



วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏธนบุรี

คณะกรรมการจัดทำวารสาร วิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏธนบุรี

คณะกรรมการที่ปรึกษา

อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและวิจัย
คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

กองบรรณาธิการ

ศ.(พิเศษ) อัจฉราพร ไชยะสุต	166 ซ.อาคารสงเคราะห์ ถ.พิชัย เขตดุสิต กรุงเทพฯ 10300	
ศ.ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ	ศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.สุธี อักษรกิตติ์	คณะกรรมการbin	มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย
รศ.ดร.เข้มชัย เหมะจันท	คณะวิทยาศาสตร์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.ศิริวรรณ ศรีสรณ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)
รศ.ดร.กัณวรีช พลุประชาญ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)
รศ.ดร.ธำรงรัตน์ มุ่งเจริญ	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
รศ.ณรงค์ บวบทอง	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
ผศ.ดร.สมเจตน์ พิชรพันธ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
ผศ.ดร.ปฐมทัศน์ จิระเดชะ	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)
ผศ.ดร.อังคณา พันธุ์หล่อ	วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยรังสิต
ดร.ชัชวาลย์ สุรัสวดี	52/14 ถ.พหลโยธิน 45 แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900	
ผศ.ดร.ศิวกร อ่างทอง	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ.ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.จักรี ศรีนนท์ฉัตร	คณะวิศวกรรมศาสตร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

ผศ.ชวลิต แสงสวัสดิ์

เลขานุการ

นางสาวปรกช สิริสุวัฒน์

ผู้ช่วยเลขานุการ

นายวีรศักดิ์ หมูเจริญ
นางสาวอมรรัตน์ ยิ้มอยู่



วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลธัญบุรี

บทบรรณาธิการ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลธัญบุรี ฉบับนี้ ยังคงนำเสนอผลงานทางวิชาการของอาจารย์และนักวิจัยด้านวิศวกรรมและเทคโนโลยีที่น่าสนใจหลายเรื่อง แต่มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบวารสารจากขนาด B-5 ไปเป็นขนาด A-4 ส่วนขนาดและลักษณะของตัวอักษรเป็นแบบเดิม ทั้งนี้เพื่อประโยชน์การตีพิมพ์ได้เนื้อหาเพิ่มขึ้นและต้นทุนการพิมพ์รูปเล่มลดลง บทความที่น่าสนใจเหล่านี้ ได้แก่ การศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุแอลฟัลต์ผสมยางในรถจักรยานยนต์ที่ใช้แล้ว การใช้ประโยชน์เศษเมลามีนเป็นมวลละเอียดในคอนกรีตมวลเบา

กองบรรณาธิการ ขอขอบพระคุณกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความวิจัยทุกท่านที่ได้เสียสละเวลาอันมีค่าอ่านทบทวนบทความเพื่อความถูกต้องทางวิชาการ และทั้งนี้หากผู้สนใจมีความประสงค์จะตีพิมพ์บทความ ขอความกรุณาจัดเตรียมต้นฉบับให้เป็นไปตามรูปแบบของทางวารสาร จัดส่งมายังกองบรรณาธิการหรือถ้ายังมีข้อสงสัยประการใดให้ติดต่อมายังเบอร์โทรศัพท์ 0 2549 3493 ท่านจะได้รับคำตอบจนพอใจ

กองบรรณาธิการ

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิผู้พิจารณาบทความ

รศ.ดร.วันชัย ธิวัณชัย	คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.เข้มชัย เหมะจันทร์	คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.อุษา แสงวัฒนาโรจน์	คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.สิริวรรณ กิตติเนาวรัตน์	คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.ชิดชนก มีใจเชื้อ	คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ผศ.ดร.ทวีชัย สำราญวานิช	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
ผศ.ดร.อาทิตย์ ไสตรโยม	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม
รศ.ดร.จงจิตร ผลประเสริฐ	คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
ผศ.ดร.อังคณา พันธุ์หล่อ	วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต
รศ.วิชัย ฉัตรพินวัฒน์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผศ.ดร.ธีระพงษ์ ว่องรัตนไพศาล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผศ.ศิวัช อัจฉริยวิริยะ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผศ.ดร.พนมกร ขาวทอง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร.อิสริย์ หารษาจรรยาโรจน์	อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.บรรยงค์ รุ่งเรืองด้วยบุญ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
รศ.ดร.เจียรนัย เล็กอุทัย	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
รศ.ดร.กัณวรัช พูลุปราชญ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)
รศ.ดร.ศิริวรรณ ศรีสรณ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)
รศ.ดร.เวทิน ปิยรัตน์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)
ผศ.ดร.นำคุณ ศรีสนธิ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)
ผศ.ดร.ปฐมทัศน์ จิระเดชะ	สถาบันยุทธศาสตร์ทางปัญญาและวิจัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ดร.สาธิต พุทธชัยยงค์	อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผศ.ดร.ปทุมทิพย์ ปราบพาล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ดร.ประเทืองทิพย์ ปานบำรุง	คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ศ.ดร.ก้องกิติ พุสสวัสดิ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
รศ.ดร.เพ็ญจิตร์ ศรีนพคุณ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
รศ.วัชรินทร์ วิทยกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
รศ.ดร.ดำรงรัตน์ มุ่งเจริญ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
ผศ.ดร.สมเจตน์ พชรพันธ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
รศ.สิริ ชัยเสรี	คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
รศ.ดร.วราวุธ วุฒินิชย์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน
รศ.ดร.ธัญญา นิยมภา	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน
รศ.ดร.วิบูลย์ ชื่นแขก	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.สมิตร ส่งพิริยะกิจ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.สมเกียรติ จงประสิทธิ์พร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.กานต์ พนาศุภมัสสุ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ผศ.ดร.สมประสงค์ ภาษาประเทศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ผศ.ดร.อภิชาติ สนธิสมบัติ
ผศ.ดร.สุนัน ปานสาคร
ผศ.ดร.จักรี ศรีนนท์ฉัตร
ผศ.ดร.สุรินทร์ แห่งงาม
ผศ.ดร.จิรวัดน์ คชสาร
ผศ.ดร.อภิรักษ์ วัลภา
ผศ.ดร.ไพฑูรย์ รักเหลือ
ผศ.ดร.ศุภวิทย์ ลวณะสกล
ผศ.ดร.พุทธรพล ทองอินทร์ดำ
ผศ.ดร.บุญฤทธิ์ ประสาทแก้ว
ผศ.สุรัตน์ ตรีวนพงค์
ผศ.ดร.จินดารัตน์ มณีเจริญ
ผศ.ดร.วีระศักดิ์ ละอองจันทร์
ผศ.ดร.มนูศักดิ์ จานทอง
ผศ.ดร.ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์
ผศ.ดร.ระพี กาญจนะ
ผศ.ดร.ศุภสัทธิ พงศ์ศิระสถิตย์
ดร.มานูช รุจิการ
ดร.ฐนียา รัชชีสุริยะชัย
ดร.จตุพล ตั้งปกาศิต
ดร.ฉัตรชัย ศุภพิทักษ์สกุล
ดร.กุลยา สาริชีวิน
ดร.บุญชัย ผึ้งไผ่งาม
อาจารย์วีระพงษ์ ครูส่ง
ผศ.ดร.เจริญ เจริญชัย
ดร.นิธิวัฒน์ ชูสกุล
ดร.สนธยา ทองอรุณศรี
ดร.นเรศ อินตะวงศ์

ผศ.ดร.เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย
รศ.ดร.ยุทธชัย บรรเทึงจิตร
ดร.ประธาน วงศ์ศรีเวช
รศ.จิราภรณ์ เบญจประภาลัยรัตน์

ดร.ชาญยุทธ กฤตสุนันท์กุล
รศ.นภาพินท์ อนันตรศิริชัย
รศ.ณรงค์ บวบทอง
รศ.ดร.ณรงค์ อยู่ถนอม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
วิทยาเขตภาคพายัพ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีแห่งสุวรรณภูมิ
ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์แห่งชาติ (สวทช.)
คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์
ในพระบรมราชูปถัมภ์
คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร
นักวิชาการอิสระ
นักวิชาการอิสระ
นักวิชาการอิสระ

การศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุแอสฟัลต์ผสมยางในรถจักรยานยนต์ที่ใช้แล้ว

Study of the mechanical properties of asphalt and old motorcycle inner tube mixture

อังคณา พันธุ์หล่อ¹ และสมศักดิ์ เอื้ออัสมาสัย²
ank_pun@yahoo.com¹, somsak@yahoo.com²

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุแอสฟัลต์ผสมยางในรถจักรยานยนต์ที่ใช้แล้ว โดยใช้อัตราส่วนผสมของยางในต่อน้ำหนักรวมของส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 0 ถึง 5 แล้วนำไปทดสอบ 1) ค่าการจมตัวของเข็มมาตรฐาน 2) ค่าจุดอ่อนตัว และ 3) ค่าความยืดดึง จากผลการทดสอบ พบว่าเมื่อเพิ่มส่วนผสมของยางในรถจักรยานยนต์มากขึ้น จะทำให้ค่าการจมตัวของเข็มลดลง อุณหภูมิของจุดอ่อนตัวของวัสดุผสมสูงขึ้น และค่าความยืดดึงลดลง ในส่วนของการนำไปใช้งานพบว่าค่าอัตราส่วนผสมของยางในรถจักรยานยนต์ที่ควรใช้คือ ร้อยละ 1.5 ซึ่งมีค่าการยืดดึงเป็นไปตามมาตรฐานที่ยอมให้

คำสำคัญ: วัสดุแอสฟัลต์ ยางในรถจักรยานยนต์

Abstract

This research studied the mechanical properties of asphalt and old motorcycle inner tube mixture, whereas the percentage of the inner tube 0-5 % in compare with the total weight of the mixture has been assigned. The mixture has been tested for 1) penetration 2) softening point and 3) ductility. The laboratory results show that by increasing the percentage of the inner tube, the penetration is increased. The softening point is decreased and the ductility is reduced as well. For working, it is recommended that the old inner tube 1.5% should be used, because it can provide the standard requirement for the ductility test.

Keywords: asphalt, old motorcycle inner tube

¹⁻² อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต

1. บทนำ

จากการพัฒนาทางเศรษฐกิจและสังคม ทำให้ความต้องการในการใช้รถจักรยานยนต์ในประเทศไทยมีจำนวนมากถึง 1,199,152 คันต่อปี และมีความต้องการใช้ยางในล้อจักรยานยนต์ประมาณ 4,088,757 เส้นต่อปี และยางในที่ใช้แล้วนั้นก็มีจำนวนสูงถึง 3,404,478 เส้นต่อปี ซึ่งทำให้เกิดปัญหาขยะจากยางในรถจักรยานยนต์เก่าเพิ่มขึ้น โดยขยะพวกนี้จะใช้ระยะเวลาในการย่อยสลายนานหลายปี ทำให้ยากต่อการกำจัด [1]

แนวคิดในการปรับปรุงคุณสมบัติวัสดุแอสฟัลต์ ที่ใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานซึ่งมีความยืดหยุ่น ให้มีความต้านทานต่อการเสียรูปอย่างถาวร (Permanent Deformation) และทนทานต่อความเสียหายของการแตกร้าวเนื่องจากความล้า (Fatigue Cracking) และการแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ (Low Temperature Cracking) โดยการผสมยางในรถจักรยานยนต์ที่ใช้แล้วเข้ากับแอสฟัลต์ เพราะยางในรถจักรยานยนต์นั้นมีส่วนผสมของยางพารา ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุผสมได้ [2] นอกจากนี้แล้วในการที่จะหลอมยางในรถจักรยานยนต์นั้นต้องใช้อุณหภูมิที่สูง จึงสามารถช่วยป้องกันการเสียรูปอย่างถาวร ได้ ทั้งนี้งานวิจัยนี้กำหนดให้มีการผสมแอสฟัลต์กับยางในรถจักรยานยนต์ที่ใช้แล้ว โดยใช้อัตราส่วนผสมของยางในต่อน้ำหนักรวมของส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 0 ถึง 5 โดยพิจารณาจากผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีดังนี้

ธนาพร (2544) ได้ศึกษาคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยผงยางล้อรถที่ใช้แล้วแล้ว [3] โดยวิธีการผสมแบบเปียกและแบบแห้ง ผลการวิจัยพบว่า วิธีการผสมแบบเปียกจะเป็นการใส่ผงยางล้อรถที่ใช้แล้วผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ก่อน แล้วจึงผสมกับมวลรวมร้อน ซึ่งจะได้คุณสมบัติที่เหมาะสมที่สุดเมื่อใช้ปริมาณผงยางล้อรถที่ใช้แล้วผสมในอัตราส่วนร้อยละ 15 ถึง 20 ของน้ำหนักแอสฟัลต์ซีเมนต์ และวิธีการผสมแบบแห้งจะเป็นการใส่ผงยางล้อรถที่ใช้แล้วผสมกับมวลรวมร้อนก่อน แล้วจึงผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ ซึ่งได้คุณสมบัติที่เหมาะสมที่สุดเมื่อใช้ปริมาณผงยางล้อรถที่ใช้แล้วผสมในอัตราส่วนร้อยละ 1 ถึง 3 ของน้ำหนักมวลรวม จากการ

เปรียบเทียบคุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพกับแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดา พบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยยางล้อที่ใช้แล้วจะมีคุณสมบัติดีกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดา

ฉัตรวรรณ สุทธิรักษ์ และยรรยง เพ็ญจันทร์ (2552) ได้ศึกษายางรถยนต์เก่ามาผสมกับยางมะตอยเพื่อทำแอสฟัลต์ซีเมนต์ [4] ผลการวิจัยพบว่า ยางมะตอยที่มีการเติมผงยางรถยนต์ในอัตราส่วนที่ต่างกัน 0.95:0.05, 0.90:0.10, 0.85:0.15, 0.80:0.20 โดยน้ำหนัก และที่ขนาดต่างกันคือ ผงยางรถยนต์ขนาด 40 เมช (425 ไมโครเมตร) และขนาด 8 เมช (2.48 มิลลิเมตร) จากผลการทดสอบพบว่าค่าการจมตัวของเข็มมาตรฐาน (Penetration) จะมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากคุณสมบัติของยางรถยนต์ เมื่อนำมาผสมกับแอสฟัลต์ จะทำให้ยางมีความอ่อนตัวมากขึ้น และเมื่อพิจารณาจากปริมาณของผงยางรถยนต์ที่เพิ่มเข้าไปในแอสฟัลต์ทั้ง 4 อัตราส่วน คือ 0.95:0.05, 0.90:0.10, 0.85:0.15, 0.80:0.20 โดยน้ำหนัก ค่าการจมตัวของเข็มมาตรฐานที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับแอสฟัลต์ที่ไม่ได้เติมผงยางรถยนต์ คือ การเติมผงยางรถยนต์ที่อัตราส่วนที่ 0.85:0.15 โดยน้ำหนักของผงยางรถยนต์ขนาด 40 เมช (425 ไมโครเมตร) ค่าความเหนียวจะมีค่าที่ต่ำลง เนื่องจากมีการเติมผงยางรถยนต์ที่มากเกินไป ทำให้แอสฟัลต์มีการยึดเกาะกับผงยางรถยนต์ลดลง ดังนั้นเมื่อเติมผงยางรถยนต์ที่อัตราส่วนที่ 0.85:0.15 โดยน้ำหนัก ของผงยางขนาด 40 เมช (ไมโครเมตร) จะมีค่าความเหนียวที่ 24.2 เซนติเมตร ผลการทดสอบคุณสมบัติของยางทั้ง 2 ค่า ทำให้สรุปได้ว่า การเติมผงยางที่อัตราส่วนที่ 0.85:0.15 โดยน้ำหนัก มีค่าใกล้เคียงกับค่าแอสฟัลต์ที่ไม่ได้เติมผงยางรถยนต์ ดังนั้นจึงนำเอาค่าอัตราส่วนที่ 0.85:0.15 โดยน้ำหนักไปทดสอบ การออกแบบการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์ ซึ่งสรุปได้ว่า จากการออกแบบการทดลองแอสฟัลต์คอนกรีตโดยวิธีมาร์แชลล์ โดยมีการออกแบบส่วนผสมของหินฝุ่น หิน 3/8" หิน 1/2" หิน 3/4" คือในอัตราส่วนที่ 50:20:20:10 ทำให้ได้ค่าต่าง ๆ ที่มีปริมาณเหมาะสมที่สุดคือ ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักมวลรวม ซึ่งการเติมเป็นร้อยละของยางดังกล่าว จะทำให้มีค่าเสถียรภาพ

มากที่สุด และมีค่าใกล้เคียงกับแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่มีการเติมผงยางรถยนต์

ณพรัตน์ วิจิตชลชัย และคณะ (2552) ได้ศึกษาการใช้ยางแห้งผสมยางมะตอยใช้ในงานทาง [5] จากการทดลองผสมยางแห้งที่ผ่านกระบวนการผลิตอย่างง่าย ได้แก่ ยางเต้าหู้และเศษยางแผ่นรมควันผสมกับแอสฟัลต์ โดยใช้วิธีบดผสมกับแอสฟัลต์ในอัตราส่วน 1:1 เป็น Master batch ก่อนนำไปผสมกับแอสฟัลต์ สรุปได้ว่าสามารถนำยางแห้งที่ไม่ผ่านกระบวนการผลิต (ยางเต้าหู้) หรือยางที่เหลือจากกระบวนการผลิต (เศษยางแผ่นรมควัน) มาใช้ปรับปรุงสมบัติแอสฟัลต์แทนน้ำยางชั้นที่ต้องผ่านกระบวนการผลิตและที่ราคาแพงกว่าได้ แต่จะต้องนำยางแห้งมาบดผสมใน Master batch ก่อนผสมกับแอสฟัลต์ในอัตราร้อยละ 5 โดยผลการทดสอบแสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบของคุณสมบัติเชิงกลของเนื้อยางแห้งในยางมะตอย [5]

คุณสมบัติ	อัตราส่วนเนื้อยางแห้งในยางมะตอย		
	0 %	2 %	5 %
Penetration (0.1 mm)	65	56	52
Softening point (°C)	48	50	61
Ductility (cm)	150	37	33

ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะช่วยลดปัญหาปริมาณขยะยางในรถจักรยานยนต์ใช้แล้วที่มีอยู่ในปัจจุบันให้น้อยลง โดยการนำยางในรถจักรยานยนต์ที่ใช้แล้วมาผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ (ยางมะตอย) โดยผลดีอีกอย่างที่เราคาดว่าจะได้รับ คือ สามารถปรับปรุงคุณภาพของถนนแบบยืดหยุ่นให้ดีขึ้นได้ [6]

2. วิธีดำเนินการวิจัย

ประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

2.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย ใช้วัสดุหลัก 2 ชนิดคือ

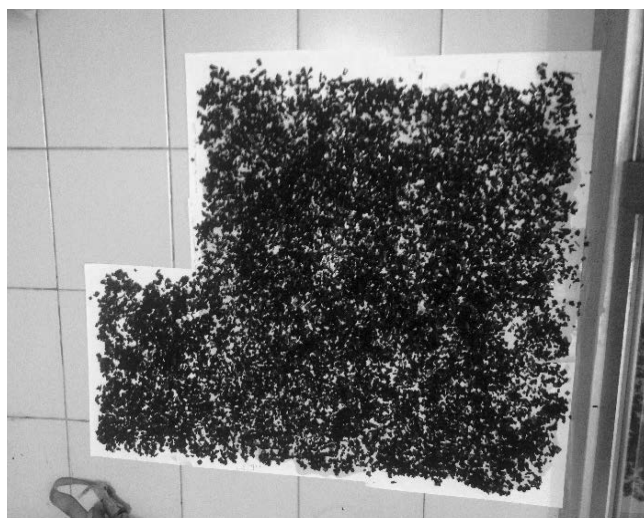
- แอสฟัลต์ซีเมนต์ (AC 60/70)
- ผงยางในรถจักรยานยนต์ ขนาดเล็กประมาณ 80 เมช

2.2 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง

- 1) นำยางในรถจักรยานยนต์ที่ใช้แล้ว มาตัดจุกยางออก แล้วนำไปตากแห้ง (รูปที่ 1)
- 2) ตัดยางเป็นชิ้นเล็ก ๆ แล้วนำไปล้างน้ำ และนำมาผึ่งให้แห้ง (รูปที่ 2)

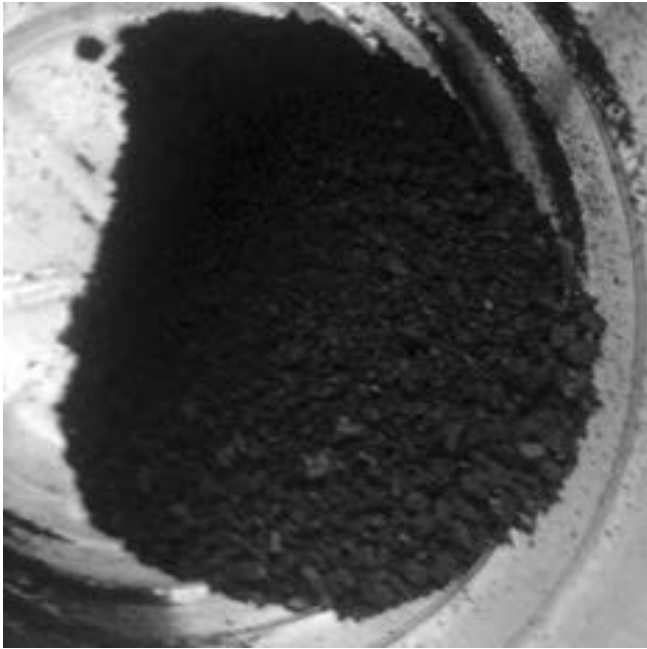


รูปที่ 1 ยางในรถจักรยานยนต์ถูกนำไปตากแห้ง



รูปที่ 2 ยางในรถจักรยานยนต์ซึ่งถูกตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ ถูกนำไปล้าง และนำมาผึ่งให้แห้ง

3) เมื่อยางแห้ง นำยางไปแช่ในไนโตรเจนเหลว เพื่อให้ยางอยู่ในสถานะเป็นของแข็งชั่วคราว แล้วนำมา บั่นทันที จนกลายเป็นผงยางขนาดเล็ก (รูปที่ 3)



รูปที่ 3 ผงยางขนาดเล็ก

4) จากนั้นนำผงยางไปร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 80 เพื่อให้ได้วัสดุผสมซึ่งมีขนาดเล็กประมาณ 80 เมช

2.3 ขั้นตอนการทดสอบ

- 1) ผสมแอสฟัลต์ซีเมนต์กับยางในรถจักรยานยนต์
 - ชั่งแอสฟัลต์ซีเมนต์ (AC 60/70) และผงยาง โดยใช้อัตราส่วนผสมของยางในต่อน้ำหนักรวมของส่วนผสมเท่ากับร้อยละ 0 ถึง 5
 - ต้มแอสฟัลต์ให้ร้อน (อุณหภูมิประมาณ 90 ถึง 120 องศาเซลเซียส) แล้วจึงเติมผงยางเข้าไป โดยขณะเติมจะต้องวัดอุณหภูมิทุกครั้ง เพื่อไม่ให้เกิน 120 องศาเซลเซียส เพราะจะทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตเสียคุณภาพ และจะต้องคนส่วนผสมตลอดเวลาเพื่อกระจายความร้อน และทำให้ยางผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกับแอสฟัลต์ได้ง่ายขึ้น (รูปที่ 4)



รูปที่ 4 การผสมแอสฟัลต์กับผงยางในรถจักรยานยนต์

2) นำส่วนผสมที่ได้ไปทำการทดสอบหาคคุณสมบัติเชิงกล ดังนี้

- การทดสอบการจมตัวของเข็มมาตรฐานของวัสดุบิทูมินัส (Penetration Test of Bituminous Materials) เพื่อทดสอบความแข็งของวัสดุชนิดกึ่งแข็งตาม มอก.1201-2536

- การทดสอบจุดอ่อนตัวของวัสดุบิทูมินัส (Test for Softening Point of Bitumen: Ring and ball Apparatus) เพื่อทดสอบหาจุดอ่อนตัวของวัสดุบิทูมินัสในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 157 องศาเซลเซียส ตาม มอก. 1216-2537

- การทดสอบความยืดดึงของวัสดุบิทูมินัส (Test for Ductility of Bituminous Materials) เพื่อทดสอบค่าการยืดตัวของวัสดุจำพวกบิทูมินัส ตาม มอก. 1202-2536

3. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

ผลทดสอบวัสดุผสมจำนวน 9 ตัวอย่างต่อหนึ่งอัตราส่วนผสม แล้วนำมาคิดค่าเฉลี่ย เป็นดังนี้

3.1 ผลการทดสอบการจมตัวของเข็มมาตรฐาน

จากตารางที่ 2 พบว่า เมื่อเพิ่มส่วนผสมของยางในรถจักรยานยนต์ ค่าการจมตัวของเข็มมาตรฐานจะลดลง ทั้งนี้ตามมาตรฐาน มอก.851-2542 แอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 60-70 จะต้องมีค่าการจมตัวของเข็มมาตรฐานอยู่ระหว่าง

60-70 ดังนั้นจะมีเพียงอัตราส่วนผสมเดียว คือ 95 : 5 ซึ่งไม่สามารถนำไปใช้ได้ เพราะให้ค่าที่ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบหาค่าการจมตัวของเข็มมาตรฐาน

อัตราส่วนของส่วนผสม ต่อยางในรถจักรยานยนต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ค่าการจมของเข็มมาตรฐาน [0.1 mm]
100 : 0	63.11
99 : 1	63.11
98 : 2	62.67
97 : 3	61.22
96 : 4	60.44
95 : 5	58.89

3.2 ผลการทดสอบหาค่าจุดอ่อนตัว

จากตารางที่ 3 พบว่า ในทุกอัตราส่วนผสม เมื่ออัตราส่วนผสมของยางในรถจักรยานยนต์มากขึ้น ค่าจุดอ่อนตัวจะสูงขึ้นเรื่อย ๆ ทั้งนี้ตามมาตรฐาน มอก.851-2542 แอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 60-70 จะต้องมียค่าจุดอ่อนตัวอยู่ระหว่าง 45 ถึง 55 องศาเซลเซียส ดังนั้นวัสดุผสมทุกอัตราส่วนผสมที่ทดสอบนั้นมีค่าจุดอ่อนตัวเป็นไปตามมาตรฐาน

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบหาค่าจุดอ่อนตัว

อัตราส่วนของส่วนผสม ต่อยางในรถจักรยานยนต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ค่าจุดอ่อนตัว [°C]
100 : 0	45.13
99 : 1	45.90
98 : 2	46.80
97 : 3	46.80
96 : 4	49.70
95 : 5	49.50

3.3 การทดสอบความยืดดึงของวัสดุผสม

จากตารางที่ 4 พบว่า เมื่อผสมยางในรถจักรยานยนต์ลงไปในส่วนผสมในปริมาณที่มากขึ้น ค่าการยืดดึงจะลดลง และเนื่องจากค่ายืดดึงตามมาตรฐาน มอก.851-2542 จะต้องไม่น้อยกว่า 50 เซนติเมตร ดังนั้นจึงทำการประมาณค่าอัตราส่วนของยางในที่เหมาะสม โดยพิจารณาช่วงที่ค่าการยืดดึงอยู่ระหว่าง 48.00 กับ 52.33 เซนติเมตร พบว่า ค่าอัตราส่วนผสมยางในรถจักรยานยนต์เท่ากับร้อยละ 1.5 ต่อน้ำหนักของส่วนผสมทั้งหมด จะทำให้วัสดุผสมมีค่าระยะยืดดึง 50 เซนติเมตรตามข้อกำหนดในมาตรฐาน

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบหาค่าความยืดดึง

อัตราส่วนของส่วนผสม ต่อยางในรถจักรยานยนต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ค่าความยืดดึง [cm]
100 : 0	150.00
99 : 1	52.33
98 : 2	48.00
97 : 3	42.67
96 : 4	39.33
95 : 5	34.00

4. บทสรุปและข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยพบว่า การผสมยางในรถจักรยานยนต์ที่ใช้แล้วเข้ากับแอสฟัลต์ซีเมนต์ สามารถช่วยปรับปรุงคุณภาพของแอสฟัลต์ซีเมนต์ได้ กล่าวคือ เมื่อเพิ่มส่วนผสมของยางในรถจักรยานยนต์ที่ใช้แล้ว จะทำให้ค่าการจมตัวของเข็มมาตรฐาน (Penetration) ลดลง ขณะที่ค่าจุดอ่อนตัว (Softening Point) เพิ่มขึ้น แต่ค่าความยืดดึง (Ductility) จะลดลง เพราะยางในจะทำให้แอสฟัลต์ซีเมนต์มีความแข็งมากขึ้น แต่มีคุณสมบัติยืดดึงลดลง ผลการทดสอบที่ได้สอดคล้องกับผลการวิจัยของณพรัตน์ วิชิตชลชัย และคณะ

ในส่วนของการนำไปใช้งาน พบว่า ค่าอัตราส่วนผสมของยางในรถจักรยานยนต์ที่ควรใช้คือ ร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนักของส่วนผสมทั้งหมด เพราะให้ค่าความยืดดึงซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานที่ยอมให้ คือจะต้องไม่ต่ำกว่า 50 ซม. (มอก.851-2542) เพราะอาจส่งผลต่อการแตกร้าวของผิวถนน

สรุปได้ว่า ยางในรถจักรยานยนต์ที่ใช้แล้ว สามารถนำมาผสมกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ได้ เพราะส่วนผสมที่ได้นั้นมีคุณสมบัติซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานของงานทาง และสามารถปรับปรุงคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์ให้ดีขึ้นในด้านของความแข็งแรง คือค่าระยะจมนของเข็มมาตรฐานจะลดลง ซึ่งช่วยป้องกันการเสียรูปอย่างถาวรของผิวถนนได้ และในส่วนของคุณสมบัติของยางในรถจักรยานยนต์เข้าไป จะทำให้ค่าจุดอ่อนตัวสูงขึ้น ซึ่งมีผลดีต่อการช่วยลดการเยิ้มตัวของแอสฟัลต์ซีเมนต์เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น [7] แต่มีข้อเสียคือทำให้ส่วนผสมมีค่าความยืดดึงลดลง

กรณีที่จะนำไปใช้งานในเชิงอุตสาหกรรมนั้นจะต้องทำการทดสอบเพิ่มเติมในแง่อื่น ๆ ที่ครอบคลุมการใช้งานจริงทั้งหมด และต้องสร้างเครื่องมือที่ใช้ในการย่อยขนาดยางให้เล็กลง หรือเครื่องมือใช้การบดยางให้เป็นผงยาง รวมทั้งเครื่องมือที่ใช้ในการผสมผงยางบดให้เข้ากับแอสฟัลต์ซีเมนต์ได้ดี รวมทั้งทดลองนำไปสร้างถนนจริง เพื่อประเมินคุณภาพของถนน และศึกษาความคุ้มค่าในการก่อสร้างจริงต่อไป ซึ่งจะเป็นประโยชน์ทั้งในแง่ของวิศวกรรมทางและช่วยลดปริมาณขยะยางในรถจักรยานยนต์ที่มีอยู่เป็นจำนวนมากในปัจจุบัน

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยรังสิต ที่ให้ความอนุเคราะห์ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมทาง และขอขอบคุณผู้ร่วมวิจัย ผู้ช่วยวิจัย และอาจารย์ปฏิบัติการประจำห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมโยธา รวมทั้งบริษัทไทยรับเบอร์ลาเท็กซ์ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) ซึ่งได้อนุเคราะห์แอสฟัลต์ซีเมนต์สำหรับใช้ในงานวิจัย จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] ยางรถจักรยานยนต์. ตลาดในยังรุ่ง...เร่งมุ่งตลาดนอก. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <http://www.positioningmag.com>
- [2] The Use of Recycled Tire Rubber to Modify Asphalt Binder and Mixtures : Understanding how tires are used in asphalt. [online] : <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/pubs/hif14015.pdf>
- [3] ธนาพร พูนสวัสดิ์, 2544. การศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติของแอสฟัลต์ธรรมดา กับแอสฟัลต์ผสมยางล้อรถที่ใช้แล้วโดยวิธีการผสมแบบเปียกและแบบแห้ง. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [4] ฉัตรวรรณ สุทธิรักษ์ และยรรยง เพ็ญจันทร์, 2552. การนำยางรถยนต์เก่ามาผสมกับยางมะตอยเพื่อทำแอสฟัลต์ซีเมนต์. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี. มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- [5] ณพรัตน์ วิชิตชลชัย และคณะ, 2552. “การใช้ยางแห้งผสมยางมะตอยใช้ในงานทาง” ศูนย์วิจัยยาง ฉะเชิงเทรา สถาบันวิจัยยาง.
- [6] Understanding how tires are used in asphalt. [online] : <http://asphaltmagazine.com/understanding-how-tires-are-used-in-asphalt>
- [7] Oliver, J.W.H., 1997. “Critical Review of the Use of Rubbers and Polymers in Bitumen Board Paving Materials”, Report AIR 1037-1, Australian Road Research Board.

**กระบวนการตกแต่งสารยึดติดพอลิยูรีเทนและอนุภาคไมโคร/นาโนซิลค์บนผ้าทอลายขัดผ้า 100%
ด้วยกระบวนการพ่นเคลือบแบบ One และ Two Steps Spraying Method
A Finishing Process of a Mixture of Polyurethane Binder
and Micro/Nano Silk Particles Coated on Plain 100% Cotton Woven Fabrics
Using One and Two Steps Spraying Method**

นพรัตน์ เนื่องชมภู¹ สมนึก สังข์หนู² และ อภิชาติ สนธิสมบัติ³

Noparat_n@mail.rmutt.ac.th¹, somnuk.s@en.rmutt.ac.th², apichart.s@en.rmutt.ac.th³

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษากระบวนการตกแต่งแบบใหม่ (พ่นเคลือบด้วยกาพ่นสี) ซึ่งแตกต่างจากกระบวนการตกแต่งแบบจุ่ม-บีบอัด-ทำแห้ง (Dip-Nip-Dry Finishing Method) ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทออย่างแพร่หลาย กระบวนการ One Step Spraying Method (สารยึดติดพอลิยูรีเทนความเข้มข้น 10% ผสมกับสารละลายอนุภาคไมโคร/นาโนซิลค์ความเข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5, 2.0% ตามลำดับ) พ่นบนผืนผ้าทอลายขัดผ้า 100% ชั่งน้ำหนักผ้า หลังจากนั้นอบแห้ง 120°C เป็นเวลา 120 วินาที นำผ้าไปเก็บไว้ ณ ห้องทดสอบมาตรฐาน และกระบวนการ Two Steps Spraying Method ครั้งแรกเป็นการพ่นเคลือบด้วยสารยึดติดก่อน จากนั้นพ่นครั้งที่สองด้วยสารละลายอนุภาคไมโคร/นาโนซิลค์ด้วยความเข้มข้นที่เหมือนกับกระบวนการ One Step Spraying Method พ่นผืนผ้าทอลายขัดผ้า 100% ชั่งน้ำหนักผ้า หลังจากนั้นอบแห้ง 120°C เป็นเวลา 120 วินาที นำผ้าไปเก็บไว้ ณ ห้องทดสอบมาตรฐาน จากนั้นนำผ้ามาทดสอบความคงทนต่อการขัดถู (สภาวะแห้ง และเปียก) ทดสอบความคงทนต่อการซักล้าง (20 ครั้ง) ทดสอบเวลาในการซึมน้ำ และตรวจสอบขนาดและสัณฐานของอนุภาคที่เกาะอยู่บนผืนผ้าด้วยกล้อง SEM สรุปว่าผลการทดลองความคงทนต่อการขัดถูมีร้อยละน้ำหนักสูญเสียอยู่ในช่วงต่ำสุด -0.114% ถึงสูงสุด -0.510% ทั้งสองกระบวนการ และเวลาในการซึมน้ำเท่ากันทั้งสองกระบวนการ แต่กระบวนการแบบ Two Steps Spraying Method พบว่าผ้ามีความคงทนต่อการซักล้างดีกว่ากระบวนการ One Step Spraying Method ซึ่งสอดคล้องกับภาพจากกล้อง SEM แสดงว่าอนุภาคไมโคร/นาโนซิลค์ยังคงหลงเหลืออยู่บนผ้าที่ตกแต่งทั้งสองกระบวนการ สรุปว่าผ้าที่ผ่านการตกแต่ง Two Steps Spraying Method อาจจะถูกละเลือกมาใช้ในการตกแต่งผ้าสำหรับงานสปา เนื่องจากสารยึดติดถูกพ่นเคลือบบนผืนผ้าก่อนเติมพื้นที่ของผืนผ้า จึงน่าจะมีการยึดติดที่ดีกว่า.

คำสำคัญ: อนุภาคไมโคร/นาโนซิลค์ ผ้าทอลายขัดผ้า 100% กระบวนการพ่นเคลือบ กาพ่นสี

¹ นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาสิ่งทอ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

^{2,3} อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ABSTRACT

The aim of this research was to study the new finishing method (Spraying Method using a Spray Gun) which is different from the Dip-Nip-Dry Finishing Method that is widely used in the textile industries. One Step Spraying Method, the solutions were prepared by mixing 10% Polyurethane binder solution with Micro/Nano Silk solutions of the amount of 0.5, 1.0, 1.5, 2.0% respectively and the solutions were sprayed on the surface of plain 100% cotton woven fabrics, weighed the fabrics and then dried at 120°C for 120 seconds. The fabrics were put into a standard condition at textile testing laboratories. Two Steps Spraying Method, the solutions were prepared by mixing 10% Polyurethane binder solution, sprayed on the surface of the fabrics, weighed the fabrics. After the first spraying, the Micro/Nano Silk solutions of the amount of 0.5, 1.0, 1.5, 2.0% respectively were sprayed on each fabric, weighed the fabrics again and then dried at 120°C for 120 seconds. The fabrics were tested for the percentage weight loss after abrasion resistance (dry and wet conditions), after washing fastness (20 times). The fabrics were tested for wicking time and they were investigated the size and morphology of the particles. It was concluded that the abrasion resistance test results had weight loss percentage (-0.114% to -0.510%). Both methods gave the same wicking time (water permeability time). Nevertheless, it was found that the Two Steps Spraying Method fabrics showed less percentage weight loss after washing process than that from the One Step Spraying Method. From the SEM images, the fabrics from both methods showed that the particles remained on the fabrics. It can be concluded that two steps spraying method may be used to finish the fabrics for spa purposes because the binder was firstly sprayed on the cloth. It might have possibilities to contact much more surface areas than that from the one step Spraying Method before spraying the Micro/Nano silk particles on top of the fabrics again.

Keywords: Micro/Nano Particles Silk, Plain 100% Cotton Woven Fabrics, Spraying Method, Spray Gun.

1. บทนำ

เส้นใยไหมเป็นเส้นใยที่ผลิตจากหนอนไหม เป็นเส้นใยที่มาจากธรรมชาติ ประเภทโปรตีนเช่นเดียวกับเส้นใยขนสัตว์ แต่เส้นใยไหมมีปริมาณของซัลเฟอร์น้อยมาก โดยทั่วไปไหมจำแนกออกเป็นสองประเภทใหญ่ๆ คือ

1. ไหมเลี้ยง (Mulberry Silk: ไหมบอมบิกซ์ มอริ (Bombyx mori)) เป็นหนอนไหมที่มนุษย์นำมาเพาะเลี้ยงด้วยใบหม่อน (Mulberry Leaves) สดๆ ซึ่งไหมชนิดนี้จะมักมีสีค่อนข้างขาว (ยกเว้นไหมไทยที่มีสีเหลืองทอง) และหลังการลอกกาวแล้วเส้นใยไหมจะมีความมันเงาเพิ่มขึ้น

2. ไหมป่า (Wild Silk) เป็นไหมที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ โดยปกติไหมทาชาร์ (Tussah Silk) จะเป็นกลุ่มตัวแทนของเส้นไหมชนิดนี้ ไหมทาชาร์จะมีแหล่งกำเนิดอยู่

ที่จีน และอินเดีย ซึ่งเจริญเติบโตด้วยใบโอ๊ก (Oak Leaves) ซึ่งปกติไหมป่าจะให้เส้นใยที่มีสีน้ำตาล มีความหยาบกระด้าง และไม่สม่ำเสมอเมื่อเทียบกับเส้นใยจากไหมเลี้ยง

จากการสำรวจพบว่าเกือบร้อยละ 80 ของการผลิตเส้นใยไหมทั่วโลกจะได้อาจาก เส้นใยไหมเลี้ยงสำหรับไหมไทยจัดว่าเป็นไหมเลี้ยง (บอมบิกซ์ มอริ) แต่มีลักษณะที่แตกต่างกัน เนื่องจากเส้นใยมีสีเหลืองทอง และค่อนข้างหยาบ นอกจากนี้จากการทดลองของอภิชชาติ สนธิสมบัติ [1-2] พบว่าไหมไทยสีเหลืองทองบางพันธุ์มีส่วนประกอบที่เป็นกาวไหมปริมาณมากถึงร้อยละ 38 ซึ่งมีปริมาณมากกว่าไหมเลี้ยงชนิดอื่นๆ โดยปกติเส้นใยไหมเลี้ยงมักมีปริมาณกาวไหมร้อยละ 20-25 กระบวนการปั่นเส้นใยไหมเริ่มตั้งแต่ตัวหนอนไหมที่โตเต็มวัยเริ่มจะกลายเป็นดักแด้

พ่นของเหลวที่มีความหนืดจากต่อมขนาดใหญ่สองต่อม ภายในตัวหนอนไหม สารละลายนี้จะถูกอัดผ่านท่อสองท่อในหัวของตัวหนอนไหมไปสู่บริเวณที่เป็นแวนกดเส้นใย ส่วนที่ของเหลวหนืดคือเส้นใย (Fibroin: ไฟโบรอิน) ถูกเคลือบด้วยกาวไหม (Sericin: เซรีซิน) ซึ่งกาวไหมจะครอบเส้นใย 2 เส้นติดกัน เมื่อโปรตีนทั้งสองชนิดสัมผัสกับอากาศจะเกิดการแข็งตัว ยึดติดกัน ก่อให้เกิดเส้นใยยาวต่อเนื่อง [1,2]

ดังนั้นเส้นใยไหมจะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ กาวไหม (เซรีซิน) และเส้นใยไหม (ไฟโบรอิน) กาวไหมเป็นส่วนที่น้อยกว่าเส้นใย (มีปริมาณประมาณร้อยละ 25 ของน้ำหนักของไหมดิบ) และกาวไหมจะมีสิ่งเจือปน เช่น ขี้ผึ้ง ไขมัน และสีที่ไม่ละลายน้ำ กาวไหมมีสีเหลือง ลักษณะแข็งไม่ยืดหยุ่น ทำหน้าที่เชื่อมเส้นใยยาวทั้งสองเส้นเพื่อป้องกันอันตรายกับเส้นใยไหม (ไฟโบรอิน) และปิดบังความมันเงาของไฟโบรอิน กาวไหมถือว่าเป็นส่วนที่ไม่เป็นระเบียบ (Amorphous) และสามารถละลายน้ำสบูร้อนได้ ปริมาณของกาวไหมจะปรากฏมากที่สุดบริเวณด้านนอกสุดของรังไหม ส่วนด้านในจะมีกาวไหมน้อยลงเรื่อยๆ สำหรับเส้นใยไหม (ไฟโบรอิน) เป็นโปรตีนที่ไม่ละลายน้ำ (ประมาณร้อยละ 75 ของน้ำหนักของไหมดิบ) ซึ่งเส้นใยไหมนี้จะมีโครงสร้างที่ค่อนข้างเป็นระเบียบและมีการเรียงตัวดี [2,3]

เส้นใยไหมมีส่วนประกอบของกรดอะมิโน 16-18 ชนิด ซึ่งจัดว่าเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ และมีสารกำจัดเชื้อจุลินทรีย์บางอย่างที่เป็นเหตุให้เกิดโรคผิวหนังของมนุษย์ได้ และมีสมบัติที่สำคัญ เช่น ช่วยควบคุมระดับโคเลสเตอรอล ช่วยสลายแอลกอฮอล์ในร่างกาย ช่วยทำให้แผลหายเร็วขึ้น ช่วยความจำ ช่วยขยายหลอดเลือด และกระตุ้นการทำงานของหัวใจ ช่วยต่อต้านไวรัส (โรคเริม และงูสวัด) รักษาปริมาณน้ำในผิวหนัง กำจัดสิ่งสกปรกในเซลล์ และยืดอายุเซลล์ผิวหนัง เป็นต้น [4-6]

อภิชาติ สนธิสมบัติ [5] จดอนุสิทธิบัตรเกี่ยวกับ นำเอาเส้นใยไหมดิบ เศษเส้นใยไหมดิบ หรือรังไหมดิบ มาผลิตเป็นอนุภาคไมโคร/นาโนซิลค์ที่ผลิตได้มีสมบัติเป็นสารทำให้ผิวหนังชุ่มชื้น (Moisturizing agent) นอกจากนี้ยังมีสมบัติเป็นสารป้องกันรังสีอัลตราไวโอเลต (UV Protecting)

หรือการนำเอาอนุภาคไมโคร/นาโนซิลค์มาเคลือบวัสดุด้านสิ่งทอ เพื่อทำให้ผิวหนังชุ่มชื้น ดูดความชื้นในอากาศได้ดี ป้องกันรังสีอัลตราไวโอเลต (UV Protecting) และลดริ้วรอยบนผิวหนังผู้สวมใส่ได้

กระบวนการตกแต่งสิ่งทอมีหลากหลายวิธี อาทิ กระบวนการจุ่ม-บีบอัด-อบแห้ง กระบวนการพ่นสเปรย์ เคลือบผิวหนังสิ่งทอ กระบวนการดูดซึม กระบวนการเคลือบด้วยโฟม ซึ่งกระบวนการตกแต่งสิ่งทอที่เหมาะสมกับมิติของสิ่งทอเกือบทุกประเภท คือ กระบวนการพ่นสเปรย์ เคลือบผิวหนังสิ่งทอ อย่างไรก็ตามอาจมีปัญหาเรื่องของความไม่สม่ำเสมอของการพ่นสเปรย์ อีกทั้งการสูญเสียสารเคมีเนื่องจากละอองกระจายตัวไม่สัมผัสกับผิวหนังสิ่งทอ [3, 7-9]

กาพ่นสีที่มีจำหน่ายในท้องตลาด [10-11] มีขนาดหัวพ่น 1.5 มม. เหมาะสมกับงานละเอียด และพื้นที่ขนาดเล็ก ขนาด 1.8 มม. เหมาะสมกับงานพ่นทั่วไป ขนาด 2.0 มม. เหมาะสมกับงานพ่นพื้นที่ขนาดใหญ่ ซึ่งขนาดหัวพ่นมีผลกับสารที่ต้องการพ่น เนื่องจากหากเลือกหัวพ่นเล็กเกินไป จะเกิดการอุดตันของหัวพ่น และไม่สามารถพ่นอย่างสม่ำเสมอ

2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาถึงกระบวนการตกแต่งสารยัดติด พอลิยูรีเทนและอนุภาคไมโคร/นาโนซิลค์บนผ้าฝ้าย 100% ด้วยกระบวนการตกแต่งแบบใหม่ (พ่นเคลือบด้วยกาพ่นสี) ซึ่งปกติในอุตสาหกรรมสิ่งทอจะไม่ใช้กระบวนการแบบนี้ ส่วนใหญ่จะใช้กระบวนการจุ่ม-บีบอัด-ทำแห้ง (Dip-Nip-Dry) ในงานวิจัยนี้จะใช้กระบวนการ One Step Spraying Method (พ่นสารยัดติดพอลิยูรีเทนผสมกับอนุภาคไมโคร/นาโนซิลค์) เปรียบเทียบกับกระบวนการ Two Steps Spraying Method (พ่นเคลือบสารยัดติด (ครั้งที่ 1) แล้วพ่นเคลือบด้วยสารละลายอนุภาคไมโคร/นาโนซิลค์ (ครั้งที่ 2) และเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในตกแต่งผ้าสำหรับงานสปา และทดสอบคงทนต่อการขัดถูและคงทนต่อการซักล้างว่ามีความคงทนมากน้อยเพียงใด

3. วัสดุและวิธีการทดลอง

3.1 วัสดุ-สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- รังไหมพันธุ์ไทย (สีเหลือง)
- โซเดียมไฮดรอกไซด์
- กรดไฮโดรคลอริก
- ผ้าซิงกรีนขนาด 180-200 Mesh (รูนีว)
- ผ้าทอลายขัดเส้นใยฝ้าย 100% เบอร์ 40 (ด้ายยืน) เบอร์ 40 (ด้ายพุ่ง) ขนาด 40 x 40 ซม.
- สารย้อมติดพอลิยูรีเทน

3.2 กระบวนการเตรียมอนุภาคไมโคร/นาโนซิลค์ และวิธีการตรวจสอบขนาดอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

3.2.1 กรรมวิธีการเตรียมอนุภาคไมโคร/นาโนซิลค์

นำรังไหมพันธุ์ไทย (สีเหลือง) จำนวน 1 กิโลกรัม มาตัดด้วยกรรไกรให้มีขนาดประมาณ 2 x 2 เซนติเมตร จากนั้นละลายรังไหมที่ตัดแล้วด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 2-5 (% w/v) ด้วยอัตราส่วนน้ำต่อรังไหม เท่ากับ 5:1 จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิหม้อต้มอย่างช้าๆ จนถึงอุณหภูมิ 95-98 องศาเซลเซียส พร้อมกับคนให้สม่ำเสมอจนรังไหมละลายเป็นสารละลายทั้งหมด ปล่อยให้เย็นตัวที่อุณหภูมิปกติ เมื่อสารละลายไหมเย็นตัวแล้ว จึงไตเตรทด้วยกรดไฮโดรคลอริก จนสารละลายมีค่า pH เป็นกลาง (6.5-7.5) ในตู้ดูดควัน คนให้เข้ากันอย่างสม่ำเสมอ จากนั้นนำสารละลายที่ได้มากรองสิ่งสกปรกออกด้วยผ้าซิงกรีนขนาด 180-200 Mesh (รูนีว) นำสารละลายที่เป็นน้ำใสที่ผ่านการกรองมาลงในภาชนะกระเบื้อง แล้วนำเข้าตู้อบแห้งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5-10 ชั่วโมง จนได้ผงไหม เมื่อแห้งสนิท นำไปบดด้วยเครื่องบดบอลมิลล์ (Ball Mill Grinding Machine) ด้วยความเร็ว 300 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 นาที จำนวน 3 ครั้ง นำอนุภาคที่ผ่านการบดแล้ว มาผ่านตะแกรงกรองขนาด 180-200 เมช เก็บเฉพาะผงที่ละเอียดใส่ถุงพลาสติกซีลปากถุงให้แน่น

3.2.2 วิธีการตรวจสอบขนาดอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope: SEM)

การตรวจสอบขนาดอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope: SEM) ดำเนินการที่บริษัท ธาธาบิสสิเนส จำกัด (Do SEM: ดูเพิ่ม) อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี ด้วยเครื่อง SEM JSM-5410LV ที่ 20 kV กำลังขยาย 1,000-10,000 เท่า และใช้โปรแกรม SemAfore 5.2 [12] ในการวิเคราะห์และเปรียบเทียบขนาดอนุภาคจากภาพถ่ายจากกล้อง SEM

3.3 กระบวนการตกแต่งด้วยการพ่นเคลือบสารย้อมติดผสมกับอนุภาคไมโคร/นาโนซิลค์และสารย้อมติดพอลิ-ยูรีเทน (One Step Method) บนผ้าฝ้าย

3.3.1 วิธีการเตรียมตัวอย่างผ้าฝ้าย

ตัดผ้าทอลายขัดเส้นใยฝ้าย 100% เบอร์ 40 (ด้ายยืน) เบอร์ 40 (ด้ายพุ่ง) ขนาด 40 x 40 ซม. จำนวน 24 ผืน เขียนหมายเลข 1-24 แล้วนำมาอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ทิ้งให้เย็นนำไปเก็บไว้ในโถดูดความชื้น (Desiccator) ซึ่งน้ำหนักบนเครื่องชั่งละเอียด ในห้องทดสอบสิ่งทอ ที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 65±2% อุณหภูมิ 27±2 องศาเซลเซียส บันทึกผลการทดลอง ทำเช่นนี้จนน้ำหนักไม่เปลี่ยนแปลง

3.3.2 วิธีการเตรียมสารละลายสารย้อมติดพอลิ-ยูรีเทนผสมกับอนุภาคไมโคร/นาโนซิลค์ (One Step Spraying Method)

ชั่งสารย้อมติดพอลิยูรีเทน ปริมาณ 60 กรัม และชั่งอนุภาคไมโคร/นาโนซิลค์ ปริมาณ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 กรัม และผสมน้ำ 540 กรัม สำหรับตัวอย่างสารย้อมติดพอลิยูรีเทนผสมกับอนุภาคไมโคร/นาโนซิลค์ ร้อยละ 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 (ตามลำดับ)

3.3.3 วิธีพ่นเคลือบสารละลายสารยึดติดพอลิ-ยูรีเทนผสมกับอนุภาคไมโคร/นาโนซิลค์

นำสารละลายจำนวน 25 กรัมมาพ่นด้วยกาพ่นสี (กระป๋องล่าง) ปริมาณการพ่นสูงสุด 150 ลูกบาศก์เซนติเมตร ต่อพื้นที่ ที่ความดันลมอัดไม่เกิน 3.5 กิโลกรัมต่อตารางเมตร หัวพ่นขนาด 1.8 มม. (เหมาะกับการพ่นทั่วไป) พ่นสารด้วยระยะห่างจากผ้า 30 ซม. โดยมีแท่นยึดผ้าฝ้ายให้ตึง ตั้งมุม 125-130 องศา (เฉียงกับพื้น) และมุมในการพ่นขนานกับพื้น โดยพ่นจากซ้ายไปขวา บริเวณด้านบนไล่ลงมาข้างล่าง จนทั่วทั้งผืน ด้านหน้า

สำหรับด้านหลัง นำสารละลายจำนวน 25 กรัมมาพ่นด้วยกาพ่นสี ดังกล่าวข้างต้น พ่นจากซ้ายไปขวา บริเวณด้านบนไล่ลงมาข้างล่าง จนทั่วทั้งผืน

เมื่อพ่นเคลือบเสร็จ นำผ้าฝ้าย ที่เปียกมาชั่งน้ำหนักบนเครื่องชั่งละเอียด บันทึกผลการทดลอง

3.3.4 กระบวนการอบแห้ง/ทำปฏิกิริยาร่างแห

นำผ้าฝ้าย ที่ผ่านการพ่นเคลือบเรียบร้อยแล้วตามข้อ 2.2.3 เข้าเครื่องสแต็นเตอร์ อบแห้งและทำปฏิกิริยาร่างแหบนผ้าฝ้าย ณ อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 วินาที เมื่อผ่านเครื่องดังกล่าวแล้วนำผ้าฝ้าย ที่ให้เย็น แล้วนำไปเก็บไว้ในโถดูดความชื้น (Desiccator) ชั่งน้ำหนักบนเครื่องชั่งละเอียด ในห้องทดสอบสิ่งทอ ที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ $65 \pm 2\%$ อุณหภูมิ 27 ± 2 องศาเซลเซียส บันทึกผลการทดลอง ทำเช่นนี้จนน้ำหนักไม่เปลี่ยนแปลง เก็บผ้าฝ้าย รอทดสอบขั้นตอนต่อไป

3.4 กระบวนการตกแต่งด้วยการพ่นเคลือบสารยึดติดตามด้วยอนุภาคไมโคร/นาโนซิลค์ (Two Steps Spraying Method) บนผ้าฝ้าย

3.4.1 วิธีการเตรียมตัวอย่างผ้าฝ้าย

ตัดผ้าฝ้าย ขนาด 40×40 ซม. จำนวน 24 ผืน เขียนหมายเลข 25-48 แล้วนำมาอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ที่ให้เย็นนำไปเก็บไว้ในโถดูดความชื้น (Desiccator) ชั่งน้ำหนักบนเครื่องชั่งละเอียด บันทึกผลการทดลอง ทำเช่นนี้จนน้ำหนักไม่เปลี่ยนแปลง

3.4.2 วิธีเตรียมสารละลายสารยึดติดพอลิยูรีเทน

ซึ่งสารยึดติดพอลิยูรีเทน ปริมาณ 60 กรัม แล้วผสมน้ำ 540 กรัม

3.4.3 วิธีเตรียมสารละลายอนุภาคไมโคร/นาโนซิลค์ความเข้มข้น 0.5%, 1.0%, 1.5% และ 2.0%

สารละลายอนุภาคไมโคร/นาโนซิลค์ความเข้มข้น 0.5%, 1.0%, 1.5% และ 2.0% เตรียมด้วยวิธีการชั่งอนุภาคไมโคร/นาโนซิลค์ปริมาณ 3, 6, 9 และ 12 กรัมละลายในน้ำ 597, 594, 591, 588 กรัม (ตามลำดับ)

3.4.4 วิธีพ่นเคลือบสารละลายสารยึดติดพอลิยูรีเทน

นำสารละลายสารยึดติดพอลิยูรีเทนจำนวน 25 กรัมมาพ่นด้วยกาพ่นสี (ตามกระบวนการ 3.3.3) โดยพ่นจากซ้ายไปขวา บริเวณด้านบนไล่ลงมาข้างล่าง จนทั่วทั้งผืน ด้านหน้า

สำหรับด้านหลัง นำสารละลายจำนวน 25 กรัมมาพ่นด้วยกาพ่นสี (ตามกระบวนการ 3.3.3) โดยพ่นจากซ้ายไปขวา บริเวณด้านบนไล่ลงมาข้างล่าง จนทั่วทั้งผืน

เมื่อพ่นเคลือบเสร็จ นำผ้าฝ้าย ที่เปียกมาชั่งน้ำหนักบนเครื่องชั่งละเอียด บันทึกผลการทดลอง

3.4.5 วิธีการเตรียมสารละลายอนุภาค- ไมโคร/นาโนซิลค์

สารละลายอนุภาคไมโคร/นาโนซิลค์ความเข้มข้น 0.5%, 1.0%, 1.5% และ 2.0% เตรียมด้วยวิธีการชั่งอนุภาคไมโคร/นาโนซิลค์ปริมาณ 3, 6, 9 และ 12 กรัมละลายในน้ำ 597, 594, 591, 588 กรัม (ตามลำดับ)

3.4.6 วิธีพ่นเคลือบสารละลายอนุภาคไมโคร/นาโนซิลค์

นำสารละลายสารละลายอนุภาคไมโคร/นาโนซิลค์จำนวน 25 กรัมมาพ่นด้วยกาพ่นสี ระยะห่าง 30 ซม. โดยมีแท่นยึดผ้าฝ้าย โดยทำให้มุมในการพ่น 50 องศา พ่นจากซ้ายไปขวา บริเวณด้านบนไล่ลงมาข้างล่าง จนทั่วทั้งผืน ด้านหน้า

สำหรับด้านหลัง นำสารละลายจำนวน 25 กรัมมาพ่นด้วยกาพ่นสี ระยะห่าง 30 ซม. โดยมีแท่นยึดผ้าฝ้าย โดยทำให้มุมในการพ่น 50 องศา พ่นจากซ้ายไปขวา บริเวณด้านบนไล่ลงมาข้างล่าง จนทั่วทั้งผืน

เมื่อพ่นเคลือบเสร็จ นำผ้าฝ้าย ที่เปียกมาชั่งน้ำหนักบนเครื่องชั่งละเอียด บันทึกผลการทดลอง

3.4.7 กระบวนการอบแห้ง/ทำปฏิกิริยาร่างแห

นำผ้าฝ้าย ที่ผ่านการพ่นเคลือบเรียบร้อยแล้ว ตามข้อ 2.3.6 เข้าเครื่องสแต็นเตอร์ อบแห้งและทำปฏิกิริยาร่างแหบนผ้าฝ้าย ณ อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 วินาที เมื่อผ่านเครื่องดังกล่าวแล้วนำผ้าฝ้าย ที่ให้เย็นแล้วนำไปเก็บไว้ในโถดูดความชื้น (Desiccator) ซึ่งน้ำหนักบนเครื่องชั่งละเอียด บันทึกผลการทดลอง ทำเช่นนี้จนน้ำหนักไม่เปลี่ยนแปลง เก็บผ้าฝ้าย รอทดสอบขั้นตอนต่อไป

3.5 กระบวนการทดสอบสมบัติผ้าที่ผ่านกระบวนการตกแต่งแล้ว

3.5.1 การทดสอบการขัดถูแบบแห้งและเปียก (ISO 105-X12:2011) ดำเนินการที่บริษัท อินเตอร์เทค เทสติ้ง เซอร์วิสเชส (ประเทศไทย) จำกัด จ.กรุงเทพฯ ด้วยเครื่องขัดถู COMETECH รุ่น QC-319

3.5.2 การทดสอบหลังการซักล้าง (ISO 3801 : 1977) จำนวน 20 ครั้ง ดำเนินการที่บริษัท อินเตอร์เทค เทสติ้ง เซอร์วิสเชส (ประเทศไทย) จำกัด จ.กรุงเทพฯ ด้วยเครื่อง DURAWASH

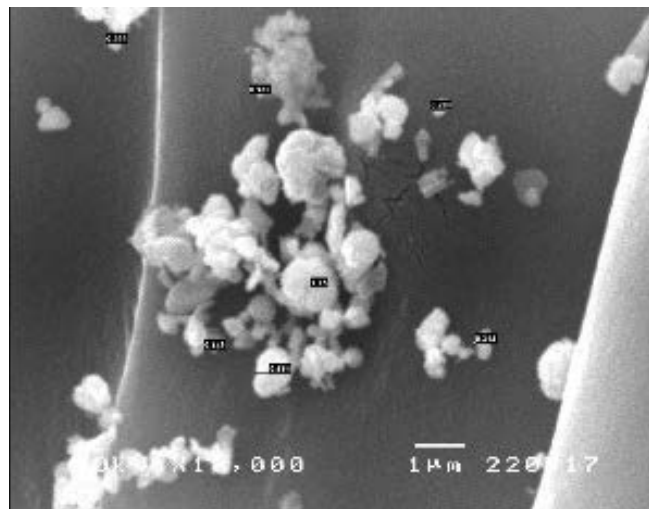
3.5.3 การทดสอบเวลาในการซึมน้ำ (Wicking Test) (AATCC 197:2011) ดำเนินการที่บริษัท อินเตอร์เทค เทสติ้ง เซอร์วิสเชส (ประเทศไทย) จำกัด จ.กรุงเทพฯ

3.5.4 วิธีการตรวจสอบขนาดอนุภาคบนผ้าที่ผ่านกระบวนการตกแต่งแล้วด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope: SEM)

การตรวจสอบขนาดอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ตามที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 3.2.2

4. ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผล

4.1 ตรวจสอบขนาดอนุภาคและสัญญาณที่ปรากฏด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM)



รูปที่ 1 ขนาดอนุภาค/สัญญาณของอนุภาคไมโคร/นาโนซิลค์

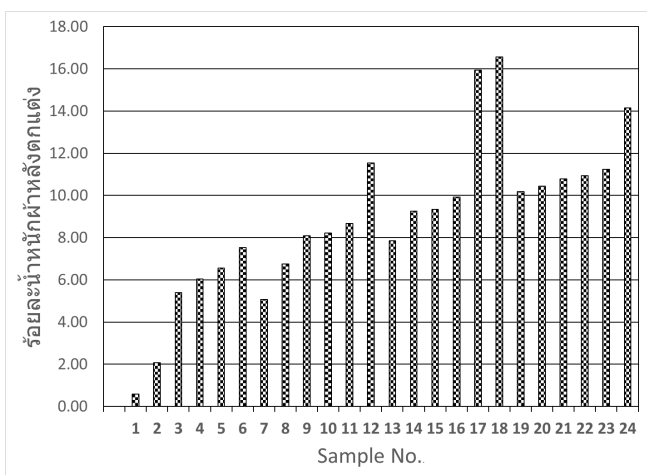
จากรูปภาพที่ 1 พบว่าอนุภาคไมโคร/นาโนซิลค์ ที่เตรียมและพ่นเคลือบในงานวิจัยนี้ มีขนาดเล็กที่สุดอยู่ในช่วง 132-314 นาโนเมตร (อนุภาคเดี่ยว) และมีขนาดใหญ่ที่สุดในช่วง 694-1,150 นาโนเมตร (อนุภาคที่จับตัวเป็นก้อน) ซึ่งพิสูจน์ได้ว่าอนุภาคที่นำมาใช้มีขนาดอยู่ระหว่างอนุภาคไมโคร (10^{-6} m) ถึงอนุภาคนาโน (10^{-9} m)

4.2 ความแตกต่างของน้ำหนักผ้าที่ผ่านกระบวนการทั้งสองแบบ

ตารางที่ 1 ร้อยละของน้ำหนักของผ้าหลังอบที่ผ่านการเคลือบด้วยสารละลายสารยึดติดพอลิยูรีเทนกับอนุภาค ไมโคร/นาโนซิลค์ (One Step Spraying Method)

ความเข้มข้น	ชิ้นตัวอย่างหมายเลข	% น้ำหนักผ้าหลังอบ (เพิ่มขึ้น)
Silk 0.5%	1	0.58
	2	2.06
	3	5.40
	4	6.03
	5	6.55
	6	7.53

Silk 1.0%	7	5.07
	8	6.74
	9	8.09
	10	8.22
	11	8.67
	12	11.54
Silk 1.5%	13	7.84
	14	9.26
	15	9.33
	16	9.91
	17	15.93
	18	16.57
Silk 2.0%	19	10.18
	20	10.44
	21	10.78
	22	10.93
	23	11.24
	24	14.14



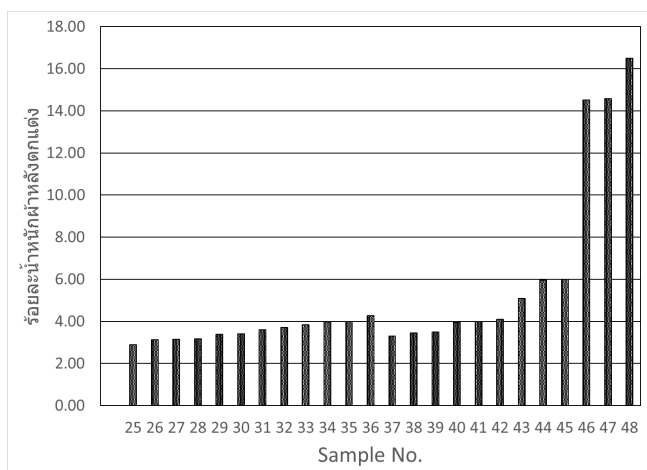
รูปที่ 2 กราฟแสดงร้อยละของน้ำหนักของผ้าที่ผ่านการเคลือบ One Step Spraying Method

จากรูปที่ 2 พบว่าร้อยละของน้ำหนักผ้าหลังการตกแต่ง ขึ้นตัวอย่างที่ 1 2 7 8 12 17 18 และ 24 (ตามที่เรียงในตารางที่ 1) มีค่าที่แตกต่างมากกว่าขึ้นตัวอย่างอื่นๆ แสดงให้เห็นว่ากระบวนการพ่นเคลือบมีข้อจำกัดในด้านสารเคมีที่ขึ้นไปติดบนผ้า ขึ้นตัวอย่าง

ที่กล่าวข้างต้น จะไม่ถูกเลือกนำมาใช้ในการทดสอบในขั้นตอนต่อไป เนื่องจากปริมาณสารเคมีน้อยเกินไปหรือมากเกินไป เพื่อลดปัญหาความผิดพลาดของข้อมูลจากการทดสอบในการทดลองถัดไป

ตารางที่ 2 ร้อยละของน้ำหนักของผ้าหลังอบที่ผ่านการพ่นเคลือบสารยึดติดตามด้วยอนุภาคไมโคร/นาโนซิลค์ (Two Steps Spraying Method)

ความเข้มข้น	ขึ้นตัวอย่างหมายเลข	% น้ำหนักผ้าหลังอบ(เพิ่มขึ้น)
Silk 0.5%	25	2.89
	26	3.13
	27	3.15
	28	3.17
	29	3.38
	30	3.41
Silk 1.0%	31	3.60
	32	3.71
	33	3.83
	34	3.96
	35	3.99
	36	4.28
Silk 1.5%	37	3.31
	38	3.44
	39	3.50
	40	3.95
	41	3.98
	42	4.10
Silk 2.0%	43	5.08
	44	5.96
	45	5.99
	46	14.51
	47	14.57
	48	16.50

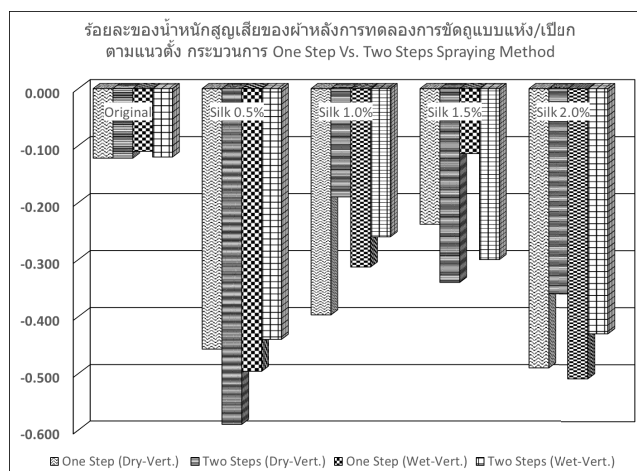


รูปที่ 3 กราฟแสดงร้อยละของน้ำหนักของผ้าที่ผ่านการเคลือบ Two Step Spraying Method

จากรูปที่ 3 พบว่าร้อยละของน้ำหนักผ้าหลังการตกแต่ง ขึ้นตัวอย่างที่ 25 36 42 และ 46-48 (ตามที่แรงเงาในตารางที่ 2) มีค่าที่แตกต่างมากกว่าขึ้นตัวอย่างอื่นๆ (คล้ายรูปที่ 2) ดังนั้นขึ้นตัวอย่างที่กล่าวข้างต้น จะไม่ถูกเลือกนำมาใช้ในการทดสอบในขั้นตอนต่อไป เนื่องจากปริมาณสารเคมีน้อยเกินไป หรือมากเกินไป เพื่อลดปัญหาความผิดพลาดของข้อมูลจากการทดสอบในการทดลองถัดไป

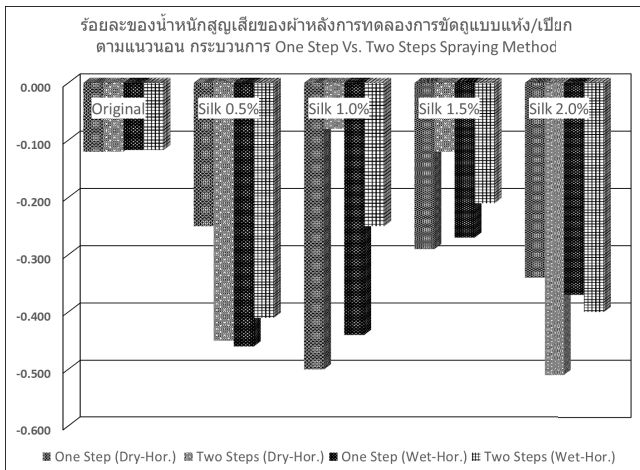
อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบระหว่างร้อยละของน้ำหนักของผ้าจากกระบวนการ One Step Process อยู่ในช่วงเฉลี่ยประมาณ +10% และร้อยละของน้ำหนักของผ้าจากกระบวนการ Two Steps Process อยู่ในช่วงเฉลี่ยประมาณ +4% ทั้งนี้อาจเกิดจากการพ่นเคลือบ 2 ครั้ง ทำให้สูญเสียสารเคมีไปในอากาศมากกว่าการพ่นเคลือบครั้งเดียว

4.3 ทดสอบการขัดถูแบบแห้งและเปียก (ISO 105-X12: 2011)



รูปที่ 4 กราฟแสดงร้อยละของน้ำหนักสูญเสียของผ้าหลังการทดลองการขัดถูแบบแห้ง/เปียก ตามแนวตั้ง กระบวนการ One Step เปรียบเทียบกับ Two Steps Spraying Method

จากรูปที่ 4 พิสูจน์ได้ว่าร้อยละของน้ำหนักสูญเสียของผ้าหลังการทดลองการขัดถูแบบแห้ง และเปียก ตามแนวตั้ง ทั้ง One Step Spraying Method และ Two Steps Spraying Method พบว่ามีค่าร้อยละน้ำหนักสูญเสียอยู่ในช่วงต่ำสุด -0.114% ถึงสูงสุด -0.590% โดยการขัดถูแบบแห้ง/เปียก ตามแนวตั้งมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่ากระบวนการทั้งสองกระบวนการไม่มีความแตกต่างกัน และสามารถสรุปได้ว่าผ้าที่ผ่านการตกแต่งทั้งสองกระบวนการมีความคงทนต่อการขัดถูดี เนื่องจากร้อยละน้ำหนักสูญเสียหลังการขัดถูน้อยมาก

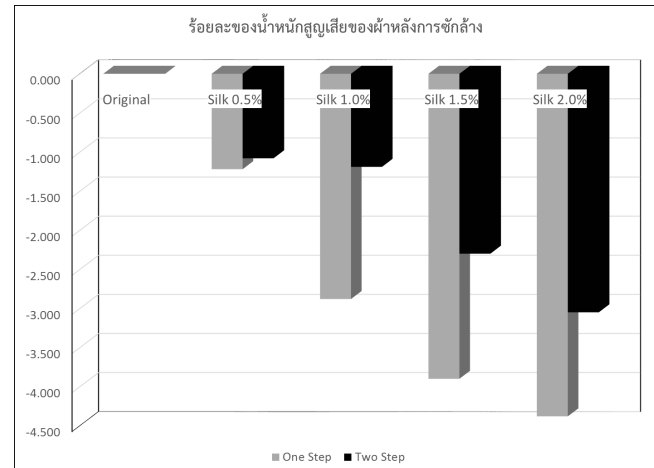


รูปที่ 5 กราฟแสดงร้อยละของน้ำที่ดูดซับของผ้าหลังการทดลองการขัดถูแบบแห้ง/เปียก ตามแนวนอน กระบวนการ One Step Vs. Two Steps Spraying Method

จากรูปที่ 5 ร้อยละของน้ำที่ดูดซับของผ้าหลังการทดลองการขัดถูแบบแห้ง และเปียก ตามแนวนอน ทั้ง One Step Spraying Method และ Two Steps Spraying Method พบว่ามีค่าร้อยละน้ำที่ดูดซับอยู่ในช่วงต่ำสุด -0.120% ถึงสูงสุด -0.510% โดยการขัดถูแบบแห้ง/เปียก ตามแนวนอนมีค่าใกล้เคียงกัน

จากรูปที่ 4 และ 5 พบว่ามีค่าร้อยละของน้ำที่ดูดซับน้อยมาก แสดงว่ากระบวนการทั้งสองกระบวนการให้ผลความคงทนต่อการขัดถู (ในสภาวะแห้งและเปียก ตามแนวนอนและแนวตั้ง) ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่สามารถสรุปได้ว่าผ้าที่ผ่านการตกแต่งทั้งสองกระบวนการมีความคงทนต่อการขัดถูดีมาก เนื่องจากร้อยละน้ำที่ดูดซับหลังการขัดถูน้อยมาก

4.4 ผลการทดสอบหลังการซักล้าง (ISO 3801: 1977)



รูปที่ 6 กราฟแสดงร้อยละของน้ำที่ดูดซับของผ้าหลังการซักล้าง (20 ครั้ง)

จากรูปที่ 6 พบว่าร้อยละน้ำที่ดูดซับของผ้าหลังการซักล้างของผ้าที่ผ่านกระบวนการ One Step Spraying Method จะมีค่าการดูดซับน้ำที่ดูดซับ (สารเคลือบ) มากกว่า ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสารยึดติดผสมกับอนุภาคไมโคร/นาโนซิลค์ ทำให้การยึดติดไม่คงทนต่อการซักล้าง เมื่อเปรียบเทียบกับ Two Steps Spraying Method (ที่ดูดซับน้ำที่ดูดซับน้อยกว่า) เพราะสารยึดติดถูกพ่นเคลือบบนผืนผ้าก่อน จึงยึดเกาะแน่นกับผิวหน้าผ้า เมื่อพ่นอนุภาคไมโคร/นาโนซิลค์ทับอีกครั้ง จึงทำให้สามารถยึดเกาะบนผิวหน้าผ้าอีกชั้นได้ดีกว่า

อย่างไรก็ตามค่าร้อยละน้ำที่ดูดซับหลังการซักล้าง 20 ครั้ง ทั้งสองกระบวนการ มีร้อยละน้ำที่ดูดซับอยู่ในช่วงต่ำสุด -1.08% ถึงสูงสุด -4.38% (น้อย) จัดว่าสารยึดติดและอนุภาคไมโคร/นาโนซิลค์ สามารถยึดเกาะบนผิวหน้าผ้าดีมาก (น้ำหนัของสารเคมีที่หลุดออกไปน้อยมาก)

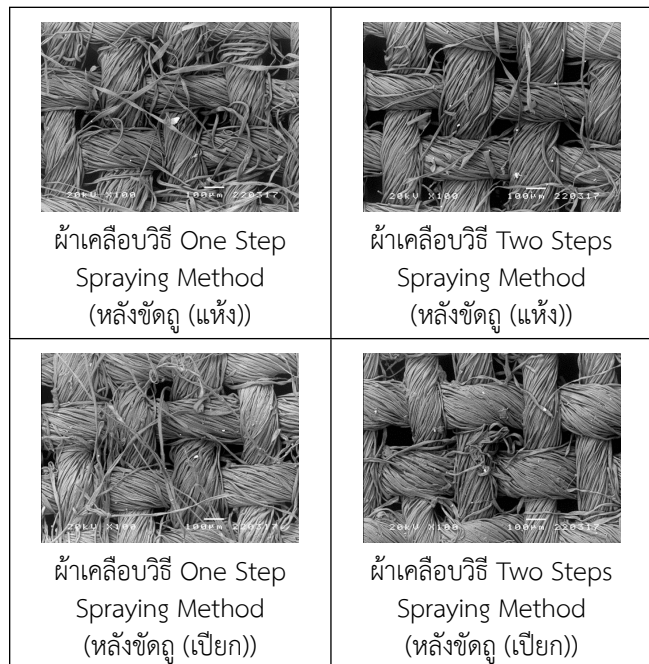
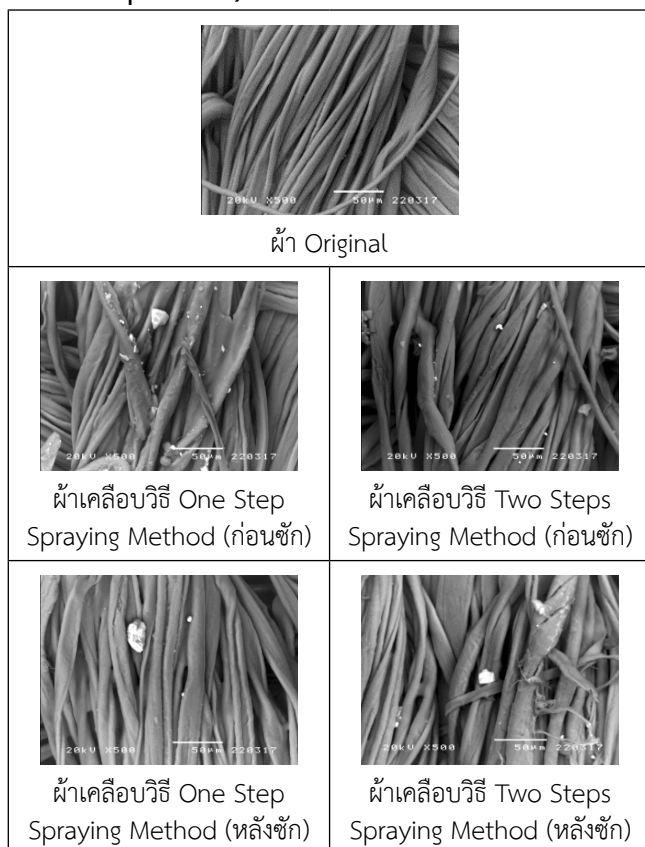
4.5 ผลการทดสอบเวลาในการซึมน้ำ (Wicking Test) (AATCC 197:2011) (หน่วย: วินาที)

ตารางที่ 3 เวลาในการซึมน้ำ (วินาที) ของผ้า Original ผ้าผ่านกระบวนการ One Step Spraying Method และ Two Steps Spraying Method (0.5% Silk)

Samples	Original	One Step Spraying Method	Two Steps Spraying Method
Wicking Time	6 Sec.	5 Sec.	5 Sec.

จากตารางที่ 3 พบว่าผ้าฝ้ายก่อนเคลือบมีเวลาในการซึมน้ำเร็วกว่าเล็กน้อย ผ้าที่ผ่านกระบวนการทั้งสองกระบวนการมีเวลาในการซึมน้ำเท่ากัน แต่มีเวลาต่างจากผ้าก่อนเคลือบ (Original) เพียง 1 วินาที ถือว่ามีผลน้อยมากสำหรับในช่วงการนำไปใช้งานที่ต้องการเวลาในการซึมน้ำที่รวดเร็ว เมื่อนำไปใช้งานผู้สวมใส่ไม่สามารถแยกความแตกต่างเวลาในการซึมน้ำได้ จึงถือว่าไม่มีผลเสียกับผ้าฝ้ายที่ผ่านการตกแต่ง

4.6 ตรวจสอบขนาดอนุภาคและสัณฐานที่ปรากฏด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope: SEM)



หมายเหตุ ผ้าเคลือบวิธี One และ Two Steps Spraying Method ณ ความเข้มข้นของอนุภาคไมโคร/นาโนซิลค์ 0.5%

รูปที่ 7 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

จากรูปที่ 7 พบว่าผ้า Original (ผ้าที่ไม่ผ่านการตกแต่ง) ผ้าผ่านการตกแต่งหลังการซัก และผ้าผ่านการตกแต่งหลังการซัก (20 ครั้ง) พบว่าผ้า Original ไม่มีอนุภาคเล็กๆ ปรากฏอยู่บนผืนผ้า ผ้าผ่านการตกแต่งหลังการซัก และหลังการซัก (20 ครั้ง) ปรากฏว่ามีอนุภาคเล็กๆ สีขาว ของอนุภาคไมโคร/นาโนซิลค์จำนวนเล็กน้อยแทรกหรือลอยอยู่บนผืนผ้า แสดงให้เห็นว่ากระบวนการตกแต่งในงานวิจัยนี้มีความคงทนต่อการซัก และหลังการซัก (20 ครั้ง) ยังคงมีอนุภาคเล็กๆ ปรากฏอยู่ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในรูปที่ 4 5 และ 6 (ร้อยละของน้ำหนักสูญเสีย้น้อยมาก)

5. บทสรุป

จากการทำวิจัยในครั้งนี้ สามารถสรุปว่า

1. กระบวนการตกแต่งด้วยการพ่นเคลือบด้วยกาพ่นสี เป็นกระบวนการตกแต่งแบบใหม่ สำหรับกระบวนการตกแต่งสิ่งทอ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะมีข้อจำกัดในด้านสารเคมีที่ขึ้นไปติดบนผ้า เนื่องจากการพ่นสเปรย์จากกาพ่นสีนั้น จะมีบางส่วนที่ฟุ้งกระจายไปในอากาศ

ถึงแม้จะควบคุมมุมการพ่น ทิศทางการพ่น ใช้กรอบซึ่งผ้าให้ตึง และใช้การชั่งน้ำหนักผ้าหลังพ่น เพื่อลดความผิดพลาดก็ตาม หากต้องการลดการฟุ้งกระจาย และต้องการตกแต่งให้สารเคมีสม่ำเสมอและมากกว่างานวิจัยนี้ อาจจะต้องพิจารณากระบวนการตกแต่งแบบจุ่ม-บีบอัด-ทำแห้ง หรือกระบวนการตกแต่งอื่นๆ อาทิ แบบโฟม แบบลูกกลิ้งเคลือบ ที่น่าจะทำให้เกิดการเคลือบผิวหน้าผ้าอย่างสม่ำเสมอ แต่อาจมีข้อเสีย ทำให้ผ้ามีความหนามากขึ้น และผิวสัมผัสหยาบกระด้างมากขึ้นเช่นกัน

2. ร้อยละน้ำหนักสูญเสียของผ้าหลังการชักล้าง (20 ครั้ง) ของผ้าที่ผ่านกระบวนการ One Step Spraying Method จะมีค่าร้อยละน้ำหนักสูญเสียมากกว่ากระบวนการ Two Steps Spraying Method ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสารยึดติดผสมกับอนุภาคไมโคร/นาโนซิลค์ ทำให้การยึดติดไม่คงทนต่อการชักล้าง เมื่อเปรียบเทียบกับ Two Steps Spraying Method ที่มีร้อยละน้ำหนักสูญเสียน้อยกว่า เพราะสารยึดติดถูกพ่นเคลือบบนผืนผ้าก่อน มีการยึดติดที่ดีกว่า จึงพ่นอนุภาคไมโคร/นาโนซิลค์ตามอีกครั้ง

3. ผ้าที่ผ่านการตกแต่งทั้งสองกระบวนการ มีเวลาในการซึมน้ำเท่ากัน แต่มีเวลาในการซึมน้ำน้อยกว่าผ้าก่อนเคลือบ (Original) เพียง 1 วินาที ซึ่งผู้สวมใส่ไม่สามารถสังเกตเห็นในการใช้งานปกติ ถือว่ามีผลน้อยมากสำหรับในช่วงการนำไปใช้งานที่ต้องการเวลาในการซึมน้ำที่รวดเร็วสำหรับผ้าในงานสปา

4. เมื่อถ่ายภาพจากกล้อง SEM พบว่าผ้าที่ผ่านกระบวนการทั้งสองกระบวนการ หลังการขัดถู (แห้ง-เปียก) และหลังการชัก (20 ครั้ง) พบว่าอนุภาคไมโคร/นาโนซิลค์ยังคงหลงเหลืออยู่บนผ้าที่ตกแต่ง สอดคล้องกับร้อยละน้ำหนักสูญเสียของผ้าหลังการทดลองการขัดถู และหลังการทดลองการชักล้าง ที่มีค่าร้อยละน้ำหนักสูญเสียน้อยมาก

5. สรุปว่าผ้าที่ผ่านการตกแต่ง Two Steps Spraying Method อาจจะถูกเลือกใช้มากกว่า One Step Spraying Method เนื่องจากสารยึดติดถูกพ่นเคลือบบนผืนผ้าเต็มพื้นที่ของผิวหน้าผ้า จึงน่าจะมีการยึดติดที่ดีกว่า การผสมสารละลายสารยึดติดที่ผสมอนุภาคไมโคร/นาโนซิลค์ครั้งเดียว

6. งานวิจัยนี้มีความเป็นไปได้ในการนำไปใช้ตกแต่งผ้าสำหรับงานสปา แต่ในอนาคต ควรเพิ่มปริมาณของอนุภาคไมโคร/นาโนซิลค์ เพื่อให้สามารถเห็นความแตกต่างอย่างชัดเจนในภาพถ่ายจากกล้อง SEM

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้สนับสนุนทุนวิจัยโดยสถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอ ประจำปีงบประมาณ 2550 (สำหรับทุนวิจัยขั้นต้นการศึกษากระบวนการผลิตอนุภาคนาโนเซรีซินและไฟโบรอิน) และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี สำหรับเครื่องมือ อุปกรณ์ครุภัณฑ์ต่างๆ ที่นำมาศึกษาค้นคว้าวิจัยต่อยอดกระบวนการผลิตเชิงอุตสาหกรรม ตั้งแต่ปี 2551 จนถึงปัจจุบัน

เอกสารอ้างอิง

- [1] Sonthisombat, A. 1993, M.Sc.Dissertation, The University of Leeds, UK.
- [2] Sonthisombat, A. 1997, Ph.D.Thesis, The University of Leeds, UK.
- [3] อภิชาติ สนธิสมบัติ สมนึก สังข์หนู สิงห์โตสกุลเชมฤทัย ปิยะพงษ์ อัครศุภฤกษ์ ชินพิทยพรหมหิตาทร โครงการวิจัย “การผลิตอนุภาคนาโนเซรีซิน และ ไฟโบรอิน เพื่อนำไปใช้ในการตกแต่งบนเสื้อผ้ากีฬา” สนับสนุนทุนวิจัยโดยสถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอ ประจำปีงบประมาณ 2550 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปทุมธานี หน้า 1-278.
- [4] พวงผกา คุ่มสีไฉ และ ยิ่งมณี ตระกูลพั้ว การประชุมหาดใหญ่วิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 6 26 มิถุนายน 2558 มหาวิทยาลัยหาดใหญ่ หน้า 1524-1534.
- [5] อภิชาติ สนธิสมบัติ, 6 มกราคม 2558, กรรมวิธีการผลิตผงไหม (ไฟโบรอินและเซรีซิน) เพื่อใช้ในงานด้านสิ่งทอ การแพทย์ และเครื่องสำอาง, ประเทศไทย เลขที่อนุสิทธิบัตร 9418.

- [6] Robson, R.M., **Silk; Composition, Structure and Properties**, in **Handbook of Fiber Science and Technology**, Vol. IV, Ed. By Lewin, M., and Pearce, E.M., Marcel Dekker Inc., New York, 1985, pp 647-700.
- [7] อภิชาติ สนธิสมบัติ, **กระบวนการทางเคมีสิ่งทอ**, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล, ปทุมธานี, 2545 หน้า 1-327.
- [8] **ความหมายของการตกแต่งเชิงกล และเชิงเคมี** [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <http://www.ttcexpert.com/lesson4.html> (29 มีนาคม 2560).
- [9] ศรีณญา พันทุกษ์, นราวิชญ์ ทองแบน และ จุฑามาศ ฉายปรีชา, 2558. **การศึกษาเปรียบเทียบสารช่วยยิดเกาะไคโตซานที่สกัดจากเปลือกกุ้งสดพันธุ์ขาวเคลือบลงบนเสื้อผ้ากีฬาเส้นใยพอลิเอสเตอร์ 100 % เพื่อต้านทานแบคทีเรีย**. ปรินญาณพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [10] **Spray Gun** [Online] Available: <http://anestiwata.com/wp-content/uploads/2011/12/manual-catalog.pdf> (13 May 2017).
- [11] **เทคนิคการฟั่นสี** [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <https://goo.gl/uSWrfv> (13 พฤษภาคม 2560).
- [12] **โปรแกรม SemAfore 5.2** [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <http://semafore.software.informer.com/5.2/> (29 มีนาคม 2560).

การใช้ประโยชน์เศษเมลามีนเป็นมวลรวมละเอียดในคอนกรีตมวลเบา

Utilization of Melamine Formaldehyde Waste as Fine Aggregate in Lightweight Concrete

ศศิประภา ศรีไชโย¹ เณลิ้มชัย ไชยธรรตน์² และสมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์³
sasiprapa.sri@gmail.com¹, chalermchai.c@eat.kmutnb.ac.th², somsaksi@sut.ac.th³

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการใช้ประโยชน์เศษเมลามีนที่เป็นของเสียจากอุตสาหกรรมผลิตผลิตภัณฑ์บนโต๊ะอาหาร โดยเศษเมลามีนจากอุตสาหกรรมถูกนำมาแทนที่ทรายร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ด้วยอัตราส่วนเศษเมลามีนแบบเม็ด ต่อแบบฝุ่นเท่ากับ 100:0, 90:10, 85:15, 75:25, 50:50 และ 0:100 กำหนดอัตราส่วนน้ำต่อนูนซีเมนต์เท่ากับ 0.5 ควบคุมความหนาแน่น 1,100 kg/m³ และ 1,300 kg/m³ ขึ้นตัวอย่างอายุบ่ม 28 วัน จะถูกทดสอบกำลังรับแรงอัด การดูดซึมน้ำ และการนำความร้อน ผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับคอนกรีตมวลเบาควบคุม การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดมีสาเหตุมาจากขนาดผลึกที่เพิ่มขึ้น รูปร่าง พื้นผิวสัมผัส ของเศษเมลามีนที่มีรูปร่างมีเหลี่ยมมุมและมีผิวสัมผัสหยาบ การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนมีค่าเพิ่มขึ้น เช่นกัน เนื่องจากเศษเมลามีนมีค่าการดูดซึมน้ำมากกว่าทราย การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีน มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย อัตราส่วนเศษเมลามีนแบบเม็ดต่อแบบฝุ่น 90:10 เป็นสูตรผสมที่มีกำลังรับอัด และการดูดซึมน้ำ ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ (มอก. 2601-2556) ทั้งสอง ความหนาแน่น และสามารถที่จะรีไซเคิลเศษเมลามีนได้ทั้งสองรูปแบบ โดยเฉพาะเศษเมลามีนแบบเม็ดที่มีปริมาณมาก ในกระบวนการผลิต ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าเศษเมลามีนสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงสมบัติคอนกรีตมวลเบา ให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นและลดการใช้ทราย โดยใช้ประโยชน์ของเสียโดยการนำกลับมาใช้ใหม่และสามารถพัฒนาต่อยอด ให้ผลิตคอนกรีตมวลเบาในเชิงพาณิชย์ต่อไป

คำสำคัญ: คอนกรีตมวลเบา, มวลรวม, เศษเมลามีน

¹ นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

² อาจารย์ประจำสาขาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกลและยานยนต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตระยอง

³ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Abstract

This paper presents utilization of melamine formaldehyde waste from Tableware industry. The melamine waste was used to replace sand in lightweight concrete as aggregates by 25 wt%. The melamine waste was in the form of granule and powder, mixing ratio between melamine waste granule to powder were 100:0, 90:10, 85:15, 75:25, 50:50 and 0:100. Concrete sample was prepared with water to cement ratio of 0.5 and the density of lightweight concrete are 1,100 kg/m³ and 1,300 kg/m³. The samples of lightweight concrete, at curing age 28 days, were tested for compressive strength, water absorption and thermal conductivity. From the testing results of lightweight concrete containing melamine waste compared with reference lightweight concrete, it was found that, the compressive strength was increased. It could be considered due to better gradation of aggregate, angular shape and rough texture of melamine. Water absorption was also increased which is due to the melamine waste has higher water absorption than sand. Thermal conductivity was slightly increased, it might be discussed from more compacted of concrete containing melamine waste. The sample with 10% of melamine powder (MFGP90:10) was conform to Thai Industrial Standard (TIS 2601-2556) in term of compressive strength and water absorption. This results yielded the opportunity to utilize melamine waste granule together with melamine waste powder. Therefore, it could be concluded that the melamine waste could be used to replace sand to produce lightweight concrete, which not only improves the strength of lightweight concrete but also reduces the use of natural resources (sand). It could also take advantage of melamine waste by recycling and can be developed for commercial production of lightweight concrete in the future.

Keywords: Lightweight concrete, Aggregate, Melamine waste

1. บทนำ

เมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์นิยมนำมาใช้ผลิตผลิตภัณฑ์เครื่องใช้บนโต๊ะอาหารด้วยวิธีการอัดขึ้นรูป ซึ่งระหว่างกระบวนการอัดขึ้นรูปเกิดของเสียที่เรียกว่าเศษครีบบเมลามีนในปริมาณมาก นอกจากนี้ยังมีกระบวนการตกแต่งผิวผลิตภัณฑ์ด้วยการขัดผิว ซึ่งทำให้เกิดฝุ่นผงเมลามีนขึ้นในปริมาณน้อย ของเสียเหล่านี้ถูกต้องกำจัดด้วยวิธีการเผาหรือฝังกลบที่อาจก่อให้เกิดค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น [1]

การกำจัดขยะมูลฝอยจำพวกพลาสติกโดยการใช้ซีเมนต์ เป็นการใช้ซีเมนต์เป็นตัวยึดประสาน ซึ่งซีเมนต์จะแทรกตัวไปในช่องว่างระหว่างอนุภาค และเมื่อได้รับน้ำซีเมนต์จะเริ่มยึดเกาะกับอนุภาคอื่น ๆ จนแข็งตัว [2]

นักวิจัยหลายท่านได้ทดลองนำพลาสติกชนิดต่าง ๆ มากำจัดด้วยซีเมนต์ ตัวอย่างเช่นการนำเศษขวดพอลิเอทิลีน เทเลฟทาเลต (PET) มาใช้เป็นมวลรวมในคอนกรีต ซึ่งทำให้คอนกรีตมีน้ำหนักเบา แต่มีค่ากำลังรับแรงอัดลดลง [3, 4, 5] พลาสติกเมลามีนก็เป็นที่น่าสนใจและถูกนำมาศึกษาโดยการนำมาผสมในคอนกรีต ซึ่งช่วยกำจัดของเสียและลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดอีกด้วย [2, 6]

คอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์เป็นนวัตกรรมใหม่ที่นำฟองโพรที่สร้างจากวิธีเชิงกลมาผสมกับซีเมนต์เพสต์ ทำให้เกิดฟองอากาศจำนวนมากในเนื้อคอนกรีต คอนกรีตจึงมีคุณสมบัติเด่นในเรื่องน้ำหนักเบา มีความแข็งแรงและสามารถกันความร้อนได้ดีกว่าคอนกรีตทั่วไป คอนกรีตที่มีน้ำหนักเบาจะช่วยลดน้ำหนักของโครงสร้าง [7]

จากงานวิจัยของ (Chalermchai C. et.al, 2016) [8] ศึกษาการใช้เศษเมลามีนเป็นมวลรวมในคอนกรีตมวลเบา เศษเมลามีนได้จากการกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนผลิตภัณฑ์จากเมลามีน เมื่อเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์ถูกนำไปวางบนแม่แบบและอัดขึ้นรูปด้วยความร้อนเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์จะหลอมกระจายเต็มแม่แบบและล้นออกมานอกแม่แบบเป็นเศษครีบริบติดกับขอบของผลิตภัณฑ์ ซึ่งเรียกว่าเศษครีบริบ โดยมีปริมาณมากถึงหนึ่งตันต่อวัน และเศษเมลามีนอีกหนึ่งรูปแบบได้จากการกระบวนการขัดตกแต่งผลิตภัณฑ์ หลังจากผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปแล้ว จะทำให้เกิดเศษฝุ่นผงที่เรียกว่าเศษเมลามีนแบบฝุ่น จากการนำเศษเมลามีนใช้ประโยชน์ในคอนกรีตมวลเบา พบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะนำเศษเมลามีนทั้งสองรูปแบบมาแทนที่ทรายบางส่วนในการผสมคอนกรีตมวลเบา ทั้งยังส่งผลดีต่อความแข็งแรงของคอนกรีต ซึ่งการผสมเศษเมลามีนแบบฝุ่นให้ความแข็งแรงมากกว่าเศษเมลามีนแบบเม็ด (จากเศษครีบริบ) แต่ในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เมลามีนมีเศษครีบริบเมลามีนที่เป็นของเสียถึง 95 เปอร์เซ็นต์ เทียบกับจำนวนของเสียทั้งหมด หากสามารถกำจัดเศษครีบริบเมลามีนได้มากขึ้นและกำจัดเศษฝุ่นไปพร้อมกัน จะสามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดและช่วยกำจัดขยะของเสีย

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะศึกษาการกำจัดเศษเมลามีนทั้งสองแบบโดยการนำไปแทนที่ทรายบางส่วน และศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนผสมระหว่างเศษเมลามีนแบบเม็ดและแบบฝุ่นต่อสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลเบา เซลลูลาร์ จุดมุ่งหมายสูงสุดคือคอนกรีตมวลเบาเซลลูลาร์ผสมเศษเมลามีนนี้สามารถพัฒนาไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์เพื่อเพิ่มมูลค่าเศษเมลามีนและได้คอนกรีตที่มีคุณภาพเพิ่มมากขึ้น

2. วิธีการทดลอง

2.1 วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยได้แก่ ปูนซีเมนต์ ทราย น้ำ เศษเมลามีน และสารเพิ่มฟอง

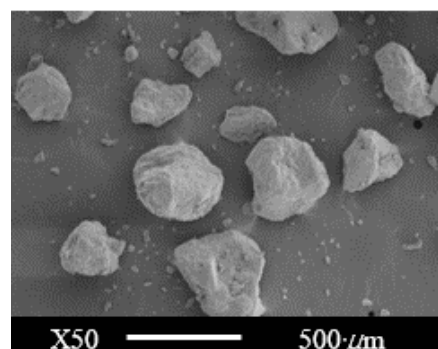
2.1.1 ปูนซีเมนต์เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน ASTM C150-12

2.1.2 ทรายแม่น้ำเป็นมวลรวมละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C33 ผ่านการร่อนด้วยตะแกรงร่อนเบอร์ 16 สมบัติทางกายภาพและทางกลแสดงในตารางที่ 1 ทรายมีรูปร่างเป็นก้อนมนผิวเรียบ ดังแสดงในรูปที่ 1 และการกระจายตัวของขนาดของทรายแสดงในรูปที่ 6

2.1.3 น้ำเป็นน้ำประปาสะอาด ไม่มีสิ่งปนเปื้อน

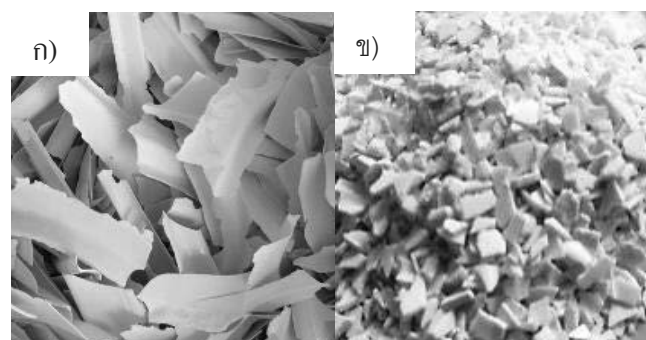
2.1.4 สารเพิ่มฟองเป็นสารเพิ่มฟองแบบสังเคราะห์โปรตีนชนิดประจุลบ

2.1.5 เมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์เป็นเศษเมลามีนที่ได้รับการสนับสนุนจากบริษัท ศรีไทย ซุปเปอร์แวร์ จำกัด (มหาชน) เศษเมลามีนที่ได้จากการบวนการผลิตผลิตภัณฑ์บนโต๊ะอาหาร แบ่งเป็น 2 รูปแบบคือ เศษเมลามีนแบบเม็ดและเศษเมลามีนแบบฝุ่น



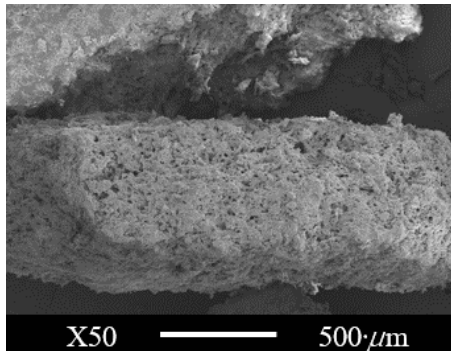
รูปที่ 1 ภาพขยายของทราย

เศษครีบริบเมลามีนแสดงในรูปที่ 2ก จะถูกนำไปบดก่อนนำมาผสมในคอนกรีตในรูปของเศษเมลามีนแบบเม็ด ดังแสดงในรูปที่ 2ข ลักษณะของเศษเมลามีนแบบเม็ดมีผิวหยาบ มีเหลี่ยมมุม ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 2 ก) เศษครีบริบเมลามีน ข) เศษเมลามีนแบบเม็ด

เศษฝุ่นผงเมลามีนจะถูกนำไปร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 140 เพื่อคัดแยกสิ่งแปลกปลอมออกจากเศษฝุ่นและได้เป็นเศษเมลามีนแบบฝุ่นดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งเศษฝุ่นมีลักษณะเป็นผงสีขาว และในรูปที่ 5 เป็นภาพขยายของเศษเมลามีนแบบฝุ่น

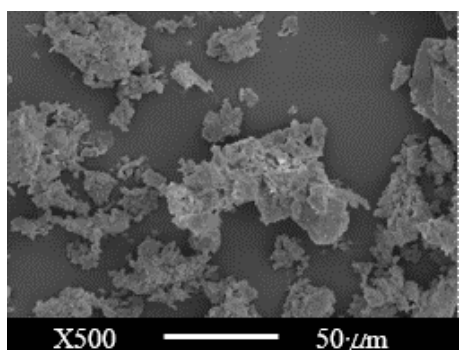


รูปที่ 3 ภาพขยายของเศษเมลามีนแบบเม็ด (บริเวณขอบ)

เศษเมลามีนแบบเม็ดมีสมบัติทางกายภาพและทางกลแสดงในตารางที่ 1 การกระจายตัวของเศษเมลามีนแบบเม็ดและเศษเมลามีนแบบเม็ดต่อแบบฝุ่น แสดงในรูปที่ 6 ตามมาตรฐานการหาขนาดคละของมวลรวมละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C33



รูปที่ 4 เศษเมลามีนแบบฝุ่น



รูปที่ 5 ภาพขยายของเศษเมลามีนแบบฝุ่น

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพและทางกลของมวลรวม

คุณสมบัติ วัสดุ		โมดูลัส ความ ละเอียด	ความถ่วง จำเพาะ	การ ดูดซึมน้ำ
ทราย		1.42	2.52	0.33
เศษเมลามีนเม็ด		3.56	1.50	5.51
เศษ เมลามีน แบบเม็ดต่อ แบบฝุ่น	50:50	1.84	-	-
	75:25	2.70	-	-
	85:15	3.40	-	-
	90:10	3.45	-	-
เศษเมลามีนฝุ่น		ขนาด อนุภาค** 34 μm	1.15*	146*

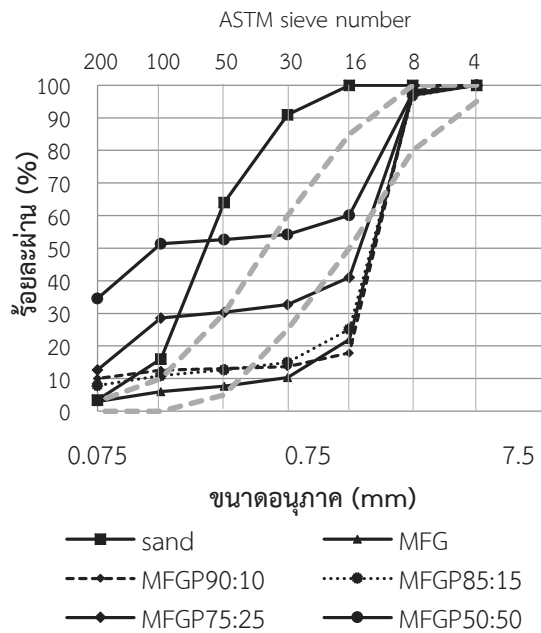
* ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C128

** เศษเมลามีนแบบฝุ่นไม่สามารถทดสอบหาโมดูลัสความละเอียดตาม ASTM C33 ได้ เนื่องจากมีขนาดเล็ก

2.2 การเตรียมตัวอย่าง

การผสมคอนกรีตมวลเบาใช้อัตราส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 3 สัญลักษณ์ที่ใช้คือ MF0 คอนกรีตมวลเบาควบคุม, MFG คอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนแบบเม็ด MFP คอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนแบบฝุ่น, MFGP คอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนแบบเม็ดและแบบฝุ่น (อัตราส่วนเม็ด: ฝุ่น 50:50, 75:25, 85:15, 90:10) รูปแบบของตัวอย่างสำหรับการทดสอบมีดังนี้ ขึ้นตัวอย่างรูปลูกบาศก์ขนาด 50x50x50 mm³ ใช้สำหรับการทดสอบกำลังรับแรงอัด ตามมาตรฐาน ASTM C109 ขึ้นตัวอย่างรูปลูกบาศก์ขนาด 100x100x100 mm³ ใช้สำหรับการทดสอบการดูดซึมน้ำตามมาตรฐาน ASTM C642 และขึ้นตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 69 mm สูง 65 mm ใช้สำหรับการทดสอบการนำความร้อนตามมาตรฐาน ASTM E1225

--- : region of fine aggregate from ASTM C33



รูปที่ 6 การกระจายตัวของมวลรวมละเอียด

ตารางที่ 2 ชนิดของคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ (มอก. 2601-2556)

ชนิด	ความหนาแน่น (kg/m ³)	แรงอัด (MPa)	ดูดซึมน้ำ (%)
C9	801-900	2.0	25
C10 C12	901-1,000 1,001-1,200	2.5	23
C14	1,201-1,400	5.0	20

ขั้นตอนการผสมคอนกรีตเริ่มจากการเตรียมส่วนผสมโดยนำไปผสมด้วยเครื่องผสม เทส่วนผสมเริ่มจากปูนซีเมนต์ ทราย เมลามีน และน้ำ ตามลำดับ เมื่อส่วนผสมเข้ากันแล้วจึงสร้างฟองโฟมด้วยเครื่องฉีดโฟมก่อนนำไปผสมในคอนกรีต วิธีการนี้เรียกว่า Preform-foamed method การกำหนดความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาจะอ้างอิงตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ มาตรฐานเลขที่ มอก. 2601-2556 ดังแสดงในตารางที่ 2 งานวิจัยนี้จะกำหนดความหนาแน่นเท่ากับ 1,100 kg/m³ (C12) และ 1,300 kg/m³ (C14) เมื่อผสมได้ความหนาแน่นตามที่กำหนดแล้วจะเทลงแบบหล่อตัวอย่างตามขนาดที่ใช้ทดสอบ กระทั่งคอนกรีตด้วย

แท่งกลมเพื่อให้คอนกรีตเต็มแบบหล่อ หลังจากการหล่อคอนกรีตผ่านไป 1 ชั่วโมงจะทำการปาดหน้าตัวอย่างให้เรียบ แล้วทิ้งคอนกรีตให้แข็งตัวภายใต้อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้คอนกรีตแข็งตัว เมื่อครบกำหนดจะทำการถอดแบบหล่อออก และนำไปบ่มด้วยการพันฟิล์มพลาสติกจนครบอายุบ่ม 28 วัน

ตารางที่ 3 ส่วนผสมคอนกรีตโดยน้ำหนัก (kg)

สัญลักษณ์	ซีเมนต์	ทราย	เศษเมลามีน		น้ำ
			เม็ด	ฝุ่น	
MF0	6.56	6.56	0	0	2.94
MFG	6.56	4.92	1.64	0	2.94
MFGP 90:10	6.56	4.92	1.42	0.22	2.94
MFGP 85:15	6.56	4.92	1.39	0.25	2.94
MFGP 75:25	6.56	4.92	1.23	0.41	2.94
MFGP 50:50	6.56	4.92	0.82	0.82	2.94
MFP	6.56	4.92	0	1.64	2.94

หมายเหตุ ทรายถูกแทนที่ด้วยเศษเมลามีนร้อยละ 25 โดยน้ำหนักด้วยอัตราส่วนเศษเมลามีนแบบเม็ดต่อแบบฝุ่นเท่ากับ 100:0, 90:10, 85:15, 75:25, 50:50 และ 0:100

2.3 การทดสอบตัวอย่าง

การทดสอบกำลังรับแรงอัด ใช้ชิ้นตัวอย่างรูปลูกบาศก์ขนาด 50x50x50 mm³ ที่อายุบ่ม 28 วัน วัดขนาดของตัวอย่างและนำไปทดสอบโดยใช้เครื่องกดคอนกรีตแบบไฮดรอลิก กำลังรับแรงอัดเป็นสัดส่วนระหว่างแรงกดสูงสุดต่อพื้นที่หน้าตัดในหน่วย MPa

การทดสอบการดูดซึมน้ำ ใช้ตัวอย่างรูปลูกบาศก์ขนาด 100x100x100 mm³ ที่อายุบ่ม 28 วัน นำตัวอย่างไปแช่น้ำเป็นเวลา 48 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดจะนำไปชั่งเพื่อหาน้ำหนักเปียก และนำตัวอย่างเดิมไปอบที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดนำออกจากเตาอบ ปล่อยให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้องแล้วชั่งน้ำหนักแห้ง ซึ่งการดูดซึมน้ำหาได้ดังนี้

$$\text{การดูดซึมน้ำ (\%)} = \frac{(\text{นน.เปียก} - \text{นน.แห้ง})}{\text{นน.เปียก}} \times 100 \quad (1)$$

การทดสอบการนำความร้อน ใช้ตัวอย่างรูปทรงกระบอก ที่อายุบ่ม 28 วัน นำไปทดสอบในเครื่องทดสอบการนำความร้อน โดยให้ความร้อน (Q) บนผิวสัมผัสด้านหนึ่ง และผิวสัมผัสอีกด้านหนึ่งจะถูกทำให้มีอุณหภูมิต่ำกว่า เพื่อให้เกิดการถ่ายความร้อน จากนั้นทำการวัดอุณหภูมิสองจุดเพื่อหาผลต่างของอุณหภูมิ (ΔT) วัดขนาดพื้นที่หน้าตัดตัวอย่าง (A) และระยะการถ่ายเทความร้อน (L) สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) ในหน่วย W/mK ได้ดังนี้

$$k = \frac{QL}{A\Delta T} \quad (2)$$

3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

การรีไซเคิลเศษเมลามีนโดยนำไปแทนที่ทรายเป็นมวลรวมในคอนกรีตมวลเบา พบว่าสามารถนำมาผสมในคอนกรีตมวลเบาได้ และผลการทดสอบคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีน ได้ผลดังต่อไปนี้

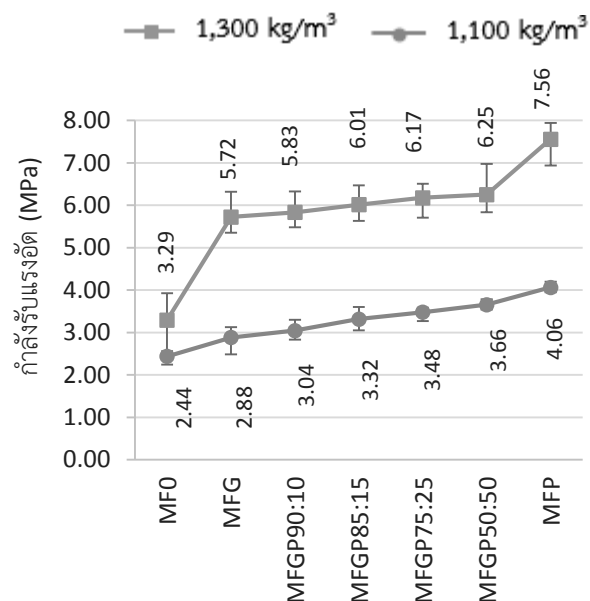
3.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแสดงในรูปที่ 7 ที่ความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาเท่ากับ 1,100 kg/m³ และ 1,300 kg/m³ ตามลำดับ พบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตมวลเบาควบคุม (MFO) ความหนาแน่นส่งผลโดยตรงต่อกำลังรับแรงอัด เนื่องจากคอนกรีตมวลเบาที่มีความหนาแน่นมาก จะมีการอัดตัวแน่น ทำให้สามารถรับแรงอัดได้ดีขึ้น ดังนั้นกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาที่มีความหนาแน่น 1,300 kg/m³ จึงมีค่ามากกว่าคอนกรีตมวลเบาที่มีความหนาแน่น 1,100 kg/m³

คอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนแบบฝุ่นมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุด เนื่องจากเศษเมลามีนแบบฝุ่นมีขนาดอนุภาคเล็กจึงสามารถแทรกตัวในช่องว่างระหว่างวัสดุอื่นได้ดี นอกจากนี้เศษเมลามีนแบบฝุ่นยังมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่าเศษเมลามีนแบบเม็ด จึงยึดเกาะกับซีเมนต์เพสต์ได้มากขึ้นทำให้คอนกรีตมวลเบามีการอัดตัวแน่น ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น ในส่วนของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนแบบเม็ดมีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ

คอนกรีตควบคุม (MFO) เนื่องจากเศษเมลามีนแบบเม็ดมีการกระจายตัวและวางตัวในทิศทางเดียวกันกับการรับแรงอัดช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับคอนกรีต นอกจากนี้เศษเมลามีนแบบเม็ดยังมีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมและผิวหยาบเมื่อเทียบกับทราย ส่งผลให้การยึดเกาะกับซีเมนต์เพสต์ได้ดีขึ้น ทำให้คอนกรีตสามารถรับแรงอัดได้เพิ่มขึ้น

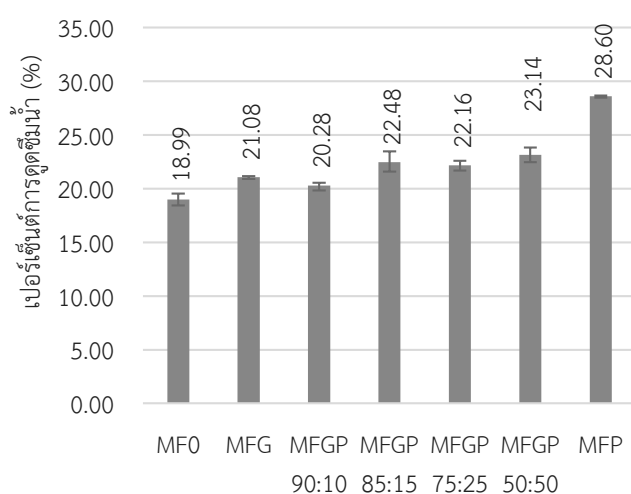
คอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนแบบเม็ดมีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่าคอนกรีตมวลเบาผสมเมลามีนแบบฝุ่น เนื่องจากเศษเมลามีนแบบฝุ่นมีผิวขรุขระทั้งอนุภาค (แสดงในรูปที่ 5) และมีพื้นที่ผิวมากกว่าจึงสามารถยึดเกาะกับซีเมนต์เพสต์ได้ดีกว่า อย่างไรก็ตามค่ากำลังรับแรงอัดยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน มอก. 2601-2556



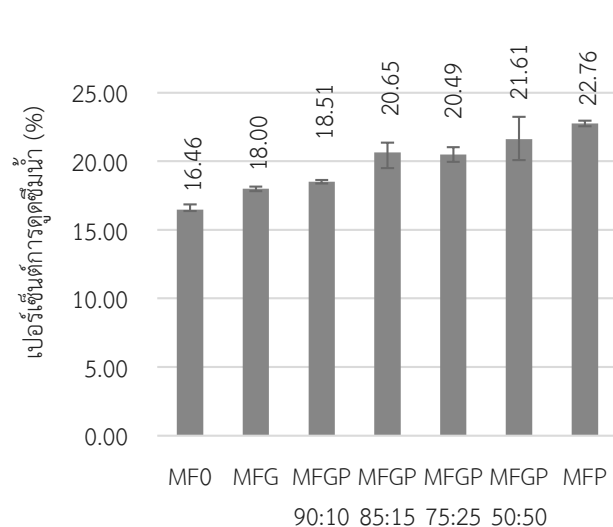
รูปที่ 7 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาความหนาแน่น 1,100 kg/m³ และ 1,300 kg/m³

จากการใช้มวลรวมผสมของเศษเมลามีนทั้งสองแบบกับทรายพบว่าเมื่อสัดส่วนของเศษเมลามีนแบบฝุ่นเพิ่มมากขึ้น จะทำให้คอนกรีตมวลเบามีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น โดยค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนแบบเม็ดและแบบฝุ่นอยู่ระหว่างคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนแบบเม็ดกับคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนแบบฝุ่น เนื่องมาจากขนาดคละของแต่ละสัดส่วนดีขึ้นตามมาตรฐาน ASTM C33 (ดังแสดงในรูปที่ 6) นอกจากนี้ยังเป็นผลมาจากเศษเมลามีนแบบฝุ่นที่มีอนุภาคขนาดเล็ก

สามารถลดช่องว่างระหว่างมวลรวมและซีเมนต์เพสต์ลง
ทั้งยังสามารถยึดเกาะกับซีเมนต์เพสต์ได้ดี จึงทำให้
คอนกรีตมีการอัดตัวแน่นและยึดเกาะกันได้ดีขึ้น การ
เปรียบเทียบคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนกับมาตรฐาน
คอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ มอก.2601-2556
กำหนดให้กำลังรับแรงอัดสำหรับความหนาแน่น 1,100
kg/m³ และ 1,300 kg/m³ ไม่น้อยกว่า 2.5 MPa และ
5 MPa ตามลำดับ จากผลการทดสอบในรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่า
คอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนทุกสูตรผสมผ่านเกณฑ์ที่
มาตรฐาน มอก. กำหนดทั้งสองความหนาแน่น



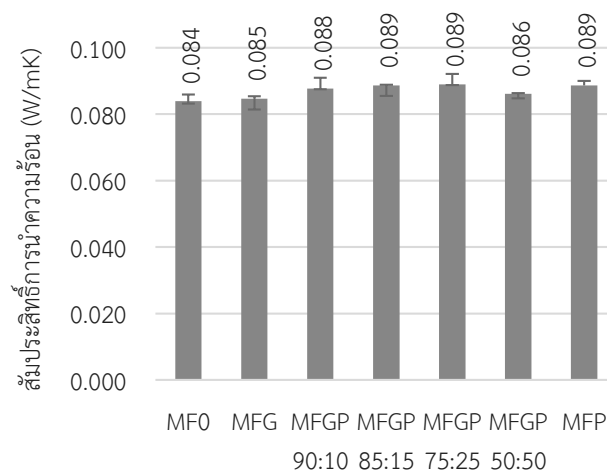
รูปที่ 8 การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาความหนาแน่น 1,100 kg/m³



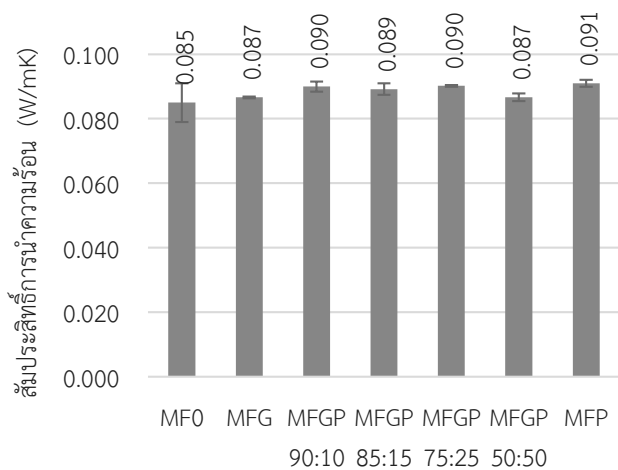
รูปที่ 9 การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาความหนาแน่น 1,300 kg/m³

3.2 การทดสอบการดูดซึมน้ำ

ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบา
แสดงในรูปที่ 8 และรูปที่ 9 พบว่าคอนกรีตมวลเบาผสม
เศษเมลามีนมีค่าการดูดซึมน้ำสูงกว่าคอนกรีตมวลเบา
ควบคุม (MF0) เนื่องจากเศษเมลามีนมีค่าการดูดซึมน้ำ
มากกว่าทราย ดังแสดงในตารางที่ 1 การเปรียบเทียบ
คอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนกับมาตรฐานคอนกรีต
มวลเบาแบบเติมฟองอากาศ มอก. 2601-2556 กำหนด
ค่าการดูดซึมน้ำสำหรับความหนาแน่น 1,100 kg/m³ และ
1,300 kg/m³ ไม่มากกว่า 23% และ 20% ตามลำดับ จาก
ผลการทดสอบในรูปที่ 8 ความหนาแน่น 1,100 kg/m³
จะเห็นได้ว่าสูตรผสมที่ผ่านเกณฑ์ 5 สูตรคือ MF0, MFG,
MFGP 90:10, MFGP 85:15 และ MFGP 75:25 และ
รูปที่ 9 ความหนาแน่น 1,300 kg/m³ มีสูตรผสมที่ผ่านเกณฑ์
3 สูตรคือ MF0, MFG และ MFGP 90:10 การเพิ่มสัดส่วน
ของเศษเมลามีนแบบฟุ้ง ทำให้การดูดซึมน้ำของคอนกรีต
มวลเบาผสมเศษเมลามีนเพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากเศษเมลา
มินแบบฟุ้งมีคุณสมบัติการดูดซึมน้ำสูงกว่าเศษเมลามีน
แบบเม็ดและทราย (ในตารางที่ 1) จึงส่งผลให้การดูดซึมน้ำ
ของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนแบบฟุ้งเพิ่มขึ้นด้วย



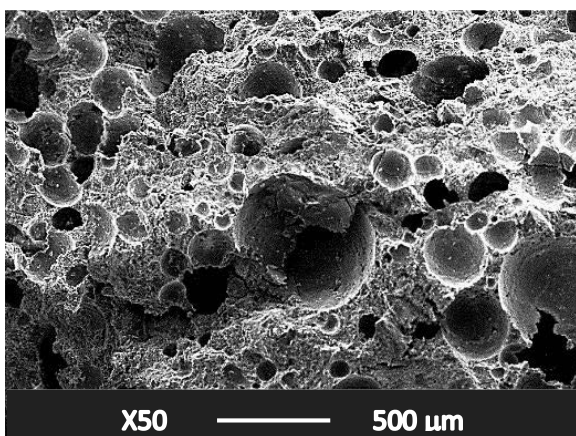
รูปที่ 10 การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาความหนาแน่น
1,100 kg/m³



รูปที่ 11 การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาความหนาแน่น 1,300 kg/m³

3.3 การทดสอบการนำความร้อน

ผลการทดสอบการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาแสดงในรูปที่ 10 และ รูปที่ 11 พบว่าคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเทียบกับคอนกรีตมวลเบาควบคุม และคอนกรีตมวลเบาความหนาแน่น 1,100 kg/m³ มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนในช่วง 0.084-0.089 W/mK ซึ่งต่ำกว่าคอนกรีตมวลเบาความหนาแน่น 1,300 kg/m³ ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนในช่วง 0.085-0.091 W/mK เล็กน้อย การเพิ่มขึ้นของค่าการนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนเกี่ยวข้องกับปริมาณรูพรุนในคอนกรีตมวลเบา หากมีปริมาณรูพรุนน้อย คอนกรีตมวลเบาจะเกิดการอัดตัวแน่นมากขึ้น อีกทั้งเศษเมลามีนยังช่วยลดช่องว่างภายในคอนกรีตและสามารถยึดเกาะเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น จึงส่งผลให้ค่าการนำความร้อนเพิ่มขึ้น



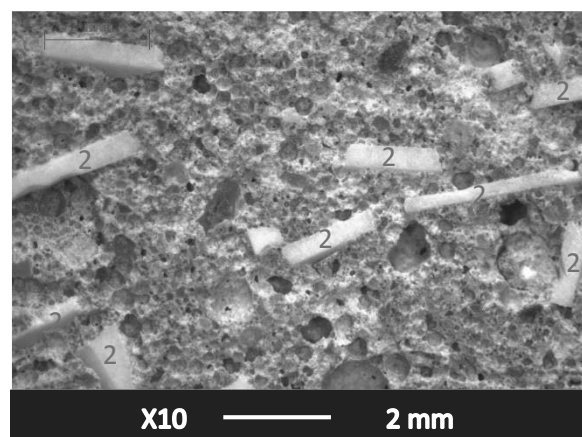
รูปที่ 12 ภาพขยายคอนกรีตมวลเบาด้วย SEM (50x)

3.4 โครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตมวลเบา

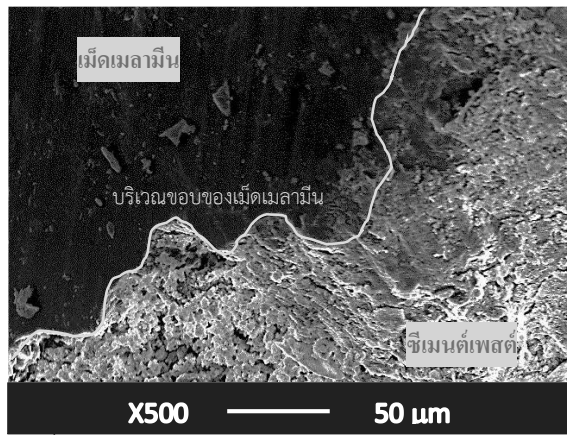
การวิเคราะห์ภาพถ่ายผิวกะเทาะ (Fractured surface) ของคอนกรีตมวลเบา MFGP90:10 ความหนาแน่น 1,300 kg/m³ ด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงในรูปที่ 12 พบว่าโพรงอากาศสามารถกระจายตัวได้ดี ทำให้คอนกรีตมีน้ำหนักเบา

การวิเคราะห์ภาพถ่ายหน้าตัดเรียบ (Polished section) ของคอนกรีตมวลเบาด้วยกล้องจุลทรรศน์ออปติคอลดังแสดงในรูปที่ 13 พบว่าการนำเศษเมลามีนมาแทนที่ทรายบางส่วนทำให้คอนกรีตมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น แต่เศษเมลามีนแบบฝุ่นมีขนาดเล็กมากจึงไม่สามารถมองเห็นได้ เศษเมลามีนแบบเม็ดมีการกระจายตัวทั่วทั้งหน้าตัดได้ค่อนข้างดีและส่วนใหญ่จะวางตัวในแนวตั้งฉาก

การวิเคราะห์ภาพถ่ายผิวกะเทาะของคอนกรีตมวลเบาด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงในรูปที่ 14 พบว่าการยึดเกาะระหว่างเศษเมลามีนแบบเม็ดกับซีเมนต์เพสต์สามารถยึดเกาะกันได้ดี เนื่องจากบริเวณขอบของเศษเมลามีนแบบเม็ดมีผิวหยาบ และการดูดซึมน้ำของเศษเมลามีนทำให้บริเวณขอบเกิดไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ซีเมนต์เพสต์จึงยึดเกาะกับเศษเมลามีนได้ดีขึ้น จึงส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา ทั้งนี้การดูดซึมน้ำของเมลามีนยังช่วยลดน้ำส่วนเกินภายในคอนกรีตไม่ให้เกิดเป็นช่องว่าง ทำให้คอนกรีตแน่นขึ้น



รูปที่ 13 ภาพขยายคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนแบบเม็ด และแบบฝุ่น ด้วยกล้องจุลทรรศน์ออปติคอล (1= ซีเมนต์เพสต์ผสมเศษเมลามีนฝุ่น, 2 = เม็ดเมลามีน)



รูปที่ 14 ภาพขยายคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนแบบเม็ด และแบบฝุ่น ด้วย SEM (500x)

4.สรุปผลการทดลอง

การใช้ประโยชน์เศษเมลามีนโดยการแทนที่ทรายเป็นมวลรวมละเอียดผสมในคอนกรีตมวลเบา สามารถปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตได้ดังนี้

1) กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนเพิ่มขึ้น เนื่องจากเศษเมลามีนแบบเม็ดมีลักษณะผิวหยาบ รูปร่างมีเหลี่ยมมุม และการดูดซึมน้ำของเศษเมลามีนทำให้บริเวณขอบมีความชื้นและเกิดไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ส่งผลให้ซีเมนต์เพสต์ยึดกับเศษเมลามีนได้ดีขึ้น และเศษเมลามีนแบบฝุ่นมีขนาดอนุภาคเล็ก และมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากกว่าเศษเมลามีนแบบเม็ด จึงสามารถแทรกตัวในช่องว่างระหว่างวัสดุอื่นได้ดี ทำให้คอนกรีตมีอัตราส่วนเพิ่มขึ้น และเศษเมลามีนแบบเม็ดสามารถกระจายได้ดีและมีการวางตัวในแนวตั้ง ซึ่งเป็นทิศทางเดียวกันกับการรับแรงอัด จึงช่วยเสริมแรงให้คอนกรีตรับแรงอัดได้มากขึ้น

2) การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตมวลเบาควบคุม เนื่องจากเศษเมลามีนมีค่าการดูดซึมน้ำมากกว่าทราย ทำให้มีการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น

3) การนำความร้อนของคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนเบามีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับคอนกรีตมวลเบาควบคุม เนื่องจากภายในคอนกรีตมวลเบาผสมเศษเมลามีนมีเนื้ออัดแน่นมากขึ้น จึงนำความร้อนได้มากขึ้น

4) อัตราส่วนเศษเมลามีนแบบเม็ดต่อแบบฝุ่น 90:10 เป็นสูตรผสมที่มีกำลังรับอัดและการดูดซึมน้ำผ่าน

ตามเกณฑ์มาตรฐาน มอก. 2601-2556 และสูตรผสมนี้ยังสามารถใช้เศษเมลามีนได้ทั้งสองรูปแบบ โดยเฉพาะเศษเมลามีนแบบเม็ดที่มีปริมาณมากในกระบวนการผลิต ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าเศษเมลามีนสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงสมบัติคอนกรีตมวลเบาให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นและลดการใช้ทราย โดยใช้ประโยชน์ของเสีย นำกลับมาใช้ใหม่และสามารถพัฒนาต่อยอดให้ผลิตคอนกรีตมวลเบาในเชิงพาณิชย์ต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีและสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัยและสนับสนุนค่าใช้จ่ายในการทำวิจัย และขอขอบคุณบริษัท ศรีไทย ซุปเปอร์แวร์ จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์เศษเมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์

เอกสารอ้างอิง

- [1] Siwadamrongpong S. & Aphirakmethawong, J., (2015). Effect of Particle Size and Content of Waste Melamine Formaldehyde on Mechanical Properties of High Density Polyethylene Composites. In The 9th South East Asian Technical University Consortium (SEATUC). Suranaree University of Technology, 27-30 July 2015 Surasammanakarn
- [2] Hasan S. Dweik, Mohamed M. Ziara and Mohamed S. Hadidoun, (2008). Enhancing Concrete Strength and Thermal Insulation Using Thermoset Plastic Waste. International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials Volume 57,635-656
- [3] C. Albano, N. Camacho, M. Hernández, A. Matheus, A. Gutiérrez, (2009). Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios. Waste Management 29, 2707-2716.

- [4] Semiha AkÇaözoğlu, Cengiz Duran Atiş, Kubilay AkÇaözoğlu, (2010). An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete. Waste management 30, 285-290.
- [5] Amir M. Azhdarpour, Mohammed R. Nikoudel, Milad Taheri., (2016). The effect of using polyethylene terephthalate particles on physical and strength-related properties of concrete; a laboratory evaluation. Construction and Building Material 109, 55-62.
- [6] Phaiboon P., Mallika P., (2007). Reuse of thermosetting plastic waste for lightweight concrete. Waste Management 28, 1581-1588.
- [7] Khamphée J., Theerawat S., Prinya C., (2011). Cellular Lightweight Concrete Containing Pozzolan Materials. Procedia Engineering 14, 1157–1164.
- [8] Chaitongrat, C. & Siwadamrongpong, S. (2018). Recycling of melamine formaldehyde waste as fine aggregate in lightweight concrete. Songklanakarin Journal of Science and Technology Vol. 40 No. 1 (January-February, 2018). IN PRESS

การบำบัดสีและซีโอดีของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก Removal of Color and COD from Dyestuff Industry by Photocatalytic Process

ธรรมศักดิ์ โรจน์วิรุฬห์¹, สันญา สิริวิทยาปกรณ², อรวรรณ โรจน์วิรุฬห์³, อมเรศ บกสุวรรณ⁴, สุขุม ลิปิเลิศ⁵
thammasak@rmutt.ac.th¹, fengsys@ku.ac.th², orawan_r@rmutt.ac.th³,
teerit8@yahoo.com⁴, sukhom.l@en.rmutt.ac.th⁵

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสี และ COD ของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาฟิล์มบาง 4 ชนิด ได้แก่ TiO_2 , $0.3\%\text{Fe-TiO}_2$, $0.5\%\text{Fe-TiO}_2$ และ $0.7\%\text{Fe-TiO}_2$ โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดรังสีอัลตราไวโอเลตชนิดเอ ซึ่งทำการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีและซีโอดีของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมดังกล่าว 2 ลักษณะ ได้แก่ น้ำเสียก่อนและหลังผ่านการบำบัดโดยระบบบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม สำหรับผลการศึกษาการบำบัดสีและซีโอดีของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมด้วยกระบวนการดังกล่าว พบว่า การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาฟิล์มบาง $0.5\%\text{Fe-TiO}_2$ ในกระบวนการโฟโตคะตะลิติกมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีและซีโอดีของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมสูงสุด โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีและซีโอดีในน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัดน้ำเสีย เท่ากับ 14.48% และ 29.29% ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีและซีโอดีในน้ำเสียหลังผ่านการบำบัดโดยระบบบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม เท่ากับ 72.11% และ 54.22% ตามลำดับ ในระยะเวลาการบำบัด 180 นาที และเมื่อทำการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกในการบำบัดซีโอดีในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดโดยระบบบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาฟิล์มบาง $0.5\%\text{Fe-TiO}_2$ ซึ่งให้ค่าประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสูงสุด พบว่า จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเป็นไปตามรูปแบบสมการ Langmuir Hinshelwood ที่ใช้ในการอธิบายปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาใช้แสง

คำสำคัญ: การบำบัดน้ำเสียขั้นสูง โฟโตออกซิเดชัน โซล-เจล อุตสาหกรรมสิ่งทอ

Abstract

This research aims to study the efficiency of color and COD removal in wastewater from dyestuff industry by photocatalytic process under UVA light irradiation. Four types of thin film photocatalyst including TiO_2 , $0.3\%\text{Fe-TiO}_2$, $0.5\%\text{Fe-TiO}_2$ and $0.7\%\text{Fe-TiO}_2$ were prepared by sol-gel method. The wastewater used in this study for photocatalytic activity test comprised of pre- and post-treatment wastewater from the wastewater treatment plant of dyestuff industry. The results of photocatalytic activity tests indicated that the $0.5\%\text{Fe-TiO}_2$ thin film photocatalyst was the most

^{1,3,4,5} อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

² อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

effective in color and COD removal with the efficiency of 14.48% and 29.29% for pre-treatment wastewater and with the efficiency of 72.11% and 54.22% for post-treatment wastewater at 180 minutes. Finally, the kinetics of photocatalytic reactions were able to describe by the Langmuir Hinshelwood model, which is a common model used to describe the kinetics of reactions that involved photocatalyst.

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

1. บทนำ

ปัจจุบันปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะมลพิษทางน้ำที่เกิดจากการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมอย่างต่อเนื่อง ซึ่งอุตสาหกรรมสิ่งทอและฟอกย้อมเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่ก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำเป็นอันดับต้น ๆ เนื่องจากต้องใช้น้ำในทุกขั้นตอนของกระบวนการผลิต ทั้งนี้ลักษณะสมบัติของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมดังกล่าว ซึ่งผลกระทบต่อระบบนิเวศทางน้ำ ได้แก่ อุณหภูมิสูง สี และสารอินทรีย์ ตลอดจนส่งผลกระทบต่อการทำงานของสัตว์น้ำเนื่องจากมีปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำสูง ทำให้ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำลดลง [1, 2] ซึ่งปัญหาและอุปสรรคของการบำบัดทั้งจากอุตสาหกรรมดังกล่าวโดยส่วนใหญ่ไม่สามารถบำบัดเสียออกมาได้ เนื่องจากเสียส่วนใหญ่ มักมีองค์ประกอบของมีสารไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างอะโรมาติกซึ่งเป็นส่วนประกอบที่ย่อยสลายได้ยาก [3, 4] ซึ่งกระบวนการบำบัดน้ำเสียดังกล่าวที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันทั้งกระบวนการบำบัดทางชีวภาพและกระบวนการทางเคมียังคงมีข้อจำกัด คือ ไม่สามารถบำบัดเสียในน้ำเสีย หรือบำบัดแล้วทำให้เกิดสารอินทรีย์ที่เป็นพิษได้ สำหรับกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่สามารถบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีหลากหลายกระบวนการ ได้แก่ กระบวนการโอโซนชัน กระบวนการเพนตัน กระบวนการก่อก้อนทางไฟฟ้าและเคมี กระบวนการดูดซับ กระบวนการเมมเบรน และกระบวนการบำบัดทางชีวภาพ เป็นต้น [5-7]

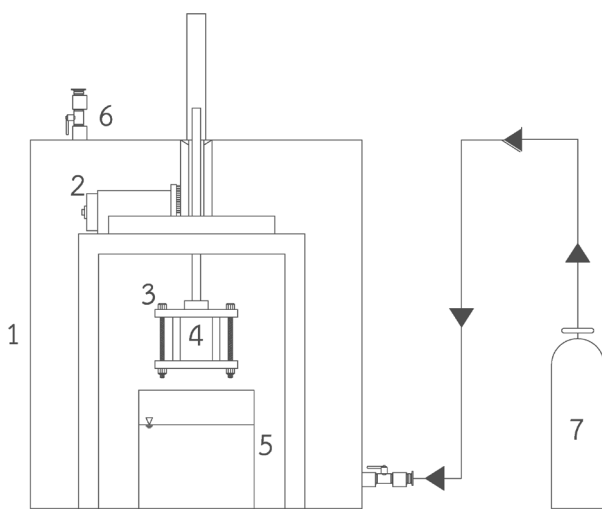
กระบวนการโฟโตคะตะลิติกเป็นกระบวนการหนึ่งซึ่งศักยภาพหลากหลายในงานด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม อาทิ การยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ การบำบัดมลพิษทางอากาศและทางน้ำ เป็นต้น [8-10] นอกจากนี้กระบวนการดังกล่าวยังสามารถปรับใช้กับแหล่งกำเนิดแสงธรรมชาติ มีอุปกรณ์และขั้นตอนในการเดินระบบที่ไม่ซับซ้อน ทั้งนี้ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้รับความนิยมสำหรับกระบวนการโฟโตคะตะลิติก เนื่องจากมีคุณสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดี ราคาถูก และมีความเป็นพิษต่ำ ซึ่งทำให้ปลอดภัยจากสารตกค้างในขั้นตอนของกระบวนการบำบัด [11, 12] นอกจากนี้ TiO_2 ยังสามารถเพิ่มศักยภาพเพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีขึ้นด้วยการเติมสารเจือปนอื่น ๆ ได้ โดยมีคุณสมบัติในการเกิดปฏิกิริยาที่ดี และมีความคงตัวสูง [13]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นในการศึกษาการใช้กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม โดยใช้กระบวนการโฟโตคะตะลิติก (Photocatalytic Process) ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาแสง (Photocatalyst) และใช้แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดรังสีอัลตราไวโอเลตชนิดเอ ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อหาประสิทธิภาพการบำบัดสีและซีโอทีในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมก่อนและหลังผ่านระบบบำบัดน้ำเสียระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกทิเวเตดสลัดจ์ (Activated Sludge) โดยมีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาฟิล์มบาง 4 ชนิด ได้แก่ TiO_2 , $0.3\%\text{Fe-TiO}_2$, $0.5\%\text{Fe-TiO}_2$ และ $0.7\%\text{Fe-TiO}_2$ เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะลิติก รวมทั้งทำการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกในการบำบัดซีโอทีในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมดังกล่าว

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาฟิล์มบาง

ตัวเร่งปฏิกิริยาฟิล์มบางที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ TiO_2 , $0.3\%\text{Fe-TiO}_2$, $0.5\%\text{Fe-TiO}_2$ และ $0.7\%\text{Fe-TiO}_2$ ซึ่งเตรียมด้วยวิธีโซลเจล ในส่วนของการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 สามารถเตรียมได้โดยผสมไทเทเนียมเตตระไฮโดรพรอกไซด์ ($\text{C}_{12}\text{H}_{28}\text{O}_4\text{Ti}$, TTIP) กับสารละลายไอโซโพรพานอล ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$) อัตราส่วน 1:15 โดยปริมาตร ทำการปรับ pH ให้อยู่ระหว่าง 2-3 ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) และสำหรับการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาฟิล์มบางที่มีการเติมสารเจือปนหลัก ได้แก่ $0.3\%\text{Fe-TiO}_2$, $0.5\%\text{Fe-TiO}_2$ และ $0.7\%\text{Fe-TiO}_2$ สามารถเตรียมได้ด้วยการเติมสารประกอบเฟอร์ริกไนเตรท ($\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) ในสารละลายผสมไทเทเนียมเตตระไฮโดรพรอกไซด์กับสารละลายไอโซโพรพานอลที่มีการปรับ pH แล้วในอัตราส่วน 0.3%, 0.5% และ 0.7% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ตามลำดับ หลังจากนั้นทำการกวนผสมในสภาวะปิดที่ไม่มีออกซิเจนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำไปแช่เย็นทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง [14]



- | | |
|--------------------------|-------------------------|
| 1. โครงอุปกรณ์เคลือบผิว | 5. ภาพขณะบรรจุสารเคลือบ |
| 2. มอเตอร์ไฟฟ้า | 6. วาล์วแก๊ส |
| 3. ถาดบรรจุชิ้นงานเคลือบ | 7. ถังแก๊ส N_2 |
| 4. Petri dish | |

รูปที่ 1 ชุดอุปกรณ์เคลือบผิวตัวเร่งปฏิกิริยา

ทั้งนี้ขั้นตอนในการเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาฟิล์มบางที่เตรียมขึ้นลงบน Petri dish สามารถทำได้โดยวิธีจุ่มเคลือบผิว (Dip coating) ในอุปกรณ์เคลือบผิวดังรูปที่ 1 โดยทำการเคลือบผิวจำนวน 5 ชั้น ทั้งนี้หลังจากการจุ่มเคลือบในแต่ละขั้นของการเคลือบผิวแล้วจะนำ Petri dish ไปอบที่อุณหภูมิ 100, 200, 250, 350 และ 500 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

2.2 การวิเคราะห์ลักษณะกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

ในการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาฟิล์มบางชนิดต่าง ๆ ซึ่งทำการศึกษาในพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ ลักษณะพื้นผิว ขนาดอนุภาค ความขรุขระเฉลี่ย พื้นที่ผิวปรากฏ และขนาดช่องว่างพลังงาน สำหรับรายละเอียดของวิธีวิเคราะห์ และอุปกรณ์ในการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ วิธีวิเคราะห์และอุปกรณ์

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์	อุปกรณ์
ลักษณะพื้นผิว	AFM	Asylum Research MFP-3DBIO
ขนาดอนุภาค ความขรุขระเฉลี่ยและพื้นที่ผิวปรากฏ	Software	Gwyddion version 2.22
ขนาดช่องว่างพลังงาน	UV-Vis spectrometer	Lambda 650 Perkin Elmer

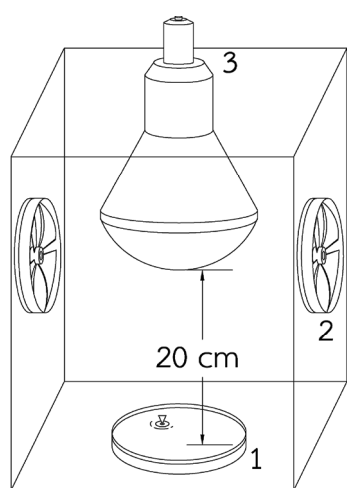
2.3 การหาประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีโอดี

นำน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมมาวิเคราะห์ลักษณะสมบัติต่าง ๆ เบื้องต้น ทั้งในส่วนที่เป็นน้ำเสียก่อนและหลังผ่านการบำบัดโดยระบบบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม โดยพารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์น้ำเสียดังกล่าวแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์และวิธีวิเคราะห์น้ำเสีย

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

สำหรับการทดลองหาประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีโอติ โดยใช้ น้ำเสียก่อนและหลังผ่านการบำบัดโดยระบบบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมเติมลงใน Petri dish ปริมาตร 50 mL ที่เคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาฟิล์มบางและทำการให้แสงจากแหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเลตชนิดเอด้วยหลอด UVA ยี่ห้อ OSRAM ขนาด 300 วัตต์ ความเข้มแสงเท่ากับ $1,000 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ ในเครื่องปฏิกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 2 หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีและซีโอติในช่วงเวลา 10, 30, 60, 120, 150 และ 180 นาที ตามลำดับ ทั้งนี้การหาค่าประสิทธิภาพการบำบัดสีและซีโอติจะทำการทดลองในชุดควบคุมในสถานะที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาฟิล์มบางแต่ไม่มีการให้แสงเพื่อใช้เปรียบเทียบกับผลการทดลองในชุดทดลอง



1. Petri dish เคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาฟิล์มบาง
2. พัดลมระบายความร้อน
3. แหล่งกำเนิดแสง

รูปที่ 2 ถึงปฏิกรณ์สำหรับทดลอง

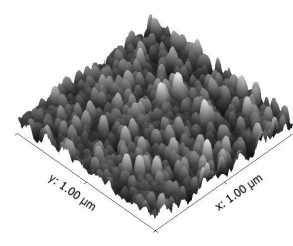
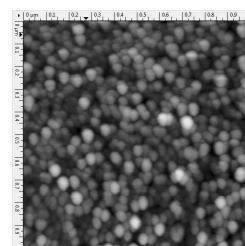
3. ผลการทดลองและวิจารณ์

3.1 ลักษณะกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

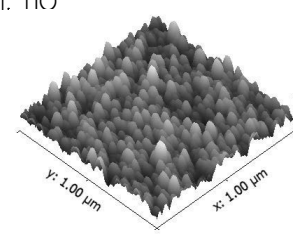
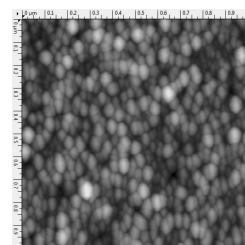
การวิเคราะห์ลักษณะทางภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาฟิล์มบางทั้ง 4 ชนิด โดยลักษณะพื้นผิวทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาฟิล์มบางทั้งหมดด้วยอุปกรณ์ Atomic Force Microscopy (AFM) รุ่น Asylum Research MFP-3DBIO ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 3

จากรูปที่ 3 แสดงให้เห็นถึงลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาฟิล์มบางทั้ง 4 ชนิด ที่เคลือบอยู่บนพื้นผิวดวกลางที่ยึดเกาะ โดยสามารถสังเกตเห็นการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วบริเวณพื้นผิวและมีขนาดอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ยึดเกาะมีขนาดใกล้เคียงกัน

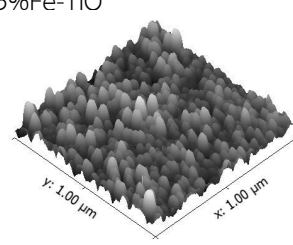
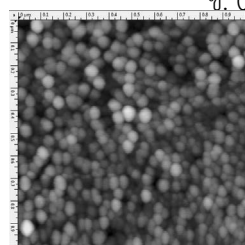
ทั้งนี้จากผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาฟิล์มบางทั้งหมดด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Gwyddion version 2.22 สามารถวิเคราะห์หาขนาดอนุภาค ค่าความขรุขระเฉลี่ย (RMS) และพื้นที่ผิวปรากฏของตัวเร่งปฏิกิริยาฟิล์มบางทั้งหมดได้ ดังแสดงในตารางที่ 4



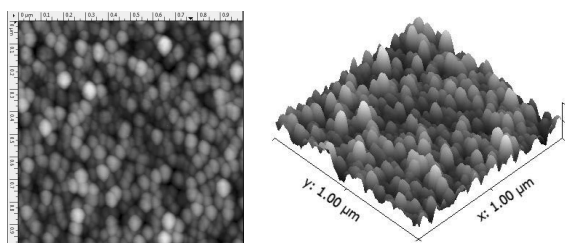
ก. TiO_2



ข. 0.3%Fe- TiO_2



ค. 0.5%Fe- TiO_2



ค. 0.7%Fe-TiO₂

รูปที่ 3 ลักษณะพื้นผิวทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตารางที่ 4 ขนาดอนุภาค ค่าความขรุขระเฉลี่ย (RMS) และพื้นที่ผิวปรากฏของตัวเร่งปฏิกิริยา

พารามิเตอร์	ตัวเร่งปฏิกิริยาฟิล์มบาง			
	TiO ₂	0.3%Fe-TiO ₂	0.5%Fe-TiO ₂	0.7%Fe-TiO ₂
ขนาดอนุภาค (nm)	30-90	45-90	50-80	40-90
RMS (nm)	4.81	3.02	1.87	4.03
พื้นที่ผิวปรากฏ (μm ²)	1.10	1.04	1.02	1.06

จากตารางที่ 4 เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาฟิล์มบางทั้งหมดในส่วนขนาดอนุภาค ค่าความขรุขระเฉลี่ย (RMS) และพื้นที่ผิวปรากฏ พบว่า ขนาดของอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาฟิล์มบางทั้งหมดที่เตรียมขึ้นมีขนาดอยู่ในระดับนาโน โดยตัวเร่งปฏิกิริยาฟิล์มบาง TiO₂, 0.3%Fe-TiO₂, 0.5%Fe-TiO₂ และ 0.7%Fe-TiO₂ มีขนาดอนุภาคตั้งแต่ 30-90 nm มีค่าความขรุขระเฉลี่ย เท่ากับ 4.81, 3.02, 1.87 และ 4.03 ตามลำดับ และมีพื้นที่ปรากฏในพื้นที่ที่ทำการเคลือบผิวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาฟิล์มบาง ขนาด 1 μm² เท่ากับ 1.10, 1.02, 1.04 และ 1.06 μm² ตามลำดับ

สำหรับการวิเคราะห์ขนาดช่องว่างของตัวเร่งปฏิกิริยาฟิล์มบางทั้งหมดด้วยอุปกรณ์ UV-Vis spectrometer รุ่น Lambda 650 Perkin Elmer ซึ่งสามารถหาขนาดช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยาฟิล์มบางทั้งหมดได้ ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ขนาดช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ขนาดช่องว่างพลังงาน (eV)
TiO ₂	3.24
0.3%Fe-TiO ₂	3.18
0.5%Fe-TiO ₂	3.11
0.7%Fe-TiO ₂	3.01

เมื่อพิจารณาขนาดช่องว่างพลังงานซึ่งเป็นคุณสมบัติเชิงแสงของตัวเร่งปฏิกิริยาฟิล์มบางทั้ง 4 ชนิด พบว่าการเติมสารเจือปนเหล็กลงในตัวเร่งปฏิกิริยาฟิล์มบาง TiO₂ ส่งผลให้ขนาดช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยามีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนซึ่งสัมพันธ์กับอัตราส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรของสารเจือปนที่ใช้กับปริมาตรของสารละลาย TiO₂ จากผลการเติมสารเจือปนเหล็กดังกล่าวส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาตอบสนองต่อแสงในช่วงความยาวคลื่นที่กว้างขึ้น อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ (Valance band) ถูกกระตุ้นไปสู่แถบการนำ (Conduction band) ได้ง่ายขึ้นและใช้พลังงานในการกระตุ้นเนื่องจากขนาดช่องว่างพลังงานมีขนาดลดลงซึ่งจะส่งผลต่อแนวโน้มการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิสติกเป็นไปในทิศทางที่ดีขึ้น [15-17]

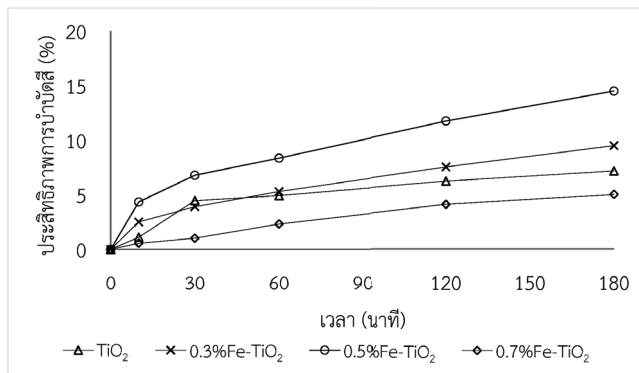
3.2 ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีโอดี

ผลการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติต่าง ๆ เบื้องต้นทั้งในส่วนที่เป็นน้ำเสียก่อนและหลังผ่านการบำบัดโดยระบบบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม แสดงดังตารางที่ 6 จากข้อมูลลักษณะสมบัติน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมเมื่อพิจารณาในส่วนของค่าสีและซีโอดีของน้ำเสียดังกล่าวทั้งในส่วนก่อนและหลังผ่านการบำบัดโดยระบบบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมฟอกย้อม พบว่า น้ำเสียดังกล่าวมีค่าสีและซีโอดีเกินมาตรฐานน้ำทิ้งที่กำหนดตามประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรม [18]

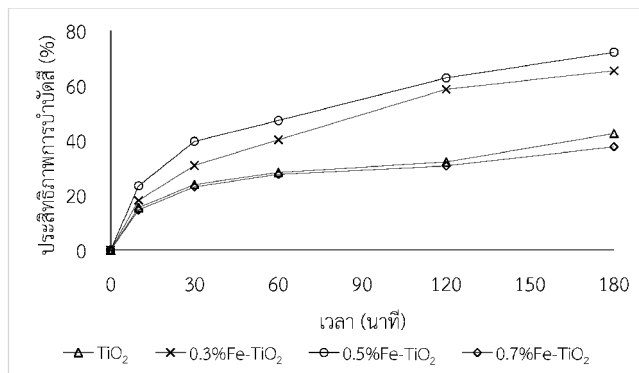
ตารางที่ 6 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฯ

พารามิเตอร์	ก่อนผ่านระบบบำบัด	หลังผ่านระบบบำบัด	มาตรฐานน้ำทิ้ง
สี (ADMI)	644.0	460.0	300.0
COD (mg/L)	460.0	139.2	120.0
pH	9.2	8.7	5.5-9.0
SS (mg/L)	311.0	16.5	£ 50.0
TDS (mg/L)	463.0	150.0	£ 3,000

สำหรับผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการบำบัดสีของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่เวลาต่าง ๆ กรณีที่ใช้น้ำเสียก่อนและหลังผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดของอุตสาหกรรมฟอกย้อมแสดงดังรูปที่ 4 และ 5



รูปที่ 4 ประสิทธิภาพการบำบัดสีกรณีที่ใช้ น้ำเสียก่อนผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดฯ



รูปที่ 5 ประสิทธิภาพการบำบัดสีกรณีที่ใช้ น้ำเสียหลังผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดฯ

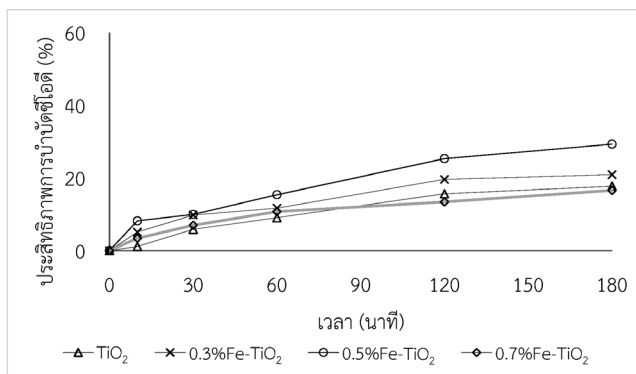
เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการบำบัดสีด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกในส่วนของการบำบัดสีก่อนผ่านการบำบัดพบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดสีด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกมีค่าต่ำมาก เนื่องจากน้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำเสียก่อนผ่านการบำบัดฯ ซึ่งมีความเข้มของสีในน้ำเสียค่อนข้างสูง ทำให้การส่องผ่านของแสงอัลตราไวโอเลตชนิดเอไปยังตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 4 ชนิดมีค่าลดต่ำลงจนกระทั่งมีพลังงานไม่มากพอที่จะทำให้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกเกิดได้ดี [19, 20] ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสีด้วยกระบวนการดังกล่าวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาฟิล์มบางทั้ง 4 ชนิด พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาฟิล์มบาง 0.5%Fe-TiO₂ มีประสิทธิภาพในกระบวนการโฟโตคะตะลิติกสูงสุด เท่ากับ 14.48% ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองในชุดควบคุมในสถานะที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาฟิล์มบางแต่ไม่มีการให้แสง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ในกรณีที่ทำการทดลองในชุดควบคุมปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกไม่สามารถเกิดได้ แต่ยังคงพบประสิทธิภาพในการบำบัดสีเนื่องจากโมเลกุลของสีในน้ำเสียเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา [20]

ในทางกลับกันสำหรับกรณีการหาประสิทธิภาพการบำบัดสีด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกในส่วนของการบำบัดสีหลังผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดของอุตสาหกรรมฟอกย้อม พบว่า กระบวนการดังกล่าวสามารถบำบัดสีในน้ำเสียดังกล่าวให้เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรม เนื่องจากความเข้มของสีในน้ำเสียอยู่ในระดับที่แสงอัลตราไวโอเลตชนิดเอยังคงสามารถส่องผ่านไปยังตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกสามารถเกิดได้อย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดสีด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกในกรณีที่ใช้น้ำเสียดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่าในกรณีแรก โดยผลจากการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสีด้วยกระบวนการดังกล่าวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาฟิล์มบางทั้ง 4 ชนิด ยังคงพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาฟิล์มบาง 0.5%Fe-TiO₂ มีประสิทธิภาพในกระบวนการโฟโตคะตะลิติกสูงสุดเช่นเดียวกัน ทั้งนี้ข้อมูลประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่เวลาต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 7

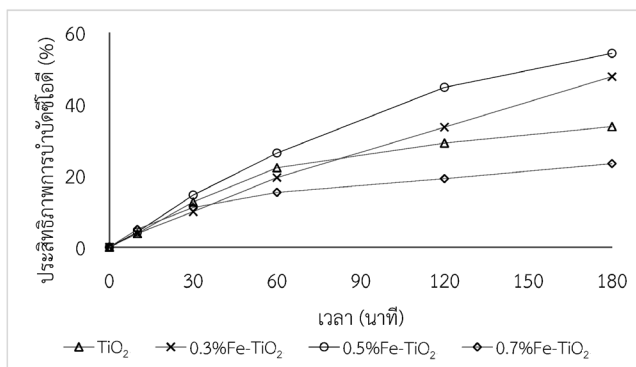
ตารางที่ 7 ประสิทธิภาพการบำบัดสี

น้ำเสีย	ตัวเร่งปฏิกิริยา	ประสิทธิภาพการบำบัดสี (%)	
		ชุดทดลอง	ชุดควบคุม
ก่อนเข้าระบบบำบัด	TiO ₂	7.15	1.34
	0.3%Fe-TiO ₂	9.47	1.96
	0.5%Fe-TiO ₂	14.48	2.23
	0.7%Fe-TiO ₂	5.01	1.25
หลังผ่านระบบบำบัด	TiO ₂	42.49	5.22
	0.3%Fe-TiO ₂	65.43	7.75
	0.5%Fe-TiO ₂	72.11	10.38
	0.7%Fe-TiO ₂	37.64	3.92

ในส่วนของประสิทธิภาพการบำบัดสีของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่เวลาต่าง ๆ กรณีที่ใช้น้ำเสียก่อนและหลังผ่านการบำบัดจากระบบบำบัดของอุตสาหกรรมฟอกย้อมแสดงดังรูปที่ 6 และ 7



รูปที่ 6 ประสิทธิภาพการบำบัดสีกรณีใช้น้ำเสียก่อนผ่านการบำบัดจากระบบบำบัด



รูปที่ 7 ประสิทธิภาพการบำบัดสีกรณีใช้น้ำเสียหลังผ่านการบำบัดจากระบบบำบัด

สำหรับประสิทธิภาพการบำบัดสีโดยใช้กระบวนการโฟโตคะตะลิติกในน้ำเสียในส่วนก่อนและหลังผ่านการบำบัดของอุตสาหกรรมฟอกย้อม พบว่า ผลการทดลองเป็นไปในทิศทางเดียวกับการบำบัดสีซึ่งประสิทธิภาพการบำบัดสีดีขึ้นกับความเข้มข้นของสีในน้ำเสียเช่นกัน ทำให้ความสามารถในการบำบัดสีโดยใช้กระบวนการโฟโตคะตะลิติกสำหรับการบำบัดน้ำเสียหลังผ่านการบำบัดมีประสิทธิภาพสูงกว่าการบำบัดน้ำเสียก่อนผ่านการบำบัดของอุตสาหกรรมฟอกย้อม โดยพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาฟิล์มบาง 0.5%Fe-TiO₂ มีประสิทธิภาพในกระบวนการโฟโตคะตะลิติกสูงสุดเช่นเดียวกันกับกรณีการบำบัดสี ทั้งนี้ข้อมูลประสิทธิภาพการบำบัดสีของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกที่เวลาต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ประสิทธิภาพการบำบัดสี

น้ำเสีย	ตัวเร่งปฏิกิริยา	ประสิทธิภาพการบำบัดสี (%)	
		ชุดทดลอง	ชุดควบคุม
ก่อนเข้าระบบบำบัด	TiO ₂	17.70	2.04
	0.3%Fe-TiO ₂	20.90	2.62
	0.5%Fe-TiO ₂	29.29	3.14
	0.7%Fe-TiO ₂	16.57	2.91
หลังผ่านระบบบำบัด	TiO ₂	34.00	3.86
	0.3%Fe-TiO ₂	47.71	2.46
	0.5%Fe-TiO ₂	54.22	3.39
	0.7%Fe-TiO ₂	23.43	2.42

จากผลการศึกษาทำให้สามารถสรุปได้ว่ากระบวนการโฟโตคะตะลิติกมีศักยภาพในการบำบัดสีและซีโอต์ได้ โดยกระบวนการดังกล่าวเหมาะสมสำหรับน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดข้างต้นโดยระบบบำบัดของอุตสาหกรรมฟอกย้อม ซึ่งกระบวนการดังกล่าวสามารถบำบัดสีในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดที่มีค่าสีเท่ากับ 460.0 ADMI

ทั้งนี้ค่าดังกล่าวยังคงมีค่าสีเกินมาตรฐานน้ำทิ้งซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานสีในน้ำทิ้งตามประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง การกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรม ซึ่งกำหนดให้การระบายน้ำเสียที่บำบัดแล้วออกจากโรงงานอุตสาหกรรมโดยเฉพาะกลุ่มอุตสาหกรรมสิ่งทอ พบว่าค่าสีในน้ำเสียที่ผ่านขั้นตอนการบำบัดสีด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกมีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานซึ่งกำหนดให้ค่าสีในน้ำทิ้งที่ระบายมีค่าต่ำกว่า 300 ADMI จนมีค่าอยู่ต่ำกว่าเกณฑ์ของมาตรฐานน้ำทิ้งโดยมีค่าสีหลังจากผ่านกระบวนการโฟโตคะตะลิติก เท่ากับ 128.29 ADMI

3.3 จลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตคะตะลิติก

สำหรับจลนพลศาสตร์ของกระบวนการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก สามารถอธิบายโดยสมการ Langmuir Hinshelwood (LH-model) [21, 22] ดังสมการที่ 1

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

ทั้งนี้สมการที่ LH-model เป็นสมการที่ใช้ในการอธิบายปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ซึ่งพิจารณาจาก 2 ปัจจัยที่มีบทบาทสำคัญในกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ได้แก่ ปฏิกิริยาการดูดซับและปฏิกิริยาการสลายตัว โดยสมการดังกล่าวสามารถจัดรูปสมการใหม่ได้ ดังสมการที่ 2

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

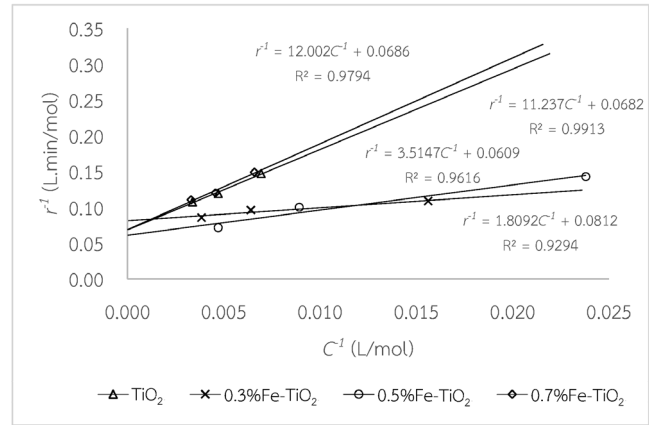
โดยที่

r = อัตราการเกิดปฏิกิริยา (mol/L-min)

C = ความเข้มข้นของสารที่เวลาเริ่มต้น (mol/L)

k = ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา (mol/L-min)

K = ค่าคงที่การปฏิกิริยาดูดซับ (L/mol)



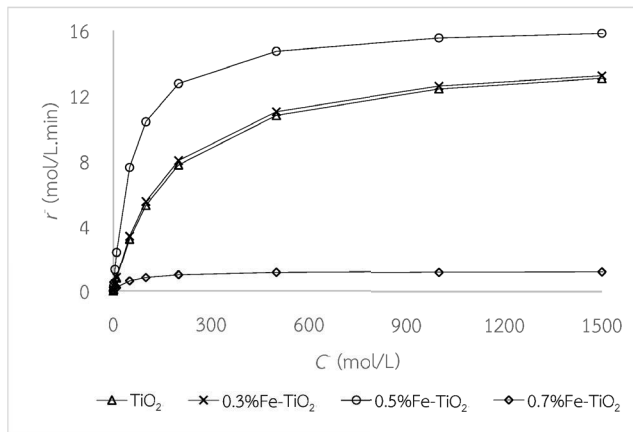
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่าง r กับ C ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง r กับ C ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกในการบำบัดสีในน้ำเสียที่ผ่านระบบบำบัดสามารถหาค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาและค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาดูดซับในปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาฟิล์มบางทั้ง 4 ชนิด ดังแสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาและค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาดูดซับในปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก

ตัวเร่งปฏิกิริยา	k	K
	(mol/L-min)	(L/mol)
TiO ₂	14.577	0.006
0.3%Fe-TiO ₂	14.663	0.006
0.5%Fe-TiO ₂	16.420	0.017
0.7%Fe-TiO ₂	12.315	0.045

เมื่อพิจารณาค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาและค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาดูดซับในปฏิกิริยาดังกล่าวและทำการนำค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาและค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาดูดซับที่วิเคราะห์ได้มาแทนค่าในสมการที่ 1 และทำการวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง r กับ C โดยพิจารณาปัจจัยที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของน้ำเสียเริ่มต้นที่มากขึ้นแสดงดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่าง r กับ C ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติก

สำหรับกราฟความสัมพันธ์ r กับ C ของปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกแสดงให้เห็นว่าหากมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของน้ำเสียเริ่มต้นแล้ว เมื่อนำน้ำเสียดังกล่าวมาบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติก ความเข้มข้นเริ่มต้นจะเป็นปัจจัยที่กำหนดอันดับของปฏิกิริยา โดยในกรณีที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นมีค่าต่ำลงส่งผลให้ค่า KC มีค่าน้อยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง และเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นมีค่าสูงมากขึ้นส่งผลให้ KC มีค่ามากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเข้าใกล้ปฏิกิริยาอันดับศูนย์ [21] อย่างไรก็ตามข้อจำกัดของปฏิกิริยาดังกล่าวในการบำบัดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนสีนั้น หากมีความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียมีค่าสูงจะส่งผลให้สีในน้ำเสียมีความเข้มข้นสูงขึ้น ซึ่งส่งผลกระทบต่อกระบวนการโฟโตคะตะลิติกเนื่องจากกระบวนการดังกล่าวใช้แสงเป็นปัจจัยหลักในการเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นหากความเข้มข้นของน้ำเสียที่นำมาบำบัดมีค่าสูง จะส่งผลให้เกิดการบดบังแสงและทำให้ปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดขึ้นได้ไม่ดี [20, 23]

ทั้งนี้ การเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกในกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาฟิล์มบางชนิดต่าง ๆ เมื่อพิจารณาค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา k พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5%Fe-TiO₂ มีค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาอื่นทั้ง 3 ชนิด TiO₂, 0.3%Fe-TiO₂ และ 0.7%Fe-TiO₂ ซึ่งส่งผลให้สามารถบำบัดน้ำเสียได้ดีที่สุดโดยมีค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา เท่ากับ 16.420 mol/L.min และมีค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาต่อตติพจน์ เท่ากับ 0.017 L/mol ตามลำดับ และเมื่อ

พิจารณาผลการทดลองทั้งหมด พบว่า ลักษณะทางกายภาพในส่วนของคุณาอนุภาคระดับนาโน การกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ มีพื้นที่ผิวเฉพาะ และขนาดช่องว่างพลังงาน นอกจากนี้ยังผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การเติมสารเจือปนในปริมาณที่สูงไม่ส่งผลกระทบต่อขนาดอนุภาค การกระจายตัว และพื้นที่ผิวเฉพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาฟิล์มบางบนพื้นผิวดวกล้างมากนัก แต่จะส่งผลกระทบโดยตรงกับขนาดช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยาอย่างชัดเจน โดยผลจากปริมาณของการเติมสารเจือปนหลักลงในตัวเร่งปฏิกิริยา TiO₂ ส่งผลให้ขนาดช่องว่างพลังงานลดลงอย่างชัดเจนซึ่งขนาดช่องว่างพลังงานที่มีการเติมสารเจือปนหลักในปริมาณมากกว่าจะมีขนาดช่องว่างพลังงานลดลงอย่างเห็นได้ชัด

แต่เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการบำบัดสีและซีโอดีในกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาฟิล์มบางที่เตรียมขึ้นทั้ง 4 ชนิด พบว่า ผลของการเติมสารเจือปนหลักส่งผลให้ขนาดช่องว่างพลังงานมีค่าลดลงซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกโดยการเติมสารเจือปนหลัก 0.3% และ 0.5% ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้น ในทางกลับกันแม้ว่าขนาดช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยาฟิล์มบาง 0.7%Fe-TiO₂ จะมีขนาดช่องว่างพลังงานน้อยที่สุด แต่ไม่ได้ส่งผลทำให้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกเกิดได้ดีขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการเติมสารเจือปนในปริมาณที่มากเกินไปส่งผลให้อิเล็กตรอน-โฮลที่ผิวหน้าถูกขัดขวางการปฏิกิริยารวมทั้งทำให้อิเล็กตรอน-โฮลเกิดการรวมตัวกันใหม่มากขึ้น ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกลดลง [24-25] นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตคะตะลิติกในการบำบัดซีโอดีในน้ำเสียดังกล่าว ส่งผลให้ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งในกระบวนการโฟโตคะตะลิติกเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาฟิล์มบาง 0.7%Fe-TiO₂ จึงมีค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาต่ำที่สุด แสดงให้เห็นว่า ในการเติมสารเจือปนใด ๆ ในตัวเร่งปฏิกิริยาหลักเพื่อจุดประสงค์ในการเพิ่มศักยภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตคะตะลิติกมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องพิจารณาถึงปริมาณสารเจือปนที่เหมาะสมเพื่อให้ปฏิกิริยาโฟโตคะตะลิติกดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพ

4. สรุป

จากผลการทดลองในการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าสามารถเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาฟิล์มบางที่เหมาะสมในการบำบัดสีและซีไอดีน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมได้ โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวมีคุณสมบัติทางกายภาพที่เหมาะสม ได้แก่ ขนาดอนุภาคระดับนาโน การกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ มีพื้นที่ผิวเฉพาะสูง และมีขนาดช่องว่างพลังงานแคบลง รวมทั้งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมในกระบวนการโฟโตคะตะลิติก

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย ประจำปี 2559-2560 และทำให้การดำเนินงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Motahare Ashrafi, Mansour Arab Chamjangali, Ghadamali Bagherian, and Nasser Goudarzi, 2017. "Application of Linear and Non-Linear Methods For Modeling Removal Efficiency of Textile Dyes From Aqueous Solutions Using Magnetic Fe₃O₄ Impregnated onto Walnut Shell", **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**. 171: 268-279.
- [2] Jun Fan, Haibo Li, Chendong Shuang, Wentao Li, and Aimin Li, 2014. "Dissolved Organic Matter Removal Using Magnetic Anion Exchange Resin Treatment on Biological Effluent of Textile Dyeing Wastewater", **Journal of Environmental Sciences**. 26, 8: 1567-1574.
- [3] Bo Chen, Yang Liu, Sijiang Chen, Xuesong Zhao, Xiangqi Meng, and Xuejun Pan, 2016. "Magnetically Recoverable Cross-Linked Polyethylenimine as a Novel Adsorbent

for Removal of Anionic Dyes with Different Structures from Aqueous Solution", **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**. 67: 191-201.

- [4] Mahmoud Roushani, Zahra Saedi, and Tahereh Musa beygi, 2016. "Anionic Dyes Removal from Aqueous Solution Using TMU-16 And TMU-16-NH₂ as Isorecticular Nanoporous Metal Organic Frameworks", **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**. 66: 164-171.
- [5] Yu-Chih Lin and Ho-Shan Lee, 2010. "Effects of TiO₂ Coating Dosage and Operational Parameters on a TiO₂/Ag Photocatalysis System for Decolorizing Procion Red MX-5B", **Journal of Hazardous Materials**. 179, 1-3: 462-470.
- [6] Ali Reza Amani-Ghadim, Shabnam Alizadeh, Fatemeh Khodam, and Zolfaghar Rezvani, 2015. "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**. 408: 60-68.
- [7] Deming Ge, Zequan Zeng, Moses Arowo, Haikui Zou, Jianfeng Chen, and Lei Shao, 2016. "Degradation of Methyl Orange by Ozone in the Presence of Ferrous and Persulfate Ions in a Rotating Packed Bed", **Chemosphere**. 146: 413-418.
- [8] Liquan Jing, Yuanguo Xu, Shuquan Huang, Meng Xie, Mingqiang He, Hui Xu, et al., 2016. "Novel magnetic CoFe₂O₄/Ag/Ag₃VO₄ composites: Highly efficient visible light photocatalytic and antibacterial activity", **Applied Catalysis B: Environmental**. 199: 11-22.

- [9] Lexuan Zhong and Fariborz Haghighat, 2015. "Photocatalytic Air Cleaners and Materials Technologies – Abilities and Limitations", **Building and Environment**. 91: 191-203.
- [10] Naofumi Ohtsu, Kento Yokoi, and Aki Saito, 2015. "Fabrication of a Visible-Light-Responsive Photocatalytic Antibacterial Coating on Titanium Through Anodic Oxidation in A Nitrate/Ethylene Glycol Electrolyte", **Surface and Coatings Technology**. 262: 97-102.
- [11] Esther Bailón-García, Abdelhakim Elmouwahidi, Miguel A. Álvarez, Francisco Carrasco-Marín, Agustín F. Pérez-Cadenas, and Francisco J. Maldonado-Hódar, 2017. "New Carbon Xerogel-TiO₂ Composites with High Performance as Visible-Light Photocatalysts for Dye Mineralization", **Applied Catalysis B: Environmental**. 201: 29-40.
- [12] Cui Lai, Man-Man Wang, Guang-Ming Zeng, Yun-Guo Liu, Dan-Lian Huang, Chen Zhang, et al., 2016. "Synthesis of Surface Molecular Imprinted TiO₂/graphene Photocatalyst and Its Highly Efficient Photocatalytic Degradation of Target Pollutant under Visible Light Irradiation", **Applied Surface Science**. 390: 368-376.
- [13] Rodrigo Pereira Cavalcante, Renato Falcao Dantas, Bernardí Bayarri, Oscar González, Jaime Giménez, Santiago Esplugas, et al., 2016. "Photocatalytic Mechanism of Metoprolol Oxidation by Photocatalysts TiO₂ and TiO₂ Doped with 5% B: Primary Active Species and Intermediates", **Applied Catalysis B: Environmental**. 194: 111-122.
- [14] Thammasak Rojviroon, Apirat Laobuthee, and Sanya Sirivithayapakorn, 2012. "Photocatalytic Activity of Toluene under UV-LED Light with TiO₂ Thin Films", **International Journal of Photoenergy**. 2012: 8.
- [15] Qinghua Chen, Shuna Wu, and Yanjun Xin, 2016. "Synthesis of Au-CuS-TiO₂ Nanobelts Photocatalyst for Efficient Photocatalytic Degradation of Antibiotic Oxytetracycline", **Chemical Engineering Journal**. 302: 377-387.
- [16] Said M. El-Sheikh, Tamer M. Khedr, Amer Hakki, Adel A. Ismail, Waheed A. Badawy, and Detlef W. Bahnemann, 2017. "Visible Light Activated Carbon and Nitrogen Co-Doped Mesoporous TiO₂ as Efficient Photocatalyst for Degradation of Ibuprofen", **Separation and Purification Technology**. 173: 258-268.
- [17] Dantong Zhou, Zhi Chen, Qian Yang, Xiaoping Dong, Jingji Zhang, and Laishun Qin, 2016. "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**. 157: 399-405.
- [18] กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2559. "กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรม": 17-21.
- [19] Abdelhadi Bentouami, Mohand Said Ouali, and Louis-Charles De Menorval, 2010. "Photocatalytic Decolourization of Indigo Carmine on 1,10-Phenanthroline Intercalated Bentonite under UV-B and Solar Irradiation", **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry**. 212: 101-106.

- [20] Thammask Rojviroon, Orawan Rojviroon, and Sanya Sirivithayapakorn, 2016. “Photocatalytic Decolourisation of Dyes Using TiO₂ Thin Film Photocatalysts”, **Surface Engineering**. 32, 8: 562-569.
- [21] Kumar K. Vasanth, Porkodi K. and Selvaganapathi A., 2007. “Constrain in solving LangmuireHinshelwood kinetic expression for the photocatalytic degradation of Auramine O aqueous solutions by ZnO catalyst”, **Dyes and Pigments**. 75: 246-249.
- [22] Kumar K. Vasanth, Porkodi K. and Rocha F., 2008. “Langmuir–Hinshelwood kinetics – A theoretical study”, **Catalysis Communications**. 9: 82-84.
- [23] Lakshi Saikia, Diganta Bhuyan, Mrinal Saikia, Banajit Malakar, Dipak Kumar Dutta and Pinaki Sengupta, 2015. “Photocatalytic performance of ZnO nanomaterials for self sensitized degradation of malachite green dye under solar light”, **Applied Catalysis A: General**. 490: 42-49.
- [24] Di Gu, Yanji Zhu, Zhigang Xu, Nan Wang, and Chuang Zhang, 2014. “Effects of Ion Doping on the Optical Properties of Dye-Sensitized Solar Cells”, **Advances in Materials Physics and Chemistry**. 4: 187-193.
- [25] Uduak G. Akpan and Bassim H. Hameed, 2009. “Parameters Affecting the Photocatalytic Degradation of Dyes Using TiO₂-based Photocatalysts: A Review”, **Journal of Hazardous Materials**. 170, 2–3: 520-529.

การผลิตผงข้าวมอลต์แอนโทไซยานินสูงจากข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่

The production of malt high anthocyanin powder from rice berry

สุนัน ปานสาคร¹ จตุรงค์ ลังกาพินธุ์² ปรียากร แจ่มพื้ง³ และช่อผกา ศรีมาศ⁴

sunan.p@en.rmutt.ac.th¹, jaturong.l@en.rmutt.ac.th², pattojorth@gmail.com³, chorphaka13136@gmail.com⁴

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตผงข้าวมอลต์แอนโทไซยานินสูงจากข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ โดยขั้นตอนแรก ทำการศึกษาผลของการงอกของเมล็ดข้าว (ข้าวมอลต์) ต่อการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีของข้าวมอลต์พันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ ผลการศึกษาพบว่าข้าวเปลือกในน้ำอุณหภูมิ 35 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 และ 24 ชั่วโมง ตามด้วยการบ่มที่อุณหภูมิเดียวกันเป็นเวลา 24 และ 36 ชั่วโมง สามารถคงปริมาณแอนโทไซยานินได้สูงประมาณ 7-9 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง รวมถึงพบว่าค่าสี ได้แก่ L^* , a^* , b^* มีแนวโน้มลดลงแต่ไม่พบความแตกต่างทางสถิติ ($P>0.05$) จากนั้นในขั้นตอนที่สองทำการปรับปรุงคุณภาพของของมอลต์ด้านกลิ่นและสีโดยการนึ่ง การคั่ว และการอบแห้ง ผลการปรับปรุงคุณภาพพบว่าขั้นตอนการนึ่งข้าวมอลต์ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ตามด้วยการอบแห้งจนกระทั่งความชื้นสุดท้ายมีค่า 9-10 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ให้ค่าปริมาณแอนโทไซยานินสูงที่สุดและแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P\leq 0.05$) กับสภาวะการทดสอบอื่นแต่เมื่อเพิ่มเวลาการนึ่งเป็น 20 นาที พบว่าแอนโทไซยานินมีแนวโน้มลดลง รวมไปถึงขั้นตอนการคั่วข้าวมอลต์ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10-20 นาที ตามด้วยการอบแห้งสามารถช่วยเพิ่มปริมาณแอนโทไซยานินเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวไรซ์เบอร์รี่ที่ไม่ผ่านการงอก ในขั้นตอนสุดท้ายทำการผลิตผงข้าวมอลต์และประเมินคุณภาพพบว่าผงข้าวมอลต์จากข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ให้ปริมาณแอนโทไซยานินที่สูงและเป็นผลิตภัณฑ์ผงข้าวมอลต์แห่งที่มีคุณภาพดี

คำสำคัญ : ข้าวไรซ์เบอร์รี่ แอนโทไซยานิน ข้าวมอลต์ การงอก

Abstract

The objective of this study was to produce of malt high anthocyanin powder from rice berry. Firstly to determine the effect of germinating on changes in physicochemical properties of rice berry malt. The results showed that rough rice were steeped in water at $35\pm 2^{\circ}\text{C}$ for 12 and 24 hr combined with incubated at same temperature for 24 and 36 hr indicated high remaining anthocyanin content 7-9 mg/g dry weight. Including, color value (L^* , a^* , b^*) seems to have a slight but non-significant ($P>0.05$). Secondary to evaluated conditions of the stages of steaming, roasting and drying on the qualities of malt products with a means of modifying the flavor and color of their final product. The results showed that malt product was significantly highest level ($P\leq 0.05$) of anthocyanin

^{1,2} อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

^{3,4} นักศึกษาภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

at condition of steaming temperature 120oC in 10 minutes and drying to final moisture content 9-10%wb, but seems to be reducing when longer steaming time for 20 minutes. In addition, the roasting of malt products at temperature 120oC for 10-20 minutes and drying presented increasing of anthocyanin content compared to those of original rice berry. Finally to evaluated the qualities of malt powder from rice berry. The resulted showed that malt powder from rice berry high remained of anthocyanin quantity and good evaluation of dried malt.

Keywords: Rice berry, Anthocyanin, Malt, Germination

1. คำนำ

ปัจจุบันคนส่วนใหญ่หันมาให้ความสำคัญกับเรื่องสุขภาพมากขึ้นสังเกตได้จากแนวโน้มการเพิ่มสูงขึ้นของการบริโภคอาหารคลีนถึงแม้จะมีราคาค่อนข้างสูง ซึ่งข้าวที่ไม่ผ่านการขัดสีเป็นหนึ่งในอาหารคลีนที่ได้รับความนิยม โดยเฉพาะ“ข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ (Rice berry)” ที่มีคุณค่าทางโภชนาการเทียบเท่ากับอาหารเพื่อสุขภาพได้เลยทีเดียว [1] ข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ ได้จากการผสมข้ามพันธุ์ระหว่างข้าวเจ้าหอมนิลกับข้าวขาวดอกมะลิ 105 ลักษณะเป็นข้าวเจ้าสีม่วงเข้ม รูปร่างเมล็ดเรียวยาว ข้าวกล้องเมื่อหุงสุกจะมีความนุ่มนวลมาก สมบัติเด่นทางด้านโภชนาการคือ มีสารต้านอนุมูลอิสระสูง ได้แก่ เบต้าแคโรทีน แกมมาโอไรซานอล วิตามินอี แทนนิน สังกะสี และโฟเลตสูง มีดัชนีน้ำตาลต่ำถึงปานกลาง นอกจากนี้รำข้าวและน้ำมันรำข้าวยังมีสมบัติต้านอนุมูลอิสระได้ดี ซึ่งจากสมบัติข้อนี้ นอกจากจะใช้รับประทานเพื่อเสริมสร้างสุขภาพที่ดี ลดความเสี่ยงต่อการเป็นโรคเมธิเร้ง ทางารแพทย์ยังนำไปใช้ทำผลิตภัณฑ์อาหาร โภชนาบำบัดอีกด้วย [1,2] อย่างไรก็ตามถึงแม้ข้าวไรซ์เบอร์รี่จะมีคุณประโยชน์สูงแต่ก็มีผู้นิยมบริโภคเพียงบางกลุ่มเท่านั้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากด้วยลักษณะเนื้อสัมผัสที่ต่างจากข้าวขาว เมื่อนำไปหุงสุกจะมีกลิ่นเฉพาะตัว จึงทำให้ผู้บริโภคส่วนใหญ่อยู่ในกลุ่มผู้รักสุขภาพเท่านั้น ดังนั้นจึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจหากได้มีการศึกษาและพัฒนาแปรรูปข้าวไรซ์เบอร์รี่เป็นผลิตภัณฑ์ชนิดอื่น ๆ ที่สะดวกสำหรับการบริโภค ให้คุณลักษณะที่ดีเพื่อส่งเสริมและสนับสนุนให้มีผู้บริโภคมากขึ้น

สารอาหารสำคัญในข้าวไรซ์เบอร์รี่ประกอบด้วย โอมะก้า 3 ธาตุเหล็ก สังกะสี วิตามินอี วิตามินบี 1 แทนนิน โพลีฟีนอล ลูทีน เส้นใย และอื่น ๆ สารอาหารเหล่านี้ช่วยลดระดับไขมันและคอเลสเตอรอล ป้องกันโรคหัวใจ ช่วยควบคุม น้ำหนัก ช่วยระบบขับถ่าย [3] และที่สำคัญข้าวไรซ์เบอร์รี่มีสารชนิดหนึ่งที่เรียกว่า “แอนโทไซยานิน” เป็นรงควัตถุหรือสารสีที่มีสมบัติเป็นโภชนะเภสัช เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ ช่วยชะลอความเสื่อมของเซลล์ ช่วยลดอัตราเสี่ยงของการเกิดโรคหัวใจและเส้นเลือดอุดตันในสมอง ด้วยการยับยั้งไม่ให้เลือดจับตัวเป็นก้อน ชะลอความเสื่อมของดวงตา ช่วยยับยั้งจุลินทรีย์ก่อโรค ในระบบทางเดินอาหาร ซึ่งเป็นสาเหตุของโรคท้องร่วงและอาหารเป็นพิษด้วย [1] จากคุณประโยชน์ดังกล่าวจึงพบว่า ข้าวไรซ์เบอร์รี่เป็นข้าวสายพันธุ์ที่น่าส่งเสริมในเชิงการค้า รวมถึงนำมาแปรรูปเพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าแทนที่จะเป็นแต่เพียงการจำหน่ายในรูปแบบข้าวสารเท่านั้น เช่น การแปรรูปเป็นข้าวมอลต์

โดยทั่วไปแล้วในการผลิตข้าวมอลต์นิยมใช้ข้าวบาร์เลย์เป็นวัตถุดิบเริ่มต้น ทั้งนี้ข้าวบาร์เลย์มีราคาสูงและต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ดังนั้นการนำข้าวไรซ์เบอร์รี่มาทดแทนเพื่อการผลิตข้าวมอลต์จึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจ ซึ่งขั้นตอนการผลิตข้าวมอลต์โดยการนำข้าวเปลือกมาแช่น้ำ จากนั้นบ่มไว้ให้งอก แล้วจึงนำข้าวเปลือกที่งอกนั้นมาคั่วเพื่อให้เกิดกลิ่นหอม ก่อนนำไปอบให้แห้งแล้วสีเอาเปลือกออก วิธีการนี้ทำให้วิตามินและสารอาหารต่าง ๆ ที่ละลายน้ำได้ยังคงอยู่ในเมล็ดข้าว [4]

มอลต์ให้กากใยอาหารชนิดละลายน้ำได้ซึ่งมีประโยชน์ต่อระบบทางเดินอาหาร นอกจากนี้มอลต์ยังให้วิตามินและแร่ธาตุที่สำคัญมากมาย ได้แก่ โปรตีนที่เสริมสร้างการเติบโต แคลเซียมที่ช่วยเสริมสร้างกระดูก วิตามินเอบำรุงสายตา วิตามินซีอาหารผิวและเซลล์ต่าง ๆ ของร่างกาย และมีวิตามินบีหลายชนิด ทั้ง บี 1, 2, 5, 6 เป็นสารอาหารจำเป็นในการทำงานของระบบประสาท บำรุงสุขภาพ มีโอโอตินเป็นส่วนประกอบจำเป็นในการผลิตฮอร์โมนของต่อมธัยรอยด์สำหรับควบคุมการทำหน้าที่และเสริมความเจริญเติบโตตามปกติของสมอง ประสาท และเนื้อเยื่อของร่างกาย มีธาตุเหล็ก ที่ช่วยในการสร้างเม็ดเลือดแดง มีทอรีนที่ช่วยเสริมการเจริญเติบโตของร่างกาย พัฒนาการทางสมอง และการมองเห็น มีโนอะซิน โปแตสเซียม ฟอสฟอรัส แมกนีเซียม ซึ่งล้วนแล้วแต่มีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อการเจริญเติบโตที่มีประสิทธิภาพของเด็ก ๆ และหนึ่งในสารอาหารที่มีประโยชน์เหล่านั้นก็คือสาร GABA [5] จากข้อมูลดังกล่าวจึงพบว่าข้าวมอลต์มีคุณค่าทางอาหารที่สูงขึ้น เนื่องจากไม่ได้ถูกขัดสีเอาสิ่งที่เป็นประโยชน์ออกไป รวมถึงมีแป้งลดลงเนื่องจากการเปลี่ยนเป็นน้ำตาลบางส่วน รสชาติจึงเปลี่ยนแปลงไปในทางที่ดีขึ้น และเมื่อนำไปให้ความร้อนหรือทำแห้งจะเกิดกลิ่นที่แปลกออกไป และมักเป็นที่นิยมชมชอบของผู้บริโภค ทั้งหมดนี้จึงส่งผลให้ข้าวมอลต์มีสมบัติที่ดีกว่าข้าวขาวหรือข้าวกล้องธรรมดา จากคุณสมบัติที่กล่าวมาของข้าวมอลต์ โดยเฉพาะการพัฒนามาใช้ข้าวสายพันธุ์ไทย (ข้าวไรซ์เบอร์รี่) ในการผลิตข้าวมอลต์ ประกอบกับเพื่อการนำผลิตภัณฑ์ไปพัฒนาต่อยอดให้หลากหลายมากขึ้น ทางนักวิจัยจึงมีแนวคิดผลิตมอลต์ชนิดผงจากข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่เพื่อนำมาเป็นวัตถุดิบในการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์รูปแบบอื่น ๆ เช่น การนำผลิตภัณฑ์ผงข้าวมอลต์จากข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ไปแปรรูปเป็น อาหารเสริม อาหารเด็กอ่อนส่วนผสมของกาแฟ น้ำนมเข้มข้น เคมีภัณฑ์ต่าง ๆ เพื่อการแพทย์ สิ่งทอ และงานวิจัยทางวิทยาศาสตร์ เป็นต้น [6] และเป็นอีกหนึ่งทางเลือกของผู้ประกอบการในการนำไปขยายต่อในเชิงพาณิชย์

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 ข้าวเปลือกพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่

จัดซื้อข้าวเปลือกพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่คุณภาพดี เมล็ดสมบูรณ์ สะอาด นำมาตรวจวัดคุณสมบัติทั้งทางกายภาพและเคมีเบื้องต้น เพื่อกำหนดการผลิตรูปเป็นข้าวมอลต์ในขั้นตอนต่อไป

2.2 การเตรียมข้าวมอลต์พันธุ์ไรซ์เบอร์รี่

นำข้าวเปลือกไรซ์เบอร์รี่ที่ผ่านการทำความสะอาดแล้วแช่น้ำที่ควบคุมอุณหภูมิ 35 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ โดยที่ต้องทำการเปลี่ยนน้ำทุก 4 ชั่วโมง เพื่อป้องกันการหมักจนเกิดกลิ่นเหม็นเมื่อครบเวลาตามกำหนด กรองเอาเฉพาะเมล็ดข้าวเปลือกนำไปสู่ขั้นตอนการบ่มเพื่อให้ข้าวเปลือกงอกโดยห่อด้วยผ้าขาวบางสะอาดชุ่มน้ำ ทิ้งไว้ในที่อากาศถ่ายเทได้ดีเป็นเวลา 24 และ 36 ชั่วโมง จะได้ข้าวเปลือกไรซ์เบอร์รี่ที่งอก (ข้าวมอลต์) ที่มีความยาวของงอกข้าวประมาณ 2-3 มิลลิเมตร เพื่อนำไปใช้ในขั้นตอนต่อไปพร้อมทั้งตรวจวัดคุณสมบัติทั้งทางกายภาพและเคมีเพื่อเปรียบเทียบคุณภาพก่อนและหลังกระบวนการงอก

2.3 การปรับปรุงคุณภาพข้าวมอลต์ด้วยการคั่วและการนึ่ง

นำตัวอย่างข้าวมอลต์พันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ที่ผ่านการเพาะงอกจากขั้นตอนที่ 2.2 เข้าสู่การปรับปรุงคุณภาพข้าวมอลต์ด้วยการคั่วและการนึ่ง โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 กระบวนการ คือ กระบวนการนึ่งด้วยเครื่องนึ่งฆ่าเชื้อ (Autoclave) ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เวลา 10 และ 20 นาที และอีกกระบวนการคือการคั่วด้วยเครื่องคั่วไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เวลา 10 และ 20 นาที จากนั้นนำตัวอย่างข้าวมอลต์ของทั้งสองกระบวนการลดความชื้นด้วยการอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส จนกระทั่งความชื้นสุดท้ายของตัวอย่างข้าวมอลต์ไรซ์เบอร์รี่อยู่ที่ประมาณ 9-10 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี ต่อไป

2.4 การผลิตผงข้าวมอลต์พันธุ์ไรซ์เบอร์รี่

จากขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างข้าวมอลต์ไรซ์เบอร์รี่ตามขั้นตอนที่ 2.2 และ 2.3 เลือกตัวอย่างที่มีคุณสมบัติดีที่สุดโดยพิจารณาจากคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีที่ได้จากการวิเคราะห์ แล้วนำมาผลิตผงข้าวมอลต์ด้วยเทคนิคการไม่เปียก โดยการกะเทาะเปลือกเพื่อนำเปลือกออกและทำความสะอาดข้าวจากนั้นแช่ตัวอย่างข้าวมอลต์ไรซ์เบอร์รี่ในน้ำอุณหภูมิ 35 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และม่ด้วยเครื่องโม่ไฟฟ้า เมื่อได้น้ำแป้งนำมากรองด้วยผ้าขาวบาง พร้อมทั้งบีบคั้นน้ำแป้งออกจากเนื้อแป้ง หลังจากนั้นนำเนื้อแป้งไปอบด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง จะได้แผ่นแป้งที่ผ่านการอบแห้งก่อนจะบดและร่อนจนได้ผงข้าวมอลต์ที่ละเอียด และนำมาตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีพร้อมทั้งเปรียบเทียบกับผงข้าวไรซ์เบอร์รี่ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการเพาะงอก

2.5 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี

2.5.1 ปริมาณความชื้นและค่าวอเตอร์แอกติวิตี (a_w)

ชั่งน้ำหนักข้าวไรซ์เบอร์รี่จำนวน 2 กรัม อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง อ้างอิงวิธีการทดสอบจากมาตรฐาน AOAC [7] และหาค่าวอเตอร์แอกติวิตี (a_w) ด้วยเครื่องวัดค่าวอเตอร์แอกติวิตียี่ห้อ Aqualab รุ่น 3 TE

2.5.2 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) เมื่อมีค่าเป็นบวกหรือในช่วง ± 60 และค่า b^* คือ ค่าความเป็นสีเหลือง (Yellowness) เมื่อมีค่าเป็นบวกและค่าความเป็นสีน้ำเงิน (Blueness) เมื่อมีค่าเป็นลบหรือในช่วง ± 60 ซึ่งก่อนทำการวัดค่าสี เครื่องวัดสีถูกปรับเทียบความเที่ยงตรงของค่าสีด้วย Standard Calibration Plate ค่า L^* , a^* และ b^* เท่ากับ 98.11, -0.11 and -0.08 ตามลำดับ

2.5.3 ปริมาณแอนโทไซยานิน

วิเคราะห์ปริมาณแอนโทไซยานิน (Total Anthocyanin Content) [8, 9] โดยเตรียมตัวอย่างผงข้าวไรซ์เบอร์รี่จำนวน 1 กรัม ด้วยการร่อนด้วยตะแกรงร่อนขนาด 125 ไมโครเมตร ใส่ลงในสารละลายเอทานอลิกไฮโดรคลอริก (เอทานอล 95 เปอร์เซ็นต์ 85 มิลลิลิตร ต่อกรดไฮโดรคลอริก 1.5 นอร์มอล 15 มิลลิลิตร) ปริมาตร 25 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันปิดฝาด้วยแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ แล้วนำไปเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง จากนั้นนำออกมารองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 4 ปรับปริมาตรด้วยสารละลายเอทานอลิกไฮโดรคลอริกให้มีปริมาตร 25 มิลลิลิตร แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 535 นาโนเมตร โดยใช้สารละลายเอทานอลิกไฮโดรคลอริกเป็นตัวปรับศูนย์ (blank) คำนวณหาปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมดจากสมการที่ 1 และ 2 ดังนี้

$$\text{Total absorbance} = (\text{OD}_{535} \times V \times 100) / W \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{Total anthocyanin content (mg/g)} \\ = \text{Total absorbance} / 98.2 \end{aligned} \quad (2)$$

โดยที่

V = ปริมาตรสารละลายที่นำมาหาปริมาณแอนโทไซยานิน (มิลลิลิตร)

W = น้ำหนักข้าวไรซ์เบอร์รี่ที่นำมาหาปริมาณแอนโทไซยานิน (กรัม)

OD_{535} = ค่าการดูดกลืนแสงที่อ่านได้จากเครื่องวัดการดูดกลืนแสง

2.6 การวิเคราะห์ทางสถิติ

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

3. ผลการศึกษาและวิจารณ์

3.1 ผลการศึกษากระบวนการผลิตข้าวไรซ์เบอร์รี่เพาะงอก (ข้าวมอลต์)

ข้าวมอลต์เป็นข้าวที่ถูกพัฒนาด้านคุณภาพ เพื่อให้เกิดประโยชน์กับผู้บริโภคทั้งด้านคุณค่าทางโภชนาการ คุณภาพด้านรสชาติ สี และมีกลิ่นหอม จากงานวิจัยนี้ นำข้าวเปลือกพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ผลิตมอลต์และเมื่อทำการเปรียบเทียบสมบัติของข้าวไรซ์เบอร์รี่ก่อนและหลังการเพาะงอกให้

ผลแสดงดัง ตารางที่ 1 จากขั้นตอนการผลิตข้าวมอลต์ด้วยการเพิ่มความชื้นของข้าวเปลือกโดยแช่เมล็ดข้าวในน้ำ เมล็ดจะดูดน้ำจนมีความชื้นตามที่ต้องการ ความชื้นจะต้องเหมาะสมเมล็ดจึงจะเกิดการงอกของรากอ่อนได้สม่ำเสมอ จากนั้นมีการให้ความร้อนด้วยการนึ่งหรือบางครั้งเป็นการลดความชื้นทันทีด้วยการคั่วหรือการอบแห้งจนเอนไซม์หยุดทำงานและทำให้มอลต์มีกลิ่นหอม และสามารถเก็บรักษาได้ยาวนานขึ้น

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพและเคมีของข้าวไรซ์เบอร์รี่และข้าวไรซ์เบอร์รี่เพาะงอก (ข้าวมอลต์) ที่สภาวะต่าง ๆ

คุณสมบัติ	ตัวอย่าง				
	RB	RB(12-24)	RB(12-36)	RB(24-24)	RB(24-36)
แอนโทไซยานิน (มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง)	8.41 ^b ±0.07	8.23 ^c ±0.05	9.42 ^a ±0.12	7.01 ^d ±0.08	9.29 ^a ±0.08
ความชื้น (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก)	13.43 ^e ±0.27	36.21 ^d ±0.30	41.13 ^c ±0.33	42.09 ^a ±0.20	41.64 ^b ±0.08
วอเตอร์แอกติวิตี (a _w)	0.49 ^b ±0.02	0.91 ^a ±0.00	0.92 ^a ±0.00	0.90 ^a ±0.03	0.92 ^a ±0.00

^{abc} อักษรที่แตกต่างกันในแถวเดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P≤0.05) เมื่อเปรียบเทียบโดย DMRT (mean± SD) RB = ข้าวไรซ์เบอร์รี่; RB(12-24) = ข้าวมอลต์ แช่น้ำ 12 ชั่วโมง และบ่ม 24 ชั่วโมง; RB(12-36)= ข้าวมอลต์ แช่น้ำ 12 ชั่วโมง และบ่ม 36 ชั่วโมง; RB(24-24)= ข้าวมอลต์ แช่น้ำ 24 ชั่วโมง และบ่ม 24 ชั่วโมง; RB(24-36)= ข้าวมอลต์ แช่น้ำ 24 ชั่วโมง และบ่ม 36 ชั่วโมง

3.1.1 การเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นและวอเตอร์แอกติวิตีของข้าวไรซ์เบอร์รี่และข้าวไรซ์เบอร์รี่เพาะงอก (ข้าวมอลต์)

ความชื้นมีผลต่อการเสื่อมเสียของอาหารโดยเฉพาะการเสื่อมเสียเนื่องจากจุลินทรีย์ อาหารที่มีความชื้นหรือปริมาณน้ำสูงจะเป็นอาหารที่เสื่อมเสียง่ายเนื่องจากมีสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญของจุลินทรีย์ อีกทั้งความชื้นมีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติเชิงความร้อนของอาหารด้านต่าง ๆ ในส่วนกระบวนการเพาะงอกข้าวไรซ์เบอร์รี่พบว่าปริมาณความชื้นเป็นปัจจัยสำคัญยิ่งต่อประสิทธิภาพของการงอกทั้งนี้หากความชื้นไม่เหมาะสมประสิทธิภาพการงอกจะลดลง [4,5] ในระหว่างการงอกจะเกิดเอนไซม์ขึ้นหลายชนิดที่สำคัญ คือ แอลฟาอะไมเลส (α-amylase) และบีตาอะไมเลส (β-amylase) เป็นเอนไซม์ที่ช่วยให้เกิด

การไฮโดรไลสเพื่อเปลี่ยนแปลงเป็นน้ำตาล [10,11] รวมถึงเกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านกายภาพแสดงผลการทดสอบดังตารางที่ 1 พบว่าค่าความชื้นก่อนการเพาะงอกเท่ากับ 13.43±0.27 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (P≤0.05) หลังการเพาะงอกซึ่งมีค่าระหว่าง 36.21-42.09 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก โดยสอดคล้องกับค่าวอเตอร์แอกติวิตี (a_w) ที่เพิ่มจากค่าเริ่มต้น 0.49±0.02 อย่างมีนัยสำคัญ (P≤0.05) ในช่วง 0.90-0.92 หลังการเพาะงอก ทั้งนี้ข้าวไรซ์เบอร์รี่ได้ดูดซึมน้ำในระหว่างกระบวนการเพาะงอกทั้งจากการแช่และการบ่ม จึงส่งผลให้ค่าความชื้นและค่าวอเตอร์แอกติวิตีเพิ่มขึ้น ซึ่งเหมาะสมต่อการงอกของเมล็ดข้าว สังเกตได้จากจุกของข้าวจะงอกออกมาที่ความยาวประมาณ 3-4 มิลลิเมตร [12]

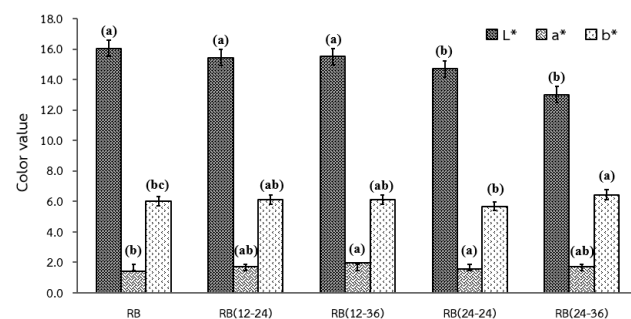
3.1.2 การเปลี่ยนแปลงค่าแอนโทไซยานินของข้าวไรซ์เบอร์รี่และข้าวไรซ์เบอร์รี่เพาะงอก (ข้าวมอลต์)

การทดสอบหาปริมาณแอนโทไซยานินในข้าวไรซ์เบอร์รี่จากขั้นตอนการเพาะงอก (ข้าวมอลต์) พบว่าการแช่เมล็ดข้าวในน้ำร่วมกับการบ่มเพื่อให้เกิดการงอกของเมล็ดส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแอนโทไซยานิน ($P \leq 0.05$) ที่มีค่าเริ่มต้น 8.41 ± 0.07 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง และหลังการเพาะงอกในช่วง 7.01-9.92 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง หรือกล่าวได้ว่าเมื่อระยะเวลาในการแช่เมล็ดข้าวในน้ำที่นานขึ้นจาก 12 ชั่วโมง เป็น 24 ชั่วโมง ในขณะที่ยังคงระยะเวลาการบ่มคงที่ ส่งผลต่อการลดลงเพียงเล็กน้อยของปริมาณแอนโทไซยานิน เช่น สภาวะการทดสอบ RB(12-24) ให้ปริมาณแอนโทไซยานิน 8.23 ± 0.05 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ลดลงเป็น 7.01 ± 0.08 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ที่สภาวะ RB(24-24) ในขณะที่เมื่อเพิ่มระยะเวลาการบ่มเป็น 36 ชั่วโมง พบว่าปริมาณแอนโทไซยานินเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) จากค่าเริ่มต้นก่อนการงอกของเมล็ดข้าวเปลือก ทั้งนี้เนื่องจากสมบัติของแอนโทไซยานินที่สามารถละลายได้ในน้ำ ไม่เสถียร แต่เนื่องจากการที่ข้าวมีเปลือกหุ้มเมล็ดในระหว่างการงอกจึงช่วยลดการสูญเสียแอนโทไซยานินและให้ผลการทดลองเช่นเดียวกับงานวิจัยที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน [13,14,15]

3.1.3 การเปลี่ยนแปลงค่าสีของข้าวไรซ์เบอร์รี่และข้าวไรซ์เบอร์รี่เพาะงอก (ข้าวมอลต์)

การเปลี่ยนแปลงค่าสีของข้าวไรซ์เบอร์รี่และข้าวไรซ์เบอร์รี่เพาะงอก (ข้าวมอลต์) เป็นปัจจัยที่สำคัญในการกำหนดคุณภาพของผลิตภัณฑ์ จากผลการทดลองดังรูปที่ 1 พบว่าข้าวไรซ์เบอร์รี่ก่อนเพาะงอกมีค่าความสว่าง (L^*) ไม่แตกต่างกับข้าวไรซ์เบอร์รี่เพาะงอกในช่วงเวลาการแช่ 12-24 ชั่วโมง ร่วมกับการบ่ม 24-36 ชั่วโมง ($P > 0.05$) ในขณะที่ค่าความสว่าง (L^*) ของเมล็ดข้าวมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) เมื่อการแช่ข้าวในน้ำเพิ่มขึ้น 24 ชั่วโมง การทดสอบค่า a^* พบว่าในข้าวไรซ์เบอร์รี่ก่อนเพาะงอกมีค่าน้อยกว่าข้าวมอลต์ในทุกสภาวะการทดสอบ หากแต่ในทางสถิติไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

($P > 0.05$) เช่นเดียวกับค่า b^* ที่ให้ผลการทดสอบเป็นไปในทิศทางเดียวกัน [13] ทั้งนี้ด้วยข้าวไรซ์เบอร์รี่เป็นข้าวที่มีเมล็ดเป็นสีม่วงเข้มหรือมีรงควัตถุชนิดแอนโทไซยานินที่ละลายน้ำได้ง่าย ดังนั้นเมื่อนำมาผ่านการแช่เพื่อเพิ่มความชื้นให้เมล็ดเกิดการงอกจึงทำให้รงควัตถุบางส่วนละลายออกมา แต่เนื่องจากการแช่เมล็ดทั้งเปลือกจึงช่วยลดการชะล้างดังกล่าว ดังนั้นเมื่อมาวิเคราะห์ค่าสีหลังการแช่จึงพบว่าการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก



รูปที่ 1 การเปลี่ยนแปลงค่าสีของข้าวไรซ์เบอร์รี่และข้าวไรซ์เบอร์รี่เพาะงอก (ข้าวมอลต์) ที่สภาวะต่าง ๆ

RB = ข้าวไรซ์เบอร์รี่;

RB (12-24) = ข้าวมอลต์ แช่น้ำ 12 ชั่วโมง และบ่ม 24 ชั่วโมง;

RB (12-36) = ข้าวมอลต์ แช่น้ำ 12 ชั่วโมง และบ่ม 36 ชั่วโมง;

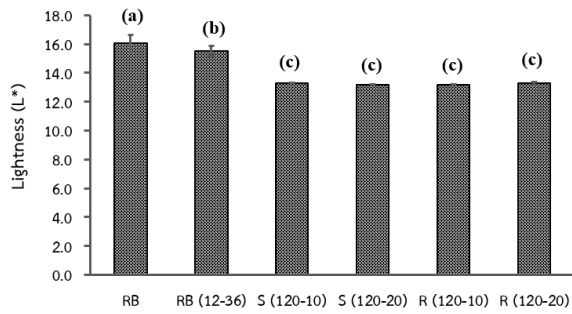
RB (24-24) = ข้าวมอลต์ แช่น้ำ 24 ชั่วโมง และบ่ม 24 ชั่วโมง;

RB (24-36) = ข้าวมอลต์ แช่น้ำ 24 ชั่วโมง และบ่ม 36 ชั่วโมง

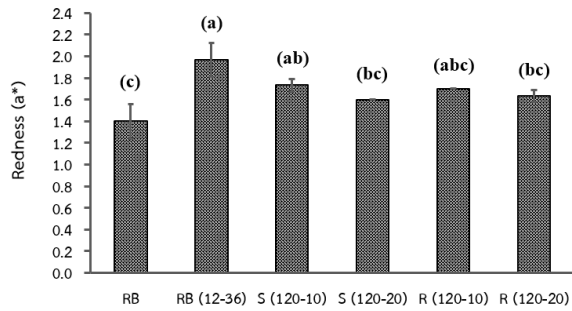
^{a,b} อักษรต่างกันในแต่ละตัวอย่างหมายถึง มีความแตกต่างกันทางสถิติตามการวิเคราะห์แบบ DMRT ($P < 0.05$)

3.2 ผลการศึกษาการปรับคุณภาพข้าวมอลต์ด้วยการคั่วและการนึ่ง

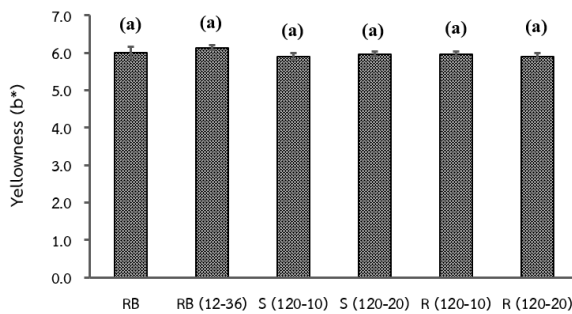
หลังกระบวนการเพาะงอกข้าวมอลต์จากขั้นตอนแรกหากพิจารณาคุณสมบัติทั้งทางกายภาพและเคมีพบว่าสภาวะที่เหมาะสมและเลือกเพื่อการนำไปใช้ในขั้นตอนต่อไป คือ RB (12-36) เนื่องจากพบว่าการคงอยู่ของปริมาณแอนโทไซยานินสูงสุด จากนั้นนำข้าวมอลต์ดังกล่าวมาศึกษาผลของการนึ่งหรือการคั่วที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และอบแห้งจนกระทั่งความชื้นสุดท้ายมีค่าประมาณ 9-10 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ซึ่งให้ผลการทดลองดังรูปที่ 2-4



(ก) ค่าความสว่าง (L*)



(ข) ค่าความเป็นสีแดง (a*)



(ค) ค่าความเป็นสีเหลือง (b*)

รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงค่าสีของข้าวมอลต์หลังการคั่วและการนึ่งที่สภาวะต่าง ๆ

RB = ข้าวไรซ์เบอร์รี่;

RB (12-36) = ข้าวมอลต์ แช่น้ำ 12 ชั่วโมง และบ่ม 36 ชั่วโมง;

S (120-10) = ข้าวมอลต์นึ่ง 120 องศาเซลเซียส, 10 นาที;

S (120-20) = ข้าวมอลต์นึ่ง 120 องศาเซลเซียส, 20 นาที;

R (120-10) = ข้าวมอลต์คั่ว 120 องศาเซลเซียส, 10 นาที;

R (120-20) = ข้าวมอลต์คั่ว 120 องศาเซลเซียส, 20 นาที

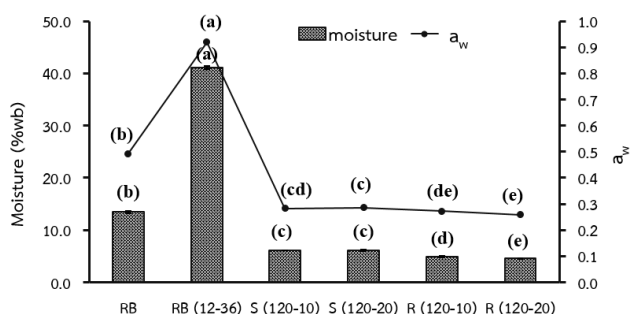
^{a,b} อักษรต่างกันในแต่ละตัวอย่างหมายถึง มีความแตกต่างกันทางสถิติตามการวิเคราะห์แบบ DMRT ($P < 0.05$)

3.2.1 การเปลี่ยนแปลงค่าสีของข้าวมอลต์หลังการคั่วและการนึ่งที่สภาวะต่าง ๆ

การเปลี่ยนแปลงค่าสีของข้าวมอลต์จากรูปที่ 2 (ก) พบว่าหลังกระบวนการนึ่งที่สภาวะ S (120-10), S (120-20) หรือการคั่วที่สภาวะ R (120-10), R (120-20) ส่งผลต่อการลดลงของค่า L^* อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) เมื่อเทียบกับข้าวไรซ์เบอร์รี่ก่อนและหลังการเพาะงอกในขณะที่ไม่เปรียบเทียบกับระหว่างการนึ่งหรือการคั่วที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เวลา 10-20 นาที ไม่พบความแตกต่างของค่า L^* ($P > 0.05$) เช่นเดียวกับรูปที่ 2 (ข) ไม่พบความแตกต่างของค่า a^* ($P > 0.05$) ระหว่างการให้ความร้อนโดยการนึ่งหรือการคั่วกับข้าวมอลต์ อย่างไรก็ตามหากพิจารณาเรื่องเวลาโดยการเพิ่มเวลาของการนึ่งหรือเวลาการคั่วข้าวมอลต์จาก 10 นาที เป็น 20 นาที พบว่าส่งผลต่อการลดลงของค่า a^* เล็กน้อยซึ่งไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($P > 0.05$) ทั้งนี้การลดลงของค่าความสว่างและค่าความเป็นสีแดงของเมล็ดข้าวมอลต์พบว่ามีสาเหตุเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลอันมีความร้อนทั้งจากการนึ่งและการคั่วเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในขณะที่ในรูปที่ 2 (ค) ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของค่า b^* (ค่าความเป็นสีเหลือง) ของข้าวมอลต์ก่อนและหลังการนึ่งรวมถึงการคั่ว

3.2.2 การเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นและค่าวอเตอร์แอกติวิตีของข้าวมอลต์หลังการคั่วและการนึ่งที่สภาวะต่าง ๆ

ขั้นตอนสุดท้ายของการผลิตข้าวมอลต์ คือ การลดความชื้นผลิตภัณฑ์ให้อยู่ในกลุ่มอาหารแห้ง ดังนั้นจากผลการทดลองดังรูปที่ 3 พบว่าหลังกระบวนการนึ่งและการคั่วข้าวมอลต์ร่วมกับการอบแห้งซึ่งให้ค่าความชื้นลดลงจากก่อนอบ 41.13 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก จนกระทั่งความชื้นสุดท้ายมีค่าระหว่าง 8-9 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก เช่นเดียวกับค่า วอเตอร์แอกติวิตีที่พบว่าข้าวมอลต์ก่อนอบแห้งมีค่า 0.91 และลดลงน้อยกว่า 0.10 หลังการอบแห้งซึ่งอยู่ในกลุ่มผลิตภัณฑ์อาหารแห้ง [16] คือผลิตภัณฑ์ที่มีค่าวอเตอร์แอกติวิตีน้อยกว่า 0.6 และความชื้นต่ำกว่า 15 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก เพื่อป้องกันและควบคุมจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเสื่อมเสียและช่วยยืดอายุผลิตภัณฑ์



รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นและค่าอวอเตอร์แอคทีวิตีของข้าวโมลต์หลังการคั่วและการนึ่งที่สภาวะต่าง ๆ

RB = ข้าวไรซ์เบอร์รี่;

RB (12-36) = ข้าวโมลต์ แช่น้ำ 12 ชั่วโมง และบ่ม 36 ชั่วโมง;

S (120-10) = ข้าวโมลต์นึ่ง 120 องศาเซลเซียส, 10 นาที;

S (120-20) = ข้าวโมลต์นึ่ง 120 องศาเซลเซียส, 20 นาที;

R (120-10) = ข้าวโมลต์คั่ว 120 องศาเซลเซียส, 10 นาที;

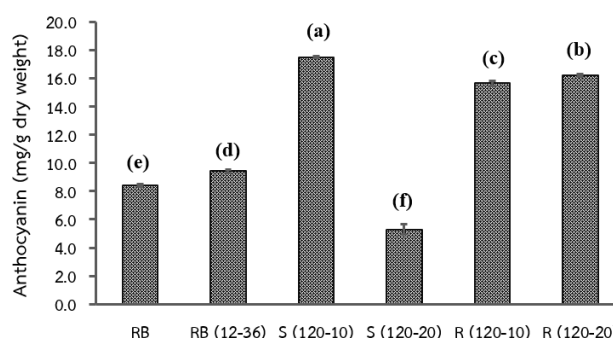
R (120-20) = ข้าวโมลต์คั่ว 120 องศาเซลเซียส, 20 นาที

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

3.2.3 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอนโทไซยานินของข้าวโมลต์หลังการคั่วและการนึ่งที่สภาวะต่าง ๆ

จากการวิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงปริมาณแอนโทไซยานินดังรูปที่ 4 พบว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ของแต่ละสภาวะการทดสอบโดยปริมาณแอนโทไซยานินเพิ่มขึ้นเมื่อนำข้าวโมลต์มาให้ความร้อนด้วยการคั่วที่เวลา 10-20 นาที รวมถึงการนึ่งที่เวลา 10 นาที อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มเวลาของการนึ่งเป็น 20 นาทีเกิดการลดลงอย่างชัดเจนของปริมาณแอนโทไซยานิน นั่นคือกรณี S (120-10) มีค่าแอนโทไซยานิน 17.48 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ลดลงเป็น 5.29 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง เมื่อเพิ่มระยะเวลาการนึ่งตามสภาวะ S (120-20) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปฏิกิริยาเมลลาร์ดหรือปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลชนิดไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างน้ำตาลรีดิวซ์กับกรดแอมิโนหรือสารประกอบไนโตรเจนโดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ผลที่ได้คือสารประกอบที่ให้สีน้ำตาล และกลิ่นรสต่าง ๆ ดังนั้นจึงพบว่าหลังกระบวนการคั่วข้าวโมลต์จะให้กลิ่นที่หอมในขณะที่การคั่วและการนึ่งที่เวลาเหมาะสมจะให้สีของข้าวโมลต์ที่เข้มขึ้น (รูปที่ 2) เมื่อตรวจสอบปริมาณแอนโทไซยานินด้วยเทคนิคการวัดค่าการดูดกลืนแสงจึงพบว่ามีแนวโน้ม

ของการเพิ่มขึ้นของปริมาณแอนโทไซยานิน อย่างไรก็ตามการนึ่งข้าวโมลต์ที่เวลามากเกินไปกลับส่งผลในทางตรงข้ามทั้งนี้ระหว่างกระบวนการให้ความร้อนด้วยการนึ่งซึ่งเป็นลักษณะความร้อนชื้น เมื่อเวลาการให้ความร้อนนานจะเกิดการชะล้างของเม็ดสีจนทำให้ปริมาณสารแอนโทไซยานินลดลงอย่างชัดเจน S (120-20) หรือสังเกตได้ว่าหลังกระบวนการนึ่งจะมีหยดน้ำสีม่วงเกิดขึ้นในขณะที่การคั่วไม่ปรากฏ [13]



รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงปริมาณสารแอนโทไซยานินของข้าวโมลต์หลังการคั่วและการนึ่งที่สภาวะต่าง ๆ

RB = ข้าวไรซ์เบอร์รี่;

RB (12-36) = ข้าวโมลต์ แช่น้ำ 12 ชั่วโมง และบ่ม 36 ชั่วโมง;

S (120-10) = ข้าวโมลต์นึ่ง 120 องศาเซลเซียส, 10 นาที;

S (120-20) = ข้าวโมลต์นึ่ง 120 องศาเซลเซียส, 20 นาที;

R (120-10) = ข้าวโมลต์คั่ว 120 องศาเซลเซียส, 10 นาที;

R (120-20) = ข้าวโมลต์คั่ว 120 องศาเซลเซียส, 20 นาที

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

3.3 ผลการทดสอบการผลิตผงข้าวโมลต์พันธุ์ไรซ์เบอร์รี่

จากผลิตภัณฑ์ข้าวโมลต์พันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ที่ผลิตได้ในขั้นตอนที่ 3.2 เลือกผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติที่ดีโดยพิจารณาในภาพรวมและมีแอนโทไซยานินในปริมาณสูงนั่นคือสภาวะ S (120-10) และ R (120-20) มาผลิตเป็นผงข้าวโมลต์ด้วยเทคนิคการโม่เปียก ทั้งนี้ได้ทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติกับผงข้าวไรซ์เบอร์รี่ที่ไม่ผ่านการงอกให้ผลดังตารางที่ 2

จากตารางที่ 2 พบว่าการผลิตผงข้าวโมลต์ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการให้ความร้อนจึงส่งผลต่อปริมาณแอนโทไซยานินที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) เมื่อเทียบกับผงจากข้าวไรซ์เบอร์รี่ (RB-F) เนื่องจากปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงแอนโทไซยานิน คือ อุณหภูมิ โดย

อุณหภูมิสูงนำมาซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าสีของแอนโทไซยานินที่มีแนวโน้มลดลง [13] สังเกตได้จากการลดลง ($P \leq 0.05$) ของค่าความสว่าง (L^*) และค่าความเป็นสีแดง (a^*) ของผงข้าวมอลต์เมื่อเทียบกับผงจากข้าวไรซ์เบอร์รี่ ในขณะที่ค่า b^* แสดงความเป็นสีเหลืองมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ($P > 0.05$) และเมื่อพิจารณาค่าความชื้นและค่าวอเตอร์แอก-

ติวิตีพบว่าผลิตภัณฑ์ผงข้าวมอลต์และผงจากข้าวไรซ์เบอร์รี่ให้ค่าความชื้นระหว่าง 11-13 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก และค่าวอเตอร์แอกติวิตี 0.3-0.5 โดยช่วงความชื้นและช่วงของค่าวอเตอร์แอกติวิตีดังกล่าวเป็นช่วงที่เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์กลุ่มอาหารแห้งจึงช่วยยืดอายุการเก็บรักษาให้ยาวนานขึ้น[16]

ตารางที่ 2 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของผงแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ ผงข้าวมอลต์ที่สภาวะต่าง ๆ

ตัวอย่าง	คุณสมบัติ					
	แอนโทไซยานิน	ความชื้น	วอเตอร์แอกติวิตี	ค่าสี		
	(มิลลิกรัมต่อกรัม น้ำหนักแห้ง)	(เปอร์เซ็นต์ มาตรฐานเปียก)	(a_w)	L^*	a^*	b^*
RB-F	$3.88^a \pm 0.69$	$13.37^a \pm 1.10$	$0.51^a \pm 0.02$	$18.30^a \pm 0.36$	$1.53^a \pm 0.06$	$5.17^a \pm 0.12$
S (120-10) - F	$1.70^c \pm 0.11$	$11.32^b \pm 0.32$	$0.38^b \pm 0.01$	$16.83^b \pm 0.06$	$1.30^b \pm 0.00$	$5.50^a \pm 0.26$
R (120-20) - F	$2.93^b \pm 0.42$	$11.73^{ab} \pm 1.13$	$0.35^b \pm 0.21$	$17.13^b \pm 0.07$	$1.27^b \pm 0.07$	$5.17^a \pm 0.15$

abc อักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบโดย DMRT (mean $\pm$ SD) RB-F = ผงจากข้าวไรซ์เบอร์รี่; S (120-10) - F = ผงข้าวมอลต์จากสภาวะ S (120-10); R (120-20) - F = ผงข้าวมอลต์จากสภาวะ R (120-20)

4. สรุปผลการวิจัย

ข้าวไรซ์เบอร์รี่เป็นข้าวที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง โดยเฉพาะมีแอนโทไซยานินและเมื่อนำมาผลิตเป็นข้าวมอลต์ด้วยกระบวนการเพาะงอกจากข้าวเปลือกซึ่งกระบวนการดังกล่าวสามารถทำให้เกิดการคงอยู่ของแอนโทไซยานินได้ในปริมาณใกล้เคียงกับข้าวไรซ์เบอร์รี่ก่อนงอก รวมถึงการเปลี่ยนแปลงค่าสีก่อนและหลังการงอกพบว่าค่าความสว่างและค่าความเป็นสีแดงลดลงเล็กน้อยในขณะที่ค่าความเป็นสีเหลืองมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก เมื่อนำข้าวมอลต์มาให้ความร้อนด้วยการนึ่งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เวลา 10 นาที และการคั่วที่เวลา 10-20 นาที อุณหภูมิเดียวกันเพื่อเพิ่มความหอมก่อนนำไปลดความชื้นจนกระทั่งความชื้นสุดท้ายอยู่ที่ 9-10 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียกพบว่าแอนโทไซยานินมีปริมาณเพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มลดลงเมื่อนำมาผลิตเป็นผงข้าวมอลต์ ทั้งนี้ปัจจัยที่ส่งผลต่อการลดลง ได้แก่ การละลายออกมาของเม็ดสีในช่วงการแช่เมล็ดข้าวในน้ำ และการให้ความร้อนในช่วงการอบแห้ง อย่างไรก็ตามผงข้าวมอลต์จากกระบวนการดังกล่าว

ยังคงมีปริมาณแอนโทไซยานินใกล้เคียงกับผงไรซ์เบอร์รี่ที่ไม่ผ่านกระบวนการงอก ดังนั้นผลิตภัณฑ์ผงข้าวมอลต์จึงมีประโยชน์ในการนำไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการแปรรูปอื่น ๆ และผลิตภัณฑ์ดังกล่าวมีความชื้นต่ำกว่า 13 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก และค่าวอเตอร์แอกติวิตีต่ำกว่า 0.5 จึงเป็นผลิตภัณฑ์อาหารแห้งที่สามารถเก็บรักษาไว้ได้นาน

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่สนับสนุนวัสดุอุปกรณ์ สถานที่ในการทำวิจัย และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่สนับสนุนทุนวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Singhasurasak, H. 2014. Rice berry. Available Source: <http://riceberry-rice.blogspot.com/2013/12/blog-post.html>. (May, 25, 2014).

- [2] Chrispeels, M.L. and E.S. David. 1994. **Plants, Genes and Agriculture**. Jones and Bartlett Publishers. London. England. 478 p.
- [3] ศูนย์วิทยาศาสตร์ข้าว. 2557. **ข้าวไรซ์เบอร์รี่**. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: http://sites.google.com/site/baanm_aklomp/khaw-risbe-xri (2 มกราคม 2557).
- [4] Varanyanond, W., P. Tungtrskul, V. Surojanametakul, L. Watanasiritham, and W. Luxiang. 2005. **Effects of water soaking on gamma-aminobutyric acid (GABA) in germs of different Thai rice varieties**. Kasetsart Journal (National Science.). 39 (3): 411-415.
- [5] Komatsuzaki, N., K. Tsukahara, H. Toyoshima, T. Suzuki, N. Shimizu, and T. Kimura. 2007. **Effect of soaking and gaseous treatment on GABA content in germinated brown rice**. Journal of Food Engineering. 78: 556-560.
- [6] ยุพกนิษฐ์ พ่วงวีระกุล และ ชลมารค พ่วงวีระกุล. 2553. **การผลิตข้าวมอลต์นี้้วิตามินบีสูงทางการค้า**. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. สำนักงานพัฒนาการวิจัยเกษตร (องค์การมหาชน).
- [7] AOAC. 1990. Official Methods of Analyses of the Association of Official Analytical Chemists. 15th ed. Association of Official Analytical Chemists.
- [8] นิศากร สุวรรณ. 2548. **ผลของวัสดุเคลือบผิวต่อความคุมการเกิดสีน้ำตาลและการสูญเสียน้ำหนักของผลิตภัณฑ์**. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาชีววิทยา มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 176 หน้า.
- [9] Ranganna, S. 1977. Plant pigment. p. 72-93. In S. Ragana (ed.). **Manual of analysis of fruit and vegetable produce**. Tata McGraw-Hill Publishing Co., Ltd, New Delhi.
- [10] Komatsuzaki, N., K. Tsukahara, H. Toyoshima, T. Suzuki, N. Shimizu, and T. Kimura. 2003. **Effect of soaking and gaseous phase sprout processing on the GABA content of pre-germinated brown rice**. The American society Society of agricultural Agricultural and biological Biological engineer Engineer. Paper number: 036073.
- [11] Kihara, M., Y. Okada, T. Iimure, and K. Ito. 2007. **Accumulation and degradation of two functional constituents, GABA and α -Glucan, and their varietals difference germinated barley grains**. Breeding Science. 57(2): 85-89.
- [12] ราณี สุรกาญจน์กุล และปกรณ อุ่นประเสริฐ. 2556. **การผลิตก๊วยเตี๋ยด้วยแป้งข้าวมอลต์**. ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง. 43(1):68-78.
- [13] Nguyen Phuoc Minh. 2014. **Nutritional powder produced from sticky black rice malt**. International Journal of Multidisciplinary Research and Development. 1(3): 49-59.
- [14] ยุพกนิษฐ์ พ่วงวีระกุล รัชฎาพร อินพา ทิพวรรณ ใจกว้าง. 2555. **การผลิตข้าวกล้องมอลต์จากข้าวไร้พื้นที่สูงในจังหวัดเชียงใหม่**. วารสารวิชาการสมาคมสถาบันอุดมศึกษาเอกชนแห่งประเทศไทย (สสอท.). 18(1):105-118.
- [15] Sutharut, J. and J. Sudarat. 2012. **Total anthocyanin content and antioxidant activity of germinated colored rice**. International Food Research Journal. 19(1): 215-221.
- [16] Delong and Deanna. 2006. **How to dry foods**. Rev. ed. New York. HPBook. 208 p.

การออกแบบและพัฒนาเครื่องทอดหอมเจียว

Design and development of Shallot frying machine

จงกล สุภารัตน์¹ ขวลิต อินปัญญา² ศิริชัย ต่อสกุล³

chongkol12@msn.com¹, ch.inpunyo@gmail.com², sirichai.to@en.rmutt.ac.th³

บทคัดย่อ

เครื่องทอดหอมเจียวถูกออกแบบและสร้างขึ้นเพื่อศึกษาและพัฒนากระบวนการผลิตหอมเจียวให้มีคุณภาพ อำนวยความสะดวก ลดการใช้แรงงาน และลดต้นทุนในการทอดหอมเจียว สำหรับใช้ในวิสาหกิจขนาดกลาง และขนาดย่อม ที่แปรรูปหอมแดงจำหน่าย เครื่องต้นแบบประกอบไปด้วย โครงสร้างเครื่อง หม้อน้ำมันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 400 มิลลิเมตร ลึก 200 มิลลิเมตร หม้อตะแกรงทอดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 380 มิลลิเมตร ลึก 150 มิลลิเมตร ขนาดรูตะแกรง 2 มิลลิเมตร ชุดใบกวนมีรัศมีการกวน 200 มิลลิเมตร ใช้มอเตอร์ขนาด 25 วัตต์ เป็นต้นกำลัง และใช้ความร้อนจากฮีตเตอร์ ขนาด 2.8 กิโลวัตต์ การทำงานของเครื่องโดยเริ่มจากการเทน้ำมันลงไป ในหม้อน้ำมัน ตั้งอุณหภูมิฮีตเตอร์ และรอให้น้ำมันร้อนตามอุณหภูมิที่กำหนด จากนั้นใส่หอมซอยลงในน้ำมัน และทำการเปิดมอเตอร์ใบกวน เมื่อหอมเจียวสุกได้ที่ก็จะยกตะแกรงทอดออกและเทหอมลงตะแกรงสะเด็ดน้ำมัน จากผลการทดลองเครื่องต้นแบบสามารถทำงานได้ดีที่อุณหภูมิการทอด 170 องศาเซลเซียส และที่ความเร็วรอบของใบกวน 45 รอบต่อนาที มีความสามารถในการทอดหอมเจียว 3 กิโลกรัม ด้วยเวลา 28.4 นาที สามารถใช้น้ำมันทอดซ้ำได้ถึง 6 ครั้ง โดยที่ปริมาณสารโพลาร์ไม่เกิน 25 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ได้ผลิตหอมเจียวที่มีคุณภาพ และปลอดภัยต่อผู้บริโภค

คำสำคัญ: หอมหัวแดง วิสาหกิจขนาดกลาง และขนาดย่อม หอมเจียว สารโพลาร์

Abstract

Shallots frying machine is designed and built for the purpose of developing and studying process in frying shallot in order to ensure a good quality, convenience, and reduce workforce and cost in producing fried shallots. The machine will be used in small to medium enterprise and transform shallots in order to sell them. Prototype of the machine comprises a machine frame, an oil pot with 400 mm in diameter and 200 mm in depth, a deep fry sieve with 380 mm in diameter and 150 mm in depth. The sieve hole is 2 mm wide the stirring blade has 200 mm radius. It uses 25 W motor as a driving force and a 2.8 kW heater to generate heat. The machine works by first pouring oil into the pot and setting heater temperature. When the oil is hot at the setting temperature the shallots are poured into the oil. After that, stirring blade will start stirring the shallots.

^{1,2,3} อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Then the cooked shallots are transfered from sieve to oil draining sieve. The experiment shows that the prototype machine can work best when temperature of the oil is at 70 °C with the blade rotating rate of 45 rpm. The machine can fry up to 3 kg of shallot within 28.4 min. the reused oil could be done up to 6 times while maintaining polar substances at 25% or less Therefore yielding fried shallots with good quality and safe to consumers is obtained.

Keywords: shallots, small to medium enterprise, fried shallots, polar substances

1. บทนำ

ปัจจุบันวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม หรือ SMEs เริ่มมีการขยายตัวเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากปัจจัยหลาย ๆ ด้าน เช่นการสนับสนุนจากภาครัฐ [1] และความต้องการของผู้บริโภคมีความต้องการเพิ่มมากขึ้น ซึ่งรวมไปถึงการขยายตัวของตลาดในประเทศ โดยปี 2558 GDP ของภาคการเกษตร สูงถึง 1,237,309 ล้านบาท หรือคิดเป็นร้อยละ 9.1 [2] ทำให้เกิดช่องทางในการสร้างรายได้ให้กับผู้ประกอบการรายย่อย หรือแม้แต่การรวมกลุ่มกันของคนในชุมชนที่สามารถก่อตั้งเป็นวิสาหกิจชุมชนเพื่อสร้างผลิตภัณฑ์ออกมาจำหน่าย

หอมแดงเป็นพืชอีกชนิดที่มีการปลูกเป็นจำนวนมากในภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคเหนือ หอมแดง (*Allium ascalonicum*) เป็นพืชในวงศ์ Alliaceae [3] ซึ่งเป็นพืชที่มีประโยชน์ทางด้านสมุนไพรและมีสรรพคุณทางยาเช่น แก้อาการคัน แก้อหอบหืด ช่วยลดระดับคอเลสเตอรอลในเลือด [4] และยังเป็นพืชเศรษฐกิจอีกประเภทของไทย ในปี 2558 พบว่ามีผลผลิตสูงถึง 129,741 ตัน [5] ซึ่งการจำหน่ายหอมแดงในท้องตลาดจะมีราคาอยู่ระหว่าง 40 - 70 บาทต่อกิโลกรัม ขึ้นอยู่กับปริมาณหอมแดงในท้องตลาดด้วย และในบางปีเกษตรกรต้องประสบปัญหาจำนวนหอมแดงในท้องตลาดมากเกินไป ความต้องการ ทำให้มีราคาตกต่ำ บางครั้งทำให้เกิดการเน่าเสีย เนื่องจากเกษตรกรไม่สามารถขายได้ ดังนั้นการแปรรูปหอมแดงเพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับเกษตรกร เช่น หอมเจียวจึงเป็นอีกทางเลือก กระบวนการผลิตหอมเจียวแบ่งออกเป็นสามขั้นตอน คือ การปอกหัวหอม การหั่นซอย และการเจียว ซึ่งปัจจุบันการทอดหอมเจียวยังใช้แรงงานคน

และเครื่องมือที่ล้าสมัย เช่นการเจียวในกระทะใบบัวที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งการทอดหอมเจียวแต่ละครั้งจะใช้น้ำมันพืชเป็นจำนวนมากเพื่อให้อุณหภูมิน้ำมันคงที่ หอมเจียวได้รับความร้อนทั่วถึง ทำให้หอมเจียวสุกและไม่เกิดการไหม้ มีการศึกษามากมายเกี่ยวกับกระบวนการทอดเพื่อแปรรูปอาหารทั้งในด้านคุณภาพของอาหาร ด้านปัจจัยที่มีผลต่อการทอด เช่น ความชื้นของวัตถุดิบ วิธีการทอด อุณหภูมิ หรือแม้แต่ชนิดของน้ำมันที่ใช้ทอด [6-7]

ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้จึงดำเนินการออกแบบและสร้างเครื่องทอดหอมเจียวต้นแบบ เพื่อทำการศึกษาและพัฒนากระบวนการผลิตหอมเจียวให้มีคุณภาพ ลดต้นทุนในการทอดหอมเจียว อำนวยความสะดวก ลดปัญหาและตอบสนองปัจจัยต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น โดยออกแบบให้มีถังทอดและใบพัดในการทอดหอมเจียว ซึ่งจะทำให้หอมนั้นสุกเท่า ๆ กันและเพื่อลดความเมื่อยล้าของผู้ผลิต

2. วิธีการศึกษา

2.1 ศึกษาข้อมูลสำหรับการออกแบบ

หอมแดงเป็นพืชที่มีลำต้นอยู่ใต้ดิน เป็นไม้หัว มีลักษณะเป็นรูปไข่และพองโต และเรียกกันอีกอย่างว่า บัลบ์ (Bulb) เรียงกันเป็นชั้น ๆ ที่มีเปลือกนอกสีม่วงปนแดง ส่วนใหญ่ขนาดหัวหอมที่นำมาหั่นซอยเพื่อผลิตหอมเจียวจะมีขนาดอยู่ระหว่าง 2- 4.5 เซนติเมตร และมีขนาดความหนาหลังการหั่นซอยอยู่ที่ 2 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 1 ซึ่งขนาดความหนาของหอมซอยควรมีความสม่ำเสมอ เนื่องจากเมื่อนำไปเจียวจะทำให้ได้หอมเจียวที่มีคุณภาพ นอกจากนี้อุณหภูมิในการทอดควรอยู่ระหว่าง 170 - 210 องศาเซลเซียส [8]



(ก)



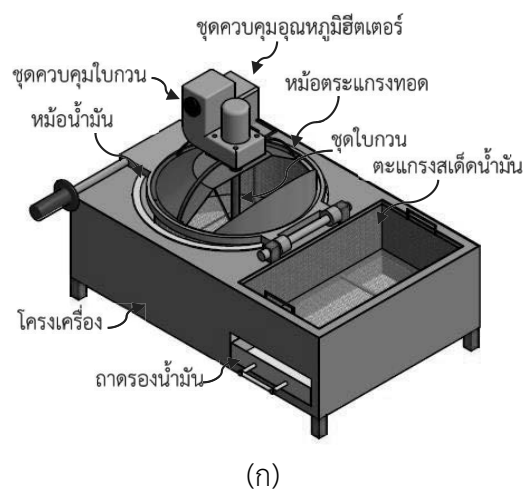
(ข)

รูปที่ 1 (ก) ลักษณะหอมซอย (ข) การวัดขนาดหอมซอยหลังการหั่น

อย่างไรก็ตามนอกจากคุณภาพของหอมเจียว ความปลอดภัยของผู้บริโภคถือว่ามีความสำคัญไม่แพ้กัน เนื่องจากน้ำมันที่ใช้ในกระบวนการทอดหอมเจียวจะมีการเสื่อมสภาพของน้ำมันทอดซ้ำที่เกิดจากโครงสร้างของน้ำมัน ถูกเปลี่ยนเป็นสารประกอบ ที่เป็นอันตรายต่อร่างกาย เช่น สารโพลาร์ (Polar compounds) ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิด โรคความดันโลหิตสูง และหลอดเลือดหัวใจตีบ และสาร โพลีไซคลิกอะโรมาติก ไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic aromatic hydrocarbons: PAHs) ซึ่งเป็นสารที่ก่อให้เกิด โรคมะเร็ง [9-10] ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากน้ำมันทอดซ้ำ โดยการวัดคุณภาพของน้ำมันทอดซ้ำสามารถวัดได้จาก ปริมาณสารโพลาร์ในน้ำมัน ซึ่งควรมีค่าไม่เกิน 25% ของน้ำหนัก ตามประกาศของกระทรวงสาธารณสุข [11]

2.2 การออกแบบเครื่องต้นแบบ

จากผลการศึกษาปัญหาและข้อมูลต่าง ๆ สำหรับการออกแบบเครื่องทอดหอมเจียวต้นแบบ เพื่อใช้ในธุรกิจ ขนาดเล็กนั้น สามารถออกแบบโดยใช้หลักการออกแบบ ทางวิศวกรรม และใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการ ออกแบบ (CAD) [12-13] ส่วนประกอบของเครื่อง ประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลัก คือ โครงสร้างเครื่อง หม้อน้ำมัน ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 400 มิลลิเมตร ความลึก 200 มิลลิเมตร หม้อตะแกรงทอด มีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 380 มิลลิเมตร ความลึก 150 มิลลิเมตร ขนาดรูตะแกรง 2 มิลลิเมตร ชุดใบกวน มีรัศมีการกวน 200 มิลลิเมตร สามารถปรับความเร็วรอบได้สูงสุด 50 รอบ ต่อนาที ชุดควบคุมอุณหภูมิฮีตเตอร์ ขนาด 2.8 กิโลวัตต์ ดังรูปที่ 2 ส่วนประกอบทั้งหมดที่สัมผัสกับหอมโดยตรง จะใช้ สแตนเลส เกรด 304 ซึ่งเป็นวัสดุสำหรับอุตสาหกรรม อาหาร [14]



(ก)



(ข)

รูปที่ 2 (ก) แบบเครื่องต้นแบบด้วยโปรแกรมด้าน CAD
(ข) เครื่องทอดหอมเจียวต้นแบบ

2.3 การทดลอง

วิธีการทดลองการทำงานของเครื่องโดยเริ่มจากการเทน้ำมันลงไปในห้องน้ำมัน 13 ลิตร ตั้งอุณหภูมิฮีตเตอร์และรอให้น้ำมันร้อนตามอุณหภูมิที่กำหนด จากนั้นจึงใส่หอมซอย 3 กิโลกรัม ลงในน้ำมัน และทำการเปิดมอเตอร์ใบกวนตามความเร็วรอบกำหนด ดังรูปที่ 3 เมื่อหอมเจียวสุกได้ที่ก็จะยกตะแกรงทอดออกเพื่อเทหอมลงตะแกรงสะเด็ดน้ำมัน ซึ่งหอมเจียวที่สุกได้ที่จะมีสีเหลืองอมน้ำตาลเข้มดังรูปที่ 4



รูปที่ 3 การทอดหอมเจียวด้วยเครื่องต้นแบบ



รูปที่ 4 สีของหอมเจียวหลังการทอด

หลังจากการทดสอบเบื้องต้นและแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ เครื่องทอดหอมเจียวต้นแบบได้ถูกทดสอบและประเมินสมรรถนะในการทำงาน รวมทั้งคุณภาพในการรักษาระดับอุณหภูมิน้ำมัน โดยประเภทของหอมแดงที่ใช้ในการทดลอง คือ หอมแดงไทย ที่มีขนาดความหนาหลังการหั่นซอยประมาณ 2 มิลลิเมตร และทำการทอดโดยใช้น้ำมันปาล์ม ในการทดลองทอดหอมเจียวด้วยเครื่องต้นแบบนี้ทำการทดลองภายใต้เงื่อนไข อุณหภูมิ และความเร็วของ

ใบกวน เพื่อหาประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องที่ดีที่สุด โดยกำหนดอุณหภูมิในการทอดหอมเจียว 3 ระดับ ได้แก่ 170 190 และ 210 องศาเซลเซียส ขณะที่ความเร็วของใบกวนแบ่งออกเป็น 3 ระดับ ได้แก่ 25 35 และ 45 รอบต่อนาที

ในการทดลองน้ำมันที่ใช้ในการทอดจะถูกเก็บตัวอย่างหลังการทอดทุกครั้ง เพื่อทดสอบคุณภาพน้ำมันที่มีการนำมาทอดซ้ำ ซึ่งตัวอย่างน้ำมันที่ได้ถูกนำมาทดสอบหาปริมาณสารโพลาร์ (Polar Metabolites Test) โดยใช้ชุดทดสอบสารโพลาร์ในน้ำมันทอดซ้ำของศูนย์วิทยาศาสตร์การแพทย์อุบลราชธานีเพื่อตรวจหาค่าสารโพลาร์ในน้ำมันทอดซ้ำ [15] โดยค่าการทดสอบสามารถเทียบกับแถบสีอ่านค่าได้ดังรูปที่ 5

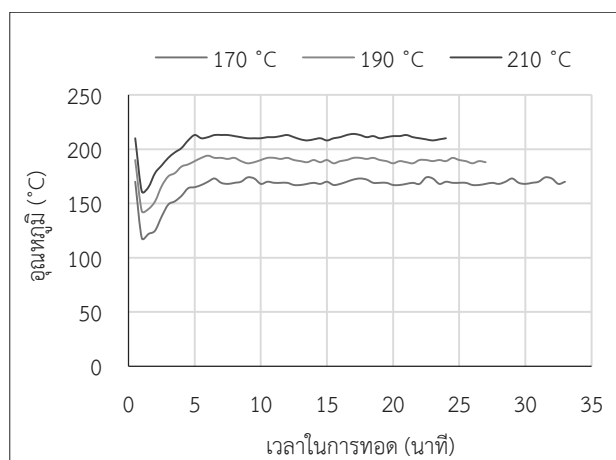


รูปที่ 5 แสดงวิธีการอ่านผลทดสอบสารโพลาร์ในน้ำมัน [16]

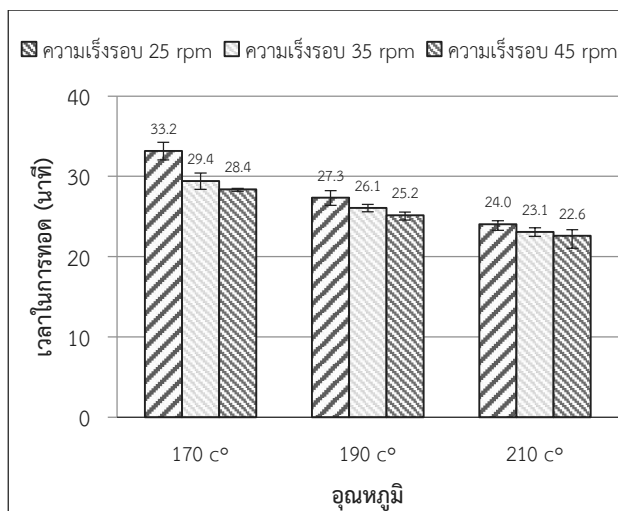
3 ผลการทดลอง

จากการทดลองทอดหอมเจียวที่อุณหภูมิในการทอด 3 ระดับ พบว่าเมื่อทำการป้อนวัตถุดิบลงไปในน้ำมันร้อนทำให้อุณหภูมิในช่วงแรกลดลง ดังรูปที่ 6 โดยอุณหภูมิน้ำมันมีการลดลงสูงสุดประมาณ 50 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นตามที่กำหนด ซึ่งใช้เวลาประมาณ 4-5 นาที อุณหภูมิจึงเริ่มคงที่ การทดลองภายใต้ตัวแปรที่แตกต่างกันนั้น พบว่าเวลาที่ใช้ในการทอดหอมเจียวมีความแตกต่างกัน ซึ่งการเพิ่มอุณหภูมิทำให้เวลาในการทอด

หอมเจียวลดลง ดังรูปที่ 7 การใช้อุณหภูมิสูงสุด 210 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการเจียวต่ำสุด ขณะที่ความเร็วของใบกวนส่งผลให้เวลาในการเจียวลดลงเช่นกัน การใช้ความเร็วของใบกวน 45 รอบต่อนาที ทำให้เวลาในการทอดต่ำสุด เมื่อเทียบกับความเร็วของใบกวนแต่ละระดับ การเพิ่มความเร็วของใบกวน หอมเจียวจะได้รับความร้อนอย่างทั่วถึง ระหว่างการทอด ทำให้หอมเจียวที่ได้มีความกรอบสม่ำเสมอ และสุกเท่า ๆ กัน แต่หากใบกวนมีความเร็วรอบสูงเกินไป จะทำให้หอมแดงจับกันเป็นก้อน และไม่มีการคลุกเคล้ากัน ภายในหม้อน้ำมัน จนทำให้หอมเจียวเกิดการไหม้ได้



รูปที่ 6 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิน้ำมันระหว่างการทอด



รูปที่ 7 ระยะเวลาในการทอดหอมเจียวที่อุณหภูมิและความเร็วรอบใบกวนแตกต่างกัน

จากผลการทดลองที่อุณหภูมิ 170 190 และ 210 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบใบกวน 45 รอบต่อนาที เมื่อนำตัวอย่างน้ำมันมาทดสอบการเกิดสารโพลาร์ในน้ำมันทอดซ้ำ พบว่าการทอดหอมเจียวที่อุณหภูมิสูงส่งผลต่ออัตราการเพิ่มขึ้นของสารโพลาร์ [17] ดังตารางที่ 1 ที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส สามารถใช้น้ำมันทอดซ้ำได้ถึง 6 ครั้ง โดยที่ค่าโพลาร์ไม่เกิน 25 เปอร์เซนต์ หรือมีระยะเวลาในการทอดซ้ำรวมแล้วไม่เกิน 170 นาที ขณะที่การใช้ อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส สามารถใช้น้ำมันทอดซ้ำได้ 5 ครั้ง หรือมีระยะเวลาในการทอดซ้ำรวมแล้วไม่เกิน 125 นาที และการใช้ อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส สามารถใช้น้ำมันทอดซ้ำได้ 4 ครั้ง หรือมีระยะเวลาในการทอดซ้ำรวมแล้วไม่เกิน 90 นาที จากผลการทดลองทั้ง 3 อุณหภูมิ พบว่าการทอดหอมเจียวที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส น้ำมันจะมีอายุการใช้งานและมีจำนวนในการทอดซ้ำมากกว่า การทอดหอมเจียวที่อุณหภูมิ 190 และ 210 องศาเซลเซียส

จากผลการทดลองดังกล่าวอุณหภูมิในการทอดหอมเจียวที่ 170 องศา เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการทำงานของเครื่องต้นแบบ เนื่องจากสามารถเพิ่มอายุการใช้งานของน้ำมัน และสามารถลดต้นทุนค่าน้ำมันที่ใช้ในการทอดหอมเจียวได้ นอกจากอุณหภูมิในการทอดแล้ว ขนาดของหอมขอยังส่งผลต่ออายุการใช้งานของน้ำมัน เนื่องจากระหว่างการทอด เศษของหอมแดงที่มีขนาดเล็กจะตกลงไปอยู่บริเวณก้นหม้อน้ำมัน และทำให้ไหม้ก่อนที่หอมทั้งหมดจะสุก ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้น้ำมันเสื่อมคุณภาพเร็วขึ้น

ตารางที่ 1 ผลการวัดปริมาณสารโพลาร์ในน้ำมันทอดซ้ำ

อุณหภูมิ (°C)	ความเร็วรอบ (RPM)	ปริมาณสารโพลาร์ (%)							
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	ครั้งที่ 7	ครั้งที่ 8
170	25	9 - 20	9 - 20	9 - 20	20 - 24	20 - 24	24 - 25	25 - 26	26 - 27
	35	9 - 20	9 - 20	9 - 20	20 - 24	20 - 24	24 - 25	25 - 26	26 - 27
	45	9 - 20	9 - 20	9 - 20	20 - 24	20 - 24	24 - 25	25 - 26	26 - 27
190	25	9 - 20	9 - 20	9 - 20	20 - 24	20 - 24	25 - 26	26 - 27	26 - 27
	35	9 - 20	9 - 20	9 - 20	20 - 24	20 - 24	25 - 26	26 - 27	26 - 27
	45	9 - 20	9 - 20	9 - 20	20 - 24	20 - 24	25 - 26	26 - 27	26 - 27
210	25	9 - 20	9 - 20	20 - 24	24 - 25	25 - 26	26 - 27	26 - 27	26 - 27
	35	9 - 20	9 - 20	20 - 24	24 - 25	25 - 26	26 - 27	26 - 27	26 - 27
	45	9 - 20	9 - 20	20 - 24	24 - 25	25 - 26	26 - 27	26 - 27	26 - 27

4. สรุปผลการทดลอง

จากการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องทอดหอมเจียวโดยใช้ตัวชี้วัดผลการศึกษา คือ ความสามารถในการทำงาน และอายุการใช้งานของน้ำมัน พบว่าเครื่องต้นแบบสามารถทำงานได้ดีที่อุณหภูมิการทอด 170 องศาเซลเซียส และที่ความเร็วรอบของใบกวน 45 รอบต่อนาที มีความสามารถในการทอดหอมเจียว 3 กิโลกรัม ด้วยเวลา 28.4 นาที และสามารถใช้น้ำมันทอดซ้ำได้ถึง 6 ครั้ง โดยที่ปริมาณสารโพลาร์ไม่เกิน 25 เปอร์เซ็นต์

ผลการทดสอบปริมาณสารโพลาร์สามารถนำไปใช้เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการกำหนดอายุการใช้งานของน้ำมันทอดซ้ำในกระบวนการทอดหอมเจียวจากเครื่องต้นแบบได้ โดยอ้างอิงจากอุณหภูมิในการทอด เพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐานการใช้น้ำมันทอดซ้ำ ที่กระทรวงสาธารณสุขกำหนด

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก RMUTT financial budget in fiscal in 2016 ที่ได้ให้งบประมาณสนับสนุนโครงการวิจัย และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ให้การสนับสนุนในด้านต่าง ๆ จะโครงการงานวิจัยนี้

ประสบผลสำเร็จในการดำเนินงานเป็นอย่างดี ทางผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] ข้าว สสว. รับมอบนโยบายส่งเสริม SMEs พร้อมเดินทางปี 2559. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <http://www.sme.go.th/th/index.php/news1/1015-smes-2559> (5 มกราคม 2560).
- [2] สำนักงานส่งเสริมวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม (สสว.), 2559. รายงานสถานการณ์ วิสาหกิจขนาดกลาง และขนาดย่อม ปี 2559
- [3] Smith, C., Lombard, KA., Peffley, EB. and Liu, W., 2003. Genetic Analysis of Quercetin in onion (Allium cepa L.). The Texas Journal of Agriculture and Natural Resource. No. 16. pp. 24-28
- [4] สุกัญญา เดชอดิษฐ์, 2553. บทความสมุนไพร เรื่องของหอม. ภาควิชาเภสัชเวชและเภสัชพฤกษศาสตร์ คณะเภสัชศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา
- [5] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. ข้อมูลการผลิตสินค้าการเกษตร 2558. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <http://www.oae.go.th>. (5 มกราคม 2560).

- [6] วารวิชนี ลอปกุลเกียรติ, วิไล รัชสาดทอง, นื่องนุช ศิริวงศ์, 2533. **ผลของปัจจัยในการทอดต่อคุณสมบัติบางประการของขนมขบเคี้ยวที่ได้จากการทอดเฟลลิต**. วารสารบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ฉบับที่ 3. หน้า 83-95.
- [7] จริยา สุขจันทร์, กาสิมัท หะมะ, 2551. **ผลของน้ำมันที่ใช้ทอดต่อคุณภาพของกล้วยหินฉาบ**. วารสารมหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา ฉบับที่ 3. หน้า 11-18.
- [8] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, นิธิยา รัตนานนท์. **Frying / การทอด**. ศูนย์เครือข่ายข้อมูลอาหารครบวงจร. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0347/frying-การทอด>. (15 กุมภาพันธ์ 2560).
- [9] นิตยสารฉลาดซื้อ. 2556. **Consumer Justice Now!** ฉบับที่ 144, ปีที่ 19. หน้า 26-31.
- [10] อภิญญา ตันทวีวงศ์, นวพร ต่อมกระโทก, 2555. **ปฏิกิริยาน้ำมันทอดซ้ำ จากกันกระหะ สู่วาระแห่งชาติ**. พิมพ์ครั้งที่ 1. ศูนย์พัฒนาวิชาการและกลไกการคุ้มครองผู้บริโภคด้านสุขภาพ, กรุงเทพฯ.
- [11] ประกาศกระทรวงสาธารณสุข 2547. **กำหนดปริมาณสารโพลาร์ในน้ำมันที่ใช้ทอดหรือประกอบอาหารเพื่อการจำหน่าย**. ฉบับที่ 283.
- [12] Krutz, G., Thomson, L., Claar, P., 1994. **Design of Agricultural Machinery**. John Wiley and Sons. New York Chichester Brisbane, Toronto, Singapore. pp. 472
- [13] Shigley, J.E., Mischke, C.R., 1989. **Mechanical Engineering Design**. Edition, McGraw-Hill Book Company, USA. Pp. 779.
- [14] อติศักดิ์ ฤชา และ มัติ ศรีหล้า, 2558. **เครื่องฝานกล้วยทำกล้วยฉาบ**. วารสารเกษตรพระวรุณ. ปีที่ 12 ฉบับที่ 2. หน้า 136-143.
- [15] กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข. **คู่มือการใช้ชุดทดสอบอาหาร**. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : http://dmsc2.dmsc.moph.go.th/webroot/BQSF/File/food_safety/document/foodsafety%20manual_fulltext.pdf. (24 กุมภาพันธ์ 2560).
- [16] SANSABAY SHOP. ชุดทดสอบสารโพลาร์ในน้ำมันทอดซ้ำ. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <http://www.sansabaytwelve.com/f015.php>. (24 กุมภาพันธ์ 2560).
- [17] ภาควิชา อดุลยเดชจิตร, 2559. **การศึกษาความสัมพันธ์ระยะเวลาต่อการเกิดสารโพลาร์ในน้ำมันที่ใช้ทอดอาหารประเภทเนื้อและแป้ง**. การประชุมวิชาการและเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ ครั้งที่ 3 ก้าวสู่ทศวรรษที่ 2: บูรณาการงานวิจัย ใช้องค์ความรู้สู่ความยั่งยืน, จังหวัดนครราชสีมา. หน้า 401-408.

**คุณสมบัติด้านกำลังและเส้นโค้งการทรุดตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์
แบบไม่หยั่งลึกที่ทำด้วยวิธีอย่างง่าย**
**Strength Properties and Settlement-time curve
of Floating Soil-Cement Column Provided by Simple Method**

สุธี ปิยะพิพัฒน์¹

suthee.p@en.rmutt.ac.th¹

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาคุณสมบัติด้านกำลังในเทอมของค่าแรงกดทิศทางเดียว และหาเส้นโค้งการทรุดตัวกับเวลาของเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึกที่ถูกทำขึ้นด้วยวิธีอย่างง่ายเพื่อใช้ในชุมชนท้องถิ่น โดยวิธีที่นำเสนอใช้เครื่องมือที่สามารถจัดหาและจัดทำได้อย่างง่ายโดยบุคคลทั่วไป มีขั้นตอนในการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ 4 ขั้นตอน ดังนี้ 1) ขั้นตอนการจัดทำหลุม 2) ขั้นตอนการผสมน้ำกับดิน 3) ขั้นตอนการผสมซีเมนต์ และ 4) ขั้นตอนการใส่ดินซีเมนต์ สำหรับประสิทธิภาพของวิธีอย่างง่ายนี้ถูกแสดงด้วยการเปรียบเทียบกับวิธีอัดฉีดแรงดันสูงโดยใช้ค่าแรงกดแกนเดียวและค่าความหนาแน่นแห้งของเสาเข็มดินซีเมนต์ นอกจากนี้ทำการทดสอบให้น้ำหนักกระทำแก่เสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อตรวจสอบค่าการทรุดตัวของทั้ง 2 วิธี สถานที่ทดสอบถูกจัดเตรียมในพื้นที่บริเวณจังหวัดปทุมธานี ประเทศไทย ซึ่งชั้นดินเป็นดินเหนียวอ่อน เสาเข็มดินซีเมนต์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.50 เมตร และยาว 4.0 เมตร ถูกสร้างด้วยวิธีที่นำเสนอและด้วยวิธีอัดฉีดแรงดันสูง ตัวอย่างทดสอบใช้เครื่องมือเจาะแก่นเก็บตัวอย่างจากเสาเข็มดินซีเมนต์ เปรียบเทียบผลการทดสอบพบว่าค่าแรงกดแกนเดียวของเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยวิธีที่นำเสนอมีค่าน้อยกว่าวิธีอัดฉีดแรงดันสูงอยู่เล็กน้อยเท่านั้น การเพิ่มขึ้นของอายุการบ่มทำให้ค่าแรงกดแกนเดียวและโมดูลัสยืดหยุ่นที่ 50 เปอร์เซ็นต์ความเครียดเพิ่มขึ้นตามทั้งสองวิธี มีแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกดแกนเดียวและค่าความหนาแน่นแห้งไปในทางเดียวกันคือค่าความหนาแน่นแห้งมากทำให้ค่าแรงกดแกนเดียวมากตาม สำหรับเส้นโค้งการทรุดตัวกับเวลาพบว่าทั้ง 2 วิธีมีค่าใกล้เคียงกัน โดยวิธีอย่างง่ายมีการทรุดตัวสูงกว่าเพียงเล็กน้อย ดังนั้นวิธีที่นำเสนอสามารถนำไปใช้ในการผลิตเสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของชั้นดินเหนียวอ่อนได้ เนื่องจากมีขั้นตอนการทำที่ง่ายและใช้เครื่องมือในการจัดทำที่สามารถหาได้ในชุมชนท้องถิ่น

คำสำคัญ: เสาเข็มดินซีเมนต์, วิธีการผสมลึก, การปรับปรุงคุณภาพดิน

Abstract

This research aims to study the strength property in term of unconfined compressive strength (q_u) and investigate the settlement-time curve of floating soil-cement column set up by the simple method for using in local community. This simple method is able to conduct with ease and the instruments of soil-cement column making are able to be provided and operated easily by the local people. For the process of proposed method, there are 4 steps as followings 1) Making a hole 2) Mixing soil with water

¹ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

3) Soil-cement mixing and 4) Soil-cement installation. The effectiveness of the simple method was demonstrated by comparing with the jet grouting method in term of the q_u value and dry density (ρ_d) of soil cement column. The testing site was located in Pathumthani, Thailand which the soil layer is a soft clayey deposit. The soil cement columns with the diameter of 0.50 m and length of 4.0 m were constructed by the proposed method and by the jet grouting method. The specimens of testing were collected by using the coring machine. The comparisons of testing results are shown that the q_u value of soil cement column by the proposed method is less slightly than that by the jet grouting method. The increasing of curing period increases the q_u value and the modulus of elasticity (E_{50}) for both methods. The tendency of q_u - ρ_d relationship by the proposed method is the same as that by the jet grouting method. This means the greater ρ_d value, the greater q_u value. For the settlement-time curve, the results of both method have the same tendency. The settlement by simple method is higher slightly than that by jet grouting method. Thus, the proposed method can be used to construct the soil-cement column for improving the soft clayey deposit by local people due to easy procedures. The construction tools can also be provided with availability in the local country.

Keywords: soil cement column, deep mixing method, ground improvement.

1. บทนำ

เทคนิคการผสมลึก (Deep mixing) คือ การใช้เครื่องมือส่งปูนขาว ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หรือส่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมกับปูนขาวลงไปลึก ๆ แล้วผสมวัสดุดังกล่าวข้างต้นเข้ากับดิน ณ ความลึกนั้น ๆ ก่อตัวเป็นลักษณะเสาเข็มดินซีเมนต์ (Soil-cement column) เพื่อทำหน้าที่ปรับปรุงคุณภาพของชั้นดินเหนียวอ่อนให้เหมาะสมกับการก่อสร้างหรือปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมบางประเภทของชั้นดินเหนียว [1, 2] ในปัจจุบันวิธีเทคนิคการผสมลึกได้นำมาประยุกต์ใช้อื่น ๆ มากมาย ได้แก่ ลดการทรุดตัวของคันดินถม และโครงสร้างอื่น ๆ ใช้ป้องกันการเกิด Slope Failure ป้องกันการเกิด Heaving และลดความยาวของเสาเข็มพืดในการขุดลึก เพิ่มความสามารถในการต้านทานแรงดันด้านข้างของโครงสร้าง เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติในด้านการเพิ่มกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของคันดินและทำหน้าที่เสมือนฐานรากได้อย่างดี [3] ในการทำเสาเข็มดินซีเมนต์ที่นิยมทำกันได้แก่ วิธีอัดฉีดซีเมนต์ด้วยแรงดันสูง (Jet Grouting) การปรับปรุงวิธีนี้จะใช้สารผสมในรูปน้ำปูนข้น (Slurry) ฟันด้วยแรงดันสูงประมาณ 200-500 บาร์

ผ่านรูเล็ก ๆ (Nozzles) ที่ปลายหัวเจาะพร้อมกับหมุนก้านเจาะเพื่อให้การผสมในรูปน้ำปูนข้น ผสมรวมเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อสารผสมที่เป็นน้ำปูนข้น ทำปฏิกิริยากับดินโดยรอบแล้วจะกลายเป็นแท่งเสาเข็ม [4] ซึ่งการผสมน้ำปูนข้นหรือน้ำปูนซีเมนต์เข้ากับดินนั้น น้ำในช่องว่างของดิน (Pore Water) จะทำปฏิกิริยากับอนุภาคซีเมนต์เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้เกิดสาร Calcium Silicate Hydrate (CSH), Calcium Aluminate Hydrate (CAH) และ Calcium Hydroxide ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวเกาะยึดมวลดินเข้าด้วยกันเป็นมวลดินขนาดใหญ่และมีกำลังสูงขึ้น [5, 6]

ในทางปฏิบัติวิธีอัดฉีดซีเมนต์ด้วยแรงดันสูงต้องอาศัยเครื่องมือที่เฉพาะและมีราคาสูง อีกทั้งต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญที่มีทั้งความรู้ และประสบการณ์ในการทำเสาเข็มดินซีเมนต์เข้าปฏิบัติ ดังนั้นโอกาสในการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อปรับปรุงคุณภาพดินที่มีงบประมาณการก่อสร้างไม่มาก หรือนำมาใช้ในแบบวิถีชาวบ้าน เช่นการเสริมคันดินเพื่อการป้องกันตลิ่งบริเวณบ้านพักอาศัยที่ติดกับแม่น้ำ หรือการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อป้องกันน้ำเค็มหรือน้ำกร่อย

เข้ามาในพื้นที่การเกษตร หรือการใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ร่วมกับคันดินเพื่อป้องกันน้ำท่วมบริเวณบ้านพักอาศัยจึงมีไม่มาก

สำหรับโครงการวิจัยนี้เป็นการนำเสนอเทคนิคการทำเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึก (Floating soil-cement column) อย่างง่าย เพื่อไปประยุกต์ใช้ในชุมชนท้องถิ่น โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติทางด้านความแข็งแรงของดินซีเมนต์ที่มามีเสาเข็มระหว่างวิธีปฏิบัติที่ถูกลำเสนอกับวิธีอัดฉีดซีเมนต์ด้วยแรงดันสูง เพื่อเป็นทางเลือก ในการใช้เทคนิคการทำเสาเข็มดินซีเมนต์ที่สามารถก่อสร้างได้อย่างง่าย เพื่อนำเสาเข็มดินซีเมนต์มาแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในชุมชนท้องถิ่น

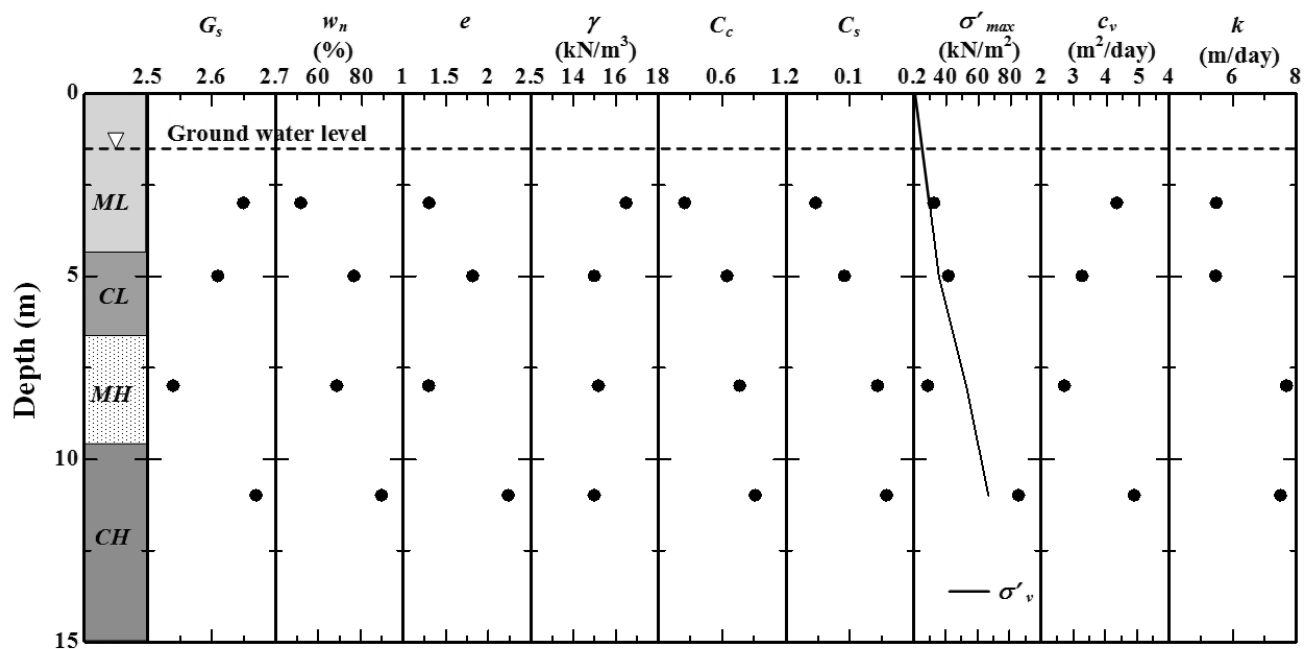
2. คุณสมบัติพื้นฐานของชั้นดินเหนียว

บริเวณที่ทำการทดสอบ การทำเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึกด้วยวิธีอย่างง่ายและวิธีอัดฉีดซีเมนต์ด้วยแรงดันสูง อยู่ในพื้นที่ของ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

ราชมงคลธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี มีผลการเจาะสำรวจชั้นดินดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งเป็นชั้นดินเหนียวมีความลึกประมาณ 15 เมตร ล่างลงไปเป็นชั้นดินทราย ระดับน้ำใต้ดินอยู่ลึกประมาณ 1.5 เมตรจากผิวดิน สำหรับการศึกษาความยาวของเสาเข็มดินซีเมนต์ในชั้นดินเหนียวเท่ากับ 4 เมตร เป็นตัวอย่างในการทดสอบ โดยดินเหนียวชั้นนี้มีค่าขีดจำกัดเหลว (Liquid limit) และค่าขีดจำกัดพลาสติกเท่ากับ 41.02% และ 13.31% ตามลำดับ มีค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.65

3. การทำเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึกอย่างง่าย

สำหรับโครงการวิจัยนี้ได้เสนอวิธีการทำเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึกอย่างง่าย เพื่อประยุกต์ใช้ในชุมชนท้องถิ่น ซึ่งมีต้นทุนในการผลิตต่ำกว่าวิธีอัดฉีดซีเมนต์ด้วยแรงดันสูง แต่ได้ความแข็งแรงของเสาเข็มดินซีเมนต์เทียบ



หมายเหตุ: G_s คือค่า Specific Gravity; w_n คือค่า Natural Water Content; e คือค่า Void Ratio; γ คือค่า Unit Weight; C_c คือค่า Compression Index; C_s คือค่า Swelling Index; σ'_{max} คือค่า Maximum Past Pressure; σ'_v คือค่า Effective Overburden Pressure; c_v คือค่า Coefficient of Consolidation; k คือค่า Coefficient of Permeability.

รูปที่ 1 แสดงลักษณะของชั้นดินและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของชั้นดิน

เท่าหรือใกล้เคียงกัน สามารถแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน โดยมีวิธีปฏิบัติดังต่อไปนี้

1) ขั้นตอนการทำหลุมเสาะเข็มดินซีเมนต์

ในขั้นตอนนี้เป็นการเจาะหลุมและทำลายโครงสร้างดิน ที่มีลักษณะเดียวกันกับการทำการกดหัวเจาะไปพร้อมการทำตัดหรือทำลายโครงสร้างดิน จนถึงระดับปลายเข็ม เพื่อให้ง่ายต่อการผสมน้ำปูนชั้น ด้วยการใช้น้ำปูนเจาะเก็บดิน มีลักษณะเดียวกันกับเครื่องเจาะเก็บตัวอย่างดินด้วยมือ ก้านเจาะสามารถต่อเพิ่มความยาวได้ตรงปลายก้านเจาะเป็นสว่านเจาะเก็บดิน (Hand Auger) มีลักษณะการปฏิบัติดังแสดงในรูปที่ 2 เจาะเป็นรูมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.50 เมตร จนถึงความลึกที่ต้องการ ในที่นี้ประมาณ 4 เมตร จึงทำการหยุดเจาะเก็บดินที่ถูกขุดขึ้นมาเพื่อใช้ทำดินซีเมนต์ในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 2 การเจาะดินทำหลุมเสาะเข็มดินซีเมนต์

2) ขั้นตอนการผสมน้ำ

ในขั้นตอนนี้เป็นการนำน้ำมาผสมกับดินที่ถูกขุดขึ้นมา เพื่อส่วนผสมของดินและน้ำให้สามารถผสมกับน้ำปูนชั้นได้ง่ายขึ้น โดยนำดินที่ถูกขุดมาผสมกับน้ำให้มีปริมาณความชื้นสูงกว่าขีดจำกัดเหลวดินจะมีลักษณะเป็นของเหลวคล้ายกับดินในวิธีอัดฉีดซีเมนต์ด้วยแรงดันสูง ที่มีตรงขั้นตอนการใช้น้ำฉีดหรือใช้น้ำและอากาศอัดลงไปพร้อมกันเพื่อทำการกวาดดินให้เหลว

3) ขั้นตอนผสมน้ำปูนชั้นกับดิน

ทำการผสมน้ำปูนชั้น เพื่อเตรียมสำหรับทำดินซีเมนต์ สำหรับงานวิจัยนี้ใช้ปริมาณซีเมนต์ 5% ของน้ำหนักดินแห้ง มาผสมกับน้ำโดยมีปริมาตรน้ำต่อผงปูนซีเมนต์

(w/c) เท่ากับ 1:1 จากนั้นผสมดินเข้ากับน้ำปูนชั้นที่เตรียมไว้ให้มีลักษณะการผสมใกล้เคียงกับวิธีอัดฉีดซีเมนต์ด้วยแรงดันสูงด้วยสว่านใบพัด ด้วยอุปกรณ์ที่แสดงในรูปที่ 3 ต่างกันตรงการผสมน้ำปูนชั้นที่เป็นการผสมนอกหลุม ดังนั้นน้ำปูนชั้นจึงไม่จำเป็นต้องถูกฉีดด้วยแรงดันสูงเหมือนวิธีอัดฉีดซีเมนต์ด้วยแรงดันสูง อีกทั้งวิธีอย่างง่ายนี้จะมีส่วนผสมที่เข้ากันได้ดีกว่าวิธีในวิธีอัดฉีดซีเมนต์ด้วยแรงดันสูง

4) ขั้นตอนการบรรจุดินซีเมนต์เพื่อเป็นเสาเข็ม

เมื่อได้ส่วนผสมจากขั้นตอนที่แล้ว นำส่วนผสมมาบรรจุลงในหลุมที่ละชั้นโดยพยายามไม่ให้มีช่องว่างดังแสดงในรูปที่ 4 อาจใช้การกระทุ้งในหลุมด้วยท่อนไม้ยาว ซึ่งสามารถทำได้เนื่องจากส่วนผสมยังไม่แข็งตัวยังคงมีความเหลวไหลได้อยู่สูง จนเต็มหลุม จากนั้นทำการบ่มโดยใช้แผ่นพลาสติกคลุมด้านบน เมื่อแข็งตัวส่วนผสมจะกลายเป็นเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีความยาวแบบไม่หยั่งลึก จากนั้นจึงเริ่มทำการทดสอบคุณสมบัติ



รูปที่ 3 การผสมน้ำปูนในดินตัวอย่าง

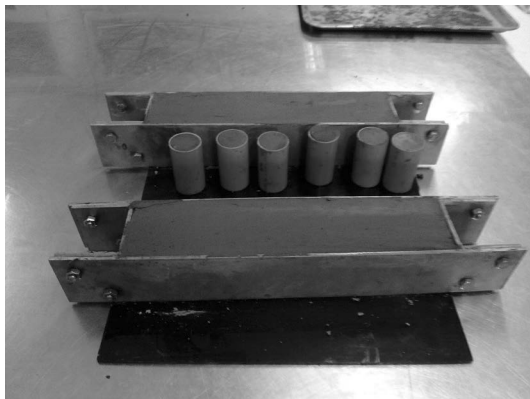


รูปที่ 4 การบรรจุดินซีเมนต์

4. การทดสอบด้านกำลังของเสาเข็มดินซีเมนต์

เสาเข็มที่ถูกจัดทำขึ้นด้วยวิธีที่นำเสนอ ถูกนำมาทดสอบคุณสมบัติด้านความแข็งแรงของเสาเข็ม โดยนำมาเปรียบเทียบกับผลทดสอบของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ถูกทำด้วยวิธีอัดฉีดซีเมนต์ด้วยแรงดันสูง การทดสอบคุณสมบัติด้านความแข็งแรงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ การทดสอบแรงกดแกนเดียว สำหรับตัวอย่างที่นำมาทดสอบใช้การเก็บตัวอย่างการทดสอบจากเสาเข็มดินซีเมนต์ในที่ที่อายุการบ่ม 7, 14, 28, 56, 90 และ 120 วัน ด้วยวิธีการเจาะแท่งที่ระดับความลึกจากหัวเสาเข็มดินซีเมนต์ 0.5 เมตร ได้ตัวอย่างดินซีเมนต์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.0 cm และสูง 16.0 cm สำหรับวิธีอัดฉีดซีเมนต์ด้วยแรงดันสูง ใช้ปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 5% ของน้ำหนักดินแห้ง ในขณะที่แรงดันในการฉีดซีเมนต์ใช้เท่ากับ 200 บาร์ ตลอดการทดลองเพื่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวเท่ากับ 0.50 เมตร และ 4.0 เมตร ตามลำดับ

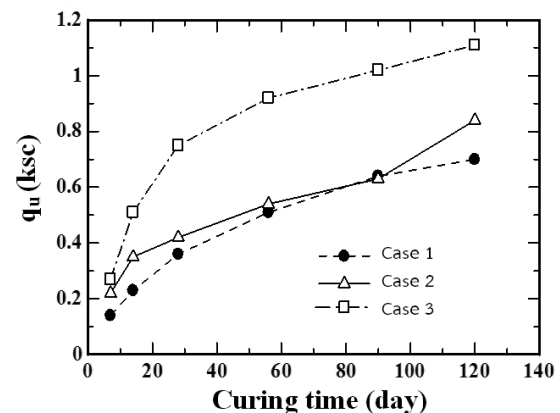
จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้มาทดสอบแรงกดแกนเดียว โดยทำการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจากตัวอย่างที่ได้จากวิธีอัดฉีดซีเมนต์ด้วยแรงดันสูง และที่ได้จากทดสอบตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ขึ้นรูปด้วยแบบรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 cm และสูง 7.0 cm ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 แบบรูปทรงกระบอก

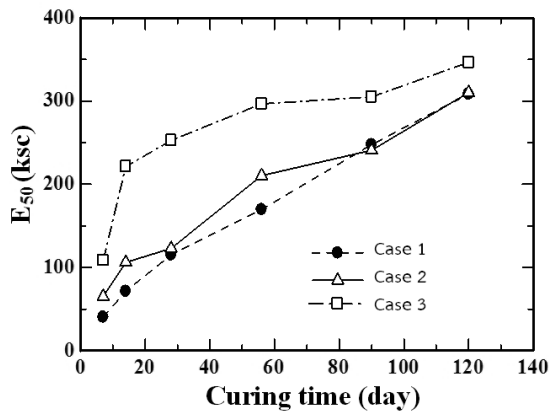
กำหนดให้ Case 1 คือตัวอย่างที่ได้จากวิธีอย่างง่ายที่นำเสนอ Case 2 คือตัวอย่างที่ได้จากวิธีอัดฉีดซีเมนต์ด้วยแรงดันสูง และ Case 3 คือตัวอย่างที่ได้จากดินซีเมนต์ที่ขึ้นรูปด้วยแบบรูปทรงกระบอก ในรูปที่ 6 แสดงผลการทดสอบ พบว่า ค่าแรงกดแกนเดียวของดินซีเมนต์ที่ได้จาก

Case 1 มีค่าน้อยกว่าวิธีที่ได้จาก Case 2 เพียงเล็กน้อย ในทุกอายุการบ่ม แสดงว่าวิธีที่นำเสนอสามารถทำให้ค่าแรงกดแกนเดียวของเสาเข็มดินซีเมนต์มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากวิธีอัดฉีดแรงดันสูงอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลทดสอบใน Case 3 กลับพบว่ามีความมากกว่าทั้งใน Case 1 และ Case 2 โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีอายุการบ่มเกิน 28 วัน ทั้งนี้เนื่องจาก ตัวอย่างดินซีเมนต์ที่ได้จาก Case 1 และ Case 2 ถูกרבกวนมากในขณะที่เก็บตัวอย่าง เมื่อนำไปทดสอบทำให้ผลการทดสอบมีค่าน้อยกว่าผลที่ได้จาก Case 3 ในทุกอายุการบ่ม ซึ่ง Case 3 ตัวอย่างที่ได้แทบไม่ถูกรบกวน อีกทั้งสภาพแวดล้อมในการบ่มตัวอย่างต่างกัน โดยที่ Case 1 และ Case 2 ตัวอย่างทดสอบอยู่ในสถานะดินเปียกล้อมรอบ ส่วน Case 3 ตัวอย่างอยู่ในห้องปฏิบัติการที่ถูกห่อด้วยแผ่นพลาสติกใสเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น

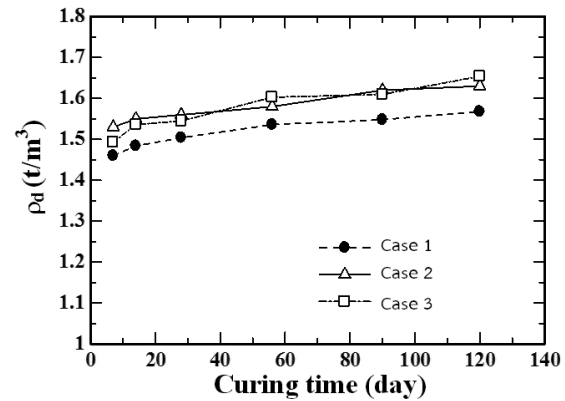


รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ของค่า q_u กับอายุการบ่ม

จากรูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า E_{50} กับอายุการบ่ม พบว่า สำหรับ Case 1 มีค่า E_{50} ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จาก Case 2 แสดงว่า วิธีที่นำเสนอ สามารถทำให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของดินซีเมนต์มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากวิธีอัดฉีดซีเมนต์ด้วยแรงดันสูง สามารถนำวิธีนี้ไปสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ได้ แต่อย่างไรก็ตามค่าที่ได้จากทั้ง Case 1 และ Case 2 มีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จาก Case 3 ในทุกอายุการบ่ม ทั้งนี้เนื่องจาก Case 3 มีความสมบูรณ์ของตัวอย่างดินซีเมนต์มากที่สุด มีการบ่มตัวอย่างน้อยมาก รวมทั้งวิธีการบ่มของตัวอย่างใน Case 3 เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ได้จาก Case 1 และ Case 2 จึงมีผลทำให้ค่า E_{50} มากที่สุด



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ของค่า q_u กับอายุการบ่ม

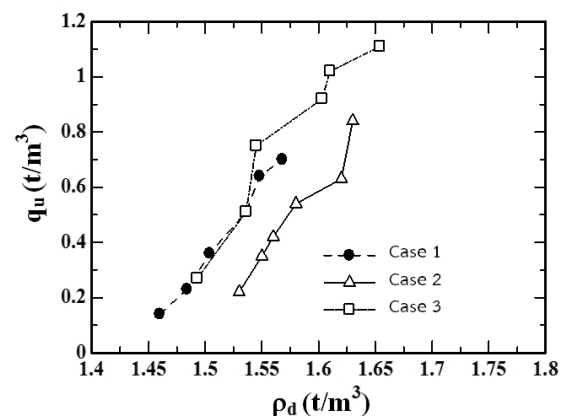


รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ของค่า ρ_d กับอายุการบ่ม

5. การเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นแห้งของเสาเข็มดินซีเมนต์

ในการตรวจสอบความสมบูรณ์ของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่สร้างขึ้นด้วยวิธีที่นำเสนอสำหรับโครงการวิจัยนี้ได้หาค่าความสมบูรณ์ของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่อยู่ในเทอมของค่าความหนาแน่นแห้งของเสาเข็มดินซีเมนต์ โดยทำการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นแห้งของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ถูกทำขึ้นด้วยวิธีอย่างง่ายที่นำเสนอ มาเปรียบเทียบกับเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ถูกทำขึ้นด้วยวิธีอัดฉีดซีเมนต์ด้วยแรงดันสูงและวิธีการผสมตัวอย่างดินซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการ สำหรับตัวอย่างดินซีเมนต์ที่นำมาใช้ในการเปรียบเทียบ เป็นตัวอย่างที่ระดับความลึกประมาณ 0.50 เมตร ที่อายุการบ่มต่าง ๆ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งเป็นรูปความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นแห้งกับอายุการบ่มของเสาเข็มดินซีเมนต์ พบว่า วิธีที่นำเสนอทำให้เสาเข็มดินซีเมนต์มีค่าความหนาแน่นแห้งน้อยกว่าวิธีอัดฉีดซีเมนต์ด้วยแรงดันสูงและวิธีการผสมตัวอย่างดินซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการอยู่ร้อยละไม่เกิน 4.5 เท่านั้นในทุกอายุการบ่ม มีแนวโน้มที่ความหนาแน่นแห้งเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่มที่มากขึ้นเหมือนกันทั้งสองวิธี นั้นแสดงว่าวิธีอย่างง่ายที่นำเสนอ (Case 1) สามารถผลิตเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีความหนาแน่นแห้งใกล้เคียงกับวิธีอัดฉีดซีเมนต์ด้วยแรงดันสูง (Case 2)

เมื่อพิจารณารูปที่ 9 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกดแกนเดียวกับความหนาแน่นแห้ง พบว่า มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นแห้งทำให้เสาเข็มดินซีเมนต์มีค่าแรงกดแกนเดียวเพิ่มขึ้น วิธีอย่างง่ายที่นำเสนอสามารถทำให้ค่าแรงกดแกนเดียวเพิ่มขึ้นตามความหนาแน่นแห้งของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มากขึ้นเป็นแนวโน้มเดียวกันกับวิธีอัดฉีดซีเมนต์ด้วยแรงดันสูงและวิธีการผสมในห้องปฏิบัติการ แสดงว่าสามารถนำวิธีอย่างง่ายที่นำเสนอไปผลิตเสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อใช้แก้ไขงานทางวิศวกรรม โดยที่คุณสมบัติด้านกำลังความแข็งแรงของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ได้มีความใกล้เคียงกันกับเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ทำด้วยวิธีอัดฉีดซีเมนต์ด้วยแรงดันสูง



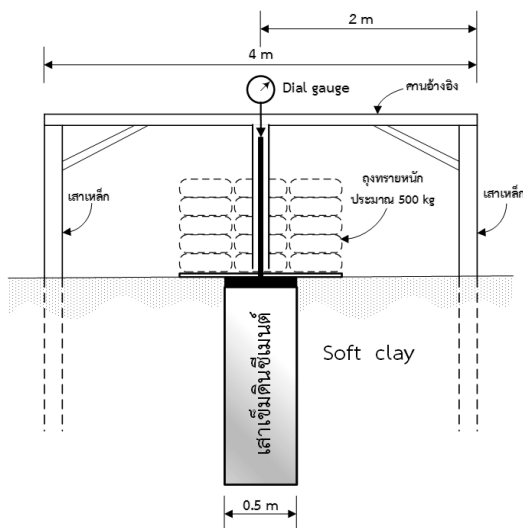
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ของค่า ρ_d กับ q_u

6. ผลการทดสอบการทรุดตัวของเสาเข็มดินซีเมนต์

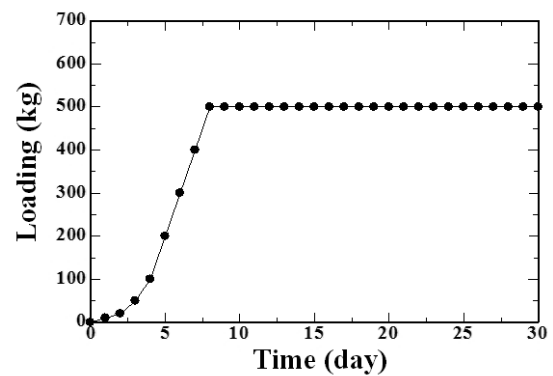
เนื่องจากเสาเข็มดินซีเมนต์มีความยาว 4 เมตร ดังนั้นจึงถือว่าเป็นพฤติกรรมเป็นแบบเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึก พิจารณาชั้นดินเหนียวที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ จำนวน 1 ต้น เป็นลักษณะสมมาตรแกนเดียว หนึ่งหน่วย (Axisymmetric unit cell) อ้างอิงการศึกษา Chai et al. [7] ทำการทดสอบเพื่อดูการทรุดตัวของชั้นดินที่ถูกปรับปรุงด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึก ที่ทำมาจากวิธีอย่างง่ายกับวิธีอัดฉีดซีเมนต์ด้วยแรงดันสูง ดังแสดงในรูปที่ 10 และ 11 ให้น้ำหนักกระทำบนผิวดินด้วยถุงทราย ทำการทดสอบเป็นเวลา 30 วัน ในรูปที่ 12 แสดงการให้น้ำหนักกระทำกับเวลาการทดสอบนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพของเสาเข็มดินซีเมนต์จากทั้ง 2 วิธีในเทอมของความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทรุดตัวกับเวลา ได้ผลการทดสอบดังนี้



รูปที่ 11 แบบจำลองในสนาม

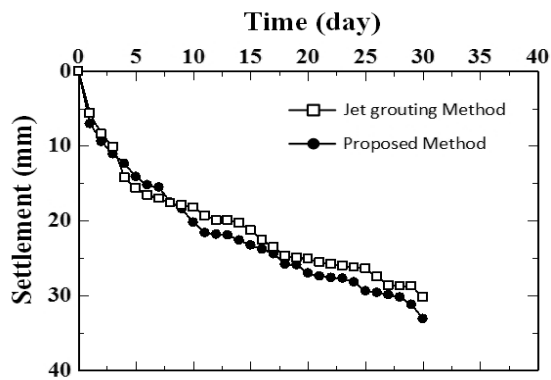


รูปที่ 10 การทดสอบการทรุดตัว



รูปที่ 12 น้ำหนักกระทำกับเวลา

จากรูปที่ 13 พบว่า เส้นโค้งการทรุดตัวกับเวลาของทั้งสองวิธีมีค่าใกล้เคียงกัน โดยวิธีอย่างง่ายมีอัตราการทรุดตัวเร็วกว่าเล็กน้อย และมีค่าการทรุดตัวมากกว่าเพียงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ทำด้วยวิธีอย่างง่ายสามารถนำไปใช้ในการเสริมความแข็งแรงของชั้นดินเหนียวอ่อน เพื่อลดการทรุดตัวได้ใกล้เคียงกับวิธีอัดฉีดซีเมนต์ด้วยแรงดันสูง เพียงแต่ไม่สามารถทำเสาเข็มดินซีเมนต์ให้ยาวได้เท่ากับวิธีอัดฉีดซีเมนต์ด้วยแรงดันสูง



รูปที่ 13 การทรุดตัวกับเวลา

7. สรุปผลการศึกษา

จากผลการศึกษาการทำเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึกด้วยเครื่องมือที่สามารถปฏิบัติได้ในชุมชนท้องถิ่นสามารถสรุปผลการศึกษาดังต่อไปนี้

1) เสาเข็มดินซีเมนต์ที่ผลิตได้มีค่าแรงกดแกนเดียวที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ถูกจัดทำด้วยวิธีอัดฉีดซีเมนต์ด้วยแรงดันสูง

2) การก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยวิธีที่นำเสนอให้ค่าความหนาแน่นแห้งของดินซีเมนต์ใกล้เคียงกับวิธีอัดฉีดซีเมนต์ด้วยแรงดันสูง โดยมีแนวโน้มความความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกดแกนเดียวกับค่าความหนาแน่นแห้งเป็นในลักษณะเดียวกันคือ ค่าแรงกดแกนเดียวเพิ่มขึ้นตามค่าความหนาแน่นแห้งที่สูงขึ้น แสดงว่าวิธีที่นำเสนอให้ความสมบูรณ์ของตัวเสาเข็มใกล้เคียงกับวิธีอัดฉีดซีเมนต์ด้วยแรงดันสูง

3) เส้นโค้งการทรุดตัวกับเวลาของทั้งสองวิธีมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน โดยวิธีก่อสร้างอย่างง่ายที่นำเสนอให้ค่าการทรุดตัวมากกว่าวิธีอัดฉีดซีเมนต์ด้วยแรงดันสูงเพียงเล็กน้อย

4) วิธีก่อสร้างอย่างง่ายที่นำเสนอสามารถนำไปใช้ผลิตเสาเข็มดินซีเมนต์แบบไม่หยั่งลึก เพื่อใช้แก้ไขปัญหาทางวิศวกรรมปฐพีได้อย่างเหมาะสม เช่น ใช้ในการแก้ไขปัญหาดินทรุด หรือใช้สำหรับเป็นกำแพงดินซีเมนต์เพื่อป้องกันตลิ่งพัง โดยเสาเข็มที่ผลิตได้มีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 0.50 เมตร และมีความยาวไม่เกิน 4.00 - 6.00 เมตร

8. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้เป็นส่วนหนึ่งของการวิจัยเรื่อง เทคนิคการทำเสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อชุมชนท้องถิ่น ซึ่งได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ด้วยทุนงบประมาณแผ่นดิน ประจำปี 2557 (วช.) จึงขอขอบคุณมา ณ.โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Kamon, M. 1996, Effective of Grouting and DMM on Big Construction Project in Japan the 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake, Grouting and Deep Mixing, The Second International Conference on Ground Improvement Geosystems, Tokyo, Vol.2, pp. 807-823.
- [2] Bergado, D.T., Anderson, L.R., Miura, N. and Balasubramaniam, A.S. 1996, Lime/Column Stabilization, Soft Ground Improvement in Lowload and Other Environmental, Asian Institute of Technology, pp. 234-304.
- [3] นกตล กรณ์ศิลป์ 2541, ความรู้เบื้องต้นด้านการปรับปรุงคุณภาพดินโดยวิธี Jet Grouting, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, หน้า 1-43.
- [4] Chida, S. 1982, Dry Jet Mixing Method – State of the Art on Improvement Methods for Soft Ground, Journal of the Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.85, No.2, pp. 69-76.
- [5] Lambe, T.W., Mitchael, A.S. and Moh, Z.C. 1957, Improvements of Soil – Cement with Alkali Metal Compounds, Highway Research Board Bulletin. 244, pp. 67-103.
- [6] Herzog, A. and Mitchell, J.K. 1963, Reactions Accompanying the Stabilization of Clay with Cement, Highways Research Board Record 36, pp. 146-171.

- [7] Chai J.C., Miura N., Kirekawa T. and Hino T. 2009, Settlement Prediction for Soft Ground Improved by Columns. Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Ground Improvement 163(2): 109–119.

Construction Simulation 3D of Tight-Fitting Sportswear to Evaluate Tension Distribution of Elastic Fabric

Nareerut Jariyapunya¹, and Jantana Sutdaen²
nareerut.j@en.rmutt.ac.th¹, jantana.s@en.rmutt.ac.th²

Abstract

Elastic fabrics are considered to be of high importance to produce sportswear garment for comfortable properties and body fitting to human body. Fabric elasticity is an important parameter, which plays a key role particularly when constructing patterns for tight-fitting clothing, in respect of changing pattern-piece size, resp. adapting the garment to the contours of a body in motion. The purpose of this research is to design 3D pattern construction with stretch fabric for women of aerobic sportswear using OptiTex software to represent the tension properties of fabric generated on the surface of the simulation model. Moreover, the study on mechanical properties of elastic fabric by FAST system and its result have illustrated that OptiTex could be used to simulate the tension map options so as to inspect its colored map depicting amounts of tension between clothing and model. It is certainly obvious that tension map area could be adjusted in accordance to the pattern design suitable for tight-fitting clothing wearing. Moreover, the outcomes of stretch fabrics could be compared with the influence of extensibility between warp and weft directions.

Keywords: Pattern Construction, Elastic fabric, Tight-fitting garment, Sportswear, Tension, Stretch fabric.

1. Introduction

Elastic garments for sportswear has been providing comfortable movement, minimizing the risk of injury or muscle fatigue, and reducing friction between body and clothing. The three main indicators affecting clothing comfort assessment include thermal-wet comfort, tactile comfort and pressure comfort [1]. However, one of the very most important indicators that help facilitate the assessment of clothing comfort is pressure comfort [2, 3, 4]. In order to produce comfortable tight-fitting

garments with suitable pressure comfort, stretch fabrics are considered to be of high importance [2, 5]. However, stretch fabrics can be assessed through 3D simulation technology to find its best pressure comfort and therefore, the 3D simulation technology of clothing not only is used for creating pattern but also to simulate the texture look of final virtual garment of fabric properties. The 3D simulation technology would be able to predict and adapt clothing pattern suitably according to B. Musilová who used regression equations to

¹ Department of Clothing, Faculty of Textile Engineering, Technical University of Liberec, Liberec, Czech Republic

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

predict the pattern dimension due to the change of mechanical properties of a stretch fabric, whilst each of them consists of the sum of characteristics that influence a pattern shape [6]. R. Nemčoková measured the fabrics using the Kawabata Evaluation System for Fabrics (KES FB-Auto) and also applied the Design Concept3D software to enable the visualization of these models which showed the pressure, curvature, strain or tension and the elongation related to the mechanical properties of fabrics [7]. Moreover, Fabric Assurance by Simple Testing (FAST) system had been used to find out mechanical properties of fabrics [8, 9] and test the stretch fabric's mechanical properties with OptiTex software by draping simulation and tension map of clothing methods [2, 5, 10]. Y.Y. Wu. et al. attempted to use simulation skirt experiment finding out the mechanical properties of 20 types of woven fabrics. In the experiment, FAST and KES measurement methods were used to measure fabric physical properties. After measurement using FAST and KES, test results were inputted into the OptiTex software to define fabrics in the simulation experiment and FAST results were reported to be relatively more reliable, less expensive and simpler to operate compared with KES [11].

In accordance to the mentioned study, not only this research attempted to use FAST system to measure fabric physical properties but also to input the test results into the OptiTex software to find out the value of tension by setting 8 measuring points on the simulated women's sportswear so as to make comparison between each point and to evaluate the influence of body shape on tension distribution of clothing. Moreover, the result will be able to help predict suitable pattern construction

for pressure comfortable on tight-fitting sportswear in the future.

2. Research Methodology

2.1 Materials

Elastic knitted fabrics consisting difference structure of knitted fabric between Single Jersey and Interlock were made of Polyamide (PA) and Elastane. Its composite varied from 92% PA, 8% Elastane of Single Jersey structure (Sample 1) and 80% PA, 20% Elastane of Interlock structure (Sample 2) respectively.

2.2 The quad load test procedure

Specimens in the wale, course, 45° bias and 135° bias were placed on the hanger and the 250 g weight was applied. After hanging one minute for the specimen to stabilize, the extended measurement between the benchmarks was recorded. The calculation of the stretch degree is simplified by Watkins's [12,13] using formula (1). The degree of stretch expressed as a percentage is calculated by subtracting the extended length from the original length 10 cm. (100 mm.).

$$\text{Degree of stretch} = [\text{Extended length} - 100] \% \quad (1)$$

When, the extended length unit is (mm.)

2.3 FAST system method

The acquired properties of stretch fabrics from Optitex simulator software testing for input parameters was measured by the FAST-1 compression meter provides a direct measure of fabric thickness at 2 gf/cm² (196 Pa) and 100 gf/cm² (9.81 kPa) can be calculated fabric surface thickness at formula (2).

$$ST = T2 - T100 \quad (2)$$

When, ST is surface thickness (mm.), T2 is average thickness (mm.) at 2 gf/cm² and T100 is average thickness (mm.) at 100 gf/cm².

The FAST-2 bending meter provides a direct measure of fabric bending length in either the wale or course direction. Bending rigidity is calculated from the bending length and fabric mass per unit area by formula (3).

$$B = W \times c^3 \times 9.81 \times 10^{-6} \quad (3)$$

When, B is bending rigidity (μN.m), W is mass per unit area (g/m²) and c is bending length (mm.)

The FAST-3 extension meter provides a direct measure of fabric extension under selected loads with wale and course directions. Shear rigidity is calculated from formula (4) which using extension on the bias at 5 gf/cm should be calculated.

$$G = 123 \div EB5 \quad (4)$$

When, G is shear rigidity (N/m) and EB5 has extension on the bias at 5 gf/cm.

Extensibility is measured at loads 100 gf/cm in wale and course directions of stretch fabric by using tensile tester because the fabric specimens had very high extension value with loading at E100 (100gf/cm) from FAST-3 extension meter. Besides, the results of extensibility measurement under the load of 5 gf/cm in bias direction have also shown a difference outcome of only 1.15% when compared to standard deviation (SD) 0.59 and the coefficient of variation (CV%) 3.52 probed 10 time by FAST system. From this condition, it could be concluded that tensile tester could creditably be used to measure the extensibility under the load of 100 gf/cm.

2.4 3D pattern construction and tension map

In designing pattern construction of this research we reduced the pattern dimension at 10% of the size measurements a standard amount from circumference length, only one size of pattern in accordance was utilized for comparison and simulation of mannequin body by changing input parameter of mechanical properties of the body size of 38 in accordance with European standard size.

The results of mechanical properties of elastic fabrics measured by FAST system and designing pattern construction as Figure 1(a) then converted properties for clothing simulation will be used in OptiTex 3D simulation to evaluate the tension map of clothing.

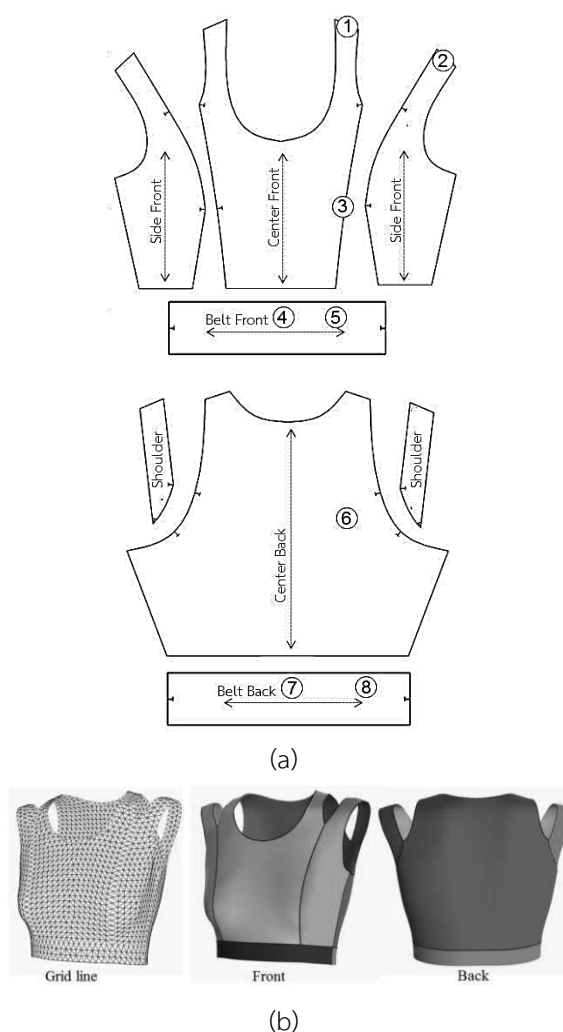


Figure 1. Pattern Construction of Sportswear [14]

The Figure 1(a) shows 2D pattern construction of dimension area with length front 28.50 cm from the center of front neck line to the center of front waist length, length back 40.00 cm. and bust circumference 79.20 cm. including waist circumference 63.00 cm. Figure 1(b) illustrates 3D pattern which simulated to garment product both front side and back side. The numerical data of pattern construction was used to calculate fabric utilization of clothing as shown in the Table 1.

TABLE 1. The Description of Sportswear Pattern

Piece name	Quantity	Area (cm ²)	Perimeter (cm)
Center front	1	472.47	134.62
Side front	2	233.31	78.93
Belt front	1	103.45	66.12
Center back	1	1,060.56	141.54
Shoulder back	2	47.90	37.07
Belt back	1	115.63	73.08
Total	8	2,314.53	647.36

3. Experiment and Results

The results of hanger load test in Table 2 was evaluated as graphics illustration throughout 360° of fabric orientation in the Figure 2 and this method measured four directions corresponding to 0°, 45°, 90° and 135° rotation while measurements were repeated 10 times in each direction.

TABLE 2. The Result Stretch Degree in Four Directions.

Elastic Fabric	Degree of stretch (%)			
	Course 0°	Bias 45°	Wale 90°	Bias 135°
92% PA, 8% Elastane (Single Jersey structure)				
Average	69.40	47.20	18.20	51.60
STDEV	1.58	0.79	0.42	0.52
% CV	2.27	1.67	2.32	1.00
80% PA, 20% Elastane (Interlock structure)				
Average	43.80	45.80	32.80	41.40
STDEV	0.42	0.79	0.79	0.52
% CV	0.96	1.72	2.40	1.25

The angular stretch distribution plots clearly demonstrate that the highest stretch is 92% PA, 8% Elastane in the course direction at 69.40 degree of stretch. Whereas, the direction of wale was merely at 18.20 degree which is the lowest degree of stretch, the line graph in the Figure 2 illustrates angular stretch distribution curves throughout 360° of fabric orientation which is compared between two fabrics. The fabric of 80% PA, 20% Elastane which is Interlock structurer, does not stretch as much as Single Jersey structurer 92% PA, 8% Elastane fabric, which can be stretch in all directions. Single Jersey structure has stretching ability in the course direction at 69.40% degree show as blue line in Figure 2 which is lesser in the wale direction. Even though Interlock fabric has higher Elastane than Single Jersey structurer but the result shown that the structure obviously has influence on extensibility.

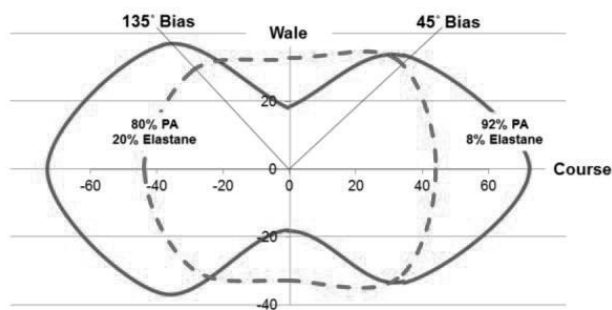


Figure 2. The Quad Angle Plots

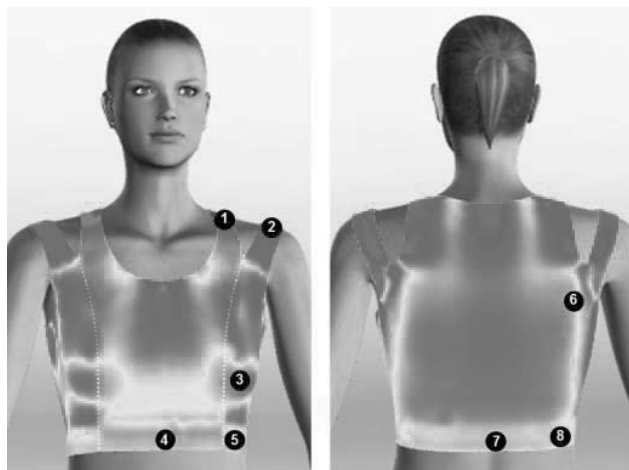
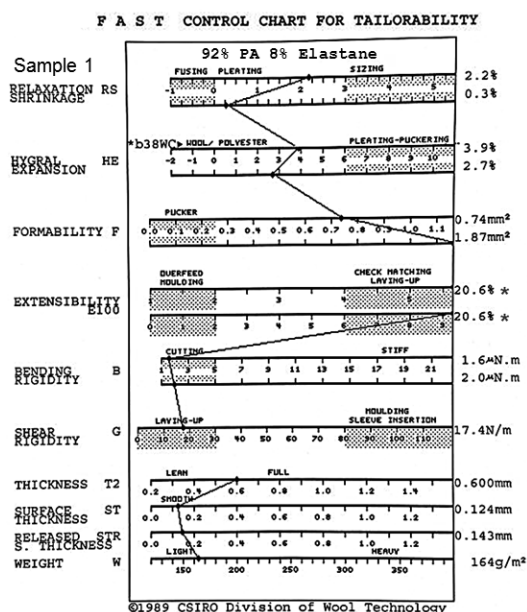


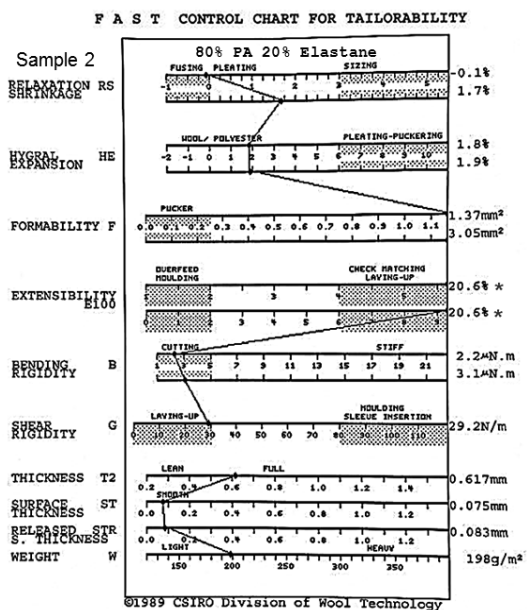
Figure 3. Tension Map Distribution

Parameters of elastic knitted fabric properties resulted from OptiTex simulator software had been used to determine the tension map on the virtual mannequin are as follows: According to Figure 3, results of FAST control chart had shown the fabric measured by FAST system. The value of extensibility marked (20.6%*) in Figure 4 (a,b) clarified that the tested fabrics had very high extensibility due to the limitation of equipment measurement performance and it could only be measured at 20.6% of extensibility value. Besides, we also simulated the value of tensile properties obtained by using the tensile tester as well as the OptiTex software which is used to input E100 extensibility to be calculated so as to simulate the tension map which had extensibility higher than 20.6%. The result of extensibility E100 from tensile tester

of 92% PA, 8% Elastane fabric in wale direction is 22.90% and 70.86% in course direction. The fabric of 80% PA, 20% Elastane which is Interlock structure of extensibility value 48.13% and 58.66% in wale and course direction respectively.



(a)



(b)

Figure 4. FAST System Control Chart

The results of mechanical properties value as shown in the Table 3 illustrated the parameters of fabrics and functions of fabric editor from OptiTex to convert fabric physical attributes from FAST parameter to OptiTex parameter for of 3D tension simulation.

TABLE 3. Knitted Properties from FAST System

Parameter of fabric	92% PA, 8% Elastane	80% PA, 20% Elastane
Bending ($\mu\text{N.m}$)		
X (Wale)	1.60	2.20
Y (Course)	2.00	3.10
Extensibility (%)		
X (Wale)	22.90	48.13
Y (Course)	70.86	58.66
Shear (N/m)	17.40	29.20
Friction	0.20	0.22
Weight (g/m^2)	164	198

Figure 5 highlights the results of tension values at the eight points which show the position of measurement in the Figure 3. The graph represents the value of tension at eight measuring points of body which can be compared by using grain line of straight grain line in vertical-wale direction of cloth as shown in Figure 6 and cross grain line in vertical-course direction for sewing garment. The graph shows that at 1st and 2nd points at the shoulder area, there are low tension values. While at the 3rd point, there is a bit high tension values at bust part of female body and point 4th – 8th the tension value also bear a resemblance to the 3rd. Due to the fact that contoured surface of a female human body is not a perfect cylinder, it is difficult to simulate tension on that particular surface.

So the value of tension distribution of clothing from this experiment could not produce similar outcome when compare to one simulated with the cylinder shape. Therefore, it was found from analyzed result that the correlation of tension value between point 3rd and point 4th – 8th used equations from linear regression were determined when Y is variable of the value of tension at point 3rd and X is variable of tension value at point 4th – 8th. The linear relationship presented strong coefficient of determination (R^2) = 0.82 from linear regression equation, $y = 1.0589x - 2.7627$.

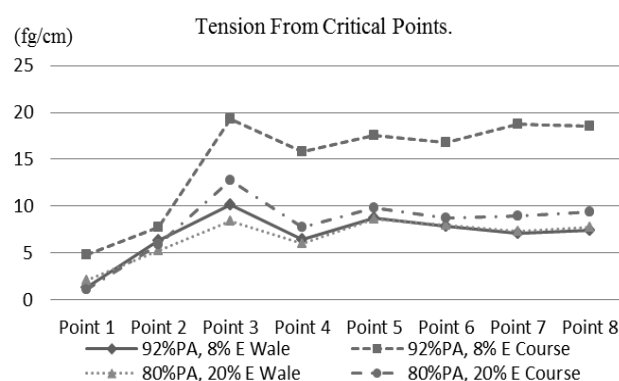


Figure 5. The Tension Simulation from 8 Critical Points

The maximum value tension of two samples elastic fabric with difference grain line between wale and course direction as show in Figure 6 which presented tension map gradient and inspect simulated cloth objects as a colored map depicting amounts of tension between the cloth and the model. The highest tension was 22.67 fg/cm in course direction of fabric, 92%PA, 8% Elastane with extensibility of 70.86% meaning the percentage of extensibility was higher, the result of tension also was higher than other direction. It could be concluded that the extensibility of fabric had the influence on the value of tension.

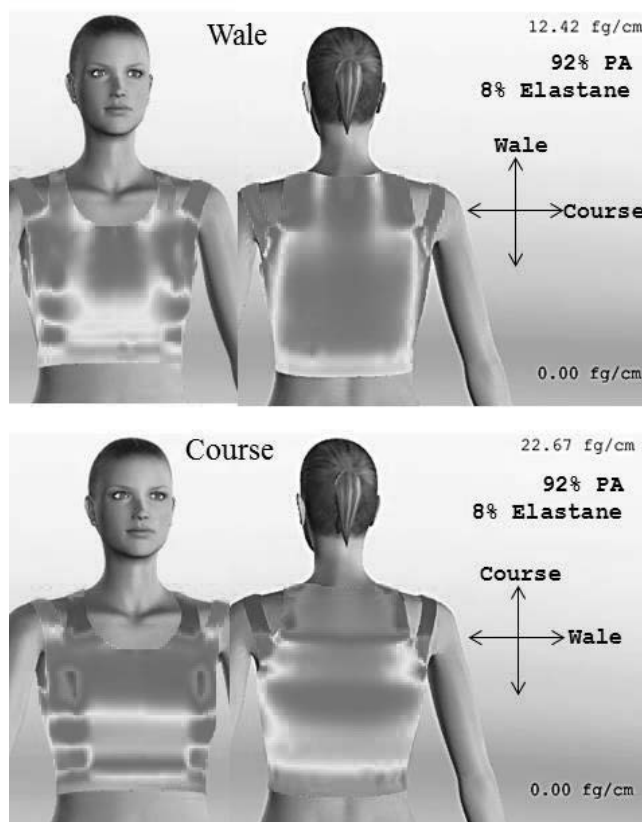


Figure 6. The 3D Simulation and Amount of Physical Tension Influencing the Cloth.

4. Conclusions

The outcomes of the simulation on the 3D pattern construction and the virtual mannequin evaluates tension mapping results. It is obvious that there are many factors that influence tension value such as Elastane, extensibility, body shape, pattern construction, grain line, etc. OptiTex as one of the most widely used software by clothing and textile researchers help find out the tension value reliably. It could be concluded that mechanical properties of fabric could be easy to use the extensibility value which the main importance influences on tension on clothing. Beside, female body shape has influenced on distribution of tension in different areas especially in the bust area where there

was more stretch value than other area. When comparing the relationship between other points and bust area points, $R^2 = 0.82$ was found to be of high and reliable while 4th point to 8th point have well-distributed tension value.

The result of this research could practically be used to compare the result with other methods the further studies and used as a tool to evaluate pattern construction for tight-fitting sportswear.

6. Acknowledgment

The authors would like to extend sincere appreciation to the Department of Clothing, Faculty of Textile Engineering, Technical University of Liberec, Univ.-Prof. Dr. SC. Jelka Geršák, Faculty of Mechanical Engineering, University of Maribor.

References

- [1] Song XX, Feng XW. 2006. "Relationship between Garment Pressure and Human Body Comfortableness". *Journal of Textile Research*, 3, pp. 103-105.
- [2] N. Jariyapunya, J. Geršák, B. Musilová and S. Baheti. 2016. "Designing and Pattern making with Stretch Fabrics", *Structure and Structural Mechanics of Textile Fabric*, ISBN 978-80-7494-269-3, pp. 239-244.
- [3] S. Baheti and N. Jariyapunya. 2016. "Characterization of Knitted Fabric Tensile Deformation by Image Analysis", ISBN 978-80-7494-293-8, pp.32-38.
- [4] Song XX. 2007. "Relationship between the Pressure of Knitted Sportswear and the Comfort of human body". *Knitting Industries*, 4, pp. 33-37.

- [5] N. Jariyapunya, B. Musilová, J. Geršák, and S. Baheti. 2016. "A Study of Mechanical Properties of Stretch Fabric and Pattern Construction to Evaluate Clothing Pressure", **Proc. Workshop for Ph.D. Students of Faculty of Textile Engineering TUL**, ISBN 978-80-7494-293-8, pp.62-67.
- [6] B. Musilová. and R. Nemčoková. 2013. "Implementing Mass Customization into Clothing Production", **Vlákna a texti (Fibres and Textiles)**, Vol.20, Issue 4, pp. 12-19.
- [7] R. Nemčoková. 2013. "3D Designing of the Product and the Effect of Mechanical and Physical Properties on the Shapes of Pattern", **Vlákna a texti (Fibres and Textiles)**, Vol.20, Issue 3, pp. 22-27.
- [8] D. Ganssauge, K.H. Lehmann, A. Angenadel. 1998. **Wie Beeinflussen Typische Gewebemerkmale den Griff Einer Ware** **Melliand Textilberichte**, 6, pp. 427 – 435.
- [9] A. Bereck, S. Dilldohner, H. Mitze, B. Weber, D.Riegel, M. Riegel, J.M. Pieper. 1997. **einfache Methode zur Messung der Weichheit textiler Flächengebilde. Teil 2. Einfluss der Ausrüstung auf die Gewebeweichheit Textilveredlung**, pp. 216 – 222.
- [10] S. Olaru, E. Filipescu, E. Filipescu, C. Niculescu, and A. Salistean. 2012. "3D Fit Garment Simulation Based on 3D Body Scanner Anthropometric Data" **8th International DAAAM Baltic Conference**.
- [11] Y.Y. Wu, P.Y. Mok, Y.L. Kwok, J.T. Fan, J. H. Xin. 2011. "An investigation on the validity of 3D clothing simulation for garment fit evaluation", **Proceedings of the IMProVe 2011 International conference on Innovative Methods in Product Design**, pp.463-468.
- [12] Watkins P A. 2011. **Improving Comfort in Clothing**, Woodhead Publishing, UK,
- [13] Watkins P A. 2011. "Designing with stretch fabrics", **Indian Journal of Fibre & Textile Research** Vol. 36 (December) : 366-379
- [14] N. Jariyapunya, B. Musilová, S. Baheti and J. Sutdaen, 2016. "Construction Simulation 3D of Sportswear to Evaluate Tension Distribution of Elastic Fabric for Tight-Fitting Garment", **7th RMUTIC International conference proceeding**. pp. 92-93

**รูปแบบของบทความสำหรับ
วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมนกคลัญบุรี
Manuscript Preparation Guidelines for the Papers Submitted
to Journal of Engineering, RMUTT**

ชวลิต แสงสวัสดิ์¹ สมชัย หิรัญโรตม² และอภิชาติ สนธิสมบัติ³
sangswasd@rmutt.ac.th¹, somchai.h@en.rmutt.ac.th², apichart.s@en.rmutt.ac.th³

บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวเกี่ยวกับรูปแบบและวิธีการส่งบทความเพื่อเสนอต่อกองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมนกคลัญบุรี ผู้ส่งบทความจะต้องยึดรูปแบบตามบทความนี้อย่างเคร่งครัด บทความใดที่มีรูปแบบไม่ถูกต้อง จะถูกส่งคืนและไม่พิจารณาอีก บทความต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ แต่ละภาษาควรมีเพียงย่อหน้าเดียว และความยาวไม่เกิน 25 บรรทัด

คำสำคัญ: วิธีการส่งบทความ รูปแบบบทความ ขนาดตัวอักษร รูปแบบตัวอักษร การเว้นบรรทัด

Abstract

This article describes a submission procedure and a format of the manuscript for the Journal of Engineering, RMUTT. Authors are required to strictly follow the guidelines provided here : otherwise, the manuscript will be rejected immediately and not be considered again. A good abstract should have only one paragraph. Both Thai and English abstracts are required, the length of each should not exceed 25 lines.

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

1. ข้อกำหนดทั่วไป

บทความต้องประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ตามลำดับต่อไปนี้คือ ชื่อเรื่องภาษาไทย ชื่อเรื่องภาษาอังกฤษ ชื่อผู้เขียนบทความ อีเมลสถาบัน ที่อยู่สถาบันอย่างละเอียด บทความย่อภาษาไทย บทความย่อภาษาอังกฤษ เนื้อเรื่อง แบ่งเป็น บทนำ เนื้อความหลัก สรุป กิตติกรรมประกาศ (ถ้ามี) เอกสารอ้างอิง และภาคผนวก (ถ้ามี)

2. คำแนะนำในการเขียนและพิมพ์

2.1 คำแนะนำทั่วไป

บทความที่เสนอจะต้องพิมพ์เป็นภาษาไทย หรือ ภาษาอังกฤษ ตามรูปแบบที่กำหนด ซึ่งพร้อมที่จะนำไป ถ่ายเพลท เพื่อพิมพ์ออฟเซตได้ทันที

¹ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมีและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

² อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

³ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การพิมพ์ให้พิมพ์ลงบนกระดาษ A4 โดยพิมพ์เป็นสองคอลัมน์ตามรูปแบบบทความนี้ ขนาดของคอลัมน์เป็นไปตามที่กำหนด จะต้องพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์เลเซอร์ที่มีความละเอียดไม่น้อยกว่า 300 dpi.

ให้พิมพ์โดยไม่เว้นบรรทัด เมื่อจะขึ้นหัวข้อใหม่ให้เว้นบรรทัด 1 บรรทัด และจะต้องพิมพ์ให้เต็มคอลัมน์ก่อนที่จะขึ้นคอลัมน์ใหม่ หรือขึ้นหน้าใหม่ ห้ามเว้นที่เหลือไว้ว่างเปล่า

การลำดับหัวข้อในส่วนของเนื้อเรื่องนี้ ให้ใส่เลขกำกับโดยให้บทนำเป็นหัวข้อหมายเลข 1 และหากมีการแบ่งหัวข้อย่อย ก็ใช้เลขระบบทศนิยมกับหัวข้อย่อย เช่น 2.1 เป็นต้น

ให้ใส่เลขเรียงลำดับหน้าด้วยดินสอไว้ที่มุมขวาบนของกระดาษทุกหน้า

2.2 ขนาดตัวอักษรและการเว้นระยะ

พิมพ์บทความภาษาไทยด้วยตัวอักษรรูปแบบ “TH SarabunPSK”

ชื่อเรื่องบทความให้ใช้ตัวอักษรขนาด 20 พอยน์ ตัวเข้ม

ชื่อผู้เขียน สถาบันให้ใช้ตัวอักษรขนาด 16 พอยน์ ตัวปกติ

ชื่อหัวข้อย่อยให้ใช้ตัวอักษรขนาด 16 พอยน์ ตัวเข้ม
บทคัดย่อและเนื้อความต่าง ๆ ให้ใช้ตัวอักษรขนาด 16 พอยน์ ตัวปกติ

สมการต่าง ๆ ให้ใช้ตัวอักษรขนาด 16 พอยน์ หรือตัวอักษร TH SarabunPSK 16 พอยน์

การเว้นระยะบรรทัดห่างในแนวตั้งแบบ exactly 20 พอยน์

ให้จัดเนื้อเรื่องในแต่ละบรรทัดเรียงชิดซ้ายและขวาอย่างสวยงาม

2.3 ชื่อเรื่อง ชื่อผู้แต่ง และชื่อหัวข้อ

การพิมพ์ชื่อเรื่อง ให้วางตำแหน่งกลางหน้ากระดาษแบบคอลัมน์เดียว

ชื่อผู้เขียน และ อีเมล ให้พิมพ์ไว้ได้ชื่อเรื่องและอยู่กลางหน้ากระดาษแบบคอลัมน์เดียว

ไม่ต้องระบุตำแหน่งวิชาการ หรือสถานะของนักศึกษาใด ๆ ทั้งสิ้น

ชื่อหัวข้อย่อยต่าง ๆ ให้วางตำแหน่งชิดขอบซ้าย

2.4 การจัดทำรูปภาพ

รูปภาพจะต้องมีความกว้างไม่เกิน 81 มม. เพื่อให้ลงในหนึ่งคอลัมน์ได้ หรือกรณีจำเป็นจริง ๆ เพื่อรักษารายละเอียดในภาพ อาจยอมให้มีความกว้างได้เต็มหน้ากระดาษ(กว้าง 168 มม.)

ตัวอักษรทั้งหมดในภาพจะต้องมีขนาดใหญ่สามารถอ่านได้สะดวก และต้องไม่เล็กกว่าตัวอักษรในเนื้อเรื่อง

รูปภาพทุกรูปจะต้องมีหมายเลข และคำบรรยายได้ภาพ หมายเลขและคำบรรยายรวมกันแล้วควรมีความยาวไม่เกิน 2 บรรทัด

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

รูปลายเส้นจะต้องเป็นเส้นหมึกดำ ส่วนรูปถ่ายควรจะเป็นรูปขาวดำที่มีความคมชัด รูปสีอนุโลมให้ใช้ได้รูปภาพควรมีรายละเอียดเท่าที่จำเป็นเท่านั้น เช่น ภาพถ่ายรูปคลื่นจากออสซิลโลสโคปที่ปรากฏให้เป็นเฉพาะจอภาพเป็นต้น และเพื่อความสวยงามให้เว้นบรรทัดเหนือรูปภาพ 1 บรรทัดและเว้นใต้คำบรรยาย 1 บรรทัด

2.5 การเขียนสมการ

สมการทุกสมการจะต้องมีหมายเลขกำกับอยู่ภายในวงเล็บและเรียงลำดับที่ถูกต้อง ควรใช้ตัวพยัญชนะเอียงแสดงถึงพารามิเตอร์หรือตัวแปรในสมการ ตำแหน่งของหมายเลขสมการจะต้องอยู่ชิดขอบด้านขวาของคอลัมน์ เว้นหนึ่งบรรทัดก่อนเขียนสมการ และเว้นหนึ่งบรรทัดหลังเขียนสมการ จัดให้สมการอยู่ตรงกลางคอลัมน์ ดังตัวอย่างนี้

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

เริ่มเขียนคำอธิบายตั้งแต่บรรทัดนี้

2.6 การจัดการทำตาราง

ตัวอักษรในตารางจะต้องไม่เล็กกว่าตัวอักษรในเนื้อเรื่อง ควรตีเส้นกรอบตารางด้วยหมึกดำให้ชัดเจน

ตารางทุกตารางจะต้องมีหมายเลข และคำบรรยายกำกับเหนือตาราง หมายเลขกำกับและคำบรรยายนี้รวมกันแล้วควรมีความยาวไม่เกิน 2 บรรทัด คำบรรยายเหนือตารางห้ามใช้คำว่า “แสดง” เช่นเดียวกับกรณีรูปภาพ

เพื่อความสวยงามให้เว้นบรรทัดเหนือตาราง 1 บรรทัด และเว้นบรรทัดใต้คำบรรยายรูปภาพ 1 บรรทัด

2.7 การอ้างอิงและเอกสารอ้างอิง

การอ้างอิงเอกสารในบทความ ให้ใช้ระบบตัวเลข (Numerical System) โดยใส่ตัวเลขของเอกสารอ้างอิงไว้ในวงเล็บ เช่น [1] ที่ท้ายข้อความที่อ้างอิงถึง

2.8 ความยาวของบทความ

เมื่อรวมทุกส่วนแล้ว แต่ละบทความมีความยาวดังนี้ บทความทั่วไปมีความยาว 10 หน้ากระดาษ A4 บทความรับเชิญมีความยาวไม่เกิน 12 หน้ากระดาษ A4

3. กรณีบทความภาษาอังกฤษ

ผู้พิมพ์บทความเป็นภาษาอังกฤษ กรุณาดูคำแนะนำวิธีการพิมพ์บทความภาษาอังกฤษที่แนบมาด้วย

4. การส่งบทความ

ผู้เขียนสามารถส่งต้นฉบับ ทางเว็บไซต์ออนไลน์ของวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชชมงคลธัญบุรี www.engineer.rmutt.ac.th/journal/ (เลือกเมนู Online Submission) หรือ เข้าสู่ระบบโดยตรงผ่านทาง <http://www.enclm.rmutt.ac.th/enjournal/> โดยต้องทำการลงทะเบียนเพื่อสมัครสมาชิกวารสารและนำส่งวารสารต้นฉบับ ในรูปแบบ “Word ไฟล์” อีกทั้งต้องส่ง “แบบฟอร์มการส่งบทความทางวิชาการ เพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชชมงคลธัญบุรี” มายังอีเมล enjournal@en.rmutt.ac.th หรือ จัดส่งไปรษณีย์

มายัง “กองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชชมงคลธัญบุรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 39 หมู่ 1 ถ.รังสิต-นครนายก ต.คลองหลวง อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110” จึงจะถือว่า การส่งวารสารนั้นเสร็จสมบูรณ์ หากขั้นตอนการนำส่งวารสารทั้ง 2 ขั้นตอน คือ การส่งวารสารทางเว็บไซต์ออนไลน์ และการนำส่งแบบฟอร์มการส่งบทความมายังอีเมล enjournal@en.rmutt.ac.th ไม่ครบถ้วนทั้ง 2 ขั้นตอน บทความนั้นจะถูกส่งคืน และไม่สามารถผ่านการพิจารณาได้

5. สรุป

ผู้เขียนบทความกรุณาตรวจสอบบทความอย่างรอบคอบโดยใช้เวลาอย่างเพียงพอก่อนส่งให้คณะกรรมการพิจารณา จะทำให้บทความของท่านมีคุณภาพสูงและผ่านการพิจารณาได้ง่ายขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้เขียนบทความทุกท่านที่ให้ความร่วมมือรักษาระเบียบการเขียนบทความอย่างเคร่งครัด

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์. **พลังงานทดแทน**. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <http://dede.go.th/dede/index.php> (30 มีนาคม 2552).
- [2] ฉวีวรรณ รมยานนท์, 2545. **เขียนแบบเทคนิค 2**. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดยุคเคชั่น.
- [3] ถาวร รัตนพรประดิษฐ์, 2551. **ศึกษาความเป็นไปได้ของการเมอร์เซอร์ไรส์กังกัง เปรียบเทียบกับการเมอร์เซอร์ ไรส์ผืนผ้าเดนิม**. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาสิ่งทอ. มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [4] ส.วงศ์ศรีตระกูล, 2552. “วช.หนุนแม่โจ้สร้างฟาร์มกังหันลมผลิตไฟฟ้าในเขตภาคเหนือตอนล่าง,” **Engineering Today**. 7,75 (มีนาคม) : 51-56.

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

C.Sangswasd¹, S.Hiranvarodom², and A.Sonthisombat³

sangswasd@rmutt.ac.th¹, somchai.h@en.rmutt.ac.th², apichart.s@en.rmutt.ac.th³

Abstract

Your manuscript will appear in A4 sized photocopy exactly the same as it is received. Please follow the guideline explicitly. English papers should begin with the English abstracts. No Thai abstract is required. The abstract should include a concise statement of objectives and a summary of important results.

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

1. General Introduction

Contributed papers are limited to 6 pages including all figures and tables. Invited papers have an 8 pages limit. Each manuscript typically contains the following sections: Title, Authors name (Nonacademic position is required., E-mail, Address in details (Give phone and Fax. Numbers, if available.), Abstract, Text, Acknowledgment (If preferred), References.

2. Style and format

2.1 General

Manuscripts are typed single space except for headings. Font type should mimic TH SarabunPSK #10 (shown here). Right – hand justification is recommended.

Type your manuscripts on A4 (21 cm x 29.7 cm) sheets. The sheet should be divided into a two – column width of 81 mm with a space between columns of 6 mm (a total width of 168 mm). This permits side margin of 21 mm each. The top and bottom margins should be 29 mm.

2.2 Title Block

The title should appear in upper and lower case without underlining, centered across both columns. Type the author's name and affiliation also in upper and lower case letters centered under the title. In case of multi-authorship, group the authors and identify each author by superscript numbers corresponding to the organization which should be grouped below authors.

¹ Department of chemical and Materials Engineering Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

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

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

2.3 Headings and Subheadings

Heading and subheadings are in upper and lower case bold letter without underlining, if available. They should appear with sequential numbers, left – hand justified in the column.

2.4 Equations

Equations are to be numbered consecutively throughout the text. The equation number should be placed in parenthesis and flushed with the right – hand margin of the column. Italic alphabets are recommended for equation parameters.

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

Leave a blank line before and after equations. A long equation should appear across the columns by interrupting the opposite column with column-termination and column-initiation bars.

3. References

References are to be listed and numbered at the end of the papers. Refer to them in the text as [1].

4. Illustrations

Figures, tables and line drawings should be positioned within the text. They may conform to either a one-column or two-column width and must be black ink or high contrast black-and-white reproductions. They must include captions.

5. Submission of Your Manuscripts

Please submit the manuscripts on the website of JOURNAL OF ENGINEERING, RMUTT www.engineer.rmutt.ac.th/journal/ (Select Online Submission menu) or direct way by the website of <http://www.enclm.rmutt.ac.th/enjournal/>. After that you have to register to be a member of Journal of Engineering, RMUTT and submit the manuscripts by “Word file”. Moreover, you have to send the technical article form for publishing on this journal back to “enjournal@en.rmutt.ac.th” or by mail to “Publication department of Journal of Engineering, RMUTT, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Rangsit – Nakhonnayok Rd. Klong 6, Thanyaburi, Pathumthani, Thailand 12110”. If no completed on 2 steps such as submission online and send back the technical article form to enjournal@en.rmutt.ac.th or Publication department address, your articles will be rejected and cannot be considered.

6. Conclusions

Your paper should be carefully checked.

7. Acknowledgment

Thank you for your good cooperation.

References

- [1] Crawford, R.J. 2005. **Plastics Engineering**, 3rd ed. Oxford : Elsevier Butterworth-Heinemann.
- [2] Samuel Forest, 2008 “Micromorphic Approach for Gradient Elasticity Viscoplasticity, and Damage,” **Journal of Engineering Mechanics**. 135, 3 (March) : 117-131.

- [3] Somjate Patcharaphun, 2008. “Numerical and Experimental validation of Skin and Core Material Distribution in Sandwich Injection Moldings”, **Journal of Research in Engineering and Technology**. 5, 4 (October - December) : 433-444.
- [4] Thaworn Rattanaphornpradit, 2551. **Feasibility Study of Mercerized Denim Garmen Versus Mercerized DenimFabric**. Master of Art’s Thesis. Rajamangala University of Technology Thamyaburi
- [5] Wikipedia. **Technology**. [Online] Available : <http://Wikipedia.org> (30 March 2009).



สมาชิกเลขที่

ใบสมัครสมาชิกวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลธัญบุรี

วันที่สมัคร

ข้าพเจ้า นาย/นาง/นางสาว สกุล อาชีพ

ที่อยู่ (สำหรับจัดส่งวารสาร) เลขที่ ถนน แขวง/ตำบล

เขต/อำเภอ จังหวัด รหัสไปรษณีย์

โทรศัพท์ โทรสาร e-mail

มีความประสงค์สมัครเป็นสมาชิก

อัตราค่าสมาชิก

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

พร้อมกันนี้ได้ส่งค่าสมาชิก จำนวน บาท

จำนวนเงินตัวอักษร

ชำระเงินโดยวิธี

ธนาคาติ ส่งจ่าย

ตัวแลกเงินไปรษณีย์ ส่งจ่าย

โอนเงินเข้าบัญชีธนาคาร ชื่อบัญชี เลขที่บัญชี

- หมายเหตุ 1. กรุณาส่งสำเนาใบเข้าบัญชี (pay-in-slip) หรือโทรสารมายังสำนักงาน
คณะวิศวกรรมศาสตร์ พร้อมเขียนชื่อ – นามสกุล และหมายเลขสมาชิก (ถ้ามี)
2. นักศึกษาที่สมัครทางไปรษณีย์ กรุณาส่งสำเนาบัตรประจำตัวนักศึกษาแนบมาด้วย

ลงชื่อ ผู้สมัคร
(.....)

แบบฟอร์มการส่งบทความทางวิชาการ
เพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมนคลธัญบุรี

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

ชื่อ-สกุล.....

(ภาษาอังกฤษ).....

ตำแหน่งทางวิชาการ (โปรดระบุ) ☐ ศาสตราจารย์ ☐ รองศาสตราจารย์ ☐ ผู้ช่วยศาสตราจารย์
อื่นๆ(โปรดระบุ).....

ที่อยู่ (ที่ติดต่อได้).....

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

โทรสาร..... อีเมล.....

มีความประสงค์ขอส่งบทความ เรื่อง:

ชื่อบทความ (ภาษาไทย).....

ชื่อบทความ (ภาษาอังกฤษ).....

การตรวจสอบ

☐ ทำการลงทะเบียน และ ส่งวารสารต้นฉบับใน เว็บไซต์

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

<http://www.enclm.rmutt.ac.th/enjournal/>. เรียบร้อยแล้ว

วันที่ ส่งวารสารต้นฉบับ เข้าสู่ระบบออนไลน์

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า บทความนี้เป็นผลงานของข้าพเจ้าและผู้ร่วมงานตามชื่อที่ระบุไว้ในบทความจริง
และบทความนี้ไม่เคยลงตีพิมพ์ในวารสารใดมาก่อน และข้าพเจ้าจะไม่นำส่งบทความนี้ไปพิจารณาตีพิมพ์ใน
วารสารอื่นภายใน 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

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://www.encm.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

(.....)

...../...../.....

