่ลงแป้งสาคู 30 กรัม กับเส้นด้ายที่ลงแป้งมัน
สำปะหลัง 30 กรัม จะเห็นว่าเส้นด้ายที่ลงแป้งสาคู
30 กรัม มีปริมาณเส้นใยโผล่พื้นผิวเส้นด้ายน้อยกว่า
เนื่องจากแป้งสาคูมีอนุภาคที่เล็กกว่าแป้งมันสำปะหลัง
จึงเคลือบปิดผิวเส้นด้ายได้ดีกว่า และเมื่อศึกษา
เปรียบเทียบระหว่างเส้นด้ายที่ลงแป้งสาคู 15 กรัม
ผสมแป้งพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ใช้ในอุตสาหกรรม

15 กรัม เส้นด้ายที่ลงแป้งมันสำปะหลัง 15 กรัม ผสมแป้งพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ใช้ในอุตสาหกรรม 15 กรัม และเส้นด้ายที่ลงแป้งพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ใช้ในอุตสาหกรรม 30 กรัม จะเห็นได้ว่า เส้นด้ายที่ลงแป้งพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ใช้ในอุตสาหกรรม 30 กรัม มีเส้นใยโพลีพัมพื้นผิวเส้นด้ายน้อยที่สุด อย่างไรก็ตามพบว่า เส้นด้ายที่ลงแป้งสาคุ 50 กรัม มีอัตราส่วนแป้งติดเพิ่มมากขึ้นจะทำให้การเก็บเส้นใยในเส้นด้ายดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับสารลงแป้งชนิดอื่นที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 1 เส้นด้ายก่อนลงแป้ง (NZ)



รูปที่ 2 เส้นด้ายที่ลงแป้งสาคุ 50 กรัม (SK50)

3.2 ความคงทนต่อการขัดถูของเส้นด้าย

จากผลการทดสอบความคงทนต่อการขัดถูของเส้นด้ายในรูปที่ 3 พบว่าเส้นด้ายที่ลงแป้งด้วยแป้งสาคุที่มีความคงทนต่อการขัดถูมากที่สุด คือ เส้นด้ายที่ลงแป้งสาคุ 50 กรัม (SK50) มีค่าความคงทนต่อการขัดถูของเส้นด้ายเท่ากับ 4099 รอบการขัดถู เมื่อเปรียบเทียบเส้นด้ายที่ลงแป้งสาคุ (SK) และเส้นด้ายก่อนลงแป้ง (NZ) พบว่า เส้นด้ายที่ลงแป้งสาคุ ตั้งแต่ 5 กรัม ถึง 50 กรัม (SK5 ถึง SK50) มีความคงทนต่อการขัดถูของเส้นด้ายมากกว่า เนื่องจากเส้นด้ายก่อนการลงแป้งมีเส้นใยโพลีพัมพื้นผิวเส้นด้ายเป็นจำนวนมาก (ดังรูปที่ 1) เส้นด้ายจึงไม่ทนต่อการขัดถู เมื่อเปรียบเทียบการลงแป้งที่น้ำหนักแป้งเท่ากันระหว่างเส้นด้ายที่ลงแป้งสาคุ 30 กรัม (SK30) และเส้นด้ายที่ลงแป้งมันสำปะหลัง 30 กรัม (T30) พบว่า เส้นด้ายที่ลงแป้งสาคุ 30 กรัม (SK30) มีความคงทนต่อการขัดถูมากกว่า เส้นด้ายที่ลงแป้งสาคุผสมแป้งพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ใช้ในอุตสาหกรรม ตั้งแต่ 5 กรัม ถึง 50 กรัม (SKP5 ถึง SKP50) ในอัตราส่วน 1:1 พบว่า เส้นด้ายที่ลงแป้งสาคุ 25 กรัมผสมแป้งพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ใช้ในอุตสาหกรรม 25 กรัม (SKP50) มีความคงทนต่อการขัดถูของเส้นด้ายมากที่สุด 15,653 รอบการขัดถู เมื่อเปรียบเทียบระหว่างเส้นด้ายที่ลงแป้งสาคุ 15 กรัม ผสมแป้งพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ใช้ในอุตสาหกรรม 15 กรัม (SKP30) และเส้นด้ายที่ลงแป้งมันสำปะหลัง 15 กรัมผสมแป้งพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ใช้ในอุตสาหกรรม 15 กรัม (TP30) เส้นด้ายที่ลงแป้งสาคุ 15 กรัมผสมแป้งพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ใช้ในอุตสาหกรรม 15 กรัม (SKP30) มีความคงทนต่อการขัดถูมากกว่า และเมื่อเปรียบเทียบ

เส้นด้ายที่ลงแป้งพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ใช้ในอุตสาหกรรม 30 กรัม (WF) กับเส้นด้ายที่ลงแป้งสาคุ และเส้นด้ายที่ลงแป้งมันสำปะหลัง จะเห็นได้ว่าเส้นด้ายที่ลงแป้งด้วยแป้งพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ใช้ในอุตสาหกรรม 30 กรัม (WF) มีความคงทนต่อการขัดถูของเส้นด้ายมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 3 จะพบว่าความคงทนต่อการขัดถูของเส้นด้ายที่ลงแป้งพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 30 กรัม (WF) เส้นด้ายที่ลงแป้งสาคุ 22.5 กรัม ผสมแป้งพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 22.5 กรัม (SKP45) และเส้นด้ายที่ลงแป้งสาคุ 25 กรัม ผสมแป้งพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 25 กรัม (SKP50) มีรอบการขัดถูดีที่สุดใกล้เคียงกัน คือ 14889, 14353 และ 15653 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้แป้งสาคุ ผสมกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ในการลงแป้งเส้นด้ายทดแทนการใช้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ทั้งหมด เป็นการลดการใช้สารเคมีในโรงงานอุตสาหกรรมได้

3.3 ความแข็งแรงต่อนแรงดึงของเส้นด้าย

จากผลการทดสอบความแข็งแรงต่อนแรงดึงของเส้นด้ายในรูปที่ 4 พบว่าเส้นด้ายที่ลงแป้งสาคุที่มีความแข็งแรงต่อนแรงดึงมากที่สุด คือ เส้นด้ายที่ลงแป้งสาคุ 20 กรัม (SK20) มีค่าความแข็งแรงต่อนแรงดึงของเส้นด้ายเท่ากับ 531 cN เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นด้ายที่ลงแป้งสาคุ (SK) และเส้นด้ายก่อนลงแป้ง (NZ) พบว่าเส้นด้ายที่ลงแป้งสาคุ ตั้งแต่ 5 กรัม ถึง 50 กรัม (SK5 ถึง SK50) มีความแข็งแรงต่อนแรงดึงมากกว่าเปรียบเทียบกับระหว่าง เส้นด้ายที่ลงแป้งสาคุ 30 กรัม (SK30) และเส้นด้ายที่ลงแป้งมันสำปะหลัง 30 กรัม (T30) พบว่าเส้นด้ายที่ลงแป้งสาคุ 30 กรัม (SK30) มีความแข็งแรงต่อนแรงดึงมากกว่าเปรียบเทียบกับระหว่าง เส้นด้ายที่ลงแป้ง

สาคุผสมแป้งพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ใช้ในอุตสาหกรรม ตั้งแต่ 5 กรัม ถึง 50 กรัม (SKP5 ถึง SKP50) ในอัตราส่วน 1:1 พบว่าเส้นด้ายที่ลงแป้งสาคุ 25 กรัม ผสมแป้งพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ใช้ในอุตสาหกรรม 25 กรัม (SKP50) มีความแข็งแรงต่อนแรงดึงมากที่สุด 558 cN แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้แป้งสาคุ 20 กรัม (SK20) และ แป้งสาคุ 25 กรัม ผสมแป้งพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ใช้ในอุตสาหกรรม 25 กรัม (SKP50) สำหรับลงแป้งเส้นด้ายทดแทนการใช้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ทั้งหมด เป็นการลดการใช้สารเคมีในโรงงานอุตสาหกรรมได้

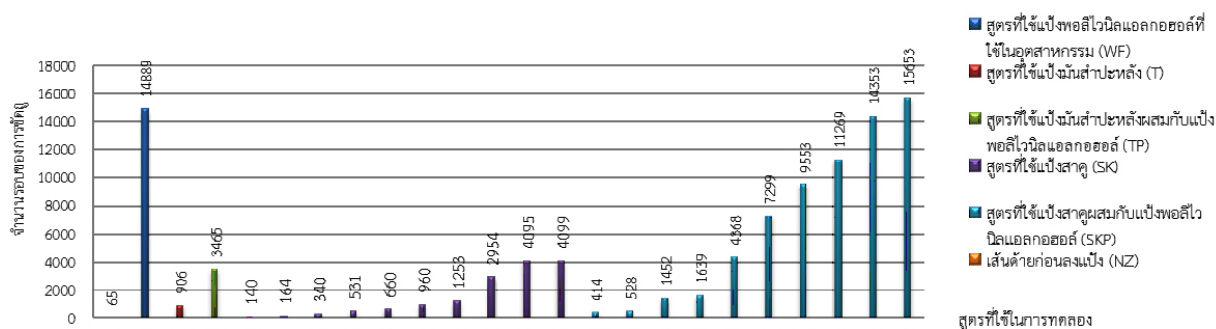
3.4 การยืดตัวก่อนขาดของเส้นด้าย

จากผลการทดสอบการยืดตัวก่อนขาดของเส้นด้าย ในรูปที่ 5 พบว่าเส้นด้ายที่ลงแป้งสาคุที่มีการยืดตัวก่อนขาดได้มากที่สุด คือ เส้นด้ายที่ลงแป้งสาคุ 20 กรัม (SK20) มีค่าการยืดตัวเท่ากับ 7.7 % เมื่อนำเส้นด้ายที่ลงแป้งสาคุ (SK) มาเปรียบเทียบกับเส้นด้ายก่อนลงแป้ง (NZ) พบว่า เส้นด้ายที่ลงแป้งสาคุ ตั้งแต่ 5 กรัมถึง 50กรัม (SK5 ถึง SK50) มีการยืดตัวก่อนขาดมากกว่าเส้นด้ายก่อนลงแป้ง เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นด้ายที่ลงแป้งสาคุ 30 กรัม (SK30) และเส้นด้ายที่ลงแป้งมันสำปะหลัง 30 กรัม (T30) พบว่า เส้นด้ายที่ลงแป้งสาคุ 30 กรัม (SK30) มีการยืดตัวก่อนขาดมากกว่า เส้นด้ายฝ้ายที่ผ่านการลงแป้งด้วยแป้งพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ใช้ในอุตสาหกรรม 30 กรัม (WF) มีการยืดตัวก่อนขาดมากที่สุด 7.2% แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้แป้งสาคุ 20 กรัม (SK20) ในการลงแป้งเส้นด้ายทดแทนการใช้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ทั้งหมด เป็นการลดการใช้สารเคมีในโรงงานอุตสาหกรรมได้

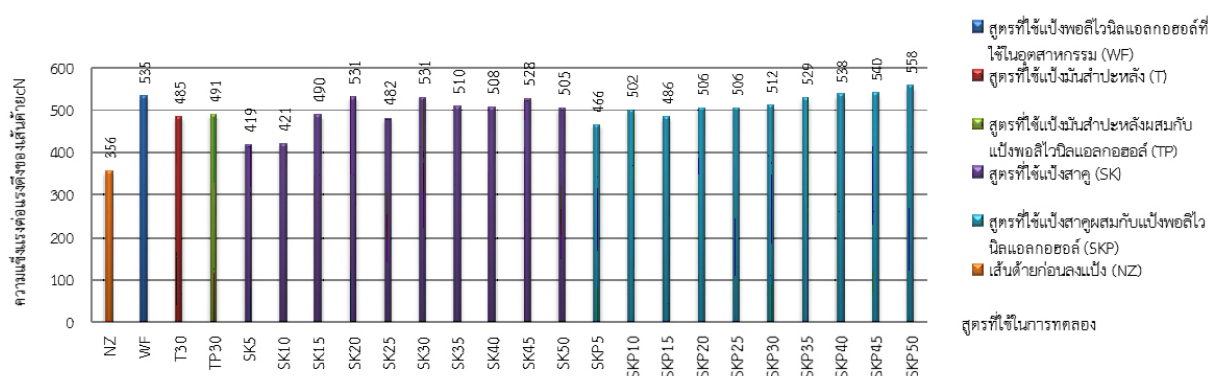
4. สรุป

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าแป้งสาคุมีความเหมาะสมที่จะถูกนำมาใช้ในกระบวนการลงแป้งด้วยฝ้ายยืนสำหรับงานทางด้านสิ่งทอได้ เนื่องจากสามารถช่วยเก็บขนบนเส้นด้ายได้ดีกว่าแป้งมันสำปะหลัง การลงแป้งเส้นด้ายด้วยแป้งสาคุ 50 กรัม (SK50) และแป้งสาคุ 25 กรัม ผสมแป้งพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 25 กรัม (SKP50) ใช้เวลาในการกวนแป้งนานที่สุด แป้งมีค่าร้อยละความเข้มข้นสูงที่สุด

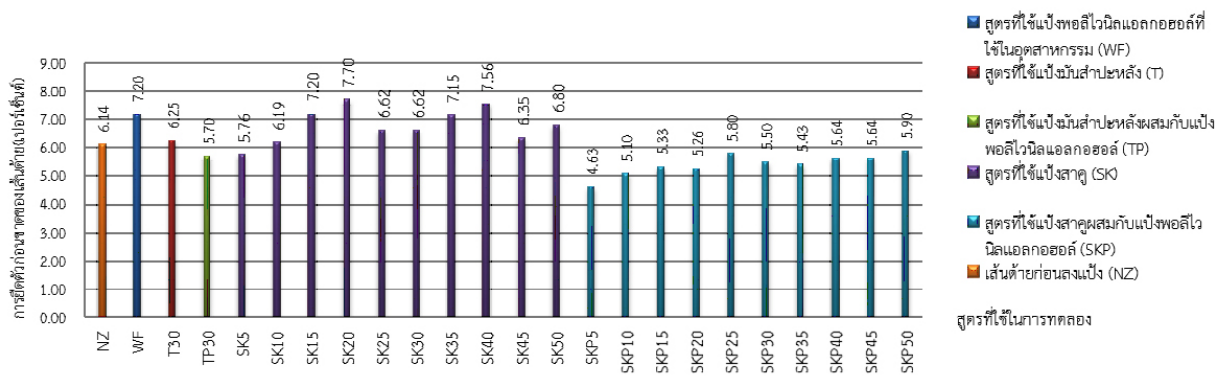
สารลงแป้งสูตรที่ทำให้มีอัตราส่วนการติดแป้งบนเส้นด้ายมากที่สุด และทำให้เส้นด้ายมีสมบัติความคงทนต่อการขัดถูมากที่สุด 15,653 รอบการขัดถู การลงแป้งด้วยแป้งสาคุ 20 กรัม (SK20) ช่วยเพิ่มสมบัติการยึดตัวก่อนขาดของเส้นด้ายได้สูงที่สุด 7.7% และเส้นด้ายที่ลงแป้งสาคุ 25 กรัม ผสมแป้งพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 25 กรัม (SKP50) มีความแข็งแรงต่อแรงดึงของเส้นด้ายสูงที่สุด 558 cN



รูปที่ 3 จำนวนรอบการขัดถูของเส้นด้ายลงแป้งต่างๆ และสูตรต่างๆ



รูปที่ 4 ความแข็งแรงต่อแรงดึงของเส้นด้ายลงแป้งต่างๆ และสูตรต่างๆ



รูปที่ 5 เปอร์เซ็นต์การยึดตัวก่อนขนาดของเส้นด้ายลงแป้งต่างๆ และสูตรต่างๆ

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ ภายใต้สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาและงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์ทางคณะผู้วิจัยต้องขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ห้องปฏิบัติการลงแป้งเส้นด้าย รวมถึงห้องทดสอบทางสิ่งทอและสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ในการบันทึกสัญญาณวิทยาของเส้นด้าย

6. เอกสารอ้างอิง

[1] TonSago, [Internet].; 2014. [cited 2014 Aug 30]: Available from : [http:// www.kroobannok.com/427](http://www.kroobannok.com/427) (in Thai)

[2] Kan Tam Pangsago, [Internet].; 2014.

[cited 2014 Aug 30]: Available from : http://www.m-culture.in.th/moc_new/album/105165 (in Thai)

[3] Pangmansampalhang, [Internet].; 2014.

[cited 2014 Aug 30]: Available from: <http://th.wikipedia.org/wiki/Pangmansampalhang> (in Thai)

[4] Yosawat Tangtananusak. A Study on The Characteristics of Cotton Yarn Sized with Oxidized Starch [dissertation]. Rajamangala University of Technology Thanyaburi; 2009 (in Thai)

[5] Watchara Jomchai. A Study Mechanical Properties of Cotton Yarn Sized with Various Starch[thesis]. Rajamangala University of Technology Thanyaburi; 2012 (in Thai)

- [6] Chanwit Prombot. A Study suitable for sizing Cotton Yarn to increase Efficiency of Weaving [thesis]. Rajamangala University of Technology Thanyaburi; 2008 (in Thai)
- [7] Sompop Narapiromanan, Lecture Notes for Weaving Preparation Subject Rajamangala University of Technology Thanyaburi; 2013 (in Thai)

กลไกการเพิ่มประสิทธิภาพของเลเซอร์สแกนเนอร์ที่ใช้สร้างพื้นผิวในสามมิติ

Performance Enhancement Mechanism of Laser Scanner for 3D Surface Reconstruction

ธนพงษ์ อุษุพันธ์^{1*} และ ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์²

Thanapong Usupan^{1*} Pradya Prempraneerach²

thanapong_u@mail.rmutt.ac.th^{1*}, pradya.p@en.rmutt.ac.th²

^{1*} ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

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

² ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

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

Received: December 1, 2017

Revised: January 19, 2018

Accepted: January 30, 2018

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอกลไกการเพิ่มประสิทธิภาพของเลเซอร์สแกนเนอร์ที่ใช้สร้างพื้นผิวในสามมิติ ในการออกแบบและพัฒนาระบบชุดกลไกการสแกนพื้นผิวสามมิติ พร้อมกับระบบควบคุมรักษาระนาบการเอียงซ้าย-ขวา และควบคุมความเร็วในการก้ม-เงยอย่างสม่ำเสมอ จะถูกนำไปใช้ในการวัด/เก็บข้อมูลที่วัดได้จากเลเซอร์สแกนเนอร์ที่สามารถนำไปติดตั้งไว้บนเรือ ฉะนั้นการวัดตำแหน่งของวัตถุและลักษณะกายภาพของวัตถุจากข้อมูลกลุ่มจุดของเลเซอร์จะมีความถูกต้องและแม่นยำขึ้น ในขั้นตอนการออกแบบได้ทำการทดสอบระบบกลไกด้วยแบบจำลองทางกลศาสตร์ เพื่อคำนวณหาความยาวของแต่ละก้านโยงสำหรับกลไกการเชื่อมต่อแบบสี่ก้านโยง (four-bar linkage mechanism) เพื่อให้ได้มุมก้ม-เงย (pitch angle) ของเลเซอร์สแกนเนอร์รอบแกน y ในช่วง $\pm 16.5^\circ$ และ แบบจำลองทางพลศาสตร์จะช่วยคำนวณหาแรงบิดสูงสุดของมอเตอร์ในแต่ละแกนที่เหมาะสม ในขั้นที่สองจึงพัฒนาระบบควบคุมสองแบบด้วย Arduino ไมโครคอนโทรลเลอร์ 1) เพื่อช่วยรักษาลेเซอร์สแกนเนอร์ให้อยู่ในระนาบนวนอน โดยใช้ระบบควบคุมแบบพีไอดีสำหรับควบคุมมอเตอร์ดีซีตัวบน โดยใช้เอนโคเดอร์ในการป้องกันกลองศาการกลิ้ง (roll angle) รอบแกน x ที่ชี้ไปทางด้านหน้าของหัวเรือ 2) เพื่อให้ได้พื้นผิวข้อมูลกลุ่มจุดของเลเซอร์สแกนเนอร์ในแนวตั้งอย่างสม่ำเสมอจากการเคลื่อนที่แบบก้ม-เงย ของกลไกแบบสี่ก้านโยงที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ดีซีตัวล่าง ด้วยระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าที่ใช้องศาการก้ม-เงยจากเซนเซอร์วัดมุมเอียง ซึ่งจะช่วยให้ลดแรงโน้มถ่วงของโลก ในส่วนที่สามจะเป็นการสร้างพื้นผิวในสามมิติจากข้อมูลกลุ่มจุดที่วัดได้จากเลเซอร์สแกนเนอร์ในแนวรัศมี ซึ่งจะทำการประมวลผลในรูปแบบพื้นผิวแบบกลุ่มจุดสามมิติในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน แล้ววิเคราะห์ค่าความแม่นยำของพื้นผิวที่สร้างขึ้นโดยพิจารณาจากระยะทางในแนวนอนทางสถิติที่มีค่าอยู่ในช่วง ± 7 เซนติเมตร และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่น้อยกว่า 2.2 เซนติเมตร

คำสำคัญ: เลเซอร์สแกนเนอร์ กลไกการเชื่อมต่อแบบสี่ก้านโยง ระบบควบคุมแบบพีไอดี

ระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า พื้นผิวแบบกลุ่มจุดสามมิติ

Abstract

This research paper presents a performance enhancement mechanism of laser scanner for three-dimensional (3D) surface reconstruction. Design and development of a 3D vertical surface-scanning mechanism along with control systems for roll-motion stabilization and periodic pitch speed is used for measuring/collecting laser-scanner point cloud data, which can be installed on a surface vessel. As a result, accuracy and precision of object's position and physical characteristics measurement from laser cloud points can be improved.

In a designing phase, testing with kinematics and dynamics models helps computing for link's length of a four-bar linkage mechanism such that a pitch angle of $\pm 16.5^\circ$ around y-axis for the laser scanner is obtained. Derived dynamic model of this mechanism assists in calculating proper maximum torque of motors for each axis. In the second phase, two control systems are developed within Arduino microcontroller 1) for laser-scanner roll-motion stabilizing using a PID control system with the top DC motor's encoder feedback, and 2) for reconstructing a smooth vertical surface from laser cloud points during a pitching motion of the four-bar linkage mechanism, driven by bottom DC motor, using a feed-forward control system with the pitching angle from Inertial Measurement Unit for a gravity compensation. In the third phase, the 3D vertical reconstructed surface from laser cloud points, measured along a radial direction, is processed as a 3D point-cloud surface in a Cartesian coordinate system. A statistically analysis of reconstructed surface precision along the horizontal direction is within ± 7 centimeter with a standard deviation less than 2.2 centimeter.

Keywords: laser scanner, four-bar linkage mechanism, PID control system, feed-forward control system, 3D point-cloud surface

1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากสภาพอากาศของโลกที่เปลี่ยนแปลงไป ภัยพิบัติในรูปแบบต่างๆ มีแนวโน้มเพิ่มสูงมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุทกภัยที่เกิดจากมรสุมและพายุฝน และวาตภัยที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องในประเทศไทย มาโดยตลอด ดังนั้นหน่วยงานต่างๆ ได้เล็งเห็นความสำคัญและเร่งดำเนินการเพื่อหามาตรการป้องกันให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยหนึ่งในวิธีการเตรียมความพร้อมรับมือกับอุทกภัย คือ การสำรวจเพื่อหยั่งความลึก และหาหน้าตัดตามขวางและปริมาตรความจุของแม่น้ำลำคลอง อ่างเก็บน้ำ ฝาย ทั่วประเทศ เพื่อให้ได้ข้อมูล ณ สถานะปัจจุบันในการจัดการและวางแผนการรองรับและระบายน้ำ ในการเก็บข้อมูลทางอุทกศาสตร์จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์เก็บข้อมูลที่ถูกต้องตั้งไว้บนเรือ ได้แก่ เลเซอร์สแกนเนอร์ (Laser Scanner) ที่นำมาใช้วัดระดับความสูงขอบตลิ่ง หรือสภาพแวดล้อมริมฝั่งน้ำ ที่พัฒนาโดย P. Prempraneerach และคณะ [1] โดยข้อมูลที่วัดได้จากเลเซอร์สแกนเนอร์ที่ติดตั้งบนเรื่อนั้นยังคงมีข้อจำกัดของข้อมูลจากเลเซอร์สแกนเนอร์ที่เก็บได้ในแนวตั้ง เมื่อเรือปะทะกับคลื่นลมจะทำให้ข้อมูลที่วัดได้เอียงไป ทำให้ข้อมูลอาจขาดหายไปบางส่วน และความแม่นยำของข้อมูลนั้นยังขึ้นกับความแม่นยำของเซนเซอร์จีพีเอสในการระบุตำแหน่งอีกด้วย

ในงานวิจัยของ Thomas J. Pastore และคณะ [2] ได้พัฒนาเรือลาดตระเวนผิวน้ำอัตโนมัติที่ติดตั้งเลเซอร์สแกนเนอร์สำหรับสำรวจหรือตรวจจับวัตถุที่เข้ามาใกล้ชายฝั่งและท่าเรือ ซึ่งการประมวลผลการควบคุมการเคลื่อนที่ด้วย MOOS-IvP suite ที่เป็นซอฟต์แวร์แบบเปิด แต่จะมีการโคลงของเรือระหว่างการปฏิบัติการซึ่งจะทำให้ข้อมูลจากเลเซอร์ในระนาบสองมิตินั้นไม่ได้ขนานกับระนาบแนวนอนตลอดเวลา และอาจทำให้ไม่สามารถระบุตำแหน่งของวัตถุที่ตรวจพบได้อย่างแน่ชัด ถ้าสามารถลดปัญหาการโคลงของข้อมูลที่เก็บได้จากเรือและสามารถจัดเก็บข้อมูลจากเลเซอร์สแกนเนอร์ในรูปแบบ 3D ได้ไปพร้อมกัน จะทำให้มีประสิทธิภาพในการบ่งบอกลักษณะของวัตถุจากข้อมูลที่เก็บได้เพิ่มมากขึ้น ในงานวิจัยของ A. Battistel และคณะ [3] ได้พัฒนาและสร้างระบบรักษาเสถียรภาพระบบตรวจจับภาพโดยใช้เซนเซอร์ไจโรแบบสองแกน (Dual-axis gyros) ที่ประยุกต์ใช้การควบคุมแบบพีไอดี (PID) ซึ่งจะช่วยลดการบิดเบี้ยวของข้อมูลภาพที่เกิดจากการเคลื่อนที่และในงานวิจัยของ L. Hongkai และคณะ [4] ได้นำเอาเลเซอร์สแกนเนอร์จำนวน 6 ตัว มาติดตั้งไว้บนรถเพื่อเก็บข้อมูลและประมวลผลข้อมูลจากเลเซอร์สแกนเนอร์ของสภาพแวดล้อมในรูปแบบ 3D ได้ แต่การใช้เลเซอร์หลายตัวนั้นต้องใช้งบประมาณสูงและการ

ประมวลผลข้อมูลที่เอื่อนั้นทำให้การคำนวณซ้ำหรือจำเป็นต้องใช้คอมพิวเตอร์ประสิทธิภาพสูงตามไปด้วย ซึ่งถ้าสามารถพัฒนากลไกที่จะช่วยให้เลเซอร์เพียงตัวเดียวสามารถเก็บข้อมูลได้ประสิทธิภาพดีกว่าข้อมูลในระนาบสองมิติแบบปกติก็จะลดงบประมาณและประมวลผลสภาพแวดล้อมได้ไวขึ้น

จากปัญหาข้างต้นและงานวิจัยที่ผ่านมาทำให้ผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะสร้างกลไกการก้ม-เงย ของเลเซอร์สแกนเนอร์ที่จะเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจวัดวัตถุเพื่อให้ได้ข้อมูลแบบสามมิติ พร้อมระบบรักษาเสถียรภาพของข้อมูลที่ได้วัดได้ในระนาบแนวนอนสำหรับติดตั้งบนเรือขึ้น โดยจะกล่าวถึงทฤษฎีที่ใช้ในการคำนวณออกแบบระบบกลไกและการเลือกใช้อุปกรณ์สำหรับระบบที่พัฒนาขึ้นในหัวข้อ 2 จะกล่าวถึงทฤษฎีที่ใช้ในการคำนวณออกแบบระบบกลไกและการเลือกใช้อุปกรณ์สำหรับระบบที่พัฒนาขึ้นในหัวข้อที่ 3 และจะแสดงผลการเก็บข้อมูลและประมวลผลข้อมูลจากเลเซอร์เพื่อสร้างเป็นพื้นผิวสามมิติและวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดของข้อมูลอีกด้วย ในหัวข้อที่ 4

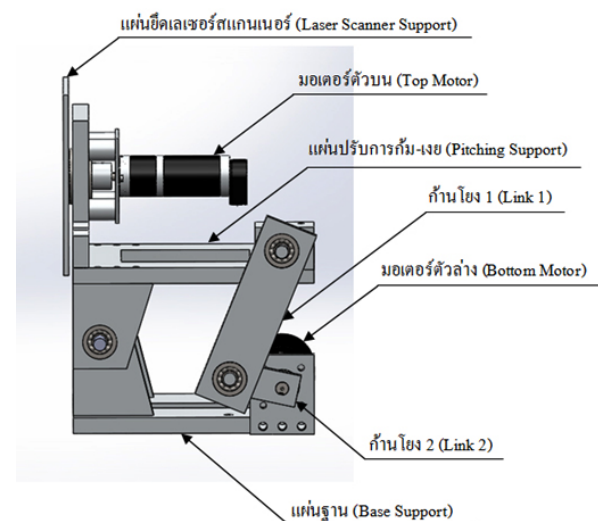
2. ทฤษฎีและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เพื่อให้เลเซอร์สแกนเนอร์สามารถเก็บข้อมูลในระนาบแนวตั้งได้ จึงได้ออกแบบและพัฒนากลไกที่เพิ่มองศาการก้ม-เงย ของเลเซอร์สแกนเนอร์ให้หมุนรอบแกน y พร้อมกันกับกลไกการรักษาองศาการเอียงซ้าย-ขวา ของเลเซอร์สแกนเนอร์รอบแกน x เพื่อให้ข้อมูลระยะทางของวัตถุอยู่ในระนาบแนวนอนเสมอไม่ว่าจะมีแรงภายนอกมากระทำหรือมีการโคลงของฐานของชุดกลไกที่จะนำไปติดตั้งบนเรือ ดังนั้นจะกล่าวถึงการออกแบบและทฤษฎีที่นำมาใช้ในการคำนวณทั้งทางจลศาสตร์และพลศาสตร์

2.1 การออกแบบโครงสร้างของชุดกลไกการเพิ่มประสิทธิภาพด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS

เพื่อให้เลเซอร์สแกนเนอร์ที่วัดข้อมูลระยะทางในแนวนอนนั้นให้สามารถเก็บข้อมูลที่เกิดจาก

การก้มเงย ซึ่งจะทำให้ได้ข้อมูลในแนวตั้งหรือในมิติที่สาม จึงได้ออกแบบกลไกแบบสี่ก้านโยงที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ตัวล่าง ดังในรูปที่ 2 ที่ส่งกำลังโดยก้านโยงที่ 1 และ 2 เพื่อทำให้แผ่นปรับการก้ม-เงยนั้นยกตัวขึ้นลงในรูปแบบของฟังก์ชันซายด์ (sinusoidal function) นอกจากนั้นแล้วได้ออกแบบให้ใช้มอเตอร์ตัวบนที่เชื่อมต่อเข้ากับแผ่นยึดเลเซอร์สแกนเนอร์โดยตรงเพื่อช่วยรักษาเสถียรภาพในการเอียงของข้อมูลที่วัดได้จากเลเซอร์ให้ขนานกับระนาบแนวนอนเสมอ กลไกทั้งหมดได้ทำการออกแบบด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS เพื่อจำลองและทดสอบการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ ก่อนดำเนินการสร้างจริง



รูปที่ 1 ส่วนประกอบของกลไกการเพิ่มประสิทธิภาพของเลเซอร์สแกนเนอร์ที่ ได้ออกแบบด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS

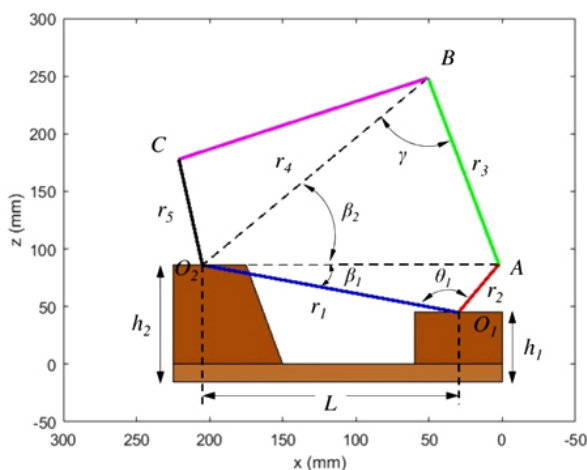


รูปที่ 2 ชุดกลไกการเพิ่มประสิทธิภาพของเลเซอร์สแกนเนอร์ที่ได้ออกแบบ (ซ้าย) และ ที่ได้สร้างขึ้นพร้อมติดตั้งอุปกรณ์และเซนเซอร์ต่างๆ (ขวา)

2.2 แบบจำลองทางจลศาสตร์ (Kinematics Model) ของชุดกลไก [5], [6]

ถ้าต้องการให้องศาการก้มเงยของเลเซอร์สแกนเนอร์อย่างน้อยสุดเท่ากับ 30 องศา จึงได้ทำการคำนวณองศาการหมุนของกลไกแบบสี่ก้านโยงสำหรับชุดกลไกที่ออกแบบไว้ ซึ่งจะสามารถช่วยใช้เลือกขนาดความยาวของก้านโยงที่ 1 และ 2 และความยาวของแผ่นการก้มเงย แล้วจึงทำการจำลองทางจลศาสตร์ลูกโซ่ของกลไกแบบสี่ก้านโยง (Four-Bar Linkage) โดยจะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ ก้านโยงที่ประกอบด้วยก้านโยง r_1 - r_2 - r_3 - r_4 และ ข้อต่อที่จุด A, B, O_1 , O_2 ดังแสดงในรูปที่ 3

ได้เลือกลักษณะกลไกที่เป็นแบบ Crank Rocker จากกฎของ Grashoff และ กฎของ Cosines (Law of Cosines) [5] มาช่วยในการคำนวณหาช่วงมุมในการส่งถ่ายแรง (γ) และ มุมก้มเงยของเลเซอร์สแกนเนอร์ (β_1) ดังในรูปที่ 3



รูปที่ 3 พารามิเตอร์ของกลไกแบบสี่ก้านโยง โดยเฉพาะมุมมองในการส่งถ่ายแรง (γ) และ มุมก้มเงย ของเลเซอร์สแกนเนอร์ (β_1)

จากรูปสามเหลี่ยม AO_1O_2 และ ABO_2 เมื่อประยุกต์ใช้กฎของ Cosines กับสามเหลี่ยมทั้งสองรูปจะได้

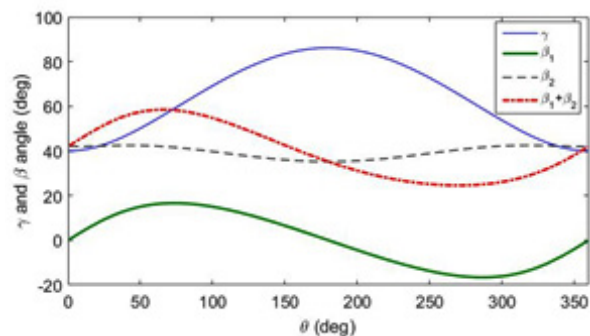
$$z^2 = r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2 \cos \theta_1 \quad (1)$$

$$z^2 = r_3^2 + r_4^2 - 2r_3r_4 \cos \gamma \quad (2)$$

และเมื่อให้ความยาวด้าน z เท่ากันหรือ (1)=(2) จะได้

$$\cos \gamma = \frac{r_1^2 + r_2^2 - r_3^2 - 2r_1r_2 \cos \theta_1}{-2r_3r_4} \quad (3)$$

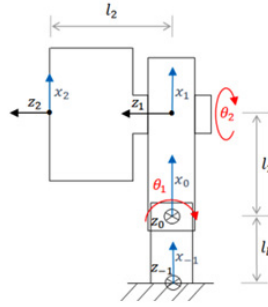
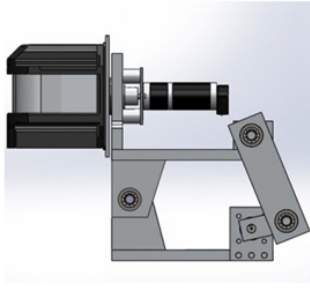
จากสมการ (3) ถ้าองศา เป็นมุมการหมุนของมอเตอร์ตัวล่างแบบต่อเนื่อง (0° - 360°) ดังนั้นจะสามารถคำนวณหา γ และ $\beta_{1,2}$ จากสามเหลี่ยม ฉะนั้นเมื่อปรับเปลี่ยนขนาดความยาวของก้านโยงทั้ง 4 ชิ้น ในโปรแกรม MATLAB จะทำให้ได้องศาของมุมก้มเงยของเลเซอร์สแกนเนอร์ (β_1) ตามที่ต้องการ โดยมีค่าอยู่ในช่วง $\pm 16.5^\circ$ ซึ่งผลการจำลองแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ผลการจำลองมุมมองในการส่งถ่ายแรง (γ) และมุมก้มเงยของเลเซอร์สแกนเนอร์ (β_1)

2.3 แบบจำลองทางพลศาสตร์ (Dynamic Model) ของชุดกลไก [7],[8],[9]

การสร้างแบบจำลองทางพลศาสตร์ของชุดกลไก ในขั้นต้นจะทำการหาเมตริกซ์ในการหมุน (Rotation Matrix) โดยใช้พารามิเตอร์ของเดนาวิตและฮาเทนเบิร์ก (Denavit-Hartenberg หรือ D-H) เพื่อใช้ในการตั้งแกนก้านต่อของกลไกเพิ่มประสิทธิภาพ ซึ่งแสดงในรูปที่ 5 และ พารามิเตอร์ของชุดกลไกในตารางที่ 1



รูปที่ 5 การตั้งแกนสำหรับกำหนดของชุดกลไก
เพิ่มประสิทธิภาพ

ตารางที่ 1 D-H Table แสดงพารามิเตอร์ของชุดกลไก

i	α_i	a_i	d_i	θ_i
0	0	$l_b = 8.6 \text{ cm}$	0	0
1	90°	$l_1 = 13.0 \text{ cm}$	0	θ_1
2	0	0	$l_2 = 2.8 \text{ cm}$	θ_2

ขั้นที่สองจะทำการคำนวณหาเมทริกซ์จacobianที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วที่ปลายก้านโยงแต่ละข้อต่อและความเร็วเชิงมุมในการหมุนของแต่ละข้อต่อ $[\dot{v}_i \ \omega_i] = J_i[\dot{\theta}_i]$ ซึ่งแสดงในสมการที่ (4) เพื่อนำไปใช้หาเมทริกซ์ในสมการพลศาสตร์

$$J_1 = \begin{bmatrix} -l_1 s_1 & 0 \\ l_1 c_1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad J_2 = \begin{bmatrix} l_2 c_1 - l_1 s_1 & 0 \\ l_1 c_1 + l_2 s_2 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & s_1 \\ 0 & -c_1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

(4) สำหรับสมการแบบจำลองทางพลศาสตร์ของชุดกลไก ในกรณีที่ไม่คิดแรงเสียดทานภายในของแต่ละข้อต่อ คือ

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = Q \quad (5)$$

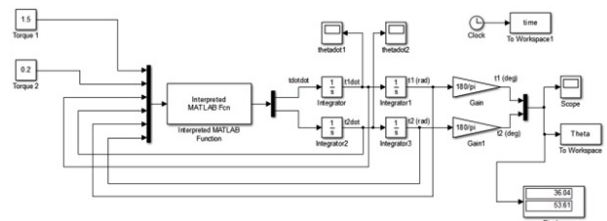
โดยที่ $M(q)$ คือ เมทริกซ์ความเฉื่อย (Inertia Matrix)

เป็นพจน์ที่เกี่ยวข้องกับองศาการหมุนของข้อต่อ q และ $C(q, \dot{q})$ คือ เมทริกซ์โคริโอลิสและสู่ศูนย์กลาง (Coriolis and Centripetal Matrix) เป็นพจน์ที่เกี่ยวข้องกับอนุพันธ์อันดับหนึ่งของ q และ $\dot{q}$ และ $G(q)$ คือ เวกเตอร์แรงบิดที่มาจากแรงโน้มถ่วงของโลก และ Q คือ แรงบิดที่เป็น อินพุตจากมอเตอร์ทั้งสองตัว ส่วน $\ddot{q}, \dot{q}, q$ คือ เวกเตอร์ของความเร่ง ความเร็ว และ องศาการหมุนของแต่ละข้อต่อ ตามลำดับ จากสมการที่ (5) ชุดกลไกจะต้องใช้แรงบิดของมอเตอร์ทั้ง 2 ตัว $(Q = [\tau_1, \tau_2])$ ได้ดังนี้

$$\tau_1 = (I_{1v} + m_1 l_{s1}^2 + m_2 (l_{s1}^2 + l_{s2}^2) + I_{2x} s_2^2 + I_{2v} c_2^2) \ddot{\theta}_1 + 2c_2 s_2 (I_{2x} - I_{2v}) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 - m_1 g l_{s1} c_1 \quad (6)$$

$$\tau_2 = I_{2z} \ddot{\theta}_2 - c_2 s_2 (I_{2x} + I_{2v}) \dot{\theta}_1^2 - m_2 g (l_{s1} c_1 + l_{s2} s_1) \quad (7)$$

นำสมการที่ (6) และ (7) ไปคำนวณหาแรงบิดของมอเตอร์ที่มากที่สุดที่จะใช้ขับเคลื่อนชุดกลไกที่ออกแบบไว้ ให้สามารถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเชิงมุม $([\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2])$ ได้ไม่เกิน 0.210 และ 0.312 เรเดียน/วินาที โดยโปรแกรม MATLAB/Simulink ซึ่งแสดงดังรูปที่ 6



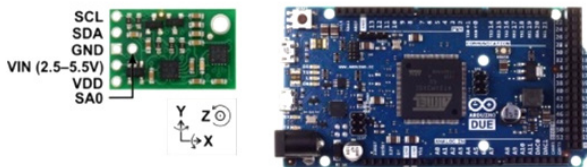
รูปที่ 6 แผนภาพสมการการเคลื่อนที่ของระบบ
โดยโปรแกรม MATLAB/Simulink

จาก Simulink ทำให้สามารถคำนวณได้ว่ามอเตอร์ที่ 1 นั้นต้องมีแรงบิด (τ_1) มากกว่า 1.5 N·m จึงจะสามารถยกกลไกแบบสี่ก้านโยงให้หมุนครบรอบได้ ส่วนมอเตอร์ที่ 2 ต้องมีแรงบิด (τ_2) มากกว่า 0.2 N·m จึงจะสามารถให้เลเซอร์สแกนเนอร์สามารถหมุนเอียงซ้าย-ขวาได้

3. การสร้างชุดกลไกเพิ่มประสิทธิภาพของเลเซอร์สแกนเนอร์

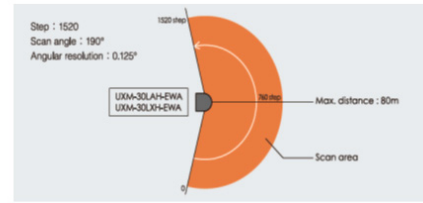
3.1 อุปกรณ์และเซนเซอร์ที่ใช้

ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของเลเซอร์สแกนเนอร์ในทั้งสองแกน นั้นจำเป็นต้องใช้เซนเซอร์วัดมุมเอียง (หรือ IMU) ในการป้อนกลับองศาการเอียงที่ใช้ร่วมกับบอร์ดควบคุมความเร็วของมอเตอร์ที่ขับเคลื่อนในทั้งสองแกน เซนเซอร์ IMU ที่ใช้วัดมุมเอียงคือ MiniIMU-9 ของ Pololu ซึ่งเป็นเซ็นเซอร์วัดมุมเอียง (Compass) ความเร่ง (Accelerometer) ความเร็วในการหันเห (Gyro) ทั้งสามแกน มีขนาดเล็ก $0.9" \times 0.6" \times 0.1"$ ใช้ไฟเลี้ยง 2.6-5.5 VDC ส่วนไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในการพัฒนาระบบควบคุมมอเตอร์ทั้งสองแกนคือ Arduino DUE ซึ่งสามารถประมวลผลความเร็วในการหมุนของมอเตอร์จากเอนโค้ดเดอร์ได้



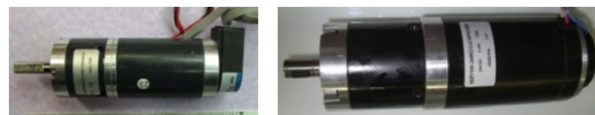
รูปที่ 7 เซนเซอร์วัดมุมเอียงแบบ 9 แกนขนาดเล็ก (MiniIMU-9) ของ Pololu [10] (ซ้าย) และ ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino DUE [11] (ขวา)

เลเซอร์สแกนเนอร์ที่ตรวจจับวัตถุ คือ Hokuyo รุ่น UXM-30LXH-EWA มีขนาด $125 \times 124 \times 150$ มม. มีน้ำหนัก 800 กรัม ใช้แหล่งจ่ายไฟในช่วง 10-30 VDC มีช่วงการวัดระยะทาง (Range) สูงสุดได้ถึง 80 เมตร ความแม่นยำ (Accuracy) ± 50 มิลลิเมตร ความถี่ในการสแกน 20 Hz มีมาตรฐานการป้องกันแบบ IP67



รูปที่ 8 เลเซอร์สแกนเนอร์ของ Hokuyo รุ่น UXM30LXH-EWA [12]

มอเตอร์ที่ใช้มี 2 ตัวคือ ได้แก่ มอเตอร์เกียร์ 24-VDC ที่มีความเร็วรอบ 250 RPM พร้อมด้วยเอนโค้ดเดอร์ (Encoder) แบบ 500 P/R ซึ่งใช้สำหรับการปรับการเอียงซ้าย-ขวาของเลเซอร์สแกนเนอร์ และ มอเตอร์เกียร์ 24-VDC ที่มีความเร็วรอบ 168 RPM ใช้สำหรับการปรับองศาแก้ม-เงยของอุปกรณ์

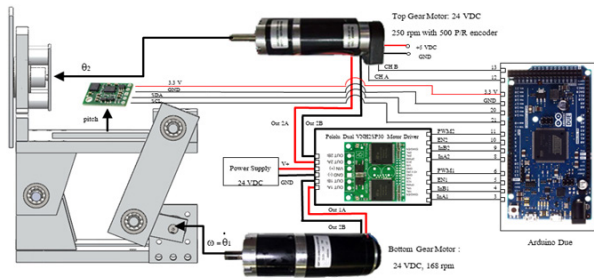


รูปที่ 9 มอเตอร์เกียร์ 24 VDC [13] ที่มีความเร็วรอบ 250 RPM พร้อมด้วยเอนโค้ดเดอร์ (Encoder) แบบ 500 P/R (ซ้าย) และมอเตอร์เกียร์ 24 VDC [14] ที่มีความเร็วรอบ 168 RPM (ขวา)

เมื่อนำอุปกรณ์และเซนเซอร์ต่างๆ มาประกอบเข้ากับชุดกลไกที่ออกแบบและสร้างขึ้น จะได้ดังในรูปที่ 2

3.2 ระบบควบคุมชุดกลไกด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

ในระบบควบคุมที่ได้ออกแบบไว้นี้จะใช้องศาการก้ม (Roll) และ องศาการแก้ม-เงย (Pitch) เพื่อใช้ในการป้อนกลับและป้อนไปข้างหน้าด้วย ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino DUE เพื่อทำการประมวลผลแล้วจึงส่งคำสั่งความเร็วในการหมุนไปยัง Motor Driver ดังแสดงในรูปที่ 10

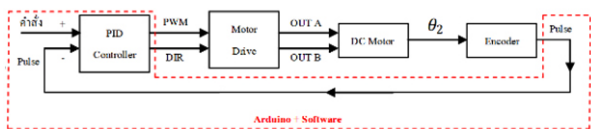


รูปที่ 10 การเชื่อมต่อฮาร์ดแวร์ของระบบควบคุมแบบป้อนกลับและแบบป้อนไปข้างหน้าด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino DUE

โดยจะประยุกต์ใช้ระบบควบคุมแบบพีอีดี (PID) [15] ดังในสมการที่ 8 เพื่อควบคุมองศาการเอียงซ้าย-ขวาของเลเซอร์สแกนเนอร์ด้วยมอเตอร์ตัวบน ซึ่งจะใช้ค่าความผิดพลาด (หรือ e) ที่นิยามเป็นผลต่างระหว่างคำสั่งองศาการกลิ้งที่แปลงเป็นคำสั่งพัลส์และองศาการกลิ้งหรือพัลส์ที่วัดได้จากเอนโค้ดเดอร์ของมอเตอร์ตัวบน

$$u_2(t) = K_P e(t) + K_I \int e(t) dt + K_D \frac{a}{dt} e(t) \quad (8)$$

โดยค่า K_P , K_I , K_D เป็นค่าอัตราขยายแบบแปรผันตรงแบบปริพันธ์ และ แบบอนุพันธ์ ตามลำดับ แผนภาพการทำงานของการควบคุมแบบ PID แสดงดังรูปที่ 11



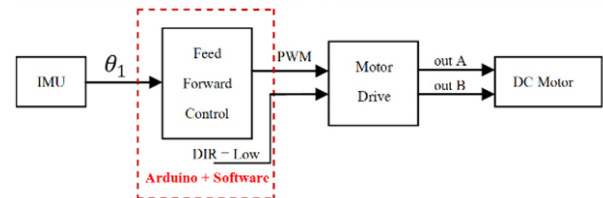
รูปที่ 11 ระบบควบคุมแบบ PID สำหรับมอเตอร์ตัวบน ที่สั่งการด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

ส่วนมอเตอร์ตัวล่างจะถูกควบคุมด้วยระบบควบคุมแบบ ป้อนไปข้างหน้า (Feed Forward) ดังในสมการที่ 9 เพื่อใช้ช่วยชดเชยแรงโน้มถ่วงโลก สำหรับการยกก้านโยก 1 และ 2 ในช่วงขาขึ้นด้วยการเพิ่มความเร็วยรอบของมอเตอร์ตัวล่าง และจะลดความเร็วรอบของมอเตอร์ตัวล่างในช่วงขาลงของกลไกแบบสี่ก้านโยก ดังนั้นจะสามารถอธิบายได้ด้วยฟังก์ชันชายด์ของ

องศาการก้ม-เงยที่ขึ้นกับเวลา โดย $\theta_1=0$ เมื่อแผ่นปรับการก้ม-เงย ขนานกับระนาบแนวนอน ส่วนเมื่อ $\theta_1 > 0$ และ $\theta_1 < 0$ เมื่อยกแผ่นปรับการก้ม-เงยให้ยกขึ้น และ ลง ตามลำดับ

$$u_1(t) = K_F \sin(A_1(\theta_1(t) - B_1)) \quad (9)$$

เมื่อ แอมพลิจูด (K_F) เป็นอัตราขยายที่ใช้ช่วยปรับความเร็วรอบการหมุนที่ป้อนไปข้างหน้า ค่า A_1 เป็นอัตราขยายขององศาการก้ม-เงย และค่า B_1 ใช้ปรับแก้องศาการก้มเงยของเซนเซอร์ IMU แผนภาพการทำงานของการทำงานการควบคุมแบบไปข้างหน้า (Feed Forward Control) แสดงดังในภาพที่ 12



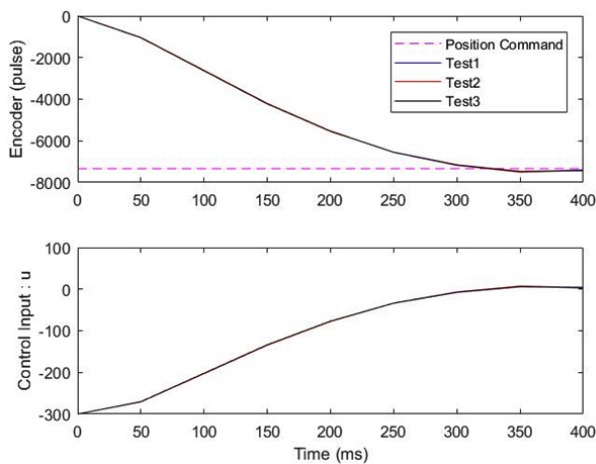
รูปที่ 12 ระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าสำหรับมอเตอร์ตัวล่าง ที่สั่งการด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

4. ผลการทดสอบการทำงานและการประมวลผลภาพจากกลุ่มจุดของเลเซอร์สแกนเนอร์

4.1 ผลทดสอบการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ในทั้งสองแกนสำหรับชุดกลไก

เมื่อเปิดสวิตซ์การทำงาน เริ่มต้นแผ่นยึดเลเซอร์สแกนเนอร์จะหมุนไปแต่ละลิมิตสวิตซ์ที่ติดตั้งไว้ฝั่งซ้ายเป็นมุม 60° จากแนวตั้ง และทำการรีเซ็ตค่าเอนโค้ดเดอร์ให้เป็นศูนย์ เพื่อใช้เป็นตำแหน่งอ้างอิง และมอเตอร์ตัวบนจะถูกหมุนกลับมาให้ตั้งตรงด้วยการป้อนกลับค่าสัญญาณพัลส์จากเอนโค้ดเดอร์ (Encoder Count) ในหนึ่งรอบจะให้ค่าพัลส์เป็น $500 \text{ P/R} \times \text{อัตราทดเกียร์ } 22:1 \times 2\text{CH (A,B)} \times 2$ การนับสัญญาณขาขึ้นและลงของสัญญาณเอนโค้ดเดอร์ ที่ไมโครคอนโทรลเลอร์นับได้

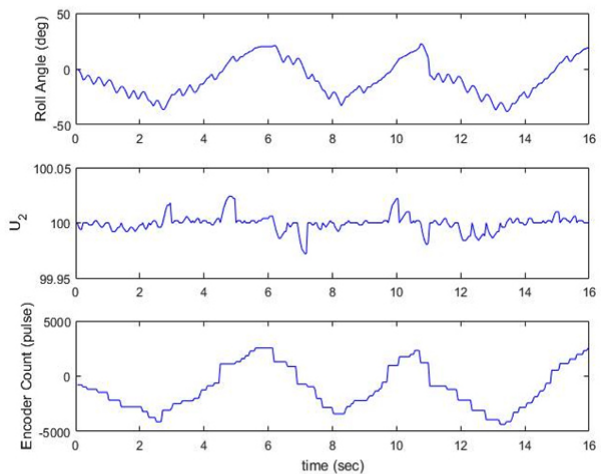
เมื่อถึง -7,333 พัลส์ (ซึ่งเป็นค่าคำสั่งอ้างอิง) แล้วมอเตอร์จะถูกสั่งให้หยุดหมุนและรีเซ็ตค่าเอนโค้ดเดอร์ให้เป็นศูนย์อีกครั้ง ได้ทำการทดสอบการหมุนกลับมาตั้งตรงขนานกับแนวดิ่งเป็นจำนวน 3 ครั้ง ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 13 จะเห็นได้ว่าแผ่นยึดเลเซอร์สามารถปรับให้เลเซอร์สแกนเนอร์กลับมาตั้งตรงได้ภายใน 400 มิลลิวินาที หลังจากแต่ละลิมิตสวิตช์เพื่อรีเซ็ตค่าเอนโค้ดเดอร์



รูปที่ 13 ค่าพัลส์ของเอนโค้ดเดอร์ (Encoder) และค่าคำสั่งแบบ PWM หรือ Control Input ที่ไปควบคุมตำแหน่งองศาการหมุนของมอเตอร์ตัวบนเทียบกับเวลา

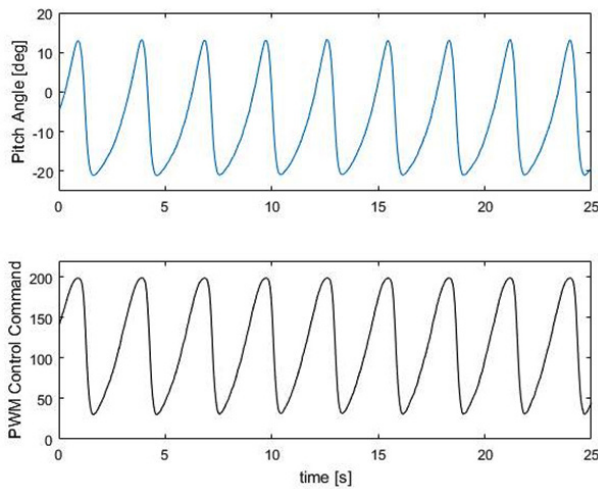
ระบบควบคุมแบบฟีดแบ็คจะพยายามรักษาองศาการหมุนของแผ่นยึดเลเซอร์สแกนเนอร์ให้ตั้งตรงเสมอเพื่อให้ได้ข้อมูลระยะทางจากเลเซอร์สแกนเนอร์ในแนวราบ ดังนั้นได้ทำการทดสอบการเอียงของแผ่นฐาน ซ้าย-ขวา เพื่อสังเกตการตอบสนองของมอเตอร์ตัวบนในการปรับแผ่นยึดเลเซอร์สแกนเนอร์ให้กลับมาตั้งตรง ดังในรูปที่ 14 ซึ่งผลการทดสอบพบว่าเมื่อเอียงแผ่นฐานไปทางซ้าย ซึ่งสังเกตได้จากองศาการกิ้ง (Roll Angle) ของ IMU ที่เป็นลบ เมื่อ $t \in [0, 4.6]$ วินาที แผ่นยึดเลเซอร์สแกนเนอร์ก็就会被ปรับให้หมุนกลับมาทางขวาให้ตั้งตรงกับแนวดิ่ง โดยค่าพัลส์ของเอนโค้ดเดอร์ (Encoder Pulse) จะมีค่าเป็นลบ

และคำสั่งของระบบควบคุมแบบฟีดแบ็ค (U_2) ที่สั่งให้มอเตอร์หมุนตามเข็มนาฬิกา ในทางกลับกันเมื่อเอียงแผ่นฐานไปทางขวาในช่วงเวลา $t \in [4.6, 7.1]$ วินาที ระบบควบคุมแบบฟีดแบ็คก็จะพยายามปรับแผ่นยึดเลเซอร์ให้หมุนกลับมาทางซ้ายหรือสั่งให้มอเตอร์หมุนทวนเข็มนาฬิกาด้วยเช่นกัน และคำสั่ง U_2 ของระบบควบคุมจะมีค่าเป็นบวก



รูปที่ 14 องศาการกิ้ง (บน), คำสั่งของระบบควบคุมแบบฟีดแบ็ค หรือ U_2 (กลาง) และค่าพัลส์ของเอนโค้ดเดอร์ (ล่าง) เมื่อทดสอบการเอียงแผ่นฐานไปทางด้านซ้ายและขวา

นอกจากนั้นยังได้ทดสอบการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ตัวล่างในการปรับการก้ม-เงยของเลเซอร์สแกนเนอร์ เมื่อเอียงแผ่นฐานไปทางซ้ายและขวา จากผลการทดสอบพบว่ามอเตอร์ตัวล่างสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องและการหมุนขึ้นลงในแต่ละรอบนั้นมีช่วงเวลาในการหมุนขึ้น-ลงที่คงที่และเท่ากัน ที่สามารถสังเกตได้จากค่ามุมก้ม-เงย (Pitch Angle) ของ IMU โดยในหนึ่งคาบใช้เวลาประมาณ 3 วินาที ซึ่งจะสัมพันธ์กับคำสั่งจากระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าที่ส่งเป็นค่าควบคุมแบบ PWM (PWM Control) เพื่อส่งไปยังบอร์ดควบคุมมอเตอร์ตัวล่างที่มีค่าอยู่ในช่วง 32 ถึง 199 ดังในรูปที่ 15

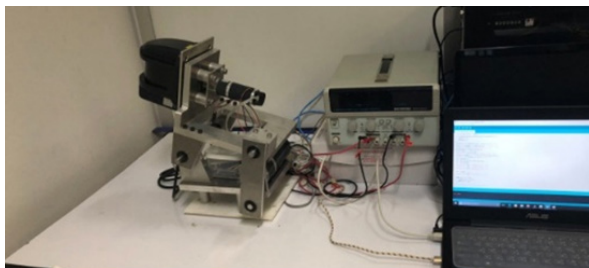


รูปที่ 15 องศาการก้ม-เงย (บน) และ คำสั่งควบคุมแบบ PWM จากระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า สำหรับมอเตอร์ตัวล่าง (ล่าง) เมื่อทดสอบการเอียงผ่านฐานไปทางด้านซ้ายและขวา

4.2 ผลทดสอบการประมวลผลภาพสามมิติ

จากกลุ่มจุดของเลเซอร์สแกนเนอร์

ในการสร้างพื้นผิวสามมิติจากข้อมูลระยะทางที่วัดได้จากเลเซอร์สแกนเนอร์ในระนาบสองมิติที่จะนำมาบูรณาเข้ากับองศาการก้ม-เงย (θ_1) ที่วัดได้จาก IMU ดังนั้นเพื่อนำข้อมูลกลุ่มจุดระยะทางในแนวรัศมีจากเลเซอร์สแกนเนอร์ (d) ที่กวาดเป็นมุม α ในช่วง $\pm 95^\circ$ มาแปลงให้เป็นข้อมูลกลุ่มจุดในพิกัดคาร์ทีเซียนเทียบกับแกนอ้างอิงที่ตั้งอยู่ที่จุดกึ่งกลางเพลลาของฐานชุดกลไกเพิ่มประสิทธิภาพของเลเซอร์สแกนเนอร์หรือจุด O_B ดังแสดงในรูปที่ 17 และ 18



รูปที่ 16 อุปกรณ์ต่างๆ สำหรับทดสอบการทำงานชุดกลไกเพิ่มประสิทธิภาพเลเซอร์สแกนเนอร์

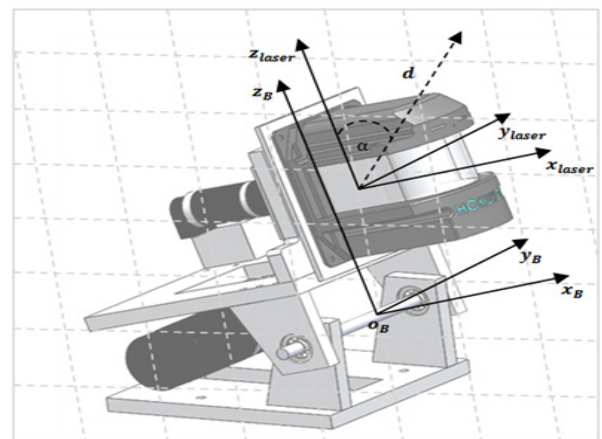
จากรูปที่ 17 จุดที่เลเซอร์สแกนเนอร์วัดระยะทางในแนวรัศมีเป็น d ที่กวาดเป็นมุม α จากฝั่งด้านซ้ายไปขวา เมื่อพิจารณาในระนาบ xz และระนาบ yz จะได้ระยะทางในแนวรัศมีเป็น $d \cos \alpha$ และ $d \sin \alpha$ ตามลำดับ ฉะนั้นจะได้ระยะทางของวัตถุเทียบกับจุด O_B ตามแกน x_B , y_B และ z_B ที่อธิบายด้วยสมการที่ 10, 11 และ 12 ดังในรูปที่ 18

$$x = (d \cos \alpha) \cos p + l \cos p - L \sin p \quad (10)$$

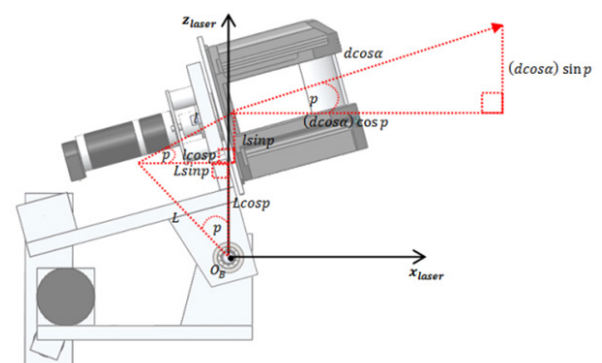
$$y = d \sin \alpha \quad (11)$$

$$z = (d \cos \alpha) \sin p + l \sin p + L \cos p \quad (12)$$

โดยที่ จุด O_B นั้นตั้งอยู่ที่กึ่งกลางของเพลลาที่ฐาน ส่วน z_B และ z_{laser} ซี่ขึ้นขนานกับขอบด้านข้างในแนวตั้งของเลเซอร์สแกนเนอร์ และ y_B และ y_{laser} ซี่ขนานไปกับเพลลาที่ฐานของชุดกลไก และ x_B และ x_{laser} ซี่ไปข้างหน้าของเลเซอร์สแกนเนอร์



รูปที่ 17 ระยะทางที่วัดได้จากเลเซอร์สแกนเนอร์ที่พุ่งออกตามแนวรัศมี และกวาดเป็นมุม α

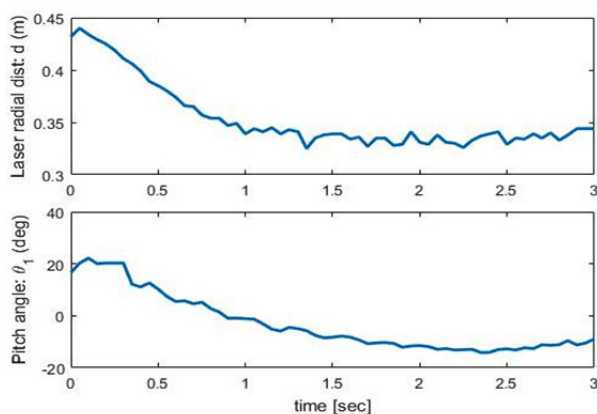


รูปที่ 18 ระยะทางของวัตถุที่วัดได้จากเลเซอร์เมื่อเทียบกับจุด O_B ที่ผ่านฐานในระนาบ xz

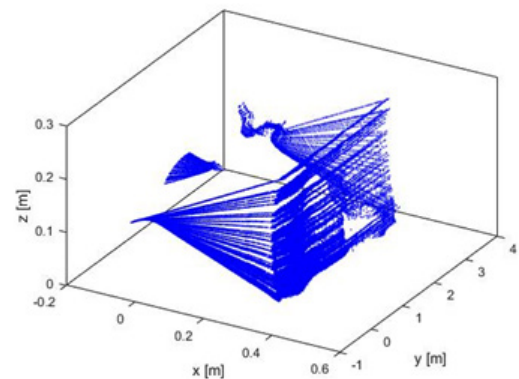
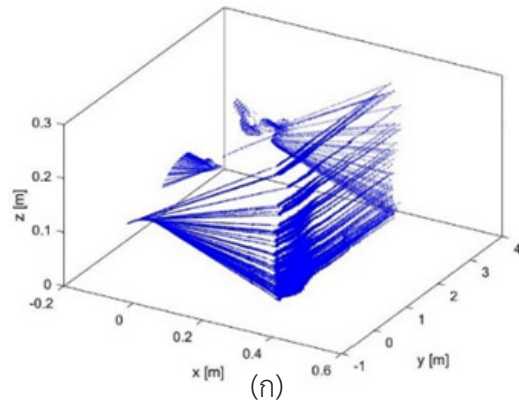
เมื่อนำข้อมูลลองศาแก้ม-เงย ที่วัดได้จาก IMU ที่อยู่ในช่วงประมาณ 3 วินาทีแรก ที่แสดงในรูปที่ 20 มาประมวลผลร่วมกับ ข้อมูลกลุ่มจุดที่วัดได้จากเลเซอร์ ในแนวนรัศมี ที่ทดสอบการเก็บข้อมูลจากผนังห้องที่ กว้าง 3.45 เมตร ในรูปที่ 19 แทนลงในสมการที่ 10, 11, 12 และ เมื่อนำข้อมูลกลุ่มจุดในสามมิติที่สร้างขึ้น ไปแสดงผลในพิกัดคาร์ทีเซียน จากการทดสอบสองครั้ง ด้วยโปรแกรม MATLAB [16] ดังในรูปที่ 21 จากรูป ที่ 22 จะเห็นได้ว่าจะสามารถวัดความกว้างและวัด แนวตั้งตรงของพื้นผิวผนังที่ได้สร้างขึ้นจากข้อมูลกลุ่ม จุดของเลเซอร์สแกนเนอร์ โดยที่จุด O_B นั้นอยู่ที่พิกัด $(x,y,z) = (0,0,0.13)$ เมตร



รูปที่ 19 สถานที่ใช้ทดสอบความแม่นยำ ของความกว้างผนังด้วยชุดกลไกเพิ่มประสิทธิภาพ เลเซอร์สแกนเนอร์

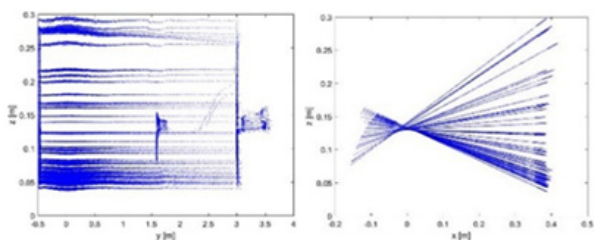


รูปที่ 20 ระยะทางที่วัดได้จากเลเซอร์ในแนวนรัศมี (d) และองศาการแก้ม-เงย (pitch angle หรือ θ_1) ในช่วงเวลา 3 วินาที



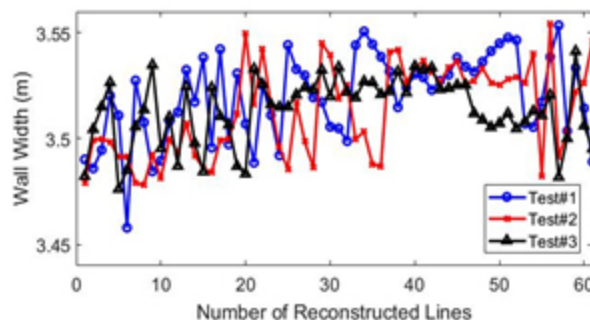
รูปที่ 21 ข้อมูลกลุ่มจุดในสามมิติที่สร้างขึ้น (3D reconstructed point cloud) ในพิกัด xyz ของผนังในห้องทดลอง (ก) ทดสอบครั้งที่ 1 (ข) ทดสอบครั้งที่ 2

เมื่อนำข้อมูลลองศาแก้ม-เงย ที่วัดได้จาก IMU ที่อยู่ในช่วงประมาณ 3 วินาทีแรก ที่แสดงในรูปที่ 20 มาประมวลผลร่วมกับ ข้อมูลกลุ่มจุดที่วัดได้จากเลเซอร์ ในแนวนรัศมี ที่ทดสอบการเก็บข้อมูลจากผนังห้องที่ กว้าง 3.45 เมตร ในรูปที่ 19 แทนลงในสมการที่ 10, 11, 12 และ เมื่อนำข้อมูลกลุ่มจุดในสามมิติที่สร้างขึ้น ไปแสดงผลในพิกัดคาร์ทีเซียน จากการทดสอบสองครั้ง ด้วยโปรแกรม MATLAB [16] ดังในรูปที่ 21 จากรูป ที่ 22 จะเห็นได้ว่าจะสามารถวัดความกว้างและวัด แนวตั้งตรงของพื้นผิวผนังที่ได้สร้างขึ้นจากข้อมูลกลุ่ม จุดของเลเซอร์สแกนเนอร์ โดยที่จุด O_B นั้นอยู่ที่พิกัด $(x,y,z) = (0,0,0.13)$ เมตร



รูปที่ 22 ข้อมูลกลุ่มจุดในสามมิติในระนาบ yz เมื่อมองจากด้านหน้า (ซ้าย) และ ในระนาบ xz เมื่อมองจากด้านข้าง (ขวา) จากการทดสอบครั้งที่ 1

จากผลการทดสอบสามครั้ง เพื่อประเมินความแม่นยำของความกว้างผนังที่วัดได้จากข้อมูลพื้นผิวแบบกลุ่มจุดในสามมิติ จำนวนแนวเส้นที่สแกนได้ (Number of Reconstructed Lines) จากเลเซอร์ในครั้งรอบในการทดสอบแต่ละครั้งจะมีจำนวนทั้งหมด 62 เส้น จึงได้ทำการวัดระยะทางความกว้างของผนังดังแสดงในรูปที่ 23 จะเห็นได้ว่าค่าความกว้างของแต่ละเส้นนั้นมีความใกล้เคียงกันมากในระดับมิลลิเมตร แล้วจึงทำการหาค่าน้อยสุด (Min) ค่ามากที่สุด (Max) ค่าเฉลี่ย (Mean) และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Std) จากข้อมูลความกว้างทั้ง 62 แนวเส้นในการทดสอบแต่ละครั้ง ดังนำเสนอในตารางที่ 1 เมื่อเทียบความกว้างของผนังในห้องทดลองที่วัดด้วยตลับเมตร กับค่าเฉลี่ยของความกว้างผนังที่ประมวลจากข้อมูลพื้นผิวแบบกลุ่มจุดที่เก็บจากเลเซอร์สแกนเนอร์ จะพบว่ามีค่าความผิดพลาด ± 7 เซนติเมตร หรือ $\pm 2\%$ ซึ่งจะมาได้จากความผิดพลาดในการวัดความกว้างด้วยตลับเมตร และ มุมก้ม-เงยที่วัดได้จากเซนเซอร์ IMU



รูปที่ 23 ความกว้างผนัง (Wall Width) ที่วัดจากข้อมูลพื้นผิวแบบกลุ่มจุดใน 3 มิติสำหรับการทดสอบ 3 ครั้ง

ตารางที่ 2 ผลการประมวลค่าความแม่นยำของความกว้างของผนัง (W) จากข้อมูลพื้นผิวแบบกลุ่มจุดในสามมิติที่ประเมินจากค่าเฉลี่ยของความกว้าง หรือ Mean (W) และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความกว้าง หรือ Std(W) จากการทดสอบ 3 ครั้ง

Test No.	Min(W) (เมตร)	Max(W) (เมตร)	Mean(W) (เมตร)	Std(W) (เมตร)
1	3.458	3.554	3.520	0.020
2	3.478	3.554	3.513	0.022
3	3.476	3.541	3.514	0.016

5. สรุปผลการทดลอง

ชุดกลไกการเพิ่มประสิทธิภาพของเลเซอร์สแกนเนอร์ที่ใช้ตรวจจับวัตถุ ได้ถูกออกแบบให้สามารถรักษาข้อมูลระยะทางจากเลเซอร์สแกน ให้อยู่ในระนาบแนวนอน และเพิ่มองศาอิสระในการเก็บข้อมูลระยะทางในแนวตั้งจากเลเซอร์ที่วัดข้อมูลในระนาบแนวนอน จะทำให้ได้พื้นผิวหรือรูปภาพแบบสามมิติ โดยได้ออกแบบให้ชุดกลไกสามารถปรับองศา ก้ม-เงย (pitching angle) ในช่วง $\pm 16.5^\circ$ ได้อย่างต่อเนื่อง โดยใช้กลไกแบบสี่ก้านโยง (Four-Bar Linkage)

ที่สามารถหมุนปรับแก้อศาการเอียงซ้าย-ขวา (roll angle) รอบแกน x ที่ชี้ไปทางด้านหน้าอยู่ในช่วง $\pm 20^\circ$ และทำการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางจลนศาสตร์และพลศาสตร์ของชุดกลไก ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ที่สามารถคำนวณหาแรงบิดอย่างน้อยที่ต้องการเพื่อใช้เลือกมอเตอร์ที่จะมาประยุกต์สร้างชุดกลไกที่ออกแบบไว้ให้มีกำลังเพียงพอจะได้พัฒนาระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID Control) สำหรับมอเตอร์ตัวบนเพื่อให้สามารถควบคุมองศาการเอียงซ้าย-ขวาได้เมื่อฐานของชุดกลไกเกิดการเอียง ที่ช่วยรักษาขนาดของข้อมูลกลุ่มจุดที่วัดได้จากเลเซอร์สแกนเนอร์ให้อยู่ในระนาบแนวนอน และระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า (Feed Forward Control) สำหรับมอเตอร์ตัวล่าง ที่สามารถรักษาความเร็วรอบของมอเตอร์ให้คงที่ โดยการเพิ่มความเร็วในช่วงขาขึ้นและลดความเร็วในช่วงขาลงของกลไกแบบสี่ก้านโยง ส่งผลให้ได้ข้อมูลกลุ่มจุดของเลเซอร์ที่วัดได้แบบสม่ำเสมอในแนวตั้ง

นอกจากนั้นได้ทำการวิเคราะห์ความแม่นยำในการสร้างพื้นผิวของกลุ่มข้อมูลแบบจุดในสามมิติ ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียนที่สร้างขึ้นจาก กลุ่มจุดข้อมูลวัดได้จากเลเซอร์สแกนเนอร์ในแนวนอน โดยได้ทำการตรวจสอบความแม่นยำของความกว้างของผนังในห้องทดลอง โดยตรวจสอบค่าความผิดพลาด อยู่ในช่วง ± 7 เซนติเมตร หรือ คิดเป็น $\pm 2\%$ ที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ไม่เกินกว่า 2 เซนติเมตร

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา สำหรับงบประมาณสนับสนุนงานวิจัยนี้ ในโครงการวิจัยเรื่อง เรือลาดตระเวนแบบสองท่อน ควบคุมระยะไกลเพื่อใช้ช่วยตรวจจับวัตถุต้องสงสัย ด้วยภาพ ประจำปีงบประมาณ 2559

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Prempraneerach, M. Janthong, K. Phothongkum, C. Choosui, S. Timpitak. Hydrographical survey using point cloud data from laser scanner and echo sounder. In 13th International Conference on Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON). 2016; pp. 1-6.
- [2] Thomas J. Pastore and A.N. Patrikalakis. Laser Scanners for Autonomous Surface Vessels in Harbor Protection: Analysis and Experimental Results. International Waterside Security Conference. 2010; pp. 1-6.
- [3] A. Battistel, F. Lizarralde, L. Hsu. Inertially stabilized platforms using dual-axis gyros: sensitivity analysis to unmodeled motion and an extension to visual tracking. American Control Conference. 2012; pp. 1-8.
- [4] L. Hongkai, H. Guojian, Y. Haichen, Z. Yan and W. Wei. Fast 3D Scene Segmentation and Classification with Sequential 2D Laser Scanning Data in Urban Environments. 2016 35th Chinese Control Conference (CCC). 2016; pp. 5446-5450.

- [5] Hamilton H. Mabie and Charles F. Reinholtz. Mechanisms and Dynamics of Machinery, 4nd edition, ISBN: 13978-0-471-80237-2. United States: John Wiley & Sons, Inc. 1987.
- [6] Wasan Leelatanaroek, Pradya Prempraneerach. Study and Design of Radio-control Flapping-wing Robot. Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi; 2014.
- [7] Reza N. Jazar. Theory of Applied Robotics: Kinematics, Dynamics, and Control, Second Edition. New York: Springer Science+Business Media, LLC 2006; 2010.
- [8] Bruno Siciliano, Lorenzo Sciavicco, Luigi Villani, Giuseppe Oriolo. Robotics : Modelling, Planning and Control. United Kingdom: Springer-Verlag London Limited; 2009.
- [9] Pitakwatchara P. Fundamentals of Robotics : Kinematics of Serial Manipulators. Bangkok, Thailand : Chulalongkorn University Press; 2014. (in Thai)
- [10] Pololu [Internet]. MiniMU-9 [modified 2016 October 15]. Available from: <https://www.pololu.com/product/1264>
- [11] Arduino [Internet]. Arduino DUE [modified 2016 October 16]. Available from: <https://www.arduino.cc/en/Guide/ArduinoDue>
- [12] Autonomoustuff [Internet]. UXM-30LXH-EWA [modified 2016 October 20]. Available from: <https://www.autonomoustuff.com/wp-content/uploads/2016/07/UXM-30LXH-EWA.pdf>
- [13] Sangtawan [Internet]. Gear Motor DC SMG016 [modified 2016 October 25]. Available from: http://www.sangtawan.org/product_detail.asp?product_id=959&lng=th
- [14] Sangtawan [Internet]. Gear Motor DC SMG033 [modified 2016 October 25]. Available from: http://www.sangtawan.org/product_detail.asp?product_id=261&lng=t
- [15] Wikipedia [Internet]. PID Control System [modified 2014 October 25]. Available from: <https://th.wikipedia.org/wiki/ระบบควบคุมพีไอดี>
- [16] Boonkrong W. Pinciple of Simulink in MATLAB. Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University; 2004. (in Thai)

การแยกกลีเซอรอลออกจากไบโอดีเซลโดยใช้เทคโนโลยีเมมเบรน

Glycerol Separation from Biodiesel by Membrane Technology

สุดปรารถนา ธีรติ^{1*}, ปวีณา พลัดพราก², ยรรยง สุขคล้าย³, วีรินทร์ดา อัมมานะ⁴ และจุไรวัลย์ รัตนะพิสิฐ⁵
Sudprattthana Thirati^{1*}, Paveena Pludprak², Yanyong Sukklay³, Weerinda Appamana⁴ and
Juraivan Ratanapisit⁵
sudprattthana_t@mail.rmutt.ac.th^{1*}, paveena_p@exchang.rmutt.ac.th², yanyong_s@en.rmutt.
ac.th³, weerinda.a@en.rmutt.ac.th⁴, juraivan.r@en.rmutt.ac.th⁵

¹⁻⁵ ภาควิชาวิศวกรรมเคมีและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

¹⁻⁵ Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Received: May 15, 2018
Revised: June 26, 2018
Accepted: August 20, 2018

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการทำไบโอดีเซลบริสุทธิ์โดยการแยกกลีเซอรอลด้วยเทคโนโลยีเมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชัน สารป้อนเป็นสารผสมระหว่างไบโอดีเซลกับกลีเซอรอลในอัตราส่วน 97:3 โดยปริมาตร ทำการทดลองด้วยชุดการกรองแบบ ปิดตายที่ความดันคงที่ต่างๆ ด้วยเมมเบรนพอลิเมอร์ชนิดพอลิอีเธอร์ซัลโฟนที่มีขนาดน้ำหนักโมเลกุลตัด (molecular weight cut-off; MWCO) แตกต่างกัน ผลการทดลองพบว่าค่าฟลักซ์เพอร์มิเอตสูงขึ้นเมื่อน้ำหนักโมเลกุลตัดและความดันสูงขึ้น อย่างไรก็ตามการลดลงของ ฟลักซ์เพอร์มิเอตจากเมมเบรน UP150 และ UH030 ณ ความดัน 8 บาร์ พบว่าที่ความดันสูงทำให้เกิดการอุดตันของเมมเบรนมากขึ้น สภาวะการทำงานที่เหมาะสมในการแยกกลีเซอรอลควรใช้เมมเบรน UH030 ณ ความดัน 6 บาร์ ให้ค่าฟลักซ์เพอร์มิเอต 0.0156 g/min.cm² และค่าความสามารถกักกันกลีเซอรอลล้อยละ 93.11 สำหรับผลการศึกษากลไกฟาล์วล้าง ด้วยแบบจำลองเฮอเมียร์พบว่า เมมเบรน UP150, UP010 และ UP005 เกิดแบบการอุดตันรูพรุนของเมมเบรน ในขณะที่เมมเบรน UH030 เกิดแบบชั้นเค้ก ผลการทดลองแสดงความเป็นไปได้ของการใช้เทคโนโลยีเมมเบรนในการทำบริสุทธิ์ไบโอดีเซล

คำสำคัญ: กลีเซอรอล, ไบโอดีเซล, เมมเบรน, อัลตราฟิลเตรชัน, ฟาล์วล้าง

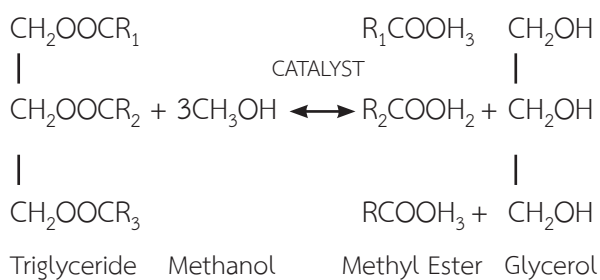
Abstract

In the present study, glycerol separation from biodiesel by ultrafiltration membrane technology was studied. Feeds as oil/glycerol in 97:3 proportion (v/v) were filtrated in a dead-end process at different transmembrane pressures. The experiments were carried out with polyethersulfone (PES) membranes of different molecular weight cut-off. Results showed that greater pore sizes, as well as greater transmembrane pressures, enable greater fluxes. However, permeate fluxes of UP 150 and UH030 membranes at 8 bar indicated an increased trend for the membranes to clog up at high pressure. The optimal operating condition of ultrafiltration by membrane UH030 at 6 bar was efficient in removing free glycerol, since the high value of stabilize permeate flux was 0.0156 g/min.cm² and glycerol rejection was 93.11%. Also the fouling mechanism was analyzed by the Hermia's model. Results showed that the pore blocking model played dominate part for UP150, UP010 and UP005 while the cake layer was significant for UH030. This work concludes that membrane technology is a possible alternative for biodiesel purification.

Keywords: Glycerol, biodiesel, membrane, ultrafiltration, fouling

1. บทนำ

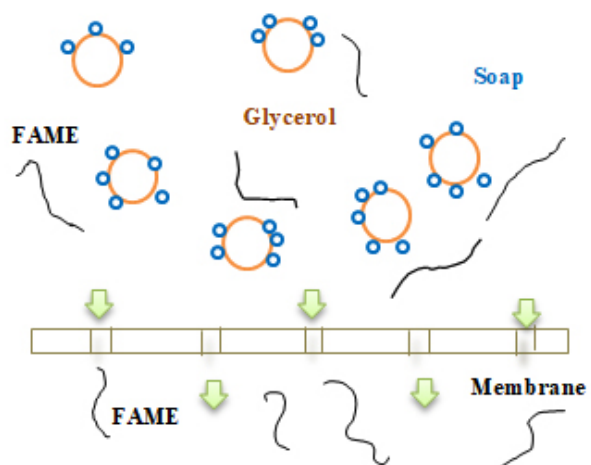
ปัจจุบันแนวโน้มการใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะการใช้พลังงานจากน้ำมันเชื้อเพลิงมีการใช้มากที่สุด ทำให้เกิดวิกฤตการณ์ด้านพลังงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเชื้อเพลิงจากปิโตรเลียม ในช่วงกว่าสิบปีที่ผ่านมา มีการนำเสนองานวิจัยด้านพลังงานทดแทนหลายวิธี ทั้งในรูปแบบชนิดของพลังงานทดแทนและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ตัวอย่างพลังงานทางเลือกของน้ำมันดีเซล ได้แก่ น้ำมันไบโอดีเซล ที่ผลิตจากน้ำมันสัตว์หรือน้ำมันพืชโดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (transesterification) กับเมทานอลและมีด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเมทิลเอสเทอร์ (methyl ester) และกลีเซอรอล โดยเมทิลเอสเทอร์มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล เมื่อนำมาใช้กับเครื่องยนต์พบว่ามีคุณสมบัติการเผาไหม้ที่ดีกว่าน้ำมันดีเซล โดยไบโอดีเซลมีปริมาณออกซิเจนผสมอยู่ประมาณร้อยละ 10 จึงทำให้มีการเผาไหม้ที่กระบอกสูบได้ดี นอกจากนี้ยังมีเขม่าคาร์บอนน้อยไม่ทำให้เกิดการอุดตันของระบบไอเสีย โดยทั่วไปการเพิ่มความบริสุทธิ์ไบโอดีเซลเป็นกระบวนการที่ใช้สารเคมี ใช้พลังงานสูง และมีชุดอุปกรณ์เสริมหลายตัว เช่น วิธีการกลั่น การเหวี่ยงแยก จึงมีค่าการลงทุนอุปกรณ์สูง การล้างไบโอดีเซลเป็นอีกหนึ่งวิธีที่นิยมใช้เพราะมีค่าการลงทุนต่ำ แต่ในขั้นตอนการล้างไบโอดีเซลเพื่อกำจัดสบู่ ตัวเร่งปฏิกิริยาและกลีเซอรอลนั้นก่อให้เกิดน้ำเสียปริมาณมาก ดังนั้น

เทคโนโลยีเมมเบรนจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ ในการประยุกต์ใช้กับขั้นตอนการทำบริสุทธิ์ไบโอดีเซล เพราะเทคโนโลยี เมมเบรนได้รับการยอมรับว่ามีประสิทธิภาพการแยกโดยไม่จำเป็นต้องมีการเปลี่ยนแปลงจึงลดการใช้พลังงาน ลดการใช้สารเคมี และลดของเสียสู่สิ่งแวดล้อม จึงมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และง่ายต่อการทำงานเมื่อเทียบกับการแยกอื่นๆ [1] เทคโนโลยีเมมเบรนมีข้อเด่นหลายประการ เช่น ความสามารถแยกองค์ประกอบขนาดใหญ่และเล็ก โดยเฉพาะเมื่อสารป้อนมีความเข้มข้นในระดับต่ำได้ดี ประกอบกับเป็นกระบวนการที่ไม่ใช้ความร้อน หรือใช้ความร้อนต่ำ (ขึ้นกับลักษณะสารป้อน) ในปัจจุบันได้มีงานวิจัยที่นำเทคโนโลยีเมมเบรนเข้ามาใช้ในการทำบริสุทธิ์ไบโอดีเซล โดยหลักการของการแยกกลีเซอรอลในไบโอดีเซลด้วยเทคโนโลยี เมมเบรน แสดงดังรูปที่ 2 โมเลกุลกลีเซอรอลรวมตัวกับโมเลกุลสารอื่นทำให้น้ำหนักของอนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น ในกรณีนี้กระแสเพอร์มิเอตเป็นกลุ่มเอสเทอร์เป็นหลัก ในขณะที่ด้านรีเทนเตตเป็นกลีเซอรอลและสารประกอบอื่นๆ [2]



รูปที่ 2 กลไกการแยกเอสเทอร์ด้วยเมมเบรน [2]

การดำเนินการของกระบวนการเมมเบรนมักให้ค่าฟลักซ์เริ่มต้นสูง แต่ค่าฟลักซ์จะลดลงอย่างรวดเร็วสาเหตุเนื่องจากโพลาไรเซชันของความเข้มข้นและฟาล์วสิ่งทั้งที่ผิวหน้าเมมเบรนและในรูพรุนของ

เมมเบรนรวมถึงการเกิดชั้นเค้ก ซึ่งส่งผลต่อค่าฟลักซ์และสมรรถนะเมมเบรน การศึกษากลไกฟาล์วลงในกระบวนการเมมเบรนจึงมีความสำคัญ เนื่องจากทำให้เข้าใจถึงพฤติกรรมการลดลงของฟลักซ์และสามารถยืดอายุการใช้งาน เมมเบรนได้ และในงานวิจัยนี้เลือกใช้แบบจำลองเฮอร์เมียเพื่อศึกษากลไกฟาล์ว

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเทคโนโลยีเมมเบรนมีความสามารถในการกำจัดกัมและฟอสโฟไลปิดในน้ำมันรำข้าวด้วยเมมเบรน พอลิเมอร์ระดับอัลตราฟิลเตรชันและนาโนฟิลเตรชันควบคู่กับการศึกษาฟาล์ว โดยใช้แบบจำลองเฮอร์เมีย [3-4] และยังสามารถกำจัดกลีเซอรอลในไบโอดีเซลได้ถึงร้อยละ 48-68 ด้วยเมมเบรน พอลิเมอร์ระดับอัลตราฟิลเตรชันควบคู่กับการเติมน้ำ [5] และพบว่าเมมเบรนระดับไมโครฟิลเตรชันไม่สามารถแยกกลีเซอรอลออกจากไบโอดีเซลได้เมื่อเทียบกับการกรองระดับอัลตราฟิลเตรชันที่มีขนาดน้ำหนักโมเลกุลตัด 10 kDa [6] รวมทั้งมีการศึกษาการใช้เมมเบรนเซรามิกที่มีขนาดรูพรุน 0.2 ไมโครเมตร พบว่ามีประสิทธิภาพในการแยกกลีเซอรอลจากไบโอดีเซล โดยให้ปริมาณกลีเซอรอลน้อยกว่าร้อยละ 0.02 โดยน้ำหนัก [7] นอกจากนี้ยังมีรายงานว่าเทคโนโลยีเมมเบรนสามารถลดปริมาณน้ำเสีย จากขั้นตอนการล้างไบโอดีเซล เมื่อประยุกต์ใช้กระบวนการเมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชันด้วยเมมเบรนพอลิเมอร์ขนาดน้ำหนักโมเลกุลตัด 100 kDa [8]

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของความดันและขนาดน้ำหนักโมเลกุลตัดของเมมเบรนเกรดการค้าชนิดพอลิเอเธอร์ซัลโฟนระดับอัลตราฟิลเตรชันต่อค่าฟลักซ์เพอร์มิเอทและความ สามารถการกักกัน รวมทั้งหาสภาวะที่เหมาะสมในการแยก กลีเซอรอลจากไบโอดีเซลและกลไกฟาล์วของเมมเบรนในช่วงความดันสูง

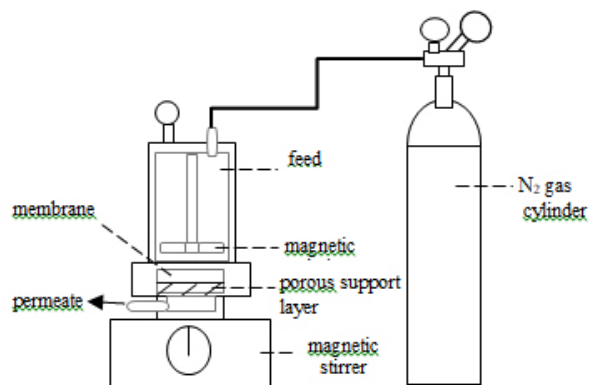
2. วิธีการศึกษา

2.1 สารป้อนที่ใช้ในการศึกษา

เพื่อควบคุมสารป้อนในการทดลองให้มีคุณภาพคงที่ น้ำมันไบโอดีเซลดิบที่ได้จากบริษัทน้ำมันพืชปทุม จำกัด ถูกนำมาล้างเพื่อแยกสารประกอบอื่นๆ ออก เช่น สบู่ กลีเซอรอล ต่าง ฯลฯ เพื่อหยุดปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชัน อัตราส่วนของน้ำมันไบโอดีเซลต่อน้ำกลั่นในการล้างแต่ละครั้งคือ 1:0.5 โดยปริมาตรล้างจนค่าความเป็นกรด-เบสของสารอยู่ในสถานะเป็นกลาง หลังจากนั้นนำไปกำจัดน้ำด้วยเครื่องกลั่นระเหยแบบหมุน (rotary evaporator) แล้วจึงเก็บไบโอดีเซลที่ได้ในภาชนะทึบแสง และปิดสนิทเพื่อรอใช้ในการทดลองสารป้อนที่ใช้ในการทดลองต้องถูกป้องกันประกอบของกลีเซอรอล ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมผสมใหม่ทุกครั้งโดยใช้ไบโอดีเซลที่ผ่านการล้างและการกำจัดน้ำข้างต้นผสมกับกลีเซอรอลสังเคราะห์ที่มีความบริสุทธิ์สูง (analytical reagent; Sigma) ในอัตราส่วนระหว่างไบโอดีเซลต่อกลีเซอรอลเป็น 97 ต่อ 3 โดยปริมาตร

2.2 ชุดการกรองแบบปิดตาย

ชุดการกรองแบบปิดตายประกอบด้วยถังแก๊สไนโตรเจนที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5 ที่ใช้เป็นแรงขับ สารป้อนต่อเข้ากับถังป้อนสแตนเลสสตีลขนาด 170 ลูกบาศก์เซนติเมตร พร้อมเกจวัดความดันที่ถูกต้องติดตั้งบนถังป้อนภายในถังป้อนทำการติดตั้งตัวกวนผสมแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ชุดเครื่องมือการกรองแบบปิดตาย

ด้านล่างถึงป้อนเป็นตำแหน่งติดตั้งเมมเบรนใหม่ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร แผ่นเมมเบรนถูกปรับสภาพโดยการแช่ในเมทิลเอสเทอร์ก่อนทำการกรองเพื่อให้เมมเบรนมีสภาพจริงพร้อมใช้งาน จากนั้นเติมสารป้อนปริมาตรเริ่มต้นคงที่ 150 ลูกบาศก์เซนติเมตร ทำการกรอง ณ อุณหภูมิห้องและควบคุมความดันให้คงที่ตามค่าที่ต้องการ แล้วทำการจับเวลาและบันทึกน้ำหนักกระแสเพอร์มิเอทเมื่อสิ้นสุดการทดลองทำการเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ปริมาณกลีเซอรอลด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ทุกสภาวะสำหรับกลไกฟาล์วลิ่งใช้การวิเคราะห์จากแบบจำลองเฮร์เมีย (Hermia model) ของของไหลชนิดนอนนิวโตเนียน (nonnewtonian fluid)

2.3 ชนิดเมมเบรน

เมมเบรนเกรดการค้าจากบริษัท Microdyn Nadir GmbH ชนิดพอลิอีเธอร์ซัลโฟน (polyethersulfone; PES) มีค่าขนาดน้ำหนักโมเลกุลตัด (MWCO) ที่ 150, 10 และ 5 kDa มีรหัสการใช้งานดังนี้ UP150, UP010 และ UP005 ตามลำดับ และชนิดไฮโดรฟิลิกพอลิอีเธอร์ซัลโฟน (hydrophilic polyethersulfone) มีรหัสการใช้งาน UH030 มีค่า MWCO 30 kDa ถูกนำมาใช้ในการทดลองเพื่อศึกษาผลของความดันต่อค่าฟลักซ์เพอร์มิเอทและความสามารถในการกักกัน โดยช่วงความดันที่ศึกษามีดังนี้ เมมเบรนชนิด UP150, UH030 และ UP010 ใช้ความดัน 4, 6 และ 8 บาร์ ในขณะที่เมมเบรน UP005 ใช้ความดัน 10, 15 และ 20 บาร์ เพื่อเพิ่มแรงขับให้ชุดทดลองเนื่องจากเป็นเมมเบรนที่มีความแน่นสูง

2.4 การวิเคราะห์

ในงานวิจัยนี้ศึกษาผลการทดลองบนฐานของฟลักซ์เพอร์มิเอท ความสามารถในการกักกัน และกลไกฟาล์วลิ่งดังนี้ ฟลักซ์ คือ อัตราการไหลผ่านเมมเบรนของเพอร์มิเอทต่อพื้นที่หน้าตัด เมมเบรน มีหน่วยเป็นน้ำหนักของเพอร์มิเอทต่อพื้นที่ต่อเวลา ดังสมการที่ 1

$$J_i = W / (a \cdot t) \quad (1)$$

โดยที่ J_i คือ ฟลักซ์ของสาร i , a คือ พื้นที่การกรอง W คือ น้ำหนักของสารที่กรองได้และ t คือ เวลา

ความสามารถการกักกัน (rejection coefficient; R) คือร้อยละของตัวถูกละลายที่ไม่สามารถผ่านเมมเบรนได้ดังสมการต่อไปนี้

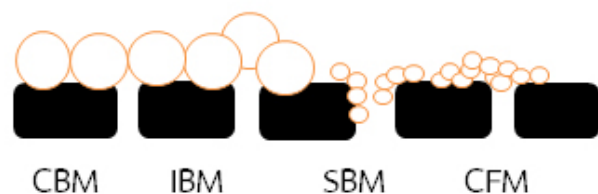
$$R = [1 - (C_p / C_f)] \times 100 \quad (2)$$

โดย

C_p คือ ความเข้มข้นตัวถูกละลายในเพอร์มิเอท

C_f คือ ความเข้มข้นตัวถูกละลายในสารป้อน

ฟาล์วลิ่ง คือการสะสมของอนุภาคที่เมมเบรนทำให้เกิดการอุดตันและส่งผลต่อสมรรถนะหรือค่าฟลักซ์ ของเมมเบรนลดลง ในงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองเฮร์เมีย (Hermia, 1982) เพื่อศึกษากลไกฟาล์วลิ่งของสารละลายชนิดนอนนิวโตเนียนที่ความดันคงที่เพื่ออธิบายการลดลงของค่าฟลักซ์ มี 4 รูปแบบคือ complete blocking model (CMB), intermediate blocking model (IBM), standard blocking model (SBM) และ cake filtration model (CFM) ดังรูปที่ 4 และตารางที่ 1



รูปที่ 4 แบบจำลองกลไกฟาล์วลิ่งของเฮร์เมียทั้ง 4 รูปแบบ [9]

ตารางที่ 1 สมการความเป็นเส้นตรงในแบบจำลองกลไกฟาล์วลิ่งของเฮอร์เมีย [10]

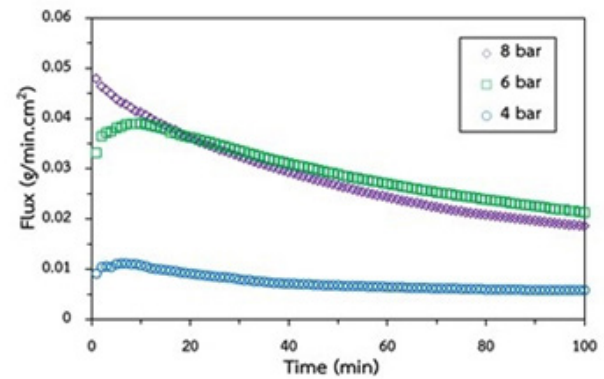
Blocking Mechanism	Linearized equation form
CBM	$\ln J = \ln J_0 - K_c t$
IBM	$1/J = (1/J_0) + K_t t$
SBM	$(1/J)^{0.5} = (1/J_0)^{0.5} + K_s t$
CFM	$(1/J)^2 = (1/J_0)^2 + K_{cf} t$

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

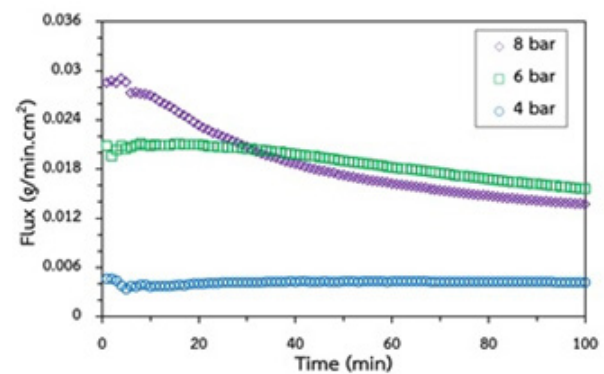
3.1 ฟลักซ์เพอร์มิเอทของการกรอง

โปรไฟล์ฟลักซ์เพอร์มิเอทของเมมเบรน UP150 และ UH030 แสดงดังรูปที่ 5 และ 6 พบว่าฟลักซ์เพอร์มิเอทมีความคล้ายคลึงกัน คือที่สภาวะเริ่มต้นการกรอง ณ ความดัน 8 บาร์ มีค่าฟลักซ์สูงสุด ทั้งนี้เพราะเป็นความดันในการดำเนินการสูงสุดส่งผลให้มีแรงขับสูงสุดผ่านเมมเบรน อย่างไรก็ตามเมื่อเวลาการกรอง นานขึ้นความดันที่สูงอาจส่งผลทำให้อนุภาคถูกอัดแน่น ที่ผิวหน้าเมมเบรนและภายในรูพรุนมากขึ้น จึงทำให้ ค่าฟลักซ์ลดลง ซึ่งพบว่าค่าฟลักซ์สุดท้าย ณ ความดัน 8 บาร์ของเมมเบรนทั้ง 2 ชนิดมีค่าต่ำกว่าความดัน 6 บาร์ และเมื่อเปรียบเทียบ โปรไฟล์ฟลักซ์ของเมมเบรน UP150 ที่ความดัน 4 และ 6 บาร์ พบว่าฟลักซ์มีการเพิ่มขึ้นในช่วงแรกอย่างสั้นๆ และลดลงเข้าสู่สภาวะคงที่ตามระยะเวลาการกรอง ทั้งนี้เป็นเพราะในช่วงเริ่มต้นของ ระบบที่มีความดันต่ำกว่านั้น อนุภาคขนาดใหญ่ยังคงแขวนลอยในสารละลาย จึงเกิดการซึมผ่านของเพอร์มิเอทอย่างต่อเนื่องและเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อเวลาการกรองเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการสะสมของอนุภาคบนผิวเมมเบรน ส่งผลให้ความต้านทานในการไหลเพิ่มขึ้นจึงทำให้มีการลดลงของฟลักซ์

ฟลักซ์เพอร์มิเอทของเมมเบรน UH030 ที่ความดัน 4 และ 6 บาร์ มีโปรไฟล์ที่คล้ายคลึงกันและมีความแตกต่างของค่าฟลักซ์อย่างมีนัยสำคัญ โดยพบความดันมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของ ฟลักซ์เพอร์มิเอท [11]



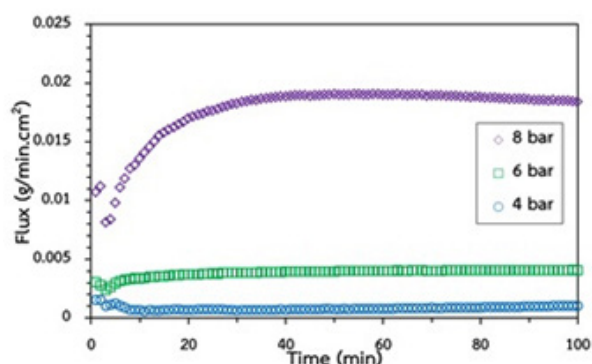
รูปที่ 5 ฟลักซ์เพอร์มิเอทของเมมเบรน UP150 ที่ความดัน 4, 6 และ 8 บาร์



รูปที่ 6 ฟลักซ์เพอร์มิเอทของเมมเบรน UH030 ที่ความดัน 4, 6 และ 8 บาร์

ฟลักซ์เพอร์มิเอทของ UP010 ที่ความดัน 4, 6 และ 8 บาร์ แสดงดังรูปที่ 7 พบว่าเมื่อเทียบกับเมมเบรน UP150 และ UH030 โปรไฟล์ฟลักซ์มีความแตกต่าง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะขนาดรูพรุนที่เล็กลงของ UP010 ร่วมกับสภาวะโพลาลิเซชันของความเข้มข้นและฟาล์วลิ่ง ความแตกต่างของ UP010 อาจเกิดจากการอุดตันที่ผิวหน้าเมมเบรน อนุภาคของสารไม่สามารถผ่านรูพรุนขนาดเล็กได้ กล่าวคือเมื่อขนาดของอนุภาค

และรูพรุนมีความแตกต่างกันอย่างมาก มีผลทำให้สารไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านรูพรุนได้ จึงลดการอุดตันภายในรูพรุนประกอบกับระบบมีตัวกวนจึงทำให้อนุภาคขนาดใหญ่มีการกระจายในเฟสของน้ำมันและอนุภาคเกิดการรวมตัวทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของค่าฟลักซ์ในช่วงเริ่มต้นแทน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ [12]



รูปที่ 7 ฟลักซ์เพอร์มิเอทของเมมเบรนระดับ UP010 ที่ความดัน 4, 6 และ 8 บาร์

รูปที่ 5, 6 และ 7 แสดงให้เห็นว่าค่าฟลักซ์เพอร์มิเอทเพิ่มขึ้นเมื่อ MWCO ของเมมเบรนสูงขึ้น นอกจากนี้ความดันในการดำเนินการที่สูงมีผลต่อค่าฟลักซ์เพอร์มิเอทที่สูงขึ้นด้วยเช่นกัน อย่างไรก็ตามการเลือกใช้เมมเบรนที่มี MWCO ขนาดเล็กควบคู่กับความดันสูง ดังรูปที่ 8 ไม่ทำให้ค่าฟลักซ์ดีขึ้นเสมอไป ดังตารางที่ 2 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ [13]

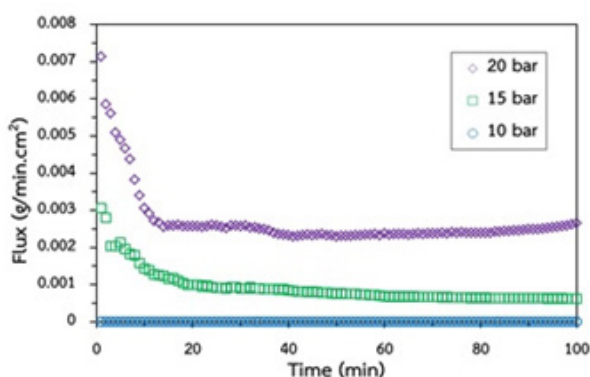
ในทำนองเดียวกันฟลักซ์เพอร์มิเอทของ UP005 แสดงดังรูปที่ 8 พบว่าความดันมีผลต่อค่าฟลักซ์อย่างมีนัยสำคัญ โปรไฟล์ฟลักซ์เพอร์มิเอทที่ความดัน 15 และ 20 บาร์ มีความคล้ายคลึงกัน คือมีการลดลงในช่วงเริ่มต้นทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากระบบดำเนินการที่ความดันสูงทำให้อนุภาคถูกบีบอัดผ่านรูพรุนไปยังกระแสน้ำเนื่องจากโพลาริเซชันของความเข้มข้นและฟัลลิ่ง

อย่างไรก็ตามโปรไฟล์ที่ความดัน 10 บาร์ มีแนวโน้มคล้ายคลึงกับเมมเบรน UP010 ทั้งนี้เนื่องจากความแตกต่างระหว่างขนาดอนุภาคและรูพรุนเป็นหลัก ในสภาวะที่ความดันไม่สูงมากเกินไป ค่าฟลักซ์เพอร์มิเอทเริ่มต้นและฟลักซ์สุดท้ายของเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันจากตารางที่ 2 พบว่า ฟลักซ์สุดท้ายของเมมเบรน UP010 ในงานวิจัยนี้มีค่าใกล้เคียงกับค่าฟลักซ์ของงานวิจัยของ Saleh และคณะ (2010) ซึ่งทดลองการทำบริสุทธิ์ไบโอดีเซลด้วยเมมเบรนพอลิเมอร์พอลิอะคริไนด์ไทรล์ (polyacrylonitrile) ขนาด 10 kDa

ตารางที่ 2 ค่าฟลักซ์เพอร์มิเอทของเมมเบรน อัลตราฟิลเตรชัน ทั้ง 4 ชนิด

Membrane	Pressure	Initial flux	Final flux
UP150	4	0.0092	0.0058
	6	0.0331	0.0213
	8	0.0479	0.0185
UH030	4	0.0046	0.0042
	6	0.0209	0.0156
	8	0.0286	0.0137
UP010	4	0.0015	0.0011
	6	0.0031	0.0041
	8	0.0107	0.0184
UP005	10	n/a*	0.00005
	15	0.0031	0.0006
	20	0.0071	0.0027

*n/a เนื่องจากปริมาณเพอร์มิเอทมีค่าน้อยมาก



รูปที่ 8 ฟลักซ์เพอร์มิเอทของเมมเบรน UP005 ที่ความดัน 10, 15 และ 20 บาร์

3.2 การกักกันกลีเซอรอล

ความสามารถการกักกันกลีเซอรอลของเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันทั้ง 4 ชนิด แสดงได้ดังตารางที่ 3 พบว่าเมมเบรนชนิด UH030 และ UP010 ให้ค่าความสามารถการกักกันที่ใกล้เคียงกันและให้ค่าสูงอยู่ในช่วงร้อยละ 91-97 ซึ่งแสดงถึงความเป็นไปได้ในการใช้เมมเบรนทั้ง 2 ชนิดเพื่อแยกกลีเซอรอล

ตารางที่ 3 ความสามารถในการกักกันกลีเซอรอลของเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน

Membrane	Pressure (bar)	Glycerol Rejection (R)
UP150	4	66.45
	6	63.44
	8	48.31
UH030	4	93.85
	6	93.11
	8	91.14
UP010	4	95.11
	6	97.62
	8	91.98
UP005	10	88.37
	15	87.52
	20	73.69

ความสามารถการกักกันกลีเซอรอลมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเมมเบรนมีน้ำหนักโมเลกุลตัดน้อยลงแต่พบว่าเมมเบรน UP005 ให้ค่าความสามารถการกักกันกลีเซอรอลในช่วงร้อยละ 4-88 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะปริมาณฟลักซ์เพอร์มิเอทของเมมเบรน UP005 มีค่าน้อยจึงส่งผลต่อการวิเคราะห์

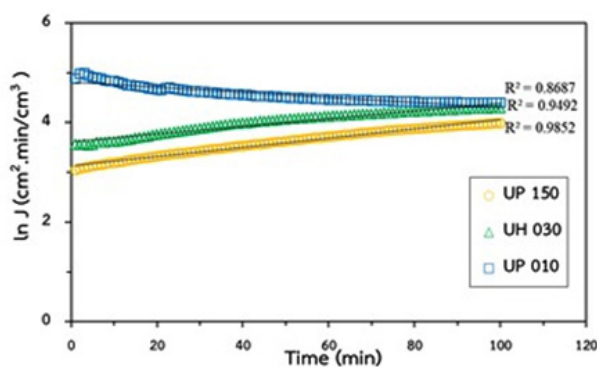
ปริมาณเนื่องจากปริมาณกลีเซอรอลอิสระที่ตกจมลงไปที่ผิวหน้าเมมเบรน ประกอบกับความดันในการดำเนินงานที่สูงกว่า UP150, UH030 และ UP010 ประมาณ 3-5 เท่า ทำให้เกิดการผลักกลีเซอรอลผ่านไปยังกระแสเพอร์มิเอท จากผลของความสามารถในการแยกกลีเซอรอลจึงสนับสนุนว่าการเลือกใช้เมมเบรนที่มีขนาดโมเลกุลตัดที่ต่ำร่วมกับการใช้ความดันสูงในการแยกสารไม่ได้ให้ผลในการแยกที่ดีเสมอไป กระบวนการแยกสารด้วยเทคโนโลยีเมมเบรนขึ้นอยู่กับองค์ประกอบอย่างอื่นควบคู่ เช่น ความดันองค์ประกอบของสารป้อน

3.3 กลไกฟาล์วล้าง

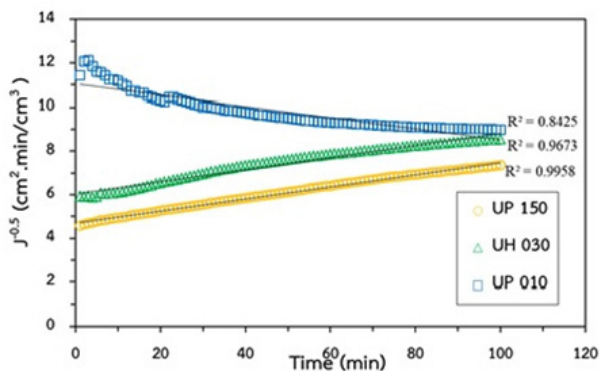
กลไกฟาล์วล้างโดยใช้การพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่คำนวณได้ตามตารางที่ 1 ของการกรองอัลตราฟิลเตรชันทั้ง 4 ชนิด ณ ความดันสูงสุด แสดงได้ดังตารางที่ 4 และรูปที่ 9 (ก)-(ง) แสดงกราฟการถดถอยเชิงเส้นตรงของเมมเบรน UP150, UH030 และ UP010 เนื่องจากเมมเบรน UP005 มีช่วงกราฟที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จึงไม่สามารถแสดงผลในกราฟเดียวกันได้

ตารางที่ 4 ค่า R^2 ของเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันทั้ง 4 ชนิด

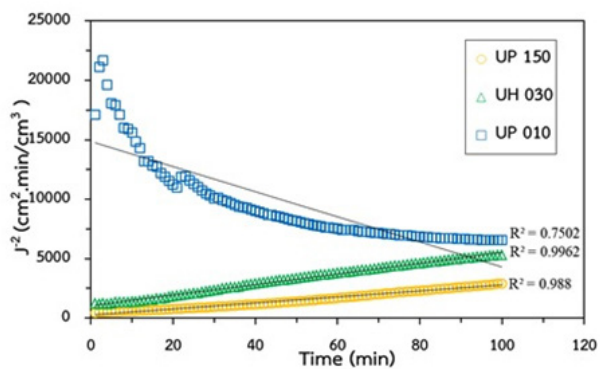
Mem-brane	Regression Coefficient, R^2			
	CBM	IBM	SBM	CFM
UP150	0.985	0.999	0.995	0.988
UH030	0.949	0.981	0.967	0.996
UP010	0.868	0.814	0.843	0.750
UP005	0.953	0.895	0.927	0.816



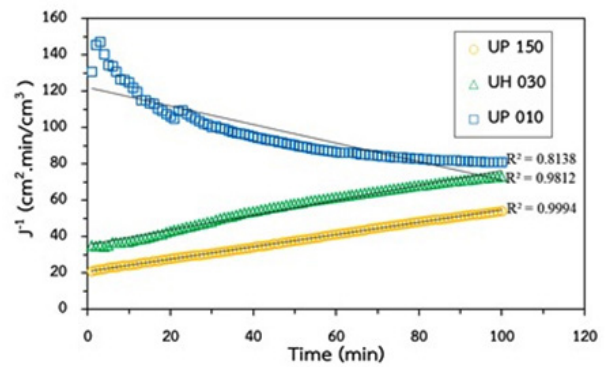
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 9 ผลของ MWCO ต่อกลไกฟาล์วลิ่ง:

(ก) CBM, (ข) IBM, (ค) SBM และ (ง) CFM

3.2 การกักกันกลีเซอรอล

ผลการทดลองพบว่าเมมเบรน UP150 ให้ค่า R^2 สูงทุกแบบจำลองมีแนวโน้มการเกิดฟาล์วลิ่งด้วยกลไกชนิดการอุดตันของรูพรุน (pore blocking) สำหรับ UP005 พบว่ากลไกการอุดตันของรูพรุนเป็นแบบ CBM ด้วยค่า R^2 สูงสุดอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับแบบจำลองอื่น

เมื่อพิจารณาการอุดตันของเมมเบรน UP010 มีแนวโน้มให้ค่า R^2 ต่ำกว่าเมมเบรนชนิดอื่น แต่มีแนวโน้มเกิดการอุดตันของรูพรุน ทั้งนี้แสดงถึงการรวมตัวของอนุภาคที่ผิวหน้าของเมมเบรนส่งผลให้อนุภาคไม่สามารถผ่านรูพรุนได้และลดปริมาตรรูพรุนในระหว่างการกรอง สำหรับเมมเบรน UH030 พบว่าผลการทดลองสอดคล้องกับกลไกการกรองแบบเค้ก

4. สรุปผล

ผลการศึกษาการแยกกลีเซอรอลออกจากไบโอดีเซลในการกรองระดับอัลตราฟิลเตรชันด้วยเมมเบรน UP150, UH030, UP010 และ UP005 พบว่า MWCO และความดันมีผลต่อฟลักซ์เพอร์-มิเอทความสามารถการกักกัน และกลไกฟาล์วลิ่ง งานวิจัยนี้พบว่าสภาวะการทำงานที่เหมาะสมควร ใช้เมมเบรน

UH030 ที่ความดัน 6 บาร์ โดยให้ค่า ฟลักซ์เพอร์มิเอต อยู่ในช่วง 0.0209-0.0156 g/min.cm² ความสามารถ กำกั้นกลีเซอรอลร้อยละ 93.11 และมีกลไกฟาล์วถึง แบบเค็ก ผลการทดลองแสดงถึงความเป็นไปได้ในการ ใช้เทคโนโลยีเมมเบรนเพื่อแยกกลีเซอรอล ในกระบวนการ ผลิตไบโอดีเซล

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ บริษัทน้ำมันพืชปทุม จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์น้ำมันไบโอดีเซลดิบสำหรับ งานวิจัย และขอขอบคุณทุนสนับสนุนงานวิจัยเงิน งบประมาณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Atadashi I.M, Aroua M.K, Abdul A. Biodiesel separation and purification: A review. Renewable Energy. 2011;36, 437-443.
- [2] Yong W, Xingguo W, Yuanfa L., Shiyi O, Yanlai T, Shuze T. Refining of biodiesel by ceramic membrane separation. Fuel Processing Technology. 2009; 90, 422-427.
- [3] Rungsinee K. Degumming in rice bran oil with nanofiltration membrane technology. The 15th TSAE National Conference and the 7th inter national conference. 2014. (in Thai)
- [4] Chiranun K. Phospolipid removal of Jatropa oil and rice bran oil by ultrafiltration. The 10th RMUTT graduate research conference. 2015. (in Thai)
- [5] Juan T, Natalia R, Javier A, Nelio O, José M. Ultrafiltration polymeric membrane for the purification of biodiesel from ethanol. Journal of Cleaner Production. 2017; 141, 641-647.
- [6] Magno A, Suellen N, Lara P, Maria M, Vicelma C, Miria R. Biodiesel purification micro and ultrafiltration membranes. Renewable Energy. 2013; 58, 15-20.
- [7] Maria G, Pedro A, Nehemias P. Biodiesel production from degummed soybean oil and glycerol removal using ceramic membrane. Journal of Membrane Science. 2011; 378, 453-461.
- [8] Jehad S, Andr'e T, Marc D. Glycerol removal from biodiesel using membrane separation technology. Fuel. 2010; 89, 2260-2266.
- [9] M. Cinta V, Silvia B, Jaime G, Enrique R. Analysis of membrane pore blocking models applied to the Ultrafiltration of PEG. Separation and Purification Technology . 2008;62 , 489-498.

- [10] Indok A, Abdul M, Mastura P, Nidal H. Analysis of deposition mechanism during ultrafiltration of glycerin-rich solutions. *Desalination*. 2010;261 , 313-320.
- [11] Mehrdad H, Agnieszka N. The influence of different factors on the stability and ultrafiltration of emulsified oil in water. *Journal of Membrane Science*. 2008; 325, 199-208.
- [12] Maria G, Nehemias P, Sueli B. Separation of biodiesel and glycerol using ceramic membrane. *Journal of Membrane Science*. 2010; 352, 271-276.
- [13] Maria G, Pedro A, Nehemias P. Influence of acidified water addition on the biodiesel and glycerol separation through membrane technology. *Journal of Membrane Science*. 2013; 431, 28-36.

การบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา Ag-TiO₂ Color Removal from Synthetic Wastewater by Photocatalytic Process with Ag-TiO₂ Catalyst

ธรรมศักดิ์ โรจน์วิรุฬห์^{1*} สัญญา สิริวิทยาปกรณ์² อรวรรณ โรจน์วิรุฬห์³ และกชกร สุรนาวรัตน์⁴
Thammasak Rojviroon^{1*} Sanya Sirivithayapakorn² Orawan Rojviroon³ Kotchakorn Suranowarath⁴
thammasak@rmutt.ac.th^{1*}, fengsys@ku.ac.th², orawan_r@rmutt.ac.th³, fengkos@ku.ac.th⁴

^{1*} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

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

^{2,4} ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

^{2,4} Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

³ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

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

Received: September 7, 2017
Revised: December 14, 2017
Accepted: January 16, 2018

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาศักยภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ โดยการเติมสารเจือปน Ag ในปริมาณที่ต่างกัน 3 ค่า ได้แก่ 0.1%, 0.5% และ 1.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร รวมทั้งนำตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวที่เตรียมขึ้นมาศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสี IC และ RB5 ที่ปนเปื้อนในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกร่วมกับแหล่งกำเนิดแสงจากหลอด UVA ที่มีความเข้มแสง 1,000 μW/cm² โดยผลจากการเติมสารเจือปน Ag ลงในตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีความเหมาะสมและมีศักยภาพมากขึ้น ซึ่งประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดสี IC และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ เท่ากับ 92.00% และ 69.00% ตามลำดับ เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1.0% Ag-TiO₂ และใช้ระยะเวลาการกำจัด 90 นาที ในส่วนของการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกในการกำจัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์สามารถใช้สมการ Langmuir Hinshelwood ในการอธิบายกลไกการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น

คำสำคัญ: สารเจือปน โฟโตออกซิเดชัน โซล-เจล อุตสาหกรรมสิ่งทอ

Abstract

This research aims to improve the potential of TiO₂ photocatalyst by doping with 3 different amounts of Ag, i.e. 0.1%, 0.5% and 1.0% weight to volume. The color removal efficiency of all prepared photocatalysts were evaluated with IC and RB5 in synthetic wastewater by photocatalytic process under UVA light sources of 1,000 μW/cm². As a result of the Ag doped into the TiO₂ photocatalyst, the doped photocatalyst was more suitable and potent for photocatalytic process. The optimum removal efficiency of IC and RB5 in synthetic wastewater was 92.00% and 69.00%, respectively for 1.0%Ag-TiO₂ photocatalyst at 90 minutes. For the kinetics analysis of photocatalytic process, the mechanism of color removal in photocatalytic reaction could be described by the Langmuir Hinshelwood model.

Keywords: dopant, photooxidation, sol-gel, textile industry

1. บทนำ

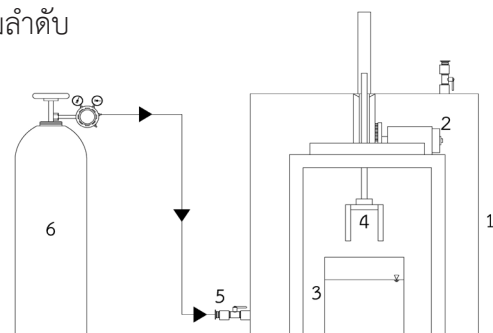
อุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นอุตสาหกรรมหนึ่ง ที่ส่งผลให้เกิดปัญหาด้านมลพิษทางน้ำ เนื่องจากเป็น อุตสาหกรรมที่ต้องมีการใช้น้ำเป็นปริมาณมากใน กระบวนการผลิต [1] ซึ่งขั้นตอนในกระบวนการผลิต ของอุตสาหกรรมสิ่งทอ ไม่ว่าจะเป็นการเตรียมวัตถุดิบ และการย้อมสี ล้วนแล้วแต่ต้องใช้น้ำ รวมทั้งวัตถุดิบ ในการผลิต เช่น สีย้อมผ้า สารเคมี สิ่งสกปรก โลหะหนัก และสิ่งเจือปนต่างๆ ในเส้นใย เป็นต้น [2, 3] ทำให้น้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตดังกล่าวเมื่อถูกปล่อย ลงสู่สิ่งแวดล้อมทางธรรมชาติ จะส่งผลกระทบต่อ การดำรงชีพของสิ่งมีชีวิต ระบบนิเวศและสิ่งแวดล้อม ทางน้ำ ทั้งนี้การบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรม ฟอกย้อมส่วนใหญ่มีองค์ประกอบของไฮโดรคาร์บอน ที่มีความคงตัวสูงและย่อยสลายได้ยาก ดังนั้นจึงเป็น ข้อจำกัดของกระบวนการบำบัดที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน แม้ว่าจะสามารถกำจัดองค์ประกอบที่เป็นมลพิษต่อ สิ่งแวดล้อมทางน้ำได้ แต่ไม่สามารถกำจัดสีในน้ำทิ้ง ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นในการบำบัดสี ในน้ำทิ้งโดยศึกษาเกี่ยวกับน้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งเตรียมจาก สีย้อม 2 ชนิด ได้แก่ Indigo carmine (IC) และ Reactive black 5 (RB5) โดยใช้กระบวนการ โฟโตคะตะลิติก (Photocatalytic Process) ซึ่งเป็น กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา แสง (Photocatalyst) และแสงอัลตราไวโอเลต ทั้งนี้ วัตถุประสงค์หลักในงานวิจัยนี้ ได้แก่ การพัฒนา ศักยภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) โดยการเติมสารมลทินเงิน (Ag-TiO_2) ซึ่งมีการเติมสารมลทินในปริมาณต่างกันด้วยวิธีโซล-เจล รวมทั้งการนำตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวมาทดสอบหา ประสิทธิภาพและวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ในการ บำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ของกระบวนการโฟโต คะตะลิติก

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาฟิล์มบาง

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อใช้ในกระบวนการ โฟโตคะตะลิติกโดยเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาฟิล์มบาง 4 ชนิด ได้แก่ TiO_2 , 0.1% Ag-TiO_2 , 0.5% Ag-TiO_2 และ 1.0% Ag-TiO_2 ซึ่งเตรียมด้วยวิธีโซล-เจล สามารถเตรียมได้โดยผสมไทเทเนียมเตตระไอโซโพรพอกไซด์ ($\text{Ti}[\text{OCH}(\text{CH}_3)_2]_4$, TTIP) กับสารละลายไอโซโพรพานอล ($\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$) อัตราส่วน 1:15 โดยปริมาตร ทำการปรับ pH ให้มีค่า 2-3 เติมสารเจือปนโดยใช้ซิลเวอร์ไนเตรท (AgNO_3) ในอัตราส่วน 0.1%, 0.5% และ 1.0% โดย น้ำหนักต่อปริมาตร แล้วทำการกวนผสมในสภาวะปิด ที่ไม่มีออกซิเจนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไป เก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้สารละลายโซล-เจลที่สามารถนำไปเคลือบผิวบน ตัวกลางได้ การเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาฟิล์มบางโดยใช้ สารละลายโซล-เจลที่เตรียมขึ้นบนผิวของ Petri dish ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. ลึก 15 มม. ซึ่ง ผลิตจากแก้วบอโรซิลิเกต สามารถทำได้โดยอุปกรณ์ จุ่มเคลือบผิว (Dip coating equipment) ดังรูปที่ 1 ด้วยอัตราเร็วในการชุบเคลือบ เท่ากับ 9 มิลลิเมตร ต่อนาที และทำการเคลือบผิวเป็นจำนวน 5 ชั้น ในการ จุ่มเคลือบผิวแต่ละชั้นเริ่มต้นตั้งแต่ชั้นที่ 1-5 เท่ากับ 100, 200, 250, 350 และ 500 องศาเซลเซียส ตามลำดับ



- | | |
|------------------------|-------------------------|
| 1. ตู้อุปกรณ์เคลือบผิว | 4. Petri dish |
| 2. มอเตอร์ไฟฟ้า | 5. วาล์วแก๊ส |
| 3. สารละลายโซล-เจล | 6. ถังแก๊ส N_2 |

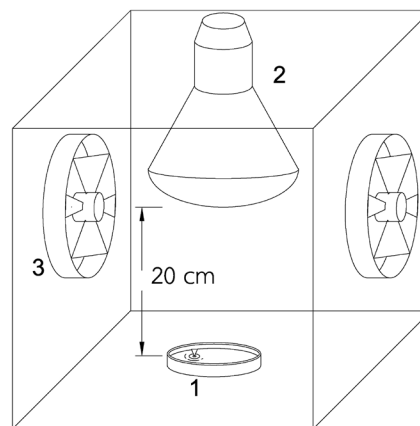
รูปที่ 1 อุปกรณ์เคลือบผิวตัวเร่งปฏิกิริยา

2.2 วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาฟิล์มบางชนิดต่างๆ ซึ่งในส่วนของลักษณะพื้นผิววิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ Atomic Force Microscopy (AFM) รุ่น Asylum Research MFP-3DBIO สำหรับขนาดอนุภาค ความขรุขระเฉลี่ยพื้นที่ผิวปรากฏ สามารถวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Gwyddion V.2.22 และสำหรับขนาดช่องว่างพลังงานสามารถวิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ UV-Vis spectrometer รุ่น Lambda 650 Perkin Elmer

2.3 การหาประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์

เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สีย้อม IC ให้มีความเข้มข้นเริ่มต้น (C_0) เท่ากับ 0.8, 1, 1.2, 1.4 และ 1.6 μM และสำหรับสีย้อม RB5 เตรียมให้มีความเข้มข้นเริ่มต้น เท่ากับ 2, 4, 6, 8 และ 10 μM เพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดสีด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ในถังปฏิกรณ์โฟโตคะตะลิติก (รูปที่ 2) โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์สีที่เตรียมขึ้นเติมลงใน Petri dish ปริมาตร 50 mL และทำการทดลองในสภาวะที่ให้แสงอัลตราไวโอเลตชนิดเอ (UVA) ที่ความเข้มแสง 1,000 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ แล้วทำการเก็บตัวอย่างมาวิเคราะห์ความเข้มข้นของสีที่เปลี่ยนแปลงไปที่เวลา 0, 5, 15, 30, 60 และ 90 นาที โดยใช้เทคนิคการวัดการดูดกลืนคลื่นแสงด้วยอุปกรณ์ UV Spectrophotometer รุ่น Biochrom Libra S12 และทำการทดลองในสภาวะควบคุมที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาฟิล์มบางแต่ไม่มีการให้แสงเพื่อใช้เปรียบเทียบกับผลการทดลองในชุดทดลอง



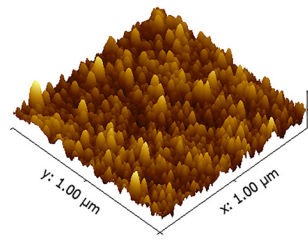
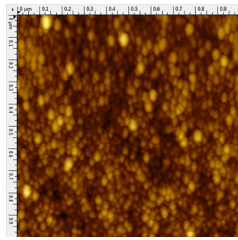
1. Petri dish เคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา
2. แหล่งกำเนิดแสง
3. พัดลมระบายความร้อน

รูปที่ 2 ถังปฏิกรณ์โฟโตคะตะลิติก

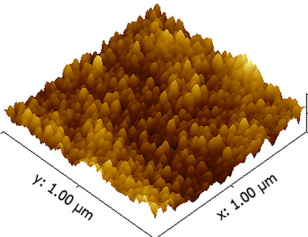
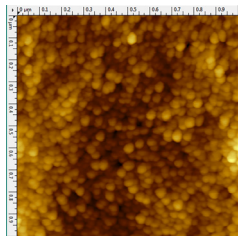
3. ผลการทดลองและวิจารณ์

3.1 ลักษณะกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

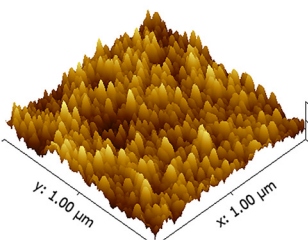
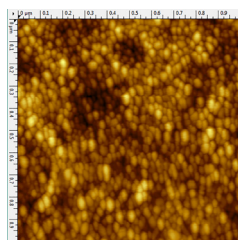
ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาฟิล์มบางที่เตรียมขึ้นทั้ง 4 ชนิด ด้วยอุปกรณ์ AFM แสดงดังรูปที่ 3 ซึ่งแสดงภาพถ่าย 2 และ 3 มิติของตัวเร่งปฏิกิริยาบนพื้นผิวดังกล่าว ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถเคลือบอยู่บนพื้นผิวดังกล่าวแบบสม่ำเสมอ เมื่อสังเกตขนาดอนุภาคและการกระจายตัวโดยรวมของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 4 ชนิด พบว่า อนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 4 ชนิดมีขนาดใกล้เคียงกัน และมีการกระจายตัวอยู่ทั่วบริเวณพื้นผิวหน้าของตัวกลางที่ยึดเกาะ สำหรับการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพปฏิกิริยาฟิล์มบางที่เตรียมขึ้นทั้งหมดด้วยโปรแกรม Gwyddion ทำให้สามารถวิเคราะห์ขนาดอนุภาค ค่าความขรุขระเฉลี่ย (RMS) และพื้นที่ผิวปรากฏของตัวเร่งปฏิกิริยาฟิล์มบางทั้งหมดที่เตรียมขึ้นได้ ดังแสดงในตารางที่ 1



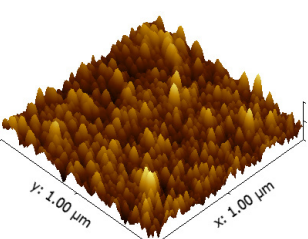
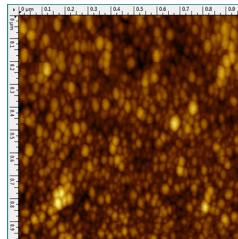
ก. TiO_2



ข. 0.1% Ag-TiO_2



ค. 0.5% Ag-TiO_2



ง. 1.0% Ag-TiO_2

รูปที่ 3 ลักษณะพื้นผิวทางกายภาพ
ของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตารางที่ 1 ขนาดอนุภาค ค่าความขรุขระเฉลี่ย (RMS)
พื้นที่ผิวปรากฏของตัวเร่งปฏิกิริยา และขนาดช่องว่าง
พลังงาน

พารามิเตอร์	TiO_2	0.1% Ag-TiO_2	0.5% Ag-TiO_2	1.0% Ag-TiO_2
ขนาด อนุภาค (nm)	35-70	30-60	40-60	50-60
RMS (nm)	1.76	1.93	1.91	1.46
พื้นที่ผิว ปรากฏ (μm^2)	1.024	1.003	1.004	1.004
ช่องว่าง พลังงาน (eV)	3.24	3.07	2.96	2.54

ตารางที่ 1 แสดงให้เห็นถึงผลวิเคราะห์ลักษณะ
พื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาฟิล์มบางทั้งหมดที่เตรียม
ขึ้น ประกอบด้วยขนาดอนุภาค ค่าความขรุขระเฉลี่ย
และพื้นที่ผิวปรากฏ ซึ่งผลวิเคราะห์ดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า
สามารถเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาฟิล์มบางที่มีอนุภาค
ขนาดนาโน มีการคงตัวในด้านขนาดอนุภาคดี และ
เมื่อพิจารณาความขรุขระเฉลี่ยของตัวเร่งปฏิกิริยา
พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา 1.0% Ag-TiO_2 มีความขรุขระ
เฉลี่ยน้อยที่สุด และเมื่อพิจารณาพื้นที่ผิวปรากฏโดย
รวมภายหลังจากการเคลือบผิวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา
ที่เตรียมขึ้น พบว่า พื้นที่ผิวปรากฏโดยรวมมีค่า
เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมเล็กน้อย สำหรับผลวิเคราะห์
ขนาดช่องว่างของตัวเร่งปฏิกิริยาฟิล์มบางทั้งหมด
ที่เตรียมขึ้น พบว่า ขนาดช่องว่างพลังงานของตัวเร่ง
ปฏิกิริยามีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัดซึ่งสอดคล้อง

กับงานวิจัยของ Demirici และคณะ ที่ศึกษาการเติมสารเจือปน Ag ในตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ส่งผลให้ขนาดช่องว่างพลังงานมีขนาดเล็กลงโดยเมื่อปริมาณการเติมสารเจือปน Ag สูงขึ้นขนาดช่องว่างพลังงานก็มีแนวโน้มที่จะแคบลง [4] ส่งผลดีต่อการนำไปใช้เพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะลิติกทำให้แนวโน้มของการเกิดปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น เนื่องจากตัวเร่งสามารถตอบสนองต่อแสงในช่วงความยาวคลื่นแสงที่มีขนาดกว้างมากขึ้น และระดับพลังงานน้อยลง [5, 6] ทั้งนี้ผลจากการเติมสารเจือปน โดย Ag ที่เติมลงไป ในรูปของสารประกอบ AgNO_3 ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เติมสารเจือปนดังกล่าวตอบสนองต่อแสงในช่วงความยาวคลื่นที่กว้างขึ้นส่งผลให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล ($\cdot\text{OH}$) และซูเปอร์ออกไซด์เรดิคัล ($\cdot\text{O}_2^-$) ซึ่งมีความสามารถในการเป็นสารออกซิไดซ์ที่รุนแรงเกิดได้ดียิ่งขึ้น [7-9]

3.2 ประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์

ประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์แสดงดังตารางที่ 2 และ 3 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลของการวิเคราะห์ประสิทธิภาพดังกล่าวแสดงให้เห็นว่ากระบวนการโฟโตคะตะลิติกสามารถกำจัดสีที่มีความเข้มข้นต่ำซึ่งมีความเข้มข้นของสีน้อยกว่าได้ดีกว่า เมื่อพิจารณาในแง่ของประเภทของสี พบว่ากระบวนการดังกล่าวสามารถกำจัดสี IC ได้ดีกว่า RB5 นอกจากนี้ในส่วนของการเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน 4 ชนิด พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีการเติมสารเจือปน Ag ใน TiO_2 ในปริมาณที่มากกว่าจะส่งผลให้การเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกเกิดขึ้นได้ดีกว่า ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าสูงกว่า โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดสีสูงสุด เท่ากับ 92.00% สำหรับสี IC ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น เท่ากับ

0.8 μM และ 69.00% สำหรับสี RB5 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น เท่ากับ 2.0 μM ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ประสิทธิภาพการกำจัดสี IC ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ C_0 แตกต่างกัน

C_0 (μM)	ประสิทธิภาพการกำจัดเมื่อใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยา (%)			
	TiO_2	0.1% Ag- TiO_2	0.5% Ag- TiO_2	1.0% Ag- TiO_2
0.8	90.00	91.25	91.88	92.00
1.0	87.00	89.00	89.00	90.00
1.2	63.33	65.00	65.83	65.83
1.4	52.14	54.29	55.71	55.71
1.6	45.02	45.64	46.89	47.51

ตารางที่ 3 ประสิทธิภาพการกำจัดสี RB5 ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่ C_0 แตกต่างกัน

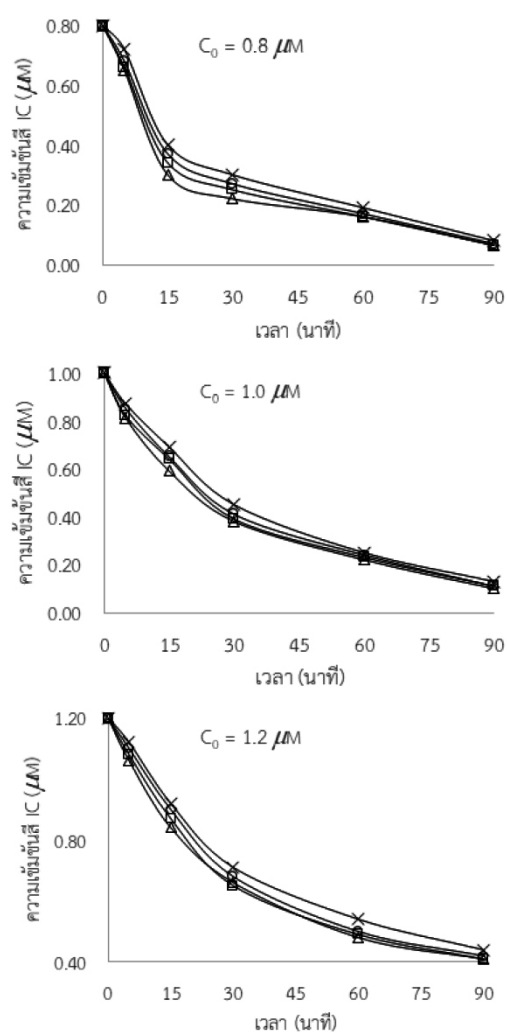
C_0 (μM)	ประสิทธิภาพการกำจัดเมื่อใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยา (%)			
	TiO_2	0.1% Ag- TiO_2	0.5% Ag- TiO_2	1.0% Ag- TiO_2
2.0	65.50	66.00	67.00	69.00
4.0	34.00	34.75	32.00	32.00
6.0	19.00	20.50	20.83	21.00
8.0	18.38	18.63	19.38	19.88
10.0	12.20	12.60	12.70	12.90

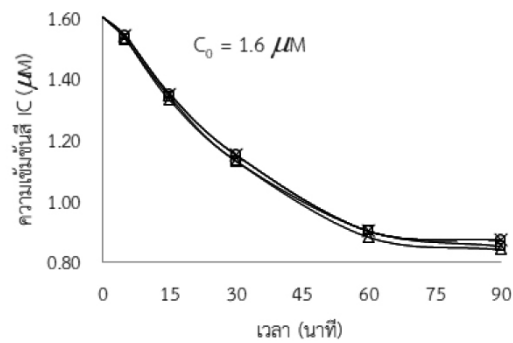
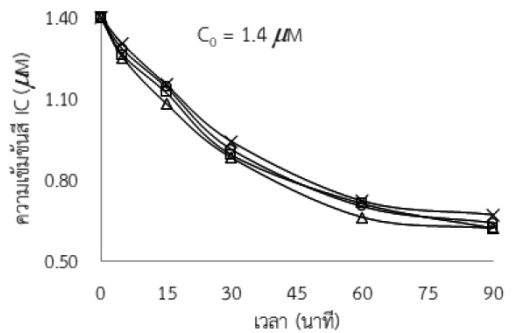
ทั้งนี้เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของกระบวนการที่สามารถกำจัดสีที่มีความเข้มข้นต่ำได้ดีกว่า เนื่องจากผลของความเข้มข้นของสีเริ่มต้นส่งผลกระทบโดยตรงต่อการสัมผัสกับแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ หากสี

ในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้นสูงจะทำให้เกิดการบดบังแสงทำให้ความเข้มแสงที่ถูกส่งไปยังผิวหน้าตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงรวมทั้งลดโอกาสการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก [10, 11] ในส่วนของผลของประเภทของสีที่เลือกใช้ จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสี IC มีค่ามากกว่า RB5 เนื่องจากขนาดโมเลกุลของสี IC มีขนาดเล็กกว่า RB5 และลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของ IC มีความซับซ้อนน้อยกว่า จึงทำให้สี IC ถูกกำจัดโดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกได้ดีกว่า [12, 13] นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาผลการเติมสารเจือปน Ag พบว่า การเติมสารเจือปน Ag ใน TiO_2 ในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลโดยตรงต่อขนาดช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยามีขนาดเล็กลงทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีมากขึ้น [4, 5]

สำหรับผลการติดตามการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสี IC และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4 และ 5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของสีทั้ง 2 ชนิดมีการลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาผ่านไป เนื่องจากผลจากกระบวนการโฟโตคะตะลิติกทำให้ $\cdot\text{OH}$ และ $\cdot\text{O}_2^-$ ซึ่งสามารถออกซิไดซ์สีที่ปนเปื้อนในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ทำให้ความเข้มข้นของสีในน้ำมีค่าลดลง [14-16] และเมื่อพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว พบว่าสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสีอย่างชัดเจนในช่วงแรกโดยมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงสุดจะอยู่ในช่วงเวลา 15 นาทีแรก ซึ่งสาเหตุเนื่องมาจากการเกิดปัจจัยจำกัดของการเคลื่อนย้ายมวล (Mass Transfer Limit) ของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยต้องอาศัยกลไกการดูดซับผิวที่ผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาจึงจะสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดย $\cdot\text{OH}$ ที่ผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นหากพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยามีพื้นที่จำกัดจะทำให้เกิดจุดจำกัดของการเกิดปฏิกิริยา (Reaction Rate Limit) ของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกได้ [17, 18]

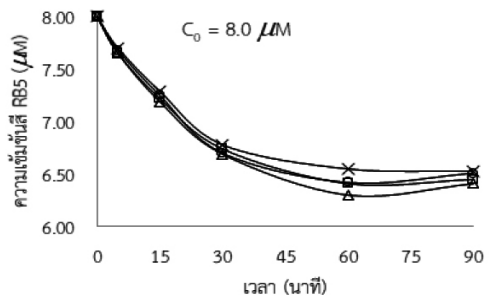
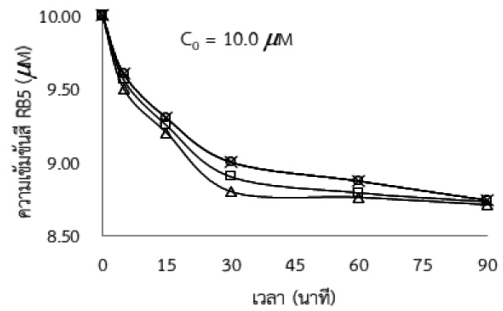
นอกจากนี้ผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างชนิดกันพบว่า การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีการเติมสารเจือปน Ag ในปริมาณที่สูงขึ้นส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ดีกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 เนื่องจากการเติมสารเจือปน Ag ช่วยให้เกิดการกระตุ้นอิเล็กตรอนที่ผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาอย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น รวมทั้งสามารถลดการเกิดรีคอมบิเนชันทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น [19] สำหรับความเหมาะสมของปริมาณสารเจือปนที่ใช้ พบว่า ที่เวลา 90 นาที ประสิทธิภาพในการกำจัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 มีค่าต่ำที่สุด แต่ในกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ag- TiO_2 ทุกชนิดที่เตรียมขึ้น พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสีมีค่ามากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณการเติมสารเจือปน Ag ใน TiO_2 ซึ่งแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนในกรณีที่ค่าความเข้มข้นของสีเริ่มต้นต่ำ





X TiO₂ O 0.1%Ag-TiO₂ □ 0.5%Ag-TiO₂
 Δ 1.0%Ag-TiO₂

รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสี IC



X TiO₂ O 0.1%Ag-TiO₂ □ 0.5%Ag-TiO₂
 Δ 1.0%Ag-TiO₂

รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสี RB5

3.3 จลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตคะตะลิติก

ในการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการกำจัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกสามารถอธิบายโดยสมการ Langmuir Hinshelwood (LH-model) [20-22] ดังสมการที่ 1 โดยสมการดังกล่าวที่สามารถอธิบายกลไกปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะลิติกซึ่งประกอบไปด้วยกลไกสำคัญ 2 กลไก ได้แก่ ปฏิกิริยาการดูดติดผิว และปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทั้งนี้สมการที่ 1 สามารถจัดรูปแบบใหม่เป็นรูปแบบของสมการเชิงเส้นได้ ดังสมการที่ 2

$$r = \frac{kKC}{(1 + KC)} \quad (1)$$

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{kKC} + \frac{1}{k} \quad (2)$$

โดยที่

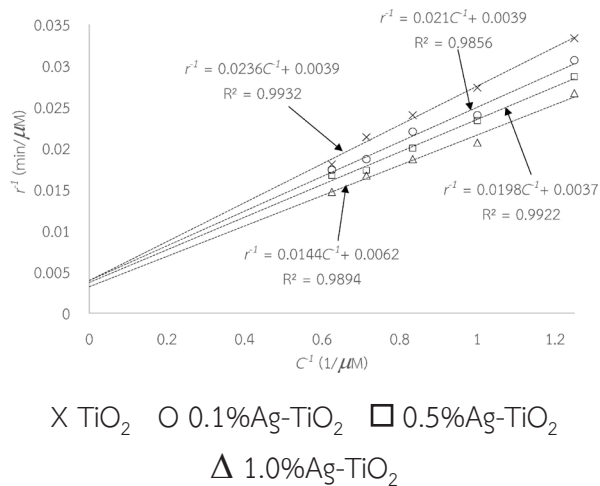
r = อัตราการเกิดปฏิกิริยา ($\mu\text{M}/\text{min}$)

C = ความเข้มข้นของสี (μM)

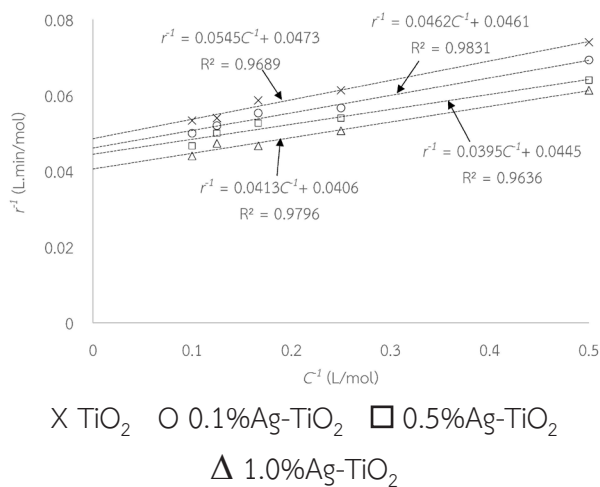
k = ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา ($\mu\text{M}/\text{min}$)

K = ค่าคงที่การปฏิกิริยาดูดติดผิว ($1/\mu\text{M}$)

ทั้งนี้จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ในการกำจัดสี IC และ RB5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการกับ C^{-1} ซึ่งพิจารณาที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 6 และ 7



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง r^{-1} กับ C^{-1} ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกในการกำจัดสี IC



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง r^{-1} กับ C^{-1} ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกในการกำจัดสี RB5

จากรูปที่ 6 และ 7 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง r^{-1} กับ C^{-1} ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกในการกำจัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์สามารถหาค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาและค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาคูดัดผิวของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

ทั้ง 4 ชนิดในการกำจัดสี IC และ RB5 ได้ ดังแสดงในตารางที่ 4 และ 5

ตารางที่ 4 ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาและค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาคูดัดผิวในปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกในการกำจัดสี IC

ตัวเร่งปฏิกิริยา	k	K
	($\mu\text{M}/\text{min}$)	($1/\mu\text{M}$)
TiO_2	161.290	0.431
0.1%Ag- TiO_2	270.270	0.187
0.5%Ag- TiO_2	256.410	0.186
1.0%Ag- TiO_2	256.410	0.165

ตารางที่ 5 ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาและค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาคูดัดผิวในปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกในการกำจัดสี RB5

ตัวเร่งปฏิกิริยา	k	K
	($\mu\text{M}/\text{min}$)	($1/\mu\text{M}$)
TiO_2	21.142	1.145
0.1%Ag- TiO_2	21.692	1.167
0.5%Ag- TiO_2	22.472	0.963
1.0%Ag- TiO_2	24.631	0.745

เมื่อพิจารณาค่าคงที่ต่างๆ ในการกำจัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกได้แก่ ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาและค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาคูดัดผิว และสำหรับการเกิดปฏิกิริยาในการกำจัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1.0%Ag- TiO_2 มีความสามารถในการกำจัดสีได้ดีที่สุด แม้ว่าเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพโดยรวมในการกำจัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เวลา 90 นาทีซึ่งมีค่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาในแง่ของจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการ

ดังกล่าว พบว่า การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1.0%Ag-TiO₂ ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยรวมเกิดสูงสุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเติมสารเจือปน Ag ในตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับกระบวนการโฟโตคะตะลิติกได้เป็นอย่างดี

4. สรุป

ผลการศึกษาในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการเติมสารเจือปน Ag บนตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ ชนิดฟิล์มบางสามารถเพิ่มศักยภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ ได้เป็นอย่างดีโดยตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถบำบัดสี IC และ RB5 ที่ปนเปื้อนในน้ำเสียสังเคราะห์ได้โดยมีประสิทธิภาพสูงสุด เท่ากับ 92.00% และ 69.00% ตามลำดับ

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สามารถสำเร็จลงได้ด้วยดีด้วยความอนุเคราะห์จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ซึ่งสนับสนุนทุนวิจัย ประจำปี 2558-2559

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Bilińska L, Gmurek M, Ledakowicz S. Textile Wastewater Treatment by AOPs for Brine Reuse, Process Safety and Environmental Protection. 2017. 109:420-428.
- [2] Paździor K, Wróblewski J, Klepacz-Smółka A, Gmurek M, Bilińska L, Kos L, et al. Influence of Ozonation and Biodegradation on Toxicity of Industrial Textile Wastewater. Journal of Environmental Management. 2017. 195:166-173.
- [3] Holkar CR, Jadhav AJ, Pinjari DV, Mahamuni NM, Pandit A.B. A Critical Review on Textile Wastewater Treatments: Possible Approaches. Journal of Environmental Management. 2016. 182:351-366.
- [4] Demirci S, Dikici T, Yurddaskal M, Gultekin S, Toparli M, Celik E. Synthesis and Characterization of Ag Doped TiO₂ Heterojunction Films and Their Photocatalytic Performances. Applied Surface Science.. 2016. 390:591-601.
- [5] Kong J, Song C, Zhang W, Xiong Y, Wan M, Wang Y. Enhanced Visible-light-active Photocatalytic Performances on Ag Nanoparticles Sensitized TiO₂ Nano-tube Arrays. Superlattices and Microstructures. 2017.
- [6] Liu S, Zhu D, Zhu J, Yang Q, Wu H. Preparation of Ag@AgCl-doped TiO₂/sepiolite and Its Photocatalytic Mechanism under Visible Light. Journal of Environmental Sciences. 2017.
- [7] Ghazalian E, Ghasemi N, Amani-Ghadim AR. Enhanced Visible Light Photocatalytic Performance of Ag₃PO₄ through Doping by Different Trivalent Lanthanide Cations. Materials Research Bulletin. 2017. 88:23-32.

- [8] Nair AK, JagadeeshBabu PE. Ag-TiO₂ Nanosheet Embedded Photocatalytic Membrane for Solar Water Treatment. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2017. 5;4:4128-4133.
- [9] Vaithiyathan R. Photocatalytic Decolourization of Reactive Dyes Using Silver Incorporated Titania Catalyst. Materials Today: Proceedings. 2016. 3;10:4226-4231.
- [10] Aazam ES. Photocatalytic Oxidation of Methylene Blue Dye under Visible Light by Ni Doped Ag₂S Nanoparticles. Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2014. 20;6: 4033-4038.
- [11] Laohaprapanon S, Matahum J, Tayo L, You SJ. Photodegradation of Reactive Black 5 in a ZnO/UV Slurry Membrane Reactor. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. 2015. 49:136-141.
- [12] Rojviroon T, Rojviroon O, Sirivithayapakorn S. Photocatalytic Decolourisation of Dyes Using TiO₂ Thin Film Photocatalysts. Surface Engineering. 2016. 32;8: 562-569.
- [13] Fathinia M, Khataee AR, Zarei M, Aber S. Comparative Photocatalytic Degradation of Two Dyes on Immobilized TiO₂ Nanoparticles: Effect of Dye Molecular Structure and Response Surface Approach. Journal of Molecular Catalysis A: Chemical. 2010. 333;1:73-84.
- [14] Abdel Messih MF, Ahmed MA, Soltan A, Anis SS. Facile Approach for Homogeneous Dispersion of Metallic Silver Nanoparticles on The Surface of Mesoporous Titania for Photocatalytic Degradation of Methylene Blue and Indigo Carmine Dyes. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry. 2017. 335:40-51.
- [15] Mousavi SM, Mahjoub AR, Abazari R. Facile Green Fabrication of Nanostructural Ni-doped ZnO Hollow Sphere as an Advanced Photocatalytic Material for Dye Degradation. Journal of Molecular Liquids. 2017. 242:512-519.
- [16] Khan SB, Hou M, Shuang S, Zhang Z. Morphological Influence of TiO₂ Nanostructures (nanozigzag, nanohelics and nanorod) on Photocatalytic Degradation of Organic Dyes. Applied Surface Science. 2017. 400:184-193.

- [17] Li K, An X, Park KH, Khraisheh M, Tang J. A Critical Review of CO₂ Photoconversion: Catalysts and Reactors. *Catalysis Today*. 2014. 224:3-12.
- [18] Mehrotra K, Yablonsky GS, Ray AK. Kinetic Studies of Photocatalytic Degradation in a TiO₂ Slurry System: Distinguishing Working Regimes and Determining Rate Dependences. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2003. 42;11:2273-2281.
- [19] Rahut S, Panda R, Basu JK. Solvothermal Synthesis of a Layered Titanate Nanosheets and Its Photocatalytic Activity: Effect of Ag Doping. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 2017. 341:12-19.
- [20] Saikia L, Bhuyan D, Saikia M, Malakar B, Dutta DK, Sengupta P. "Photocatalytic Performance of ZnO Nanomaterials for Self Sensitized Degradation of Malachite Green Dye under Solar Light. *Applied Catalysis A: General*. 2015. 490:42-49.
- [21] Kumar KV, Porkodi K, Rocha F. Langmuir–Hinshelwood Kinetics – A Theoretical Study. *Catalysis Communications*. 2008. 9;1:82-84.
- [22] Khuzwayo Z, Chirwa EMN. Modelling and Simulation of Photocatalytic Oxidation Mechanism of Chlorohalogenated Substituted Phenols in Batch Systems: Langmuir–Hinshelwood Approach. *Journal of Hazardous Materials*. 2015. 300:459-466.

การประเมินความเสียหายของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แผ่นดินไหว ด้วยข้อกำหนด FEMA 356 และ มยพ.1303-57

Evaluation of Reinforced Concrete Building under Seismic Forces by Guideline of FEMA 356 and DPT.1303-57

สุธน รุ่งเรือง^{1*} และวิศวินทร์ อัครปัญญาธร²
Suthon Rungruang^{1*} Wissawin Arckarapunyathorn²
suthon.r@rmutr.ac.th^{1*}, A.Wissawin@gmail.com²

¹ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตศาลายา

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

² สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

² Department of Civil Engineering, Faculty of Science and Technology, Nakhon Pathom Rajabhat University

Received: September 29, 2017
Revised: November 30, 2017
Accepted: March 22, 2018

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เน้นไปที่การเปรียบเทียบผลการประเมินความเสียหายภายใต้แรงแผ่นดินไหวด้วยข้อกำหนด FEMA 356 และ มยพ.1303-57 ของโครงสร้างอาคารตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็ก 5 และ 8 ชั้น ซึ่งเป็นอาคารพักอาศัยรวมในจังหวัดเชียงใหม่ที่ไม่ได้ออกแบบให้ต้านทานแผ่นดินไหว ด้วยโปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ อาคารตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็ก 5 และ 8 ชั้น เป็นโครงสร้างระบบโครงข้อแข็งคาน-เสา รูปร่างของอาคารมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าและมีความสูงรวม 14.95 และ 25.75 เมตร ตามลำดับ การวิเคราะห์โครงสร้างเป็นแบบ 3 มิติ วิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์เชิงเส้น (LDP) โดยใช้วิธีสเปกตรัมการตอบสนองแบบโหมด (RSA) และกำหนดให้ฐานรองรับของแบบจำลองโครงสร้างเป็นฐานรองรับแบบยึดแน่น จากการศึกษาพบว่าอาคารตัวอย่างทั้งสองมีระดับสมรรถนะของอาคารอยู่ในระดับป้องกันการพังทลาย (Collapse Prevention Level; CP) ค่าเกณฑ์การยอมรับระดับสมรรถนะในคานของทั้งสองข้อกำหนดไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่ค่าเกณฑ์การยอมรับระดับสมรรถนะในเสาของทั้งสองข้อกำหนดมีความแตกต่างกัน โดยเกณฑ์การยอมรับระดับสมรรถนะในเสาของ มยพ.1303-57 มีค่ามากกว่า 0% - 20.70% สำหรับเกณฑ์การยอมรับระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที (Immediate Occupancy Level; IO) และ มีค่ามากกว่า 0% - 20.4% สำหรับเกณฑ์การยอมรับระดับปลอดภัยต่อชีวิต (Life Safety Level; LS) เมื่อเทียบกับค่าเกณฑ์การยอมรับระดับสมรรถนะของ FEMA 356 ในขณะที่เกณฑ์การยอมรับระดับ CP ในเสาของ มยพ.1303-57 มีค่าน้อยกว่า 0% - 13.33% เมื่อเทียบกับค่าเกณฑ์การยอมรับระดับสมรรถนะของ FEMA 356

คำสำคัญ: คอนกรีตเสริมเหล็ก, แผ่นดินไหว, การประเมินความเสียหาย, สเปกตรัมตอบสนอง

Abstract

The objective of this research is to compare the evaluation of performance damage levels under seismic forces by guideline of FEMA 356 and DPT.1303-57. Five and eight-story reinforced concrete building were structural models by using finite element program. The studied building is a common housing building in Chiang Mai. The structure is a beam-column system and not be designed for earthquake resistance. Both buildings have rectangular shaped building. The height of five and eight-story building are 14.95 and 25.75 meters respectively. The Linear dynamic procedure (LDP) utilized modal response spectrum analysis (RSA) was used this procedure was conducted for 3-Dimensional structure. Fixed support was used. The evaluation results indicated that performance level of both of the buildings is collapse prevention level (CP). The acceptance criteria of performance level for beam based on the guideline of DPT.1303-57 and FEMA 356 are slightly different, but, for a column, the both of guideline are different. The acceptance criteria

of performance level for a column based on the guideline of DPT.1303-57, percentage of increasing was 0% - 20.70% for immediate occupancy Level (IO), and percentage of increasing was 0% - 20.40% for life safety level (LS) compared with guideline of FEMA 356. Whereas, the acceptance criteria of performance level for a column on CP level based on the guideline of DPT.1303-57, percentage of decreasing was 0% - 13.33% compared with guideline of FEMA 356.

Keywords: reinforced concrete, earthquake, damage evaluation and response spectrum analysis.

1. บทนำ

เมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ. 2557 ประเทศไทยได้เผชิญกับเหตุการณ์แผ่นดินไหวครั้งรุนแรงที่สุดในประวัติศาสตร์ไทยในรอบ 40 ปี โดยมีขนาดความรุนแรงของแผ่นดินไหว 6.3 ริคเตอร์ ส่งผลให้อาคารต่างๆ เกิดความเสียหายอย่างหนัก ซ้ำร้ายอาคารบางส่วนได้พังทลายลง จนเป็นเหตุทำให้ประชาชนได้รับบาดเจ็บ และอาคารไม่สามารถใช้งานต่อไปได้ เหตุการณ์นี้เป็นสิ่งที่ย้ำเตือนว่าแผ่นดินไหวเป็นภัยที่ใกล้ตัว และมีความเสี่ยงต่อชีวิตและทรัพย์สิน

ในอดีตจนถึงปัจจุบันประเทศไทยได้ตระหนักถึงภัยอันตรายจากแผ่นดินไหวมาโดยตลอด โดยในปี พ.ศ. 2540 ประเทศไทยได้ออกกฎกระทรวงฉบับที่ 49 ซึ่งเป็นข้อบังคับสำหรับด้านการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหวเป็นครั้งแรก [1] และต่อมาในปี พ.ศ. 2550 ประเทศไทยได้ออกกฎกระทรวงฉบับที่ 50 เพื่อบังคับใช้แทนกฎกระทรวงฉบับเดิม ซึ่งได้ทำการปรับปรุงแก้ไขเนื้อหาของกฎกระทรวงฉบับที่ 49 ให้มีความทันสมัยและสะดวกในการวิเคราะห์โครงสร้างมากยิ่งขึ้น โดยใช้วิธีแรงสถิตเทียบเท่าในการวิเคราะห์โครงสร้างอาคารเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหว [2] อย่างไรก็ตามวิธีการวิเคราะห์นี้ไม่เหมาะสมสำหรับอาคารที่มีรูปทรงไม่สม่ำเสมอ ต่อมาภายหลังในปี พ.ศ. 2552 ทางกรมโยธาธิการและผังเมืองได้จัดทำมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยผ.1302) [3] และในปี พ.ศ. 2554 ได้จัดทำมาตรฐานประกอบการออกแบบอาคารเพื่อต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยผ.1301-54) [4] ซึ่งได้กำหนดวิธีการวิเคราะห์ที่หลากหลาย และการออกแบบอาคารเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหว

ให้มีความทันสมัยมากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามมีอาคารจำนวนมากที่ไม่ได้ออกแบบเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหว โดยเฉพาะอย่างยิ่งอาคารที่สร้างก่อนปี พ.ศ. 2540 ดังนั้นอาคารเหล่านี้จึงมีความเสี่ยงที่จะได้รับความเสียหายเนื่องจากแรงแผ่นดินไหวและต้องเตรียมการรับมือความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นได้ การเตรียมการรับมือภัยธรรมชาติเนื่องจากแรงแผ่นดินไหวมีหลากหลายวิธี ซึ่งวิธีการประเมินความเสียหายของอาคารจากแบบจำลองโครงสร้าง ก็เป็นวิธีการหนึ่งสำหรับการเตรียมความพร้อมในการรับมือจากเหตุการณ์แผ่นดินไหว [5]

ข้อกำหนด FEMA 356 [6] และ มยผ.1303-57 [7] เป็นข้อกำหนดสำหรับการประเมินความเสียหายของโครงสร้างอาคาร โดยข้อกำหนด มยผ.1303-57 เป็นข้อกำหนดที่มีความทันสมัยมากกว่า แต่ในขณะเดียวกัน ข้อกำหนด FEMA 356 ก็เป็นข้อกำหนดที่ได้รับการยอมรับจากทั่วทุกมุมโลก จะเห็นว่า แม้ข้อกำหนด มยผ.1303-57 จะมีความทันสมัยมากกว่าข้อกำหนด FEMA 356 แต่ยังไม่มีการเปรียบเทียบความแตกต่างของผลการประเมินความเสียหายระหว่างข้อกำหนดทั้งสองอย่างชัดเจน ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องสร้างองค์ความรู้และเปรียบเทียบผลการประเมินความเสียหายเพื่อนำไปใช้งานต่อไป

ทั้งนี้ขอบเขตของงานวิจัยนี้ จะเป็นการประเมินความเสียหาย และเปรียบเทียบผลการประเมินความเสียหายระหว่างข้อกำหนด FEMA 356 และ มยผ.1303-57 โดยพิจารณาโครงสร้างอาคารพักอาศัยรวม คอนกรีตเสริมเหล็ก 5 และ 8 ชั้น ในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งเป็นอาคารที่มีปริมาณเป็นจำนวนมาก

วัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้ มุ่งเน้นเพื่อประเมิน ความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับโครงสร้างอาคาร พักอาศัยรวมคอนกรีตเสริมเหล็ก 5 และ 8 ชั้น ในพื้นที่ จังหวัดเชียงใหม่ และเพื่อศึกษาและเปรียบเทียบผลการ ประเมินความเสียหายระหว่างข้อกำหนด FEMA 356 และ มยพ.1303-57

2. อาคารตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 5 และ 8 ชั้น โดยอาคารเหล่านี้ถูก ออกแบบให้รับน้ำหนักบรรทุกทุกในแนวตั้งและแรงลม เท่านั้น มิได้คำนึงถึงแรงแผ่นดินไหว เหล็กเสริมที่ใช้ใน โครงสร้างองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กมี 2 ชนิด คือ เหล็กเส้นกลมชั้นคุณภาพ SR24 และเหล็กข้ออ้อยชั้น คุณภาพ SD40 โดยมีกำลัง ณ จุดครากเท่ากับ 2,400 และ 4,000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ อาคารตัวอย่างนี้กำหนดให้รับน้ำหนักบรรทุกคงที่ เพิ่มเติม 150 กิโลกรัมต่อตารางเมตร และน้ำหนัก ของผนังก่ออิฐ 180 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ระบบ โครงสร้างของอาคารตัวอย่างนี้เป็นแบบระบบโครง คาน-เสา (Beam-Column Frame) ซึ่งเป็นอาคาร อพาร์ตเมนต์ ประเภทที่พักอาศัยรวม ในจังหวัดเชียงใหม่ มาเป็นกรณีศึกษา

2.1 อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 5 ชั้น

รายละเอียดของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก สูง 5 ชั้น มีดังต่อไปนี้

2.1.1 ผนังอาคารมีขนาด 14.1x31.3 เมตร ความสูงทั้งหมด 14.95 เมตร ภายในอาคารใช้อิฐมวลถู กันเป็นกำแพงระหว่างห้อง

2.1.2 คอนกรีตมีค่ากำลังอัดประลัย 240 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (รูปทรงกระบอก) ที่อายุ 28 วัน และมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่น 233,928.20 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ดูจากแบบก่อสร้าง)

2.1.3 พื้นชั้นที่ 1 เป็นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อในที่หนา 10-15 เซนติเมตร โดยมี คานรองรับ สำหรับพื้นที่ชั้นที่ 2-5 เป็นแผ่นพื้นคอนกรีต

อัดแรงสำเร็จรูปหนา 10 เซนติเมตร (ความหนา รวม คอนกรีตเททับหน้า) ยกเว้นพื้นห้องน้ำเป็นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อในที่หนา 10 เซนติเมตร โดยเหล็กเสริม ในพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อในที่จะใช้เหล็กเสริม DB12 @ 0.15-0.30 เมตร

2.1.4 เสาที่ใช้พิจารณาในการวิเคราะห์นี้ มีขนาด 30x50, 30x40, 25x40, 25x30, 20x40, 20x30, 20x25 และ 20x20 เซนติเมตร โดยมีการเสริมเหล็กที่แตกต่างกัน (ปริมาณเหล็กเสริมต่อพื้นที่ หน้าตัดเสาอยู่ระหว่าง 1.13% - 8.2%)

2.1.5 คานที่ใช้พิจารณาในการวิเคราะห์นี้ มีขนาด 20x40, 20x50 และ 25x60 เซนติเมตร โดยมีการเสริมเหล็กที่แตกต่างกัน

2.1.6 อาคารตัวอย่างนี้กำหนดให้รับ น้ำหนักบรรทุกทุกจรเท่ากับ 200 กิโลกรัมต่อตารางเมตร (สำหรับชั้นที่ 1-5) และ 50 กิโลกรัมต่อตารางเมตร (สำหรับชั้นหลังคา)

2.2. อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 8 ชั้น

รายละเอียดของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก สูง 8 ชั้น มีดังต่อไปนี้

2.2.1 ผนังอาคารมีขนาด 17.4x48 เมตร ความสูงทั้งหมด 25.75 เมตร ภายในอาคารใช้อิฐมวลถู กันเป็นกำแพงระหว่างห้อง

2.2.2 คอนกรีตมีค่ากำลังอัดประลัย 280 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (รูปทรงกระบอก) ที่อายุ 28 วัน และมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่น 252,671.32 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ดูจากแบบก่อสร้าง)

2.2.3 พื้นเป็นแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรง สำเร็จรูปหนา 10 เซนติเมตร (ความหนา รวมคอนกรีต เททับหน้า)

2.2.4 เสาที่ใช้พิจารณาในการวิเคราะห์นี้ มีขนาด 20x50, 20x40, 20x30, 20x20, 20x40, 20x45, 20x35, 20x50, 20x30 และ 20x25 เซนติเมตร โดยมีการเสริมเหล็กที่แตกต่างกัน (ปริมาณเหล็กเสริม ต่อพื้นที่หน้าตัดเสาอยู่ระหว่าง 1.13% - 4.33%)

2.2.5 คานที่ใช้พิจารณาในการวิเคราะห์นี้มีขนาด 20x35, 20x30, 20x20, 25x60, 20x30, 10x30, 15x35, 15x30, 25x35 และ 20x60 เซนติเมตร โดยมีการเสริมเหล็กที่แตกต่างกัน

2.2.6 อาคารตัวอย่างนี้กำหนดให้น้ำหนักบรรทุกจรเท่ากับ 200 กิโลกรัมต่อตารางเมตร (สำหรับชั้นที่ 1-8) และ 50 กิโลกรัมต่อตารางเมตร (สำหรับชั้นหลังคา)

3. วิธีการวิเคราะห์และการดำเนินการวิจัย

3.1. แบบจำลองโครงสร้างอาคารตัวอย่าง

ในการศึกษาวิจัยนี้จะจำลองโครงสร้างอาคารที่พักอาศัยรวมคอนกรีตเสริมเหล็ก 5 และ 8 ชั้น แบบ 3 มิติ โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 1 และ 2 ตามลำดับ สำหรับฐานรองรับของแบบจำลองโครงสร้างในงานวิจัยนี้กำหนดให้เป็นฐานรองรับแบบยึดแน่น (Fixed Support) และกำหนดค่าสติฟเนสขององค์อาคารคอนกรีต โดยลดค่าสติฟเนสของเสาและคานจากหน้าตัดก่อนเกิดการแตกร้าวเหลือ 70% และ 35% ตามลำดับ เนื่องจากการแตกร้าวของโครงสร้าง (Crack Section) จะมีผลต่อค่าสติฟเนส [3]

3.2. การวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์เชิงเส้น

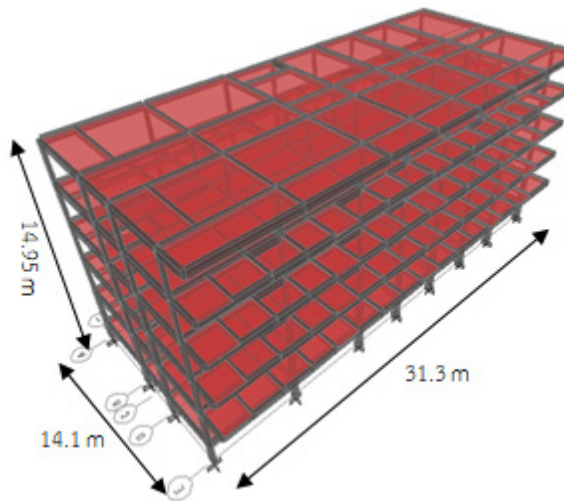
สำหรับงานวิจัยนี้ใช้การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีพลศาสตร์เชิงเส้นโดยใช้วิธีสเปกตรัมการตอบสนองแบบโหมด (Modal Response Spectrum Analysis) เนื่องจากวิธีพลศาสตร์เชิงเส้นเป็นวิธีที่มีขั้นตอนการคำนวณที่สะดวกกว่าวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น และมีความถูกต้องใกล้เคียงกับวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น ดังนั้นวิธีการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีพลศาสตร์เชิงเส้นจึงมีประสิทธิภาพเพียงพอต่อการวิเคราะห์และการประเมินความเสียหายอาคาร [8] โดยกำหนดชนิดของโครงสร้างอาคารเป็นแบบโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กแบบธรรมดา (Ordinary Reinforced Concrete Moment Resisting Frame; $R = 3$, $\Omega_0 = 3$ และ $C_d = 2.5$) ตามมาตรฐาน

การออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว [3]

จำนวนของโหมดที่ต้องพิจารณาจะต้องมีค่าน้ำหนักประสิทธิผลเชิงโหมด (Effective Modal Weight, or Modal Weight Participation) ไม่น้อยกว่า 90% ของน้ำหนักประสิทธิผลทั้งหมดของอาคารสำหรับแต่ละทิศทางของแผ่นดินไหวในแนวราบที่ตั้งฉากกัน ซึ่งมีทั้งหมด 9 โหมด สำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก 5 ชั้น ดังแสดงในตารางที่ 1 และ 15 โหมด สำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก 8 ชั้น ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยผลการวิเคราะห์ในแต่ละโหมด ที่นำมาพิจารณาจะนำมารวมกันแบบ Square Root Sum of Square (SRSS)

3.3. ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหว

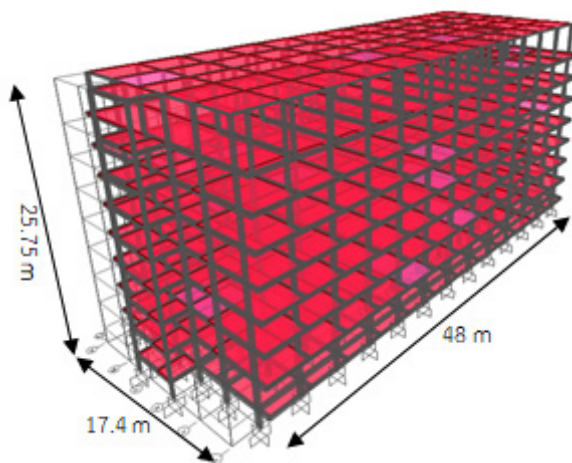
ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่ใช้สำหรับการประเมินกำลังต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารตัวอย่าง จะใช้ตามมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว [3] ค่าความเร่ง ตอบสนองเชิงสเปกตรัม (Spectral Acceleration) สำหรับคาบเวลา 1.0 และ 0.2 วินาที จะถูกแสดงดังตารางที่ 3 และประเภทของชั้นดินที่ใช้สำหรับวิเคราะห์โครงสร้างอาคารตัวอย่างจะกำหนดให้เป็นชั้นดินประเภท D สำหรับสเปกตรัมตอบสนองในการวิเคราะห์โครงสร้างอาคารตัวอย่าง จะแสดงในรูปที่ 3 ผลแรงเฉือนที่ฐานอาคารจากการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีพลศาสตร์เชิงเส้นจะต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 85% ของแรงเฉือนที่ฐานอาคารจากการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีสถิตเทียบเท่าซึ่งผลของแรงเฉือนที่ฐานอาคารจากการวิเคราะห์โครงสร้างมีค่าเท่ากับ $V_x = 408.02$ ตัน และ $V_y = 422.29$ ตัน สำหรับอาคาร 5 ชั้น และ $V_x = 574.34$ ตัน และ $V_y = 573.32$ ตัน สำหรับอาคาร 8 ชั้น



รูปที่ 1 แบบจำลองอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก
สูง 5 ชั้น

Mode	Period	UX	UY	RZ
	sec	%	%	%
5	0.422	0%	1%	1%
6	0.385	0%	9%	9%
7	0.231	8%	0%	0%
8	0.201	1%	2%	0%
9	0.183	0%	7%	9%
Total		92%	93%	93%

ตารางที่ 2 ค่าความถี่ธรรมชาติและน้ำหนักประสิทธิผล
ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก 8 ชั้น



รูปที่ 2 แบบจำลองอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก
สูง 8 ชั้น

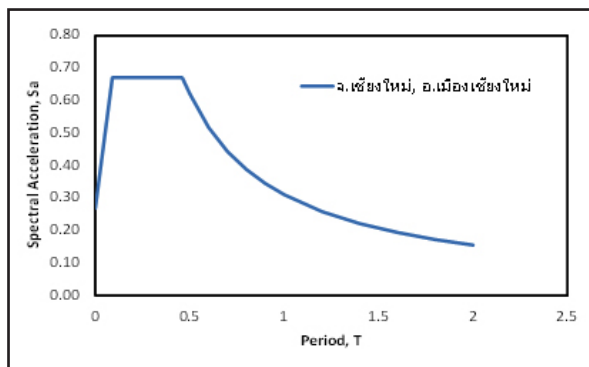
Mode	Period	UX	UY	RZ
	sec	%	%	%
1	2.672	70%	0%	6%
2	1.655	0%	0%	10%
3	1.379	0%	67%	54%
4	1.278	0%	4%	1%
5	1.150	0%	0%	1%
6	1.134	1%	0%	0%
7	0.909	8%	0%	1%
8	0.804	1%	0%	0%
9	0.752	0%	0%	0%
10	0.545	4%	0%	2%
11	0.506	0%	3%	6%
12	0.469	0%	7%	1%
13	0.266	6%	1%	6%
14	0.249	4%	2%	3%
15	0.220	0%	6%	1%
Total		94%	90%	92%

ตารางที่ 1 ค่าความถี่ธรรมชาติและน้ำหนักประสิทธิผล
ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก 5 ชั้น

Mode	Period	UX	UY	RZ
	sec	%	%	%
1	1.383	72%	0%	4%
2	1.163	0%	13%	2%
3	1.066	0%	61%	67%
4	0.496	11%	0%	1%

ตารางที่ 3 ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม

คาบเวลา	ค่าความเร่งตอบสนอง (g)
คาบเวลา 0.2 วินาที (S_0)	0.878
คาบเวลา 1.0 วินาที (S_1)	0.248



รูปที่ 3 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการวิเคราะห์

3.4. การประเมินกำลังต้านทานแผ่นดินไหวของอาคาร

การประเมินกำลังต้านทานแผ่นดินไหวหรือการประเมินระดับสมรรถนะของอาคารและโครงสร้าง หมายถึง ค่าที่แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของโครงสร้าง ในขณะที่รับแรงแผ่นดินไหวและความเสียหายที่เกิดขึ้น ตามข้อกำหนด FEMA 356 [6] และ มยผ. 1303-57 [7] ได้จำแนกระดับสมรรถนะของอาคารออกเป็น 4 ระดับ คือ ระดับอาคารปฏิบัติงานได้ (Operational Level) ระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที (Immediate Occupancy Level; IO) ระดับปลอดภัยต่อชีวิต (Life Safety Level; LS) และระดับป้องกันการพังทลาย (Collapse Prevention Level; CP)

การประเมินระดับสมรรถนะของโครงสร้างอาคารทั้งระบบจะวัดจากค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น (Story Drift) โดยจำแนกเป็น 3 ระดับ คือ ระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที (IO) ค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์

ระหว่างชั้นจะต้องมีค่าไม่เกิน 1% ระดับปลอดภัยต่อชีวิต (LS) ค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นจะต้องมีค่าไม่เกิน 2% และระดับป้องกันการพังทลาย (CP) ค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นจะต้องมีค่าไม่เกิน 4%

การประเมินระดับสมรรถนะของโครงสร้างอาคารในแต่ละชั้นส่วนของโครงสร้างคานและเสา โดยวิธีพลศาสตร์เชิงเส้น จะใช้ค่าตัวประกอบปรับแก้ความเหนียว (m-factor) เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับเกณฑ์การยอมรับค่าระดับความเสียหายของชั้นส่วนตามข้อกำหนด FEMA 356 [6] และ มยผ.1303-57 [7] โดยค่า m-factor สามารถคำนวณได้ตามสมการดังต่อไปนี้

$$mkQ_{CE} \geq Q_{UD} \quad (1)$$

โดยที่ m คือ ตัวประกอบปรับแก้ความเหนียว (m-factor) ของชั้นส่วนโครงสร้าง, k คือ ตัวประกอบความเชื่อมั่นของข้อมูล ซึ่งในที่นี้กำหนดให้เท่ากับ 1, Q_{CE} คือ ค่าคาดหวังของกำลังต้านทานของชั้นส่วนโครงสร้างที่สภาวะการเสียรูปที่กำลังพิจารณา โดยต้องคำนึงถึงพฤติกรรมอื่นๆ ภายใต้สภาวะแรงกระทำที่ใช้ในการออกแบบที่กำลังกระทำต่อชั้นส่วนโครงสร้างนั้นด้วย และ Q_{UD} คือ พฤติกรรมที่ถูกควบคุมโดยการเสียรูปที่ใช้ในการออกแบบจากผลของน้ำหนักบรรทุกแนวตั้งรวมกับผลของแรงแผ่นดินไหว ซึ่ง Q_{UD} สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$Q_{UD} = Q_G \pm Q_E \quad (2)$$

$$Q_G = 1.1(Q_D + Q_L) \quad (3)$$

โดยที่ Q_G คือ ผลของน้ำหนักบรรทุกแนวตั้งที่ใช้ในการออกแบบ, Q_E คือ ผลของแรงแผ่นดินไหวที่ใช้ในการออกแบบ โดยคำนวณจากแรงและการวิเคราะห์แบบจำลอง, Q_D คือ ผลของน้ำหนักบรรทุกคงที่เพื่อการออกแบบ และ Q_L คือ ผลของน้ำหนักบรรทุกจรเพื่อการออกแบบ ซึ่งเท่ากับ 25% ของน้ำหนักบรรทุกจรเพื่อการออกแบบที่ยังไม่ลดค่า

4. ผลการวิจัย

4.1. ผลการประเมินความเสียหายในคาน

จากผลการประเมินความเสียหายในคาน โดยภาพรวมจากทั้งข้อกำหนด FEMA 356 และ มยพ. 1303-57 สำหรับอาคารตัวอย่าง 5 ชั้น พบว่า คาน ชั้นที่ 1-4 มีความเสียหายอยู่ในระดับ CP และคาน ชั้นที่ 5-หลังคา ไม่เกิดความเสียหาย (ไม่เกินระดับ IO) ดังแสดงในรูปที่ 4 และ 5 ตามลำดับ สำหรับอาคาร ตัวอย่าง 8 ชั้น พบว่า คานชั้นที่ 1-6 มีความเสียหาย อยู่ในระดับ CP คานชั้นที่ 7 มีความเสียหายอยู่ในระดับ LS คานชั้นที่ 8 มีความเสียหายอยู่ในระดับ IO และ คานชั้นหลังคา ไม่มีความเสียหาย ดังแสดงในรูปที่ 6 และ 7 ตามลำดับ ผลการประเมินความเสียหายของคาน จากทั้งสองข้อกำหนดให้ผลการประเมินที่เหมือนกัน ในขณะที่ค่าเกณฑ์การยอมรับระดับสมรรถนะ (ความเสียหาย) ในคานของทั้งสองข้อกำหนดมีความ แตกต่างกันเล็กน้อย โดยเกณฑ์การยอมรับระดับ สมรรถนะในคานของ มยพ.1303-57 มีค่าสูงกว่า 0.3%-0.43% เมื่อเทียบกับค่าเกณฑ์การยอมรับระดับ สมรรถนะของ FEMA 356

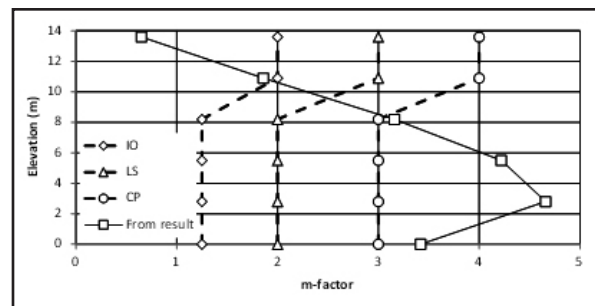
สมการที่ใช้คำนวณค่าเกณฑ์การยอมรับ ระดับสมรรถนะในคานของข้อกำหนด มยพ.1303- 57 และ FEMA 356 เป็นสมการเดียวกัน แต่ใช้หน่วย ในการคำนวณที่แตกต่างกัน ซึ่งหน่วยของ FEMA 356 จะใช้หน่วยปอนด์และนิ้ว ส่วนของ มยพ.1303-57 จะใช้หน่วยนิวตันและมิลลิเมตร สำหรับการแทนค่า ในสมการดังกล่าว ทำให้ตัวเลขที่คำนวณได้มีความ คลาดเคลื่อน เนื่องจากการปัดเศษตัวเลขหลังจากการ แปลงหน่วย ด้วยสาเหตุนี้จึงทำให้ค่าเกณฑ์การยอมรับ ระดับสมรรถนะในคานมีความแตกต่างกัน แต่อย่างไร ก็ตามผลกระทบจากการใช้หน่วยที่แตกต่างกันในการ คำนวณไม่ได้ทำให้ค่าเกณฑ์การยอมรับระดับสมรรถนะ ในคานมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้อง กับงานวิจัยของ วิศวินทร์ อัครปัญญาธร และศุภมน วงศ์ปิยะบวร [9]

4.2. ผลการประเมินความเสียหายในเสา

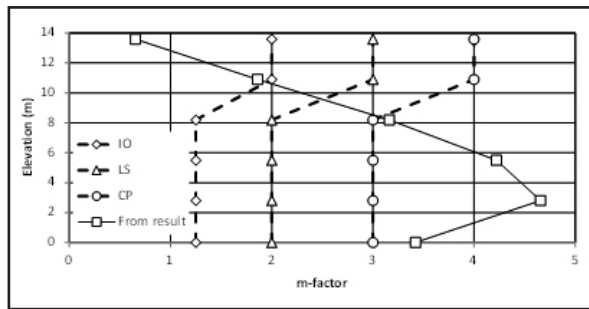
จากผลการประเมินความเสียหายในเสาโดย ภาพรวมจากทั้งข้อกำหนด FEMA 356 และ มยพ. 1303-57 สำหรับอาคารตัวอย่าง 5 ชั้น พบว่า เสาชั้นที่ 1-2 ไม่เกิดความเสียหาย เสาชั้นที่ 3 มีความเสียหาย อยู่ในระดับ LS และเสาชั้นที่ 4-5 มีความเสียหายอยู่ใน ระดับ CP ดังแสดงในรูปที่ 8 และ 9 ตามลำดับ

ผลการประเมินความเสียหายในเสาโดย ภาพรวมจากข้อกำหนด FEMA 356 สำหรับอาคาร ตัวอย่าง 8 ชั้น จะถูกแสดงดังรูปที่ 10 โดยพบว่า เสาชั้นที่ 1 มีความเสียหายอยู่ในระดับ IO เสาชั้นที่ 2 และ 6 มีความเสียหายอยู่ในระดับ LS เสาชั้นที่ 4-5 มีความเสียหายอยู่ในระดับ CP และเสาชั้นที่ 3, 7 และ 8 ไม่เกิดความเสียหาย

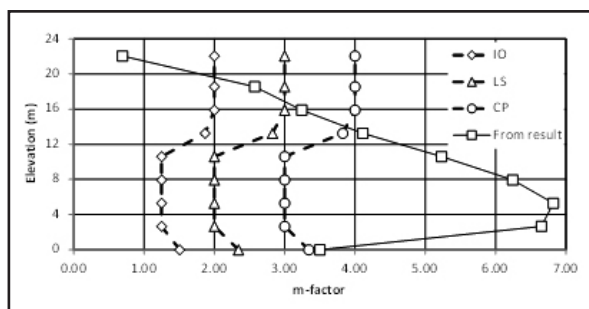
ผลการประเมินความเสียหายในเสาโดย ภาพรวมจากข้อกำหนด มยพ.1303-57 สำหรับอาคาร ตัวอย่าง 8 ชั้น แสดงดังรูปที่ 11 และพบว่า เสาชั้นที่ 1, 3, 7 และ 8 ไม่เกิดความเสียหาย เสาชั้นที่ 2 มีความ เสียหายอยู่ในระดับ LS และเสาชั้นที่ 4-6 มีความ เสียหายอยู่ในระดับ CP



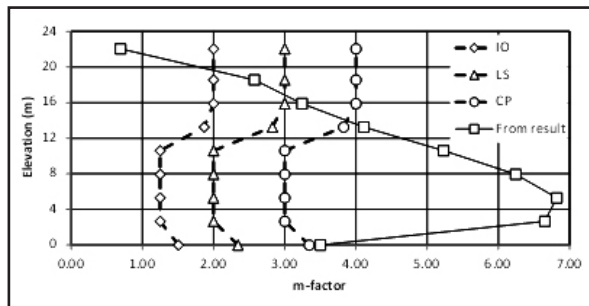
รูปที่ 4 ผลการประเมินความเสียหายในคานของ อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก 5 ชั้น โดยข้อกำหนด FEMA356



รูปที่ 5 ผลการประเมินความเสียหายในคานของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก 5 ชั้น โดยข้อกำหนด มยพ.1303-57



รูปที่ 6 ผลการประเมินความเสียหายในคานของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก 8 ชั้น โดยข้อกำหนด FEMA356



รูปที่ 7 ผลการประเมินความเสียหายในคานของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก 8 ชั้น โดยข้อกำหนด มยพ.1303-57

เมื่อนำผลการประเมินความเสียหายในเสา โดยภาพรวมจากข้อกำหนด FEMA 356 และ มยพ. 1303-57 สำหรับอาคารตัวอย่าง 8 ชั้น มาเปรียบเทียบ พบว่า เสาชั้นที่ 1 และ 6 ให้ผลของระดับความเสียหายที่ต่างกัน โดยเสาชั้นที่ 1 มีความ

เสียหายอยู่ในระดับ IO และไม่เกิดความเสียหายสำหรับข้อกำหนด FEMA 356 และ มยพ.1303-57 ตามลำดับ ในขณะที่เสาชั้นที่ 6 มีความเสียหายอยู่ในระดับ LS และ CP สำหรับข้อกำหนด FEMA 356 และ มยพ.1303-57 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4

จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า เส้นเกณฑ์การยอมรับระดับสมรรถนะของทั้งสองข้อกำหนดให้เกณฑ์การยอมรับระดับสมรรถนะที่ต่างกัน เนื่องจากค่าตัวประกอบปรับแก้ความเหนียวของชิ้นส่วนโครงสร้าง (m-factor) ที่ให้ไว้ในตารางเกณฑ์การยอมรับเชิงตัวเลขสำหรับวิธีแบบเชิงเส้นของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กของทั้งสองข้อกำหนดมีความแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง โดยค่าเกณฑ์การยอมรับระดับสมรรถนะในเสาของ มยพ.1303-57 มีค่ามากกว่า 0% - 20.70% สำหรับเกณฑ์การยอมรับระดับ IO และมีค่ามากกว่า 0% - 20.4% สำหรับเกณฑ์การยอมรับระดับ LS เมื่อเทียบกับค่าเกณฑ์การยอมรับระดับสมรรถนะของ FEMA 356 ในขณะที่เกณฑ์การยอมรับระดับ CP ในเสาของ มยพ.1303-57 มีค่าน้อยกว่า 0% - 13.33% เมื่อเทียบกับค่าเกณฑ์การยอมรับระดับสมรรถนะของ FEMA 356

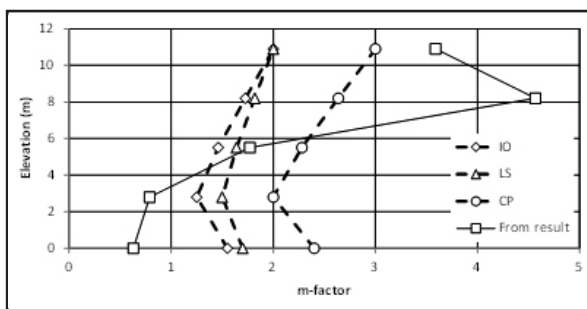
4.3. ผลการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น (Story Drift)

จากรูปที่ 12 แสดงค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น (Story Drift) ของอาคารตัวอย่าง 5 ชั้น พบว่าค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 1.3% และ 0.9% สำหรับแนวแกน X และ Y ตามลำดับ ซึ่งมีค่าไม่เกินค่าที่ยอมให้ตามมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวคือ 2% จากผลการวิเคราะห์โดยภาพรวมพบว่า ระดับสมรรถนะของอาคารอยู่ในระดับ LS

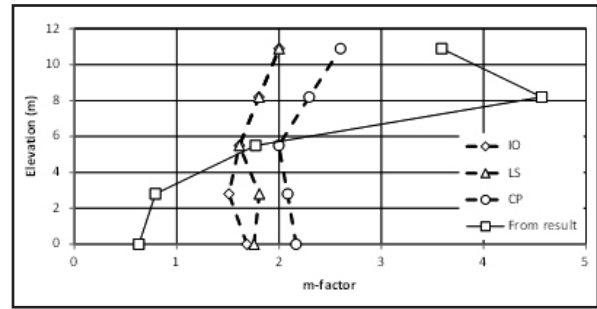
จากรูปที่ 13 แสดงค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นของอาคารตัวอย่าง 8 ชั้น พบว่าค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 2.4% และ 0.8% สำหรับแนวแกน X และ Y ตามลำดับ

ซึ่งมีค่าเกินค่าที่ยอมให้ตามมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวสำหรับแกน X ในขณะที่แกน Y มีค่าไม่เกินค่าที่ยอมให้ตามมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว จากผลการวิเคราะห์โดยภาพรวม พบว่า ระดับสมรรถนะของอาคารอยู่ในระดับ CP ค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นในแนวแกน X ของอาคารตัวอย่าง 5 และ 8 ชั้น มีค่าสูงกว่าในแนวแกน Y เนื่องจากอาคารด้านแนวแกน Y มีค่าสติเฟนส์ของอาคารโดยรวมที่มากกว่าด้านแนวแกน X

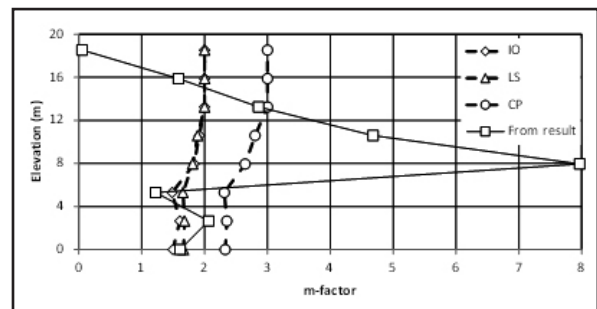
จากผลการวิเคราะห์ที่ได้ทั้งหมดนี้ (ผลการประเมินความเสียหายในคาน เสา และการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น) โดยภาพรวมจะเห็นว่าการใช้ข้อกำหนด FEMA 356 ในการประเมินระดับสมรรถนะหรือความเสียหายโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กจะมีความประหยัดมากกว่าข้อกำหนดของ มยพ.1303-57 เนื่องจากเกณฑ์การยอมรับระดับ CP ในเสาของ FEMA 356 มีค่าสูงกว่า มยพ.1303-57 ทำให้โอกาสที่เสาจะมีความเสียหายอยู่ในระดับ CP ลดน้อยลงเป็นผลทำให้สามารถลดตำแหน่งในการเสริมกำลังอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อต้านทานแผ่นดินไหวได้มากกว่า



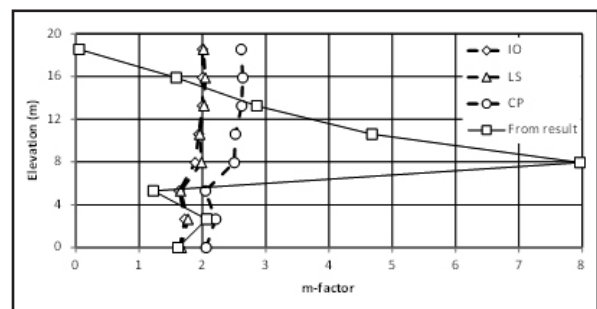
รูปที่ 8 ผลการประเมินความเสียหายในเสาของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก 5 ชั้น โดยข้อกำหนด FEMA356



รูปที่ 9 ผลการประเมินความเสียหายในเสาของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก 5 ชั้น โดยข้อกำหนด มยพ.1303-57



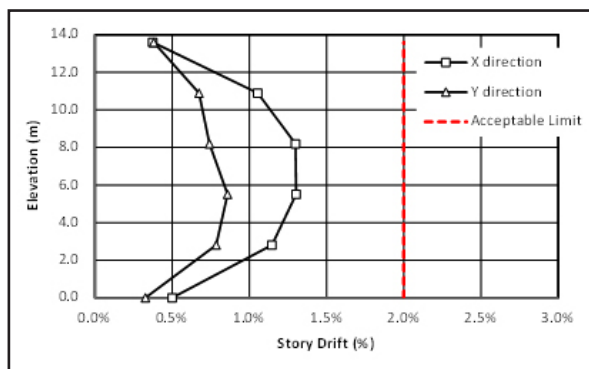
รูปที่ 10 ผลการประเมินความเสียหายในเสาของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก 8 ชั้น โดยข้อกำหนด FEMA356



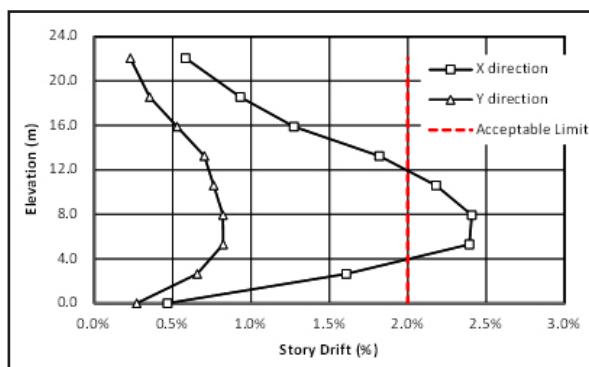
รูปที่ 11 ผลการประเมินความเสียหายในเสาของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก 8 ชั้น โดยข้อกำหนด มยพ.1303-57

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบผลการประเมินความเสียหายในเสาของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก 8 ชั้น

ระดับชั้น	ระดับความเสียหาย	
	FEMA 356	มยพ.1303-57
1	IO	-
2	LS	LS
3	-	-
4	CP	CP
5	CP	CP
6	LS	CP
7	-	-
8	-	-



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความสูงและค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นของอาคารตัวอย่าง 5 ชั้น



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความสูงและค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นของอาคารตัวอย่าง 8 ชั้น

5. สรุป

จากผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการประเมินความเสียหายระหว่างข้อกำหนด FEMA 356 และ มยพ.1303-57 ของอาคารตัวอย่าง 5 และ 8 ชั้น สามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

5.1. จากการศึกษาพบว่าอาคารตัวอย่างที่פקอาศัยรวมคอนกรีตเสริมเหล็ก 5 และ 8 ชั้น มีระดับสมรรถนะโดยภาพรวมของอาคารอยู่ในระดับป้องกันการพังทลาย (CP) ทั้งจากการใช้ข้อกำหนดของ FEMA 356 และ มยพ.1303-57

5.2. ค่าเกณฑ์การยอมรับระดับสมรรถนะในคานของข้อกำหนด มยพ.1303-57 และ FEMA 356 ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากสมการที่ใช้คำนวณค่าเกณฑ์การยอมรับระดับสมรรถนะเป็นสมการเดียวกัน แต่ใช้หน่วยในการคำนวณที่แตกต่างกัน ซึ่งหน่วยของ FEMA 356 จะใช้หน่วยปอนด์และนิ้ว ส่วนของ มยพ.1303-57 จะใช้หน่วยนิวตันและมิลลิเมตร ด้วยสาเหตุนี้จึงทำให้ค่าเกณฑ์การยอมรับระดับสมรรถนะในคานมีความแตกต่างกัน

5.3. ค่าเกณฑ์การยอมรับระดับสมรรถนะในเสาของ มยพ.1303-57 มีค่ามากกว่า 0% - 20.70% สำหรับเกณฑ์การยอมรับระดับ IO และมีค่ามากกว่า 0% - 20.4% สำหรับเกณฑ์การยอมรับระดับ LS เมื่อเทียบกับค่าเกณฑ์การยอมรับระดับสมรรถนะของ FEMA 356 ในขณะที่เกณฑ์การยอมรับระดับ CP ในเสาของ มยพ.1303-57 มีค่าน้อยกว่า 0% - 13.33% เมื่อเทียบกับค่าเกณฑ์การยอมรับระดับสมรรถนะของ FEMA 356 ทั้งนี้เนื่องจากตารางเกณฑ์การยอมรับเชิงตัวเลขสำหรับวิธีแบบเชิงเส้นของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กของทั้งสองข้อกำหนดมีความแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง

5.4. การใช้ข้อกำหนด FEMA 356 ในการประเมินระดับสมรรถนะหรือความเสียหายโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยภาพรวม จะมีความประหยัมากกว่าข้อกำหนดของ มยพ.1303-57 เนื่องจากค่าเกณฑ์การยอมรับระดับ CP ในเสาของ

ข้อกำหนด FEMA 356 มีค่ามากกว่าข้อกำหนด มยผ. 1303-57 จึงทำให้ลดตำแหน่งในการเสริมกำลังอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อต้านทานแผ่นดินไหวได้มากกว่า

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ ได้รับการสนับสนุนงบประมาณในการทำวิจัย จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตศาลายา คณะผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Ministry of Interior. Notification of Ministry of Interior No.49 (1997) Bearing Capacity, Resistance and Durability of Building to Resist Vibration & Earthquake. Bangkok; 1997. (in Thai)
- [2] Ministry of Interior. Notification of Ministry of Interior No.50 (2007) Bearing Capacity, Resistance and Durability of Building to Resist Vibration & Earthquake. Bangkok; 2007. (in Thai)
- [3] Department of Public Works and Town & Country Planning. Standard for Building Design to Resist Vibration of Earthquake (DPT.1302). Bangkok; 2009. (in Thai)
- [4] Department of Public Works and Town & Country Planning. Standard for Building Design to Resist Vibration of Earthquake (DPT.1301-54). Bangkok; 2011. (in Thai)
- [5] Nutalai P, Chintanapakdee C. Building Damage and Loss Assessment for Bangkok Area due to Earthquake. Proceedings of the 19th National Convention on Civil Engineering. 2014;19:351-358. (in Thai)
- [6] Federal emergency management agency (FEMA). Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings (FEMA 356). Washington D.C.; 2000.
- [7] Department of Public Works and Town & Country Planning. Standard for Evaluation and Rehabilitation of Building Structures in the District Vibration of Earthquake (DPT.1303-57). Bangkok; 2014. (in Thai)
- [8] Chananan W. Comparative Evaluation of Analysis Procedures for Seismic Evaluation of a Reinforced Concrete Building [master's thesis]. Department of Civil Engineering; Faculty of Engineering; King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok; 2006. (in Thai)
- [9] Arckarapunyathorn W, Wongpiyaboworn S. Seismic Evaluation by Guideline of FEMA 356 and DPT.1303-57: Case Study of a Two-Story Reinforced Concrete Building in Chiang Mai. Proceedings of the 4th Suan Sunandha Academic National Conference on Research for Sustainable Development. 2016;4:55-66. (in Thai)

การประยุกต์ใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ในการคัดเลือกโครงการปรับปรุงคุณภาพเพื่อลดของเสีย: กรณีศึกษา กระบวนการผลิตถังบรรจุอากาศ

Application of Analytic Hierarchy Process to Select Quality Improvement for Defect Reduction Projects: A Case Study of Air Tank Manufacturer

มงคล กิตติญาณจอร์^{1*}

Mongkol Kittiyakajon^{1*}

mongkolk3@hotmail.com^{1*}

^{1*} สาขาการจัดการอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี

^{1*} Department of Industrial management, Faculty of Technology, Udon Thani Rajabhat University

Received: April 17, 2018
Revised: August 3, 2018
Accepted: August 20, 2018

บทคัดย่อ

ในการปรับปรุงคุณภาพเพื่อลดของเสียขั้นตอนที่สำคัญขั้นตอนหนึ่งคือขั้นตอนการคัดเลือกโครงการ ซึ่งส่วนใหญ่จะเลือกใช้เครื่องมือที่แพร่หลายอย่างเช่น ผังพาเรโต (Pareto chart), ดัชนีความสำคัญ (Pareto priority index, PPI), การคัดเลือกหัวข้อปัญหาตามแนวทางกิจกรรมกลุ่มควบคุมคุณภาพ (Quality control circle), หรือ การวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure mode & effect analysis, FMEA) อย่างไรก็ตามวิธีดังกล่าวมีเกณฑ์การคัดเลือกด้วยการพิจารณาเพียงปัจจัยด้านเดียว เช่น ผังพาเรโตของเปอร์เซ็นต์ของเสียหรือพิจารณาหลายปัจจัยแต่ให้น้ำหนักของปัจจัยด้านต่างๆ สำคัญเท่ากัน ในโรงงานกรณีศึกษาซึ่งพบปัญหาของเสียจากการผลิตที่อยู่ในระดับที่สูง แต่การทำการปรับปรุงยังต้องพิจารณาปัจจัยสำคัญอื่นๆ นอกจากเพียงปริมาณของเสียที่เกิดขึ้น เช่น ความรุนแรง, ความเป็นไปได้และต้นทุนของเสีย งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อลดของเสียโดยการประยุกต์ใช้เครื่องมือที่ทำงานร่วมกันระหว่างเครื่องมือคุณภาพทั้ง 7 และกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytic hierarchy process, AHP) ในการคัดเลือกหัวข้อปัญหาและทำการปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อลดของเสีย ผลการวิจัยพบว่าภายหลังการปรับปรุงกระบวนการผลิตโดยการประยุกต์ใช้เครื่องมือที่ทำงานร่วมกันระหว่างเครื่องมือคุณภาพทั้ง 7 (7 QC tool) และกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytic hierarchy process, AHP) ผลการคัดเลือกโครงการปรับปรุงคุณภาพเพื่อลดของเสียสามารถสะท้อนเหตุผลจากความแตกต่างของน้ำหนักความสำคัญของแต่ละเกณฑ์ในการคัดเลือกได้อย่างเหมาะสมอีกทั้งยังสามารถลด %ของเสียในปัญหาคุณภาพ สีเป็นเม็ดลงได้ 2.63% โดยคิดเป็นเงิน 9,529 บาทต่อเดือน

คำสำคัญ: กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์, การคัดเลือกโครงการ, การลดของเสีย

Abstract

One of the most important phase in quality improvement for defect reduction projects is the project selection phase, almost current researchers commonly use the well-known techniques such as Pareto chart, Pareto priority index, Quality control circle method and Failure mode and effect analysis. However, some of such methods consider only one kind of selection criteria like defective rate of Pareto technique or multiple criteria consideration with the equal important weight. In the case study, the quality improvement project selection must be selected base on not only the defective rate but also severity, possibility, and failure cost aspects. Therefore, this paper proposed the integration of 7 QC tools with Analytic hierarchy process techniques to select the improvement projects for defect reduction. The results of the integration of 7 QC tools with Analytic hierarchy process techniques application, the project selection result can reasonably reflect the different important weight of each selection criteria. Moreover, the defective rate of air tank painting was reduced about 2.63% that cost 9,529 Baht per month.

Keywords: analytic hierarchy process, project selection, defect reduction.

1. บทนำ

เนื่องจากในสภาวะการณ์ปัจจุบันที่ธุรกิจอุตสาหกรรมทุกแขนงมีการแข่งขันทางการค้าที่รุนแรง อีกทั้งลูกค้ามีความต้องการสินค้าที่มีคุณภาพในเวลาที่ยรวดเร็ว การเพิ่มอัตราการผลิตและลดจำนวนของเสียจากกระบวนการผลิตนั้นจึงเป็นหัวใจที่สำคัญของการอยู่รอดทางธุรกิจและการเติบโตทางอุตสาหกรรม เพื่อให้สามารถแข่งขันกับคู่แข่งรายอื่นได้ ผู้ประกอบการจึงมีความจำเป็นที่จะต้องผลิตสินค้าที่มีคุณภาพเป็นไปตามความต้องการของลูกค้า โดยมีต้นทุนต่ำพร้อมด้วยการผลิตที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

ข้อมูลในกระบวนการผลิตของโรงงานกรณีศึกษาทำการผลิตถังบรรจุอากาศสำหรับรถบรรทุกในปัจจุบันกระบวนการผลิตได้มีปริมาณของเสียในระดับที่สูงโดยพบว่าระหว่างเดือนเมษายน - มิถุนายน 2560 มีของเสียเกิดขึ้นโดยคิดเป็น 9.22% ของจำนวนการผลิตทั้งหมด และคิดเป็นต้นทุนความเสียหายประมาณ 33,827 บาท ต่อเดือน ซึ่งถือว่าเป็นปัญหาที่ส่งผลต่อต้นทุนการผลิตรวมของโรงงาน

อย่างไรก็ตาม ระหว่างขั้นตอนวิเคราะห์เพื่อค้นหาและคัดเลือกโครงการสำหรับปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อลดของเสียนั้นผู้วิจัยส่วนใหญ่ใช้เครื่องมือที่เป็นที่รู้จักและแพร่หลาย เช่น แผนภูมิพาเรโต (Pareto chart) [1-3], ดัชนีความสำคัญ (Pareto priority index, PPI) [4], การคัดเลือกหัวข้อปัญหาตามแนวทางกิจกรรมกลุ่มควบคุมคุณภาพ (Quality control circle) [5], และการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure mode & effect analysis, FMEA) [6] โดยวิธีในการคัดเลือกหัวข้อปัญหาเพื่อทำโครงการปรับปรุงดังกล่าวยังใช้การพิจารณาเพียงปัจจัยด้านเดียว เช่น แผนภูมิพาเรโตของเปอร์เซ็นต์การเกิดของเสียหรืออาจพิจารณาหลายปัจจัยแต่ให้น้ำหนักของปัจจัยในการคัดเลือกด้านต่างๆ สำคัญเทียบเท่ากัน เช่น วิธี (Pareto Priority index, PPI) โดยการพิจารณาแต่ละปัจจัยที่ให้ค่าน้ำหนักความสำคัญเท่ากันนี้ ขัดแย้งกับความเป็นจริงที่ว่าผู้ประเมิน

ย่อมมีความเห็นถึงน้ำหนักความสำคัญ ที่ควรแตกต่างกันในแต่ละด้าน ของเกณฑ์ในการคัดเลือกหัวข้อปัญหาดังกล่าว

จากเหตุผลดังกล่าวจึงเล็งเห็นความสำคัญ และได้นำเสนอการปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อลดของเสียโดยการประยุกต์ใช้เครื่องมือที่ทำงานร่วมกันระหว่างเครื่องมือคุณภาพทั้ง 7 (7 QC tool) และกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytic hierarchy process, AHP) ในการคัดเลือกหัวข้อปัญหาและทำการปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อลดของเสีย

2. วัตถุประสงค์งานวิจัย

2.1 เพื่อนำเสนอแนวทางในการใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์เพื่อคัดเลือกหัวข้อปัญหาและทำการปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อลดต้นทุนของเสีย

2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบของการปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อลดของเสียโดยการประยุกต์ใช้การทำงานร่วมกันของเครื่องมือคุณภาพทั้ง 7 และกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์

3. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 การคัดเลือกหัวข้อปัญหาเพื่อทำโครงการ ปรับปรุงคุณภาพ

1) แผนภูมิพาเรโต (Pareto chart) เป็นวิธีที่นิยมแพร่หลายในการจำแนกปัญหาดังเช่น การประยุกต์ใช้ของ [1], [2], และ [3] โดยอาศัยกฎ 80:20 เพื่อคัดเลือกหัวข้อปัญหาที่มีความสำคัญสูง จำนวน 20% ซึ่งส่งผลกระทบต่อภาพรวมถึง 80% โดยส่วนใหญ่ในการคัดเลือกหัวข้อปัญหาเพื่อทำโครงการลดของเสียจะใช้ปัจจัยด้านความถี่ในการเกิดของเสียหรือเปอร์เซ็นต์ของเสียเป็นหลักในการสร้างแผนภูมิพาเรโต

2) การคัดเลือกหัวข้อปัญหาตามแนวทางกิจกรรมกลุ่มควบคุมคุณภาพ(Quality control circle) [5] เป็นวิธีการซึ่งถูกแนะนำและประยุกต์ใช้แพร่หลายในการทำกิจกรรมกลุ่มควบคุมคุณภาพ (QCC) โดย

มีปัจจัยในการพิจารณาต่างๆ ดังนี้ ความถี่, ความรุนแรง, ความเป็นไปได้และต้นทุนของเสีย

3) ดัชนีความสำคัญ (Pareto priority index, PPI) เทคนิค PPI [4] ถูกนำมาใช้ในการคัดเลือกหัวข้อปัญหาโดยมีการพิจารณาปัจจัยด้านต้นทุน, ผลประโยชน์ที่ได้รับ, ความน่าจะเป็นที่จะทำสำเร็จและเวลาในการทำโครงการเพื่อช่วยในการตัดสินใจโดยค่า PPI หาได้จากสมการ (1)

$$ppi = \frac{\text{Saving cost} \times \text{Probability of success}}{\text{Implementation cost} \times \text{Completion time}} \quad (1)$$

4) การวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure mode & effect analysis, FMEA) [6] เป็นเทคนิคทางวิศวกรรมที่มีการจัดลำดับข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์โดยพิจารณาดัชนีความเสี่ยงซึ่งนำ (Risk Priority Number, RPN) ซึ่งเป็นผลระหว่างความรุนแรง (Severity, S) โอกาสในการเกิด (Occurrence, O) และความสามารถในการตรวจจับ (Detectability, D)

3.2 กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์

กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytic Hierarchy Process: AHP) เป็นเทคนิคหนึ่งที่ถูกนำมา

ใช้ในกระบวนการตัดสินใจซึ่งได้รับความนิยมอย่างมาก และเป็นที่ยอมรับกันในระดับสากลอย่างแพร่หลาย ซึ่งถูกคิดค้นโดย [7] และถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลาย [8] ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้การแบ่งองค์ประกอบของปัญหาออกเป็นส่วนๆ ในรูปของแผนภูมิตามลำดับชั้นแล้วมีการให้ค่าน้ำหนักของแต่ละองค์ประกอบแล้วนำมาคำนวณค่าน้ำหนักเพื่อนำไปสู่ค่าลำดับความสำคัญของแต่ละทางเลือกกว่าทางเลือกใดมีค่าสูงสุดแล้วนำมาประกอบการตัดสินใจ ซึ่งมีโครงสร้างเลียนแบบกระบวนการคิดของมนุษย์ ดังนั้นเทคนิคนี้จึงเหมาะสำหรับทั้งการตัดสินใจที่เป็นรายบุคคลและเป็นกลุ่ม โดยมีจุดเด่นดังนี้คือง่ายในการสร้าง และสามารถนำเอาปัจจัยที่เป็นทั้งนามธรรมและรูปธรรมมาวินิจฉัยได้อย่างมีความสอดคล้องกันของเหตุผล โดยมีขั้นตอนกระบวนการลำดับชั้นเชิงดังนี้

1. วางกรอบและกำหนดเป้าหมาย
2. กำหนดเกณฑ์หรือปัจจัยในการพิจารณา
3. กำหนดแผนภูมิระดับชั้นในการตัดสินใจ
4. ทำการเปรียบเทียบปัจจัยเป็นคู่ๆ

โดยการเปรียบเทียบทางเลือกเป็นคู่ๆ อาศัยเกณฑ์ประเมินมาตรฐานที่ใช้ในการเปรียบเทียบความสำคัญโดยมีคะแนน 1-9 ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบทางเลือกเป็นคู่ๆ โดยอาศัยเกณฑ์ประเมินมาตรฐาน

ระดับความเข้มข้นของความสำคัญ	ความหมาย	คำอธิบาย
1	สำคัญเท่ากัน	ทั้ง 2 เกณฑ์ส่งผลกระทบต่อวัตถุประสงค์เท่าๆ กัน
3	สำคัญกว่าปานกลาง	เกณฑ์หนึ่งสำคัญกว่าอีกเกณฑ์หนึ่งอยู่ในระดับปานกลาง
5	สำคัญกว่ามาก	เกณฑ์หนึ่งสำคัญกว่าอีกเกณฑ์หนึ่งอยู่ในระดับมาก
7	สำคัญกว่ามากที่สุด	เกณฑ์หนึ่งสำคัญกว่าอีกเกณฑ์หนึ่งอยู่ในระดับมากที่สุด
9	สำคัญกว่าสูงสุด	เกณฑ์หนึ่งสำคัญกว่าอีกเกณฑ์หนึ่งอยู่ในระดับสูงสุด
2,4,6,8	อยู่ระหว่างระดับที่ได้ อธิบายมาแล้วข้างต้น	อยู่ระหว่างระดับที่ได้อธิบายมาแล้วข้างต้น

3.3 เครื่องมือคุณภาพทั้ง 7

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการแก้ปัญหาด้านคุณภาพ ซึ่งช่วยศึกษาสภาพทั่วไปของปัญหา, คัดเลือกปัญหา, ค้นหาและวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาที่แท้จริงเพื่อทำการแก้ไขอย่างถูกต้องและป้องกันไม่ให้เกิดซ้ำโดยมีส่วนประกอบดังนี้

1) แผ่นตรวจสอบ (Check sheet) คือ แบบฟอร์มที่มีการออกแบบเพื่อจะใช้ในการบันทึกข้อมูล

2) ผังพาเรโต (Pareto Diagram) คือ เป็นแผนภูมิที่ใช้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญระหว่างสาเหตุข้อบกพร่องกับปริมาณความสูญเสียที่เกิดขึ้น

3) กราฟ (Graphs) คือ กราฟภาพที่แสดงถึงตัวเลขหรือข้อมูลทางสถิติที่ใช้เมื่อต้องการนำเสนอข้อมูลและวิเคราะห์ผลของข้อมูล

4) ผังเหตุและผล (Cause and effect diagram) คือ ผังที่แสดงความสำคัญระหว่าง คุณลักษณะทางคุณภาพกับปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง

5) ฮิสโตแกรม (Histogram) คือ กราฟที่แสดงถึงความผันแปรของข้อมูลที่ได้มาจากการวัดสำหรับข้อมูลกลุ่มย่อยเดียวกัน

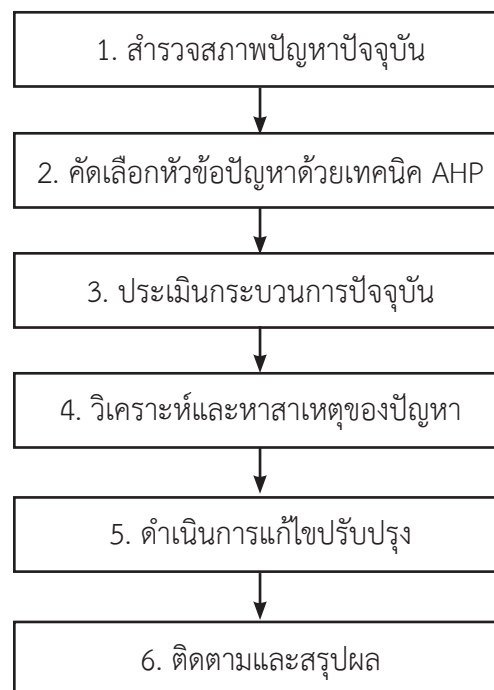
6) ผังการกระจาย (Scatter diagram) คือ ผังที่ใช้แสดงค่าของข้อมูลที่เกิดจากความสำคัญที่เกิดจากตัวแปรสองตัวว่ามีแนวโน้มไปในทางใดเพื่อใช้หาความสำคัญที่แท้จริง

7) แผนภูมิควบคุม (Control Chart) คือ แผนภูมิที่การเขียนขอบเขตที่ยอมรับได้เพื่อนำไปเป็นแนวทางในการควบคุมกระบวนการ

4. วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ แบ่งส่วนวิจัยหลักเป็น 2 ส่วน สำคัญ กล่าวคือ มีการนำเสนอกระบวนการลำดับขั้นเชิงวิเคราะห์ (AHP) เพื่อทำการคัดเลือกหัวข้อปัญหาตามขั้นตอนการวิจัยตามรูปที่ 1 ขั้นที่ 1-2 ส่วนขั้นตอนการวิจัยที่ 3-6 เป็นการประยุกต์ใช้เครื่องมือคุณภาพทั้ง 7 ในการดำเนินการวิเคราะห์และแก้ไข

ปัญหาตามตารางที่ 2 ขั้นตอนและเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา



รูปที่ 1 แผนภูมิขั้นตอนการวิจัย

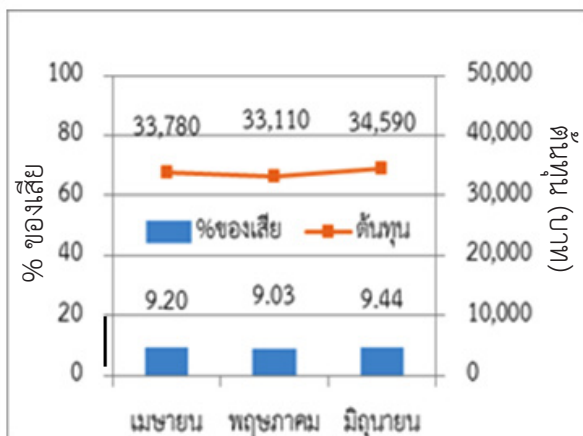
ตารางที่ 2 ขั้นตอนและเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา

ขั้นที่	ขั้นตอน	เครื่องมือที่ใช้
1	สำรวจสภาพปัญหาปัจจุบัน และคัดเลือกปัญหา	ผังพาเรโต, ผังกระบวนการ, กระบวนการลำดับขั้นเชิงวิเคราะห์
2	ประเมินกระบวนการปัจจุบัน	แผ่นตรวจสอบ, ผังเหตุและผล, เทคนิคการถามทำไ้ม 5 ครั้ง
3	พิสูจน์ปัญหา	การทดสอบสมมุติฐาน
4	ปรับปรุงแก้ไข	แผนภูมิควบคุม กระบวนการ
5	ติดตามและสรุปผล	มาตรฐานขั้นตอนการทำงาน

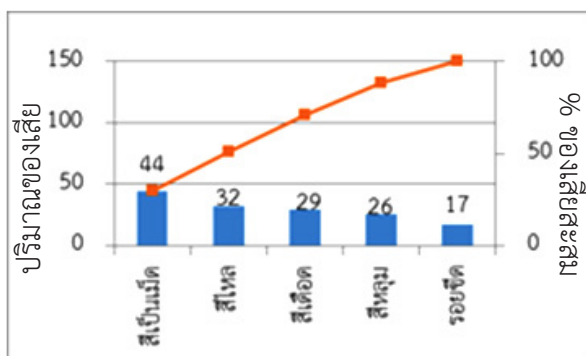
5. ผลการวิจัย

5.1 ผลการสำรวจสภาพปัญหาปัจจุบัน

จากการเก็บรวบรวมข้อมูลของปัญหาในกระบวนการผลิตถึงบรรจุอากาศของโรงงานกรณีศึกษา ตั้งแต่เดือนเมษายน – มิถุนายน 2560 พบว่าของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตถึงบรรจุอากาศบรรทุกคิดเฉลี่ยเป็น 9.23% ต่อเดือน คิดต้นทุนของเสียเป็นเงิน 33,827 บาท ต่อเดือนดังแสดงในรูปที่ 2 โดยสามารถจำแนกปัญหาคุณภาพ ของเสียที่เกิดขึ้น ตามผังพาเรโต ดังรูปที่ 3 ซึ่งแสดงปริมาณของเสียในกระบวนการผลิตที่มีปริมาณของเสียสูงที่สุดคือปัญหาคุณภาพ สีเป็นเม็ด มีจำนวนของเสียเท่ากับ 44 ชิ้น โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เท่ากับ 29.73% รองลงมาเป็น ปัญหาคุณภาพ สีไหล, สีเดือด, สีหลุม, และรอยขีด ตามลำดับ ซึ่งตามหลักการ 80:20 ของพาเรโตปัญหาที่ควรถูกเลือกเพื่อทำการแก้ไข ควรประกอบด้วย สีเป็นเม็ด, สีไหล และ สีเดือด



รูปที่ 2 ของเสียภาพรวมที่พบในกระบวนการผลิต



รูปที่ 3 ผังพาเรโตจำแนกชนิดปัญหาคุณภาพที่พบ

หากแต่ในการคัดเลือกหัวข้อปัญหาเพื่อทำโครงการปรับปรุงคุณภาพโดยงานวิจัยทั่วไปจะนำปัจจัยทางด้านปริมาณหรือ % ของเสียที่พบมาจัดเรียงลำดับโดยอาศัยผังพาเรโตซึ่งจะทำให้ลำดับความสำคัญของชนิดของปัญหาคุณภาพ ที่พบในกระบวนการผลิตถึงบรรจุอากาศสามารถเรียงจากความสำคัญสูงไปหาต่ำที่สุดได้ดังนี้ สีเป็นเม็ด (มีลักษณะเป็นเม็ดนูนสูงจากผิวปกติ), สีไหล(มีลักษณะเป็นรอยไหลของสีจากผิวปกติ), สีเดือด (มีลักษณะเป็นฟองอากาศภายในสีจากผิวปกติ), สีหลุม (มีลักษณะเป็นรอยแหว่และเป็นหลุมของสีจากผิวปกติ), และรอยขีด (มีลักษณะเป็นรอยขีดลึกบนสีผิวปกติ) อย่างไรก็ตามการคัดเลือกปัญหาไม่ควรพิจารณาเพียงปัจจัยเดียว

5.2 ผลคัดเลือกหัวข้อปัญหาเพื่อทำการปรับปรุง

เพื่อให้เห็นข้อดีของการคัดเลือกหัวข้อปัญหาด้วยวิธีการกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ที่นำเสนออย่างชัดเจน ดังนั้นวิธีการคัดเลือกหัวข้อปัญหาตามแนวทางกิจกรรมกลุ่มควบคุมคุณภาพ จึงถูกนำมาใช้เพื่อเปรียบเทียบกับวิธีการกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ โดยผลที่ได้จากวิธีการคัดเลือกหัวข้อปัญหาตามแนวทางกิจกรรมกลุ่มควบคุมคุณภาพซึ่งถูกจัดทำโดยสมาชิกกลุ่มจากส่วนงานที่เกี่ยวข้องคือฝ่ายผลิตซ่อมบำรุงและวิศวกรรมจำนวน 5 คน และทำการให้คะแนนโดยมีค่าจาก 1-5 โดยเรียงจากคะแนนต่ำสุดไปหาสูงสุดตามลำดับ ซึ่งผลการคัดเลือกถูกนำมาแสดงในตารางที่ 9 โดยมีเกณฑ์ในการให้คะแนนตามคำแนะนำโดย [5] เป็นดังนี้คือ ผลกระทบด้าน ต้นทุน โอกาสในการแก้ไขความถี่ของปัญหา และความรุนแรงของปัญหา และผลการคัดเลือกหัวข้อปัญหาด้วยวิธีการกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ถูกนำมาแสดงไว้ในตารางที่ 4-8 โดยผลการจัดลำดับเกณฑ์การคัดเลือกหัวข้อปัญหาตามตารางที่ 4, การจัดลำดับและคัดเลือกหัวข้อปัญหาภายใต้ปัจจัยด้านความรุนแรงตามตารางที่ 6 และด้านโอกาสในการแก้ไขตามตารางที่ 8 ซึ่งเป็น

ข้อมูลเชิงคุณภาพ (Qualitative data) จะใช้วิธีการเปรียบเทียบที่ละคู่ซึ่งอาศัยเกณฑ์ประเมินมาตรฐานตามตารางที่ 1 ตามตัวอย่างการคำนวณหาค่าน้ำหนักความสำคัญจาก AHP ในตารางที่ 3 ภายใต้กรอบผังโครงสร้างการคัดเลือกหัวข้อด้วยวิธีกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ดังรูปที่ 4

ตารางที่ 3 ตัวอย่างการคำนวณหาค่าน้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์การคัดเลือกจาก AHP

ผลการเปรียบเทียบเกณฑ์ที่ละคู่	ต้นทุน	โอกาส	ความถี่	รุนแรง	ค่าเฉลี่ยด้วยวิธี GMM
ต้นทุน	1	6	4	1	2.21
โอกาส	1/6	1	1/3	1/5	0.32
ความถี่	1/4	3	1	1/3	0.71
รุนแรง	1	5	3	1	1.97

โดยค่าน้ำหนักจาก AHP หาได้ด้วยวิธีการ Geometric mean method (GMM) [7] ดังตัวอย่างการคำนวณค่าเฉลี่ยด้วยวิธี GMM ในเกณฑ์ด้านต้นทุนซึ่งหาได้จาก $[1 \times 6 \times 4 \times 1]^{1/4} = 2.21$ จากนั้นหาค่าน้ำหนักจาก AHP ด้วยการนำค่าเฉลี่ยด้วยวิธี GMM มาทำการ Normalize เพื่อให้น้ำหนักรวมนีค่าเท่ากับ 1 โดยสามารถแสดงได้ดังนี้ $2.21 / (2.21 + 0.32 + 0.71 + 1.97) = 0.42$

ตารางที่ 4 ผลการจัดลำดับเกณฑ์การการคัดเลือกหัวข้อปัญหาเพื่อทำการปรับปรุง (CR = 0.02)

หัวข้อ	เกณฑ์ในการคัดเลือก	ค่าเฉลี่ยด้วยวิธี	ค่าน้ำหนักจาก AHP	ลำดับที่
1	ต้นทุน	2.21	0.42	1
2	โอกาส	0.32	0.06	4
3	ความถี่	0.71	0.14	3
4	รุนแรง	1.97	0.38	2

จากผลการจัดลำดับเกณฑ์การคัดเลือกหัวข้อปัญหาเพื่อทำการปรับปรุง ตามตารางที่ 4 พบว่าเกณฑ์การคัดเลือกที่ได้รับคะแนนสูงที่สุดคือ เกณฑ์ด้านต้นทุนของเสีย (0.42) รองลงมาเป็นความรุนแรงของปัญหา (0.38) ด้านความถี่ในการเกิด (0.14) และด้านโอกาสในการแก้ไข (0.06) ตามลำดับ

ตารางที่ 5 ผลการจัดลำดับและคัดเลือกหัวข้อปัญหาภายใต้ปัจจัยด้านต้นทุน

ปัจจัยด้านต้นทุน	ต้นทุน (บาท)	ค่าน้ำหนัก	ลำดับที่
สีเป็นเม็ด	240	0.21	1
สีไหล	200	0.18	2
สีเดือด	200	0.18	2
สีหลุม	240	0.21	1
รอยขีด	240	0.21	1

ผลการจัดลำดับปัญหาภายใต้ปัจจัยด้านต้นทุนตามตารางที่ 5 พบว่ามีปัญหาคุณภาพ สีเป็นเม็ด, สีหลุม และรอยขีดมีต้นทุนในการแก้ไขงานสูงกว่าอาการอื่น เป็นเงินถึง 240 บาทต่อชิ้นในขณะที่ปัญหาคุณภาพอื่นที่เหลือสามารถแก้ไขได้ด้วยต้นทุนที่ต่ำกว่าคือ 200 บาทต่อชิ้น

ตารางที่ 6 ผลการจัดลำดับและคัดเลือกหัวข้อปัญหาภายใต้ปัจจัยด้านความรุนแรง (CR = 0.07)

ปัจจัยด้านความรุนแรง	ค่าเฉลี่ยด้วยวิธี GMM	ค่าน้ำหนักจาก (AHP)	ลำดับที่
สีเป็นเม็ด	1.15	0.23	3
สีไหล	0.73	0.14	4
สีเดือด	1.37	0.27	2
สีหลุม	0.26	0.05	5
รอยขีด	1.55	0.31	1

ผลการจัดลำดับและคัดเลือกหัวข้อปัญหา ภายใต้ปัจจัยด้านรุนแรงพบว่าสามารถเรียงลำดับตาม น้ำหนักความสำคัญจากสูงไปต่ำได้ดังนี้ รอยขีด, สีเดือด, สีเป็นเม็ด, สีไหล, และสีหลุม, ตามตารางที่ 6

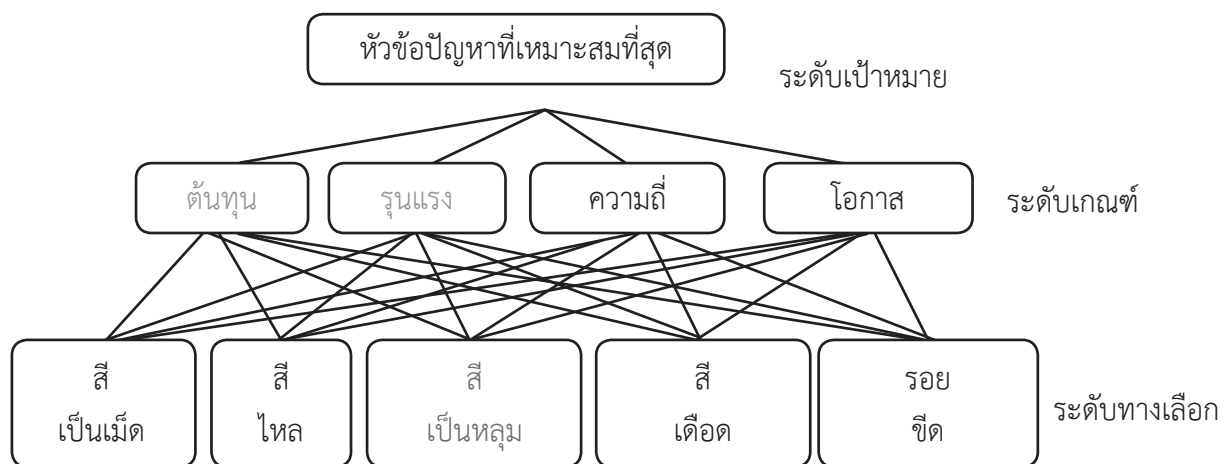
ตารางที่ 7 ผลการจัดลำดับและคัดเลือกหัวข้อปัญหา ภายใต้ปัจจัยด้านความถี่

ปัจจัยด้านความถี่ของปัญหาที่เกิด	%ของเสีย	ค่าน้ำหนัก	ลำดับที่
สีเป็นเม็ด	2.65	0.30	1
สีไหล	1.93	0.22	2
สีเดือด	1.74	0.20	3
สีหลุม	1.56	0.18	4
รอยขีด	1.02	0.11	5

ในขณะเดียวกันผลการจัดลำดับและคัดเลือกหัวข้อปัญหาภายใต้ปัจจัยด้านความถี่พบว่าสามารถเรียงลำดับตามน้ำหนักความสำคัญจากสูงไปต่ำได้ดังนี้ สีเป็นเม็ด, สีไหล, สีหลุม, และรอยขีดตามตารางที่ 7

ตารางที่ 8 ผลการจัดลำดับและคัดเลือกหัวข้อปัญหา ภายใต้ปัจจัยด้านโอกาส (CR = 0.05)

ปัจจัยด้านโอกาสในการแก้ไข	ค่าเฉลี่ยด้วยวิธี GMM	ค่าน้ำหนักจาก (AHP)	ลำดับที่
สีเป็นเม็ด	3.84	0.58	1
สีไหล	0.84	0.13	3
สีเดือด	0.87	0.07	4
สีหลุม	0.27	0.04	5
รอยขีด	1.20	0.18	2



รูปที่ 4 แผนผังลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์เพื่อคัดเลือกหัวข้อปัญหาเพื่อทำการปรับปรุง

ตารางที่ 9 ผลการคัดเลือกหัวข้อปัญหาด้วยวิธีกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (AHP)

ข้อที่	เกณฑ์การประเมิน		น้ำหนักความสำคัญของหัวข้อปัญหาคุณภาพ				
	รายละเอียดของเกณฑ์	น้ำหนัก	สีเป็นเม็ด	สีไหล	สีเดือด	สีเป็นหลุม	รอยขีด
1	ผลด้านต้นทุน	0.42	0.21	0.18	0.18	0.21	0.21
2	โอกาสในการแก้ไข	0.06	0.58	0.13	0.07	0.04	0.18
3	ความถี่ของปัญหา	0.14	0.30	0.22	0.20	0.18	0.11
4	ความรุนแรงของปัญหา	0.38	0.23	0.14	0.27	0.05	0.31
ค่าน้ำหนักความสำคัญโดยรวม			0.25	0.17	0.21	0.14	0.23
ลำดับความสำคัญของหัวข้อปัญหาคุณภาพ			1	4	3	5	2

ตารางที่ 10 ผลการคัดเลือกหัวข้อปัญหาตามแนวทางกิจกรรมกลุ่มควบคุมคุณภาพ (Quality control circle)

หัวข้อปัญหา	ผลกระทบด้านต้นทุน	โอกาสในการแก้ไข	ความถี่ของปัญหา	ความรุนแรงของปัญหา	รวมคะแนน	ลำดับ
1. สีเป็นเม็ด	4	5	5	3	17	1
2. สีไหล	3	3	4	2	12	3
3. สีเดือด	3	2	3	4	12	3
4. สีเป็นหลุม	4	1	2	1	8	5
5. รอยขีด	4	4	1	5	14	2

ส่วนผลจากการจัดลำดับและคัดเลือกหัวข้อปัญหาภายใต้ปัจจัยด้านโอกาสในการแก้ไขปัญหานั้นพบว่าสามารถเรียงลำดับตามน้ำหนักความสำคัญจากสูงไปต่ำได้ดังนี้ สีเป็นเม็ด, รอยขีด สีไหล, สีเดือด และสีหลุมตามตารางที่ 8

เมื่อการคัดเลือกภาพรวมถูกกระทำโดยนำน้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์การเลือกในแต่ละด้านมาคูณกับคะแนนที่ได้ในแต่ละด้าน ปัญหาคุณภาพที่ควรถูกคัดเลือกมาทำการปรับปรุงสามารถเรียงลำดับจากสูงไปต่ำได้ดังนี้ สีเป็นเม็ด (0.25), รอยขีด (0.23) สีเดือด (0.21) สีไหล (0.17), และ สีหลุม (0.14) ดังแสดงในตารางที่ 9

โดยเมื่อนำผลการคัดเลือกหัวข้อปัญหาเพื่อทำการปรับปรุงโดยวิธีกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์มาเปรียบเทียบกับวิธีพื้นฐานคือการคัดเลือกหัวข้อปัญหาตามแนวทางกิจกรรมกลุ่มควบคุมคุณภาพ (Quality control circle) ตามตารางที่ 10 ซึ่งมีการพิจารณาเกณฑ์ในการคัดเลือกโดยให้น้ำหนักความสำคัญเท่ากันในทุกเกณฑ์พบว่า ผลการจัดลำดับโดยวิธีพื้นฐานมีการสลับลำดับของปัญหาคุณภาพหัวข้อ 2 สีไหล และ 3 สีเดือด ซึ่งวิธีกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ให้น้ำหนักความสำคัญกับปัญหาคุณภาพ ที่ 3 สีเดือดมากกว่า ปัญหาคุณภาพที่ 2 สีไหล อันเนื่องมาจากอิทธิพลของน้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์ความรุนแรงของปัญหาที่มีค่าสูง (0.38) ส่งเสริม

กับคะแนนที่ ปัญหาคุณภาพสีเดือดได้รับสูงที่สุด (0.27) ภายใต้การประเมินด้วยเกณฑ์ความรุนแรงดังกล่าว

ซึ่งหากปราศจากการพิจารณาความแตกต่างของน้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์การคัดเลือก แม้ว่าหัวข้อปัญหาที่ได้คะแนนสูงสุดจะเป็นปัญหาคุณภาพเดียวกันระหว่างทั้งสองวิธีคือสีเป็นเม็ดแต่ ปัญหาคุณภาพที่มีความสำคัญระดับรองลงไปอาจถูกจัดลำดับในการเลือกนำไปปรับปรุงอย่างไม่เหมาะสม ซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพและต้นทุนของผลิตภัณฑ์ในที่สุด

อย่างไรก็ตามเนื่องจากผลการคัดเลือกหัวข้อปัญหาเพื่อทำการปรับปรุงด้วยวิธีทั้งกระบวนการลำดับขั้นเชิงวิเคราะห์และวิธีตามแนวทางกิจกรรมกลุ่มควบคุมคุณภาพให้ผลการคัดเลือกปัญหาคุณภาพที่มีความสำคัญสูงสุดตรงกันคือ สีเป็นเม็ด อีกทั้งข้อจำกัดทางด้านทรัพยากรในการเลือกลงทุนเพื่อปรับปรุง งานวิจัยนี้จึงคัดเลือกหัวข้อปัญหาคุณภาพสีเป็นเม็ดเพียงปัญหาเดียวเพื่อทำการปรับปรุงในฐานะโครงการนำร่องแทนการเลือก ทั้ง 3 ปัญหาคุณภาพตามหลักการ 80:20 ของพาเรโต

5.3 ผลการศึกษากระบวนการผลิตด้วยแผนภูมิกระบวนการ (Process mapping)

จากการศึกษาขั้นตอนกระบวนการผลิตถึงบรรจุอากาศในโรงงานกรณีศึกษาพบว่า มีขั้นตอนการผลิตทั้งหมด 18 ขั้นตอนตาม รูปที่ 5 แผนภูมิกระบวนการผลิต โดยมีขั้นตอนที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการเกิดของเสียในขั้นตอนการผลิตที่ 16 พ่นสีรองพื้น

- 1. กลิ้งให้แผ่นเหล็กกลม
- 2. เชื่อมยึด
- 3. เชื่อมตะเข็บ
- 4. ใส่ไส้ในของถัง
- 5. เชื่อมติดรูอากาศ
- ◇ 6. เช็คนาตรูอากาศตัวถัง
- 7. เชื่อมติดรูอากาศของฝาปิด
- ◇ 8. เช็ครอยรั่วของฝาถัง

- ◇ 9. เช็คนาตรูเกลียวฝา
- 10. ใส่ไส้ใน
- 11. ปิดฝาถังแล้วเชื่อมยึดติด
- 12. เชื่อมติดฝาถัง
- 13. เชื่อมยึดติดน็อตตัวถัง
- 14. ขัดตัวถัง
- ◇ 15. เช็ครอยรั่วของถัง
- 16. พ่นสีรองพื้น
- 17. พ่นสีเคลือบบน
- ◇ 18. ตรวจสอบเช็คถัง

รูปที่ 5 แผนภูมิกระบวนการผลิตถังบรรจุอากาศ

โดยรูปภาพแสดงการทำงานในกระบวนการพ่นสีรองพื้นได้ถูกนำเสนอไว้ได้ตาม รูปที่ 6 โดยขั้นตอนดังกล่าวจะมีกลไกของม่านน้ำที่ถูกติดตั้งไว้ดักจับสีที่ถูกพ่นและกระจายออกไปไม่ให้ย้อนกลับมาติดกับชิ้นงานในภายหลังได้



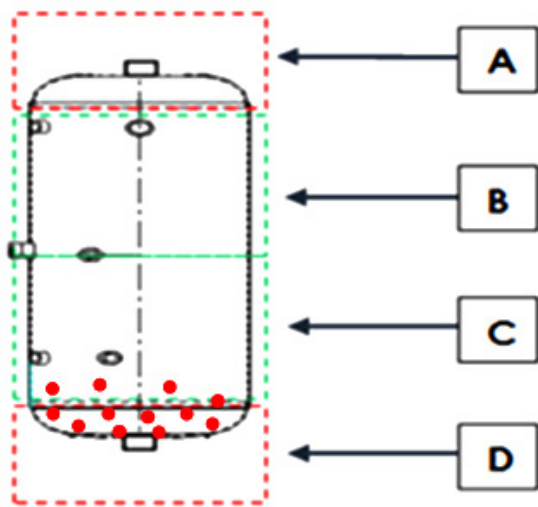
รูปที่ 6 การทำงานในกระบวนการพ่นสีรองพื้น

5.4 ผลการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาด้วยแผนตรวจสอบตำแหน่งของเสียที่เกิดขึ้นงาน (Defect location check sheet)

จากข้อมูลที่ได้เก็บรวบรวมจากชิ้นงานที่เป็นของเสียปัญหาคุณภาพ สีเป็นเม็ดพบว่าส่วนใหญ่เกิดในตำแหน่งด้านล่างบริเวณพื้นที่ D ซึ่งคิดเป็น 75% ของจำนวนของเสียอาการสีเป็นเม็ดทั้งหมดที่ตั้งแสดงในตารางที่ 11 และ รูปที่ 7

ตารางที่ 11 แสดงตำแหน่งที่พบของเสียปัญหาคุณภาพ สีเป็นเม็ดบนชิ้นงาน

ลำดับ	ตำแหน่งที่พบ	จำนวนและร้อยละชิ้นงาน ปัญหาคุณภาพสีเป็นเม็ด	
1	A	0	0%
2	B	0	0%
3	C	4	25%
4	D	12	75%

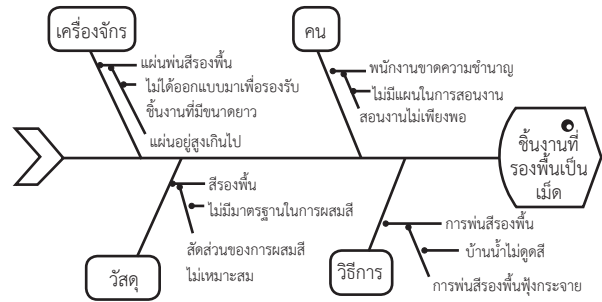


รูปที่ 7 ผลการตรวจสอบตำแหน่งสีเป็นเม็ด

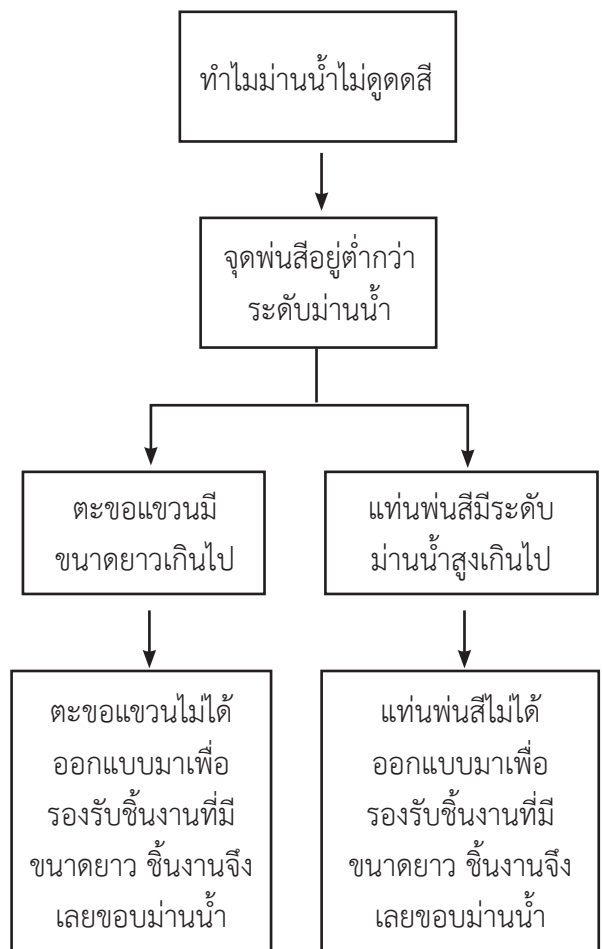
จากข้อมูลดังกล่าวบ่งชี้ได้ว่าตำแหน่งที่มักพบของเสียปัญหาคุณภาพ สีเป็นเม็ดมีความสอดคล้องกับบริเวณที่ม่านน้ำซึ่งมีหน้าที่ดักจับสีไม่ให้ฟุ้งกระจายอาจครอบคลุมไม่ถึง

5.5 ผลการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาด้วยผังเหตุและผล (Cause and effect diagram)

เพื่อให้การวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา มีความครอบคลุม ผังเหตุและผล ตามรูปที่ 8 จึงถูกนำมาใช้ร่วมกับการพิจารณาดัชนีความเสี่ยงขึ้นนำ (Risk priority number) ตามหลักการการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบ (FMEA) โดยผลการวิเคราะห์พบว่าปัญหาคุณภาพสีเป็นเม็ด มีสาเหตุหลักมาจากการที่ ม่านน้ำไม่ดูดซับสี



รูปที่ 8 ผลการวิเคราะห์หาสาเหตุโดยผังเหตุและผล (Cause and effect diagram)



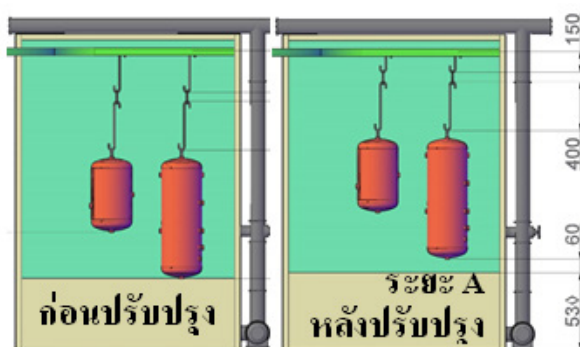
รูปที่ 9 ผลการวิเคราะห์หาสาเหตุโดยการถามทำไม (Why-why analysis)

จากผลการวิเคราะห์หาสาเหตุโดยการถามทำไม (Why-why analysis) ตามรูปที่ 9 พบว่าสาเหตุหลักที่ทำให้ม่านน้ำไม่ดูดซับสีเกิดจากตะขอแขวนชิ้นงานและแท่นพ่นสีไม่ได้ถูกออกแบบให้รองรับชิ้นงานที่มีขนาดยาว ดังนั้นจึงทำให้พื้นที่ที่ชิ้นงานยาวกว่า

ระยะม่านน้ำจึงไม่สามารถดูดซับสีที่กระจายจากการพ่นได้

5.6 แนวทางการแก้ปัญหา ม่านน้ำไม่ดูดสี โดยการปรับระดับม่านน้ำ

จากผลการวิเคราะห์หาสาเหตุโดยการถามทำไม (Why-why analysis) สาเหตุที่ทำให้ม่านน้ำไม่ดูดสีเกิดจากระดับม่านน้ำไม่เพียงพอที่จะครอบคลุมชิ้นงานที่มีขนาดยาวได้เนื่องจากตะขอแขวนและแท่นไม่ได้ออกแบบมาเพื่อรองรับชิ้นงานขนาดยาว ชิ้นงานจึงเลยขอบม่านน้ำ ดังนั้นจึงตัดสินใจปรับระดับม่านน้ำโดยปรับให้ระยะ A ของม่านน้ำเพิ่มขึ้นจาก 0 cm เป็น 60 cm (ตามขนาดความยาวของชิ้นงานที่มีขนาดยาวที่สุดที่มีการผลิต) เพื่อให้เพิ่มพื้นที่ครอบคลุมมากขึ้นด้วยการออกแบบระยะของตะขอแขวนและความสูงแท่นพ่นสีให้เหมาะสมเพื่อรองรับชิ้นงานขนาดยาว



รูปที่ 10 ระดับม่านน้ำในขั้นตอนการพ่นสีรองพื้น

5.7 ผลการแก้ปัญหา ม่านน้ำไม่ดูดสี โดยการปรับระดับม่านน้ำ

หลังจากการปรับปรุงกระบวนการพ่นสีรองพื้นด้วยการปรับระดับม่านน้ำ จึงได้ทำการทดสอบเพื่อประเมินผลกระทบจากการปรับปรุงโดยการตรวจสอบชิ้นงานที่ผลิตจากระดับม่านน้ำที่ปรับแล้วเป็นระยะเวลา 1 เดือน (ระหว่างวันที่ 15 กรกฎาคมถึง 15 สิงหาคม) เทียบกับก่อนการปรับปรุงผลปรากฏว่า % ของเสียปัญหาคุณภาพสีเป็นเม็ดลดลง จาก 2.65% เป็น 0 % ดังแสดงในตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ของเสียหลังการปรับม่านระดับน้ำ

ของเสีย อาการสีเป็นเม็ด	ก่อนการ ปรับปรุง	หลังการ ปรับปรุง
ปริมาณการผลิต (ชิ้น)	1662	1659
จำนวนของเสีย (ชิ้น)	44	0
เปอร์เซ็นต์	2.65%	0.00%

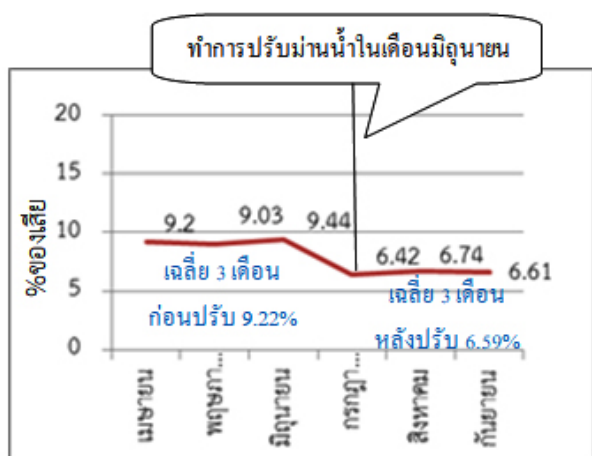
โดยผลการทดสอบสมมุติฐานซึ่งถูกตั้งไว้ว่า % ของเสียปัญหาคุณภาพสีเป็นเม็ดระหว่างก่อนและหลังการปรับปรุงมีค่าไม่แตกต่างกัน ด้วยการทดสอบทางสถิติ แบบ 2 proportional test แสดงให้เห็นผลการปฏิเสธสมมุติฐานโดยผลการปรับปรุงด้วยการปรับม่านน้ำส่งผลต่อ % ของเสียปัญหาคุณภาพสีเป็นเม็ดให้มีความแตกต่างจากก่อนปรับปรุงโดยมีระดับลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ที่ ค่า P value = 0.000 ตามรูปที่ 11

Z Test for Two Proportions	
Successes in Group 1	44
Sample Size Group 1	1662
Proportion Group 1	0.026
Successes in Group 2	0
Sample Size Group 2	1659
Proportion Group 2	0.000
Average Proportion	0.013
Difference in Two Proportions	0.026
Hypothesized Difference	0
α	0.05
Z	6.671603666
Two-Tailed Test	
Lower Critical Value	-1.959963985
Upper Critical value	1.959963985
p-value	0.00000000
Decision	Reject

รูปที่ 11 ผลการทดสอบสมมุติฐานด้วยการทดสอบทางสถิติ แบบ 2 proportional test

5.7 การเฝ้าติดตามผลการแก้ปัญหา ม่านน้ำไม่ดูดีโดยการปรับระดับม่านน้ำในระยะยาว

หลังจากการปรับปรุงกระบวนการพ่นสี
รองพื้นด้วยการปรับระดับม่านน้ำที่ได้รับการปรับ
ในกระบวนการพ่นสีจริงในเดือน มิถุนายน 2560
การเฝ้าติดตามผลการแก้ปัญหา ม่านน้ำไม่ดูดี
โดยการปรับระดับม่านน้ำในระยะยาวจึงถูกกระทำ
ต่อเนื่องอีกสามเดือนระหว่าง เดือนกรกฎาคม-กันยายน
2560 โดย % ของเสียปัญหาคุณภาพ สีเป็นเม็ดลดลง
2.63% ซึ่งส่งผลให้ % ของเสียลดลง จากค่าเฉลี่ย
9.22 % ระหว่าง เดือนเมษายน-มิถุนายน เป็น 6.59%
ระหว่าง เดือนกรกฎาคม-กันยายน 2560 ดังแสดงผล
ได้ตามรูปที่ 12



รูปที่ 12 % ของเสียสีเป็นเม็ดจากการเฝ้าติดตามผล
การแก้ปัญหา ม่านน้ำไม่ดูดีโดยการปรับระดับ
ม่านน้ำในระยะยาว

6. สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

โดยทั่วไปเครื่องมือที่แพร่หลายอย่างเช่น
ผังพาเรโต (Pareto chart), ดัชนี ความสำคัญ (Pareto
priority index, PPI), การคัดเลือกหัวข้อปัญหา
ตามแนวทางกิจกรรมกลุ่มควบคุมคุณภาพ (Quality
control circle), หรือ การวิเคราะห์ข้อบกพร่องและ
ผลกระทบ (Failure mode & effect analysis, FMEA)
จะถูกนำมาใช้กับการคัดเลือกหัวข้อปัญหาเพื่อทำการ
ปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อลดของเสียแต่ อย่างไร

ก็วิธีดังกล่าวมีเกณฑ์การคัดเลือกด้วยการพิจารณา
เพียงปัจจัยด้านเดียว เช่น ผังพาเรโตของเปอร์เซ็นต์
ของเสียหรือพิจารณาหลายปัจจัยแต่ให้น้ำหนักของ
ปัจจัยด้านต่างๆ สำคัญเท่ากัน ในโรงงานกรณีศึกษา
ซึ่งพบปัญหาของเสียจากการผลิตที่อยู่ในระดับที่สูง
แต่การทำการปรับปรุงยังต้องพิจารณาปัจจัยสำคัญ
อื่นๆ นอกจากเพียงปริมาณของเสียที่เกิดขึ้น เช่น
ความรุนแรง, ความเป็นไปได้และต้นทุนของเสีย
งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการปรับปรุงกระบวนการผลิต
เพื่อลดของเสียโดยการประยุกต์ใช้เครื่องมือที่ทำงาน
ร่วมกันระหว่างเครื่องมือคุณภาพทั้ง (7 QC tool)
และกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytic
hierarchy process, AHP) ในการคัดเลือกหัวข้อ
ปัญหาและทำการปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อ
ลดของเสีย

ผลการวิจัยพบว่าภายหลังการปรับปรุง
กระบวนการผลิตโดยการประยุกต์ใช้เครื่องมือที่ทำงาน
ร่วมกันระหว่างเครื่องมือคุณภาพทั้ง (7 QC tool)
และกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytic
hierarchy process, AHP) ผลการคัดเลือกโครงการ
ปรับปรุงคุณภาพเพื่อลดของเสียสามารถสะท้อน
เหตุผลจากความแตกต่างของน้ำหนักความสำคัญ
ของแต่ละเกณฑ์ในการคัดเลือกได้อย่างเหมาะสม
มากกว่าวิธีพื้นฐาน อีกทั้งยังสามารถลด % ของเสีย
ปัญหาคุณภาพ สีเป็นเม็ดลดลงจาก 2.63% ซึ่งส่งผลให้ %
ของเสียค่าเฉลี่ยลดลงจาก 9.22 % ระหว่าง เดือน
เมษายน-มิถุนายน เป็น 6.59% ระหว่าง เดือน
กรกฎาคม-กันยายน 2560 โดยคิดเป็นเงิน 9,529 บาท
ต่อเดือน

7. ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากระดับม่านน้ำมีความสำคัญและ
ส่งผลต่อการเกิดของเสียจึงเสนอให้ทางโรงงานวาง
มาตรฐานไว้ ในมาตรฐานการติดตั้งเครื่องจักรใหม่
ให้เป็นไปในทางเดียวกันอันเป็นการป้องกันไม่ให้เกิด
ปัญหาซ้ำ

8. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณโรงงานกรณีศึกษาซึ่งเป็นผู้ผลิตถังบรรจุอากาศในการให้ความร่วมมือและสนับสนุนข้อมูลระหว่างการทำวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] Homkri P and Kongthana J. Design of Experiment (DOE) to Reduce Waste in Plastic Injection Process of Automation parts. Kasem Bundit Engineering Journal. 2013; 3(2): 73-95. (in Thai)
- [2] Vungkahad K and Kubtustean N. Defect Reduction in Gear Production: A Case Study of Motor Component Manufacturing. Journal of Engineering, RMUTT. 2014;12(2): 29-41. (in Thai)
- [3] Srilerd K and Kubtustean N. Waste Reduction in Induction Hardening Process: A Case Study. Journal of Engineering, RMUTT. 2016;14(2): 1-10. (in Thai)
- [4] Manowichean J and Kantanantha N. Quality Cost Reduction in Digital Camera Assembly Process. KKU Engineering Journal. 2014; 40(3): 313-322. (in Thai)
- [5] Ploychalearn K. Quality Control at Front Line QC Circle. 5th ed. Bangkok: Sor Asia Press; 2008. (in Thai)
- [6] Inhun K and Laosirihongtong T. Prioritization of Failure Modes by Using Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP): A Case study Electronics Parts / Components Manufacturing. The journal of KMUTNB. 2016 26(23): 427-436. (in Thai)
- [7] Satty. T. L. The Analytic Hierarchy Process. New York: McGraw-Hill; 1980
- [8] Tunsirikongkol W. AHP The Most Famous Decision Process in the World. Bangkok: Graphic and Printer Center; 1999. (in Thai)

การพัฒนากระเบื้องยางธรรมชาติผสมเศษขยะพลาสติก เอทิลีนไวนิลอะซิเตทแบบละเอียด

Development of Low Cost Natural Rubber Floor Tile Mixed with Fine Ethylene Vinyl Acetate Plastic Waste

วิหาร ดีปัญญา^{1*} และกิตติพงษ์ สุวีโร²

Wiharn Deepanya^{1*} Kittipong Suweero²

wiharn.d@rmutp.ac.th^{1*}, kittipong.s@en.rmutt.ac.th²

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

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

² ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

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

Received: March 22, 2018

Revised: May 15, 2018

Accepted: August 20, 2018

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์กระเบื้องยางธรรมชาติผสมเศษขยะพลาสติกเอทิลีนไวนิลอะซิเตท (พลาสติกอีวีเอ) แบบความละเอียด โดยใช้ยางธรรมชาติแท้ STR20 ในปริมาณเท่ากับ 100 phr ต่อเศษขยะพลาสติกอีวีเอที่ผ่านการย่อยผ่านตะแกรงเบอร์ 10 ในปริมาณ 0, 5, 10, 20, 40, และ 80 phr ตามลำดับ และผสมปริมาณสารเคมีในอัตราส่วนคงที่ ประกอบด้วย ซิงค์ออกไซด์ เท่ากับ 5 phr กรดสเตียริก เท่ากับ 2 phr เมอร์แคปโทเบนโซไทอาโซล เท่ากับ 0.5 phr ไดฟีนิลกวานิดีน เท่ากับ 0.2 phr และกำมะถัน เท่ากับ 3 phr ทำการบดผสมด้วยเครื่องบดแบบสองลูกกลิ้ง แล้วอัดขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดแบบร้อน ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ได้แผ่นยางธรรมชาติ ขนาด 30x30x0.2 เซนติเมตร ทดสอบสมบัติตามมาตรฐาน ASTM พบว่า กระเบื้องยางธรรมชาติผสมพลาสติกอีวีเอ อัตราส่วน 10 phr มีสมบัติที่เหมาะสมสำหรับนำไปปูพื้น เนื่องจากมีค่าความแข็ง ความต้านทานแรงดึง และความต้านทานการสึกหรอที่มากขึ้น ส่วนความหนาแน่นและสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีค่าลดลง เมื่อเทียบกับกระเบื้องยางธรรมชาติที่ไม่มีพลาสติกอีวีเอ

คำสำคัญ: ยางธรรมชาติ; เศษพลาสติกเอทิลีนไวนิลอะซิเตท; ความละเอียดสูง; กระเบื้องปูพื้น

Abstract

This research aims to develop the natural-rubber floor tiles mixed with fineness ethylene vinyl acetate plastic wastes (EVA plastics) from the factories. The study use natural-rubber STR 20 at 100 phr with various contents of EVA plastics (e.g. 0, 5, 10, 20, 40, and 80 phr) and then mixed with chemical substance at constant ratio include zinc oxide at 5 phr, stearic acid at 2 phr, mercaptobenzothiazole at 0.5 phr, diphenyl guanidine at 0.2 phr and sulfur at 3 phr. The samples are ground by two-roll mill and formed by compression molding at 150 degree Celsius with 30x30x0.2 cm of dimension. The properties of the natural-rubber floor tiles are tested under ASTM standard. From the results, it is found that the natural-rubber floor tiles mixed with 10 phr of EVA plastics is the suitable ratio for using as the rubber floor tiles in building. This ratio can increase the hardness, tensile strength and wear resistant properties, and decrease the density and thermal insulation properties when compare to the natural-rubber floor tiles without EVA plastic.

Keywords: natural-rubber; ethylene vinyl acetate plastic waste; high fineness; floor tile

1. บทนำ

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ยางธรรมชาติหรือยางพารา เป็นพืชเศรษฐกิจที่ได้รับการส่งเสริมจากรัฐบาลให้มีการปลูกอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในพื้นที่ภาคใต้และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ทำให้ปัจจุบันประเทศไทยเป็นผู้ผลิตและส่งออกยางธรรมชาติมากเป็นอันดับต้นๆ ของโลก มีเนื้อที่เพาะปลูกประมาณ 12.3 ล้านไร่ มีผลผลิตส่งออกปีละประมาณ 2.4 ล้านตัน มูลค่า 100,000 ล้านบาทต่อปี ส่วนใหญ่ส่งออกในรูปแบบของน้ำยางข้น ยางแผ่นรมควัน ยางอบแห้ง และยางแท่ง [1] แต่ด้วยปริมาณการปลูกยางธรรมชาติของกลุ่มประเทศเอเชียตะวันออกเฉียงใต้และประเทศจีนที่เริ่มหันมาเพาะปลูกกันมากขึ้น ส่งผลต่อราคาของยางธรรมชาติที่มีแนวโน้มตกต่ำลง การพัฒนาผลิตภัณฑ์แผ่นกระเบื้องยางจากยางธรรมชาติ จึงเป็นแนวทางการแก้ไขปัญหาราคายางธรรมชาติตกต่ำที่ดีที่สุดทางหนึ่ง เนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้างที่มีปริมาณความต้องการใช้สูงตามการขยายตัวของประชากร ที่อยู่อาศัย และเศรษฐกิจ สามารถใช้ประโยชน์ได้หลากหลายมากกว่าวัสดุพื้นทั่วไป เนื่องจากสมบัติที่ยืดหยุ่นดี พื้นผิวไม่ลื่นเป็นฉนวนไฟฟ้า และอ่อนตัวง่าย ลดการเกิดและความรุนแรงจากอุบัติเหตุ ป้องกันกระแสไฟฟ้ารั่วผ่านร่างกาย รวมทั้งใช้ปูพื้นบนผิวต่างๆ ได้ เช่น พื้นคอนกรีต พื้นหินขัด พื้นไม้เก่าหรือใหม่ เป็นต้น โดยการใช้กาวยา (ไดโนกลู) [2] แต่ปัญหาที่สำคัญที่สุดของแผ่นกระเบื้องยาง โดยเฉพาะกระเบื้องยางสังเคราะห์ เพราะยางธรรมชาติเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความจำเป็นต้องใส่สารเติมแต่งค่อนข้างมาก เพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีสี มีความคงทน และมีคุณสมบัติตามต้องการ ด้วยเหตุนี้ จึงมีความจำเป็นต้องหาวัสดุเหลือทิ้งมาผสมเป็นสารเติมแต่งให้กับยางธรรมชาติได้ดี ทดแทนสารเติมแต่งที่มีราคาสูง จากปัญหาปริมาณขยะพลาสติกเอทิลีนไวน์ลอะซิเตท (Ethylene Vinyl Acetate) หรืออีวีเอ (EVA) ที่ไม่สามารถรีไซเคิล

ได้ทั้งหมดของโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ มากกว่า 1,000 โรงงาน (ประเทศไทยส่งออกผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากอีวีเอมากเป็นอันดับ 5 ของโลก) เมื่อพิจารณาจากลักษณะและความเป็นไปได้ของการนำไปใช้เป็นสารตัวเติมในผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ พบว่า เศษขยะพลาสติกอีวีเอ สามารถบดย่อยให้มีขนาดเล็กและผสมเข้าไปในเนื้อผลิตภัณฑ์ได้ดี มีคุณสมบัติให้สีเมื่อผสมเข้ากับยางธรรมชาติ มีแนวโน้มช่วยพัฒนาสมบัติทางกายภาพและทางกล และด้วยจุดหลอมเหลวของเศษขยะพลาสติกชนิดนี้ที่แตกต่างจากยางธรรมชาติ จึงทำให้ผลิตภัณฑ์กระเบื้องยางธรรมชาตินี้มีสมบัติในการดูดซับแรงกระแทกเพราะช่องว่างระหว่างเนื้อผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ เศษขยะพลาสติกอีวีเอยังเป็นวัสดุที่ไม่มีมูลค่า และเป็นปัญหาของผู้ประกอบการในการกำจัดอีกด้วย [3] โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการพัฒนากระเบื้องยางธรรมชาติผสมเศษขยะพลาสติกเอทิลีนไวน์ลอะซิเตทแบบละเอียด ซึ่งนอกจากจะเพิ่มมูลค้ายางธรรมชาติแล้ว ยังช่วยลดปัญหาขยะพลาสติกจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ยากต่อการกำจัด รวมทั้งมีส่วนพัฒนาประเทศชาติให้มีความมั่นคงด้านราคายางธรรมชาติ และมีสิ่งแวดล้อมที่ดีอย่างยั่งยืนต่อไป

2. วัสดุและอุปกรณ์

วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ ยางธรรมชาติแท่งเกรด STR20 เศษพลาสติกเอทิลีนไวน์ลอะซิเตท (Ethylene Vinyl Acetate, EVA) จากโรงงานรองเท้าในจังหวัดสมุทรปราการ บดย่อยให้มีขนาดเล็กด้วยเครื่องบดพลาสติก ดังรูปที่ 1 และ 2 กำมะถัน ชนิด Rhombic Sulfur ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) กรดสเตียริก (Stearic Acid) เมอร์แคปโตเบนโซไทโอเอซอล (Mercapto Benzthiazole, MBT) ไดฟีนิลกวานิดีน (Diphenyl Guanidine, DPG) เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล แบบหล่อแผ่นกระเบื้องยาง ขนาด 15 x 15 x 0.2 เซนติเมตร ตู้อบ ชุดอุปกรณ์ทดสอบความหนาแน่น เครื่องบดผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง

(Two - Roll Mill) เครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน (Compression Molding) เครื่องทดสอบความหนืด (Mooney Viscometer) เครื่องทดสอบการคงรูป (Oscillating Disc Rheometer, ODR) เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine, UTM) เครื่องวัดความแข็งแบบชอร์เอ (Shore A) เครื่องทดสอบความสึกหรอของยาง (Abrasion Resistance) และเครื่องตัดตัวอย่าง



รูปที่ 1 เศษขยะพลาสติกอีวีเอ

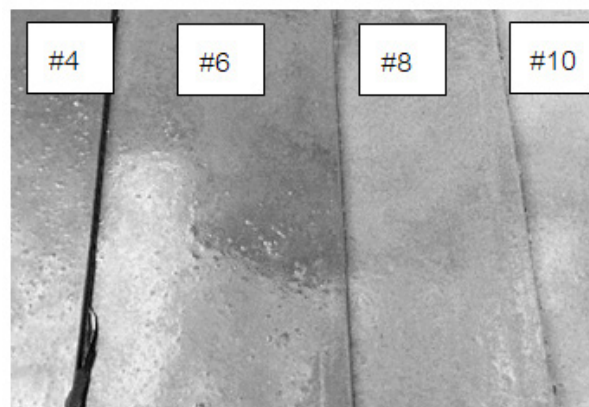


รูปที่ 2 พลาสติกอีวีเอหลังการบดย่อย

3. การออกแบบอัตราส่วนผสม

ออกแบบอัตราส่วนผสมหรือสูตรของแผ่นกระเบื้องยางธรรมชาติผสมพลาสติกอีวีเอ ความละเอียดสูง ได้แก่ ยางธรรมชาติ 100 phr (Part Per Hundred Rubber; phr) ซิงค์ออกไซด์ 5 phr กรดสเตียริก 2 phr กำมะถัน 3 phr เมอร์แคปโตเบนโซไทโธเอซอล 0.5 phr ไดฟีนิลกัวนิดิน 0.2 phr และ

เศษพลาสติกอีวีเอ 20 phr จากสูตรดังกล่าว จะมี การปรับเปลี่ยนขนาดของเศษพลาสติกอีวีเอ จำนวน 4 ขนาด ได้แก่ ขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร), ขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 6 (3.35 มิลลิเมตร), ขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 8 (2.36 มิลลิเมตร) และขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 10 (2 มิลลิเมตร) เพื่อหาขนาดที่เหมาะสมที่สุด โดยพิจารณาจากความเรียบเนียนของพื้นผิวแผ่นกระเบื้องยางธรรมชาติผสมพลาสติกอีวีเอ ดังรูปที่ 3 พบว่า ขนาดเศษพลาสติกอีวีเอผ่านตะแกรงเบอร์ 10 เป็นขนาดที่เหมาะสมที่สุด รองลงมาคือ ขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 8 ขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 6 และขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ได้แผ่นกระเบื้องยางธรรมชาติผสมพลาสติกอีวีเอมีลักษณะที่หยาบที่สุด ตามลำดับ จากนั้นจึงนำสูตรและขนาดเศษพลาสติกอีวีเอผ่านตะแกรงเบอร์ 10 สำหรับหาปริมาณเศษพลาสติกอีวีเอที่เหมาะสม โดยใช้ส่วนผสมเดิม แต่มีการปรับเฉพาะปริมาณเศษพลาสติกอีวีเอ จำนวน 6 ปริมาณ ได้แก่ เศษพลาสติกอีวีเอ 0 phr (EVA 0) 5 phr (EVA 5) 10 phr (EVA 10) 20 phr (EVA 20) 40 phr (EVA 40) และ 80 phr (EVA 80)



รูปที่ 3 พื้นผิวของแผ่นกระเบื้องยางธรรมชาติผสมพลาสติกอีวีเอขนาดต่างๆ

4. การขึ้นรูปและทดสอบตัวอย่าง

เริ่มจากชั่งน้ำหนักส่วนผสมในการขึ้นรูปแผ่นกระเบื้องยางธรรมชาติผสมพลาสติกอีวีเอตามที่ออกแบบ จากนั้นทำการบดยางธรรมชาติแท่งเกรด STR20 สำหรับผสมส่วนผสมอื่นๆ ด้วยเครื่องบดผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง ด้วยอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ด้วยความเร็วปานกลาง ท้ายเติมสารซิงค์ออกไซด์และกรดสเตียริกลงในส่วนผสมที่กำลังบด แล้วจึงเติมเศษพลาสติกอีวีเอที่ผ่านการบดย่อยแล้วลงในยางธรรมชาติที่บดภายในเครื่องบดผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง ดังรูปที่ 4 จากนั้นเติมเมอร์แคปโตเบนโซไทเอโซลและไดฟีนิลกวินิลีนลงไปในส่วนผสม ผสมส่วนผสมจนเข้ากัน แล้วจึงเติมกำมะถันเพื่อช่วยให้ส่วนผสมเกิดการคงรูป และทดสอบการคงรูปของส่วนผสมทั้งหมด โดยใช้เครื่องทดสอบความหนืด และเครื่องทดสอบการคงรูป (ODR) ต่อไปให้นำส่วนผสมที่เข้ากันดีแล้วใส่ลงในแบบหล่อที่รองด้วยแผ่นพลาสติกสำหรับป้องกันการติดแบบของส่วนผสม เพื่อขึ้นรูปเป็นกระเบื้องยางธรรมชาติผสมพลาสติกอีวีเอ ดังรูปที่ 5 ทำการขึ้นรูปแผ่นกระเบื้องยางธรรมชาติผสมพลาสติกอีวีเอด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส จนยางธรรมชาติเกิดการคงรูป ดังรูปที่ 6 แล้วจึงนำแผ่นกระเบื้องยางที่ขึ้นรูปแล้วออกจากแบบหล่อและแผ่นพลาสติกรองแบบ ได้แผ่นกระเบื้องยางธรรมชาติผสมพลาสติกอีวีเอ ดังรูปที่ 7



รูปที่ 4 การเติมเศษพลาสติกอีวีเอลงในยางธรรมชาติ



รูปที่ 5 การใส่ส่วนผสมในแบบหล่อที่รองด้วยแผ่นพลาสติก



รูปที่ 6 การขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดความร้อน



รูปที่ 7 การนำแผ่นกระเบื้องยางธรรมชาติผสมพลาสติกอีวีเอออกจากแบบหล่อ

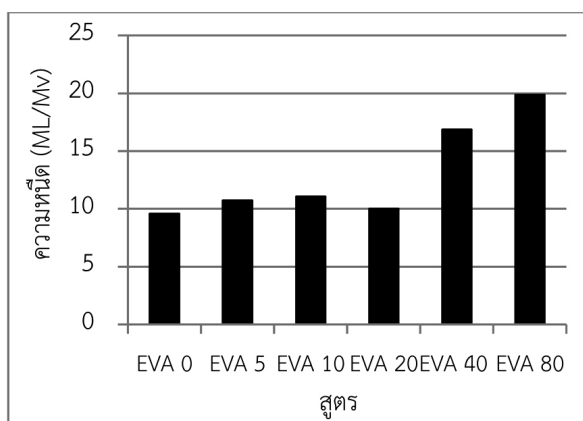
ทดสอบสมบัติต่างๆ ที่จำเป็นต่อการใช้งาน ตามมาตรฐาน ASTM [4] โดยใช้จำนวนตัวอย่างทดสอบ 5 ตัวอย่างต่ออัตราส่วนต่อการทดสอบ ประกอบด้วย ความหนาแน่น ตามมาตรฐาน ASTM D1817 การดูดซึมน้ำ ตามมาตรฐาน ASTM D570 ความแข็งตามมาตรฐาน ASTM D2240 ความต้านทานแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D412 ความทนการฉีกขาดตามมาตรฐาน ASTM D624 ความสึกหรอ ตามมาตรฐาน ASTM D1630 และสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ตามมาตรฐาน ASTM C177

5. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

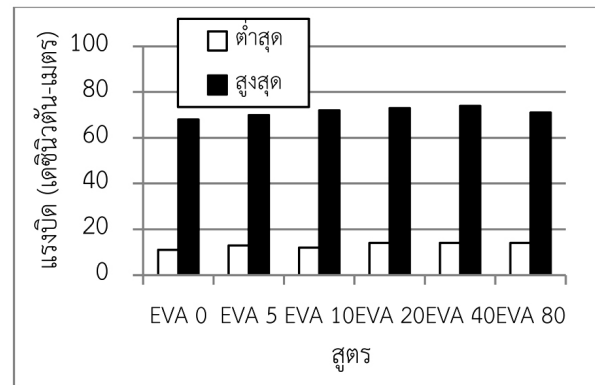
จากการพัฒนาผลิตภัณฑ์กระเบื้องยางธรรมชาติผสมเศษขยะพลาสติกเอทิลีนไวนิลอะซิเตท (อีวีเอ) ความละเอียดสูงจากโรงงานอุตสาหกรรมตามมาตรฐาน ASTM และมาตรฐานอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องสามารถสรุปผลการทดสอบได้ ดังต่อไปนี้

5.1 ความหนืดและการคงรูปของส่วนผสม

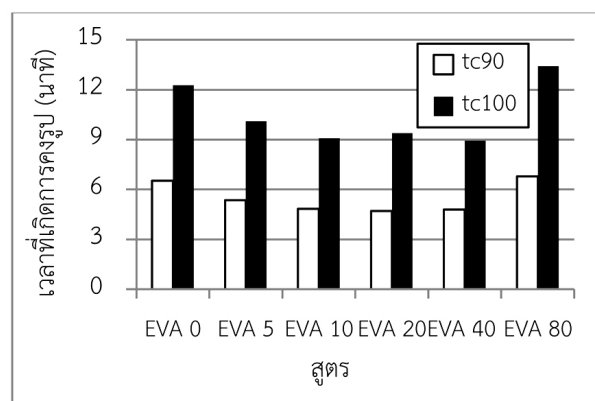
ผลการทดสอบความหนืดและการคงรูปของส่วนผสมในการขึ้นรูปแผ่นกระเบื้องยางธรรมชาติผสมพลาสติกอีวีเอทุกสูตร สามารถสรุปได้ ดังรูปที่ 8 ถึง 10



รูปที่ 8 ผลการทดสอบความหนืดส่วนผสมของตัวอย่าง



รูปที่ 9 ผลการทดสอบแรงบิตของตัวอย่าง



รูปที่ 10 ผลการทดสอบเวลาที่เกิดการคงรูประหว่าง ts_2 และ tc_{90} ของตัวอย่าง

จากรูปที่ 8 ถึง 10 พบว่า การผสมเศษพลาสติกอีวีเอในปริมาณที่มากขึ้น จะทำให้ส่วนผสมมีความหนืดและค่าแรงบิตต่ำสุดขณะกระบวนการคงรูปมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเมื่อนำส่วนผสมดังกล่าวไปใส่แบบหล่อและอัดขึ้นรูป จะทำให้การไหลตัวของส่วนผสมทำได้ยากมากขึ้นเนื่องจากพลาสติกอีวีเอและยางธรรมชาติมีจุดหลอมเหลวต่างกัน [7-9] ส่วนระยะเวลาใช้ในการคงรูปแผ่นกระเบื้องยางของส่วนผสมที่มีปริมาณเศษพลาสติกอีวีเอมากจะมีค่าลดลง แต่การผสมเศษพลาสติกอีวีเอในปริมาณที่มากเกินไป จะทำให้เวลาที่ใช้ในการคงรูปของส่วนผสมกลับเพิ่มมากขึ้น

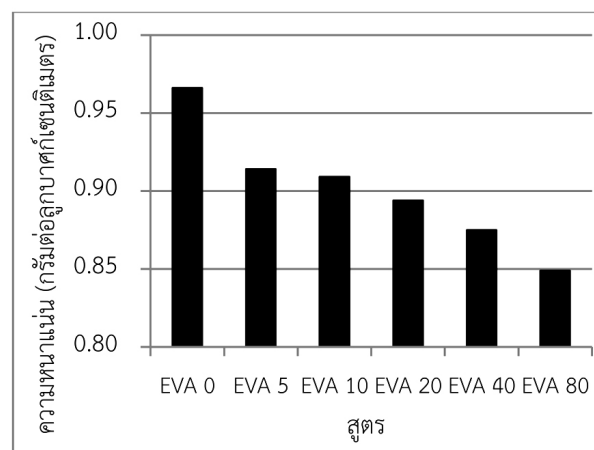
5.2 ความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำ

ผลการทดสอบความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำของแผ่นกระเบื้องยางธรรมชาติผสมพลาสติกอีวีเอ ดังรูปที่ 11 พบว่า การผสมเศษพลาสติกอีวีเอ ลงในแผ่นกระเบื้องยางธรรมชาติผสมพลาสติกอีวีเอ ปริมาณมากขึ้น จะมีผลทำให้ความหนาแน่นของแผ่นกระเบื้องยางธรรมชาติต่ำกว่าแผ่นกระเบื้องยางธรรมชาติที่ไม่ผสมพลาสติกอีวีเอ หรือผสมพลาสติกอีวีเอในปริมาณน้อย โดยแผ่นกระเบื้องยางธรรมชาติที่ไม่มีการผสมพลาสติกอีวีเอ (สูตร EVA 0) มีความหนาแน่นสูงสุด รองลงมาคือ แผ่นกระเบื้องยางธรรมชาติที่ผสมพลาสติกอีวีเอสูตร EVA 5, สูตร EVA 10, สูตร EVA 20, สูตร EVA 40 และแผ่นกระเบื้องยางธรรมชาติที่ผสมพลาสติกอีวีเอสูตร EVA 80 เป็นสูตรที่มีความหนาแน่นต่ำที่สุด ตามลำดับ ทั้งนี้ เป็นผลมาจากลักษณะความพรุนของเนื้อพลาสติกอีวีเอ (รูปที่ 12) และความหนาแน่นของเศษพลาสติกอีวีเอที่ใช้ในงานวิจัยมีค่าประมาณ 0.930 - 0.965 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร [5] ซึ่งต่ำกว่าแผ่นกระเบื้องยางธรรมชาติที่ไม่ผสมพลาสติกอีวีเอ (สูตร EVA 0) ที่เท่ากับ 0.966 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร นอกจากนี้ การผสมพลาสติกอีวีเอลงในแผ่นกระเบื้องยางธรรมชาติ จะทำให้เกิดช่องว่างขนาดเล็กภายในเนื้อขึ้น เนื่องจากพลาสติกอีวีเอและยางธรรมชาติมีจุดหลอมเหลวต่างกัน [7-9] (ดังรูปที่ 13) เหล่านี้ จะทำให้ความหนาแน่นของแผ่นกระเบื้องยางธรรมชาติผสมพลาสติกอีวีเอมีแนวโน้มต่ำลง [6] อย่างไรก็ตาม ช่องว่างภายในเนื้อที่เกิดขึ้นเบื้องต้น จะยังคงเล็กมาก และไม่ทำให้เกิดการดูดซึมน้ำ หรือมีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 0

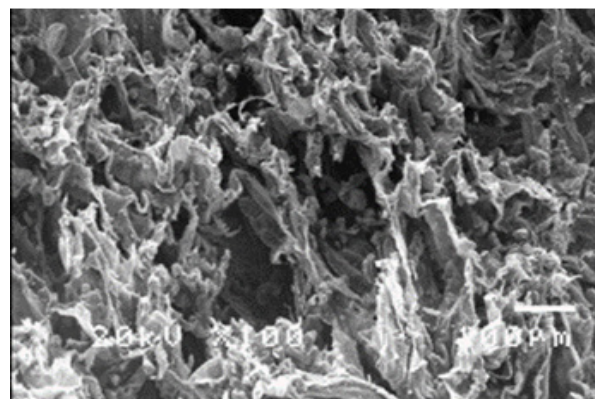
5.3 ความแข็ง

ผลจากการทดสอบความแข็งแบบชอร์เอ (Shore-A) ของแผ่นกระเบื้องยางธรรมชาติผสมพลาสติกอีวีเอ ทั้ง 6 อัตราส่วน ดังรูปที่ 14 พบว่า การผสมเศษพลาสติกอีวีเอในปริมาณที่เพิ่มขึ้นมากขึ้น มีผลต่อ

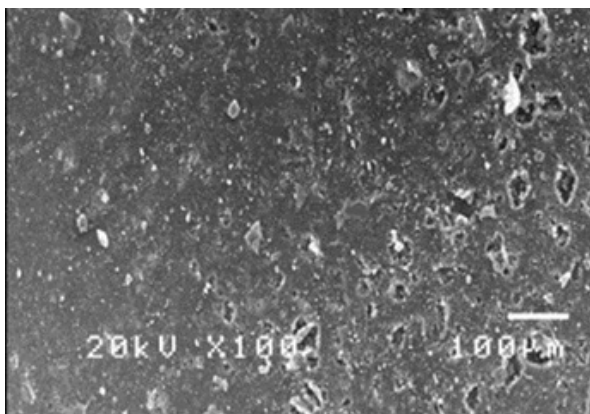
ความแข็งของแผ่นกระเบื้องยางธรรมชาติที่เพิ่มขึ้น โดยแผ่นยางธรรมชาติที่ไม่ผสมเศษพลาสติกอีวีเอ (สูตร EVA 0) จะมีค่าความแข็งต่ำที่สุด รองลงมาคือ แผ่นยางธรรมชาติผสมเศษพลาสติกอีวีเอ สูตร EVA 5, สูตร EVA 10, สูตร EVA 20, สูตร EVA 40 และสูตร EVA 80 เป็นอัตราส่วนที่มีความแข็งสูงที่สุดตามลำดับ ทั้งนี้ เป็นผลมาจากค่าความแข็งส่วนใหญ่ของเศษพลาสติกอีวีเอที่ใช้ในการวิจัยมีค่าสูงกว่าแผ่นกระเบื้องยางธรรมชาติที่ไม่ผสมพลาสติกอีวีเอ โดยมีค่าเท่ากับ 75 ชอร์เอ [5] ในขณะที่แผ่นกระเบื้องยางธรรมชาติที่ไม่ผสมพลาสติกอีวีเอ มีค่าความแข็งค่อนข้างต่ำเพียง 35.1 ชอร์เอ ดังนั้น เมื่อผสมเศษพลาสติกอีวีเอลงในแผ่นกระเบื้องยางธรรมชาติ จึงทำให้ค่าความแข็งของแผ่นกระเบื้องมีค่าเพิ่มมากขึ้นดังกล่าว



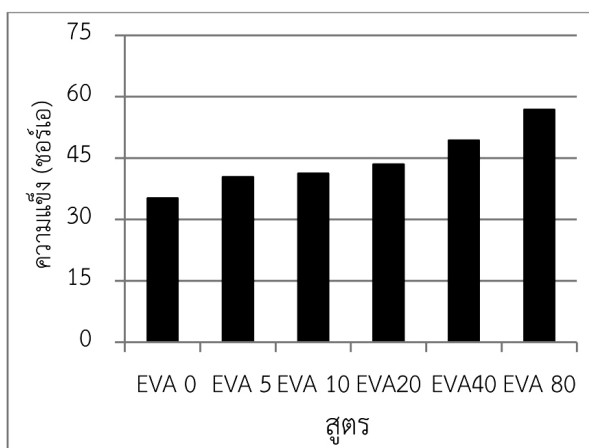
รูปที่ 11 ผลการทดสอบความหนาแน่นของตัวอย่าง



รูปที่ 12 ภาพขยายเศษพลาสติกอีวีเอด้วยกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 100 เท่า



รูปที่ 13 ภาพขยายกระเบื้องยางพาราผสมพลาสติก
อีวีเอ สูตร 80 ด้วยกล้อง SEM
ที่กำลังขยาย 100 เท่า

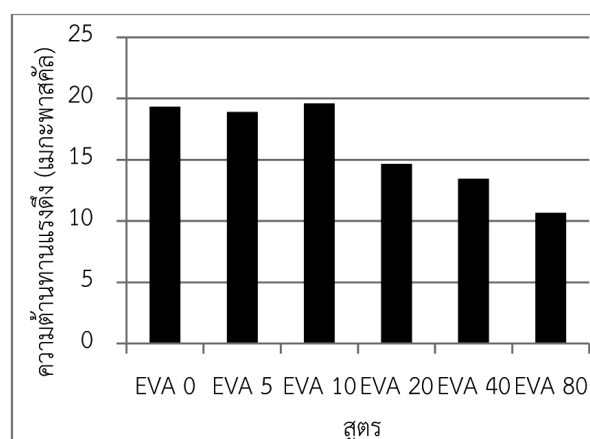


รูปที่ 14 ผลการทดสอบความแข็งแรงของตัวอย่าง

5.4 ความต้านทานแรงดึง

สำหรับผลการทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึงของแผ่นกระเบื้องยางธรรมชาติผสมพลาสติกอีวีเอ ทั้ง 6 สูตร ในรูปที่ 15 พบว่า แผ่นกระเบื้องยางธรรมชาติที่ผสมพลาสติกอีวีเอในปริมาณที่ไม่สูงมากคือ ไม่เกินกว่าสูตร EVA 10 มีส่วนทำให้ความต้านทานแรงดึงของแผ่นกระเบื้องยางดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงหรือสูงกว่าแผ่นกระเบื้องยางธรรมชาติที่ไม่ผสมพลาสติกอีวีเอเล็กน้อย ทั้งนี้ เป็นผลมาจากพลาสติกอีวีเอจากโรงงานเป็นวัสดุที่มีความต้านทานแรงดึงใกล้เคียงกับแผ่นกระเบื้องยางธรรมชาติ (เท่ากับ 18 ถึง 29 เมกะพาสคัล) [5] แต่เมื่อผสมพลาสติกอีวีเอ

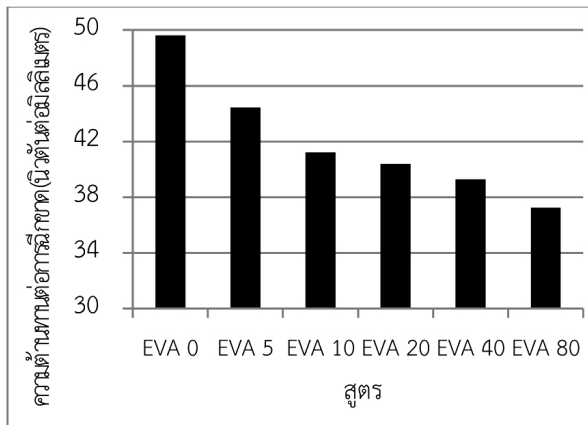
ในปริมาณที่สูงมากขึ้น ทั้งสูตร EVA 20, สูตร EVA 40 และ EVA 80 จะส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงที่ลดต่ำลง แต่การผสมพลาสติกอีวีเอในปริมาณมากซึ่งทำให้เกิดช่องว่างภายในเนื้อกระเบื้องยางที่มากขึ้น ดังจะเห็นได้จากความหนาแน่นของกระเบื้องยางที่ลดลง และช่องว่างเหล่านี้จะทำให้พื้นที่รับแรงดึงและค่าความต้านทานแรงดึงของแผ่นกระเบื้องยางธรรมชาติผสมพลาสติกอีวีเอดังกล่าวมีค่าลดน้อยลง [7-9]



รูปที่ 15 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึง
ของตัวอย่าง

5.5 ความต้านทานต่อการฉีกขาด

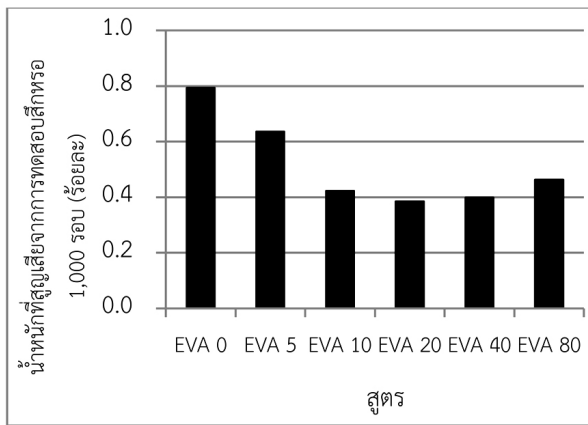
การทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาดของแผ่นกระเบื้องยางธรรมชาติที่ผสมพลาสติกอีวีเอสามารถสรุปผลการทดสอบได้ ดังรูปที่ 16 โดยพบว่าพลาสติกอีวีเอที่ผสมลงในแผ่นกระเบื้องยางที่ปริมาณเพิ่มขึ้น จะส่งผลต่อสมบัติด้านความต้านทานต่อการฉีกขาดที่ลดลง โดยกระเบื้องยางธรรมชาติที่ไม่ผสมพลาสติกอีวีเอ (สูตร EVA 0) จะมีค่าความทนทานต่อการฉีกขาดที่สูงที่สุด รองลงมาคือ สูตร EVA 5, สูตร EVA 10, สูตร EVA 20, สูตร EVA 40 และสูตร EVA 80 มีค่าความทนทานต่อการฉีกขาดต่ำที่สุด ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มใกล้เคียงกับการที่ปริมาณเศษพลาสติกอีวีเอมีผลการทดสอบความต้านทานแรงดึง



รูปที่ 16 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาดของตัวอย่าง

5.6 ปริมาณการสึกหรอ

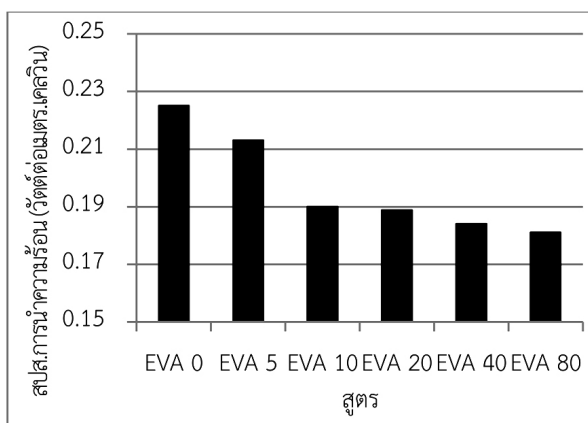
ผลการทดสอบปริมาณการสึกหรอของแผ่นกระเบื้องยางธรรมชาติผสมพลาสติกอีวีเอสูตรต่างๆ เป็นคุณสมบัติที่จำเป็นต่อความคงทนในการใช้งาน โดยแผ่นกระเบื้องยางธรรมชาติผสมพลาสติกอีวีเอสูตรที่มีการสูญเสียน้ำหนักน้อย จะเป็นอัตราส่วนที่สามารถใช้งานได้ยาวนานและคงทนมากกว่าแผ่นกระเบื้องยางธรรมชาติผสมพลาสติกอีวีเอที่มีการสูญเสียน้ำหนักมาก จากรูปที่ 17 พบว่า การผสมพลาสติกอีวีเอลงในส่วนผสมของแผ่นกระเบื้องยางธรรมชาติ จะมีผลต่อความต้านทานการสึกหรอที่เพิ่มมากขึ้น หรือมีผลทำให้น้ำหนักที่สูญเสียจากการขัดสีลดลง โดยแผ่นกระเบื้องยางธรรมชาติผสมพลาสติกอีวีเอสูตร EVA 20 เป็นอัตราส่วนที่ต้านทานการสึกหรอที่ดีที่สุด แต่เมื่อผสมพลาสติกอีวีเอในสูตรที่มากกว่า EVA 20 จะเริ่มมีผลทำให้แผ่นกระเบื้องยางธรรมชาติเกิดการสึกหรอมีค่าเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากพลาสติกอีวีเอไม่สามารถรวมกับยางธรรมชาติเป็นเนื้อเดียวกันโดยสมบูรณ์ อย่างไรก็ตาม การสึกหรอของแผ่นกระเบื้องยางธรรมชาติที่ผสมพลาสติกอีวีเอสูตรต่างๆ ทั้งหมด ก็ยังคงต่ำกว่าแผ่นกระเบื้องยางธรรมชาติที่ไม่ผสมพลาสติกอีวีเอ



รูปที่ 17 ผลการทดสอบการสึกหรอของตัวอย่าง

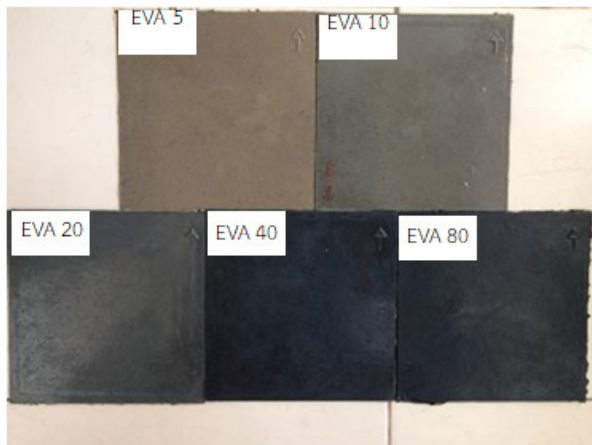
5.7 สัมประสิทธิ์การนำความร้อน

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแผ่นกระเบื้องยางธรรมชาติผสมพลาสติกอีวีเอที่อัตราส่วนต่างๆ ในรูปที่ 18 สามารถแสดงให้เห็นว่าพลาสติกอีวีเอมีผลต่อสมบัติด้านสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแผ่นกระเบื้องยางธรรมชาติผสมพลาสติกอีวีเอที่ลดต่ำลง โดยแผ่นกระเบื้องยางที่ไม่ผสมพลาสติกอีวีเอ จะมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงที่สุด รองลงมาคือ สูตร EVA 5, สูตร EVA 10, สูตร EVA 20, สูตร EVA 40 และสูตร EVA 80 จะมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำที่สุดตามลำดับทั้งนี้เป็นผลมาจากพลาสติกอีวีเอที่นำมาใช้เป็นวัสดุที่มีรูพรุน (รูปที่ 12) มากกว่ายางธรรมชาติ [8] ซึ่งรูพรุนดังกล่าวจะมีสมบัติความเป็นฉนวนป้องกันความร้อนที่ดีและมีผลต่อสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ลดต่ำลง [10]



รูปที่ 18 ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของตัวอย่าง

นอกจากคุณสมบัติของกระเบื้องยางธรรมชาติ จะเปลี่ยนไปตามปริมาณเศษพลาสติกอีวีเอที่ผสม แล้ว ยังมีผลต่อลักษณะและสีของแผ่นกระเบื้องยางธรรมชาติด้วย ดังรูปที่ 19



รูปที่ 19 แผ่นกระเบื้องยางธรรมชาติ ผสมพลาสติกอีวีเอ สูตรต่างๆ

จากลักษณะและสีของแผ่นกระเบื้องยางธรรมชาติผสมพลาสติกอีวีเอ ดังรูปที่ 19 สามารถสรุปได้ว่า พื้นผิวของแผ่นกระเบื้องยางธรรมชาติผสมพลาสติก อีวีเอสูตรที่มีปริมาณเศษพลาสติกอีวีเอมาก จะมีลักษณะที่ขรุขระเป็นเม็ดต่างๆ มากกว่าแผ่นกระเบื้องยางธรรมชาติผสมพลาสติกอีวีเอสูตรที่มีปริมาณเศษพลาสติกอีวีเอน้อย คล้ายกับการนำเศษพลาสติกอีวีเอที่มีขนาดหยาบมาผสม และสีของแผ่นกระเบื้องยางธรรมชาติผสมพลาสติกอีวีเอสูตรที่มีปริมาณเศษพลาสติกอีวีเอมาก จะมีสีที่เปลี่ยนไปตามสีของเศษพลาสติกอีวีเอชัดเจนกว่าแผ่นกระเบื้องยางธรรมชาติผสมพลาสติกอีวีเอสูตรที่มีปริมาณเศษพลาสติกอีวีเอน้อย โดยจะเปลี่ยนจากสีน้ำตาลอ่อนเป็นสีของเศษพลาสติกอีวีเอ

6. สรุปและข้อเสนอแนะ

จากการพัฒนากระเบื้องยางธรรมชาติผสมเศษขยะพลาสติกเอทิลีนไวนิลอะซิเตทแบบละเอียด สามารถสรุปได้ว่า เศษขยะพลาสติกเอทิลีนไวนิลอะซิเตท (อีวีเอ) สามารถบดย่อยให้มีขนาดเล็กกว่า 2

มิลลิเมตร โดยใช้เครื่องบดพลาสติก พร้อมตะแกรงเบอร์ 10 ทำให้ได้เศษขยะพลาสติกเอทิลีนไวนิลอะซิเตทความละเอียดสูงสำหรับใช้เป็นสารเติมแต่งในผลิตภัณฑ์กระเบื้องยางธรรมชาติต้นทุนต่ำได้ โดยอัตราส่วนผสมหรือสูตรที่เหมาะสมสำหรับผลิตเป็นกระเบื้องยางธรรมชาติจากเศษขยะพลาสติกอีวีเอความละเอียดสูง คือ สูตร EVA 10 เนื่องจากเป็นสูตรกระเบื้องยางธรรมชาติผสมเศษขยะพลาสติกอีวีเอที่มีพื้นผิวเรียบ สีอ่อน (สามารถปรับแต่งสีเพิ่มเติมได้) และมีคุณสมบัติที่ดีกว่าสูตรกระเบื้องยางธรรมชาติสูตรที่ผสมเศษขยะพลาสติกอีวีเอมากกว่า โดยมีคุณสมบัติทางกล ประกอบด้วย ความหนาแน่น 0.909 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ความแข็ง 41.2 ชอร์เอ น้ำหนักที่สูญเสียจากการขัดสี 1,000 รอบ ร้อยละ 0.353 ความต้านทานการฉีกขาด 41.2 นิวตันต่อมิลลิเมตร ความต้านทานแรงดึง 19.6 เมกะพาสคัล และสัมประสิทธิ์การนำความร้อน 0.190 วัตต์ต่อเมตร.เคลวินทั้งนี้เศษพลาสติกอีวีเอปริมาณที่เหมาะสมสามารถลดความหนาแน่น และสัมประสิทธิ์การนำความร้อน และเพิ่มความแข็ง ความต้านทานการสึกหรอ และความต้านทานแรงดึงให้กับแผ่นกระเบื้องยางธรรมชาติได้

สำหรับการศึกษาต่อไป ควรมีการพัฒนาคุณสมบัติด้านความต้านทานการลามไฟ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์กระเบื้องยางธรรมชาติผสมเศษพลาสติกเอทิลีนไวนิลอะซิเตท (อีวีเอ) ที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ ได้หลากหลาย และมีคุณสมบัติที่โดดเด่นกว่าแผ่นกระเบื้องยางทั่วไป นอกจากนี้ อาจมีการศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มเส้นใยต่างๆ ลงไป เพื่อให้แผ่นกระเบื้องยางธรรมชาติผสมพลาสติกอีวีเอ มีสมบัติทางกายภาพและทางกลที่ดีขึ้นได้

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณแผ่นดินมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ประจำปี 2560 ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] The Thailand Research Fund. Research Fund Announcement of Small Research Project in Para Rubber Topic. Bangkok: The Thailand Research Fund; 2005. (in Thai)
- [2] Worrasoontaroste P. Construction Materials. Bangkok: Se-Education Publishers; 1997. (in Thai)
- [3] Khamput P. and Suweero K. Using Vulcanized Latex to Develop the Properties of Concrete Block Mixed with Ethylene Vinyl Acetate Plastic. Proceeding of 8th Annual Concrete Conference. Chonburi: ACI Partners with Thailand Concrete Association; 2012. (in Thai)
- [4] American Society for Testing and Materials (ASTM). Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia: American Society for Testing and Materials; 2014.
- [5] Dupont. Compare EVA Grades and Performance Properties. Delaware: E.I. du Pont de Nemours and company; 2012.
- [6] Subramaniam, A.. Molecular Weight and Molecular Weight Distribution of Natural Rubber. RRIM Technology Bulletin. 1980; 4: 1-25.
- [7] Barlow, Fred W.. Rubber Compounding : Principles, Materials, and Techniques. 2nd ed. Florida: CRC Press; 1993.
- [8] Jesse Edenbaum. Plastics additives and modifiers handbook. New York: Van Nostrand Reinhold; 1992
- [9] Holfmann, W.B.. Rubber Technology Handbook. Munich: Hanser Publishers; 1989.
- [10] Pakunworakij T., Puthipiroj P., Oonjittichai W. and Tisavipat P. Thermal resistance efficiency of building insulation material from agricultural waste. Journal of Architectural/Planning Research and studies. 2006; 3(4): 119-126. (in Thai)

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ และพิกัดของโหลด สำหรับติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ

Analysis of the Relationship between Solar Power and Rated Load for Installation of Stand-Alone PV System

ไพโรจน์ ทองประศรี^{1*}
Pairote Thongprasri^{1*}
pairote@eng.src.ku.ac.th^{1*}

^{1*} ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

^{1*} Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering at Sriracha, Kasetsart University Sriracha Campus

Received: May 15, 2018
Revised: July 19, 2018
Accepted: August 20, 2018

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์และพิกัดของโหลด เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลในการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ การวิเคราะห์แบ่งเป็น 3 กรณีคือต้องการทราบพิกัดของเซลล์อาทิตย์สำหรับติดตั้งเมื่อผู้ใช้ทราบขนาดของโหลดและระยะเวลาในการใช้งาน ต้องการทราบขนาดของโหลดสูงสุดเมื่อผู้ใช้ทราบพิกัดของเซลล์แสงอาทิตย์และระยะเวลาในการใช้งาน และต้องการทราบระยะเวลาในการใช้งานเมื่อผู้ใช้ทราบพิกัดของเซลล์แสงอาทิตย์และขนาดของโหลด ผลที่ได้จากการทดลองผลิตกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่พิกัด 50 วัตต์ 100 วัตต์ 150 วัตต์ และ 200 วัตต์ใน 1 วันสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการพาราโบลาและได้ถูกเปลี่ยนให้เป็นสมการสำหรับหาพิกัดของโหลด สมการที่ได้นี้ถูกนำไปทดสอบทั้ง 3 กรณี เพื่อตรวจสอบความถูกต้อง ผลที่ได้มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 8.25% 4.01% และ 5.09% ตามลำดับ

คำสำคัญ: การวิเคราะห์ กำลังไฟฟ้า เซลล์แสงอาทิตย์ พิกัดของโหลด สมการพาราโบลา

Abstract

This paper presents a method for analyzing the relationship between solar power and rated load to use as a database for the installation of stand-alone PV system. The analysis is divided into 3 cases; need to know the rated of the solar cell for installation when the user knows the size of the load and the duration of use, need to know the maximum load size when the user knows the rated of the solar cell and the duration of use, and need to know the duration of use when the user knows the rated of the solar cell and the size of the load. The results of experiments to produce solar cell power at 50 watts, 100 watts, 150 watts and 200 watts in one day can be written in the form of the equation of a parabola and it is transformed into the equation for determining the rated load. This equation was tested for all three cases to verify the accuracy that the results have the average error of 8.25%, 4.01% and 5.09%, respectively.

Keywords: analysis, power, solar cell, rated load and equation of parabola.

1. บทนำ

แถบพื้นที่ซึ่งระบบการไฟฟ้าเข้าไปให้บริการไม่ถึง เช่น พื้นที่บนภูเขา พื้นที่ทุรกันดาร เป็นต้น หรือผู้ที่ต้องการลดค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยใช้พลังงานทดแทน การผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เป็นทางเลือกที่ได้รับความนิยม เนื่องจากพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานทดแทนที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และพื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศไทยได้รับรังสีดวงอาทิตย์มากกว่า $17 \text{ MJ/m}^2\text{-day}$ [1] ซึ่งเป็นระดับที่สูงสามารถนำมาใช้ผลิตไฟฟ้าได้เป็นอย่างดี เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างขึ้นเพื่อเป็นอุปกรณ์สำหรับเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ข้อด้อยของเซลล์แสงอาทิตย์ คือ ประสิทธิภาพในการผลิตกำลังไฟฟ้าค่อนข้างต่ำ เนื่องจากกำลังไฟฟ้าสูงสุดแต่ละช่วงเวลาของวันจะเปลี่ยนแปลงไปตามการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ความเข้มของแสงอาทิตย์ อุณหภูมิสภาพแวดล้อม และอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ [2] กระบวนการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Point Tracking : MPPT) ได้ถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้ระบบการผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ ให้มีความสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดในทุกๆ ช่วงเวลา วิธีการติดตามกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ที่นิยมใช้ ได้แก่ วิธีรบกวนและสังเกต (Perturb and Observe : P&O) เป็นวิธีการที่ง่ายต่อการประยุกต์ใช้งาน [3] โดยการเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในคาบเวลาปัจจุบันกับคาบเวลา ก่อน เพื่อนำมาวิเคราะห์ว่าจะเพิ่มหรือลดแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยวิธีการเปลี่ยนแปลงค่าวัฏจักรหน้าที่หรือดีวตี้ไซเคิล (Duty Cycle : D) ของวงจรแปลงผันกำลัง เพื่อให้จุดทำงานเข้าใกล้จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด ณ ความเข้มแสงขณะนั้นมากที่สุด วิธีการดังกล่าวนี้เป็นกระบวนการที่ง่าย และมีประสิทธิภาพสูงในการหาจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าสูงสุด แต่ปัญหาคือเกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าที่จุดจ่ายกำลังไฟฟ้าในสภาวะคงตัว [2] การติดตาม

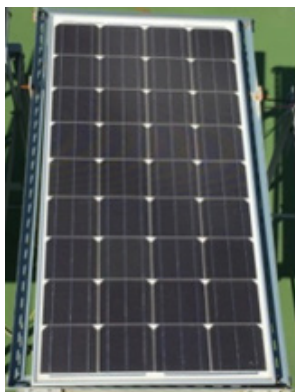
ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดด้วยเทคนิคการเพิ่มค่าความนำ (Incremental Conductance : IC) เป็นวิธีที่สามารถหาจุดจ่ายกำลังสูงสุดได้แม้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณแสงอย่างรวดเร็ว [4] ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ [1] แบ่งเป็น 3 ระบบ คือ i) ระบบการผลิตไฟฟ้าแบบอิสระ (Stand-alone PV system) ถูกออกแบบใช้งานในพื้นที่ที่ไม่มีระบบสายส่งไฟฟ้า ii) ระบบการผลิตไฟฟ้าแบบเชื่อมต่อกับระบบจำหน่าย (Grid-connected PV system) ถูกออกแบบให้ผลิตไฟฟ้าเพื่อส่งเข้าระบบสายส่งไฟฟ้าโดยตรง iii) ระบบผลิตไฟฟ้าแบบผสมผสาน (Hybrid PV system) ถูกออกแบบให้ผลิตไฟฟ้าร่วมกับระบบผลิตไฟฟ้าอื่นๆ สิ่งที่ต้องคำนึงถึงสำหรับการตัดสินใจเลือกติดตั้งระบบผลิตกำลังไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ ได้แก่ ศักยภาพความเข้มรังสีรวม ไฟฟ้าที่ได้จะเป็นไฟฟ้ากระแสตรงเมื่อต้องการใช้กับโหลดไฟฟ้ากระแสสลับต้องมีตัวแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ หรือที่เรียกว่าอินเวอร์เตอร์ ใน [5] ได้นำเสนออินเวอร์เตอร์ประสิทธิภาพสูงสำหรับระบบการผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ ระบบการผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์เป็นที่นิยมน้อยมาก เนื่องจากในปัจจุบันการหาซื้อแผงเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับการติดตั้งไม่ใช่เรื่องยาก โดยถ้าเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ให้เป็นไปตามมาตรฐาน มอก. 1843-2553 (เฉพาะชนิดผลึกซิลิคอน) และ มอก. 2210 (เฉพาะชนิดฟิล์มบาง) [6] ซึ่งเป็นมาตรฐานกำหนดคุณสมบัติที่ต้องการของเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับใช้งานกลางแจ้งในระยะยาวในภูมิภาคทั่วไทย สายไฟที่ใช้เชื่อมต่อแผงเซลล์แสงอาทิตย์ควรเลือกใช้ตามมาตรฐาน IEC 60502 [6] แต่ปัญหาหลักคือผู้ที่จะติดตั้งนั้นไม่ทราบว่าควรใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ในการติดตั้งขนาดเท่าไรที่จะทำให้เพียงพอต่อความต้องการของผู้ใช้ในช่วงเวลาที่ต้องการ บทความนี้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์และพิกัดของโหลด เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลในการติดตั้งระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ โดยผลที่ได้จากการวิเคราะห์ถูกทำให้อยู่

ในรูปแบบของสมการสำหรับหาพิกัดของโหนด ซึ่งขึ้นอยู่กับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตกำลังไฟฟ้าได้แต่ละช่วงเวลา โดยมีลักษณะเป็นกราฟพาราโบลา สมการที่ได้นี้ถูกนำไปทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้องกับชุดการทดลองการผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์

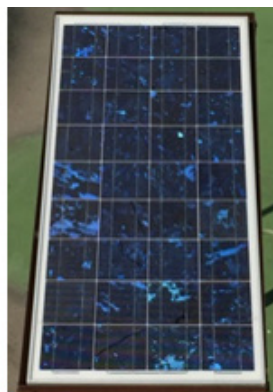
2. เซลล์แสงอาทิตย์ [2]

2.1 พื้นฐานการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำประเภทซิลิคอนแบ่งได้ 2 ประเภท คือแบบรูปผลึกและแบบไม่เป็นรูปผลึก โดยประเภทแบบรูปผลึกดังแสดงในรูปที่ 1 มีทั้งแบบซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว (Monocrystalline Silicon) และแบบหลายผลึก (Polycrystalline Silicon) ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยวมีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูง ต้นทุนการผลิตสูง ส่วนแบบหลายผลึกมีสีน้ำเงินเข้มเห็นเป็นลาย ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานต่ำกว่าแบบผลึกเดี่ยวเล็กน้อย แต่ต้นทุนการผลิตต่ำกว่ามาก

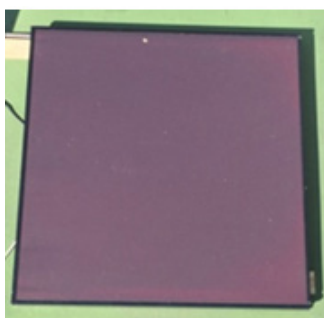


(ก) แบบผลึกเดี่ยว



(ข) แบบหลายผลึก

รูปที่ 1 เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทซิลิคอน



รูปที่ 2 ซิลิคอนแบบอะมอร์ฟัส

แบบไม่เป็นรูปผลึกหรือซิลิคอนแบบอะมอร์ฟัส (Amorphous Silicon) ดังแสดงในรูปที่ 2 เกิดจากสารประกอบซิลิคอนและสารอื่นๆ ที่อยู่ในสถานะก๊าซ มาเคลือบเป็นฟิล์มบางบนแผ่นฐาน ต้นทุนการผลิตต่ำ ประสิทธิภาพต่ำและอายุการใช้งานสั้น

การติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์แบ่งได้ 2 แบบคือการติดตั้งแบบอยู่กับที่และแบบเคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์ การติดตั้งแบบอยู่กับที่ที่ต้องให้มีความลาดเอียงเพียงพอเพื่อให้ได้รับแสงมากที่สุด และให้เกิดการระบายน้ำฝน สำหรับประเทศไทยควรติดตั้งให้มีความลาดเอียง 15 องศา โดยหันหน้าไปทางทิศใต้ ดังรูปที่ 3

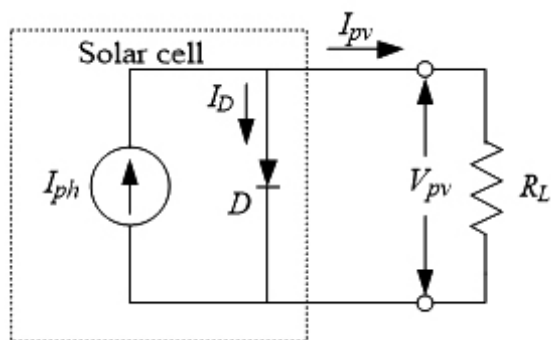


รูปที่ 3 การติดตั้งแบบอยู่กับที่

การติดตั้งแบบเคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์เป็นการติดตั้งให้หน้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถปรับตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ โดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นตัวขับเคลื่อน วิธีนี้จะให้ประสิทธิภาพสูงสุดแต่มีค่าใช้จ่ายสูง

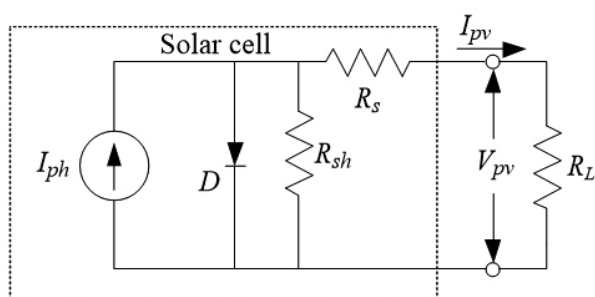
2.2 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

คุณลักษณะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในอุดมคติ สามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลประกอบด้วยแหล่งจ่ายกระแสขนานกับไดโอด ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 วงจรสมมูลทางอุดมคติ

กระแส I_{ph} คือกระแสที่สร้างจากเซลล์แสงอาทิตย์ มีสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มแสงและอุณหภูมิ โดยสามารถแทนด้วยแหล่งจ่ายกระแสคงที่ ส่วนไดโอดแสดงถึงคุณลักษณะของสารกึ่งตัวนำที่เป็นรอยต่อพีเอ็น สำหรับกระแสจ่ายออกของเซลล์แสงอาทิตย์ I_{pv} คือความแตกต่างของกระแส I_{ph} กับกระแสของไดโอด



รูปที่ 5 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์

ค่าสูญเสียที่เกิดขึ้นจากความต้านทานภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถแทนด้วยความต้านทานที่ขนาน และความต้านทานที่อนุกรมกับวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ทางอุดมคติ ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยคุณลักษณะทางกระแสต้านออกของเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ในรูปของฟังก์ชันเอ็กโพเนนเชียล [7] หาได้จากสมการที่ (1)

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{q(V_{pv} + I_{pv}R_s)}{AKT}} - 1 \right) - \frac{V_{pv} + I_{pv}R_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

โดยที่

I_{pv} คือกระแสไฟฟ้าที่จ่ายออกของเซลล์แสงอาทิตย์

(A)

I_s คือกระแสไบอัสอิ่มตัวย้อนกลับของไดโอด (A)

q คือประจุอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19}

(C)

T คืออุณหภูมิที่รอยต่อขณะทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ ($^{\circ}\text{K}$)

A คือตัวประกอบทางอุดมคติ (Ideal Factor) มีค่าดังตารางที่ 1

K คือค่าคงที่ของ Boltzman มีค่าเท่ากับ ($\text{J}/^{\circ}\text{K}$)

V_{pv} คือแรงดันที่ขั้วเซลล์แสงอาทิตย์ (V)

R_s คือค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์ (Ω)

R_{sh} คือค่าความต้านทานขนานของเซลล์อาทิตย์ (Ω)

ตารางที่ 1 ตัวประกอบทางอุดมคติ

ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์	A
ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว	1.2
ซิลิคอนแบบหลายผลึก	1.3
ฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน	1.8

ค่า I_{ph} เป็นค่ากระแสที่ถูกสร้างขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มแสง (Radiation Intensity) และอุณหภูมิ สามารถหาค่าได้จากสมการที่ (2)

$$I_{ph} = (I_{sc} + K_i(T - T_{ref})) \frac{\lambda}{1000} \quad (2)$$

โดยที่

I_{sc} คือกระแสขณะลัดวงจร (A)

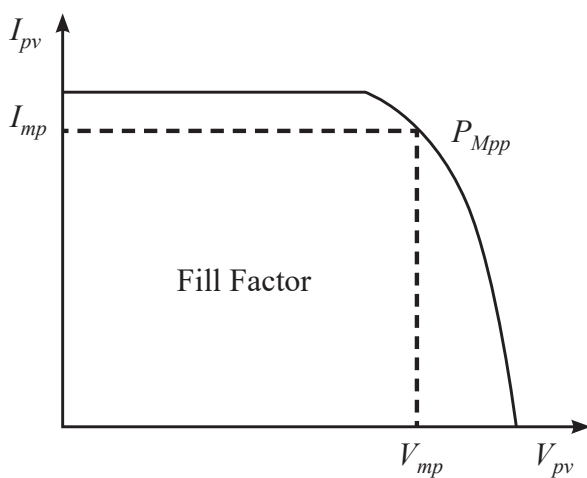
K_i คือค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของกระแสลัดวงจร ($\text{A}/^{\circ}\text{C}$)

T_{ref} คือค่าอุณหภูมิอ้างอิงของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ 25°C หรือ 298°K

λ คือค่าความเข้มแสง (W/m^2)

2.3 กราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์

กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้ของเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถหาได้จากกราฟคุณลักษณะของกระแสและแรงดัน (I-V Curve) หากอุณหภูมิและปริมาณความเข้มแสงที่ตกกระทบแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าคงที่ กราฟคุณลักษณะของกระแสและแรงดันจะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งมีจุดที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power Point : MPP) อยู่ที่ตำแหน่งของแรงดันไฟฟ้าสูงสุด V_{mp} และกระแสไฟฟ้าสูงสุด I_{mp}



รูปที่ 6 กราฟคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่ออุณหภูมิและปริมาณความเข้มแสงคงที่

ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ คือ อัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าด้านออกต่อกำลังแสงอาทิตย์ด้านเข้า สามารถหาได้จาก

$$\eta = \frac{V_{oc} I_{sc} FF}{P_{in}} \quad (3)$$

โดยที่ FF คือค่าฟิลล์แฟคเตอร์ (Fill Factor) แสดงถึงคุณภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ หาได้จาก

$$FF = \frac{V_{mp} I_{mp}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (4)$$

3. วิธีการวิเคราะห์

เซลล์อาทิตย์รุ่น KANEKA G-EA050 ในรูปที่ 7 ซึ่งมีคุณลักษณะต่อแผงดังแสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 7 เซลล์แสงอาทิตย์รุ่น KANEKA G-EA050

ตารางที่ 2 คุณลักษณะ KANEKA G-EA050 (1แผง)

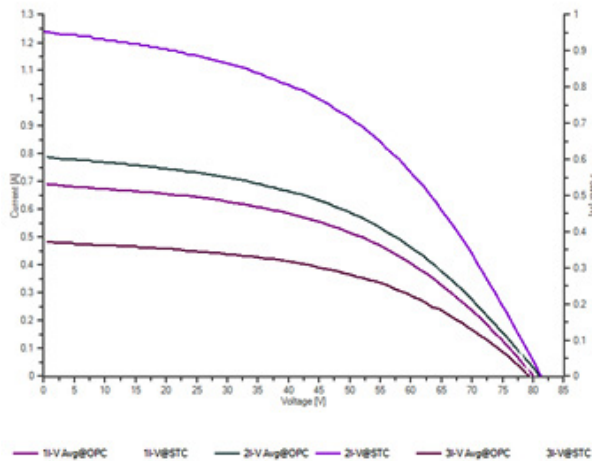
ตัวแปร	พิกัด
Nominal Power	50W
Tolerance	+10/-5%
Efficiency of Module (not Cell)	6.3%
Kind of Cell	a-Si
Cells per Module	108
Voltage MPPT	67V
Current MPPT	0.9A
Voltage open circuit	92V
Current short circuit	1.19A



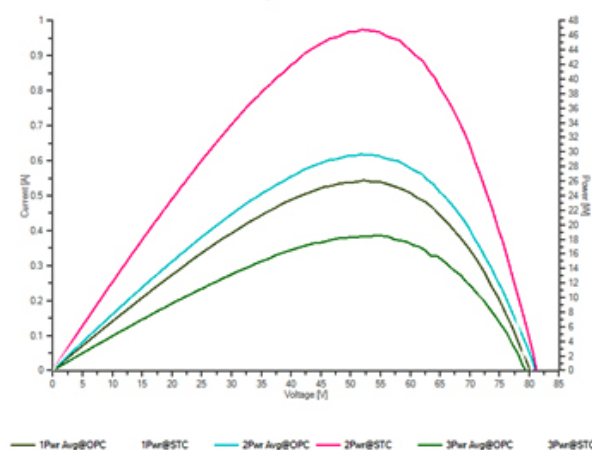
รูปที่ 8 เครื่องวัดเซลล์แสงอาทิตย์ (รุ่น HT Instruments I-V 400)

เครื่องมือวัดเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น HT Instruments I-V 400 ดังแสดงในรูปที่ 8 สำหรับวัดวิเคราะห์ กำลังไฟฟ้า ทดสอบประสิทธิภาพ วัดพลังงาน ความเข้มของแสง และอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

กราฟคุณลักษณะกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ ในรูปที่ 9 (ก) วัดที่ความเข้มแสง 1,000 W/m², 636W/m², 563W/m², และ 423W/m² (ลำดับจากบนลงล่าง) และกราฟคุณลักษณะของแรงดัน-กำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังแสดงในรูปที่ 9 (ข) วัดที่ความเข้มแสง 1,000W/m² 636W/m², 563W/m² และ 423W/m² (ลำดับจากบนลงล่าง)



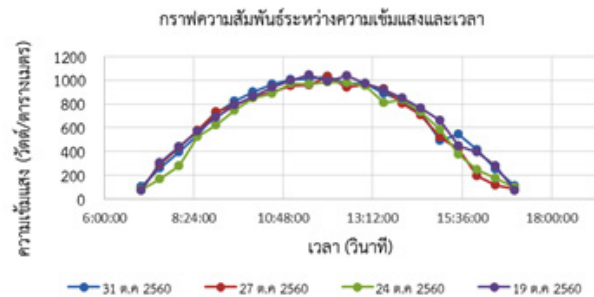
(ก) กราฟคุณลักษณะกระแส-แรงดัน



(ข) กราฟคุณลักษณะของแรงดัน-กำลังไฟฟ้า

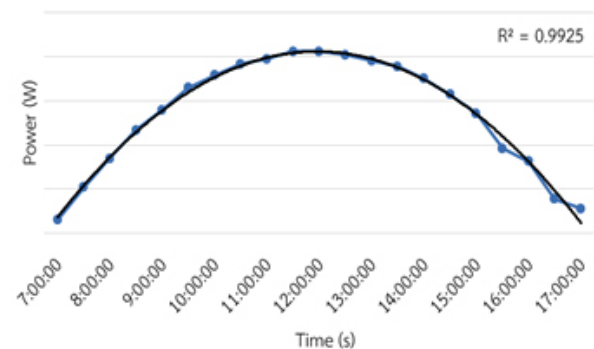
รูปที่ 9 กราฟคุณลักษณะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์รุ่น KANEKA G-EA050

กำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตได้ขึ้นอยู่กับความเข้มแสง ค่าความเข้มของแสงที่ทดสอบอยู่ในช่วงเวลา 7:00 -17.00 น. โดยในรูปที่ 10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงและเวลาที่ได้จากการวัดแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 1 แผง



รูปที่ 10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงและเวลาในรอบ 1 วัน

รูปที่ 11 แสดงผลผลิตกำลังไฟฟ้าของเซลล์อาทิตย์ 1 แผงในรอบ 1 วัน (สีน้ำเงิน) โดยใช้เครื่องมือวัดเปรียบเทียบกับกำลังไฟฟ้าที่เกิดจากสมการทางคณิตศาสตร์ (สีดำ) พาราโบลา ดังแสดงในสมการที่ (5) เมื่อกำหนดให้ช่วงเวลา 12.00 น. คือจุดกึ่งกลางของพาราโบลา



รูปที่ 11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและเวลาในรอบ 1 วัน

$$y = ax^2 + bx + c \quad (5)$$

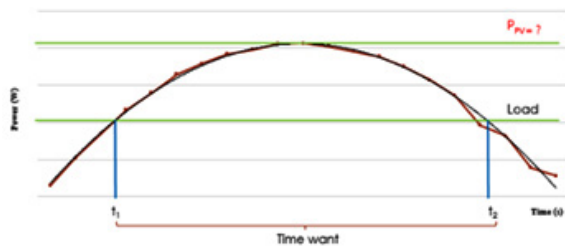
โดยที่

y คือกำลังไฟฟ้า (W)

x คือช่วงเวลา (ชั่วโมง)

a, b, c คือค่าคงที่

สมการที่ (5) แสดงถึงความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าและช่วงเวลาที่ใช้งาน โดยกำลังไฟฟ้าสามารถเป็นได้ทั้งของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตได้หรือขนาดของโหลดที่ใช้งาน ความแตกต่างคือกำลังของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตได้จะมีลักษณะเป็นกราฟเส้นโค้งพาราโบลาเกิดขึ้นตามความเข้มของแสงอาทิตย์ ในขณะที่ขนาดของโหลดจะมีลักษณะเป็นกราฟเส้นตรงตลอดการใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 12

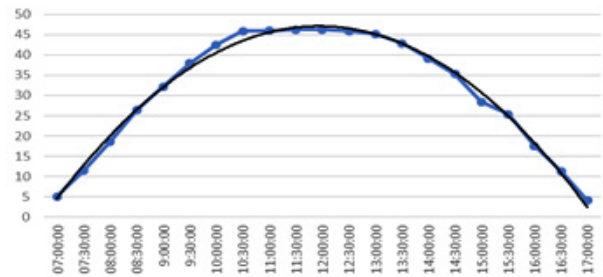


รูปที่ 12 กราฟสำหรับวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าและช่วงเวลาที่ใช้งาน

เมื่อพิจารณากราฟรูปที่ 12 ทำให้สามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าและฐานการใช้โหลดได้ 3 กรณี คือ i) ต้องการทราบพิกัดของเซลล์อาทิตย์สำหรับติดตั้ง เมื่อผู้ใช้ทราบขนาดของโหลดและระยะเวลาในการใช้งาน ii) ต้องการทราบขนาดของโหลดสูงสุด เมื่อผู้ใช้ทราบพิกัดของเซลล์แสงอาทิตย์และระยะเวลาในการใช้งาน iii) ต้องการทราบระยะเวลาในการใช้งาน โดยต้องเปลี่ยนสมการที่ (5) ให้อยู่ในรูปของสมการสำหรับหาขนาดกำลังไฟฟ้าของโหลดสูงสุดที่ใช้ ซึ่งจะแสดงวิธีการได้มาของสมการในหัวข้อถัดไป

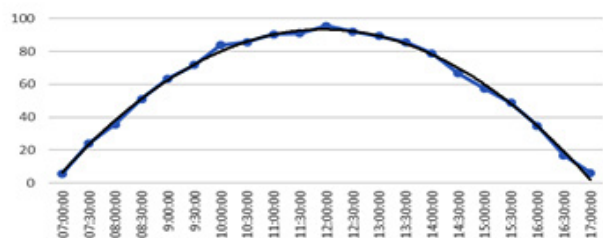
4. ผลการทดลองและการวิเคราะห์

ทดลองวัดกำลังไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตได้พิกัด 50 วัตต์ 100 วัตต์ 150 วัตต์ และ 200 วัตต์ ในรอบเวลา 1 วัน การทดลองจะนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาต่อขนานกันเพื่อให้ได้ตามพิกัด (1 แผงมีพิกัด 50 วัตต์) ผลการทดลองที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 13 ถึงรูปที่ 16 ตามลำดับ



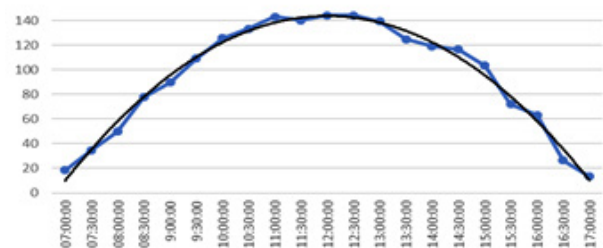
รูปที่ 13 เซลล์แสงอาทิตย์พิกัด 50 วัตต์

$$y_1 = -0.436x^2 + 9.486x - 4.4301 \quad (6)$$



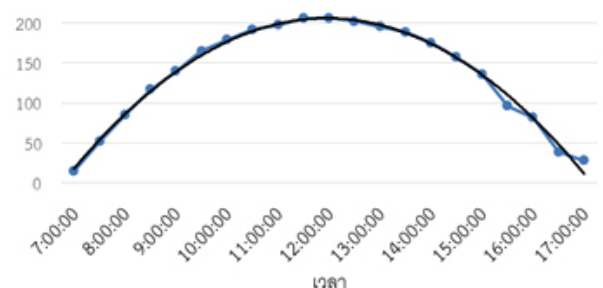
รูปที่ 14 เซลล์แสงอาทิตย์พิกัด 100 วัตต์

$$y_2 = -0.862x^2 + 18.501x - 10.671 \quad (7)$$



รูปที่ 15 เซลล์แสงอาทิตย์พิกัด 150 วัตต์

$$y_3 = -1.337x^2 + 29.424x - 18.119 \quad (8)$$



รูปที่ 16 เซลล์แสงอาทิตย์พิกัด 200 วัตต์

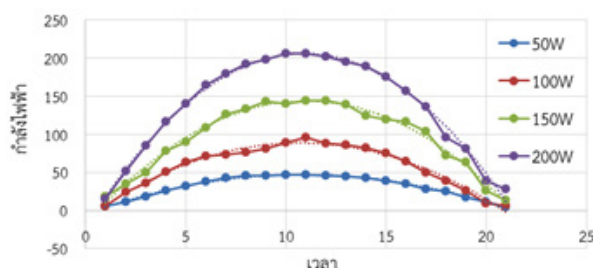
$$y_4 = -1.910x^2 + 41.699x - 21.648 \quad (9)$$

รูปที่ 13 ถึงรูปที่ 16 สามารถเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และช่วงเวลาใน 1 วัน โดยสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการพาราโบลาได้ดังสมการที่ (6) ถึง (9) ตามลำดับ โดยที่ y คือกำลังไฟฟ้ามีหน่วยเป็นวัตต์ และ x คือช่วงเวลามีหน่วยเป็นชั่วโมง

เปลี่ยนช่วงเวลาให้อยู่ในรูปจำนวนเต็มสำหรับการใช้ในการวิเคราะห์ด้วยอัตราส่วน 30 นาทีต่อ 1 ผลที่ได้ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เทียบค่าเวลาเป็นเลขจำนวนเต็ม

เวลา	t	เวลา	t
07:00 น.	1	12:30 น.	12
07:30 น.	2	13:00 น.	13
08:00 น.	3	13:30 น.	14
8:30 น.	4	14:00 น.	15
09:00 น.	5	14:30 น.	16
09:30 น.	6	15:00 น.	17
10:00 น.	7	15:30 น.	18
10:30 น.	8	16:00 น.	19
11:00 น.	9	16:30 น.	20
11:30 น.	10	17:00 น.	21
12:00 น.	11	-	-



รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเทียบกับช่วงเวลาในรูปจำนวนเต็ม

รูปที่ 17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตได้ทั้ง 4 พิกัดเทียบกับช่วงเวลาให้อยู่ในรูปแบบจำนวนเต็ม

เปลี่ยนสมการให้อยู่ในรูปของสมการพาราโบลา 1 วัตต์ โดยนำสมการที่ (6) ถึง (9) หาค่าพิกัดของเซลล์แสงอาทิตย์ 50 วัตต์ 100 วัตต์ 150 วัตต์ และ 200 วัตต์ ตามลำดับ ผลที่ได้คือ

$$y_{1B} = -0.0087t^2 + 0.1897t - 0.0886 \quad (10)$$

$$y_{2B} = -0.0086t^2 + 0.1850t - 0.1067 \quad (11)$$

$$y_{3B} = -0.0089t^2 + 0.1962t - 0.1208 \quad (12)$$

$$y_{4B} = -0.0096t^2 + 0.2085t - 0.1082 \quad (13)$$

นำสมการที่ (10) ถึง (13) เฉลี่ยเป็นสมการพาราโบลาเฉลี่ยฐาน 1 วัตต์ (y_b) ซึ่งเป็นสมการกลางสำหรับหาค่ากำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตได้ในแต่ละช่วงเวลา

$$y_b = \frac{(y_{1B} + y_{2B} + y_{3B} + y_{4B})}{4} \quad (14)$$

สมการกลางหรือสมการสำหรับหาขนาดกำลังไฟฟ้าของโหลดสูงสุดที่ใช้ได้ (P_L) ขึ้นอยู่กับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตกำลังไฟฟ้าได้จริงในแต่ละช่วงเวลาสามารถหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned} P_L &= y_b \times P_V \\ &= \frac{(y_{1B} + y_{2B} + y_{3B} + y_{4B})}{4} \times P_V \end{aligned} \quad (15)$$

โดยที่

P_V คือพิกัดกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ต่ำสุดที่ต้องใช้ (W)

t คือเวลาที่ต้องการใช้งาน (ชั่วโมง) โดยเทียบค่าเป็นจำนวนเต็มในตารางที่ 3

ตรวจสอบความถูกต้องของสมการกลาง โดยทดสอบ 3 กรณี กำหนดเงื่อนไขดังนี้

i) ผู้ใช้ต้องการใช้โหลดที่ 70 วัตต์ เป็นเวลา 8 ชั่วโมง (8:00-16:00 น.) จะต้องติดตั้งพิกัดของเซลล์แสงอาทิตย์ต่ำสุดเท่าไร

วิธีคิด กำหนด $P_L = 70$ วัตต์ ใช้งานเป็นเวลา 8 ชั่วโมง (8:00-16.00 น.) เทียบตารางที่ 3 ดังนั้นเวลามีค่า $t = 3$ และ $t = 19$ แทนลงในสมการที่ (15) ทำให้ได้

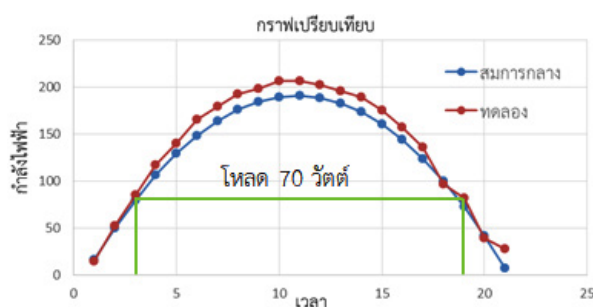
$$70 = (-0.0089t^2 + 0.1949t - 0.1061)P_V$$

เมื่อแทน $t = 3$ ผลที่ได้คือ $P_V = 175.93$ วัตต์

เมื่อแทน $t = 19$ ผลที่ได้คือ $P_V = 192.33$ วัตต์

สรุปเลือกติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์พิกัด 200 วัตต์

รูปที่ 18 แสดงผลของกำลังไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ ซึ่งเกิดจากการทดลองและการวิเคราะห์ด้วยสมการที่ (15) ผลจากการวิเคราะห์หาค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 8.25% เมื่อเทียบกับการวัดและเมื่อพิจารณาจากกราฟพบว่าช่วงเวลา 8.00-16.00 น. เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงกว่าความต้องการของโหลด 70 วัตต์



รูปที่ 18 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการวัดและการคำนวณที่พิกัด 200 วัตต์

ii) ผู้ใช้มีเซลล์แสงอาทิตย์พิกัด 100 วัตต์ ต้องการใช้งาน 6 ชั่วโมง (9:00-15.00 น.) จะสามารถใช้โหลดขนาดสูงสุดได้กี่วัตต์

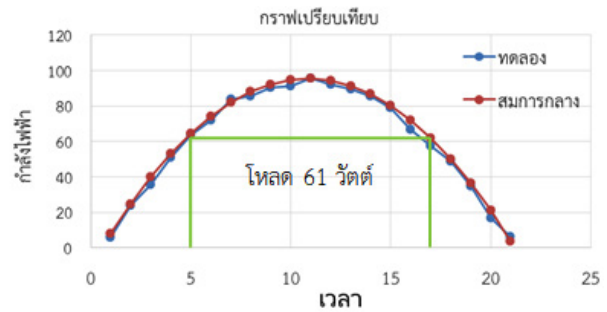
วิธีคิด กำหนด $P_V = 100$ วัตต์ ใช้งานเป็นเวลา 8 ชั่วโมง (8:00-16.00 น.) เทียบตารางที่ 3 ดังนั้นเวลามีค่า $t = 5$ และ $t = 17$ แทนลงในสมการที่ (15) ทำให้ได้

$$P_L = (-0.0089t^2 + 0.1949t - 0.1061) \times 100$$

เมื่อแทน $t = 5$ ผลที่ได้คือ $P_L = 64.31$ วัตต์

เมื่อแทน $t = 17$ ผลที่ได้คือ $P_L = 61.89$ วัตต์

สรุปสามารถใช้โหลดขนาดสูงสุด 61 วัตต์



รูปที่ 19 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการวัดและการคำนวณที่พิกัด 100 วัตต์

รูปที่ 19 แสดงผลของกำลังไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ ซึ่งเกิดจากการทดลองและการวิเคราะห์ด้วยสมการที่ (15) ผลจากการวิเคราะห์หาค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 4.01% เมื่อเทียบกับการวัดและเมื่อพิจารณาจากกราฟพบว่าช่วงเวลา 9.00-15.00 น. เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงกว่าความต้องการของโหลด 61 วัตต์

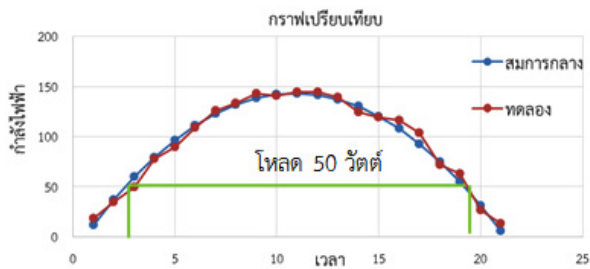
iii) ผู้ใช้ติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์พิกัด 150 วัตต์ ต้องการใช้กับโหลดขนาด 50 วัตต์ จะสามารถใช้งานได้กี่ชั่วโมง

วิธีคิด กำหนด $P_V = 150$ วัตต์ และ $P_L = 50$ วัตต์ แทนลงในสมการที่ (15) ทำให้ได้

$$50 = (-0.0089t^2 + 0.1949t - 0.1061) \times 150$$

ผลที่ได้คือ $t = 2.55$ และ $t = 19.02$

นำค่า t ที่ได้เปรียบเทียบกับตารางที่ 3 ทำให้ได้เวลาที่ใช้ 8 ชั่วโมง คือช่วงเวลาที่ใช้คือ 7.48-16.07 น.



รูปที่ 20 เปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการวัดและการคำนวณที่พิกัด 150 วัตต์

รูปที่ 20 แสดงผลของกำลังไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ ซึ่งเกิดจากการทดลองและการวิเคราะห์ด้วยสมการที่ (15) ผลจากการวิเคราะห์มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 5.09% เมื่อเทียบกับการวัด และเมื่อพิจารณาจากกราฟพบว่าช่วงเวลา 8.00-16.00 น. เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงกว่าความต้องการของโหลด 50 วัตต์

หลักการวิเคราะห์เพื่อหาพิกัดของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เหมาะสมกับขนาดของโหลดที่ใช้ในช่วงเวลาที่กำหนดที่นำเสนอ ไม่จำเป็นต้องมีระบบกักเก็บพลังงานเมื่อใช้ในรอบ 1 วันที่มีความเข้มดวงอาทิตย์ในสภาวะปกติ เมื่อพิจารณาผลการทดลองในรูปที่ 18-20 จะพบว่ากำลังไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้จะเหลือน้อยเมื่อใช้ช่วงเวลาล้น ในทางตรงข้ามถ้าต้องการใช้ช่วงเวลาเต็มวันควรต้องมีระบบกักเก็บพลังงานเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป โดยในบทความนี้ระบบคอนเวอร์เตอร์ต่างๆจะพิจารณาแบบทางความคิด (ไม่มีการสูญเสีย)

5.สรุป

บทความนี้นำเสนอวิธีการหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้และเวลาในรอบ 1 วัน โดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ รุ่น KANEKA G-EA050 เป็นต้นแบบ ผลของการวิเคราะห์สามารถเขียนแทนด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบ

พาราโบลา สมการที่ได้จะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของสมการหาพิกัดโหลดซึ่งประกอบไปด้วย 3 ตัวแปร คือ ขนาดกำลังไฟฟ้าของโหลด พิกัดกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ และช่วงเวลาที่ต้องการใช้งาน สมการที่นำเสนอได้ถูกนำไปทดสอบกับเงื่อนไขที่กำหนดขึ้นมา 3 กรณี เพื่อยืนยันสอบความถูกต้อง ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทำให้ผู้ใช้สามารถทราบพิกัดของเซลล์แสงอาทิตย์ที่จะติดตั้งให้เหมาะสมกับโหลดที่ใช้งานตามช่วงเวลาที่กำหนด ผลพลอยได้คือจะมีพลังงานที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตเกินความต้องการของโหลด ดังนั้นพลังงานในส่วนนี้สามารถนำไปกักเก็บในระบบสะสมพลังงาน (แบตเตอรี่) ได้ เพื่อนำไปใช้ช่วงเวลากลางคืนหรือช่วงที่ไม่มีความเข้มของแสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นงานวิจัยต่อเนื่องที่กำลังดำเนินการ

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยการประยุกต์ใช้งานอิเล็กทรอนิกส์กำลังและการจัดการพลังงาน (PEAEM) คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา ที่สนับสนุนเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Rinpol N. Design for solar power systems. 13th ed. Ecoplanetworld; 2014. (in Thai)
- [2] Thongprasri P. Power electronics for energy conservation. KU press; 2017. (in Thai)
- [3] Viswambaran VK, Ghani A, Zhou E. Modeling and simulation of maximum power point tracking algorithms & review of MPPT techniques for PV applications. ICEDSA. 2016;1-4.

- [4] Zakzouk NE, Elsharty MA., Abdelsalam AK, Helal AA, Williams BW. Improved performance low-cost incremental conductance PV MPPT technique. IET J Renewable Power Generation. 2015;10(4);1-14.
- [5] Jain S, Sonti V. A highly efficient and reliable inverter configuration based cascaded multilevel inverter for PV systems. IEEE Trans on industrial electronics, 2016;64(4);2865-2875.
- [6] Academic service center renewable energy conservation. Solar PV rooftop safety. Department of Alternative Energy Development and Efficiency. 2014. (in Thai)
- [7] Impreeda D, Subsingha W. Real-time simulation with MATLAB/Simulink photovoltaic module. TREC-4; 2011; (37-44). (in Thai)

การสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงจากหม้อแปลงฟลายแบคสำเร็จรูป

High Voltage Power Supply from Commercial Flyback Transformer

อาทิตย ยาวุฒิ^{1*} และ พิสิษฐ์ วิมลธนสิทธิ์²

Artit Yawootti^{1*} and Pisit Wimonthanasit²

yartit@rmutl.ac.th^{1*} and pisitwimonthanasit@gmail.com²

¹⁻² คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

¹⁻² Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology LANNA

Received: September 7, 2017

Revised: November 1, 2017

Accepted: March 16, 2018

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอวิธีการสร้างไฟฟ้าแรงดันสูงระหว่าง 3 – 27 kV ด้วยหม้อแปลงฟลายแบคสำเร็จรูป สำหรับการประยุกต์ใช้ไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสต่ำ วิธีการสร้างไฟฟ้าแรงดันสูงด้วยหม้อแปลงฟลายแบคที่นำเสนอมีการใช้วงจรควบคุมแบบเปิดเพื่อให้ได้ไฟฟ้าแรงดันสูงคงที่โดยที่กระแสใช้งานเปลี่ยนแปลงไปตามเงื่อนไขภาวะโหลดทางไฟฟ้าและมีการใช้วงจรควบคุมแบบปิดที่มีการตรวจสอบกระแสดีสชาร์จกลับมาช่วยกำหนดการสร้างสัญญาณ PWM เพื่อใช้สำหรับงานที่ต้องการควบคุมการปล่อยประจุไฟฟ้าแรงดันสูงให้คงที่ มีการควบคุมสวิตช์นำกระแสขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงฟลายแบคอย่างง่าย มีการสร้างสัญญาณ PWM ด้วยไอซีสำเร็จรูป NE555 และ TL494 นอกจากนี้ยังมีการใช้วงจรไอซี TLP250 สำหรับขยายสัญญาณขั้วเกต มีการใช้ไอซีออปแอมป์ LM741 ทำหน้าที่แปลงและขยายกระแสดีสชาร์จเป็นสัญญาณแรงดันเพื่อควบคุมการสร้างสัญญาณ PWM ร่วมกับไอซี UC3842 ในการควบคุมแบบปิด ผลการทดสอบการสร้างไฟฟ้าแรงดันสูงแบบต่าง ๆ พบว่าแต่ละวิธีสามารถสร้างไฟฟ้าแรงดันสูงได้จริงและยังแสดงให้เห็นถึงคุณลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นของไฟฟ้าแรงดันสูงที่ได้ต่อความถี่ที่เปลี่ยนแปลง ผลการตรวจสอบกำลังทางไฟฟ้าของหม้อแปลงฟลายแบคสำเร็จรูป พบว่ามีค่าประมาณ 20 W

คำสำคัญ: หม้อแปลงฟลายแบค ไฟฟ้าแรงดันสูง การควบคุมแบบเปิด การควบคุมแบบปิด

Abstract

This paper presents a method for generating a high voltage between 3 – 27 kV from a commercial flyback transformer. It's useful in high voltage fields such as ionization or plasma applications. This high voltage generation method has consisted of an open-loop control that depends on the electric load and closed-loop control for setting a discharge current constantly. The high voltage is generated from the conventional switch circuit and use a PWM control signal from NE555 and TL494 controller. In addition, it had a gate drive circuit from the TLP250 controller. The LM741 is used for converting and amplify a discharge current to voltage signal for closed-loop control by UC3842 controller. The results show that every method can generate a high voltage and show the nonlinear characteristic between high voltage output and frequency changes. The electrical power of the commercial flyback transformer has about 20 W.

Keywords: Flyback transformer, high voltage electrical, open loop control, closed loop control.

1. บทนำ

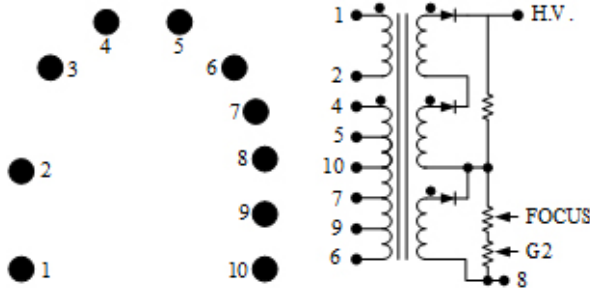
ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้ไฟฟ้าแรงดันสูงในเครื่องใช้ไฟฟ้าหรืออุปกรณ์ทำงานในชีวิตประจำวันของมนุษย์มีหลากหลายงานโดยที่เราอาจจะไม่ได้สังเกต เช่นในเครื่องถ่ายภาพเอกซเรย์ จอภาพของเครื่องรับโทรทัศน์หรือคอมพิวเตอร์แบบ Crystal Ray Tube (CRT) โคมไฟดัก/ฆ่าแมลง หลอดไฟแสงสว่างในรถแบบซินอนเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Precipitator; ESP) เครื่องฟอกอากาศ เครื่องกระตุ้นเซลล์หรือฆ่าเชื้อโรคแบบ Pulse Electric Field (PEF) รวมถึงหม้อแปลงในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าตามหมู่บ้าน เป็นต้น การสร้างไฟฟ้าแรงดันสูงอาจทำได้โดยการใช้หม้อแปลงไฟฟ้าสเต็ปอัพ (Step Up Transformer) แปลงแรงดันต่ำให้เป็นแรงดันสูง หากใช้ความถี่ต่ำในการแปลงเช่น 50 Hz จะทำให้ต้องใช้จำนวนรอบทั้งขาเข้าและขาออกมารอบเพื่อให้ได้ค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) ที่สอดคล้องกับกระแสใช้งานทางด้านอินพุต ดังนั้นหม้อแปลงที่ใช้ความถี่ต่ำจึงมีขนาดใหญ่ น้ำหนักมากและราคาแพง ส่วนหม้อแปลงแบบความถี่สูงอย่างหม้อแปลงฟลายแบค (Flyback Transformer) ถูกพัฒนามาใช้สำหรับงานที่ต้องการสร้างแรงดันสูงส่วนใหญ่ใช้กับงานที่ไม่ต้องการกำลังไฟฟ้าที่สูงมากนัก และสร้างแรงดันได้สูงระหว่าง 10 – 50 kV ตัวอย่างเช่น ชุดสร้างไฟฟ้าแรงดันสูงของ Leybold Didactic โมเดล 521721 และของ BERTAN แต่บางชนิดที่ออกแบบมาพิเศษเช่นของ Gamma High Voltage Research รุ่น ES100P-20W อาจจะสามารถสร้างได้ถึง 100 kV ซึ่งจะต้องคำนึงถึงฉนวนป้องกันไฟฟ้าแรงดันสูงเป็นอย่างดีด้วย นอกจากนี้ยังมีแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงอย่างของ Spellman ที่ประยุกต์รวมทั้งหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูงและวงจรทวีแรงดัน (Cockroft-Walton) สำหรับการสร้างไฟฟ้าแรงดันสูงจากหม้อแปลงฟลายแบคสำเร็จรูปที่มีขายเชิงพาณิชย์ทั่วไปนั้นถูกนำไปประยุกต์ใช้ในหลากหลายงานเช่นงานบำบัดน้ำเสีย เครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตและเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงแบบพัลส์เป็นต้น [1, 2, 3]

2. หม้อแปลงฟลายแบคและวงจรใช้งาน

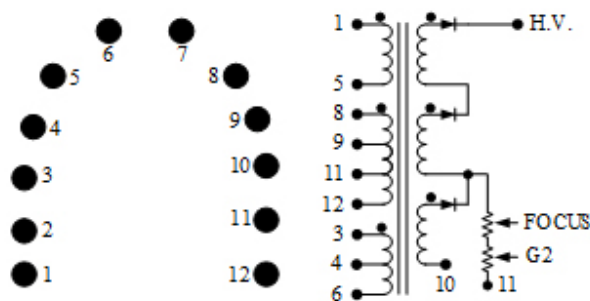
โดยทั่วไปแล้วหม้อแปลงฟลายแบคที่อยู่ในวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้าแบบฟลายแบค (Flyback Converter) จะความสามารถที่แปลงผันแรงดันไฟฟ้าได้หลากหลายลักษณะ แต่ในบทความนี้จะกล่าวถึงหม้อแปลงฟลายแบคเฉพาะที่ใช้ในการสร้างไฟฟ้าแรงดันสูงดังแสดงในรูปที่ 1(ก) และ(ข)เป็นตำแหน่งขาและขดลวดภายในหม้อแปลงฟลายแบครุ่น HR8545 และ HR8457 ที่มีแบบ 10 ขาและแบบ 12 ขาตามลำดับ [4] ขดลวดที่สำคัญภายในคือขั้วไฟฟ้าแรงดันสูง (High Voltage) ทางด้านทุติยภูมิ (Secondary) ที่จะมีลักษณะเป็นสายไฟสีแดงเส้นใหญ่ซึ่งขั้วกราวด์ของไฟฟ้าแรงดันสูงนี้จะขา 8 (แบบ 10 ขา) และขา 10 (ในแบบ 12 ขา) ส่วนขั้วการใช้งานขดลวดปฐมภูมินั้นพบว่ามีความแตกต่างกันมาก (ศึกษาเพิ่มเติมจากเอกสารรายละเอียดในแต่ละรุ่นที่ผู้ผลิต) หากไม่สามารถหาเอกสารรายละเอียดรุ่นนั้นๆ ได้ อาจใช้วิธีการพันขดลวดปฐมภูมิขึ้นใหม่บนแกนหม้อแปลง แต่จะต้องคำนึงถึงความสูญเสียเนื่องจากปรากฏการณ์ทางผิว (Skin Effect) ของตัวนำและความถี่ใช้งาน โดยเฉพาะการใช้งานในความถี่ที่สูงควรใช้ตัวนำแบบเส้นลวดตีขนาน (Litzendraht: Litz Wire) หรือลวดตัวนำเส้นเล็กหุ้มฉนวนหลายเส้นพันตีเกลียวให้มีพื้นที่หน้าตัดรวมเท่ากับพื้นที่หน้าตัดของขดลวดเส้นใหญ่แบบตัน [5]

วงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์เป็นวงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง (DC-to-DC Converter) นิยมใช้ในแหล่งจ่ายไฟฟ้าขนาดเล็กไม่เกิน 100 W โดยพัฒนามาจากวงจรบัค-บูสต์คอนเวอร์เตอร์ (Buck-Boost Converter) [6, 7] ที่มีการแทนส่วนของตัวเหนี่ยวนำ (วงจรบัค-บูสต์) ด้วยหม้อแปลงไฟฟ้า (ฟลายแบค) ทำให้สามารถมีเอาต์พุตได้หลากหลายลักษณะ ทั้งแรงดันไฟฟ้าที่ต่ำกว่าหรือสูงกว่าแรงดันแหล่งจ่ายที่ใช้และยังสามารถมีขดลวดทางด้านทุติยภูมิออกหลายๆ ขดแยกกันทำให้มีเอาต์พุตหลายระดับแรงดันได้

การทำงานของวงจรฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์สามารถแบ่งเป็นโหมดนำกระแสต่อเนื่อง (Continuous Conduction Mode;



(ก) แบบ 10 ขาเซ็นในรุ่น HR8545



(ข) แบบ 12 ขาเซ็นในรุ่น HR8457

รูปที่ 1 ขดลวดภายในหม้อแปลงฟลายแบค

CCM) และโหมดนำกระแสไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous Conduction Mode; DCM) โดยการกำหนดค่าความเหนี่ยวนำร่วมของหม้อแปลงฟลายแบค (Mutual Inductance) หรือ L_M ตามสมการที่ (1) เมื่อ D คือรอบวัฏจักรการทำงาน (Duty Cycle), R_L คือค่าความต้านทานที่โหลด f คือความถี่ใช้งาน N_1 และ N_2 คือจำนวนรอบของขดลวดทางปฐมภูมิและทุติยภูมิตามลำดับ [5, 8] วงจรฟลายแบคในรูปที่ 2 ทำงานโดยอาศัยหลักการแปลงพลังงานไฟฟ้าให้เป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวเหนี่ยวนำร่วม L_M ในขดลวดปฐมภูมิตามช่วงเวลา DT_S (เมื่อ T_S เป็นคาบเวลาในแต่ละ

วัฏจักรการทำงาน D) ซึ่งปกติทั่วไปจะกำหนดที่ $D=50\%$ หรือมากกว่าเล็กน้อย และในขณะที่อุปกรณ์สวิตช์หยุดการทำงานจะทำให้พลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าใน L_M ส่งผ่านแกนเฟอร์ไรต์ ไปยังขดลวดทางทุติยภูมิทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตามจำนวนรอบ N_2 ส่งไปยังโหลด R_L [9]

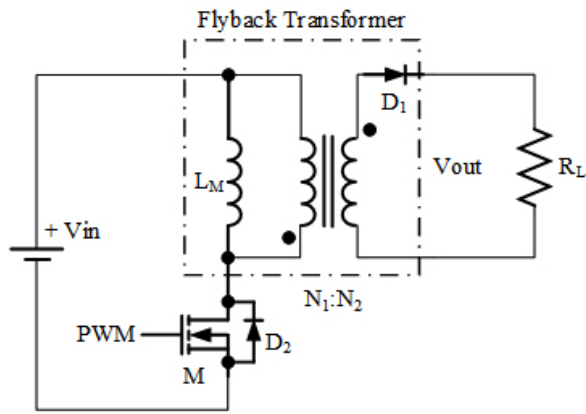
$$L_M = \frac{(1-D)^2 R_L}{2f} \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \quad (1)$$

3. วงจรขับหม้อแปลงฟลายแบคและการทดสอบ

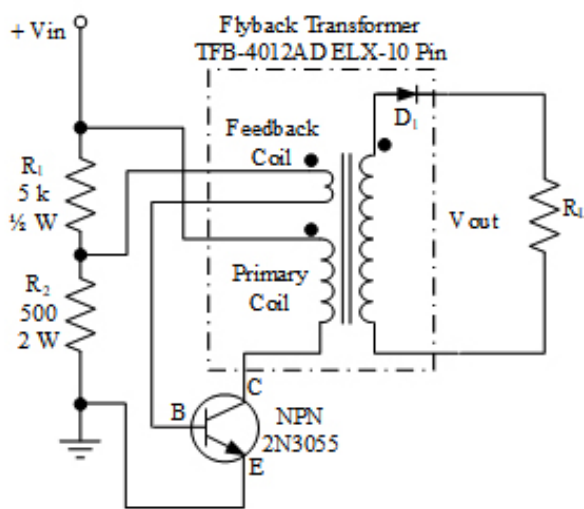
หลักการจ่ายกระแสไฟฟ้าเป็นจังหวะให้กับตัวเหนี่ยวนำร่วมเพื่อเก็บสะสมพลังงานในรูปแบบสนามแม่เหล็กไฟฟ้าก่อนที่จะส่งผ่านไปยังขดลวดทุติยภูมินั้น สามารถใช้สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์อย่างทรานซิสเตอร์หรือมอสเฟตที่มีการควบคุมหลายรูปแบบดังนี้

3.1 วงจรขับด้วยสวิตช์ธรรมดา

รูปที่ 3 เป็นวงจรทั่วไปของการใช้สวิตช์ธรรมดาแบบตัวเดียวในการขับนำกระแสขดลวดทางด้านปฐมภูมิแบบซีกเดียว (Unipolar) ซึ่งใช้ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN ทำหน้าที่เป็นสวิตช์และใช้สัญญาณกระแสชนิดบวกจากขดลวดป้อนกลับ (Feedback Coil) มาขับขาเบส (B) โดยปกติจะกำหนดอัตราส่วนความต้านทาน R_1/R_2 ที่ระหว่าง 8 – 25 และจำเป็นต้องใช้ R_1 ที่มีกำลังวัตต์สูงเนื่องจากใช้ในการจ่ายกระแสขับขาเบส ส่วน R_2 สามารถเลือกใช้ตัวต้านทานที่มีกำลังวัตต์น้อยกว่าได้ สำหรับจำนวนขดลวดที่พันบนแกนของหม้อแปลงฟลายแบคจะกำหนดเป็น 2T และ 4T สำหรับขดลวดป้อนกลับและขดลวดปฐมภูมิตามลำดับ เช่นหากใช้จำนวนรอบของขดลวดป้อนกลับเท่ากับ 8 รอบจะต้องใช้ขดทางด้านปฐมภูมิจำนวน 16 รอบ (ค่า $T=4$) และในขณะใช้งานวงจรจะต้องมีการใส่แผงระบายความร้อน (Heat Sink) ที่ตัวทรานซิสเตอร์เสมอเพื่อระบายความร้อนที่สะสมบนตัวทรานซิสเตอร์



รูปที่ 2 วงจรทั่วไปของฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์

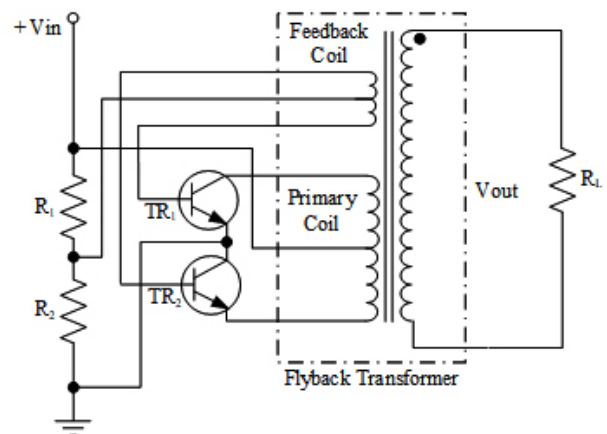


รูปที่ 3 วงจรขับหม้อแปลงฟลายแบคด้วยสวิตช์ตัวเดียว

รูปที่ 4 เป็นวงจรทั่วไปของการใช้สวิตช์ธรรมดาแบบ 2 ตัวในการขับนำกระแสให้ขดลวดปฐมภูมิแบบพุช-พูล (Push-Pull) สลับกันทำให้เกิดการยุบตัวของขั้วแม่เหล็กภายในในทิศทางตรงกันข้ามกัน ขดลวดป้อนกลับจะทำหน้าที่ขับขาเบสของทรานซิสเตอร์ TR_1 และ TR_2 สลับกัน ตัวต้านทาน R_1 และ R_2 ที่ใช้กำหนดอัตราส่วนการสวิตช์ยังกำหนดตามแบบสวิตช์ตัวเดียวและการทำงานลักษณะนี้หากใช้กับหม้อแปลงฟลายแบคที่ไม่มีไดโอดภายในแล้วจะทำให้ได้ไฟฟ้าแรงดันสูงทางเอาต์พุตเป็นสองเท่าของการขับด้วยสวิตช์เพียงตัวเดียว

3.2 การควบคุมสัญญาณ PWM แบบรูปเปิด

เนื่องจากวงจรขับสวิตช์ธรรมดาทั้งแบบตัวเดียวและแบบ 2 ตัวที่กล่าวมานั้นยังมีข้อจำกัดเรื่องความผิดเพี้ยนของสัญญาณขับที่แตกต่างจากทางอุดมคติมากจนมีการสูญเสียและเกิดความร้อนสูงที่ตัวสวิตช์ อีกทั้งประสิทธิภาพการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าหม้อแปลงฟลายแบคควรใช้ค่า Duty Cycle ที่ประมาณ 50% ซึ่งวิธีการขับโดยสวิตช์ธรรมดาไม่สามารถกำหนดให้มีค่า Duty Cycle ที่ความต้องการดังกล่าวได้ วิธีการขับสวิตช์แบบใช้สัญญาณพัลส์เบิ้ลยูเอ็ม (Pulse Width Modulation; PWM) จากภายนอก จึงถูกนำมาใช้เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว อีกทั้งยังสามารถกำหนดความถี่ทำงานให้คงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามค่าแรงดันอินพุต (V_{in})



รูปที่ 4 วงจรขับหม้อแปลงฟลายแบคด้วยสวิตช์ 2 ตัว

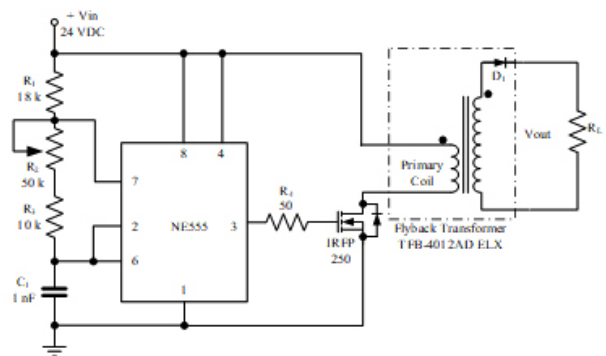
ไอซีสำเร็จรูป NE555 [10] ถูกพัฒนาโดยฮันส์ อาร์ คาเมนซินด์ (Hans R. Camenzind) เมื่อปี 2514 ซึ่งได้รับความนิยมใช้งานเกี่ยวกับการตั้งเวลาหรือสร้างพัลส์แบบสี่เหลี่ยม (Square Wave) รูปที่ 5 เป็นลักษณะของวงจรขับสวิตช์หม้อแปลงฟลายแบคที่กำหนดการขับนำกระแสขดลวดปฐมภูมิด้วยไอซี NE555 ตัวต้านทาน R_1 R_2 R_3 และตัวเก็บประจุ C_1 ถูกต่อร่วมกับขา 7 2 และ 6 เพื่อกำหนดความถี่และสามารถปรับความกว้างของพัลส์ (R_2) สัญญาณพัลส์ที่ได้จะถูกนำไปใช้ขับขาเบสของสวิตช์ (มีการจำกัด

กระแสด้วย R_4) ซึ่งอาจจะเป็นทรานซิสเตอร์หรือมอสเฟตก็ได้ โดย NE555 สามารถจ่ายกระแสสูงสุดได้ถึง 225 mA หรือทรานซิสเตอร์ PNP และ NPN ต่อขา E ร่วมกัน (Common Emitter) เป็นวงจรแบบ Totem Pole Push-Pull Output Stages หรืออาจใช้ไอซี TLP250 [11] เพื่อช่วยเพิ่มกระแสขับให้มากขึ้นได้

TL494 [12] เป็นไอซีสำเร็จรูปราคาถูกที่นิยมนำมาสร้างสัญญาณ PWM ที่ความถี่ต่างๆ ให้กับแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิง รูปที่ 6 เป็นตัวอย่างการใช้ไอซี TL494 สร้างสัญญาณ PWM ให้กับมอสเฟตที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ควบคุมการนำกระแสของขดลวดปฐมภูมิบนแกนหม้อแปลงฟลายแบค วงจรนี้เป็นการควบคุมแบบลูปเปิด (Open Loop Control) คือไม่มีการนำสัญญาณจากแรงดันเอาต์พุตกลับมาใช้ร่วมในการสร้างสัญญาณควบคุม PWM วงจรนี้สามารถกำหนดความถี่ใช้งานจาก R_T และ C_T ในส่วนของวงจร Oscillator ภายในของไอซี TL494 ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (2) ตัวต้านทาน R_1 ทำหน้าที่กำหนดความกว้างของ Duty Cycle หรือช่วงเวลา T_{ON} ซึ่งจะเริ่มมีสัญญาณ Duty Cycle ที่ค่าแรงดันประมาณ 3.66 V และเมื่อลดแรงดันลงไปที่ประมาณ 1 V จะมี Duty Cycle ที่มากที่สุด (Duty Cycle = 50 % ที่แรงดันประมาณ 2.24 V) นอกจากนี้ยังมีทรานซิสเตอร์แยกจากกันสำหรับใช้ขับสวิตช์เช่นมอสเฟตหรือทรานซิสเตอร์ได้ 2 ตัว ซึ่งสามารถต่อขนานกันเพื่อเพิ่มพิกัดกระแสขับสวิตช์ ส่วน R_3 และ R_4 ทำหน้าที่จำกัดกระแสขับเกตและป้องกันขาเกต Turn ON เองจากไฟฟ้าสถิตในระบบตามลำดับ และเนื่องจากตัว TL494 สามารถขับกระแสเกตได้สูงสุดเพียง 250 mA เท่านั้น ในกรณีที่มีความต้องการใช้กระแสในการขับเกตที่มากกว่านี้ สามารถใช้ทรานซิสเตอร์ 2 ตัวต่อแบบ Common Emitter หรืออาจเลือกใช้ไอซีสำเร็จรูปอย่าง TLP250 ที่มีกระแสขับเกตสูงถึง 1.5 A มาช่วยในการขับเกตได้

3.3 การควบคุมสัญญาณ PWM แบบลูปปิด

การใช่วงจรขับด้วยสัญญาณ PWM จากไอซีสำเร็จรูปในโหมดควบคุมแบบลูปเปิดนั้นเป็นรูปแบบที่ง่าย โดยค่าไฟฟ้าแรงดันสูงที่ได้จะขึ้นอยู่กับขนาด Duty Cycle จำนวนรอบของขดลวดและแรงดันทางปฐมภูมิ การนำไฟฟ้าแรงดันสูงที่ได้จากการควบคุมแบบเปิดนี้ไปสร้างพลาสมาหรือคอโรนาดีสชาร์จที่ไม่สามารถควบคุมเงื่อนไขของสิ่งแวดล้อมทั้งอุณหภูมิและความดันทานระหว่างขั้ว

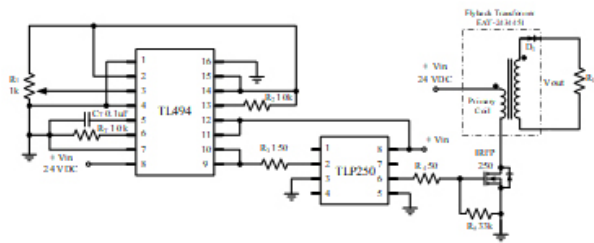


รูปที่ 5 วงจรขับหม้อแปลงฟลายแบคด้วยไอซี NE555

$$f(\text{Hz}) = \frac{1.1}{R_T \cdot C_T} \quad (2)$$

อิเล็กทรอนิกส์นั้น จะทำให้กระแสดีสชาร์จเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา การควบคุมให้ชุดสร้างไฟฟ้าแรงดันสูงมีการปรับเปลี่ยนระดับแรงดันได้ตามเงื่อนไขสิ่งแวดล้อมเพื่อให้รักษากระแสดีสชาร์จให้คงที่จึงมีความจำเป็นมาก ซึ่งสามารถใช้การควบคุมแบบลูปปิด (Closed Loop Control) โดยการตรวจเช็คกระแสดีสชาร์จแล้วนำมาใช้ควบคุมการสร้างสัญญาณ PWM ที่ใช้ในการขับเกต กระบวนการดังกล่าวสามารถประยุกต์ใช้อุปกรณ์ LM741 [13] ในการรับค่ากระแสดีสชาร์จ โดยมีวงจรการทำงานตามรูปที่ 7 ซึ่งออกแบบตัวที่ 1 ทำหน้าที่รับกระแสดีสชาร์จจากขั้วอิเล็กทรอนิกส์จากนั้นแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าและขยายสัญญาณด้วยอัตราขยายตามสมการที่ (3) ส่วนออกแบบตัวที่ 2 ทำหน้าที่กลับเฟสของสัญญาณ เมื่อได้สัญญาณแรงดันจากการแปลงกระแสดีสชาร์จแล้ว จะง่ายต่อการนำไปใช้ควบคุม

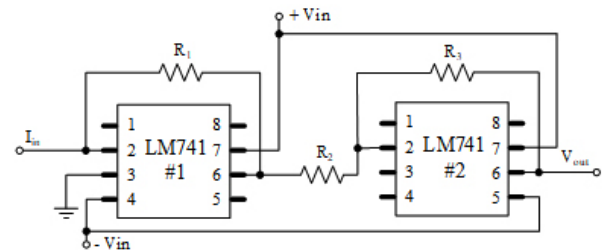
การสร้างสัญญาณ PWM เช่นในกรณีที่ใช้อิซี TL494 ที่สามารถนำสัญญาณแรงดันที่ได้ไปเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิงที่ Error Amp ภายใน โดยหากค่าแรงดันที่ตรวจวัดได้ มีค่ามากกว่าแรงดันอ้างอิงแล้ว Error Amp จะสั่งให้หยุดการสร้าง PWM ดังวงจรที่แสดงในรูปที่ 8 ความต้านทาน R_1 และ R_2 ทำหน้าที่แบ่งแรงดันจากแรงดันอ้างอิง 5 V ที่ขา 14 จากนั้นแรงดัน 1 V ที่ได้ถูกนำไปอ้างอิงที่ขา 2 ของ Error Amp ซึ่งหากขา 1 ตรวจพบแรงดันที่มีค่ามากกว่า 1 V จะทำให้ชุด Error Amp สั่งหยุดการสร้างสัญญาณ PWM และเมื่อไม่มีการจ่ายกระแสที่ขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลง ฟลายแบคจะทำให้แรงดันที่ขา 1 ไม่ถึง 1 V ทำให้ไอซี TL494 กลับมาสร้างสัญญาณ PWM อีกครั้ง



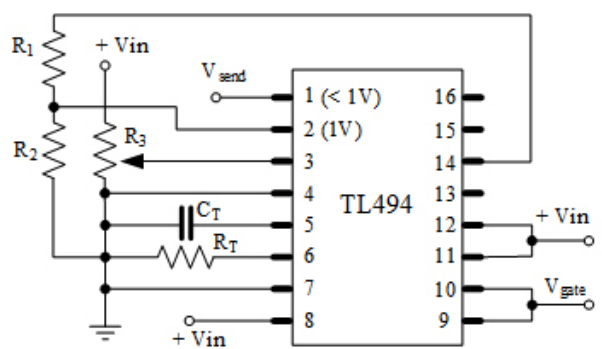
รูปที่ 6 การใช้งาน TL494 ร่วมกับ TLP250

นอกจากการใช้ Error Amp ในไอซี TL494 มาประยุกต์ใช้ในการควบคุมแบบลูปิดแล้ว ยังมีไอซี UC3842 [14] ที่มีทั้งลูปิดแรงดันและลูปิดกระแส อีกทั้งยังทำงานเร็วกว่าและมีกระแสขั้วเบตที่สูงกว่าถึง 1 A สามารถกำหนดความถี่ใช้งานได้จากค่า R_T และ C_T เหมือนกับไอซี TL494 โดยเป็นไปตามสมการที่ (4) วงจรขับหม้อแปลงฟลายแบคที่แสดงในรูปที่ 9 พบว่าลูปิดแรงดันป้อนกลับขา 2 (Feedback Voltage) ที่ใช้สำหรับตรวจสอบแรงดันใน Error Amp นั้น หากมีแรงดันมากกว่าระดับ 2.5 V จะสั่งให้หยุดสร้างสัญญาณ PWM นอกจากนี้ยังมีลูปิดกระแสขา 3 ที่ต่อกับ Current Sense Comparator โดยตรง สำหรับใช้ตรวจสอบกระแสที่ไหลในสวิตช์ (ขดปฐมภูมิ) ซึ่งปกติแล้วการตรวจจับกระแสที่สวิตช์จะใช้ Current Transformer ร่วมกับวงจรเรียงกระแสที่ใช้ไดโอดแบบกลับตัวเร็ว (Fast Recovery Diode) แล้วแปลงค่ากระแสเป็นแรง

ดันที่สามารถปรับระดับได้ด้วยตัวต้านทาน R_3 (ตรวจจับที่ประมาณ 0.3 V) ส่วน R_1 และ C_1 เป็นการกำหนดค่าความไว Comparator ในการตรวจวัดลูปิดแรงดัน ซึ่งอาจจะประยุกต์ใช้การควบคุมแบบ Proportional Integral Derivative (PID) หรืออาจใช้ PI หรือ PD ได้



รูปที่ 7 การแปลงสัญญาณกระแสดีสชาร์จด้วย LM741



รูปที่ 8 วงจรใช้งาน TL494 แบบลูปิด

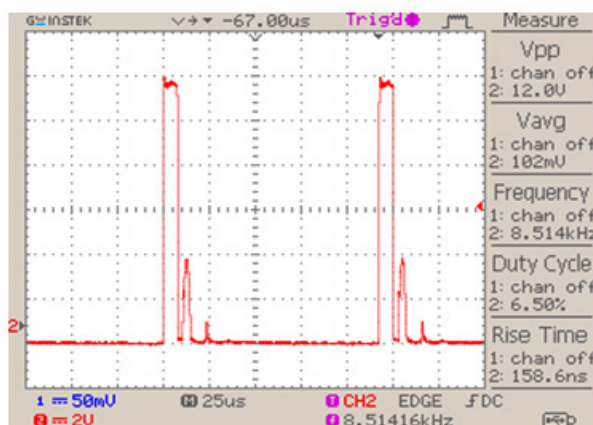
$$V_o = I \cdot R_f \quad (3)$$

3.4 การวัดกระแสดีสชาร์จของหม้อแปลงฟลายแบค

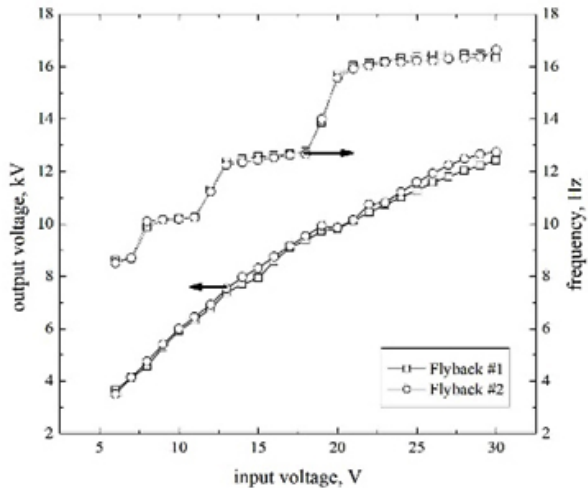
เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Precipitator; ESP) ตามรูปที่ 10 [2] ถูกนำมาใช้ประมาณความสามารถในการจ่ายกระแสดีสชาร์จเพื่อหากำลังวัตต์ของหม้อแปลงฟลายแบค ไฟฟ้าแรงดันสูงค่าต่างๆ ที่จ่ายให้เส้นลวดอิเล็กโทรดจะเกิดการดีสชาร์จไปยังอิเล็กโทรดแบบแผ่นแบน 2 แผ่น (มีพื้นที่แผ่นแบนรวม 0.27 m²) ทำการวัดกระแสดีสชาร์จนี้ด้วยแอมมิเตอร์แบบเข็ม โดยกำหนดระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเส้นลวดกับอิเล็กโทรดแผ่นแบนเท่ากับ 50 mm ดังที่

ส่วนขดลวดป้อนกลับใช้ลวดทองแดงพันบนแกนหม้อแปลงจำนวน 15 รอบ ในขณะที่สวิตช์ที่ใช้เป็นทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N3055 ชนิด NPN โดยติดยึดบนแผงระบายความร้อนอะลูมิเนียม มีการทดสอบกับหม้อแปลงฟลายแบค 2 ตัวชนิดเดียวกัน ผลการทดสอบแสดงสัญญาณการขับสวิตช์ที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์เทียบกับกราวด์ตามรูปที่ 12 โดยพบว่าค่า Duty Cycle ที่ใช้ขับมีประมาณ 6.5 % และมีการแกว่ง (Oscillate) หลังจากช่วงหยุดนำกระแส ซึ่งพฤติกรรมนี้เป็นสาเหตุที่ทำให้ทรานซิสเตอร์ที่ใช้เป็นสวิตช์เกิดความร้อนกว่าปกติ เมื่อเพิ่มค่าแรงดันอินพุตในวงจร พบว่าแรงดันเอาต์พุตเพิ่มขึ้นต่อเนื่องตั้งแต่ 3–13 kV ส่วนความถี่ใช้งานอยู่ในช่วง 9–17 kHz ตามแรงดันอินพุตที่ป้อนดังแสดงในรูปที่ 13 ขณะที่กระแสอินพุตอยู่ระหว่าง 0.04 – 0.25 A

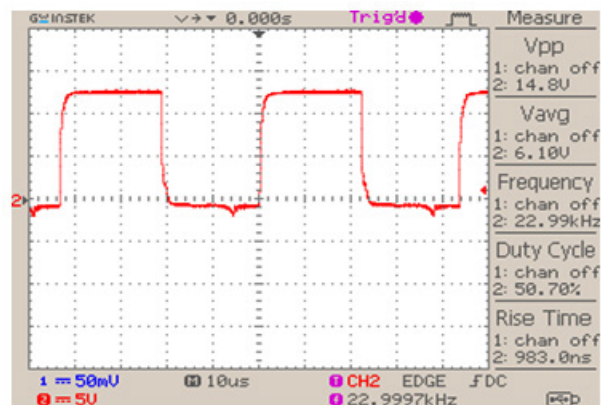
วงจรขับด้วยสัญญาณ PWM จากไอซี NE555 ตามรูปที่ 5 มีสัญญาณขับเป็นแบบยูนิโพลาร์ซีกเดียวตามรูปที่ 14 ในการทดสอบนี้ใช้ลวดทองแดงพันตีเกลียว 15 รอบบนแกนหม้อแปลงฟลายแบครุ่น TFB4012AD และทำการปรับค่าตัวต้านทาน R_2 เพื่อกำหนดความถี่ได้ระหว่าง 10 – 35 kHz ค่า Duty Cycle เท่ากับ 50 % พบว่าแรงดันเอาต์พุตมีการเพิ่มและลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น



รูปที่ 12 ลักษณะสัญญาณขับสวิตช์



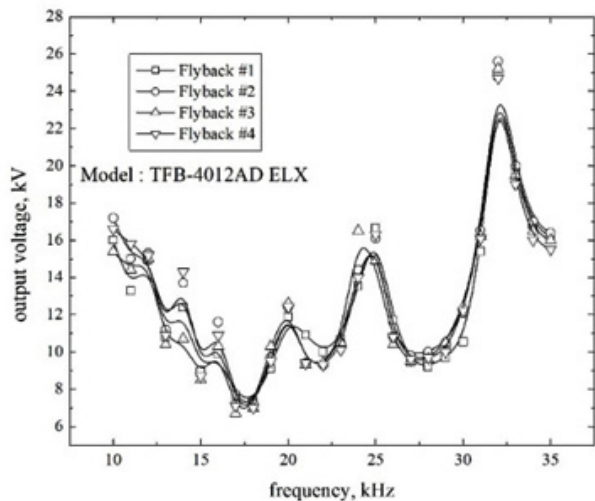
รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ของแรงดันและ ความถี่



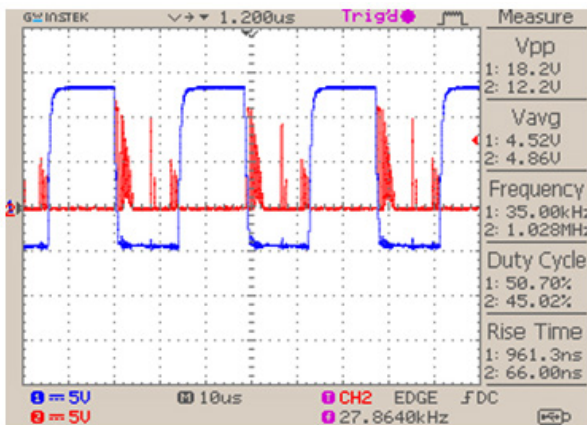
รูปที่ 14 ลักษณะของสัญญาณขับของไอซี NE555

ตามรูปที่ 15 โดยจะมีค่าสูงที่ความถี่ประมาณ 10, 25 และ 33 kHz ซึ่งเป็นผลจากคุณสมบัติที่ไม่เป็นเชิงเส้นของค่าความซาบซึมแม่เหล็ก (Magnetic Permeability) ในวัสดุแกนหม้อแปลงแบบเฟอร์ไรต์ [5] ในแต่ละรุ่นที่แตกต่างกัน โดยจะมีความคล้ายกันในกลุ่มเดียวกัน ส่วนค่ากระแสอินพุตพบว่ามีความสอดคล้องกับแรงดันเอาต์พุตซึ่งสังเกตได้ว่ามีค่ากระแสน้อยที่ความถี่ประมาณ 17 kHz หากต้องการใช้งานแรงดันเอาต์พุตที่ประมาณ 16 kV สามารถใช้ความถี่ที่ประมาณ 10 หรือ 25 kHz ได้ แต่หากต้องการแรงดันที่สูงกว่าในระดับ 20 kV ขึ้นไป ควรใช้ความถี่ที่ประมาณ 32 kHz

วงจรขับด้วยสัญญาณ PWM จากไอซี TL494 ตามรูปที่ 6 ขดลวดปฐมภูมิใช้ลวดทองแดงพันตีเกลียวบนแกนหม้อแปลงฟลายรุ่น EAY2434451 จำนวน



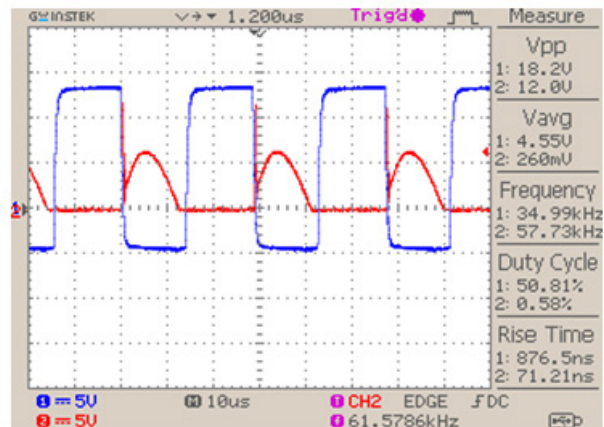
รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ของแรงดันเอาต์พุตต่อความถี่



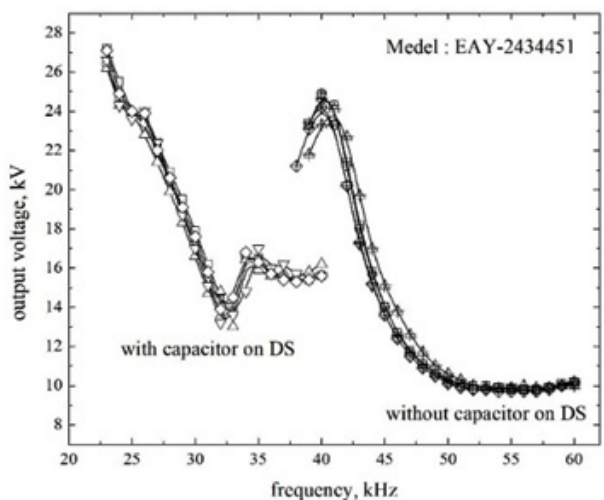
รูปที่ 16 ลักษณะสัญญาณที่ขาเกตและสัญญาณสไปค์ที่ขาเดรนและขาซอสของสวิตช์

9 รอบ (เพื่อแสดงคุณสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นของแกนเฟอร์ไรต์เช่นเดียวกับรุ่น TFB4012AD) ปรับค่าตัวต้านทาน R_T เพื่อกำหนดความถี่ได้ระหว่าง 37–60 kHz ค่า Duty Cycle เท่ากับ 50 % มีการใช้เซ็นเซอร์ไดโอดเพื่อตั้งฐานสัญญาณให้ต่ำกว่าศูนย์ตามรูปที่ 16 พบว่าสัญญาณขับเคลื่อนในช่องที่ 1 มีลักษณะใกล้เคียงกับสัญญาณอุดมคติมากและแรงดันคร่อมสวิตช์ระหว่างขาเดรน (D) และขาซอส (S) ในช่องวัดที่ 2 มีสัญญาณสไปค์มาก ส่วนแรงดันเอาต์พุตในรูปที่ 18 (ที่ไม่มีการต่อตัวเก็บประจุคร่อมสวิตช์) พบว่ามีค่ามากถึง 25 kV ที่ความถี่ประมาณ 40 kHz การขับสวิตช์มอสเฟตที่มีสัญญาณสไปค์รบกวนแบบนี้ส่งผลให้มอสเฟตร้อน

ขึ้นกว่าปกติ โดยสามารถต่อตัวเก็บประจุแบบไม่มีขั้วค่าน้อยเช่น 0.1 μF กรองความถี่สูงระหว่างขาเดรน



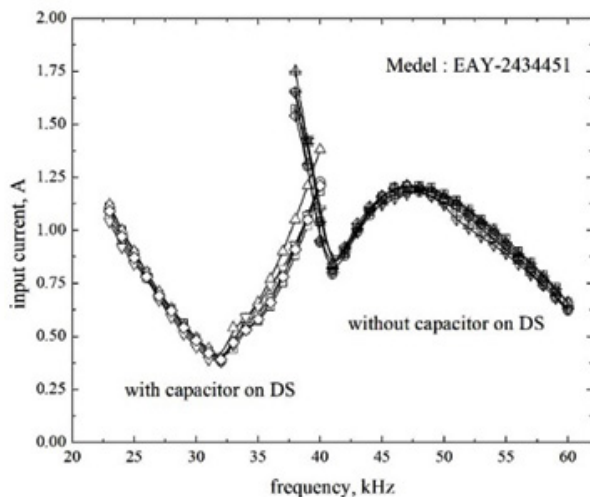
รูปที่ 17 การแก้ไขรูปคลื่นแรงดันสไปค์ที่ขาเดรนและขาซอสของสวิตช์



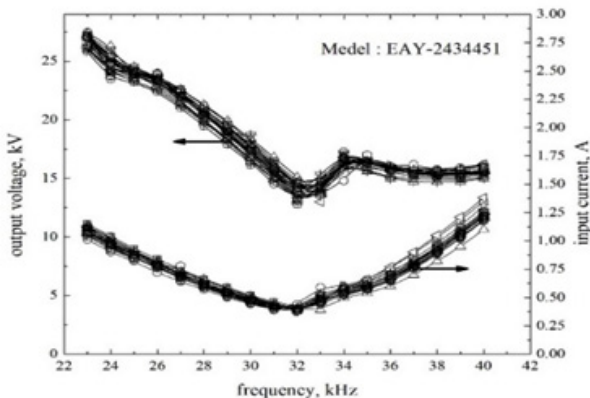
รูปที่ 18 การตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตที่ความถี่ต่างๆ

และซอส เพื่อลดสัญญาณสไปค์ได้ตามรูปที่ 17 ซึ่งยังส่งผลให้ได้แรงดันเอาต์พุตสูงถึง 27 kV และมีการตอบสนองต่อความถี่ที่ต่ำลงดังแสดงในรูปที่ 18 นอกจากนี้ยังพบว่าการตอบสนองของกระแสอินพุตที่ความถี่ต่างๆ มีการเปลี่ยนแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้นดังแสดงในรูปที่ 19 จากนั้นเมื่อทดสอบกับหม้อแปลงฟลายแบคชนิดเดียวกันจำนวน 20 ลูก พบว่าการตอบสนองของแรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุตคล้ายกันมากดังแสดงในรูปที่ 20

การทดสอบวงจรขับด้วยสัญญาณ PWM จะใช้ไอซีเบอร์ UC3842 ควบคุมแบบลูปปิดในการจ่ายกระแสดีสชาร์จให้คงที่ โดยในลูปของกระแสขา 3 ที่ใช้ตรวจเช็คและป้องกันไม่ให้สวิตช์ทำงานเกินพิกัดนั้นจะสั่ง Shutdown เมื่อแรงดันเกินค่า 0.3 V และลูปแรงดันขา 2 ที่ใช้ตรวจเช็คแรงดันเอาต์พุต จะถูกประยุกต์ใช้ในการตรวจเช็คให้มีการจ่ายกระแสดีสชาร์จ



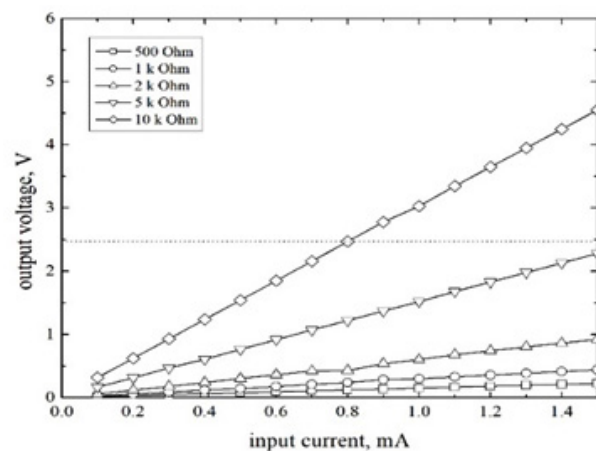
รูปที่ 19 การตอบสนองของกระแสอินพุตที่ความถี่ต่างๆ



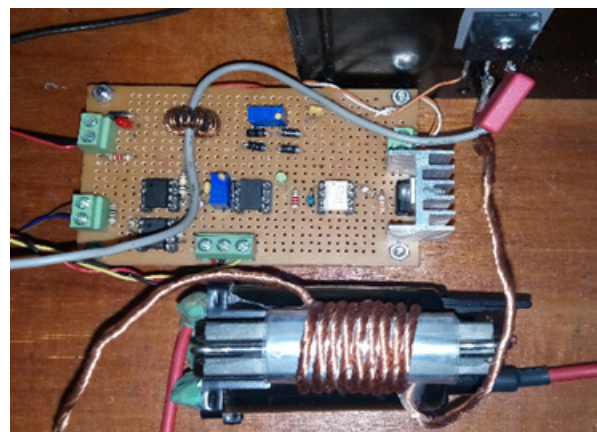
รูปที่ 20 การตอบสนองต่อแรงดันเอาต์พุตและกระแสอินพุตต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่างๆ

ให้คงที่ โดยในการทดสอบนี้จะกำหนดให้มีการจ่ายกระแสดีสชาร์จคงที่ที่ 1 mA ซึ่งมีความจำเป็นที่จะต้องใช้ออปแอมป์ LM741 แปลงค่ากระแสดีสชาร์จเป็นค่าแรงดัน ตามวงจรในรูปที่ 8 ซึ่งพบว่าควรเลือกใช้ตัว

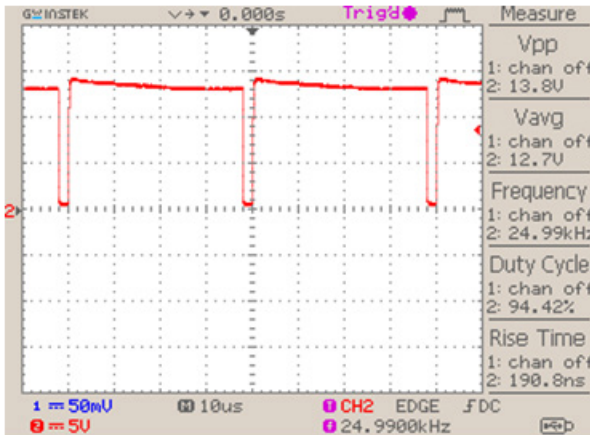
ต้านทานป้อนกลับค่า 10 k Ω ที่จะทำให้ได้สามารถตรวจวัดกระแสดีสชาร์จได้ระหว่าง 0.8 – 1.5 mA ตามรูปที่ 21 จากนั้นทำการทดสอบวงจรทำงานของไอซี UC3842 และหม้อแปลงฟลายแบคตามรูปที่ 10 ซึ่งมีการต่อวงจรตามรูปที่ 22 ที่ทำให้ได้ความถี่ใช้งานประมาณ 25 kHz โดยเมื่อยังไม่มีสัญญาณแรงดันเข้ามาที่ลูปแรงดันขา 2 และลูปกระแสขา 3 จะทำให้ได้สัญญาณขับตามรูปที่ 23 ที่หมายความว่าเป็นการจ่าย Duty Cycle เต็มพิกัด ให้กับสวิตช์ในวงจรฟลายแบคคอน



รูปที่ 21 การแปลงกระแสดีสชาร์จเป็นแรงดันไฟฟ้า

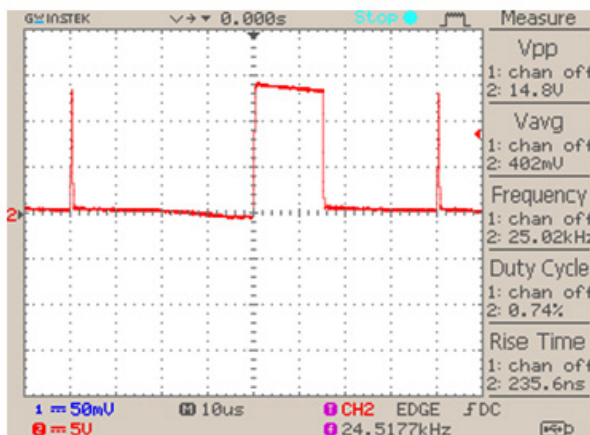


รูปที่ 22 ลักษณะการต่ออุปกรณ์ควบคุมแบบลูปปิด

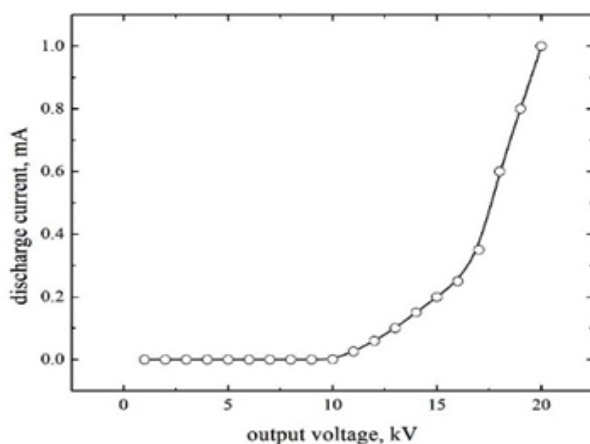


รูปที่ 23 สัญญาณก่อนขับเคลื่อนของไอซี UC3842

เวอร์เตอร์และเมื่อมีการสร้างไฟฟ้าแรงดันสูงจนเกิดกระแสดีสชาร์จ ที่ระดับ 1 mA จะถูกออปแอมป์ LM741 แปลงค่ากระแสดีสชาร์จนี้เป็นแรงดันที่ระดับ 2.5 V ส่งมาที่ขา 2 ทำให้หยุดการสร้างสัญญาณ PWM



รูปที่ 24 สัญญาณขับเคลื่อนของการควบคุมแบบลูปิด



รูปที่ 25 กระแสดีสชาร์จในชุดตกตะกอนไฟฟ้าสถิต

และเมื่อระบบในวงจรทำงานต่อเนื่องไปตลอด จะสามารถวัดค่าสัญญาณขับที่ไม่เป็นรูปแบบที่แน่นอนตามรูปที่ 24 อย่างนี้ตลอดไป

สำหรับการตรวจสอบหาพิกัดกำลังวัตต์ของหม้อแปลงฟลายแบคตามรูปที่ 11 ใช้การขับด้วยสัญญาณ PWM จากไอซี TL494 โดยการใช้ความถี่ที่ 35 kHz จากนั้นปรับแรงดันอินพุตจาก 0 – 24 V ให้ได้แรงดันสูงทางด้านเอาต์พุตเพิ่มขึ้นต่อเนื่อง จากนั้นทำการวัดกระแสดีสชาร์จที่อิเล็กทรอนิกส์แบบแผ่นแบนทั้งสองด้วยแอมมิเตอร์แบบเข็ม โดยมีการปรับค่าแรงดันสูงเพิ่มขึ้นจนไม่สามารถปรับได้เพิ่มอีก (หรือที่เอาต์พุตเกิดแรงดันไฟตก) ผลการทดสอบพบว่าหม้อแปลงฟลายแบครุ่น TFB-4012AD ELX ที่ใช้ทดสอบนี้สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าดีสชาร์จได้สูงสุดประมาณ 1 mA ที่แรงดัน 20 kV ตามรูปที่ 25 ซึ่งสามารถคิดเป็น 3.7 mA/m^2 หรือ ประมาณ 20 W

5. สรุป

บทความนี้เป็นการนำเสนอวิธีการสร้างไฟฟ้าแรงดันสูงจากหม้อแปลงฟลายแบคสำเร็จรูปที่มีขายเชิงพาณิชย์ทั่วไป เนื่องจากเป็นหม้อแปลงที่ออกแบบมาสำหรับการสร้างไฟฟ้าแรงดันสูงโดยเฉพาะ ทำให้มีคุณสมบัติความเป็นฉนวนไฟฟ้าแรงดันสูงอยู่ในตัว อีกทั้งยังหาซื้อได้ในราคาไม่แพงนัก จึงเหมาะต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานหรือพัฒนาเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงในงานปล่อยประจุไฟฟ้าหรืองานพลาสมากำลังต่ำ วงจรการสร้างไฟฟ้าแรงดันสูงที่กล่าวถึงในบทความนี้มีทั้งแบบอย่างง่ายต้นทุนต่ำที่ใช้สวิทช์เพียงตัวเดียว หรือการใช้ไอซีสำเร็จรูปอย่าง NE555 นอกจากนั้นยังมีการใช้ไอซี TL494 และ UC3842 เป็นไอซีสำหรับงานสร้างสัญญาณ PWM ขับสวิทช์โดยตรงและมี Error Amp สำหรับใช้ในการควบคุมแบบลูปิดแบบอัตโนมัติ สามารถเพิ่มกระแสขับได้ด้วยวงจร Totem Pole หรือการใช้ไอซีสำเร็จรูปอย่าง TLP250 การทดสอบความสามารถในการจ่ายกระแสดีสชาร์จแสดงให้เห็นว่าหม้อแปลงฟลายแบค

ทั่วไปมีพิกัดกำลังไฟฟ้าประมาณ 20 W นอกจากนี้ การทดสอบหม้อแปลงฟลายแบคที่ความถี่ต่างๆ ทั้ง 2 รุ่น แสดงให้เห็นคุณสมบัติของแกนเฟอร์ไรต์ที่มี การตอบสนองต่อความถี่ที่ไม่เป็นเชิงเส้นเหมือนกัน แต่ยังคงมีความคล้ายกัน ในหม้อแปลงรุ่นเดียวกัน ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการต่อขนานหม้อแปลง เพื่อเพิ่มกำลังวัตต์ได้ การทดสอบการจ่ายกระแสดีสชาร์จ คงที่ด้วยการควบคุมแบบลูปปิดสามารถใช้งานได้ดี เหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานลักษณะต่างๆ ได้

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์กิตติกร สาสุจิตต์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Chatchai S, Boonme T, Danai P, and Nattapong P. Design and Development of the Corona Discharge Generator for Waste Water Treatment. Electrical Engineering Network 5th. 2013 (in Thai)
- [2] Artit Y, Panich I, and Wisut A. Design and Development of High Voltage Generator for the Electrostatic Precipitator, MFU Academic Chiang Rai. 2010 (in Thai)
- [3] Artit Y, Visut A, Suttichai P, and Panich I. The Low Cost of High Voltage Pulse Electric Field Generator for Electrostatic Work Application. Academic Conference "Science Research" 3th. Phitsanulok Province. 2011 (in Thai)
- [4] HR Series. Flyback Transformer. [cited 2017 Jun 18]; Available from: <http://www.donberg.ie>
- [5] Weerachat K, and Woothipol T. Power Electronic. V J Printing. ISBN 974-92440 -9-5. 6th. 2007 (in Thai)
- [6] Daniel M. M., DC-DC Switching Regulator Analysis. McGraw-Hill. Inc. United States of America. 1988.
- [7] Simon S. A., Power Switching Converters. Marcel Dekker. Inc. New York. 1995.
- [8] Supachai H, and Chanin B. The Comparison of Flyback Converter Circuit in CCM and DCM. Lat Krabang Academic. 20th. 2003. Vol. 1 (in Thai)
- [9] Sung-Soo H. Sang-Keun J. Young-Jin J. and Chung-Wook R., Analysis and Design of a High Voltage Flyback Converter with Resonant Elements. Journal of Power Electronics. 2010. Vol. 10. No. 2. 107-114.
- [10] Timer IC555. Timer and Pulse Wave Generator. [cited 2017 Jun 18]; Available from: <https://en.wikipedia.org>
- [11] TLP250. Photocoupler. TOSHIBA. [cited 2017 Jun 18]; Available from: <https://toshiba.semicon-storage.com>
- [12] TL494. Switch Mode Pulse Width Modulation Control Circuit. ON Semiconductor. [cited 2017 Jun 18]; Available from: <http://onsemi.com>
- [13] LM741. Operational Amplifier. Texas Instruments. [cited 2017 Jun 18]; Available from: www.ti.com
- [14] UC3842, Current Mode PWM Controller. Texas Instrument. [cited 2017 Jun 18]; Available from: www.ti.com

การออกแบบและสร้างเครื่องกะเทาะเมล็ดกระบกแบบต่อเนื่อง

Design and Fabrication of Continuous Type Barking

Deer's Mango Nut Sheller

รุ่งเรือง กาลศิริศิลป์^{1*} วุฒิชัย ชาวสวนแพ² และจตุรงค์ ลังกาพินธุ์³

Roongruang Kalsirisilp^{1*} Wootichai Chawsuanpair² Jaturong Langkapin³

Roongruang.k@en.rmutt.ac.th^{1*}, wootichai_c@mail.rmutt.ac.th², Jaturong.L@en.rmutt.ac.th³

¹⁻³ ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

¹⁻³ Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Received: July 24, 2018
Revised: August 1, 2018
Accepted: August 20, 2018

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อเป็นเครื่องทุ่นแรงและช่วยเพิ่มความสามารถในการผลิตเมล็ดกระบกในชุมชนเครื่องกะเทาะเมล็ดกระบกประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 4 ส่วน คือ โครงสร้างเครื่อง ชุดลำเลียง ชุดกะเทาะ และระบบส่งกำลังโดยการทดสอบได้แบ่งขั้นตอนการทดสอบออกเป็น 2 ขั้นตอน ในขั้นตอนแรกเป็นการทดสอบเพื่อหาลักษณะของหัวเจาะที่ให้สมรรถนะและประสิทธิภาพในการทำงานที่ดีที่สุด และขั้นตอนที่สองเป็นการทดสอบหาสมรรถนะของเครื่องกะเทาะเมล็ดกระบก ผลการทดสอบในขั้นตอนแรก ที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 1,000 รอบต่อนาที พบว่าหัวเจาะชนิด แบบเรียบเป็นหัวเจาะที่ดีที่สุดเมื่อพิจารณาจากสมรรถนะและเมล็ดที่กะเทาะได้ ผลการทดสอบขั้นตอนที่สองพบว่าที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 1,000 รอบต่อนาที และอัตราการป้อน 30 เมล็ดต่อนาที เครื่องกะเทาะเมล็ดกระบกมีความสามารถในการทำงาน 10.4 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เมล็ดที่กะเทาะได้ 1.04 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 0.87 กิโลวัตต์-ชั่วโมง เมื่อวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการใช้เครื่องกะเทาะเมล็ดกระบกพบว่าค่าใช้จ่ายในการทำงาน 4.5 บาทต่อกิโลกรัม และมีจุดคุ้มทุนในการทำงาน 393 ชั่วโมงต่อปี เมื่อพิจารณาชั่วโมงการทำงานของเครื่องกะเทาะเมล็ดกระบก 720 ชั่วโมงต่อปี จะมีระยะเวลาในการคืนทุน 0.3 ปี

คำสำคัญ: เมล็ดกระบก, เครื่องกะเทาะ, หัวเจาะเมล็ดกระบกแบบเรียบ

Abstract

This research was aimed to increase the production of barking deer's mango in the community. The machine consisted of four main parts namely, steel frame, conveying unit, shelling unit and power transmission unit. Experiments were divided into two parts. The first part was aimed to evaluate the optimum shape of shelling unit. The second part was aimed to evaluate the performance and efficiency of continuous type barking deer's mango nut sheller. Based on the tests results, it was found that the flat shape of shelling unit performed the best in terms of capacity and efficiency of the machine at the revolution speed of 1,000 rpm. The performance tests of the machine further showed that the machine had its capacity as 10.4 kg.nuts per hour or 1.04 kg.kernels per hour at the speed and feed rate of 1,000 rpm and 30 nuts/min, respectively. The electrical consumption was found as 0.87 kW-hr. The economic analysis showed that the operation cost of the machine was approximately 4.5 Baht per kg with the break even point of 393 hour per year. Considering the working hour per year as 720, the pay back period of the machine was found to be 0.3 year.

Keywords: barking deer's mango, nut sheller, flat shape of shelling unit

1. บทนำ

กระบกเป็นพืชที่สามารถพบได้ทั่วไป ในเขตภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ซึ่งในประเทศไทยจะพบมากที่สุดในภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ กระบกเป็นพืชยืนต้น ซึ่งทุกส่วนของกระบกล้วนสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ทั้งสิ้น ขนาดของต้นกระบกในพื้นที่นาเกษตรกรรมมีความสูงอยู่ระหว่าง 10-30 เมตร ใบเป็นใบเดี่ยวขนาดกว้างอยู่ระหว่าง 2.5-3 เซนติเมตร ความยาวของใบอยู่ระหว่าง 7-12 เซนติเมตร ใบเรียงสลับรูปวงรี ขอบขนาน ผลสดของกระบก จะมีเนื้อออกในช่วงเดือนเมษายนถึงเดือนพฤษภาคม ทรงกลมรี สีเขียวจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองเมื่อสุกผลแห้งภายในเนื้อจะเป็นสีส้ม ขึ้นหุ้มเมล็ดเปลือกในแข็ง ภายในจะมีเมล็ดสีขาว 1 เมล็ด รสมัน [1] ประโยชน์ของเมล็ดกระบกด้านสมุนไพรสามารถใช้ปรุงยาถ่ายพยาธิ บำรุงไขข้อ บำรุงตับ แก้เส้นเอ็นพิการ และให้ความอบอุ่นแก่ร่างกาย ซึ่งเนื้อกระบกจะมีคาร์โบไฮเดรต โปรตีน ธาตุเหล็ก และแคลเซียม [2] น้ำมันเมล็ดกระบก ประกอบไปด้วย กรดไขมันอิ่มตัว ซึ่งได้แก่ กรดปาล์มิติก 4.5 เปอร์เซ็นต์ กรดลอริก 40.11 เปอร์เซ็นต์ ไมริสติก 50.12 เปอร์เซ็นต์ และกรดสเตียริก 0.55% ส่วนกรดไขมันไม่อิ่มตัว ได้แก่ กรดไลโนเลอิก 1.46 เปอร์เซ็นต์ กรดโอเลอิก 3.12 เปอร์เซ็นต์ และกรดปาล์มิโตเลอิก 0.12 เปอร์เซ็นต์ [3] และในด้านการแปรรูปสามารถนำไปใช้ในการทำเครื่องสำอาง สบู่ สกัดเป็นน้ำมันเมล็ดกระบก และสามารถนำมาแปรรูปเป็นขนมขบเคี้ยว [4]

วิธีการกะเทาะเมล็ดกระบกในปัจจุบันสามารถทำได้ 2 วิธีได้แก่ 1. เกษตรกรจะใช้มีดผ่าหรือใช้ค้อนทุบให้เปลือกนอกของเมล็ดกระบกที่แข็งแยกออกจากกัน 2. การใช้เครื่องกะเทาะเมล็ดกระบกแบบใช้แรงอัดกับแรงกระแทกซึ่งต้องใช้แรงงานคนในการทำงานเป็นหลัก และก่อให้เกิดอาการเมื่อยล้าแก่ผู้ปฏิบัติงาน [5] จากปัญหาดังกล่าว จึงได้ดำเนินการจัดทำโครงการวิจัยเรื่องการออกแบบและสร้างเครื่องกะเทาะเมล็ดกระบกแบบต่อเนื่อง โดยใช้หลักการของ

กลไกเจนีวาเป็นอุปกรณ์กำหนดอัตราการป้อนของเมล็ดกระบก (Geneva mechanism) และหลักการของลูกเบี้ยวในการขับเคลื่อนหัวเจาะเมล็ดกระบก (Cam mechanism) จากผลการศึกษาที่ผ่านมาพบว่ากลไกแบบเจนีวา และลูกเบี้ยว เป็นกลไกสำหรับการออกแบบเครื่องกะเทาะเมล็ดกระบก โดยกลไกเจนีวาเป็นตัวกำหนดการเคลื่อนที่ของโซ่ลำเลียงดอกกระเจียบเข้าสู่ชุดหัวเจาะเมล็ด และใช้หลักการของลูกเบี้ยวเป็นอุปกรณ์ถ่ายทอดกำลังไปยังชุดหัวเจาะเมล็ดกระเจียบ ซึ่งผลการศึกษาพบว่ามีประสิทธิภาพในการกะเทาะเมล็ดกระเจียบ 95 เปอร์เซ็นต์ [6] ผลการศึกษาเรื่องการออกแบบและสร้างเครื่องตัดใบบัวหลวง ใช้หลักการของเจนีวาในการออกแบบชุดป้อนลำเลียงใบบัวหลวง โดยผลการทดสอบพบว่าเปอร์เซ็นต์การตัดใบบัวหลวง 98 เปอร์เซ็นต์ [7]

จากข้อมูลที่กล่าวมาข้างต้น คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการดำเนินโครงการวิจัยเรื่องการออกแบบและสร้างเครื่องกะเทาะเมล็ดกระบกแบบต่อเนื่องสำหรับใช้ทดแทนแรงงานคนในการกะเทาะ และเพิ่มรายได้ให้กับเกษตรกรผู้ที่ย้ายเมล็ดกระบกเป็นอาชีพเสริม และเป็นโอกาสให้กับชุมชนที่จะรวมกลุ่มเกษตรกรผู้จำหน่ายเมล็ดกระบกที่กะเทาะแล้วทำการแปรรูปเพื่อเพิ่มมูลค่าของผลผลิตต่อไป (รูปที่ 1)



รูปที่ 1 เนื้อในเมล็ดกระบก

2. อุปกรณ์และวิธีการ

งานวิจัยนี้ให้ความสำคัญในการออกแบบและสร้างเครื่องกะเทาะเมล็ดกระบก ซึ่งมีวิธีการวิจัยดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.1 ศึกษาลักษณะทางกายภาพของเมล็ดกระบก

วัตถุประสงค์เพื่อให้ทราบถึงลักษณะทางกายภาพของเมล็ดกระบก ได้แก่ ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของผลกระบกและเมล็ดกระบกสำหรับเป็นเกณฑ์ในการออกแบบ ชุดกะเทาะ และระบบป้อนเมล็ดกระบกดำเนินการศึกษาโดยการวัดผลและเมล็ดกระบกด้วยเวอร์เนียคาร์ลิปเปอร์ จำนวน 100 เมล็ด ซึ่งตำแหน่งในการวัดจะแสดงดังรูปที่ 1 แล้วนำค่าที่ได้จากการวัดมาวิเคราะห์ทางสถิติหาค่าเฉลี่ย (average) ค่าต่ำสุด (minimum) และค่าสูงสุด (maximum) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของเมล็ดกระบก พบว่า ขนาดความกว้างของเมล็ดกระบกทั้งเปลือกอยู่ระหว่าง 18.8-31.8 มิลลิเมตร มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 23.1 ± 2.2 มิลลิเมตร ความยาวของเมล็ดกระบกทั้งเปลือกอยู่ระหว่าง 26.6-40 มิลลิเมตร มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 33 ± 2.6 มิลลิเมตร ความหนาของเมล็ดกระบกอยู่ระหว่าง 10.5-20 มิลลิเมตร มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 14.5 ± 1.8 มิลลิเมตร ความหนาของเปลือกเมล็ดกระบกอยู่ระหว่าง 4.1-6.8 มิลลิเมตร มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.5 ± 2.7 มิลลิเมตร จากลักษณะทางกายภาพของเมล็ดกระบกที่ได้ศึกษานำไปใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบชุดป้อนและชุดกะเทาะเมล็ดกระบกตามลำดับ

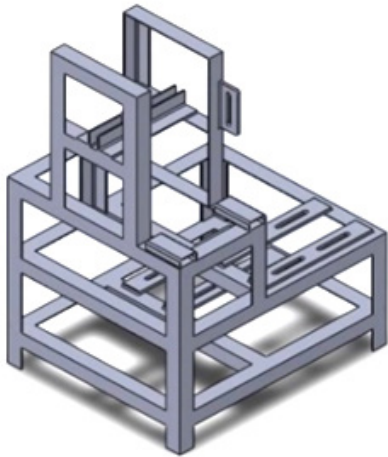


รูปที่ 2 การวัดขนาดของเมล็ดกระบก

2.2 ออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบ

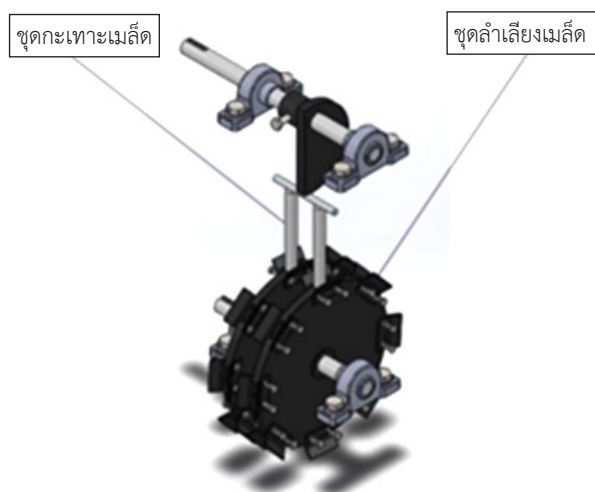
การออกแบบเครื่องกะเทาะเมล็ดกระบกต้นแบบนั้นนอกจากจะใช้ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของเมล็ดกระบกแล้ว ยังได้ประยุกต์ใช้ความรู้และหลักการออกแบบเครื่องจักรกลเกษตร [8] รวมทั้งใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบและเขียนแบบ ซึ่งส่วนประกอบหลักคือ โครงสร้างเครื่องกะเทาะเมล็ดกระบก ชุดลำเลียงเมล็ด ชุดกะเทาะเมล็ด และระบบส่งกำลัง ใช้มอเตอร์ไฟฟ้า ขนาด 1 แรงม้า เป็นต้นกำลัง โดยแต่ละส่วนประกอบมีรายละเอียดในการออกแบบดังนี้ โครงสร้างของเครื่องใช้สำหรับติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ ของเครื่องต้นแบบทำจาก เหล็กฉากขนาด 40x40x4 มิลลิเมตร ทำการเชื่อม

ประกอบกันเป็นโครงดังรูปที่ 3 โครงเครื่องมีขนาด ความกว้าง ความยาว และความสูง เท่ากับ 500 x 600 x 900 มิลลิเมตร



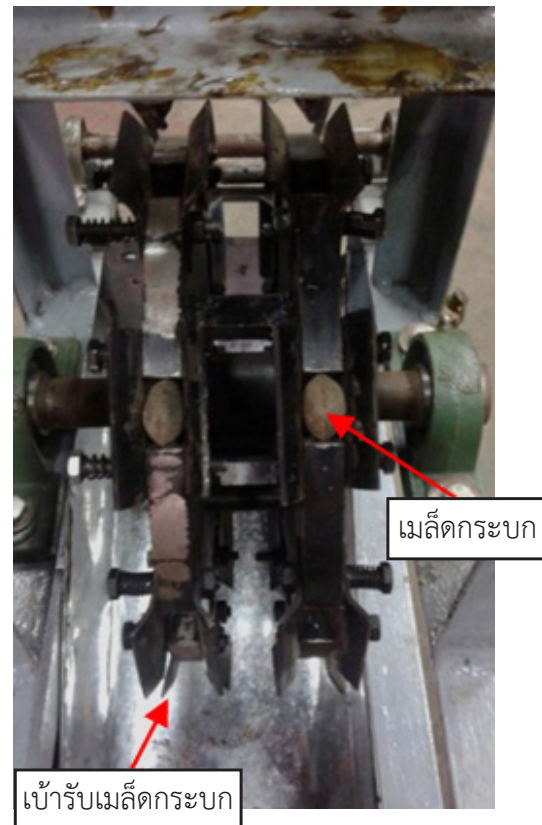
รูปที่ 3 โครงสร้างเครื่องกะเทาะกระบอก

ชุดหัวเจาะเม็ล็ดกระบอกทำหน้าที่ในการ กะเทาะเม็ล็ดที่ถูกลำเลียงมายังชุดกะเทาะ ซึ่งมีลักษณะ การทำงาน คือ เคลื่อนที่ขึ้นลงในบูชที่เป็นตัวประกอบ ให้ตรงกับเบ้า และลูกเบี้ยวจะตอยึดเข้ากับเพลลาซึ่งมี เฟืองโซ่ 21 ฟัน เป็นตัวขับ โดยหัวเจาะจะมีจังหวะ เคลื่อนที่ขึ้น-ลง ตามการเคลื่อนที่ของลูกเบี้ยว มี ส่วนประกอบที่สำคัญได้แก่ 1. ก้านหัวเจาะ ทำจาก เหล็กเพลลา มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 17 มิลลิเมตร ยาว 140 มิลลิเมตร 2. ลูกเบี้ยว 3. เฟืองโซ่ และ 4. เพลลาขับลูกเบี้ยว (รูปที่ 4)



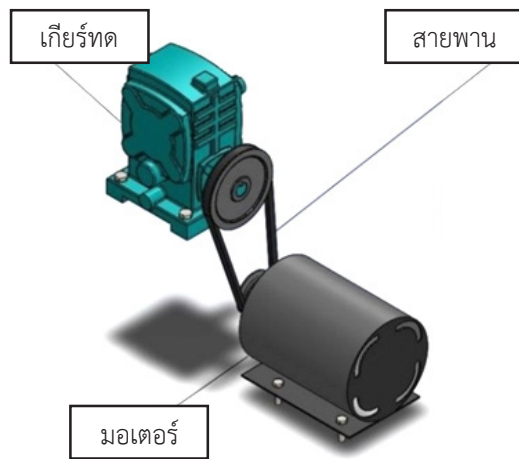
รูปที่ 4 กลไกชุดกะเทาะเม็ล็ดกระบอก

ชุดลำเลียงเม็ล็ดกระบอกจะทำหน้าที่ลำเลียง เม็ล็ดกระบอกจากการป้อนที่ใส่ลงเบ้าให้มายังตำแหน่ง ตรงกับหัวเจาะและลำเลียงเม็ล็ดกระบอกที่กะเทาะแล้ว ให้ไปตกยังถาดรองเม็ล็ด โดยจะทำงานเป็นจังหวะ ซึ่งกำหนดจังหวะโดยกลไกเจนิวา ชุดลำเลียงเม็ล็ด กระบอกประกอบด้วย เบ้าสำหรับรองรับเม็ล็ดกระบอก เฟืองโซ่ และกลไกเจนิวา (รูปที่ 5)



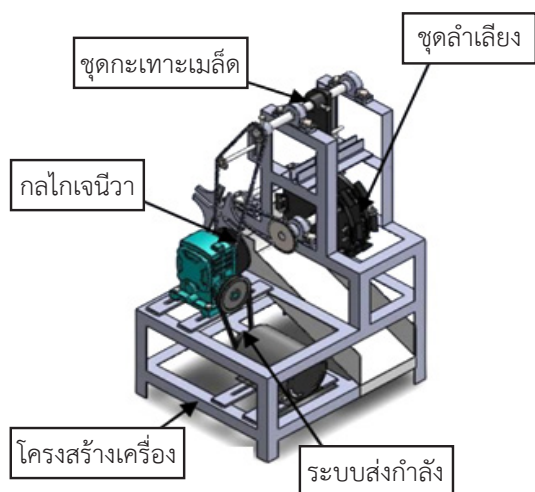
รูปที่ 5 ชุดลำเลียงเม็ล็ดกระบอก

ระบบส่งกำลังของเครื่องกะเทาะเม็ล็ดกระบอก จะใช้มอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า เป็นต้นกำลังและมีชุด เกียร์ทด 1:30 ในการทดรอบความเร็ว และทำงาน สัมพันธ์กับตัวชุดกะเทาะเม็ล็ด (รูปที่ 6)

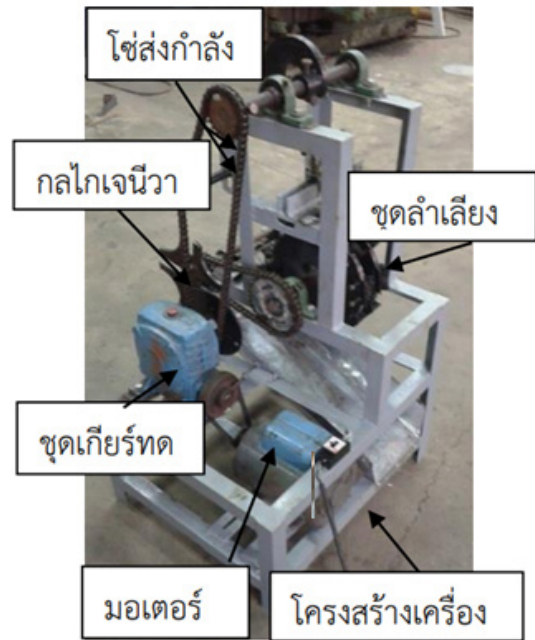


รูปที่ 6 ระบบส่งกำลังของเครื่องกะเทาะเมล็ดกระบะก

หลักการทำงานของเครื่องกะเทาะเมล็ดกระบะก ที่สร้างขึ้นทำงานโดยอาศัยมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า เป็นต้นกำลัง ส่งถ่ายกำลังไปยังไปยังชุดเกียร์ทด ชุดป้อน และชุดกะเทาะเมล็ดกระบะกตามลำดับ ผู้ควบคุมเครื่อง ทำการป้อนเมล็ดกระบะกที่ชุดป้อนเมล็ดกระบะก เมื่อเครื่องเริ่มทำงาน ทำให้ชุดกะเทาะเคลื่อนที่ลงมากด เมล็ดกระบะกที่ตำแหน่งจุดกึ่งกลางตามแนวตั้งของ เมล็ดกระบะก ทำให้เปลือกเมล็ดกระบะกแยกออกจากกัน รูลานรองเมล็ดก็จะหมุนให้เมล็ดกระบะกหลุดออกไป ยังถาดรองรับเมล็ด แท่งเหล็กที่เป็นชุดกะเทาะก็จะ เคลื่อนที่ขึ้นเพื่อทำการกะเทาะเมล็ดกระบะกเมล็ดถัดไป โดยมีกลไกชุดเจนิวา เป็นกลไกในการป้อนเมล็ดเข้าสู่ ชุดกะเทาะเมล็ดถัดไป รูปที่ 7 แสดงเครื่องต้นแบบ เครื่องกะเทาะเมล็ดกระบะก



1) แบบเครื่องกะเทาะเมล็ดกระบะก ด้วยโปรแกรมด้าน CAD

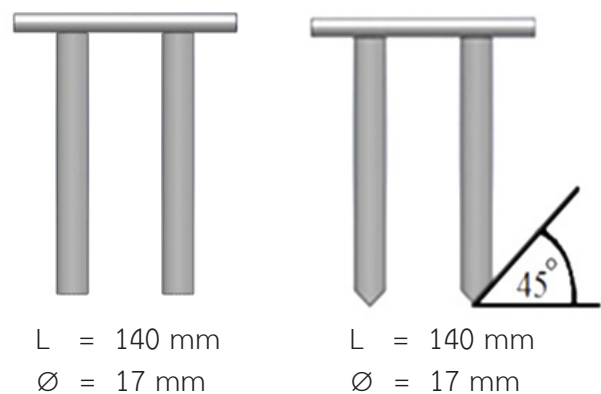


2) เครื่องต้นแบบเครื่องกะเทาะเมล็ดกระบะก

รูปที่ 7 แบบและเครื่องต้นแบบเครื่องกะเทาะ เมล็ดกระบะก

2.3 การทดสอบและประเมินสมรรถนะการ ทำงาน

ศึกษาชนิดของหัวกะเทาะ 2 แบบ ได้แก่ ชนิดที่ 1 หัวเจาะแบบเรียบ และชนิดที่ 2 หัวเจาะ แบบแหลม (รูปที่ 8) ผลการศึกษาชนิดของหัวเจาะที่ เหมาะสมพบว่าหัวเจาะที่ดีที่สุดจากการทดสอบพบว่า หัวเจาะชนิดที่ 1 แบบเรียบ ให้ความสามารถในการ ทำงาน และเปอร์เซ็นต์การกะเทาะเมล็ด ได้สูงกว่า หัวเจาะชนิดที่ 2 แบบแหลม



1) หัวเจาะแบบเรียบ 2) หัวเจาะแบบแหลม

รูปที่ 8 หัวเจาะเมล็ดกระบะก

โดยผลการทดสอบพบว่า หัวเจาะชนิดหัวเรียบ มีความสามารถในการกะเทาะเมล็ดในหน่วยกิโกรัมต่อชั่วโมงมากกว่าหัวเจาะแบบแหลม ร้อยละ 17 ความเสียหายของเมล็ดกระบะบของหัวเจาะแบบเรียบน้อยกว่าหัวเจาะแบบแหลมร้อยละ 32 เนื่องจากหัวเจาะแบบแหลม เมื่อเจาะลงไปจะทำให้หัวเจาะไม่ตรงเมล็ด การกะเทาะเมล็ดจึงผิดตำแหน่งทำให้ส่วนที่เป็นเปลือกของเมล็ดกระบะบไม่ถูกผ่าแยกออกจากกัน และทำให้เมล็ดในของเมล็ดกระบะบเสียหาย ในขณะที่หัวเจาะแบบหัวเรียบ จะมีความกว้างมาก มีพื้นที่ในการสัมผัสกับเปลือกเมล็ดกระบะบมากกว่าหัวเจาะแบบแหลม ทำให้ตำแหน่งการเจาะของหัวเจาะแบบเรียบมีความถูกต้องมากกว่า และหัวเจาะแบบหัวเรียบมีกรรมวิธีการผลิตที่ง่ายและสะดวกกว่าหัวเจาะแบบแหลม ดังนั้นจึงเลือกชนิดของหัวเจาะแบบหัวเรียบในการทดสอบสมรรถนะและประสิทธิภาพของเครื่องกะเทาะเมล็ดกระบะบ ปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ ความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ 800, 1,000 และ 1,200 รอบต่อนาที ทำการทดสอบ 3 ซ้ำ อัตราการป้อนเมล็ดกระบะบที่ทดสอบ ได้แก่ 24, 30 และ 38 เมล็ดต่อนาที ตามลำดับ โดยพิจารณาจากจำนวนเมล็ดที่ชุดกะเทาะสามารถกะเทาะได้ต่อนาที โดยประเมินจากค่าสัมประสิทธิ์การศึกษาดังนี้

ก) ความสามารถในการทำงานของเครื่องกะเทาะเมล็ดกระบะบ (กิโกรัมต่อชั่วโมง) คำนวณได้จากสมการที่ 1

$$C_a = \frac{W}{t} \quad (1)$$

C_a = ความสามารถในการกะเทาะของเครื่องกะเทาะเมล็ดกระบะบ (กิโกรัมต่อชั่วโมง)

W = น้ำหนักของเมล็ดกระบะบที่กะเทาะได้ทั้งหมด (กิโกรัม)

T = เวลาที่ใช้ในการทำงาน (ชั่วโมง)

ข) เปอร์เซ็นต์การกะเทาะเมล็ดกระบะบ คำนวณได้จากสมการที่ 2

$$S_t = \frac{G}{W} \times 100 \quad (2)$$

S_t = เปอร์เซ็นต์การกะเทาะเมล็ดกระบะบ (เปอร์เซ็นต์)

G = น้ำหนักของเมล็ดกระบะบที่กะเทาะได้โดยไม่เสียหาย (กิโกรัม)

W = น้ำหนักของเมล็ดกระบะบที่กะเทาะได้ทั้งหมด (กิโกรัม)

ค) เปอร์เซ็นต์เมล็ดกระบะบที่เสียหาย คำนวณได้จากสมการที่ 3

$$D_g = \frac{F}{W} \quad (3)$$

D_g = เปอร์เซ็นต์เมล็ดกระบะบที่เสียหาย (เปอร์เซ็นต์)

F = น้ำหนักของเมล็ดกระบะบที่ไม่สามารถกะเทาะได้ (กิโกรัม)

W = น้ำหนักของเมล็ดกระบะบที่กะเทาะได้ทั้งหมด (กิโกรัม)

ง) อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าของเครื่องกะเทาะเมล็ดกระบะบ (กิโวลต์-ชั่วโมง)

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

W_a = อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า (กิโวลต์-ชั่วโมง)

I = กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

V = แรงเคลื่อนไฟฟ้า (โวลต์)

t = เวลา (ชั่วโมง)

2.4 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์

2.4.1 การวิเคราะห์และประเมินค่าใช้จ่ายโดยเฉลี่ย

วิธีการประเมินค่าใช้จ่ายโดยรวม เกี่ยวข้องกับต้นทุนในการใช้งานเครื่องโดยพิจารณาจาก เกษตรกรซื้อเครื่องกะเทาะเมล็ดกระบะบไปกะเทาะแทนวิธีการใช้แรงงานคน ซึ่งค่าใช้จ่ายโดยรวมจะประกอบด้วย

ต้นทุนคงที่ (Fixed cost) และต้นทุนผันแปร (Variable cost) โดยต้นทุนคงที่ได้แก่ ค่าเสื่อมราคาของเครื่อง (คิดค่าเสื่อมราคาโดยวิธีเส้นตรงเมื่อประมาณอายุการใช้งานของเครื่องกะเทาะเมล็ดกระบกเท่ากับ 5 ปี) และค่าเสียโอกาสของเงินทุน (คิดอัตราดอกเบี้ย 10 เปอร์เซ็นต์) ซึ่งค่าใช้จ่ายที่เป็นต้นทุนคงที่จะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณของการกะเทาะเมล็ดกระบก อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์จะไม่คิดต้นทุนคงที่เกี่ยวกับค่าประกันภัย ค่าภาษี ค่าโรงเรือน และค่าจ้างขนย้ายเครื่องไปทำงานตามสถานที่ต่างๆ เป็นต้น สำหรับต้นทุนผันแปรซึ่งเป็นต้นทุนที่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณของการกะเทาะเมล็ดกระบก ได้แก่ ค่าจ้างแรงงานคนเพื่อทำงานร่วมกับเครื่อง ค่าไฟฟ้า ค่าบำรุงรักษา และค่าซ่อมแซม เป็นต้น [9]

2.4.2 การวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุน (Pay-back period)

เป็นการคำนวณหาระยะเวลาคืนทุนของเครื่องจักรว่ามีระยะเวลานานเท่าไรเมื่อลงทุนในเครื่องกะเทาะเมล็ดกระบกไปแล้ว จะได้รับผลตอบแทนกลับคืนมาในจำนวนเงินเท่ากับที่ลงทุนไปแล้วภายในระยะกี่ปี คำนวณได้จากสมการที่ 5 [9]

$$PBP = \left(\frac{P}{R} \right) \quad (5)$$

PBP = ระยะเวลาในการคืนทุน (ปี)
 P = ราคาเครื่องจักร (บาท)
 R = กำไรสุทธิต่อปี (บาทต่อปี)

2.4.3 การคำนวณหาจุดคุ้มทุน (Break-even point)

เป็นการคำนวณหาเวลาที่ใช้ในการทำงานของเครื่องต่อปีโดยคิดเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการกะเทาะเมล็ดกระบก ระหว่างแรงงานคนกับเครื่องต้นแบบโดยพิจารณาจากต้นทุนในการทำงานโดยใช้แรงงานคนเท่ากับต้นทุนในการทำงานโดยใช้เครื่องกะเทาะเมล็ดกระบก ค่าใช้จ่ายคงที่ ได้แก่ ค่าเสื่อมราคา และค่าเสียโอกาสในการลงทุน ค่าใช้จ่ายผันแปร ได้แก่ ค่าจ้าง

แรงงานในการควบคุมเครื่อง ค่าไฟฟ้า และค่าซ่อมแซม บำรุงรักษาเครื่อง จุดคุ้มทุนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 6 [9]

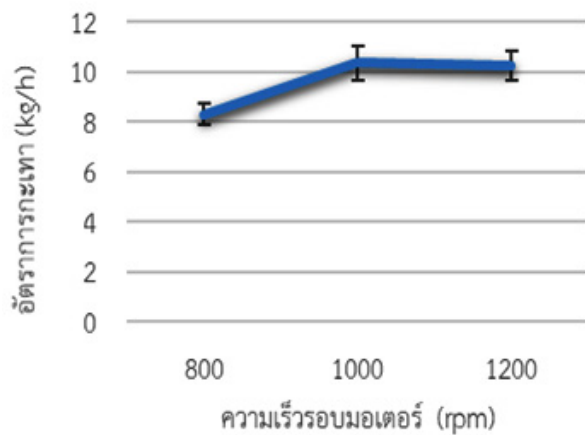
$$BEP = \left(\frac{F_c}{B - VC} \right) \quad (6)$$

BEP = จุดคุ้มทุน (ชั่วโมงต่อปี)
 F_c = ค่าใช้จ่ายคงที่ (บาท)
 B = อัตราการรับจ้าง (บาทต่อชั่วโมง)
 VC = ค่าใช้จ่ายผันแปร (บาทต่อชั่วโมง)

3 ผลและวิจารณ์

3.1 ความสามารถในการกะเทาะเมล็ดกระบกทั้งเปลือก

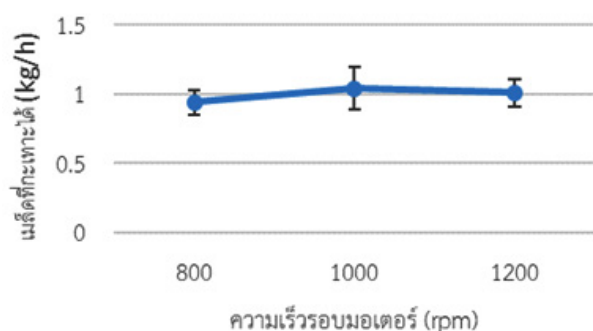
ความสามารถในการกะเทาะเมล็ดกระบกทั้งเปลือกพิจารณาในหน่วยกิโลกรัมต่อชั่วโมง โดยทำการทดสอบที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 800, 1,000 และ 1,200 รอบต่อนาที ตามลำดับ ผลการทดสอบพบว่า ที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 800 รอบต่อนาที มีอัตราการป้อนเมล็ดกระบกช้าเกินไปทำให้ผู้ปฏิบัติงานต้องเสียเวลาในการรอเพื่อป้อนเมล็ดกระบกเข้าสู่ชุดลำเลียง ดังนั้นจึงทำให้ใช้เวลาในการกะเทาะเมล็ดนาน ความสามารถในการกะเทาะเมล็ดกระบกจึงมีค่าต่ำ ส่วนที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 1,200 รอบต่อนาที มีอัตราการป้อนที่เร็วเมื่อมีผู้ปฏิบัติเพียง 1 คนจะทำให้การป้อนเมล็ดกระบกลงในเข้าหรือชุดป้อนเมล็ด ไม่ทันกับจังหวะการทำงาน จึงทำให้ความสามารถในการทำงานกะเทาะเมล็ดกระบกต่ำ ส่วนที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 1,000 รอบต่อนาที มีอัตราการป้อนที่เหมาะสมสามารถป้อนเมล็ดกระบกได้ทันและเหมาะสมกับความเร็วในการเคลื่อนที่ของชุดกะเทาะเมล็ด จึงทำให้มีความสามารถในการกะเทาะเมล็ดกระบก ที่สูงกว่าความเร็วรอบมอเตอร์ 8,00 และ 1,200 รอบต่อนาที ที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 1,000 รอบต่อนาที ความสามารถในการกะเทาะเมล็ดกระบกทั้งเปลือก 10.4 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ในขณะที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 1,200 รอบต่อนาที มีความสามารถในการกะเทาะเมล็ดกระบกเท่ากับ 10.2 กิโลกรัมต่อชั่วโมง (รูปที่ 9)



รูปที่ 9 อัตราการกะเทาะที่ความเร็วรอบมอเตอร์แตกต่างกัน

3.2 ความสามารถในการกะเทาะเมล็ดกระบะก

ความสามารถในการกะเทาะเมล็ดกระบะกเมื่อพิจารณาจากเนื้อในของเมล็ดกระบะกที่ได้จากการทดสอบ พบว่าเนื้อในของเมล็ดกระบะกที่กะเทาะได้ของเครื่องมีค่าเท่ากับ 1.04 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ที่ความเร็วรอบของมอเตอร์ 1,000 รอบต่อนาที ในขณะที่ใช้แรงงานคนในการกะเทาะเมล็ดกระบะกจะสามารถกะเทาะได้ 0.6 กิโลกรัมต่อชั่วโมง โดยการใช้เครื่องกะเทาะเมล็ดกระบะกจะสามารถทำงานได้เร็วกว่าคนประมาณ 1.7 เท่า (รูปที่ 10)



รูปที่ 10 อัตราการกะเทาะเมล็ดไม่รวมเปลือกที่ความเร็วรอบมอเตอร์แตกต่างกัน

3.3 เปอร์เซ็นต์ความเสียหาย

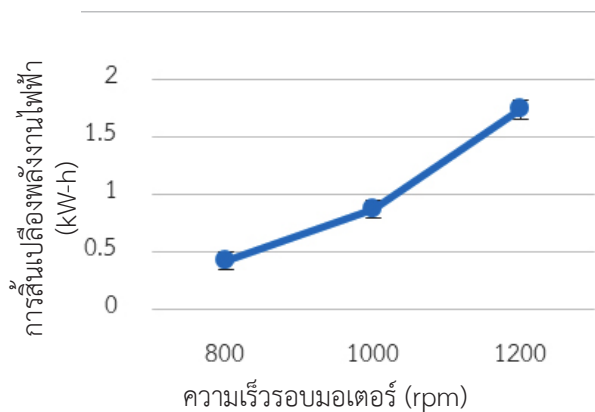
ความสามารถในการทำงานของเครื่องกะเทาะเมล็ดกระบะกมีค่าเท่ากับ 10.4 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ในขณะที่ใช้แรงงานคนจะมีความสามารถในการทำงาน 5 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เปอร์เซ็นต์เมล็ดที่เสียหายด้วยเครื่องมีค่าเท่ากับ 8 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ใช้แรงงานคนจะมีค่าเท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เป็นเพราะการใช้แรงงานคนจะกะเทาะด้วยมีดทำให้เวลากะเทาะเสร็จเมล็ดเกิดความเสียหายมากกว่าเครื่อง ส่วนเครื่องจะเกิดเปอร์เซ็นต์เมล็ดที่เสียหายน้อยเพราะออกแบบหัวเจาะแบบหัวเรียบทำให้เมื่อกะเทาะในระยະที่เหมาะสมจะทำให้เมล็ดเสียหายน้อย รูปที่ 11 แสดงเมล็ดเนื้อในกระบะกที่กะเทาะได้จากการทดสอบ



รูปที่ 11 เมล็ดกระบะกที่กะเทาะได้

3.4 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า

เครื่องกะเทาะเมล็ดกระบะกใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นต้นกำลังในการทำงานทำให้มีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าเกิดขึ้นจึงจำเป็นต้องหาอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าในแต่ละความเร็วรอบเพื่อเปรียบเทียบการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า ผลของการวิเคราะห์ค่าการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 12 โดยที่ความเร็วรอบมอเตอร์ 1,000 รอบต่อนาที อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 0.87 กิโลวัตต์-ชั่วโมง



รูปที่ 12 การสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าที่ความเร็วรอบมอเตอร์แตกต่างกัน

3.5 ผลการวิเคราะห์และประเมินผลเชิงเศรษฐศาสตร์

จากผลการทดสอบเครื่องกะเทาะเมล็ดกระบก ที่ได้ออกแบบและพัฒนาขึ้นโดยใช้แรงงานคนปฏิบัติงาน 1 คน สามารถวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการทำงานของเครื่องได้โดยมีรายละเอียดดังนี้ ค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่อง 13,000 บาท กำหนดให้เครื่องทำงาน 8 ชั่วโมงต่อวัน ทำงานปีละ 90 วัน หรือคิดเป็นชั่วโมงการทำงานของเครื่องต่อปีเท่ากับ 720 ชั่วโมงต่อปี ค่าเสื่อมราคาของเครื่องจักร พิจารณาอายุการใช้งานที่ 5 ปี เท่ากับ 2,340 บาทต่อปี ค่าเสียโอกาสในการลงทุน ที่อัตราดอกเบี้ย 10 เปอร์เซ็นต์ เท่ากับ 715 บาทต่อปี รวมเป็นต้นทุนคงที่เท่ากับ 3,055 บาทต่อปี ค่าจ้างแรงงานในการควบคุมเครื่อง 300 บาทต่อวันต่อคน หรือคิดเป็น 27,000 บาทต่อปี ค่าบำรุงรักษาเครื่องเฉลี่ย 900 บาทต่อปี กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยใช้งาน 0.87 กิโลวัตต์-ชั่วโมง หรือคิดเป็น 2,505 บาทต่อปี ค่าใช้จ่ายผันแปรรวมเท่ากับ 30,405 บาทต่อปี หรือคิดเป็น 42.2 บาทต่อชั่วโมง พิจารณาความสามารถในการกะเทาะเมล็ดกระบกของเครื่องที่ 10.4 กิโลกรัมต่อชั่วโมง สามารถคิดค่าใช้จ่ายในการทำงานได้เท่ากับ 4.5 บาทต่อกิโลกรัม แต่เมื่อเกษตรกรนำเมล็ดกระบกที่กะเทาะแล้วไปจำหน่าย จะได้รับราคากิโลกรัมละ 100 บาท ที่อัตราการรับจ้างกะเทาะเมล็ดกระบกโดยใช้แรงงานคนในการกะเทาะเท่ากับ 50 บาทต่อชั่วโมง จะมีจุดคุ้มทุนในการทำงานของเครื่องเท่ากับ 393

ชั่วโมงต่อปี เมื่อพิจารณาชั่วโมงการทำงานของเครื่องกะเทาะเมล็ดกระบกที่ 720 ชั่วโมงต่อปี กำไรสุทธิเฉลี่ยต่อปีจะมีค่าเท่ากับ 43,400 บาทต่อปี ดังนั้นระยะเวลาในการคืนทุนของเครื่องกะเทาะเมล็ดกระบกจะมีค่าเท่ากับ 0.3 ปี

4 สรุป

ขั้นตอนการกะเทาะเมล็ดกระบก โดยทั่วไปเกษตรกรใช้มีดผ่าหรือค้อนทุบ ซึ่งต้องกระทำเป็นจำนวนหลายๆ ครั้ง เนื่องจากส่วนที่เป็นกะลาหรือเปลือกหุ้มเมล็ดจะมีลักษณะหนาและแข็ง ก่อให้เกิดความไม่สะดวก และเสียเวลาในการกะเทาะอีกทั้งก่อให้เกิดอันตรายต่อเกษตรกรด้วย เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงได้ดำเนินการออกแบบและสร้างเครื่องกะเทาะเมล็ดกระบกแบบต่อเนื่อง โดยเครื่องกะเทาะเมล็ดกระบกต้นแบบ ที่ได้ดำเนินการออกแบบและสร้างประกอบด้วยโครงสร้าง 4 ส่วนหลักได้แก่ ชุดลำเลียง ชุดกะเทาะ และระบบส่งกำลัง สามารถทำงานได้ตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ ทำงานได้รวดเร็วและต่อเนื่องช่วยประหยัดเวลาและแรงงาน ในการกะเทาะเมล็ดกระบกรวมทั้งสามารถพัฒนาให้ใช้ทดแทนแรงงานคนได้ต่อไปในอนาคต โดยมีค่าซื้อผลในการศึกษา ได้แก่ ความสามารถในการทำงาน เปอร์เซ็นต์เมล็ดที่เสียหาย อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า ซึ่งผลการทดสอบ ที่ความสามารถในการกะเทาะทั้งเปลือก 10.4 กิโลกรัมต่อชั่วโมง 1 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า 0.87 กิโลวัตต์-ชั่วโมง เมล็ดเนื้อในที่กะเทาะได้ 1.04 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เปอร์เซ็นต์เมล็ดที่เสียหายเท่ากับ 8 และวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการใช้เครื่องกะเทาะเมล็ดกระบก พบว่ามีค่าใช้จ่าย 4.5 บาทต่อกิโลกรัม เมื่อใช้เครื่องทำงาน 720 ชั่วโมงต่อปี จะมีระยะเวลาคืนทุน 0.3 ปี หรือ 3.6 เดือน การใช้เครื่องกะเทาะสามารถทำงานได้เร็วกว่าการใช้แรงงานคนประมาณ 1.7 เท่า ซึ่งจะช่วยลดค่าใช้จ่ายของเกษตรกร ทำให้เกษตรกรมีรายได้สูงขึ้น สามารถแข่งขันกับประเทศในกลุ่มประชาคมเศรษฐกิจอาเซียนได้

5 กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากงบประมาณรายจ่ายประจำปี 2560 ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี โดยคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่สนับสนุนงบประมาณ สถานที่และอุปกรณ์ในการทดสอบต่าง ๆ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Barking deer's mango nut. [Internet]. 2018. Jun. Available from: <https://medthai.com> (in Thai)
- [2] Wikipedia.free encyclopedia. [Internet]. 2018. Jun. Available from:<https://th.wikipedia.org/wiki> (in Thai)
- [3] Benefit and properties of barking deer's mango nut [Internet]. 2018. Jun. Available from: <http://www.vichakaset.com>. (in Thai)
- [4] Natural herb database, Faculty of Pharmaceutical Science, Ubon Ratchathani University [Internet]. 2018. Jun. Available from: <http://www.phargarden.com> (in Thai)
- [5] Sudajan S, Chusilp S. Development of a Irvingia Malayana Nut Sheller. KRU Research Journal 2004, 9(1) 61-74. (In Thai)
- [6] Kalsirisilp R, Nathong P, Khamngam W, Design and Development of Roselle Seed peeling Machine. Journal of Engineering, RMUTT. 2008 (12): 77-83. (In Thai)
- [7] Buaklee A, Langkapin J, Kalsirisilp, R, Pansakorn. Design and Fabrication of a Lotus Leaf Cutting Machine.Paper presented at the 18th TSAE National Conference and the 10th TSAE International Conference (TSAE 2017): 165-168. (In Thai)
- [8] Krutz, G, Thompsan, L and Claar, P. 1984. Design of Agricultural Machinery. John Wiley and Sons. New York, USA, 472p.
- [9] Hunt, D. 2001. Farm Power and Machinery Management. (10th edition) Ames, Iowa, USA. Iowa State University Press, 360 p.

ผลิตภัณฑ์แผ่นฝ้าเพดานผสมขุยมะพร้าวที่มีสมบัติ ความเป็นฉนวนป้องกันความร้อน Coconut Coir Ceiling Board Product with Thermal Insulation Property

ปราโมทย์ วีรานุกุล^{1*} กิตติพงษ์ สุวีโร² และอิทธิ วีรานุกุล³
Pramot Weeranukul^{1*} Kittipong Suweero² Itthi Weeranukul³
pramot.w@rmutp.ac.th^{1*}, kittipong.s@en.rmutt.ac.th², Itthi.w@rmutsb.ac.th³

^{1*} สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

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

² ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

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

³ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

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

Received: March 22, 2018
Revised: May 21, 2018
Accepted: August 20, 2018

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแผ่นฝ้าเพดานผสมขุยมะพร้าว โดยออกแบบอัตราส่วนยิปซัมปลาสเตอร์: ขุยมะพร้าว: โซเดียมซิลิเกต: น้ำประปา จำนวน 5 อัตราส่วน ได้แก่ 1: 0: 1: 0.03, 1: 100: 1: 0.03, 1: 150: 1: 0.03, 1: 200: 1: 0.03, 1: 250: 1: 0.03 และ 1: 300: 1: 0.03 โดยน้ำหนัก ขึ้นรูปแผ่นฝ้าเพดานด้วยวิธีหล่อในอุณหภูมิปกติ (30 – 35 องศาเซลเซียส) ทำการทดสอบสมบัติตามมาตรฐาน มอก.219-2552 เรื่องแผ่นยิปซัม ประกอบด้วย การทดสอบแรงกดแตก แรงต้านทานการดึงตะปู การแฉกตัว การดูดซึมน้ำ ความหนาแน่น และสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ผลการทดสอบ พบว่า อัตราส่วน 1: 150: 1: 0.03 โดยน้ำหนัก เป็นอัตราส่วนแผ่นฝ้าเพดานผสมขุยมะพร้าวเหมาะสมที่สุด แผ่นซีเมนต์บอร์ดที่พัฒนาขึ้นนี้ สามารถลดปริมาณขยะลามะพร้าวเหลือทิ้ง และได้ผลิตภัณฑ์แผ่นฝ้าเพดานที่มีสมบัติการเป็นฉนวนป้องกันความร้อนที่ดี

คำสำคัญ: แผ่นฝ้าเพดาน; แผ่นยิปซัม, ขุยมะพร้าว; ฉนวนป้องกันความร้อน; ชุมชนท้องถิ่น

Abstract

This research aims to develop the ceiling board mixed with coconut coir. The 5 ratios of gypsum plaster: coconut coir: sodium silicate: tap water are equal to 1: 0: 1: 0.03, 1: 100: 1: 0.03, 1: 150: 1: 0.03, 1: 200: 1: 0.03, 1: 250: 1: 0.03 and 1: 300: 1: 0.03 by weight. The ceiling boards were produced by casting in normal temperature (30 – 35 degree of Celsius). The properties testing of ceiling board mixed with coconut coir followed the TIS 219-2009 standard (gypsum plasterboard) including: breaking load, nail pull resistance, deflection, water absorption, density, and thermal conductivity coefficient. From the results, 1: 150: 1: 0.03 is the most suitable ratio of ceiling board mixed with coconut coir. This developed ceiling boards can reduce the quantity of coconut coir waste and get the good thermal insulation ceiling board products.

Keywords: ceiling board; gypsum board; coconut coir; thermal insulation; local community

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

มะพร้าว เป็นพืชนิยมปลูกกันมากในภาคใต้ ภาคกลาง และภาคตะวันออก พื้นที่ปลูกรวมทั้งประเทศ 2,163,439 ไร่ พื้นที่ให้ผลผลิต 1,917,287 ไร่ ผลผลิต 1,947,963.59 ตัน ผลผลิตเฉลี่ย 1,016 กิโลกรัมต่อไร่ จากปริมาณผลผลิตของมะพร้าวข้างต้น ทำให้มีปริมาณเปลือกมะพร้าวเหลือทิ้งในปริมาณมากด้วย [1] ได้แก่ เส้นใยและขุยมะพร้าวที่ได้จากการแกะด้านในของเปลือกมะพร้าว วัสดุทั้ง 2 ชนิด เป็นวัสดุธรรมชาติที่ไม่มีสารพิษ เส้นใยมะพร้าว เป็นวัสดุที่มีลักษณะเป็นเส้นใยยาวๆ สามารถต้านทานปฏิกิริยาจากจุลินทรีย์ ทนการกัดกร่อนจากน้ำเค็มได้ดี [2] นิยมนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมขนาดเล็ก เช่น เชือกและที่นอน เป็นต้น และขุยมะพร้าว เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากมะพร้าวที่มีลักษณะเป็นขุยๆ ละเอียดประมาณเม็ดทราย แห้งสนิท มีสมบัติเบา ทนแดด และทนฝน ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์เมื่อเทียบกับเส้นใยมะพร้าว ทำให้ขุยมะพร้าวเกือบทั้งหมดถูกทิ้งเป็นขยะหรือถูกเผาก่อให้เกิดปัญหาต่อสภาพแวดล้อม จากเหตุผลดังกล่าว จึงมีแนวคิดที่จะนำขุยมะพร้าวมาผสมลงในแผ่น ฝ้า เพดานเพื่อพัฒนาคุณสมบัติด้านต่างๆ ได้แก่ ความหนาแน่น ความแข็งแรง และความเป็นฉนวนป้องกันความร้อนของแผ่นฝ้าเพดาน โดยแผ่นฝ้าเพดาน (ceiling board) เป็นวัสดุตกแต่งอาคารสำหรับปกปิดส่วนที่ไม่ต้องการให้เห็น เช่น โครงหลังคา คาน โครงสร้าง และท่อน้ำ เป็นต้น ประกอบด้วย ปูนยิปซัม (gypsum plaster) เป็นไส้กลางระหว่างกระดาษเหนียว ผิวเรียบ หรือวัสดุผิวเรียบทั้งสองด้าน โดยมีการผสมเส้นใยสังเคราะห์ หรือวัสดุเพิ่มคุณภาพอื่นๆ ที่นำเข้าจากต่างประเทศ ทำให้แผ่นฝ้าเพดานเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา ติดตั้งง่าย สามารถติดตั้งได้ทั้งชนิด

ฉาบเรียบ และชนิดทึบบาร์ [3] ทั้งนี้ ศูนย์วิจัยกสิกรไทย ได้ประเมินไว้ว่า กลุ่มผู้บริโภคและผู้รับเหมามีความต้องการวัสดุก่อสร้างที่มากขึ้นทุกปี ในปัจจุบันมีมูลค่าอยู่ที่ประมาณ 997,500 – 1,015,900 ล้านบาท และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นไม่ต่ำกว่าร้อยละ 5 ต่อปี [4] การผสมขุยมะพร้าวลงในแผ่นฝ้าเพดานนั้น นอกจากจะพัฒนาคุณสมบัติแล้ว ยังสามารถลดปริมาณการใช้ปูนยิปซัม และเส้นใยสังเคราะห์ที่มีต้นทุนสูงของแผ่นฝ้าเพดานลงได้ โดยวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์แผ่นฝ้าเพดานขุยมะพร้าวที่มีสมบัติความเป็นฉนวนป้องกันความร้อน ตามมาตรฐานของสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.) ซึ่งวิสาหกิจชุมชนสามารถลงทุนได้ มีผลตอบแทนที่ดี และช่วยสร้างงาน สร้างรายได้สู่เกษตรกรชาวสวนมะพร้าว ซึ่งเป็นชุมชนฐานรากของประเทศ

2. วัสดุและอุปกรณ์

วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ ปูนยิปซัมพลาสติก ขุยมะพร้าวที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 หรือ 4.72 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 1 โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) น้ำประปา เครื่องผสมคอนกรีต ตะแกรงร่อนวัสดุ เครื่องชั่งน้ำหนัก แบบหล่อขนาด $60 \times 60 \times 0.9$ เซนติเมตร แบบหล่อขนาด $30 \times 30 \times 0.9$ เซนติเมตร ชุดทดสอบหาค่าความหนาแน่น ความชื้น และการดูดซึมน้ำ เครื่องทดสอบแรงกด (Universal Testing Machine; UTM) เครื่องทดสอบสภาพนำความร้อน เครื่องตัดเส้นใย พร้อมตะแกรงบด ดังรูปที่ 2



รูปที่ 1 ขุยมะพร้าวที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4



รูปที่ 2 เครื่องตัดเส้นใย

3. การออกแบบอัตราส่วนผสม

ออกแบบอัตราส่วนผสมของแผ่นผ้าเพาะานผสมขุยมะพร้าว จำนวน 6 อัตราส่วน โดยทำการเพิ่มขุยมะพร้าวมากขึ้น จากอัตราส่วนปูนยิปซัมพลาสติกต่อขุยมะพร้าว เท่ากับ 1:0.100 ไปจนถึง 1:0.300 โดยน้ำหนัก ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนัก

อัตราส่วน	ปูนยิปซัมพลาสติก	ขุยมะพร้าว	น้ำประปา	สารเร่งการก่อตัว
C0	1	0	1	0.03
C100	1	0.100	1	0.03
C150	1	0.150	1	0.03
C200	1	0.200	1	0.03
C250	1	0.250	1	0.03
C300	1	0.300	1	0.03

4. การขึ้นรูปตัวอย่างแผ่นผ้าเพาะาน

เริ่มจากย่อยและคัดขนาดขุยมะพร้าวให้มีขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 4 หรือ 4.72 มิลลิเมตร และความยาว 1 นิ้ว หรือ 2.54 เซนติเมตร จากนั้นตวงปูนยิปซัมพลาสติก ขุยมะพร้าว สารโซเดียมซิลิเกต และน้ำประปา ตามอัตราส่วนที่ออกแบบ ทำการผสมสารโซเดียมซิลิเกตและน้ำประปาให้เข้ากัน แล้วจึงผสมปูนยิปซัมพลาสติก ขุยมะพร้าว และน้ำประปาผสมสารเร่งการก่อตัว เข้าด้วยกันอย่างสม่ำเสมอ ตามอัตราส่วนที่กำหนด ด้วยเครื่องผสมคอนกรีต เตรียมแบบหล่อให้สะอาด เทส่วนผสมทั้งหมดลงในแบบและปาดให้ผิวเรียบ ในอุณหภูมิปกติ (30–35 องศาเซลเซียส) ดังรูปที่ 3 จากนั้นบ่มแผ่นผ้าเพาะานขุยมะพร้าวในอากาศตามระยะเวลาที่กำหนด ดังรูปที่ 4



รูปที่ 3 การเทส่วนผสมผ้าเพดานลงในแบบหล่อ



รูปที่ 4 แผ่นผ้าเพดานขุยมะพร้าวที่บ่มในอากาศ

5. การทดสอบคุณสมบัติของตัวอย่างแผ่นผ้าเพดาน

ทดสอบแผ่นผ้าเพดานขุยมะพร้าวที่มีสมบัติความเป็นฉนวนป้องกันความร้อน ตามสมบัติเป็นฉนวนป้องกันความร้อนสำหรับชุมชน น้ำประปาผสมสารเร่งการก่อตัวเข้าด้วยกันอย่างสม่ำเสมอ ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.219-2552 เรื่องแผ่นยิปซัม [5] มาตรฐาน ASTM C 177 [6] และมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง ประกอบด้วย แรงกดแตก แรงต้านทานการดัดงอ (รูปที่ 5) การแ่นตัว การดูดซึมน้ำ ได้แก่ การดูดซึมน้ำ และอัตราการดูดซึมน้ำที่ผิว ความหนาแน่น และสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแผ่นผ้าเพดานขุยมะพร้าว ที่อายุการบ่ม 28 วัน โดยใช้ตัวอย่างทดสอบ จำนวน 5 ตัวอย่างต่ออัตราส่วนต่อการทดสอบ (กรณีการทดสอบที่ต้องตัดชิ้นทดสอบ

ให้ดำเนินการตัดบริเวณกึ่งกลาง ซ้ายบน ขวาบน ซ้ายล่าง และขวาล่างของแผ่นตัวอย่าง)



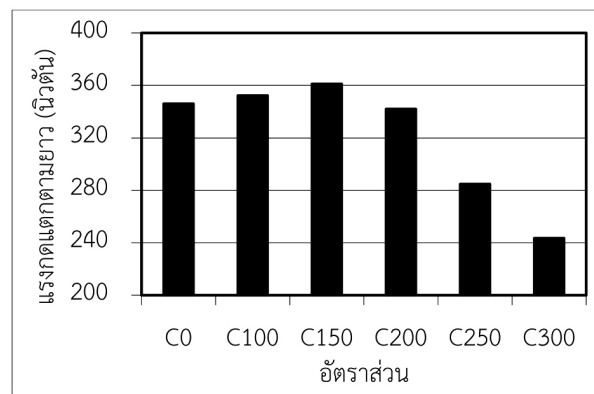
รูปที่ 5 การทดสอบแรงต้านทานการดัดงอของแผ่นผ้าเพดานขุยมะพร้าว

6. ผลการทดสอบ

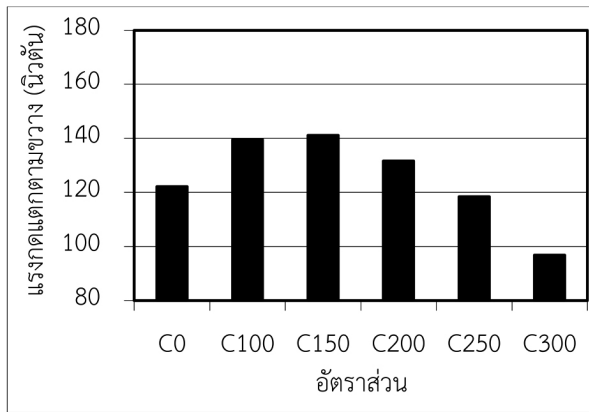
จากการทดสอบสมบัติทางกายภาพ และทางกลของผลิตภัณฑ์แผ่นผ้าเพดานผสมขุยมะพร้าว ที่มีท้องถิ่นตามมาตรฐาน มอก.219-2552 เรื่องแผ่นยิปซัม [5] และมาตรฐานอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง สามารถสรุปผลการทดสอบได้ ดังต่อไปนี้

6.1 แรงกดแตก

การทดสอบแรงกดแตกของแผ่นผ้าเพดานผสมขุยมะพร้าว ทั้ง 6 อัตราส่วน ในแนวตามยาวและตามขวางนั้น สามารถสรุปผลได้ ดังรูปที่ 6 และ 7



รูปที่ 6 แรงกดแตกตามยาวของแผ่นผ้าเพดานผสมขุยมะพร้าว ที่อายุการบ่ม 28 วัน

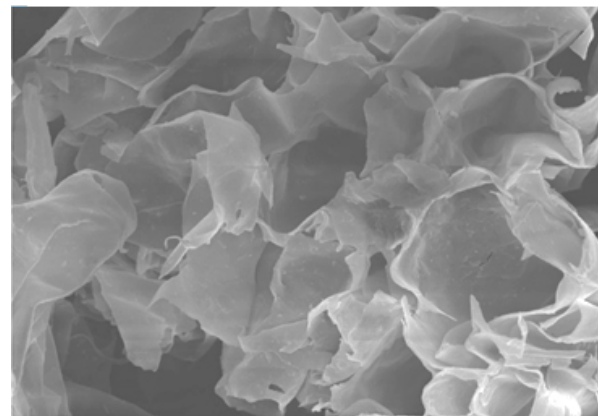


รูปที่ 7 แรงกดแตกตามขวางของแผ่นผ้าเพดานผสมขุยมะพร้าว ที่อายุการบ่ม 28 วัน

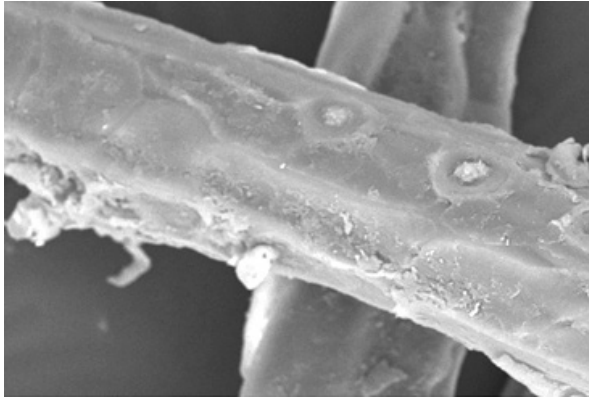
จากผลการทดสอบแรงกดแตกตามยาวและตามขวางในรูปที่ 6 และ 7 พบว่าปริมาณของขุยมะพร้าวที่เหมาะสมที่สุดสำหรับนำมาผสมลงในแผ่นผ้าเพดานเพื่อเพิ่มความต้านทานแรงกดแตก คือ อัตราส่วนปูนยิปซัมพลาสติกต่อขุยมะพร้าว เท่ากับ 1:0.150 หรืออัตราส่วน C150 รองลงมาคือ อัตราส่วน C100 อัตราส่วน C200 อัตราส่วน C0 อัตราส่วน C250 และอัตราส่วน C300 เป็นอัตราส่วนเหมาะสมน้อยที่สุดตามลำดับ ทั้งนี้ เป็นผลมาจากขุยมะพร้าวมีส่วนที่เป็นเส้นใยเซลลูโลสซึ่งมีความสามารถในการรับแรงดึงได้ดี ดังภาพขยายขุยมะพร้าวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยายต่างๆ ในรูปที่ 8 และ 9 ทำให้เมื่อผสมลงในยิปซัมพลาสติกแล้วจะสามารถช่วยพัฒนาคุณสมบัติด้านความต้านทานแรงดึง ซึ่งมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของแรงกดแตกทั้งตามยาวและตามขวางได้ อย่างไรก็ตาม การเพิ่มขุยมะพร้าวในปริมาณที่มากเกินไป จะทำให้ปริมาณปูนยิปซัมพลาสติกน้อยเกินไปกว่าจะเชื่อมประสานขุยมะพร้าวและส่วนผสมทั้งหมดให้เป็นแผ่นผ้าเพดานที่แข็งแรงได้ [7] เมื่อเทียบกับมาตรฐาน มอก.219-2552 เรื่องแผ่นยิปซัม [5]

6.2 แรงต้านทานการดึงตะปู

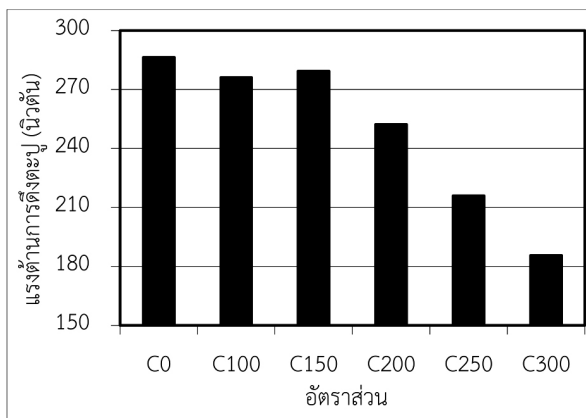
มาตรฐาน มอก.219-2552 เรื่องแผ่นยิปซัม [5] กำหนดให้แผ่นยิปซัมหรือแผ่นผ้าเพดาน ต้องรับแรงต้านทานการดึงตะปู ไม่ต่ำกว่า 270 นิวตัน (ความหนาแผ่นยิปซัม 9 มิลลิเมตร) ซึ่งจะช่วยให้แผ่นยิปซัมสามารถใช้งานได้หลากหลายและคงทน จากรูปที่ 10 พบว่า แผ่นผ้าเพดานผสมขุยมะพร้าว อัตราส่วน C0, C100 และ C150 ทั้ง 3 อัตราส่วน สามารถผ่านมาตรฐานที่กำหนด โดยแผ่นผ้าเพดานที่ไม่ผสมขุยมะพร้าวจะสามารถรับแรงดึงตะปูได้มากที่สุด รองลงมาคือ แผ่นผ้าเพดานผสมขุยมะพร้าวอัตราส่วน C150, C100, C200, C250 และ C300 เป็นอัตราส่วนที่รับแรงดึงตะปูได้น้อยที่สุด ทั้งนี้ เป็นผลมาจากขุยมะพร้าวเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูงและมีน้ำหนักเบา ทำให้เมื่อผสมลงในแผ่นผ้าเพดานผสมขุยมะพร้าวแล้ว จะทำให้เนื้อของแผ่นผ้าเพดานมีความหนาแน่นลดน้อยลง และมีแรงต้านทานการดึงตะปูที่ต่ำลง [8]



รูปที่ 8 ภาพขยายขุยมะพร้าวที่ส่องผ่านกล้อง SEM กำลังขยาย 500 เท่า



รูปที่ 9 ภาพขยายเส้นใยที่ปะปนอยู่ในขุยมะพร้าวที่ส่องผ่านกล้อง SEM กำลังขยาย 1,000 เท่า

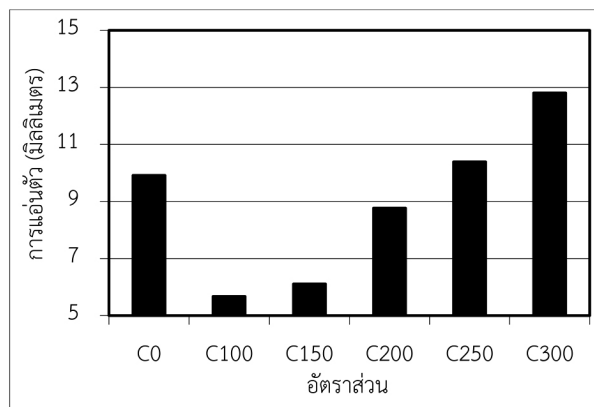


รูปที่ 10 แรงต้านทานการดึงตะปูของแผ่นผ้าเพดานผสมขุยมะพร้าว ที่อายุการบ่ม 28 วัน

6.3 การแ่นตัว

ผลการทดสอบการแ่นตัวของแผ่นผ้าเพดานทั้งที่ผสมและไม่ผสมขุยมะพร้าว ตามมาตรฐาน มอก. 219-2552 เรื่องแผ่นยิปซัม [5] ดังรูปที่ 11 พบว่าแผ่นผ้าเพดานที่ผสมขุยมะพร้าวในปริมาณน้อยหรือไม่มากจนเกินไป จะมีการแ่นตัวที่ต่ำกว่าแผ่นผ้าเพดานที่ไม่ผสมขุยมะพร้าว และแผ่นผ้าเพดานที่ผสมขุยมะพร้าวมากกว่าอัตราส่วน C200 ขึ้นไป ซึ่งเป็นผลมาจากความสามารถในการรับแรงดึงของขุยมะพร้าวที่ดี อย่างไรก็ตาม การผสมขุยมะพร้าวลงในแผ่นผ้า

เพดานที่มากเกินไป จะทำให้ความสามารถในการเชื่อมประสานของแผ่นผ้าเพดานลดลง และมีการแ่นตัวที่มากขึ้น เช่นเดียวกับผลการทดสอบแรงกดแตกและแรงต้านทานการดึงตะปูของแผ่นผ้าเพดานผสมขุยมะพร้าว [7] ทั้งนี้ ตามมาตรฐาน มอก.219-2552 เรื่องแผ่นยิปซัม [5] กำหนดให้การแ่นตัวของแผ่นผ้าเพดานผสมขุยมะพร้าว ความหนา 9 มิลลิเมตร ต้องมีการแ่นตัวไม่เกิน 10 มิลลิเมตร ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีเพียงแผ่นผ้าเพดานผสมขุยมะพร้าวอัตราส่วน C300 เท่านั้น ที่ไม่ผ่านตามที่มาตรฐานกำหนด

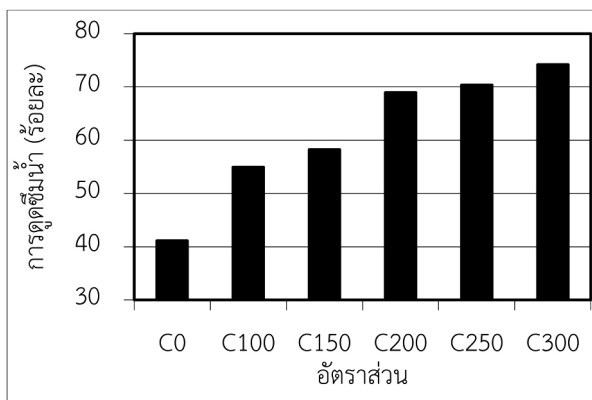


รูปที่ 11 การแ่นตัวของแผ่นผ้าเพดานผสมขุยมะพร้าว ที่อายุการบ่ม 28 วัน

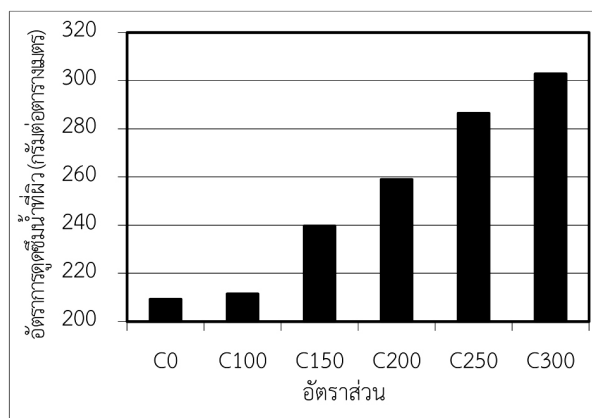
6.4 การดูดซึมน้ำ

จากลักษณะของขุยมะพร้าวที่มีช่องว่างในเนื้อค่อนข้างมาก (รูปที่ 8) เมื่อผสมลงในแผ่นผ้าเพดานจึงทำให้มีผลต่อพฤติกรรมการดูดซึมน้ำของแผ่นผ้าเพดานผสมขุยมะพร้าวที่เพิ่มมากขึ้น ดังรูปที่ 12 และ 13 โดยแผ่นผ้าเพดานที่ไม่ผสมขุยมะพร้าวเป็นอัตราส่วน ที่มีการดูดซึมน้ำต่ำที่สุด รองลงมาคือแผ่นผ้าเพดานผสมขุยมะพร้าวอัตราส่วน C100, C150, C200, C250 และ C300 เป็นอัตราส่วนที่มีการดูดซึมน้ำสูงที่สุด ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบค่าการดูดซึมน้ำ

น้ำที่เกิดขึ้นกับมาตรฐาน มอก.219-2552 เรื่องแผ่นยิปซัม [5] พบว่า มาตรฐานดังกล่าวจะกำหนดให้แผ่นยิปซัม เฉพาะประเภททนความชื้น ต้องมีค่าการดูดซึมน้ำ ไม่เกินร้อยละ 5 และอัตราการดูดซึมน้ำที่ผิว ไม่เกิน 160 กรัมต่อตารางเมตร ซึ่งแผ่นฝ้าเพดานผสมขุยมะพร้าวทั้งหมดที่พัฒนาขึ้นมีค่าการดูดซึมน้ำและอัตราการดูดซึมน้ำที่ผิวเกินกว่าที่มาตรฐานกำหนด อย่างไรก็ตาม ในการวิจัยต่อไปจะมีการปรับปรุงค่าการดูดซึมน้ำให้ต่ำลง และผลิตภัณฑ์แผ่นฝ้าเพดานผสมขุยมะพร้าวที่พัฒนานี้ ยังคงสามารถผลิตเป็นแผ่นฝ้าเพดานยิปซัมประเภทไม่ทนความชื้นตามมาตรฐานนี้ได้



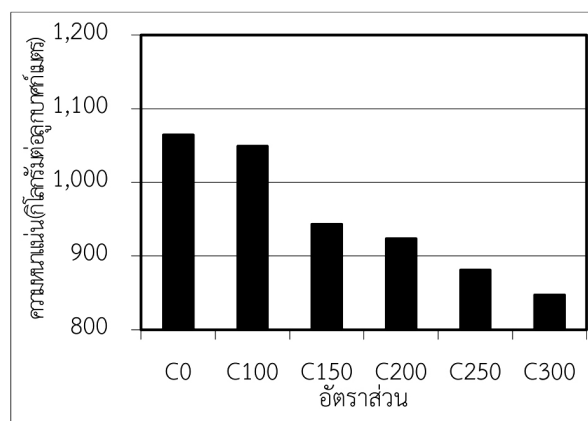
รูปที่ 12 การดูดซึมน้ำของแผ่นฝ้าเพดานผสมขุยมะพร้าว ที่อายุการบ่ม 28 วัน



รูปที่ 13 อัตราการดูดซึมน้ำที่ผิวของแผ่นฝ้าเพดานผสมขุยมะพร้าว ที่อายุการบ่ม 28 วัน

6.5 ความหนาแน่น

ผลกระทบของปริมาณขุยมะพร้าวที่มีต่อความหนาแน่นของแผ่นฝ้าเพดานในรูปที่ 14 พบว่า นอกจากลักษณะช่องว่างของขุยมะพร้าว (รูปที่ 8) จะมีผลต่อการดูดซึมน้ำแล้ว ยังมีผลต่อค่าความหนาแน่นของแผ่นฝ้าเพดานยิปซัมอีกด้วย โดยแผ่นฝ้าเพดานที่ไม่ผสมขุยมะพร้าว (อัตราส่วน C0) จะมีความหนาแน่นสูงที่สุด เท่ากับ 1,064.20 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร รองลงมาคือ แผ่นฝ้าเพดานผสมขุยมะพร้าวอัตราส่วน C100 เท่ากับ 1,049.38 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร, C150 เท่ากับ 943.21 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร, C200 เท่ากับ 923.46 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร, C250 เท่ากับ 881.02 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ C300 จะมีความหนาแน่นต่ำที่สุด เท่ากับ 846.91 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ นอกจากนี้ ยังเป็นผลมาจากค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุจำพวกเซลลูโลสของขุยมะพร้าวที่มีค่าเพียง 0.6 [9] ในขณะที่ยิปซัมพลาสติกจะมีค่าความถ่วงจำเพาะสูงกว่า

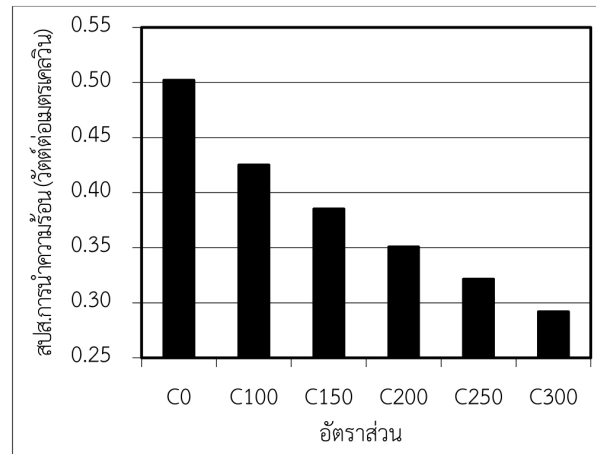


รูปที่ 14 ความหนาแน่นของแผ่นฝ้าเพดานผสมขุยมะพร้าว ที่อายุการบ่ม 28 วัน

6.6 สัมประสิทธิ์การนำความร้อน

สัมประสิทธิ์การนำความร้อนเป็นการทดสอบคุณสมบัติของแผ่นฝ้าเพดานที่แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการป้องกันความร้อนจากหลังคาเข้าสู่ภายในอาคาร ซึ่งผลการทดสอบสามารถสรุปได้ ดังรูปที่ 15 พบว่า แผ่นฝ้าเพดานที่มีปริมาณขุยมะพร้าวมากที่สุด คือ อัตราส่วน C300 เป็นอัตราส่วนที่มีสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำที่สุด เท่ากับ 0.292 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน รองลงมาคือ อัตราส่วน C250 เท่ากับ 0.321 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน อัตราส่วน C200 เท่ากับ 0.351 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน อัตราส่วน C150 เท่ากับ 0.385 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน อัตราส่วน C100 เท่ากับ 0.425 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน และอัตราส่วน C0 เท่ากับ 0.502 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน เป็นอัตราส่วนที่มี

สัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงที่สุด ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นผลมาจากลักษณะของขุยมะพร้าวที่มีช่องว่างมาก จะส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ลดลง [10]



รูปที่ 15 สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแผ่นฝ้าเพดานผสมขุยมะพร้าว ที่อายุการบ่ม 28 วัน

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของแผ่นฝ้าเพดานผสมขุยมะพร้าวอัตราส่วนต่างๆ

คุณสมบัติ	C0	C100	C150	C200	C250	C300
แรงกดแตกตามยาว (N)	346.11	352.18	361.30	342.09	284.82	243.55
แรงกดแตกตามขวาง (N)	122.18	139.44	141.09	131.65	118.37	96.78
แรงต้านทานการดึงตะปู (N)	286.30	276.09	279.41	252.28	216.01	185.66
การแอ่นตัว (mm)	9.91	5.67	6.11	8.77	10.39	12.81
การดูดซึมน้ำ (%)	41.10	54.92	58.22	68.94	70.35	74.17
อัตราการดูดซึมน้ำที่ผิว (g/m^2)	209.32	211.54	239.71	259.05	286.41	302.81
ความหนาแน่น (kg/m^3)	1,064.20	1,049.38	943.21	923.46	881.02	846.91
สปส.การนำความร้อน (w/m.K)	0.502	0.425	0.385	0.351	0.321	0.292

7. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

ผลจากการพัฒนาผลิตภัณฑ์แผ่นฝ้าเพดานผสมขี้เถ้าที่มีสมบัติความเป็นฉนวนป้องกันความร้อนตามมาตรฐาน 219-2552 เรื่องแผ่นยิปซัม สามารถสรุปได้ว่า กระบวนการผลิตแผ่นฝ้าเพดานผสมขี้เถ้าสามารถขึ้นรูปได้ด้วยวิธีการหล่อขึ้นรูป โดยอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตแผ่นฝ้าเพดานผสมขี้เถ้าที่ผ่านมาตรฐานดังกล่าว ประเภทไม่ทนความชื้น คือ อัตราส่วนปูนยิปซัมพลาสติกต่อขี้เถ้าต่อปูนน้ำประปาต่อสารโซเดียมซิลิเกต เท่ากับ 1: 0.150: 1: 0.03 โดยน้ำหนัก (อัตราส่วน C150) ซึ่งมีคุณสมบัติ ได้แก่ แรงกดแตกตามยาว 356 นิวตัน แรงกดแตกตามขวาง 141.09 นิวตัน แรงต้านการดึงตะปู 279.41 นิวตัน การแอ่นตัว 6.11 มิลลิเมตร ความหนาแน่น 943.21 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และสัมประสิทธิ์การนำความร้อน 0.385 วัตต์ต่อเมตร เคลวิน ในการศึกษาต่อไป ควรพัฒนาแผ่นฝ้าเพดานผสมขี้เถ้าให้มีสมบัติผ่านมาตรฐาน มอก.219-2552 เรื่องแผ่นยิปซัม ประเภททนความชื้น และทนไฟ โดยการเพิ่มน้ำยางธรรมชาติและสารตัวเติมต่างๆ เข้าไป เพื่อให้ได้แผ่นฝ้าเพดานผสมขี้เถ้าที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและประหยัดพลังงานได้

8. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณแผ่นดินมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ประจำปี 2560 ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] Office of the Higher Education Commission. Development of Light-weight Materials from Coconut Fiber, Project of Research and Technology Transfer of Coconut. Bangkok: Research Network in Lower Central of Thailand, Office of the Higher Education Commission; 2004. (in Thai)
- [2] Asasutjarit, C., Hirunlabh, J., Khedari, J., Charoenvai, S., Zeghmatti, B., & Shin, U.C.. Development of coconut coir-based lightweight cement board. Construction and Building Materials. 2007; 21(2): 277–288.c
- [3] Khamput P., Rungthongbaisuree S., Deeboonno S., and Srisinhorm S. Development of Cement Roof Tile and Ceiling Board by Using Natural Rubber for Reducing the Indoor Temperature. Pathum Thani: Raja mangala University of Technology Thanyaburi; 2009. (in Thai)
- [4] Kasikorn Research Center. Real Estate Trend. [Internet]. 2012 [cited 2012 Sep 4]. Available from : <https://www.kasikornresearch.com/th/keconanalysis/pages/ViewSummary.aspx?docid=31781> (in Thai)

- [5] Thai Industrial Standards Institute (TISI). Thai Industrial Standard No.219-2009: Gypsum Board. Bangkok: Thai Industrial Standards Institute; 2009. (in Thai)
- [6] American Society for Testing and Materials (ASTM). Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia: American Society for Testing and Materials; 2012.
- [7] Jindaprasert P. and Jaturapitakkul C. Cement, Pozzolan, and Concrete. 7th ed. Bangkok: ACI Partners with Thailand Concrete Association; 2012. (in Thai)
- [8] Bledzki, A.K. and Gassan, J.. Composites Reinforced with Cellulose based Fibers. Progress in Polymer Science. 1999; 24: 221-274.
- [9] Faherty, Keith F. and Williamson, Thomas G.. Wood Engineering and Construction Handbook. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, Inc.; 1995.
- [10] Pakunworakij T., Puthipiroj P., Oonjittichai W. and Tisavipat P. Thermal resistance efficiency of building insulation material from agricultural waste. Journal of Architectural/Planning Research and Studies. 2006; 3(4): 119-126. (in Thai)

สมบัติด้านความคงทนของมอร์ตาร์และคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด

Durability Properties of Mortars and Concrete Containing Strength Enhancing Mineral Admixture

ปิติศานต์ กร้ามาตร^{1*} ธนฤต มณีรัตน์² ปานเทพ จุลนิพิฐวงศ์³
จินดารัตน์ มณีเจริญ⁴ และสมนึก ตั้งเต็มสิริกุล⁵

Pitisan Krammart^{1*} Tanakrit Maneerat² Parntep Julnipitawong³

Jindarat Maneecharoen⁴ Somnuk Tangtermsirikul⁵

pitisan.k@en.rmutt.ac.th^{1*}, zerotype07@gmail.com², parnthep@siit.tu.ac.th³, jindarat.m@
en.rmutt.ac.th⁴, somnuk@siit.tu.ac.th⁵

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

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

³ ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

³ Construction and Maintenance Technology Research Center, Sirindhorn International of Technology, Thammasat University

⁵ ภาควิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยีโยธา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

⁵ School of Civil Engineering and Technology, Sirindhorn International of Technology, Thammasat University

Received: May 4, 2016
Revised: October 18, 2017
Accepted: January 30, 2018

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด (SA) โดยการเพิ่มเติมและโดยการแทนที่ในปริมาณร้อยละ 5.5, 6.5 และ 7.5 โดยน้ำหนักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) โดยศึกษาการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ การเกิดคาร์บอนขึ้นของคอนกรีต ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต และความต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์ ผลการศึกษา พบว่าการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยมีค่าน้อยกว่าของ OPC ล้วน ค่อนข้างชัดเจน ส่วนการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสม SA มีค่าน้อยกว่าของ OPC ล้วน โดยเฉพาะเมื่อผสม SA ในปริมาณที่มากขึ้น และการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสม SA โดยการเพิ่มเติมมีแนวโน้มว่าน้อยกว่าของโดยการแทนที่ สำหรับการเกิดคาร์บอนขึ้นของคอนกรีตนั้น พบว่าของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่ามากกว่า ส่วนของคอนกรีตผสม SA โดยการเพิ่มเติมมีค่าน้อยกว่า ในขณะที่ของคอนกรีตผสม SA โดยการแทนที่กลับมีแนวโน้มมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับของคอนกรีต OPC ล้วน และการเพิ่ม SA ในปริมาณที่มากขึ้นทำให้การเกิดคาร์บอนขึ้นของคอนกรีตที่มากขึ้น นอกจากนี้พบว่า ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอย และของคอนกรีตผสม SA (โดยเฉพาะเมื่อผสม SA ในปริมาณที่มากขึ้น) มีค่าน้อยกว่าของคอนกรีต OPC ล้วน โดยความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสม SA โดยการเพิ่มเติมมีแนวโน้มว่าจะน้อยกว่าของโดยการแทนที่ที่สุดท้ายการขยายตัวของมอร์ตาร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตนั้น พบว่าของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วนของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย และของมอร์ตาร์ผสม SA โดยการแทนที่ มีค่าน้อยกว่า ในขณะที่ของมอร์ตาร์ผสม SA โดยการเพิ่มเติมมีค่าไม่แตกต่าง เมื่อเปรียบเทียบกับของมอร์ตาร์ OPC ล้วน และการผสม SA ในปริมาณที่ต่างกันให้ค่าการขยายตัวของมอร์ตาร์ที่ไม่แตกต่างกัน ส่วนการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตนั้น พบว่าของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน และของมอร์ตาร์ผสม SA มีค่าน้อยกว่า ในขณะที่ของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยมีค่ามากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับของมอร์ตาร์ OPC ล้วน และการผสม SA ในปริมาณที่ต่างกันให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ที่ใกล้เคียงกัน

คำสำคัญ: สารเพิ่มกำลังอัด, การหดตัวแบบแห้ง, ความลึกคาร์บอนขึ้น, ความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์, การต้านทานซัลเฟต

Abstract

This research was aimed to study the durability properties of concrete containing strength enhancing mineral admixture (SA). The SA was used to add and partial replacement of 5.5, 6.5 and 7.5% by weight in Portland cement type 1 (OPC). Dry shrinkage of mortar, carbonation of concrete, resistance to chloride penetration of concrete and sulfate resistance of mortar were considered. The study found that the drying shrinkage of mortar with fly ash was rather small when compared to that of OPC mortar. Also, drying shrinking of mortar containing SA was less than that of the OPC mortar, especially when mixed in greater quantities. The drying shrinkage of mortar contained SA addition was likely that less of mortar containing SA with partial replaced. Furthermore, the carbonation of concrete with fly ash was greater than that of OPC concrete. The carbonation of concrete contained SA addition was lesser than that of OPC concrete whereas the carbonation of concrete containing SA with partial replaced was higher. By adding SA was used in greater quantities, the carbonation of concrete had increased. In addition, the resistance to chloride penetration of concrete with fly ash and containing SA was better than that of OPC concrete. Moreover, the more SA was mixed, the better to resist the penetration of chloride occurred. The resistance to chloride penetration of concrete contained SA addition was lower than that of concrete containing SA with partial replaced. Finally, the expansions in sodium sulfate solution of type V cement mortar, mortar with fly ash and mortar containing SA with partial replacement were lesser than those of OPC mortar, while its expansion of mortar contained SA addition was no different to that of OPC mortar. The different of using SA quantity, the expansion in sodium sulfate solution of concrete was no different. The weight loss in magnesium sulfate solution of type V cement mortar and mortar containing SA was lesser than that of OPC mortar. While the weight loss of mortar with fly ash was greater than that of OPC mortar. The different of using SA quantity, the weight loss in magnesium sulfate solution of mortar was no different.

Keywords: strength enhancing mineral admixture, drying shrinkage, carbonation depth, chloride penetration resistance, sulfate resistance

1. บทนำ

โดยทั่วไปในอดีตการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีการกำหนดคุณสมบัติของคอนกรีตเป็นลักษณะเดียวกัน แม้ว่าสภาพแวดล้อมของโครงสร้างจะมีความแตกต่างกันทำให้โครงสร้างคอนกรีตที่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่รุนแรงมีอายุการใช้งานสั้น การนำคอนกรีตไปใช้ในงานก่อสร้างควรคำนึงถึงความคงทนของคอนกรีตและสภาวะแวดล้อมที่คอนกรีตจะต้องเผชิญ

ปัจจุบันการค้นคว้าวิจัยทางด้านวัสดุคอนกรีต นักวิจัยและวิศวกรมีความรู้ความเข้าใจมากขึ้น และได้มีงานวิจัยที่ระบุแนวทางการเลือกสัดส่วนผสมที่เหมาะสมกับสมรรถนะของคอนกรีต ทำให้มีผู้คิดค้น

สารสังเคราะห์ เพื่อช่วยปรับปรุงปฏิกิริยาในส่วนผสมปูนซีเมนต์ โดยสารที่สังเคราะห์จะทำปฏิกิริยาเพิ่มเติมให้ได้มาซึ่งสารที่ก่อให้เกิดกำลังในคอนกรีตเพิ่มเติม มีนักวิจัยได้ทดลองแทนที่สารผสมเพิ่มกำลังอัดในคอนกรีต และพบว่าทำให้ปฏิกิริยาในช่วงอายุเริ่มแรกสามารถพัฒนากำลังไปได้ดี [1] ทำให้มีการประเมินกันว่า การแทนที่สารเพิ่มกำลังอัดจะช่วยทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตเปลี่ยนแปลงไปทั้งในด้านของสมบัติเบื้องต้นและด้านความคงทน [2]

การศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาถึงสมบัติของสารเพิ่มกำลังอัด รวมทั้งเพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมในการใช้งานสารเพิ่มกำลังอัดอย่างมีประสิทธิภาพ โดยได้ศึกษาถึงสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีต

ได้แก่ การหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ การเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีต การต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต และความต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมสารเพิ่มกำลังอัดเพื่อนำผลงานวิจัยอันเป็นประโยชน์ไปใช้พัฒนาเทคโนโลยีด้านวัสดุคอนกรีตต่อไป

2. รายละเอียดวิธีการศึกษา

2.1 วัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

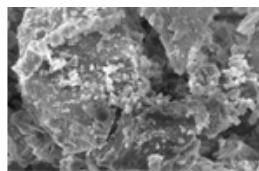
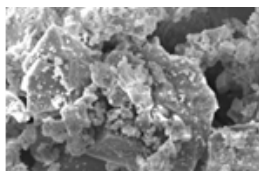
วัสดุประสานที่ใช้ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ตามมาตรฐาน มอก.15-2555 [3] เถ้าลอยจาก อ. แม่เมาะ จ. ลำปาง ตาม มอก. 2135-2545 [4] และสารเพิ่มกำลังอัด โดยตารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบทางเคมี ความถ่วงจำเพาะ และความละเอียดโดยวิธีเบลนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 เถ้าลอย และสารเพิ่มกำลังอัด ส่วนรูปที่ 1 แสดงภาพถ่ายขยายกำลังสูง (3,500 เท่า) ของอนุภาคของวัสดุประสานที่ใช้ พบว่าอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 และสารเพิ่มกำลังอัดมีลักษณะเป็นเหลี่ยม ผิวขรุขระ ขนาดไม่แน่นอนแตกต่างกันไป ในขณะที่อนุภาคของเถ้าลอยมีลักษณะเป็นทรงกลมและผิวค่อนข้างเรียบมีหลาย ๆ ขนาดปนกันอยู่เป็นจำนวนมาก

2.2 การหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์

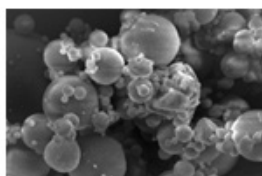
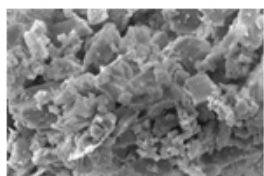
การทดสอบการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ใช้ตัวอย่างขนาด 25x25x285 มิลลิเมตร กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 596-01 [5] โดยตัวอย่างมอร์ตาร์หลังจากถอดแบบที่อายุ 24 ชั่วโมงนำตัวอย่างบ่มในน้ำเป็นเวลา 7 วัน แล้วบ่มในอากาศ เพื่อทดสอบการหดตัวแบบแห้งที่อายุ 1 3 5 7 14 21 28 42 56 และ 91 วัน

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมี ความถ่วงจำเพาะ และความละเอียดโดยวิธีเบลนของวัสดุประสานที่ใช้

ร้อยละองค์ประกอบทางเคมี	ปูนซีเมนต์ประเภท		เถ้าลอย	สารเพิ่มกำลังอัด
	ที่ 1	ที่ 5		
SiO ₂	18.93	21.69	37.61	1.94
Al ₂ O ₃	5.51	3.91	20.21	1.39
Fe ₂ O ₃	3.31	4.26	11.51	0.61
CaO	65.53	64.57	17.28	42.97
MgO	1.24	1.16	7.24	0.10
Na ₂ O	<0.01	<0.01	0.78	-
K ₂ O	0.31	0.21	2.46	-
SO ₃	2.88	2.03	2.28	49.50
LOI	2.24	1.62	0.48	2.68
ความถ่วงจำเพาะ	3.15	3.15	2.38	2.95
ความละเอียดโดยวิธีเบลน (ชม. ² /ก.)	3,300	3,340	2,373	2,800



ก) ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ข) ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5



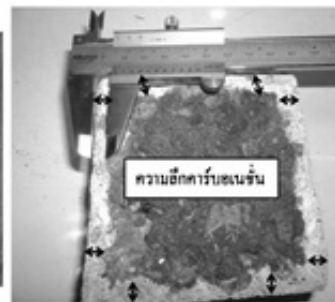
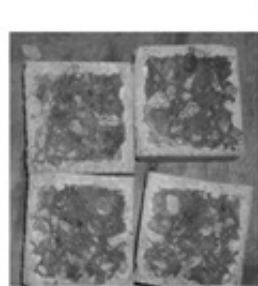
ค) สารเพิ่มกำลังอัด

ง) แก้วลอย

รูปที่ 1 ภาพถ่ายขยายกำลังสูง (3,500 เท่า) ของอนุภาคของวัสดุประสานที่ใช้

2.3 การเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีต

การเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีต ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 109-07 [6] และ ASTM C 856-04 [7] โดยตัวอย่างคอนกรีตขนาด 100x100x100 มิลลิเมตร หลังจากถอดแบบที่อายุ 24 ชั่วโมง แล้วนำตัวอย่างบ่มในน้ำเป็นเวลา 7 และ 28 วัน หลังจากบ่มตามระยะเวลาที่กำหนด นำตัวอย่างดังกล่าวไปอบในตู้อบการเกิดคาร์บอนชั้น (อุณหภูมิ $30 \pm 5^\circ\text{C}$) โดยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จะถูกปล่อยออกมาในปริมาณ 40,000 ppm และควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่ร้อยละ 50 ถึง 55 โดยระยะเวลาที่ตัวอย่างเผชิญกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 28 วัน และ 56 วัน เมื่อครบอายุที่กำหนด นำไปทดสอบหาค่าความลึกของการเกิดคาร์บอนชั้น โดยแบ่งตัวอย่างออกเป็น 2 ซีก โดยใช้เครื่องทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต จากนั้นฉีดสารละลายฟีนอล์ฟทาเลิน (Phenolphthalein) ที่ตัวอย่างซึ่งจะปรากฏเป็นสีม่วงในกรณีที่ไม่เกิดคาร์บอนชั้น แต่ในส่วนที่เกิดคาร์บอนชั้นตัวอย่างคอนกรีตจะไม่มีสี ใช้เวอร์เนียวัดค่าความลึกบริเวณที่ไม่เกิดสีม่วง (บริเวณที่เกิดคาร์บอนชั้น) ทั้งหมด 8 ตำแหน่งต่อตัวอย่างแต่ละซีก ดังแสดงในรูปที่ 2 แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยค่าความลึกคาร์บอนชั้น



รูปที่ 2 การวัดความลึกคาร์บอนชั้น

2.4 ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต

สำหรับการศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ (chloride penetration resistance) ของตัวอย่างคอนกรีต กระทำตามมาตรฐาน ASTM C 1202-12 [8] ด้วยชุดเครื่องมือทดสอบแบบแรงให้เกิดการแทรกซึมของคลอไรด์ไอออน (รูปที่ 3) ใช้ตัวอย่างคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตรหนา 50 มิลลิเมตร โดยถอดแบบที่อายุ 24 ชั่วโมง แล้วบ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วัน ส่วนสารละลายที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วย สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้น 0.3 โมลาร์ เมื่อครบอายุบ่ม 28 วัน นำตัวอย่างประกอบเข้ากับเซลล์ (Cell) โดยทำการเคลือบรอบๆ ผิวตัวอย่างด้วยกาวโพลียูรีเทน เมื่อกาวแห้งจึงเติมสารละลาย NaCl ลงในเซลล์ด้านซ้ายและเติมสารละลาย NaOH ลงในเซลล์ด้านขวามือ เมื่อเติมสารละลายแล้วนำประกอบเข้ากับชุดทดสอบดังรูปที่ 4 หลังจากนั้นปล่อยแรงดันไฟฟ้าขนาด 60 ± 0.1 โวลต์ผ่านชิ้นตัวอย่าง เครื่องมือจะทำการอ่านค่ากระแสไฟที่ผ่านตัวอย่างของแต่ละเซลล์ซึ่งจะทำการบันทึกค่าโดยอัตโนมัติ ทุก ๆ 30 นาที ใช้เวลาทดสอบ 6 ชั่วโมง โดยแสดงผลการทดสอบเป็นค่าประจุไฟฟ้าสะสมที่เคลื่อนผ่านตัวอย่างมีหน่วยเป็นคูลอมบ์ (Coulombs) ในการคำนวณค่าประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่าน ใช้ดังสมการที่ (1) นอกจากนี้ ASTM C 1202 ได้กำหนดระดับการแทรกซึมคลอไรด์จากผลการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า ดังตารางที่ 2

$$Q = 900(I_{30} + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + I_{360}) \quad (1)$$

โดยที่ Q คือค่าประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านแท่งตัวอย่าง คอนกรีตมีหน่วยเป็นคูลอมป์ (Coulomb) ส่วน I_0 คือแรงดันไฟฟ้าทันทีหลังจากที่เปิดแรงดันไฟฟ้า มีหน่วยเป็นแอมแปร์ (Amperes) ในขณะที่ I_t คือแรงดันไฟฟ้าแต่ละช่วงเวลาที่ทำการทดสอบ มีหน่วยเป็นแอมแปร์

ตารางที่ 2 ระดับการแทรกซึมคลอไรด์ พิจารณาจากผลประจุไฟฟ้าการเคลื่อนผ่าน (ASTM C 1202)

จำนวนประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนผ่าน (คูลอมป์)	ระดับการแทรกซึมคลอไรด์
มากกว่า 4,000	สูง
2,000 ถึง 4,000	ปานกลาง
1,000 ถึง 2,000	ต่ำ
100 ถึง 1,000	ต่ำมาก
น้อยกว่า 100	ไม่มีผล



(ก) เซลล์



(ข) เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า

รูปที่ 3 เครื่องมือทดสอบแบบเร่งให้เกิดการแทรกซึมของคลอไรด์ไอออน



รูปที่ 4 การประกอบเซลล์เข้ากับชุดทดสอบแบบเร่งให้เกิดการแทรกซึมของคลอไรด์ไอออน

2.5 การต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์

ในการศึกษาการต้านทานซัลเฟตในครั้งนี้ใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์ โดยการประเมินใช้วัดการขยายตัวของตัวอย่างในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และวัดการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

2.5.1 การขยายตัว

ในการทดสอบการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 1012-04 [9] โดยใช้ตัวอย่างขนาด 25x25x285 มิลลิเมตร หลังจากถอดแบบที่อายุ 24 ชั่วโมง นำตัวอย่างแช่ในน้ำปูนขาวอิ่มตัวเป็นเวลา 28 วัน เมื่อครบกำหนดทำการวัดความยาวเริ่มแรกด้วยเครื่องวัดความยาว แล้วนำตัวอย่างแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (โดยใช้โซเดียมซัลเฟต 50 กรัม ในสารละลาย 1 ลิตร ซึ่งมีปริมาณ SO_4^{2-} เท่ากับ 33,800 ppm) โดยวัดการขยายตัวของตัวอย่างที่อายุ 2 4 8 และ 13 สัปดาห์ และทุกๆ 2 เดือน ของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

2.5.2 การสูญเสียน้ำหนัก

ใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร ในการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต หลังจากถอดแบบตัวอย่างที่อายุ 24 ชั่วโมง นำตัวอย่างแช่ในน้ำปูนขาวอิ่มตัวเป็นเวลา 28 วัน เมื่ออายุครบ ทำการวัดน้ำหนักเริ่มแรกของตัวอย่าง แล้วนำตัวอย่างแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่มีปริมาณ SO_4^{2-} เท่ากับ 33,800 ppm (โดยใช้แมกนีเซียมซัลเฟต 42.36 กรัมในสารละลาย 1 ลิตร) แล้ววัดค่าการสูญเสียน้ำหนักตัวอย่างที่อายุ 2 4 8 และ 13 สัปดาห์ และทุกๆ 2 เดือน ของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

2.6 สัดส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษา

สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์และคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ แยกตามสมบัติด้านต่าง ๆ ที่ศึกษา ซึ่งได้แก่ การหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ การเกิดคาร์บอนชั่นของคอนกรีต ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต และการต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์ แสดงดังตารางที่ 3 ถึง 5

การใช้สัญลักษณ์ของสัดส่วนผสมในการศึกษาเป็นดังนี้ CC1 หมายถึงคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน MC1 หมายถึงมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน MC5 หมายถึงมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน CC1 5.5Ad หมายถึงคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมโดยการเพิ่มเติม (Addition) สารเพิ่มกำลังอัดร้อยละ 5.5 MC1 6.5Re หมายถึงมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมโดยการแทนที่ (Replacement) สารเพิ่มกำลังอัด ร้อยละ 6.5 และ MC1FA30 หมายถึงมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่เถ้าลอยร้อยละ 30 เป็นต้น

ตารางที่ 3 สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ในการทดสอบการหดตัวแบบแห้งและการต้านทานซัลเฟต โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.55

ที่	สัญลักษณ์	สัดส่วนผสมโดยน้ำหนัก (กรัม)					
		ปูนซีเมนต์ประเภท		เถ้าลอย	สารเพิ่มกำลังอัด	ทราย	น้ำ
		ที่ 1	ที่ 5				
1	MC1	1.00	-	-	-	2.75	0.55
2	MC5	-	1.00	-	-	2.75	0.55
3	MC1FA30	0.70	-	0.30	-	2.75	0.55
4	MC1 5.5Ad	1.00	-	-	0.055	2.75	0.55
5	MC1 6.5Ad	1.00	-	-	0.065	2.75	0.55
6	MC1 7.5Ad	1.00	-	-	0.075	2.75	0.55
7	MC1 5.5Re	0.95	-	-	0.055	2.75	0.55
8	MC1 6.5Re	0.94	-	-	0.065	2.75	0.55
9	MC1 7.5Re	0.93	-	-	0.075	2.75	0.55

ตารางที่ 4 สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบการเกิดคาร์บอนชั่น โดยใช้อัตราน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50

ที่	สัญลักษณ์	สัดส่วนผสมโดยน้ำหนักของคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัม)					
		ปูนซีเมนต์ประเภท 1	เถ้าลอย	สารเพิ่มกำลังอัด	ทราย	หิน	น้ำ
1	CC1	393	-	-	727	1047	196
2	CC1FA30	275	118	-	727	1047	196
3	CC1 5.5Ad	393	-	22	727	1047	196
4	CC1 6.5Ad	393	-	26	727	1047	196
5	CC1 7.5Ad	393	-	30	727	1047	196
6	CC1 5.5Re	372	-	22	727	1047	196
7	CC1 6.5Re	368	-	26	727	1047	196
8	CC1 7.5Re	364	-	30	727	1047	196

ตารางที่ 5 สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ โดยใช้อัตราน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.30

ที่	สัญลักษณ์	สัดส่วนผสมโดยน้ำหนักของคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร (กิโลกรัม)						
		ปูนซีเมนต์ประเภท 1	เถ้าลอย	สารเพิ่มกำลังอัด	ทราย	หิน	น้ำ	สารลดน้ำ
1	CC1	520	-	-	727	1047	151	5.2
2	CC1FA30	364	156	-	727	1047	151	5.2
3	CC1 5.5Ad	520	-	29	727	1047	151	5.2
4	CC1 6.5Ad	520	-	34	727	1047	151	5.2
5	CC1 7.5Ad	520	-	39	727	1047	151	5.2
6	CC1 5.5Re	491	-	29	727	1047	151	5.2
7	CC1 6.5Re	486	-	34	727	1047	151	5.2
8	CC1 7.5Re	481	-	39	727	1047	151	5.2

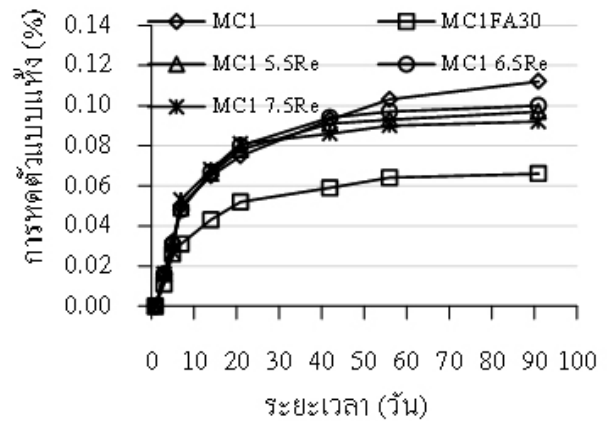
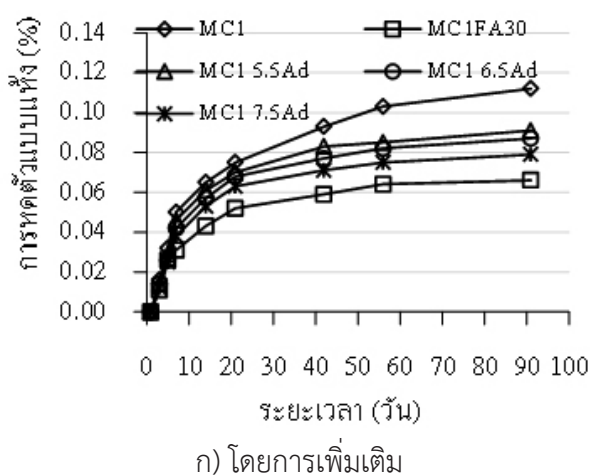
3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 การหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์

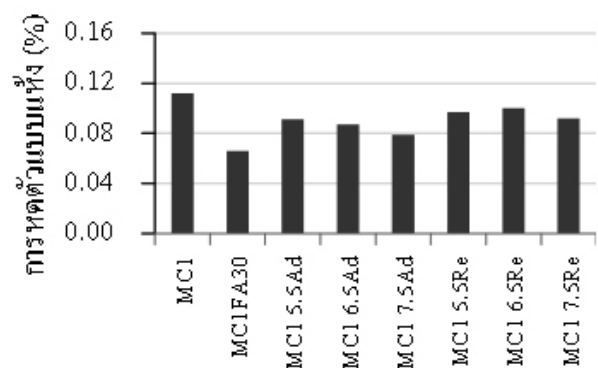
รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของตัวอย่างมอร์ตาร์ โดยในส่วนมอร์ตาร์ผสมสารเพิ่มกำลังอัด มีการผสมใน 2 ลักษณะคือ ผสมโดยการเพิ่มเติม (Addition) และผสมโดยการแทนที่ (Replacement) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 5.5 6.5 และ 7.5 โดยน้ำหนัก พบว่าการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย (ร้อยละ 30) มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ค่อนข้างชัดเจน ทั้งนี้เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอยทำให้มอร์ตาร์แน่นขึ้น การสูญเสียความชื้นจึงเป็นไปได้ยากขึ้นส่งผลให้การหดตัวมีค่าลดลง ส่วนการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสม

สารเพิ่มกำลังอัดทั้งโดยการเพิ่มเติมและโดยการแทนที่มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสารเพิ่มกำลังอัดเข้าไปทำปฏิกิริยาเกิดเป็นตัวประสานทำให้เพสต์มีความแน่นมากขึ้น ช่วยให้โครงสร้างของเพสต์มีความแข็งแรงมากขึ้น ทำให้การสูญเสียความชื้นยากขึ้น รวมทั้งโครงสร้างเพสต์ด้านการหดตัวได้มากขึ้น จึงส่งผลให้การหดตัวแบบแห้งมีค่าน้อยลง โดยเฉพาะเมื่อผสมในปริมาณที่มากขึ้น ทั้งนี้เพราะปริมาณที่มากขึ้นของสารเพิ่มกำลังอัด ช่วยทำให้โครงสร้างของเพสต์มีความแน่นและแข็งแรงมากขึ้น และถ้าเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ผสมสารเพิ่มกำลังอัดระหว่างโดยการเพิ่มเติมกับการแทนที่ จะสังเกตว่าการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์โดยการเพิ่มเติมมีแนวโน้มว่าน้อยกว่าของการแทนที่ ทั้งนี้อาจเป็นไปได้ว่าการเพิ่มเติมนั้นมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) น้อยลง (ใช้น้ำเท่าเดิม) ส่งผลให้มอร์ตาร์มีความแน่นมากกว่า การหดตัวจึงน้อยกว่า

รูปที่ 6 แสดงการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย และมอร์ตาร์ผสมสารเพิ่มกำลังอัด (ทั้งโดยการเพิ่มเติมและโดยการแทนที่) ที่อายุ 91 วัน ซึ่งเห็นได้ชัดเจนถึงค่าการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของตัวอย่างมอร์ตาร์

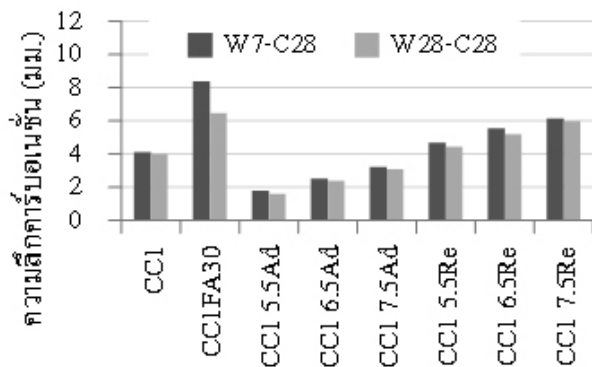


รูปที่ 6 การหดตัวแบบแห้งของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่อายุ 91 วัน

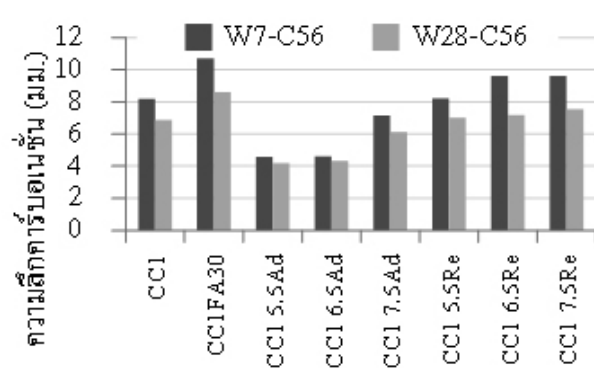
3.2 การเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีต

รูปที่ 7 แสดงการเกิดคาร์บอนเนชั่นของตัวอย่างคอนกรีต เมื่อตัวอย่างบ่มในน้ำ 7 และ 28 วัน โดยรูปที่ 7ก) กรณีตัวอย่างเผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 28 วัน ส่วนรูปที่ 7ข) กรณีตัวอย่างเผชิญก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 56 วัน พบว่าการเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอย มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะการแทนที่เถ้าลอยซึ่งเป็นสารปอซโซลานไปลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ส่งผลให้คาร์บอนเนชั่นเกิดขึ้นเร็วขึ้น ส่วนการเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัดโดยการเพิ่มเติม มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็น

เพราะสารเพิ่มกำลังอัดจะช่วยให้โครงสร้างเพสต์มีความแน่นมากขึ้น ทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปได้ยากขึ้น จึงทำให้เกิดคาร์บอนชั้นน้อยลง อย่างไรก็ตามการเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัดโดยการแทนที่ กลับมีแนวโน้มมากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการแทนที่ผงเคมีผสมเพิ่มเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง จึงไปลด Ca(OH)_2 ส่งผลให้คาร์บอนชั้นเกิดมากขึ้น และทั้งนี้โดยการเพิ่มเติมและโดยการแทนที่สารเพิ่มกำลังอัดในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้การเกิดคาร์บอนชั้นมากขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการเพิ่มขึ้นของสารเพิ่มกำลังอัด ทำให้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานน้อยลง (ใช้น้ำเท่าเดิม) ส่งผลให้ความเป็นต่างลดลง การเกิดคาร์บอนชั้นจึงมีค่ามากขึ้น นอกจากนี้การเกิดคาร์บอนชั้นของคอนกรีต (ทั้งที่ผสมก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ 28 และ 56 วัน) ที่บ่มในน้ำ 7 วันมีมากกว่าของคอนกรีตที่บ่มน้ำ 28 วัน ก่อนผสมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทั้งนี้เพราะการบ่มตัวอย่างคอนกรีตที่นานกว่า ทำให้ตัวอย่างมีความที่บ่มมากกว่าของตัวอย่างที่บ่มน้อยกว่า ส่งผลให้การเกิดคาร์บอนชั้นที่น้อยกว่า



ก) เผิผิวก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 28 วัน



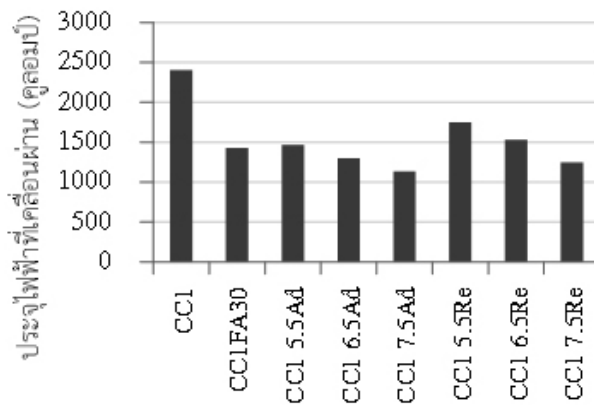
ข) เผิผิวก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 56 วัน

รูปที่ 7 การเกิดคาร์บอนชั้นของตัวอย่างคอนกรีต โดยตัวอย่างบ่มในน้ำที่ 7 และ 28 วัน

3.3 ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีต

รูปที่ 8 แสดงปริมาณประจุไฟฟ้า (คูลอมป์) ที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีต พบว่า ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีตผสมเกลือลอย (ร้อยละ 30) และของตัวอย่างคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด (ทั้งโดยการเพิ่มเติมและโดยการแทนที่ ร้อยละ 5.5 6.5 และ 7.5) มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยในกรณีเกลือลอยนั้น เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานและเกลือที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาช่วยในการเติมเต็มช่องว่างในเพสต์ จึงทำให้คอนกรีตมีความแน่นมากขึ้น ส่วนสารเพิ่มกำลังอัดนั้นเข้าไปทำปฏิกิริยาเกิดเป็นตัวประสานทำให้เพสต์มีความแน่นมากขึ้น และช่วยให้โครงสร้างของคอนกรีตมีความแข็งแรงมากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านยากขึ้น โดยเฉพาะเมื่อผสมสารเพิ่มกำลังอัดในปริมาณที่มากขึ้น ทั้งนี้เพราะปริมาณที่มากขึ้นของสารเพิ่มกำลังอัด ช่วยทำให้โครงสร้างของคอนกรีตมีความแน่นและแข็งแรงมากขึ้น ทำให้สามารถมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้สูงขึ้น และถ้าเปรียบเทียบคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัดระหว่างโดยการเพิ่มเติมกับโดยการแทนที่นั้น สังเกตได้ว่าปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัดโดยการเพิ่มเติมมีแนวโน้มว่าจะน้อยกว่า

ของการแทนที่ ทั้งนี้อาจเป็นไปได้ว่าโดยการเพิ่มเติมไม่มีการลดปริมาณปูนซีเมนต์ ซึ่งส่งผลให้การประสานของเพสต์ได้ดีกว่าของการแทนที่ซึ่งเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง



รูปที่ 8 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีต

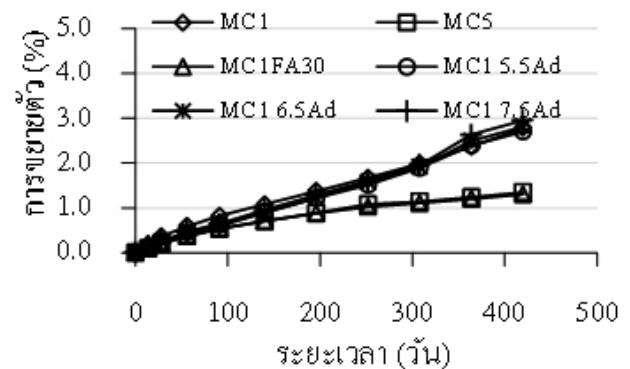
3.4 ความต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์

3.4.1 การขยายตัว

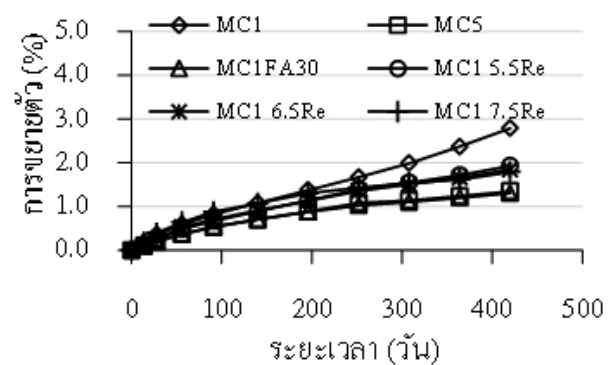
รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตกับอายุของตัวอย่างมอร์ตาร์ พบว่า การขยายตัวของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะปริมาณ C_3A ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จึงทำให้เกิดปริมาณยิปซัมและ Ettringite น้อยกว่าส่วนการขยายตัวของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย (ร้อยละ 30) มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานช่วยลดปริมาณ $Ca(OH)_2$ รวมทั้งการแทนที่ด้วยเถ้าลอยเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลงจึงเป็นการลดปริมาณ C_3A ส่วนการขยายตัวของมอร์ตาร์ผสมสารเพิ่มกำลังอัดโดยการเพิ่มเติม ร้อยละ 5.5 6.5 และ 7.5 มีค่าไม่แตกต่างกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน (รูปที่ 9ก) ในขณะที่การขยายตัวของมอร์ตาร์ผสมสารเพิ่มกำลังอัดโดยการแทนที่ ร้อยละ 5.5 6.5 และ 7.5

มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน (รูปที่ 9ข) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการแทนที่สารเพิ่มกำลังอัดเป็นการลดปริมาณ C_3A ลง จึงทำให้เกิด Ettringite น้อยลง ส่งผลให้การขยายตัวน้อยลง นอกจากนี้การผสมปริมาณของสารเพิ่มกำลังอัดที่ต่างกัน ให้ค่าการขยายตัวของมอร์ตาร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่ไม่แตกต่างกัน

ส่วนรูปที่ 10 แสดงค่าการขยายตัวของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย และมอร์ตาร์ผสมสารเพิ่มกำลังอัด (ทั้งโดยการเพิ่มเติมและโดยการแทนที่) ที่อายุ 420 วัน ซึ่งเห็นได้ชัดเจนถึงค่าการขยายตัวของมอร์ตาร์ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

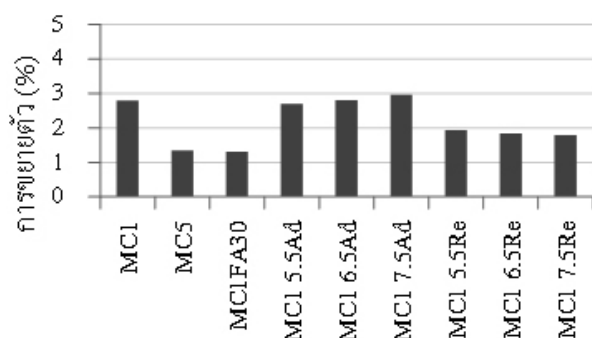


ก) โดยการเพิ่มเติม

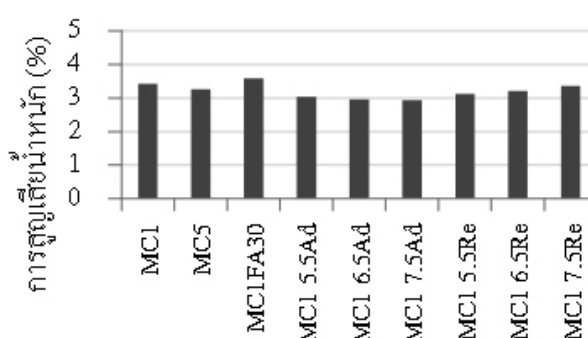


ข) โดยการแทนที่

รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต



รูปที่ 10 การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์ในสารละลายโซเดียมซิลเฟต ที่อายุ 420 วัน



รูปที่ 11 การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์ในสารละลายแมกนีเซียมซิลเฟต ที่อายุ 420 วัน

3.4.2 การสูญเสียน้ำหนัก

รูปที่ 11 แสดงการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์ในสารละลายแมกนีเซียมซิลเฟตที่อายุ 420 วัน พบว่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะปริมาณ C_3A ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในขณะที่การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย (ร้อยละ 30) มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้ความเป็นด่างในมอร์ตาร์ลดลง (ลดCa(OH)_2) ทำให้ความไม่เสถียรภาพเกิดขึ้น จึงทำให้แคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์เปลี่ยนเป็นแมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ซึ่งไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน [10] ส่วนการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ผสมสารเพิ่มกำลังอัดทั้งโดยการเพิ่มเติมและโดยการแทนที่ร้อยละ 5.5 6.5 และ 7.5 มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสารเพิ่มกำลังอัดช่วยเพิ่มความสามารถในการประสานในเพสต์ จึงทำให้สารละลายซิลเฟตเข้าไปทำลายได้ยากขึ้น ส่วนการผสมสารเพิ่มกำลังอัดที่ต่างกันให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ใกล้เคียงกัน

4. สรุป

จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) การหัดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยมีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ค่อนข้างชัดเจน ส่วนการหัดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมสารเพิ่มกำลังอัด มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อผสมในปริมาณที่มากขึ้น โดยการหัดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมสารเพิ่มกำลังอัดโดยการเพิ่มเติมมีแนวโน้มว่าน้อยกว่าของโดยการแทนที่
- 2) การเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่ามากกว่า ส่วนการเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัดโดยการเพิ่มเติมมีค่าน้อยกว่า ในขณะที่ของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัดโดยการแทนที่กลับมีแนวโน้มมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยการผสมสารเพิ่มกำลังอัดในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้การเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตที่มากขึ้น
- 3) ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมเถ้าลอย และของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด (โดยเฉพาะเมื่อผสมสารเพิ่มกำลังอัดในปริมาณที่มากขึ้น) มีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมสารเพิ่มกำลังอัด โดยการเพิ่มเติมมีแนวโน้มว่าจะน้อยกว่าของโดยการแทนที่

4) ในสารละลายโซเดียมซิลเฟตนั้น การขยายตัวของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย และมอร์ตาร์ผสมสารเพิ่มกำลังอัดโดยการแทนที่มีค่าน้อยกว่า ในขณะที่ของมอร์ตาร์ผสมสารเพิ่มกำลังอัดโดยการเพิ่มเติมมีค่าไม่แตกต่าง เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยการผสมสารเพิ่มกำลังอัดในปริมาณที่ต่างกัน ให้ค่าการขยายตัวของมอร์ตาร์ที่ไม่แตกต่างกัน

5) ในสารละลายแมกนีเซียมซิลเฟตนั้น การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน และของมอร์ตาร์ผสมสารเพิ่มกำลังอัด มีค่าน้อยกว่า ในขณะที่ของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยมีค่ามากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และการผสมปริมาณของสารเพิ่มกำลังอัดที่ต่างกันให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ที่ใกล้เคียงกัน

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (CONTEC) สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

9. เอกสารอ้างอิง

[1] Julnipitawong P, Tangtermsirikul S. Investigation on Performance of Concrete and Mortar Using Active Chemical Compound Rockfil-HSM. Final Report Submission to BKG Group Corporation. 2013.

[2] Julnipitawong P, Tangtermsirikul S. A Study on Effect of Strength Accelerating Compound on Properties of Concrete and Mortar. volume 2, No. 1, January – June 2014; pp. 17-29.

[3] Thai Industrial Standard. TIS 15-2555; Portland Cement Part 1 Specification. Ministry of Industry. Bangkok. 2012. (in Thai)

[4] Thai Industrial Standard. TIS 2135-2545; Coal Fly Ash for Use as an Admixture in Concrete. Ministry of Industry. Bangkok. 2002. (in Thai)

[5] American Society for Testing and Materials. ASTM C 596 - 01: Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement. Annual Book of ASTM Standards. 2001.

[6] American Society for Testing and Materials. ASTM C 109 - 07: Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens). Annual Book of ASTM Standards. 2007.

[7] American Society for Testing and Materials. ASTM C 856 - 04: Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete. Annual Book of ASTM Standards. 2004.

- [8] American Society for Testing and Materials. ASTM C 1202 - 12: Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. Annual Book of ASTM Standards. 2012.
- [9] American Society for Testing and Materials. ASTM C 1012 - 04: Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution. Annual Book of ASTM Standards. 2004.
- [10] Al-Amoudi, O. S. B.. Mechanisms of Sulfate Attack in Plain and Blended Cement: a Review. Proceeding of the International Seminar. September 1999. University of Dundee, Scotland, UK. pp. 247-260.

อิทธิพลของรูปร่างใบตัด จำนวนใบตัด และทิศทางการเติมต่อเศษการตัดทางปาล์ม ของเครื่องตัดทางปาล์มใบตั้ง

Effect of Blade Geometries, Blade Amount, and Feed Direction on Palm Cutting Chip of Orbital Cutting Blade Palm Chopping Machine

ไพบูลย์ แยมเพื่อน^{1*} ปราโมทย์ พูนนายม² วรญา วัฒนจิตสิริ³ สุรัตน์ ตรีนวนพงศ์⁴ และกิตติพงษ์ กิมะพงศ์⁵
Paiboon Yaemphurn^{1*} Pramot Poonnayom² Voraya Wattanjitsiri³ Surat Triwanapong⁴
and Kittipong Kimapong⁵

paiboon.y@en.rmutt.ac.th^{1*}, promote.p@en.rmutt.ac.th², voraya.w@en.rmutt.ac.th³, surat.t@
en.rmutt.ac.th⁴, kittipong.k@en.rmutt.ac.th⁵

¹⁻⁵ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

¹⁻⁵ Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Received: August 7, 2017
Revised: September 7, 2017
Accepted: January 30, 2018

บทคัดย่อ

หนึ่งในตัวแปรสำคัญในการเพิ่มผลผลิตปาล์ม คือการบริหารจัดการวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในสวนปาล์ม วัสดุเหลือใช้ เช่น กิ่งและใบปาล์ม มักถูกตัดให้มีขนาดเล็กและนำไปใช้ในการทำปุ๋ยหรือเลี้ยงสัตว์กบในพื้นที่ชนบท ด้วยเหตุนี้วิธีการตัดย่อยทางปาล์มที่เหลือใช้จึงมีการดำเนินการและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง บทความนี้มีจุดประสงค์ในการเลือกกรูปร่างใบตัด จำนวนใบตัด และทิศทางการเติม ที่มีความเหมาะสมในการตัดย่อยทางปาล์มด้วยเครื่องย่อยทางปาล์มใบตั้งแนวตั้ง ในการทดลองนี้ใบตัดที่ออกแบบถูกผลิตขึ้นด้วยสภาวะที่กำหนดถูกประยุกต์ใช้ในการตัดย่อยทางปาล์มด้วยสภาวะการตัดที่กำหนด ผลการทดลองโดยสรุปมีดังนี้ ใบตัดทางปาล์มที่ทำจากเหล็กกล้าคาร์บอนไม่ควรทำการอบคืนไฟหลังจากการชุบแข็งเพราะทำให้ความแข็งและความต้านทานการสึกหรอของใบตัดลดลง ใบตัดทางปาล์มกึ่งวีเป็นใบตัดที่ให้ความต้านทานการสึกหรอและความแข็งที่ดีกว่าใบตัดวี โดยแสดงค่าความแข็ง 481 HV และน้ำหนักสูญหายที่ปลายมีด 6.24% ใบตัดกึ่งวีให้อัตราการผลิตเศษในแนวโน้มที่สูงขึ้นมากกว่าใบตัดวี ที่ความเร็วรอบสูงสุด 1200 รอบต่อนาทีสามารถผลิตเศษเท่ากับ 3878 กรัม จำนวนใบตัดที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้เกิดการเพิ่มประสิทธิภาพการตัดย่อยทางปาล์ม เช่นปริมาณการตัดที่สูงขึ้น เศษทางปาล์มที่ลดลง และใช้เวลาตัดย่อยลดลง ทิศทางการป้อนที่มีความเอียงส่งผลทำให้เกิดการลดแรงเสียดทานและทำให้ลดแรงในการกดตัดทางปาล์ม และทำให้ง่ายต่อการเติมทางปาล์ม

คำสำคัญ: ใบตัด, การสึกหรอ, ความแข็ง, เศษทางปาล์ม,

Abstract

One of important factors for increasing palm productivity is an palm residue management. Some palm tree residues such as palm branch and leaf were always cut to small size and then utilized as a fertilizer or a hoof food in a rural area. Therefore, a palm chopping method for utilizing a palm residue was always conducted and developed continuously. This article aimed to select an optimized cutting blade shape, blade amount, and feed direction for cutting a palm branch by an orbital cutting blade palm chopping machine. In this experiment, the designed cutting blades that were produced by a specified condition, were applied for cutting the palm branch using a specified cutting condition. The summarized results are as follows. The cutting lade that made of carbon steel should not apply the tempering after the hardening because it affected to decrease hardness and cutting edge wear. The semi-V cutting blade

showed the higher wear resistance and hardness than that of the V cutting blade and indicated hardness of 481 HV and weight loss of 6.24%. The semi-V cutting blade produced higher and larger palm chopping scrap than that of the V cutting blade and could produce the scrap of 3878 g at the cutting speed of 1200 rpm. Increase of the cutting blade amount affected to increase the palm cutting efficiency such as the increase of scrap amount, the decrease of scrap dimension, and the decrease of operation time. Feed direction that inclined to the horizontal axis could decrease a friction force and cutting force between the cutting edge and palm surface and also assisted easily to feed the palm branch.

Keywords: cutting blade, wear, hardness, palm scrap,

1. บทนำ

ปาล์มจัดเป็นพืชน้ำมันชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญของโลก แหล่งปลูกปาล์มน้ำมันที่สำคัญในปัจจุบันอยู่ในประเทศแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ซึ่งได้แก่ ประเทศ มาเลเซีย อินโดนีเซีย และไทย มีพื้นที่ปลูกรวมมากกว่า 50 ล้านไร่ สำหรับประเทศไทยปาล์มเป็นพืชน้ำมันที่สำคัญของประเทศไทย โดยรัฐบาลมีเป้าหมายให้มีการขยายพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันเพิ่มอีกประมาณ 5 ล้านไร่ [1] ในการปลูกปาล์มเพื่อนำมาทำเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น น้ำมันพืช สบู่ หรือไบโอดีเซลนั้น พบว่าต้นปาล์มที่ประกอบด้วยลำต้น กิ่ง ใบ ดอก และผล นั้นมีส่วนของผลปาล์มเพียง 20-30% เท่านั้นที่ถูกนำมาแปรรูป [2] และมีกลุ่มเกษตรกรผู้เลี้ยงสัตว์บางกลุ่มได้นำทางปาล์มมาใช้เป็นอาหารสัตว์เคี้ยวเอื้องโดยการตัดแขวนให้สัตว์แทะกินโดยตรงหรือนำทางปาล์มสดมาสับให้มีขนาด 1-3 เซนติเมตร ซึ่งสามารถนำไปเลี้ยงสัตว์เคี้ยวเอื้องได้เป็นอย่างดี [3] ขณะที่ส่วนอื่นๆ นั้นเมื่อสิ้นอายุการให้ผลปาล์มของต้นปาล์ม เกษตรกรจะทำการย่อยให้มีขนาดเล็กเล็กเพื่อนำไปใช้งานรูปแบบอื่นต่อไป เครื่องจักรที่ใช้ในการย่อยทางปาล์มหรือส่วนประกอบต่างๆ ของต้นปาล์มมีรูปร่างคล้ายดังเครื่องย่อยกิ่งไม้ทั่วไปดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งมีขนาดใหญ่และมีราคาสูง



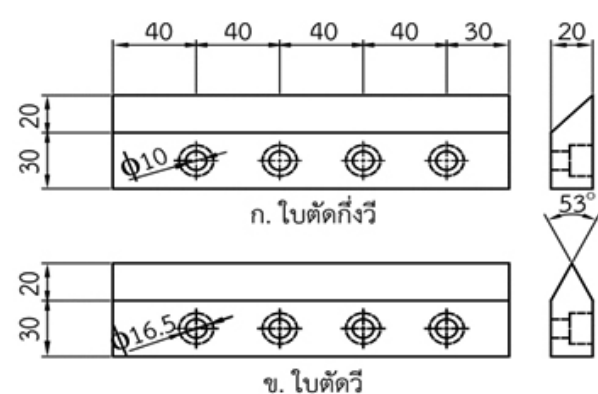
รูปที่ 1 ลักษณะเครื่องย่อยกิ่งไม้

ด้วยเหตุนี้เกษตรกรที่ปลูกต้นปาล์มจึงได้คิดค้นเครื่องย่อยทางปาล์มขนาดเล็กขึ้นมาใช้งาน เครื่องย่อยปาล์มขนาดเล็กนี้สามารถทำการเคลื่อนย้ายไปตำแหน่งต่างๆ ในไร่ปาล์มได้โดยอาศัยรถไถขนาดเล็กและใช้ต้นกำลังจากรถไถขนาดเล็กนั้นในการทำให้ระบบการย่อยเศษเกิดขึ้น อย่างไรก็ตามด้วยข้อจำกัดทางด้านวิศวกรรม การศึกษาและพัฒนาในการเลือกรูปร่างใบตัดและตัวแปรการตัดที่เหมาะสมสำหรับเครื่องย่อยทางปาล์มขนาดเล็กจึงมีค่อนข้างจำกัด ปัญหาสำคัญดังกล่าวจึงมีความสำคัญที่ต้องการแก้ไขและพัฒนาต่อไป ที่ผ่านมามีการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับการเลือกตัวแปรการตัดต่างๆ ที่สามารถประยุกต์ใช้ได้กับการตัดย่อยทางปาล์ม เช่น การวิเคราะห์ช่องว่างระหว่างใบมีดในการตัดแผ่นโลหะโดยใช้ไฟไนท์อีลิเมนต์รวมทั้งการวิเคราะห์ความหนาแน่นของโลหะและแรงตัดของช่องว่างใบตัดเพื่อใช้ในการออกแบบ

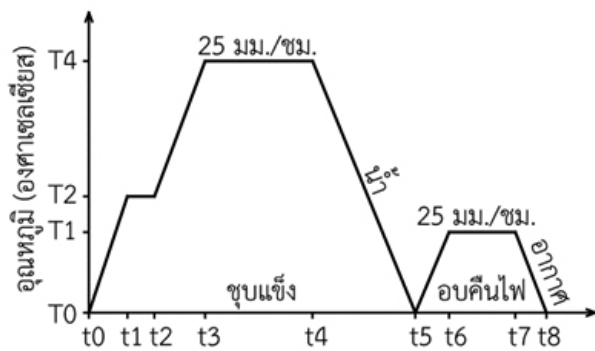
ระบบการตัดทางปาล์ม ค่าที่ได้ถูกนำไปใช้ทำการเปรียบเทียบกับสูตรการคำนวณแบบดั้งเดิม [4] ผลการจำลองสถานการณ์พบว่าค่าการวิเคราะห์ ที่ควบคุมโดยเกณฑ์การพังทลายแบบเหนียวมีค่าใกล้เคียงกับค่าการทดลองมีความเบี่ยงเบนอยู่ในช่วง 10.8-20.8% สำหรับเหล็กชนิดเดียวกันถ้าความหนามีค่ามากกว่า ช่องว่างใบมีดจะมีค่ามากกว่า ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและช่องว่างใบมีดมีค่าค่อนข้างเป็นเส้นตรง ค่าแรงเฉือนสูงสุดที่ได้จากการจำลองสถานการณ์และค่าการตัดมีค่า 7.7 ถึง 12.0 % และแสดงให้เห็นว่าค่าการจำลองสถานการณ์มีค่าใกล้เคียงกับค่าการตัด การเพิ่มช่องว่างใบมีดและความหนาส่งผลต่อการเพิ่มแรงตัดเฉือน หรือการศึกษาอิทธิพลของทิศทางการตัด จำนวนของใบมีด และขนาดเกรนของวัสดุขัดผิวต่อความหยาบผิวของไม้ทิวส์ซีดาร์ [5] การศึกษาได้ทำการพัฒนาทิศทางการทำมุมต่างๆ กับใบมีด ใบตัดของเครื่องตัดไม้ประกอบด้วย แบบ 1 ใบมีด และ 3 ใบมีด และผ่านการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 60 และ 100 ตามลำดับ ชิ้นงาน 80 ตัวอย่าง ประกอบด้วย การศึกษาทิศทางการตัด 2 ทิศทาง ใบมีด 2 แบบ การขัด 2 แบบ ความหยาบผิวทำการขัดตาม ISO42878 ค่าที่ได้ถูกทำการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่า ทิศทางการตัดและเทคนิคการเตรียมผิวสำเร็จมีผลต่อความหยาบผิวและการตัดไม้ในทิศทางที่ทำมุม ทำให้เกิดผิวที่มีความเรียบมากกว่าการตัดแบบสัมผัสหรือทำมุมน้อย ความเรียบของผิวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อกระดาษทรายมีค่าละเอียดเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นได้มีการศึกษาการออกแบบและสร้างชุดทดสอบใบมีดสำหรับวัสดุเหลือใช้จากข้าว โดยมีปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ ความเร็วรอบของเพล 540 และ 720 รอบ ต่อนาที ลักษณะใบมีดแบบใบเรียบและแบบใบเลื่อย และระดับของใบมีด คือ 4-6 ใบ โดยทดสอบนำต่อซึ่งข้าวมาเรียงบนเหล็กหนึบที่เตรียมไว้

ทำการทดสอบกับชุดทดสอบโดยใช้ความเร็วรอบ 540 และ 720 รอบ ต่อนาที โดยใช้ใบมีด 2 แบบ และระดับของใบมีด 3 ระดับ โดยทำการทดสอบกับใบมีดทั้ง 2 แบบ กับทุกความเร็วรอบ และทุกระดับของใบมีด เก็บผลซ้ำ 3 ครั้ง ผลการทดสอบพบว่า ที่ความเร็วรอบ 720 รอบ ต่อนาที ที่ระดับใบมีด 6 ใบ ใบมีดแบบเลื่อย สามารถย่อยต่อซึ่งข้าวได้มากที่สุดเท่ากับ 66% ช่วงความยาวของซึ่งข้าวที่ขาดสูงที่สุดคือ 8.1-12 ซม. จำนวน 35.7% [6]

ด้วยข้อมูลปัญหาการใช้งานเครื่องย่อยปาล์มที่ใบตัดมีอายุการใช้งานสั้น และมักเกิดคำถามถึงประสิทธิภาพการตัดที่ดีกับจำนวนและรูปแบบใบตัดที่เหมาะสม งานวิจัยจึงมีจุดประสงค์ในการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติของใบตัด 2 แบบ จำนวนใบตัดและทิศทางการเดิมที่เหมาะสม ใบมีดที่ออกแบบถูกประยุกต์ใช้ในการตัดย่อยเศษทางปาล์มด้วยสภาวะการตัดที่กำหนดในเครื่องย่อยทางปาล์มแบบใบตัดตั้งฉากขนาดเล็กที่มีความเร็วรอบใบตัดที่ 200-1250 รอบต่อนาที ผลการทดลองที่ได้สามารถทำให้เกิดการพัฒนากระบวนการย่อยเศษทางปาล์มที่สามารถเผยแพร่ไปสู่กลุ่มเกษตรกรสวนปาล์ม สามารถใช้เป็นข้อมูลทางเลือกของเกษตรกรและช่างซ่อมบำรุงเครื่องย่อยทางปาล์ม และส่งผลต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมเกษตรของประเทศต่อไป

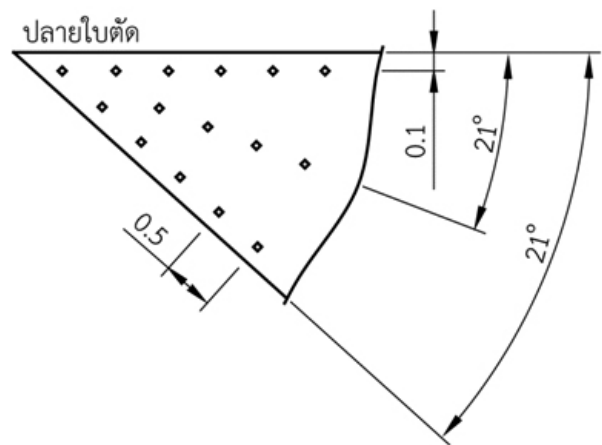


รูปที่ 2 ชิ้นงานทดสอบ (หน่วย: มิลลิเมตร)



รูปที่ 3 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างเวลา อุณหภูมิ และการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อน

วัสดุในการทดลองที่ใช้ในการผลิตใบตัดของเครื่องย่อยทางปาล์มแบบใบตัดตั้ง คือ เหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C ที่มีส่วนผสมทางเคมีโดยน้ำหนักประกอบด้วย Fe 0.42% C 0.23% Si 0.67% Mn 0.02% P 0.02% S 0.04% Ni 0.98% Cr 0.17% Mo 0.01% Cu 0.02% Al 0.04% W เหล็กกล้าถูกนำมาทำการขึ้นรูปด้วยวิธีการกัด (Milling) ที่มีการหล่อเย็นด้วยเครื่องกัดอัตโนมัติที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์เชิงตัวเลข (Computer numerical control: CNC) ให้มีรูปร่างเป็นใบตัดสำหรับเครื่องย่อยทางปาล์มใบตัดแนวตั้งขนาดเล็ก ขนาดของใบตัดมีขนาดกว้าง 50 มิลลิเมตร ยาว 190 มิลลิเมตร และหนา 18 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 1 รูปร่างใบตัดในการทดลองนี้แบ่งออกเป็น 1) ใบตัดกึ่งวี (Semi-V cutting blade) และ 2) ใบตัดวี (V cutting blade) เมื่อทำการขึ้นรูปชิ้นงานเรียบร้อยแล้ว ชิ้นงานถูกนำไปทำการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนด้วยวิธีการชุบแข็ง (Hardening) และวิธีการชุบแข็ง + การอบคืนไฟ (Hardening+tempering) ดังรูปที่ 3

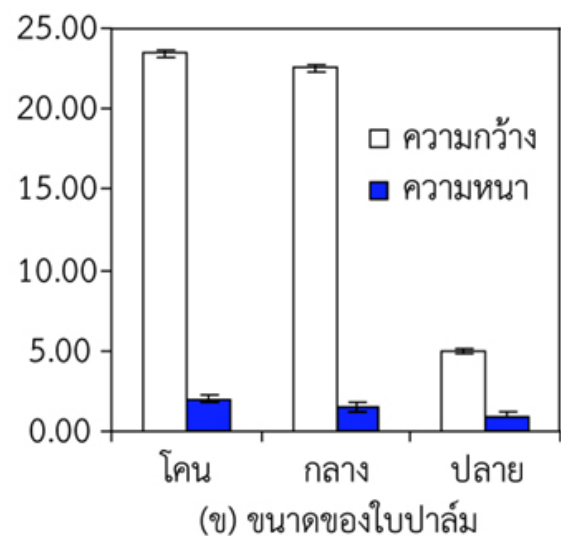
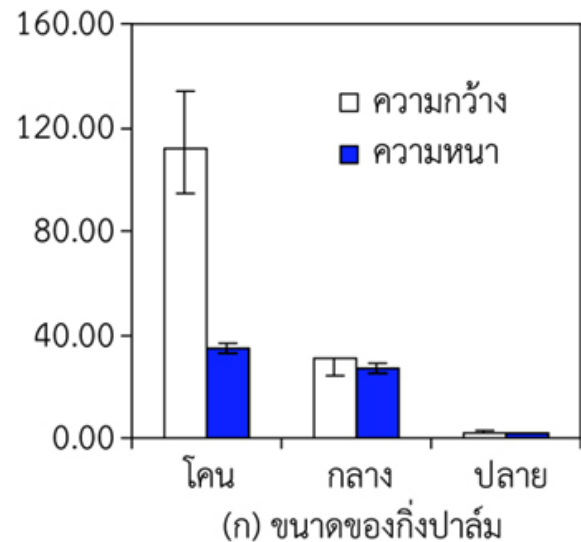


รูปที่ 4 ตำแหน่งวัดความแข็งที่ปลายคมตัด (หน่วย: มิลลิเมตร)

ชิ้นงานที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนถูกนำมาทำการเตรียมขึ้นทดสอบความต้านทานการสึกหรอโดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของโคนใบตัดที่มีขนาดกว้าง 25 มิลลิเมตร ยาว 50 มิลลิเมตร และหนา 20 มิลลิเมตร และส่วนปลายของใบตัดที่มีขนาดกว้าง 25 มิลลิเมตร ยาว 50 มิลลิเมตร และหนาตามความลาดเอียงของคมตัด การทดสอบความต้านทานการสึกหรอเป็นไปตาม ASTM G65-94 ดำเนินการเพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญหายของชิ้นทดสอบ ความต้านทานการสึกหรอที่มีค่าสูง คือ เปอร์เซ็นต์การสูญหายของน้ำหนักที่ต่ำ การทดสอบดำเนินการโดยการกัดชิ้นงานด้วยแรง 130 นิวตันลงบนผิวล้ออย่างที่เหมาะสมด้วยความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ขณะล้ออย่างและชิ้นงานเกิดการขัดสีกัน กึ่งกลางระหว่างผิวขัดสีถูกเติมด้วยทรายธรรมชาติแห้งที่มีขนาดมากกว่า 80 เมช เป็นเวลา 30 นาที หรือระยะทางประมาณ 4000 เมตร [7]

ความแข็งของชิ้นงานก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนถูกทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งไมโครวิกเกอร์สโดยใช้แรงทดสอบ 300 กรัมแรง เวลาทดสอบ 10 วินาที [8] แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน คือ การทดสอบความแข็ง

ที่โคนใบตัดและปลายใบตัดโดยการทดสอบความแข็งแรงบนพื้นผิวการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค การทดสอบความแข็งแรงบริเวณโคนใบตัดทำการทดสอบแบบสุ่มจำนวน 15 จุด แต่ละจุดห่างกันอย่างน้อย 0.5 มิลลิเมตร ขณะที่การทดสอบความแข็งแรงที่บริเวณปลายใบตัดกำหนดให้มีจุดทำการทดสอบดังรูปที่ 4 โดยจุดทำการทดสอบห่างจากปลายใบมีดประมาณ 0.5 มิลลิเมตร และทำการทดสอบห่างจากผิวด้านข้าง 0.1 มิลลิเมตร ระยะห่างการทดสอบ 0.5 มิลลิเมตร ใบตัดที่ได้จากการผลิตทั้งสองแบบถูกนำไปทำการทดสอบตัดย่อยทางปาล์มโดยติดตั้งเข้ากับเครื่องตัดย่อยทางปาล์มแบบใบตัดแนวตั้ง โดยใช้ความเร็วรอบ 250-1200 รอบต่อนาที การทดสอบการตัดใช้กิ่งทางปาล์มที่มีอายุเฉลี่ย 3 ปี ความสูงเฉลี่ยของต้นปาล์มของ 3.0 เมตร การเก็บข้อมูลกระทำโดยการวัดขนาดทางปาล์มจำนวน 100 กิ่งในพื้นที่กรณีตัวอย่างอำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี ระหว่างเดือนกรกฎาคม-กันยายน 2559 พบว่าทางปาล์มมีน้ำหนักเฉลี่ย 3.55 กิโลกรัมต่อกิ่ง มีความยาวกิ่งปาล์มที่ตัดออกมาเฉลี่ย 3,761 มิลลิเมตร ความยาวใบปาล์มที่ตัดออกมาเฉลี่ย 971 มิลลิเมตร โคนกิ่งปาล์มมีความหนาเฉลี่ย 34.74 มิลลิเมตร กว้าง 111.91 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นส่วนที่มีความหนามากที่สุดของทางปาล์ม ส่วนกลางกิ่งปาล์มมีความหนาเฉลี่ย 27.19 มิลลิเมตร กว้าง 31.14 มิลลิเมตร และส่วนปลายของกิ่งปาล์มมีความหนาเฉลี่ย 2.16 มิลลิเมตร และกว้างประมาณ 2.10 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 5 (ก) ขณะที่ส่วนโคนใบปาล์มมีความหนาเฉลี่ย 34.74 มิลลิเมตร กว้าง 111.91 มิลลิเมตร ส่วนกลางใบปาล์มมีความหนาเฉลี่ย 27.19 มิลลิเมตร กว้าง 31.14 มิลลิเมตร และส่วนปลายของใบปาล์มมีความหนาเฉลี่ย 2.16 มิลลิเมตร และกว้างประมาณ 2.10 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 5 (ข)

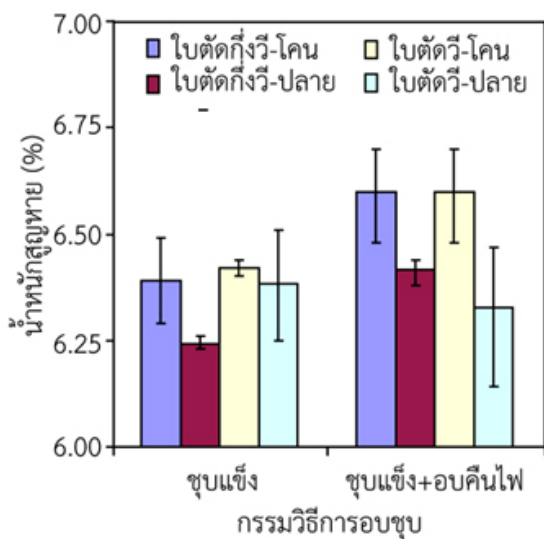


รูปที่ 5 ขนาดของทางปาล์มที่นำมาทำการตัดย่อย

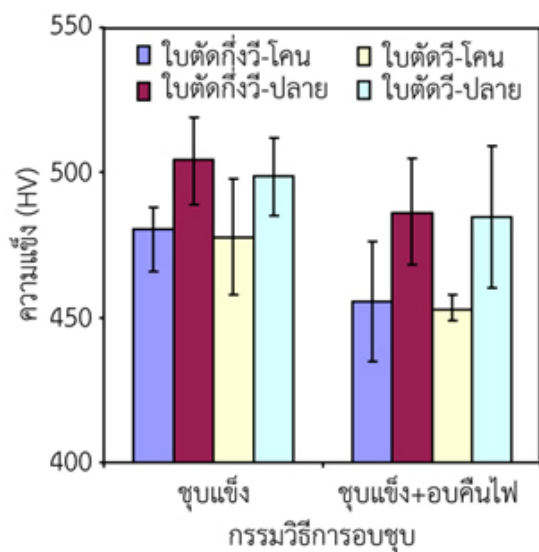
3. ผลการทดลองและการวิจารณ์

รูปที่ 6 แสดงผลการทดสอบการสึกหรอที่แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของน้ำหนักก่อนและหลังการทดสอบการสึกหรอ ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2 วิธีการทดลอง ค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักสูญหายที่มีค่าต่ำนั้นแสดงความต้านทานการสึกหรอที่มีค่าสูง และค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักสูญหายที่มีค่าสูงนั้นแสดงความต้านทานการสึกหรอที่มีค่าต่ำ ในผลการทดลองแสดงการทดสอบความต้านทานการสึกหรอของโลหะใบตัดในสภาวะการทดลอง 3 สภาวะ ประกอบด้วย

1) สภาวะจำหน่วย 2) สภาวะชุปแข็ง และ 3) สภาวะที่นำชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งไปทำการอบคืนไฟ ผลการทดลองพบว่าเมื่อเปรียบเทียบเหล็กกล้าคาร์บอนในสภาวะจำหน่วยหรือสภาวะที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนที่มีน้ำหนักสูญหายสูงสุด (ความต้านทานการสึกหรอต่ำสุด) ประมาณ 7.45% นั้น



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอ การปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อน และรูปแบบของใบตัด

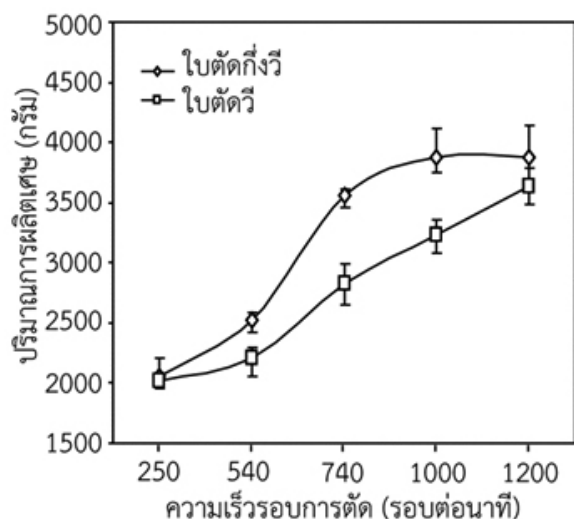


รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็ง การปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อน และรูปแบบของใบตัด

ค่าน้ำหนักสูญหายของใบตัดมีค่าลดลงเมื่อทำการชุบแข็ง และมีค่าน้ำหนักสูญหายเพิ่มขึ้นเมื่อใบตัดชุบแข็งถูกนำไปทำการอบอ่อน ผลการทดลองที่ได้นี้เกิดขึ้นกับใบตัดกึ่งวีและใบตัดวีที่ตำแหน่งโคนและปลายของใบตัดทั้งสองแบบ อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบค่าน้ำหนักสูญหายของใบตัดกึ่งวีและใบตัดวีที่ตำแหน่งโคนและปลายของใบตัด พบว่าค่าน้ำหนักสูญหายของใบตัดกึ่งวีมีค่าต่ำกว่าใบตัดวี ซึ่งหมายถึงใบตัดกึ่งวีมีความต้านทานต่อการสึกหรอมากกว่าใบตัดวี

การเปลี่ยนแปลงค่าน้ำหนักสูญหายของใบตัดกึ่งวีและใบตัดวีที่เกิดขึ้นส่งผลทำให้เกิดความเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งเฉลี่ยของใบตัดดังรูปที่ 7 ความต้านทานการสึกหรอที่มีค่าสูงเกิดขึ้นเนื่องจากความแข็งสูงของใบตัด ใบตัดที่ผ่านการชุบแข็งมีความแข็งสูงกว่าใบตัดที่ผ่านการชุบแข็ง+การอบคืนไฟ ความแข็งที่ลดลงและเป็นผลทำให้ความต้านทานการสึกหรอลดลง เมื่อพิจารณาตำแหน่งการตรวจสอบความแข็งระหว่างโคนใบตัดและปลายของใบตัดของใบตัดกึ่งวีและใบตัดวี พบว่าที่บริเวณโคนของใบตัดมีค่าความแข็งต่ำกว่าปลายใบตัด และใบตัดกึ่งวีมีค่าความแข็งสูงกว่าใบตัดวี การเกิดลักษณะนี้เกิดจากความหนาที่สูงกว่าส่งผลทำให้การถ่ายเทความร้อนผ่านโลหะสู่สภาวะแวดล้อมมีค่าช้ากว่า [9] การเย็นตัวที่ช้ากว่าหรืออัตราการเย็นตัว (Cooling rate) ที่เร็วกว่าส่งผลทำให้ความสามารถในการชุบแข็งหรือความสามารถในการเปลี่ยนโครงสร้างจุลภาคของเฟสออสเทนไนต์เป็นเฟสมาร์เทนไซต์ของเหล็กกล้าคาร์บอนเพิ่มขึ้น นอกจากนี้หนึ่งในตัวแปรที่ทำให้เกิดโครงสร้างมาร์เทนไซต์ในปริมาณสูงละมีขนาดเล็ก คือหากเกรนของออสเทนไนต์มีขนาดใหญ่ซึ่งเกิดขึ้นได้จากการเพิ่มอุณหภูมิออสเทนไนต์หรืออุณหภูมิในการอบแช่ของการชุบแข็งให้มีค่าสูงกว่า สามารถทำให้ปริมาณเฟส

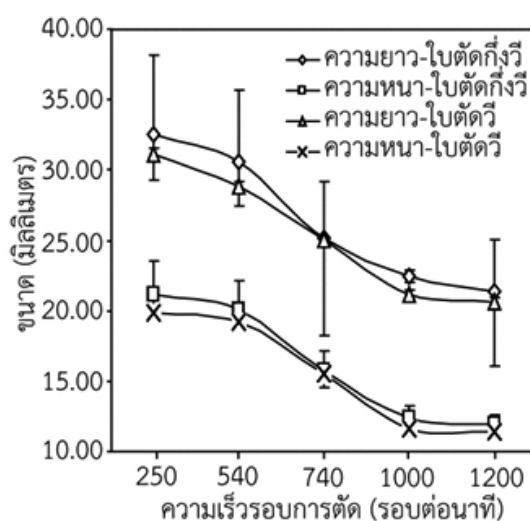
มาแทนไซท์ในเหล็กกล้าคาร์บอนเมื่อเย็นตัวสู่อุณหภูมิห้องได้สูงกว่าและเล็กละเอียดกว่า [10] อย่างไรก็ตาม การพิจารณาตัวแปรในการชุบแข็ง เช่น อัตราการเย็นตัว อุณหภูมิในการชุบแข็ง หรือระยะเวลาในอบแช่ ควรนำมาทำการทดลองกับใบตัดรูปร่างต่างๆ สำหรับการย่อยทางปาล์มต่อไป



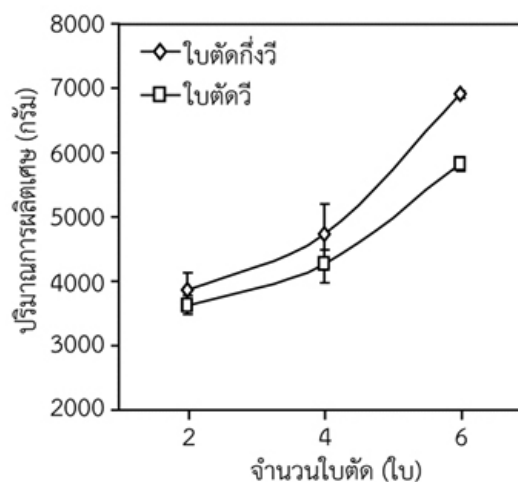
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเศษทางปาล์ม ความเร็วรอบ และใบตัด 2 ชนิด

รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการผลิตเศษทางปาล์ม ความเร็วรอบการตัด และรูปแบบของใบตัด 2 แบบ ใบตัดทั้งสองแบบที่ใช้ในการตัดย่อยทางปาล์มในรูปที่ 8 นั้นเป็นใบตัดที่ผ่านการชุบแข็งเท่านั้น เนื่องจากเป็นสภาวะที่ทำให้เกิดความต้านทานการสึกหรอและความแข็งแรงสูงสุด ในการทดลองตัดทางปาล์มกำหนดให้ทิศทางการป้อนทางปาล์มทำมุมตั้งฉากกับใบตัดเท่านั้น ผลการทดลองการตัดย่อยทางปาล์มพบว่าความเร็วรอบการตัดที่เพิ่มขึ้นส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณเศษที่ได้ เมื่อพิจารณา รูปแบบของใบตัดทั้งสองแบบที่ใช้ในการตัดพบว่า ปริมาณการผลิตเศษทางปาล์มนั้นมีความแตกต่างกัน กล่าวคือเมื่อใช้ใบตัดที่มีรูปร่างตัววีนั้น ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการผลิตเศษทางปาล์มและความเร็ว

รอบการตัดมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรง ขณะที่ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการผลิตเศษทางปาล์มและความเร็วรอบของใบตัดที่มีรูปร่างกึ่งวีนั้นมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นที่แตกต่างไป ใบตัดกึ่งวีมีการผลิตเศษทางปาล์มที่เพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบการตัดเพิ่มขึ้นระหว่างความเร็วรอบการตัด 540-740 รอบต่อนาที ขณะที่ความเร็วรอบการตัดระหว่าง 1000-1200 รอบต่อนาที อัตราการผลิตเศษของใบตัดกึ่งวีมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น

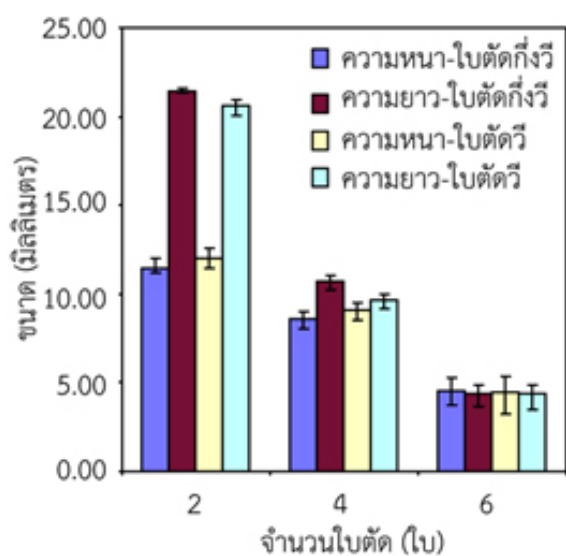


รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเศษทางปาล์ม ความเร็วรอบ และใบตัด 2 ชนิด



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเศษทางปาล์ม รูปแบบใบตัด และจำนวนใบตัด

รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเศษทางปาล์ม ความเร็วรอบการตัด และรูปแบบของใบตัด 2 แบบ ขนาดของเศษทางปาล์มที่ได้มีแนวโน้มที่ลดลงในด้านความยาวและความหนาเมื่อความเร็วรอบของการตัดเพิ่มขึ้น ความเร็วรอบสูงสุด 1200 รอบต่อนาทีและใบตัดวี สามารถทำให้เกิดเศษทางปาล์มที่มีค่าต่ำกว่าใบตัดกึ่งวี คือหนา 11.46 มิลลิเมตร และยาว 20.61 มิลลิเมตร ขณะเดียวกันเมื่อทำการเปรียบเทียบใบตัดกึ่งวีและใบตัดวีพบว่าใบตัดวีสามารถทำให้เกิดเศษการตัดที่มีขนาดเล็กกว่าใบตัดกึ่งวี



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเศษทางปาล์ม รูปแบบใบตัด และจำนวนใบตัด

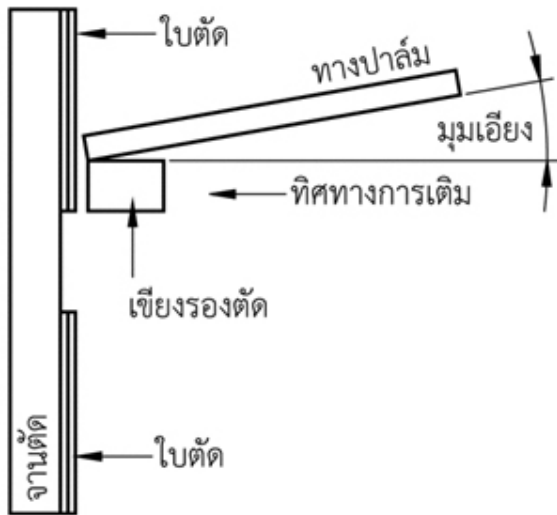
รูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเศษทางปาล์ม รูปแบบใบตัด และจำนวนใบตัดบนจานตัดเครื่องย่อยทางปาล์มที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ระหว่าง 2 ถึง 6 ใบ ในการทดลองหาจำนวนใบตัดที่เหมาะสมในรูปที่ 10 กำหนดใช้ความเร็วรอบการตัด 1200 รอบต่อนาที ซึ่งเป็นความเร็วรอบการตัดที่ทำให้เกิดปริมาณเศษการตัดสูงสุดดังรูปที่ 8 ขณะเดียวกันใบตัดกึ่งวีและใบตัดวีถูกนำมาทำการทดสอบตัดย่อยทางปาล์ม ผลการทดสอบตัดย่อยทางปาล์มพบว่าจำนวนใบตัดที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ปริมาณเศษการตัดทางปาล์มเพิ่มขึ้น และแสดงค่าสูงสุดเมื่อใช้จำนวน

ใบตัด 6 ใบ ผลการทดลองสรุปได้ว่าใบตัด 6 ใบแสดงค่าปริมาณการผลิตเศษสูงสุดที่ประมาณ 6910 กรัม เมื่อเปรียบเทียบผลการใช้ใบตัด 2 แบบ พบว่าใบตัดกึ่งวีแสดงการผลิตเศษได้สูงกว่าใบตัดวี

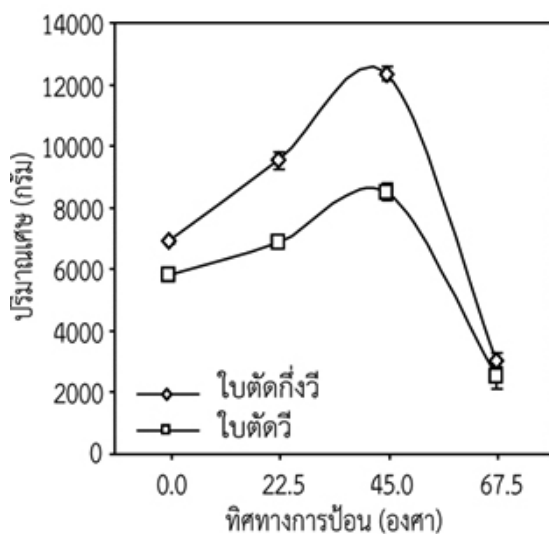
นอกจากนั้นเมื่อทำการเปรียบเทียบขนาดความหนาและความกว้างของเศษการตัดทางปาล์มด้วยใบตัด 2-6 ใบ ด้วยใบตัดกึ่งวีและใบตัดวี พบว่าขนาดของเศษมีการลดลงเมื่อจำนวนใบตัดเพิ่มขึ้น และแสดงค่าความหนาและความยาวของเศษการตัดที่มีค่าใกล้เคียงกันเมื่อทำการตัดด้วยใบตัด 6 ใบดังรูปที่ 11 และมีขนาดความหนาและความยาวของเศษต่ำกว่า 5 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นขนาดที่ใกล้เคียงกับเศษทางปาล์ที่ถูกนำไปทำการเลี้ยงสัตว์และใช้ประโยชน์ในทางเกษตรสวนปาล์ม [3] นอกจากนี้ผลการทดลองยังสอดคล้องกับการตัดย่อยวัสดุเหลือใช้จากการทำนา เช่น ฟางข้าว ที่แสดงผลการใช้ความเร็วสูงประมาณ 720 รอบต่อนาที และจำนวนใบตัดสูงสุด 6 ใบ ที่ทำให้เกิดเศษการตัดที่มีปริมาณสูงและมีขนาดเล็กสุดเมื่อเปรียบเทียบกับจำนวนใบตัดที่ต่ำกว่า [6]

ในการพิจารณาตัวแปรการตัดเพื่อให้ได้เศษตัดที่มีขนาดเล็ก ปริมาณการผลิตเศษสูง ความยากง่ายในการตัดเฉือน และความคงทนของคมตัด ใบตัดที่มีรวมที่ปลายมีดและคมตัดที่น้อยสุด สามารถทำให้เกิดคมตัดที่มีความคมสูง และสามารถกดจมลึกลงไปในเนื้อวัสดุมากกว่า นอกจากนั้นทำให้เกิดการการคลายเศษที่ดีกว่า [11-13] นอกจากนั้นใบตัดที่มุมเอียงรวมของปลายมีดและคมตัดน้อยส่งผลในการลดแรงเสียดทานที่ทำให้เกิดความเสียดทานขณะทำการตัดและเกิดความร้อนขึ้นที่ผิวของคมตัดและวัสดุ ความร้อนเสียดทานที่เกิดขึ้นนี้ทำให้เกิดความท้อหรือการลดความคมของใบตัดอันส่งผลถึงการลดความสามารถในการตัดเฉือนของใบตัดได้ อย่างไรก็ตามการเพิ่มความร้อนเสียดทานบนผิววัสดุนั้นสามารถทำให้เกิดการตัดเฉือนได้ง่ายขึ้น ผิววัสดุที่มีอุณหภูมิสูงเมื่อถูกกดด้วยแรงตัดเฉือนมักเกิดการเปลี่ยนรูปและคมตัดจมลงไปในเนื้อวัสดุง่ายกว่า ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอน

สำคัญในการตัดเฉือนวัสดุเพราะทำให้เกิดการตัดเฉือนง่ายกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุที่ไม่มีการเปลี่ยนรูปบนพื้นผิว [14]



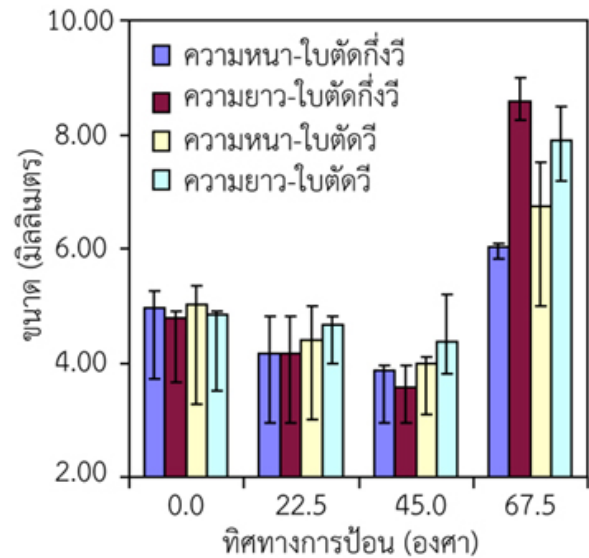
รูปที่ 12 การปรับทิศทางการเดิมทางปาล์ม



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเศษทางปาล์ม รูปแบบใบตัด และทิศทางการป้อน

แนวคิดในการลดแรงเสียดทานและแรงตัด โดยทำการเพิ่มมุมเอียงของใบมีดที่กระทำต่อเนื้อวัสดุจึงถูกนำมาออกแบบการทดลองโดยทำการปรับทิศทางและความเอียงของการเดิมทางปาล์มเข้าสู่ใบตัดดังรูปที่ 12 มุมเอียง 0 องศาตั้งที่ทำการทดลองที่ผ่านมา คือมุมที่ทางปาล์มวางขนานกับแนวระนาบ

การปรับมุมเอียงทิศทางการเดิม คือการทำมุมเอียงกับแนวระนาบดังรูปที่ 12 มุมเอียงนี้กำหนดให้ทำการทดลองที่ 4 มุม คือ 0 ถึง 67.5 องศา



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเศษทางปาล์ม รูปแบบใบตัด และทิศทางการป้อน

รูปที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเศษทางปาล์ม รูปแบบใบตัด และทิศทางการป้อน ทางปาล์มเข้าสู่ใบตัด พบว่า มุมเอียงที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้เกิดการตัดเฉือนได้ง่ายขึ้น ดังปริมาณการผลิตเศษทางปาล์มที่เพิ่มขึ้น ทิศทางการเดิมทางปาล์มที่มีมุมเอียง 45 องศาเป็นทิศทางการเดิมทางปาล์มที่ทำให้เกิดปริมาณการผลิตเศษสูงสุดในการทดลอง มุมเอียงที่เพิ่มขึ้นนั้นทำให้คมตัดถูกกดลงบนเนื้อวัสดุด้วยลักษณะที่เป็นแรงเฉือนเพิ่มขึ้น และมีความต้านทานการกดคมตัดจมลงไปสู่เนื้อไม้ลดลง [11] นอกจากนั้นเมื่อทำการตัดย่อยทางปาล์มด้วยทิศทางการเดิมที่มีมุมเอียงเพิ่มมากขึ้น น้ำหนักของทางปาล์มก่อให้เกิดแรงดันทางปาล์มเข้าสู่ใบตัดเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเพิ่มทิศทางการเดิมให้มีมุมเอียงที่มากกว่า 45 องศา ปัญหาในการใช้งานเครื่องย่อยทางปาล์มได้เกิดขึ้น กล่าวคือการเกิดปริมาณเศษการตัดที่ลดลงเนื่องเกิดการติดตัวโค้งของทางปาล์มที่มีความยาวทำให้ยากแก่การป้อนเข้าสู่ใบตัด นอกจากนั้นน้ำหนักของ

ทางปาล์มเพิ่มแรงดันทางปาล์มเข้าสู่ใบตัดเร็วเกินไป เกิดการดีดตัวออกจากใบตัดของทางปาล์ม และทำให้ การตัดย่อยที่มีเสียงดังเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ ทิศทางการเดิมอื่นๆ

เศษทางปาล์มที่ถูกทำการตัดย่อยด้วย มุมเอียงต่างๆ ถูกนำมาทำการวัดเปรียบเทียบกับเศษ ทางปาล์มที่ถูกตัดย่อยด้วยทิศทางการเดิมที่มีมุมเอียง 0 องศาและแสดงผลการตรวจสอบดังรูปที่ 14 พบว่า มุมเอียงที่เพิ่มขึ้นส่งผลดีในการทำให้เศษปาล์มมีขนาด เล็กกลง และมีค่าเล็กกว่าเศษทางปาล์มที่สามารถนำไป ใช้ประโยชน์ในสวนปาล์มได้ [6] อย่างไรก็ตามปัญหา ที่เกิดขึ้นในการเดิมทางปาล์มที่มีทิศทางมากกว่า 45 องศา ส่งผลทำให้เศษทางปาล์มที่ได้มีขนาดที่ใหญ่ขึ้น และมีค่าที่แตกต่างกันในความหนาและความยาว ของเศษดังแสดงด้วยค่าความผิดพลาดในการวัดขนาด ของเศษทางปาล์มของทิศทางการเดิม 67.5 องศา ในรูปที่ 14

4. สรุปผลการทดลอง

บทความนี้นำเสนอผลการศึกษาสมบัติของ ใบตัดสองชนิดที่มีความเหมาะสมในการตัดย่อยทาง ปาล์มด้วยเครื่องย่อยทางปาล์มใบตัดแนวตั้ง และทำ การประยุกต์ใช้ใบตัดทั้งสองแบบในการตัดย่อยทาง ปาล์มเพื่อหารูปทรงใบตัด จำนวนใบตัด และทิศทาง การเดิมทางปาล์ม ที่สามารถทำให้เกิดเศษทางปาล์ม ที่ปริมาณสูงและขนาดเศษทางปาล์มที่มีขนาดเล็ก ผลการทดลองโดยสรุปมีดังนี้

4.1 ใบตัดทางปาล์มที่ทำจากเหล็กกล้า คาร์บอนไม่ควรทำการอบคืนไฟหลังจากการชุบแข็ง เพราะทำให้ความแข็งและความต้านทานการสึกหรอ ของใบตัดลดลง

4.2 ใบตัดทางปาล์มกึ่งวีเป็นใบตัดที่ให้ความ ต้านทานการสึกหรอและความแข็งที่ดีกว่าใบตัดวี โดยแสดงค่าความแข็ง 481 HV และน้ำหนักสูญหายที่ ปลายมีด 6.24%

4.3 ใบตัดกึ่งวีให้อัตราการผลิตเศษใน แนวโน้มที่สูงขึ้นมากกว่าใบตัดวี ที่ความเร็วรอบสูงสุด 1200 รอบต่อนาทีสามารถผลิตเศษเท่ากับ 3878 กรัม

4.4 จำนวนใบตัดที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้การ ตัดย่อยทางปาล์มมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น และทำให้เกิด เศษการตัดที่สามารถไปใช้ประโยชน์ทางการเกษตร สวนปาล์มได้

4.5 ทิศทางการป้อนที่มีความเอียงส่งผล ทำให้เกิดการลดแรงเสียดทานและทำให้ลดแรงในการ กัดตัดทางปาล์ม และทำให้ง่ายต่อการเดิมทางปาล์ม เข้าสู่ใบตัด

5. ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากเครื่องตัดย่อยทางปาล์มที่ใช้ในการ ศึกษาเป็นเครื่องจักรต้นแบบที่พัฒนาขึ้นในห้อง ปฏิบัติการ ด้วยเหตุนี้อายุการใช้งานของเครื่องจักร รวมทั้งชิ้นส่วนต่างๆ ในสภาวะการใช้งานจริงควรมี การศึกษาและพัฒนาต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements)

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยประจำ ปี 2559 จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

7. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] Eksomtramage W. and Eksomtramage T. Heritability and Correlations of Argonomic Charaters in Tenera Oil Palm Hybrid. Article Journal of Agriculture. 2553;26: 231-239. (in Thai)
- [2] Wikipidia. Palm. Available from: <https://th.wikipedia.org/wiki>. (in Thai).
- [3] Poksawat A., Songkong S. Cutting and Separating Machine Oil Palm Leaves and Fronds Used as Ruminant Animal Feed. Proceeding of the 5th UBU Coference. 2011;August 4-5: 226-234 (in Thai).

- [4] Li Y.G., Ye Q, Fan F., Bao Y., and Huang QX. Finite Element Method Analysis of Effect of Blade Clearance on Plate Shearing Process. *Journal of Iron and Steel Research, International*. 2012;19: 26-29.
- [5] Aslan S., Coşkun, H., and Kılıç, M. The effect of the cutting direction, number of blades and grain size of the abrasives on surface roughness of Taurus cedar (*Cedrus Libani* A. Rich.) woods. *Building and Environment*; 43:696-701.
- [6] Kosoom K. Study and Design of Cutting Blade from Rid Residues. *Proceeding of the 5th Rajamangala University of Technology Conference*. 2014;June 23-25:79-86 (in Thai).
- [7] Kimapong K., Poonnayom P., and Wattanjitsiri V. Microstructure and Wear Resistance of Hardfacing Weld Metal on JIS-S50C Carbon Steel in Agricultural Machine Parts. *Materials Science Forum*. 2016;872:55-61.
- [8] Kimapong K., Triwanapong S., Prasomthong S., and Wattanjitsiri V. Effect of Buffer layer and Hard-faced Welding on Mechanical properties of JIS-S50C Carbon Steel Weld Metal. *Journal of Engineering, RMUTT*. 2016;14:77-90. (in Thai).
- [9] Adelaja AO, Dirker J., and Meyer JP. Effects of the thick walled pipes with convective boundaries on laminar flow heat transfer. *Applied Energy*. 2014;130:838-845.
- [10] Hwang B., Suh DW., and Kim SJ. Austenitizing temperature and hardenability of low-carbon boron steels. *Scripta Materialia*. 2011;64:1118-1120.
- [11] McCarthy CT., Hussey M., and Gilchrist MD. On the sharpness of straight edge blades in cutting soft solids: Part I – indentation experiments. *Engineering Fracture Mechanics*. 2007;74: 2205-2224.
- [12] McCarthy CT., Annaidh AN., and Gilchrist MD. On the sharpness of straight edge blades in cutting soft solids: Part II – Analysis of blade geometry. *Engineering Fracture Mechanics*. 2010;77: 437-451.
- [13] Reilly GA., McCormack BAO., and Taylor D. Cutting sharpness measurement: a critical review," *Journal of Materials Processing Technology*. 2004;153–154:261-267.
- [14] Brown T., James SJ., and Purnell GL. Cutting forces in foods: experimental measurements. *Journal of Food Engineering*. 2005;70:165-170.

Determination of Physical and Thermal Properties of Herbal Compress Ball

Sommai Trichaiyaporn^{1*} Sophida Tangkhananon² Kanlayanee Niyomsat³

Krongkaew Thawilprapa⁴ Nattagul Srisuk⁵

sommai.t@en.rmutt.ac.th¹, Sophida.che@gmail.com², Kanlayaneeniyomsat@gmail.com³,

k.krongkaew@hotmail.com⁴, slowlygul@gmail.com⁵

¹⁻⁵ Department of Chemical and Material Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Received: March 27, 2017
Revised: March 16, 2018
Accepted: August 20, 2018

Abstract

This study investigated determination of physical and thermal properties of herbal compress ball. These properties are dispensable for studying heat transfer mechanism and process because herbal compress balls are generally heated by steam before use. Some physical and thermal properties of dried herbal compress ball were measured and characterized in this study. Some reliable measuring methods of such properties as well as in-house-made gas expansion pycnometer were developed. Experimental results showed that significant physical and thermal properties were successfully measured and in-house-built apparatus could work well with small error ($\pm 0.70\%$). Also, it was obvious that the temperature change in herbal compress ball was strongly affected by diffusion of steam inside the herbal compress ball and its thermal conductivity was close to that of woods.

Keywords: Herbal compress ball, physical properties, thermal properties, heat transfer

1. Introduction

Herbal compress ball (HCB) has been used in Thai culture since historical period. It composes of many kinds of herb such as phlai, turmeric, kaffir lime, lemongrass, tamarind's leaf, *Acacia Concinna's* leaf, borneol camphor, camphor, etc. [1], gathered in a piece of cloth wrapped like a small ball and used for medical purposes such as curing some diseases, relieving physical pains, muscle fatigue, etc. [2] Nowadays HCB has widely been exploited in beauty and spa business. Herbal compress balls have generally been produced in two types: dried and fresh ones.

Fresh HCB is more beautiful, more aromatic and cheaper but it can be kept only 1-2 months in refrigerator. In contrast, dried HCB can be stored longer (12 months) without crucial degradation but its disadvantages are less attractive, less aromatic and more expensive. However, common HCBs sold in markets are dried type

Before use, a dried HCB is commonly sprayed with a small amount of water (to soften it), then heated for 10-15 minutes with steam by using a steam pot. The action of heating with steam causes cell wall to break and herbal substances called active

ingredients are subsequently released to exterior. These active ingredients are important because they contain chemical substances that possess healing ability. Thus heat transfer process from steam to the HCB obviously plays an important role as a key factor that controls releasing rate of active ingredients, and consequently healing quality.

Literature review shows that researches related to HCB are somewhat available, but majority of them concern analyzing of active ingredients. Very rare information on heat transfer in which we are interested has been found. This present work is aimed on one hand to determine some physical and thermal properties of HCB which are dispensable for investigating heat transfer process during steaming, and on the other hand to develop reliable methods of measurement for some physical and thermal properties with in-house-made apparatus. These are steps to undergo prior to deal with heat transfer problems.

2. Materials

Herbal compress balls, as shown in Fig. 1, were purchased from Thai Medical College, Rajamangala University of Technology Thanyaburi and tested without further treatment. It composed of phlai, turmeric, zedoary, *Acorus Calamus*, wild turmeric, kaffir lime, lemongrass, tamarind's leaf, *Acacia Concinna's* leaf, borneol camphor, and camphor. HCB consists of two parts: bulb and handle. The herbal particles are in the bulb only.

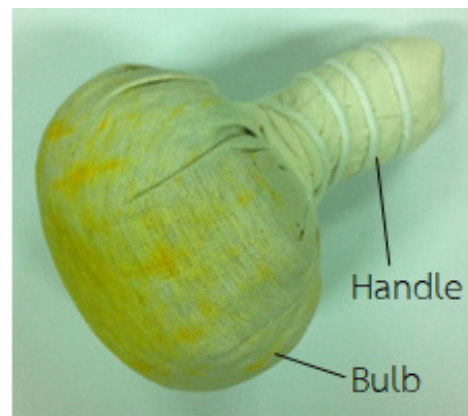


Fig.1 Herbal compress ball

3. Methods of measurement and apparatus

3.1 Mean diameter

Foods and grains have normally non-geometric shape. Therefore their sizes are usually reported in geometric mean diameter (*GMD*). Mohsenin [3] proposed to use 3 lengths measured in 3 different axes (length, width and thickness) in determining *GMD* of plants and animal materials. However, since HCB has a ball-like shape, it is better to represent the average diameter by using 4 diameters measured at 4 different angles (0, 45, 90 and 135° from horizontal line) as written in Eq. (1),

$$GMD = (ABCD)^{1/4} \quad (1)$$

where *A*, *B*, *C* and *D* are diameters measured at 0, 45, 90 and 135° respectively. A Vernier caliper (Always) was used to measure all HCB's diameters.

3.2 Density and void fraction

Density of a material is defined as a ratio between its mass and volume occupied by that mass. To determine the density, one must know the volume of the object

being measured. Since the HCB is made by wrapping small pieces of herbs with a cloth as a bulb, it contains void in its bulb and thus 2 types of density can be measured: true and bulk density. The bulk volume was obtained by using *GMD* with an assumption of spherical shape of the bulb. The true volume of solid was measured by using a method of gas displacement [4, 5, 6]. The device is called “gas expansion pycnometer”. An in-house-built pycnometer, as shown in Fig. 2, composed of 2 cylindrical stainless-steel vessels of known volume, one was empty and the other contained HCB sample. They were connected with a ball valve at the lower part of the vessels. In the experiment the empty vessel was filled with dry compressed air to a pre-determined pressure while the other was at atmospheric pressure. After that the connection valve was open and the pressures

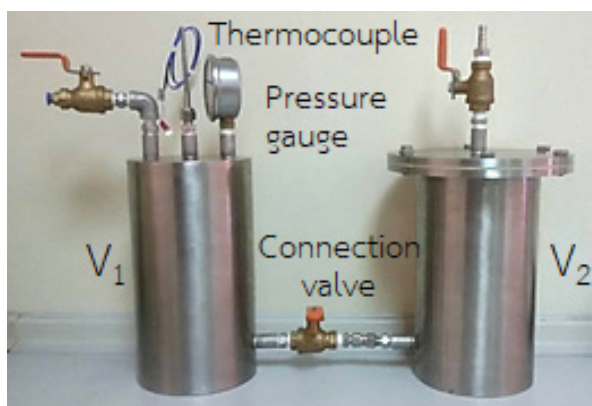


Fig. 2 In-house-made gas expansion pycnometer

in both vessels were allowed to equalize. The final pressure was recorded and the true volume of the sample was then determined by using Eq. (2),

$$V_s = V_2 + V_1 \left(1 - \frac{P_{1g}}{P_{fg}} \right) \quad (2)$$

Where

V_s was true volume of sample
 V_1, V_2 were spatial volume of vessel 1 and 2 respectively
 P_{1g} was gauge pressure of vessel 1 and
 P_{fg} was final gauge pressure of both vessels.

A type K thermocouple and a pressure gauge were installed at vessel 1 to measure system temperature and pressure.

Eq. (2) was particularly derived for the case of which the sample was placed in a non-pressurized vessel. This equation was modified from the equation of Tamari [7] for which the sample was put in the pressurized vessel.

Once the true volume was determined, the true density (ρ) of HCB was then calculated by using Eq. (3).

$$\rho = \frac{M}{V_s} \quad (3)$$

For the bulk density (ρ_b), it was obtained by employing Eq. (4) [8]

$$\rho_b = \frac{M}{(\pi/6)(GMD)^3} \quad (4)$$

Once ρ and ρ_b were known, the void fraction of HCB could be determined by employing a relation shown in Eq. (5)

$$\varepsilon = 1 - \frac{V_s}{V_b} = 1 - \frac{\rho_b}{\rho} \quad (5)$$

3.3 Sphericity

Sphericity (ϕ_s) is a parameter that describes how similar to a sphere an object is. Therefore a sphere will have the sphericity of 1. Mohsenin [3] proposed relation between sphericity and GMD as shown in the following equation:

$$\phi_s = \frac{(ABC)^{1/3}}{A} \quad (6)$$

Where A , B and C were length, width and thickness of material respectively. With little modification, we proposed an equation for determining of HCB to be:

$$\phi_s = \frac{GMD}{\text{longest diameter}} \quad (7)$$

3.4 Moisture content

Dried HCB has some moisture content. In Thai community product standard 176/2553 [9], it must not be greater than 14% on wet basis. Many standard methods for moisture content determination are available. In this work AOAC 925.10 [10] was employed. Sample (HCB) was placed in an oven, in which the temperature was controlled at 120°C, for 2 hours. The moisture content (wet basis) was determined by the difference between the weight of sample before and after drying in the oven as written in Eq. (8).

$$MC = \frac{W_i - W_f}{W_i} \times 100\% \quad (8)$$

3.5 Heat capacity

Heat capacity (c_p) is one of the most important thermal properties of a material. It explains how much heat must be applied to an object of a unit mass to raise its

temperature by 1 degree. Several methods for determining c_p exist. One of the most convenient methods is “Differential Scanning Calorimetry” (DSC). In the present work, the Perkin Elmer, USA model DSC 8000 was used to determine c_p of HCB sample. The HCB had to be unwrapped and the herbal content was transferred into a cutting machine in which the herbal content would be reduced into small particles. The particles then were packed in a sample pan and placed in the DSC in order to perform c_p measurement with an empty pan as reference.

3.6 Thermal conductivity

Thermal conductivity (k) of a material is a property that indicates how fast a material can conduct heat across itself. Materials of high thermal conductivity have higher rate of heat transfer by conduction than those of low thermal conductivity. Direct measurement of HCB’s thermal conductivity is difficult to perform because HCB is a mixture of several kinds of herb particles. In the present work, indirect method was attempted by wrapping the HCB with a plastic film and heating it in a steam pot. In this case no steam was allowed to diffuse into the bulb of the HCB, consequently heat was carried from the surface to the center of HCB by conduction alone.

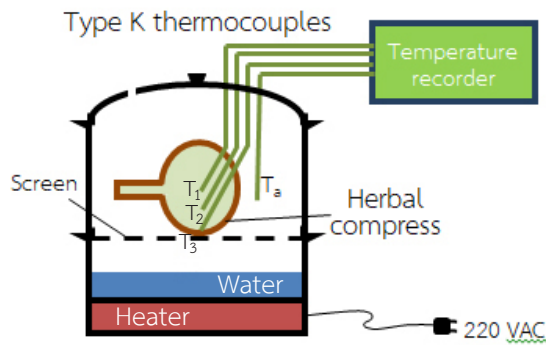


Fig. 3 Experimental setup

Fig. 3 shows the experimental setup. It composed of 2-chamber steam pot with a lid. Water was filled in the lower chamber to produce steam by using electric heater (220V, 1,300 Watts) and the HCB was placed on the screen located in the upper chamber. Four type K thermocouples were mounted through the lid, three of them were situated at the surface (under the cloth), at half the radius ($R/2$) and at the center of HCB. The last one was at the spatial room of the upper chamber to measure steam temperature. The four temperatures were recorded during steaming process until all temperatures were constant at their maximum values. The phenomena occurred in this system were the case of unsteady state conduction problem under conditions of negligible surface resistance ($Bi \gg 0.1$). In this case and for one-dimensional heat flow, the solution for the temperature history has to follow Fourier equation [11],

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (9)$$

with the initial and boundary conditions

$$T = T_0(x) \text{ at } t = 0 \text{ for } 0 \leq x \leq L$$

$$T = T_s \text{ at } x = 0 \text{ for } t > 0$$

and

$$T = T_s \text{ at } x = L \text{ for } t > 0$$

Where L is thickness/2. For the case in which the conducting object has a uniform initial temperature, solving of Eq. (9) gives the following solution

$$\frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \sin\left(\frac{n\pi}{L}x\right) e^{-(n\pi/2)^2 Fo} \quad (10)$$

where $n = 1, 3, 5, \dots$

The central history as well as at the surface and at midpoint of the plane wall, infinite cylinder, and sphere are presented in the form of Heissler charts as shown in Fig. 4 [11] allowing graphical method problem solving. The charts have four parameters, as shown in table 1: with unaccomplished change (Y) on the y-axis, the relative time (X) on the x-axis and the last two terms (n and m) as selectable parameters. For radial-direction heat transfer in a sphere, the characteristic length x becomes any radius r and x_1 is the radius R of the sphere.

To solve such kind of problem, it is necessary to know the convective heat transfer coefficient (h). Ainong [12] compared methods of determining heat transfer coefficients over moist food materials and proposed a following equation allowing prediction of h ,

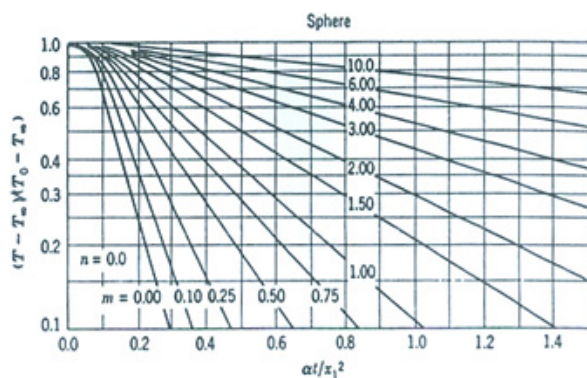


Fig. 4 Central temperature history of a sphere with initial uniform temperature [11]

Table 1 Symbols for unsteady-state chart

	Parameter symbol	Heat conduction
Unaccomplished change, (a dimensionless ratio)	γ	$\frac{T_{\infty} - T}{T_{\infty} - T_0}$
Relative time	X	$\frac{\alpha t}{x_1^2}$
Relative position	n	$\frac{x}{x_1}$
Relative resistance	m	$\frac{k}{hx_1}$

$$h = 0.594 \left[\frac{k_f^3 \rho_f^2 h_{fg}}{\mu_f} \right]^{0.25} \frac{1}{(T_a - T_s)^{0.70}} \quad (11)$$

where k_f was thermal conductivity of steam, ρ_f density, μ_f viscosity and h_{fg} latent heat of vaporization of steam respectively, T_a ambient (steam) temperature and T_s surface temperature. Eq. (11), obtained by Inverse Calculation Method, was originally developed for steam cooking of surimi paste, packed on an insulated stainless-steel tray, with uniform initial temperature of 12-14°C in a steam

chamber using saturated steam at 100°C and 1 atm as the heating medium. One-dimensional heat conduction was assumed for heat transfer in surimi paste. Eq. (11) relates heat transfer coefficient (h) with thermal properties of the steam and the temperature difference between the ambient and the surface, no characteristic length appears in the equation. This provides simplicity in estimating heat transfer coefficient (h).

4. Results and Discussions

4.1 Mean diameter, sphericity, density and void fraction

The gas expansion pycnometer was first calibrated with a sample of known volume (a cube of wood of 7.70×7.85×7.60 mm). It was found that the volume determined by the pycnometer was 462.593 cm³ while the true volume was 459.382 cm³ which gave an error of ±0.70%.

Geometric mean diameter (GMD), true and bulk density, void fraction and sphericity of HCB tested in experiments are shown in table 2.

Table 2 Geometric mean diameter (GMD), true and bulk density, void fraction and sphericity of herbal compress ball

no.	GMD (mm)	ρ (kg/m ³)	ρ_b (kg/m ³)	ε	ϕ_s (-)
1	83.76	946.84	627	0.338	0.888
2	87.09	n.a.	n.a.	n.a.	0.897
3	87.67	n.a.	n.a.	n.a.	0.887
4	89.27	n.a.	n.a.	n.a.	0.881
5	87.45	n.a.	n.a.	n.a.	0.945

It was seen that the HCBs used were almost round, like a sphere. They had sphericity in the range of 0.881-0.945. The true and bulk density of sample no.1 had extendedly been determined. The results implied that HCB tested was moderately packed and sufficient room was provided for steam to diffuse through the HCB's bulb, helping for heat transfer rate to increase significantly.

4.2 Moisture content

The moisture content (wet basis) obtained after 2 hours of drying in an oven at 120°C (AOAC 925.10 method) was 6.78% which was within the standard value of 14%. Moreover, we had continued to further dry the HCB sample until nearly constant weight was attained and a result of 12.57% was obtained which was still in the limit of the standard value. The additional weight loss was probably due to loss of some volatiles remained in the sample.

4.3 Heat capacity

The experimental result of DSC for HCB sample was shown in Fig. 5.

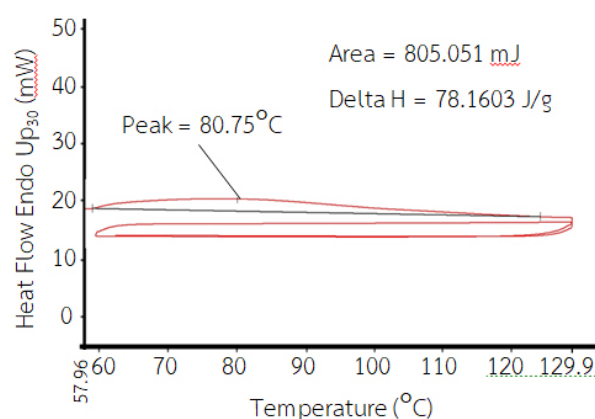


Fig. 5 DSC result: heat flow vs. temperature of HCB

It gave heat capacity of 1.1798 kJ/kg·°C for the scanning temperature range of 60-130°C.

4.4 Thermal conductivity

The change of 4 temperatures recorded during steaming process with wrapped HCB is shown in Fig. 6 and Fig. 7 shows the temperature change of bear HCB. As one could see, all temperatures increased from their initial temperatures to a maximum value which was close to steam temperature as time passed. The surface temperature started to rise first, then the temperature at R/2 and the central temperature was the last one. In both cases (wrapped and bear) the surface temperatures had already reached their maximum temperatures while the central temperatures still remained at their initial temperatures. At the end all temperatures stayed constant at their maximum values. The time needed for central temperature to reach its maximum value for bear HCB was 11 minutes, while for wrapped HCB it required 32 minutes. We could say that the heat transfer rate was nearly 3 times higher for bear HCB than that of wrapped HCB. It was certainly due to heat transfer by steam diffusion inside the bulb. Also it should be noted that some values of T_1 , T_2 and T_3 were slightly higher than steam temperature (T_a); this was probably due to instrumental error.

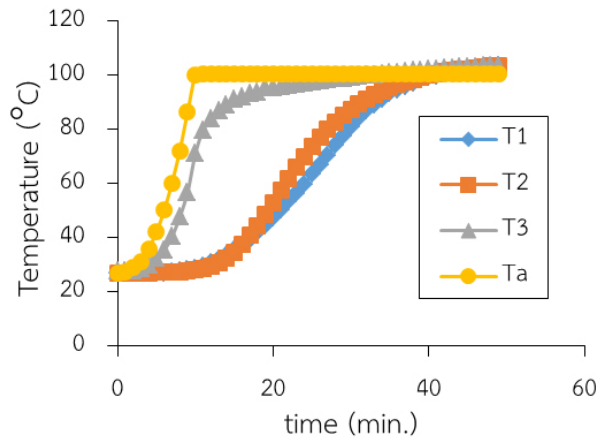


Fig. 6 Change of temperatures during steaming of wrapped HCB (T_a =steam, T_3 =surface, T_2 =R/2 and T_1 =center) (d_p =0.0917 m, ρ_b = 493.67 kg/m³, c_p =1179.8 J/kg·K)

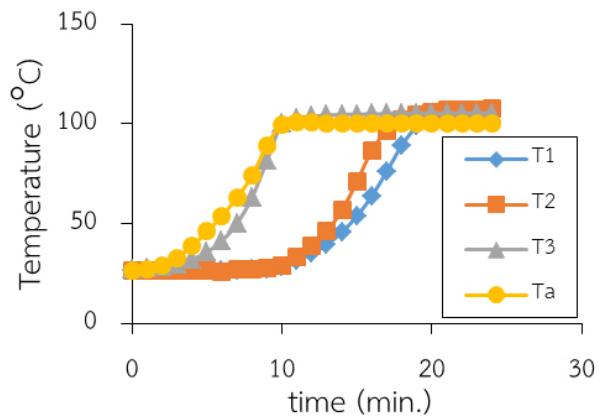


Fig. 7 Change of temperatures during steaming of bare HCB (T_a =steam, T_3 =surface, T_2 =R/2 and T_1 =center) (d_p =0.0941 m)

To determine thermal conductivity (k) of HCB, the data for the case of wrapped HCB and the Heissler chart were used. To solve the problem, we needed to know heat transfer coefficient (h), from ambient steam to the HCB's surface, in the relative resistance parameter (m) and h could be calculated by using Eq. (11). Fig. 8 showed the values of h calculated and surface temperature (T_3) of HCB sample as a function of time. Consistently

with Eq. (11) the values of h increased with increasing in surface temperature (T_3).

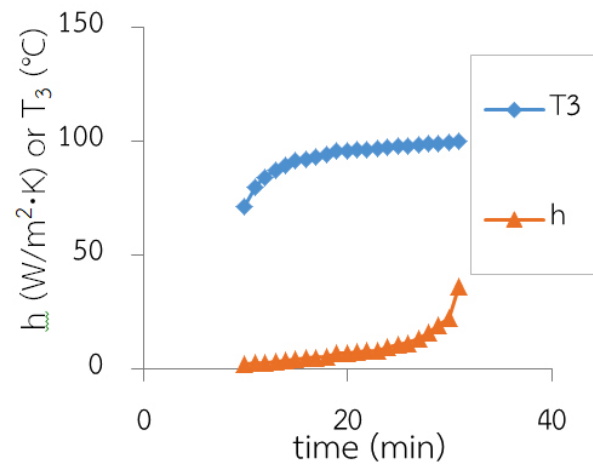


Fig. 8 h calculated and surface temperature (T_3) of HCB sample vs. time

By selecting the central point of the bulb, the relative position (n) became 0. The solving procedure was trial and error method with the following steps:

- Calculate Y .
- Assume m .
- For $n = 0$, read X which corresponded to the intersection between Y and m values.
- Knowing X then k could be calculated.
- Check whether k calculated gave the same m as assumed (if not the case, assume new value of m and redo solving).

In order to be able to calculate h by using Heissler chart and Eq. (11) we chose to investigate the value of central temperature between 10 to 31 minutes which were correspondent to the temperature range of 84-93°C for the reason that during this time the steam temperature (T_a) had already reached 100°C and stayed constantly at this value. The thermal conductivity (k) of

HCB obtained was 0.256-0.449 W/m·K in the temperature range selected (84-93°C). These values of k gave Bi in the range of 1.23 to 2.15 which satisfied the condition of negligible surface resistance ($Bi \gg 0.1$).

5. Conclusions

The experimental results obtained can be drawn for the following conclusion:

1. Important physical and thermal properties of herbal compress ball were successfully determined in this work.

2. True volume of HCB can be reliably determined by a gas expansion pycnometer built in our laboratory.

3. Diffusion of steam plays an important role in increasing temperature of HCB during steaming, it makes increasing the heating rate to be 3 times faster.

4. The thermal conductivity (k) of HCB obtained in the range of 84-93°C is about 0.256-0.449 W/m·K which is close to that of woods ($k \sim 0.04$ -0.21 W/m·K, across grain) [13].

Though successful results, direct measurement method of k should be performed in the next step in order to validate the values above. Also, it will be very interesting to compare heat transfer phenomena with a mathematic simulation.

6. Acknowledgement

This work was granted by the Research and Development division, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi.

Nomenclature

A, B, C, D	Diameter at 0, 45, 90 and 135° respectively or distance (m)
c_p	Heat capacity (kJ/kg·°C, J/kg·K)
d_p	Diameter of particle (m)
h	Convective heat transfer coefficient (W/m ² ·K)
k	Thermal conductivity (W/m·K)
L	Thickness/2 (m)
M	Mass (kg)
MC	Moisture content (%)
P	Pressure (atm)
R	Radius (m)
t	Time (min)
T	Temperature (°C)
V	Volume (m ³)
W	Weight (kg)
x	Any radius or distance (m)
x_1	Radius of a sphere (m)
α	Thermal diffusivity = $k\rho/C_p$ (m ² /s)
ε	Void fraction (-)
ϕ_s	Sphericity (-)
ρ	Density (kg/m ³)

Dimensionless parameters

Bi	Biot number (hV/A)/ k (-)
Fo	Fourier number ($\alpha t/(V/A)^2$) (-)

Index

1, 2	Vessel number 1 and 2 respectively
b	Bulk
f	Final or fluid
g	Gauge
i	Initial
s	Sample

7. References

- [1] Department of Science Service, Ministry of Science and Technology. Herbal compress Ball (Dry). [Internet] 2012 [Cited 2016 May 3]. Available from: <http://www.siweb.dss.go.th/bct/full-text/report/otop1.pdf> (in Thai)
- [2] Be Thanks. Herbal Heritage of Thailand. [Internet]. 2016 [Cited 2016 May 3]. Available from: <http://www.bethanks.com/index.php/en/articles/201-2013-06-26-02-31-50>(in Thai)
- [3] Mohsenin NN. Physical Properties of Plants and Animal Materials. New York: Gordon and Breach, Science Publishers Inc; 1980.
- [4] Shea JE. US Patent 2,667,782. Apparatus for measuring volumes of solid materials. 1954.
- [5] Turner PL, Gilkey RW, Lagus PL. US Patent 4,083,228. Gas comparison pycnometer. 1978.
- [6] Furuse A. US Patent 4,888,718. Volume measuring apparatus and method. 1989.
- [7] Tamari S. Optimum Design of the Constant-volume Gas Pycnometer for Determining the Volume of Solid Particles. Meas. Sci. Technol. 2004; 15:549–558.
- [8] Buckman HO, Brady NC. The Nature and Property of Soils - A College Text of Edaphology. 6th ed. New York: MacMillan Publishers; 1960.
- [9] Thai community product standard 176/2553. Thai Industrial Standards Institute, Ministry of Industry. 2010. (in Thai)
- [10] The Association of Official Analytical Chemists. AOAC Official Method 925.10 - Solid (Total) and Moisture in Flour, Air Oven Method. In Official Methods of Analysis of AOAC INTERNATIONAL. 17th ed. 2nd Rev. Ch32, p1. Gaithersburg, MD: The Association of Official Analytical Chemists, International; 2002.
- [11] Welty JR, Wicks CE, Wilson RE. Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons; 1984.
- [12] Ainong (Ellen) S. Comparative Methods of Determining Heat Transfer Coefficients over Moist Food Materials. [Master of Science Thesis]. Oregon State University; 1997.
- [13] Perry RH. Perry's Chemical Engineers' Handbook. 6th ed. Japan: McGraw-Hill; 1984.

การวิเคราะห์ความเสี่ยงโซ่อุปทานโดยชี้วัดความสามารถในการแข่งขันของวิสาหกิจ
ขนาดกลางและขนาดย่อม : กรณีศึกษาโรงงานฉีดพลาสติก
An Analysis of Supply Chain Risk Management (SCRM)
in Competitiveness Indicators :
A Case study of Injection Plastics Factory

ปฐมพงษ์ หอมศรี^{1*} เลิศเลขา ศรีรัตน์² และกฤษดา พิศลยบุตร³

Patomphon Homsri^{1*}, Lerdlekha Sriratana² and Krisda Bisalyaputra³

patomphon.homsri@gmail.com^{1*}, lerdlekha@hotmail.com², Akrisda@hotmail.com³

¹⁻³ สาขาวิชาการตรวจสอบและกฎหมายวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง

¹⁻³ The Inspection and Engineering Law graduate degree program Ramkhamhaeng University

Received: September 7, 2017

Revised: January 16, 2018

Accepted: March 26, 2018

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประเภทของความเสี่ยงที่เกิดขึ้นในโซ่อุปทานของโรงงานผลิตชิ้นส่วนฉีดพลาสติก สำหรับชิ้นส่วนยานยนต์ โดยทั่วไปแล้วความเสี่ยงจะประกอบด้วยความเสี่ยงภายในและความเสี่ยงภายนอกโดยได้จำแนกประเภทของความเสี่ยงออกมาได้เป็น 6 ประเภทของความเสี่ยงที่เกิดขึ้นได้แก่ ความเสี่ยงด้านอุปสงค์ ความเสี่ยงด้านการผลิต ความเสี่ยงด้านอุปทาน ความเสี่ยงด้านข้อมูล ความเสี่ยงด้านขนส่ง และความเสี่ยงด้านการเงิน ทำการสอบถามผู้ประกอบการเพื่อประเมินความสามารถในการแข่งขันของผู้ประกอบการ งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น AHP เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของประเภทความเสี่ยงและหัวข้อของ SCOR Model ทั้งเกณฑ์หลักและเกณฑ์ย่อยเพื่อหาน้ำหนักความสำคัญของแต่ละประเภทของความเสี่ยงและหลังจากนั้นได้ทำการแก้ไข้ปัญหาที่เกิดขึ้นโดยใช้หลัก IE Technique ต่างๆ เพื่อแก้ไข้ปัญหาที่เกิดขึ้นและติดตามผลที่เกิดขึ้นหลังการแก้ไข้เพื่อเทียบกับตัวชี้วัดความสามารถในการแข่งขันของผู้ประกอบการหลังการปรับปรุงอีกครั้ง ผลการวิจัยพบว่าความเสี่ยงที่ส่งผลกระทบต่อความเสียหายต่อการดำเนินงานที่มีความสำคัญอยู่ใน 3 อันดับแรก ได้แก่ ของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต, ความพยากรณ์ไม่มีความแม่นยำ และ รอบเวลาเฉลี่ยของสินค้าคงคลังในคลังสินค้า

คำสำคัญ: แบบจำลองอ้างอิงการดำเนินงานโซ่อุปทาน กระบวนการวิเคราะห์ลำดับชั้น การจัดการความเสี่ยงของโซ่อุปทาน

Abstract

This research aims to study the types of risks that occur in the supply chain of plastic injection molding parts. In general, the risk consists of internal and external risks, whereby the risk is classified into six types : demand risk manufacturing risk, supply risk, information risk, transportation risk and financial risk. Entrepreneurs were required to evaluate the competitiveness of enterprise. This research was analyzed by AHP technique to identified the relationship of risk categories and SCOR model topic in major and minor criteria to determine the important weight of each type risks. After that, IE technique were applied to solve the problems and monitor the results after improvement in orders to compare with competitiveness indicators. The research found the top three critical type of risks effect on the factory operation were defect from production process, unaccuracy forecasting and average inventory cycle time.

Keywords: Supply Chain Operation Reference (SCOR) Analytic Hierarchy Process (AHP) Supply Chain Risk Management (SCRM)

1. บทนำ

สืบเนื่องจากแผนยุทธศาสตร์การพัฒนาระบบ โลจิสติกส์แห่งชาติ ฉบับที่ 2 พ.ศ. 2556-2560 ที่มุ่งเน้นการพัฒนาภายใต้กรอบยุทธศาสตร์ที่สำคัญ โดยเป็นที่ยอมรับของนักวิชาการและวงการธุรกิจ สากลว่า การแข่งขันในภาคธุรกิจ (Competition Landscape) ส่วนใหญ่ได้ยกระดับจากการแข่งขันที่ระดับหน่วยธุรกิจหรือบริษัทเดียวไปสู่การแข่งขันที่ระดับโซ่อุปทาน ผู้ประกอบการที่ต้องการจะสร้างหรือรักษาความสามารถในการแข่งขันของตน จะไม่มองเพียงแค่กิจกรรมที่ดำเนินการภายในหรือบริษัทของตนเอง แต่จะต้องมองไกลไปถึงปัจจัยที่จะส่งผลกระทบต่อกิจการของตนตลอดห่วงโซ่อุปทาน (Supply Chain) ทั้งในแง่ของต้นทุนปัจจัยการผลิตที่รับจากผู้ขาย (Supplier) ประสิทธิภาพการผลิตหรือการประกอบการอย่างบูรณาการ และความสามารถในการตอบสนองความต้องการของลูกค้าของบริษัท ตลอดจนลูกค้าคนสุดท้ายในโซ่อุปทานว่าทั้งหมดเหล่านี้มีส่วนต่อการกำหนดความสามารถของธุรกิจในการสร้างและเก็บเกี่ยวมูลค่าทางเศรษฐกิจจากโซ่คุณค่า (Value Chain) ของตนเอง

เพื่อให้ความสอดคล้องกับเวทีการแข่งขัน และการเปลี่ยนแปลงบริบททั้งภายในและภายนอกที่โครงสร้างโซ่อุปทานของภูมิภาค เพื่อลดความเสี่ยงจากภัยพิบัติที่ก่อให้เกิดการหยุดชะงักของโซ่อุปทาน (Supply Chain Disruption) เพื่อตอบสนองต่อความได้เปรียบในการแข่งขันโดยเปรียบเทียบ (Comparative Advantage) ที่เกิดจากการความต่างศักยภาพระดับการพัฒนาของกลุ่มประเทศในภูมิภาคนี้ รวมทั้งความร่วมมือทางเศรษฐกิจอาเซียน (AEC)

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประเภทของความเสี่ยงโซ่อุปทานโดยอ้างอิงจากมาตรฐานแบบจำลองอ้างอิงการดำเนินงานโซ่อุปทาน (Supply Chain Operation Reference Model : SCOR) เพื่อชี้วัดความสามารถในการแข่งขันของผู้

ประกอบการวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม หรือ SMEs โดยทำการวินิจฉัยปัญหาเพื่อจัดลำดับความสำคัญของปัญหาและความเสี่ยงผู้ประกอบการ SMEs เพื่อจะลดความเสี่ยงต่างๆ ลง

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ห่วงโซ่อุปทาน (Supply Chain) นั้น ในตอนแรกได้ริเริ่มมาจากกิจกรรมสายการลำเลียงทางด้านการทหารโดยเฉพาะทางด้านเสบียงอาหาร หรือยุทธโศปกรณ์ทางการรบหรืออีกความหมายหนึ่งคือเป็นกิจกรรมต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการบูรณาการ และการจัดการในองค์กรที่ได้มีการนำโซ่อุปทานและ กิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับความร่วมมือ ที่มีผลกระทบต่อ กระบวนการทางธุรกรรมในอันที่จะเสริมสร้างให้มีมูลค่าเพิ่มในสินค้าและบริการในอันนำมาซึ่งความสามารถในการแข่งขันได้อย่างยั่งยืน [1]

2.2 แบบจำลองอ้างอิงการดำเนินงานโซ่อุปทาน (Supply Chain Operation Reference Model: SCOR Model) แบบจำลองนี้เป็นการบูรณาการแนวคิดที่สำคัญของการรีเอนจิเนียริง กระบวนการทางธุรกิจ (Business Process Reengineering) การเทียบเคียง (Benchmarking) และการวัดกระบวนการ (Process Measurement) เพื่อให้เกิดแนวทางมาตรฐานที่จะนำไปสู่การกรอบการทำงานร่วมกันระหว่างแผนกในองค์กร ซึ่งขอบเขตของแบบจำลองจะครอบคลุมถึงขั้นตอนการปฏิสัมพันธ์กับลูกค้าทั้งระบบตั้งแต่การจัดหาวัตถุดิบจนถึงการจัดส่งสินค้า ความเข้าใจอุปสงค์โดยรวมและการเติมเต็มของคำสั่งซื้อ (Order Fulfillment) จากทฤษฎี SCOR มีพื้นฐานขององค์ประกอบหลักการทางด้านการจัดการ 6 ประการได้แก่ การวางแผน (Plan) การจัดซื้อ (Source) การผลิต (Make) การจัดส่ง (Delivery) การจัดส่ง (Delivery) และ การทำให้เกิดขึ้น (Enable) [2]



รูปที่ 1 กระบวนการจัดการหลัก 6 ประการ [3]

2.3 ความเสี่ยงในโซ่อุปทาน เป็นความเสี่ยงที่เกิดขึ้นเมื่อมีเหตุการณ์ที่ไม่คาดคิด ที่ซึ่งอาจจะเกิดการรบกวนต่อกระแสการเดินทางของวัตถุดิบ (สินค้า) จากผู้จัดหาเริ่มต้นจนถึงมือลูกค้าคนสุดท้าย ความเสี่ยงในโซ่อุปทาน แบ่งออกได้ตามพื้นฐานเป็น 2 ประเภท [4][5] คือ

2.3.1 Internal Risk เป็นความเสี่ยงที่เกิดขึ้นภายในการดำเนินการปกติ เช่น การจัดส่งล่าช้า สินค้าคงคลังขาด เกิน การพยากรณ์ที่คาดเคลื่อน ความเสี่ยงทางการเงิน ความล้มเหลวของเทคโนโลยี เป็นต้น

2.3.2 External Risk คือ ความเสี่ยงที่เกิดขึ้นมาจากภายนอกของโซ่อุปทาน เช่น แผ่นดินไหว โรคระบาด พายุเฮอริเคน การก่อการร้าย การเมือง วิกฤตทางการเงิน เป็นต้น

นอกจากการแบ่งประเภทของความเสี่ยงในโซ่อุปทานเป็นแบบภายนอกและภายในแล้ว ยังได้มีการแบ่งประเภทของความเสี่ยงที่มีผลต่อโซ่อุปทานไว้ดังนี้ ความเสี่ยงด้านอุปทาน (Supply Risk) ความเสี่ยงการดำเนินงาน (Operations Risk) ความเสี่ยงด้านอุปสงค์ (Demand Risk) ความเสี่ยงทางด้านความปลอดภัย (Safety Risk) ความเสี่ยงทางด้านเศรษฐกิจมหภาค (Macro Risk) ความเสี่ยงทางการเมือง (Political Risk) ความเสี่ยงด้านการแข่งขัน (Competitive Risk) และความเสี่ยงด้านทรัพยากร (Resource Risk) [1] [6]

จากบทความของ Quick Scan Audit Methodology (QSAM) ได้ให้คำจำกัดความของความไม่แน่นอนของโซ่อุปทานใน 4 ด้าน [1] ดังนี้

- Supply uncertainty เป็นความไม่แน่นอนที่เกิดจากด้านอุปทาน
 - Demand uncertainty เป็นความไม่แน่นอนที่เกิดจากด้านอุปสงค์
 - Process uncertainty เป็นความไม่แน่นอนที่เกิดจากกระบวนการดำเนินงาน
 - Control uncertainty เป็นความไม่แน่นอนที่เกิดจากการควบคุมการดำเนินการในโซ่อุปทาน
- นอกจากนี้จากการค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องสามารถจำแนกประเภทของความเสี่ยงได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตัวอย่างประเภทของความเสี่ยงที่เกิดขึ้นจากการสังเคราะห์บทความและงานวิจัยในการออกแบบสอบถามภายในห่วงโซ่อุปทาน [7]

ประเภทของความเสี่ยง	งานวิจัย/บทความที่เกี่ยวข้อง								
	Olson and Wu (2010)	Pujawan and Geraldin (2007)	Keirsten et al. (2007)	สกลย (2553)	Chopra and Sodhi (2004)	Tunc and Alpan (2010)	Tunc and Alpan (2010)	Walker (2003)	Tummala and Schoenherr (2011) Samvedi, Jain, and Chan (2013)
1. ความเสี่ยงด้านสภาพแวดล้อม		✓				✓	✓	✓	✓
2. ความเสี่ยงด้านยุทธศาสตร์					✓				
3. ความเสี่ยงด้านการแข่งขัน	✓							✓	
4. ความเสี่ยงด้านการตลาด	✓							✓	✓

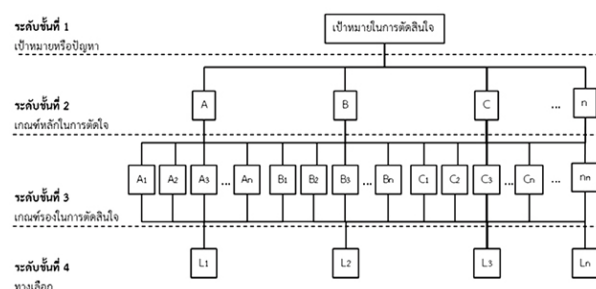
5. ความเสี่ยงด้านการผลิต	✓		✓		✓	✓	✓	✓	✓
6. ความเสี่ยงด้านการขนส่ง		✓			✓				
7. ความเสี่ยงด้านอุปทาน					✓				
9. ความเสี่ยงด้านอุปสงค์					✓				
10. ความเสี่ยงด้านข้อมูล					✓				
12. ความเสี่ยงด้านการเงิน					✓				

2.4 กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analysis Hierarchy Process) [8]

การตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์ (Multiple Criteria Decision Making) เป็นการตัดสินใจโดยพิจารณาประเมินหลักเกณฑ์หลายทางเลือก โดยการเปรียบเทียบหลักเกณฑ์แต่ละด้าน ซึ่งเป็นขั้นตอนการกำหนดหลักเกณฑ์จากการประเมินด้วยกระบวนการกระบวนการเรียงลำดับความสำคัญ โดยเทคนิคกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytic Hierarchy Process) หรือเรียกสั้นๆ ว่า AHP เป็น เทคนิคหนึ่งของการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินผลมีความซับซ้อนการตัดสินใจเป็นลำดับชั้น โดยจัดโครงสร้างของเกณฑ์หลายตัวเลือกเป็นลำดับชั้นเพื่อการประเมินความสำคัญของเกณฑ์ คือการกำหนดเป้าหมาย (Goal) แล้วจึงกำหนดเกณฑ์ (Criteria) เกณฑ์ย่อย (Sub criteria) และทางเลือก (Alternatives) ตามลำดับวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการประเมิน

ด้วยการเปรียบเทียบปัจจัยเป็นรายคู่ (Pairwise) ในการประเมินค่าน้ำหนักความสำคัญเพื่อจัดลำดับความสำคัญของเกณฑ์ในการหาทางเลือกที่ดีที่สุด ซึ่งการดำเนินการของวิธี AHP ดังนี้

การสลายปัญหาที่ซับซ้อนให้อยู่ในรูปของแผนภูมิโครงสร้างเป็นลำดับชั้นซึ่งแต่ละระดับชั้นประกอบไปด้วยเกณฑ์ในการตัดสินใจที่เกี่ยวข้องกับปัญหานั้นระดับชั้นบนสุดเรียกว่าเป้าหมายโดยรวม ซึ่งมีเพียงปัจจัยเดียวเท่านั้นระดับชั้นที่ 2 อาจมีหลายปัจจัยขึ้นอยู่กับว่าแผนภูมินั้นมีทั้งหมดกี่ระดับชั้นที่สำคัญที่สุดปัจจัยต่างๆ ในระดับชั้นเดียวกันต้องมีความสำคัญทัดเทียมกันถ้ามีความสำคัญแตกต่างกันมาก ควรแยกเอาปัจจัยที่มีความสำคัญน้อยกว่าลงไปอยู่ระดับชั้นที่อยู่ถัดลงไปตัวอย่างแผนภูมิชั้นโครงสร้าง AHP แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงโครงสร้างลำดับชั้น AHP

การหาลำดับความสำคัญโดยการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ที่ละคู่จากปัจจัยที่มีผลกระทบต่อเกณฑ์การตัดสินใจในแต่ละระดับชั้นโครงสร้างโดยใช้วิธี Principle of hierarchical Composition การวินิจฉัยจะแสดงออกมาในรูปของมาตราส่วนของระดับความพึงพอใจที่เป็นตัวเลข 1 ถึง 9 ในตารางเมตริกซ์เนื่องจากตารางเมตริกซ์คือเครื่องมือที่เหมาะสมที่สุดในการเปรียบเทียบในลักษณะเป็นคู่ๆ หรือจับคู่ นอกจากจะช่วยให้เข้าใจเกี่ยวกับการเปรียบเทียบแล้วตารางเมตริกซ์ยังสามารถทดสอบความสอดคล้องกันของการวินิจฉัยและสามารถวิเคราะห์ถึงความอ่อนไหวของลำดับความสำคัญ

เมื่อการวินิจฉัยเปลี่ยนแปลงผู้วินิจฉัยจะกำหนดมาตราส่วนในการวินิจฉัยเปรียบเทียบเป็นระดับความเข้มข้นของสำคัญด้วยตัวเลข 1 ถึง 9 โดยความหมายของตัวเลขที่แสดงระดับความเข้มข้นของสำคัญแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ระดับความเข้มข้นของสำคัญในการวินิจฉัยเปรียบเทียบแบบ AHP

ระดับความสำคัญ	ความหมาย	คำอธิบาย
1	สำคัญเท่ากัน	ทั้งสองปัจจัยส่งผลกระทบต่อวัตถุประสงค์เท่ากัน
2	สำคัญกว่าปานกลาง	ความพึงพอใจในปัจจัยหนึ่งมากกว่าอีกปัจจัยหนึ่งปานกลาง
5	สำคัญกว่ามาก	ความพึงพอใจในปัจจัยหนึ่งมากกว่าอีกปัจจัยหนึ่งมาก
7	สำคัญกว่ามากที่สุด	ปัจจัยหนึ่งได้รับความพึงพอใจมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอีกปัจจัยหนึ่งในทางปฏิบัติปัจจัย
9	สำคัญกว่าสูงสุด	มีหลักฐานยืนยันความพึงพอใจในปัจจัยหนึ่งมากกว่าอีกปัจจัยหนึ่งในระดับที่สูงสุดเท่าที่จะเป็นไปได้

2, 4, 6, 8	สำหรับในกรณีประนีประนอมเพื่อลดช่องว่างระหว่างระดับความรู้สึก	การวินิจฉัยในลักษณะก้ำกึ่งกันและไม่สามารถอธิบายด้วยคำพูดที่เหมาะสมได้
------------	--	---

ตารางที่ 3 ตัวอย่างตารางเมตริกซ์ที่ใช้แสดงการเปรียบเทียบเป็นคู่

เกณฑ์ตัดสินใจ		ปัจจัย			
		x_1	x_2	x_3	x_4
ปัจจัย	x_1	a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{14}
	x_2	a_{21}	a_{22}	a_{23}	a_{24}
	x_3	a_{31}	a_{32}	a_{33}	a_{34}
	x_4	a_{41}	a_{42}	a_{43}	a_{44}

โดยที่ a_{ij} สมาชิกในแถวที่ i หลักที่ j ของเมตริกซ์หมายถึง ผลการเปรียบเทียบความสำคัญระหว่างปัจจัย x_1 และ x_{ij}

โดยสูตรที่ใช้ในการคำนวณหาจำนวนครั้งในการวินิจฉัยเปรียบเทียบ (n) คือ

$$\frac{n^2 - n}{n}$$

โดยที่ n = จำนวนปัจจัยที่นำมาเปรียบเทียบเป็นคู่ (1)

การคำนวณค่าความสอดคล้องในทุกๆ ระดับชั้นที่มีการคำนวณค่าถ่วงน้ำหนัก อัตราค่าความสอดคล้อง (Consistency Ratio) ซึ่งเป็นการวัดความสอดคล้องในการเปรียบเทียบปัจจัยแต่ละคู่ในตารางเมตริกซ์ การวิเคราะห์ความสอดคล้องเป็นวิธีการคำนวณหาความสอดคล้องกันของเหตุผลในการให้คะแนนโดยใช้การเปรียบเทียบปัจจัยทีละคู่ของปัจจัยทั้งหมดที่ถูกกำหนดโดยนำผลรวมของค่าวินิจฉัยของแต่ละปัจจัยในแถวตั้งแต่แต่ละแถวมาคูณด้วยผลรวมของค่าเฉลี่ยในแถวบนแต่ละแถวแล้วนำเอาผลคูณที่ได้

มารวมกันผลลัพธ์จะเท่ากับจำนวนปัจจัยทั้งหมดที่ถูกนำมาเปรียบเทียบผลรวมนี้เรียกว่า Eigen Values

ในการกำหนดเกณฑ์ปัจจัยต่าง ๆ ทุกตารางเมตริกซ์ที่ทำการเปรียบเทียบต้องสามารถแสดงค่า CR ที่ยอมรับได้ ถ้าตารางเมตริกซ์มีความสอดคล้องกันของเหตุผลสมบูรณ์ (100%) ค่า Maximums Eigenvalue ($\lambda_{\max}$) จะมีค่าเท่ากับจำนวนปัจจัย (n) ที่ถูกนำมาเปรียบเทียบ แต่ถ้าการวินิจฉัยเริ่มไม่มีความสอดคล้องกัน ค่า $\lambda_{\max}$ จะมีค่าสูงกว่าจำนวนปัจจัยที่ถูกนำมาเปรียบเทียบ

1. คำนวณหาค่าถ่วงน้ำหนักและค่าสำหรับแต่ละตารางเมตริกซ์ตามจำนวนปัจจัยที่พิจารณา (n)
2. คำนวณหาค่าดัชนีความสอดคล้อง (Consistency Index - CI) สำหรับแต่ละตารางเมตริกซ์ โดยใช้สมการที่ (2)

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

เมื่อ n = จำนวนปัจจัย

3. คำนวณหาอัตราส่วนของความสอดคล้อง (CR) โดยใช้สมการที่ (3)

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3)$$

เมื่อค่า RI เป็นค่าดัชนีจากการสุ่มตัวอย่างที่ได้จากการประมวลผลในแบบจำลองและมีความแตกต่างกันตามขนาดของตารางเมตริกซ์ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งค่าของ RI จะเป็นของตารางเมตริกซ์ตั้งแต่ 1-10 โดยความไม่สอดคล้องกันนี้ถูกนำมาเปรียบเทียบตัวเลขที่สุ่มตัวอย่างจากตารางเมตริกซ์คือ

ตารางที่ 4 ค่าเฉลี่ยดัชนีจากการสุ่มตัวอย่าง (Average Random Index - RI) ซึ่งเอามาจากขนาดของตารางเมตริกซ์

ขนาดของตารางเมตริกซ์	ค่า RI ที่ได้จากการสุ่มตัวอย่าง
1	0
2	0
3	0.52
4	0.89
5	1.11
6	1.25
7	1.35
8	1.4
9	1.45
10	1.49

จากตารางที่ 4 พบว่า:

1. ค่าอัตราส่วนความสอดคล้องที่ 5% สำหรับตารางเมตริกซ์ที่มีขนาดเป็น 3×3
2. ค่าอัตราส่วนความสอดคล้องที่ 8% สำหรับตารางเมตริกซ์ที่มีขนาดเป็น 4×4

3. ค่าอัตราส่วนความสอดคล้องที่ 10% สำหรับตารางเมตริกซ์ที่มีขนาดมากกว่า 4×4

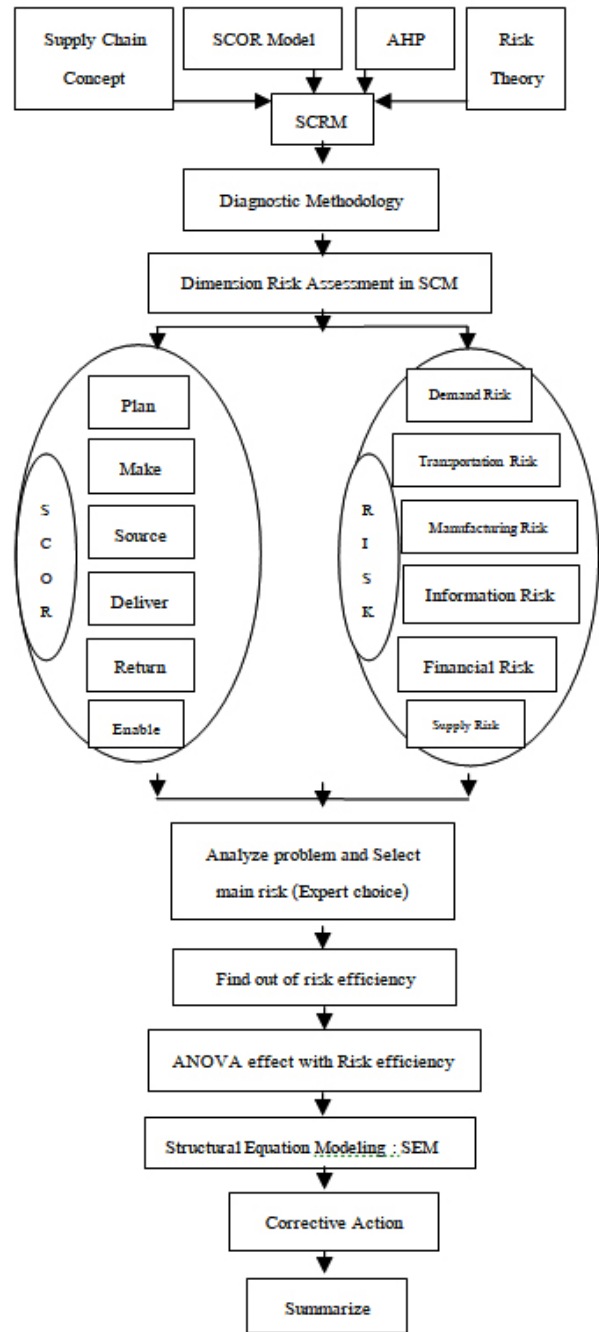
ถ้าค่า CR ที่ได้ตกอยู่ในระดับที่รับได้คือ มีค่าเท่ากับหรือน้อยกว่าที่กำหนด ก็หมายความว่า ผลของค่าเฉลี่ยที่ได้ถูกต้อง (มีความสอดคล้องกัน) และการประเมินผลนั้นให้ผลเพื่อยอมรับได้ แต่ถ้าค่า CR มีค่ามากกว่าค่าที่ยอมรับได้ก็แสดงว่าผลของการทำการประเมินและวิเคราะห์นั้นไม่มีความสอดคล้องภายในตารางเมตริกซ์ ผู้ประเมินจำเป็นต้องมีการประเมินผลใหม่

4. คำนวณหาทางเลือกที่ดีที่สุดโดยพิจารณาจากลำดับความสำคัญเป็นเกณฑ์

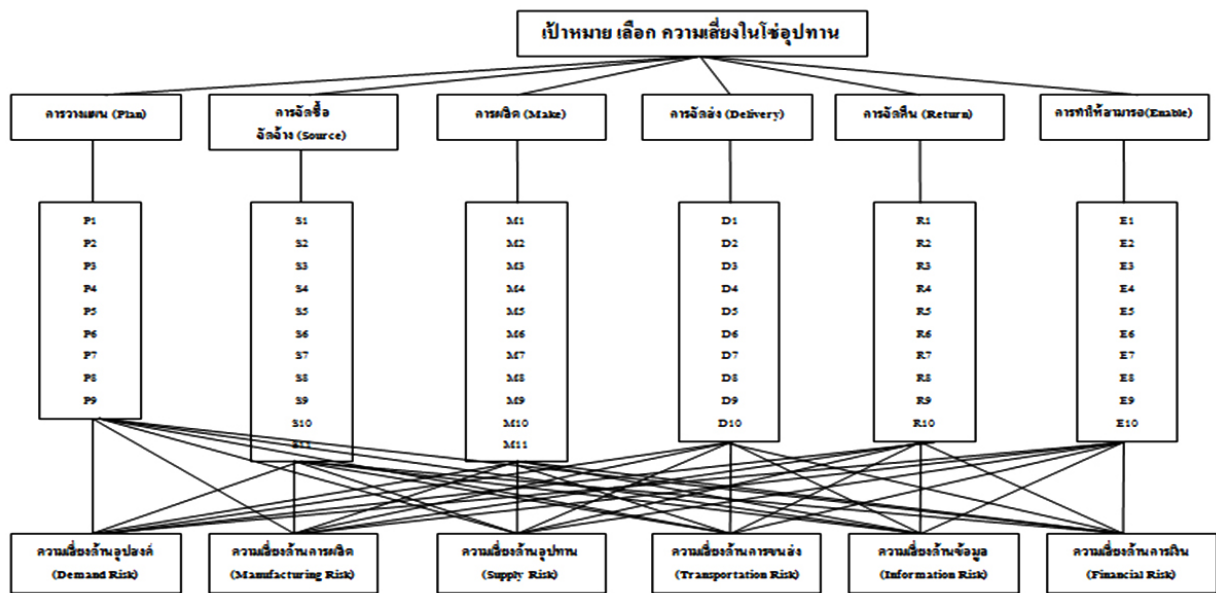
3 วิธีการดำเนินการวิจัย

ผู้วิจัยได้ทำการจัดทำแบบสอบถามให้ผู้ประกอบการวิสาหกิจจำนวน 10 รายได้ทำการประเมินเพื่อชี้วัดความสามารถในการแข่งขันของตนเอง ดังตารางที่ 5 โดยมีกรอบการวิจัยดังรูปที่ 3

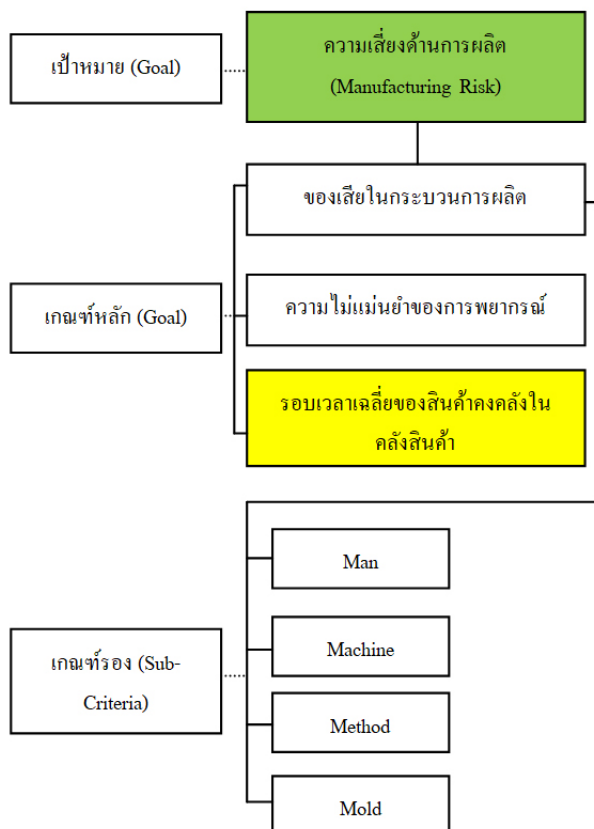
สำหรับเครื่องมือวัดระดับความเสี่ยงของโซ่อุปทานจะถูกพัฒนาขึ้นในลักษณะของแบบสอบถามเพื่อเก็บข้อมูลก่อนนำมาประเมินโดยอ้างอิงจากแบบจำลอง SCOR โดยแสดงผลได้ดังตารางที่ 5 โดยมีทั้งหมด 10 หัวข้อ สำหรับการวัดระดับความเสี่ยงในโซ่อุปทาน ตามประเด็นที่เกี่ยวข้องในการประเมินความเสี่ยง จะแบ่งความเสี่ยงในโซ่อุปทานออกเป็น 6 ด้าน ที่ระบุถึงแหล่งที่มาของความเสี่ยงในโซ่อุปทาน จะมีมาจาก 6 ด้าน คือ ด้านอุปสงค์ (Demand Risk) ด้านการผลิต (Manufacturing Risk) ด้านอุปทาน (Supply Risk) ด้านขนส่ง (Transportation Risk) ด้านการเงิน (Financial Risk) และด้านข้อมูล (Information Risk) โดยเราจะใช้เป็นทางเลือกเพื่อเชื่อมโยงกับเกณฑ์หลักและเกณฑ์รองจาก SCOR Model Version 11.0 โดยจะใช้การจัดลำดับความสำคัญและคัดเลือกความเสี่ยงในโซ่อุปทาน ทั้ง 6 ด้าน ซึ่งประกอบด้วยเป้าหมาย เกณฑ์หลัก เกณฑ์ย่อย และทางเลือก ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 3 แผนผังแสดงลำดับขั้นตอนการดำเนินการวิจัย



รูปที่ 4 แสดงลำดับชั้นของปัญหาความเสี่ยงในโซ่อุปทาน



รูปที่ 5 แสดงลำดับชั้นของปัญหาความเสี่ยงด้านการผลิต (Manufacturing Risk)

ตารางที่ 5 แสดงผลการใช้แบบจำลอง SCOR เพื่อประเมินความสามารถในการแข่งขันของผู้ประกอบการ

ประเภทของเครื่องมือวัด	การวัดประสิทธิภาพระดับที่ 1	หน่วย
สมรรถนะด้านความน่าไว้วางใจ Reliability	การเติมเต็มคำสั่งซื้อสมบูรณ์ Perfect Order Fulfillment	%
สมรรถนะด้านการตอบสนอง Responsiveness	รอบระยะเวลาเฉลี่ยการเติมเต็มคำสั่งซื้อสมบูรณ์ Order Fulfillment Cycle Time	วัน
สมรรถนะด้านการตอบสนอง Responsiveness	รอบระยะเวลาเฉลี่ยการเติมเต็มคำสั่งซื้อสมบูรณ์ Order Fulfillment Cycle Time	วัน
	ความสามารถในการปรับเพิ่มปริมาณ Upside Adaptability	วัน
	ความสามารถในการปรับลดปริมาณ Downside Adaptability	วัน
	มูลค่าความเสี่ยงของกิจการ Overall Value-at-Risk	บาท

สมรรถนะด้าน ต้นทุน Cost	ต้นทุนการบริหารซัพพลายเชน Total Supply Chain Management Cost	บาท
สมรรถนะด้าน ประสิทธิภาพการ บริหารทรัพย์สิน Asset Management Efficiency	รอบกระแสเงินสด Cash-to-Cash Cycle Time	บาท
	ผลตอบแทนของสินทรัพย์ Return on Fixed Assets	บาท
	ผลตอบแทนจากทุนหมุนเวียน Return on Working Capital	บาท

ตารางที่ 6 รายละเอียดของเกณฑ์รองในการวางแผน [7]

เกณฑ์หลัก	เกณฑ์รอง
การวางแผน (Plan)	P1-ความแม่นยำในการพยากรณ์ P2-การส่งสินค้าครบจำนวน ตรงเวลา และเอกสารครบถ้วน P3-การจัดสมดุลระหว่างทรัพยากรที่มีกับ ความต้องการของโซ่อุปทาน P4-การวางแผนความต้องการการผลิต P5-การวางแผนการจัดส่งสินค้า P6-ต้นทุนรวบรวมและจัดลำดับความต้องการ ของผลิตภัณฑ์ P7-ต้นทุนในการวางแผน P8-มูลค่าของการเก็บสต็อกในโซ่อุปทาน P9-การวางแผนการจัดส่งผลิตภัณฑ์

ตารางที่ 7 รายละเอียดของเกณฑ์รองในการจัดซื้อ

เกณฑ์หลัก	เกณฑ์รอง
การจัดซื้อ จัดจ้าง (Source)	S1-เวลาในการเตรียมการสั่งซื้อจนได้วัตถุดิบ/ สินค้าครบถ้วน S2-ตารางการจัดส่งวัตถุดิบ S3-ความถูกต้องของเอกสารในการสั่งซื้อ S4-การปรับเปลี่ยนแผนการส่งวัตถุดิบ S5-การเลือกผู้แทนจำหน่าย (Supplier) S6-ประเมินผู้แทนจำหน่าย (Supplier) S7-ต้นทุนในการจัดซื้อ S8-จำนวนสินค้าที่สามารถจัดหาได้ S9-การนำวัตถุดิบกลับมาใช้ใหม่ (Recycle) S10-จำนวนวันของการเก็บสต็อกวัตถุดิบ S11-รอบเวลาในการจ่ายเงินให้ผู้แทนจำหน่าย (Supplier)

ตารางที่ 8 รายละเอียดของเกณฑ์รองในการผลิต

เกณฑ์หลัก	เกณฑ์รอง
การผลิต (Make)	M1-การผลิตเสร็จตรงตามเวลา M2-ของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิต M3-การรับประกันคุณภาพสินค้า (Warranty) M4-ต้นทุนในการผลิต M5-จำนวนสินค้าที่ผลิตได้ M6-ความสำคัญต่อประสิทธิภาพการผลิต (input/ output) M7-เวลาที่ใช้ในการทดสอบผลิตภัณฑ์ M8-รอบเวลาของผลิตภัณฑ์ เริ่มตั้งแต่เริ่มผลิต จนถึงผลิตภัณฑ์เสร็จสมบูรณ์ M9-การใช้ทรัพยากรที่มีให้เกิดประโยชน์สูงสุด M10-การนำผลิตภัณฑ์ที่มีปัญหากลับมาใช้ใหม่ (Recycle) M11-ต้นทุนสินค้าสำเร็จรูป

ตารางที่ 9 รายละเอียดของเกณฑ์รองในการจัดส่ง

เกณฑ์หลัก	เกณฑ์รอง
การจัดส่ง (Delivery)	D1-ความถูกต้องของใบแจ้งราคาสินค้า (Invoice) D2-ส่งของถึงลูกค้าตรงตามเวลา D3-ส่งของถึงลูกค้าครบตามจำนวน D4-เวลาที่ใช้ในการลำเลียงสินค้าและจัดเตรียมเอกสารเพื่อจัดส่ง D5-การเก็บสต็อกของสินค้าสำเร็จรูปในชั้น ยลูกค้า D6-รอบเวลาที่ใช้ในการรับและตรวจสอบสินค้าโด ยลูกค้า D7-ต้นทุนในการจัดส่ง D8-จำนวนสินค้าที่จัดส่งได้ D9-จำนวนวันของการเก็บสต็อกสินค้าสำเร็จรูป D10-เวลาของการขาย (รับเงินจากลูกค้า)

ตารางที่ 10 รายละเอียดของเกณฑ์รองในการส่งคืน

เกณฑ์หลัก	เกณฑ์รอง
การจัดคืน (Return)	R1-บริการหลังการขาย เมื่อสินค้ามีข้อบกพร่อง (ซ่อมแซมได้)
	R2-บริการหลังการขาย เมื่อสินค้าเสียหาย (ซ่อมแซมไม่ได้)
	R3-บริการหลังการขาย เมื่อสินค้าเกินความต้องการ
	R4-การทำงาน เพื่อแก้ไขงานที่บกพร่อง
	R5-การทดแทนสินค้าที่ผิดจากข้อตกลง
	R6-ต้นทุนในการส่งคืน
	R7-จำนวนสินค้าที่มีการจัดส่งคืนทั้งวัตถุดิบและสินค้าสำเร็จรูป
	R8-มูลค่าของสินค้าคงคลังที่มีข้อบกพร่อง
	R9-มูลค่าของสินค้าคงคลังที่เสียหาย
	R10-มูลค่าของสินค้าคงคลังที่เกินความต้องการ

ตารางที่ 11 รายละเอียดของเกณฑ์รองการสนับสนุน

เกณฑ์หลัก	เกณฑ์รอง
การสนับสนุน (Enable)	E-1 การจัดการกฎทางธุรกิจของห่วงโซ่อุปทาน
	E-2 การจัดการสมรรถนะ
	E-3 การจัดการข้อมูลและสารสนเทศ
	E-4 การจัดการทรัพยากรมนุษย์ห่วงโซ่อุปทาน
	E-5 การจัดการสินทรัพย์ห่วงโซ่อุปทาน
	E-6 การจัดการสัญญาห่วงโซ่อุปทาน
	E-7 การจัดการเครือข่ายห่วงโซ่อุปทาน
	E-8 การจัดการกฎระเบียบ
	E-9 การจัดการความเสี่ยง

การประเมินผลจะนำเกณฑ์การตัดสินใจหรือปัจจัยจากแผนภูมิระดับชั้นมาทำเป็นตารางเมตริกซ์เพื่อทำการวินิจฉัยเปรียบเทียบแต่ละปัจจัยในแต่ละระดับชั้นเป็นคู่ๆ โดยการใส่ค่าให้อยู่ในรูปจำนวนเต็มเมื่อคิดว่าปัจจัยในแนวตั้งมีความสำคัญมากกว่าปัจจัยในแนวนอนที่ทำการเปรียบเทียบ หรือใส่ให้อยู่ในรูปเศษส่วนเมื่อคิดว่าปัจจัยในแนวตั้งมีความสำคัญน้อยกว่าปัจจัยในแนวนอน จากนั้นทำการสังเคราะห์

ตัวเลขจากการวินิจฉัยเปรียบเทียบในตารางเมตริกซ์เพื่อให้ผลรวมที่ได้มีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งในการสังเคราะห์ตัวเลขนี้สามารถให้ผลที่เป็นค่าลำดับความสำคัญค่าถ่วงน้ำหนักด้วยเช่นกัน การเปรียบเทียบความสำคัญของเกณฑ์การตัดสินใจหลักและค่าลำดับความสำคัญของเกณฑ์การตัดสินใจหลัก ดังแสดงตารางที่ 2 และ 3 ตามลำดับ และตารางที่ 4 แสดงผลรวมของ $\lambda_{\max}$ ของเกณฑ์การตัดสินใจหลักเพื่อนำไปประเมินค่าที่ยอมรับได้สำหรับตารางเมตริกซ์ ค่า $\lambda_{\max}$ ที่ได้มีค่าเท่ากับ 6.06 ถือเป็นค่าที่ยอมรับได้ เพราะค่า $\lambda_{\max}$ ควรมีค่าเท่ากับจำนวนเกณฑ์การตัดสินใจหลักที่นำมาทำการเปรียบเทียบในตารางเมตริกซ์ ซึ่งเกณฑ์การตัดสินใจหลักที่นำมาเปรียบเทียบมีทั้งหมด 6 เกณฑ์ด้วยกัน และการหาอัตราส่วนค่าความสอดคล้องแสดงได้ดังนี้

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{6.06 - 6}{6 - 1} = 0.012$$

ค่า RI = 1.25 [1] เมื่อขนาดของตารางเมตริกซ์เท่ากับ 6x6

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.012}{1.25} = 1\%$$

ค่าอัตราความสอดคล้องที่ได้มีค่าเท่ากับ 1% ถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้สำหรับตารางเมตริกซ์ที่มีจำนวนเกณฑ์การตัดสินใจหลัก 6 เกณฑ์ ตามหลักการของ Saaty [1] ที่ไม่ควรจะมีค่าอัตราความสอดคล้องเกิน 10%

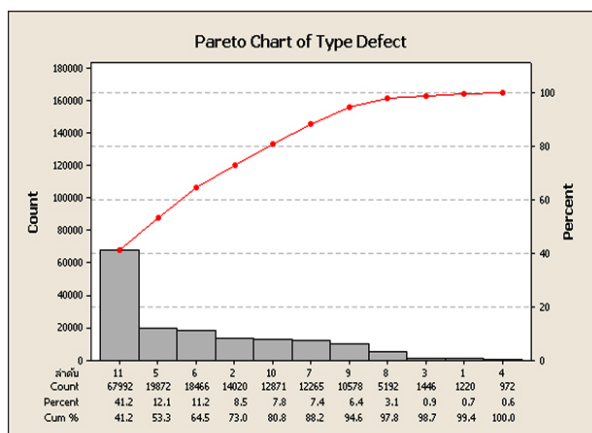
ดังนั้นค่าที่ใส่ลงไปตารางเมตริกซ์เพื่อทำการเปรียบเทียบความสำคัญของเกณฑ์การตัดสินใจหลักเป็นค่าที่เชื่อถือได้ เนื่องจากค่าความสอดคล้องที่ได้เป็นค่าที่ยอมรับได้

หลังจากที่ทางผู้วิจัยได้ทำการปรึกษากับทางโรงงานโดยทางโรงงานต้องการที่จะปรับปรุงในเรื่องการผลิต Make M2-ของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตเป็นลำดับที่ 1, ปัญหาของการพยากรณ์ไม่แม่นยำเป็นลำดับที่ 2 และรอบเวลายืมของสินค้าคงคลังเป็นลำดับที่ 3

สำหรับปัญหาของเสียของเสียที่พบในกระบวนการผลิตของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดของบริษัทฯ ในปี พ.ศ. 2558 ในช่วงเดือน ม.ค. ถึงเดือน ต.ค. แสดงข้อมูลดังตารางที่ 12 ดังนี้

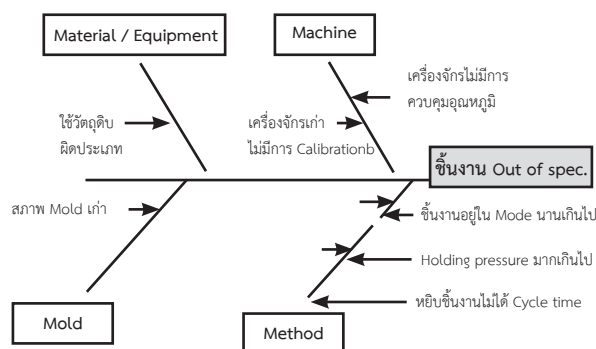
ตารางที่ 12 ปัญหาของของเสียในปี พ.ศ. 2558 ในช่วงเดือน ม.ค. ถึงเดือน ต.ค. 2558

ลำดับ	ปัญหา	จำนวน (ชิ้น)
1	ฉีดไม่เต็ม	1,220
2	มีครีป	14,020
3	ความเรียบร่อยในการตัดเกท	1,446
4	สีลาย	972
5	บวม	19,872
6	รอยฉีก	18,466
7	รอยต่อ , แตกร้าว	12,265
8	ความเรียบร่อยการตกแต่ง , แต่งเข้าเนื้อ	5,192
9	ผิวเป็นคราบ , คราบขาว	10,578
10	รอยเย็น , รอยกระแทก , รอยย่น	12,871
11	ขนาดไม่ได้มาตรฐาน	67,992



รูปที่ 6 แผนภูมิพาเรโตแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัญหาที่เกิดขึ้นและจำนวนของเสียในช่วงเดือน ม.ค. – ต.ค. พ.ศ. 2558

จากรูปที่ 6 และ 7 ได้นำข้อมูลข้อเสียประเภทต่างๆ มาจัดลำดับความสำคัญของปัญหาพบว่า 3 ปัญหาแรกที่พบมากที่สุด คือ ขนาดไม่ได้มาตรฐาน บวม และ รอยฉีก เป็นต้น



รูปที่ 7 แผนภาพสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagram)

ดำเนินการวิจัยของขั้นตอนการวิเคราะห์ผลและออกแบบการทดลอง

จากตารางที่ 13 เป็นการแสดงปัจจัยที่ส่งผลในการฉีดชิ้นงานโดยมี 3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อปัญหาคุณภาพของชิ้นงาน ได้แก่ อุณหภูมิของแม่พิมพ์ (Mold Temp) รอบเวลาในการฉีดของชิ้นงาน (Cycle Time) และ แรงดันฉีดย้ำ (Holding Pressure) ซึ่งเป็นการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ (2^k Factorial Design)

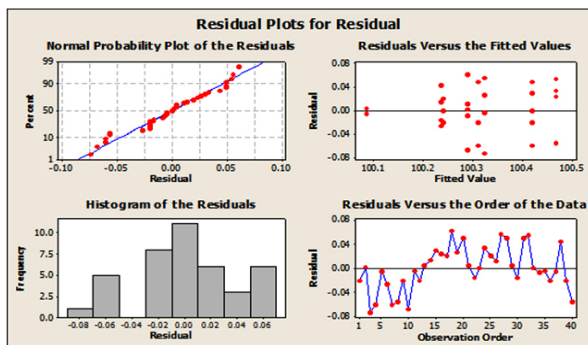
ตารางที่ 13 แสดงปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ (2^k Factorial Design)

ปัจจัย	ระดับของปัจจัย	
	Low (-)	High (+)
Mold Temp ($^{\circ}\text{C}$)	35	45
Cycle Time (Sec)	32	37
Holding Pressure (MPa)	10	20

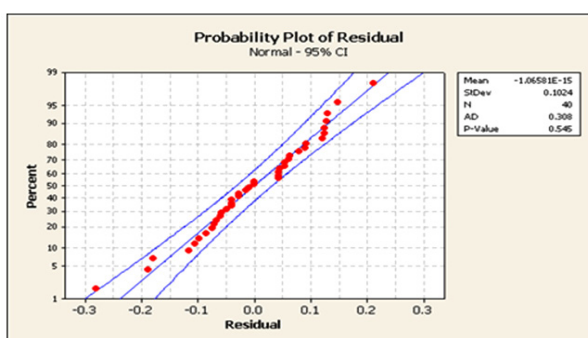
ตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (Model Adequacy Checking)

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลองเป็นการตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งผลการตรวจสอบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8 ถึงรูปที่ 10 โดยมีสมมติฐานว่า รูปแบบของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) ที่ได้จากข้อมูลในการทดลองต้องเป็นไปตามหลักการของ $\varepsilon_{ij} \sim NID(0, \sigma^2)$ คือ ค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ และเป็นอิสระด้วยค่าเฉลี่ยใกล้เคียง 0 และ σ^2 มีค่าคงตัว (Stability) จึงจะทำให้ข้อมูลจากการทดลองมีความถูกต้องและเชื่อถือได้ การตรวจสอบ ε_{ij} มี 4 ขั้นตอน คือ

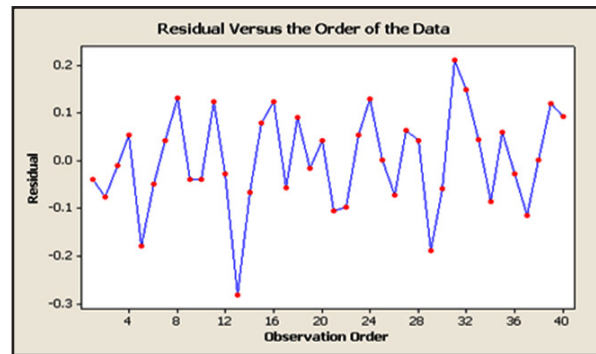
1. การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) ของค่าส่วนตกค้าง (Residual)
2. การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) ของค่าส่วนตกค้าง (Residual)
3. การตรวจสอบค่าเฉลี่ยของค่าส่วนตกค้าง (Residual)
4. การตรวจสอบความเสถียรของ σ^2 (Variance Stability)



รูปที่ 8 แสดง Residual Plot



รูปที่ 9 แสดงการกระจายแบบปกติของค่า Residual



รูปที่ 10 แสดงการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residual) เทียบกับ Observation Order

4. ผลการวิจัย

หลังจากการให้ความสำคัญของปัจจัยต่างๆ ที่ได้ของผลลัพธ์เกณฑ์หลักและเกณฑ์ย่อยเพื่อหาน้ำหนักความสำคัญของแต่ละประเภทของความเสี่ยงที่ทางโรงงานให้ความสำคัญของปัจจัยมากที่สุด 3 ลำดับแรก คือ

ตารางที่ 14 แสดงลำดับของความเสี่ยงที่อ้างอิงใน SCOR Model

ความเสี่ยง	เกณฑ์หลัก	เกณฑ์รอง	ค่าน้ำหนัก
การผลิต Manufacturing	การผลิต	M2-ของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิต	0.082
อุปสงค์ Demand	การวางแผน	P1-ความแม่นยำในการพยากรณ์	0.065
อุปสงค์ Demand	การจัดซื้อจัดจ้าง	S10-จำนวนวันของการเก็บสต็อกวัตถุดิบ	0.054

หลังจากที่เราได้ทราบค่าน้ำหนักของแต่ละปัจจัยในแต่ละเกณฑ์รองของแต่ละหัวข้อแล้ว จึงได้ทำการประเมินวัดประสิทธิภาพตามเกณฑ์ของ SCOR Model ตามรายละเอียดดังในตารางที่ 5 โดยได้ทำการเปรียบเทียบตัวชี้วัดในแต่ละประเภทก่อนและหลังการวิเคราะห์ความเสี่ยงลงในตารางที่ 16 ซึ่งการเติมเต็มคำสั่งซื้อสมบูรณ์และรอบระยะเวลาเฉลี่ยการเติมเต็มคำสั่งซื้อสมบูรณ์มีเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มสูงขึ้นเนื่องจาก

สามารถลดของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตลงได้โดยใช้หลักการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2k โดยผลการวิจัยสามารถเปรียบเทียบเพื่อนำเสนอในเชิงตัวเลข ได้แก่ จำนวนของเสียในกระบวนการผลิตลดลง 98.80 เปอร์เซนต์ดังตารางที่ 15 แสดงรายละเอียดผลจากการการผลิตเมื่อนำค่าปัจจัยใหม่ไปใช้เมื่อเปรียบเทียบกับก่อนและหลังการทำวิจัย

ตารางที่ 15 แสดงรายละเอียดผลจากการการผลิตเมื่อนำค่าปัจจัยใหม่ไปใช้เมื่อเปรียบเทียบกับก่อนและหลัง การทำวิจัย

ผลิตภัณฑ์ 7320723AA	จำนวน ผลิต ภัณฑ์ ดี (ชิ้น)	จำนวน ของ เสีย (ชิ้น)	จำนวน รวม ผลิต (ชิ้น)	ราคา ต่อ ชิ้น (บาท)	สูญเสีย (บาท)
ม.ค. - ต.ค. 2558	12,780	8,189	20,969	6.020	49,297.78
พ.ย.- ธ.ค. 2558	3,425	98	3,523	6.020	589.96

ตารางที่ 16 แสดงผลการใช้แบบจำลอง SCOR เพื่อประเมินความสามารถในการแข่งขันของ ผู้ประกอบการ (เปรียบเทียบกับก่อน-หลังการ วิเคราะห์ความเสี่ยง)

ประเภทของ ตัวชี้วัด	การวัดประสิทธิภาพ ระดับที่ 1	ก่อน	หลัง
สมรรถนะ ด้านความ น่าไว้วางใจ Reliability (%)	การเติมเต็ม คำสั่งซื้อสมบูรณ์ Perfect Order Fulfillment	78	85
สมรรถนะ ด้านการตอบสนอง Responsiveness (%)	รอบระยะเวลาเฉลี่ย การเติมเต็มคำสั่งซื้อ สมบูรณ์ Order Fulfillment Cycle Time	4	2.5

สมรรถนะด้าน ความยืดหยุ่น Agility	รอบระยะเวลาการ ปรับเปลี่ยน กระบวนการ Upside Flexibility	4	4
	ความสามารถในการ ปรับเพิ่มปริมาณ Upside Adaptability	6	6
	ความสามารถในการ ปรับลดปริมาณ Downside Adaptability	3	3
	มูลค่าความเสี่ยง ของกิจการ Overall Value at-Risk	TBD	TBD
สมรรถนะ ด้านต้นทุนCost (บาท)	ต้นทุนการบริหาร ซัพพลายเชน Total Supply Chain Management Cost	914k	1210k (Set- ting ERP)
สมรรถนะ ด้านประสิทธิภาพ การบริหาร ทรัพย์สิน Asset Management Efficiency (บาท)	รอบกระแสเงินสด Cash-to-Cash Cycle Time	60k	60k
	ผลตอบแทน ของสินทรัพย์ Return on Fixed Assets	670k	670k
	ผลตอบแทนจาก ทุนหมุนเวียน Return on Working Capital	120k	120k

5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัยของผู้ประกอบการขนาดกลางและขนาดย่อมทำให้ทราบถึงความเสี่ยงที่เกิดขึ้นในห่วงโซ่อุปทานของโรงงานผลิตชิ้นส่วนฉีดพลาสติกสำหรับชิ้นส่วนยานยนต์โดยทำการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาความเสี่ยงประเภทต่างๆเพื่อสัมพันธ์กับ SCOR

Model ในระดับชั้นที่ 1 ทั้ง 6 กระบวนการหลัก คือ วางแผน ผลิต จัดซื้อ ส่งมอบ ส่งคืน และกระบวนการในการจัดเตรียมกฎธุรกิจหรือข้อบังคับในการดำเนินงานต่างๆ เมื่อทำการจัดลำดับความสำคัญโดยใช้ AHP แล้วพบว่าประเภทความเสี่ยงที่เกิดขึ้นในโซ่อุปทานของโรงงานผลิตชิ้นส่วนฉีดพลาสติก ส่งผลกระทบต่อมูลค่าความเสียหายต่อการดำเนินงานที่มีความสำคัญใน 3 อันดับแรก คือ ของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต, ความพยากรณ์ไม่มีความแม่นยำ และ รอบเวลาเฉลี่ยของสินค้าคงคลังในคลังสินค้าทำการวิเคราะห์หาสาเหตุของการเกิดความเสี่ยงจากเกณฑ์หลักและเกณฑ์รองเพื่อลดค่าความเสี่ยงที่เกิดขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 นำแนวทางการจัดการความเสี่ยงในโซ่อุปทานของโรงงานผลิตชิ้นส่วนฉีดพลาสติกสำหรับชิ้นส่วนยานยนต์นำไปขยายผลสำหรับการประเมินกับโรงงานผลิตอื่นๆหรือกลุ่มวิสาหกิจอื่นๆ เช่น กลุ่มอุตสาหกรรมโลหะ กลุ่มอุตสาหกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ กลุ่มอุตสาหกรรมเครื่องจักรกล เป็นต้น

5.2.2 นำแนวทางการจัดการความเสี่ยงของโซ่อุปทานเพื่อลดและป้องกันความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นและส่งผลกระทบต่อโซ่อุปทาน โดยพิจารณาจากปัจจัยความเสี่ยงของแต่ละประเภทตามสภาพความเป็นจริง

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยขอขอบคุณสำนักพัฒนาอุตสาหกรรมสนับสนุน กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม ภายใต้โครงการให้คำแนะนำปรึกษาการเพิ่มผลิตภาพและความสามารถในการแข่งขันอุตสาหกรรมสนับสนุน ภายใต้โครงการให้คำปรึกษาแนะนำเชิงลึกแก่ SMEs ในอุตสาหกรรมสนับสนุน ปี 2558

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Janjintanan N. Development Tooling in Supply Chain Risk Management a Case Study Machine Import Company. Business for Master degree student, 2012. Thammasat Business School. (in Thai)
- [2] Talapkeaw S, Rungreangan W. Competitiveness Indicator of Small and Medium Enterprise of Pranakorn Sri Authaya Province. The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok. 2018;3,20 (September): 534-543. (in Thai)
- [3] Supply-Chain Council, 2012. Supply Chain Operations Reference Model Version 11.0, pp. 1-19.
- [4] Sonwattana, P, Wasusri, T. An Analysis of Supply Chain Risk Management in Metropolitan. KMUTT Research and Development Journal. 2014. Vol. 37, No2, pp. 257-270. (in Thai)
- [5] Saijafuengkijkarn P, Wasusri T. An Analysis of Supply Chain Risk Management in a Manufacturing Fermented Vegetable Canning. KMUTT 2012 Research and Development Journal, Vol. 35, No3, pp. 311-321. (in Thai)
- [6] Tomsomboon J. Technique and Tooling for knowledge management to efficiency risk management. Independent study. Faculty of Science. 2011. Thammasat University. (in Thai)

- [7] Tasorn A, Karnjana R. A Risk Analysis of Supply Chain Ribbed Unsmoked Natural Rubber Sheet : Case Study of the Province of Narathiwat. Journal of Engineering, RMUTT 2014; 35-41. (in Thai)
- [8] Tansirimongkol W. AHP Decision Process The Most of Popular in The World. 1st Edition. Bangkok: Graphic and Printing Press. 1999.

**รูปแบบบทความสำหรับ
วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลัญบุรี**
**Manuscript Preparation Guidelines for the Papers Submitted to
Journal of Engineering, RMUTT**

ปรกช สิริสุวัฒน์^{1*}, สุมนมัลย์ เนียมกลาง² และกุลยา สาริชีวิน³
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*} ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

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

² ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

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

³ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

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

บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวเกี่ยวกับรูปแบบและวิธีการส่งบทความเพื่อเสนอต่อกองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลัญบุรี ผู้ส่งบทความต้องยึดรูปแบบตามบทความนี้อย่างเคร่งครัด บทความใดที่มีรูปแบบไม่ถูกต้องจะถูกส่งคืนเพื่อทำการแก้ไขก่อนนำส่งผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ หากไม่ทำการแก้ไขให้ถูกต้องกองบรรณาธิการจะทำการตัดสิทธิ์การส่งบทความนี้ ทั้งนี้บทคัดย่อต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ แต่ละภาษาควรมีเพียงย่อหน้าเดียว และมีความยาวไม่เกิน 300 คำ

คำสำคัญ: วิธีการส่งบทความ, รูปแบบบทความ, ขนาดตัวอักษร, รูปแบบตัวอักษร, การเว้นบรรทัด

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

บทความต้องประกอบด้วยส่วนต่างๆตามลำดับต่อไปนี้ 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 ควรสั้นและกระชับแต่ครอบคลุมสาระทั้งเรื่องสื่อความหมายชัดเจนไม่ควรใช้คำย่อและวางกึ่งกลางหน้ากระดาษ

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

2.2.1 E-mail ผู้เขียนเรียงตามลำดับชื่อผู้เขียนและ ใส่เครื่องหมาย (*) ถัดจากหมายเลขลำดับ (ตัวยก) ของผู้เขียนหลัก

2.3. ที่อยู่ผู้เขียน (Affiliation) มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ไม่ต้องระบุตำแหน่งวิชาการ หรือสถานะของนักศึกษาใดๆ ทั้งสิ้น

2.4. บทย่อดำ (Abstract) เป็นการสรุปประเด็นเนื้อหาที่เป็นแก่นสำคัญเน้นประเด็นสำคัญของงาน ที่ต้องการนำเสนอจริงๆ ควรเขียนให้สั้นกระชับ มีความยาวภาษาไทยและอังกฤษรวมกันไม่เกินหนึ่งหน้ากระดาษ

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

การลำดับหัวข้อในส่วนของเนื้อเรื่องนี้ ให้ใส่เลขกำกับโดยให้บทนำเป็นหัวข้อหมายเลข 1 และหากมีการแบ่งหัวข้อย่อย ก็ใช้เลขระบบทศนิยมกับหัวข้อย่อย เช่น 1.1 เป็นต้น

ให้ใส่เลขเรียงลำดับหน้าด้วยดินสอไว้ที่มุมขวาบนของกระดาษทุกหน้า

ตารางที่ 1 การตั้งค่าหน้ากระดาษ

ระยะขอบ	เซนติเมตร
บน (Top)	3
ล่าง (Bottom)	2
ซ้าย (Left)	3
ขวา (Right)	3
ระยะห่างคอลัมน์	1.27

ตารางที่ 2 ขนาดตัวอักษรและการเว้นระยะพิมพ์บทความภาษาไทยและภาษาอังกฤษด้วยตัวอักษรรูปแบบ “TH SarabunPSK”

รายการ	ขนาด	ตำแหน่ง	ลักษณะ
ชื่อเรื่อง	20	กึ่งกลาง	ตัวหนา
ชื่อผู้เขียน อีเมล	16	กึ่งกลาง	ปกติ
ที่อยู่ผู้เขียน	12	ชิดซ้าย	ปกติ
บทย่อคัด	14	ชิดซ้าย	ปกติ
ชื่อหัวข้อ, หัวข้อย่อย	16	ชิดซ้าย	ตัวหนา
เนื้อความ	16	กระจาย แบบไทย	ปกติ
สมการ ต่างๆ	16	กึ่งกลาง	ตัวเอียง
คำบรรยาย ประกอบ รูปและ ตาราง	16	กึ่งกลาง	ปกติ

การเว้นระยะบรรทัดห่างในแนวตั้งแบบ exactly 20 พอยน์

ให้จัดเนื้อเรื่องในแต่ละบรรทัดเรียงชิดซ้ายและขวาอย่างสวยงาม เว้นบรรทัดแรกของย่อหน้าใช้ 1 แท็บ หรือ 0.5 นิ้ว

2.7.1 การจัดทำรูปภาพ

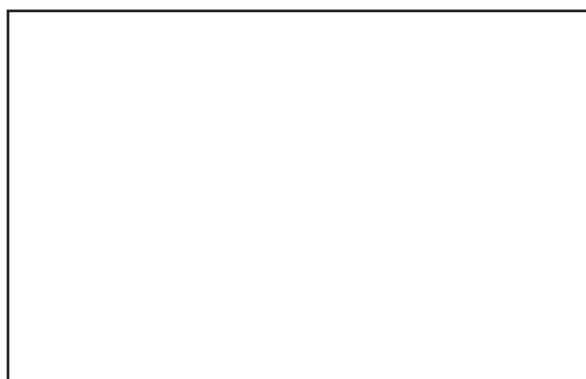
รูปภาพจะต้องมีความกว้างไม่เกิน 65 มม. เพื่อให้ลงในหนังสือคอลัมน์ได้ หรือกรณีจำเป็นจริงๆ เพื่อรักษารายละเอียดในภาพ อาจยอมให้มีความกว้างได้เต็มหน้ากระดาษ (กว้าง 150 มม.)

ตัวอักษรทั้งหมดในภาพจะต้องมีขนาดใหญ่สามารถอ่านได้สะดวก และต้องไม่เล็กกว่าตัวอักษรในเนื้อเรื่อง

รูปภาพทุกรูปจะต้องมีหมายเลข และคำบรรยายใต้ภาพ หมายเลขและคำบรรยายรวมกันแล้วควรมีความยาวไม่เกิน 2 บรรทัด

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

ตัวอย่าง



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่าง....

รูปถ่ายเส้นจะต้องเป็นเส้นหมึกดำ ส่วนรูปถ่ายควรจะเป็นรูปขาวดำที่มีความคมชัด รูปสีอนุโลมให้ใช้ได้ รูปภาพควรมีรายละเอียดเท่าที่จำเป็นเท่านั้น เช่น ภาพถ่าย รูปคลื่นจากออสซิลโลสโคปที่ปรากฏให้เป็นเฉพาะจอภาพ เป็นต้น และเพื่อความสวยงามให้เว้นบรรทัดเหนือรูปภาพ 1 บรรทัดและเว้นใต้คำบรรยาย 1 บรรทัด

2.7.2 การเขียนสมการ

สมการทุกสมการจะต้องมีหมายเลขกำกับ อยู่ภายในวงเล็บและเรียงลำดับที่ถูกต้อง ควรใช้ตัว พยัญชนะเอียงแสดงถึงพารามิเตอร์หรือตัวแปรใน สมการ ตำแหน่งของหมายเลขสมการจะต้องอยู่ชิดขอบ ด้านขวาของคอลัมน์ เว้นหนึ่งบรรทัดก่อนเขียนสมการ และเว้นหนึ่งบรรทัดหลังเขียนสมการ จัดให้สมการอยู่ ตรงกลางคอลัมน์ ดังตัวอย่างนี้

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

เริ่มเขียนคำอธิบายตั้งแต่บรรทัดนี้

2.7.3 การจัดการทำตาราง

ตัวอักษรในตารางจะต้องไม่เล็กกว่าตัวอักษร ในเนื้อเรื่อง ควรตีเส้นกรอบตารางด้วยหมึกดำให้ชัดเจน

ตารางทุกตารางจะต้องมีหมายเลข และ คำบรรยายกำกับเหนือตาราง หมายเลขกำกับและ คำบรรยายนี้รวมกันแล้วควรมีความยาวไม่เกิน 2 บรรทัด คำบรรยายเหนือตารางห้ามใช้คำว่า “แสดง” เช่นเดียวกับกรณีรูปภาพ

เพื่อความสวยงามให้เว้นบรรทัดเหนือตาราง 1 บรรทัด และเว้นบรรทัดใต้คำบรรยายรูปภาพ 1 บรรทัด

2.7.4 ความยาวของบทความ

เมื่อรวมทุกส่วนแล้ว บทความไม่ควรจะมีความยาวน้อยกว่า 10 หน้า และยาวไม่เกิน 15 หน้า กระดาษ A4

2.7.5 กรณียกบทความภาษาอังกฤษ

ผู้พิมพ์บทความเป็นภาษาอังกฤษ กรุณาดู คำแนะนำ วิธีการพิมพ์บทความภาษาอังกฤษที่แนบ มาด้วย

2.7.6 การส่งบทความ

ผู้เขียนสามารถส่งต้นฉบับ ทางเว็บไซต์ ออนไลน์ ของวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลธัญบุรี www.engineer.rmutt.ac.th/journal/



โดยต้องทำการลงทะเบียนเพื่อสมัครสมาชิก วารสารและนำส่งวารสารต้นฉบับในรูปแบบไฟล์

Word PDF

กรุณาจัดส่ง แบบฟอร์มยืนยันการส่งบทความ ทางวิชาการ เพื่อลงตีพิมพ์ใน วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลธัญบุรี มายัง อีเมล enjournal@en.rmutt.ac.th หรือ จัดส่งไปรษณีย์มายังกองบรรณาธิการ วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลธัญบุรี มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 39 หมู่ 1 ถ.รังสิต-นครนายก ต.คลองหลวง อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110” จึงจะ ถือว่า การส่งวารสารนั้นเสร็จสมบูรณ์

หากขั้นตอนการนำส่งวารสารทั้ง 2 ขั้นตอน คือ การส่งวารสารทางเว็บไซต์ ออนไลน์ และการ นำส่งแบบฟอร์มยืนยันการส่งบทความมายังอีเมล enjournal@en.rmutt.ac.th ไม่ครบถ้วนทั้ง 2 ขั้นตอน บทความนั้นจะถูกส่งคืน และไม่สามารถ ผ่านการพิจารณาได้

3. สรุป (Conclusion)

ผู้เขียนบทความกรุณาตรวจสอบบทความอย่างรอบคอบโดยใช้เวลาอย่างเพียงพอก่อนส่งให้คณะกรรมการพิจารณา จะทำให้บทความของท่านมีคุณภาพสูง ผ่านการพิจารณาง่ายขึ้น และหากไม่มีการแก้ไขบทความกลับภายในระยะเวลา 3 เดือน หลังจากได้รับบทความกลับคืน บทความนั้นจะถูกยกเลิกการพิจารณาโดยอัตโนมัติ และไม่รับพิจารณาบทความใดๆ ของผู้เขียนนั้น เป็นระยะเวลา 1 ปี นับตั้งแต่วันที่ครบกำหนดการส่งบทความกลับคืน

4. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements)

ขอขอบคุณข้อมูลจาก TCI และผู้เขียนบทความทุกท่านที่ให้ความร่วมมือรักษาระเบียบการเขียนบทความอย่างเคร่งครัด

5. เอกสารอ้างอิง (References)

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

ในการเขียนเอกสารอ้างอิงผู้เขียนต้องเขียนเป็นภาษาอังกฤษ ในกรณีแหล่งข้อมูลที่ใช้อ้างอิงมาจากแหล่งอ้างอิงภาษาไทย เช่น ตำราไทย วารสารไทย เป็นต้น ให้แปลเป็นภาษาอังกฤษ แล้ววงเล็บด้านท้ายว่า (in Thai) ทั้งนี้ผู้เขียนบทความ ควรใช้แหล่งอ้างอิงที่ได้รับการยอมรับกันตามเกณฑ์สากล

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

(เครื่องหมาย\หมายถึง 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)

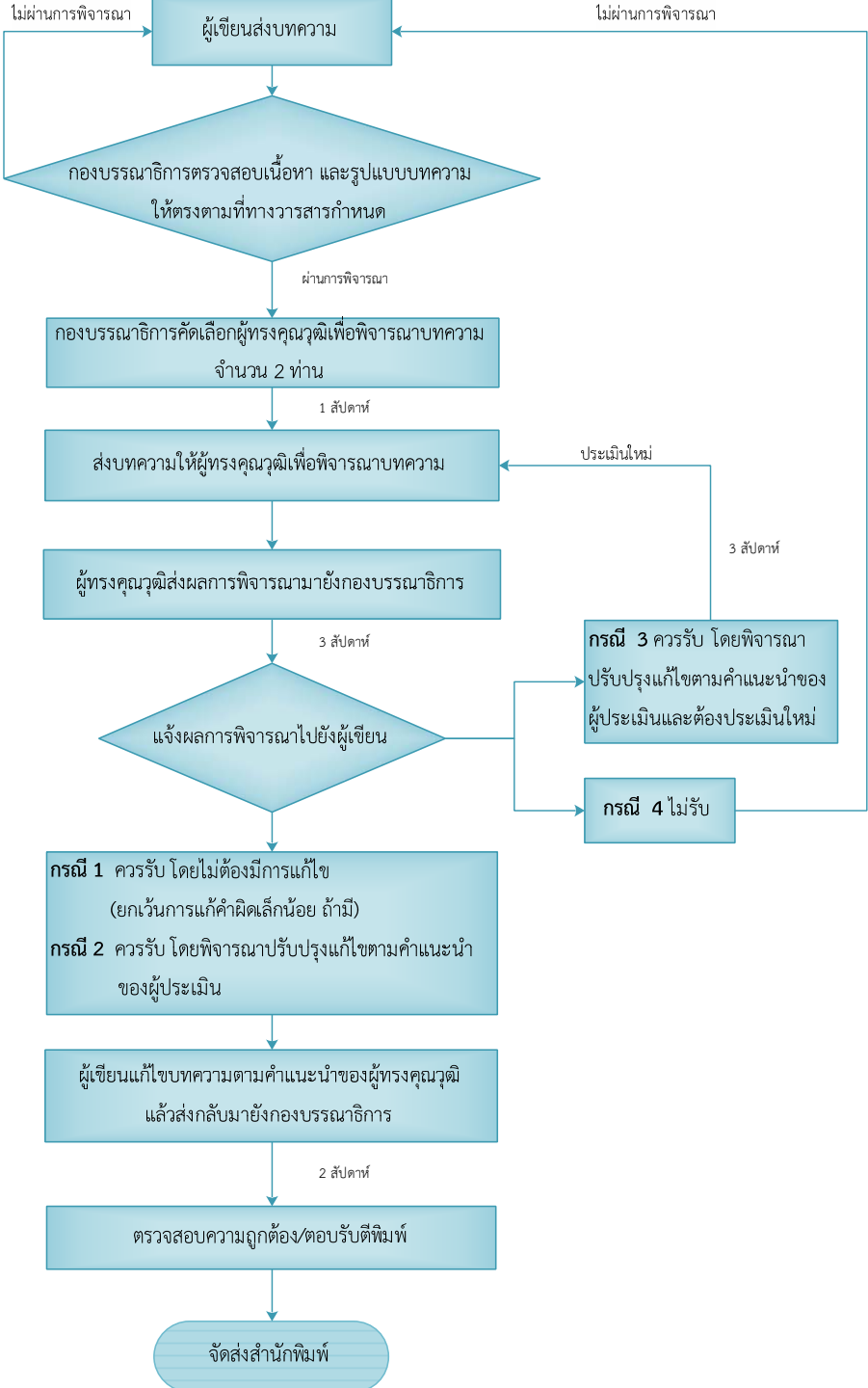
- [7] Murray PR, RoawnrhL KS, Kobayashi GS, Pfaller MA. Medical microbiology. 4th ed. St.Louis: Mosby; 2002.
- [8] Borkowski MM. Infant sleep and feeding: a telephone survey of Hispanic Americans [dissertation]. Mount Pleasant (MI): Central Michigan University; 2002.

รูปแบบสื่ออิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Material)

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

ตัวอย่าง(Example)

- [10] Siriprasert R. Model Development for Health Screening System in Prachin Buri Province. Journal of Health Science [Internet]. 2010 [cited 2011 Feb 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.htm>Article

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมนกคณัฏฐบุรี

ในกรณีที่ 2 และ 3 หลังจากพบความผ่านการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิแล้ว ผู้เขียนควรพิจารณาการแก้ไขและส่งบทความกลับในระยะเวลาที่กำหนดหากล่าช้าเกิน 90 วัน (นับจากวันแจ้งแก้ไข) กองบรรณาธิการขอแจ้งไม่รับพิจารณาบทความโดยอัตโนมัติ และผู้เขียนไม่สามารถส่งบทความเข้าสู่ระบบได้เป็น ระยะเวลา 1 ปี (เนื่องจากมีผลต่อค่าใช้จ่ายในการประเมินบทความ และขาดความต่อเนื่องในการพิจารณาบทความจากผู้ทรงคุณวุฒิ)

หมายเหตุ : รวมระยะเวลาโดยประมาณ 90 วัน หากไม่มีการแก้ไขใดๆเพิ่มเติม



สมาชิกเลขที่

ใบสมัครสมาชิกวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลธัญบุรี

วันที่สมัคร

ข้าพเจ้า นาย/นาง/นางสาว สกุล อาชีพ

ที่อยู่ (สำหรับจัดส่งวารสาร) เลขที่ ถนน แขวง/ตำบล

เขต/อำเภอ จังหวัด รหัสไปรษณีย์

โทรศัพท์..... โทรสาร e-mail

มีความประสงค์สมัครเป็นสมาชิก

อัตราค่าสมาชิก

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลธัญบุรี 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

ธนาคาติ ส่งจ่าย

ตัวแลกเงินไปรษณีย์ ส่งจ่าย

โอนเงินเข้าบัญชีธนาคาร..... ชื่อบัญชี เลขที่บัญชี

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

ลงชื่อ ผู้สมัคร
(.....)

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลธัญบุรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

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 NumberMobile 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.....

(.....)

...../...../.....



คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12100

โทร. 0-2549-3493 โทรสาร 0-2549-3493

www.engineer.rmutt.ac.th/journal