



วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏนครราชสีมา

Journal of Engineering, RMUTT

ปีที่ 17 ฉบับที่ 1 เดือน มกราคม – มิถุนายน 2562

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

การเคลื่อนที่ติดตามเส้นวิถีโคจรแบบอัตโนมัติของยานพาหนะบนบกและในน้ำด้วยตัวควบคุมแบบ L_1	1
Autonomous Trajectory Tracking for Ground and Marine-Surface Vessels Using L_1 Controller	
• คุณากร อนุวัตพานิชย์ และปริญญ์ เปรมปรานีรัตน์	
การใช้ประโยชน์เศษหินบะซอลต์เนื้อโพรงขี้เถ้าเป็นมวลรวมในแผ่นซีเมนต์บอร์ดสำหรับผนังอาคารกวดประกอบ	15
Utilization of Vesicular Basalt Fragment as Aggregate in Cement Board for Knockdown Building Wall	
• ปราโมทย์ วิจารณ์กุล กิตติพงษ์ สุวิโร และอัคริ วิจารณ์กุล	
การจัดลำดับแนวทางการปรับปรุงสิ่งสนับสนุนการเรียนรู้ โดยการประยุกต์ใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์	25
Learning Resources Improvement Project Prioritization: An Application of Analytic Hierarchy Process Method	
• มงคล กิตติญาณขจร	
การบำบัดสีและซีโอดีในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมโดยถังปฏิกรณ์โฟโตแคทาไลติกชนิดไหลต่อเนื่อง	41
Removal of Color and COD from Dyestuff Industry with Continuous-photocatalytic Reactor	
• ธรณศักดิ์ ไร่บุญรอด สันติญา สิริวิทยาภรณ์ และอรพรรณ ไร่บุญรอด	
การพัฒนาผนังบ้านดินสำเร็จรูปที่ต้านทานการชะล้างสูงและเป็นฉนวนป้องกันความร้อนที่ดีสำหรับอาคารอนุรักษ์พลังงานและสิ่งแวดล้อม	55
Development of Precast Adobe Wall Panel with High Corrosion Resistance and Good Thermal Insulation for Energy and Environmental Conservation Building	
• วิภากร ติปัญญา และกิตติพงษ์ สุวิโร	
การศึกษาเปรียบเทียบสมบัติทางกลและค่าใช้จ่ายในการผลิตสำหรับการเลือกวัสดุใบมีดตัดทางปาล์ม	65
Comparative Study of Mechanical Properties and Production Cost for Palm Cutting Blade Materials Selection	
• ปราโมทย์ พูนพรม วรญา วัฒนจิตศิริ สุรัตน์ ธีรวัฒน์พงศ์ และกิตติพงษ์ ภิรมย์พงศ์	
การศึกษาเวลามาตรฐานการติดตั้งแม่พิมพ์กรณีศึกษา บริษัทผลิตถุงพลาสติก	77
A Standard Time Study of Install the Paint Mold : A Case Study of Plastic Bag Manufacturing Company	
• กิตติชัย อธิกุลรัตน์	
การศึกษาความเป็นไปได้ทางเทคนิคของการใช้ถ่านชาร์จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วเป็นสารดูดซับมลพิษอากาศในอาคาร	91
Technical Feasibility Study of Char from Fast-Pyrolysis as Adsorbent for Removing Indoor Air Pollutant	
• มนรัตน์ องค์กรวรรณดี กับทีม ชาติสุวรรณ และอดิศักดิ์ ปัตติยะ	
การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรการเชื่อมอาร์กโลหะ-เหล็กและสมบัติของโลหะเชื่อมพอกแข็งเหล็กหล่อสีเทา	103
Relative Study of Gas Metal Arc Welding Parameter and Hard-faced Weld Metal Properties on Grey Cast Iron Surface	
• ทวี คุ้มดี ปิยะวรรณ สุภาสอน และอรจิตร แจ่มแสง	
การหาค่าปัจจัยการตัดเยื่อทางปาล์มที่เหมาะสมด้วยเครื่องตัดเยื่อใบปาล์ม	115
Palm Cutting Parameter Optimization of Orbital Cutting Blade Chopper Machine	
• สุรัตน์ ธีรวัฒน์พงศ์ ปราโมทย์ พูนพรม วรญา วัฒนจิตศิริ และกิตติพงษ์ ภิรมย์พงศ์	
การออกแบบและสร้างเครื่องลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวง	127
Design and Fabrication of a Lotus Seed Membrane Peeling Machine	
• จุฑรงค์ สังภาพินธุ์ สุนัน ปานสาคร รุ่งเรือง ทาสศิริศิลป์ เกียรติกร ไชยมั่งงู ปาริษา จามนิล และธีรภัทร์ จุ้ย	
การออกแบบและสร้างเครื่องสไลด์เหง้าบัวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแปรรูปผลิตผลทางการเกษตร	139
Design and Construction of the Lotus Root Slicing Machine to Increase the Efficiency of the Agricultural Product Process	
• มานพ แยมแพง และบุญฤทธิ์ ประสาทแก้ว	
ค่าการยุบตัวและกำลังอัดของคอนกรีตผสมมวลรวมรีไซเคิลและหินปูนแทนมวลรวมละเอียด	149
Slump and Compressive Strength of Concrete Containing Recycled Aggregate and Lime Stone Dust	
• วิศวันทร์ อัครปัญญากร	
ผลกระทบของรูปทรงส่วนปลายใบแบบครึ่งทรงกระบอกต่อสมรรถนะของกังหันลมแบบแกนแนวตั้ง	163
Effects of End Plates of Bucket on the Performance of Vertical Axis Wind Turbines	
• ธนาพล สุขชนะ	
ผลของอุณหภูมิในขั้นตอนการแช่และการอบแห้งต่อคุณภาพของข้าวเหนียวพันธุ์หอมนิล	175
Effect of Temperature on Soaking and Drying on Quality of Parboiled Hom-nin Rice	
• สุนัน ปานสาคร และจุฑรงค์ สังภาพินธุ์	
สิ่งทอใยสาในดินสำหรับประยุกต์ในงานรางรถไฟ	187
Different Geotextiles in Soil for Railway Construction Application	
• วิชุดา จันทรประภาณนท์ และนิธินาถ ชิตพงศ์	

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

การเคลื่อนที่ติดตามเส้นวิถีโคจรแบบอัตโนมัติของยานพาหนะบนบกและในน้ำด้วยตัวควบคุมแบบ L_1 หน้า 1 Autonomous Trajectory Tracking for Ground and Marine-Surface Vessels Using L_1 Controller โดย : คุณากร อนุวัตพานิชย์ และปรัชญา เปรมปราณีรัชต์	
การใช้ประโยชน์เศษหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายเป็นมวลรวมในแผ่นซีเมนต์บอร์ดสำหรับผนังอาคาร ถอดประกอบ Utilization of Vesicular Basalt Fragment as Aggregate in Cement Board for Knockdown Building Wall โดย : ปราโมทย์ วีรานุกุล กิตติพงษ์ สุวิโร และอิทธิ วีรานุกุล	15
การจัดลำดับแนวทางการปรับปรุงสิ่งสนับสนุนการเรียนรู้ โดยการประยุกต์ใช้กระบวนการลำดับชั้น เชิงวิเคราะห์ Learning Resources Improvement Project Prioritization: An Application of Analytic Hierarchy Process Method โดย : มงคล กิตติญาณขจร	25
การบำบัดสีและซีโอทีในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมโดยถังปฏิกรณ์โฟโตแคทาไลติกชนิดไหลต่อเนื่อง Removal of Color and COD from Dyestuff Industry with Continuous-photocatalytic Reactor โดย : ธรรมศักดิ์ โรจน์วิรุฬห์ สัญญา สิริวิทยาปกรณ และอรรธรณ โรจน์วิรุฬห์	41
การพัฒนาผนังบ้านดินสำเร็จรูปที่ต้านทานการชะล้างสูงและเป็นฉนวนป้องกันความร้อนที่ดีสำหรับ อาคารอนุรักษ์พลังงานและสิ่งแวดล้อม Development of Precast Adobe Wall Panel with High Corrosion Resistance and Good Thermal Insulation for Energy and Environmental Conservation Building โดย : วิหาร ติปัญญา และกิตติพงษ์ สุวิโร	55
การศึกษาเปรียบเทียบสมบัติทางกลและค่าใช้จ่ายในการผลิตสำหรับการเลือกวัสดุใบมีดตัดทางปาล์ม Comparative Study of Mechanical Properties and Production Cost for Palm Cutting Blade Materials Selection โดย : ปราโมทย์ พูนนายน วรญา วัฒนจิตสิริ สุรัตน์ ตรัณพนงค์ และกิตติพงษ์ กิมะพงศ์	65
การศึกษาเวลามาตรฐานการติดตั้งแม่พิมพ์ กรณีศึกษา บริษัทผลิตถุงพลาสติก A Standard Time Study of Install the Paint Mold : A Case Study of Plastic Bag Manufacturing Company. โดย : กิตติชัย อธิกุลรัตน์	77

การศึกษาความเป็นไปได้ทางเทคนิคของการใช้ถ่านชาร์จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว เป็นสารดูดซับมลพิษอากาศในอาคาร Technical Feasibility Study of Char from Fast-Pyrolysis as Adsorbent for Removing Indoor Air Pollutant โดย : มณีนีรัตน์ องค์กรธรณี ทับทิม ชาตีสวรรณ์ และอดิศักดิ์ ปัตติยะ	91
การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุมและสมบัติของโลหะเชื่อม พอกแข็งเหล็กหล่อสีเทา Relative Study of Gas Metal Arc Welding Parameter and Hard-faced Weld Metal Properties on Grey Cast Iron Surface โดย : ทวี หมดส๊ะ ปิยะวรรณ สุนาสวน และอรจิตร แจ่มแสง	103
การหาค่าปัจจัยการตัดย่อยทางปาล์มที่เหมาะสมด้วยเครื่องตัดย่อยใบตัดตั้ง Palm Cutting Parameter Optimization of Orbital Cutting Blade Chopper Machine โดย : สุรัตน์ ตริยวนพงศ์ ปราโมทย์ พูนนายม วรญา วัฒนจิตสิริ และกิตติพงษ์ กิมะพงศ์	115
การออกแบบและสร้างเครื่องลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวง Design and Fabrication of a Lotus Seed Membrane Peeling Machine โดย : จตุรงค์ ลังกาพินธุ์ สุนัน ปานสาคร รุ่งเรือง กาลศิริศิลป์ เกรียงไกร แซมสีม่วง ปาริชา งามนิล และธีรภัทร์ จูอี่	127
การออกแบบและสร้างเครื่องสไลด์เหง้าบัวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแปรรูปผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร Design and Construction of the Lotus Root Slicing Machine to Increase the Efficiency of the Agricultural Product Process โดย : มานพ แยมแพง และบุญญฤทธิ์ ประสาทแก้ว	139
ค่าการยุบตัวและกำลังอัดของคอนกรีตผสมมวลรวมใช้แล้วแทนมวลรวมหยาบและหินฝุ่นแทน มวลรวมละเอียด Slump and Compressive Strength of Concrete Containing Recycled Aggregate and Lime Stone Dust โดย : วิศวินทร์ อัครปัญญาธร	149
ผลกระทบของรูปทรงส่วนปลายใบแบบครึ่งทรงกระบอกต่อสมรรถนะของกังหันลมแบบแกนแนวตั้ง Effects of End Plates of Bucket on the Performance of Vertical Axis Wind Turbines โดย : ธนาพล สุขชนะ	163
ผลของอุณหภูมิในขั้นตอนการแช่และการอบแห้งต่อคุณภาพของข้าวเหนียวพันธุ์หอมนิล Effect of Temperature on Soaking and Drying on Quality of Parboiled Hom-nin Rice โดย : สุนัน ปานสาคร และจตุรงค์ ลังกาพินธุ์	175
สิ่งทอโยธาในงานดินสำหรับประยุกต์ในงานรางรถไฟ Different Geotextiles in Soil for Railway Construction Application โดย : วิชุดา จันทรประภาณนท์ และนิธินาถ ชิตพงศ์	187



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 พูลปราชญ์
รศ.ดร.ธารังรัตน์ มุ่งเจริญ
รศ.ณรงค์ บวบทอง
ผศ.ดร.สมเจตน์ พชรพันธ์
ผศ.ดร.ปฐมทัศน์ จิระเดชะ
ผศ.ดร.อังคณา พันธุ์หล่อ
ดร.ชัชวาลย์ สุรัสวดี
ผศ.ดร.ศิวกร อ่างทอง
รศ.ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์
ผศ.ดร.จักรี ศรีนนท์ฉัตร
ผศ.สมศักดิ์ แก่นทอง
ผศ.ดร.สุมนมาลย์ เนียมกลาง
ผศ.ชวลิต แสงสวัสดิ์

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

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

ดร.ปรกช สิริสุวัฒน์

เลขานุการ

นางสาวอมรรัตน์ ยิ้มอยู่

ผู้ช่วยเลขานุการ

นายอัศชนะ คูเจริญไพบูลย์

ผู้ดูแลระบบงานเทคโนโลยีสารสนเทศ

นายพัฒนพงศ์ สุนันทพจน์



Journal of Engineering, RMUTT

Editorial Board Members

Consultant Board Members

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

Editorial Board

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 ราชมงคลธัญบุรี

บทบรรณาธิการ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลธัญบุรี ปีที่ 17 ฉบับที่ 1 เดือน มกราคม ถึง มิถุนายน พ.ศ. 2562 นี้ ได้รับความอนุเคราะห์เสมอมาจากผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความทั้งจากบุคลากรภายใน และภายนอกมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

บทความวิจัยในฉบับนี้ ยังคงเนื้อหาด้านวิศวกรรมศาสตร์ และเทคโนโลยีต่างๆ 16 บทความ ซึ่งผ่านการประเมินอย่างเข้มข้นจากผู้ทรงคุณวุฒิที่มีความเชี่ยวชาญในสายงานนั้นๆ

ในการนี้ กองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลธัญบุรี ขอขอบพระคุณผู้เขียน บทความทุกท่านที่มีความสนใจในการนำเสนอผลงานทางด้านวิชาการในวารสารฯ ฉบับนี้ และขอขอบพระคุณผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความที่ให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะต่างๆ แก่ผู้เขียนบทความ เพื่อนำไปปรับปรุงผลงานให้มีคุณภาพมากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังส่งเสริมให้วารสารฯ คงคุณภาพอยู่ในวารสารกลุ่มที่ 1 จากการประเมินคุณภาพวารสารวิชาการในฐานข้อมูล TCI สืบเนื่องต่อไป

กองบรรณาธิการ

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิผู้พิจารณาบทความ

รศ.ดร.วันชัย ธิวัชรนิช	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม
ผศ.ดร.อังคณา พันธุ์หล่อ	วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต
รศ.ดร.วิชัย ฉัตรทิณวัฒน์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผศ.ดร.บรรยงค์ รุ่งเรืองด้วยบุญ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
ดร.ฉันทเศรษฐ์ เศรษฐบุตร	สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ผศ.ดร.วิชากร จารุศิริ	คณะวัฒนธรรมสิ่งแวดล้อมและการท่องเที่ยวเชิงนิเวศ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รศ. ขนิษฐา เจริญลาภ	คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ศ.ดร.ก้องกิติ พุสสวัสดิ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
รศ.ดร.เพ็ญจิตร ศรีนพคุณ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
รศ.วัชรินทร์ วิทยกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
ผศ.ดร.สุชาติ เหลืองประเสริฐ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
รศ.ภัชราภรณ์ สุวรรณวิทยา	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
รศ.ดร.สิริ ชัยเสรี	คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
รศ. ดร. ชัยรัตน์ ธีระวัฒนสุข	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ. ดร.ณพล อยู่บรรพต	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.ปานมนัส ศิริสมบุรณ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.ทวิช พูลเงิน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ. ดร.รักติพงษ์ สหมิตรมงคล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.สุรัตน์ ตรีวัฒนพงศ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.ระพี กาญจนะ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.กุลชาติ จุลเพ็ญ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.ศิริชัย ต่อสกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ. ดร.ภาณุ ประทุมทรัพย์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ. ดร. ขวัญชัย จ้อยเจริญ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ.ดร.สมใจ ขจรชีพพันธุ์งาม	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผศ.ดร.วิวัฒน์ พัวทัศนานนท์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

Peer Reviews

Assoc.Prof.Dr.Vanchai Rijiravanich	Faculty of Engineering Siam University
Asst.Prof.Dr.Ankana Punlor	College of Engineering Rangsit University
Assoc.Prof.Dr.Wichai Chattinnawat	Faculty of Engineering Chiang Mai University
Asst.Prof.Dr.Bunyong Rungroungdouyboon	Faculty of Engineering Thammasat University
Dr.Thunyaseth Sethaput	Sirindhorn International Institute of Technology
Asst.Prof.Dr.Witchakorn Charusiri	Faculty of Environmental Culture and Ecotourism Srinakharinwirot University
Assoc.Prof.Khanittha Charoenlarp	Faculty of Textile Industry Rajamangala University of Technology Krungthep
Prof.Dr.Kongkitti Phusavat	Faculty of Engineering Kasetsart University
Assoc.Prof.Dr.Penjit Srinophakun	Faculty of Engineering Kasetsart University
Assoc.Prof.Watcharin Witayakul	Faculty of Engineering Kasetsart University
Asst.Prof.Dr.Suchat Leungprasert	Faculty of Engineering, Kasetsart University
Assoc.Prof.Patcharaporn Suwanvitaya	Faculty of Engineering, Kasetsart University
Assoc.Prof.Dr.Siree Chaiseri	Faculty of Agro-Industry Kasetsart University
Assoc.Prof.Dr.Chairat Teerawattanasuk	Faculty of Engineering King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Assoc.Prof.Dr.Naphol Yoobanpot	Faculty of Engineering King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Assoc.Prof.Dr.Panmanas Sirisomboon	Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Assoc.Prof.Dr.Tawich Pulngern	Faculty of Engineering King Mongkut's University of Technology Thonburi
Asst. Prof. Dr. Raktipong Sahamitmongkol	Faculty of Engineering King Mongkut's University of Technology Thonburi
Assoc.Prof.Dr.Krischonme Bhumkittipich	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Surat Triwanapong	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Rapee Kanchana	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Kittipong Kimapong	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Dr.Kunlachart Junlapen	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Sirichai Torsakul	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Panu Pratumnopharat	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Kwanchai Choicharoen	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Assoc.Prof.Dr.Somjai Kajorncheappunngam	Faculty of Engineering, Khon Kaen University
Asst.Prof.Dr.Wiwat Puatatsananon	Faculty of Engineering Ubonratchathani University

การเคลื่อนที่ติดตามเส้นวิถีโคจรแบบอัตโนมัติของยานพาหนะบนบกและในน้ำ ด้วยตัวควบคุมแบบ L_1

คุณากร อนุวัตพานิชย์^{1*} และปรัชญา เปรมปราณีรัชต์²
khunakon_a@mail.rmutt.ac.th^{1*}, pradya.p@en.rmutt.ac.th²

^{1*, 2} ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Received: March 7, 2018
Revised: May 15, 2018
Accepted: July 6, 2018

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้ได้นำเสนอผลการศึกษาการประยุกต์ใช้ตรรกะการนำทางติดตามเส้นวิถีโคจรแบบอัตโนมัติของหุ่นยนต์รถสี่ล้อและหุ่นยนต์เรือแบบสองหุ่น ด้วยตัวควบคุมแบบ L_1 โดยการคำนวณเส้นทางไปยังเป้าหมายอ้างอิง จะคำนวณค่าคำสั่งความเร่งสู่ศูนย์กลางที่อธิบายด้วยพารามิเตอร์ระยะการขจัด (L_1) และ อัตราส่วนความหน่วง (ζ) เพื่อให้ยานพาหนะสามารถลู่เข้าหาเส้นวิถีโคจรแบบเส้นตรงที่กำหนด โดยผลกระทบของสามพารามิเตอร์ คือ 1) L_1 และ 2) ζ และ 3) K_{ps} ของการควบคุมแบบพีไอดีสำหรับการหันเห (K_{ps}) ที่มีต่อประสิทธิภาพในการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติของยานพาหนะทั้งสองรูปแบบ จะถูกประเมินผลด้วยการพิจารณาจาก 1) ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของระยะทางของยานพาหนะที่ห่างจากเส้นทางที่กำหนดในแนวตั้งฉาก (average cross-track error) และ 2) ค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดสูงสุดของการพุ่งเกิน (overshoot) จากเส้นทางที่กำหนดโดยผลการทดสอบการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัตินั้นแสดงให้เห็นว่า หุ่นยนต์รถสี่ล้อที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ L_1 นั้นจะมีลักษณะการลู่เข้าหาเส้นวิถีโคจรเป็นแบบความหน่วงเกิน โดยจะไม่ไว (sensitive) ต่อการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ L_1 และ ζ มากนัก เนื่องจากพลศาสตร์ของรถสี่ล้อที่มีความสามารถในการเกาะพื่นได้ดีในระหว่างการเลี้ยวหักมุม ซึ่งจะต่างจากผลการทดสอบของเรือแบบสองหุ่นที่สามารถไถลไปในน้ำเนื่องจากความเฉื่อย ทำให้ผลกระทบของพารามิเตอร์ L_1 , ζ และ K_{ps} มีผลกระทบต่อการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติมาก ซึ่งค่าพารามิเตอร์ L_1 และ K_{ps} ที่น้อย จะทำให้การเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติของหุ่นยนต์เรือสามารถเคลื่อนที่ติดตามเส้นวิถีโคจรแบบเส้นตรงได้อย่างมีประสิทธิภาพดี

คำสำคัญ: การนำทางติดตามเส้นวิถีโคจร ระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ ตัวควบคุมแบบ L_1 หุ่นยนต์รถสี่ล้อ หุ่นยนต์เรือแบบสองหุ่น ผลกระทบของพารามิเตอร์

Autonomous Trajectory Tracking for Ground and Marine-Surface Vessels Using L_1 Controller

Khunakon Anuwatpanich^{1*} and Pradya Prempraneerach²
khunakon_a@mail.rmutt.ac.th^{1*}, pradya.p@en.rmutt.ac.th²

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

Received: March 7, 2018
Revised: May 15, 2018
Accepted: July 6, 2018

Abstract

This research paper presents studies of applying autonomous trajectory-tracking logic for 4-wheel car robot and catamaran robot using an L_1 controller. A trajectory computation toward specified target points need to calculate a centripetal-acceleration command, described by distance (L_1) and damping ratio (ζ) parameters, such that vehicle can approach the desired straight-path trajectory. Effect of three parameters: 1) L_1 , 2) ζ and 3) proportional gain (K_{ps}) of a PID control for steering, on efficiency of autonomous trajectory tracking of both vehicles are evaluated from 1) an average error of a perpendicular distance from vehicle toward the specified path or average cross-track error and 2) an average maximum error of overshoot from specified path. Experiments of autonomous trajectory tracking reveal that 4-wheel robot car, governed by the L_1 controller, approaches desired trajectory similar to an overdamped response. Robot car trajectory is not sensitive to L_1 and ζ parameter variations because a 4-wheel car dynamic has good traction capability during a sharp turn. On the contrary, catamaran can slideways in water because of small hydrodynamics drag force. As a result, L_1 , ζ , K_{ps} variations have strong effects on a performance of the autonomous trajectory tracking. Using small L_1 and K_{ps} , catamaran can track specified straight trajectories automatically with good performance

Keywords: trajectory-tracking navigation, autonomous control system, L_1 controller, four-wheel car robot, catamaran robot, effect of parameter variation

1. บทนำ

ในการปฏิบัติงานด้านสำรวจภาคสนาม ยานพาหนะเคลื่อนที่อัตโนมัติถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดตามวัตถุประสงค์ด้านการสำรวจนั้นๆ ความสามารถในการเคลื่อนที่ติดตามเส้นทางที่วางแผนไว้อย่างถูกต้องแม่นยำนับว่าเป็นส่วนสำคัญที่จะทำให้หุ่นยนต์ปฏิบัติงานนั้นๆ สำเร็จลุล่วงไปได้อย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย สำหรับเทคนิคการควบคุมหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติตามจุดพิกัดที่กำหนดนั้น มีเทคนิคการควบคุมหลายประเภท อาทิเช่น Dongdong Mu and et al [1]. ได้เสนอวิธีการควบคุมมุมหันเหของยานพาหนะด้วยตัวควบคุมที่มีชื่อว่า “Intelligent Track Guiding Control (ITGC)” ที่มีพื้นฐานบนตัวควบคุมแบบพีชชี ที่ช่วยเสริมประสิทธิภาพด้วยเทคนิคการระบุเอกลักษณ์วิธีกำลังสองน้อยสุด (Least Squared Estimation Method) , WANG Changshun and et al [2]. ได้เสนอวิธี “Active Disturbance Rejection Control (ADRC)” เพื่อออกแบบการควบคุมยานพาหนะผิวน้ำแบบอัตโนมัติที่ปฏิบัติงานในสภาพแวดล้อมที่มีพลศาสตร์ไม่แน่นอน จากผลการจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงให้เห็นว่า ยานพาหนะสามารถติดตามเส้นทางวิถีโคจรได้อย่างแม่นยำขณะที่มีสิ่งรบกวนจากสิ่งแวดล้อม สำหรับตัวควบคุมแบบ L_1 ถูกนำเสนอขึ้นโดย Sanghyuk Park and et al [3]. ได้ทำการศึกษาและติดตั้งเข้ากับอากาศยานไร้คนขับที่มีความสามารถในการติดตามเส้นทางวิถีโคจรที่กำหนด โดยนำเสนอการติดตามรูปแบบเส้นตรง, โค้ง และ วงกลม ซึ่งในปัจจุบัน ตัวควบคุม L_1 ถูกนำมาพัฒนาเข้ากับระบบควบคุมนำทางอัตโนมัติสำเร็จรูป Ardupilot [4] และถูกนำไปประยุกต์ใช้กับยานพาหนะอัตโนมัติอย่างกว้างขวาง เช่น ในงานวิจัยของ M. H. B. M. Idris and et al [5]. ได้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาหุ่นยนต์

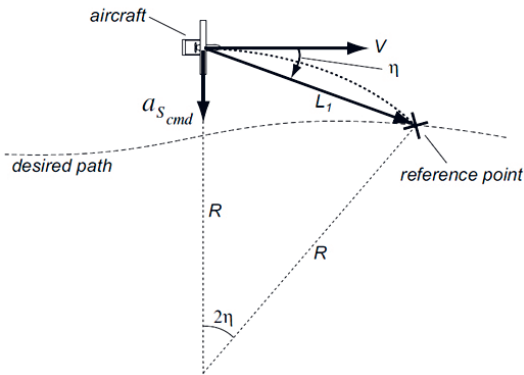
หุ่นยนต์เรือสำรวจความลึกของแหล่งน้ำโดยใช้หน่วยควบคุม Ardupilot และ ในงานวิจัยของ Armando Sinisterra and et al [6]. ได้ประยุกต์ใช้หน่วยควบคุม Ardupilot ติดตั้งบนหุ่นยนต์เรือแบบสองท่อนที่เรียกว่า Wave Adaptive Modular Vehicle (WAM-V) ที่สามารถทำงานร่วมกับพาหนะอากาศยานไร้คนขับและยานพาหนะใต้น้ำไร้คนขับ หรือแม้กระทั่งการใช้ Ardupilot เพื่อวัตถุประสงค์ทางการทหารเช่นในงานวิจัยของ Syedalqra Hassan et al [7]. ทำการออกแบบยานพาหนะ ภาคพื้นดินขนาดเล็กที่ติดตั้งหน่วยควบคุม Ardupilot โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในการสำรวจพื้นที่ลาดตระเวน

ดังนั้นผู้วิจัยได้เล็งเห็นความสำคัญในการนำตรรกะการควบคุมแบบ L_1 และการนำหน่วยควบคุม Ardupilot มาประยุกต์ใช้กับหุ่นยนต์รถแบบสี่ล้อและหุ่นยนต์เรือแบบสองท่อน จึงทำการศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์สำหรับตรรกะของตัวควบคุม L_1 ได้แก่ คาบ (Period หรือ L_1), ค่าความหน่วง (damping ratio หรือ ζ) และอัตราขยายสัดส่วนของระบบควบคุมการหันเห (KP-steering หรือ K_{ps}) สำหรับการควบคุมเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติติดตามเส้นทางวิถีโคจรของยานพาหนะภาคพื้นดินและน้ำ เพื่อนำมาอภิปรายพฤติกรรม การติดตามเส้นต่อไปและเพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบและอภิปรายผลการทดลองการเคลื่อนที่ที่ติดตามเส้นทางวิถีโคจรของหุ่นยนต์ยานพาหนะภาคพื้นดินและหุ่นยนต์ยานพาหนะภาคพื้นผิวน้ำว่าแตกต่างกันอย่างไร

2. ทฤษฎีตรรกะการนำทางด้วยควบคุมแบบ L_1 [3]

ระบบการนำทางนั้นมีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับยานพาหนะอัตโนมัติ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ตรรกะการนำทางแบบไม่เป็นเชิงเส้นด้วยตัวควบคุมป้อนกลับแบบเชิงเส้น ที่มีความสามารถ

ติดตามเส้นวิถีโคจร ในส่วนการติดตามเส้นวิถีโคจรแบบตรงนั้นจะคล้ายคลึงกับตัวควบคุมแบบสัดส่วน-อนุพันธ์ (PD) และในส่วนการติดตามเส้นวิถีโคจรแบบโค้งจะการใช้การควบคุมล่วงหน้าช่วยให้สามารถติดตามเส้นวิถีโคจรแบบโค้งได้อย่างราบรื่น วิธีนี้สามารถติดตามเส้นวิถีโคจรโดยเสมือนว่ามีความเร่งสู่ศูนย์กลางจำลอง ($a_{s_{cmd}}$) หรือความเร่งด้านข้างของยานพาหนะ ดังในสมการที่ (1) เพื่อให้ยานพาหนะรู้เข้าหาเส้นทางวิถีโคจร จะใช้ความเร็ว (V) และมุมหันเห (η) ของยานพาหนะเพื่อช่วยในการคำนวณ ที่แสดงได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนผังแนวคิดของตรรกะการนำทางด้วยตัวควบคุมแบบ L_1 และ ตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง [3]

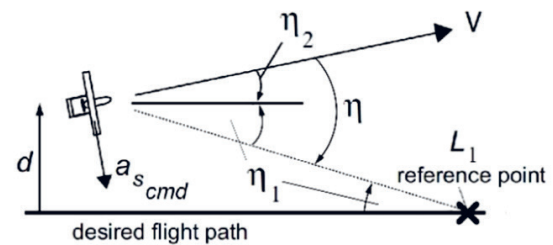
$$a_{s_{cmd}} = 2 \frac{V^2}{L_1} \sin \eta \quad (1)$$

เมื่อ $a_{s_{cmd}}$ คือ ความเร่งด้านข้างที่มีทิศทางตั้งฉากกับทิศทางของเวกเตอร์ความเร็วของยานพาหนะ (V) , L_1 คือ ระยะการขจัดจากตำแหน่งยานพาหนะไปยังจุดอ้างอิงบนวิถีที่ต้องการ และ η คือ มุมระหว่างเวกเตอร์ความเร็วเทียบกับเส้นทางวิถีโคจรตามแนว L_1

ในการวิเคราะห์การติดตามเส้นวิถีโคจรแบบเส้นตรง ที่แสดงคุณลักษณะสำคัญนั้นจะศึกษาจาก 2 ตัวแปร คือ ระยะการขจัดตาม

แนวเส้นตรง L_1 ระหว่างยานพาหนะกับจุดอ้างอิง (Reference point) บนเส้นทางการเคลื่อนที่ที่ต้องการ (Design flight path) และมุม η ระหว่างเวกเตอร์ความเร็ว (V) และแนวเส้นตรง L_1 ซึ่งจะสามารถใช้การวิเคราะห์ด้วยระบบเชิงเส้นอันดับสองดังในรูปที่ 2 โดยกำหนดให้ตัวแปรในระบบเชิงเส้นอันดับสองเป็น d ที่นิยามเป็นค่าผิดพลาดของระยะขจัดจากยานพาหนะไปยังเส้นวิถีโคจรในแนวตั้งฉาก (หรือ Cross-track error) และสมมติว่ามุม η มีขนาดเล็กๆ ซึ่ง

$$\sin \eta \approx \eta = \eta_1 + \eta_2 \quad (2)$$



รูปที่ 2 แบบจำลองการติดตามเส้นวิถีโคจรแบบเส้นตรง [3]

จากรูปที่ 2 สำหรับสามเหลี่ยมด้านล่างจะได้ $\eta_1 \approx d/L_1$ และสามเหลี่ยมด้านบนจะได้ $\eta_2 \approx \dot{d}/V$ เมื่อแทน η_1 และ η_2 ลงในสมการที่ (2) และ แทน $\sin \eta$ กลับเข้าไปในสมการที่ (1) จะได้สมการตรรกะการนำทางในรูปแบบระบบเชิงเส้นอันดับสอง ดังนี้

$$a_{s_{cmd}} = 2 \frac{V^2}{L_1} \sin \eta \approx 2 \frac{V}{L_1} \left(\dot{d} + \frac{V}{L_1} d \right) \quad (3)$$

เมื่อเปรียบเทียบกับสมการที่ 3 กับตัวควบคุมแบบสัดส่วน-อนุพันธ์ (PD Controller) โดยกำหนดให้ $(2V^2/L_1^2)$ คือ เทอมที่เสมือนตัวควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional หรือ P) $(2V/L_1)$ คือ เทอมของตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative หรือ D)

ในการหาระยะห่างระหว่างยานพาหนะและเส้นทางวิถีโคจรตามแนว L_1 สามารถคำนวณได้โดยการวิเคราะห์เสถียรภาพด้วยแบบจำลองของระบบที่เป็นแบบเชิงเส้นที่ประกอบด้วยตัวควบคุมแบบเชิงเส้นและระบบควบคุมจากสมการที่ (3) เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณและวิเคราะห์เสถียรภาพจะสมมติว่า ไม่มีคิพพลศาสตร์ของยานพาหนะ และสันนิษฐานว่ามุม η_2 มีขนาดเล็ก ๆ และแทนค่าสั่งของความเร่งสู่ศูนย์กลางเป็น $a_{s_{cmd}} \approx -\ddot{d}$ ในสมการที่ (3) จะได้ว่า

$$\ddot{d} + 2\zeta\omega_n\dot{d} + \omega_n^2 d = 0 \quad (4)$$

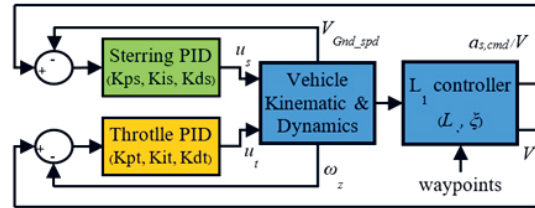
โดยค่าอัตราส่วนความหน่วงของระบบ (ζ) คือ $\zeta = 1/\sqrt{2}$ หรือค่าอัตราส่วนความหน่วงวิกฤติและค่าความถี่ธรรมชาติของระบบ (ω_n) คือ $\omega_n = \sqrt{2V/L_1}$ จากสมการที่ (4) สำหรับกรณีเส้นวิถีโคจรแบบเส้นตรงที่เป็นระบบแบบเชิงอันดับสองที่มีอัตราส่วนความหน่วงวิกฤตินั้น ความถี่ธรรมชาติจะถูกกำหนดโดยอัตราส่วนของความเร็วของยานพาหนะที่ต้องการ (V) และระยะการขจัดระหว่างยานพาหนะและเส้นทางวิถีโคจรสำหรับการเลือกจุดอ้างอิง (L_1)

ในการควบคุมการบังคับเลี้ยวของหัวเรือ นั้นจะพิจารณาจากมุมหันเหของเวกเตอร์ความเร็วยานพาหนะที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ($\Delta\psi$) เนื่องจากค่าคำสั่งของความเร่งด้านข้าง ($a_{s_{cmd}}$) ที่คำนวณได้จาก

$$\Delta\psi = \frac{a_s}{V} \Delta t \quad (5)$$

เมื่อ Δt คือ ผลต่างของเวลาในรูปการควบคุม ฉะนั้นจะสามารถพิจารณา $\Delta\psi$ ได้เสมือนกับค่าความผิดพลาดของมุมเลี้ยวของหัวเรือ (e_s) ที่จะนำมาใช้ในการป้อนกลับด้วยระบบควบคุมแบบฟีดแบ็ค ที่มีพารามิเตอร์ของระบบควบคุมเป็น K_{ps} ,

K_{ds} และ K_{is} เพื่อให้ได้สัญญาณควบคุมบังคับเลี้ยว (u_s) ในส่วนการควบคุมความเร็วรอบของใบพัดเรือหรือความเร็วในการเคลื่อนที่ของเรื่อนั้นจะใช้ระบบการควบคุมแบบฟีดแบ็คด้วยเช่นกัน เพื่อให้ได้สัญญาณควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่ (u_v) ที่มีพารามิเตอร์ของระบบควบคุมเป็น K_{pt} , K_{dt} และ K_{it} เมื่อนิยามค่าความผิดพลาดของความเร็ว (e_v) ที่เป็นผลต่างของ V ที่คำนวณได้จากสมการที่ (3) กำหนดค่า L_1 และ ζ เมื่อเทียบกับ ความเร็วที่วัดได้จากยานพาหนะด้วยการบูรณาการข้อมูลของเซนเซอร์จีพีเอส (GPS) เซนเซอร์วัดความเฉื่อย (IMU) และเข็มทิศแบบดิจิตอล (Compass)

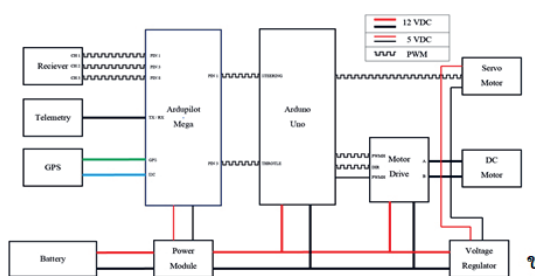


รูปที่ 3 การเชื่อมต่อระบบควบคุมขั้นต่ำแบบฟีดแบ็คและการติดตามเส้นวิถีโคจรเส้นตรง L_1 เข้ากับยานพาหนะ

อุปกรณ์ของหุ่นยนต์รถบังคับวิทยุและหุ่นยนต์เรือสองท่อน

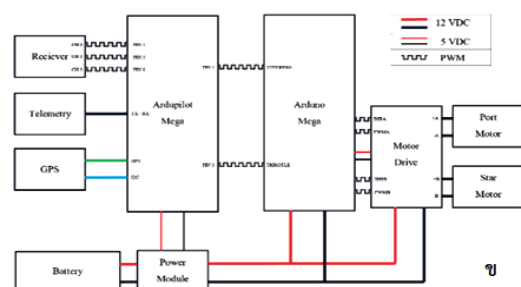
ในงานวิจัยนี้จะนำเสนอการทดสอบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ทั้งสองรูปแบบ คือ 1) หุ่นยนต์รถบังคับวิทยุที่ขับเคลื่อนด้วยล้อหลังและบังคับเลี้ยวด้วยสองล้อหน้า รุ่น Weight Grade V.2 ดังแสดงในรูปที่ 4 มีคุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความกว้างและความสูงโดยรวมเป็น 31 และ 28 เซนติเมตร ตามลำดับ มังง์เลี้ยวสูงสุดไม่เกิน 45 องศา ที่บังคับเลี้ยวล้อหน้าด้วยเซอร์โวมอเตอร์ (Servo motor) และ รถสามารถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงสุดไม่เกิน 2 เมตรต่อวินาที ที่ใช้ดีซีมอเตอร์ (DC motor) ในการขับเคลื่อนล้อหลัง โดยใช้แบตเตอรี่ลิเทียมโพลิเมอร์ 3 เซลล์ เป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้ากระแส

ตรงหลัก ที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้าด้วยโมดูลกำลัง (Power module) และ 2) หุ่นยนต์เรือแบบสองท่อน



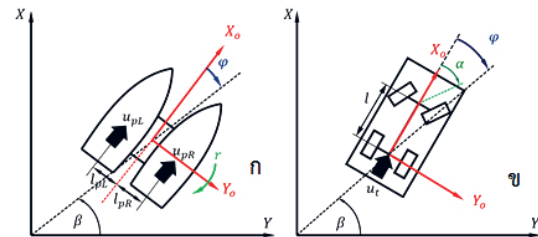
รูปที่ 4 รายละเอียดของหุ่นยนต์รถบังคับวิทยุแบบสี่ล้อ

- ก) รถสี่ล้อบังคับวิทยุและอุปกรณ์ควบคุม
- ข) แผนภาพการเชื่อมต่อระบบควบคุมและวงจรไฟฟ้าของรถบังคับวิทยุ



รูปที่ 5 รายละเอียดของหุ่นยนต์เรือสองท่อน

- ก) เรือสองท่อนบังคับวิทยุและอุปกรณ์ที่ใช้ควบคุม
- ข) แผนภาพการเชื่อมต่อระบบควบคุมและวงจรไฟฟ้าของเรือสองท่อน



รูปที่ 6 แผนภาพวัตถุอิสระ

- ก) หุ่นยนต์เรือแบบสองท่อน [8]
- ข) หุ่นยนต์รถแบบบังคับด้วยล้อหน้า [9]

บังคับวิทยุภาคพื้นผิวน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 5 ที่มีคุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความกว้างและความยาวโดยรวมเป็น 123 และ 84 เซนติเมตรตามลำดับ และ เรือสามารถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงสุดไม่เกิน 1.5 เมตรต่อวินาที โดยใช้แบตเตอรี่แบบตะกั่ว 12 โวลต์ จำนวน 2 ลูก แต่ละลูกจ่ายกระแสได้สูงสุด 12 แอมแปร์ต่อชั่วโมง เป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าหลัก ที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้าด้วยโมดูลกำลัง (Power module) โดยหุ่นยนต์ทั้งสองประเภทนี้จะสามารถเคลื่อนที่ได้ทั้งในโหมดบังคับวิทยุและโหมดอัตโนมัติ ตามเส้นทางที่เชื่อมต่อจุดพิกัดที่กำหนด

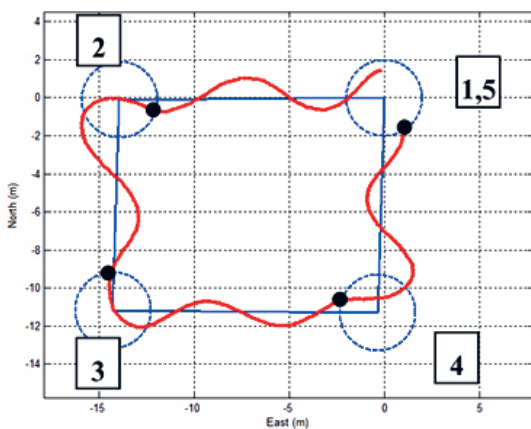
การควบคุมการเคลื่อนที่ของรถแบบสี่ล้อจะนำสัญญาณ u_s การควบคุมด้วย Ardubrover มาใช้เพื่อบังคับเลี้ยวสองล้อหน้าด้วยเซอร์โวมอเตอร์ (Servo motor) ได้โดยตรง ส่วนความเร็วของรถที่ขับเคลื่อนด้วยล้อหลัง จะใช้สัญญาณ u_l ในการควบคุมความเร็วรอบดีซีมอเตอร์ที่ขับเคลื่อนล้อหลังได้โดยตรงเช่นกัน แต่ทว่าเมื่อนำการควบคุมด้วย Ardubrover มาประยุกต์ใช้กับเรือแบบสองท่อน จะต้องทำการแปลงสัญญาณควบคุม u_s และ u_l มาใช้ปรับความเร็วรอบของใบพัดเรือที่ติดตั้งไว้กึ่งกลางเรือของแต่ละท่อนร่วมกัน โดยได้สร้างความ

สัมพันธของระบบควบคุมใบพัดซ้าย (u_{pL}) และ ใบพัดขวา (u_{pR}) เป็นดังสมการที่ (6)

$$\begin{aligned} u_{pL} &= u_t + 0.5u_s u_t + 0.3u_s & \text{และ} \\ u_{pR} &= u_t - 0.5u_s u_t - 0.3u_s \end{aligned} \quad (6)$$

3. ผลกระทบของพารามิเตอร์ของระบบควบคุมแบบ L_1 ในการติดตามเส้นวิถีโคจรแบบเส้นตรง

ในการทดลอง ผู้วิจัยได้กำหนดจุดพิกัดเป้าหมายไว้ทั้ง 5 จุด ที่ให้เส้นวิถีโคจรเป็นแบบเส้นตรงจำนวน 4 เส้นที่วนกลับมาที่จุดเริ่มต้นหรือจุดพิกัดที่ 1 และ 5 เป็นจุดเดียวกัน และกำหนดให้ขนาดรัศมีของวงกลมรอบจุดพิกัดเป้าหมายที่กำหนดมีค่าเป็น 2 เมตร (ที่แสดงด้วยวงกลมเส้นประ) ตอนเริ่มต้นหุ่นยนต์จะอยู่ภายในวงกลมรอบตำแหน่งที่ 1 และมีจุดพิกัดเป้าหมายเป็นจุดที่ 2 และ หุ่นยนต์จะพยายามติดตามเส้นวิถีโคจรที่ 1 เมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่เข้าไปสู่ภายในวงกลมรอบจุดพิกัดตำแหน่งที่ 2 ระบบตรรกะการควบคุมจะเปลี่ยนจุดพิกัดเป้าหมายเป็นจุดที่ 3 และหุ่นยนต์จะติดตามเส้นวิถีโคจรที่ 2 จนกระทั่งหุ่นยนต์เคลื่อนที่เข้าสู่วงกลมรอบตำแหน่งจุดพิกัดที่ 5 จึงเป็นการสิ้นสุดโปรแกรมการควบคุมแบบอัตโนมัติ ดังแสดงในรูปที่ 7



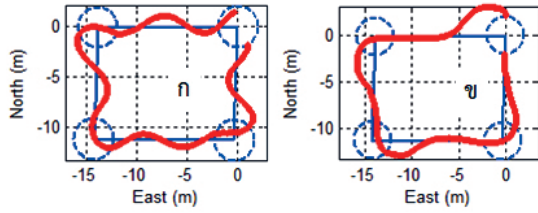
รูปที่ 7 การกำหนดรูปแบบการทดลองหุ่นยนต์ติดตามเส้นวิถีโคจร

เพื่อศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของโปรแกรม Ardurever ทั้งหมด 3 ตัวแปรของตัวควบคุมแบบ L_1 ในสมการที่ 4 คือ 1) $L_1 = [17, 19, 20, 21]$ เมื่อ $\zeta = 0.8$ และ $K_{ps} = 1$ และ 2) $\zeta = [0.6, 0.7, 0.8]$ เมื่อ $L_1 = 17$ และ $K_{ps} = 1$ และ 3) $K_{ps} = [0.8, 1.0, 1.2, 1.4]$ ของตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID) เมื่อ $L_1 = 17$ และ $\zeta = 0.8$ ซึ่งการวิเคราะห์ผลการทดสอบการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติของเรือแบบสองท่อนั้นจะพิจารณาประสิทธิภาพการทำงานของตรรกะการควบคุมแบบ L_1 ได้จากค่าเฉลี่ยของค่าผิดพลาดของระยะการขจัดจากยานพาหนะไปยังเส้นวิถีโคจรในแนวตั้งฉาก (หรือ $\bar{d}$) และ ค่าสูงสุดโดยเฉลี่ยของค่าผิดพลาดของระยะขจัดจากยานพาหนะไปยังเส้นวิถีโคจรในแนวตั้งฉาก (หรือ $\overline{\max(d)}$) ซึ่งคำนวณจากสมการที่ (7) และ (8) ตามลำดับ

$$\bar{d}_i = \frac{\left(\sum_{j=2}^4 |GPS_{ij}(x, y) - WP_CMD_{ij}(x, y)| \right)}{3} \quad (7)$$

$$\overline{\max(d)}_i = \frac{\left(\sum_{j=2}^4 \max(GPS_{ij}(x, y) - WP_CMD_{ij}(x, y)) \right)}{3} \quad (8)$$

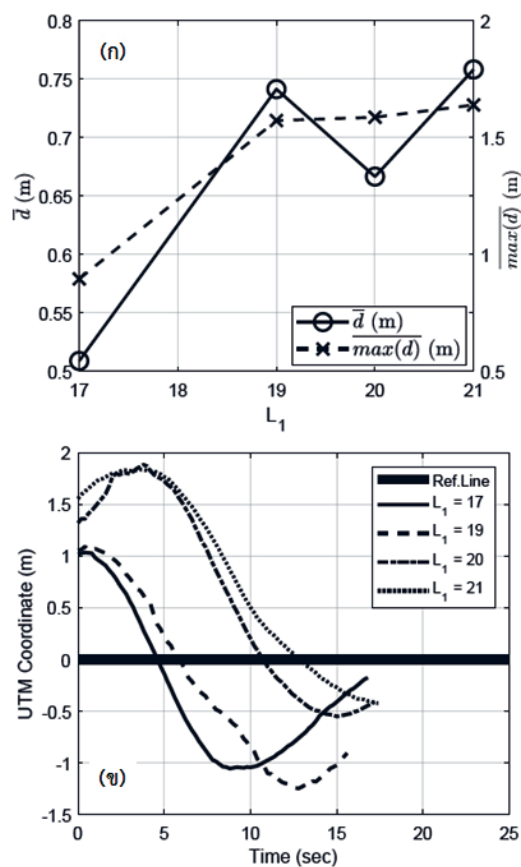
เมื่อ $GPS_{ij}(x, y)$ คือ ค่าข้อมูลพิกัดตำแหน่งของหุ่นยนต์ในระบบพิกัด UTM [10], $WP_CMD_{ij}(x, y)$ คือ ตำแหน่งบนเส้นวิถีโคจรแบบตรงสำหรับอ้างอิงค่าความผิดพลาดจากการติดตามเส้นวิถีโคจร, i แทน การทดลองครั้งที่ i และ j แทนเส้นวิถีโคจรอ้างอิงจากจุดพิกัดเริ่มต้นที่ 2 ถึง 4 โดยกำหนดให้เส้นจากจุดเป้าหมายที่ 2 ไปยังเป้าหมายที่ 3 คือ เส้นวิถีโคจรอ้างอิงที่ 2 เป็นต้น โดยผู้วิจัยจะไม่พิจารณาการเคลื่อนที่จากการติดตามเส้นวิถีโคจรที่ 1 เนื่องจากสภาพแวดล้อมทางอุทกศาสตร์สำหรับเก็บผลการทดลองส่งผลให้ไม่สามารถกำหนดให้ตำแหน่งเริ่มต้นของหุ่นยนต์เรือได้เท่ากันในทุกการทดลองได้ ดังนั้นในการหาค่าเฉลี่ย $\bar{d}$ และ $\overline{\max(d)}$ จะคำนวณจากเส้นวิถีโคจรในช่วงที่เริ่มจากจุดที่ 2-4 เท่านั้น



ก) เมื่อ $L_1 = 15$

ข) เมื่อ $L_1 = 21$

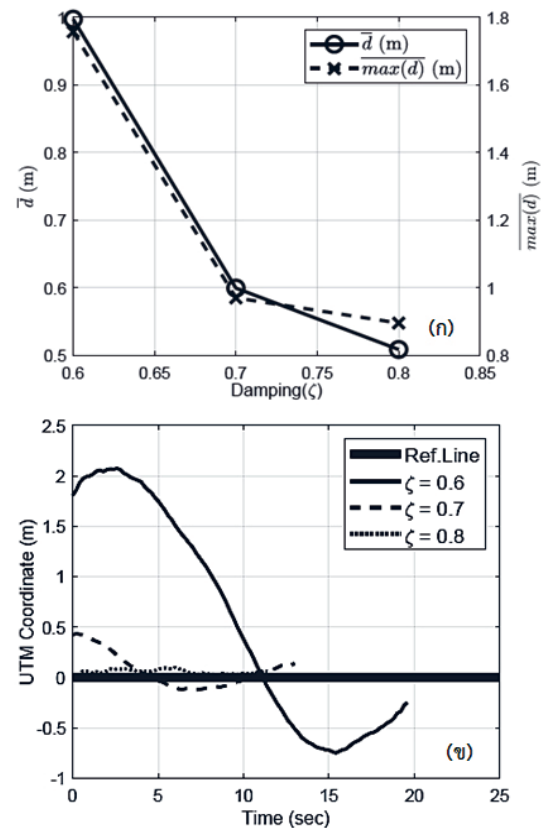
รูปที่ 8 การเปรียบเทียบพฤติกรรมติดตามเส้นวิถีโคจรของหุ่นยนต์เรือแบบสองหุ่น เมื่อปรับค่า L_1



รูปที่ 9 ผลการทดลองติดตามเส้นทางของเรือสองหุ่น เมื่อ $L_1 = [17, 19, 20, 21]$ และ $\zeta = 0.8, K_{ps} = 1$ คงที่ (ก) ผลกระทบต่อ $\bar{d}$ และ $\max(d)$ (รูปบน) และ (ข) เส้นทางเคลื่อนที่ที่ติดตามเส้นวิถีโคจร (รูปล่าง)

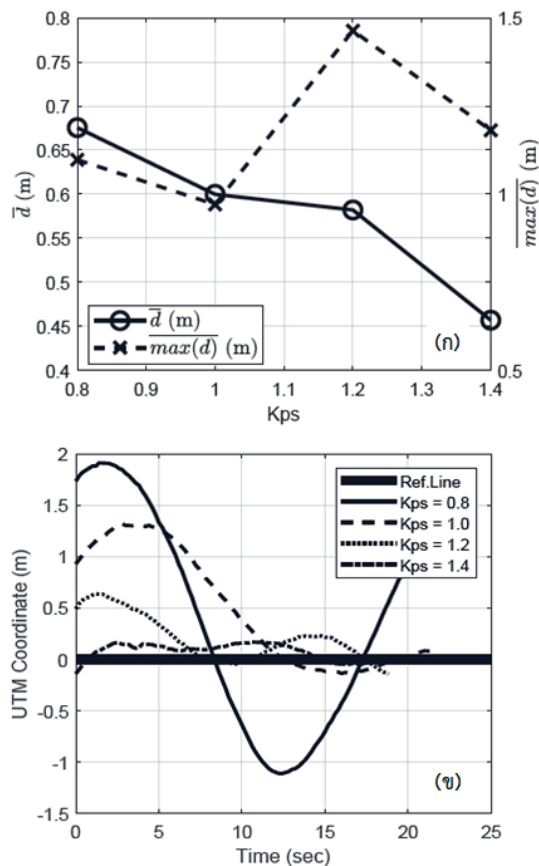
รูปที่ 8 แสดงพฤติกรรมติดตามเส้นวิถีโคจรแบบเส้นตรงที่เชื่อมต่อกับจุดพิกัดที่กำหนดแบบอัตโนมัติของเรือแบบสองหุ่น โดยเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เรือจะมีค่าผิดพลาดของระยะ

ขจัดจากยานพาหนะไปยังเส้นวิถีโคจรในแนวตั้งฉาก (d) ที่มีผลตอบสนองเชิงเวลาของระบบอันดับสองเป็นแบบหน่วงขาด (Underdamped response) เมื่อเพิ่มค่าระยะการขจัดของ L_1 จาก 15 เป็น 21 (โดยกำหนดให้ $\zeta = 0.8, K_{ps} = 1$ เป็นค่าคงที่) จากรูปแสดงให้เห็นเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เรือจะลู่เข้าหาเส้นตรงที่เชื่อมต่อกับจุดพิกัดที่กำหนดข้างล่างที่ราบเรียบขึ้น ซึ่งทำให้ผลตอบสนองเชิงเวลามีการแกว่งที่น้อยลง ดังนั้น จากสมการที่ 7 และ 8 สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังแสดงรูปที่ 9 โดยที่ค่าเฉลี่ย $\bar{d}$ และ $\max(d)$ จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งหมายความว่าระยะห่างจากเส้นตรงอ้างอิงโดยรวมจะมีค่ามากขึ้นแม้ว่าจะมีการกวัดแกว่งที่น้อยลง



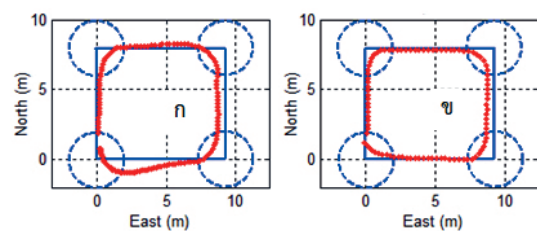
รูปที่ 10 ผลการทดลองติดตามเส้นทางของเรือสองหุ่น เมื่อ $\zeta = [0.6, 0.7, 0.8]$ และ $L_1 = 17, K_{ps} = 1$ คงที่ (ก) ผลกระทบต่อ $\bar{d}$ และ $\max(d)$ (รูปบน) และ (ข) เส้นทางเคลื่อนที่ที่ติดตามเส้นวิถีโคจร (รูปล่าง)

ส่วนการเพิ่มค่าอัตราส่วนความหน่วง (หรือ ξ) จาก 0.6 ไปถึง 0.8 จะทำให้เรือหุ่นยนต์ มีเส้นวิถีโคจรที่ติดตามเส้นตรงที่เชื่อมจุดพิกัดที่กำหนดได้ราบเรียบดีขึ้น และมีการกวัดแกว่งที่น้อยลงมาก ดังนั้นค่าเฉลี่ย $\bar{d}$ และ $\max(\bar{d})$ จะมีค่าลดน้อยลงตามไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 10 ซึ่งมีผลกระทบเช่นเดียวกันกับการเพิ่มค่าอัตราขยาย K_{ps} ที่แสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 11 ผลการทดลองติดตามเส้นทางของเรือสองหุ่น เมื่อ $K_{ps} = [0.8, 1.0, 1.2, 1.4]$ และ $L_1 = 17$, $\xi = 0.8$ คงที่ (ก) ผลกระทบต่อ $\bar{d}$ และ $\max(\bar{d})$ (รูปบน) และ (ข) เส้นทาง การเคลื่อนที่ติดตามเส้นวิถีโคจร (รูปล่าง)

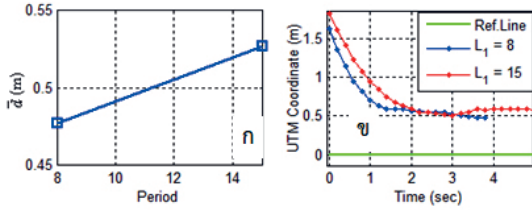
เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมเคลื่อนที่ติดตามเส้นวิถีโคจรแบบเส้นตรงของเรือแบบสองหุ่น กับหุ่นยนต์รถแบบสี่ล้อที่แตกต่างกันอันเนื่องมาจากพลศาสตร์ของหุ่นยนต์ทั้งสองรูปแบบ เมื่อใช้พารามิเตอร์แบบเดียวกัน คือ $L_1 = 15$, $\xi = 0.8$ และ $K_{ps} = 1$ จากรูปที่ 12 จะเห็นได้ว่าพฤติกรรม การติดตามเส้นวิถีโคจรแบบเส้นตรงที่เชื่อมต่อสี่จุดพิกัดที่กำหนดแบบอัตโนมัติของหุ่นยนต์รถสี่ล้อ โดยเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์รถสี่ล้อจะมีค่าผิดพลาดของระยะขจัดจากยานพาหนะไปยังเส้นวิถีโคจรในแนวตั้งฉาก (d) ที่มีผลตอบสนองเชิงเวลาของระบบอันดับสองเป็นแบบความหน่วงเกิน (Overdamped response) เมื่อลดค่าระยะการ ขจัดของ L_1 จาก 15 ลดลงเหลือ 8 เส้นทาง การเคลื่อนที่ของรถแบบสี่ล้อจะลู่อเข้าหาเส้นตรงที่เชื่อมต่อจุดพิกัดที่กำหนดได้รวดเร็วขึ้น หรือ สามารถติดตามเส้นทางที่กำหนดได้ดีขึ้นนั่นเอง ซึ่งจะสามารถสังเกตได้จากสมการที่ (4) เมื่อลดค่า L_1 จะทำให้ค่าความถี่ธรรมชาติ (ω_n) หรือ ความถี่ ในการแกว่งของผลตอบสนองของเส้นทางการเคลื่อนที่เพิ่มมากขึ้น จึงให้หุ่นยนต์รถสี่ล้อสามารถ ลู่อเข้าหาเส้นตรงที่กำหนดได้รวดเร็วขึ้น



ก) เมื่อ $L_1 = 15$

ข) เมื่อ $L_1 = 8$

รูปที่ 12 เปรียบเทียบพฤติกรรมการติดตามเส้นทางของรถสี่ล้อ เมื่อ $L_1 = [8, 15]$ และ $\xi = 1$, $K_{ps} = 1$

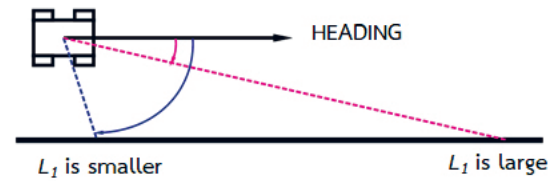


รูปที่ 13 ผลการทดลองติดตามเส้นของหุ่นยนต์
เรือสองหุ่น เมื่อ $L_1 = [8, 15]$ และ $L_1 = 17$,
 $\xi = 0.8$ คงที่ ก) ผลกระทบต่อ $\bar{d}$ และ $\max(\bar{d})$
ข) เส้นทางการเคลื่อนที่ติดตามเส้นวิถีโคจร

4. การอภิปรายผลการทดลอง

เพื่อศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ค่า
ระยะการขจัด (L_1) ต่อพฤติกรรมเคลื่อนที่ของ
ยานพาหนะแบบอัตโนมัติ จากในรูปที่ 8 พฤติกรรม
การติดตามเส้นวิถีโคจรของหุ่นยนต์เรือแบบ
สองหุ่นเมื่อกำหนดให้ $L_1 = 15$ ส่งผลให้หุ่นยนต์เรือ
ลู่เข้าหาเส้นตรงที่กำหนดเร็วเกินไป ทำให้เส้นทาง
การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เรือแกว่งกลับไปมา
อย่างรวดเร็ว เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ใช้ $L_1 = 21$
ที่มีพฤติกรรมติดตามเส้นวิถีโคจรได้ช้ากว่าแต่
ราบเรียบมากกว่า โดยจะสามารถอธิบายผลกระทบ
ของพารามิเตอร์ L_1 ได้ด้วยรูปที่ 14 ในกรณีที่
กำหนดให้ระยะการขจัด L_1 มีค่าสั้นเกินไปดังแสดง
ด้วยเส้นประสีน้ำเงิน จะทำให้หุ่นยนต์มีมุมหันเห
กว้างมาก แม้ว่าหุ่นยนต์จะสามารถเคลื่อนที่เข้าหา
เส้นวิถีโคจรได้เร็ว แต่ระบบควบคุมบังคับเลี้ยวมุม
หันเหของหุ่นยนต์เรื่อนั้นไม่สามารถตอบสนองให้
เรือติดตามเส้นวิถีโคจรได้อย่างทันท่วงท่าทำให้เส้น
วิถีโคจรกวัดแกว่งไปมาเมื่อเทียบกับในกรณีที่ใช้
 $L_1 = 21$ ที่แสดงด้วยเส้นประสีชมพูที่ยาวมากขึ้น
ทำให้หุ่นยนต์เรือมีมุมหันเหลู่เข้าสู่เส้นวิถีโคจร
ที่น้อยลง ส่งผลให้ผลตอบสนองของเรือในการลู่
เข้าเส้นวิถีโคจรนั้นช้าลงตามไปด้วย และอาจทำให้
เส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เรือจะไม่ทนทาน
ต่อสิ่งรบกวนจากสภาพแวดล้อมภายนอก ซึ่ง
สามารถสรุปผลการวิเคราะห์ของการเคลื่อนที่

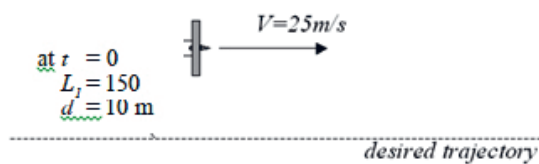
ติดตามเส้นวิถีโคจรแบบเส้นตรงแบบอัตโนมัติในรูป
ที่ 9 ได้คือ เมื่อเพิ่มค่า L_1 ให้สูงขึ้นจะพบว่าค่าเฉลี่ย
ของค่าผิดพลาดของระยะการขจัดจากยานพาหนะ
ไปยังเส้นวิถีโคจรในแนวตั้งฉาก (หรือ $\bar{d}$) มีแนวโน้ม
เพิ่มขึ้นตามค่า L_1 และค่าสูงสุดโดยเฉลี่ยของค่า
ผิดพลาดของระยะขจัดจากยานพาหนะไปยังเส้น
วิถีโคจรในแนวตั้งฉาก (หรือ $\max(\bar{d})$) เพิ่มขึ้น
ตามค่า L_1 ที่มากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจนเช่นกัน



รูปที่ 14 ลักษณะการติดตามเส้นวิถีโคจร
เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า L_1

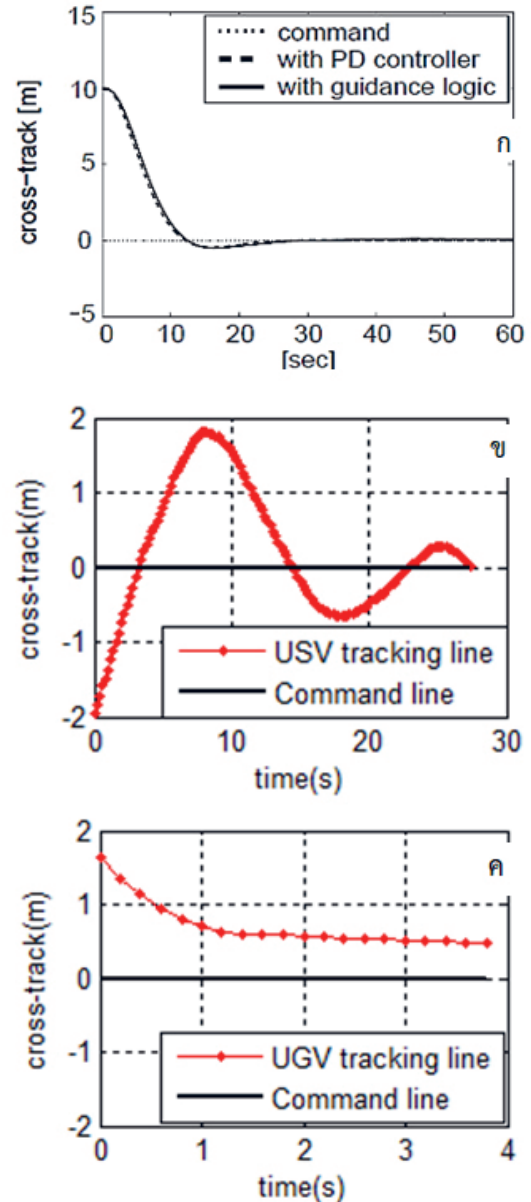
และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบพฤติกรรม
การติดตามเส้นวิถีโคจรแบบเส้นตรงแบบอัตโนมัติ
ที่แตกต่างกันของหุ่นยนต์ทั้งสองรูปแบบ เมื่อใช้ค่า
 $L_1 = 15$ ที่เท่ากัน พบว่าหุ่นยนต์รถ (ในรูปที่ 12 ก)
มีพฤติกรรมติดตามเส้นที่ราบเรียบกว่า
หุ่นยนต์เรือ (ในรูปที่ 8 ก) เนื่องจากล้อของ
หุ่นยนต์รถไม่มีการสั่นไถลไปบนพื้นผิวถนน ทำให้
หุ่นยนต์รถตอบสนองได้ไวเมื่อบังคับเลี้ยวมุมหันเห
ติดตามเส้นวิถีโคจร และเมื่อผู้วิจัยทดลอง
เปลี่ยนแปลงค่า L_1 ที่ใช้กับหุ่นยนต์รถพบว่าในกรณี
ที่ใช้ค่า $L_1 = 8$ พบว่าหุ่นยนต์รถสามารถลู่เข้าหา
เส้นวิถีโคจรได้เร็วกว่าในการทดลองที่ใช้ค่า $L_1 = 15$
ดังแสดงด้วยตัวอย่างพฤติกรรมจริงในรูปที่ 12
(ข) และยังส่งผลให้ $\bar{d}$ ลดลงตาม L_1 อีกด้วย
ดังแสดงในรูปที่ 13 (ก) เมื่อพิจารณาผลกระทบ
จากค่า L_1 ที่มีผลต่อพฤติกรรมของหุ่นยนต์ทั้งสอง
ประเภทที่มีความแตกต่างกันของพลศาสตร์
จะเห็นได้ว่าโดยผลการศึกษาในงานวิจัยนี้ มีความ
สอดคล้องกับผลการศึกษาในงานวิจัยอ้างอิงที่ [3]
ซึ่งอภิปรายทฤษฎีการควบคุมติดตามเส้นวิถี

โคจรด้วยตัวควบคุม L_1 และทำการศึกษาแบบจำลองพฤติกรรมเคลื่อนที่ติดตามเส้นวิถีโคจรแบบตรงด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ของอากาศยานไร้คนขับ โดยกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นดังแสดงในรูปที่ 15 ผลการจำลองพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอากาศยานไร้คนขับในทางทฤษฎีสอดคล้องและเป็นไปในแนวทางเดียวกันกับผลการทดสอบของหุ่นยนต์รถล้อและของหุ่นยนต์เรือสองหุ่นในงานวิจัยนี้ และยังแสดงให้เห็นชัดว่าค่า L_1 ที่เหมาะสมกับยานพาหนะแต่ละประเภทจะแตกต่างกันได้ซึ่งเป็นผลมาจากข้อจำกัดทางกายภาพและทางพลศาสตร์ของยานพาหนะชนิดนั้นๆ ดังการเปรียบเทียบพฤติกรรมการลู่เข้าหาเส้นทางที่กำหนดที่แสดงในรูปที่ 16



รูปที่ 15 เงื่อนไขเริ่มต้นของการจำลองทางคณิตศาสตร์ในงานวิจัยอ้างอิง [3]

ในขั้นถัดมา การศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่า ξ ที่มีผลต่อพฤติกรรมติดตามเส้นวิถีโคจรของหุ่นยนต์เรือพบว่า การเพิ่มให้สูงขึ้นจะส่งผลให้ค่า $\bar{d}$ และ $\max(\bar{d})$ ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 10 (ก) และจากรูปที่ 10 (ข) แสดงให้เห็นว่าการใช้ $\xi = 0.6$ (เส้นสีน้ำเงิน) แสดงพฤติกรรมติดตามเส้นวิถีโคจรของหุ่นยนต์เรือแกว่งกลับไปกลับมามากที่สุด กลับไปมามากที่สุด ทำให้มี $\max(\bar{d})$ สูงที่สุดและยังส่งผลให้ $\bar{d}$ มีค่าสูงที่สุดไปด้วยเช่นกัน



รูปที่ 16 การเปรียบเทียบพฤติกรรมติดตามเส้นวิถีโคจร ก) ผลการจำลองทางคณิตศาสตร์จากงานวิจัยอ้างอิง [3] ข) ผลการทดลองติดตามเส้นวิถีโคจรของหุ่นยนต์เรือสองหุ่น ค) ผลการทดลองติดตามเส้นวิถีโคจรของหุ่นยนต์รถล้อ

เมื่อผู้วิจัยทดลองเพิ่มค่า ξ ให้สูงขึ้นเป็น 0.7 (เส้นสีแดง) จะเห็นได้ว่าพฤติกรรมติดตามเส้นวิถีโคจรแบบส่ายกลับไปมาจะลดลง ส่งผลให้ $\max(\bar{d})$ และ $\bar{d}$ ลดลงตามไปด้วย และเมื่อเพิ่มค่า $\xi = 0.75$ จะเห็นได้ว่า หุ่นยนต์สามารถลู่เข้าหาเส้นวิถีโคจรได้ราบเรียบมากที่สุด ส่งผลให้

$\overline{\max(d)}$ และ $\bar{d}$ มีค่าน้อยที่สุด จากการทดลองเปลี่ยนแปลงค่า ξ แสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกับผลตอบสนองแบบฮาร์โมนิกที่ได้รับมาจากสมการที่ (4) ซึ่งเป็นสมการอนุพันธ์เชิงเส้นอันดับสอง (2nd order linear ODEs) เมื่อกำหนดให้ $0 < \xi < 1$ จะเป็นผลตอบสนองแบบมีความหน่วงขาด (underdamped response) ซึ่งช่วยให้ลดพฤติกรรมเคลื่อนที่ส่ายกลับไปมาและลู่อเข้าหาเส้นวิถีโคจรได้อย่างราบเรียบและเร็วมากขึ้นเมื่อเพิ่มค่า ξ ให้เข้าใกล้ 1 และจะลู่อเข้าหาเส้นวิถีโคจรได้ช้าลงเมื่อ ξ มากกว่า 1 หรือเป็นผลตอบสนองแบบความหน่วงเกิน (Overdamped response)

ในส่วนการศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงค่า $K_{p\text{-Steering}}$ (K_{ps}) ต่อพฤติกรรมเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เรือดั้งแสดงในรูปที่ 11 (ก) จะพบว่าเมื่อค่า K_{ps} เพิ่มขึ้น $\bar{d}$ จะมีแนวโน้มลดลง แต่ $\overline{\max(d)}$ จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จากรูปที่ 11 (ข) แสดงพฤติกรรมเคลื่อนที่ติดตามเส้นวิถีโคจรของหุ่นยนต์เรื่อ ซึ่งจะเห็นได้ชัดในกรณีที่ใช้ค่า $K_{ps} = 0.8$ (เส้นสีน้ำเงิน) เปรียบเทียบกับการทดลองที่ใช้ค่า $K_{ps} = 1.4$ (เส้นสีชมพู) จะพบว่าที่ค่า $K_{ps} = 0.8$ แสดงให้เห็นถึงผลตอบสนองการบังคับเลี้ยวมุมหันเหของหุ่นยนต์เรื่อเกิดขึ้นล่าช้า ทำให้มุมการลู่อเข้าเส้นวิถีโคจรจึงมีขนาดกว้างมาก ส่งผลให้มีพฤติกรรมเคลื่อนที่ตามเส้นทางแบบส่ายกลับไปมาและไม่ทนทานต่อสิ่งรบกวนจากสภาพแวดล้อม แต่ในกรณีที่ใช้ค่า $K_{ps} = 1.4$ แสดงให้เห็นถึงการตอบสนองบังคับเลี้ยวมุมหันเหของหุ่นยนต์เรื่อที่ไวมากกว่าเมื่อใช้ค่า $K_{ps} = 0.8$ ผลที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีตัวควบคุมแบบพีไอดี จากคุณลักษณะของ K_{ps} ซึ่งเป็นตัวควบคุมอัตราขยายค่าความผิดพลาดของมุม η ในกรณีที่ผลอัตราขยายสัดส่วนที่ต่ำจะส่งผลให้ระบบควบคุม

จะมีผลตอบสนองเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady-State) ล่าช้า ในทางกลับกัน ผลจากอัตราขยายสัดส่วนที่สูง ค่าความผิดพลาดก็จะเปลี่ยนแปลงมากขึ้น ส่งผลให้ระบบควบคุมจะมีผลตอบสนองที่ไวมากยิ่งขึ้นตามไปด้วย

5. สรุปผลการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาตรรกะการนำทางติดตามเส้นวิถีโคจรด้วยตัวควบคุม L_1 โดยศึกษาผลกระทบในการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม L_1 จำนวน 3 ค่า คือ L_1 , ξ และ K_{ps} และได้ใช้ตรรกะการนำทางด้วยตัวควบคุม L_1 กับหุ่นยนต์ 2 ประเภทที่มีพลศาสตร์แตกต่างกัน คือ หุ่นยนต์รถสี่ล้อที่มีการบังคับเลี้ยวด้วยล้อหน้า, ขับเคลื่อนด้วยล้อหลังและไม่สามารถลื่นไถลบนผิวสัมผัสถนน ซึ่งแตกต่างจากหุ่นยนต์เรื่อสองพุนจะใช้แรงผลักดันระหว่างใบพัดที่เท่ากันในทิศทางเดียวกันสำหรับการเคลื่อนที่ทางตรงและบังคับเลี้ยวด้วยการสร้างแรงผลักต่างกันระหว่างสองใบพัดและสามารถลื่นไถลไปบนผิวน้ำได้เมื่อมีผลกระทบจากอุทกพลศาสตร์ จากการศึกษาเปรียบเทียบหุ่นยนต์ทั้ง 2 ประเภทสามารถสรุปได้ดังนี้

1) ในการศึกษาผลกระทบจากการปรับเปลี่ยนค่า L_1 ของหุ่นยนต์ทั้งสองประเภทพบว่า การกำหนดค่า L_1 จะแปรผันตรงกับขนาดระยะขจัดของเส้นตรง L_1 และแปรผกผันกับมุมหันเลี้ยวเส้นวิถีโคจร การกำหนดค่า L_1 ที่มีความเหมาะสมจะส่งผลให้หุ่นยนต์สามารถติดตามเส้นวิถีโคจรได้อย่างราบเรียบและลู่อเข้าหาเส้นทางอย่างรวดเร็วโดยเฉพาะกับหุ่นยนต์เรื่อสองพุน เนื่องจากพฤติกรรมของเรือที่เป็นแบบความหน่วงขาด ทำให้ต้องใช้ค่า L_1 ที่มากจึงจะมีส่วนหุ่นยนต์รถสี่ล้อมีพฤติกรรมเป็นแบบความหน่วงเกิน ทำให้ต้องปรับตั้งค่า L_1 ที่น้อยจึงจะลู่อเข้าหาเส้นทางได้อย่างรวดเร็ว

2) การศึกษาผลกระทบจากการปรับเปลี่ยนค่า ξ ที่ใช้กับหุ่นยนต์เรือพบว่ามีความสอดคล้องกับผลตอบสนองจากระบบอันดับสองแบบมีความหน่วงแบบหน่วงขาด ซึ่งส่งผลให้พฤติกรรมตามเส้นทางวิถีโคจรแกว่งกลับไปมาและค่อยๆ ลดลงตามเวลา เนื่องจากพลศาสตร์ของเรื่อนั้นมีแรงเสียดทานต้านที่น้อย การเพิ่มค่า ξ ให้สูงขึ้นจนเข้าใกล้ค่า $1/\sqrt{2}$ หรือค่าความหน่วงวิกฤติ จะช่วยลดพฤติกรรมแกว่งกลับไปมาและลู่เข้าหาเส้นทางวิถีโคจรได้รวดเร็วและราบเรียบมากยิ่งขึ้น ส่วนการปรับค่า ξ จะมีผลกระทบต่อ ผลตอบสนองของหุ่นยนต์รถที่น้อยมากเนื่องจากผลตอบสนองเป็นแบบความหน่วงเกินอยู่แล้ว

3) ในตัวควบคุมพีไอดีของระบบการบังคับเลี้ยว เมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่า K_{ps} ให้สูงขึ้นจะช่วยให้หุ่นยนต์ทั้งสองประเภทสามารถเคลื่อนที่ลู่เข้าหาเส้นทางวิถีโคจรได้เร็วมากขึ้นและยังช่วยให้หุ่นยนต์สามารถติดตามเส้นทางวิถีโคจรได้ดียิ่งขึ้นโดยมีการกวัดแกว่งของเส้นทางเคลื่อนที่น้อยลง

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติสัญญารับทุนเลขที่ TG-44-47-59-067M

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Mu D, Zhao Y, Wang G, Fan Y and Bai Y. Course control of usv based on fuzzy adaptive guide control. 2016 Chinese Control and Decision Conference (CCDC). 2016 : 6433-6437.

[2] Changshun W, Huang Z, Yu Y. USV trajectory tracking control system based on ADRC. 2017 Chinese Automation Congress (CAC). 2017 : 7534-7538.

[3] Park S, John D, Jonathan H. A New nonlinear guidance logic for trajectory tracking. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Guidance, Navigation, and Control and Co-located Conferences. 2004.

[4] Idris M H B M, Kamarudin M A A B C, Sahalan M I, Abidin Z B Z, Rashid M M. Design and development of an autonomous surface vessel for inland water depth monitoring. 2016 International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCCE). Kuala Lumpur. 2016 : 177-182.

[5] ArduPilot Dev Team. ArduPilot mega [Internet]. 2017 [cited 2017 May 15]. Available from: <http://www.ardupilot.org> (in Thai)

[6] Sinisterra A, Dhanak M, Kouvaras N. A USV platform for surface autonomy. OCEANS 2017 – Anchorage. 2017 : 1-8.

[7] Hassan S, Alam M, Siddiqui N A, A A Siddiqui, M T Qadri. Designing and control of autonomous Unmanned Ground Vehicle. 2017 International Conference on Innovations in Electrical Engineering and Computational Technologies (ICIEECT). 2017 : 1-5.

- [8] Boonyarak S, Prempraneerach P. Real-time obstacle avoidance for car robot using potential field and local incremental planning. 2014 11 th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON). 2014 : 1-5.
- [9] Prempraneerach P. Trajectory tracking using sliding mode control for autonomous surface vessel. 2016 International Computer Science and Engineering Conference (ICSEC). 2016, pp. 1-6.
- [10] Yiengveerachon V. Engineering surveying. 2. Bangkok: Chulalongkorn University Press. Bangkok. 2016 (in Thai).

การใช้ประโยชน์เศษหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายเป็นมวลรวมในแผ่นซีเมนต์บอร์ด สำหรับผนังอาคารถอดประกอบ

ปราโมทย์ วีรานุกุล^{1*}, กิตติพงษ์ สุวีโร² และอิทธิ วีรานุกุล³

pramot.w@rmutp.ac.th^{1*}, kittipong.s@en.rmutt.ac.th², itthi.w@rmutsb.ac.th³

^{1*} สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

² ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

³ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

Received: March 22, 2018
Revised: April 25, 2018
Accepted: July 4, 2018

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแผ่นซีเมนต์บอร์ดจากเศษหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท1: หินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย: สารโซเดียมซิลิเกต: น้ำประปา จำนวน 5 อัตราส่วน เท่ากับ 1: 2: 0: 0.03: 0.5, 1: 2: 2: 0.03: 0.5, 1: 2: 4: 0.03: 0.55, 1: 2: 6: 0.03: 0.6 และ 1: 2: 8: 0.03: 0.65 โดยน้ำหนัก ขึ้นรูปแผ่นซีเมนต์บอร์ดด้วยเครื่องอัด และทดสอบคุณสมบัติตามมาตรฐาน มอก.878-2537 เรื่องแผ่นซีเมนต์อัดซีเมนต์: ความหนาแน่นสูง จากผลการทดสอบที่อายุการบ่ม 28 วัน พบว่า อัตราส่วน 1: 2: 4: 0.03: 0.55 เป็นอัตราส่วนแผ่นซีเมนต์บอร์ดจากเศษหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายที่เหมาะสมที่สุด แผ่นซีเมนต์บอร์ดที่พัฒนาขึ้นนี้ สามารถนำเศษหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้างที่มีน้ำหนักเบา แข็งแรง เป็นฉนวนป้องกันความร้อน และทนความชื้นได้ดี

คำสำคัญ: แผ่นซีเมนต์บอร์ด เศษหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย ฉนวนป้องกันความร้อน อาคารถอดประกอบ

Utilization of Vesicular Basalt Fragment as Aggregate in Cement Board for Knockdown Building Wall

Pramot Weeranukul^{1*} Kittipong Suweero² and Itthi Weeranukul³
pramot.w@rmutp.ac.th^{1*}, kittipong.s@en.rmutt.ac.th², itthi.w@rmutsb.ac.th³

^{1*} 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

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

Received: March 22, 2018
Revised: April 25, 2018
Accepted: July 4, 2018

Abstract

This research aims to develop the cement board from vesicular basalt fragment. The 5 ratios of Portland cement type1: fine sand: vesicular basalt fragment: sodium silicate: tap water are equal to 1: 2: 0: 0.03: 0.5, 1: 2: 2: 0.03: 0.5, 1: 2: 4: 0.03: 0.55, 1: 2: 6: 0.03: 0.6 and 1: 2: 8: 0.03: 0.65 by weight. The cement boards were produced by compression machine. The property tests of cement-bonded fiberboard followed the TIS. 878-1994 standard (cement bonded particle board: high density). From the results at 28 days of curing, 1: 2: 4: 0.03: 0.55 is the most suitable ratio of cement board from vesicular basalt fragment. This developed cement boards can apply the vesicular basalt fragment to use as the construction materials with light-weight, high strength, good thermal insulation, and moisture protection properties.

Keywords: cement board, vesicular basalt fragment, thermal insulation, knockdown building

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

หินบะซอลต์ (basalt) เป็นหินอัคนีผุ เนื้อละเอียดมีสีเทาถึงดำ น้ำตาลแกมแดง ม่วงปนดำ เกิดจากหินหนืดขึ้นมายึดตัวบนพื้นโลก ผ่านรอยแตกของเปลือกโลกหรือปล่องภูเขาไฟ มีองค์ประกอบหลักทางเคมี ได้แก่ ซิลิกา อะลูมินา เหล็ก แคลไซต์ แมกนีไซต์ โซดา โพแทสเซียม ไททานเนียม แมงกานีส และฟอสฟอรัส [1] ประเทศไทยมีแหล่งหินบะซอลต์ที่มีศักยภาพ (potential reserve) 42,252.8 ล้านตัน [2] พบได้ในจังหวัดกาญจนบุรี แพร่ ลำปาง ศรีสะเกษ จันทบุรี ตราด เชียงราย ลำปาง เพชรบูรณ์ ลพบุรี นครราชสีมา ชลบุรี สระบุรี อุทัยธานี บุรีรัมย์ อุบลราชธานี และสุรินทร์ [3] ปัจจุบันมีการใช้หินบะซอลต์ขนาดใหญ่มาเป็นหินก่อสร้าง แต่การนำหินดังกล่าวมาใช้งานจะต้องคัดเศษหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย (vesicular basalt) ออก เป็นเศษหินสีเทาถึงดำ ขนาดเม็ดหินค่อนข้างละเอียด และมีรูพรุนมาก พบมากบริเวณปากปล่องภูเขาไฟที่มีลักษณะการไหลของลาวาแบบลอนคลื่น (pahoehoe) เมื่อเปิดหน้าดินลึกลงไปเพื่อทำเหมืองหินจะพบชั้นของเศษหินบะซอลต์โพรงข่าย มีความหนา 0.5 – 5 เมตร [4] เศษหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายเป็นเศษหินที่มีปริมาณมากมีมูลค่าต่ำและไม่ถูกนำมาใช้ประโยชน์ จากลักษณะของเศษหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายที่ละเอียด และน้ำหนักเบา ทำให้เห็นว่าเหมาะสมสำหรับนำไปใช้เป็นมวลรวมของผลิตภัณฑ์แผ่นซีเมนต์บอร์ดที่นิยมใช้เป็นผนังของอาคารถอดประกอบ (knockdown wall) ที่มีมูลค่าตลาดมากกว่า 6,000 ล้านบาท [5] งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาต้นแบบผลิตภัณฑ์แผ่นซีเมนต์บอร์ดที่ใช้เศษหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายเป็นมวลรวมสำหรับใช้ก่อสร้างผนังของอาคารถอดประกอบ ซึ่งเป็นการนำทรัพยากรธรรมชาติมาใช้ประโยชน์

และสร้างรายได้ให้กับผู้ประกอบการ ชุมชนท้องถิ่น และผู้บริโภค



รูปที่ 1 หินบะซอลต์โพรงข่าย

2. วัสดุและอุปกรณ์

วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 หินละเอียดจากทรายบก เศษหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายจากจังหวัดบุรีรัมย์ น้ำประปา สารโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) เครื่องผสมคอนกรีต เครื่องอัดแผ่นซีเมนต์บอร์ด พร้อมแบบหล่อ ขนาด $30 \times 30 \times 1.5$ เซนติเมตร เครื่องย่อยหิน พร้อมตะแกรงสำหรับคัดขนาดเบอร์ 4 หรือ 4.76 มิลลิเมตร เครื่องชั่งน้ำหนัก ชุดทดสอบหาค่าความหนาแน่น ความชื้น และการพองตัวเมื่อแช่น้ำ เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine; UTM) ยี่ห้อ Chun Yen รุ่น CY-6040A12 ชีตความสามารถประยุกต์แรงสูงสุด 100 ตัน ผลิตโดยประเทศไต้หวัน และเครื่องทดสอบสภาพนำความร้อนของกรมวิทยาศาสตร์บริการ

3. การออกแบบส่วนผสม

ออกแบบอัตราส่วนผสมของแผ่นซีเมนต์บอร์ดจากเศษหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย จำนวน 5 อัตราส่วน โดยอ้างอิงจากอัตราส่วนของคอนกรีตทั่วไป ซึ่งประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ต่อทรายต่อหินต่อน้ำ เท่ากับ 1:2:4:0.5 โดยน้ำหนัก แล้วจึงปรับเปลี่ยนปริมาณหินบะซอลต์เพื่อหาอัตราส่วน

ที่เหมาะสม ส่วนโซเดียมซิลิเกตใช้ในอัตราส่วน โซเดียมซิลิเกตต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 0.03 โดย น้ำหนัก [6] ดังตารางที่ 1

4. การขึ้นรูปแผ่นซีเมนต์บอร์ด

เริ่มจากผสมสารโซเดียมซิลิเกตเพื่อ เร่งการก่อตัวของแผ่นซีเมนต์บอร์ดในปริมาณ ร้อยละ 3 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ ให้เข้ากับ น้ำประปา จากนั้นผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 ทรายละเอียด เศษหินบะซอลต์ เนื้อโพรงขำย และน้ำประปาที่ผสมสารเร่งการ ก่อตัวแล้ว ให้เข้ากันด้วยเครื่องผสมคอนกรีต เทส่วนผสมทั้งหมดลงในแบบหล่อที่ทำน้ำมัน หล่อลื่นแล้ว และขึ้นรูปแผ่นซีเมนต์บอร์ดที่ใช้ เศษหินบะซอลต์เนื้อโพรงขำยเป็นมวลรวมด้วย เครื่องอัดแผ่นซีเมนต์บอร์ด หรือโต๊ะสั่นเขย่า โดยใช้ความดัน 1015.26 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว หรือ 70 บาร์ ดังรูปที่ 2 และบ่มแผ่นซีเมนต์บอร์ดที่ใช้ เศษหินบะซอลต์เนื้อโพรงขำยเป็นมวลรวมด้วย กระสอบพรุนน้ำตามระยะเวลาที่กำหนด ได้แก่ 7, 14, 21 และ 28 วัน ก่อนนำไปทดสอบ

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนัก

อัตรา ส่วน	ปูน ซี เมนต์	ทราย ละเอียด	หิน บะ ซอลต์	โซ เดียม ซิลิ เกต	น้ำ ประ ปา
B0	1	2	0	0.03	0.50
B2	1	2	2	0.03	0.50
B4	1	2	4	0.03	0.55
B6	1	2	6	0.03	0.60
B8	1	2	8	0.03	0.65



รูปที่ 2 การขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแผ่นซีเมนต์บอร์ด

5. การทดสอบสมบัติของแผ่นซีเมนต์บอร์ด

ทดสอบสมบัติทางกายภาพและทาง กลของแผ่นซีเมนต์บอร์ดผสมเศษหินบะซอลต์ เนื้อโพรงขำย ตามมาตรฐาน มอก.878-2537 เรื่องแผ่นขึ้นไม้อัดซีเมนต์: ความหนาแน่นสูง [7] ซึ่งมีความใกล้เคียงกันในลักษณะของการ ใช้งานมาทดสอบเทียบเคียง พร้อมทั้งนำผลิตภัณฑ์ แผ่นขึ้นไม้อัดซีเมนต์: ความหนาแน่นสูง ที่มี จำหน่ายในท้องตลาดอีก 2 ยี่ห้อ ซึ่งผ่านการ รับรองตามมาตรฐาน มอก.878-2537 และ มีส่วนประกอบหลักเป็นขึ้นไม้ มาทดสอบ เปรียบเทียบด้วย โดยใช้ตัวอย่างทดสอบ จำนวน 5 ตัวอย่างต่อการทดสอบ ในทุกอัตราส่วน ประกอบด้วย ลักษณะทั่วไป ความหนาแน่น ความชื้น สภาพนำความร้อน การพองตัวเมื่อแช่น้ำ ความต้านทานแรงดัด โมดูลัสยืดหยุ่น และความ ต้านทานแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า



รูปที่ 3 การทดสอบความต้านทานแรงดึงตั้งฉากที่ผิวหน้า

6. ผลการวิจัย

ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางกลของแผ่นซีเมนต์บอร์ดจากหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย ตามมาตรฐาน มอก.878-2537 เรื่องแผ่นขึ้นไม้อัดซีเมนต์: ความหนาแน่นสูง [7] สามารถสรุปได้ ดังนี้

6.1 ผลการทดสอบลักษณะทั่วไป

ผลการตรวจพินิจลักษณะทั่วไปของแผ่นซีเมนต์บอร์ดจากหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย ที่อายุการบ่ม 28 วัน พบว่า แผ่นซีเมนต์บอร์ดจากหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย ทั้งที่ไม่ผสมหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย และที่ผสมหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายไม่เกินอัตราส่วน B4 สามารถผ่านตามที่มาตรฐานกำหนด คือ มีความหนาแน่น และความเรียบของแผ่นซีเมนต์บอร์ดที่สม่ำเสมอ และบริเวณขอบมีความฉาก [7] ส่วนการผสมหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายที่อัตราส่วน B6 และ B8 เนื้อของซีเมนต์บอร์ดจะมีความร่วน กล่าวคือ ปริมาณของหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายมีปริมาณมากเกินไปที่ปูนซีเมนต์จะเชื่อมประสานได้ทั้งหมด จึงทำให้แผ่นซีเมนต์บอร์ดที่ได้เกิดการบิ่นที่ขอบหรือเกิดการแตกร้าวได้ง่าย ส่วนแผ่นขึ้นไม้อัดซีเมนต์: ความหนาแน่นสูง ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด ทั้ง 2 ยี่ห้อ ก็มีลักษณะผ่านมาตรฐาน

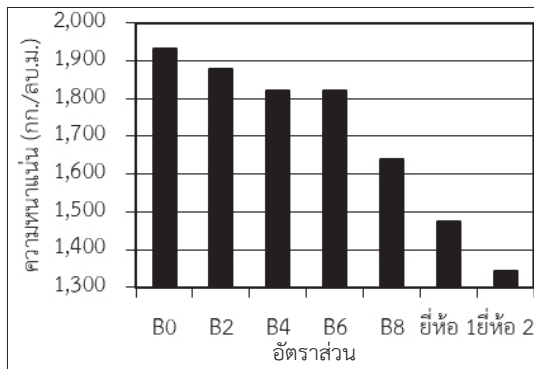
6.2 ผลการทดสอบความหนาแน่น

ผลการหาความหนาแน่นของแผ่นซีเมนต์บอร์ดที่ผสมและไม่ผสมหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย ทั้ง 5 อัตราส่วน ที่อายุการบ่ม 28 วัน และแผ่นซีเมนต์บอร์ดที่จำหน่ายในท้องตลาดอีก 2 ยี่ห้อ ในรูปที่ 4 พบว่า แผ่นซีเมนต์บอร์ดทั้งหมดมีค่าความหนาแน่นเกินกว่าที่มาตรฐานกำหนด คือ มีค่าเกินกว่า 1,300 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร [7] โดยปริมาณหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายที่ผสมลงในแผ่นซีเมนต์บอร์ด มีผลทำให้ความหนาแน่น

ของแผ่นซีเมนต์บอร์ดลดลง ดังจะเห็นได้จากแผ่นซีเมนต์บอร์ดอัตราส่วน B0 มีความหนาแน่นมากที่สุด รองลงมาคือ อัตราส่วน B2, B4, B6 และ B8 มีความหนาแน่นต่ำที่สุด อย่างไรก็ตามความหนาแน่นของแผ่นซีเมนต์บอร์ดจากหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายที่ลดต่ำลงก็ยังคงสูงกว่าแผ่นซีเมนต์บอร์ดในท้องตลาด ซึ่งเป็นผลมาจากความหนาแน่นของวัสดุเชื่อมประสานอย่างปูนซีเมนต์ที่มีค่าสูง เท่ากับ 3,100 ถึง 3,200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ทราบ เท่ากับ 2,600 ถึง 2,700 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย เท่ากับ 2,000 ถึง 2,300 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร [8] แตกต่างจากแผ่นขึ้นไม้อัดซีเมนต์ทั่วไปที่มีส่วนผสมหลักเป็นขึ้นไม้ ซึ่งมีความหนาแน่นเพียง 600 ถึง 1,100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร [9]

6.3 ผลการทดสอบความชื้น

ผลการทดสอบความชื้นของแผ่นซีเมนต์บอร์ดจากหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย ที่อายุการบ่ม 28 วัน และแผ่นซีเมนต์บอร์ดในท้องตลาด ในรูปที่ 5 พบว่า แผ่นซีเมนต์บอร์ดทั้งหมด มีค่าอยู่ในช่วงที่มาตรฐานกำหนด คือ มีค่าความชื้นอยู่ระหว่างร้อยละ 9 ถึง 15 [7] เนื่องจากแผ่นซีเมนต์บอร์ดดังกล่าว มีการอัดด้วยความดันในกระบวนการผลิต ทำให้ความชื้นบางส่วนถูกนำออกจากส่วนผสม และความชื้นที่เหลือจะถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ [10] ความชื้นของแผ่นซีเมนต์บอร์ดจึงมีค่าต่ำมาก



รูปที่ 4 ความหนาแน่นของแผ่นซีเมนต์บอร์ด

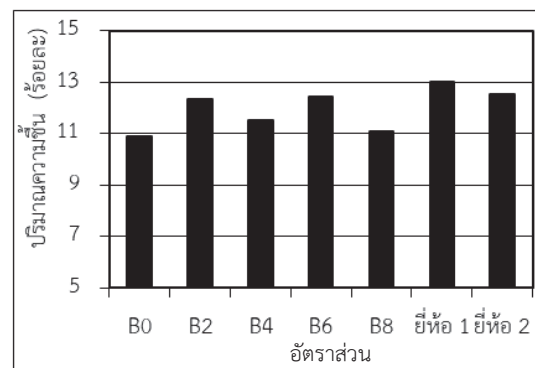
6.4 ผลการทดสอบสภาพนำความร้อน

การทดสอบสภาพนำความร้อนของแผ่นซีเมนต์บอร์ดจากหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย ที่อายุการบ่ม 28 วัน และแผ่นซีเมนต์บอร์ดในท้องตลาด ตามมาตรฐาน มอก.878-2537 [7] สามารถสรุปผลได้ ดังรูปที่ 6 พบว่า สภาพนำความร้อนหรือสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแผ่นซีเมนต์บอร์ดจากหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย อัตราส่วน B4, B6, B8 และแผ่นซีเมนต์บอร์ดในท้องตลาด มีค่าผ่านตามมาตรฐาน คือ มีสภาพนำความร้อน ไม่เกินกว่า 0.25 วัตต์ต่อเมตร.เคลวิน [7] ส่วนแผ่นซีเมนต์บอร์ดอัตราส่วน B0 และ B2 มีสภาพนำความร้อนเกินกว่าที่มาตรฐานกำหนด จากผลการทดสอบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า หินบะซอลต์ เนื้อโพรงข่าย สามารถช่วยลดค่าสภาพนำความร้อนได้ โดยเป็นผลมาจากความพรุนที่มากของเศษหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายที่ผสม [11] ดังนั้น อาคารที่มีการติดตั้งแผ่นซีเมนต์บอร์ดที่ผสมหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย ปริมาณมากเป็นผนังจะประหยัดพลังงานจากการใช้เครื่องปรับอากาศดีกว่าแผ่นซีเมนต์บอร์ดที่ผสมหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายปริมาณน้อย

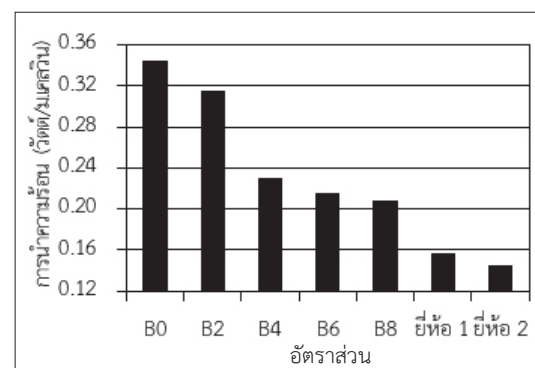
6.5 ผลการทดสอบการพองตัวเมื่อแช่น้ำ

สำหรับผลการทดสอบการพองตัวเมื่อแช่น้ำของแผ่นซีเมนต์บอร์ดจากหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย ที่อายุการบ่ม 28 วัน และแผ่นซีเมนต์

บอร์ดในท้องตลาด สามารถสรุปได้ ดังรูปที่ 7 พบว่า การพองตัวเมื่อแช่น้ำของแผ่นซีเมนต์บอร์ดจากหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย และแผ่นซีเมนต์บอร์ดในท้องตลาดที่แตกต่างกัน โดยแผ่นซีเมนต์บอร์ดจากหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย เป็นวัสดุที่มีค่าการพองตัวเมื่อแช่น้ำที่ต่ำมาก ในขณะที่แผ่นซีเมนต์บอร์ดในท้องตลาดเป็นวัสดุที่มีค่าการพองตัวเมื่อแช่น้ำที่สูงมาก เป็นผลมาจากลักษณะของส่วนผสม คือ หินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายเป็นวัสดุที่ไม่เกิดการพองตัว ต่างจากซีเมนต์ที่เกิดการพองตัวมากเมื่อแช่น้ำ อย่างไรก็ตาม แผ่นซีเมนต์บอร์ดจากหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย และแผ่นซีเมนต์บอร์ดจากท้องตลาด ที่นำมาทดสอบ สามารถผ่านมาตรฐานที่กำหนดให้มีค่าไม่เกินร้อยละ 2 ได้ [7]



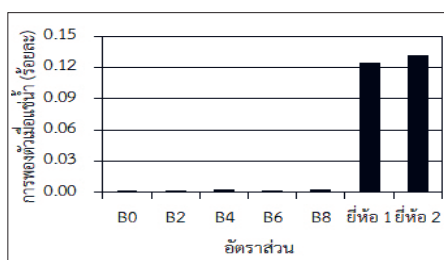
รูปที่ 5 ความชื้นของแผ่นซีเมนต์บอร์ด



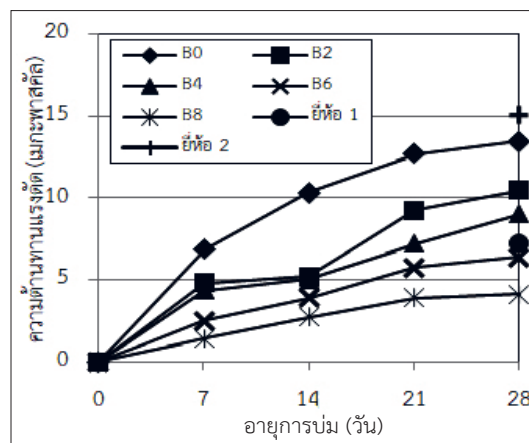
รูปที่ 6 สภาพการนำความร้อนของแผ่นซีเมนต์บอร์ด

6.6 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดัด

ความต้านทานแรงดัดของแผ่นซีเมนต์บอร์ดจากหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย ที่อายุการบ่ม 7, 14, 21 และ 28 วัน และแผ่นซีเมนต์บอร์ดในท้องตลาด สามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังรูปที่ 8 โดยพบว่าแผ่นซีเมนต์บอร์ดที่ไม่มีการผสมบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย (อัตราส่วน B0) มีความต้านทานแรงดัดสูงที่สุด รองลงมาคือแผ่นซีเมนต์บอร์ดจากหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย อัตราส่วน B2 อัตราส่วน B4 อัตราส่วน B6 และอัตราส่วน B8 มีความต้านทานแรงดัดต่ำที่สุดตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า หินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายที่ผสม มีส่วนทำให้ความต้านทานแรงดัดลดลง ทั้งนี้ เป็นผลมาจากความพรุนหรือช่องว่างของหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย [10] ทำให้มีความแข็งแรงลดลง เพราะจะทำให้มีพื้นที่รับแรงน้อย นอกจากนี้ การผสมหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายที่มาก จะมีผลต่อปริมาณปูนซีเมนต์ที่ช่วยยึดเกาะน้อยกว่า แผ่นซีเมนต์บอร์ดที่มีปริมาณหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายน้อย เมื่อเทียบกับมาตรฐานที่กำหนดให้ความต้านทานแรงดัดต้องไม่น้อยกว่า 9 เมกะพาสคัล [7] พบว่า แผ่นซีเมนต์บอร์ดจากหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย อัตราส่วน B0, B2 และ B4 สามารถผ่านตามที่มาตรฐานกำหนด ส่วนแผ่นซีเมนต์บอร์ดตามท้องตลาด มีเพียง 1 ยี่ห้อ เท่านั้น ที่ผ่านตามที่มาตรฐานกำหนด



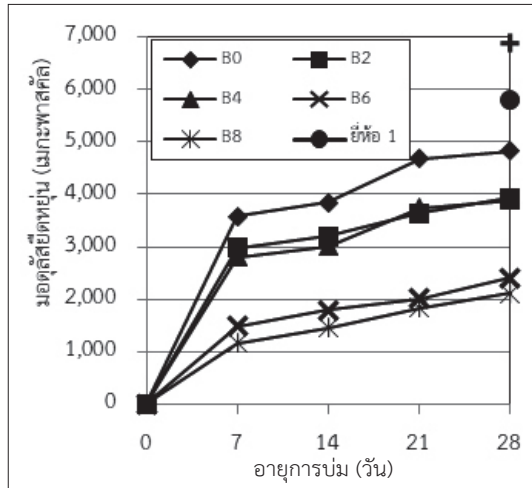
รูปที่ 7 การพองตัวเมื่อแช่น้ำของแผ่นซีเมนต์บอร์ดจากหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย ที่อายุการบ่ม 28 วัน



รูปที่ 8 ความต้านทานแรงดัดของแผ่นซีเมนต์บอร์ด

6.7 ผลการทดสอบมอดุลัสยืดหยุ่น

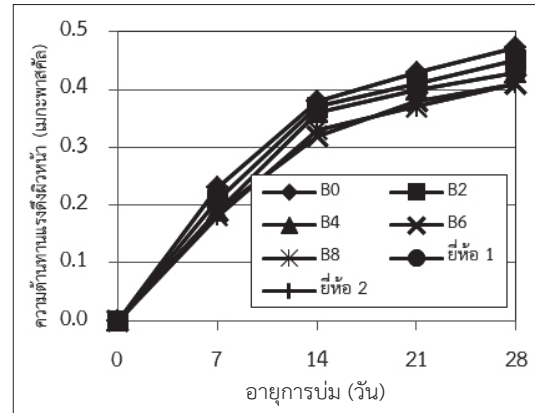
ผลการทดสอบมอดุลัสยืดหยุ่นของแผ่นซีเมนต์บอร์ดจากหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย ที่อายุการบ่มต่างๆ และแผ่นซีเมนต์บอร์ดในท้องตลาด ดังรูปที่ 9 พบว่า ผลการทดสอบมอดุลัสยืดหยุ่นเป็นสมบัติทางกลที่เกี่ยวข้องกับความต้านทานแรงดัด โดยค่ามอดุลัสยืดหยุ่นที่มาก แสดงว่า แผ่นซีเมนต์บอร์ดมีความแข็งแรงและทนการโก่งตัวมากกว่าแผ่นซีเมนต์บอร์ดที่มีค่ามอดุลัสยืดหยุ่นน้อย โดยหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย มีผลต่อความต้านทานแรงดัดและมอดุลัสยืดหยุ่นที่ลดลง ดังจะเห็นได้จากแผ่นซีเมนต์บอร์ดที่ไม่มีการผสมบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย (อัตราส่วน B0) มีค่ามอดุลัสยืดหยุ่นสูงที่สุด รองลงมาคือ แผ่นซีเมนต์บอร์ดจากหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายอัตราส่วน B2 อัตราส่วน B4 อัตราส่วน B6 และอัตราส่วน B8 มีค่ามอดุลัสยืดหยุ่นต่ำที่สุด ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานที่กำหนดให้ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นต้องไม่ต่ำกว่า 3,000 เมกะพาสคัล [7] พบว่า แผ่นซีเมนต์บอร์ดจากหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย อัตราส่วน B0, B2 และ B4 สามารถผ่านตามที่มาตรฐานกำหนด ส่วนแผ่นซีเมนต์บอร์ดที่ไม่ใช่ซีเมนต์: ความหนาแน่นสูง ในท้องตลาด ทั้ง 2 ยี่ห้อ ก็มีค่ามอดุลัสยืดหยุ่นผ่านตามที่มาตรฐานกำหนดเช่นกัน



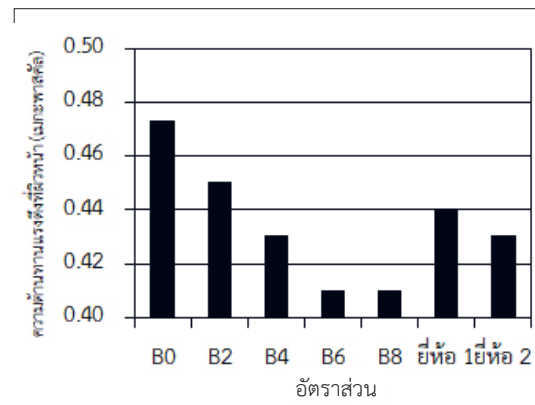
รูปที่ 9 มอดูลัสยืดหยุ่นของแผ่นซีเมนต์บอร์ด

6.8 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า

จากผลการทดสอบความต้านทานแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าของแผ่นซีเมนต์บอร์ดต่างๆ ในรูปที่ 10 และ 11 พบว่า ปริมาณหินบะซอลต์เนื้อโพร่ง่ายที่มากมีแนวโน้มต่อค่าความต้านทานแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าที่ลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากลักษณะของหินบะซอลต์ที่มีเนื้อโพร่ง่ายมีช่องว่างมากทำให้มีพื้นที่รับแรงน้อย ส่งผลให้แผ่นซีเมนต์บอร์ดที่ผสมหินบะซอลต์เนื้อโพร่ง่ายมาก สามารถรับแรงดึงที่ผิวหน้าได้น้อย โดยแผ่นซีเมนต์บอร์ดอัตราส่วน B0 มีความต้านทานแรงดึงผิวหน้าสูงที่สุด รองลงมาคือ อัตราส่วน B2, B4, B6 และ B8 มีความต้านทานแรงดึงผิวหน้าต่ำที่สุด ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ซึ่งกำหนดให้ค่าความต้านทานแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้า ต้องสูงกว่า 0.4 เมกะพาสคัล [7] พบว่า แผ่นซีเมนต์บอร์ดจากหินบะซอลต์เนื้อโพร่ง่าย และแผ่นซีเมนต์บอร์ดในท้องตลาดที่นำมาทดสอบ สามารถผ่านตามที่มาตรฐานกำหนด



รูปที่ 10 ความต้านทานแรงดึงผิวหน้าของแผ่นซีเมนต์บอร์ด



รูปที่ 11 ความต้านทานแรงดึงผิวหน้าของแผ่นซีเมนต์บอร์ด

7. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากผลการพัฒนาต้นแบบผลิตภัณฑ์แผ่นซีเมนต์บอร์ดที่ใช้เศษหินบะซอลต์เนื้อโพร่ง่ายเป็นมวลรวมสำหรับใช้ก่อสร้างผนังของอาคารถอดประกอบ สามารถสรุปได้ว่า แผ่นซีเมนต์บอร์ดจากหินบะซอลต์เนื้อโพร่ง่าย สามารถขึ้นรูปได้ด้วยวิธีการอัดและสั่นเขย่าให้ส่วนผสมเรียงและจับตัวกันเป็นแผ่นซีเมนต์บอร์ดได้โดยไม่ต้องใช้วิธีการให้น้ำหนักค้ำไว้แบบแผ่นซีเมนต์บอร์ดทั่วไป ชุมชนและผู้ประกอบการจึงสามารถเข้าถึงเทคโนโลยีได้ง่าย และไม่ต้องลงทุนเครื่องจักรสำหรับการผลิตที่มีราคาสูงเกินไป ทั้งนี้ อัตราส่วนที่เหมาะสมในการผลิต

แผ่นซีเมนต์บอร์ดจากหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย คือ อัตราส่วน B4 (อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ต่อทรายต่อหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายต่อสาร โซเดียมซิลิเกตต่อน้ำ เท่ากับ 1:2:4:0.03:0.55 โดยน้ำหนัก) เนื่องจากมีสมบัติที่ใกล้เคียงกับ มาตรฐาน มอก.878-2537 มากที่สุด (มีเพียง ความหนาแน่นที่เกินกว่ามาตรฐาน) และเป็น อัตราส่วนที่ใช้เศษหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย เป็นมวลรวมในแผ่นซีเมนต์บอร์ดมากที่สุด ทั้งนี้ หินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายที่ผสมลงใน แผ่นซีเมนต์บอร์ด จะช่วยให้แผ่นซีเมนต์บอร์ด มีความหนาแน่น และสภาพนำความร้อนที่ ลดต่ำลง ซึ่งดีต่อการนำไปใช้งานเป็นผนังอาคาร เพราะจะช่วยให้อาคารไม่ร้อน แต่ด้วยความพรุน ที่มากของเศษหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย จึง ทำให้ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มมากขึ้น ส่วนสมบัติ ทางกล เศษหินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย จะมีผล ทำให้ความต้านทานแรงดัด โมดูลัสยืดหยุ่น และความต้านทานแรงดึงตึงต่ำกว่าผิวหน้ามีค่า ลดต่ำลง แม้ว่าแผ่นซีเมนต์บอร์ดที่ใช้เศษหิน บะซอลต์เนื้อโพรงข่ายเป็นมวลรวม เป็นวัสดุ ก่อสร้างที่ยังไม่มีมาตรฐานมาควบคุมโดยตรง แต่ด้วยคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ แผ่นซีเมนต์บอร์ด จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำ ผลิตภัณฑ์แผ่นซีเมนต์บอร์ดจากเศษหินบะซอลต์ เนื้อโพรงข่ายที่พัฒนาไปประยุกต์ใช้งานทดแทน แผ่นซีเมนต์บอร์ด โดยมีจุดเด่นอยู่ที่การคงทน ต่อการแช่น้ำที่เกิดการพองตัวน้อยมากเมื่อ เปรียบเทียบกับแผ่นซีเมนต์ทั่วไปในการ ศึกษาต่อไป ควรพัฒนาแผ่นซีเมนต์บอร์ดจาก หินบะซอลต์เนื้อโพรงข่ายให้มีสมบัติผ่านมาตรฐาน มอก.878-2537 เรื่องแผ่นซีเมนต์บอร์ด: ชนิดความหนาแน่นสูง รวมทั้งมีสมบัติที่ดีกว่า แผ่นซีเมนต์บอร์ดในท้องตลาดทั่วไป โดยอาจ เพิ่มเส้นใยธรรมชาติมาช่วยรับแรงดึงและลด น้ำหนักให้กับแผ่นซีเมนต์บอร์ดจากหินบะซอลต์

เนื้อโพรงข่าย ซึ่งน่าจะทำให้แผ่นซีเมนต์บอร์ดจาก หินบะซอลต์เนื้อโพรงข่าย สามารถแข่งขันและ เป็นทางเลือกของผลิตภัณฑ์ผนังอาคารที่เป็นมิตร ต่อสิ่งแวดล้อมและประหยัดพลังงานได้

8. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณ แผ่นดินมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ประจำปี 2560 ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] Tonnayopas D. Minerals and rocks. 2nd ed. Songkla: Prince of Songkla University; 2010. (in Thai)
- [2] Chaiket Y, Sukrut P, Chuanchaoen S, Netratip W. utilization of basalt powder in ceramic casting. Songkla: Prince of Songkla University; 2008. (in Thai)
- [3] Tonnayopas D. Mineralogy. 2nd ed. Songkla: Prince of Songkla University; 2009. (in Thai)
- [4] Department of Mineral Resources. Area classification for geology and mineral resources management, Buriram province. Bangkok: Department of Mineral Resources; 2010. (in Thai)
- [5] Weeranukul P, Choosit P, Boontositrakul K, Suweero K. Study of light-weight precast concrete wall panel product with aerated foam injection technique as core wall. Journal of Industrial Technology Ubon Ratchathani Rajabhat University. 2018; 8(2): 13-24. (in Thai)

- [6] Chirayus T. Development of cement bonded particle board from eucalytus camaldulensis wood. Paper presented at: 1985 Annual Conference of Forest; 1985; Bangkok, Thailand. (in Thai)
- [7] Thai Industrial Standards Institute (TISI). Thai industrial standard no.878-1989: cement bonded particle board: high density. Bangkok: Thai Industrial Standards Institute; 1989. (in Thai)
- [8] Young HD. Hyper physics. Addison Wesley: University Physics; 1992.
- [9] Faherty KF, Williamson TG. Wood engineering and construction handbook. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, Inc.; 1995.
- [10] Jindaprasert P, Jaturapitakkul C. Cement, pozzolan, and concrete. 7th ed. Bangkok: ACI Partners with Thailand Concrete Association; 2012. (in Thai)
- [11] 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)

การจัดลำดับแนวทางการปรับปรุงสิ่งสนับสนุนการเรียนรู้ โดยการประยุกต์ใช้ กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์

มงคล กิตติญาณขจร^{1*}

mongkolk3@hotmail.com^{1*}

^{1*} สาขาการจัดการอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี

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

บทคัดย่อ

เนื่องจากการศึกษาความพึงพอใจต่อสิ่งสนับสนุนการเรียนรู้ในแต่ละด้านงานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่ใช้วิธีการวิจัยเชิงสำรวจและวิเคราะห์ระดับความพึงพอใจโดยใช้ค่าเฉลี่ยเปรียบเทียบกันในแต่ละด้านโดยตรงอีกทั้งยังขาดการแนะนำแนวทางการปรับปรุงที่เป็นรูปธรรมซึ่งเมื่อสถาบันการศึกษาต้องการวางแผนปรับปรุงสิ่งสนับสนุนการเรียนรู้หลายด้านอาจมีข้อจำกัดในเรื่องทรัพยากรที่มีอยู่จึงมีความสามารถทำการปรับปรุงในทุกด้านพร้อมกันดังนั้นแนวทางการปรับปรุงพร้อมน้ำหนักรความสำคัญของแต่ละแนวทางซึ่งได้มาจากวิธีการที่เหมาะสมจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการวางแผนพัฒนาในระยะยาว งานวิจัยจึงมีจุดมุ่งหมายในการนำเสนอวิธีการจัดลำดับแนวทางการปรับปรุงสิ่งสนับสนุนการเรียนรู้เพื่อเพิ่มความพึงพอใจโดยการประยุกต์ใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ซึ่งมีการให้น้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์การคัดเลือกที่แตกต่างกันเพื่อให้สามารถสะท้อนความเป็นจริงมากกว่าวิธีปัจจุบัน ผลการวิจัยพบว่าการจัดลำดับแนวทางการปรับปรุงสิ่งสนับสนุนการเรียนรู้โดยการประยุกต์ใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ ระบุว่าควรให้ลำดับความสำคัญสูงสุดต่อ แนวทางการปรับปรุงเรื่องการจัดพื้นที่สำหรับอาจารย์และนักศึกษาได้พบปะและแลกเปลี่ยนสนทนา หรือทำงานร่วมกัน รองลงมาเป็นปรับปรุงระบบอินเทอร์เน็ตใหม่ให้ครอบคลุมพื้นที่มากขึ้น โดยผลดังกล่าวเป็นไปในทางตรงกันข้ามกับวิธีปัจจุบัน อันเนื่องมาจากอิทธิพลของความแตกต่างของน้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์การคัดเลือกจากการประยุกต์ใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์

คำสำคัญ: กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ ความพึงพอใจ สิ่งสนับสนุนการเรียนรู้ การจัดลำดับ

Learning Resources Improvement Project Prioritization: An Application of Analytic Hierarchy Process Method

Mongkol Kittiyakajon^{1*}
mongkolk3@hotmail.com^{1*}

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

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

Abstract

According to current learning resources satisfaction assessment method, almost current researchers use survey research with average comparison directly among each aspects. Moreover, the clearly improvement methods are not specified. When the institutions have to plan long term improvement projects, all of improvement projects could not be implemented in the same time due to the limited of resources. Therefore, the improvement projects with prioritization that provided by proper calculation method is necessary. This paper proposed learning resources improvement project prioritization using analytic hierarchy process technique that provides different important weight for each selection criteria. This can reasonably reflect the fact more than current method. The results of the analytic hierarchy process prioritization show that the improvement project that was given the highest important weight was “providing the meeting area between teachers and students”. The second place was “improving internet system”. This ranking order was opposite to current method. This might due to the influence of the different important weight for each selection criteria from analytic hierarchy process prioritization method.

Keywords: AHP, Satisfaction, Learning resources, prioritization.

1. บทนำ

ปัจจุบันสภาพแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลง ทำให้องค์กรจำเป็นต้องพัฒนาเพื่อให้สามารถอยู่รอดและมีศักยภาพแข่งขันได้โดยเฉพาะในสถาบันอุดมศึกษาซึ่งมีบทบาทสำคัญในการจัดการหลักสูตรการศึกษาให้มีความเหมาะสมและทันสมัย เพื่อพัฒนาผู้เรียนให้เป็นบัณฑิตที่มีคุณภาพ ซึ่งหนึ่งในปัจจัยที่สำคัญประการหนึ่งในการจัดการเรียนการสอนคือสิ่งสนับสนุนการเรียนรู้ ซึ่งประกอบด้วยความพร้อมทั้งทางกายภาพและความพร้อมด้านอุปกรณ์โดยสถาบันการศึกษาจำเป็นต้องพัฒนาและปรับปรุงสิ่งสนับสนุนการเรียนรู้ให้ทันสมัยเหมาะสมกับผู้เรียน เพื่อพัฒนาผู้เรียนให้มีทักษะกระบวนการใฝ่เรียนรู้ มีความคิดริเริ่มสร้างสรรค์และสติปัญญาควบคู่ไปกับความรู้ทางวิชาการ อีกทั้งสถาบันอุดมศึกษาในประเทศไทยภายใต้การกำกับของสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาแห่งชาติยังจำเป็นต้องดำเนินการเพื่อรองรับการประเมินตามเกณฑ์การประกันคุณภาพการศึกษาภายใน ปี พ.ศ. 2557

จากเหตุผลดังกล่าวจึงมีงานวิจัยจำนวนหนึ่งที่ทำการศึกษาประเมินความพึงพอใจต่อสิ่งสนับสนุนการเรียนรู้เพื่อตอบสนองเป้าหมายในการประเมินคุณภาพการศึกษาภายใน เช่น [1, 2,3,4,5,6,7,8 และ 9] ซึ่งสอดคล้องกับเกณฑ์การประเมินประกันคุณภาพการศึกษาภายในระดับอุดมศึกษา ประจำปีการศึกษา 2557 ในองค์ประกอบที่ 6 สิ่งสนับสนุนการเรียนรู้ [10] โดยทำการประเมินความพึงพอใจในด้านต่างๆ ต่อสิ่งสนับสนุนการเรียนรู้ แต่อย่างไรก็ตามเครื่องมือที่งานวิจัยดังกล่าวใช้ในการประเมินความพึงพอใจต่อสิ่งสนับสนุนการเรียนรู้ส่วนใหญ่เป็นการวิจัยเชิงสำรวจ โดยการใช้สถิติเชิงอนุมานซึ่งพิจารณาเพียงค่าเฉลี่ย,ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน นอกจากนั้นผลของระดับความพึงพอใจที่ได้

ยังขาดการนำไปใช้ต่อเนื่อง เพื่อกำหนดและจัดลำดับความสำคัญของแต่ละแนวทางการปรับปรุงต่อสิ่งสนับสนุนการเรียนรู้เพื่อเพิ่มความพึงพอใจอย่างเป็นรูปธรรม ทั้งนี้เนื่องจากข้อจำกัดในด้านทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดของสถาบันอุดมศึกษาดังนั้นในการทำการปรับปรุงสิ่งสนับสนุนการเรียนรู้อาจไม่สามารถทำได้ทั้งหมดทุกด้านในเวลาเดียวกันด้วยเหตุนี้แนวทางการปรับปรุงพร้อมลำดับความสำคัญของแต่ละทางเลือกจึงจำเป็นอย่างยิ่งในการวางแผนการพัฒนาระยะยาวของสถาบันอุดมศึกษา

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาและนำเสนอวิธีการในการจัดลำดับความสำคัญของแนวทางการปรับปรุงสิ่งสนับสนุนการเรียนรู้เพื่อเพิ่มระดับความพึงพอใจด้วยการประยุกต์ใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (AHP) โดยมีหลักสูตรการจัดการอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานีเป็นกรณีศึกษาเปรียบเทียบกับวิธีการปัจจุบันที่มีการประเมินความพึงพอใจโดยปราศจากการจัดลำดับแนวทางการปรับปรุง

2. วัตถุประสงค์งานวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาความพึงพอใจต่อสิ่งสนับสนุนการเรียนรู้ของสถาบันอุดมศึกษากรณีตัวอย่าง

2.2 เพื่อจัดลำดับความสำคัญของแต่ละแนวทางการปรับปรุงด้วยวิธีกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์

2.3 เพื่อนำเสนอแนวทางการปรับปรุงต่อสิ่งสนับสนุนการเรียนรู้ด้านที่ได้รับคะแนนต่ำ

3. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 สิ่งสนับสนุนการเรียนรู้ ภายใต้มาตรฐานการประกันคุณภาพภายในของสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา [10] ได้ให้ข้อกำหนดและนิยามของสิ่งสนับสนุนการ

เรียนรู้ไว้ดังนี้ความพร้อมของสิ่งสนับสนุน การเรียนการสอนมีหลายประการได้แก่ ความพร้อมทางกายภาพ เช่น ห้องเรียน ห้องปฏิบัติการ ที่พักของนักศึกษา ฯลฯ และ ความพร้อมของอุปกรณ์เทคโนโลยี และสิ่งอำนวยความสะดวกหรือทรัพยากรที่เอื้อต่อการเรียนรู้ เช่น อุปกรณ์การเรียนการสอน ห้องสมุด หนังสือ ตำรา สิ่งพิมพ์ วารสาร ฐานข้อมูลเพื่อการสืบค้น แหล่งเรียนรู้สื่ออิเล็กทรอนิกส์ ฯลฯ สิ่งสนับสนุนเหล่านี้ต้องมีปริมาณเพียงพอและมีคุณภาพ พร้อมใช้งานทันสมัยโดยพิจารณาการดำเนินการ ปรับปรุงพัฒนาจากผลการประเมินความพึงพอใจ ของอาจารย์และนักศึกษา

3.2 กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytic Hierarchy Process: AHP) เป็นเทคนิคหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในกระบวนการตัดสินใจซึ่งได้รับความนิยมนอย่างมากและเป็นที่ยอมรับกันในระดับสากลอย่างแพร่หลายซึ่งถูกคิดค้นโดย [11] และถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลาย [12] ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้การแบ่งองค์ประกอบของปัญหาออกเป็น ส่วนๆ ในรูปของแผนภูมิตามลำดับชั้นแล้วมีการให้ค่าน้ำหนักของแต่ละองค์ประกอบแล้วนำมา คำนวณค่าน้ำหนักเพื่อนำไปสู่ค่าลำดับความ สำคัญของแต่ละทางเลือกกว่าทางเลือกใดมีค่า สูงสุดแล้วนำมาประกอบการตัดสินใจ ซึ่งมี โครงสร้างเลียนแบบกระบวนการคิดของมนุษย์ ดังนั้นเทคนิคนี้จึงเหมาะสำหรับการตัดสินใจ ที่เป็นรายบุคคลและเป็นกลุ่มโดยมีจุดเด่นดังนี้ คือ ง่ายในการสร้าง และสามารถนำเอาปัจจัยที่เป็น ทั้งนามธรรมและรูปธรรมมาวินิจฉัยได้อย่างมี ความสอดคล้องกันของเหตุผล โดยมีขั้นตอน กระบวนการลำดับชั้นเชิงดังนี้ วางกรอบและ กำหนดเป้าหมาย, กำหนดเกณฑ์หรือปัจจัยในการ พิจารณา, กำหนดแผนภูมิระดับชั้นในการตัดสินใจ และทำการเปรียบเทียบปัจจัยเป็นคู่ๆ โดยการ เปรียบเทียบทางเลือกเป็นคู่ๆ อาศัยเกณฑ์ประเมิน

มาตรฐานที่ใช้ในการเปรียบเทียบความสำคัญ โดยมีคะแนน 1-9 ตามตารางที่ 1

3.3 การวิจัยเชิงพรรณนา (Descriptive research) เป็นการวิจัยที่มุ่งเน้นการค้นหา คำตอบหรือคำอธิบายของข้อเท็จจริงเกี่ยวกับ สภาพการณ์ ปรากฏการณ์ หรือเรื่องราวต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในสภาพปัจจุบัน [13] โดยทำการศึกษา เพื่อบ่งชี้ให้เห็นว่าสภาพการณ์เหล่านั้นเป็นอย่างไร การวิจัยประเภทนี้อาจเป็นการศึกษาเชิงสำรวจ หรือการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง แต่ผลจากการวิจัยส่วนใหญ่ มักจะ เป็นการตอบคำถามเกี่ยวกับสภาพการณ์ที่เป็น ข้อเท็จจริงการวิจัยประเภทนี้มักจะพบเห็นทั่วไป ที่เกี่ยวกับการสำรวจหรือการศึกษาเจตคติหรือ การศึกษาความคิดเห็นของบุคคลต่อองค์กรหรือ ต่อสิ่งต่างๆ ที่เกิดขึ้นและมีผลกระทบต่องสังคม โดยรวม เช่น ปัญหา การเลือกตั้ง ความคิดเห็น ของชุมชน เป็นต้น ซึ่งข้อมูลที่ศึกษาส่วนมาก จะเกิดจากการเก็บข้อมูลโดยใช้วิธีการสอบถาม การสำรวจ การสัมภาษณ์ และการสำรวจแนวทาง ที่เหมาะสำหรับการวิจัยเชิงบรรยายมีดังนี้

1) ข้อเท็จจริงปรากฏการณ์ และสภาพ การณ์ปัจจุบันรวมทั้งความสัมพันธ์ของสิ่งต่าง ๆ ที่เป็นอยู่ในปัจจุบัน

2) ภารกิจกระบวนการต่าง ๆ ที่กำลัง ดำเนินอยู่ในปัจจุบันหรือสิ่งที่ปฏิบัติอยู่เป็นประจำ

3) เจตคติแนวความคิดความคิดเห็น หรือความเชื่อต่อสิ่งต่าง ๆ

4) การทำนายหรือการคาดหมาย ลักษณะของผลหรือปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่จะ เกิดขึ้น

5) แนวโน้มหรือความเปลี่ยนแปลงของ สิ่งต่าง ๆ ที่คาดว่าจะเกิดขึ้นหรือเปลี่ยนแปลง

โดยงานวิจัยเชิงพรรณนาสามารถแบ่ง ตามลักษณะของการวิจัยได้ 3 ประเภทดังนี้

1) การวิจัยเชิงสำรวจ (Survey research),

2) การวิจัยเชิงความสัมพันธ์ (Interrelationship research) และ 3) การวิจัยเชิงพัฒนาการ (Developmental research) ซึ่งการศึกษาความพึงพอใจต่อสิ่งสนับสนุนการเรียนรู้โดยงานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่มีการประยุกต์ใช้การวิจัยเชิงสำรวจดังเช่น [3], [5], [6], [7] และ [8] ซึ่งเป็นงานวิจัยเพื่อศึกษาปัญหาอย่างกว้างๆ

โดยสำรวจเกี่ยวกับสภาพความเป็นจริงหรือลักษณะทั่วไปและจัดเป็นประเภทงานวิจัยพื้นฐานเพื่อเป็นข้อมูลขั้นต้นให้กับงานวิจัยเชิงวิเคราะห์ซึ่งเป็นงานวิจัยในระดับที่สูงขึ้น

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบทางเลือกเป็นคู่ๆ อาศัยเกณฑ์ประเมินมาตรฐานที่ใช้ในการ

ระดับความเข้มข้นของความสำคัญ	ความหมาย	คำอธิบาย
1	สำคัญเท่ากัน	ทั้ง 2 เกณฑ์ส่งผลกระทบต่อวัตถุประสงค์เท่าๆ กัน
3	สำคัญกว่าปานกลาง	ผู้วิจัยให้ความคิดเห็นว่าเกณฑ์หนึ่งสำคัญกว่าอีกเกณฑ์หนึ่งอยู่ในระดับปานกลาง
5	สำคัญกว่ามาก	ผู้วิจัยให้ความคิดเห็นว่าเกณฑ์หนึ่งสำคัญกว่าอีกเกณฑ์หนึ่งอยู่ในระดับมาก
7	สำคัญกว่ามากที่สุด	ผู้วิจัยให้ความคิดเห็นว่าเกณฑ์หนึ่งสำคัญกว่าอีกเกณฑ์หนึ่งอยู่ในระดับมากที่สุด
9	สำคัญกว่าสูงสุด	ผู้วิจัยให้ความคิดเห็นว่าเกณฑ์หนึ่งสำคัญกว่าอีกเกณฑ์หนึ่งอยู่ในระดับสูงสุด
2,4,6,8	อยู่ระหว่างระดับที่ได้อธิบายมาแล้วข้างต้น	อยู่ระหว่างระดับที่ได้อธิบายมาแล้วข้างต้น

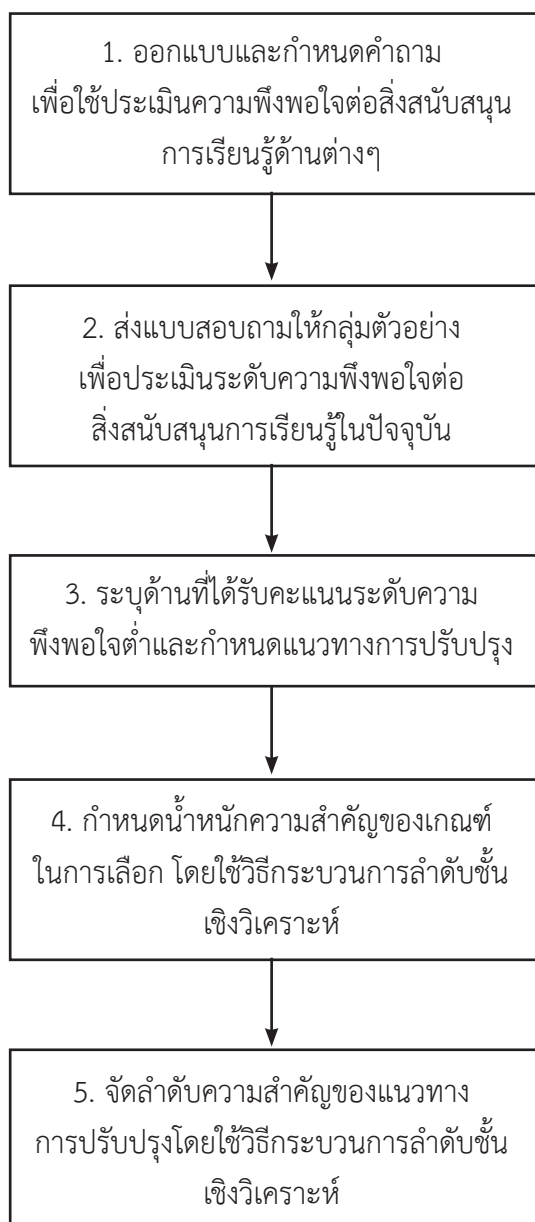
5. วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้มีการแบ่งส่วนขั้นตอนงานวิจัยออกเป็นสองส่วนหลักดังนี้

5.1 การวิจัยเชิงสำรวจ

5.2 การวิจัยโดยการประยุกต์ใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์

ดังแสดงให้เห็นขั้นตอนการทำการวิจัยในแผนผังวิธีการวิจัยตาม รูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนภูมิขั้นตอนการวิจัย
จากแผนภูมิขั้นตอนการวิจัยตามรูปที่ 1

ขั้นตอนการวิจัยลำดับที่ 1-3 อยู่ในส่วนของ การวิจัยเชิงสำรวจโดยการออกแบบสอบถามเพื่อรวบรวมความพึงพอใจต่อสิ่งสนับสนุนการเรียนรู้โดยมีคำถามทั้งหมด 10 ด้าน ประกอบด้วย ห้องเรียนมีอุปกรณ์เหมาะสมเอื้อต่อการเรียนรู้และเพียงพอ, ห้องปฏิบัติการมีอุปกรณ์เหมาะสม เอื้อต่อการเรียนรู้และเพียงพอ, มีบริการคอมพิวเตอร์ อินเทอร์เน็ตความเร็วสูงเพื่อสะดวกต่อการสืบค้นในการเตรียมการสอน, เทคโนโลยีที่ใช้ในการจัดการเรียนการสอนมีความเหมาะสมกับยุคสมัย เอื้อต่อการเรียนรู้และเพียงพอ, การจัดพื้นที่สำหรับนักศึกษาและอาจารย์ได้พบปะ แลกเปลี่ยนสนทนา หรือทำงานร่วมกัน, ห้องสมุดเหมาะสม เอื้อต่อการเรียนรู้และเพียงพอ, สนามกีฬา ที่ออกกำลังกาย ห้องพักสำหรับเตรียมการสอนเหมาะสมเอื้อต่อการเรียนรู้และเพียงพอ, หนังสือตำราที่ใช้ในการสอน มีความเพียงพอและมีคุณภาพทันสมัยส่งเสริมการเรียนรู้, สภาพแวดล้อมภายในห้องเรียนโดยรวม, และสภาพแวดล้อมภายนอกห้องเรียนโดยรวม

โดยการสำรวจได้ส่งแบบสอบถามที่มีลักษณะให้เลือกตอบตามความคิดเห็นของผู้ตอบโดยใช้ระดับคะแนนแบบ Likert scale ซึ่งมีระดับคะแนน 5 ระดับเรียงจากมากไปหาน้อย ดังนี้ มากที่สุด (5 คะแนน) มาก (4 คะแนน) ปานกลาง (3 คะแนน) น้อย (2 คะแนน) น้อยที่สุด (1 คะแนน) ให้กับกลุ่มตัวอย่างซึ่งเป็นนักศึกษาที่กำลังศึกษาระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 1, 2, 3, 4 และอาจารย์ประจำสาขาวิชา ภาควิชาการจัดการอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี ปีการศึกษา 2560 ทั้งสิ้นจำนวน 91 คน จากจำนวนประชากรทั้งหมด 131 คน ในสถาบันการศึกษาด้วยระดับความเชื่อมั่น 95% โดยอาศัยวิธีการกำหนดจำนวนกลุ่มตัวอย่างตามวิธีของ [14] ส่วนขั้นตอนการวิจัยลำดับ

ที่ 4 และ 5 อยู่ในส่วนของการวิจัยโดยใช้วิธีการบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์

6. ผลการวิจัย

6.1 ระดับความพึงพอใจต่อสิ่งสนับสนุนการเรียนรู้

พบว่านักศึกษาและอาจารย์ได้ให้ระดับคะแนนความคิดเห็นต่อปัจจัยในแต่ละด้าน โดยด้านที่มีค่าเฉลี่ยมากที่สุดคือ ห้องสมุดเหมาะสมเอื้อต่อการเรียนรู้และเพียงพอ (3.84), ห้องเรียนมีอุปกรณ์เหมาะสม เอื้อต่อการเรียนรู้และเพียงพอ (3.76), หนังสือตำราที่ใช้ในการสอนมีความเพียงพอและมีคุณภาพ ทันสมัยส่งเสริมการเรียนรู้ (3.75), สนามกีฬา ที่ออกกำลังกาย ห้องพักสำหรับเตรียมการสอนเหมาะสมเอื้อต่อการเรียนรู้และเพียงพอ (3.71), สภาพแวดล้อมภายนอกห้องเรียนโดยรวม (3.71), สภาพแวดล้อมภายในห้องเรียนโดยรวม (3.70), ห้องปฏิบัติการมีอุปกรณ์เหมาะสม เอื้อต่อการเรียนรู้และเพียงพอ มี (3.59), เทคโนโลยีที่ใช้ในการจัดการเรียนการสอนมีความเหมาะสมกับยุคสมัยเอื้อต่อการเรียนรู้และเพียงพอ (3.56), การจัดพื้นที่สำหรับนักศึกษาและอาจารย์ได้พบปะแลกเปลี่ยนสนทนา หรือทำงานร่วมกัน (3.41), และด้านที่มีค่าเฉลี่ยต่ำที่สุดคือ มีบริการคอมพิวเตอร์ อินเทอร์เน็ตความเร็วสูงเพื่อสะดวกต่อการสืบค้นในการเตรียมการสอน และภาระงานด้านต่างๆ (2.69) ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 2

6.2 แนวทางการปรับปรุงสิ่งสนับสนุนการเรียนรู้

จากผลระดับความพึงพอใจพบว่า มีด้านต่างๆ ที่ได้รับคะแนนความพึงพอใจอยู่ในระดับต่ำจำนวน 5 ด้านคือด้านที่ 3 5 4 2 และ 9 ดังนั้น สิ่งสนับสนุนการเรียนรู้ในด้านดังกล่าวจึงถูกคัดเลือกเพื่อหาแนวทางปรับปรุงโดยได้มีการนำเสนอแนวทางการปรับปรุงในแต่ละด้านโดยการระดมความคิดระหว่างบุคลากรในสถาบันตามตารางที่ 3

6.3 คำนำน้าหนักความสำคัญของเกณฑ์การประเมิน

เพื่อให้การคัดเลือกแนวทางการปรับปรุงสิ่งสนับสนุนการเรียนรู้ไปได้อย่างเหมาะสม จึงกำหนดเกณฑ์ในการคัดเลือกแนวทางการปรับปรุงโดยใช้หลักการวิเคราะห์ต้นทุนและผลประโยชน์ตาม [15] ประกอบไปด้วย 1) ปริมาณเงินลงทุน, 2) เวลาทำโครงการ, 3) ผลที่คาดว่าจะได้รับต่อคุณภาพบัณฑิต, และ 4) ความเป็นไปได้ในการลงทุน จากนั้นเกณฑ์เหล่านี้จะถูกทำการเปรียบเทียบที่ละคู่ตามกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์โดยผู้เชี่ยวชาญซึ่งเป็นตัวแทนจากทั้งนักศึกษาและอาจารย์จำนวน 5 คน จากนั้นทำการรวมความคิดเห็นรายบุคคลเป็นความคิดเห็นกลุ่มด้วยวิธี Geometric mean method (GMM) ตามคำแนะนำของ [11] ดังอย่างการคำนวณในตารางที่ 4 เพื่อหาน้ำหนักความสำคัญในแต่ละเกณฑ์โดยผลค่าน้ำหนักความสำคัญถูกแสดงตามตารางที่ 5

ตารางที่ 2 ระดับคะแนนค่าเฉลี่ยรวมของความพึงพอใจต่อสิ่งสนับสนุนการเรียนรู้ในปัจจุบัน

ด้าน ที่	รายการประเมิน	ค่า เฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	แปลผล ระดับ ความคิดเห็น	ลำดับ ที่
1	ห้องเรียนมีอุปกรณ์เหมาะสม เอื้อต่อการเรียนรู้	3.76	0.75	มาก	2
2	ห้องปฏิบัติการมีอุปกรณ์เหมาะสมเอื้อต่อการเรียนรู้	3.59	0.89	มาก	7
3	มีบริการคอมพิวเตอร์ อินเทอร์เน็ตความเร็วสูงเพื่อ สะดวกต่อการสืบค้นในการเตรียมการสอน	2.69	0.87	ปานกลาง	10
4	ห้องเรียนมีอุปกรณ์เหมาะสม เอื้อต่อการเรียนรู้	3.56	0.85	มาก	8
5	การจัดพื้นที่/สถานที่สำหรับนักศึกษาและอาจารย์ ได้พบปะ แลกเปลี่ยนสนทนา หรือทำงานร่วมกัน	3.41	0.93	มาก	9
6	ห้องเรียนมีอุปกรณ์เหมาะสม เอื้อต่อการเรียนรู้	3.84	0.95	มาก	1
7	สนามกีฬา ที่ออกกำลังกาย ห้องพักสำหรับ เตรียมการสอนเหมาะสมเอื้อต่อการเรียนรู้	3.71	0.99	มาก	4
8	หนังสือตำราที่ใช้ในการสอน มีความเพียงพอและ มีคุณภาพ ทันสมัยส่งเสริมการเรียนรู้	3.75	0.80	มาก	3
9	สภาพแวดล้อมภายในห้องเรียนโดยรวม (เช่น ความสะดวก แสง และอากาศถ่ายเท เป็นต้น)	3.70	0.86	มาก	6
10	สภาพแวดล้อมภายนอกห้องเรียนโดยรวม (เช่น ความสะดวก ความสงบร่มรื่น เป็นต้น)	3.71	0.86	มาก	5

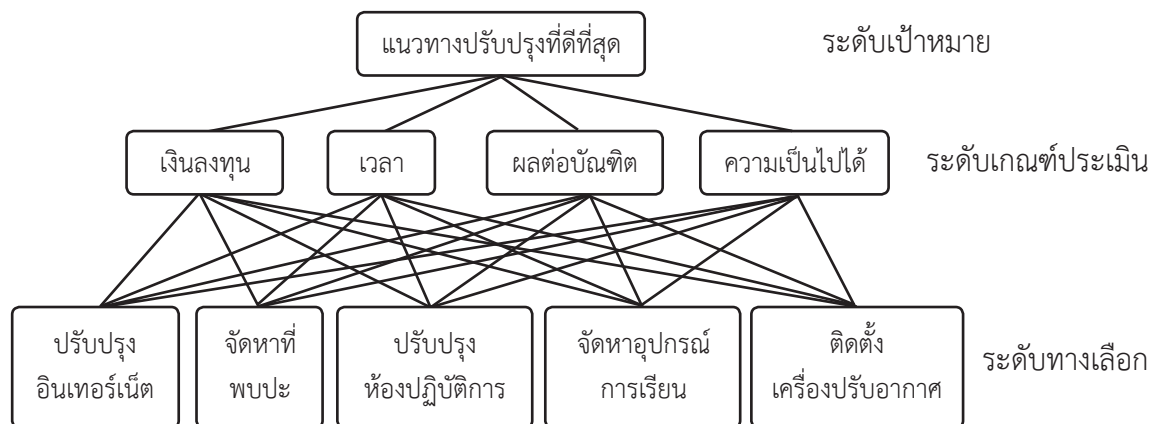
ตารางที่ 3 แนวทางการปรับปรุงสิ่งสนับสนุนการเรียนรู้

ด้านที่	รายการประเมิน	แนวทางการปรับปรุง
3	มีบริการคอมพิวเตอร์ อินเทอร์เน็ตความเร็วสูงเพื่อสะดวกต่อการสืบค้นในการเตรียมการสอน และภาระงานด้านต่างๆ	ปรับปรุง ระบบอินเทอร์เน็ตใหม่ให้ครอบคลุมพื้นที่มากขึ้น (ปรับปรุงอินเทอร์เน็ต)
5	การจัดพื้นที่/สถานที่สำหรับนักศึกษาและอาจารย์ได้พบปะ แลกเปลี่ยนสนทนา หรือทำงานร่วมกัน	จัดหาให้มีสถานที่พบปะอาจารย์เพิ่มเติม
4	เทคโนโลยีที่ใช้ในการจัดการเรียนการสอนมีความเหมาะสมกับยุคสมัย เอื้อต่อการเรียนรู้และเพียงพอ	ปรับปรุงและจัดซื้ออุปกรณ์ที่ทันสมัยและเพียงพอต่อจำนวนนักศึกษา (จัดหาอุปกรณ์การเรียน)
2	ห้องปฏิบัติการมีอุปกรณ์เหมาะสม เอื้อต่อการเรียนรู้และเพียงพอ	ปรับปรุงอุปกรณ์เดิมที่มีอยู่และจัดซื้ออุปกรณ์การเรียนรู้เพิ่มให้เพียงพอต่อจำนวนนักศึกษา (ปรับปรุงห้องปฏิบัติการ)
9	สภาพแวดล้อมภายในห้องเรียนโดยรวม (เช่น ความสะอาด แสง และอากาศถ่ายเท เป็นต้น)	ปรับปรุงโดยการติดตั้งเครื่องปรับอากาศในห้องเรียน (ติดตั้งเครื่องปรับอากาศ)

ตารางที่ 4 ตัวอย่างการคำนวณหาค่าน้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์การคัดเลือกจาก AHP

ผลการเปรียบเทียบเกณฑ์ที่ละคู่โดยการตัดสินใจแบบกลุ่ม	เงินลงทุน	เวลา	ผลต่อบັນจิต	ความเป็นไปได้	ค่าเฉลี่ยด้วยวิธี GMM
เงินลงทุน	1	6.32	1.42	0.29	1.27
เวลา	0.16	1	0.54	0.15	0.34
ผลต่อบັນจิต	0.70	1.84	1	0.36	0.83
ความเป็นไปได้	3.39	6.71	2.77	1	2.82

หมายเหตุ: การเปรียบเทียบทีละคู่อาศัยเกณฑ์มาตรฐานตามตารางที่1 โดยค่าน้ำหนักจาก AHP หาได้ด้วยวิธีการ Geometric mean method (GMM) [11] ดังตัวอย่างการคำนวณค่าเฉลี่ยด้วยวิธี GMM ในเกณฑ์ด้านเงินลงทุน ซึ่งหาได้จาก $[1 \times 6.32 \times 1.42 \times 0.29]^{1/4} = 1.27$ จากนั้นหาค่าน้ำหนักจาก AHP ด้วยการนำค่าเฉลี่ยด้วยวิธี GMM มาทำการ Normalize เพื่อให้ให้น้ำหนักรวมมีค่าเท่ากับ 1 โดยสามารถแสดงได้ดังนี้ $1.27 / (1.27 + 0.34 + 0.83 + 2.82) = 0.24$



รูปที่ 2 แผนผังลำดับขั้นเชิงวิเคราะห์เพื่อคัดเลือกแนวทางการปรับปรุงสิ่งสนับสนุนการเรียนรู้

ตารางที่ 5 การจัดลำดับเกณฑ์ในการคัดเลือกแนวทางการปรับปรุงสิ่งสนับสนุนการเรียนรู้ (CR = 0.09)

หัวข้อ	เกณฑ์ในการคัดเลือก	ค่าเฉลี่ยด้วยวิธี GMM	ค่าน้ำหนักจาก AHP	ลำดับที่
1	ปริมาณเงินลงทุน	1.27	0.24	2
2	เวลาทำโครงการ	0.34	0.06	4
3	ผลที่คาดว่าจะได้รับต่อคุณภาพบัณฑิต	0.83	0.16	3
4	ความเป็นไปได้ในการลงทุน	2.82	0.54	1

ซึ่งผลพบว่าการจัดลำดับของแต่เกณฑ์การคัดเลือกโดยเรียงลำดับจากค่าน้ำหนักมากไปหาน้อยที่สุดเป็นไปตามนี้คือ ลำดับที่ 1 ความเป็นไปได้ในการลงทุน (0.54) ลำดับที่ 2 คือ ปริมาณเงินลงทุน (0.24) ลำดับที่ 3 คือ ผลที่คาดว่าจะได้รับต่อคุณภาพบัณฑิต (0.16) ลำดับที่ 4 คือเวลาทำโครงการ (0.06) ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผู้ประเมินมีความเห็นว่าเกณฑ์ที่มีสำคัญมากที่สุดเป็นเรื่องของความเป็นไปได้ในการลงทุน และสำคัญน้อยที่สุดคือเวลาในการทำโครงการ

6.4 การจัดลำดับแนวทางการปรับปรุงสิ่งสนับสนุนการเรียนรู้ภายใต้เกณฑ์การคัดเลือกในแต่ละด้าน

ภายใต้เกณฑ์การคัดเลือกในแต่ละด้านตามตารางที่ 4 และแผนผังลำดับขั้นเชิงวิเคราะห์เพื่อคัดเลือกแนวทางการปรับปรุงสิ่งสนับสนุนการเรียนรู้ดังรูปที่ 2 แนวทางการปรับปรุงสิ่งสนับสนุนการเรียนรู้ตามตารางที่ 3 จึงถูกนำมาประเมินภายใต้เกณฑ์การคัดเลือกด้วยกระบวนการลำดับขั้นเชิงวิเคราะห์ ที่ละเกณฑ์จนครบทุกเกณฑ์โดยผลการประเมินได้นำมาแสดงได้ตามตารางที่ 6-9

ตารางที่ 6 ผลการจัดลำดับแนวทางการปรับปรุง
ภายใต้เกณฑ์ด้านปริมาณเงินลงทุน

ภายใต้ เกณฑ์ด้าน ปริมาณเงินลงทุน	เงินลงทุน (พันบาท)	ค่าน้ำหนัก	ลำดับ ที่
ปรับปรุงอินเทอร์เน็ต	150	0.18	3
จัดหาที่พบปะ	100	0.29	1
จัดหาอุปกรณ์การเรียน ที่ทันสมัย	100	0.29	2
ปรับปรุงห้องปฏิบัติการ	300	0.10	5
ติดตั้งเครื่องปรับอากาศ	200	0.14	4

ตารางที่ 7 ผลการจัดลำดับแนวทางการปรับปรุง
ภายใต้เกณฑ์ด้านเวลาทำโครงการ

ภายใต้ เกณฑ์ด้าน เวลาทำโครงการ	เวลาทำ โครงการ (ปี)	ค่าน้ำหนัก	ลำดับ ที่
ปรับปรุงอินเทอร์เน็ต	2	0.25	1
จัดหาที่พบปะ	2	0.25	2
จัดหาอุปกรณ์การเรียน ที่ทันสมัย	3	0.17	3
ปรับปรุงห้องปฏิบัติการ	3	0.17	4
ติดตั้งเครื่องปรับอากาศ	3	0.17	5

ตารางที่ 8 ผลการจัดลำดับแนวทางการปรับปรุง
ภายใต้เกณฑ์ด้านผลตอบแทน (CR=0.07)

ภายใต้เกณฑ์ด้านผล ต่อคุณภาพบัณฑิต	ค่าเฉลี่ย ด้วยวิธี GMM	ค่าน้ำหนัก จาก (AHP)	ลำดับ ที่
ปรับปรุงอินเทอร์เน็ต	1.32	0.19	3
จัดหาที่พบปะ	0.34	0.05	5
จัดหาอุปกรณ์การเรียน ที่ทันสมัย	2.67	0.39	1
ปรับปรุงห้องปฏิบัติการ	2.20	0.32	2
ติดตั้งเครื่องปรับอากาศ	0.37	0.05	4

ตารางที่ 9 ผลการจัดลำดับแนวทางการปรับปรุง
ภายใต้เกณฑ์ด้านความเป็นไปได้ (CR = 0.09)

ภายใต้เกณฑ์ด้าน ความเป็นไปได้ ในการลงทุน	ค่าเฉลี่ย ด้วยวิธี GMM	ค่าน้ำหนัก จาก (AHP)	ลำดับ ที่
ปรับปรุงอินเทอร์เน็ต	1.48	0.27	2
จัดหาที่พบปะ	1.80	0.33	1
จัดหาอุปกรณ์การเรียน ที่ทันสมัย	0.87	0.16	3
ปรับปรุงห้องปฏิบัติการ	0.54	0.10	5
ติดตั้งเครื่องปรับอากาศ	0.80	0.15	4

จากตารางที่ 6 พบว่าการจัดลำดับ
ทางเลือกแนวทางการปรับปรุงของปัจจัยด้าน
ปริมาณเงินลงทุน โดยเรียงลำดับจากค่ามากที่สุด
ไปหาน้อยสุด ทางเลือกที่มีค่าน้ำหนักมากที่สุด
ลำดับที่ 1 คือ จัดหาที่พบปะ มีค่าน้ำหนักเท่ากับ
0.29 ลำดับที่ 2 คือ จัดหาอุปกรณ์การเรียนที่
ทันสมัยมีค่าน้ำหนักเท่ากับ 0.29 ลำดับที่ 3 คือ
ปรับปรุงอินเทอร์เน็ต มีค่าน้ำหนักเท่ากับ 0.19
ลำดับที่ 4 คือ ติดตั้งเครื่องปรับอากาศ มีค่า
น้ำหนักเท่ากับ 0.14 และลำดับที่ 5 คือ ปรับปรุง
ห้องปฏิบัติการ มีค่าน้ำหนักเท่ากับ 0.10

จากตารางที่ 7 พบว่าการจัดลำดับ
ทางเลือกแนวทางการปรับปรุงของปัจจัยด้านเวลา
ทำโครงการ โดยเรียงลำดับจากค่าน้ำหนัก มากสุด
ไปหาน้อยสุด ทางเลือกที่มีค่าน้ำหนักมากที่สุด
เป็นเทคนิคลำดับที่ 1 คือ ปรับปรุงอินเทอร์เน็ต
มีค่าน้ำหนักเท่ากับ 0.25 ลำดับที่ 2 คือ จัดหา
ที่พบปะ มีค่าน้ำหนักเท่ากับ 0.25 ลำดับที่ 3 คือ
จัดหาอุปกรณ์การเรียนที่ทันสมัยมีค่าน้ำหนัก
เท่ากับ 0.17 ลำดับที่ 4 คือ ปรับปรุงห้องปฏิบัติการ
มีค่าน้ำหนักเท่ากับ 0.17 และลำดับที่ 5 ติดตั้ง
เครื่องปรับอากาศ มีค่าน้ำหนักเท่ากับ 0.17

จากตารางที่ 8 พบว่าการจัดลำดับทางเลือกแนวทางการปรับปรุงของปัจจัยด้านผลต่อคุณภาพบัณฑิต โดยเรียงลำดับจากค่ามากที่สุดไปหาน้อยสุด ทางเลือกที่มีค่าน้ำหนักมากที่สุด ลำดับที่ 1 คือ จัดหาอุปกรณ์การเรียนที่ทันสมัย มีค่าน้ำหนักเท่ากับ 0.39 ลำดับที่ 2 คือ ปรับปรุงห้องปฏิบัติการ มีค่าน้ำหนักเท่ากับ 0.32 ลำดับที่ 3 คือ ปรับปรุงอินเทอร์เน็ต มีค่าน้ำหนักเท่ากับ 0.19 ลำดับที่ 4 คือ ติดตั้งเครื่องปรับอากาศ มีค่าน้ำหนักเท่ากับ 0.05 และลำดับที่ 5 คือ จัดหาที่พักพิบะ มีค่าน้ำหนักเท่ากับ 0.05

จากตารางที่ 9 พบว่าการจัดลำดับทางเลือกแนวทางการปรับปรุงของปัจจัยด้านความเป็นไปได้ในการลงทุน โดยเรียงลำดับจากค่ามากที่สุดไปหาน้อยสุด ทางเลือกที่มีค่าน้ำหนักมากที่สุด ลำดับที่ 1 คือ จัดหาที่พักพิบะ มีค่าน้ำหนักเท่ากับ 0.33 ลำดับที่ 2 คือ ปรับปรุงอินเทอร์เน็ต มีค่าน้ำหนักเท่ากับ 0.27 ลำดับที่ 3 คือ จัดหาอุปกรณ์การเรียนที่ทันสมัย มีค่าน้ำหนักเท่ากับ 0.16 ลำดับที่ 4 คือ ติดตั้งเครื่องปรับอากาศ มีค่าน้ำหนักเท่ากับ 0.15 และลำดับที่ 5 คือ ปรับปรุงห้องปฏิบัติการ มีค่าน้ำหนักเท่ากับ 0.10

6.5 การจัดลำดับแนวทางการปรับปรุงสิ่งสนับสนุนการเรียนรู้ภาพรวม

จากผลการจัดลำดับแนวทางการปรับปรุงสิ่งสนับสนุนการเรียนรู้ภายใต้เกณฑ์การคัดเลือกในแต่ละด้าน ตามข้อ 6.4 ค่าน้ำหนักความสำคัญของแต่ละแนวทางการปรับปรุงสิ่งสนับสนุนการเรียนรู้จะถูกนำไปคูณกับค่าน้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์การคัดเลือกตามผลในตารางที่ 5 แบบเมตริกซึ่งจะทำให้ได้ค่าน้ำหนักความสำคัญรวมของแต่ละแนวทางการปรับปรุงสิ่งสนับสนุนการเรียนรู้ตามตารางที่ 10 และเพื่อให้เห็นถึงความแตกต่างและจุดเด่นของกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ในการจัดลำดับแนวทางการปรับปรุงสิ่งสนับสนุนการ

เรียนรู้ผลการจัดลำดับความสำคัญในแต่ละแนวทางการปรับปรุงสิ่งสนับสนุนการเรียนรู้จึงถูกนำมาแสดงเปรียบเทียบกับวิธีค่าเฉลี่ยปัจจุบันตามตารางที่ 2 ดังแสดงในตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ผลการจัดลำดับแนวทางการปรับปรุงภายใต้เกณฑ์ด้านเวลาทำโครงการ

แนวทาง การปรับปรุง สิ่งสนับสนุน การเรียนรู้	วิธี AHP		วิธีค่าเฉลี่ย ปัจจุบัน	
	น้ำหนัก ความ สำคัญ	ลำดับ	ค่า เฉลี่ย	ลำดับ
1. ปรับปรุงอินเทอร์เน็ต	0.24	2	2.69	1
2. จัดหาที่พักพิบะ	0.26	1	3.41	2
3. จัดหาอุปกรณ์ การเรียนรู้ที่ทันสมัย	0.23	3	3.56	3
4. ปรับปรุงห้อง ปฏิบัติการ	0.14	4	3.59	4
5. ติดตั้ง เครื่องปรับอากาศ	0.13	5	3.70	5

จากข้อมูลในตารางที่ 10 พบว่าผลการจัดลำดับความสำคัญของแนวทางการปรับปรุงสิ่งสนับสนุนการเรียนรู้โดยเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยจัดเรียงตามวิธีกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์สามารถจัดได้ดังนี้ 1) จัดหาที่พักพิบะ, 2) ปรับปรุงอินเทอร์เน็ต, 3) จัดหาอุปกรณ์การเรียนรู้ที่ทันสมัย, 4) ปรับปรุงห้องปฏิบัติการ และ 5) ทำการติดตั้งเครื่องปรับอากาศ ซึ่งให้ผลแตกต่างจากวิธีการจัดลำดับด้วยวิธี ความพึงพอใจค่าเฉลี่ยปัจจุบัน ที่ให้ผลการจัดลำดับความสำคัญของแนวทางการปรับปรุงสิ่งสนับสนุนการเรียนรู้เป็นดังนี้ 1) ปรับปรุงอินเทอร์เน็ต, 2) จัดหาที่พักพิบะ, 3) จัดหาอุปกรณ์การเรียนรู้ที่ทันสมัย, 4) ปรับปรุงห้องปฏิบัติการ, และ 5) ติดตั้งเครื่อง

ปรับอากาศ โดยมีผลการจัดลำดับที่แตกต่างกัน อย่างชัดเจนคือแนวทางการปรับปรุงด้าน การ จัดหาที่พบปะและการปรับปรุงอินเทอร์เน็ต ซึ่งทั้งสองวิธีให้ผลในทางตรงข้ามกันกล่าวคือ วิธีกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ให้ความสำคัญ ต่อด้านการจัดหาที่พบปะมากกว่า การ ปรับปรุงอินเทอร์เน็ตแต่ วิธีค่าเฉลี่ยปัจจุบัน ให้ผลในทางตรงข้ามซึ่งความแตกต่างใน ผลการจัดลำดับมาจากอิทธิพลจากค่าน้ำหนัก ความสำคัญของเกณฑ์ความเป็นไปได้ในการ ลงทุนซึ่งมีค่าสูงสุด (0.54) ตามตารางที่ 5 และ แนวทางการปรับปรุงโดยจัดหาที่พบปะระหว่าง อาจารย์กับนักศึกษาได้รับคะแนนในด้านนี้สูงที่สุด (0.33) ตามตารางที่ 9 ซึ่งเมื่อคะแนนค่าน้ำหนัก ความสำคัญถูกรวมโดยคำนึงถึงระดับความสำคัญ ของเกณฑ์ดังกล่าวจึงทำให้แนวการปรับปรุง ด้านจัดหาที่พบปะระหว่างอาจารย์กับนักศึกษา คะแนนสูงกว่าการปรับปรุงอินเทอร์เน็ตที่แม้จะ ได้ รับคะแนนสูงสุดโดยการจัดลำดับด้วยวิธี ค่าเฉลี่ย ปัจจุบัน จากเหตุผลข้างต้นข้อมูลความสำคัญของ เกณฑ์การคัดเลือกดังกล่าวจะถูกกลืนในกรณี การพิจารณาเพียงคะแนนผลการประเมินความ พึงพอใจโดยค่าเฉลี่ยแบบปัจจุบันและอาจทำให้ การคัดเลือกแนวทางการปรับปรุงสิ่งสนับสนุน การเรียนรู้เป็นไปในแนวทางที่ไม่เหมาะสม

7. สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

จากผลการประเมินความพึงพอใจต่อ สิ่งสนับสนุนการเรียนรู้ของสถาบันอุดมศึกษากรณี ศึกษาพบว่ามีความที่ได้รับความพึงพอใจในระดับ ต่ำจึงได้รับการคัดเลือกเพื่อหาแนวทางปรับปรุง ทั้งหมด 5 ด้านแต่จากเหตุผลทางด้านทรัพยากร ที่มีอย่างจำกัดแนวทางการปรับปรุงต่างๆ จึงไม่ สามารถกระทำพร้อมกันในทุกๆ ด้านได้ ดังนั้น แนวทางการปรับปรุงพร้อมลำดับความสำคัญ ของแต่ละแนวทางจึงมีความจำเป็นงานวิจัยนี้ จึงนำเสนอกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์เพื่อ

จัดลำดับความสำคัญของแนวทางการปรับปรุง สิ่งสนับสนุนการเรียนรู้โดยผลที่ได้ถูกนำมา เปรียบเทียบกับวิธีการปัจจุบัน ซึ่งใช้วิธีค่าเฉลี่ย ซึ่งปราศจากการให้น้ำหนักความสำคัญของ เกณฑ์การเลือก

ด้วยวิธีการในปัจจุบันโดยพิจารณา เพียงค่าเฉลี่ย ซึ่งเป็นการวิจัยเชิงสำรวจ เช่นเดียวกับ [3], [5], [6], [7] และ [8] ผลการ จัดลำดับแนวทางการปรับปรุงสิ่งสนับสนุน การเรียนรู้ สามารถเรียงลำดับค่าน้ำหนัก ความสำคัญของแต่ละทางเลือกจากมากไปหา น้อยได้ ดังนี้ คือ ปรับปรุงอินเทอร์เน็ต, จัดหา ที่พบปะ, จัดหาอุปกรณ์การเรียนที่ทันสมัย, ปรับปรุงห้องปฏิบัติการ, และทำการติดตั้ง เครื่องปรับอากาศ แต่ในทางกลับกันการ จัดเรียงลำดับตามวิธีกระบวนการลำดับชั้น เชิงวิเคราะห์สามารถเรียงลำดับได้ดังนี้ จัดหา ที่พบปะ, ปรับปรุงอินเทอร์เน็ต, จัดหาอุปกรณ์ การเรียนที่ทันสมัย, ปรับปรุงห้องปฏิบัติการ, ทำการติดตั้งเครื่องปรับอากาศ

โดยจุดแตกต่างที่ชัดเจนคือการสลับ ตำแหน่งของแนวทางลำดับที่ 1 (ปรับปรุง อินเทอร์เน็ต) และ 2 (จัดหาที่พบปะ) ของ ทั้งสองวิธีซึ่งมีผลมาจากอิทธิพลของคะแนนที่สูง ของแนวทางการปรับปรุงด้วยการจัดหาที่พบปะ ระหว่างอาจารย์กับนักศึกษา (0.33) ภายใต้เกณฑ์ การคัดเลือกที่มีความสำคัญสูงสุดคือ เกณฑ์ด้าน ความเป็นไปได้ในการลงทุน (0.54)

ดังนั้นวิธีการจัดลำดับความสำคัญของ แนวทางการปรับปรุงสิ่งสนับสนุนการเรียนรู้ ด้วยกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์สามารถ สะท้อนเหตุผลความสำคัญของเกณฑ์ในการ เลือกได้มากกว่าวิธีปัจจุบัน จึงเหมาะสำหรับ การนำไปประยุกต์ใช้ในการจัดลำดับความสำคัญ ของแนวทางการปรับปรุงสิ่งสนับสนุนการเรียนรู้ เพื่อเพิ่มระดับความพึงพอใจดังกล่าว

8. ข้อเสนอแนะ

การจัดลำดับแนวทางการปรับปรุง สิ่งสนับสนุนการเรียนรู้เพื่อเพิ่มระดับความพึงพอใจ โดยการประยุกต์ใช้กระบวนการลำดับขั้นเชิงวิเคราะห์ โดยเฉพาะการจัดพื้นที่สำหรับอาจารย์และนักศึกษาได้พบปะ และแลกเปลี่ยน สนทนา หรือทำงานร่วมกัน ซึ่งมีความสำคัญอยู่ในลำดับสูงสุด จึงควรปรับปรุงให้มีพื้นที่พบปะและแลกเปลี่ยนสนทนาระหว่างอาจารย์และนักศึกษา

อีกทั้งควรมีการศึกษาความสำคัญ ของปัจจัยที่ส่งผลต่อการปรับปรุงสิ่งสนับสนุน การเรียนรู้ หลักสูตรการจัดการอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี ที่ศึกษาเจาะจงในรายวิชา เพื่อให้ได้รายละเอียด ที่ชัดเจนในการเลือกแนวทางการปรับปรุง และ ตรงกับความต้องการของนักศึกษามากยิ่งขึ้น

9. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์และนักศึกษา จากหลักสูตรการจัดการอุตสาหกรรม คณะ เทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานีในการ ให้ความร่วมมือให้ข้อมูลระหว่างการทำวิจัย จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

10. เอกสารอ้างอิง

- [1] Porncharoen R, Pongput D, Wichiranon S. First-Year Students' Satisfaction towards activities at Rajamangala University of Technology Phra Nakhon. Journal of graduate studies Valaya Alongkorn Rajabhat University. 2017; 11(2): 130-141. (in Thai)
- [2] Limsukol P, Padungsit M. Accounting staff working satisfaction. Journal of accounting profession. 2011; 7(20): 50-65. (in Thai)
- [3] Thong-oon W, Panyindee J. Satisfaction toward program in human resource management in faculty of management science, Nakhon Pathom Rajabhat University. Journal of MCU Buddhapanya Review. 2017; 2(1): 1-12. (in Thai)
- [4] Laeprurat S. The relationship between job satisfaction and turnover Intention: a study of generation y employees of commercial banks in khon kaen province, Thailand. Veridian E-Journal 2014; 7(3): 863-877. (in Thai)
- [5] Prewthaisong S. A survey of satisfaction towards students on learning facilities in the microprocessor application course. Journal of Humanities and Social Sciences Thonburi University. 2018; 22(27): 79-84. (in Thai)
- [6] Dissaman S. Employer satisfaction with information studies graduates, Chulalongkorn University. Library Science Journal. 2007; 28(2): 33-48. (in Thai)
- [7] Jongjaisutham S. Students' Satisfaction towards instructional management of graduate studies program at Nakhon Si Thammarat Rajabhat University. Wichcha Journal Nakhon Si Thammarat Rajabhat University. 2010; 29(2): 25-33. (in Thai)

- [8] Satsuwan A, Srithailaun O. The satisfaction of the fourth year students towards the undergraduate program of science in nursing, Kuakarun Faculty of Nursing, Navamindradhiraj University. Kuakarun Journal of nursing, 2013; 21(Special issue): 59-76
- [9] Chotvivathana I. Students' satisfaction towards the undergraduate program, school of accountancy, University of The Thai Chamber of Commerce. University of the Thai Chamber of Commerce journal. 2013; 33(Special issue): 1-12. (in Thai).
- [10] Office of the Higher Education Commission. Manual for the internal quality assurance for Higher education institutions. 2014. Bangkok: Tana Press.
- [11] Satty T.L. The analytic hierarchy process. New York: McGraw-Hill; 1980.
- [12] Tunsirikongkol W. AHP The most famous decision process in the world. Bangkok: Graphic and Printer Center; 1999. (in Thai)
- [13] Tiantong M. Statistics and research methodology for IT. Bangkok: King Mongkut's University of Technology North Bangkok; 2005. (in Thai)
- [14] Yamane, Taro. Statistics: An introductory analysis. 2nd Ed., New York: Harper and Row; 1973.
- [15] Pisanbud S. Project planning and management. Bangkok: Suan Dusit University; 2004 (in Thai)

การบำบัดสีและซีโอटीในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม โดยถังปฏิกรณ์โฟโตแคทาลิติกชนิดไหลต่อเนื่อง

ธรรมศักดิ์ วัฒนวิรุฬห์^{1*} สัญญา สิริวิทยาปกรณ์² และอรรณพ วัฒนวิรุฬห์³
thammasak@rmutt.ac.th¹, fengsys@ku.ac.th², orawan_r@rmutt.ac.th³

^{1,3} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

² ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Received: January 16, 2018
Revised: February 23, 2018
Accepted: August 20, 2018

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) แบบฟิล์มบางโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตแคทาลิติก และนำมาใช้ทดสอบประสิทธิภาพในการบำบัดสีและซีโอटीในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมในถังปฏิกรณ์โฟโตแคทาลิติกชนิดไหลต่อเนื่องโดยใช้แหล่งกำเนิดแสงจากดวงอาทิตย์ ทั้งนี้ น้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่นำมาใช้มี 2 ลักษณะ ได้แก่ น้ำเสียก่อนและหลังผ่านการบำบัดโดยระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่งของสถานประกอบการอุตสาหกรรมฟอกย้อม ผลการศึกษาในงานวิจัยนี้ พบว่า การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 แบบฟิล์มบางที่เตรียมขึ้นเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตแคทาลิติกสามารถบำบัดสีและซีโอटीในน้ำเสียทั้ง 2 ลักษณะที่นำมาใช้ทดสอบได้ โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีและซีโอटीสูงสุด เท่ากับ 39.85% และ 45.23% ตามลำดับ สำหรับน้ำเสียก่อนผ่านระบบบำบัดน้ำเสียของสถานประกอบการฯ โดยใช้เวลาในการบำบัด 300 นาที และมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีและซีโอटीสูงสุด เท่ากับ 28.21% และ 44.41% ตามลำดับ สำหรับน้ำเสียหลังผ่านระบบบำบัดน้ำเสียของสถานประกอบการฯ โดยใช้เวลาในการบำบัด 300 นาที ทั้งนี้ จากผลการศึกษาสามารถหาค่าจลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตแคทาลิติกในการบำบัดซีโอटीในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมซึ่งสามารถอธิบายได้โดยสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง โดยสามารถหาค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งได้เท่ากับ 0.0121 และ 0.0107 min^{-1} ตามลำดับ สำหรับน้ำเสียก่อนและหลังผ่านการบำบัดโดยระบบบำบัดน้ำเสียของสถานประกอบการอุตสาหกรรมฟอกย้อม

คำสำคัญ: การบำบัดน้ำเสียขั้นสูง โฟโตออกซิเดชัน โซล-เจล อุตสาหกรรมสิ่งทอ

Removal of Color and COD from Dyestuff Industry with Continuous-photocatalytic Reactor

Thammasak Rojviroon^{1*}, Sanya Sirivithayapakorn² and Orawan Rojviroon³
thammasak@rmutt.ac.th¹, fengsys@ku.ac.th², orawan_r@rmutt.ac.th³

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

² Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

Received: January 16, 2018
Revised: February 23, 2018
Accepted: August 20, 2018

Abstract

This research prepared a TiO_2 thin film photocatalyst for photocatalytic process. The removal efficiency of color and COD from dyestuff industry were examined in a continuous-photocatalytic reactor under sunlight as solar irradiation. The wastewater used in this research for photocatalytic performance test comprised of pre- and post-treatment wastewater from the wastewater treatment plant with activated sludge treatment process of dyestuff industry. The results show that the use of prepared TiO_2 photocatalyst in photocatalytic processes can remove color and COD in pre- and post-treatment wastewater with the maximum efficiency of color and COD removal of 39.85% and 45.23%, respectively for pre-treatment wastewater and with the maximum efficiency of 28.21% and 44.41%, respectively for post-treatment wastewater, after 300 minutes treatment. The kinetics of COD removal by photocatalytic process based on the results of this study can be explained by the first-order reaction equation. The calculated first-order reaction constant was 0.0121 min^{-1} and 0.0107 min^{-1} , respectively for pre- and post-treatment wastewater from the wastewater treatment plant of dyestuff industry.

Keywords: advanced wastewater treatment, photooxidation, sol-gel, textile industry

1. บทนำ

ในทิศทางที่ประเทศไทยมีการส่งเสริมให้เกิดการขยายตัวในภาคอุตสาหกรรมอย่างต่อเนื่อง ส่งผลเกี่ยวข้องกับปัญหามลพิษที่เกิดขึ้นจากภาคอุตสาหกรรม ซึ่งประกอบด้วยปัญหามลพิษทางน้ำ ของเสียทิ้งที่เป็นอันตรายและไม่เป็นอันตรายจากภาคอุตสาหกรรม มลพิษทางอากาศ รวมถึงการปนเปื้อนในดินและน้ำใต้ดิน ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากกระบวนการผลิตในภาคอุตสาหกรรม การใช้สารเคมี และแนวทางการจัดการปัญหามลพิษทางด้านที่เกิดขึ้นในภาคอุตสาหกรรมซึ่งหากมีการจัดการปัญหามลพิษดังกล่าวโดยใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสมและถูกต้องตามหลักวิชาการจะทำให้ลดผลกระทบจากปัญหาดังกล่าวได้ ในส่วนของอุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นอุตสาหกรรมที่มีการใช้ปริมาณสารเคมีและน้ำในกระบวนการผลิตในทุกขั้นตอนการผลิตในปริมาณที่สูง หากผู้ประกอบการไม่มีการบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตต่างๆ อย่างเหมาะสมจะทำให้เกิดผลกระทบต่อระบบนิเวศทางน้ำในวงกว้าง ทั้งนี้ลักษณะสมบัติของน้ำ

เสียจากอุตสาหกรรมดังกล่าวในบางช่วงบางตอนที่มีการผลิตสูงยังคงมีกลิ่นอุนหภูมิสูง องค์ประกอบของสารอินทรีย์ และสีที่มีโครงสร้างที่ย่อยสลายได้ยากทำให้ไม่สามารถบำบัดได้หมดโดยกระบวนการบำบัดน้ำเสียของภาคอุตสาหกรรมสิ่งทอ สำหรับกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่ใช้ในปัจจุบันของภาคอุตสาหกรรมดังกล่าว ได้แก่ กระบวนการก่อดักตะกอนทางเคมี กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ กระบวนการโอโซนชัน กระบวนการเฟ้นตัน กระบวนการดูดซับ และกระบวนการใช้เมมเบรน เป็นต้น [1-5] ซึ่งในแต่ละกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่กล่าวข้างต้นยังคงมีข้อจำกัดในการดำเนินระบบ อาทิเช่น ไม่สามารถบำบัดสีปนเปื้อนในน้ำเสียได้หมด สิ้นเปลืองพลังงานและสารเคมี ก่อเกิดผลิตภัณฑ์

ที่เป็นสารพิษหรือสารก่อมะเร็ง ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบสูง และมีความยุ่งยากซับซ้อนในการเดินระบบ รวมทั้งขาดบุคลากรที่มีความรู้ในการเดินระบบ เป็นต้น [6-8]

สำหรับงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นในการศึกษาการใช้กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม โดยใช้กระบวนการโฟโตแคทาลิติก (Photocatalytic Process) ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาแสง (Photocatalyst) ภายใต้แสงอาทิตย์ โดยกระบวนการดังกล่าวเป็นกระบวนการที่มีศักยภาพและมีการประยุกต์ใช้งานในหลายลักษณะ เช่น การยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ การบำบัดมลพิษทางอากาศและทางน้ำ เป็นต้น [9-11] ประกอบกับเป็นกระบวนการที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน และมีอุปกรณ์น้อยชิ้น ในส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ในกระบวนการโฟโตแคทาลิติก ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดี ราคาถูก และมีความเป็นพิษต่ำ รวมทั้งการใช้ TiO_2 ในกระบวนการดังกล่าวไม่ก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นอันตรายหรือก่อโรค และไม่ก่อให้เกิดสารตกค้างในขั้นตอนของกระบวนการบำบัด [12-14]

ทั้งนี้วัตถุประสงค์ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นเพื่อหาประสิทธิภาพการบำบัดสีและซีโอดีในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมก่อนและหลังผ่านระบบบำบัดน้ำเสียระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกทีเวเต็ดสลัดจ์ (Activated Sludge, AS) ของสถานประกอบการอุตสาหกรรม โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 แบบฟิล์มบางที่เตรียมขึ้นร่วมกับแสงอาทิตย์ เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตแคทาลิติก รวมทั้งทำการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตแคทาลิติกในการบำบัดซีโอดีในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมดังกล่าว

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 แบบฟิล์มบาง

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 แบบฟิล์มบางโดยวิธี Sol-gel สามารถเตรียมได้โดยผสมสารละลาย 2 ชนิด ได้แก่ไทเทเนียมเตตระไฮดรอกไซด์ ($\text{C}_{12}\text{H}_{28}\text{O}_4\text{Ti}$, TTIP) ผสมกับสารละลายไอโซโพรพานอล ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$) ในอัตราส่วนโดยปริมาตรเท่ากับ 1:15 ปรับ pH ให้อยู่ระหว่าง 2-3 ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) กวนผสมในสภาวะปิดที่ไม่มีออกซิเจนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง [15] สำหรับการเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 แบบฟิล์มบางที่เตรียมขึ้นลงบนตัวกลางซึ่งใช้เป็นแผ่นกระจกขนาด $9.0 \times 11.0 \times 0.4$ cm จำนวน 48 แผ่น โดยวิธีจุ่มเคลือบผิว (Dip coating) ในอุปกรณ์เคลือบผิว โดยทำการเคลือบผิวจำนวน 5 ชั้น ทั้งนี้หลังจากการจุ่มเคลือบในแต่ละชั้นของการเคลือบผิวแล้วจะนำแผ่นกระจกดังกล่าวไปอบที่อุณหภูมิ 100, 200, 250, 350 และ 500 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

2.2 การวิเคราะห์ลักษณะกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 แบบฟิล์มบางสามารถวิเคราะห์ในพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ลักษณะพื้นผิว ขนาดอนุภาค ความขรุขระเฉลี่ย พื้นที่ผิวปรากฏ และขนาดช่องว่างพลังงาน ทั้งนี้วิธีการและอุปกรณ์ในการวิเคราะห์ แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ วิเคราะห์และอุปกรณ์สำหรับวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 แบบฟิล์มบาง

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์/อุปกรณ์
ลักษณะพื้นผิว	AFM/Asylum Research รุ่น MFP-3DBIO
ขนาดอนุภาค	
ความขรุขระเฉลี่ยและพื้นที่ผิวปรากฏ	Gwyddion v.2.22
ขนาดช่องว่างพลังงาน	UV-Vis spectrometer/ Perkin Elmer รุ่น Lambda 650

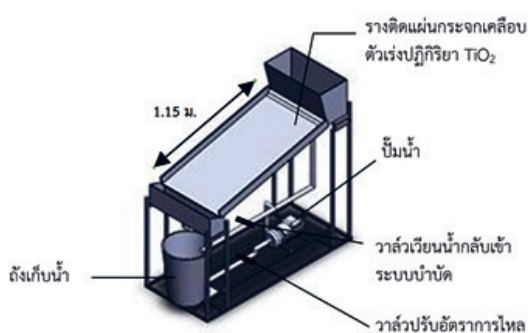
2.3 การหาประสิทธิภาพการบำบัดสี

น้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่นำมาศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีและซีไอดี แบ่งเป็น 2 ส่วนได้แก่ น้ำเสียก่อนเข้าและหลังจากจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบ AS โดยนำน้ำเสียดังกล่าวมาวิเคราะห์ลักษณะสมบัติต่างๆ เบื้องต้น สำหรับพารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์น้ำเสียดังกล่าวแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์น้ำเสีย

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์
สี (ADMI)	ADMI methods
COD (mg/L)	Close reflux, Titrimetric method
SS (mg/L)	Gravimetric method
TDS (mg/L)	Gravimetric method
pH	Electrical potential method

โดยสามารถหาประสิทธิภาพการบำบัดสีและซีโอดี โดยใช้น้ำเสียก่อนเข้าและหลังออกจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบ AS และทำการทดลองในถังปฏิกรณ์โฟโตแคทาลิติกชนิดไหลต่อเนื่องดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งมีการจัดวางแผ่นกระจกซึ่งผ่านการเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 แบบฟิล์มบางจำนวน 48 แผ่น ลงบนรางของถังปฏิกรณ์ดังกล่าว จากนั้นเติมเข้าสู่ระบบผ่านทางถังเก็บน้ำปริมาตร 20 ลิตร โดยมีอัตราการไหลของน้ำเสียที่ไหลผ่านผิวกระจกเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 แบบฟิล์มบางมีค่าคงที่เท่ากับ 0.25 ลิตรต่อวินาที และมีการไหลวนเวียนภายในถังปฏิกรณ์ดังกล่าว โดยมีความหนาของชั้นน้ำที่ไหลผ่านแผ่นกระจกอยู่ระหว่าง 2.0-2.5 cm ซึ่งการศึกษาดังกล่าวดำเนินการภายใต้สภาวะที่มีแสงจากดวงอาทิตย์เป็นเวลา 300 นาที โดยมีความเข้มแสงเฉลี่ยเท่ากับ $1,840 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ ทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีและซีโอดีในช่วงเวลา 0, 10, 15, 20, 30, 60, 90, 120, 180, 240 และ 300 นาที ตามลำดับ



รูปที่ 1 ถังปฏิกรณ์โฟโตแคทาลิติกชนิดไหลต่อเนื่อง

ทั้งนี้การหาค่าประสิทธิภาพการบำบัดสีและซีโอดีจะทำการทดลองในชุดควบคุมในสภาวะที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 แบบฟิล์มบางแต่ไม่มีการให้แสงอาทิตย์ (ชุดควบคุมที่ 1) และทดลองในชุดควบคุมในสภาวะที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 แบบฟิล์มบางแต่มีการให้แสงอาทิตย์ (ชุดควบคุม

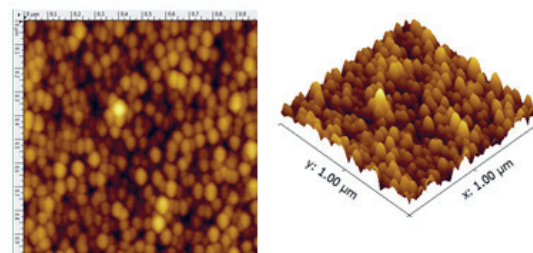
ที่ 2) เพื่อใช้เปรียบเทียบกับผลการทดลองในชุดทดลอง

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

3.1 ลักษณะกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

ผลการศึกษาลักษณะทางภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 แบบฟิล์มบางด้วยอุปกรณ์ Atomic Force Microscopy (AFM) รุ่น Asylum Research MFP-3DBIO ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 2

จากรูปที่ 2 แสดงให้เห็นถึงลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ฟิล์มบางเคลือบอยู่บนพื้นผิวแผ่นกระจกตัวกลางซึ่งสามารถสังเกตเห็นขนาดอนุภาคที่กลมมนมีขนาดใกล้เคียงกัน ซึ่งเกาะและมีการกระจายตัวของอนุภาค TiO_2 อยู่ทั่วบริเวณพื้นผิวอย่างสม่ำเสมอทั่วบริเวณพื้นผิว



รูปที่ 2 ลักษณะพื้นผิวทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 แบบฟิล์มบาง

ทั้งนี้จากผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 แบบฟิล์มบางด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Gwyddion v.2.22 พบว่าขนาดของอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 แบบฟิล์มบางมีขนาดอนุภาคอยู่ระหว่าง 30-70 นาโนเมตร มีค่าความขรุขระเฉลี่ย เท่ากับ 3.97 และมีพื้นที่ปรากฏในพื้นที่ทำการเคลือบผิวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาฟิล์มบาง ขนาด $1 \mu\text{m}^2$ เท่ากับ 1.05 นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ขนาดช่องว่างของ

ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 แบบฟิล์มบางด้วยอุปกรณ์ UV-Vis spectrometer รุ่น Lambda 650 Perkin Elmer พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 แบบฟิล์มบางที่เตรียมขึ้นมีขนาดช่องว่างพลังงานเท่ากับ 3.24 eV ซึ่งแสดงให้เห็นว่าขนาดช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นมีค่าใกล้เคียงกับขนาดช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 โดยทั่วไป โดยขนาดช่องว่างพลังงานดังกล่าวสามารถตอบสนองต่อแสงอาทิตย์ทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันได้ [16-18]

3.2 ประสิทธิภาพการบำบัดสีและซีโอดี

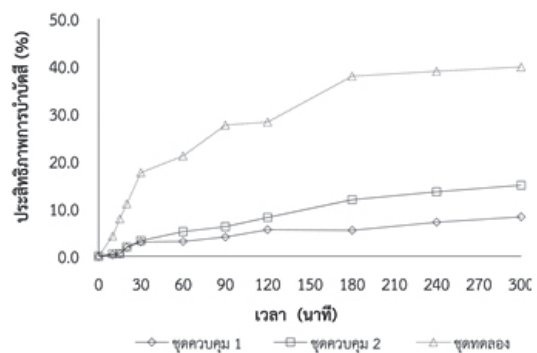
ผลการศึกษาลักษณะสมบัติต่างๆ ของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมก่อนและหลังผ่านระบบบำบัดน้ำเสียของสถานประกอบการอุตสาหกรรมแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฯ

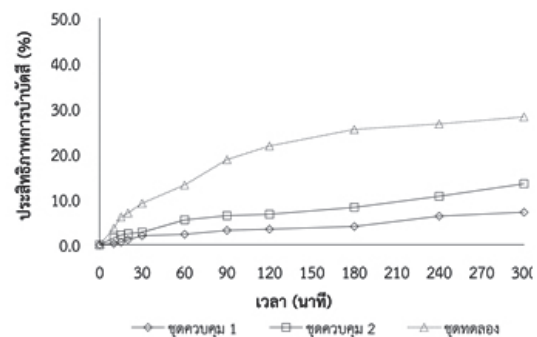
พารามิเตอร์	ก่อนผ่านระบบบำบัด	หลังผ่านระบบบำบัด	ค่ามาตรฐาน
สี (ADMI)	815.6	408.1	300.0
COD (mg/L)	658.8	213.7	120.0
pH	8.8	7.0	5.5-9.0
SS (mg/L)	417.5	35.0	≤ 50.0
TDS (mg/L)	2,743	2,368	$\leq 3,000$

จากข้อมูลลักษณะสมบัติของน้ำเสียดังกล่าวเมื่อพิจารณาในส่วนของคุณค่าสีและซีโอดีแสดงให้เห็นว่า ค่าสีและซีโอดีของน้ำเสียทั้งในส่วนก่อนและหลังผ่านระบบบำบัดน้ำเสียยังมีค่าเกินมาตรฐานตามที่กำหนดไว้ในประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรม [19]

ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการบำบัดสีด้วยกระบวนการโฟโตแคทาลิติกที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้น้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมทั้งในส่วนน้ำเสียก่อนและหลังผ่านระบบบำบัดน้ำเสียของสถานประกอบการอุตสาหกรรม แสดงดังรูปที่ 3 และข้อมูลประสิทธิภาพการบำบัดสีสูงสุดด้วยกระบวนการโฟโตแคทาลิติก แสดงให้เห็นว่ากระบวนการดังกล่าวสามารถบำบัดสีในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมทั้งในส่วนน้ำเสียก่อนและหลังผ่านระบบบำบัดของสถานประกอบการอุตสาหกรรมแสดงดังตารางที่ 4



ก. กรณีใช้น้ำเสียก่อนผ่านระบบบำบัดน้ำเสีย



ข. กรณีใช้น้ำเสียหลังผ่านระบบบำบัดน้ำเสีย

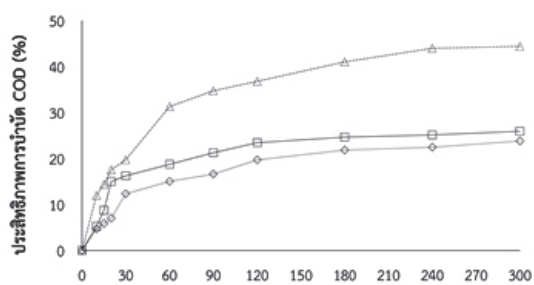
รูปที่ 3 ประสิทธิภาพการบำบัดสีด้วยกระบวนการโฟโตแคทาลิติก

ตารางที่ 4 ประสิทธิภาพการบำบัดสี

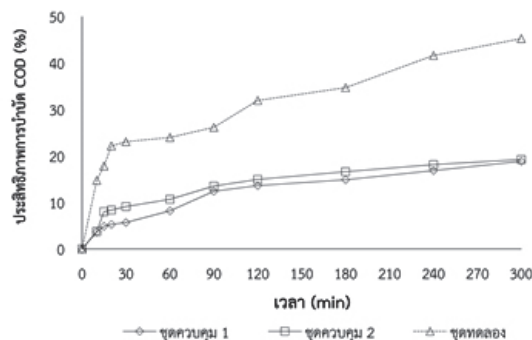
ชุดการทดลอง	ประสิทธิภาพการบำบัดสีโดยใช้น้ำเสีย (%)	
	ก่อนผ่านระบบบำบัด	หลังผ่านระบบบำบัด
ชุดทดลอง	39.85	28.21
ชุดควบคุม 1	8.28	7.18
ชุดควบคุม 2	14.95	13.46

ผลจากการทดลองหาประสิทธิภาพการบำบัดสี พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดสีสูงสุดด้วยกระบวนการโฟโตแคทาลิติกสำหรับชุดทดลองทั้งในส่วนน้ำเสียก่อนและหลังผ่านระบบบำบัดฯ มีค่าเท่ากับ 39.85% และ 28.21% ตามลำดับ ที่เวลา 300 นาที คิดเป็นค่าสีที่บำบัดได้เท่ากับ 325.0 ADMI และ 115.1 ADMI ตามลำดับ โดยมีค่าสีคงเหลือเท่ากับ 490.6 ADMI และ 293.0 ADMI ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีในส่วนของน้ำเสียก่อนและหลังผ่านการบำบัดของอุตสาหกรรมฟอกย้อม แสดงให้เห็นว่ากระบวนการโฟโตแคทาลิติกสามารถบำบัดซีโอดีควบคู่ไปกับการบำบัดสี ทั้งนี้ข้อมูลประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมด้วยกระบวนการโฟโตแคทาลิติกที่เวลาต่างๆ กรณีที่ใช้น้ำเสียก่อนและหลังผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดของอุตสาหกรรมฟอกย้อมแสดงดังรูปที่ 4



ก. กรณีใช้น้ำเสียก่อนผ่านระบบบำบัดน้ำเสีย



ข. กรณีใช้น้ำเสียหลังผ่านระบบบำบัดน้ำเสีย

รูปที่ 4 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีกรณีที่ใช้ น้ำเสียก่อนผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดฯ

สำหรับข้อมูลประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีสูงสุดด้วยกระบวนการโฟโตแคทาลิติก ทั้งในส่วนน้ำเสียก่อนและหลังผ่านระบบบำบัดของสถานประกอบการอุตสาหกรรมแสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี

ชุดการทดลอง	ประสิทธิภาพการบำบัดสีโดยใช้น้ำเสีย (%)	
	ก่อนผ่านระบบบำบัด	หลังผ่านระบบบำบัด
ชุดทดลอง	45.23	44.41
ชุดควบคุม 1	23.82	18.86
ชุดควบคุม 2	25.94	19.25

ผลจากการทดลองหาประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีพบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีสูงสุดด้วยกระบวนการโฟโตแคทาลิติกสำหรับชุดทดลองทั้งในส่วนน้ำเสียก่อนและหลังผ่านระบบบำบัดฯ มีค่าเท่ากับ 45.23% และ 44.41% ตามลำดับ ที่เวลา 300 นาที คิดเป็นค่าซีโอดีที่บำบัดได้เท่ากับ 298.0 mg/L และ 95.0 mg/L ตามลำดับ โดยมีค่าซีโอดีคงเหลือเท่ากับ 360.8 mg/L และ 118.7 mg/L ตามลำดับ

ภาพรวมการเปลี่ยนแปลงของสีและซีโอดีตลอดช่วงเวลาทำการทดลอง พบว่า ในชุดทดลองที่ประกอบไปด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาและแสงอาทิตย์สามารถบำบัดสีได้ดีที่สุด เนื่องจากชุดทดลองดังกล่าวเกิดกระบวนการโฟโตแคทาลิติกส่งผลให้สามารถเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันได้โดยอนุภาคของ TiO_2 ที่อยู่บนผิวหน้าของฟิล์มบางเมื่อได้รับแสงอาทิตย์ซึ่งมีพลังงานมากกว่าช่องว่างแถบพลังงาน พลังงานดังกล่าวเพียงพอที่จะกระตุ้นอิเล็กตรอนในแถบเวเลนซ์ (valance band) ให้มีระดับพลังงานเพิ่มขึ้นไปสู่แถบการกระตุ้น (conduction band) ส่งผลทำให้เกิดโฮล (hole) ที่แถบเวเลนซ์ โดยผลลัพธ์จากการที่อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นและหลุดออกไปจากแถบเวเลนซ์ส่งผลทำให้เกิดปฏิกิริยาในลักษณะที่เป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรงในรูปแบบต่างๆ ได้แก่ hydroxyl radicals ($\cdot\text{OH}$) และ superoxide radicals ($\cdot\text{O}_2^-$) [20-23] ซึ่งผลิตภัณฑ์ดังกล่าวสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสิ่งปนเปื้อนต่างๆ ในน้ำเสียได้

เมื่อพิจารณาการเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันในช่วงเริ่มต้นการทดลองในช่วงเวลา 30 นาทีแรกปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ค่อนข้างเร็วเนื่องจากบริเวณพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 ฟิล์มบางยังสะอาดทำให้ที่ผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถเกิดปฏิกิริยาดูดติดผิวควบคู่ไปกับการเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชัน ทั้งนี้กลไกการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวเป็นไปตามลักษณะทั่วไปของการเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชัน ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะมีค่าลดลงเมื่อเวลาผ่านไป เนื่องจากเกิดปัจจัยจำกัดของพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยา [24-26]

ในกรณีที่เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดสีและซีโอดีโดยพิจารณาในส่วนของปริมาณของสีและซีโอดีที่บำบัดได้ พบว่า

ประสิทธิภาพการบำบัดสีและซีโอดีในกรณีที่ใช้ น้ำเสียก่อนผ่านระบบบำบัดน้ำเสียมีค่ามากกว่าประสิทธิภาพการบำบัดสีในกรณีที่ใช้ น้ำเสียหลังผ่านระบบบำบัดน้ำเสีย ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดออกซิเดชันกับสารประกอบต่างๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียที่เป็นโมเลกุลเล็กและสามารถย่อยสลายได้ง่ายรวมทั้งมีจำนวนมากจะถูกกำจัดออกก่อน [27, 28] ซึ่งในน้ำเสียก่อนผ่านระบบบำบัดน้ำเสียยังคงมีปริมาณสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ง่ายในปริมาณที่มากกว่าน้ำเสียหลังผ่านระบบบำบัดน้ำเสียของสถานประกอบการอุตสาหกรรมซึ่งเป็นระบบบำบัดทางชีวภาพ ส่งผลให้ภาพรวมประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีโอดีสำหรับในกรณีที่มีการติดตามประสิทธิภาพการบำบัดสีและซีโอดีในน้ำเสียก่อนผ่านระบบบำบัดฯ มีค่าสูงกว่าในกรณีที่ใช้น้ำเสียหลังผ่านระบบบำบัดน้ำเสียฯ เล็กน้อย แม้ว่าความเข้มข้นของสีในน้ำจะเป็นอุปสรรคสำคัญในการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าว [29, 30]

ในทางกลับกันในกรณีที่มีการติดตามประสิทธิภาพการบำบัดสีในน้ำเสียหลังผ่านระบบบำบัดฯ โดยน้ำเสียดังกล่าวผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการทางชีวภาพของสถานประกอบการอุตสาหกรรมมาแล้ว ส่งผลให้คงเหลือแต่สารประกอบต่างๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียที่เป็นโมเลกุลใหญ่ และย่อยสลายได้ยากทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมของกระบวนการมีค่าน้อยกว่า แต่ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าการใช้กระบวนการโฟโตแคทาลิติกยังทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันส่งผลให้สารประกอบต่างๆ ที่เป็นโมเลกุลใหญ่และยังปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียหลังผ่านระบบบำบัดน้ำเสียของสถานประกอบการอุตสาหกรรมสามารถถูกกำจัดออกได้อีก

ทั้งนี้เมื่อพิจารณาในส่วนของการทดลองในชุดความคุมทั้ง 1 และ 2 พบว่า ประสิทธิภาพ

การบำบัดสีมีค่าต่ำมาก เนื่องจากการมีแสงอาทิตย์หรือตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 फिल्मบางเพียงอย่างเดียวไม่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชัน และเมื่อเปรียบเทียบผลการบำบัดสีในชุดควบคุมทั้ง 2 ชุด ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 फिल्मบางในกรณีที่ไม่มีเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชัน เนื่องจากตามธรรมชาติแสงอาทิตย์ทำให้เกิดปฏิกิริยา

ออกซิเดชันได้แต่ปฏิกิริยาจะเกิดได้ช้ากว่าในกรณีที่มิตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองในชุดควบคุมในสภาวะที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา फिल्मบางแต่ไม่มีการให้แสงพบว่า ในชุดควบคุมดังกล่าวไม่เกิดปฏิกิริยาโฟโตแคทาลิติก แต่ยังคงพบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดสีและซีโอดีซึ่งเป็นผลจากโมเลกุลของสารปนเปื้อนในน้ำเสียถูกดูดติดผิวบนผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 फिल्मบาง [29]

สำหรับภาพรวมของการบำบัดน้ำเสียก่อนและหลังผ่านการบำบัดของอุตสาหกรรมฟอกย้อมด้วยกระบวนการโฟโตแคทาลิติกเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรม แสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมด้วยกระบวนการโฟโตแคทาลิติก

พารามิเตอร์	ผลการบำบัดโดยใช้น้ำเสีย		ค่ามาตรฐาน
	ก่อนผ่านระบบบำบัด	หลังผ่านระบบบำบัด	
สี (ADMI)	490.6	293.0	300.0
COD (mg/L)	360.8	118.7	120.0
pH	9.1	7.2	5.5-9.0
SS (mg/L)	228.0	29.7	≤ 50.0
TDS (mg/L)	1,390	1,188	$\leq 3,000$

จากข้อมูลในตารางที่ 6 แสดงให้เห็นภาพรวมผลการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมด้วยกระบวนการโฟโตแคทาลิติก ซึ่งแสดงให้เห็นการหายไปของ SS อย่างชัดเจน แต่ในส่วนของ TDS มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยซึ่งอาจเป็นผลเนื่องจากการไหลเวียนภายในถังปฏิกิริยาทำให้ของแข็งแขวนลอยเกิดการแตกตัวและเปลี่ยนรูปไป ทั้งนี้จากกระบวนการดังกล่าวมีศักยภาพและสามารถประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่เกิดขึ้นในทั้ง 2 กรณีทั้งน้ำเสียก่อนและหลังผ่านระบบบำบัดน้ำเสียของสถานประกอบการอุตสาหกรรมโดยเฉพาะอย่างยิ่งสามารถบำบัดน้ำเสียหลังผ่านระบบบำบัดน้ำเสียของสถานประกอบการอุตสาหกรรมให้เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดขึ้นได้ในทุกพารามิเตอร์ที่กำหนดได้ และหากมีการพัฒนาใช้กระบวนการดังกล่าวเป็นกระบวนการช่วยเสริมศักยภาพในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมจะทำให้ช่วยลดปัญหามลพิษทางน้ำที่เกิดจากการปล่อยระบายน้ำทิ้งดังกล่าวได้

3.3 จลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตแคทาลิติก

สำหรับจลนพลศาสตร์ของกระบวนการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคทาลิติก เมื่อพิจารณาจากค่าซีโอดีในน้ำเสียที่เปลี่ยนแปลงไปสามารถอธิบายโดยสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง [2, 31] ดังสมการที่ 1

$$\frac{dC}{dt} = -k_1 C \quad (1)$$

ทั้งนี้สมการที่ 1 สามารถอินทิเกรตและจัดรูปใหม่ได้ ดังสมการที่ 2

$$\ln\left(\frac{C_0}{C}\right) = k_1 t \quad (2)$$

โดยที่

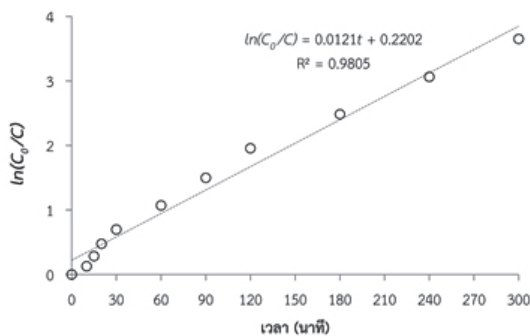
$\frac{dC}{dt}$ = อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เวลาใดๆ (mol/L-min)

C_0 = ความเข้มข้นของสารที่เวลาเริ่มต้น (mol/L)

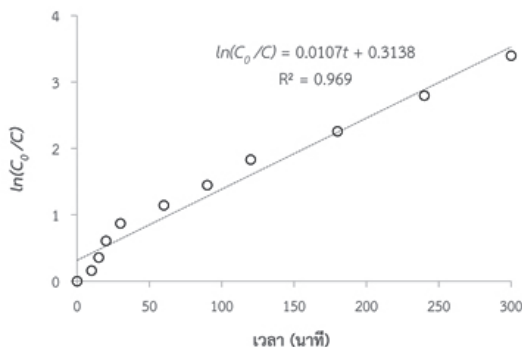
C = ความเข้มข้นของสารที่เวลาใดๆ (mol/L)

t = เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา (min)

k_1 = ค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (min⁻¹)



ก. กรณีใช้น้ำเสียก่อนผ่านระบบบำบัดน้ำเสีย



ข. กรณีใช้น้ำเสียหลังผ่านระบบบำบัดน้ำเสีย

รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(C_0/C)$ กับเวลาของปฏิกิริยาโฟโตแคทาลิติก

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(C_0/C)$ กับเวลาของปฏิกิริยาโฟโตแคทาลิติกในการบำบัดซีโอทีในน้ำเสียที่ทั้งก่อนและหลังผ่านกระบวนการทางชีวภาพของสถานประกอบการอุตสาหกรรมตลอดระยะเวลา 300 นาที สามารถหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันโดยสอดคล้องกับจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งในกระบวนการโฟโตแคทาลิติกได้ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.0121 min⁻¹ และ 0.0107 min⁻¹ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชันในการกำจัดซีโอทีโดยกระบวนการโฟโตแคทาลิติกในกรณีใช้น้ำเสียก่อนและหลังผ่านระบบบำบัดฯ มีค่าใกล้เคียงกัน โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวในส่วนของการใช้น้ำเสียก่อนผ่านระบบบำบัดฯ จะมีค่าสูงกว่าในกรณีใช้น้ำเสียหลังผ่านระบบบำบัดฯ เล็กน้อยซึ่งสอดคล้องกับค่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอทีของกระบวนการดังกล่าวเช่นเดียวกัน

4. สรุป

ผลการศึกษาในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นการประยุกต์ใช้กระบวนการโฟโตแคทาลิติกร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ แบบฟิล์มที่เตรียมขึ้นโดยวิธี Sol-gel โดยตัวเร่งปฏิกิริยาฯ ที่เตรียมขึ้นมีคุณสมบัติที่ดีและเหมาะสมในการใช้ร่วมกับกระบวนการโฟโตแคทาลิติก โดยแสดงให้เห็นประสิทธิภาพในการบำบัดการบำบัดสีและซีโอทีในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมได้เป็นอย่างดี

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย ประจำปี 2560 และทำให้การดำเนินงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Lin Y-C, Lee H-S. Effects of TiO_2 coating dosage and operational parameters on a TiO_2/Ag photocatalysis system for decolorizing Procion red MX-5B. *Journal of Hazardous Materials*. 2010;179(1-3):462-70.
- [2] Amani-Ghadim AR, Alizadeh S, Khodam F, Rezvani Z. Synthesis of rod-like α -FeOOH nanoparticles and its photocatalytic activity in degradation of an azo dye: Empirical kinetic model development. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*. 2015;408: 60-8.
- [3] Ge D, Zeng Z, Arowo M, Zou H, Chen J, Shao L. Degradation of methyl orange by ozone in the presence of ferrous and persulfate ions in a rotating packed bed. *Chemosphere*. 2016;146:413-8.
- [4] Yang R, Li D, Li A, Yang H. Adsorption properties and mechanisms of palygorskite for removal of various ionic dyes from water. *Applied Clay Science*. 2018;151(Supplement C):20-8.
- [5] Qiu Z-L, Kong X, Yuan J-J, Shen Y-J, Zhu B-k, Zhu L-P, et al. Cross-linked PVC/hyperbranched polyester composite hollow fiber membranes for dye removal. *Reactive and Functional Polymers*. 2018;122(Supplement C):51-9.
- [6] Zhang T, Xu B, Wang A, Cui C. Degradation kinetics of organic chloramines and formation of disinfection by-products during chlorination of creatinine. *Chemosphere*. 2018;195 (Supplement C):673-82.
- [7] Tian F-X, Xu B, Lin Y-L, Hu C-Y, Zhang T-Y, Xia S-J, et al. Chlor(am)ination of iopamidol: Kinetics, pathways and disinfection by-products formation. *Chemosphere*. 2017;184 (Supplement C):489-97.
- [8] Nawaz MS, Ahsan M. Comparison of physico-chemical, advanced oxidation and biological techniques for the textile wastewater treatment. *Alexandria Engineering Journal*. 2014;53(3): 717-22.
- [9] Jing L, Xu Y, Huang S, Xie M, He M, Xu H, et al. Novel magnetic $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}/\text{Ag}_3\text{VO}_4$ composites: Highly efficient visible light photocatalytic and antibacterial activity. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2016;199:11-22.
- [10] Zhong L, Haghighat F. Photocatalytic air cleaners and materials technologies - Abilities and limitations. *Building and Environment*. 2015;91:191-203.

- [11] Ohtsu N, Yokoi K, Saito A. Fabrication of a visible-light-responsive photocatalytic antibacterial coating on titanium through anodic oxidation in a nitrate/ethylene glycol electrolyte. *Surface and Coatings Technology*. 2015;262:97-102.
- [12] Bailón-García E, Elmouwahidi A, Álvarez MA, Carrasco-Marín F, Pérez-Cadenas AF, Maldonado-Hódar FJ. New carbon xerogel-TiO₂ composites with high performance as visible-light photocatalysts for dye mineralization. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2017;201:29-40.
- [13] Lai C, Wang M-M, Zeng G-M, Liu Y-G, Huang D-L, Zhang C, et al. Synthesis of surface molecular imprinted TiO₂/graphene photocatalyst and its highly efficient photocatalytic degradation of target pollutant under visible light irradiation. *Applied Surface Science*. 2016;390:368-76.
- [14] Szczuka A, Parker KM, Harvey C, Hayes E, Vengosh A, Mitch WA. Regulated and unregulated halogenated disinfection byproduct formation from chlorination of saline groundwater. *Water Research*. 2017;122 (Supplement C):633-44.
- [15] Rojviroon T, Laobuthee A, Sirivithayapakorn S. Photocatalytic Activity of Toluene under UV-LED Light with TiO₂ Thin Films. *International Journal of Photoenergy*. 2012;2012:8.
- [16] Chen Q, Wu S, Xin Y. Synthesis of Au-CuS-TiO₂ nanobelts photocatalyst for efficient photocatalytic degradation of antibiotic oxytetracycline. *Chemical Engineering Journal*. 2016;302: 377-87.
- [17] EL-Sheikh SM, Khedr TM, Hakki A, Ismail AA, Badawy WA, Bahnemann DW. Visible light activated carbon and nitrogen co-doped mesoporous TiO₂ as efficient photocatalyst for degradation of ibuprofen. *Separation and Purification Technology*. 2017;173:258-68.
- [18] Zhou D, Chen Z, Yang Q, Dong X, Zhang J, Qin L. In-situ construction of all-solid-state Z-scheme g-C₃N₄/TiO₂ nanotube arrays photocatalyst with enhanced visible-light-induced properties. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2016;157:399-405.
- [19] Ministry of Natural Resources and Environment, Establish Standards for the Control of Industrial Sewerage Industrial Estate and Industrial Area. 2559: 17-21(In Thai)

- [20] C. S, N. S. Bactericidal and Detoxification Effects of Irradiated Semiconductor Catalyst, TiO_2 . Current Science. 2003;85(10): 1431-8.
- [21] T. M, A. B, G. E, E. R. Algal Growth Inhibition on Cement Mortar: Efficiency of Water Repellent and Photocatalytic Treatments under UV/VIS Illumination. International Biodeterioration & Biodegradation. 2014;89:115-25.
- [22] M. B, Z. Z, X. X, X. Y, L. H, D. F. Killing Effects of Hydroxyl Radical on Algae and Bacteria in Ship's Ballast Water and on Their Cell Morphology. Plasma Chemistry and Plasma Processing. 2010;30(6):831-40.
- [23] Zhang G, Wurtzler EM, He X, Nadagouda MN, O'Shea K, El-Sheikh SM, et al. Identification of TiO_2 photocatalytic destruction byproducts and reaction pathway of cylindrospermopsin. Applied Catalysis B: Environmental. 2015;163(Supplement C):591-8.
- [24] Petronella F, Truppi A, Ingrosso C, Placido T, Striccoli M, Curri ML, et al. Nanocomposite materials for photocatalytic degradation of pollutants. Catalysis Today. 2017;281(Part 1):85-100.
- [25] Bagheri S, Muhd Julkapli N, Bee Abd Hamid S. Titanium Dioxide as a Catalyst Support in Heterogeneous Catalysis. The Scientific World Journal. 2014;2014:727496.
- [26] Chaturvedi S, Dave PN, Shah NK. Applications of nano-catalyst in new era. Journal of Saudi Chemical Society. 2012;16(3): 307-25.
- [27] Homlok R, Takács E, Wojnárovits L. Degradation of organic molecules in advanced oxidation processes: Relation between chemical structure and degradability. Chemosphere. 2013;91(3):383-9.
- [28] Miao J, Zhang R, Zhang L. Photocatalytic degradations of three dyes with different chemical structures using ball-milled TiO_2 . Materials Research Bulletin. 2018;97(Supplement C):109-14.
- [29] Rojviroon T, Rojviroon O, Sirivithayapakorn S. Photocatalytic decolourisation of dyes using TiO_2 thin film photocatalysts. Surface Engineering. 2016;32(8): 562-9.
- [30] Aazam ES. Photocatalytic oxidation of methylene blue dye under visible light by Ni doped Ag_2S nanoparticles. Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2014;20(6):4033-8.

- [31] Haritha E, Roopan SM, Madhavi G, Elango G, Al-Dhabi NA, Arasu MV. Green chemical approach towards the synthesis of SnO₂ NPs in argument with photocatalytic degradation of diazo dye and its kinetic studies. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology. 2016;162:441-7.

การพัฒนาผนังบ้านดินสำเร็จรูปที่ต้านทานการชะล้างสูงและเป็นฉนวนป้องกันความร้อนที่ดีสำหรับอาคารอนุรักษ์พลังงานและสิ่งแวดล้อม

วิหาร ดีปัญญา^{1*} และกิตติพงษ์ สุวีโร²

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

^{1*} สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

² ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Received: March 22, 2018
Revised: May 10, 2018
Accepted: August 20, 2018

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาผนังบ้านดินสำเร็จรูปที่ต้านทานการชะล้างสูงและเป็นฉนวนป้องกันความร้อนที่ดี โดยการนำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ดินเหนียว เถ้ากลบ ฟางข้าว แกลบสด น้ำยากันซึม และน้ำประปา มาผสมและหล่อขึ้นรูปคล้ายกับการหล่อคอนกรีต และเสริมไฟเบอร์กลาสเป็นวัสดุรับแรง ผลจากการทดสอบ พบว่า ต้นแบบผนังบ้านดินสำเร็จรูปที่เหมาะสมที่สุด คือ อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1: ดินเหนียว: เถ้ากลบ: ฟางข้าว: แกลบสด: น้ำยากันซึม: น้ำประปา เท่ากับ 1: 3: 0.3: 0.02: 0.02: 0.02: 0.4 โดยน้ำหนัก โดยส่วนผสมมีค่าความหนาแน่น 1,797 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าการดูดซึมน้ำ เท่ากับ ร้อยละ 16.70 ความต้านทานแรงดัด 2.61 เมกะพาสคัล ความต้านทานแรงอัด 21.40 เมกะพาสคัล และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน 0.314 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน นอกจากนี้ต้นแบบผนังบ้านดินสำเร็จรูปยังมีความทนต่อการกระแทก ความตรง และความแข็ง ผ่านตามมาตรฐาน มอก.2226-2548 กำหนดได้ถึงประเภทที่ 2 คือ อาคารสำนักงาน ทั้งนี้ปริมาณฟางข้าวและแกลบสดจะมีผลทำให้ความหนาแน่น ความต้านทานแรงดัด และสัมประสิทธิ์การนำความร้อนลดลง ส่วนผลต่อความต้านทานแรงอัด และการดูดซึมน้ำมีค่าที่เพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: ผนังบ้านดินสำเร็จรูป ดินเหนียว ปูนซีเมนต์ การชะล้าง ฉนวนป้องกันความร้อน

Development of Precast Adobe Wall Panel with High Corrosion Resistance and Good Thermal Insulation for Energy and Environmental Conservation Building

Wiharn Deepanya^{1*} and Kittipong Suweero²
wiharn.d@rmutp.ac.th^{1*}, kittipong.s@en.rmutt.ac.th²

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

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

Received: March 22, 2018
Revised: May 10, 2018
Accepted: August 20, 2018

Abstract

The objective of this research is to develop the precast adobe wall panel with high corrosion resistance and good thermal insulation. The ratio of Portland cement type1, clay, rice husk ash, straw, rice husk, waterproofed liquid, and tap water was mixed and casted as same as the common concrete, and reinforced by bamboo. From the results, the proper prototype ratio of precast adobe wall panel was Portland cement type1: clay: rice husk ash: straw: rice husk: waterproofed liquid: tap water which equal to 1: 3: 0.3: 0.02: 0.02: 0.02: 0.4 by weight. The properties of the precast adobe wall panel prototype included density 1,797 kg/m³, water absorption 16.70%, bending strength 2.61 MPa, compressive strength 21.40 MPa, thermal conductivity coefficient 0.314 watt/m.Kelvin. Moreover, the precast adobe wall panel prototype was verified by TIS.2226-2548 with properties of impact resistance, deflection, and hardness in medium duty (MD) level. The contents of straw and rice husk effected the precast adobe wall panel to decrease the density, bending strength, thermal conductivity coefficient, and increase the compressive strength and water absorption.

Keywords: precast adobe wall panel, clay, cement, corrosion and thermal Insulation

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหา

บ้านดิน (Earth Building) เป็นอาคารที่พัฒนามาจากการก่อสร้างบ้านที่มีวัสดุส่วนใหญ่เป็นดินเหนียวและเป็นอาคารประหยัดพลังงาน เพราะสามารถลดอุณหภูมิภายในอาคารในเวลากลางวันได้ดี [1] จากการก่อสร้างด้วยวัสดุธรรมชาติ และความเป็นโฮมสเตย์แบบอนุรักษ์ (Eco-tourism) จึงทำให้บ้านชนิดนี้ได้รับความนิยม โดยเฉพาะในธุรกิจท่องเที่ยวของไทย ที่มีมูลค่าปีละกว่า 7.72 แสนล้านบาท [2] วิธีการก่อสร้างบ้านดิน ส่วนใหญ่ใช้เทคนิคการก่อสร้างแบบอิฐดินดิบ (Adobe Brick) ซึ่งเป็นการนำดินเหนียวมาผสมกับเส้นใยธรรมชาติ เช่น แกลบ และฟางข้าว เป็นต้น แล้วอัดเป็นก้อน จากนั้นจึงนำมาก่อผนังโดยใช้โคลนเป็นตัวประสาน [3] แต่บ้านดินดังกล่าวมีปัญหาอยู่หลายประการ เช่น รอยต่อของโครงสร้างเกิดการร้าวซึมได้ง่าย ระยะเวลาในการก่อสร้างที่ควบคุมได้ยาก ความไม่แข็งแรงของผนัง การพังทลายของโครงสร้างขณะดำเนินการก่อสร้าง การรบกวนของเศษวัสดุภายในบ้าน และต้องใช้ช่างฝีมือ โดยเฉพาะในการก่อสร้างและบำรุงรักษา เป็นต้น [4] ดังนั้นผนังบ้านดินสำเร็จรูปจึงเป็นนวัตกรรมแผ่นผนังสำเร็จจากดินที่มีความเป็นธรรมชาติ แตกต่างจากแผ่นผนังคอนกรีตสำเร็จรูปโดยทั่วไป เนื่องจากวัสดุที่ใช้ส่วนใหญ่มาจากธรรมชาติ ได้รับการพัฒนาคุณสมบัติต่างๆ ให้สามารถต้านทานการชะล้างสูง และมีความเป็นฉนวนป้องกันความร้อนที่ดี รวมทั้งออกแบบให้มีจุดยึดสำหรับติดตั้งแผ่นผนังได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นการแก้ไข ปัญหาที่สำคัญของบ้านดินได้ ในงานวิจัยนี้จะใช้ปูนซีเมนต์ ไม้ไผ่ แกลบ ฟางข้าวเป็นวัสดุเสริมแรง และใช้แกลบเป็นวัสดุช่วยให้ขนาดคละติขึ้น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาต้นแบบผนังบ้านดินสำเร็จรูปที่ต้านทานการชะล้างสูงและเป็นฉนวนป้องกันความร้อนที่ดีสำหรับอาคารอนุรักษ์พลังงาน

และสิ่งแวดล้อม ซึ่งจะช่วยสร้างงานและรายได้ให้กับชุมชน และสร้างกระแสความนิยมอาคารจากวัสดุธรรมชาติ

2. วัสดุและอุปกรณ์

วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ ประกอบด้วย ดินเหนียว ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แกลบ แกลบ ฟางข้าว (บดย่อยให้มีความยาวไม่เกิน 5 เซนติเมตร) น้ำประปา ไม้รวก แบบหล่อขนาด 60x120x15 เซนติเมตร แบบหล่อขนาด 40x20x10 เซนติเมตร แบบหล่อขนาด 30x30x5 เซนติเมตร แบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร แบบหล่อทรงลูกบาศก์ขนาด 10x10x10 เซนติเมตร เครื่องบดเส้นใย และชุดทดสอบคุณสมบัติโดยทั่วไป ได้แก่ ความหนาแน่น ความตรง และการดูดซึมน้ำ เครื่องทดสอบความแข็งแรงและการทนการกระแทก เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine; UTM) เครื่องทดสอบสภาพนำความร้อน ตาม ASTM C177 [5] และชุดทดสอบการชะล้าง

3. การออกแบบอัตราส่วนผสม

ใช้ส่วนผสมประกอบด้วย ดินเหนียว ปูนซีเมนต์ แกลบ แกลบ ฟางข้าว น้ำประปา และไม้รวก โดยมีอัตราส่วนผสม ดังแสดงในตารางที่ 1 พร้อมทั้งออกแบบตำแหน่งการติดตั้งไม้รวก

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนัก

อัตราส่วน	ปูนซีเมนต์	ดินเหนียว	แกลบ	ฟางข้าว	แกลบสด	น้ำยากันซึม	น้ำ
F1	1	3	0.3	0.01	0.01	0.02	0.4
F2	1	3	0.3	0.02	0.02	0.02	0.4
F3	1	3	0.3	0.03	0.03	0.02	0.4
F4	1	3	0.3	0.04	0.04	0.02	0.4
F5	1	3	0.3	0.05	0.05	0.02	0.4

4. การขึ้นรูปตัวอย่างทดสอบ

เริ่มจากการชั่งน้ำหนักส่วนผสมตามอัตราส่วนผสมที่ออกแบบ จากนั้นผสมส่วนผสมให้เข้ากัน ดังรูปที่ 1 แล้วจึงเทส่วนผสมลงในแบบหล่อ จำนวน 3 ขนาด ได้แก่ แบบหล่อขนาด 10x10x10 เซนติเมตร สำหรับทดสอบความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำ แบบหล่อขนาด 40x20x10 เซนติเมตร สำหรับทดสอบการชะล้างแบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร สำหรับทดสอบความต้านทานแรงอัด แบบหล่อขนาด 30x30x5 เซนติเมตร เสริมไฟรวก สำหรับทดสอบความต้านทานแรงดัด และสัมประสิทธิ์การนำความร้อน และแบบหล่อขนาด 60x120x15 เซนติเมตร เสริมไฟรวก (รูปที่ 2) สำหรับทดสอบแรงกระแทก ความแข็ง ความตรง และลักษณะทั่วไป ตามมาตรฐาน มอก.2226-2548 เรื่องแผ่นผนังคอนกรีตสำเร็จรูป [6] และ มอก.878-2532 เรื่องแผ่นขึ้นไม้อัดซีเมนต์: ความหนาแน่นสูง [7]

5. การทดสอบคุณสมบัติ

ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของผนังบ้านดินสำเร็จรูป ตามมาตรฐาน มอก.2226-2548 เรื่องแผ่นผนังคอนกรีตสำเร็จรูป [6] และ มอก.878-2532 เรื่องแผ่นขึ้นไม้อัดซีเมนต์: ความหนาแน่นสูง [7] โดยแบ่งตามขนาดของตัวอย่างผนังบ้านดินสำเร็จรูป ประกอบด้วยตัวอย่างผนังบ้านดินสำเร็จรูป ขนาด 10x10x10 เซนติเมตร ได้แก่ ความหนาแน่น และการดูดซึมน้ำที่อายุการบ่ม 28 วัน ตัวอย่างผนังบ้านดินสำเร็จรูป ขนาด 40x20x10 เซนติเมตร ได้แก่ การชะล้าง ตามงานวิจัยของประเทศออสเตรเลีย [8] ที่อายุการบ่ม 28 วัน โดยใช้ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับวัตถุทดสอบในแนวระดับ 470 มิลลิเมตร ความดันของน้ำ 50 กิโลปาสกาล หัวฉีดน้ำชนิดสเปรย์ (Spray) และระยะเวลาการทดสอบ 30 นาที

ดังตารางที่ 2 และรูปที่ 3 ตัวอย่างผนังบ้านดินสำเร็จรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร ได้แก่ ความต้านทานแรงอัด ที่อายุการบ่ม 7, 14, 21 และ 28 วัน ตัวอย่างผนังบ้านดินสำเร็จรูปขนาด 30x30x5 เซนติเมตร เสริมไฟรวก ได้แก่ ความต้านทานแรงดัด ที่อายุการบ่ม 28 วัน ดังรูปที่ 4 สัมประสิทธิ์การนำความร้อน ที่อายุการบ่ม 28 วัน ตัวอย่างผนังบ้านดินสำเร็จรูปขนาด 60x120x15 เซนติเมตร เสริมไฟรวก ได้แก่ ลักษณะโดยทั่วไป ที่อายุการบ่ม 28 วัน การรับแรงกระแทก ที่อายุการบ่ม 28 วัน (รูปที่ 5) ความตรง ที่อายุการบ่ม 28 วัน และความแข็ง ที่อายุการบ่ม 28 วัน

6. ผลการวิจัย

ผลการทดสอบตัวอย่างผนังบ้านดินสำเร็จรูปที่ต้านทานการชะล้างสูงและเป็นฉนวนป้องกันความร้อนที่ดีสำหรับอาคารอนุรักษ์พลังงานและสิ่งแวดล้อม ตามมาตรฐาน มอก.2226-2548 เรื่องแผ่นผนังคอนกรีตสำเร็จรูป [6] สามารถสรุปได้ดังนี้



รูปที่ 1 การผสมส่วนผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องผสม



รูปที่ 2 การขึ้นรูปตัวอย่างขนาด
60x120x15 เซนติเมตร



รูปที่ 4 การทดสอบความต้านทานแรงคัต
ของตัวอย่าง

ตารางที่ 2 ระดับการป้องกันการชะล้างของ
ตัวอย่าง

ระดับความสามารถ ในการป้องกันน้ำ	ความลึกของ ผิวหน้าก้อนอิฐ ที่ถูกน้ำฉีดย่น (มิลลิเมตร)
ดีมาก	น้อยกว่า 10 มิลลิเมตร
ดี	10 - 20 มิลลิเมตร
ปานกลาง	20 - 30 มิลลิเมตร
ควรปรับปรุง	มากกว่า 30 มิลลิเมตร



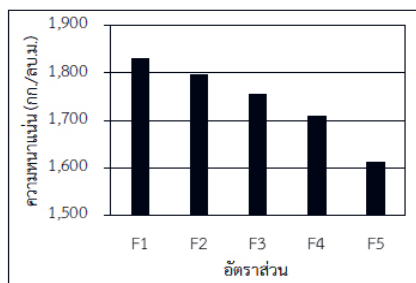
รูปที่ 5 การทดสอบการกระแทกด้วยวัสดุแข็ง
ของตัวอย่าง



รูปที่ 3 การทดสอบการชะล้างของตัวอย่าง

6.1 ผลการทดสอบความหนาแน่น

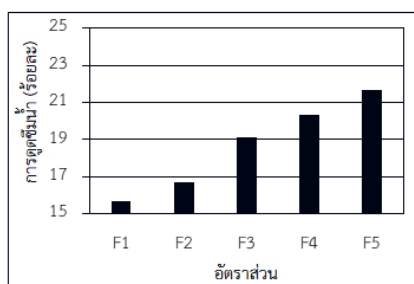
ผลการทดสอบความหนาแน่นของ
ตัวอย่างผนังบ้านดินสำเร็จรูป ที่อายุการบ่ม 28 วัน
ดังรูปที่ 6 พบว่า การผสมฟางข้าวและแกลบสด
มีผลทำให้ความหนาแน่นของตัวอย่างผนังบ้านดิน
สำเร็จรูปมีค่าลดลง โดยตัวอย่างผนังบ้านดิน
สำเร็จรูปอัตราส่วน F1 เป็นอัตราส่วนที่มีความ
หนาแน่นสูงสุด รองลงมาคือ อัตราส่วน F2, F3,
F4 และอัตราส่วน F5 เป็นอัตราส่วนที่มีความ
หนาแน่นต่ำที่สุด ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นผลมาจาก
ค่าความถ่วงจำเพาะของฟางข้าวและแกลบสด
เป็นวัสดุจำพวกเซลลูโลสที่มีค่าเพียง 0.6 [9]
ทำให้เมื่อผสมลงในตัวอย่างผนังบ้านดินสำเร็จรูป
ความหนาแน่นของผนังจึงลดลง



รูปที่ 6 ผลการทดสอบความหนาแน่น

6.2 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ

ผลจากลักษณะของฟางข้าวและ แกลบสดที่มีช่องว่างในเนื้อค่อนข้างมาก เมื่อผสม ลงในตัวอย่างผนังบ้านดินสำเร็จรูป จึงทำให้ ค่าการดูดซึมน้ำมีค่าเพิ่มมากขึ้น ดังจะเห็นได้จาก รูปที่ 7 ซึ่งแสดงผลทดสอบค่าการดูดซึมน้ำของ ตัวอย่างผนังบ้านดินสำเร็จรูป ที่อายุการบ่ม 28 วัน โดยอัตราส่วน F1 เป็นอัตราส่วนที่มีการดูดซึมน้ำต่ำที่สุด รองลงมาคือ อัตราส่วน F2, F3, F4 และอัตราส่วน F5 เป็นอัตราส่วนที่มีการดูดซึมน้ำสูงที่สุด ตามลำดับ อย่างไรก็ตามค่าการดูดซึมน้ำที่สูงที่สุดของตัวอย่างผนังบ้านดิน สำเร็จรูป ยังคงมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานของวัสดุ ก่อผนังทั่วไป เช่น คอนกรีตบล็อกก่อผนัง ตาม มอก.58-2533 กำหนดไว้ คือ ไม่เกินร้อยละ 25 [10] แต่เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน มอก. 2226-2548 เรื่องแผ่นผนังคอนกรีตสำเร็จรูป พบว่า ตัวอย่างผนังบ้านดินสำเร็จรูปทุกอัตราส่วน มีค่าการดูดซึมน้ำเกินกว่ามาตรฐานกำหนด คือ เกินกว่าร้อยละ 14 [6]



รูปที่ 7 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ

6.4 ผลการทดสอบความต้านทาน

แรงอัด

ผลการทดสอบความต้านทานแรงอัดของ ผนังตัวอย่างผนังบ้านดินสำเร็จรูปทรงกระบอก ที่อายุการบ่ม 7, 14, 21 และ 28 วัน สามารถ สรุปรได้ ดังรูปที่ 8 โดยพบว่า การผสมฟางข้าว

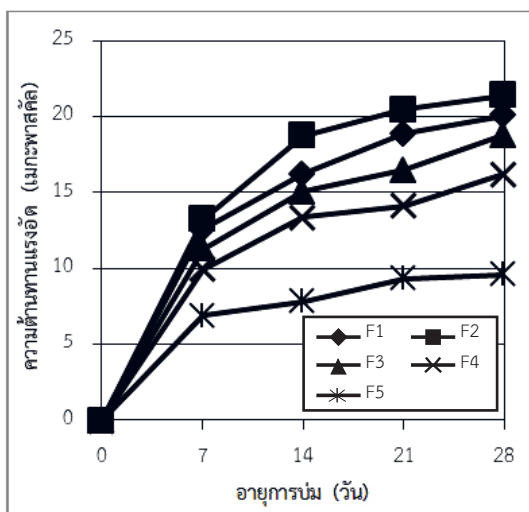
6.3 ผลการทดสอบการชะล้าง

ผลการทดสอบการชะล้างของตัวอย่าง ผนังบ้านดินสำเร็จรูป ทั้ง 5 อัตราส่วน ดังแสดง ในตารางที่ 1 [8] ที่อายุการบ่ม 28 วัน แสดงใน ตารางที่ 3 พบว่า การผสมฟางข้าวและแกลบสด ในปริมาณมากขึ้นเข้าไปส่วนผสมของตัวอย่าง ผนังบ้านดินสำเร็จรูป ขนาด 40x20x10 เซนติเมตร มีผลทำให้ความสามารถในการทนต่อการชะล้าง ลดต่ำลง โดยอัตราส่วน F1 ถึง F3 เป็นอัตราส่วน ที่ไม่มีการชะล้าง และอัตราส่วน F4 และ F5 เป็นอัตราส่วนที่มีการชะล้างต่ำ หรือระดับความ สามารถในการป้องกันน้ำดีมาก อย่างไรก็ตาม การเพิ่มปริมาณฟางข้าวและแกลบสดทำให้สาร เชื่อมประสาน เช่น ดินเหนียว และปูนซีเมนต์ มีสัดส่วนที่น้อยลงและเกิดช่องว่างภายในเนื้อ มากขึ้น [11] ทำให้เนื้อของตัวอย่างผนังบ้านดิน สำเร็จรูปถูกชะล้างได้ง่าย

ตารางที่ 3 ความสึกของผิวหน้าตัวอย่างผนัง บ้านดินสำเร็จรูปจากการทดสอบชะล้าง

อัตรา ส่วน	ระดับความสามารถ ในการป้องกันน้ำ	ความสึกของผิวหน้า ที่ถูกน้ำฉีด (มิลลิเมตร)
F1	ดีมาก	0 มิลลิเมตร
F2	ดีมาก	0 มิลลิเมตร
F3	ดีมาก	0 มิลลิเมตร
F4	ดีมาก	2 มิลลิเมตร
F5	ดีมาก	4 มิลลิเมตร

และกลับลดลงในตัวอย่างผนังบ้านดินสำเร็จรูป ในปริมาณที่เหมาะสม สามารถพัฒนาความต้านทานแรงอัดของตัวอย่างผนังบ้านดินสำเร็จรูปให้ดีขึ้นได้ โดยอัตราส่วน F2 เป็นอัตราส่วนที่มีความต้านทานแรงอัดสูงที่สุด รองลงมาคือ อัตราส่วน F1, F3, F4 และอัตราส่วน F5 เป็นอัตราส่วนที่มีความต้านทานแรงอัดต่ำที่สุดตามลำดับ ทั้งนี้เป็นผลมาจากฟางข้าวและแกลบสดเป็นเส้นใยเซลลูโลสที่สามารถรับแรงดึงได้ดี รวมทั้งมีขนาดที่แตกต่างจากส่วนผสมอื่นๆ ของตัวอย่างผนังบ้านดินสำเร็จรูป ทำให้การผสมฟางข้าวและแกลบสดจะทำให้ตัวอย่างผนังบ้านดินสำเร็จรูปมีขนาดละเอียดขึ้นได้เมื่อผสมวัสดุดังกล่าวในปริมาณที่เหมาะสม นอกจากนี้ฟางข้าวและแกลบสดยังช่วยเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวให้เนื้อของตัวอย่างผนังบ้านดินสำเร็จรูปดีขึ้นเมื่อต้องรับแรงกระทำต่างๆ [11]



รูปที่ 8 ผลการทดสอบความต้านทานแรงอัด

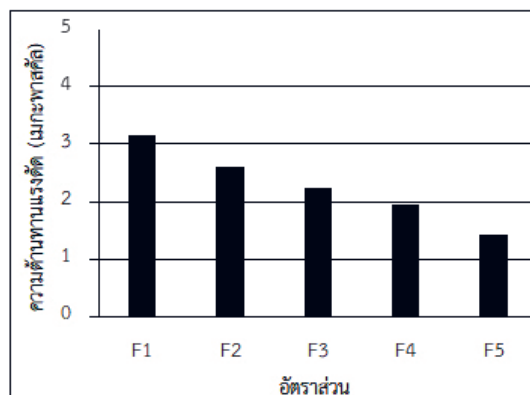
6.5 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดัด

แม้ว่าการผสมฟางข้าวและแกลบสดในปริมาณที่เหมาะสม จะทำให้ความต้านทานแรงอัดของแผ่นผนังบ้านดินสำเร็จรูปมีค่าเพิ่มมากขึ้น แต่การที่ฟางข้าวและแกลบสดมีขนาด

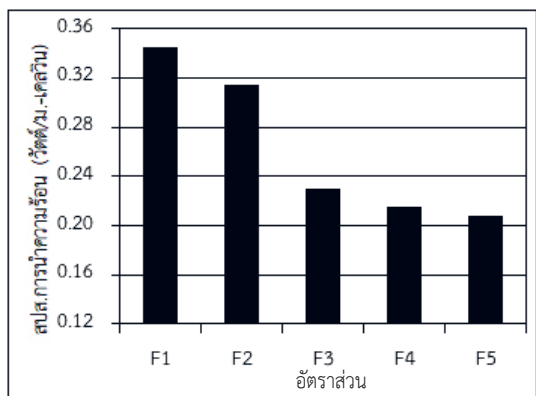
เส้นใยที่สั้น จึงไม่สามารถช่วยในการรับแรงดึงได้มากเท่าที่ควร [11] ดังนั้นค่าความต้านทานแรงดัดของแผ่นผนังบ้านดินสำเร็จรูป ขนาด 30x30x5 เซนติเมตร ที่อายุการบ่ม 28 วัน ในรูปที่ 9 จึงมีค่าลดต่ำลง ทั้งนี้อัตราส่วน F1 เป็นอัตราส่วนที่มีความต้านทานแรงดัดสูงที่สุด รองลงมาคือ อัตราส่วน F2, F3, F4 และ อัตราส่วน F5 เป็นอัตราส่วนที่มีความต้านทานแรงดัดต่ำที่สุดตามลำดับ

6.6 ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

สัมประสิทธิ์การนำความร้อน หรือความสามารถในการนำความร้อนผ่านแผ่นผนังบ้านดินสำเร็จรูป ขนาด 30x30x5 เซนติเมตร ที่อายุการบ่ม 28 วัน สามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังรูปที่ 10 โดยพบว่า แผ่นผนังบ้านดินสำเร็จรูปอัตราส่วน F5 เป็นอัตราส่วนที่มีสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำที่สุด รองลงมาคือ อัตราส่วน F4, F3, F2 และอัตราส่วน F1 เป็นอัตราส่วนที่มีสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงที่สุด ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นผลมาจากลักษณะของฟางข้าวและแกลบสดที่มีช่องว่างมาก จะส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ลดลง [12]



รูปที่ 9 ผลการทดสอบความต้านทานแรงดัด



รูปที่ 10 ผลการทดสอบสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

6.7 ผลการทดสอบลักษณะโดยทั่วไป

ผลจากการพิจารณาลักษณะทั่วไปของแผ่นผนังบ้านดินสำเร็จรูป ขนาด 60x120x15 เซนติเมตร เสริมไฟรวก ที่อายุการบ่ม 28 วัน พบว่า ลักษณะทั่วไปของแผ่นผนังที่อัตราส่วน F1, F2, F3 และ F4 มีความสมบูรณ์ใกล้เคียงกัน ตามมาตรฐาน มอก.2226-2548 [6] ยกเว้น แผ่นผนังบ้านดินสำเร็จรูปอัตราส่วน F5 ที่ผิวเกิดการหลุดเป็นผงและบิ่นได้ง่าย ทั้งนี้เป็นผลมาจากการเพิ่มฟางข้าวและแกลบสดลงในแผ่นผนังบ้านดินสำเร็จรูป ทำให้แผ่นผนังบ้านดินสำเร็จรูปเกิดการแตกร้าวได้ง่ายขึ้น อย่างไรก็ตามรอยแตกร้าวดังกล่าวก็ยังมีขนาดค่อนข้างเล็กมาก

6.8 ผลการทดสอบการรับแรงกระแทก

การทดสอบรับแรงกระแทก เป็นการนำวัสดุแข็งขนาดเล็ก (ตุ้มน้ำหนัก) และวัสดุนุ่มขนาดใหญ่ (กระสอบทราย) มากระแทกแผ่นผนังบ้านดินสำเร็จรูป ขนาด 60x120x15 เซนติเมตร ด้วยมุมและความสูง ตามมาตรฐาน มอก.2226-2548 ที่อายุการบ่ม 28 วัน สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4 และ 5 โดยพบว่า แผ่นผนังบ้านดินสำเร็จรูปที่มีส่วนผสมของฟางข้าวและแกลบสดสามารถทนการกระแทกของวัสดุแข็งขนาดเล็กได้ถึงประเภทที่ 2 อาคารสำนักงาน (Medium

Duty, MD) และสามารถทนการกระแทกของวัสดุนุ่มขนาดใหญ่ได้ถึงประเภทที่ 3 อาคารสาธารณะ (Heavy Duty, HD) ตามมาตรฐาน มอก.2226-2548 [6]

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบความทนการกระแทกด้วยวัสดุแข็งขนาดเล็ก

อัตราส่วน	ประเภท LD	ประเภท MD	ประเภท HD	ประเภท SD
F1	ผ่าน	ผ่าน	ไม่ผ่าน	ไม่ผ่าน
F2	ผ่าน	ผ่าน	ไม่ผ่าน	ไม่ผ่าน
F3	ผ่าน	ผ่าน	ไม่ผ่าน	ไม่ผ่าน
F4	ผ่าน	ผ่าน	ไม่ผ่าน	ไม่ผ่าน
F5	ไม่ผ่าน	ไม่ผ่าน	ไม่ผ่าน	ไม่ผ่าน

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบความทนการกระแทกด้วยวัสดุนุ่มขนาดใหญ่

อัตราส่วน	ประเภท LD	ประเภท MD	ประเภท HD	ประเภท SD
F1	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	ไม่ผ่าน
F2	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	ไม่ผ่าน
F3	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	ไม่ผ่าน
F4	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	ไม่ผ่าน
F5	ผ่าน	ผ่าน	ไม่ผ่าน	ไม่ผ่าน

6.9 ผลการทดสอบความตรง

จากตารางที่ 6 แสดงผลการทดสอบความตรงของแผ่นผนังบ้านดินสำเร็จรูป ตามมาตรฐาน มอก.2226-2548 ที่อายุการบ่ม 28 วัน เมื่อวางตามลักษณะการใช้งานจริง โดยใช้ระยะจุดรองรับ 100 เซนติเมตร พร้อมทั้งสังเกตและการวัดระยะการโก่งตัวของแผ่นผนัง ทั้ง 5 อัตราส่วน พบว่า แผ่นผนังบ้านดินสำเร็จรูปทั้งหมด ไม่มีการโก่งตัวภายหลังจากการวางผนังตามแนวการใช้งาน ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน มอก.2226-2548 ที่กำหนดให้ต้องมีค่าไม่เกินกำหนด

คือ L/480 หรือ 1000 มิลลิเมตร/480 หรือไม่เกิน 2 มิลลิเมตร [6]

ตารางที่ 6 ความตรงของแผ่นผนังบ้านดินสำเร็จรูป

อัตราส่วน	การโก่งตัว (มิลลิเมตร)	ผลการเปรียบเทียบมาตรฐาน มอก.2226-2548
F1	0	ผ่าน
F2	0	ผ่าน
F3	0	ผ่าน
F4	0	ผ่าน
F5	0	ผ่าน

6.10 ผลการทดสอบความแข็ง

ความแข็งของแผ่นผนังบ้านดินสำเร็จรูปเมื่อวัดค่าการโก่งตัวสูงสุดและการโก่งตัวคงค้างของทุกอัตราส่วน ตามมาตรฐาน มอก.2226-2548 ที่อายุการบ่ม 28 วัน พบว่า ความแข็งของแผ่นผนังบ้านดินสำเร็จรูปทุกอัตราส่วน สามารถผ่านตามที่มาตรฐาน มอก.2226-2548 ประเภทที่ 1 ผนังสำเร็จรูปสำหรับอาคารที่อยู่อาศัย (Light Duty, LD) กำหนด คือมีค่าการโก่งตัวสูงสุดไม่เกิน 25 มิลลิเมตร และการโก่งตัวคงค้างไม่เกิน 5 มิลลิเมตร [6]

7. สรุปผลการวิจัย

ต้นแบบผนังบ้านดินสำเร็จรูปที่ต้านทานการชะล้างสูงและเป็นฉนวนป้องกันความร้อนที่ดีสำหรับอาคารอนุรักษ์พลังงาน และสิ่งแวดล้อม เป็นการนำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ดินเหนียว เถ้ากลบ ฟางข้าว แกลบสด น้ำยากันซึม และน้ำประปา มาผสมด้วยเครื่องผสมคอนกรีต และนำส่วนผสมที่ได้ไปหล่อขึ้นรูปคล้ายกับการหล่อคอนกรีต โดยเสริมไม้รอกเป็นวัสดุรับแรง สามารถสรุปผลการวิจัยได้ว่า อัตราส่วนผสมของต้นแบบผนังบ้านดินสำเร็จรูปที่เหมาะสมที่สุด คือ อัตราส่วนปูนซีเมนต์

ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1: ดินเหนียว: เถ้ากลบ: ฟางข้าว: แกลบสด: น้ำยากันซึม: น้ำประปา (อัตราส่วน F2) เท่ากับ 1: 3: 0.3: 0.02: 0.02: 0.02: 0.4 โดยน้ำหนัก โดยมีค่าความหนาแน่น 1,797 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 16.70 (เกินกว่าที่มาตรฐาน มอก.2226-2548 กำหนด) ความต้านทานแรงดัด 2.61 เมกะพาสคัล ความต้านทานแรงอัด 21.40 เมกะพาสคัล (ผ่านตามที่มาตรฐาน มอก.2226-2548 กำหนด) สัมประสิทธิ์การนำความร้อน 0.314 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน นอกจากนี้ ต้นแบบผนังบ้านดินสำเร็จรูปยังมีความทนต่อการกระแทก ความตรง และความแข็ง ผ่านตามที่มาตรฐาน มอก.2226-2548 กำหนดได้ถึงประเภทที่ 2 คืออาคารสำนักงาน (Medium Duty, MD) ทั้งนี้ปริมาณฟางข้าวและแกลบสดจะทำให้ความหนาแน่น ความต้านทานแรงดัด และสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีค่าลดลง ส่วนความต้านทานแรงอัด และการดูดซึมน้ำจะมีค่าเพิ่มขึ้น

8. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณแผ่นดินมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ประจำปี 2560 ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] Khamput P. Study of earth house (chapter 1). Journal of Engineering RMUTT. 2005; 3(6): 29-50. (in Thai)
- [2] Kasikorn Research Center. Thai travel market in 2015: 772,000 million baht of total values. Kra Sae Tus Journal. 2015; 2591: 1-7. (in Thai)

- [3] Watcharatairong V. Self-help housing process: a case study of adobe housing Baan Theppana Thep Sathit district Chaiyaphum province [master's thesis]. Bangkok: Chulalongkorn University; 2002. (in Thai)
- [4] Boonchaiyo R, Uthaipattrakul T, Pongsura P. Earth house: principle of earth house construction. 1st ed. Bangkok: Suan-spirit Publisher; 2002. (in Thai)
- [5] American Society for Testing and Materials (ASTM). Standard test method for steady-state heat flux measurements and thermal transmission properties by means of the guarded-hot-plate apparatus (ASTM C177). Philadelphia: ASTM; 2013.
- [6] Thai Industrial Standards Institute (TISI). Thai industrial standard no.2226-2005: precast concrete wall panels. Bangkok: Thai Industrial Standards Institute; 2005. (in Thai)
- [7] Thai Industrial Standards Institute (TISI). Thai industrial standard no.878-1989: cement bonded particle board: high density. Bangkok: Thai Industrial Standards Institute; 1989. (in Thai)
- [8] Moor G, Heathcote K. Earth building in Australia-durability research. Sydney: University of Technology Sydney; 2004.
- [9] Faherty KF, Williamson TG. Wood engineering and construction hand book. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, Inc.; 1995.
- [10] Thai Industrial Standards Institute (TISI). Thai industrial standard no.58-1990: hollow non-load-bearing concrete masonry. Bangkok: Thai Industrial Standards Institute; 1990. (in Thai)
- [11] Jindaprasert P, Jaturapitakkul C. Cement, pozzolan, and concrete. 7th ed. Bangkok: ACI Partners with Thailand Concrete Association; 2012. (in Thai)
- [12] 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)

การศึกษาเปรียบเทียบสมบัติทางกลและค่าใช้จ่ายในการผลิต สำหรับการเลือกวัสดุใบมีดตัดทางปาล์ม

ปราโมทย์ พูนนายม¹ วรญา วัฒนจิตสิริ² สุรัตน์ ตรีนวนพงศ์³ และกิตติพงษ์ กิมะพงศ์^{4*}
promote.p@en.rmutt.ac.th¹, voraya.w@en.rmutt.ac.th², surat.t@en.rmutt.ac.th³,
kittipong.k@en.rmutt.ac.th^{4*}

^{1-4*} ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Received: August 7, 2017
Revised: November 1, 2017
Accepted: July 4, 2018

บทคัดย่อ

ปัญหาอายุการใช้งานที่สั้นของใบมีดตัดย่อยทางปาล์มส่งผลทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องย่อยทางปาล์มลดลง การพัฒนาเพื่อหาใบมีดที่มีประสิทธิภาพและอายุการใช้งานสูงจึงเป็นเรื่องเร่งด่วนที่มีการปฏิบัติอย่างต่อเนื่อง งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ใน 1) การศึกษาสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของใบมีดโลหะ 4 ชนิด ประกอบด้วยเหล็กกล้า S45C SCM440 SUS304 และ SKD11 และ 2) การเปรียบเทียบต้นทุนในการผลิตใบมีดย่อยทางปาล์ม ผลการทดลองโดยสรุปมีดังต่อไปนี้ ใบมีดเหล็กกล้า SKD11 ที่ผ่านการชุบแข็งด้วยสภาวะที่กำหนดให้ค่าความต้านทานการสึกหรอสูงกว่าใบมีดเหล็กกล้า SUS304 S45C และ SCM440 ที่ค่าประมาณร้อยละ 34 45 และ 60 ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่าเหล็กกล้า S45C มีราคาต้นทุนในการผลิตต่อหน่วยต่ำกว่าเหล็กกล้า SCM440 SKD11 และ SUS304 ประมาณร้อยละ 6 42 และ 52 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาสมบัติทางกลเช่น ความต้านทานการสึกหรอและความแข็งและต้นทุนการผลิต ใบมีดเหล็กกล้า SKD11 และใบมีดเหล็กกล้า S45C มีความเหมาะสมในการผลิตเป็นใบมีดย่อยทางปาล์มเครื่องตัดย่อยแบบใบมีดตั้งฉากตามลำดับ

คำสำคัญ: ปาล์ม เครื่องตัดปาล์ม การสึกหรอ ต้นทุนการผลิต

Comparative Study of Mechanical Properties and Production Cost for Palm Cutting Blade Materials Selection

Pramot Poonnayom¹ Voraya Wattanajitsiri² Surat Triwanapong³ and Kittipong Kimapong^{4*}
promote.p@en.rmutt.ac.th¹, voraya.w@en.rmutt.ac.th², surat.t@en.rmutt.ac.th³,
kittipong.k@en.rmutt.ac.th^{4*}

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

Received: August 7, 2017
Revised: November 1, 2017
Accepted: July 4, 2018

Abstract

Shorten tool life service problem of a palm chopper machine cutting blade affects to deteriorate a palm chopper machine efficiency. Development for optimizing the cutting blade that shows high efficiency and tool life service was an urgent issue that is continuously performed. This research aims to 1) study mechanical properties and microstructure of 4 cutting blades metals and 2) compare the manufacturing cost of palm chopper machine cutting blade. The summarized results are as follows. The SKD11 steel cutting blade that was harden at the given condition showed the higher wear resistance than that of SUS304, S45C and SCM440 steels cutting blades for 34, 45 and 60%, respectively. It was also found that the S45C steel cutting blade showed the lowered manufacturing cost than that of SCM440, SKD11 and SUS304 for 6, 42 and 52%, respectively. When comparing wear resistance and production cost, the SKD11 steel blade and the S45C steel blade were optimized to apply as a cutting blade of the orbital cutting blade palm chopping machine, respectively.

Keywords: plam, plam chopper, wear, production cost.

1. บทนำ

ปาล์มเป็นหนึ่งในพืชเศรษฐกิจสำคัญที่ทำรายได้เข้าประเทศเป็นปริมาณสูง นอกจากนั้นเป็นพืชที่ทำให้เกิดการสร้างงานให้แก่เกษตรกรมากกว่าหนึ่งแสนครัวเรือน และมีพื้นที่เพาะปลูกปาล์มและพื้นที่ให้ผลผลิตมากกว่า 3 ล้านไร่ และมีแนวโน้มความต้องการสูงขึ้น เนื่องจากความต้องการในการใช้น้ำมันปาล์มเป็นแหล่งพลังงานทางเลือกของโลก [1] ในการปลูกปาล์มเพื่อนำมาทำเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น น้ำมันพืช สบู่ หรือไบโอดีเซลนั้น พบว่าต้นปาล์มที่ประกอบด้วยลำต้น กิ่ง ใบ ดอก และผล นั้นมีส่วนของผลปาล์มไม่เกินร้อยละ 30 เท่านั้นที่ถูกนำมาแปรรูป [2] ขณะที่ส่วนอื่นๆนั้นเมื่อสิ้นอายุการให้ผลปาล์มของต้นปาล์ม เกษตรกรจะทำการย่อยให้มีขนาดเล็กเพื่อนำไปใช้งานรูปแบบอื่นต่อไป ด้วยเครื่องเครื่องย่อยกิ่งไม้ทั่วไปซึ่งมีขนาดใหญ่และมีราคาสูง ด้วยเหตุนี้เกษตรกรที่ปลูกต้นปาล์มจึงมีคิดค้นเครื่องย่อยทางปาล์มขนาดเล็กขึ้นมาใช้งาน โดยใช้ต้นกำลังจากรถไถขนาดเล็กนั้นในการทำให้ระบบการย่อยเศษเกิดขึ้น ด้วยข้อจำกัดทางด้านวิศวกรรม ปัญหาอายุการใช้งานที่สั้นลงของไบโอมัดตัดย่อยทางปาล์มที่มีความเหนียวกว่าเศษไม้ทั่วไปได้เกิดขึ้น และส่งผลทำให้ประสิทธิภาพใบตัดของเครื่องย่อยไม้ลดลง ปัญหาดังกล่าวเกษตรกรได้ทำการทดลองเลือกใช้วัสดุหลายชนิด และวิธีการปรับปรุงสมบัติด้วยวิธีการต่างๆ หากข้อมูลการเลือกใช้โลหะที่เหมาะสมในการผลิตใบตัดเครื่องย่อยปาล์มมีการศึกษาอย่างเป็นระบบอาจทำให้เกิดประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมการผลิตปาล์มได้

ที่ผ่านมาทีมงานวิจัยที่ทำการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติของโลหะต่างๆ เพื่อเลือกวัสดุที่ใช้ในการตัดวัสดุ และมีการเปรียบเทียบผลการทดลองที่สำคัญดังต่อไปนี้ การศึกษาเปรียบเทียบสมบัติทางกลของไบโอมัดตัดย่อยที่ทำจากเหล็กกล้า

คาร์บอน 2 ชนิด คือ SUPA และ SUP7 ที่ผ่านการชุบแข็งด้วยวิธีการต่างๆ พบว่าไบโอมัดตัดย่อยที่อบชุบด้วยกระบวนการที่กำหนดและผ่านการอบคืนไฟ ทำให้ไบโอมัดมีความแข็งในระดับเดียวกันกับมิดตัดย่อยที่นำเข้าจากต่างประเทศ ได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.5 [3] หรือการศึกษาการออกแบบและสร้างชุดทดสอบไบโอมัดตัดต่อซึ่งข้าวเพื่อจุดประสงค์ในเลือกชนิดไบโอมัดที่มีความเหมาะสมของกลุ่มไบโอมัด 2 แบบ และตัวแปรการตัดต่าง ผลการทดลองที่ได้แสดงตัวแปรการออกแบบไบโอมัดตัดต่อซึ่งข้าวที่สามารถย่อยต่อซึ่งข้าวได้มากที่สุดเท่ากับร้อยละ 66 ที่มีความยาวของซึ่งข้าวสูงสุดคือ 8.1-12 ซม. [4] หรือการเลือกไบโอมัดผสมอาหารสัตว์ที่ผลิตจากเหล็กกล้าคาร์บอนและมีการปรับปรุงสมบัติของไบโอมัดด้วยการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนและการเคลือบผิวด้วยวิธีการต่างๆ พบว่าผิวของไบโอมัดที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยวิธีการที่กำหนด 2 รูปแบบให้อัตราการสึกกร่อนต่ำกว่าผิวของไบโอมัดที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนไบโอมัดที่เคลือบผิวด้วยเซรามิกผสมเป็นไบโอมัดที่แสดงค่าอัตราการสึกกร่อนต่ำสุดและเหมาะสมนำไปใช้งาน [5] หรือการเลือกเหล็กกล้า 4 ชนิดที่มีอัตราการสึกกร่อนต่ำสุด

เพื่อการตัดวัสดุกระดาดแผ่นบางที่เรียงตัวเป็นชั้นหนา โดยทำการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนเพื่อปรับปรุงโครงสร้างให้มีความแข็งและกระจายตัวพบว่าประสิทธิภาพในการตัดของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมและต่ำกว่าเหล็กกล้าตามัสกัส [6] หรือการศึกษาคุณลักษณะและกลไกการสึกกร่อนของไบโอมัดที่มีความบางของไบโอมัดที่ทำจากเหล็กกล้าคาร์บอน 3 ชนิดที่มีปริมาณคาร์บอนที่แตกต่างกัน และผ่านการชุบแข็งและอบคืนไฟ การเลือกไบโอมัดที่เหมาะสมทำได้โดยการเปรียบเทียบผลการทดสอบการสึกกร่อนและการจำลองสถานการณ์

และพบว่าอัตราการสึกกร่อนของใบมีดที่มีความบางมีผลเนื่องจากรูปร่างและความหนาของคมตัด [7] หรือการเลือกชนิดของใบมีดที่เคลือบผิวด้วยเทคนิคต่างๆ สำหรับใช้ในการตัดไม้ที่พบว่าใบตัดที่เคลือบผิวด้วยพอลิเทราฟลูออโรเอธิลีนทำให้เกิดการออกแรงในการตัดน้อยกว่าใบมีดแบบอื่นๆ และเหมาะสมในการออกแบบใบมีดตัดไม้ [8] หรือการหาสภาวะทิศทางการตัด จำนวนใบมีด และขนาดเกรนของวัสดุขัดผิวที่เหมาะสมในการตัดและเตรียมไม้ซีดาร์ ที่พบว่าทิศทางการตัดและเตรียมผิวมีผลต่อการเลือกใบมีดและผิวสำเร็จของเนื้อไม้ ความเรียบของผิวไม้ขึ้นอยู่กับมุมของการเติมไม้และความละเอียดของกระดาษทรายที่ใช้ขัด [9] นอกจากนี้การตัดย่อยไม้ป๊อปลาร์ที่มีความชื้นที่แตกต่างกันสามารถเลือกใช้ใบมีดรูปทรงกรวยที่ผ่านการชุบแข็ง และได้เศษไม้ที่มีขนาดความยาวของเศษไม้ลดลงเมื่อมุมเอียงการป้อนเพิ่มขึ้นได้ [10] เป็นต้น งานวิจัยเหล่านี้ได้นำเสนอแนวคิดในการเลือกวัสดุที่ใช้ในการผลิตใบตัด และกระบวนการในการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนของใบตัดที่มีความเหมาะสมในการตัดวัสดุแต่ละชนิด เพื่อให้อายุการใช้งานของใบตัดยาวนานขึ้นได้

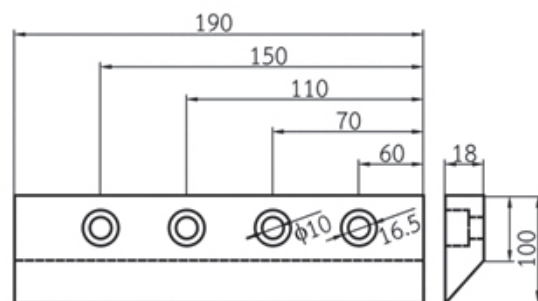
ด้วยข้อมูลปัญหาการใช้งานเครื่องย่อยปาล์มขนาดเล็กที่มีอายุการใช้งานของใบตัดเครื่องย่อยปาล์มขนาดเล็กที่สั้น และข้อมูลการวิจัยในการพัฒนาใบมีดตัด ที่จำกัด บทความนี้จึงมีแนวคิดในการนำเสนอผลการศึกษาเลือกวัสดุในการผลิตใบตัดเครื่องย่อยปาล์มขนาดเล็ก และใช้วิธีการปรับปรุงสมบัติด้วยวิธีการทางความร้อนที่เหมาะสมที่คาดว่าจะสามารถส่งผลทำให้เกิดการเพิ่มอายุการใช้งานและเพิ่มประสิทธิภาพของใบตัดเครื่องย่อยทางปาล์มขนาดเล็กที่ก่อให้เกิดความคุ้มค่าในการลงทุน และสามารถทำให้เกิดประโยชน์ในกลุ่มผู้ใช้งาน กลุ่มช่างซ่อมบำรุง และผู้เกี่ยวข้อง

2. วิธีการทดลอง

วัสดุในการทดลองประกอบด้วยเหล็กกล้าผสมต่ำเกรด SCM440 เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS304 เหล็กกล้าคาร์บอน S45C และเหล็กกล้าเครื่องมือเกรด SKD11 ที่มีส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

ธาตุ	SCM440	SUS304	S45C	SKD11
Fe	สมดุล	สมดุล	สมดุล	สมดุล
C	0.38	0.42	0.45	1.07
Si	0.23	1.70	0.23	0.97
Mn	0.65	0.02	0.67	0.45
P	0.02	0.03	0.02	0.04
S	0.02	7.70	0.02	0.02
Ni	0.04	17.41	0.04	0.14
Cr	0.96	0.24	0.98	12.35
Mo	0.15	-	0.17	1.86
Cu	0.01	-	0.01	0.04
Al	0.02	-	0.02	0.01
W	0.03	-	0.04	0.05



รูปที่ 1 ชิ้นงานทดสอบ (หน่วย: มม.)

เหล็กกล้าทั้ง 4 ชนิด ถูกนำมาทำการขึ้นรูปด้วยวิธีการทางกัด (Milling) ที่มีการหล่อเย็นด้วยน้ำหล่อเย็นขณะทำการขึ้นรูปให้มีรูปร่างเป็นใบตัดเครื่องย่อยทางปาล์มใบตัดแนวตั้งขนาดเล็ก ขนาดของใบตัดมีขนาดกว้าง 50 มม. ยาว 190 มม. และหนา 18 มม. ดังรูปที่ 1 เมื่อทำการขึ้นรูปชิ้นงานเรียบร้อยแล้ว ชิ้นงานถูกนำไปทำการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนด้วยกรรมวิธีการชุบแข็ง และการชุบแข็ง+การอบคืนไฟด้วยตัวแปรการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนดังตารางที่ 2

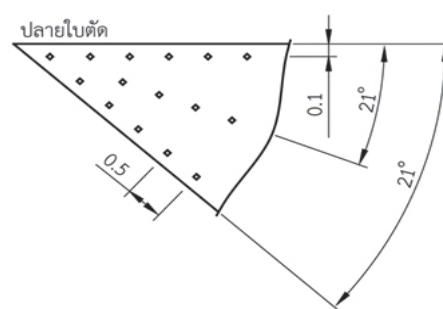
ชิ้นงานใบตัดที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนถูกนำมาทำการเตรียมชิ้นทดสอบเพื่อทำการศึกษาสมบัติทางกลและโครงสร้างโลหะวิทยาประกอบด้วยการทดสอบความต้านทานการสึกหรอบแบบขัดสี การทดสอบความแข็ง และการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

การทดสอบความต้านทานการสึกหรอเป็นไปตาม ASTM G65-94 กำหนดให้ชิ้นงานทดสอบมีขนาดกว้าง 25 มม. ยาว 50 มม. และหนา 18 มม. สำหรับโคนใบตัด มีขนาดกว้าง 25 มม. ยาว 50 มม. และหนาตามความลาดเอียงของคมตัด ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความต้านทานการสึกหรอด้วยการขัดสีพื้นผิวด้วยล้อยางและใช้สารขัดเป็นทรายแห้งขนาด 80 เมช ล้อยางหมุนด้วยอัตราเร็ว 200 รอบต่อวินาที เวลาในการทดสอบ 30 นาที และทำการเปรียบเทียบเทียบค่าน้ำหนักชิ้นงานที่สูญเสียไป [11]

ตารางที่ 2 สภาวะการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อน

วัสดุ	สภาวะ	การชุบแข็ง	การอบคืนไฟ
SCM440	อุณหภูมิ	1200 °C	650 °C
	เวลา	60 นาที	60 นาที
	สารชุบ	น้ำ	อากาศ
SUS304	อุณหภูมิ	1090 °C	650 °C
	เวลา	60 นาที	60 นาที
	สารชุบ	น้ำมัน	อากาศ
S45C	อุณหภูมิ	1050 °C	650 °C
	เวลา	60 นาที	60 นาที
	สารชุบ	น้ำมัน	อากาศ
S45C	อุณหภูมิ	1030 °C	650 °C
	เวลา	60 นาที	60 นาที
	สารชุบ	น้ำมัน	อากาศ

การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา ใบตัดบริเวณคมตัดถูกทำการตัดแยกออกและหล่อประคองด้วยเรซิน ผิวหน้าของชิ้นทดสอบถูกขัดเตรียมโดยการขัดหยาบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 150-2000 ในน้ำไหล แล้วขัดละเอียดด้วยผงเพชรขนาด 9 3 และ 1 ไมครอนบนผ้าสักหลาดจนกระทั่งได้ผิวมันวาวคล้ายกระจกเงา และกัดผิวหน้าด้วยสารละลายที่กำหนดเพื่อแสดงรายละเอียดของโครงสร้างจุลภาค



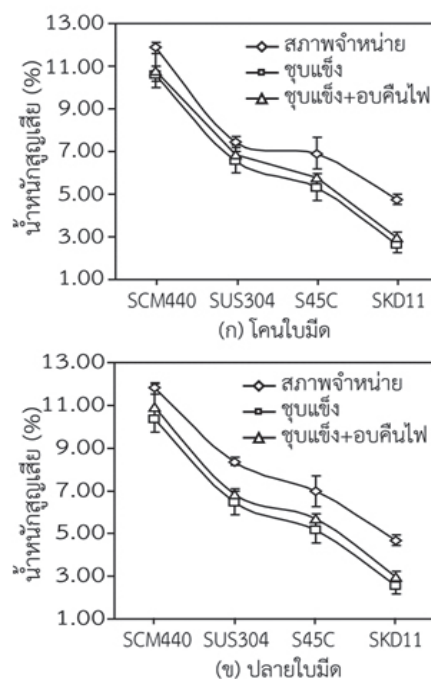
รูปที่ 2 ตำแหน่งวัดความแข็งที่ปลายคมตัด (หน่วย: มม.)

ความแข็งแรงของชิ้นงานก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนถูกทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรงไมโครวิกเกอร์สตามมาตรฐานการทดสอบ JIS Z2244 กำหนดให้ใช้แรงในการกดทดสอบ 300 กรัมแรง เวลา กดแช่ 10 วินาที [12] แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วนประกอบ คือ การทดสอบความแข็งแรงที่โคนใบตัดและปลายใบตัดโดยการทดสอบความแข็งแรงบนพื้นผิวการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค การทดสอบความแข็งแรงบริเวณโคนใบตัดทำการทดสอบแบบสุ่มจำนวน 15 จุด แต่ละจุดห่างกันอย่างน้อย 0.5 มม. ขณะที่การทดสอบความแข็งแรงที่บริเวณปลายใบตัดกำหนดให้มีจุดทำการทดสอบดังรูปที่ 2 โดยจุดทำการทดสอบห่างจากปลายใบมีดประมาณ 0.5 มม. และทำการทดสอบห่างจากผิวด้านข้าง 0.1 มม. ระยะห่างการทดสอบ 0.5 มม. หลังจากทำการศึกษสมบัติทางกล ค่าใช้จ่ายในการผลิตผลผลิตของใบตัดเหล็กกล้าทั้ง 4 ชนิดถูกนำมาเปรียบเทียบโดยคำนวณจากผลรวมระหว่างค่าวัสดุ ค่าแรงงาน ค่าเสียหยาบ ค่าไฟฟ้า และค่าสารชุบ

3. ผลการทดลองและการวิจารณ์

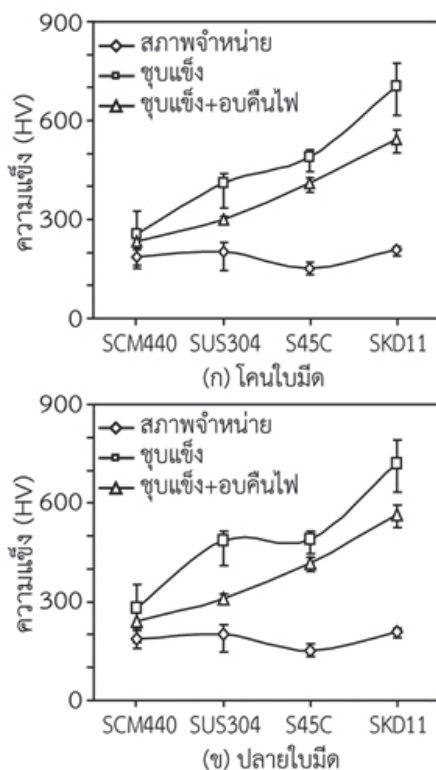
รูปที่ 3 แสดงการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดสอบการสึกหรอ การแปลความหมายผลการทดสอบนี้ คือหากชิ้นทดสอบมีการสูญเสียน้ำหนักน้อยหมายถึงชิ้นทดสอบมีความต้านทานการสึกหรอสูง และหากชิ้นทดสอบมีการสูญเสียน้ำหนักมากหมายถึงชิ้นทดสอบมีความต้านทานการสึกหรอต่ำ เหล็กกล้าที่ใช้เป็นชิ้นทดสอบใบตัดย่อยทางปาล์มให้ค่าความต้านทานการสึกหรอที่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาชนิดของเหล็กกล้าที่ใช้ในการทดสอบพบว่า ค่าความต้านทานการสึกหรอของเหล็กกล้ามีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อชิ้นทดสอบมีการเปลี่ยนแปลง คือเหล็กกล้า SCM440 SUS304 S45C และ SKD11 ตามลำดับ ขณะเดียวกันเมื่อทำการเปรียบเทียบ

ชนิดของเหล็กกล้าในสภาพจำหน่วย สภาพที่ผ่านการชุบแข็ง และสภาพการชุบแข็ง+การอบคืนไฟพบว่าเหล็กกล้ามีความต้านทานการสึกหรอต่ำเมื่ออยู่ในสภาพจำหน่วย และเพิ่มสูงขึ้นเมื่อถูกนำไปทำการชุบแข็ง และสุดท้ายมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อชิ้นงานที่ผ่านการชุบแข็งถูกนำไปทำการอบคืนไฟ ค่าความต้านทานการสึกหรอนี้มีความแตกต่างกันตามตำแหน่งและรูปร่างของรูป ค่าเสียหยาบ ค่าไฟฟ้า และค่าสารชุบขึ้นทดสอบดังแสดงด้วยการทดสอบความต้านทานการสึกหรอที่โคนใบตัดและปลายใบตัด ผลการทดลองดังรูปที่ 3 (ก) และ (ข) แสดงความต้านทานการสึกหรอของชิ้นทดสอบที่มีความบางกว่า ซึ่งในที่นี้ คือปลายใบตัดมีค่าความต้านทานการสึกหรอที่สูงกว่าโคนใบตัดที่มีความหนาของชิ้นทดสอบสูงกว่า ผลการทดสอบความต้านทานการสึกหรอแสดงค่าความต้านทานสูงสุดที่ชิ้นทดสอบเหล็กกล้า SKD11 ตำแหน่งปลายใบตัดที่ค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักประมาณ 2.53



รูปที่ 3 ผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของวัสดุใบตัดแบบต่างๆ ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อน

การเปลี่ยนแปลงความต้านทานการสึกหรอของวัสดุโลหะหรือชิ้นผิวเคลือบมีสาเหตุหลักมาจากการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของโลหะที่เกิดการเสียดสีกับสิ่งแวดล้อม [13] ด้วยเหตุนี้ผลการทดสอบความต้านทานการสึกหรอของชิ้นทดสอบเหล็กกล้าต่างๆ ที่ใช้ในการผลิตใบตัดเครื่องย่อยทางปาล์มจึงถูกนำมาทำการทดสอบความแข็งโดยการทดสอบความแข็งดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2 ผลการทดสอบความแข็งที่ได้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับความต้านทานการสึกหรอ



รูปที่ 4 ผลการทดสอบความแข็งของวัสดุใบตัดที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อน

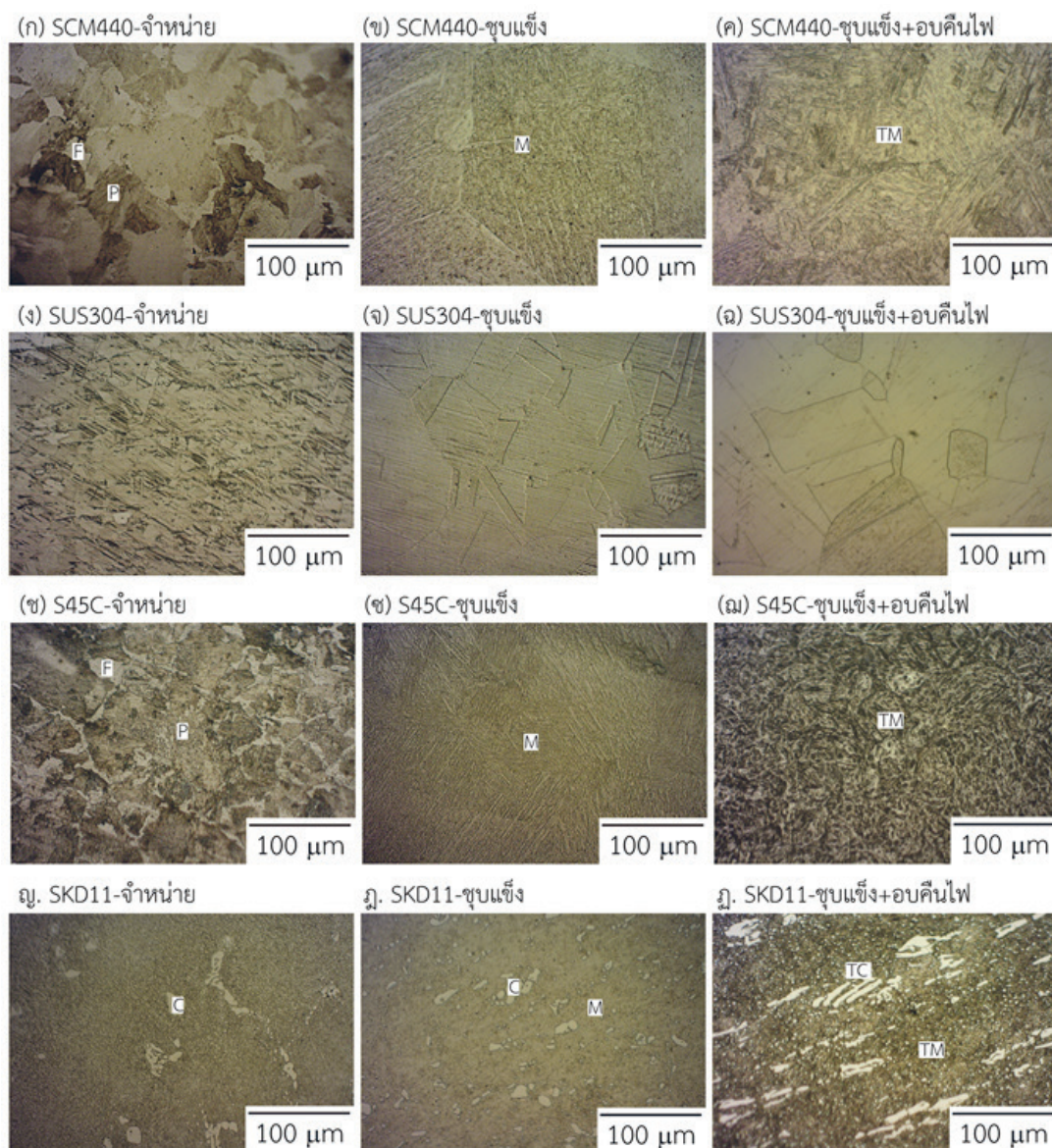
ในสภาพจำหน่ายชิ้นทดสอบที่ทำจากเหล็กกล้า SCM440 ที่แสดงความแข็งต่ำ แสดงค่าความต้านทานการสึกหรอต่ำสุด และค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อเหล็กกล้าเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็น S45C SUS304 และ SCM440 ตามลำดับ ค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นนี้ส่งผลทำให้เหล็กกล้าต่างๆ

ในสภาพจำหน่ายมีความต้านทานการสึกหรอที่เพิ่มขึ้น การเพิ่มค่าความแข็งเมื่อรูปแบบของเหล็กในสภาพจำหน่ายเกิดการเปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 4 นี้เกิดจากส่วนผสมทางเคมีของธาตุที่เสริมความแข็งและความแข็งแรงของเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้น [14] ธาตุผสมดังกล่าวของเหล็ก เช่น คาร์บอน มีปริมาณสูงมากขึ้นเมื่อเหล็กเกิดการเปลี่ยนแปลงจาก SCM440 ถึง SKD11 ดังแสดงในตารางที่ 1 ปริมาณของคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้เฟสซีเมนไต์ (C) ในเฟลไลต์ (P) (กรณีของเหล็กกล้าคาร์บอน) และเฟสออสเทนไนต์ (กรณีของเหล็กกล้าไร้สนิม) เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 5 (ก) (ง) (ข) และ (ญ) สามารถทำให้ความแข็งของเหล็กเพิ่มขึ้นได้ [15]

การเพิ่มความแข็งของใบตัดที่ทำจากเหล็กกล้าทั้ง 4 ชนิด มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใบตัดถูกนำไปทำการชุบแข็งในสภาวะที่กำหนด การเพิ่มค่าความแข็งเนื่องจากการเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสพื้นฐานของเหล็กกล้า คือ เฟอไรต์ เฟลไลต์ และออสเทนไนต์เหล็กกล้าทั้ง 4 ชนิดดังรูปที่ ดังรูปที่ 5 (ก) (ง) (ข) และ (ญ) เป็นเฟสมาเทนไซต์ดังรูปที่ 5 (ข) (จ) (ช) และ (ฎ) เมื่อเปรียบเทียบกับเฟสพื้นฐานของเหล็กกล้าก่อนการชุบแข็งเฟสมาเทนไซต์มีความแข็งสูงและเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ใบตัดที่ผ่านการชุบแข็งมีค่าสูงขึ้น [13] ปริมาณของเฟสมาเทนไซต์ที่เพิ่มขึ้นและขนาดของเฟสมาเทนไซต์ที่เล็กและละเอียดลง เป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้เกิดความแข็งของใบตัดที่มีค่าเพิ่มขึ้น [15] เหล็กกล้าที่นำมาชุบแข็งที่สามารถทำให้เกิดโครงสร้างมาเทนไซต์ได้ในปริมาณสูง คือเหล็กกล้าที่มีความสามารถในการชุบแข็ง (Hardenability) สูง ซึ่งพบได้ในเหล็กกล้าที่มีปริมาณธาตุผสม เช่น คาร์บอน โครเมียม นิกเกิล วานาเดียม เป็นต้นในปริมาณสูง นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาการวัดค่าความแข็งที่โคนใบตัดที่มีความหนามากกว่าและปลายใบตัด

ที่มีความหนาต่ำกว่า ชิ้นงานที่มีความหนาต่ำกว่า มักทำให้เกิดการเย็นตัวในอัตราที่เร็วกว่าและ ส่งผลทำให้เกิดโครงสร้างเฟสมาเทนไซต์ที่มีความแข็งสูงกว่าได้ [16-18] ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมทางเคมีและ ตำแหน่งการทดสอบความแข็งของชิ้นทดสอบ ใบตัดเหล็กกล้า SCM440 SUS304 S45C และ SKD11 ตามลำดับ ความแข็งของชิ้นทดสอบ ใบตัดเหล็กกล้าที่ผ่านการชุบแข็งมีค่าความแข็ง ลดลงเล็กน้อยในทุกชนิดของเหล็กกล้าเมื่อถูกนำไป

ทำการอบคืนไฟในสภาวะที่กำหนด การอบคืนไฟ ดังกล่าวเป็นการอบเพื่อลดความเครียด และ เพิ่มความเหนียวให้กับเฟสมาเทนไซต์ทำให้ได้ เฟสเทมเปอร์มาเทนไซต์ (Tempered martensite: TM) ส่งผลทำให้เฟสมาเทนไซต์ที่ได้มีขนาดใหญ่ขึ้น และมีความกลมมนเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ เฟสคาร์ไบด์บางตัวสามารถตรวจสอบพบได้ใน พื้นหลักโลหะที่ผ่านการอบคืนไฟดังรูปที่ 5 (ค) (ฉ) (ณ) และ (ญ)



รูปที่ 5 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุใบตัดก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อน (F=เฟอไรต์ P=เพอไรท์ M=มาเทนไซต์ TM=เทมเปอร์มาเทนไซต์ C=คาร์ไบด์ TC=คาร์ไบด์เปลี่ยนแปลงรูปร่าง)

ตารางที่ 3 ต้นทุนการผลิตไบโอมีดัตตทางปาล์มต่อหน่วย (บาทต่อหนึ่งหน่วย)

วัสดุ	สถานะ	ค่าวัสดุ	ค่าแรงขึ้นรูป	ค่าสัทยุ	ค่าไฟฟ้า*	ค่าสารชุบ	รวม
SCM440	จำหน่าย	200.00	200.00	250.00	0.00	0.00	650.00
	ชุบแข็ง	200.00	200.00	250.00	65.00	10.00	725.00
	ชุบแข็ง+อบคืนไฟ	200.00	200.00	250.00	73.00	10.00	733.00
SUS304	จำหน่าย	600.00	300.00	250.00	0.00	0.00	1150.00
	ชุบแข็ง	600.00	300.00	250.00	65.00	34.00	1249.00
	ชุบแข็ง+อบคืนไฟ	600.00	300.00	250.00	73.00	34.00	1257.00
S45C	จำหน่าย	150.00	200.00	250.00	0.00	0.00	600.00
	ชุบแข็ง	150.00	200.00	250.00	65.00	10.00	675.00
	ชุบแข็ง+อบคืนไฟ	150.00	200.00	250.00	73.00	10.00	683.00
SKD11	จำหน่าย	300.00	300.00	250.00	0.00	0.00	850.00
	ชุบแข็ง	300.00	300.00	250.00	65.00	34.00	949.00
	ชุบแข็ง+อบคืนไฟ	300.00	300.00	250.00	73.00	34.00	957.00

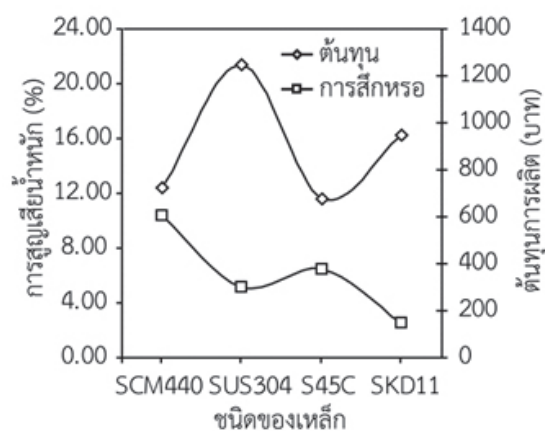
*ค่าไฟฟ้าคำนวณจากการใช้ไฟฟ้าของเตาอบในการปรับปรุงสมบัติด้วยความร้อนเท่านั้น

นอกจากกระบวนการอบชุบสามารถทำให้เกิดการเพิ่มความแข็งและความต้านทานการสึกหรอของชิ้นงานไบโอดเหล็กกล้าทั้ง 4 ชนิดแล้ว การเพิ่มขึ้นของปริมาณธาตุคาร์บอน โครเมียม วานาเดียม แมงกานีส โมลิบดีนัม และคาร์บอน ในเหล็กกล้าทั้ง 4 ชนิด เป็นสิ่งที่ต้องมีการศึกษาเพื่อให้เข้าใจถึงกลไกการเพิ่มความแข็งและความต้านทานการสึกหรอของไบโอด เนื่องจากธาตุเหล่านี้อาจทำให้เกิดโลหะคาร์ไบด์ในเหล็กกล้าผสมสูง เช่น เหล็กกล้า SKD11 ซึ่งแสดงสมบัติทางกลเด่นที่สุดในการทดลองนี้ ที่สามารถเสริมความแข็งและความแข็งของโลหะเชื่อมเพิ่มขึ้นและเฟสเสริมความแข็งมีขนาดลดลง [19] เฟสดังกล่าวอาจสามารถก่อตัวเป็นเฟสโลหะคาร์ไบด์ (M7C3) ที่มีขนาดเล็กและกระจายตัวในเฟสพื้นยูเทคติกคาร์ไบด์ ที่ส่งผลทำให้ค่าความแข็งและความต้านทานการสึกหรอสามารถเพิ่มขึ้นได้ [20] นอกจากนั้นความแข็งของโลหะเหล็กกล้าผสม

สามารถเพิ่มขึ้นได้เนื่องจากธาตุผสมเหล่านี้นักทำให้เกิดโลหะคาร์ไบด์เชิงซ้อนหลายแบบที่มีความแข็งในโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าได้ [21] อย่างไรก็ตามในการทดลองครั้งนี้ไม่ได้ทำการศึกษาเพื่อระบุชนิดของเฟสต่างๆ ที่แม่นยำไว้ เนื่องจากข้อจำกัดในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ที่มีความแม่นยำ เช่น การวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer: XRD) หรือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope: TEM) และสมควรดำเนินการต่อไปในอนาคต และความเข้าใจกลไกการเพิ่มความแข็งและความต้านทานการสึกหรอในไบโอดต่อไป

ตารางที่ 3 แสดงราคาต้นทุนการผลิตไบโอดัตตปาล์ม ซึ่งในการเลือกใช้วัสดุไบโอดัตตนั้น มีหลักในการลดต้นทุนที่สำคัญ คือ การเลือกใช้วัสดุที่ทำให้เกิดต้นทุนต่อหน่วยที่น้อยที่สุด โดยคำนึงถึงผลกระทบต่อคุณภาพเป็นสำคัญ เพื่อให้มีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน ดังราคาต้นทุน

การผลิตใบตัดในสภาพซบแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C ดังรูปที่ 6 พบว่าใบมีดตัดที่ทำจากเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C และเหล็กกล้าผสมต่ำเกรด SCM440 นั้น มีราคาต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่าในเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด SUS304 และเหล็กกล้าเครื่องมือเกรด SKD11 อยู่เกือบเท่าตัว โดยมีต้นทุนการผลิตของเหล็กกล้าในสภาพซบแข็งของวัสดุแต่ละชนิดจากต่ำไปหาสูงสำหรับเหล็กกล้า S45C SCM440 SUS304 และ SKD11 ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม เมื่อนำต้นทุนการผลิตไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบสมบัติทางกลแล้ว พบว่า เหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C และเหล็กกล้าผสมต่ำเกรด SCM440 แม้จะให้ค่าผลการทดสอบสมบัติทางกลที่ต่ำกว่าเหล็กกล้าเครื่องมือ SKD11 แต่ก็มีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการนำมาทำใบตัดได้เป็นอย่างดี เนื่องจากมีสมบัติทางกลปานกลาง รวมถึงราคาต้นทุนที่ต่ำสุด จึงเป็นเหตุผลในการเลือกใช้เหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C ในการทำใบมีดตัดทางปาล์มมากกว่าเหล็กกล้าผสมต่ำเกรด SCM440



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของเหล็ก การสูญเสียน้ำหนัก และต้นทุนการผลิต

4. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติทางกลวัสดุสำหรับทำใบมีดตัดทางปาล์มและต้นทุนการผลิต เพื่อให้ได้ใบตัดที่มีความเหมาะสมในการย่อยทางปาล์ม ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้ ใบตัดเหล็กกล้า SKD11 ที่ผ่านการชุบแข็งด้วยสภาวะที่กำหนดให้ค่าความต้านทานการสึกหรอสูงกว่าใบตัดเหล็กกล้า SUS304 S45C และ SCM440 ที่ค่าประมาณร้อยละ 34 45 และ 60 ตามลำดับ เหล็กกล้า S45C มีราคาต้นทุนในการผลิตต่อหน่วยต่ำกว่าเหล็กกล้า SCM440 SKD11 และ SUS304 ประมาณร้อยละ 6 42 และ 52 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาสมบัติทางกล เช่น ความต้านทานการสึกหรอและความแข็งและต้นทุนการผลิต ใบตัดเหล็กกล้า SKD11 และใบตัดเหล็กกล้า S45C มีความเหมาะสมในการผลิตเป็นใบตัดย่อยทางปาล์มเครื่องตัดย่อยแบบใบตัดตั้งฉากตามลำดับ

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยประจำปี 2559 จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Ksmecare.com [Internet] Bangkok: Kasikorn Thai Research Center. [Updated 2014 June 12; cited 2014 June 12] Available from <http://www.ksmecare.com/Article/82/28155>.
- [2] Wikipedia.org [Internet] Bangkok: wikimedia Thailand. [Updated 2014 June 12; cited 2014 June 12] Available from <https://th.wikipedia.org/wiki/ปาล์มน้ำมัน>

- [3] Leetrakul T. The development cutting tool in sugar cane harvester for evaluated of hardness. Proceeding of 2012 IE Network Conference; 2012 October 17-19, Petchburi, Thailand. pp. 1666-1670 (in Thai).
- [4] Kosoom K. Study and design of cutting blade from rid residues. Proceeding of the 5th Rajamangala University of Technology Conference. 2014;June 23-25:79-86 (in Thai).
- [5] Niranatlumpong P, Sukhonket C, Nakngonthong J. Wear resistant surface treatment of pulverizer blades. Wear. 2013;302: 878-881.
- [6] Verhoeven JD, Clark HF. Carbon diffusion between the layers in modern pattern-welded damascus Blades. Materials Characterization. 1998;41;183-191.
- [7] Lau KH, Mei D, Yeung CF, Man HC. Wear characteristics and mechanisms of a thin edge cutting blade. Journal of Materials Processing Technology. 2000;102: 203-207.
- [8] Päivinen M, Heinimaa T. The effects of different hand tool blade coatings on force demands when cutting wood. International Journal of Industrial Ergonomics. 2003;32:1 39-146.
- [9] Aslan S, Coşkun H, Kılıç M. The effect of the cutting direction, number of blades and grain size of the abrasives on surface roughness of Taurus cedar (Cedrus Libani A. Rich.) woods. Building and Environment. 2008; 43:696-701.
- [10] Wegener JK, Wegener T. Wood chipping with conical helical blades – Theoretical deliberations and practical experiments concerning the adjustment of chip length with a set pitch of the blade. Biomass and Bioenergy. 2014;66: 151-158.
- [11] Kimapong K, Poonnayom P, Wattanjitsiri V. Microstructure and wear resistance of hardfacing weld metal on JIS-S50C carbon steel in agricultural machine parts. Materials Science Forum. 2016; 872:55-61.
- [12] Kimapong K, Triwanapong S, Prasomthong S, and Wattanjitsiri V. Effect of buffer layer and hard-faced welding on mechanical properties of JIS-S50C carbon steel weld metal. Journal of Engineering, RMUTT. 2016;14:77-90. (in Thai).
- [13] Kimapong K, Tosakul S, Memon A, Klanpracha N. Engineering Materials. Bangkok: Cengage Learning Co.Ltd., 2010 (In Thai).

- [14] Groover MP. Fundamentals of modern manufacturing, material, processes and systems. USA: John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [15] Avner SH. Introduction to physical metallurgy. Singapore: McGraw-Hill, 1974.
- [16] Askeland DR, Phule PP. The science and engineering of materials. Toronto: Thompson Canada Limited, 2006.
- [17] Verhoeven JD. Fundamentals of physical metallurgy. USA: John Wiley & Sons, INC., 1975.
- [18] Abbaschian R, Abbaschian L, Reed-Hill RE. Physical Metallurgy Principles, 4ed. Singapore: Cengage Learning, 2010.
- [19] Wu W, Hu S, Shen J. Microstructure, mechanical properties and corrosion behavior of laser welded dissimilar joints between ferritic stainless steel and carbon steel. Materials & Design. 2015;65:855-861.
- [20] Zahiri R, Sundaramoorthy R, Lysz P, Subramanian C. Hardfacing using ferro-alloy powder mixtures by submerged arc welding. Surface and Coatings Technology. 2014;260:220-229.
- [21] Jeshvaghani RA, Harati E, Shamanian M. Effects of surface alloying on microstructure and wear behavior of ductile iron surface-modified with a nickel-based alloy using shielded metal arc welding. Materials & Design. 2011;32:1531-1536.

การศึกษาเวลามาตรฐานการติดตั้งแม่พิมพ์ กรณีศึกษา บริษัทผลิตถุงพลาสติก

กิตติชัย อธิกุลรัตน์^{1*}

kittichai.athi@gmail.com^{1*}

^{1*} ภาควิชาวิศวกรรมขนถ่ายวัสดุและโลหิติกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

Received: August 28, 2018
Revised: September 7, 2018
Accepted: November 5, 2018

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงการติดตั้งแม่พิมพ์และหาเวลามาตรฐานติดตั้งแม่พิมพ์ โดยการศึกษาการติดตั้งแม่พิมพ์ ด้วยการศึกษาการทำงานของ คน-เครื่องจักร พร้อมกับวิเคราะห์ขั้นตอนที่ไม่มีคุณค่าด้วยการตั้งคำถาม 5W1H และปรับปรุงการดำเนินการด้วยหลักการ ECRS ภายหลังการปรับปรุงสามารถปรับกระบวนการใหม่โดยตัดขั้นตอนที่ไม่มีคุณค่า ทำให้เหลือขั้นตอนในการติดตั้งแม่พิมพ์จากเดิม 13 ขั้นตอนเหลือ 6 ขั้นตอน ลดเวลาในการติดตั้งแม่พิมพ์จากเดิม ใช้เวลา 76.99 นาที เหลือ 52.42 นาที หรือคิดเป็นลดลงร้อยละ 31.91 จากนั้นทำการหาเวลามาตรฐานโดยการจับเวลาทางตรง พร้อมกับหาจำนวนครั้งการจับเวลาที่เหมาะสมด้วยความเชื่อมั่น 95% และความคลาดเคลื่อน $\pm 10\%$ ผลการวิจัยพบว่า การปรับตั้งแม่พิมพ์ มีเวลาปกติและเวลามาตรฐาน คือ 56.613 นาที และ 65.105 นาที

คำสำคัญ: เวลาไม่มีคุณค่า เวลาปกติ เวลามาตรฐาน

A Standard Time Study of Install the Paint Mold : A Case Study of Plastic Bag Manufacturing Company.

Kittichai Athikulrat^{1*}
Kittichai.athi@gmail.com^{1*}

^{1*} Department of Materials Handling and Logistics Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

Received: August 28, 2018
Revised: September 7, 2018
Accepted: November 5, 2018

Abstract

This research aims to improve a mold setup process and determine the standard time for installing the paint Mold. By studying the Mold Installation by focusing on a work study of Man-Machine with analyzing non-value added activities by using 5W1H questions as well as applying ECRS concept in order to improve the setup process. After the process has been improved by eliminated non-value added activities, the activities of setting up the printing machine have been reduced from 13 activities to 6 activities, the time of a mold setup was reduced from 76.99 minutes to 52.42 minutes, 57.13% time decreased. After that, find out the standard time by employing stopwatch and counting suitable numbers with the 95% confidence interval and $\pm 10\%$ tolerance. The result shows that normal time and standard time are 56.613 minutes and 65.105 minutes.

Keywords: Non-value added-time, Normal time, Standard time.

1. บทนำ

อุตสาหกรรมถุงพลาสติกและบรรจุภัณฑ์เป็นอุตสาหกรรมที่มีการแข่งขันสูงเนื่องจากไม่ได้เป็นอุตสาหกรรมเชิงนวัตกรรมที่ผู้ผลิตคิดค้นต้นแบบและนำมาสร้างมูลค่าเพิ่มแต่อย่างใดผู้ประกอบการทำหน้าที่ผลิตตามความต้องการของตลาดหรือลูกค้า ลวดลาย สี สัน ขนาด ถูกกำหนดด้วยลูกค้าเป็นหลัก ดังนั้นลักษณะธุรกิจจึงเป็นลักษณะรับจ้างผลิตหรือ (Original Equipment Manufacturing : OEM) ผู้ซื้อเป็นผู้กำหนดคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ อีกทั้งผู้ผลิตจำเป็นต้องผลิตตามราคาหรือต้นทุน (Cost) คุณภาพ (Quality) และ เวลาในการส่งมอบ (Delivery) ที่ตกลงกัน ด้วยเหตุนี้เองกิจการ จำเป็นต้องลดความสูญเปล่า (Waste) เพื่อเพิ่มขีดความสามารถของกิจการ ให้สามารถแข่งขันกับคู่แข่งได้ให้สามารถสร้างผลประกอบการเป็นที่ยอมรับ โดยความสูญเปล่าสามารถจำแนกได้เป็น 7 ประการซึ่งประกอบไปด้วย 1) ความสูญเปล่าเนื่องจากการผลิตมากเกินไป (Over Production) 2) ความสูญเปล่าเนื่องจากการเก็บวัสดุคงคลัง (Inventory) 3) ความสูญเปล่าเนื่องจากการขนส่ง (Transportation) 4) ความสูญเปล่าเนื่องจากการเคลื่อนไหว (Motion) 5) ความสูญเปล่าเนื่องจากระบวนการผลิต (Processing) 6) ความสูญเปล่าเนื่องจากการรอคอย (Delay) 7) ความสูญเปล่าเนื่องจากการผลิตของเสีย (Defect)

อย่างไรก็ตามได้มีนักวิจัยหลายท่านได้ศึกษาและปรับปรุงกระบวนการผลิต เพื่อเพิ่มผลผลิตและเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันให้แก่องค์กร ดังนี้ ได้มีการนำหลักการการศึกษาการทำงาน (Work Study) และเครื่องมือด้านวิศวกรรมอุตสาหกรรม ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูลและปรับปรุงกระบวนการทำงาน [1] มีการศึกษาและปรับปรุงการทำงานของสายการประกอบ

ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ โดยการรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์การทำงานด้วยการเคลื่อนไหวพื้นฐานของสองมือ [2] นอกจากนี้แล้วยังมีงานวิจัยที่ศึกษาและปรับปรุงการทำงานด้วยการจัดทำสมดุลสายการผลิตด้วยวิธีทางพันธุกรรม [3] รวมถึงมีงานวิจัยศึกษาและปรับปรุงการเย็บประกอบเบาะรถจักรยานยนต์ตามแนวคิดการผลิตแบบลีนโดยการวิเคราะห์ผ่านสายธารคุณค่า (Value Stream mapping) เพื่อหาแผนงานสำหรับการปรับปรุงจากนั้นบันทึกการทำงานด้วยแผนภูมิการไหล (Flow Process Chart) เพื่อใช้ 5W1H และ ECRS เพื่อการวิเคราะห์และปรับปรุง [4] อย่างไรก็ตามได้มีงานวิจัยที่ทำการศึกษาเวลามาตรฐานโดยการปรับปรุงการทำงานและศึกษาเวลาการทำงานเพื่อพัฒนาเป็นเวลามาตรฐานของกระบวนการผลิตกล่องลูกฟูก[5].

บริษัท กรณิศศึกษาเป็นผู้ผลิตและจัดจำหน่ายถุงพลาสติกสำหรับบรรจุภัณฑ์หลายรูปแบบทั้งแบบ หูหิ้วแบบเจาะเม็ดแก้วและแบบซิปพหู ดังรูปที่ 1-3 อย่างไรก็ตามในกระบวนการผลิตถุงพลาสติกของบริษัท กรณิศศึกษา มีรูปแบบการวางแผนการผลิตเป็นแบบตามกระบวนการผลิต (Process Layout) ตั้งแต่กระบวนการ เป่า พิมพ์ ตัด บรรจุ ทำให้มีการไหลของงานแบบไม่ต่อเนื่องจากกระบวนการก่อนหน้าไปยังกระบวนการถัดไปโดยการจัดส่งเป็นล็อต มีความสูญเปล่าในกระบวนการทำงานตั้งแต่กระบวนการเป่าถุงพลาสติก พิมพ์ ตัด และบรรจุ พบกว่าในกระบวนการพิมพ์มีงานกองระหว่างผลิตเป็นจำนวนมาก เนื่องจากเวลาการปฏิบัติงานในแต่ละแผนกไม่เท่ากัน ซึ่งสาเหตุหนึ่งมาจากการสูญเสียเวลาการรอคอยการติดตั้งแม่พิมพ์สำหรับการพิมพ์ลาย ตามที่ลูกค้าต้องการ



รูปที่ 1
แบบหู้หิ้ว



รูปที่ 2
แบบเจาะเม็ดถั่ว



รูปที่ 3
แบบซ้อพหู

โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงกระบวนการติดตั้งแม่พิมพ์ พร้อมกับหาเวลามาตรฐานในการติดตั้งแม่พิมพ์

2. วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเชิงปฏิบัติการ (Action Research) กล่าวคือเป็นงานวิจัยที่ได้ศึกษาการปฏิบัติงานโดยใช้ระเบียบวิธีทางวิทยาศาสตร์ เพื่อระบุถึงปัญหาและแก้ไขปัญหาทางานที่ปฏิบัติอยู่ด้วยโดยดำเนินการวิจัยที่ปฏิบัติงานโดยจุดมุ่งหมายสำคัญของงานวิจัยเชิงปฏิบัติการคือ มุ่งหมายที่จะปรับปรุงประสิทธิภาพของการปฏิบัติงานประจำให้ดีขึ้น การวิจัยในครั้งนี้มี 6 ขั้นตอน ดังนี้

1. การเลือกงานในการศึกษาวิจัย การวิจัยในครั้งนี้ทำการศึกษาและเลือกงานตามความสำคัญของผลิตภัณฑ์ โดยพิจารณาคัดเลือกงานจากยอดขายของผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิตของผลิตภัณฑ์

2. การศึกษาสภาพปัจจุบันของสถานประกอบการ เป็นการศึกษาสภาพการดำเนินงานปัจจุบันขั้นตอนการปฏิบัติงาน โดยการศึกษาการทำงาน (Method Study) และจับเวลาการทำงานในแต่ละกระบวนการจำนวน 30 ครั้ง พร้อมบันทึกการทำงานและบันทึกเวลาเฉลี่ยในแต่ละกระบวนการ

3. การวิเคราะห์เพื่อหาแนวทางการปรับปรุงกระบวนการติดตั้งแม่พิมพ์ เป็นขั้นตอนการประยุกต์เครื่องมือด้านวิศวกรรมอุตสาหการ

เพื่อหาสาเหตุของปัญหา โดยประยุกต์ใช้หลักการ 5W1H เพื่อการวิเคราะห์เพื่อการปรับปรุง

4. การปรับปรุงกระบวนการเป็นขั้นตอนการปรับปรุง โดยการประยุกต์ใช้หลักการ ECRS เพื่อปรับปรุงการปฏิบัติงาน

5. การหาเวลามาตรฐานในการปฏิบัติงานหลังปรับปรุงกระบวนการ [1] โดยมีขั้นตอนดังนี้

5.1 การหาจำนวนครั้งการจับเวลา

$$N = \left[\frac{40 \sqrt{n \sum x^2 - (\sum x)^2}}{\sum x} \right]^2 \quad (1)$$

โดย N = จำนวนครั้งในการจับเวลาที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และความคลาดเคลื่อน $\pm 10\%$

n = จำนวนครั้งการจับเวลาเบื้องต้น

x = ค่าเวลาที่จับได้ในแต่ละครั้ง (ข้อมูลของตัวอย่าง)

การหาจำนวนครั้งการจับเวลา โดยข้อมูลการจับเวลาเบื้องต้นเป็นการจับเวลาจำนวน 30 ครั้ง ทุกขั้นตอน

ภายหลังได้ข้อมูลเวลา คือ จำนวนครั้งการจับเวลา และข้อมูลเวลาทั้งหมดแล้วดำเนินการตรวจสอบและยืนยันข้อมูลการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) ด้วยโปรแกรมมินิแทป

5.2 หาค่าเวลาปกติ (Normal Time: NT)

โดย เวลาปกติ (NT) = เวลาเฉลี่ย $\times$ %Rating (2)

ทั้งนี้การประเมินการทำงานของพนักงาน (% Rating) ด้วยการประเมิน Westinghouse คือการประเมิน 4 ด้าน ได้แก่ ทักษะ (Skill) ความพยายาม (Effort) สภาพการทำงาน (Condition) และ ความสม่ำเสมอ (Consistency) โดยมีรายละเอียดดัง ตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คะแนนการประเมินด้วยวิธี
Westinghouse

ทักษะ (Skills)		
คะแนน	สัญลักษณ์	คำอธิบาย
+0.15	A1	ดีเยี่ยม
+0.13	A2	
+0.11	B1	ดีมาก
+0.08	B2	
+0.06	C1	ดี
+0.03	C2	
0.00	D	ปานกลาง
-0.05	E1	เฉยๆ
-0.10	E2	
-0.16	F1	แย่
-0.22	F2	
ความพยายาม (Effort)		
คะแนน	สัญลักษณ์	คำอธิบาย
+0.13	A1	ดีเยี่ยม
+0.12	A2	
+0.10	B1	ดีมาก
+0.08	B2	
+0.05	C1	ดี
+0.02	C2	
0.00	D	ปานกลาง
-0.04	E1	เฉยๆ
-0.08	E2	
-0.12	F1	แย่
-0.17	F2	

ตารางที่ 1 (ต่อ)

สภาพการทำงาน (Condition)		
คะแนน	สัญลักษณ์	คำอธิบาย
+0.06	A	ในอุดมคติ
+0.04	B	ดีมาก
+0.02	C	ดี
0.00	D	ปานกลาง
-0.03	E	เฉยๆ
-0.07	F	แย่
ความสม่ำเสมอ (Regularity)		
คะแนน	สัญลักษณ์	คำอธิบาย
+0.04	A	สมบูรณ์แบบ
+0.03	B	ดีมาก
+0.01	C	ดี
0.00	D	ปานกลาง
-0.02	E	เฉยๆ
-0.04	F	แย่

5.3 หาค่าเวลามาตรฐาน (Standard Time: ST) โดย $\text{เวลามาตรฐาน (ST)} = \text{เวลาปกติ (NT)} + \text{ค่าเผื่อ (Allowance : A)}$ (3)

ค่าเผื่อกำหนดเป็น 2 ลักษณะคือ ค่าเผื่อส่วนบุคคล โดยทั่วไปกำหนดร้อยละ 5 และค่าเผื่อเพื่อความเมื่อยล้า ร้อยละ 10 รวมร้อยละ 15

3. ผลการศึกษา

ผลการวิจัยสามารถอธิบายผลตามขั้นตอนการวิจัยทั้ง 5 ขั้นตอน ดังนี้

1. การเลือกงาน

การเลือกงานเพื่อใช้ประกอบการทำวิจัยในครั้งนี้ ได้ทำการคัดเลือกผลิตภัณฑ์และกระบวนการสำหรับการวิจัยจากผลิตภัณฑ์ที่มี

ยอดขายสูงสุด และมีกระบวนการผลิตครบทุกกระบวนการตั้งแต่ เป่า พิมพ์ ตัด และบรรจุ เพื่อใช้สำหรับปรับปรุงการผลิต ผลการคัดเลือกพบว่าผลิตภัณฑ์ที่มียอดขายสูงสุด คือ ถุงบุญถาวร ซึ่งเป็นถุงแบบหิ้ว ขนาด 8x12 (กว้างxยาว : นิ้ว) และกระบวนการที่มีกำลังการผลิตน้อยที่สุดคือกระบวนการพิมพ์ หรือเป็นกระบวนการที่เป็นคอขวดของการผลิต ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงกำลังการผลิตในแต่ละกระบวนการ (กิโลกรัม/วัน)

กระบวนการ	เป่า	พิมพ์	ตัด	บรรจุ
กำลังการผลิต	800	600	1,000	840

นอกจากนี้แล้วยังทำการศึกษาการทำงานในกระบวนการพิมพ์พบว่ามีความที่ไม่ก่อให้เกิดคุณค่า (Non Value Activities) คือ เวลาการเปลี่ยนแม่พิมพ์

2. การศึกษาสภาพปัจจุบัน

การศึกษาสภาพปัจจุบันของการเปลี่ยนและติดตั้งแม่พิมพ์ใหม่โดยทำการศึกษาการทำงาน (Work Study) พร้อมบันทึกการเปลี่ยนและติดตั้งแม่พิมพ์ผ่านด้วยแผนภูมิการปฏิบัติงาน คน-เครื่องจักร โดยมีรายละเอียดกระบวนการดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แผนภูมิการปฏิบัติงาน คน-เครื่องจักร

ลำดับ	รายละเอียด	เวลาเฉลี่ย (นาที)	
		คน	เครื่องจักร
1	เดินเพื่อไปหยิบแม่พิมพ์	3.46	ว่าง
2	ตรวจสอบแม่พิมพ์	2.57	ว่าง
3	ทำความสะอาดแม่พิมพ์	4.55	ว่าง

ตารางที่ 3 (ต่อ)

ลำดับ	รายละเอียด	เวลาเฉลี่ย (นาที)	
		คน	เครื่องจักร
4	หาลูกยาง	2.38	ว่าง
5	ทำความสะอาดลูกยาง	3.52	ว่าง
6	หาบล็อก	5.56	ว่าง
7	นำแม่พิมพ์มาติดตั้ง	7.40	7.40
8	นำลูกยางและบล็อกติดตั้ง	6.50	6.50
9	เบกสีและทินเนอร์	2.53	ว่าง
10	เทสีลงเครื่องพิมพ์	1.13	1.13
11	เก็บสี	3.63	3.63
12	เปิดเครื่องพิมพ์	0.46	0.46
13	ลองพิมพ์	33.30	33.30
	รวม	76.99	52.42

จากการศึกษาเวลาการทำงานตามแผนภูมิการปฏิบัติงาน คน-เครื่องจักร มีทั้งสิ้น 13 ขั้นตอน พบว่ามี 6 ขั้นตอน ที่คนและเครื่องจักรปฏิบัติงานพร้อมกันหรือปฏิบัติงานไปด้วยกัน ไม่เกิดการรอคอยระหว่างกัน และมี 7 ขั้นตอน ที่คนปฏิบัติงาน ส่วนเครื่องจักรว่างงาน หรือเกิดการรอคอยของเครื่องจักรขณะที่คนกำลังปฏิบัติงานอยู่ ซึ่งเป็นขั้นตอนที่คนปฏิบัติงานอย่างเดียว ได้แก่ขั้นตอนที่ 1 - 6 และขั้นตอนที่ 9 การเบกสี ดังนั้นเองหากสามารถวิเคราะห์ความสำคัญหรือความจำเป็นของขั้นตอนดังกล่าว จะทำให้สามารถปรับปรุงการติดตั้งแม่พิมพ์ได้

3. การศึกษาและวิเคราะห์เพื่อหาแนว

ทางการปรับปรุงการเปลี่ยนแม่พิมพ์ จากตารางที่ 3 แผนภูมิการปฏิบัติงาน คน-เครื่องจักร พบว่ามีกระบวนการที่เครื่องจักรว่างคือรอพนักงานปฏิบัติงาน จำนวน 7 ขั้นตอน คือ ลำดับที่ 1-6 และ 9 มีรายละเอียดการวิเคราะห์

เพื่อปรับปรุง โดยใช้หลักการตั้งคำถาม 5W1H
ดังตารางที่ 4-10

ตารางที่ 4 ขั้นตอนที่ 1 : เดินเพื่อไปหยิบแม่พิมพ์

	ตอบ	ทำไม	ตอบ
ทำอะไร (What)	เดินไปหยิบ แม่พิมพ์	ทำไมต้อง เดินไปหยิบ	แม่พิมพ์ อยู่ห่างจาก พื้นที่ ปฏิบัติงาน
ทำที่ไหน (Where)	ชั้นวาง อุปกรณ์ ที่แผนก พิมพ์ลาย	ทำไมต้อง เป็นที่ชั้น วางอุปกรณ์ แผนก พิมพ์ลาย	สะดวกต่อ การจัดเก็บ
ทำเมื่อไร (When)	ตอนปรับตั้ง เครื่องจักร	ทำไมต้อง หยิบตอน ปรับตั้ง เครื่องจักร	ไม่ได้เตรียม ไว้ก่อน การปรับตั้ง
ใคร (Who)	พนักงาน ติดตั้ง เครื่องจักร	ทำไมต้อง เป็นคนนี้	มีความรู้ ความ ชำนาญ ในการหา แม่พิมพ์
ทำอย่างไร (How)	เดินไปหยิบ และค้นหา แม่พิมพ์	ทำไมต้อง ค้นหา	ชั้นวาง อุปกรณ์ ไม่มี ความเป็น ระเบียบ

ตารางที่ 5 ขั้นตอนที่ 2 : การตรวจสอบแม่พิมพ์

	ตอบ	ทำไม	ตอบ
ทำอะไร (What)	ตรวจสอบ สภาพความ พร้อมของ แม่พิมพ์	ทำไมต้อง ตรวจสอบ การปฏิบัติ งาน	ภายหลัง การปฏิบัติ งานไม่มีการ ตรวจสอบ ความพร้อม
ทำที่ไหน (Where)	บริเวณ เครื่อง พิมพ์ลาย	ทำไมต้อง เป็นบริเวณ เครื่อง พิมพ์ลาย	สะดวกต่อ การติดตั้ง แม่พิมพ์
ทำเมื่อไร (When)	ก่อนการ ติดตั้ง แม่พิมพ์	ทำไมต้อง ตรวจสอบ	ไม่มีการ ตรวจสอบ ภายหลัง ปฏิบัติงาน เสร็จ
ใคร (Who)	พนักงาน ประจำ เครื่อง	ทำไม ต้องเป็น พนักงาน ประจำ เครื่อง	มีความ ชำนาญ ในการ ตรวจสอบ
ทำอย่างไร (How)	ประเมิน ด้วยสายตา	ทำไมต้อง ใช้การ ประเมิน ด้วยสายตา	เนื่องจาก ผู้ประเมิน มีความ ชำนาญ

ตารางที่ 6 ขั้นตอนที่ 3 : ทำความสะอาดแม่พิมพ์

	ตอบ	ทำไม	ตอบ
ทำอะไร (What)	ทำความสะอาดแม่พิมพ์	ทำไมต้องทำความสะอาดแม่พิมพ์	ภายหลังการปฏิบัติงานไม่มีการทำความสะอาดแม่พิมพ์
ทำที่ไหน (Where)	บริเวณเครื่องพิมพ์ลาย	ทำไมต้องเป็นบริเวณเครื่องพิมพ์ลาย	สะดวกต่อการติดตั้งแม่พิมพ์
ทำเมื่อไร (When)	หลังจากทำการตรวจสอบแม่พิมพ์เสร็จ	ต้องทำหลังจากการตรวจสอบแม่พิมพ์	เป็นขั้นตอนต่อเนื่องจากการตรวจสอบ
ทำอย่างไร (How)	ใช้ผ้าชุบน้ำมันก๊าสเช็ดทำความสะอาดสีที่ติดแม่พิมพ์	ทำไมต้องใช้น้ำมันก๊าสเช็ดสีที่ติดอยู่ที่แม่พิมพ์	หากมีสีเก่าติดอยู่จะทำให้ชิ้นงานใหม่ไม่มีคุณภาพ

ตารางที่ 7 ขั้นตอนที่ 4 : หาลูกยาง

	ตอบ	ทำไม	ตอบ
ทำอะไร (What)	หาลูกยาง	ทำไมต้องค้นหาลูกยาง	ลูกยางไม่ได้วางอยู่ในตำแหน่งที่แน่นอน
ทำที่ไหน (Where)	ชั้นวางอุปกรณ์ที่สำนักงาน	ทำไมต้องหาลูกยางที่สำนักงาน	เป็นชิ้นส่วนในการจัดเก็บเฉพาะ
ทำเมื่อไร (When)	ก่อนการติดตั้งแม่พิมพ์	ทำไมต้องหาลูกยางขณะติดตั้งแม่พิมพ์	ไม่มีการเตรียมลูกยางก่อนการปรับตั้งเครื่องจักร
ใครทำ (Who)	พนักงานประจำเครื่อง	ทำไมต้องเป็นพนักงานประจำเครื่อง	มีความชำนาญในการเบิกลูกยาง
ทำอย่างไร (How)	เขียนใบเบิกและเบิกลูกยางก่อนใช้งาน	มีการตรวจสอบสต็อกลูกยางสม่ำเสมอ	ควบคุมปริมาณการใช้ลูกยาง

ตารางที่ 8 ขั้นตอนที่ 5 : ทำความสะอาดลูกยาง

	ตอบ	ทำไม	ตอบ
ทำอะไร (What)	เช็ด ทำความสะอาด ลูกยาง	ทำไม ต้องเช็ด ทำความสะอาด ลูกยาง	เพื่อป้องกัน ปัญหาด้าน คุณภาพ
ทำที่ไหน (Where)	บริเวณ เครื่อง พิมพ์ลาย	ทำไมต้อง เป็นบริเวณ เครื่อง พิมพ์ลาย	สะดวกต่อ การติดตั้ง ลูกยาง
ทำเมื่อไร (When)	ก่อนจะ ทำการ ติดตั้ง ลูกยาง ที่เครื่อง พิมพ์ลาย	ทำไมไม่ ทำความสะอาด ล่วงหน้า นั้น	ไม่มีการ ทำความสะอาด ล่วงหน้า
ใครทำ (Who)	พนักงาน ประจำ เครื่อง	ทำไม ต้องเป็น พนักงาน ประจำ เครื่อง	มีความ ชำนาญ ในการ ทำความสะอาด
ทำอย่างไร (How)	เช็ด ทำความสะอาด ด้วยผ้า	เช็ด ทำความสะอาด	ลูกยาง ที่สะอาด จะทำให้ งานมี คุณภาพ

ตารางที่ 9 ขั้นตอนที่ 6 : หาบล้อยก

	ตอบ	ทำไม	ตอบ
ทำอะไร (What)	หาบล้อยก	ทำไม ต้องหา บล็อก	ไม่มีการจัด หมวดหมู่ บล็อก ที่ชัดเจน
ทำที่ไหน (Where)	ชั้นวาง อุปกรณ์ ที่แผนก พิมพ์ลาย	ทำไม ต้องหา บล็อกที่ ชั้นวาง	จัดเก็บไว้ที่ ชั้นวาง ไม่เป็น หมวดหมู่
ทำเมื่อไร (When)	ก่อนการ ติดตั้ง แม่พิมพ์	ทำไม ขณะที่ เครื่องพิมพ์ ทำงานอยู่ ได้หรือไม่	สามารถ ทำได้
ใครทำ (Who)	พนักงาน ประจำ เครื่อง	ทำไมต้อง ใช้พนักงาน ประจำ เครื่อง	มีความ ชำนาญ ในการ ค้นหา
ทำอย่างไร (How)	เบิกและ ค้นหา บล็อกที่ ต้องการ	ทำไมต้อง ค้นหา	ไม่มีการจัด หมวดหมู่ ที่เหมาะสม

ตารางที่ 10 ขั้นตอนที่ 7 : เบกสีและทินเนอร์

	ตอบ	ทำไม	ตอบ
ทำอะไร (What)	เบกสีและ ทินเนอร์	ทำไมต้อง เบกสีและ ทินเนอร์	สีและ ทินเนอร์ ไม่ได้อยู่ใน พื้นที่ ปฏิบัติงาน
ทำที่ไหน (Where)	ชั้นวาง อุปกรณ์ ที่แผนก พิมพ์ลาย	ทำไมต้อง เป็นที่ชั้น วางอุปกรณ์ แผนก พิมพ์ลาย	สะดวก ต่อการ ปฏิบัติงาน
ทำเมื่อไร (When)	ภายหลัง การติดตั้ง แม่พิมพ์ และบล็อก เสร็จ	ทำไมไม่จัด เตรียมก่อน เริ่มติดตั้ง แม่พิมพ์	สามารถ จัดเตรียม ไว้ก่อน ล่วงหน้าได้
ใครทำ (Who)	พนักงาน ประจำ เครื่อง	ทำไมต้อง พนักงาน ประจำ เครื่อง	เพราะมี ประสบ การณ์
ทำอย่างไร (How)	เบกสีตาม ใบสั่งงาน	ทำไมต้อง เบกตาม ใบสั่งงาน	เพื่อการ เบิกจ่าย ที่มีขั้นตอน และระบบ

จากตารางที่ 4-10 พบว่าขั้นตอน ทั้ง 7 ได้แก่ 1) การหยิบแม่พิมพ์ 2) ตรวจสอบแม่พิมพ์ 3) ทำความสะอาดแม่พิมพ์ 4) หาลูกยาง 5) เช็ดลูกยาง 6) หาบบล็อก 7)เบกสีและทินเนอร์ เป็นขั้นตอนไม่ก่อให้เกิดคุณค่า แต่จำเป็นต้องทำจากการตั้งคำถามด้วยหลักการ 5W1H ผลการตอบคำถามสามารถสรุปได้ว่า ขั้นตอนดังกล่าว

ทั้ง 7 สามารถดำเนินการก่อนล่วงหน้าก่อนการเปลี่ยนแม่พิมพ์ใหม่ หรือระหว่างดำเนินการผลิตงานอื่นเพื่อให้ไม่เสียเวลารอคอย ภายหลังการเปลี่ยนแม่พิมพ์คอย เพื่อให้การปฏิบัติงานของเครื่องจักรไม่เกิดการว่างหรือรอคอย การปฏิบัติงานของพนักงาน

4. การปรับปรุงกระบวนการ

ภายหลังการวิเคราะห์กระบวนการผ่าน 5W1H นั้น ได้ทำการปรับปรุงตามหลักการ ECRS จากตารางที่ 4-10 พบว่าเมื่อถามคำถาม เมื่อไหร่ (When) พบว่าขั้นตอนต่างๆ ตั้งแต่ การหยิบแม่พิมพ์ ตรวจสอบแม่พิมพ์ ทำความสะอาดแม่พิมพ์ หาลูกยาง เช็ดลูกยาง หาบบล็อก เบกสีและทินเนอร์ สามารถดำเนินการก่อนล่วงหน้า โดยการสลับขั้นตอน (Rearrange) ให้ขั้นตอนดังกล่าวดำเนินการเตรียมงานไว้ก่อนล่วงหน้าเพื่อมิให้เครื่องจักรว่างขณะปฏิบัติงานดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 ขั้นตอนการปฏิบัติงานหลังการปรับปรุง

ลำดับ	รายละเอียด	เวลาเฉลี่ย (นาที)	
		คน	เครื่องจักร
1	นำแม่พิมพ์มาติดตั้ง	7.40	7.40
2	นำลูกยางและบล็อกติดตั้ง	6.50	6.50
3	เทสีลงเครื่องพิมพ์	1.13	1.13
4	เก็บสี	3.63	3.63
5	เปิดเครื่องพิมพ์	0.46	0.46
6	ทดลองพิมพ์	33.30	33.30
	รวม	52.42	52.42

5. การหาเวลามาตรฐานในการปฏิบัติงาน
การหาเวลามาตรฐาน โดยทำการจับเวลา
ภายหลังการปรับปรุงกระบวนการติดตั้งแม่พิมพ์
โดยการศึกษาเวลา (Time Study) มี 4 ขั้นตอน
ดังนี้

1. การจับเวลาเบื้องต้น

เป็นการจับเวลาในแต่ละกระบวนการ
ทำงานจำนวน 30 ครั้ง ในแต่ละขั้นตอน ได้ผล
ของการจับเวลา ดังตารางที่ 12 – 17 ดังนี้

ตารางที่ 12 เวลากระบวนการนำแม่พิมพ์มา
ติดตั้ง (หน่วย : นาที)

7.46	7.42	7.37	7.35	7.48	7.42
7.36	7.44	7.46	7.38	7.36	7.44
7.40	7.41	7.39	7.37	7.41	7.40
7.36	7.42	7.37	7.40	7.39	7.38
7.45	7.36	7.38	7.41	7.38	7.39

ตารางที่ 13 เวลานำลูกยางและบล็อกมาติดตั้ง
(หน่วย : นาที)

6.48	6.46	6.52	6.51	6.49	6.50
6.47	6.46	6.52	6.53	6.50	6.46
6.50	6.48	6.52	6.54	6.48	6.48
6.51	6.52	6.48	6.51	6.52	6.51
6.52	6.48	6.48	6.50	6.53	6.54

ตารางที่ 14 เวลาเทสียงแม่พิมพ์ (หน่วย : นาที)

1.08	1.09	1.18	1.09	1.09	1.10
1.11	1.11	1.11	1.12	1.12	1.13
1.14	1.15	1.15	1.15	1.14	1.17
1.10	1.10	1.11	1.11	1.19	1.21
1.13	1.13	1.09	1.14	1.17	1.19

ตารางที่ 15 เวลาเก็บสีย (หน่วย : นาที)

3.60	3.60	3.60	3.60	3.61	3.61
3.62	3.62	3.63	3.63	3.63	3.63
3.64	3.64	3.64	3.65	3.65	3.65
3.61	3.62	3.62	3.62	3.65	3.66
3.64	3.64	3.64	3.64	3.65	3.66

ตารางที่ 16 เวลาเปิดเครื่อง (หน่วย : นาที)

0.43	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44
0.45	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46
0.47	0.47	0.47	0.47	0.48	0.48
0.45	0.45	0.45	0.45	0.48	0.48
0.46	0.46	0.46	0.47	0.48	0.49

ตารางที่ 17 เวลาเปิดเครื่อง (หน่วย : นาที)

33.28	33.27	33.27	33.28	33.28	33.28
33.29	33.31	33.32	33.30	33.30	33.30
33.31	33.30	33.32	33.30	33.32	33.32
33.29	33.31	33.29	33.31	33.32	33.27
33.31	33.33	33.31	33.33	33.29	33.29

2. การหาจำนวนครั้งการจับเวลา ดังนี้

จากข้อมูลการศึกษาและปรับปรุง
การทำงานพร้อมกับจับเวลาเบื้องต้นในแต่ละ
ขั้นตอนภายหลังการปรับปรุง จำนวน 30 ครั้ง
เพื่อหาจำนวนครั้งการจับเวลา ตามสมการที่ 1

โดยการแทนค่าเวลาในแต่ละชุดข้อมูล
ของแต่ละขั้นตอนเพื่อหาจำนวนครั้งการจับเวลา
โดยแสดงรายละเอียดการแทนค่าลงในสมการ
ที่ 1 ในขั้นตอนการนำแม่พิมพ์มาติดตั้ง เวลา
ดังแสดงในตารางที่ 12

$$N = \left[\frac{40 \sqrt{n \sum x^2 - (\sum x)^2}}{\sum x} \right]^2$$

$$n = 30 \text{ ครั้ง}$$

$$\sum x = 222.01$$

$$(\sum x)^2 = 49,288.44$$

$$\sum x^2 = 1,642.982$$

แทนค่าลงในสมการ

$$N = \left[\frac{40 \sqrt{30(1,642.982 - 49,288.44)}{222.01} \right]^2$$

$$= \left[\frac{40 \sqrt{49,289.47 - 49,288.44}}{222.01} \right]^2$$

$$= \left[\frac{40 \sqrt{1.03}}{222.01} \right]^2$$

$$= \left[\frac{40 \times 1.014}{222.01} \right]^2$$

$$= 0.333 \text{ ครั้ง หรือ คิดเป็นจำนวน 1 ครั้ง}$$

ผลการแทนค่าชุดข้อมูลเวลาในสมการที่ 1 ในขั้นตอนอื่นๆ สามารถสรุปได้ดัง ตารางที่ 18

ตารางที่ 18 จำนวนครั้งการจับเวลาจากสมการ

ขั้นตอน	จำนวนครั้ง การจับเวลา จากสมการ
นำแม่พิมพ์มาติดตั้ง	1
นำลูกยางและบล็อกมาติดตั้ง	1
เทสีลงเครื่องพิมพ์	1
เก็บสี	1
เปิดเครื่องพิมพ์	1
ทดลองพิมพ์	1

จำนวนครั้งการจับเวลา คือ 1 ครั้ง ดังนั้นเองทุกขั้นตอนมีจำนวนชุดข้อมูลเวลาเริ่มต้น 30 ชุด

จากตารางที่ 18 พบว่า ทุกขั้นตอนที่นำค่าข้อมูลเวลาที่ทำการจับเวลา ซึ่งมีจำนวน 30 ชุดข้อมูล แทนค่าในสมการที่ 1 พบว่า จึงไม่จำเป็นต้องจับเวลาเพิ่ม อย่างไรก็ตามเพื่อให้แน่ใจว่าค่าเฉลี่ยของชุดข้อมูลในแต่ละขั้นตอนสามารถเป็นตัวแทนของชุดข้อมูลดังกล่าวได้ จึงได้ทำการตรวจสอบรูปแบบการกระจายตัวของชุดข้อมูลเพื่อทดสอบรูปแบบการกระจายตัวแบบปกติด้วยโปรแกรมมินิแทป (Minitab) เพื่อยืนยันลักษณะการกระจายตัวว่าเป็นแบบปกติหรือไม่ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

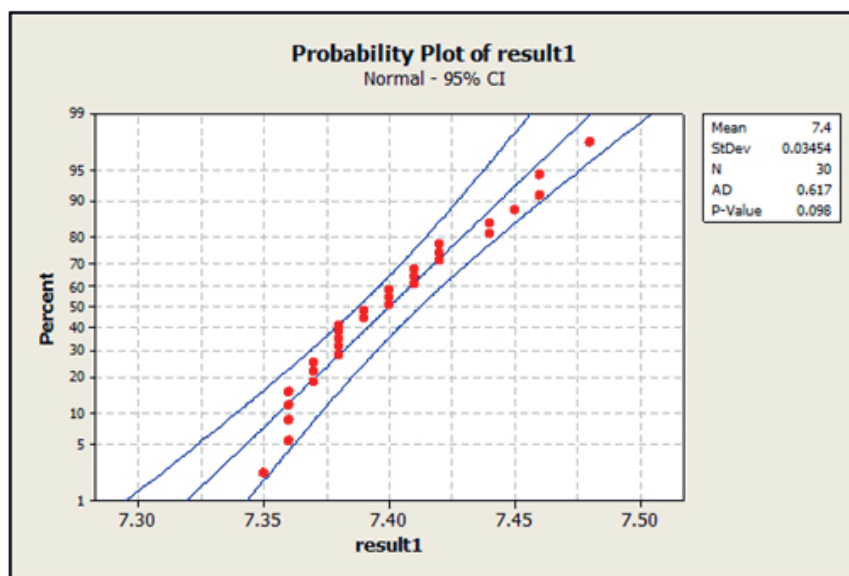
การตรวจสอบชุดข้อมูลจากตารางการจับเวลาของขั้นตอนต่างๆ ตามตารางที่ 12-17 โดยการตรวจสอบค่า P-Value เทียบกับค่าความผิดพลาดที่ 0.05 หาก P-Value > 0.05 ยอมรับ H0 ปฏิเสธ H1

กำหนดให้

H₀ คือ ข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ

H₁ คือ ข้อมูลมีการกระจายไม่ใช่แบบปกติ

ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ผ่านการตรวจสอบรูปแบบการกระจายตัวแบบปกติสามารถเป็นตัวแทนของชุดข้อมูลเพื่อนำไปใช้สำหรับหาค่าเวลามาตรฐานต่อไป



รูปที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเวลาการนำแม่พิมพ์มาติดตั้ง

ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของข้อมูล จากรูปที่ 4 ขั้นตอนนำแม่พิมพ์มาติดตั้งพบว่าข้อมูลมีค่าเฉลี่ย 7.4 นาที่ และมีค่า P-Value = 0.098 ซึ่งมากกว่า 0.05

ดังนั้น ยอมรับ H_0 ปฏิเสธ H_1 คือ ข้อมูลมีการกระจายตัวเป็นแบบปกติ

ทั้งนี้ในส่วนการตรวจสอบการกระจายตัวของข้อมูลของขั้นตอนอื่นๆ ได้สรุปเป็นตารางค่า P-Value ดังตารางที่ 19 ค่า P-Value จากโปรแกรมมินิแทปเพื่อประกอบการตรวจสอบสมมติฐาน

ตารางที่ 19 ค่า P-Value ของชุดข้อมูลในแต่ละขั้นตอน

ขั้นตอน	ค่า P-Value	ค่าเฉลี่ย (นาที่)
นำแม่พิมพ์มาติดตั้ง	0.098	7.40
นำลูกยางและบล็อกติดตั้ง	0.068	6.50
เทสีลงเครื่องพิมพ์	0.098	1.13
เก็บสี	0.083	3.63
เปิดเครื่องพิมพ์	0.066	0.46
ทดลองพิมพ์	0.128	33.30

จากตารางที่ 19 ค่า P-Value พบว่าทุกขั้นตอน มีค่า P-Value > 0.05 ดังนั้นจึง ยอมรับ H_0 ปฏิเสธ H_1 สามารถสรุปได้ว่าทุกขั้นตอนมีชุดข้อมูลที่มีการกระจายตัวเป็นแบบปกติ ที่ความผิดพลาด 0.05 ทำให้สามารถแน่ใจว่าค่าเฉลี่ยของข้อมูลสามารถเป็นตัวแทนของกลุ่มได้

3. การหาเวลามาตรฐาน

การหาค่าเวลามาตรฐานสามารถหาได้ 2 ขั้นตอน คือ 1. การหาค่าเวลาปกติ และ 2. หาค่าเวลามาตรฐาน ต่อไป

การหาเวลาปกติ (Normal Time : NT) โดยสามารถหาค่าเวลาปกติได้จาก การปรับค่าเวลาเฉลี่ย ด้วยค่า Rating factor ของ Westing house ผลการประเมินจากปัจจัยทั้ง 4 ด้านได้คะแนน ดังตารางที่ 20

ตารางที่ 20 ผลการประเมินการปฏิบัติงาน

ปัจจัย	ระดับ	คะแนน
ความชำนาญ	B1	+0.11
ความพยายาม	E1	-0.04
สภาพการทำงาน	D	0.00
ความสม่ำเสมอ	C	+0.01
รวม		+ 0.08

$$\begin{aligned}\text{เวลาปกติ (NT)} &= \text{เวลาเฉลี่ย} \times \% \text{Rating} \\ &= 52.42 \times 1.08 \\ &= 56.613 \text{ นาที}\end{aligned}$$

เวลามาตรฐาน (ST) = เวลาปกติ (NT) + ค่าเผื่อ (A)
การกำหนดค่าเผื่อได้ทำการกำหนดเป็น 2 ลักษณะคือ ค่าเผื่อส่วนบุคคล โดยทั่วไปกำหนดร้อยละ 5 และค่าเผื่อเพื่อความเมื่อยล้า ร้อยละ 10 รวมร้อยละ 15

$$\begin{aligned}\text{เวลามาตรฐาน} &= \text{เวลาปกติ} + \text{ค่าเผื่อ} \\ &= 56.613 + (0.15 \times 56.613) \\ &= 56.613 + 8.492 \\ &= 65.105 \text{ นาที}\end{aligned}$$

ดังนั้นเวลามาตรฐานในการติดตั้งแม่พิมพ์ คือ 65.105 นาที

4. สรุปผลการวิจัย

ผลการวิจัยเพื่อหาเวลามาตรฐานในการเปลี่ยนแม่พิมพ์ ในครั้งนี้ได้ทำการศึกษาสภาพการทำงานปัจจุบันพร้อมบันทึกการปฏิบัติด้วยแผนภูมิการทำงาน คน เครื่องจักร พร้อมกับนำหลักการตั้งคำถามด้วย 5W1H เพื่อตั้งคำถามเป็นแนวทางสำหรับการปรับปรุง ภายหลังการปรับปรุง สามารถลดขั้นตอนการดำเนินงานจากเดิม 13 ขั้นตอน เหลือเพียง 6 ขั้นตอน และเวลาการปฏิบัติงานก่อนปรับปรุง 76.99 นาที เหลือ 52.42 นาที ลดลงร้อยละ 31.91 จากนั้นนำกระบวนการหลังปรับปรุงปรับเป็นกระบวนการมาตรฐานและเวลามาตรฐานต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณ ผู้บริหาร บริษัท กรณีศึกษา ในการให้โอกาสผู้วิจัยเข้าไปทำวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Rijiravanich V. Work study : principle and case study. 4th Chulalongkorn University Press. 2548. (In Thai)
- [2] Athikulrat K. Productivity improvement by fundamental of hand motions : a case study of assembly line in an electronics company. RMUTP Research Journal. 2017,11(1):165-176. (In Thai)
- [3] Sangdeun K, Pornsing C, Wattanasangasuk A. Productivity improvement with line balancing technique by genetic algorithm. In proceeding of 7th Nation Conference of Industrial Engineering Network, 2007 Oct 24-26; Petchaburi. 685-692.
- [4] Athikulrat k, Pakpoom P. Application of lean manufacturing system to increase productivity : case study of U.P.S. Industrial Co., Ltd. Journal of Science and Technology. 2017.6(3).13-26. (In Thai)
- [5] Mounmoon K, Kartea N, Chaikumpun M. The standard time study of carton corrugated production : case study ruengchana packing limited partnership. Kasem Bundit Engineering Journal. 2016.6(1): 107-121. (In Thai)

การศึกษาความเป็นไปได้ทางเทคนิคของการใช้ถ่านชาร์จาก กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วเป็นสารดูดซับมลพิษอากาศในอาคาร

มนีรัตน์ องค์กรธนดี^{1*} ทับทิม ชาติสุวรรณ² และอดิศักดิ์ ปัตติยะ³
maneerat.o@msu.ac.th^{1*}, c.thabtim@gmail.com², adisak_pattiya@yahoo.com³

^{1,2} สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

³ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Received: April 17, 2018
Revised: August 20, 2018
Accepted: November 5, 2018

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติกายภาพและเคมีของถ่านชาร์จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วของชีวมวล 2 ชนิด ได้แก่ ชี้อ้อยไม้และไม้กระถินยักษ์ เพื่อใช้ถ่านชาร์เป็นสารดูดซับมลพิษอากาศในอาคาร ทำการทดสอบสมบัติของถ่านชาร์ ได้แก่ ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซโทลูอินซึ่งใช้เป็นตัวแทนมลพิษอินทรีย์ระเหย ค่าไอโอดีน พื้นที่ผิวจำเพาะและรูพรุน หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว และโครงสร้างอสังฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด และเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่ผลิตเชิงพาณิชย์จากกะลามะพร้าวและยูคาลิปตัส ผลการวิเคราะห์ไอโซเทอมพหุคูณพบว่าถ่านชาร์ทั้งสองมีลักษณะการดูดซับดี ถ่านชาร์ไม้กระถินยักษ์ให้ค่าความจุจำเพาะของการดูดซับและเลขยกกำลังพหุคูณใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ ค่าไอโอดีนของถ่านชาร์ชี้อ้อยไม้และไม้กระถินยักษ์เท่ากับ 731 และ 802 มก./กรัม ตามลำดับ โดยถ่านชาร์ไม้กระถินยักษ์มีพื้นที่ผิวจำเพาะและเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนมากกว่าถ่านชาร์ชี้อ้อยไม้ประมาณ 2 เท่า สอดคล้องภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่แสดงให้เห็นรูพรุนของถ่านชาร์ไม้กระถินยักษ์มีลักษณะคล้ายคาลิปปาร์และช่องเปิดใหญ่กว่า หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวบนถ่านชาร์ทั้งสองมีพันธะหมู่เอโรมาติก จากสมบัตินี้ถ่านชาร์ไม้กระถินยักษ์สามารถใช้เป็นสารดูดซับมลพิษอากาศประเภทสารอะโรมาติกได้โดยตรง รวมทั้งการนำถ่านชาร์มาผ่านกระบวนการกระตุ้นผลิตเป็นถ่านกัมมันต์เพื่อปรับปรุงพื้นผิวการดูดซับและเพิ่มหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวให้มีความสามารถในการดูดซับกลิ่นหรือสารมลพิษอากาศประเภทอื่น

คำสำคัญ: ถ่านชาร์ ไพโรไลซิส สารดูดซับ สารอินทรีย์ระเหย การเพิ่มมูลค่า

Technical Feasibility Study of Char from Fast-Pyrolysis as Adsorbent for Removing Indoor Air Pollutant

Maneerat Ongwandee^{1*}, Thabtim Chatsuvan² and Adisak Pattiya³
maneerat.o@msu.ac.th^{1*}, c.thabtim@gmail.com², adisak_pattiya@yahoo.com³

^{1*,2} Environmental Engineering Program, Faculty of Engineering, Mahasarakham University

³ Mechanical Engineering Program, Faculty of Engineering, Mahasarakham University

Received: April 17, 2018
Revised: August 20, 2018
Accepted: November 5, 2018

Abstract

This research was to characterize physical and chemical properties of char obtained from fast pyrolysis of two biomass types, i.e. sawdust and acacia wood, in order to use char as an adsorbent for removal of indoor air pollutants. Studied chars were tested as follows: adsorption isotherm for gaseous toluene used as a representative of a volatile organic compound, iodine number, specific surface area and pore characteristics, functional groups on the surface, and morphology by scanning electron microscopy (SEM). The Freundlich isotherm indicated that both chars provided favorable adsorption isotherms. The acacia-wood char had specific adsorption capacity and Freundlich isotherm exponent closer to the activated carbon. Iodine numbers of the acacia-wood and sawdust chars were 731 and 802 mg/g, respectively. The specific surface area and mean pore size of the acacia-wood char were twice as large as those of the sawdust char. These results agreed with SEM images that showed capillary-like pores and greater open pores found in the acacia-wood char than in the sawdust char. The similar functional group of aromatic bonds was observed on the surfaces of both chars. According to these properties, the acacia-wood char is capable of directly using as an adsorbent for removing aromatic indoor pollutants. Furthermore, improvement of the char properties by activation and addition of particular functional groups on the surfaces can increase the char ability to adsorb odors and other air pollutants.

Keywords: char, pyrolysis, adsorbent, volatile organic compounds, value-added

1. บทนำ

กระบวนการไพโรไลซิสจัดเป็นกระบวนการทางความร้อนแบบหนึ่งที่ใช้ย่อยสลายชีวมวลภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงในรูปแบบต่างๆ โดยไพโรไลซิสแบบเร็วนิยมใช้ในการเปลี่ยนชีวมวลให้เป็นเชื้อเพลิงเหลวที่เรียกว่าไบโอออยล์ (bio-oil) เนื่องจากได้ปริมาณสูงถึง 75% เมื่อเทียบกับไพโรไลซิสแบบกลาง (intermediate) ที่ให้ไบโอออยล์เพียง 50% เงื่อนไขของปฏิกิริยาไพโรไลซิสแบบเร็วจะใช้อุณหภูมิปฏิกิริยาประมาณ 500 องศาเซลเซียส และเวลาดำเนินการไพโรไลซิสสั้นมากประมาณ 1-2 วินาที นอกเหนือจากผลิตภัณฑ์หลักที่ได้คือไบโอออยล์แล้วยังได้ผลิตภัณฑ์รองอื่น ได้แก่ แก๊ส 13% และถ่านชาร์ 12% [1] ในปัจจุบันแก๊สและถ่านชาร์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วถูกนำไปใช้ประโยชน์เป็นเชื้อเพลิงสำหรับให้ความร้อนในขั้นตอนการบ่อนชีวมวลที่ต้องทำให้แห้งเท่านั้น ยังไม่มีการวิจัยเพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มให้แก่ผลิตภัณฑ์รองแต่อย่างใด

ปัจจุบันการจัดการคุณภาพอากาศในอาคารได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากคนชั้นกลางส่วนใหญ่ใช้เวลามากกว่า 87% ของแต่ละวันภายในอาคาร [2] และคุณภาพอากาศที่ไม่ดีก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพของผู้อาศัยหรือทำงานในอาคาร ซึ่งองค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมประเทศสหรัฐอเมริกา (US Environmental Protection Agency, US EPA) กำหนดให้คุณภาพอากาศในอาคารที่ไม่ดีเป็นความเสี่ยง 1 ใน 5 อันดับแรกของความเสี่ยงทางสุขภาพจากสิ่งแวดล้อม [3] งานวิจัยหลายบทความระบุตรงกันว่า กลุ่มอาการป่วยเหตุอาคาร (sick building syndromes, SBS) มีความสัมพันธ์กับสารอินทรีย์ระเหย (volatile organic compounds, VOCs) ที่ตรวจพบในอาคารอย่าง

ชัดเจน แม้ว่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยที่ตรวจพบอยู่ในระดับต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานกำหนดโดยหน่วยงานด้านอาชีวอนามัยก็ตาม [4-5]

การควบคุมหรือกำจัดสารมลพิษอากาศในอาคารประกอบด้วย 3 หลักการ ได้แก่ การควบคุมที่แหล่งกำเนิดมลพิษ การระบายอากาศ และการทำความสะอาดอากาศ [6] โดยหลักการสุดท้ายนี้มีการใช้เทคนิคต่างๆ เพื่อทำความสะอาดอากาศที่ปนเปื้อนมลพิษ เช่น เครื่องฟอกอากาศดักจับฝุ่นละอองขนาดเล็ก หรือถ่านกัมมันต์ (activated carbon) กำจัดกลิ่นหรือสารอินทรีย์ระเหยต่างๆ เช่น สารแอโรมาติก (aromatics) เป็นต้น จากการศึกษาที่ผ่านมาด้วยแบบสอบถามพบว่า เรื่องกลิ่นและความชื้นเป็นปัญหาที่ผู้อาศัยในคอนโดมิเนียมตอบมากที่สุด จึงนำไปสู่การออกแบบผลิตภัณฑ์ของตกแต่งด้วยถ่านไม้ที่สามารถดูดกลิ่นและความชื้นได้ อย่างไรก็ตามในงานวิจัยดังกล่าวใช้ถ่านไม้อัดแท่งมาดัดแปลงสร้างผลิตภัณฑ์ดูดซับกลิ่น ซึ่งเน้นงานออกแบบเป็นหลักโดยไม่ได้มีการทดสอบความสามารถในการดูดซับของผลิตภัณฑ์ที่ออกแบบมา [7]

ดังนั้นงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาความเป็นไปได้ในการเพิ่มมูลค่าของถ่านชาร์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วมาใช้เป็นสารดูดซับมลพิษอากาศในอาคารประเภทสารอินทรีย์ระเหย โดยเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสารมลพิษกับถ่านกัมมันต์ที่ผลิตเชิงพาณิชย์ รวมทั้งศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของถ่านชาร์เพื่อเสนอแนวทางการประยุกต์ใช้ถ่านชาร์

2. วิธีการทดลอง

2.1 ถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์ที่ศึกษา

ถ่านชาร์เป็นผลิตภัณฑ์รองจากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วเพื่อผลิต

ไบโอออยล์ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบฟอง (bubbling fluidized bed reactor) ของหน่วยวิจัยพลังงานชีวภาพและทรัพยากรหมุนเวียน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ขนาดห้องปฏิบัติการที่มีอัตราป้อนชีวมวล 300 กรัม/ชั่วโมง โดยใช้อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิคงอยู่ของไฮโดรไลซิสก่อนการควบแน่น และอุณหภูมิของถ่านหลังทำปฏิกิริยาก็คือ 420 องศาเซลเซียส ในงานวิจัยนี้ศึกษาถ่านชาร์ที่ได้จากชีวมวล 2 ชนิด ได้แก่ ขี้เลื่อยไม้ (P sawdust) เป็นของเหลือทิ้งจากโรงเลื่อย และไม้กระถินยักษ์ (Pacacia) สมบัติของชีวมวลแสดงสรุปในตารางที่ 1 ส่วนถ่านกัมมันต์ที่ผลิตเชิงพาณิชย์ได้จากบริษัทจัดจำหน่ายในประเทศไทย จำนวน 2 ชนิด ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าว (C coconut shell) และจากไม้ยูคาลิปตัส (C eucalyptus) ด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ (physical activation) โดยถ่านทั้ง 4 ชนิดเป็นผงสีดำ ขนาดอยู่ในช่วง 70-200 ไมครอน

ตารางที่ 1 สมบัติของชีวมวลที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว

ลักษณะสมบัติ*	ปริมาณ (%)	
	ขี้เลื่อยไม้	ไม้กระถินยักษ์
สารระเหย	82.9	79.1
คาร์บอนคงตัว	10	18.5
เถ้า	7.1	2.4

* ทดสอบที่สภาวะแห้ง

2.2 การทดสอบไอโซเทอมการดูดซับก๊าซโทลูอิน

งานวิจัยนี้เลือกโทลูอิน (toluene) เป็นตัวแทนสารมลพิษอินทรีย์ระเหยเพราะโทลูอินมักตรวจพบในอากาศภายในอาคารทั่วไปด้วยความ

เข้มข้นสูง ในอาคารสำนักงานของประเทศไทย ตรวจพบโทลูอินในปริมาณสูงถึง 54% ของปริมาณสารอินทรีย์ระเหย 13 ชนิดที่ตรวจวัด [8]

ขั้นตอนการทดสอบทำโดยการเตรียมก๊าซโทลูอินจากของเหลวโทลูอิน บริสุทธิ์ (Merck KGaA, Germany) ซึ่งปล่อยให้ระเหยในขวดแก้วขนาด 10 มล. จนได้ความดันไออิ่มตัว (saturated vapor) จากนั้นจึงเจือจางไอระเหยอิ่มตัวลงในขวดแก้วขนาด 20 มล. ซึ่งภายในบรรจุถ่านที่ทดสอบปริมาณ 0.10 กรัม ให้ได้ความเข้มข้น 0.3-0.9 ส่วนในล้านส่วน (ppm) หรือเทียบเท่า 1.1-3.7 มก./ลบ.ม. เขย่าขวดด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 40 นาทีที่อุณหภูมิ 25 ± 2 องศาเซลเซียส จากนั้นดูดก๊าซในขวดไปวิเคราะห์หาปริมาณโทลูอินที่เหลือนับด้วยเครื่อง Gas Chromatography / Flame Ionization Detector, GC-FID (Shimizu Co., Japan) ซึ่งจะได้ความเข้มข้นโทลูอินในขวดที่สภาวะสมดุล สภาวะการทำงานของเครื่อง GC/FID มีดังนี้ คอลัมน์ที่ใช้ Rtx-5ms ขนาด 30 m x 0.25 mm i.d. (Restex Co., USA), อุณหภูมิเตา 40 องศาเซลเซียส คงที่เป็นเวลา 10 นาที อุณหภูมิการฉีด 250 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิตัวตรวจวัด 300 องศาเซลเซียส ปรับเทียบค่าความเข้มข้นด้วยความเข้มข้นโทลูอินมาตรฐาน 4 ค่า

พฤติกรรมการดูดซับก๊าซโทลูอินจะอธิบายด้วยแบบจำลองการดูดซับของฟรอนด์ลิช (Freundlich adsorption isotherm) โดยถือว่าพื้นผิวของวัสดุดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด (heterogeneous surfaces) และพลังงานพื้นผิวของกระบวนการดูดซับมีลักษณะกระจายซับซ้อน การดูดซับของโมเลกุลตัวถูกดูดซับสามารถซ้อนกันเกินกว่าหนึ่งชั้นได้ [9] สมการฟรอนด์ลิชแสดงดังสมการ (1)

$$q_e = K_f C_e^n \quad (1)$$

โดยที่ q_e คือ ความสามารถของถ่านในการดูดซับ โทลูอิน (มก./กรัมของถ่าน), C_e คือ ความเข้มข้นของโทลูอิน ณ สภาวะสมดุล (มก./ลบ.ม.), K_f คือ ค่าคงที่แสดงถึงความจำเพาะของการดูดซับ ที่สภาวะความเข้มข้นค่าใดๆ (specific capacity) และ n คือ ค่ายกกำลังแสดงถึงระดับการสะสม และความหลากหลายของพลังงานในปฏิกิริยาการดูดซับ กรณี $n < 1$ เส้นกราฟไอโซเทอมจะโค้งออก (convex isotherm), $n = 1$ เส้นกราฟไอโซเทอมเป็นเส้นตรง (linear isotherm) และ $n > 1$ เส้นกราฟไอโซเทอมจะโค้งเข้า (concave isotherm)

ข้อมูล q_e และ C_e ที่ได้จากการทดลอง จะใช้ทำนายค่า K_f และ n ในสมการ (1) ด้วยการวิเคราะห์ถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear regression) ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป NLREG[®] ซึ่งจะแตกต่างจากการทำนายค่าพารามิเตอร์ของฟรอนตลิชในงานวิจัยอื่นที่นิยมใช้วิธีแปลงข้อมูลดั้งเดิมที่มีความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้น ให้เป็นความสัมพันธ์เชิงเส้น (linearization) เช่น การแปลงข้อมูลด้วยวิธีฐานสิบ (log-transformation) เพื่อหาพารามิเตอร์การดูดซับ อย่างไรก็ตามการแปลงข้อมูลให้เป็นเชิงเส้นมักมีข้อเสีย เช่น ทำให้เกิดการลำเอียงของข้อมูลที่ถูกละเลย ซึ่งอาจมีผลกระทบต่อค่าพารามิเตอร์ที่ทำนายไม่อยู่ในช่วงความเชื่อมั่น 95% เป็นต้น [10]

2.3 การวิเคราะห์หาค่าไอโอดีน (iodine number)

ทดสอบหาค่าไอโอดีนของถ่านเพื่อประเมินค่าความพรุนของรูขนาดเล็ก (microporosity) โดยใช้วิธีวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D4607-86 [11] โดยนำถ่านอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชม. ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น จากนั้นชั่งถ่าน 1.000 ± 0.050 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มล. นำไปวิเคราะห์หาการดูดซับไอโอดีนของถ่านที่ทดสอบ

2.4 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและรูพรุน

ทดสอบถ่านชาร์เพื่อวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะตามทฤษฎีของเบ็ต (BET, The Brunauer-Emmett-Teller) ด้วยก๊าซไนโตรเจนหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน (pore size diameter) และปริมาตรของรูพรุน (pore volume) ด้วยเครื่องวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นผิว (Bel Sorp mini II, BEL Japan, Inc.)

2.5 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว (functional groups)

ทดสอบถ่านชาร์เพื่อวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อความสามารถในการดูดซับสารมลพิษแต่ละประเภท โดยวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) (Bruker Co., USA)

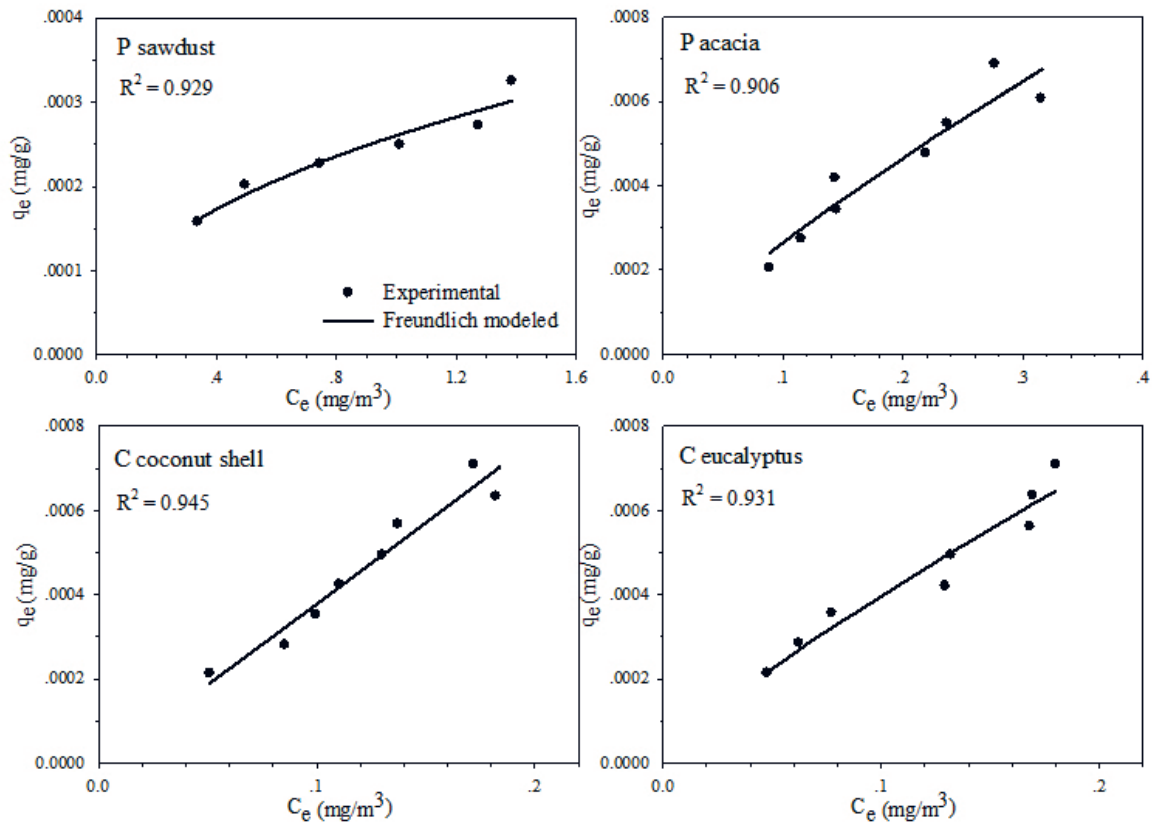
2.6 การศึกษาโครงสร้างอณูฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (scanning electron microscopy, SEM)

ทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างอณูฐานวิทยา และลักษณะรูพรุนของถ่านชาร์ ด้วยเครื่อง scanning electron microscope (JSM-6010, JEOL, Ltd, Japan)

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 ไอโซเทอมการดูดซับโทลูอินและค่าไอโอดีน

รูปที่ 1 แสดงเส้นกราฟไอโซเทอมการดูดซับโทลูอินของถ่านแต่ละชนิดที่ได้จากการทดลองและเส้นกราฟที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองฟรอนตลิชตามสมการ (1)



รูปที่ 1 ไอโซเทอมการดูดซับโพลีอินของถ่านชาร์ไฟโวลีซิสและถ่านกัมมันต์ ที่ได้จากการทดลอง การดูดซับและจากการทำนายด้วยสมการฟรอนด์ลิช

ตารางที่ 2 สรุปค่าพารามิเตอร์ฟรอนด์ลิช K_f และ n ที่ได้จากการทำนายและค่า proportion of variance explained (R^2) จากผลการวิเคราะห์ถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยทุกการทดลองได้ค่า R^2 สูงกว่า 0.90 ซึ่งแสดงถึงการแนบสนิทระหว่างข้อมูลการทดลองกับข้อมูลจากการทำนายด้วยแบบจำลองฟรอนด์ลิช ค่าบวกของ K_f และ n แสดงความคลาดเคลื่อนของพารามิเตอร์จากการทำนายที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ในตารางที่ 2 ยังแสดงค่าไอโอดีนด้วย

ตารางที่ 2 K_f และ n ที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองฟรอนด์ลิช และค่าไอโอดีน

ชนิดถ่าน	K_f	n	R^2	ค่าไอโอดีน**
P sawdust	2.6×10^{-4} $\pm 2 \times 10^{-5}$	0.447	0.929	731
P acacia	1.7×10^{-3} $\pm 8 \times 10^{-4}$	0.815	0.906	802
C coconut shell	3.9×10^{-3} $\pm 2 \times 10^{-3}$	1.019	0.945	972
C eucalyptus	2.7×10^{-3} $\pm 1 \times 10^{-3}$	0.827 ± 0.273	0.931	943

* หน่วยค่า K_f คือ $\text{mg}^{1-n} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{g}^{-1}$

** หน่วยค่าไอโอดีน คือ mg/g carbon

จากรูปที่ 1 และตารางที่ 2 ค่า n ชี้ให้เห็นว่าการดูดซับโทลูอินของถ่านชาร์ทั้งสองชนิดมีลักษณะเส้นกราฟโค้งออก ($n < 1$) จัดว่าเป็นการดูดซับดีหรือ favorable adsorption นั่นคือถ่านชาร์จะสูญเสียความสามารถในการดูดซับ (q^e) ไม่มากเมื่อความเข้มข้นมลพิษขาเข้าลดลง เท่ากับความเข้มข้นมลพิษขาออก ซึ่งตรงข้ามกับ unfavorable adsorption [9] เมื่อพิจารณาความจุจำเพาะของการดูดซับหรือ K_f ของถ่านทั้ง 4 ชนิดที่ค่าความเข้มข้นสารมลพิษโทลูอินใดๆ จะเห็นว่า ถ่านชาร์ซีเลื่อยไม่มีค่าต่ำสุด โดยต่ำกว่าถ่านชนิดอื่นประมาณ 10 เท่า ในขณะที่ถ่านชาร์ไม้กระถินยักษ์มีค่าต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตเชิงพาณิชย์ทั้ง 2 ชนิดประมาณ 1-2 เท่า ทั้งนี้เป็นเพราะถ่านชาร์จากกระบวนการไพโรไลซิสเทียบได้กับการผลิตถ่านกัมมันต์ที่ผ่านเพียงกระบวนการคาร์บอนไนเซชันเท่านั้น ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการกระตุ้นเพื่อเปลี่ยนถ่านชาร์ให้เป็นถ่านกัมมันต์ ดังนั้นจึงยังไม่เกิดการขยายขนาดและการพัฒนารูพรุนอย่างเต็มที่ [12] แต่มีข้อน่าสังเกตว่าถ่านชาร์ไม้กระถินยักษ์มีค่าพารามิเตอร์พรุนดิลิชใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์ที่นำมาทดสอบเปรียบเทียบในขณะที่ถ่านชาร์ซีเลื่อยไม่มีค่าต่ำกว่าค่อนข้างมาก เมื่อพิจารณาสมบัติของชีวมวลตั้งต้นทั้งสองที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิส (ตารางที่ 1) พบว่ามีสมบัติคล้ายคลึงกัน ยกเว้นปริมาณเถ้าของซีเลื่อยไม่มีค่าสูงกว่าไม้กระถินยักษ์ถึง 3 เท่า จึงชี้เป็นนัยว่าโครงสร้างคาร์บอนของถ่านชาร์ที่ได้จากซีเลื่อยไม้จะมีปริมาณน้อยกว่าถ่านชาร์ที่ได้จากไม้กระถินยักษ์เมื่อคือน้ำหนักที่เท่ากัน

จากผลการวิเคราะห์ค่าไอโอดีนพบว่า ได้ผลการทดสอบคล้ายคลึงกับผลการดูดซับโทลูอิน โดยถ่านชาร์ซีเลื่อยไม่มีค่าไอโอดีนต่ำสุดเท่ากับ 731 มก./กรัม ตามด้วยถ่านชาร์ไม้กระถินยักษ์ 802 มก./กรัม ในขณะที่ถ่านกัมมันต์มีค่า

สูงกว่า 900 มก./กรัม เนื่องจากผ่านกระบวนการกระตุ้นแล้วจึงเพิ่มความพรุนของรูขนาดเล็กมากกว่า และเมื่อเปรียบเทียบมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์ประเทศไทย (มอก. 900-2547) [13] สำหรับถ่านชนิดผง อาจจัดได้ว่าถ่านชาร์ไพโรไลซิสเป็นไปตามเกณฑ์ขั้นต่ำที่กำหนดสำหรับค่าไอโอดีนคือ 600 มก./กรัม

3.2 พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาด และปริมาตรรูพรุนของถ่านชาร์

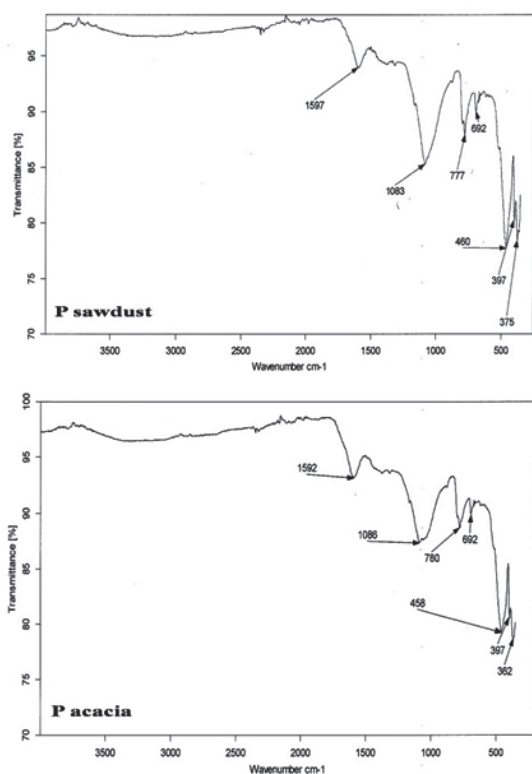
ตารางที่ 3 แสดงพื้นที่ผิวจำเพาะ เส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุน และปริมาตรทั้งหมดของรูพรุนของถ่านชาร์ซีเลื่อยไม้และไม้กระถินยักษ์ ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนว่ากระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วสำหรับชีวมวลทั้งสองก่อให้เกิดลักษณะรูพรุนภายในแตกต่างกัน ถ่านชาร์ซีเลื่อยไม่มีรูพรุนเฉลี่ยขนาดเล็กกว่าของถ่านไม้กระถินยักษ์ถึง 2 เท่า และมีปริมาตรรูพรุนทั้งหมดมากกว่าถ่านชาร์ไม้กระถินยักษ์ อย่างไรก็ตามเมื่อวัดพื้นที่ผิวจำเพาะกลับมีค่าต่ำกว่า ดังนั้นอาจชี้เป็นนัยได้ว่า ช่องเปิดที่เกิดขึ้นในถ่านชาร์ซีเลื่อยไม้มีขนาดเล็กจนบางส่วนไม่มีประสิทธิภาพต่อการดูดซับสารมลพิษได้เท่ากับถ่านชาร์ไม้กระถินยักษ์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการดูดซับโทลูอิน

ตารางที่ 3 พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาด และปริมาตรรูพรุนของถ่านชาร์

ลักษณะสมบัติ	P sawdust	P acacia
พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตร.ม./กรัม)	1.15	2.75
ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด (ลบ.ซม./กรัม)	8.00×10^{-3}	6.43×10^{-3}
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุน (นาโนเมตร)	42.67	115.95

3.3 หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของถ่านชาร์

รูปที่ 2 แสดงแถบสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นรังสีช่วงกลางอินฟราเรดประมาณ 400-4000 ซม.⁻¹ ของถ่านชาร์ทั้ง 2 ชนิดด้วยเครื่อง FT-IR ซึ่งจะเห็นได้ว่าการดูดกลืนรังสีมีลักษณะคล้ายคลึงกันมาก โดยมีการดูดกลืนที่เด่นชัดในช่วง 350-1600 ซม.⁻¹ แต่ไม่พบการดูดกลืนรังสีในช่วงสูงกว่า 2000 ซม.⁻¹



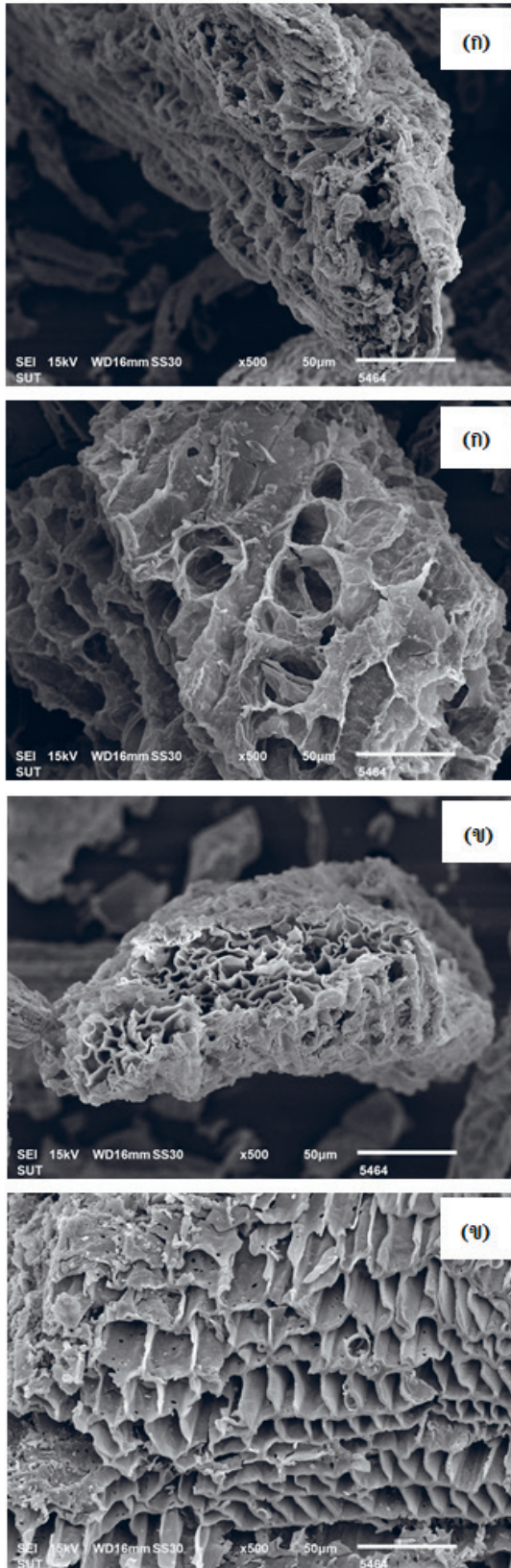
รูปที่ 2 แถบสเปกตรัมการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของถ่านชาร์ไพโรไลซิสด้วยเครื่อง FT-IR

ถ่านชาร์ทั้งสองพบการดูดกลืนรังสีช่วงประมาณ 1590 ซม.⁻¹ และช่วง 690-780 ซม.⁻¹ แสดงถึงพันธะ C=C และ C-H ในหมู่แอโรมาติก [14-15] ถ่านชาร์เป็นผลิตภัณฑ์ที่หลงเหลือจากกระบวนการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวลซึ่งคาดว่าจะอยู่ในรูปของลิกนินเป็นส่วนใหญ่เนื่องจากลิกนินสลายตัวทางความร้อนได้ยากกว่าชีวมวลส่วนที่เป็นเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ลิกนินเป็นสารประกอบพอลิเมอร์มีโครงสร้างพื้นฐานคือวงแหวนอะโรมาติก

การไม่พบแถบสเปกตรัมดูดกลืนรังสีสูงกว่า 2000 ซม.⁻¹ ของถ่านชาร์ทั้งสองแสดงถึงพื้นผิวไม่มีพันธะหมู่แอลเคน ไนไตรล์ และรวมถึงพันธะหมู่กรด เช่น กรดคาร์บอกซิลิก หรือฟีนอล ซึ่งจะดูดซับรังสีสูงกว่า 3000 ซม.⁻¹ [15] เพราะถ่านชาร์ไม่ได้ถูกกระตุ้นต่อทางเคมีด้วยกรดหรือไม่ได้มีการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนชนิดต่างๆ โดยกระบวนการไพโรไลซิสเป็นกระบวนการภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน ถึงแม้ว่าถ่านชาร์ที่เกิดขึ้นมีการสัมผัสกับอากาศในภายหลัง แต่การออกซิเดชันด้วยอากาศในสภาวะบรรยากาศทั่วไปไม่สามารถเพิ่มหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนให้กับพื้นผิวถ่านชาร์ได้

3.4 โครงสร้างอณูพื้นฐานวิทยาของถ่านชาร์

รูปที่ 3(ก) และ (ข) แสดงโครงสร้างอณูพื้นฐานวิทยาของถ่านชาร์ซีเลื้อยไม้และไม่กระถินยักษ์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดกำลังขยาย 500 เท่า ตามลำดับ



รูปที่ 3 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด
ของถ่านชาร์ (ก) ชี้อยู่ไม่ และ
(ข) ไม้กระถินยักษ์

จากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดแสดงให้เห็นรูพรุนหรือช่องเปิดบนพื้นผิวของถ่านชาร์ทั้ง 2 ชนิด โดยถ่านชาร์ไม้กระถินยักษ์พบรูพรุนลักษณะคล้ายกับคาปิลลารี (Capillary) จำนวนมากกว่าที่พบในถ่านชาร์ชี้อยู่ไม่ และรูพรุนยังมีขนาดใหญ่กว่า มีการกระจายที่สม่ำเสมอ ซึ่งอาจช่วยให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะที่มีประโยชน์ต่อการดูดซับมีค่าสูงกว่าดังแสดงในตารางที่ 3 อย่างไรก็ตาม ถ่านชาร์ทั้ง 2 ชนิดยังพบรูพรุนที่ไม่มีช่องเปิดสู่ภายนอกด้วย เนื่องจากยังไม่ได้รับการกระตุ้นเพื่อให้เกิดการพัฒนาช่องเปิดอย่างเต็มที่ และยังมีอนุภาคขนาดเล็กปะปนอยู่ที่ผิวหน้าถ่านชาร์

3.5 แนวทางการนำถ่านชาร์ไปใช้เป็นสารดูดซับ

จากผลการวิเคราะห์สมบัติถ่านชาร์ไพโรไลซิสและผลเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่ขายในท้องตลาด อาจสามารถจำแนกแนวทางการนำถ่านชาร์ไปสร้างเป็นผลิตภัณฑ์การค้าเพื่อใช้เป็นสารดูดซับกลิ่นหรือมลพิษอากาศในอาคารได้ดังนี้

แนวทางที่ 1 การนำถ่านชาร์ไปใช้ในรูปแบบเดิมโดยไม่ต้องมีกระบวนการเพิ่มสมบัติหรือความสามารถในการดูดซับ ซึ่งแนวทางนี้จะเหมาะกับถ่านชาร์ไม้กระถินยักษ์มากกว่าถ่านชาร์ชี้อยู่ไม่เพราะมีความจุในการดูดซับสูงกว่า โดยสามารถนำถ่านชาร์ไม้กระถินยักษ์มาใช้ดูดซับมลพิษอากาศในอาคารประเภทสารอินทรีย์อะโรมาติก เช่น เบนซีน โทลูอิน สไตรีน ไซลีน เป็นต้น หรือสารมลพิษไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว หรือใช้ดูดซับก๊าซมลพิษ อนินทรีย์ เช่น โอโซน เป็นต้น

แนวทางที่ 2 การนำถ่านชาร์มาผ่านกระบวนการเพิ่มสมบัติหรือความสามารถในการดูดซับก่อนนำไปใช้งาน แบ่งตามกระบวนการเพิ่มสมบัติถ่านชาร์ดังนี้

(1) การกระตุ้นถ่านชาร์ให้เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดเหมาะสม มีพื้นผิวในการดูดซับเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์ยังแสดงถึงช่องเปิดที่ยังไม่พัฒนาอย่างเต็มที่และการมีอนุภาคขนาดเล็กปนเปื้อนอยู่ที่พื้นผิว การกระตุ้นอาจทำได้ทั้งการกระตุ้นทางกายภาพหรือทางเคมี ซึ่งจำเป็นต้องมีการศึกษาความเหมาะสมทางเทคนิคต่อไป เนื่องจากมีความเกี่ยวข้องกับชนิดของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวและความเสถียรทางความร้อนของหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นด้วย

(2) การเพิ่มหมู่ฟังก์ชันชนิดต่างๆ บนพื้นผิวเพื่อให้ได้สารดูดซับที่มีความสามารถจำเพาะในการดูดซับสารมลพิษอากาศบางชนิด เช่น การเพิ่มหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนชนิดต่างๆ หรือการเพิ่มหมู่กรดซึ่งจะทำให้สารดูดซับมีพื้นผิวเหมาะสมต่อการดูดซับสารมลพิษต่างกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาทางเทคนิคเพิ่มเติม

นอกจากนี้การเพิ่มมูลค่าของสารดูดซับจากถ่านชาร์ในทางการตลาดควรคำนึงถึงการศึกษาและออกแบบผลิตภัณฑ์ให้มีความเหมาะสมด้านประโยชน์ใช้สอยของกลุ่มลูกค้าเพื่อให้ตอบสนองพฤติกรรมในการใช้งาน และมีความคุ้มค่าของราคาด้วยนอกเหนือจากการพิจารณาเพียงด้านประสิทธิภาพหรือความสามารถในการดูดซับของผลิตภัณฑ์

4. สรุป

งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของถ่านชาร์ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์รองได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วในการสลายชีวมวลให้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิง ผลการวิเคราะห์ไอโซเทอมการดูดซับโทลูอินด้วยแบบจำลองฟรอนดลิช ค่าไอโอดีน พื้นผิวจำเพาะ ขนาดและปริมาตรรูพรุน หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว และภาพถ่ายยอสันฐานวิทยาพบว่า ถ่านชาร์ไม้กระถินยักษ์มีพฤติกรรมการดูดซับและความจุ

ในการดูดซับโทลูอินใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์ที่ผลิตเชิงพาณิชย์มากกว่าถ่านชาร์ซีเลื่อยไม้ ส่วนค่าไอโอดีนของถ่านชาร์ทั้งสองยังต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตเชิงพาณิชย์จากทั้งกะลามะพร้าวและยูคาลิปตัสที่นำมาเปรียบเทียบอาจเนื่องจากถ่านชาร์ยังไม่ผ่านการกระตุ้นให้มีลักษณะเป็นถ่านกัมมันต์ที่เพิ่มความพรุนของรูขนาดเล็ก อย่างไรก็ตามถ่านชาร์ทั้งสองมีค่าไอโอดีนสูงกว่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์ชนิดผงซึ่งกำหนดไว้ที่ 600 มก./กรัม ผลการวิเคราะห์พื้นผิวแสดงให้เห็นว่า ถ่านชาร์ไม้กระถินยักษ์มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่าและมีขนาดรูพรุนไม่เล็กเกินไปเมื่อเทียบกับถ่านชาร์ซีเลื่อยไม้ ซึ่งผลดังกล่าวยังยืนยันได้จากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์ส่องกราด ถ่านชาร์ไม้กระถินยักษ์มีรูพรุนคล้ายคาปิลารี รูพรุนมีช่องเปิดสู่ภายนอกสำหรับหมู่ฟังก์ชันที่พื้นผิวของถ่านชาร์ทั้งสองคล้ายคลึงกัน คือ พบหมู่อะโรมาติก เนื่องจากการเกิดของถ่านชาร์จากชีวมวลมีกระบวนการเหมือนกัน จากสมบัติดังกล่าวสามารถเพิ่มมูลค่าของถ่านชาร์ด้วยการนำไปใช้เป็นสารดูดซับมลพิษอากาศในอาคาร โดยแบ่งเป็น 2 แนวทาง คือ การนำถ่านชาร์ไม้กระถินยักษ์ซึ่งมีสมบัติใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์ที่ผลิตเชิงพาณิชย์ไปใช้ดูดซับสารมลพิษอะโรมาติกได้โดยไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการปรับปรุงสมบัติเพิ่มเติมกับอีกแนวทางคือการนำถ่านชาร์มาผ่านกระบวนการเพิ่มสมบัติหรือความสามารถในการดูดซับก่อนนำไปใช้งานที่ต้องการกำจัดสารมลพิษแบบจำเพาะ

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม และคณะผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือกลางมหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้ความสะดวกในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Bridgwater AV. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*. 2012;38: 68-94.
- [2] Jenkins LP, Phillips JT, Molberg SE, Hui PS. Activity patterns of californians: use of and proximity to indoor pollutant sources. *Atmospheric Environment*. 1992;26A:2141-3148.
- [3] United States Environmental Protection Agency [Internet]. Why indoor air quality is important to schools. 2017 [cited 2017 December 20]. Available from: <https://www.epa.gov/iaq-schools/why-indoor-air-quality-important-schools>.
- [4] Hedge A. Work-related illness in offices: a proposed model of the sick building syndrome. *Environmental International*. 1989;15:143-158.
- [5] Ten Brinke J, Selvin S, Hodgson TA, Fisk JW, Mendell JM, Koshland PC, Daisey MJ. Development of new volatile organic compound (VOC) exposure metrics and relationship to sick building syndromes. *Indoor Air*. 1989;8:140-152.
- [6] Godish T. *Indoor air pollution control*. Michigan: Lewis; 1989.
- [7] Tieosuwan P. Designing a range of home decoration products that help eliminate unwanted odor and absorb humidity condominium by utilizing the attributes of charcoal [master's independent study]. Nakhon Pathom: Silpakorn University; 2014.
- [8] Ongwandee M, Moonrinta R, Panyame theekul S, Tangbanluekal C, Morrison G. Investigation of volatile organic compounds in office buildings in Bangkok, Thailand: concentrations, sources and occupant symptoms. *Building and Environment*. 2011;46:1512-1522.
- [9] DiGiano FA, Weber WJ. *Process dynamics in environmental systems*. New York: Wiley & Sons; 1996.
- [10] Berthouex PM, Brown LC. *Statistics for environmental engineering*. Florida: Lewis; 1994.
- [11] American Society for Testing and Materials. ASTM D4607-86 Standard test method for determination of iodine number of activated carbon. Philadelphia: ASTM Committee on Standards; 1986.
- [12] Katesa J. Effects of carbonization temperature on properties of chars and activated carbon from coconut shell [master's thesis]. Nakhon Ratchasima: Suranaree University of Technology; 2013.

- [13] Thai Industrial Standard. TIS 900-2547 activated carbon. Bangkok: Thai Industrial Standard Institute; 2004.
- [14] Friedel RA, Hofer LJE. Spectral characterization of activated carbon. The Journal of Physical Chemistry. 1970;74:2921-2922.
- [15] Abugu HO, Okoye PAC, Ajiwe VIE, Omuku PE, Umeobika UC. Preparation and characterization of activated carbon produced from oil bean (Ugba or Ukpaka) and snail shell. Environmental Analytical Chemistry. 2015;2:1-17.

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุมและสมบัติของโลหะเชื่อมพอกแข็งเหล็กหล่อสีเทา

ทวี หมด๊ะ^{1*} ปิยะวรรณ สุนาสวน² และอรจิตร แจ่มแสง³

tavee.mad@rmutr.ac.th^{1*}, piyawan.sun@rmutr.ac.th², orajit.pra@rmutr.ac.th³

¹⁻³ สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
รัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล

Received: May 29, 2017
Revised: March 22, 2018
Accepted: June 11, 2018

บทคัดย่อ

การเชื่อมพอกแข็งเป็นหนึ่งในวิธีการเพิ่มสมบัติทางกลของพื้นผิวชิ้นส่วนเครื่องจักร เช่น ความแข็ง หรือความต้านทานการเสียดสี ที่สามารถทำได้ง่ายและการปฏิบัติการไม่ซับซ้อน อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงวัสดุพื้นผิวหรือวัสดุของผิวพอกแข็งที่มีการกระทำอย่างต่อเนื่องส่งผลทำให้ต้องมีการศึกษาเพื่อจัดทำข้อกำหนดจำเพาะขั้นตอนการเชื่อมใหม่ งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ในการศึกษาตัวแปรการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุมประกอบด้วยกระแสเชื่อมและจำนวนชั้นการพอกแข็ง ที่มีผลต่อความต้านทานการสึกหรอ ความแข็ง โครงสร้างจุลภาค และการแตกร้าวของโลหะเชื่อมพอกแข็งบนพื้นผิวเหล็กหล่อเทา ผลการทดลองโดยสรุปมีดังนี้ กระแสเชื่อมที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ความแข็งของแนวเชื่อมพอกแข็งและความต้านทานการสึกหรอของแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น ตัวแปรการเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งสูงสุด 550 HV และอัตราการต้านทานการสึกหรอต่ำสุด 1.23 % คือแนวเชื่อมพอกแข็งกระแสเชื่อม 160 A การเพิ่มจำนวนชั้นในการพอกแข็งส่งผลทำให้ความแข็งและความต้านทานการสึกหรอเพิ่มขึ้น แต่ส่งผลทำให้ปริมาณการแตกร้าวในโลหะเชื่อมเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: การเชื่อมพอกแข็ง กระแสเชื่อม จำนวนชั้น การสึกหรอการแตกร้าว

Relative Study of Gas Metal Arc Welding Parameter and Hard-faced Weld Metal Properties on Grey Cast Iron Surface

Tavee Madsa^{1*}, Piyawan Sunasuan² and Orakit Jaemsang³
tavee.mad@rmutr.ac.th^{1*}, piyawan.sun@rmutr.ac.th², orakit.pra@rmutr.ac.th³

¹⁻³ Department of Industrial Engineering Technology, Faculty of Industry and Technology,
Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Wang Klai Kang Won Campus

Received: May 29, 2017
Revised: March 22, 2018
Accepted: June 11, 2018

Abstract

Hard-faced welding is a simple and non-complex operation that could raise mechanical properties such as hardness and wear of the machine part surface. However, a variation of a base material and an electrode that is continuously performed, it leads to investigate for new welding procedure specification. This research aims to study gas metal arc welding process parameter that composed of welding currents and hard-faced weld layers on wear, hardness, microstructure and cracking on a hard-faced weld metal on grey cast surface. The summarized results were as follows. Increase of the welding current affected to increase the hardness and the wear resistance of the hard-faced weld metal. The optimum welding parameter that produced the hardness of 550 HV and the wear resistance of 1.23% was the welding current of 160 A. Increase of the hard-faced weld layer resulted in the increase of the hardness and the wear resistance of the weld metal and resulted in the increase of the crack amount.

Keywords: hard-faced welding, welding current, welding layer, wear, cracking.

1. บทนำ

การสึกหรอของพื้นผิวชิ้นส่วนเครื่องจักรกล เกิดจากการสัมผัสของพื้นผิว เช่น การขัด การสี การหมุน การกระแทก กับสภาวะแวดล้อมที่มีความแข็งที่แตกต่าง เช่น พื้นผิวของชิ้นส่วนอื่นๆ หรือส่วนของแข็งขนาดเล็กที่หลุดร่วงในเครื่องจักร การเคลื่อนที่เข้าสัมผัสกันของชิ้นส่วนและสิ่งแวดล้อมต่างๆ นี้ทำให้เกิดการหลุดร่วงออกมาของอนุภาค และทำให้ขนาดของชิ้นส่วนเกิดความการลดขนาดลงจากขนาดเดิม ผลของการลดขนาดลงนี้ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องจักรลดลงได้ [1] ตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงการสึกหรอประกอบด้วย โครงสร้างจุลภาคของโลหะที่เกิดการสัมผัสกัน รูปแบบของโลหะ ความหยาบผิวของโลหะ ขนาดเกรนของโลหะ แรงที่มากระทำต่อชิ้นส่วน อุณหภูมิในการสัมผัสกันของโลหะสองชนิด ความเร็วในการสัมผัส และสิ่งแวดล้อมในขณะใช้งาน เป็นต้น [2]

การเชื่อมซ่อม (Repair welding) เป็นวิธีการหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในกระบวนการซ่อมแซมเนื้อโลหะที่เกิดการสึกหรอ เนื่องจากเป็นวิธีการที่สะดวก ต้นทุนในการผลิตผิวพอกต่ำ ในบางกรณีไม่จำเป็นต้องถอดชิ้นส่วนออกจากเครื่องจักร นอกจากนั้นการเชื่อมพอกสามารถทำให้เกิดผิวพอกที่มีความแข็งและสามารถต้านทานการสึกหรอได้ดีกว่าโลหะเดิม เมื่อเลือกลวดเชื่อมพอกแข็งและตัวแปรการเชื่อมที่มีความเหมาะสมกับโลหะนั้นๆ ที่ผ่านมามีการประยุกต์การเชื่อมเพื่อทำการสร้างชิ้นโลหะพอกแข็งที่น่าสนใจ และพบว่าความแข็งของโลหะเชื่อมพอกแข็งนั้นขึ้นอยู่กับรูปแบบของเฟสที่เกิดขึ้นในโลหะเชื่อม โลหะเชื่อมบนพื้นผิวเหล็กกล้าคาร์บอน 1020 ที่สร้างขึ้นด้วยการเชื่อมอาร์กกลดหุ้มฟลักซ์ (Shielded metal arc welding: SMAW) นั้นสามารถเพิ่มความแข็งได้

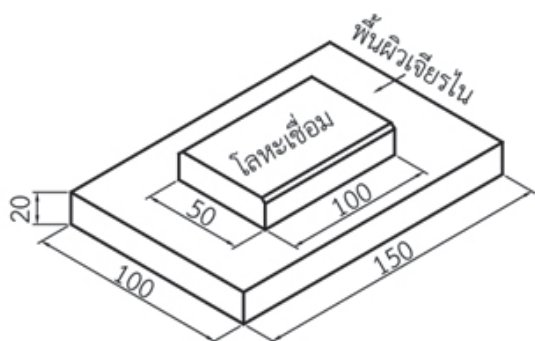
เมื่อลวดเชื่อมที่เลือกใช้นั้นสามารถทำให้เกิดการกระจายตัวอย่างละเอียดของเฟส Fe-Ti Fe-V Fe-Mo และเฟสคาร์ไบด์ [3] หรือการกระจายตัวอย่างละเอียดของเฟสโครเมียมคาร์ไบด์ในเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง JIS-S45C [4] นอกจากนั้นค่าความแข็งและความต้านทานการสึกหรอของโลหะเชื่อมพอกแข็งบนพื้นผิวเหล็กกล้าคาร์บอนสามารถเพิ่มขึ้นได้เมื่อมีการควบคุมอุณหภูมิระหว่างที่เยวเชื่อม และจำนวนการเชื่อมซ้อนแนว [5] ในกรณีของการเชื่อมเหล็กหล่อเทา ค่าความแข็งของชิ้นโลหะเชื่อมพอกแข็งด้วยวิธีการเชื่อมอาร์กกลดหุ้มฟลักซ์สามารถเพิ่มขึ้นได้เมื่อการกระจายตัวของเฟสโลหะคาร์ไบด์ต่างๆ เช่น โครเมียมคาร์ไบด์ หรือวานาเดียมคาร์ไบด์ ในโลหะเชื่อมพอกแข็งมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามหากเลือกโลหะเชื่อมที่มีปริมาณคาร์บอนสูงอาจทำให้โลหะเกิดการแตกร้าได้ [6-8]

ข้อมูลที่กล่าวมาข้างต้นผู้วิจัยจึงมีจุดประสงค์ในการเชื่อมพอกแข็งเหล็กหล่อเทาด้วยการเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม (Gas metal arc welding: GMAW) ซึ่งเป็นกระบวนการเชื่อมอัตโนมัติ ง่ายต่อการควบคุมตัวแปร และสามารถลดปัญหาของคุณภาพช่างเชื่อมและลวดเชื่อมลงได้ โลหะเชื่อมที่ผ่านการเชื่อมถูกนำไปทำการตรวจสอบเพื่อศึกษาเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อม ข้อมูลการทดลองที่ได้สามารถนำไปใช้ในการเชื่อมพอกแข็งโลหะเหล็กหล่อเทาในงานอุตสาหกรรมต่อไป

2. วิธีการทดลอง

โลหะฐาน (Base metal: BM) ในการทดลองคือแผ่นเหล็กหล่อเทาหนา 20 มิลลิเมตร กว้าง 100 มิลลิเมตร และยาว 150 มิลลิเมตร ที่ได้จากการหล่อทรายเปียก (Green sand casting) ดังรูปที่ 1 ผิวดิบของแผ่นเหล็กหล่อ

ด้านบนถูกกำจัดออกด้วยเครื่องเจียรไนราบที่มีการหล่อเย็นเพื่อทำให้เกิดความสม่ำเสมอ ก่อนการเชื่อม ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กหล่อเทาและลวดเชื่อมแสดงดังตารางที่ 1



รูปที่ 1 รูปร่างชิ้นงานเชื่อม (หน่วย: mm.)

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุทดลอง

ธาตุผสม	ส่วนผสมทางเคมี (%น้ำหนัก)	
	เหล็กหล่อเทา	ลวดเชื่อม
C	3.200	0.588
Si	2.300	0.667
Mn	0.550	1.994
P	-	0.012
S	-	0.001
Cr	0.400	7.846
Mo	-	0.572
V	-	0.345

กระบวนการเชื่อมในการทดลองนี้ คือ การเชื่อมอาร์กโลหะแก๊สคลุม โดยเครื่องเชื่อมอินเวอร์เตอร์เครื่องหมายการค้า Fronius รุ่น Transpuls synergic 2700 Alu-edition ลวดเชื่อมที่ใช้ในการสร้างชั้นพอกแข็ง คือลวดไส้ฟลักส์ (Flux-cored wire electrode) ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 1 เส้นผ่านศูนย์กลางของลวดเชื่อม 1.60 มิลลิเมตร

ในการเชื่อมโลหะพอกแข็ง กำหนดให้การเชื่อมเกิดขึ้นในพื้นที่กว้าง 50 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นเหล็กหล่อ [9] ดังรูปที่ 1 เท่านั้น ตัวแปรการเชื่อมในการทดลองถูกกำหนดค่าดังตารางที่ 2 การเชื่อมซ้ำแนวกำหนดให้เป็นดังรูปที่ 2 กล่าวคือแนวเชื่อมปัจจุบันมีการเกยซ้อนบนแนวเชื่อมก่อนหน้าประมาณ 30% (พิจารณาแนวเชื่อมที่ 1 และ 2) ขณะที่แนวเชื่อมชั้นที่สูงขึ้น กำหนดให้แนวเชื่อมเริ่มต้นอยู่กึ่งกลางแนวเชื่อมด้านล่างดังตำแหน่งแนวที่ 7 ที่อยู่กึ่งกลางของแนวที่ 1 และ 2

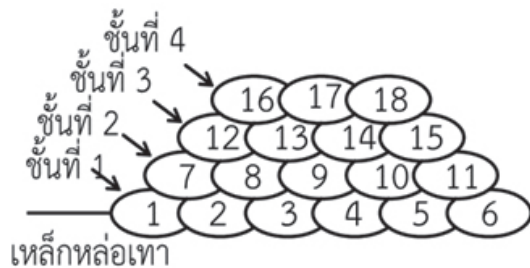
ตารางที่ 2 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการเชื่อม

ตัวแปรการเชื่อม	ค่ากำหนด
- กระแสเชื่อม (A)	120-180
- ความเร็วเดินแนว (mm/min)	200
- จำนวนชั้นพอกแข็ง (ชั้น)	1-4
- อุณหภูมิอุ้งงาน (°C)	400
- แก๊สปกคลุม	CO ₂
- อัตราการไหลแก๊สปกคลุม (l/min.)	12

การทดสอบและตรวจสอบสมบัติของโลหะเชื่อมพอกแข็งประกอบด้วย การทดสอบความต้านทานการสึกหรอ (Wear test) การทดสอบความแข็งของโลหะเชื่อม และการตรวจสอบโครงสร้างโลหะวิทยาของโลหะเชื่อม โดยมีรายละเอียดการดำเนินการดังนี้

การทดสอบความต้านทานการสึกหรอ เป็นการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบน้ำหนักก่อนและหลังการทดสอบของโลหะเชื่อม โลหะเชื่อมที่มีการสูญเสีย น้ำหนักน้อย คือโลหะที่มีความต้านทานการสึกหรอสูง การทดสอบดำเนินการตาม ASTM G65 โดยกำหนดสภาวะการทดสอบ ประกอบด้วยความเร็วรอบการหมุนของล้อขัด

200 รอบต่อนาที แรงกดขึ้นทดสอบเข้าสู่ล้อยัด
 ยางเท่ากับ 130 นิวตัน สารขัด คือทรายซิลิกา
 ขนาด 120 เมช ระยะเวลาในการขัด 30 นาที
 ระยะทางในการทดสอบรวม 4000 เมตร [10]



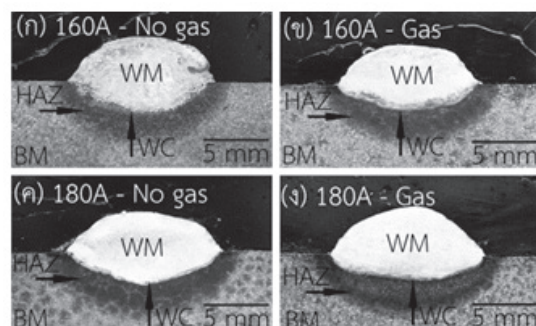
รูปที่ 2 ลำดับการเชื่อมพอกแข็ง [4]

การทดสอบความแข็งแรงใช้การทดสอบ
 ความแข็งแรงไมโครวิกเกอร์ส สภาพการทดสอบ
 ประกอบด้วยแรงกด 300 กรัมแรง เวลากดแช่
 10 วินาที โดยทำการทดสอบความแข็งแรงในพื้นที่
 ของโลหะฐาน พื้นที่กระทบร้อน (Heat affected
 zone: HAZ) และโลหะเชื่อมพอกแข็ง (Weld
 metal: WM) ในแต่ละชั้น

การตรวจสอบโครงสร้างโลหะวิทยา
 ประกอบด้วยการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคผ่าน
 กล้องกำลังขยายต่ำและการตรวจสอบโครงสร้าง
 จุลภาคผ่านกล้องจุลทรรศน์แสง (Light optical
 microscope: LOM) ในการเตรียมชิ้นทดสอบ
 แผ่นโลหะเชื่อมถูกเลือกตัดตั้งฉากกับแนวเชื่อม
 ที่ระยะกึ่งกลางแผ่นโลหะเชื่อมด้วยเครื่องตัด
 ใบขัดสีความเร็วรอบสูงที่มีการหล่อเย็นด้วย
 น้ำหล่อเย็นขณะตัดเพื่อป้องกันการเกิดการ
 เปลี่ยนแปลงโครงสร้างโลหะวิทยาเนื่องจาก
 ความร้อน ชิ้นงานที่ได้ถูกนำทำการขัดหยาบด้วย
 กระดาษทรายในน้ำไหลเบอร์ 150-1500 และ
 ทำการขัดมันด้วยผงเพชรขนาด 1 ไมโครเมตร
 ผิวหน้าชิ้นงานที่มันวาวคล้ายกระจกถูกทำการ
 กัดผิวหน้าด้วยสารละลายที่กำหนดเพื่อแสดง
 รายละเอียดของโครงสร้างโลหะวิทยา

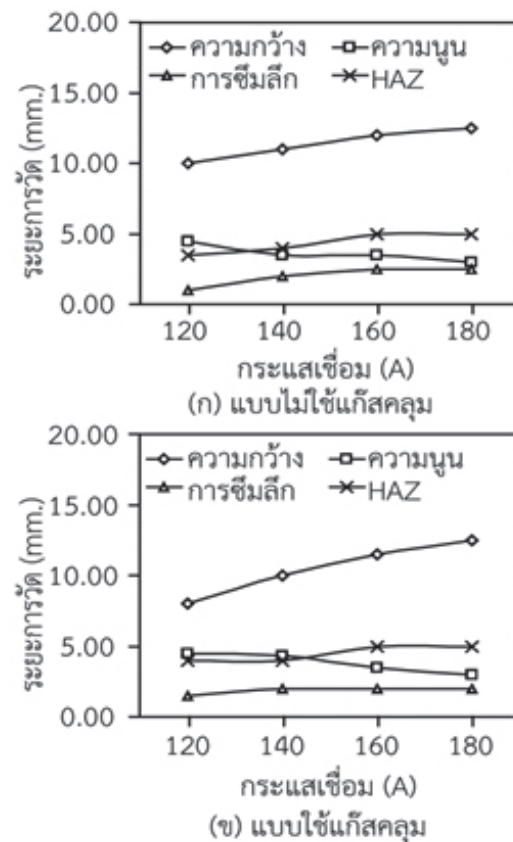
3. ผลการทดลอง

รูปที่ 3 แสดงโครงสร้างมหภาคของแนว
 เชื่อมพอกแข็ง 1 แนวที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม
 160 และ 180 แอมแปร์ (A) ที่มีการเชื่อมโดย
 ไม่มีแก๊สคลุม (No gas) และมีแก๊สคลุม (Gas)
 พบโครงสร้างมหภาคแบ่งออกเป็น 3 พื้นที่หลัก
 ประกอบด้วยโลหะฐาน (BM) โลหะเชื่อมพอก
 (WM) และพื้นที่กระทบร้อน (HAZ) การตรวจสอบ
 โครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมพบว่าแนวเชื่อม
 ที่ได้มีความสมบูรณ์ไม่พบจุดบกพร่องต่างๆ เช่น
 รูพรุน การหลอมไม่สมบูรณ์ หรือรอยกัดแหว่ง
 ในโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อม อย่างไรก็ตาม
 เมื่อทำการเชื่อมที่กระแสต่ำ 120 A ทั้งสองแบบ
 พบจุดบกพร่อง ขนาดใหญ่ที่เกิดจากการ
 หลอมละลายไม่สมบูรณ์ ด้วยเหตุนี้การเชื่อมที่
 กระแสต่ำควรมีการหลีกเลี่ยง กระแสเชื่อมที่
 เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มทำให้ความกว้างของแนวเชื่อม
 ความกว้างของพื้นที่กระทบร้อน และระยะ
 การซึมลึกของแนวเชื่อมพอกแข็งเพิ่มขึ้น แต่มี
 ความนูนของแนวเชื่อมลดลง ความกว้างของ
 แนวเชื่อมที่เพิ่มขึ้นเมื่อกระแสไฟเชื่อมมีค่าสูง
 ส่งผลทำให้โลหะเชื่อมที่เกิดการอาร์กที่รุนแรงขึ้น
 กระจายออกด้านข้างของแนวเชื่อมและทำให้
 ความนูนของแนวเชื่อมลดลงดังรูปที่ 4

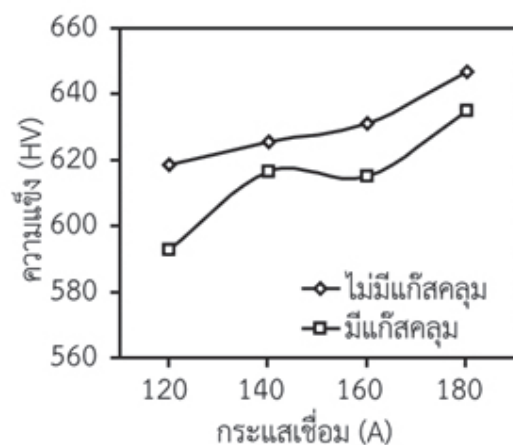


รูปที่ 3 โครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมพอกแข็ง
 1 ชั้น ที่เชื่อมด้วยกระแส 160 A

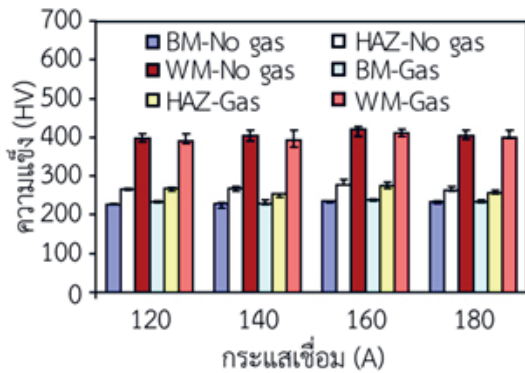
ค่าการเปลี่ยนแปลงมิติต่างๆ ของแนวเชื่อมของโลหะเชื่อมพอกแข็งบนพื้นผิวเหล็กหล่อเทาที่ได้นี้มีความเหมือนและแตกต่างจากมิติของโลหะเชื่อมพอกแข็งบนเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง 0.45% ที่ใช้ลวดเชื่อมโครเมียมสูงในการเชื่อมพอกแข็งเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางนั้น ความกว้าง ความหนา และระยะห่างของพื้นที่ HAZ มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อใช้กระแสเชื่อม 150-230 A และทำให้ระยะการซึมลึกลดลงได้ [4] การตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของโลหะเชื่อมที่บริเวณขอบเขตระหว่างพื้นที่การหลอมละลายและพื้นที่ที่กระแทกร้อนเกิดขึ้นหลอมสีขาว (White cast layer) เกิดขึ้นดังแสดงด้วยลูกศร WC ในรูปที่ 3 ชั้นหลอมสีขาวที่เกิดขึ้นนี้มีค่าความแข็งค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่อื่นๆ ของโลหะเชื่อมเนื่องจากบริเวณนี้เกิดการก่อตัวของโลหะคาร์ไบด์ที่เกิดจากธาตุคาร์บอนและเหล็กหรือโครเมียม หรือวานาเดียม หรือแมงกานีส ซึ่งเป็นธาตุผสมที่มีในลวดเชื่อมพอกแข็ง [11] การเกิดเฟสเหล่านี้ส่งผลทำให้ค่าความแข็งของชั้นหลอมสีขาวเกิดการเปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 5 อย่างไรก็ตามการตรวจสอบโครงสร้างที่ชัดเจนด้วยเครื่องมือที่มีความเที่ยงตรงควรมีการศึกษาต่อไป



รูปที่ 4 มิติของแนวเชื่อมพอกแข็ง

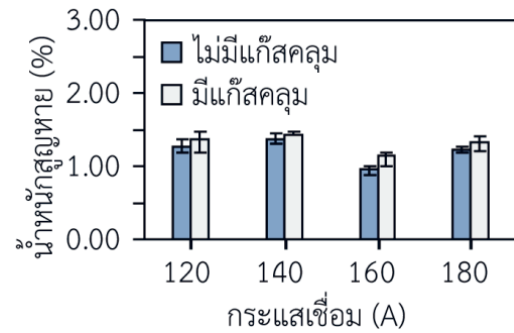


รูปที่ 5 ความแข็งของโลหะเชื่อมพอกแข็ง 1 แนวที่กระแสเชื่อมต่างๆ



รูปที่ 6 ความแข็งแรงของโลหะฐาน พื้นที่กระพร้อน และโลหะเชื่อมพอกที่กระแสเชื่อมต่างๆ

เมื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงเฉลี่ยของโลหะฐาน พื้นที่กระพร้อน และโลหะเชื่อมพอก 1 แนวที่ทำการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อมต่างๆ ยังไม่มีและมีแก๊สคลุมโลหะเชื่อมดังรูปที่ 6 (ความแข็งแรงที่ได้ในรูปที่ 6 นี้ไม่นับรวมกับความแข็งแรงของชั้นหลอมสีขาวที่พบในรูปที่ 5) ผลการทดสอบพบว่าค่าความแข็งแรงของพื้นที่กระพร้อนมีค่าสูงกว่าโลหะฐาน เนื่องจากการปรับสภาพของเกล็ดกราไฟท์และโครงสร้างพื้น (Matrix) ของเหล็กหล่อเทาที่มีขนาดเล็กและละเอียดลง [12] ขณะเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบกับความแข็งแรงของโลหะเชื่อมพบว่าความแข็งแรงที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นสูง เนื่องจากการก่อตัวของเฟสโลหะคาร์ไบด์เสริมแรงในปริมาณสูงของเหล็กหล่อเทาทำให้ค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นได้ [6-8] และเมื่อพิจารณาโลหะเชื่อมที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อมต่างๆ พบว่าค่าความแข็งแรงสูงสุดของโลหะเชื่อมเมื่อทำการเชื่อมด้วยกระแส 4 ค่าและใช้แก๊สปกคลุมที่แตกต่าง การเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 160 A แบบไม่ใช้แก๊สปกคลุมมีค่าความแข็งแรงสูงสุดประมาณ 418 HV

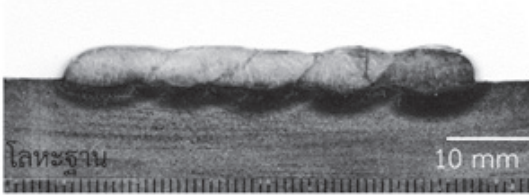


รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำที่ดูดซับและกระแสเชื่อมของโลหะเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น

ค่าความแข็งแรงของโลหะเชื่อมที่เชื่อมด้วยกระแส 120-180 A และการใช้แก๊สปกคลุมที่แตกต่างนี้ส่งผลโดยตรงต่อความต้านทานการสึกหรอของโลหะเชื่อมพอกแข็งที่ทำการทดสอบและแสดงในรูปของการสูญเสียน้ำหนักโลหะเชื่อมที่มีความแข็งแรงสูงเป็นโลหะเชื่อมที่มีความต้านทานการสึกหรอสูงสูงสุดดังรูปที่ 7 ด้วยเหตุนี้จึงสามารถสรุปได้ว่า กระแสเชื่อม 160 A และการเชื่อมแบบไม่ใช้แก๊สคลุมเป็นกระแสเชื่อมที่เหมาะสมทำให้เกิดความแข็งแรงสูง และความต้านทานการสึกหรอสูงจึงถูกเลือกเป็นตัวเลือกการเชื่อมสำหรับสร้างโลหะเชื่อมพอกแข็ง 1-4 ชั้นบนแผ่นเหล็กหล่อเทาต่อไป

รูปที่ 8 แสดงโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมพอกแข็ง 1-4 ชั้น พบรอยแตกร้าว (Crack) บนพื้นที่ทำการตรวจสอบ และมีทิศทางตั้งฉากกับผิวหน้าแนวเชื่อมดังรูปที่ 8 (ก) เมื่อจำนวนชั้นพอกแข็งเพิ่มขึ้น ปริมาณแตกร้าวที่แนวเชื่อมเพิ่มขึ้น และตำแหน่งการเกิดการแตกร้าวเกิดทั่วไปบนโลหะเชื่อมเริ่มจากแนวที่ 1 ไปสู่ผิวหน้าแนวเชื่อม นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาตำแหน่งโคนแนวเชื่อมเมื่อทำการเชื่อมชั้นพอกแข็งที่ 2-4 พบการเกิดการแตกร้าวที่โคนแนวเชื่อมขึ้นดังวงรีในรูปที่ 8 (ข) ถึง (ง)

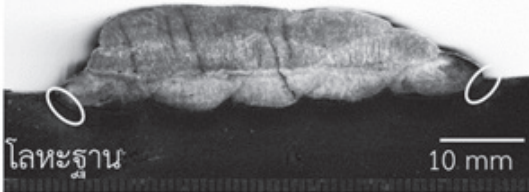
(ก) 1 ชั้น



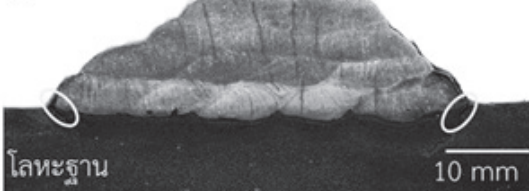
(ข) 2 ชั้น



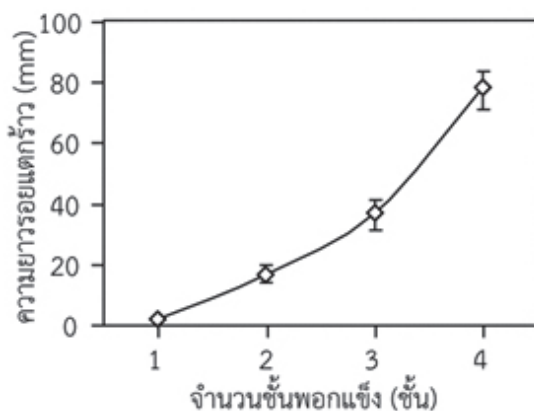
(ค) 3 ชั้น



(ง) 4 ชั้น

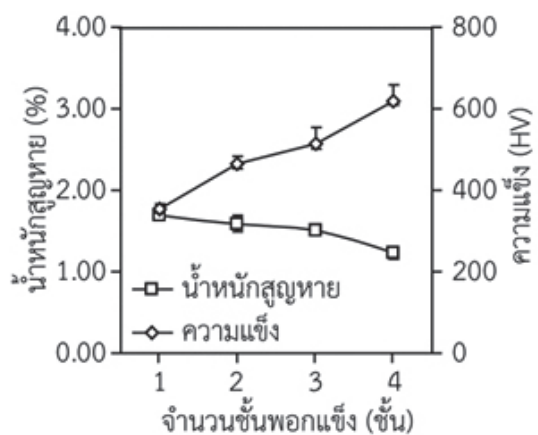


รูปที่ 8 โครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อม
พอกแข็ง 1-4 ชั้น



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวแตกร้า
และจำนวนชั้นพอกแข็ง

รอยแตกร้านี้ขยายตัวลึกลงไปในพื้นที่
กระพร้อนของแนวเชื่อม เมื่อทำการวัดความ
ยาวรวมที่เกิดขึ้นในโครงสร้างมหภาคของการ
เชื่อมพอกแข็ง 1-4 ชั้น พบว่าความยาวของการ
แตกร้าแปรผันตรงกับจำนวนชั้นพอกแข็งดังรูป
ที่ 9 การแตกร้าที่เกิดขึ้นในการเชื่อมเหล็กหล่อนี้
เป็นสิ่งที่ต้องการทำการพิจารณาหาสาเหตุ
ต่อไป เนื่องจากการเชื่อมพอกแข็งด้วยลวดเชื่อม
หุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางที่มีปริมาณ
โครเมียมต่ำกว่า 4.50% นั้นไม่เกิดขึ้น และ
ค่าความแข็งและความต้านทานการสึกหรอที่ได้
มีค่าต่ำกว่า [12] นอกจากรอยแตกร้าที่เกิดขึ้น
ในรอยต่อพบว่าการเชื่อมพอกแข็งซ้ำหลายแนว
ส่งผลโดยตรงต่อการบิดตัวของแนวเชื่อม
ดังพบได้ในรูปที่ 8 แผ่นงานโลหะด้านข้างถูกดึง
เข้าแนวเชื่อมและบิดงอเพิ่มมากขึ้นเมื่อจำนวน
ชั้นเพิ่มมากขึ้น การศึกษาเรื่องการขยายและ
หดตัวเนื่องจากความร้อนที่ให้แกแนวเชื่อมควรมี
การศึกษาเพิ่มเติม เพื่อลดการบิดเบี้ยวเนื่องจาก
ความร้อนการเชื่อมต่อไป



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ของตัวแปรการเชื่อม
พอกแข็งระหว่างค่าความแข็งและอัตราการ
ต้านทานการสึกหรอ

แผ่นเหล็กหล่อที่ถูกเชื่อมพอกแข็งจำนวน 1-4 ชั้นถูกนำมาทำการเตรียมชิ้นทดสอบ เพื่อทดสอบความแข็ง และทดสอบความต้านทานการสึกหรอ ผลการทดสอบดังรูปที่ 10 แสดงค่าความแข็งของโลหะเชื่อมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนชั้นพอกแข็งเพิ่มขึ้นจาก 1 ถึง 4 ชั้น ค่าน้ำหนักสูญหายที่มีค่าต่ำสุดหรือค่าความต้านทานสูงสุดพบได้เมื่อทำการเชื่อมพอกแข็ง 4 ชั้น ที่แสดงค่าน้ำหนักสูญหายประมาณ 1.23% การเพิ่มขึ้นของโลหะเชื่อมพอกแข็งเมื่อจำนวนชั้นเพิ่มขึ้น คาดว่าเกิดจากการลดความเจือจาง (Dilution) ของส่วนผสมทางเคมีของโลหะลวดเชื่อมเมื่อจำนวนชั้นการเชื่อมซ้อนแนวเพิ่มขึ้น ส่วนผสมของโลหะลวดเชื่อมที่มีค่าเจือจางลดลงนี้ทำให้ส่วนผสมทางเคมีของโลหะเชื่อมเข้าใกล้ส่วนผสมทางเคมีของโลหะลวดเชื่อมซึ่งบ่งชี้ให้ทราบถึงการที่โลหะลวดเชื่อมมีสมบัติทางกลที่ใกล้เคียงกับโลหะลวดเชื่อมที่กำหนด ผลการทดลองคล้ายกันนี้พบได้เมื่อทำการเชื่อมบนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิม 304 และเหล็กกล้ามาเทนไซต์ SA553 ที่เชื่อมด้วยการเชื่อมเลเซอร์ [13] หรือการเคลือบผิวพอกแข็งโลหะผสมนิกเกิล-โครเมียม-โบรอน-ซิลิกอน-คาร์บอนบนพื้นผิวเหล็กกล้าคาร์บอน [14] หรือการเชื่อมพอกแข็งจำนวน 3 ชั้นบนพื้นผิวเหล็กกล้าคาร์บอน ASTM A36 ด้วยการเชื่อมอาร์กกลวดหุ้มฟลักซ์ [15, 16] หรือการเชื่อมพอกแข็งจำนวน 3 ชั้นบนพื้นผิวเหล็กหล่อเทา ASTM grade 2500 ด้วยการเชื่อมอาร์กกลวดหุ้มฟลักซ์ [17] ผลการทดลองเหล่านี้แสดงให้เห็นถึงการมีส่วนผสมของโลหะเชื่อมที่มีค่าใกล้เคียงลวดเชื่อมเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนชั้นการเชื่อมพอกแข็งเพิ่มขึ้น และทำให้ความแข็งและความต้านทานการสึกหรอที่เพิ่มขึ้น

4. สรุปผลการทดลอง

โลหะเชื่อมพอกแข็งถูกสร้างขึ้นด้วยตัวแปรการเชื่อมที่กำหนดเพื่อเสริมความแข็งและความต้านทานการสึกหรอของพื้นผิวเหล็กหล่อเทา เพื่อหาสภาวะการเชื่อมที่ทำให้เกิดความแข็งและความต้านทานการสึกหรอสูงสุด ผลการทดลองโดยสรุปที่ดังนี้

4.1 กระแสเชื่อมที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ความแข็งของแนวเชื่อมพอกแข็งและความต้านทานการสึกหรอของแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น

4.2 ตัวแปรการเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งสูงสุด 550 HV และอัตราการต้านทานการสึกหรอต่ำสุด 1.23 % คือแนวเชื่อมพอกแข็งกระแสเชื่อม 160 A ความเร็วเดินเชื่อม 200 มม./นาที และจำนวนชั้นพอกผิว 4 ชั้น

4.3 การเพิ่มจำนวนชั้นในการพอกแข็งส่งผลทำให้ความแข็งและความต้านทานการสึกหรอเพิ่มขึ้น แต่ส่งผลทำให้ปริมาณการแตกร้าวในโลหะเชื่อมเพิ่มขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยประจำปี 2559 จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Wang XH, Han F, Liu XM, Qu SY, Zou ZD. Effect of molybdenum on the microstructure and wear resistance of Fe-based hardfacing coatings. Materials Science and Engineering: A. 2008; 489:193-200.
- [2] American Society for Metals. ASM Metals HandBook Volume 8 - Mechanical Testing and Evaluation. USA: ASTM International, 1995.

- [3] Yang K, Yu S, Li Y, Li C. Effect of carbonitride precipitates on the abrasive wear behaviour of hardfacing alloy. *Applied Surface Science*. 2008;254:5023-5027.
- [4] Kimapong K, Triwanapong S, Prasomthng S, Wattanajitsiri V. Effect of buffering and hard-faced welding on mechanical properties of JIS-S50C carbon steel. *Journal of Engineering, RMUTT*. 2016;14: 77-86 (In Thai).
- [5] Selvi S, Sankaran SP, Srivatsavan R. Comparative study of hardfacing of valve seat ring using MMAW process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008;207: 356-362.
- [6] Poonnayom P, Wattanajitsiri V, Chanchana A, Meechakha S, Kimapong K. Effect of milling process parameter on chip morphology and cutting edge wear in faced milling process of hardfacing weld metal on JIS-S50C carbon steel surface. *Journal of Research and Development*. 2016;27:37-42 (In Thai).
- [7] Buchanan VE, Shipway PH, McCartney DG. Microstructure and abrasive wear behaviour of shielded metal arc welding hardfacings used in the sugarcane industry. *Wear*. 2007; 263:99-110.
- [8] Fan C, Chen MC, Chang CM, Wu W. Microstructure change caused by (Cr,Fe)₂₃C₆ carbides in high chromium Fe–Cr–C hardfacing alloys. *Surface and Coatings Technology*. 2006;201:908-912.
- [9] Japanese Industrial Standard, Welding: JIS Z 3114 (1990) Method of Hardness Test for Deposited Metal. Tokyo: Japanese Standards Association. 1997.
- [10] Buchely MF, Gutierrez JC, León LM, Toro A. The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys. *Wear*. 2005;259:52-61.
- [11] Klocke F, Hensgen L, Klink A, Ehle L, Schwedt A. Structure and composition of the white layer in the Wire-EDM process. *Procedia CIRP*. 2016;42:673-678.
- [12] Poonnayom P, Yamphurn P, Wattanajitsiri V, Triwanapong S, Kimapong K. Microstructure and wear of hard-faced weld metal on FC25 grey cast iron. *Journal of Research and Development*. 2016;27:35-41 (In Thai).
- [13] Wu Y, Cai Y, Wang H, Shi S, Hua X, Wu Y. Investigation on microstructure and properties of dissimilar joint between SA553 and SUS304 made by laser welding with filler wire. *Materials & Design*. 2015;87:567-578.

- [14] Hemmati I, Ocelík V, De Hosson JTM. Dilution effects in laser cladding of Ni–Cr–B–Si–C hardfacing alloys. *Materials Letters*. 2012;84: 69-72.
- [15] Jeshvaghani RA, Harati E, Shamanian M. Effects of surface alloying on microstructure and wear behavior of ductile iron surface-modified with a nickel-based alloy using shielded metal arc welding. *materials & design*. 2011;32:1531-1536.
- [16] Coronado JJ, Caicedo HF, Gómez AL. The effects of welding processes on abrasive wear resistance for hardfacing deposits. *Tribology International*. 2009;42:745-749.
- [17] Chatterjee S, Pal TK. Weld procedural effect on the performance of iron based hardfacing deposits on cast iron substrate. *Journal of Materials Processing Technology*. 2006; 173:61-69.

การหาค่าปัจจัยการตัดย่อยทางปาล์มที่เหมาะสมด้วยเครื่องตัดย่อยใบตัดตั้ง

สุรัตน์ ตรีวนพงษ์^{1*} ปราโมทย์ พูนนายม² วรญา วัฒนจิตศิริ³ และกิตติพงษ์ กิมะพงศ์⁴
surat.t@en.rmutt.ac.th^{1*}, promote.p@en.rmutt.ac.th², voraya.w@en.rmutt.ac.th³,
kittipong.k@en.rmutt.ac.th⁴

¹⁻⁴ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Received: July 13, 2017
Revised: November 13, 2017
Accepted: August 20, 2018

บทคัดย่อ

เทคนิคการตัดกิ่งปาล์มด้านล่างเป็นวิธีการเพิ่มผลิตภาพในพื้นที่การเพาะปลูกปาล์มเนื่องจากการตัดกิ่งปาล์มด้านล่างให้สั้นลงนั้นสามารถทำให้ต้นปาล์มสามารถเก็บสะสมอาหารไว้ได้มากกว่า สามารถทำให้เกิดการแตกทางปาล์มใหม่ และสามารถส่งผลต่อการเพิ่มปริมาณผลปาล์มให้สูงขึ้นได้ ในการดำเนินการดังกล่าวส่งผลทำให้ปริมาณขยะกิ่งปาล์มในปริมาณสูงและมีความต้องการในการนำไปใช้ประโยชน์ เช่น การทำปุ๋ย หรือเป็นอาหารสัตว์ในอนาคต ด้วยเหตุนี้การตัดย่อยเพื่อให้เกิดเศษขนาดเล็ก และมีความเหมาะสมในการนำไปใช้ประโยชน์จึงมีความจำเป็นในการดำเนินการอย่างต่อเนื่อง บทความนี้มีจุดประสงค์ คือ 1) เพื่อทำการออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าปัจจัยการตัดที่เหมาะสมซึ่งสามารถทำให้เกิดเศษขนาดเล็กและปริมาณเศษปาล์มที่มีค่าสูงโดยใช้เครื่องตัดทางปาล์มใบตั้ง และ 2) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยการตัดที่ส่งผลต่อขนาดและปริมาณเศษทางปาล์ม ปัจจัยการตัดในการศึกษานี้ ประกอบด้วยความเร็วรอบ 540-1000 รอบต่อนาที และจำนวนของใบตัด 2-6 ใบ การวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติแบบแฟคตอเรียล 23 แฟคตอเรียล แบบ 2 ปัจจัย 3 ระดับ ถูกใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง ผลการทดลองโดยสรุปพบว่า ตัวแปรการตัดที่ให้ค่าเศษการตัดที่มีขนาด 3.8 มิลลิเมตร และปริมาณการผลิตเศษ 6600 กรัม ประกอบด้วยความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาทีของเครื่องย่อยทางปาล์ม และจำนวนใบมีดตัด 6 ใบ การเพิ่มความเร็วรอบในการตัดและการเพิ่มจำนวนใบมีดส่งผลทำให้ขนาดของเศษการตัดทางปาล์มลดลง และทำให้ปริมาณการผลิตเศษทางปาล์มมีค่าเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ: ปาล์ม การตัด อัตราการผลิตเศษ

Palm Cutting Parameter Optimization of Orbital Cutting Blade Chopper Machine

Surat Triwanapong^{1*}, Pramot Poonnayom² Voraya Wattanajitsiri³, Kittipong Kimapon⁴
surat.t@en.rmutt.ac.th^{1*}, promote.p@en.rmutt.ac.th², voraya.w@en.rmutt.ac.th³,
kittipong.k@en.rmutt.ac.th⁴

¹⁻⁴ Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Received: July 13, 2017
Revised: November 13, 2017
Accepted: August 20, 2018

Abstract

Lower palm branch cutting technique was a productivity method in a palm growing area due to this cutting technique could store more food for the palm tree, produce a new palm branch and also affect to increase a higher palm fruit. To perform this technique, larger amount of the palm branch waste was produced and was required to utilize as a fertilizer or an animal feed in the near future. Therefore, the palm chopping that could produce small scrap size and suit to utilize was continuously performed. This article aimed 1) to experimental design for optimizing cutting parameter that could produce small scrap size and large amount of scrap using an orbital cutting blade palm chopping machine and 2) to study the lation of the cutting parameter that could influence the palm scrap size and amount. The cutting parameter in this study was composed of the cutting speed of 540-1000 rpm and cutting blade amount of 2-6 blades. 23 factorial statistical analysis technique which was 2 factors and 3 levels, was carried out to design and analyzed the experimental results. The summarized results are as follows. The optimized cutting parameter that could produce the palm scraps size of 3.8 millimeters and the palm scrap amount of 6600 grams was a cutting speed of 1000 revolutions per minute and the cutting blade of 6 blades. An increase of the cutting speed and an increase of the blade amount affected directly to decrease the palm scraps size and increase the palm scrap production amount.

Keywords: palm, cutting, scrap production rate.

1. บทนำ

การขาดแคลนน้ำมันในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจเป็นวิกฤติพลังงานที่เกิดขึ้นในโลกปัจจุบันที่ส่งผลทำให้เกิดการศึกษาและพัฒนาแหล่งพลังงานทางเลือกเพื่อใช้ในการทดแทนน้ำมันเชื้อเพลิง หนึ่งในแหล่งพลังงานทางเลือกที่มีการนิยมนำมาประยุกต์ในการใช้ทดแทนน้ำมันเชื้อเพลิง คือ ปาล์มน้ำมัน ซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญและมีการปลูกอย่างแพร่หลายในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ [1, 2] การส่งเสริมการใช้ปาล์มเป็นพลังงานทางเลือกนี้สามารถทำให้เกิดการเสริมสร้างและพัฒนาขีดความสามารถของภาคการผลิต เพื่อยกศักยภาพอุตสาหกรรมไทยให้มีความเข้มแข็งทางเศรษฐกิจและแข่งขันได้อย่างยั่งยืนดังเจตนารมณ์ของแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติฉบับที่ 12 พ.ศ.2560-2565 [3]

ในการปลูกปาล์มเพื่อให้ได้ผลผลิตลูกปาล์มเพื่อนำไปทำการแปรรูปเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงนั้น ต้นปาล์มจะมีการเติบโตและมีความสูงเพิ่มขึ้นทุกปี การตัดกิ่งปาล์มด้านล่างเป็นสิ่งที่จะต้องมีการดำเนินการอย่างสม่ำเสมอเพื่อเพิ่มผลิตภาพ (Productivity) ของลูกปาล์ม การตัดกิ่งก้านนี้มีเทคนิคในการตัดหลายๆ วิธีการเพื่อเพิ่มผลิตภาพของต้นปาล์ม เช่น เทคนิคการตัดกิ่งปาล์มด้านล่างให้มีความยาวคงเหลือจากลำต้นประมาณ 1 คอกเพื่อให้ต้นปาล์มสามารถเก็บสะสมอาหารไว้ได้มากกว่า เพื่อใช้ในการแตกทางปาล์มใหม่ และเพื่อส่งผลต่อการออกดอกตัวเมียมากกว่าดอกตัวผู้ทำให้ได้ผลปาล์มในปริมาณที่สูงกว่า [4] เมื่อพิจารณาทางปาล์มที่ถูกตัดออกมาดังรูปที่ 1 พบว่าที่ผ่านมามีปริมาณค่อนข้างสูงโดยมีตัวเลขที่รายงานจำนวนทางปาล์มที่ต้องทำการตัดเดือนละ 2 ครั้ง ต้นละ 2 ทางปาล์ม หรือประมาณ 44 ทางปาล์มต่อไร่ หากเกษตรกรมีการปลูกต้นปาล์มหลายสิบไร่ พบว่าปริมาณทางปาล์มที่ถูกตัดเมื่อเปรียบเทียบกับ

กับพื้นที่การเพาะปลูกนั้นมีปริมาณค่อนข้างสูง [5] การนำทางปาล์มไปใช้ประโยชน์จึงมีการคิดค้นและพัฒนากันอย่างต่อเนื่อง ตัวอย่างที่ผ่านมาพบว่าทางปาล์มถูกนำมาทำการย่อยให้มีขนาดเล็กด้วยเครื่องย่อยไม้ขนาดใหญ่เพื่อทำเป็นปุ๋ยและใช้เป็นอาหารของสัตว์ เช่น แพะ หรือแกะได้ [6, 7] การใช้เครื่องย่อยไม้ขนาดใหญ่สามารถทำให้เกิดอัตราการผลิตที่สูงได้แต่มีข้อจำกัดในการเคลื่อนที่เข้าสู่สวนปาล์ม ในบางครั้งการใช้งานจึงมีข้อจำกัดที่ผ่านมามีการพัฒนาเครื่องย่อยทางปาล์มขนาดเล็กขึ้นมาหลายรูปแบบเพื่อทำการย่อยทางปาล์มในพื้นที่สวนปาล์ม [6] อย่างไรก็ตามในการศึกษาปัจจัยการตัดย่อยที่เหมาะสมของเครื่องตัดย่อยแต่ละตัวจึงควรมีการศึกษาเพื่อกำหนดประสิทธิภาพสูงสุดของเครื่องย่อยทางปาล์ม



รูปที่ 1 ทางปาล์มน้ำมันรอย่อยสลาย [8]

ในขั้นตอนการตัดย่อยวัสดุ ปัจจัยการตัดที่แตกต่างกันมักทำให้เกิดผลลัพธ์ในการตัดย่อยที่แตกต่างกัน นอกจากนั้นปัจจัยการตัดมักมีความแตกต่างตามรูปแบบของการตัด เช่น การตัดย่อยไม้ทัวร์สซิดาร์ที่มีปัจจัยการตัดประกอบด้วยทิศทางการตัด จำนวนของใบมีด และขนาดเกรน

ของวัสดุตัด [9] หรือการตัดวัสดุเหลือใช้จากข้าว ที่มีปัจจัยการตัดประกอบด้วยความเร็วรอบ รูปแบบใบตัด และจำนวนใบตัด [10] หรือการ ตัดย่อยไม้ด้วยใบตัดแบบกรวยที่มีปัจจัยการตัด ประกอบด้วยมุมการเติมไม้ที่ และความชื้นของไม้ [11] หรือการตัดวัสดุอ่อนนิ่ม (Soft Solid Material) ที่มีปัจจัยการตัดประกอบด้วยแรงตัด และรูปร่างใบตัดแบบต่างๆ [12] งานวิจัยเหล่านี้ ล้วนทำการทดลองโดยกำหนดปัจจัยการตัด หลายตัวแปร และทำการตัดทุกๆ สภาวะการตัด ที่ออกแบบไว้ และไม่ได้วิเคราะห์ความสัมพันธ์ ของปัจจัยการตัดต่างๆ ซึ่งวิธีการศึกษาลักษณะนี้ หากการศึกษามีเวลาที่จำกัดอาจทำให้เกิด ผลการทดลองที่คลาดเคลื่อนได้ ด้วยเหตุนี้การนำ วิธีการทางสถิติเข้ามาประยุกต์ใช้ในการออกแบบ และดำเนินการทดลอง รวมทั้งวิเคราะห์ผลการ ทดลองจึงมีความนิยมเพิ่มขึ้นเพื่อทำให้เกิดการ ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการหาปัจจัย การตัดที่มีความเหมาะสม ที่ผ่านมามีการใช้วิธี การทางสถิติในการออกแบบการทดลองเพื่อ ให้เกิดคุณภาพของรอยตัดที่มีคุณภาพสูงที่น่าสนใจ และคาดว่าจะอาจประยุกต์ใช้กับการตัดทางปาล์ม ในพื้นที่การดำเนินการวิจัยได้ เช่น การออกแบบ การทดลอง (Design of experiment) โดยการ ใช้เทคนิคการออกแบบแฟคตอเรียลระดับ 2 (Two level factorial design) และวิธีทาคุชิ (Taguchi method) ในการออกแบบปัจจัย การตัดไม้อัดแผ่นความหนาแน่นปานกลาง (Medium density fiberboard: MDF) ด้วยปัจจัยการตัดด้วยเลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ 4 ปัจจัย ผลการออกแบบปัจจัยการตัดสามารถ ลดเวลาและค่าใช้จ่ายในตัดให้ได้ผิวที่มีคุณภาพสูง ความหยาบผิวลดลงเมื่อพลังงานเลเซอร์ เพิ่มขึ้น ความเร็วในการตัดลดลง และแรงดัน อากาศลดลง อย่างไรก็ตามการเพิ่มพลังงานทำให้ ค่าใช้จ่ายการตัดเพิ่มขึ้น [13] หรือการวิเคราะห์

ความสัมพันธ์เกรย์-ทาคุชิ (Taguchi Grey Relational Analysis) ในการตัดเจาะพอลิ เมอร์เสริมแรงคาร์บอนไฟเบอร์ (Carbon fiber reinforced polymer: CFRP) ที่ประกอบด้วย ปัจจัยการตัด 3 ปัจจัย เพื่อหาปัจจัยที่เหมาะสมทำให้เกิดอัตราการตัดเนื้อวัสดุ (Materials Removal rate: MRR) สูงสุด ซึ่งวิธีการที่ใช้ในการ ออกแบบสามารถทำให้ทราบปัจจัยการตัด ที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดผิวการตัดเจาะที่มีคุณภาพ ดังต้องการ [14] หรือ

ด้วยข้อมูลการดำเนินการศึกษาเพื่อหา ปัจจัยการตัดที่เหมาะสมที่ผ่านมา งานวิจัยนี้จึงมี จุดประสงค์ในการออกแบบการทดลองเพื่อการ หาปัจจัยการตัดที่เหมาะสมในการตัดย่อยทาง ปาล์มด้วยเครื่องตัดย่อยทางปาล์มขนาดเล็ก ที่มีใบตัดตั้งฉาก การดำเนินการทดลองตัดและ การวิเคราะห์ผลการตัดกระทำโดยการใช้วิธีทาง สถิติเพื่อให้เกิดความประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย ในการหาปัจจัยการตัดที่มีความเหมาะสมที่ทำให้ เกิดเศษปาล์มที่มีขนาดเล็กที่สุดและมีอัตราการ ผลิตเศษปาล์มสูงสุด ผลการทดลองที่ได้ สามารถประยุกต์ใช้กับการตัดย่อยทางปาล์ม ในพื้นที่กรณีตัวอย่างหรือสวนปาล์มอื่นๆ ในอนาคตต่อไป

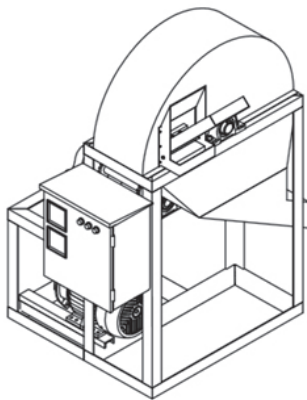
2. วิธีการทดลอง

2.1 เครื่องตัดย่อยทางปาล์มแบบใบตัด ตั้งฉาก

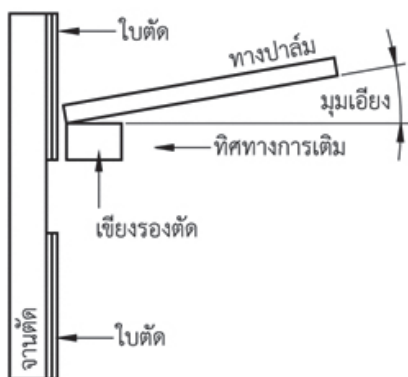
เครื่องย่อยทางปาล์มใบตัดแนวตั้งมี ลักษณะดังรูปที่ 2 ซึ่งเป็นเครื่องย่อยทางปาล์ม ที่มีคุณลักษณะดังนี้

- เครื่องตัดย่อยทางปาล์มที่ได้จาก การออกแบบและสร้างขึ้นมีขนาด กว้าง 1000 มิลลิเมตร ยาว 1000 มิลลิเมตร สูง 1000 มิลลิเมตร

- ความเร็วรอบในการตัดสามารถรับความเร็วรอบได้ที่ 100-1200 รอบต่อนาที
- เครื่องตัดย่อยทางปาล์มสามารถบรรจุใบตัดได้ 2-6 ใบ
- มุมเอียงของการป้อนสามารถปรับค่าได้ตั้งแต่ 0-45 องศา ค่ามุมเอียง 0 องศา คือทิศทางการป้อนทำมุมฉากกับใบตัดดังรูปที่ 3
- ใบตัดที่ใช้ในการตัดย่อยทางปาล์มเป็นใบตัดกึ่งวี (Single V cutting blade) ที่มีลักษณะดังรูปที่ 4 ก. ใบตัดกึ่งวีดังกล่าวมีขนาดของใบตัดดังรูปที่ 4 ข. ใบตัดนี้ทำจากเหล็กกล้าคาร์บอน S45C ที่ผ่านการชุบแข็งด้วยน้ำด้วยอุณหภูมิที่กำหนด



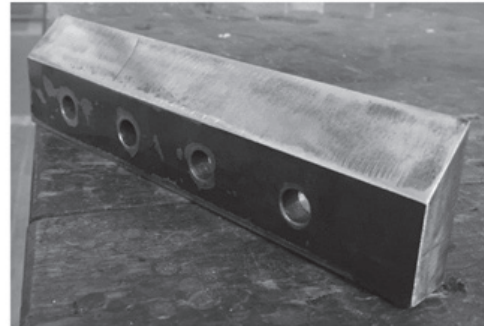
รูปที่ 2 เครื่องย่อยทางปาล์มใบตัดแนวตั้ง



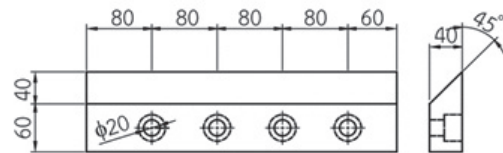
รูปที่ 3 มุมเอียงในการป้อนทางปาล์ม

2.2 คุณสมบัติทางปาล์ม

ทางปาล์มที่ใช้ในการทดลองย่อยในการทดลองนี้เป็นทางปาล์มที่เก็บตัวอย่างในพื้นที่อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี ช่วงเดือนมิถุนายน-สิงหาคม 2559 จำนวน 50 ทางปาล์ม คุณสมบัติทางปาล์มประกอบด้วยค่าต่างๆ ดังนี้



ก. ใบตัดกึ่งวีในการตัดย่อยทางปาล์ม



ข. ขนาดของใบตัดกึ่งวีในการตัดย่อยทางปาล์ม

รูปที่ 4 ใบตัดกึ่งวี (หน่วย: มิลลิเมตร)

- ทางปาล์มมีน้ำหนักเฉลี่ย 3.55 กิโลกรัมต่อกิ่งปาล์ม
- ความยาวทางปาล์มที่ตัดออกมาเฉลี่ย 3,761 มิลลิเมตร
- ความยาวใบปาล์มที่ตัดออกมาเฉลี่ย 971 มิลลิเมตร
- โคนกิ่งปาล์มมีความหนาเฉลี่ย 34.74 มิลลิเมตร กว้าง 111.91 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นส่วนที่มีความหนามากที่สุดของทางปาล์ม
- ส่วนกลางกิ่งปาล์มมีความหนาเฉลี่ย 27.19 มิลลิเมตร กว้าง 31.14 มิลลิเมตร
- ส่วนปลายของกิ่งปาล์มมีความหนาเฉลี่ย 2.16 มิลลิเมตร และกว้างประมาณ 2.10 มิลลิเมตร

- โคนใบปาล์มมีความหนาเฉลี่ย 34.74 มิลลิเมตร และกว้าง 111.91 มิลลิเมตร
- ส่วนกลางใบปาล์มมีความหนาเฉลี่ย 27.19 มิลลิเมตร และกว้าง 31.14 มิลลิเมตร
- ส่วนปลายของใบปาล์มมีความหนาเฉลี่ย 2.16 มิลลิเมตร และกว้าง ประมาณ 2.10 มิลลิเมตร

2.3 การกำหนดปัจจัยที่มีผลต่อการตัดทางปาล์ม

การศึกษาเพื่อค่าปัจจัยการตัดทางปาล์มของเครื่องตัดทางปาล์มแบบใบตัดฉากที่มีความเหมาะสมในการผลิตเศษปาล์มนั้นมีการกำหนดปัจจัยการตัดดังนี้

- ตัวแปรตอบสนอง (Response) ที่ต้องการวัดผลประกอบด้วย ขนาดรูปร่างของเศษปาล์มที่ถูกตัด และอัตราการผลิตเศษปาล์ม
- ตัวแปรควบคุม (Control) ประกอบด้วย ความเร็วรอบในการตัด และจำนวนใบตัด
- มุมเอียงในการป้อนทางปาล์มเข้าสู่ใบตัดที่กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0 องศา ค่ามุมเอียงที่ 0 องศา นี้ คือค่ามุมทางปาล์มที่ป้อนเข้าสู่เครื่องย่อยปาล์มและทำมุม 90 องศา กับใบตัด ดังรูปที่ 3

2.4 การวางแผนการออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองแบบแฟคตอเรียล กรณี 23 แฟคตอเรียล คือ 2 ปัจจัย 3 ระดับ [1] ทำการทดลองทั้งหมด 27 ครั้ง โดยการกำหนดค่าแต่ละปัจจัยในแต่ละระดับดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปัจจัยที่ทำการทดลอง

ปัจจัย	ปัจจัย	ระดับการทดลอง		
		540	750	1000
A	ความเร็วรอบในการตัด (รอบต่อนาที)			
B	จำนวนใบมีดตัด	2 ใบ	3 ใบ	6 ใบ
ปัจจัยร่วม				
AB	ความเร็วรอบในการตัดและจำนวนใบมีดตัด			

สมมติฐานการวิจัย: ความเร็วรอบในการตัด (ปัจจัย A) มีผลต่อขนาดของเศษปาล์มและอัตราการผลิตเศษปาล์ม
สมมติฐานทางสถิติ

$$H_0 = \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 0$$

$$H_1 = \text{อย่างน้อยมีค่าใดค่าหนึ่ง } (\alpha_i) \neq 0$$

สมมติฐานการวิจัย: จำนวนใบมีดตัด (ปัจจัย B) มีผลต่อขนาดของเศษปาล์มและอัตราการผลิตเศษปาล์ม
สมมติฐานทางสถิติ

$$H_0 = \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$$

$$H_1 = \text{อย่างน้อยมีค่าใดค่าหนึ่ง } (\beta_j) \neq 0$$

สมมติฐานการวิจัย: อิทธิพลของความเร็วนรอบในการตัดและจำนวนใบมีดตัด (ผลกระทบร่วม) ที่มีผลต่อขนาดของเศษปาล์มและอัตราการผลิตเศษปาล์ม
สมมติฐานทางสถิติ

$$H_0 = (\alpha\beta)_{ij} = 0 \text{ ทุกๆ ค่า } ij$$

$$H_1 = \text{อย่างน้อยมีค่าใดค่าหนึ่ง } (\alpha\beta)_{ij} \neq 0 \text{ ที่ระดับนัยสำคัญที่ } \alpha = 0.05$$

3. ผลการทดลอง

ตารางที่ 2 ขนาดของเศษปาล์ม (หน่วย: มิลลิเมตร)

ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	จำนวนใบ		
	2	3	6
540	30.540	24.380	4.940
750	27.295	18.920	4.795
1000	21.224	13.020	3.645
540	29.747	23.430	5.195
750	26.721	18.240	4.825
1000	21.381	13.240	3.818
540	32.590	24.470	5.450
750	28.660	19.210	4.855
1000	21.538	13.460	3.985

ตารางที่ 3 อัตราการผลิตเศษปาล์ม (หน่วย: กรัม)

ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	จำนวนใบ		
	2	3	6
540	2820	3480	5015
750	3240	3850	5760
1000	3630	4020	6520
540	2930	3560	5030
750	3470	3910	5800
1000	3700	4200	6600
540	2980	3300	5045
750	3420	3820	5880
1000	3770	4320	6680

การกำหนดปัจจัยและระดับของปัจจัย คือ ความเร็วรอบในการตัดที่ 540 รอบต่อนาที 720 รอบต่อนาที และ 1000 รอบต่อนาที และ จำนวนใบมีดตัดที่ 2 ใบ 3 ใบ และ 6 ใบ ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 2 และ 3 ผลการทดลองมีแนวโน้มของการลดขนาดเศษทางปาล์ม เมื่อความเร็วรอบของการตัด และจำนวนของใบมีดมีค่าเพิ่มขึ้น ขณะเดียวกันในการเพิ่มความเร็วดัด และจำนวนใบมีดนั้นส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มปริมาณการผลิตเศษปาล์มเครื่องตัดย่อยทางปาล์มแบบใบตัดตั้ง การเพิ่มปริมาณเศษการตัดและการลดลงของขนาดเศษตัดนี้เป็นไปในทางเดียวกันกับการสับย่อยฟางข้าวซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากการทำนาที่สามารถทำให้เกิดเศษที่มีปริมาณสูงและมีขนาดเล็กกลงได้เมื่อความเร็วรอบการสับย่อยและจำนวนใบมีดสับย่อยฟางข้าวมีค่าสูงขึ้น [10]

General Linear Model: SIZE versus รอบ, จำนวนใบ			
Factor	Type	Levels	Value
รอบ	Fixed	3	540, 750, 1000
จำนวนใบ	Fixed	3	2, 3, 6

Anayasis of Variance for SIZE, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	<u>Seq</u> SS	<u>Adj</u> SS	<u>Adj</u> MS	F	P
รอบ	2	240.08	240.08	120.04	277.57	0.000
จำนวนใบ	2	2239.25	2239.5	1119.63	2588.92	0.000
รอบ*จำนวนใบ	4	81.16	81.16	20.29	46.92	0.000
Error	18	7.78	7.78	0.43		
Total	26	2568.28				

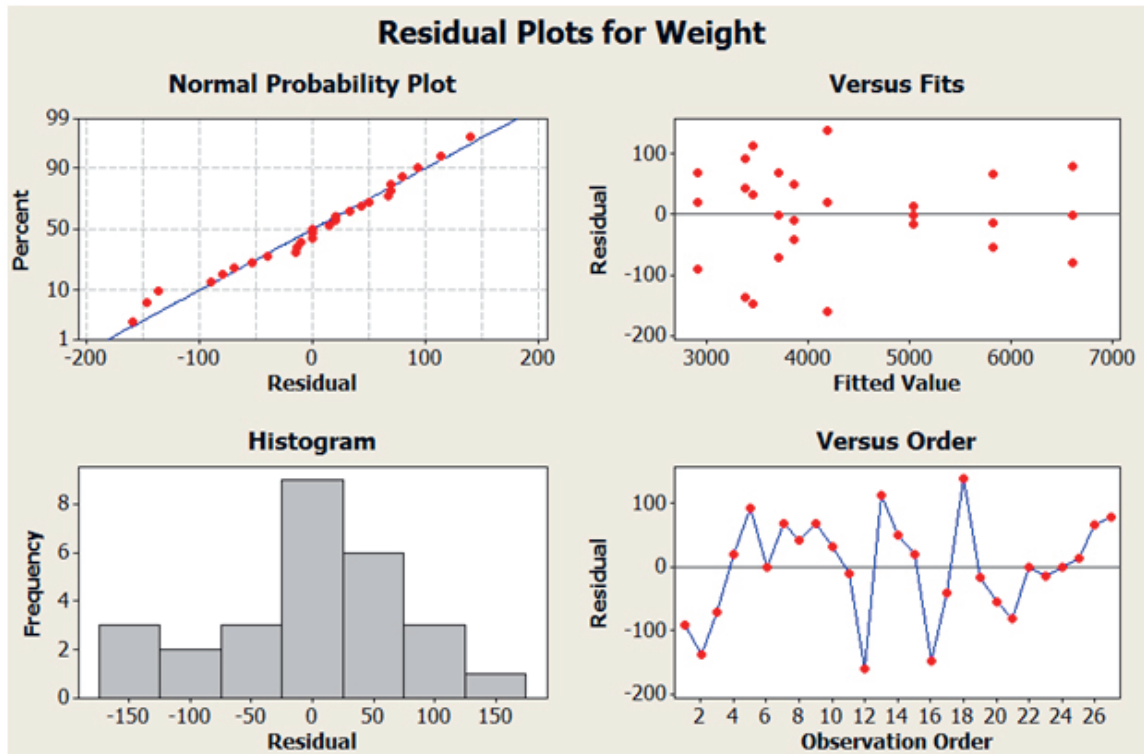
S = 0.657623 R-Sq = 99.70% R-Sq (adj) = 99.56%

รูปที่ 5 ผลการทดสอบความแปรปรวนของขนาดเศษปาล์ม

General Linear Model: WEIGHT versus รอบ, จำนวนใบ			
Factor	Type	Levels	Value
รอบ	Fixed	3	540, 750, 1000
จำนวนใบ	Fixed	3	2, 3, 6

<u>Anayasis</u> of Variance for SIZE, using Adjusted SS for Tests						
Source	DF	<u>Seq</u> SS	<u>Adj</u> SS	<u>Adj</u> MS	F	P
รอบ	2	4793430	4793430	2396715	272.27	0.000
จำนวนใบ	2	31111252	31111252	15555626	1767.13	0.000
รอบ*จำนวนใบ	4	661370	661370	165343	18.78	0.000
Error	18	158450	158450	8803		
Total	26	26724502				
S = 93.8231		<u>R Sq</u> = 99.57%		<u>R Sq</u> (adj) = 99.38%		

รูปที่ 6 ผลการทดสอบความแปรปรวนของอัตราการผลิตเศษปาล์ม

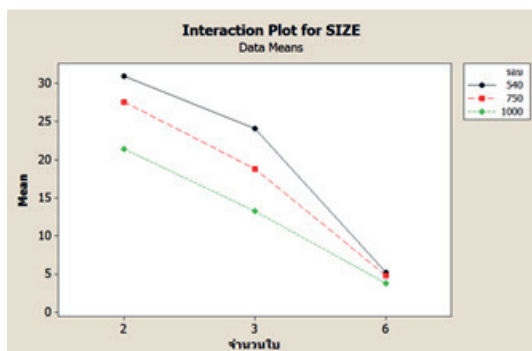


รูปที่ 7 กราฟทดสอบความพอเพียงของแบบจำลอง

ผลการทดลองที่ได้ในตารางที่ 1 และ 2 ถูกนำไปทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance) โดยใช้โปรแกรมมินิแท็ป [15] ช่วยในการวิเคราะห์และได้ผลดังรูปที่ 5 และรูปที่ 6 การตรวจสอบผลของการใช้โปรแกรมมินิแท็ปในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model adequacy checking) สามารถทำได้ดังรูปที่ 7

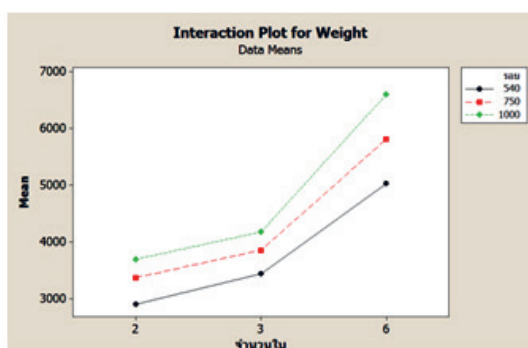
ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองพบว่ากราฟการแจกแจงความน่าจะเป็นปกติ (Normal probability plot) ดังรูปซ้ายบนของรูปที่ 7 มีการแจกแจงเชิงเส้นกล่าวคือในการสร้างกราฟจุดที่สร้างขึ้นมีค่าใกล้เคียงกันและแนวโน้มเป็นเส้นตรง และตัวแปรตามและตัวแปรอิสระมีความสัมพันธ์กันเป็นเชิงเส้นตรง [16] ชุดข้อมูลที่ได้เมื่อทำการพิจารณาด้วยกราฟฮิสโตแกรม (Histogram) พบว่าข้อมูลมีลักษณะการกระจายตัวแบบระฆังคว่ำซึ่งเป็นลักษณะการกระจายตัวแบบปกติ

ผลการทดสอบความแปรปรวนของขนาดเศษปาล์มดังรูปที่ 5 พบว่า ค่าพี (P-Value) ของความเร็วรอบ จำนวนใบมีด และผลกระทบร่วมหรืออันตรกิริยา มีค่าเท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่าค่า $\alpha = 0.05$ ผลการทดสอบจึงปฏิเสธสมมติฐาน และพบว่าตัวแปรของความเร็วรอบ จำนวนใบมีด และผลกระทบร่วม มีผลต่อขนาดของเศษปาล์ม ดังนั้นเมื่อพิจารณาผลกระทบร่วมแล้วค่าที่เหมาะสมที่ทำให้ขนาดของเศษปาล์มมีขนาดเล็กที่สุดอยู่จะใช้ความเร็วรอบที่ 1000 รอบต่อนาทีและใบมีดที่ 6 ใบ ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 ผลกระทบร่วม (อันตรกิริยา) ของความเร็วรอบและจำนวนใบมีดของขนาดเศษปาล์ม

ผลการทดสอบความแปรปรวนของอัตราการผลิตเศษปาล์มดังรูปที่ 6 พบว่า ค่า P-Value ของความเร็วรอบ จำนวนใบมีด และผลกระทบร่วมหรืออันตรกิริยามีค่าเท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่าค่า $\alpha = 0.05$ ผลการทดสอบจึงปฏิเสธสมมติฐาน และแสดงว่าตัวแปรของความเร็วรอบ จำนวนใบมีดและผลกระทบร่วมมีผลต่ออัตราการผลิตเศษปาล์ม ดังนั้นเมื่อพิจารณาผลกระทบร่วมแล้วค่าที่เหมาะสมที่ทำให้อัตราการผลิตเศษปาล์มมีอัตราการผลิตสูงสุดอยู่ จะใช้ความเร็วรอบที่ 1000 รอบต่อนาทีและใบมีดที่ 6 ใบ ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ผลกระทบร่วมของอัตราการผลิตเศษปาล์ม

4. สรุปผลการทดลอง

บทความนี้นำเสนอผลการหาค่าปัจจัยการตัดย่อยทางปาล์มที่เหมาะสมด้วยเครื่องตัดย่อยใบตัดตั้ง ตัวแปรการทดลองประกอบด้วยความเร็วรอบและจำนวนใบมีดตัดของเครื่องย่อยทางปาล์มใบตัดแนวตั้งที่มีผลต่อขนาดรูปร่างของเศษปาล์มและอัตราการผลิตของเศษปาล์ม โดยทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติแบบแฟคตอเรียล 23 แฟคตอเรียล แบบ 2 ปัจจัย 3 ระดับ ผลการทดลองโดยสรุปพบว่า ที่ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาทีของเครื่องย่อยทางปาล์มและจำนวนใบมีดตัด 6 ใบ จะทำให้ได้ขนาดรูปร่างเล็กที่สุด มีขนาดเฉลี่ย 3.8 มิลลิเมตร ขณะที่ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาทีของเครื่องย่อยทางปาล์มและจำนวนใบมีดตัด 6 ใบ ทำให้อัตราการผลิตของเครื่องย่อยทางปาล์มได้มากที่สุด อัตราการผลิตเฉลี่ย 6,600 กรัม

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยประจำปี 2559 จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Sriprasom N, Akesomtramet T. Correlation and heritability of vegetative characters of oil palm seedling. 2008;6(2):109-115 (in Thai).
- [2] Ajchompoo P, Sripuerk W, Borirak S. Development on the Use of Oil Palm Fronds as Roughage Feed Source for Thai Native Cattle. Proceeding of the 5th RMUT National Conference; 2013 July 15-16, Bangkok, Thailand. Bangkok: RMUTK. 2013. P. 79-86 (in Thai).
- [3] Nesdb.go.th [Internet]. Bangkok:

- Office of the National Economic and Social Development Board; [Updated 2017 June 14; cited 2017 June 14]. Available from <http://www.nesdb.go.th>
- [4] Meehaythai.com [Internet]. Chan taburi: Mee Hay; [Updated 2017 July 5; cited 2017 July 5] Available from <http://www.meehaythai.com>.
- [5] Farmkaset.org [Internet]. Amnat chareon: Ran Farm Kaset; [Updated 2014 May 20; cited 2014 May 20] Available from <http://www.farmkaset.org/contents/?content=00849>
- [6] Poksawat A, Songkong S. Cutting and Separating Machine Oil Palm Leaves and Fronds Used as Ruminant Animal Feed. Proceeding of the 5th UBU Conference; 2011 August 4-5, Ubonratchathani, Thailand. Ubonratchathani: UBU. p. 226-234 (in Thai).
- [7] Farmkaset.org [Internet]. Amnat chareon: Ran Farm Kaset; [Updated 2014 June 20; cited 2014 May 20] Available from <http://www.farmkaset.org/annasan.suratthani.doae.go.th/newshot6.html>
- [8] Rakbankerd.com [Internet] Bangkok: Rakbankerd Co.Ltd; [Updated 2014 May 20; cited 2014 May 20] Available from <http://www.rakbankerd.com/agriculture/page.php?id=1212&s=tblanimal>.
- [9] Aslan S. Coşkun H, Kılıç M. The effect of the cutting direction, number of blades and grain size of the abrasives on surface roughness of Taurus cedar (Cedrus Libani A. Rich.) woods. 2008;43:696-701.
- [10] Kosoom K. Study and Design of Cutting Blade from Rice Residues. Proceeding of the 5th Rajamangala University of Technology Conference. 2014; June 23-25:79-86 (in Thai).
- [11] Wegener JK and Wegener T. Wood chipping with conical helical blades – Theoretical deliberations and practical experiments concerning the adjustment of chip length with a set pitch of the blade. Biomass and Bioenergy. 2014; 66:151-158.
- [12] Atkins T. Optimum blade configurations for the cutting of soft solids. Engineering Fracture Mechanics. 2006;73: 2523-2531.
- [13] Eltawahni HA, Olabi AG, Benyounis KY. Investigating the CO2 laser cutting parameters of MDF wood composite material. Optics & Laser Technology. 2011;43: 648-659.
- [14] Aravind S, Shunmugesh K, Biju J, Vijayan JK. Optimization of Micro-Drilling Parameters by Taguchi Grey Relational Analysis. Materials Today: Proceedings. 2017;4:4188-4195.

[15] MINITAB. Minitab User Manual (Release 15) Making data analysis easier. USA: MINITAB Inc., 2001.

[16] MJu.ac.th [Internet] Chiangmai: MJU; [Updated 2017 July 1; cited 2017 July 1] Available from www.e-manage.mju.ac.th/openFile.aspx?id=NTg4Mjg=

การออกแบบและสร้างเครื่องลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวง

จตุรงค์ ลังกาพินธุ์^{1*}, สุนัน ปานสาคร², รุ่งเรือง กาลศิริศิลป์³, เกรียงไกร แชมสีม่วง⁴

ปาริชา งามนิล⁵ และ ชีรภัทร์ จูอี้⁶

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

grianggai.s@en.rmutt.ac.th⁴, prs.parisa@hotmail.com⁵, therapat_1@hotmail.com⁶

^{1*-6} ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Received: March 22, 2018

Revised: April 25, 2018

Accepted: May 21, 2018

บทคัดย่อ

เครื่องลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวงได้ถูกออกแบบและสร้างขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดเวลาและแรงงานในการแปรรูปเมล็ดบัวอบซึ่งเป็นสินค้าโอท็อปของจังหวัดที่มีการทำนาบัว เครื่องต้นแบบประกอบด้วยโครงสร้างเครื่อง ชุดลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวง ระบบส่งกำลัง และใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 0.5 แรงม้า เป็นต้นกำลัง หลักการทำงานของเครื่องเริ่มจากผู้ทำงานป้อนเมล็ดบัวหลวงครั้งละ 0.5 กิโลกรัม และน้ำ 1.5 ลิตรลงในช่องป้อนทางด้านบนของเครื่องเพื่อลอกเยื่อในชุดลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวง หลังจากที่ได้เมล็ดบัวหลวงถูกลอกเยื่อแล้ว จึงเปิดช่องทางออกซึ่งอยู่ทางด้านล่างของเครื่องเพื่อให้เมล็ดบัวไหลออกมาสู่ภาชนะรองรับจากการทดสอบเครื่องลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวงที่ความเร็วของชุดลอกเยื่อที่ 1,000 1,200 และ 1,400 รอบต่อนาที ที่เวลาในการทดสอบ 3, 4, 5, 6 และ 7 นาที ตามลำดับ พบว่าเครื่องต้นแบบสามารถทำงานได้ดีที่สุดที่ความเร็วของชุดลอกเยื่อ 1,200 รอบต่อนาที ใช้เวลาทำงาน 4 นาที มีความสามารถในการทำงาน 7.1 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เปอร์เซ็นต์ในการลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวง 94.5% เปอร์เซ็นต์ความเสียหายของเมล็ด 2.9% และอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า 0.66 กิโลวัตต์-ชั่วโมง จากการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมพบว่าเมื่อใช้เครื่องลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวง 1,440 ชั่วโมงต่อปี มีค่าใช้จ่ายเฉลี่ยของเครื่อง 3.90 บาทต่อกิโลกรัม จะมีระยะคืนทุน 3.4 ปี และจุดคุ้มทุน 1,170 ชั่วโมงต่อปี เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการลอกเยื่อด้วยแรงงานคน

คำสำคัญ: การออกแบบ เครื่องลอกเยื่อ เมล็ดบัวหลวง บัวหลวง

Design and Fabrication of a Lotus Seed Membrane Peeling Machine

Jaturong Langkapin^{1*} Sunan Parnsakhorn² Roongruang Kalsirisilp³

Grianggai samseemoung⁴ Parisa Ngmanil⁵ and Theerapat Juey⁶

jaturong.l@en.rmutt.ac.th^{1*}, sunan.p@en.rmutt.ac.th², Roongruang.k@en.rmutt.ac.th³,
grianggai.s@en.rmutt.ac.th⁴, prs.parisa@hotmail.com⁵, therapat_1@hotmail.com⁶

^{1*-6} Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Received: March 22, 2018

Revised: April 25, 2018

Accepted: May 21, 2018

Abstract

The research was to design and fabricate a lotus seeds membrane peeling machine to minimize the time and labor requirement in the processing of OTOP products of the provinces with lotus planting areas. The prototype consists of the main frame, lotus seed membrane peeling unit, the power transmission unit, and a 0.5 hp electric motor, which was used as a prime mover. In the operation, the 0.5 kg lotus seeds and 1.5 lites of water were fed manually into feeding chute at the top of the machine to peel the lotus seed membrane in the peeling unit. After the peeling, lotus seeds were released through outlet chute at the bottom. Results of testing at the peeling speed of 1,000, 1,200 and 1,400 rpm, and testing time at 3, 4, 5, 6 and 7 min, respectively indicated that the optimal performance was achieved when the machine was operated 4 min at peeling speed 1,200 rpm. The working capacity was 7.1 kg/hour, percentage of peeling was found to be 94.5% with seed damaged 2.9%, and consumed 0.66 kW-hour of energy. An engineering economic analysis showed that, at an annual usage rate of 1,440 hours, the machine cost was on average of 3.9 THB per kilogram, payback period of 3.4 years and the break-even point of the machine was 1,170 hours per year.

Keywords: design, peeling machine, lotus seed, lotus

1. บทนำ

เมล็ดบัวหลวงเป็นธัญพืชที่เป็นส่วนผสมในตำรายาหลายตำรับ มีคาร์โบไฮเดรต จึงให้พลังงาน โดยสรรพคุณที่โดดเด่นของเมล็ดบัวคือ ถ้าทานเมล็ดสดจะมีวิตามินซีสูง หรือทานแบบอบกรอบจะมีโปรตีนสูง มีฟอสฟอรัส ธาตุเหล็ก และแคลเซียม ในตำราแพทย์แผนจีน เมล็ดบัวมีฤทธิ์เป็นกลาง ช่วยบำรุงเลือด บำรุงหัวใจ รวมถึงอวัยวะภายในร่างกาย ช่วยบำรุงข้อ [1] ถิ่นกำเนิดของบัวส่วนใหญ่อยู่ในเขตร้อน จึงสามารถเจริญเติบโตได้ดีในทุกพื้นที่ของประเทศไทย ดังนั้นภาครัฐจึงได้สนับสนุนให้ปลูกบัวหลวงเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีน้ำท่วมขังไม่สามารถปลูกพืชชนิดอื่นได้ [2] เกษตรกรจำนวนมากในหลายจังหวัดยึดการปลูกบัวเป็นอาชีพหลัก และเนื่องจากบัวเป็นไม้ล้มลุก ลักษณะของแปลงปลูกจึงต้องมีการขังน้ำเหมือนทำนาข้าว จึงเรียกว่า การทำนาบัว นาบัวสามารถดูแลรักษาง่ายกว่านาข้าว มีโรคและแมลงรบกวนน้อย ใช้น้ำน้อยกว่า สามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตทั้งในรูปดอกตูมและเก็บเมล็ด ซึ่งผลผลิตทั้งสองรูปแบบนี้ยังเป็นที่ต้องการของทั้งในประเทศและต่างประเทศ ดังนั้นจากสภาพปัจจุบันที่เกษตรกรผู้ทำนาข้าวประสบปัญหาทั้งในเรื่อง การขาดน้ำ และราคาข้าวไม่แน่นอน นาบัวจึงเป็นทางเลือกใหม่ทางหนึ่งที่มีความเหมาะสมกับพื้นที่นาข้าว [3, 4, 5] ปัจจุบันเมล็ดบัวยังสามารถนำมาแปรรูปเป็นสินค้าโอท็อป ของจังหวัดที่มีการทำนาบัว เช่น วิชากิจชุมชนกลุ่มสตรีบึงสีไฟ อ.เมือง จ.พิจิตร ผลิต “เมล็ดบัวอบกรอบ” บรรจุกล่องพลาสติก และดิบแคปซูลจำหน่ายเป็นสินค้าโอท็อป ซึ่งมียอดจำหน่ายแต่ละปีกว่า 1.2 ล้านบาท [6] นอกจากนั้นเมล็ดบัวยังเป็นส่วนประกอบหลักของไส้ขนมไหว้พระจันทร์ไส้ลูกบัวของโรงงานผลิตขนมไหว้พระจันทร์ต่างๆ สำหรับส่งขายทั่วประเทศ เช่น โรงงานผลิตขนมไหว้พระจันทร์ เอส แอนด์ พี เป็นต้น

เมล็ดบัวหลวงสด (มีเปลือกสีเขียวเข้ม) ที่จะนำไปแปรรูปในปัจจุบันจะแกะเปลือกโดยใช้มีด แล้วทำการลอกเยื่อจนได้เมล็ดบัวสีขาวด้วยมีด ดังรูปที่ 1 ซึ่งขั้นตอนดังกล่าวยังใช้แรงงานคนเป็นหลักทำให้ต้องใช้เวลาในการเตรียมเมล็ดบัวเพื่อการแปรรูปสูง อีกทั้งในประเทศไทยยังไม่มีเครื่องทุ่นแรงสำหรับใช้ในกระบวนการแกะเปลือกและลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวง ส่วนเครื่องแกะเปลือกและเครื่องลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวงที่มีใช้ในต่างประเทศ เช่นในประเทศจีนนั้นไม่เหมาะที่จะนำมาใช้กับเมล็ดบัวพันธุ์ที่นิยมปลูกในประเทศไทยเนื่องจากเมล็ดบัวหลวงมีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกัน และราคานำเข้าค่อนข้างแพง จึงทำให้ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ได้วิจัยและพัฒนาเครื่องแกะเมล็ดบัวหลวงขึ้น [7, 8] ดังนั้นเพื่อเพิ่มศักยภาพการผลิตผลิตภัณฑ์สินค้าโอท็อปของวิชากิจชุมชนให้สูงขึ้น จึงได้ทำการวิจัยต่อเนื่องโดยการออกแบบและสร้างเครื่องลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวงที่ทำงานต่อจากเครื่องแกะเมล็ดบัวหลวง



รูปที่ 1 ก) การแกะเปลือก และ
ข) ลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวง โดยใช้มีด

2. อุปกรณ์และวิธีการ

งานวิจัยนี้ให้ความสำคัญในการออกแบบและสร้างเครื่องลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวงที่ปลูกในประเทศไทย ซึ่งมีระเบียบวิธีการวิจัยดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.1 ศึกษาข้อมูลที่เป็นต่อการออกแบบ

2.1.1 ศึกษาปัญหาและวิธีการลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวง

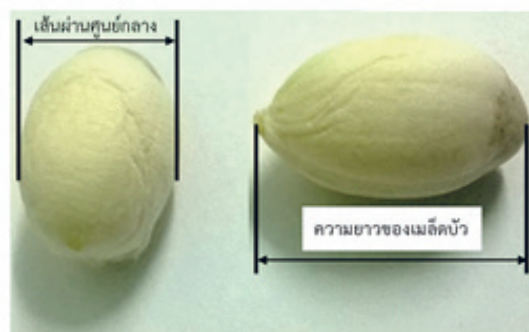
วัตถุประสงค์เพื่อให้ทราบถึงปัญหาและวิธีการลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวงของเกษตรกรในปัจจุบัน เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับเปรียบเทียบการทำงานระหว่างเครื่องลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวงต้นแบบกับวิธีที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน จากการสัมภาษณ์กลุ่มแม่บ้านบึงสีไฟ อ.เมือง จ.พิจิตร ได้ผลการศึกษาดังนี้

- แรงงานในกระบวนการผลิตมาจากแรงงานในกลุ่มสหกรณ์ในชุมชนซึ่งมีสมาชิก 30 คน หรือหมู่บ้านใกล้เคียง ซึ่งในปัจจุบันจำนวนแรงงานมีจำนวนลดลง
- ค่าจ้างแรงงานสำหรับการแกะและลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวง 10 บาทต่อกิโลกรัม
- ปริมาณการแกะและลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวงในแต่ละวันประมาณ 24-36 กิโลกรัม (ทำงานไม่เกิน 8 ชั่วโมง) โดยขึ้นอยู่กับความชำนาญในการแกะและลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวง
- ปัญหาที่พบในขั้นตอนการลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวงคือเกิดความไม่ปลอดภัยในการทำงาน เช่น เกิดอุบัติเหตุจากมีดบาด

2.1.2 ลักษณะทางกายภาพของเมล็ดบัวหลวง

การศึกษาในขั้นตอนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้ข้อมูลลักษณะทางกายภาพของเมล็ดบัวหลวงสำหรับใช้ในการออกแบบเครื่องต้นแบบ ได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลาง และความยาวของเมล็ดบัวหลวง ดังรูปที่ 2 สำหรับใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบชุดลอกเยื่อและการปรับตั้งต่างๆ ที่จำเป็นในการออกแบบเครื่อง โดยการสุ่มวัดขนาดเมล็ดบัวหลวงจำนวน 100 เมล็ด ด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ จากการศึกษาได้เส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 9.0-14.0 มิลลิเมตร

มีค่าเฉลี่ย 12.2 ± 1.0 มิลลิเมตร และความยาวของเมล็ดบัวหลวงระหว่าง 14.0-18.0 มิลลิเมตร มีค่าเฉลี่ย 16.2 ± 0.8 มิลลิเมตร ซึ่งเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของเมล็ดบัวหลวงได้ถูกนำไปใช้ออกแบบระยะห่างของชุดลอกเยื่อ ความกว้างและความสูงของช่องป้อนเมล็ดบัวหลวง



รูปที่ 2 ลักษณะทางกายภาพของเมล็ดบัวหลวง

2.2 ออกแบบและสร้างเครื่องลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวง

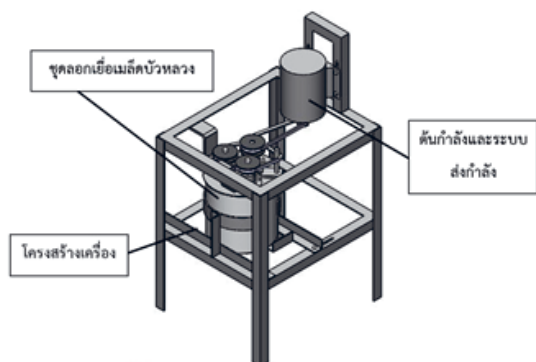
การออกแบบเครื่องลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวงต้นแบบนี้้นอกจากจะใช้ข้อมูลที่จำเป็นต่อการออกแบบแล้ว ยังได้ประยุกต์ใช้ความรู้และหลักการออกแบบเครื่องจักรกลและเครื่องจักรกลเกษตร [9, 10, 11] รวมทั้งโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบและเขียนแบบ [12] ซึ่งมีส่วนประกอบหลักดังรูปที่ 3 (ก) คือ โครงสร้างเครื่อง ชุดลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวง ระบบส่งกำลัง และใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 0.5 แรงม้า เป็นต้นกำลัง มีรายละเอียด ดังนี้

โครงสร้างของเครื่อง ใช้สำหรับติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ของเครื่องต้นแบบ มีขนาด $530 \times 620 \times 1,100$ มิลลิเมตร (กว้าง×ยาว×สูง) สร้างจากเหล็กฉากขนาด 40×40 มิลลิเมตรหนา 4 มิลลิเมตร โดยอุปกรณ์ส่วนใหญ่ถูกยึดเข้ากับโครงสร้างด้วยน็อตและสกรู

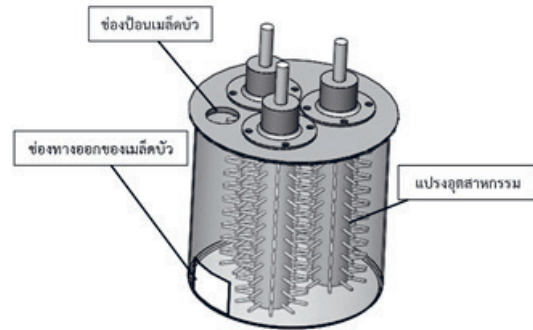
ชุดลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวงดังรูปที่ 3 (ข) ทำหน้าที่หมุนลอกเยื่อของเมล็ดบัวหลวง มีส่วนประกอบหลัก ได้แก่ ชุดแปรงลอกเยื่อ เมล็ดบัวหลวงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ยาว 250 มิลลิเมตร จำนวน 3 ชุด ขับด้วยเพลาคับขนาด 0.6 นิ้ว และติดตั้งอยู่ใน ถังสแตนเลสเส้นผ่านศูนย์กลาง 260 มิลลิเมตร สูง 260 มิลลิเมตร หนา 1 มิลลิเมตร

ระบบส่งกำลัง การส่งกำลังไปยังส่วน ประกอบต่างๆ ของเครื่องต้นแบบจะใช้พูลเลย์ และสายพาน เนื่องจากออกแบบง่าย ไม่เกิด เสียงดังขณะทำงาน และราคาถูก

หลักการทำงานของเครื่องเริ่มจาก ผู้ทำงานป้อนเมล็ดบัวหลวงและน้ำลงไป ใน ชุดลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวง เมื่อเปิดเครื่อง ชุดแปรงลอกเยื่อจะทำการหมุนลอกเยื่อออก จากเมล็ดบัวโดยมีน้ำเป็นตัวช่วย เมื่อครบเวลา ที่กำหนดทำการหยุดเครื่อง แล้วเปิดช่องทางออก ทางด้านล่างของเครื่อง เพื่อให้เมล็ดบัวหลวงไหล ออกมาสู่ภาชนะที่รองรับ ซึ่งเครื่องต้นแบบที่สร้าง เสร็จแสดงดังรูปที่ 3 (ค)



ก) แบบเครื่องต้นแบบด้วยโปรแกรมด้าน CAD



ข) แบบชุดลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวง



ค) เครื่องลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวงต้นแบบ

รูปที่ 3 แบบและเครื่องลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวง ต้นแบบ

2.3 ทดสอบและประเมินสมรรถนะ เครื่องต้นแบบ

เครื่องต้นแบบได้ถูกทดสอบและประเมิน สมรรถนะในการทำงาน รวมทั้งคุณภาพในการ ลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวง โดยใช้เปอร์เซ็นต์การลอก เยื่อเมล็ดบัวหลวง เปอร์เซ็นต์ความเสียหาย ของเมล็ด ความสามารถในการทำงาน และอัตรา การสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า เป็นค่าชี้ผลการศึกษา ซึ่งคำนวณได้จากสมการ ดังนี้

1) เปอร์เซ็นต์การลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวง (%)

$$\frac{\text{น้ำหนักของเมล็ดบัวหลวงที่ลอกเยื่อได้}}{\text{น้ำหนักของเมล็ดบัวหลวงทั้งหมด}} \times 100 \quad (1)$$

2) เปอร์เซ็นต์ความเสียหายของเมล็ด (%)

$$\frac{\text{น้ำหนักของเมล็ดบัวหลวงที่เสียหาย}}{\text{น้ำหนักของเมล็ดบัวหลวงทั้งหมด}} \times 100 \quad (2)$$

3) ความสามารถในการทำงาน (kg/hr)

$$\frac{\text{น้ำหนักของเมล็ดบัวหลวงที่ลอกเยื่อได้ทั้งหมด}}{\text{เวลาในการทำงานทั้งหมด}} \times 100 \quad (3)$$

4) อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า (kW-hr)

$$= \frac{IVt}{1000}$$

เมื่อ I = กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

V = แรงเคลื่อนไฟฟ้า (โวลต์)

t = เวลา (ชั่วโมง)

การทดสอบใช้เมล็ดบัวหลวงปทุม
เส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 9.0-14.0 มิลลิเมตร
มีค่าเฉลี่ย 12.2±0.9 มิลลิเมตร และความยาว
ของเมล็ดบัวหลวงระหว่าง 14.0-18.0 มิลลิเมตร
มีค่าเฉลี่ย 16.2±0.7 มิลลิเมตร (สุ่มวัด 50 เมล็ด)
ตลอดการทดสอบ จากการทดสอบเบื้องต้น
พบว่าต้องเดินเครื่องที่ความเร็วรอบของชุด
ลอกเยื่ออย่างน้อย 1,000 รอบต่อนาที ใช้เวลา
มากกว่า 3 นาที และต้องผสมน้ำเปล่ารวมกับ
เมล็ดบัวหลวงด้วยจึงจะสามารถลอกเยื่อได้
ดังนั้นจึงเลือกทดสอบที่ความเร็วรอบของชุด
ลอกเยื่อที่ 1,000, 1,200 และ 1,400 รอบ
ต่อนาที เพื่อหาความเร็วของชุดลอกเยื่อที่ดีที่สุด
โดยกำหนดเวลาในการลอกเยื่อเป็น 3, 4, 5, 6
และ 7 นาที ตามลำดับ โดยแต่ละการทดสอบ
ใช้เมล็ดบัวหลวง 0.5 กิโลกรัม และน้ำ 1.5 ลิตร
ทำซ้ำ 3 ซ้ำ และบันทึกเวลาที่ใช้ในการทำงาน
ทั้งหมด กระแสไฟฟ้า น้ำหนักเมล็ดบัวที่ลอกเยื่อได้

น้ำหนักเมล็ดบัวที่ลอกเยื่อไม่ได้ และน้ำหนัก
เมล็ดบัวที่เสียหาย เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณ
ค่าชี้ผลการศึกษา และวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์
วิศวกรรม เช่น ค่าใช้จ่าย ระยะเวลาคืนทุน และ
จุดคุ้มทุน ในการใช้เครื่องลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวง

2.4 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์

2.4.1 การวิเคราะห์และประเมิน ค่าใช้จ่ายโดยเฉลี่ย

วิธีการประเมินค่าใช้จ่ายโดยรวมเกี่ยวกับ
ต้นทุนในการใช้งานเครื่องลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวง
สมมติว่าเกษตรกรซื้อเครื่องลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวง
แทนวิธีการใช้แรงงานคน ซึ่งค่าใช้จ่ายโดยรวม
จะประกอบด้วยต้นทุนคงที่ (Fixed cost) และ
ต้นทุนผันแปร (Variable cost) โดยต้นทุนคงที่
ได้แก่ ค่าเสื่อมราคาของเครื่อง (คิดค่าเสื่อมราคา
โดยวิธีเส้นตรงเมื่อประมาณอายุการใช้งานของ
เครื่องลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวงได้ 5 ปี) และค่า
เสียโอกาสของเงินทุน (คิดอัตราดอกเบี้ย 10%)
ซึ่งค่าใช้จ่ายที่เป็นต้นทุนคงที่จะไม่เปลี่ยนแปลงไป
ตามปริมาณของการลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวง [13]

2.4.2 การวิเคราะห์ระยะเวลาคืน ทุน (Pay-back period)

เป็นการคาดคะเนว่า เมื่อลงทุนใช้
เครื่องลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวงไปแล้ว จะได้รับ
ผลตอบแทนกลับคืนมาในจำนวนเงินเท่ากับ
ที่ลงทุนไปแล้วภายในระยะกี่ปี โดยคิดจากราคา
ในการลงทุนซื้อเครื่องลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวง
หารกับผลประโยชน์สุทธิที่คาดว่าจะได้รับในการ
ใช้งานเครื่องลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวง 5 ปี [13]

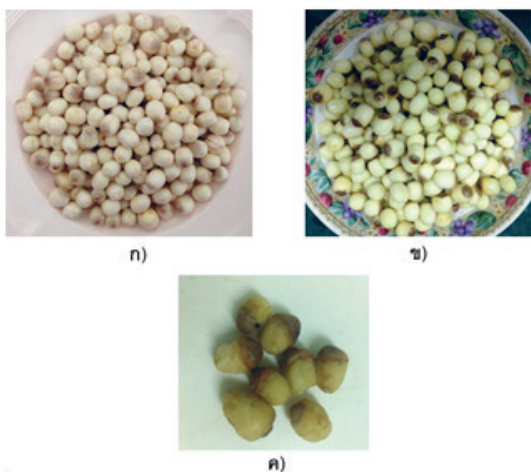
2.4.3 การวิเคราะห์จุดคุ้มทุน (Break-even point)

เป็นการคำนวณหาจุดคุ้มทุนในการใช้
เครื่องลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวงต้นแบบ โดยการ
เปรียบเทียบระหว่างต้นทุนในการลอกเยื่อเมล็ด

บัวหลวงจากการใช้เครื่องต้นแบบและการลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวงด้วยแรงงานคน

3. ผลการวิจัย

ในการทดสอบสมรรถนะการทำงานของเครื่องลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวงต้นแบบ ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4 โดยรูปที่ 4 (ก) แสดงเมล็ดบัวหลวงสดหลังการแกะเปลือกออกแล้ว ก่อนการทดสอบ ซึ่งหลังจากได้นำไปทดสอบโดยเครื่องลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวงต้นแบบแล้ว จะได้เมล็ดบัวหลวง ดังรูปที่ 4 (ข) ที่พร้อมจะนำไปแปรรูปเป็นเมล็ดบัวอบเพื่อนำไปจำหน่ายต่อไป ส่วนรูปที่ 4 (ค) แสดงเมล็ดบัวหลวงบางส่วนเกิดความเสียหายจากการทดสอบ โดยเมล็ดบัวที่เสียหายพิจารณาจากเมล็ดบัวที่มีรอยแตกเสียหายทุกๆ แบบจากเมล็ดเต็ม ซึ่งเมล็ดบัวที่เสียหายนี้สามารถนำไปดัดเป็นแป้งเมล็ดบัวสำหรับทำไส้ขนมได้ต่อไป



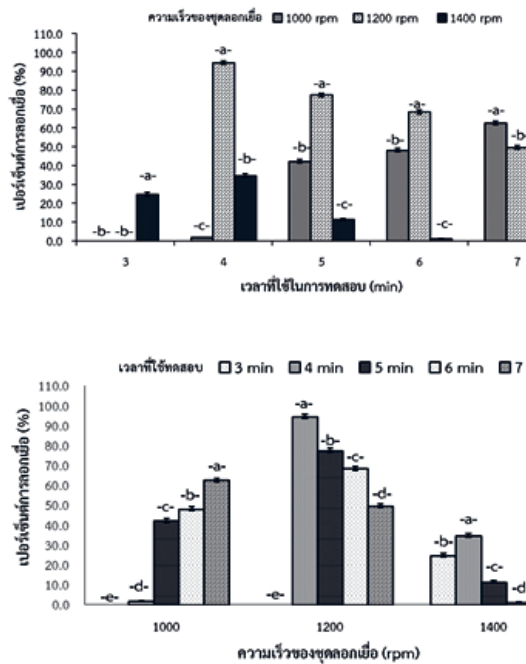
รูปที่ 4 ก) เมล็ดบัวหลวงที่ใช้ทดสอบ
ข) เมล็ดบัวหลวงหลังการลอกเยื่อ และ
ค) เมล็ดบัวที่เสียหายจากการทดสอบ

ผลการทดสอบเครื่องลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวงที่ความเร็วรอบของชุดลอกเยื่อและเวลาในการทดสอบต่างๆ จะนำเสนอตามค่าชี้ผลการศึกษา ดังนี้

3.1 เพอร์เซ็นต์การลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวง

จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า เพอร์เซ็นต์การลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวงมีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ทั้งในการทดสอบโดยใช้ความเร็วของชุดลอกเยื่อและที่เวลาในการทดสอบต่างๆ ดังรูปที่ 5

จากผลการทดสอบเครื่องลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวงดังรูปที่ 5 ที่ความเร็วรอบของชุดลอกเยื่อที่ 1,000, 1,200 และ 1,400 รอบต่อนาที โดยกำหนดเวลาในการลอกเยื่อเป็น 3, 4, 5, 6 และ 7 นาที ตามลำดับ พบว่าเมื่อใช้ความเร็วรอบของชุดลอกเยื่อต่ำจะต้องใช้เวลาในการลอกเยื่อนานขึ้นเพื่อให้เครื่องมีเพอร์เซ็นต์การลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวงสูงขึ้น และในกรณีที่เพิ่มความเร็วรอบของชุดลอกเยื่อให้สูงขึ้นและเพิ่มเวลาในการทำงานเพอร์เซ็นต์การลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวงจะลดลงเนื่องจากเมล็ดบัวเกิดความเสียหายเพิ่มขึ้นซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป จากการทดลองเครื่องต้นแบบสามารถลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวงได้ดีที่สุดที่ความเร็วรอบของชุดลอกเยื่อ 1,200 รอบต่อนาที ใช้เวลาทดสอบ 4 นาที มีเพอร์เซ็นต์การลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวง 94.5%



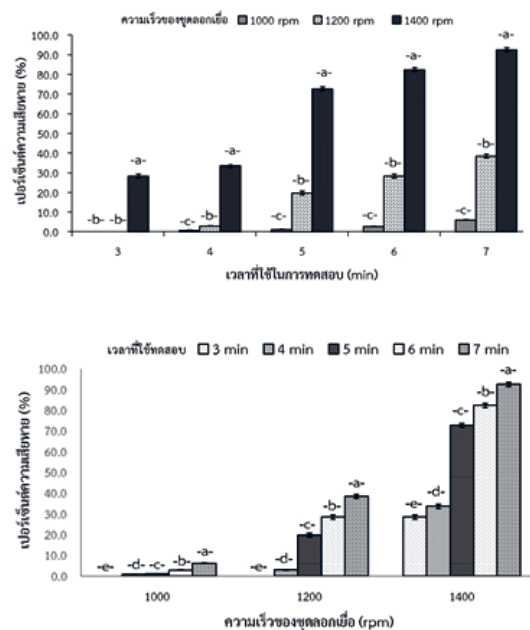
รูปที่ 5 เปอร์เซ็นต์การลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวง ในแต่ละความเร็วของชุดลอกเยื่อที่เวลาในการทดสอบต่างๆ (abcde อักษรที่แตกต่างกัน ในแต่ละชุดการทดสอบแสดงว่าเปอร์เซ็นต์การการลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวงมีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05)

3.2 เปอร์เซ็นต์ความเสียหายของเมล็ดบัวหลวง

จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า เปอร์เซ็นต์ความเสียหายของเมล็ดบัวหลวงมีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ทั้งในการทดสอบโดยใช้ความเร็วของชุดลอกเยื่อและที่เวลาในการทดสอบต่างๆ ดังรูปที่ 6

จากผลการทดสอบเครื่องลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวง ที่ความเร็วรอบของชุดลอกเยื่อที่ 1,000, 1,200 และ 1,400 รอบต่อนาที โดยกำหนดเวลาในการลอกเยื่อเป็น 3, 4, 5, 6 และ 7 นาที ตามลำดับ ดังรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่า เมล็ดบัวหลวงจะเกิดความเสียหายเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วรอบของชุดลอกเยื่อและเวลาในการทำงาน ในกรณีที่ทดสอบที่เวลาเท่ากันเมล็ดบัวจะเกิด

การเสียหายมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วรอบของชุดลอกเยื่อ ส่วนกรณีที่ทดสอบที่ความเร็วรอบของชุดลอกเยื่อเดียวกันเมื่อเพิ่มเวลาในการทดสอบให้นานขึ้นเมล็ดบัวจะเกิดการเสียหายมากขึ้นเช่นกัน ดังนั้นจากการทดลองดังกล่าว เครื่องต้นแบบมีเปอร์เซ็นต์การลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวงสูงสุดที่ความเร็วรอบของชุดลอกเยื่อ 1,200 รอบต่อนาที ใช้เวลาทดสอบ 4 นาที ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ความเสียหายของเมล็ดบัวหลวง 2.9%



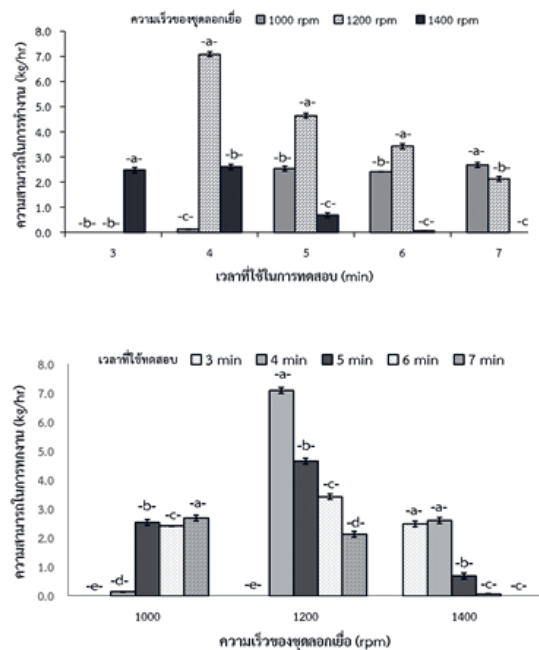
รูปที่ 6 เปอร์เซ็นต์ความเสียหายของ เมล็ดบัวหลวงในแต่ละความเร็วของชุดลอกเยื่อที่เวลาในการทดสอบต่างๆ (abcde อักษรที่แตกต่างกันในแต่ละชุดการทดสอบแสดงว่าเปอร์เซ็นต์การลอกเยื่อ เมล็ดบัวหลวงมีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05)

3.3 ความสามารถในการทำงานของเครื่อง

จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า ความสามารถในการทำงานมีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ทั้งในการทดสอบ

โดยใช้ความเร็วของชุดลอกเยื่อและที่เวลาในการทดสอบต่างๆ ดังรูปที่ 7

จากผลการทดลองข้างต้นเครื่องต้นแบบทำงานได้ดีที่สุดที่ความเร็วรอบของชุดลอกเยื่อ 1,200 รอบต่อนาที ใช้เวลาทดสอบ 4 นาที มีความสามารถในการทำงาน 7.1 ± 0.1 กิโลกรัม ชั่วโมง หรือคิดเป็น 56.72 กิโลกรัมต่อวัน (1 วันทำงาน 8 ชั่วโมง) เมื่อเปรียบเทียบกับการทำงานของเกษตรกรที่ทำงานได้เพียง 24-36 kg กิโลกรัมต่อวัน จะเห็นว่าเครื่องต้นแบบสามารถทำงานได้มากกว่าการทำงานของเกษตรกรถึง 20 กิโลกรัมต่อวัน ดังนั้นจึงได้เลือกใช้ความสามารถในการทำงาน 7.1 กิโลกรัม ชั่วโมง ไปใช้ในการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมต่อไป

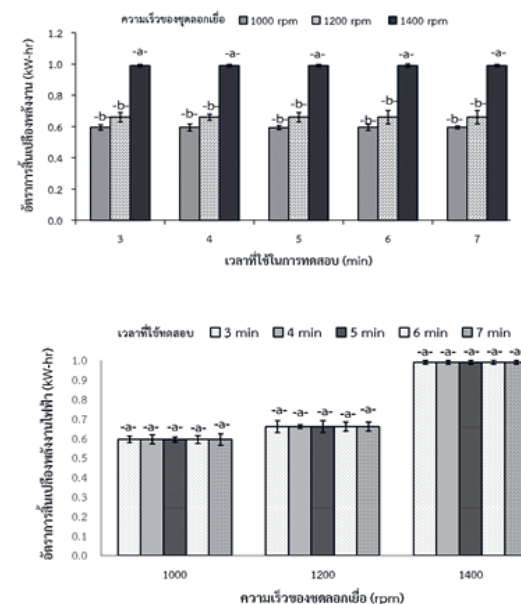


รูปที่ 7 ความสามารถในการทำงานในแต่ละความเร็วของชุดลอกเยื่อที่เวลาในการทดสอบต่างๆ (abcde อักษรที่แตกต่างในแต่ละชุดการทดสอบแสดงว่าเปอร์เซ็นต์การลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวงมีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05)

3.4 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า

จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้ามีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ในการทดสอบโดยใช้ความเร็วของชุดลอกเยื่อต่างกัน และมีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ในการทดสอบโดยใช้ที่เวลาในการทดสอบต่างๆ ดังรูปที่ 8

จากผลการทดสอบ ดังรูปที่ 8 พบว่าช่วงความเร็วที่ใช้ขับชุดลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวงมีการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามความเร็วการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ามีค่าระหว่าง 0.59-0.99 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ซึ่งจะนำค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าของมอเตอร์ขับที่ความเร็วรอบของชุดลอกเยื่อ 1,200 รอบต่อนาที เท่ากับ 0.66 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ไปเป็นค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมต่อไป



รูปที่ 8 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าในแต่ละความเร็วของชุดลอกเยื่อที่เวลาในการทดสอบต่างๆ (abcde อักษรที่แตกต่างในแต่ละชุดการทดสอบแสดงว่าเปอร์เซ็นต์การลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวงมีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05)

3.5 ผลการวิเคราะห์และประเมินผลเชิงเศรษฐศาสตร์

จากผลการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม โดยคิดที่ราคาเครื่องต้นแบบ 11,700 บาท อายุการใช้งาน 5 ปี อัตราดอกเบี้ย 10% ใช้ผู้ควบคุมเครื่อง 1 คน ความสามารถในการทำงาน 7.1 กิโลกรัมชั่วโมง อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า 0.66 กิโลวัตต์-ชั่วโมง เมื่อใช้เครื่องต้นแบบทำงาน 6 เดือน หรือ 1,440 ชั่วโมงต่อปี (ทำงานวันละ 8 ชั่วโมง) มีค่าใช้จ่ายเฉลี่ยของเครื่อง 3.9 บาทต่อกิโลกรัม ระยะเวลาคืนทุน 3.4 ปี และการใช้งานที่จุดคุ้มทุน 1,170 ชั่วโมงต่อปี เมื่อเปรียบเทียบกับแรงงานคน 1 คน มีค่าใช้จ่ายเฉลี่ย 10 บาทต่อกิโลกรัม

4. สรุปผลการทดลอง

จากการทดสอบสมรรถนะเครื่องลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวงโดยใช้ค่าชี้วัดการศึกษา คือ เปอร์เซ็นต์การลอกเยื่อ เปอร์เซ็นต์ความเสียหาย ความสามารถในการทำงาน และอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า พบว่าเครื่องต้นแบบสามารถทำงานได้ดีที่สุดที่ความเร็วรอบของชุดลอกเยื่อ 1,200 รอบต่อนาที ใช้เวลาทำงาน 4 นาที มีเปอร์เซ็นต์การลอกเยื่อ 94.5% เปอร์เซ็นต์ความเสียหาย 2.9% ความสามารถในการทำงาน 7.1 กิโลกรัมชั่วโมง และใช้พลังงานไฟฟ้า 0.66 กิโลวัตต์-ชั่วโมง และจากการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการใช้เครื่องลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวง พบว่าค่าใช้จ่ายเฉลี่ยของเครื่อง 3.90 บาทต่อกิโลกรัม ระยะเวลาคืนทุน 3.4 ปี และการใช้งานที่จุดคุ้มทุน 1,170 ชั่วโมงต่อปี เมื่อเปรียบเทียบกับแรงงานคน ซึ่งเครื่องต้นแบบสามารถที่จะพัฒนาเพื่อใช้ทดแทนแรงงานคนได้ต่อไปในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากงบประมาณรายจ่ายประจำปี 2560 ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี โดยคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) รวมทั้งภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่สนับสนุนสถานที่และอุปกรณ์ในการทดสอบต่างๆ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Suksawat W. 7 benefits of Thai grains [Internet]. Bangkok. 2017 Jun-[cited 2018 April 23]; Available from: <http://www.tnews.co.th/contents>.
- [2] Lotus production situation [Internet]. Bangkok. Department of Agriculture Extension. [updated 2017 May 16; cited 2018 Jul 9]. Available from: <http://www.doae.go.th/LIBRARY/>.
- [3] Suwannaro T. Lotus farming. Extension and Training Office. Bangkok: Kasetsart University; 2007.
- [4] Lotus field in Nakhon Phanom province of Thailand [Internet]. Bangkok, Matichon Online. 2016 Jun- [cited 2016 Feb 16]. Available from: <http://www.matichon.co.th/news>.
- [5] Mueangsuk S. Lotus farming in Bueng Kan [Internet]. Bangkok, kaosod Online. 2016 Feb- [cited 2016 Feb 15]. Available from: https://www.kaosod.co.th/view_newsonline.php?newsid.

- [6] Vjittwittayapong P. 2552. Lotus seeds product of Phichit [Internet]. Bangkok, Matichon Online. 2013 Jun- [cited 2013 Feb 13]. Available from: http://www.matichon.co.th/matichon/view_news.
- [7] Pimparain P, Srisudto P, and Upmagay T. Design and development of a lotus seed peeling machine. [Engineering Project]. Pathum thani: Rajamangala University of Technology Thanyaburi; 2009. (in Thai)
- [8] Langkapin J, Parnsakhorn S, Kalsirisilp R, Prorod M, and Khotpromsrt N. Study and testing of a lotus seed peeling machine. Journal of Engineering RMUTT. 2018;1:35-42. (in Thai)
- [9] Langkapin J. Theory of agricultural machines. 1st ed. Bangkok: Triple Education Co., Ltd; 2015. (in Thai)
- [10] Krutz, G, Thomson, L and Claar, P. Design of agricultural machinery. 1st ed. New York: John Wiley and Sons, 1994.
- [11] Shigley, J.E. and Mischke, C.R. Mechanical engineering design. 5th ed, USA: McGraw-Hill Book Company; 1989.
- [12] Langkapin J. Solidworks. 3rd. Bangkok: Triple Education Co., Ltd; 2018. (in Thai)
- [13] Hunt, D. Farm power and machinery. 10th ed. Iowa, USA: Iowa State University Press; 2001.

การออกแบบและสร้างเครื่องสไลด์เหง้าบัวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ การแปรรูปผลิตผลทางการเกษตร

มานพ แยมแพง^{1*} และบุญฤทธิ์ ประสาทแก้ว²

manop.y@en.rmutt.ac.th^{1*}, boonrit.p@en.rmutt.ac.th²

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Received: March 16, 2018
Revised: March 30, 2018
Accepted: July 4, 2018

บทคัดย่อ

การออกแบบและสร้างเครื่องสไลด์เหง้าบัวเพื่อนำไปเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการแปรรูปให้กับกลุ่มเกษตรกร โดยเครื่องสไลด์เหง้าบัวประกอบด้วย กระจบอกล่เหง้าบัว ชุดสไลด์เหง้าบัว และชุดต้นกำลังใช้มอเตอร์ขนาด 1/2 แรงม้า การออกแบบและสร้างเครื่องจะใช้หลักทางกลเป็นส่วนสำคัญ การทำงานของเครื่องโดยผู้ทำงานจะป้อนเหง้าบัวลงในกระจบอกล่เหง้าบัวที่มีมุมให้เลือก 45 และ 90 องศา โดยปัจจัยที่ศึกษาคือความเร็วรอบของชุดสไลด์เหง้าบัวที่เหมาะสม จากผลการทดสอบพบว่า สมรรถนะสูงสุดของเครื่องสไลด์เหง้าบัวอยู่ที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที สามารถสไลด์เหง้าบัวได้ 55 และ 60 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ที่กระจบอกล่เหง้าบัวมุม 45 และ 90 องศา ตามลำดับ และเครื่องสามารถสไลด์เหง้าบัวได้มากกว่าการสไลด์ด้วยแรงงานคน 2.4 เท่า มีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า 0.373 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ซึ่งเครื่องสไลด์เหง้าบัวสามารถสไลด์เหง้าบัวได้สม่ำเสมอและมีอัตราการผลิตคงที่ถึงแม้ว่าจะทำงานเป็นระยะเวลานาน และเมื่อเกษตรกรนำเครื่องสไลด์เหง้าบัวไปใช้จะมีระยะเวลาการคืนทุน 3.2 เดือน

คำสำคัญ: บัว เหง้าบัว เครื่องสไลด์

Design and Construction of the Lotus Root Slicing Machine to Increase the Efficiency of the Agricultural Product Process

Manop Yamfang^{1*} and Boonrit Prasartkaew²
manop.y@en.rmutt.ac.th^{1*}, boonrit.p@en.rmutt.ac.th²

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

Received: March 16, 2018
Revised: March 30, 2018
Accepted: July 4, 2018

Abstract

Design and construction of the lotus root slicing machine are to increase the efficiency of the agricultural product process for the farmer sector. The lotus root slicing machine consists of the lotus root feeding pipe, the lotus root slicing unit and the motor power unit 1/2 hp. The design and construction of this machine use the mechanical principles as the important parts. For the operation of the machine, the operator brings the lotus root into the lotus root feeding pipe that is composed of two angle choices: 45 and 90 degrees. The studied parameter is the suitable speed for the lotus root slicing unit. From the experiment, it is found that the maximum efficiency of the lotus root slicing machine occurs at speed 200 rpm. The machine can slice the lotus root 55 kg/h and 60 kg/h at the angle 45 and 90 degrees, respectively. Furthermore, the machine can slice the lotus root more than 2.4 times the labor force does. The power consumption is 0.373 kW-h. The lotus root slicing machine can cut the lotus root regularly and has a constant production rate despite working for long periods of time. When the farmers use the lotus root slicing machine, the payback period is 3.2 month.

Keywords: lotus, lotus root, slicing machine

1. บทนำ

บัว ถือว่าเป็นของขบถด้านอาหาร และสมุนไพรที่สำคัญอย่างหนึ่งของมนุษยชาติ เพราะเป็นอาหารและยารักษาโรค เมื่อครั้งอดีตกาลคนในแถบเอเชียและอเมริกาเหนือต่างรู้จักใช้เมล็ดบัว และเหง้าบัวเป็นอาหารโดยเฉพาะในช่วงฤดูแล้ง ที่อาหารขาดแคลน คุณค่าโภชนาการของบัวนั้น สูงมากเมื่อเทียบกับพืชดอกอีกหลายชนิด เหง้าบัว หรือรากบัวมีลักษณะเป็นปล้องๆ สีขาวอมเหลือง เมื่อตัดตามขวางจะเห็นรูกลวงเป็นช่อง รากบัว ที่ดีต้องเป็นสีขาว อวบ และใหญ่ รากบัวกินได้ ทั้งดิบและสุก โดยทั่วไปแล้วจะนำรากบัวมา เชื่อมเพื่อรับประทานหรือนำไปปรุงยาช่วย ในการบำรุงกำลัง แก้อ่อนใน กระหายน้ำ แก้เสมหะ แก้พุพอง [1-3] การสไลด์เหง้าบัวในปัจจุบันนั้น ยังคงต้องใช้แรงงานคนในการสไลด์อยู่ซึ่งต้องใช้ เวลาและแรงงานคนเป็นจำนวนมากในขั้นตอนนี้ รวมทั้งผู้ที่สไลด์เหง้าบัวได้นั้นจะต้องมีความ ชำนาญจึงจะได้เหง้าบัวที่มีลักษณะสวย เหมาะแก่ การนำไปเชื่อมเพื่อการบริโภค ถึงแม้ว่าผู้สไลด์จะมี ความชำนาญแต่ในการสไลด์ในระยะเวลาสั้นๆ นั้น อาจเกิดความเมื่อยล้า ซึ่งอาจเป็นสาเหตุให้ เกิดอุบัติเหตุด้วยเช่นกัน มีผลให้ประสิทธิภาพ ในการทำงานลดลง ซึ่งมีงานวิจัยที่สร้างเครื่อง สไลด์เฟือกที่มีลักษณะใกล้เคียงกับเหง้าบัว โดยทำการออกแบบและสร้างเครื่องสไลด์เฟือก โดยการหยอดหัวเฟือกลงในช่องด้านบนของเครื่อง แบบต่อเนื่องกันจนหมด ซึ่งมีช่องหยอดอยู่ 2 ช่อง มีขนาด 120 และ 80 มิลลิเมตร เครื่องจะทำการ สไลด์เป็นแผ่นบางๆ ตามแนวนอนของหัวเฟือก โดยไม่ต้องใช้อุปกรณ์ช่วยกด ความหนาบางของ แผ่นที่ทำได้ตั้งแต่ 0.3 ถึง 1.7 มิลลิเมตร ขึ้นอยู่กับการตั้งใบมีด ขนาดโตสุดของหัวเฟือกเส้นผ่าน ศูนย์กลาง 120 มิลลิเมตร ซึ่งใช้ความเร็วรอบตั้งแต่ 10 ถึง 200 รอบต่อนาที จากการทดลองเครื่อง สไลด์เฟือกโดยเฉลี่ยการสไลด์ต่อหัวประมาณ 30 วินาที ได้ 60 ถึง 80 แผ่น ขึ้นอยู่กับความหนาบาง

[4] และมีการสร้างเครื่องสำหรับสไลด์กล้วยดิบ ที่ปอกเปลือกแล้วที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและ ความยาวของผลไม่เกิน 3 และ 10 เซนติเมตร ตามลำดับ โดยใช้อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า 210 วัตต์ จากการทดลองสามารถสไลด์กล้วยดิบ ให้เป็นชิ้นบาง ตลอดแนวยาวของผลได้ในอัตรา 160 กิโลกรัมต่อชั่วโมง หรือสไลด์ได้ไม่น้อยกว่า 26,000 ชิ้นต่อชั่วโมง สามารถปรับความหนา บางของการสไลด์ได้ตั้งแต่ 1 ถึง 2 มิลลิเมตร ง่ายต่อการ ลำเลียงออกและบรรจุภัณฑ์ [5] จากงานวิจัย ที่ผ่านมาผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะออกแบบและสร้าง เครื่องสไลด์เหง้าบัว เพื่อนำไปเพิ่มประสิทธิภาพ ในกระบวนการแปรรูปเหง้าบัวของกลุ่มเกษตรกร

จากเหตุผลดังกล่าวทำให้ผู้วิจัยมีแนว ความคิดที่จะนำเครื่องจักรมาประยุกต์ใช้ใน กระบวนการผลิตเพื่อช่วยเกษตรกร จึงเป็น อีกทางเลือกหนึ่งในการสไลด์เหง้าบัวให้ได้ผลดี และรวดเร็ว สามารถลดระยะเวลาในการทำงาน และเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิต เพิ่มความปลอดภัยให้กับผู้ปฏิบัติงานและ เครื่องจักรสามารถสไลด์เหง้าบัวได้สม่ำเสมอ ทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานไม่ลดลงแม้จะ ทำงานเป็นระยะเวลานานๆ

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 ศึกษาข้อมูลที่จำเป็นต่อการ ออกแบบ

2.1.1 ศึกษาปัญหาและขั้นตอน ในการสไลด์เหง้าบัวของกลุ่มเกษตรกร

วัตถุประสงค์เพื่อให้ทราบถึงปัญหาและ ข้อมูลในการสไลด์เหง้าบัวของเกษตรกรหรือ ผู้ประกอบการ เพื่อใช้วิเคราะห์ค่าใช้จ่ายเชิง เศรษฐศาสตร์วิศวกรรม จากการศึกษาข้อมูลจาก เกษตรกรพบว่าค่าแรงงานในการสไลด์เหง้าบัว 2 บาทต่อกิโลกรัม ปัจจุบันกลุ่มเกษตรกรใช้ แรงงานคนในการสไลด์เหง้าบัวอยู่ ซึ่งเมื่อทำงาน ไปเป็นระยะเวลานานจะเกิดการเมื่อยล้าทำให้

เกิดอุบัติเหตุจากใบมีดที่สไลด์เห้ง้าบัว ทำให้ไม่ปลอดภัยในขณะปฏิบัติงาน

2.1.2 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของเห้ง้าบัว

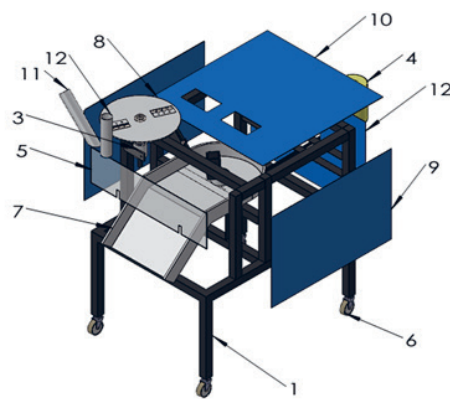
วัตถุประสงค์เพื่อให้ทราบถึงลักษณะทางกายภาพของเห้ง้าบัวจะมีลักษณะเป็นท่อนยาว แบ่งเป็นปล้องๆ ดังรูปที่ 1 เมื่อหันตามขวางจะเห็นรูกลวงเรียงตัวเป็นรัศมี เนื้อเห้ง้าบัวฉ่ำกรอบ สีขาวอมเหลืองหรือสีเหลืองงาช้าง มีกลิ่นหอมอ่อนๆ คล้ายดอกบัว สามารถกินได้ทั้งแบบดิบและแบบสุก การศึกษาทางกายภาพของเห้ง้าบัวได้แก่ ความกว้าง ความยาว ที่มีขนาดใหญ่สุดและเล็กสุดสำหรับใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบและสร้างเครื่อง จากการศึกษาจะใช้เห้ง้าบัวที่จังหวัดนครสวรรค์ ซึ่งพบว่าความกว้างและความยาวของเห้ง้าจะขึ้นอยู่กับความสมบูรณ์และฤดูกาล ซึ่งจากการสังเกตเห้ง้าบัวและสอบถามเกษตรกรที่แปรรูปเห้ง้าบัว ซึ่งการสไลด์ส่วนใหญ่จะสไลด์เห้ง้าบัวตามขวาง คือมุมเอียง 45 และ 90 องศา ซึ่งข้อมูลนี้จะนำไปใช้ในการออกแบบเครื่องและสร้างเครื่อง



รูปที่ 1 ลักษณะทางกายภาพของเห้ง้าบัว [1]

2.2. วิธีการออกแบบและสร้างเครื่องสไลด์เห้ง้าบัว

จากการรวบรวมข้อมูลที่จำเป็นต่อการออกแบบ เครื่องต้นแบบจะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบก่อนที่จะทำการสร้างเพื่อหาขนาดและความเหมาะสมในการติดตั้งชิ้นส่วนและอุปกรณ์ต่างๆ ของเครื่องก่อนที่จะนำไปสร้างตามแบบที่ได้ทำการออกแบบไว้ดังรูปที่ 2

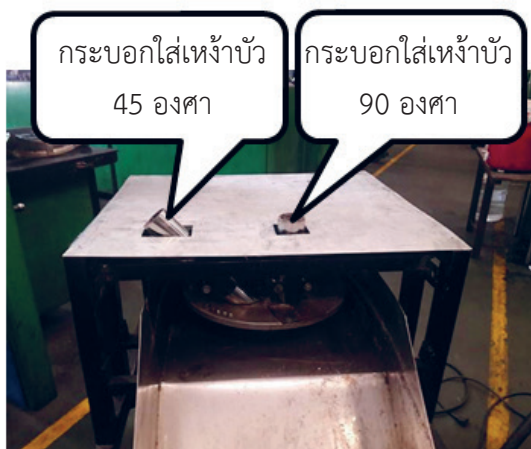


รูปที่ 2 เครื่องสไลด์เห้ง้าบัวที่ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ

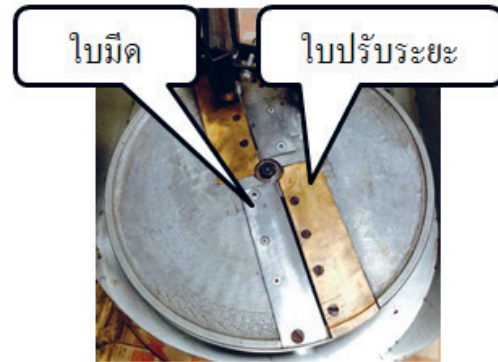
ตารางที่ 1 ชิ้นส่วนเครื่องสไลด์เห้ง้าบัว

หมายเลข	ชิ้นส่วน
1	โครงสร้าง
2	ฝาครอบบน
3	เฟลาตุ๊กตา
4	มอเตอร์
5	การ์ด Safety
6	ล้อ PVC
7	ถาดรอง
8	ชุดใบมีด
9	ฝาครอบข้าง
10	ฝาครอบหลัง
11	กระบอกลใส่เห้ง้าบัวมุม 45 องศา
12	กระบอกลใส่เห้ง้าบัวมุม 90 องศา

เนื่องจากเหง้าบัวส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นทรงกระบอกเมื่อนำมาแปรรูปผู้ประกอบการจะนำเหง้าบัวมาปอกเปลือกออกก่อนที่จะนำไปแปรรูป โดยทั่วไปการนำเหง้าบัวมาแปรรูปผู้ประกอบการจะทำการสไลด์เหง้าบัวสองแบบคือ แบบแรกจะสไลด์ตามแนวขวางของเหง้าบัวซึ่งจะได้เหง้าบัวที่มีลักษณะเป็นวงกลม แบบที่สองจะสไลด์ตามแนวเฉียงของเหง้าบัวซึ่งจะได้เหง้าบัวที่มีลักษณะเป็นวงรี ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เลือกมุมของกระบอกที่จะลำเลียงเหง้าบัวไปยังชุดใบมีดสองมุม คือมุม 90 องศา และมุม 45 องศา เพื่อที่จะได้เหง้าบัวตามที่ผู้ประกอบการต้องการดังรูปที่ 3 ขึ้นอยู่กับการนำไปแปรรูป ซึ่งการออกแบบชุดใบมีดจะออกแบบเป็นลักษณะจานหมุนและสามารถปรับใบมีดได้เพื่อที่จะได้เลือกความหนาของชิ้นเหง้าบัวดังรูปที่ 4 ส่วนช่องใส่เหง้าบัวจะออกแบบให้ใหญ่กว่าเหง้าบัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.6 เซนติเมตรยาว 28 เซนติเมตรเพื่อที่จะใส่เหง้าบัวได้ถึงแม้ว่าเหง้าบัวจะมีลักษณะไม่ตรง



รูปที่ 3 กระบอกใส่เหง้าบัวมุม 45° และ 90°



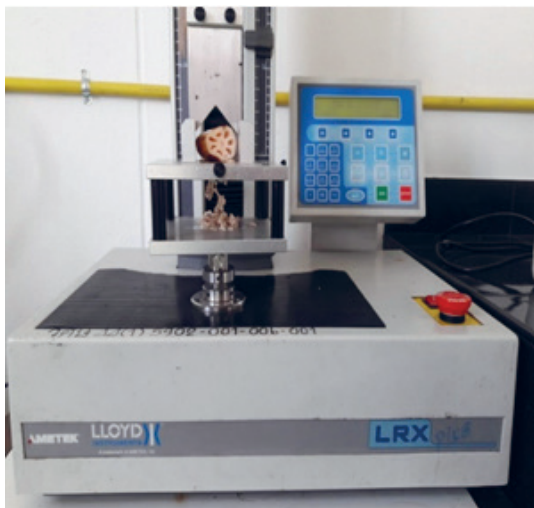
รูปที่ 4 ชุดใบมีดของเครื่องสไลด์เหง้าบัว

สำหรับการออกแบบชุดใบมีดสไลด์เหง้าบัวจะมีลักษณะเป็นจานกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 เซนติเมตร หนา 0.5 เซนติเมตร มีใบมีดสองใบติดตั้งตรงกันข้าม มุมของใบมีดจะทำมุม 90 องศา กับแกนเพลาสี่มุมของใบมีดจะไม่ส่งผลต่อการตัดเหง้าบัวเพราะความแข็งของเหง้าบัวมีค่าน้อย และที่ชุดใบมีดจะมีอุปกรณ์ที่สามารถปรับระยะระหว่างจานและใบมีดเพื่อที่จะสามารถสไลด์เหง้าบัวได้ตามความต้องการ

การทำงานของเครื่องสไลด์เหง้าบัวเหง้าบัวที่ปอกเปลือกแล้วจะถูกใส่ลงในกระบอกโดยต้นกำลังจะมาจากมอเตอร์ขนาด 1/2 แรงม้าส่งกำลังผ่านสายพานไปยังชุดใบมีด เมื่อเครื่องทำงานชุดใบมีดจะหมุนและสไลด์เหง้าบัวที่อยู่ในกระบอกออกมาเป็นชิ้นบางตกลงไปในถาดรองรับด้านล่างของเครื่อง

การคำนวณหาขนาดมอเตอร์ [6]

การหาแรงเหวี่ยงจะทำการทดสอบโดยเหง้าบัวไปทดสอบหาแรงที่ใช้ในการเหวี่ยงจากเครื่องทดสอบแรงเหวี่ยงรุ่น LRX plus ดังรูปที่ 5 ได้ $F = 74.47 \text{ N}$ การออกแบบใช้ค่า safety factor = 1.5 จะได้ $F = 74.47 \times 1.5 = 111.7 \text{ N}$



รูปที่ 5 เครื่องทดสอบแรงเฉือนรุ่น LRX plus

หาขนาดของมอเตอร์จากแรงกดตัด $F=74.47 \text{ N}$

$$\text{จาก} \quad T = Fr \quad (1)$$

เมื่อ

T = แรงบิด (N-m)

F = แรงที่ใช้สไลด์เห้างบัว (N)

r = รัศมีของชุดไบมีด (m)

การออกแบบใช้ความเร็วรอบไม่เกิน 250 รอบ/นาที่ เลือกอัตราทดมอเตอร์ 8 : 1 และรัศมีของชุดไบมีดคือ 0.175 m

$$\text{จะได้} \quad T = 1.6 \text{ N-m}$$

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

เมื่อ

P = กำลังมอเตอร์ (W)

N = ความเร็วรอบมอเตอร์ (1450 รอบ/นาที่)

ซึ่งได้มอเตอร์ขนาด 242.9 วัตต์ ซึ่งเป็นกำลังทางกลที่คำนวณได้ ในงานวิจัยเลือกใช้มอเตอร์เป็นต้นกำลัง สมมติให้มอเตอร์มีประสิทธิภาพ 70% จะได้กำลังทางไฟฟ้าดังนี้

70% ของกำลังไฟฟ้า = กำลังทางกลที่คำนวณได้
ซึ่งจะต้องใช้กำลังทางไฟฟ้า = $(242.9/0.7)$

$$= 347 \text{ W หรือ } 0.46 \text{ HP}$$

ดังนั้นเลือกใช้มอเตอร์ขนาด 1/2 HP



รูปที่ 6 ลักษณะเครื่องสไลด์เห้างบัว

6. วิธีการทดสอบ

การทดสอบเครื่องสไลด์เห้างบัวจะเป็นการทดสอบเพื่อหาสมรรถนะสูงสุดของเครื่องในการสไลด์เห้างบัวจริง เพื่อที่จะได้ผลการสไลด์เห้างบัวที่ดี และมีการสูญเสียขณะทำการสไลด์เห้างบัวน้อยที่สุด โดยทำการทดสอบความเร็วรอบของเพลาชับที่ 150 200 และ 250 รอบต่อนาที โดยทดสอบที่ความเร็วรอบต่างๆ จำนวน 3 ครั้ง ซึ่งมีวิธีการทดสอบดังนี้

ขั้นตอนในการทดสอบเครื่องสไลด์เห้างบัวสด

1) เตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ ในการทดสอบ

2) เดินเครื่องสไลด์เห้างบัว ใช้เครื่องวัดความเร็วรอบ (Hand tachometer) วัดความเร็วรอบที่เพลาชับ ปรับอินเวอร์เตอร์เพื่อให้ได้ความเร็วรอบที่ต้องการ

3) นำเห้างบัวที่ปอกเปลือกแล้วใส่ลงในเครื่องสไลด์เห้างบัว ขณะทดสอบทำการจับเวลา

4) ทำการตรวจสอบคุณภาพของเห้างบัวและบันทึกผล

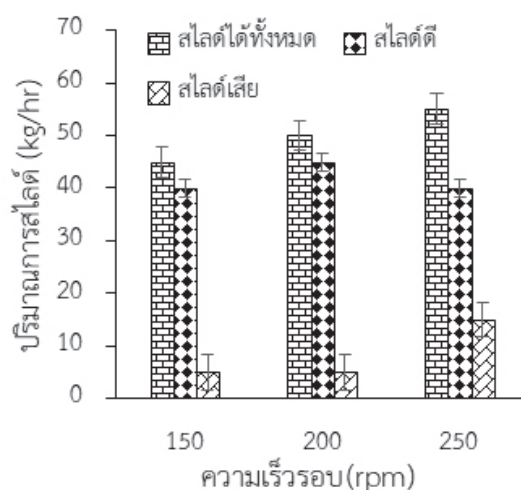
5) ทำการทดสอบตามข้อ 2-4 ปรับความเร็วรอบเป็น 150 200 และ 250 รอบต่อนาที ตามลำดับ

6) นำค่าที่ได้คำนวณหาสมรรถนะของเครื่องสไลด์เห้ง้าบัว และเปรียบเทียบกับเครื่องสไลด์เมื่อใช้แรงงานคน

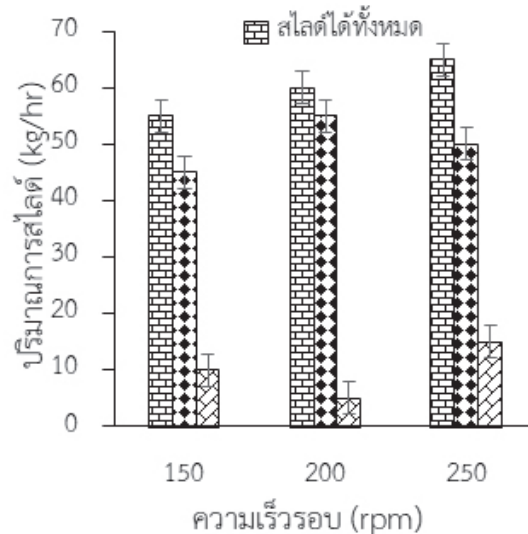
7. ผลการทดลอง

จากผลการทดลอง พบว่า ปริมาณเห้ง้าบัวที่สไลด์ด้วยเครื่องมีลักษณะเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบ ทำให้ได้อัตราการผลิตมากขึ้นตามความเร็วรอบ เมื่อจับเวลาทุกความเร็วรอบพบว่า เมื่อนำเห้ง้าบัวใส่ลงในกระบอกลูกทำมุม 90 องศา เปลี่ยนแปลงความเร็วรอบ 150 200 และ 250 รอบต่อนาที ตามลำดับ จากรูปที่ 7 เครื่องสามารถสไลด์เห้ง้าบัวได้ 55 60 และ 65 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ และเมื่อมุมกระบอกลูกที่ใส่เห้ง้าบัวมุม 45 องศา ปริมาณการสไลด์ที่เครื่องสไลด์คือ 45 50 และ 55 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ ถึงแม้ว่าอัตราการสไลด์จะเพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบก็ตาม แต่เมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นการสไลด์มีปริมาณขึ้นเสียเพิ่มขึ้นเช่นกัน เป็นผลเนื่องมาจากเมื่อความเร็วรอบสูงขึ้น จะทำให้ชิ้นเห้ง้าบัวที่สไลด์มีการฉีกหรือแตกไม่เป็นชิ้นเป็นผลมาจากเห้ง้าบัวที่อยู่ในกระบอกลูกมาไม่ทันทำให้ชิ้นเห้ง้าบัวที่สไลด์ได้มีขนาดบางและไม่ได้ขนาดส่งผลต่อการเสียหายที่เกิดขึ้น จึงทำให้การสไลด์เสียเพิ่มขึ้นโดยพบว่ากระบอกลูกใส่เห้ง้าบัวมุม 45 องศา ปริมาณการสไลด์ด้วยเครื่องจะสามารถสไลด์เห้ง้าบัวได้ทั้งหมด 45 50 และ 55 กิโลกรัมต่อชั่วโมง แต่มีปริมาณเห้ง้าบัวที่เสีย 5 5 และ 15 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ ดังรูปที่ 7 และเมื่อกระบอกลูกใส่เห้ง้าบัวมุม 90 องศา เครื่องสไลด์เห้ง้าบัวได้ทั้งหมด 55 60 และ 65 กิโลกรัมต่อชั่วโมง แต่มีปริมาณเห้ง้าบัวที่เสีย 10 5 และ 15 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ ดังรูปที่ 8 จากผลการทดลองจะเห็นว่าเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นอัตราการสไลด์เห้ง้าบัวที่ได้ขึ้นดีมีแนวโน้มปริมาณลดลงทั้งกระบอกลูกใส่เห้ง้าบัวมุม 45 และ 90

องศา จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าเปอร์เซ็นต์ความเสียหายของเห้ง้าบัวที่สไลด์ด้วยเครื่องที่กระบอกลูกใส่เห้ง้าบัวมุม 45 และ 90 องศา มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของชิ้นเห้ง้าบัวคือความเร็วรอบของเครื่องสไลด์



รูปที่ 7 เปรียบเทียบปริมาณเห้ง้าบัวที่เครื่องสไลด์ได้ที่กระบอกลูกทำมุม 45 องศา



รูปที่ 8 เปรียบเทียบปริมาณเห้ง้าบัวที่เครื่องสไลด์ได้ที่กระบอกลูกทำมุม 90 องศา

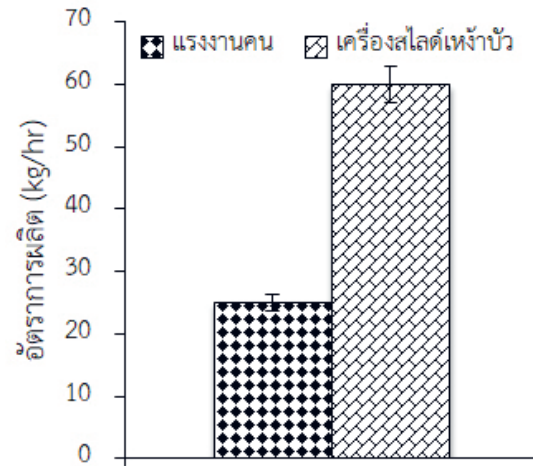


รูปที่ 9 ชิ้นเหง้าบัวที่ตีที่เครื่องสไลด์ได้



รูปที่ 10 ชิ้นเหง้าบัวที่เสียหลังการสไลด์ด้วยเครื่อง

เมื่อเปรียบเทียบการสไลด์เหง้าบัวด้วยเครื่องและแรงงานคนจากรูปที่ 11 พบว่าการสไลด์เหง้าบัวด้วยเครื่องจะสามารถสไลด์เหง้าบัวได้ 60 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และเมื่อใช้แรงงานคนสไลด์จะสามารถสไลด์เหง้าบัวได้ 25 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ดังนั้นการสไลด์ด้วยเครื่องจะสามารถสไลด์ได้มากกว่าแรงงานคนถึง 2.4 เท่า และเมื่อใช้แรงงานคนสไลด์เป็นระยะเวลานานๆ จะทำให้เกิดการอ่อนล้าทำให้ประสิทธิภาพการทำงานลดลง



รูปที่ 11 เปรียบเทียบการสไลด์เหง้าบัวด้วยเครื่องและแรงงานคน

8. การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์วิศวกรรม [7]

การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมของเครื่องสไลด์เหง้าบัวที่ออกแบบและสร้างขึ้นโดยใช้แรงงานคนปฏิบัติงาน 1 คน กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยใช้งาน 0.373 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ความสามารถในการสไลด์เหง้าบัวด้วยเครื่อง 60 กิโลกรัมต่อชั่วโมง กำหนดให้เครื่องทำงาน 8 ชั่วโมงต่อวัน ทำงานปีละ 180 วัน สามารถนำมาหาระยะเวลาคืนทุนของเครื่องสไลด์เหง้าบัวได้ดังนี้

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์และประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

ต้นทุนคงที่ (Fixed cost)	
ราคาเครื่องสไลด์เหง้าบัว	30,000 บาท
มูลค่าซากเครื่องสไลด์เหง้าบัวเมื่อสิ้นปีที่ 5 มีมูลค่าคงเหลือ 10 เปอร์เซ็นต์ของราคาต้นทุนเครื่อง (S) = (10/100) × (30,000)	3,000 บาท
ค่าเสื่อมราคา (DP) = (P-S)/L = (30,000 - 3,000) / 5	5,400 บาท

ตารางที่ 2 (ต่อ)

ต้นทุนคงที่ (Fixed cost)	
ดอกเบี้ยหรือค่าเสียโอกาส (Interest on investment, I) $I = ((P+S)/2) \times (i/100)$ กำหนดให้ อัตราดอกเบี้ย ต่อปีเท่ากับ 10 เปอร์เซ็นต์ จะได้ $((30,000+3,000)/2)$ $\times (10/100)$	1,650 บาท ต่อปี
รวมต้นทุนคงที่ (Fixed cost)	7,050 บาท ต่อปี
ต้นทุนแปรผัน (Variable cost)	
ค่าบำรุงรักษาคิดเฉลี่ย ประมาณวันละ 10 บาท ทำงาน 180 วันต่อปี	1,800 บาท ต่อปี
ค่าไฟฟ้าเฉลี่ยใช้งาน 0.373 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ราคาไฟฟ้า หน่วยละ 3.5 บาท ใน 1 ปี ทำงาน 180 วัน วันละ 8 ชั่วโมง ดังนั้นจะเสียค่าไฟฟ้า $0.373 \times 3.5 \times 180 \times 8$	1,890 บาท ต่อปี
ค่าจ้างแรงงานวันละ 300 บาท จำนวน 1 คน ทำงาน 180 วัน	54,000 บาท ต่อปี
รวมต้นทุนแปรผัน (Variable cost)	57,690 บาท ต่อปี
ค่าใช้จ่ายในการทำงาน (บาทต่อกิโลกรัม) ของเครื่อง สไลด์เห้งงำบวในเวลา 1 ปี เวลาทำงาน 1,440 ชั่วโมง ความสามารถในการทำงาน 60 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ดังนั้น จะได้ $57,690 / (1,440 \times 60)$ ชั่วโมง	0.67 บาทต่อ กิโลกรัม

ต้นทุนคงที่ (Fixed cost)	
ค่าแรงงานสไลด์เห้งงำบว 2 บาทต่อกิโลกรัม ทำงาน 60 กิโลกรัมต่อชั่วโมง	120 บาท ต่อชั่วโมง
ชั่วโมงการทำงาน	1,440 ชั่วโมง ต่อปี
ดอกเบี้ย	1,650 บาท ต่อปี
ต้นทุนแปรผัน	57,690 บาท ต่อปี
ต้นทุนรวม $57,690+1,650$	59,340 บาท ต่อปี
ผลประโยชน์ที่ได้รับ $1,440 \times 120$	172,800 บาท ต่อปี
ผลประโยชน์สุทธิ $172,800-59,340$	113,460 บาท ต่อปี
ระยะเวลาคืนทุน $(30,000/113,460) \times 12$	3.2 เดือน

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบการทำงานระหว่าง
การสไลด์เห้งงำบวด้วยเครื่องและการสไลด์
เห้งงำบวด้วยแรงงานคน

หัวข้อในการเปรียบเทียบ	เครื่อง สไลด์ เห้งงำบว	แรงงานคน
1. ความสามารถ ในการทำงาน (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	60	25
2. ค่าใช้จ่าย ในการทำงาน (บาทต่อกิโลกรัม)	0.67	2

จากการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์วิศวกรรมพบว่าเครื่องสไลด์เห้าง้าบสามารถสไลด์เห้าง้าบได้ 60 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ต้นทุนการสไลด์ด้วยเครื่อง 0.67 บาทต่อกิโลกรัม มีระยะเวลาคืนทุน 3.2 เดือน ซึ่งการสไลด์เห้าง้าบด้วยเครื่องจะเป็นการลดระยะเวลาในการทำงานและเพิ่มความปลอดภัยกับผู้ปฏิบัติงาน

9. สรุปผลการทดลอง

จากการวิจัยพบว่าสมรรถนะสูงสุดของเครื่องสไลด์เห้าง้าบอยู่ที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที สามารถสไลด์เห้าง้าบได้ 55 และ 60 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ที่กระบอกใส่เห้าง้าบมุม 45 และ 90 องศา ตามลำดับ ซึ่งสมรรถนะของเครื่องสไลด์เห้าง้าบจะไม่แปรผันตามความเร็วรอบ เพราะถ้าความเร็วรอบเพิ่มขึ้นปริมาณการสไลด์เห้าง้าบเสียจะเพิ่มขึ้นตาม และเครื่องสามารถสไลด์เห้าง้าบได้มากกว่าการแรงงานคน 2.4 เท่า ซึ่งเครื่องสไลด์เห้าง้าบสามารถสไลด์เห้าง้าบได้สม่ำเสมอและมีอัตราการผลิตคงที่ถึงแม้ว่าจะทำงานเป็นระยะเวลานาน ซึ่งเป็นการนำเทคโนโลยีเครื่องจักรกลเข้ามาช่วยในกระบวนการผลิตให้กับเกษตรกร ซึ่งเมื่อเกษตรกรนำเครื่องสไลด์เห้าง้าบไปใช้จะมีระยะเวลาการคืนทุน 3.2 เดือน

10. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณหน่วยวิจัยการออกแบบและสร้างเครื่องจักรเพื่อแปรรูปผลิตผลทางการเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่สนับสนุนวัสดุอุปกรณ์ สถานที่ในการทำวิจัย และโครงการอนุรักษ์พันธุกรรมพืชอันเนื่องมาจากพระราชดำริฯ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี มทร.ธัญบุรี ที่สนับสนุนทุนวิจัย

11. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] Siriluk P. Lotus. [Internet]. 2016 [cited 2016 Oct 20]. Available from: <https://www.gotoknow.org/posts/463537>
- [2] Hiruntacho S. properties. [Internet]. 2016 [cited 2016 Sep 3]. Available from: <https://www.tnews.co.th/contents/469673>
- [3] Homhual S. Properties. [Internet]. 2016 [cited 2016 Sep 3]. Available from: <https://medthai.com/lotus/>
- [4] Perapuschara J. Taro slide machine. [Internet]. 2016 [cited 2016 Sep 13]. Available from: http://clinictech.rmutp.ac.th/decade1/wp-content/uploads/2013/06/taro_slide_machine.pdf
- [5] Wikipedia. Banana slide machine. [Internet]. 2016 [cited 2016 Sep 13]. Available from: http://clinictech.rmutp.ac.th/decade1/wp-content/uploads/2013/06/banana_slide_machine.pdf
- [6] Tantipisalkul C. Mechanical engineering design 2. 2nd ed. Bangkok: 1999.
- [7] Yaemphuan P. Engineering Economy. 2nd. Bangkok: 2000.

ค่าการยุบตัวและกำลังอัดของคอนกรีตผสมมวลรวมใช้แล้วแทนมวลรวมหยาบ และหินฝุ่นแทนมวลรวมละเอียด

วิศวินทร์ อัครปัญญาธร^{1*}

A.Wissawin@gmail.com^{1*}

^{1*} สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

Received: January 16, 2018

Revised: May 15, 2018

Accepted: June 11, 2018

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความสามารถในการใช้งานและกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมใช้แล้วแทนมวลรวมหยาบจากธรรมชาติ (หินปูนย่อย) ในอัตราส่วนร้อยละ 70, 80, 90 และ 100 โดยปริมาตรของมวลรวมหยาบ และหินฝุ่นแทนมวลรวมละเอียดจากธรรมชาติ (ทรายแม่น้ำ) ในอัตราส่วนร้อยละ 70, 80, 90 และ 100 โดยปริมาตรของมวลรวมละเอียด เป็นส่วนผสม โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 1, 3, 7, 14, 21 และ 28 วัน โดยใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มม. สูง 300 มม. ผลการทดสอบพบว่าค่าการยุบตัวของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการใช้หินฝุ่นแทนทรายธรรมชาติที่เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่การใช้เศษคอนกรีตแทนหินธรรมชาติมีแนวโน้มทำให้ค่าการยุบตัวของคอนกรีตเพิ่มขึ้นเล็กน้อย กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณอัตราส่วนเศษคอนกรีตแทนที่หินธรรมชาติที่เพิ่มขึ้น และหินฝุ่นแทนที่ทรายธรรมชาติไม่เกินร้อยละ 80 ทำให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่การใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายธรรมชาติมากเกินไปร้อยละ 80 ส่งผลกระทบบให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลง สำหรับแนวโน้มการพัฒนา กำลังอัดของคอนกรีตที่มีหินฝุ่นและเศษคอนกรีตเป็นส่วนผสม พบว่ามีแนวโน้มการพัฒนา กำลังอัดคล้ายกับคอนกรีตควบคุมที่ใช้ทรายและหินธรรมชาติล้วนเป็นมวลรวม

คำสำคัญ: มวลรวมใช้แล้ว หินฝุ่น กำลังอัด ค่าการยุบตัว

Slump and Compressive Strength of Concrete Containing Recycled Aggregate and Lime Stone Dust

Wissawin Arckarapunyathorn^{1*}
A.Wissawin@gmail.com^{1*}

^{1*} Department of Civil Engineering, Faculty of Science and Technology, Nakhon Pathom Rajabhat University

Received: January 16, 2018
Revised: May 15, 2018
Accepted: June 11, 2018

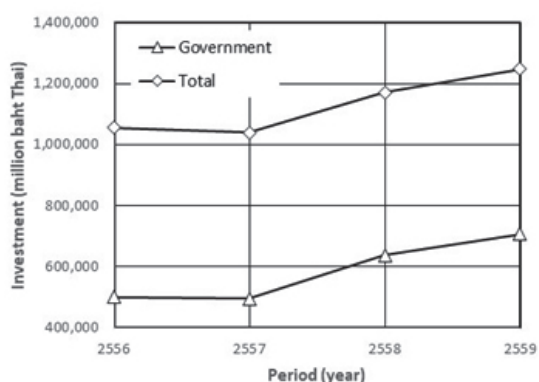
Abstract

This research is to study the workability and compressive strength of concrete containing recycled aggregate and lime stone dust. Recycled aggregate (RCA) is used to replace crushed stone was 70%, 80%, 90% and 100% by volume of total coarse aggregate. Lime stone dust (CD) is used to replace river sand was 70%, 80%, 90% and 100% by volume of total fine aggregate. The water to binder ratio = 0.65 was used. Compressive strength was determined at the ages of 1, 3, 7, 14, 21 and 28 days by using concrete cylinder (dimension was 150 millimeter in diameter and 300 millimeter in height) for testing. The results show that, workability of concrete was decreasing, when the amount of CD to be increasing, while workability of concrete was slightly increased, when the amount of RCA to be increasing. For the compressive strength of concrete at the ages of 28 days, the tendency was to be decreasing, when the amount of RCA to be increasing. For the amount of CD in concrete lower than 80%, compressive strength was tending to increasing. While the amount of CD in concrete more than 80%, compressive strength was decreased. In addition, the tendency of the compressive strength development of concrete with RCA and CD was similar to conventional concrete (concrete without RCA and CD).

Keywords: recycled concrete, lime stone dust, compressive strength and slump.

1. บทนำ

คอนกรีตเป็นวัสดุอันดับต้นๆ ที่ถูกใช้ในงานด้านการก่อสร้างอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมก่อสร้างในประเทศไทย ทั้งนี้เนื่องมาจากราคาถูกเมื่อเทียบกับวัสดุอื่นๆ การหล่อเป็นรูปร่างได้ตามต้องการสามารถทำได้โดยง่าย เทเข้าแบบง่าย และสามารถใช้ร่วมกันวัสดุอื่นๆ ได้ดี เป็นต้น จากข้อมูลของสำนักงานคณะกรรมการการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ระหว่างปี พ.ศ.2556 – 2559 มูลค่าการก่อสร้างทั้งหมด (มูลค่าการก่อสร้างภาครัฐและเอกชน) ในประเทศไทยมีอัตราการเติบโตมากขึ้น 6.05% ต่อปี เมื่อเทียบกับปี พ.ศ.2556 ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งแสดงถึงความต้องการในการใช้คอนกรีตมีมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 1 มูลค่าการก่อสร้างในประเทศไทย [1]

องค์ประกอบในคอนกรีตประกอบด้วยปูนซีเมนต์ น้ำ มวลรวมละเอียด (ทราย) และมวลรวมหยาบ (หิน) ในปัจจุบันประเทศไทยใช้มวลรวม (มวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบ) เป็นส่วนผสมหลักในคอนกรีต เนื่องจากมีปริมาณ 70-80% ของปริมาณส่วนผสมทั้งหมดในคอนกรีต [2] โดยมวลรวมเหล่านี้ที่นำมาใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีตเป็นวัสดุที่ได้จากธรรมชาติ เมื่อมีการนำมาใช้ประโยชน์ก็ย่อมมีปริมาณที่ลดลง และมีแนวโน้มราคาที่สูงขึ้นในอนาคตเนื่องจากมีอุปสงค์มากกว่าอุปทาน

มวลรวมหยาบที่ใช้สำหรับเป็นส่วนผสมของคอนกรีตในประเทศไทยนิยมใช้หินปูนเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากประเทศไทยมีภูเขาหินปูนกระจายอยู่ทั่วประเทศ ทั้งนี้การนำหินปูนมาใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีตจะต้องระเบิดภูเขาและเข้าสู่กระบวนการโม่หินก่อนนำไปใช้งาน ในขณะที่การนำมวลรวมละเอียด (ทราย) มาใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีต จะต้องดูทรายจากแม่น้ำ หรือจากพื้นดินเสียก่อน จึงนำมาใช้งานต่อไปได้ จากกระบวนการการผลิตมวลรวมเหล่านี้จะเห็นได้ว่าเป็นการทำลายธรรมชาติ และทำให้ทรัพยากรที่มีอยู่ลดน้อยลง โดยเฉพาะกระบวนการผลิตทรายอาจเป็นผลทำให้เกิดการทรุดตัวของพื้นที่ใกล้เคียงได้

หินฝุ่นเป็นวัสดุเหลือใช้ที่มีประโยชน์น้อยและมีปริมาณมาก โดยหินฝุ่นเป็นผลพลอยได้ในขั้นตอนการโม่หินจากกระบวนการผลิตหิน ซึ่งเศษหินฝุ่นที่ได้จากขั้นตอนนี้จะมีขนาดเล็กมาก และจะไม่ผ่านตะแกรงร่อนแต่จะปลิวออกมาตกกองทับถมอยู่ใต้เครื่องโม่ ซึ่งโดยปกติจะต้องขนออกไปทิ้ง จากข้อมูลของกรมทรัพยากรธรณีพบว่ามีการผลิตย่อยหินในประเทศไทยประมาณ 90,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ซึ่งเป็นสิ่งที่สะท้อนให้เห็นว่าเป็นการทำลายธรรมชาติ และทำให้เกิดวัสดุเหลือทิ้งอย่างมากมาย อีกทั้งการเกิดเศษหินฝุ่นจำนวนมากจะทำให้สิ่งแวดล้อมพื้นที่และค่าใช้จ่ายจำนวนมาก หินฝุ่นมีลักษณะทางกายภาพใกล้เคียงกับทราย และมีราคาเพียง 1/8 ของทราย [3] จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าหินฝุ่นสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรมคอนกรีตได้ โดยการนำหินฝุ่นมาใช้เป็นส่วนผสมแทนที่ทรายบางส่วนหรือทั้งหมดซึ่งให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตใกล้เคียงกับคอนกรีตปกติ [3-7]

นอกจากนี้ยังมีเศษวัสดุเหลือใช้อีกชนิดหนึ่ง นั่นคือมวลรวมที่ใช้แล้วจากเศษคอนกรีตสับเนื่องมาจากการต้องการในการก่อสร้างอาคารที่เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้อาคารหรือสิ่งปลูกสร้างในอดีตถูกรื้อถอน เพื่อสร้างใหม่ ซึ่งในกระบวนการรื้อถอนนี้ ทำให้ได้เศษวัสดุคอนกรีตเหลือทิ้งที่ไม่สามารถนำใช้งานได้ จนเป็นเหตุทำให้ต้องนำไปถมที่ หรือนำไปทิ้งเท่านั้น ต่อมาได้มีการทำวิจัยเพื่อนำเศษวัสดุเหลือทิ้งชนิดนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านอุตสาหกรรมคอนกรีตอย่างต่อเนื่อง โดยนำเศษวัสดุคอนกรีตเหลือทิ้งเหล่านี้มาใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีตแทนที่มวลรวมหยาบ และมวลรวมละเอียดเพื่อทดแทนมวลรวมจากธรรมชาติ แต่ผลที่ได้ส่วนใหญ่กลับไม่เป็นที่น่าพอใจ เนื่องจากทำให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตปกติ [8-11]

จากที่กล่าวมาข้างต้น สามารถสรุปได้ 2 ประเด็นคือ (1) การศึกษาโดยนำมวลรวมใช้แล้วมาแทนที่มวลรวมหยาบให้กำลังอัดที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม และมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณที่ใช้ทดแทน (2) การศึกษาโดยการนำหินปูนมาแทนที่มวลรวมละเอียดให้กำลังอัดที่มากกว่าหรือน้อยกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม จะเห็นได้ว่าการนำเศษคอนกรีตที่ใช้แล้วมาแทนที่มวลรวมหยาบในส่วนผสมของคอนกรีตยังไม่สามารถให้คุณภาพด้านกำลังอัดที่เทียบเท่ากับคอนกรีตควบคุมได้ อีกทั้งการใช้เศษคอนกรีตที่ใช้แล้วร่วมกับหินปูนเพื่อแทนที่มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดยังไม่มีการศึกษาวิจัยเพื่อหาส่วนผสมที่เหมาะสม ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นศึกษาการนำวัสดุเหลือทิ้งทั้งสองชนิดมาใช้แทนที่มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดในส่วนผสมของคอนกรีต ให้มีคุณภาพเทียบเท่าหรือมากกว่าคอนกรีตที่ผสมโดยมวลรวมธรรมชาติ (คอนกรีตควบคุม)

2. วิธีการวิจัย

2.1. วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC)
- มวลรวมละเอียดจากธรรมชาติ (Sand: NFA) คือ ทรายแม่น้ำผ่านตะแกรงเบอร์ 4
- มวลรวมหยาบจากธรรมชาติ (Crushed stone: NCA) คือ หินปูนย่อยขนาดโตสุด $\frac{3}{4}$ นิ้ว ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ $\frac{3}{4}$ และค้ำตะแกรงเบอร์ 4
- มวลรวมละเอียดจากหินฝุ่น (หินปูน) (Lime stone dust: CD) ได้จากพื้นที่บ้านรางกระต่ายในจังหวัดกาญจนบุรี และนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4
- มวลรวมหยาบจากคอนกรีตที่ใช้แล้ว (Recycled Concrete: RCA) ได้มาจากการย่อยเสาคอนกรีตที่มีกำลังอัดอยู่ในช่วง 400-500 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยมีขนาดโตสุด $\frac{3}{4}$ นิ้ว (ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ $\frac{3}{4}$ และค้ำตะแกรงเบอร์ 4)

มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่นำมาใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีตจะอยู่ในสถานะอิ่มตัวผิวแห้ง (SSD) ตามมาตรฐาน ASTM C127 [12] และ ASTM C128 [13] ค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1. (Portland.Cement.Type.1) ทราย (NFA) หิน (NCA) หินฝุ่น (CD) และเศษคอนกรีต (RCA) ที่ใช้ในการออกแบบสัดส่วนผสมคอนกรีต เท่ากับ 3.15, 2.63, 2.61, 2.70 และ 2.45 ตามลำดับ สำหรับคุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวม ได้ถูกแสดงไว้ดังตารางที่ 1

2.2. ส่วนผสมของคอนกรีต

การออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตจะใช้วิธีกำหนดปริมาตรของมวลรวมและซีเมนต์เพสต์ โดยกำหนดช่วงกำลังอัดที่อายุ 28 วันให้อยู่ในระหว่าง 200-250 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร สำหรับค่าการออกแบบส่วนผสม

ของคอนกรีตใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ใช้เท่ากับ 0.65 (ใช้ตามตารางความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์และกำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จากมาตรฐาน ACI 211.1-91 [14]) โดยใช้สัดส่วนของมวลรวมละเอียดต่อมวลรวมทั้งหมด (s/a) ร้อยละ 45 โดยปริมาตร และใช้สัดส่วนของมวลรวมต่อคอนกรีต (Vagg). ร้อยละ 65. โดยปริมาตร (หมายความว่า 1,000 ลิตร จะประกอบด้วย 650 ลิตร สำหรับมวลรวม และ 350 ลิตร สำหรับซีเมนต์เฟส) ทั้งนี้การออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตในข้างต้น มีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมตัวแปรต่างๆ ให้คงที่ เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลการทดสอบกันได้อย่างชัดเจนว่าสัดส่วนผสมของคอนกรีตต่างๆ ให้ผลที่ดีหรือแตกต่างกันอย่างไร

ตารางที่ 2 แสดงสัดส่วนผสมของคอนกรีต โดยคอนกรีตควบคุม (ROCO) ใช้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดจากหินและทรายธรรมชาติ (หินปูนย่อยและทรายแม่น้ำ) ในขณะที่สัดส่วนผสมคอนกรีตอื่นๆ ใช้มวลรวมหยาบจากเศษคอนกรีตและมวลรวมละเอียดจากหินฝุ่นแทนที่มวลรวมธรรมชาติร้อยละ 100, 90, 80 และ 70 โดยปริมาตร โดยสัญลักษณ์ R คือ เศษคอนกรีต และสัญลักษณ์ C คือ หินฝุ่น เช่น ROCO หมายความว่า คอนกรีตที่ใช้หินและทรายเป็นมวลรวม และ R100C100 หมายถึง คอนกรีตที่ใช้คอนกรีตย่อยและหินฝุ่นแทนหินและทรายทั้งหมด



(ก) ทรายและหินฝุ่น



(ข) มวลรวมที่ใช้แล้วและหินธรรมชาติ

รูปที่ 2 มวลรวมที่ได้จากหินฝุ่น มวลรวมที่ใช้แล้ว และมวลรวมธรรมชาติ

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพของมวลรวม

Properties	NCA	RCA	NFA	CD
Bulk Specific Gravity (SSD)	2.61	2.45	2.63	2.70
Apparent Specific Gravity	2.64	2.67	2.67	2.83
Water Absorption (%)	0.75	5.71	0.94	2.84
Fineness Modulus	6.49	6.60	2.57	3.25
Maximum Size (mm.)	19	19	4.75	4.75
Unit Weight (kg/m ³)	1,597	1,444	1,745	1,893
Void Content (%)	39.71	40.82	31.97	12.83

การผสมคอนกรีตเริ่มจากการใส่มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด เติมน้ำและเครื่องผสมคอนกรีตประมาณ 3 นาที เพื่อให้มวลรวมเข้ากัน จากนั้นค่อยใส่ปูนซีเมนต์ แล้วเติมน้ำและเครื่องผสมคอนกรีตอีกครั้งประมาณ 3 นาที เพื่อให้เม็ดปูนซีเมนต์กระจายตัวทั่วส่วนผสม แล้วใส่น้ำ และเติมน้ำและเครื่องผสมคอนกรีต อีกอย่างน้อยประมาณ 3 นาที หรือจนกว่าส่วนผสมจะเข้ากันจนเป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นก็นำคอนกรีตที่ได้ไปทำการทดสอบและเก็บตัวอย่างในรูปแบบต่างๆ

2.3 วิธีการทดสอบ

2.3.1 ค่ายุบตัวของคอนกรีต

การทดสอบหาค่าการยุบตัวของคอนกรีต ทำตามมาตรฐาน ASTM.C143/C143M [15] โดยผสมคอนกรีตที่ต้องการทดสอบหาค่าการยุบตัว จำนวน 3 ครั้ง เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย

2.3.2 กำลังอัดของคอนกรีต

ทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก (Cylinder) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร จำนวน 3 ตัวอย่าง เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย ที่อายุ 1, 3, 7, 14, 21 และ 28 วัน

3. ผลการวิจัย

3.1 ค่าการยุบตัวของคอนกรีต

ค่าการยุบตัวของคอนกรีตควบคุมมีค่าเท่ากับ 16 เซนติเมตร สำหรับส่วนผสมคอนกรีตที่มีหินฝุ่นและคอนกรีตที่ใช้แล้ว พบว่าค่ายุบตัวลดลง 45.63% – 59.38% (มีค่าอยู่ระหว่าง 6.5 – 8.7 เซนติเมตร) เมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่าการใช้หินฝุ่นและคอนกรีตที่ใช้แล้วทำให้ค่ายุบตัวของคอนกรีตลดลงอย่างมาก

ตารางที่ 2 Mix Proportion (kg/m³)

NO.	Cement	NFA	NCA	CD	RCA	Water
R0C0	362	769	933	0	0	235
R100C100	362	0	0	790	876	235
R100C90	362	77	0	711	876	235
R100C80	362	154	0	632	876	235
R100C70	362	231	0	553	876	235
R90C100	362	0	93	790	788	235
R90C90	362	77	93	711	788	235
R90C80	362	154	93	632	788	235
R90C70	362	231	93	553	788	235
R80C100	362	0	187	790	701	235
R80C90	362	77	187	711	701	235
R80C80	362	154	187	632	701	235
R80C70	362	231	187	553	701	235
R70C100	362	0	280	790	613	235
R70C90	362	77	280	711	613	235
R70C80	362	154	280	632	613	235
R70C70	362	231	280	553	613	235

ตารางที่ 3 กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีต

Concrete	Compressive Strength (ksc)					
	Normalized Compressive Strength (%)					
	1 day	3 day	7 day	14 day	21 day	28 day
R0C0	172.15	225.98	255.65	286.21	306.71	325.03
	100	100	100	100	100	100
R100C100	147.11	192.08	215.78	257.36	280.55	275.70
	85.45	85	84.40	89.92	91.47	84.82
R90C100	140.01	160.69	231.29	231.91	250.22	271.41
	81.33	71.1	90.47	81.02	81.58	83.50
R80C100	189.63	216.58	248.31	287.27	292.26	312.06
	*110.15	95.84	97.13	*100.37	95.28	96.01
R70C100	167.50	217.50	231.93	277.22	293.34	307.15
	97.30	96.24	90.72	96.86	95.64	94.50
R100C90	179.31	232.09	245.09	273.83	278.17	288.67
	*104.16	*102.70	95.87	95.67	90.69	88.81
R90C90	131.74	193.26	205.14	243.67	286.97	296.13
	76.52	85.52	80.24	85.14	93.56	91.10
R80C90	181.09	233.21	285.22	291.73	335.90	356.76
	*105.19	*103.20	*111.56	*101.92	*109.52	*109.76
R100C80	173.66	220.93	250.84	258.76	259.96	300.13
	*100.87	97.76	98.12	90.41	84.75	92.34
R90C80	169.45	188.77	237.03	299.04	310.53	338.43
	98.43	83.53	92.72	*104.48	*101.24	*104.12
R80C80	189.72	233.12	248.75	286.21	307.40	353.13
	*110.20	*103.16	97.30	*100.00	*100.22	*108.64
R100C70	180.79	221.87	268.18	270.46	275.58	295.58
	*105.01	98.18	*104.90	94.50	89.85	90.94
R90C70	165.72	209.38	249.92	275.85	306.46	309.78
	96.26	92.65	97.75	96.38	99.91	95.30
R80C70	169.45	228.75	232.06	257.38	289.98	343.05
	98.43	*101.22	90.77	89.92	94.54	*105.54
R70C70	158.45	221.58	252.55	301.24	318.59	346.05
	92.04	98.05	98.79	*105.25	*103.87	*106.47

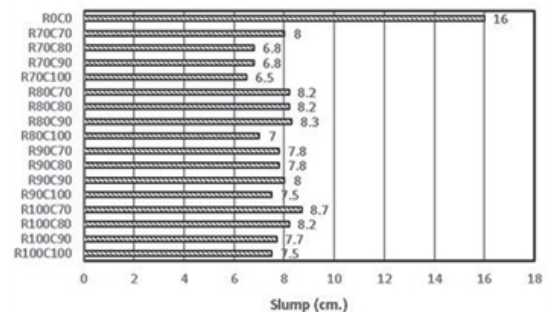
หมายเหตุ: ส่วนที่มีเครื่องหมาย * มีค่าร้อยละกำลังอัดมากกว่าคอนกรีตปกติ

จากรูปที่ 4 พบว่า การใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายธรรมชาติในส่วนผสมคอนกรีต ทำให้ค่ายุบตัวของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงและลดลงตามปริมาณอัตราส่วนของหินฝุ่นที่แทนที่ทรายธรรมชาติที่มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะรูปร่างของหินฝุ่นจะมีความเป็นเหลี่ยมมุมและผิวหยาบมากกว่าทรายธรรมชาติที่มีลักษณะรูปร่างกลมและมน [16] ทำให้แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคมีค่าเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งจากรูปที่ 5 และ 6 จะพบว่าขนาดอนุภาคของหินฝุ่นในส่วนละเอียดมีค่ามากกว่าทรายธรรมชาติและมากกว่าเกณฑ์ตามมาตรฐาน ASTM C33/C33M [17] อีกด้วยเป็นเหตุทำให้น้ำอิสระในระบบลดลงเนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสของมวลรวมละเอียดเพิ่มมากขึ้น (น้ำที่โดนจับที่ผิวเพิ่มมากขึ้น) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Bongkodsupapa et al. [18] และ Junruchai et al. [16] ในขณะที่ใช้ปริมาณอัตราส่วนของคอนกรีตที่ใช้แล้วแทนที่หินธรรมชาติที่เพิ่มมากขึ้น พบว่ามีแนวโน้มทำให้ค่าการยุบตัวของคอนกรีตเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากขนาดอนุภาคของคอนกรีตที่ใช้แล้วมีขนาดละเอียดที่ใหญ่มากกว่าหินธรรมชาติอยู่เล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 7 และ 8

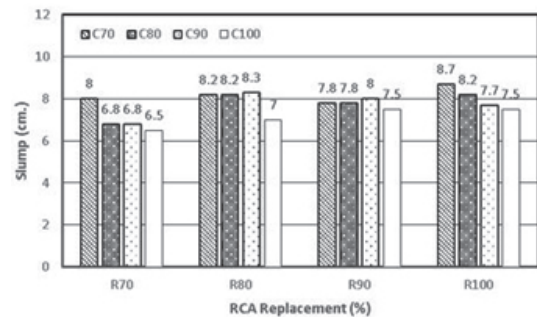
3.2 กำลังอัดของคอนกรีต

ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตและร้อยละกำลังอัดเมื่อเปรียบเทียบกับกำลังอัดของคอนกรีตควบคุม (Normalized Compressive Strength) ดังแสดงในตารางที่ 3 จากการทดสอบพบว่าคอนกรีตควบคุม (R0C0) ที่อายุ 1, 3, 7, 14, 21 และ 28 วัน มีกำลังอัดเท่ากับ 172.15, 225.98, 255.65, 286.21, 306.71 และ 325.03 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ สำหรับสัดส่วนของคอนกรีตที่มีหินฝุ่นและคอนกรีตที่ใช้แล้ว R100C100, R90C100, R70C100, R90C90 และ R90C70 ให้กำลังอัด

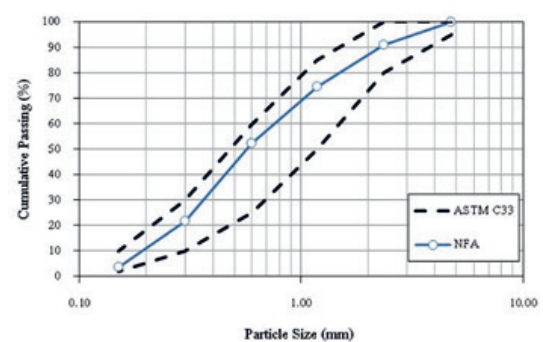
ที่ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมทุกช่วงอายุการบ่มคิดเป็นร้อยละ 71.1% – 99.91% ของคอนกรีตควบคุม ในขณะที่สัดส่วนของคอนกรีตที่มีหินฝุ่นและคอนกรีตที่ใช้แล้ว R80C90 และ R70C80 ให้กำลังอัดที่สูงกว่าคอนกรีตควบคุมทุกช่วงอายุการบ่ม คิดเป็นร้อยละ 101.92% – 118.15% ของคอนกรีตควบคุม



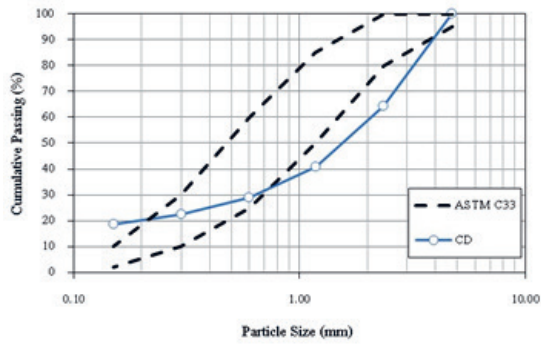
รูปที่ 3 ค่าการยุบตัวของคอนกรีต



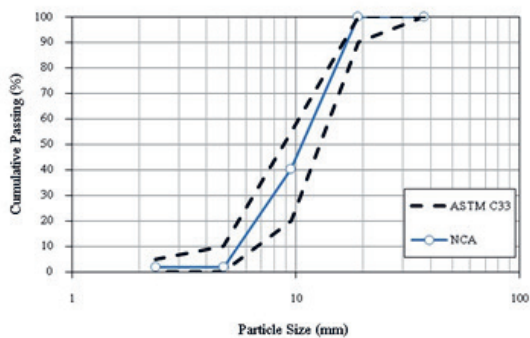
รูปที่ 4 ค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่มีหินฝุ่นและคอนกรีตที่ใช้แล้วเป็นส่วนผสม



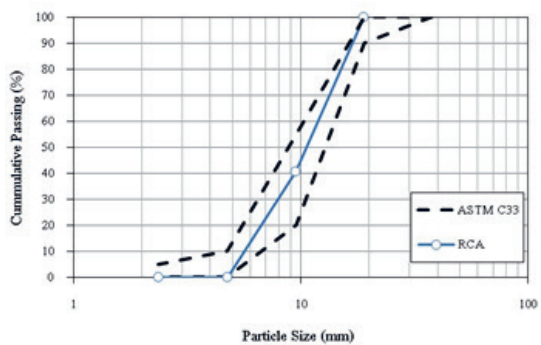
รูปที่ 5 ขนาดละเอียดของทรายธรรมชาติ



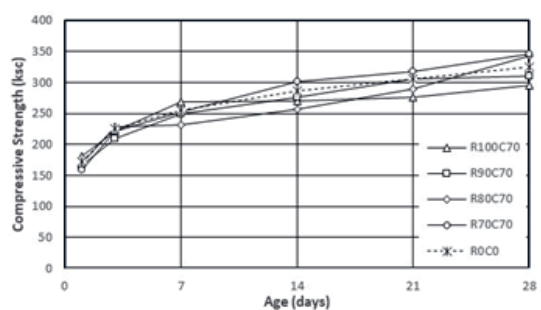
รูปที่ 6 ขนาดคละของหินฝุ่น



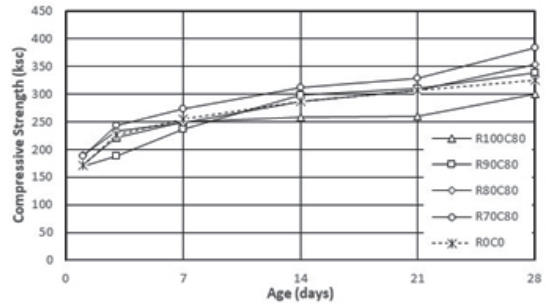
รูปที่ 7 ขนาดคละของหินธรรมชาติ



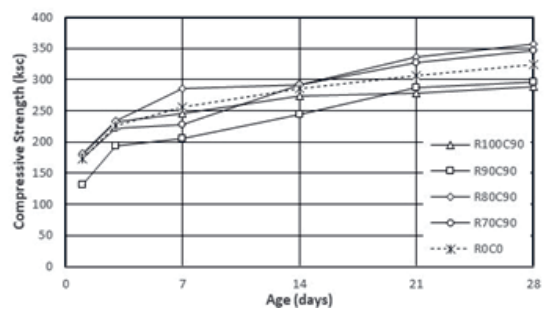
รูปที่ 8 ขนาดคละของหินย่อย
จากเศษคอนกรีตที่ใช้แล้ว



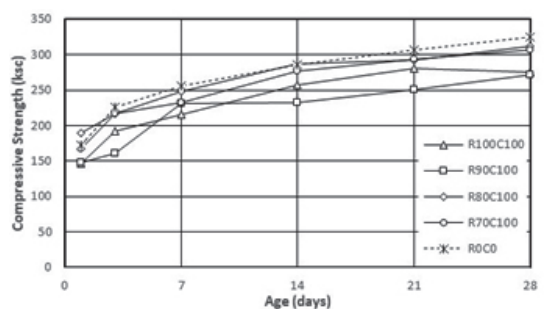
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุ
ของคอนกรีตที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทราย 70%



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุ
ของคอนกรีตที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทราย 80%



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุ
ของคอนกรีตที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทราย 90%



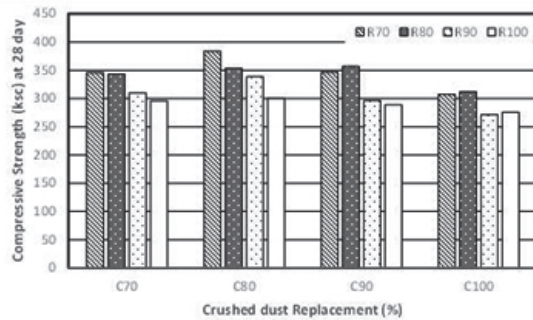
รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุ
ของคอนกรีตที่ใช้หินฝุ่นแทนที่ทราย 100%

เมื่อพิจารณากำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้หินฝุ่นและคอนกรีตที่ใช้แล้ว R80C90, R70C90, R90C80, R80C80, R70C80, R80C70 และ R70C70 ให้กำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุม ซึ่งมีค่าเท่ากับ 356.76, 346.57, 338.43, 353.13, 384.02, 343.05 และ 346.05 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรตามลำดับ หรือคิดเป็น 109.76%, 106.62%,

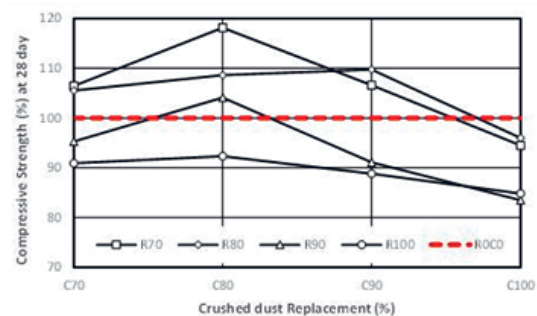
104.12%, 108.64%, 118.15%, 105.54% และ 106.47% ของคอนกรีตควบคุม อย่างไรก็ตามแม้ว่าสัดส่วนผสมอื่นๆ ให้กำลังอัดที่ต่ำกว่า คอนกรีตควบคุม แต่ก็ลดลงไม่เกิน 10% ของ คอนกรีตควบคุม ยกเว้นสัดส่วนผสม R100C100, R90C100 และ R100C90 ที่ให้กำลังอัดลดลงมากกว่า 10% ของคอนกรีตควบคุมขึ้นไป สำหรับ แนวโน้มการพัฒนา กำลังอัดของคอนกรีตที่มี หินฝุ่นและคอนกรีตที่ใช้แล้วเป็นส่วนผสม พบว่า มีแนวโน้มการพัฒนา กำลังอัดที่คล้ายกับคอนกรีต ควบคุมที่ใช้ทรายและหินธรรมชาติล้วนเป็น มวลรวม ดังแสดงในรูปที่ 9 – 12 นั้นแสดงว่าการใช้ หินฝุ่นและคอนกรีตที่ใช้แล้วเป็นมวลรวมของ คอนกรีตไม่ได้มีผลกระทบต่อแนวโน้มการพัฒนา กำลังของคอนกรีตอย่างมีนัยยะสำคัญ

จากรูปที่ 13 เมื่อพิจารณาถึงการ ใช้ คอนกรีตที่ใช้แล้วแทนที่หินธรรมชาติในคอนกรีต โดยพิจารณา กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน พบว่า เมื่อปริมาณการแทนที่เพิ่มขึ้น จะส่งผล ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าลดลง ซึ่งผล การศึกษาสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chen et al. [8], Poon et al. [9] และ Tangchirapat et al. [11] จากผลการทดสอบอัตราส่วนช่องว่าง ระหว่างมวลรวมใช้แล้วและหินธรรมชาติ พบว่า อัตราส่วนช่องว่างของหินใช้แล้วมีค่าที่สูงกว่า หินธรรมชาติเล็กน้อย ดังแสดงในตารางที่ 1 อีกทั้งผลการทดสอบความต้านทานการแตกหัก (Crushing Value) ของคอนกรีตที่ใช้แล้วและ หินธรรมชาติ พบว่าคอนกรีตที่ใช้แล้วมีค่าความ ต้านทานการแตกหักเท่ากับ 21.9% ในขณะที่ ค่าความต้านทานการแตกหักของหินธรรมชาติ มีค่าเท่ากับ 18.8% นั้นแสดงให้เห็นว่ามวล รวมหยาบที่ได้จากคอนกรีตที่ใช้แล้วมีความ แข็งแรงที่น้อยกว่าหินธรรมชาติ ทั้งนี้อาจเนื่อง มาจากคอนกรีตที่ใช้แล้วมีมอร์ตาร์เกาะติดอยู่ ที่ผิว ซึ่งมีความแข็งแรงที่น้อยกว่าหินธรรมชาติ

และด้วยสาเหตุนี้จึงส่งผลกระทบทำให้ค่ากำลังอัด มีค่าลดลง



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับ ร้อยละการแทนที่ของหินฝุ่นและคอนกรีต ที่ใช้แล้วในคอนกรีตที่อายุ 28 วัน



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละกำลังอัด กับร้อยละการแทนที่ของหินฝุ่นและคอนกรีต ที่ใช้แล้วในคอนกรีตที่อายุ 28 วัน

จากรูปที่ 14 เมื่อพิจารณากำลังอัดของ คอนกรีตที่อายุ 28 วัน จะเห็นว่าการใช้หินฝุ่น แทนที่ทรายธรรมชาติไม่เกินร้อยละ 80 ทำให้ ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ใน ขณะที่การใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายธรรมชาติมากกว่า ร้อยละ 80 จะส่งผลกระทบทำให้ค่ากำลังอัด ของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลง ซึ่งสอดคล้องกับ งานวิจัยของ Komenthammasopon [6] สำหรับ สัดส่วนผสมที่ดีที่สุดคือคอนกรีต R70C80 โดยมี ค่าร้อยละกำลังอัดที่อายุ 28 วัน สูงที่สุด ซึ่งเท่ากับ 118.15% ของคอนกรีตควบคุม สำหรับสัดส่วน ที่มีค่าร้อยละกำลังอัดรองลงมาได้แก่ R80C90,

R80C80, R70C90, R70C70, R80C70 และ R90C80 โดยมีค่าเท่ากับ 109.76%, 108.64%, 106.62%, 106.47%, 105.54% และ 104.12% ของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสัดส่วนดังกล่าวสามารถพัฒนากำลังอัดจนมีกำลังอัดที่สูงกว่าคอนกรีตควบคุม ทั้งนี้เนื่องมาจากลักษณะรูปร่างของหินฝุ่นที่มีความเป็นเหลี่ยมมุมและผิวหยาบ ทำให้มีแรงยึดเหนี่ยวและแรงเสียดทานระหว่างวัสดุที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับทรายธรรมชาติ อีกทั้งขนาดอนุภาคของหินฝุ่นในส่วนละเอียดมีค่ามากกว่าทรายธรรมชาติ ซึ่งสามารถช่วยลดช่องว่างในคอนกรีตได้ และทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นที่เพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดที่สูงขึ้น [16]

4. สรุป

จากผลการทดสอบที่ได้ทำการศึกษาทั้งหมดสามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

1) การใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายธรรมชาติในส่วนผสมคอนกรีต ทำให้ค่ายุบตัวของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงและลดลงตามปริมาณอัตราส่วนของหินฝุ่นที่แทนที่ทรายธรรมชาติที่มากขึ้น

2) การใช้คอนกรีตที่ใช้แล้วแทนที่หินธรรมชาติในส่วนผสมคอนกรีต มีแนวโน้มทำให้ค่าการยุบตัวของคอนกรีตเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

3) กำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้หินฝุ่นและคอนกรีตที่ใช้แล้ว R80C90, R70C90, R90C80, R80C80, R70C80, R80C70 และ R70C70 ให้กำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุม แต่อย่างไรก็ตามแม้ว่าสัดส่วนผสมอื่นๆ ให้กำลังอัดที่ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม แต่ก็ลดลงไม่เกิน 10% ของคอนกรีตควบคุม ยกเว้นสัดส่วนผสม R100C100, R90C100 และ R100C90 ที่ให้กำลังอัดลดลงมากกว่า 10% ของคอนกรีตควบคุมขึ้นไป

4) แนวโน้มการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่มีหินฝุ่นเป็นส่วนผสม พบว่ามีแนวโน้มการพัฒนากำลังอัดที่คล้ายกับคอนกรีตควบคุมที่ใช้ทรายเป็นมวลรวม

5) เมื่อพิจารณาถึงการใช้คอนกรีตที่ใช้แล้วแทนที่หินธรรมชาติในคอนกรีต โดยพิจารณากำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณอัตราส่วนของคอนกรีตที่ใช้แล้วที่แทนที่หินธรรมชาติที่เพิ่มขึ้น

6) เมื่อพิจารณากำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน จะเห็นว่าการใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายธรรมชาติไม่เกินร้อยละ 80 ทำให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่การใช้หินฝุ่นแทนที่ทรายธรรมชาติมากกว่าร้อยละ 80 จะส่งผลกระทบทำให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลง

7) สัดส่วนผสมที่ดีที่สุดคือคอนกรีต R70C80 โดยมีค่าร้อยละกำลังอัดที่อายุ 28 วัน สูงที่สุด ซึ่งเท่ากับ 118.15% ของคอนกรีตควบคุม สำหรับสัดส่วนที่มีค่าร้อยละกำลังอัดรองลงมา ได้แก่ R80C90, R80C80, R70C90, R70C70, R80C70 และ R90C80 โดยมีค่าเท่ากับ 109.76%, 108.64%, 106.62%, 106.47%, 105.54% และ 104.12% ของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสัดส่วนดังกล่าวสามารถพัฒนากำลังอัดจนมีกำลังอัดที่สูงกว่าคอนกรีตควบคุม

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนงบประมาณแผ่นดิน จากมหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐมและสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ให้ทุนอุดหนุนการวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Office of The National Economic and Social Development Board. [Internet]. 2016 [cited 2016 Aug 15]. Available from: <http://www.cit.or.th> (in Thai)
- [2] Setthabut C. Concrete technology. Bangkok: 1997. (in Thai)
- [3] Chaisakulkiet U, Malai A. Strength development of mortar mixed with fly ash and crushed stone. The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok. 2016;26(1):13-18. (in Thai)
- [4] Thapprom T. The study of compressive strength of concrete by using silt stone instead of sand for fine aggregate. A case study on silt stone from Narathiwat stone mine. Princess of Naradhiwas University Journal. 2009;1(2):28-41. (in Thai)
- [5] Komenthammasopon S. The investigation of compressive strength of concrete in case study using granite dust from Thai crushing plant as replacement for sand. Princess of Naradhiwas University Journal. 2012;4(3):44-53. (in Thai)
- [6] Komenthammasopon S. The investigation of compressive strength of concrete in case study using sieved granite dust from Thai crushing plant as replacement for sand. Princess of Naradhiwas University Journal. 2013;5(1):49-60. (in Thai)
- [7] Kingkaew R, Chaijit P, Chotchuay V, Chaihan J. The substitution of s and by stonedust in ready mixed concrete. Journal of Southern Technology. 2015;8(2):55-61. (in Thai)
- [8] Chen HJ, Yen T, Chen KH. Use of building rubbles as recycled aggregates. Cement and Concrete Research. 2003;33:125-132.
- [9] Poon CS, Shui ZH, Lam L, Fok H, Kou SC. Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. Cement and Concrete Research. 2004;34:31-36.
- [10] Tipyota N. Compressive strength of recycle concrete produced from burnt waste concrete. The 10th National Convention on Civil Engineering; 2005 May. (in Thai)
- [11] Tangchirapat W, Buranasing R, Jaturapitakkul C, Chidaprasit P. Use of rice husk-bark ash in concrete containing recycled concrete aggregates. Engineering Journal of Research and Development. 2008;19(2):60-67. (in Thai)
- [12] American Society for testing and Materials. Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of coarse aggregate. ASTM C127-15. 2015.

- [13] American Society for testing and Materials. Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of fine aggregate. ASTM C128-15. 2015.
- [14] American Concrete Institute. Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete. ACI 211.1-91. 1991.
- [15] American Society for testing and Materials. Standard test method for slump of hydraulic-cement concrete. ASTM C143/C143M-12. 2012.
- [16] Junruchai P, Somna R, Supromwan J. Compressive strength and drying shrinkage of concrete using quarry dust to replace sand. The 21st National Convention on Civil Engineering; 2016 June 728-732. (in Thai)
- [17] American Society for testing and Materials. Standard specification for concrete aggregates. ASTM C33/C33M-13. 2013.
- [18] Bongkodsupapa K, Pajitvijarn C, Duangkaeoand C, Sinthaworn S, Teerajetkul W. Experimental investigation of the effect of aggregate type Cal properties of concrete. The 21st National Convention on Civil Engineering; 2016 June 761-767. (in Thai)

ผลกระทบของรูปทรงส่วนปลายใบแบบครึ่งทรงกระบอกต่อสมรรถนะ ของกังหันลมแบบแกนแนวตั้ง

ธนาพล สุขชนะ^{1*}

thanaphol.s@rmutsb.ac.th, ton0019@hotmail.com

^{1*} สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
สุวรรณภูมิ

Received: November 1, 2018
Revised: December 31, 2018
Accepted: February 25, 2019

บทคัดย่อ

การวิจัยเชิงทดลองครั้งนี้เพื่อศึกษาผลกระทบของรูปทรงส่วนปลายใบแบบครึ่งทรงกระบอกต่อสมรรถนะของกังหันลมและการทำนายประสิทธิภาพกังหันลมแบบแกนแนวตั้งที่มีรูปแบบการปิดส่วนของปลายใบแตกต่างกัน ใบกังหันลมทำด้วยเหล็กหนา 1.2 mm อัตราส่วนความสูงต่อความกว้าง (h/b) เท่ากับ 2.0 ใบกังหันลมที่ใช้ในการทดลองมี 3 รูปแบบ คือ แบบปลายใบเปิด (Model 1) แบบปลายใบปิดตั้งฉาก (Model 2) และแบบปลายใบปิดเฉียง 45° (Model 3) โดยทำการทดลองหาสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ (C_d) แล้วนำใบกังหันที่มีค่า C_d ต่ำสุด 2 รูปแบบมาประกอบเป็นกังหันลมชนิด 2 ใบ โดยมีระยะเกยของใบกังหันเท่ากับ 0.1d ทำการทดลองภายในอุโมงค์ลมด้วยความเร็วลมคงที่ระหว่าง 2.7 ถึง 9.2 m/s ผลการทดลองพบว่าลักษณะส่วนปลายของใบแบบปิดเฉียง 45° มีค่า C_d ต่ำสุดเท่ากับ 1.19 และมีค่าประสิทธิภาพพลังงานลม (P_m/P_w) เฉลี่ย 27% ด้วยอัตราส่วนของความเร็วเชิงมุมต่อความเร็วลม (V_ω/V_a) เท่ากับ 0.8 นอกจากนี้สามารถทำนายประสิทธิภาพสูงสุดของกังหันลมด้วยความสัมพันธ์ของ ความเร็วลม ความเร็วเชิงมุม สัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ อัตราเร็วรอบ และประสิทธิภาพของใบกังหัน

คำสำคัญ: กังหันลม แกนแนวตั้ง ความเร็วลม แรงต้านอากาศ สมรรถนะ

Effects of End Plates of Bucket on the Performance of Vertical Axis Wind Turbines

Thanaphol Sukchana^{1*}

thanaphol.s@rmutsb.ac.th, ton0019@hotmail.com

^{1*} Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

Received: November 1, 2018
Revised: December 31, 2018
Accepted: February 25, 2019

Abstract

This experimental research was conducted to study the effect of the bucket savonius rotors on the performance and predicting an efficiency of vertical axis wind turbines with different closing end of bucket. The bucket made from mild steel with 1.2 mm of thickness while the ratio of height to length (h/b) is 2.0. There are three types of bucket for used in the experimental. That the both ends open is Model 1, the both ends horizontal closed is Model 2 and the both ends 45° closed is Model 3. Drag coefficient (C_d) of bucket is the first tested. Then assembly to the savonius rotors with the smallest C_d value in two type of bucket, while the gap of bucket is 0.1d. Experiment within the wind tunnel with constant wind speed between 2.7 to 9.2 m/s. The results showed that the bucket both ends 45° closed had the smallest C_d value of 1.19. An average wind energy efficiency (P_m/P_w) was 27% in speed ratio (V_w/V_a) of 0.8. Moreover, it is also to predicting the maximum efficiency of a wind turbine by using the relationship of wind speed, angular speed, drag coefficient, shaft speed and the efficiency of turbine bucket.

Keywords: wind turbine, vertical axis, wind velocity, drag force, performance

1. บทนำ

พลังงานลมเป็นพลังงานทดแทนทางเลือกหนึ่งที่ช่วยลดการนำเข้าเชื้อเพลิงจากต่างประเทศ สำหรับลักษณะลมของประเทศไทยจะมีความเร็วลมและพลังงานลมเฉลี่ยอยู่ในระดับต่ำถึงปานกลาง เทคโนโลยีพลังงานลมจึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาให้มีขีดความสามารถในการทำงานได้ที่ความเร็วลมต่ำถึงปานกลาง กังหันลมที่ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าในปัจจุบันมีสองลักษณะคือ กังหันลมแกนแนวนอน (Horizontal Axis Wind Turbine, HAWT) และกังหันลมแบบแกนแนวตั้ง (Vertical Axis Wind Turbine, VAWT) กังหันทั้งสองแบบมีข้อดีและข้อเสียในการใช้งานที่แตกต่างกัน สำหรับกังหันลมแบบแกนแนวตั้งเป็นกังหันลมที่มีแกนใบพัดตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของลมที่มาในแนวราบทำให้กังหันลมสามารถรับลมในแนวราบได้ทุกทิศทางโดยไม่ต้องมีหางเสือควบคุมทิศทาง กังหันลมแบบแกนแนวตั้งได้มีการพัฒนาและสามารถใช้งานได้ดีมีอยู่ 2 แบบ คือ แบบแดร์เรียส (Darrieus) และแบบซาโวเนียส (Savonius) สำหรับในประเทศไทยมีผู้วิจัยทางด้านพลังงานลมและกังหันลมอย่างต่อเนื่องดังเช่น วิรัชโยธินรินทร์ [1] ได้ศึกษาวิจัยพัฒนากังหันลมต้นแบบทั้งแบบแกนแนวตั้งและแกนแนวนอนขนาด 5 kW พบว่ากังหันให้กำลังสูงสุดที่ความเร็วลม 13 m/s พรเทพ สุรมาตย์ และปรีชา เกรียงกรกฎ [2] ได้ศึกษาออกแบบสร้างและทดสอบสมรรถนะของกังหันลมแบบแกนแนวตั้งในช่วงความเร็วลม 2.5–6 m/s พบว่าอัตราเร็วรอบของกังหันลมเท่ากับ 439 rpm ที่ความเร็วลมเท่ากับ 6 m/s เกษมสันต์ มโนมัยพิบูลย์ และอริยวัฒน์ พระบำรุง [3] ได้รายงานภาพรวมของพลังงานลมในประเทศไทยที่ระดับความสูง 100 m เหนือพื้นดินว่าประเทศไทยมีแหล่งศักยภาพพลังงานลมสูงในบางพื้นที่ นอกจากนี้

มีการวิจัยและพัฒนากังหันลมแบบแกนแนวตั้งในต่างประเทศในลักษณะต่างๆ ดังเช่น Blackwell et al. [4] ได้ศึกษาทดลองสมรรถนะของกังหันลมแบบซาโวเนียสชนิด 2 ใบ และ 3 ใบ พบว่าประสิทธิภาพพลังงานลมของกังหันลมโดยเฉลี่ย 22% Ronold et al. [5] ได้ศึกษาค่าความปลอดภัยในการออกแบบกังหันลมโดยสร้างเป็นสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อวิเคราะห์หาความแข็งแรงสำหรับการออกแบบ พบว่าสมการที่สร้างขึ้นสามารถประเมินอายุการใช้งานของกังหันลมได้ไม่น้อยกว่า 20 ปี Altan and Atilgan [6] ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของกังหันลมแบบแกนแนวตั้งด้วยโปรแกรมสร้างแบบจำลอง พบว่าหากมาบับคับลมอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมจะช่วยให้ประสิทธิภาพของกังหันลมสูงขึ้น Pope et al. [7] ได้เสนอสมการสำหรับการทำนายผลกระทบของใบพัดสเตเตอร์ต่อสมรรถนะของกังหันลมแกนแนวตั้ง Sareni et al. [8] ได้นำเสนอแบบจำลองอย่างง่ายของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าภายในตัวกังหันลม เพื่อวัตถุประสงค์ในการจำลองกังหันลมได้หลายขนาดซึ่งสามารถทำให้ได้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เหมาะสมกับกังหันลมที่ต้องการใช้งาน

การพัฒนากังหันลมแกนแนวตั้งให้มีประสิทธิภาพสูงนั้นทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากขนาดและจำนวนใบพัดจะมีผลโดยตรงต่อแรงต้านการหมุนของกังหันลม ส่งผลให้ประสิทธิภาพของกังหันลมต่ำลงด้วย รวมถึงการออกแบบสร้างกังหันลมให้มีขนาดใหญ่ทำได้ยากจากการศึกษาลักษณะการทำงานและผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ในการออกแบบสร้างที่มีผลต่อสมรรถนะของกังหันลม พบว่าการลดแรงต้านอากาศด้านหลังใบนั้นเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถทำได้เพื่อเพิ่มสมรรถนะของกังหันลมให้สูงขึ้นได้ การวิจัยเชิงทดลองในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ

ด้านหลังของใบกังหันลม เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงสมรรถนะของกังหันลมแบบแกนแนวตั้ง โดยการปรับเปลี่ยนรูปแบบการปิดส่วนปลายของใบกังหันที่มีรูปครึ่งทรงกระบอก (Bucket) พร้อมทั้งประกอบเป็นกังหันลมแบบ 2 ใบ และทดสอบสมรรถนะ

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 อุโมงค์ลมสำหรับการทดลอง

รูปที่ 1 แสดงส่วนประกอบต่างๆ ของอุโมงค์ลม (Wind tunnel) ที่ใช้ในการทดลองการทำงานของกังหันลมและหาค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศของใบกังหันลม (Bucket) แบบต่างๆ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์สมรรถนะของใบกังหันลม อุโมงค์ลมมีพื้นที่หน้าตัดของห้องทดสอบ (Test section) เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 1.2×1.2 m และยาว 1.5 m บริเวณทางเข้ามีรังผึ้ง (Honey-comb) ช่วยปรับเรียงกระแสลมให้กระจายทั่วทั้งห้องทดสอบ พัดลม (Fan) ทำหน้าที่ดูดอากาศให้ไหลเข้าอุโมงค์ลมด้วยความเร็วคงที่ โดยมีต้นกำลังเป็นมอเตอร์ไฟฟ้า (M) ขนาด 7.5kW, 380V, 3P, 1450 RPM สามารถปรับความเร็วลมในห้องทดสอบด้วยการเปลี่ยนขนาดของมู่เล่ย์ขับที่มอเตอร์ต้นกำลัง ซึ่งจะทำให้มีค่าความผิดพลาดของความเร็วลมในการทดลองน้อยกว่าการปรับความเร็วรอบด้วยอินเวอร์เตอร์

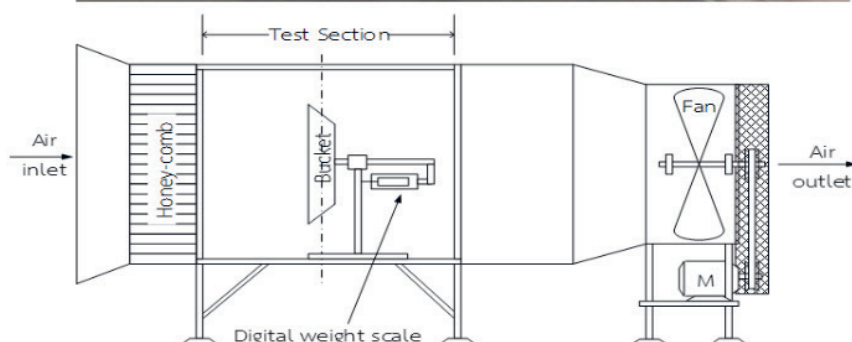
2.2 การทดลองและเงื่อนไขการทดลอง

ในการสร้างและทดสอบผลกระทบรูปร่างส่วนปลายใบแบบครึ่งทรงกระบอกของกังหันลมแบบแกนแนวตั้งแบบชาโวเนียส กำหนดให้ใบมีลักษณะเป็นรูปครึ่งทรงกระบอกผ่าครึ่งโดยมีขนาดความกว้างของใบ (b) เท่ากับ 0.3 m และสูง (h) เท่ากับ 0.6 m ทำให้ได้อัตราส่วนความสูงต่อความกว้าง (h/b) เท่ากับ 2.0 โดยที่ส่วนปลายของใบสำหรับการทดลองทั้ง 3 รูปแบบแสดง

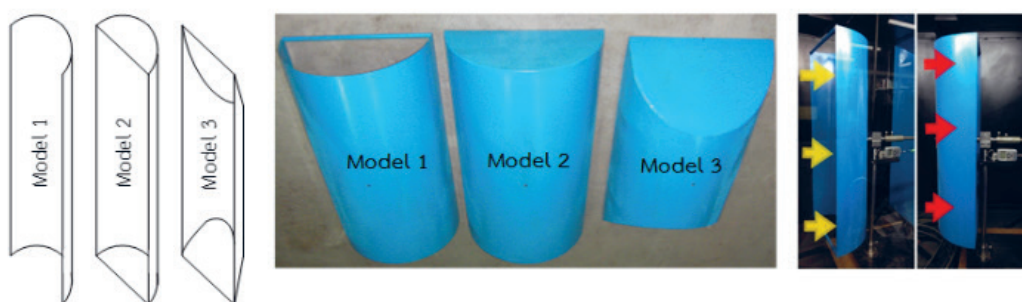
ดังรูปที่ 2 คือ ส่วนปลายทั้งสองด้านเปิด (Model 1) ส่วนปลายทั้งสองด้านปิดตั้งฉาก (Model 2) และส่วนปลายทั้งสองด้านปิดเฉียง 45° (Model 3) เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะที่เกิดจากรูปทรงส่วนปลายของใบพัดโดยการทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศของใบในมุมปะทะแนวตรง (90°) ด้วยการวัดแรงกระทำจากลมทั้งสองด้านด้วยเครื่องชั่งแบบตัวเลข OEM WeiHeng รุ่น WH-A05 ค่าความละเอียด 0.01 kg และพิสัยการวัดสูงสุดเท่ากับ 45 kg ซึ่งประกอบเป็นแท่นสำหรับยึดติดกับใบกังหันลม แล้วนำค่าแรงดึงที่วัดได้ไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศด้วยสมการที่ (1) แล้วนำใบกังหันที่มีสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศต่ำที่สุด 2 แบบ ไปสร้างเป็นกังหันลมแบบแกนแนวตั้งแบบ 2 ใบ เพื่อทดสอบสมรรถนะการทำงานของกังหันลม

$$Cd = \frac{2F_D}{\rho A V^2} \quad (1)$$

โดย Cd คือค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของอากาศ (Drag Coefficient) F_D คือแรงที่วัดได้จากเครื่องวัดแรง (N) ρ คือความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3) A คือ พื้นที่ภาคตัดตั้งฉากกับทิศทางลม (0.18 m^2) และ V คือความเร็วลม (m/s) ซึ่งความเร็วลมที่กระทำต่อใบกังหันลมสามารถวัดได้โดยใช้เครื่องวัดความเร็วลมแบบตัวเลข DAVIS รุ่น AVM-01 ค่าความละเอียด 0.1 m/s พิสัยการวัดสูงสุดเท่ากับ 30 m/s



รูปที่ 1 อุโมงค์ลมสำหรับทดลอง



รูปที่ 2 ลักษณะของใบกังหันที่ใช้ทดลองหาสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

3.1 การทดสอบประสิทธิภาพใบกังหัน

การทดสอบประสิทธิภาพ (ϵ) ของใบกังหันลม ทำการทดสอบในอุโมงค์ลม ที่ความเร็วลมคงที่ เฉลี่ยเท่ากับ 2.7, 3.2, 3.7, 4.4, 5.4, 6.5, 7.8 และ 9.2 m/s ประสิทธิภาพของใบกังหันลมจะอธิบาย ด้วยอัตราส่วนของสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ ดังสมการที่ (2) ซึ่ง $C_d F$ เป็นสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศด้านรับลมของใบกังหัน และ C_{df} เป็นสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศด้านหลังของใบกังหัน จากการทดลองพบว่าค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์

แรงต้านอากาศด้านรับลมของ Model 1, 2 และ 3 เท่ากับ 2.27, 2.39 และ 2.46 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศของ ใบกังหันลม Model 3 สูงกว่า Model 1 และ 2 ทั้งนี้สัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศของรูปทรงครึ่ง ทรงกระบอกมาตรฐานจะมีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศด้านรับลมเฉลี่ยเท่ากับ 2.3 [9, 10] แสดงให้เห็นว่าการปิดเฉียงที่ปลายใบกังหัน ทั้งสองด้านมีผลทำให้เกิดแรงต้านอากาศสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากทิศทางของเวกเตอร์ความเร็ว ลมที่ปะทะกับส่วนปิดเฉียงของใบกังหันทำให้เกิด

แรงยกและแรงกดเสริมกับแรงที่เกิดขึ้นในแนวตั้งฉาก ซึ่งลักษณะของการเกิดแรงยกและแรงกดนี้จะไม่เกิดขึ้นกับใบกังหัน Model 1 และ 2 และพบว่าค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศด้านหลังใบเท่ากับ 1.24, 1.23 และ 1.19 ตามลำดับ ในขณะที่สัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศด้านโค้งของรูปทรงครึ่งทรงกระบอกมาตรฐานเฉลี่ยเท่ากับ 1.2 [9, 10] แสดงให้เห็นว่าการปิดปลายใบแบบเฉียงมีผลให้แรงต้านอากาศด้านหลังใบลดลง เนื่องจากส่วนของปลายใบกังหันจะก่อให้เกิดการหมุนวนของอากาศและไหลข้ามปลายใบโดยไม่เกิดแรงต้านขึ้นกับใบกังหันส่วนที่ปิดเฉียง

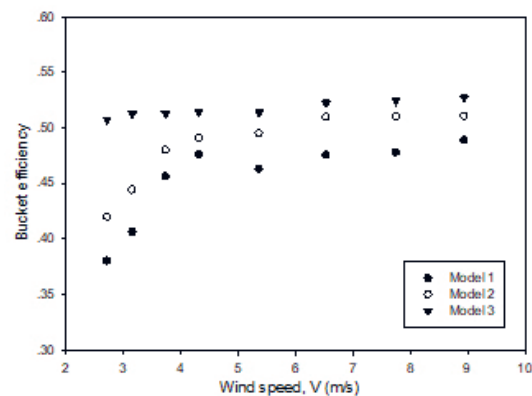
รูปที่ 3 แสดงประสิทธิภาพของใบกังหันลมแต่ละแบบที่ใช้ในการทดลอง โดยนำเสนอรูปแบบของอัตราส่วนของสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศสามารถคำนวณด้วยสมการที่ (2) จะเห็นได้ว่าการปิดเฉียงที่ปลายใบกังหันทั้งสองด้าน (Model 3) มีผลทำให้สมรรถนะของใบกังหันสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลจากแรงต้านอากาศด้านรับลมของใบที่สูงขึ้นและแรงต้านอากาศด้านหลังใบที่ลดลง โดยประสิทธิภาพของใบทั้ง Model 1, 2 และ 3 เท่ากับ 0.45, 0.48 และ 0.52 ตามลำดับ ทั้งนี้ประสิทธิภาพสูงสุดในทางทฤษฎีของกังหันลมจะไม่เกิน 0.59 หรือ 59% [9, 10]

$$\varepsilon = \frac{Dd_F - Cd_f}{Cd_F} \quad (2)$$

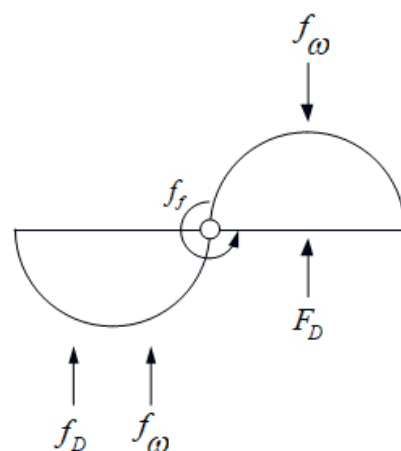
3.2 การทำนายประสิทธิภาพของกังหันลม

จากผลการทดลองประสิทธิภาพของใบกังหันลมแบบแกนแนวตั้งแบบครึ่งทรงกระบอกสามารถนำมาวิเคราะห์หาสมการในการประเมินประสิทธิภาพของกังหันลมที่มีใบกังหัน 2 ใบได้ โดยคำนึงถึงแรงต้านอื่นๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพ

ของกังหันลมดังรูปที่ 4 ซึ่งเป็นการวิเคราะห์เพื่อทำนายประสิทธิภาพของกังหันลมในขณะที่เกิดแรงกระทำและแรงต้านจากอากาศสูงสุด โดยกำหนดให้ F_D คือแรงต้านอากาศเนื่องจากความเร็วลมด้านรับลมของใบกังหัน f_D คือแรงต้านอากาศเนื่องจากความเร็วลมด้านหลังของใบกังหัน f_ω คือแรงต้านอากาศเนื่องจากความเร็วเชิงมุมของใบ และ f_f คือแรงต้านการหมุนเนื่องจากแรงเสียดทานของแบริ่งที่มีค่าคงที่ โดยจะมีผลทำให้แรงสูงสุดที่ได้จากแรงกระทำของลมดังสมการที่ 3



รูปที่ 3 ผลของปลายใบแต่ละแบบที่มีต่อประสิทธิภาพใบที่ความเร็วลมต่างกัน



รูปที่ 4 ไดอะแกรมของแรงกระทำและแรงต้านสำหรับใบกังหันแบบครึ่งทรงกระบอก

$$\sum F = F_D - f_D - f_f - 2f_\omega \quad (3)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ 3 จะได้

$$F_D - f_D = \varepsilon F_D = 0.5\varepsilon\rho ACd_F V^2 \quad (4)$$

แรงต้านอากาศเนื่องจากความเร็วเชิงมุม (f_ω)

$$f_\omega = \rho ACd_f (\pi r N)^2 \quad (5)$$

กำลังงานกลเพลลาของกังหันลม (P_m)

$$P_m = 2\pi r N \sum F \quad (6)$$

แทนค่า $\sum F$ ด้วยสมการที่ (3-5) ใน (6) และกำหนดให้ f_f มีค่าเข้าใกล้ 0 เนื่องจากเป็นแรงเสียดทานของแบร้งที่มีค่าน้อยและคงที่ จะได้

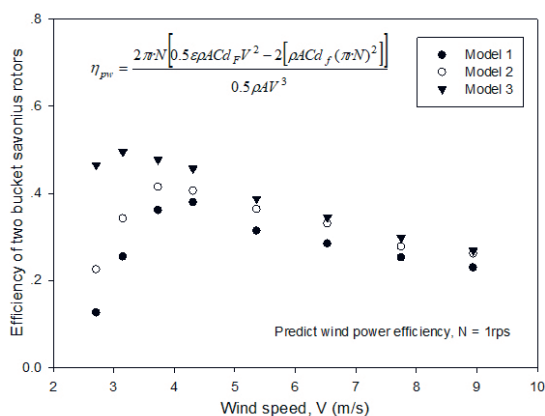
$$P_m = 2\pi r N \left[0.5\varepsilon\rho ACd_F V^2 - 2 \left(0.5\rho ACd_f (\pi r N)^2 \right) \right] \quad (7)$$

จากสมการพลังงานของกระแสลม

$$P_w = 0.5\rho A V^3 \quad (8)$$

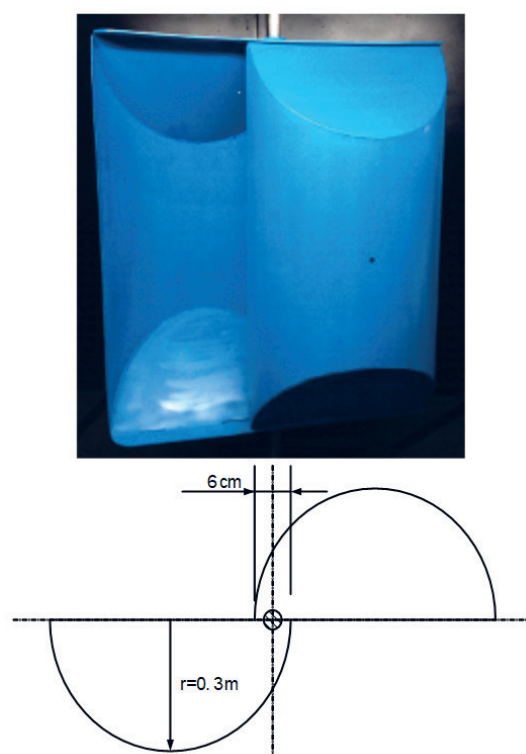
จะได้ประสิทธิภาพของกังหันลม (η_{pw})

$$\eta_{pw} = \frac{2\pi r \cdot N \left[0.5\varepsilon\rho ACd_F V^2 - 2 \left(0.5\rho ACd_f (\pi r N)^2 \right) \right]}{0.5\rho A V^3} \quad (9)$$



รูปที่ 5 ประสิทธิภาพของกังหันลมจากการคำนวณด้วยสมการที่ (9)

รูปที่ 5 แสดงการทำนายประสิทธิภาพของกังหันลมหรือเรียกว่าสัมประสิทธิ์กำลังงานของกังหันลมก็ได้เช่นกัน (Power Coefficient, Cp) กรณียกใช้ใบกังหันทั้ง 3 แบบ โดยการคำนวณด้วยสมการที่ (9) ซึ่งสมมติให้ความเร็วรอบใช้งานของกังหันลมคงที่ 1 rps โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ ความเร็วลม สมรรถนะของใบกังหันรัศมี และพื้นที่ของใบกังหันเป็นไปตามข้อมูลที่ได้จากการทดลอง พบว่าประสิทธิภาพพลังงานลมของกังหันลมจากการทำนายที่ใช้ใบกังหันทั้ง 3 แบบมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.25-0.4 (25-40%) โดยประสิทธิภาพพลังงานของกังหันลมลดลงเมื่อความเร็วลมสูงขึ้นซึ่งเกิดจากผลของแรงต้านอากาศด้านหลังของใบกังหัน (f_D) และแรงต้านอากาศเนื่องจากความเร็วเชิงมุมของใบ (f_ω) ที่มีค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วลม

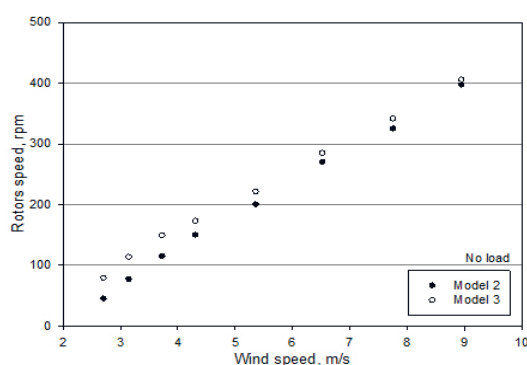


รูปที่ 6 ลักษณะการประกอบใบกังหันในการทดลอง

3.3 การทดลองสมรรถนะของกังหันลม

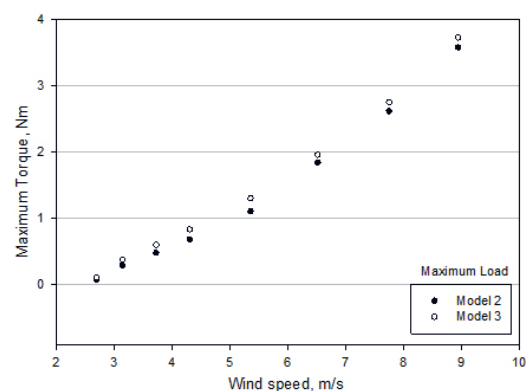
หลังจากทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพของใบกังหันพบว่าใบกังหันแบบปิดเฉียง 45° มีประสิทธิภาพสูงถึง 52% รองลงมาเป็นใบแบบปิดตั้งฉากซึ่งมีประสิทธิภาพ 48% ในการทดลองสมรรถนะของกังหันลมแบบแกนแนวตั้งแบบครึ่งทรงกระบอก 2 ใบครั้งนี้เลือกใช้ใบกังหัน Model 2 และ 3 โดยประกอบให้มีระยะเกย (Gap) ดังรูปที่ 6 ซึ่งเป็นลักษณะการประกอบที่ทำให้ลมที่หมุนวนออกจากด้านรับลมส่วนหนึ่งไหลเข้าเสริมกำลังให้กับใบที่หมุนมารับลมได้อย่างต่อเนื่อง [6] และช่วยลดแรงต้านอากาศด้านหลังใบลงได้ โดยมีอัตราส่วนของระยะเกยต่อขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของใบที่เหมาะสมของใบกังหันแบบซาร์โวเนี่ยสอยู่ที่ประมาณ 0.1d [4, 6]

ผลการทดลองหาอัตราเร็วรอบสูงสุดของกังหันลมแบบไม่มีภาระดังแสดงในรูปที่ 7 อัตราเร็วรอบวัดด้วยเครื่องความเร็วรอบแบบตัวเลข DIGICON รุ่น DT-245P ค่าความละเอียด 0.1 rpm เมื่อพิสัยการวัดสูงสุดไม่เกิน 1000 rpm จะเห็นได้ว่าอัตราเร็วรอบของกังหันลมสูงขึ้นเมื่อความเร็วลมสูงขึ้น โดยกังหันลมที่มีใบแบบปิดเฉียง 45° มีอัตราเร็วรอบสูงกว่ากังหันลมที่มีใบแบบปิดตั้งฉาก เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศด้านหลังใบต่ำกว่า

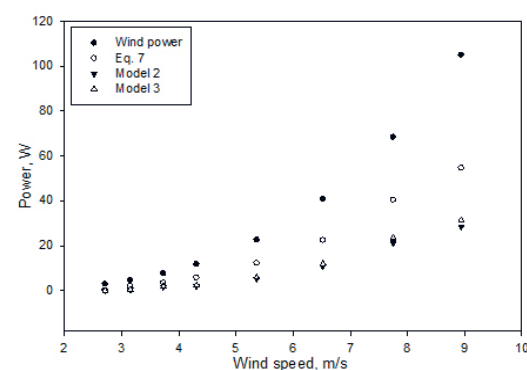


รูปที่ 7 อัตราเร็วรอบของกังหันลมที่ความเร็วลมต่างกัน

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมและแรงบิดสูงสุด (Maximum Torque, T_{max}) ของกังหันลมดังรูปที่ 8 โดยแรงบิดใช้วิธีการวัดแบบเบรกเชือกซึ่งเป็นการวัดค่าจำนวน 12 ครั้งต่อ 1 ความเร็วลม แล้วเฉลี่ยค่าแรงบิดโดยตัดค่าที่วัดได้สูงสุดและต่ำสุดออก จะเห็นได้ว่าแรงบิดเพลาสูงสุดของกังหันลมทั้งสองแบบมีความแตกต่างกัน โดยกังหันลมที่มีใบแบบปิดเฉียง 45° สามารถให้แรงบิดได้สูงกว่ากังหันลมที่มีใบกังหันแบบปิดตั้งฉากตรงมากขึ้นเมื่อความเร็วลมสูงกว่า 5 m/s เช่นเดียวกันกับอัตราเร็วรอบของกังหันลม ซึ่งกังหันลมที่มีใบกังหันแบบปลายปิดเฉียง 45° สามารถให้แรงบิดและอัตราเร็วรอบสูงกว่าเฉลี่ยประมาณ 10–15% เมื่อความเร็วลมสูงกว่า 5 m/s



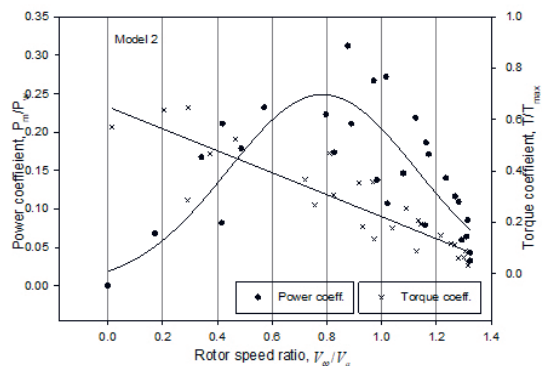
รูปที่ 8 แรงบิดสูงสุดของกังหันลมที่ความเร็วลมต่างกัน



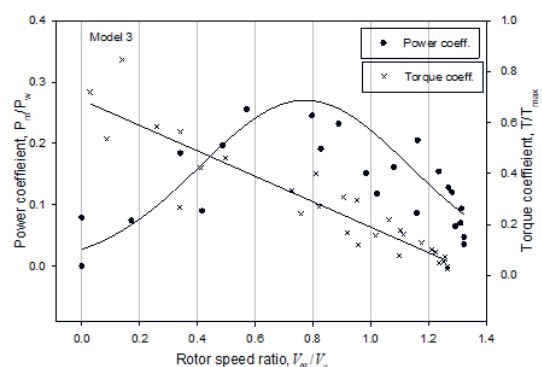
รูปที่ 9 กำลังลมจากการคำนวณและกำลังจากการทดลองของกังหันลมที่ความเร็วลมคงที่ต่างกัน

พลังงานลมสูงสุด (Maximum wind power) คำนวณด้วยสมการที่ (8) กำลังงานเพลาคำนวณด้วยสมการที่ (7) และกำลังเพลจากการทดลองคำนวณด้วยสมการที่ (10) โดยแรงบิด (T) และความเร็วรอบ (N) ได้จากการวัดด้วยเครื่องมือวัด จากรูปที่ 9 จะเห็นได้ว่าพลังงานลมสูงขึ้นเมื่อความเร็วลมสูงขึ้น พบว่ากังหันลมแบบใบปิดเฉียง 45° ให้กำลังเพลสูงกว่าแบบใบปิดตั้งฉากตรงเฉลี่ย 10%

$$P_m = \frac{2\pi TN}{60} \quad (10)$$



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ของ P_m/P_w , T/T_{max} และ V_w/V_a แบบปลายใบปิดตั้งฉาก



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ของ P_m/P_w , T/T_{max} และ แบบปลายใบปิดเฉียง 45°

จากรูปที่ 10 และ 11 แสดงความสัมพันธ์ของ P_m/P_w , T/T_{max} และ V_w/V_a ของกังหันลมทั้งสองแบบ ซึ่ง P_m คำนวณด้วยสมการที่ (10) P_w คำนวณด้วยสมการที่ (8) และ V_w คำนวณด้วยสมการที่ (11) รูปที่ 10 และ 11 จะเห็นได้ว่า V_w/V_a มีผลต่อ P_m/P_w และ T/T_{max} โดยตรง ซึ่งพบว่าอัตราส่วนของ V_w/V_a ที่ทำให้กังหันลมมีประสิทธิภาพพลังงานสูงสุดเท่ากับ 0.8 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ [4, 10, 11] โดยพบว่าประสิทธิภาพพลังงานสูงสุดเท่ากับ 25% และ 27% สำหรับกังหันลมที่มีใบแบบปลายใบปิดตั้งฉากและปิดเฉียง 45° ตามลำดับ ในขณะที่ผลการทดสอบของ [4] พบว่าสมรรถนะของกังหันลมแบบซาโวเนียชนิด 2 ใบ มีประสิทธิภาพพลังงานลมสูงสุดอยู่ในช่วงเฉลี่ย 22–26% ด้วย V_w/V_a เท่ากับ 0.8 โดยที่ปลายใบกังหันเป็นการปิดแบบตั้งฉากเหมือนกับ Model 2 ในการทดลอง

4. สรุปผลการทดลอง

กังหันลมแกนแนวตั้งเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการเปลี่ยนรูปพลังงานจากลมเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ อีกทั้งยังมีส่วนในการช่วยลดปัญหาภาวะโลกร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงได้อีกด้วย ทั้งนี้กังหันลมที่ดีนั้นจะต้องมีประสิทธิภาพสูงและสามารถทำงานได้เมื่อความเร็วลมต่ำ จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าการออกแบบส่วนปลายของใบกังหันที่มีการปิดเฉียง 45° มีผลทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานของกังหันลมสูงขึ้น โดยมีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของอากาศด้านหลังของใบเท่ากับ 1.19 และพบว่าประสิทธิภาพของกังหันสูงสุดเท่ากับ 27% ในขณะที่ยังอัตราส่วนของความเร็วเชิงมุมต่อความเร็วลม (V_w/V_a) เท่ากับ 0.8 ซึ่งจากการปิดปลายใบกังหันแบบเฉียง 45° เป็นวิธีหนึ่งที่จะช่วยให้สัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศของด้านหลังของใบกังหันลดลง ทั้งนี้สัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศเป็นตัวแปรสำคัญในการพัฒนา

ประสิทธิภาพพลังงานลมของกังหันลมให้สูงขึ้น และเหมาะสมกับการใช้งานในประเทศไทยซึ่งมีความเร็วลมเฉลี่ยอยู่ในช่วงต่ำถึงปานกลาง นอกจากนี้การปรับปรุงพื้นผิวด้านหลังของใบให้เป็นหลุมหรือเป็นร่องเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจ ในการสร้างการหมุนวนของอากาศเพื่อลดสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศสำหรับการพัฒนาประสิทธิภาพพลังงานของกังหันลมแบบแกนแนวตั้งได้

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Wirachai R. Development and demonstration of prototype wind turbine technology for power generation with low wind speed. Research report, Rajamangala University of Technology Thanyaburi. 2008. (in Thai)
- [2] Pornthep S, Preecha K. Efficiency comparison of pan type model in the vertical axis wind turbines as lenz ii type in wind tunnel model using design of experimental, Proceedings of the 6th Ubon Ratchathani University Research Conference, 2012;326-335. (in Thai)
- [3] Kasemsan M, Ariyawat P. Overall wind resource potential of thailand at 100 meters above ground - first results derived from a developed dual highresolution info-database system of wind resource, Thesis report of Joint Graduate School of Energy and Environment – JGSEE, KMUTT. (in Thai)
- [4] Ben FB, Robert ES, Louis VF. Wind Tunnel Performance Data for Two- and Three-Bucket Savonius Rotors, National Technical Information Service. U. S. Department of Commerce. 1977.
- [5] Knut OR, Jakob WH, Carl. JC. Calibration of partial safety factors for design of wind- turbine rotor blades against fatigue failure in flap wise bending, Proceedings of the 1996 European Union wind energy conference, Goteborg Sweden, 20-24 May 1996; 926-933.
- [6] Burcin DA, Mehmet A. The use of a curtain design to increase the performance level of a Savonius wind rotors. Renewable Energy. 2010; 35: 821–829.
- [7] Pope K, Rodrigues V, Doylea R, sopelas A, Gravelins R, Naterer GF, Tsang E. Effects of stator vanes on power coefficients of a zephyr vertical axis wind turbine. Renewable Energy. 2010; 35: 1043-1051.
- [8] Sareni B, Abdelli A, Roboam X, Tran DH. Model simplification and optimization of a passive wind turbine generator. Renewable Energy. 2009; 34: 2640–2650.
- [9] Gerald M, Mark FJ, Euan S. Vertical axis resistance type wind turbines for use in buildings. Renewable Energy. 2009; 34: 1407–1412.

[10] Qasim AY, Usubamatov R, Zain ZM. Investagation and design impeller type vertical axis wind turbine. Aust. J. Basic & Appl. Sci. 2011; 5 (12): 121-126.

[11] Ramadan A, Yousef K, Said M, Mohamed MH. Shape optimization and experimental validation of a drag vertical axis wind turbine. Energy. 2018; 151: 839—853.

ผลของอุณหภูมิในขั้นตอนการแช่และการอบแห้งต่อคุณภาพของข้าวหนึ่งพันธุ์หอมนิล

สุนัน ปานสาคร^{1*} และจตุรงค์ ลังกาพินธุ์²

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

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Received: December 1, 2017
Revised: March 22, 2018
Accepted: August 20, 2018

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาผลของอุณหภูมิ (30, 40 °C) ในขั้นตอนการแช่เมล็ดข้าวในน้ำและอุณหภูมิ (40, 80 °C) ในขั้นตอนการอบแห้ง ต่อคุณภาพข้าวหนึ่งพันธุ์หอมนิล ได้แก่ ค่าสี (L^* , a^* , b^*) ค่าความแตกต่างของสีโดยรวม (ΔE^*) ค่าความชื้น ค่าปริมาณน้ำอิสระ และค่าปริมาณสารแอนโทไซยานิน ผลการวิจัยพบว่า ค่าสี L^* , a^* , b^* ของเมล็ดข้าวหอมนิลก่อนและหลังกระบวนการผลิตข้าวหนึ่ง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) แต่เมื่อเปรียบเทียบค่าความแตกต่างของสีโดยรวมระหว่างค่าสีของเมล็ดข้าวหอมนิลก่อนและหลังการผลิตข้าวหนึ่ง พบแนวโน้มการลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการแช่เมล็ดข้าวหอมนิลจาก 30 °C เป็น 40 °C ที่เวลา 4 hr และการอบแห้งข้าวหอมนิลหนึ่งด้วยอุณหภูมิ 40 °C และ 80 °C ทั้งนี้จากการลดความชื้นของเมล็ดข้าวหอมนิลหนึ่ง ให้ค่าปริมาณความชื้นระหว่าง 11.33-13.57%wb. และค่าวอเตอร์แอคทิวิตี (a_w) ระหว่าง 0.5-0.6 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์อาหารแห้งเนื่องจากช่วยยืดอายุการเก็บรักษา นอกจากนี้เมื่อตรวจสอบปริมาณสารแอนโทไซยานิน พบว่าข้าวหอมนิลก่อนผ่านกระบวนการหนึ่งมีค่า 5.11 mg/g dry weight และคงเหลือระหว่าง 3.03-4.33 mg/g dry weight เมื่อเมล็ดข้าวหอมนิลผ่านการแช่ในน้ำที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ร่วมกับการลดความชื้นด้วยการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงขึ้น อย่างไรก็ตามกระบวนการผลิตข้าวหนึ่งเป็นการปรับปรุงคุณภาพข้าวและช่วยให้สามารถเก็บรักษาได้ยาวนานขึ้นกว่าการเก็บในรูปของข้าวกล้องหอมนิล

คำสำคัญ: ข้าวหอมนิล ข้าวหนึ่ง การแช่ การอบแห้ง แอนโทไซยานิน

Effect of Temperature on Soaking and Drying on Quality of Parboiled Hom-nin Rice

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: December 1, 2017
Revised: March 22, 2018
Accepted: August 20, 2018

Abstract

The objective of research was to investigate the effect of temperature (30, 40 °C) on the immersion process of rice in water and temperature (40, 80 °C) in the drying step to the quality of parboiled Hom-nin rice. Color values (L^* , a^* , b^*), total color difference (ΔE^*), moisture content and the amount of anthocyanin were investigated. The results showed that no statistically significant differences ($P > 0.05$) in color value (L^* , a^* , b^*) of the Hom-nin rice kernel before and after the production of parboiled rice. However, find out the total color difference reduction trend when increasing the temperature of the soaked rice seed from 30 °C to 40 °C at 4 hr and drying of parboiled Hom-nin rice with temperature 40 °C and 80 °C. By the dehumidification of parboiled Hom-nin rice kernel was show the moisture content value between 11.33-13.57%wb. and water activity (a_w) between 0.5-0.6. It is suitable for dry food products as it extends the shelf life. In addition, when detecting the amount of anthocyanin of Hom-nin rice was presented 5.11 mg/g dry weight. But, after rice is soaked in water and drying at higher temperatures from parboiling process found that the amount of anthocyanin just left between 3.03-4.33 mg/g dry weight. However, the production process of parboiled rice is to improve rice quality and it can be stored longer than the storage in the form of brown rice.

Keywords: Homnin rice, Parboiled rice, Soaking, Drying, Anthocyanin

1. บทนำ

ข้าวเป็นอาหารหลักของคนไทยและอีกหลายชนชาติ เนื่องจากเป็นแหล่งอาหารที่ให้พลังงานในราคาที่ไม่สูงมากนัก ประเทศไทยเป็นประเทศผู้นำในการส่งออกข้าวมาอย่างยาวนาน โดยเฉพาะข้าวเหนียว (Parboiled rice) ซึ่งเป็นการนำข้าวมาผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพข้าวนั้นๆ ทั้งในด้านกายภาพและเคมี กระบวนการดังกล่าวประกอบด้วย การแช่น้ำ (Soaking) การให้ความร้อน (Steaming) และการลดความชื้น (Drying) [1,2,3] ส่งผลให้ข้าวเหนียวมีสมบัติที่แตกต่างจากข้าวทั่วไป เช่น มีความแข็งเพิ่มมากขึ้น สีเหลืองกลืนและรสชาติเฉพาะหลังการหุงสุก และยังมีคุณประโยชน์ในแง่ของวิตามินเพิ่มมากขึ้น ปริมาณข้าวต้นสูงขึ้น และมีอายุการเก็บรักษาที่ยาวนานขึ้น [4,5,6] อย่างไรก็ตามคนไทยไม่นิยมบริโภคข้าวเหนียวเนื่องจากกลิ่นเฉพาะตัวและเนื้อสัมผัสที่ค่อนข้างแข็ง ใช้เวลาในการหุงนาน สิ้นเปลืองพลังงานตั้งแต่กระบวนการผลิตจนถึงกระบวนการหุงสุก ราคาสูงกว่าข้าวขาวทั่วไป ดังนั้นจึงมีความพยายามการปรับปรุงคุณภาพข้าวเหนียวด้วยเทคนิคและวิธีการต่างๆ เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภค

กระบวนการผลิตข้าวเหนียวจะใช้วัตถุดิบเริ่มต้นเป็นข้าวเปลือกสายพันธุ์ต่างๆ มาผ่านขั้นตอนการแช่น้ำ การให้ความร้อน และการลดความชื้น ซึ่งเปลือกของข้าวเป็นปัจจัยที่สำคัญของการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพประการหนึ่ง เช่น การซึมของเมล็ดสีจากเปลือกเข้าไปในเมล็ด ในระหว่างกระบวนการแช่ ทำให้เมล็ดข้าวเหลืองและมีกลิ่น เปลือกเป็นตัวขัดขวางการถ่ายเทความร้อนและมวลสารทำให้เวลาของกระบวนการเพิ่มมากขึ้น เป็นต้น ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงมีงานวิจัยได้ศึกษาการใช้ข้าวกล้องเป็นวัตถุดิบเริ่มต้น เรียกว่า “ข้าวกล้องเหนียว (Parboiled brown rice)” ซึ่งพบว่าสามารถปรับปรุงคุณภาพข้าวนั้น

ในส่วนเมล็ดข้าวมีความขาวของเมล็ดเพิ่มขึ้น เมล็ดข้าวมีความนุ่มหลังการหุงสุก มีกลิ่นหอม และสามารถเก็บรักษาได้นานขึ้นเมื่อเทียบกับการเก็บข้าวกล้องโดยทั่วไป [4,7,8,9,10] ดังนั้นข้าวกล้องเหนียว จึงเป็นการพัฒนาคุณภาพของข้าวกล้องให้ดียิ่งขึ้น ประกอบกับในปัจจุบันข้าวกล้องเป็นที่นิยมของผู้บริโภคมากขึ้น โดยเฉพาะข้าวกล้องหอมนิล เนื่องจากเป็นข้าวที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูงมีโปรตีนมากกว่าข้าวหอมมะลิ 105 ถึง 2 เท่า และยังประกอบไปด้วยธาตุเหล็ก สังกะสี ทองแดง แคลเซียม โพแทสเซียม มีสารแอนโทไซยานิน (Anthocyanin) สารนี้มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) ช่วยลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคหลอดเลือดหัวใจอุดตัน โรคกระเพาะ สามารถช่วยลดการอักเสบของเนื้อเยื่อ บรรเทาโรคเบาหวาน ช่วยบำรุงสายตา เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการมองเห็นเวลาตอนกลางคืน [11] ซึ่งปัญหาที่สำคัญของข้าวกล้องหอมนิลคือมีอายุการเก็บรักษาที่สั้น ประมาณ 3-6 เดือน และจะเกิดกลิ่นหืนได้เร็ว ดังนั้นกระบวนการหนึ่งจึงช่วยลดปัญหาดังกล่าวได้ ทั้งนี้ต้องกระทำบนขั้นตอนและกระบวนการที่เหมาะสม เนื่องจากยังไม่มีรายงานวิจัยที่ทำการศึกษการผลิตข้าวเหนียวพันธุ์หอมนิล ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิในขั้นตอนการแช่และการอบแห้งต่อคุณภาพของข้าวเหนียวพันธุ์หอมนิลเพื่อเป็นข้อมูลที่สามารถนำความรู้ไปใช้ในการพัฒนา ควบคุมดูแลคุณภาพข้าวเหนียวพันธุ์หอมนิลหรือเพื่อเป็นข้อมูลให้กับอุตสาหกรรมแปรรูปข้าวนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ต่อไป

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การเตรียมข้าวพันธุ์หอมนิล

จัดซื้อข้าวเปลือกพันธุ์หอมนิลคุณภาพดี เมล็ดสมบูรณ์ สะอาด มีค่าความชื้นอยู่ที่ประมาณ 12-13%wb. จากนั้นนำตัวอย่างข้าวเปลือกมา

กะเทาะด้วยเครื่องกะเทาะ (Model THU 35A, Japan) และแยกเมล็ดที่หักออกจากเมล็ดเต็มด้วยเครื่องแยก (Model TRG05B, Japan) ทำความสะอาดโดยการเป่าแยกฝุ่นละล่องก่อนที่จะนำไปทดสอบในขั้นตอนการทำข้าวหนึ่งต่อไป

2.2 การผลิตข้าวหนึ่งพันธุ์หอมนิล

- การแช่น้ำ : นำข้าวกล้องหอมนิลที่ผ่านการกะเทาะเปลือกออกแล้ว แช่ในน้ำควบคุมอุณหภูมิแบ่งเป็น 2 ระดับ ได้แก่ $30 \pm 2^{\circ}\text{C}$ และ $40 \pm 2^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 4 hr ด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Water bath)

- การให้ความร้อน : นำข้าวกล้องหอมนิลทั้งสองตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการแช่น้ำแล้ว มาให้ความร้อนในหม้อนึ่งอุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 15 min

- การลดความชื้น : นำข้าวกล้องหอมนิลที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยการนึ่งมาลดความชื้นด้วยการอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 40°C และ 80°C จนกระทั่งความชื้นสุดท้ายอยู่ที่ประมาณ 13%wb. จากนั้นตรวจสอบสมบัติทางกายภาพและเคมีดังแผนการทดลองแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แผนการทดลองการผลิตข้าวหนึ่งพันธุ์หอมนิล

ตัวอย่าง	การแช่น้ำ		การให้ความร้อน		การลดความชื้น
	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	เวลา (hr)	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	เวลา (min)	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)
ข้าวหอมนิลหนึ่ง (PBR 30-40)	30	4	100	15	40
ข้าวหอมนิลหนึ่ง (PBR 30-80)	30	4	100	15	80
ข้าวหอมนิลหนึ่ง (PBR 40-40)	40	4	100	15	40
ข้าวหอมนิลหนึ่ง (PBR 40-80)	40	4	100	15	80

2.3 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมี

2.3.1 ปริมาณความชื้นและค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ (a_w)

ชั่งน้ำหนักข้าวกล้องหอมนิลจำนวน 2 g อบแห้งที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 16 hr อ้างอิงวิธีการทดสอบจากมาตรฐาน AOAC [12] และหาค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ (a_w) ด้วยเครื่องวัดค่าวอเตอร์แอกติวิตี้ (Model Aqualab รุ่น 3 TE, สหรัฐอเมริกา)

2.3.2 ค่าสี

วัดค่าสีด้วยเครื่องวัดสี (Model JC801, Tokyo, Japan) รายงานผลในรูปของ L^* , a^* , b^* ซึ่งค่าทั้ง 3 ค่าเป็นการแสดงการวัดค่าสีโดยที่ค่า L^* คือ ค่าความสว่าง (Lightness) มีค่าความสว่างมากเมื่อเข้าใกล้ 100 และมีความมืดเมื่อเข้าใกล้ 0 ค่า a^* คือค่าความเป็นสีเขียว (Greenness) เมื่อมีค่าเป็นลบและมีค่าความเป็นสีแดง (Redness) เมื่อมีค่าเป็นบวก และค่า b^* คือค่าความเป็นสีเหลือง (Yellowness) เมื่อมีค่าเป็นบวกและค่าความเป็นสีน้ำเงิน (Blueness) เมื่อมีค่าเป็นลบ และวัดค่าความแตกต่างของสีโดยรวม (ΔE^* , Total color difference)

แสดงดังสมการที่ (1) [13] เปรียบเทียบระหว่างก่อนกระบวนการและหลังกระบวนการ ซึ่งก่อนทำการวัดค่าสี เครื่องวัดสีถูกปรับเทียบความเที่ยงตรงของค่าสีด้วย Standard Calibration Plate ค่า L^* , a^* และ b^* เท่ากับ 98.11, -0.11 and -0.08 ตามลำดับ

$$\Delta E^* = ((L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2) \quad (1)$$

โดยที่

ΔE^* = ความแตกต่างของสี (Total color difference)

L_0^*, L^* = ค่าความสว่างของตัวอย่างก่อนกระบวนการและหลังกระบวนการ

a_0^*, a^* = ค่าความเป็นสีเขียวหรือสีแดงของตัวอย่างก่อนกระบวนการและหลังกระบวนการ

b_0^*, b^* = ค่าความเป็นสีเหลืองหรือสีน้ำเงินของตัวอย่างก่อนกระบวนการและหลังกระบวนการ

2.3.3 ปริมาณแอนโทไซยานิน

วิเคราะห์ปริมาณแอนโทไซยานิน (Total Anthocyanin Content) [14,15] โดยเตรียมตัวอย่างผงข้าวหอมนิลจำนวน 1 g ด้วยการร่อนด้วยตะแกรงร่อนขนาด $125\mu\text{m}$ ใส่ลงในสารละลายเอทานอลิกไฮโดรคลอริก (เอทานอล 95% 85 ml ต่อ กรดไฮโดรคลอริก 1.5 นอร์มอล 15 ml) ปริมาตร 25 ml เขย่าให้เข้ากัน ปิดฝาด้วยแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์แล้วนำไปเก็บที่อุณหภูมิ 4°C นาน 24 hr จากนั้นนำออกมารองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 4 ปรับปริมาตรด้วยสารละลายเอทานอลิกไฮโดรคลอริกให้มีปริมาตร 25 ml แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 535 nm โดยใช้สารละลายเอทานอลิกไฮโดรคลอริก เป็นตัวปรับศูนย์ (blank) คำนวณหาปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมดจากสมการที่ (2) และ (3) ดังนี้

$$\text{Total Absorbance} = (OD_{535} \times V \times 100)/W$$

$$\text{Total anthocyanin content (mg/g)} \quad (2)$$

$$= \text{Total absorbance} / 98.2 \quad (3)$$

โดยที่

V = ปริมาตรของสารละลายที่นำมาหาปริมาณแอนโทไซยานิน (ml)

W = น้ำหนักของข้าวหอมนิลที่นำมาหาปริมาณแอนโทไซยานิน (g)

OD = ค่าการดูดกลืนแสงที่อ่านได้จากเครื่องวัดการดูดกลืนแสง

2.4 การวิเคราะห์ทางสถิติ

ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์ผลการทดลองที่ระดับความแตกต่างทางสถิติ 95% (One-way analysis of variance (ANOVA)) และทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตามวิธีของ Duncan New's Multiple Range Test (DMRT)

3. ผลการศึกษาและวิจารณ์

3.1 ผลการศึกษาสัมบัติด้านสีของข้าวหอมนิลก่อนและหลังกระบวนการผลิตข้าวหนึ่ง ที่สภาวะต่างๆ

ข้าวหอมนิลมีเมล็ดสีม่วงดำ จากงานวิจัยในอดีต [16,17,18] เมื่อวิเคราะห์ปริมาณสีของเมล็ดข้าวหอมนิล พบว่ามีสีเป็นลักษณะสีม่วงดำ ซึ่งประกอบไปด้วยสีม่วงเข้ม (Cyanidin) สีชมพูอ่อน (Peonidin) และสีน้ำตาล (Procyanidin) ดังนั้นจากงานวิจัยนี้เมื่อวัดค่าสีของข้าวหอมนิล (Control) พบว่ามีเมล็ดสีม่วงดำและให้ค่า L^* , a^* , b^* เท่ากับ 26.47 ± 0.58 , 1.63 ± 0.06 และ 4.83 ± 0.06 ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 2 และเมื่อเมล็ดข้าวหอมนิลหลังผ่านกระบวนการผลิตข้าวหนึ่ง ด้วยขั้นตอนการแช่น้ำอุณหภูมิ 30°C และ 40°C ตามด้วยการนึ่งอุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 15 min และขั้นตอนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 40°C และ 80°C พบว่าไม่มีความ

แตกต่างของค่าสี (L^* , a^* , b^*) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) รวมถึงเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวหอมนิลที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการนึ่ง (Control) ให้ผลเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตามหากสังเกตจะพบว่า การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของขั้นตอน

การแช่และการอบแห้งส่งผลต่อการลดลงเล็กน้อยของค่าความสว่าง (L^*) ของเมล็ดข้าวหอมนิล ในขณะที่ค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) เพิ่มขึ้นแต่ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$)

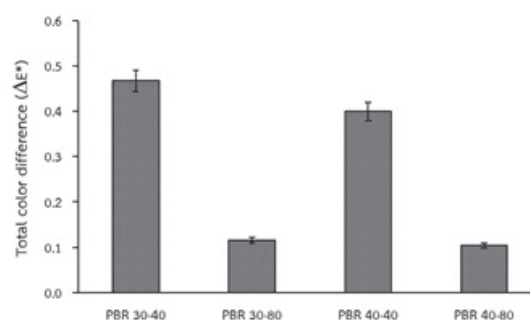
ตารางที่ 2 เปรียบเทียบสมบัติด้านสีของข้าวหอมนิลก่อนและหลังกระบวนการผลิตข้าวหนึ่งที่สภาวะต่างๆ

ตัวอย่าง	ค่าสี		
	L^{*ns}	a^{*ns}	b^{*ns}
ข้าวหอมนิล (Control)	26.47±0.58	1.63±0.06	4.83±0.06
ข้าวหอมนิลนึ่ง (PBR 30-40)	26.93±0.06	1.57±0.06	4.77±0.06
ข้าวหอมนิลนึ่ง (PBR 30-80)	26.57±0.58	1.68±0.08	4.80±0.10
ข้าวหอมนิลนึ่ง (PBR 40-40)	26.87±0.06	1.63±0.06	4.83±0.06
ข้าวหอมนิลนึ่ง (PBR 40-80)	26.50±0.30	1.70±0.10	4.90±0.06

^{ns} หมายถึงค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแนวดิ่งไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) เมื่อเปรียบเทียบโดย DMRT (mean± SD)

กระบวนการผลิตข้าวหนึ่งเป็นการปรับปรุงคุณภาพข้าวด้วยขั้นตอนการแช่ การนึ่ง และการอบแห้ง ซึ่งกระบวนการเหล่านี้อยู่บนพื้นฐานของความแตกต่างของปัจจัยต่างๆ โดยเฉพาะอุณหภูมิ ดังนั้นเมื่อพิจารณาค่าความแตกต่างของสีโดยรวม (ΔE^*) ระหว่างค่าสีของเมล็ดข้าวหอมนิลก่อนและหลังการผลิตข้าวหนึ่ง แสดงดังรูปที่ 1 พบแนวโน้มการลดลงของค่าความแตกต่างของสีโดยรวมเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการแช่เมล็ดข้าวหอมนิล 30 °C เป็น 40 °C ที่เวลา 4 hr เพื่อเพิ่มความชื้น และการอบแห้งข้าวหอมนิลหนึ่งจากอุณหภูมิ 40 °C เป็น 80 °C เพื่อลดความชื้นของเมล็ดข้าว จนกระทั่ง ความชื้นสุดท้ายมีค่าประมาณ 13%wb. การลดลงของค่าความแตกต่างของสีโดยรวมเนื่องมาจากปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) หรือปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (Browning

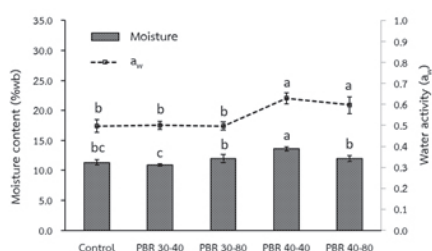
reaction) ที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ ปฏิกิริยาดังกล่าวนี้อาจเกิดขึ้นระหว่าง น้ำตาลรีดิวซ์ (Reducing sugar) กับกรดอะมิโน โปรตีนหรือสารประกอบไนโตรเจนอื่นๆ โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดเป็นสารประกอบหลายชนิดที่ให้สีน้ำตาลหรือทำให้ผลิตภัณฑ์นั้นมีสีเข้มขึ้น [19,20]



รูปที่ 1 เปรียบเทียบค่าความแตกต่างของสีโดยรวม (ΔE^*) ของข้าวหอมนิลก่อนและหลังกระบวนการผลิตข้าวหนึ่งที่สภาวะต่างๆ

3.2 ผลการศึกษาสมบัติด้านความชื้นและวอเตอร์แอกติวิตีของข้าวหอมนิลก่อนและหลังกระบวนการผลิตข้าวหนึ่งที่สภาวะต่างๆ

ความชื้นมีผลต่อการเสื่อมเสียของอาหาร โดยเฉพาะการเสื่อมเสียเนื่องจากจุลินทรีย์อาหารที่มีความชื้นหรือปริมาณน้ำสูงจะเป็นอาหารที่เสื่อมเสียง่าย เนื่องจากมีสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญของจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเกิดการเสื่อมเสีย อีกทั้งความชื้นมีผลต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงความร้อนของอาหารด้านต่างๆ [21] ในส่วนการผลิตข้าวหนึ่งพบว่าหลังสิ้นสุดกระบวนการ ความชื้นที่เหมาะสมสำหรับการเก็บรักษาตัวอย่างข้าวหนึ่งให้ยาวนานก่อนการจำหน่ายถึงผู้บริโภคจะอยู่ในช่วงปริมาณความชื้นไม่เกิน 14%wb. [19, 22] ดังนั้นจากผลการอบแห้งข้าวหอมนิลหนึ่งด้วยอุณหภูมิ 40 °C และ 80 °C พบว่าให้ค่าปริมาณความชื้นระหว่าง 11.33 -13.57%wb. ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมแสดงดังรูปที่ 2 โดยสอดคล้องกับค่า วอเตอร์แอกติวิตี (a_w) ที่อยู่ในช่วง 0.5-0.6 เป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์อาหารแห้งเนื่องจากช่วยยืดอายุการเก็บรักษา [23] และค่าวอเตอร์แอกติวิตียังเป็นปัจจัยที่ชี้ระดับปริมาณน้ำต่ำสุดในผลิตภัณฑ์อาหารที่เชื้อจุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ในการเจริญและใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมีต่างๆ



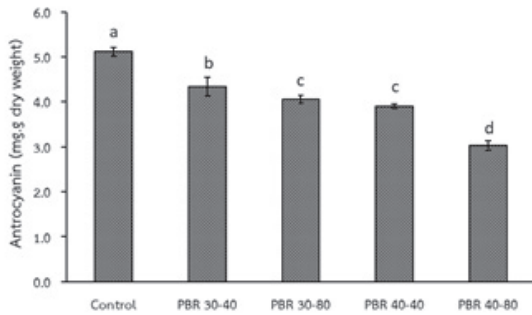
รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นและวอเตอร์แอกติวิตีของข้าวหอมนิลก่อนและหลังกระบวนการผลิตข้าวหนึ่งที่สภาวะต่างๆ

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

3.3 ผลการศึกษาสมบัติด้านแอนโทไซยานินของข้าวหอมนิลก่อนและหลังกระบวนการผลิตข้าวหนึ่งที่สภาวะต่างๆ

สีม่วงดำของเมล็ดข้าวหอมนิลเป็นสีที่มีสารกลุ่มฟลาโวนอยด์ (Flavonoid) หรือที่เรียกว่าสารแอนโทไซยานิน (Anthocyanin) ซึ่งเป็นสารแอนต้ออกซิแดนซ์ (Antioxidant) ทำหน้าที่จับกับอนุมูลอิสระ และช่วยทำให้กลไกการทำงานของร่างกายมีประสิทธิภาพมากขึ้นกว่าปกติ [16] ดังนั้นการที่ข้าวหอมนิลมีสารแอนโทไซยานินที่มีประโยชน์จึงจัดเป็นผลิตภัณฑ์อาหารสุขภาพ (Functional Foods) ช่วยลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคหัวใจอุดตันและมะเร็ง [11,17]

จากการทดสอบหาปริมาณแอนโทไซยานินก่อนนำไปผลิตเป็นข้าวหนึ่ง (Control) มีค่าเท่ากับ 5.11 mg/g dry weight จากนั้นเมื่อผ่านกระบวนการผลิตข้าวหนึ่งพบว่าการแช่เมล็ดข้าวในน้ำที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจาก 30 °C เป็น 40 °C ที่เวลา 4 hr และการลดความชื้นด้วยการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงขึ้นจาก 40 °C เป็น 80 °C ส่งผลต่อการลดลงของปริมาณสารแอนโทไซยานินอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) มีค่าคงเหลือระหว่าง 3.03-4.33 mg/g dry weight ทั้งนี้เนื่องจากสมบัติของแอนโทไซยานินที่ละลายได้ดีในน้ำ ไม่เสถียร สลายตัวได้ง่ายด้วยความร้อน ออกซิเจน แสง เมื่อโครงสร้างเปลี่ยนแปลงสีจะเปลี่ยนไปด้วย [24] สังเกตได้จากลักษณะเมล็ดข้าวหอมนิลหนึ่งที่สภาวะต่างๆ ดังรูปที่ 4 อย่างไรก็ตามข้าวหนึ่งที่ผลิตจากข้าวหอมนิลยังคงมีปริมาณสารแอนโทไซยานินเหลืออยู่ที่เป็นประโยชน์ต่อผู้บริโภค และกระบวนการผลิตข้าวหนึ่งเป็นการปรับปรุงคุณภาพข้าวช่วยให้สามารถเก็บรักษาได้ยาวนานขึ้นกว่าการเก็บในรูปของข้าวกล้องที่พบว่าอายุการเก็บรักษาที่สั้นและจะเกิดกลิ่นหืนได้เร็ว ดังนั้นกระบวนการนี้จึงช่วยลดปัญหาดังกล่าวได้



รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงค่าแอนโทไซยานินของข้าวหอมนิลก่อนและหลังกระบวนการผลิตข้าวนี้ที่สภาวะต่างๆ

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

4. สรุปผลการวิจัย

ข้าวหอมนิลเป็นข้าวที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูงโดยเฉพาะมีแอนโทไซยานินและเมื่อนำมาผลิตเป็นข้าวหอมนิลหนึ่ง ด้วยขั้นตอนการแช่น้ำอุณหภูมิ 30 °C และ 40 °C เป็นเวลา 4 hr ตามด้วยการนึ่งอุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 15 min และขั้นตอนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 40 °C และ 80 °C พบว่าค่าสี (L^* , a^* , b^*) ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) กับข้าวหอมนิลที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการ ประกอบกับหลังผ่านการลดความชื้นให้ค่าปริมาณความชื้นระหว่าง 11.33 -13.57%wb. ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมในการเก็บรักษาและสอดคล้องกับค่าวอเตอร์-แอกติวิตี (a_w) ที่อยู่ในช่วง 0.5-0.6 เมื่อตรวจสอบปริมาณสารแอนโทไซยานินพบว่า การแช่เมล็ดข้าวในน้ำที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น และการลดความชื้นด้วยการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงขึ้น ส่งผลต่อการลดลงของปริมาณสารแอนโทไซยานินเนื่องจากแอนโทไซยานินมีคุณสมบัติละลายได้ดีในน้ำ ไม่เสถียร สลายตัวได้ง่ายด้วยความร้อนเมื่อโครงสร้างเปลี่ยนแปลงก็จะเปลี่ยนไปด้วย

ทั้งนี้กระบวนการผลิตข้าวนี้เป็นการปรับปรุงคุณภาพข้าวและช่วยให้สามารถเก็บรักษาได้ยาวนานขึ้นกว่าการเก็บในรูปของข้าวกล้อง



(ก) CONTROL



(ข) PBR 30-40



(ค) PBR 30-80



(ง) PBR 40-40



(จ) PBR 40-80

รูปที่ 4 ตัวอย่างข้าวหอมนิลก่อนและหลังกระบวนการผลิตข้าวนี้ที่สภาวะต่างๆ

(ก) ข้าวหอมนิล

(ข) ข้าวหอมนิลหนึ่ง (PBR 30-40)

(ค) ข้าวหอมนิลหนึ่ง (PBR 30-80)

(ง) ข้าวหอมนิลหนึ่ง (PBR 40-40)

(จ) ข้าวหอมนิลหนึ่ง (PBR 40-80)

4. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่สนับสนุนวัสดุอุปกรณ์ สถานที่ในการทำวิจัย และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่สนับสนุนทุนวิจัย

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Leethanapanich K, Mauromoustakos A, Y.J. Wang Y.J. Impacts of parboiling conditions on quality characteristics of parboiled commingled rice. *Journal of Cereal Science*. 2016; 69: 283–289.
- [2] Paiva F. F, Vanier N. L. V, Berrios J. J, Pinto V. Z, Wood D, Williams T. Elias M.C. Polishing and parboiling effect on the nutritional and technological properties of pigmented rice. *Food Chemistry*. 2016; 191: 105–112.
- [3] Sarangapani C, Thirumdas R, Devi Y, Trimukhe A, Deshmukh R. R, Annapure U.S. Effect of low-pressure plasma on physicochemical and functional properties of parboiled rice flour. *LWT - Food Science and Technology*. 2016; 69: 482–489.
- [4] Bhattacharya K. R. Parboiling of rice. In E. T. Champagne (Ed.), *Rice: Chemistry and technology*. St. Paul, MN, USA: American Association of Cereal Chemists; 2004. p. 289-348.
- [5] Delcour, J. A. Hosney R.C. Rice and oat processing. *Principles of Cereal Science and Technology*. St. Paul, MN, USA: AACC International; 2010. p. 149-160.
- [6] Buggenhout J, Brijs K, Celus I, Delcour J.A. The breakage susceptibility of raw and parboiled rice: a review. *Journal of Food Engineering*. 2013; 117: 304-315.
- [7] Kar N, Jain R.K, Srivastaya P.P. Parboiling of de husked rice. *Journal of Food Engineering*. 1999; 39(1): 17-22.
- [8] Soponronnarit S, Nathakarakakule A, Jirajindalert A, Taechapairoj C. Parboiling brown rice using superheated steam fluidization technique. 2006; *Journal of Food Engineering*. 2006; 75(3): 423-432.
- [9] Parnsakhorn S, Noomhorm A. Changes in Physicochemical Properties of Parboiled Brown Rice during Heat Treatment. *Agricultural Engineering International: the CIGR E-journal*. Manuscript FP 08 009. Vol. X. 2008.
- [10] Buggenhout J, Brijs K, Oevelen J.V, Delcour J.A. Milling breakage susceptibility and mechanical properties of parboiled brown rice kernels. *Food Science and Technology*. 2014; 59(1): 369-375.

- [11] Laze M.C, Savio M, Pizzala R, Cazzalini O, Perucca P, Scovassi A.I, Stivala L.A, Bianchi L. Anthocyanins induce cell cycle perturbations and apoptosis in different human celllines. *Carcinogenesis*. 2004; 25(8): 1427-1433.
- [12] AOAC. Official Methods of Analyses of the Association of Official Analytical Chemists. 15th ed. Association of Official Analytical Chemists. 1990.
- [13] Rhim R. V, Nunes V. A, Jones K, Swartzel R. Kinetics of color change of grape juice generated using linearly increasing temperature. *Journal of Food Science*. 1989; 54(3): 776-777.
- [14] Suwan N. Effect of coating materials on controlling of browning and weight loss in lychee fruit. Master of Science in Biology. Chiang Mai University. 2005. (in Thai)
- [15] Ranganna S. Plant pigment. In S. Ragana (ed.). *Manual of analysis of fruit and vegetable produce*. Tata McGraw-Hill Publishing Co., Ltd, New Delhi; 1977. p. 72-93.
- [16] Sompong R, Siebenhandl-Ehn S, Linsberger-Martin G. Berhhofer E. Physicochemical and antioxidative properties of red and black rice varieties from Thailand, China and Srilanka. *Food Chemistry*. 2011; 124(1): 132-140.
- [17] Lee J.C, Kim J.D, Hsieh F.H, Eun J.B. Production of black rice cake using ground black rice and medium-grain brown rice. *International Journal of Food Science and Technology*. 2008; 43(6): 1078-1082.
- [18] Singhasurasak H, Rice berry. 2014 [cited 2014 May 25]. Available from: <http://riceberry-rice.blogspot.com/2013/12/blog-post.html>. (in Thai)
- [19] Pillaiyar P, Mohandas R. Hardness and color in parboiled rice produced at low and high temperature. *Journal of Food Science and Technology*. 1981; 18: 7-9.
- [20] Kimura T, Bhattacharya K.R, Ali S.Z. Discoloration characteristics of rice during parboiling (I): Effect of processing conditions on the color intensity of parboiled rice. *Journal of the Society of Agricultural Structures*. 1993; 24(2): 23-30.

- [21] Parnsakhorn S. Thermal process. 2nd ed. Bangkok: Triple Education Co., Ltd.; 2017. (in Thai)
- 22] Das A, Das S, Subudhi H, Mishra P, Sharma S. Extension of shelf life of brown rice with some traditionally available materials. Indian Journal of Traditional Knowledge. 2012; 11(3): 553-555.
- Parnsakhorn S. Thermal process. 2nd ed. Bangkok: Triple Education Co., Ltd.; 2017.
- [23] Rungsardthong V. Food processing technology. 5th ed. Bangkok: Text and Journal Publication Co., Ltd.; 2014. (in Thai)
- [24] Markakis P. Anthocyanins as food colors. New York : Academic Press. 1982.

สิ่งทอโยธาในงานดินสำหรับประยุกต์ในงานรางรถไฟ

วิชุดา จันทรประภาณนท์^{1*} และนิธินาถ ชิตพงศ์²

wichuda.c@en.rmutt.ac.th^{1*}, nithinart_c@rmutt.ac.th²

^{1*, 2} ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Received: October 9, 2018
Revised: November 5, 2018
Accepted: November 30, 2018

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการนำวัสดุทางสิ่งทอไปใช้ในงานดินสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในระบบขนส่งทางรางรถไฟ ผ้าไม่ทอสามตัวอย่างเตรียมด้วยเครื่องสางใยและกระบวนการยัดดัดทางกลด้วยเครื่องปักเข็ม ซึ่งมีน้ำหนักประมาณ 200 – 600 กรัมต่อตารางเมตร และมีความหนาประมาณ 2 – 7 มิลลิเมตร ผ้าไม่ทอที่มีน้ำหนักมากที่สุด คือ 609.8 กรัมต่อตารางเมตร และมีความหนามากที่สุด คือ 6.76 มิลลิเมตร มีค่าการทนต่อแรงดึงและแรงฉีกสูง แต่มีสมบัติการซึมผ่านของอากาศและน้ำต่ำ เมื่อนำผ้าไม่ทอทั้งสามตัวอย่างและผลิตภัณฑ์สิ่งทอโยธาไปทำการทดสอบในงานดินด้วยการทดสอบ ซี บี อาร์ พบว่า การวางวัสดุสิ่งทอเหล่านี้ในระหว่างชั้นดิน ทำให้การต้านแรงกดอัดของดินมีค่าต่ำลง อย่างไรก็ตาม พบว่าค่า ซี บี อาร์ ของชั้นดินที่มีการวางตัวอย่างผ้าไม่ทอที่มีน้ำหนักมากที่สุดมีค่าสูงกว่าค่า ซี บี อาร์ ของชั้นดินที่มีการวางตัวอย่างผลิตภัณฑ์สิ่งทอโยธาประมาณ 87 เปอร์เซ็นต์ นั่นคือ ชั้นดินที่มีตัวอย่างผ้าไม่ทอที่มีน้ำหนักมากที่สุดจากงานวิจัยนี้ สามารถทนแรงกดอัดได้มากกว่าชั้นดินที่มีผลิตภัณฑ์สิ่งทอโยธาที่ใช้งานจริง

คำสำคัญ: ผ้าไม่ทอ แผ่นใยสังเคราะห์ สิ่งทอเทคนิค สิ่งทอโยธา ซี บี อาร์

Different Geotextiles in Soil for Railway Construction Application

Wichuda Chanprapanon^{1*} and Nithinart Chitpong²
wichuda.c@en.rmutt.ac.th^{1*}, nithinart_c@rmutt.ac.th²

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

Received: October 9, 2018
Revised: November 5, 2018
Accepted: November 30, 2018

Abstract

This research aimed to study the use of different geotextiles in soil for railway construction application. Three nonwovens were produced by carding followed by needlepunching and then were compared to commercial geotextile. The fabric weight of three nonwovens was around 200 to 600 gram per square meter (gsm) and the thickness of them was typically 2 to 7 millimeter (mm). Nonwoven having the heaviest in fabric weight of 609.8 gsm and the thickest of 6.76 mm exhibited the highest in both of tensile strength and bursting strength but had the slightest in hydraulic properties both of air permeability and water permeability. In addition, three nonwovens and the commercial geotextile were performed in a laboratory California Bearing Ratio (CBR) test to investigate the behavior of reinforced soil with different materials. The results showed that the stress of each penetration of soil was not improved with the inclusion of each material. However, CBR value of the soil with the heaviest nonwoven were higher than that of the soil with commercial geotextile about 87%. Therefore, the introduction of the heaviest nonwoven reinforcement in soil enhanced the bearing capacity compared to the placing of commercial geotextile in soil.

Keywords: nonwoven, geosynthetics, technical textiles, geotextile, CBR

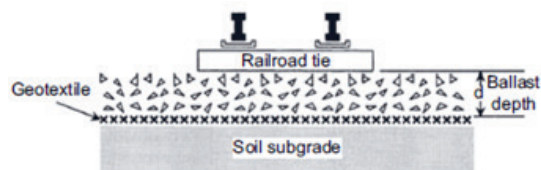
1. บทนำ

ในปัจจุบันสิ่งทอเทคนิค (Technical textiles) หรือสิ่งทออุตสาหกรรม (Industrial textiles) เป็นอุตสาหกรรมที่เติบโตเร็วที่สุดในวงการอุตสาหกรรมสิ่งทอ ยกตัวอย่างเช่น ผ้าอ้อมเด็ก ถูนอน บอลลูกน เส้นด้ายในยางรถยนต์ กรอบแว่นกันแดด แผ่นควบคุมการพังทลายของหน้าดิน เป็นต้น เนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์ของสิ่งทอที่มีการปรับปรุงให้มีสมบัติและสมรรถนะทางด้านเทคนิคมากกว่ารูปร่างที่ปรากฏหรือคุณลักษณะด้านความสวยงาม ผลิตภัณฑ์ของสิ่งทอเทคนิคเหล่านี้แยกตามลักษณะของงานที่ใช้ [1] เช่น สิ่งทอทางการเกษตร (Agrotech) สิ่งทอทางการแพทย์ (Medtech) สิ่งทอทางการก่อสร้าง (Buildtech) สิ่งทอในยานยนต์ (Mobitech) สิ่งทอทางกีฬาและนันทนาการ (Sporttech) สิ่งทอในบรรจุภัณฑ์ (Packtech) เป็นต้น ทั้งนี้รวมถึงสิ่งทอโยธาหรือสิ่งทอทางธรณีหรือจีโอเทค (Geotech or geotextile) ที่นำมาใช้ทางด้านธรณีและวัสดุทางด้านวิศวกรรมโยธาด้วย

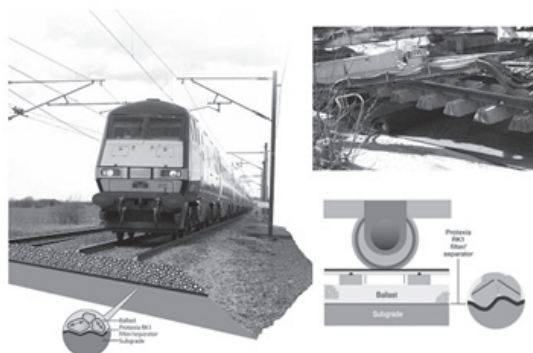
สิ่งทอโยธา คือ ผืนผ้าซึ่งหมายความว่ารวมถึงผ้าทอ (Woven fabric) ผ้าถัก (Knitted fabric) ผ้าไม่ทอ (Nonwoven fabric) และผ้าเชิงประกอบ (Composite fabric) ที่น้ำสามารถซึมผ่านได้เพื่อนำมาใช้ทางด้านธรณีวิทยา ได้แก่ ดิน หิน พื้นโลก และสิ่งก่อสร้างทางวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องกับพื้น เช่น การวางกั้นระหว่างพื้นดินกับท่อ หินฐานเขื่อน หรือผนังสำหรับการระบายออกของน้ำและยึดตัวดินให้คงรูปอยู่เพื่อเพิ่มความแข็งแรง การเสริมแรงในแนวตั้งและชายฝั่ง การสร้างฐานของถนนชั่วคราว ถนนที่ถาวรและทางด่วน และใช้ป้องกันการกัดเซาะของดินบริเวณฝั่งแม่น้ำและทางทะเล เป็นต้น [1, 2]

สิ่งทอโยธาสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในระบบราง (Railroad applications) [2-3] โดยที่

สิ่งทอโยธาจะทำหน้าที่ในการแบ่งชั้น (Separation) วัสดุระหว่างชั้นดินออกจากหินคลุก (Ballast) ในกรณีที่เป็นการสร้างระบบรางใหม่ หรือแบ่งชั้นระหว่างหินคลุกเก่าและหินคลุกใหม่ ในกรณีที่เป็นการปรับปรุงระบบรางเก่า [2-4] ดังแสดงในรูปที่ 1 และตัวอย่างการใช้ผลิตภัณฑ์ทางการค้า Protexia RK1 เป็นตัวแบ่งชั้นในระบบราง [5] ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 1 ลักษณะการวางสิ่งทอโยธาในระบบราง [3]



รูปที่ 2 การใช้ผลิตภัณฑ์สิ่งทอโยธา Protexia RK1 ในระบบราง [5]

สิ่งทอโยธาช่วยเสริมความแข็งแรง (Reinforcement) กับชั้นฐานดิน ทั้งยังทำหน้าที่เป็นตัวกรอง (Filtration) เพื่อป้องกันการฟุ้งของเนื้อดินอันเนื่องจากการเพิ่มระดับของน้ำ และสามารถทำหน้าที่ในการระบายน้ำ (Drainage) โดยมีทิศทางการไหลในแนวระนาบ อย่างไรก็ตาม การนำสิ่งทอโยธาไปใช้ในระบบรางยังไม่มีข้อกำหนดที่แน่ชัดถึงวัสดุหรือโครงสร้างของสิ่งทอโยธา แต่พบว่าผ้าไม่ทอชนิดเข็มปรุที่มีน้ำหนักมากจะตรงตามสมบัติที่จะนำไปใช้ในการ

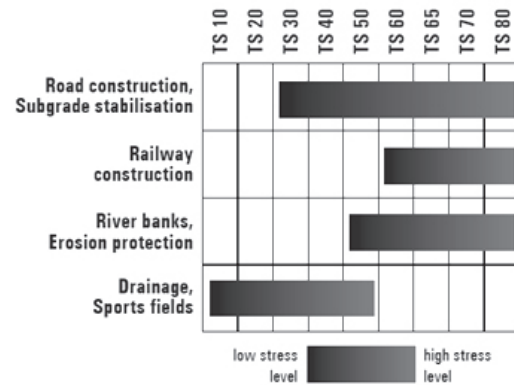
ปูใต้หินคลุก เนื่องจากมีคุณสมบัติในการยืดหยุ่นตัวสูง (Flexibility) ซึ่งจำเป็นเมื่อนำไปใช้ปูใต้หินคลุกที่มีขนาดและลักษณะแตกต่างกัน และมีคุณสมบัติที่สามารถระบายน้ำได้ดี (In-plane drainage or transmissivity) ตามลักษณะรูปพรรณจากโครงสร้างผ้า [2] นอกจากนี้ สิ่งทอโธยาก็ยังมีคุณสมบัติทางด้านการเสริมแรงและความเหนียวอีกด้วย

Ashpiz และคณะ [6] ศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงและซ่อมแซมรางรถไฟสาย St.Petersburg – Moscow ประเทศรัสเซีย เพื่อให้รองรับการรถไฟความเร็วสูง โดยการเคลื่อนย้ายหินคลุกเก่าที่มีการปนเปื้อนกับชั้นดินออกมาทำความสะอาดและนำกลับเข้าไปใส่เหมือนเดิม หลังจากที่มีการปูสิ่งทอโธยา Tyvar® R3857 เป็นผ้าไม่ทอที่ถูกอัดด้วยความร้อนทำจากเส้นใยพอลิโพรพิลีน โดยทำหน้าที่ในการแบ่งชั้นวัสดุและการปรับพื้นให้คงตัวพบว่า เมื่อระยะเวลาผ่านไป 5 ปี สิ่งทอโธยาที่ถูกวางลงไปนั้นยังคงสภาพที่ดีและคงประสิทธิภาพในการแบ่งชั้นวัสดุ โดยดูได้จากการปนเปื้อนของหินคลุก สิ่งทอโธยามีความเสียหายเพียงเล็กน้อยซึ่งไม่มีผลอะไรต่อระบบพื้นทางรถไฟ

Christopher [4] กล่าวถึงการนำสิ่งทอโธยามาใช้แบ่งชั้นวัสดุของหินคลุกในงานระบบรางว่าควรจะเป็นผ้าไม่ทอที่มีน้ำหนักระหว่าง 300 – 500 กรัมต่อตารางเมตร (gsm) เพื่อให้สามารถรับน้ำหนักของโครงสร้างระบบรางรถไฟได้ นอกจากนี้ ผ้าทอที่มีค่าความแข็งแรงและความเหนียวสูงก็เหมาะที่จะนำมาใช้งานในด้านนี้เช่นกัน

ผู้ประกอบการด้านระบบราง ProRail นำเอาผลิตภัณฑ์สิ่งทอโธยา ชื่อทางการค้าว่า TenCate Polyfelt® เป็นผ้าไม่ทอที่ทำจากพอลิโพรพิลีนที่มีการใส่สารเติมแต่งป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ตไปทำการซ่อมแซมพื้นทางรถไฟที่ประเทศเนเธอร์แลนด์ โดยทำหน้าที่หลักเป็นตัวแบ่งชั้นวัสดุในโครงสร้างพื้นทาง ซึ่งสามารถ

ทำงานได้ดี และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม [7] ผลิตภัณฑ์สิ่งทอโธยา TenCate Polyfelt® มีหลายเกรด ซึ่งเหมาะกับการใช้งานที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ลักษณะการนำไปใช้งานของผลิตภัณฑ์สิ่งทอโธยา TenCate Polyfelt® แต่ละเกรด [8]

จากข้อมูลข้างต้น จึงเกิดแนวคิดที่จะศึกษาการนำเอาสิ่งทอโธยามาใช้ในระบบรางรถไฟ โดยใช้กระบวนการผลิตผ้าไม่ทอผลิตผ้าให้มีน้ำหนักที่ต่างกัน แล้วนำไปทดสอบสมบัติของผ้าไม่ทอ รวมทั้งทดสอบการนำเอาผ้าไม่ทอนี้ไปใช้งานดิน

2. วิธีการทดลอง

ในการดำเนินโครงการวิจัยแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การเตรียมผ้าไม่ทอจากเส้นใยพอลิเอสเตอร์ชนิดสั้นเพื่อใช้เป็นสิ่งทอโธยา การทดสอบและเปรียบเทียบสมบัติของสิ่งทอโธยาจากกระบวนการผลิตในงานวิจัยกับผลิตภัณฑ์สิ่งทอโธยา และการทดสอบการนำสิ่งทอโธยาไปใช้งานดิน

2.1 การเตรียมผ้าไม่ทอ

เตรียมผ้าไม่ทอที่มีน้ำหนักแตกต่างกัน 3 ระดับ เริ่มต้นจากการเปิดเส้นใยพอลิเอสเตอร์ชนิดสั้น เพื่อให้เส้นใยเกิดการกระจายตัวได้ดี

แล้วนำเข้าเครื่องสางใย (Carding machine) เพื่อผลิตเป็นแผ่นเส้นใย โดยทำซ้ำ 2-3 ครั้ง เพื่อให้มีการเรียงตัวอย่างสม่ำเสมอ จากนั้นนำแผ่นเส้นใยไปผ่านกระบวนการยัดติดแผ่นเส้นใย ด้วยเครื่องปักเข็ม (Needlepunching machine) เพื่อช่วยเพิ่มการยึดเกาะให้กับโครงสร้างของแผ่นเส้นใย

2.2 การทดสอบสมบัติของผ้าไม่ทอ

ทดสอบสมบัติต่างๆ ของผ้าไม่ทอจากการเตรียมในงานวิจัย และผลิตภัณฑ์สิ่งทอโยธาของ TenCate Polyfelt®TS60 ดังนี้

- น้ำหนักของผ้าไม่ทอ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D3776-09a
- ความหนาของผ้าไม่ทอ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1777-96
- ความต้านทานแรงดึงของผ้าไม่ทอ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D5035-11
- ความต้านทานต่อแรงดันทะลุของผ้าไม่ทอ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D6797-15
- การซึมผ่านของอากาศ (Air permeability) ของผ้าไม่ทอ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D737-04
- การซึมผ่านของน้ำ (Water permeability) ของผ้าไม่ทอ ทดสอบตามมาตรฐาน ISO 8096-05

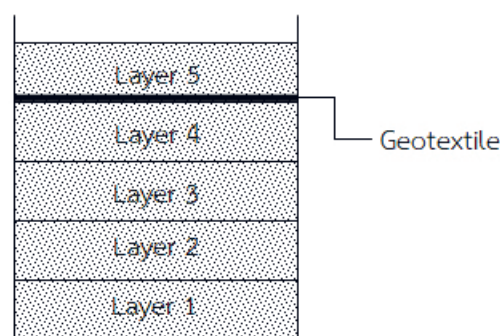
การทดสอบความแข็งแรงและการทดสอบการซึมผ่านของผ้าไม่ทอนั้นทดสอบที่บริษัท อินเตอร์เทค เทสติ้ง เซอร์วิสเอส (ประเทศไทย) จำกัด

2.3 การทดสอบผ้าไม่ทอในงานดิน

การทดสอบผ้าไม่ทอในงานดิน ทดสอบเพื่อหาค่า ซี บี อาร์ (California Bearing Ratio: CBR) ตามมาตรฐานวิธีทดสอบแบบไม่แช่น้ำ (Unsoaked) ตามมาตรฐานวิธีทดลอง ASTM D1883 ที่ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

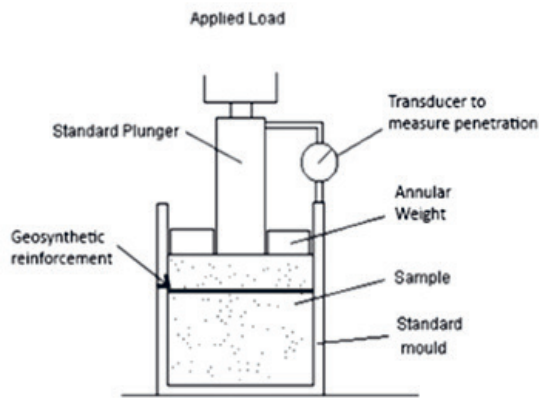
เริ่มต้นเตรียมดินตัวอย่าง โดยนำดินลูกรังไปผ่านการบดอัดเพื่อทำให้เม็ดดินเป็ดตัวชิดกัน จากนั้นร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 3/4 และนำไปหาความชื้นที่ความหนาแน่นสูงสุด (Optimum moisture content) โดยวิธี Modified Proctor method

จากนั้นเตรียมโมลสำหรับการใช้ในการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4 โดยนำดินลูกรังที่ผ่านการบดอัดในปริมาณที่กำหนดไว้ไปอัดให้แน่นในโมลที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว สูง 7 นิ้ว โดยเริ่มจากการอัดดินลูกรัง 4 ใน 5 ส่วนของความสูงของโมล แล้ววางตัวอย่างผ้าไม่ทอ และอัดดินลูกรังในโมลส่วนที่เหลือ



รูปที่ 4 ลักษณะการแบ่งชั้นโมลเพื่ออัดดินลูกรังและวางผ้าไม่ทอ

จากนั้นนำโมลที่มีการอัดดินและวางชั้นตัวอย่างไปทำการทดสอบแรงกดแสดงดังรูปที่ 5 โดยจัดวางโมลที่เตรียมไว้เข้าเครื่องทดสอบแรงกด ซึ่งมีแท่งเหล็ก (Piston) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพื้นที่หน้าตัด 3 ตารางนิ้วประกอบติดอยู่ จัดการ Load ในอัตรา 0.05 นิวตันต่อวินาที พร้อมกับอ่านค่าน้ำหนักที่ตรงกับการตอก (Penetration) ระยะต่างๆ แล้วนำไปหาอัตราส่วนเปรียบเทียบกับค่า Unit load มาตรฐานที่ได้จากการทดลองกดแท่งเหล็กขนาดเดียวกันนี้บนหินที่อัดแน่นที่มีความลึกของ Penetration เท่ากัน ค่าที่ได้นี้เรียกว่า “เปอร์เซ็นต์ CBR” เทียบอัตราส่วนเป็นเปอร์เซ็นต์ของ Standard Unit load



รูปที่ 5 ส่วนประกอบของเครื่องทดสอบ CBR [9]

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

3.1 ผลการเตรียมผ้าไม่ทอ

จากการเตรียมผ้าไม่ทอด้วยเส้นใยพอลิเอสเตอร์ได้ผ้าไม่ทอที่มีลักษณะพองฟูและมีความหนาตามลักษณะของผ้าไม่ทอที่มีการยัดดัดโดยใช้เครื่องเข็มปรุ ต่างกับผลิตภัณฑ์สิ่งทอใยตา TenCate Polyfelt®TS60 ซึ่งใช้วัตถุดิบต่างชนิด และใช้กระบวนการผลิตที่ต่างกัน น้ำหนักและความหนาของผ้าไม่ทอแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สัญลักษณ์ น้ำหนักและความหนาของผ้าไม่ทอ

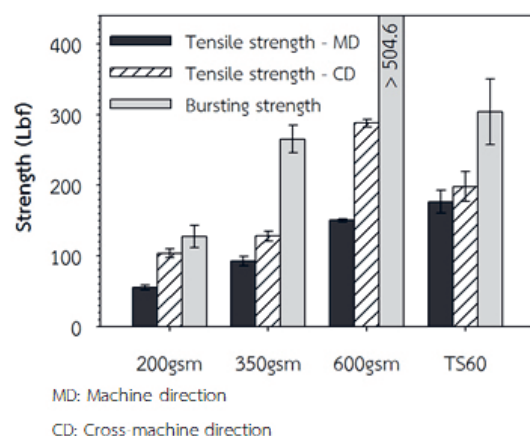
ผ้าไม่ทอ	น้ำหนัก (gsm)	ความหนา (mm)
200gsm	221.3 ± 2.2	2.44 ± 0.04
350gsm	363.8 ± 4.8	4.58 ± 0.02
600gsm	609.8 ± 5.8	6.76 ± 0.08
TS60	225.9 ± 50.8	1.88 ± 0.03

เมื่อเปรียบเทียบผ้าไม่ทอทั้งสามตัวอย่าง 600gsm มีค่าน้ำหนักมากที่สุด เท่ากับ 609.8 gsm และมีความหนา เท่ากับ 6.76 mm ส่วน 200gsm มีค่าน้ำหนักน้อยที่สุดเท่ากับ 221.3 gsm และบางที่สุดเท่ากับ 2.44 mm ตามลำดับ ซึ่งทั้งน้ำหนัก

และความหนาของ 200gsm นั้นมีค่าน้อยกว่า 600gsm เกือบ 3 เท่า นั่นคือ ความหนาของผ้าไม่ทอจากการเตรียมด้วยวิธีการยัดดัดทางกลแบบเข็มปรุจะเพิ่มขึ้นตามน้ำหนักของแผ่นเส้นใยจากกระบวนการเตรียมแผ่นเส้นใย

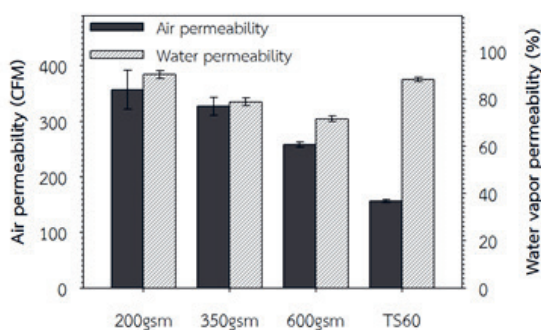
3.2 ผลการทดสอบสมบัติของผ้าไม่ทอ

ความแข็งแรงของผ้าไม่ทอทั้งความต้านทานต่อแรงดึง และความต้านทานต่อแรงดันทะลุแสดงดังรูปที่ 6 พบว่า 600gsm มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงทั้งสองทิศทางมากที่สุด รองลงมาคือ 350gsm และ 200gsm ตามลำดับ เนื่องจาก 600gsm มีความหนาแน่นของเส้นใยมากที่สุดโดยพิจารณาจากค่าน้ำหนักต่อหน่วยพื้นที่ของผ้าไม่ทอ ผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดันทะลุมีแนวโน้มเหมือนกับผลการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง อย่างไรก็ตาม ไม่สามารถทดสอบเพื่อหาค่าแรงดันทะลุของ 600gsm ได้ เนื่องจากเกินความสามารถของเครื่องทดสอบ นั่นคือ น้ำหนักของผ้าไม่ทอส่งผลอย่างมากต่อความแข็งแรงของผ้าไม่ทอ ผ้าไม่ทอที่มีน้ำหนักมากจะมีความแข็งแรงมากขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 6 ความแข็งแรงต่อแรงดึงและแรงดันทะลุของผ้าไม่ทอ

ผลการซึมผ่านของอากาศและการซึมผ่านของน้ำของผ้าไม่ทอแสดงดังรูปที่ 7 พบว่า 200gsm มีค่าการซึมผ่านของอากาศมากที่สุด นั่นคือ อากาศสามารถไหลผ่านผ้าไม่ทอตัวอย่างนี้ได้มากที่สุด เนื่องจาก 200gsm เป็นผ้าไม่ทอที่มีกระบวนการยัดติดเชิงกลแบบเข็มปรุที่เส้นใยจะมีการยัดติดทางกายภาพเท่านั้นในลักษณะที่มีการพันกัน เป็นผลมาจากการเจาะของเข็มทะลุลงบนแผ่นเส้นใยแล้วเกี่ยวเอาเส้นใยขึ้นมาพัน จึงทำให้ผ้าไม่ทอที่กระบวนการนี้มีโครงสร้างที่ฟูและมีรูพรุนมาก รองลงมาคือ 350gsm และ 600gsm ตามลำดับ TS60 ให้ค่าการซึมผ่านของอากาศต่ำที่สุด จะเห็นได้ว่า น้ำหนักของผ้าไม่ทอมีผลต่อความสามารถในการซึมผ่านของอากาศของผ้าไม่ทอ นั่นคือ เมื่อน้ำหนักของผ้าไม่ทอสูงขึ้นจะส่งผลให้ความสามารถในการซึมผ่านของอากาศของผ้าไม่ทอลดลง หมายความว่า จะทำให้ผ้าไม่ทอนั้นต้านทานการไหลของอากาศ อันเนื่องมาจากจำนวนของเส้นใยและความหนาแน่นของผ้าไม่ทอนั้นมีค่ามากขึ้น [10]



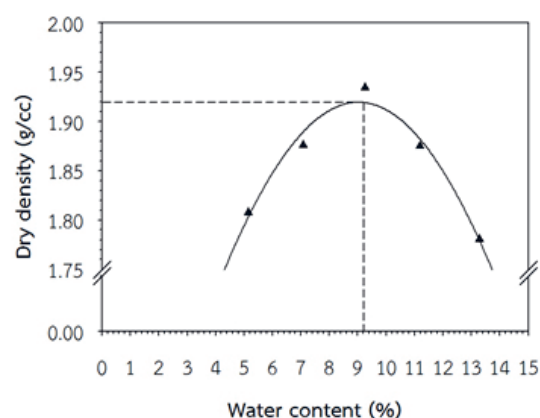
รูปที่ 7 การซึมผ่านของอากาศและน้ำของผ้าไม่ทอ

เมื่อพิจารณาความสามารถในการซึมผ่านของน้ำของผ้าไม่ทอพบว่า 200gsm มีความสามารถในการซึมผ่านของน้ำได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับผ้าไม่ทอชนิดเดียวกัน นั่นคือ 200gsm สามารถยอมให้น้ำไหลผ่านมากที่สุด

ซึ่งเป็นสมบัติที่ดีของการนำผ้าไม่ทอไปใช้ในงานโยธาโดยเฉพาะในงานดิน รองลงมาคือ 350gsm และ 600gsm ตามลำดับ ซึ่งให้แนวโน้มเดียวกับความสามารถในการซึมผ่านของอากาศของผ้าไม่ทอ อย่างไรก็ตาม TS60 มีความสามารถในการไหลผ่านของน้ำรองจาก 200gsm เนื่องมาจากความบางของผ้าไม่ทอ ทำให้น้ำใช้เวลาในการไหลผ่านสั้นกว่าผ้าไม่ทอที่มีความหนา

3.3 ผลการทดสอบผ้าไม่ทอในงานดิน

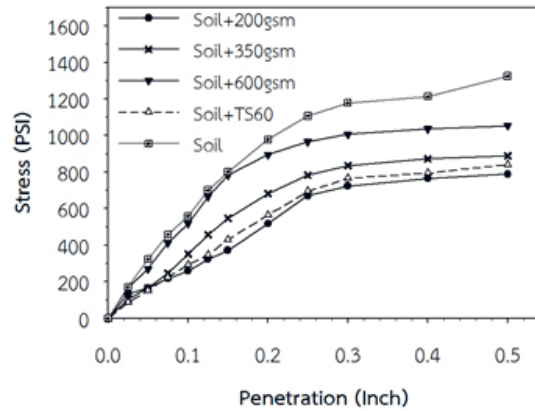
จากการนำดินลูกรังมาผ่านการบดอัดด้วยผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 3/4 โดยวิธี Modified Proctor method แล้วสร้างความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำในดิน (Water content) และความหนาแน่นของดินแห้ง (Dry density) พบว่าความหนาแน่นสูงสุดของดินแห้ง เท่ากับ 1.92 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cc) และความชื้นที่ความหนาแน่นสูงสุด (Optimum water content) เท่ากับ 9.1% แสดงดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับความหนาแน่นแห้งของดินลูกรังที่ผ่านการบดอัด

หลังจากนั้นนำผ้าไม่ทอไปใช้ในงานดินโดยทดสอบ CBR แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดที่ระยะต่างๆ ดังรูปที่ 9 พบว่า ตัวอย่างที่มีการนำผ้าไม่ทอทั้งสามตัวอย่างรวมทั้ง TS60 ทำให้แรงต้านทานต่อแรงกดลดต่ำลง ซึ่งโดยปกติแล้ว

การนำสิ่งทอโธธาไปวางในชั้นดินนั้น จะช่วยเพิ่มแรงต้านทานต่อแรงกด จากงานวิจัยของ Kumar และ Rajkumar แสดงให้เห็นการเพิ่มขึ้นของแรงต้านทานแรงกดในการทดสอบ CBR เมื่อนำสิ่งทอโธธาชนิดผ้าทอและสิ่งทอโธธาชนิดผ้าไม่ทอจากเส้นใยพอลิโพรพิลีนไปวางระหว่างชั้นดิน [11] นอกจากนี้ ยังพบการเพิ่มขึ้นของแรงต้านทานแรงกดในลักษณะเดียวกัน เมื่อนำผ้าไม่ทอชนิดเข็มปรุผลิตจากเส้นใยธรรมชาติ น้ำหนัก 1087 gsm และ 1215 gsm ไปวางระหว่างชั้นดินในการทดสอบ CBR [12] ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่า น้ำหนักของผ้าไม่ทอสามตัวอย่างที่ผลิตจากงานวิจัยนี้อาจจะน้อยเกินไปที่จะไปช่วยเสริมแรงในการใช้งานในดิน อย่างไรก็ตาม แนวโน้มของการลดลงของแรงกดที่ระยะต่างๆ เมื่อวางผ้าไม่ทอลงไปในพื้นที่ดินนั้นได้มีการรายงานในงานวิจัยของ Naeini และ Mirzakhaniari ซึ่งพบว่าการใช้ผ้าไม่ทอจากเส้นใยพอลิโพรพิลีนวางในตำแหน่งต่างๆ ของโมลที่อัดด้วยดินที่มีความหนาแน่นสูงสุดของดินแห้ง เท่ากับ 1.98 g/cc และความชื้นที่ความหนาแน่นสูงสุด เท่ากับ 6.5% ทำให้แรงต้านทานการกดอัดลดลง แต่เมื่อนำไปวางกับโมลที่อัดด้วยดินที่มีความหนาแน่นสูงสุดของดินแห้ง เท่ากับ 2.31 g/cc และความชื้นที่ความหนาแน่นสูงสุด เท่ากับ 7.2% สามารถเพิ่มแรงต้านทานการกดอัด [13] ดังนั้น นอกจากชนิดและน้ำหนักของสิ่งทอโธธา ชนิดของดินและการบดอัดก็ส่งผลต่อผลการทดสอบ CBR เช่นกัน



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดที่ระยะต่างๆ จากการทดสอบ CBR

เมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างที่มีการวางผ้าไม่ทอสามตัวอย่างพบว่า Soil+600gsm มีค่าต้านทานแรงกดมากที่สุด รองลงมาคือ Soil+350gsm และ Soil+200gsm ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า น้ำหนักของผ้าไม่ทอชนิดเข็มปรุที่นำไปวางในชั้นดินมีผลต่อการต้านทานแรงกดจากการทดสอบ CBR ผ้าไม่ทอชนิดเข็มปรุที่มีน้ำหนักมากจะสามารถเสริมแรงกับชั้นดินได้มากกว่าผ้าไม่ทอที่มีน้ำหนักเบา ซึ่งเป็นไปตามงานวิจัยที่ค้นพบการเพิ่มขึ้นของแรงต้านทานแรงกดเมื่อนำผ้าไม่ทอชนิดเข็มปรุผลิตจากเส้นใยธรรมชาติ น้ำหนัก 1,087 gsm และน้ำหนัก 1,215 gsm ไปวางระหว่างชั้นดิน [13] สำหรับ Soil+60TS มีค่าความต้านทานแรงกดต่ำกว่า Soil+600gsm และ Soil+350gsm แต่สูงกว่า Soil+200gsm เพียงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่า น้ำหนักของผ้าไม่ทอและชนิดของการยึดติดแผ่นเส้นใย ส่งผลต่อการเสริมแรงเมื่อนำไปใช้งานในชั้นดิน

เนื่องจาก TS60 เป็นผลิตภัณฑ์สิ่งทอโธธาที่ใช้ในงานจริง จึงนำค่า CBR ของตัวอย่างที่มีการวางผ้าไม่ทอมาวิเคราะห์เทียบกับค่า CBR ของตัวอย่างที่มีการวาง TS60 แสดงดังตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่า Soil+600gsm มีการเพิ่มขึ้นของค่า CBR ถึง 87% เมื่อเทียบกับ Soil+TS60 ดังนั้น

ผ้าไม่ทอชนิดเข็มปรุที่มีน้ำหนักมาก สามารถที่จะนำมาใช้งานแทน TS60 ในงานโยธาได้

ตารางที่ 2 ค่าร้อยละของ CBR ของแต่ละตัวอย่าง

ตัวอย่าง	ค่า CBR (%)	อัตราการเพิ่มขึ้นของค่า CBR เทียบกับ Soil+TS60 (%)
Soil+200gsm	25.9	-6
Soil+350gsm	33.5	21
Soil+600gsm	51.8	87
TS60	27.7	-
Soil	59.5	-

4. สรุป

ผ้าไม่ทอสามตัวอย่างเตรียมด้วยกระบวนการสางใยและกระบวนการยัดติดด้วยเข็มปรุ ได้ผ้าไม่ทอที่มีลักษณะพองฟูที่มีน้ำหนักต่างกันในช่วง 200 – 600 กรัมต่อตารางเมตร และมีความหนาในช่วง 2 – 7 มิลลิเมตร

น้ำหนักของผ้าไม่ทอชนิดเข็มปรุส่งผลต่อความแข็งแรงทั้งต่อแรงดึงและแรงดันทะลุ โดยผ้าไม่ทอชนิดเข็มปรุที่มีน้ำหนักมาก จะมีความแข็งแรงมากตามไปด้วย แต่ยอมให้อากาศและน้ำซึมผ่านลดลง นั่นคือ ผ้าไม่ทอที่มีน้ำหนักมากที่สุด คือ 609.8 กรัมต่อตารางเมตร มีความแข็งแรงสูงสุด แต่ยอมให้อากาศและน้ำซึมผ่านต่ำที่สุด

เมื่อนำผ้าไม่ทอวางในชั้นดินและทดสอบ CBR พบว่า การวางผ้าไม่ทอทั้งผ้าไม่ทอที่เตรียมขึ้นและผลิตภัณฑ์สิ่งทอโยธา TenCate Polyfelt®TS60 ในชั้นดิน ทำให้แรงต้านทานการกดอัดของดินลดลง อาจเป็นเพราะชนิดของดินและการกดอัดดินไม่แน่นพอ และอาจเกิดจากผ้าไม่ทอชนิดเข็มปรุมีน้ำหนักและความหนาแน่นที่น้อยเกินไป อย่างไรก็ตาม เมื่อเทียบลักษณะ

การใช้งานในดินระหว่างผ้าไม่ทอชนิดเข็มปรุกับผลิตภัณฑ์สิ่งทอโยธา พบว่า ผ้าไม่ทอชนิดเข็มปรุที่มีน้ำหนักมากที่สุด คือ 609.8 กรัมต่อตารางเมตร ทำให้แรงต้านทานการกดอัดในดินเพิ่มขึ้นถึง 87% ดังนั้น ผ้าไม่ทอชนิดเข็มปรุที่มีน้ำหนักมากในงานวิจัยนี้ สามารถนำไปใช้ในงานโยธาในลักษณะที่ผลิตภัณฑ์สิ่งทอโยธาดังกล่าวถูกใช้งานได้เช่นกัน

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนวิจัยประเภทงบประมาณรายจ่าย งบประมาณปี 2560 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ในการสนับสนุนทุนการวิจัยหลัก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความช่วยเหลือในการทดสอบผ้าไม่ทอในงานดิน และภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่สนับสนุนวัสดุอุปกรณ์และสถานที่ในการทำงานวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Hemmachandra K. Technical Textiles. Bangkok: Offset Creations Co.,Ltd. 2006. (in Thai)
- [2] Koerner RM. Designing with geosynthetics Vol. 1. 6th ed. Kentucky: Xlibris Corporation. 2014.
- [3] Koerner RM. Chapter 11 geotextile used in separation. In: Koerner RM, editor. Geotextile from Design to Applications. Cambridge: Woodhead Publishing. 2016. p. 241–256.

- [4] Christopher BR. Chapter 14 geotextiles used in reinforcing paved and unpaved roads and railroads. In: Koerner RM, editor. Geotextile from Design to Applications. Cambridge: Woodhead Publishing. 2016. p. 305–335.
- [5] Rail Design Support Manual. cited 2016 October 21. Available from www.geofabrics.com
- [6] Ashpiz ES, Diederich R, Koslowski C. The use of spunbonded geotextile in railway track renewal St. Petersburg-Moscow. Proceeding of 7th International Conference on Geosynthetics, Nice, France, 2002. p. 1173-1176.
- [7] TenCate Polyfelt® in Dutch Rail Renovation. cited 2016 January 5. Available from www.tencate.com/textures/winter-2011/TenCate-Polyfelt-in-Dutch-rail-renovation.aspx
- [8] Polyfelt® TS – Separation & Filtration Nonwovens. cited 2016 January 5. Available from <https://www.buildsite.com/pdf/tcmirafi/TenCate-Polyfelt-TS-Product-Data-1540984.pdf>
- [9] Adam C, Apraku E, Opuku-Boahen R. Effect of triaxial geogrid reinforcement on CBR strength of natural gravel soil for road pavements. Journal of Civil Engineering Research. 2015;5(1): 45-51.
- [10] Çinçik E, Koç E. An analysis on air permeability of polyester/viscose blended needle-punched nonwovens. Text. Res. J. 2011;82(5): 430-442.
- [11] Kumar PS, Rajkumar R. Effect of geotextile on CBR strength of unpaved road with soft subgrade. Electronic Journal of Geotechnical Engineering. 2012;17: 1355-1363.
- [12] Kumar PS, Devi SP. Effect of needle punched nonwoven coir and jute geotextile on CBR strength of soft subgrade. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2011;6(11): 114-116.
- [13] Naeini SA, Mirzakhani M. The effect of geotextile grading on the bearing ratio of granular soils. Electronic Journal of Geotechnical Engineering. 2008;13: 1-10.

รูปแบบบทความสำหรับ วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมนคลธัญบุรี

ปรกช สิริสุวัฒน์^{1*}, สุมนมัลย์ 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

บทความต้องประกอบด้วยส่วนต่างๆ 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 (ด้วยก) เรียงตามลำดับความสำคัญ โดยใส่เครื่องหมายดอกจัน (*) ผู้เขียนหลักถัดจากหมายเลขลำดับ (ด้วยก) หากผู้เขียนอยู่สถานที่เดียวกัน ให้ระบุลำดับเลขเดียวกัน

2.2.1 E-mail ผู้เขียนเรียงตามลำดับชื่อผู้เขียนและ ใส่เครื่องหมาย (*) ถัดจากหมายเลขลำดับ (ด้วยก) ของผู้เขียนหลัก

2.3. ที่อยู่ผู้เขียน (Affiliation) มีทั้ง

ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ไม่ต้องระบุตำแหน่งวิชาการ หรือสถานะของนักศึกษาใด ๆ ทั้งสิ้น

2.4. บทย่อดำเนินการ (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 หรือภาษาอังกฤษ ตามรูปแบบที่กำหนด ซึ่งพร้อมที่จะนำไปถ่ายเพลท เพื่อพิมพ์ออฟเซตได้ทันที

การพิมพ์ให้พิมพ์ลงบนกระดาษ A4 โดยพิมพ์เป็น 2 คอลัมน์ตามรูปแบบบทความนี้ ขนาดของคอลัมน์เป็นไปตามที่กำหนด จะต้องพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์เลเซอร์ที่มีความละเอียดไม่น้อยกว่า 300 dpi.

ให้พิมพ์โดยไม่เว้นบรรทัด เมื่อจะขึ้นหัวข้อใหม่ให้เว้นบรรทัด 1 บรรทัด และจะต้องพิมพ์ให้เต็มคอลัมน์ก่อนที่จะขึ้นคอลัมน์ใหม่ หรือขึ้นหน้าใหม่ ห้ามเว้นที่เหลือไว้ว่างเปล่า

การลำดับหัวข้อในส่วนเนื้อหาของเนื้อเรื่องนี้ ให้ใส่เลขกำกับโดยให้บทนำเป็นหัวข้อหมายเลข 1 และหากมีการแบ่งหัวข้อย่อย ก็ใช้เลขระบบทศนิยมกับหัวข้อย่อย เช่น 1.1 เป็นต้น

ให้ใส่เลขเรียงลำดับหน้าด้วยดินสอไว้ที่มุมขวาบนของกระดาษทุกหน้า

ตารางที่ 1 การตั้งค่าหน้ากระดาษ

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

ตารางที่ 2 ขนาดตัวอักษรและการเว้นระยะพิมพ์บทความภาษาไทยและภาษาอังกฤษด้วยตัวอักษรรูปแบบ “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

ให้จัดเนื้อเรื่องในแต่ละบรรทัดเรียงชิดซ้ายและขวาอย่างสวยงาม เว้นบรรทัดแรกของย่อหน้า ใช้ 1 แท็บ หรือ 0.5 นิ้ว

2.7.1 การจัดทำรูปภาพ

รูปภาพจะต้องมีความกว้างไม่เกิน 70 มม. เพื่อให้ลงในหนึ่งคอลัมน์ได้ หรือกรณีจำเป็นจริงๆ เพื่อรักษารายละเอียดในภาพ อาจยอมให้มีความกว้างได้เต็มหน้ากระดาษ (กว้าง 150 มม.)

ตัวอักษรทั้งหมดในภาพจะต้องมีขนาดใหญ่สามารถอ่านได้สะดวก และต้องไม่เล็กกว่าตัวอักษรในเนื้อเรื่อง

รูปภาพทุกรูปจะต้องมีหมายเลข และคำบรรยายใต้ภาพ หมายเลขและคำบรรยายรวมกันแล้วควรมีความยาวไม่เกิน 2 บรรทัด

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

ตัวอย่าง



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่าง....

รูปลายเส้นจะต้องเป็นเส้นหมึกดำ ส่วนรูปถ่ายควรจะเป็นรูปขาวดำที่มีความคมชัด รูปสีอนุญาตให้ใช้ได้ รูปภาพควรจะมีรายละเอียดเท่าที่จำเป็นเท่านั้น เช่น ภาพถ่ายรูปคลื่นจากออสซิลโลสโคปที่ปรากฏให้เป็นเฉพาะจอภาพ เป็นต้น และเพื่อความสวยงามให้เว้นบรรทัดเหนือรูปภาพ 1 บรรทัดและเว้นใต้คำบรรยาย 1 บรรทัด

2.7.2 การเขียนสมการ

สมการทุกสมการจะต้องมีหมายเลขกำกับอยู่ภายในวงเล็บและเรียงลำดับที่ถูกต้อง *ควรใช้ตัวพยัญชนะเอียง* แสดงถึงพารามิเตอร์หรือตัวแปรในสมการ 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 กรณียบทความภาษาอังกฤษ

ผู้พิมพ์บทความเป็นภาษาอังกฤษ กรุณา
ดูคำแนะนำ วิธีการพิมพ์บทความภาษาอังกฤษ

2.7.6 การส่งบทความ

ผู้เขียนสามารถส่งต้นฉบับ ทางเว็บไซต์ออนไลน์ ของวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคล ธิญบุรี www.engineer.rmutt.ac.th/journal/



โดยต้องทำการลงทะเบียนเพื่อสมัครสมาชิกวารสารและนำส่งวารสารต้นฉบับในรูปแบบไฟล์

● Word ● PDF

กรุณาจัดส่ง แบบฟอร์มยืนยันการส่งบทความทางวิชาการ เพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลธิญบุรี มายังอีเมล enjournal@en.rmutt.ac.th หรือจัดส่งไปรษณีย์ มายังกองบรรณาธิการ วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลธิญบุรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ธิญบุรี 39 หมู่ 1 ถ.รังสิต-นครนายก ต.คลองหลวง อ.ธิญบุรี จ.ปทุมธานี 12110” จึงจะถือว่า การส่งวารสารนั้นเสร็จสมบูรณ์

หากขั้นตอนการนำส่งวารสารทั้ง 2 ขั้นตอน คือ การส่งวารสารทางเว็บไซต์ออนไลน์ และการนำส่งแบบฟอร์มยืนยันการส่งบทความมายังอีเมล enjournal@en.rmutt.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) ทั้งนี้ ผู้เขียนบทความควรใช้แหล่งอ้างอิงที่ได้รับการยอมรับกันตามเกณฑ์สากล

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)

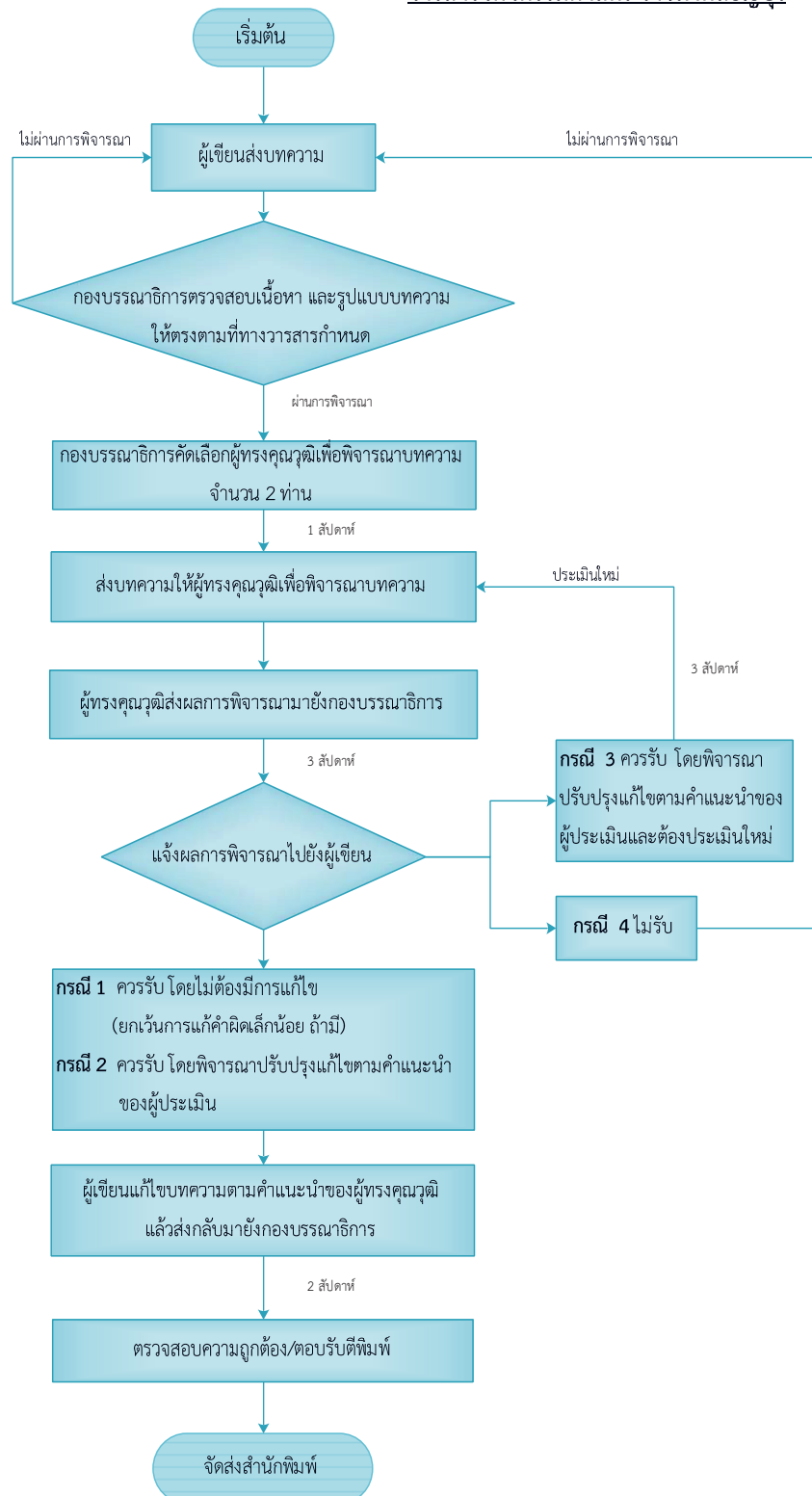
- [10] Siriprasert R. Model development for health screening system in prachinburi province. Journal of Health Science [Internet]. 2010 [cited 2011 Feb 25];19 (3):409-21. Available from: http://pubnet.moph.go.th/pubnet2/e_doc.php?id=2593(in Thai)

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

สามารถดาวน์โหลดรูปแบบบทความ Template ในรูปแบบ Word และคู่มือการอ้างอิงระบบ (Vancouver Style) ได้ที่

<https://drive.google.com/drive/folders/1jPxtFBwmeIUTtRwHH3HEFIFuVZXsIOPV>

**ขั้นตอนการตีพิมพ์ลง
วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชวมงคลธัญบุรี**



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

หมายเหตุ: รวมระยะเวลาโดยประมาณ 90 วัน หากไม่มีการแก้ไขใดๆเพิ่มเติม



สมาชิกเลขที่

ใบสมัครสมาชิกวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏบรภูมิ

วันที่สมัคร

ข้าพเจ้า นาย/นาง/นางสาว สกุล อาชีพ

ที่อยู่ (สำหรับจัดส่งวารสาร) เลขที่ ถนน แขวง/ตำบล

เขต/อำเภอ จังหวัด รหัสไปรษณีย์

โทรศัพท์..... โทรสาร e-mail

มีความประสงค์สมัครเป็นสมาชิก

อัตราค่าสมาชิก

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

พร้อมกันนี้ได้ส่งค่าสมาชิก จำนวน บาท

จำนวนเงินตัวอักษร

ชำระเงินโดยวิธี

ธนาคาร สังกัด

ตัวแลกเงินไปรษณีย์ สังกัด

โอนเงินเข้าบัญชีธนาคาร..... ชื่อบัญชี เลขที่บัญชี

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

ลงชื่อ ผู้สมัคร
(.....)

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏบรภูมิ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชภัฏบรภูมิ

39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

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

แบบฟอร์มการส่งบทความทางวิชาการ
เพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมนคลธัญบุรี

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

ชื่อ-สกุล

(ภาษาอังกฤษ)

ตำแหน่งทางวิชาการ (โปรดระบุ) ☐ ศาสตราจารย์ ☐ รองศาสตราจารย์ ☐ ผู้ช่วยศาสตราจารย์

☐ อาจารย์ ☐ อื่นๆ (โปรดระบุ)

ที่อยู่ (ที่ติดต่อได้)

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

โทรสาร.....อีเมล์.....

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 ส่งเสริมการผลิตเชิงพาณิชย์ 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