



วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏนครราชสีมา

Journal of Engineering, RMUTT

ปีที่ 17 ฉบับที่ 2 เดือน กรกฎาคม – ธันวาคม 2562

www.engineer.rmutt.ac.th/journal

Print : ISSN 1685-5280
Online : ISSN 2697-4339

การแยกเซลลูโลสและน้ำตาลรีดิวซ์จากสารละลายไฮโดรไลเซตของหญ้าเนเปียร์ด้วยกระบวนการเมมเบรน	1
Separation of Cellulase and Reducing Sugar from Napier Grass Hydrolyzate by Membrane Filtration	
• มินทิชา พิษณุพงศ์วิบุตย์ ธีระวัฒน์ เหมื่อนศรีชัย และอุไรวัลย์ รัตนะพิสิฐ	
การปรับปรุงการกระจายสินค้าประเภทอะไหล่ยานยนต์จากประเทศผู้ผลิตไปยังตัวแทนจำหน่ายในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้	13
The Improvement of Automotive Spare Parts Distribution from Manufacturer Countries to Distributors in South East Asia	
• เอื้ออาทร ครุสงฆ์ และกมลชนก สุทธิวานฤพนธ์	
การพัฒนาเปลือกอาคารผสมเส้นใยมะพร้าว	25
Development of Building Envelope Mixed with Coconut Fiber	
• กิตติพันธ์ บุญโตสัตะกุล กิตติพงษ์ สุวีโร และปราโมทย์ วิจารณ์กุล	
การพัฒนารูปแบบการเรียนรู้แบบผสมผสานด้วยการคิดเชิงออกแบบ ร่วมกับหลักการสอนแบบทริซเพื่อส่งเสริมการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมของนิสิตนักศึกษาวิศวกรรมศาสตร์ระดับปริญญาบัณฑิต	37
Development of Blended Learning Model with Design Thinking and TRIZ Principles to Enhance Engineering Problem Solving Skills of Engineering Undergraduate Students	
• พิชรา วงศ์ตาพา และเนาวนิตย์ สงคราม	
การพิจารณาค่าเฉลี่ยเป้าหมายสำหรับการผลิตปริมาณมากจากข้อกำหนด สำหรับการแจกแจงสามัญในวิศวกรรมโยธา	49
Determination of the Target Mean Values for Mass Production from the Specifications for Common Distributions in Civil Engineering	
• ก้อง กมลเลิศวรา และวินัย อวยพรประเสริฐ	
การศึกษาเปรียบเทียบการรักษาความชื้นของดิน และการป้องกันวัชพืชจากการใช้ผ้าไม่ทอที่ปักด้วยเข็มปักเป็นวัสดุคลุมดิน กรณีศึกษาการเจริญเติบโตของแคนตาลูป	63
A Comparison Study on Soil Moisture and Protection of Weed using Needle Punch Nonwoven Mulch: A case Study for Planting of Cantaloupe	
• มินทาสันต์ ขวัญข้าว สมนึก สังข์หนู และจักรกฤษณ์ เจริญใส	
การศึกษาแนวทางการออกแบบและพัฒนาเครื่องนวดกระสอบน้ำตาลทรายในขั้นตอนการลำเลียงกระสอบขึ้นรถบรรทุก	75
A Study of Design and Development Guidelines for Sugar Sack-Threshing Machine on Process of Sacks Transport into a Truck	
• ญาญ์ณินท์ จันทรวิเชียร และเชิดพงษ์ เชื้อชาญวัฒน์	
การศึกษาอัตราเร็วรอบเครื่องยนต์แก๊สสันดาปด้วยการควบคุมตำแหน่งของลิ้นควบคุมอัตราเร็วเดินเบา	87
Study of Gasoline Engine Speed by Controlling Position of Idle Speed Control Valve	
• เอกนรงค์ ใจยงค์	
การออกแบบและสร้างเครื่องแยกน้ำและน้ำมันในกระบวนการผลิตแคะหมูโร้มนัน	99
Design and Construction of Water and Oil Removal Machine for Pork Snack Production	
• มานพ แยมแพง	
กำลังอัดและความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน และใช้กากหินเตาแทนที่บางส่วนของมวลรวมละเอียด	113
Compressive Strength and Chloride Penetration Resistance of Concrete with Fly Ash, Limestone Powder and Partial Replacement of Fine Aggregate by Bottom Ash	
• ศิระ อาทมาท และกวิชัย สำราญวานิช	
เครื่องเทอร์โมฟอร์มมิงสำหรับขึ้นรูปภาชนะบรรจุข้าวแต๋น	127
Thermoforming Machine for Produced of the Kaotan Packaging	
• กนต์ธีร์ สุขตาจันทร์ ตอน วิละคำ และนเรศ อินดิวงค์	
ผลของอุณหภูมิและการดัดแปลงสภาพบรรยากาศในบรรจุภัณฑ์ต่ออายุการเก็บรักษาของบัวสดตัดแต่ง	139
Effects of Temperature and Modified Atmosphere Packaging (MAP) on Storage Life of Fresh Cut Lotus Root	
• สุนัน ปานสาคร และจตุรงค์ ลังกาพันธุ์	
สมการจลนพลศาสตร์การอบแห้งที่เหมาะสมของพลพล	151
Drying Kinetics Equations of Persimmon Fruit	
• ศิระ อัจฉริยวิริยะ อารีย์ อัจฉริยวิริยะ และธนิตา เกตุวิจิตรชัย	
อิทธิพลของรูปร่างเครื่องมือตัดในงานกลึงเหล็กกล้าคาร์บอน S50C ปราศจากสารหล่อเย็นสำหรับผลิตชิ้นส่วนยานยนต์	163
The Influence of Cutting Tool Geometry in a Dry Turning Operation of Carbon Steel (S50C) in Automotive Parts Production	
• ไพศาล ทองสงค์ ศิริชัย ต่อสกุล พันธุ์พงษ์ คงพันธุ์ และประจักษ์ อ่างบุญตา	
ผลกระทบของแรงและเวลาอัดในกระบวนการเชื่อมเสียดทานที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของรอยต่อระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1045 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304	173
Effects of Compressive Force and Time in Friction Welding Process on Microstructure and Mechanical Properties of AISI 1045 Carbon Steel and AISI 304 Stainless Steel Joint	
• วรพงศ์ บุญช่วยแทน รอมฎอน บุระพา และวรรณพร ชีววัฒน์พงศ์	
อินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบที่ 19 ระดับ 3 เฟส ที่มีความเพี้ยนฮาร์โมนิกรวมต่ำ	189
3-phase 19-level T-type Multilevel Inverter Based Low Total Harmonic Distortion	
• ไพโรจน์ ทองประศรี	

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเป็นเอกสารเผยแพร่ผลงานวิชาการและวิจัยทางด้านวิศวกรรมศาสตร์
2. เป็นสื่อแลกเปลี่ยนความรู้ใหม่ทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ระหว่างนักวิจัยและผู้สนใจ
3. เพื่อส่งเสริมสนับสนุนให้คณาจารย์ และบุคลากร คณะวิศวกรรมศาสตร์ทำผลงานทางด้านวิชาการที่เป็นประโยชน์ต่อสังคม
4. เป็นเอกสารรวบรวมรายงานวิจัยและบทความทางวิชาการที่น่าสนใจและมีคุณค่าทางวิศวกรรมศาสตร์ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

เจ้าของ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี
จังหวัดปทุมธานี 12100
โทร. 0-2549-3400
โทรสาร 0-2577-5026

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลธัญบุรี

พิมพ์ออกเผยแพร่ 2 ฉบับต่อปี
ตั้งแต่ เดือนมกราคม-เดือนมิถุนายน
และเดือนกรกฎาคม-ธันวาคม
ติดต่อขอรับเป็นสมาชิกได้โดยตรงที่
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

พิมพ์ที่ บริษัท กริปเพิล กรุ๊ป จำกัด

95 ถ.แจ้งวัฒนะ ช.6 แขวงตลาดบางเขน
เขตหลักสี่ กรุงเทพฯ 10210
โทรศัพท์ 0 2521-8420
โทรสาร 0 2521 8424

คณะวิศวกรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เป็นคณะหนึ่งที่มีการศึกษาระดับปริญญาตรี ปริญญาโท และปริญญาเอก สาขาวิศวกรรมศาสตร์โดยมีจุดประสงค์ เพื่อผลิตวิศวกรในหลักสูตรปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) วิศวกรในหลักสูตรปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) และวิศวกรในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วศ.ด.) สนองความต้องการในตลาดแรงงาน และพัฒนาอุตสาหกรรมของประเทศ

ส่งเสริมงานด้านวิจัย และดำเนินงานวิจัยทางอาชีวศึกษาและเทคโนโลยี

จัดอบรมและสัมมนาวิชาการให้กับครูประจำการ และอาจารย์ผู้สอนทั้งของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีและเอกชน เพื่อยกระดับความรู้ทางวิชาการให้สอดคล้องกับความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีและแผนภูมิการบริหารงานคณะวิศวกรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์มีวัตถุประสงค์ที่จัดการเรียนการสอนเพื่อให้ นักศึกษามีความรู้พื้นฐานและวิชาชีพ และสามารถวิเคราะห์และสังเคราะห์ระบบและงานด้านวิศวกรรมศาสตร์ได้เป็นอย่างดี เพื่อที่จะให้สำเร็จเป็นบัณฑิตที่มีความสามารถในการประกอบอาชีพ ซึ่งสอดคล้องและตรงกับความต้องการของตลาดแรงงาน โดยบัณฑิตจะต้องมีความรับผิดชอบและซื่อสัตย์ ควบคู่กับความรู้ทางด้านวิชาการ มีจริยธรรม ควบคู่กับการมีคุณธรรมประจำใจ

การแยกเซลลูโลสและน้ำตาลรีดิวซ์จากสารละลายไฮโดรไลเซตของหญ้าเนเปียร์ด้วยกระบวนการ เมมเบรน Separation of Cellulase and Reducing Sugar from Napier Grass Hydrolyzate by Membrane Filtration โดย : มินทิตา พิเชฐพงศ์วิมุตติ อธิวัฒน์ เหมือนศรีชัย และจุไรวัลย์ รัตนะพิสิฐ	หน้า 1
การปรับปรุงการกระจายสินค้าประเภทอะไหล่ยานยนต์จากประเทศผู้ผลิตไปยังตัวแทนจำหน่ายใน ภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ The Improvement of Automotive Spare Parts Distribution from Manufacturer Countries to Distributors in South East Asia โดย : เอื้ออาทร ครุสงฆ์ และกมลชนก สุทธิวาทีนฤพุฒิ	13
การพัฒนาเปลือกอาคารผสมเส้นใยมะพร้าว Development of Building Envelope Mixed with Coconut Fiber โดย : กิตติพันธ์ บุญโตสัตรีกุล กิตติพงษ์ สุวิโร และปราโมทย์ วีรานุกูล	25
การพัฒนาแบบการเรียนรู้แบบผสมผสานด้วยการคิดเชิงออกแบบ ร่วมกับหลักการสอนแบบ ทริซเพื่อส่งเสริมการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมของนิสิตนักศึกษาวิศวกรรมศาสตร์ระดับปริญญาบัณฑิต Development of Blended Learning Model with Design Thinking and TRIZ Principles to Enhance Engineering Problem Solving Skills of Engineering Undergraduate Students โดย : พิชรา วงศ์ตาผา และเนาวนิตย์ สงคราม	37
การพิจารณาค่าเฉลี่ยเป้าหมายสำหรับการผลิตปริมาณมากจากข้อกำหนด สำหรับการแจกแจง สามัญในวิศวกรรมโยธา Determination of the Target Mean Values for Mass Production from the Specifications for Common Distributions in Civil Engineering โดย : ก้อง กมลเลิศวรา และวินัย อวยพรประเสริฐ	49
การศึกษาเปรียบเทียบการรักษาความชื้นของดิน และการป้องกันวัชพืชจากการใช้ผ้าไม่ทอที่ปัก ด้วยเข็มปักเป็นวัสดุคลุมดิน กรณีศึกษาการเจริญเติบโตของแคนตาลูป A Comparison Study on Soil Moisture and Protection of Weed using Needle Punch Nonwoven Mulch: A case Study for Planting of Cantaloupe โดย : บิณฑสันต์ ขวัญข้าว สมนึก สังข์หนู และจักรกฤษณ์ เจริญใส	63
การศึกษาแนวทางการออกแบบและพัฒนาเครื่องนวดกระสอบน้ำตาลทรายในขั้นตอนการลำเลียง กระสอบขึ้นรถบรรทุก A Study of Design and Development Guidelines for Sugar Sack-Threshing Ma- chine on Process of Sacks Transport into a Truck โดย : ญาณุณินท์ จันทร์วิเชียร และเชิดพงษ์ เชี่ยวชาญวัฒนา	75

การศึกษาอัตราเร็วรอบเครื่องยนต์แก๊ซลิ้นด้วยการควบคุมตำแหน่งของลิ้นควบคุมอัตราเร็วเดินเบา Study of Gasoline Engine Speed by Controlling Position of Idle Speed Control Valve โดย : เอกณรงค์ ใจยงค์	87
การออกแบบและสร้างเครื่องเหวี่ยงแยกน้ำและน้ำมันในกระบวนการผลิตแฮมไรมัน Design and Construction of Water and Oil Removal Machine for Pork Snack Production โดย : มานพ แยมแพง	99
กำลังอัดและความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน และใช้ เถ้าก้นเตาแทนที่บางส่วนของมวลรวมละเอียด Compressive Strength and Chloride Penetration Resistance of Concrete with Fly Ash, Limestone Powder and Partial Replacement of Fine Aggregate by Bottom Ash โดย : ศิระ อาทมาท และทวีชัย สำราญวานิช	113
เครื่องเทอร์โมฟอร์มมิ่งสำหรับขึ้นรูปภาชนะบรรจุข้าวแต๋น Thermoforming Machine for Produced of the Kaotan Packaging โดย : กนต์ธีร์ สุขตากจันทร์ ดอน วิละคำ และนเรศ อินต๊ะวงศ์	127
ผลของอุณหภูมิและการดัดแปลงสภาพบรรยากาศในบรรจุภัณฑ์ต่ออายุการเก็บรักษารากบัวสดตัดแต่ง Effects of Temperature and Modified Atmosphere Packaging (MAP) on Storage Life of Fresh Cut Lotus Root โดย : สุนัน ปานสาคร และจตุรงค์ ลังกาพินธุ์	139
สมการจลนพลศาสตร์การอบแห้งที่เหมาะสมของผลพลับ Drying Kinetics Equations of Persimmon Fruit โดย : ศิวะ อัจฉริยวิริยะ อารีย์ อัจฉริยวิริยะ และชนิดา เกตุวิจิตรชัย	151
อิทธิพลของรูปร่างเครื่องมือตัดในงานกลึงเหล็กกล้าคาร์บอน S50C ปราศจากสารหล่อเย็นสำหรับ ผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ The Influence of Cutting Tool Geometry in a Dry Turning Operation of Carbon Steel (S50C) in Automotive Parts Production โดย : ไพศาล ทองสงค์ ศิริชัย ต่อสกุล พันธุ์พงษ์ คงพันธุ์ และประจักษ์ อ่างบุญตา	163
ผลกระทบของแรงและเวลาอัดในกระบวนการเชื่อมเสียดทานที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติ ทางกลของรอยต่อระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1045 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 Effects of Compressive Force and Time in Friction Welding Process on Microstructure and Mechanical Properties of AISI 1045 Carbon Steel and AISI 304 Stainless Steel Joint โดย : วรพงศ์ บุญช่วยแทน รอมฎอน บุระพา และวรรณพร ชีววุฒิพงศ์	173
อินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบที่ 19 ระดับ 3 เฟส ที่มีความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมต่ำ 3-phase 19-level T-type Multilevel Inverter Based Low Total Harmonic Distortion โดย : ไพโรจน์ ทองประศรี	189



วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏธนบุรี

คณะกรรมการจัดทำวารสาร วิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏธนบุรี

คณะกรรมการที่ปรึกษา

อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ
คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

กองบรรณาธิการ

ศ.ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ
รศ.ดร.สุธี อักษรกิตติ
รศ.ดร.เข้มชัย เหมะจันทร์
รศ.ดร.ศิริวรรณ ศรีสรณ์
รศ.ดร.กัณวรัช พลุประทุม
รศ.ดร.ธารังรัตน์ มุ่งเจริญ
รศ.ณรงค์ บวบทอง
ผศ.ดร.สมเจตน์ พชรพันธ์
ผศ.ดร.ปฐมทัศน์ จิระเดชะ
ผศ.ดร.อังคณา พันธุ์หล่อ
ดร.พัชราลัย สุรัสวดี
ผศ.ดร.ศิวกร อ่างทอง
รศ.ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์
ผศ.ดร.จักรี ศรีนนท์ฉัตร
ผศ.สมศักดิ์ แก่นทอง
ผศ.ดร.สุนนมาลย์ เนียมกลาง
ผศ.ชวลิต แสงสวัสดิ์

ศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
คณะกรรมการ มหวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย
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
33 ซอยอุดมสุข แขวงบางนา เขตบางนา กรุงเทพฯ 10260

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

ดร.ปรกช สิริสุวัฒน์

เลขานุการ

นางสาวอมรรัตน์ ยิ้มอยู่

ผู้ช่วยเลขานุการ

นายอัศชนะ คูเจริญไพบูลย์

ผู้ดูแลระบบงานเทคโนโลยีสารสนเทศ

นายพัฒนร์พี สุนันทพจน์



Journal of Engineering, RMUTT

Editorial Board Members

Consultant Board Members

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

Editorial Board

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

Editor in Chief

Dr.Porakoch Sirisuwan

Secretary

Miss.Amonrat Yimyoo

Assistant Secretary

Mr..Uschana Koojarenphaiboon

System administrator

Mr.Patrapee Sunantapot



วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏบุรีรัมย์

บทบรรณาธิการ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏบุรีรัมย์ ปีที่ 17 ฉบับที่ 2 เดือน กรกฎาคม – ธันวาคม 2562 ยังคงเนื้อหาสาระที่เข้มข้นในการประเมินจากผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความจำนวน 16 บทความ ซึ่งถูกนำเสนอจากผู้เขียนหลากหลายสาขาในด้านวิศวกรรมศาสตร์ และสาขาอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง อันเป็นบุคลากรทั้งภายในและภายนอกมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชภัฏบุรีรัมย์

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏบุรีรัมย์ ขอขอบพระคุณ ทุกๆ ท่าน ที่ได้มีส่วนร่วมในการทำให้เกิดผลงานทางวิชาการที่มีคุณภาพสืบเนื่องมาจนถึงปัจจุบันเป็นระยะเวลา 17 ปี

ในวาระดิถีขึ้นปีใหม่ 2563 กองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏบุรีรัมย์ ขออำนาจสิ่งศักดิ์สิทธิ์ทั้งหลายในสากลโลก อำนาจคุณพระศรีรัตนตรัย โปรดดลบันดาลให้ทุกๆ ท่าน ประสบแต่ความสุข ความเจริญ และพลานามัยสมบูรณ์ แข็งแรง ตลอดปี 2563 นี้

กองบรรณาธิการ

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิผู้พิจารณาบทความ

ศ.ดร.ดนัย บุญยเกียรติ	คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผศ.ดร.นภัส หาดุพรชัย	คณะเศรษฐศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รศ.ดร.พัลลภ พิริยะสุรวงศ์	คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.วิลาวัณย์ พร้อมพรม	คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รศ.ดร.เพ็ญจิตร ศรีนพคุณ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
รศ.ดร.วรรณิ จิรภาคย์กุล	คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.ทศพล พรพรม	คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน
ผศ.ดร.พันธุ์พงษ์ คงพันธุ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.ภาณุ ประทุมทรัพย์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.มนูศักดิ์ จานทอง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.ระพี กาญจนะ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ.ดร.ศิริชัย ต่อสกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.สุรัตน์ ตรีชนพงศ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ศรีไร จารุกัญญา	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ.ดร.บวร อิศรางกูร ณ อยุธยา	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ.ดร.จตุรงค์ ลังกาพันธ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ.ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ.ดร.ปิติกานต์ กร้ามาตร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ศิริชัย แดงอม	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ.ดร.กัณวรัช พลุประชาญ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)
รศ.ดร.ปานมนัส ศิริสมบุรณ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.ดร.วีรชาติ ตั้งจิรภัทร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.สมเสียง จันทาสี	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
รศ.ดร.ดนุพล ตันนโยภาส	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รศ.ดร.สุภาวรรณ ฐิระวนิชย์กุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผศ.ดร.สินินาฏ จงคง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผศ.เฉลิมพล คล้ายนิล	คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล
ผศ.ดร.ประเทืองทิพย์ ปานบำรุง	คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผศ.ดร.ประภาศ เมืองจันทร์บุรี	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

Peer Reviews

Prof.Dr.Danai Boonyakiat	Faculty of Agriculture Chiang Mai University
Asst.Prof.Dr.Napat Harnpornchai	Faculty of Economics Chiang Mai University
Assoc.Prof.Dr.Pallop Piriyasurawong	Faculty of Industrial Education King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Asst.Prof.Dr.Wilawan Promprom	Faculty of Science, Mahasarakham University
Assoc.Prof.Dr.Penjit Srinophakun	Faculty of Engineering Kasetsart University
Assoc.Prof.Dr.Wanee Jirapakkul	Faculty of Agro-Industry Kasetsart University
Assoc.Prof.Dr.Tosapon Pornprom	Faculty of Agriculture at Kamphaeng Saen, Kasetsart University
Asst.Prof.Dr.Panpong Komgpan	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Panu Pratumnopharat	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Manusak Janthong	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Rapee Kanchana	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Assoc.Prof.Dr.Sirichai Torsakul	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Surat Triwanapong	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Srirai Jarupinyo	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Assoc.Prof.Dr.Borvorn Israngkura Na Ayudhya	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Assoc.Prof.Dr.Jaturoung Lungapin	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Assoc.Prof.Dr.Boonyang Plangklang	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Assoc.Prof.Dr.Pitisan Krammart	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Sirichai Dangeam	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Kittipong Kimapong	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Assoc.Prof.Dr.Ganwarich Pluphrach	Faculty of Engineering Srinakharinwirot University
Assoc.Prof.Dr.Panmanas Sirisomboon	Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Asst.Prof.Dr.Weerachart Tangchirapat	Faculty of Engineering King Mongkut's University of Technology Thonburi
Asst.Prof.Somsiang Chantasee	Faculty of Engineering Burapha University
Assoc.Prof.Dr.Danupon Tonnayopas	Faculty of Engineering, Prince of Songkla University
Assoc.Prof.Dr.Supawan Tirawanichakul	Faculty of Engineering, Prince of Songkla University
Asst.Prof.Dr.Sininart Chongkhong	Faculty of Engineering, Prince of Songkla University
Asst. Chalernpol Klaynil	Faculty of Industry and Technology Rajamangala University of Technology Rattanakosin
Asst.Prof.Dr.Pratuangtip Panbumrung	Faculty of Textile Industry Rajamangala University of Technology Krunghthep
Asst.Prof.Dr.Prapas Muangjunburee	Faculty of Engineering Prince of Songkla University

การแยกเซลลูเลสและน้ำตาลรีดิวซ์จากสารละลายไฮโดรไลเซต ของหญ้าเนเปียร์ด้วยกระบวนการเมมเบรน

มินติตา พิเชฐพงศ์วิมุตติ^{1*}, อีระวัฒน์ เหมือนศรีชัย² และจุไรวัลย์ รัตนะพิสิฐ³
mintita_p@rmutt.ac.th¹, thirawat.m@en.rmutt.ac.th², juraivan.r@en.rmutt.ac.th³

^{1*–3} ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Received	: 12-Nov-2018
Revised	: 22-Feb-2019
Accepted	: 12-Mar-2019

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการแยกเซลลูเลสด้วยการกรองระดับอัลตราฟิลเตรชัน (UF) และการกักกันน้ำตาลรีดิวซ์ด้วยการกรองระดับนาโนฟิลเตรชัน (NF) จากสารละลายไฮโดรไลเซตของหญ้าเนเปียร์ การทดลองประกอบด้วยเมมเบรน 5 ชนิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลตัดการกรอง (MWCO) ต่างกันดังนี้ การกรองระดับ UF (PES500, PES100, PES10) และการกรองระดับ NF (NP010, NP030) กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันทำการกรองแบบไหลขวางที่อัตราการไหล 3 ค่า (30, 50 และ 75 mL/min) โดยสารละลายเพอร์มิเอตของ UF ถูกป้อนเข้าสู่การกรองนาโนฟิลเตรชันแบบปิดตายที่ความดันคร่อมเมมเบรน (TMP) 4 ค่า (10, 15, 20 และ 25 bar) ผลการทดลองพบว่า ฟลักซ์เพอร์มิเอตสัมพันธ์กับอัตราการไหลและ TMP อย่างมีนัยสำคัญ เมมเบรน PES100 อัตราการไหล 75 mL/min ให้ค่าฟลักซ์เพอร์มิเอตสูงสุดของการกรอง UF สำหรับค่าการกักกันเซลลูเลส น้ำตาล และเอทานอลของการกรองระดับ UF และ NF สัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับค่า MWCO กลไกฟาล์วลิ่งแบบเค้กบนฐานแบบจำลองเฮอร์เมียร์ให้ค่า R^2 สูงสุด สำหรับฟาล์วลิ่งแบบผันกลับไม่ได้ (IF) พบว่าเมมเบรน PES100 ให้ค่า IF ต่ำที่สุด (14.3%) ณ อัตราการไหลต่ำ (30 mL/min) ซึ่งสัมพันธ์กับค่าฟลักซ์เพอร์มิเอต นอกจากนี้เมื่ออัตราการไหลสูงขึ้น ค่า IF สัมพันธ์กับขนาดรูพรุนและ TMP

คำสำคัญ: ไฮโดรไลเซต อัลตราฟิลเตรชัน นาโนฟิลเตรชัน ฟาล์วลิ่ง

Separation of Cellulase and Reducing Sugar from Napier Grass Hydrolyzate by Membrane Filtration

Mintita Pichadpongwimut^{1*}, Thirawat Mueansichai² and Juraivan Ratanapisit³
mintita_p@rmutt.ac.th¹, thirawat.m@en.rmutt.ac.th², juraivan.r@en.rmutt.ac.th³

^{1*3} Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thunyaburi

Received	: 12-Nov-2018
Revised	: 22-Feb-2019
Accepted	: 12-Mar-2019

Abstract

This study investigated separation of cellulase by ultrafiltration (UF) and reducing sugar by nanofiltration (NF) from the Napier grass hydrolyzate. Experiments were consisted of 5 membranes with different molecular weight cut-off (MWCO): PES500, PES100, PES10 for UF and NP010, NP030 for NF. The UF cross-flow study was carried out at 3 flow rates (30, 50 and 75 mL/min). Permeate from the UF was used as a feed to a dead-end NF which was operated for 4 transmembrane pressure (TMP) (10, 15, 20 and 25 bar). Results showed that the permeate flux was significantly related to the flow rate and TMP. The PES100 yielded the best flux for UF at 75 mL/min. Also the rejection of cellulase, reducing sugar and ethanol in both UF and NF significantly depended on MWCO. Fouling by cake layer formation provided the highest R^2 based on the Hermia fouling model. The irreversible fouling (IF) of PES100 was the lowest (14.3%) at the low flow rate (30 mL/min) which related to the declining of the permeate flux. In addition, the IF was influenced by the MWCO and TMP in the limit of higher feed flow rate.

Keywords: Hydrolyzate, ultrafiltration, nanofiltration, fouling

1. บทนำ

ปัจจุบันมีการผลิตเอทานอลจากวัสดุเซลลูโลสอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเซลลูโลสเป็นวัตถุดิบที่มีราคาถูกและไม่ส่งผลกระทบต่อวงจรอาหารของมนุษย์ [1] แต่การใช้วัสดุเซลลูโลสยังมีข้อจำกัดทางด้านเศรษฐศาสตร์ของเอนไซม์ เพราะเอนไซม์เซลลูเลสที่ใช้ในกระบวนการเปลี่ยนเซลลูโลสให้เป็นน้ำตาลมีราคาสูงและที่ผ่านมามีการใช้เอนไซม์มักเป็นแบบใช้แล้วทิ้ง ไม่มีการนำกลับมาใช้ซ้ำ ซึ่งถือว่าไม่มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ [2] จึงมีการนำเสนอวิธีการนำกลับเซลลูเลสด้วยวิธีต่างๆ เช่น วิธีการดูดซับคายซับของเอนไซม์ [3], การตรึงเอนไซม์เซลลูเลสบนแม่เหล็กลอนาโน [4], การใช้ไฟฟ้าร่วมกับกระบวนการกรองด้วยเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน [5] และการกรองด้วยเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันในระบบการกรองแบบปิดตาย [6] ซึ่งพบว่าหลายวิธีการนำกลับมีศักยภาพในการนำไปใช้งานได้

กระบวนการแยกด้วยเมมเบรนมีจุดเด่นด้านการใช้พลังงานต่ำ สามารถแยกผลิตภัณฑ์ที่มีความอ่อนไหวต่อความร้อน และทำให้ผลิตภัณฑ์เข้มข้นขึ้น จึงเป็นการแยกและทำให้บริสุทธิ์ได้พร้อมกัน กระบวนการนี้สามารถจำแนกได้ตามน้ำหนักโมเลกุลของสารตั้งต้นได้หลายระดับและหนึ่งในนั้นคือ กระบวนการแยกด้วยเมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชัน (UF) เป็นกระบวนการแยกอนุภาคหรือตัวละลายที่มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 1,000-500,000 ดัลตัน ไม่ให้ผ่านเมมเบรนออกไป สามารถดำเนินการได้ในสภาวะอุณหภูมิห้องและความดันไม่สูงมาก [7] การประยุกต์ใช้งานเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน ได้แก่ การแยกโปรตีนเป็นต้น กระบวนการนี้จึงเป็นกระบวนการที่น่าสนใจในการแยก เซลลูเลสออกจากส่วนละลายไฮโดรไลเซต เพื่อนำเซลลูเลสกลับมาใช้ใหม่ เนื่องจากเมมเบรนระดับนี้มีน้ำหนักโมเลกุลตัดการกรองอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกับน้ำหนัก

โมเลกุลเซลลูเลส [8,9] การใช้เมมเบรนระดับนาโนฟิลเตรชัน (NF) เพื่อเพิ่มความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ถือเป็นอีกหนึ่งกระบวนการที่น่าสนใจ เนื่องจากในกระบวนการหมักเพื่อผลิตเอทานอลใช้ยีสต์เพื่อเปลี่ยนน้ำตาลเป็นเอทานอล ปริมาณยีสต์และความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ที่มากพอมีผลต่อปริมาณเอทานอลและคุณภาพของเอทานอล [10] ซึ่งหลังจากกระบวนการแยกเซลลูเลส ในระดับอัลตราฟิลเตรชันจะได้สารละลายที่ประกอบไปด้วยน้ำตาลรีดิวซ์, สารละลายไฮโดรไลเซตและเซลลูเลส เป็นต้น บางส่วนที่ลอดผ่านเมมเบรนออกมา [11] ถ้าหากทำการกรองสารละลายดังกล่าวในขั้นที่สองโดยใช้เมมเบรนที่มีน้ำหนักโมเลกุลตัดการกรองที่เล็กลง (นาโนฟิลเตรชัน) จะสามารถแยกน้ำตาลรีดิวซ์ ออกจากสารละลายได้ [12] และหลังจากกระบวนการแยกจะได้น้ำตาลที่มีความเข้มข้นสูงพร้อมที่จะเข้าสู่กระบวนการหมักเอทานอลกับสารละลายที่สามารถนำกลับเข้ามาสู่ในกระบวนการหมักตอนเริ่มต้นได้อีกครั้ง [6,13]

อย่างไรก็ตามกระบวนการเมมเบรนมีข้อจำกัดของการเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันและฟาล์วลิ่ง ทำให้ฟลักซ์มีค่าลดลง [14] ปัญหานี้สามารถบรรเทาได้หากเข้าใจกลไกฟาล์วลิ่ง ซึ่งแบบจำลองเฮอร์เมียร์ถูกนำมาใช้เพื่อหาชนิดฟาล์วลิ่งของระบบ การปรับเปลี่ยนสภาวะการดำเนินการมีผลฟาล์วลิ่งแบบผันกลับได้ในขณะที่ฟาล์วลิ่งแบบ ผันกลับไม่ได้เกิดจากการอุดตันของอนุภาคทั้งภายในและภายนอกของรูพรุน ซึ่งโดยทั่วไปสามารถกำจัดออกได้โดยการล้างด้วยสารเคมี [15]

ถึงแม้ว่ามีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการแยกเซลลูเลสด้วยเมมเบรน แต่กระบวนการที่ใช้ระบบการกรองต่อเนื่องแบบไหลขวาง ยังไม่มีผลการศึกษามากนัก อีกทั้งการศึกษากักกันน้ำตาลรีดิวซ์เพื่อเพิ่มความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวซ์ในขั้นตอนที่ 2 นั้นก็มีการศึกษาอยู่อย่างจำกัด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง

การศึกษากลไกฟาล์วสิ่งจากสารละลายไฮโดรไลเซทของเมมเบรนทั้ง UF และ NF ที่มีอยู่น้อยมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาฟลักซ์เพอร์มิเอตและความสามารถในการกักกันของเซลล์ูล์น้ำตาลรีดิวิซ์ และเอทานอล โดยมีขนาดรูพรุนเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนแตกต่างกัน สำหรับการกรองระดับอัลตราฟิลเตรชันดำเนินการด้วยชุดเครื่องมือแบบไหลขวางที่อัตราการไหลของสารป้อนต่างกัน และการกรองระดับนาโนฟิลเตรชันดำเนินการด้วยชุดเครื่องมือแบบปิดตายที่ความดันของระบบต่างกัน รวมทั้งศึกษาการลดลงของฟลักซ์เพอร์มิเอตเทียบกับเวลา เพื่อหากลไกฟาล์วสิ่งด้วยแบบจำลองเฮอร์เมียร์และฟาล์วสิ่งแบบผันกลับไม่ได้ โดยใช้สารละลายไฮโดรไลเซทจากหญ้า เนเปียร์

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 หญ้าเนเปียร์, ครูดเซลล์ูล์และเมมเบรน

หญ้าเนเปียร์สด จากจังหวัดพระนครศรีอยุธยา นำมาตัดให้มีขนาดประมาณ 1-2 cm จากนั้นนำไปอบจนมีความชื้นน้อยกว่า 12%

ครูดเซลล์ูล์เป็นจุลินทรีย์ผสมระหว่าง เชื้อรา *Trichoderma reesei* และยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* จากห้องปฏิบัติการชีวเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

เมมเบรนที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นชนิดโพลีอีเทอร์ซัลโฟน (PES) ชนิดเส้นใยกลวงเกรดการค้า (Spectrum Lab, USA) สำหรับการกรองระดับ อัลตราฟิลเตรชัน แลเมมเบรนชนิดแผ่นเกรดการค้า (Microdyn-Nadir, Germany) สำหรับการกรองระดับ นาโนฟิลเตรชัน คุณสมบัติของเมมเบรนแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเมมเบรน

เมมเบรน	อัลตราฟิลเตรชัน		
	PES500	PES100	PES10
MWCO	500 kDa	100 kDa	10 kDa
พื้นที่ (cm ²)	245	155	155
เมมเบรน	นาโนฟิลเตรชัน		
	NP010	NP030	
ค่าการกักกัน Na ₂ SO ₄ (%)	35-75	80-95	
พื้นที่ (cm ²)	196.3	196.3	

2.2 กระบวนการปรับสภาพและการผลิตสารละลายไฮโดรไลเซท

หญ้าเนเปียร์ถูกปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2% (w/v) ปริมาณ 300 ml ต่อปริมาณหญ้า เนเปียร์ 50 g จากนั้นนำไปเข้าหม้อนึ่งความดัน ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นเวลา 1 hr จากนั้นนำมาล้างด้วยน้ำกลั่นจนสภาพเป็นกลาง อบด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ 80°C จนหญ้าเนเปียร์มีความชื้นต่ำกว่า 12% [16]

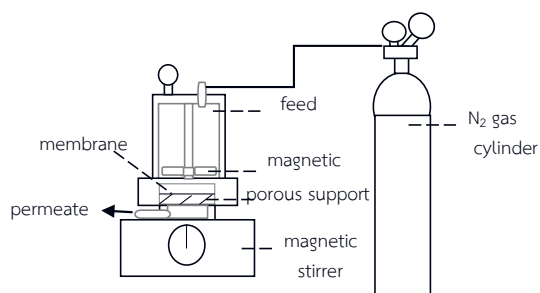
นำหญ้าที่ผ่านการปรับสภาพข้างต้น 300 g ผสมกับอาหารเหลว 6 L และครูด เซลล์ูล์ 300 g ผสมให้เข้ากัน จากนั้นวิเคราะห์ปริมาณเซลล์ูล์ แอคติวิตี, น้ำตาลรีดิวิซ์ และเอทานอล ทุกวันจนกระทั่งมีปริมาณเซลล์ูล์ แอคติวิตีสูงสุดจึงยุติการไฮโดรไลเซท จากนั้นแยกสารละลายของเหลวออกจากของแข็งผ่านการกรองด้วยผ้าขาวบาง ของเหลวที่ได้นำไปเหวี่ยงแยกด้วยความเร็วรอบ 3,500 rpm เป็นเวลา 10 min สารละลายส่วนใสนำไปใช้เป็นสารป้อนของกระบวนการกรองระดับอัลตราฟิลเตรชัน

2.3 กระบวนการแยกด้วยเมมเบรน

เครื่องมือที่ใช้สำหรับการกรองระดับ อัลตราฟิลเตรชันเป็นแบบไหลขวาง (บริษัท Spectrum Lab, USA) ทำการกรองโดยใช้อัตราการไหล 3 ค่า คือ 30, 50 และ 75 ml/min

กรองจนกระทั่งได้ปริมาณเพอร์มิเอตเป็น 60% ของปริมาณสารป้อน จากนั้นจึงยุติการกรอง ซึ่งระหว่างกระบวนการกรองได้ทำการเก็บค่าฟลักซ์ทุก 1 min จากนั้นนำสารละลายทั้งกระแสปอร์มิเอตและรีเทนเทตวิเคราะห์ปริมาณเซลล์เลส, น้ำตาลรีดิคซ์ และเอทานอล หลังการใช้งานทุกครั้งทำความสะอาดเมมเบรน ด้วยน้ำและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อฟื้นฟูสภาพพร้อมกับการล้างย้อนกลับและตรวจสอบฟลักซ์ก่อนใช้งานในครั้งถัดไป รวมทั้งวัดค่าฟลักซ์น้ำกลั่นก่อนและหลังการทดลอง ณ อัตราการไหล 20 mL/min เพื่อตรวจสอบฟาล์วลักษณะผันกลับไม่ได้

สารละลายที่ได้จากเพอร์มิเอตของการกรองระดับอัลตราฟิลเตรชันถูกนำมาใช้เป็นสารป้อนของระบบการกรองนาโนฟิลเตรชันแบบปิดตาย แผนภาพเครื่องมือแสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งในการทดลองใช้ความดัน 4 ค่า คือ 10, 15, 20 และ 25 bar และเวลาการกรอง 2 hr บันทึกค่าฟลักซ์ทุก 1 min หลังกระบวนการทำการวิเคราะห์ปริมาณต่างๆ เช่นเดียวกับการกรองระดับอัลตราฟิลเตรชัน โดยก่อนและหลังกระบวนการได้ทำการกรองด้วยน้ำกลั่นที่ ความดัน 10 bar เพื่อตรวจสอบกลไกการเกิดฟาล์วลักษณะผันกลับไม่ได้



รูปที่ 1 แผนภาพเครื่องมือการกรองปิดตาย

2.4 การวิเคราะห์

ค่าฟลักซ์เพอร์มิเอต สามารถคำนวณได้จากสมการ 1

$$J = V / (A \cdot t) \quad (1)$$

โดย J คือค่าฟลักซ์เพอร์มิเอต ($\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$), V คือปริมาณเพอร์มิเอตที่ผ่านเมมเบรน (g), A คือพื้นที่การกรอง (cm^2) และ t คือช่วงเวลาการกรอง (min) [17]

ความสามารถการกักกันเซลล์เลสและน้ำตาลรีดิคซ์ และเอทานอล (%R) คำนวณได้ดังสมการ 2

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

โดยที่ C_p และ C_r คือความเข้มข้นของตัวละลายในเพอร์มิเอตและรีเทนเทต ตามลำดับ (g/L) [17]

กลไกฟาล์วลักษณะผันกลับไม่ได้ความดันคงที่สามารถวิเคราะห์จากแบบจำลองเฮอร์เมียร์ [18] คำนวณได้ดังสมการ 3

$$d^2t/dV^2 = k (dt/dV)^n \quad (3)$$

เมื่อ k คือค่าคงที่ของการเกิดฟาล์วลักษณะผันกลับไม่ได้ตามแบบจำลองต่างๆ โดยหน่วยจะขึ้นอยู่กับค่า n และ n คือค่าคงที่ขึ้นกับชนิดกลไกฟาล์วลักษณะผันกลับไม่ได้แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าคงที่ของชนิดกลไกฟาล์วลักษณะผันกลับไม่ได้

Fouling model	n
complete	2
standard	3/2
intermediate	1
cake	0

กลไกฟาล์วลิ่งแบบผันกลับไม่ได้
สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4 และ 5

$$L_p = J / TMP \quad (4)$$

$$IF = (L_{pb} - L_{pa}) / L_{pb} \quad (5)$$

โดย L_p คือค่าการซึมผ่านของน้ำบริสุทธิ์ ($\text{g}/\text{cm}^2 \text{min bar}$), J คือฟลักซ์ของน้ำบริสุทธิ์ ($\text{g}/\text{cm}^2 \text{min}$), TMP คือความดันที่คร่อมเมมเบรน (bar), IF คือฟาล์วลิ่งแบบผันกลับไม่ได้, L_{pb} และ L_{pa} คือค่าการซึมผ่านของน้ำบริสุทธิ์ก่อนและหลังกรอง [6]

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

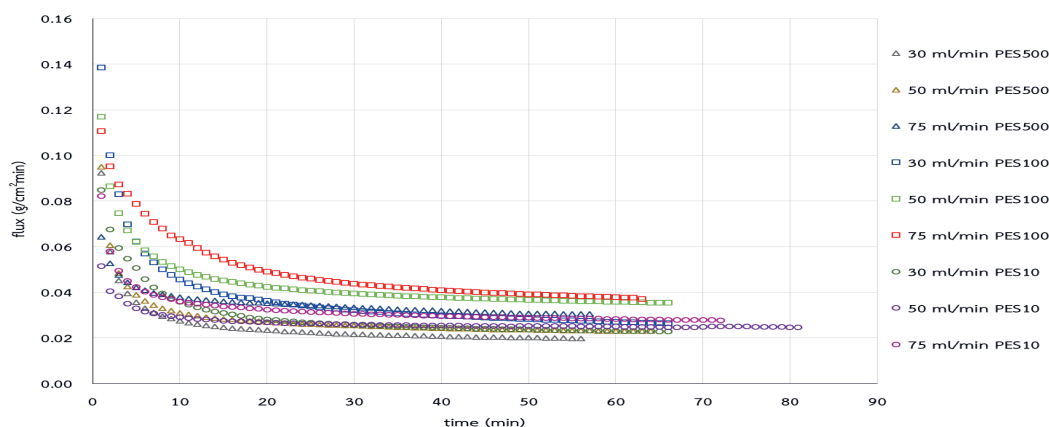
3.1 ฟลักซ์เพอร์มิเอเตอร์ระดับอัลตราฟิลเตรชัน

จากรูปที่ 2 พบว่าที่อัตราการไหลสูงขึ้น ค่าฟลักซ์เพอร์มิเอเตอร์ที่สภาวะคงตัวสูงขึ้นตาม ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการไหลสูงสามารถกวาดอนุภาคที่ผิวหน้าเมมเบรนได้มากกว่า ความต้านทานการไหลที่ผิวหน้าเมมเบรนจึงลดลง [19] และเมื่อพิจารณาที่น้ำหนักโมเลกุลตัดการกรองของเมมเบรนที่แตกต่างกันพบว่าเมมเบรน PES100 ให้ค่าฟลักซ์เพอร์มิเอเตอร์สูงสุด รองลงมาคือ PES10 และ PES500 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจาก PES500 อาจเกิดการอุดตันของอนุภาคที่รูพรุน ส่งผลให้เกิดความ

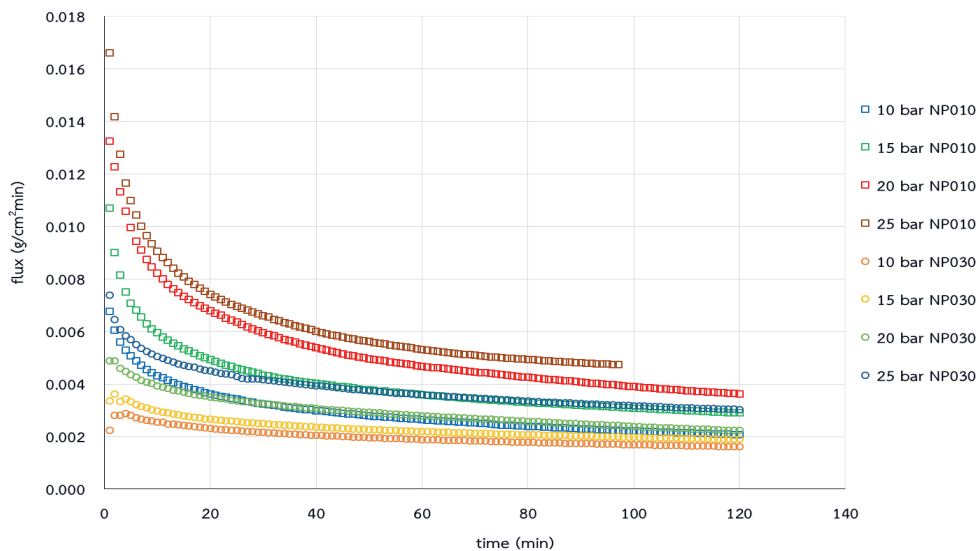
ต้านทานการไหลสูง ดังนั้นค่าฟลักซ์ที่สภาวะคงตัวจึงมีค่าต่ำ ในขณะที่ PES100 มีขนาดรูพรุนที่เล็กกว่า ฟาล์วลิ่งส่วนใหญ่น่าจะมาจากการเกาะตัวที่ผิวหน้าเมมเบรน จึงอาจส่งผลต่อค่า ฟลักซ์เพอร์มิเอเตอร์ที่สูงกว่า PES500 สำหรับเมมเบรน PES10 ที่มีขนาดรูพรุนเล็กที่สุดนั้น ทำให้มีความต้านทานการไหลสูงกว่าที่เมมเบรน ขนาดรูพรุนใหญ่ [20]

3.2 ฟลักซ์เพอร์มิเอเตอร์ระดับนาโนฟิลเตรชัน

จากรูปที่ 3 พบว่าช่วงเริ่มต้นมีการลดลงของค่าฟลักซ์อย่างรวดเร็วและเข้าสู่สภาวะคงตัว ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันร่วมกับการเกิดฟาล์วลิ่ง นอกจากนี้ยังพบว่าช่วงเริ่มต้นที่ความดัน 25 บาร์ เมมเบรน NP030 มีลักษณะโปรไฟล์ ฟลักซ์คล้ายกับ NP010 แต่ที่ความดัน 10, 15 และ 20 บาร์มีลักษณะที่แตกต่าง นั่นคือ ในตอนเริ่มต้นมีค่าฟลักซ์ที่เพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดและจึงลดลงอย่างช้าๆ จนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงตัวทั้งนี้เป็นเพราะเมมเบรน NP030 มีขนาดรูพรุนเล็กกว่า NP010 ดังนั้นกลไกการไหลผ่านอาจเป็นผลมาจากการแพร่ซึมและการอุดตัน ของอนุภาคภายในรูพรุนมีโอกาสเกิดขึ้น ได้น้อยกว่า การซึมผ่านจึงเกิดขึ้นได้ดีกว่า



รูปที่ 2 ฟลักซ์เพอร์มิเอเตอร์อัลตราฟิลเตรชัน



รูปที่ 3 ฟลักซ์เพอร์มิเอตนาโนฟิลเตรชัน

ประกอบกับระบบดำเนินการที่สภาวะความดันต่ำทำให้มีกลไกการเกิดฟัลวลิ้งเกิดได้ช้ากว่า [21] และเมื่อพิจารณาฟลักซ์ที่สภาวะคงตัวของทั้ง 2 เมมเบรนพบว่าที่ความดันสูง ให้ค่าฟลักซ์สูงกว่าที่ความดันต่ำ เพราะมีแรงผลักดันไปยังผิวหน้าเมมเบรนได้มากกว่า [22]

3.3 ความสามารถในการกักกันของเซลล์เลส, น้ำตาลรีดิคซ์ และเอทานอล

การศึกษาการกักกันเซลล์เลส น้ำตาลและเอทานอลในสารละลายไฮโดรไลเซตของเมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชัน พบว่า เมมเบรน PES10 ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลตัดการกรองน้อยที่สุด ให้ค่าการกักกันเซลล์เลส แอคติวิตี, น้ำตาลและเอทานอลสูงที่สุด เท่ากับ 67.5%, 36.9% และ 30.7% ซึ่งมีความเข้มข้นของเซลล์เลส แอคติวิตี เท่ากับ 2.247 g/L รองลงมาคือ PES100 และ PES500 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากเมมเบรนน้ำหนักโมเลกุลตัดการกรองต่ำจะมีขนาดรูพรุนของเมมเบรนที่เล็กจึงทำให้อนุภาคสามารถเคลื่อนผ่านไปยัง

กระแสน้ำได้ยากกว่าเมมเบรนที่มีน้ำหนักโมเลกุลตัดการกรองสูง กล่าวคือความสามารถในการกักกันมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อขนาดรูพรุน เช่นเดียวกับที่เมมเบรนระดับนาโนฟิลเตรชัน ซึ่งมีขนาดรูพรุนเล็กกว่าเมมเบรนระดับอัลตราฟิลเตรชันจึงสามารถกักกันเซลล์เลสที่หลงเหลือจากกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันได้สูง และสามารถกักกันน้ำตาลรีดิคซ์ได้มากกว่าด้วยเช่นกัน โดยที่เมมเบรน NP030 สามารถกักกันน้ำตาลรีดิคซ์ได้สูงถึง 50.7% หรือเท่ากับ 10.045 g/L อีกทั้งยังสามารถกักกันเอทานอลได้ในปริมาณที่มากพอสมควร [22,23] ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 3 และเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Benkun Qi และคณะ [6] ซึ่งทำการศึกษากักกัน เซลล์เลส/โปรตีน ด้วยระบบการกรองแบบปิดตายพบว่าให้ค่าการกักกันน้อยกว่าระบบไหลขวาง (0.108 g/L) แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิคซ์ที่ระบบการกรองระบบเดียวกันพบว่าให้ค่าความเข้มข้นน้อยกว่าเนื่องจากเซลล์เลสที่นำมาใช้สามารถทำงานได้สองกระบวนการพร้อมกันน้ำตาลรีดิคซ์บางส่วนจึงถูกเปลี่ยนไปเป็นเอทานอล

3.4 กลไกการเกิดฟัลวลิ่งด้วยแบบจำลองเฮอร์เมียร์

จากข้อมูลที่ได้เมื่อนำมาวิเคราะห์ตามแบบจำลองเฮอร์เมียร์ พบว่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่อาจจะเกิดกลไกฟัลวลิ่งได้ทั้ง 4 แบบ เนื่องจากค่า R^2 ที่คำนวณได้มีค่าเข้าใกล้ 1 อย่างไรก็ตามกลไกการเกิดฟัลวลิ่งแบบ cake formation ยังคงมีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือ intermediate blocking, standard blocking และ complete blocking ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 4 ซึ่งเป็นเช่นนี้ทุกอัตราการไหลและทุกชนิดเมมเบรน

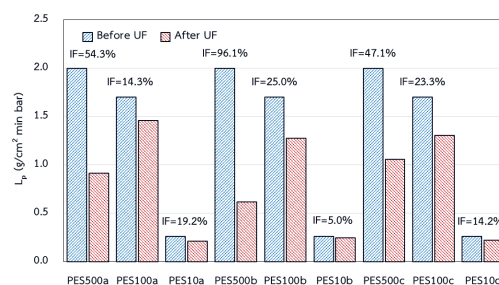
ตารางที่ 3 เปอร์เซนต์การกักกันเซลลูเลส แอคติวิตี้, น้ำตาลรีดิวิซ์และเอทานอล

เมมเบรน	เปอร์เซนต์การกักกัน		
	เซลลูเลส	น้ำตาลรีดิวิซ์	เอทานอล
PES500	32.4	21.6	8.9
PES100	51.6	26.1	20.1
PES10	67.5	36.9	30.7
NP010	97.5	47.4	31.9
NP030	99.0	50.7	38.4

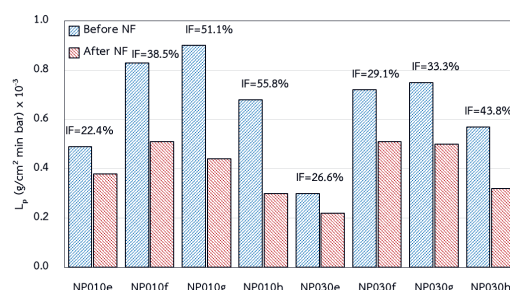
3.5 การเกิดฟัลวลิ่งแบบผันกลับไม่ได้

ผลการทดลองพบว่าที่อัตราการไหล 30 ml/min เมมเบรน PES100 ให้ค่าฟัลวลิ่ง แบบผันกลับไม่ได้ (IF) ต่ำที่สุด ในขณะที่เมมเบรน PES500 ให้ค่า IF สูงที่สุด แสดงดังรูปที่ 4 ซึ่งสอดคล้องกับค่าฟลักซ์เพอร์มิเอต ฟัลวลิ่งแบบผันกลับไม่ได้ยังขึ้นอยู่กับขนาดรูพรุนเช่นกัน นอกจากนี้เมื่ออัตราการไหลสูงขึ้นค่า IF แปรผันตรงกับโมเลกุลตัดการกรองอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เป็นเพราะขนาดรูพรุนที่เล็กกว่าขนาดอนุภาคมีโอกาที่จะกักกันอนุภาคไว้ที่ผิวหน้า

เมมเบรนในขณะที่เมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนใหญ่มีแนวโน้มให้อนุภาคไหลเข้าไปอุดตันภายในรูพรุนได้มากกว่าจึงทำให้ค่า IF สูงกว่า [24] และเมื่อพิจารณาการเกิดฟัลวลิ่งแบบผันกลับไม่ได้ของเมมเบรนระดับนาโนฟิลเตรชัน (รูปที่ 5) พบว่าเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนเล็กกว่า (NP030) เกิดการอุดตันแบบผันกลับไม่ได้ต่ำกว่าเช่นเดียวกับเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน แต่เมื่อพิจารณาจากค่าความดันคร่อมเมมเบรนพบว่า ที่ความดันสูงขึ้น ค่า IF สูงขึ้นตาม ทั้งนี้เป็นเพราะระบบการกรองแบบปิดตายนั้น เมื่อความดันสูงขึ้นจะผล็้อนุภาคเข้าไปอุดตันภายในรูพรุนเมมเบรนได้มากกว่าความดันต่ำ [24]



รูปที่ 4 IF ของเมมเบรน UF (a, b, c คือ อัตราการไหล 30, 50, 75 ml/min)



รูปที่ 5 IF ของเมมเบรน NF (e, f, g, h คือ ความดัน 10, 15, 20 และ 25 บาร์)

ตารางที่ 4 สัมประสิทธิ์ การตัดสินใจต่อแบบจำลองเฮอร์เมียร์

เมม- เบรน	R ²			
	CBM	IBM	SBM	CFM
PES500	0.918 ^a	0.959 ^a	0.941 ^a	0.983 ^a
	0.918 ^b	0.945 ^b	0.933 ^b	0.969 ^b
	0.917 ^c	0.935 ^c	0.926 ^c	0.950 ^c
PES100	0.931 ^a	0.970 ^a	0.954 ^a	0.990 ^a
	0.959 ^b	0.977 ^b	0.969 ^b	0.987 ^b
	0.958 ^c	0.974 ^c	0.967 ^c	0.986 ^c
PES10	0.951 ^a	0.971 ^a	0.963 ^a	0.980 ^a
	0.837 ^b	0.858 ^b	0.848 ^b	0.874 ^b
	0.911 ^c	0.943 ^c	0.928 ^c	0.967 ^c
NP010	0.875 ^d	0.956 ^d	0.921 ^d	0.994 ^d
	0.771 ^e	0.910 ^e	0.852 ^e	0.976 ^e
	0.812 ^f	0.925 ^f	0.877 ^f	0.979 ^f
	0.808 ^g	0.911 ^g	0.866 ^g	0.969 ^g
NP030	0.918 ^d	0.954 ^d	0.938 ^d	0.979 ^d
	0.886 ^e	0.934 ^e	0.912 ^e	0.968 ^e
	0.931 ^f	0.975 ^f	0.956 ^f	0.994 ^f
	0.870 ^g	0.936 ^g	0.906 ^g	0.976 ^g

^{a,b,c} คือ อัตราการไหล 30, 50 และ 75 mL/min และ ^{d,e,f,g} คือ ความดัน 10, 15, 20 และ 25 บาร์ ตามลำดับ

4. สรุป

ฟลักซ์เพอร์มิเอตมีความสัมพันธ์กับอัตราการไหล, TMP และขนาดรูพรุนของเมมเบรนอย่างมีนัยสำคัญโดยเมมเบรน PES100 สำหรับระบบ UF ให้ค่าฟลักซ์เพอร์มิเอตที่ดีที่สุด ในขณะที่เมมเบรน NP030 ให้ค่า ฟลักซ์ดีกว่า NP010 นอกจากนี้เมมเบรน PES10 และ NP030 ให้ค่าการกักกันดีที่สุดในการกรองทั้ง 2 ระบบ นอกจากนี้ยังพบว่ากลไกฟาล์วลิ่งด้วยแบบจำลองเฮอร์เมียร์อาจเป็นไปได้ทั้ง 4 แบบ โดยมีแนวโน้มการอุดตันแบบเค้กมากที่สุด สำหรับการเกิดฟาล์วลิ่งแบบแผ่นกลับไม่ได้มี

ความสัมพันธ์กับขนาดของรูพรุน อัตราการไหล และ TMP

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนงานวิจัยเงินงบประมาณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีและเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Gnansounou E, Dauriat A. Techno-economic analysis of lignocellulosic ethanol: review. *Bioresource Technology*. 2010;101:4980-4991.
- [2] Gomes DG, Serna LS, Cardona AC, Gama M, Domingues L. Insights into the economic viability of cellulases recycling on bioethanol production from recycled paper sludge. *Bioresource Technology*. 2018;267:347-355.
- [3] Qi B, Chen X, Su Y, Wan Y. Enzyme adsorption and recycling during hydrolysis of wheat straw lignocellulose. *Bioresource Technology*. 2011;102: 2881-2889.
- [4] Khoshnevisan K, Vakhshiteh F, Barkhi M, Baharifar H, Poor AE, Zari N, Stamatis H, Bordbar AK. Immobilization of cellulase enzyme onto magnetic nanoparticles: Applications and recent advances. *Molecular Catalysis*. 2017;442: 66-73.
- [5] Chen G, Song W, Qi B, Lu J, Wan Y. Recycling cellulase from enzymatic hydrolyzate of acid treated wheat straw by electroultrafiltration.

- Bioresource Technology. 2013;144: 186-193.
- [6] Qi B, Luo J, Chen G, Chen X, Wan Y. Application of ultrafiltration and nanofiltration for recycling cellulase and concentrating glucose from enzymatic hydrolyzate of steam exploded wheat straw. Bioresour Technology. 2012;104:466-472.
- [7] Charcosset C. Membrane process in biotechnology: An overview. Biotechnology Advances. 2006; 24:482-492.
- [8] Saxena A, Tripathi BP, Kumar M, Shahi VK. Membrane based techniques for the separation and purification of proteins: An overview. Advances in Colloid and Interface Science. 2009;145:1-22.
- [9] Strathmann H. Membrane process in biotechnology. Trend in Biotechnology. 1985;3(5):112-118.
- [10] Jutakanoke R, Leepipatpiboon N, Tolieng V, Kitpreechavanich V, Srinorakutara T, Akaracharanya A. Sugarcane leaves: pretreatment and ethanol fermentation by *saccharomyces cerevisiae*. Biomass and Bioenergy. 2012;39:283-289.
- [11] Yang S, Ding W, Chen H. Enzymatic hydrolysis of corn stalk in a hollow fiber ultrafiltration membrane reactor. Biomass and Bioenergy. 2009;33: 332-336.
- [12] Goulas AK, Kapasakalidis PG, Sinclair HR, Rastall RA, Grandison AS. Purification of oligosaccharides by nanofiltration. Journal of Membrane Science. 2002;209(1): 321-335.
- [13] Qi B, Luo J, Chen X, Hang X, Wan Y. Separation of furfural from monosaccharides by nanofiltration. Bioresource Technology. 2011;102 (14):7111-7118.
- [14] Nurul I, Amin HM, Mohammad AW, Markom M, Peng LC, Hilal N. Analysis of deposition mechanism during ultrafiltration of glycerin-rich solutions. Desalination. 2010; 261:313-320.
- [15] Kanani DM, Sun X, Ghosh R. Reversible and irreversible membrane fouling during in-line microfiltration of concentrated protein solutions. Journal of Membrane Science. 2008;315:1-10.
- [16] Phitsuwan P, Sakka K, Ratanakhanokchai K. Structural changes and enzymatic response of Napier grass (*Pennisetum purpureum*) stem induced by alkaline pretreatment. Bioresource Technology. 2016;218: 247-256.
- [17] Nguyen N, Fargues C, Guiga W, Lameloise ML. Assessing nanofiltration and reverse osmosis for the detoxification of lignocellulosic hydrolysates. Journal of Membrane Science. 2015;487:40-50.
- [18] Jacques H. Constant pressure blocking filtration laws. Application to power-law non Newtonian fluid. Trans. Inst. Chem. Eng. Lond. 1982;60:183-187.
- [19] Alcaina CC, Blanco SÁ, Bes-Piá MA, Mendoza-Roca JA, Pastor-Alcañiz

- L. Ultrafiltration of residual fermentation brines from the production of table olives at different operating conditions. *Journal of Cleaner Production*. 2018;189: 662- 672.
- [20] Carbonell-Alcaina C, CorbatónBáguena MJ, Álvarez-Blanco S, Bes-Piá MA, Mendoza-RocaJA, Pastor-Alcañiz L. Determination of fouling mechanisms in polymeric ultrafiltration membranes using residual brines from table olive storage wastewaters as feed. *Journal of Food Engineering*. 2016;187:14-23.
- [21] Vikbjerg AF, Jonsson G, Mu H, Xu X. Application of ultrafiltration membranes for purification of structured phospholipids produced by lipasecatalyzed acidolysis. *Separation and Purification Technology*. 2006;50: 184-191.
- [22] Asif MB, Hai FI, Dhar BR, Ngo HH, Guo W, Jegatheesan V, Price WE, Nghiem LD, Yamamoto K. Impact of simultaneous retention of micro pollutants and laccase on micro pollutant degradation in enzymatic membrane bioreactor. *Bioresource Technology*. 2018;267:473-480.
- [23] Guo S, Luo J, Wu Y, Qi B, Chen X, Wan Y. Decoloration of sugarcane molasses by tight ultrafiltration: Filtration behavior and fouling control. *Separation and Purification Technology*. 2018;204:66-74.
- [24] Kumar SM, Roy S. Filtration characteristics in dead-end microfiltration of living *Saccharomyces cerevisiae* cells by alumina membranes. *Desalination*. 2008;229:348–361.

การปรับปรุงการกระจายสินค้าประเภทอะไหล่ยานยนต์จากประเทศผู้ผลิตไปยัง ตัวแทนจำหน่ายในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้

เอื้ออาทร ครุสง^{1*}, และกมลชนก สุทธิวาที²

Uea-arthorn.K@student.chula.ac.th^{1*}, Kamonchanok.S@chula.ac.th²

^{1*2} หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการโลจิสติกส์และโซ่อุปทาน (สหสาขาวิชา) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Received	: 24-Jul-2018
Revised	: 30-Apr-2019
Accepted	: 5-Jun-2019

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาแนวทางปรับปรุงการกระจายสินค้าที่เหมาะสมและลดเวลานำของสินค้า (lead time) ประเภทอะไหล่ยานยนต์ จากประเทศผู้ผลิตต้นทาง 4 ประเทศมายังตัวแทนจำหน่ายปลายทางของประเทศต่างๆในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โดยคำสั่งซื้อที่มีขนาดเล็กไม่สามารถเติมเต็มตู้คอนเทนเนอร์ รวมถึงอุปสงค์มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงกะทันหันและยากต่อการพยากรณ์ ซึ่งทำให้ตัวแทนจำหน่ายต้องรอสินค้าเฉลี่ยนานกว่า 6-9 เดือน นับตั้งแต่ส่งคำสั่งซื้อจนสินค้าถึงท่าเรือปลายทาง ทำให้สูญเสียโอกาสในการขายเป็นจำนวนมากถึงร้อยละ 15 ทั้งนี้ได้ทำการศึกษาต้นทุนรวมและระยะเวลาในการขนส่งจากข้อมูลการดำเนินงานจริงของการขนส่งในรูปแบบโดยตรงในปี พ.ศ.2560 ร่วมกับการสอบถามและสัมภาษณ์กลุ่มบุคคลที่เกี่ยวข้อง เปรียบเทียบกับกรณีมีศูนย์กลางกระจายสินค้า จากการศึกษาพบว่ากรณีมีศูนย์กลางกระจายสินค้าในประเทศไทย (คลังสินค้าปลอดอากร) จะสามารถช่วยลดระยะเวลาเฉลี่ยของการรอคอยสินค้าได้ถึง 2-3 เท่า แม้ว่าจะมีต้นทุนรวมในด้านการขนส่ง และกระจายสินค้าที่สูงกว่าเดิมถึงร้อยละ 115 แต่เมื่อได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลต่างๆ พบว่าการลดระยะเวลาการรอคอยนั้น จะช่วยสนับสนุนให้ยอดขายเพิ่มได้ถึงร้อยละ 30 โดยร้อยละ 15 แรกมาจากการแก้ปัญหาการยกเลิกคำสั่งซื้อ และอีกร้อยละ 15 มาจากการคาดการณ์ว่าจะได้ส่วนแบ่งทางการตลาดมากขึ้น ส่งผลต่อกำไรสุทธิรวมที่สูงขึ้นร้อยละ 0.41 อีกทั้งช่วยลดจำนวนการเก็บสินค้าคงคลังเวลานำในการเข้าสู่ตลาด เป็นที่พึงพอใจของลูกค้า และสามารถสร้างความได้เปรียบด้านการแข่งขันได้

คำสำคัญ: ต้นทุน การกระจายสินค้า ประเทศผู้ผลิต ตัวแทนจำหน่าย ระยะเวลาการรอคอย เวลานำ

The Improvement of Automotive Spare Parts Distribution from Manufacturer Countries to Distributors in South East Asia

Uea-arthorn Krusong^{1*} and Kamonchanok Suthiwartnarueput²

Uea-arthorn.K@student.chula.ac.th^{1*}, Kamonchanok.S@chula.ac.th²

^{1*2} Master of Science, Logistics and Supply Chain Management Interdisciplinary Programs,
Chulalongkorn University

Received	: 24-Jul-2018
Revised	: 30-Apr-2019
Accepted	: 5-Jun-2019

Abstract

This research aims to improve and develop an appropriate products delivery and distribution and to reduce delivery lead time from 4 manufacturer countries of automotive spare parts, with insufficient order to fulfill the container, to distributors in South East Asia. Nowadays, Full-Container-Load (FCL) delivery was operated from manufacturer countries to distributor countries. The distributors have been waiting for 6-9 months starting from placing order to receiving goods at destination port. It caused loss in selling opportunity because the customers cancelled the order due to too long waiting time. The result showed that to set up distribution center at Thailand Free Trade zone, to consolidate products from many manufacturers and the deliver to distributors in various countries, can reduce waiting period for about 30%. Although the total delivery and distribution cost is higher about 115% but the customer comments revealed that the delivery and distribution efficiency development can raise total sale up to 30% and net profit increased 0.41%. More advantages are less inventory for distributors, longer product life, higher service level in overview, higher customer satisfaction, higher competition ability, and better company image and reputation leading to customer confidence.

Keywords: Cost, Distribution, Manufacturer countries, Distributors, Waiting time, Lead time

1 บทนำ

ในสภาพเศรษฐกิจสังคมปัจจุบัน ประเทศต่างๆ ทั่วโลกจำเป็นต้องติดต่อพึ่งพาอาศัย ค่าขายซึ่งกันและกัน ทั้งนี้เนื่องจากต้นทุน ทรัพยากร และความชำนาญในการผลิตสินค้าของแต่ละประเทศนั้น มีความได้เปรียบเสียเปรียบที่แตกต่างกันไป การขนส่งและการกระจายสินค้าระหว่างประเทศที่มีประสิทธิภาพทั้งด้านระยะเวลาและต้นทุนการขนส่ง จึงมีบทบาทสำคัญอย่างมากในการสนับสนุนส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ เพื่อตอบสนองให้ธุรกิจขยายตัวและเจริญก้าวหน้า อีกทั้งยังส่งผลโดยตรงต่อส่วนแบ่งทางการตลาด ความได้เปรียบทางด้านราคา และรวมไปถึงผลกำไรโดยรวมขององค์กร

ธุรกิจของบริษัทที่ศึกษาเป็นธุรกิจอะไหล่ยานยนต์ ทั้งสำหรับประกอบรถใหม่ (OEM : Original Equipment Manufacturer) และอะไหล่ทดแทน (REM : Replacement Equipment Manufacturer) ที่มีการขนส่งและกระจายสินค้าโดยตรงจากโรงงานผลิตในประเทศต่างๆ ทั่วทุกภูมิภาคของโลก รวมถึงประเทศไทย ซึ่งถือเป็นผู้ผลิตรายหลัก 85% ของจำนวนสินค้าทั้งหมด มายังประเทศปลายทางต่างๆ ทั่วทุกภูมิภาคของโลก โดยการขนส่งสินค้าทางทะเลแบบเต็มตู้ คอนเทนเนอร์ (Full Container Load : FCL) เป็นรูปแบบหลัก ด้วยลักษณะสินค้าที่มีขนาดใหญ่ มีปริมาตรและมีน้ำหนักมาก การขนส่งทางทะเลจึงมีต้นทุนในการขนส่งต่อหน่วยต่ำและเหมาะสมที่สุดในการนำเข้าสินค้า แต่ขอบเขตในงานวิจัยฉบับนี้ จะศึกษาเฉพาะอะไหล่ทดแทน ทั้งนี้เนื่องมาจากการปฏิบัติงานพบว่า มีตัวแทนจำหน่ายบางประเทศเท่านั้น โดยเฉพาะประเทศในแถบภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ที่ได้รับสินค้า

ล่าช้าจากบางประเทศผู้ผลิต อันเนื่องมาจากลักษณะของคำสั่งซื้อที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว คำสั่งซื้อมีขนาดเล็ก จำนวนไม่เพียงพอในแต่ละครั้งที่จะทำให้สินค้าเต็มตู้คอนเทนเนอร์ และตัวแทนจำหน่ายปฏิเสธที่จะรับการขนส่งสินค้าแบบไม่เต็มตู้ (LCL) ด้วยเหตุผลและข้อจำกัดบางประการ โดยเฉพาะเหตุผลทางด้านต้นทุนการขนส่งและการดำเนินงานที่สูงขึ้น จึงทำให้ระยะเวลาการรอคอยสินค้าตั้งแต่ส่งคำสั่งซื้อจนกระทั่งสินค้าถึงท่าเรือปลายทาง มีระยะเวลานานกว่า 6-9 เดือน ซึ่งปัญหานี้ส่งผลกระทบโดยตรงต่อบริษัทและตัวแทนจำหน่ายของบริษัทในด้านต่างๆ อาทิเช่น สูญเสียโอกาสในการขาย ระดับความพึงพอใจของลูกค้า อายุการใช้งานของสินค้าสั้นลง ตัวแทนจำหน่ายต้องแบกรับภาระในการเก็บสินค้าคงคลัง รวมถึงภาพลักษณ์โดยรวมของบริษัท เป็นต้น ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้ จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาต้นทุนและระยะเวลาที่ใช้ในการกระจายสินค้าที่เป็นอยู่ในปีพ.ศ. 2560 เพื่อหาแนวทางที่เป็นไปได้ในการพัฒนา ปรับปรุงประสิทธิภาพในการกระจายสินค้าในอนาคต เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขัน และสร้างความพึงพอใจสูงสุดให้กับลูกค้า โดยจะมุ่งศึกษาเส้นทางที่มีปัญหามาก รวม 28 เส้นทาง ซึ่งประกอบไปด้วยจาก 4 ประเทศผู้ผลิตต้นทาง และ 7 ประเทศตัวแทนจำหน่ายปลายทาง

2. การทบทวนวรรณกรรม

ต้นทุนในธุรกิจการขนส่งระหว่างประเทศสามารถจำแนกออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้ ต้นทุนทางตรง (Direct Costs) คือต้นทุนที่เกิดขึ้นเมื่อมีการขนส่ง, ต้นทุนทางอ้อม (Indirect Costs) เช่น ค่าใช้จ่ายสำนักงาน, ค่าซ่อมแซม และสุดท้ายต้นทุนอื่นๆ คือต้นทุนที่

จำเป็นสำหรับการดำเนินธุรกิจโดยทั่วไป เช่น ต้นทุนบริหาร การจัดการ การตลาด ค่าเสื่อมราคา เป็นต้น ในขณะที่ปัจจัยหลักที่มีผลต่อเศรษฐศาสตร์การขนส่ง ได้แก่ ระยะทาง ปริมาณ ความหนาแน่น การจัดเก็บ การจัดการ ความรับผิดชอบ และการตลาด ซึ่งพบว่ายิ่งการขนส่งมีระยะทางไกลขึ้น จะทำให้ต้นทุนเพิ่มขึ้น ในอัตราที่ลดลง เช่นเดียวกันกับ การขนส่งในปริมาณมากขึ้นหรือ หรือความหนาแน่นมากขึ้น ก็จะทำให้ต้นทุนต่อหน่วยลดลง ทั้งนี้เพื่อการจัดการต้นทุน และให้บริการอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด องค์กรต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายด้าน ประกอบกัน นอกจากนี้ การตัดสินใจเลือกรูปแบบและเส้นทางการขนส่งขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ อย่างน้อย 6 อย่างได้แก่ 1. ค่าระวางการขนส่ง 2. ความน่าเชื่อถือ 3. ระยะเวลาการขนส่ง 4. อัตราสินค้าสูญหายและเสียหาย 5. การตัดสินใจของผู้ประกอบการขนส่ง และ 6. การตัดสินใจของเจ้าของสินค้า [1]

การศึกษาความเหมาะสมและความเป็นไปได้ในการส่งออกผลิตผลยางพาราธรรมชาติจากภาคใต้ของไทยไปยังประเทศจีน และญี่ปุ่นด้วยเรือชายฝั่งจากท่าเรือสงขลา ไปที่ท่าเรือแหลมฉบัง ที่ใช้กฎเกณฑ์การขนส่งแบบ FOB โดยใช้เครื่องมือในการวิจัยคือจัดทำแบบสอบถาม และแบบสัมภาษณ์ ทั้งนี้พบว่าปัจจัยที่มีผลมากที่สุดต่อการตัดสินใจเลือกเส้นทางการขนส่ง จากมุมมองผู้ส่งออกและผู้นำเข้าคือ ค่าใช้จ่ายที่ตนเองต้องรับผิดชอบ รองลงมาคือปัจจัยด้านความน่าเชื่อถือและความสะดวกสบาย และสุดท้ายเป็นปัจจัยด้านระยะเวลาการขนส่ง เนื่องจากแต่ละเส้นทางมีระยะเวลาการขนส่งที่ไม่แตกต่างกันมากนัก และอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ นอกจากนี้แล้ว ลำดับ

ความสำคัญของปัจจัยต่างๆ ก็ขึ้นอยู่กับลักษณะของสินค้าที่จะทำการขนส่งด้วย [2]

การศึกษาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพระบบการจัดการส่งชิ้นส่วนยานยนต์ระหว่างจังหวัดสมุทรปราการ และจังหวัดระยอง เนื่องจากการขนส่งปัจจุบันส่งผลกระทบต่อต้นทุนและเวลา ดังนั้นคลังสินค้าที่ตั้งอยู่ใกล้เคียงกลุ่มลูกค้าเป็นจึงถือเป็นตัวสร้างความสมดุลให้กับระบบการจัดส่งและจัดหาพาหนะขนส่งให้มีความเหมาะสมเพื่อสนองตอบความต้องการของกลุ่มลูกค้าที่จะนำระบบการส่งแบบทันเวลาพอดีเข้ามาใช้ [3]

การศึกษาเรื่องการออกแบบเครือข่ายโลจิสติกส์สำหรับการขนส่งขาออกในวิสาหกิจอาหารแช่แข็งขนาดย่อม โดยใช้ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่บูรณาการกิจกรรมต่างๆ ในงานโลจิสติกส์ขาออก เพื่อสร้างรูปแบบการกระจายสินค้าที่เหมาะสมทั้งการขนส่งสินค้าจากโรงงานผลิต ไปยังศูนย์กระจายสินค้า และจากศูนย์กระจายสินค้าไปยังลูกค้า มีการทดสอบตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นด้วยการวิเคราะห์หาจำนวนศูนย์กระจายสินค้า ตำแหน่งที่ตั้งแต่ละรูปแบบการขนส่งที่เหมาะสม จากการศึกษาพบว่า การตั้งศูนย์กระจายสินค้าสามารถลดต้นทุนการขนส่งจากเดิมร้อยละ 18.78 เหลือร้อยละ 10.31 หรือลดลงจากเดิมประมาณร้อยละ 8.42 คิดเป็นมูลค่าต้นทุนการกระจายสินค้าลดลงต่อปี ประมาณ 3,020,770.08 บาทต่อปี แทนการขนส่งจากโรงงานไปสู่ลูกค้าโดยตรง [4]

การศึกษาเปรียบเทียบรูปแบบการกระจายสินค้าอุปโภค บริโภค ของบริษัทข้ามชาติแห่งหนึ่งจากประเทศไทย ไปยังลูกค้าในประเทศมาเลเซีย ซึ่งมี 2 รูปแบบ คือการกระจายสินค้าโดยการส่งผ่านคลังสินค้า Normal shipment (ศูนย์กระจายสินค้าในไทย->ศูนย์กระจายสินค้าในมาเลเซีย->ท่าเรือ

Klang->ท่าเรือ Kota Kinabalu->ศูนย์กระจายสินค้าของลูกค้าปลายทาง) และการส่งสินค้าตรงไปยังลูกค้าปลายทาง Direct shipment (ศูนย์กระจายสินค้าในไทย->ท่าเรือแหลมฉบัง->ท่าเรือ Singapore->ท่าเรือ Kota Kinabalu->ศูนย์กระจายสินค้าของลูกค้าปลายทาง) โดยใช้การเปรียบเทียบประสิทธิภาพจากปัจจัยต่างๆ 5 ด้าน ที่มีผลกระทบต่อการเลือกรูปแบบการกระจายสินค้าที่ผู้ศึกษาได้มาจากการศึกษาดำเนินงานในการกระจายสินค้าของบริษัทตัวอย่าง ทฤษฎีและงานวิจัยที่ผ่านมา ประกอบกับ ข้อมูลที่ได้มาจากการตอบแบบสอบถามและการสัมภาษณ์ของกลุ่มประชากรผู้ให้บริการผู้ใช้บริการ และผู้เกี่ยวข้องในการกระจายสินค้าทั้งสองรูปแบบ ผลจากการศึกษาพบว่า การขนส่งผ่านศูนย์กระจายสินค้า มีประสิทธิภาพสูงกว่าการขนส่งตรงในปัจจัยด้านระยะเวลาในการสั่งซื้อ ความถี่การบริการ ความสะดวก และความน่าเชื่อถือ ในขณะที่มีประสิทธิภาพต่ำกว่าในเรื่องของต้นทุนรวม [5]

การศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความต้องการศูนย์กระจายสินค้าไทยในต่างประเทศ ด้วยการสำรวจข้อมูลโดยใช้แบบสอบถามปลายเปิดและปลายปิด โดยศึกษากลุ่มผู้ส่งออกในประเทศ 5 อันดับแรก คือ เครื่องคอมพิวเตอร์ , อุปกรณ์และส่วนประกอบรถยนต์, อุปกรณ์และส่วนประกอบแผงวงจรไฟฟ้า, เม็ดพลาสติกและยางพารา ไปยังประเทศที่มีมูลค่าการส่งออกสูงและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นใน 10 ประเทศ พบว่าการคาดการณ์ของมูลค่าการส่งออกในอนาคตและราคามีอิทธิพลมากที่สุด โดยศูนย์กระจายสินค้านี้ควรเป็นความร่วมมือกันของภาครัฐและภาคเอกชน รวมถึงต้องมีบริการด้านกระจายสินค้า การทำเอกสารส่งออก และการรับประกันความเสียหายของสินค้าที่มีประสิทธิภาพ [6]

การศึกษาความสามารถในการตอบสนองต่อลูกค้าอย่างรวดเร็วของการ

ให้บริการศูนย์กระจายสินค้า หากมีความแปรปรวนใน 3 ด้านคือ ปริมาณ เวลา และปริมาณ โดยใช้วิธีการสัมภาษณ์ผู้บริหารระดับสูงของธุรกิจสินค้าทั่วไป และธุรกิจหนังสือจำนวน 9 บริษัท พบว่าองค์ประกอบหลักที่จะช่วยสร้างความสำเร็จคือ การวางแผนงานและการบริหารจัดการที่ดี ทั้งนี้ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการตอบสนองอย่างรวดเร็ว ได้แก่ การขยายกิจการ, การสร้างความสัมพันธ์ทางธุรกิจให้เพิ่มขึ้น และผลกระทบของฤดูกาล [7]

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อผู้ขนส่งสินค้าในการตัดสินใจใช้ศูนย์กระจายสินค้าในต่างประเทศ เป็นที่รวมสินค้าก่อนส่งต่อไปยังผู้บริโภคลำดับถัดไป โดยการใช้แบบสอบถามและนำข้อมูลมาวิเคราะห์ พบว่า 5 ปัจจัยแรกที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจมากที่สุด คือ การบริการของเทคโนโลยีสารสนเทศ, การบริหารจัดการโลจิสติกส์, ต้นทุนโลจิสติกส์, การจัดการคลังสินค้า และการกระจายสินค้า ส่วนปัจจัยที่ไม่มีผลคือความเปราะบางของการเมืองในประเทศ [8]

ทั้งนี้การบริหารจัดการโลจิสติกส์ระหว่างประเทศเป็นเรื่องที่ท้าทายสำหรับองค์กรเนื่องจากต้องเชื่อมโยงบุคคลต่างๆที่เกี่ยวข้องเข้าด้วยกันตั้งแต่ต้นน้ำถึงปลายน้ำ ทั้งผู้จัดหาวัตถุดิบ ผู้ผลิต ผู้กระจายสินค้า และผู้บริโภคภายใต้เงื่อนไขที่จำกัด ประกอบกับปัจจัยด้านหลักต่างๆ ที่ต้องพิจารณา ทั้งความแตกต่างในแต่ละด้านของแต่ละประเทศ ต้นทุนการบริหารจัดการ และการยกระดับการให้บริการลูกค้า เป็นต้น มีการนำแนวคิด Trade off มาช่วยประกอบการพิจารณาตัดสินใจ ดังนั้นการเลือกใช้รูปแบบการกระจายสินค้าที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพถือเป็นกลยุทธ์ที่สำคัญที่จะช่วยสร้างความได้เปรียบด้านการแข่งขันของ

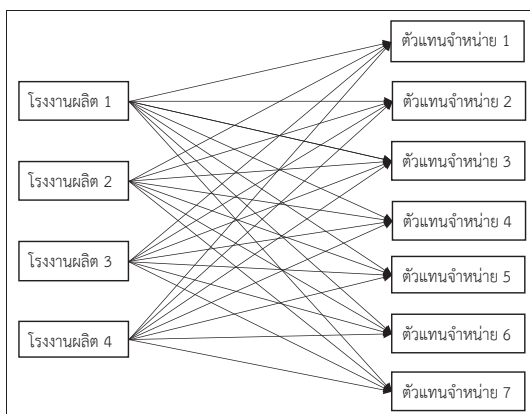
องค์กรในด้านการส่งมอบสินค้าและบริการ เช่นเดียวกับตลาดยุโรป ที่มีการนำหลักการรวม ศูนย์กลางของสินค้าคงคลังมาประยุกต์ใช้มากขึ้น พบว่าสามารถช่วยทำให้ต้นทุนด้านสินค้าคงคลัง ลดลง สินค้าเข้าสู่ตลาดได้เร็วขึ้น และตอบสนอง ความต้องการของลูกค้าอย่างน่าเชื่อถือมากขึ้น แม้ว่าจะมีต้นทุนด้านการขนส่งที่เพิ่มขึ้น แต่ ต้นทุนโลจิสติกส์โดยรวมลดลง [9]

3. วิธีการวิจัย

เครื่องมือสำหรับการศึกษาวิจัยและเก็บ ข้อมูลในครั้งนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ

3.1 การศึกษาวิเคราะห์ต้นทุน และ ระยะเวลา ของเส้นทางที่มีปัญหามากทั้ง 28 เส้นทาง ซึ่งประกอบไปด้วย 4 ประเทศผู้ผลิตต้นทาง ไปยัง 7 ประเทศตัวแทนจำหน่ายปลายทาง ซึ่งจะทำให้การศึกษาการกระจายสินค้าทั้ง 2 รูปแบบ ดังนี้

1) การกระจายสินค้าแบบโดยตรง ดังรูปที่ 1

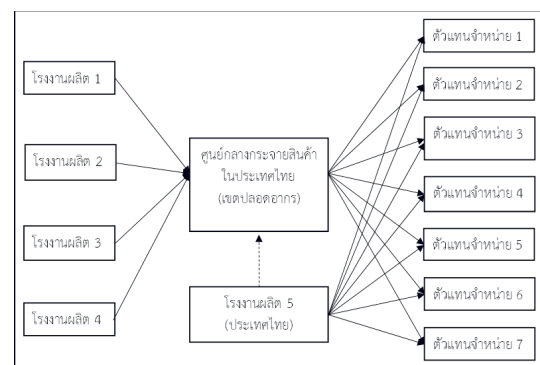


รูปที่ 1 การกระจายสินค้าแบบโดยตรงที่เป็นอยู่ในปัจจุบัน

ข้อมูลมาจากการเก็บข้อมูลจริงของบริษัท ตัวอย่าง เป็นระยะเวลา 1 ปี ตั้งแต่เดือน มกราคม-ธันวาคม ปีพ.ศ. 2560 ทั้งนี้ต้นทุนการกระจายสินค้าจะประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลักคือ

1. ต้นทุนดำเนินงานด้านคลังสินค้า ค่าดำเนินการศุลกากร และต้นทุนการขนส่งทางบกภายในประเทศจากโรงงานผลิตต้นทางมายังท่าเรือต้นทาง 2. ต้นทุนค่าระวางสินค้าของการขนส่งทางทะเลแบบเต็มตู้คอนเทนเนอร์ (FCL) จากท่าเรือต้นทางไปยังท่าเรือปลายทางของประเทศตัวแทนจำหน่าย ส่วนด้านระยะเวลา จะนำข้อมูลมาหาค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก แบ่งเป็น 2 ช่วงคือ 1. ระยะเวลาการรอคอยการเติมเต็มสินค้าให้เต็มตู้คอนเทนเนอร์ นับจากวันที่ลูกค้าส่งคำสั่งซื้อไปยังโรงงานผลิตจนถึงวันที่สามารถบรรจุสินค้าลงตู้คอนเทนเนอร์เพื่อเตรียมรับขนในช่วงถัดไป โดยมีสมมติฐานว่าสินค้ามีพร้อมสำหรับการส่งทุกครั้ง 2. ช่วงเวลาเดินเรือนับตั้งแต่วันที่เรือออกจากท่าเรือต้นทางจนถึงวันที่เรือถึงท่าเรือปลายทาง

2) การใช้ประเทศไทยเป็นศูนย์กลางในการกระจายสินค้า ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การกระจายสินค้าแบบใช้ประเทศไทยเป็นศูนย์กลางในการกระจายสินค้า (คลังสินค้าปลอดอากร)

ซึ่งจะทำการคำนวณต้นทุนการกระจายสินค้า หากจำลองสถานการณ์ในรูปแบบนี้ โดยจะอ้างอิงข้อมูลจริงของรายละเอียดสินค้าต่างๆที่เกิดขึ้นในปีพ.ศ. 2560 เช่น จำนวนสินค้าน้ำหนัก ประเทศต้นทาง ปลายทาง เป็นต้น และ

นำมาคำนวณค่าใช้จ่ายในแต่ละกิจกรรม ประกอบกับใบเสนอราคาของผู้ให้บริการในปี พ.ศ. 2560 ทั้งนี้ต้นทุนการกระจายสินค้าจะประกอบไปด้วย 5 ส่วนหลักคือ 1. ต้นทุนดำเนินงานด้านคลังสินค้า ค่าดำเนินงานพิธีการศุลกากร และต้นทุนการขนส่งทางบกภายในประเทศจากโรงงานผลิตต้นทางมายังท่าเรือต้นทาง รวมถึงต้นทุนค่าระวางสินค้าของการขนส่งทางทะเลแบบเต็มตู้คอนเทนเนอร์ (FCL) จากท่าเรือต้นทางมายังท่าเรือปลายทางในประเทศไทย 2. ค่าดำเนินการในคลังสินค้าปลอดอากร ประเทศไทย 3. ค่าดำเนินพิธีการศุลกากรในส่วนของการนำเข้าและออกจากประเทศไทย 4. ต้นทุนค่าขนส่งทางบกภายในประเทศทั้งการนำเข้าและออกจากประเทศไทย 5. ต้นทุนค่าระวางสินค้าของการขนส่งทางทะเลแบบเต็มตู้คอนเทนเนอร์ (FCL) จากท่าเรือต้นทางที่ประเทศไทยไปยังท่าเรือปลายทางของประเทศตัวแทนจำหน่าย ในส่วนนี้จะมีบางประเทศปลายทางของตัวแทนจำหน่ายใช้การขนส่งทางบกข้ามแดนจากประเทศไทยแทนการขนส่งทางเรือ โดยพิจารณาจากลักษณะภูมิศาสตร์และระบบโครงสร้างพื้นฐานด้านสาธารณูปโภคต่างๆ ส่วนด้านระยะเวลาจะทำการหาค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก แบ่งเป็น 3 ช่วง คือ 1. ระยะเวลาการรอคอยการเติมเต็มสินค้าให้เต็มตู้คอนเทนเนอร์ นับจากวันที่ลูกค้าส่งคำสั่งซื้อไปยังโรงงานผลิตจนถึงวันที่สามารถบรรจุสินค้าลงตู้คอนเทนเนอร์เพื่อเตรียมรับขนในช่วงถัดไป โดยมีสมมติฐานว่าสินค้ามีพร้อมสำหรับการส่งทุกครั้ง 2. ช่วงเวลาเดินเรือ นับตั้งแต่วันที่เรือออกจากท่าเรือต้นทางจนถึงวันที่เรือถึงท่าเรือปลายทางในประเทศไทย 3. ช่วงเวลาการรวบรวมสินค้าเพื่อส่งออกจากท่าเรือต้นทาง

ประเทศไทยไปยังท่าเรือปลายทางในประเทศผู้แทนจำหน่าย หรือส่งออกข้ามแดนจากประเทศไทย ไปยังประเทศผู้แทนจำหน่ายปลายทาง

3.2 การสอบถามและสัมภาษณ์

ทำการเก็บข้อมูลโดยใช้เวลาทั้งหมด 6 เดือนแรกในช่วงต้นปีพ.ศ. 2560 โดยมีจำนวนผู้ให้ข้อมูลทั้งหมด 19 ท่าน ประกอบไปด้วยผู้บริหารของบริษัทตัวแทนจำหน่ายสินค้าในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ 10 ท่าน พนักงานฝ่ายขายของบริษัท 7 ท่าน และผู้บริหารระดับสูงของฝ่ายขาย 2 ท่าน ซึ่งบุคคลกลุ่มนี้ถือเป็นกลุ่มบุคคลที่รู้จักสภาพตลาดมากที่สุด มีอำนาจในการตัดสินใจ และได้รับผลกระทบโดยตรงจากการส่งมอบสินค้าและบริการของบริษัทตัวอย่าง โดยคำถามหลักๆจะมีทั้งหมด 4 ข้อ มีลักษณะเป็นคำถามปลายเปิด เกี่ยวกับความพึงพอใจและสิ่งที่ควรปรับปรุงในด้านต่างๆ ที่มีต่อการกระจายสินค้าของบริษัทตัวอย่าง, ความพึงพอใจและข้อมูลการกระจายสินค้าที่ลูกค้ามีต่อคู่ค้าอื่นในธุรกิจเดียวกัน, ระยะเวลาานที่สุดที่ลูกค้าสามารถรอได้, โอกาสและประโยชน์ที่จะได้รับหากมีการพัฒนาปรับปรุงการกระจายสินค้าได้อย่างเหมาะสมมีประสิทธิภาพ

4. ผลการวิจัย

4.1 ต้นทุน และระยะเวลา

จากการศึกษาต้นทุนและระยะเวลารวมที่ใช้ในการกระจายสินค้า ทั้ง 2 รูปแบบ ด้วยการนำข้อมูลมาวิเคราะห์ด้วยหลักสถิติเบื้องต้น จากการหาค่าเฉลี่ย พบว่าการขนส่งในรูปแบบปัจจุบันมีต้นทุนรวมดังตารางที่ 1 และระยะเวลารวมดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ต้นทุนรวมในการขายสินค้าแบบโดยตรงที่เป็นอยู่ในปัจจุบัน

ต้นทุน	ค่าใช้จ่าย (บาท)	สัดส่วน
ค่าดำเนินการต่างๆ และค่าขนส่งสินค้าภายในประเทศต้นทาง	650,000	44%
ค่าระวางเรือจากประเทศต้นทาง - ประเทศปลายทางในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้	820,000	56%
ต้นทุนรวม	1,470,000	100%

ตารางที่ 2 ระยะเวลาการรอคอยเฉลี่ยในการกระจายสินค้าแบบโดยตรงที่เป็นอยู่ในปัจจุบัน

ระยะเวลาการรอคอยเฉลี่ย	เดือน
ตั้งแต่ส่งคำสั่งซื้อ - สินค้าเต็มตู้ - บรรจุสินค้าลงตู้เพื่อการรับขนช่วงถัดไป	5-7 เดือน
ตั้งแต่เรือออกจากท่าเรือต้นทาง - ท่าเรือปลายทาง	1-2 เดือน
ระยะเวลารวม	6-9 เดือน

- มีจำนวนตู้สินค้าทั้งหมด 33 ตู้คอนเทนเนอร์ต่อปี แบ่งเป็นตู้ 20 ฟุต จำนวน 22 ตู้ และตู้ 40 ฟุตไฮคิวบ์ จำนวน 11 ตู้ ทำการขนส่งสินค้าแบบเต็มตู้คอนเทนเนอร์ (FCL)
 - บรรจุสินค้าเฉลี่ยต่อตู้ประมาณ 65-80% ของพื้นที่ตู้ทั้งหมดของคอนเทนเนอร์ เนื่องจากคำสั่งซื้อไม่เพียงพอที่จะเต็มตู้
 - ระยะเวลาการรอคอยเฉลี่ยในการกระจายสินค้า 6-9 เดือน ดังตารางที่ 2 ซึ่งถือว่าเป็นระยะเวลานานเกินความคาดหวังของลูกค้า ทำให้สูญเสียโอกาสในการขายเป็นจำนวนมาก
 - จำนวนสินค้าขนส่งเฉลี่ยประมาณ 5,600 หน่วย, และมีปริมาตร 1,500 ลูกบาศก์เมตร ต่อปี
- จากการศึกษาต้นทุนและระยะเวลาเฉลี่ยในการรอคอยสินค้า ด้วยวิธีการกระจายสินค้าอีกรูปแบบ คือการรวมคำสั่งซื้อของตัวแทนจำหน่ายทั้ง 7 ประเทศในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ และส่งสินค้าออกจากผู้ผลิตใน 4 ประเทศต้นทาง ด้วยการขนส่งสินค้าแบบเต็มตู้คอนเทนเนอร์ (FCL) เพื่อมารวบรวมและคัดแยก ณ ศูนย์กระจายสินค้าในประเทศไทย ที่คลังสินค้าปลอดอากร แล้วส่งต่อไปยังตัวแทนจำหน่ายใน 7 ประเทศปลายทาง โดยอ้างอิงจากข้อมูลเดียวกันในเรื่องของปริมาณสินค้า จำนวนน้ำหนัก พบว่าต้นทุนรวมเป็นไปดังตารางที่ 3 ซึ่งต้นทุนเพิ่มกว่า 2 เท่าของการขนส่งสินค้าในปัจจุบัน และระยะเวลาการรอคอยลดลงเป็น 2-3 เดือน ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 3 ต้นทุนรวมในการขนส่งและกระจายสินค้าแบบใช้ประเทศไทยเป็นศูนย์กลางในการกระจายสินค้า (คลังสินค้าปลอดอากร)

ต้นทุน	ค่าใช้จ่าย (บาท)	สัดส่วน
ค่าดำเนินการคลังสินค้าต้นทาง ค่าขนส่งทางบกภายในประเทศ และค่าระวางเรือจากประเทศต้นทาง - ประเทศไทย	1,100,000	35%
ค่าดำเนินการในคลังสินค้าปลอดอากร	1,042,000	33%
ค่าดำเนินการพิธีการศุลกากร	130,000	4%
ค่าขนส่งสินค้าภายในประเทศ	315,000	10%
ค่าระวางเรือหรือค่าขนส่งทางบก จากประเทศไทย-ประเทศปลายทางในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้	570,000	18%
ต้นทุนรวม	3,157,000	100%

ทั้งนี้ นอกจากความได้เปรียบทางภูมิศาสตร์ของประเทศไทย, ท่าเรือที่ตั้ง ที่อยู่ใจกลางภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้, และโครงสร้างพื้นฐาน ประเทศไทยยังถือเป็นประเทศผู้ผลิตรายหลักของบริษัทที่ผลิตสินค้าส่งออกไปยังภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ถึงร้อยละ 85 ซึ่งในกรณีที่มีการรวมคำสั่งซื้อของ 4 ประเทศผู้ผลิตต้นทางแล้ว

สินค้ายังไม่เพียงพอต่อการเติมเต็มตู้ การเติมสินค้าที่ผลิตจากประเทศไทยยังช่วยให้การรวบรวมสินค้าเพื่อส่งออกไปยังตัวแทนจำหน่ายในแต่ละประเทศ เติบโตได้เร็วยิ่งขึ้น ทั้งนี้การนำสินค้าเข้ามาจากต่างประเทศเพื่อไปเก็บในเขตปลอดอากรดังกล่าวยังจะได้รับการยกเว้นภาษีอากรขาเข้ามายังประเทศไทยอีกด้วย

ตารางที่ 4 ระยะเวลาการรอคอยเฉลี่ยในการกระจายสินค้าแบบใช้ประเทศไทยเป็นศูนย์กลางในการกระจายสินค้า (คลังสินค้าปลอดอากร)

ระยะเวลาการรอคอยเฉลี่ย	เดือน
ตั้งแต่ส่งคำสั่งซื้อ - สินค้าเต็มตู้	0.75-1 เดือน
ตั้งแต่เรือออกจากท่าเรือต้นทาง - ประเทศไทย - สินค้าเต็มตู้	1-1.50 เดือน
ตั้งแต่ส่งสินค้าจากประเทศไทย - ประเทศปลายทาง	0.25-0.50 เดือน
ระยะเวลาเฉลี่ยรวม	2-3 เดือน

4.2 ทำการสอบถามและสัมภาษณ์
จากการสอบถามและสัมภาษณ์ พบว่าบริษัทควรทำการปรับปรุงระยะเวลาการกระจายสินค้าอย่างเร่งด่วนเพื่อป้องกันการสูญเสียโอกาสใน

การขายและสูญเสียลูกค้าที่มีมากถึงร้อยละ 15 โดยลูกค้ามีระยะเวลาการรอคอยที่คาดหวังอยู่ที่ 2-3 เดือนตามที่คุณค่าอื่นสามารถให้บริการได้ และสามารถรอได้นานที่สุดไม่ควรเกิน 4-6 เดือน

หลังจากส่งคำสั่งซื้อ ซึ่งจากการสอบถามความเห็นพบว่าหากบริษัทสามารถลดระยะเวลาขนส่งและกระจายสินค้าได้ลงมากถึง 2-3 เท่า จนเหลือระยะเวลาการรอคอยสินค้า เพียง 2-3 เดือนหรือน้อยกว่านั้น จะช่วยทำให้ยอดขายเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 30 ใน ขณะเดียวกัน ตัวแทนจำหน่ายก็สามารถลดต้นทุนด้านการจัดเก็บสินค้าคงคลัง ส่วนความเห็นของฝ่ายขายมองว่าการลดระยะเวลาการรอคอยและเวลานำไม่ได้ช่วยให้ตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้เท่า นั้น แต่ยังสามารถช่วยลดต้นทุนและสร้างความยืดหยุ่นให้กับองค์กรมากขึ้น รวมถึงลดความเสี่ยงในการขาดแคลนสินค้าซึ่งนำไปสู่การสูญเสียการขาย และมีสินค้าคงคลังเก็บไว้มากเกินซึ่งนำไปสู่การลดราคา สินค้าหมดอายุ ดังนั้นฝ่ายขายมีความเห็นว่าการลดเวลานำ มีความสำคัญในระยะยาวมากกว่าปัจจัยทางด้านต้นทุน ทั้งนี้จะต้องมีการควบคุมต้นทุนให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ เพื่อจะส่งผลดีต่อทุกฝ่ายในภาพรวม

5. สรุปและอภิปรายผล

จากผลการศึกษาพบว่าการใช้ประเทศไทยเป็นศูนย์กลางในการกระจายสินค้า (คลังสินค้าปลอดอากร) ไปสู่ตัวแทนจำหน่ายในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ถือเป็นทางเลือกที่เหมาะสมที่สุดในการการกระจายสินค้า สำหรับลักษณะธุรกิจ ลักษณะสินค้า และจำนวนอุปสงค์ของลูกค้าที่เป็นอยู่ในปัจจุบัน โดยสามารถลดระยะเวลาการรอคอยของลูกค้าได้ถึง 2-3 เท่า จากเดิม 6-9 เดือน เหลือ 2-3 เดือน ถึงแม้จะมีต้นทุนรวมในการขนส่งและกระจายสินค้าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเทียบกับวิธีการที่เป็นอยู่ในปัจจุบัน พบว่าตัวแทนจำหน่ายมีความพึงพอใจโดยรวมมากขึ้น เมื่อมีความพึงพอใจมากขึ้น ก็มีแนวโน้มว่าจะช่วยให้อุดขายเพิ่มถึงร้อยละ 30

ส่งผลให้กำไรสุทธิเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.41 ทั้งนี้หากคิดยอดขายเพิ่มขึ้น 3 เท่า จากการประมาณการของระยะเวลารอคอยที่ลดลง 3 เท่า ที่ส่งผลให้ส่งสินค้าเพิ่มได้ 3 รอบ จะทำให้บริษัทมีกำไรเพิ่มถึงร้อยละ 164.24 ดังสรุปได้ในตารางที่ 5 ประโยชน์ที่ตัวแทนจำหน่ายได้รับ คือ สินค้าขาดตลาดลดลงทำให้ลดการสูญเสียโอกาสในการขาย, มีการเก็บสินค้าคงคลังน้อยลง ส่งผลให้มีเงินทุนเวียนมากขึ้น รวมถึงอายุการใช้งานของสินค้ายาวขึ้น ลดการลดราคาของสินค้าที่เหลืออายุการใช้งานน้อย, สามารถลดจำนวนครั้งและต้นทุนในการดำเนินพิธีการขาเข้า ในภาพรวมสรุปได้ว่าเมื่อผู้แทนจำหน่ายมีความพึงพอใจในการให้บริการอย่างมาก ก็จะทำให้บริษัทมีโอกาสในการขายเพิ่มขึ้น สามารถรักษฐานลูกค้าเดิม มีโอกาสที่จะเพิ่มลูกค้าใหม่ ภาพลักษณ์ ชื่อเสียงของบริษัทดีขึ้น และสามารถเป็นที่แข่งขันในตลาดโลกได้ ทั้งนี้หากมีการเปลี่ยนแปลงในปัจจัยต่างๆ เช่น คำสั่งซื้อของลูกค้าเพิ่มขึ้นมากในแต่ละประเทศผู้ผลิต จนสามารถเต็มเต้มตู้ได้ ก็อาจจะทำให้การขนส่งและกระจายสินค้าแบบโดยตรงมีความเหมาะสมมากกว่า เช่นเดียวกัน หากลูกค้าปลายทางมีจำนวนเพิ่มขึ้น ด้วยจำนวนอุปสงค์เฉลี่ยเท่าเดิมต่อเจ้า ก็จะทำให้วิธีการขนส่งและการกระจายสินค้าแบบมีศูนย์กลางกระจายสินค้า มีความเหมาะสม และมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เนื่องจากจะทำให้การรวบรวมสินค้าของผู้ผลิตต้นทางมายังศูนย์กลางในการกระจายสินค้า จนส่งถึงตัวแทนจำหน่ายปลายทางมีความรวดเร็วและง่ายมากขึ้น นอกจากนี้หากประเทศไทยไม่ได้เป็นผู้ผลิตรายหลักอีกต่อไป การพิจารณาประเทศที่จะเป็นศูนย์กลางในการกระจายสินค้าก็อาจจะเปลี่ยนไปด้วยเช่นกัน

ตารางที่ 5 รายละเอียดในการกระจายสินค้าแบบต่างๆ

รายการ	รูปแบบการกระจายสินค้า			
	แบบโดยตรง	ผ่านศูนย์กระจายสินค้า ¹	ผ่านศูนย์กระจายสินค้า ²	ผ่านศูนย์กระจายสินค้า ³
ยอดขายเฉลี่ย (หน่วย)	5,600	5,600	7,280	16,800
รายได้ (บาท)	70,000,000	70,000,000	86,730,000	200,000,000
ต้นทุนอื่นๆ (บาท)	56,700,000	56,700,000	70,251,300	162,000,000
ต้นทุนค่าขนส่ง (บาท)	1,470,000	3,157,000	4,600,000	6,740,000
กำไรสุทธิ (บาท)	11,830,000	10,143,000	11,878,700	31,260,000

หมายเหตุ

¹ ยอดขายเท่าปัจจุบันมาจากการเก็บรวบรวมข้อมูลที่เกิดขึ้นจริงในปีพ.ศ. 2560

² ยอดขายที่เพิ่มขึ้นร้อยละ 30 มาจากการสัมภาษณ์ตัวแทนจำหน่าย พนักงานขาย และผู้บริหารฝ่ายขายของบริษัท

³ ยอดขายที่เพิ่มขึ้น 3 เท่า มาจากการประมาณการจากระยะเวลารอคอยที่ลดลง 3 รอบ

6.เอกสารอ้างอิง

- [1] Bowersox DJ, Closs DJ, Cooper MB. Supply chain logistics management. Second Edition. McGraw-Hill; 2007.
- [2] Ahuwari S. Feasibility of exporting natural rubber via coastal [master's thesis]. Faculty of Engineering: Chulalongkorn University; 2003. (in Thai)
- [3] Watana-amart P. Efficiency enhancement of automotive spare parts distribution system between samut prakan and eayong provinces [master's thesis]. Graduate School: Kasem Bundit University; 2001. (in Thai)
- [4] Sodsoon S. Logistic network design for outbound transportation of small frozen food enterprises [master's thesis]. Graduate School:
- Chiang Mai University; 2004. (in Thai)
- [5] Tangitcharoenpanich P. A comparative study on the distribution of consumer products by transshipment via distribution center and Direct shipment [master's thesis]. Graduate School: Chulalongkorn University; 2005. (in Thai)
- [6] Tunprawat R. Overseas thai distribution center [master's thesis]. Graduate School: Chulalongkorn University; 2009. (in Thai)
- [7] Baker P. The design and Operation of distribution centres within agile supply chain [master's thesis]. Cranfield School of Management. Cranfield University UK; 2008.

- [8] Cheng YH, Tsai YL. Factors influencing shippers to use multiple country consolidation services in international distribution centers [master's thesis]. Department of Transportation and Communication Management Science. National Cheng Kung University and Department of Logistics Department. National Kaohsiung First University of Science and Technology, Taiwan; 2009.
- [9] Kotcharin S. International logistics challenge: case study of distribution center in european markets. Journal of business Administration, Thammasat Business Journal. 2004;27(104):33-50. (in Thai)

การพัฒนาเปลือกอาคารผสมเส้นใยมะพร้าว

กิตติพันธ์ บุญโตสัตรกุล¹ กิตติพงษ์ สุวิโร^{2*} และปราโมทย์ วีรานุกุล³
kittiphan.b@rmutp.ac.th¹, kittipong.s@en.rmutt.ac.th², pramot.w@rmutp.ac.th³

^{1,3} สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

^{2*} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Received	: 22-Mar-2018
Revised	: 4-Oct-2018
Accepted	: 26-Aug-2019

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเปลือกอาคารผสมเส้นใยมะพร้าว โดยออกแบบอัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1: ทรายละเอียด: เส้นใยมะพร้าว: น้ำยากันซึม: น้ำประปา จำนวน 6 อัตราส่วน เท่ากับ 1: 3: 0: 0.02: 0.5, 1: 3: 0.05: 0.02: 0.5, 1: 3: 0.1: 0.02: 0.5, 1: 3: 0.15: 0.02: 0.5, 1: 3: 0.2: 0.02: 0.5, และ 1: 3: 0.25: 0.02: 0.5 โดยน้ำหนัก ขึ้นรูปด้วยการหล่อและบ่มในอากาศ ทำการทดสอบคุณสมบัติที่อายุการบ่ม 28 วัน พบว่า การผสมเส้นใยมะพร้าวในปริมาณที่เหมาะสมในเปลือกอาคาร จะสามารถลดความหนาแน่น สัมประสิทธิ์การนำความร้อน และเพิ่มความต้านทานแรงดัดของเปลือกอาคารผสมเส้นใยมะพร้าวได้ ทั้งนี้ อัตราส่วนเปลือกอาคารผสมเส้นใยมะพร้าวที่เหมาะสมที่สุด คือ อัตราส่วน 1: 3: 0.1: 0.02: 0.5 โดยน้ำหนัก โดยมีความหนาแน่นต่ำเพียง 1,582 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สัมประสิทธิ์การนำความร้อน 0.371 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน การดูดซึมน้ำ ร้อยละ 17.31 ความต้านทานแรงอัด 118 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และมีค่าความต้านทานแรงดัด 29 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เปลือกอาคารที่พัฒนานี้สามารถนำไปหล่อหรือฉาบเป็นผนังอาคารได้ดี

คำสำคัญ: เปลือกอาคาร เส้นใยมะพร้าว สัมประสิทธิ์การนำความร้อน ความต้านทานแรงดัด

Development of Building Envelope Mixed with Coconut Fiber

Kittiphan Boontositrakul¹ Kittipong Suweero^{2*} and Pramot Weeranukul³
kittiphan.b@rmutp.ac.th¹, kittipong.s@en.rmutt.ac.th², pramot.w@rmutp.ac.th³

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

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

Received	: 22-Mar-2018
Revised	: 4-Oct-2018
Accepted	: 26-Aug-2019

Abstract

The objective of this research is developed the building envelope mixed with coconut fiber. The 6 ratios of Portland cement type 1 mixing of fine sand: coconut fiber: waterproofed liquid: tap water were designed which proportion to 1: 3: 0: 0.02: 0.5, 1: 3: 0.05: 0.02: 0.5, 1: 3: 0.1: 0.02: 0.5, 1: 3: 0.15: 0.02: 0.5, 1: 3: 0.2: 0.02: 0.5, and 1: 3: 0.25: 0.02: 0.5 by weight. The samples were tested to find engineering properties at 28 days of curing in ambient. According to the results, the suitable amount of coconut fiber can reduce the density and thermal conductivity, and increase the bending strength of building envelope mixed with coconut fiber. The 1: 3: 0.1: 0.02: 0.5 of ratio was the suitable ratio to use as the building envelope, and it had the properties as following: density 1,582 kg/m³, thermal conductivity coefficient 0.371 watt/m.Kelvin, water absorption 17.31 %, compressive strength 118 ksc, and bending strength 29 ksc. This developed building envelope can apply to cast and plaster as the walls in the building.

Keywords: building envelope, coconut fiber, thermal conductivity, bending strength

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหา

เปลือกอาคาร (Building Envelope) เป็นส่วนประกอบภายนอกของอาคารที่ต้องสัมผัสและป้องกันผู้อยู่อาศัยจากสภาวะแวดล้อมจากหน้าที่ของเปลือกอาคารดังกล่าว ทำให้การพัฒนาเปลือกอาคารมีผลโดยตรงต่อการใช้งานหรือการอยู่อาศัย ทั้งนี้ เปลือกอาคารโดยทั่วไปขึ้นรูปมาจากมอร์ตาร์ (Mortar) หรือปูนซีเมนต์ผสมทราย น้ำ และน้ำยากันซึม เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติด้านความหนาแน่น และสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่สูง รวมทั้งมีความต้านทานแรงดัดต่ำ [1] ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการใช้งานอาคาร โดยเฉพาะค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนหรือการป้องกันการส่งผ่านของอุณหภูมิเข้ามาภายในอาคาร เปลือกอาคารที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำ จะช่วยให้เครื่องปรับอากาศทำงานน้อยลง และเมื่อพิจารณาวัสดุจำพวกเส้นใยมะพร้าว ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากเปลือกมะพร้าวในอุตสาหกรรมการแปรรูป พบว่า เส้นใยมะพร้าวเป็นวัสดุธรรมชาติที่ไม่มีสารพิษ มีลักษณะเป็นเส้นใยยาว น้ำหนักเบา ทนแดด ทนฝน นำความร้อนต่ำ สามารถต้านทานปฏิกิริยาจากจุลินทรีย์ และทนการกัดกร่อนจากน้ำเค็มได้ดี [1] เส้นใยชนิดนี้มีปริมาณมากตามความนิยมเพาะปลูกมะพร้าวทั่วประเทศ รวมมีพื้นที่ปลูก 2,163,439 ไร่ พื้นที่ให้ผลผลิต 1,917,287 ไร่ ผลผลิตรวม 1,947,963.59 ตัน และผลผลิตเฉลี่ย 1,016 กิโลกรัมต่อไร่ [2-3] การนำเส้นใยมะพร้าวมาผสมในวัสดุเปลือกอาคาร จึงมีความเป็นไปได้ในการพัฒนาสมบัติด้านน้ำหนัก ความแข็งแรง คงทน และเป็นฉนวนป้องกันความร้อนได้ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเปลือกอาคารที่มีสมบัติความเป็นฉนวนป้องกันความร้อน เป็นการพัฒนาวัสดุก่อสร้างที่ช่วยลดปริมาณเศษวัสดุเหลือทิ้งจากมะพร้าว ช่วยสร้างงาน สร้างรายได้ สู่เกษตรกรชาวสวนมะพร้าว

2. วัสดุและอุปกรณ์

วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทรายละเอียด เส้นใยมะพร้าว ย่อยที่มีความยาวไม่เกิน 2.54 เซนติเมตร หรือ 1 นิ้ว และมีเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 0.12-0.25 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 1 และ 2 น้ำยากันซึมประเภทพลาสติกไซเซอร์ สีน้ำตาลปน น้ำประปา แบบหล่อ ขนาด 10 x 10 x 10 เซนติเมตร แบบหล่อขนาด 30 x 30 x 5 เซนติเมตร เครื่องผสมปูน แผ่นไม้อัดสำหรับหล่อเปลือกอาคาร หนา 4 มิลลิเมตร เหล็กเส้นกลม RB เกรด SR24 ขนาด 6 มิลลิเมตร ตะแกรงเหล็กสี่เหลี่ยม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.56 มิลลิเมตร ระยะห่าง 0.5 นิ้ว ชุดคอมพิวเตอร์ประมวลผล และเครื่องทดสอบเบรกดึง (Universal Testing Machine, UTM)



รูปที่ 1 เส้นใยมะพร้าว



รูปที่ 2 ภาพขยายเส้นใยมะพร้าวที่สอดด้วย กล้อง SEM กำลังขยาย 1,000 เท่า

3. การออกแบบส่วนผสมของเปลือกอาคาร

ออกแบบส่วนผสมของเปลือกอาคารผสมเส้นใยมะพร้าว โดยการนำอัตราส่วนผสมของปูนฉาบทั่วไป มาปรับปรุงคุณสมบัติด้วยเส้นใยมะพร้าว จำนวน 6 อัตราส่วน ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนัก

รหัสส่วนผสม	ปูนซีเมนต์	ทรายละเอียด	เส้นใยมะพร้าว	น้ำยากันซึม	น้ำประปา
C0	1	3	0	0.02	0.5
C5	1	3	0.05	0.02	0.5
C10	1	3	0.1	0.02	0.5
C15	1	3	0.15	0.02	0.5
C20	1	3	0.2	0.02	0.5
C25	1	3	0.25	0.02	0.5

4. การขึ้นรูปตัวอย่างเปลือกอาคาร

ขึ้นรูปตัวอย่างเปลือกอาคารสำหรับทดสอบคุณสมบัติ จำนวน 2 รูปแบบ ได้แก่ ตัวอย่างขนาด 10 × 10 × 10 เซนติเมตร และตัวอย่างขนาด 30 × 30 × 5 เซนติเมตร โดยมีขั้นตอนการขึ้นรูป เริ่มจากทวงส่วนผสมตามที่ออกแบบ ทำการผสมส่วนผสมให้เข้ากัน เทส่วนผสมลงในแบบหล่อ ถอดแบบหล่อ และบ่ม

ตัวอย่างเปลือกอาคารในอากาศ ที่อายุการบ่ม 7, 14, 21 และ 28 วัน

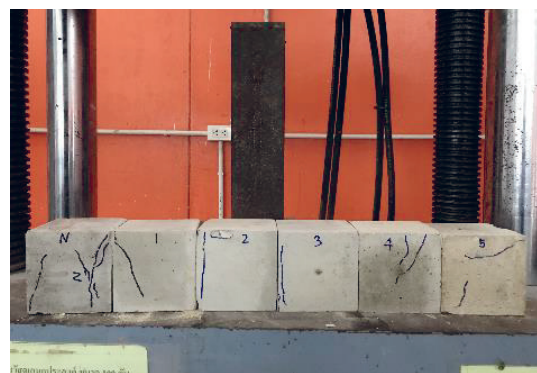
5. การทดสอบตัวอย่างเปลือกอาคาร

ทดสอบคุณสมบัติของตัวอย่างเปลือกอาคาร ซึ่งจำเป็นต่อการใช้งาน โดยใช้ตัวอย่างทดสอบ จำนวน 5 ก้อนต่อการทดสอบ ทำการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางกล เทียบเคียงกับวิธีการทดสอบของวัสดุเปลือกอาคารที่นิยมใช้ คือ คอนกรีตบล็อกชนิดไม่รับน้ำหนัก และคุณสมบัติอื่นๆ ได้แก่

5.1) ความหนาแน่น ที่อายุการบ่ม 28 วัน โดยใช้ก้อนตัวอย่างเปลือกอาคาร ขนาด 10 × 10 × 10 เซนติเมตร ตามมาตรฐาน มอก.58-2533 [4]

5.2) การดูดซึมน้ำ ที่อายุการบ่ม 28 วัน โดยใช้ก้อนตัวอย่างเปลือกอาคาร ขนาด 10 × 10 × 10 เซนติเมตร ตามมาตรฐาน มอก.58-2533 [4]

5.3) ความต้านทานแรงอัด ที่อายุการบ่ม 7, 14, 21 และ 28 วัน โดยใช้ก้อนตัวอย่างเปลือกอาคาร ขนาด 10 × 10 × 10 เซนติเมตร ตามมาตรฐาน มอก.58-2533 [4] ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ก้อนตัวอย่างเปลือกอาคารที่วัดได้จากแรงอัดที่มีลักษณะเช่นเดียวกับคอนกรีตทั่วไป

5.4) ความต้านทานแรงดัด ที่อายุการบ่ม 7, 14, 21 และ 28 วัน โดยใช้แผ่นตัวอย่างเปลือกอาคาร ขนาด $30 \times 30 \times 5$ เซนติเมตร ตามมาตรฐาน มอก.378-2531 [5] ดังรูปที่ 4 และ 5



รูปที่ 4 การทดสอบความต้านทานแรงดัดของแผ่นตัวอย่างเปลือกอาคารด้วยเครื่อง UTM



รูปที่ 5 แผ่นตัวอย่างเปลือกอาคารที่วิบัติจากการทดสอบความต้านทานแรงดัด

5.5) สัมประสิทธิ์การนำความร้อน ตามมาตรฐาน ASTM C177 [6] โดยใช้แผ่นตัวอย่างเปลือกอาคาร ขนาด $30 \times 30 \times 5$ เซนติเมตร

5.6) การใช้งานจริง โดยการหล่อและฉาบเปลือกอาคารลงบนโครงสร้างเหล็กรูปครึ่งทรงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เมตร สูง 3.5 เมตร พื้นที่ใช้สอย 19.635 ตารางเมตร (รูปที่ 6) ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงาน ดังนี้

5.6.1) คัดเลือกส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดจากตัวอย่างทดสอบ จำนวน 1 อัตราส่วน

5.6.2) ติดตั้งเหล็กเส้นกลม ขนาด 6 มิลลิเมตร ในแนวตั้ง ทุกระยะ 10 เซนติเมตร

5.6.3) ติดตั้งแผ่นไม้อัด เป็นแบบหล่อ

5.6.4) ติดตั้งเหล็กตะแกรง เป็นเหล็กเสริมป้องกันการแตกร้าว ดังรูปที่ 7



รูปที่ 6 โครงสร้างอาคารสำเร็จรูปที่พร้อมสำหรับการหล่อและฉาบเปลือกอาคาร



รูปที่ 7 การติดตั้งแผ่นไม้อัด เหล็กเส้นกลม และเหล็กตะแกรง สำหรับหล่อแผ่นเปลือกอาคาร

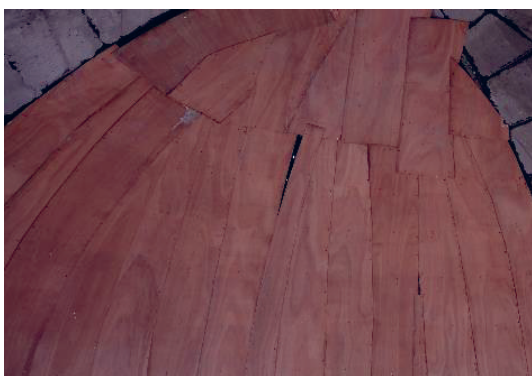
5.6.5) ตวงส่วนผสมตามที่คัดเลือก

5.6.6) ผสมส่วนผสมให้เข้ากัน

5.6.7) ฉาบส่วนผสมในแบบหล่อที่มีการติดตั้งตะแกรงเหล็กไว้ ดังรูปที่ 8 และ 9



รูปที่ 8 ฉาบส่วนผสมในแบบที่มีการติดตั้งตะแกรงเหล็ก



รูปที่ 9 เปลือกอาคารเบื้องต้นที่ผ่านการเทหล่อ

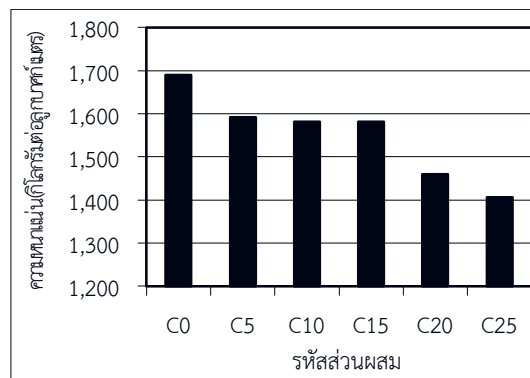
5.6.8) ฉาบเรียบและทาสีน้ำเปลือกอาคารให้มีความสวยงามเรียบร้อย

6. ผลการดำเนินงานวิจัย

ผลการทดสอบตัวอย่างเปลือกอาคารตามคุณสมบัติที่จำเป็นต่อการใช้งานเป็นเปลือกอาคาร สามารถสรุปได้ ดังต่อไปนี้

6.1 ความหนาแน่น

ผลการทดสอบความหนาแน่นของตัวอย่างเปลือกอาคารผสมเส้นใยมะพร้าว ที่อายุการบ่ม 28 วัน สามารถสรุปได้ ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 ความหนาแน่นของตัวอย่างเปลือกอาคารผสมเส้นใยมะพร้าว ที่อายุการบ่ม 28 วัน

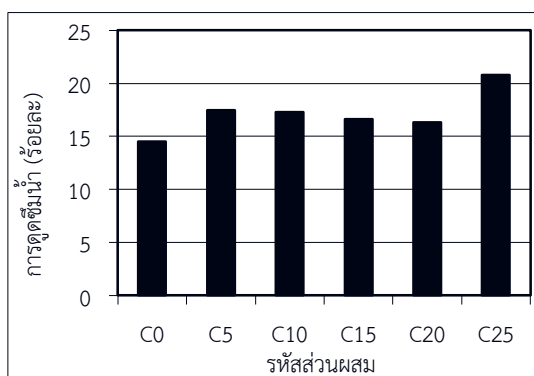
จากรูปที่ 10 พบว่า ความหนาแน่นของตัวอย่างเปลือกอาคารผสมเส้นใยมะพร้าวมีค่าลดต่ำลงเมื่อผสมเส้นใยมะพร้าวในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น โดยตัวอย่างเปลือกอาคารที่ไม่ผสมเส้นใยมะพร้าว (อัตราส่วน C0) เป็นอัตราส่วนที่มีความหนาแน่นสูงที่สุด รองลงมาคือ ตัวอย่างเปลือกอาคารผสมเส้นใยมะพร้าวอัตราส่วน C5, C10, C15, C20, และ C25 เป็นอัตราส่วนที่มีความหนาแน่นต่ำที่สุด ตามลำดับ ทั้งนี้ เป็นผลมาจากค่าความถ่วงจำเพาะของเส้นใยมะพร้าวที่มีค่าเพียง 0.6 [7]

6.2 การดูดซึมน้ำ

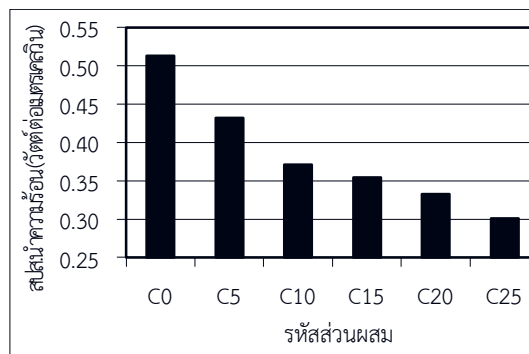
การดูดซึมน้ำของตัวอย่างเปลือกอาคารผสมเส้นใยมะพร้าว ที่อายุการบ่ม 28 วัน สามารถสรุปผลการทดสอบได้ ดังรูปที่ 11 พบว่า ลักษณะเส้นใยมะพร้าวที่มีช่องว่างจากการเรียงตัว นอกจากจะมีผลต่อความหนาแน่นที่ลดลงแล้ว ยังมีผลต่อการดูดซึมน้ำของตัวอย่างเปลือกอาคารที่เพิ่มมากขึ้น [8] โดยตัวอย่างเปลือกอาคารที่ไม่ผสมเส้นใยมะพร้าว (อัตราส่วน C0) เป็นอัตราส่วนที่มีการดูดซึมน้ำต่ำที่สุด และตัวอย่างเปลือกอาคารผสมเส้นใยมะพร้าวมีการดูดซึมน้ำที่สูงขึ้นใกล้เคียงกัน

6.3 สัมประสิทธิ์การนำความร้อน

ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของตัวอย่างเปลือกอาคารผสมเส้นใยมะพร้าว ที่อายุการบ่ม 28 วัน ในรูปที่ 12 พบว่า เส้นใยมะพร้าว เป็นวัสดุที่มีความเป็นฉนวนป้องกันความร้อนที่ดี โดยสามารถช่วยลดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของตัวอย่างเปลือกอาคารให้ลดลงได้ ซึ่งตัวอย่างเปลือกอาคารที่ผสมเส้นใยมะพร้าวในปริมาณมากที่สุด (อัตราส่วน C25) เป็นอัตราส่วนที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำที่สุด รองลงมาคือ ตัวอย่างเปลือกอาคารที่ผสมเส้นใยมะพร้าว อัตราส่วน C20, C15, C10, C5 และเปลือกอาคารที่ไม่ผสมเส้นใยมะพร้าว (อัตราส่วน C0) เป็นอัตราส่วนที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงที่สุด ตามลำดับ เป็นผลมาจากเส้นใยมะพร้าวที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำ [9]



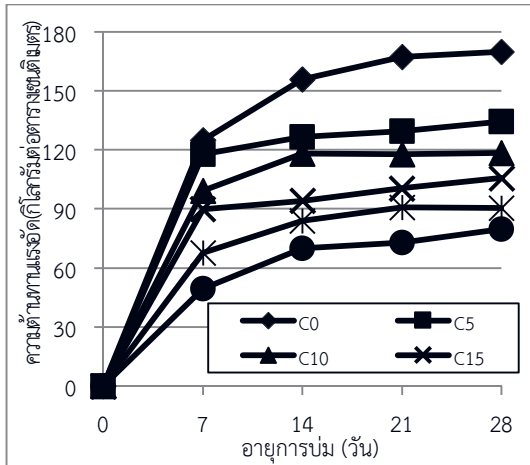
รูปที่ 11 การดูดซึมน้ำของตัวอย่างเปลือกอาคารผสมเส้นใยมะพร้าว ที่อายุการบ่ม 28 วัน



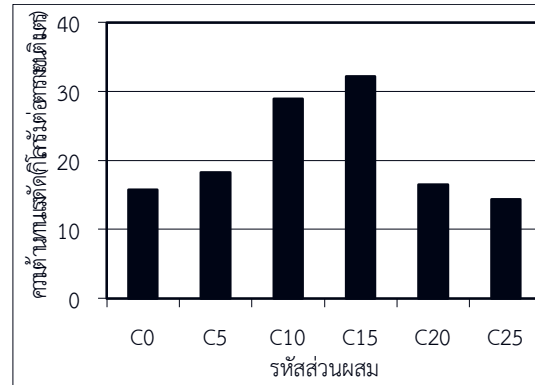
รูปที่ 12 สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของตัวอย่างเปลือกอาคารผสมเส้นใยมะพร้าว ที่อายุการบ่ม 28 วัน

6.4 ความต้านทานแรงอัด

สำหรับผลการทดสอบความต้านทานแรงอัดของตัวอย่างเปลือกอาคารผสมเส้นใยมะพร้าว รูปทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ขนาด 10 x 10 x 10 เซนติเมตร ที่อายุการบ่ม 7, 14, 21 และ 28 วัน สามารถสรุปได้ ดังรูปที่ 13 พบว่า ความต้านทานแรงอัดของตัวอย่างเปลือกอาคารที่มีการผสมเส้นใยมะพร้าวในปริมาณมาก จะมีค่าต่ำกว่าความต้านทานแรงอัดของตัวอย่างเปลือกอาคารที่มีการผสมเส้นใยมะพร้าวในปริมาณน้อย หรือไม่มีการผสมเส้นใยมะพร้าวเลย เป็นผลมาจากเส้นใยมะพร้าวเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่น ซึ่งลักษณะดังกล่าวมีผลต่อพื้นที่การรับแรงอัดที่ลดลง และทำให้ตัวอย่างเปลือกอาคารที่มีการผสมเส้นใยมะพร้าวในปริมาณมากมีค่าความต้านทานแรงอัดต่ำดังกล่าว [8]



รูปที่ 13 ความต้านทานแรงอัดของตัวอย่างเปลือกอาคารผสมเส้นใยมะพร้าว ที่อายุการบ่มต่างๆ



รูปที่ 14 ความต้านทานแรงดัดของตัวอย่างเปลือกอาคารผสมเส้นใยมะพร้าว ที่อายุการบ่ม 28 วัน

6.5 ความต้านทานแรงดัด

ผลการทดสอบความต้านทานแรงดัดของตัวอย่างเปลือกอาคารผสมเส้นใยมะพร้าว ที่อายุการบ่ม 28 วัน ดังรูปที่ 14 พบว่า การผสมเส้นใยมะพร้าวลงในแผ่นตัวอย่างเปลือกอาคาร มีผลช่วยให้ค่าความต้านทานแรงดัดเพิ่มมากขึ้นจากแผ่นตัวอย่างเปลือกอาคารที่ไม่มีการผสมเส้นใยมะพร้าว ทั้งนี้ เป็นผลมาจากเส้นใยมะพร้าวเป็นวัสดุเซลลูโลสที่สามารถรับแรงดึงให้แก่วัสดุเมื่อต้องรับแรงดัดได้ [10] อย่างไรก็ตาม หากผสมเส้นใยมะพร้าวในปริมาณที่มากเกินไป หรือมากกว่าอัตราส่วน C15 จะทำให้ความต้านทานแรงดัดของตัวอย่างเปลือกอาคารลดลง โดยเป็นผลมาจากช่องว่างที่เกิดขึ้นภายในเนื้อเปลือกอาคารเมื่อมีการผสมเส้นใยมะพร้าวในปริมาณมากเกินไปนั้น ไม่สามารถรับแรงต่างๆ ได้ ดังรูปที่ 15 [8, 11]



รูปที่ 15 ลักษณะเนื้อและช่องว่างของแผ่นตัวอย่างเปลือกอาคารที่วิบัติจากทดสอบความต้านทานแรงดัด

6.6 การใช้งานจริง

จากผลการทดสอบตัวอย่างเปลือกอาคารตามคุณสมบัติที่จำเป็นต่อการใช้งานเป็นเปลือกอาคาร ได้แก่ ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน ความต้านทานแรงอัด และความต้านทานแรงดัด ทำให้สามารถพิจารณาคัดเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้เป็นเปลือกอาคารในการทดสอบใช้งานจริง คือ อัตราส่วน C10 เนื่องจากเป็นอัตราส่วนที่มีปริมาณเส้นใยมะพร้าวมากพอสมควร มีความหนาแน่นที่ต่ำเพียง 1,582 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เบากว่าผนังคอนกรีต

ทั่วไปที่หนักถึง 2,400 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร [8] มีสัมประสิทธิ์การนำความร้อน 0.371 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน ซึ่งมีความเป็นฉนวนป้องกันความร้อนที่ดีกว่าผนังทั่วไป ดูดซึมน้ำร้อยละ 17.31 โดยไม่เกินกว่าค่าที่คอนกรีตบล็อกก่อผนัง ตาม มอก.58-2533 กำหนดไว้คือไม่เกิน ร้อยละ 25 [4] นอกจากนี้ ยังเป็นอัตราส่วนที่มีความต้านทานแรงอัดสูงถึง 118.47 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร สูงกว่าปูนฉาบทั่วไป ตาม มอก.1776-2542 [12] ที่กำหนดไว้คือ 50 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และสูงกว่าคอนกรีตบล็อกก่อผนัง ตาม มอก.58-2533 คือ 25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร [4] และมีความต้านทานแรงดัด 28.88 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร สูงกว่าผนังปูนฉาบทั่วไปที่รับแรงดัดได้เพียง 15.79 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ด้วยเหตุนี้ จึงเลือกอัตราส่วน C10 สำหรับขึ้นรูปเป็นเปลือกอาคารในการขึ้นรูปต้นแบบต่อไป ส่วนผลการขึ้นรูปต้นแบบเปลือกอาคาร โดยนำโครงสร้างอาคารที่ขึ้นรูปแล้ว มาหล่อและฉาบเปลือกอาคาร พบว่า เปลือกอาคารผสมเส้นใยมะพร้าว สามารถใช้งานเป็นผนังอาคารได้ดี ผนังมีความเรียบ ไม่แตกร้าว หล่อและฉาบได้ง่ายเช่นเดียวกับวัสดุจำพวกคอนกรีตทั่วไป ดังรูปที่ 16 ถึง 19

7. สรุปผล และข้อเสนอแนะ

จากผลการดำเนินการ พบว่า เปลือกอาคารผสมเส้นใยมะพร้าวอัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1: ทรายละเอียด: เส้นใยมะพร้าว: น้ำยากันซึม: น้ำประปา เท่ากับ 1: 3: 0.1: 0.02: 0.5 โดยน้ำหนัก (อัตราส่วน C10) เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสม สามารถนำมาใช้หล่อและฉาบเป็นเปลือกอาคารได้ดี โดยเปลือกอาคารที่ได้มีความหนาแน่นต่ำเพียง 1,582 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สัมประสิทธิ์การนำความร้อน 0.371 วัตต์ต่อเมตรเคลวิน การดูดซึมน้ำ ร้อยละ 17.31 ความต้านทานแรงอัด 118.47

กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และมีค่าความต้านทานแรงดัด 28.88 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร สามารถใช้งานเป็นผนังอาคารได้ดี ผนังมีความเรียบ ไม่แตกร้าว หล่อและฉาบได้ง่ายเช่นเดียวกับวัสดุจำพวกคอนกรีตทั่วไป สำหรับข้อเสนอแนะ ควรมีการนำส่วนผสมที่พัฒนาไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนสำเร็จรูปเชิงอุตสาหกรรม เพื่อลดต้นทุนค่างานเปลือกอาคาร และเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันความร้อน



รูปที่ 16 อาคารสำเร็จรูปครึ่งทรงกลมที่ฉาบเบื้องต้น



รูปที่ 17 ด้านหน้าอาคารสำเร็จรูปครึ่งทรงกลมก่อนทาสี



รูปที่ 18 การทำสีผนังอาคารสำเร็จรูปทรงกลม



รูปที่ 19 ด้านข้างอาคารสำเร็จรูปครึ่งทรงกลม
หลังทาสี

8. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณ
แผ่นดินมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ประจำปี 2560 ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] Asasutjarit C, Hirunlabh J, Khedari J, Charoenvai S, Zeghamati B, Shin UC. Development of coconut coir-based lightweight cement board. Construction and Building Materials. 2007; 21(2): 277–288.
- [2] Office of the Higher Education Commission (OHEC). Development of light-weight materials from

coconut fiber, research and technology transfer project in coconut. Bangkok: Research Network: Lower Central, Office of the Higher Education Commission; 2004. (in Thai)

- [3] Weeranukul P, Suweero K. Development of cement boards from coconut shell ash for energy and environment conservation. KKU Engineering Journal. 2016; 43(S1): 173-175. (in Thai)
- [4] Thai Industrial Standards Institute (TISI). Thai industrial standard no.5 8 -1990: hollow non-load-bearing concrete masonry units. Bangkok: Thai Industrial Standards Institute; 1990. (in Thai)
- [5] Thai Industrial Standards Institute (TISI). Thai industrial standard no.378-1988: concrete floor tile. Bangkok: Thai Industrial Standards Institute; 1988. (in Thai)
- [6] American Society for Testing and Materials (ASTM). Standard test method for steady-state heat flux measurements and thermal transmission properties by means of the guarded-hot-plate apparatus. Philadelphia: ASTM International; 2010.
- [7] Faherty KF, Williamson TG. Wood engineering and construction handbook. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, Inc.; 1995.
- [8] Jindaprasert P, Jaturapitakkul C. Cement, pozzolan, and concrete. 7th ed. Bangkok: ACI Partners with

- Thailand Concrete Association;
2012. (in Thai)
- [9] Pakunworakij T, Puthipiroj P, Oonjittichai W, Tisavipat P. Thermal resistance efficiency of building insulation material from agricultural waste. Journal of Architectural/Planning Research and Studies. 2006; 3(4): 119-126. (in Thai)
- [10] Bledzki AK, Gassan J. Composites reinforced with cellulose based fibers. Progress in Polymer Science. 1999; 24: 221-274.
- [11] Padkhoa N. The production and study property of insulation wall light board from bagasse fiber for using in architecture work. Journal of Engineering, RMUTT. 2015; 13(2): 11-20. (in Thai)
- [12] Thai Industrial Standards Institute (TISI). Thai industrial standard no.1776-1999: dry mortar for plastering. Bangkok: Thai Industrial Standards Institute; 1999. (in Thai)

การพัฒนารูปแบบการเรียนรู้แบบผสมผสานด้วยการคิดเชิงออกแบบ ร่วมกับหลักการสอนแบบทริซเพื่อส่งเสริมการแก้ปัญหาทางวิศวกรรม ของนิสิตนักศึกษาวิศวกรรมศาสตร์ระดับปริญญาบัณฑิต

พัชรา วงศ์ตาผา^{1*} และเนาวนิตย์ สงคราม²

patchara.won@student.chula.ac.th^{1*}, noawanit_s@hotmail.com²

^{1,2} ภาควิชาเทคโนโลยีและสื่อสารการศึกษา คณะครุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Received	: 29-Apr-2019
Revised	: 5-Jun-2019
Accepted	: 3-Jul-2019

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อพัฒนารูปแบบการเรียนรู้แบบผสมผสานด้วยการคิดเชิงออกแบบร่วมกับหลักการสอนแบบทริซ เพื่อส่งเสริมการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมของนิสิตนักศึกษาวิศวกรรมศาสตร์ระดับปริญญาบัณฑิต กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ได้แก่ นิสิตนักศึกษาวิศวกรรมศาสตร์ระดับปริญญาบัณฑิตที่ลงทะเบียนเรียนในรายวิชา การออกแบบและสร้างชิ้นส่วนผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยประกอบด้วย 1) แบบสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญ 2) แผนการจัดการเรียนรู้แบบผสมผสานด้วยการคิดเชิงออกแบบร่วมกับหลักการสอนแบบทริซ 3) แบบประเมินรูปแบบการเรียนรู้แบบผสมผสานด้วยการคิดเชิงออกแบบร่วมกับหลักการสอนแบบทริซ 4) แบบวัดความสามารถในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรม 5) แบบประเมินผลงานนวัตกรรม 6) แบบสังเกตพฤติกรรม 7) แบบสอบถามความคิดเห็นที่มีต่อรูปแบบการเรียนรู้แบบผสมผสาน ฯ 8) บทเรียนออนไลน์โดยใช้ระบบจัดการเรียนรู้ สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล คือ ร้อยละ ค่าเฉลี่ย ($\bar{x}$) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ทดสอบสมมติฐานด้วย t-test dependent

ผลการวิจัยพบว่า รูปแบบการเรียนรู้แบบผสมผสานด้วยการคิดเชิงออกแบบร่วมกับหลักการสอนแบบทริซ มีองค์ประกอบได้ แก่ 1) การเรียนแบบเผชิญหน้า 2) การเรียนแบบออนไลน์ 3) การติดต่อสื่อสาร 4) ระบบจัดการเรียนรู้ 5) หลักการสอนแบบทริซ ทฤษฎีการแก้ปัญหาเชิงประดิษฐ์คิดค้น ผลการทดลองใช้รูปแบบการเรียนรู้แบบผสมผสานด้วยการคิดเชิงออกแบบร่วมกับหลักการสอนแบบทริซ เพื่อส่งเสริมการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมศาสตร์ระดับปริญญาบัณฑิต ผู้เรียนมีคะแนนความสามารถในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมศาสตร์ หลังเรียนสูงกว่าก่อนเรียนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ .05

คำสำคัญ: การเรียนแบบผสมผสาน การคิดเชิงออกแบบ หลักการสอนแบบทริซ (TRIZ) การแก้ปัญหาทางวิศวกรรม

Development of Blended Learning Model with Design Thinking and TRIZ Principles to Enhance Engineering Problem Solving Skills of Engineering Undergraduate Students

Patchara Wongtapha^{1*} and Noawanit Songkram²
patchara.won@student.chula.ac.th^{1*}, noawanit_s@hotmail.com²

^{1*,2} Department of Educational Technology and Communications, Chulalongkorn University

Received	: 29-Apr-2019
Revised	: 5-Jun-2019
Accepted	: 3-Jul-2019

Abstract

The research was to develop of blended learning model with design thinking and triz principles to enhance engineering problem solving skills of engineering undergraduate students, the sample used in this research consisted of 35 undergraduate students at Faculty of Engineering, who registered in Industrial engineering design and build. The instruments of this research were: 1) a questionnaire for instructors 2) lesson plans for the blended learning model using design thinking and triz, 3) blended learning model with design thinking and triz principles model assessment, for the blended learning model using design thinking and triz, 4) a engineering problem solving ability test, 5) assessment innovative 6) a learning behavior observation form, 7) questionnaire for students' opinion, 8) learning management system on line learning. The data were statistical analyzed by the following instruments percentage, Mean, standard deviation, dependent t-test.

The results of this research was as follows. The blended learning model with design thinking and triz principles to enhance engineering problem solving skills of engineering which comprised 1) face to face learning 2) self-paced e-learning 3)communication 4)learning Management System 5) triz : theory of Inventive Problem Solving, The result of experimental from using blended learning model with design thinking and triz principles to enhance engineering problem solving skills of engineering undergraduate students, statistically significant higher than before level of .05

Keywords: Blended learning, Design thinking, TRIZ, Problem solving.

1. บทนำ

การจัดการเรียนการสอนในปัจจุบัน เพื่อส่งเสริมการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมศาสตร์ ของผู้เรียน เป็นการบูรณาความรู้พื้นฐาน ทางด้านคณิตศาสตร์ และความรู้ทางด้าน วิทยาศาสตร์ และความรู้พื้นฐานด้านวิศวกรรม รวมไปถึงการเลือกใช้เครื่องมือทางเทคโนโลยี เช่นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เทคนิคและหลักการ ต่าง ๆ ที่เป็นเครื่องมือช่วยในการออกแบบ นวัตกรรม โดยทั่วไปผู้เรียนด้านวิศวกรรมจะมีวิธี แก้ปัญหาในการออกแบบชิ้นงานโดยอาศัย ประสบการณ์ความคุ้นชิน ซึ่งยังขาดการหา แนวทางในการแก้ไขปัญหา การวิเคราะห์ระบุ ปัญหาในระหว่างกระบวนการออกแบบที่ชัดเจน เจาะจงในการออกแบบนวัตกรรมเชิงประดิษฐ์ ผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาพัฒนารูปแบบการเรียนรู้ แบบผสมผสานด้วยการคิดเชิงออกแบบร่วมกับ หลักการสอนแบบทริชเพื่อส่งเสริมการแก้ปัญหา ทางวิศวกรรมของนิสิตนักศึกษาวิศวกรรมศาสตร์ ระดับปริญญาบัณฑิต โดยใช้กระบวนการคิดเชิง ออกแบบในการออกแบบกิจกรรมการเรียนรู้ กระตุ้นให้ผู้เรียนด้วยการจัดกิจกรรมส่งเสริมการ เรียนรู้สอดแทรกด้วยหลักการและเทคนิคต่างใน การใช้เครื่องมือ เพื่อมุ่งเน้นด้านการแก้ปัญหา ทางวิศวกรรม

ในยุคของการเปลี่ยนผ่านประเทศไทย เข้าสู่โมเดล “ประเทศไทย 4.0” โดยการปฏิรูป โครงสร้างเศรษฐกิจขับเคลื่อนด้วยนวัตกรรม สนับสนุนการเติบโตของธุรกิจรูปแบบใหม่ เพื่อ สร้างฐานประเทศไทยสู่การเป็นอุตสาหกรรม รวมไปถึงการพัฒนาผลิตภัณฑ์ธุรกิจทางการศึกษา และการยกระดับคุณภาพการศึกษาการเรียนรู้ ให้มีคุณภาพ ปรับหลักสูตรและผลิตกำลังคนให้ สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงและความต้องการ ของสถานประกอบการ [1] ในการผลิตบัณฑิต

เพื่อเป็นกำลังแรงงานสำคัญที่จะเข้ามามีบทบาท ในด้านการผลิตสินค้านวัตกรรม สามารถ วิเคราะห์ปัญหา และแก้ไขปัญหา เพื่อเพิ่มมูลค่า ของผลิตภัณฑ์สู่ความต้องการของตลาด ใน แผนการศึกษาแห่งชาติ พ.ศ. 2560 - 2579 การวิจัย และ นวัตกรรม เพื่อ สร้างขีด ความสามารถในการแข่งขันของประเทศ โดย กำหนดเป้าหมายในการผลิตกำลังคนให้มีทักษะ และสมรรถนะที่จำเป็นตรงต่อความต้องการของ ตลาดแรงงาน สถาบันการศึกษาและหน่วยงานที่ จัดการศึกษาการผลิตบัณฑิตที่มีความเชี่ยวชาญ และเป็นเลิศเฉพาะด้าน [2] และทักษะด้าน การปฏิบัติงานการแก้ไขปัญหา ความสามารถ ด้านการคิดการออกแบบและการแก้ปัญหาอย่าง เป็นระบบ จำต้องอาศัยแนวทางกระบวนการ จัดการเรียนรู้รูปแบบใหม่เพื่อช่วยกระตุ้นทักษะ และสมรรถนะของผู้เรียนที่สำคัญให้สอดคล้อง กับการเปลี่ยนแปลงยุคอุตสาหกรรม และการ ปรับเปลี่ยนบริบททางการศึกษา สร้าง คุณลักษณะอันพึงประสงค์ของผู้เรียนในศตวรรษ ที่ 21 ทักษะและความเชี่ยวชาญเฉพาะด้าน ความคิดสร้างสรรค์ในการออกแบบ สู่การ แก้ปัญหาอย่างเป็นระบบ

การจัดการศึกษาจึงต้องมีกระบวนการ ส่งเสริมผู้เรียนได้พัฒนาด้านทักษะความสามารถ ของตนเองได้อย่างเต็มที่ แต่ก็เนื่องด้วยข้อจำกัด หลายประการที่จำเป็นจะต้องพิจารณา แนวทาง ในการจัดการเรียนแบบผสมผสาน (Blended learning) จึงเป็นทางเลือกที่มีส่วนช่วยสนับสนุน และเสริมสร้างการเรียนรู้ให้ดียิ่งขึ้น [3] ซึ่ง เป็น การรวมนวัตกรรมความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี ด้วยการมีปฏิสัมพันธ์การเรียนรู้แบบออนไลน์ และการมีส่วนร่วมในการเรียนแบบเผชิญหน้าใน ชั้นเรียน (Face to Face) [4] ในการสอนผู้สอน ย่อมกำหนดจุดประสงค์ไว้หลายด้าน ทั้งด้าน ความรู้เจตคติ และทักษะ ถ้าผู้สอนใช้วิธีสอนวิธี ใดวิธีหนึ่งวิธีเดียว อาจไม่สามารถสนองตอบ จุดประสงค์ทุกด้านได้ ดังนั้นผู้สอนต้องรู้จัก

เลือกใช้วิธีสอนหลายๆ วิธีอย่างผสมผสานกัน ผู้สอนต้องเลือกใช้ให้สอดคล้องเหมาะสมกับสถานการณ์ผู้เรียนและเนื้อหาวิชา บางครั้งบางชั่วโมงอาจต้องเลือกใช้หลายวิธีอย่างผสมผสานกัน เพื่อช่วยให้ผู้เรียนเกิดการเรียนรู้ได้ดี การผสมผสานวิธีสอนหลาย วิธีเข้าด้วยกัน จะช่วยให้การเรียนการสอนสนุก น่าสนใจ และเป็นการเปลี่ยนบรรยากาศการเรียนการสอนให้ดีขึ้น [5] การจัดสภาพแวดล้อมบนเครือข่ายแบบผสมผสานจะช่วยสนับสนุนและสร้างความเข้าใจในการถ่ายทอดความคิดเห็นระหว่างครูและผู้เรียน ช่วยส่งเสริมการคิดและการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นได้

ผู้วิจัยได้ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการคิดเชิงออกแบบ (Design thinking) ถึงกระบวนการที่จะสร้างนวัตกรรม ที่จะนำขึ้น ตอนของกระบวนการคิดเชิงออกแบบ เทคนิคและทักษะจำเป็นที่จะนำไปสู่ความสามารถเข้าใจในการมองปัญหาและการแก้ปัญหา [6] เป็นแนวคิดเพื่อสนับสนุนการออกแบบและพัฒนานวัตกรรม ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงสร้างแรงบันดาลใจ (Inspiration) สร้างแนวคิด (Ideation) และการนำทางเลือกไปปรับใช้ (Implementation) สังเคราะห์ข้อมูลและความเป็นไปได้ในการแก้ปัญหาสามารถคิดและสร้างสรรค์สิ่งประดิษฐ์ใหม่ ๆ นวัตกรรมและเทคโนโลยีต่าง ๆ ทำให้เกิดความเปลี่ยนแปลงแนวทางใหม่ ๆ ในการดำเนินชีวิต เป็นการฝึกการคิดและค้นพบแนวทางในการแก้ปัญหาต่าง ๆ ได้หลากหลายจนสำเร็จ การศึกษาวิธีการและหลักการสร้างทักษะกระบวนการคิดจึงเป็นสิ่งที่ควรกระทำเพื่อเป็นรากฐานทางด้านการศึกษาในการเรียนด้านวิศวกรรมอุตสาหกรรม และด้านอื่น ๆ สิ่งสำคัญที่จะทำให้ผู้เรียนประสบความสำเร็จได้ซึ่งมีหลายองค์ประกอบ ได้แก่ รูปแบบการสอน วิธีการและเทคนิคในการสอนที่ช่วยส่งเสริมผู้เรียนให้ฝึกคิดวิเคราะห์และแก้ปัญหา และสิ่งสำคัญอย่างหนึ่งคือ การนำระบบเทคโนโลยี

สารสนเทศ เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์เข้ามามีส่วนช่วยในเรื่องการเรียนรู้ และเป็นเครื่องมือที่จะช่วยสนับสนุนการเรียนรู้ได้หลายหลายด้าน

ในการออกแบบนวัตกรรมเชิงประดิษฐ์ทางวิศวกรรมศาสตร์ ทริซ (TRIZ: Theory of Inventive Problem Solving) เป็นเครื่องมือทางการสอนรูปแบบหนึ่งที่เป็นหลักการในการคิดค้น และออกแบบประดิษฐ์กรรมสำหรับแก้ปัญหาต่าง ๆ ที่พบในทางอุตสาหกรรม ที่สามารถเรียกได้ว่าเป็นการแก้ปัญหาแบบเชิงประดิษฐ์คิดค้น (Inventive problem solving) หลักการทริซ จะช่วยลดระยะเวลาและทรัพยากรที่ใช้ในการพัฒนานวัตกรรม การบูรณาการ หลักการและเทคนิคต่าง ๆ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการนำมาเป็นส่วนเติมเต็มในการพัฒนาจัดการศึกษาทางด้านการออกแบบ ซึ่งผู้เรียนจะได้มีทางเลือกในการใช้เครื่องมือหลักการ ที่หลากหลายในการจัดการกับปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการออกแบบนวัตกรรม และผลิตภัณฑ์ ทริซเป็นหลักการในการคิดค้น และออกแบบประดิษฐ์กรรมสำหรับแก้ปัญหาต่าง ๆ ที่พบในทางอุตสาหกรรม ซึ่งจะมีข้อจำกัดของความขัดแย้งกัน (Contradiction) ของตัวแปรต่าง ๆ กล่าวคือ ของสิ่งหนึ่งนั้น เมื่อเราพยายามที่จะเพิ่มคุณสมบัติหนึ่ง ก็มักมีผลในทางตรงกันข้ามกับอีกคุณสมบัติหนึ่ง ซึ่งประกอบด้วย 39 ตัวแปร และหลักการ 40 ข้อในการแก้ปัญหาเชิงประดิษฐ์คิดค้น เช่น

ตัวอย่างที่ 1 ปัญหาและความขัดแย้ง : เราต้องการต้มน้ำหวานเย็น ๆ โดยใส่น้ำแข็งให้น้ำหวานเย็นขึ้น แต่เมื่อเวลาผ่านไปน้ำแข็งจะละลายทำให้น้ำหวาน เสียความหวานไป หลักการ 40 ข้อในการแก้ปัญหาเชิงประดิษฐ์คิดค้นที่ใช้ [7]

Principles ที่ใช้	แนวทางในการปฏิบัติ
33. ความเป็นเนื้อเดียวกัน	ใช้น้ำแข็งที่ทำจากน้ำหวาน
35. การเปลี่ยนคุณสมบัติ	
39. การใช้สภาพแวดล้อมเจือย	ทำภาชนะให้เย็น รักษาอุณหภูมิ น้ำหวานไว้
40. วัสดุผสม	ภาชนะเป็นสุญญากาศตรงกลาง ทำให้ความร้อนจากน้ำหวานถูกถ่ายเทได้ช้าลง

รูปที่ 1 ตัวอย่างการใช้หลักการแก้ปัญหาด้วย 40 Inventive Principles

2. สมมติฐานการวิจัย

ผู้เรียนวิศวกรรมศาสตร์ที่เรียนด้วยรูปแบบการเรียนรู้แบบผสมผสานด้วยการคิดเชิงออกแบบร่วมกับหลักการสอนแบบทริช เพื่อส่งเสริมการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมของนิสิต นักศึกษาวิศวกรรมศาสตร์ระดับปริญญาบัณฑิต มีผลคะแนนหลังเรียนสูงกว่าก่อนเรียนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

3. วัตถุประสงค์

การวิจัยครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อ

3.1 เพื่อสร้างรูปแบบการเรียนรู้แบบผสมผสานด้วยการคิดเชิงออกแบบร่วมกับหลักการสอนแบบทริช ส่งเสริมการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมของนิสิตนักศึกษาวิศวกรรมศาสตร์ระดับปริญญาบัณฑิต

3.2 เพื่อศึกษาผลการใช้รูปแบบการเรียนรู้แบบผสมผสานการคิดเชิงออกแบบร่วมกับหลักการสอนแบบทริช เพื่อส่งเสริมการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมของนิสิตนักศึกษาวิศวกรรมศาสตร์ระดับปริญญาบัณฑิต ในการสร้างชิ้นงานนวัตกรรม

4. วิธีการทดลอง

4.1 การดำเนินการวิจัยแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนซึ่งรายละเอียดการดำเนินการวิจัยของแต่ละขั้นตอน มีดังต่อไปนี้

4.1.1 ขั้นตอนที่ 1 การศึกษาเอกสาร ทฤษฎี หลักการ แนวคิด และวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องตามแนวคิดการพัฒนา รูปแบบการเรียนรู้แบบผสมผสานด้วยการคิดเชิงออกแบบ ร่วมกับหลักการสอนแบบทริช เพื่อส่งเสริมการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมของนิสิต นักศึกษาวิศวกรรมศาสตร์ระดับปริญญาบัณฑิต ขั้นตอนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับรูปแบบการจัดการเรียนการสอน และเทคนิควิธีการ ซึ่งจะนำมาใช้เป็นแนวทางในการออกแบบกิจกรรมการเรียนการสอน พิจารณาแบบแผนและความสัมพันธ์ขององค์ประกอบต่างๆ ด้วยการคิดเชิงออกแบบ มุ่งเน้นผลลัพธ์การเรียนรู้ ในด้านการแก้ปัญหาเชิงประดิษฐ์คิดค้นทางวิศวกรรม โดยอาศัยแนวคิดการคิดเชิงออกแบบและ ประยุกต์ใช้ในการด้านการออกแบบเชิงผลิตภัณฑ์ชิ้นส่วนทางวิศวกรรม ซึ่งมีขั้นตอนของกระบวนการแก้ปัญหาเป็นขั้นตอนการทำงานสำคัญในกระบวนการออกแบบนวัตกรรมเชิงประดิษฐ์ เพื่อตรวจสอบแนวคิดการแก้ปัญหาการปฏิบัติงาน (Making the item) ด้วยการสร้างชิ้นงานเพื่อนำไปแก้ปัญหา การประเมินผล (Evaluating it) ดำเนินการแก้ปัญหาด้วยหลักการ เทคนิค ในการสร้างชิ้นงานและประเมินว่าสามารถแก้ปัญหาได้หรือไม่ และการนำเสนอผล (Presenting the results) ทั้งนี้การทำงานสามารถย้อนกลับเพื่อปรับปรุงแก้ไขได้ตลอดจนกระทั่งได้แนวทางที่เหมาะสมที่สุด (Optimum) โดยการสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญจำนวน 3 ท่าน เพื่อประเมินแผนการจัดกิจกรรมการเรียนรู้

1) การศึกษาเอกสารด้านองค์ประกอบและขั้นตอนรูปแบบการเรียนรู้แบบผสมผสานด้วยการคิดเชิงออกแบบ ร่วมกับหลักการสอนแบบทริช เพื่อส่งเสริมการแก้ปัญหาทางวิศวกรรม ของนิสิตนักศึกษาวิศวกรรมศาสตร์ระดับปริญญาบัณฑิต ประกอบด้วย 5 องค์ประกอบ ได้แก่

1. การเรียนการสอนแบบเผชิญหน้า (Face to Face) เป็นการจัดการเรียนการสอนที่ผู้สอนกับผู้เรียนอยู่ในสถานที่เดียวกัน เวลาเดียวกัน ซึ่งแจ้งจุดประสงค์แนวทางของการจัดกิจกรรมการเรียน เน้นให้ผู้เรียนลงมือปฏิบัติจริง มีการนำอุปกรณ์เครื่องมือทางเทคโนโลยีเข้ามาผสมผสานกับกระบวนการเรียนการสอน การใช้โปรแกรมในการสอนที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการจัดกิจกรรมการเรียนรู้ เพื่อให้บรรลุเป้าหมายของการจัดกิจกรรมการเรียนรู้

2. การเรียนด้วยตนเองบนเว็บ (Self-paced e-learning) การเรียนด้วยตนเองบนเว็บ (Self-paced e-learning) หมายถึง กิจกรรมที่ผู้เรียนประสบผลสำเร็จด้วยตนเอง แทนการสอนแบบเผชิญหน้าในชั้นเรียน กระตุ้นการเรียนรู้ให้เกิดขึ้นภายในตัวบุคคล การตอบสนองบทเรียน ถ้าย่อยการเรียนรู้ต่อเนื่องจากการเรียนแบบเผชิญหน้าในชั้นเรียนปกติ โดยที่ผู้เรียนใช้เทคโนโลยีผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตเป็นเครื่องมือสำคัญในการเรียนรู้ สามารถเลือกเนื้อหาจากสื่อการเรียน และเวลาเรียนตามที่ตนเองสะดวก โดยผู้สอนมีหน้าที่ในการออกแบบการเรียนรู้จัดเตรียมสื่อกิจกรรมการเรียนการสอน เพื่อให้ผู้เรียนเข้าถึงข้อมูลได้อย่างสะดวก รวดเร็ว พร้อมทั้งให้คำแนะนำและข้อมูลป้อนกลับ การถาม-ตอบ ระหว่างที่ผู้เรียนศึกษาเนื้อหาหรือทำกิจกรรมอยู่ในเว็บ

3. การติดต่อสื่อสาร (Communication) หมายถึง เครื่องมือที่ใช้เป็นการติดต่อสื่อสารกันระหว่างผู้สอนกับผู้เรียนผ่านระบบจัดการเรียนรู้ แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ 1) เครื่องมือแบบประสานเวลา (Synchronous) เป็นการติดต่อที่ผู้เรียนสามารถสื่อสารโต้ตอบกับผู้สอนได้ทันที ณ เวลานั้น ถึงแม้จะอยู่กันคนละสถานที่ก็ตาม โดยผ่าน Chat Room หรือ VDO call 2) การติดต่อแบบไม่ประสานเวลา (Asynchronous) เป็นการ

สื่อสารที่ผู้เรียน และผู้สอนไม่ได้ออนไลน์ในเวลาเดียวกัน แต่สามารถสื่อสารผ่านทาง อีเมล (E-mail), กระดานข่าว (Web board) หรือปัจจุบันที่ติดต่อผ่านทาง Web blog ซึ่งสามารถติดต่อและบันทึกเนื้อหา ความรู้ได้ภายในเว็บเดียว เช่น โปรแกรม Blogger, WordPress เป็นต้น

4. ระบบจัดการเรียนรู้ (Learning Management System) ระบบจัดการเรียนรู้ เป็นระบบที่ใช้บริหารจัดการการเรียนรู้ที่อำนวยความสะดวกในการจัดกิจกรรมการเรียนการสอนด้านเนื้อหา จัดการรายวิชานำเข้าข้อมูลบทเรียน เป็นเครื่องมือสื่อสารปฏิสัมพันธ์ระหว่างผู้สอนกับผู้เรียน ได้ตอบและแสดงความคิดเห็นร่วมกัน

5. หลักการสอนแบบทฤษฎีการแก้ปัญหาเชิงประดิษฐ์คิดค้น เครื่องมือหลักการในการแก้ปัญหาเชิงประดิษฐ์คิดค้น มุ่งเน้นการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมศาสตร์ เพื่อให้เกิดกระบวนการและความหลากหลายในการค้นพบแนวทางวิธีการแก้ปัญหาทางวิศวกรรม

2) ขั้นตอนในการจัดกิจกรรมการเรียนรู้แบบผสมผสาน ประกอบด้วย 5 ขั้นตอน ได้แก่

1. ขั้นการเตรียมสมองการเตรียมความพร้อม (Sense & Sensibility) กิจกรรมในชั้นเรียนเพื่อเตรียมความพร้อมของผู้เรียน ผู้สอนชี้แจงจุดประสงค์ รูปแบบการเรียน และการเรียนแบบออนไลน์ ขั้นตอนการเข้าใช้งานเพื่อศึกษาเนื้อหาที่ผู้สอนเตรียมไว้ให้

2. ขั้นการทำความเข้าใจกลุ่มเป้าหมาย บริบทของผู้ใช้ วิเคราะห์ข้อมูลเชิงลึกและกำหนดความต้องการ (Empathy) การเรียนแบบเผชิญหน้า ผู้สอนใช้กรณีศึกษา (Case) การยกตัวอย่างสถานการณ์ และการเรียนแบบออนไลน์การเรียนรู้ด้วยตนเองบนเว็บศึกษาข้อมูลเพิ่มเติมด้านเนื้อหาการจัดการเรียนการสอนบนเว็บ

3. ขั้นการสร้างไอเดีย

พัฒนาแนวความคิด และเลือกแนวคิดในการออกแบบ (Ideation) ผู้สอนจัดกิจกรรมในชั้นเรียนกำหนดโจทย์ในการสร้างสรรค์ชิ้นงานนวัตกรรม ให้ครอบคลุมวิธีการคิดเชิงออกแบบ และให้ผู้เรียนเลือกใช้หลักการทริชเพื่อแก้ปัญหาจากโจทย์สถานการณ์ที่กำหนดขึ้น และเขียนกระดานสะท้อนคิดหลังสิ้นสุดกิจกรรมการเรียนรู้ การสอน

4. ขั้นสร้างต้นแบบ รับฟัง

คำติชมจากผู้ใช้งาน ปรับปรุง (Prototype) ผู้เรียนการสร้างงานต้นแบบการเลือกใช้เครื่องมือในการสร้าง โดยใช้โปรแกรม Inventor ในการออกแบบ การสร้างชิ้นส่วนอุปกรณ์ (Design menu, Modify menu, Feature menu) เป็นกิจกรรมการเรียนรู้แบบเผชิญหน้า โดยผู้สอนสาธิตแนะนำวิธีการปฏิบัติ และให้ผู้เรียนทดลองด้วยตนเองในการใช้เครื่องมือคำสั่งโปรแกรม และการเรียนแบบออนไลน์ในการเลือกใช้หลักการทริช เมื่อสิ้นสุดกิจกรรมการเรียนรู้ให้ผู้เรียนเขียนสะท้อนคิดสิ่งที่ได้จากกิจกรรมการเรียนรู้

5. ขั้นนำมาทดสอบและใช้

งานจริง (Test) ผู้เรียนนำเสนอชิ้นงานที่ได้จากการออกแบบและสร้างชิ้นงานในห้องเรียน อภิปรายผลร่วมกัน และแสดงความคิดเห็นผ่านกระดานสะท้อนคิดในการเรียนแบบออนไลน์



รูปที่ 2 องค์ประกอบและขั้นตอนรูปแบบการเรียนรู้แบบผสมผสาน

สัญลักษณ์องค์ประกอบของรูปแบบองค์ประกอบและขั้นตอนรูปแบบการเรียนรู้แบบผสมผสาน

-  หมายถึง การเรียนแบบเผชิญหน้า
-  หมายถึง การเรียนแบบออนไลน์
-  หมายถึง การติดต่อสื่อสาร
-  หมายถึง ระบบจัดการเรียนรู้

4.1.2 ขั้นตอนที่ 2 การสร้างรูปแบบการเรียนรู้แบบผสมผสานด้วยการคิดเชิงออกแบบ ร่วมกับการสอนแบบทริช เพื่อส่งเสริมการแก้ปัญหาทางวิศวกรรม ของนิสิตนักศึกษาวิศวกรรมศาสตร์ระดับปริญญาบัณฑิต นำข้อมูลที่ได้จากการสัมภาษณ์มาวิเคราะห์และสังเคราะห์ร่วมกับข้อมูลทางเอกสาร ซึ่งผลการวิเคราะห์และสังเคราะห์ข้อมูลในขั้นที่ 1 ดังกล่าวมาสร้างเป็นรูปแบบการสอนโดยมีจุดมุ่งหมายหลัก เพื่อส่งเสริมการแก้ปัญหาทางวิศวกรรม ของนิสิตนักศึกษาวิศวกรรมศาสตร์ระดับปริญญาบัณฑิต

การสร้างรูปแบบการเรียนรู้แบบผสมผสานด้วยการคิดเชิงออกแบบ ร่วมกับการสอนแบบทริช ฯ นำร่างรูปแบบการเรียนรู้แบบผสมผสานด้วยการคิดเชิงออกแบบ

ร่วมกับหลักการสอนแบบทริช ไปให้ผู้ทรงคุณวุฒิตรวจสอบจำนวน 5 ท่าน ที่มีความเชี่ยวชาญด้านการคิดเชิงออกแบบ หลักการสอนแบบทริช และการแก้ปัญหาทางวิศวกรรม วิเคราะห์ข้อมูลแบบเชิงคุณภาพ ผู้เชี่ยวชาญยอมรับว่ารูปแบบการสอนที่จัดทำขึ้นมีความเหมาะสมสามารถนำไปใช้ได้

4.1.3 ขั้นตอนที่ 3 การวัดผลการใช้รูปแบบการเรียนรู้แบบผสมผสานด้วยการคิดเชิงออกแบบ ร่วมกับหลักการสอนแบบทริช เพื่อส่งเสริมการแก้ปัญหาทางวิศวกรรม ของนิสิต นักศึกษาวิศวกรรมศาสตร์ระดับปริญญาบัณฑิต โดยใช้เครื่องมือที่ใช้ในการวัดผลในงานวิจัยดังต่อไปนี้

1) แบบวัดความสามารถในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรม นำแบบวัดความสามารถในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรม เป็นแบบ (Rating Scale) 5 ระดับ โดยการเก็บข้อมูล 2 ระยะ ได้แก่ ก่อนเรียนและหลังเรียน กำหนดข้อคำถามแบบปลายปิด (Close Ended Question) กำหนดข้อคำถาม 6 ด้าน ประกอบด้วย 1. ด้านการรับรู้ปัญหา 2. ด้านการวิเคราะห์ปัญหา 3. ด้านการค้นหาทางเลือกที่เหมาะสมในการแก้ปัญหา 4. ด้านการเลือกเครื่องมือหลักในการแก้ปัญหา 5. ด้านการสร้างผลิตภัณฑ์ 6. ด้านประเมินวิธีการแก้ปัญหา

2) แบบประเมินผลงานนวัตกรรม การประเมินแบบประเมินผลงานนวัตกรรมตามแบบประเมินดัชนีความสอดคล้อง มีมาตราส่วนเป็นแบบประมาณค่า 3 ระดับ ผู้วิจัยได้กำหนดแนวทางการให้คะแนนแบบปรนัย โดยใช้มาตราวัดความสำเร็จของงานแบบรูป ริกส์ (Rubric scale) ซึ่งมีการกำหนดรายละเอียดการให้คะแนนการประเมินผลงานนวัตกรรมในแต่ละด้าน ประกอบด้วย 1. ด้านโครงสร้างของนวัตกรรม 2. ด้านวัตถุประสงค์การใช้งาน และ 3. ด้านคุณค่าโดยสรุป เกณฑ์การประเมินคุณภาพผลงานที่เป็นนวัตกรรมโดย

ภาพรวม พิจารณาจากคะแนนรวมทุกตัวบ่งชี้ดังนี้

คะแนนเฉลี่ย 103 – 123 คะแนน = ดีเยี่ยม

คะแนนเฉลี่ย 82 – 102 คะแนน = ดี

คะแนนเฉลี่ย 61 – 81 คะแนน = พอใช้

คะแนนเฉลี่ย 40 – 60 คะแนน = ควรปรับปรุง

3) แบบสังเกตพฤติกรรมการเรียนรู้แบบผสมผสานด้วยการคิดเชิงออกแบบ ร่วมกับหลักการสอนแบบทริช เพื่อส่งเสริมการแก้ปัญหาทางวิศวกรรม โดยสังเกตการปฏิบัติของผู้เรียนในแต่ละขั้นตอนตามแผนกำกับกิจกรรมการจัดการเรียนการสอน ในแต่ละด้านของผู้เรียนได้แก่ 1. ด้านการรับรู้ปัญหา 2. ด้านการวิเคราะห์ปัญหา 3. ด้านการค้นหาทางเลือกที่เหมาะสมในการแก้ปัญหา 4. ด้านการเลือกเครื่องมือหลักในการแก้ปัญหา 5. ด้านการสร้างผลิตภัณฑ์ 6. ด้านประเมินวิธีการแก้ปัญหา โดยใบแบบประเมินค่า (Rating scale) 5 ระดับ การวิเคราะห์ข้อมูลค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

4) แบบสอบถามความคิดเห็นของผู้เรียนที่มีต่อรูปแบบการเรียนรู้แบบผสมผสานด้วยการคิดเชิงออกแบบ ร่วมกับหลักการสอนแบบทริช เพื่อส่งเสริมการแก้ปัญหาทางวิศวกรรม ผู้วิจัยได้ดำเนินการสร้างแบบสอบถามความคิดเห็น และนำแบบสอบถามความคิดเห็นไปให้ผู้เรียนตอบ เป็นแบบประเมินค่า 5 ระดับ โดยมีข้อคำถามทั้งหมด 4 ด้าน ได้แก่ 1. ด้านเนื้อหา 2. ขั้นตอนการจัดกิจกรรมการเรียนรู้ 3. ด้านการจัดกิจกรรมการเรียนรู้แบบผสมผสาน และ 4. ด้านโครงสร้างการออกแบบบทเรียนบนเว็บไซต์ แล้วแปลความหมายของแบบสอบถามความคิดเห็น โดยใช้คะแนนเฉลี่ยที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลเป็นแบบประเมินค่า 5 ระดับ แปลผลข้อมูลกำหนดดังนี้ [8]

คะแนนเฉลี่ย 4.50 – 5.00 คะแนน = เห็นด้วยในระดับมากที่สุด

คะแนนเฉลี่ย 3.50 – 4.49 คะแนน = เห็นด้วยในระดับมาก
 คะแนนเฉลี่ย 2.50 – 3.49 คะแนน = เห็นด้วยในระดับปานกลาง
 คะแนนเฉลี่ย 1.50 – 2.49 คะแนน = เห็นด้วยในระดับน้อย
 คะแนนเฉลี่ย 1.00 – 1.49 คะแนน = เห็นด้วยในระดับน้อยที่สุด

5. สรุปผลการทดลอง

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลก่อนเรียน และหลังเรียน ตามรูปแบบการเรียนรู้แบบผสมผสาน ฯ ประกอบไปด้วย 1) ด้านการรับรู้ปัญหา 2) ด้านการวิเคราะห์ปัญหา 3) ด้านการค้นหาทางเลือกที่เหมาะสมในการแก้ปัญหา 4) ด้านการเลือกเครื่องมือ หลักในการแก้ปัญหา 5) ด้านการสร้างผลิตภัณฑ์ 6) ด้านประเมินวิธีการแก้ปัญหา

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลก่อนเรียน และหลังเรียน ตามรูปแบบการเรียนรู้แบบผสมผสาน ความสามารถในการแก้ไขปัญหาทางวิศวกรรมศาสตร์

รายการประเมิน	ผลการวิเคราะห์ข้อมูล			
	$\bar{x}$	SD	แปลผล	ลำดับที่
1.ด้านการรับรู้ปัญหา	4.01	0.65	มาก	1
2.ด้านการวิเคราะห์ปัญหา	3.97	0.70	มาก	2
3.ด้านการค้นหาทางเลือกที่เหมาะสมในการแก้ปัญหา	3.91	0.73	มาก	4
4.ด้านการเลือกเครื่องมือ หลักในการแก้ปัญหา	3.84	0.69	มาก	6
5.ด้านการสร้างผลิตภัณฑ์	3.85	0.67	มาก	5
6.ด้านประเมินวิธีการแก้ปัญหา	3.95	0.72	มาก	3
ค่าเฉลี่ยรวม	3.92	0.69	มาก	

จากตารางที่ 1 พบว่าแบบวัดความสามารถในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมก่อนเรียน 1) ด้านการรับรู้ปัญหาของผู้เรียน ($\bar{x}$ = 4.01) ค่าเฉลี่ยรวม 0.65 แปลความในระดับมาก 2) ด้านการวิเคราะห์ปัญหา ($\bar{x}$ = 3.79) ค่าเฉลี่ยรวม 0.70 แปลความในระดับมาก 3) ด้านการค้นหาทางเลือกที่เหมาะสมในการแก้ปัญหา ($\bar{x}$ = 3.91) ค่าเฉลี่ยรวม 0.73 แปลความในระดับมาก 4) ด้านการเลือกเครื่องมือหลักในการแก้ปัญหา ($\bar{x}$ = 3.84) ค่าเฉลี่ยรวม 0.69 แปลความในระดับมาก 5) ด้านการสร้างผลิตภัณฑ์ ($\bar{x}$ = 3.85) ค่าเฉลี่ยรวม 0.67 แปลความในระดับมาก 6) ด้านประเมินวิธีการแก้ปัญหา ($\bar{x}$ = 3.95) ค่าเฉลี่ยรวม 0.72 แปลความในระดับมาก โดยภาพรวมมีค่าเฉลี่ย ($\bar{x}$ = 3.92) ค่าเฉลี่ยรวม 0.69 แปลความในระดับมาก

ตารางที่ 2 ผลแบบวัดความสามารถในการแก้ไขปัญหาทางวิศวกรรมระหว่างก่อนเรียนและหลังเรียน

การทดสอบ	N	$\bar{x}$	S.D.	t	Sig.
ก่อนเรียน	35	133.29	14.15	-8.575	.000
หลังเรียน	35	148.00	11.18		

จากตารางที่ 2 พบว่าค่าคะแนนความสามารถในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมก่อนเรียนมีค่าเฉลี่ยคะแนนเท่ากับ 133.29 หลังเรียน มีค่าเฉลี่ยคะแนนเท่ากับ 148.00 ดังนั้นการทดสอบสถิติพบว่า ค่าเฉลี่ยคะแนนของผู้เรียนหลังเรียน สูงกว่าก่อนเรียนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

ตารางที่ 3 ผลแบบสอบถามความคิดเห็นที่มีต่อรูปแบบการเรียนรู้แบบผสมผสานฯ

รายการประเมิน	ผลการวิเคราะห์			
	$\bar{x}$	S.D	แปลความ	ลำดับที่
1. ด้านเนื้อหา	3.91	0.94	มาก	4
2. ขั้นตอนการจัดกิจกรรมการเรียนรู้	4.10	0.81	มาก	2
3. ด้านการจัดกิจกรรมการเรียนรู้แบบผสมผสาน	3.97	0.85	มาก	3
4. ด้านโครงสร้างการออกแบบบทเรียนบนเว็บไซต์	4.11	0.86	มาก	1
ค่าเฉลี่ยรวม	4.02	0.86	มาก	

จากตารางที่ 3 พบว่าผลแบบสอบถามความคิดเห็นของผู้เรียน ที่มีต่อรูปแบบการเรียนรู้แบบผสมผสานด้วยการคิดเชิงออกแบบร่วมกับหลักการสอนแบบทริช การวิเคราะห์ข้อมูล ด้วยการหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน แบบสอบถามความคิดเห็นของผู้เรียนที่มีต่อรูปแบบการเรียนรู้แบบผสมผสานฯ ประกอบไปด้วย 1) ด้านเนื้อหา 2) ขั้นตอนการจัดกิจกรรมการเรียนรู้ 3) ด้านการจัดกิจกรรมการเรียนรู้แบบผสมผสาน และ 4) ด้านโครงสร้างการออกแบบบทเรียนบนเว็บไซต์ พบว่ามีค่าเฉลี่ยรายด้าน แบ่งเป็น ด้านเนื้อหา ($\bar{x}$ = 3.91) แปลความตามเกณฑ์ประเมิน เห็นด้วยในระดับมากที่สุด ด้านขั้นตอนการจัดกิจกรรมการเรียนรู้ ($\bar{x}$ = 4.10) ด้านการจัดกิจกรรมการเรียนรู้แบบผสมผสาน ($\bar{x}$ = 3.97) ด้านโครงสร้างการออกแบบบทเรียนบนเว็บไซต์ ($\bar{x}$ = 4.11) ค่าเฉลี่ยรวม 4.02 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.86 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับเกณฑ์เป็นแบบประเมินค่า 5 ระดับ คะแนนเฉลี่ย 3.50 – 4.49 คะแนนแปลความ = เห็นด้วยในระดับมาก

ผลการประเมินคุณภาพผลงานนวัตกรรม โดยแบ่งกลุ่มผู้เรียนออกเป็น 7 กลุ่ม มีผลการวิเคราะห์ข้อมูล จากตารางที่ 5 ดังนี้

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลประเมินผลงานนวัตกรรมในภาพรวมทุกด้าน

กลุ่ม	1. ด้านโครงสร้างของ	2. ด้านวัตถุประสงค์การใช้	3. ด้านคุณค่าโดยสรุป	คะแนนรวมทุกด้าน	แปลผล
กลุ่ม 1	43	37	24	104	ดีเยี่ยม
กลุ่ม 2	45	40	24	109	ดีเยี่ยม
กลุ่ม 3	47	41	22	110	ดีเยี่ยม
กลุ่ม 4	31	40	19	90	ดี
กลุ่ม 5	38	37	23	98	ดี
กลุ่ม 6	42	39	22	103	ดีเยี่ยม
กลุ่ม 7	47	44	23	114	ดีเยี่ยม

จากตารางที่ 4 พบว่าผลของการประเมินผลงานนวัตกรรม ซึ่งมีการกำหนดรายละเอียดการให้คะแนนการประเมินผลงานนวัตกรรมในแต่ละด้าน เมื่อพิจารณาเกณฑ์การประเมินคุณภาพผลงานที่เป็นนวัตกรรมโดยภาพรวม พิจารณาจากคะแนนรวมทุกตัวบ่งชี้ ในแต่ละด้าน 1) ด้านความโครงสร้างของนวัตกรรม 2) ด้านวัตถุประสงค์การใช้งาน และ 3) ด้านคุณค่าโดยสรุป จากการวิเคราะห์ข้อมูล เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับเกณฑ์เป็นแบบประเมินค่า 4 แปลความคุณภาพของนวัตกรรมอยู่ในระดับ = ดีเยี่ยม 5 กลุ่ม และอยู่ในระดับ = ดี 2 กลุ่ม

6. อภิปรายผล

ผลการทดลองใช้รูปแบบการเรียนรู้แบบผสมผสานด้วยการคิดเชิงออกแบบร่วมกับหลักการสอนแบบทริช เพื่อส่งเสริมการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมศาสตร์ระดับปริญญาบัณฑิต ผลการทดลองใช้รูปแบบการเรียนรู้แบบ

ผสมผสานด้วยการคิดเชิงออกแบบร่วมกับหลักการสอนแบบทริช เพื่อส่งเสริมการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมศาสตร์ระดับปริญญาบัณฑิต ผู้เรียนมีความสามารถในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมศาสตร์ มีค่าเฉลี่ยคะแนนหลังเรียนสูงกว่าก่อนเรียนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

7. ข้อเสนอแนะ

จากผลสรุปและอภิปรายผลงานวิจัย ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป ดังนี้

1. รูปแบบการเรียนรู้แบบผสมผสานด้วยการคิดเชิงออกแบบร่วมกับหลักการสอนแบบทริช เพื่อส่งเสริมการแก้ปัญหาวิศวกรรมของนิสิตนักศึกษาวิศวกรรมศาสตร์ระดับปริญญาบัณฑิต จะต้องทำความเข้าใจในเนื้อหา รายวิชาการออกแบบและสร้างชิ้นส่วนผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม และการนำหลักการสอนแบบทริชที่นำมาจัดการเรียนการสอนต้องมีความสอดคล้องกัน

2. ในการจัดกิจกรรมการเรียนการสอนตามรูปแบบการเรียนรู้แบบผสมผสานด้วยการคิดเชิงออกแบบร่วมกับหลักการสอนแบบทริชเพื่อส่งเสริมการแก้ปัญหาวิศวกรรมของนิสิตนักศึกษาวิศวกรรมศาสตร์ระดับปริญญาบัณฑิต จะต้องสร้างความเข้าใจให้กลุ่มตัวอย่างที่ผู้วิจัยจะนำรูปแบบไปทดลองใช้ การเตรียมความพร้อมในด้านเทคโนโลยีสารสนเทศทักษะการใช้งาน ในการเรียนแบบออนไลน์

3. ผู้สอนที่จะนำรูปแบบการเรียนรู้แบบผสมผสานด้วยการคิดเชิงออกแบบร่วมกับหลักการสอนแบบทริชเพื่อส่งเสริมการแก้ปัญหาวิศวกรรมของนิสิตนักศึกษาวิศวกรรมศาสตร์ระดับปริญญาบัณฑิตไปใช้ จะต้องมีความสามารถด้านการใช้เทคโนโลยีสารสนเทศต้องสามารถให้การช่วยเหลือ แนะนำ ตลอดการจัดกิจกรรมการเรียนรู้ ตามขั้นตอนของรูปแบบการเรียนรู้ดังกล่าว

4. ตรวจสอบความพร้อมด้านระบบอินเทอร์เน็ต การเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์ เครื่องมือที่ใช้ในการสื่อสาร ให้มีความเหมาะสมในการจัดกิจกรรมการเรียนรู้ ทั้งในห้องเรียนปกติและห้องเรียนออนไลน์

8. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] Office of the Education Council. Education-Development-Plan 2018-2028. 2018.
- [2] Office of the National Economics and Social Development Council. The Twelfth National Economic and Social Development Plan 2018. 2018;12:224.
- [3] Thorne, Steven L.J. Artifacts and cultures-of-use in intercultural communication. Language Learning Technology. 2003;7(2):38-67.
- [4] J. A. Teaching Principle. Bangkok: O.S Printing House; 2012.
- [5] C. S. Educational technology: principle theories tp practices. KhonKaen: Klungnana Vitthaya Press; 2008.
- [6] Brown T. Design thinking. Harvard Business review. 2008;(2):84-95.
- [7] Jaran S. TRIZ 40 Inventive Principles. Quality Production. 2008;033.
- [8] Prakong K. Statistics for research in Behavioral Sciences.3, editor. Bangkok: Chulalongkorn University ; 1999.

**การพิจารณาค่าเฉลี่ยเป้าหมาย
สำหรับการผลิตปริมาณมากจากข้อกำหนด
สำหรับการแจกแจงสามัญในวิศวกรรมโยธา**

ก้อง กมลเลิศรา^{1*} และวินัย อวยพรประเสริฐ²
kong@asiagroup1999.com^{1*}, owinai@yahoo.com²

^{1*, 2} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต

Received	: 12-Nov-2018
Revised	: 25-Feb-2019
Accepted	: 11-Mar-2019

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเสนอกลวิธีพิจารณาค่าเฉลี่ยเป้าหมาย สำหรับการผลิตจากข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์ ให้เหมาะสมกับข้อมูลทางสถิติที่มีอยู่ในโรงงาน การพิจารณาค่าเฉลี่ย ขึ้นกับข้อกำหนด ค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน และโอกาสที่ค่าตัวแปรจะไม่ต่ำกว่าข้อกำหนด ฟังก์ชันการแจกแจง และพารามิเตอร์รูปร่าง รวมถึงขั้นตอนการคำนวณได้ถูกสรุปไว้การแจกแจงต่าง ๆ ที่ใช้งานอย่างสามัญในวิศวกรรมโยธามี 11 ชนิด ผู้เขียนยังได้พัฒนาโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ MeanProd สำหรับคำนวณและสรุปรายการค่าเฉลี่ยสำหรับการแจกแจงดังกล่าว รวมถึงได้แสดงตัวอย่างการพิจารณาค่าเฉลี่ยกำลังอัดคอนกรีตที่เหมาะสมอีกด้วย

คำสำคัญ: ค่าเฉลี่ยกับข้อกำหนด การทดสอบภาวะเข้าสู่สภาวะ การแจกแจงแบบต่อเนื่อง การแจกแจงไม่ปกติ การผลิตปริมาณมาก

Determination of the Target Mean Values for Mass Production from the Specifications for Common Distributions in Civil Engineering

Kong Kamollertvara^{1*} and Winai Ouypornprasert²
kong@asiagroup1999.com^{1*}, owinai@yahoo.com²

^{1*, 2} Department of Civil Engineering, College of Engineering, Rangsit University

Received	: 12-Nov-2018
Revised	: 25-Feb-2019
Accepted	: 11-Mar-2019

Abstract

The objective of this technical paper was to propose an approach to determine the target mean values for mass production from the specified values suitable to statistical data available in the factory. The determination of the mean values was based on the specified values, the coefficient of variation and the chance that the values of the variable would be less than the specifications. Distribution functions and the corresponding shape parameters as well as calculation procedures were summarized for 11 functions commonly used in civil engineering. The author also developed a computer program MeanProd for calculating and summarizing mean values for all these distributions as well as showing an example to determine suitable mean values of the compressive strength of concrete.

Keywords: Mean Value and Specification, Goodness-of-Fit Test, Continuous Distribution, Non-normal Distribution, Mass Production.

1. บทนำ

สำหรับ การผลิตสินค้าปริมาณมากจากโรงงาน ให้มีคุณสมบัติตามข้อกำหนด ค่าคุณสมบัติเฉลี่ยที่สูงเกินไป ทำให้ต้นทุนการผลิตสูงเกินควร ในทางตรงกันข้ามค่าที่ต่ำเกินไป ก็เสี่ยงต่อการไม่ผ่านเกณฑ์ขั้นต่ำที่กำหนด จากการศึกษาในอดีตพบว่า การควบคุมการผลิตที่ไม่ได้คุณภาพ จะส่งผลให้คุณสมบัติมีความแปรปรวนสูง ทำให้จำเป็นต้องเพิ่มค่าเฉลี่ยคุณสมบัติให้สูงขึ้น ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูงเกินความจำเป็น ยิ่งไปกว่านั้น คุณสมบัติทางวิศวกรรม ยังมีแนวโน้มการแจกแจงเป็นแบบไม่ปกติ (non-normal distributions) [1 -2] ดังเช่น การแจกแจงลอกปกติ การแจกแจงแกมมา การแจกแจงไวบูลล์ และการแจกแจงบีตา เป็นต้น ดังนั้น การทำนายค่าเฉลี่ย สำหรับการแจกแจงแบบไม่ปกติ เพื่อการผลิตปริมาณมาก จึงเป็นสิ่งที่ท้าทายมาก เนื่องจากการควบคุมความแปรปรวนของคุณสมบัติทางวิศวกรรม ขึ้นกับเทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิต การทำนายในบทความนี้จะตั้งอยู่บนสมมติฐานว่า การแปรผันของคุณสมบัติทางวิศวกรรมเป็นปัจจัยคงตัว ขึ้นกับความสามารถในการควบคุมคุณภาพการผลิต

เนื้อหาในบทความนี้ ในบทที่ 2 จะเริ่มจากการทำนายค่าคาดหวัง ของคุณสมบัติทางวิศวกรรม สำหรับการแจกแจงปกติ หลังจากนั้น จะขยายผลให้สามารถใช้ได้ทั่วไปกับการแจกแจงไม่ปกติ ในบทที่ 3 จะแสดงตัวอย่างการทำนายค่าเฉลี่ยคอนกรีตสำหรับโรงงานผลิตคอนกรีตอัดแรง และการลดต้นทุนการผลิตโดยการควบคุมคุณภาพ ท้ายที่สุดบทสรุปและข้อเสนอแนะในบทที่ 4

2. การกำหนดค่าคาดหวังและเกณฑ์ขั้นต่ำของผลิตภัณฑ์

2.1. การแจกแจงปกติ

ตามปกติ ผู้ผลิตจำเป็นต้องกำหนดให้คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์มีค่าคาดหวัง สูงกว่าเกณฑ์ขั้นต่ำ (ข้อกำหนด) ของผลิตภัณฑ์ ทั้งนี้ มักกำหนดให้ผลิตภัณฑ์มีโอกาสไม่ผ่านเกณฑ์ขั้นต่ำน้อย ๆ ดังเช่น ไม่เกินร้อยละห้า สำหรับตัวแปรปกติ X หากกำหนดให้มีการแจกแจงปกติ (normal distribution) โดยมีค่าเฉลี่ย (mean - μ) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation - σ) ฟังก์ชันความหนาแน่นน่าจะเป็น (probability density function - $f_X(x)$) จะอยู่ในรูป

$$f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (1)$$

ฟังก์ชันการแจกแจง (distribution function - $F_X(x)$) จะได้จากการอินทิเกรต ฟังก์ชันความหนาแน่นน่าจะเป็น ดังแสดงข้างล่าง

$$F_X(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx \quad (2)$$

สำหรับตัวแปรปกติมาตรฐาน (standard normal - Z) นิยามจาก

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (3)$$

ฟังก์ชันความหนาแน่นน่าจะเป็น ($\phi(z)$) และฟังก์ชันการแจกแจง ($\Phi(z)$) ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

เป็นหนึ่งใน จะอยู่ในรูปสมการที่ (4) และ (5) ตามลำดับ

$$\varphi(z) = f_z(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}z^2} \quad (4)$$

$$\Phi(z) = F_z(z) = \int_{-\infty}^z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}z^2} dz \quad (5)$$

2.2. การกำหนดค่าเฉลี่ยคาดหวัง สำหรับตัวแปรปกติ

สำหรับการแจกแจงแบบปกติ สำหรับ ตัวแปร X ค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน (coefficient of variation - Ω) กำหนดจาก

$$\Omega = \frac{\sigma}{\mu} \quad (6)$$

ค่า z และ x ที่จะทำให้เกิดไม่ เกิน p สามารถคำนวณจากสมการที่ (7) และ (8) ตามลำดับ

$$z = \Phi^{-1}(p) \quad (7)$$

$$x = \mu + \sigma \cdot \Phi^{-1}(p) \quad (8)$$

เนื่องจาก Ω เป็นผลมาจาก ความสามารถในการควบคุมคุณภาพการผลิต เราจึงอาจนิยามส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจาก สมการที่ (9)

$$\sigma = \Omega \cdot \mu \quad (9)$$

แทนค่า z จากสมการที่ (7) และ σ จากสมการที่ (9) ลงในสมการที่ (8) จะได้

$$x = \mu + \Omega \cdot \mu \cdot \Phi^{-1}(p)$$

หากกำหนดให้ x_{spec} เป็นเกณฑ์ขั้นต่ำ จากการจัดรูปใหม่จะได้

$$\mu = \frac{x_{spec}}{1 + \Omega \cdot \Phi^{-1}(p)} \quad (10)$$

ค่า $z = \Phi^{-1}(p)$ สำหรับ p ในช่วง 0.01 – 0.10 ดังสรุปในตารางที่ 1

เอกสาร ACI 214-57 ได้แนะนำให้ใช้ สมการในรูปแบบที่คล้ายคลึงกับสมการที่ (10) ตั้งแต่ ปี ค.ศ. 1957 สำหรับการทดสอบ คอนกรีตภาคสนาม เพื่อให้สามารถครอบคลุม พิสัยกำลังอัดคอนกรีต ได้อย่างกว้างขวาง [3] อย่างไรก็ตาม ในเอกสารอ้างอิงทางคอนกรีต เทคโนโลยี ดังเช่น [4-5] ได้แนะนำค่าเฉลี่ย สำหรับการออกแบบปฏิภาคส่วนผสมคอนกรีต ในรูปส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ดังสมการข้างล่าง

$$\mu = x_{spec} + k \cdot \sigma$$

เมื่อ k เป็นค่าคุณลักษณะ (Characteristic value) สำหรับ p เป็น 0.05 และ 0.01 ค่า คุณลักษณะจะเป็น 1.645 (เอกสารบางแหล่งใช้ 1.64 [4] บางแหล่งใช้ 1.65 [5]) และ 2.326 ตามลำดับ (ในเอกสารอ้างอิงใช้ 2.33)

ตารางที่ 1 ค่าคะแนนมาตรฐานสำหรับโอกาสต่ำกว่าค่ากำหนดต่าง ๆ กัน

$p(\%)$	$z = \Phi^{-1}(p)$
1	-2.326
2	-2.054
3	-1.881
4	-1.751
5	-1.645
6	-1.555
7	-1.476
8	-1.405
9	-1.341
10	-1.282

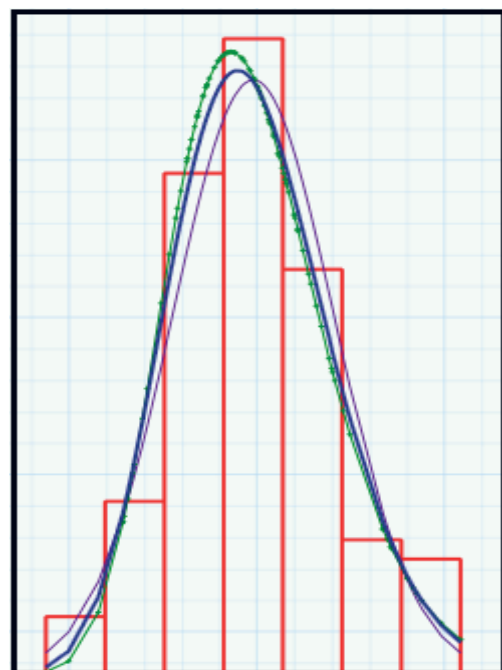
2.3. การกำหนดค่าเฉลี่ยคาดหวังสำหรับตัวแปรไม่ปกติ

2.3.1 ทัวไป

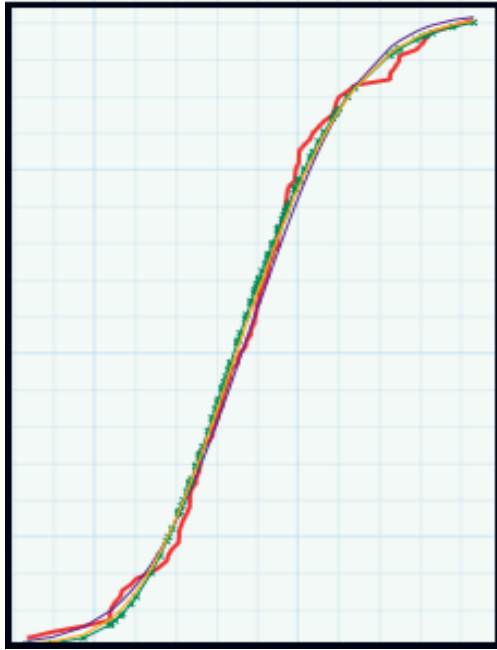
สำหรับงานทางวิศวกรรม มีตัวแปรจำนวนมากที่มีการแจกแจงแบบไม่ปกติ ดังเช่นในรูปที่ 1 และ 2 แสดงรูปแบบการแจกแจงที่กระชับเข้ากับข้อมูลที่จัดเก็บในโรงงานสำหรับกำลังอัดของคอนกรีตอายุ 1 วัน สำหรับฟังก์ชันความหนาแน่นน่าจะเป็น และฟังก์ชันการแจกแจงตามลำดับ รูปแบบการแจกแจงที่เข้ารูปสนิทกับข้อมูล เรียงจากมากไปหาน้อย ได้แก่ การแจกแจงแบบแกมมา การแจกแจงแบบลอการิทึม และการแจกแจงแบบปกติตามลำดับ

สำหรับบทความนี้ จะกล่าวถึงการพิจารณาค่าเฉลี่ยจากข้อกำหนด สำหรับรูปแบบการแจกแจงที่ใช้กันอย่างสามัญในวิศวกรรมโยธา เพิ่มเติมจากการแจกแจงปกติจำนวน 10 รูปแบบ ได้แก่ การแจกแจงแบบสม่ำเสมอ (Uniform Distribution) การแจกแจงแบบเลขชี้กำลังเลื่อน (Shifted Exponential Distribution) การแจกแจงแบบเรย์ลีฟเลื่อน

(Shifted Rayleigh Distribution) การแจกแจงค่าสูงสุดแบบกุ่มเบล (Gumbel-Type I-Largest Distribution) การแจกแจงค่าต่ำสุดแบบกุ่มเบล (Gumbel-Type I-Smallest Distribution) การแจกแจงลอการิทึม (Lognormal Distribution) การแจกแจงแกมมา (Gamma Distribution) การแจกแจงค่าสูงสุดแบบเฟรเชต์ (Fréchet-Type II-Largest Distribution) การแจกแจงค่าต่ำสุดแบบไวบูลล์ (Weibull-Type III-Smallest Distribution) และการแจกแจงบีตา (Beta Distribution) สำหรับรูปแบบการแจกแจง พารามิเตอร์รูปร่าง และความสัมพันธ์กับค่าสถิติพื้นฐาน ผู้เขียนอ้างอิงมาจาก [1] นอกเหนือจากนั้น การวิเคราะห์ สูตร และขั้นตอนการหาค่าเฉลี่ย รวมถึงการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ สำหรับขอบเขตเนื้อหาในบทความนี้ ผู้เขียนเป็นผู้สร้างและพัฒนาขึ้นมาเองทั้งหมด



รูปที่ 1 ฟังก์ชันความหนาแน่นน่าจะเป็นกับฮิสโทแกรม



รูปที่ 2 ฟังก์ชันการแจกแจง
กับความถี่สัมพัทธ์สะสม

2.3.2 การแจกแจงแบบ
สม่ำเสมอ (Uniform Distribution)
ฟังก์ชันความหนาแน่นน่าจะเป็น ดัง
แสดงในสมการที่ (11)

$$f_x(x) = \frac{1}{b-a}; a \leq x \leq b \quad (11)$$

เมื่อ a และ b เป็นค่าขอบเขตล่าง และขอบเขต
บน ตามลำดับ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบน
มาตรฐาน ดังแสดงในสมการที่ (12) และ (13)
ตามลำดับ

$$\mu = \frac{a+b}{2} \quad (12)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{12}(b-a)^2 \quad (13)$$

สำหรับการแจกแจงแบบสม่ำเสมอ

$$p = \frac{x_{spec} - a}{b - a} \quad (14)$$

จากสมการ (14) เราจะได้ความสัมพันธ์
2 สมการ ดังแสดงข้างล่าง

$$a = \frac{x_{spec} - p \cdot b}{1 - p} \quad (15.a)$$

$$b = \frac{x_{spec} - a \cdot (1 - p)}{p} \quad (15.b)$$

เราสามารถเขียนสัมประสิทธิ์การแปร
ผัน จากสมการที่ (12) และ (13) ดังแสดงใน
สมการข้างล่าง

$$\Omega = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{b-a}{a+b} \right)$$

สมการดังกล่าวสามารถเปลี่ยนรูปใหม่
เป็น

$$a = \left(\frac{1 - \sqrt{3} \cdot \Omega}{1 + \sqrt{3} \cdot \Omega} \right) \cdot b$$

เมื่อแทนค่า b จากสมการที่ (15.b) ลง
ในสมการข้างบน เราสามารถหาค่าขอบเขตล่าง
ได้จากสมการที่ (16)

$$a = \frac{c \cdot x_{spec}}{p + c \cdot (1 - p)} \quad (16)$$

$$\text{เมื่อ } c = \left(\frac{1 - \sqrt{3} \cdot \Omega}{1 + \sqrt{3} \cdot \Omega} \right)$$

หลังจากนั้น จะสามารถหาขอบเขตบน และค่าเฉลี่ย ได้จากสมการที่ (15.b) และ (12) ตามลำดับ

2.3.3 การแจกแจงแบบเลขชี้

ก ำ ล ัง เ ล ือ น (Shifted Exponential Distribution)

ฟังก์ชันความหนาแน่นน่าจะเป็น มีรูป ดังแสดงในสมการที่ (17)

$$f_X(x) = \lambda e^{-\lambda(x-a)}; \quad x \geq a \quad (17)$$

เมื่อ a เป็นขอบเขตล่าง (lower limit) และ λ เป็นพารามิเตอร์รูปร่าง (shape parameter) มีความสัมพันธ์กับค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ดังแสดงในสมการที่ (18) และ (19) ตามลำดับ

$$\mu = \frac{1}{\lambda} + a \quad (18)$$

$$\sigma = \frac{1}{\lambda} \quad (19)$$

โดยการอินทิเกรตสมการที่ (17) เราจะได้

$$1 - e^{-(x-a)} = \frac{p}{\lambda} = p \cdot \sigma$$

จัดรูปแบบสมการใหม่ได้

$$a = x_{spec} + \ln(1 - p \cdot \sigma) \quad (20)$$

แทนสมการที่ (19) ลงในสมการที่ (18) และใช้ความสัมพันธ์ $\sigma = \Omega \cdot \mu$ จะได้ และหา a ในรูปของพจน์ที่เหลือจะได้

$$a = \mu \cdot (1 - \Omega) \quad (21)$$

จากสมการที่ (20) และ (21) เราสามารถหาค่าเฉลี่ยได้จากสมการที่ (22)

$$\mu = \frac{x_{spec} + \ln(1 - p)}{1 - \Omega} \quad (22)$$

2.3.4 การแจกแจงเรย์ลีย์

(Rayleigh Distribution)

ฟังก์ชันความหนาแน่นน่าจะเป็นมีรูปดัง สมการที่ (23)

$$f_X(x) = \frac{x-a}{\alpha^2} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{x-a}{\alpha}\right)^2\right); x \geq a \quad (23)$$

เมื่อ a เป็น ขอบเขตล่าง และ α เป็น พารามิเตอร์รูปร่าง มีความสัมพันธ์กับค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ดังแสดงในสมการที่ (24) และ (25) ตามลำดับ

$$\mu = \alpha \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}} + a \quad (24)$$

$$\sigma = \alpha \cdot \sqrt{2 - \frac{\pi}{2}} \quad (25)$$

โดยการอินทิเกรตสมการที่ (23) โดยตรงจะได้

$$1 - e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x_{spec}-a}{\alpha}\right)^2} = p$$

จัดรูปใหม่ได้เป็น

$$a = x_{spec} - \alpha \cdot \sqrt{-2 \ln(1 - p)} \quad (26)$$

เราสามารถหาสัมประสิทธิ์การแปรผัน โดยการหารสมการที่ (25) ด้วยสมการที่ (24)

และแทนค่า α จากสมการที่ (26) ลงไป จะทำให้หาพารามิเตอร์รูปร่าง α ดังแสดงในสมการที่ (27)

$$\alpha = \frac{\Omega \cdot x_{spec}}{2 - 0.5\pi + \Omega \cdot (\sqrt{0.5\pi} - \sqrt{-2\ln(1-p)})} \quad (27)$$

หลังจากนั้นจะหาค่าขอบเขตล่าง และค่าเฉลี่ย โดยใช้สมการที่ (26) และ (24) ตามลำดับ

2.3.5 การแจกแจงค่าสูงสุด ชนิดที่หนึ่งแบบกุ่มเบล (Gumbel - Type I - Largest Distribution)

เมื่อหาของการแจกแจงแม่ (mother distribution) $F_X(x)$ มีลักษณะแบบเลขชี้กำลัง ฟังก์ชันการแจกแจงค่าสูงสุด y จะอยู่ในรูปดังแสดงในสมการที่ (28)

$$F_Y(y) = \exp[-e^{-\alpha(y-u)}]; -\infty < y < \infty \quad (28)$$

เมื่อ u เป็นฐานนิยม (mode) และ α เป็นพารามิเตอร์รูปร่าง มีความสัมพันธ์กับ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานดังแสดงในสมการที่ (29) และ (30) ตามลำดับ

$$\mu = u + \frac{\gamma}{\alpha} \quad (29)$$

$$\sigma = \frac{\pi}{\sqrt{6} \cdot \alpha} \quad (30)$$

เมื่อ γ เป็นค่าคงตัวออยเลอร์มีค่าเท่ากับ 0.5772156 ฟังก์ชันความหนาแน่นน่าจะเป็น อาจหาได้จากการหาอนุพันธ์สมการที่ (28) เทียบกับ y โดยตรง

โดยการแทนค่า โดยตรงในสมการที่ (28) และจัดรูปใหม่จะได้

$$\ln(-\ln(p)) = -\alpha(x_{spec} - u)$$

เขียน α ในรูป σ จากสมการที่ (30) หลังจากนั้นแทนผลที่ได้ ลงในสมการที่ (29) เพื่อหา u ในรูปพจน์ที่เหลือ เมื่อแทน α และ u ลงในสมการข้างบน เราสามารถหาค่าเฉลี่ยได้จากสมการที่ (31)

$$\mu = \frac{-c \cdot x_{spec}}{\ln(-\ln(p)) + \gamma - c} \quad (31)$$

$$\text{เมื่อ } c = \frac{\pi}{\sqrt{6} \cdot \Omega}$$

2.3.6 การแจกแจงค่าต่ำสุด ชนิดที่หนึ่งแบบกุ่มเบล (Gumbel - Type I - Smallest Distribution)

เมื่อหาของการแจกแจงแม่ (mother distribution) $F_X(x)$ มีลักษณะแบบเลขชี้กำลัง ฟังก์ชันการแจกแจงค่าต่ำสุด z จะอยู่ในรูปดังแสดงในสมการที่ (32)

$$F_Z(z) = 1 - \exp[-e^{\alpha(z-u)}]; -\infty < z < \infty \quad (32)$$

เมื่อ u เป็นฐานนิยม (mode) และ α เป็นพารามิเตอร์รูปร่าง มีความสัมพันธ์กับ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานดังแสดงในสมการที่ (33) และ (34) ตามลำดับ

$$\mu = u - \frac{\gamma}{\alpha} \quad (33)$$

$$\sigma = \frac{\pi}{\sqrt{6} \cdot \alpha} \quad (34)$$

ฟังก์ชันความหนาแน่นน่าจะเป็น อาจหาได้จากการหาอนุพันธ์สมการที่ (32) เทียบกับ z โดยตรง

โดยการแทนค่า โดยตรงในสมการที่ (32) และจัดรูปใหม่จะได้

$$\ln(-\ln(1-p)) = \alpha(x_{spec} - u)$$

เขียน α ในรูป σ จากสมการที่ (34) หลังจากนั้นแทนผลที่ได้ ลงในสมการที่ (33) เพื่อหา u ในรูปพจน์ที่เหลือ เมื่อแทน α และ u ลงในสมการข้างบน เราสามารถหาค่าเฉลี่ยได้จากสมการที่ (35)

$$\mu = \frac{c \cdot x_{spec}}{\ln(-\ln(1-p)) + \gamma + c} \quad (35)$$

$$\text{เมื่อ } c = \frac{\pi}{\sqrt{6} \cdot \Omega}$$

2.3.7 การแจกแจงลอกปรกติ

(Log normal Distribution)

ฟังก์ชันความหนาแน่นน่าจะเป็น ดังแสดงในสมการที่ (36)

$$f_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \lambda}{\zeta}\right)^2\right]; x > 0 \quad (36)$$

เมื่อ λ และ ζ เป็นพารามิเตอร์รูปร่าง มีความสัมพันธ์กับค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ดังแสดงในสมการที่ (37) และ (38) ตามลำดับ

$$\mu = \exp\left(\lambda + \frac{1}{2}\zeta^2\right) \quad (37)$$

$$\sigma^2 = \mu_x^2(e^{\zeta^2} - 1) \quad (38)$$

เราสามารถหาพารามิเตอร์รูปร่างทั้งสองได้โดยตรงจากสมการที่ (39) และ (40) ตามลำดับ

$$\zeta = \sqrt{\ln(\Omega^2 + 1)} \quad (39)$$

$$\lambda = \ln \mu_x - \frac{1}{2}\zeta^2 \quad (40)$$

เราสามารถหาค่าเฉลี่ยได้จากสมการที่ (41)

$$\mu = \frac{x_{spec}}{\exp(\zeta \cdot \Phi^{-1}(p))} \quad (41)$$

ค่าคะแนนมาตรฐาน $z = \Phi^{-1}(p)$ สามารถหาได้จากตารางที่ 1

2.3.8 การแจกแจงแกมมา

(Gamma Distribution)

ฟังก์ชันความหนาแน่นน่าจะเป็น มีรูปดังแสดงในสมการที่ (42)

$$f_x(x) = \frac{v(vx)^{k-1} e^{-vx}}{\Gamma(k)}; x \geq 0 \quad (42)$$

เมื่อ v และ k เป็นพารามิเตอร์รูปร่าง ในขณะที่ $\Gamma(\cdot)$ เป็นค่าของฟังก์ชันแกมมา มีรูปดังแสดงในสมการที่ (43)

$$\Gamma(k) = \int_0^\infty x^{k-1} e^{-x} dx; k > 0 \quad (43)$$

พารามิเตอร์รูปร่างทั้งสอง มีความสัมพันธ์กับค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ดังแสดงในสมการที่ (44) และ (45) ตามลำดับ

$$\mu = \frac{k}{v} \quad (44)$$

$$\sigma = \frac{\sqrt{k}}{v} \quad (45)$$

เราสามารถหาค่าพารามิเตอร์รูปร่าง k จากสมการที่ (46)

$$k = \frac{I}{\Omega^2} \quad (46)$$

หลังจากนั้น ให้เราหาค่าพารามิเตอร์รูปร่าง v จากตัวแปรลดรูป vx_{spec} ที่หาได้จาก $F^{-1}(p)$ ก่อน ค่า vx_{spec} สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน (Ω) ในช่วง 0.01 – 0.30 และโอกาสต่ำกว่าค่ากำหนด (p) ในช่วง 0.01 – 0.10 ดังสรุปในตารางที่ 2 หลังจากนั้นจึงสามารถหาค่าเฉลี่ย โดยอาศัยสมการที่ (44) และสมการที่ (46) ได้ผลลัพธ์ดังสมการข้างล่าง

$$\mu = \frac{x_{spec}}{\Omega^2 \cdot vx_{spec}}$$

ตารางที่ 2 ค่าตัวแปรลดรูป vx_{spec} สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน (Ω) และโอกาสต่ำกว่าค่ากำหนด (p) ต่างๆกัน

$\Omega(p\%)$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.01	9768.837	9795.899	9812.788	9825.622	9836.085	9844.997	9852.816	9859.820	9866.192	9872.061
0.02	2395.155	2398.388	2406.810	2413.158	2418.330	2422.738	2426.607	2430.075	2433.232	2436.140
0.03	1035.040	1043.730	1049.269	1053.449	1056.857	1059.764	1062.317	1064.606	1066.691	1068.613
0.04	568.316	574.735	578.833	581.929	584.455	586.611	588.506	590.206	591.755	593.183
0.05	354.948	360.005	363.239	365.684	367.681	369.387	370.887	372.233	373.460	374.593
0.06	240.482	244.630	247.288	249.299	250.944	252.349	253.586	254.696	255.709	256.644
0.07	172.325	175.826	178.071	179.773	181.166	182.357	183.405	184.348	185.207	186.001
0.08	128.649	131.683	133.600	135.070	136.273	137.303	138.211	139.027	139.772	140.460
0.09	99.087	101.724	103.421	104.710	105.767	106.672	107.469	108.187	108.843	109.449
0.10	78.216	80.550	82.055	83.200	84.139	84.944	85.654	86.294	86.878	87.418
0.11	62.976	65.063	66.411	67.438	68.281	69.004	69.643	70.217	70.743	71.229
0.12	51.539	53.420	54.838	55.566	56.329	56.984	57.562	58.084	58.560	59.002
0.13	42.758	44.485	45.572	46.417	47.112	47.710	48.237	48.713	49.149	49.552
0.14	35.886	37.444	38.456	39.230	39.867	40.415	40.899	41.336	41.736	42.107
0.15	30.418	31.847	32.777	33.489	34.076	34.581	35.028	35.431	35.801	36.143
0.16	26.006	27.322	28.181	28.838	29.381	29.849	30.263	30.637	30.979	31.297
0.17	22.401	23.616	24.413	25.023	25.527	25.962	26.347	26.695	27.014	27.310
0.18	19.424	20.553	21.292	21.859	22.329	22.734	23.093	23.418	23.716	23.993
0.19	16.942	17.991	18.680	19.210	19.648	20.027	20.363	20.667	20.947	21.206
0.20	14.853	15.832	16.475	16.971	17.382	17.737	18.053	18.338	18.601	18.844
0.21	13.083	13.998	14.601	15.066	15.451	15.785	16.082	16.350	16.597	16.827
0.22	11.573	12.429	12.995	13.432	13.795	14.109	14.388	14.642	14.875	15.092
0.23	10.275	11.078	11.610	12.022	12.364	12.660	12.924	13.164	13.384	13.589
0.24	9.154	9.909	10.410	10.798	11.121	11.401	11.651	11.878	12.087	12.281
0.25	8.181	8.891	9.364	9.730	10.036	10.301	10.538	10.753	10.951	11.135
0.26	7.332	8.001	8.447	8.794	9.084	9.335	9.560	9.764	9.952	10.127
0.27	6.588	7.219	7.641	7.970	8.244	8.483	8.696	8.890	9.069	9.236
0.28	5.934	6.530	6.929	7.241	7.501	7.728	7.931	8.116	8.286	8.445
0.29	5.356	5.919	6.298	6.593	6.841	7.057	7.250	7.426	7.589	7.740
0.30	4.843	5.377	5.736	6.017	6.252	6.458	6.642	6.810	6.965	7.110

2.3.9 การแจกแจงค่าสูงสุด

ชนิดที่สองแบบเฟรเชต์ (Fréchet - Type II – Largest Distribution)

เมื่อหางของการแจกแจงแม่ $F_X(x)$ มีลักษณะแบบพหุนาม ฟังก์ชันการแจกแจงค่าสูงสุดแบบเฟรเชต์ สำหรับ y จะมีลักษณะดังแสดงในสมการที่ (47)

$$F_Y(y) = \exp \left[- \left(\frac{w}{y} \right)^m \right]; m > 0, w > 0, y > 0 \quad (47)$$

เมื่อ w และ m เป็นพารามิเตอร์รูปร่าง โดย w จะพิจารณาขนาด ในขณะที่ m จะพิจารณารูปร่าง พารามิเตอร์รูปร่างทั้งสองมีความสัมพันธ์กับฟังก์ชันความหนาแน่นน่าจะเป็นอาจได้จากการหาอนุพันธ์สมการที่ (47) เทียบกับ y โดยตรง ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ดังแสดงในสมการที่ (48) และ (49)

$$\mu = w \Gamma \left(1 - \frac{1}{m} \right) \quad (48)$$

$$\left(\frac{\sigma}{\mu - \varepsilon} \right)^2 = \frac{\left\{ \Gamma \left(1 - \frac{2}{m} \right) - \Gamma^2 \left(1 - \frac{1}{m} \right) \right\}}{\Gamma^2 \left(1 - \frac{1}{m} \right)}; m > 2 \quad (49)$$

ให้สังเกตว่า ในกรณีที่ $\varepsilon = 0$ ด้านซ้ายมือของสมการที่ (49) ก็คือ กำลังสองของค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันนั่นเอง ในกรณีเช่นนี้ เราสามารถหาพารามิเตอร์รูปร่าง m จากการแก้สมการไม่เชิงเส้น รายละเอียดดังอภิปรายใน [2] หลังจากนั้นให้หาค่าเฉลี่ยจากสมการที่ (50)

$$\mu = x_{spec} \cdot (-\ln(p))^{\frac{1}{m}} \cdot \Gamma \left(1 - \frac{1}{m} \right) \quad (50)$$

2.3.10 การแจกแจงค่าต่ำสุดชนิดที่สามแบบไวบูลล์ (Weibull - Type III - Smallest Distribution)

เมื่อการแจกแจงแม่ $F_X(x)$ ถูกนิยามในช่วง $\varepsilon \leq x < \infty$ ในรูปของสมการที่ (51)

$$F_X(x) = a(x - \varepsilon)^m; -\infty < x < \infty, x \geq \varepsilon \quad (51)$$

ฟังก์ชันการแจกแจง สำหรับ z จะมีรูปดังแสดงในสมการที่ (52)

$$F_Z(z) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{z - \varepsilon}{v - \varepsilon}\right)^m\right]; z \geq \varepsilon, m > 0, v \geq \varepsilon \quad (52)$$

เมื่อ V และ m เป็นพารามิเตอร์รูปร่าง โดย V จะพิจารณาขนาด ในขณะที่ m จะพิจารณารูปร่าง พารามิเตอร์รูปร่างทั้งสองมีความสัมพันธ์กับ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ดังแสดงในสมการที่ (53) และ (54)

$$\mu = \varepsilon + (v - \varepsilon)\Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) \quad (53)$$

$$\left(\frac{\sigma}{\mu - \varepsilon}\right)^2 = \frac{\left\{\Gamma\left(1 + \frac{2}{m}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{m}\right)\right\}}{\Gamma^2\left(1 + \frac{1}{m}\right)}; m > 0 \quad (54)$$

ให้สังเกตว่า ในกรณีที่ $\varepsilon = 0$ ด้านซ้ายมือของสมการที่ (54) ก็คือ กำลังสองของค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันนั่นเอง ในกรณีเช่นนี้ เราสามารถหาพารามิเตอร์รูปร่าง m จากการแก้สมการไม่เชิงเส้น รายละเอียดดังอภิปรายใน [2] หลังจากนั้นให้หาค่าเฉลี่ยจากสมการที่ (55)

$$\mu = \frac{x_{spec}}{(-\ln(1-p))^{\frac{1}{m}}} \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) \quad (55)$$

2.3.11 การแจกแจงบีตา

(Beta Distribution)

ฟังก์ชันความหนาแน่นน่าจะเป็นสำหรับการแจกแจงแบบบีตา มีรูปดังสมการที่ (56)

$$f_X(x) = \frac{1}{B(q, r)} \frac{(x-a)^{q-1}(b-x)^{r-1}}{(b-a)^{q+r-1}}; a \leq x \leq b \quad (56)$$

เมื่อ a และ b เป็นขอบเขตล่าง และขอบเขตบนตามลำดับ ในขณะที่ q และ r เป็นพารามิเตอร์รูปร่าง และ $B(q, r)$ เป็นฟังก์ชันบีตา นิยามด้วยสมการที่ (57)

$$B(q, r) = \int_0^1 x^{q-1}(1-x)^{r-1} dx = \frac{\Gamma(q)\Gamma(r)}{\Gamma(q+r)} \quad (57)$$

พารามิเตอร์ทั้งสองมีความสัมพันธ์กับค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ดังแสดงในสมการที่ (58) และ (59)

$$\mu = a + \frac{q}{q+r}(b-a) \quad (58)$$

$$\sigma^2 = \frac{qr}{(q+r)^2(q+r+1)}(b-a)^2 \quad (59)$$

การหาพารามิเตอร์รูปร่าง อาจหาได้โดยการแก้ระบบสมการไม่เชิงเส้นจำนวน 2 สมการ ดังแสดงในสมการที่ (60) และ (61) ดังอภิปรายใน [2]

$$\left(\frac{\sigma}{\mu - a}\right)^2 = \frac{r}{q \cdot (q+r+1)} \quad (60)$$

$$r = q \cdot \left[\frac{(b-a)}{(q+r) \cdot (\mu - a)} - 1 \right] \quad (61)$$

อย่างไรก็ตาม ในการหาค่าเฉลี่ยจำเป็นต้องอาศัยกระบวนการกระทำซ้ำ (iterative procedure) โดยอาศัยสมมติฐานว่า ค่าพารามิเตอร์รูปร่างทั้งสองมีค่าเหมือนการแจกแจงปีตาของตัวแปรที่ทราบค่า และมีคุณสมบัติทางสถิติใกล้เคียงกัน

2.4. โปรแกรมคอมพิวเตอร์

ผู้เขียนได้พัฒนา โปรแกรมคอมพิวเตอร์ MeanProd ภายใต้สิ่งแวดล้อมของซอฟต์แวร์ Mathcad Prime 3.0 สำหรับคำนวณค่าเฉลี่ยสำหรับรูปแบบการแจกแจงที่ใช้กันอย่างสามัญในวิศวกรรมโยธา จำนวน 11 รูปแบบ ดังกล่าวในหัวข้อที่ 2.3.1 เมื่อกำหนด ค่าสัมประสิทธิ์การแปรผัน (Ω) ค่ากำหนด (x_{spec}) และโอกาสที่ตัวแปรจะมีค่าไม่มากกว่าค่ากำหนด (p) ทั้งนี้สำหรับการแจกแจงแบบปีตา จำเป็นต้องกำหนดค่าพารามิเตอร์รูปร่าง q และ r จากการแจกแจงต้นแบบที่คุณสมบัติทางสถิติใกล้เคียงกัน เพื่อเป็นจุดตั้งต้นสำหรับกระบวนการกระทำซ้ำ

3. ตัวอย่างการใช้งาน

สำหรับ การหล่อผลิตภัณฑ์คอนกรีตชนิดหนึ่ง ต้องการกำลังอัดของคอนกรีต ณ อายุ 1 วัน มีค่าไม่น้อยกว่า 250 กก./ตร.ซม. ในขณะที่ กำลังอัดของคอนกรีต ณ อายุ 7 วัน มีค่าไม่น้อยกว่า 350 กก./ตร.ซม. ผู้ออกแบบปฏิกิริยาส่วนผสมคอนกรีต จะต้องออกแบบให้กำลังอัดของคอนกรีตอายุ 1 วัน และ 7 วัน ไม่น้อยกว่าเท่าไร เพื่อให้โอกาสที่กำลังอัดของคอนกรีตที่ออกแบบ มีโอกาสต่ำกว่าค่าที่กำหนดไม่เกิน 5% ($p = 0.05$) เมื่อสัมประสิทธิ์การแปรผัน ของการผลิตกำลังอัดคอนกรีต ด้วยเทคโนโลยีปัจจุบัน เป็น 0.20 ผลการพิจารณาโดยใช้โปรแกรม MeanProd ดังสรุปในรูปที่ 3

ในเบื้องต้น เมื่อไม่มีข้อมูลรูปแบบการแจกแจงที่เหมาะสม อาจสมมติให้รูปแบบการแจกแจงกำลังอัดคอนกรีตเป็นแบบปกติ ทำให้

ต้องผลิตคอนกรีตอายุ 1 วัน และ 7 วันให้มีกำลังอัดไม่น้อยกว่า 372.6 และ 536.5 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ

ต่อมาผู้ผลิตได้มีการเก็บข้อมูลทางสถิติพบว่า การแจกแจงที่เหมาะสมที่สุด สำหรับกำลังอัดคอนกรีต ได้แก่ การแจกแจงแบบลอกปรกติ ทำให้ผู้ผลิตสามารถออกแบบปฏิกิริยาส่วนผสมคอนกรีต ให้กำลังอัดคอนกรีตอายุ 1 วัน และ 7 วัน ให้มีค่าลดลงเหลือ ไม่น้อยกว่า 346.3 และ 484.8 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ หรือลดลงจากเดิม 7.06% และ 9.64% ตามลำดับ

หากผู้ผลิตต้องการใช้เทคโนโลยีใหม่ ในการผลิต เพื่อให้สามารถควบคุม สัมประสิทธิ์การแปรผันของกำลังอัดคอนกรีต ไม่เกิน 0.12 ผลการวิเคราะห์กำลังอัดของคอนกรีตอายุ 1 วัน และ 7 วัน โดยโปรแกรม MeanProd ดังสรุปในรูปที่ 4 ทำให้ผู้ผลิต สามารถออกแบบปฏิกิริยาส่วนผสมคอนกรีต ให้กำลังอัดคอนกรีตอายุ 1 วัน และ 7 วัน ในรูปแบบการแจกแจงแบบลอกปรกติ ให้มีค่าลดลงเหลือเพียงไม่น้อยกว่า 304.3 และ 426.1 กก./ตร.ซม. ตามลำดับ หรือลดลงจากเดิม 18.33% และ 20.56% ตามลำดับ

Type Distr.	Spec.	
	250 ksc	350 ksc
Normal	372.6	536.5
Uniform	363.3	508.6
Exponential	312.4	437.4
Rayleigh	298.1	417.3
Gumbel Largest	338.3	473.7
Gumbel Smallest	398.8	558.4
lognormal	346.3	484.8
gamma	359.6	503.4
Fréchet	320.1	448.2
Weibull	386.4	541.0
beta	310.7	435.0

รูปที่ 3 ค่าเฉลี่ยกำลังอัดคอนกรีตเป้าหมายอายุ 1 วัน และ 7 วัน ($\Omega=0.20$)

Type Distr.	Spec.	
	250 ksc	350 ksc
Normal	311.5	436.1
Uniform	307.5	430.5
Exponential	284.0	397.7
Rayleigh	283.2	396.4
Gumbel Largest	296.4	415.0
Gumbel Smallest	322.1	451.0
lognormal	304.3	426.1
gamma	308.2	431.5
Fréchet	291.1	407.6
Weibull	319.9	447.8
beta	283.2	396.5

รูปที่ 4 ค่าเฉลี่ยกำลังอัดคอนกรีตเป้าหมายอายุ 1 วัน และ 7 วัน ($\Omega=0.12$)

4. สรุปและวิจารณ์ผลการทดสอบ

บทความนี้ผู้วิจัย

- 1) ได้สรุปฟังก์ชันการแจกแจง ที่ใช้งานงานอย่างสามัญสำหรับวิศวกรกรมโยธาจำนวน 11 รูปแบบ รวมถึงพารามิเตอร์รูปร่าง พร้อมทั้งการวิเคราะห์สูตรต่าง ๆ ที่จำเป็นต้องใช้พิจารณาค่าเฉลี่ย จากค่ากำหนด และสัมประสิทธิ์การแปรผัน โดยให้ค่าตัวแปรมีโอกาสต่ำกว่าค่ากำหนดไม่เกินกว่าเกณฑ์ที่กำหนด
- 2) ได้พัฒนา โปรแกรมคอมพิวเตอร์ MeanProd เพื่อคำนวณค่าเฉลี่ยสำหรับการแจกแจงทั้ง 11 ชนิด
- 3) สาธิตการประยุกต์ใช้งาน สำหรับการพิจารณาค่าเฉลี่ยขั้นต่ำ เพื่อการผลิตคอนกรีตที่เหมาะสม และแสดงการลดต้นทุนการผลิตโดยการใช้รูปแบบการแจกแจง ที่เหมาะสม และแสดงผลของการใช้เทคโนโลยีการผลิต เพื่อควบคุมให้ความแปรปรวนของคุณสมบัติผลิตภัณฑ์ให้น้อยลง
- 4) แนวคิดดังกล่าว อาจสามารถนำใช้งานพิจารณาค่าเฉลี่ย เพื่อการออกแบบผลิตภัณฑ์ปริมาณมาก ให้เหมาะสมยิ่งขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัท เอเชียกรุป (1999) จำกัด ที่ให้เงินอุดหนุนการวิจัยแบบเต็ม และอนุเคราะห์ให้ใช้ซอฟต์แวร์ Mathcad Prime 3.0 Academic Edition นอกจากนี้ ยังขอขอบคุณ พนักงาน บริษัท เอเชียกรุป (1999) จำกัด ที่ช่วยจัดเตรียมข้อมูลที่จำเป็นต้องใช้สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Achintya H, Sankaran M. Probability, reliability and statistical methods in engineering design. New York: John Wiley & Sons; 2000.
- [2] Ouypornprasert W. Goodness-of-fit tests for common distributions in civil engineering. In Proceedings of the Conference on Computational Mathematics and Modeling (CMM2002), Organized by Mahidol University and Curtin University of Technology. 2002:117-126.
- [3] American Concrete Institute (ACI). Standard recommended practice for evaluation of compression test results of field concrete (ACI 214-57). 1957:1-19.
- [4] Neville AM, Brooks JJ. Concrete technology. Longman Scientific & Technical; 1987.
- [5] Gambhir ML. Concrete technology. 3rd ed. Tata McGraw Hill Education; 2004.

การศึกษาเปรียบเทียบการรักษาความชื้นของดิน และการป้องกันวัชพืชจากการ ใช้ผ้าไม่ทอที่ปักด้วยเข็มปักเป็นวัสดุคลุมดิน กรณีศึกษาการเจริญเติบโตของ แคนตาลูป

บดินทสันต์ ขวัญข้าว^{1*} สมนึก สังข์หนู² และจักรกฤษณ์ เจริญใส³

bintasan.k@en.rmutt.ac.th^{1*}, somnuk.s@en.rmutt.ac.th², chakkrit_c@rmutt.ac.th³

^{1*–3} ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Received	: 24-Jul-2018
Revised	: 20-Dec-2018
Accepted	: 25-Feb-2019

บทคัดย่อ

วัสดุคลุมดิน เป็นวัสดุที่มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อใช้ในการรักษาความชื้นในดิน ในขณะเดียวกันยังสามารถลดปริมาณวัชพืชในแปลงพืช ปัจจุบันวัสดุที่นำมาใช้เป็นวัสดุคลุมดินมีหลากหลายชนิดทั้งที่ได้จากวัสดุธรรมชาติ วัสดุสังเคราะห์ และวัสดุคลุมดินที่เป็นสิ่งทอทางเกษตรเช่น วัสดุคลุมดินจากผ้าไม่ทอ เป็นต้น เมื่อนำเส้นใยพอลิเอสเตอร์ มาทำการพัฒนาเป็นวัสดุคลุมดิน โดยทดลองผลิตเป็นผ้าไม่ทอด้วยเทคนิคปักด้วยเข็มปัก ทั้งหมด 4 ตัวอย่าง ผ้าไม่ทอตัวอย่าง A มวล 47 g/m^2 หนา 0.28 mm , ผ้าไม่ทอตัวอย่าง B มวล 105 g/m^2 หนา 0.90 mm , ผ้าไม่ทอตัวอย่าง C มวล 155 g/m^2 หนา 1.27 mm และผ้าไม่ทอตัวอย่าง D มวล 210 g/m^2 หนา 2.62 mm นำผ้าที่ได้ศึกษาสมบัติด้านความแข็งแรงพบว่า ผ้าไม่ทอตัวอย่าง C แข็งแรงมากที่สุด ผ้าไม่ทอตัวอย่าง A และ D ไม่สามารถทดสอบได้เนื่องจากผ้าบางและหนาเกินไป นอกจากนั้นผ้าไม่ทอทั้ง 4 ตัวอย่าง ยังถูกนำไปศึกษาเป็นวัสดุคลุมดินบนแปลงต้นแคนตาลูป และเปรียบเทียบกับ 3 แปลงได้แก่ แปลงที่ไม่มีวัสดุคลุมดิน, แปลงที่ใช้พลาสติก และแปลงที่ใช้ฟางข้าวเป็นวัสดุคลุมดิน พบว่าแปลงของผ้าไม่ทอตัวอย่าง D สามารถรักษาความชื้นในดินดี จำนวนวัชพืชที่พบมีน้อยลำต้นแคนตาลูปเจริญเติบโตได้ดี ขนาดของผล และใบเมื่อเทียบกับแปลงอื่น แปลงที่ใช้ผ้าไม่ทอตัวอย่าง D ยังได้ผลผลิตดี

คำสำคัญ: วัสดุคลุมดิน สิ่งทอทางเกษตร ผ้าไม่ทอที่ปักด้วยเข็มปัก แคนตาลูป

A Comparison Study on Soil Moisture and Protection of Weed using Needle Punch Nonwoven Mulch: A case Study for Planting of Cantaloupe

Bintasan Kwankhao^{1*} Somnuk Sungnoo² and Chakkrit Charoensai³
bintasan.k@en.rmutt.ac.th^{1*}, somnuk.s@en.rmutt.ac.th², chakkrit_c@rmutt.ac.th³

^{1*3} Department of Textile Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Received	: 24-Jul-2018
Revised	: 20-Dec-2018
Accepted	: 25-Feb-2019

Abstract

Mulching is mainly help in conserving of soil moisture and also reducing weed growth in cultivation area. Nowadays materials that are used as mulching are varied to natural materials, synthesis materials, and agricultural textile materials such as nonwoven mulching. In this study, polyester fiber is developed into mulching by needle-punched nonwoven technic with four sizes of samples including nonwoven fabric (A) size 47 g/m² thickness 0.28 mm., nonwoven fabric (B) size 105 g/m² thickness 0.90 mm., nonwoven fabric (C) size 155 g/m² thickness 1.27 mm. and nonwoven fabric (D) size 210 g/m² thickness 2.62 mm. Strength test are conducted on four samples. It is founded that sample C has the highest strength; while sample A and sample D are not capable of the test due to its thickness, too thin and too thick respectively. Moreover, all four samples are studied on cantaloupe cultivation as mulching, comparing to another three cultivations with different mulching: no mulching, plastic sheet mulching, and rice straw mulching. The results show that cultivation using sample D is well conserve of soil moisture, has less weeds, and can grow strong cantaloupe. Sizes of fruits and leaf from sample D cultivation are also good comparing to other cultivations.

Keywords: mulch, agrotextile, needle punching nonwoven fabric, Cantaloupe

1. บทนำ

น้ำจัดเป็นปัจจัยพื้นฐานที่จำเป็นในระบบนิเวศโดยเฉพาะอย่างยิ่งในภูมิภาคที่แห้งแล้งและกึ่งแห้งแล้ง รวมไปถึงระบบนิเวศที่มีความอุดมสมบูรณ์ [1-2] ซึ่งในแต่ละชั้นของดินจะมีความสามารถกักเก็บความชื้นไม่เท่ากัน ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าระดับความชื้นในดินเป็นสิ่งสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช [3-4] เนื่องจากต้นพืชที่เจริญเติบโตได้ดีนั้นจะต้องขึ้นอยู่กับปริมาณการหมุนเวียนของน้ำ การพังทลายของชั้นดิน และการระเหยของน้ำบริเวณชั้นดิน ณ สถานที่ภูมิอากาศนั้นๆ นอกจากนี้ปัจจัยของภูมิอากาศและความชื้นในดินยังส่งผลโดยตรงต่อความรูปร่างและความสมบูรณ์ของต้นพืช [5-6]

แคนตาลูป เป็นผลไม้อีกชนิดหนึ่งที่กำลังเป็นที่นิยมบริโภคกันมากในปัจจุบันและเป็นผลไม้ที่มีการส่งออกขายนอกประเทศ เนื่องจากเป็นผลไม้ที่มีรสชาติดี เนื้อนุ่มหวานฉ่ำและมีกลิ่นหอม สีของเนื้อผลมีความหลากหลาย ทั้งขาว ครีမ် เหลือง เขียว แสด และส้ม จึงชวนให้รับประทานมากยิ่งขึ้น แคนตาลูปจัดว่าเป็นทั้งผักและผลไม้ ขึ้นอยู่กับลักษณะการบริโภคซึ่งมีทั้งใช้บริโภคในรูปของผลไม้หรือใช้เป็นส่วนผสมประกอบในสลัดผัก ในการขายแคนตาลูป นิยมขายกันตามน้ำหนักของผลซึ่งมีราคาตั้งแต่กิโลกรัมละ 20 บาท ไปจนถึง 80-100 บาท ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดและพันธุ์ของแคนตาลูป นอกจากนี้ยังเป็นพืชที่ใช้ระยะเวลาในการปลูกและเก็บเกี่ยวสั้นเมื่อเปรียบเทียบกับผลไม้ชนิดอื่นบางสายพันธุ์มีอายุการเก็บเกี่ยวไม่เกิน 65 วันเท่านั้นหลังหยอดเมล็ด จึงจัดเป็นพืชที่ทำรายได้ให้แก่เกษตรกรเป็นอย่างดีในเวลาอันรวดเร็ว การปลูกแคนตาลูปให้ได้ผลผลิตดีนั้นจะต้องพิถีพิถันสูง เนื่องจากพืชมีความอ่อนแอ ไม่ค่อยทนทานต่อโรค แมลง สภาพอากาศที่ร้อนจัดหรือหนาวจัด และจะต้องมีการควบคุมความชื้นให้เหมาะสม ซึ่งเป็นปัจจัยหลักในการปลูกแคนตาลูป แคนตาลูปเป็นพืชที่ชอบ

ความชื้นในดินสูง หากพืชขาดน้ำ และน้ำไม่พอหรือมากเกินไป แคนตาลูปจะเจริญเติบโตช้า ผลผลิตที่ได้ไม่ตรงตามความต้องการ [7-8]

ที่คลุมดิน หรือวัสดุคลุมดิน คือวัสดุที่ใช้คลุมบริเวณพื้นผิวดิน มีหน้าที่รักษาความชื้น อุณหภูมิ และป้องกันแมลงศัตรูพืช [9] วัสดุที่ใช้สำหรับคลุมดินมีหลากหลายชนิด สามารถแยกประเภทหลักๆ ได้ 3 ประเภท ได้แก่ วัสดุธรรมชาติ (organic materials) เช่น ฟางข้าว และมูลสัตว์ เป็นต้น วัสดุสังเคราะห์ (synthetic materials) เช่น แผ่นพลาสติกดำ และแผ่นพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้เอง สุดท้ายกลุ่มวัสดุคลุมดินชนิดพิเศษ เช่น ทรายกรวด (sand-grave) คอนกรีต และหินภูเขาไฟ เป็นต้น ในทางการเกษตร นับว่าวัสดุคลุมดินเข้ามามีบทบาทสำคัญ และมีประโยชน์เป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถป้องกันการเสื่อมสภาพทั้งทางกายภาพ และเคมีของดินได้เป็นอย่างดี มีการนำเอาวัสดุคลุมดินไปใช้กับพืชหลากหลายชนิด เช่น ใช้ฟางข้าวคลุมแปลงต้นมันฝรั่ง ต้นถั่ว หัวหอม และแผ่นพลาสติกดำคลุมแปลงต้นบร็อคโคลี่ ต้นข้าวโพด ต้นฝ้าย เป็นต้น ในปัจจุบันสิ่งทอทางเกษตร (agrotexiles) มีการพัฒนาใช้วัสดุต่างๆ เข้ามาใช้อย่างแพร่หลายเช่น ผ้าถักสำหรับมุงป้องกันแมลง และใช้ผ้าทอเป็นวัสดุป้องกันแสงแดด นอกจากนี้ผ้าไม่ทอยังถูกพัฒนาให้สามารถใช้งานในด้านนี้มากขึ้น

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่าการใช้วัสดุคลุมดินเพื่อรักษาระดับความชื้นในดิน และป้องกันวัชพืชเป็น 2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของต้นพืชเป็นอย่างมาก ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ให้ความสำคัญกับการพัฒนาวัสดุคลุมดินโดยใช้ผ้าไม่ทอ ที่ปักด้วยเข็มปัก ทำจากเส้นใยพอลิเอสเตอร์ และศึกษาเปรียบเทียบผลของการนำผ้าไม่ทอมาเป็นวัสดุคลุมดินเพื่อดูการเจริญเติบโตของลำต้นแคนตาลูป อัตราการลดลงของวัชพืชบนดิน การเจริญเติบโตของผล และการเจริญเติบโตของใบแคนตาลูป

องค์ความรู้ที่ได้จะเป็นประโยชน์ต่อหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ซึ่งสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดสู่เกษตรกรได้อย่างกว้างขวาง

2. วิธีการทดลอง

2.1 ทดลองผลิตผ้าไม่ทอที่ปักด้วยเข็มปัก และทดสอบสมบัติทางกายภาพ

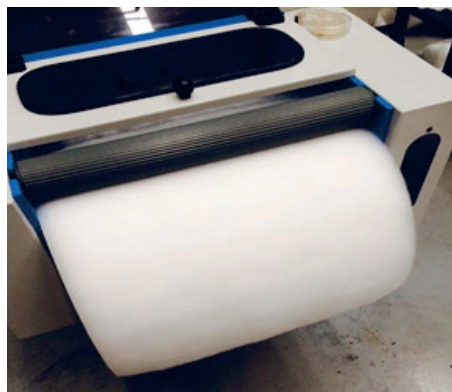
2.1.1 ทดลองผลิตผ้าไม่ทอที่ปักด้วยเข็มปัก จากเศษเส้นใยพอลิเอสเตอร์ มาทำเป็นวัสดุคลุมดิน

1) เส้นใยพอลิเอสเตอร์ที่ถูกนำมาใช้เป็นวัตถุดิบผลิตเป็นผ้าไม่ทอนั้นต้องเป็นเส้นใยพอลิเอสเตอร์ 100 เปอร์เซ็นต์ และผ่านกระบวนการทำให้สั้น (staple fiber) และมีความหยิกงอ (crimp) นำมากำหนดมวลความหนา 4 ระดับ แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 น้ำหนักเส้นใยพอลิเอสเตอร์ที่ใช้ในการผลิตผ้าไม่ทอที่ปักด้วยเข็มปัก

ผ้าไม่ทอ	น้ำหนักเส้นใยพอลิเอสเตอร์ (กรัม)
A	50
B	100
C	150
D	200

นำเส้นใยพอลิเอสเตอร์จากตารางที่ 1 มาผ่านกระบวนการสาางใย 3 ครั้ง ต่อ 1 ผืน เพื่อจัดเรียงเส้นใยให้มีการเรียงตัวกันอย่างสม่ำเสมอ เมื่อผ่านกระบวนการวิธีสาางใยเสร็จสิ้น ผลผลิตที่ได้จากเครื่องสาางใยจะเรียกว่า แผ่นเว็บ (Web) (ภาพที่ 1)



ภาพที่ 1 ตัวอย่างผลผลิตที่ได้จากเครื่องสาางใย จะเรียกว่า แผ่น (Web)

2) นำแผ่นเว็บ ที่ได้จากกระบวนการวิธีสาางใย มาจัดวัดและตัดขนาดให้พอดีกับหน้าเครื่อง Needle Punching แล้วทำการเย็บเข้ากับผืนผ้าที่นำมาเป็นผ้านำ จากนั้นทำการป้อนแผ่นเว็บ ที่ทำการเย็บติดกับตัวผ้านำเข้าไปสู่เครื่อง Needle Punching ที่ใช้เข็มจำนวน 1080 เล่ม เบอร์ 38 โดยการป้อนจะมีอุปกรณ์ที่เป็น แท่งโลหะขนาดเล็ก ส่วนปลายด้านหนึ่งเป็นการโค้งงอในลักษณะ ตะขอ เพื่อทำการเกี่ยวหรือดึงผ้านำ ออกมายังตำแหน่งท้ายเครื่อง

3) เดินเครื่อง โดยกำหนดค่าความเร็วของลูกกลิ้งแต่ละตัว และ ระยะการปักของเข็มบนแผ่น เว็บ จากนั้นผลผลิตที่ได้จะออกมาเป็นผืนผ้าที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทอหรือถัก เรียกว่า "ผ้าไม่ทอ" โดยใช้การผลิตแบบปักด้วยเข็มปัก (ภาพที่ 2)



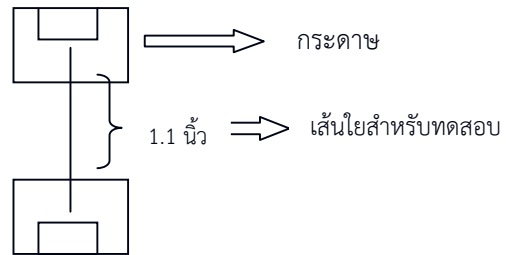
ภาพที่ 2 ผ้าไม่ทอที่ปักด้วยเข็มปัก (Needle Punching Nonwoven)

2.1.2 ทดสอบสมบัติทางกายภาพของผ้าไม่ทอที่ปักด้วยเข็มปัก

สมบัติทางกายภาพที่สำคัญของวัสดุสิ่งทอที่นำมาใช้ในงานเกษตรนั้นได้แก่ ความแข็งแรง (strength) และความหนา (thickness) เพื่อให้ทราบสมบัติพื้นฐานที่จำเป็นต่อการใช้งานจึงได้นำผ้าไม่ทอมาทดสอบดังนี้

1) การทดสอบด้านความแข็งแรงของเส้นใยพอลิเอสเตอร์

ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงของเส้นใย มาตรฐานการทดสอบ ASDM D-2256-97 ซึ่งมีวิธีการทดสอบ เริ่มตั้งแต่ตัดกระดาษขนาดช่องว่างด้านใน 1.1 นิ้ว ขอบระยะห่างจากช่องด้านใน 1 เซนติเมตร นำเส้นใยแปะระหว่างของกระดาษ ดังแสดงในภาพที่ 3 นำขึ้นกระดาษใส่ในเครื่องทดสอบ แล้วทำการอ่านค่าแรงดึงสูงสุดที่ทำให้เส้นใยขาด ทำการทดสอบซ้ำจำนวน 10 ครั้ง หาค่าเฉลี่ยเพื่อสรุปผลทดสอบ



ภาพที่ 3 การเตรียมตัวอย่างเส้นใยสำหรับทดสอบด้านความแข็งแรง มาตรฐาน ASDM D-2256-97

2) การทดสอบวัดความหนาของผ้า

ทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D1777-96 นำผ้าตัวอย่างมาทำการวัดขนาดหาอัตราส่วนวัดความหนา 10 จุด ทำการวัดค่าความหนาโดยเริ่มจากจุดที่ 1 แล้วบันทึกค่าและจุดต่อไปจนครบถึงจุดที่ 10 หาค่าเฉลี่ยความหนาบางใช้ขึ้นทดสอบชนิดผ้าไม่ทอละ 10 ชิ้นเพื่อหาค่าเฉลี่ย แล้วนำไปสรุปผลการทดสอบ

3) การทดสอบความต้านทานแรงดันทะลุ (Bursting strength)

ทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D5034-96 นำผ้าตัวอย่างมาทำการวัดค่าต้านทานแรงดันทะลุของผ้า อ่านค่าแรงดันทะลุต่อหน่วยพื้นที่ จากเครื่องทดสอบ ทำการทดสอบขึ้นตัวอย่างผ้าไม่ทอ 10 ครั้ง หาค่าเฉลี่ยบันทึกผล

4) การทดสอบน้ำหนักผ้า

ทดสอบด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักผ้า ASTM D3776-96 ตัดผ้าขนาด 10 × 10 เซนติเมตร ปรับเครื่องทดสอบน้ำหนักผ้าให้อยู่ที่ศูนย์ ทดสอบน้ำหนักผ้าจนครบทุกขนาด และมีการทดสอบจำนวน 10 ซ้ำ แล้วจึงสรุปผล

2.2 ทดลองปลูกแคนตาลูป โดยใช้ผ้าไม่ทอที่ปักด้วยเข็มปักมาทำเป็นวัสดุคลุมดิน เพื่อศึกษาค่าความชื้นในดิน ศึกษาการเจริญเติบโต ใบ ดอก และผลของต้นพืช อัตราการลดลงของวัชพืชบนดิน

2.2.1 ทดลองปลูกแคนตาลูปสายพันธุ์ ซันเลดี้ (Sun Lady) ใช้เวลาทดลองนาน 70 วัน ซึ่งตรงกับเวลาเก็บเกี่ยวผลแคนตาลูป โดยใช้ผ้าไม่ทอที่ปักด้วยเข็มปักมาทำเป็นวัสดุคลุมดิน และทำการทดลองปลูกในฤดูร้อน ณ สวนแคนตาลูป ตำบลคลองหก อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี โดยการทดลองปลูกมี 4 ขั้นตอนดังนี้

1) เตรียมดินให้มีความพร้อมสำหรับการทดลองปลูกโดยการพรวนดินตากแดดจัด 6 ชั่วโมงต่อวัน นาน 20 วัน เพื่อกำจัดเชื้อโรคและวัชพืช ระหว่างตากแดดถ้ามีฝนตกต้องพรวนดินใหม่และเริ่มตากแดดใหม่ใส่อินทรีย์วัตถุและสารปรับปรุงบำรุงดิน (ปุ๋ยคอก)

2) เตรียมแปลงทดลองแบบขึ้นค้ำให้ห่างกัน 1.2 -1.5 เมตร ความกว้างของร่องน้ำ 60-70 เซนติเมตร หลังแปลงกว้าง 80 - 90 เซนติเมตร ทั้งหมด 7 แปลง ดังนี้

แปลงที่ 1 ไม่ใช้วัสดุคลุมดิน แล้วทำการขุดหลุมปลูกห่างกัน 40 – 50 เซนติเมตร

แปลงที่ 2 ใช้ฟางข้าวคลุม แล้วทำการขุดหลุมปลูกห่างกัน 40 – 50 เซนติเมตร

แปลงที่ 3 ใช้พลาสติกคลุม แล้วทำการขุดหลุมปลูกห่างกัน 40 – 50 เซนติเมตร

แปลงที่ 4 ใช้ผ้าไม่ทอ Needle punched A คลุมดิน แล้วทำการขุดหลุมปลูกห่างกัน 40 – 50 เซนติเมตร

แปลงที่ 5 ใช้ผ้าไม่ทอ Needle punched B คลุมดิน แล้วทำการขุดหลุมปลูกห่างกัน 40 – 50 เซนติเมตร

แปลงที่ 6 ใช้ผ้าไม่ทอ Needle punched C คลุมดิน แล้วทำการขุดหลุมปลูกห่างกัน 40 – 50 เซนติเมตร

แปลงที่ 7 ใช้ผ้าไม่ทอ Needle punched D คลุมดิน แล้วทำการขุดหลุมปลูกห่างกัน 40 – 50 เซนติเมตร

โดยติดตั้งระบบน้ำหยดสำหรับให้น้ำ และสารอาหารทางราก และระบบสปริงเกอร์พ่นฝอยเหนือต้นสำหรับให้สารอาหาร

ในการเตรียมแปลง ผู้วิจัยได้เตรียมแปลงจำนวน 3 แปลงต่อ วัสดุคลุมดินที่ใช้ 1 ชนิด

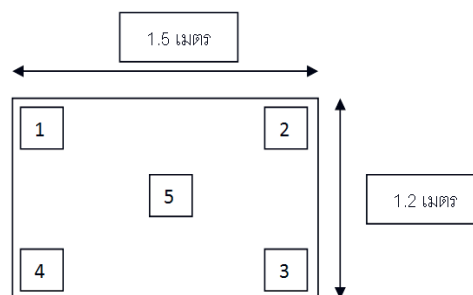
3) เตรียมเมล็ดพันธุ์และปลูก เมล็ดที่นำมาทดลองปลูกต้องผ่านการตรวจสอบวันหมดอายุ และคัดเมล็ด โดยนำเมล็ดพันธุ์ลงแช่ในน้ำเกลือเจือจาง คัดเมล็ดลอยทิ้งเพราะเสื่อมสภาพ เลือกใช้เฉพาะเมล็ดจมน้ำ นำขึ้นผึ่งลมให้แห้ง นำเมล็ดพันธุ์ที่เลือกได้แล้วลงแช่ในน้ำที่ประกอบด้วย ไคดินไคโตซานและธาตุรอง/ธาตุเสริม นาน 12 ชั่วโมง นำขึ้นมาหุ้มผ้าชื้น (ห่ม) เก็บในที่เย็นขึ้นอีกรอบนาน 24 ชั่วโมงหรือจนกระทั่งเมล็ดเริ่มปริและเริ่มมีรากแทงออกให้เห็นจึงนำไปปลูก จากนั้นใช้ปลายไม้เล็กๆ ขุดหลุมลึก 1-1.5 ซม. วาง 1-2 เมล็ดลงไป แล้วเกลี่ยดินที่เป็นฝอยละเอียดกลบเบาๆ ไม่ต้องกดเพราะอาจจะทำให้รากขาดหรือหักได้ เมื่อต้นกล้าโตขึ้นได้ใบ 2-3 คู่แล้วให้เลือกคัดออก 1 ต้น

4) การบำรุงดูแลแปลงปลูกแคนตาลูป ช่วงกล้าตั้งแต่เริ่มงอก ถึง ได้ใบ 4-5 คู่ ยังไม่จำเป็นต้องให้ปุ๋ยทางราก ปล๋อยให้ต้นรับสารอาหารจากดินปลูกที่เตรียมไว้ แคนตาลูปเป็นพืชเลื้อยไม่มีมือเกาะ เมื่อเถาเริ่มยาว (สูง) ขึ้นให้ใช้เชือกผูกเข้ากับหลักหรือไม้ค้ำ พร้อมกับใช้เชือกอีกเส้นหนึ่งผูกหลวมๆ ที่ยอดแล้วยกขึ้นเพื่อนำยอดขึ้นสูง เมื่อเถายาวขึ้นก็ให้ยกยอดสูงตามขึ้นไปเรื่อยๆ พยายามรักษาให้เถาตรงอยู่เสมอ หลังจากต้นกล้าโตได้ใบ 5-7 ใบแล้วให้เด็ดยอดเหนือข้อของใบสูงสุดประมาณ 1/2 เซนติเมตร ทาแผลรอยด้วยปูนกินหมากเพื่อป้องกันเชื้อโรค พิจารณาตัดทิ้งยอดแขนงที่ไม่สมบูรณ์ออกแล้วเก็บยอดแขนงที่สมบูรณ์ไว้ 2 ยอด ซึ่งยอดแขนงนี้ คือ ยอดที่จะเอาผลในอนาคต เริ่มจัดระเบียบยอดแขนงให้เลื้อยไปในทิศทางที่จะไม่ชิดกับกิ่งแขนงข้างเคียง จนผลเบียดกันและเพื่อให้ใบทุกใบได้รับแสงแดด เมื่อยอดแขนงทั้งสองโตจะแตกยอดพร้อมกับดอก

ออกมาใหม่ตามข้อ (ที่ข้อมีใบ) ทุกข้อ ให้เด็ดยอดและดอกตั้งแต่แรกล่างสุดถึงยอดที่ 9 ทั้งหมดแต่ให้คงเหลือใบไว้ วิธีเด็ดยอดและดอกทิ้งเหลือแต่ใบนี้วัตถุประสงค์หลัก คือ การไว้เถาและใบสำหรับเลี้ยงผล หลังจากเด็ดยอดครบทั้ง 9 ยอด แล้วให้เก็บดอกกระหว่างข้อที่ 10 ถึงข้อที่ 13 ไว้ รอจนกระทั่งดอกพัฒนาเป็นผลจึงพิจารณาตัดทิ้งผลไม่สมบูรณ์ออก 2 ผล แล้วเก็บผลที่สมบูรณ์ไว้เพียง 1 ผล จากเถาดันต่อ 1 เถาหรือ 1 ต้นแล้วแตกแขนงเป็น 2 แขนง ใน 1 แขนงไว้ผล 1 ผล จึงเท่ากับเถาดันต่อ 1 ต้นหรือ 1 เถาได้ผล 2 ผล หลังจากได้จำนวนผลไว้ตามต้องการแล้ว ให้หมั่นเด็ดยอดแตกใหม่จากข้อที่อยู่สูงกว่าผลขึ้นไปทุกยอดเพื่อไม่ให้เกิดดอกจนเป็นผลซ้อนขึ้นซ้ำอีก และเมื่อเถาโตจนถึงใบที่ 24-25 ก็ให้ตัดยอดเพื่อหยุดการเติบโตของเถา เพื่อบังคับให้ต้นส่งธาตุอาหารไปเลี้ยงผลได้อย่างเต็มที่ แคนตาลูปมีช่วงพัฒนาการทุกช่วงค่อนข้างสั้น การให้สารอาหารต่างๆผ่านทางใบนั้นให้ได้เพียง 1-2 ครั้งเท่านั้น ซึ่งอาจจะไม่พอเพียง แนวทางแก้ไขคือ เตรียมสารอาหารต่างๆให้พร้อมไว้ในดินหรือวัสดุปลูกก่อนลงมือปลูก ทั้งนี้สารอาหารที่แคนตาลูปต้องใช้จริงจำนวน 3 ใน 4 ส่วนได้จากดินหรือวัสดุปลูก กับ 1 ใน 4 ส่วนได้จากทางใบ ธรรมชาติของแคนตาลูปออกดอกเองเมื่อโตได้อายุโดยไม่ต้องเปิดตาดอก ก่อนถึงช่วงออกดอก 7-10 วัน ถ้าได้รับสารอาหารทางใบกลุ่มสะสมอาหารเพื่อการออกดอก (0-42-56 หรือ กลูโคส หรือ นมสัตว์สด อย่างใดอย่างหนึ่ง + ธาตุรอง/ธาตุเสริม) เพียง 1 รอบเท่านั้นก็จะช่วยให้ดอกที่ออกมาสมบูรณ์ดีกว่าไม่ได้ให้เสียเลยหรือปล่อยให้ออกแบบตามมีตามเกิด นอกจากนี้ต้น (เถา) ยังเขียวเข้มอวบอ้วนและเตี้ยทำให้ง่ายต่อการเข้าไปทำงานอีกด้วย

2.2.2 ศึกษาค่าความชื้นในดินบนแปลงปลูกแคนตาลูป โดยใช้ผ้าไม่ทอที่ปักด้วยเข็มปักเป็นวัสดุคลุมดิน

การทดลองหาค่าความชื้นในดินเป็นการตรวจสอบประสิทธิภาพการรักษาน้ำในดินของวัสดุคลุม ซึ่งได้ทำการทดสอบบนแปลงที่ปลูกแคนตาลูป 7 แปลงโดยทุกแปลงผ่านการเตรียมจาก ข้อ 2.1.1 ขนาดกว้าง 1.2 เมตร ยาว 1.5 เมตร เริ่มต้นทดสอบหาค่าความชื้นครั้งที่ 1 ในดินภายหลังจากการปลูก 1 สัปดาห์ ที่เวลา 17.00 น. จากนั้นวัดค่าความชื้น 1 ครั้ง ทุกสัปดาห์ นาน 10 สัปดาห์ ในการทดสอบจะใช้เครื่องวัดความชื้นในดินดิจิทัล ยี่ห้อ Rapitest รุ่น 1825 บนแปลงดิน ทั้งหมด 5 ตำแหน่ง (ภาพที่ 4) ในแต่ละแปลงทดลองจะมีการวัดค่าความชื้น 3 ซ้ำ จากนั้นนำค่าความชื้นทั้งหมดหาค่าเฉลี่ยร้อยละ



ภาพที่ 4 ตำแหน่งการวัดค่าความชื้นในดินบนแปลงปลูกต้นแคนตาลูป

2.2.3 ศึกษาการเจริญเติบโตของต้น ผล และใบของแคนตาลูป

กำหนดให้ทำการทดสอบวัดค่าการเจริญเติบโตโดยประเมินจากความยาวของลำต้น เส้นรอบวงของผล ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของใบ จากต้นแคนตาลูปที่ผ่านคัดเลือกที่สมบูรณ์ที่สุดจำนวน 3 ต้น เริ่มทดสอบครั้งที่ 1 ภายหลังจากการปลูก 1 สัปดาห์ ณ เวลา 17.00 น. จากนั้นทำการวัดอีก 1 ครั้ง ทุกสัปดาห์ นาน 10 สัปดาห์ โดยใช้ ที่วัดมาตรฐาน ยี่ห้อ TYLON TAPE รุ่น 5 เมตร 30-696N สำหรับวัดขนาดลำต้น และเวอร์เนียคาลิเปอร์ (Vernier Caliper) ยี่ห้อ MITUTOYO รุ่น 530-119 สำหรับวัด

ขนาดของใบ และผลของแคนตาลูป นำค่าที่บันทึกได้คำนวณหาค่าเฉลี่ยร้อยละ

2.2.4 ศึกษาอัตราการลดลงของวัชพืชบนแปลงต้นแคนตาลูป

การศึกษากการลดจำนวนของของวัชพืชบนแปลงเกษตรเป็นอีกหนึ่งตัวชี้วัดถึงประสิทธิภาพการใช้วัสดุคลุมดิน ซึ่งได้ทำการทดสอบกับแปลงต้นแคนตาลูปทั้งหมด 7 แปลง เริ่มวัดครั้งที่ 1 ภายหลังจากการปลูก 1 สัปดาห์ ณ เวลา 17.00 น. จากนั้นทำการวัดอีก 1 ครั้ง ทุกสัปดาห์ นาน 10 สัปดาห์ โดยการนับต้นวัชพืชที่เกิดขึ้นบนแปลงทดลอง ทุกแปลงแล้วหาค่าเฉลี่ยของแต่ละแปลง

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

3.1 ทดลองผลิตผ้าไม่ทอที่ปักด้วยเข็มปัก และทดสอบสมบัติทางกายภาพเส้นใยเส้นใยพอลิเอสเตอร์ สามารถผลิตเป็นผ้าไม่ทอด้วยเทคนิคปักด้วยเข็มปักได้ กำหนดให้ผ้าไม่ทอ A, B, C และ D คือผ้าไม่ทอที่ได้จากน้ำหนักเส้นใย A, B, C และ D ในตารางที่ 1 ตามลำดับ โดยมีสมบัติทางกายภาพดังนี้

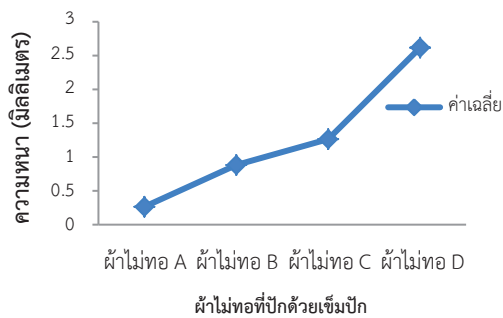
3.1.1 ผลทดสอบสมบัติของเส้นใยพอลิเอสเตอร์ ด้วยมาตรฐาน ASDM D-2256-97 ด้านความแข็งแรงของเส้นใยถือว่าเป็นสิ่งสำคัญขั้นต้นของการนำเส้นใยไปใช้ประโยชน์จากการนำเส้นใยพอลิเอสเตอร์ทดสอบสมบัติพื้นฐานด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงพบว่ามีการยืดตัว (Elongation) 26 เปอร์เซ็นต์ มีค่าต้านทานแรงดึง (Tenacity) 0.29 gf/den และค่าความสามารถทนแรงยืดดึง (Extension at break) 6.2 มิลลิเมตร (ตารางที่ 2) สมบัติพื้นฐานของเส้นใยพอลิเอสเตอร์ซึ่งจัดอยู่ในประเภทพอลิเมอร์สังเคราะห์ซึ่งมีค่าด้านความแข็งแรงอยู่ในเกณฑ์ดี เนื่องจากในสายโซ่พอลิเมอร์ของเส้นใยมีส่วนที่เป็นผลึก (crystalline

region) เรียงตัวกันเป็นระเบียบหนาแน่น ส่งผลให้เส้นใยมีสมบัติด้านความแข็งแรงสูง [10],[11]

ตารางที่ 2 ค่าการยืดตัว (Elongation) ค่าความเหนียว (Tenacity) และค่าความสามารถแรงยืดดึง (Extension)

สมบัติเส้นใยพอลิเอสเตอร์	
ค่าการยืดตัว (Elongation)	26.07 %
ค่าต้านทานแรงดึง (Tenacity)	0.29 gf/den
ค่าความสามารถแรงยืดดึง (Extension at break)	6.2 mm

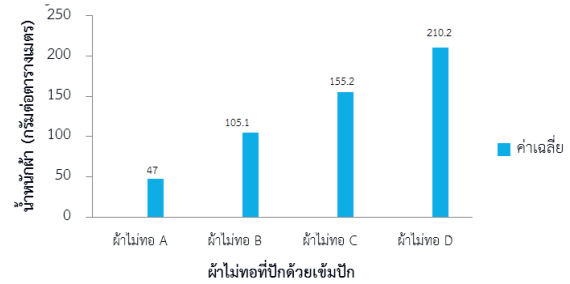
3.1.2 การทดสอบวัดความหนาของผ้า สมบัติด้านความหนาของวัสดุสิ่งทอทางการเกษตร (Agro textiles) นับว่าเป็นสมบัติพื้นฐานที่ต้องคำนึงถึง จากการหาค่าความหนาของผ้าไม่ทอที่ปักด้วยเข็มปักทั้ง 4 ขนาด ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D1777-96 พบว่า ผ้าไม่ทอ D มีความหนาสูงสุดที่ 2.62 มิลลิเมตร และค่าความหนาของผ้าจะแปรผันตามน้ำหนักของมวลผ้า โดยที่ผ้าไม่ทอ A บางที่สุด 0.28 มิลลิเมตร (ภาพที่ 5) วัสดุสิ่งทอสำหรับคลุมป้องกันในงานเกษตรนั้นนิยมใช้ผ้าไม่ทอที่ปักด้วยเข็มปัก ซึ่งอัตราการเจริญเติบโตของพืช และฤดูการของการเพาะปลูกเป็นปัจจัยหลักในการพิจารณาเลือกใช้วัสดุที่จะนำมาคลุมดินได้เป็นอย่างดี โดยมีความหนาตั้งแต่ 0.08 มิลลิเมตรขึ้นไป [12] และค่าความหนาบางของวัสดุคลุมดินยังมีผลต่อความชื้นในดิน วัสดุที่มีความหนาสูงจะสามารถเก็บความชื้นได้ดี [13]



ภาพที่ 5 ค่าเฉลี่ยผลทดสอบความหนาของผ้าไม่ทอที่ปิดด้วยเชิ่มปัก

3.1.3 การทดสอบเครื่องวัดแรงดันทะลุ (Bursting strength) ทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D5034-96 ซึ่งเป็นการทดสอบสมบัติด้านความแข็งแรงของผ้าไม่ทอในการทดสอบผ้าไม่ทอทั้ง 4 ขนาด ผ้าไม่ทอ A ไม่สามารถทดสอบได้เนื่องจากผ้าเกินไป และผ้าไม่ทอ D ก็ไม่สามารถทดสอบได้เช่นเดียวกันเนื่องจากผ้าหนาเกินไป ไม่สามารถนำเข้าเครื่องทดสอบได้ ในขณะที่ผ้าไม่ทอ C มีค่าต้านทานต่อแรงดัน 6.40 มิลลิเมตรสูงสุด ข้อดีของการใช้ผ้าไม่ทอมาเป็นวัสดุคลุมดินที่มีความแข็งแรงสูงทำให้สามารถป้องกันแมลง ศัตรูพืชได้เป็นอย่างดี

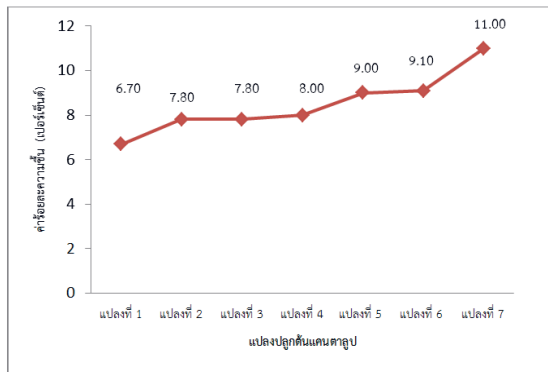
3.1.4 การทดสอบน้ำหนักผ้าไม่ทอที่ปิดด้วยเชิ่มปัก ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบน้ำหนักผ้าตามมาตรฐาน ASTM D3776-96 พบว่าผ้าไม่ทอที่ปิดด้วยเชิ่มปัก D มีน้ำหนักเฉลี่ย 210.2 กรัมต่อตารางเมตร ซึ่งเป็นค่าน้ำหนักที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับผ้าไม่ทอขนาดอื่น และผ้าไม่ทอ A (ภาพที่ 6) มีน้ำหนักเฉลี่ยกรัมต่อตารางเมตมน้อยที่สุดเนื่องจากในขั้นตอนการเตรียมเส้นใยพอลิเอสเตอร์เพื่อนำมาผลิตเป็นผ้าไม่ทอที่ปิดด้วยเชิ่มปักใช้ปริมาณเส้นใยแตกต่างกัน จึงส่งผลโดยตรงต่อน้ำหนักผ้าไม่ทอ



ภาพที่ 6 แผนภูมิค่าเฉลี่ยผลการทดสอบน้ำหนักของผ้าไม่ทอที่ปิดด้วยเชิ่มปัก

3.2 ทดลองปลูกแคนตาลูป โดยใช้ผ้าไม่ทอที่ปิดด้วยเชิ่มปักมาทำเป็นวัสดุคลุมดิน จากการนำผ้าไม่ทอที่ปิดด้วยเชิ่มปักมาใช้เป็นวัสดุคลุมดินในแปลงปลูกแคนตาลูป ทั้งหมด 7 แปลง โดยเริ่มบันทึกผลการทดลองตั้งแต่สัปดาห์ที่ 1 ของการปลูกต้นแคนตาลูปถึงสัปดาห์ที่ 10

3.2.1 ประสิทธิภาพการรักษาน้ำในดินทั้ง 7 แปลง พบว่าทุกแปลงมีค่าความชื้นในดินเป็นผลจากการเตรียมดินให้สมบูรณ์ก่อนการเพาะปลูก ซึ่งเป็นผลทำให้ดินสามารถกักเก็บความชื้นไว้ได้ แปลงปลูกแคนตาลูปที่ใช้ผ้าไม่ทอที่ปิดด้วยเชิ่มปัก แปลงที่ 7 มีค่าเฉลี่ยร้อยละความชื้นในดินสูงสุด 11 เปอร์เซ็นต์ (ภาพที่ 7) แปลงที่ไม่ใช้วัสดุคลุมดินมีค่าเฉลี่ยร้อยละต่ำสุด ร้อยละ 6 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณความชื้นที่ระเหยออกจากดินนั้นมากขึ้นอยู่กับชนิดของดิน และชนิดของวัสดุคลุมดิน โดยทั่วไปดินที่ไม่มีวัสดุมาควบคุมความชื้น ปริมาณน้ำในดินจะต่ำกว่าดินที่มีวัสดุคลุม ในทางกลับกันวัสดุคลุมดินสามารถเพิ่มปริมาณความชื้นให้กับดินได้อีกด้วย [14]



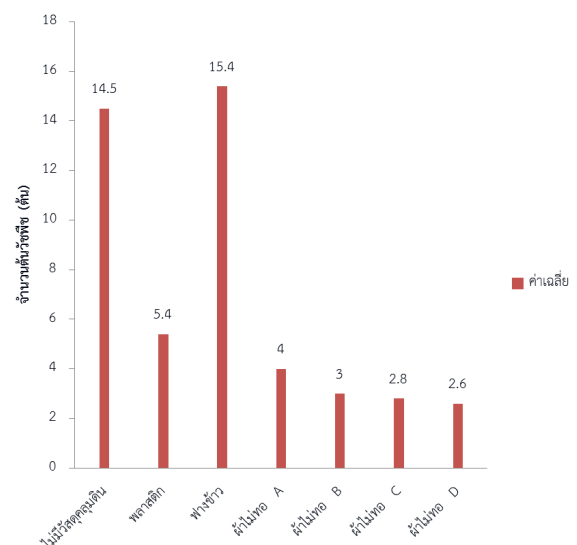
ภาพที่ 7 ค่าเฉลี่ยร้อยละความชื้นของแปลงต้นแคนตาลูป โดยใช้เวลาในการทดลอง 10 สัปดาห์

3.2.2 ศึกษาการเจริญเติบโต ใบ ดอก และผลของต้นแคนตาลูป จากการศึกษากการเจริญเติบโต และผลของต้นแคนตาลูปที่สมบูรณ์ที่สุด จำนวน 3 ต้น ต่อแปลง จำนวนทั้งหมด 7 แปลง อายุต้นพืชตั้งแต่ 1 – 10 สัปดาห์ จากการบันทึกผลทุกสัปดาห์พบว่า แปลงที่ใช้ผ้าไม่ทอที่ปักด้วยเข็มปัก D ค่าการเจริญเติบโตลำต้น ผล และใบ ดีกว่าแปลงปลูกแคนตาลูปแปลงอื่น โดยวัดจากความยาวของลำต้น ความยาวเส้นรอบวงของผล และความยาวเส้นผ่าศูนย์กลางของใบ (หน่วย: เซนติเมตร) เนื่องจากผลของการรักษาความชื้น ของผ้าไม่ทอ D ดีที่สุดจึงส่งผลให้พืชสามารถเจริญเติบโตดี [15] (ภาพที่ 8)



ภาพที่ 8 ค่าเฉลี่ยการเจริญเติบโตของต้นแคนตาลูป

3.2.3 ศึกษาอัตราการลดลงของวัชพืชบนแปลงต้นแคนตาลูปวัชพืชบนแปลงดินเกษตรเป็นปัญหาสำคัญที่เกษตรกรต่างก็พยายามหาวิธีแก้ไข ซึ่งผลจากการศึกษาการลดลงของวัชพืชในแปลงที่มีวัสดุคลุมดินพบว่า จำนวนต้นวัชพืชที่อยู่บนแปลงที่ใช้วัสดุคลุมดินจากผ้าไม่ทอ D มีน้อยกว่าแปลงที่ไม่ใช้วัสดุคลุมดิน (ภาพที่ 9) จะเห็นว่าวัชพืชสามารถเจริญเติบโตได้ดีบนแปลงที่มีฟางข้าวเป็นวัสดุคลุมดิน เนื่องจากระยะเวลาทดลองนาน 70 วัน ทำให้ฟางข้าวซึ่งเป็นวัสดุคลุมดินธรรมชาติ (organic mulches) เกิดการย่อยสลายกลายเป็นแร่ธาตุในดิน และความหนาของชั้นฟางข้าวลดลง จึงเป็นเหตุผลหลักของการเกิดวัชพืชบนแปลงที่ใช้ฟางข้าวเป็นวัสดุคลุมดิน



ภาพที่ 9 แผนภูมิแท่งปริมาณจำนวนวัชพืชบนแปลงต้นแคนตาลูป

4. สรุป

เส้นใยพอลิเอสเตอร์มีความแข็งแรงดี สามารถนำมาผลิตเป็นผ้าไม่ทอที่ปักด้วยเข็มปักได้ เมื่อนำผ้าไม่ทอทั้ง 4 ขนาดมาทดสอบสมบัติทางกายภาพได้แก่ ความหนาบาง วัดค่าแรงดันทะลุ และน้ำหนักผ้า ผ้าไม่ทอที่ปักด้วย

เข็มปัก D มีความหนา และยังมีน้ำหนักมากที่สุด ส่วนผ้าไม่ทอ C มีค่าทนต่อแรงดันทะลุได้สูงสุด นอกจากนี้ยังนำผ้าไม่ทอทั้ง 4 ชนิดไปทดลองใช้เป็นวัสดุคลุมดินบนแปลงต้นแคนตาลูป ผ้าไม่ทอ D สามารถเก็บรักษาความชื้นในดินได้เป็นอย่างดี ส่งผลให้การเจริญเติบโตของต้นพืชดีกว่าแปลงที่ใช้ผ้าไม่ทออื่น และยังพบว่าจำนวนวัชพืชในแปลงที่ใช้ผ้าไม่ทอ D น้อยกว่าแปลงอื่นเช่นเดียวกัน

5.กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติในการสนับสนุนทุนการวิจัยหลัก และศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ที่เอื้อเฟื้อข้อมูล อุปกรณ์เครื่องมือการผลิตผ้าไม่ทอเพื่อใช้ในการวิจัย นอกจากนี้ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีเป็นอย่างสูงในการใช้อาคารสถานที่หลักในการทำงานวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Deng L, Wang K, Li J, Zhao G, Shangguan Z. Effect of soil moisture and atmospheric humidity on both plant productivity and diversity of native grasslands across the Loess Plateau, China. *Ecological Engineering*. 2016;(94):525-31.
- [2] Paul, J. Kramer. Soil Moisture in Relation to Plant Growth. *The Botanical Review*. 1944(9):525-559.
- [3] Kyriacou MC, Leskovar DI, Colla G, Rouphael Y. Watermelon and melon fruit quality: The genotypic and agroenvironmental factors implicated. *Scientia Horticulturae*. 2018;(234):393-408.

- [4] Kyrikou I, Briassoulis D. Biodegradation of Agricultural Plastic Films: A Critical Review. *Journal of Polymers and the Environment*. 2007;15(3):227-.
- [5] Heisler-White JL, Knapp AK, Kelly EF. Increasing precipitation event size increases aboveground net primary productivity in a semi-arid grassland. *Oecologia*. 2008;158(1):129-40.
- [6] C. PDP, Jin Y, E. SO, P. AJ. Directional climate change and potential reversal of desertification in arid and semiarid ecosystems. *Global Change Biology*. 2012;18(1):151-63.
- [7] Rukkla [Internet]. ; 2017. The manual of melon plant; 2018 [22 Apr 2018]; [about 1 p.] from: <https://www.rukkla.com/content/10739/คู่มือการปลูกแคนตาลูป>. (in Thai)
- [8] Sanook [Internet].; 2015. New generation and Super rich Melon; 2018 [22 Apr 2018]; [about 1 p.]; [about 1 p.] from:<http://money.sanook.com/260137>. (In Thai).
- [9] Chalker-Scott L. Impact of Mulches on Landscape Plants and the Environment — A Review. *Journal of Environmental Horticulture*. 2007;25(4):239-49.
- [10] Xiangwu, Z. Fundamentals of Fiber Science. 1st ed. Pennsylvania: Destech Publication, Inc; 2014
- [11] Weerasak Udomkeasy. Fiber since. 1st ed. Bangkok: Chulalongkorn University Printing House;1999. (In Thai)

- [12] Russell SJ, Smith PA. 6 - Technical fabric structures – 3. Nonwoven fabrics A2 - Horrocks, A. Richard. In: Anand SC, editor. Handbook of Technical Textiles (Second Edition): Woodhead Publishing; 2016. p. 163-88.
- [13] Zribi W, Aragüés R, Medina E, Faci JM. Efficiency of inorganic and organic mulching materials for soil evaporation control. Soil and Tillage Research. 2015;148:40-5.
- [14] Kader MA, Senge M, Mojid MA, Ito K. Recent advances in mulching materials and methods for modifying soil environment. Soil and Tillage Research. 2017;168: 155-66.
- [15] Abd El-Mageed TA, Semida WM, Abd El-Wahed MH. Effect of mulching on plant water status, soil salinity and yield of squash under summer-fall deficit irrigation in salt affected soil. Agricultural Water Management. 2016;173: 1-12.

การศึกษาแนวทางการออกแบบและพัฒนาเครื่องนวดกระสอบน้ำตาลทรายใน ขั้นตอนการลำเลียงกระสอบขึ้นรถบรรทุก

ญาญ์ณินท์ จันทรวีเชียร¹ และ เชิดพงษ์ เชี่ยวชาญวัฒนา^{2*}
yanin110134@gmail.com¹, cherdpong.ch@rmuti.ac.th^{2*}

¹ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

^{2*} สาขาวิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรมเครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

Received	: 4-Oct-2019
Revised	: 16-Oct-2019
Accepted	: 17-Oct-2019

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพของน้ำตาลที่แข็งตัวภายในกระสอบ และการศึกษาแรงกดที่ทำให้ก้อนน้ำตาลเกิดการแตกตัว ตลอดจนการศึกษาองค์ประกอบในการออกแบบลูกนวดที่ส่งผลให้ก้อนน้ำตาลเกิดการแตกตัวอย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้การออกแบบลูกนวดที่มีลักษณะคล้ายเฟืองฟันตรง โดยปัจจัยที่ใช้ในการทดสอบ ประกอบด้วย ระยะเวลาสูงของฟันลูกนวด จำนวน 3 ระดับคือ 0.5 1.0 และ 1.5 นิ้ว ความเร็วเชิงเส้นของลูกนวดเท่ากับ 0.086 0.105 และ 0.123 เมตรต่อวินาที จากผลการทดสอบพบว่า ระดับความสูงฟันลูกนวด 1 นิ้ว ความเร็วเชิงเส้นของลูกนวดเท่ากับ 0.105 เมตรต่อวินาที ส่งผลต่อค่าการกด โดยมีค่าความเค้นกดเท่ากับ 40.35 กิโลปาสคาล ความเค้นเฉือนเท่ากับ 15.83 กิโลปาสคาล และมีค่าแรงบิดเท่ากับ 6.03 นิวตันเมตร ผลการทดสอบการกดกับกระสอบน้ำตาลพบว่า ค่าความแข็งโดยเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 50.5 บริเนลล์ ซึ่งผลการทดสอบ แสดงถึงระดับของฟันลูกนวดส่งผลต่อการทำงานของเครื่องนวดกระสอบน้ำตาลทราย โดยที่ช่วงระดับความสูงของฟันลูกนวดที่เหมาะสม มีค่าเท่ากับ 1 นิ้ว ซึ่งระดับความสูงของฟันลูกนวดเพิ่มขึ้นไม่ส่งผลทำให้น้ำตาลมีการแตกตัวดีขึ้น แต่ส่งผลให้ระยะการกดของลูกนวดที่กระทำต่อกระสอบน้ำตาลมีค่ามากขึ้นในทิศทางตรงกันข้าม

คำสำคัญ: เครื่องนวดกระสอบ ลูกนวด ฟันลูกนวด น้ำตาลทราย

A Study of Design and Development Guidelines for Sugar Sack-Threshing Machine on Process of Sacks Transport into a Truck

Yanin Chanwichian¹ and Cherdpong Chiawchanwattana^{2*}
yanin110134@gmail.com¹, cherdpong.ch@rmuti.ac.th^{2*}

¹College of Industrial Technology, King Mongkut's University Of Technology North Bangkok

² Department of Technical Education in Mechanical Engineering, Faculty of Technical Education.
Rajamangala University of Technogy Isan Khonkaen Campus

Received	: 4-Oct-2019
Revised	: 16-Oct-2019
Accepted	: 17-Oct-2019

Abstract

This research aimed to study physical characteristics of caking of sugar in sacks, the compressive that caused sugar cracking and elements in threshers design that caused to efficient sugar cracking in the way that a thresher design has a similarity of spur gear. Experimental factors consist of 3 levels of a height of rasp – bar type thresher as 0.5, 1.0 and 1.5 inches and linear velocity of threshers as 0.086, 0.105 and 0.123 meters per second. According to the results, it was found that the Rasp - bar type a height of 1 inch and linear velocity of threshers as 0.105 meters per second affected 40.35 kilopascals of compressive stress, 15.83 kilopascal of shear stress and 6.03 new ton meters of torsional moment. Experimental results of sugar sacks compression found that an average of hardness test was equal to 50.5 brinells which revealed that levels of rasp - bar type threshers have an effect on functions of sugar sack-threshing machine. A suitable height range of rasp – bar type thresher was 1 inch. Higher levels had no effect on more sugar dissolving. However, scales of compressive stress of rasp – bar type thresher on sugar sacks increased in the opposite way.

Keywords: Threshing Machine, Thresher, Rasp-bar type thresher, Sugar

1. บทนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมในประเทศไทยมีการส่งออกน้ำตาลทรายเป็นอันดับ 2 ของโลกรองจากบราซิล และในภูมิภาคเอเชียไทยยังเป็นประเทศเดียวที่มีศักยภาพในการส่งออกน้ำตาลทรายอย่างสม่ำเสมอ [1] จากข้อมูลในเดือนเมษายน ปี 2018 รายงานว่า ประเทศไทยมีปริมาณหีบอ้อยเท่ากับ 131.11 ล้านตันเพิ่มขึ้นร้อยละ 41 เมื่อเทียบกับช่วงเดียวกันของปีก่อน และผลผลิตน้ำตาลเพิ่มขึ้นเท่ากับ 14.1 ล้านตันจาก 9.9 ล้านตันเมื่อเทียบกับปีก่อน ซึ่งกระทรวงเกษตรสหรัฐอเมริกา คาดการณ์ว่าไทยจะมีการผลิตน้ำตาลเพิ่มขึ้นมากกว่าร้อยละ 2 ในปี 2018/19 การส่งออกน้ำตาลทรายของประเทศเท่ากับ 715,000 ตัน ในเดือนมีนาคมเพิ่มขึ้นร้อยละ 6.7 เทียบกับช่วงเดียวกันกับปีก่อน อันเป็นผลให้การส่งออกทั้งหมดสำหรับเดือนตุลาคมถึงมีนาคม 2017/18 เท่ากับ 3.095 ล้านตัน ซึ่งเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจาก 3.02 ล้านตันเมื่อเทียบกับช่วงเดียวกัน [2] ทั้งนี้ น้ำตาลยังเป็นสินค้าเกษตรที่ส่งออกสำคัญเป็นอันดับ 3 รองลงมาจากยางพาราและข้าวอีกด้วย

ปัญหาน้ำตาลทรายขาวจับตัวเป็นก้อนแข็งส่งผลกระทบต่อภาคอุตสาหกรรมไทยเป็นอย่างมาก จัดเป็นเรื่องใหญ่ที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องซึ่งส่งผลกระทบต่อภาพลักษณ์ของมาตรฐานการผลิตและคุณภาพของน้ำตาลทรายที่ผลิตในประเทศ โดยการเก็บรักษาน้ำตาลในคลังสินค้าเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เกิดปัญหาน้ำตาลทรายขาวจับตัวเป็นก้อนแข็งภายในกระสอบ [3] ซึ่งปัญหาดังกล่าวได้สอดคล้องกับข้อมูลจากการสัมภาษณ์วิศวกร ณ โรงงานน้ำตาลแห่งหนึ่งพบว่าปัจจุบันน้ำตาลทรายขนาด 50 กิโลกรัม ที่มีการเก็บในโกดังเกิดปัญหาการแข็งตัวเป็นก้อนภายในกระสอบ ทำให้ไม่สามารถจำหน่ายน้ำตาลทรายที่แข็งตัวออกไปได้ จึงเป็นปัญหาที่ต้องได้รับการแก้ไขเป็นอันดับต้นๆ ของโรงงานซึ่งปัญหาดังกล่าวส่งผลกระทบต่อผู้ประกอบการ

โดยแนวทางการแก้ไขเบื้องต้นของโรงงาน ได้ใช้แรงงานคนในการทุบกระสอบน้ำตาลระหว่างการลำเลียงกระสอบขึ้นรถบรรทุก เพื่อให้น้ำตาลเกิดการแตกตัวก่อนส่งออกจำหน่าย

งานวิจัยในการศึกษารังนี้จึงมีแนวทางการออกแบบและพัฒนาเครื่องนวดกระสอบน้ำตาลทรายในระหว่างการลำเลียงกระสอบขึ้นรถบรรทุก เพื่อช่วยแก้ปัญหาการจับตัวเป็นก้อนแข็งภายในกระสอบของน้ำตาลทรายบรรจุขนาด 50 กิโลกรัม โดยเป็นการออกแบบเครื่องต้นแบบขนาดย่อส่วนโดยอ้างอิงอัตราส่วนจากขนาดความกว้าง ความยาว ความสูง ของขนาดกระสอบน้ำตาลจากอัตราส่วนระหว่างขนาด 50 กิโลกรัมต่ออัตราส่วนขนาด 1 กิโลกรัม ทั้งนี้ในการออกแบบมีความจำเป็นต้องศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบชุดทดสอบแรงที่กระทำกับก้อนน้ำตาลเกิดการแตกตัว เพื่อนำผลมาแก้ไขปัญหการจับตัวเป็นก้อนแข็งของน้ำตาลในกระสอบก่อนการส่งมอบ

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพของน้ำตาลที่แข็งตัวภายในกระสอบ การศึกษาแรงกดที่ทำให้ก้อนน้ำตาลเกิดการแตกตัว ตลอดจนการศึกษารองค์ประกอบในการออกแบบลูกนวด ที่ส่งผลให้ก้อนน้ำตาลเกิดการแตกตัวได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อนำผลที่ได้ไปใช้เป็นแนวทางในการสร้างเครื่องต้นแบบเครื่องนวดกระสอบน้ำตาลทรายต่อไป

2. แนวคิดในการออกแบบเครื่องนวดกระสอบน้ำตาลทราย

2.1 แนวคิดในการออกแบบฟันลูกนวด

การออกแบบเครื่องนวดกระสอบน้ำตาลทรายมีแนวคิดในการออกแบบหลายองค์ประกอบด้วยกัน จากการศึกษาได้แบ่งลักษณะแนวแรงที่ฟันลูกนวดดังนี้

1. แรงในแนวเส้นรอบวง (F_b) ที่ลูกนวดบนและล่าง

2. แรงในแนวรัศมี (F_r) ที่ลูกนวดบน
และล่าง

เมื่อพิจารณาจาก Freebody Diagram ดังรูปที่
1 (ก) และ (ข) ได้ความสัมพันธ์ของแรงดังนี้
[4,5]

$$F_b = F_n \cos \phi \quad (1)$$

$$F_r = F_n \sin \phi \quad (2)$$

โดยมีรูปที่ 1 (ข) เป็นรูปจำลองลักษณะแรงที่
เกิดขึ้นบนลูกนวดที่ได้ออกแบบ

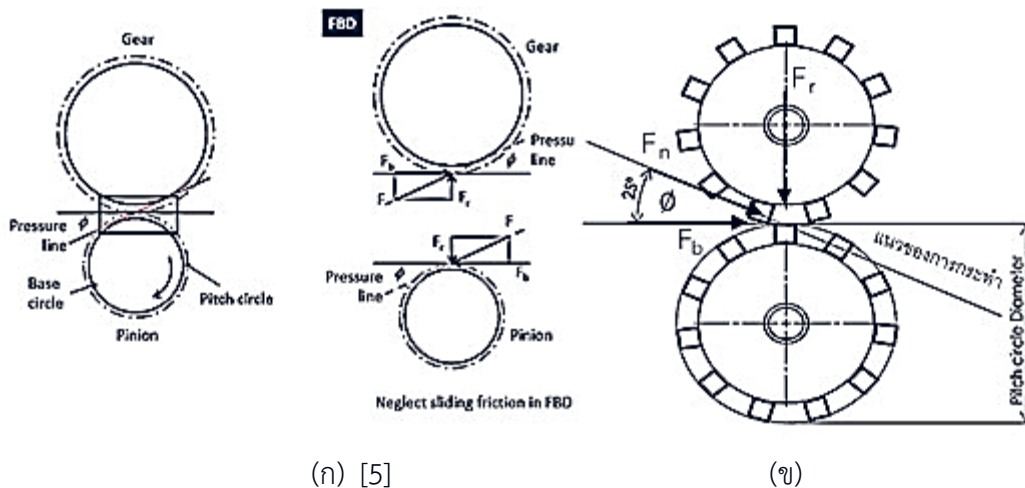
พิจารณาให้ลูกนวดมีลักษณะเป็นคานยื่น
(Cantilever beam) ให้แรงที่ลูกนวดกระทำกับ
กระสอบน้ำตาลอยู่บริเวณปลายฟันของลูกนวด

ทำให้มีความสัมพันธ์ของแรงเมื่อ $\phi = 25$ องศา
ดังนี้

$$F_b = F_n \cos 25^\circ \quad (3)$$

$$F_r = F_n \sin 25^\circ \quad (4)$$

จากข้อมูลการศึกษาพบว่าขนาดของมูม
กด ของเฟืองมาตรฐานเท่ากับ 20 และ 25 องศา
โดยมูมกดมากทำให้ลูกนวดส่งกำลังได้มากแต่จะ
ทำให้จำนวนของฟันเฟืองสัมผัสกันน้อย [6]
ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงเลือกขนาดมูมกดที่ 25 องศา
ซึ่งทำให้เกิดความสัมพันธ์ของแรงในสมการที่ 3
ละ 4



รูปที่ 1 ลักษณะแนวแรงที่เกิดขึ้นบนลูกนวด

2.2 แนวคิดการออกแบบชุดลูกนวด

การออกแบบชุดลูกนวดประกอบไปด้วย 3 ส่วนที่สำคัญดังนี้

2.2.1 การออกแบบเพลาดัน

ตามมาตรฐาน ASME [7]

$$d_0^3 = \frac{16}{\pi \tau} \left[(C_t T)^2 + (C_m M)^2 \right] \frac{1}{2}$$

$$d = \left[\frac{16}{\pi \tau} \left[(C_t T)^2 + (C_m M)^2 \right] \frac{1}{2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (mm)

τ คือ ความเค้นเฉือนสูงสุด (P_a)

C_t คือ ตัวประกอบความล้าเนื่องจากการบิด

C_m คือ ตัวประกอบความล้าเนื่องจากการดัด

T คือ แรงบิดที่เพลาดัน (N.m)

M คือ โมเมนต์ดัด (N.m)

F คือ แรงที่กระทำบนเพลาดัน (N)

โดยมีค่าตัวประกอบความล้าแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าตัวประกอบความล้า

ชนิดของแรง	C_m	C_t
เพลาดันอยู่:		
แรงสม่ำเสมอหรือเพิ่มขึ้นช้าๆ	1.0	1.0
แรงกระตุก	1.5-2.0	1.5-2.0
เพลาดันหมุน:		
แรงสม่ำเสมอหรือเพิ่มขึ้นช้าๆ	1.5	1.0
แรงกระตุกอย่างเบา	1.5-2.0	1.0-1.5
แรงกระตุกอย่างแรง	2.0-3.0	1.5-3.0

2.2.2 การคำนวณหาโมเมนต์บิดที่เพลาดัน

$$T = F \times r \quad (6)$$

T คือแรงบิด (N.m)

F คือแรงที่กระทำต่อวัตถุ (N)

r คือ รัศมี (mm)

2.2.3 การคำนวณหาความเร็วของลูกนวด

$$v = 2\pi n r \quad (7)$$

v คือความเร็วเชิงเส้น (m/s)

n คือความเร็วรอบ (rpm)

r คือรัศมีเส้นผ่านศูนย์กลางพิตช์ (mm)

2.3 แนวคิดการออกแบบระบบส่งถ่าย

กำลัง

การคำนวณอัตราทดเฟืองฟันตรง

$$m \omega = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{d_2}{d_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad (8)$$

ω คือ ความเร็วเชิงมุม (rad/s)

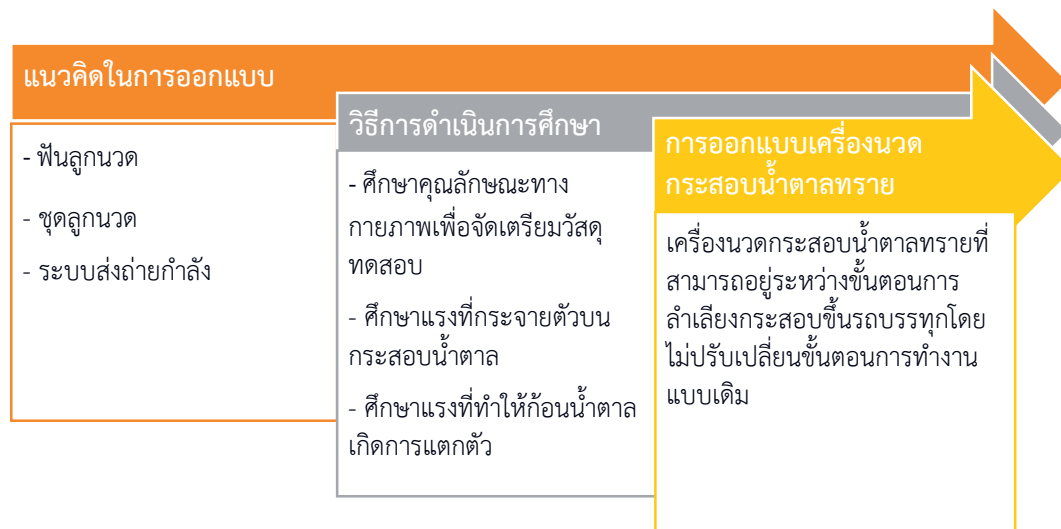
n คือ ความเร็วรอบ (rpm)

d คือเส้นผ่านศูนย์กลางพิตช์ (mm)

N คือจำนวนฟัน

ทั้งนี้ในการออกแบบเครื่องนวดกระสอบ

น้ำตลทรายสามารถสรุปกรอบแนวคิดการวิจัยได้แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 กรอบแนวคิดการวิจัย

3.วิธีการดำเนินการศึกษา

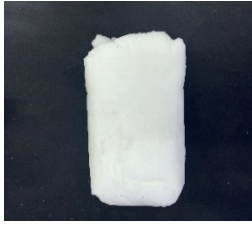
ประกอบไปด้วยการศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพของกระสอบน้ำตาลทรายเพื่อนำมาสร้างวัสดุทดสอบ การศึกษาแรงที่กระจายตัวบนกระสอบน้ำตาลทั้งกระสอบน้ำตาลสภาพปกติและสภาพแข็งตัวตลอดแนว จากนั้นได้ทำการศึกษาแรงที่ทำให้ก้อนน้ำตาลเกิดการแตกตัว เพื่อรวบรวมเป็นองค์ประกอบในการออกแบบเครื่องวัดกระสอบน้ำตาลทรายในหัวข้อสุดท้ายที่ได้ศึกษาโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 การศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพและการจัดเตรียมวัสดุทดสอบ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพของน้ำตาลทรายภายในกระสอบ จากการสุ่มวัดขนาดของกระสอบน้ำตาลทรายขนาด 50 กิโลกรัม จำนวน 20 กระสอบ ภายในโรงงานน้ำตาลแห่งหนึ่ง เพื่อนำขนาดที่ได้มาจัดทำวัสดุทดสอบโดยการจัดทำวัสดุทดสอบนั้น ได้จัดทำเป็นขนาดย่อยส่วนด้วยสัดส่วนเดียวกัน จากกระสอบขนาด 50 kg เป็นกระสอบขนาด 1 kg จากนั้นได้จัดทำให้น้ำตาลแข็งตัวตลอดแนวเพื่อนำมาศึกษาในหัวข้อการกระจายแรงและแรงที่ทำให้ก้อนน้ำตาลเกิดการแตกตัวต่อไป

โดยการจัดทำวัสดุทดสอบนั้นได้ศึกษาจากสาเหตุการจับตัวเป็นก้อนของน้ำตาลทรายโดยได้ศึกษาข้อมูลเพื่อจัดทำวัสดุทดสอบ การศึกษาปัญหาการจับตัวเป็นก้อนของน้ำตาลทรายระหว่างการเก็บรักษานั้น สาเหตุเกิดจากการดูดและคายความชื้นของน้ำตาลทราย (water adsorption and desorption) เริ่มต้นจากเมื่อสถานะแวดล้อมที่จัดเก็บน้ำตาลมีความชื้นสูงกว่าตัวน้ำตาลเอง จะทำให้น้ำตาลดูดความชื้นเข้าสู่ผลึก ซึ่งส่งผลให้บริเวณผิวหน้าของผลึกน้ำตาลมีการละลายเยิ้ม (surface dissolution) และทำให้ผลึกน้ำตาล หลุดร่อนมาจับตัวรวมกันเป็นก้อน ต่อมาหากสภาพความชื้นของสถานะแวดล้อมต่ำกว่าความชื้นของตัวน้ำตาล จะทำให้น้ำตาลคายความชื้นสู่ชั้นบรรยากาศภายนอก [8] และเกิดการจับตัวเป็นก้อนแข็งในที่สุด

งานวิจัยนี้จึงได้จัดทำวัสดุทดสอบโดยการผ่านกระบวนการให้ความชื้นกับน้ำตาลและนำเข้าตู้อบลมร้อนเพื่อให้น้ำตาลเกิดการคายความชื้น โดยทำให้มีลักษณะเป็นก้อนสี่เหลี่ยมแข็งเสมอกันตลอดแนวดังรูปที่ 3 (ก) และนำมาเย็บใส่กระสอบดังรูปที่ 3 (ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 3 วัสดุทดสอบน้ำตาลแข็งเสมอกันตลอด
แนว (ก) และน้ำตาลแข็งตัวในกระสอบ (ข)

3.2 การศึกษาแรงที่กระจายตัวบน กระสอบน้ำตาล

3.2.1 กระสอบน้ำตาลสภาพ
แข็งตัวตลอดแนว

3.2.2 กระสอบน้ำตาลสภาพ
ปกติ

การทดสอบแรงที่กระจายตัวบน
กระสอบน้ำตาลนั้น ทดสอบโดยใช้เครื่อง
Hardness tester รุ่น EQUOTIP โดยใช้หัวกด
ชนิด D ค่าความละเอียด 0.01 HLD หลักการ
ทดสอบที่ใช้ทำการทดสอบนั้นได้แบ่งพื้นที่วัสดุ
ทดสอบโดยการตีกิริตขนาดกว้าง 1 นิ้ว ยาว 1
นิ้ว เพื่อทำการทดสอบแรงที่กระจายตัวบน
กระสอบน้ำตาลในแต่ละช่องพื้นที่ของวัสดุ
ทดสอบที่ได้จัดทำขึ้น เทียบกับแรงที่กระจายตัว
ในถุงน้ำตาลสภาพปกติ โดยรูปที่ 4 แสดงวัสดุ
ทดสอบและกิริตในการแบ่งพื้นที่การทดสอบ



รูปที่ 4 การเตรียมกิริตแบ่งพื้นที่การทดสอบ
และการเตรียมวัสดุทดสอบ

3.3 การศึกษาแรงที่ทำให้ก้อนน้ำตาล เกิดการแตกตัว

เป็นการศึกษาแรงที่กระทำทำให้ก้อน
น้ำตาลเกิดการแตกตัวโดยการกดจากเครื่อง
Universal Testing Unit (UTM) โดยค่าที่ได้จาก
การกดจากเครื่อง UTM เป็นค่าที่แรงถูกกด
กระทำในแนวนอนหรือ (F_r) ในการกำหนด
ปัจจัยการทดสอบ ค่าความเร็วในการปรับเซต
เครื่อง UTM ได้จากการคำนวณสมการที่ 7 ใน
หัวข้อ 2.2.3 อ้างอิงความเร็วรอบตามสายพาน
ลำเลียงภายในโรงงานน้ำตาลแห่งหนึ่ง ($n =$
21.84 rpm) โดยคิดขณะที่เครื่องทำงานเต็ม
100% ไม่สูญเสียพลังงาน จากนั้นนำค่าแรงกด
(F_r) มาคำนวณหาค่าแรงในแนวเส้นรอบวงหรือ
(F_b) จากสมการที่ 3 ในหัวข้อ 2.1 และ
คำนวณหาค่าโมเมนต์บิดที่เพลตามสมการที่ 6
ในหัวข้อ 2.2.2 ทั้งนี้ นำค่าแรงที่ได้คำนวณ
เปรียบเทียบเป็นความเค้นกดและความเค้น
เฉือนเพื่อทดสอบแรงระหว่างปัจจัยในการ
ทดสอบแล้วบันทึกผล

3.4 การออกแบบเครื่องนวดกระสอบ น้ำตาลทราย

ในหัวข้อนี้ จะกล่าวถึงเกณฑ์ในการ
ออกแบบ รายละเอียดในการออกแบบและการ
แสดงองค์ประกอบของเครื่องนวดกระสอบ
น้ำตาลทราย

4. ผลการวิจัย

4.1 ผลการศึกษาคุณลักษณะทาง กายภาพและการจัดเตรียมวัสดุทดสอบ

แสดงค่าเฉลี่ยผลการสุ่มวัดน้ำตาลทราย
ขนาด 50 kg. และการเทียบสัดส่วนระหว่าง
กระสอบน้ำตาลทรายขนาด 50 kg. ต่อ กระสอบ
น้ำตาลทรายขนาด 1 kg. รวมไปถึงการหาค่า
ขนาดของวัสดุทดสอบกระสอบน้ำตาลทราย 1
kg. แสดงดังตารางที่ 2

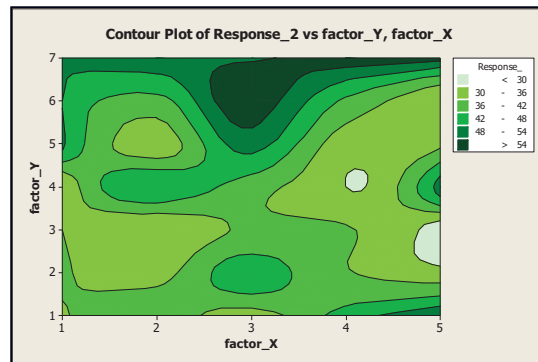
ตารางที่ 2 ค่าสัดส่วนกระสอบน้ำตาล

ความจุ	ขนาด (cm.)			สัดส่วน	
	(W)	(L)	(T)	(W:T)	(L:T)
50 kg.	52	80	16	3.25	5
1 kg.	13	20	4	3.25	5

4.2 ผลการศึกษาแรงที่กระจายตัวบนกระสอบน้ำตาล

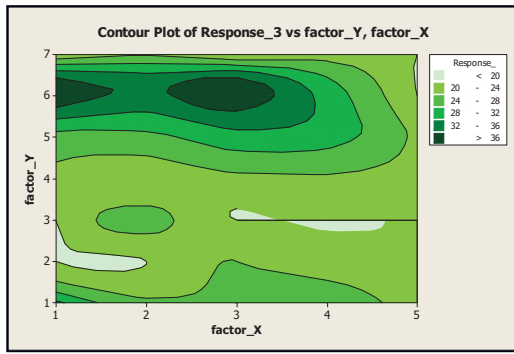
ผลการศึกษาแรงที่กระจายตัวบนกระสอบน้ำตาลทรายเพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพ ความแข็งของกระสอบน้ำตาล โดยแสดงเป็นเส้นระดับความสูง (Contour line) ทำการศึกษาทั้งสิ้น 4 วัสดุทดสอบได้แก่ กระสอบน้ำตาลที่ทำให้แข็งตัวตลอดแนวและกระสอบน้ำตาลสภาพปกติที่ใช้บริโภคในตลาดทั้งหมด 3 ยี่ห้อ โดย Factor X และ Factor Y ในรูป Contour line คือพิกัดของกระสอบในแนวราบ และ พิกัดของกระสอบในแนวตั้ง ซึ่งได้แบ่งพื้นที่การทดสอบโดยการตักกริดทั้งหมด 35 ช่อง แนวราบ 5 ช่อง แนวตั้ง 7 ช่อง เพื่อศึกษา ลักษณะความแข็งของกระสอบน้ำตาลในแต่ละช่วงพื้นที่ของกระสอบ

4.2.1 ผลการศึกษาการกระจายตัวของแรงบนกระสอบน้ำตาลที่มีลักษณะแข็งตัวตลอดแนว มีผลการทดสอบค่าความแข็งโดยเฉลี่ยเท่ากับ 50.5 HB มีค่าต่ำสุดอยู่บริเวณขอบของกระสอบทั้งสองด้านและค่าสูงสุดของความแข็งอยู่บริเวณกลางกระสอบ โดยค่าความแข็งสูงสุดและต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 24 HB และ 71 HB ตามลำดับ และมีค่า SD. เท่ากับ 35.24 แสดงให้เห็นว่ากระสอบมีความแข็งเสมอกันทั่วพื้นที่ของกระสอบ ผลของการวัดทุกช่วงพื้นที่บนกระสอบแสดงดังรูปเส้นระดับความสูง ดังรูปที่ 5

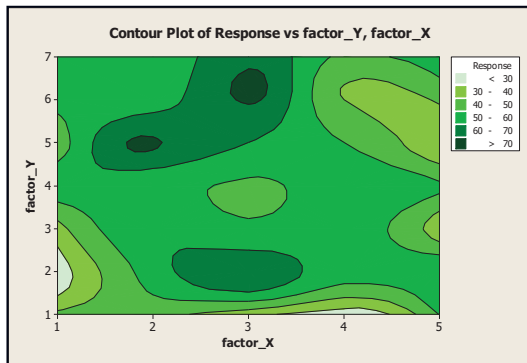


รูปที่ 5 เส้นระดับความสูงของกระสอบน้ำตาลที่แข็งตัวตลอดแนว

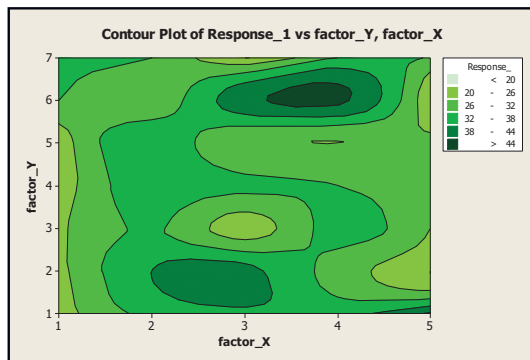
4.2.2 ผลการกระจายตัวของแรงบนกระสอบน้ำตาลสภาพปกติ การทดสอบการกระจายแรงในกระสอบน้ำตาลสภาพปกติได้ทำการทดสอบด้วยน้ำตาลบริโภคในตลาดทั้งหมด 3 ยี่ห้อ ผลการทดสอบน้ำตาลบริโภคในตลาดยี่ห้อที่ 1 มีค่าความแข็งโดยเฉลี่ยเท่ากับ 35.5 HB มีค่าต่ำสุดและสูงสุดของความแข็งเท่ากับ 21 HB และ 45.5 HB ตามลำดับและมีค่า SD. เท่ากับ 22.68 ผลของการวัดทุกช่วงพื้นที่แสดงรูปเส้นระดับความสูง ดังรูปที่ 6 (ก) น้ำตาลสภาพปกติยี่ห้อที่ 2 มีค่าความแข็งโดยเฉลี่ยเท่ากับ 41.5 HB มีค่าต่ำสุดและสูงสุดของความแข็งเท่ากับ 30 HB และ 45.5 HB และมีค่า SD. เท่ากับ 28.50 แสดงผลของการวัดทุกช่วงพื้นที่เป็นรูปเส้นระดับความสูง ดังรูปที่ 6 (ข) ผลการทดสอบน้ำตาลบริโภคในตลาดยี่ห้อที่ 3 มีค่าความแข็งโดยเฉลี่ยเท่ากับ 23 HB มีค่าต่ำสุดและสูงสุดของความแข็งเท่ากับ 20 HB และ 39 HB ตามลำดับและมีค่า SD. เท่ากับ 24.25 แสดงผลของการวัดทุกช่วงพื้นที่โดย เส้นระดับความสูง ดังรูปที่ 6 (ค) จะเห็นได้ว่าน้ำตาลทั้ง 3 ยี่ห้อ มีค่าความแข็งของน้ำตาลไม่แตกต่างกันโดยลักษณะของความแข็งแจกแจงได้ตามเส้นระดับความสูงค่าความแข็งต่ำสุดและสูงที่สุดอยู่บริเวณพื้นที่เดียวกัน



(ก)



(ข)



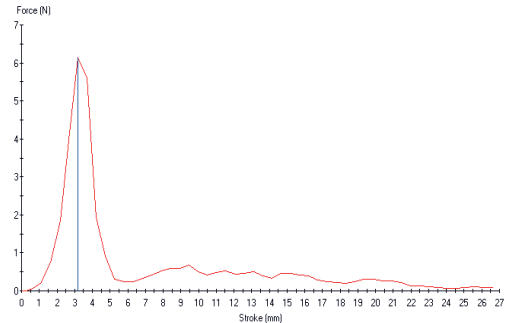
(ค)

รูปที่ 6 เส้นระดับความสูงของกระสอบที่
สภาวะปกติ

4.3 ผลการศึกษาแรงที่กระทำให้อ่อน น้ำตาลเกิดการแตกตัว

การกำหนดค่าความเร็วเครื่อง UTM (v_{utm}) ทั้งหมด 3 ค่าความเร็วได้แก่ 0.086 0.105 และ 0.123 เมื่อลูกนวดมีความสูงของฟันเท่ากับ 0.5 1 และ 1.5 นิ้ว ตามลำดับ ค่าแรงกดที่ได้จากการทดสอบถูกแบ่งออกตามค่าความเร็ว v_{utm} ที่คำนวณได้ แสดงผลการทดสอบและการคำนวณดังตารางที่ 3 โดยรูปที่ 7 แสดง

ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการทดสอบกระสอบ
น้ำตาลด้วยเครื่อง UTM



รูปที่ 7 ตัวอย่างกราฟจากการทดสอบด้วย
เครื่อง UTM

ตารางที่ 3 ผลของแรงกดกระสอบน้ำตาลจาก
เครื่องUTM

รายละเอียด	ความเร็ว m/s		
	0.086	0.105	0.123
$F_{r_{ave}}$ (N.)	86.85	86.09	88.17
F_b (N.)	33.26	32.97	33.77
รัศมีวงกลมพิตช์ (mm)	0.058	0.070	0.082
โมเมนต์บิดที่เพลลา (N.m)	5.04	6.03	7.23
ความเค้นกด (kPa)	40.70	40.35	41.32
ความเค้นเฉือน (kPa)	15.59	15.92	15.83

การแสดงผลของแรงกดจากเครื่อง UTM ที่ความเร็ว 0.086 0.105 และ 0.123 m/s จากการทดสอบทั้งหมด 3 ซ้ำ พบว่าค่าแรงกดที่ทำให้ก้อนน้ำตาลเกิดการแตกตัว (F_r) โดยเฉลี่ยเท่ากับ 86.85 86.09 และ 87.42 N. ตามลำดับ โดยค่าที่ได้ เกิดจากการนำค่าของน้ำหนักลูกนวดรวมกับค่าแรงกดที่เกิดขึ้นจากเครื่อง UTM มาคำนวณ ส่งผลให้ค่า (F_b) เท่ากับ

33.26 32.97 และ 33.77 N. และมีค่าโมเมนต์บิดที่เพลาท่เท่ากับ 5.04 6.03 และ 7.23 N/m. และมีค่าความเค้นกด (Normal stress) เท่ากับ 40.70 40.35 และ 41.32 kPa ตลอดจนมีค่าความเค้นเฉือน (Shear stress) เท่ากับ 15.59 15.92 และ 15.83 kPa ตามลำดับ

4.4 ผลการออกแบบเครื่องนวด กระสอบน้ำตาลทราย

4.4.1 เกณฑ์ในการออกแบบ

ลูกนวดมีลักษณะการทำงานแบบเฟืองขบชนิดอินโวลูตทำงานในลักษณะใช้แรงบีบอัดในแนวตั้ง โดยกำหนดให้มีมุมกดในแนวการกระทำที่ 25 องศา และมีแรงส่งกำลังทั้งหมดกระทำที่ปลายพินกำหนดให้วงกลมพิตช์ อยู่บริเวณขอบนอกสุดของพินลูกนวดและเครื่องสามารถถอดเปลี่ยนชุดลูกนวดได้ การออกแบบใช้กลไกที่เรียบง่ายไม่ซับซ้อนและสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเครื่องนวดกระสอบน้ำตาลทรายในระดับอุตสาหกรรมได้

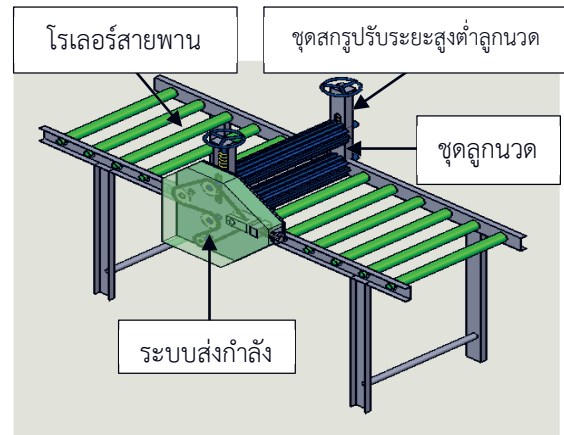
4.4.2 การแสดงองค์ประกอบของเครื่องนวดกระสอบน้ำตาลทราย แสดงดังรูปที่ 8 โดยเครื่องนวดกระสอบน้ำตาลทรายมีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้

- (1.) โรลเลอร์สายพานลำเลียง
- (2.) โครงรับลูกนวด
- (3.) ประกับยึดตลับลูกปืนลูกนวด
- (4.) สกรูปรับความสูง – ต่ำของลูกนวด
- (5.) ลูกนวด

ซึ่งเป็นอุปกรณ์หลักในการนวด โดยการทดสอบได้สร้างลูกนวดทั้งหมด 3 ชุด แตกต่างกันในระดับความสูงของพินลูกนวด มี 3 ระดับ ได้แก่

- ระดับที่ 1 ความสูงของพิน 0.5 นิ้ว
- ระดับที่ 2 ความสูงของพิน 1 นิ้ว
- ระดับที่ 3 ความสูงของพิน 1.5 นิ้ว

- (6.) ชุดคอยล์สปริงปรับแรงกดของลูกนวด



รูปที่ 8 องค์ประกอบเครื่องนวดกระสอบน้ำตาลทราย

5. สรุปผล

สำหรับผลการศึกษาคูณลักษณะทางกายภาพ และการจัดเตรียมวัสดุทดสอบพบว่าขนาดกระสอบน้ำตาลทราย 50 kg. ในโรงงานน้ำตาลแห่งหนึ่งมีค่าความกว้าง ความยาว ความหนาโดยเฉลี่ย เท่ากับ 52 80 และ 16 cm. ซึ่งมีสัดส่วนความกว้างต่อความหนาและความยาวต่อความหนาเท่ากับ 3.25 และ 5 ตามลำดับ ทำให้ขนาดของกระสอบน้ำตาลทรายที่ได้จัดทำขึ้นขนาดย่อยส่วน 1 kg. มีความกว้าง ความยาวและความหนาเท่ากับ 13 20 และ 4 cm. ตามลำดับ

จากการศึกษาแรงที่กระจายตัวบนกระสอบน้ำตาลพบว่าค่าความแข็งของวัสดุทดสอบ น้ำตาลที่แข็งตัวตลอดแนวที่ได้จัดทำขึ้นมีค่าความแข็งโดยเฉลี่ยเท่ากับ 50.5 HB และค่าความแข็งของน้ำตาลทรายสภาพปกติที่บริโภคนในตลาด มีค่าความแข็งโดยเฉลี่ยเท่ากับ 33.3 HB ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบวัสดุทดสอบที่ได้จัดทำขึ้นกับน้ำตาลที่บริโภคในตลาดมีความแตกต่างของค่าความแข็งโดยเฉลี่ยเท่ากับ 17.2 HB ซึ่งความแตกต่างการกระจายตัวของแรงของน้ำตาลที่ได้จัดทำเป็นวัสดุทดสอบนั้นมีการกระจายตัวของแรงน้อยกว่าน้ำตาลที่สภาพปกติ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การจัดทำวัสดุทดสอบมีความแข็งสม่ำเสมอทั้งทั่วทั้งกระสอบ โดยผล

การศึกษาแรงที่กระทำให้อ่อนน้ำตาลเกิดการแตกตัวพบว่าระยะความสูงของฟันลูกนวดที่เหมาะสมเท่ากับ 1 นิ้ว เนื่องจากให้ค่าความเค้นที่น้อยที่สุดที่กระทำให้น้ำตาลเกิดการแตกตัวได้โดยมีความเค้นอัดเท่ากับ 40.35 kPa และมีความเค้นเฉือนเท่ากับ 15.92 kPa และให้ค่าโมเมนต์บิดที่เพลเท่ากับ 6.03 N.m โดยขนาดความสูงของฟันลูกนวดไม่ได้ทำให้แนวโน้มของการนวดมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นแต่เป็นการเพิ่มความความลึกในการกดอัดกระสอบน้ำตาลได้ลึกขึ้นเท่านั้นเนื่องจากการนวดในลูกนวดลักษณะนี้ต้องอาศัยแรงในแนวเส้นรอบวงร่วมด้วยเนื่องจากแรงนี้ทำให้เกิดแรงบิด ซึ่งแรงดังกล่าวมีความสัมพันธ์กันกับขนาดของลูกนวดซึ่งเมื่อระยะความสูงของฟันลูกนวดเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้แรงบิดมีค่าลดน้อยลงในทางทฤษฎี

การกำหนดเกณฑ์การออกแบบเครื่องนวดกระสอบน้ำตาลทรายสามารถสรุปรูปแบบการทำงานของเครื่องได้ดังนี้ เครื่องสามารถปรับระยะสูงต่ำของลูกนวดเพื่อรองรับกับช่วงความหนาของกระสอบและสามารถถอดเปลี่ยนชุดลูกนวดได้ มีระบบการลำเลียงกระสอบน้ำตาลเข้าเครื่องโดยใช้โรลเลอร์และใช้โซ่เป็นระบบส่งกำลังอย่างง่าย ทั้งนี้การนำประโยชน์ไปใช้การศึกษานี้เป็นการศึกษาแนวทางในการออกแบบเครื่องนวดกระสอบน้ำตาล เพื่อนำผลที่ได้ศึกษาไปประยุกต์ใช้กับโรงงานอุตสาหกรรม

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและได้รับการอนุเคราะห์จากคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยมหาสารคามถึงสถานที่การดำเนินงานวิจัย ตลอดจนอุปกรณ์การทดสอบในงานวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Bank of Thailand, NE Symposium. Step into a new context of the Thai sugarcane and sugar industry. Academic seminar On the occasion of the 49th anniversary of the Bank of Thailand Northeast office; 2017 Sep 1, Khon Kaen. Bank of Thailand Northeast ; 2017. (in Thai)
- [2] Office of the cane and sugar board. World sugar market report for April 2018. [Internet]. 2018 April [cited 2019 Sep 23]. Available. <http://www.ocsb.go.th/upload/international/fileupload/9733-9430.pdf> (in Thai)
- [3] The Faculty of Agro-Industry at Kasetsart University. Preventing canking in white sugar. Sugarcane and Sugar industry. [Internet]. 2008 October 10 [cited 2019 Sep 23]; 1-5, Available. <http://www.ocsb.go.th/upload/contents/12/attachfiles/report.pdf> (in Thai)
- [4] Ratanasumawong.C .Gears in general. [Internet]. Bangkok: Engineering Chulalongkorn university; 2018 [cited 2019 Sep 19]; Available: http://pioneer.netserv.chula.ac.th/rchanat/CRW01_Gears20General.pdf. (in Thai)
- [5] Ratanasumawong.C .Gears in general. [Internet]. Bangkok: Engineering Chulalongkorn university; 2018 [cited 2019 Sep 19]. Available: http://pioneer.netserv.chula.ac.th/rchanat/CRW02_SpurGears20.pdf (in Thai)

- [6] Wittaya W. Gear of power transmission. Mechanical Electrical and Industrial . 1994; 110: 123-125 (in Thai)
- [7] Ungpakron W, Tanadngan C, Machine design. 1st ed. Bangkok; 2013
- [8] Wanchaitanawong P. Mechanism of Caking of Sugar. Sugarcane and Sugar industry. 2005; 1 : 3-3 (in Thai)

การศึกษาอัตราเร็วรอบเครื่องยนต์แก๊สolineด้วยการควบคุมตำแหน่ง ของลิ้นควบคุมอัตราเร็วเดินเบา

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

^{1*} ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต

Received	: 1-Nov-2018
Revised	: 25-Jan-2019
Accepted	: 25-Feb-2019

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการออกแบบระบบควบคุมอัตราเร็วรอบเครื่องยนต์แก๊สolineโดยใช้ลิ้นควบคุมอัตราเร็วเดินเบา เครื่องยนต์ที่ทดลองเป็น YAMAHA แบบลูกสูบเดี่ยว ความจุกระบอกสูบ 115 cc. ระบบจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิงแบบคาร์บูเรเตอร์ เครื่องยนต์ถูกจำลองเป็นระบบอันดับหนึ่งอย่างง่ายและอาศัยโปรแกรม MATLAB R2011a ในการวิเคราะห์ ไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F4011 ถูกโปรแกรมด้วยภาษา C เป็นตัวควบคุม เมื่อป้อนสัญญาณอ้างอิงแบบขั้นบันไดวิธีออกแบบตัวควบคุมทางภาพของเซนฮอนเรสวิก (Chien-Hrones-Reswick : CHR) ถูกใช้เพื่อทราบค่าเกนตัวควบคุมพีไอดี การออกแบบตัวควบคุมของ CHR ข้างต้น 2 วิธี ถูกทดลอง คือ วิธี 20% overshoot และ วิธี Least overshoot ผลการทดลองพบว่าวิธี Least overshoot ให้ผลการพุ่งเกินและมีสมรรถนะที่ดี สมรรถนะของระบบถูกทดสอบ 3 กรณีคือ การควบคุมอัตราเร็วรอบเครื่องยนต์คงที่ การเปลี่ยนอัตราเร็วรอบอ้างอิงแบบฉับพลัน และการรบกวนด้วยภาระจากการเบรก ผลการทดสอบพบผลตอบสนองตัวควบคุมที่ออกแบบสามารถติดตามอัตราเร็วรอบอ้างอิงในเวลา 1.9 วินาที โดยไม่พบค่าพุ่งเกิน ระบบสามารถกำจัดการรบกวนจากการเบรกภายในเวลา 6 วินาที

คำสำคัญ: เครื่องยนต์แก๊สoline เซนฮอนเรสวิก dsPIC30F4011

Study of Gasoline Engine Speed by Controlling Position of Idle Speed Control Valve

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

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

Received	: 1-Nov-2018
Revised	: 25-Jan-2019
Accepted	: 25-Feb-2019

Abstract

The objective of this research was to design a gasoline engine speed control system by using Idle Speed Control Valve (ISCV). The engine of interest was a 115 cc. single-cylinder YAMAHA engine with a carburetor. It was modeled as a first-order linear system for simplicity, and was verified by using MATLAB R2011a. Using the C programming language, a dsPIC30F4011 microcontroller was programmed as the controller. The Chien-Hrones-Reswick (CHR) graphical techniques were used to obtain the PID controller gains when unit step reference inputs were applied to the control system. For this, two possibilities associated with the CHR technique were examined, namely PID 20% overshoot and PID least overshoot. It was found that the PID least overshoot method yielded satisfactory overshoot and performance. Performance of the control system was examined in three experiments. These included constant engine speed control, increasing speed control, and breaking disturbance rejection. It appeared from these experiments that, the output of the system could reach a constant speed reference input within 1.9 seconds, with no overshoot. The breaking disturbance was rejected within 6 seconds.

Keywords: Gasoline engine, Chien-Hrones-Reswick, dsPIC30F4011.

1. บทนำ

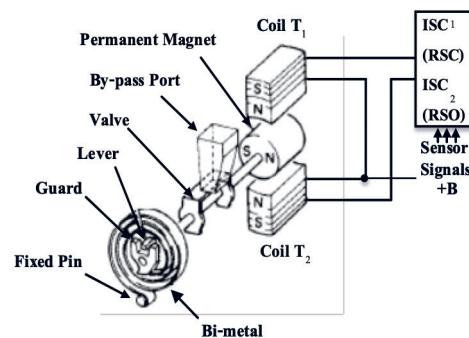
งานวิจัยการศึกษาอัตราเร็วรอบเครื่องยนต์แก๊สโซลีนด้วยการควบคุมตำแหน่งของลิ้นควบคุมอัตราเร็วเดินเบา มีแนวคิดจากการควบคุมอัตราเร็วรอบเครื่องยนต์ให้คงที่ เพื่อลดเชื้อเพลิงในขณะเปลี่ยนอัตราเร็วอ้างอิงจากการกดคันเร่ง การควบคุมดังกล่าวถูกนำเสนอหลายวิธี ในปี ค.ศ. 1769 [1], [2] เจมส์ วัตต์ ได้ประดิษฐ์เครื่องจักรไอน้ำสามารถควบคุมอัตราเร็วรอบเครื่องจากระบบทางกล โดยออกแบบมวลเฉื่อยทรงกลมหมุนรอบเพลตามอัตราเร็วรอบเครื่อง กรณีอัตราเร็วรอบสูง มวลเฉื่อยจะเคลื่อนที่กดแหวนสปริงที่สวมในเพล และส่งกำลังกลลิ้นลดอัตราการไหลของไอน้ำ ทำให้อัตราเร็วรอบเครื่องจักรไอน้ำลดลง ในปัจจุบันเครื่องยนต์แก๊สโซลีนถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย เครื่องยนต์ถูกติดตั้งลิ้นควบคุมอัตราเร็วเดินเบา (Idle Speed Control Valve : ISCV) ขนานกับลิ้นปีกผีเสื้อ[3] การออกแบบตัวควบคุมถูกนำเสนอหลายวิธี เช่น วิธี Fuzzy Adaptive PID [4] วิธี Fuzzy Self-tuning PID [5] งานวิจัยทั้งสองมีจุดประสงค์ออกแบบตัวควบคุมที่สามารถรักษ้อัตราเร็วรอบเดินเบาในขณะรถรับแรงบิดรบกวนจากการทำงานของเครื่องยนต์ แนวคิดดังกล่าวถูกพัฒนาเป็นระบบรักษ้อัตราเร็วของตัวรถคันที่ ในปี ค.ศ. 2016 Rout MK และคณะ[6] ได้ออกแบบตัวควบคุมพีไอดี (Proportion – Integral – Derivative Controller: PID) สำหรับระบบ Cruise Control ด้วยวิธีวางโพล

ระบบ Cruise Control ถูกจดสิทธิบัตร เช่น [7]-[8] ในปี ค.ศ. 1990 [9] ระบบถูกผลิตเพื่อการค้าสำหรับรถยนต์ Honda CIVIC โดยระบบจะป้อนกลับอัตราเร็วตัวรถมาที่ตัวควบคุม

ส่งผลให้สามารถรักษ้อัตราเร็วรถที่ต้องการ ระบบสามารถทนต่อการรบกวนจากภายนอกได้ด้วยแนวคิดลดพลังงานเชื้อเพลิงขณะขับ ระบบ Cruise Control และการควบคุมอัตราเร็วรอบเดินเบาด้วย ISCV ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดศึกษ้อัตราเร็วรอบเครื่องยนต์แก๊สโซลีนด้วยการควบคุมตำแหน่งของลิ้นควบคุมอัตราเร็วเดินเบา

2. การควบคุมอัตราการไหลของอากาศด้วย ISCV

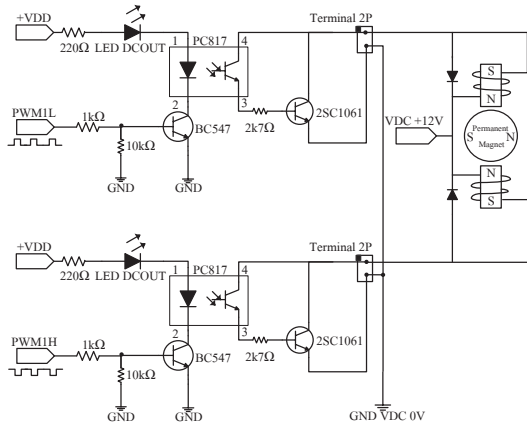
ลิ้นควบคุมอัตราเร็วเดินเบา (ISCV) ทำหน้าที่เปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศที่ผ่านลิ้น โดยการเพิ่มหรือลดอัตราการไหลซึ่งแปรผันกับสัญญาณจากชุดควบคุมแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Control Unit : ECU) งานวิจัยนี้เลือก ISCV ชนิดโรตารี โซเลนอยด์ (Rotary Solenoid) โครงสร้างประกอบด้วยชุดลวดสองชุดแม่เหล็กถาวร ตัวลิ้นและแกนเพลลา ปลายแกนเพลลาติดตั้งสปริงกันหอย ดังแสดงในรูปที่ 1



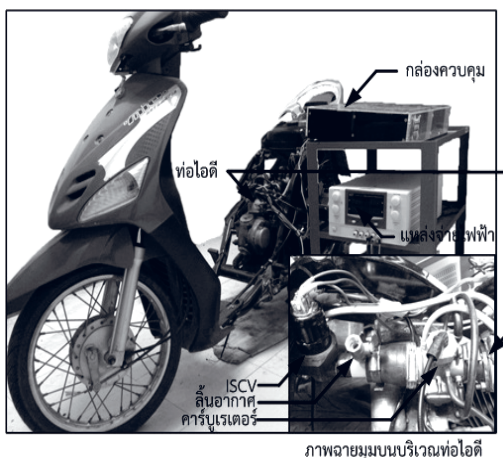
รูปที่ 1 โครงสร้าง ISCV แบบโรตารี โซเลนอยด์[10]

การควบคุมตำแหน่งของลิ้น ISCV ถูกควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F4011 ขา PWM1L และ PWM1H วงจรขับ ISCV แสดงได้ดังรูปที่ 2 เมื่อ +VDD

คือ แหล่งจ่าย 5 โวลต์ GND คือ สายดินจาก ไมโครคอนโทรลเลอร์ VDC+12V คือ แหล่งจ่าย จากแบตเตอรี่ GND VDC 0V คือ สายดินจาก แบตเตอรี่



รูปที่ 2 วงจรขับ ISCV



ภาพลายมบนบริเวณท่อไอเสีย

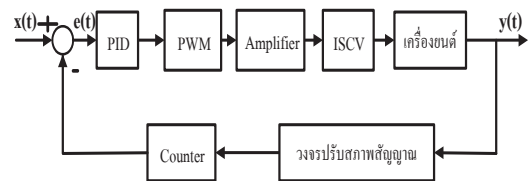
รูปที่ 3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3. การออกแบบระบบควบคุม

การควบคุมอัตราเร็วรอบเครื่องยนต์ถูก ทดลองกับรถจักรยานยนต์ YAMAHA Mio (เลข เครื่องยนต์ 5WR-046433) ความจุกระบอกสูบ 115 cc. ระบบการจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิงแบบ คาร์บูเรเตอร์ ผู้วิจัยติดตั้ง ISCV และลิ้นอากาศ

ระหว่างคาร์บูเรเตอร์กับกรองอากาศ โดยเปิด ลิ้นคาร์บูเรเตอร์ในตำแหน่งเปิดสุด อุปกรณ์ใน การทดลองแสดงดังรูปที่ 3

การควบคุมอัตราเร็วรอบเครื่องยนต์ อธิบายดังรูปที่ 4 มอดูลตัวนับในไมโคร คอนโทรลเลอร์นับสัญญาณที่ผ่านวงจรปรับ สภาพสัญญาณในหนึ่งช่วงเวลาการชักตัวอย่าง จากนั้นคำนวณอัตราเร็วรอบปัจจุบันของ เครื่องยนต์ สัญญาณผลต่างถูกคำนวณจาก อัตราเร็วรอบอ้างอิงลบอัตราเร็วรอบปัจจุบัน ตัวควบคุมพีไอดีจะคำนวณสัญญาณผลต่างและ สร้างสัญญาณควบคุมแบบพีดับเบิลยูเอ็ม (Pulse-Width Modulation: PWM) สัญญาณ นี้จะถูกขยายเพื่อขับ ISCV



รูปที่ 4 การควบคุมอัตราเร็วรอบเครื่องยนต์

4. การออกแบบตัวควบคุมพีไอดี

ตัวควบคุมพีไอดีนิยมใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากความเรียบง่ายของโครงสร้างตัว ควบคุม และความสามารถในการลดค่าความ ผิดพลาดได้หลายชนิดในตัวควบคุมเดียว [11] ตลอดจนความยืดหยุ่นในการปรับเกนตัวควบคุม โดยไม่จำเป็นต้องทราบแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์ของระบบ ตัวควบคุมพีไอดีแสดงดัง สมการที่ 1 [12]

$$y(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

เมื่อ $e(t)$ คือ สัญญาณผลต่าง ($x(t) - y(t)$)
 $y(t)$ คือ สัญญาณเอาต์พุต
 $x(t)$ คือ สัญญาณอินพุต
 K_P, K_I, K_D คือ เกนตัวควบคุม พี ไอ ดี ตามลำดับ

การโปรแกรมสมการพีไอดีข้างต้นลงไมโครคอนโทรลเลอร์ ถูกโปรแกรมเป็นสมการผลต่างดังสมการที่ 2 [12]

$$y(kT) = K_P e(kT) + K_I S_{kT} + K_D [e(kT) - e_{(k-1)T}] \quad (2)$$

โดยที่ $K_I T = K_I$ และ $S_{kT} = S_{(k-1)T} + e_{(kT)}$

เมื่อ T คือ คาบเวลาซิกตัวอย่าง

k คือ จุดซิกตัวอย่างสัญญาณ

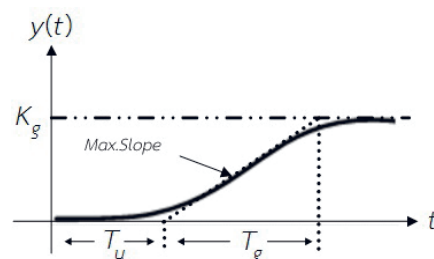
S_{kT} คือ ผลรวมผลต่างอดีตและปัจจุบัน

5. วิธีปรับค่าเกนตัวควบคุมพีไอดี

ปัญหาการปรับค่าเกนตัวควบคุมพีไอดีคือ ค่าเกนของตัวควบคุมควรมีค่าใดจึงเหมาะสมกับระบบนั้น ๆ ในทางทฤษฎีค่าเกนสามารถคำนวณได้อย่างถูกต้องถ้าทราบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ ในทางปฏิบัติการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ซับซ้อนเป็นเรื่องยาก เนื่องจากมีจำนวนตัวแปรพลวัตที่มาก จากปัญหาดังกล่าว การปรับเกนตัวควบคุมจึงอาศัยวิธีสุ่มค่าและวิธีเปิดตาราง ในปี ค. ศ. 1942 [13] ซีเกลอร์ นิโคลส์ (Ziegler-Nichols) พัฒนาวิธีปรับค่าเกนตัวควบคุมพีไอดีโดยอาศัยการทดลองระบบวงปิดโดยป้อนสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณขั้นบันได จากนั้นบันทึกผลตอบสนองช่วงไม่มีการหน่วง (Undamped oscillation) สำหรับระบบควบคุมอัตราเร็วรอบเครื่องยนต์ การปรับค่า

เกนด้วยวิธีซีเกลอร์นิโคลส์ดังกล่าวเป็นเรื่องยากและอาจส่งผลให้เครื่องยนต์ได้รับความเสียหายด้วยข้อจำกัดนี้ผู้วิจัยจึงศึกษาวิธีปรับค่าเกนพีไอดีจากผลตอบสนองวงเปิด และเลือกวิธีปรับค่าเกนตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีเซนฮรอนเรสวิก (Chien-Hrones-Reswick: CHR) [12]-[14] โดยป้อนสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันได การคำนวณค่าเกนตัวควบคุมอาศัยวิธีทางภาพ การปรับค่าเกนพีไอดีวิธี CHR มีขั้นตอนดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1. ต่อวงจรควบคุมเป็นแบบวงเปิดและป้อนสัญญาณควบคุมเป็นสัญญาณแบบขั้นบันได
- ขั้นตอนที่ 2. บันทึกผลตอบสนอง $y(t)$ และอ่านค่า K_g ในสภาวะคงตัว ดังรูปที่ 5
- ขั้นตอนที่ 3. จากผลตอบสนองที่ได้ลากเส้นตรงที่มีความชันสูงสุดตัดกับเส้นผลตอบสนองในสภาวะคงตัวและแกนเวลา อ่านคาบเวลา T_u และ T_g
- ขั้นตอนที่ 4. แทนค่า K_g คาบเวลา T_g และ T_u ในตารางที่ 1 เพื่อทราบค่าเกนสำหรับตัวควบคุมแต่ละแบบ
- ขั้นตอนที่ 5. คำนวณค่า $R = T_g / T_u$ และเลือกตัวควบคุมดังตารางที่ 2



รูปที่ 5 ผลตอบสนองวงเปิดวิธี CHR

ผลลัพธ์เมื่อแทนค่า K_g คาบเวลา T_u และ T_g ในตารางที่ 1 ให้ผลตอบสนองสองแบบ คือ ผลตอบสนองมีค่าพุ่งเกิน 20% (20% overshoot) และผลตอบสนองมีการพุ่งเกินน้อยที่สุด (Least overshoot)

ตารางที่ 1 ค่าเกณฑ์ควบคุมวิธี CHR

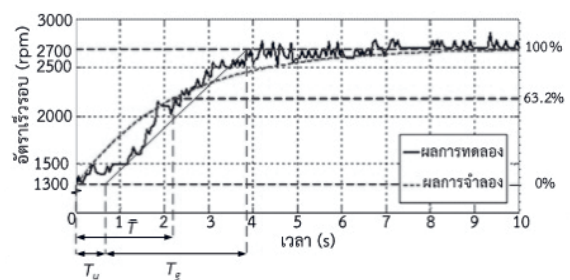
ตัวควบคุม	20% overshoot	Least overshoot
P	$K_p = 0.7R / K_g$	$K_p = 0.3R / K_g$
PI	$K_p = 0.6R / K_g$ $K_i = K_p / T_g$	$K_p = 0.35R / K_g$ $K_i = K_p / 1.2T_g$
PID	$K_p = 0.95R / K_g$ $K_i = K_p / 1.35T_g$ $K_d = K_p \times 0.47T_u$	$K_p = 0.6R / K_g$ $K_i = K_p / T_g$ $K_d = K_p \times 0.5T_u$

ตารางที่ 2 การเลือกตัวควบคุมวิธี CHR

ตัวควบคุม	R
P	$R > 10$
PI	$7.5 < R < 10$
PID	$3 < R < 7.5$
Higher-Order	$R < 3$

6. การทดลองผลตอบสนองวงเปิด

ขั้นตอนการทดลองผลตอบสนองวงเปิด เริ่มจากไม่โครคอนโทรลเลอร์สร้างสัญญาณพัลส์เปิดยูเอ็มปิดลิ้น ISCV ในตำแหน่งปิดสุด (0 %) จากนั้นติดเครื่องยนต์และปรับลิ้นอากาศในรูปที่ 3 ควบคุมให้อัตราเร็วรอบเครื่องยนต์อยู่ในสภาพเดินเบา อากาศจะถูกดูดผ่านลิ้นอากาศผ่านคาร์บูเรเตอร์เข้าสู่ท่อไอดี เมื่อเปิดลิ้น ISCV ในตำแหน่งเปิดสุด (100 %) อย่างฉับพลัน ผลตอบสนองวงเปิดแสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ผลตอบสนองวงเปิด

จากผลตอบสนองวงเปิดรูปที่ 6 อัตราเร็วรอบเดินเบาคือ 1,300 rpm อัตราเร็วรอบในสภาวะคงตัวคือ 2,700 rpm อาศัยโปรแกรม MATLAB Simulink รุ่น R2011a ประมาณผลการทดลองวงเปิดเป็นระบบอันดับหนึ่ง พบว่าแบบจำลองเครื่องยนต์มีคาบเวลาคงตัว $\bar{T}$ คือ 2.2 วินาที และเกณฑ์แบบจำลองมีค่าเป็น 1,400

โดยอาศัยผลตอบสนองวงเปิดและวิธีทางภาพดังรูปที่ 6 พบว่า T_u คือ 0.7 วินาที T_g คือ 3.3 วินาที K_g คือ 1,400 และ R คือ 4.714 ดังนั้นตัวควบคุมวิธี CHR จึงเป็นตัวควบคุมแบบพีไอดีดังตารางที่ 3

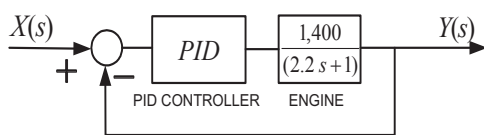
ตารางที่ 3 ค่าเกณฑ์ควบคุมพีไอดีวิธี CHR

20% overshoot	Least overshoot
$K_p = 0.003199$	$K_p = 0.002020$
$K_i = 0.000718$	$K_i = 0.000612$
$K_d = 0.001052$	$K_d = 0.000707$

7. การทดลองและผลการทดลอง

เนื้อหาในส่วนนี้กล่าวถึงผลการจำลองและผลการทดลองควบคุมอัตราเร็วรอบเครื่องยนต์ การจำลองอาศัยโปรแกรม MATLAB Simulink สร้างแบบจำลองดังรูปที่ 7 การจำลองและการทดลองมีเวลา 15 วินาที

แบ่งเป็นสามส่วน ส่วนแรกกล่าวถึงการควบคุมระบบวงปิดเมื่อกำหนดให้อัตราเร็วรอบอ้างอิงเป็นสัญญาณขั้นบันได ส่วนที่สองทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมเมื่อมีการเพิ่มอัตราเร็วรอบอ้างอิงอย่างฉับพลัน ส่วนที่สามกล่าวถึงการทดสอบความสามารถของตัวควบคุม ในการกำจัดสัญญาณรบกวนจากภาระการเบรก ในขณะที่รถขับเคลื่อนด้วยล้อหลังอย่างอิสระ

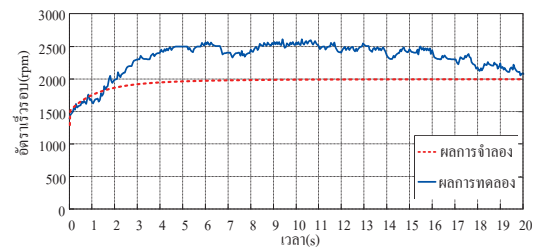


รูปที่ 7 แบบจำลองโดยโปรแกรม MATLAB Simulink

สำหรับการทดลองในส่วนแรกเป็นการโปรแกรมตัวควบคุมพีไอดีแบบ 20% overshoot และ Least overshoot เริ่มการทดลองจากติดเครื่องยนต์ในอัตราเร็วรอบเดินเบา จากนั้นเพิ่มอัตราเร็วรอบอ้างอิงอย่างฉับพลันเป็น 2,000 rpm ตัวควบคุมที่ให้ผลตอบสนองที่มีค่าพ่วงเกินน้อยกว่าจะถูกเลือกทดลองความสามารถในการติดตามอัตราเร็วรอบอ้างอิง และความสามารถในการกำจัดสัญญาณรบกวนในการทดลองส่วนที่สองและสามตามลำดับ

ผลตอบสนองวงปิดเมื่อกำหนดให้อัตราเร็วรอบอ้างอิงเป็นสัญญาณแบบขั้นบันได

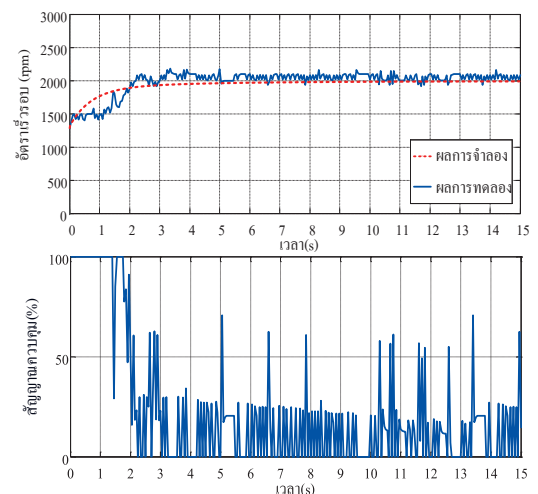
ผลการจำลองและผลการทดลองตัวควบคุมพีไอดีแบบ Least overshoot แสดงดังรูปที่ 8 ผลการจำลองพบว่าอัตราเร็วรอบเครื่องยนต์เพิ่มจาก 1,300 rpm เป็น 1,500 rpm ภายในเวลา 0.1 วินาที ผลการจำลองใช้เวลา 5 วินาทีเข้าสู่อัตราเร็วรอบอ้างอิงที่ 2,000 rpm



รูปที่ 8 วิธี Least overshoot เมื่อ

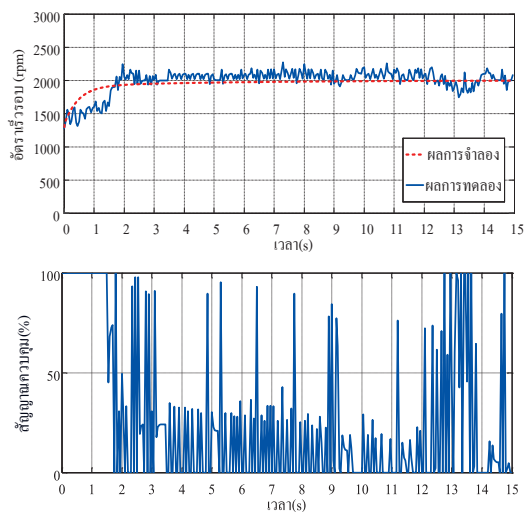
$$K_p=0.002020, K_i=0.000612, K_D=0.000707$$

ผลตอบสนองจากการทดลองมีอัตราเร็วรอบสูงสุดที่ 2,500 rpm และไม่สามารถติดตามอัตราเร็วรอบอ้างอิงที่กำหนด ผลตอบสนองมีการสั่นรอบสัญญาณอ้างอิงตั้งแต่เวลา 20 วินาที ด้วยเหตุผลนี้ผู้วิจัยจึงลดเกน K_D เพื่อลดผลการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณผลต่าง เมื่อทดลองปรับแต่งตัวควบคุมโดยลดเกน K_D จากตารางที่ 3 ลง 10 เท่า พบว่าผลตอบสนองจากการทดลองสามารถเข้าสู่อัตราเร็วรอบอ้างอิงโดยไม่พบค่าความคลาดเคลื่อนที่ สภาวะคงตัว ผลตอบสนองวงปิดกรณีปรับแต่งเกน K_D วิธี Least overshoot และ 20% overshoot แสดงดังรูปที่ 9 และ 10 ตามลำดับ



รูปที่ 9 วิธี Least overshoot เมื่อ

$$K_p=0.002020, K_i=0.000612, K_D=0.000070$$



รูปที่ 10 วิธี 20% overshoot เมื่อ $K_p = 0.003199$, $K_I = 0.000718$, $K_D = 0.000105$

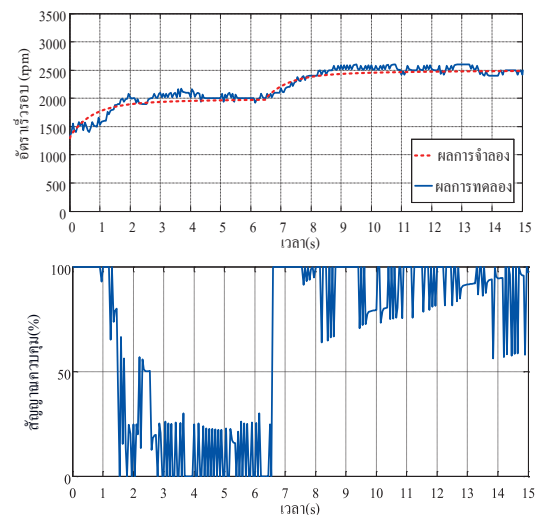
เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองวิธี Least overshoot รูปที่ 9 และวิธี 20% overshoot รูปที่ 10 พบว่า ผลตอบสนองวิธี Least overshoot เข้าสู่อัตราเร็วอ้างอิงช้ากว่าวิธี 20% overshoot 0.1 วินาที และสามารถเข้าสู่อัตราเร็วรอบอ้างอิงโดยไม่พบค่าพุ่งเกินใน ขณะที่ผลตอบสนองวิธี 20% overshoot มีค่าพุ่งเกินสูงสุดที่ 2,250 rpm ที่เวลา 2 วินาที

เมื่อเปรียบเทียบสัญญาณควบคุม พบว่า ตัวควบคุมพีไอดีวิธี Least overshoot สร้างสัญญาณควบคุมในช่วง 0 - 25% เมื่ออัตราเร็วรอบต่ำกว่าอัตราเร็วรอบอ้างอิง สัญญาณควบคุมจะพุ่งขึ้นที่ 60% การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุมที่ไม่สูงมากทำให้อัตราเร็วรอบเครื่องยนต์มีค่าที่สม่ำเสมอ ในขณะที่ตัวควบคุมพีไอดีวิธี 20% overshoot สร้างสัญญาณควบคุมในช่วง 0 - 30% เมื่ออัตราเร็วรอบต่ำกว่าอัตราเร็วรอบอ้างอิง สัญญาณควบคุมจะพุ่งขึ้นที่ 90% การเปลี่ยนแปลงแบบฉับพลันทำให้อัตราเร็วรอบเครื่องยนต์ไม่สม่ำเสมอ และมีค่าพุ่งเกินสูงสุดในวินาทีที่ 2

ผู้วิจัยเลือกตัวควบคุมพีไอดีวิธี Least overshoot เกณฑ์ตัวควบคุมคือ $K_p = 0.00202$, $K_I = 0.000612$, $K_D = 0.000070$ เนื่องจากผลตอบสนองสามารถเข้าสู่อัตราเร็วรอบอ้างอิงโดยไม่พบค่าพุ่งเกินและอัตราเร็วรอบเครื่องยนต์ที่สม่ำเสมอ

ผลตอบสนองเมื่อเปลี่ยนอัตราเร็วรอบอ้างอิงอย่างฉับพลัน

การทดลองเมื่อเปลี่ยนอัตราเร็วรอบอ้างอิงอย่างฉับพลัน มีวัตถุประสงค์ทดสอบความสามารถติดตามอัตราเร็วรอบอ้างอิง โดยเปลี่ยนอัตราเร็วรอบ 2,000 rpm เป็น 2,500 rpm ที่เวลา 6.5 วินาที ผลการจำลองและการทดลองดังรูปที่ 11 สามารถติดตามอัตราเร็วรอบอ้างอิงภายในเวลา 1.9 วินาที โดยไม่พบค่าพุ่งเกิน



รูปที่ 11 ผลตอบสนองเมื่อเปลี่ยนอัตราเร็วรอบอ้างอิงอย่างฉับพลัน

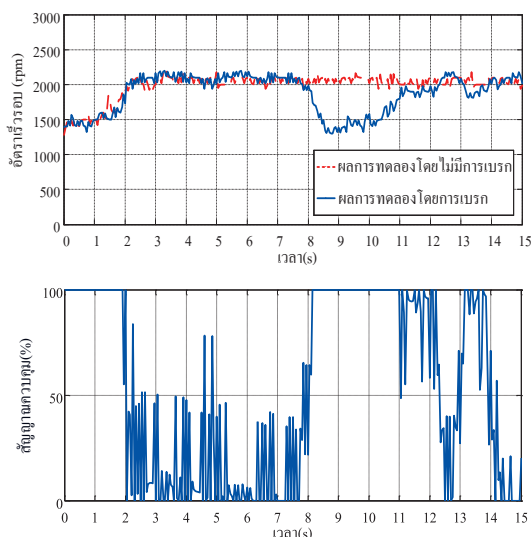
ผลตอบสนองเมื่อมีการรบกวนระบบ

การทดลองหัวข้อนี้กล่าวถึงการทดสอบสมรรถนะการกำจัดสัญญาณรบกวนเนื่องจากการเบรคคกที่ ในขณะที่รถขับเคลื่อนด้วยล้อ

หลังอย่างอิสระ ขั้นตอนการทดลองเริ่มจากผูกเชือกยึดล้อหน้ากับต้นเสา ยกขาตั้งค้ำล้อหลังให้ล้อลอยอย่างอิสระ ผูกปลายเชือกด้านหนึ่งกับก้านเบรก และผูกปลายเชือกอีกด้านกับมวลน้ำหนัก 4 กิโลกรัม คล้องเชือกผ่านปลอกโลหะด้านซ้ายที่ขั้วโลมด้วยน้ำมันหล่อลื่นดังแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 12 การทดลองการรบกวนเนื่องจากการเบรกคงที่



รูปที่ 13 ผลตอบสนองเมื่อมีการรบกวนเนื่องจากการเบรกคงที่

การทดลองเริ่มจากควบคุมอัตราเร็วรอบคงที่ที่ 2,000 rpm ในช่วงวินาทีที่ 8 ปลอมวลอย่างฉับพลัน ผลการทดลองปรากฏดังรูปที่ 13 พบว่าเมื่อระบบถูกรบกวน อัตราเร็วรอบเครื่องยนต์ลดลงต่ำสุดที่ 1,400 rpm จากนั้นระบบพยายามติดตามอัตราเร็วรอบอ้างอิงอีกครั้ง โดยใช้เวลากำจัดการรบกวน 6 วินาที

8. สรุป

การศึกษาอัตราเร็วรอบเครื่องยนต์แก๊โซลีนด้วยการควบคุมตำแหน่งของลิ้นควบคุมอัตราเร็วเดินเบา มีจุดประสงค์เพื่อสร้างต้นแบบระบบควบคุมอัตราเร็วรอบเครื่องยนต์แก๊โซลีนด้วย ISCV ระบบนี้เป็นระบบอัตโนมัติอาศัยสัญญาณจากตัววัดอัตราเร็วรอบเครื่องยนต์เป็นสัญญาณป้อนกลับ ระบบถูกพัฒนาด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ตัวควบคุมเป็นแบบพีไอดีถูกออกแบบด้วยวิธี CHR งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมสองวิธีคือ Least overshoot และ 20% overshoot

การทดสอบสมรรถนะของระบบถูกยืนยันจากผลการทดลองและจำลอง งานวิจัยนี้ออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี Least overshoot เพราะสมรรถนะในการลดค่าฟุ้งเกิน เมื่อทดลองเปลี่ยนอัตราเร็วรอบอ้างอิง พบว่าตัวควบคุมสามารถติดตามอัตราเร็วรอบอ้างอิงใหม่โดยไม่พบค่าฟุ้งเกิน นอกจากนั้นพบว่าตัวควบคุมยังสามารถกำจัดภาระรบกวนจากการเบรกได้

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] Spear B. James Watt: the steam engine and the commercialization of patents. World Patent Information. 2008 Mar; 30(1):53-8.

- [2] Ogata KS. Modern control engineering. 4th ed. New Jersey: Aeeizh; 2002.
- [3] DENSO. Engine management systems catalogue 2014/2015; 2014.
- [4] Hu L, Wang Y. Design and simulate the idle speed control system based on fuzzy adaptive. IEEE Advanced Information Technology Electronic and Automation Control Conference [Internet]. 2016 [cited 2019 Feb 6]:714–7. Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7428648/>
- [5] Mu H, Li X, Tang J. Study with fuzzy self-turning PID controller on idle speed controlling of automobile. Chinese Automation Congress Conference [Internet]. 2017 [cited 2019 Feb 25]:5755–9. Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8243811/>
- [6] Rout MK, Sain D, Swain SK, Mishra SK. PID controller design for cruise control system using genetic algorithm. IEEE International Electrical Electronics and Optimization Techniques Conference [Internet]. 2016 [cited 2019 Feb 25]:4170–4. Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7755502/>
- [7] Shima T, inventor; Nissan Motor Co Ltd., assignee. Vehicle cruise control system. United States patent US7440835B2. 2008 Oct 21.
- [8] Sekine H, Sugimoto Y, inventor; Honda Motor Co Ltd., assignee. Adaptive cruise control apparatus. United States patent US9162677B2. 2015 Oct 20.
- [9] Honda Motor. 1991 CIVICS 3/4 DR servie manual. Printed in USA; 1991.
- [10] Toyota Motor Sales. Engine controls part3 idle speed control [internet]. 2018 [cited 2018 Dec 10]:1-14. Available from: <https://www.lovehorsepower.com/ToyotaPDFs/26.PDF>.
- [11] Arisariyawong S. How to adjust the gain of the PID controller In case of not knowing mathematical model (chapter 1). Industrial Technology Review Magazine. 2005 Sep;11:142-6. (in thai)
- [12] Janjornmanit S. Linear systems control. RMUTL: The Book centre of Electrical Engineering RMUTL; 2012. (in Thai)
- [13] Xue D, Chen Y, Atherton DP. Linear feedback control analysis and design with MATLAB. Philadelphia USA.: The Society for Industrial and Applied Mathematics; 2007.
- [14] Sinha RK, Bhakta S, Pal P. Design of a PID controller for unstable system: a pole-placement based firefly approach. IEEE International Computation of Power Energy

Information and Communication
Conference [Internet]. 2018 [cited
2019 Feb 25]:356–62. Available
from:[https://ieeexplore.ieee.org/
document/8525203/](https://ieeexplore.ieee.org/document/8525203/)

การออกแบบและสร้างเครื่องเหวี่ยงแยกน้ำและน้ำมันในกระบวนการผลิตแคบหมูไร้มัน

มานพ แยมแพง^{1*}

Manop.y@en.rmutt.ac.th^{1*}

^{1*} ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Received	: 7-Sep-2018
Revised	: 11-Oct-2018
Accepted	: 1-Nov-2018

บทคัดย่อ

เครื่องเหวี่ยงแยกน้ำและน้ำมันสำหรับกระบวนการผลิตแคบหมูถูกออกแบบที่มีแกนศูนย์กลางอยู่ร่วมกันและสร้างขึ้นเพื่อลดเวลาการทำงานในกระบวนการผลิตแคบหมู ซึ่งเครื่องประกอบด้วยถังทรงกระบอก 3 ชั้น โดยถังชั้นกลางที่อยู่กับที่เป็นถังทรงกระบอกที่มีรูขนาด 9.5 มิลลิเมตร กระจายทั่วพื้นผิวแนวตั้งของถังเพื่อลดความเร็วของน้ำและน้ำมันก่อนที่จะไปชนถังชั้นนอกเพื่อป้องกันการสะท้อนกลับ ถังชั้นในที่หมุนเพื่อเหวี่ยงแยกน้ำและน้ำมันเป็นถังทรงกระบอกที่มีรูขนาด 8 มิลลิเมตร กระจายทั่วพื้นผิวแนวตั้งของถัง โดยวัสดุที่ทำถังทำจาก Stainless Steel และใช้มอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า เป็นต้นกำลัง เมื่อผู้ประกอบการนำเครื่องเหวี่ยงแยกน้ำออกจากหนังหมูไปใช้สามารถลดระยะเวลาในกระบวนการทำงานได้เป็น 10 นาที/ครั้ง ที่ความเร็วรอบ 179 รอบ/นาที ซึ่งเป็นความเร็วรอบที่เหมาะสมในการทำงาน และเมื่อนำเครื่องเหวี่ยงแยกน้ำมันเครื่องใหม่แทนเครื่องเก่าที่ใช้งานอยู่จะสามารถลดระยะเวลาการทำงานลง 6 เท่า ซึ่งเครื่องเก่าที่ผู้ประกอบการใช้งานอยู่สามารถเหวี่ยงแยกน้ำมันออกจากแคบหมูได้ 1 กิโลกรัม/ครั้ง หรือ ½ ถัง/ครั้ง (1ถังสามารถบรรจุแคบหมูได้ 2 กิโลกรัม) เมื่อใช้เครื่องใหม่สามารถเหวี่ยงแยกน้ำมันออกจากแคบหมูได้ 6 กิโลกรัม/ครั้ง หรือ 3 ถัง/ครั้ง ที่เวลาการเหวี่ยงแยกน้ำมันเท่ากัน อัตราการผลิตแคบหมูโดยเฉลี่ยของผู้ประกอบการ 50 ถัง/วัน ถ้าผู้ประกอบการใช้เครื่องเก่าจะต้องทอดและเหวี่ยงแยกน้ำมัน 100 ครั้ง/วัน แต่เมื่อใช้เครื่องใหม่จะทำงาน 17 ครั้ง/วัน ซึ่งการทำงานจะลดลง 83 ครั้ง/วัน

คำสำคัญ: แคบหมู เครื่องสไลด์ การออกแบบ

Design and Construction of Water and Oil Removal Machine for Pork Snack Production

Manop Yamfang^{1*}
Manop.y@en.rmutt.ac.th^{1*}

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

Received	: 7-Sep-2018
Revised	: 11-Oct-2018
Accepted	: 1-Nov-2018

Abstracts

The water and oil removal machine for pork snack production is designed and built to reduce the time spent in the pork snack production process. The machine consists of three concentric cylindrical tanks. The middle tank has 9.5 mm diameter holes distributed on the surface of tank to reduce the speed of water and oil before colliding with the outer tank to prevent the oil reflection. The inner tank with holes of 8 mm is rotated to remove water and oil. The tank material is made from stainless steels and a motor of 1 hp is used for main power. When the manufacturers use this machine for remove water from pigskin, it can reduce the process time to 10 minutes / time at a speed of 179 rpm which is the optimal working speed. For producing pork snack, when this machine is used instead of the old machine, it can reduce the working time by 6 times. The old machine used by the manufacturer can take the oil out of the pork snack 1 kg / time or ½ bag / time. (1 bag contains 2 kg of pork snack). When the new machine is operated, it can remove the oil from pork snack 6 kg / time or 3 bags / time at the same period. The normal rate to produce pork snack is 50 bags per day. If the manufacturer uses the old machine, working 100 times per day are required. However, when the new machine is used, working 17 times a day will be done which can reduce working 83 times a day.

Keywords: Pork snack, Centrifugal separator, Design

1. บทนำ

วิสาหกิจชุมชนแคบหมูไร่มันกรชนก ตั้งอยู่ที่ 74 ม.6 ต.สวนพริกไทย อ.เมืองปทุมธานี จ.ปทุมธานี ซึ่งประกอบกิจการทำแคบหมู แต่ประสบปัญหาด้านกระบวนการผลิตเพราะปัจจุบันการทำแคบหมูของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนนั้นมีแรงงานจำกัดส่งผลต่อกระบวนการผลิต ขั้นตอนการผลิตบางขั้นตอนใช้เวลานาน เนื่องจากไม่มีเครื่องจักรทำให้ต้องมีการรอเวลาในกระบวนการถัดไป เช่นในขั้นตอนนํ้าออก จากหนังหมูหลังจากกระบวนการชุดชนแล้วนำมาล้างเพื่อทำความสะอาด ซึ่งในกระบวนการนี้ผู้ประกอบการใช้วิธีการตากที่ราวแล้วใช้พัดลมเป่า เพื่อความรวดเร็ว ซึ่งผู้ประกอบการจะแปรรูปหนังหมู 300 กิโลกรัม/วันซึ่งใช้เวลานานพอควรในขั้นตอนนี้รวมทั้งยังสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าทำให้เป็นการเพิ่มต้นทุนในกระบวนการผลิต และในกระบวนการถัดไปไม่สามารถทำได้จึงมีการรอเวลาในกระบวนการทำให้กลุ่มวิสาหกิจชุมชนต้องการเครื่องเหวี่ยงเพื่อแยกนํ้าออกจากหนังหมูเพื่อลดระยะเวลาในขั้นตอนนี้ รวมทั้งหลังกระบวนการทอดซึ่งจะต้องมีการเหวี่ยงเพื่อแยกนํ้ามันออกจากผลิตภัณฑ์ซึ่งทางกลุ่มวิสาหกิจมีเครื่องเหวี่ยงแต่ยังไม่ทันในกระบวนการผลิต และจะส่งผลต่อกระบวนการบรรจุในขั้นตอนต่อไป ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการออกแบบและสร้างเครื่องเหวี่ยงแยกนํ้ามันอเนกประสงค์ เพื่อเหวี่ยงแยกนํ้ามันออกจากผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด คือ ไก่ทอด เฟรนช์ฟรายด์ และปลาทอด เครื่องเหวี่ยงแยกนํ้ามัน อเนกประสงค์มีขนาดความกว้าง 45 เซนติเมตร ความยาวของเครื่อง 50.2 เซนติเมตร และความสูง 80 เซนติเมตร ถึงสลัดขับเคลื่อนโดยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ 1 เฟส ขนาด 160 วัตต์ ความเร็วของมอเตอร์และทำให้เกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเป็นผลให้นํ้ามันที่อยู่ในผลิตภัณฑ์ถูกสลัดออกและตกลงมายังถาดรองนํ้ามัน และเมื่อสิ้นสุดช่วงเวลาที่กำหนดสวิตซ์ตั้งเวลาจะตัดเพื่อหยุดการทำงาน ผลการทดลอง

พบว่าความเร็วรอบที่เหมาะสมสำหรับไก่ทอด เฟรนช์ฟรายด์ และปลาทอด ที่ 3 กิโลกรัม คือ 1300 รอบต่อนาที 1100 รอบต่อนาที และ 900 รอบต่อนาที ตามลำดับ ซึ่งจะ ใช้เวลาในการสลัด 4 นาที [1] และมีเครื่องที่มีลักษณะทำงานใกล้เคียงกันคือการออกแบบกระบวนการสลัดแห้งพลาสติกเพื่อนํากลับมาผลิตใช้ใหม่ ในการออกแบบเครื่องสลัดแห้งพลาสติกจะออกแบบรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 65 เซนติเมตร สูง 40 เซนติเมตร ใช้มอเตอร์เป็นต้นกำลังขนาด 2 แรงม้า โดยใช้ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที ใช้เวลาในการสลัดแห้งที่ช่วงเวลา 4 6 8 10 12 14 และ 16 นาที ผลการทดลองพบว่าเครื่องสลัดแห้งสามารถสลัดพลาสติกได้ 12 กิโลกรัมต่อครั้ง ใช้เวลา 10 นาที หรือมีกำลังการผลิต 72 กิโลกรัมต่อชั่วโมง พบว่าความชื้นในพลาสติกลดลง 10.17 เปอร์เซ็นต์ [2] และมีเครื่องเหวี่ยงแยกนํ้าดอกดาวเรืองให้อยู่ในช่วง 4.00 - 4.48 กิโลกรัมจากนํ้าหนักก่อนสลัดที่ 5 กิโลกรัม โดยไม่ทำให้นํ้าหนักของดอกดาวเรืองแห้งเกินไปจากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ ขนาด 220 โวลต์ 1/3 แรงม้า ซึ่งต่อกับถังหมุนในอัตรา 500 รอบต่อนาที เพื่อเหวี่ยงแยกนํ้าที่ตกค้างออกจากดอกดาวเรือง จากการทดลองในการเปรียบเทียบการเหวี่ยงแยกนํ้าดอกดาวเรืองโดยใช้แรงงานคนกับเครื่องที่พัฒนาขึ้นในการทดลอง 30 ครั้ง พบว่าเครื่องที่พัฒนาใช้เวลาในการเหวี่ยงแยกนํ้าออกจากดอกดาวเรืองน้อยกว่าเมื่อใช้แรงงานคนอยู่ที่ 25 นาที [3] มีการพัฒนาสมรรถนะเครื่องเหวี่ยงแยกนํ้ามันที่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์อาหารทอด โดยเครื่องที่สร้างมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 55 เซนติเมตร ปริมาตร 154 427 ลูกบาศก์เซนติเมตร และความสูง 60 เซนติเมตร ระบบรองรับนํ้าหนัก โดยใช้สปริง 4 ชุด เพื่อให้ถึงเหวี่ยงมีความสมดุล ในขณะที่หมุนเหวี่ยง ส่วนถึงสำหรับบรรจุผลิตภัณฑ์ เพื่อเหวี่ยงแยกนํ้ามันออก ความเร็วรอบในการสลัด ปรับได้ 3 ระดับ คือ 1900 2000 และ 2100 รอบต่อนาที

สามารถเลือกความเร็วรอบการสไลด์และสามารถตั้งเวลาการสไลด์ 1 3 และ 5 นาที เพื่อให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์อาหารทอด จากการทดสอบสมรรถนะและประสิทธิภาพเครื่องเหวี่ยงแยกน้ำมันที่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์อาหารทอด ผลการประเมินสมรรถนะที่ความเร็วรอบ 2,100 รอบต่อนาที ต่อระยะเวลาการเหวี่ยงแยกน้ำมัน 5 นาที พบว่า กลัวยทอดและปลาทอดแปรรูปมีปริมาณความชื้นและค่าความหืน 2.45 5.02 เปอร์เซ็นต์ของเหลว และ 6.85 5.03 มิลลิกรัม สมมูลต่อกิโลกรัมตัวอย่าง ที่ระยะเวลา 30 วัน ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช.) เมื่อเทียบกับน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่ใช้เป็นกลุ่มตัวอย่าง [4]

จากงานวิจัยที่ศึกษามาสามารถนำมาเป็นแนวทางในการออกแบบและสร้างเครื่องเหวี่ยงแยกน้ำและน้ำมันในกระบวนการผลิตแคบหมู ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาการเหวี่ยงแยกน้ำหรือน้ำมันจะเป็นการเหวี่ยงในแนวตั้ง ซึ่งขนาด ภาชนะที่บรรจุ เวลา และความเร็วรอบของถังหมุนจะมีผลต่อผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด ดังนั้นผู้วิจัยได้ออกแบบและสร้างเครื่องโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการลดระยะเวลาในกระบวนการผลิตแคบหมู โดยทำการทดลองเพื่อหาความเร็วรอบที่เหมาะสม เพื่อจะได้เครื่องที่สามารถทำงานได้ตามที่ผู้ประกอบการต้องการ

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 ศึกษาขั้นตอนและกระบวนการผลิตแคบหมูจากสถานประกอบการและรวบรวมงานวิจัย การศึกษาข้อมูลพื้นฐานของเครื่องเหวี่ยง โดยการค้นคว้าและรวบรวมข้อมูลที่จะนำมาใช้ในการออกแบบและสร้างเครื่องเหวี่ยงแยกน้ำและน้ำมันในกระบวนการผลิตแคบหมู เป็นการนำเครื่องจักรมาใช้ในกระบวนการผลิตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตให้กับผู้ประกอบการ โดยมีขั้นตอนดังนี้ นำหนังหมูที่เป็นชั้นมาต้มจากนั้นจะนำหนังหมูที่ผ่าน

กระบวนการต้มไประบายความร้อนโดยการนำไปแช่ในน้ำอุณหภูมิแวดล้อม แล้วนำไปขูดขนเพื่อทำความสะอาด จากนั้นจะนำไปลดความชื้นโดยการนำไปแขวนที่ราวแล้วใช้พัดลมเป่าช่วยในการลดความชื้น ดังรูปที่ 1 ขั้นตอนถัดไปจะนำหนังหมูไปขูดไขมันออกและนำไปเข้าเครื่องหั่นเป็นชิ้นแล้วจึงนำไปปรุงรส จากนั้นนำหนังหมูที่ผ่านการปรุงรสแล้วไปตากแดดเพื่อลดความชื้นก่อนที่จะนำไปต้มในน้ำมันเพื่อไล่น้ำที่ยังเหลืออยู่ในหนังหมูออก กระบวนการถัดไปจะนำหนังหมูไปทอดแล้วนำไปเข้าเครื่องเหวี่ยงเพื่อเหวี่ยงแยกน้ำมันออกและนำไปบรรจุถุงเพื่อรอจำหน่าย



รูปที่ 1 ขั้นตอนการผลิตแคบหมูของกลุ่มวิสาหกิจชุมชน

2.2 นำข้อมูลที่ได้ศึกษามาใช้ในการออกแบบและสร้างเครื่องเหวี่ยงแยกน้ำและน้ำมัน โดยจะศึกษาลักษณะทางกายภาพของ

ผลิตภัณฑ์เพื่อที่จะนำข้อมูลมาใช้ในการออกแบบและสร้างเครื่อง

2.3 ทำการออกแบบและสร้างเครื่องเหวี่ยงแยกน้ำและน้ำมันในกระบวนการผลิตแควหมู โดยการออกแบบและสร้างเครื่องจะต้องไปพบผู้ประกอบการ เพื่อหาข้อมูลที่ต้องใช้ในการออกแบบและสร้างเครื่อง เช่น ปริมาณการผลิต ระยะเวลาในกระบวนการทำแต่ละขั้นตอน แบบที่ผู้ประกอบการต้องการ ความปลอดภัยกับผู้ปฏิบัติงาน รวมทั้งปัจจัยอื่น ๆ ที่จะนำมาใช้ในการออกแบบและสร้างเครื่อง ซึ่งจากการลงพื้นที่ได้มีการประชุมกลุ่มระหว่างผู้วิจัย นักศึกษา และกลุ่มผู้ที่จะนำเครื่องไปใช้งานเพื่อจะได้ทราบถึงปัญหาและความต้องการที่ผู้ประกอบการและผู้ใช้งานต้องการ โดยเครื่องที่ผู้ประกอบการต้องการคือเครื่องเหวี่ยงแยกน้ำออกจากหนังหมูซึ่งปัจจุบันที่ผู้ประกอบการทำอยู่คือจะนำหนังหมูที่ผ่านกระบวนการชุดชนแล้วไปทำความสะอาดโดยการล้างน้ำแล้วนำไปตากลมเพื่อให้หนังหมูแห้งพอประมาณก่อนที่จะนำไปกระบวนการถัดไปแต่ใช้เวลานาน ดังนั้นจึงต้องใช้พัดลมเป่าเพื่อลดระยะเวลาการตากลมดังรูปที่ 1 และเครื่องที่ผู้ประกอบการต้องการคือเครื่องเหวี่ยงแยกน้ำมันออกจากแควหมูเมื่อผ่านกระบวนการทอดมาแล้ว

2.4 ออกแบบและสร้างเครื่องตามที่ต้องการตามหลักวิศวกรรม

2.5 ศึกษาความเร็วรอบที่เหมาะสมในการทำงานของเครื่องเหวี่ยงแยกน้ำและน้ำมันในกระบวนการผลิตแควหมู เปรียบเทียบระยะเวลาก่อนและหลังการนำเครื่องไปใช้

2.6 วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ

3. การออกแบบและสร้างเครื่องเหวี่ยงแยกน้ำและน้ำมันในการผลิตแควหมู

จากการที่ศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาสามารถนำมาออกแบบและสร้างเครื่อง โดยขณะที่เครื่องทำงานเมื่อน้ำมันถูกเหวี่ยงออกมา

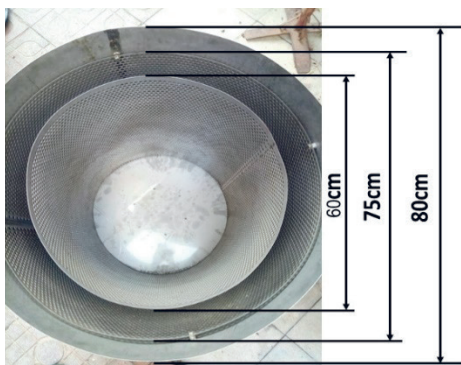
จากผลิตภัณฑ์จะออกผ่านรูของถังในขณะที่หมุนไปกระทบกับผนังด้านในของถังชั้นนอกที่อยู่กับที่ ซึ่งน้ำมันหรือน้ำจะไหลมีลักษณะเป็นฟิล์มเพิ่มขึ้นตามความลึกของถังลงไปยังด้านล่างเป็นผลทำให้การไหลของน้ำมันที่จะไหลลงสู่ด้านล่างช้าลง และน้ำมันหรือน้ำบางส่วนเมื่อถูกเหวี่ยงไปชนกับผนังของถังจะมีการสะท้อนกลับมายังถังชั้นในที่หมุนโดยเฉพาะด้านล่างของถังเนื่องจากฟิล์มน้ำมันมีความหนา ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงออกแบบถังที่มีชุดลดความเร็วของน้ำมันหรือน้ำที่ถูกเหวี่ยงมาจากวัสดุก่อนที่จะไปชนกับด้านในของถังชั้นนอกเพื่อลดการสะท้อนกลับของน้ำมันหรือน้ำ

การออกแบบและสร้างเครื่องเหวี่ยงแยกน้ำจากหนังหมูหลังจากกระบวนการชุดชนเพื่อต้องการนำน้ำออกจากหนังหมูก่อนที่จะไปในการบวนการถัดไปและเครื่องที่สองทำการออกแบบและสร้างเครื่องเหวี่ยงแยกน้ำมันออกจากแควหมูหลังจากกระบวนการทอด ซึ่งทั้งสองเครื่องจะมีลักษณะเหมือนกันและมีขนาดเท่ากัน โดยการออกแบบร่วมกับผู้ประกอบการในการกำหนดเงื่อนไขด้าน รูปแบบ การป้องกันอุบัติเหตุ ขนาดเครื่องเพื่อให้เหมาะสมและสะดวกกับการปฏิบัติงาน สำหรับเครื่องเหวี่ยงแยกน้ำออกจากหนังหมูนั้นจะมีข้อจำกัดเรื่องของน้ำหนักของหนังหมูเพราะจะส่งผลกระทบต่อแรงเหวี่ยงเนื่องจากการเหวี่ยงจะเป็นการเหวี่ยงแบบหนีศูนย์กลาง เพราะถ้าใส่หนังหมูมากจะทำให้เกิดโมเมนตัมมากในขณะที่เครื่องทำงานซึ่งจะส่งผลกระทบต่อความสมดุลของเครื่อง ดังนั้นปริมาณการใส่วัสดุที่เหมาะสมของทั้งสองเครื่องนั้นจะได้จากการทดสอบ ดังนั้นจึงได้ออกแบบเครื่องต้นแบบที่มีการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ถังเหวี่ยงเมื่อความเร็วของน้ำมันหรือน้ำที่ถูกสลัดออกมาจากวัสดุทดสอบก่อนที่จะไปชนกับผนังด้านในของถังชั้นนอก ทำให้ไม่มีการสะท้อนกลับมายังวัสดุทดสอบอีกครั้งซึ่งเป็นการลดระยะเวลาในการนำน้ำมันหรือน้ำออกจาก

ผลิตภัณฑ์ ซึ่งสามารถนำหลักการและวิธีการออกแบบและสร้างเครื่องไปใช้กับการนำของเหลวออกจากผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะใกล้เคียงกันได้

3.1 การสร้างเครื่องเหวี่ยงแยกน้ำและน้ำมันในกระบวนการผลิตแคบหมู

การสร้างเครื่องเหวี่ยงแยกน้ำและน้ำมันในกระบวนการผลิตแคบหมู โดยเครื่องที่ทำการออกแบบและสร้างจะมีขนาดเท่ากันทั้งสองเครื่อง ซึ่งเครื่องจะมีลักษณะเป็นถังทรงกระบอกสามชั้น โดยที่ชั้นในสุดจะใช้ใส่ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการเหวี่ยงแยกจะมีลักษณะเป็นรูเพื่อที่ต้องการแยกของเหลวออกจากผลิตภัณฑ์ ส่วนชั้นกลางจะมีลักษณะเป็นรูเช่นกันแต่นั่นจะมีขนาดใหญ่กว่าเพื่อใช้สำหรับลดความเร็วของของเหลวที่ออกมาจากผลิตภัณฑ์ก่อนที่จะไปสัมผัสกับด้านในของถังชั้นนอกสุด ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ลักษณะของถังเหวี่ยงแยกน้ำและน้ำมัน 3 ชั้น

1. การสร้างโครงเครื่อง โครงสร้างเครื่องประกอบด้วยเหล็กฉากขนาด 3 นิ้ว นำมาเชื่อมประกอบเป็นโครงเครื่องและเชื่อมทำฐานตั้งมอเตอร์
2. ชุดต้นกำลัง ได้ออกแบบโดยให้ชุดต้นกำลังมาจากมอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า ใช้ไฟฟ้า 1 เฟส 220 โวลต์ กระแสสลับ ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์

ส่งกำลังผ่านสายพานไปยัง pulley เพื่อไปหมุนถังเหวี่ยงแยกน้ำและน้ำมันในกระบวนการผลิตแคบหมู

3. ชุดควบคุมการทำงาน เครื่องเหวี่ยงแยกน้ำและน้ำมันในกระบวนการผลิตแคบหมูจะมีชุดตั้งเวลาการทำงานของเครื่องเพื่อความสะดวกในการใช้งานกับผู้ปฏิบัติงาน โดยเฉพาะเมื่อมีการเปลี่ยนคนควบคุมเครื่องซึ่งจะไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์เพราะการตั้งเวลาการทำงานของเครื่องจะเป็นตัวกำหนดคุณภาพของผลิตภัณฑ์

3.2 การออกแบบเครื่องเหวี่ยงแยกน้ำออกจากหนังหมูในกระบวนการผลิตแคบหมู

การออกแบบเครื่องต้นแบบจะใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งจากการลงพื้นที่จากสถานประกอบการพบว่าอัตราการผลิตแคบหมูจะใช้หนังหมู 300 กิโลกรัม/วัน และเมื่อผ่านขั้นตอนการชุบขนแล้วจะนำหนังหมูมาล้างทำความสะอาด จากนั้นจะนำหนังหมูไปตากบนราวและใช้พัดลมเป่าเพื่อลดระยะเวลาในการลดความชื้นก่อนที่จะไปขั้นตอนการชุบแยกไขมันออก ดังรูปที่ 3



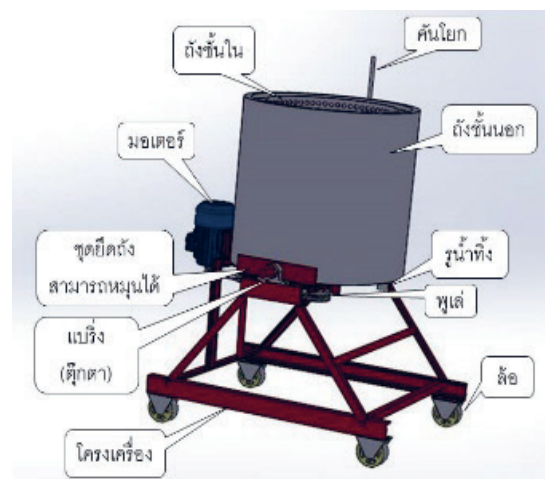
รูปที่ 3 การใช้พัดลมช่วยลดความชื้นออกจากหนังหมู

ในการลดความชื้นโดยใช้พัดลมช่วย ผู้ประกอบการจะทำครั้งละ 10 กิโลกรัม และจะใช้เวลาในการลดความชื้น 15 นาที/ครั้ง จากข้อมูลดังกล่าวผู้วิจัยจึงนำมาออกแบบและสร้างเครื่องเหวี่ยงแยกน้ำออกจากหนังหมูโดยมีเงื่อนไขในการออกแบบและสร้างเครื่องดังนี้

1. เครื่องที่สร้างสามารถบรรจุหนังหมูได้ 10 - 20 กิโลกรัม
2. เครื่องสามารถตั้งเวลาการทำงานได้เพื่อความสะดวกต่อผู้ใช้งาน
3. เครื่องสามารถหมุนเอียงถึงได้เพื่อนำวัสดุออกได้สะดวก
4. มีความปลอดภัยกับผู้ปฏิบัติงาน
5. เครื่องที่สร้างขึ้นมีชิ้นส่วนที่ไม่ซับซ้อนง่ายต่อการใช้งานและผู้ใช้งานสามารถบำรุงรักษาเครื่องได้ง่าย

เครื่องเหวี่ยงแยกน้ำสำหรับกระบวนการผลิตแคบหมูถูกออกแบบและสร้างขึ้นเพื่อลดเวลาการทำงาน โดยผู้ประกอบการมีส่วนร่วมในการให้ข้อมูลที่นำมาใช้ในการออกแบบและสร้างเครื่อง รวมถึงการแก้ปัญหา วิเคราะห์ปัญหา และปรับปรุงเครื่องทำให้เครื่องที่สร้างขึ้นสามารถพัฒนาได้ตรงกับความต้องการของผู้ประกอบการ โดยเครื่องเหวี่ยงแยกน้ำและน้ำมันสำหรับกระบวนการผลิตแคบหมูมีลักษณะเป็นทรงกระบอก 3 ชั้น ดังรูปที่ 2 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 เซนติเมตร ยาว 75 เซนติเมตร ถึงทรงกระบอก 3 ชั้น โดยถังชั้นนอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 เซนติเมตร ชั้นกลางมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 เซนติเมตร รูขนาด 9.5 มิลลิเมตร รอบถังเพื่อลดความเร็วของน้ำและน้ำมันก่อนที่จะไปชนถังชั้นนอกเพื่อป้องกันการสะท้อนกลับ ส่วนถังชั้นในที่มีหนังหมูมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 เซนติเมตร เพื่อเหวี่ยงแยกน้ำและน้ำมันมีรูขนาด 8 มิลลิเมตร รอบถัง โดยใช้วัสดุ Stainless Steel ทำถัง ชุดต้นกำลังใช้มอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า สามารถบรรจุหนังหมูได้มากกว่า 10 - 20

กิโลกรัม ซึ่งจะสามารถลดระยะเวลาในกระบวนการดังกล่าวไม่น้อยกว่า 1 เท่าของระยะเวลาที่ทำงานในปัจจุบัน ในการสร้างเครื่องต้นแบบจะใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 เครื่องเหวี่ยงแยกน้ำออกจากหนังหมู โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ

3.2.1 การคำนวณหาขนาดมอเตอร์ของเครื่องเหวี่ยงแยกน้ำออกจากหนังหมูในกระบวนการผลิตแคบหมู

$$P = \frac{2\pi TN}{60} \quad (1)$$

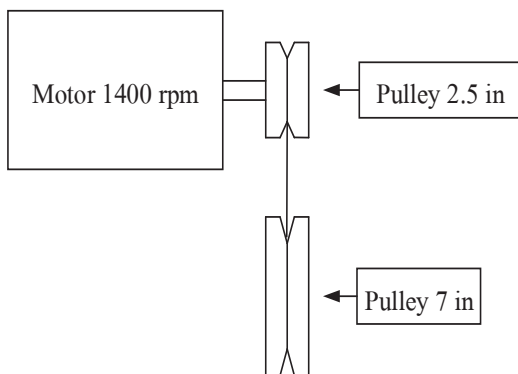
$$T = F \times r \quad (2)$$

เมื่อ	P	คือ	กำลัง (W)
	T	คือ	Torque (N-m)
	N	คือ	ความเร็วรอบ (rpm)
	F	คือ	แรง (N)
	r	คือ	รัศมี (m)

จากการทดสอบแรงที่ใช้ทำให้หนังหมูโดยใช้เครื่องวัดแรงดึงระบบดิจิตอลได้แรง 105 N

$$\begin{aligned}
 T &= F \times r \\
 &= 105 \times 0.3 \\
 &= 31.5 \text{ N-m}
 \end{aligned}$$

คำนวณหาความเร็วรอบมอเตอร์



รูปที่ 5 การทอดรอบจากมอเตอร์ไปยังถึงเครื่อง
เหวี่ยงแยกน้ำออกจากหนึ่งหมูครั้งที่ 1

$$N = \frac{1400}{i_{a1}}$$

โดยที่

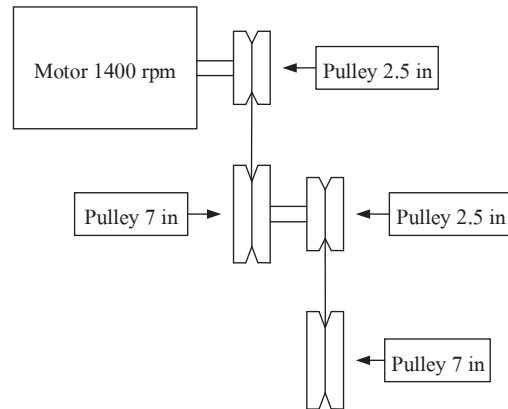
i_{a1} คือ อัตราทด pulley ครั้งที่ 1 คือ 2.5 in : 7 in

$$\begin{aligned}
 N &= \frac{1400}{(7/2.5)} \\
 &= 500 \text{ rpm}
 \end{aligned}$$

จากสมการ (1)

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{2\pi TN}{60} \\
 &= \frac{2\pi(31.5)(500)}{60} \\
 &= 1649.3 \text{ W} \\
 &= 2.21 \text{ HP}
 \end{aligned}$$

เมื่อต้องการลดขนาดของมอเตอร์จึงเพิ่มอัตรา
ทอดรอบโดยใช้ pulley ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 การทอดรอบจากมอเตอร์ไปยังถึงเครื่อง
เหวี่ยงแยกน้ำออกจากหนึ่งหมูครั้งที่ 2

$$N = \frac{1400}{i_{a1} \times i_{a2}}$$

โดยที่

i_{a1} คือ อัตราการทด pulley ครั้งที่ 1 คือ 2.5in:7in

i_{a2} คือ อัตราการทด pulley ครั้งที่ 2 คือ 2.5in:7in

$$\begin{aligned}
 N &= \frac{1400}{\left(\frac{7}{2.5}\right) \times \left(\frac{7}{2.5}\right)} \\
 &= 178.6 \text{ rpm}
 \end{aligned}$$

จากสมการ (1)

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{2\pi TN}{60} \\
 &= \frac{2\pi(31.5)(178.6)}{60} \\
 &= 589 \text{ W}
 \end{aligned}$$

ซึ่งกำลังที่ได้เป็นกำลังทางกล ในงานวิจัยเลือกใช้
มอเตอร์เป็นต้นกำลัง สมมติให้มอเตอร์มีประสิทธิภาพ
80% จะได้กำลังทางไฟฟ้าดังนี้

$$\begin{aligned}
 80\% \text{ ของกำลังไฟฟ้า} &= \text{กำลังทางกลที่คำนวณได้} \\
 \text{ซึ่งจะต้องใช้กำลังทางไฟฟ้า} &= (589/0.8) \\
 &= 736.25 \text{ W} \\
 &= 0.98 \text{ HP}
 \end{aligned}$$

ดังนั้นจึงเลือกใช้มอเตอร์ขนาด 1 HP

การออกแบบและสร้างเครื่องผู้วิจัยจะใช้หลักการออกแบบทางวิศวกรรมและความปลอดภัยกับผู้ปฏิบัติงาน เครื่องสามารถเอียงถึงเพื่อนำหนังหมูออกเมื่อเครื่องทำงานเสร็จเนื่องจากผู้ปฏิบัติงานส่วนใหญ่เป็นผู้สูงอายุ และเครื่องสามารถตั้งเวลาการทำงานได้โดยชุดควบคุม ซึ่งจะสะดวกกับผู้ปฏิบัติงานซึ่งเป็นการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ถึงแม้ว่าจะเปลี่ยนคนปฏิบัติงาน ดังรูปที่ 8



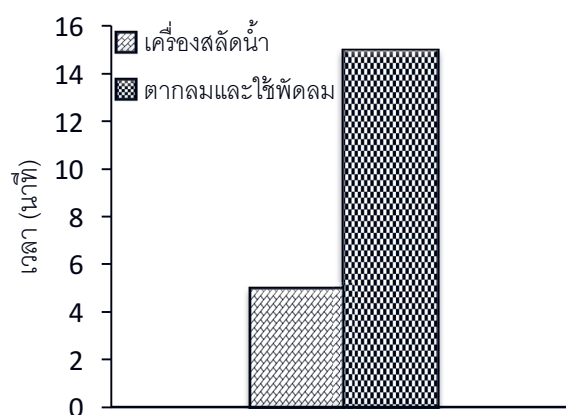
รูปที่ 7 เครื่องเหวี่ยงแยกน้ำออกจากหนังหมู



รูปที่ 8 การนำหนังหมูออกจากเครื่องเหวี่ยงแยกน้ำเมื่อเครื่องทำงานเสร็จ

3.2.2 ผลการทดลองเครื่องเหวี่ยงแยกน้ำออกจากหนังหมู

การทดลองจะมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของมอเตอร์โดยใช้ inverter เพื่อหาความเร็วรอบที่เหมาะสมในการใช้งาน เมื่อทำการทดลองจนได้ความเร็วรอบที่เหมาะสม ซึ่งความเร็วรอบที่เหมาะสมคือ 179 รอบ/นาที ซึ่งถ้าความเร็วรอบมากกว่านี้จะใช้เวลาลดลงแต่จะส่งผลกระทบต่อการทำงานของเครื่อง เพราะเครื่องจะใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางจะทำให้เครื่องเกิดการสั่นสะเทือน แต่ถ้าใช้ความเร็วรอบต่ำกว่านี้จะใช้ระยะเวลาเพิ่มขึ้น จากนั้นนำความเร็วรอบที่เหมาะสมไปคำนวณอัตราการทดรอบจากมอเตอร์ไปยังถึงเหวี่ยงแยกน้ำ โดยปริมาณหมูที่ใส่ในเครื่องจำนวน 10 กิโลกรัม ซึ่งเป็นปริมาณที่เหมาะสมจะทำให้ทันในกระบวนการถัดไปจะได้ผลดังรูปที่ 9



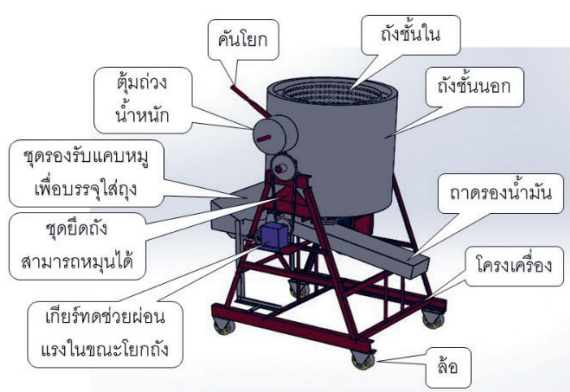
รูปที่ 9 เปรียบเทียบเวลาที่ใช้ระหว่างตากลมและใช้พัดลมกับการใช้เครื่องเหวี่ยงแยกน้ำต่อ 1 รอบการทำงาน

วิธีการที่ผู้ประกอบการทำงานอยู่ปัจจุบันคือการตากลมและใช้พัดลมช่วยลดความชื้นและระยะเวลาการทำงาน ดังรูปที่ 3 ใช้เวลา 15 นาที/ครั้ง แต่เมื่อใช้เครื่องเหวี่ยงแยกน้ำจากรูปที่ 10 พบว่าใช้เวลา 5 นาที/ครั้ง ซึ่งสามารถลดระยะเวลาในกระบวนการนี้ได้ 10 นาที/ครั้ง อีกทั้งในสถานประกอบการเมื่อ

ผู้ปฏิบัติงานนำหนังหมูไปตากที่ราวแล้วใช้พัดลมเป่า ดังรูปที่ 3 น้ำที่ออกมาจากหนังหมูจะตกลงสู่พื้นจะทำให้พื้นบริเวณนั้นลื่นส่งผลกับผู้ปฏิบัติงานซึ่งมีอายุมากในขณะทำงาน แต่เมื่อใช้เครื่องเหวี่ยงจะไม่เกิดปัญหาดังกล่าวเนื่องจากน้ำที่ออกมาจากหนังหมูจะลงสู่ท่อทางออกด้านล่างของถังเหวี่ยงซึ่งจะมีสายยางต่อน้ำไปทิ้งตามต้องการ

3.3 การออกแบบเครื่องเหวี่ยงแยกน้ำมันหลังจากกระบวนการทอด

การออกแบบเครื่องต้นแบบโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งจากการลงพื้นที่จากสถานประกอบการพบว่าผู้ประกอบการมีเครื่องเหวี่ยงเหวี่ยงแยกน้ำมันอยู่แล้วแต่เครื่องมีขนาดเล็กเกินไปสมรรถนะของเครื่องทำได้ 1/2 ถัง/ครั้ง (ขนาดถัง 20 x 30 in 1 ถัง สามารถบรรจุแคหมูได้ 2 กิโลกรัม) ใน 1 วัน กำลังการผลิตที่ต้องการ 50 ถัง ทำให้ใช้เวลานานในกระบวนการดังกล่าว ซึ่งผู้วิจัยได้ได้นำปัญหาดังกล่าวมาทำการออกแบบและสร้างเครื่องโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 เครื่องเหวี่ยงแยกน้ำมันหลังจากกระบวนการทอดโดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ

จากข้อมูลดังกล่าวผู้วิจัยจึงนำมาออกแบบและสร้างเครื่องเหวี่ยงแยกน้ำมันหลัง

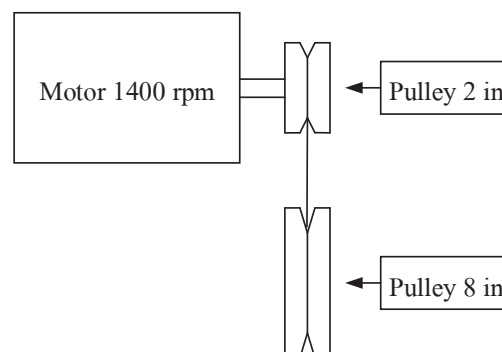
กระบวนการทอดโดยมีเงื่อนไขในการออกแบบและสร้างเครื่องดังนี้

1. เครื่องที่สร้างสามารถบรรจุแคหมูได้ 2-3 ถัง/ครั้ง
2. เครื่องสามารถตั้งเวลาการทำงานได้เพื่อความสะดวกต่อผู้ใช้งาน
3. มีความปลอดภัยกับผู้ปฏิบัติงาน
4. เครื่องที่สร้างขึ้นมีชิ้นส่วนที่ไม่ซับซ้อนง่ายต่อการใช้งานและผู้ใช้งานสามารถบำรุงรักษาเครื่องได้ง่าย

3.3.1 การคำนวณหาขนาดมอเตอร์ของเครื่องเหวี่ยงแยกน้ำมันออกจากแคหมูในกระบวนการผลิตแคหมู

การทดลองจะมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของมอเตอร์โดยใช้ inverter เพื่อหาความเร็วรอบที่เหมาะสมในการทำงานของเครื่องซึ่งพบว่าความเร็วรอบที่เหมาะสมของเครื่องอยู่ที่ 350 รอบ/นาที เพราะถ้าความเร็วรอบมากกว่านี้แคหมูจะหลุดออกด้านบนของถังซึ่งไม่มีฝาปิด แต่ถ้าความเร็วรอบน้อยกว่านี้จะต้องใช้ระยะเวลาเพิ่มขึ้น เมื่อได้ความเร็วรอบที่เหมาะสมจากนั้นจะไปคำนวณอัตราการทอดจากมอเตอร์ไปยังถังเหวี่ยงแยกน้ำมันตามรอบที่ได้ทดลอง

การคำนวณหาความเร็วรอบมอเตอร์



รูปที่ 11 การทอดรอบจากมอเตอร์ไปยังถังเครื่องเหวี่ยงแยกน้ำมันออกจากแคหมู

จากการทดสอบแรงที่ใช้ทำให้ถังหมุนเมื่อมี
 แคมหมูโดยใช้เครื่องวัดแรงดึงระบบดิจิทัลได้
 แรง 50 N

$$N = \frac{1400}{i_{a1}}$$

โดยที่

i_{a1} คือ อัตราทด pulley ครั้งที่ 1 คือ 2 in : 8 in

$$\begin{aligned} N &= \frac{1400}{(8/2)} \\ &= 350 \text{ rpm} \end{aligned}$$

จากสมการ (1)

$$\begin{aligned} P &= \frac{2\pi TN}{60} \\ &= \frac{2\pi(15)(350)}{60} \\ &= 550 \text{ W} \end{aligned}$$

สมมติให้มอเตอร์มีประสิทธิภาพ 80% จะได้กำลังทาง
 ไฟฟ้าดังนี้

$$\begin{aligned} \text{กำลังทางไฟฟ้า} &= (550/0.8) \\ &= 687.2 \text{ W} \\ &= 0.92 \text{ HP} \end{aligned}$$

ดังนั้นจึงเลือกใช้มอเตอร์ขนาด 1 HP

เครื่องที่สร้างขึ้นจะมีขนาดถังเหวี่ยง
 แยกน้ำมันออกจากแคมหมูหลังกระบวนการ
 ทอดมีลักษณะเป็นทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่าน
 ศูนย์กลาง 60 เซนติเมตร ยาว 75 เซนติเมตร มี
 รูขนาด 8 มิลลิเมตร กระจายบนพื้นผิว
 ทรงกระบอก ซึ่งวัสดุที่ใช้ทำจาก Stainless
 Steel และสามารถบรรจุแคมหมูได้ 2 - 3 ถัง/
 ครั้ง ซึ่งจะสามารถลดระยะเวลาในกระบวนการ
 ดังกล่าวไม่น้อยกว่า 1 เท่าของระยะเวลาที่
 ทำงานในปัจจุบัน ในการสร้างเครื่องต้นแบบจะ
 ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบโดยร่วมกับ
 ผู้ประกอบการเพื่อที่จะได้เครื่องที่เหมาะสมใน
 การนำไปใช้งาน เมื่อได้แบบที่เหมาะสมแล้วจะ
 นำไปสร้างเครื่องตามแบบ โดยต้นกำลังจะใช้

มอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า เป็นต้นกำลังส่งกำลัง
 ผ่านสายพานไปยังถังเหวี่ยงแยกน้ำมัน ซึ่งเครื่อง
 สามารถตั้งเวลาการทำงานได้โดยชุดควบคุมซึ่ง
 จะสะดวกกับผู้ปฏิบัติงาน เมื่อเครื่องทำงาน
 เหวี่ยงแยกน้ำมันออกจากแคมหมูเสร็จแล้ว
 สามารถเอียงถังเพื่อเทแคมหมูลงในชุดรองรับ
 เพื่อใส่ถุง ดังรูปที่ 12 และ 13



รูปที่ 12 เครื่องเหวี่ยงแยกน้ำมันหลังจาก
 กระบวนการทอด

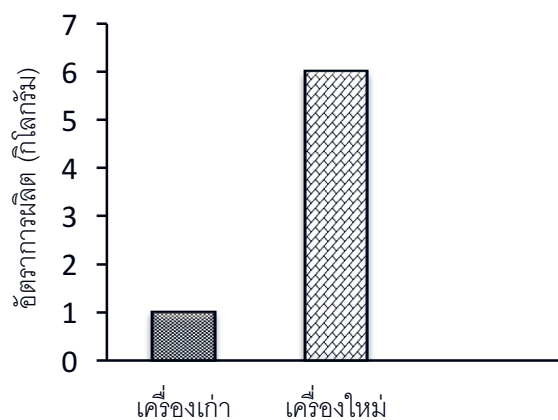


รูปที่ 13 การเทแคมหมูจากเครื่องเพื่อบรรจุถุง

3.3.2 ผลการทดลองเครื่อง เหวี่ยงแยกน้ำมันออกจากแคมหมูใน กระบวนการผลิตแคมหมู

เมื่อได้แบบและความเร็วรอบที่
 เหมาะสมแล้วจึงนำไปสร้างเครื่องดังรูปที่ 12
 และนำไปทดสอบกับสถานประกอบการจริงเพื่อ

เปรียบเทียบกับเครื่องเก่าที่ผู้ประกอบการใช้งาน
อยู่ได้ผลดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 การเปรียบเทียบปริมาณการผลิตระหว่าง
เครื่องเก่าและเครื่องใหม่ต่อ 1 รอบการทำงาน

ปัจจุบันเครื่องที่ผู้ประกอบการใช้งาน
อยู่นั้นมีขนาดเล็กเกินไปทำให้ไม่ทันต่อการผลิต
ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการออกแบบและสร้างเพื่อ
นำมาทดแทนเครื่องเก่าที่ใช้งานอยู่ซึ่งจากรูปที่
14 พบว่าเครื่องเก่าที่ผู้ประกอบการใช้งานอยู่นั้น
สามารถเหวี่ยงแยกน้ำมันออกจากแคบหมูได้ 1
กิโลกรัม/ครั้ง (1/2 ถัง/ครั้ง) แต่เมื่อใช้เครื่องใหม่
ที่ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบและสร้างสามารถ
เหวี่ยงแยกน้ำมันออกจากแคบหมูได้ 6 กิโลกรัม/
ครั้ง (3 ถัง/ครั้ง) ที่เวลาทำงานเท่ากัน จะเห็นว่
การทำงานจะลดลง 6 เท่า เมื่อใช้เครื่องใหม่แทน
เครื่องเก่าที่ใช้งานอยู่ ผู้ประกอบการจะมีอัตรา
การผลิตแคบหมูโดยเฉลี่ย 50 ถัง/วัน ถ้า
ผู้ประกอบการใช้เครื่องเก่าจะต้องทอดและ
เหวี่ยงแยกน้ำมันออกจากแคบหมู 100 ครั้ง/วัน
แต่เมื่อใช้เครื่องใหม่จะทำงาน 17 ครั้ง/วัน ซึ่ง
การทำงานจะลดลง 83 ครั้ง/วัน

4. สรุป

ปัญหาจากวิสาหกิจชุมชนที่ผู้วิจัยได้ลง
พื้นที่ไปทำวิจัยพบว่าปัญหาที่เกิดขึ้นกับวิสาหกิจ
ชุมชนเนื่องจากแรงงานไม่คงที่และแรงงานที่

ทำงานอยู่ในปัจจุบันเป็นผู้สูงอายุ ซึ่งบางครั้งมี
ปริมาณการสั่งซื้อที่เพิ่มขึ้นแต่ผู้ประกอบการไม่
สามารถทำการผลิตได้ทันเป็นผลมาจาก
แรงงานคนที่มีจำนวนจำกัด อีกทั้งยังเป็น
แรงงานที่เป็นผู้สูงอายุทำให้เสียโอกาสทางการ
ค้าส่งผลกระทบต่อรายได้ที่ได้รับ ผลการวิจัยการ
ออกแบบและสร้างเครื่องเหวี่ยงแยกน้ำและ
น้ำมันสำหรับกระบวนการผลิตแคบหมู เมื่อ
ผู้ประกอบการนำเครื่องเหวี่ยงแยกน้ำออกจาก
หนึ่งหมูหลังจากกระบวนการชุบขนไปใช้
สามารถลดระยะเวลาในกระบวนการทำงานได้
10 นาที/ครั้ง ที่ความเร็วรอบ 179 รอบ/นาที
สามารถเพิ่มความปลอดภัยกับผู้ปฏิบัติงาน และ
เมื่อนำเครื่องเหวี่ยงแยกน้ำมันเครื่องใหม่แทน
เครื่องเก่าที่ใช้งานอยู่จะสามารถลดระยะเวลา
การทำงานลง 6 เท่า

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณหน่วยวิจัยการ
ออกแบบและสร้างเครื่องจักรเพื่อแปรรูปผลิตผล
ทางการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชม
งคลธัญบุรี และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการ
วิจัย(สกว.) ที่ให้ทุนสนับสนุนในโครงการ
ออกแบบและสร้างเครื่องเหวี่ยงแยกน้ำและ
น้ำมันสำหรับกระบวนการผลิตแคบหมู ประจำปี
2560 เลขที่สัญญา ABCRMUTT 60B02 ซึ่งทำ
ให้สามารถดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ได้อย่างสำเร็จ
ลุล่วงไปได้ด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] Thepwong K and Sangcharukul P. The design and construction of multi-purpose oil separator. [bachelor's thesis]. Chiang Mai: Rajamangala University of Technology Lanna; 2014.
- [2] Maunkhaw De and Dulyakul Y. The study and design of plastic spinning

process for plastic recycling.
Kasetsart University Kamphaeng
Saen Campus. Proceedings of the
8th. P363-71. 2016.

- [3] Kruekumary P, Ngernnate T, Hebkham
W and Thongdee P. Development
of spinning marigolds dehydrator
machine. [bachelor's thesis]. Chiang
Mai: Rajamangala University of
Technology Lanna; 2016.
- [4] Development of the performance of
the oil separator suitable for fried
food products. [bachelor's thesis].
Phetchaburi: Phetchaburi Rajabhat
University; 2013.

กำลังอัดและความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย และผงหินปูน และใช้เถ้าก้นเตาแทนที่บางส่วนของมวลรวมละเอียด

ศิริระ อาทมาท¹ และทวีชัย สำราญวานิช^{2*}
yokkyokk123@gmail.com¹, twc@buu.ac.th^{2*}

^{1-2*} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

Received	: 1-Nov-2018
Revised	: 27-May-2019
Accepted	: 25-Jun-2019

บทคัดย่อ

บทความนี้มุ่งศึกษา กำลังอัด ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และความต้านทานไฟฟ้าของ คอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูนแทนที่วัสดุประสาน และใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียด ที่มี ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 และ 0.55 อัตราส่วนการแทนที่วัสดุประสานด้วยเถ้าลอยเท่ากับ 0.30 และ 0.50 อัตราส่วนการแทนที่ วัสดุประสานด้วยผงหินปูนเท่ากับ 0.10 ใช้อัตราส่วนการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยเถ้าก้นเตาเท่ากับ 0.10 และ 0.30 บ่มตัวอย่างคอนกรีตในน้ำประปาจนกระทั่งอายุครบ 28 วัน 56 วัน และ 91 วัน จึงทำ การทดสอบกำลังอัดและการแทรกซึมคลอไรด์ จากการทดสอบกำลังพบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาร้อย ละ 10 มีกำลังอัดที่สูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าก้นเตาและคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาร้อยละ 30 ด้านการทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์นั้น คอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาร้อยละ 10 ร่วมกับ เถ้าลอยร้อยละ 30 มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงที่สุด และเมื่อดูผลในระยะยาว คอนกรีตที่ อายุ 510 วัน ทดสอบด้วยความต้านทานไฟฟ้า พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 50 ร่วมกับเถ้าก้น เตาร้อยละ 10 มีความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตดีที่สุด

คำสำคัญ: คอนกรีต คลอไรด์ เถ้าก้นเตา เถ้าลอย ผงหินปูน

Compressive Strength and Chloride Penetration Resistance of Concrete with Fly Ash, Limestone Powder and Partial Replacement of Fine Aggregate by Bottom Ash

Sira Arttamart¹ and Taweechai Sumranwanich^{2*}
yokkyokk123@gmail.com¹, twc@buu.ac.th^{2*}

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

Received	: 1-Nov-2018
Revised	: 27-May-2019
Accepted	: 25-Jun-2019

Abstract

The paper aims to study compressive strength, chloride penetration resistance and electrical resistivity of concrete with fly ash and bottom ash as partial replacement of fine aggregate. Ordinary Portland cement was used as a main cementitious material. The water to binder ratio was employed at 0.45 and 0.55. The fly ash to binder ratio was kept at 0.30 and 0.50. The limestone powder to binder ratio was kept 0.10. Fine aggregate was partially replaced by bottom ash at the replacement ratio of 0.10 and 0.30. Specimens were cured in tap water until 28, 56 and 91 days, then compressive strength and chloride penetration were performed. From the experimental results, it was found that concrete with bottom ash replacement ratio of 0.10 has higher compressive strength than concrete without bottom ash and concrete with bottom ash replacement of 0.30. Chloride penetration test concrete with bottom ash replacement of 0.10 and fly ash to binder ratio of 0.30 has the highest chloride penetration resistance. Moreover, concrete with 50% of cement replacement by fly ash and 10% of fine aggregate replacement by bottom ash has the best electrical resistivity at 510 days..

Keywords: Concrete, Chloride, Bottom ash, Fly ash, Limestone powder

1. บทนำ

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมทางทะเลจำนวนมากเกิดการเสื่อมสภาพและทรุดโทรมเนื่องจากเหล็กเสริมภายในของโครงสร้างเกิดสนิมอันเป็นผลมาจากเกลือคลอไรด์ในน้ำทะเลแทรกซึมเข้าไปสะสมในคอนกรีตที่ตำแหน่งผิวเหล็กเสริม มากเกินกว่าระดับปริมาณคลอไรด์วิกฤตของคอนกรีต มีงานวิจัยศึกษาเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวให้อายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้สภาพแวดล้อมทางทะเลให้ยาวนานขึ้น โดยมุ่งปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตด้วยการใช้วัสดุปอซโซลานเพื่อเพิ่มความทนทานของคอนกรีตให้มีแข็งแรงมากขึ้น [1]

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการใช้เถ้าลอย (Fly ash) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า มาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นวัสดุประสานหลักบางส่วนเพื่อปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีต โดยที่เถ้าลอยนั้นมีองค์ประกอบหลักคือ อลูมินา และซิลิกา ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic reaction) กับสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ส่งผลให้เกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอลูมินาไฮเดรตมากขึ้น รวมทั้งได้นำผลพลอยได้อีกชนิดหนึ่งจากการเผาถ่านหินมาใช้คือ เถ้าก้นเตา (Bottom ash) ซึ่งมีอนุภาคที่ใช้ใกล้เคียงกับมวลรวมละเอียด และมีความพรุน (Porosity) ที่สูง จึงสามารถเก็บกักน้ำ (Water retainability) ไว้ภายในได้ ทำให้เถ้าก้นเตาสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุบ่มภายใน (Internal curing materials) เนื้อของคอนกรีตได้ โดยที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียด เพื่อเพิ่มความสามารถในบ่มภายในคอนกรีต ซึ่งจากผลการศึกษา [2,3] ความต้านทานการแทรก

ซึมคลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาที่เผิชญสิ่งแวดล้อมทะเลจริงของไทยพบว่า เมื่อใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10 โดยปริมาตรของทราย ทำให้คอนกรีตมีสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ต่ำลง อีกทั้งยังทำให้คอนกรีตมีกำลังที่สูงขึ้น

อีกทั้งงานวิจัยนี้ยังนำผงหินปูน (Limestone powder) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการย่อยหินเพื่อผลิตมวลรวมหยาบมาใช้ โดยผงหินปูนนั้นสามารถเป็นวัสดุเติมแทรกภายในโพรงช่องว่างของคอนกรีตทำให้คอนกรีตมีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น [4]

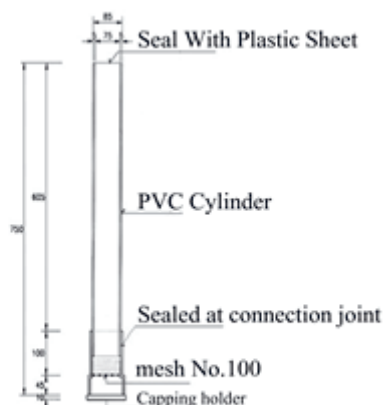
2. รายละเอียดวิธีการศึกษา

2.1 วัสดุและส่วนผสมคอนกรีต

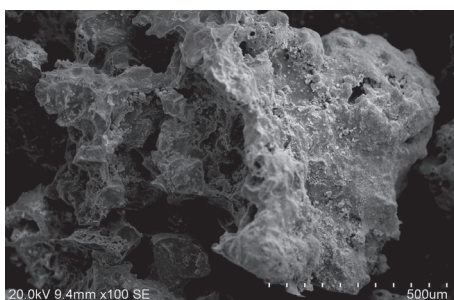
ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลักของคอนกรีต ใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะแทนที่วัสดุปูนซีเมนต์ร้อยละ 30 และ 50 โดยน้ำหนัก และผงหินปูนแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 ร่วมกับเถ้าลอยร้อยละ 20 และ 40 ใช้เถ้าก้นเตาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะจำนวน 2 ชนิดคือ BA และ BB ซึ่งมีความสามารถเก็บกักน้ำร้อยละ 37.77 และ 30.31 ตามลำดับ แทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 0 10 และ 30 โดยปริมาตร ตารางที่ 1 แสดงสมบัติทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย ผงหินปูน และเถ้าก้นเตา ตารางที่ 2 แสดงรายละเอียดส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 และ 0.55 ทำการถอดแบบเมื่อคอนกรีตมีอายุครบ 1 วัน หลังจากนั้นนำคอนกรีตบ่มน้ำเป็นระยะเวลาอีก 28 56 และ 91 วัน

อย่างไรก็ตามวิธีการทดสอบการดูดซึมน้ำ (Absorption) ของมวลรวมละเอียด เช่น ทราย

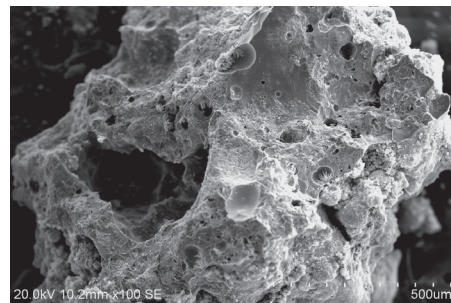
ไม่สามารถใช้กับเถ้ากันเตาได้ เนื่องจากเถ้ากันเตามีความพรุนสูงและมีแรงเสียดทานพื้นผิวสูง แม้ในสภาวะที่แห้ง ดังนั้นจึงใช้ค่าความสามารถเก็บกักน้ำ (Water retainability) แทนค่าการดูดซึม โดยความสามารถเก็บกักน้ำหมายถึงปริมาณน้ำที่เติมเต็มช่องว่างในวัสดุพรุนรวมทั้งน้ำที่ถูกยึดจับไว้ที่ร่องพื้นผิวของวัสดุพรุนภายใต้แรงโน้มถ่วง โดยในการทดสอบหาความสามารถเก็บกักน้ำและความถ่วงจำเพาะของเถ้ากันเตา ทดสอบตามวิธีของ Kasemchaisiri R. และ Tangtermsirikul S. [5] โดยรูปที่ 1 แสดงอุปกรณ์ในการทดสอบความสามารถในการเก็บกักน้ำของเถ้ากันเตา และรูปที่ 2 แสดงอนุภาคของเถ้ากันเตา



รูปที่ 1 อุปกรณ์ทดสอบความสามารถเก็บกักน้ำของเถ้ากันเตา



(ก) เถ้ากันเตาชนิด A



(ข) เถ้ากันเตาชนิด BB

รูปที่ 2 อนุภาคของเถ้ากันเตา

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าลอย ผงหินปูน และเถ้ากันเตา

Chemical composition (%)	OPC	Bottom ash (BA)	Bottom ash (BB)	Fly ash	Limestone powder
SiO ₂	19.51	36.29%	30.13%	39.4	0.26
CaO	65.38	20.84%	27.78%	19.19	55.93
Al ₂ O ₃	4.97	19.96%	17.84%	17.93	<0.01
Fe ₂ O ₃	3.78	14.56%	15.99%	12.92	0.07
MgO	1.08	1.96%	2.19%	2.99	0.55
SO ₃	2.16	0.96%	1.92%	3.03	<0.01
LOI	2.27	1.36%	0.20%	0.17	43.17
Physical properties					
Specific gravity	3.15	1.78	1.94	2.29	2.69
water retainability	-	37.77	30.31	-	-

2.2 รายละเอียดวิธีการทดลอง

2.2.1 กำลังอัดของคอนกรีต

ทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 10x10x10 ซม.3 แล้วบ่มน้ำจนอายุครบ 28 56 และ 91 วัน จึงทดสอบหากำลังอัดของคอนกรีต

2.2.2 ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงของคอนกรีต

ทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. บ่ม

ตัวอย่างคอนกรีตในน้ำครบ 28 56 และ 91 วัน ก่อนทำการตัดตัวอย่างทดสอบให้มีความหนาเท่ากับ 5 ซม. จากนั้นทำการทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง (Rapid chloride penetration test, RCPT) ตามมาตรฐาน ASTM C1202 [6] ด้วยอุปกรณ์ทดสอบ ซึ่งด้านหนึ่งของเซลล์เติมสารละลาย NaCl ความเข้มข้นร้อยละ 3.0 อีกด้านของเซลล์เติมสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 0.30M ทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตแสดงผลเป็นปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต (Charge passed) เป็นคูลอมบ์ (Coulomb) ซึ่งตามเกณฑ์คุณภาพของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C1202 ระบุว่าค่าปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านมีค่ามากกว่า 4,000 คูลอมบ์ ถือว่าการแทรกซึมคลอไรด์ผ่านคอนกรีตมีค่าสูง ถ้าอยู่ในช่วง 2,000-4,000 คูลอมบ์ อยู่ในระดับปานกลาง และ 1,000-2,000 คูลอมบ์ อยู่ในระดับที่ต่ำ

2.2.3 ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบช้าของคอนกรีต
ทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. บ่มตัวอย่างคอนกรีตในน้ำครบ 28 วัน จากนั้นนำตัวอย่างคอนกรีตแช่ในสารละลายเกลือคลอไรด์ตามมาตรฐาน ASTM C1556 ความเข้มข้นร้อยละ 5 [7] เป็นระยะเวลา 28 56 และ 91 วัน เมื่อครบกำหนดแล้ว จึงนำตัวอย่างขึ้นมาตัดเป็นชิ้น แต่ละชิ้นมีความหนา 1 ซม. โดยตัดทั้งหมด 5 ชิ้น แล้วนำตัวอย่างคอนกรีตมาบดเป็นผงให้ละเอียด จากนั้นนำผงตัวอย่างมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20 แล้วนำมาทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ด้วยเครื่อง Potentiometric titration เพื่อหาค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total

chloride content) ของคอนกรีต ที่แต่ละระยะจากผิวหน้าของคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C1152 [8] นำค่าที่ได้มาหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ (Chloride diffusion coefficient) ดังสมการที่ 1

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

$C(x, t)$ คือ ปริมาณคลอไรด์ที่ระยะความลึก x จากผิวหน้า ที่ระยะเวลาเผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล t (% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน)

C_s คือ ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต (% โดยน้ำหนักวัสดุประสาน)

D_a คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีต (ซม.2/ปี)

x คือ ระยะทางจากผิวหน้าคอนกรีต (ซม.)

t คือ ระยะเวลาที่เผชิญสิ่งแวดล้อมทะเล (ปี)

2.2.4 ความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของคอนกรีต

ทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดความสูง 20 ซม. เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. บ่มตัวอย่างคอนกรีตในน้ำที่อายุ 510 วัน เพื่อทราบถึงความต้านทานของคอนกรีต โดยเป็นการวัดเชิงกายภาพ ทำให้วัดได้ง่ายและใช้เวลาสั้น

2.2.5 ความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีต

หล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกความสูง 20 ซม. เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. และบ่มตัวอย่างในน้ำที่อายุ 510 วัน

ตารางที่ 2 รายละเอียดส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้

Mix id.	Mix proportion of concrete (kg/m ³)						
	Binder			Bottom ash	Water	Sand (SSD)	Rock (SSD)
	OPC	Fly ash	Lime stone powder				
I55	388	-	-	-	213	742	995
I55BA10	388	-	-	51	213	668	996
I55BA30	388	-	-	153	214	519	995
I55F30	272	116	-	-	213	732	957
I55F30BA10	272	116	-	50	213	653	974
I55F30BA30	272	116	-	172	214	512	967
I55F30BB10	272	116	-	55	214	653	974
I55F30BB30	272	116	-	164	213	508	974
I55F50	174	174	-	-	214	720	952
I55F50BA10	174	174	-	57	214	643	959
I55F50BA30	174	174	-	170	214	500	959
I55F20L10	271	78	39	-	213	728	977
I55F20L10BA10	271	78	39	50	213	655	977
I55-F20L10BA30	271	78	39	151	213	510	977
I55F40L10	194	155	39	-	213	717	963
I55F40L10BA10	194	155	39	49	213	646	963
I55F40L10BA30	194	155	39	148	213	502	963
I45	439	-	-	-	197	742	995
I45BA10	439	-	-	51	197	668	995
I45BA30	439	-	-	154	197	519	995

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 กำลังอัดของคอนกรีต

จากผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ที่ใช้เถำกันเตาแทนที่มวลรวมละเอียดในปริมาณต่างๆ ให้ผลดังรูปที่ 3(ก) พบว่าคอนกรีตที่ใช้เถำกันเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 ให้ค่ากำลังอัดที่สูงที่สุดตั้งแต่ในช่วงอายุ 28 วัน ไปจนถึงอายุ 91 วัน

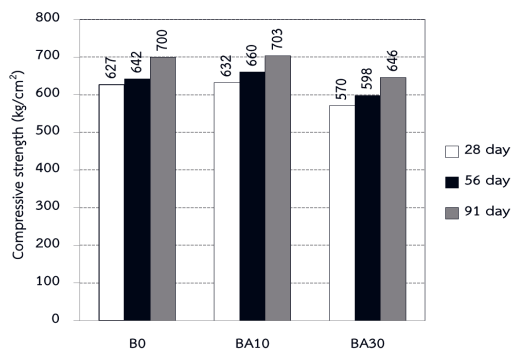
รูปที่ 3(ข) แสดงถึง คอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และใช้เถำกันเตาแทนที่มวลรวมละเอียด พบว่าคอนกรีตที่ใช้เถำกันเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 ให้กำลังอัดที่สูงที่สุด โดยเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใช้เถำล่อยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ

ละ 30 ร่วมกับการใช้เถำกันเตา ดังรูปที่ 4(ก) แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่ใช้เถำกันเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 ให้กำลังอัดที่สูงที่สุดเนื่องจากภายในขอเถำกันเตาสามารถที่จะเก็บกักน้ำไว้ได้ ทำให้เป็นวัสดุบ่มภายในที่ดี อีกทั้งภายในโพรงช่องว่างของเถำกันเตามีเถำล่อยแทรกตัวอยู่ภายใน ซึ่งเถำล่อยนี้สามารถที่จะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ อีกทั้งเมื่อได้เปรียบเทียบบการใช้เถำกันเตาทั้ง 2 ชนิด ดังแสดงในรูปที่4(ก) พบว่าการใช้เถำกันเตาชนิด BA จะให้ค่ากำลังอัดที่สูงกว่า

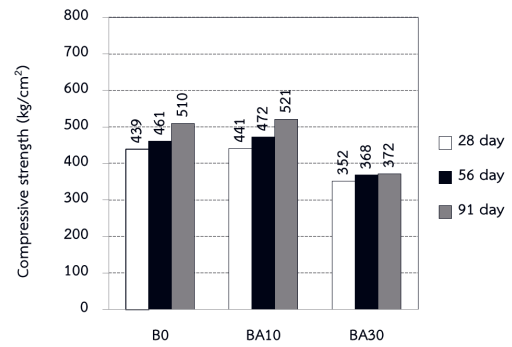
รูปที่ 4(ข) เปรียบคอนกรีตที่ผสมเถำล่อยแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 50 ร่วมกับการใช้เถำกันเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตมีค่าที่ต่ำ เนื่องจาก

การนำเถ้าลอยมาทดแทนปริมาณปูน ส่งผลให้ปูนซีเมนต์ในเนื้อคอนกรีตลดลง ส่งผลให้ CH ซึ่งเป็นผลผลิตที่ใช้ในกระบวนการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอยลดลง ทำให้ผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลานิก เช่น C-A-H และ C-S-H ลดลงตามไปด้วย [8]

รูปที่ 5(ก) แสดงผลกำลังอัดคอนกรีตที่ใช้ผงหินปูนร้อยละ 10 และเถ้าลอยร้อยละ 20 แทนที่วัสดุประสาน ร่วมกับการใช้เถ้าก้นเตาบางส่วนในมวลรวมละเอียด ซึ่งผลบ่งบอกได้ว่าการใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10 ร่วมเข้าไปด้วยนั้นจะให้ผลกำลังอัดสูงที่สุดทั้งในช่วงอายุต้นและอายุปลาย เมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าก้นเตา และคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 30 รูปที่ 5(ข) แสดงค่าผลกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ผงหินปูนร้อยละ 10 และเถ้าลอยร้อยละ 40 จะให้ค่ากำลังอัดที่ไม่สูงมาก เนื่องจากการแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์มากเกินไป

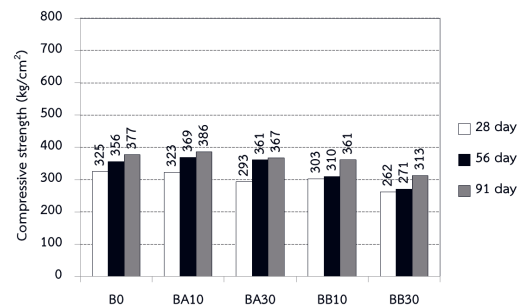


(ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45

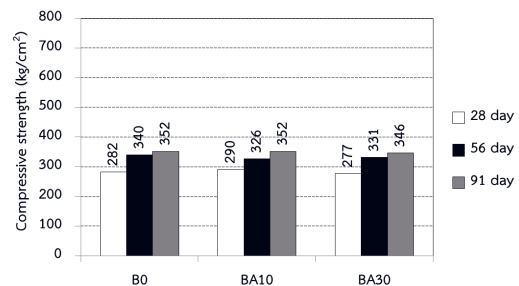


(ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55

รูปที่ 3 กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน

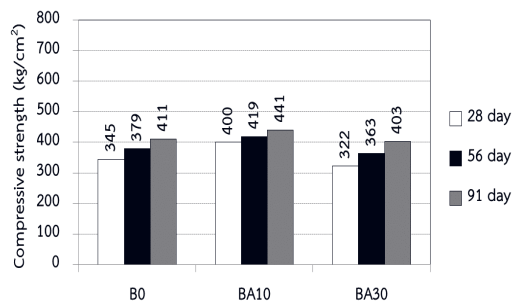


(ก) คอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 30

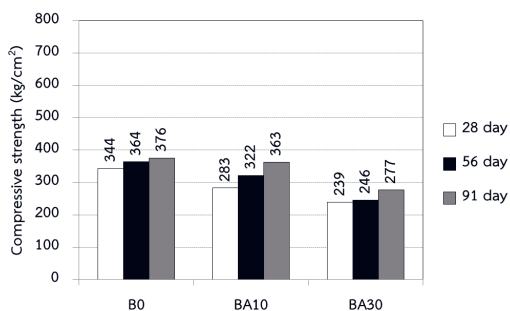


(ข) คอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 50

รูปที่ 4 กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดและเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสาน



(ก) แก้วลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10



(ข) แก้วลอยร้อยละ 40 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10

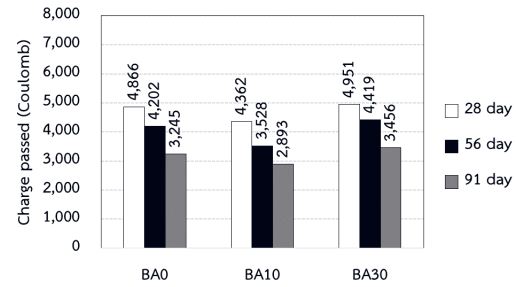
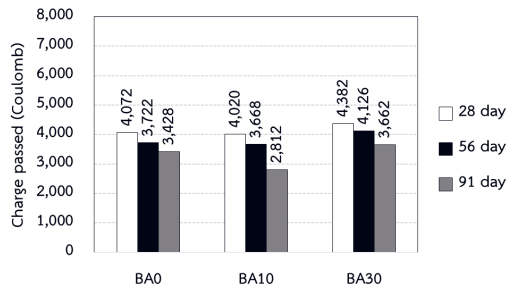
รูปที่ 5 กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดและใช้แก้วลอยร่วมกับผงหินปูนแทนที่วัสดุประสาน

3.2 ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต

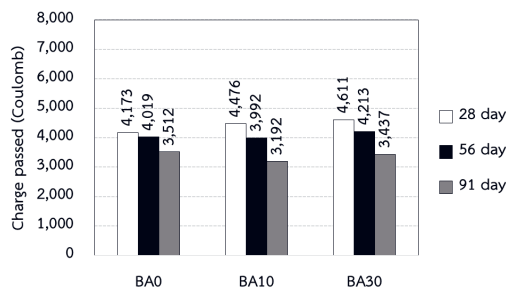
จากผลการทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงของคอนกรีตนั้นแสดงเป็นค่าปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตมีหน่วยวัดเป็นคูลอมบ์ โดยรูปที่ 6(ก) แสดงถึงคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาร้อยละ 10 ให้ค่าปริมาณประจุไฟฟ้าต่ำที่ไหลผ่านคอนกรีตต่ำที่สุด แต่ค่านั้นสูงขึ้นหากใช้เถ้าก้นเตาในปริมาณที่มากถึงร้อยละ 30 เนื่องจากภายในของเถ้าก้นเตานั้นเป็นโพรง หากใส่ในปริมาณที่มากเกินไปอาจทำให้คอนกรีตภายในมีความพรุนมากขึ้น และรูปที่ 6(ข)แสดงถึงผลการทดสอบปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อ

วัสดุประสาน 0.55 กล่าวได้ว่าการใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10 ในการแทนที่มวลรวมละเอียดนั้นให้ค่าปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตต่ำที่สุดในช่วงอายุ 91 วัน อีกทั้งเมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่าปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 มีค่าต่ำกว่า เนื่องจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่น้อยลง ทำให้ปริมาณน้ำอิสระภายในของคอนกรีตลดลง ส่งผลให้เกิดโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตต่ำลง ส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบแน่นมากยิ่งขึ้น

รูปที่ 7(ก) แสดงถึงคอนกรีตที่ใช้แก้วลอยร้อยละ 30 แทนที่วัสดุประสาน ร่วมกับเถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียด พบว่าการใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10 ร่วมกับแก้วลอยร้อยละ 30 ให้ค่าปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตต่ำที่สุด ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างเถ้าก้นเตาชนิด BA และชนิด BB นั้น สังเกตได้ว่าในช่วงอายุต้นมีค่าประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านใกล้เคียงกัน แต่เมื่อถึงอายุ 91 วันนั้น ถ้าก้นเตาชนิดชนิด BA มีค่าประจุไฟฟ้าไหลผ่านต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ใส่แก้วลอยร้อยละ 30 และคอนกรีตที่ใส่แก้วลอยร้อยละ 30 ร่วมกับเถ้าก้นเตาชนิด BB ร้อยละ 10 อีกทั้งยังพบว่าคอนกรีตที่ผสมแก้วลอยร้อยละ 50 ร่วมกับเถ้าก้นเตาในปริมาณต่างๆดังแสดงในรูปที่ 7(ข) พบว่าการใช้แก้วลอยร้อยละ 50 ร่วมกับเถ้าก้นเตาร้อยละ 10 ให้ค่าปริมาณประจุไฟฟ้าไหลผ่านคอนกรีตต่ำที่สุด และจากรูปที่ 8(ก) การใช้แก้วลอยร้อยละ 20 และผงหินปูนร้อยละ 10 แทนที่วัสดุประสาน ร่วมกับแก้วลอยร้อยละ 10 ให้ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านต่ำที่สุด 10 สามารถเพิ่มความสามารถของคอนกรีต แต่เมื่อนำเถ้าก้นเตามาใช้ในปริมาณร้อยละ 30 ค่าประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตกลับมีค่าที่สูงขึ้น

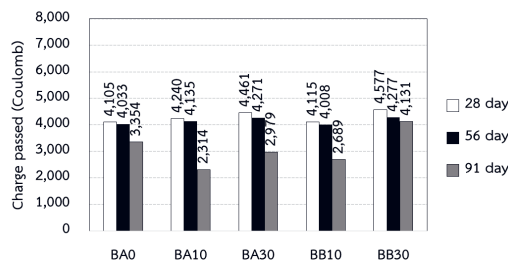


(ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45

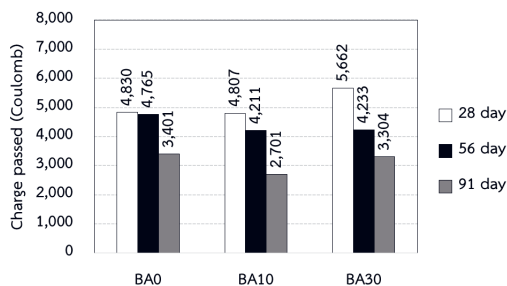


(ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55

รูปที่ 6 การแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงของคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียด



(ก) เถ้าลอยร้อยละ 30



(ข) เถ้าลอยร้อยละ 50

รูปที่ 7 การแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงของคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดและเถ้าลอยแทนที่วัสดุประสาน

รูปที่ 8 การแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10

3.3 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีต

จากผลการทดสอบความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบแช่ของคอนกรีตให้ค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด เพื่อนำมาหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ (D_a) ซึ่งคอนกรีตมีอายุที่เพิ่มขึ้นสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์นั้นมีค่าที่ต่ำลง เนื่องจากเนื้อของคอนกรีตสามารถเกิดปฏิกิริยาได้สมบูรณ์มากขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตมีเนื้อภายในที่แน่นขึ้นและโพรงช่องว่างภายในลดลง จากรูปที่ (9)ก แสดงถึงคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ร่วมกับเถ้าก้นเตาในอัตราส่วนต่างๆ พบว่าการใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์จะต่ำที่สุด และรูปที่ 9(ข)แสดงถึงคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 ร่วมกับเถ้าก้นเตาในอัตราส่วนต่างๆ พบว่าการใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 10 ให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ต่ำที่สุดเช่นกัน และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 และ 0.55 สามารถกล่าวได้ว่าการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำลง ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์มีค่าลดลง เนื่องจากปริมาณน้ำอิสระที่ลดลง

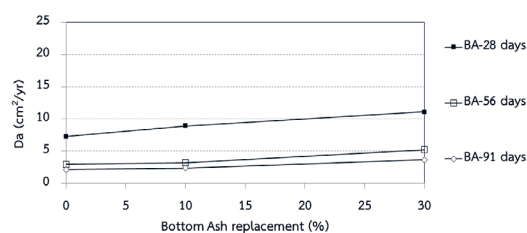
ช่วยให้คอนกรีตที่โพรงช่องว่างลดลง ส่งผลให้คอนกรีตบีบแน่นมากยิ่งขึ้น

รูปที่ 10(ก) แสดงสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 30 ร่วมกับเถ้าก้นเตาชนิด BA และ BB พบว่าคอนกรีตอายุที่ 91 โดยใช้เถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 ร่วมกับเถ้าลอยร้อยละ 30 มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม ซึ่งสอดคล้องกับค่าปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีต อีกทั้งเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าระหว่างเถ้าก้นเตาชนิด BA และเถ้าก้นเตาชนิด BB แล้ว การใช้เถ้าก้นเตาชนิด BA มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ต่ำกว่าชนิด BB เนื่องจากความสามารถในการเก็บกักน้ำของเถ้าก้นเตาชนิด BA มีสูงกว่าส่งผลให้เมื่อเวลาผ่านไปปูนซีเมนต์สามารถดึงน้ำภายในเถ้าก้นเตาไปใช้ในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้มาก ทำให้คอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาชนิด BA บีบแน่นมากกว่า

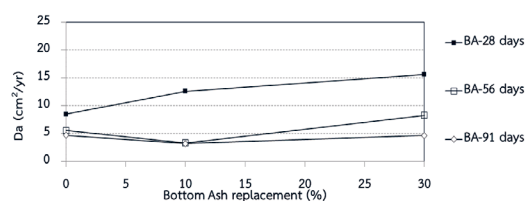
รูปที่ 10(ข) การใช้เถ้าลอยร้อยละ 50 แทนที่วัสดุประสานร่วมกับเถ้าก้นเตาที่แทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 10 และ 30 กล่าวได้ว่าการใช้เถ้าลอยร้อยละ 50 ร่วมกับเถ้าก้นเตาร้อยละ 10 ส่งผลให้อายุ 91 วันของคอนกรีต มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าก้นเตาและคอนกรีตที่ใช้เถ้าก้นเตาร้อยละ 30

รูปที่ 11(ก) แสดงสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 20 และผงหินปูนร้อยละ 10 แทนที่วัสดุประสานร่วมกับเถ้าก้นเตาร้อยละ 10 มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์จะต่ำที่สุด และรูปที่ 11(ข) เป็นการที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 40 และผงหินปูนร้อยละ 10 ร่วมกับเถ้าก้นเตา โดยค่าที่ดีที่สุดคือการ

ใช้ร่วมกับเถ้าก้นเตาร้อยละ 10 ที่อายุ 91 วัน ซึ่งการใช้เถ้าลอยมากเกินไป ส่งผลให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง เมื่อปูนซีเมนต์ลดลงผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ได้แก่ Ca(OH)_2 ลดลงเช่นกันส่งผลให้ผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลานิคลดน้อยลงตามไปด้วยเช่นกัน [9]

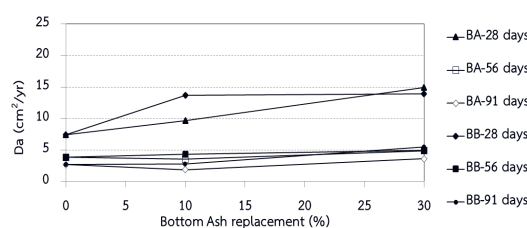


(ก) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45

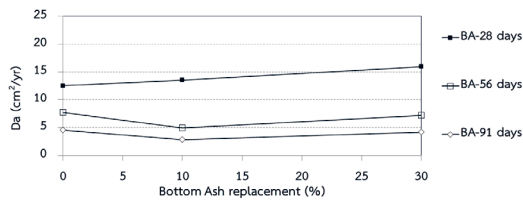


(ข) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55

รูปที่ 9 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน

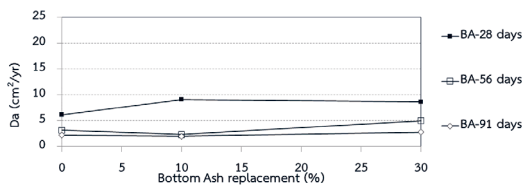


(ก) เถ้าลอยร้อยละ 30

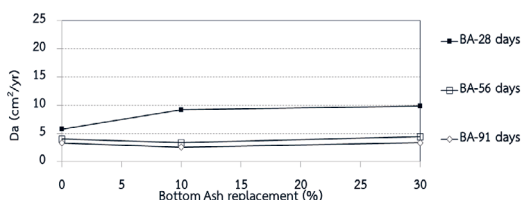


(ข) แก้วลอยร้อยละ 50

รูปที่ 10 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดและใช้แก้วลอยแทนที่วัสดุประสาน



(ก) แก้วลอยร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10



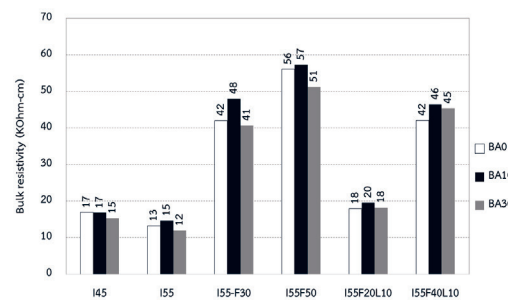
(ข) แก้วลอยร้อยละ 40 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10

รูปที่ 11 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ผสมเถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดและใช้แก้วลอยร่วมกับผงหินปูนแทนที่วัสดุประสาน

3.4 ความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของคอนกรีต

การทดสอบค่าความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของคอนกรีตทดสอบที่อายุ 510 วัน โดยเมื่อพิจารณาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานดังรูปที่ 12 แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อ

วัสดุประสานที่ 0.45 มีค่าความต้านทานดีกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 อันเนื่องมาจากการลดน้ำที่ใช้นั้นจะลดปริมาณน้ำอิสระ ส่งผลให้คอนกรีตมีความพรุนลดน้อยลง และเปรียบเทียบคอนกรีตที่ทั้งหมดคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 50 ให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าของคอนกรีตดีที่สุดเนื่องจากเมื่ออายุถึง 510 วัน คอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยมากสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้มาก ทำให้เนื้อคอนกรีตมีความแน่น โดยให้ผลไปในแนวโน้มเดียวกับผลของปริมาณประจุไฟฟ้าที่ไหลผ่านคอนกรีตและสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีต คือเมื่อผสมเถ้าก้นเตาร้อยละ 10 ส่งผลให้คอนกรีตมีความต้านทานดีที่สุด

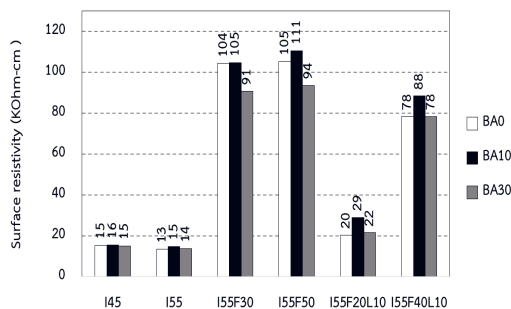


รูปที่ 12 ความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดของคอนกรีต

3.5 ความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีต

การทดสอบค่าความต้านทานที่ผิวของคอนกรีตทดสอบที่อายุ 510 วัน พบว่าเมื่อใช้เถ้าลอยในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้ ค่าความต้านทานที่ผิวของคอนกรีตมากขึ้น และดีที่สุดเมื่อใช้ร่วมกับเถ้าก้นเตาร้อยละ 10 และการเปรียบเทียบระหว่างคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 และ 40 ร่วมกับผงหินปูน ซึ่งการใช้เถ้าลอยร้อยละ 40 ส่งผลให้คอนกรีตมีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวได้ดีกว่าและเมื่อใช้ร่วมกับเถ้าก้นเตาที่ร้อยละ 10 เนื่องจากการผสมเถ้าก้นเตาแทนที่มวลรวมละเอียดสามารถเป็นวัสดุบ่ม

ภายในของคอนกรีตได้ และและดีที่สุดเมื่อใช้เถ้าลอยร้อยละ 50 แทนที่วัสดุประสาน ร่วมกับเถ้าก้นเตาร้อยละ 10 ที่มวลรวมละเอียด 10 มีความสามารถในการต้านทานที่ผิวได้ดีที่สุด



รูปที่ 13 ความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีต

4.สรุปผล

1. คอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงที่สุดคือ คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ที่ผสมเถ้าก้นเตาชนิด BA ร้อยละ 10 เนื่องจากเถ้าก้นเตา BA มีความสามารถเก็บกักน้ำได้สูง ทำให้เป็นวัสดุบ่มภายในที่ดี

2. คอนกรีตที่มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ได้ดีที่สุดคือ คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 30 แทนที่วัสดุประสาน ร่วมกับเถ้าก้นเตาร้อยละ 10 เนื่องจากการใช้เถ้าลอยนั้นสามารถ

เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ทำให้คอนกรีตบีบแน่นมากยิ่งขึ้น อีกทั้งเมื่อผสมเถ้าก้นเตาลงไปสามารถเป็นวัสดุบ่มภายในคอนกรีตได้ ทำให้ภายในคอนกรีตเกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

3. คอนกรีตที่ใช้ผงหินปูนร้อยละ 10 ร่วมกับเถ้าลอยร้อยละ 40 มีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ที่ดี และดีที่สุดเมื่อใช้ร่วมกับเถ้าก้นเตาร้อยละ 10

4. ความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดและความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 50 ร่วมกับเถ้าก้นเตาร้อยละ 10 มีค่าความต้านทานดีที่สุด เนื่องจากปฏิกิริยาปอซ

โซลานสามารถเกิดได้อย่างสมบูรณ์ อีกทั้งการใช้เถ้าก้นเตาสามารถเป็นวัสดุบ่มภายในได้

5. เมื่อพิจารณาที่อายุ 510 วัน คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยร้อยละ 50 ร่วมกับเถ้าก้นเตาร้อยละ 10 มีความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวและความต้านทานไฟฟ้าทั้งหมดดีที่สุด เนื่องจากระยะเวลาที่นานคอนกรีตภายในที่ผสมเถ้าลอยสามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้มาก อีกทั้งเมื่อผสมเถ้าก้นเตาที่เป็นวัสดุบ่มภายใน ทำให้ปฏิกิริยาภายในเกิดได้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (Construction & Maintenance Technology Research Center, CONTEC) สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธรมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ สำหรับผู้แต่งที่ 1 และหน่วยวิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษาบูรพา (BCONTEC) มหาวิทยาลัยบูรพา

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Poon C.S, Kon S.C, Lam L. Compressive strength chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete. Construction and building material.2006,20:858-865.
- [2] Kunmongkol U. Rapid chloride penetration resistance and chloride threshold content of concrete of concrete containing fly ash and limestone powder and using bottom ash as partial replacement of fine aggregate

- [master's thesis]. Chonburi: Burapha university; 2013. (in Thai)
- [3] Namchan S. The application of bottom ash as partially sand replacement for concrete under marine environment. Annual concrete conference 11th. 2016 Feb 17-19; Thailand. Nakhon Ratchasima ; 2016 (in Thai)
- [4] Hornain H, Marchand J, Duhot V, Moranville M. Diffusion of chloride ions in limestone filler blended cement pastes and mortars. Cement and concrete research. 1995 Dec;25(8): 1667-1678.
- [5] Kasemchaisiri R, Tangtermsirikul S. A method to determine water retainability of porous fine aggregate for design and quality control of fresh concrete. Construction and building Materials. 2007; 21: 1322-1334.
- [6] ASTM C1202, Standard test method for electrical indication concrete's ability to resist chloride ion penetration. 2004. Vol 4.02
- [7] ASTM C1556, Standard test method for determining the apparent chloride diffusion coefficient of cementitious mixtures by bulk diffusion. 2004. Vol 4.02
- [8] ASTM C1152, Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete. 2004. Vol 4.02
- [9] Chindaprasirt P, Jaturapitakkul C and Sinsiri T. Effect of fly ash fineness on microstructure of blended cement paste. Construction and Building Materials. 2007; 21: 1534-1541.

เครื่องเทอร์โมฟอร์มมิ่งสำหรับขึ้นรูปภาชนะบรรจุข้าวแตน

กนต์ธีร์ สุขตากจันทร์^{1*} ดอน วิลละคำ² และนเรศ อินตะวงศ์³
luang_s4@hotmail.com^{1*}, wilakhamd@gmail.com², naret_i@yahoo.com³

¹⁻³ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่

² ฝ่ายวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

Received	: 9-Aug-2019
Revised	: 29-Aug-2019
Accepted	: 5-Sep-2019

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและจัดสร้างเครื่องเทอร์โมฟอร์มมิ่งขนาดเล็ก โดยมีหลักการทำงานคือ แผ่นพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตขนาดความหนา 0.3 มิลลิเมตรที่ถูกลำเลียงมาอย่างต่อเนื่องมายังตำแหน่งแม่พิมพ์ จากนั้นแผ่นพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตจะถูกให้ความร้อนด้วยฮีตเตอร์อินฟราเรดช่วงอุณหภูมิ 240 °C ถึง 260 °C จนอ่อนตัวและถูกดึงขึ้นรูปด้วยแรงดูดสุญญากาศภายในแม่พิมพ์ และถูกลำเลียงไปยังชุดตัดให้ได้รูปทรงภาชนะบรรจุภัณฑ์ที่ต้องการ สำหรับภาชนะบรรจุผลิตภัณฑ์ที่ได้ถูกออกแบบให้มีช่องบรรจุที่เหมาะสมกับขนาดข้าวแตน ทำให้ไม่ให้เกิดความเสียหายจากการกระแทกทางด้านข้างระหว่างขนย้าย รวมทั้งสามารถสร้างตราสัญลักษณ์เครื่องหมายการค้าของตนเองลงบนภาชนะได้อีกด้วย ผลการดำเนินงานพบว่าเครื่องเทอร์โมฟอร์มมิ่งสามารถขึ้นรูปขึ้นงานภาชนะบรรจุผลิตภัณฑ์ข้าวแตนได้ตามวัตถุประสงค์ของการออกแบบ สภาพการผลิตที่เหมาะสมคือที่อุณหภูมิการผลิต 260 °C เวลาในการให้ความร้อนแก่แผ่นพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตเท่ากับ 20 วินาที เวลาในการขึ้นรูปเท่ากับ 5 วินาที และความดันการขึ้นรูปเท่ากับ 0.005 บาร์ ผลการวิเคราะห์ความหนาของภาชนะบรรจุภัณฑ์พบว่าบริเวณส่วนกลางของหลุมขึ้นงานมีขนาดหนามากที่สุดจากนั้นมีแนวโน้มที่จะลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงบริเวณขอบของขึ้นงาน กำลังการผลิตที่เครื่องเทอร์โมฟอร์มมิ่งทำได้คือ 704 ชิ้นงานต่อวัน ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์พบว่าต้นทุนการผลิตภาชนะบรรจุภัณฑ์พลาสติกด้วยเครื่องเทอร์โมฟอร์มมิ่งเท่ากับ 2.14 บาทต่อชิ้นงาน และมีระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 2 ปี 2 เดือน

คำสำคัญ: เครื่องเทอร์โมฟอร์มมิ่ง ภาชนะบรรจุภัณฑ์พลาสติก ข้าวแตน แม่พิมพ์

Thermoforming Machine For Produced of the Kaotan Packaging

Konthee Sugtakchan^{1*}, Don Wilakham² and Naret Intawong³
luang_s4@hotmail.com^{1*}, wilakhamd@gmail.com², naret_i@yahoo.com³

¹⁻³ Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna.

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

Received	: 9-Aug-2019
Revised	: 29-Aug-2019
Accepted	: 5-Sep-2019

Abstract

This research aims to design and produce a small thermoforming machine. The working principle of the machine was to continuously feed a 0.3 millimeter thick polyethylene terephthalate sheet into the mold position. The polyethylene terephthalate sheet was heated by infrared heater at a temperature range of 240 °C to 260 °C until softened. Then the softened sheet was pulled by vacuuming force inside the mold. Finally it was fed to the cutting unit to achieve the desired container shape for Kaotan packaging. The Kaotan packaging was designed to have a suitable compartment for the Kaotan product size and to prevent damage from side impact during transportation. Manufacturers could also be able to put their own logos or trade marks on the kaotan packages. Results showed that the constructed thermoforming machine was able to mold the kaotan packaging container according to purpose of the design. The suitable producing condition for thermoforming machine was optimum production temperature of 260 °C. The preheating time (PT) and Vacuum forming time (VFT) were 20 seconds and 5 seconds, respectively. The vacuum pressure used in forming was 0.005 bar. Analysis of thickness of kaotan packaging revealed that the container was thickest at the center and tended to get continuously thinner towards the edge of the kaotan packaging. Production capacity of the thermoforming machine was 704 pieces per day. The economic analysis showed that the cost of producing kaotan packaging with thermoforming machines was 2.14 baht per piece, with a return of investment within a period of 2 years and 2 months.

Keywords: Thermoforming machine, Plastic Sheet Packaging, Rice Snack (Kaotan), Mould

1. บทนำ

ข้าวแต่น [1] เป็นขนมพื้นบ้านทางภาคเหนือ ที่แสดงถึงเอกลักษณ์ และภูมิปัญญาพื้นบ้าน รวมทั้งแสดงถึงวัฒนธรรมของชาวพื้นเมือง ที่บริโภคข้าวเหนียวเป็นอาหารหลัก ข้าวแต่นมักนิยมทำขึ้นเพื่อใช้เป็นขนมประกอบพิธีกรรมในเทศกาลงานบุญตามประเพณีของชาวภาคเหนือมาแต่โบราณ ปัจจุบันได้มีการปรับปรุงและพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าวแต่นในหลาย ๆ รูปแบบ เช่น การนำเอาน้ำผลไม้เช่นน้ำแตงโมและเมล็ดธัญพืชมาผสมเป็นส่วนประกอบเพิ่มเติมเพื่อเป็นการสร้างจุดขายของผลิตภัณฑ์ จนเป็นที่ นิยมของตลาดเป็นอย่างมาก ตลอดจนมีแนวโน้มทางการตลาดที่ดีในรูปแบบสินค้า “หนึ่งตำบลหนึ่งผลิตภัณฑ์” [2] ที่สร้างชื่อเสียงประเภทสินค้ายอดเยี่ยมระดับภาคเหนือ ซึ่งนอกจากจะบริโภคในประเทศแล้วยังสามารถส่งออกไปยังต่างประเทศ เช่น ประเทศมาเลเซีย และไต้หวัน เป็นต้น

ในการนี้ทางหุ้นส่วนสามัญนิติบุคคล “ข้าวแต่นหมื่นคำ” ได้มีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าวแต่นขึ้นใหม่ในลักษณะของรูปทรง “โดนัท” ดังแสดงในรูปที่ 1 และมีความต้องการที่จะสร้างภาชนะบรรจุภัณฑ์ ที่มีรูปทรงและขนาดเหมาะสมกับขนาดผลิตภัณฑ์ใหม่ดังกล่าว นอกจากนี้ยังต้องการสร้างตราสัญลักษณ์ของตนเองบนภาชนะบรรจุภัณฑ์อีกด้วย สำหรับวัตถุดิบหลักที่ใช้ในการผลิตข้าวแต่นคือข้าวเหนียวประมาณ 22,500 กิโลกรัม/ปี และ เมล็ดธัญพืชจำนวน 240 กิโลกรัม/ปี

จากแนวโน้มความต้องการทางการตลาดที่ดีของผลิตภัณฑ์ข้าวแต่นตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น ได้มีการวิจัยและพัฒนาเพื่อเพิ่มความสามารถในการแข่งขันในตลาดของ

ผลิตภัณฑ์ให้มากขึ้น [1] พื้นฐานการออกแบบและพัฒนาจากงานวิจัยที่ผ่านมาอดีต [3] ซึ่งได้ออกแบบและสร้างเครื่องเทอร์โมฟอร์มมิ่งที่มีกลไกการทำงานด้วยการให้ความร้อนแก่แผ่นพอลิเมอร์ชนิดพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตที่ถูกป้อนมาอย่างต่อเนื่องมายังตำแหน่งแม่พิมพ์ จากนั้นแผ่นพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตจะถูกให้ความร้อนด้วยอินฟราเรดฮีตเตอร์จนอ่อนตัวและถูกดึงขึ้นรูปด้วยแรงดูดสุญญากาศ (Vacuum Forming) [4] ในแม่พิมพ์ (Mould) [5] โดยเป็นการทำงานแบบกึ่งอัตโนมัติ ผลการวิจัยได้นำเสนอข้อมูลสภาวะการผลิตที่เหมาะสมที่ใช้ในการปรับตั้งเครื่องเทอร์โมฟอร์มมิ่งเพื่อให้ได้คุณภาพด้านความหนาขึ้นงานที่สมบูรณ์

สำหรับปัญหาที่เป็นขีดจำกัดด้านการพัฒนารูปลักษณะของภาชนะบรรจุข้าวแต่นนั้นพบว่าผู้ประกอบการไม่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปแบบของภาชนะบรรจุข้าวแต่นได้หลากหลายมากนัก ส่วนใหญ่มักมีรูปร่างเป็นถุงสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยจะต่างกันเฉพาะสีของถุงและฉลากของผู้ประกอบการเท่านั้น และผู้ประกอบการไม่สามารถสร้างตราสัญลักษณ์ที่เป็นเอกลักษณ์ของผู้ประกอบการเองลงบนแผ่นพลาสติกทรงก้นกระแทกได้ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากรูปลักษณะของภาชนะบรรจุข้าวแต่นดังกล่าวถูกกำหนดด้วยแผ่นพลาสติกที่ถูกขึ้นรูปด้วยเทคนิคสุญญากาศ ที่มีรูปแบบเดียวกัน แผ่นพลาสติกพลาสติกมีรูปทรงแบบเดียวกันไม่สร้างความแตกต่างของผลิตภัณฑ์ อีกปัญหาหนึ่งคือแผ่นพลาสติกก้นกระแทกมีขนาดไม่เหมาะสมกับขนาดและรูปร่างของผลิตภัณฑ์ ข้าวแต่นที่มีความหลากหลายมากขึ้น รวมทั้งแผ่นพลาสติกดังกล่าวมิได้ช่วยในการป้องกันการกระแทกจากทางด้านข้างแต่อย่างใด ส่วนใหญ่มี

ขนาดของช่องบรรจุเล็กกว่าขนาดผลิตภัณฑ์ข้าว
แต่นและข้าวแต่นถูกวางไว้บนแผ่นพลาสติกที่อยู่
ด้านล่างภายในถุงพลาสติก โดยในความเป็น
จริงแล้วตัวผลิตภัณฑ์ข้าวแต่นควรจะอยู่ในช่อง
ของภาชนะบรรจุพลาสติกที่พอดี ปัญหาดังกล่าว
นำมาซึ่งความแตกหักเสียหายของผลิตภัณฑ์ข้าว
แต่นระหว่างการขนส่งเสมอ ดังนั้นวัตถุประสงค์
ของงานวิจัยนี้คือการออกแบบและจัดสร้าง
เครื่องเทอร์โมฟอร์มมิ่งขนาดเล็ก ที่สามารถผลิต
ภาชนะบรรจุผลิตภัณฑ์ข้าวแต่นที่ทำหน้าที่
ห่อหุ้มข้าวแต่นไม่ให้เคลื่อนที่ระหว่างขนย้าย
รวมทั้งสามารถป้องกันการกระแทกจากด้านข้าง
ได้อีกทางหนึ่ง นอกจากนี้ยังสามารถสร้างตรา
สัญลักษณ์เครื่องหมายการค้าลงบนภาชนะได้
อย่างคมชัดและสวยงาม



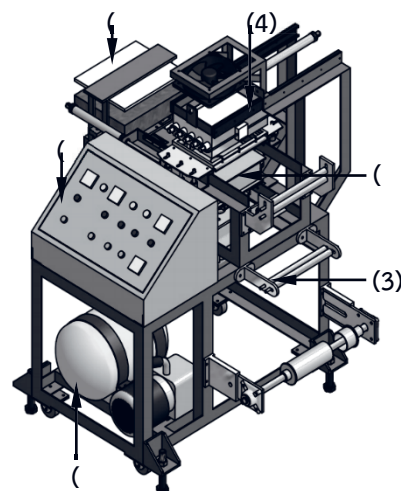
รูปที่ 1 ผลิตภัณฑ์ข้าวแต่นรูปทรง “โดนัท”

2. วิธีดำเนินงานวิจัย

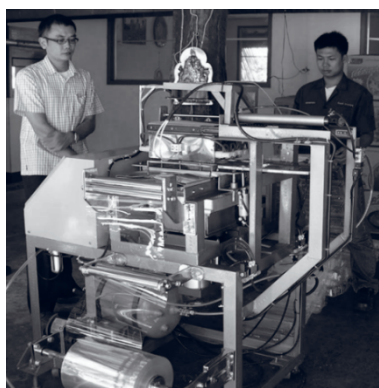
2.1 การออกแบบและจัดสร้างเครื่อง เทอร์โมฟอร์มมิ่ง

เครื่องเทอร์โมฟอร์มมิ่งที่สร้างขึ้นใน
งานวิจัยนี้เป็นเครื่องจักรที่มีระบบการผลิตแบบ
อัตโนมัติ ชิ้นงานถูกขึ้นรูปร่างต่อเนื่องโดยไม่
จำเป็นต้องใช้ผู้ปฏิบัติงานทำหน้าที่วางแผ่น
พลาสติกลงในแม่พิมพ์ การนำชิ้นงานออกจาก
แม่พิมพ์ และมีกลไกการตัดชิ้นงานภายหลังจาก
การขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์แล้ว นอกจากนี้ยัง
สามารถผลิตภาชนะบรรจุผลิตภัณฑ์ข้าวแต่นที่
ทำหน้าที่ห่อหุ้มข้าวแต่นไม่ให้เคลื่อนที่ระหว่าง
ขนย้าย และสามารถป้องกันการกระแทกจาก
ด้านข้างได้อีกทางหนึ่งรวมทั้งสามารถสร้างตรา
สัญลักษณ์เครื่องหมายการค้าของผู้ประกอบการ
เองลงบนภาชนะได้อย่างคมชัดและสวยงาม

เครื่องเทอร์โมฟอร์มมิ่งที่ได้ออกแบบและ
จัดสร้างขึ้นประกอบด้วย 6 ส่วนได้แก่ แม่พิมพ์
(1) ระบบสุญญากาศ (2) ระบบการลำเลียงแผ่น
พลาสติก (3) ชุดให้ความร้อนฮีตเตอร์และการ
ขึ้นรูปแผ่นพลาสติก (4) ชุดตัดแผ่นพลาสติก (5)
และชุดควบคุมการทำงาน (6) ดังแสดงในรูปที่ 2



ก) แบบเครื่องเทอร์โมฟอร์มมิ่ง



ข) เครื่องเทอร์โมฟอร์มมิ่งต้นแบบ
รูปที่ 2 แบบและเครื่องเทอร์โมฟอร์มมิ่งที่ได้
จัดสร้างขึ้น

- แม่พิมพ์

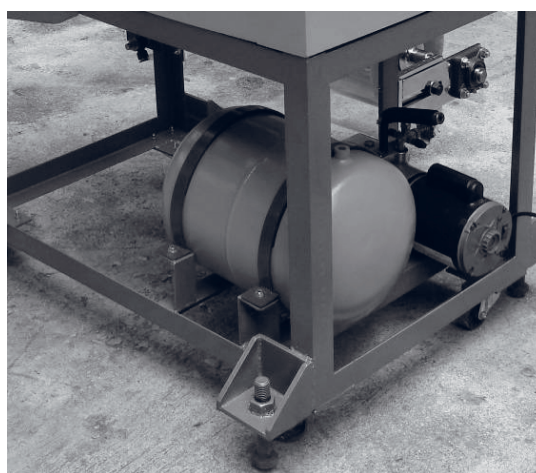
รูปที่ 3 แสดงรูปทรงของแม่พิมพ์ที่ผลิตจากวัสดุอะลูมิเนียมเพื่อใช้สำหรับขึ้นรูปภาชนะบรรจุภัณฑ์ข้าวแต๋นมีรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 280x230 mm. สามารถบรรจุข้าวแต๋นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 65 mm ได้ 20 ชิ้น โดยได้ทำตราสัญลักษณ์เครื่องหมายการค้า “ข้าวแต๋นหมื่นคำ” และตรารูปรถม้าซึ่งเป็นสัญลักษณ์ของจังหวัดลำปางลงในแม่พิมพ์ด้วย สำหรับการชุดขับเคลื่อนแม่พิมพ์โดยกล่องสุญญากาศจะถูกทำให้เคลื่อนที่ขึ้นและลงตามจังหวะการขึ้นรูปใช้กระบอกลมนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm ระยะชักสูงสุด 100 mm เป็นต้นกำลัง แม่พิมพ์ถูกเจาะรูเพื่อให้เป็นท่อขนาดเล็กสำหรับเชื่อมต่อกับระบบสุญญากาศ



รูปที่ 3 แสดงรูปทรงของแม่พิมพ์

- ระบบสุญญากาศ

รูปที่ 4 แสดงระบบสุญญากาศใช้หลักการดูดอากาศออกจากถังพักขนาดปริมาตรความจุ 25 ลิตรเพื่อให้ถังมีความดันประมาณ 45 เซนติเมตรปรอทในการดูดขึ้นรูปแผ่นพลาสติก ปัมสุญญากาศที่ใช้คือ MISU Vacuum Pump รุ่น FY-2B มีความสามารถดูดอากาศได้ 115 l/min โดยปั๊มลมจะทำงานทุก ๆ 20 วินาทีเพื่อรักษาระดับความดันในถังพักให้คงที่

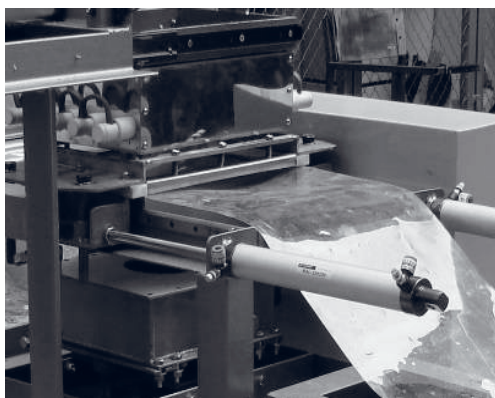
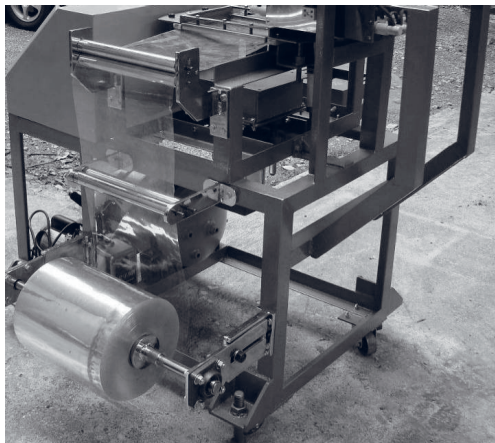


รูปที่ 4 ระบบสุญญากาศ

- ระบบการลำเลียงแผ่นพลาสติก

รูปที่ 5 แสดงส่วนประกอบของชุดลำเลียงแผ่นพลาสติกซึ่งมีหลักการทำงานคือใช้การจับยึดแผ่นพลาสติกด้วยแรงกดจากแผ่นพลาสติกทนความร้อนรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งติดตั้งบนชุดจับยึดรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด 220x380 mm โดยประกอบเข้ากับกระบอกลมนต้นกำลังขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 mm ระยะชัก 50 mm ทั้งสองด้านของแผ่นกดแผ่นพลาสติก โดยกระบอกลมนดังกล่าวจะเคลื่อนที่พร้อมกันกล่าวคือ การเคลื่อนที่ขึ้นเพื่อปล่อยแผ่นพลาสติกภายหลังขึ้นรูปแล้ว และเคลื่อนที่ลงเพื่อจับยึดแผ่นพลาสติกแผ่นใหม่เข้าสู่กระบวนการขึ้นรูปต่อไป โดยชุด

ลำเลียงแผ่นพลาสติกจะทำงานร่วมกับชุดจับยึด
ม้วนพลาสติก

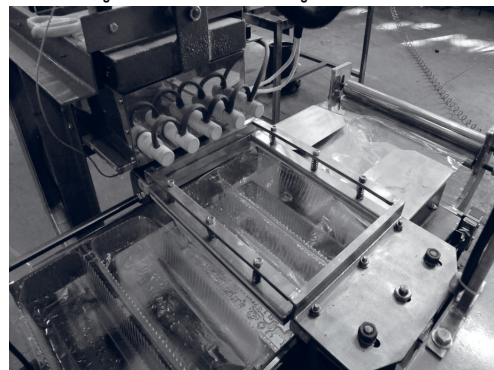


รูปที่ 5 แสดงส่วนประกอบของชุดลำเลียงแผ่น
พลาสติก

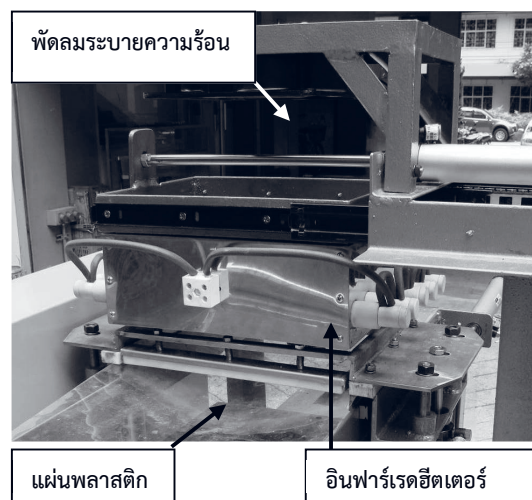
- ชุดให้ความร้อนฮีตเตอร์และการขึ้น
รูปแผ่นพลาสติก

รูปที่ 6 แสดงอินฟราเรดฮีตเตอร์ที่ใช้ใน
การให้ความร้อนแผ่นพลาสติก ซึ่งประกอบอยู่ใน
กล่องโลหะขนาด 210×290×100 mm (ก×ย×ส)
กำลังไฟที่ใช้โดยรวมเท่ากับ 3500 W. AC
ฮีตเตอร์ดังกล่าวติดตั้งอยู่บนชุดขับเคลื่อนซึ่ง
สามารถเคลื่อนที่ไปและกลับเพื่อให้ความร้อนแก่
แผ่นพลาสติกบริเวณชุดขึ้นรูป การควบคุม
อุณหภูมิอาศัยอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ
เทอร์โมคัปเปิล นอกจากนี้ได้ติดตั้งพัดลม

ระบายอากาศขนาด 200×200×60mm(ก×ย×ส)
กำลังไฟที่ใช้เท่ากับ 40 W. ระยะห่างจากพัดลม
ระบายความร้อนถึงแม่พิมพ์เท่ากับ 300 mm
ทำหน้าที่ระบายความร้อนแก่แผ่นพลาสติกที่
ผ่านการขึ้นรูปแล้วดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 6 ชุดให้ความร้อนอินฟราเรดฮีตเตอร์

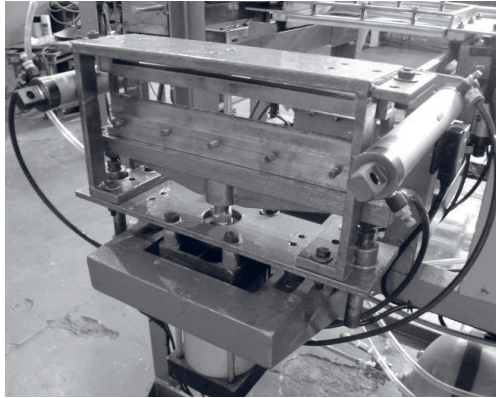


รูปที่ 7 แผ่นพลาสติกที่ผ่านการขึ้นรูปแล้ว

- ชุดตัดแผ่นพลาสติก

ชุดตัดขึ้นงานทำหน้าที่ตัดแผ่นพอลิ
เมอร์ขึ้นงานหลังจากทำการขึ้นรูปแล้วโดยใช้
วิธีการตัดแบบเฉือน โครงสร้างทำจากเหล็กฉาก
ขนาด 25×25×50 mm. ส่วนใบมีดตัดบนและ
ล่างทำมาจากเหล็กเครื่องมือ 210×50×10 mm.
และถูกติดตั้งเข้ากับโครงชุดตัดบนและล่าง

เช่นกัน โดยใบมีดทั้งสองถูกประกอด้วยเพลาลูกกลิ้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 mm. ทั้งสองด้านของชุดใบมีดติดตั้งแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 ชุดตัดแผ่นพลาสติก

- ชุดควบคุมการทำงาน

ชุดควบคุมระบบไฟฟ้าสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วนคือ ชุดควบคุมอุณหภูมิ และอุปกรณ์ควบคุมการทำงานของปั๊มสุญญากาศ ซึ่งแต่ละชุดมีหน้าที่ของการทำงานดังต่อไปนี้ ชุดควบคุมอุณหภูมิประกอบด้วยอุปกรณ์ไฟฟ้าและวงจรควบคุมอุณหภูมิของฮีตเตอร์อินฟราเรด ซึ่งทำงานร่วมกับ เทอร์โมคัปเปิล ชนิด K ที่ติดตั้งอยู่บริเวณด้านข้างของกล่องฮีตเตอร์ สามารถปรับตั้งอุณหภูมิ ช่วงอุณหภูมิการทำงานสูงสุดที่สามารถปรับตั้งได้คือ 400°C ความละเอียด $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ชุดควบคุมระบบสุญญากาศประกอบด้วยวงจรควบคุมการเปิด/ปิดระบบสุญญากาศด้วยโซลินอยวาล์วไฟฟ้าทำหน้าที่ควบคุมสถานะสุญญากาศภายในถังเก็บให้อยู่ในระดับคงที่ตลอดเวลาที่อัตราการดูดอากาศ 115 L/min เพื่อให้เพียงพอต่อการดูดขึ้นรูปชิ้นงาน

2.1 วิธีการทดลอง

- วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

พอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลองคือ พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene Terephthalate, PET) [6] ชนิดแผ่น ซึ่งผ่านการขึ้นรูปแบบอัดรีดและม้วนเก็บในลูกกลิ้งกระดาษ ขนาดความหนา 0.3 mm . กว้าง 210 mm . และความยาวเท่ากับ 290 mm . ต่อ 1 รอบในการผลิต จากบริษัทซี.เอ.พี.อินเตอร์เทรด จำกัด

- การหาสภาวะการผลิตที่เหมาะสม

1. อุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิต

อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบขึ้นรูปชิ้นงานคือ 240°C 250°C และ 260°C ซึ่งสามารถปรับตั้งได้จากชุดควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติพิจารณาคุณภาพของชิ้นงานในแต่ละอุณหภูมิการผลิตการปรับตั้งด้วยการวัดขนาดความหนาแต่ละส่วนของชิ้นงาน

2. เวลาในการผลิตที่เหมาะสม

การปรับตั้งเวลาในการผลิตสามารถแยกออกเป็น 2 ช่วงเวลาคือ ช่วงเวลาให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน (Preheat Time) และช่วงเวลาของการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยสุญญากาศ (Vacuum Forming Time) ช่วงเวลาให้ความร้อนแก่ชิ้นงานเครื่องจักรสามารถปรับตั้งได้ในช่วง 0 ถึง 95 วินาที สำหรับงานวิจัยนี้ช่วงเวลาให้ความร้อนแก่ชิ้นงานถูกกำหนดให้เป็นพารามิเตอร์คงที่คือ 20 วินาที โดยอ้างอิงจากงานวิจัยที่ผ่านมา [3] ซึ่งพบว่าเป็นเวลาในการให้ความร้อนแก่แผ่นพลาสติกที่เหมาะสม ช่วงเวลาของการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยสุญญากาศปรับตั้งในช่วง 5 วินาที ถึง 20 วินาที ตามลำดับ พิจารณาคุณภาพของ

- การตรวจวัดการกระจายตัวของความหนาขึ้นงาน



รูปที่ 9 แสดงตำแหน่งของการวัดขนาดความหนาของชิ้นงานทดสอบ

- การคำนวณทางเศรษฐศาสตร์

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

3.1 ความสามารถในการขึ้นรูป ชิ้นงานของเครื่องเทอร์โมฟอร์มมิ่ง



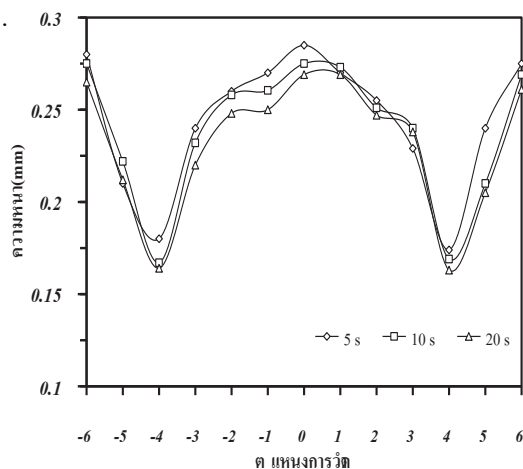
รูปที่ 10 แสดงผลผลิตภัณฑ์ข้าวแต่นถูกบรรจุใน
ภาชนะบรรจุภัณฑ์ที่ขึ้นรูปจากเครื่อง
เทอร์โมฟอร์มมิง

เครื่องเทอร์โมฟอร์มมิ่งที่ได้จัดสร้างขึ้น
สามารถขึ้นรูปชิ้นงานภาชนะบรรจุผลิตภัณฑ์
ข้าวแต๋นได้ตามวัตถุประสงค์ของการออกแบบ
ดังจะเห็นได้จากตัวอย่างชิ้นงานตามรูปที่ 10
แผ่นพลาสติก PET ถูกขึ้นรูปเป็นภาชนะบรรจุ
และรูปร่างเป็นไปตามแม่พิมพ์ที่ได้ออกแบบไว้
ภาชนะบรรจุที่ได้มีขนาดเหมาะสมกับขนาดของ
ข้าวแต๋น สามารถบรรจุข้าวแต๋นขนาดเส้นผ่าน

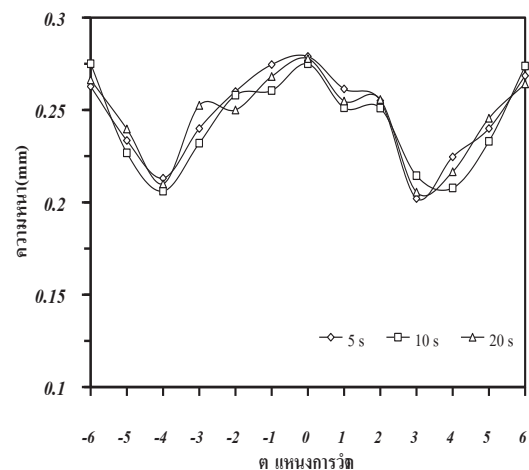
ศูนย์กลาง 65 mm ได้ 20 ชั้นได้อย่างพอดี ภาชนะบรรจุทำหน้าที่ห่อหุ้มข้าวแต่นไม่ให้ เคลื่อนที่ระหว่างขนย้าย รวมทั้งสามารถป้องกันการ กระแทกจากด้านข้างได้อีกทางหนึ่ง นอกจากนี้ยังสามารถสร้างตราสัญลักษณ์ เครื่องหมายการค้าลงบนภาชนะได้อย่างคมชัด และสวยงามตามที่คาดไว้

3.2 การหาสภาวะการผลิตที่เหมาะสม

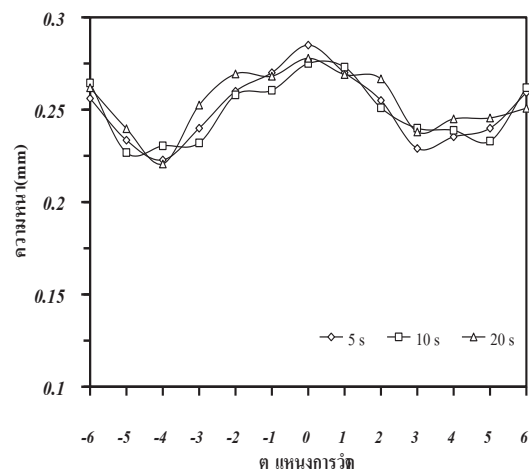
การเลือกสภาวะการผลิตที่เหมาะสม จะพิจารณาจากการกระจายตัวของความหนา ของแผ่นขึ้นงานที่มีความสม่ำเสมอตลอดทั้ง ขึ้นงาน โดยมีตัวแปรที่ต้องคำนึงถึงคือ อุณหภูมิ การผลิต เวลาในการให้ความร้อน (Preheat Time, PT) และเวลาในการขึ้นรูป (Vacuum Forming Time, VFT) [7]



รูปที่ 11 ค่าความหนาที่ตำแหน่งการวัดต่าง ๆ ที่ VFT เท่ากับ 5 วินาที 10 วินาที และ 20 วินาที อุณหภูมิการผลิต 240°C



รูปที่ 12 ค่าความหนาที่ตำแหน่งการวัดต่าง ๆ ที่ VFT เท่ากับ 5 วินาที 10 วินาที และ 20 วินาที อุณหภูมิการผลิต 250°C



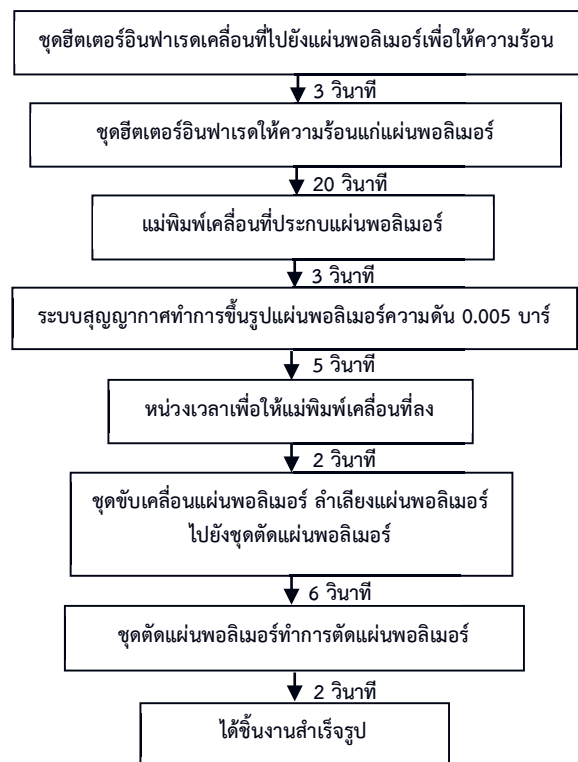
รูปที่ 13 ค่าความหนาที่ตำแหน่งการวัดต่าง ๆ ที่ VFT เท่ากับ 5 วินาที 10 วินาที และ 20 วินาที อุณหภูมิการผลิต 260°C

รูปที่ 11 รูปที่ 12 และรูปที่ 13 แสดงผล การวัดความหนาขึ้นงานที่สภาวะการผลิตคือ อุณหภูมิในการขึ้นรูป 240°C, 250°C และ 260 °C ตามลำดับ เวลาในการให้ความร้อนแก่ แผ่นพลาสติก (PT) เท่ากับ 20 วินาที เวลาใน การขึ้นรูป (VFT) เท่ากับ 5 วินาที 10 วินาที

และ 20 วินาที ปรับตั้งค่าความดันสุญญากาศของการขึ้นรูปเท่ากับ 0.005 บาร์ ผลการวิเคราะห์ความหนาของภาชนะบรรจุภัณฑ์พบว่าบริเวณส่วนกลางของหลุมขึ้นงานมีขนาดหนามากที่สุดจากนั้นมีแนวโน้มที่จะลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงบริเวณขอบของขึ้นงาน เวลาในการขึ้นรูปด้วยสุญญากาศไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาของขึ้นงานในแต่ละตำแหน่งการวัดของทุกสภาวะการผลิต ทั้งนี้เนื่องมาจากว่าแผ่นพลาสติกจะเย็นตัวทันทีเมื่อสัมผัสกับผนังของแม่พิมพ์ หลังจากนั้นจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างถึงแม้ว่าจะยังคงให้เวลาในการดูดขึ้นรูปยาวนานขึ้นก็ตาม

นอกจากนี้ยังพบว่าความหนาของขึ้นงานมีแนวโน้มใกล้เคียงกันตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการผลิต ทั้งนี้เนื่องมาจากการเพิ่มอุณหภูมิการผลิตทำให้แผ่นขึ้นงานพลาสติกได้รับความร้อนอย่างทั่วถึงทั้งแผ่นและสะสมความร้อนได้มากกว่า ซึ่งทำให้การดึงยืดขณะขึ้นรูปด้วยสุญญากาศเป็นไปได้อย่างสมบูรณ์มากกว่า จากผลการทดลองที่ได้กล่าวมาพอสรุปได้ว่าสภาวะการผลิตที่เหมาะสมคือที่อุณหภูมิการผลิต 260 °C เวลาในการให้ความร้อนแก่แผ่นพลาสติกเท่ากับ 20 วินาที เวลาในการขึ้นรูปเท่ากับ 5 วินาที และความดันการขึ้นรูปเท่ากับ 0.005 บาร์ เนื่องจากได้ขึ้นงานที่มีความหนาใกล้เคียงกันมากที่สุดดังแสดงในรูปที่ 14

นำผลการทดลองที่ได้จากสภาวะการผลิตที่ดีที่สุดไปทดลองผลิตจริงตามลำดับขั้นการผลิตดังแผนภูมิรูปที่ 14 พบว่าในการขึ้นรูปขึ้นงาน 1 ชิ้นใช้เวลาทั้งหมด 41 วินาทีหรือเท่ากับ 88 ขึ้นงานต่อชั่วโมง



รูปที่ 14 ลำดับขั้นการผลิตและเวลารวมของการขึ้นรูปขึ้นงาน 1 ชิ้น

3.3 การคำนวณทางเศรษฐศาสตร์ [8]

- ค่าใช้จ่ายด้านแรงงาน

การควบคุมเครื่องเทอร์โมฟอร์มมิ่งใช้แรงงานคนจำนวน 1 คน ค่าใช้จ่ายเท่ากับ 300 บาทต่อวัน (ทำงานวันละ 8 ชั่วโมง) กำลังการผลิต 88 ชิ้นต่อชั่วโมงหรือ 704 ชิ้นต่อวัน รวม ต้นทุนเท่ากับ 0.4 บาทต่อชิ้นงาน

- ค่าวัตถุดิบ

ราคาแผ่นพลาสติก PET ขนาด 61x100x0.2 mm ราคา 15 บาท สามารถผลิตเป็นขึ้นงานได้ 10 ชิ้นงาน ดังนั้นราคาต่อหน่วยเท่ากับ 1.50 บาท/ชิ้นงาน

- ค่ากระแสไฟฟ้า

มอเตอร์ปั๊มลม ½ Hp	= 375	W
มอเตอร์ปั๊มสุญญากาศ ½ Hp	= 375	W
ฮีตเตอร์	= 2000	W
รวม	= 2.8	kW/h

ค่ากระแสไฟฟ้า (400 หน่วยขึ้นไป/เดือน)
 $= 3$ บาท/kW
 ค่ากระแสไฟฟ้าต่อชั่วโมง
 $2.75 \times 3 = 8.25$ บาท/ชั่วโมง
 กำลังการผลิตของเครื่อง = 88 ชิ้น/ชั่วโมง
 ต้นทุนค่าไฟฟ้า = 0.09 บาทต่อชิ้นงาน

- **ค่าเสื่อมราคาเครื่องจักร**
 สูตรค่าเสื่อมราคา $= \frac{B - SV}{N}$
 เมื่อ B = ราคาต้นทุนสินทรัพย์ (เครื่องจักร
 ราคา=150,000 บาท)
 SV = มูลค่าซาก (10%ของราคาต้นทุน
 สินทรัพย์)
 N = อายุการใช้งาน (5 ปี)
 ค่าเสื่อมราคา
 $= (150,000 - 15,000) / 5 = 27,000$ บาท
 จำนวนวันในการทำงานใน 1 ปี = 261 วัน
 ดังนั้นค่าเสื่อมราคา $= 27,000 / 261 = 103$ บาทต่อวัน
 กำลังการผลิต 704 ชิ้นงานต่อวัน
 ดังนั้นค่าเสื่อมราคา = 0.15 บาทต่อชิ้นงาน

- **การวิเคราะห์จุดคุ้มทุนและระยะ
 เวลาคืนทุนของการผลิต**
 ต้นทุนการผลิตด้วยเครื่องเทอร์โมฟอร์ม
 มิ่งเท่ากับ
 $= (\text{ค่าแรงงาน} + \text{ค่าวัตถุดิบ} + \text{ค่ากระแสไฟฟ้า} + \text{ค่าเสื่อมราคาเครื่องจักร})$
 $= (0.4 + 1.5 + 0.09 + 0.15)$
 $= 2.14$ บาทต่อชิ้นงาน
 แต่เดิมผู้ประกอบการมีค่าใช้จ่ายค่าแผ่น
 พลาสติกที่เป็นบรรจุภัณฑ์เดิมราคา 2.50 บาทต่อ
 ชิ้นงาน ดังนั้น
 จุดคุ้มทุน = ต้นทุนคงที่ / (ต้นทุนเดิม - ต้นทุนแปรผัน)
 $= 150,000 / (2.50 - 2.14)$

$= 416,667$ ชิ้นงาน
 กำลังการผลิตของเครื่องเทอร์โมฟอร์มมิ่ง
 เท่ากับ 704 ชิ้นต่อวัน ดังนั้นระยะเวลาคืนทุนคือ
 $= 2$ ปี 2 เดือน

4. สรุปผลการทดลอง

4.1 เครื่องเทอร์โมฟอร์มมิ่งที่ได้จัดสร้างขึ้น
 สามารถขึ้นรูปชิ้นงานภาชนะบรรจุผลิตภัณฑ์ข้าว
 แต้นได้ตามวัตถุประสงค์ของการออกแบบ โดย
 สามารถบรรจุข้าวแต้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 65
 mm ได้ 20 ชิ้นได้อย่างพอดี

4.2 ภาชนะบรรจุขึ้นรูปจากเครื่องเทอร์โม
 ฟอร์มมิ่งทำหน้าที่ห่อหุ้มข้าวแต้นไม่ให้เคลื่อนที่
 ระหว่างขนย้าย รวมทั้งสามารถป้องกันการกระแทก
 จากด้านข้างได้อีกทางหนึ่ง นอกจากนี้ยังสามารถ
 สร้างตราสัญลักษณ์เครื่องหมายการค้าลงบนภาชนะ
 ได้อย่างคมชัดและสวยงามตามที่คาดไว้

4.3 ผลการวัดความหนาของภาชนะบรรจุ
 ภัณฑ์ที่ผลิตได้ พบว่าบริเวณส่วนกลางของหลุม
 ชิ้นงานมีขนาดหนามากที่สุดบริเวณตราสัญลักษณ์
 จากนั้นมีแนวโน้มที่จะลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึง
 บริเวณขอบของชิ้นงานในทุก ๆ สภาวะการผลิต

4.4 สภาวะการผลิตที่เหมาะสมคือที่
 อุณหภูมิการผลิต 260°C เวลาในการให้ความร้อน
 แก่แผ่นพลาสติกเท่ากับ 20 วินาที เวลาในการขึ้นรูป
 เท่ากับ 5 วินาที และความดันการขึ้นรูปเท่ากับ
 0.005 บาร์กำลังการผลิตเท่ากับ 88 ชิ้นงานต่อชั่วโมง
 หรือ 704 ต่อวัน

4.5 จากการคำนวณทางเศรษฐศาสตร์
 พบว่าต้นทุนการผลิตภาชนะบรรจุภัณฑ์พลาสติก
 ด้วยเครื่องเทอร์โมฟอร์มมิ่งเท่ากับ 2.14 บาทต่อ
 ชิ้นงาน และมีระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 2 ปี 2 เดือน

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยขอขอบคุณอุทยานวิทยาศาสตร์ภาคเหนือ (อน.) ผู้ให้ทุนอุดหนุนการวิจัยและการพัฒนาในหัวข้อ “การพัฒนาและถ่ายทอดเทคโนโลยีการผลิตเครื่องขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์ข้าวแต๋น” ในปีงบประมาณ 2553 ตลอดจน “ร้านข้าวแต๋นหมื่นคำ” ผู้สนับสนุนวัตถุดิบในการทดลอง รวมทั้งสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องมือในการทำวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Sugtakcha K, Wilakham D and Intawong N-T. Development on Kaotan packaging machine and technology transfer of Kaotan packaging production. Final Report. Northern Science Park; 2011. (in Thai)
- [2] BAAC Thailand. Kiangkhu Ru Kha Kap Thokoso [Internet]. 2018. .[Updated 2018 October 3; cited 2019 July 15] Available from https://www.youtube.com/watch?v=oR7v5OL9Z_Y
- [3] Intawong N-T. Development of thermoforming machines for production of Kaotan packaging. Final Report. Ministry of Science and Technology 2011. (in Thai)
- [4] Morton-Jones D. H. Polymer processing, TJ Press (Padstow) Ltd; 1989.
- [5] Banleng Sonnin. Plastic technology, 16th edition. Technology Production Association (Thailand-Japan); 2004. (in Thai)
- [6] Ratchatwet A, Polymer. Duangkamol Publishing. Bangkok; 2012. 223. (in Thai)
- [7] Khueanphet M, Chiramat P, Chaison S and Intawong N-T. Thermoforming machines for produced of Kaotan packaging. Final Report. Industrial and Research Projects for Undergraduate Students, IRPUS. The Thailand Research Fund, TRF; 2007.
- [8] Lomchart N and Nuchanat A. A comparative study of the costs and returns of Barramundi culture in ponds, brackish and salt water. A case study sea bass culture in Prachuap Khiri Khan province. The 5th Rajamangala University of Technology National Conference; 2016. 80-90. (in Thai)

ผลของอุณหภูมิและการดัดแปลงสภาพบรรยากาศในบรรจุภัณฑ์ต่ออายุการเก็บรักษารากบัวสดตัดแต่ง

สุนัน ปานสาคร^{1*} และจตุรงค์ ลังกาพินธุ์²
sunan.p@en.rmutt.ac.th^{1*}, Jaturoung.L@en.rmutt.ac.th²

^{1*2} ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Received	: 7-Nov-2018
Revised	: 5-May-2019
Accepted	: 12-May-2019

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิและการดัดแปลงสภาพบรรยากาศในบรรจุภัณฑ์ต่ออายุการเก็บรักษารากบัวสดตัดแต่ง โดยบรรจุรากบัวสดตัดแต่งความหนา 1 cm บนถาด (150 g ต่อถาด) และบรรจุในถุงชนิดโพลีโพรพิลีนที่มีการปรับปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์และอุณหภูมิการเก็บรักษา ประกอบด้วย 28% CO₂ เก็บรักษาที่ 4±1°C และ 28% CO₂ เก็บรักษาที่ 27±1°C และตัวอย่างควบคุมบรรจุในบรรจุภัณฑ์ที่ไม่มีการดัดแปลงสภาพบรรยากาศมีคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น 0.6% และจัดเก็บที่อุณหภูมิเดียวกัน (0.6% CO₂, 4±1°C storage และ 0.6% CO₂, 27±1°C storage) ระหว่างการเก็บรักษา 15 วัน ทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางเคมีของรากบัวสดตัดแต่งระหว่างการเก็บรักษารากบัวสดตัดแต่งที่ 27±1°C ในบรรจุภัณฑ์ที่ไม่มีการดัดแปลงสภาพบรรยากาศพบว่าคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ในขณะที่การเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ (4±1°C) ช่วยชะลอการเพิ่มขึ้นของปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ บรรจุภัณฑ์ที่มีการดัดแปลงสภาพบรรยากาศในบรรจุภัณฑ์ร่วมกับการเก็บที่อุณหภูมิต่ำมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์เพียงเล็กน้อย (28-31%) ในช่วง 9 วัน และเมื่อสิ้นสุดการเก็บรักษารากบัวสดตัดแต่งที่ 15 วัน ให้ค่าปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรจุภัณฑ์เป็น 40% การเก็บรักษารากบัวสดตัดแต่งพบว่าค่าความสว่าง (L*) ค่าความแข็ง ปริมาณความชื้น ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) มีแนวโน้มลดลงและในทางตรงกันข้ามค่าความเป็นสีแดง (a*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b*) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในทุกสภาวะการทดสอบ ดังนั้นการเก็บรักษารากบัวสดตัดแต่งที่อุณหภูมิต่ำ (4±1°C) ร่วมกับการดัดแปลงสภาพบรรยากาศในบรรจุภัณฑ์ช่วยลดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและทางเคมีได้

คำสำคัญ : รากบัว การดัดแปลงสภาพบรรยากาศในบรรจุภัณฑ์ คาร์บอนไดออกไซด์ การเก็บรักษา

Effects of Temperature and Modified Atmosphere Packaging (MAP) on Storage Life of Fresh Cut Lotus Root

Sunan Parnsakhorn^{1*} and Jaturong Langkapin²
sunan.p@en.rmutt.ac.th^{1*}, jaturong.l@en.rmutt.ac.th²

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

Received	: 7-Nov-2018
Revised	: 5-May-2019
Accepted	: 12-May-2019

Abstract

This research aimed to study the effects of temperature and modified atmosphere packaging (MAP) on storage life of fresh cut lotus root. The Fresh cut of lotus roots was sliced into 1 cm in thickness, placed on trays (150 g/tray) and packed in polypropylene bags after that filled with different carbon dioxide composition and different storage temperature, i.e. 28% CO₂, 4±1°C storage and 28% CO₂, 27± 1 °C storage. Other slices of sample were packed at non-modified atmospheres packaging as a control (0.6% CO₂) and stored at same temperature (0.6% CO₂, 4±1°C and 0.6% CO₂, 27±1°C). At 15 days of storage, the physicochemical properties of fresh cut lotus root were analyzed. Storage fresh cut of lotus roots at 27±1°C (Control) was found that carbon dioxide concentration significantly increased ($P \leq 0.05$) whereas storage at low temperatures (4±1°C) the slowdown in the rise of CO₂ was observed. Modified atmosphere packaging (MAP) with storage in low temperature was showed a slight change in CO₂ (28-31%) over a 9 days period, whereas CO₂ increased to 40% at the end of storage with 15 days. The lightness, hardness, moisture content and pH value of treatments were decreased when the level of redness and yellowness were increased in all test conditions. Low temperatures storage (4 ±1 °C) combined with modified atmosphere packaging (MAP) of fresh cut lotus root retarded with a change in physical and chemical properties.

Keywords: Lotus root, Modified atmosphere packaging, Carbon dioxide, Storage

1. คำนำ

ผักผลไม้มักเกิดการเสื่อมเสียได้อย่างรวดเร็วหลังการเก็บเกี่ยวเนื่องจากมีปริมาณน้ำในเนื้อเยื่อค่อนข้างสูง มีสารอาหารที่เหมาะสมกับการเจริญของจุลินทรีย์ และมีลักษณะอวบน้ำ ดังนั้นเทคโนโลยีการบรรจุผักผลไม้ภายใต้การดัดแปลงสภาพบรรยากาศในบรรจุภัณฑ์ (Modified atmosphere packaging, MAP) จึงถูกนำมาใช้กันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากช่วยลดอัตราการหายใจ ลดการสูญเสีย ลดการเกิดสีน้ำตาล ลดผลกระทบจากความเย็นในการเก็บรักษาและที่สำคัญช่วยยืดอายุการเก็บรักษาผักผลไม้ได้ [1] ประกอบกับอุณหภูมิเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญต่อคุณภาพของผลผลิตหลังการเก็บเกี่ยว การเปลี่ยนแปลงต่างๆ ทางเคมีภายในผลผลิต ตลอดจนการเจริญของจุลินทรีย์ต่างๆ มีอัตราของปฏิกิริยาแปรตามอุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิสูง อัตราปฏิกิริยาหรืออัตราการเจริญจะสูงตามไปด้วย และส่งผลให้อายุการเก็บรักษาลดลง ดังนั้นการบรรจุผักผลไม้ภายใต้การดัดแปลงสภาพบรรยากาศในบรรจุภัณฑ์จึงมักจะทำควบคู่ไปกับการเก็บรักษาภายใต้อุณหภูมิที่เหมาะสมด้วย ทั้งนี้บรรจุภัณฑ์ดัดแปลงสภาพบรรยากาศ โดยทั่วไปจะทำการปรับสภาพบรรยากาศในบรรจุภัณฑ์ด้วยการดูดอากาศออกจากภาชนะบรรจุแล้วเติมก๊าซส่วนผสมใหม่ลงไปตามความเหมาะสม จากนั้นปิดภาชนะบรรจุให้สนิท และเก็บรวมกับการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ ระหว่างการเก็บรักษาจะมีการเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบของบรรยากาศไปตามอัตราการหายใจและอัตราการซึมผ่านเข้าออก (Permeability) ของก๊าซผ่านฟิล์มของภาชนะบรรจุที่ใช้ วิธีการดังกล่าวนี้จึงสามารถยับยั้งหรือชะลอกระบวนการหายใจตามธรรมชาติของพืชผัก ยับยั้งการสร้างเอทิลีน และการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาในระหว่างการเก็บรักษาได้ [2] ซึ่งผักผลไม้ที่ไม่เกิดการเสื่อมเสียย่อมเป็นผลดีต่อผู้ที่จะนำมาบริโภคต่อไป

ปัจจุบันผู้บริโภคหันมาให้ความสำคัญกับสุขภาพมากขึ้น ดังนั้นการบริโภคอาหารรวมถึงผักและผลไม้จึงนิยมเลือกรับประทานผักผลไม้ที่ให้คุณค่าทางโภชนาการสูง ซึ่งนักวิจัยพบว่าบัวหลวง เป็นพืชที่มีประโยชน์แทบทุกส่วน โดยเฉพาะรากบัว (*Nelumbo nucifera* Gaerth) มีคุณสมบัติเป็นได้ทั้งยา ช่วยคลายความเครียด บำรุงเลือด ช่วยดับร้อน ช่วยรักษาโรคความดันโลหิตสูง เบาหวาน ท้องผูก [3] และมีคุณค่าทางโภชนาการ เนื่องจากอุดมไปด้วยโปรตีน กรดอะมิโน ไฟเบอร์ แปะ วิตามินซี วิตามิน B1 และวิตามิน B2 [4] นอกจากนี้รากบัวยังอุดมไปด้วยสารประกอบฟีนอล (Polyphenolic compound) ซึ่งเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ [5,6] ประกอบกับรากบัวสดมีเนื้อสัมผัสที่กรอบมีกลิ่นหอมรสชาติดีจึงได้มีการนำมาประกอบอาหารหลากหลาย เช่น สลัด น้ำรากบัว รากบัวทอด เป็นต้น ถึงแม้รากบัวสดจะเป็นพืชที่มีประโยชน์ดังที่ได้กล่าวมาแล้วแต่มีข้อจำกัดในเรื่องอายุการเก็บรักษาสั้นโดยเฉพาะรากบัวสดที่ผ่านการตัดแต่งแล้ว พบว่าเกิดความเสื่อมเสียจากจุลินทรีย์และการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลในระหว่างกระบวนการเก็บรักษาซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวมีอิทธิพลต่อสารประกอบฟีนอล [7] ทั้งนี้มีรายงานวิจัยพบว่าการเก็บรักษารากบัวสดตัดแต่ง โดยการใช้สารที่ช่วยยับยั้งการเกิดสีน้ำตาลร่วมกับการเก็บรักษาโดยการเพิ่มปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรจุภัณฑ์ระดับ 100% CO₂ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5°C สามารถยืดอายุการเก็บรักษารากบัวสดตัดแต่งได้เป็นเวลา 21 วัน [8] แต่ข้อมูลที่มีรายงานผลยังค่อนข้างจำกัด ดังนั้นเพื่อช่วยยืดอายุการเก็บรักษา ช่วยลดการสูญเสีย ลดการเกิดสีน้ำตาลของรากบัวสดตัดแต่ง งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาผลของอุณหภูมิและการดัดแปลงสภาพบรรยากาศในบรรจุภัณฑ์ต่ออายุการเก็บรักษารากบัวสดตัดแต่ง

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 วัตถุดิบ : นำรากบัวหลวงมาล้างทำความสะอาด แล้วทำการปอกเปลือกกรากบัวออก นำไปตัดแต่งรากบัวโดยการหั่นตามขวางลักษณะเป็นแว่น กำหนดขนาดความหนาประมาณ 1 cm นำรากบัวที่ตัดแต่งเรียบร้อยแล้วมาแช่น้ำหนัก โดยวางรากบัวที่เตรียมไว้ลงบนถาดโฟมซึ่งทำมาจากโพลีโพรพิลีนขนาด 10x19 cm น้ำหนักบรรจุประมาณ 150 g และนำถาดโฟมที่มีรากบัวที่ผ่านการตัดแต่งแล้ว มาบรรจุในถุงพลาสติกปิดชนิดโพลีโพรพิลีนและซีลปิดปากถุงสนิทเพื่อป้องกันการรั่วไหลของอากาศ

2.2 การเตรียมบรรจุภัณฑ์ตัดแปลงสภาพบรรยากาศ : เตรียมตัวอย่างรากบัวสดตัดแต่งตามขั้นตอนดังที่กล่าวมา จากนั้นแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 กลุ่มตัวอย่าง ได้แก่ บรรจุภัณฑ์เริ่มต้นที่ไม่ผ่านการเติมก๊าซ ตรวจสอบพบว่ามีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ 0.6% (ควบคุม) และอีกกลุ่มตัวอย่างทำการเติมคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณ 28%

2.3 การเก็บรักษา : นำรากบัวสดตัดแต่งจากขั้นตอนการเตรียมบรรจุภัณฑ์ตัดแปลงสภาพบรรยากาศ เก็บรักษา ณ ตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ $4 \pm 1^{\circ}\text{C}$ และอุณหภูมิห้องควบคุมที่ $27 \pm 1^{\circ}\text{C}$ หลังจากนั้นสุ่มเก็บตัวอย่างวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและเคมีทุกๆ 3 วัน โดยพิจารณาความเสียหายที่เกิดขึ้นกับตัวอย่างจากการตกกลิ่น การพิจารณาค่า L^* หรือค่าความสว่าง (Lightness) ที่ระดับต่ำกว่า 55 ซึ่งสีที่ได้เริ่มคล้ำ และค่าความแข็งที่ระดับต่ำกว่า 25 N พบว่าเนื้อสัมผัสของรากบัวสดเริ่มนิ่ม

2.4 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมี :

- **อัตราการแพร่ผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ :** ทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณก๊าซซีหย่อ PIB Dansensor รุ่น Check Mate II ประเทศเดนมาร์ก

- **ปริมาณความชื้น (Moisture content) :** ชั่งน้ำหนักตัวอย่างรากบัวสด 30 g อบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 hr. อ้างอิงวิธีการทดสอบจาก [9]

- **ค่าสี (Color value):** วัดค่าสีด้วยเครื่อง Color Difference Meter (Model JC801, Tokyo, Japan) รายงานผลในรูปของ L^*, a^*, b^* ซึ่งค่าทั้ง 3 ค่าเป็นการแสดงการวัดค่าสีเฉพาะเจาะจงโดยที่ค่า L^* คือ ค่าความสว่าง (Lightness) มีค่าความสว่างมากเมื่อเข้าใกล้ 100 และมีความมืดเมื่อเข้าใกล้ 0 ค่า a^* คือค่าความเป็นสีเขียว (Greenness) เมื่อมีค่าเป็นบวกและมีค่าความเป็นสีแดง (Redness) เมื่อมีค่าเป็นลบ และค่า b^* คือ ค่าความเป็นสีเหลือง (Yellowness) เมื่อมีค่าเป็นบวกและค่าความเป็นสีน้ำเงิน (Blueness) เมื่อมีค่าเป็นลบ ซึ่งก่อนทำการวัดค่าสี เครื่องวัดสีจะถูกปรับเทียบความเที่ยงตรงของค่าสีด้วย Standard Calibration Plate ค่า L^*, a^* และ b^* เท่ากับ 98.11, -0.11 and -0.08 ตามลำดับ

- **ความแตกต่างของสี (ΔE) :** คำนวณหาค่าความแตกต่างของสีรากบัวสดหลังการเก็บรักษาที่สภาวะต่างๆ โดยเปรียบเทียบกับค่าสีเริ่มต้นด้วยสมการที่ (1) [10]

$$\Delta E = (\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})^{1/2} \quad (1)$$

- **ค่าความแข็ง (Hardness) :** ทดสอบค่าความแข็งด้วยเครื่อง Instron Universal Tester Machine ใบ มีด Warner-Bratzler ความเร็ว 50 mm/min ตัดบริเวณด้านกลางของชิ้นรากบัว และพิจารณาถึงค่าความแข็ง (Hardness) ของรากบัวจากการตัดเฉือนในหน่วยนิวตัน (N) ทำการทดลอง 3 ซ้ำในแต่ละตัวอย่าง [11]

- **ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) :** นำรากบัวหั่นหรือซอยเป็นชิ้นเล็กๆ จากนั้นชั่งน้ำหนัก 10 g เติลงในบีกเกอร์ และทำการบีบคั้นน้ำกลั่น 10 ml ลงในบีกเกอร์ ใช้แท่งแก้วคนรากบัวนาน

30 s แล้วพักทิ้งไว้ 3 min ทำซ้ำอย่างนี้ 5 ซ้ำ ทำการกรองรากบัวด้วยผ้าขาวบาง แล้วนำไปวัดค่าโดยใช้เครื่องวัด pH ยี่ห้อ Sartorius [12]

2.5 การวิเคราะห์ทางสถิติ : ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ที่ระดับความแตกต่างทางสถิติ 95% (One-way analysis of variance (ANOVA)) และทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตามวิธีของ Duncan New's Multiple Range Test (DMRT)

3. ผลการศึกษาและวิจารณ์

3.1 ผลของการบรรจุภายใต้การตัดแปลงสภาพบรรยากาศในบรรจุภัณฑ์ต่อการเปลี่ยนแปลงคาร์บอนไดออกไซด์ในระหว่างการเก็บรักษารากบัวสดตัดแต่ง

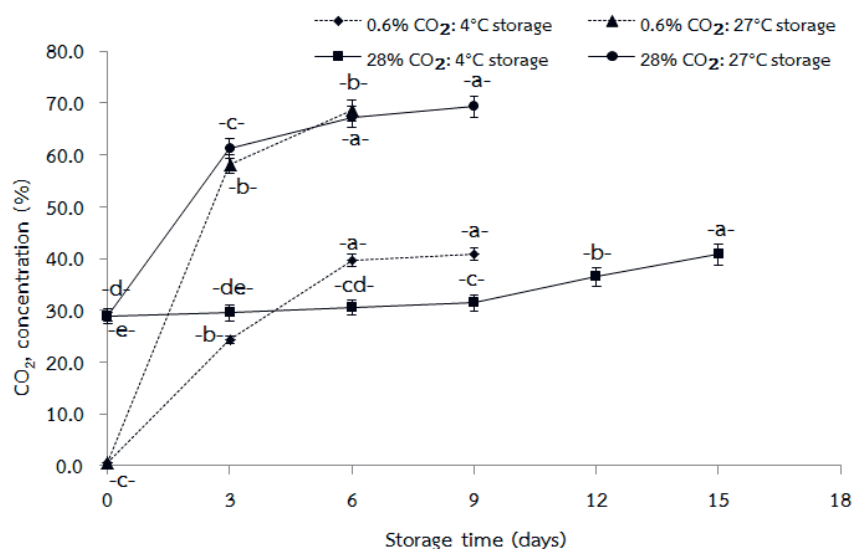
จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรจุภัณฑ์รากบัวสดตัดแต่งแสดงดังรูปที่ 1 พบว่า บรรจุภัณฑ์ที่ไม่มีการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือมีเพียงปริมาณเริ่มต้นเล็กน้อย (0.6%) เมื่อนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ($27\pm 1^{\circ}\text{C}$) มีการเพิ่มขึ้นของก๊าซอย่างรวดเร็วที่ 58% ($P\leq 0.05$) ในช่วง 3 วันแรก และเกิดการเสื่อมสภาพของรากบัวสดตัดแต่งเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิดังกล่าวในวันที่ 6 หรือกล่าวได้ว่าที่อุณหภูมิการเก็บรักษาสูงอัตราการหายใจสูง พืชจะใช้ออกซิเจนที่มีอยู่ภายในทำให้ขาดก๊าซออกซิเจน และเกิดการสะสมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในภาชนะบรรจุ จึงทำให้ผลิตผลเกิดการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจนส่งผลให้เกิดกลิ่นหมักขึ้น [13] เช่นเดียวกับการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ ($4\pm 1^{\circ}\text{C}$) ซึ่งพบแนวโน้มของการเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P\leq 0.05$) จาก 0.6% ไปยัง 40% หลังการเก็บรักษา 6 วัน และไม่มีการเปลี่ยนแปลงจนกระทั่งวันที่ 9 ของการเก็บรักษา ซึ่งพบว่าอุณหภูมิต่ำสามารถช่วยยืดอายุของผลิตภัณฑ์ได้มากขึ้น ในขณะที่บรรจุภัณฑ์ที่มีการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้นที่ 28%

พบว่าเมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิ $27\pm 1^{\circ}\text{C}$ มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของก๊าซอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P\leq 0.05$) และสิ้นสุด ณ วันที่ 9 ของการเก็บรักษาให้ค่าปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 70%

ในทางตรงกันข้ามพบว่าสภาวะดังกล่าวเมื่อนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ $4\pm 1^{\circ}\text{C}$ มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพียงเล็กน้อย (28-31%) ในช่วง 9 วัน และสุดท้ายสิ้นสุดการเก็บรักษาที่ 15 วัน เนื่องจากเกิดการเสื่อมสภาพของรากบัวสดและให้ค่าปริมาณก๊าซในบรรจุภัณฑ์เป็น 40% ทั้งนี้รากบัวสดมีปริมาณความชื้นที่สูงพบการเสื่อมเสียที่เกิดจากเชื้อราและจุลินทรีย์ได้ง่าย การบรรจุในสภาพที่มีคาร์บอนไดออกไซด์สูง ซึ่งมีคุณสมบัติเป็น Bacteriost สามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ [14,15] ที่อุณหภูมิ $4\pm 1^{\circ}\text{C}$ คาร์บอนไดออกไซด์สามารถละลายเข้าไปยังผลผลิตได้ดี [16] ทำให้ประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์มากกว่าที่อุณหภูมิห้อง ดังนั้นการเก็บรักษารากบัวสดตัดแต่งภายใต้การตัดแปลงสภาพบรรยากาศในบรรจุภัณฑ์ร่วมกับการเก็บรักษาด้วยความเย็นสามารถช่วยยืดอายุผลิตภัณฑ์ได้ ทั้งนี้เพิ่มเติมสังเกตได้จากที่สภาวะ $0.6\%\text{CO}_2:27^{\circ}\text{C}$ storage ซึ่งถือได้ว่าเป็นสภาวะควบคุมเนื่องจากไม่มีการปรับปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์และเป็นการเก็บรักษาเทียบเท่าอุณหภูมิห้อง สภาวะดังกล่าวนี้สามารถเก็บรักษารากบัวสดได้เป็นเวลา 6 วัน โดยพิจารณาจากปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ อัตราการแพร่ผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ปริมาณความชื้น ค่าสี ความแตกต่างของสี (ΔE) ค่าความแข็ง ค่าความเป็นกรดต่าง และลักษณะปรากฏภายนอก (ได้แสดงผลการทดสอบในหัวข้อต่อไป) ในขณะที่เมื่อทำการตัดแปลงสภาพบรรยากาศในบรรจุภัณฑ์ที่สภาวะ $28\%\text{CO}_2:4^{\circ}\text{C}$ storage และทำการทดสอบปัจจัยชุดเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบปัจจัยดังกล่าวที่เวลา

การเก็บรักษารากบัวสดตัดแต่งที่มีการดัดแปลงสภาพบรรยากาศในบรรจุภัณฑ์นั้น พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพจากเริ่มต้นจน

กระทั่งเกิดการเสื่อมเสียโดยมีลักษณะใกล้เคียงกับการเก็บรักษาที่สภาวะควบคุม แต่ปรากฏว่าได้ระยะเวลาการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นเป็น 15 วัน



รูปที่ 1 การเปลี่ยนแปลงปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ระหว่างการเก็บรักษารากบัวสดตัดแต่งในบรรจุภัณฑ์ดัดแปลงสภาพบรรยากาศ

3.2 ผลของการบรรจุภายใต้การดัดแปลงสภาพบรรยากาศในบรรจุภัณฑ์ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสีในระหว่างการเก็บรักษารากบัวสดตัดแต่ง

จากการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงของสีของรากบัวสดตัดแต่งภายใต้สภาวะการดัดแปลงสภาพบรรยากาศในบรรจุภัณฑ์แสดงดังตารางที่ 1 พบว่ารากบัวสดตัดแต่งก่อนการบรรจุมีค่าความสว่าง (L*) ค่าความเป็นสีแดง (a*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b*) เท่ากับ 65.97 ± 0.63 , 2.77 ± 0.02 , 11.91 ± 0.08 ตามลำดับ ทั้งนี้ในระหว่างการเก็บรักษาพบว่าค่า L* มีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ในทุกสภาวะการทดสอบและในทางตรงกันข้ามกลับพบว่าค่า a* และ b* มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ในทุกสภาวะการทดสอบเช่นกัน อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิการเก็บรักษาพบว่าอุณหภูมิต่ำช่วยชะลอการเปลี่ยนแปลงของค่าสี เช่นเดียวกับการเก็บตัวอย่างรากบัวสดตัดแต่งโดยการดัดแปลง

สภาพบรรยากาศ (ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ 28%) พบว่าสามารถช่วยชะลอการเปลี่ยนค่าสีเช่นเดียวกัน จากสีขาวขุ่นในช่วงแรกและกลายเป็นสีน้ำตาลเมื่อเวลาการเก็บรักษานานขึ้น ซึ่งพบว่าระยะเวลาการเก็บรักษา สภาวะบรรยากาศ และอุณหภูมิมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสีดังกล่าว ทำให้ค่า a* ที่แสดงถึงความเป็นสีแดงเพิ่มขึ้น โดยเมื่ออุณหภูมิสูงและระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้น มีผลต่อการเกิดสีน้ำตาลเนื่องจากรากบัวสดมีการตัดแต่งจึงเกิดการฉีกขาดของเซลล์ ดังนั้นเมื่อเซลล์เกิดแผลทำให้เอนไซม์ และออกซิเจนเข้ามาสัมผัสกับสารโมโนฟีนอลและถูกออกซิไดซ์เป็นไดฟีโนล ซึ่งไม่มีสี และถูกออกซิไดซ์ต่อเป็นโอควิโนน (o-quinone) ซึ่งจะทำปฏิกิริยาต่อกับกรดแอมิโนหรือโปรตีนทำให้เกิดเป็นสารสีน้ำตาล การเปลี่ยนแปลงสีของรากบัวสดตัดแต่งนี้สอดคล้องกับงานวิจัยหลายงานที่พบว่าพืชที่ผ่านการตัดแต่งจะมีค่าความสว่างลดลง ความเป็นสีแดงเพิ่มขึ้น [17,18] เมื่อพิจารณาการ

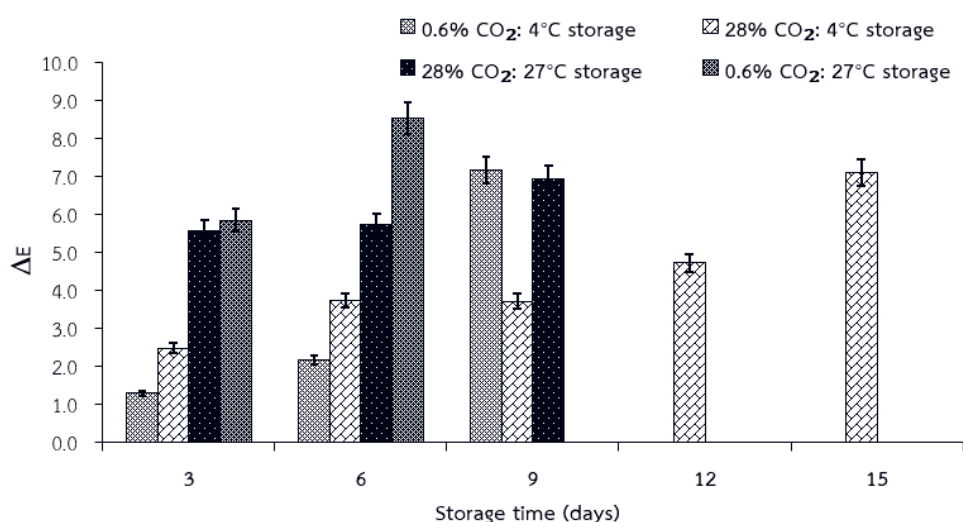
เปลี่ยนแปลงความแตกต่างของสี (ΔE) ให้ผลสอดคล้องกันแสดงดังรูปที่ 2 พบว่าเมื่อเวลาการเก็บรักษานานขึ้นความแตกต่างของสี (ΔE) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแต่การดัดแปลงสภาพ

บรรยากาศ (ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ 28%) ร่วมกับการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ สามารถช่วยชะลอการเปลี่ยนค่าความแตกต่างของสี

ตารางที่ 1 การเปลี่ยนแปลงค่าสี (L^*, a^*, b^*) รากบัวสดตัดแต่งระหว่างการเก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์ดัดแปลงสภาพบรรยากาศ

Treatments	Color value	Storage time (days)					
		0	3	6	9	12	15
0.6% CO ₂ : 27°C storage	L*	65.97±0.63 ^a	62.02±1.18 ^b	56.57±0.89 ^c	-	-	-
	a*	2.77±0.02 ^c	4.27±0.10 ^b	5.65±0.57 ^a	-	-	-
	b*	11.91±0.08 ^c	15.95±0.19 ^b	19.69±0.88 ^a	-	-	-
0.6% CO ₂ : 4°C storage	L*	65.97±0.63 ^{ab}	64.69±0.82 ^b	67.06±0.48 ^a	55.32±1.24 ^c	-	-
	a*	2.77±0.02 ^c	2.90±0.05 ^c	3.68±0.04 ^b	4.33±0.13 ^a	-	-
	b*	11.91±0.08 ^c	12.05±0.12 ^c	13.77±0.08 ^b	18.87±0.49 ^a	-	-
28% CO ₂ : 27°C storage	L*	65.97±0.63 ^a	62.39±0.12 ^b	59.02±0.76 ^c	58.75±1.06 ^c	-	-
	a*	2.77±0.02 ^c	5.12±0.02 ^b	5.18±0.04 ^b	6.64±0.08 ^a	-	-
	b*	11.91±0.08 ^c	15.46±0.46 ^b	16.80±0.50 ^a	17.39±0.39 ^a	-	-
28% CO ₂ : 4°C storage	L*	65.97±0.63 ^{ab}	67.06±0.48 ^a	65.03±0.53 ^{bc}	63.62±1.86 ^{cd}	63.28±0.21 ^d	60.34±0.46 ^e
	a*	2.77±0.02 ^e	3.21±0.08 ^d	3.38±0.05 ^{cd}	3.41±0.17 ^c	5.86±0.13 ^a	5.62±0.06 ^b
	b*	11.91±0.08 ^d	14.09±0.12 ^c	15.56±0.36 ^b	15.53±0.57 ^b	15.41±0.08 ^b	18.39±0.01 ^a

^{abc} อักษรที่ต่างกันแถวเดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบโดย DMRT (mean± SD)



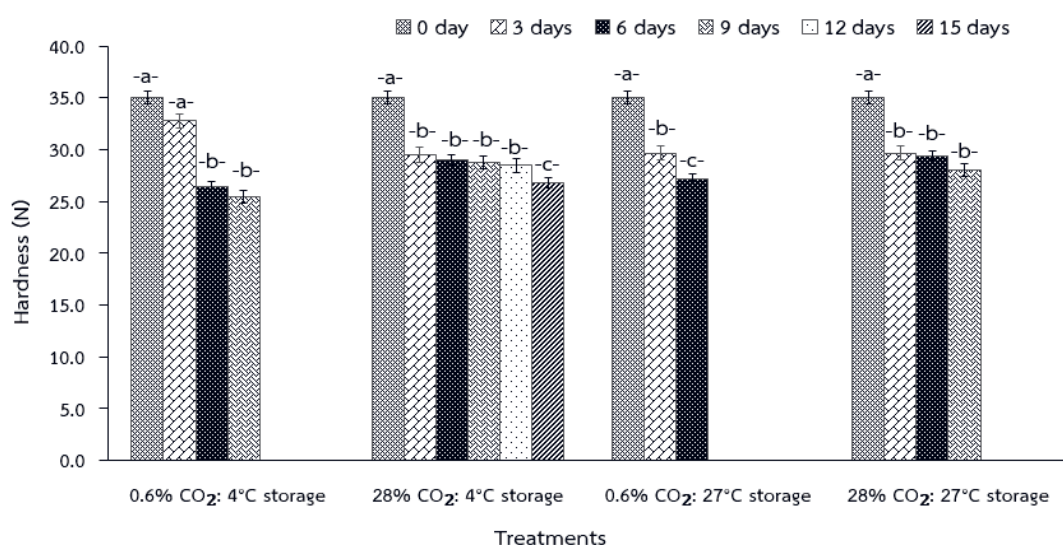
รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงความแตกต่างของสี (ΔE) รากบัวสดตัดแต่งระหว่างการเก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์ดัดแปลงสภาพบรรยากาศ

3.3 ผลของการบรรจุภายใต้การ ดัดแปลงสภาพบรรยากาศในบรรจุภัณฑ์ต่อ การเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งในระหว่างการ เก็บรักษารากบัวสดตัดแต่ง

ค่าความแข็งของรากบัวสดตัดแต่งมีอิทธิพลจากสภาวะการเก็บรักษา ได้แก่ อุณหภูมิ ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ และระยะเวลาการเก็บรักษา จากรูปที่ 3 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็งของรากบัวสดตัดแต่งระหว่างการเก็บรักษาพบว่า ค่าความแข็งมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) เมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษายาวนานขึ้น อย่างไรก็ตามการดัดแปลงสภาพบรรยากาศในบรรจุภัณฑ์และการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำช่วยชะลอการลดลงของค่าความแข็ง การเก็บรักษารากบัวสดตัดแต่งที่สภาพบรรยากาศดัดแปลงโดยการเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ $4 \pm 1^\circ\text{C}$ มีการลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ของค่าความแข็งในช่วง 3 วันแรก (35 N เป็น 29 N) จากนั้นค่าความแข็งมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยระหว่าง 28-29 N ($P > 0.05$) ในช่วงระยะเวลาการเก็บรักษา 12 วัน จนกระทั่งสิ้นสุดระยะเวลาการเก็บรักษาที่ 15

วัน พบว่าเนื้อสัมผัสของรากบัวสดตัดแต่งมีลักษณะนิ่ม เกิดสีน้ำตาลชัดเจน ทั้งนี้สภาวะดังกล่าวสามารถยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ได้เพิ่มขึ้นเนื่องจากสภาวะการเก็บประคองสามารถเก็บได้เพียง 6 วัน

การลดลงของค่าความแข็ง (เนื้อสัมผัสมีลักษณะนิ่มขึ้น) สอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในกรณีที่ไม่มีมีการปรับสภาพบรรยากาศ เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์มีผลทำให้โปรตีนเสียสภาพธรรมชาติ ทำให้รากบัวสดตัดแต่งมีการสูญเสียน้ำทำให้แรงดันเต่ง (Turgor pressure) ในเซลล์ของรากบัวสดตัดแต่งลดลงส่งผลให้ความความแข็งลดลงซึ่งสังเกตได้จากรูปที่ 3 และรูปที่ 4 พบว่ารากบัวสดมีการลดลงของค่าความแข็งเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้น ประกอบกับสภาวะดังกล่าวเอื้อต่อการเจริญของจุลินทรีย์ ส่งผลให้มีการย่อยสลายของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นผลิตภัณฑ์จึงมีค่าความแข็งที่ลดลง [19,20] ในขณะที่การเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ร่วมกับการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ $4 \pm 1^\circ\text{C}$ เป็นการช่วยยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์



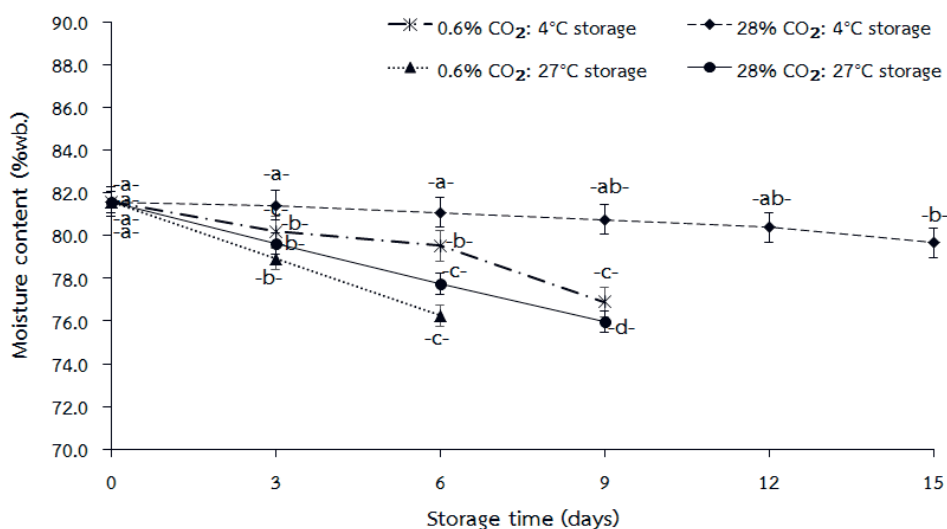
รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงค่าความแน่นเนื้อรากบัวสดตัดแต่งระหว่างการเก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์ดัดแปลงสภาพบรรยากาศ

^{a,b} อักษรต่างกันในแต่ละตัวอย่างหมายถึง มีความแตกต่างกันทางสถิติ ตามการวิเคราะห์แบบ DMRT ($P < 0.05$)

3.4 ผลของการดัดแปลงสภาพบรรยากาศในบรรจุภัณฑ์ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นในระหว่างการเก็บรักษารากบัวสดตัดแต่ง

การเปลี่ยนแปลงที่สังเกตได้ชัดเจนระหว่างการเก็บรักษารากบัวสดตัดแต่งนอกจากการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสและสีแล้ว คือ รากบัวสดตัดแต่งเกิดการสูญเสียน้ำในระหว่างการเก็บรักษา เกิดขึ้นเนื่องจากการหายใจส่งผลให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น ทั้งนี้คาร์บอนไดออกไซด์มีความสามารถในการละลายน้ำ ดังนั้นจึงละลายไปในน้ำที่อยู่ในผลิตภัณฑ์จึงทำให้โปรตีนในรากบัว [21] เกิดการเสียสภาพธรรมชาติและเสียคุณสมบัติในการจับน้ำ โดยเฉพาะอุณหภูมิในการเก็บรักษาที่สูงขึ้น ส่งผลให้เกิดไอน้ำ (หรือการคายน้ำ)

สูงขึ้นด้วย จึงทำให้ถุงบรรจุมีหยดน้ำเกิดขึ้นภายใน จึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เกิดการเจริญของจุลินทรีย์ ดังนั้นเมื่อนำผลิตภัณฑ์ไปทดสอบค่าความชื้นจึงพบว่าการลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยเฉพาะที่อุณหภูมิการเก็บรักษา $27 \pm 1^\circ\text{C}$ ระหว่าง 0-9 วัน แสดงดังรูปที่ 4 ทั้งนี้ส่งผลถึงการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสและสีของผลิตภัณฑ์ด้วยเช่นกัน ในขณะที่การเก็บรักษารากบัวสดตัดแต่งที่สภาพบรรยากาศดัดแปลงโดยการเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ร่วมกับการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ $4 \pm 1^\circ\text{C}$ เป็นการลดอัตราการหายใจและยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ ดังนั้นจึงพบว่าในช่วง 0-12 วัน แรกของการเก็บรักษามีค่าปริมาณความชื้นค่อนข้างคงที่ 80-81%wb. และลดลงเล็กน้อยในวันที่ 15 (78%wb.)



รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นรากบัวสดตัดแต่งระหว่างการเก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์ดัดแปลงสภาพบรรยากาศ

^{a,b} อักษรต่างกันในแต่ละตัวอย่างหมายถึง มีความแตกต่างกันทางสถิติ ตามการวิเคราะห์แบบ DMRT ($P < 0.05$)

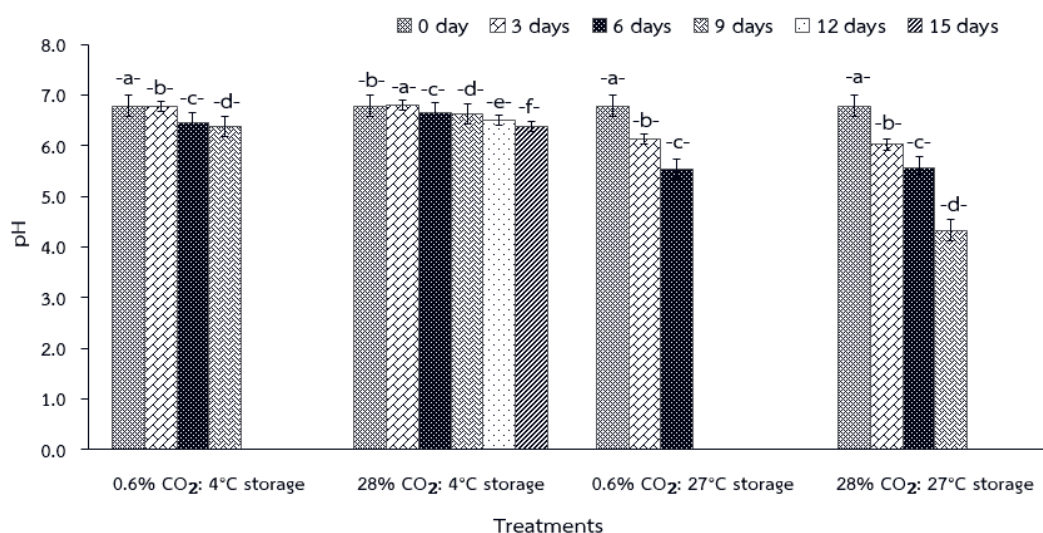
3.5 ผลของการดัดแปลงสภาพบรรยากาศในบรรจุภัณฑ์ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ในระหว่างการเก็บรักษารากบัวสดตัดแต่ง

จากรูปที่ 5 พบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของรากบัวสดตัดแต่งจากการบรรจุภายใต้สภาพบรรยากาศดัดแปลงในทุกสภาวะการเก็บ

รักษามีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) เมื่อระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการเจริญของจุลินทรีย์ [19] ดังนั้นเมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ร่วมกับการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ $4 \pm 1^\circ\text{C}$ มีแนวโน้มของการลดลงของค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) น้อยที่สุด หรือลดลง

จาก 6.79 เป็น 6.38 ระหว่าง 0-15 วัน ทั้งนี้จากที่กล่าวมา คือ คาร์บอนไดออกไซด์ช่วยยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ แต่เมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิสูง ($27\pm 1^{\circ}\text{C}$) พบว่าเกิดการลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P\leq 0.05$) ของค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อย่างรวดเร็วในช่วงการเก็บรักษาระหว่าง 0-9 วัน โดยลดลงจาก 6.79 เป็น 4.33 เนื่องจากอุณหภูมิเหมาะสมต่อการเจริญ

ของจุลินทรีย์ ซึ่งการลดลงดังกล่าวให้ผลการทดสอบในลักษณะเดียวกันกับกรณีที่ไม่ได้มีการปรับสภาพบรรยากาศ ดังนั้นการบรรจุภายใต้สภาพบรรยากาศดัดแปลงร่วมกับการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำจึงช่วยชะลอการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของรากบัวสดตัดแต่งในระหว่างการเก็บรักษาได้



รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) รากบัวสดตัดแต่งระหว่างการเก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์ดัดแปลงสภาพบรรยากาศ

^{a,b} อักษรต่างกันในแต่ละตัวอย่างหมายถึง มีความแตกต่างกันทางสถิติ ตามการวิเคราะห์แบบ DMRT ($P<0.05$)

4. สรุปผลการวิจัย

บรรจุภัณฑ์ที่ไม่มีการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ $27\pm 1^{\circ}\text{C}$ มีการเพิ่มขึ้นของก๊าซอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P\leq 0.05$) ในขณะที่การเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ ($4\pm 1^{\circ}\text{C}$) ช่วยชะลอการเพิ่มขึ้นของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กรณีบรรจุภัณฑ์ที่มีการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้นร่วมกับการเก็บที่อุณหภูมิต่ำมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณก๊าซเพียงเล็กน้อย (28-31%) ในช่วง 9 วัน และสิ้นสุดการเก็บรักษาที่ 15 วัน ให้ค่าปริมาณก๊าซในบรรจุภัณฑ์เป็น 40% การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของรากบัวสดตัดแต่งในระหว่าง

การเก็บรักษาพบว่าค่าความสว่าง (L^*) ค่าความแข็ง ปริมาณความชื้น ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) มีแนวโน้มลดลง และในทางตรงกันข้ามค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในทุกสภาวะการทดสอบ ทั้งนี้อุณหภูมิต่ำในการเก็บรักษาและการเพิ่มปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้นในบรรจุภัณฑ์ช่วยชะลอการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพต่างๆ ได้ ดังนั้นการดัดแปลงสภาพบรรยากาศในบรรจุภัณฑ์ร่วมกับการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำช่วยยืดอายุการเก็บรักษารากบัวสดตัดแต่งได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่สนับสนุนวัสดุอุปกรณ์ สถานที่ในการทำวิจัย และทุนวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Zagory D, Kader A.A. Modified atmosphere packaging of fresh produce. Food Technology. 1988; 42(9):70-77.
- [2] Jacxsens L, Devlieghere F, Debevere J. Validation of systematic approach to design equilibrium modified atmosphere packages for fresh-cut produce. Lebensmittel-Wissenschaftund-Technologie. 1999; 32(7):425-432.
- [3] Michael J. Amazing Health Benefits of Lotus Root. [Internet]. 2018 [cited 2018 Sep 4]; Available Source: <https://www.naturalfoodseries.com/11-health-benefits-lotus-root/>.
- [4] Chiang P.Y, Luo Y.Y. Effect of pressurized cooking on the relationship between the chemical compositions and texture change of lotus root (*Nelumbo nucifera* Gaerth). Food Chemistry. 2006; 105(2): 480-484.
- [5] Hu M, Skibsted. Antioxidation capacity of rhizome extract and rhizome knot extract of edible lotus (*Nelumbo nucifera*). Food Chemistry. 2002;76(3):327-333.
- [6] Yans S, Wang Q, Peng G, Gao Z. Study on the extraction of lotus root polyphenol. Food Res Dev. 2006;127:55-58.
- [7] Liu J, Zhang M, Wang S. Processing characteristics and flavor of full lotus root powder beverage. Journal Sci Food Agricultural. 2010;90(4): 2482-2489.
- [8] Son J, Hyun JE, Lee JW, Lee SY, Moon B. Combined Application of Antibrowning, Heat Treatment and Modified-Atmosphere Packaging to Extend the Shelf Life of Fresh-Cut Lotus Root. Journal of Food Science. 2015;80(6):1178-1187.
- [9] AOAC. Official Methods of Analysis. Association of Official Analytical Chemists. 15th Ed. Arlington, Virginia, USA; 1990.
- [10] Mokrzycki W.S, Tatol M. Colour difference ΔE - A survey. Faculty of Mathematics and Informatics University of Warmia and Mazury. Poland; 2012.
- [11] Phuangsombut A, Terdwongworakul A, Kasikanlapapriuk J, Chanin P. The study and design of a device for automatic measurement of papaya crispiness. Thai Society of Agricultural Engineering Journal. 2019;25(1):8-13. (in Thai)
- [12] Phromphakdee C, Vejaphan O. Treatment of straw mushroom under modified atmospheric conditions in packaging with freezing. Thesis of Engineering. Rajamangala University of Technology Thanyaburi. 2008. (in Thai)

- [13] Chantanop P, Chinsirikul W, Winotapun C, Domrongpakkaphan V, Thumthanaruk B. Quality and Shelf-life of Fresh Longan under Modified Atmosphere Packaging. The Journal of KMUTNB. 2014;24(3):614-623. (in Thai)
- [14] Phuparodom N. Gas and food product packaging. Kasetsart University. Bangkok; 1992. p.173 .
- [15] Gill C.O, Tan K.H. Effect of Carbon dioxide on Growth of Meat Spoilage Bacterial. J. Applied and Environmental Microbiology. 1980; 39(2):317-319.
- [16] Daniels F.A, Rishamurthi R.K, Rizvi S.H. A Review of Effect of Carbon dioxide on Microbial Growth and Food Quality. J. Food Protection. 1985;48(6):532-537.
- [17] Dea S, Brecht J.K, Nunes M.C.N, Baldwin E.A. Quality of fresh-cut “Kent” mango slices prepared from hot water or non-hot water-treated fruit. Postharvest Biol. Tec. 2010;56(2):171-180.
- [18] Siddiq M, Dogi D.S, Dolan K.D. Antioxidant properties, total phenolics and quality of fresh-cut “Tommy Atkins” mangoes as affected by different pre-treatments. LWT Food Sci. and Technol. 2013;53(1):156-162.
- [19] Meechai P, Vongsawasdi P. Effect of Carbon Dioxide and Nitrogen Ratios on Shelf-life of Fish Balls Packed under Modified Atmosphere Condition. KMUTT Research and Development Journal. 2007;30(3): 449-461. (in Thai)
- [20] Sirijariyawat A, Kumsripool K, Kamnerdphant S. Quality change of fresh-cut ripe mango during cold storage. Khon Kaen Agriculture Journal. 2015; 43(1) : 851-856. (in Thai)
- [21] Shad MA, Nawaz H, Hussain M, Yousaf B. Proximate composition and functional properties of rhizomes of lotus (*Nelumbo nucifera*) from Punjab. Pakistan Journal of Botany. 2011; 43(2): 895-904.

สมการจลนพลศาสตร์การอบแห้งที่เหมาะสมของผลพลับ

ศิวะ อัจฉริยวิริยะ^{1*} อารีย์ อัจฉริยวิริยะ² และธนิดา เกตุวิจิตรชัย³

siva@dome.eng.cmu.ac.th^{1*}, aree@dome.eng.cmu.ac.th², ni.ketwijitchai@gmail.com³

^{1*-3} ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Received : 30-Apr-2019
Revised : 8-Aug-2019
Accepted : 29-Aug-2019

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสมการจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งผลพลับที่เหมาะสม ด้วยการทดลองอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 45°C, 55°C และ 65°C ที่ความเร็วของลมร้อนเท่ากับ 1 m/s ผลพลับที่ใช้มีขนาดของรัศมีเฉลี่ยในช่วง 2.9 ถึง 3.1 เซนติเมตร พลับมีความชื้นเริ่มต้น 470±10% มาตรฐานแห้ง อบแห้งจนพลับมีความชื้นลดลงเหลือ 30±2 % มาตรฐานแห้ง จากการนำข้อมูลการทดลองมาวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นด้วยการใช้สมการจลนพลศาสตร์ทางทฤษฎีที่สมมติให้พลับมีลักษณะเป็นทรงกลม และหาค่าคงที่การอบแห้งด้วยการใช้สมการจลนพลศาสตร์กึ่งทฤษฎีรูปแบบต่าง ๆ และสมการจลนพลศาสตร์เอมพิริคัลตามรูปแบบของ Page การวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เหล่านี้ใช้การฟิตข้อมูลการทดลองเข้ากับสมการรูปแบบต่างดังกล่าวด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด การหาสมการจลนพลศาสตร์ที่เหมาะสมจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย และค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยในการตัดสินใจ ซึ่งพบว่า สมการจลนพลศาสตร์เอมพิริคัลตามรูปแบบของ Page สามารถทำนายพฤติกรรมการลดลงของความชื้นของพลับได้ใกล้เคียงกับข้อมูลการทดลองมากที่สุด

คำสำคัญ: พลับอบแห้ง จลนพลศาสตร์การอบแห้ง สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น ค่าคงที่การอบแห้ง

Drying Kinetics Equations of Persimmon Fruit

Siva Achariyaviriya^{1*}, Aree Achariyaviriya², Thanida Ketwijitchai³
siva@dome.eng.cmu.ac.th^{1*}, aree@dome.eng.cmu.ac.th², ni.ketwijitchai@gmail.com³

^{1*,3}Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiangmai University

Received	: 30-Apr-2019
Revised	: 8-Aug-2019
Accepted	: 29-Aug-2019

Abstract

The objective of this research is to develop the drying kinetics equations of persimmons fruits. The experiments were carried out at drying air temperatures of 45°C, 55°C and 65°C with a constant hot air velocity of 1 m/s. The average fruit radii varied between 2.9 and 3.1 cm. The initial moisture content was about 470±10% on a dry-basis. The drying process continued until the final fruit moisture content was about 30±2 % on a dry-basis. Drying kinetic equations such as the theoretical model, semi-theoretical model and empirical model were studied. The parameters of those equations such as the effective diffusion coefficients and the drying constant were determined and developed by the method of least squares. The values of the coefficient of determination, root mean square error and mean absolute percentage error were used for selecting the appropriate equation. For drying kinetics, the best fit with the experiment data was the Page equation.

Keywords: Dried persimmon, Drying kinetics, Effective moisture diffusivities, Drying constant.

1. บทนำ

พลับเป็นผลไม้ลักษณะค่อนข้างกลม ผิวเรียบ ผลพลับมีสีเหลืองจนถึงแดงส้มซึ่งมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Diospyros kaki* L. สามารถแบ่งออกได้เป็นสองสายพันธุ์ใหญ่ๆ คือ พลับพันธุ์ฝาด (Astringent) ซึ่งผลพลับจะมีรสฝาดและพลับพันธุ์หวาน (Non-Astringent) ซึ่งผลจะมีรสหวาน พลับได้รับความนิยมในการบริโภคเนื่องจากมีรสชาติหวานหอม สีสันที่สวยงาม การบริโภคพลับมีประโยชน์ต่อสุขภาพ ให้แคลอรีที่ต่ำ มีส่วนกากใยอาหารที่สูง [1] พลับยังมีวิตามินซี (Vitamin C) วิตามินเอ (Vitamin A) น้ำตาลฟรุคโทส (Fructose) และน้ำตาลกลูโคส (Glucose) ในปริมาณที่สูง [2] ซึ่งล้วนเป็นสารอาหารที่มีประโยชน์ต่อร่างกายทั้งสิ้น จากคุณประโยชน์ของพลับที่ได้กล่าวมาในข้างต้นจึงส่งผลให้พลับเป็นผลไม้ที่ได้รับความนิยมในการบริโภคสูงทั้งในทวีปเอเชีย ได้แก่ ประเทศจีน เกาหลี ญี่ปุ่น ไทย รวมไปถึงทวีปยุโรป การเพาะปลูกพลับในประเทศไทย ครั้งแรกอยู่ในช่วงปีพุทธศักราช 2471 โดยนำเข้ามาจากประเทศจีน พลับได้รับความนิยมเพาะปลูกในเขตภาคเหนือของประเทศไทย เนื่องจากมีลักษณะภูมิประเทศที่เป็นเทือกเขาสูง มีสภาพอากาศที่หนาวเย็นเหมาะสมแก่การเพาะปลูก [3] สำหรับการเพาะปลูกพลับของชนเผ่าพื้นเมืองที่สูงในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ ได้แก่หมู่บ้านดอยสามหมื่น ซึ่งเป็นหมู่บ้านหนึ่งในเทือกเขาถนนธงชัย ตั้งอยู่ในเขตอุทยานแห่งชาติห้วยน้ำดัง ห่างจากตัวเมืองเชียงใหม่ประมาณ 150 กิโลเมตร หมู่บ้านดอยสามหมื่นได้นำพันธุ์พลับ ซึ่งเป็นพืชเมืองหนาวเข้าไปปลูกในพื้นที่ พบว่าพลับสามารถเพาะปลูกได้เป็นอย่างดี ให้ผลผลิตพลับที่มีคุณภาพ สีสันสวยงาม รสชาติหวานหอม แสดงดังรูปที่ 1 แต่หมู่บ้านดอยสามหมื่นกลับประสบปัญหาด้านการขนส่งผลผลิตพลับออกไปจำหน่ายในตัวเมืองเชียงใหม่และพื้นที่ใกล้เคียงเนื่องจากพลับจะออกผลผลิตและเก็บเกี่ยวได้

ในช่วงเดือนกรกฎาคมถึงเดือนกันยายน ซึ่งช่วงเวลาดังกล่าวตรงกับช่วงฤดูฝนของประเทศไทย ประกอบกับเส้นทางเข้าออกหมู่บ้านสามหมื่นนั้นยังคงเป็นดินลูกรัง ลัดเลาะไปตามเทือกเขา จึงส่งผลให้การคมนาคมไม่สะดวก ถนนถูกตัดขาดเป็นบางช่วง ผลผลิตพลับที่เก็บเกี่ยวไว้ในหมู่บ้านจึงไม่สามารถนำออกมาจำหน่ายได้ จึงเกิดความเสียหายและเน่าเสียของผลผลิตพลับขึ้น ดังนั้นเพื่อการแก้ไขปัญหาดังกล่าวพลับที่ถูกเก็บเกี่ยวไว้จะถูกนำออกมาแปรรูปเพื่อยืดอายุเวลาการเก็บรักษา และเพิ่มมูลค่า สำหรับวิธีที่ได้รับความนิยมในการแปรรูปพลับ ได้แก่ การทำพลับแห้ง



รูปที่ 1 ผลผลิตพลับในหมู่บ้านดอยสามหมื่น จ. เชียงใหม่

การทำพลับแห้ง เป็นวิธีแปรรูปเพื่อยืดอายุเวลาเก็บรักษาผลผลิตพลับให้นานขึ้น เป็นวิธีที่ทำกันมาตั้งแต่สมัยโบราณในประเทศจีน และประเทศญี่ปุ่น โดยจะทำการตากแห้ง และแขวนตากแห้ง แต่สำหรับวิธีการดังกล่าวนี้มีข้อเสีย คือ ไม่สามารถควบคุมสภาพแวดล้อมขณะทำการตากแห้งได้ ส่งผลให้คุณภาพของพลับที่ทำการตากแห้งในแต่ละครั้งจึงไม่คงที่ ดังนั้นจึงมีการนำเครื่องอบแห้งเข้ามาใช้ในการอบแห้งพลับมากขึ้นเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว นอกจากนี้ชุมชนดอยสามหมื่นยังได้รับเครื่องอบแห้ง [4] เพื่อนำไปอบแห้งผลผลิตการเกษตรใน

พื้นที่สูงแต่ชาวบ้านยังขาดความรู้ด้านการอบแห้ง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาด้านการอบแห้งเพื่อแนะนำชาวบ้านในชุมชนต่างๆต่อไป

สำหรับการอบแห้งนั้นมีพารามิเตอร์ที่จำเป็น ได้แก่ ความชื้นสัมพัทธ์ ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำออกจากวัสดุ ความร้อนจำเพาะ ความหนาแน่น และจลนพลศาสตร์การอบแห้ง ข้อมูลพารามิเตอร์ดังกล่าวมีความสำคัญในการนำไปวิเคราะห์และจำลองกระบวนการอบแห้งเพื่อหาสภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมจนถึงการนำไปใช้ในการออกแบบเครื่องอบแห้งและนำไปสู่การใช้พลังงานในการอบแห้งอย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

จากการศึกษาเอกสารที่เกี่ยวข้องจะพบว่ายังไม่ปรากฏข้อมูลในส่วนของการจลนพลศาสตร์การอบแห้งของพลับ สำหรับของสมการความชื้นสัมพัทธ์ ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำออกจากพลับ ความร้อนจำเพาะ และความหนาแน่น ธนิตาและคณะ [5] ได้นำเสนอในบทความเรื่องสมบัติทางกายภาพและเชิงความร้อนของพลับ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นในการพัฒนาสมการจลนพลศาสตร์การอบแห้งของพลับเพื่อใช้ประโยชน์ในการทำพลับอบแห้งต่อไป

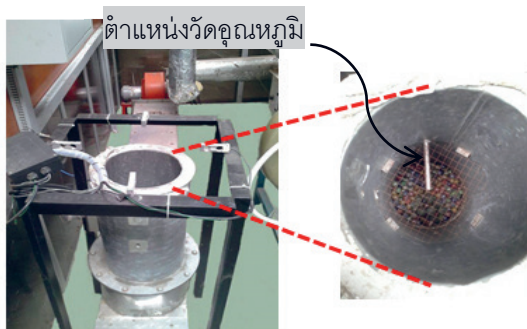
จลนพลศาสตร์การอบแห้งเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญในการวิเคราะห์และจำลองกระบวนการอบแห้ง ซึ่งใช้วิเคราะห์พฤติกรรมการณ์การลดลงของความชื้น โดยสมการจลนพลศาสตร์การอบแห้งนั้นเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง และมีความคงที่ของการอบแห้งขึ้นอยู่กับชนิดวัสดุที่อบแห้ง โดยค่าคงที่ดังกล่าวจะอยู่ในรูปความสัมพันธ์กับอุณหภูมิของลมร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีดังต่อไปนี้ ญัฐพล และคณะ [6] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการสมการจลนพลศาสตร์การอบแห้งของมะม่วงน้ำดอกไม้แบบชั้นบางโดยใช้เครื่อง

อบแห้งแบบปั๊มความร้อนระบบปิด มะม่วงน้ำดอกไม้ที่ใช้ในการศึกษานั้นมีค่าความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 4.50 – 5.20 dry basis ในการทดลองทำการสไลด์มะม่วงน้ำดอกไม้ออกเป็นชิ้น ๆ ขนาด 1.0 cm x 3.0 cm x 0.7 cm จากนั้นนำไปอบด้วยก๊าซร้อนชนิดต่างๆที่ใช้ในการพาความร้อนไปยังมะม่วงน้ำดอกไม้ โดยก๊าซที่ใช้การศึกษาได้แก่ อากาศ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไนโตรเจน ทำการทดลองอบที่อุณหภูมิ 50 °C, 60 °C และ 70 °C ทดลองที่ความเร็วของก๊าซตัวกลางเท่ากับ 0.5 m/s ทำการอบแห้งจนกระทั่งมะม่วงน้ำดอกไม้สไลด์มีค่าความชื้นเท่ากับ 0.28 dry basis จากการทดลองพบว่า สมการที่สามารถใช้ทำนายพฤติกรรมการณ์การลดลงของความชื้นตามรูปแบบของ Page, Two-term และ Logarithmic สามารถใช้ทำนายการอบแห้งด้วยอากาศร้อน ก๊าซไนโตรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีที่สุดตามลำดับ ส่วนอัตราส่วนความชื้นของมะม่วงน้ำดอกไม้สไลด์ที่ทำกรอบแห้งโดยใช้ตัวกลางเป็นก๊าซต่าง ๆ นั้น มีค่าการลดลงที่ไม่แตกต่างกัน โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะใช้เวลาในการอบแห้งต่ำที่สุด Doymaz [7] ทำการศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาสมการจลนพลศาสตร์การอบแห้งพลับสไลด์แบบชั้นบางด้วยลมร้อนทางทฤษฎี เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งและผลของการทำ blanching ที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ (D) โดยการนำชิ้นพลับที่สไลด์ไปการให้ความร้อนด้วยน้ำร้อนอุณหภูมิ 70 °C ที่เวลา 2 min แล้วทำให้ชิ้นพลับสไลด์เย็นลงโดยใส่ลงในน้ำประปาที่อุณหภูมิห้อง อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง คือ 50 °C 60 °C และ 70 °C ที่ความเร็วลมร้อนเท่ากับ 2±0.1 m/s ความชื้นเริ่มต้นของชิ้นพลับสไลด์เท่ากับ 75.2 % มาตรฐานเปียก ทำการอบแห้งจนความชื้นของชิ้นพลับสไลด์มีค่าเท่ากับ 20 % มาตรฐานเปียก ผลการศึกษาพบว่า ชิ้นพลับสไลด์ที่ผ่านการทำ

blanching จะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยกว่า และมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ (D) มีค่าสูงกว่า ส่วนการอบแห้งที่ใช้อุณหภูมิสูงกว่าจะทำให้ความชื้นลดลงได้เร็วกว่า นอกจากนี้ยังพบว่า การอบแห้งชิ้นปลัสไลด์นั้น มีเฉพาะช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเท่านั้น Zhu and Shen [8] ทำการศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาสมการจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งฟิชสไลด์ที่ความเร็วในการอบแห้ง และความหนาของฟิชสไลด์ต่างๆ ด้วยลมร้อน ในทดลองจะใช้ฟิชที่มีความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ 6.81 dry basis ทำการทดลองโดยสไลด์ฟิชให้มีขนาดเท่ากับ 0.04 x 0.02 x 0.002 m , 0.04 x 0.02 x 0.003 m และ 0.04 x 0.02 x 0.004 m ตามลำดับ ซึ่งความเร็วของลมร้อนที่ใช้ในการศึกษาอยู่ในช่วง 0.423 m/s 0.598 m/s 0.733 m/s 0.946 m/s 1.120 m/s อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งเท่ากับ 60 °C 65 °C 70 °C 75 °C และ 80 °C จากผลการทดลองพบว่า เมื่อใช้อุณหภูมิและความเร็วของลมร้อนที่ใช้ในการอบแห้งที่สูง โดยที่มีความหนาของชิ้นปลัสไลด์บางสุด มีระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งต่ำสุด สมการจลนพลศาสตร์การอบแห้งตามรูปแบบของ Page สามารถทำนายพฤติกรรมการลดลงของอัตราส่วนความชื้นของฟิชสไลด์ที่ใช้อุณหภูมิในการอบแห้งระหว่าง 60 - 80 °C ได้ดีที่สุด นอกจากนี้ยังมีนักวิจัยอีกหลายท่านที่ศึกษาเกี่ยวกับจลนพลศาสตร์การอบแห้งเช่น Thanutyot *et. al.* [9] ศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งและคุณภาพของลำไยโดยใช้ลมร้อนร่วมกับไอน้ำร้อนยิ่งยวด Paradorn *et. al.* [10] ศึกษาแบบจำลองและจลนพลศาสตร์การอบแห้งของลำไยทั้งลูกโดยใช้อินฟราเรดร่วมกับลมร้อน สารภี และคณะ [11] ศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งเนื้อลำไยที่อุณหภูมิสูง Kritsna and Siva [12] ศึกษาสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของกระเจียบเขียวโดยใช้สมการจลนพลศาสตร์การอบแห้งทางทฤษฎี เป็นต้น

2. วิธีดำเนินการ

ปลั๊กที่ใช้ในการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้เป็นปลั๊กพันธุ์เชื้อโຈหรือชีซู (P2) โดยจัดซื้อจากมูลนิธิโครงการหลวง ตำบลสุเทพ จังหวัดเชียงใหม่ โดยนำปลั๊กที่ผ่านกระบวนการลดความฝาดเรียบร้อยแล้ว ซึ่งการลดความฝาดใช้วิธีปั่นบ้าน กล่าวคือใช้ใบไม้ใส่ไว้ในถุงพลาสติกแล้วปิดปากถุงทิ้งไว้ค้างหนึ่งคืน จากนั้นทำความสะอาดปลั๊กด้วยการล้างน้ำแล้วจึงปอกเปลือกทิ้งผลแต่ไม่ตัดหัว ปลั๊กที่เตรียมเสร็จมีระดับความสุกปานกลาง มีน้ำหนักลูกละ 90±3 กรัม ความชื้นเริ่มต้น 470±10% มาตรฐานแห้งกำหนดความชื้นสุดท้ายที่ 30± 2 % มาตรฐานแห้ง ทำการอบแห้งโดยใช้เครื่องทดสอบการอบแห้งชั้นบาง ดังรูปที่ 2 ที่ใช้ลมร้อนเป็นตัวกลางที่อุณหภูมิ 45°C, 55°C และ 65°C ความเร็วลมร้อน 1±0.1 m/s วัดโดยใช้เครื่องวัดความเร็วลมแบบดิจิตอลของ Digicon Model. DA-40 ขณะทำการทดลองทำการบันทึกน้ำหนัก และรัศมีของตัวอย่างปลั๊ก ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอลความละเอียด ±0.001 g ของ Sartorius CP 323s และเวอร์เนียร์ดิจิตอลความละเอียด ±0.01 mm ของ Mitutoyo CD-8' csx พร้อมทั้งทำการบันทึกอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อมโดยใช้อุปกรณ์วัดของ Testo 650 ความละเอียดของการวัดอุณหภูมิเท่ากับ ±0.1°C และความละเอียดของการวัดความชื้นสัมพัทธ์ของลมเท่ากับ 0.1% อบแห้งจนปลั๊กมีความชื้น 30% มาตรฐานแห้ง จากนั้นทำการหามวลแห้งโดยอบแห้งตัวอย่างปลั๊กต่อที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 72 h จะได้น้ำหนักแห้งของปลั๊กเพื่อใช้คำนวณหาค่าความชื้น โดยที่แต่ละอุณหภูมิทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง



รูปที่ 2 เครื่องทดสอบการอบแห้งชิ้นบาง

การพัฒนาสมการจลนพลศาสตร์การอบแห้งจะถูกพัฒนาให้อยู่ในรูปของอัตราส่วนความชื้น (MR) ของปลั๊กที่เวลาการอบแห้งต่างๆ โดยอัตราส่วนความชื้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$MR = \frac{M - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} \quad (1)$$

อัตราส่วนความชื้น นั้น นอกจากจะมีความสัมพันธ์กับค่าความชื้นที่เวลาใดๆ (M) และความชื้นเริ่มต้น (M_{in}) แล้ว ยังมีความสัมพันธ์กับความชื้นสมดุล (M_{eq}) อีกด้วย โดยสามารถคำนวณหาความชื้นสมดุลได้จากสมการความชื้นสมดุลของปลั๊กที่พัฒนาโดย ธนิตา และคณะ [5] ดังสมการที่ (2)

$$M_{eq} = (0.39557 - 0.00338T) \left(\frac{\phi}{1 - \phi} \right)^{\frac{1}{1.974396}} \quad (2)$$

ความชื้นสมดุลจะมีความสัมพันธ์กับค่าอุณหภูมิ (T หน่วยเป็นองศาเซลเซียส) และความชื้นสัมพัทธ์ของลมร้อน (ϕ หน่วยเป็นทศนิยม)

เมื่อได้ข้อมูลผลการทดลองในส่วนของอัตราส่วนความชื้นและรัศมีของตัวอย่างปลั๊กที่เวลาต่างๆ แล้วจะทำการพัฒนาสมการจลนพลศาสตร์การอบแห้งของปลั๊กโดยใช้สมการทั้ง 3 รูปแบบ กล่าวคือ สมการทางทฤษฎีที่สมมุติให้ปลั๊กมีลักษณะเป็นทรงกลมโดยใช้ 500 เทอมแรกซึ่งจะให้ค่าอัตราส่วน

ความชื้นเริ่มต้นมีค่าละเอียดเพียงพอ (MR มีค่าประมาณเท่ากับ 1) มีรูปแบบดังสมการที่ (3), สมการกึ่งทฤษฎีตามรูปแบบของ Newton ดังสมการที่ (4) รูปแบบของ Henderson and Pabis ดังสมการที่ (5), รูปแบบของ Logarithmic ดังสมการที่ (6) และสมการเอมพิริคัลตามรูปแบบของ Page ดังสมการที่ (7)

$$MR = \left(\frac{6}{\pi^2} \right) \sum_{i=1}^{500} \left[\left(\frac{1}{i^2} \right) \exp \left(\frac{-3600 i^2 \pi^2 D t}{r^2} \right) \right] \quad (3)$$

$$MR = \exp(-kt) \quad (4)$$

$$MR = a \exp(-kt) \quad (5)$$

$$MR = a \exp(-kt) + c \quad (6)$$

$$MR = \exp(-kt^n) \quad (7)$$

โดยที่พารามิเตอร์ในสมการต่างๆ มีดังนี้
 D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น, m^2 / s
 t คือ เวลา, h

3600 จำนวนแปลงหน่วยเวลา ชั่วโมงเป็นวินาที

r คือ รัศมีของตัวอย่างปลั๊ก, mm

k คือ ค่าคงที่ของการอบแห้ง, h^{-1}

a, c, n คือ ค่าคงที่

การหาค่าพารามิเตอร์ของแต่ละสมการนั้นจะใช้ข้อมูลจากผลการทดลองปัดเข้ากับสมการต่างๆ ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แล้วจะนำไปหาความสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง โดยค่าพารามิเตอร์ของสมการต่างๆ คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (D) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (8) และคงที่ของการอบแห้ง (k) มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (9) สำหรับค่าคงที่ a, c และ n จะถูกกำหนดให้เป็นค่าคงที่เฉลี่ยไม่แปรผันตามอุณหภูมิของลมร้อนเพื่อเป็นการลดจำนวนพารามิเตอร์ลง

$$D = D_0 \exp \left(\frac{-E_a}{R(T+273.15)} \right) \quad (8)$$

$$k = d \exp (eT) \quad (9)$$

เมื่อ D_0 คือ Arrhenius factor, m^2 / s

E_a คือ พลังงานการกระตุ้น, kJ/mol

R คือ ค่าคงที่สากลของก๊าซ, $kJ/mol \cdot K$

d, e คือ ค่าคงที่

บรรทัดฐานในการตัดสินใจความแม่นยำของสมการต่างๆ ในการทำนายผลนี้จะใช้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error, $RMSE$) และค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Percentage Error, $MAPE$) ซึ่งค่าเหล่านี้คำนวณได้จากสมการที่ (10), (11) และ (12) ตามลำดับ

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (\bar{y} - y_i)^2}{\sum_{i=1}^m (\bar{y} - \hat{y}_i)^2} \quad (10)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (\hat{y}_i - y_i)^2}{m}} \quad (11)$$

$$MAPE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left| \frac{\hat{y}_i - y_i}{\hat{y}_i} \right| \times 100 \quad (12)$$

เมื่อ $\bar{y}$ คือ ค่าพารามิเตอร์เฉลี่ยผลการทดลอง

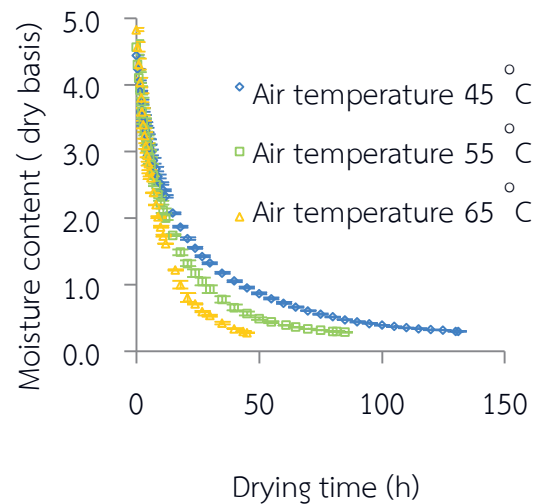
y_i คือ พารามิเตอร์จากสมการทางคณิตศาสตร์

$\hat{y}_i$ คือ พารามิเตอร์ที่ได้ตามผลการทดลอง

m คือ จำนวนข้อมูล

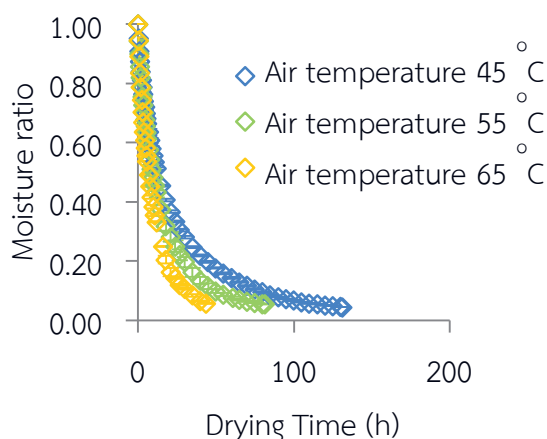
3. ผลและวิจารณ์

จากการทดลองอบแห้งพลับด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ $45^\circ C$, $55^\circ C$ และ $65^\circ C$ ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่ให้ผลพลับอบแห้งมีคุณภาพที่รับได้ [13] ความเร็วลมร้อนเท่ากับ 1 m/s ได้ผลการทดลองของการลดลงความชื้นพลับของการอบแห้งแต่ละอุณหภูมิลมร้อนเทียบกับเวลา ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ผลการทดลองหาการลดลงของความชื้นพลับที่อุณหภูมิลมร้อนต่างๆ

จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิที่สูงจะส่งผลให้ความชื้นของพลับลดลงได้เร็วกว่าการอบแห้งที่ใช้อุณหภูมิที่ต่ำซึ่งให้ผลทำนองเดียวกับผลไม้ชนิดอื่น ๆ เนื่องจากความชื้นเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลองมีค่าที่แตกต่างกันอยู่บ้าง จึงแปลงความชื้นให้อยู่ในรูปความชื้นไร้หน่วยโดยใช้สมการที่ (1) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลาได้ดังรูปที่ 4

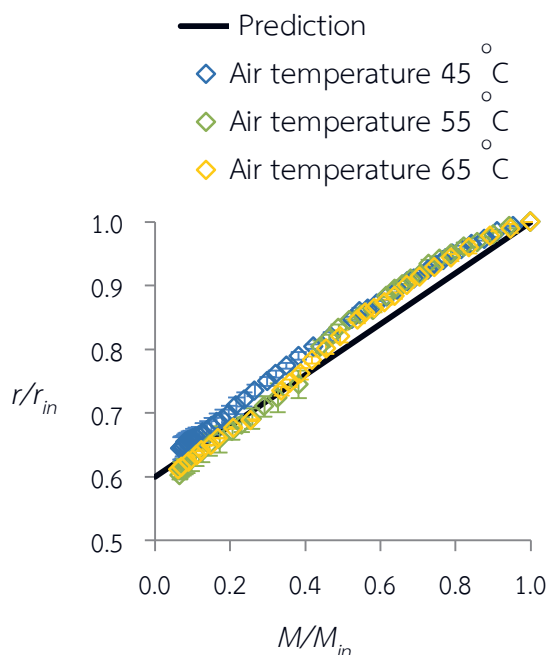


รูปที่ 4 อัตราส่วนความชื้นของผลพลับด้วยเวลาที่เวลาอบแห้งต่างๆ

เนื่องจากระหว่างการอบแห้ง พลั้บจะมีการหดตัวและการพัฒนาสมการจลนพลศาสตร์ทางทฤษฎี จำเป็นต้องใช้รัศมีในแต่ละช่วงเวลาของการอบแห้ง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงพัฒนาสมการการหดตัวของพลั้บระหว่างการอบแห้งซึ่งพบว่าพลั้บจะเกิดการหดตัว ส่งผลให้รัศมีของพลั้บลดลง จากการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนรัศมีต่อรัศมีเริ่มต้น ($\frac{r}{r_{in}}$) กับสัดส่วนความชื้นต่อความชื้นเริ่มต้น ($\frac{M}{M_{in}}$) ของพลั้บได้ดังสมการที่ (13)

$$\frac{r}{r_{in}} = 0.40 \frac{M}{M_{in}} + 0.60 \quad (13)$$

เมื่อนำผลการทดลองเทียบกับผลการคำนวณที่ได้จากสมการที่ (13) มาเขียนกราฟจะได้ดังรูปที่ 5 ซึ่งพบว่า พลั้บที่ความชื้นเดียวกัน ที่อบแห้งด้วยอุณหภูมิร้อน 45°C, 55°C และ 65°C จะมีการหดตัวที่ใกล้เคียงกัน สมการที่ (13) สามารถทำนายค่าสัดส่วนรัศมีต่อรัศมีเริ่มต้นได้ใกล้เคียงกับข้อมูลผลการทดลอง จากการวิเคราะห์ความแม่นยำด้วยหลักการทางด้านสถิติ พบว่าค่า R^2 , $RMSE$ และ $MAPE$ เท่ากับ 0.852 0.027 และ 2.894 ตามลำดับ



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ของสัดส่วนรัศมีต่อรัศมีเริ่มต้นกับสัดส่วนความชื้นต่อความชื้นเริ่มต้น

3.1 สมการจลนพลศาสตร์ทางทฤษฎี

การพัฒนาสมการจลนพลศาสตร์การอบแห้งพลั้บทางทฤษฎีนั้นจะใช้ข้อมูลการทดลองของแต่ละอุณหภูมิที่เวลาการอบแห้งใดๆ เพื่อคำนวณหาอัตราส่วนความชื้นโดยใช้สมการที่ (1) และคำนวณหารัศมีของพลั้บโดยใช้สมการที่ (13) เพื่อพิตข้อมูลเข้ากับสมการจลนพลศาสตร์ทางทฤษฎี [สมการที่ (3)] โดยมีสมมติฐานที่ว่า พลั้บมีขนาดคงที่ในช่วงเวลาการอบแห้งสั้นๆ การพิตข้อมูลนี้ใช้ช่วงเวลาเท่ากับ 0.5 ชั่วโมง จากการพิตข้อมูลสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นของแต่ละการทดลอง จากนั้นจึงหาความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นกับอุณหภูมิโดยให้ความสัมพันธ์ตามรูปแบบสมการที่ (8) ได้ผลดังสมการที่ (14)

$$D = 7.72 \times 10^{-5} \exp \left[\frac{-32.641}{R(T+273.15)} \right] \quad (14)$$

3.2 สมการจลนพลศาสตร์กึ่งทฤษฎีและเอมพิริคัล

การพัฒนาสมการจลนพลศาสตร์การอบแห้งผลพลับที่เกาะทฤษฎีและเอมพิริคัลนั้นจะใช้ข้อมูลการทดลองของแต่ละอุณหภูมิที่เวลาการอบแห้งใดๆ เพื่อคำนวณหาอัตราส่วนความชื้นโดยใช้สมการที่ (1) เพื่อฟิตข้อมูลเข้ากับสมการจลนพลศาสตร์กึ่งทฤษฎีตามรูปแบบของ Newton [สมการที่ (4)] ตามรูปแบบของ Henderson and Pabis [สมการที่ (5)] ตามรูปแบบของ Logarithmic [สมการที่ (6)] และสมการจลนพลศาสตร์เอมพิริคัลรูปแบบของ Page [สมการที่ (7)] จากนั้นจึงหาความสัมพันธ์ของค่าคงที่การอบแห้งของแต่ละรูปแบบกับอุณหภูมิโดยให้ความสัมพันธ์ตามรูปแบบสมการที่ (9) ได้ผลดังสมการที่ (15) ถึง สมการที่ (18) ตามลำดับ

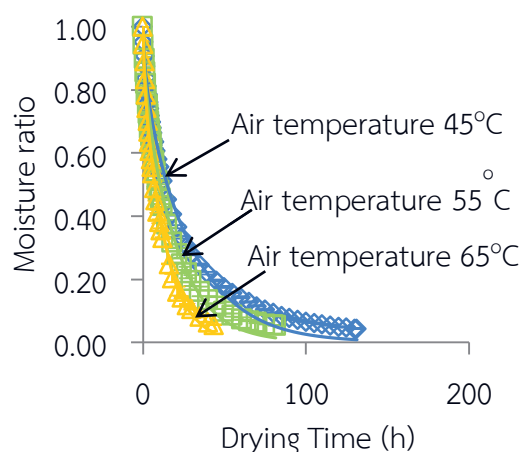
$$k = 0.010682 \exp(0.034050T) \quad (15)$$

$$k = 0.007871 \exp(0.036395T) \quad (16)$$

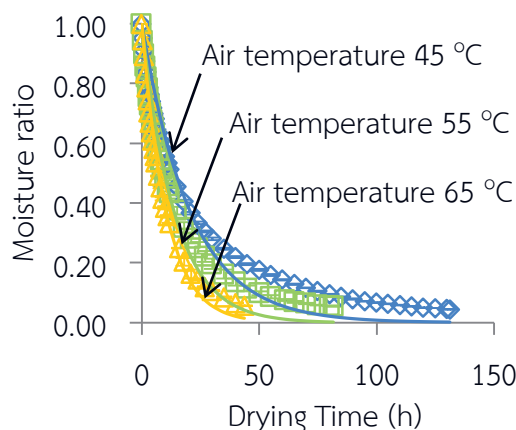
$$k = 0.0012082 \exp(0.033180T) \quad (17)$$

$$k = 0.029304 \exp(0.026516T) \quad (18)$$

การหาสมการจลนพลศาสตร์การอบแห้งผลพลับที่เหมาะสมด้วยการพิจารณาเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการทำนายอัตราส่วนความชื้นที่ใช้สมการจลนพลศาสตร์ทางทฤษฎี สมการจลนพลศาสตร์กึ่งทฤษฎีของ Newton สมการจลนพลศาสตร์กึ่งทฤษฎีของ Henderson and Pabis สมการจลนพลศาสตร์กึ่งทฤษฎีของ Logarithmic และสมการจลนพลศาสตร์เอมพิริคัลของ Page ตามลำดับ แสดงได้ดัง รูปที่ 6 ถึงรูปที่ 10



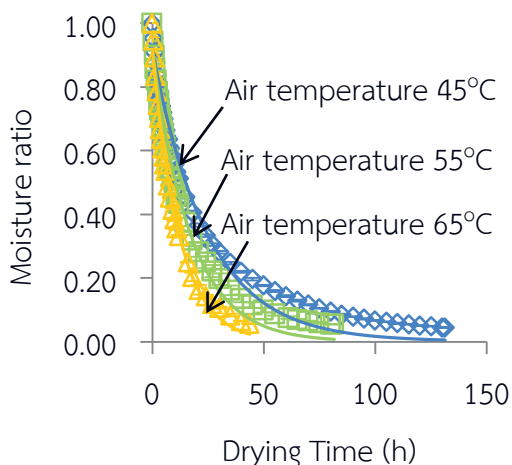
รูปที่ 6 ผลการทำนายอัตราส่วนความชื้นโดยใช้สมการทางทฤษฎี



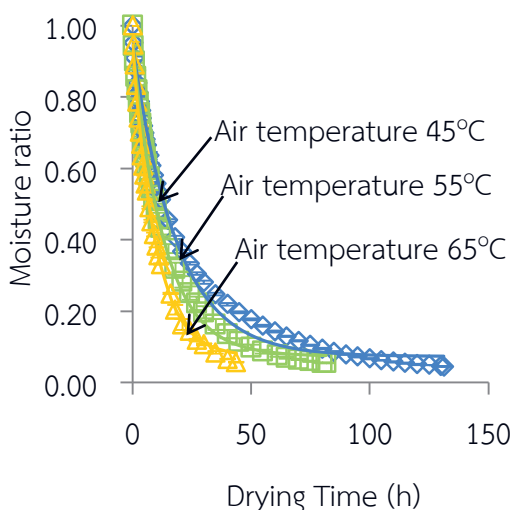
รูปที่ 7 ผลการทำนายอัตราส่วนความชื้นโดยใช้สมการกึ่งทฤษฎีของ Newton

พิจารณารูปที่ 6 ถึงรูปที่ 10 จะเห็นได้ว่าผลการทำนายอัตราส่วนความชื้นที่ใช้สมการจลนพลศาสตร์เอมพิริคัลตามรูปแบบของ Page (รูปที่ 10) ให้ผลการทำนายที่สอดคล้องกับผลการทดลองมากที่สุดของทุกๆ อุณหภูมิลมร้อน และจะเห็นได้ว่าผลการทำนายอัตราส่วนความชื้นที่ใช้สมการจลนพลศาสตร์กึ่งทฤษฎีตามรูปแบบของ Newton (รูปที่ 7) ให้ผลการทำนายคลาดเคลื่อนจากผลการทดลองมากที่สุด สำหรับผลการทำนายที่ใช้สมการกึ่งทฤษฎีของ Logarithmic ให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลการทดลอง แต่ช่วงอุณหภูมิลมร้อนต่ำๆ (45°C) จะเห็นได้

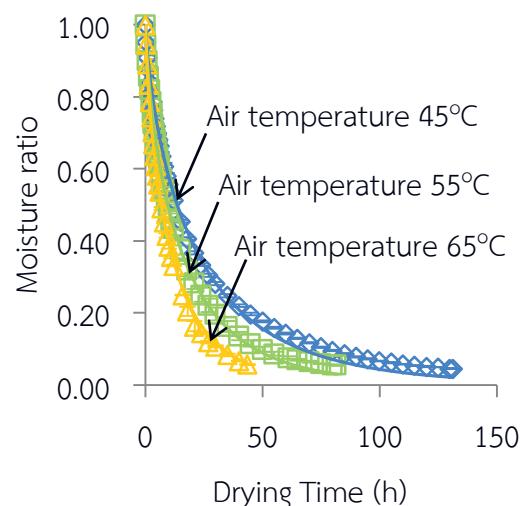
ชี้ว่าที่ช่วงเวลาการอบแห้งที่ 30 ถึง 60 ชั่วโมง จะให้ผลการทำนายอัตราส่วนความชื้นต่ำกว่าผลการทดลองและช่วงท้ายของเวลาการอบแห้งจะให้ผลการทำนายอัตราส่วนความชื้นสูงกว่าผลการทดลอง



รูปที่ 8 ผลการทำนายอัตราส่วนความชื้นโดยใช้สมการกึ่งทฤษฎีของ Henderson and Pabis



รูปที่ 9 ผลการทำนายอัตราส่วนความชื้นโดยใช้สมการกึ่งทฤษฎีของ Logarithmic



รูปที่ 10 การทำนายอัตราส่วนความชื้นโดยใช้สมการเอมพิริคัลของ Page

จากการวิเคราะห์หาค่าความแม่นยำด้วยหลักการทางด้านสถิติได้ค่า สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย ($RMSE$) และค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย ($MAPE$) ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 R^2 , $RMSE$ และ $MAPE$ รูปแบบต่าง ๆ

สมการรูปแบบ	R^2	$RMSE$	$MAPE$
ทางทฤษฎี	0.96	0.029	17.12
กึ่งทฤษฎี Newton	0.75	0.054	30.23
กึ่งทฤษฎี Henderson and Pabis	0.90	0.041	22.99
กึ่งทฤษฎี Logarithmic	0.99	0.025	10.35
เอมพิริคัล Page	0.98	0.019	10.24

พิจารณาจากตารางที่ 1 พบว่าสมการเอมพิริคัลของ Page ให้ค่า $RMSE$ และ $MAPE$ ได้ต่ำที่สุด คือเท่ากับ 0.019 และ 10.24 ตามลำดับ แม้ว่าสมการกึ่งทฤษฎีของ Logarithmic นั้นจะสามารถให้ค่า R^2 ได้สูงกว่าเล็กน้อย แต่เนื่องจากสมการกึ่งทฤษฎีของ Logarithmic นั้นมีค่าคงที่จำนวนมากกว่าสมการของ Page [ดูตั้งสมการที่ (6) และ (7)] ส่งผลให้จำนวนระดับความอิสระ (Degree of freedom) ของสมการของ Logarithmic มีค่าสูงกว่าทำให้ไม่สามารถใช้ค่า R^2 ในการตัดสินใจได้ แต่เมื่อเปรียบเทียบค่า $RMSE$ และ $MAPE$ จะเห็นว่าสมการจลนพลศาสตร์เอมพิริคัลตามรูปแบบของ Page นั้นคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดซึ่งสอดคล้องกับการอบแห้งฟิชโซลด์ [8]

จากรูปแบบสมการทั้งสามรูปแบบจะเห็นได้ว่าสมการทางทฤษฎีเท่านั้นที่แปรผันไปตามขนาดของผลพลับ ดังนั้นถ้าต้องการทำนายอัตราส่วนความชื้นที่มีขนาดผลพลับแตกต่างจากขนาดในช่วงของการทดลองจะมีเพียงสมการจลนพลศาสตร์ทางทฤษฎีเท่านั้นที่สามารถนำมาใช้ทำนายหาอัตราส่วนความชื้นได้

4. สรุปผลการทดลอง

สมการจลนพลศาสตร์เอมพิริคัลตามรูปแบบของ Page เป็นสมการสำหรับใช้ทำนายพฤติกรรมการลดลงของความชื้นผลพลับได้เหมาะสมที่สุด โดยผลพลับควรมีขนาดรัศมีเฉลี่ยในช่วง 2.9 ถึง 3.1 เซนติเมตรอุณหภูมิร้อนที่ใช้อบแห้งอยู่ในช่วง 45°C ถึง 65°C อย่างไม่รู้ก็ตามถ้าผลพลับมีขนาดไม่อยู่ในช่วงของการทดลองนี้ สมการเอมพิริคัลและสมการอื่นๆจะไม่สามารถนำมาใช้ทำนายอัตราส่วนความชื้นได้ แต่สมการจลนพลศาสตร์ทางทฤษฎีเท่านั้นที่สามารถนำมาใช้ได้

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณบริษัท NHK-SPRING (ประเทศไทย) จำกัด ที่ได้ให้การ

สนับสนุนทุนวิจัยและขอขอบพระคุณ นายสามารถ สุ่มโนจิตรภรณ์ ช่วยประสานงานในการเข้าพื้นที่ปลูกพลับที่ต๋อยสามหมื่น จังหวัดเชียงใหม่

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Med Thai. "34 Health and Nutrition Benefits of Persimmon" [Cited 31 Oct 2018]. Available from: <https://medthai.com/persimmon>.
- [2] Karakasova L, Babanovska-Milenkovska F, Lazov M, Karakasov B, Stojanova M. Quality properties of solar dried persimmon (*Diospyros kaki*). Journal of Hygienic Engineering and Design. 2013; 4: 54-59.
- [3] Kirdsaeng P. Development of a quality of the Persimmon in Hyakuma variety for sale as Non Astringent Persimmon. Journal of Kasetsart News. 2010; .56(1): 1-12. (in Thai)
- [4] Achariyiviriya S, Achariyiviriya A, Chunkaew P. Evaluation of technology transfer to rural communities for drying using LPG and solar energy cabinet dryer. International Journal of Agricultural Technology. 2014; 10(5): 1139-1150.
- [5] Chunthaworn S, Achariyaviriya A, Achariyaviriya S. Physical and thermal properties of persimmon fruit. Engineering Journal Chiangmai University. 2016; 23(1): 73-84
- [6] Poomsa-ad N, Wiset L, Tipsanprom W, Rudchapo T. Thin-layer drying equations of Mango (Nam Dok Mai) under hot air drying Using Air Carbon Dioxide and Nitrogen Gas

- Agricultural Science Journal. 2009; 40(1): 445-448. (in Thai)
- [7] Doymaz, I. Evaluation of some thin-layer drying models of persimmon slice (*Diospyros kaki* L.) Energy Conversion and Management, Vol 56: 199-205.
- [8] Zhu A, Shen X, The model and mass transfer characteristics of convection drying peach slices. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2014; 72: 345-351.
- [9] Somjai T, Namsanguan Y, Achariyaviriya S, Achariyaviriya A. Drying kinetics and quality of longan dried by two-stage superheated steam and hot air dryers. The proceedings of the 5th asia-pacific drying conference, Hong Kong China. 13 – 15 August 2007; 1: 166-171.
- [10] Nuthong P, Achariyaviriya A, Namsanguan K, Achariyaviriya S. Kinetics and modeling of whole longan with combined infrared and hot air. Journal of Food Engineering. 2011; 102(3): 233-239.
- [11] Chunthaworn S, Achariyaviriya S, Achariyaviriya A, Namsanguan K. Drying Kinetic of longan flesh Using high temperature. The 6th Conference on Energy Network of Thailand, Phetchaburi, Thailand. May 5-7, 2010: ENETT6-1020. (in Thai)
- [12] Mongkolkerd K, Achariyaviriya S. Effective diffusion coefficient of okra during hot air drying. Journal of Interdisciplinary Networks. 2013; 2 (Special Issue No. 1): 19-25.
- [13] Ketwijitchai T. Development of mathematical model of Persimmon fruit drying parameters. Master thesis of Engineering (Energy Engineering), Chiangmai university. 2016.

อิทธิพลของรูปร่างเครื่องมือตัดในงานกลึงเหล็กกล้าคาร์บอน S50C ปราศจากสารหล่อเย็นสำหรับผลิตชิ้นส่วนยานยนต์

ไพศาล ทองสงค์^{1*} ศิริชัย ต่อสกุล² พันธุ์พงษ์ คงพันธุ์³ และประจักษ์ อ่างบุญตา⁴
paisan.t@en.rmutt.ac.th^{1*}, sirichai.to@en.rmutt.ac.th², phanphong.k@en.rmutt.ac.th³
prajak.a@en.rmutt.ac.th⁴

^{1*4} ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Received	: 30-Apr-2019
Revised	: 8-Aug-2019
Accepted	: 29-Aug-2019

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษารูปร่างของเครื่องมือตัดภายใต้สภาวะการตัดเฉือน และพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเศษ อุณหภูมิการตัดเฉือน และความหยาบผิวในการกลึงของเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง เกรด S50C โดยมีตัวแปรหลักคือ มุมเดินเข้าสู่ชิ้นงาน และมุมคาย ที่เปลี่ยนแปลงไป โดยการศึกษาครั้งนี้จะใช้วิธีการทดลองด้วยมุมเดินเข้าสู่ชิ้นงาน 5 ค่าคือ -10° , -5° , 0° , 5° , 10° และมุมคาย 5 ค่าคือ -10° , -5° , 0° , 5° , 10° โดยใช้ค่าคงที่ คือ ความเร็วตัด 70 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด 0.5 มิลลิเมตรต่อคมตัดต่อรอบ และความลึกในการป้อนตัด 0.5 มิลลิเมตร โดยใช้วัสดุเครื่องมือตัดประเภทเหล็กกล้าความเร็วรอบสูง เกรด P ขนาดหน้าตัด 14×14 มิลลิเมตร การทดลองนี้ใช้กระบวนการกลึงปอกเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง S50C โดยมุมเดินเข้าสู่ชิ้นงานและมุมคายที่เปลี่ยนไป หลังจากนั้นนำค่าที่ทดลองของแต่ละมุมมาเปรียบเทียบกับค่าการทดลองของมุมมาตรฐาน จากผลการทดลองพบว่าเมื่อมุมเดินเข้าสู่ชิ้นงานมากขึ้น ค่าความสึกหรอที่เกิดขึ้นบนเครื่องมือตัดมีค่าน้อยที่สุด คือ มุมเดินเข้าสู่ชิ้นงาน 10° ร่วมกับมุมคาย 5° อุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนเครื่องมือตัดน้อยที่สุดคือ มุมเดินเข้าสู่ชิ้นงาน -5° ที่มุมคาย 10° มีค่าอุณหภูมิต่ำสุดอยู่ที่ 51.31 องศาเซลเซียส และความหยาบผิวที่มีค่าน้อยที่สุดคือที่มุมเดินเข้าสู่ชิ้นงาน 10° ร่วมกับมุมคาย 0° มีค่าความหยาบผิวเฉลี่ยอยู่ที่ $2.25 \mu\text{m}$

คำสำคัญ : มุมเดินเข้าสู่ชิ้นงาน มุมคาย เครื่องมือตัด การสึกหรอ

The Influence of Cutting Tool Geometry in a Dry Turning Operation of Carbon Steel (S50C) in Automotive Parts Production

Paisan Thongsong^{1*}, Sirichai Torsakul², Phanphong Kongphan³ and Prajak Angboonta³
paisan.t@en.rmutt.ac.th^{1*}, sirichai.to@en.rmutt.ac.th², phanphong.k@en.rmutt.ac.th³
prajak.a@en.rmutt.ac.th⁴

^{1*-4} Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Received	: 30-Apr-2019
Revised	: 8-Aug-2019
Accepted	: 29-Aug-2019

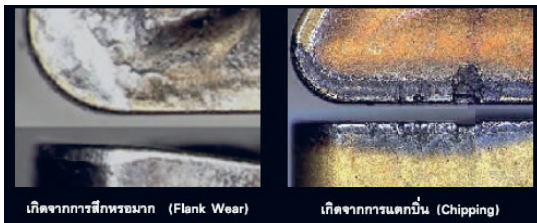
Abstract

This research aims to investigate an influence of cutting tool geometry in a dry turning operation of the medium carbon steel (S50C) on a chip formation, cutting temperature, and surface roughness. Entering and rack angles were the main process parameters in this study ranged between -10° and 10° ($-10^\circ, -5^\circ, 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$) for both parameters, while other parameters, including cutting speed, feed rate and depth of cut, were fixed at 70 m/min, 0.5 mm/tooth/rev, and 0.5 mm, respectively. The cutting tool was a high speed steel (HSS) classification P with a cross-section of 14x14 mm. Based on the experimental results, it can be concluded that a tool wear, cutting temperature, and surface roughness can be reduced when the entering angle was increased. It can be found that a combination of 10° entering angle and 5° rack angle, -5° entering angle and 10° rack angle, and 10° entering angle and 0° rack angle resulted in the lowest tool wear, the lowest cutting temperature, and the lowest surface roughness in this study.

Keywords : Entering Angle, Rack Angle, Cutting Tool, Wear

1. บทนำ

ในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนในอุตสาหกรรม ปัจจุบันมุ่งเน้นทำการปรับปรุงกระบวนการให้มีประสิทธิภาพสูงมากยิ่งขึ้นเพื่อมุ่งส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพของชิ้นงานที่ผลิตได้ วัสดุประเภท เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางเกรด S50C ได้ถูกนำมาใช้ในการผลิตชิ้นส่วนต่างๆ ของยานยนต์ เป็นจำนวนมาก ดังนั้นการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการตัดเฉือนวัสดุจะช่วยเพิ่มความความสามารถในการผลิตให้มีประสิทธิภาพและประสิทธิผลสูงสุดได้ต่อไป [1]



รูปที่ 1 การเกิดการสึกหรอของมีดตัด [2]

ในกระบวนการตัดเฉือนวัสดุด้วยงานกลึงปัจจัยที่สำคัญประการหนึ่งของกระบวนการคือ รูปร่างหรือรูปทรงของเครื่องมือตัด [2] นอกจากนี้พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดอุณหภูมิขณะเกิดการตัดโลหะ คือ ชนิดของวัสดุ ความลึกที่ใช้ องศาในการตัดเฉือนและความเร็วที่ใช้ในการตัด [3] การวิเคราะห์อุณหภูมิภายใต้สภาวะการตัดเฉือนของเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด S50C [4] พบว่าความเร็วตัดและอัตราป้อน นั้นมีผลต่ออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของเศษโลหะ

ดังนั้นทางคณะผู้วิจัยจึงมุ่งเน้นที่จะทำการศึกษาเกี่ยวกับรูปร่างของเครื่องมือตัด ด้วยการปรับเปลี่ยนรูปทรงของเครื่องมือตัดในบริเวณที่เกี่ยวข้องต่อการตัดเฉือน อันได้แก่ มุมเดินเข้าสู่ชิ้นงาน (Entering Angle) มุมหลบหน้า (Main Flank Angle) และมุมคายเศษ (Rack Angle) ของเครื่องมือตัดต่อประสิทธิภาพในการตัดเฉือนแบบแห้งบนวัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางเกรด S50C ซึ่งคณะผู้วิจัยมุ่ง

วัดผลหลายปัจจัยอันได้แก่ ค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน (Surface Roughness) อุณหภูมิในการตัดเฉือน (Cutting Temperature) และการสึกหรอของเครื่องมือตัด (Tool Wear) อันจะช่วยส่งผลให้สามารถกำหนดแนวทางการเลือกลักษณะรูปร่างของเครื่องมือตัดที่มีความเหมาะสมต่อการตัดเฉือนได้ด้วยการอธิบายค่าความสัมพันธ์ของรูปร่างของเครื่องมือตัดต่อปัจจัยที่ทำการวัดผลได้ [5]

2. เครื่องมือและวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องจักรกลอัตโนมัติ ที่ใช้ในการทดลองอยู่ที่ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ยี่ห้อ HAAS AUTOMATION รุ่น ST-10 โดยใช้โปรแกรม G Code และ M Code เป็นชุดคำสั่งควบคุม ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 เครื่องจักรกลอัตโนมัติ ยี่ห้อ HAAS AUTOMATION รุ่น ST-10

เครื่องวัดอุณหภูมิ เทอร์โมคัปเปิลแบบ J คืออุปกรณ์วัดอุณหภูมิโดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือความร้อนเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้า (emf) ใช้วัดอุณหภูมิในช่วง 0-750 องศาเซลเซียส ติดตั้งกับเครื่องบันทึกผล Graphtec midi logger gl800 ดังรูปที่ 3



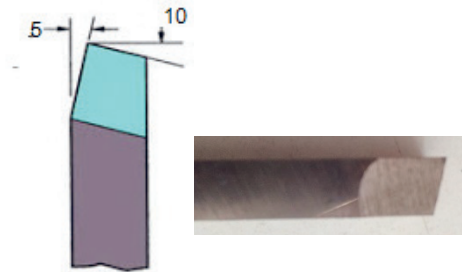
รูปที่ 3 เครื่องวัดอุณหภูมิ เทอร์โมคัปเปิลแบบ J ติดตั้งกับเครื่องบันทึกผล Graphtec midi logger gl800

เครื่องมือวัดค่าความหยาบผิววัดค่าพารามิเตอร์ Ra โดยใช้เครื่อง Kozaka Laboratory Ltd. Surfscorder SE-40D สามารถวัดความยาวได้ 30 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 การวัดค่าความหยาบผิวด้วยเครื่อง Kozaka Laboratory Ltd. Surfscorder SE-40 D

เครื่องมือตัดเหล็กกล้าความเร็วรอบสูง (High Speed Steel; HSS) โดยผู้วิจัยได้ใช้เครื่องเจียระไนในการลับคมตัด และใช้ใบวัดมุมเป็นเครื่องมือในการตรวจสอบ ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 เครื่องมือตัดเหล็กกล้าความเร็วรอบสูง

วัสดุชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางเกรด S50C ขนาดผิวงานดิบเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ความยาวชิ้นงาน 220 มิลลิเมตร ระยะความยาวปอกผิวเตรียมชิ้นงาน 180 มิลลิเมตร และขนาดผิวปอกเตรียมชิ้นงานเส้นผ่านศูนย์กลาง 48 มิลลิเมตร



รูปที่ 6 ชิ้นงานทดลอง เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง เกรด S50C

การวัดอุณหภูมิระหว่างการตัดเฉือนจะทำการวัดที่ส่วนปลายของเครื่องมือตัดเหล็กกล้าความเร็วรอบสูง ดังรูป 7



รูปที่ 7 แสดงจุดที่ทำการวัดอุณหภูมิในการทดลอง

การทดลองกลึงชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางเกรด S50C ด้วยเครื่องมือตัดเหล็กกล้าความเร็วรอบสูง โดยทำการทดลองด้วยมุมมีดมาตรฐาน แล้วนำผลการทดลองที่ได้มานั้น ตั้งเป็นค่ามาตรฐานเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบค่าความสึกหรอที่เกิดขึ้นบนเครื่องมือตัด อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในการตัดเฉือนและค่าความเรียบผิวของชิ้นงาน โดยใช้ตัวแปรที่ได้กำหนดขึ้นมา คือ มุมเดินเข้าสู่ชิ้นงาน 10° , 5° , 0° , -5° , -10° ร่วมกับมุมคายเศษ 10° , 5° , 0° , -5° , -10°

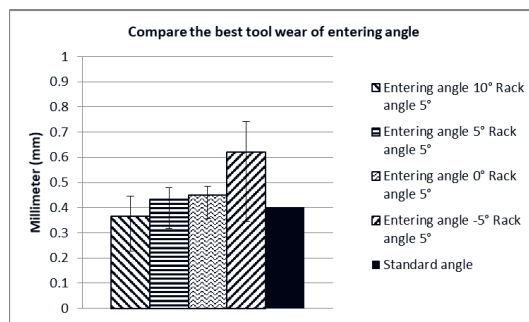
3 ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 ผลการสึกหรอของเครื่องมือตัด

ผลการทดลองของอิทธิพลของรูปร่างเครื่องมือตัดต่อวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง S50C ในส่วนของค่าการสึกหรอที่เกิดขึ้นหลังการตัดเฉือนที่ได้จากการทดลอง เพื่อทำการเปรียบเทียบค่าการสึกหรอของมุมเดินเข้าสู่ชิ้นงานที่ 10° , 5° , 0° , -5° , -10° พบว่ามุมคายเศษที่มีผลของการสึกหรอของเครื่องมือตัดดีที่สุดคือมุมคาย 5° โดยมีมุมเดินเข้าสู่ชิ้นงาน 10° ที่มุมคาย 5° มีค่าความสึกหรอน้อยที่สุดซึ่งมีค่าอยู่ที่ 0.37 มิลลิเมตร เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าความสึกหรอของเครื่องมือตัดที่มีมุมมาตรฐาน

พบว่าค่าที่ได้มีค่าน้อยกว่าค่ามุมมาตรฐาน รองลงมาคือมุมเดินเข้าสู่ชิ้นงาน 0° ที่มุมคาย 5° มีค่าความสึกหรออยู่ที่ 0.41 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าของมุมมาตรฐาน โดยค่าการสึกหรอของมุมมาตรฐานคือ 0.40 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 8

การที่ค่าของความสึกหรอที่เกิดขึ้นบนเครื่องมือตัดนั้นลดลง ที่มุมเดินเข้าสู่ชิ้นงานที่ 10° , 5° , 0° , -5° , -10° พบว่าเมื่อมุมเดินเข้าสู่ชิ้นงานมีองศาที่มากขึ้นนั้นจะส่งผลให้ค่าความสึกหรอที่เกิดขึ้นบนเครื่องมือตัดเหล็กกล้าความเร็วรอบสูง มีค่าของความสึกหรอน้อยลง เพราะผิวสัมผัสของมุมที่มากขึ้นที่จุดของคมตัด จะเกิดการกระจายของชิ้นเหล็ก และความร้อนที่เกิดขึ้นมากนั้นทำให้การกระจายตัวของชิ้นเหล็กนั้นเกิดขึ้นมากจึงทำให้มีผลโดยตรงต่อค่าสึกหรอของเครื่องมือตัดที่มุม Flank wear และ Crater wear ดังที่ K.kudou [6] ได้กล่าวไว้ว่า ความสึกของ Flank wear มีค่าความสัมพันธ์โดยตรงกับการกระจายของชิ้นเหล็ก

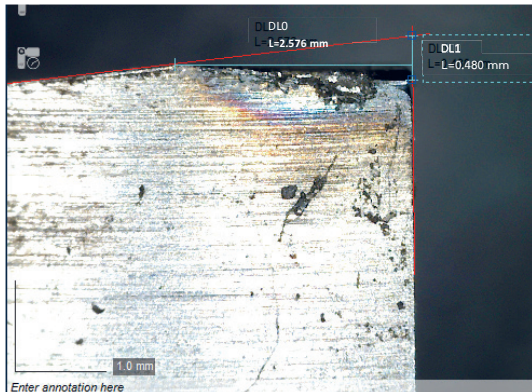


รูปที่ 8 เปรียบเทียบค่าความสึกหรอของแต่ละมุมเดินเข้า

3.2 กลไกการสึกหรอของเครื่องมือตัด

การวิเคราะห์เครื่องมือตัดเหล็กกล้าความเร็วรอบสูง ได้ทำการวิเคราะห์กลไกการสึกหรอที่มุม Flank wear โดยจากผลการทดลองที่มุมคาย 5° เกิดค่าความสึกหรอน้อยที่สุด และรูปแบบของการสึกหรอที่เกิดขึ้นมากที่สุดในการ

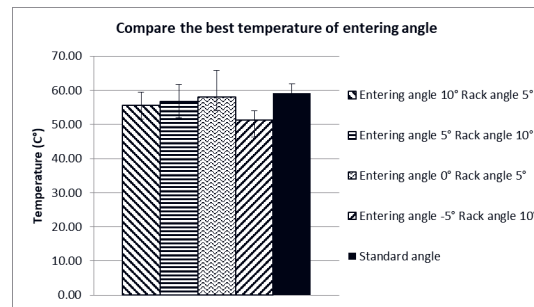
ทดลองคือมุมเดินเข้าสู่ชิ้นงาน 5° ร่วมกับมุมคาย 0° มีลักษณะดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ลักษณะการเกิดการสึกหรอที่ Flank wear

3.3 การวิเคราะห์ผลอุณหภูมิในการตัดเฉือน

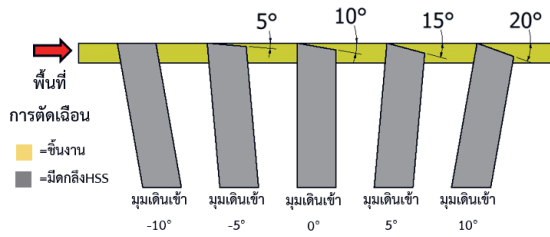
จากรูปที่ 10 แสดงผลการทดลองของ อิทธิพลของรูปร่างเครื่องมือตัดต่อวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง S50C ในส่วนของค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นหลังการตัดเฉือนที่ได้จากการทดลอง เพื่อทำการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของมุมเดินเข้าสู่ชิ้นงานที่ 10° , 5° , 0° , -5° , -10° พบว่ามุมเดินเข้าสู่ชิ้นงาน -5° ที่มุมคาย 10° มีค่าอุณหภูมิน้อยที่สุดซึ่งมีค่าอยู่ที่ 51.31 องศาเซลเซียส เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าอุณหภูมิของเครื่องมือตัดที่มุมมาตรฐาน พบว่าค่าที่ได้มีค่าน้อยกว่าค่ามุมมาตรฐาน รองลงมาคือมุมเดินเข้าสู่ชิ้นงานที่ 10° มุมคาย 5° มีค่าอุณหภูมิอยู่ที่ 55.53 องศาเซลเซียส ซึ่งน้อยกว่าค่าของมุมมาตรฐาน โดยค่าอุณหภูมิของมุมมาตรฐาน คือ 59.13 องศาเซลเซียส



รูปที่ 10 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ของแต่ละมุมเดินเข้าสู่ชิ้นงาน

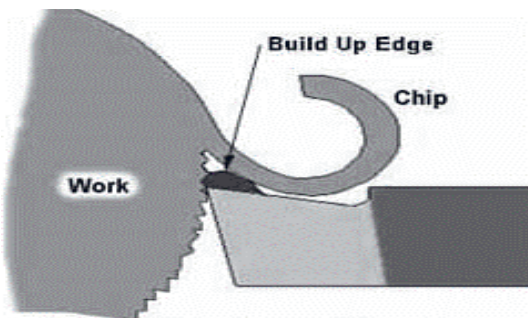
การที่อุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนเครื่องมือตัดที่มุมเดินเข้าสู่ชิ้นงานที่ 10° , 5° , 0° , -5° , -10° พบว่าเมื่อมุมเดินเข้าสู่ชิ้นงาน และมุมคายมีองศาที่มากขึ้นนั้นจะส่งผลให้ค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนเครื่องมือตัดเหล็กกล้าความเร็วรอบสูงมีค่าของค่าอุณหภูมิน้อยลง เพราะอุณหภูมิที่เกิดขึ้นนั้น ขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัย คือ มุมเดินเข้าสู่ชิ้นงาน และมุมคาย

1) มุมเดินเข้าสู่ชิ้นงาน คือ มุมที่ถูกเจียรไนให้คมตัดของมีดเอียงทำมุมกับขอบของตัวมีดเพื่อให้เครื่องมือตัดเดินตัดเฉือนเนื้อวัสดุได้สะดวก เพราะมีแรงต้านทานระหว่างเครื่องมือตัดกับชิ้นงาน ดังนั้นมุมเดินเข้าสู่ชิ้นงานจะส่งผลกระทบโดยตรงต่อมุมหลบข้าง ถ้ามุมเดินเข้าสู่ชิ้นงานมีค่าน้อยเกินไปอาจทำให้มุมหลบข้างมีมุมหลบน้อยลง และจะทำให้ตัดเฉือนวัสดุได้ไม่นานเครื่องมือตัดก็อาจเสียหายได้ หรือมุมเดินเข้าสู่ชิ้นงานมากเกินไปก็อาจทำให้เกิดแรงต้านทานระหว่างคมตัดสูงทำให้เครื่องมือตัดเกิดอุณหภูมิที่สูง และอาจเกิดความเสียหายได้ [7] ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 เปรียบเทียบมุมเดินเข้าสู่ชิ้นงาน

2) มุมคายเศษ คือ มุมที่เจียรระโนให้ผิว เครื่องมือตัดเอียงลงไปทางข้างปลายเครื่องมือตัด สำหรับช่วยให้คายเศษโลหะขณะที่คมของ เครื่องมือตัดเข้าเนื่องาน มุมนี้ถ้ามีขนาดมาก เกินไปจะทำให้มุมลิ้มเล็กหรือถ้าน้อยจะทำให้มุม ลิ้มใหญ่ เศษที่คายออกจากชิ้นงานนั้นจะมี อุณหภูมิที่สูงมากจึงส่งผลให้เครื่องมือตัดเกิด ความร้อนสะสม และส่งผลให้เครื่องมือตัด เสียหาย [7] ดังรูปที่ 12



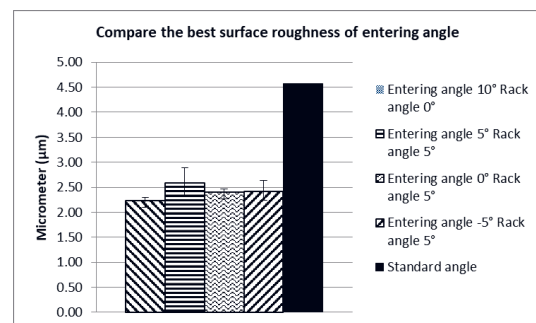
รูปที่ 12 การตัดเฉือนให้เห็นมุมคายเศษ และ เศษโลหะ[8]

3.4 การวิเคราะห์ผลค่าความหยาบผิว

ผลการทดลองของอิทธิพลของรูปปร่าง เครื่องมือตัดต่อวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง S50C ในส่วนของค่าความหยาบผิวที่เกิดขึ้นหลัง การตัดเฉือนที่ได้จากการทดลอง เพื่อทำการ เปรียบเทียบค่าความหยาบผิวของมุมเดินเข้าสู่ ชิ้นงานที่ 10°, 5°, 0°, -5°, -10° พบว่ามุมคาย เศษที่มีผลของค่าความหยาบผิวของเครื่องมือตัด ดีที่สุดคือมุมคาย 5° โดยมีมุมเดินเข้าสู่ชิ้นงาน 10° ที่มุมคาย 0° มีค่าความหยาบผิวที่ดีที่สุดซึ่งมี

ค่าอยู่ที่ 2.23 ไมโครเมตร เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าความหยาบผิวของเครื่องมือตัดที่มุม มาตรฐาน พบว่าค่าที่ได้มีค่าน้อยกว่าค่าของมุม มาตรฐาน รองลงมาคือมุมเดินเข้าสู่ชิ้นงาน 0° ที่ มุมคาย 5° มีค่าความหยาบผิวอยู่ที่ 2.40 ไมโครเมตร ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าของมุมมาตรฐาน โดยค่าความหยาบผิวของมุมมาตรฐานคือ 4.57 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 13

ค่าความหยาบผิวที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานที่มุม เดินเข้าสู่ชิ้นงานที่ 10°, 5°, 0°, -5°, -10° พบว่า เมื่อมุมเดินเข้าสู่ชิ้นงานมีองศาที่มากขึ้นนั้นจะ ส่งผลให้ค่าความหยาบผิวที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน มีค่าของค่าความหยาบผิวน้อยลง เนื่องจากมุม เดินเข้าสู่ชิ้นงานน้อยจะทำให้มีดสัมผัสกับ ชิ้นงานมากจึงทำให้วัสดุเครื่องมือตัดไม่ได้มีการ ตัดเฉือนชิ้นงานเพราะว่าคมตัดนั้นสึกหรอมากจึง ถูกกับชิ้นงานแทนจึงทำให้ค่าความหยาบผิวมีค่าที่ สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ N. Muthukrishnan et al., (2009) ได้กล่าวไว้ว่า มุมเดินเข้าสู่ชิ้นงานมากหรือมีดสัมผัสกับชิ้นงาน น้อยจะทำให้ค่าความหยาบผิวน้อยลง [9]



รูปที่ 13 เปรียบเทียบค่าความหยาบผิวของแต่ ละมุมเดินเข้าสู่ชิ้นงาน

อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อความหยาบผิวและการสึกหรอ จากค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างการทดลอง ค่าความสึกหรอของเครื่องมือตัดหลังการทดลอง และค่าความหยาบผิวที่ได้ กล่าวได้ว่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นมากส่งผลโดยตรงต่อค่าความสึกหรอของเครื่องมือตัด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lin Zhu ที่กล่าวว่าการยืดอายุของเครื่องมือตัดควรทำให้เครื่องมือตัดเย็นตัวลง [10] แต่อุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างการตัดเฉือนนั้นไม่ได้ส่งผลโดยตรงต่อค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน งานวิจัยของ Adeel H ได้กล่าวไว้ว่าที่อุณหภูมิน้อยลงส่งผลให้ได้ค่าความหยาบผิวที่น้อย [11]

4. สรุปผลการทดลอง

1. ค่าความสึกหรอของเครื่องมือตัดเหล็กกล้าความเร็รรอบสูง โดยมีตัวแปร คือ มุมเดินเข้าสู่ชิ้นงาน 10° , 5° , 0° , -5° , -10° ร่วมกับมุมคายเศษ 10° , 5° , 0° , -5° , -10° จากผลการทดลองพบว่า เมื่อมุมเดินเข้าสู่ชิ้นงานมีองศาที่มากขึ้นนั้นจะส่งผลให้ค่าความสึกหรอที่เกิดขึ้นบนเครื่องมือตัดมีค่าของความสึกหรอน้อยลง ผลการทดลองที่ดีที่สุดคือที่มุมเดินเข้าสู่ชิ้นงาน 10° ร่วมกับมุมคาย 5°

2. อุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างการตัดเฉือนของเครื่องมือตัดเหล็กกล้าความเร็รรอบสูง (High speed steel; HSS) โดยมีตัวแปร คือ มุมเดินเข้าสู่ชิ้นงาน 10° , 5° , 0° , -5° , -10° ร่วมกับมุมคายเศษ 10° , 5° , 0° , -5° , -10° จากผลการทดลองพบว่า เมื่อมุมเดินเข้าสู่ชิ้นงานมีองศาที่มากขึ้นนั้นจะส่งผลให้ค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนเครื่องมือตัดมีค่าของค่าอุณหภูมิน้อยลง ผลการทดลองที่ดีที่สุดคือที่มุมเดินเข้าสู่ชิ้นงาน -5° ร่วมกับมุมคาย 10°

3. ค่าความหยาบผิวที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง S50C ด้วยเครื่องมือตัดเหล็กกล้าความเร็รรอบสูง (High speed steel; HSS) โดยมีตัวแปร คือ มุมเดิน

เข้าสู่ชิ้นงาน 10° , 5° , 0° , -5° , -10° ร่วมกับมุมคายเศษ 10° , 5° , 0° , -5° , -10° จากผลการทดลองพบว่า เมื่อมุมเดินเข้าสู่ชิ้นงานมีองศาที่มากขึ้นนั้นจะส่งผลให้ค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนเครื่องมือตัดมีค่าของความหยาบผิวน้อยลง ผลการทดลองที่ดีที่สุดคือที่มุมเดินเข้าสู่ชิ้นงาน 10° ร่วมกับมุมคาย 0°

4. อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อความหยาบผิว ค่าอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองนั้นไม่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวของชิ้นงานโดยตรง แต่ส่งผลต่อการสึกหรอโดยตรง จากการที่เกิดอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้ชั้นเหล็กเกิดการกระจายมากจึงทำให้ค่าความสึกหรอของเครื่องมือตัดมีค่ามาก

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก RMUTT financial budget in fiscal in 2018 ที่ได้ให้งบประมาณสนับสนุนโครงการวิจัย และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ให้การสนับสนุนในด้านต่างๆ จนโครงการวิจัยนี้ประสบผลสำเร็จในการดำเนินงานเป็นอย่างดี ทางผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] AB Sandvik Coromant. Modern metal cutting – a practical handbook: Tofters Tryckeri AB; 1994.
- [2] Cutting tool selection. [cited 2017 June]. Available from: <http://tools-article.sumipol.com/insert-selection-technique-for-turning/> (in Thai)
- [3] Omar, O.E.E.K., El-Wardany, T, Ng, E, Elbestawi, M.A. An improved cutting force and surface topography prediction model in end milling. International journal of machine Tools & Manufacture. 2007;47: 1263-1275.
- [4] Moetakef Imani B. Identification of tool life and wear characteristics of HSS tools used in turning of Ck45. 2007.
- [5] DIN Standard. Terminology of chip removing; reference system and angles on the cutting part of the tool in DIN6581: DeutschesInstitut-FurNormung E.V. (German National Standard). 1985.
- [6] Kudou K, Onob T, Okadac S. Crater wear characteristics of an Fe-diffused carbide cutting tool. Department of mechanical engineering, university of Kanagawa. 2003.
- [7] List G, Sutter G, Bouthiche A. Cutting temperature prediction in high speed machining by numerical modelling of chip formation and its dependence with crater wear. Laboratoire d'etude des microstructures et de mécanique des matériaux, université Paul Verlaine. 2012.
- [8] eligoprojects./ Different Types of Chips in Metal Cutting. [cited 2018 Feb 13]. Available from: <https://eligoprojects.com/different-types-of-chips-in-metal-cutting/>
- [9] Boonrawd W, Ratanawilai T. Effect of turning parameters on surface roughness of aluminum casting semi-solid. Research and development journal. 2012;23(4). (in Thai)
- [10] Zhu L, Shuang-Shuang P, Cheng-Long Y, Tien-Chien J, Xi C, Yi-Hsin Y. Cutting temperature, tool wear, and tool life in heat-pipe-assisted end-milling operations. Mechanical engineering department, An-Hui agricultural university. 2014.
- [11] Adeel H, Suhail, Ismail N, Wong S.V, Abdul Jalil N.A. Optimization of cutting parameters based on surface roughness and assistance of workpiece surface temperature in turning process. Department of mechanical and manufacturing engineering, faculty of engineering, Putra Malaysia university. 2010.

ผลกระทบของแรงและเวลาอัดในกระบวนการเชื่อมเสียดทานที่มีผลต่อ โครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของรอยต่อระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1045 และเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304

วรพงศ์ บุญช่วยแทน^{1*} รอมฎอน บุระพา² และ วรธนพร ชีววุฒิพงษ์³
worapong.b@rmuts.ac.th^{1*}, romadorn.b@hotmail.com², c.watthanaphon@gmail.com³

¹⁻³ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

¹⁻³ หน่วยเทคโนโลยีการแปรรูปวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

บทคัดย่อ

Received	: 28-Jun-2019
Revised	: 13-Nov-2019
Accepted	: 15-Nov-2019

การเชื่อมเสียดทานเป็นกระบวนการเชื่อมในสภาวะของแข็งที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันเนื่องจากมีข้อดีหลายประการ เช่น เกิดความร้อนในกระบวนการเชื่อมต่ำ ประสิทธิภาพการผลิตสูง มีความสะดวกในการผลิต และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม วัสดุที่ยากต่อการเชื่อมในสภาวะการเชื่อมแบบหลอมละลายสามารถเชื่อมได้โดยการเชื่อมเสียดทาน ด้วยเหตุนี้งานวิจัยในครั้งนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของรอยต่อเชื่อมเสียดทานระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1045 กับเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ซึ่งมีตัวแปรการเชื่อม คือ ความเร็วหมุนเชื่อม คือ 1400 รอบต่อนาที แรงดันเสียดทาน คือ 40 บาร์ แรงดันอัด 3 ระดับ คือ 40 50 60 บาร์ เวลาเสียดทาน คือ 3 วินาที และเวลาอัด 3 ระดับ คือ 3 5 7 วินาที ผลการทดลองพบว่า ตัวแปรการเชื่อมส่งผลต่อความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อม ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดของรอยต่อมีค่าเท่ากับ 729.8 MPa สำหรับรอยเชื่อมที่ทดลองภายใต้ปัจจัยการเชื่อมเสียดทานด้วยแรงดันอัด 40 บาร์ เวลาอัด 3 วินาที

คำสำคัญ: การเชื่อมเสียดทาน โครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกล เหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าไร้สนิม

Effects of Compressive Force and Time in Friction Welding Process on Microstructure and Mechanical Properties of AISI 1045 Carbon Steel and AISI 304 Stainless Steel Joint

Worapong Boonchouytan^{1*}, Romadon Burapa² and Watthanaphon Cheewawuttipong³
worapong.b@rmuts.ac.th^{1*}, romadorn.b@hotmail.com², c.watthanaphon@gmail.com³

^{1*3} Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamankala University of Technology Srvijaya

^{1*3} Materials Processing Technology Research Unit, Faculty of Engineering, Rajamankala University of Technology Srvijaya

Received	: 28-Jun-2019
Revised	: 13-Nov-2019
Accepted	: 15-Nov-2019

Abstract

Friction welding is a solid-state welding process, which is widely used due to its low heat generation, high production efficiency, production convenience, and environmental friendliness. Difficult to fusion weld materials could be success weld by this process. Therefore, this study aimed to determine the microstructure and mechanical properties of friction welding joint between the carbon steel AISI 1045 and the stainless steel AISI 304. The welding process parameter consisted of a rotation speed of 1400 rpm, a friction pressure of 40 bar, 3 levels of compressive pressure (40, 50 and 60 bar), 3 seconds friction time, and compression times of 3, 5 and 7 seconds, respectively. The results showed that the welding process parameter affected to vary the tensile strength of the joint. The maximum tensile strength of 729.8 MPa could be observed when the compressive time of 40 bar, the friction time of 3 seconds, and compress time of 3 seconds, were applied.

Keywords: friction welding, microstructure, mechanical properties, carbon steel, stainless steel.

1. บทนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมได้มีการนำเหล็กกล้าคาร์บอน (AISI 1045) มาใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งอุตสาหกรรมยานยนต์ ชิ้นส่วนอะไหล่เครื่องจักร เพลลา ข้อเหวี่ยง และเกียร์ เนื่องจากวัสดุนี้มีสมบัติที่มีความแข็งแรงสูง มีความต้านทานการสึกหรอที่ดี และต้นทุนต่ำ [1 - 2] เช่นเดียวกับเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304) ได้ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายมากกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดอื่น ๆ ถูกใช้เป็นวัสดุที่มีโครงสร้างสำหรับงานท่อน้ำยาหล่อเย็น เครื่องปฏิกรณ์ ตัววาล์ว และเครื่องเรือ ซึ่งมีสมบัติต้านทานการกัดกร่อน [3 - 5] แต่การเชื่อมในสภาวะหลอมละลายส่งผลต่อขนาดของเกรนที่หยาบขึ้นในบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (Heat Affect Zone; HAZ) และอาจส่งผลต่อสมบัติทางกลให้ลดลงได้ ซึ่งสามารถลดผลกระทบดังกล่าวได้ด้วยวิธีการเชื่อมเสียดทาน [6 - 9] การใช้งานรอยเชื่อมระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าไร้สนิม เพื่อนำข้อดีของวัสดุสองชนิดมารวมกัน เป็นเรื่องยากที่จะทำให้วัสดุที่แตกต่างกัน เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีสมบัติทางกล รวมถึงสมบัติทางความร้อน อย่างไรก็ตามสามารถเชื่อมต่อกันได้ด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทาน (Friction Welding; FW) [10]

กระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding) เป็นวิธีการเชื่อมที่พัฒนาจากสถาบันการเชื่อมแห่งสหราชอาณาจักร (The Welding Institute; TWI) ในปี พ.ศ. 2534 (ค.ศ. 1991) [11] โดยมีหลากหลายวิธี เช่น การเชื่อมเสียดทานแบบโรตารี (Rotary Friction Welding; RFW) การเชื่อมเสียดทานแบบตรง (Linear Friction Welding; LFW)

และการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Welding Stir; FSW) [12 - 14] กระบวนการเชื่อมเสียดทานเป็นกระบวนการเชื่อมโลหะให้ประสานเข้าด้วยกันซึ่งเป็นกระบวนการที่ได้รับการยอมรับว่าเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพจากความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานระหว่างผิวชิ้นงานสองชิ้น ทำให้วัสดุเกิดความร้อนและเข้าสู่สภาพหนืดหรืออ่อนตัวลง [15 - 17] การเชื่อมเสียดทานเหมาะสำหรับรอยเชื่อมที่ต้องการผสานกันของโลหะสองชนิดที่ต่างกัน มีการใช้งานและสมบัติที่แตกต่างกัน รวมถึงสามารถประหยัดต้นทุนที่เกิดขึ้นกับวัสดุที่มีราคาแพงและหายาก การเชื่อมแบบหลอมละลายของการผสานกันของโลหะที่แตกต่างกันยังไม่เป็นที่ต้องการในการปฏิบัติจริง เนื่องจาก การทำให้เกิดเฟสของสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic Compound) ที่เปราะและต่ำ เนื่องจากความแตกต่างกันของโครงสร้างทางโลหะวิทยา ส่งผลทำให้มีสมบัติทางกลลดลงไปด้วย ดังนั้นกระบวนการเชื่อมในสภาวะของแข็งจึงเป็นกระบวนการเชื่อมที่เหมาะสม และน่าจะส่งผลต่อสมบัติทางกลที่ดีกว่าการเชื่อมแบบหลอมละลาย

การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมเสียดทาน เช่น Ambroziak, A., และคณะ [18] พบว่า ปัจจัยของการเชื่อมเสียดทานระหว่างวัสดุอลูมิเนียมกับเหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าไร้สนิม ที่มีอิทธิพลต่อโครงสร้างบริเวณรอยเชื่อม สมบัติความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงดัด และความแข็งแรงเฉือน คือ ความเร็วหมุนเชื่อม แรงดันเสียดทาน เวลาเสียดทาน และ แรงดันอัด ใน ส่วน ของ Satyanarayana, V.V. และคณะ [19] ได้ศึกษาการเชื่อมเสียดทานวัสดุต่างชนิดระหว่าง

เหล็กกล้าไร้สนิมอสเทนนิติกกับเฟอร์ริติก พบว่ารอยเชื่อมในด้านวัสดุของเหล็กกล้าไร้สนิมอสเทนนิติกมีความเค้นตกค้างสูงในรอยเชื่อมเนื่องจากมีความเค้นไหลที่สูงขึ้นและมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัววัสดุอันเนื่องมาจากความร้อนที่สูงขึ้น นอกจากนี้ Ma, H. และคณะ [20] ศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของเหล็กกล้าคาร์บอนกับเหล็กกล้าไร้สนิมโดยการเชื่อมเสียดทาน พบว่า การเชื่อมสามารถระบุอินเตอร์เฟซ (Interface) ในบริเวณการเสียรูปอย่างสมบูรณ์แบบ (Fully Deformed Zone; FPDZ) ได้ชัดเจนโลหะทั้งสองชนิดเชื่อมต่อกัน โครงสร้าง Pearlite มีความหนาแน่นมากขึ้น และเกิด Ferrite ในบริเวณ DZ จากรายงานการวิจัยดังกล่าวการศึกษาตัวแปรการเชื่อมของความเร็วหมุนเชื่อม แรงดันอัด และเวลาอัด ของการเชื่อมเสียดทานวัสดุต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอน (AISI 1045) กับเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304) ยังไม่ปรากฏเป็นหลักฐานแน่ชัดมากนัก

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาโครงสร้างมหภาค โครงสร้างจุลภาค และสมบัติทางกลของกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานวัสดุต่างชนิดระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอน (AISI 1045) กับเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304) โดยมีตัวแปรการเชื่อมเสียดทาน คือ ความเร็วหมุนเชื่อม แรงดันเสียดทาน แรงดันอัด เวลาเสียดทาน และเวลาอัด และสามารถนำผลงานวิจัยไปประยุกต์ใช้หรือเป็นฐานข้อมูลให้กับภาคอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องต่อไป

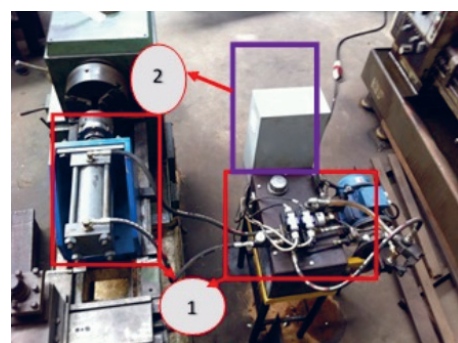
2. ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1. วัสดุที่ใช้ในการทดลองมี 2 ชนิด คือ เหล็กกล้าคาร์บอน (AISI 1045) มีส่วนผสม

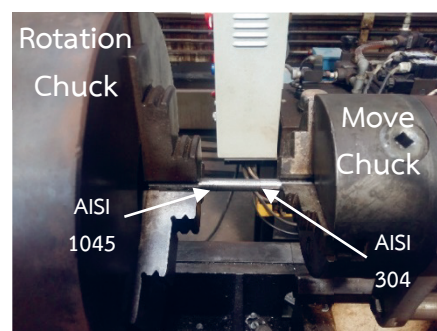
ทางเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ประกอบด้วย C-0.45, Mn-0.70, P-0.04, S-0.05, Fe-98.76 และเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304) มีส่วนผสมทางเคมี (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ประกอบด้วย C-0.08, Mn-2.00, P-0.045, S-0.03, Si-0.08, Cr-18.00, Ni-8.00, N-0.10, Fe-77.67 ขนาดของชิ้นงานที่ใช้ในการเชื่อมเสียดทาน คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร และความยาว 50 มิลลิเมตร

2.2. เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการเชื่อมเสียดทาน

2.2.1 เครื่องกลึงยืนศูนย์ ยี่ห้อ Torrent รุ่น mod. T. 71-68 ใช้ในการทดลองการเชื่อมเสียดทาน



(ก) อุปกรณ์การเชื่อมเสียดทาน



(ข) การจับยึดชิ้นงานเชื่อม

รูปที่ 1 กรรมวิธีการเชื่อมเสียดทาน

2.2.2 อุปกรณ์การเชื่อมเสียดทาน ดังรูปที่ 1(ก) ใช้ในการทดลองการเชื่อม

เสียดทาน มีส่วนประกอบอยู่ 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นส่วนจับยึดชิ้นงานและระบบไฮดรอลิกส์ ส่วนสองเป็นระบบควบคุมของอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทาน และมีลักษณะการจับยึดชิ้นงานเชื่อมดังรูปที่ 1(ข) โดยวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน (AISI 1045) จับยึดด้านหัวจับที่หมุนได้โดยใช้ปัจจัยความเร็วหมุนเชื่อมเป็นปัจจัยในการเชื่อม ส่วนวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304) จับยึดฝั่งด้านหัวจับที่เคลื่อนที่เข้าหาโดยใช้ปัจจัยแรงดันอัดและเวลาอัดเป็นปัจจัยในการเชื่อม

2.3. กระบวนการเชื่อมเสียดทาน (Friction Welding : FW) โดยควบคุมตัวแปรต่าง ๆ อันประกอบด้วย

2.3.1 ความเร็วหมุนเชื่อม คือ 1400 รอบต่อนาที (rpm)

2.3.2 แรงดันเสียดทาน คือ 40 บาร์ (bar)

2.3.3 แรงดันอัด 3 ระดับ คือ 40, 50, 60 บาร์

2.3.4 เวลาเสียดทาน คือ 3 วินาที (s)

2.3.5 เวลาอัด 3 ระดับ คือ 3, 5, 7 วินาที โดยแสดงปัจจัยที่ใช้ในการทดลองการเชื่อมเสียดทาน ดังตารางที่ 1

2.4. การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค โดยการนำชิ้นงานไปผ่าครึ่งด้วยเครื่องเลื่อยสายพานแนวนอน รุ่น CS – 230 จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปหล่อเรซิน แล้วนำไปขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์หยาบจนถึงละเอียด แล้วขัดด้วยผ้าสักหลาดอีกครั้ง จากนั้นนำไปกัดด้วยกรดซิลเลอร์เป็นเวลา 10 วินาที แล้วนำไปตรวจสอบโครงสร้างระดับมหภาค และระดับจุลภาค โดยมีตำแหน่งการส่องกล้องจุลทรรศน์

คือ บริเวณเนื้อโลหะเดิม (Base Metal; BM) บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (Heat Affect Zone; HAZ) บริเวณการเสียรูป (Deformation Zone; DZ) และบริเวณการเสียรูปอย่างสมบูรณ์แบบ (Fully Deformed Zone; FPDZ) ซึ่งทำการทดสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง และทดสอบโครงสร้างมหภาคด้วยกล้องถ่ายภาพกำลังขยาย 2-10 เท่า

ตารางที่ 1 ปัจจัยที่ใช้ในการทดลองการเชื่อมเสียดทาน

ความเร็วหมุนเชื่อม (rpm)	เวลาอัด (s)	แรงดันอัด (bar)	จำนวนทดลองซ้ำ (times)	หมายเลขการทดลอง
1400	3	40	3	1
		50	3	2
		60	3	3
	5	40	3	4
		50	3	5
		60	3	6
	7	40	3	7
		50	3	8
		60	3	9

2.5. การทดสอบสมบัติทางกลแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การทดสอบความแข็ง และการทดสอบความแข็งแรงดึง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.5.1 การทดสอบความแข็ง นำมาจากชิ้นงานที่ผ่าครึ่งอีกด้านหนึ่งมาทำการหล่อเรซินแล้วขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์หยาบจนถึงละเอียด และขัดต่อด้วยผ้าสักหลาดพอเรียบเสร็จแล้วนำมาทดสอบความแข็งด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ กดบริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยเชื่อม ระยะห่างระหว่างรอยกด 1 มิลลิเมตร แรงกดที่ใช้ 100 กรัม เป็นเวลา 10 วินาที ต่อหนึ่งรอยกด โดยใน 1 ชิ้นงานทดสอบจะกดทั้งหมด 3 แนว แล้วนำทั้ง 3 แนว

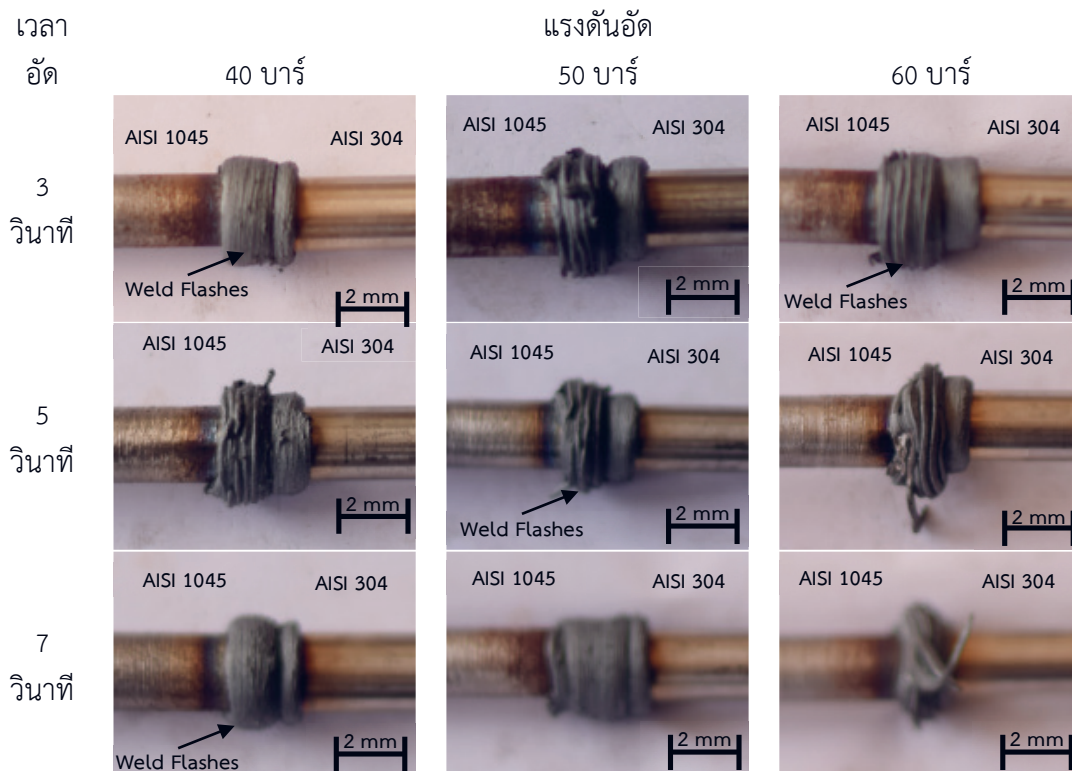
มาคำนวณค่าเฉลี่ยเพื่อเป็นตัวแทนของชิ้นงานทดสอบแต่ละสภาวะการทดลอง

2.5.2 การทดสอบความแข็งแรงดึง เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความแข็งแรงของวัสดุภายใต้การรับภาระหรือแรงแบบดึง การเตรียมชิ้นทดสอบในขั้นตอนนี้ขึ้นทดสอบที่ได้จากกรรมวิธีการเชื่อมเสียหายนจะนำไปขึ้นรูปขึ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E8M ด้วยเครื่องกลึงยันศูนย์ เมื่อแปรรูปชิ้นงานทดสอบเสร็จก็นำไปทดสอบความแข็งแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบแบบเอนกประสงค์ที่อุณหภูมิห้องโดยมีความเร็วในการดึง 1 มิลลิเมตรต่อนาที

3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

3.1. ลักษณะผิวด้านบนของการเชื่อมเสียหายน ดังรูปที่ 2 พบว่า ไม่มีข้อบกพร่องที่มี

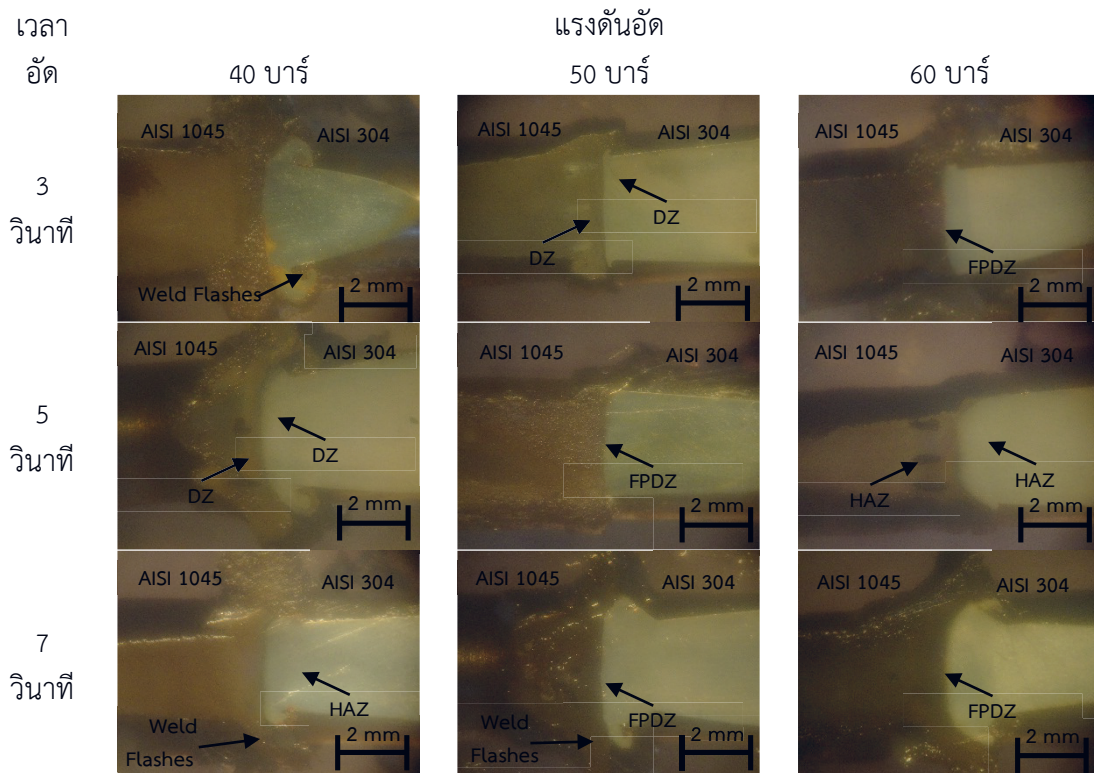
ผลต่อรอยเชื่อมหรือความไม่ต่อเนื่องของรอยเชื่อมปรากฏอยู่บนรอยเชื่อม รอยเชื่อมมีการประสานของวัสดุทั้งสองชนิดได้เป็นอย่างดี แรงดันอัดส่งผลโดยตรงต่อรูปร่างของแนวเชื่อม โดยเฉพาะครีบของแนวเชื่อม (Weld Flashes) ที่มีเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มแรงดันอัดสูงขึ้นจาก 40 เป็น 60 บาร์ ซึ่งมีผลการศึกษาล้ายกับ Satyanarayana V V และคณะ [19] ยิ่งไปกว่านั้นครีบของด้านวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน (AISI 1045) นั้นมีมากกว่าด้านวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304) ในทุก ๆ ปัจจัยการเชื่อม ผลลัพธ์นี้เกิดจากการที่มีส่วนประกอบของโลหะผสม โดยเฉพาะโครเมียม (Cr) ในวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304) ส่งผลทำให้ความแข็งแรงของเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304) มีค่ามากกว่าเหล็กกล้าคาร์บอน (AISI 1045) ที่อุณหภูมิสูง [20]



รูปที่ 2 ลักษณะผิวด้านบนของรอยเชื่อมเสียหายนเหล็กกล้าคาร์บอนกับเหล็กกล้าไร้สนิม

3.2. โครงสร้างมหภาคของการเชื่อมเสียดทาน ดังรูปที่ 3 พบว่า ครีบที่เกิดขึ้นบนด้านเหล็กกล้าคาร์บอน (AISI 1045) มีขนาดใหญ่กว่าที่อยู่ทางด้านเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304) ในรอยเชื่อมพบบริเวณที่สำคัญของรอยเชื่อม ประกอบด้วย บริเวณเนื้อโลหะเดิม (Base Metal; BM) บริเวณที่ได้รับผลกระทบจากความร้อน (Heat Affect Zone; HAZ) บริเวณการเสียรูป (Deformation Zone; DZ) และบริเวณการเสียรูปอย่างสมบูรณ์แบบ (Fully

Deformed Zone; FPDZ) รอยเชื่อมในทุกกรณีไม่มีข้อบกพร่อง มีครีบเกิดขึ้นบริเวณขอบของรอยเชื่อมซึ่งเกิดจากการเสียรูปเชิงพลาสติกในวัสดุที่มีความแข็งแรงน้อยกว่า [21] ข้อสังเกตพบว่าถ้าเมื่อยิ่งเพิ่มแรงดันจะทำให้เกิดครีบเพิ่มมากขึ้น ความกว้างของบริเวณ DZ และบริเวณ HAZ ด้านวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน (AISI 1045) นั้น มีความกว้างกว่าเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304) เนื่องจากมีค่าการนำความร้อนสูงกว่า [22]



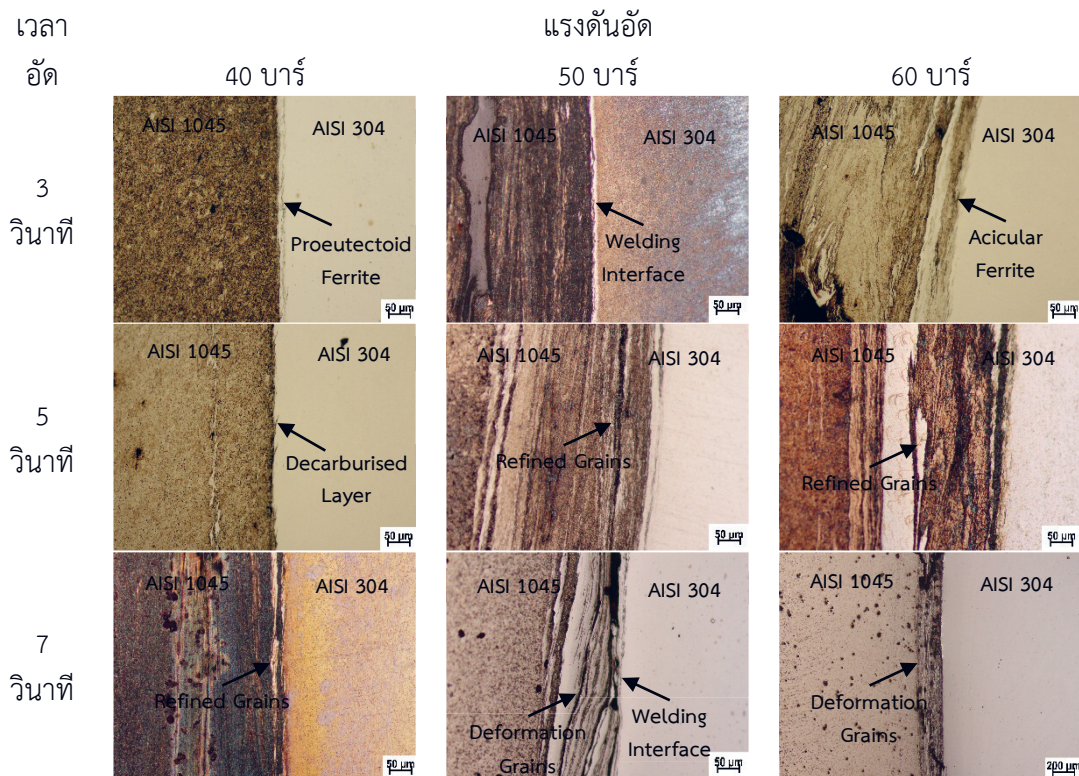
รูปที่ 3 โครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้าคาร์บอนกับเหล็กกล้าไร้สนิม

3.3. โครงสร้างจุลภาคของการเชื่อมเสียดทาน ดังรูปที่ 4 โครงสร้างจุลภาคที่ส่วนรอยเชื่อมแตกต่างกันไปตามแนวรัศมีของชิ้นงานทรงกระบอก ในบริเวณ FPDZ รอยเชื่อมสามารถชี้จุดของวัสดุได้ง่ายเนื่องจากเหล็กกล้า

คาร์บอน (AISI 1045) และเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304) จะถูกแบ่งโดยแนวการเชื่อมประสาน (Welding Interface) ในบริเวณ DZ เหล็กกล้าคาร์บอน (AISI 1045) กับเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304) เกิดการเสียรูปร่างของเกรนเนื่องจากการ

เสียรูปเชิงพลาสติกที่มีความรุนแรงมากกว่าเมื่อเทียบกับบริเวณ HAZ [23] นอกจากนี้ในรอยเชื่อมมีการเกิดขึ้นของชั้นโปรยูเทคตอยด์เฟอร์ไรต์ (Proeutectoid Ferrite) บาง ๆ และอยู่ใกล้กับรอยเชื่อมในบริเวณ FPDZ สาเหตุเกิด

จากการเกิดขึ้นของความร้อนด้วยปัจจัยของการเชื่อม คือ แรงดันอัด และเวลาอัด ซึ่งมีอุณหภูมิของกระบวนการเชื่อมเสียดทานในบริเวณ DZ ระหว่าง 727-1493 องศาเซลเซียส (°C) [20]



รูปที่ 4 โครงสร้างจุลภาคของของรอยเชื่อมเสียดทานเหล็กกล้าคาร์บอนกับเหล็กกล้าไร้สนิม

พื้นที่โครงสร้างจุลภาคมีความแตกต่างในปัจจัยการเชื่อมเสียดทานที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น เมื่อเพิ่มแรงดันอัดมากขึ้น รอยเชื่อมบริเวณ FPDZ มีความกว้างมากขึ้น ส่วนในบริเวณ DZ มีพื้นที่ลดลง ปรากฏการณ์นี้เกิดจากข้อเท็จจริงที่ว่าเมื่อเพิ่มแรงดันอัดมากขึ้น ทำให้วัสดุเกิดอุณหภูมิสูงมากขึ้นซึ่งนำไปสู่การลดลงของบริเวณ DZ ที่มากขึ้น นอกจากนี้แรงดันอัดมากขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น วัสดุที่มีความแข็งแรงน้อยกว่านั้น ทำให้เกิดการเสียรูปเชิงพลาสติกที่มากกว่า [24]

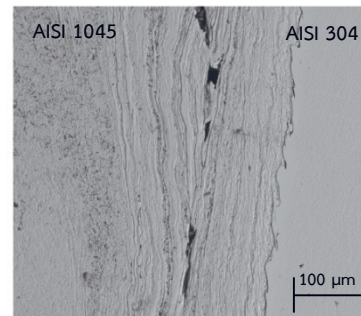
เส้นแนวการเชื่อมประสาน (Welding Interface) จะได้เห็นว่าเป็นเส้นแบ่งระหว่างเหล็กกล้าคาร์บอน (AISI 1045) กับเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304) อย่างชัดเจน เนื่องจากการเกิดขึ้นของชั้น Proeutectoid Ferrite บาง ๆ ปรากฏขึ้นเนื่องจากการแพร่ของธาตุแบบเข้มข้นโดยเฉพาะคาร์บอน ในบริเวณ DZ เกิดปรากฏการณ์การลดลงของความร้อนอย่างรวดเร็วหลังจากที่อุณหภูมิสูงที่เกิดจากปัจจัยการเชื่อม

การเปลี่ยนรูปเชิงพลาสติกของกระบวนการเชื่อมเสียดทานมีผลเนื่องมาจากความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้นในของบริเวณ DZ ทำให้ Ferrite บางตัวอยู่ในรูปเข็ม โครงสร้างดังกล่าวเรียกว่า Acicular Ferrite สำหรับด้านวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304) ของวัสดุทดลองเกิดจากการตกผลึกแบบพลวัตของเกรน Austenite ซึ่งส่งผลในการปรับปรุงสมบัติความแข็งแรงขึ้น Refined Grains เนื่องมาจากการแพร่กระจายของคาร์บอนจากด้านเหล็กกล้าคาร์บอน (AISI 1045) ไปยังด้านวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304) และความแข็งแรงลดลง และอาจนำไปสู่การแตกหักที่บริเวณ DZ ของด้านวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304) ลักษณะการเช่นนี้มีผลคล้ายกันกับ Ma H และคณะ [25]

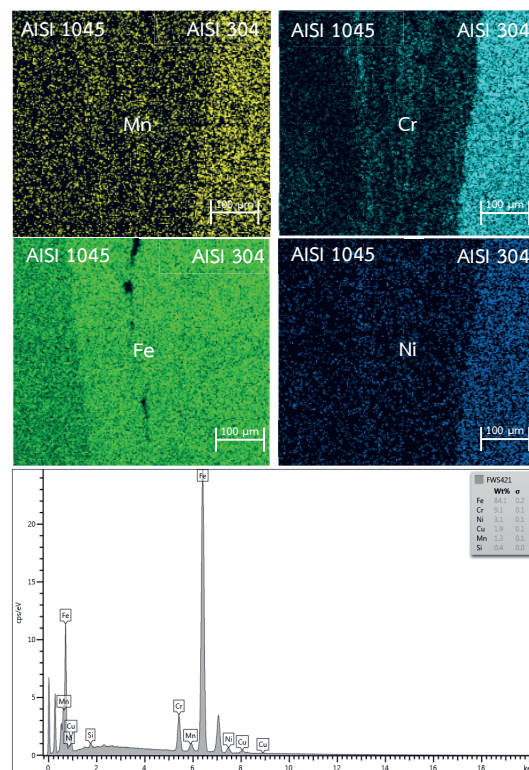
โครงสร้างจุลภาค SEM ของรอยเชื่อมที่เวลาอัด 3 วินาที และแรงดันอัด 40 บาร์ ดังรูปที่ 5 พบว่า การเกิดขึ้นของเฟส δ - Ferrite ประการแรกเป็นเฟสที่เกิดขึ้นเมื่อมีอุณหภูมิสูงซึ่งมักจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$) ดังนั้นจึงสามารถพบเฟส δ - Ferrite จำนวนมากได้ที่รอยต่อเชื่อมที่อุณหภูมิสูงสุด โดยทั่วไปในรอยเชื่อมของวัสดุที่คล้ายกัน [23, 26-28] เนื่องจากค่าการนำความร้อนของเหล็กกล้าคาร์บอน (AISI 1045) นั้นสูงกว่าเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304) และประการที่สองเฟสตั้งต้นของ Ferrite ในเนื้อวัสดุเดิมของเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304) สามารถตกตะกอนได้ภายใต้อิทธิพลของความร้อนและการเปลี่ยนรูปเชิงพลาสติก การสลายตัวของ δ - Ferrite คือ การสลายตัวของยูเทคตอยด์ (Eutectoid) [29]

การทำแผนที่องค์ประกอบ X-ray สำหรับองค์ประกอบอนุภาคของ แมงกานีส (Mn) โครเมียม (Cr) เหล็ก (Fe) และ นิกเกิล (Ni) ผสมผสาน

(Interface) ของรอยเชื่อมที่กระทำด้วยสภาวะความดันในการอัด 40 บาร์ การปรากฏนี้ค่อนข้างชัดเจนและสอดคล้องกันด้วยการสแกนอนุภาค ดังรูปที่ 6 พบว่าในบริเวณรอยเชื่อมจะพบอนุภาคของ Mn Cr และ Ni กระจุกกระจายทั่วบริเวณ เนื่องมาจากกระบวนการเชื่อมเสียดทาน



รูปที่ 5 โครงสร้างจุลภาค SEM ของรอยเชื่อม



รูปที่ 6 EDX ของรอยเชื่อมที่ความดันในการอัด 40 บาร์ และเวลาในการอัด 3 วินาที

โดยเฉพาะอนุภาค Cr จะเห็นได้ชัดว่า มีการแทรกตัวเข้าไปในฝั่งของด้านเหล็กกล้า คาร์บอน (AISI 1045) เนื่องมาจากกระบวนการ เชื่อมเสียดทาน และบริเวณความหนาแน่นของ อนุภาค Fe จะมีมากในด้านเหล็กกล้าคาร์บอน (AISI 1045) และมีน้อยลงในด้านเหล็กกล้าไร้ สนิม (AISI 304) ซึ่งเป็นผลมาจากส่วนผสมทาง เคมีของวัสดุทั้งสองนั่นเอง

3.4. ผลการทดสอบความแข็งแรงดึง ของรอยเชื่อมเสียดทาน เป็นค่าเฉลี่ยของทั้ง 3 ซ้ำ 9 ตัวอย่าง ดังตารางที่ 2

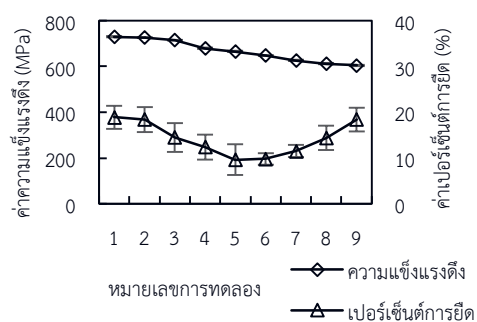
ตารางที่ 2 ค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อม

หมายเลขการ ทดลอง	ความแข็งแรงดึง (MPa)	ความเค้นคราก (MPa)	การยืดตัว (%)
1	729.8	518.8	18.9
2	726.1	469.1	18.4
3	715.3	630.6	14.5
4	678.9	484.1	12.4
5	665.0	470.0	9.6
6	647.9	578.3	9.8
7	625.8	561.3	11.5
8	611.8	494.6	14.4
9	605.2	570.6	18.4
AISI 1045 (BM)	712.38	460.12	13.89
AISI 304 (BM)	809.59	741.67	27.78

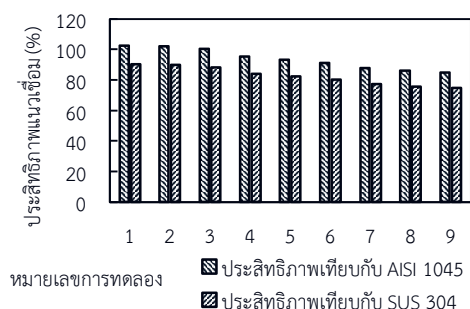
ความแข็งแรงดึงและการยืดตัวใน ปัจจัยการเชื่อมที่แตกต่างกัน บ่งชี้ว่ามีความสัมพันธ์ที่ ดีระหว่างสมบัติความแข็งแรงดึงและปัจจัยการเชื่อม ด้วยแรงเสียดทาน การเพิ่มขึ้นของแรงเสียดทานที่ ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึงและการยืดตัว ซึ่งมี อิทธิพลมาจากปัจจัยแรงดันอัดและเวลาอัด ดังนั้น แรงดันอัดและเวลาอัดที่เพียงพอ และแรงเสียดทานที่ เหมาะสมมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการปรับปรุง สมบัติทางกลของรอยเชื่อม สำหรับรูปแบบของความ แข็งแรงดึงและการยืดตัวที่มีแรงดันอัดไม่เหมาะสม จะมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มขึ้นแรงดันอัด สิ่งนี้ชี้ให้เห็น

ว่าแรงดันอัดที่สูงขึ้นจะส่งผลให้สมบัติทางกลลดลง สำหรับการศึกษานี้

ผลกระทบของแรงดันอัดที่ส่งผลต่อ ค่าความแข็งแรงดึงในการเชื่อมเสียดทาน ดังรูปที่ 7 (ก) พบว่า การเปลี่ยนแปลงของแรงดันอัดทำให้เกิด การเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงดึงในรอยเชื่อม โดยมี ค่าความแข็งแรงดึงลดลง เมื่อผลกระทบของแรงดัน อัดเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยต่ำสุด 605.2 เมกะปาสคาล (MPa) ที่แรงดันอัด 60 บาร์ และเวลาอัด 7 วินาที ส่วนค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยสูงสุด 729.8 เมกะปาสคาล ที่แรงดันอัด 40 บาร์ และเวลาอัด 3 วินาที ยิ่งไปกว่านั้นรอยเชื่อมที่มีความแข็งแรงดึง สูงสุดยังแสดงถึงเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่ดีที่สุด โดยมี ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว 18.9 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งบ่งชี้ว่า รอยเชื่อมสามารถรองรับค่าความแข็งแรงสูงและ ความเหนียวได้ดี



(ก) ค่าความแข็งแรงดึงของการเชื่อมเสียดทาน



(ข) ประสิทธิภาพแนวเชื่อม

รูปที่ 7 ค่าความแข็งแรงดึงของแนวเชื่อม

นอกจากนี้ประสิทธิภาพรอยเชื่อมเมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อโลหะเดิม ดังรูปที่ 7 (ข) ปัจจัยที่มีค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยมากที่สุดมีค่าประสิทธิภาพรอยเชื่อมเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าคาร์บอน (AISI 1045) มีค่าเท่ากับ 102.4 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304) มีค่าเท่ากับ 90.1 เปอร์เซ็นต์

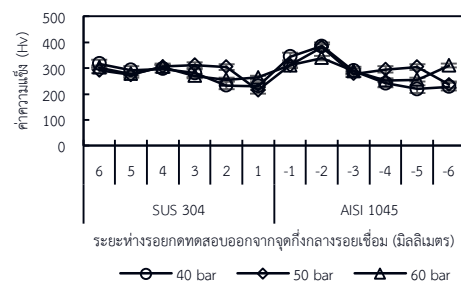
โดยทั่วไปแรงดันสูงส่งผลให้มีความเหนียวและความแข็งแรงดึงสูง แต่ถ้าชิ้นงานมีโครงสร้างที่ละเอียดมีความแข็งแรงสูงและมีความเหนียวต่ำในขณะที่โครงสร้างจุลภาคหยาบมีแนวโน้มย้อนกลับ [19] จุดขาดของการทดสอบความแข็งแรงดึงจะพบที่บริเวณ FPDZ และบริเวณ DZ ใกล้กับรอยเชื่อม ปัจจัยของการ บ่งชี้ว่ามีความสัมพันธ์ที่ดีระหว่างสมบัติความแข็งแรงดึงกับปัจจัยของการเชื่อมเสียตทาน แรงดันอัดและเวลาอัด เป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึง นอกจากนี้ยังมีปัจจัยประกอบอื่น ๆ ที่มีส่วนร่วมต่อการปรับปรุงสมบัติทางกลของรอยเชื่อม คือ เวลาเสียตทานที่เพียงพอและแรงดันเสียตทานที่เหมาะสมก็มีความสำคัญเช่นกัน วัสดุทั้งสองถูกเชื่อมติดกันอย่างแน่นหนาเนื่องจากการเปลี่ยนรูปเชิงพลาสติกที่มีปริมาณเพียงพอและมีช่วงอุณหภูมิที่ 780-800 °C เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการเชื่อมนี้ ยิ่งไปกว่านั้นที่อุณหภูมิในรอยเชื่อมต่ำจะทำให้วัสดุทั้งสองชนิดมีความเครียดที่สูงและมีการเพิ่มขึ้นของการตกผลึกของเกรนแบบพลวัต [30]

3.5. ผลการทดสอบความแข็งแรงของรอยเชื่อมเสียตทาน แสดงดังรูปที่ 8 - 10

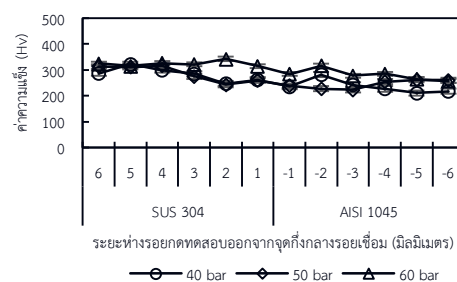
3.5.1 ค่าความแข็งแรงรอยเชื่อมที่เวลาตัน 3 วินาที ดังรูปที่ 8 มีค่าความแข็งแรงเฉลี่ยสูงสุด เท่ากับ 385.3 HV ที่แรงดันอัด 40 บาร์ และค่าความแข็งแรงเฉลี่ยน้อยสุดเท่ากับ 219.7 HV ที่แรงดันอัด 40 บาร์

3.5.2 ค่าความแข็งแรงรอยเชื่อมที่เวลาตัน 5 วินาที ดังรูปที่ 9 มีค่าความแข็งแรงเฉลี่ยสูงสุด เท่ากับ 342.7 HV ที่แรงดันอัด 60 บาร์ และค่าความแข็งแรงเฉลี่ยน้อยสุดเท่ากับ 211.1 HV ที่แรงดันอัด 40 บาร์

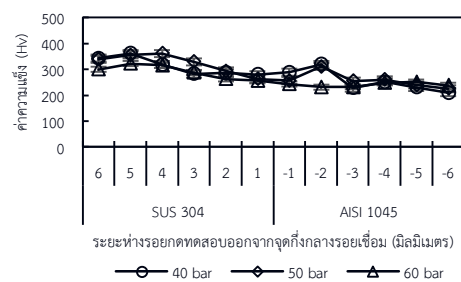
3.5.3 ค่าความแข็งแรงรอยเชื่อมที่เวลาตัน 7 วินาที ดังรูปที่ 10 มีค่าความแข็งแรงเฉลี่ยสูงสุด เท่ากับ 362.1 HV ที่แรงดันอัด 40 บาร์ และค่าความแข็งแรงเฉลี่ยน้อยสุดเท่ากับ 209.3 HV ที่แรงดันอัด 40 บาร์



รูปที่ 8 ค่าความแข็งแรงรอยเชื่อมที่เวลาตัน 3 วินาที



รูปที่ 9 ค่าความแข็งแรงรอยเชื่อมที่เวลาตัน 5 วินาที



รูปที่ 10 ค่าความแข็งแรงรอยเชื่อมที่เวลาตัน 7 วินาที

ค่าความแข็งมีการปรับเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มแรงดันอัดมากขึ้น จากข้อสังเกตในสภาวะของเวลาอัดที่ 3 และ 5 วินาที ซึ่งเกิดจากการการเปลี่ยนรูปเชิงพลาสติกที่เพิ่มขึ้น [31] นอกจากนี้เมื่อแรงดันอัดเพิ่มขึ้นทำให้วัสดุทั้งสองด้านมีค่าความแข็งลดลง ปรากฏการณ์นี้เกี่ยวข้องกับบริเวณ DZ ที่สั้นลงภายใต้แรงดันอัดที่สูงขึ้น [20]

ค่าความแข็งใกล้บริเวณรอยเชื่อมจะมีค่าสูงและลดลงไปตามค่าความแข็งเดิมของเนื้อโลหะเดิม ค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นเนื่องมาจากแรงดันที่เพิ่มขึ้น แต่ค่าความแข็งลดลงเมื่อเพิ่มเวลาดันมากเกินไป ค่าความแข็งสูงสุดที่ได้รับในบริเวณใกล้เคียงกับรอยเชื่อม [19] ซึ่งการเพิ่มขึ้นนี้สามารถอธิบายได้จากการก่อตัวของมาร์เทนไซต์ที่รอยเชื่อมที่ถูกสร้างขึ้นเนื่องจากวัสดุได้รับความร้อนและการระบายความร้อนอย่างรวดเร็วในระหว่างกระบวนการเชื่อมเสียหายน การก่อตัวของมาร์เทนไซต์จะทำให้ลดสมบัติทางกลของการเชื่อมเสียหายน แต่อย่างไรก็ตามก็จะถูกควบคุมโดยปัจจัยของการเชื่อม จากผลการทดลองค่าความแข็งเฉลี่ยต่ำสุดในบริเวณรอยเชื่อมเท่ากับ 209.3 HV ที่เวลาอัด 7 วินาที และแรงดันอัด 40 บาร์ และค่าความแข็งเฉลี่ยสูงสุดในบริเวณรอยเชื่อมเท่ากับ 756.1 HV ที่เวลาอัด 7 วินาที และแรงดันอัด 60 บาร์

4. สรุปผลการทดลอง

4.1. การเกิดครีปของรอยเชื่อม (Weld Flashes) มีขนาดมากขึ้นเมื่อมีแรงดันอัดสูงขึ้น และน้อยลงเมื่อมีแรงดันอัดต่ำลง

4.2. โครงสร้างบริเวณ FPDZ มีลักษณะเป็นเกรนละเอียด การจัดเรียงตัวเป็นแถวในทิศทางหมุนเดียวกันที่มีผลมาจากความเร็วหมุนเชื่อม แรงดันอัด และเวลาอัดของการเชื่อมเสียหายน

4.3. ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 729.8 เมกะปาสคาล ที่แรงดันอัด 40 บาร์ และเวลาอัด 3 วินาที

4.4. ค่าความแข็ง มีอิทธิพลมาจากการเปลี่ยนแปลงแรงดันอัด เมื่อแรงดันอัดสูงขึ้นค่าความแข็งจะเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งของรอยเชื่อมสูงสุดเท่ากับ 756.1 HV ที่แรงดันอัด 60 บาร์ และเวลาอัด 7 วินาที

4. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณแผ่นดิน ประจำปี 2561 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Ananthapadmanaban D, Rao VS, Abraham N, Rao KP, A study of mechanical properties of friction welded mild steel to stainless steel joints. Mater Design. 2009;30(7):2642-6.
- [2] Hong M, Guoliang Q, Peihao G, Fei L, Xiangmeng M, Banglong F, Effect of post-weld heat treatment on friction welded joint of carbon steel to stainless steel. J Mater Process Tech. 2016;227:24-33.
- [3] Tavares SSM, Fruchart D, Miraglia S, A magnetic study of the reversion of martensite α' in a 304 stainless steel. J Alloy Compd. 2000;307(1-2):311-7.
- [4] Sahin M, Characterization of properties in plastically deformed austenitic-

- stainless steels joined by friction welding. *Mater Design*. 2009;30(1): 135-144.
- [5] Guilong W, Jinglong L, Jiangtao X, Wei Z, Fusheng Z, Study on microstructure evolution of AISI 304 stainless steel joined by rotary friction welding. *Weld World*. 2018;62(6):1187-93.
- [6] Sathiya P, Aravindan S, Haq, AN, Some experimental investigations on friction welded stainless steel joints. *Mater Design*. 2008;29(6):1099-109.
- [7] Kimura M, Inoue H, Kusaka M, Kaizu K, Fuji A, Analysis Method of Friction Torque and Weld Interface Temperature during Friction Process of Steel Friction Welding. *J Solid Mech Mater*. 2010;4(3):401-13.
- [8] Uday MB, Ahmad Fauzi, MN, Zuhailawati H, Ismail AB, Advances in friction welding process: a review. *Sci Technol Weld Join*. 2010;15(7):534-58.
- [9] Sahin M, Evaluation of the joint-interface properties of austenitic-stainless steels (AISI 304) joined by friction welding. *Mater Design*. 2007;28(7):2244-50.
- [10] Kurt B, The interface morphology of diffusion bonded dissimilar stainless steel and medium carbon steel couples. *J Mater Process Tech*. 2007;190(1-3): 138-41.
- [11] Thomas WM, Nicholas ED, Needham JC, Murch MG, Temple-Smith P, Dawes CJ, Friction stir butt welding. Patent. 1991 ;No. PCT/GB92/02203.
- [12] Sketchley PD, Threadgill PL, Wright IG, Rotary friction welding of an Fe3Al based ODS alloy. *Mater Sci Eng A*. 2002;329-331:756-62.
- [13] Bhamji I, Preuss M, Thradgill PL, Addison AC, Solid state joining of metals by linear friction welding : a literature review. *Mater Sci Tech*. 2011;27(1):2-12.
- [14] Alberti N, Fratini L, Friction stir welding: a solid state joining process. *Adv Mech Mater*. 2005;486:67-86.
- [15] Sahin M, Friction welding of different materials, *Inter Scien Con. Gabrovo, Bulgaria*, 2010;131-34.
- [16] Shubhavardhan RN, Surendran S, Friction welding to join dissimilar metals. *Int J Emer Tech Adv Eng*. 2012;2:200-10.
- [17] Sahinh M, Joining of stainless-steel and aluminium materials by friction welding. *Int J Adv Manuf Tech*. 2009;41(5-6):487-97.
- [18] Ambroziak A, Korzeniowski M, Kustron P, Winnicki M, Sokolowski P,

- Harapinska E, Friction welding of aluminium and aluminium alloys with steel, *Adv Mater Sci Eng*. 2014;1-15.
- [19] Satyanarayana VV, Madhusudhan RG, Mohandas T, Dissimilar metal friction welding of austenitic-ferritic stainless steels. *J Mater Process Tech*. 2005;160(2):128-37.
- [20] Ma H, Qin G, Geng P, Li F, Fu B, Meng X, Microstructure characterization and properties of carbon steel to stainless steel dissimilar metal joint made by friction welding. *Mater Des*. 2015;86:587-97.
- [21] Mumin S, Joining with friction welding of high-speed steel and medium-carbon steel. *J Mater Process Tech*. 2005;168:202-10.
- [22] Gawhar IK, Sherko AB, Efficiency of dissimilar friction welded 1045 medium carbon steel and 316L austenitic stainless steel joints, *J mater res technol*. 2019;Article in Press.
- [23] Ji S, Liu J, Yue Y, Lu Z, Fu L, 3D numerical analysis of material flow behavior and flash formation of 45# steel in continuous drive friction welding, *Trans Nonferrous Metals Soc China*. 2012;22:s528-s33.
- [24] Li P, Li J, Salman M, Liang L, Xiong J, Zhang F, Effect of friction time on mechanical and metallurgical properties of continuous drive friction welded Ti6Al4V/SUS321 joints. *Mater Des*. 2014;56:649-56.
- [25] Ma H, Qin G, Geng P, Li F, Meng X, Fu B, Effect of post-weld heat treatment on friction welded joint of carbon steel to stainless steel. *J Mater Process Technol*. 2016;227:24-33.
- [26] Li W, Wang F, Modeling of continuous drive friction welding of mild steel. *Mater Sci Eng A*. 2011;528:5921-26.
- [27] Bhamji I, Preuss M, Threadgill PL, Moat RJ, Addison AC, Peel MJ, Linear friction welding of AISI 316L stainless steel. *Mater Sci Eng A*. 2010;528:680-90.
- [28] Das S, Mukherjee M, Pal TK, Effect of grain boundary precipitation and δ -ferrite formation on surface defect of low nickel austenitic stainless steels. *Eng Fail Anal*. 2015;54:90-102.
- [29] Lee KM, Cho HS, Choi DC, Effect of isothermal treatment of SAF 2205 duplex stainless steel on migration of δ/γ interface boundary and growth of

austenite. J Alloys Compd. 1999;
285(1):156-61.

[30] Mirzadeh H, Roostaei M, Parsa MH, Mahmudi R, Rate controlling mechanisms during hot deformation of Mg-3 Gd-1 Zn magnesium alloy: Dislocation glide and climb, dynamic recrystallization, and mechanical twinning. Mater Des. 2015;68:228-31.

[31] Moteshakker A, Danaee I, Moeinifar S, Ashrafi A, Hardness and tensile properties of dissimilar welds joints between SAF 2205 and AISI 316L. Sci Technol Weld Join. 2016;21:1-10.

อินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบที่ 19 ระดับ 3 เฟส ที่มีความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมต่ำ

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

^{1*} ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

Received	: 8-Aug-2019
Revised	: 18-Sep-2019
Accepted	: 17-Oct-2019

บทคัดย่อ

การออกแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับที่ดีต้องให้รูปคลื่นแรงดันด้านออกมีระดับขั้นบันไดอยู่บนรูปคลื่นไซน์เปรียบเทียบทุกระดับ ผลที่เกิดขึ้นความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมต่ำ อินเวอร์เตอร์หลายระดับที่มีระดับสูงเมื่อถูกควบคุมด้วยวิธีสเปซเวกเตอร์ รูปคลื่นแรงดันออกที่ระดับขั้นบันไดสูงจะอยู่บนกรุปคลื่นไซน์เปรียบเทียบ ส่งผลให้ความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมสูง บทความนี้นำเสนออินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบที่ 19 ระดับ 3 เฟส ควบคุมด้วยวิธีสเปซเวกเตอร์แบบปรับตำแหน่งเวกเตอร์ เพื่อให้แรงดันระดับขั้นบันไดอยู่บนรูปคลื่นไซน์เปรียบเทียบทุกระดับ เวกเตอร์ถูกปรับจากแบบดั้งเดิม 18 ตำแหน่ง ตำแหน่งของเวกเตอร์ทำให้ทราบแรงดันดีซีลิงค์ของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ที่ใช้สำหรับออกแบบ โดยมีตำแหน่งมุมของการสวิตช์ทั้งหมด 54 สภาวะ ผลการทดลองเมื่อใช้อินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบที่ 19 ระดับ 3 เฟส ที่นำเสนอขับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 4 ขั้ว พิกัด $\frac{1}{4}$ แรงม้า ผลเกิดค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของแรงดันและกระแสอยู่ที่ 4.1% และ 1.1% ตามลำดับ

คำสำคัญ: อินเวอร์เตอร์หลายระดับ ความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม สเปซเวกเตอร์ แรงดันขั้น รูปคลื่นไซน์

3-phase 19-level T-type Multilevel Inverter Based Low Total Harmonic Distortion

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

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

Received	: 8-Aug-2019
Revised	: 18-Sep-2019
Accepted	: 17-Oct-2019

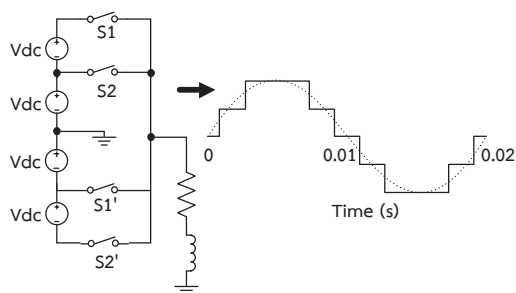
Abstract

A good multilevel inverter design, the output voltage waveform must be a staircase waveform that the step voltage is on the sinusoidal waveform referenced at all levels. As a result is a low total harmonic distortion. Multilevel inverter with high levels is controlled by a space vector method. The output waveform at the high staircase level is outside the sinusoidal waveform referenced resulting in a high harmonic distortion. This paper presents a 3-phase 19-level T-type multilevel inverter which is controlled by adjusting vector position of a space vector method. In order to control the step voltage to be on the sinusoidal waveform referenced at all levels; the vector has been adjusted 18 positions from the original position. The position of the vector indicates the DC link voltage of the 3-phase inverter used for the design which has the position of the switching angle of all 54 switches. The experimental results, a 3-phase induction motor with 4 poles rated ¼ HP is driven by the proposed 3-phase 19-level T-type multilevel inverter. The multilevel inverter produces the total harmonic distortion of the voltage and current at 4.1% และ 1.1%, respectively.

Keywords: multilevel inverter, total harmonic distortion, space vector, step voltage and sinusoidal waveform

1. บทนำ

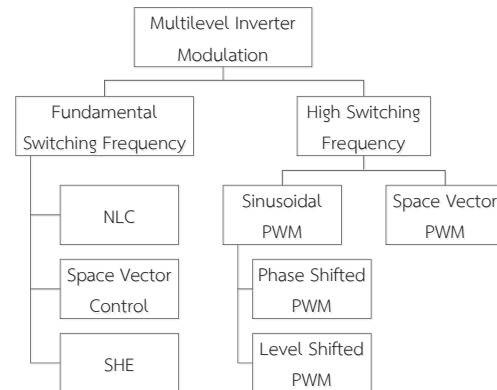
อินเวอร์เตอร์หลายระดับ (Multilevel Inverter : MLI) เป็นอินเวอร์เตอร์ที่ได้รับความนิยม เนื่องจากสามารถสร้างให้พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงได้ สัญญาณด้านนอกใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์ ส่งผลให้ความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (Total Harmonics Distortion : THD) ไม่สูงมาก หลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์หลายระดับคือ การควบคุมให้แรงดันไฟฟ้าเชื่อมโยงกระแสตรงหรือแรงดันดีซีลิงค์ (DC-link voltage : V_{dc}) เพิ่มขึ้นหรือลดลงเป็นขั้นบันไดตามสัญญาณรูปคลื่นไซน์ เปรียบเทียบควบคุมด้วยสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ตัวอย่างพื้นฐานโครงสร้างและสัญญาณด้านออกของอินเวอร์เตอร์ 5 ระดับ 1 เฟส ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้างและสัญญาณด้านออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ 5 ระดับ 1 เฟส [1]

โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์หลายระดับที่ได้รับความนิยมมีหลายแบบ [2] ได้แก่ แบบเอชบริดจ์ (H-bridge) แบบไดโอดคลัมป์ (diode-clamped) แบบฟลายอิงคาปาซิเตอร์ (flying capacitor) และแบบที (T-type) เป็นต้น การสร้างสัญญาณควบคุมการทำงานของสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในอินเวอร์เตอร์หลายระดับต้องคำนึงถึงความเหมาะสมของโครงสร้างอินเวอร์เตอร์ และความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม การสร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์สามารถแบ่งตามความถี่ของการสวิตช์ [3] คือ ความถี่การสวิตช์แบบมูลฐาน (fundamental switching

frequency) และความถี่การสวิตช์แบบสูง (high switching frequency) โดยสามารถแบ่งวิธีควบคุมการสวิตช์ได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 วิธีการควบคุมการสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ [2]

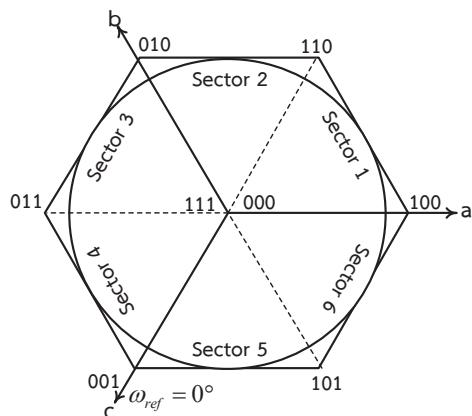
พิจารณาเฉพาะการสวิตช์ความถี่แบบมูลฐาน ซึ่งมีข้อดีคือมีค่าความสูญเสียของการสวิตช์ต่ำ [4] การสวิตช์ความถี่แบบมูลฐานในรูปที่ 2 แบ่งได้ 3 แบบ คือแบบ nearest level switching control (NLC) มีข้อดีคือสัญญาณด้านออกขั้นบันไดทุกระดับอยู่บนรูปคลื่นไซน์ เปรียบเทียบ ความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมต่ำ ข้อจำกัดคือไม่สามารถนำไปใช้กับอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิด 3 เฟสได้ เนื่องจากโครงสร้างอินเวอร์เตอร์ที่ออกแบบต้องสามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าเชื่อมโยงกระแสตรงพร้อมกันในทุกสถานะของการสวิตช์ [5] แบบ space vector switching control (SVC) มีข้อดีคือจำนวนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์น้อยกว่าแบบ NLC แต่ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมสูงกว่าแบบ NLC [6] และแบบ selective harmonic elimination (SHE) เป็นวิธีการที่เลือกกำจัดฮาร์มอนิกที่ต้องการ แต่มีวิธีการที่ซับซ้อนต้องใช้สมการแบบไม่เชิงเส้นในการวิเคราะห์ [7]

อินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบที เป็นหนึ่งในโครงสร้างที่นิยมนำไปประยุกต์ใช้กับ

แรงดันไฟฟ้าต่ำ เนื่องจากให้ประสิทธิภาพสูงเมื่อควบคุมความถี่การสวิตช์แบบมูลฐาน มีค่าการสูญเสียในการสวิตช์ต่ำ [8] การสวิตช์แบบ SVC สัญญาณด้านออกแบบขั้นบันไดของอินเวอร์เตอร์ที่ระดับสูงกว่า 13 ระดับ จะเริ่มไม่อยู่บนรูปคลื่นไซน์เปรียบเทียบส่งผลให้ความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมสูง บทความนี้นำเสนอโครงสร้างอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบที่ 19 ระดับ 3 เฟส การออกแบบมีความสัมพันธ์กับการควบคุมการสวิตช์ให้ได้สัญญาณด้านออกแบบขั้นบันไดอยู่บนรูปคลื่นไซน์เปรียบเทียบทุกระดับ วิธีการควบคุมการสวิตช์ประยุกต์มาจากการสวิตช์แบบ SVC ซึ่งผลที่ได้จะทำให้ค่าความเพี้ยนของฮาร์มอนิกรวมต่ำ

2. หลักการควบคุมการสวิตช์แบบ SVC

พื้นฐานการสร้างแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์แบบที่ 3 ระดับ 3 เฟส ควบคุมการสวิตช์แบบ SVC ดังแสดงในรูปที่ 3

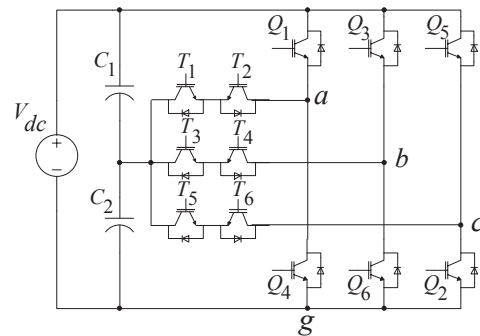


รูปที่ 3 แผนภาพ SVC ควบคุมอินเวอร์เตอร์ 3 ระดับ

ตำแหน่งบนเซกเตอร์หกเหลี่ยม คือจำนวนสถานะของการสวิตช์ (switching state : ss) ใน 1 วงจักร มีจำนวนทั้งหมด 6 สถานะสามารถหาได้จากสมการที่ (1) วงกลมในเซกเตอร์ 6 เหลี่ยม คือขนาดแรงดันของสัญญาณรูปคลื่นไซน์เปรียบเทียบ

$$ss = 3(m - 1) \quad (1)$$

โดยที่ m คือจำนวนระดับของอินเวอร์เตอร์หลายระดับ



รูปที่ 4 อินเวอร์เตอร์แบบที่ 3 ระดับ 3 เฟส [9]

โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์แบบที่ 3 ระดับ 3 เฟส ดังรูปที่ 4 สามารถหาแรงดันระหว่างสายและแรงดันเฟสได้จากสมการที่ (2) และ (3) ตามลำดับ [10]

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \end{bmatrix} \quad (3)$$

โดยที่

V_{ab} คือแรงดันระหว่างสาย a และ b
 V_{bc} คือแรงดันระหว่างสาย b และ c
 V_{ca} คือแรงดันระหว่างสาย c และ a
 V_{an} คือแรงดันเฟส a เทียบกับ n
 V_{bn} คือแรงดันเฟส b เทียบกับ n
 V_{cn} คือแรงดันเฟส c เทียบกับ n

V_{ag} คือแรงดันชั่ว a เทียบกับ g

V_{bg} คือแรงดันชั่ว b เทียบกับ g

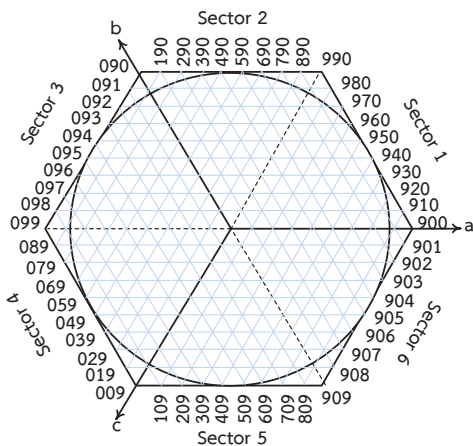
V_{cg} คือแรงดันชั่ว c เทียบกับ g

เลข 3 ตัวที่ตำแหน่งต่างๆ บนเซกเตอร์ คือแรงดันดีซีลิงค์ต่อหน่วยหรือแรงดันต่อหน่วย ที่ชั่ว a, b, c เทียบกับจุด g เช่น ตำแหน่ง เซกเตอร์ที่ 180 องศา คือ $V(110)$ ดังนั้น

$$V_{ag} = 1V_{dc}, V_{bg} = 1V_{dc} \text{ และ } V_{cg} = 0V_{dc}$$

หลักการออกแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบที่ชนิด 3 เฟส ให้มีค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมต่ำ ต้องกำหนดตำแหน่งต่างๆ บนเซกเตอร์ให้อยู่ใกล้กับวงกลมมากที่สุด ผลที่ได้คือแรงดันด้านออกขึ้นบันไดของอินเวอร์เตอร์จะอยู่บนรูปคลื่นไซน์เปรียบเทียบทุกระดับ

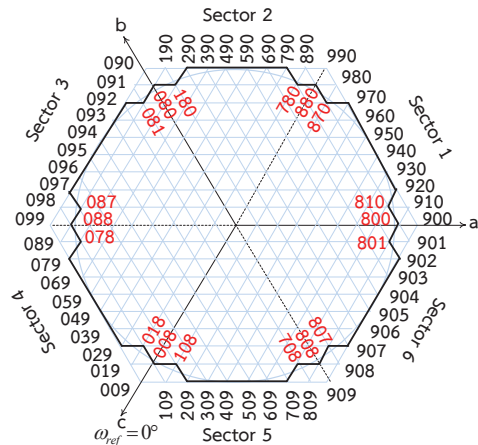
แผนภาพ SVC ในรูปที่ 5 สำหรับใช้ควบคุมการสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์ 19 ระดับ จำนวนสภาวะของการสวิตช์ มีค่าเท่ากับ ตำแหน่งบนเซกเตอร์หกเหลี่ยมใน 1 วัฏจักร หาได้จากสมการที่ (1) มีจำนวนทั้งหมด 54 สภาวะ



รูปที่ 5 แผนภาพ SVC ควบคุมอินเวอร์เตอร์ 19 ระดับ

เพื่อที่จะออกแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบที่ 19 ระดับ 3 เฟส ให้มีค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมต่ำ ตำแหน่งเซกเตอร์ที่ต้องการทำการเปลี่ยนเพื่อให้อยู่ใกล้วงกลมมากที่สุด

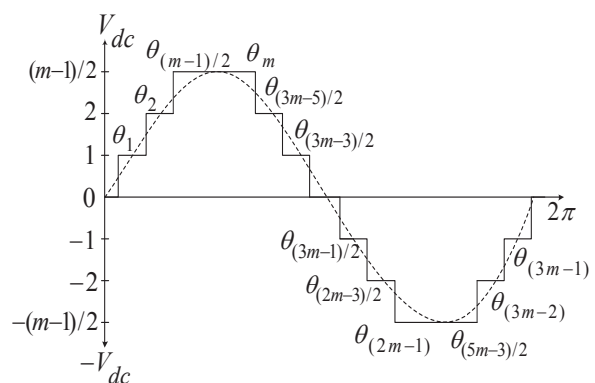
สามารถเปลี่ยนตำแหน่งเซกเตอร์ได้ 18 เซกเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 6 โดยประกอบไปด้วยเซกเตอร์ $V(008) V(108) V(708) V(808) V(807) V(801) V(800) V(810) V(870) V(880) V(780) V(180) V(080) V(081) V(087) V(088) V(078)$ และ $V(018)$



รูปที่ 6 แผนภาพ SVC สำหรับอินเวอร์เตอร์ 19 ระดับ เมื่อเปลี่ยนตำแหน่งเซกเตอร์

ผลของการเปลี่ยนตำแหน่งเซกเตอร์ทำให้ทราบแรงดันดีซีลิงค์หรือแรงดันชั่วของอินเวอร์เตอร์ โดยจะถูกนำไปออกแบบในลำดับถัดไป

3. โครงสร้างอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบที่ 19 ระดับ 3 เฟส



รูปที่ 7 สัญญาณแรงดันขึ้นบันได m ระดับ

ระดับแรงดันขั้นบันไดของสัญญาณด้าน
ออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับสัมพันธ์กับมุม
ของการสวิตช์ (θ_i) โดยรูปที่ 7 แสดงสัญญาณ
ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ m ระดับ โดยมุมของ
การสวิตช์ในช่วง $0-2\pi$ มีค่า $\theta_1, \theta_2, \theta_3,$
 $\dots \theta_{3(m-1)}$

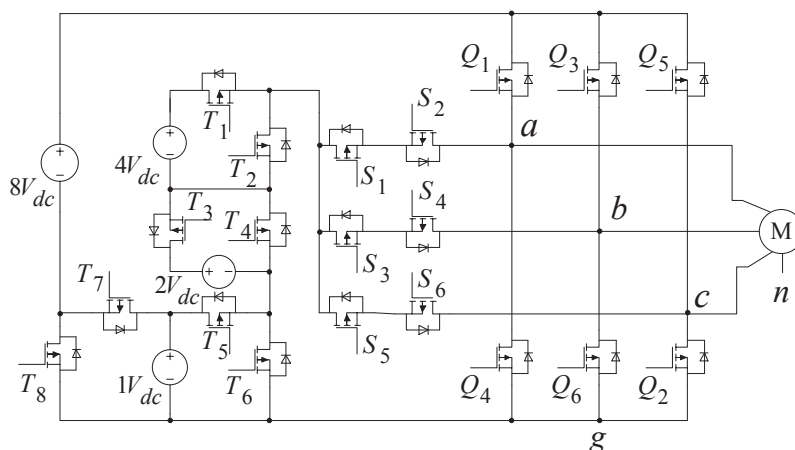
โครงสร้างอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบที่
19 ระดับ 3 เฟส ที่นำเสนอแสดงในรูปที่ 8
ประกอบด้วย 2 ส่วน ส่วนแรกคืออินเวอร์เตอร์
3 เฟส ($Q_1 - Q_6$) แต่ละกิ่งจะถูกต้องกับสวิตช์
แบบ 2 ทิศทาง ($S_1 - S_6$) มีลักษณะคล้ายรูปตัว
T ถูกหมุนไป 90 องศา โครงสร้างสวิตช์ 2
ทิศทางจะมีไดโอดบล็อกกิ้งสำหรับควบคุมทิศ

ทางการไหลของกระแส ส่วนที่สองคือส่วน
ควบคุมแรงดันดีซีลิงค์ ($T_1 - T_8$) สำหรับจ่าย
ให้กับอินเวอร์เตอร์แบบที่ ในช่วงคาบเวลา $0-2\pi$
จะมีสภาวะการสวิตช์มีทั้งหมด 54 สภาวะ
ดังแสดงในภาคผนวกรูปที่ 1(ผ)

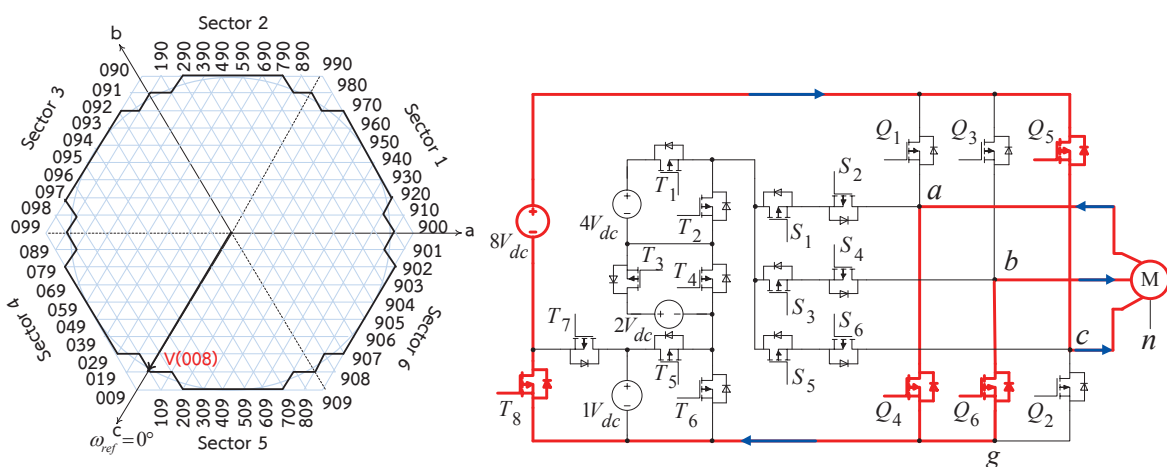
มุมของการสวิตช์แต่ละสภาวะสามารถ
หาได้จาก

$$\theta_i = \left(i - \frac{1}{2}\right) \times \left(\frac{360}{3(m-1)}\right) \quad (4)$$

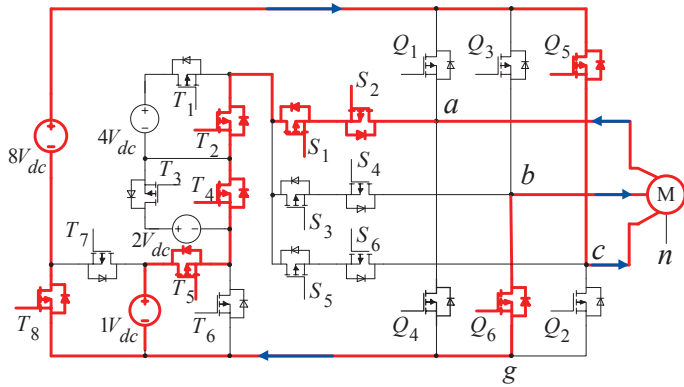
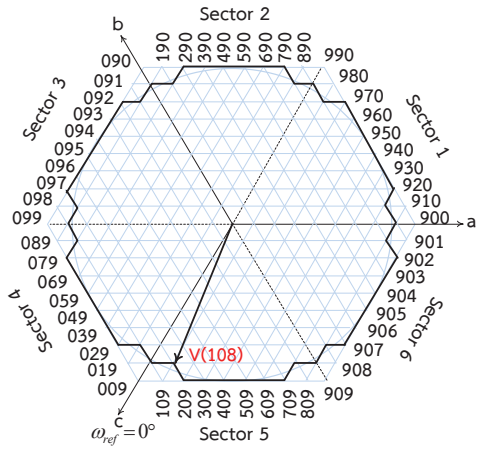
โดยที่ $i = 1, 2, 3, \dots 3(m-1)$



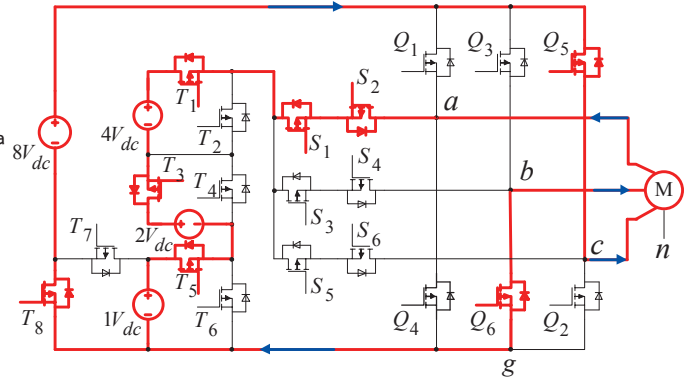
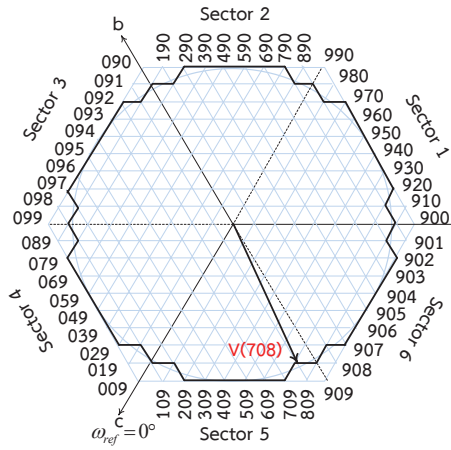
รูปที่ 8 โครงสร้างอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบที่ 19 ระดับ 3 เฟส



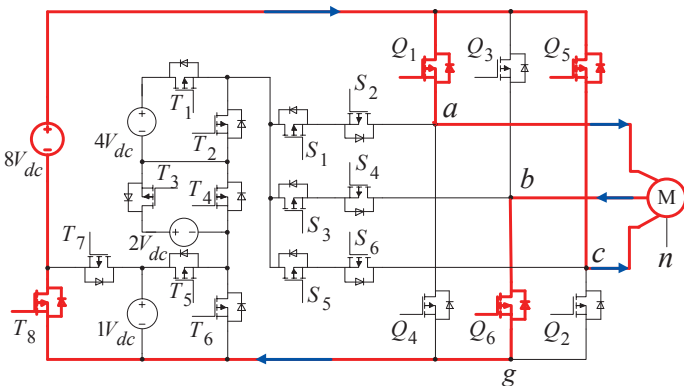
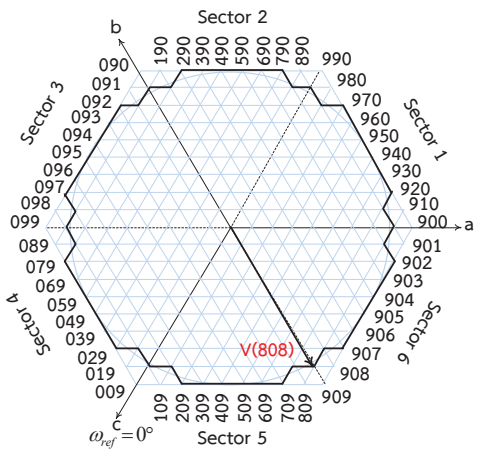
(ก) สภาวะ 1: ($V_{ag} = 0, V_{bg} = 0, V_{cg} = 8)V_{dc}$ และ ($V_{ab} = 0, V_{bc} = -8, V_{ca} = 8)V_{dc}$



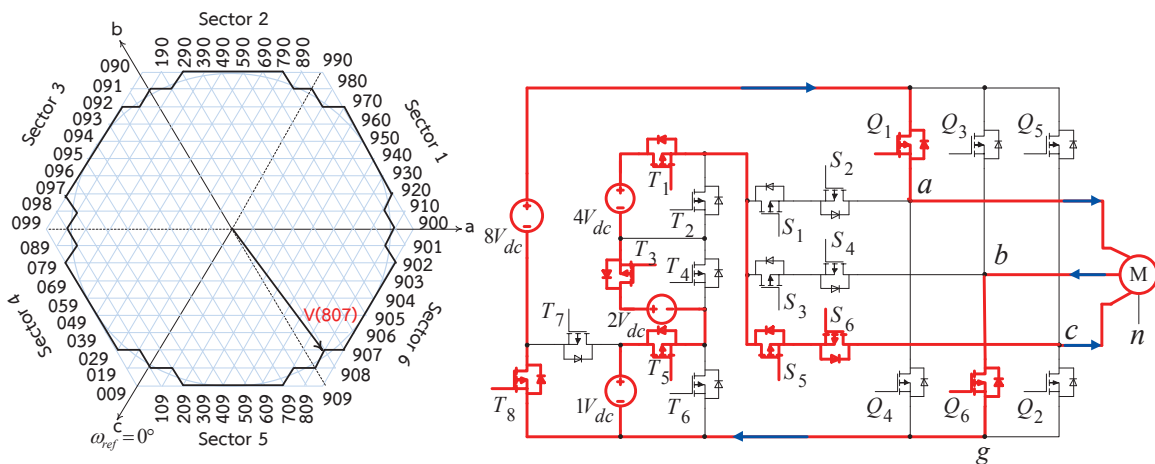
(ข) สภาวะ 2: ($V_{ag} = 1, V_{bg} = 0, V_{cg} = 8$) V_{dc} และ ($V_{ab} = 1, V_{bc} = -8, V_{ca} = 7$) V_{dc}



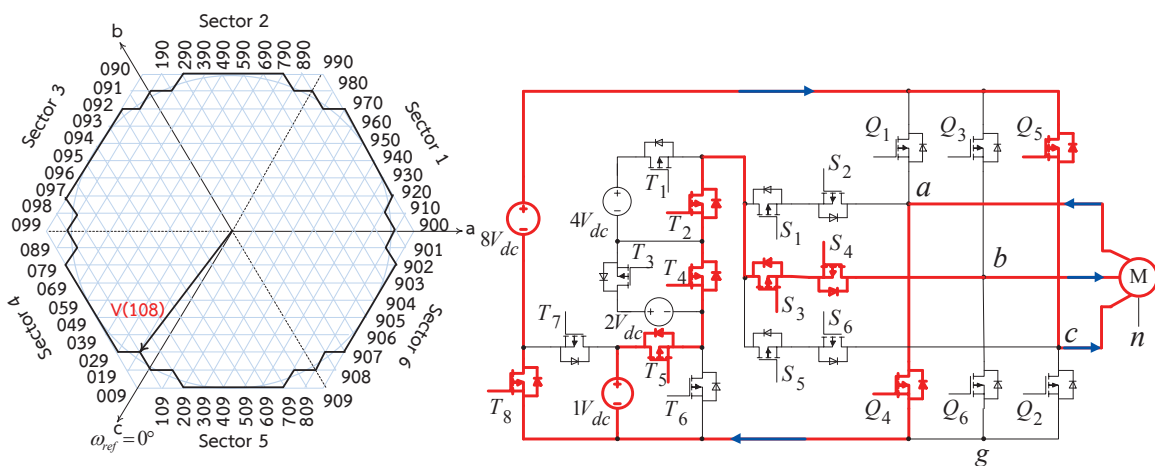
(ค) สภาวะ 9: ($V_{ag} = 7, V_{bg} = 0, V_{cg} = 8$) V_{dc} และ ($V_{ab} = 7, V_{bc} = -8, V_{ca} = 1$) V_{dc}



(ง) สภาวะ 10: ($V_{ag} = 8, V_{bg} = 0, V_{cg} = 8$) V_{dc} และ ($V_{ab} = 8, V_{bc} = -8, V_{ca} = 0$) V_{dc}



(จ) สภาวะ 11: ($V_{ag} = 8, V_{bg} = 0, V_{cg} = 7$) V_{dc} และ ($V_{ab} = 8, V_{bc} = -7, V_{ca} = -1$) V_{dc}



(ข) สภาวะ 54: ($V_{ag} = 0, V_{bg} = 1, V_{cg} = 8$) V_{dc} และ ($V_{ab} = -1, V_{bc} = -7, V_{ca} = 8$) V_{dc}

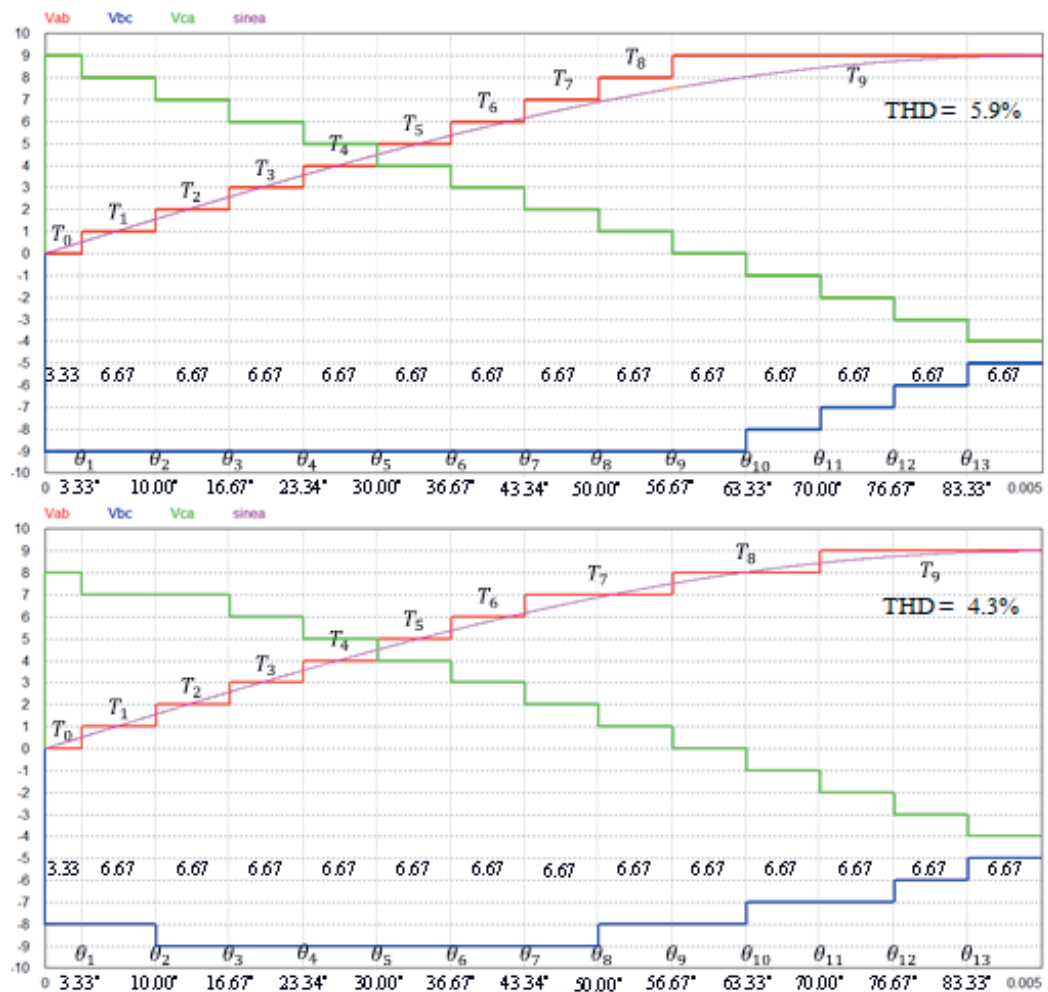
รูปที่ 9 การสวิตช์ที่ตำแหน่งเวกเตอร์ของสภาวะที่ 1 2 9 10 11 และ 54

ตัวอย่างการควบคุมสวิตช์ที่ตำแหน่งเวกเตอร์ของสภาวะที่ 1 2 9 10 11 และสภาวะที่ 54 โดยมีทิศทางการไหลของกระแส และค่าแรงดันระหว่างสายซึ่งคำนวณจากสมการที่ (2) ผลที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 9 (ก)-(ข) ตามลำดับ

พิจารณารูปคลื่นแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบที่ 19 ระดับ 3 เฟส ในรูปที่ 10 เมื่อควบคุมการสวิตช์แบบ SVC จะพบว่าระดับแรงดันขึ้นบันไดไม่ได้อยู่บนรูปคลื่นไซน์เปรียบเทียบทุกระดับ ($T_7 - T_9$ อยู่ นอก รูปคลื่นไซน์เปรียบเทียบ) แต่เมื่อมีการปรับเปลี่ยนตำแหน่งเวกเตอร์ 18 ตำแหน่ง ผลที่ได้คือระดับแรงดันขึ้นบันไดอยู่บนรูปคลื่นไซน์

เปรียบเทียบทุกระดับ โดยมุมของการสวิตช์ (θ_i) แต่ละสภาวะสามารถหาได้จากสมการ (2) โดยแต่ละสภาวะมีช่วงเวลาห่างกัน 6.67°

ผลจำลองการทำงานพบว่าแรงดันระหว่างสายด้านออกมีค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมอยู่ที่ 5.9% เมื่ออินเวอร์เตอร์ถูกควบคุมการสวิตช์แบบเวกเตอร์ดั้งเดิม แต่เมื่อมีการปรับตำแหน่งเวกเตอร์ใหม่ 18 ตำแหน่งดังที่ได้นำเสนอ ผลค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมลดลงอยู่ที่ 4.3% ผลที่ได้ยืนยันความถูกต้องของวิธีการที่นำเสนอ



รูปที่ 10 รูปคลื่นแรงดันด้านออก: ควบคุมแบบ SVC (บน) ปรับตำแหน่งเวกเตอร์ (ล่าง)



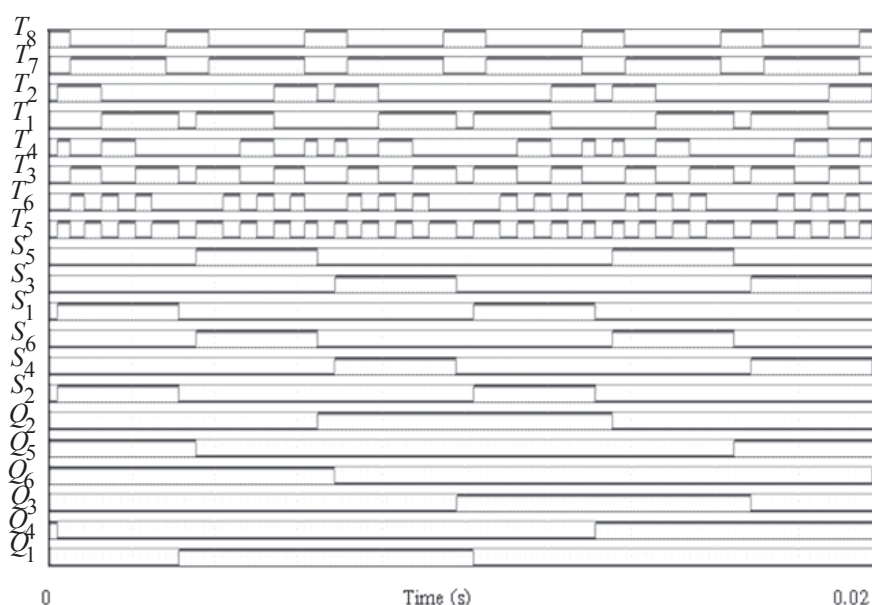
รูปที่ 11 ชุดทดลองต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบที่ 19 ระดับ 3 เฟส

4. ผลการทดลอง

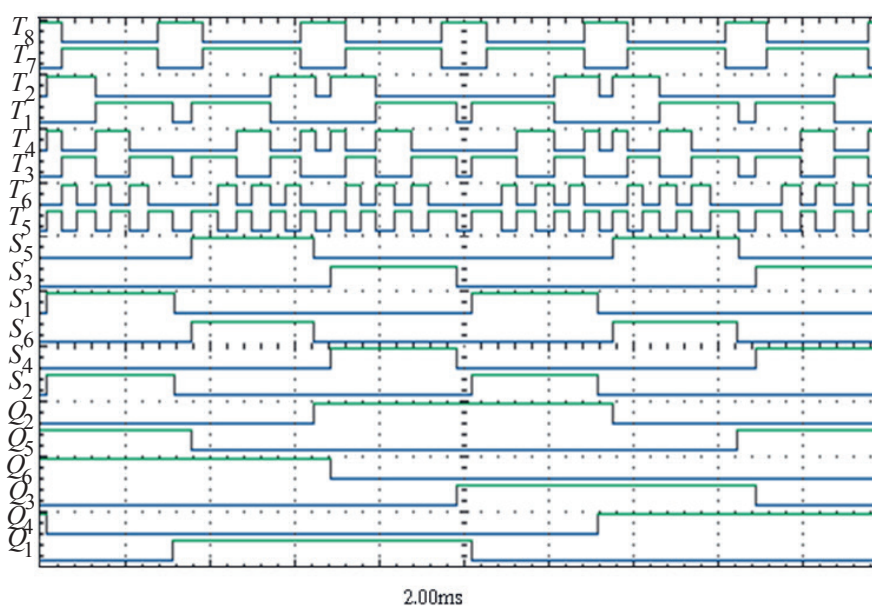
ชุดทดลองต้นแบบอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบที่ 19 ระดับ 3 เฟส ดังแสดงในรูปที่ 11 ควบคุมการสวิตช์แบบ SVC เมื่อปรับตำแหน่งเวกเตอร์ 18 ตำแหน่ง อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้เป็นสวิตช์คือ IRFP460 ตัวขับใช้ไอซี TLP250 แรงดันดีซีลิงค์ที่ใช้ $V_{dc} = 380/9$ V อุปกรณ์สร้างสัญญาณควบคุมสวิตช์คือตัวประมวลสัญญาณดิจิทัล 32 บิต เบอร์

TMS320F28335 โหลดที่ใช้คือมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 4 ขั้ว ¼ แรงม้า

รูปที่ 12(ก) และรูปที่ 12(ข) แสดงรูปคลื่นสัญญาณควบคุมอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ($Q_1 - Q_6$) สวิตช์แบบ 2 ทิศทาง ($S_1 - S_6$) และส่วนควบคุมแรงดันดีซีลิงค์ ($T_1 - T_8$) ซึ่งเกิดจากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSIM และได้จากการทดลองตามลำดับ

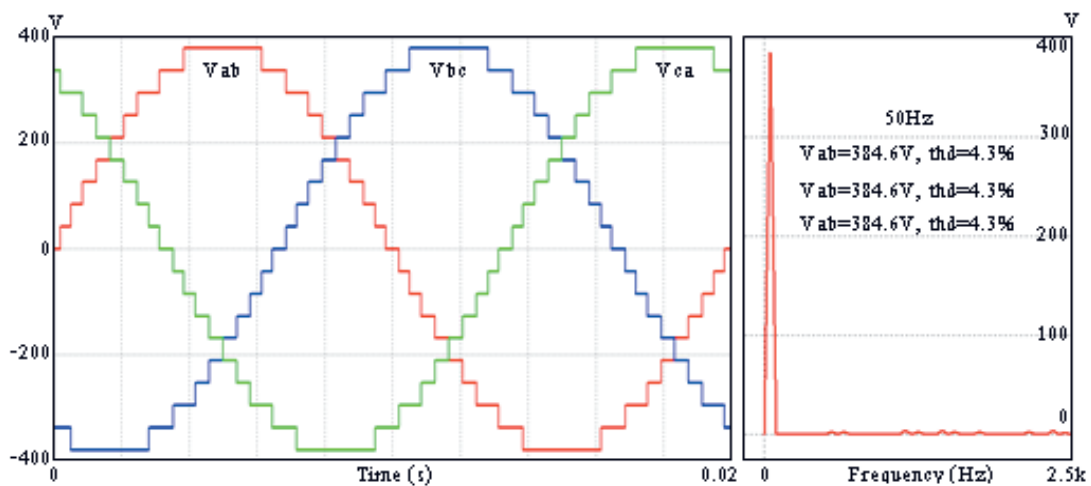


(ก) ผลจำลองการทำงาน

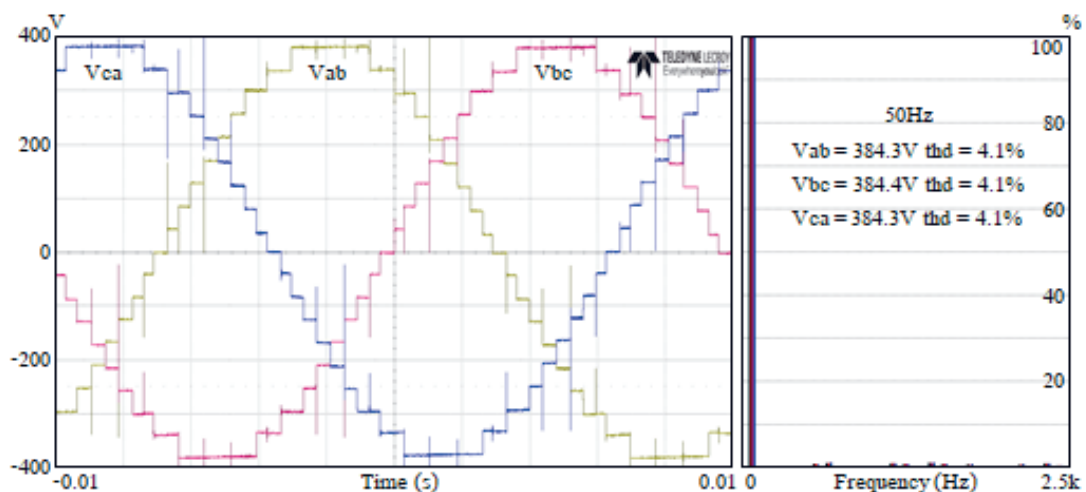


(ข) ผลการทดลอง

รูปที่ 12 สัญญาณควบคุมสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์



(ก) ผลจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSIM



(ข) ผลการทดลอง

รูปที่ 13 รูปคลื่นแรงดันระหว่างสายด้านออก

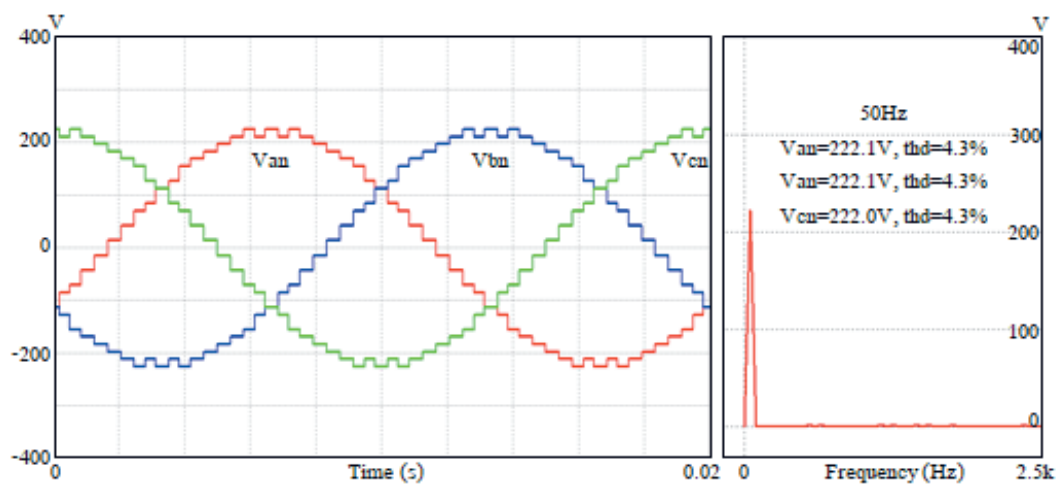
รูปคลื่นแรงดันระหว่างสายด้านออกซึ่งเป็นผลที่เกิดจากการจำลองการทำงานและการทดลอง ผลที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 13 โดยมีค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมอยู่ที่ 4.3% และ 4.1% ตามลำดับ

ผลจำลองการทำงานและผลการทดลองของรูปคลื่นแรงดันเฟสด้านออก ดังแสดงในรูปที่ 14 โดยมีค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมอยู่ที่ 0.9% และ 1.1% ตามลำดับ

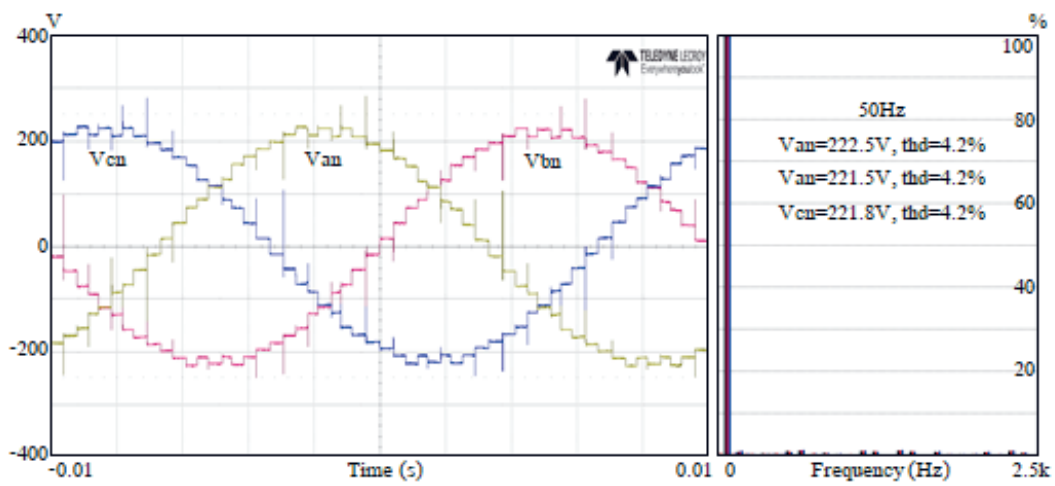
รูปที่ 15 แสดงรูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านโหลดมอเตอร์เหนี่ยวนำ ซึ่งเกิดจากผลจำลองการทำงานและผลการทดลอง โดยมีค่า

ความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมอยู่ที่ 0.9% และ 1.1% ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาในรูปที่ 10 ประกอบผลจำลองการทำงานพบว่าแรงดันระหว่างสายด้านออกมีค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมอยู่ที่ 5.9% เมื่ออินเวอร์เตอร์ถูกควบคุมการสวิตช์แบบเวกเตอร์ดั้งเดิม ในขณะที่เมื่อมีการปรับตำแหน่งเวกเตอร์ใหม่ดังที่ได้นำเสนอ ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมอยู่ที่ 4.3% เมื่อเปรียบเทียบจะพบว่าค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกส์รวมลดลง 27.12% ผลที่ได้ยืนยันความถูกต้องถึงวิธีการที่ได้นำเสนอ

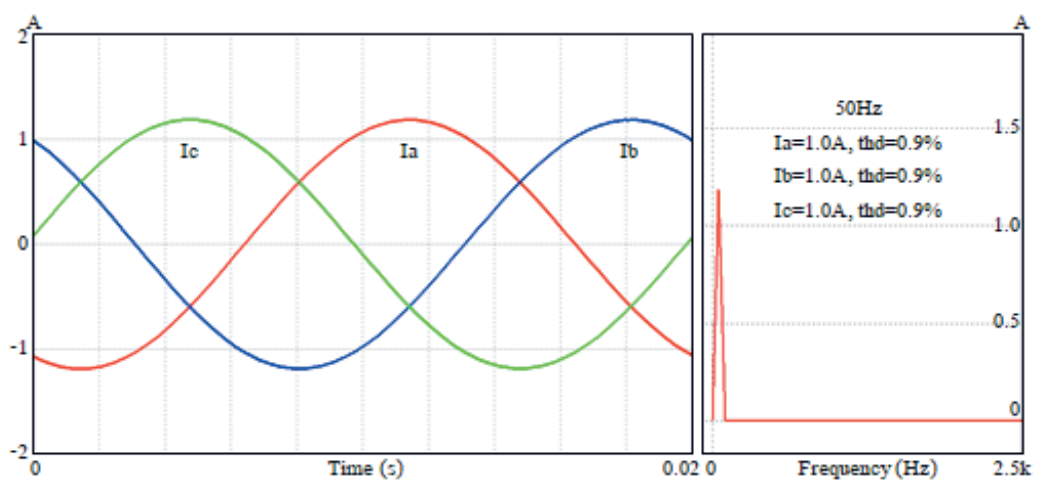


(ก) ผลจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSIM

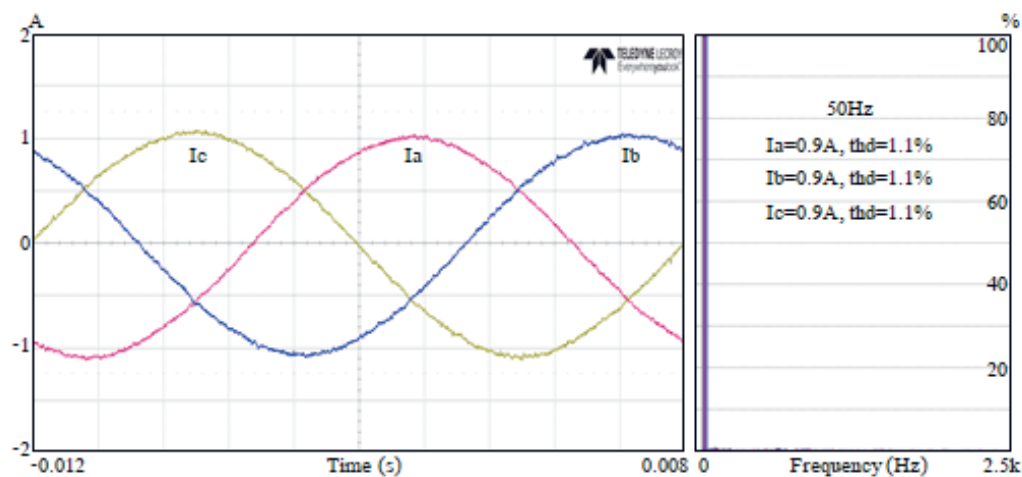


(ข) ผลการทดลอง

รูปที่ 14 รูปคลื่นแรงดันด้านออกระหว่างสาย



(ก) ผลจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSIM



(ข) ผลการทดลอง

รูปที่ 15 รูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านโหลด

5.สรุป

อินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบที่ 19 ระดับ 3 เฟสควบคุมด้วยวิธีสเปซเวกเตอร์ รูปคลื่นแรงดันออกที่ระดับขั้นบันไดที่ 7 (T_7) เป็นต้นไปจะอยู่นอกรูปคลื่นไซน์เปรียบเทียบ ส่งผลให้ความเพี้ยนฮาร์มอนิกสูง บทความนี้ตำแหน่งเวกเตอร์ถูกปรับจากแบบดั้งเดิม 18 ตำแหน่ง คือ V(008) V(108) V(708) V(808) V(807) V(801) V(800) V(810) V(870) V(880) V(780) V(180) V(080) V(081) V(087) V(088) V(078) และ V(018) เพื่อให้รูปคลื่นแรงดันขั้นบันไดอยู่บนรูปคลื่นไซน์เปรียบเทียบทุกระดับ ข้อจำกัดคือความยากสำหรับการออกแบบอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ต้องออกแบบให้ระดับแรงดันระหว่างสายด้านออกทั้ง 3 เฟสรวมกันเป็นศูนย์ทุกตำแหน่งของการสวิตช์ ตำแหน่งของเวกเตอร์ทำให้ทราบแรงดันดีซีลิงค์ของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส โดยมีตำแหน่งมุมของการสวิตช์ทั้งหมด 54 สภาวะ ผลที่ได้จากการทดลองกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส 4 ขั้ว พิกัด ¼ แรงม้า ค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดันและกระแสอยู่ที่ 4.1% และ 1.1% ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้ยืนยันความ

ถูกต้องของวิธีการปรับเปลี่ยนตำแหน่งเวกเตอร์ที่ได้นำเสนอ

โครงสร้างอินเวอร์เตอร์ที่นำเสนอมีวัตถุประสงค์เพื่อให้เกิดค่าของความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมต่ำ โดยใช้มอเตอร์พิกัด ¼ แรงม้า ความถี่ 50 Hz แบบไม่มีโหลดแทนการใช้โหลด R-L เนื่องจากดีซีลิงค์ที่ใช้ในการทดลองมีพิกัดกระแสไม่สูง ถ้าต้องการนำอินเวอร์เตอร์ไปขับมอเตอร์ที่ต่อโหลด จำเป็นต้องเพิ่มพิกัดกระแสของดีซีลิงค์ให้สูงขึ้น และควรทดลองที่ความถี่อื่นๆ สำหรับขับมอเตอร์เพื่อทดสอบการตอบสนองของอินเวอร์เตอร์

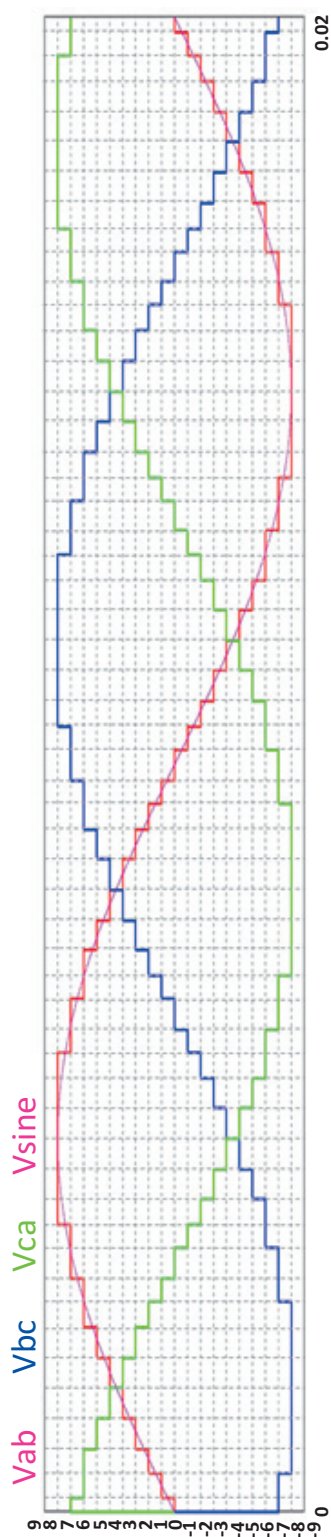
6.กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยการประยุกต์ใช้งานอิเล็กทรอนิกส์กำลังและการจัดการพลังงาน (PEAEM) คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา ที่สนับสนุนเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Yang JH, Le TV, Ibadullaev A, Park SJ. A study of TNPC type single-phase 5-level inverter for energy storage

- system. ITEC Asia-Pacific, 2016;346-350.
- [2] Rodriguez J, Lai JS, Peng FZ. Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002;49(4); 724-738.
- [3] Edpuganti A, Rathore AK. Fundamental switching frequency optimal pulse width modulation of medium-voltage cascaded seven-level inverter. IEEE Transactions on Industry Applications. 2015; 51(4);3485-3492.
- [4] Du Z, Tolbert LM, Ozpineci B, Chiasson JN. Fundamental frequency switching strategies of a seven-level hybrid cascaded H-bridge multilevel inverter. IEEE Transactions on Power Electronics. 2009;24(1);25-33.
- [5] Hu P, Jiang D. A level-increased nearest level modulation method for modular multilevel converters. IEEE Transactions on Power Electronics. 2015;30(4);1836-1842.
- [6] Gao L, Fletcher JE. A space vector switching strategy for three-level five-Phase inverter drives. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2010;57(7);2332-2343.
- [7] Ahmed M, Sheir A, Orabi M. Real-time solution and implementation of selective harmonic elimination of seven-Level multilevel inverter. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. 2017;5(4);1700-1709.
- [8] Alnamer SS, Mekhilef S, Mokhlis H. Proposed new N-multilevel family of topologies for T-type inverter. IEICE Electronics Express. 2017;14 (15);1-11.
- [9] Masaoud A, Ping HW, Mekhilef S, Taallah AS. New three-phase multilevel inverter with reduced number of power electronic components. IEEE Transactions on Power Electronics. 2014;29 (11);6018-6029.
- [10] Masaoud A, Ping HW, Mekhilef S, Taallah AS. New three-phase multilevel inverter with reduced number of power electronic components. IEEE Transactions on Power Electronics. 2014;29 (11);6018-6029.

[illegible]

ภาคผนวก : รูปที่ 1(ผ) สภาวะการสวิตช์ทั้งหมด 54 สภาวะ เมื่อปรับเปลี่ยนตำแหน่งเวกเตอร์ 18 ตำแหน่ง

รูปแบบบทความสำหรับ วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมนคลธัญบุรี

ปรกช สิริสุวณณ^{1*}, สุมณมัลย์ เนียมกลาง² และกุลยา สาริชีวิน³
porakoch.s@en.rmutt.ac.th^{1*}, sumonman.n@en.rmutt.ac.th², kullaya.s@en.rmutt.ac.th³

^{1*} ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

² ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

³ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวเกี่ยวกับรูปแบบและวิธีการส่งบทความเพื่อเสนอต่อกองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมนคลธัญบุรี ผู้ส่งบทความต้องยึดรูปแบบตามบทความนี้อย่างเคร่งครัด บทความใดที่มีรูปแบบไม่ถูกต้องจะถูกส่งคืนเพื่อทำการแก้ไขก่อนนำส่งผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ หากไม่ทำการแก้ไขให้ถูกต้องกองบรรณาธิการจะทำการตัดสิทธิ์การส่งบทความนี้ ทั้งนี้บทคัดย่อต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ แต่ละภาษาควรมีเพียงย่อหน้าเดียว และมีความยาวไม่เกิน 300 คำ

คำสำคัญ: วิธีการส่งบทความ รูปแบบบทความ ขนาดตัวอักษร รูปแบบตัวอักษร การเว้นบรรทัด

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

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

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

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

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

Abstract

This article describes a submission procedure and a format of the manuscript for the Journal of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi (JERMUTT). Authors are required to strictly follow the guideline provided here, otherwise, the manuscript will be returned for proper correction before to be reviewed by two referees who are specialists in that fields. If no completed on this step your manuscript will be rejected and cannot be considered again. So that an abstract should have had only one paragraph. Both Thai and English abstracts are required the length of all should not exceed 300 words.

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

1. ข้อกำหนดทั่วไป

บทความต้องประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ตามลำดับต่อไปนี้ คือ

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

2. คำแนะนำในการเขียนและพิมพ์

คำแนะนำทั่วไป

2.1. ชื่อเรื่อง/บทความ (Title) มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ควรสั้นและกระชับ แต่ครอบคลุมสาระทั้งเรื่องสื่อความหมายชัดเจน ไม่ควรใช้คำย่อ และวางกึ่งกลางหน้ากระดาษ

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 ควรเขียนให้สั้น และกระชับ

2.5. คำสำคัญ (Keywords) ให้ระบุไม่เกิน 3-5 คำ

2.6. บทนำ (Introduction) ส่วนนำจะเป็นส่วนที่ผู้เขียนจงใจให้ผู้อ่านเกิดความสนใจในเรื่องนั้นๆ วัตถุประสงค์ของงานวิจัย และข้อมูลทางวิชาการ

2.7. เนื้อหา (Text) บทความที่เสนอจะต้องพิมพ์เป็นภาษาไทย หรือภาษาอังกฤษตามรูปแบบที่กำหนด ซึ่งพร้อมที่จะนำไปถ่ายเพลท เพื่อพิมพ์ออฟเซตได้ทันที

การพิมพ์ให้พิมพ์ลงบนกระดาษ A4 โดยพิมพ์เป็น 2 คอลัมน์ตามรูปแบบบทความนี้ ขนาดของคอลัมน์เป็นไปตามที่กำหนด จะต้องพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์เลเซอร์ที่มีความละเอียดไม่น้อยกว่า 300 dpi.

ให้พิมพ์โดยไม่เว้นบรรทัด เมื่อจะขึ้นหัวข้อใหม่ให้เว้นบรรทัด 1 บรรทัด และจะต้องพิมพ์ให้เต็มคอลัมน์ก่อนที่จะขึ้นคอลัมน์ใหม่หรือขึ้นหน้าใหม่ ห้ามเว้นที่เหลือไว้ว่างเปล่า

การลำดับหัวข้อในส่วนเนื้อหาของเนื้อเรื่องนี้ ให้ใส่เลขกำกับโดยให้บทนำเป็นหัวข้อหมายเลข 1 และหากมีการแบ่งหัวข้อย่อย ก็ใช้เลขระบบทศนิยมกับหัวข้อย่อย เช่น 1.1 เป็นต้น

ตารางที่ 1 การตั้งค่าหน้ากระดาษ

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

ตารางที่ 2 ขนาดตัวอักษรและการเว้นระยะ
พิมพ์บทความภาษาไทยและภาษาอังกฤษด้วยตัวอักษร
รูปแบบ “TH SarabunPSK”

รายการ	ขนาด	ตำแหน่ง	ลักษณะ
ชื่อเรื่อง	20	กึ่งกลาง	ตัวหนา
ชื่อผู้เขียน อีเมล	16	กึ่งกลาง	ปกติ
ที่อยู่ผู้เขียน	14	ชิดซ้าย	ปกติ
บทย่อคัด	16	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

ให้จัดเนื้อเรื่องในแต่ละบรรทัดเรียงชิด
ซ้ายและขวาอย่างสวยงาม เว้นบรรทัดแรกของ
ย่อหน้า ใช้ 1 แท็บ หรือ 0.5 นิ้ว

2.7.1 การจัดทำรูปภาพ

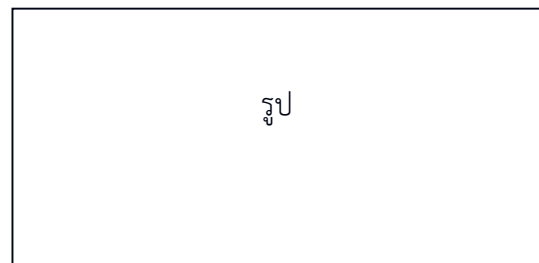
รูปภาพจะต้องมีความกว้างไม่เกิน 70 มม. เพื่อให้ลงในหนึ่งคอลัมน์ได้ หรือกรณีจำเป็นจริงๆ เพื่อรักษารายละเอียดในภาพ อาจยอมให้มีความกว้างได้เต็มหน้ากระดาษ(กว้าง 150 มม.)

ตัวอักษรทั้งหมดในภาพจะต้องมีขนาด
ใหญ่สามารถอ่านได้สะดวก และต้องไม่เล็กกว่า
ตัวอักษรในเนื้อเรื่อง

รูปภาพทุกรูปจะต้องมีหมายเลข และคำ
บรรยายใต้ภาพ หมายเลขและคำบรรยาย
รวมกันแล้วควรมีความยาวไม่เกิน 2 บรรทัด

คำบรรยายใต้ภาพห้ามใช้คำว่า “แสดง”
เช่น ห้ามเขียนว่า “รูปที่ 1 แสดงความสัมพันธ์
ระหว่าง..” ที่ถูกต้องควรเป็น “รูปที่ 1 ความสัมพันธ์
ระหว่าง..”

ตัวอย่าง



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่าง....

รูปลายเส้นจะต้องเป็นเส้นหมึกดำ
ส่วนรูปถ่ายควรจะเป็นรูปขาวดำที่มีความคมชัด
รูปสีอนูโลมให้ใช้ได้ รูปภาพควรจะมีรายละเอียด
เท่าที่จำเป็นเท่านั้น เช่น ภาพถ่ายรูปคลื่นจาก
ออสซิลโลสโคปที่ปรากฏให้เป็นเฉพาะจอภาพ
เป็นต้น และเพื่อความสวยงามให้เว้นบรรทัด
เหนือรูปภาพ 1 บรรทัดและเว้นใต้คำบรรยาย 1
บรรทัด

2.7.2 การเขียนสมการ

สมการทุกสมการจะต้องมีหมายเลขกำกับอยู่ภายในวงเล็บและเรียงลำดับที่ถูกต้อง ควรใช้ตัวพยัญชนะเอียงแสดงถึงพารามิเตอร์หรือตัวแปรในสมการ ตำแหน่งของหมายเลขสมการจะต้องอยู่ชิดขอบด้านขวาของคอลัมน์ เว้นหนึ่งบรรทัดก่อนเขียนสมการ และเว้นหนึ่งบรรทัดหลังเขียนสมการ จัดให้สมการอยู่ตรงกลางคอลัมน์ ดังตัวอย่างนี้

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

เริ่มเขียนคำอธิบายตั้งแต่บรรทัดนี้

2.7.3 การจัดการทำตาราง

ตัวอักษรในตารางจะต้องไม่เล็กกว่าตัวอักษรในเนื้อเรื่อง ควรตีเส้นกรอบตารางด้วยหมึกดำให้ชัดเจน

ตารางทุกตารางจะต้องมีหมายเลขและคำบรรยายกำกับเหนือตาราง หมายเลขกำกับและคำบรรยายนี้รวมกันแล้วควรมีความยาวไม่เกิน 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 กรุณาดูคำแนะนำ วิธีการพิมพ์บทความภาษาอังกฤษที่แนบมาด้วย

2.7.6 การส่งบทความ

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



โดยต้องทำการลงทะเบียนเพื่อสมัครสมาชิกวารสารและนำส่งวารสารต้นฉบับในรูปแบบไฟล์

- Word
- PDF

กรุณาจัดส่ง แบบฟอร์มยืนยันการส่งบทความทางวิชาการ เพื่อลงตีพิมพ์ใน วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลธัญบุรี มายัง อีเมล enjournal@en.mutt.ac.th หรือ จัดส่งไปรษณีย์ มายังกองบรรณาธิการ วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลธัญบุรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 39 หมู่ 1 ถ.รังสิต-นครนายก ต.คลองหลวง อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110” จึงจะถือว่าการส่งวารสารนั้นเสร็จสมบูรณ์

หากขั้นตอนการนำส่งวารสารทั้ง 2 ขั้นตอน คือ การส่งวารสารทางเว็บไซต์ออนไลน์ และการนำส่งแบบฟอร์มยืนยันการส่งบทความ มา ยัง อีเมล enjournal@en.mutt.ac.th ไม่ครบถ้วนทั้ง 2 ขั้นตอน บทความนั้นจะถูกส่งคืน และไม่สามารถผ่านการพิจารณาได้

3. สรุป (Conclusion)

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

4. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements)

ขอขอบคุณข้อมูลจาก TCI และผู้เขียนบทความทุกท่านที่ให้ความร่วมมือรักษาระเบียบการเขียนบทความอย่างเคร่งครัด

5. เอกสารอ้างอิง (References)

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

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

ตัวอย่าง (Example)

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

ตัวอย่างการเขียนเอกสารอ้างอิง

(เครื่องหมาย\หมายถึง เว้นวรรค 1 ระยะ)

รูปแบบบทความวารสาร

(Articles in Journals)

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

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

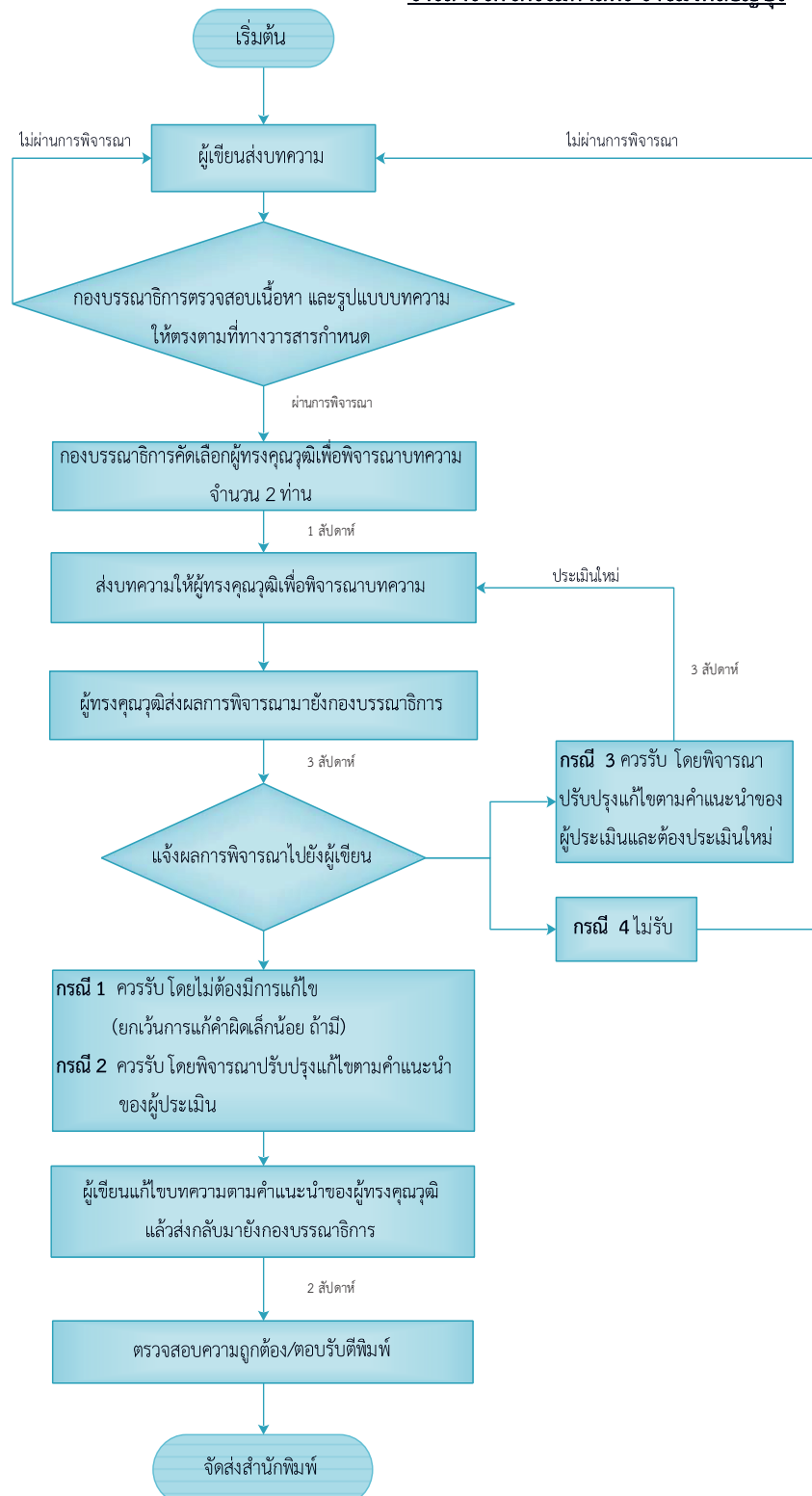
ตัวอย่าง(Example)

- [1 0] Siriprasert R. Model development for health screening system in prachinburi province. Journal of Health Science [Internet]. 2010 [cited 2011 Fed 25];19 (3):409-21. Available from:http://pubnet.moph.go.th/pubnet2/e_doc.php?id=2593(in Thai)
- [11] Aboud S. Quality improvement initiative in nursing homes: the ANA acts in an advisory role. Am J Nurs [Internet]. 2002 Jun [cited 2002 Aug 12];102(6)[about 1 p.]. Available from : http://www.nursingworld.org /AJN/2002/june/Wawatch.htmArticle

สามารถดาวน์โหลดรูปแบบบทความ Template ในรูปแบบ Word และคู่มือการอ้างอิงระบบ (Vancouver Style)ได้ที่

<https://drive.google.com/drive/folders/1jPxtFBwmeIUTtRwHH3HEFIFuVZXslOPV>

**ขั้นตอนการตีพิมพ์ลง
วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชชมงคลธัญบุรี**



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

หมายเหตุ: รวมระยะเวลาโดยประมาณ 90 วัน หากไม่มีการแก้ไขใดๆเพิ่มเติม



สมาชิกเลขที่

ใบสมัครสมาชิกวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏบรภูมิ

วันที่สมัคร

ข้าพเจ้า นาย/นาง/นางสาว สกุล อาชีพ

ที่อยู่ (สำหรับจัดส่งวารสาร) เลขที่ ถนน แขวง/ตำบล

เขต/อำเภอ จังหวัด รหัสไปรษณีย์

โทรศัพท์..... โทรสาร e-mail

มีความประสงค์สมัครเป็นสมาชิก

อัตราค่าสมาชิก

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏบรภูมิ ปี 1 ปี 2 ฉบับ 120 บาท (สำหรับบุคคลทั่วไป)

80 บาท (สำหรับนักศึกษา)

ต่ออายุสมาชิก ปี 1 ปี 2 ฉบับ 120 บาท (สำหรับบุคคลทั่วไป)

80 บาท (สำหรับนักศึกษา)

พร้อมกันนี้ได้ส่งค่าสมาชิก จำนวน บาท

จำนวนเงินตัวอักษร

ชำระเงินโดยวิธี

ธนาคาร สักจ่าย

ตัวแลกเงินไปรษณีย์ สักจ่าย

โอนเงินเข้าบัญชีธนาคาร..... ชื่อบัญชี เลขที่บัญชี

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

ลงชื่อ ผู้สมัคร
(.....)

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏบรภูมิ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชภัฏบรภูมิ

39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

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

แบบฟอร์มการส่งบทความทางวิชาการ
เพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมนคลธัญบุรี

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

ชื่อ-สกุล

(ภาษาอังกฤษ)

ตำแหน่งทางวิชาการ (โปรดระบุ) ☐ ศาสตราจารย์ ☐ รองศาสตราจารย์ ☐ ผู้ช่วยศาสตราจารย์

☐ อาจารย์ ☐ อื่นๆ (โปรดระบุ)

ที่อยู่ (ที่ติดต่อได้).....

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

โทรสาร.....อีเมล.....

มีความประสงค์ขอส่งบทความ เรื่อง:

ชื่อบทความ (ภาษาไทย)

ชื่อบทความ (ภาษาอังกฤษ)

การตรวจสอบ

☐ ทำการลงทะเบียน และ ส่งวารสารต้นฉบับใน เว็บไซต์

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

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

วันที่ ส่งวารสารต้นฉบับ เข้าสู่ระบบออนไลน์

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า บทความนี้เป็นผลงานของข้าพเจ้าและผู้ร่วมงานตามชื่อที่ระบุไว้ในบทความจริง และบทความนี้ไม่เคยลงตีพิมพ์ในวารสารใดมาก่อน และข้าพเจ้าจะไม่นำส่งบทความนี้ไปพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารอื่นภายใน 60 วัน นับจากวันที่ข้าพเจ้าส่งบทความ

ลงนาม.....

(.....)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

TECHNICAL ARTICLE FORM
FOR PUBLISHING ON JOURNAL OF ENGINEERING, RMUTT

Title ☐ Mr. ☐ Ms. ☐ Others (Please specify)

Name-Surnames.....

Academic Positions (Please specify) ☐ Professor ☐ Associate Professor ☐ Assistant Professor

☐ Lecturer ☐ Others (Please specify).....

Address (for Contact).....

.....

.....

Office Phone Number.....Mobile Phone Number.....

Fax Number.....E-mail.....

Name of Article:.....

.....

.....

Submission Checklist ☐ Already register and submit the manuscripts on

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

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

The days of Online Submission

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

Sign.....

(.....)

...../...../.....

วิสัยทัศน์

“องค์กรผลิตวิศวกรเชิงปฏิบัติการ ในระดับมาตรฐานสากล”

พันธกิจ

1. จัดการศึกษาด้านวิศวกรรมศาสตร์ที่มีคุณภาพ
2. สร้างงานวิจัย สิ่งประดิษฐ์ และนวัตกรรม สู่การผลิตเชิงพาณิชย์ และการถ่ายทอดเทคโนโลยีเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของประเทศ
3. ให้บริการงานวิชาการและบูรณาการองค์ความรู้จากผลงานวิชาการสู่สังคม อย่างมีประสิทธิภาพ
4. ทำนุบำรุงศิลปวัฒนธรรมและรักษาสิ่งแวดล้อม
5. จัดระบบบริหารจัดการให้มีประสิทธิภาพด้วยหลักธรรมาภิบาล



คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12100

โทร. 0-2549-3493 โทรสาร 0-2549-3493

www.engineer.rmutt.ac.th/journal