



วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏธนบุรี

คณะกรรมการจัดทำวารสาร วิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏธนบุรี

คณะกรรมการที่ปรึกษา

อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและวิจัย
คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

กองบรรณาธิการ

ศ.(พิเศษ) อัจฉราพร ไสละสุต

ศ. ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ

รศ. ดร.สุธี อักษรกิตติ์

รศ. ดร.เข้มชัย เหมะจันทร์

รศ. ดร.ศิริวรรณ ศรีสรณ์

รศ. ดร.กัณวรัช พลุประสิทธิ์

รศ. ดร.ธำรงรัตน์ มุ่งเจริญ

รศ.ดร.รงค์ บวบทอง

ผศ. ดร.สมเจตน์ พชรพันธ์

ผศ. ดร.ปฐมทัศน์ จิระเดชะ

ผศ. ดร.อังคณา พันธุ์หล่อ

ดร.ชัชวาลย์ สุรัสวดี

ผศ. ดร.ศิวกร อ่างทอง

รศ. ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์

ผศ. ดร.จักรี ศรีนนท์นิต

166 ซ.อาคารสงเคราะห์ ถ.พิชัย เขตดุสิต กรุงเทพฯ 10300

ศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย

คณะกรรมการ

คณะวิทยาศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์

52/14 ถ.พหลโยธิน 45 แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

คณะวิศวกรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)

มหาวิทยาลัยรังสิต

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

ผศ.ชวลิต

แสงสวัสดิ์

เลขานุการ

นางสาวปรกช

สิริสุวัฒน์

ผู้ช่วยเลขานุการ

นายวิรัชศักดิ์

ห่มเจริญ

นางสาวพรทิพย์

พุ่มเหมือน



วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏบุรีรัมย์

บทบรรณาธิการ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏบุรีรัมย์ ได้ดำเนินงานมาเป็นปีที่ 14 ได้รับความสนใจจากนักวิจัย หลาย ๆ ท่าน ส่งผลงานมาตีพิมพ์เผยแพร่ เป็นประโยชน์ต่อผู้อ่านได้รับทราบ การพัฒนางานวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีภายในประเทศ และดังเช่นเคยทุก ๆ บทความ ที่ได้รับการตีพิมพ์จะได้รับการกลั่นกรอง อ่านทบทวน จากคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณา บทความประจำวารสาร ทั้งนี้เพื่อความถูกต้องทางวิชาการ ผลงานที่น่าสนใจหลายเรื่อง ในวารสารฉบับนี้ได้แก่ การต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด การทำปฏิกิริยาหมักจากของเสียอินทรีย์โดยใช้ถังเติมอากาศ และการศึกษาประสิทธิภาพการป้องกัน คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของผ้าทอจากฝ้าย/สแตนเลสฯ

กองบรรณาธิการขอขอบพระคุณคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความทุกท่าน ที่ได้สละเวลา อันมีค่าอ่านทบทวนบทความเพื่อความถูกต้องทางวิชาการ ทั้งนี้หากท่านผู้สนใจ มีความประสงค์จะขอตีพิมพ์บทความ กรุณาจัดเตรียมต้นฉบับให้เป็นไปตามรูปแบบของ ทางวารสาร และจัดส่งมายังกองบรรณาธิการ ตามที่อยู่ที่ให้ไว้ หรือจัดส่งทางเว็บไซต์ www.engineer.rmutt.ac.th/journal และถ้ามีข้อสงสัยประการใด โปรดใช้เบอร์โทรศัพท์ 0 2549 3493 เพื่อสอบถาม ท่านจะได้รับคำตอบจนพอใจ

กองบรรณาธิการ

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิผู้พิจารณาบทความ

รศ. ดร.วันชัย ธิวัชรวิชัย	คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ. ดร.เข็มชัย เหมะจันทร์	คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ. ดร.อุษา แสงวัฒนาโรจน์	คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ. ดร.สิริวรรณ กิตติเนาวรัตน์	คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ. ดร.ชิตชนก มีใจเชื้อ	คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ผศ. ดร.ทวีชัย สำราญวานิช	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
ผศ. ดร.อาทิตย์ ไสตรโยม	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม
รศ. ดร.จงจินต์ ผลประเสริฐ	คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
ผศ. ดร.อังคณา พันธุ์หล่อ	วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต
รศ. วิชัย ฉัตรทินวัฒน์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผศ. ดร.ธีระพงษ์ ว่องรัตนะไพศาล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผศ. ศิวะ อัจฉริยวิริยะ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผศ. ดร.พนมกร ขาวทอง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ. ดร.อิสสระย์ หารราชเจริญโรจน์	อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ. ดร.บรรยงค์ รุ่งเรืองด้วยบุญ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
รศ. ดร.เจียรนัย เล็กอุทัย	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
รศ. ดร.กัณวรัช พูลประชาญ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)
รศ. ดร.ศิริวรรณ ศรีสรณ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)
รศ. ดร.เวคิน ปิยรัตน์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)
ผศ. ดร.นำคุณ ศรีสนิโท	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)
ผศ. ดร.ปฐมทัศน์ จิระเดชะ	สถาบันยุทธศาสตร์ทางปัญญาและวิจัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ดร.สาธิต พุทธิชัยยังค์	อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผศ. ดร.ปทุมทิพย์ ปรามพาล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ดร.ประเทืองทิพย์ ปานบำรุง	คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ศ. ดร.ก้องกิติ พุสวีสดี	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
รศ. ดร.เพ็ญจิตร ศรีนพคุณ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
รศ. วชิรพันธ์ วิทยกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
รศ. ดร.ธารังรัตน์ มุ่งเจริญ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
ผศ. ดร.สมเจตน์ พัทธพันธ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
รศ. ลีรี ชัยเสรี	คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
รศ. ดร.วรารุณ วุฒินิชย์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน
รศ. ดร.ธัญญา นิยมมาภา	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

ศ. ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ
รศ. ดร.มานะ อมรภิชาบุร่ง
ผศ. ดร.นริส ประทีนทอง
ผศ. ดร.ธนิศ สวัสดิ์เสวี
ศ. ดร.โกสินทร์ จันทน์ไทย
รศ. ดร.วิโรจน์ บุญอำนวยวิทยา
รศ.พรเกษม จงประดิษฐ์
ผศ. ดร.สมโพธิ อยู่ไว
ผศ. ดร.ทวิช พูลเงิน
ผศ. ดร.สุทัศน์ สีสาทวิวัฒน์
ดร.ศิรินทร ทองแสง
รศ. ดร.รุ่งเรือง กาลศิริศิลป์
รศ. ดร.ชัยยุทธ ช่างสาร
รศ. ดร.ณฐา คุปต์ชัยียร์
รศ. ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์
รศ. ดร.จตุรงค์ ลังกาพินธุ์
รศ.มานพ ต้นตระกูลบัณฑิตย์
รศ.ธีระพงษ์ ไชยเฉลิมวงศ์
รศ.สุจิระ ขจรจิตต์เมตต์
ผศ. ดร.ศิวกร อ่างทอง
ผศ. ดร.วันชัย ทรัพย์สิงห์
ผศ. ดร.สมชัย หิรัญวโรตม
ผศ. ดร.ปิตินันต์ กรำมาตร
ผศ. ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง
ผศ. ดร.สมหมาย ผิวสอาด
ผศ. ดร.สมหมาย ตริย์ไชยาพร
ผศ. ดร.อำนวย เรืองวารี
ผศ. ดร.ไพฑูรย์ กิตติสุนทร
ผศ. ดร.สมนึก สังข์หนู

[illegible]

ผศ. ดร.สมประสงค์ ภาษาประเทศ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ. ดร.อภิชาติ สนธิสมบัติ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ. ดร.สุนัน ปานสาคร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ. ดร.จักรี ศรีนนท์ฉัตร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ. ดร.สุรินทร์ แห่งมงาม	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ. ดร.จิรวรรณ คชสาร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ. ดร.อภิรักษ์ วัลภา	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ. ดร.ไพฑูรย์ รักเหลือ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ. ดร.ศุภวิทย์ ลวณะสกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ. ดร.พุทธรพล ทองอินทร์ดำ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ. ดร.บุญยฤทธิ์ ประสาทแก้ว	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.สุรัตน์ ตรีชวนพงศ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ. ดร.จินดารัตน์ มณีเจริญ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.มานิช รุจิการ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.วีระศักดิ์ ละอองจันทร์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.ชาอุยยุทธ กฤตสุนันท์กุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.ฐนินยา รัชชีสุริยชัย	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.จุฑพล ตั้งปกาศิต	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.มนุศักดิ์ จานทอง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.ฉัตรชัย ศุภพิทักษ์สกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.ระพี กาญจนะ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.กุลยา สาริชีวิน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.ศุภลลิตี พงศ์ศิweiseสถิตย์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.บุญชัย ผึ้งไผ่งาม	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์วีระพงษ์ ครูส่ง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ. ดร.เจริญ เจริญชัย	คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.นิธิวัฒน์ ชูสกุล	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.สนธยา ทองอรุณศรี	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.นเรศ อินตะวงศ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ. ดร.เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย	วิทยาเขตภาคพายัพ
รศ. ดร.ยุทธชัย บรรเทงจิตร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ดร.ประธาน วงศ์ศรีเวช	คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีแห่งสุวรรณภูมิ
รศ.จิราภรณ์ เบญจประภาภรณ์	ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สวทช.)
รศ.นภาพินท์ อนันตรศิริชัย	คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์
รศ.ณรงค์ บวบทอง	ในพระบรมราชูปถัมภ์
รศ. ดร.ณรงค์ อยู่ถนอม	นักวิชาการอิสระ
	นักวิชาการอิสระ
	นักวิชาการอิสระ

การขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟุ้ง และผงหินปูน

Expansion and Weight Loss in Sulfate Solution of Mortar with Fly Ash, Ground Granulated Blast-Furnace Slag, Silica Fume and Limestone Powder

ปิติศานต์ กร้ามาตร¹ จตุพล ตั้งปกาศิต^{2*} ราพีง ชัยหลี่เจริญ³ และสมนึก ตั้งเต็มสิริกุล⁴
pitisan.k@en.rmutt.ac.th¹, jatuphon_t@rmutt.ac.th²,
rumpueng.c@en.rmutt.ac.th³, somnuk@siit.tu.ac.th⁴

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟุ้ง และผงหินปูน ซึ่งเป็นวัสดุกากอุตสาหกรรม โดยแทนที่วัสดุดังกล่าวในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผลการศึกษาพบว่า ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตนั้น การขยายตัวของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟุ้ง และผงหินปูน มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ยกเว้นเมื่อแทนที่ด้วยผงหินปูนอย่างเดียว และแทนที่ด้วยเถ้าลอยหรือตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปริมาณที่น้อย ๆ ไม่ว่าจะแทนที่อย่างเดียว และ/หรือร่วมกับผงหินปูน จะให้ค่าการขยายตัวมากกว่าหรือใกล้เคียงกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตนั้น การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยและตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ในขณะที่การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ผสมซิลิกาฟุ้งไม่แตกต่างจากของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และการแทนที่ผงหินปูนในปูนซีเมนต์มีแนวโน้มให้การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ที่น้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ยกเว้นเมื่อแทนที่ร่วมกับปริมาณที่มากของเถ้าลอยและ/หรือตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด

คำสำคัญ: มอร์ตาร์, การขยายตัว, การสูญเสียน้ำหนัก, สารละลายซัลเฟต

¹ผู้ช่วยศาสตราจารย์

^{2,3}อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

⁴ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยีโยธา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

*Corresponding Author, E-mail: jatuphon_t@rmutt.ac.th

Abstract

This research aims to study the expansion in sodium sulfate solution and weight loss in magnesium sulfate solution of mortar with fly ash, ground granulated blast-furnace slag (GGBS), silica fume and limestone powder which are industrial wastes. These industrial wastes were used to partially replace in Portland cement type 1 (OPC). The study found that in sodium sulfate solution, expansion of mortars with fly ash, GGBS, silica fume and limestone powder was less than all of the OPC mortars. Except when replaced with limestone powder and with fly ash or GGBS at small quantities, the expansion will be higher than or close to all of the OPC mortars. Besides, in magnesium sulfate solution, weight loss of mortar with GGBS and fly ash was greater than all of the OPC mortars. While the weight loss of mortar with silica fume was no different from all of the OPC mortars. Finally, the replacement of limestone powder in OPC mortars tend to be lesser weight loss than OPC mortars, except when replaced with limestone powder at large amount of fly ash and / or GGBS.

Keywords: Mortar, Expansion, Weight loss, Sulfate solution.

1. บทนำ

เนื่องจากปัญหาสถานะโลกร้อนและกระแสรองรักษ์พลังงานรวมถึงสถานะการแข่งขันทางด้านเศรษฐกิจปัจจุบัน ทำให้มีการนำวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์มาใช้ในอุตสาหกรรมคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น หากพิจารณาประโยชน์จากการใช้วัสดุทดแทนปูนซีเมนต์โดยเฉพาะกรณีวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น เถ้าลอย (Fly ash) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการถลุงเหล็ก โรงผลิตกระแสไฟฟ้า ตะกรันเตาถลุงเหล็ก บดละเอียด (Ground granulated blast-furnace slag) ซึ่งเกิดจากกระบวนการถลุงเหล็ก ซิลิกาฟุ้ง (Silica fume) ซึ่งเป็นผลพลอยได้ของโรงงานผลิตซิลิกอนเมทัลและเฟอร์โรซิ-

ลิกอนอัลลอยด์ และผงหินปูน (Limestone powder) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการย่อยหิน เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ ย่อมส่งผลโดยตรงต่อการลดลงของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ นอกจากนี้ยังสามารถลดต้นทุนในการผลิตและพัฒนาคุณสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้น รวมทั้งสามารถแก้ปัญหาการกำจัดของเสียและช่วยประหยัดพลังงาน

ปัจจุบันสิ่งก่อสร้างต่าง ๆ ที่ใช้คอนกรีตเป็นวัสดุเมื่อสัมผัสกับสารละลายซัลเฟต (SO_4^{2-}) ทำให้คอนกรีตถูกกัดกร่อน ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างบางส่วนเสียหาย ดังนั้นการก่อสร้าง

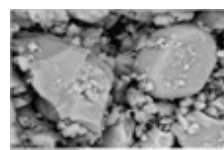
อาคารคอนกรีตจำเป็นต้องพิจารณาความคงทนของคอนกรีตที่สัมผัสกับสารละลายซัลเฟตซึ่งเป็นปัจจัยหลักประการหนึ่งที่ต้องนำมาพิจารณาในการก่อสร้างอาคาร เช่น น้ำใต้ดิน น้ำทะเล บริเวณชายฝั่งทะเล และน้ำเสียจากโรงงาน เป็นต้น สภาพแวดล้อมดังกล่าวมีสารละลายซัลเฟตเจือปนอยู่จำนวนมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมนั้น สารละลายซัลเฟตสามารถกัดกร่อนสร้างความเสียหายให้กับคอนกรีตโดยตรง ส่งผลกระทบให้สิ่งก่อสร้างนั้นเสียหายตามไปด้วย นำไปสู่การพังของโครงสร้างทำให้สิ้นเปลืองงบประมาณในการซ่อมแซม จากการสืบค้นผลงานวิจัย [1, 2, 3 และ 4] ซึ่งให้ผลในแนวทางเดียวกัน กล่าวคือการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลาน (Pozzolan materials) เช่น เถ้าลอย และตะกรันเตาถลุงเหล็ก เป็นต้น ในอัตราส่วนที่เหมาะสม สามารถต้านทานซัลเฟตได้ดี อย่างไรก็ตามปัจจัยบางอย่างก็ให้ผลในด้านลบได้เช่นกัน ตัวอย่างเช่น คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ในปูนซีเมนต์จะดีกว่าไม่มีการแทนที่เมื่อสัมผัสกับสารละลายโซเดียมซัลเฟต แต่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต กลับแย่กว่าเมื่อเทียบกับการไม่แทนที่ [1 และ 2]

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟุ้ง และผงหินปูน ซึ่งเป็นวัสดุภาคอุตสาหกรรมแทนที่บางส่วนของวัสดุประสานเพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำวัสดุดังกล่าวผสมในคอนกรีตที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมซัลเฟต

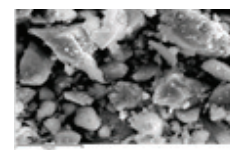
2. ระเบียบวิธีการศึกษา

2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

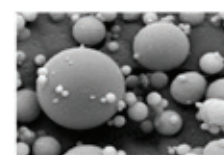
สำหรับวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ (FM) และจากโรงไฟฟ้า BLCP จังหวัดระยอง (FR) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟุ้ง และผงหินปูน (ขนาด 8 ไมโครเมตร) มวลรวมใช้ทรายแม่น้ำร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และสารละลายซัลเฟตโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต โดยรูปที่ 1 แสดงภาพถ่ายขยายกำลังสูงของอนุภาคของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาโดยวิธี Scanning Electronic Microscope (SEM) กำลังขยาย 3,500 เท่า ส่วนตารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบทางเคมี ความถ่วงจำเพาะ และความละเอียดโดยวิธีเบลน ของวัสดุประสานที่ใช้



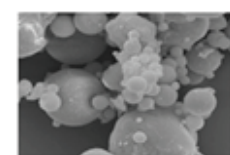
ก) ปูนซีเมนต์
ประเภทที่ 1



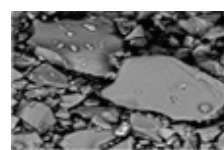
ข) ปูนซีเมนต์
ประเภทที่ 5



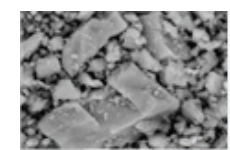
ค) เถ้าลอยแม่เมาะ (FM)



ง) เถ้าลอยระยอง (FR)



จ) ตะกรันเตาถลุงเหล็ก
บดละเอียด



ฉ) ผงหินปูน

รูปที่ 1 ลักษณะของอนุภาคของวัสดุประสานซึ่งเป็นภาพถ่าย SEM กำลังขยาย 3,500 เท่า

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมี ความถ่วงจำเพาะ และความละเอียดโดยวิธีเบลนของวัสดุประสานที่ใช้

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท		เถ้าลอย		ตะกรันเตาหลอมเหล็ก	ซิลิกาฟุ่ม	ผงหินปูน
	ที่ 1	ที่ 5	แม่น้ำมะ	ระยอง			
SiO ₂	18.93	20.97	35.71	61.46	34.06	92.00	0.45
Al ₂ O ₃	5.51	3.49	20.44	20.27	16.27	0.70	0.05
Fe ₂ O ₃	3.31	4.34	15.54	5.56	1.70	1.20	0.03
CaO	65.53	63.86	16.52	1.73	36.05	0.20	55.20
MgO	1.24	3.33	2.00	0.96	7.38	0.20	0.34
Na ₂ O	0.15	2.12	1.15	0.73	2.16	-	<
K ₂ O	0.31	0.12	2.41	1.36	0.21	-	<
SO ₃	2.88	0.47	4.26	0.38	1.09	1.50	0.01
LOI	-	1.44	0.49	5.38	1.44	-	43.12
Free lime	1.00	1.01	1.71	0.03	-	-	-
ความถ่วงจำเพาะ	3.12	3.18	2.53	2.22	2.96	2.21	2.69
ความละเอียดเบนสัน, ซม., ัก.	3,190	3,340	2,723	2,722	4,600	-	5,210

หมายเหตุ : เนื่องด้วยวิธีเบลนไม่สามารถใช้วัดค่าความละเอียดของซิลิกาฟุ่มได้ (อาจใช้วิธี nitrogen absorption แทน)

2.2 สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ในการศึกษา

ในการศึกษาการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายซัลเฟตของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาหลอมเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟุ่ม และผงหินปูน โดยวัดการขยายตัว (Expansion) ของตัวอย่างมอร์ตาร์เฉพาะในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และวัดการสูญเสียน้ำหนักเฉพาะในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ทั้งนี้เพราะการทำลายของสารละลายโซเดียมซัลเฟตต่อคอนกรีตโดยหลักแล้วเป็นการเปลี่ยนผลผลิตของเพสต์ให้เป็น Ettringite ซึ่งมีคุณสมบัติในการขยายตัว ในขณะที่การทำลายของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตต่อคอนกรีตนั้นเป็นการเปลี่ยนแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) ให้เป็นแมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรต (MSH) ซึ่งไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน [5] โดยรายละเอียดสัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้แสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.55 และอัตราส่วน

ทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 2.75 โดยน้ำหนักตลอดการศึกษา

ตารางที่ 2 สัดส่วนผสมมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาหลอมเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟุ่ม และผงหินปูนที่ใช้

สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ ประเภท		เถ้าลอย		ตะกรัน เตาหลอม เหล็ก	ซิลิกา ฟุ่ม	ผง หิน ปูน
	ที่ 1	ที่ 5	แม่น้ำ มะ (FM)	ระ ยอง (FR)			
C1	1.00	-	-	-	-	-	-
C5	-	1.00	-	-	-	-	-
C1-20FM	0.80	-	0.20	-	-	-	-
C1-40FM	0.60	-	0.40	-	-	-	-
C1-20FR	0.80	-	-	0.20	-	-	-
C1-40FR	0.60	-	-	0.40	-	-	-
C1-30SL	0.70	-	-	-	0.30	-	-
C1-50SL	0.50	-	-	-	0.50	-	-
C1-5SF	0.95	-	-	-	-	0.05	-
C1-10SF	0.90	-	-	-	-	0.10	-
C1-5LP	0.95	-	-	-	-	-	0.05
C1-10LP	0.90	-	-	-	-	-	0.10
C1-15FM-5LP	0.80	-	0.15	-	-	-	0.05
C1-10FM-10LP	0.80	-	0.10	-	-	-	0.10
C1-35FM-5LP	0.60	-	0.35	-	-	-	0.05
C1-30FM-10LP	0.60	-	0.30	-	-	-	0.10
C1-15FR-5LP	0.80	-	-	0.15	-	-	0.05
C1-30FR-10LP	0.60	-	-	0.30	-	-	0.10
C1-25SL-5LP	0.70	-	-	-	0.25	-	0.05
C1-20SL-10LP	0.70	-	-	-	0.20	-	0.10
C1-45SL-5LP	0.50	-	-	-	0.45	-	0.05
C1-40SL-10LP	0.50	-	-	-	0.40	-	0.10
C1-5SF-5LP	0.90	-	-	-	-	0.05	0.05
C1-10SF-5LP	0.85	-	-	-	-	0.10	0.05

หมายเหตุ :

C1 หมายถึง มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

C5 หมายถึง มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน

C1-20FM หมายถึง มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยแม่น้ำมะร้อยละ 20

C1-30SL หมายถึง มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาหลอมเหล็กร้อยละ 30

C1-5LP หมายถึง มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยผงหินปูนร้อยละ 5

C1-15FM-5LP หมายถึง มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยเถ้าลอยแม่น้ำมะร้อยละ 15 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5

C1-25SL-5LP หมายถึง มอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แทนที่ด้วยตะกรันเตาหลอมเหล็กบดละเอียดร้อยละ 25 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5

2.3 วิธีการศึกษา

ในการศึกษาการขยายตัวของตัวอย่างในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ ใช้ขนาดตัวอย่าง $25 \times 25 \times 285$ มม.³ ในขณะที่ยกตัวอย่าง 50x50x50 มม.³ ทำการบ่มตัวอย่างในน้ำปูนขาวอิ่มตัวเป็นเวลา 28 วัน หลังจากนั้นนำตัวอย่างมอร์ตาร์ไปแช่ในสารละลายซัลเฟตซึ่งมีความเข้มข้นของไอออนซัลเฟต (SO_4^{2-}) เท่ากับ 33,800 ppm (โดยใช้สารโซเดียมซัลเฟต 50 กรัม ในขณะใช้สารแมกนีเซียมซัลเฟต 43.26 กรัม ในสารละลาย 1 ลิตร ทั้งนี้เพื่อให้ได้ปริมาณ SO_4^{2-} เท่ากับ 33,800 ppm) แล้วทำการทดสอบการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ที่อายุ 2, 4, 8 และ 13 สัปดาห์ และทุก ๆ 8 สัปดาห์ ซึ่งแต่ละสัปดาห์ผสมของมอร์ตาร์ใช้ 3 ตัวอย่างเพื่อเฉลี่ยหาค่าการขยายตัว และค่าการสูญเสียน้ำหนัก โดยใช้ปริมาณของสารละลายซัลเฟตต่อปริมาณของตัวอย่างมอร์ตาร์เท่ากับ 4:1 และมีการเปลี่ยนสารละลายซัลเฟตทุก ๆ 2 เดือนของการแช่ตัวอย่าง

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 การขยายตัวของมอร์ตาร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

การพิจารณาการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตนั้น ได้พิจารณาผลกระทบจากการแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูนโดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1.1 กรณีวัสดุประสานร่วม 2 ชนิด

รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง

การขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์กับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของตัวอย่างที่ใช้วัสดุประสานร่วม 2 ชนิด พบว่า การขยายตัวของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณไตรแคลเซียมอลูมินेट (C_3A) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ทำให้เกิดปริมาณยิปซัมและ Ettringite มากกว่า ส่งผลทำให้เกิดการขยายตัวที่มากกว่า ส่วนการขยายตัวของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย (ทั้ง 2 ชนิด) ร้อยละ 20 และ 40 (รูปที่ 2ก และ 2ข) มีค่าน้อยกว่า หรือใกล้เคียงกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากการแทนที่ด้วยเถ้าลอยนั้น เป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ และผลของการปฏิกิริยาปอซโซลานช่วยลดปริมาณ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ จึงทำให้เกิดยิปซัมและ Ettringite น้อย ส่งผลให้เกิดค่าของการขยายตัวน้อย โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ปริมาณเถ้าลอยที่มากขึ้น (ร้อยละ 40)

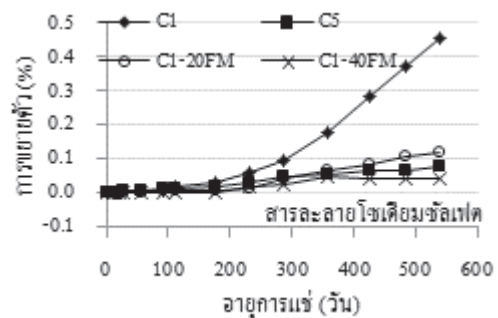
สำหรับการขยายตัวของมอร์ตาร์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (รูปที่ 2ค) พบว่ามอร์ตาร์ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ร้อยละ 30 มีแนวโน้มใกล้เคียงหรือมากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะการแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดซึ่งมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ค่อนข้างสูง (ร้อยละ 36.05) ในปริมาณที่น้อยนั้น ปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดน้อย ซึ่งลดปริมาณ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ได้น้อย ทำให้ Ettringite เกิดมาก ในขณะที่มอร์ตาร์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ร้อยละ 50 มีค่าการขยายตัวใกล้เคียงหรือแนวโน้มที่น้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากการแทนที่ร้อยละ 50 ทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดมาก จึงสามารถ

ลดปริมาณ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ได้มาก ส่งผลให้เกิด Ettringite น้อย

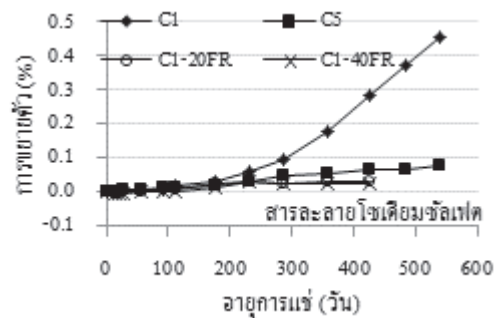
ส่วนการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์ผสมซิลิกาฟุ่มทั้งร้อยละ 5 และ 10 (รูปที่ 2ง) มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน โดยเฉพาะร้อยละ 10 มีค่าการขยายตัวที่น้อยกว่าร้อยละ 5 ทั้งนี้เพราะการแทนที่ด้วยซิลิกาฟุ่มนั้นเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์รวมทั้งปฏิกิริยาปอซโซลานไปช่วยลดปริมาณ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ทำให้ลดปริมาณ Ettringite นอกจากนี้ซิลิกาฟุ่มซึ่งมีอนุภาคค่อนข้างละเอียดสามารถช่วยเติมเต็มในช่องว่างของเพสต์ ทำให้สารละลายโซเดียมซิลิเกตเข้าได้ยากขึ้น จากเหตุผลที่กล่าวมาจึงทำให้การขยายตัวมีค่าน้อย

ในส่วนการขยายตัวของมอร์ตาร์ผสมผงหินปูนร้อยละ 5 และ 10 (รูปที่ 2จ) มีแนวโน้มใกล้เคียงหรือมากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากผงหินปูนไม่มีคุณสมบัติในการทำปฏิกิริยาทางเคมี แต่จะมีคุณสมบัติทางกายภาพ กล่าวคือผงหินปูนจะเข้าไปอุดช่องว่างในมอร์ตาร์ทำให้มอร์ตาร์มีความแน่นเพิ่มขึ้น และทำให้ช่องว่างเหลือน้อยลงสำหรับการเกิด Ettringite ทำให้เกิดการขยายตัวมากขึ้น และพบว่าการขยายตัวของมอร์ตาร์ผสมผงหินปูนร้อยละ 5 มีค่ามากกว่าของร้อยละ 10 ทั้งนี้เพราะการแทนที่ร้อยละ 10 สามารถลดปริมาณปูนซีเมนต์ได้มากกว่า รวมทั้งอาจเป็นเพราะการผสมผงหินปูนร้อยละ 5 อาจทำให้มอร์ตาร์มีความทึบแน่นมากกว่าร้อยละ 10 จึงมีช่องว่างสำหรับเกิด Ettringite น้อยกว่า จึงทำให้เกิดการขยายตัวมากกว่า

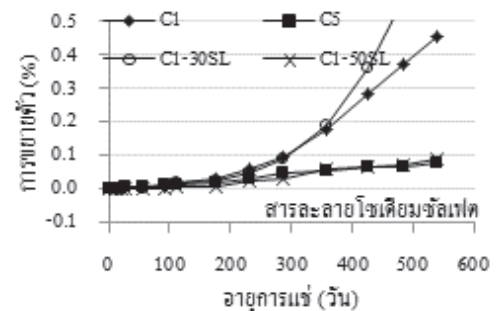
ส่วนรูปที่ 3 แสดงการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซิลิเกตของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟุ่ม และผงหินปูน ที่อายุ 61 สัปดาห์ (427 วัน) ซึ่งเห็นได้ชัดเจนถึงผลกระทบของชนิดและปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟุ่ม และผงหินปูน ต่อการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซิลิเกตของมอร์ตาร์ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว



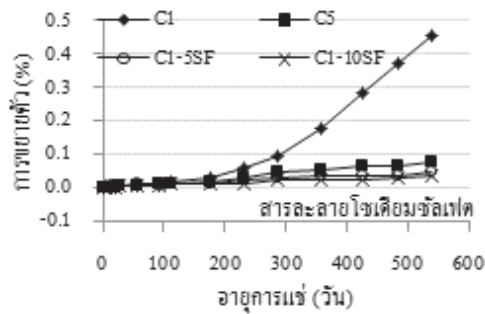
ก) ผสมเถ้าลอยแม่เมาะ (FM)



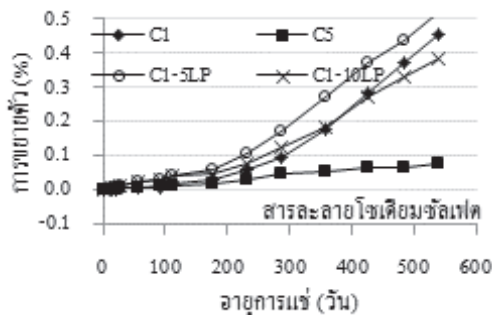
ข) ผสมเถ้าลอยระยอง (FD)



ค) ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด

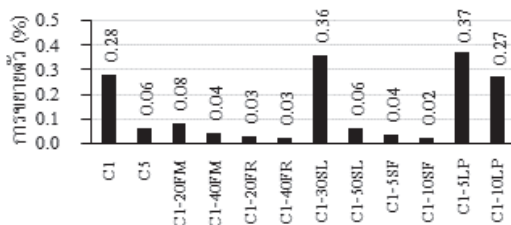


ง) ผสมซิลิกาฟุ่ม



จ) ผสมผงหินปูน

รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซิลเฟตของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟุ่ม และผงหินปูน



รูปที่ 3 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซิลเฟตของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟุ่ม และผงหินปูน ที่อายุ 61 สัปดาห์ (427 วัน)

3.1.2 กรณีวัสดุประสานร่วม 3 ชนิด

รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของตัวอย่างมอร์ตาร์กับอายุการแช่ในสารละลายโซเดียมซิลเฟตของตัวอย่างมอร์ตาร์ที่

ใช้วัสดุประสานร่วม 3 ชนิด พบว่า การขยายตัวของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย FM ร้อยละ 10 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 15 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 (รูปที่ 4ก) มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากการแทนที่ด้วยเถ้าลอย FM (ที่ใช้ในครั้งนี้) มีปริมาณ CaO ค่อนข้างสูง (ร้อยละ 16.52) ในปริมาณที่ต่ำ ผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานจะช่วยลด Ca(OH)_2 ได้น้อย จึงทำให้เกิด Ettringite มากขึ้น และผงหินปูนจะช่วยในการเติมเต็มช่องว่างทำให้ตัวอย่างมอร์ตาร์มีช่องว่างน้อยลง ส่งผลให้การขยายตัวมากขึ้น แต่เมื่อผสมเถ้าลอย FM ร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 และร้อยละ 35 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 กลับให้ค่าการขยายตัวที่น้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งนี้เป็นเพราะการผสมเถ้าลอย FM ในปริมาณมากเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ได้มาก และทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดได้มากขึ้น จึงทำให้เกิด Ettringite น้อยลง อีกทั้งผงหินปูนซึ่งมีอนุภาคขนาดเล็กมีความสามารถในการอุดช่องว่างทำให้ไอออนซิลเฟตเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ยากขึ้น

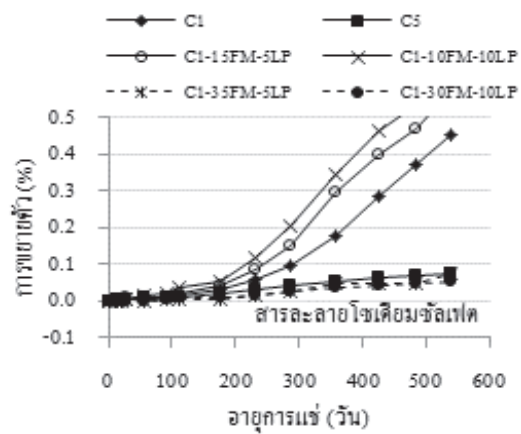
ส่วนการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซิลเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย FR (ซึ่งมีปริมาณ CaO ค่อนข้างต่ำ คือร้อยละ 1.75) ผสมร่วมกับผงหินปูนให้ค่าค่อนข้างน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน (รูปที่ 4ข) ทั้งนี้เพราะเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์แล้ว และปริมาณ CaO ของเถ้าลอยน้อย รวมทั้งปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอยจึงทำให้เกิด Ettringite ได้น้อยมาก ดังเหตุผลที่ได้กล่าวแล้ว

รูปที่ 4ค แสดงการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซิลเฟตของมอร์ตาร์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน พบว่าการ

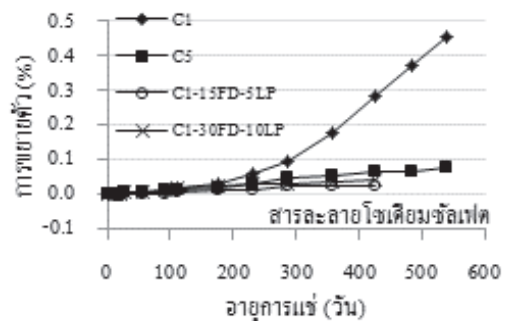
ขยายตัวของมอร์ตาร์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 20 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เนื่องจากการผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซึ่งมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ค่อนข้างสูง (ร้อยละ 36.05) ในปริมาณที่น้อยนั้น ปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดน้อยซึ่งทำให้ลดปริมาณ Ca(OH)_2 ได้น้อยทำให้ Ettringite เกิดมาก และผงหินปูนส่งผลให้มอร์ตาร์มีความแน่นขึ้น จึงทำให้มีช่องว่างไม่เพียงพอต่อการเกิด Ettringite ทำให้เกิดการขยายตัวมาก อย่างไรก็ตามในกรณีมอร์ตาร์ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 25 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 ผสมร้อยละ 40 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 และผสมร้อยละ 45 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 5 กลับให้ค่าการขยายตัวใกล้เคียงกับของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ทั้งนี้เหตุผลดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

รูปที่ 4ง แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่สารในละลายโซเดียมซิลเฟตของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน และผสมซิลิกาฟุ่มร่วมกับผงหินปูน พบว่าการขยายตัวของมอร์ตาร์ผสมซิลิกาฟุ่มร่วมกับผงหินปูนทุกสัดส่วนผสมที่ศึกษา มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ทั้งนี้เหตุผลดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

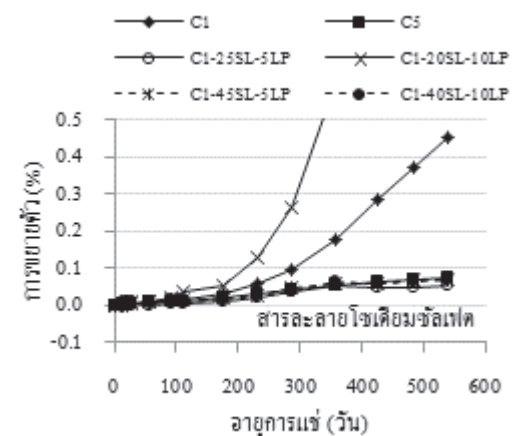
รูปที่ 5 แสดงการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซิลเฟตของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน และผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน และซิลิกาฟุ่มร่วมกับผงหินปูน ที่อายุ 61 สัปดาห์ (427 วัน) ซึ่งทำให้เห็นได้ชัดเจนของการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซิลเฟตของมอร์ตาร์ที่แตกต่างกัน ดังที่ได้กล่าวแล้ว



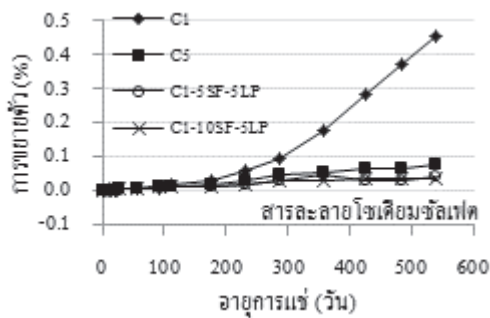
ก) ผสมเถ้าลอยชนิด FM ร่วมกับผงหินปูน



ข) ผสมเถ้าลอยชนิด FR ร่วมกับผงหินปูน

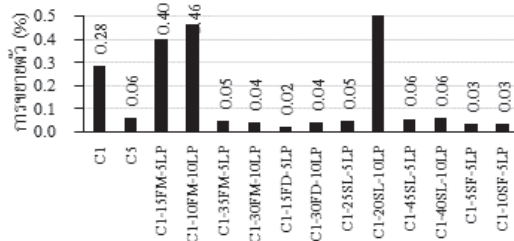


ค) ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน



ง) ผสมซิลิกาฟุ่มร่วมกับผงหินปูน

รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแท้งในสารละลายโซเดียมซิลเฟตของมอร์ตาร์ทปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน มอร์ตาร์ทผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน และซิลิกาฟุ่มร่วมกับผงหินปูน



รูปที่ 5 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซิลเฟตของมอร์ตาร์ทปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน และมอร์ตาร์ทผสมเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูน ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน และซิลิกาฟุ่มร่วมกับผงหินปูน ที่อายุ 61 สัปดาห์ (427 วัน)

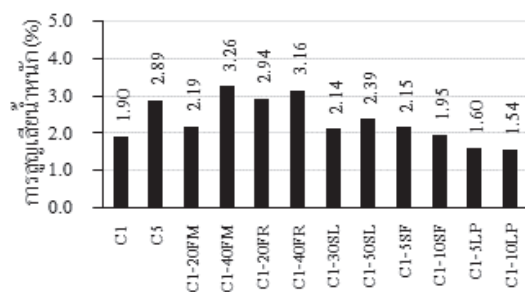
3.2 การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ทในสารละลายแมกนีเซียมซิลเฟต

รูปที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซิลเฟตของมอร์ตาร์ทปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน และมอร์ตาร์ทผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟุ่ม และผงหินปูน ที่อายุ 61 สัปดาห์ (427 วัน) ของการแท้งในสารละลายแมกนีเซียมซิลเฟต พบว่าการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ทปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน มีค่า

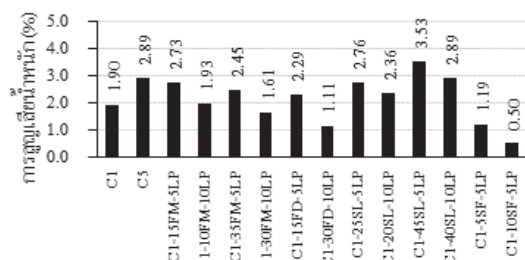
มากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีความพรุนมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 [6] ทำให้สารละลายซิลเฟตเข้าไปทำลายได้มากขึ้น ส่วนการแทนที่เถ้าลอย (ทั้งชนิด FM และ FR ไม่ว่าจะเป็นร้อยละ 20 หรือร้อยละ 40) และตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 พบว่าการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ทมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากผลจากปฏิกิริยาปอซโซลาน ทำให้ความเป็นด่างในมอร์ตาร์ทน้อยลง (ลด $\text{Ca}(\text{OH})_2$) ทำให้ความไม่เสถียรภาพเกิดขึ้นในซีเมนต์เพสต์ จึงทำให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) เปลี่ยนเป็นแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต (MSH) ซึ่งไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่เถ้าลอยในปริมาณที่สูงขึ้น ในขณะที่การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ทผสมซิลิกาฟุ่มนั้นให้ค่าไม่แตกต่างจากของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนมากนัก ทั้งนี้อาจเป็นเพราะซิลิกาฟุ่มมีอนุภาคค่อนข้างละเอียดมากจึงสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี รวมทั้งเป็นตัวเติมเต็ม ส่งผลให้เพสต์มีความทึบมากขึ้น การเข้าทำลายซิลเฟตได้ยากขึ้น ซึ่งเช่นเดียวกับของมอร์ตาร์ทผสมผงหินปูนให้ผลของการสูญเสียน้ำหนักที่ใกล้เคียงหรือน้อยกว่าของมอร์ตาร์ทปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน โดยเฉพาะอย่างยิ่งมีค่าน้อยกว่ากรณีของตัวอย่างที่แทนที่ด้วยเถ้าลอยอย่างเดียวในปูนซีเมนต์ ทั้งนี้เนื่องจากผงหินปูนรบกวนปฏิกิริยาการเกิด MSH ส่งผลให้ MSH เกิดยากขึ้น [7] นั้น แสดงว่าในกรณีของสารละลายแมกนีเซียมซิลเฟต การแทนที่ผงหินปูนในปูนซีเมนต์บางส่วนสามารถต้านทานซิลเฟตได้ดี ในขณะที่การแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์กลับด้อยลง แต่อย่างไรก็ตาม

การแทนที่ของเถ้าลอยนั้นจะต้านทานซัลเฟตได้ดีในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

ส่วนในกรณี 3 วัสดุประสาน (รูปที่ 6ข) สังเกตเห็นว่าการผสมผงหินปูนรวมทั้งเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และซิลิกาฟูม นั้น จะส่งผลให้การสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีค่าน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณี 2 วัสดุประสาน (รูปที่ 6ก) ทั้งนี้ก็เพราะผงหินปูนนอกจากจะเป็นตัวเติมเต็มแล้วยังสามารถรบกวนปฏิกิริยาการเกิด MSH ดังที่กล่าวแล้ว



ก) กรณี 2 วัสดุประสาน



ข) กรณี 3 วัสดุประสาน

รูปที่ 6 การสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูนที่อายุ 61 สัปดาห์ (427 วัน)

4. สรุปผล

จากผลการศึกษาวิจัยครั้งนี้ สามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

1. เมื่อเผชิญสารละลายโซเดียมซัลเฟต การขยายตัวของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ในขณะที่การขยายตัวของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด ซิลิกาฟูม และผงหินปูน มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ยกเว้นเมื่อแทนที่ด้วยผงหินปูนอย่างเดียว และแทนที่ด้วยเถ้าลอยหรือตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปริมาณที่น้อย ๆ ไม่ว่าจะแทนอย่างเดียว และ/หรือร่วมกับผงหินปูน จะให้ค่าการขยายตัวมากกว่าหรือใกล้เคียงกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

2. เมื่อเผชิญสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน มีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย และตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ในขณะที่การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ผสมซิลิกาฟูมไม่แตกต่างจากของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และการแทนที่ผงหินปูนในปูนซีเมนต์ ส่งผลให้การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์มีแนวโน้มที่น้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยงบประมาณประจำปี 2558 ในงานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Tangtermsirikul S. and Bumrungwong C, Conceptual Model for Determining Optimum Proportion of Fly Ash in Sulfate resisting Concrete, *Proceedings of the 3rd National Convention on Civil Engineering, Thailand*, January, 1997, pp. MAT 4-1 to 4-9.
- [2] Pitisan K. and Somnuk T., Expansion, Strength Reduction and Weight Loss of Fly Ash Concrete in Sulfate Solution, *ASEAN Journal on SCIENCE & TECHNOLOGY FOR DEVELOPMENT*, V21, 2004.
- [3] เจต นาจารย์ และปิติศานต์ กร้ามาตร, การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด, วารสารคณะวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลธัญบุรี, ปีที่ 11 ฉบับที่ 2 (กรกฎาคม-ธันวาคม), 2556.
- [4] ยงยุทธ์ วัฒนกุล ปิติศานต์ กร้ามาตร อธิพร ศิริสวัสดิ์ และสมนึก ตั้งเต็มสิริกุล, คุณสมบัติด้านซีเมนต์ และการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเถ้าลอย และผงหินปูน, วารสารคณะวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลธัญบุรี, ปีที่ 8 ฉบับที่ 2 (กรกฎาคม-ธันวาคม), 2553.
- [5] Al-Amoudi, O. S. B., Mechanisms of Sulfate Attack in Plain and Blended Cement: a Review, *Proceeding of the International Seminar*, September 1999, University of Dundee, Scotland, UK, pp. 247-260.
- [6] Pitisan Krammart, "Properties of cement made by partially replacing cement raw materials with municipal solid waste ash and calcium carbide waste, and sulfate resistance of flyash concrete", Ph. D. Thesis, Civil Engineering, School of Civil Engineering and Technology, Sirindhorn International Institute of Technology Thammasat University, 2005.
- [7] Ittiporn S., Lalita B., Warangka S., Pitisan K., and Somnuk T. "Sodium and Magnesium Sulfate Resistance of Mortars with Interground Limestone and Limestone Powder Replacing Cements," *Journal of Advanced Concrete Technology*, volume 12 (2014), pp. 403-412.

การต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด

Sulfate Resistance of Concrete with Ground Granulated Blast-Furnace Slag

รำพึง ชัยหล้าเจริญ¹ ปิติศานต์ กร่ำมาตร^{2*} จตุพล ตั้งปกาศิต³ และนฤชาติ ชูเมือง³
rumpueng.c@en.rmutt.ac.th¹, pitisan.k@en.rmutt.ac.th²,
jatuphon_t@rmutt.ac.th³, x_kingdom@hotmail.com³

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด โดยวัดการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต คอนกรีตใช้ปริมาณวัสดุประสานเท่ากับ 320 กก./ม.³ และ 400 กก./ม.³ และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานใช้เท่ากับ 0.50 ผลการศึกษาพบว่าในสารละลายโซเดียมซัลเฟตนั้น การขยายตัวของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) ล้วน โดยการขยายตัวของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่ใช้ปริมาณวัสดุประสานน้อยกว่า มีค่าน้อยกว่าของเมื่อใช้ปริมาณวัสดุประสานมากกว่า ส่วนในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตนั้น การขยายตัวของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด มีค่ามากกว่าของคอนกรีต OPC ล้วน ยกเว้นคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปริมาณน้อย จะให้ค่าการขยายตัวน้อยกว่าของ OPC ล้วน โดยการขยายตัวของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่ใช้ปริมาณวัสดุประสานน้อยกว่า มีค่ามากกว่าของเมื่อใช้ปริมาณวัสดุประสานมากกว่า นอกจากนี้พบว่า การสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด มีค่ามากกว่าของคอนกรีต OPC ล้วน โดยเมื่อใช้ปริมาณวัสดุประสานที่น้อยกว่าส่งผลให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดน้อยกว่าของเมื่อใช้ปริมาณวัสดุประสานที่มากกว่า

คำสำคัญ: คอนกรีต, ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด, การต้านทานซัลเฟต, การขยายตัว, การสูญเสียน้ำหนัก

^{1,3}อาจารย์

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์

³นักศึกษานิพนธ์โท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

*Corresponding Author, E-mail: pitisan.k@en.rmutt.ac.th

Abstract

This paper aimed to study the sulfate resistance of concrete with ground granulated blast-furnace slag (GGBS). The expansion and weight loss of concrete samples in sodium sulfate (NS) solution and magnesium sulfate (MS) solution were evaluated for the sulfate resistance. The binder content of concrete with GGBS of 320 and 400 kg/m³ was used. The water to binder ratio was kept at 0.50 for concrete. The results shown that the expansion in NS solution of concretes with GGBS had lesser than that of OPC concrete. The expansion in NS solution of GGBS concrete with low binder content had lesser than that with high binder content. In case of MS solution, the expansion of concrete with GGBS was higher than that of OPC concrete, except concrete with small amount of GGBS had smaller expansion than OPC concrete. Likewise, the weight loss in MS solution of concrete with GGBS was larger than that of OPC concrete. Finally, the weight loss in NS solution of GGBS concrete with low binder content had less than that with high binder content.

Keywords: concrete, ground granulated blast-furnace slag, sulfate resistance, expansion, weight loss.

1. บทนำ

เนื่องจากปัญหาสถานะโลกร้อนและ กระแสการอนุรักษ์พลังงาน รวมถึงสถานะ การแข่งขันทางด้านเศรษฐกิจปัจจุบันทำให้ มีการนำวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์มาใช้ใน อุตสาหกรรมคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น เป็นที่ทราบ กันดีว่าในการผลิตปูนซีเมนต์ในปัจจุบันก่อให้เกิด ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณมาก [1] หากพิจารณาประโยชน์จากการใช้วัสดุทดแทน ปูนซีเมนต์โดยเฉพาะกรณีวัสดุเหลือใช้จาก อุตสาหกรรมต่าง ๆ ย่อมส่งผลโดยตรงต่อการ ลดลงของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิด ขึ้นจากอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ นอกจากนี้ ยังสามารถลดต้นทุนในการผลิตและพัฒนา คุณสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้น

รวมทั้งสามารถแก้ปัญหาการกำจัดของเสียและ ช่วยประหยัดพลังงานโดยรวมของประเทศ เช่น พลังงานที่ใช้ในการเผาวัตถุดิบเพื่อผลิต ปูนซีเมนต์ พลังงานที่ใช้ลำเลียงผลพลอยได้ ไปทิ้งในบ่อกลบฝัง พลังงานที่ใช้ในการระเบิด ภูเขาหินปูน และพลังงานที่ใช้ในการย่อยหินเพื่อ ผลิตปูนซีเมนต์ เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถยืด ระยะเวลาในการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดได้ ยาวนานยิ่งขึ้นอีกด้วย

ปัจจุบันสิ่งก่อสร้างต่าง ๆ ที่ใช้คอนกรีต เป็นวัสดุบางส่วนสัมผัสกับสารละลายซัลเฟต (SO_4^{2-}) ทำให้คอนกรีตถูกกัดกร่อน ส่งผลกระทบ ต่อโครงสร้างบางส่วนเสียหาย ดังนั้นการก่อสร้าง อาคารคอนกรีตจำเป็นต้องพิจารณาความคงทน ของคอนกรีตที่สัมผัสกับสารละลายซัลเฟต

ซึ่งเป็นปัจจัยหลักประการหนึ่งที่ต้องนำมาพิจารณาในการก่อสร้างอาคาร เช่น น้ำใต้ดิน น้ำทะเล บริเวณชายฝั่งทะเล และน้ำเสียจากโรงงาน เป็นต้น สารละลายซัลเฟตสามารถกัดกร่อนทำความเสียหายให้กับคอนกรีตโดยตรง ส่งผลกระทบให้สิ่งก่อสร้างนั้นเสียหายตามไปด้วยนำไปสู่การพังของโครงสร้างทำให้สิ้นเปลืองงบประมาณในการซ่อมแซม

ในปัจจุบันการใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด นอกจากจะใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์แล้ว ยังใช้เป็นวัสดุประสานในส่วนผสมร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดสามารถใช้ในรูปของปูนซีเมนต์ผสมหรือใช้เป็นส่วนผสมแยกต่างหากในการผสมคอนกรีต ซึ่งการใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดแยกผสมต่างหากในการผสมคอนกรีตมีเหตุผลสองประการ คือสามารถลดตะกรันเตาถลุงเหล็กได้ละเอียดจนถึงค่าที่ต้องการ และสามารถปรับส่วนผสมคอนกรีตที่มีตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดให้เหมาะสมกับงานแต่ละงานได้ง่าย [2] สำหรับในประเทศไทยยังมีข้อมูลการศึกษาวิจัยการนำเอาตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดมาใช้เป็นส่วนผสมในคอนกรีตนั้นพบว่า น้อยมาก หรืออาจกล่าวได้ว่าแทบไม่มีก็ได้ ส่วนผงหินปูนเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์อีกชนิดหนึ่งที่สามารถหาได้ในประเทศไทย เมื่อแทนที่ด้วยผงหินปูนบางส่วนในปูนซีเมนต์สามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดในระยะต้นและความคงทนบางชนิดให้แก่คอนกรีตได้ [3] จากข้อดีของผงหินปูนดังกล่าว ทำให้มีแนวโน้มที่จะถูกนำมาใช้ในปริมาณมากขึ้น

จากปัญหาดังกล่าวข้างต้นจึงได้ทำการศึกษาการต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด โดยวัดการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีต

ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกส่วนผสมที่เหมาะสมของการนำเอาตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด มาใช้ในงานคอนกรีต โดยเฉพาะเมื่อโครงสร้างคอนกรีตสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมซัลเฟต

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และผงหินปูน มวลรวมใช้หินและทรายน้ำจืด สำหรับองค์ประกอบทางเคมี (โดยวิธี X-Ray Diffractometer: XRD) ความถ่วงจำเพาะ (ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C188) และความละเอียดโดยวิธีเบลน (ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C204) ของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมี ความถ่วงจำเพาะ และความละเอียดโดยวิธีเบลนของวัสดุประสานที่ใช้

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด	ผงหินปูน
SiO ₂	18.93	34.06	0.45
Al ₂ O ₃	5.51	16.27	0.05
Fe ₂ O ₃	3.31	1.70	0.03
CaO	65.53	36.05	55.20
MgO	1.24	7.38	0.34
Na ₂ O	0.15	2.16	< 0.01
K ₂ O	0.31	0.21	< 0.01
SO ₃	2.88	1.09	0.01
LOI	-	1.44	43.12
Free lime	1.00	-	-
ความถ่วงจำเพาะ	3.12	2.96	2.69
ความละเอียดโดยวิธีเบลน; ซม. ² /ก.	3,190	4,600	5,210

2.2 สัดส่วนผสม

สำหรับการศึกษาการต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในครั้งนี้ ประกอบด้วยสัดส่วนของวัสดุประสานดังนี้

- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน
- ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 20 50 60 และ 70 โดยน้ำหนัก
- ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 30 50 และ 60 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยน้ำหนัก
- ปริมาณวัสดุประสานใช้เท่ากับ 320 และ 400 กิโลกรัมต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร
- อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 โดยน้ำหนัก

หมายเหตุ ในการแทนที่ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ ในปริมาณที่ค่อนข้างสูง (ร้อยละ 50 หรือ 60) ทั้งนี้เนื่องจากตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดเป็นทั้งสารซีเมนต์และวัสดุปอซโซลาน ทำให้สามารถแทนที่ในปริมาณที่มากได้ ส่วนผงหินปูนนั้นเป็นวัสดุเติมเต็ม ดังนั้นเมื่อแทนที่ในปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นวัสดุประสาน จึงใช้แทนที่ในปริมาณที่น้อย (ร้อยละ 10)

สัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษา OPC หมายถึง คอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน, ส่วน GS20 หมายถึงคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 20 และ GS30LS10 หมายถึงคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 30 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10

2.3 สารละลายซัลเฟต

การศึกษาในครั้งนี้ใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) ในการเตรียมสารละลายซัลเฟต โดยใช้โซเดียมซัลเฟต 50 กรัม (SO_4^{2-} เท่ากับ 33,800 ppm) ในสารละลาย 1 ลิตร และใช้แมกนีเซียมซัลเฟต 42.36 กรัม ในสารละลาย 1 ลิตร เพื่อให้ปริมาณ SO_4^{2-} เท่ากัน โดยเตรียมสารละลายซัลเฟตล่วงหน้า 1 วัน ที่อุณหภูมิประมาณ 30 องศาเซลเซียส ก่อนที่ใช้แช่ตัวอย่าง อัตราส่วนของปริมาตรสารละลายซัลเฟตต่อปริมาตรตัวอย่างที่แช่ประมาณ 4 : 1 โดยมีการเปลี่ยนสารละลายซัลเฟตทุก ๆ 2 เดือน

2.4 การวัดการขยายตัว

วิธีการวัดการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีต (ขนาด 3.75x3.75x28.5 ซม.) ที่แช่ในสารละลายซัลเฟต (กระทำได้ตามมาตรฐาน ASTM C 1012) โดยหลังจากแช่ตัวอย่างในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว 28 วัน ทำการวัดความยาวเริ่มต้นของตัวอย่างด้วยเครื่องวัดความยาว (Length comparator) (ตามมาตรฐาน ASTM C 490) ต่อจากนั้นนำตัวอย่างแช่ในสารละลายซัลเฟตที่เตรียมไว้ แล้วทำการวัดความยาวของตัวอย่างที่อายุ 2 3 4 8 13 และ 16 สัปดาห์ จากนั้นทำการวัดทุก ๆ อายุ 2 เดือนของการแช่ในสารละลายซัลเฟต ค่าการขยายตัวของเป็นการเฉลี่ยการขยายตัวของ 3 ตัวอย่าง ค่าการขยายตัวของคอนกรีตคำนวณจากสมการ (1)

$$\text{การขยายตัว (\%)} = [(L_t - L_i)/L_i] \times 100 \quad (1)$$

โดยที่ L_i คือค่าความยาวเริ่มต้นของตัวอย่างหลังจากแช่ในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว 28 วัน และ L_t คือค่าความยาวของตัวอย่างหลังจากแช่ในสารละลายซัลเฟตที่อายุต่าง ๆ

2.5 การวัดการสูญเสียน้ำหนัก

ในส่วนการวัดการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างลูกบาศก์คอนกรีต (ขนาด 10x10x10 ซม.) ในสารละลายซัลเฟตนั้น โดยหลังจากถอดแบบที่อายุตัวอย่างคอนกรีต 1 วัน แล้วนำไปต้มในน้ำที่อุณหภูมิด้วยปูนขาว เป็นเวลา 28 วัน หลังจากเสร็จสิ้นการต้มในน้ำที่อุณหภูมิด้วยปูนขาวแล้ว นำชิ้นตัวอย่างลูกบาศก์คอนกรีตของแต่ละสัดส่วนผสมซึ่งน้ำหนักโดยเป็นน้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่างลูกบาศก์คอนกรีต หลังจากซึ่งน้ำหนักเสร็จแล้วนำตัวอย่างคอนกรีตแช่ในสารละลายซัลเฟต เมื่อครบอายุที่ต้องการวัดการสูญเสียน้ำหนัก โดยนำตัวอย่างคอนกรีตมาขัดผิวด้วยแปรงเพื่อให้เศษคอนกรีตที่เสื่อมสภาพเนื่องจากการทำลายโดยสารละลายซัลเฟตหลุดออก จากนั้นนำตัวอย่างคอนกรีตไปชั่งน้ำหนัก เพื่อนำค่าไปหาการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างคอนกรีตเนื่องจากสารละลายซัลเฟต โดยสามารถหาค่าการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีต (เป็นการเฉลี่ยจาก 3 ตัวอย่าง) ได้จากสมการ (2)

$$\text{การสูญเสียน้ำหนัก (\%)} = [(W_i - W_x) / W_i] \times 100 \quad (2)$$

โดยที่ W_i คือค่าน้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่างหลังจากการแช่ในน้ำที่อุณหภูมิด้วยปูนขาว และ W_x คือค่าน้ำหนักของตัวอย่างหลังจากแช่ในสารละลายซัลเฟต ที่อายุต่าง ๆ

3. ผลการศึกษาและวิเคราะห์

สำหรับผลการศึกษาในครั้งนี้จะพิจารณาในการประเมินความต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตใน 2 ลักษณะคือ 1) การขยายตัวของคอนกรีต โดยจะพิจารณาทั้งในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต และ

2) การสูญเสียน้ำหนัก โดยจะพิจารณาเฉพาะในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเท่านั้น ทั้งนี้ เพราะจากกลไกการทำลายของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตต่อคอนกรีตนั้นเป็นการเปลี่ยนแปลงเคมีซิลิเกตไฮเดรต ให้เป็นแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน โดยทำให้มีการหลุดร่อนและสูญเสียผิวหรือส่วนของเพสต์ [4]

3.1 การขยายตัวของคอนกรีต

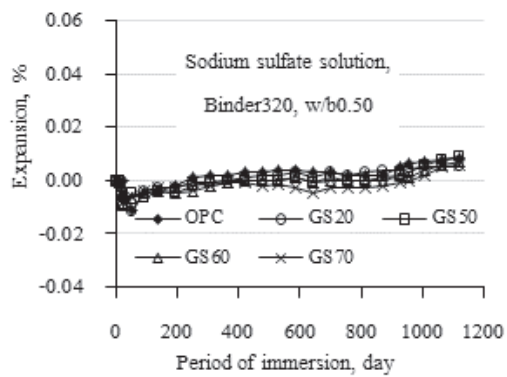
โดยผลทดสอบการขยายตัวของคอนกรีตในสารละลายซัลเฟตนั้น ได้พิจารณาจากผลกระทบของการแทนที่ตะกั่วเม็ดสูงเหล็กบดละเอียด และผลกระทบจากปริมาณของวัสดุประสานต่อการขยายตัวของคอนกรีต

3.1.1 ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

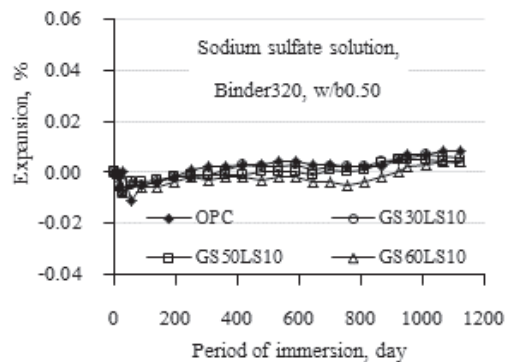
รูปที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับระยะเวลาการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมตะกั่วเม็ดสูงเหล็กบดละเอียด เมื่อใช้ปริมาณวัสดุประสาน 320 กก./ม.³ และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 ซึ่งเป็นการพิจารณาถึงผลกระทบของการแทนที่ตะกั่วเม็ดสูงเหล็กบดละเอียดต่อการขยายตัวของคอนกรีต พบว่าการขยายตัวของคอนกรีตผสมตะกั่วเม็ดสูงเหล็กบดละเอียดมีค่าไม่แตกต่างจากของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากการขยายตัวของตัวอย่างค่อนข้างน้อยมากแม้ว่าอายุในการแช่ในสารละลายซัลเฟตมีมากแล้วก็ตาม (160 สัปดาห์) นั้นแสดงว่าการใช้ปริมาณวัสดุประสานที่น้อย ไม่ว่าจะใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน หรือใช้ตะกั่วเม็ดสูงเหล็กบดละเอียด หรือผงหินปูนร่วมด้วย ก็ไม่ทำให้การขยายตัวของคอนกรีตในสารละลายโซเดียมซัลเฟตแตกต่างกัน อย่างไรก็ตามก็มี

แนวโน้มว่าการขยายตัวของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และ/หรือตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน มีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เพราะการแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดหรือผงหินปูนเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง และผลของปฏิกิริยาปอซโซลาน (ของตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด) ทำให้ลดปริมาณ Ca(OH)_2 ได้ ส่งผลให้ยิบซั่มและ Ettringite เกิดได้น้อย โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดในปริมาณที่มากขึ้น ส่วนผงหินปูนนั้นเป็นการเติมเต็มทำให้คอนกรีตมีความทึบสูงขึ้น

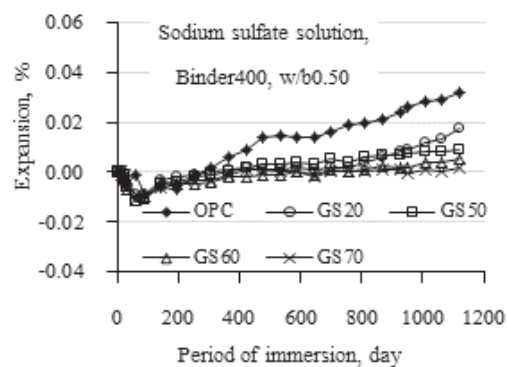
ส่วนรูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับระยะเวลาการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน เมื่อใช้ปริมาณวัสดุประสาน 400 กก./ม.³ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 พบว่าการขยายตัวของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูนทุกสัดส่วนผสม ไม่ว่าจะแทนที่ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดอย่างเดียว หรือแทนที่ร่วมกับผงหินปูน มีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เนื่องจากการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง อีกทั้งผลของปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้น ทำให้ลดปริมาณ Ca(OH)_2 ได้ อีกทั้งยังมีการแทนที่ร่วมกับผงหินปูนซึ่งมีอนุภาคที่เล็ก ช่วยในการอุดช่องว่าง ทำให้ไอออนซัลเฟตเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ยากขึ้นจากเหตุผลดังกล่าว ส่งผลให้เกิดการขยายตัวที่น้อยกว่า



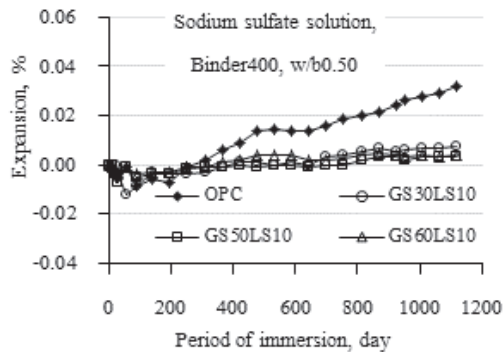
ก) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด



ข) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน
รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับระยะเวลาการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตเมื่อใช้ปริมาณวัสดุประสาน 320 กก./ม.³



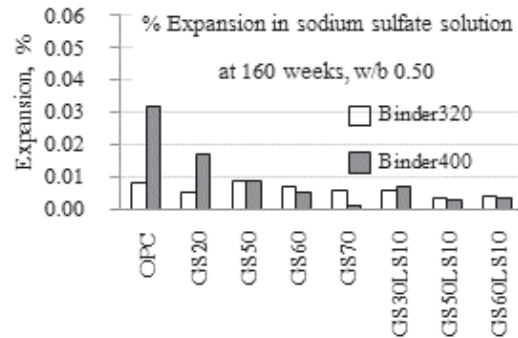
ก) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด



ข) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน

รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับระยะเวลาการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตเมื่อใช้ปริมาณวัสดุประสาน 400 กก./ม.³

สำหรับผลกระทบจากปริมาณของวัสดุประสานต่อการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กแสดงดังรูปที่ 3 ซึ่งเป็นการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีต ที่อายุ 160 สัปดาห์ (1,120 วัน) เป็นการเปรียบเทียบระหว่างคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสาน 320 กก./ม.³ และ 400 กก./ม.³ (อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50) พบว่าการขยายตัวของคอนกรีตที่ใช้ปริมาณวัสดุประสาณน้อยกว่า (320 กก./ม.³) มีแนวโน้มน้อยกว่าของคอนกรีตที่ใช้ปริมาณวัสดุประสานมากกว่า (400 กก./ม.³) ทั้งนี้เนื่องจากการใช้ปริมาณวัสดุประสาณที่น้อยกว่า ทำให้เพสต์มีปริมาณที่น้อยกว่าในการทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมซัลเฟต รวมทั้งคอนกรีตที่มีปริมาณเพสต์น้อยยังมีแนวโน้มการเกิดความทึบน้ำได้ดีกว่า ทำให้สารละลายโซเดียมซัลเฟตเข้าไปทำปฏิกิริยาได้น้อยกว่า ส่งผลให้เกิดการขยายตัวน้อยกว่า

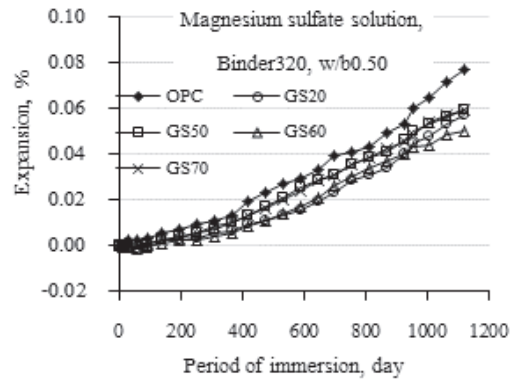


รูปที่ 3 การขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีต ที่อายุ 160 สัปดาห์

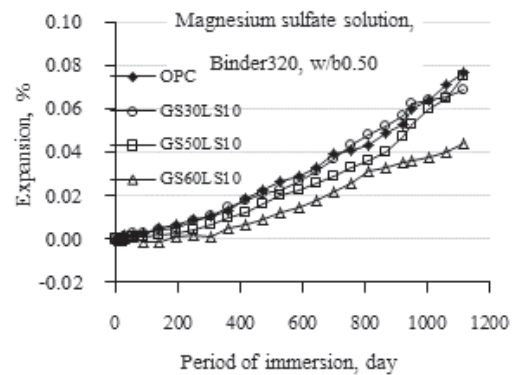
3.1.2 ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับระยะเวลาการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด และตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน เมื่อใช้ปริมาณวัสดุประสาน 320 กก./ม.³ และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาณเท่ากับ 0.50 พบว่าการขยายตัวในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด (ทั้งร้อยละ 20, 50, 60 และ 70) (รูปที่ 4 ก) และคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 30 50 และ 60 ร่วมกับผงหินปูนร้อยละ 10 (รูปที่ 4 ข) มีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เนื่องจาก เป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง และผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานจะช่วยลด Ca(OH)_2 จึงทำให้เกิดยิปซั่มและ Ettringite น้อย ส่งผลให้การขยายตัวน้อยเช่นเดียวกับในกรณีของสารละลายโซเดียมซัลเฟต

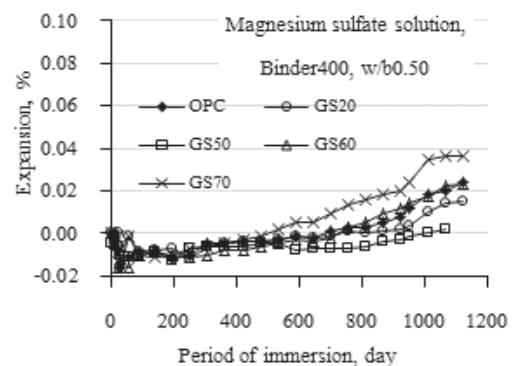
ส่วนรูปที่ 5 ก) เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับระยะเวลาการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วนคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดเมื่อใช้ปริมาณวัสดุประสาน 400 กก./ม.³ พบว่า การขยายตัวของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 20 และ 50 มีค่าน้อยกว่า ในขณะที่ของคอนกรีตที่ผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 60 และ 70 มีแนวโน้มมากกว่า โดยเฉพาะเมื่อแทนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร้อยละ 70 เห็นได้ชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบกับของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการใช้ปริมาณวัสดุประสานที่มาก (400 กก./ม.³) ทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดได้มาก ซึ่งลดความเป็นด่างลง ไม่มีเสถียรภาพในเฟสดี ทำให้ตัวอย่างคอนกรีตบวม ส่งผลให้การขยายตัวมาก ส่วนในกรณีการผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน (รูปที่ 5 ข)) จะเห็นได้ชัดเจนว่าการขยายตัวของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูนมีค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ทั้งนี้เนื่องมาจากการแทนที่ด้วยตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง และปฏิกิริยาปอซโซลาน ลดปริมาณ Ca(OH)_2 ส่งผลให้เสถียรภาพในคอนกรีตลดลง และผงหินปูนซึ่งมีอนุภาคที่เล็กซึ่งมีคุณสมบัติในการอุดช่องว่าง ทำให้คอนกรีตมีความทึบมากขึ้น ไม่พอสำหรับการเกิด Ettringite ส่งผลให้เกิดการขยายตัวมาก



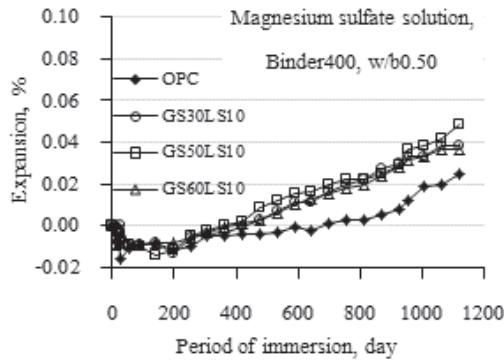
ก) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด



ข) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับระยะเวลาการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของคอนกรีต เมื่อใช้ปริมาณวัสดุประสาน 320 กก./ม.³

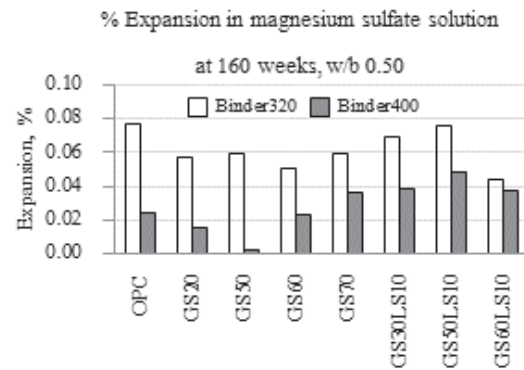


ค) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด



ข) ตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดร่วมกับผงหินปูน
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับระยะเวลาการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของคอนกรีต เมื่อใช้ปริมาณวัสดุประสาน 400 กก./ม.³

รูปที่ 6 แสดงการขยายตัวในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของคอนกรีตที่อายุ 160 สัปดาห์ ในการพิจารณาถึงผลกระทบจากปริมาณของวัสดุประสานต่อการขยายตัวในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ระหว่างคอนกรีตที่ใช้วัสดุประสาน 320 กก./ม.³ และ 400 กก./ม.³ พบว่าการขยายตัวของคอนกรีตที่ใช้ปริมาณวัสดุประสาณน้อยกว่า (320 กก./ม.³) มีค่ามากกว่าของคอนกรีตที่ใช้ปริมาณวัสดุประสานมากกว่า (400 กก./ม.³) อาจเนื่องมาจากคอนกรีตที่ใช้ปริมาณวัสดุประสาณน้อย ทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำสูงกว่า ทำให้สารละลายซัลเฟตทำที่ผิวของตัวอย่างคอนกรีต และเมื่อสารละลายซัลเฟตเข้าไป รวมทั้งมีช่องว่างจำกัดต่อการการเกิด Ettringite ส่งผลให้การขยายตัวมากขึ้น

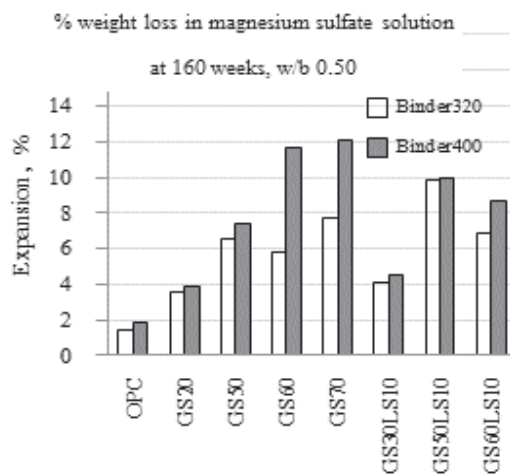


รูปที่ 6 การขยายตัวในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของคอนกรีต ที่อายุ 160 สัปดาห์

3.2 การสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีต

รูปที่ 7 แสดงการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของตัวอย่างคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน เมื่อใช้ปริมาณวัสดุประสาน 320 และ 400 กก./ม.³ และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.50 ที่อายุ 160 สัปดาห์ของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต พบว่าการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน โดยมีแนวโน้มค่าการสูญเสียน้ำหนักมากขึ้นตามปริมาณการที่แทนตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดที่มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการลดปูนซีเมนต์ลง และผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานทำให้ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลง (ลด $\text{Ca}(\text{OH})_2$) ทำให้ความไม่เสถียรภาพเกิดขึ้นในซีเมนต์เพสต์ จึงทำให้แคลเซียมซิลิเกตไฮดรตเปลี่ยนเป็นแมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรต ซึ่งไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน [4] นอกจากนี้

พบว่าเมื่อใช้ปริมาณวัสดุประสานที่น้อย (320 กก./ม.³) มีค่าการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตน้อยกว่าที่ใช้ปริมาณวัสดุประสานที่มากกว่า (400 กก./ม.³) ทั้งนี้เนื่องจากการใช้ปริมาณเพสต์ปริมาณน้อยกว่า ทำให้ปฏิกิริยากับสารละลายซัลเฟตน้อยกว่า รวมทั้งความทึบของคอนกรีตที่มากกว่าสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตจึงเข้าได้ยากกว่า ส่งผลให้เกิดการสูญเสียน้ำหนักที่น้อยกว่า



รูปที่ 7 การสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของคอนกรีต ที่อายุ 160 สัปดาห์

4. สรุป

จากผลการศึกษาการต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดสามารถสรุปได้ดังนี้

1) ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต การขยายตัวของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน มีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยการขยายตัวของคอนกรีตที่ใช้ปริมาณวัสดุประสานน้อยกว่า มีค่าน้อยกว่าของคอนกรีตที่ใช้ปริมาณวัสดุประสานมากกว่า

2) ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต การขยายตัวของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน มีค่ามากกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ยกเว้นคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดอย่างเดียวในปริมาณน้อย จะให้ค่าการขยายตัวน้อยกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยการขยายตัวของคอนกรีตที่ใช้ปริมาณวัสดุประสานน้อยกว่า มีค่ามากกว่าของคอนกรีตที่ใช้ปริมาณวัสดุประสานมากกว่า

3) การสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและผงหินปูน มีค่ามากกว่าของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเมื่อใช้ปริมาณวัสดุประสานที่น้อย ส่งผลให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตน้อยกว่าของคอนกรีตที่ใช้ปริมาณวัสดุประสานที่มากกว่า

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ได้สนับสนุนทุนการวิจัยประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558 ในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Pitisan Krammart, Krisada Sisomphon, Somnuk Tangtermsirikul and Pichaya Rachdawong, "Properties of Cement Made by Partially Replacing Cement Raw Materials with Municipal Solid Waste Ashes and Calcium Carbide Waste," Proceedings of The ICCMC/IBST 2001 International Conference on Advanced Technologies in design, Construction and Maintenance of Concrete Structures, 28-29 March 2001, Hanoi, Vietnam, pp 494-500.

[2] ปริญญาจินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต. กรุงเทพฯ: สมาคมคอนกรีตไทย, 2547.

[3] ปิติศานต์ กร้ามาตร, สมนึก ตั้งเต็มสิริกกุล, การต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์ฝุ่น หินปูน, การประชุมวิชาการคอนกรีต ประจำปี ครั้งที่ 3, ชลบุรี, 24-26 ตุลาคม, 2550.

[4] Al-Amoudi, O.S.B., "Mechanisms of Sulfate in Plain and Blended Cement. a Review," Proceeding of the International Seminar, University of Dundee, Scotland, UK., 1999. pp. 247.

การทำปุ๋ยหมักจากของเสียอินทรีย์โดยใช้ถังเติมอากาศ

Composting of Organic Waste Using Aeration Tank

กุลยา สารชีวิน¹ และ ธันียา รัชชีสุริยะชัย¹

kullaya.s@en.rmutt.ac.th¹, thaneeya.r@en.rmutt.ac.th¹

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาคุณลักษณะสุดท้ายของปุ๋ยหมัก ที่ผลิตจากเศษอาหาร, ใบไม้แห้ง และมูลวัว โดยใช้ถังเติมอากาศ และเพื่อศึกษาความเหมาะสมของระยะเวลาการเติมอากาศ ที่จะให้ปุ๋ยหมักที่ดี โดยแปรผันการเติมอากาศที่แตกต่างกัน 4 รูปแบบ ดังนี้ ถังที่ 1 เติมอากาศ 24 ชั่วโมง ถังที่ 2 ไม่เติมอากาศ ถังที่ 3 เติมอากาศ 6 ชั่วโมง และไม่เติมอากาศ 6 ชั่วโมง และ ถังที่ 4 เติมอากาศ 12 ชั่วโมง และไม่เติมอากาศ 12 ชั่วโมง ถังทั้งหมดจะหมักเก็บไว้ 60 วัน ผลการทดลองแสดงว่าคุณลักษณะของปุ๋ยหมักถังที่ 1, 2, 3 และ 4 มีค่าดังนี้ ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 8.14, 6.05, 6.32 และ 6.31 ปริมาณความชื้นเท่ากับร้อยละ 42, 59, 59 และ 46 ค่าร้อยละ คาร์บอนเท่ากับ 22.76, 27.67, 24.73 และ 26.2 ค่าร้อยละไนโตรเจนเท่ากับ 1.08, 1.05, 1.1 และ 1.06 อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับร้อยละ 21.09, 26.46, 22.42, และ 24.62 และค่าร้อยละฟอสฟอรัสเท่ากับ 20.0, 24.4, 30.6 และ 17.7 ตามลำดับ ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า ระยะเวลาการเติมอากาศมีผลต่อการย่อยสลายของปุ๋ยหมัก

คำสำคัญ: ปุ๋ยหมัก, เศษอาหาร, ถังเติมอากาศ

Abstract

This research aims to study the final characteristic of composts that produced from food scraps, dry leaves and cow manure by using aeration tanks, and to study the suitable aeration period that generates the good composts. The four different aeration periods were varied: 1) tank no.1 24 hrs aeration 2) tank no.2 without aeration 3) tank no.3 6 hrs with and without aerations 4) tank no.4 12 hrs with and without aerations. All tanks were kept for composting 60 days. The experimental results showed that the characteristics of compost in the tanks no. 1, 2, 3 and 4 were as follows: pH were 8.14, 6.05, 6.32 and 6.31; the moisture content were 42, 59, 59 and 46%; the percentage of carbon were 22.76, 27.67, 24.73 and 26.2%; the percentage of nitrogen were 1.08, 1.05, 1.1 and 1.06%; C/N ratio were 21.09, 26.46, 22.42, and 24.62, and the

¹อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

percentage of phosphorus were 20.0, 24.4, 30.6 and 17.7%, respectively. The studied results indicated that the decomposition of composts were affected by the aeration period.

Keywords: compost, food scrap, aeration tank.

1. บทนำ

ประเทศไทยในปัจจุบันต้องเผชิญกับเรื่องของขยะมูลฝอย ซึ่งเป็นปัญหาทางสิ่งแวดล้อมที่นับวันจะยิ่งทวีความรุนแรงมากขึ้น อันเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากร การเติบโตทางเศรษฐกิจ การขยายตัวของภาคเกษตรกรรมและครัวเรือน ทำให้ปริมาณของเสียเหลือทิ้งหรือขยะมูลฝอยมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตามมา เช่น ผลกระทบต่อคุณภาพน้ำ คุณภาพอากาศ คุณภาพดิน หรือทัศนียภาพโดยทั่วไป สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะปริมาณมูลฝอยที่มนุษย์ผลิตขึ้นมานั้น ไม่สามารถทำลายได้หมดหรือไม่สามารถทำลายได้ทันต่อเวลา กรมควบคุมมลพิษ [1] กล่าวว่า ในปี พ.ศ. 2551 มีปริมาณมูลฝอยชุมชนทั่วประเทศประมาณ 15.03 ล้านตัน หรือวันละ 41,064 ตัน (ไม่รวมปริมาณมูลฝอยก่อนที่จะนำไปทิ้งในถัง) เพิ่มขึ้นจากปี 2550 ประมาณ 0.26 ล้านตัน หรือร้อยละ 1.82 ซึ่งอัตราการเกิดมูลฝอยต่อคนต่อวันเฉลี่ยทั่วประเทศอยู่ที่ประมาณ 0.64 กิโลกรัมต่อคนต่อวัน โดยพบว่า ขยะมูลฝอยทั่วประเทศนั้นอันดับหนึ่งคือเศษอาหารเศษผักผลไม้ มีสัดส่วนอยู่ประมาณร้อยละ 53.49 รองลงมาได้แก่พลาสติกและโฟม ประมาณร้อยละ 20.12 และอันดับสามได้แก่ กระดาษ ประมาณร้อยละ 8.95 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเศษอาหารมีปริมาณที่มากที่สุด

แนวทางในการจัดการขยะมูลฝอยได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องโดยจะเห็นได้ว่ามีงานวิจัย

ที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการจัดการขยะมูลฝอยอย่างยั่งยืนและหาวิธีการกำจัดขยะมูลฝอยที่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด [2-3] โดยการจัดการขยะมูลฝอยเหล่านี้มีอยู่ด้วยกันหลายวิธี เช่น การนำไปฝังกลบ การเผา การกองทิ้งบนดิน เป็นต้น แต่วิธีการดังกล่าวข้างต้นนั้นอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และมีค่าใช้จ่ายในการกำจัดค่อนข้างสูง จึงอาจยังไม่เหมาะสมต่อการกำจัดขยะมูลฝอยประเภทเศษอาหารเท่าใดนัก อย่างไรก็ตามการทำปุ๋ยหมักก็เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่สามารถกำจัดขยะมูลฝอยที่มีสารอินทรีย์สูงได้ดี เนื่องจากเศษอาหารมีความชื้นสูงและเน่าเปื่อยได้ง่าย อีกทั้งการทำปุ๋ยหมักยังเป็นการลดปริมาณการผลิตมูลฝอยซึ่งจะต้องนำไปกำจัดและยังเป็นแนวทางในการนำมูลฝอยกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่อีกด้วย โดยแหล่งที่มีการผลิตมูลฝอยประเภทนี้มีแหล่งใหญ่ คือ แหล่งชุมชนซึ่งมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีถือได้ว่าเป็นแหล่งชุมชนที่ขนาดใหญ่เช่นกัน โดยเมื่อทำการสำรวจเศษอาหารเหลือทิ้งในแต่ละวันมีเป็นจำนวนมากรวมถึงบริเวณมหาวิทยาลัยมีการปลูกต้นไม้ค่อนข้างเยอะ ทำให้มีเศษใบไม้แห้งภายในมหาวิทยาลัยที่ต้องกำจัดมากในทุก ๆ วัน ดังนั้นจึงมีแนวคิดที่จะนำเศษอาหารและเศษใบไม้แห้งเหล่านี้มาทำการกำจัดโดยวิธีการหมัก เพื่อลดปริมาณเศษใบไม้แห้งและเศษอาหารที่เหลือทิ้งในรูปการแปรรูป นอกจากนี้การทำปุ๋ยหมักก็ยังช่วยลดการใช้ปุ๋ยของเกษตรกร ซึ่งช่วยในการลดปัญหาในเรื่องของค่าใช้จ่ายจากการซื้อ

ปุ๋ยเคมีที่มีราคาแพง และยังเป็นภาระส่งเสริมการทำเกษตรแบบธรรมชาติ ทำให้ไม่มีสารเคมีตกค้างอยู่ในดินและสิ่งแวดล้อม

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาช่วงเวลาเติมอากาศที่เหมาะสมในการหมักขยะจากเศษอินทรีย์วัตถุที่ได้จากครัวเรือน รวมถึงศึกษาคุณภาพของปุ๋ยหมักที่ได้เพื่อใช้เป็นต้นแบบในการทำถังหมักขยะขนาดเล็กสำหรับใช้ในครัวเรือนและสถาบันการศึกษา

2. วิธีดำเนินงานวิจัย

2.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ

ถังที่ใช้ในการทำปุ๋ยหมักแบบเติมอากาศนี้เป็นถังพลาสติกแบบมีฝาปิด ขนาดความจุประมาณ 0.07 ลูกบาศก์เมตร (เส้นผ่านศูนย์กลาง 46.50 เซนติเมตร และความสูง 46.50 เซนติเมตร) ภายในถังจะมีรูระบายให้อากาศไหลผ่านได้ โดยที่ก้นถังจะใช้ กะละมังสแตนเลส และทำการเจาะรู (เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 เซนติเมตร) จำนวน 56 รู หุ้มด้วยตาข่ายไนล่อน เพื่อป้องกันเศษวัสดุที่ใช้ในการหมักหลุดลงไป ในส่วนของการเติมอากาศ ถังหมักจะวางสูงจากพื้นดินประมาณ 25 เซนติเมตร นอกจากนี้จะทำการเติมอากาศโดยการเจาะรูเพื่อต่อท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 เซนติเมตร สูงจากก้นถัง 5 เซนติเมตร โดยรอบถังทั้ง 4 ด้าน เพื่อใช้สำหรับต่อสายให้อากาศเข้า และใช้สำหรับระบายก๊าซที่เกิดขึ้น ทำการเติมอากาศโดยใช้เครื่องเติมอากาศที่ใช้ในตู้ปลา โดยใช้เครื่องควบคุมเวลา (Timer switch) ในการควบคุมการเปิด-ปิดของเครื่องเติมอากาศ ส่วนด้านล่างของถังทำการเจาะช่องระบายน้ำเพื่อระบายน้ำเสียออกจากถังหมัก ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ถังหมักแบบเติมอากาศที่ใช้ในการทดลอง

2.2 ขั้นตอนการทดลอง

ในการศึกษาการทำปุ๋ยหมักจากเศษอาหารร่วมกับเศษใบไม้ และมูลวัวโดยใช้การเติมอากาศนี้ ได้ทำการแปรเปลี่ยนระยะเวลาในการเติมอากาศ โดยการผสมเศษอาหาร เศษใบไม้ และมูลวัวด้วย อัตราส่วนโดยปริมาตรเท่ากับ 2:1:1 โดยวัสดุหมักแต่ละชนิดมีคุณลักษณะดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณลักษณะของวัสดุที่ใช้ในการหมัก

วัสดุ	C (%)	N (%)	C/N ratio	ความหนาแน่นของวัสดุ (kg/m ³)
เศษอาหาร	54.08	1.314	41.16	1,138
เศษใบไม้	47.43	0.660	71.87	78.82
มูลวัว	22.67	1.086	20.87	772.9

ในการทดลองแบ่งการหมักปุ๋ยออกเป็น 4 ถังดังนี้

- ถังหมักที่ 1 มีการเติมอากาศตลอด 24 ชั่วโมง
- ถังหมักที่ 2 ไม่มีการเติมอากาศ
- ถังหมักที่ 3 มีการเติมอากาศ 6 ชั่วโมง สลับกับการหยุดเติมอากาศ 6 ชั่วโมง
- ถังหมักที่ 4 มีการเติมอากาศ 12 ชั่วโมง สลับกับการหยุดเติมอากาศ 12 ชั่วโมง โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1) ทำการรวบรวมเศษอาหารจากโรงอาหารของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เพื่อใช้เป็นวัสดุหลักที่ใช้ในการหมักทำปุ๋ย จากนั้นทำการคัดแยกมูลฝอย ซึ่งไม่สามารถย่อยสลายได้ออกก่อนนำไปหมัก เช่น พลาสติก ยาง แก้ว โลหะต่าง ๆ

2) เตรียมเศษใบไม้ และมูลวัว โดยสับให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ ขนาดประมาณ 3-5 เซนติเมตร สำหรับการผสม จากนั้นนำเศษอาหาร เศษใบไม้ และมูลวัว ไปหาค่าความหนาแน่น เพื่อคำนวณหาปริมาณของเศษอาหาร เศษใบไม้ และมูลวัว ที่ใช้ในการหมักปุ๋ย

3) ทำการผสมโดยใช้อัตราส่วนผสมของเศษอาหารต่อเศษใบไม้ต่อมูลวัว เท่ากับ 2:1:1 แยกเป็น 4 ส่วน เพื่อใส่ถังหมักแต่ละใบ

4) นำส่วนผสมเข้าถังหมัก ตรวจสอบอุปกรณ์ต่าง ๆ ให้เรียบร้อย ทำการต่อสายเครื่องอากาศสำหรับถังที่ใช้เติมอากาศ และทำการเดินเครื่อง

5) ทำการกลับกองปุ๋ยหมักสัปดาห์ละครั้ง เพื่อให้การหมักเกิดขึ้นได้ดีทั้งถัง และเก็บตัวอย่างระหว่างหมักสัปดาห์ละ 1 ครั้ง โดยการสุ่มเก็บเป็นจุดทั้งกอง เพื่อเป็นตัวแทนตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ ซึ่งใช้น้ำหนักประมาณ 500 – 1000 กรัม แล้วนำไปใส่ภาชนะสุญญากาศ เพื่ออบในตู้อบที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปวิเคราะห์หาค่าความชื้น ความเป็นกรดเป็นด่าง และปริมาณของอัตราส่วนปริมาณคาร์บอนต่อปริมาณไนโตรเจน (C/N ratio)

6) วัดอุณหภูมิของบรรยากาศรอบ ๆ กองหมัก โดยใช้เทอร์โมมิเตอร์ ซึ่งจะทำการวัดทุกวันและเมื่อสิ้นสุดการทดลองจึงสุ่มตัวอย่างปุ๋ยหมักที่ได้ในแต่ละถัง นำมาเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อวิเคราะห์

หาค่าคาร์บอน, ไนโตรเจน อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน และฟอสฟอรัส

2.3 วิธีการวิเคราะห์

พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์วัสดุหมักและปุ๋ยหมัก เป็นไปตามคู่มือวิธีวิเคราะห์ปุ๋ยอินทรีย์ ของกรมวิชาการเกษตร [4] วิธีการวิเคราะห์ปุ๋ยหมักได้แสดงไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 วิธีการวิเคราะห์ตัวอย่างปุ๋ยหมัก [4]

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์
ค่าความชื้น	Oven – drying method
ค่าความเป็นกรดด่าง	pH meter
คาร์บอนทั้งหมด	Walkley-Black method
ไนโตรเจนทั้งหมด	Kjeldahl method
ฟอสฟอรัสทั้งหมด	Spectrophotometric Molybdovanadophosphate method

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

ทำปุ๋ยหมักด้วยถังหมักเติมอากาศโดยมีการหมักในถังเติมอากาศและใช้วัสดุการหมัก ได้แก่ เศษอาหาร เศษใบไม้ และมูลวัว ในอัตราส่วนโดยปริมาตร 2 : 1 : 1 และแปรผันระยะเวลาในการเติมอากาศทั้งหมด 4 รูปแบบ ได้แก่ ถังหมักที่ 1 มีการเติมอากาศตลอด 24 ชั่วโมง ถังหมักที่ 2 ไม่มีการเติมอากาศ ถังหมักที่ 3 มีการเติมอากาศ 6 ชั่วโมง สลับกับไม่เติมอากาศ 6 ชั่วโมง และถังหมักที่ 4 มีการเติมอากาศ 12 ชั่วโมง สลับกับไม่เติมอากาศ 12 ชั่วโมง ได้ผลการทดลองดังนี้

3.1 สภาพการหมักและการควบคุม

3.1.1 อุณหภูมิ

อุณหภูมิในถังหมักทั้ง 4 ถัง ได้เพิ่มสูงขึ้นในช่วง 10 วันแรก โดยพบว่าอุณหภูมิในถังหมัก

ที่ 1 เพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 45-66 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นค่าอุณหภูมิที่ค่อนข้างสูงสำหรับการเติมอากาศแบบตลอด 24 ชั่วโมง อุณหภูมิถังหมักที่ 2 ซึ่งไม่มีการเติมอากาศเลย อยู่ในช่วง 31-40 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ถือว่า ค่อนข้างต่ำ และใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง อุณหภูมิในถังหมักที่ 3 อยู่ในช่วง 39-60 องศาเซลเซียส และถังหมักที่ 4 วัดอุณหภูมิได้อยู่ในช่วง 39-46 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิบรรยากาศตลอดช่วงที่ทำการหมักปุ๋ยในช่วง 29-33 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิในถังหมักจะเริ่มคงที่ทุกถังเมื่อระยะเวลาการหมักผ่านไปประมาณ 60 วัน โดยพบว่าในถังหมักที่ 1 อุณหภูมิในถังหมักจะเริ่มคงที่ตั้งแต่ 30 วันหลังการหมัก ถังหมักที่ 3 และ 4 อุณหภูมิในถังหมักจะเริ่มคงที่ตั้งแต่ในช่วง 35 วัน และถังหมักที่ 2 ซึ่งไม่มีการเติมอากาศ อุณหภูมิในถังหมักจะเริ่มคงที่ในช่วง 45 วันหลังการหมัก

3.1.2 ความชื้น

ในระหว่างการทำทดลอง ได้ทำการควบคุมความชื้นในถังหมักทั้ง 4 ถัง ให้อยู่ในช่วง 40 – 65% โดยจะพบว่า ในถังหมักที่มีการเติมอากาศจะมีค่าความชื้นต่ำกว่าในถังหมักที่ไม่มีการเติมอากาศ โดยเฉพาะถังหมักที่ 1 และถังหมักที่ 4 ซึ่งมีการให้อากาศอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน จึงทำให้ความชื้นภายในถังลดลงได้เร็วและง่ายกว่าถังหมักที่ 2 และถังหมักที่ 3 ดังนั้นจึงต้องรักษาสภาพภายในถังหมักให้มีค่าความชื้นอย่างเหมาะสม โดยทุก ๆ 3 วันจะทำการเปิดถังปุ๋ยหมัก และสัมผัสความชื้นของวัสดุหมักในถัง ถ้าพบว่าวัสดุหมักมีความแห้งจะพรมน้ำในถังปุ๋ยหมักให้มีความชื้นเพิ่มขึ้น โดยเมื่อใช้มือกำวัสดุหมักและบีบน้ำจะต้องไม่มีน้ำไหลออกมา ซึ่งแสดงว่าปุ๋ยหมักมีความชื้นที่เหมาะสม จะทำให้การทำงานของจุลินทรีย์ในการย่อยสลายปุ๋ยหมักเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

3.2 คุณลักษณะของปุ๋ยหมัก

3.2.1 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ตลอดเวลาของการหมักปุ๋ย ค่าความเป็นกรด-ด่างจะต้องไม่ต่ำกว่า 5.5 และไม่เกิน 9 ซึ่งเป็นช่วงที่จุลินทรีย์และรา สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ดี เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างอาจลดลงอยู่ในช่วงระหว่าง 6-8 นั้นถือว่าปุ๋ยหมักนั้นได้เกิดการหมักสมบูรณ์แล้ว และจากการทดลองทำปุ๋ยหมักที่ระยะเวลาการหมักปุ๋ย 60 วัน ได้ทำการวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง ของปุ๋ยหมักถังที่ 1, 2, 3 และ 4 มีค่า เท่ากับ 8.14, 6.05, 6.32 และ 6.31 ตามลำดับ

ในทุกถังหมักปุ๋ยพบว่า เมื่อเริ่มต้นทดลองหมักปุ๋ย ค่าความเป็นกรด-ด่างที่วัดได้ค่อนข้างเป็นกลาง ในช่วงการหมักค่าความเป็นกรด-ด่างที่วัดได้ของทั้ง 4 ถังมีค่าอยู่ในช่วงควบคุมหรือมีช่วงเวลาที่ค่าเกิน 9 เล็กน้อย เนื่องจากกระบวนการของจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ธาตุอาหารคาร์บอนและไนโตรเจน ก็ถูกนำไปใช้ในส่วนหนึ่งของกระบวนการ โดยเมื่อจุลินทรีย์ย่อยสลายธาตุอาหารไนโตรเจน จะทำให้เกิดแอมโมเนีย จึงส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่างในกองปุ๋ยหมักปรับตัวสูงขึ้น แสดงว่าช่วงระยะเวลาการหมักนี้มีอัตราการเมตาบอลิซึม และการย่อยสลายสารอาหารของจุลินทรีย์สูง และเมื่อสิ้นสุดการหมักค่าความเป็นกรด-ด่างที่วัดได้ในถังที่ 1, 2 , 3 และถังที่ 4 มีแนวโน้มลดลงจนอยู่ในช่วงค่าที่ค่อนข้างเป็นกลาง แสดงว่ากระบวนการหมักปุ๋ยนั้นเสร็จสมบูรณ์แล้ว จะสังเกตได้ว่าลักษณะของปุ๋ยนั้น ไม่มีกลิ่นเหม็น มีกลิ่นเหมือนดิน เนื้อวัสดุหมักมีสภาพร่วนซุย ดังแสดงในรูปที่ 2

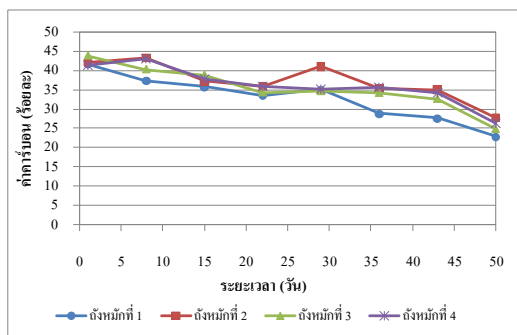


รูปที่ 2 ลักษณะของปุ๋ยหมักที่หมักเสร็จสมบูรณ์

3.2.2 ค่าร้อยละคาร์บอน

ค่าคาร์บอน กล่าวคือ เป็นปริมาณสารอาหารที่จุลินทรีย์ในกองปุ๋ยหมักมีความต้องการ โดยมีแหล่งคาร์บอนใหญ่ ๆ 2 แห่งสำหรับเซลล์จุลินทรีย์ คือ คาร์บอนอินทรีย์และคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งคาร์บอนเป็นส่วนประกอบหลักของเซลล์และลิกนินที่มีอยู่ในพืช และยังเป็นส่วนประกอบของโครงสร้างในเซลล์สัตว์ [5]

จากการทดลองพบว่า ค่าคาร์บอนในการหมักระยะเริ่มต้นของแต่ละถังนั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยในถังหมักที่ 1, 2, 3 และ 4 มีค่าเท่ากับร้อยละ 41.54, 42.14, 43.79 และ 41.24 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อได้ทำการหมักปุ๋ยพบว่าค่าคาร์บอนที่วัดได้จากการหมักมีแนวโน้มลดลงเรื่อย ๆ ตามระยะเวลาในการหมัก และมีการย่อยสลายของเศษอาหาร เศษใบไม้ อย่างเห็นได้ชัด แสดงให้เห็นถึงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นโดยเมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการหมักพบว่าค่าร้อยละคาร์บอนในถังที่ 1, 2, 3 และ 4 นั้นมีค่าเท่ากับร้อยละ 22.76, 27.67, 24.73 และ 26.20 ตามลำดับซึ่งมีการลดลงของคาร์บอนอย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ค่าร้อยละของคาร์บอนของถังหมักต่าง ๆ

จากผลการทดลองพบว่าการแปรผันการเติมออกซิเจนในถังหมักโดยใช้ช่วงระยะเวลาที่แตกต่างกันนั้น มีผลทำให้อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์แตกต่างกัน โดยพบว่าในช่วง 20 วันแรกถังหมักที่ 1, 2, 3 และ 4 มีการลดลงของค่าร้อยละคาร์บอนค่อนข้างเร็ว และยังพบปรากฏการณ์นี้เกิดต่อเนื่องในถังหมักที่ 1 ในขณะที่ในถังหมักที่ 2, 3 และ 4 การลดลงของร้อยละคาร์บอนจะลดลงน้อยกว่า เนื่องจากมีการหยุดเติมอากาศเป็นช่วง ๆ จึงทำให้จุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจนมีประสิทธิภาพในการทำงานลดลง

3.2.3 ค่าร้อยละไนโตรเจน

ไนโตรเจนเป็นปริมาณสารอาหารที่จุลินทรีย์ในกองปุ๋ยหมักมีความต้องการ ซึ่งใช้ในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ โดยไนโตรเจนพบในรูปของโปรตีนและสารประกอบอื่น ๆ ที่อยู่นอกเซลล์พืช และสัตว์จะใช้ไนโตรเจนมาสร้างเป็นโปรตีนและสารพันธุกรรม ในการหมักปุ๋ยการมีไนโตรเจนมากเกินไปก็เป็นสิ่งไม่ดี เพราะอาจจะทำให้เกิดอันตรายต่อจุลินทรีย์ เพราะไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียมีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์อย่างมาก [5]

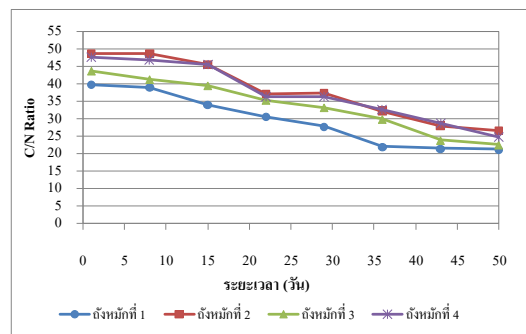
จากการทดลองพบว่า ค่าร้อยละไนโตรเจนในการหมักระยะเริ่มต้นของถังหมักที่ 1, 2, 3 และ 4 นั้นมีค่าเท่ากับร้อยละ 1.05, 0.87, 1.01 และ 0.87 ตามลำดับ และเมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมักปุ๋ย ค่าร้อยละไนโตรเจนในถังหมักที่ 1, 2, 3 และ 4 มีค่าเท่ากับร้อยละ 1.08, 1.06, 1.10 และ 1.06 ตามลำดับ โดยพบว่าการเปลี่ยนแปลงไนโตรเจนในระหว่างการหมักมีแนวโน้มที่คล้ายกันทั้ง 4 ถัง โดยมีร้อยละของไนโตรเจนค่อย ๆ เพิ่มขึ้น และหลังจากนั้นปริมาณไนโตรเจนจึงลดลง ซึ่งเป็นช่วงของการสิ้นสุดการหมัก ค่าไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้นในช่วงเวลานั้นอาจเกิดจากแอมโมเนียที่เกิดขึ้นภายในถัง และอาจมาจากเซลล์จุลินทรีย์ที่มีการตรึงไนโตรเจนเข้าไปอยู่เป็นองค์ประกอบในเซลล์จุลินทรีย์

3.2.4 อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน

อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเป็นปริมาณคาร์บอนและไนโตรเจนเป็นสารที่สำคัญสำหรับกระบวนการหมักและมีผลต่อการจำกัดอัตราการย่อยสลายของจุลินทรีย์ สัดส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนมีบทบาทสำคัญในประเด็นที่ว่า เมื่อไนโตรเจนมีปริมาณต่ำซึ่งทำให้ค่า C/N มีระดับสูง จุลินทรีย์จะแก่งแย่งไนโตรเจนกันและไนโตรเจนกลายเป็นตัวจำกัดอัตราการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุ ดังนั้น ค่า C/N จึงเป็นดัชนีชี้บ่งอัตราเร็วของการย่อยสลายของอินทรีย์วัตถุ และอัตราการปลดปล่อยไนโตรเจนที่เป็นประโยชน์ต่อพืชโดยสภาวะที่เหมาะสมของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในการหมักทำปุ๋ยตามทฤษฎีมีค่าอยู่ระหว่าง 25-30

ค่าดังกล่าวเหมาะสมต่อการที่แบคทีเรียจะนำคาร์บอนและไนโตรเจนไปใช้ในการสร้างเซลล์ ถ้าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนสูงกว่าค่าดังกล่าว จะทำให้กระบวนการย่อยสลายช้าลง จึงได้นำค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนไปใช้ในการพิจารณา และใช้ในการควบคุมอัตราการย่อยสลายระหว่างการหมัก [5]

จากการทดลองจะพบว่า อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเริ่มต้น ของถังหมักที่ 1, 2, 3 และ 4 มีค่าเท่ากับ 39.60, 48.58, 43.53 และ 47.63 ตามลำดับ และเมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการหมัก จะพบว่าค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในทุกถังหมักมีค่าลดลง โดยในถังหมักที่ 1, 2, 3 และ 4 มีค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนลดลงเหลือ 21.09, 26.46, 22.42 และ 24.62 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) ของถังหมักต่าง ๆ

จากรูปที่ 4 จะเห็นว่าในช่วง 1 - 2 สัปดาห์แรก พบว่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนยังมีแนวโน้มคงที่ ซึ่งการลดลงของคาร์บอนต่อไนโตรเจนยังมีไม่มาก หลังจากนั้นแนวโน้มของค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน

เริ่มมีการลดลงเรื่อย ๆ ตามลำดับ โดยเฉพาะช่วงประมาณวันที่ 10 ของการหมัก เริ่มพบว่า มีเชื้อราสีขาวเกิดขึ้นในถังหมักที่ 1 และถังหมักที่ 3 และในช่วงประมาณสัปดาห์ที่ 3 ก็มีเชื้อราสีขาว เกิดขึ้นในถังหมักที่ 2 และถังหมักที่ 4 และยังพบว่า เศษอาหารที่ผสมกันในถังมีการย่อยสลายมากขึ้นโดยมีความสัมพันธ์ต่อการลดลงของอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน แสดงให้เห็นถึงการเกิดปฏิกิริยาภายในถังจากกระบวนการทำงานของจุลินทรีย์ จนเมื่อสิ้นสุดระยะการหมัก ค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนสุดท้ายที่ได้นั้น ในถังที่ 1 ถึงที่ 2 ถึงที่ 3 และถังที่ 4 นั้น มีค่าเกินกว่ามาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ที่กำหนด ซึ่งมาตรฐานกำหนดไว้ว่า ค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ต้องไม่น้อยกว่า 20 ซึ่งเกิดจากวัสดุที่ใช้ในการหมักมี

ร้อยละคาร์บอนสูง และมีค่าร้อยละของไนโตรเจนต่ำ จึงทำให้อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนสูง

3.3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของปุ๋ยหมักที่ได้กับมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์

ตารางที่ 3 แสดงค่าเปรียบเทียบคุณสมบัติของปุ๋ยหมักที่ได้จากถังหมักทั้ง 4 ถัง กับค่ามาตรฐานของปุ๋ยอินทรีย์ จะเห็นได้ว่า คุณลักษณะของปุ๋ยหมักที่ได้จากการหมักปุ๋ยจากทั้ง 4 ถัง จะมีคุณลักษณะใกล้เคียงกัน และพารามิเตอร์ส่วนใหญ่ผ่านมาตรฐานของปุ๋ยอินทรีย์ ยกเว้นค่า C/N ratio ที่ทุกถังมีค่าเกินมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุที่ใช้ในการหมักปุ๋ยส่วนใหญ่มีค่าร้อยละคาร์บอนสูง แต่มีค่าร้อยละไนโตรเจนค่อนข้างต่ำ จึงทำให้ค่า C/N ratio ที่ได้ค่อนข้างสูง

ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์ของปุ๋ยหมักเมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานของปุ๋ยอินทรีย์

พารามิเตอร์	ถังหมักที่ 1	ถังหมักที่ 2	ถังหมักที่ 3	ถังหมักที่ 4	ค่ามาตรฐานของปุ๋ยอินทรีย์ [6]
ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	8.14	6.05	6.32	6.31	5.5 – 8.5
ค่าร้อยละฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total phosphorus) (P_2O_5)	20.00	24.40	30.60	17.70	ไม่น้อยกว่าร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก
ค่าไนโตรเจนทั้งหมด (Total nitrogen)	1.08	1.05	1.10	1.06	ไม่น้อยกว่าร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก
ค่าคาร์บอนทั้งหมด (Total carbon)	22.76	27.67	24.73	26.20	-
C/N Ratio	21.09	26.46	22.42	24.62	ไม่เกิน 20 : 1

4. สรุปผล

จากการศึกษาการแปรผันของระยะเวลาของการเติมอากาศในถังหมักปุ๋ย พบว่า

การเติมอากาศมีผลต่อการย่อยสลายของปุ๋ยหมัก โดยในถังหมักที่ 1, 3 และ 4 ที่มีการเติมอากาศ จะเป็นปุ๋ยหมักได้เร็วกว่าถังหมักที่ 2 ที่ไม่มีการ

เติมอากาศ ทั้งนี้เนื่องจากอากาศหรือออกซิเจนมีความจำเป็นในการดำรงชีวิตของจุลินทรีย์ ซึ่งจุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ย่อยสลายวัสดุอินทรีย์ในกองปุ๋ยหมักส่วนใหญ่ เป็นพวกที่ต้องการออกซิเจนเพื่อเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในกระบวนการหายใจ ในถังหมักที่ 1 อุณหภูมิในถังปุ๋ยหมักจะเริ่มคงที่หลังจากทำการหมักประมาณ 30 วัน ในขณะที่ถังหมักที่ 3 และ 4 อุณหภูมิในถังปุ๋ยหมักจะเริ่มคงที่หลังจากการหมักผ่านไปประมาณ 35 วัน และถังหมักที่ 2 อุณหภูมิจะเริ่มคงที่ประมาณ 45 วัน ซึ่งการเติมอากาศอย่างเพียงพอจะมีผลต่ออัตราเร็วในการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุของจุลินทรีย์ ในขณะที่จุลินทรีย์ทำการย่อยสลายนั้นอุณหภูมิในการหมักจะเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อย่อยสลายได้หมดอุณหภูมิในการปุ๋ยหมักก็จะเริ่มคงที่ โดยพบว่าถังหมักที่ 1, 3 และ 4 ที่มีการเติมอากาศ จะย่อยสลายและมีอุณหภูมิของการหมักคงที่เร็วกว่าถังหมักที่ 2 ที่ไม่มีการเติมอากาศ ส่วนคุณลักษณะของปุ๋ยหมักที่ได้จากการหมักปุ๋ยจากทั้ง 4 ถัง จะมีคุณลักษณะใกล้เคียงกัน และพารามิเตอร์ส่วนใหญ่ผ่านมาตรฐานของปุ๋ยอินทรีย์ ยกเว้น ค่า C/N ratio ที่ทุกถังมีค่าเกินมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุที่ใช้ในการหมักปุ๋ยส่วนใหญ่มีคาร์บอนสูง แต่มีคาร์บอนไนโตรเจนค่อนข้างต่ำ จึงทำให้ค่า C/N ratio ที่ได้ค่อนข้างสูง

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตรมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ทุนงบประมาณเงินรายได้ประจำปี 2555 เป็นผู้ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมควบคุมมลพิษ, 2552. **สรุปสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย ปี 2551**: กรุงเทพฯ: กขกร พับลิชชิ่ง.
- [2] สมเกียรติ แสงจันทร์ และสินตรา ตรีนุสนธิ, 2547. **การเพิ่มประสิทธิภาพปุ๋ยหมักจากตลาดสดด้วยกากตะกอนจากระบบ. ปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. คณะวิศวกรรมและเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.**
- [3] Karnchanawong, S. and Suriyanon, N, 2011. "Household Organic Waste Composting using Bins with different types of passive aeration, " **Resource, Conservation and Recycling**. 55: 548-553.
- [4] กลุ่มวิจัยเกษตรเคมี สำนักวิจัยพัฒนาปัจจัยการผลิตทางการเกษตร กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2551. **คู่มือวิธีวิเคราะห์ปุ๋ยอินทรีย์**: กรุงเทพฯ: กรมวิชาการเกษตร.
- [5] Tchobanoglous, G., Theisen, H. and Vigil, S.A, 1993. **Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues**. NY: McGraw-Hill, Inc.
- [6] กรมวิชาการเกษตร. ประกาศกรมวิชาการเกษตร เรื่อง **มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ พ.ศ. 2548**. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <http://law.longdo.com/law/376/sub25312> (2 มีนาคม 2557).

การศึกษาประสิทธิภาพการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของผ้าทอจากฝ้าย/สแตนเลส

A Study on Electromagnetic Shielding Effectiveness of Cotton/Stainless Steel woven fabric

มัลลิกา ทองเจริญ¹ สมประสงค์ ภาษาประเทศ² และรัตนพล มงคลรัตนสิริ³
tomullika@gmail.com¹, zoom99th@hotmail.com², rattanaphol.m@rmutp.ac.th³

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของผ้าทอจากฝ้าย/สแตนเลส ซึ่งเส้นด้ายที่นำไปทอผ้าเป็นเส้นด้ายควบระหว่างฝ้าย/สแตนเลส นำมาทอเป็นผืนผ้าตามโครงสร้างพื้นฐาน 3 แบบคือ ผ้าทอลายขัด ผ้าทอลายทแยง และผ้าทอลายทวน เพื่อศึกษาโครงสร้างผ้าทอที่มีผลต่อการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและการใช้สัดส่วนเส้นใยสแตนเลสในรูปแบบการทอที่ต่างกัน ผลที่ได้แสดงว่าผ้าทอที่ผลิตจากเส้นด้ายควบฝ้าย/สแตนเลสทุกโครงสร้างสามารถป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดี ผ้าทอที่มีสัดส่วนการใช้เส้นใยสแตนเลสมากกว่าจะสามารถป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีกว่า

คำสำคัญ: เส้นด้ายฝ้าย เส้นใยสแตนเลส เส้นด้ายควบ เส้นด้ายบิด คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การป้องกัน

Abstract

The electromagnetic shielding effectiveness of woven fabrics that is woven by plied yarn of cotton yarn and stainless steel fibers in 3 basic structures i.e. plain weave, twill weave and sateen weave is studied in this research in order to investigate the effects of fabric structures on the electromagnetic shielding effectiveness. Also, different proportions of stainless steel fibers contained in various woven fabrics are used to study the effectiveness. The results showed that woven fabrics that made from plied yarn i.e. cotton yarn and stainless steel fibers in all structures had a good effect on electromagnetic shielding effectiveness. The woven fabrics that used higher proportion of stainless steel fibers had higher electromagnetic shielding effectiveness.

Keywords: cotton yarn, stainless steel fiber, plied yarn, twisted yarn, electromagnetic wave, shielding

¹นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาสิ่งทอ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

²อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

³อาจารย์ประจำภาควิชาเทคโนโลยีเคมีสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอและออกแบบแฟชั่น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1. บทนำ

ในปัจจุบันเครื่องใช้ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์มีอิทธิพลกับการใช้ชีวิตประจำวันมาก เช่น คอมพิวเตอร์ โทรศัพท์มือถือ วิทยุ โทรทัศน์ ไมโครเวฟ และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ อุปกรณ์ต่าง ๆ ดังกล่าวมีการแผ่คลื่นหรือสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จากรายงานการศึกษาวิจัยหลายฉบับ [1] พบว่าการสัมผัสสนามคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากำลังอ่อน (Extremely Low Frequency Electromagnetic Field, ELF-EMF) โดยตรงอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลานานอาจทำให้เกิดผลเสียต่อสุขภาพขึ้นได้จากหลายโรค เช่น โรคมะเร็งสมอง โรคมะเร็งทรวงอก และโรคมะเร็งเม็ดเลือดขาว จากผลและอันตรายที่เกี่ยวข้องกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้น จึงจำเป็นต้องมีการป้องกัน ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธีและการใช้วัสดุสิ่งทอก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ เช่น สวมใส่เสื้อผ้าที่สามารถป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเข้าถึงตัวเราน้อยที่สุด โดยทั่วไปอาจมี 3 แนวทางในการพัฒนาและออกแบบเสื้อผ้าสำหรับป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้แก่ [2, 3]

1) การใช้ผ้าที่ป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามาทำการออกแบบตัดเย็บเป็นเสื้อผ้าสำเร็จรูปที่มีลักษณะโครงสร้างและสโตร์ที่มีความแตกต่างกันออกไป

2) การใช้วัสดุที่สามารถป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามาทำเป็นแผ่นรองใน (Lining) หรือนำมาบุด้านในของเสื้อผ้า

3) การใช้วัสดุหรือสารเคลือบด้านนอกของตัวเสื้อผ้าสำเร็จรูปเพื่อป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

2. วัตถุประสงค์และขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของผ้าทอที่ผลิตจากเส้นด้ายควบฝ้าย/สแตนเลส นำไปทอเป็นผืนผ้าตามโครงสร้างพื้นฐานคือ ผ้าทอลายขัด ผ้าทอลายทแยง และผ้าทอลายตัววน เพื่อทำการศึกษาเปรียบเทียบโครงสร้างของผ้าทอที่มีผลต่อการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากการใช้สัดส่วนเส้นใยสแตนเลสตามแนวด้ายพุ่งที่ต่างกัน ทั้งนี้เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์และเพิ่มความหลากหลายในการใช้งานเฉพาะทาง

ผ้าทอที่นำมาศึกษาวิจัยเป็นผ้าทอที่ทอจากเส้นด้ายยืนคือเส้นด้ายฝ้ายขนาดเบอร์ 30 Ne และ เส้นด้ายพุ่งจะใช้เส้นด้าย 2 กลุ่มคือ กลุ่มแรกเป็นเส้นด้ายฝ้ายขนาดเบอร์ 30 Ne ส่วนอีกกลุ่มเป็นเส้นด้ายควบระหว่างเส้นด้ายฝ้ายขนาดเบอร์ 30 Ne กับเส้นใยสแตนเลสขนาด 0.3 มิลลิเมตร โดยนำมาทอเป็นผืนผ้าตามโครงสร้างพื้นฐาน คือ ผ้าทอลายขัด 1/1 ผ้าทอลายทแยง 2/1 และผ้าทอลายตัววน 1/4 ดังแสดงตัวอย่างผ้าทอตามรูปที่ 1



ผ้าทอลายขัด 1/1



ผ้าทอลายทแยง 2/1



ผ้าทอลายตัวน 1/4

รูปที่ 1 ตัวอย่างผ้าทอ 3 โครงสร้าง

สำหรับการศึกษาเปรียบเทียบการใช้ สัตส่วนเส้นใยสแตนเลสของผ้าทอแต่ละโครงสร้าง นั้น จะกำหนดการทอผ้าต่อ 1 ชั่วโมงประกอบด้วย เส้นด้ายยืนเป็นเส้นด้ายฝ้ายขนาดเบอร์ 30 Ne ทั้งหมดและเส้นด้ายพุ่งแบ่งรูปแบบการใช้สัตส่วน เส้นใยสแตนเลสเป็น 4 แบบประกอบด้วย

1) แบบที่ 1 กำหนดเป็นเส้นด้ายฝ้าย ขนาดเบอร์ 30 Ne จำนวน 2 เส้นกับเส้นด้ายควบ ฝ้าย/สแตนเลส จำนวน 1 เส้นต่อ 1 ชั่วโมง

2) แบบที่ 2 กำหนดเป็นเส้นด้ายฝ้าย ขนาดเบอร์ 30 Ne จำนวน 1 เส้นกับเส้นด้ายควบ ฝ้าย/สแตนเลส จำนวน 1 เส้นต่อ 1 ชั่วโมง

3) แบบที่ 3 กำหนดเป็นเส้นด้ายฝ้าย ขนาดเบอร์ 30 Ne จำนวน 1 เส้นกับเส้นด้ายควบ ฝ้าย/สแตนเลส จำนวน 2 เส้นต่อ 1 ชั่วโมง

4) แบบที่ 4 กำหนดเป็นเส้นด้ายควบ ฝ้าย/สแตนเลสทั้งหมดต่อ 1 ชั่วโมง

ซึ่งรูปแบบการใช้สัตส่วนของเส้นใย สแตนเลสที่ต่างกันตามแนวด้ายพุ่ง จะแสดง ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การใช้สัตส่วนเส้นด้ายควบฝ้าย/สแตนเลส ตามแนวด้ายพุ่ง

แบบที่	ด้ายยืน	ด้ายพุ่งต่อ 1 ชั่วโมง (repeat)
1	เส้นด้ายฝ้าย 30 Ne	เส้นด้ายฝ้าย 2 เส้นกับ เส้นด้ายควบ 1 เส้น
2	เส้นด้ายฝ้าย 30 Ne	เส้นด้ายฝ้าย 1 เส้นกับ เส้นด้ายควบ 1 เส้น
3	เส้นด้ายฝ้าย 30 Ne	เส้นด้ายฝ้าย 1 เส้นกับ เส้นด้ายควบ 2 เส้น
4	เส้นด้ายฝ้าย 30 Ne	เส้นด้ายควบทั้งหมด

เมื่อทำการทอผ้าทั้ง 3 โครงสร้างตามการใช้ สัตส่วนเส้นใยสแตนเลสที่ต่างกัน จะมีตัวอย่างผ้า ทอเพื่อการศึกษาวิจัยทั้งหมดจำนวน 12 ชิ้น ดัง แสดงตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 จำแนกชิ้นงานทดสอบตามโครงสร้างของผ้า

รหัส	โครงสร้างผ้า	ด้ายพุ่งต่อ 1 ชั่วโมง (repeat)
P33	ลายขัด 1/1	เส้นด้ายฝ้าย 2 เส้นกับ เส้นด้ายควบ 1 เส้น
P50	ลายขัด 1/1	เส้นด้ายฝ้าย 1 เส้นกับ เส้นด้ายควบ 1 เส้น
P67	ลายขัด 1/1	เส้นด้ายฝ้าย 1 เส้นกับ เส้นด้ายควบ 2 เส้น
P100	ลายขัด 1/1	เส้นด้ายควบทั้งหมดต่อ 1 ชั่วโมง
T33	ลายทแยง 2/1	เส้นด้ายฝ้าย 2 เส้นกับ เส้นด้ายควบ 1 เส้น
T50	ลายทแยง 2/1	เส้นด้ายฝ้าย 1 เส้นกับ เส้นด้ายควบ 1 เส้น
T67	ลายทแยง 2/1	เส้นด้ายฝ้าย 1 เส้น กับเส้นด้ายควบ 2 เส้น
T100	ลายทแยง 2/1	เส้นด้ายควบทั้งหมดต่อ 1 ชั่วโมง
S33	ลายตัวน 1/4	เส้นด้ายฝ้าย 2 เส้นกับ เส้นด้ายควบ 1 เส้น
S50	ลายตัวน 1/4	เส้นด้ายฝ้าย 1 เส้นกับ เส้นด้ายควบ 1 เส้น
S67	ลายตัวน 1/4	เส้นด้ายฝ้าย 1 เส้นกับ เส้นด้ายควบ 2 เส้น
S100	ลายตัวน 1/4	เส้นด้ายควบทั้งหมดต่อ 1 ชั่วโมง

จากตารางที่ 2 ผ้าทอรหัส P33 T33 และ S33 จะมีการใช้สัดส่วนเส้นใยสแตนเลสตามแนวด้ายพุ่งต่อการทอผ้า 1 ซ้ำเป็น 33% ผ้าทอรหัส P50 T50 และ S50 จะมีการใช้สัดส่วนเส้นใยสแตนเลสตามแนวด้ายพุ่งต่อการทอผ้า 1 ซ้ำเป็น 50% สำหรับผ้าทอรหัส P67 T67 และ S67 จะมีการใช้สัดส่วนเส้นใยสแตนเลสตามแนวด้ายพุ่งต่อการทอผ้า 1 ซ้ำเป็น 67% และผ้าทอรหัส P100 T100 และ S100 จะมีการใช้สัดส่วนเส้นใยสแตนเลสตามแนวด้ายพุ่งทั้งหมดต่อการทอผ้า 1 ซ้ำเป็น 100% จากนั้นนำผ้าทอทั้งหมดทดสอบเพื่อหาสัดส่วนร้อยละของเส้นใยในผ้าทอตามมาตรฐานการทดสอบหมายเลข ISO 1833 ซึ่งแสดงรายละเอียดตามตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สัดส่วนร้อยละของเส้นใยในผ้าทอ

รหัส	เส้นใยฝ้าย	เส้นใยสแตนเลส
P33	94.9	5.1
P50	92.6	7.4
P67	90.5	9.5
P100	86.4	13.6
T33	94.8	5.2
T50	92.4	7.6
T67	90.4	9.6
T100	85.8	14.2
S33	94.9	5.1
S50	92.7	7.3
S67	90.1	9.9
S100	86.4	13.6

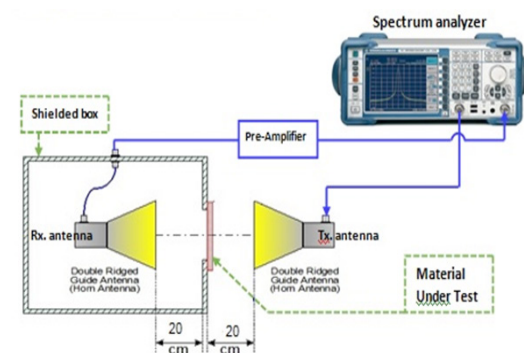
จากนั้นนำผ้าทอทั้งหมดที่ได้จากการทอตามรูปแบบการทอที่ต่างกัน ไปทดสอบเพื่อหาสมบัติของผ้าทอดังแสดงตามตารางที่ 4 ซึ่งจะมีสมบัติของผ้าที่ประกอบด้วย จำนวนเส้นด้ายต่อตารางนิ้ว ความหนาของผ้า และน้ำหนักของผ้า

ตารางที่ 4 จำนวนเส้นด้าย ความหนาและน้ำหนักของผ้า

รหัส	P33	P50	P67	P100
จำนวนเส้นด้าย (เส้น/ตร.นิ้ว) ด้ายยืน × ด้ายพุ่ง	62 × 52	62 × 52	62 × 54	62 × 52
ความหนาของผ้า (มิลลิเมตร)	0.32	0.31	0.31	0.32
น้ำหนักของผ้า (กรัมต่อตร.เมตร)	116.2	116.3	118.2	120.6
รหัส	T33	T50	T67	T100
จำนวนเส้นด้าย (เส้น/ตร.นิ้ว) ด้ายยืน × ด้ายพุ่ง	62 × 54	62 × 54	63 × 54	62 × 55
ความหนาของผ้า (มิลลิเมตร)	0.35	0.35	0.36	0.37
น้ำหนักของผ้า (กรัมต่อตร.เมตร)	108.8	108.9	120.5	120.7
รหัส	S33	S50	S67	S100
จำนวนเส้นด้าย (เส้น/ตร.นิ้ว) ด้ายยืน × ด้ายพุ่ง	62 × 52	62 × 52	60 × 51	62 × 52
ความหนาของผ้า (มิลลิเมตร)	0.44	0.44	0.44	0.43
น้ำหนักของผ้า (กรัมต่อตร.เมตร)	112.3	112.8	112.7	120.3

จากสมบัติของผ้าทอตามตารางที่ 4 พบว่าผ้าทอลายทแยงมีจำนวนเส้นด้ายต่อตารางนิ้วตามแนวด้ายพุ่งมากที่สุดและผ้าทอลายทแยงที่มีรูปแบบการทอที่มีการใช้สัดส่วนเส้นใยสแตนเลสทั้งหมดตามแนวด้ายพุ่งจะมีน้ำหนักของผ้ามากที่สุด สำหรับผ้าทอลายขัดจะมีน้ำหนักของผ้าวรองลงมาจากผ้าทอลายทแยง และสำหรับผ้าทอลายต่วนจะมีความหนาของผ้ามากที่สุด

การทดสอบประสิทธิภาพการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะจัดเตรียมเครื่องมือการทดสอบตามรูปที่ 2 โดยนำผ้าทอที่จะทดสอบมาวางหน้าตู้ทดสอบที่มีการกำบังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Shielded box) ให้มีระยะห่างจากสายอากาศตัวรับและตัวส่งสัญญาณ (Antenna) ทั้ง 2 เป็นระยะ 20 เซนติเมตร จากนั้นจะปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดสัญญาณ (Spectrum analyzer) และทำการบันทึกค่าที่อ่านได้ซึ่งเป็นค่าประสิทธิภาพการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยการทดสอบจะทำการทดสอบผ้าทอทั้ง 2 แนวคือแนวตั้งและแนวนอน โดยการหมุนปรับสายอากาศตัวนอกเครื่องทดสอบ และจะทำการทดสอบทั้งหมด 5 ครั้งต่อผ้า 1 ชิ้น และนำมาคำนวณเฉลี่ยหาค่าประสิทธิภาพการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ 2 การจัดเตรียมเครื่องมือเพื่อทดสอบหาค่าประสิทธิภาพการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [4]

หลังการทดสอบหาค่าประสิทธิภาพการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของผ้าทอ จะนำค่าที่อ่านได้จากเครื่องทดสอบไปประเมินผลการทดสอบโดยเปรียบเทียบจากระดับของการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีการจำแนกไว้ทั้งหมด 2 กลุ่ม คือกลุ่มสำหรับผู้ใช้งานที่ต้องสัมผัสคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยตรงและกลุ่มสำหรับใช้งานเสื้อผ้าสวมใส่ทั่วไป สำหรับงานวิจัยนี้จะนำไปเปรียบเทียบกับระดับของการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สำหรับกลุ่มของเสื้อผ้าที่ใช้สวมใส่ทั่วไป [5] ซึ่งมีทั้งหมด 5 ระดับ มีความแตกต่างตามค่าประสิทธิภาพการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าดังแสดงตามตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ระดับการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับกลุ่มของเสื้อผ้าที่ใช้สวมใส่ทั่วไป

ระดับ	ประสิทธิภาพการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (SE) หน่วย : เดซิเบล
5 - ดีที่สุด	$SE > 30$
4 - ดีมาก	$30 \geq SE > 20$
3 - ดี	$20 \geq SE > 10$
2 - ปานกลาง	$10 \geq SE > 7$
1 - พอใช้	$7 \geq SE > 5$

3. ผลและวิจารณ์

เมื่อนำผ้าทอทั้งหมดไปทำการทดสอบหาประสิทธิภาพการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electro- magnetic shielding effectiveness, SE) ผลการทดสอบพบว่าผ้าทอทั้งหมดสามารถป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ในระดับดี ซึ่งเทียบเท่ากับระดับ 3 ($20 > SE > 10$) จากตารางบ่งชี้ระดับการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สำหรับกลุ่มของเสื้อผ้าที่ใช้สวมใส่ทั่วไป ซึ่งอยู่ในช่วงคลื่นความถี่ระหว่าง 800-3000 เมกะเฮิรตซ์ ดังแสดงตามตารางที่ 6-8

ตารางที่ 6 ประสิทธิภาพการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของผ้าทอลายขัด (หน่วย : เดซิเบล)

ความถี่ (เมกะเฮิรตซ์)	P33	P50	P67	P100
800	23.2	23.6	27.4	20.7
1000	36.8	36.3	41.5	42.2
1200	38.2	28.6	37.9	35.8
1400	36.7	34.8	33.7	38.3
1600	19.1	25.6	27.0	27.3
1800	16.9	27.9	29.5	30.8
2000	20.0	22.7	23.5	25.8
2200	20.9	21.2	23.8	24.2
2400	23.6	29.9	22.4	30.9
2600	22.0	26.1	28.3	28.6
2800	17.8	28.3	22.0	31.8
3000	13.9	20.3	21.7	35.3

จากตารางที่ 6 พบว่าผ้าทอลายขัดจะมีค่าประสิทธิภาพการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ดีที่สุดในช่วงคลื่นความถี่ 1000 เมกะเฮิรตซ์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 42.2 เดซิเบล และมีค่าประสิทธิภาพการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ต่ำที่สุดในช่วงคลื่นความถี่ 3000 เมกะเฮิรตซ์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 13.9 เดซิเบล

ตารางที่ 7 ประสิทธิภาพการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของผ้าทอลายทแยง (หน่วย : เดซิเบล)

ความถี่ (เมกะเฮิรตซ์)	T33	T50	T67	T100
800	19.6	22.1	23.0	36.1
1000	36.4	48.3	53.8	57.2
1200	25.7	36.8	34.3	39.7
1400	25.9	27.6	27.7	41.3
1600	19.8	32.4	32.1	45.5
1800	31.4	36.2	46.1	36.0
2000	17.9	22.7	22.3	25.0
2200	19.6	24.3	22.2	26.2
2400	31.9	32.9	26.4	34.0
2600	26.2	34.5	39.5	47.5
2800	23.8	27.1	25.5	30.3
3000	21.0	26.3	30.3	33.4

จากตารางที่ 7 พบว่าผ้าทอลายทแยงจะมีค่าประสิทธิภาพการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ดีที่สุดในช่วงคลื่นความถี่ 1000 เมกะเฮิรตซ์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 57.2 เดซิเบล และมีค่าประสิทธิภาพการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ต่ำที่สุดในช่วงคลื่นความถี่ 2000 เมกะเฮิรตซ์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 17.9 เดซิเบล

ตารางที่ 8 ประสิทธิภาพการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของผ้าทอลายทวน (หน่วย : เดซิเบล)

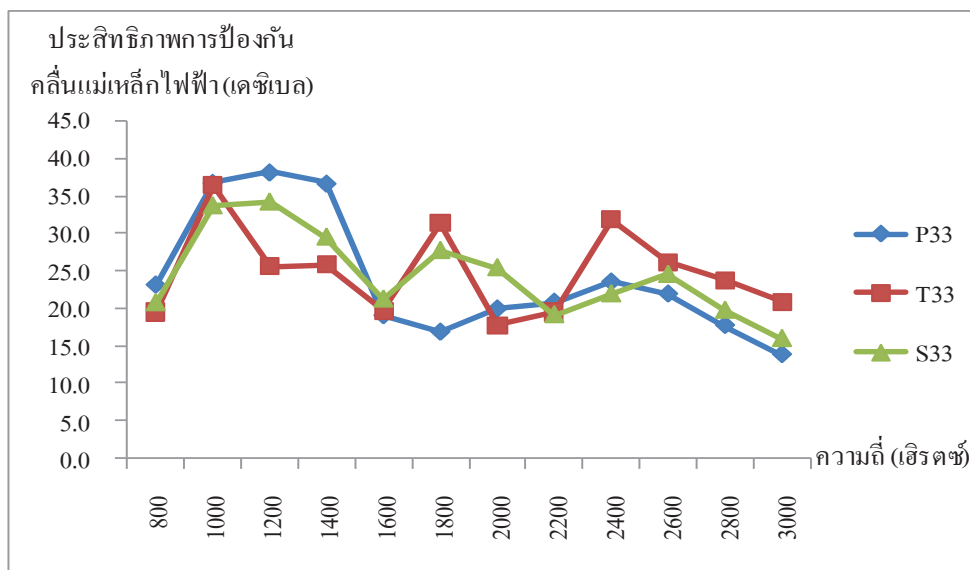
ความถี่ (เมกะเฮิรตซ์)	S33	S50	S67	S100
800	20.8	18.5	19.7	21.3
1000	33.8	29.0	32.1	36.1
1200	34.3	35.8	39.0	39.1
1400	29.6	27.6	26.4	29.8
1600	21.3	24.2	27.0	27.8
1800	27.8	33.6	29.5	33.7
2000	25.5	28.6	32.6	33.1
2200	19.2	23.6	23.8	26.7
2400	22.0	24.8	22.4	33.0
2600	24.6	32.0	28.3	35.5
2800	19.8	17.8	21.2	31.3
3000	16.0	18.8	21.7	23.0

จากตารางที่ 8 พบว่าผ้าทอลายทวนจะมีค่าประสิทธิภาพการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ดีที่สุดในช่วงคลื่นความถี่ 1200 เมกะเฮิรตซ์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 39.1 เดซิเบล และมีค่าประสิทธิภาพการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ต่ำที่สุดในช่วงคลื่นความถี่ 3000 เมกะเฮิรตซ์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 16.0 เดซิเบล

จากค่าประสิทธิภาพการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามตารางที่ 6-8 พบว่าผ้าทอแต่ละโครงสร้างที่มีรูปแบบการทอโดยใช้สัดส่วนเส้นใยแบบที่ 4 ที่เป็นการทอโดยใช้เส้นด้ายควบฝ้าย/สแตนเลสทั้งหมดตามแนวด้ายพุ่ง จะมีค่าประสิทธิภาพการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ดีที่สุด สามารถเทียบเท่ากับ

ระดับ 5 ($SE > 30$) จากตารางบ่งชี้ระดับการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับกลุ่มของเสื้อผ้าที่ใช้สวมใส่ทั่วไป ซึ่งเป็นผ้าทอรหัส P100 T100 และ S100 และมีค่าประสิทธิภาพการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเท่ากับ 42.2 57.2 และ 39.1 เดซิเบลตามลำดับ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า การสอดแทรกเส้นใยสแตนเลสในการทอผ้าเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของผ้าทอได้และค่าประสิทธิภาพการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะดีที่สุดเมื่อมีการใช้สัดส่วนของเส้นใยสแตนเลสที่มากที่สุดในการทอผ้า

สำหรับการศึกษาค่าประสิทธิภาพการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่อโครงสร้างการทอ จะทำการเปรียบเทียบผลการศึกษาโดยวิเคราะห์จากผ้าที่มีการใช้สัดส่วนเส้นด้ายควบฝ้าย/สแตนเลสในการทอรูปแบบเดียวกัน ซึ่งมีทั้งหมด 4 แบบตามข้างต้นที่ได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 2 ซึ่งเป็นวัตถุประสงค์และขอบเขตงานวิจัยนี้ และจากผลการศึกษาประสิทธิภาพการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สามารถแสดงค่าประสิทธิภาพการป้องกันตามรูปที่ 3-6 ดังนี้



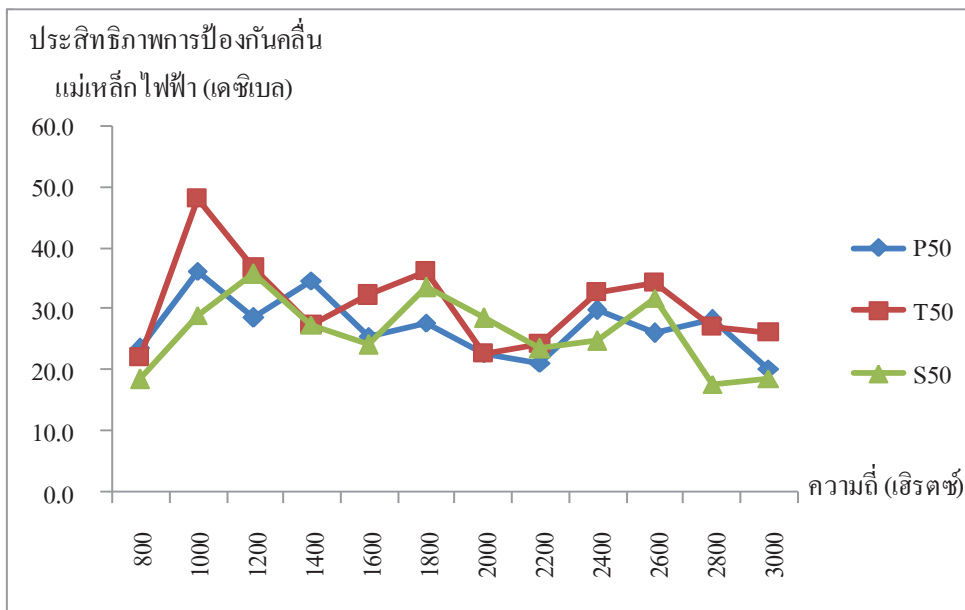
รูปที่ 3 ค่าเปรียบเทียบประสิทธิภาพการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของผ้าทอแบบที่ 1

จากรูปที่ 3 เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่อโครงสร้างการทอที่กำหนดการใช้สัดส่วนเส้นใยสแตนเลสรูปแบบที่ 1 พบว่าผ้าทอลายทแยงจะมีแนวโน้มค่าประสิทธิภาพการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าส่วนใหญ่ดีกว่าผ้าทอลายขัดและผ้าทอลายตัวน ซึ่งสามารถพบชัดเจนที่ช่วงคลื่นความถี่

2400-3000 เมกะเฮิรตซ์ ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 21.0-31.9 เดซิเบล พบค่าการป้องกันที่ดีที่สุดเทียบเท่าระดับ 5 ในช่วงคลื่นความถี่ 2400 เมกะเฮิรตซ์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 31.9 เดซิเบลและพบค่าการป้องกันที่ต่ำที่สุดเทียบเท่าระดับ 4 ในช่วงคลื่นความถี่ 3000 เมกะเฮิรตซ์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 21.0

เดซิเบล จากการศึกษาค่าผลและเปรียบเทียบพบว่า ผ้าทอลายทแยงมีจำนวนเส้นด้ายพุ่งต่อตาราง นิ้วมากกว่าผ้าทอลายขัดและผ้าทอลายตัวน อีกทั้งยังมีน้ำหนักของผ้ามากกว่า จึงทำให้มีค่า ประสิทธิภาพการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ดีกว่าเนื่องจากจำนวนเส้นใยสแตนเลส

ตามแนวด้ายพุ่งมีมากกว่า สำหรับผ้าทอลายตัวน มีค่าการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ตรงลงมา จากผ้าทอลายทแยง เนื่องจากความหนาของ ผ้าทอลายตัวนมากกว่าผ้าทอลายขัดเมื่อ เปรียบเทียบจากการกำหนดการทอผ้าเป็น รูปแบบที่ 1



รูปที่ 4 ค่าเปรียบเทียบประสิทธิภาพการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของผ้าทอแบบที่ 2

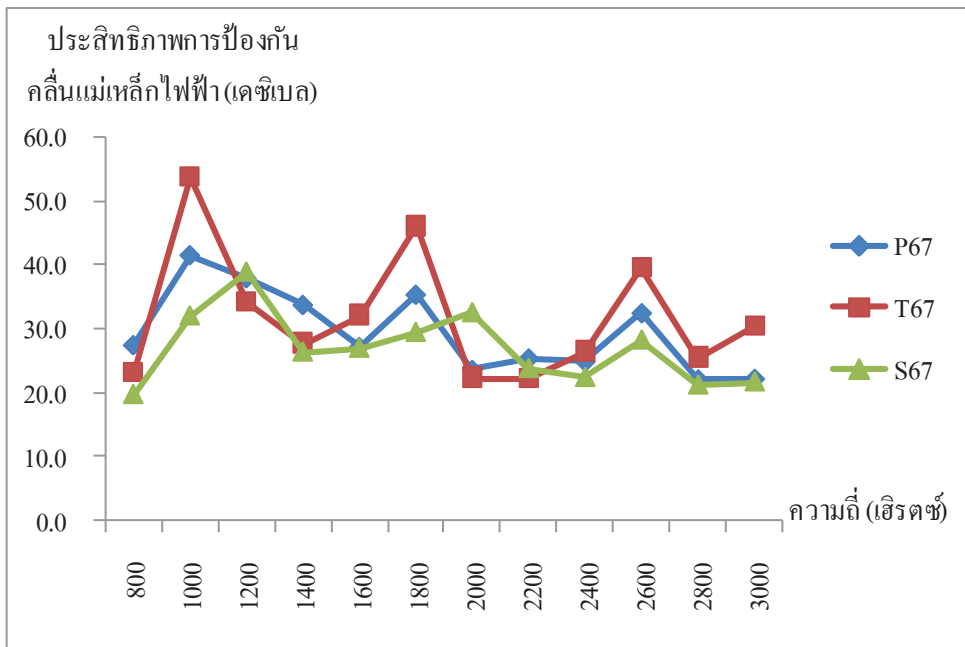
จากรูปที่ 4 เป็นการศึกษาประสิทธิภาพ การป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่อโครงสร้าง การทอที่กำหนดการใช้สัดส่วนเส้นใยสแตนเลส รูปแบบที่ 2 พบว่าผ้าทอลายทแยงจะมีแนวโน้ม ค่าประสิทธิภาพการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ส่วนใหญ่ดีกว่าผ้าทอลายขัดและผ้าทอลายตัวน ซึ่งสามารถพบชัดเจนในช่วงคลื่นความถี่ 2200-3000 เมกะเฮิรตซ์ มีค่าอยู่ระหว่าง 24.3 – 34.5 เดซิเบล พบค่าการป้องกันที่ดีที่สุดเทียบเท่าระดับ 5 ในช่วงคลื่นความถี่ 2600 เมกะเฮิรตซ์ ซึ่งมีค่า เท่ากับ 34.5 เดซิเบล และพบค่าการป้องกัน ที่ต่ำที่สุดเทียบเท่าระดับ 4 ในช่วงคลื่นความถี่ 2200 เมกะเฮิรตซ์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 24.3 เดซิเบล จากการศึกษาค่าผลและเปรียบเทียบพบว่า

ผ้าทอลายทแยงมีจำนวนเส้นด้ายพุ่งต่อตาราง นิ้วมากกว่าผ้าทอลายขัดและผ้าทอลายตัวน อีกทั้งยังมีน้ำหนักของผ้ามากกว่า จึงทำให้มีค่า ประสิทธิภาพการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ ดีกว่าเนื่องจากจำนวนเส้นใยสแตนเลสตามแนว ด้ายพุ่งมีมากกว่า สำหรับผ้าทอลายขัดมีค่าการ ป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ตรงลงมาจาก ผ้าทอลายทแยง เนื่องจากสัดส่วนร้อยละของ เส้นใยสแตนเลสของผ้าทอลายขัดมีมากกว่า ผ้าทอลายตัวนเมื่อเปรียบเทียบจากการกำหนด การทอผ้าเป็นรูปแบบที่ 2

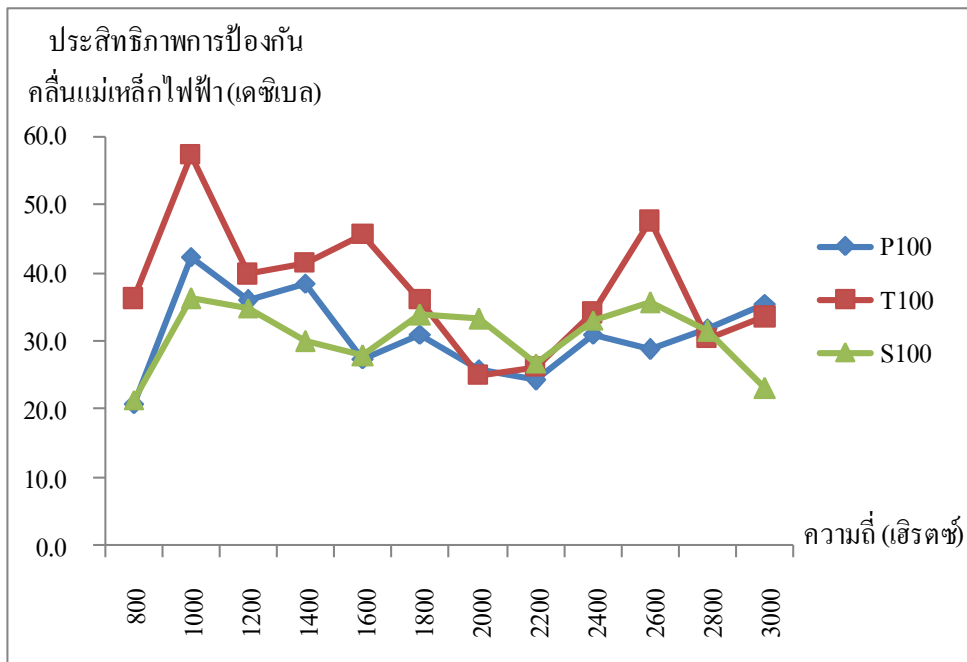
จากรูปที่ 5 เป็นการศึกษาประสิทธิภาพ การป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่อโครงสร้าง การทอที่กำหนดการใช้สัดส่วนเส้นใยสแตนเลส

รูปแบบที่ 3 พบว่าผ้าทอลายทแยงจะมีแนวโน้มค่าประสิทธิภาพการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าส่วนใหญ่มากกว่าผ้าทอลายขัดและผ้าทอลายตัวน ซึ่งสามารถพบชัดเจนในช่วงคลื่นความถี่ 2400-3000 เมกะเฮิรตซ์ ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 25.5 – 39.5 เดซิเบล พบค่าการป้องกันที่ดีที่สุดเทียบเท่าระดับ 5 ในช่วงคลื่นความถี่ 2600 เมกะเฮิรตซ์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 39.5 เดซิเบล และพบค่าการป้องกันที่ต่ำที่สุดเทียบเท่าระดับ 4 ในช่วงคลื่นความถี่ 2800 เมกะเฮิรตซ์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 25.5 เดซิเบล จากการศึกษาผลและเปรียบเทียบพบว่า ผ้าทอลายทแยงมีจำนวนเส้นด้ายพุ่งต่อตารางนิ้วมากกว่าผ้าทอลายขัดและผ้าทอ

ลายตัวนอีกทั้งยังมีน้ำหนักของผ้ามากกว่าจึงทำให้มีค่าประสิทธิภาพการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ดีกว่าเนื่องจากจำนวนเส้นใยสแตนเลสตามแนวด้ายพุ่งมีมากกว่า สำหรับผ้าทอลายขัดมีค่าแนวโน้มการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีรองลงมาจากผ้าทอลายทแยง เนื่องจากผ้าทอลายขัดมีจำนวนเส้นด้ายต่อตารางนิ้วมากกว่าผ้าทอลายตัวน อีกทั้งยังมีน้ำหนักผ้ามากกว่าจึงทำให้มีค่าประสิทธิภาพการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ดีกว่าเนื่องจากจำนวนเส้นใยสแตนเลสตามแนวด้ายพุ่งมีมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบจากการกำหนดการทอผ้าเป็นแบบที่ 3



รูปที่ 5 ค่าเปรียบเทียบประสิทธิภาพการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของผ้าทอแบบที่ 3



รูปที่ 6 ค่าเปรียบเทียบประสิทธิภาพการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของผ้าทอแบบที่ 4

จาก**รูปที่ 6** เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่อโครงสร้างการทอที่กำหนดการใช้สัดส่วนเส้นใยสแตนเลสรูปแบบที่ 4 พบว่าผ้าทอลายทแยงจะมีแนวโน้มค่าประสิทธิภาพการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าส่วนใหญ่ดีกว่าผ้าทอลายขัดและผ้าทอลายตัวน ซึ่งสามารถพบชัดเจนในช่วงคลื่นความถี่ 800-1800 เมกะเฮิรตซ์ ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 36.0 – 57.2 เดซิเบล พบค่าการป้องกันที่ดีที่สุดเทียบเท่าระดับ 5 ในช่วงคลื่นความถี่ 1000 เมกะเฮิรตซ์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 57.2 เดซิเบล และพบค่าการป้องกันที่ต่ำที่สุดเทียบเท่าระดับ 5 ในช่วงคลื่นความถี่ 1800 เมกะเฮิรตซ์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 36.0 เดซิเบล จากการศึกษาผลและเปรียบเทียบพบว่า ผ้าทอลายทแยงมีจำนวนเส้นด้ายพุ่งต่อตารางนิ้วมากกว่าผ้าทอลายขัดและผ้าทอลายตัวน อีกทั้งยังมีน้ำหนักของผ้าและสัดส่วนร้อยละของเส้นใยสแตนเลสของผ้าทอมากกว่า จึงทำให้มีค่าประสิทธิภาพการ

ป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ดีกว่าเนื่องจากจำนวนเส้นใยสแตนเลสมีมากกว่า สำหรับผ้าทอลายตัวนมีค่าการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ตรงลงมาจากผ้าทอลายทแยง เนื่องจากของผ้าทอลายตัวนมีความหนาของผ้ามากกว่าผ้าทอลายขัดเมื่อเปรียบเทียบจากการกำหนดการทอผ้าเป็นรูปแบบที่ 4

จากผลการศึกษาค่าประสิทธิภาพการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่อโครงสร้างการทอของผ้าสำหรับงานวิจัยนี้ พบว่าผ้าทอลายทแยงจะมีค่าประสิทธิภาพการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าดีกว่าผ้าทอลายขัดและผ้าทอลายตัวน เนื่องจากจำนวนเส้นด้ายต่อตารางนิ้ว น้ำหนักของผ้า และสัดส่วนร้อยละของเส้นใยสแตนเลสในผ้าทอลายทแยงมีมากกว่าผ้าทอลายขัดและผ้าทอลายตัวน ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้มีผลต่อการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หากคำนึงถึงค่าการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อให้มีประสิทธิภาพ

ในการป้องกันที่ดีที่สุด ควรเลือกใช้ผ้าทอที่มีการใช้สัดส่วนของเส้นใยสแตนเลสมากที่สุด ซึ่งเส้นใยสแตนเลสจะทำหน้าที่ป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและให้ค่าประสิทธิภาพการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สูงด้วยเช่นกัน

4. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเพื่อการศึกษาประสิทธิภาพการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของผ้าทอนี้ได้ดำเนินการลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องมาจากการได้รับความอนุเคราะห์สำหรับคำแนะนำและความช่วยเหลือทุกด้านจากอาจารย์ณัฐดนัย รุ่งเรืองกิจไกร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับเส้นด้ายฝ้าย จากบริษัทยูไนเต็ดย้าย จำกัด สำหรับการทอผืนผ้า จากอาจารย์ศิริอร วนิชโชตยานนท์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ สำหรับอุปกรณ์และเครื่องมือทดสอบ อีกทั้งคำแนะนำในการทดสอบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (PTEC) และสำหรับอุปกรณ์และเครื่องมือทดสอบผืนผ้า จากบริษัทวีเอฟเอสซึ่งจำกัดประเทศไทย

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] กมลทิพย์ ไหมวงศ์จรัส, 2554. การประเมินผล กระบวนการสุภาพของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงในประเทศไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ. สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
- [2] Hui S, Jianping W, Xiaona C. and Yan-zhen W., 2011. **Research on Electromagnetic Shielding Clothing.** Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless technology conference (volume: 1 - (26-30 July 2011)) . 211-213. ISBN: 978-1-4244-9792-8.
- [3] ณัฐดนัย รุ่งเรืองกิจไกร, รัตนพล มงคลรัตนาสีธิ, นิตยา ทับทิมทัย, ศิริอร วนิชโชตยานนท์, จริญญา คล้ายจ้อย, เสาวนีย์ อารีจงเจริญ, ก้องเกียรติ เหมอินทร์, สาคร ชลสาครและกิตติยาพรณ โพธิ์ล้ำ, 2555. วัสดุสิ่งทอสำหรับการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (ตอนที่1). Colourway. 18 (104) (Jan-Feb 2013) : 23-26. ISSN: 0859-1849.
- [4] ศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (PTEC), 2557: แฟ้มข้อมูลคอมพิวเตอร์
- [5] Taiwan Textile Federation. Specified Requirements of Electromagnetic Shielding. (online), เข้าถึงได้จาก : www.ftts.org.tw/images/fa003E.pdf (3 มีนาคม 2005)

การออกแบบและสร้างเครื่องแยกเนื้อตาลสุก

Design and Fabrication of A Ripe Palmyra Fruit Pulp Separating Machine

จตุรงค์ ลังกาพินธุ์^{1*} สุนัน ปานสาคร¹ ภูรินทร์ อัครกุลธร² สุกฤษฎ์ สร้อยแมน¹ และศุภณัฐ สร้อยแมน¹
jaturong.l@en.rmutt.ac.th¹, sunan.p@en.rmutt.ac.th¹, Purin4907@yahoo.com²

บทคัดย่อ

เครื่องแยกเนื้อตาลสุกถูกออกแบบและสร้างขึ้นเพื่อลดเวลาและแรงงานในการแยกเนื้อตาลสุก เครื่องต้นแบบประกอบด้วย โครงสร้างเครื่อง ชุดแยกเนื้อตาลมีลักษณะเป็นตะแกรงหมุนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 450 มิลลิเมตร ระบบส่งกำลัง และใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 1 แรงม้าเป็นต้นกำลัง การทำงานของเครื่องเริ่มจากผู้ทำงานป้อนลูกตาลสุกและน้ำสะอาดเข้าในช่องป้อนทางด้านหน้าของเครื่อง หลังจากนั้นลูกตาลสุกจะเข้าสู่ชุดแยกเนื้อตาล เนื้อตาลที่ผ่านการแยกเนื้อจะไหลลงสู่ช่องทางออกด้านหน้าของเครื่อง จากผลการทดสอบพบว่าเครื่องต้นแบบสามารถทำงานได้ดีที่ความเร็วรอบของชุดแยกเนื้อตาล 280 รอบต่อนาที มีเปอร์เซ็นต์การแยกเนื้อตาลสุก $96.8 \pm 0.3\%$ ความสามารถในการทำงาน 37.9 ± 0.6 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และมีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า 0.72 กิโลวัตต์-ชั่วโมง จากการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมพบว่าเมื่อใช้เครื่องต้นแบบทำงาน 1,440 ชั่วโมงต่อปี มีค่าใช้จ่ายเฉลี่ยของเครื่อง 3 บาทต่อกิโลกรัม ระยะเวลาคืนทุน 40 วัน และการใช้งานที่จุดคุ้มทุน 32 ชั่วโมงต่อปี

คำสำคัญ : ต้นตาล, ลูกตาลสุก, เนื้อตาลสุก, เครื่องแยก

ABSTRACT

A ripe palmyra fruit pulp separating machine was designed and fabricated to reduce the separating time and the number of labor for the ripe palmyra fruit pulp separating. The prototype consisted of main frame, separating unit. Diameter of separating rotor was 450 mm. The power transmission unit and 1 Hp electric motor was used as a prime mover. The ripe palmyra fruit and fresh water were fed manually into feeding chute at the front of the machine. Then the pulp and other part of fruit were separated by separating unit, and the pulp fell through

¹ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 39 หมู่ 1 ต. คลองหก อ. ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110 โทรศัพท์: +66(2)-549-3328 โทรสาร: +66(2)-549-3581 E-mail: * jaturong.l@en.rmutt.ac.th;

²ภาควิชาเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปอาหาร คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

the chute in front of the machine. Testing results indicated that the best separating quality was obtained when the machine was operated at 280 rpm separating rotor speed. The percentage of separation was found to be $96.8 \pm 0.3\%$ at working capacity of 37.9 ± 0.6 kg/hour where the energy consumption was 0.72 kW-hour. Based on engineering economical analysis, the machine cost was found to be 3 Bath/kg, payback period was 40 days and the break-even point of the machine was 32 hour per year at the annual use of 1, 440 hour per year.

Keyword: Asian Palmyra Palm, Ripe Palmyrah Fruit, Palmyrah Fruit Pulp, Separating Machine

1. คำนำ

ตาลโตนดเป็นปาล์มชนิดหนึ่งพบได้ทั่วไปในประเทศไทย เช่น จังหวัดสงขลา เพชรบุรี ราชบุรี สุพรรณบุรี นครปฐม ชัยนาท พิษณุโลก และจังหวัดอื่น ๆ [1, 2] ประโยชน์จากส่วนต่าง ๆ ของตาลโตนดมีมากมายตั้งแต่ ราก ลำต้น ใบ ดอก และผล โดยรากนำมาทำยา ลำต้นนำมาทำตะเกียบ ใบนำมาทำกระดาด น้ำตาลจากงวงตาลนำมาทำน้ำตาลสด ผลตาลอ่อนนำมาใช้ในอุตสาหกรรมผลไม้ในน้ำเชื่อม บรรจุกระป๋อง ผลตาลสุกนำมาใช้กับน้ำหรือเรียกว่า เนื้อตาลยี ผลผลิตจากต้นตาลเป็นสินค้าเกษตรที่ช่วยเพิ่มรายได้เสริมให้กลุ่มเกษตรกรที่ปลูกตาลไว้ตามคันนา หรือเป็นรายได้หลักให้แก่เกษตรกรที่ปลูกตาลในเชิงพาณิชย์ เช่น เกษตรกร อำเภอบ้านลาด จังหวัดเพชรบุรี หรือ กลุ่มแม่บ้านเกษตรกร อำเภอดำรงวิทยะ จังหวัดพิษณุโลก [3] เนื้อตาลยีจะนำไปใช้เป็นส่วนผสมอาหารในขนมต่าง ๆ เช่น บัวลอยลูกตาล ขนมขี้หนู และไอศกรีม [2] โดยเฉพาะนำไปทำขนมตาล ซึ่งเป็นขนมพื้นบ้านของไทยที่มีจำหน่ายทั่วไป [4] ยังเป็นสินค้าโอท็อปชื่อดัง เช่น ขนมตาลป่าไข่ [5] ของตลาดนัดดอนหวาย อำเภอสามพราณ จังหวัดนครปฐม

วิธีการยีเนื้อตาลออกจากลูกตาลสุกของเกษตรกร หรือผู้ประกอบการที่ยีเนื้อตาลขายในปัจจุบัน จะใช้มีดหรือมือฉีกขั้วและเปลือกออกเพื่อเอาเต้าของลูกตาลสุก (แต่ละผลจะมี 1-4 เต้า) แล้วนำเต้าตาลสุกมาแยกเนื้อที่ติดอยู่ในเส้นใยของตาลโดยใช้ตะแกรงหรือตะกร้าเพื่อแยกเนื้อตาลสุกออกมามีดังรูปที่ 1 [6, 7] ต่อจากนั้นนำเนื้อตาลที่ได้ไปเทลงในผ้าขาวบางผูกเชือกแล้วก็นำแขวนทิ้งไว้ประมาณ 8-10 ชั่วโมง เพื่อให้ น้ำที่ปนอยู่ในเนื้อตาลหยดลงมาจนหมด เหลือแค่เพียงเนื้อตาลเพียงอย่างเดียว แล้วนำเนื้อตาลที่ได้ไปแปรรูปหรือจำหน่ายต่อไป ซึ่งจะเห็นว่าขั้นตอนดังกล่าวยังใช้แรงงานคนเป็นหลัก ทำให้เสียเวลาและแรงงานในการแยกเนื้อตาลสุกค่อนข้างมาก จึงทำให้ผู้ขายบางรายนำเนื้อมะละกอหรือเนื้อฟักทองมาผสมเนื้อตาลเพื่อเพิ่มปริมาณในการจำหน่าย ทำให้คุณภาพของเนื้อตาลต่ำลง และจะเกิดสีดำถ้าเก็บไว้นาน เมื่อนำไปทำขนมตาลรสชาติจะไม่อร่อยจากการสืบค้นข้อมูลและสอบถามจากผู้ประกอบการที่ยีเนื้อตาลสุกขาย ยังไม่พบว่ามีเครื่องจักรกลที่ใช้ในการยีตาลสุกโดยเฉพาะ แต่มีการประยุกต์ใช้เครื่องซักผ้า หรือเครื่องกวนซึ่งแยกเนื้อตาลได้ไม่ค่อยดีและไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในการผลิต

วัตถุดิบที่นำไปทำอาหาร ดังนั้นจึงควรวิจัยเพื่อสร้างเครื่องแยกเนื้อตาลสุก สำหรับใช้ทดแทนแรงงานคน แก้ไขปัญหาดังกล่าวข้างต้น และช่วยพัฒนาผลิตภัณฑ์วิสาหกิจชุมชนของประเทศไทยให้มีความเข้มแข็งต่อไป



รูปที่ 1 วิธีการแยกเนื้อตาลสุกของเกษตรกร

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 ศึกษาข้อมูลที่เป็นต่อการออกแบบ

ก) ศึกษาปัญหาในขั้นตอนการแยกเนื้อตาลสุกในปัจจุบัน

วัตถุประสงค์เพื่อให้ทราบถึงปัญหาและข้อมูลในการแยกเนื้อตาลสุกของเกษตรกรหรือผู้ประกอบการ เพื่อใช้วิเคราะห์ค่าใช้จ่ายเชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม จากการศึกษาพบว่าค่าแรงงานในการแยกเนื้อตาลสุก 300 บาทต่อวัน เกษตรกรหนึ่งคนสามารถแยกเนื้อตาลสุกได้ 5.4 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ขณะทำงานมีความเหนื่อยล้าและไม่ปลอดภัย เช่น เกิดอุบัติเหตุจากคมของตะแกรงหรือตะกร้า

ข) การศึกษาลักษณะทางกายภาพของเต้าตาลสุก

วัตถุประสงค์เพื่อให้ทราบถึงลักษณะทางกายภาพของเต้าตาลสุกได้แก่ ความยาว ความกว้าง และความหนาของเต้าตาลสุกที่มีขนาดใหญ่มากและเล็กสุด ดังรูปที่ 2 สำหรับใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบชุดแยกเนื้อตาลสุกและการปรับตั้งระยะต่าง ๆ ที่จำเป็นของเครื่องต้นแบบ จากการศึกษาโดยสุ่มวัด

เต้าตาลสุกจำนวน 50 ลูก ด้วยเวอร์เนียคาร์ลิปเปอร์ พบว่าความกว้างของเต้าตาลสุกมีค่าระหว่าง 75-86 มิลลิเมตร มีค่าเฉลี่ย 80.1 ± 3.2 มิลลิเมตร ความยาวของเต้าตาลสุกมีค่าระหว่าง 92-155 มิลลิเมตร มีค่าเฉลี่ย 119.9 ± 18.5 มิลลิเมตร และความหนาของเต้าตาลสุกมีค่าระหว่าง 40-60 มิลลิเมตร มีค่าเฉลี่ย 59.9 ± 6.1 มิลลิเมตร ซึ่งจากผลการวัดดังกล่าวจึงได้ออกแบบขนาดรูของถังแยกเนื้อตาลสุกให้มีขนาดเล็กกว่าความหนาของเต้าตาลสุกเพื่อไม่ให้เนื้อตาลสุกและเมล็ดตาลปะปนกันหลังจากที่ชุดแยกเนื้อตาลสุกได้แยกเนื้อตาลออกจากเมล็ดแล้ว



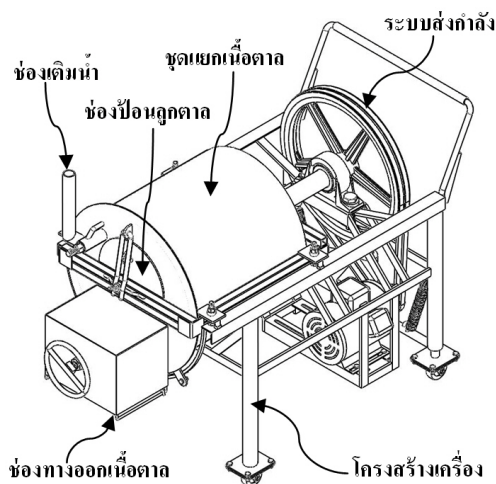
รูปที่ 2 ลักษณะทางกายภาพของเต้าตาลสุก

2.2 ออกแบบและสร้างเครื่องแยกเนื้อตาลสุกต้นแบบ

หลังจากการรวบรวมข้อมูลที่เป็นต่อการออกแบบ เครื่องต้นแบบได้ถูกออกแบบโดยใช้หลักการออกแบบทางวิศวกรรม [8, 9] และใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบและเขียนแบบ [10] ซึ่งเครื่องต้นแบบประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก คือ โครงสร้างเครื่อง ชุดแยกเนื้อตาลสุกที่สร้างจากสแตนเลส ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกระบอกสองชั้นยาว 400 มิลลิเมตร ชั้นในมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 400 มิลลิเมตร และเจาะรูขนาด 25 มิลลิเมตรโดยรอบพื้นผิวของทรงกระบอกทำหน้าที่หมุนแยกเนื้อตาลสุกออกจากเมล็ด ส่วนชั้นนอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 450 มิลลิเมตร โดยใช้พูลเลย์และสายพานเป็นอุปกรณ์ส่งกำลังจากมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด

1 แร่มา ไปยังชุดแยกเนื้อตาล ดังรูปที่ 3 (ก)

การทำงานของเครื่องเริ่มจากผู้ควบคุมเครื่อง ป้อนลูกตาลสุกเข้าไปในช่องป้อนลูกตาลทางด้านหน้าของเครื่องและเติมน้ำสะอาดทางช่องเติมน้ำเข้าสู่ชุดแยกเนื้อตาลให้ท่วมลูกตาล แล้วเปิดเครื่อง ชุดแยกเนื้อตาลจะหมุนแยกเนื้อตาลสุกออกจากเมล็ด และเมื่อผู้ควบคุมเปิดช่องทางออกทางด้านหน้าของเครื่องเนื้อตาลที่ถูกแยกออกจากเมล็ดแล้วจะไหลลงสู่ภาชนะรองรับ ซึ่งเครื่องต้นแบบที่สร้างเสร็จแสดงดังรูปที่ 3 (ข)



ก) แบบเครื่องต้นแบบด้วยโปรแกรมด้าน CAD



ข) เครื่องแยกเนื้อตาลสุกต้นแบบ
รูปที่ 3 แบบและเครื่องแยกเนื้อตาลสุกต้นแบบ

2.3 ทดสอบและประเมินสมรรถนะเครื่องต้นแบบ

เครื่องต้นแบบได้ถูกทดสอบและประเมินสมรรถนะในการทำงาน รวมทั้งคุณภาพในการแยกเนื้อตาลสุก โดยใช้เปอร์เซ็นต์การแยกเนื้อตาลสุก ความสามารถในการทำงาน และอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า เป็นค่าชี้ผลการศึกษา ซึ่งคำนวณได้จากสมการดังนี้

1) เปอร์เซ็นต์การแยกเนื้อตาลสุก (%)

$$\frac{\text{น้ำหนักเนื้อตาลสุกที่ได้จากการแยก}}{\text{น้ำหนักของเนื้อตาลสุกทั้งหมด}} \times 100 \quad (1)$$

2) ความสามารถในการทำงาน (kg/hr)

$$\frac{\text{น้ำหนักของเนื้อตาลสุกที่แยกได้ทั้งหมด}}{\text{เวลาในการทำงานทั้งหมด}} \quad (2)$$

3) อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า (kW-hr)

อ่านค่าอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจากอุปกรณ์ กิโลวัตต์-ชั่วโมงมิเตอร์ที่ต่อกับมอเตอร์ไฟฟ้าของเครื่องต้นแบบขณะทดสอบ

ใช้ลูกตาลสุกพันธุ์สมความกว้างเฉลี่ยของเต้าตาลสุกมีค่าเท่ากับ 80 ± 2.6 มิลลิเมตร ความยาวเฉลี่ยของเต้าตาลสุกเท่ากับ 120 ± 19 มิลลิเมตร และความหนาเฉลี่ยของเต้าตาลสุกเท่ากับ 50 ± 6 มิลลิเมตร (สุ่มวัด 25 ลูก) ตลอดการทดสอบ จากการทดสอบเบื้องต้นพบว่าเมื่อเดินเครื่องที่ความเร็วชุดแยกมากกว่า 280 รอบต่อนาที เครื่องจะเริ่มสั่นสะเทือน ดังนั้นจึงได้เลือกทดสอบเครื่องต้นแบบที่ความเร็วของชุดแยกเนื้อตาลสุกที่ 220, 250 และ 280 รอบต่อนาที ตามลำดับ โดยแต่ละการทดลองจะใช้เต้าตาล 5-6 กิโลกรัม ทำซ้ำ 3 ซ้ำ บันทึกเวลาในการทำงานทั้งหมด กำลังไฟฟ้าที่ใช้ น้ำหนักของเนื้อตาลสุกที่ได้จากการแยก

ด้วยเครื่องและน้ำหนักเนื้อตาลสุกทั้งหมด เพื่อคำนวณค่าสัมผลการศึกษา และหาค่าใช้จ่ายระยะเวลาคืนทุน และจุดคุ้มทุน ในการใช้เครื่องแยกเนื้อตาลสุก

2.4 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์

2.4.1 การวิเคราะห์และประเมินค่าใช้จ่ายโดยเฉลี่ย

วิธีการประเมินค่าใช้จ่ายโดยรวมเกี่ยวกับต้นทุนในการใช้งานเครื่องแยกเนื้อตาลสุก สมมติว่าเกษตรกรซื้อเครื่องแยกเนื้อตาลสุกแทนวิธีการใช้แรงงานคน ซึ่งค่าใช้จ่ายโดยรวมจะประกอบด้วยต้นทุนคงที่ (Fixed cost) และต้นทุนผันแปร (Variable cost) โดยต้นทุนคงที่ได้แก่ ค่าเสื่อมราคาของเครื่อง (คิดค่าเสื่อมราคาโดยวิธีเส้นตรงเมื่อประมาณอายุการใช้งานของเครื่องแยกเนื้อตาลสุกได้ 5 ปี) และค่าเสียโอกาสของเงินทุน (คิดอัตราดอกเบี้ย 10%) ซึ่งค่าใช้จ่ายที่เป็นต้นทุนคงที่จะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณของการแยกเนื้อตาลสุก [11]

2.4.2 การวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุน (Pay-back period)

เป็นการคาดคะเนว่า เมื่อลงทุนใช้เครื่องแยกเนื้อตาลสุกไปแล้ว จะได้รับผลตอบแทนกลับคืนมาในจำนวนเงินเท่ากับที่ลงทุนไปแล้วภายในระยะกี่ปี โดยคิดจากราคาในการลงทุนซื้อเครื่องแยกเนื้อตาลสุกหารกับผลประโยชน์สุทธิที่คาดว่าจะได้รับในการใช้งานเครื่องแยกเนื้อตาลสุก 5 ปี [11]

2.4.3 การวิเคราะห์จุดคุ้มทุน (Break-even point)

เป็นการคำนวณหาจุดคุ้มทุนในการใช้เครื่องแยกเนื้อตาลสุกต้นแบบ โดยการเปรียบเทียบระหว่างต้นทุนในการแยกเนื้อตาลสุกจากการใช้เครื่องต้นแบบและการแยกเนื้อตาลด้วยแรงงานคน

3. ผลการวิจัย

รูปที่ 4 แสดงเม็دتาลสุกก่อนการทดสอบ

(ก) ซึ่งหลังจากได้นำเม็دتาลสุกไปทดสอบโดยเครื่องแยกเนื้อตาลสุกต้นแบบแล้ว จะได้เนื้อตาลสุก (ข) ที่พร้อมจะนำไปจำหน่ายหรือแปรรูป และยังได้เม็دتาลที่มีเส้นใยเหลือติดอยู่ (ค) ซึ่งเกษตรกรจะนำไปเพาะเพื่อให้เกิดจาวตาลสำหรับนำไปทำขนมต่อไป

ผลการทดสอบเครื่องแยกเนื้อตาลสุก ที่ความเร็วรอบของชุดแยกเนื้อตาลสุกต่าง ๆ จะนำเสนอตามค่าสัมผลการศึกษา ดังนี้



ก) เม็دتาลก่อนการทดสอบ

ข) เนื้อตาลสุกที่ใส่ถังหลังการทดสอบ



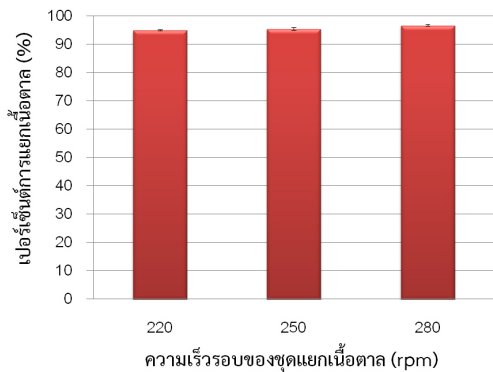
ค) เม็دتาลหลังจากการทดสอบ

รูปที่ 4 ลักษณะของลูกตาลสุกก่อนและหลังการทดสอบ

3.1 เพอร์เซ็นต์การแยกเนื้อตาลสุก

จากการทดสอบเครื่องแยกเนื้อตาลสุก ที่ความเร็วรอบของชุดแยกเนื้อตาลสุกต่าง ๆ พบว่าที่ความเร็วรอบของชุดแยกเนื้อตาลสุก 220, 250 และ 280 รอบต่อนาที เครื่องต้นแบบสามารถแยกเนื้อตาลสุกได้ 94.9 ± 0.2 , 95.5 ± 0.5 และ 96.8 ± 0.3 % ตามลำดับ ดังรูปที่ 5 ซึ่งผลการทดสอบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า เพอร์เซ็นต์การแยกเนื้อตาลสุกจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วรอบของชุดแยกเนื้อตาลสุก เนื่องจากแรงเหวี่ยงที่เพิ่มขึ้นตามความเร็วรอบการหมุนของชุดแยกเนื้อตาล ทำให้เม็دتาลเกิดการขจัดสี

กับถังแยกและระหว่างเม็ดตาลด้วยกันเองมากขึ้น เป็นผลให้เนื้อตาลแยกออกจากเม็ดได้มากขึ้นตาม อย่างไรก็ตาม ความเร็วในการทำงานของชุดแยกเนื้อตาลสูงไม่ควรเกิน 280 รอบต่อนาที เนื่องจากเครื่องต้นแบบจะเกิดการสั่นสะเทือน ซึ่งอาจจะเป็นต้นเหตุให้ชิ้นส่วนของเครื่องแยกเนื้อตาลสูงเกิดความเสียหายได้

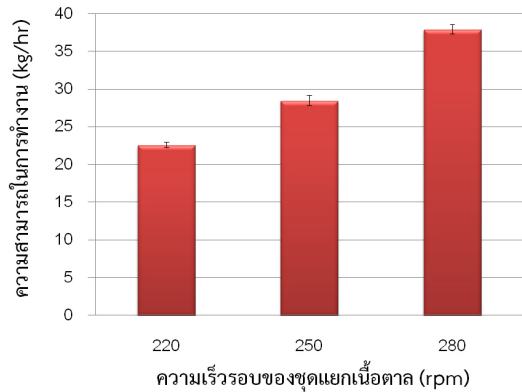


รูปที่ 5 เปอร์เซนต์การแยกเนื้อตาลที่ความเร็วรอบของชุดแยกเนื้อตาลต่าง ๆ

3.2 ความสามารถในการทำงานของเครื่อง

ผลการทดสอบ ดังรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่าที่ความเร็วรอบของชุดแยกเนื้อตาลสูง 220, 250 และ 280 รอบต่อนาที เครื่องต้นแบบสามารถทำงานได้ 22.6 ± 0.4 , 28.5 ± 0.7 และ 37.9 ± 0.6 กิโลกรัมชั่วโมง ตามลำดับ

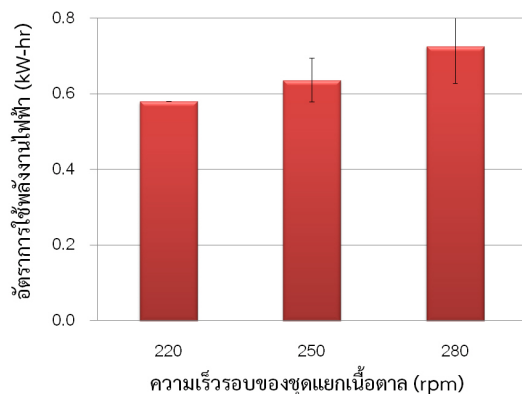
ความเร็วรอบของชุดแยกเนื้อตาลสูงที่เหมาะสมในการทำงาน คือ 280 รอบต่อนาที มีความสามารถในการทำงานของเครื่องเฉลี่ย 37.9 กิโลกรัมชั่วโมง หรือคิดเป็น 303.2 กิโลกรัมต่อวัน (1 วันทำงาน 8 ชั่วโมง) เมื่อเปรียบเทียบกับ การแยกเนื้อตาลสูงของเกษตรกรที่ทำงานได้เพียง 43.2 กิโลกรัมต่อวัน จะเห็นว่าเครื่องต้นแบบสามารถทำงานได้มากกว่าเกษตรกรถึง 260 กิโลกรัมต่อวัน



รูปที่ 6 ความสามารถในการทำงานที่ความเร็วรอบของชุดแยกเนื้อตาลต่าง ๆ

3.3 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า

จากการทดสอบดังรูปที่ 7 จะเห็นว่าช่วงความเร็วรอบที่ใช้ขับชุดแยกเนื้อตาลสูง ทั้งสามความเร็ว มีการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามความเร็วการหมุนของชุดแยกเนื้อตาลสูง มีค่าระหว่าง 0.57-0.72 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ซึ่งจะนำค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ความเร็วการหมุนของชุดแยกเนื้อตาลสูง 280 รอบต่อนาที เท่ากับ 0.72 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ไปเป็นค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมต่อไป



รูปที่ 7 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าที่ความเร็วรอบของชุดแยกเนื้อตาลต่าง ๆ

3.5 ผลการวิเคราะห์และประเมินผลเชิงเศรษฐศาสตร์

จากผลการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม โดยคิดที่ราคาเครื่องต้นแบบ 29,000 บาท อายุการใช้งาน 5 ปี อัตราดอกเบี้ย 10% ใช้ผู้ควบคุมเครื่อง 1 คน ความสามารถในการทำงาน 37.9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า 0.72 กิโลวัตต์-ชั่วโมง เมื่อใช้เครื่องต้นแบบทำงาน 6 เดือน หรือ 1,440 ชั่วโมงต่อปี (ทำงานวันละ 8 ชั่วโมง) มีค่าใช้จ่ายเฉลี่ยของเครื่อง 3 บาทต่อกิโลกรัม ระยะเวลาคืนทุน 40 วัน และการทำงานที่จุดคุ้มทุน 32 ชั่วโมงต่อปี เมื่อเปรียบเทียบกับแรงงานคน 1 คน มีค่าใช้จ่ายเฉลี่ย 8 บาทต่อกิโลกรัม

4. สรุปผลการทดลอง

จากการทดสอบสมรรถนะของเครื่องแยกเนื้อตาลสุกโดยใช้ค่าชี้ผลการศึกษา คือ เปอร์เซ็นต์การแยกเนื้อตาลสุก ความสามารถในการทำงาน และอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า พบว่าเครื่องต้นแบบสามารถทำงานได้ดีที่ความเร็วรอบของชุดแยกเนื้อตาล 280 รอบต่อนาที มีเปอร์เซ็นต์การแยกเนื้อตาลสุก $96.8 \pm 0.3\%$ ความสามารถในการทำงาน 37.9 ± 0.6 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และมีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า 0.72 กิโลวัตต์-ชั่วโมง จากการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม พบว่าเมื่อใช้เครื่องต้นแบบทำงาน 1,440 ชั่วโมงต่อปี มีค่าใช้จ่ายเฉลี่ยของเครื่อง 3 บาทต่อกิโลกรัม ระยะเวลาคืนทุน 40 วัน และการทำงานที่จุดคุ้มทุน 32 ชั่วโมงต่อปี สามารถที่จะพัฒนาเครื่องต้นแบบเพื่อนำไปใช้ทดแทนแรงงานคนได้ต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่สนับสนุนงบประมาณและสถานที่ในการวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] พจน์ สัจจะ, 2540. **ชุดสารคดีอาหาร: โลกวัฒนธรรมของอาหาร**. สำนักพิมพ์แสงแดด, กรุงเทพฯ. 175 น.
- [2] Wikipedia. **ตาล**, [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <http://th.wikipedia.org> (15 กุมภาพันธ์ 2557) .
- [3] ทวีศักดิ์ ชัยเรืองยศ, **ตาลโตนด**. เทคโนโลยีชาวบ้าน, หนังสือพิมพ์มติชน, [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <http://info.matichon.co.th/techno/> (15 มีนาคม 2557) .
- [4] เขวาลี ชุมขำ, **ขนมตาล ขนมใบทองยังขายดี**, [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <http://www.dailynews.co.th/article> (15 กุมภาพันธ์ 2557) .
- [5] ขนมตาลป่าไข่. **ขนมตาลป่าไข่ของดีตลาดน้ำดอนหวาย อำเภอสามพราน จังหวัดนครปฐม**, [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <http://kanomthaipakhai.blogspot.com> (15 กุมภาพันธ์ 2557) .
- [6] ครั้วบ้านพิม. **วิธียี่ลูกตาล เพื่อไว้ทำขนมตาล**, [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <http://pim.in.th/tip-in-kitchen> (15 กุมภาพันธ์ 2557) .
- [7] ศิรินันท์. **วิธีทำขนมตาล**, [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <http://www.bansuanpor-peang.com> (15 กุมภาพันธ์ 2557) .

- [8] Krutz, G., Thomson, L., Claar, P. 1994. **Design of Agricultural Machinery.** John Wiley and Sons. New York Chicheter Brisbane, Toronto, Singapore. 472 P.
- [9] Shigley, J.E., Mischke, C.R. 1989. **Mechanical Engineering Design.** 5th Edition, McGraw-Hill Book Company, USA. 779 P.
- [10] จตุรงค์ ลังกาพินิจ. 2555. **ออกแบบและเขียนแบบวิศวกรรมด้วยโปรแกรม SolidWorks** (ฉบับเรียนได้ด้วยตัวเอง). สำนักพิมพ์ทริปเพิ้ล เอ็ดดูเคชั่น จำกัด. 192 หน้า.
- [11] Hunt, D. 2001. **Farm Power and Machinery.** (10th Edition). Ames, Iowa, USA: Iowa State University Press.

**ผลกระทบของเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์อิสระสูง
ต่อคุณสมบัติด้านซีเมนต์ และการหดตัวแบบออโตจีนัส
และแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย**
**Effect of High Free Lime Content in Fly Ash on Cementitious
Properties and Autogenous and Drying Shrinkages
of Fly Ash Mixtures**

ปิติศานต์ กร้ามาตร¹ สมโชค สุขแย้ม² ปานเทพ จุลนิพิฐวงษ์³

รำพึง ชัยหลี่เจริญ⁴ และสมนึก ตั้งเต็มสิริกุล⁵

pitisan.k@en.rmutt.ac.th¹, choke_co@windowlive.com², parnthep@siit.tu.ac.th³,
rumpueng.c@en.rmutt.ac.th⁴, somnuk@siit.tu.ac.th⁵

บทคัดย่อ

บทความนี้มุ่งศึกษาผลกระทบของเถ้าลอยที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์สูง ต่อคุณสมบัติด้านซีเมนต์ และการหดตัวแบบออโตจีนัสและแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย โดยใช้เถ้าลอยที่มีปริมาณ Free lime ต่างกัน 3 ชนิด (เถ้าลอยตั้งต้น) และเถ้าลอยที่มีการเติมผง Free lime ให้มีปริมาณสูงร้อยละ 5 และ 10 ในเถ้าลอยตั้งต้นทั้ง 3 ชนิด และแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 20 และ 40 เพื่อศึกษาคุณสมบัติด้านซีเมนต์ และการหดตัวแบบออโตจีนัสและแบบแห้งของมอร์ตาร์ ผลการศึกษาพบว่า คุณสมบัติด้านซีเมนต์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมกับเถ้าลอยที่มีปริมาณ Free lime สูง ทำให้ปริมาณน้ำที่เหมาะสมมากขึ้น ระยะเวลาการก่อตัวเร็วขึ้น และกำลังอัดประลัยในช่วงอายุต้นดีขึ้น นอกจากนี้พบว่า การหดตัวแบบออโตจีนัสและแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยทั้งที่มีปริมาณ Free lime ต่ำ และ Free lime สูง มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนการเติมปริมาณ Free lime ในเถ้าลอยให้มีปริมาณไม่เกินร้อยละ 5 ไม่มีผลกระทบต่อ การหดตัวแบบออโตจีนัสและแบบแห้งของมอร์ตาร์

คำสำคัญ: แคลเซียมออกไซด์อิสระ คุณสมบัติด้านซีเมนต์ การหดตัวแบบออโตจีนัส การหดตัวแบบแห้ง

¹ผู้ช่วยศาสตราจารย์

²นักศึกษาปริญญาโท

³อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

⁴นักวิจัย ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

⁵ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยีโยธา สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

Abstract

This paper aims to study the effect of high free lime content in fly ash on the cementitious properties and autogenous and drying shrinkages of fly ash mortars. Three original fly ashes with different free lime content were used. The addition of free lime powder to those original fly ashes was applied for making 5% and 10% of free lime contents. The replacement ratios of fly ash in ordinary Portland cement (OPC) were 20% and 40%. The cementitious properties, autogenous shrinkages of mortar and drying shrinkage of mortar were studied. The study found that pastes with high free lime content of fly ash results in higher normal consistency, earlier setting time and higher compressive strength at early age. Moreover, the autogenous and drying shrinkages of fly ash mortars for both high and low free lime contents are lower than those of OPC mortar. The additions of free lime in fly ash without exceeding 5% content do not affect the autogenous and drying shrinkages of mortars.

Keywords: free lime, cementitious properties, autogenous shrinkage, drying Shrinkage.

1. บทนำ

ในปัจจุบันการก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีการนำเถ้าลอยมาใช้ประโยชน์ในงานคอนกรีตอย่างแพร่หลาย การนำเถ้าลอยมาใช้ประโยชน์นั้นมีส่วนช่วยในการลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ลง ซึ่งมีผลทำให้ลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ มีส่วนช่วยในการบรรเทาปัญหาสภาวะโลกร้อน นอกจากนี้ยังสามารถพัฒนาคุณสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้น เช่น ความสามารถในการเทของคอนกรีต ลดอุณหภูมิอันเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ลดการซึมผ่าน ลดการกัดกร่อนจากสารละลายซัลเฟต และเพิ่มกำลังอัดประลัยในระยะยาว และจากการสืบค้นผลงานวิจัย [1, 2, 3 และ 4] ซึ่งให้ผลในแนวทางเดียวกัน กล่าวคือการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลาน (Pozzolan materials) เช่น เถ้าลอย และตะกรันเตาถลุงเหล็ก เป็นต้น ในอัตราส่วนที่

เหมาะสม สามารถทำให้คอนกรีตมีความคงทนขึ้น อย่างไรก็ตามปัจจัยบางอย่างก็ให้ผลในด้านลบได้เช่นกัน ตัวอย่างเช่น คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ในปูนซีเมนต์จะดีกว่าไม่มีการแทนที่เมื่อสัมผัสกับสารละลายโซเดียมซัลเฟต แต่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต กลับแย่กว่าเมื่อเทียบกับการไม่แทนที่ เป็นต้น

จากการพิจารณาผลวิเคราะห์ตัวอย่างถ่านหินโรงไฟฟ้าแม่เมาะ พบว่าปริมาณเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินมีแนวโน้มที่จะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์อิสระ (Free lime) สูงขึ้น ซึ่งการใช้เถ้าลอยเหล่านี้ในงานคอนกรีตมีข้อดีคือกำลังอัดประลัยในช่วงอายุต้นนั้นดีขึ้น [5] แต่อาจส่งผลเสียต่อคุณสมบัติของคอนกรีตได้โดยเฉพาะคุณสมบัติด้านการขยายตัว เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณ Free lime ทำให้เกิดการขยายตัวเพิ่มขึ้น [6] รวมทั้งมีผลกระทบต่อคุณสมบัติด้านอื่น ๆ ของคอนกรีตเช่นกัน ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของปริมาณ Free lime

ในแง่ลดย่อมส่งผลให้ผู้ใช้นั่นใจในการนำแ้ลลยดังกล่าวไปใช้งาน

จากปัญหาดังกล่าวข้างต้นจึงได้ทำการศึกษาหาปริมาณ Free lime ในแ้ลลยที่ไม่ส่งผลเสียในการนำไปใช้ในงานคอนกรีต โดยศึกษาผลกระทบของแ้ลลยที่มี Free lime สูงต่อคุณสมบัติด้านซีเมนต์ การหดตัวแบบออโตจีนัส และแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมแ้ลลยที่มีปริมาณ Free lime ต่างกัน 3 ชนิด และแ้ลลยที่มีการเติมผง Free lime ให้มีปริมาณสูงในแ้ลลยตั้งต้นทั้ง 3 ชนิด โดยใช้แ้ลลยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนต่างกัน

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แ้ลลยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะจังหวัดลำปาง ซึ่งมี 3 ชนิดคือ F(A) มีปริมาณ Free lime ร้อยละ 1.71 F(B) มีปริมาณ Free lime ร้อยละ 3.93 และ F(C) มีปริมาณ Free lime ร้อยละ 3.06 มวลรวมใช้ทรายน้ำจืดขนาดคละทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C33

สำหรับองค์ประกอบทางเคมี (โดยวิธี X-Ray Diffractometer: XRD) ความถ่วงจำเพาะ (ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C188) และความละเอียดโดยวิธีเบลน (ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C204) ของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาแสดงในตารางที่ 1 และตารางที่ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ) ของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

รายการ	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	แ้ลลย		
		F(A)	F(B)	F(C)
SiO ₂	18.93	35.71	26.61	25.22
Al ₂ O ₃	5.51	20.44	13.60	13.88
Fe ₂ O ₃	3.31	15.54	18.34	17.39
CaO	65.53	16.52	24.97	26.25
MgO	1.24	2.00	2.33	2.38
Na ₂ O	0.15	1.15	1.75	1.40
K ₂ O	0.31	2.41	1.77	1.92
SO ₃	2.88	4.26	8.53	9.44
LOI	-	0.49	0.53	0.56
Free Lime	-	1.71	3.93	3.06

ตารางที่ 2 ความถ่วงจำเพาะและความละเอียดเบลนของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

รายการ	ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1	แ้ลลย			ผง Free lime
		F(A)	F(B)	F(C)	
ความถ่วงจำเพาะ	3.15	2.21	2.57	2.57	2.96
ความละเอียดเบลน, ซม. ² /ก.	3,100	2,867	2,820	2,723	3,749

2.2 รายละเอียดวิธีการศึกษา

2.2.1 การเตรียมแ้ลลย

การศึกษาลักษณะของแ้ลลยที่มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์อิสระสูงต่อคุณสมบัติด้านซีเมนต์ และการหดตัวแบบออโตจีนัสและแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมแ้ลลยโดยใช้แ้ลลยที่มีปริมาณ Free lime ต่างกัน 3 ชนิดคือ F(A) F(B) และ F(C) และแ้ลลยที่มีการเติมผง Free lime ให้มีปริมาณสูงในแ้ลลยตั้งต้นทั้ง 3 ชนิด เท่ากับร้อยละ 5 (F(A5) F(B5) และ F(C5)) และ

ร้อยละ 10 (F(A10) F(B10)) และ F(C10)) ซึ่งการเติมผง Free lime ในเถ้าลอยสามารถทำได้และให้ผลไม่แตกต่างกับเถ้าลอยตั้งต้นที่มีปริมาณ Free lime อยู่แล้ว [1]

2.2.2 คุณสมบัติด้านซีเมนต์ของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

คุณสมบัติด้านซีเมนต์ประกอบด้วย ปริมาณน้ำที่เหมาะสม (ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C187) ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ (ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C191) และ กำลังอัดประลัยของมอร์ตาร์ (ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C109)

2.2.3 คุณสมบัติด้านการหดตัวแบบออโตจีนัสและแบบแห้งของมอร์ตาร์

สำหรับคุณสมบัติด้านการหดตัวแบบออโตจีนัสและแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยนั้น การหดตัวแบบออโตจีนัส (ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C157) เมื่อหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์เสร็จแล้วให้นำมาหุ้มด้วยพลาสติก เพื่อไม่ให้น้ำระเหยออก เมื่อครบ 1 วัน แกะแบบออกแล้วหุ้มด้วยพลาสติกและห่อด้วยฟอยอีกชั้นหนึ่ง แล้ววัดความยาวเริ่มต้น ในขณะการหดตัวแบบแห้ง (ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C596) หลังจากที่ได้หล่อขึ้นตัวอย่างคอนกรีตโดยถอดออกจากแบบหล่อตัวอย่างที่อายุ 24 ชั่วโมง แล้วนำไปบ่มในน้ำเป็นเวลา 7 วัน เมื่อเสร็จสิ้นการบ่ม จะนำชิ้นตัวอย่างขึ้นจากน้ำ เช็ดด้วยผ้าแห้งแล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิบรรยากาศเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้ววัดความยาวเริ่มต้น โดยตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ทดสอบ ทั้งการหดตัวแบบออโตจีนัส และการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ หลังจากวัดความยาวเริ่มต้นแล้ว จะเก็บชิ้นตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้อง โดยจัดวางชิ้นตัวอย่างไว้บนโต๊ะให้มีระยะห่างของแต่ละชิ้นไม่น้อยกว่า 1 นิ้ว หลังจากนั้นทำการวัดการหดตัวที่อายุ 1 2 3 5

7 14 28 42 56 และ 91 วัน เพื่อหาค่าร้อยละของการหดตัวของชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ (ขนาด $2.54 \times 2.54 \times 28.5$ เซนติเมตร จำนวน 3 ชิ้น ต่อสัดส่วนผสม)

สำหรับการทดสอบการหดตัวแบบออโตจีนัสของตัวอย่างมอร์ตาร์นั้น ทุกอายุของการทดสอบการหดตัว จะทำการชั่งน้ำหนักของตัวอย่างควบคู่กันไปด้วย เพื่อเป็นการตรวจสอบการระเหยนํ้าสู่บรรยากาศของตัวอย่าง

2.2.4 สัดส่วนวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับสัดส่วนวัสดุประสานของเพสต์และของมอร์ตาร์ที่ใช้ในการศึกษานั้นประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน (C100) และสัดส่วนผสมเถ้าลอยแต่ละประเภทแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 20 และ 40 ในส่วนของมอร์ตาร์นั้นได้ใช้อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน (s/b) เท่ากับ 2.75 และอัตราส่วนนํ้าต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.55

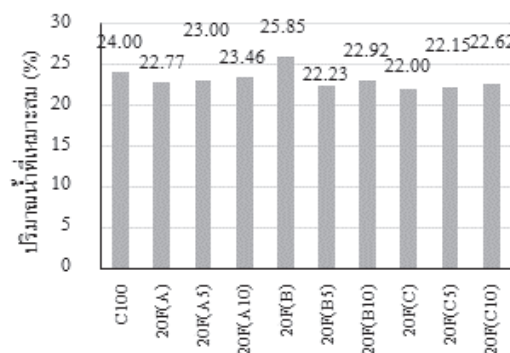
3. ผลการศึกษาและวิเคราะห์

3.1 คุณสมบัติด้านซีเมนต์ของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา

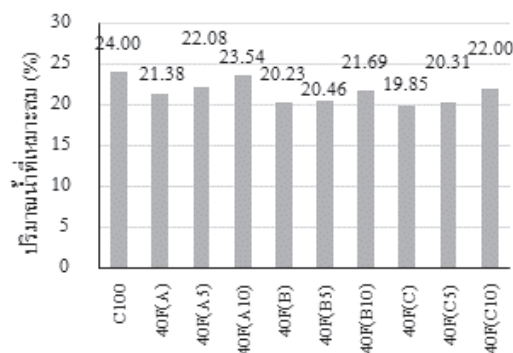
3.1.1 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์

จากการศึกษาพบว่า ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ผสมเถ้าลอย (ทั้งร้อยละ 20 และ 40) (รูปที่ 1) มีค่าน้อยกว่าของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และเมื่อใช้เถ้าลอยแทนที่ร้อยละ 40 จะให้ค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์น้อยกว่าใช้เถ้าลอยร้อยละ 20 ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าลอยมีลักษณะกลมช่วยในการหล่อ ทำให้ปริมาณน้ำที่เหมาะสมน้อยลง ส่วนเมื่อเปรียบเทียบระหว่างเพสต์ของเถ้าลอยตั้งต้นทั้ง 3 ชนิด (F(A) F(B) และ F(C)) พบว่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ผสมเถ้าลอย F(A) มีค่า

มากกว่าของ F(B) และ F(C) ตามลำดับ ทั้งนี้ เพราะความละเอียดของ F(A) มีค่ามากกว่าของ F(B) และ F(C) ตามลำดับ ซึ่งทำให้มีพื้นที่ผิวมากกว่าส่งผลให้มีปริมาณน้ำที่เหมาะสมมากขึ้น แต่เมื่อมีการเติมปริมาณ Free lime ในแต่ละชนิด ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากการเพิ่มของปริมาณ Free lime เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิว จึงทำให้ปริมาณ น้ำที่เหมาะสมเพิ่มขึ้น แสดงว่า เมื่อมีการเติมผง ปริมาณ Free lime ในแต่ละชนิด มีผลกระทบ ต่อปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์



ก) เถ้าลอยร้อยละ 20



ข) เถ้าลอยร้อยละ 40

รูปที่ 1 ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และเพสต์ผสม เถ้าลอย (ร้อยละ 20 และ 40)

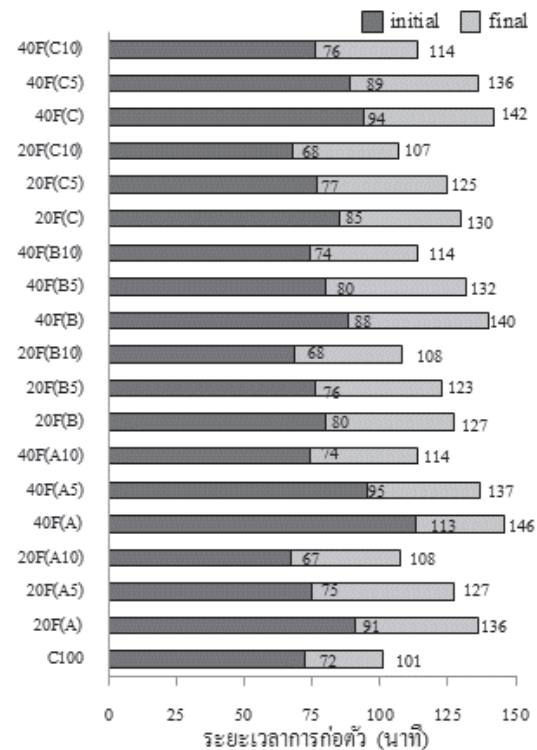
3.1.2 ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์

รูปที่ 2 แสดงระยะการก่อตัว (Setting time) ของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท ที่ 1 ล้วน และเพสต์ผสมเถ้าลอย โดยใช้เถ้าลอย จากแม่เถ้าจำนวน 3 ชนิด คือ F(A) F(B) และ F(C) ซึ่งเป็นเถ้าลอยตั้งต้น จากการศึกษาพบว่า การใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (ทั้งร้อยละ 20 และ 40) นั้น จะส่งผลให้การก่อตัวช้ากว่าของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ต แลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเฉพาะเมื่อแทนที่ ในปริมาณมากขึ้น (ร้อยละ 40) ส่งผลให้ระยะ การก่อตัวของเพสต์ช้าลง ทั้งนี้เพราะการแทนที่ ด้วยเถ้าลอยเป็นการลดปูนซีเมนต์ลง ทำให้เกิด ปฏิกิริยาไฮเดรชันน้อยลง และเมื่อเปรียบเทียบ ระหว่างเถ้าลอยทั้ง 3 ชนิด พบว่าเพสต์เถ้าลอย F(B) มีแนวโน้มว่าการก่อตัวเร็วกว่าของ F(C) และ F(A) ตามลำดับ เนื่องจากปริมาณ Free lime สูงกว่าตามลำดับ จึงทำให้ระยะเวลาการ ก่อตัวของเพสต์เร็วกว่า เนื่องจากการเร่ง ปฏิกิริยาไฮเดรชัน ส่วนเมื่อมีการเติมปริมาณ Free lime ลงในเถ้าลอยให้มีปริมาณเท่ากับ ร้อยละ 5 และ 10 ทำให้ระยะการก่อตัวของ เพสต์เร็วขึ้นเช่นเดียวกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่อเติมปริมาณ Free lime ร้อยละ 10 ใน เถ้าลอยนั้น ส่งผลให้ระยะการก่อตัวเริ่มต้น ของเพสต์ผสมเถ้าลอย (ในอัตราส่วนทั้งร้อยละ 20 และ 40) มีค่าใกล้เคียงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ล้วน แสดงว่าปริมาณ Free lime มีผลทำให้เร่งระยะการก่อตัวของเพสต์

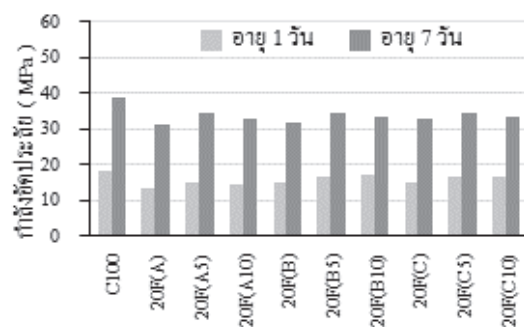
3.1.3 กำลังอัดประลัยของมอร์ตาร์

ส่วนการศึกษากำลังอัดประลัย (Compressive strength) ของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย ทั้ง 3 ชนิด (รูปที่ 3) พบว่ากำลังอัดประลัยของ มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย (ทั้งร้อยละ 20 และ 40) ทั้งอายุ 17 และ 28 วัน ของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย

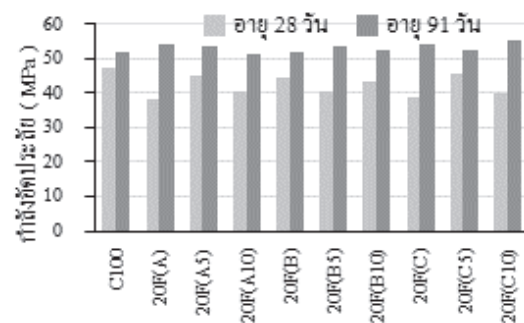
ทั้ง 3 ชนิด มีค่าน้อยกว่าของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยเมื่อแทนที่เถ้าลอยร้อยละ 40 จะให้ค่ากำลังอัดประลัยของมอร์ตาร์น้อยกว่าเมื่อแทนที่ร้อยละ 20 เนื่องจากการแทนที่เถ้าลอยเป็นการลดปูนซีเมนต์ลงทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันน้อยลง ส่วนเมื่ออายุ 91 วัน กำลังอัดประลัยของมอร์ตาร์มีค่าใกล้เคียงหรือมีแนวโน้มมากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เนื่องจากเถ้าลอยเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างเถ้าลอยทั้ง 3 ชนิด พบว่ามอร์ตาร์ของเถ้าลอย F(B) ในช่วงอายุต้นมีแนวโน้มกำลังอัดประลัยมากกว่าของ F(C) และ F(A) ตามลำดับ ทั้งนี้เพราะปริมาณ Free lime ของเถ้าลอยที่สูงกว่า ทำให้กำลังอัดประลัยมากกว่า และเมื่อมีการเติมปริมาณ Free lime ลงไปในเถ้าลอยให้สูงขึ้น (เท่ากับร้อยละ 5 และ 10) กำลังอัดประลัยที่อายุ 1 และ 7 วัน มีแนวโน้มสูงขึ้นมากกว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยตั้งต้น เนื่องจากการเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยเมื่ออายุ 28 และ 91 วันนั้น พบว่ากำลังอัดประลัยของมอร์ตาร์มีแนวโน้มใกล้เคียงกับของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยตั้งต้น



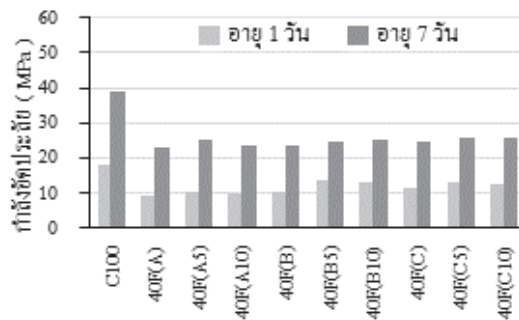
รูปที่ 2 ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และเพสต์ผสมเถ้าลอย (ร้อยละ 20 และ 40)



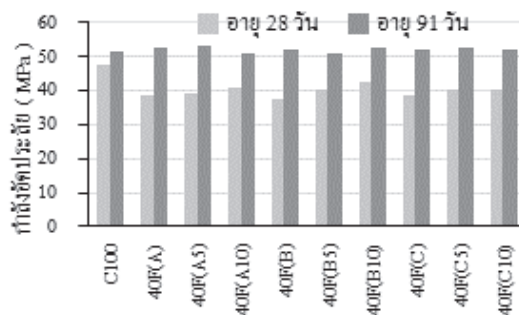
ก) เถ้าลอยร้อยละ 20 ที่อายุ 1 และ 7 วัน



ข) เถ้าลอยร้อยละ 20 ที่อายุ 28 และ 91 วัน



ค) เถ้าลอยร้อยละ 40 ที่อายุ 1 และ 7 วัน



ง) เถ้าลอยร้อยละ 40 ที่อายุ 28 และ 91 วัน

รูปที่ 3 กำลังอัดประลัยของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 และ 40 ที่อายุ 1, 7, 28 และ 91 วัน

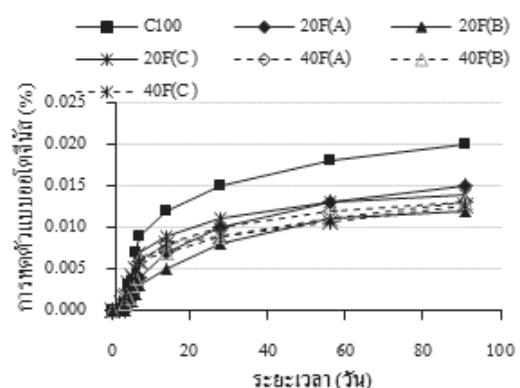
3.2 การหดตัวแบบออโตจีนัสและแบบแห้งของมอร์ตาร์

3.2.1 การหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ตาร์

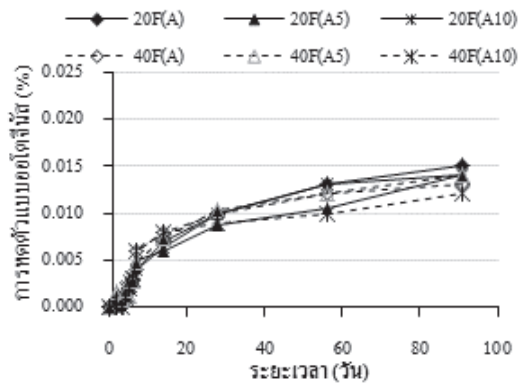
สำหรับการหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยนั้น พบว่าการหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยทั้ง 3 ชนิด (ทั้งร้อยละ 20 และ 40) มีค่าต่ำกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยทั้ง 3 ชนิด มีค่าการหดตัวใกล้เคียงกัน (รูปที่ 4) นั้นแสดงว่าการใช้เถ้าลอยสามารถลดการหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ตาร์ได้ เนื่องจากการใช้เถ้าลอยทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง การสูญเสียน้ำในช่องว่างคาปิลลารีจึงลดลงตามไปด้วย

รวมทั้งการใช้เถ้าลอยทำให้ปริมาณน้ำอิสระในมอร์ตาร์เพิ่มขึ้น ซึ่งการหดตัวแบบออโตจีนัสเกิดจากการสูญเสียน้ำจากปฏิกิริยาไฮเดรชันออกจากช่องว่างคาปิลลารี ดังนั้นเมื่อมีน้ำอิสระเพิ่มขึ้นการหดตัวจึงลดลง ซึ่งปรากฏการณ์นี้ส่งผลให้มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 40 มีแนวโน้มให้การหดตัวแบบออโตจีนัสต่ำกว่าของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยร้อยละ 20 เนื่องจากเถ้าลอยในปริมาณมาก ส่งผลให้น้ำอิสระในมอร์ตาร์มากขึ้นด้วย เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานในส่วนผสมปริมาณเท่ากัน

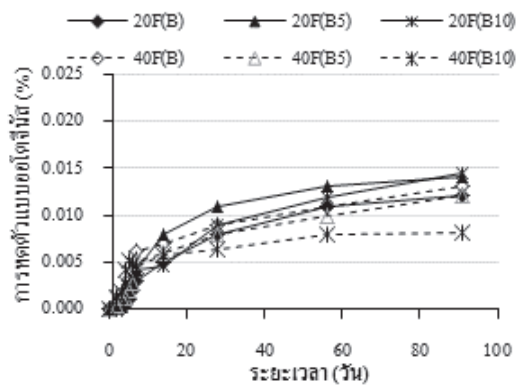
อย่างไรก็ตาม เมื่อศึกษาถึงผลกระทบของปริมาณ Free lime ในเถ้าลอยแต่ละชนิดต่อการหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ตาร์ พบว่าเมื่อเติมปริมาณ Free lime ลงไปในเถ้าลอยตั้งต้นทั้ง 3 ชนิดเป็นร้อยละ 5 การหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ตาร์มีค่าใกล้เคียงกันหรือมีแนวโน้มต่ำกว่าเล็กน้อยกับของมอร์ตาร์เถ้าลอยตั้งต้น (รูปที่ 5) แต่เมื่อเติมในปริมาณร้อยละ 10 ให้ค่าการหดตัวที่ต่ำกว่าของมอร์ตาร์เถ้าลอยตั้งต้น นั้นแสดงว่าการเติมปริมาณ Free lime ในเถ้าลอยให้มีปริมาณมากพอ (>ร้อยละ 10) แนวโน้มมีผลต่อการหดตัวแบบออโตจีนัสของมอร์ตาร์



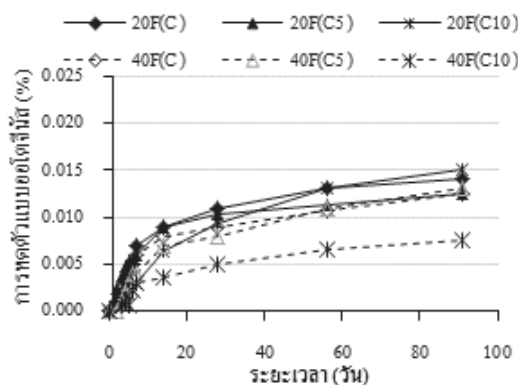
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบออโตจีนัสกับอายุของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย



ก) แคลลอย F(A)



ข) แคลลอย F(B)



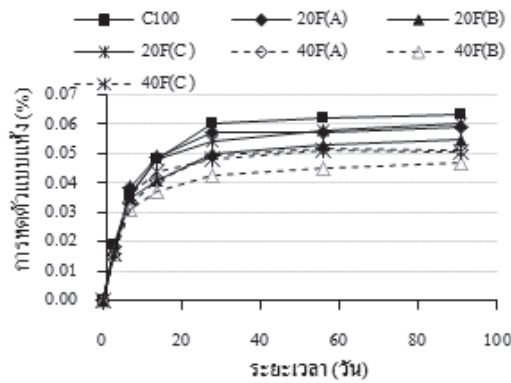
ค) แคลลอย F(C)

รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบบอโตจีนัสกับอายุของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ตาร์ผสมแคลลอยตั้งต้นทั้ง 3 ชนิด และมอร์ตาร์ผสมแคลลอยที่มีการเติมผง Free lime

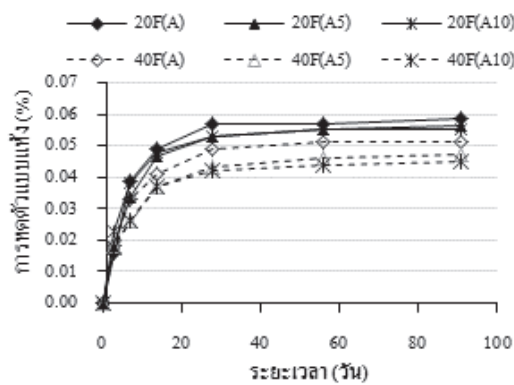
3.2.2 การหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์

ส่วนการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมแคลลอย พบว่าการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมแคลลอยตั้งต้นทั้ง 3 ชนิด (ทั้งร้อยละ 20 และ 40) มีค่าต่ำกว่าของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน โดยมอร์ตาร์ผสมแคลลอยทั้ง 3 ชนิด จะมีค่าการหดตัวที่ใกล้เคียงกัน (รูปที่ 6) นั้นแสดงว่าการใช้แคลลอยสามารถลดการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ได้ เนื่องจากการใช้แคลลอยจะมีส่วนทำปฏิกิริยาและไม่ทำปฏิกิริยา โดยแคลลอยที่ปฏิกิริยาจะทำปฏิกิริยาปอซโซลานก่อให้เกิด CSH เพิ่มขึ้น ซึ่ง CSH และอุดช่องว่างซีเมนต์เฟสให้มีความหนาแน่นขึ้น ส่วนแคลลอยที่ไม่ทำปฏิกิริยาทำหน้าที่เหมือน Micro aggregates ในการช่วยลดช่องว่างของมอร์ตาร์ ทำให้มอร์ตาร์มีความหนาแน่นขึ้นสามารถต้านทานการหดตัวได้ ส่วนมอร์ตาร์ผสมแคลลอยร้อยละ 40 มีค่าการหดตัวแบบแห้งต่ำกว่าของมอร์ตาร์ที่ใช้แคลลอยร้อยละ 20 ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะการใช้แคลลอยในปริมาณมากขึ้นจะช่วยทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้มาก รวมทั้งสามารถเติมเต็มได้มากขึ้น ทำให้น้ำระเหยได้ยากขึ้น

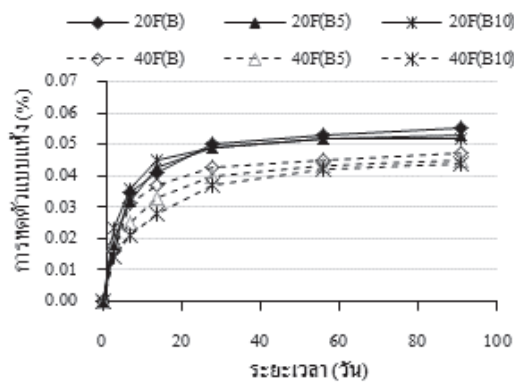
เมื่อศึกษาผลกระทบของปริมาณ Free lime ในแคลลอยแต่ละชนิดต่อการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์พบว่าเมื่อเติมปริมาณ Free lime ลงไปในแคลลอยตั้งต้นทั้ง 3 ชนิดเป็นร้อยละ 5 การหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์มีค่าใกล้เคียงกัน หรือมีแนวโน้มต่ำกว่าเล็กน้อยกับของมอร์ตาร์แคลลอยตั้งต้น (รูปที่ 7) แต่เมื่อเติมในปริมาณร้อยละ 10 ให้ค่าการหดตัวที่ต่ำกว่าของมอร์ตาร์แคลลอยตั้งต้น นั้นแสดงว่าการเติมปริมาณ Free lime ในแคลลอยให้มีปริมาณมากพอ (> ร้อยละ 10) แนวโน้มมีผลต่อการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์เช่นเดียวกับการหดตัวแบบบอโตจีนัส



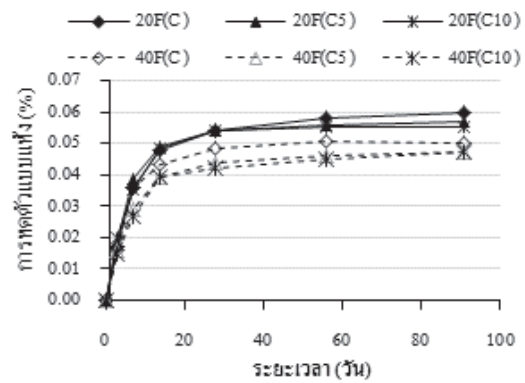
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยตั้งต้นทั้ง 3 ชนิด



ก) เถ้าลอย F(A)



ข) เถ้าลอย F(B)



ค) เถ้าลอย F(C)

รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวแบบแห้งกับอายุของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยตั้งต้นทั้ง 3 ชนิด และมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยที่มีการเติมผง Free lime

4. สรุป

จากการศึกษาคุณสมบัติด้านซีเมนต์และการหดตัวแบบบอโตจีนิสและแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยที่มีปริมาณ Free lime สูงสามารถสรุปได้ดังนี้

1. คุณสมบัติด้านซีเมนต์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมกับเถ้าลอยที่มีปริมาณ Free lime สูง ทำให้ปริมาณน้ำที่เหมาะสมมากขึ้น ระยะเวลาการก่อตัวเร็วขึ้นและกำลังอัดประลัยในช่วงอายุต้นดีขึ้น

2. การหดตัวแบบบอโตจีนิสและแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยทั้งที่มีปริมาณ Free lime ต่ำ และ Free lime สูง มีค่าน้อยกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนการเติมปริมาณ Free lime ในเถ้าลอยให้มีปริมาณไม่เกินร้อยละ 5 จะไม่มีผลกระทบต่อการหดตัวแบบบอโตจีนิสและแบบแห้งของมอร์ตาร์

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยงบประมาณประจำปี 2558 ในงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (EGAT) และศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (CONTEC) สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่มีส่วนร่วมในงานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Tangtermsirikul S. and Bumrungwong C, Conceptual Model for Determining Optimum Proportion of Fly Ash in Sulfate resisting Concrete, Proceedings of the 3rd National Convention on Civil Engineering, Thailand, January, 1997, pp. MAT 4-1 to 4-9.
- [2] Pitisan K. and Somnuk T., Expansion, Strength Reduction and Weight Loss of Fly Ash Concrete in Sulfate Solution, ASEAN Journal on SCIENCE & TECHNOLOGY FOR DEVELOPMENT, V21, 2004.
- [3] เจต นาจารย์ และปิติศานต์ กร้ามาตร, การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียด, วารสารคณะวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลธัญบุรี, ปี 11 ฉบับที่ 2 (กรกฎาคม-ธันวาคม), 2556.
- [4] ยงยุทธ วัฒนกุล ปิติศานต์ กร้ามาตร อธิธิพร ศิริสวัสดิ์ และสมนึก ตั้งเต็มสิริกุล, คุณสมบัติด้านซีเมนต์ และการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเถ้าลอย และผงหินปูน, วารสารคณะวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลธัญบุรี, ปีที่ 8 ฉบับที่ 2 (กรกฎาคม-ธันวาคม), 2553.
- [5] Krittiya Kaewmanee, Pitisan Krammart, Taweechai Sumranwanich, Pongsak Choktaweekarn and Somnuk tangtermsirikul, 2013. Effect of free lime content on properties of cement – fly ash mixtures. Construction and Building materials, 38:829-836.
- [6] ปรินญาจินดาประเสริฐและชัยจาตุรพิทักษ์กุล, 2555. ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต. 1500. 7. สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย.

สภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมข้าวกล้องหอมนิลออแกนิกส์เพาะงอกหุงสุก ในภาชนะพลาสติกอ่อนตัวปิดสนิท

Optimum Conditions of Preparation for the Process of Germinated Hom Nin Organic Brown Rice Product in Retort Pouch

สุนัน ปานสาคร^{1*} และ จตุรงค์ ลังกาพินธุ์¹
sunan.p@en.rmutt.ac.th^{1*}, Jaturoung.L@en.rmutt.ac.th¹

บทคัดย่อ

สภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมตัวอย่างข้าวกล้องหอมนิลออแกนิกส์เพาะงอก สำหรับการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องหอมนิลออแกนิกส์เพาะงอกหุงสุกในภาชนะพลาสติกอ่อนตัวปิดสนิท โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีประกอบด้วย ค่าสี ($L^*a^*b^*$) ความชื้น ค่าความแข็ง และปริมาณสารกาบา ทั้งก่อนและหลังการเพาะงอก จากนั้นเพิ่มความชื้นของตัวอย่างโดยแช่น้ำควบคุมอุณหภูมิที่ $45 \pm 1^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง 3 ชั่วโมง และ 4 ชั่วโมง ร่วมกับการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121°C เป็นเวลา 30 นาที พบว่าหลังกระบวนการเพาะงอกข้าวกล้องหอมนิลออแกนิกส์มีค่าความชื้นสูงขึ้นและปริมาณสารกาบาเพิ่มขึ้นกว่า 10 เท่า ในขณะที่ค่าสีประกอบด้วยค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) ไม่มีการเปลี่ยนแปลง และเมื่อนำข้าวกล้องหอมนิลออแกนิกส์งอกแช่น้ำที่เวลา 2-4 ชั่วโมง ร่วมกับการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121°C เป็นเวลา 30 นาที พบว่าระยะเวลาการแช่เมล็ดข้าวในน้ำที่นานขึ้นส่งผลต่อการเพิ่มของค่า L^* ค่า a^* ค่าความชื้น ในขณะที่ ค่า b^* และค่าความแข็งมีแนวโน้มลดลง รวมถึงปริมาณสารกาบาในข้าวกล้องหอมนิลออแกนิกส์เพาะงอกมีแนวโน้มลดลง หลังผ่านการแช่น้ำที่นานขึ้นร่วมกับการฆ่าเชื้อ

คำสำคัญ : ข้าวกล้องหอมนิล ข้าวกล้องงอก ภาชนะพลาสติกอ่อนตัวปิดสนิท ปริมาณสารกาบา

Abstract

The optimum conditions in preparation of germinated Hom Nin organic brown rice product in retort pouch were determined. Changes in physicochemical properties consisting of color values (L^* , a^* , b^*), moisture content, hardness, and GABA content of both brown rice and germinated brown rice were measured and evaluated. Germinated brown rice was soaked in water at $45 \pm 1^\circ\text{C}$ for 2 hr, 3

¹อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

hr, and 4 hr, and was subjected to sterilization process at 121°C for 30 min. Results indicated that moisture content and GABA content in germinated rice increased 10 times higher than the regular one, while soaking time did not significantly affect the grain colors (L^* , a^* , b^*). After sterilizing of germinated soaked (2-4 hr) brown rice, the findings revealed that soaking at longer period resulted in the increment of L^* values, a^* values and moisture content. On the contrary, the decrease of b^* values and hardness were observed. In addition, the combination of long-period soaking and sterilization was found to decrease the GABA content in germinated Hom Nin organic brown rice.

Keywords: Hom Nin rice; Germinated brown rice; Retort pouch; GABA content

1. คำนำ

ข้าว นับเป็นอาหารหลักของทั้งคนไทย และคนส่วนใหญ่ในโลก การบริโภคข้าวมีได้หลากหลายรูปแบบทั้งการบริโภคแบบหุงสุก หรือการแปรรูป ซึ่งปัจจุบันผู้บริโภคหันมาให้ความสนใจดูแลสุขภาพมากขึ้น สังเกตได้จากความนิยมด้านการออกกำลังกายโดยการปั่นจักรยานหรือออกกำลังกายเสริมที่มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด รวมถึงด้านการบริโภคพบว่าความนิยมบริโภคข้าวกล้องมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น เป็นที่ทราบกันดีว่าข้าวกล้องคือข้าวที่ไม่ผ่านการขัดสี จึงมีคุณค่าทางโภชนาการมากกว่าข้าวขาว ปัจจุบันมีพันธุ์ข้าวชนิดหนึ่งที่กำลังเป็นที่นิยมของกลุ่มผู้รักสุขภาพ ได้แก่ “ข้าวหอมนิล” เป็นข้าวที่มีเมล็ดข้าวกล้องเรียวยาว สีม่วงเข้ม เมื่อหุงสุกจะนุ่มเหนียวและมีกลิ่นหอมมีคุณค่าทางอาหารสูงประกอบไปด้วยธาตุเหล็ก สังกะสี ทองแดง แคลเซียม และโพแทสเซียม สูงกว่าข้าวหอมมะลิ 105 [1] โดยเฉพาะอย่างยิ่งมีสาร “แอนโทไซยานิน” ซึ่งเป็นสารต้านอนุมูลอิสระช่วยชะลอความเสื่อมของเซลล์ช่วยลดอัตราเสี่ยงของการเกิดโรคหัวใจ และเส้นเลือดอุดตันในสมองด้วยการยับยั้งไม่ให้

เลือดจับตัวเป็นก้อนชะลอความเสื่อมของดวงตา ช่วยยับยั้งจุลินทรีย์ในระบบทางเดินอาหาร [2]

นอกจากนี้ยังมีการนำข้าวหอมนิลมาแปรรูปเป็นข้าวกล้องงอก เป็นที่ทราบกันดีว่าข้าวกล้องงอก (Germinated brown rice หรือ “GABA-rice”) เมื่อผ่านกระบวนการงอกจะช่วยส่งเสริมให้ข้าวกล้องมีสารอาหารเพิ่มมากขึ้นจากเดิม เช่น โยอาหาร กรดไฟติก วิตามินซี วิตามินอี โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารกาบา (Gamma aminobutyric acid) ที่ช่วยป้องกันโรคต่าง ๆ เช่น โรคกระเพาะ เบาหวาน และช่วยในการควบคุมน้ำหนักตัว เป็นต้น และยังพบว่าข้าวกล้องงอกที่หุงสุกมีเนื้อสัมผัสที่อ่อนนุ่ม รับประทานได้ง่ายกว่าข้าวกล้องธรรมดา [3, 4, 5, 6] การจำหน่ายข้าวกล้องงอกตามท้องตลาดมักพบในรูปแบบข้าวกล้องงอกแห้ง ที่ผ่านการอบแห้งลดความชื้นก่อนส่งถึงมือผู้บริโภค โดยที่การทำแห้งด้วยอุณหภูมิสูงจะเป็นการทำลายและก่อให้เกิดการสูญเสียของสารกาบาที่เพิ่มขึ้นในข้าวกล้องงอกรวมถึงธาตุฟอสฟอรัสชนิดอื่น ๆ [7] ด้วยเหตุนี้การบริโภคข้าวกล้องงอกสดที่ไม่ผ่านการอบแห้งจะได้คุณประโยชน์สูงกว่าการบริโภคในรูปแบบที่ผ่าน

การอบแห้งแล้ว

ปัจจุบันการใช้ชีวิตของคนส่วนใหญ่อยู่บนพื้นฐานของความเร่งรีบ ดังนั้นการบริโภคอาหารจึงมักอยู่ในกลุ่มอาหารสำเร็จรูปหรือกึ่งสำเร็จรูป เพื่อสะดวกในการรับประทาน ทั้งนี้กรมวิทยาศาสตร์บริการ ได้ศึกษาวิจัยนำองค์ความรู้ทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาหารมาพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่และประยุกต์ดัดแปลงให้เกิดนวัตกรรมเชิงพาณิชย์เพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มแก่ข้าว หนึ่งในนั้นคือข้าวสำเร็จรูปในถุงรีทอร์ต [8] และมีงานวิจัยทางด้านการแปรรูปข้าวกล้องงอกในกระป๋องโดยใช้ข้าวพันธุ์พื้นเมืองในภาคใต้ ซึ่งได้รับความนิยมจากผู้บริโภคพอสมควร [9] อย่างไรก็ตามด้วยคุณสมบัติของข้าวกล้องหอมนิลงอกอีกทั้งยังไม่มีรายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแปรรูปข้าวกล้องหอมนิลงอกในถุงรีทอร์ต รวมถึงการผลิตข้าวกล้องงอกต้องผ่านการผลิตหลายขั้นตอน ผู้วิจัยจึงมีความสนใจการแปรรูปข้าวกล้องหอมนิลงอกเป็นผลิตภัณฑ์หุงสุกในภาชนะพลาสติกอ่อนตัวปิดสนิท เพื่อสะดวกในการบริโภคได้คุณค่าทางอาหารสูงสุดจากการบริโภคข้าวกล้องงอก อีกทั้งเป็นการช่วยเพิ่มมูลค่าของข้าวอันเป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศ อย่างไรก็ตามจากแนวความคิดที่กล่าวมาข้างต้นนี้พบว่าก่อนการได้มาซึ่งผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพจำเป็นต้องศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการเตรียมตัวอย่างเพื่อการผลิตข้าวกล้องหอมนิลเพาะงอกหุงสุกในภาชนะพลาสติกอ่อนตัวปิดสนิท โดยเลือกข้าวหอมนิลออแกนิกส์เป็นวัตถุดิบเริ่มต้น

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 ข้าวกล้องพันธุ์หอมนิลออแกนิกส์

จัดซื้อข้าวกล้องพันธุ์หอมนิลออแกนิกส์คุณภาพดี เมล็ดสมบูรณ์ สะอาด นำมาตรวจวัด

คุณสมบัติทั้งทางกายภาพและเคมีเบื้องต้นเพื่อรอการทำงานในขั้นตอนต่อไป

2.2 การเตรียมข้าวกล้องหอมนิลออแกนิกส์เพาะงอก

นำข้าวกล้องหอมนิลออแกนิกส์แช่น้ำในหม้อต้มน้ำที่อุณหภูมิ $30 \pm 2^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นนำข้าวกล้องหอมนิลล้างด้วยน้ำสะอาดและห่อด้วยผ้าขาวบางบรรจุในกล่องพลาสติก ก่อนนำไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิเดิมเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เรียกขั้นตอนนี้ว่า “การบ่ม” ระหว่างกระบวนการบ่มนำข้าวกล้องล้างด้วยน้ำสะอาดทุก 4 ชั่วโมง เพื่อป้องกันการหมักทำให้เกิดกลิ่นเหม็นเน่า เมื่อครบเวลา 24 ชั่วโมง จะได้ข้าวกล้องหอมนิลออแกนิกส์งอกที่มีความยาวของงอกข้าวประมาณ 0.5-1 มิลลิเมตร เพื่อนำไปใช้ในขั้นตอนต่อไปพร้อมทั้งตรวจวัดคุณสมบัติทั้งทางกายภาพและเคมีเพื่อเปรียบเทียบคุณภาพก่อนและหลังกระบวนการงอก

2.3 การปรับคุณภาพข้าวกล้องหอมนิลออแกนิกส์งอกด้วยการแช่น้ำ

ก่อนเข้าสู่ขั้นตอนการฆ่าเชื้อในภาชนะพลาสติกอ่อนตัวปิดสนิท นำข้าวกล้องหอมนิลออแกนิกส์งอกปรับความชื้นด้วยการแช่ในหม้อต้มน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ $45 \pm 1^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 2 3 และ 4 ชั่วโมง ตามลำดับ จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักโดยกำหนดน้ำหนักของตัวอย่างข้าวกล้องหอมนิลออแกนิกส์งอกหลังการแช่น้ำปริมาณ 150 g ต่อดู่ง และปิดผนึกให้สนิท ก่อนเข้าหม้อฆ่าเชื้อด้วยอุณหภูมิ 121°C เป็นเวลา 30 นาที หลังการให้ความร้อนนำตัวอย่างมาตรวจวัดคุณสมบัติทั้งทางกายภาพและเคมีต่อไป

2.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี

2.4.1 ปริมาณความชื้น

ชั่งน้ำหนักข้าวกล้องหอมนิลจำนวน 2 กรัม อบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 16 ชั่วโมง อ้างอิงวิธีการทดสอบจาก AOAC [10]

2.4.2 ค่าสี

วัดค่าสีด้วยเครื่องวัดสี (Model JC801, Tokyo, Japan) รายงานผลในรูปของ L^* , a^* , b^* ซึ่งค่าทั้ง 3 เป็นการแสดงการวัดค่าสีเฉพาะเจาะจงโดยที่ L^* คือ ค่าความสว่าง (Lightness) มีค่าความสว่างมากเมื่อเข้าใกล้ 100 และมีความมืดเมื่อเข้าใกล้ 0 ส่วน a^* คือ ค่าความเป็นสีเขียว (Greenness) เมื่อมีค่าเป็นบวก และมีค่าความเป็นสีแดง (Redness) เมื่อมีค่าเป็นลบ และค่า b^* คือ ค่าความเป็นสีเหลือง (Yellowness) เมื่อมีค่าเป็นบวกและค่าความเป็นสีน้ำเงิน (Blueness) เมื่อมีค่าเป็นลบ ซึ่งก่อนทำการวัดค่าสี เครื่องวัดสีจะถูกปรับเทียบความเที่ยงตรงของค่าสีด้วย Standard Calibration Plate ค่า L^* , a^* และ b^* เท่ากับ 98.11, -0.11 and -0.08 ตามลำดับ

2.4.3 ค่าความแข็ง

ข้าวกล้องหอมนิลล่อแกนิคส์เพาะงอก หลังผ่านการแช่น้ำ นำไปหุงสุกเพื่อทดสอบค่าความแข็งด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Instron

Universal Tester Machine) ตามวิธีการกดแบบ Back extrusion ค่าที่อ่านได้เป็นค่าที่แสดงความแข็งของตัวอย่างข้าวกล้องหอมนิลหุงสุกในหน่วยของนิวตัน [11] และตรวจวัดปริมาณสารกาบา (GABA) อ้างอิงกระบวนการทดสอบจากมาตรฐาน [12]

2.5 การวิเคราะห์ทางสถิติ

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

3. ผลการศึกษาและวิจารณ์

3.1 ผลการศึกษากระบวนการผลิตข้าวกล้องหอมนิลล่อแกนิคส์เพาะงอก

ผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องหอมนิลล่อแกนิคส์เพาะงอกหุงสุกในภาชนะพลาสติกก่อนตัวปิดสนิท ต้องใช้ข้าวกล้องหอมนิลเพาะงอกเป็นวัตถุดิบหลัก และหลังกระบวนการเพาะงอกได้ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติในด้านสี ความชื้น และสารกาบา (GABA) พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับข้าวกล้องหอมนิลล่อแกนิคส์ก่อนการเพาะงอก แสดงผลการทดลองดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของข้าวกล้องหอมนิลล่อแกนิคส์ก่อนและหลังการเพาะงอก

ตัวอย่าง	ค่าสี			ความชื้น (%wb.)	กาบา mg/kg
	L^*	a^*	b^*		
ข้าวกล้อง	15.2±0.01	1.4±0.06	5.3±0.10	13.57±1.95	19.37±0.00
ข้าวกล้องงอก	15.7±0.12	1.6±0.06	5.3±0.10	40.68±0.89	200.84±0.00

ตัวเลขที่ปรากฏในตารางเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ (mean± SD)

3.1.1 ค่าสีของข้าวกล้องหอมนิลออแกนิกส์ก่อนและหลังการเพาะงอก

ค่าสีนับเป็นปัจจัยหนึ่งของการยอมรับหรือไม่ยอมรับของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์อาหาร ดังนั้นในกระบวนการผลิต ผลิตภัณฑ์อาหารใด ๆ จึงต้องคำนึงถึงปัจจัยเรื่องสีของผลิตภัณฑ์เป็นปัจจัยแรก ๆ เสมอ ซึ่งจากตารางที่ 1 พบว่าค่าสีของข้าวกล้องหอมนิลออแกนิกส์ก่อนการเพาะงอกและหลังการเพาะงอกมีค่าใกล้เคียงกัน นั่นคือเมล็ดข้าวกล้องหอมนิลให้ความสว่างของสี (L^*) อยู่ในกลุ่มค่อนข้างมืด (15-16) ในขณะที่ค่า a^* มีค่า 1.4-1.6 และค่า b^* มีค่าประมาณ 5.3 หรือให้ค่าสีเฉดสีม่วง หมายความว่ากระบวนการงอกไม่ส่งผลใด ๆ ต่อค่าสีของเมล็ดข้าวกล้องหอมนิลออแกนิกส์

3.1.2 ความชื้นของข้าวกล้องหอมนิลออแกนิกส์ก่อนและหลังการเพาะงอก

ความชื้นมีผลต่อการเสื่อมเสียของอาหารโดยเฉพาะการเสื่อมเสียเนื่องจากจุลินทรีย์อาหารที่มีความชื้นหรือปริมาณน้ำสูงจะเป็นอาหารที่เสื่อมเสียง่ายเนื่องจากมีสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญของจุลินทรีย์ทำให้อาหารเสื่อมเสีย อีกทั้งความชื้นมีผลต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงความร้อนของอาหารด้านต่าง ๆ ในส่วนกระบวนการเพาะงอกข้าวกล้องหอมนิลออแกนิกส์พบว่าปริมาณความชื้นเป็นปัจจัยสำคัญยิ่งต่อประสิทธิภาพของการงอก ทั้งนี้หากความชื้นไม่เหมาะสมประสิทธิภาพการงอกจะลดลง [5,6] จากการเปรียบเทียบความชื้นของตัวอย่างข้าวกล้องหอมนิลออแกนิกส์ก่อนและหลังการเพาะงอก ซึ่งให้ผลดังตารางที่ 1 พบว่าค่าความชื้นก่อนการเพาะงอกเท่ากับ $13.57 \pm 1.95\%wb$. และค่าความชื้นหลังการ

เพาะงอกมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ $40.68 \pm 0.89\%wb$. ทั้งนี้เนื่องจากข้าวกล้องหอมนิลได้ดูดซึมน้ำในระหว่างกระบวนการเพาะงอกทั้งจากการแช่และการบ่ม จึงส่งผลให้ค่าความชื้นเพิ่มขึ้น ซึ่งความชื้นดังกล่าวเหมาะสมต่อการงอกของเมล็ดข้าว ทั้งนี้สังเกตได้จากเมื่อได้เวลาที่เหมาะสม จมูกของข้าวจะงอกออกมาที่มีความยาวประมาณ 1-2 มิลลิเมตร

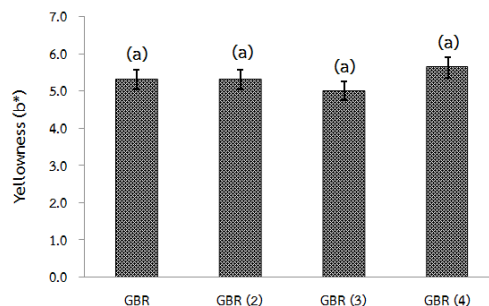
3.1.3 สารกาบาของข้าวกล้องหอมนิลออแกนิกส์ก่อนและหลังการเพาะงอก

ในการทดลองนี้ได้ทำการเปรียบเทียบปริมาณสารกาบา ก่อนการเพาะงอกและหลังการเพาะงอกซึ่งให้ผลดังตารางที่ 1 พบว่าหลังการเพาะงอกข้าวกล้องหอมนิลออแกนิกส์มีปริมาณสารกาบาเพิ่มขึ้น 10 เท่า เมื่อเทียบกับข้าวกล้องหอมนิลที่ไม่ผ่านการเพาะงอก (จากปริมาณ 19.37 ± 0.00 mg/kg เพิ่มขึ้นเป็น 200.84 ± 0.00 mg/kg) โดยที่สารกาบาเป็นสารที่มีความเกี่ยวข้องกับกระบวนการย่อยสลายในเมล็ดข้าว และถูกสังเคราะห์จากกระบวนการดีคาร์บอกซิเลชัน (Decarboxylation) ของกรดกลูตามิก (Glutamic Acid) ด้วยเอนไซม์กลูตาเมตคาร์บอกซิเลส (Glutamate Decarboxylase) ซึ่งจะเปลี่ยนจาก กรดแอลกลูตามิก (L-glutamic acid) เป็นสารกาบา [13]

3.2 สภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมข้าวกล้องหอมนิลออแกนิกส์เพาะงอก

เนื่องด้วยข้าวกล้องหอมนิลออแกนิกส์หลังการเพาะงอกมีปริมาณความชื้นค่อนข้างต่ำสำหรับการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องหอมนิลหุงสุก พิจารณาจากผลการทดลองในตารางที่ 1 มีค่าประมาณ $40.68\%wb$. ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องหอมนิลออแกนิกส์

เพาะงอกหลังผ่านการฆ่าเชื้อ ดังนั้นก่อนกระบวนการฆ่าเชื้อจึงต้องทำการเพิ่มความชื้นที่เหมาะสมให้กับเมล็ดข้าวกล้องงอกก่อนนำไปบรรจุในถุงเพาะเพื่อรอการฆ่าเชื้อต่อไป ในขั้นตอนนี้จะได้นำข้าวกล้องหอมนิลเพาะงอกจากขั้นตอนแรก (GBR) แช่ในหม้อต้มน้ำควบคุมอุณหภูมิ ($45\pm 1^{\circ}\text{C}$) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (GBR (2)) 3 ชั่วโมง (GBR (3)) และ 4 ชั่วโมง (GBR (4)) ตามลำดับ เพื่อหาค่าความชื้นที่เหมาะสมและได้ข้าวกล้องหอมนิลเพาะงอกที่มีคุณภาพดี หลังจากนั้นนำไปผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121°C เป็นเวลา 30 นาที พร้อมทั้งศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 1 รูปที่ 2 และตารางที่ 2



(ค) ค่าความเป็นสีเหลือง (b*)

รูปที่ 1 การเปลี่ยนแปลงค่าสีของข้าวกล้องหอมนิลออแกนิกส์เพาะงอกหลังการแช่น้ำที่เวลาต่าง ๆ ร่วมกับการฆ่าเชื้อ

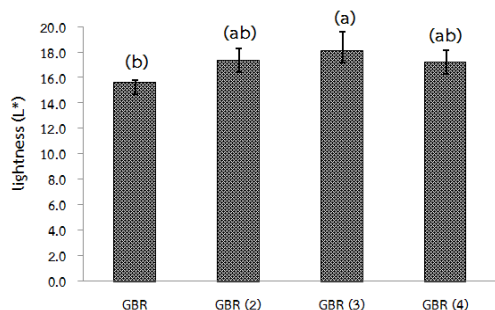
GBR = ข้าวกล้องงอก;

GBR (2) = ข้าวกล้องงอกแช่น้ำ $45\pm 1^{\circ}\text{C}$ 2 ชม.

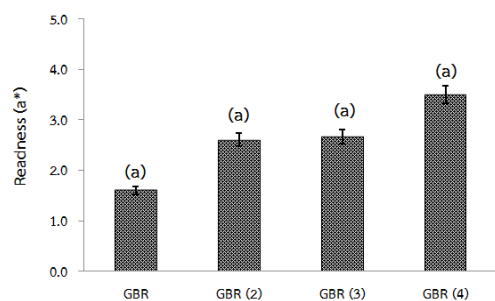
GBR (3) = ข้าวกล้องงอกแช่น้ำ $45\pm 1^{\circ}\text{C}$ 3 ชม.

GBR (4) = ข้าวกล้องงอกแช่น้ำ $45\pm 1^{\circ}\text{C}$ 4 ชม.

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



(ก) ค่าความสว่าง (L*)



(ข) ค่าความเป็นสีแดง (a*)

3.2.1 การเปลี่ยนแปลงค่าสี

จากการทดสอบพบว่าการแช่เมล็ดข้าวกล้องหอมนิลออแกนิกส์เพาะงอกในน้ำที่เวลาต่าง ๆ พร้อมทั้งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121°C เป็นเวลา 30 นาที ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสีแสดงดังรูปที่ 1 โดยค่า L^* บ่งบอกถึงค่าความสว่างของเมล็ดข้าว จากการทดลองพบว่าข้าวกล้องหอมนิลออแกนิกส์เพาะงอกมีค่า L^* อยู่ที่ 15.7 ซึ่งให้ค่าในกลุ่มค่อนข้างมืดทั้งนี้ด้วยสีของเมล็ดที่มีสีม่วง และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อนำเมล็ดข้าวกล้องงอกไปแช่น้ำที่อุณหภูมิ $45\pm 1^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (GBR(2)) และ 3 ชั่วโมง (GBR(3)) ร่วมกับการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121°C เป็นเวลา 30 นาที โดยให้ค่า L^* เพิ่มขึ้นเป็น 17.4 และ 18.2 ตามลำดับ แต่ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($P>0.05$) อย่างไรก็ตามจากการทดลองพบว่า

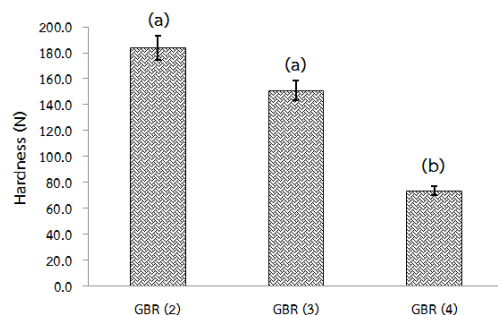
เมื่อการแช่นานขึ้นเป็น 4 ชั่วโมง (GBR(4)) การเปลี่ยนแปลงของความความสว่างของเมล็ดข้าวกลีบดลงเล็กน้อย (17.3) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเมื่อข้าวกล้องหอมนิลผ่านการแช่น้ำเมล็ดสีที่อยู่บริเวณผิวด้านนอกของเมล็ดมีการหลุดลอกออกมาโดยสังเกตได้จากน้ำที่แชจะมีสีม่วงเข้ม ดังนั้นจึงส่งผลให้ค่าความสว่างของเมล็ดข้าวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วง 2 ถึง 3 ชั่วโมงแรก

ค่า a^* บ่งบอกถึงค่าความเป็นสีแดงของเมล็ดข้าว จากการทดลองพบว่าค่า a^* ดังรูปที่ 1 มีแนวโน้มของความเป็นสีแดงเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการแช่ข้าวกล้องหอมนิล ออแกนิกส์เพาะงอกนานขึ้นในช่วง 2 3 และ 4 ชั่วโมง ซึ่งการแช่เมล็ดข้าวกล้องหอมนิลในน้ำมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มความชื้นดังผลการทดลองที่ได้กล่าวถึงต่อไป ทั้งนี้พบว่าระหว่างกระบวนการแช่เมล็ดข้าวในน้ำ เมล็ดจะดูดซึมน้ำมากขึ้นตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นจนเข้าสู่สภาวะสมดุล ขณะเดียวกันก็มีการดูดซึมเม็ดสี (สีม่วง) จากผิวของเมล็ดข้าว หรือจากน้ำที่ผ่านการชะสีจากเมล็ดข้าว เข้าไปยังเมล็ดข้าวด้วยเช่นกัน ดังนั้นจึงส่งผลให้ค่าความเป็นสีแดงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแต่ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($P>0.05$)

ค่า b^* บ่งบอกถึงค่าความเป็นสีเหลืองของเมล็ดข้าว จากการทดลองพบว่าเมื่อนำข้าวกล้องหอมนิลออแกนิกส์เพาะงอกแช่ในน้ำที่อุณหภูมิ $45\pm 1^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 2 3 และ 4 ชั่วโมง ร่วมกับการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121°C เป็นเวลา 30 นาที ให้ค่า b^* ในช่วง 5-6 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่า b^* ของข้าวกล้องหอมนิลเพาะงอกก่อนการแช่ (5.3) ดังนั้นจึงพบว่าการแช่น้ำที่อุณหภูมิดังกล่าวในช่วงเวลา 2-4 ชั่วโมง ไม่ส่งผลต่อค่า b^* และไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($P>0.05$)

3.2.2 การเปลี่ยนแปลงค่าความแข็ง

จากการทดลองการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของข้าวกล้องหอมนิลออแกนิกส์เพาะงอกและหลังการแช่น้ำที่เวลา 2 3 และ 4 ชั่วโมง ร่วมกับการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121°C เป็นเวลา 30 นาที แสดงดังรูปที่ 2 โดยทดสอบด้วยเครื่องทดสอบเนื้อสัมผัสอาหาร และนำเสนอค่าของแรงกดในหน่วยนิวตัน (N) พบว่าความแข็งของข้าวกล้องหอมนิลออแกนิกส์เพาะงอกที่ผ่านการแช่ในหม้อต้มน้ำอุณหภูมิ $45\pm 1^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 2 3 และ 4 ชั่วโมง ให้ค่าเท่ากับ 183.95 N, 150.95 N และ 73.57 N ตามลำดับ แสดงว่าค่าความแข็งมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มเวลาการแช่เมล็ดข้าวในน้ำ ส่งผลให้เมล็ดข้าวกล้องหอมนิลออแกนิกส์เพาะงอกมีความนุ่มมากขึ้นและสอดคล้องกับค่าความชื้นที่เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน อย่างไรก็ตามการลดลงของค่าความแข็งนี้ไม่พบความแตกต่างในทางสถิติ ($P>0.05$)



รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของข้าวกล้องหอมนิล ออแกนิกส์เพาะงอกหลังการแช่น้ำที่เวลาต่าง ๆ ร่วมกับการฆ่าเชื้อ

GBR = ข้าวกล้องงอก;

GBR (2) = ข้าวกล้องงอกแช่น้ำ $45\pm 1^{\circ}\text{C}$ 2 ชม.

GBR (3) = ข้าวกล้องงอกแช่น้ำ $45\pm 1^{\circ}\text{C}$ 3 ชม.

GBR (4) = ข้าวกล้องงอกแช่น้ำ $45\pm 1^{\circ}\text{C}$ 4 ชม.

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

ตารางที่ 2 การเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นและสารกาบาของข้าวกล้องหอมนิล ข้าวกล้องหอมนิลเพาะงอก และหลังการแช่น้ำที่เวลาต่าง ๆ ร่วมกับการฆ่าเชื้อ

คุณสมบัติ	ตัวอย่าง				
	BR	GBR	GBR(2)	GBR(3)	GBR(4)
ความชื้น (%wb.)	13.57 ^b ±1.95	40.67 ^a ±0.89	42.71 ^a ±2.81	42.86 ^a ±1.66	44.86 ^a ±4.77
กาบา (mg/kg)	19.37 ^e ±0.20	200.84 ^a ±1.03	51.34 ^d ±1.02	117.4 ^b ±1.09	58.0 ^c ±0.07

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

BR = ข้าวกล้อง; GBR = ข้าวกล้องงอก; GBR (2) = ข้าวกล้องงอกแช่น้ำ 45±1°C 2 ชม.

GBR (3) = ข้าวกล้องงอกแช่น้ำ 45±1°C 3 ชม. ; GBR (4) = ข้าวกล้องงอกแช่น้ำ 45±1°C 4 ชม.

3.2.3 การเปลี่ยนแปลงค่าความชื้น

จากการทดลองวัดค่าการเปลี่ยนแปลงความชื้นของตัวอย่างข้าวกล้องหอมนิลออแกนิกส์ แสดงดังตารางที่ 2 พบว่าปริมาณความชื้นของข้าวกล้องหอมนิลออแกนิกส์เพาะงอกเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นของการแช่เมล็ดข้าวในน้ำ ความชื้นของข้าวกล้องหอมนิลออแกนิกส์เท่ากับ 13.57%wb และเพิ่มขึ้นเป็น 40.67%wb. หลังการเพาะงอก จากนั้นเมื่อผ่านการแช่เมล็ดข้าวในน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 2 ชั่วโมง 3 ชั่วโมง และ 4 ชั่วโมง ร่วมกับการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121°C เป็นเวลา 30 นาที มีค่าเท่ากับ 40.70%wb., 42.68%wb. และ 44.86%wb. ตามลำดับ นั่นหมายความว่า ในระหว่างกระบวนการแช่ เมล็ดข้าวกล้องหอมนิลออแกนิกส์เพาะงอกได้มีการดูดซึมน้ำเข้าไปยังเมล็ด ส่งผลให้มีค่าความชื้นเพิ่มขึ้นแต่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) และส่งผลต่อค่าความแข็งซึ่งพบว่ามีแนวโน้มลดลง

3.2.4 การเปลี่ยนแปลงของสารกาบา (GABA)

สารกาบาเป็นสารที่มีความเกี่ยวข้องกับกระบวนการย่อยสลายในเมล็ดข้าว และมักมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเมล็ดข้าวผ่านกระบวนการงอก จากการทดสอบหาปริมาณสารกาบา แสดง

ดังตารางที่ 2 พบว่าค่าปริมาณสารกาบาของข้าวกล้องหอมนิลออแกนิกส์ก่อนการเพาะงอกมีค่าเท่ากับ 19.37 mg/kg และเมื่อผ่านกระบวนการเพาะงอกพบว่าปริมาณสารกาบาเพิ่มสูงขึ้นกว่า 10 เท่า (200.84 mg/kg) จากนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างข้าวกล้องหอมนิลออแกนิกส์เพาะงอกที่ผ่านการแช่น้ำควบคุมอุณหภูมิ 45±1°C ในหม้อต้มน้ำ 2 ชั่วโมง 3 ชั่วโมง และ 4 ชั่วโมง ร่วมกับการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121°C เป็นเวลา 30 นาที ให้ปริมาณสารกาบาเท่ากับ 51.34 mg/kg, 117.40 mg/kg และ 58.08 mg/kg ตามลำดับ พบว่าเวลาในการแช่น้ำของข้าวกล้องงอกหอมนิลมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของสารกาบาในช่วงแรก และมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาการแช่นานขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากกระบวนการแช่น้ำ เมล็ดข้าวกล้องจะเริ่มงอก สารอาหารที่ถูกเก็บไว้ในเมล็ดข้าวจะถูกย่อยสลายไปตามกระบวนการทางชีวเคมีจนเกิดเป็นสารประเภทคาร์โบไฮเดรตที่มีโมเลกุลเล็กและน้ำตาลรีดิคซ์ โปรตีนภายในเมล็ดข้าวจะถูกย่อยให้เกิดเป็นกรดอะมิโนและเปปไทด์ รวมทั้งพบการสะสมสารเคมีที่สำคัญ คือ สารแกมมาอะมิโนบิวทิริกแอซิด (Gamma-aminobutyric acid) หรือสารกาบา (GABA) เมื่อการงอกสิ้นสุดที่เวลาการแช่น้ำระดับหนึ่งเอนไซม์กาบาทรานสมิเนส

จะกระตุ้นให้เกิดการผันกลับของกาบาไปเป็นซักซินิก เซมิแอลดีไฮด์ (Succinic semialdehyde) ส่งผลต่อการลดลงของสารกาบาและอาจเกิดกระบวนการหมักเกิดขึ้น [14, 15] รวมถึงจากการทดสอบยังพบว่าปริมาณสารกาบาในข้าวกล้องหอมนิลออแกนิกส์เพาะงอกมีแนวโน้มลดลงหลังผ่านการแช่น้ำที่ยาวนานขึ้นร่วมกับการฆ่าเชื้อ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการฆ่าเชื้อต้องผ่านการให้ความร้อนด้วยหม้อฆ่าเชื้อ (Retort) ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นเวลา 30 นาที ส่งผลให้ปริมาณสารกาบาลดลง อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบปริมาณสารกาบาที่ลดลงนี้ ยังคงมีค่าสูงกว่าข้าวกล้องหอมนิลออแกนิกส์ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการเพาะงอก และแสดงลักษณะของข้าวกล้องหอมนิลออแกนิกส์เพาะงอกและหลังการแช่น้ำที่เวลาต่าง ๆ ดังรูปที่ 3

4. สรุปผลการวิจัย

จากการทดสอบเพื่อปรับปรุงคุณภาพของข้าวกล้องหอมนิลออแกนิกส์เพาะงอกโดยการนำไปแช่น้ำที่อุณหภูมิ $45 \pm 1^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 2 3 และ 4 ชั่วโมง ร่วมกับการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121°C เป็นเวลา 30 นาที พบว่าคุณสมบัติด้านสี ความชื้น และความแข็งที่ให้ผลที่ดีที่สุดกับกระบวนการดังกล่าวนี้คือ การแช่ข้าวกล้องหอมนิลเพาะงอกที่เวลา 4 ชั่วโมง ซึ่งเหมาะสม



(ก) ข้าวกล้องหอมนิลออแกนิกส์เพาะงอก



(ข) ข้าวกล้องหอมนิลออแกนิกส์เพาะงอกหลังการแช่น้ำ 2 ชั่วโมง



(ค) ข้าวกล้องหอมนิลออแกนิกส์เพาะงอกหลังการแช่น้ำ 3 ชั่วโมง



(ง) ข้าวกล้องหอมนิลออแกนิกส์เพาะงอกหลังการแช่น้ำ 4 ชั่วโมง

รูปที่ 3 ลักษณะของข้าวกล้องหอมนิลออแกนิกส์เพาะงอกหลังการแช่น้ำที่เวลาต่าง ๆ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตรมหาวิทาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่สนับสนุนวัสดุอุปกรณ์ สถานที่ในการทำวิจัย และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่สนับสนุนทุนวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Chrispeels, M.L. and E.S. David. 1994. Plants, Genes and Agriculture. Jones and Bartlett Publishers. London. England. 478p.
- [2] Singhasurasak, H. 2014. Rice berry. Available Source: <http://riceberry-rice.blogspot.com/2013/12/blog-post.html>. May, 25, 2014.
- [3] อังคณา เหลืองศิริโรรัตน์ และ เครือวัลย์ อัดตะวีริยะสุข. 2539. เรื่องของเมล็ดข้าว ข้าว: ความรู้คู่ชาวนา, เอกสารวิชาการครบรอบ 80 ปี, ศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี, สถาบันวิจัยข้าว, กรมวิชาการเกษตร, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.
- [4] สุนัน ปานสาคร ศราวุฒิ สุขนาคน เบญจวรรณ พงษ์ศักดิ์ และ สุกานดา สนมรัมย์. 2553. ศึกษาและออกแบบเครื่องผลิตข้าวกล้องงอกขนาดเล็กในครัวเรือน. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ราชภัฏนครราชสีมา. 8(1): 61-67.
- [5] Varanyanon, W., P. Tungtrakul, 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.
- [6] 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.
- [7] สุนัน ปานสาคร จตุรงค์ ลังกาพันธุ์ กาญจนากลัดแสง และ วรณภัส เชียงทอง. 2556. พัฒนาระบบการผลิตผลิตภัณฑ์งอกข้าวร่วมกับข้าวเพื่อเพิ่มมูลค่าผลผลิตทางการเกษตร. วารสารแก่นเกษตร. 41(3): 305-316.
- [8] วรณดี มหรรณพกุล. 2552. เทคโนโลยีการแปรรูปธัญชาติสร้างงาน สร้างเงิน สร้างคุณภาพชีวิต. สำนักเทคโนโลยีชุมชน. 36: 82-83.
- [9] ไพบุลย์ ธรรมรัตน์วาลิก. 2550. การศึกษาคุณค่าทางโภชนาการและทางยาของข้าวงอกเพื่อเป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์เสริมอาหารและอาหารเพื่อสุขภาพ. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [10] AOAC. 1990. Official Methods of Analyses of the Association of Official Analytical Chemists. 15th ed. Association of Official Analytical Chemists.
- [11] Reyes. V.G. and V.K. Jindal. 1989. A small sample back extrusion test for measuring texture of cooked rice. Journal of Food Quality. 13(2): 109-118.
- [12] Mustafa, A., P. Aman, R. Andersson, and A. Kamal-Eldin. 2007. Analysis of free amino acids in cereal products. Food Chemistry. 105(1): 317-324.

- [13] 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.
- [14] Kihara, M., Y. Okada, T. Imure, and K. Ito. 2007. Accumulation and degradation of two functional constituents, GABA and α -Glucan, and their varieties difference germinated barley grains. *Breeding Science*. 57(2): 85-89.
- [15] จารุรัตน์ สันเต วรรณช ศรีเจษฎารักษ์ และ รัชฎา ตั้งวงศ์ไชย. 2550. ผลของกระบวนการแช่และกระบวนการงอกของข้าวกล้อง (หอมมะลิ 105) ต่อปริมาณสารแกมมาอะมิโนบิวเทอริกเอซิดในข้าวกล้องงอก. *วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร*. 38(6) (พิเศษ): 103-106

**อิทธิพลของการรองพื้นและการพอกผิวแข็งต่อสมบัติทางกล
ของโลหะเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน JIS-S50C**
**Effect of Buttering and Hardfacing on Mechanical Properties
of JIS-S50C Steel Weld Metal**

กิตติพงษ์ กิมะพงศ์¹ สุรัตน์ ตรียานพงศ์¹ สุริยา ประสมทอง² วรญา วัฒนจิตศิริ¹
kittipong.k@en.rmutt.ac.th¹, surat.t@en.rmutt.ac.th¹,
suriya-tea@hotmail.com², voraya.w@en.rmutt.ac.th¹

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาอิทธิพลตัวแปรการเชื่อมอาร์กไส้ฟลักซ์พอกแข็งที่มีผลต่อสมบัติทางกลของแนวเชื่อมพอกแข็งบนพื้นผิวเหล็กกล้าคาร์บอน JIS-S50C และเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมพอกแข็ง ผลการทดลองโดยสรุปมีดังนี้ กระแสเชื่อมที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ความแข็งแรงของแนวเชื่อมพอกแข็งและความต้านทานการสึกหรอของแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น โครงสร้างจุลภาคแสดงการเพิ่มขึ้นของธาตุเสริมความแข็งแรงของโลหะประกอบด้วยซิลิกอน วานาเดียม โครเมียม แมงกานีส และโมลิบดีนัม เมื่อตำแหน่งการตรวจสอบใกล้ผิวบนของโลหะพอกผิวแข็ง การเพิ่มจำนวนชั้นพอกแข็งส่งผลต่อการเพิ่มความแข็งแรงและความต้านทานการสึกหรอของแนวเชื่อม เนื่องจากการเพิ่มปริมาณธาตุเพิ่มความแข็งแรงในโลหะเชื่อม ตัวแปรการเชื่อมที่ให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักต่ำสุด 0.0218% คือ แนวเชื่อมแบบไม่รองพื้น กระแสไฟที่ใช้เชื่อม 210 A ความเร็วเดินแนวเชื่อม 300 มม./นาที และชั้นพอกแข็ง 3 ชั้น

คำสำคัญ: การเชื่อมอาร์กไส้ฟลักซ์, แนวเชื่อมพอกแข็ง, ความต้านทานการสึกหรอ.

¹อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

²อาจารย์ประจำสาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหการ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ สุพรรณบุรี

Abstract

This research aim is determined to study the effect of flux-cored arc welding parameters on the mechanical properties of JIS-S50C carbon steel hard-faced weld metal. This work is also studied a relation between mechanical properties and microstructure of hard-faced weld metal. The experimental results are summarized as follows. 1) Increasing the welding current is directly affected to increased hardness and wear resistance of a hard-faced weld metal. 2) Metallographic examinations of the hard faced weld at the top surface are showed the increased some elements which able to increase the hardness of weld metal i.e. silicon, vanadium, chromium, manganese and molybdenum. The increased hard-faced weld layer is affected for the hardness increasing and wear resistance of the weld metal because of their increased reinforced elements. Optimized welding parameters are produced for the maximum hardness of 837 HV which the minimum weight loss of 0.0218% i.e. that is not welded the first welded buffer layer, using the welding current of 210 A, the welding speed of 300 mm/min and the 3 hard-faced weld layers.

Keywords: flux cored arc welding, hard-faced weld, wear resistance.

1. บทนำ

เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางเป็นเหล็กกล้าที่นิยมในการใช้เป็นวัสดุสำหรับการผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักรกลเกษตร เนื่องจากความเหนียว ความแข็ง และความแข็งแรงของวัสดุที่เหมาะสมเมื่อได้รับแรงกระทำภายนอก [1] อย่างไรก็ตามเมื่อเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางถูกนำไปใช้งานและเกิดการสัมผัสกับความชื้นหรือเสียดสีกับวัสดุที่มีความแข็งเท่ากันหรือแข็งกว่า หรือกระทบกับวัสดุอื่นอาจส่งผลให้ผิวของเหล็กกล้าเกิดการสึกหรอ (Wear) เนื้อโลหะบริเวณที่เกิดการสัมผัสเสียดสีออกไปนั้นส่งผลโดยตรงทำให้ประสิทธิภาพของชิ้นส่วนลดลง [2]

การเชื่อมซ่อม (Repair welding) เป็นหนึ่งในวิธีการที่ถูกนำมาใช้ในการซ่อมแซมเพื่อชดเชยเนื้อโลหะที่เกิดการสึกหรอเนื่องจากการใช้งาน

กระบวนการเชื่อมซ่อมเพื่อเพิ่มปริมาณโลหะบนพื้นผิวเหล็กกล้าสามารถทำได้หลายวิธี ที่ผ่านมามีผลการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับการเชื่อมซ่อมพอกผิวแข็งบนเหล็กต่าง ๆ ด้วยวิธีการเชื่อมอาร์กที่น่าสนใจ เช่น ผิวพอกแข็งเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำสามารถเพิ่มความแข็งได้โดยการควบคุมอุณหภูมิระหว่างพอก (Interpass temperature) และการเลือกใช้ลวดเชื่อมที่มีคาร์บอนในอัตราที่ต่ำในลวดเชื่อมที่เชื่อมซ้อนแนวที่อุณหภูมิระหว่างพอกที่ส่งผลให้ความแข็งและความต้านทานการสึกหรอของผิวพอกแข็งสูงขึ้น [3] หรือการพอกผิวแข็งเหล็กกล้าคาร์บอนโดยการเชื่อมทับแนวรวม 4 ชั้น ที่พบค่าความแข็งของผิวพอกแข็งสูงเกิดจากการเติมโบรอนลงในโลหะพอกผิวแข็ง [4] หรือการเชื่อมพอกผิวแข็งบนเหล็กกล้าคาร์บอน 1020 ด้วยลวดเชื่อมกลุ่มเหล็กเป็นหลัก ที่พบความแข็ง

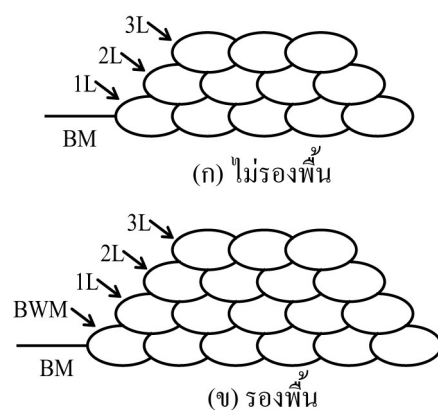
ของผิวพอกแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อเฟส Fe-Ti Fe-V Fe-Mo และกราไฟท์เพิ่มขึ้นได้ [5] นอกจากนี้ ผิวพอกแข็งที่เหมาะสมต้องสามารถนำมาทำการ ตกแต่งผิวหน้าเพื่อให้สามารถนำไปใช้ได้ในระดับ ที่ยอมรับได้ เช่น การกัดปาดผิวหน้าวัสดุประกอบ โลหะหลักแมกนีเซียมที่เสริมแรงด้วยอนุภาค ของซิลิกอนคาร์ไบด์ด้วยเครื่องมือตัดคาร์ไบด์ ที่มีการเคลือบผิวด้วย TiCN/TiN ที่เศษของ ของการกัดขนาดประมาณ 3-4 ไมโครเมตร มีลักษณะคล้ายพื้นเลื่อยลักษณะต่อเนื่องหรือ กึ่งต่อเนื่อง ค่าความหยาบผิวอยู่ในระดับที่ยอมรับ ได้ทางทฤษฎี [6] หรือการกลึงตัดเฉือนผิวพอก แข็งที่มีส่วนประกอบหลัก คือ โครเมียมคาร์ไบด์ (Fe-Cr-C) ที่ความสามารถในการตัดเฉือน (Machinability) ของผิวพอกแข็งโครเมียม- คาร์ไบด์ขึ้นอยู่กับลักษณะของโครงสร้างจุลภาค ที่ปรากฏ และการสึกหรอของคาร์ไบด์ขนาดใหญ่ [7] หรือการศึกษาอุณหภูมิของการกลึงผิวพอก แข็งโครเมียมคาร์ไบด์ (Fe-Cr-C) ที่อุณหภูมิ การกลึงขึ้นกับความละเอียดของคาร์ไบด์ละเอียด [8] เป็นต้น

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ในการเชื่อมพอก แข็งเหล็กกล้าคาร์บอน JIS-S50C ด้วยการเชื่อม อาร์กลดไฟฟฟลักซ์ และทำการศึกษาดัชนีการ เชื่อมที่ประกอบด้วยจำนวนชั้นพอกแข็ง กระแสเชื่อม และการเชื่อมแบบรองพื้น ซึ่งงาน ที่ได้นำไปทำการศึกษเปรียบเทียบความ สัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกลและโครงสร้าง จุลภาคของแนวเชื่อมต่อไป

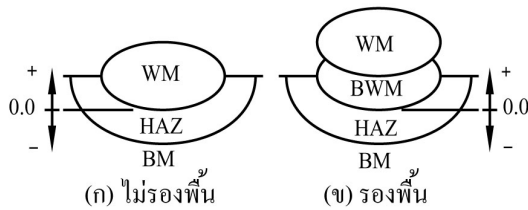
2. วิธีการทดลอง

วัสดุในการทดลอง คือ เหล็กกล้าคาร์บอน JIS-S50C (0.52C 0.26Si 0.78Mn 0.03P 0.01S 0.19Cr 0.01Mo 0.006V % โดยน้ำหนัก) แผ่นเหล็กถูกตัดด้วยเลื่อยกลที่มีการหล่อเย็น

ด้วยสารหล่อเย็นขณะทำการตัดให้มีรูปร่าง สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีขนาดกว้าง 100 มม. ยาว 150 มม. และหนา 25 มม. ก่อนทำการเชื่อม แผ่นเหล็กถูกนำไปทำการอบที่อุณหภูมิ 150°C จากนั้นแผ่นเหล็กกล้าถูกนำมาทำการเชื่อมพอก ผิวแข็งด้วยกรรมวิธีการเชื่อมอาร์กลดไฟฟฟลักซ์ ซึ่งมีตัวแปรการเชื่อมประกอบด้วย การเชื่อม เติ้นแนวบนแผ่นแบบไม่สายลวดเชื่อมทำราบ ลวดเชื่อมพอกผิวแข็งที่ใช้ คือลวดเชื่อมที่ส่วน ผสมหลักของโครเมียมคาร์ไบด์ ลวดเชื่อมรองพื้น ใช้ลวดเชื่อมเหล็กเหนียวที่มีส่วนผสมหลักของ คาร์บอน-ซิลิกอน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ภายนอก 1.2 มม. แก๊สคลุมสำหรับการเชื่อม ชั้นรองพื้น คือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ อัตราไหลของแก๊สปกคลุมแนวเชื่อม 12 ลิตร/ นาที สำหรับการเชื่อมพอกผิวแข็งไม่ใช้แก๊สคลุม กระแสเชื่อม 170-230A ความเร็วเดินแนว 150 มม./นาที อุณหภูมิระหว่างเทียวยเชื่อม มากกว่า 150°C จำนวนชั้นพอกผิวแข็ง 1-3 ชั้น และมีการเชื่อมแบบไม่มีและมีการสร้างชั้นรองพื้น ดังรูปที่ 1



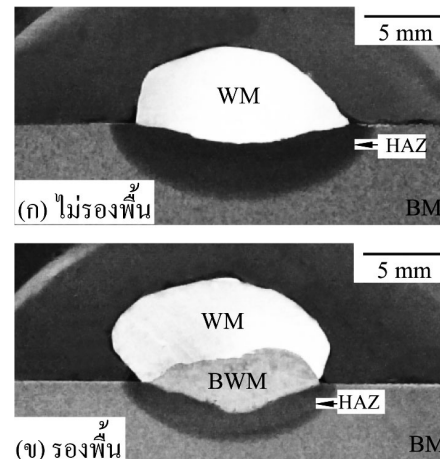
รูปที่ 1 ขั้นตอนการเชื่อมซ้อนแนว (BM = โลหะฐาน BWM = โลหะเชื่อมชั้นรองพื้น 1L = โลหะเชื่อม ชั้นที่ 1 2L = โลหะเชื่อมชั้นที่ 2 3L = โลหะเชื่อม ชั้นที่ 3)



รูปที่ 2 การทดสอบความแข็งแรงแนวเชื่อมพอกแข็ง (WM=โลหะเชื่อม HAZ=พื้นที่กระทบร้อน)

ชิ้นงานที่เตรียมด้วยวิธีการทางกลเพื่อการทดสอบสมบัติของแนวเชื่อมพอกแข็งประกอบด้วย การทดสอบความแข็งแรงโดยกำหนดสภาวะการทดสอบด้วยแรงกด 300 กรัมแรง เวลากดแช่ 10 วินาที การทดสอบความแข็งแรงกระทำในแนวตั้งจากผิวหน้าแนวเชื่อมพอกแข็งสู่โลหะฐาน กำหนดให้ระยะห่างระหว่างจุดทดสอบมีค่า 0.5 มม. ตำแหน่ง 0.0 มม. คือตำแหน่งที่เส้นขอบเขตระหว่างโลหะฐานและโลหะเชื่อม ดังรูปที่ 2 การตรวจสอบความต้านทานการสึกหรอ (Wear resistance) ของผิวพอกแข็งด้วยเครื่องทดสอบความต้านทานการสึกหรอนตาม ASTM G65 [9] โดยกำหนดสภาวะการทดสอบประกอบด้วยความเร็วรอบการหมุน 200 รอบ/นาที น้ำหนักกดรวม 130 นิวตัน สารขัด คือ ทรายซิลิกาขนาด 120 เมช ระยะเวลาในการขัด 2 นาที ระยะทางในการทดสอบรวม 4000 เมตร การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาแบ่งออกเป็น การตรวจสอบโครงสร้างในระดับมหภาคและจุลภาคของรอยเชื่อม การตรวจสอบเลือกทำการศึกษาที่ภาคตัดของชิ้นทดสอบที่ทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการเดินแนวเชื่อม การเตรียมชิ้นทดสอบประกอบด้วย การขัดหยาบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 150-1200 และขัดมันด้วยผงเพชรขนาด 1 ไมโครเมตร บนผ้าสักหลาดจนผิวหน้ามันวาวคล้ายกระจก ชิ้นงานมันวาวถูกนำมากัดผิวด้วยสารละลาย 5% ไนตรัล และทำการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงต่อไป

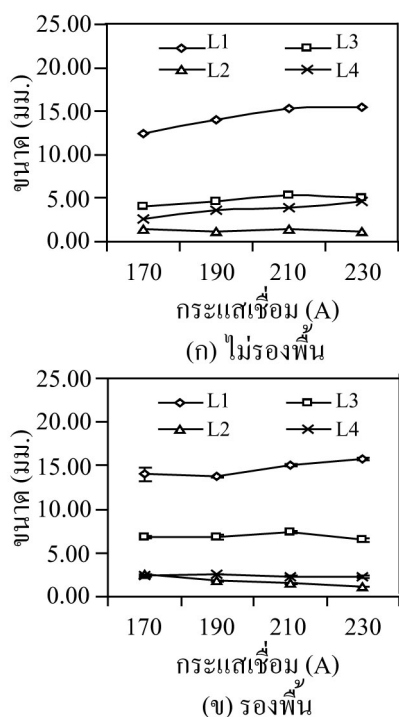
3. ผลการทดลองและการวิจารณ์



รูปที่ 3 โครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้นที่เชื่อมด้วยกระแส 210A

รูปที่ 3 (ก) และ (ข) แสดงโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมตัดขวางตามทิศทางการเดินแนวเชื่อม แนวเชื่อมพอกผิวแข็งถูกเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 210 A บนพื้นผิวเหล็กกล้าคาร์บอนที่ไม่มีการสร้างชั้นรองรับและมีการสร้างชั้นรองรับ พบว่าแนวเชื่อมที่ได้มีความสมบูรณ์ไม่พบจุดบกพร่องต่าง ๆ ในโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อม อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเชื่อมที่กระแสต่ำ 170 A พบจุดบกพร่องขนาดใหญ่ที่หลอมละลายไม่สมบูรณ์ ผลการตรวจสอบมิติของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งแบบไม่รองรับ ดังรูปที่ 4 (ก) และแบบรองรับ ดังรูปที่ 4 (ข) (L1 = ความกว้างของแนวเชื่อม L2 = ความสูงของแนวเชื่อม L3 = ระยะการซึมลึก L4 = ความกว้างของพื้นที่กระทบร้อน) พบว่ากระแสเชื่อมที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มที่ทำให้ค่าความกว้างของแนวเชื่อม ความสูงของแนวเชื่อม และความกว้างของพื้นที่กระทบร้อนของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งแบบไม่มีการสร้างชั้นรองรับและแบบมีการสร้างชั้นรองรับลดลง แต่ทำให้ระยะการซึมลึกของแนวเชื่อมพอกผิวแข็งมีการซึมลึกที่น้อยลง ค่าความกว้างและความสูงของแนวเชื่อม

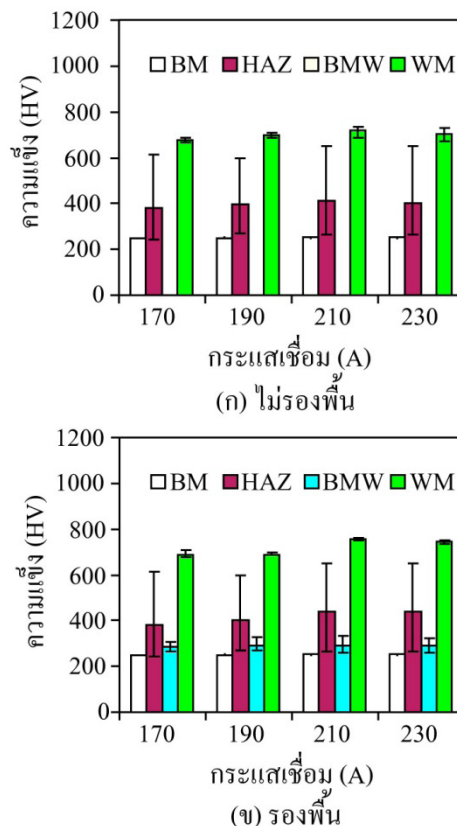
ที่เพิ่มขึ้นแสดงถึงความสามารถในการหลอมละลายและการเติมโลหะเชื่อมลงบนพื้นผิวของเหล็กกล้าคาร์บอน



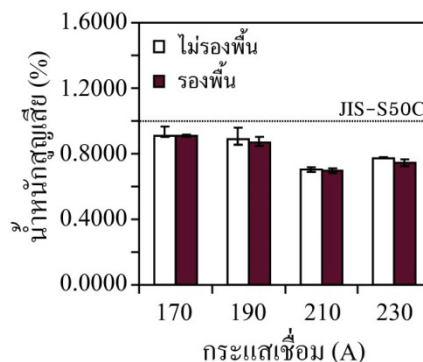
รูปที่ 4 ขนาดของการวัดมิติของแนวเชื่อม (ก) แบบไม่รองพื้น และ (ข) แบบรองพื้น

รูปที่ 5 แสดงผลการวัดความแข็งของแนวเชื่อมพอกแข็งที่ไม่มีและมีการสร้างชั้นพอกแข็งที่กระแสเชื่อมต่าง ๆ ค่าความแข็งของพื้นที่ที่กระแทกร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าแตกต่างจากโลหะฐานถึงเส้นการหลอมละลายด้านโลหะเชื่อม นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาค่าความแข็งของพื้นที่ที่กระแทกร้อนของแนวเชื่อมพอกแข็งที่ใช้กระแสเชื่อมต่างกันพบว่าค่าความแข็งที่ได้มีค่าสูงขึ้นเมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มขึ้น ตำแหน่งทดสอบความแข็งเข้าสู่พื้นที่ของชั้นรองพื้น ค่าความแข็งจะลดลงใกล้เคียงกับความแข็งของโลหะฐาน คือมีค่าความแข็งประมาณ 259-292 HV สำหรับกระแสเชื่อม 170-230 A ดังรูปที่ 5 (ข) ความแข็งแนวเชื่อม

พอกแข็งที่มีการสร้างชั้นรองพื้นมีค่าสูงกว่าความแข็งของแนวเชื่อมพอกแข็งที่ไม่มีการสร้างชั้นรองพื้น หากพิจารณาความแข็งของชั้นพอกผิวแข็งเป็นหลัก เหล็กกล้าคาร์บอนควรมีการสร้างชั้นรองพื้นก่อนการเชื่อมพอกผิวแข็งเพื่อให้ได้ค่าความแข็งที่สูงกว่า

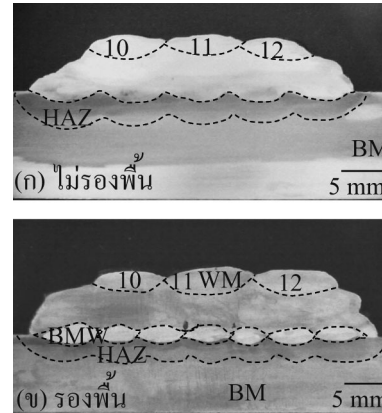


รูปที่ 5 ความแข็งของโลหะเชื่อมพอกผิวแข็ง 1 ชั้น



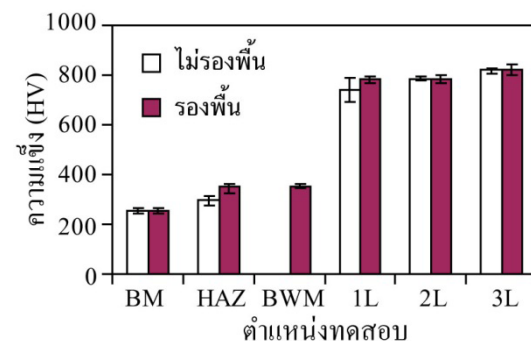
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักสูญหายและกระแสเชื่อมของแนวเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น

รูปที่ 6 แสดงผลการทดสอบการสึกหรอ (Wear test) ของแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง 1 ชั้น ที่ไม่มีการสร้างชั้นรองพื้นและมีการสร้างชั้นรองพื้น ที่กระแสเชื่อม 170-230 A พบว่า ค่าน้ำหนักสูญหายของผิวหน้าแนวเชื่อมพอกแข็ง มีค่าแนวโน้มที่ลดลงเมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มขึ้นจาก 170-210 A และแสดงค่าการสึกหรอต่ำสุด ที่กระแสเชื่อม 210 A ที่ค่าน้ำหนักสูญหาย ประมาณ 0.7007% และ 0.6976% สำหรับ แนวเชื่อมแบบไม่มีชั้นรองพื้นและแนวเชื่อมแบบมีชั้นรองพื้น ค่าน้ำหนักสูญหายที่พบมีความ สอดคล้องกับค่าความแข็งที่แสดงใน**รูปที่ 5** กล่าวคือ ค่าความแข็งที่สูงส่งผลโดยตรงทำให้ ค่าน้ำหนักสูญหายลดลง ความแข็งที่สูงกว่า ของแนวเชื่อมพอกแข็งที่มีการสร้างชั้นรองพื้น ส่งผลทำให้ค่าน้ำหนักสูญหายของแนวเชื่อม ลดลงได้ ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งและ ความต้านทานการสึกหรอของชั้นพอกแข็ง ที่เปลี่ยนแปลงซึ่งเป็นหนึ่งในเหตุผลหลัก คือ การเพิ่มขึ้นของธาตุผสมที่อยู่ในโลหะฐานและ โลหะผสมพอกแข็ง การเกิดโลหะคาร์ไบด์ในโลหะ พอกแข็งที่เพิ่มขึ้นส่งผลโดยตรงทำให้ความแข็ง และความต้านทานการสึกหรอในโลหะพอกแข็ง เพิ่มขึ้น โลหะคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นในกรณีการเชื่อม เหล็กกล้าคาร์บอนด้วยลวดเชื่อมที่มีโลหะผสม หลักหรือโครเมียมเป็นสารประกอบเชิงซ้อน รูปแบบต่าง ๆ เช่น $(Cr, Fe)_7C_3$ $(Cr, Fe)_{23}C_6$ หรือ Fe-Cr-C [10]



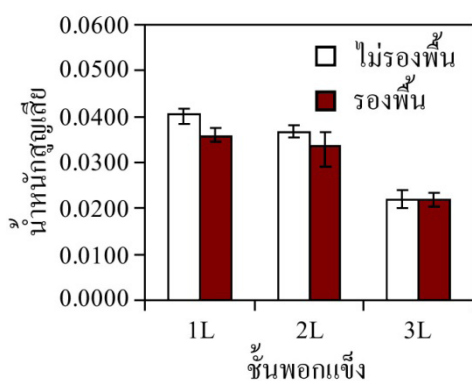
รูปที่ 7 โครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น

รูปที่ 7 แสดงโครงสร้างมหภาคแนวเชื่อมพอกแข็งที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 210 A จำนวนชั้นพอกแข็ง 3 ชั้น แบบไม่มีและมีการสร้างชั้นรองพื้น หมายเลข 10-12 คือ ลำดับชั้นของการเดินแนวเชื่อมพอกแข็งในชั้นพอกแข็งที่ 3 ผิวหน้าแนวเชื่อมที่ได้แสดงความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมและไม่สามารถตรวจพบจุดบกพร่องต่าง ๆ พบการแบ่งแยกพื้นที่ของแนวเชื่อมดังแสดงให้เห็นดังเส้นประ และไม่มีจุดบกพร่องบนพื้นที่โลหะเชื่อมใด ๆ เมื่อทำการเปรียบเทียบขนาดความกว้างและความสูงของแนวเชื่อมพอกแข็งชั้นที่ 3 ทั้งสองแบบ พบว่าแนวเชื่อมพอกแข็งแบบมีการสร้างชั้นรองพื้นมีความกว้างและความหนาสูงกว่าส่งผลทำให้ผิวพอกแข็งมีพื้นที่ในการรับการเสียดสีมากกว่า



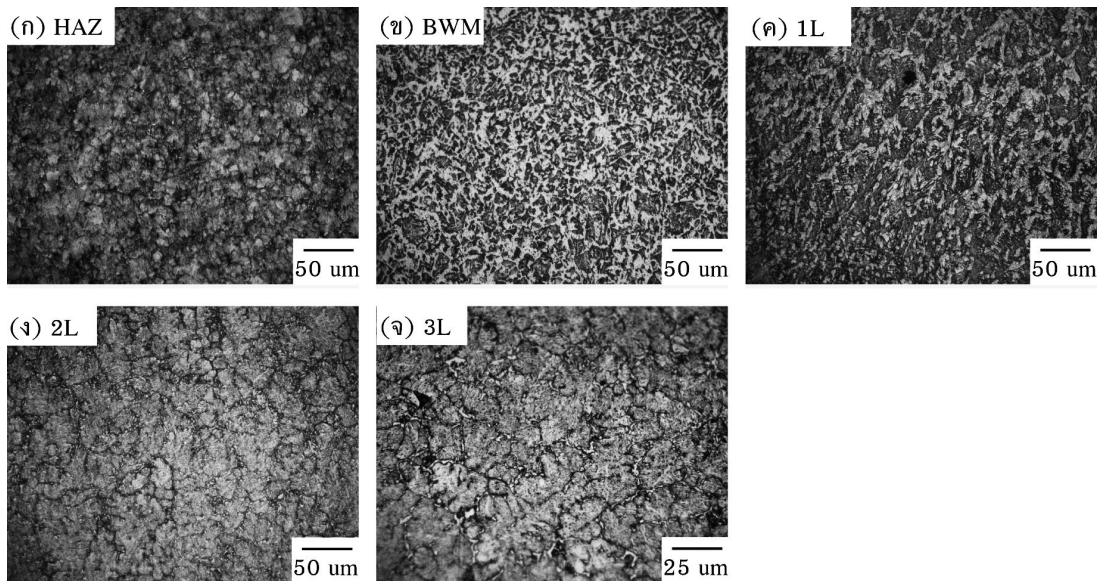
รูปที่ 8 ความแข็งโลหะเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น

รูปที่ 8 แสดงผลการทดสอบความแข็งแรงของแนวเชื่อมพอกแข็งที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 210 A พบว่าความแข็งแรงของแนวเชื่อมพอกแข็งมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนชั้นพอกผิวแข็งเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามมีความแตกต่างที่ตรวจสอบพบที่โลหะเชื่อมชั้นรองพื้นเมื่อเปรียบเทียบกับความแข็งแรงของแนวเชื่อมพอกแข็ง 1 ชั้น กล่าวคือแนวเชื่อมที่มีการเชื่อมพอกแข็งที่เพิ่มขึ้นถึง 3 ชั้นพอกผิวแข็งส่งผลทำให้ค่าความแข็งแรงของโลหะเชื่อมชั้นรองพื้นมีความแข็งแรงเพิ่มสูงกว่าพื้นที่กระแทกร้อนของแนวเชื่อม นอกจากนี้ความแข็งแรงที่ได้ของโลหะเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 1-3 มีค่าสูงกว่าแนวเชื่อมพอกแข็งแบบไม่มีการสร้างชั้นรองพื้น ความแตกต่างของค่าความแข็งแรงของแนวเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้นทั้ง 2 แบบมีค่าลดลงเมื่อจำนวนชั้นพอกผิวแข็งเพิ่มขึ้นจาก 1 ถึง 3 ชั้น ด้วยเหตุนี้จึงกล่าวได้ว่าการสร้างชั้นรองพื้นเพื่อทำการเพิ่มความแข็งแรงแก่โลหะฐานเหล็กกล้าคาร์บอน JIS-S50C อาจไม่มีความจำเป็นในการเชื่อมพอกแข็ง เมื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงของกระแสเชื่อมต่าง ๆ จากค่า 170-230 A



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรื้อดึง และจำนวนชั้นพอกแข็งที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 210 A

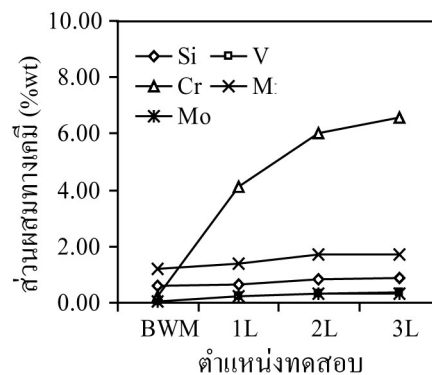
รูปที่ 9 แสดงผลการทดสอบความต้านทานการสึกหรอของแนวเชื่อมพอกแข็งชั้นที่ 1-3 ที่เชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 210 A พบว่าน้ำหนักรื้อดึงของชิ้นงานทดสอบแปรผกผันกับค่าความแข็งแรงของชั้นพอกผิวแข็ง ความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้น้ำหนักรื้อดึงลดลง แนวเชื่อมพอกแข็งที่มีการสร้างชั้นรองพื้นแสดงค่าความต้านทานการสึกหรอที่ดีกว่าค่าการรื้อดึงของน้ำหนักรื้อดึงของแนวเชื่อมพอกแข็งต่ำสุดที่กระแสเชื่อม 210 A และเป็นการเชื่อมแบบรองพื้นที่ค่าเท่ากับ 0.6299% และมีค่าสูงกว่าโลหะฐานประมาณ 40% การเพิ่มขึ้นของจำนวนชั้นพอกแข็งและความสูงของชั้นโลหะพอกแข็งที่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงและความต้านทานการสึกหรอของเหล็กกล้าคาร์บอนในการทดลองนี้มีผลการทดลองเป็นไปในแนวเดียวกันกับการเชื่อมพอกแข็งเหล็กหล่อสีเทาที่ใช้ในการผลิตลูกรีดสำหรับรีดอ้อยที่พบว่าจำนวนชั้นที่เพิ่มขึ้นจาก 1 ชั้นถึง 3 ชั้นทำให้ความหนาของชั้นพอกแข็งเพิ่มขึ้นและทำให้ความแข็งแรงของโลหะพอกแข็งที่เชื่อมด้วยลวดเชื่อมไส้ฟลักซ์ที่มีส่วนผสมหลักคือโครเมียม ปริมาณโครเมียมที่เพิ่มขึ้นก่อให้เกิดการรวมตัวของโครเมียมคาร์ไบด์เพิ่มขึ้นและส่งผลทำให้ความแข็งแรงและความต้านทานการสึกหรอเพิ่มขึ้นได้ อย่างไรก็ตามในการทดลองเชื่อมเหล็กหล่อสีเทานั้นทำการเชื่อมด้วยจำนวนชั้นโลหะเชื่อมพอกแข็งสูงสุด 3 ชั้นเท่านั้น [11]



รูปที่ 10 โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น ที่มีการสร้างชั้นรองพื้น และทำการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 210 A

รูปที่ 10 (ก) แสดงโครงสร้างจุลภาคของพื้นที่ที่กระแทกของแนวเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้น ที่ไม่มีการสร้างชั้นรองพื้น และทำการเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 210 A โครงสร้างจุลภาคแสดงการกระจายตัวของเฟอร์ไรต์ในพื้นที่หลักเพิร์ลไลต์ เฟสทั้งสองที่พบมีแนวโน้มที่เล็กกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่ที่กระแทกของแนวเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้นที่ไม่มีการสร้างชั้นรองพื้น เมื่อเปรียบเทียบกับเดนไดรต์ของโลหะเชื่อมชั้นรองพื้นของแนวเชื่อมพอกแข็ง 3 ชั้นดังรูปที่ 10 (ข) กับโครงสร้างเดนไดรต์ของโลหะเชื่อมชั้นรองพื้นของแนวเชื่อมพอกแข็ง 1-3 ชั้น พบว่าเดนไดรต์ที่พบมีขนาดที่ยาวกว่าและกระจายสม่ำเสมอมากกว่าในพื้นที่หลัก การกระจายตัวของเดนไดรต์ที่เล็กและสม่ำเสมอกว่าเป็นสาเหตุที่ทำให้ความแข็งแรงและความต้านทานการสึกหรอเพิ่มขึ้น เมื่อจำนวนชั้นโลหะพอกผิวแข็งเพิ่มขึ้นจาก 1-3 ชั้น ดังรูปที่ 10 (ค)-(จ) พบว่ารูปแบบของเดนไดรต์มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น เกิดเป็นเฟสที่มีขนาดเล็กสีขาวแทรกอยู่ระหว่างพื้นที่ที่สีเข้ม

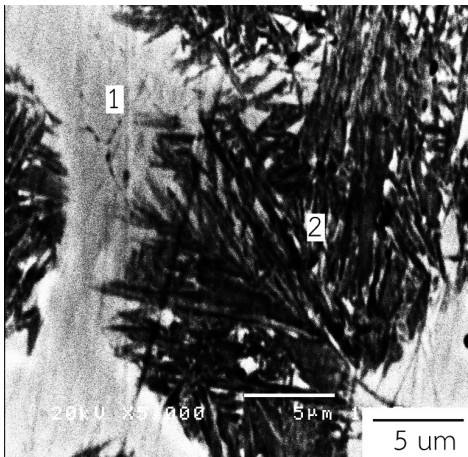
เพื่อความเข้าใจการก่อตัวของเฟสที่ละเอียดในพื้นที่โลหะเชื่อมพอกแข็งชั้นที่ 1-3 และพื้นที่โลหะเชื่อมชั้นรองพื้น



รูปที่ 11 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะเชื่อมของการเชื่อมพอก 3 ชั้น ด้วยกระแสเชื่อม 210 A

โครงสร้างจุลภากดังรูปที่ 10 (ข)-(จ) ถูกนำมาทำการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยวิธีการวัดการกระจายพลังงานรังสีเอ็กซ์และแสดงผลในรูปที่ 11 ผลการวิเคราะห์พบว่าปริมาณธาตุที่ทำหน้าที่เพิ่มความแข็งแรง คือ Si V Cr Mn และ Mo มีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนชั้นพอก

ผิวแข็งเพิ่มขึ้น ในที่สุดทำให้ความแข็งและความต้านทานการสึกหรอของเหล็กกล้าถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ นอกจากนี้ธาตุผสมที่ตรวจพบในชั้นโลหะพอกแข็งมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนชั้นเพิ่มขึ้นและเข้าใกล้กับส่วนผสมทางเคมีของโลหะเชื่อมที่ใช้ในการทดลอง [4]



รูปที่ 12 ตำแหน่งการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของเฟสกระจายตัวในโครงสร้างจุลภาคแนวเชื่อมพอกแข็งชั้นที่ 3 แบบไม่มีชั้นรองพื้นและเชื่อมด้วยกระแสเชื่อม 210A

รูปที่ 12 แสดงภาพถ่ายขยายตำแหน่งเฟสสีขาวขนาดเล็กที่กระจายในพื้นที่เฟสสีเข้มในโลหะพอกแข็งชั้นที่ 3 ที่มีลักษณะโครงสร้างคล้ายเข็มเรียงตัวชี้ออกมาด้านนอกคล้ายกับเดนไดรต์ การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของจุดที่ 1 บนพื้นที่เฟสสีขาว และจุดที่ 2 บนพื้นที่เฟสสีเข้ม ส่วนผสมทางเคมีที่ได้พบว่า เฟสสีขาว ($0.81\text{Si } 0.36\text{V } 9.31\text{Cr } 2.03\text{Mn}$ และ $0.59\text{Mo } \%$ โดยน้ำหนัก) ประกอบด้วยธาตุเพิ่มความแข็งและความแข็งแรงให้แก่โลหะเชื่อมมากกว่าเฟสสีเข้ม ($0.72\text{Si } 0.24\text{V } 6.13\text{Cr } 1.57\text{Mn}$ และ $0.36\text{Mo } \%$ โดยน้ำหนัก) เมื่อเฟสสีขาวขนาดเล็กที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอบนพื้นหลักสีเข้มส่งผลทำให้ความแข็งและความแข็งแรงของโลหะเชื่อมเพิ่มขึ้นได้ การเกิดเฟสสีขาวขนาด

เล็กกระจายตัวในพื้นที่หลักโลหะเชื่อมพอกแข็งนี้คาดว่าเป็นสาเหตุที่ทำให้ความต้านทานการสึกหรอเพิ่มขึ้นได้ ผลการทดลองที่ได้คล้ายกับการเกิดการกระจายตัวของเฟสสารประกอบขนาดเล็กที่กระจายตัวในโลหะพอกแข็งบนผิวเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ($0.14\% \text{C}$) ที่ทำให้ความแข็งและความต้านทานการสึกหรอเพิ่มขึ้น นอกจากนี้พบว่าลวดเชื่อมที่ใช้ในการเชื่อมพอกแข็งมีการแสดงการเกาะยึดของโลหะเชื่อมที่ดีกว่า [4] อย่างไรก็ตามการศึกษาเรื่องอิทธิพลของเฟสแข็งตัวขนาดเล็กต่อสมบัติทางกลของแนวเชื่อมพอกแข็งนี้ควรมีการศึกษาต่อไป

4. สรุปผลการทดลอง

4.1 กระแสเชื่อมที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ความแข็งของแนวเชื่อมพอกแข็งและความต้านทานการสึกหรอของแนวเชื่อมเพิ่มขึ้น การเกิดลักษณะนี้เนื่องจากการลดขนาดและการกระจายตัวสม่ำเสมอของเฟสเสริมแรงขนาดเล็กในโลหะเชื่อม

4.2 โครงสร้างทางโลหะวิทยาของแนวเชื่อมแสดงการเพิ่มขึ้นของธาตุที่มีผลในการเพิ่มความแข็งของโลหะประกอบด้วยซิลิกอน วานาเดียม โครเมียม แมงกานีส และโมลิบดีนัม เมื่อตำแหน่งการตรวจสอบเข้าใกล้ผิวบนของโลหะพอกผิวแข็ง

4.3 การเพิ่มจำนวนชั้นพอกผิวแข็งส่งผลต่อการเพิ่มความแข็งและความต้านทานการสึกหรอของแนวเชื่อม ความแตกต่างของค่าความแข็งและความต้านทานการสึกหรอของแนวเชื่อมแบบไม่มีและมีการสร้างชั้นรองพื้นมีค่าลดลงเมื่อจำนวนชั้นการพอกผิวแข็งเพิ่มขึ้น

4.4 ตัวแปรการเชื่อมที่ให้ค่าความแข็งสูงสุด 837 HV และอัตราการต้านทานต่ำสุด 0.6299% คือ แนวเชื่อมพอกแข็งแบบไม่รองพื้น กระแสเชื่อม 210 A ความเร็วเดินแนวเชื่อม 300 มม./นาที และจำนวนชั้นพอกแข็ง 3 ชั้น

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยประจำปี 2557 จากสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) (สวก.) และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

6. บรรณานุกรม

- [1] กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, ศิริชัย ต่อสกุล, อนินท์ มีมนต์, นรพร กลั่นประชา, 2553. วัสดุวิศวกรรม. กรุงเทพมหานคร: เซนเจก เลิร์นนิ่ง (ประเทศไทย) จำกัด.
- [2] The James F. Linclon Foundation. Repair and Maintenance Procedures for Heavy Machinery Components. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: www.jflf.org (10 กันยายน 2558)
- [3] Selvi, S., Sankaran, S.P., Srivatsavan, R., 2008. "Comparative study of hardfacing of valve seat ring using MMAW process," Journal of Materials Processing Technology, 207: 356-362.
- [4] Hemmati, I., Ocelik, V., De Hosson, J. T. M., 2012. "Dilution effects in laser cladding of Ni-Cr-B-Si-C hardfacing alloys," Materials Letters, 84: 69-72.
- [5] Yang, K., Yu, S., Li, Y., Li, C., 2008. "Effect of carbonitride precipitates on the abrasive wear behaviour of hardfacing alloy," Applied Surface Science, 254: 5023-5027.
- [6] Pedersen, W., Ramulu, M., 2006 "Facing SiCp/Mg metal matrix composites with carbide tools", Journal of Materials Processing Technology, 172: 417-423.
- [7] Ren, X.J., Yang, Q.X., James, R.D., Wang, L., 2004 "Cutting temperatures in hard turning chromium hardfacings with PCBN tooling," Journal of Materials Processing Technology, 147: 38-44.
- [8] Ren, X.J., James, R.D., Brookes, E.J., Wang, L., 2001. "Machining of high chromium hardfacing materials", Journal of Materials Processing Technology, 115: 423-429.
- [9] Buchely, M. F., Gutierrez, J. C., León, L. M., Toro, A., 2005. "The effect of micro-structure on abrasive wear of hardfacing alloys", Wear, 259: 52-61.
- [10] Chang, C.M., Chen, Y.C., Wu, W., 2010. "Microstructural and abrasive characteristics of high carbon Fe-Cr-C hardfacing alloy", Tribology International, 43: 929-934.
- [11] Buchanan, V.E., Shipway, P.H., McCartney, D.G., 2007. "Microstructure and abrasive wear behaviour of shielded metal arc welding hardfacings used in the sugar-cane industry", Wear, 263: 99-110.

**รูปแบบของบทความสำหรับ
วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมนคลธัญบุรี**
**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

บทความนี้กล่าวเกี่ยวกับรูปแบบและวิธีการส่งบทความเพื่อเสนอต่อกองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ราชมนคลธัญบุรี 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.

¹อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมีและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

²อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

³อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

1. ข้อกำหนดทั่วไป

บทความต้องประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ตามลำดับต่อไปนี้คือ ชื่อเรื่องภาษาไทย ชื่อเรื่องภาษาอังกฤษ ชื่อผู้เขียนบทความ อีเมล สถาบัน ที่อยู่สถาบันอย่างละเอียด บทความย่อภาษาไทย บทความย่อภาษาอังกฤษ เนื้อเรื่องแบ่งเป็น บทนำ เนื้อความหลัก สรุป กิตติกรรมประกาศ (ถ้ามี) เอกสารอ้างอิง และภาคผนวก (ถ้ามี)

2. คำแนะนำในการเขียนและพิมพ์

2.1 คำแนะนำทั่วไป

บทความที่เสนอจะต้องพิมพ์เป็นภาษาไทย หรือภาษาอังกฤษ ตามรูปแบบที่กำหนด ซึ่งพร้อมที่จะนำไปถ่ายเพลท เพื่อพิมพ์ออฟเซตได้ทันที

การพิมพ์ให้พิมพ์ลงบนกระดาษ A4 โดยพิมพ์เป็นสองคอลัมน์ตามรูปแบบบทความนี้ ขนาดของคอลัมน์เป็นไปตามที่กำหนด จะต้องพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์เลเซอร์ที่มีความละเอียดไม่น้อยกว่า 300 dpi.

ให้พิมพ์โดยไม่เว้นบรรทัด เมื่อจะขึ้นหัวข้อใหม่ให้เว้นบรรทัด 1 บรรทัด และจะต้องพิมพ์ให้เต็มคอลัมน์ก่อนที่จะขึ้นคอลัมน์ใหม่หรือขึ้นหน้าใหม่ ห้ามเว้นที่เหลือไว้ว่างเปล่า

การลำดับหัวข้อในส่วนหนึ่งของเนื้อเรื่องนี้ให้ใส่เลขกำกับโดยให้บทนำเป็นหัวข้อหมายเลข 1 และหากมีการแบ่งหัวข้อย่อย ก็ใช้เลขระบบทศนิยมกับหัวข้อย่อย เช่น 2.1 เป็นต้น

ให้ใส่เลขเรียงลำดับหน้าด้วยดินสอไว้ที่มุมขวาบนของกระดาษทุกหน้า

2.2 ขนาดตัวอักษรและการเว้นระยะ

พิมพ์บทความภาษาไทยด้วยตัวอักษรรูปแบบ “TH SarabunPSK”

ชื่อเรื่องบทความให้ใช้ตัวอักษรขนาด

16 พอยน์ ตัวเข้ม

ชื่อผู้เขียน สถาบันให้ใช้ตัวอักษรขนาด

14 พอยน์ ตัวปกติ

ชื่อหัวข้อย่อยให้ใช้ตัวอักษรขนาด 14

พอยน์ ตัวเข้ม

บทความย่อและเนื้อความต่าง ๆ ให้ใช้ตัวอักษรขนาด 14 พอยน์ ตัวปกติ

สมการต่าง ๆ ให้ใช้ตัวอักษรขนาด 14 พอยน์ หรือตัวอักษร TH SarabunPSK 14 พอยน์

การเว้นระยะบรรทัดทั้งในแนวตั้งแบบ exactly 16 พอยน์

ให้จัดเนื้อเรื่องในแต่ละบรรทัดเรียงชิดซ้ายและขวาอย่างสวยงาม

2.3 ชื่อเรื่อง ชื่อผู้แต่ง และชื่อหัวข้อ

การพิมพ์ชื่อเรื่อง ให้วางตำแหน่งกลางหน้ากระดาษแบบคอลัมน์เดียว

ชื่อผู้เขียน และ อีเมล ให้พิมพ์ไว้ใต้ชื่อเรื่องและอยู่กลางหน้ากระดาษแบบคอลัมน์เดียว

ไม่ต้องระบุตำแหน่งวิชาการ หรือสถานะของนักศึกษาใด ๆ ทั้งสิ้น

ชื่อหัวข้อย่อยต่าง ๆ ให้วางตำแหน่งชิดขอบซ้าย

2.4 การจัดทำรูปภาพ

รูปภาพจะต้องมีความกว้างไม่เกิน 81 มม. เพื่อให้ลงในหนึ่งคอลัมน์ได้ หรือกรณีจำเป็นจริง ๆ เพื่อรักษารายละเอียดในภาพอาจยอมมิให้ความกว้างได้เต็มหน้ากระดาษ (กว้าง 168 มม.)

ตัวอักษรทั้งหมดในภาพจะต้องมีขนาดใหญ่สามารถอ่านได้สะดวก และต้องไม่เล็กกว่าตัวอักษรในเนื้อเรื่อง

รูปภาพทุกรูปจะต้องมีหมายเลข และคำบรรยายใต้ภาพ 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

สมการทุกสมการจะต้องมีหมายเลขกำกับอยู่ภายในวงเล็บและเรียงลำดับที่ถูกต้องควรใช้ตัวพยัญชนะเอียงแสดงถึงพารามิเตอร์หรือตัวแปรในสมการ ตำแหน่งของหมายเลขสมการจะต้องอยู่ชิดขอบด้านขวาของคอลัมน์ เว้นหนึ่งบรรทัดก่อนเขียนสมการ และเว้นหนึ่งบรรทัดหลังเขียนสมการ จัดให้สมการอยู่ตรงกลางคอลัมน์ ดังตัวอย่างนี้

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

เริ่มเขียนคำอธิบายตั้งแต่บรรทัดนี้

2.6 การจัดทำตาราง

ตัวอักษรในตารางจะต้องไม่เล็กกว่าตัวอักษรในเนื้อเรื่อง ควรตีเส้นกรอบตารางด้วยหมึกดำให้ชัดเจน

ตารางทุกตารางจะต้องมีหมายเลขและคำบรรยายกำกับเหนือตาราง 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. กรณิบทความภาษาอังกฤษ

ผู้พิมพ์บทความเป็นภาษาอังกฤษ กรุณาดูคำแนะนำ วิธีการพิมพ์บทความภาษาอังกฤษที่แนบมาด้วย

4. การส่งบทความ

ผู้เขียนสามารถส่งต้นฉบับ ทางเว็บไซต์ออนไลน์ ของวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชวมงคลวิทยุ www.engineer.rmutt.ac.th/journal/ (เลือกเมนู Online Submission) หรือเข้าระบบโดยตรงผ่านทาง <http://www.enclm.rmutt.ac.th/enjournal/> โดยต้องทำการลงทะเบียนเพื่อสมัครสมาชิกวารสารและ

นำส่งวารสารต้นฉบับ ในรูปแบบ “Word ไฟล์” อีกทั้งต้องส่ง “แบบฟอร์มการส่งบทความทางวิชาการ เพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชวมงคลธัญบุรี” มายัง อีเมล enjournal@en.rmutt.ac.th หรือ จัดส่งไปรษณีย์มายัง “กองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชวมงคลธัญบุรี 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 ขั้นตอนบทความนั้นจะถูกส่งคืน และไม่สามารถผ่านการพิจารณาได้

5.สรุป

ผู้เขียนบทความกรุณาตรวจสอบบทความอย่างรอบคอบโดยใช้เวลาอย่างเพียงพอ ก่อนส่งให้คณะกรรมการพิจารณา จะทำให้บทความของท่านมีคุณภาพสูงและผ่านการพิจารณาได้ง่ายขึ้น

6.กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้เขียนบทความทุกท่านที่ให้ความร่วมมือรักษาระเบียบการเขียนบทความอย่างเคร่งครัด

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานทดแทน. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <http://dede.go.th/dede/index.php> (30 มีนาคม 2552) .
- [2] ฉวีวรรณ รมยานนท์, 2545. **เขียนแบบเทคนิค 2**. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น.
- [3] ถาวร รัตนพรประดิษฐ์, 2551. **ศึกษาความเป็นไปได้ของการเมอร์เซอร์ไรส์กางเกง เปรียบเทียบกับการเมอร์เซอร์ไรส์ผืนผ้าเดนิม**. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาสิ่งทอ. มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [4] ส.วงศ์ศรีตระกูล, 2552. “วช.หนุนแม่ใจสร้างฟาร์กักหน้ลผลิตไฟฟ้าในเขตภาคเหนือตอนล่าง,” **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.

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. Style and format

2.1 General

Manuscripts are typed single space except for headings. Font type

2.2 Title Block

The title should appear in upper and lower case without underlining, centered across both columns. Type

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

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

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

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.

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 not 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 Denim Fabric**. Master of Art’s Thesis. Rajamangala University of Technology Thamyaburi
- [5] Wikipedia. **Technology**. [Online] Available : <http://Wikipedia.org> (30 March 2009).



สมาชิกเลขที่

.....

ใบสมัครสมาชิกวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลัญบุรี

วันที่สมัคร

ข้าพเจ้า นาย/นาง/นางสาว สกุล อาชีพ

ที่อยู่ (สำหรับจัดส่งวารสาร) เลขที่ ถนน แขวง/ตำบล

เขต/อำเภอ จังหวัด รหัสไปรษณีย์

โทรศัพท์ โทรสาร e-mail

มีความประสงค์สมัครเป็นสมาชิก

อัตราค่าสมาชิก

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลัญบุรี 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

ธนาณัติ สั่งจ่าย

ตัวแลกเงินไปรษณีย์ สั่งจ่าย

โอนเงินเข้าบัญชีธนาคาร ชื่อบัญชี เลขที่บัญชี

หมายเหตุ 1. กรุณาส่งสำเนาใบเข้าบัญชี (pay-in-slip) หรือโทรสารมายังสำนักงาน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ พร้อมเขียนชื่อ – นามสกุล และหมายเลขสมาชิก (ถ้ามี)

2. นักศึกษาที่สมัครทางไปรษณีย์ กรุณาส่งสำเนาบัตรประจำตัวนักศึกษาแนบมาด้วย

ลงชื่อ ผู้สมัคร

(.....)

แบบฟอร์มการส่งบทความทางวิชาการ
เพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมนคลัญบุรี

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

ชื่อ-สกุล.....

(ภาษาอังกฤษ).....

ตำแหน่งทางวิชาการ (โปรดระบุ) ☐ ศาสตราจารย์ ☐ รองศาสตราจารย์ ☐ ผู้ช่วยศาสตราจารย์

อื่นๆ(โปรดระบุ).....

ที่อยู่ (ที่ติดต่ได้).....

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

โทรสาร.....อีเมล.....

มีความประสงค์ขอส่งบทความ เรื่อง:

ชื่อบทความ (ภาษาไทย).....

ชื่อบทความ (ภาษาอังกฤษ).....

การตรวจสอบ ☐ ทำการลงทะเบียน และ ส่งวารสารต้นฉบับใน เว็บไซต์

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

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

วันที่ ส่งวารสารต้นฉบับ เข้าสู่ระบบออนไลน์

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า บทความนี้เป็นผลงานของข้าพเจ้าและผู้ร่วมงานตามชื่อที่ระบุไว้ในบทความจริง และบทความนี้ไม่เคยลงตีพิมพ์ในวารสารใดมาก่อน และข้าพเจ้าจะไม่นำส่งบทความนี้ไปพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารอื่นภายใน 60 วัน นับจากวันที่ข้าพเจ้าส่งบทความ

ลงนาม.....

(.....)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

TECHNICAL ARTICLE FORM
FOR PUBLISHING ON JOURNAL OF ENGINEERING, RMUTT

Title ☐ Mr. ☐ Ms. ☐ Others (Please specify).....

Name-Surnames

Academic Positions (Please specify) ☐ Professor ☐ Associate Professor ☐ Assistant Professor

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.enclm.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

(.....)

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

