วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลธัญบุรี
Journal of Engineering, RMUTT

ปีที่ 12 ฉบับที่ 2 เดือนกรกฎาคม – ธันวาคม 2557 www.engineer.rmutt.ac.th/journal ISSN 1685-5280

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเป็นเอกสารเผยแพร่งานวิชาการและวิจัยทางด้านวิศวกรรมศาสตร์
2. เป็นสื่อแลกเปลี่ยนความรู้ใหม่ทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ระหว่างนักวิจัยและผู้สนใจ
3. เพื่อส่งเสริมสนับสนุนให้คณาจารย์ และบุคลากรคณะวิศวกรรมศาสตร์ทำผลงานทางด้านวิชาการที่เป็นประโยชน์ต่อสังคม
4. เป็นเอกสารรวบรวมรายงานวิจัยและบทความทางวิชาการที่น่าสนใจและมีคุณค่าทางวิศวกรรมศาสตร์ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

เจ้าของ คณะวิศวกรรมศาสตร์

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

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลธัญบุรี

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

พิมพ์ที่ บริษัท ทริปเพิ้ล กรุ๊ป จำกัด

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

คณะวิศวกรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เป็นคณะหนึ่งที่จัดการศึกษาระดับปริญญาตรี และปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตร์ โดยมีจุดประสงค์ เพื่อผลิตวิศวกรในหลักสูตรปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต (วศ.บ) และวิศวกรในหลักสูตรปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม) สนองความต้องการในตลาดแรงงานและพัฒนาอุตสาหกรรมของประเทศ

ส่งเสริมงานด้านวิจัย และดำเนินงานวิจัยทางอาชีวศึกษาและเทคโนโลยี

จัดอบรมและสัมมนาวิชาการให้กับครูประจำการและอาจารย์ผู้สอนทั้งของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และเอกชนเพื่อยกระดับความรู้ทางวิชาการให้สอดคล้องกับความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีและแผนภูมิการบริหารงานคณะวิศวกรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์มีวัตถุประสงค์ที่จัดการเรียนการสอนเพื่อให้นักศึกษามีความรู้พื้นฐานและวิชาชีพและสามารถวิเคราะห์และสังเคราะห์ระบบและงานด้านวิศวกรรมศาสตร์ได้เป็นอย่างดี เพื่อที่จะให้สำเร็จเป็นบัณฑิตที่มีความสามารถในการประกอบอาชีพซึ่งสอดคล้องและตรงกับความต้องการของตลาดแรงงาน โดยบัณฑิตจะต้องมีความรับผิดชอบและซื่อสัตย์ ควบคู่กับความรู้ทางด้านวิชาการ มีจริยธรรมควบคู่กับการมีคุณธรรมประจำใจ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลธัญบุรี

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิผู้พิจารณาบทความ

รศ.ดร.วันชัย ริจิรวนิช	คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.เข็มชัย เหมะจันทร	คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.อุษา แสงวัฒนาโรจน์	คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.สิริวรรณ กิตติเนาวรัตน์	คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.ชิดชนก มีใจซื่อ	คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ผศ.ดร.ทวีชัย สำราญวานิช	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
ผศ.ดร.อาทิตย์ โสตรโยม	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม
รศ.ดร.ณรงค์ อยู่ถนอม	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม
ผศ.ดร.จงจินต์ ผลประเสริฐ	คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
ผศ.ดร.อังคณา พันธ์หล่อ	วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต
รศ.ดร.วิชัย ฉัตรทินวัฒน์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผศ.ดร.ธีระพงษ์ ว่องรัตนะไพศาล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผศ.ดร.ศิวะ อัจฉริยวิริยะ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผศ.พนมกร ขวาของ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร.อิสสรีย์ หรรษาจรูญโรจน์	อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
รศ.ณรงค์ บวบทอง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
ผศ.ดร.บรรยงค์ รุ่งเรืองด้วยบุญ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
รศ.ดร.เจียรนัย เล็กอุทัย	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
รศ.ดร.กัณวริช พลูปราชญ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)
รศ.ดร.ศิริวรรณ ศรีสรฉัตร์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)
รศ.เวคิน ปิยรัตน์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)
ผศ.ดร.นำคุณ ศรีสนิท	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)
ผศ.ดร.ปฐมทัศน์ จิระเดชะ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)
ดร.สาธิต พุทธชัยยงค์	อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผศ.ดร.ปทุมทิพย์ ปราบพาล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ดร.ประเทืองทิพย์ ปานบำรุง	คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
รศ.ดร.เพ็ญจิตร ศรีนพคุณ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
รศ.ดร.ก้องกิติ พูสวัสดิ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
รศ.ดร.วัชรินทร์ วิทยกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
รศ.ดร.ธำรงรัตน์ มุ่งเจริญ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
ผศ.ดร.สมเจตน์ พัชรพันธ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
รศ.ดร.วราวุธ วุฒิวณิชย์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
รศ.ดร.ธัญญา นิยมาภา	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
รศ.ดร.วิบูลย์ ชื่นแขก	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

รศ.ดร.ยุทธชัย บรรเทิงจิตร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.สมเกียรติ จงประสิทธิ์พร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.กานต์ พนาศุภมัสดุ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.สมิตร ส่งพิริยะกิจ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.ปานมนัส ศิริสมบูรณ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.ชวลิต เบญจางคประเสริฐ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.กนก เจนจิระพงศ์เวช	คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.อิสระชัย งามหรู	คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.วิจิตร กิณเรศ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.นภพินทุ์ อนันตรศิริชัย	คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผศ.มิ่ง โลกิจแสงทอง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ดร.ภพ จันทร์เจริญสุข	คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.วราวุฒิ ครูส่ง	คณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.มานะ อมรกิจบำรุง	คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.นริส ประทินทอง	คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ธนิต สวัสดิ์เสวี	คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศ.ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ	ศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.โกสินทร์ จำนงไทย	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.วิโรจน์ บุญอำนวยวิทยา	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.สมโพธิ อยู่ไว	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.ทวิช พูลเงิน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.สุทัศน์ ลีลาทวีวัฒน์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร.ศิรินทร ทองแสง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.รุ่งเรือง กาลศิริศิลป์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ.ดร.ชัยยุทธ ช่างสาร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ.ดร.ณฐา คุปตัษเฐียร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ.มานพ ตันตระบัณฑิตย์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ.ธีระพงษ์ ไชยเฉลิมวงศ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ.สุจิระ ขอจิตต์เมตต์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.สมชัย หิรัญวโรดม	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.ปิติศานต์ กร้ำมาตร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.สมหมาย ผิวสอาด	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.สมหมาย ตรัยไชยาพร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.ศิวกร อ่างทอง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.ไพฑูรย์ กิติสุนทร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ผศ.ดร.สมนึก สังข์หนู	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.สมประสงค์ ภาษาประเทศ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.อภิชาติ สนธิสมบัติ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.สุนัน ปานสาคร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.สุรัตน์ ตรัยวนพงศ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.สุรินทร์ แหงมงาม	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.จิรวัฒน์ คชสาร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.มาโนช รุจิภากร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.วีระศักดิ์ ละอองจันทร์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.ชาญยุทธ กฤตสุนันท์กุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.ฐนียา รังษีสุริยะชัย	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.จตุพล ตั้งปกาศิต	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.มนูศักดิ์ จานทอง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.จตุรงค์ ลังกาพินธุ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.อภินันท์ วัลภา	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.ฉัตรชัย ศุภพิทักษ์สกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.วันชัย ทรัพย์สิงห์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.ระพี กาญจนะ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.ไพฑูรย์ รักเหลือ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์วีระพงษ์ ครูส่ง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.เจริญ เจริญชัย	คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.นิธิวัฒน์ ชูสกุล	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.สนธยา ทองอรุณศรี	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา วิทยาเขตตาก
ดร.นเรศ อินต๊ะวงศ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา วิทยาเขตภาคพายัพ
ผศ.ดร.เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ดร.ประธาน วงศ์ศริเวช	ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์แห่งชาติ (สวทช.)
รศ.จิราภรณ์ เบญจประกายรัตน์	คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์

การดูดซับกลิ่นของผลิตภัณฑ์น้ำมันจากขยะพลาสติกด้วยถ่านกัมมันต์
Adsorption Odors of Oil Product from Waste Plastics with Activated Carbon.

ณัฐชา เพ็ชร์ยิ้ม[1] ปิยะมาส สิริแสงสว่าง[1] และ วีราภรณ์ ผิวสอาด[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงกลิ่นของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสขยะพลาสติกประเภทพอลิเอทิลีนที่มาจากขวดน้ำดื่มโดยใช้ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ชนิดผงและชนิดอัดแท่งเป็นตัวดูดซับสารที่ก่อให้เกิดกลิ่นฉุน ในการทดลองจะเปรียบเทียบการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ 3 วิธี ได้แก่ การกระตุ้นด้วยความร้อน การกระตุ้นด้วยกรดไนตริกเข้มข้น 60 ร้อยละโดยน้ำหนัก และการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 60 ร้อยละโดยน้ำหนัก ผลการทดลองพบว่าถ่านกัมมันต์ชนิดอัดแท่งที่กระตุ้นด้วยกรดไนตริกให้น้ำมันไพโรไลซิสที่มีกลิ่นพึงประสงค์มากที่สุด คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ ได้แก่ ค่าความหนืด จุดวาบไฟ ค่าสีและค่าการกลั่นเป็นไปตามมาตรฐานน้ำมันดีเซลที่กรมธุรกิจพลังงานได้ประกาศไว้ เมื่อเลือกตัวอย่างน้ำมันที่ให้กลิ่นลดลงจำนวน 5 ตัวอย่างไปวิเคราะห์องค์ประกอบสารด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิทรี (GC-MS) พบว่าในน้ำมันมีช่วงจำนวนคาร์บอนส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง C_{14}-C_{19} ร้อยละ 27.79 และไม่พบสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ก่อให้เกิดกลิ่น เช่น คีโตน แอลไคน์ ไซโคลแอลเคน ไซโคลแอลคีน และแอลกอฮอล์

คำสำคัญ: ไพโรไลซิส, พอลิเอทิลีน, กลิ่น, ถ่านกัมมันต์

Abstract

The aim of this research is improve odors of fuel oil from pyrolysis of high density polyethylene plastic wastes from drinking water bottles. Activated carbons in form power and extrude were used to adsorbed compound which produced odor of pyrolytic oil. In the experiment, the comparisons of three activated methods such as: activated by heating, activated by 60% wt nitric acid and activated by

[1] อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมีและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

60% wt potassium hydroxide. The results were shown that the extrude activated carbon with nitric acid had less odor of oil products, properties of their such as viscosity, flash point and distillation followed the diesel standard of Department of Energy Business. Chemical compositions of selected 5 oil samples were analyzed by Gas Chromatography Mass Spectrometry (GC-MS) had carbon atom range C_{14}-C_{19} for 27.79% and disappear hydrocarbon compound of odor of pyrolytic oil such as ketone, alkyne, cycloalkane cycloalkene and alcohol.

Keywords: pyrolysis, polyethylene, odor, activated carbon

1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากปัญหาราคาน้ำมันเชื้อเพลิงที่สูงขึ้นประกอบกับจำนวนรถยนต์ในประเทศไทยที่ทวีจำนวนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้พลังงานทดแทนน้ำมันเชื้อเพลิงเป็นที่ต้องการมากขึ้น การหาพลังงานขึ้นมาทดแทนการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงจึงมีบทบาทอย่างมาก ในกรณีของน้ำมันดีเซลนั้น มีการวิจัยเพื่อหาพลังงานทดแทน เช่น น้ำมันไบโอดีเซล น้ำมันจากขยะพลาสติก เป็นต้น การนำขยะพลาสติกมาผ่านการใช้ความร้อนสูงภายใต้ความดันบรรยากาศในสภาวะที่มีปริมาณออกซิเจนต่ำหรือไม่มีออกซิเจน โดยการนำก๊าซไนโตรเจนเข้ามาแทนที่ ทำให้โครงสร้างไฮโดรคาร์บอนเกิดการแตกสลายได้ผลิตภัณฑ์ออกเป็น 3 ส่วนคือ ก๊าซ น้ำมันเชื้อเพลิงและของแข็ง ในปัจจุบันทางเลือกสำหรับประชาชนทั่วไปในการใช้เชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันดีเซล มีเพียงน้ำมันไบโอดีเซลเท่านั้นที่มีจำหน่ายตามปั๊มน้ำมันต่าง ๆ เหตุเพราะน้ำมันเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกมีความไม่แน่นอนของประเภทขยะเนื่องจากประเทศไทยไม่มีระบบการคัดแยกขยะ แตกต่างกับในต่างประเทศ เช่น ประเทศญี่ปุ่นที่มีการคัดแยกขยะตั้งแต่ครัวเรือนแล้ว น้ำมันเชื้อเพลิงจากกระบวนการไพโรไลซิสที่ได้จะมีคุณสมบัติเทียบเคียงได้กับน้ำมันดีเซล แต่มีกลิ่นฉุนเฉพาะตัว หากสูดดมเป็นเวลานาน อาจทำให้เวียนศีรษะได้

น้ำมันไพโรไลซิสจากพลาสติกจะมีคุณสมบัติทางเคมีและการกระจายของสารประกอบอินทรีย์ขึ้นอยู่กับสภาวะการเกิดปฏิกิริยาและวัตถุดิบที่ป้อนในถังปฏิกรณ์เคมี [1] เมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-MS จะพบสารประกอบมากกว่า 300 ชนิด สามารถแบ่งเป็น 4 กลุ่มสารอินทรีย์ คือพาราฟิน โอเลฟิน แนฟทีนและอะโรเมติก [2] ในอากาศรอบบริเวณของกระบวนการไพโรไลซิสขยะพลาสติกประเภทพอลิเอทิลีนจะพบสารจำพวกสารอินทรีย์อัลดีไฮด์ คีโตนในปริมาณสูง [3]

ถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่อยู่ในรูปคาร์บอนอสัณฐานชนิดหนึ่ง ผลิตขึ้นมาจากกระบวนการก่อกัมมันต์ (Activated) ทำให้พื้นที่ผิวภายในเพิ่มขึ้น มีความสามารถในการดูดซับสูง เนื่องจากมี

โครงสร้างแบบรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก เมื่อนำถ่านกัมมันต์มาผ่านกระบวนการกระตุ้นจะทำให้มีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น เพราะพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นและผิวมีความว่องไวมากขึ้น ในอุตสาหกรรมมีการใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับก๊าซหรือไอระเหยของตัวทำละลายอินทรีย์ ทำให้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับที่เหมาะสมในการนำมาลดกลิ่นในน้ำมันไพโรไลซิส

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการลดกลิ่นของสารอินทรีย์ระเหย ในน้ำมันไพโรไลซิสจากขยะพอลิเอทิลีน โดยเติมตัวดูดซับเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์เคมีเพื่อดูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่ทำให้เกิดกลิ่น ตัวดูดซับที่ศึกษาได้แก่ ถ่านกัมมันต์ชนิดผงและชนิดอัดแท่งที่ผ่านการกระตุ้นด้วยความร้อน กระตุ้นด้วยกรดไนตริก (HNO_3) และกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เพื่อเปรียบเทียบว่าตัวดูดซับชนิดใดสามารถลดปริมาณสารที่ก่อให้เกิดกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ในน้ำมันไพโรไลซิสได้ [4]

3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การไพโรไลซิสระดับห้องปฏิบัติการ

ใช้ถังปฏิกรณ์เคมีแบบกะขนาด 1 ลิตร ทำการไพโรไลซิสที่ความดัน 1 บรรยากาศภายใต้สภาวะไร้ก๊าซออกซิเจน โดยใช้ก๊าซไนโตรเจนเข้าไปแทนที่ ใช้ซีโอไลต์ปริมาณ 0.5% โดยน้ำหนักเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและให้ควบคุมความร้อนที่อุณหภูมิ 450 °ซ เป็นเวลานาน 3 ชั่วโมง [5]

3.2 วัตถุดิบและสารเคมี

ขยะพลาสติกพอลิเอทิลีนจากขวดน้ำดื่มขนาดอนุภาคเฉลี่ย 5 มิลลิเมตร ถ่านกัมมันต์ชนิดผง ขนาดอนุภาค 300 เมช ถ่านกัมมันต์ชนิดอัดแท่ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มม. ทำการศึกษาผลของปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ 1, 2 และ 3 ร้อยละโดยน้ำหนัก โดยเปรียบเทียบน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากการใช้ถ่านกัมมันต์ที่ไม่ผ่านการกระตุ้นเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้น 3 วิธีคือ (1) กระตุ้นด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 110 °ซ (2) กระตุ้นด้วย HNO_3 60 ร้อยละโดยน้ำหนัก และ (3) กระตุ้นด้วย KOH 60 ร้อยละโดยน้ำหนัก

3.3 การทดสอบสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิง

ทำการทดสอบสมบัติของน้ำมันไพโรไลซิสทั้งหมด 5 เครื่อง ได้แก่ เครื่องวัดจุดวาบไฟ (Flash point) ยี่ห้อ Pensky Martens รุ่น HFP 380 ASTM D 93 เครื่องวัดความหนืด ยี่ห้อ Tomson รุ่น Tv 2500 ASTM D 445 เครื่องวัดความถ่วงจำเพาะ ASTM D 1298 เครื่องวัดค่าการกลั่น ยี่ห้อ Tanaka รุ่น AD-6 ASTM D 86 และเครื่องวัดสี ยี่ห้อ Lovibond รุ่น Comparator 3000 series ASTM D 1500

3.4 เครื่องมือวิเคราะห์

ตรวจสอบลักษณะผิวของถ่านกัมมันต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ยี่ห้อ LEO รุ่น 1450 VP LEO ใช้กำลังขยาย 2,000 เท่า และทำการวิเคราะห์สารประกอบ

ในน้ำมันเชื้อเพลิงด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปคโตเมทรี (Gas Chromatography-Mass Spectrometry, GC-MS) ใช้คอลัมน์ HP-5 ความยาว 30 ม. เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25 มม. Split 10:1 อัตราการไหล 0.9 มล./นาที อุณหภูมิเตา 170 °ซ (8 °ซ/นาที) จนถึง 320 °ซ (10 °ซ/นาที)

4. ผลการวิจัย

4.1 ปริมาณถ่านกัมมันต์ต่อการดูดซับกลิ่น

เมื่อเปรียบเทียบกลิ่นของน้ำมันไพโรซิสที่ใช้ถ่านกัมมันต์ที่ไม่กระตุ้นและกระตุ้นด้วยความร้อน พบว่าที่ปริมาณถ่านกัมมันต์ 3% โดยน้ำหนัก สามารถลดกลิ่นฉุนของน้ำมันได้ดีกว่า จึงเลือกปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ 3% โดยน้ำหนักมาศึกษาผลการลดกลิ่นน้ำมันโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วย HNO_3 และ KOH จากตัวอย่างน้ำมันทั้งหมด 17 ตัวอย่าง ได้ทำการเลือกน้ำมันไพไรไลซิสที่ให้กลิ่นฉุนน้อยมาก 5 ตัวอย่าง ได้แก่ P คือน้ำมันไพโรไลซิสที่ไม่ผ่านกระบวนการดูดซับกลิ่น AP_3 คือน้ำมันไพโรไลซิสที่ดูดซับกลิ่นโดยใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดผงไม่กระตุ้น AE_3 คือน้ำมันไพโรไลซิสที่ดูดซับกลิ่นโดยใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดอัดแท่งไม่กระตุ้น A-AP_3 คือน้ำมันไพโรไลซิสที่ดูดซับกลิ่นโดยใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดผงกระตุ้นด้วยกรด A-AE_3 คือน้ำมันไพโรไลซิสที่ดูดซับกลิ่นโดยใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดอัดแท่งกระตุ้นด้วยกรด แล้วนำมาทดสอบสมบัติและองค์ประกอบสาร

4.2 การทดสอบสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิง

จากผลการวัดสมบัติน้ำมันไพโรไลซิส (ตารางที่ 1) พบว่าน้ำมันไพโรไลซิสทั้ง 5 การทดลอง มีความหนืด ความถ่วงจำเพาะ ค่าสี ได้ตามมาตรฐานน้ำมันดีเซลที่กรมธุรกิจพลังงานได้ประกาศ เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล พ.ศ. 2553 ไว้ ยกเว้นจุดวาบไฟที่ต่ำกว่าค่ามาตรฐาน ส่วนค่าการกลั่นมีเพียงการทดลองที่ AP_3 ซึ่งเป็นการใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดผงไม่ผ่านการกระตุ้นมีค่าการกลั่นไม่เป็นไปตามมาตรฐาน (เกิน 357 °ซ)

4.3 การวิเคราะห์สารประกอบ

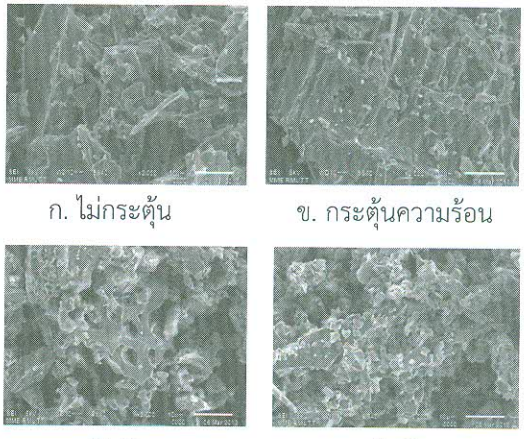
การทดลองที่ให้น้ำมันไพโรไลซิสให้กลิ่นที่พึงประสงค์มากที่สุด (กลิ่นฉุนน้อย) คือ A-AE_3 โดยทำการเปรียบเทียบกับน้ำมันไพโรไลซิสที่ไม่ผ่านการดูดซับกลิ่น พบว่า มีสารพวก คีโตน แอลไคน์ ไซโคลแอลเคน ไซโคลแอลคีน และแอลกอฮอล์ลดลง ได้แก่ trimethylcyclohexane, ethylcyclohexane, ethyl heptyl ether,1-proponylcyclohexane, 1-nonene, methyl-cyclooctane, , 1-pentyl-2-propyl-cyclopentane, hexyl-cyclopentane, octadecane, cyclotetradecane, 3-methyl-2-cyclopentenone, trans-7-pentadecene, 1-octadecene, tetracosane, cyclotetracosane (ดังตารางที่2)

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของน้ำมันไพโรไลซิส

คุณสมบัติ	ตัวอย่างน้ำมันไพโรไลซิส					มาตรฐานน้ำมันดีเซล
	P	AP_3	AE_3	$A\text{-}AP_3$	$A\text{-}AE_3$	
ความหนืด@40 °ซ (เซนติสโตรก)	2.4	2.51	2.67	2.71	2.34	ช่วง 1.8-4.1
ความถ่วงจำเพาะ	0.790	0.785	0.78	0.78	0.78	ช่วง 0.81-0.87
สี	1	1.5	1.5	1.5	1	ไม่สูงกว่า 4
จุดวาบไฟ (°ซ)	37.6	33	36	33	30	ไม่ต่ำกว่า 52 °ซ
การกลั่น (°ซ) ที่กลั่นได้ปริมาณ 90%	349.6	393.75	277.2	355.3	354.5	ไม่เกิน 357 °ซ

4.4 ลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์

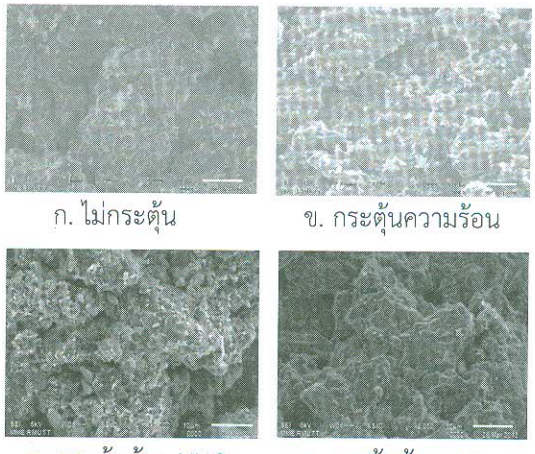
พื้นผิวของถ่านกัมมันต์ตรวจสอบโดยใช้ SEM เปรียบเทียบถ่านกัมมันต์ทั้งชนิดผงและชนิดอัดแท่งที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้นกับที่ผ่านการกระตุ้นด้วยความร้อน, กระตุ้นด้วย HNO_3 และถ่านกัมมันต์ทั้งชนิดผงและชนิดอัดแท่งที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้นกับที่ผ่านการกระตุ้นด้วยความร้อนกระตุ้นด้วย HNO_3 และกระตุ้นด้วย KOH แสดงดังรูปที่ 1 และ 2 พบว่าถ่านกัมมันต์ทั้งชนิดผงและชนิดอัดแท่งก่อนการกระตุ้น และหลังจากผ่านการกระตุ้นจะมีลักษณะพื้นผิวที่เปลี่ยนไป พื้นผิวจะมีความขรุขระ ทำให้มีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น จากผลวิเคราะห์องค์ประกอบของสารด้วยเครื่อง GC-MS ตัวอย่างน้ำมัน $A\text{-}AE_3$ สามารถลดสารที่ให้กลิ่นไม่พึงประสงค์ได้ และจากรูปที่ 2 (ข) เห็นได้ว่าพื้นผิวของถ่านกัมมันต์นี้ค่อนข้างมีความขรุขระมากที่สุด



ก. ไม่กระตุ้น ข. กระตุ้นความร้อน

ค. กระตุ้นด้วย HNO_3 ง. กระตุ้นด้วย KOH

รูปที่ 1 ลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ชนิดผง



ก. ไม่กระตุ้น ข. กระตุ้นความร้อน

ค. กระตุ้นด้วย HNO_3 ง. กระตุ้นด้วย KOH

รูปที่ 2 ลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ชนิดอัดแท่ง

ตารางที่ 2 วิเคราะห์ผลร้อยละปริมาณของสารประกอบต่าง ๆ ในน้ำมันไพโรไลซิสด้วยเครื่อง GC-MS

ลำดับ	ชื่อสารประกอบ	P	AP_3	AE_3	A-AP_3	A-AE_3
1	1,2-dimethyl-Cyclohexene	0.348	0.281	0.510	0.330	0.444
2	Trimethylcyclohexane	0.137				
3	Ethylcyclohexane,	0.264		0.321	0.401	0.389
4	Ethyl heptyl ether	0.483				
5	3-methyl-2-Cyclopentenone	0.310	0.234	0.347		
6	2-Pentanone, 4-hydroxy-4-methyl		0.194	0.159		0.188
7	1-(2-Propenyl) Cyclopentene					0.395
8	2,3-dimethyl-2-Cyclopenten-1-one				0.180	
9	8-Hexadecyne				0.300	
10	3-Octyne			0.119		
11	1-methyl-2-pentyl-Cyclopropane				1.534	
12	Spiro[2.5]octane		0.438	0.380		
13	1-Nonene	1.337	1.220	1.417		
14	Nonane (CAS)	1.421	1.422	1.369	1.702	1.611
15	2,4-Pentadien-1-ol		0.166			
16	1-propenyl-Cyclohexane	0.290				
17	1-Ethyl-2-methyl Benzene		0.220		0.279	
18	1-butyl-2-methylcyclopentene		0.195			
19	1-Decene	2.042	1.745	0.208	0.278	2.387
20	4-Decene				0.236	
21	Cyclodecene			0.177		
22	E-2-Decene	0.336		0.225		
23	methyl-Cyclooctane	0.609				
24	Decane	2.169	1.845	1.726	2.049	1.988
25	cis-3-Decene		0.210			
26	1-heptyl-2-methyl-Cyclopropane	2.650				
27	Bicyclo[2.2.2]octane, 2-methyl-		0.182			
28	4-Trifluoroacetoxytetradecane					

ตารางที่ 2 (ต่อ)

ลำดับ	ชื่อสารประกอบ	P	AP_3	AE_3	A-AP_3	A-AE_3
29	Undecane	2.951	2.358	0.583	2.413	2.504
30	1-Undecane		2.323	2.176	2.479	
31	2-Undecene,(Z)-			0.222		
32	5-Undecene		0.278		0.257	
33	Cyclododecane	2.969	0.262	2.432		0.376
34	trans-2-nonadecene			0.132		
35	E-5-Eicosene		0.134			
36	Dodecane	3.552	2.752	2.392	2.734	2.845
37	2-Dodecene	0.365	0.306		0.309	0.278
38	Z-5-Dodecene			0.200		
39	1-Dodecene	0.365	2.352			2.844
40	2-butyl-1,1,3-trimethyl-Cyclohex-ane	0.536	0.146	0.471		
41	1-Tridecene	3.236	2.545	0.280	2.602	3.070
42	6-Tridecene		0.279			0.518
43	Tridecane	4.156	2.894	0.382	2.772	3.163
44	5-Nonadecen-1-ol				0.429	0.553
45	Z-3-Tridecene	0.534				
46	E-5-Tridecene		0.247			0.269
47	E-1,9-Tetradecadiene		0.366	0.388		
48	1-pentyl-2-propyl-cyclopentane	0.416				
49	1-Tetradecene	3.286	2.818		2.935	3.318
50	E-2-Tetradecene		0.418	2.877	0.406	
51	2-Methyl-1-tetradecene		0.314			
52	Tetradecane	4.798	3.390	3.006	3.249	3.408
53	6-Tetradecene	0.481				
54	n-butylcyclohexane	0.518				
55	Hexyl- Cyclopentane	0.621				

ตารางที่ 2 (ต่อ)

ลำดับ	ชื่อสารประกอบ	P	AP_3	AE_3	A-AP_3	A-AE_3
56	1-Pentadecene	2.996	2.799	2.728	2.778	3.503
57	Pentadecane	4.887	3.543	3.284	3.388	3.557
58	trans-7-pentadecene	0.410	0.374	0.256		
59	1-Hexadecene		2.707	2.668		
60	1-Heptadecene	2.603	0.525			3.236
61	Hexadecane		3.945	3.379	3.717	3.993
62	Z-3-Hexadecene		2.584		2.762	0.575
63	E-2-Octadecadecene-1-ol		0.348	0.339		
64	3-Heptadecene	0.612	0.463	2.429	2.578	2.884
65	Heptadecane	5.136	3.964	3.336	3.749	3.851
66	8-Heptadecene		0.401	0.387		0.466
67	3-Heptadecene, (Z)-	0.525	0.463	0.318		0.443
68	Cyclododecanemethanol		0.308	2.127	0.290	0.379
69	Cyclotetradecane	0.392				
70	8-Hatadecene	0.431				
71	1-Octadecene		2.214	0.381	2.190	1.642
72	Octadecane			3.291	3.803	3.855
73	5-Octadecene, (E)-		0.519		0.396	0.421
74	Z-5-Nonadecene		1.891	1.810	1.953	2.040
75	Nonadecane		4.006	3.217	3.722	3.696
76	1-Octadecene	1.598			1.902	
77	Eicosane	3.607	3.923	3.343	3.782	3.465
78	1-Octadecene	0.986				
79	Octadecane	4.711				
80	5-Octadecene	0.447				
81	Cis-2-Methyl-7-Octadecene	0.303				
82	Heneicosane		3.693	2.843	3.372	3.472
83	Z-5-Nonadecene	1.310				1.303

ตารางที่ 2 (ต่อ)

ลำดับ	ชื่อสารประกอบ	P	AP_3	AE_3	$A\text{-}AP_3$	$A\text{-}AE_3$
84	1-Docosene		1.092			0.932
85	Docosane	2.465	3.694	2.752	3.368	3.037
86	1-Nonadecene		0.714	0.863	1.015	0.703
87	Nonadecane	4.154	3.143		2.984	2.711
88	Cyclotetracosane		0.483	0.430		0.511
89	Tetracosane		2.696	2.349		2.129
90	Pentacosane	0.950	2.149	2.301	2.754	1.752
91	Tetracosane	1.426			2.572	
92	Octacosane		0.922	2.192	1.276	
93	Nonacosane		0.596	1.983	2.194	
94	1-Tricosene	0.396				
95	Triacontane		0.384	1.777		
96	Tetracosane	1.426			2.572	
97	Z-9-Tricosene	0.121				
98	Hexacosane	0.817				
99	Cyclotetracosane	0.224			0.497	
100	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-		0.119	0.287		
101	4-Methoxy-3-(3-Methoxyphenyl)-4-methylpentan-1-ol	0.096				

เมื่อแบ่งช่วงของจำนวนคาร์บอนอะตอมในน้ำมันไพโรไลซิสเป็น ช่วงน้ำมันเบนซิน C_6-C_{12} ช่วงน้ำมันก๊าด C_{10}-C_{14} ช่วงน้ำมันดีเซล C_{14}-C_{19} และช่วงน้ำมันหล่อลื่น C_{19}-C_{35} พบว่าน้ำมันไพโรไลซิสที่ผ่านการดูดซับกลิ่นแล้วจะอยู่ในช่วงน้ำมันดีเซลมากที่สุด โดยตัวอย่าง $A\text{-}AE_3$ มีน้ำมันในช่วงดีเซลคิดเป็นร้อยละ 27.79 รองมาเป็นช่วง C_{10}-C_{14} ร้อยละ 26.38

5. สรุปผล

น้ำมันไพโรไลซิสจากขยะพลาสติกพอลิเอทิลีน เมื่อใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดอัดแท่งปริมาณ 3% โดยน้ำหนักที่ผ่านการกระตุ้นด้วยกรด HNO_3 มาดูดซับกลิ่น ทำให้สามารถลดสารอินทรีย์ที่ก่อให้เกิดกลิ่นฉุนได้เมื่อเทียบกับน้ำมันไพโรไลซิสที่ไม่ผ่านการดูดซับกลิ่น ส่วนสมบัติของน้ำมันมีจุดวาบไฟที่ไม่เป็นไปตามมาตรฐานน้ำมันดีเซล

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ เป็นผู้ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัย ทุนงบประมาณรายได้ประจำปี 2555 และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหะการที่ช่วยเหลือในการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ด้วยเครื่อง SEM

เอกสารอ้างอิง

[1] Pinto, F. Costa, P. Gulyurlu, I., Cabrita, I., Pyrolysis of plastic wastes. 1. Effect of plastic waste composition on product yield, J Anal Appl Pyrolysis 1999; 51:39.

[2] Seo, YH. Shin, DH., Determination of paraffin and aromatic hydrocarbon type chemicals in liquid distillates produced from the pyrolysis process of waste plastics by isotope-dilution mass spectrometry, Fuel 2002;81:2103

[3] Tsai, CJ. Chen, ML. Chang, KF. Mao, IF., The pollution characteristics of odor, volatile organochlorinated compounds and polycyclic aromatic hydrocarbons emitted from plastic waste recycling plants, Chemosphere 2009;74:1104

[4] เดชา ฉัตรศิริเวช, 2552. **กระบวนการดูดซับ.** สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[5] ศิรินภา บุตรดี, ณัฐธิญา อิ่มละม้าย, ณัฐชา เพ็ชร์ยิ้ม. **การผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกด้วยกระบวนการไพโรไลซิส,** ภาควิชาวิศวกรรมเคมีและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี; 2553.

การลดของเสียในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนฉีดพลาสติกสำหรับชิ้นส่วนยานยนต์ โดยใช้หลักการออกแบบการทดลอง

Defects Reduction in the process of automotive injection plastic part by using Design of Experiment (DOE)

ปฐมพงษ์ หอมศรี[1] และ จักรพรรณ คงธนะ[2]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการลดปริมาณของของเสียที่เกิดขึ้นจากการผลิตในงานฉีดพลาสติกแบบ Injection Molding โดยใช้หลักการทางสถิติมาช่วยทำการวิเคราะห์หาสาเหตุและปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์เข้ามาอธิบายถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์เพื่อที่ทำการปรับปรุง สภาพปัญหาของโรงงานก่อนดำเนินการแก้ไขมีของเสียประเภทขนาดไม่ได้มาตรฐาน (มีขนาดโตกว่ากำหนด) ซึ่งส่งผลกระทบต่อโรงงานอย่างมากในด้านค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น การวิจัยจึงเริ่มดำเนินการจากวิเคราะห์หาสาเหตุด้วยแผนภาพสาเหตุและผลของงานที่มีปริมาณของเสียมากที่สุดแล้วจึงทำการคัดเลือกปัจจัย เพื่อนำปัจจัยที่มีลำดับความสำคัญมาก 3 อันดับแรกมาทำการพิจารณาจากการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องของผลกระทบพบว่าปัจจัยที่มีลำดับความสำคัญมากอยู่ในส่วนของวิธีการได้แก่ แรงดันย้ำ (Holding pressure), อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold Temperature) และ รอบการทำงาน (Cycle Time) แล้วจึงนำปัจจัยที่ได้มาทำการออกแบบการทดลองเพื่อทดสอบความมีนัยสำคัญของปัจจัยเหล่านั้นโดยใช้การออกแบบ 2^k Factorial Design จากผลการทดลองพบว่าปัจจัยทั้งสามมีผลกระทบต่อขนาดของชิ้นงานทั้งแบบ Main Effect และ Interaction จากนั้นจึงดำเนินการปรับปรุงแก้ไขปัญหาของโรงงานในเรื่องของของเสียประเภทขนาดไม่ได้มาตรฐาน (มีขนาดโตกว่ากำหนด) โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ทั้ง 3 ตัวแล้วดำเนินการผลิตพบว่าสามารถลดปริมาณของเสียได้จากเดิมร้อยละ 39.05 ลดลงมาเป็นร้อยละ 2.78 จากการตั้งเป้าหมายในการลดของเสียลง 50% ตามนโยบายของบริษัท จากผลที่ได้เนื่องมาจากในปัจจัยเรื่อง Mold Temperature การทดลองใช้ค่า 45°C มีค่าสูงจากเดิมส่งผลให้การเกิดโครงสร้างผลึกมีโอกาสในการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบมากขึ้นส่งผลให้ขนาดลดลง ในส่วน

[1] วิศวกรอาวุโสประจำ บริษัท ฟอร์ด มอเตอร์ คัมปะนี (ประเทศไทย) จำกัด

[2] กรรมการผู้จัดการบริษัท JK Consultant Group จำกัด

ปัจจัยเรื่อง Cycle Time ใช้ค่า 32 วินาทีซึ่งมีค่าลดลง มีผลให้ชิ้นงานถูกเอาออกจากแม่พิมพ์เร็วขึ้น ทำให้สามารถเย็นตัวนอกแม่พิมพ์ได้มาก ทำให้ชิ้นงานสามารถหดตัวได้เพิ่มขึ้นและปัจจัยเรื่อง Holding Pressure ใช้ค่า 10MPa เนื่องจาก Holding Pressure เป็นการเพิ่มมวลให้กับชิ้นงานจึงควรมีค่าต่ำเพื่อให้มวลของชิ้นงานลดลง

คำสำคัญ: กระบวนการฉีดพลาสติก, ขนาดไม่ได้มาตรฐาน, การออกแบบการทดลอง

Abstract

The objective of this research is to reduce the amount of Injection Molding defects. Statistical principles are applied to analyze causal factors that affect product's quality. In addition, before beginning the research, the problems about large, non-standard shape defects which affected production costs are the main problem for the factory. The research is conducted by using Cause and Effect Diagram to analyze the causes to determine the most 3 critical factors for further analysis. The FMEA is consequently used to identify the first three importance factors; holding pressure, mold temperature, and cycle time. Those factors are used in designing the experiment with 2^k Factorial Design to test them if affect this problem significantly. Finally, the factors considered are adjusted to decrease the defects. The result from the research reveals that those factors affect to the problem by both main effect and interaction among the factors. After adjusting the factors, the amount of defects has reduced from 39.05 percent to 2.78 percent follow objective target 50% refer company policy. It can be explained when mold temperature is higher, it allows the product to generate more crystal structure opportunity to reducing size. In terms of Cycle Time, the shorter cycle time is forced the product to cool down outside the mold and promote more shrinkage. Lastly, low Holding Pressure would lower the product's mass. The experiment showed that Mold temperature is 45 degree Celsius, Cycle time is 32 second and holding pressure is 10 Mpa would be the most appropriate for this case.

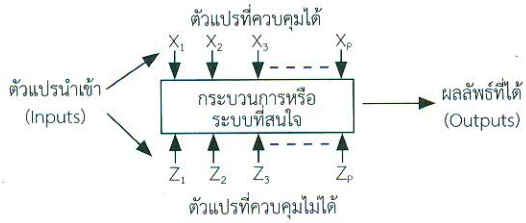
Keywords: Injection Molding Process, Non-standard Size, Design of Experiment (DOE)

1. บทนำ

จากผลิตภัณฑ์มวลรวมในประเทศ [6] ไตรมาสที่ 2/2555 ที่ผ่านมา ภาคการผลิตสาขาอุตสาหกรรมปรับตัวดีขึ้น ขยายตัวร้อยละ 5.0 จากที่หดตัวร้อยละ 4.3 ในไตรมาสที่แล้ว เป็นผลจากการฟื้นตัวของโรงงานอุตสาหกรรมที่ได้รับผลกระทบจากปัญหาน้ำท่วมเมื่อปลายปีที่ผ่านมา การใช้กำลังการผลิตกลับสู่ภาวะปกติ มีการเร่งการผลิตเพื่อตอบสนองต่อความต้องการและคำสั่งซื้อที่ยังคงตกค้างจากในช่วงอุทกภัยที่ผ่านมา โดยเฉพาะอุตสาหกรรมยานยนต์เป็นผลมาจากการผลิตอุตสาหกรรมยานยนต์ขยายตัวสูง เพื่อตอบสนองความต้องการในประเทศที่ขยายตัวสูงขึ้นจากนโยบายรถยนต์คันแรกของรัฐบาล และคำสั่งซื้อจากต่างประเทศที่ยังคงขยายตัว อุตสาหกรรมฉีดพลาสติกถือเป็นอีกหนึ่งอุตสาหกรรมที่มีการขยายตัวอย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว อีกทั้งชิ้นส่วนยานยนต์ปัจจุบันหันมาทำเป็นพลาสติกซึ่งเป็นวัสดุทางเลือกที่ยังคงใช้ในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์เพิ่มมากขึ้น โรงงานที่เป็นกรณีศึกษาถือเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ฉีดพลาสติกที่ผลิตและจำหน่ายให้กับ OEM (Original Equipment Manufacturer) และผู้ผลิตชิ้นส่วนประกอบยานยนต์ต่าง ๆ ที่อยู่ในห่วงโซ่อุปทานของกระบวนการผลิตรถยนต์ทั้งในประเทศและต่างประเทศ โดยผู้บริหารถือหุ้นโดยคนไทย 100% ปัจจุบันโรงงานที่เป็นกรณีศึกษากำลังประสบปัญหาเรื่องการผลิตผลิตภัณฑ์ไม่ผ่านข้อกำหนดการตรวจสอบ ซึ่งถือว่าเป็นปัญหาที่สำคัญอย่างยิ่งที่จะต้องทำการตรวจสอบสาเหตุและดำเนินการแก้ไข เพราะส่งผลต่อต้นทุนการผลิตที่เพิ่มสูงขึ้น และถ้าหากว่ามีผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้คุณภาพส่งออกไปถึงมือลูกค้าจะทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่สามารถประกอบได้และส่งผลต่อหน้าที่การใช้งานของชิ้นส่วนในอนาคตอีก และที่สำคัญลูกค้าจะเอาปัญหาที่เกิดขึ้นมาใช้ในการตัดสินใจกับผลิตภัณฑ์ใหม่ที่จะเกิดขึ้นในอนาคต ปัจจุบันการออกแบบการทดลองถูกนำมาใช้กันในการศึกษาเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตเพื่อลดของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการ

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การออกแบบการทดลอง [2] คือ การทดสอบเพียงครั้งเดียวหรือต่อเนื่อง โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรนำเข้า (Input Variable) ในระบบหรือกระบวนการที่สนใจศึกษา เพื่อที่จะทำให้สามารถสังเกตและชี้ถึงสาเหตุต่าง ๆ ที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ที่ได้ (Out puts or Responses) จากกระบวนการหรือระบบนั้น โดยตัวแปรนำเข้าจะถูกจัดแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ควบคุมได้ เรียกว่า ตัวแปร (หรือปัจจัย) ที่ควบคุมได้ (Controllable Variables or Factor) หรือ ตัวแปร (หรือปัจจัย) ที่สามารถออกแบบได้ (Design Variable or Factors) และกลุ่มที่ไม่สามารถควบคุมได้ เรียกว่า ตัวแปร (หรือปัจจัย) ที่รบกวนระบบ (Uncontrollable or Noise Variables Factors) ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ในกระบวนการหรือระบบที่สนใจ

เทคนิคการออกแบบการทดลองถูกนำมาประยุกต์ใช้ในหลาย ๆ งานวิจัย ได้แก่

ปิยะพงษ์[1] ทำการศึกษาการลดของเสียในกระบวนผลิตกระจกโครเมียมโดยใช้หลักการออกแบบการทดลองสามารถลดของเสียลง 9.82 เปอร์เซ็นต์

อภิชิต[3] ทำการศึกษาการลดของเสียในโรงงานอุตสาหกรรมฉีดพลาสติก พบว่าปัจจัยทั้งสามมีผลกระทบต่อขนาดของชิ้นงานทั้งแบบ Main Effect และ Interaction จึงดำเนินการปรับปรุงแก้ไขปัญหาในเรื่องของเสียประเภทขนาดไม่ได้มาตรฐาน (มีขนาดโตกว่ากำหนด) โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ทั้ง 3 ตัวแล้วดำเนินการผลิตพบว่าสามารถลดปริมาณของเสียได้จากเดิมร้อยละ 37.42 ลดลงมาเป็นร้อยละ 2 ผลที่ได้จากปัจจัยเรื่อง Mold Temperature การทดลองใช้ค่า 75°C มีค่าสูงส่งผลให้การเกิดโครงสร้างผลึกมีโอกาสในการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบมากขึ้นส่งผลให้ขนาดลดลง ในส่วนปัจจัยเรื่อง Cycle Time ใช้ค่า 22 วินาทีซึ่งมีค่าลดลง มีผลให้ชิ้นงานถูกเอาออกจากแม่พิมพ์เร็วขึ้น ทำให้ชิ้นงานสามารถหดตัวได้เพิ่มขึ้นและปัจจัยเรื่อง Holding Pressure ใช้ค่า 10MPa เนื่องจาก Holding Pressure เป็นการเพิ่มมวลให้กับชิ้นงานจึงควรมีค่าต่ำเพื่อให้มวลของชิ้นงานลดลง

โสภิดา[4] ทำการศึกษาการลดปริมาณของเสียในกระบวนการผลิตพลาสติกแผ่นประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง พบว่า ในกระบวนการผลิตพลาสติกพีวีซีแผ่นมีปริมาณของเสียประเภทเม็ดพีวีซีไม่หลอมละลายที่เกิดขึ้นบนผิวผลิตภัณฑ์ 54.66 เปอร์เซ็นต์ ของปัญหาของเสียทั้งหมด ซึ่งคิดเป็นมูลค่าประมาณ 1,561,716 บาทต่อปี ทำให้เกิดการเก็บผลิตภัณฑ์เข้าคลังเพื่อรอการนำกลับมาผลิตใหม่ ส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตเพิ่มมากขึ้น การประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลอง เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่น่าจะมีผลต่อการเกิดเม็ดพีวีซีไม่หลอมละลายที่เกิดขึ้นบนผิวผลิตภัณฑ์ และเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง พบว่า ที่อุณหภูมิในการหลอม PVC Compound ที่ Mixing Rolls 180 องศาเซลเซียส และปริมาณเศษพีวีซีแผ่นที่นำกลับมาหลอมใหม่ที่ Mixing Rolls 30 กิโลกรัม/Batch จะทำให้ค่าจำนวนจุดบกพร่องประเภทเม็ดพีวีซีไม่หลอมละลายที่เกิดขึ้นบนผิวผลิตภัณฑ์ 1 ตารางเมตร อยู่ในช่วงที่ต้องการ คือ ไม่เกิน 10 จุดต่อตารางเมตร ทำให้สามารถลดจำนวนผลิตภัณฑ์ที่ไม่ผ่านข้อกำหนดการตรวจสอบประเภทเม็ดพีวีซีไม่หลอมละลายลงได้ที่ 73.08 เปอร์เซ็นต์

2.2 การทดลองแฟกทอเรียล [5] คือ การทดลองที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในการออกแบบแผนการทดลองเนื่องจากสามารถศึกษาปัจจัย

ได้หลายปัจจัยพร้อมกัน โดยมีวัตถุประสงค์หลัก คือ ศึกษาผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย หรือที่เรียกว่า อันตรกิริยา (Interactions) เช่น กรณีศึกษา 3 ปัจจัย คือ ปัจจัย A, B และ C ผลกระทบที่เกิดขึ้นสามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภท คือ

2.2.1 ผลกระทบหลัก หรือ ผลกระทบปัจจัยเดี่ยว (Main Effects) คือ ผลกระทบที่กรณีที่สนใจพิจารณาปัจจัยเดี่ยว ได้แก่ ผลกระทบของปัจจัย A ผลกระทบของปัจจัย B และผลกระทบของปัจจัย C

2.2.2 ผลกระทบร่วมระหว่าง 2 ปัจจัย (Two-Factor or 2-ways Interactions) คือ ผลกระทบที่เกิดจากการพิจารณาปัจจัยสามปัจจัยพร้อมกัน ในที่นี้ได้แก่ ผลกระทบร่วม ABC

2.3 การทดลองอย่างสุ่มสมบูรณ์หรือการจำแนกทางเดียว (Completed Randomized Design ; CRD หรือ One-Way ANOVA) [1] คือ เป็นการสนใจศึกษาปัจจัยเพียงปัจจัยเดียว ซึ่งจำนวนระดับที่สนใจศึกษาของปัจจัยนี้เท่ากับ a ระดับ เพื่อดูว่าระดับที่แตกต่างกันของปัจจัยนั้น จะมีผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยของตัวแปรตอบสนอง (Y's ; Response) อย่างมีนัยสำคัญหรือไม่อย่างไร

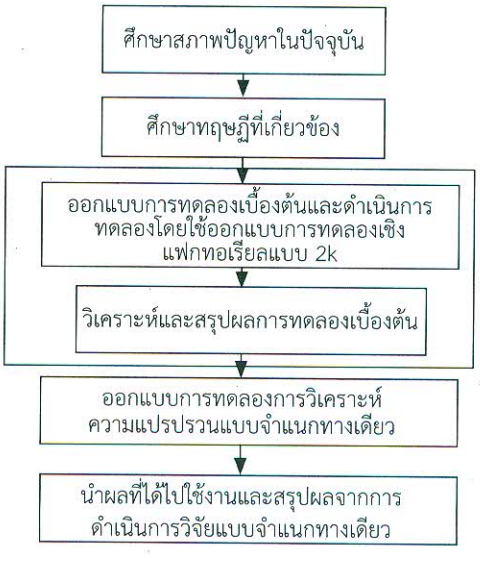
3. วิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้แบ่งส่วนการวิจัยออกเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ คือ

1) การค้นหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการทำให้เกิดของเสียและปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อลักษณะของขนาดชิ้นงาน โดยการกรองปัจจัยด้วยการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k เพื่อลดปัจจัยหลักที่ไม่มีนัยสำคัญออก และนำปัจจัยหลักที่เหลืออยู่ไปศึกษาต่อ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อไป

2) การทดลองเพื่อค้นหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียว

2.2.3 ผลกระทบร่วม 3 ปัจจัย (Three-Factor or 3-ways Interactions) คือ ผลกระทบที่เกิดจากการพิจารณาปัจจัยพร้อมกันเป็นคู่ (ครั้งละ 2 ปัจจัย) ได้แก่ ผลกระทบร่วม (อันตรกิริยา) AB, BC และ AC สามารถอธิบายเป็นแผนผังแสดงลำดับขั้นตอนการดำเนินการวิจัยได้ดังรูปที่ 2



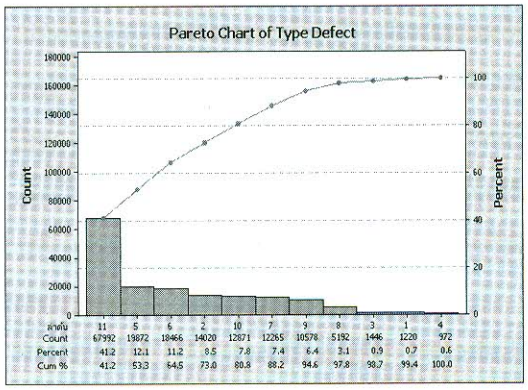
รูปที่ 2 แผนผังแสดงลำดับขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

ทางผู้วิจัยได้ทำการศึกษาข้อมูลของปัญหาของของเสียของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดของบริษัทในปี พ.ศ. 2555 ในช่วงเดือน ม.ค. ถึงเดือน ต.ค. แสดงข้อมูลดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปัญหาของของเสียในปี พ.ศ. 2555 ในช่วงเดือน ม.ค. ถึงเดือน ต.ค.

ลำดับ	ปัญหา	จำนวน (ชิ้น)
1	ฉีดไม่เต็ม	1,220
2	มีครีบ	14,020
3	ความเรียบร้อยในการตัดเกท	1,446
4	สีลาย	972
5	บุบ	19,872
6	รอยฉีด	18,466
7	รอยต่อ, แตกร้าว	12,265
8	ความเรียบร้อยการตกแต่ง, แต่งเข้าเนื้อ	5,192
9	ผิวเป็นคราบ, คราบขาว	10,578
10	รอยเยิน, รอยกระแทก, รอยย่น	12,871
11	ขนาดไม่ได้มาตรฐาน	67,992

หลังจากทราบปัญหาที่เกิดขึ้นแล้วเพื่อที่จะทราบว่าปัญหาใดเป็นปัญหาหลักที่ควรจะนำมาทำการแก้ไขก่อนปรับปรุงโดยทำการวิเคราะห์โดยอาศัยหลักการของพาเรโต และใช้กฎ 80:20 ในการจำแนกประเภทของปัญหา



รูปที่ 3 แผนภูมิพาเรโตแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัญหาที่เกิดขึ้นและจำนวนของเสียในช่วงเดือน ม.ค. – ต.ค. พ.ศ. 2555

จากพาเรโตข้างบนแสดงให้เห็นว่าข้อมูลอยู่ในสภาวะเสถียรภาพและสามารถใช้คาดการณ์ได้เนื่องจากแผนภาพพาเรโตแสดงถึงตัวแบบที่สอดคล้องกับหลักการของพาเรโต คือ สิ่งที่มีความสำคัญมีจำนวนเพียงเล็กน้อย (Vital Few) ในขณะที่สิ่งที่มีความสำคัญเพียงเล็กน้อยมีจำนวนค่อนข้างมาก (Trivial Many) ทำให้สามารถคาดการณ์ได้ว่าปัญหาขนาดไม่ได้มาตรฐาน (ปัญหาที่ 11) เป็นปัญหาหลัก ดังนั้นผู้ทำการวิจัยจึงได้ทำการเลือกปัญหาเรื่องขนาดไม่ได้มาตรฐานมาทำการแก้ไขเป็นปัญหาแรกจากการทำการเก็บและวิเคราะห์ข้อมูลในเรื่องของปัญหาขนาดไม่ได้มาตรฐานในช่วงเดือน ม.ค.–ต.ค. พ.ศ. 2555 ทำให้พบว่ามีผลิตภัณฑ์หลายผลิตภัณฑ์ที่มีปัญหาในเรื่องขนาดไม่ได้มาตรฐานจึงทำการศึกษาและวิเคราะห์เพื่อดูว่าผลิตภัณฑ์ใดที่ควรนำมาทำการแก้ไขก่อนรายละเอียดดังตารางที่ 2

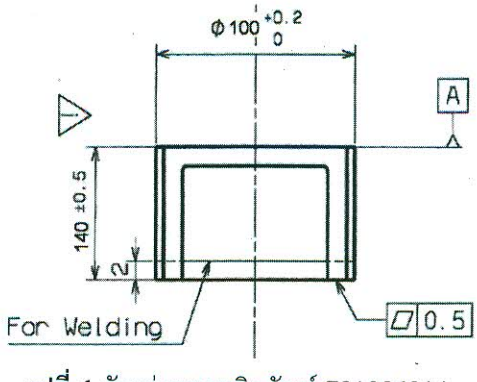
ตารางที่ 2 รายละเอียดของผลิตภัณฑ์ที่พบปัญหาเรื่องชิ้นงานไม่ได้ขนาดตามมาตรฐาน ในช่วงเดือน ม.ค. - เดือน ต.ค. 2555

ผลิตภัณฑ์	จำนวนผลิตภัณฑ์ดี (ชิ้น)	จำนวนของเสีย (ชิ้น)	จำนวนรวมผลิต (ชิ้น)	ราคาต่อชิ้น (บาท)	สูญเสีย (บาท)	% ของเสีย
7320723	12,780	8,189	20,969	6.020	49,297.78	39.05
731038	32,978	8,367	41,345	2.430	20,331.81	20.24
7320719	23,789	5,289	29,078	0.840	4,442.76	18.19
7310380	12,450	7,176	19,626	3.720	26,694.72	36.56
7310178	23,890	7,211	31,101	4.190	30,214.09	23.19
7310311	34,620	4,199	38,819	4.230	17,761.77	10.82
7310312	21,600	8,432	30,032	4.400	37,100.8	28.08
7310263	23,590	9,686	33,276	5.580	54,047.88	29.11
7310323	12,220	6,211	18,431	5.330	33,104.63	33.70
7330306	8,960	3,232	12,192	6.020	19,456.64	26.51

จากตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์ 7320723AA มูลค่าความสูญเสียมีค่าสูงเป็นอันดับสองรองจาก 7310263AA แต่เปอร์เซ็นต์ของเสียที่เกิดขึ้นสูงเป็นอันดับหนึ่ง (39.05%) ผู้ทำการวิจัยจึงได้เลือกผลิตภัณฑ์ 7320723AA มาทำการศึกษาต่อไป

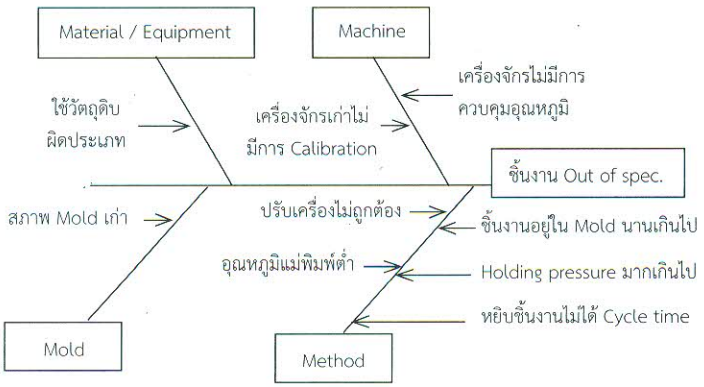
การบ่งชี้สภาพที่เกิดปัญหาของเสียแบบขนาดชิ้นงานไม่ได้มาตรฐาน

เพื่อทำการบ่งชี้ว่าของเสียประเภทขนาดไม่ได้มาตรฐานของผลิตภัณฑ์ 7320723AA (ซึ่งใช้วัตถุดิบ HD-PE เกรด GG3245) เกิดขึ้นบริเวณใดบนชิ้นงาน ผู้วิจัยจึงทำการถ่ายรูปชิ้นงาน โดยแสดงตัวอย่างของรูปร่างของชิ้นงานดังรูปที่ 4 ซึ่งขนาดที่ตรงมาตรฐานจะต้องมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 100 -100.20 มิลลิเมตร (แสดงในรูปที่ 4) และชิ้นงานที่ขนาดไม่ได้มาตรฐานจะมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางออกนอกช่วงนี้แต่ปัญหาที่พบจะเป็นแบบขนาดเกินมาตรฐานหรือขนาดโตกว่ามาตรฐานทั้งหมด



รูปที่ 4 ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ 7310263AA

การศึกษาและวิเคราะห์เพื่อระบุปัจจัยที่มีผลต่อปัญหาที่ต้องการศึกษาเพื่อให้ทราบถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อปัญหาจึงทำการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาโดยใช้แผนภาพสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) หรือแผนภาพก้างปลา (Fish Bone Diagram) ในการวิเคราะห์ความผันแปร เพื่อศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผลนั้นมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีการระดมสมอง (Brainstorming) จากผู้มีความรู้เฉพาะทาง และมาจากเทคโนโลยีเฉพาะด้าน (Intrinsic Technology) เพื่อให้ได้มาซึ่งสาเหตุของปัญหาแล้วทำการพิสูจน์ตามข้อเท็จจริงสำหรับการแก้ไขต่อไป และเมื่อทำการศึกษากระบวนการโดยครบถ้วนแล้ว จึงทำให้ทราบว่าตัวแปรที่สำคัญของกระบวนการมีอะไรบ้าง และมีความจำเป็นต้องทำการระดมสมอง เพื่อทำการค้นหาสาเหตุที่เป็นไปได้ทั้งหมด ในขั้นตอนการระดมสมองนั้นจะให้ผู้ที่มีส่วนร่วมในกระบวนการผลิตเสนอความคิดเห็นโดยที่ผู้ร่วมแสดงความคิดนั้นจะเป็นหัวหน้างาน และผู้ชำนาญการปฏิบัติงาน ซึ่งมีความรู้ในกระบวนการที่ทำการศึกษา ซึ่งในการเสนอความคิดเห็นนั้นจะไม่จำกัดปริมาณและคุณภาพของความคิดเห็น เพื่อป้องกันการตกหล่นของสาเหตุที่มีผลกระทบต่อปัญหา สุดท้ายก็จะนำความคิดเห็นที่ได้มาจัดเป็นหมวดหมู่ด้วยแผนภาพสาเหตุและผลเพื่อให้เข้าใจถึงความสัมพันธ์ของสาเหตุหลักและสาเหตุย่อย ซึ่งจากการระดมสมองได้ปัจจัยต่าง ๆ ที่คาดว่าจะส่งผลทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดโตกว่ามาตรฐาน ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 แผนภาพสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagram)

ดำเนินงานวิจัยของขั้นตอนการวิเคราะห์ผลและออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ (2^k Factorial Design) คือการออกแบบที่ประกอบด้วย k ปัจจัย แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ ระดับของปัจจัยแต่ละตัวจะอยู่ที่ "ต่ำ" และ "สูง"ซึ่งจะต้องทำการทดลองทั้งหมด $2x2x2.....x2 = 2^k$ การทดลอง เมื่อได้ผลการทดลองครบถ้วนแล้วให้นำผลการทดลองทั้งหมดไปวิเคราะห์และสรุปผล

ในการวิเคราะห์ผลการทดลองได้ใช้วิธีการสถิติวิศวกรรม เพื่อให้ได้ผลการทดลองและข้อสรุปจากการทดลอง โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนจากผลการดำเนินการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลสองระดับ ซึ่งอาศัยโปรแกรม Minitab ® มาทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยผลจากการวิเคราะห์การทดลองจะทำให้ทราบว่าปัจจัยป้อนเข้าที่ได้จากการดำเนินงานการวิเคราะห์นั้นมีความสัมพันธ์กับของเสียประเภทขนาดไม่ได้มาตรฐานหรือไม่ โดยในที่นี้ปัจจัยที่นำมาวิเคราะห์ คือ Holding Pressure, Cycle Time, อุณหภูมิ Mold Temp โดยค่าพารามิเตอร์ที่ทางโรงงานใช้ของเดิมนั้นได้มาจากการกำหนดของฝ่ายวิศวกรรมของทางโรงงานโดยแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์เดิมของโรงงาน

Mold Temp (°C)	Cycle Time (Sec)	Holding Pressure (MPa)
35	65	75

แต่เนื่องจากปัญหาขนาดไม่ได้มาตรฐานเป็นแบบขนาดใหญ่เกินจาก Specification จากการศึกษาและสอบถามจากผู้ที่มีความรู้ทางด้านการฉีดพลาสติกของญี่ปุ่น (เป็นผู้เชี่ยวชาญด้านการฉีดพลาสติกประจำโรงงานมีประสบการณ์ประมาณ 35 ปี) จะใช้ค่า Mold Temp ควรเท่าเดิม Cycle Time ควรลดลง และค่า Holding Pressure ที่น้อยลงแต่ไม่ทราบว่าค่าเท่าไรจึงเหมาะสมจึงทำการแปรผันค่าต่าง ๆ ที่พอจะเป็นไปได้และทำการวิเคราะห์เพื่อดูว่าปัจจัยทั้ง 3 อย่างนั้นมีผลอย่างไรและเพื่อที่จะเป็นแนวทางในการปรับตั้งค่าต่อไปโดยค่าที่ทำการแปรผันใหม่แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แสดงปัจจัยและดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ (2^k Factorial Design)

ปัจจัย	ระดับของปัจจัย	
	Low (-)	High (+)
Mold Temp (°C)	35	45
Cycle Time (Sec)	32	37
Holding Pressure (MPa)	10	20

เหตุผลในการเลือกใช้ค่า Mold Temp เท่ากับ 35°C และ 45°C เนื่องจากในคำแนะนำของวัสดุชนิด High-density polyethylene (HDPE) or polyethylene high-density (PEHD) (จากมาตรฐาน Material Data for Injection Molders) [7] ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ในการผลิตของผลิตภัณฑ์ 7320723AA นั้นแนะนำว่าปกติค่า Mold Temp ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 30–50 °C แต่เมื่อเกิดปัญหาชิ้นงานขนาดโตควรจะเลือกใช้ค่าสูง ในส่วนของ Cycle Time ควรจะมีค่าลดลงแต่ได้ถึงเท่าไรที่ไม่ให้ส่งผลต่อชิ้นงาน ถ้าใช้เวลาน้อยเกินไปจะทำให้การเย็นตัวของชิ้นงานทำได้น้อยชิ้นงานยังไม่แข็งตัวดีพอเวลาเอาชิ้นงานออกจากแบบจะทำให้เกิดปัญหาอย่างอื่น เช่น ชิ้นงานเกิดรอยบุบจากการกระทุ้งเพื่อนำชิ้นงานออกจากแบบ เป็นต้น และค่า

Holding Pressure ที่ควรจะมีค่าต่ำ แต่จากความสามารถในการปรับตั้งของเครื่องจักรซึ่งสามารถปรับได้ในหลักสิบจึงเป็นที่มาของการใช้ค่าตัวเลขต่าง ๆ ดังกล่าวเนื่องจากมีปัจจัย 3 ปัจจัยและการหาขนาดของสิ่งตัวอย่าง (Sample Size) เท่ากับ 5 ชิ้น ($nx2^k$) หรือ $5x2^3$ จึงทำการทดลองทั้งหมด 40 การทดลอง โดยข้อมูลผลการทดลองแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการทดลองจากการออกแบบการทดลอง

Run Order	Mold Temp	Cycle Time	Holding Pressure	ขนาด (mm)
1	-	-	-	100.22
2	-	-	+	100.29
3	-	+	-	100.25
4	-	+	+	100.25
5	+	-	-	100.08
6	+	-	+	100.21
7	+	+	-	100.36
8	+	+	+	100.41
9	-	-	-	100.22
10	-	-	+	100.22
11	-	+	-	100.32
12	-	+	+	100.29
13	+	-	-	100.09
14	+	-	+	100.25
15	+	+	-	100.45
16	+	+	+	100.49
17	-	-	-	100.26
18	-	-	+	100.35
19	-	+	-	100.35

ตารางที่ 5 (ต่อ)

Run Order	Mold Temp	Cycle Time	Holding Pressure	ขนาด (mm)
20	-	+	+	100.36
21	+	-	-	100.09
22	+	-	+	100.22
23	+	+	-	100.42
24	+	+	+	100.50
25	-	-	-	100.26
26	-	-	+	100.30
27	-	+	-	100.38
28	-	+	+	100.36
29	+	-	-	100.09
30	+	-	+	100.22
31	+	+	-	100.47
32	+	+	+	100.52
33	-	-	-	100.24
34	-	-	+	100.28
35	-	+	-	100.32
36	-	+	+	100.29
37	+	-	-	100.08
38	+	-	+	100.28
39	+	+	-	100.40
40	+	+	+	100.41

เมื่อ

เครื่องหมายลบ (-) หมายถึง ระดับของปัจจัยที่มีระดับต่ำ (Low Qualitative Level)

เครื่องหมายบวก (+) หมายถึง ระดับของปัจจัยที่มีระดับสูง (High Qualitative Level)

การวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองเบื้องต้น

จากผลการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ (2^k Factorial Design) ในตารางที่ 5 นำค่าตอบสนองที่ได้มาวิเคราะห์ผลทางสถิติ โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อหาปัจจัยการเกิดปัญหาชิ้นงานขนาดโต (หรือมีนัยสำคัญ) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 (α=0.05) ซึ่งในขั้นตอนการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองเบื้องต้นนี้ ผู้วิจัยได้อาศัยโปรแกรมทางสถิติ Minitab ® 14 มาทำการวิเคราะห์ผลการทดลองดังนี้

ตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (Model Adequacy Checking)

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลองเป็นการตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งผลการตรวจสอบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6 ถึงรูปที่ 11 โดยมีสมมติฐานว่า รูปแบบของค่าส่วนตกค้าง (Residuals) ที่ได้จากข้อมูลในการทดลองต้องเป็นไปตามหลักการของ $\varepsilon_{ij} \sim NID(0,\sigma^2)$ คือ ค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ และเป็นอิสระด้วยค่าเฉลี่ยใกล้เคียง 0 และ σ^2 มีค่าคงตัว (Stability) จึงจะทำให้ข้อมูลจากการทดลองมีความถูกต้องและเชื่อถือได้ การตรวจสอบ σ_{ij} มี 4 ขั้นตอน คือ

1. การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) ของค่าส่วนตกค้าง (Residual)

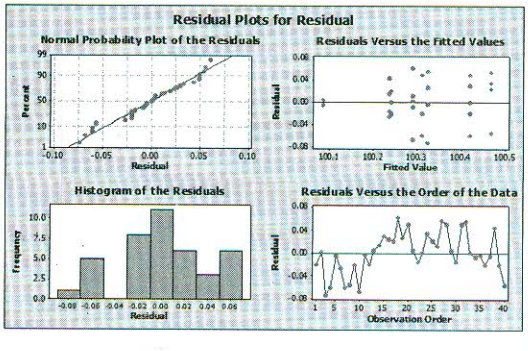
2. การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) ของค่าส่วนตกค้าง (Residual)

3. การตรวจสอบค่าเฉลี่ยของค่าส่วนตกค้าง (Residual)

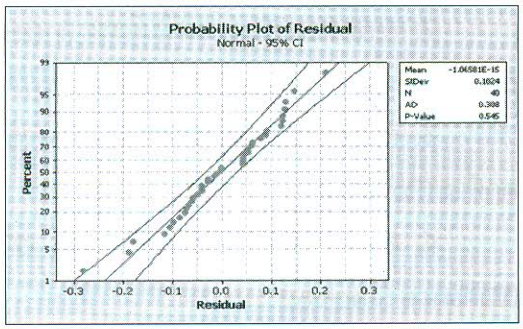
4. การตรวจสอบความเสถียรของ σ^2 (Variance Stability)

ผลการตรวจสอบความเป็นไปได้ตามข้อสมมติฐานแสดงได้ดังนี้

การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) ของค่าส่วนตกค้าง (Residual) จากการพิจารณาของค่าส่วนตกค้าง (Residual) ซึ่งใช้ในการทดสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability Plot) โดยนำข้อมูลในตารางที่ 5 มาสร้างเป็นแผนภูมิดังรูปที่ 7 พบว่า ค่าส่วนตกค้าง (Residual) มีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง ทำให้ประมาณได้ว่า ค่าส่วนตกค้าง (Residual) มีการแจกแจงแบบปกติ และ P-value สูงเท่ากับ 0.545 (เทียบกับค่า 0.05 เนื่องจากในการทดลองเราต้องการให้มีค่า Error ต่ำที่สุดเราจึงกำหนดค่าให้ต่ำที่สุดเท่าที่จะทำได้) แสดงว่าข้อมูลดีนำไปวิเคราะห์ต่อไปได้

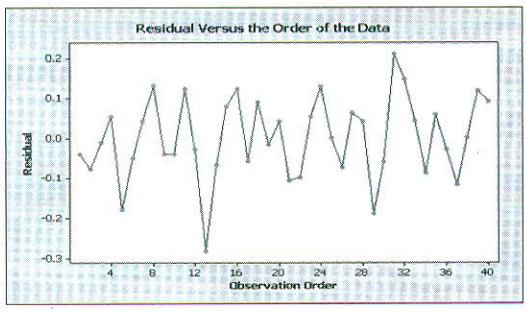


รูปที่ 6 แสดง Residual Plot



รูปที่ 7 แสดงการกระจายแบบปกติของค่า Residual

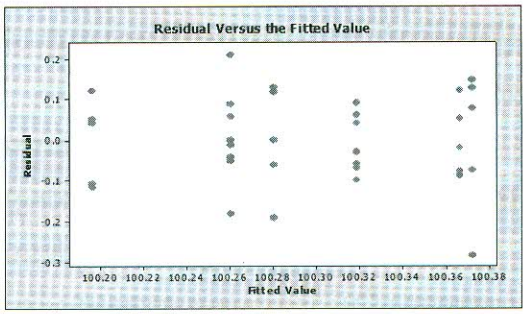
การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) ของค่าส่วนตกค้าง (Residual) สามารถพิจารณาจากการนำข้อมูลในตารางที่ 5 มาสร้างแผนภูมิการกระจาย (Scatter Plot) ดังรูปที่ 8 เมื่อพิจารณาการกระจายของข้อมูลบนแผนภูมิพบว่า การกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residual) มีรูปแบบที่เป็นอิสระ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน หรือไม่สามารถประมาณรูปแบบที่แน่นอนได้ แสดงให้เห็นว่าค่าส่วนตกค้าง (Residual) มีความเป็นอิสระต่อกัน (Independent)



รูปที่ 8 แสดงการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residual) เทียบกับ Observation Order

5. การตรวจสอบค่าเฉลี่ยของค่าส่วนตกค้าง (Residual)

การตรวจสอบค่าเฉลี่ยของค่าส่วนตกค้าง (Residual) สามารถพิจารณาจากแผนภูมิการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residual) เทียบกับ Fitted Value โดยการนำข้อมูลในตารางที่ 5 มาสร้างเป็นแผนภูมิแสดงการกระจายของค่าส่วนตกค้าง (Residual) เทียบกับระดับของปัจจัยทุกตัว ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 แสดงการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residual) เทียบกับ Fitted Value

การตรวจสอบความเสถียรของ σ^2 (Variance Stability) สามารถพิจารณาจากแผนภูมิการกระจายดังรูปที่ 9 ซึ่งเป็นแผนภูมิการกระจายของค่าส่วนตกค้าง (Residual) เทียบกับ Fitted Value พบว่า σ^2 ของค่าส่วนตกค้าง (Residual) มีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละตำแหน่ง และไม่พบว่ารูปแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง (Residual) มีลักษณะเป็นแนวโน้มแต่อย่างใด จึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน

จากรูปที่ 6 ถึง 9 พบว่ารูปแบบของค่าส่วนตกค้าง (Residual) ที่ได้จากข้อมูลในการทดลองเป็นไปตามหลักการของ $\varepsilon_{ij} \sim NID(0,\sigma^2)$ ทุกประการ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลการทดลองชุดนี้มีความถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือ สามารถนำข้อมูลดังกล่าวไปทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนในขั้นต่อไปได้

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

จากผลการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลองพบว่า ไม่มีความผิดปกติของการทดลองเกิดขึ้น และข้อมูลที่ได้มีความน่าเชื่อถือ จึงได้นำข้อมูลในตารางที่ 5 มาทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยทั้งหมด โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ 95% (α = 0.05)

ตารางที่ 6 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลการทดลองเชิงแฟกทอเรียลสองระดับ

การวิเคราะห์ผลจากโปรแกรม Minitab

Full Factorial Design

Factors: 3 Base Design: 3, 8

Runs: 40 Replicates: 5

Blocks: 1 Center pts (total): 0

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์ Factorial Fit: Response versus Mold Temp, Cycle Time, Holding Pressure

Estimated Effects and Coefficients for Response (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		100.296	0.006297	15926.81	0.000
Mold Temp	0.012	0.006	0.006297	0.91	0.368
Cycle Time	0.167	0.084	0.006297	13.30	0.000
Holding Pressure	0.057	0.029	0.006297	4.57	0.000
Mold Temp*Cycle Time	0.115	0.057	0.006297	9.09	0.000
Mold Temp*Holding Pressure	0.040	0.020	0.006297	3.22	0.003
Cycle Time*Holding Pressure	-0.041	-0.021	0.006297	-3.30	0.002
Mold Temp*Cycle Time* Holding Pressure	-0.011	-0.005		-0.83	0.411

S = 0.0398278 R-Sq = 90.45% R-Sq(adj) = 88.36%

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	0.314947	0.314947	0.104982	66.18	0.000
2-Way Interactions	3	0.164727	0.164727	0.054909	34.62	0.000
3-Way Interactions	1	0.001103	0.001103	0.001103	0.70	0.411
Residual Error	32	0.050760	0.050760	0.001586		
Pure Error	32	0.050760	0.050760	0.001586		
Total	39	0.531537				

ในการวิเคราะห์ด้วยความแปรปรวนกรณีการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูป (2^k) จะทำการพิจารณาอันตรกิริยา (ผลกระทบร่วม) ก่อนเสมอ ซึ่งในกรณีที่ทำการวิเคราะห์มากกว่า 2 ปัจจัย และถ้าผลกระทบร่วมมีนัยสำคัญ (p-value < α) จะไม่ทำการพิจารณาปัจจัยหลักที่เกี่ยวข้องกับเทอมผลกระทบร่วม (ปัจจัยร่วม) นั้น

การตรวจสอบข้อสมมติในการใช้ตาราง การวิเคราะห์ความแปรปรวนผ่านค่าผิดพลาดมีการแจกแจงปกติ ค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ ความแปรปรวนคงที่และเป็นอิสระต่อกัน (จากรูปที่ 6-9) จึงสามารถอ่านผลจากตาราง ANOVA ในตารางที่ 6 ได้ ค่า p-value ของปัจจัยหลักระหว่าง Mold Temp > α = 0.05 ไม่พบอันตรกิริยา, Cycle Time และ Holding Pressure เท่ากับ 0.000 < α = 0.05 มีผลต่ออันตรกิริยา สรุปได้ว่าปัจจัยหลักทั้งสอง คือ Cycle Time และ Holding Pressure มีผลต่อขนาดของชิ้นงาน แต่ค่าของp-value ของอันตรกิริยาระหว่าง Mold Temp, Cycle Time และ Holding Pressure เท่ากับ 0.411 > σ = 0.05 ดังนั้นจึงไม่พบอันตรกิริยา (ผลกระทบระหว่าง 3 ปัจจัย)

จากกรณีทดสอบปัจจัยร่วม (Test of Interaction Factors) รูปทั่วไปของสมการที่ทดสอบ คือ

H_0 : ปัจจัยร่วมไม่มีผลต่อค่าตอบสนอง (y)

H_1 : ปัจจัยร่วมมีผลต่อค่าตอบสนอง (y)

$H_0 : (\alpha\beta)^*_{ij} = 0 \ \forall_{I,j}$ และ $H_1 : : (\alpha\beta)^*_{ij} \neq 0 \ \exists_{I,j}$

(* กรณีสนใจปัจจัยร่วม A และ B)

จากการพิจารณาค่า R^2 = 90.45% แสดงว่าการทดลองได้รับการออกแบบมาดีแล้วถ้าหากความผันแปรทั้งหมด มีค่า 100 หน่วย แล้วสามารถอธิบายความผันแปรจากทรีตเมนต์ได้ถึง 90.45 หน่วย ส่วนที่เหลือไม่สามารถอธิบายได้ด้วยสาเหตุด้านรีพีททะบิลิตี้ซึ่งเมื่อพิจารณาค่า R^2 Adjust = 88.36% ใกล้เคียงกับ R^2 = 90.45% แสดงว่าจำนวนข้อมูลที่เก็บมาจากการทดลองมีจำนวนเพียงพอแล้ว

จากนั้นดูที่ค่า P-value ของแต่ละปัจจัยซึ่งแสดงค่า P-value ต่ำ (เทียบกับค่า 0.05) แสดงว่า ปัจจัยนั้นมีนัยสำคัญหรือมีผล แต่ค่า P-value ของ Temp มีค่ามากแสดงว่าไม่มีนัยสำคัญทางสถิติแต่เมื่อนำปัจจัย Temp ไป Interaction กับปัจจัยอื่นแล้วปรากฏว่าค่า P-value ต่ำแสดงว่ามีผลทำให้ไม่สามารถยุบ Temp ออกได้ ผลแสดงให้เห็นว่า interaction ของทั้งสามปัจจัยไม่มีผล

จากนั้นพิจารณาความสัมพันธ์ของปัจจัยต่าง ๆ ที่ต้องการศึกษา ซึ่งจะทำการวิเคราะห์ผ่านสมการ ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

สมการ คือ Y = M(C+H) + C (H+1) + H + Constant โดยที่

M คือ Mold Temp, C คือ Cycle Time, H คือ Holding pressure และ Constant คือค่า 100 เป็นค่ากลางของขนาดของชิ้นงานที่ใช้ในการผลิต ในสมการเราจึงกำหนดให้เป็นค่าคงที่ (Constant value)

ผลจากการทดลองการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียวเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม

จากผลการทดลองเบื้องต้นเพื่อกรองปัจจัยโดยวิธีการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับทำให้ทราบได้ว่าปัจจัยใดบ้างมีอิทธิพลต่อการเกิดของเสียและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และจากผลการทดลองเบื้องต้น พบว่าปัจจัยเวลา

ในการฉีดพลาสติกนั้น มีอิทธิพลต่อคุณภาพของชิ้นงาน ผู้วิจัยจึงได้ทำการทดลองเพิ่มเติมเพื่อหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสม สามารถแสดงค่าผลการทดลองได้ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ผลการทดลองการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียว

One-way ANOVA: 10, 20, 32, 37

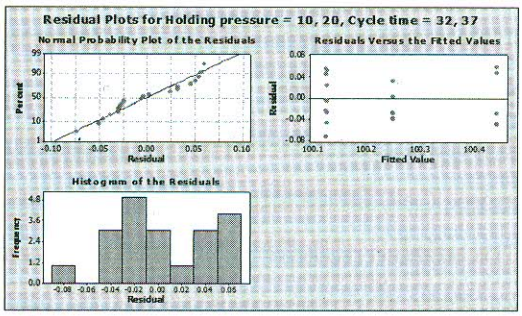
❶ ❷

```
Source  DF       SS       MS      F      P
Factor   3  0.33197  0.11066  54.78  0.000
Error   16  0.03232  0.00202
Total   19  0.36429

S = 0.04494   R-Sq = 91.13%   R-Sq(adj) = 89.46%

                              Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled
StDev
Level  N     Mean  StDev     +---------+---------+---------+--------
-
10     5  100.124  0.053     (---*--)
20     5  100.248  0.033          (---*---)
32     5  100.126  0.040     (---*--)
37     5  100.440  0.051                          (---*---)
                             +---------+---------+---------+--------
-
                            100.08    100.20    100.32    100.44
```

Pooled StDev = 0.045

❶ แสดงตาราง ANOVA ได้ค่า F = 54.78

❷ P-Value พบว่าได้ค่าน้อยมาก คือ 0.000 < (0.05) α จึงปฏิเสธสมมุติฐานหลัก คือ H_0 : ปัจจัยร่วมไม่มีผลต่อค่าตอบสนอง (y) และสรุปได้ว่าค่า Cycle time และ Holding pressure มีผลต่อค่าของขนาดของชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 11 กราฟแสดงการวิเคราะห์เศษเหลือ (Residual)

จากกราฟ ❶ Normal Probability Plot of the Residuals แสดงเส้นตรง 1 เส้น และ ❷ Histogram แสดงรูปทรงระฆังคว่ำ แสดงว่าข้อมูลมาจากการทดลองที่มี setting ค่อนข้างดี

จากข้อมูลซึ่งได้จากการทดลองโดยนำข้อมูลมาจัดเรียงให้เป็นหมวดหมู่ ผลการทดลองการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบจำแนกทางเดียว เพื่อหาค่าระดับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ ระดับปัจจัยที่ Cycle time = 32 วินาที และ Holding pressure ที่ 10 MPa มีผลต่อขนาดของชิ้นงาน โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ 95% (α = 0.05) ดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ผลการทดลองที่ทำการจัดเรียงแล้ว

Mold Temp (OC)	Cycle Time (Sec)	Holding Pressure (MPa)	1	2	3	4	5	Average (mm)
35	32	10	100.22	100.29	100.25	100.25	100.21	100.24
35	32	20	100.22	100.35	100.30	100.28	100.25	100.28
35	37	10	100.32	100.35	100.38	100.28	100.29	100.32
35	37	20	100.41	100.49	100.50	100.41	100.39	100.44
45	32	10	100.08	100.09	100.09	100.09	100.08	100.08
45	32	20	100.21	100.25	100.22	100.23	100.25	100.23
45	37	10	100.36	100.45	100.42	100.47	100.40	100.42
45	37	20	100.41	100.50	100.52	100.41	100.39	100.44

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าที่ Mold Temp เท่ากับ 45°C, Cycle Time เท่ากับ 32 วินาที และ Holding Pressure เท่ากับ 10 MPa ทำให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ คือ 100.00 – 100.20 มิลลิเมตร นำผลจากการทดลอง Mold Temp เท่ากับ 45°C, Cycle Time เท่ากับ 32 วินาที และ Holding Pressure เท่ากับ 10 MPa

ตารางที่ 9 ผลการทดลองเปรียบเทียบผลจากสมการ Regression

เปรียบเทียบชิ้นงาน	ชิ้นงาน	ขนาดชิ้นงาน (mm)	Mold Temp (OC)	Cycle Time (Sec)	Holding Pressure (MPa)
ผลที่ได้จากการทดลอง	1	100.08	45	32	10
	2	100.09			
	3	100.09			
	4	100.09			
	5	100.08			
ผลที่ได้จากสมการ		100.07			

สรุป

สรุปผลการวิจัย

การดำเนินการวิจัยในครั้งนี้ สามารถลดของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฉีดพลาสติกที่เป็นชิ้นส่วนยานยนต์ ได้ใช้แนวทางการลดของเสียในกระบวนการผลิตโดยใช้หลักการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k โดยผลการวิจัยสามารถเปรียบเทียบเพื่อนำเสนอในเชิงตัวเลข ได้แก่ จำนวนของเสียในกระบวนการผลิตลดลง 98.80 เปอร์เซ็นต์

เปรียบเทียบผลก่อนและหลังการวิจัย

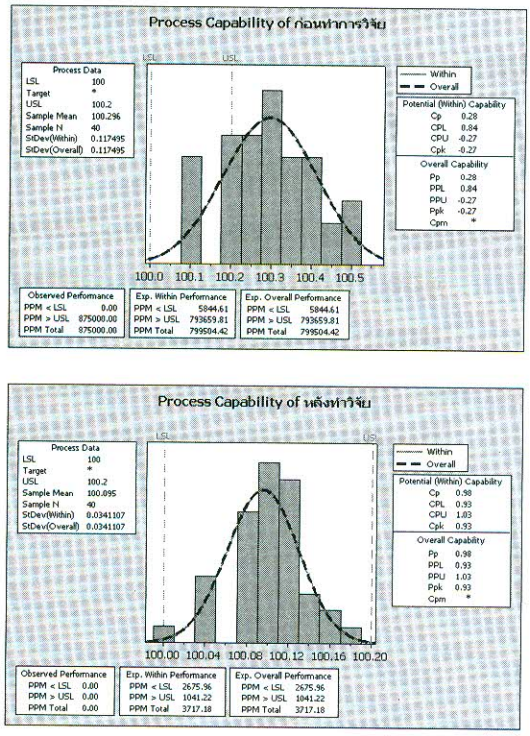
หลังจากที่ทางแผนกผลิตของโรงงานตัวอย่างได้นำค่า Mold Temp เท่ากับ 45 °C, Cycle time เท่ากับ 32 วินาที และ Holding pressure เท่ากับ 10 MPa ไปทำการผลิตชิ้นงานซึ่งสามารถส่งผลทำให้สามารถลดจำนวนของเสียลงได้โดยทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลก่อนการทำวิจัยในปี 2555 ดังนี้

ตารางที่ 10 แสดงรายละเอียดผลจากการการผลิตเมื่อนำค่าปัจจัยใหม่ไปใช้เมื่อเปรียบเทียบก่อนและหลังการทำวิจัย

ผลิตภัณฑ์ 7320723AA	จำนวนผลิตภัณฑ์ดี (ชิ้น)	จำนวนของเสีย (ชิ้น)	จำนวนรวมผลิต (ชิ้น)	ราคาต่อชิ้น (บาท)	สูญเสีย (บาท)	(%) ของเสีย (จำนวนผลิตต่อจำนวนเสีย)
ม.ค. - ต.ค. 2555	12,780	8,189	20,969	6.020	49,297.78	39.05
พ.ย. - ธ.ค. 2555	3,425	98	3,523	6.020	589.96	2.78

ผลจากตารางที่ 10 แสดงให้เห็นว่าเมื่อนำค่า Mold Temp เท่ากับ 45 °C, Cycle time เท่ากับ 32 วินาที และ Holding pressure เท่ากับ 10 MPa มาใช้ในกระบวนการผลิต ทำให้สามารถลดปริมาณของเสียลงได้อย่างมาก โดยของเสียก่อนทำการวิจัย 8,189 ชิ้นลดลงมาเป็น 98 ชิ้น หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เท่ากับ 98.80 และคิดเป็นเงินจาก 49,297.78 บาท และลดลงเป็น 589.96 บาท หรือ 98.80 เปอร์เซ็นต์ จากการทดสอบยืนยันผลการทดลองและเปรียบเทียบกับชิ้นงานก่อนการปรับปรุงจำนวน 40 ชิ้น พบว่า ดัชนีศักยภาพความสามารถของกระบวนการ (Potential Process Capability Index; Cp) ก่อนทำการวิจัยหรือก่อนทำการปรับปรุง มีค่าเท่ากับ 0.28 และดัชนีความสามารถของกระบวนการ (Process Capability Index; Cpk) มีค่าเท่ากับ -0.27 สำหรับ Cp และ Cpk หลังทำการวิจัยมีค่าเท่ากับ 0.98 และ 0.93 ตามลำดับ ซึ่งก่อนทำการปรับปรุงค่า Cp และ Cpk มีค่าต่ำเนื่องจากขนาดของชิ้นงานไม่ตาม Spec. ที่กำหนด เกินขอบเขตบนของ Spec. (Upper Spec. Limit) และเมื่อทำการปรับปรุง

ผลที่ได้ค่า Cp และ Cpk มีค่าสูงขึ้นแต่ยังไม่ดีเท่าที่ควร ซึ่งจะมีชิ้นงานที่ยังไม่ได้ตาม Spec. เกินขอบเขตล่างของ Spec. (Lower Spec. Limit) ซึ่งจะต้องทำการทดลองเพื่อหาทางปรับปรุงคุณภาพของชิ้นงานในลำดับต่อไปเนื่องจากชิ้นงานจะต้องได้ค่า Cp และ Cpk มากกว่า 1.33 ตามข้อกำหนดของลูกค้า



รูปที่ 12 กราฟแสดงความสามารถของกระบวนการก่อนและหลังการปรับปรุง

เปรียบเทียบกับผลงานวิจัยกับบุคคลอื่น

จากการเปรียบเทียบกับผลงานวิจัยของ อภิชิต [3] พบว่ามีการวิจัยที่คล้ายกันโดยปัจจัยที่มีผลต่อขนาดของชิ้นงานคือ แรงดันย้ำ (Holding pressure), อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mold Temperature) และ รอบการทำงาน (Cycle Time) แต่จะแตกต่างกันคือ ประเภทของชิ้นงาน, ขนาดของชิ้นงาน และวัตถุดิบที่ไม่เหมือนกัน ทำให้ปัจจัย (Main effect) มีความแตกต่างกัน รวมถึงเครื่องฉีดพลาสติกทำให้ส่งผลแตกต่างกันแต่แนวทางในการวิจัยจะมีลักษณะคล้าย ๆ กัน เป็นต้น

ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองทำให้โรงงานสามารถนำหลักการด้านเทคนิค ไปใช้เพื่อเป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหาในเรื่องของขนาดใหญ่กว่ามาตรฐาน โดยนำปัจจัยต่าง ๆ มาวิเคราะห์ ได้แก่ อุณหภูมิของแม่พิมพ์ ซึ่งถ้าอุณหภูมิจะเพิ่มมากขึ้นเท่าใดก็จะต้องอยู่ในข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์นั้น และเวลาที่ลดลงเพื่อที่จะให้ชิ้นงานสามารถหดตัวภายนอกแม่พิมพ์ได้ แต่ก็ไม่ควรน้อยเกินไปซึ่งจะส่งผลต่อชิ้นงานเสียรูปทรงได้, Holding pressure ควรจะให้น้อย ๆ เพื่อให้มวลของชิ้นงานลดลงเพื่อให้เย็นตัวอยู่ในแม่พิมพ์ เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยขอขอบคุณสำนักพัฒนาอุตสาหกรรมสนับสนุน กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม ภายใต้โครงการให้คำแนะนำปรึกษา การเพิ่มผลิตภาพและความสามารถในการแข่งขันอุตสาหกรรมสนับสนุน ภายใต้โครงการให้คำปรึกษาแนะนำเชิงลึกแก่ SMEs ในอุตสาหกรรมสนับสนุน ปี 2555

เอกสารอ้างอิง

[1] ปิยพงษ์ ริดเขียว, 2555. **การลดของเสียในกระบวนการผลิตกระจกโครเมียมโดยใช้หลักการออกแบบการทดลอง.** วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

[2] ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์, 2551. **การออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์การทดลอง.** กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ ท๊อป.

[3] อภิชิต ศรัณยนิตย์, 2548. **การลดของเสียในโรงงานอุตสาหกรรมฉีดพลาสติก.** วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมระบบการผลิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

[4] โสภิดา ท้วมมี, 2550. **การลดปริมาณของเสียในกระบวนการผลิตพลาสติกแผ่น โดยการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง กรณีศึกษา บริษัท ในอุตสาหกรรมผลิตพลาสติก.** วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

[5] D.C., Montgomery, 2005. **Design and Analysis of Experiments, 6th ed.** USA: John Wiley & sons.

[6] http://www.nesdb.go.th/Portals/0/eco_datas/ account/qgdp/data2_12/detail_Thai.pdf

[7] http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=fce23f90005d4fbe8e12a1bce53ebdc8

การลดปัญหาของเสียในการผลิตเกียร์ด้วยหลักการ DMAIC : กรณีศึกษาบริษัทผลิตชิ้นส่วนมอเตอร์ไฟฟ้า

Defect Reduction in Gear Production : A Case Study of Motor Component Manufacturing

กัญญรัตน์ วังคะฮาด[1] และณฐา คุปตัษเฐียร[2]

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตเกียร์ โดยประยุกต์ใช้หลักการ DMAIC ของ ซิกซ์ ซิกม่า จากปัญหาหลักเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเกินกว่าค่าที่กำหนดให้ลดลง 50% ตามเป้าหมายของโรงงานตัวอย่าง ขั้นตอนการวิจัยแบ่งเป็น 5 ขั้นตอนการวิจัย ดังนี้ (1) ขั้นตอนการกำหนดปัญหาที่เกิดขึ้น (Defined Phase) โดยใช้แผนภูมิพาเรโต (Pareto Diagram) (2) ขั้นตอนการวัด (Measure Phase) เพื่อกำหนดหาสาเหตุปัญหา (3) ขั้นตอนการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา (Analysis Phase) โดยการวิเคราะห์ทีละสาเหตุ ทีละปัจจัย (4) ขั้นตอนการปรับปรุงแก้ไขกระบวนการ (Improved Phase) โดยทำการออกแบบการทดลอง 2^2 Factorial Design, Operation Standard และ Gauge Repeatability and Reproducibility (GR&R) (5) ขั้นตอนการควบคุมกระบวนการต่าง ๆ (Control Phase) โดยได้กำหนดมาตรฐานการทำงาน (Work Instruction) เพื่อช่วยในการควบคุมกระบวนการผลิต หลังการปรับปรุงกระบวนการผลิตตามหลักการ DMAIC ของ ซิกส์ ซิกม่า ทำให้พบว่า ลดลงจากเดิม 3.4% เหลือเพียง 0.91% ของปริมาณของเสียทั้งหมด ดังนั้น การปรับปรุงครั้งนี้สามารถลดปริมาณของเสียได้ถึง 76.47% ซึ่งเกินกำหนดเป้าหมายของบริษัทที่วางเอาไว้ที่ 50%

คำสำคัญ: ของเสีย, การกลึง, หลักการ DMAIC

[1] นักศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

[2] อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Abstract

This research aimed to reduce the defects of a gear production by using DMAIC principle stage of Six Sigma technique. According to the case study company's target, the main problem was the over specification of 50%. The research methodology consisted of 5 steps : (1) Defined phase, the pareto diagram was use to define the problem (2) Measure phase, the root cause of problems wear determined (3) Analysis phase (4) Improved phase, the Design Of Experiments (DOE) with 2^2 Factorial Design, Operation standard and Gauge Repeatability and Reproducibility (GR&R) (5) Control Phase, the Work Instruction (WI) is applied to control the process. After improvement by implementing the DMAIC method, it found that the scrap rate was reduced from 3.40% to 0.91% of all defect rates. Thus,as this improvement the amount of defects can be reduced by 76.47% more than of company policy.

Keywords: Defect, Turning, DMAIC Principle

1. บทนำ

ในธุรกิจทางด้านอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ถือเป็นธุรกิจที่มีบทบาทสำคัญต่อเศรษฐกิจไทยในปัจจุบันค่อนข้างมาก โดยมีการส่งออกเป็นอันดับหนึ่งต่อเนื่องมาเป็นระยะเวลาหลายปี ซึ่งจุดแข็งของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ไทยในปัจจุบันคือฐานการผลิตเพื่อการส่งออกที่สำคัญของสหรัฐอเมริกา สิงคโปร์ โดยเฉพาะญี่ปุ่น ประกอบกับไทยมีแรงงานที่มีความชำนาญเป็นพิเศษทั้งความละเอียด ประณีต ซึ่งเหมาะกับความต้องการของอุตสาหกรรมนี้ ทำให้อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ของไทยเริ่มเป็นที่ยอมรับในศักยภาพและได้รับความเชื่อถือในด้านการผลิตจากหน่วยงานและบริษัทต่างประเทศตามลำดับ ในขณะเดียวกันอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คือผลิตภัณฑ์ที่มักมีการเปลี่ยนแปลงทางเทคโนโลยีค่อนข้างรวดเร็ว ดังนั้น ภายใต้ภาวะการแข่งขันที่รุนแรงมากขึ้น ส่งผลให้ผู้ผลิตของไทยจะต้องปรับตัวโดยปรับเพิ่มกลยุทธ์ในการผลิต เพื่อเพิ่มศักยภาพในด้านราคา คุณภาพ และการส่งมอบที่ทันเวลา ซึ่งเป็นการสร้างโอกาสในทางการตลาดอีกด้วย [1]

ข้อมูลในกระบวนการผลิตของโรงงานที่ทำกรณีศึกษา ซึ่งมีผลิตภัณฑ์ของบริษัทแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ ผลิตภัณฑ์ชิ้นส่วนยานยนต์ 20%, ผลิตภัณฑ์เครื่องมือแพทย์ 10% และผลิตภัณฑ์ชิ้นส่วนมอเตอร์ไฟฟ้า 70% ปัจจุบันพบชิ้นส่วนเสียปนออกมาในสายการผลิตเกียร์ (Gear) ซึ่งเป็นชิ้นส่วนที่ประกอบกับ

มอเตอร์ไฟฟ้า การเก็บข้อมูลย้อนหลังจากเดือนมกราคม-มิถุนายน 2556 พบว่าปัญหาที่พบมากเป็นอันดับหนึ่งในชิ้นส่วนดังกล่าว คือ ปัญหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเกินกว่าค่าที่กำหนด (ID over spec) โดยคิดเป็น 3.40% เทียบกับยอดการผลิตทั้งหมด

จากเหตุผลดังกล่าว ผู้ทำการวิจัยได้เล็งเห็นว่าการประยุกต์ใช้แนวทาง DMAIC ของ ซิกซ์ ซิกม่า น่าจะเป็นตัวเลือกที่นำมาช่วยในการปรับปรุงกระบวนการผลิต เพื่อช่วยลดของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตชิ้นส่วนเกียร์ (Gear) ที่ไม่ได้คุณภาพในส่วนของการกลึงได้ดังหลาย ๆ อุตสาหกรรม เช่น การลดของเสียในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ [2] และการลดของเสียในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ [3] เป็นต้น

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ซิกซ์ ซิกม่า คือ แนวทางการพัฒนาองค์กรที่มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งหลายองค์กรที่นำไปใช้ได้พิสูจน์แล้วว่าสามารถเพิ่มขีดความสามารถของกระบวนการทางด้านธุรกิจได้เป็นอย่างดี ด้วยเป้าหมายที่ท้าทาย คือ 3.4 ความผิดพลาดใน 1 ล้านครั้งของการทำงาน ทั้งนี้องค์กรสามารถบรรลุเป้าหมายดังกล่าวได้โดยการประยุกต์ใช้หลักการทางสถิติชั้นสูงที่มีระเบียบแบบแผนในการปฏิบัติอย่างชัดเจน [11]

เทคนิคซิกซ์ ซิกม่า มุ่งเน้นการกำจัดข้อบกพร่องในกระบวนการและเชื่อมโยงหลักการพื้นฐานของธุรกิจสถิติและวิศวกรรมศาสตร์เพื่อให้บรรลุผลตามเป้าหมาย เพื่อการปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง เพื่อสร้างผลกำไร โดยการกำจัดความแปรปรวนเพื่อลดความสูญเสีย ลดข้อผิดพลาดให้น้อยลงในทุก ๆ ด้านจากการผลิตสินค้าเพื่อตอบสนองยอดการสั่งซื้อ และเป็นการสร้างความพึงพอใจให้กับลูกค้า อันจะนำไปสู่การสร้างผลกำไรให้กับองค์กรในท้ายที่สุด [12]

DMAIC ของ ซิกซ์ ซิกม่า (Six Sigma) โดยถูกนำมาใช้ทั้งหมด 5 ขั้นตอน [2] ดังนี้

2.1 การกำหนดปัญหา

เป็นการหาลำดับความสำคัญของปัญหาเพื่อเลือกไปใช้ในการปรับปรุงต่อไป โดยต้องระบุรุ่นของชิ้นส่วน โดยผู้วิจัยพิจารณาจากแผนภูมิพาเรโต (Pareto Diagram) [4, 10]

2.2 ขั้นตอนการวัด

เป็นการหาปัจจัยนำเข้าที่สำคัญของกระบวนการ วัตถุประสงค์เพื่อค้นหาสาเหตุที่แท้จริงของปัญหา ทำการศึกษากระบวนการโดยละเอียด เพื่อกำหนดปัจจัยที่ได้รับจากกระบวนการ หรือตัวแปรตอบสนองกระบวนการโดยทำการศึกษาทั้งกระบวนการ (Process Mapping) [8] การวิเคราะห์แผนผังแสดงเหตุและผล (Why-Why Tree Diagram) [2]

2.3 การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา

ทำการค้นหาสภาวะปัจจุบันจนถึงปัจจัยต่าง ๆ ทั้งหลายที่สามารถนำกระบวนการผลิตให้ไปสู่เป้าหมายที่ตั้งไว้โดยใช้วิธีการทดสอบการวิเคราะห์ค่าสัดส่วนของประชากร 2 ชุด (2 Proportions) เพื่อพิสูจน์ว่าปัจจัยตัวใดเป็นสาเหตุที่แท้จริงที่ทำให้เกิดปัญหาเส้นผ่านศูนย์กลาง

เกินกว่าค่าที่กำหนด และพิสูจน์สาเหตุโดยใช้การประเมินความสามารถของระบบการวัดแบบข้อมูลนับ (GR&R)

2.4 การปรับปรุงแก้ไขกระบวนการ

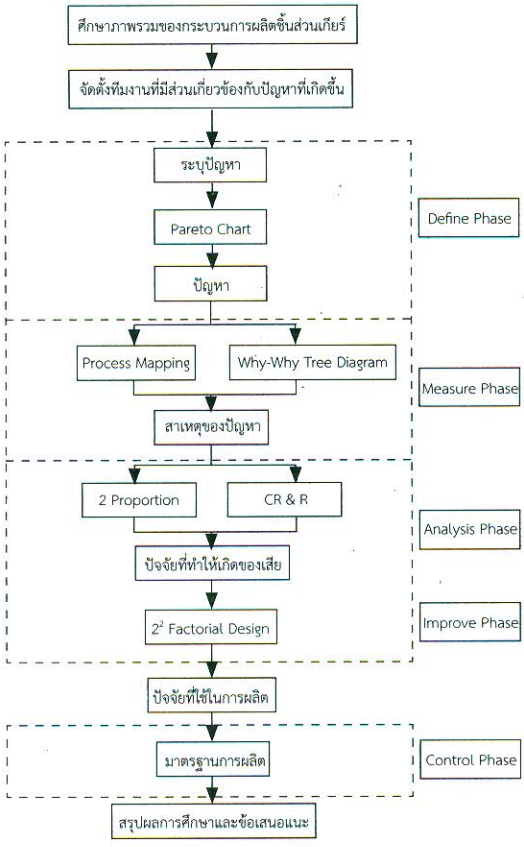
ออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) [9] โดยทำการออกแบบการทดลองแบบ 2^2 Factorial Design [10] เพื่อทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการ กลึงทำให้ทราบปัจจัยที่เหมาะสมในการปรับตั้งเครื่องจักรในสายงานกระบวนการผลิต

2.5 ขั้นตอนการควบคุมกระบวนการต่าง ๆ

ขั้นตอนนี้เป็นการควบคุมข้อบกพร่องต่าง ๆ ซึ่งมีผลทั้งทางตรงและทางอ้อม ต้องควบคุมระบบการทำงานเพื่อไม่ให้เกิดปัญหาซ้ำอีก หรือเป็นการตรวจติดตามปัญหาอย่างต่อเนื่อง โดยได้ทำการออกแบบและจัดสร้างระบบเอกสารมาตรฐานการทำงานในการควบคุมคุณภาพ (Work Instruction)

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัยสามารถแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอนตามแนวทาง DMAIC ดังรูปที่ 3-1



รูปที่ 3-1 ขั้นตอนในการดำเนินงาน

3.1 ขั้นตอนการกำหนดปัญหา

โดยได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลย้อนหลัง 6 เดือน ตั้งแต่เดือนมกราคม–มิถุนายน 2556 โดยแผนภาพพาเรโต้ (Pareto Diagram) [4], [10]

3.2 ขั้นตอนการวัด

การดำเนินการขั้นนี้ เป็นขั้นตอนการวัดความผิดพลาดต่าง ๆ เพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการปรับปรุง โดยการสร้างแผนภูมิการไหลของกระบวนการ เพื่อหาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหา แล้วนำเข้าสู่กระบวนการระดมสมองโดยการสร้างแผนภูมิต้นไม้ (Why-Why Tree) [2] เพื่อแสดงเหตุและผลของปัญหา

3.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์

หลังจากหาปัจจัยนำเข้าที่สำคัญซึ่งน่าจะมีผลต่อปัญหาแล้ว ขั้นตอนนี้จะเป็นขั้นตอนการพิสูจน์สมมติฐานเพื่อหาว่าปัจจัยต่าง ๆ มีผลจริงหรือไม่ โดยแยกออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

3.3.1 ศึกษาการนำเข้าทั้งหมด 2 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของชิ้นงาน ได้แก่ อายุการใช้งานของดอกเจาะ (Usage of Tooling) และระยะการตั้งศูนย์ของเครื่องจักร (Centering of machine) จากนั้นทำการวิเคราะห์โดยใช้การทดสอบสมมติฐานเปรียบเทียบแบบประชากร 2 กลุ่ม โดยวิเคราะห์ทีละสาเหตุแห่งปัจจัย ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ของ 2 Proportion เป็นการตัดสินใจจากค่า P-Value $>$ 0.05 เพื่อเป็นการทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis Test Method)

3.3.2 การประเมินความสามารถของระบบการวัดแบบข้อมูลนับ (Measurement System Analysis) โดยพิสูจน์จากผลการวัด GR&R กับกระบวนการกลึงเกียร์

3.4 ขั้นตอนการปรับปรุง

ออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) โดยทำการออกแบบการทดลองแบบ 22 Factorial Design [9] เพื่อหาความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่างตัวแปรตอบสนองของกระบวนการกับปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อตัวแปรตอบสนองของกระบวนการกลึง ทำให้ทราบปัจจัยที่เหมาะสมในการปรับตั้งเครื่องจักรในกระบวนการผลิต

3.5 ขั้นตอนการควบคุมปัญหา

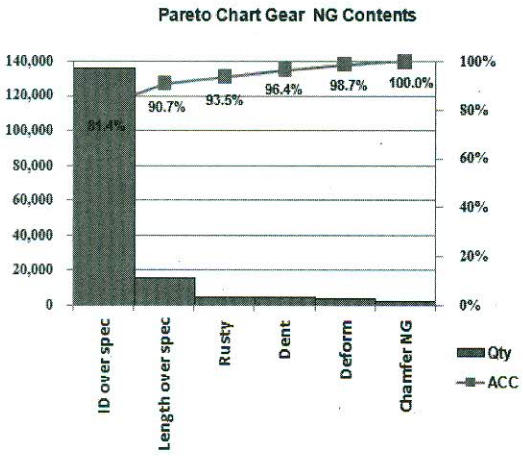
ขั้นตอนนี้เป็นการติดตาม ตรวจสอบ และประเมินผลงานที่ปฏิบัติ โดยการเปรียบเทียบผลก่อนและหลังการปรับปรุง ถ้าผลลัพธ์ออกมาตามเป้าหมายก็จะนำไปกำหนดเป็นมาตรฐานในการปฏิบัติงาน (Work Instruction) ครั้งต่อไป และใช้แบบฟอร์ม (Check Sheet) ในการควบคุมกระบวนการผลิตอีกด้วย

4. ผลการวิจัย

4.1 ผลขั้นตอนการระบุปัญหา

จากการเก็บรวบรวมข้อมูลของปัญหาในกระบวนการผลิตเกียร์ของโรงงานกรณีศึกษา ตั้งแต่เดือนมกราคม–มิถุนายน 2556 พบว่าปัญหาที่เกิดขึ้นมากที่สุด คือ ปัญหาเส้นผ่าน

ศูนย์กลางภายในเกินกว่าค่าที่กำหนดของโมเดล ID 3 (-0.010/-0.020) คิดเฉลี่ยเป็น 3.4% ของยอดการผลิต โดยปัญหานี้มีสาเหตุหลักมาจากกระบวนการกลึง แสดงการจำแนกปัญหา ดังรูปที่ 4-1

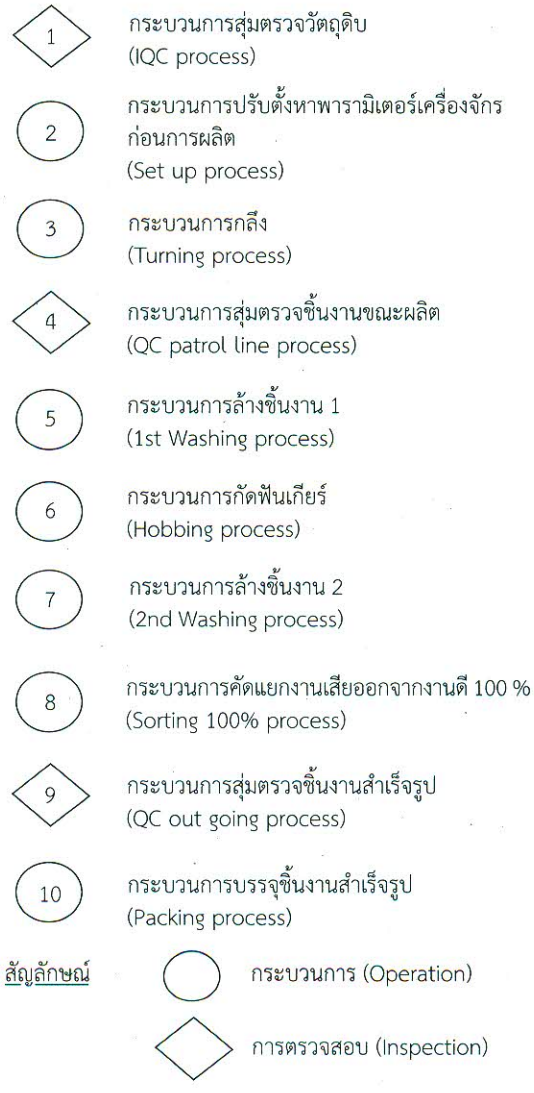


รูปที่ 4-1 แผนภาพพาเรโตจำแนกลักษณะของปัญหา NG

รูปที่ 4-1 แผนภาพพาเรโตแสดงปริมาณของเสียในกระบวนการผลิตเกียร์ พบปัญหาเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเกินกว่าค่าที่กำหนด (ID over spec) มีเปอร์เซ็นต์สะสมจากการดำเนินงานมากที่สุดเท่ากับ 81.40% ซึ่งสอดคล้องกับการเลือกปัญหาที่มีนัยสำคัญมากที่สุดตามกฎ 80-20 ดังนั้น ปัญหาเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเกินกว่าค่าที่กำหนด (ID over spec) ควรเป็นปัญหาเร่งด่วนที่ถูกนำมาดำเนินการปรับปรุงแก้ไขก่อน

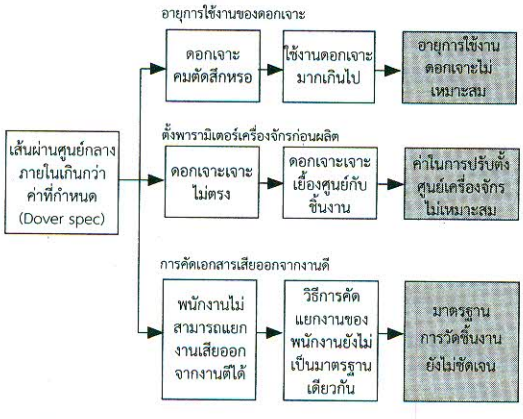
4.2 ขั้นตอนการวัด

4.2.1 จากการสร้างแผนที่กระบวนการผลิตเกียร์ (Process Mapping) [2, 9] เพื่อทำการศึกษาปัจจัยและความสัมพันธ์ในแต่ละกระบวนการ ดังรูปที่ 4-2 พบว่าปัญหาชิ้นงานเส้นผ่านศูนย์กลางเกินกว่าค่าที่กำหนดเกิดขึ้นที่กระบวนการกลึง แสดงโดยเส้นแดง และอาจเกิดปัญหาการหลุดรอดของชิ้นงานเสียที่กระบวนการคัดแยกงานเสียออกจากงานดี (Sorting 100% process)



รูปที่ 4-2 กระบวนการที่จะก่อให้เกิดปัญหาเกียร์เส้นผ่านศูนย์กลางเกินกว่าค่าที่กำหนด

4.2.2 จากนั้นวิเคราะห์แผนภาพสาเหตุและผล (Why-Why Tree Diagram) [2] โดยการระดมสมอง ซึ่งในทีมประกอบไปด้วยฝ่ายผลิต ฝ่ายช่างเทคนิค ฝ่ายซ่อมบำรุง ฝ่ายวิศวกรรม และฝ่ายควบคุมคุณภาพ โดยการนำปัจจัยนำเข้าแยกตามกระบวนการ แสดงดังรูปที่ 4-3 จากแผนผังต้นไม้แสดงเหตุและผลของปัจจัยนั้นจะพบว่าสาเหตุรากเหง้าของปัญหาที่เกิดขึ้นในแต่ละกระบวนการมีทั้งหมด 3 สาเหตุ คือ 1) อายุการใช้งานของดอกเจาะไม่เหมาะสม 2) ค่าในการปรับตั้งศูนย์เครื่องจักรยังไม่เหมาะสม 3) มาตรฐานขั้นตอนการวัดยังไม่ชัดเจน



รูปที่ 4-3 แผนภูมิต้นไม้แสดงเหตุและผลของปัจจัยที่เกิดปัญหาเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเกินกว่าค่าที่กำหนด

4.3 ผลขั้นตอนการวิเคราะห์

จากขั้นตอนการวัดผล พบว่าสาเหตุที่ส่งผลกระทบต่อปัญหาที่ทำการศึกษามี 3 สาเหตุ ประกอบด้วย 1) อายุการใช้งานของดอกเจาะไม่เหมาะสม 2) ค่าในการปรับตั้งศูนย์เครื่องจักรยังไม่เหมาะสม 3) มาตรฐานขั้นตอนการวัดยังไม่ชัดเจน

แนวทางการวิเคราะห์นั้นจะทำการวิเคราะห์ทีละสาเหตุแห่งปัจจัย โดยใช้วิธีการทดสอบสมมติฐานระหว่างค่าสัดส่วนของประชากรสองชุด (2 Proportion) ในสาเหตุที่ 1-2 และใช้วิธีการประเมินความสามารถของระบบการวัดแบบข้อมูลวัด (GR&R) ในสาเหตุที่ 3 เพื่อพิสูจน์ว่าปัจจัยตัวใดเป็นสาเหตุที่แท้จริงที่ทำให้เกิดปัญหาเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเกินกว่าค่าที่กำหนด โดยในการทดลองนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อกลั่นกรองปัจจัยต่าง ๆ (Screening Factor) ที่สงสัยออกก่อนหรือเป็นการกรองเฉพาะปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปัญหาเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเกินกว่าค่าที่กำหนดอย่างมีนัยสำคัญ โดยลักษณะงานดีของชิ้นงานจะต้องมีค่าเส้นผ่านศูนย์กลางภายในมีขนาด 3 (-0.010/-0.020) มิลลิเมตร

4.3.1 อายุการใช้งานของดอกเจาะ (Usage of Tooling) ในการทดลองนี้ผู้วิจัยได้ทำการทดลองที่ช่วง 150,000 ชิ้น และ 200,000 ชิ้น จากนั้นวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนได้ค่า P-Value = 0.000 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 นั่นหมายถึงอัตราการเกิดปัญหาเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเกินกว่าค่าที่กำหนดเมื่อนำดอกเจาะมาใช้ผลิตงานในช่วง 150,000 ชิ้น มีความแตกต่างกับการนำดอกเจาะมาใช้ผลิตงานที่ 200,000 ชิ้น แสดงให้เห็นว่าอายุการใช้งานของดอกเจาะ เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหาเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเกินกว่าค่าที่กำหนดตามที่ได้ตั้งสมมติฐานไว้ ดังรูปที่ 4-4

Test and CI for Two Proportions

Sample	X	N	Sample p
1	6795	200000	0.033975
2	2005	150000	0.013367

Difference = p (1) - p (2)
Estimate for difference: 0.0206083
95% CI for difference: (0.0196244, 0.0215923)
Test for difference = 0 (vs not = 0): Z = 41.05 P-Value = 0.000

รูปที่ 4-4 ผลการทดสอบสมมติฐานข้อบกพร่องของอายุการใช้งานของดอกเจาะ

4.3.2 ค่าในการปรับตั้งศูนย์ของเครื่องจักร (Centering of Machine) ในการทดลองนี้ผู้วิจัยได้ทำการทดลองที่ช่วง 5 ไมครอน และ 12 ไมครอน จากนั้นวิเคราะห์หาความแปรปรวนได้ค่า P-Value = 0.000 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 นั่นหมายถึงอัตราการเกิดปัญหาเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเกินกว่าค่าที่กำหนดเมื่อทำการปรับตั้งศูนย์ของชุดเจาะทั้งสองครั้งมีความแตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่าค่าในการปรับตั้งศูนย์ของเครื่องจักร เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหาเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเกินกว่าค่าที่กำหนดตามที่ตั้งสมมติฐานไว้ ดังรูปที่ 4-5

Test and CI for Two Proportions

Sample	X	N	Sample p
1	75	2000	0.037500
2	13	2000	0.006500

Difference = p (1) - p (2)
Estimate for difference: 0.031
95% CI for difference: (0.0219595, 0.0400405)
Test for difference = 0 (vs not = 0): Z = 6.72 P-Value = 0.000

รูปที่ 4-5 ผลการทดสอบสมมติฐานข้อบกพร่องของค่าในการปรับตั้งศูนย์ของเครื่องจักร

4.3.3 การประเมินประสิทธิภาพการตรวจสอบชิ้นงานโดยใช้ทฤษฎี GR&R

Gage R&R

Source	VarComp	%Contribution (of VarComp)
Total Gage R&R	0.0000003	88.76
Repeatability	0.0000003	88.76
Reproducibility	0.0000000	0.00
Opertor	0.0000000	0.00
Part-To-Part	0.0000000	11.24
Total Variation	0.0000003	100.00

Source	StdDev (SD)	Study Var (6 * SD)	%Study Var (%SV)	%Tolerance (SV/Toler)
Total Gage R&R	0.0005224	0.0031343	94.21	31.34
Repeatability	0.0005224	0.0031343	94.21	31.34
Reproducibility	0.0000000	0.0000000	0.00	0.00
Opertor	0.0000000	0.0000000	0.00	0.00
Part-To-Part	0.0001859	0.0011152	33.52	11.15
Total Variation	0.0005545	0.0033268	100.00	33.27

รูปที่ 4-6 ผลการคำนวณค่า Total GR&R

รูปที่ 4-6 ผลพบว่าค่า Total GR&R เท่ากับ 31.34% หมายความว่าค่าที่อ่านจากเครื่องมือวัด BMD มีค่าผันแปรไม่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ จึงสรุปได้ว่าเครื่องมือวัด BMD ไม่สามารถใช้ในการตรวจจับและการแยกแยะของดีหรือของเสียได้อย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นระบบการวัดจึงเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหาเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเกินกว่าค่าที่กำหนด

4.4 ผลขั้นตอนการปรับปรุง

4.4.1 การออกแบบการทดลองแบบ 2^2 Factorial Design จากการทดลองวิเคราะห์หาความแปรปรวนเพื่อกลั่นกรองปัจจัยต่าง ๆ มีปัจจัยที่ยังไม่สามารถทราบค่าปัจจัยที่เหมาะสม ดังนั้นจึงกำหนด Level ของแต่ละปัจจัยต่าง ๆ โดยอ้างข้อมูลเดิมของการผลิตเกียร์โมเดล ID 3 (-0.010/-0.020) ดังรูปที่ 4-7

ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง	Current Condition	Level		หน่วย
		1	2	
Usage of tooling	200,000	200,000	150,000	pieces/tool
Centering of machine	12	12	5	μmm.

รูปที่ 4-7 ปัจจัยและลักษณะปัจจัยป้อนเข้า

จากนั้น ออกแบบการทดลอง ผลการทดลองแบบ 2^2 Factorial Design [9] เพื่อวิเคราะห์ความปรวนแปรจากสาเหตุหลักและความแปรปรวนร่วมของแต่ละ factor ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 4-8

Factorial Fit: Defect versus Usage, Center MC

Estimated Effects and Coefficients for Defect (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		4579.8	41.18	111.21	0.000
Usage	2857.0	1428.5	41.18	34.69	0.000
Center MC	2576.0	1288.0	41.18	31.28	0.000
Usage*Center MC	-1096.5	-548.2	41.18	-13.31	0.000

S = 116.474 PRESS = 217060
R-Sq = 99.83% R-Sq(pred) = 99.32% R-Sq(adj) = 99.70%

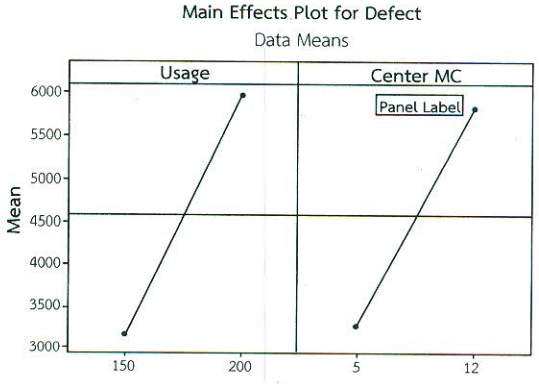
รูปที่ 4-8 ค่าวิเคราะห์ความแปรปรวน

จากรูปที่ 4-8 จากผลการทดสอบที่ได้พบว่า

1) อายุการใช้งานของดอกเจาะ มีค่า P-Value เท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 นั่นหมายถึงอายุการใช้งานของดอกเจาะมีผลต่อปัญหาเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเกินกว่าค่าที่กำหนดอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05

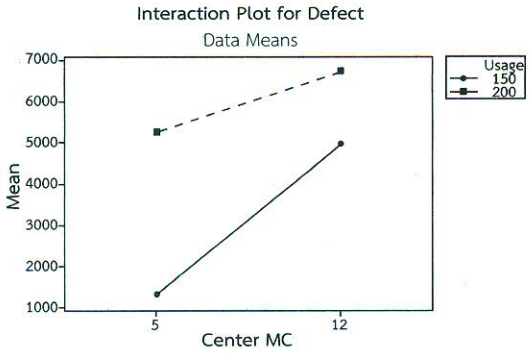
2) ค่าในการปรับตั้งศูนย์ของเครื่องจักร มีค่า P-Value เท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 นั่นหมายถึง ค่าในการปรับตั้งศูนย์ชุดเจาะมีผลต่อปัญหาเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเกินกว่าค่าที่กำหนดอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05

สรุปผลของการทดลองใช้ Main Effect Plot และ Interaction Plot เพื่อหาระดับปัจจัยที่ทำให้เกิดปัญหาเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเกินกว่าค่าที่กำหนดน้อยที่สุด ดังรูปที่ 4-9 และ 4-10



รูปที่ 4-9 กราฟผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของสาเหตุหลัก

รูปที่ 4-9 เป็นการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นของสาเหตุหลักแต่ละตัว โดยเมื่อลดอายุการใช้งานของดอกเจาะลงจากเดิม คือ 200,000 ชิ้นต่อดอกเจาะ 1 ตัว เป็น 150,000 ชิ้นต่อดอกเจาะ 1 ตัว จะทำให้ปัญหาเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเกินกว่าค่าที่กำหนดลดลง และเมื่อเปลี่ยนค่าปรับตั้งศูนย์ของเครื่องจักรจากเดิม คือ 12 ไมครอน เป็น 5 ไมครอน จะทำให้ปัญหาเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเกินกว่าค่าที่กำหนดลดลงเช่นเดียวกัน



รูปที่ 4-10 ผลการวิเคราะห์ตัวแปรร่วมแต่ละตัว

รูปที่ 4-10 พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอายุการใช้งานของดอกเจาะ และค่าในการปรับตั้งศูนย์ของเครื่องจักร จะพบว่าอายุการใช้งานของดอกเจาะที่ใช้ผลิตชิ้นงาน 150,000 ชิ้น ทำให้เกิดปัญหาจุดดำลดลง และค่าปรับตั้งศูนย์ของเครื่องจักรที่ 5 ไมครอน ทำให้เกิดปัญหาเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเกินกว่าค่าที่กำหนดลดลง สรุปได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างอายุการใช้งานของดอกเจาะกับค่าปรับตั้งศูนย์ของเครื่องจักรไม่มีอิทธิพลร่วมต่อกัน

4.4.2 การจัดทำมาตรฐานขั้นตอนการตรวจสอบ (Operation Standard) จากการทำการวิเคราะห์ GR&R จากข้อ 4.3.3 พบว่าค่า Repeatability มากกว่าค่าที่กำหนด ซึ่งวิเคราะห์ได้ว่ากระบวนการวัดเกิดข้อบกพร่องจากวิธีการวัด ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้คิดและกำหนดมาตรฐานในการตรวจสอบงานรูปแบบใหม่ และได้นำไปทำการฝึกอบรม (Training) ให้กับพนักงานที่อยู่ในกระบวนการคัดแยกชิ้นงานเสียออกจากงานดี 100% ซึ่งหลังจากการอบรมจะทำให้พนักงานปฏิบัติงานไปในแนวทางเดียวกัน จากนั้นการประเมินประสิทธิภาพการตรวจสอบชิ้นงานโดยใช้ทฤษฎี GR&R อีกครั้ง ดังรูปที่ 4-11

Gage R&R

Source	VarComp	%Contribution (of VarComp)
Total Gage R&R	0.0000000	100.00
Repeatability	0.0000000	87.96
Reproducibility	0.0000000	12.04
Opertor	0.0000000	1.30
Opertor*Part No	0.0000000	10.74
Part-To-Part	0.0000000	0.00
Total Variation	0.0000000	100.00

Source	StdDev (SD)	Study Var (6 * SD)	%Study Var (%SV)	%Tolerance (SV/Toler)
Total Gage R&R	0.0001069	0.0006413	100.00	6.41
Repeatability	0.0001002	0.0006015	93.79	6.01
Reproducibility	0.0000371	0.0002225	34.70	2.23
Opertor	0.0000122	0.0000732	11.41	0.73
Opertor*Part No	0.0000350	0.0002101	32.77	2.10
Part-To-Part	0.0000000	0.0000000	0.00	0.00
Total Variation	0.0001069	0.0006413	100.00	6.41

รูปที่ 4-11 ค่า Total GR&R หลังการฝึกอบรม

จากรูปที่ 4-11 ผลการคำนวณค่า Total GR&R เท่ากับ 6.41% หมายความว่าค่าที่อ่านจากเครื่องมือวัด BMD มีค่าผันแปรที่อยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้ จึงสรุปได้ว่า เครื่องมือวัด BMD สามารถใช้ในการตรวจจับและการแยกแยะของดีหรือของเสียได้อย่างมีนัยสำคัญ

4.5 ขั้นตอนการควบคุมปัญหา

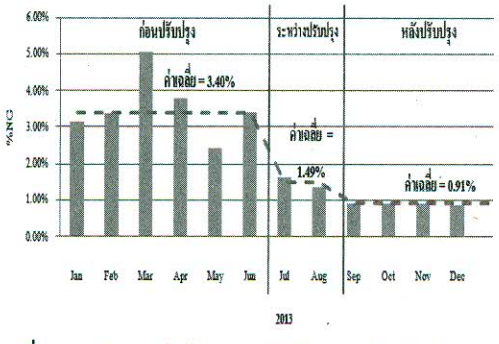
ตัวแปรที่ทำการควบคุมปัญหาคือ

1. อายุการใช้งานของดอกเจาะ (Usage of Tooling) เป็นหน้าที่แผนกวิศวกรรมที่จะต้องทำการกำหนดมาตรฐานอายุการใช้งานของดอกเจาะใน tooling layout และทำการเปลี่ยนตามกำหนดพร้อมลงบันทึกลงในใบบันทึกข้อมูล

2. ค่าในการปรับตั้งศูนย์ของเครื่องจักรเป็นหน้าที่ของหัวหน้าฝ่ายผลิต

แผนกกลึงที่จะต้องทำการกำหนดมาตรฐานในการปรับตั้งศูนย์ของเครื่องจักรโดยต้องปรับตั้งแต่เริ่มต้นกระบวนการผลิตทุกครั้ง แล้วทำการฝึกอบรมพนักงานให้ปฏิบัติไปในแนวทางเดียวกัน พร้อมลงในบันทึกข้อมูล (Set up record)

3. การจัดทำมาตรฐานการวัด เป็นหน้าที่ของแผนกควบคุมคุณภาพที่จะต้องกำหนดมาตรฐานในการวัดที่เหมาะสมและถูกต้อง พร้อมทั้งฝึกอบรมพนักงานให้ปฏิบัติไปในทางเดียวกัน และทำแผนการฝึกอบรมซ้ำ หลังจากการปรับปรุงและการควบคุมตัวแปรต่าง ๆ แล้ว พบว่าปัญหาเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเกินกว่าค่าที่กำหนดมีแนวโน้มที่ลดลง แสดงดังรูปที่ 4-12

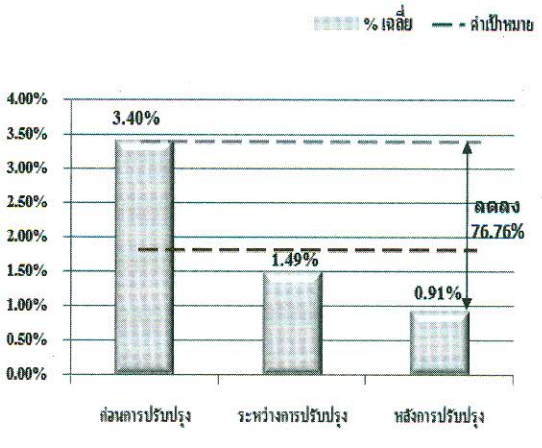


รูปที่ 4-12 แนวโน้มการเกิดปัญหาเกียร์เส้นผ่านศูนย์กลางภายในเกินกว่าค่าที่กำหนด

รูปที่ 4-12 พบว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบข้อมูลทางสถิติ ปัญหาเกียร์เส้นผ่านศูนย์กลางภายในเกินกว่าค่าที่กำหนดจากผลการดำเนินงาน โดยช่วงก่อนการดำเนินการแก้ไขปัญหา คือ เดือนมกราคม – มิถุนายน 2556 พบว่ามีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 3.40% ซึ่งผลการดำเนินการแก้ไขและปรับปรุงปัญหาสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วง คือช่วงแรกเป็นการวิเคราะห์ปัญหาและกำลังปรับปรุง คือเดือนกรกฎาคม–สิงหาคม 2556 พบว่ามีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1.49% และช่วงที่สองเป็นผลหลังจากการควบคุมปัจจัยที่ก่อให้เกิดปัญหา คือเดือนกันยายน–ธันวาคม 2556 พบว่ามีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.91% ซึ่งสามารถลดปัญหาเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเกินค่าที่กำหนดลงได้ตามเป้าหมายที่วางเอาไว้

4.5 สรุปผลการดำเนินงาน

จากการประยุกต์ใช้หลักการ DMAIC ของซิกซ์ ซิกม่า มาช่วยแก้ปัญหาชิ้นงานเกียร์เส้นผ่านศูนย์กลางภายในเกินค่าที่กำหนดในกระบวนการกลึง จากเดิมพบของเสียอยู่ที่ 3.40% เหลือ 0.91% ซึ่งบรรลุเป้าหมายที่ตั้งไว้ โดยสามารถลดปัญหาเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเกินค่าที่กำหนดมากถึง 76.76% ดังรูปที่ 4-13



รูปที่ 4-13 สรุปผลการทดลองหลังการปรับปรุง

ข้อเสนอแนะ

1. งานวิจัยฉบับนี้ได้ศึกษาชิ้นงานเกียร์ (Gear) โมเดล ID 3 (-0.10/-0.020) เท่านั้น ผู้ที่สนใจจะนำงานวิจัยนี้ไปพัฒนาต่อยอดนั้น สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโมเดลอื่น ๆ เพื่อทำการปรับปรุงแก้ไขสายการผลิตให้ให้มีคุณภาพดีขึ้นได้ แต่จะต้องพิจารณาปัจจัยในส่วนอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง เพื่อที่จะทำให้ผู้ที่จะทำการศึกษาต่อไปมีแนวทางในการวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

2. ในการศึกษาครั้งต่อไป หากมีการเพิ่มเติมความสามารถของกระบวนการการผลิต โดยการนำเทคนิค ดีเอ็มเอไอซี (DMAIC) ของซิกส์ ซิกม่ามาประยุกต์ใช้ในช่วงที่ผลิตภัณฑ์กำลังทำการวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ (New Product) ก็จะยิ่งส่งผลให้การผลิตมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เนื่องจากเมื่อเริ่มทำการผลิตผลิตภัณฑ์ไปแล้ว การปรับปรุงแก้ไขบางอย่างทำได้ยากมาก เนื่องจากจะกระทบต่อต้นทุนและอาจต้องแจ้งให้ลูกค้าทราบเพื่อขออนุมัติการเปลี่ยนแปลง

3. ในการดำเนินงานตามหลักการซิกซ์ซิกม่านั้น พนักงานในองค์กรทุกคนควรมีความรู้และทักษะ เพื่อจะสามารถดำเนินงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและประโยชน์สูงสุดต่อองค์กร

4. หลักการ DMAIC ของซิกซ์ ซิกม่า นอกจากจะมีประโยชน์ในด้านการผลิตกับบริษัทกรณีศึกษาแล้ว ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับหน่วยงานหรือองค์กรอื่น ในด้านอื่น ๆ ดังนี้

- ด้านผลิตภัณฑ์ เช่น ลดระยะเวลาในการเสนอผลิตภัณฑ์ใหม่เข้าสู่ตลาดการแข่งขัน, เป็นผู้นำทางเทคโนโลยี, มีการพัฒนาผลิตภัณฑ์อย่างต่อเนื่อง และต้นทุนผลิตภัณฑ์ลดลง

- ด้านลูกค้า เช่น คุณภาพของผลิตภัณฑ์และบริการเป็นที่พึงพอใจของลูกค้า, ราคาของผลิตภัณฑ์ต่ำลง และลูกค้าได้รับสิ่งที่พวกเขาต้องการจริง ๆ

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รศ. ดร.ณฐา คุปตัษเฐียร ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษา แนวคิด ข้อเสนอแนะ ตลอดจนแนวทางในการปรับปรุงหัวข้อต่าง ๆ ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และคณาจารย์ทุกท่าน ที่สนับสนุนงานวิจัยไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

เอกสารอ้างอิง

[1] กรมเจรจาการค้าระหว่างประเทศ (Department of Trade Negotiations), 2556. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก http://www.thaifta.com

[2] ธนรัตน์ เอี่ยมเจริญ, 2554. **การลดข้อบกพร่องในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนปุ่มฉุกเฉินโดยใช้หลักการ DMAIC: กรณีศึกษาโรงงานผลิตชิ้นส่วนพลาสติก.** มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี .การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ ประจำปี 2554 20-21 ตุลาคม 2554

[3] บรรหาร ลิลา, 2554. **การลดปัญหารอยบุบของฝาครอบด้านบนในกระบวนการประกอบฮาร์ดดิสก์ด้วยวิธี DMAIC.** การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ ประจำปี 2554 20-21 ตุลาคม 2554

[4] **วสันต์ พุกผาสุก, 2551. การลดของเสียจากกระบวนการชุบโครเมียมโดยประยุกต์ใช้วิธีการซิกซ์ ซิกม่า : กรณีศึกษาบริษัทในอุตสาหกรรมชุบโครเมียม.** มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ,วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 18 ฉบับที่ 2 พ.ค.–ส.ค. 2551

[5] พงศ์ สกุลพุกผาสุก, 2550. **การลดของเสียจากกระบวนการชุบโครเมียม โดยการประยุกต์ใช้วิธีการซิกซ์ ซิกม่า กรณีศึกษาบริษัทในอุตสาหกรรมชุบโครเมี่ยม.** ภาควิชาวิศกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

[6] Wichai Chattinnawat, 2008. **Methodology of DMAIC with Why-Why Analysis in a Hierarchical Decision Procedure: A Case Study of Quality Improvement of Polarization Maintain and absorption Reducing (PANDA) Fiber Connectors,** Journal of Industrial Engineering, ICMIT2008.

[7] วลัยพร เหมโส, 2013. **การลดของเสียจากกระบวนการผลิตผ้าเบรครถยนต์โดยประยุกต์ใช้วิธีการ DMAIC.** ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

[8] Nabeel Mandahawia, Rami H. Fouad*, a, Suleiman Obeidata, 2012. **An Application of Customized Lean Six Sigma to Enhance Productivity at a Paper Manufacturing Company.** Industrial Engineering Department, Faculty of Engineering, Hashemite University, Zarqa 13115, Jordan

[9] นายธีระพงษ์ บุญสมปอง และณฐา คุปตัษเฐียร. **การลดปัญหาทูมสโตน คอมโพเน้นท์ โดยใช้แนวทางซิกส์ ซิกม่า กรณีศึกษา : กระบวนการประกอบแผ่นวงจรชนิดอ่อน.** คณะวิศวกรรมสาสตร์ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

[10] Anup A.Junankar1, **P.N Shende2, Minimization Of Rework In Belt Industry Using DMAIC.** Department of Mechanical Engineering, Engineering College, Nagpur

[11] วชิรพงษ์ สาลีสิงห์. 2548. **ปฏิวัติกระบวนการทำงานด้วยเทคนิค Six Sigma ฉบับ Champion และ Black Belt บ.ศิริวัฒนาอินเตอร์พรินท์ จำกัด (มหาชน),**กรุงเทพฯ.

[12] วิทยา สุหฤทดำรง และก้องเดชา บ้านมะหิงษ์. 2545. **Six Sigma กลยุทธ์การสร้างผลกำไรขององค์กรระดับโลก.** สำนักพิมพ์ท้อป จำกัด, กรุงเทพฯ.

เครื่องมือต้นแบบทดสอบการแอ่นตัวของถนนลาดยางแบบกึ่งอัตโนมัติ

Prototype of Semi-Automatic Deflectometer Equipment for Asphalt Roads

พุทธพล ทองอินทร์ดำ[1] และ จักรกฤษ อ่อนชื่นจิตร[2]

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันหน่วยงานหลักด้านการทางในประเทศได้หันไปใช้เครื่องมือวัดค่ากำลังรับน้ำหนักผิวทางจากต่างประเทศที่มีเทคโนโลยีทันสมัยแต่มีราคาแพง ทำให้หน่วยงานท้องถิ่นซึ่งมีงบประมาณจำกัดไม่สามารถจัดหาเครื่องมือดังกล่าวมาใช้งานได้ งานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายเพื่อพัฒนาเครื่องมือต้นแบบทดสอบกำลังรับน้ำหนักของถนนลาดยาง โดยการพัฒนาเครื่องเบนเคลแมนบีม (BB) ที่หน่วยงานท้องถิ่นส่วนใหญ่มีอยู่แล้วให้สามารถอ่านค่าวัดได้รวดเร็วขึ้น และใช้ต้นทุนต่ำ และมีความถูกต้องอยู่ในเกณฑ์รับได้ ผลการศึกษาทำให้สามารถพัฒนาเครื่องมือต้นแบบที่มีต้นทุนต่ำกว่า 300,000 บาท/เครื่อง โดยมีองค์ประกอบหลัก 2 ส่วน ส่วนที่ 1 คือ ชุดโครงเครื่องมือแบบใหม่ และส่วนที่ 2 คือ กล่องควบคุมและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ส่วนควบที่เซนเซอร์สามารถอ่านค่าแอ่งการยุบตัวของผิวทางแบบกึ่งอัตโนมัติได้ถึง 4 จุด และอ่านค่าอุณหภูมิที่ผิวและกึ่งกลางชั้นแอสฟัลต์คอนกรีต ค่าทั้งหมดแสดงผลโดยทันทีและส่งข้อมูลผ่านสัญญาณไร้สายไปยังคอมพิวเตอร์พกพา ผลการสอบเทียบพบว่าค่า R^2 มีค่ามากกว่า 0.95 และมีความคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ย 13.78 ไมครอน และมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการเปลี่ยนตำแหน่งเซนเซอร์ 15 ไมครอน ในขณะที่ค่าการทรุดตัวจริงของผิวทางสามารถปรับแก้โดยง่ายในโปรแกรมคำนวณทั่วไปโดยอาศัยสมการปรับแก้ที่นำเสนอในบทความวิจัยนี้

คำสำคัญ: เบนเคลแมนบีมกึ่งอัตโนมัติ, ถนนลาดยางท้องถิ่น, การทรุดตัวที่ผิวทาง

[1] อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

[2] อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Abstract

Nowadays the main authorities of highway in the country are using high technology equipment for evaluation of pavement bearing capacity. It is impossible for local authorities to afford these expensive equipment. This research aims to develop a prototype of deflectometer equipment for asphalt roads based on the Benkelman Beam which is already available in most of those local authorities. Goals of the development are to get a better BB in terms of testing time, low-price and reliability. At the outcome, the research team is able to develop the prototype with price lower than 300,000 THB/equipment. It comprises of two main units, a new design frame and a control box with electronic assembly which contains sensors for measuring 4 surface deflection points and probes for measuring surface and mid-depth temperatures of asphalt layer. All the measurement results will be real-time and wirelessly delivered to a notebook computer. It has been found from the calibration that the R^2 is greater than 0.95 and the average standard deviation is 13.78 microns. The standard deviation of changing sensors configuration is about 15 microns. Moreover, all the real surface deflection values can be simply calculated by a spreadsheet program using correction equations proposed in this paper.

Keywords: semi-automatic Benkelman beam, local asphalt road, surface deflection.

1. บทนำ

โครงข่ายถนนลาดยางหรือแอสฟัลต์คอนกรีตได้ถูกสร้างขึ้นเป็นจำนวนมากโดยงบประมาณของรัฐโดยเฉพาะในท้องถิ่นต่าง ๆ เนื่องจากความเหมาะสมในหลายด้าน โดยเฉพาะสามารถใช้งบประมาณก่อสร้างที่ต่ำ และความสะดวกในการบำรุงรักษาซ่อมแซมในภายหลัง นอกจากนั้นถนนลาดยางยังมีความได้เปรียบในแง่ของคุณภาพการให้บริการในการขับขี่ เนื่องจากเป็นโครงสร้างผิวทางที่ไม่มีรอยต่อ มีสีเข้มไม่สะท้อนแสงมาก และมีความนุ่มนวลในการขับขี่ เป็นต้น ในขณะที่การบริหารจัดการให้สามารถใช้งานโครงข่ายถนนลาดยางให้เต็มประสิทธิภาพนั้นต้องอาศัยการออกแบบที่ดี การก่อสร้างที่เป็นไปตามมาตรฐาน การควบคุมน้ำหนักบรรทุก และการประเมินสภาพผิวทางทั้งในแง่ความปลอดภัยและกำลังรับน้ำหนักซึ่งมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงไปตลอดอายุการใช้งาน ทั้งนี้ตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบันได้มีความพยายาม

ในการคิดค้นพัฒนาเครื่องมือและวิธีการในการประเมินหากำลังรับน้ำหนักของถนนลาดยางอย่างต่อเนื่อง ทั้งการทดสอบแบบทำลายและไม่ทำลาย (destructive and non-destructive) ซึ่งในระยะหลังการวิจัยพัฒนาเครื่องมือทดสอบแบบไม่ทำลายได้รับความนิยมอย่างมาก เนื่องจากสะท้อนสภาพที่แท้จริงของโครงสร้างผิวทางได้มากกว่าการทดสอบแบบทำลายที่ส่วนใหญ่ทำในห้องปฏิบัติการ

เครื่องมือการทดสอบแบบไม่ทำลายยุคแรก.ๆ ที่ถูกนำมาใช้ในหน่วยงานด้านการทางอย่างแพร่หลายในประเทศไทย ได้แก่ เบนเคลแมนบีม (Benkelman Beam, BB) ซึ่งมีราคาประมาณ 150,000 – 300,000 บาท/เครื่อง จัดเป็นเครื่องมือทดสอบแบบสถิตหรือกึ่งสถิตที่ทำหน้าที่วัดค่ายุบตัวของถนนลาดยางจากน้ำหนักลงเพลามาตรฐานของรถบรรทุก และมีกระบวนการวิเคราะห์ผลทดสอบเพื่อคำนวณหาอายุการใช้งานคงเหลือและความหนาชั้นทางเสริมความแข็งแรงที่ต้องการรองรับปริมาณการจราจรในขณะนั้นจนตลอดอายุการออกแบบ แต่ต่อมาหน่วยงานหลักในประเทศด้านการทางก็ยกเลิกการใช้เบนเคลแมนบีมเนื่องจากสาเหตุหลายประการ [1] เช่น ผลทดสอบที่ไม่แน่นอน ความล่าช้าในการทดสอบ กีดขวางการจราจรและอันตรายกับผู้ปฏิบัติงาน เป็นต้น และมีการทดแทนด้วยเครื่องมือทดสอบที่ใช้เทคโนโลยีสูงกว่า เช่น เครื่องวัดค่าความยุบตัวจากตุ้มกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) ซึ่งมีความแม่นยำกว่า รวดเร็วกว่า ไม่ต้องใช้รถบรรทุกซึ่งกีดขวางการจราจร และปลอดภัยกับผู้ปฏิบัติงานมากกว่า [2] เหมาะกับการทดสอบถนนสายหลักที่มีปริมาณการจราจรสูงเป็นอย่างยิ่ง แต่เครื่อง FWD นี้ยังมีราคาสูงอยู่มาก ประมาณ 15,000,000 – 20,000,000 บาท/เครื่อง จึงทำให้มีใช้อยู่ในเพียงบางหน่วยงานหลักด้านการจราจรของประเทศไทยเท่านั้น และแทบจะไม่มีทางเป็นไปได้ในอนาคตอันใกล้ที่จะสามารถจัดสรรงบประมาณให้หน่วยงานท้องถิ่นได้จัดหาเครื่องมือดังกล่าวไว้ใช้งานประเมินสายทาง

ทั้งนี้หากพิจารณาเฉพาะการทดสอบการยุบตัวของถนนลาดยางในท้องถิ่นแล้ว ข้อเสียเปรียบของเครื่องมือเบนเคลแมนบีมนั้นอาจจะลดน้อยลงอย่างมาก [1,4] เนื่องจากถนนมีความหนาไม่มาก และปริมาณจราจรไม่สูงนัก แต่จากงานวิจัยที่ผ่านมา [1,2,3,4] พบว่าเครื่องมือเบนเคลแมนบีมแบบดั้งเดิมให้ค่าทดสอบที่มีความคลาดเคลื่อนสูงเนื่องจากการอ่านค่าด้วยตาเปล่าจากผู้ปฏิบัติการและการอ่านค่าการยุบตัวเพียงจุดเดียวนั้นมีความอ่อนไหวมากเกินไป และไม่สามารถนำผลทดสอบมาวิเคราะห์ต่อเนื่องได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะพัฒนาเครื่องมือเบนเคลแมนบีมให้สามารถก้าวข้ามปัญหาดังกล่าวได้ เพื่อให้การนำไปใช้งานจริงในการตรวจประเมินถนนลาดยางในท้องถิ่นมีประสิทธิภาพสูงสุด และสามารถนำไปต่อยอดให้เป็นเครื่องมือที่ได้รับการยอมรับในระดับนานาชาติต่อไป รวมไปถึงเป็นการผลิตเครื่องมือ

ทดสอบแบบใหม่ที่มีต้นทุนต่ำ แต่ยังคงมีประสิทธิภาพอยู่ในเกณฑ์ดี ลดการนำเข้าเครื่องมือราคาแพงจากต่างประเทศ

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างผิวทาง

ดังที่กล่าวข้างต้นว่าการประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างผิวทางนั้น แบ่งตามลักษณะการทดสอบได้ 2 ประเภทคือ การทดสอบแบบทำลาย และแบบไม่ทำลาย โดยในส่วนของการทดสอบแบบทำลายนั้นจะมีการขุดหรือเจาะเพื่อทดสอบในสนาม หรือนำตัวอย่างมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ เช่น วิธีการเจาะเก็บก้อนตัวอย่าง (Coring) เป็นต้น แต่วิธีการดังกล่าวเป็นวิธีที่สร้างความเสียหายให้กับโครงสร้างทาง ใช้เวลานาน และได้จุดทดสอบที่เป็นตัวแทนโครงสร้างโดยรวมน้อย ดังนั้นวิธีการแบบทำลายจึงนำมาใช้ในการทดสอบในบางกรณีเท่านั้น ส่วนวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลายเป็นวิธีการทดสอบที่นิยมนำมาใช้ในการทดสอบโครงข่ายถนน โดยเฉพาะในสายทางที่จำเป็นต้องทดสอบจำนวนหลายจุด นอกจากนั้นการทดสอบแบบไม่ทำลายยังให้ผลการทดสอบที่มีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น เนื่องจากเป็นการทดสอบที่อยู่ภายใต้สภาวะแวดล้อมจริง ในการทดสอบแบบไม่ทำลายจะอาศัยผลตอบสนองของผิวทางมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล เช่น ค่าการสะท้อนของคลื่น หรือค่าการยุบตัวของผิวทาง เป็นต้น ทั้งนี้เครื่องมือทดสอบแบบไม่ทำลายสามารถแยกออกเป็นหลายประเภท ได้แก่ [5]

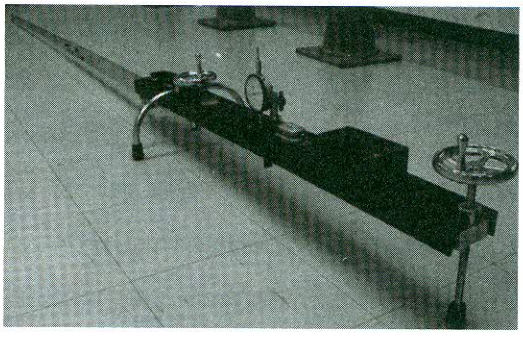
1) เครื่องมือแบบสถิต (static device) ซึ่งใช้น้ำหนักกดทับแบบสถิตหรือกึ่งสถิต เช่น เบนเคลแมนบีม

2) เครื่องมือแบบสั่นสะเทือน (vibratory device) เช่น เครื่อง Dynaflect หรือ Road Rater

3) เครื่องมือแบบใช้แรงกระตุ้น (impulse device) เช่น เครื่องวัดค่าความยุบตัวด้วยลูกตุ้มกระแทก (FWD)

2.2 เครื่องมือเบนเคลแมนบีม (BB)

เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดค่าการยุบตัวของผิวทางแบบสถิตโดยมีลักษณะเครื่องมือดั้งเดิมดังรูปที่ 1 ซึ่งมีสัดส่วนระหว่างปลายคานทั้ง 2 ด้านถึงจุดหมุนที่แน่นอน เช่น 4:1 เป็นต้น และใช้เป็นค่าตัวประกอบปรับแก้ค่าการยุบตัวของผิวทางที่อ่านได้จากนาฬิกาวัด (dial gauge) เพื่อความสะดวกและปลอดภัยนิยมกำหนดให้ทดสอบบนแนวร่องล้อด้านนอก (outer wheel path) โดยใช้น้ำหนักจากรถบรรทุกที่มีน้ำหนักลงเพลามาตรฐานขนาด เช่น เพลาเดี่ยวล้อคู่ขนาด 18,000 ปอนด์ โดยมีวิธีการทดสอบทั้งแบบโดยตรง (direct method) คือการถอยรถบรรทุกช้า ๆ ให้ช่องว่างระหว่างล้อคู่หลังเข้าสู่บริเวณจุดทดสอบซึ่งมีปลายคาน BB ตั้งรออยู่ และทำการวัดค่าการยุบตัวของผิวทางแบบคืนค่า (rebound method) ที่ทำการทดสอบในทางกลับกัน ซึ่งทั้งสองวิธีการมีข้อได้เปรียบเสียเปรียบที่แตกต่างกัน ค่ายุบตัวที่ได้จะสามารถนำมาออกแบบเสริมผิวทางได้



รูปที่ 1 เครื่องมือเบนเคลแมนบีมเชิงพาณิชย์

2.3 พัฒนาการของเครื่องเบนเคลแมนบีม

เนื่องจากเครื่องมือ BB เป็นเครื่องมือที่มีการใช้งานมาเป็นเวลานาน ดังนั้นจึงมีนักวิจัยหลายท่านที่มีความสนใจในการพัฒนาวิธีการทดสอบเพื่อปรับปรุงให้แม่นยำและใช้งานได้อย่างกว้างขวางมากยิ่งขึ้น เช่น ในปี พ.ศ. 2553 พุทธพล และ นิรชร [1] ได้มีการพัฒนาวิธีการทดสอบและนำมาเปรียบเทียบกับวิธีการทดสอบแบบ อื่นๆ พบว่า สาเหตุหลักที่ทำให้เครื่องมือเบนเคลแมนบีมขาดความแม่นยำในการทดสอบ คือ การอ่านค่าการยุบตัวด้วยตาเปล่าของผู้ปฏิบัติงาน และการอ่านค่าการยุบตัวเพียงจุดเดียว ส่วนงานวิจัยอื่น ๆ ในต่างประเทศ เช่น Jundhare และคณะ [6] ในปี ค.ศ. 2012 ได้เปรียบการทดสอบเพื่อหาค่าการยุบตัวที่บริเวณขอบและที่มุมของแผ่นคอนกรีตที่มีการเสริมผิวบนชั้นแอสฟัลต์คอนกรีต (Whitetopping Overly) โดยเป็นการหาความสัมพันธ์ของค่าการยุบตัวระหว่างการทดสอบด้วยเครื่องมือเบนเคลแมนบีมและเครื่องมือ FWD จากการวิจัยพบว่า ความความสัมพันธ์ของค่าการยุบตัวจากเครื่องมือทั้งสองได้ค่า R^2 อยู่ในระดับเกณฑ์ที่ดี คือมีค่าระหว่าง 0.65-0.80 โดยใช้ ฟังก์ชันเชิงเส้น ฟังก์ชันเลขชี้กำลัง และฟังก์ชันลอการิทึม จากนั้นในปีถัดมานักวิจัยกลุ่มดังกล่าว [7] ได้มีการศึกษาการนำเครื่องมือเบนเคลแมนบีมจำนวน 2 เครื่อง มาใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนัก (Load Transfer Efficiency, LTE) ของแผ่นพื้นคอนกรีตที่เสริมผิวบนชั้นแอสฟัลต์คอนกรีต แทนการทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD ผลการวิจัยพบว่า เครื่องมือเบนเคลแมนบีมสามารถนำมาใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนักของแผ่นพื้นคอนกรีตได้ ดังนั้นจากงานวิจัยข้างต้นจะเห็นว่านักวิจัยทางด้านวิศวกรรมผิวทางได้ให้ความสนใจและมีความพยายามในการพัฒนาเครื่องมือเบนเคลแมนบีมอย่างต่อเนื่อง แต่จากงานวิจัยที่กล่าวมานั้น ยังเป็นเพียงการพัฒนาเฉพาะในส่วนของการทดสอบเท่านั้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้มีการพัฒนาทั้งในส่วนของเครื่องมือและวิธีการทดสอบ รวมทั้งวิธีการวิเคราะห์ผลไปพร้อมกัน

3. วิธีการศึกษาและดำเนินการวิจัย

3.1 พัฒนาต้นแบบเครื่องมือวัดค่าการยุบตัวกึ่งอัตโนมัติ

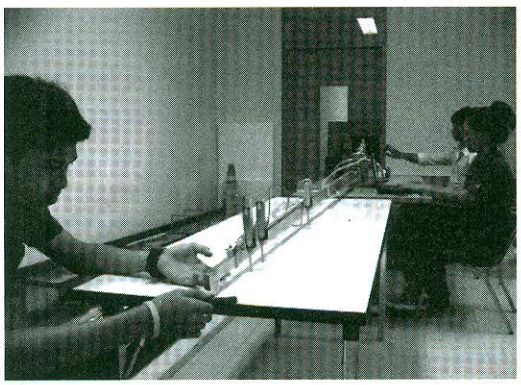
การพัฒนาต้นแบบมี 2 ส่วน โดยส่วนที่ 1 พัฒนาต้นแบบอุปกรณ์ส่วนควบเพื่อใช้กับเบนเคลแมนบีมเชิงพาณิชย์ที่มีขายทั่วไป และส่วนที่ 2 พัฒนาต้นแบบโครงเครื่องมือเบนเคล-แมนบีมกึ่งอัตโนมัติชุดสมบูรณ์

3.1.1 การพัฒนาอุปกรณ์ส่วนควบอิเล็กทรอนิกส์สำหรับเครื่องมือเบนเคลแมนบีมเชิงพาณิชย์ทั่วไป โดยการเลือกเซนเซอร์ที่เหมาะสมสำหรับวัดค่าการยุบตัวที่ตำแหน่งปลายคานและตำแหน่งออฟเซ็ตตามแนวรัศมีรวม 4 ตำแหน่ง และเซนเซอร์สำหรับวัดอุณหภูมิชั้นทางแอสฟัลต์คอนกรีตทั้งบริเวณผิวทางและกึ่งกลางชั้นทาง (surface and mid-depth temperature) เพื่อนำผลมาใช้ในการปรับแก้ค่ายุบตัวเทียบกับอุณหภูมิมาตรฐาน พัฒนาระบบกำลังไฟฟ้าสำรองที่กะทัดรัด รวมทั้งการส่งผ่านข้อมูลผ่านระบบไร้สายเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์พกพา เพื่อลดขั้นตอนและระยะเวลาในการทดสอบในสนาม

3.1.2 การพัฒนาต้นแบบโครงเครื่องเบนเคลแมนบีมกึ่งอัตโนมัติ เป็นการออกแบบสร้างโครงเครื่องมือใหม่ทั้งชุด เพื่อให้ตอบโจทย์ทั้งทางด้านขนาด น้ำหนัก ราคา และความสะดวกต่อการนำไปใช้ในการทดสอบในสนาม และที่สำคัญสามารถติดตั้งชุดอุปกรณ์ส่วนควบอิเล็กทรอนิกส์ในข้อ 3.1.1 ได้อย่างเหมาะสม

3.2 สอบเทียบความถูกต้องของเครื่องมือ

เป็นการสอบเทียบความถูกต้องในส่วนของอุปกรณ์เซนเซอร์วัดค่าการยุบตัวจำนวน 4 ชุด ซึ่งเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมด เพื่อตรวจสอบความละเอียดและถูกต้องของอุปกรณ์ ทำการสอบเทียบโดยทดลองวัดค่าการยุบตัวผ่านแบบจำลองชั้นทางขนาดเล็กของถนนลาดยางที่สร้างขึ้นโดยเฉพาะสำหรับทดสอบในห้องปฏิบัติการด้วยตุ้มน้ำหนักขนาด 25 กิโลกรัม และทดสอบทุกช่วงระยะการเคลื่อนที่ทางดิ่งโดยใช้ฟิลเลอร์เกจ (feeler gauge) ที่มีความหนาแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2 จากนั้นทำการวิเคราะห์ทางสถิติหาความถูกต้องและเที่ยงตรงของเครื่องมือ



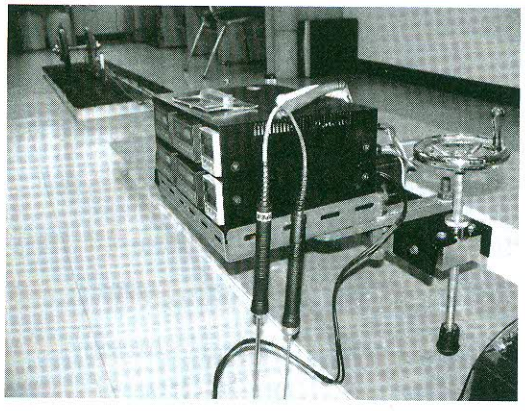
รูปที่ 2 การสอบเทียบความละเอียดและถูกต้องของอุปกรณ์ส่วนควบต้นแบบ

4. ผลการศึกษา

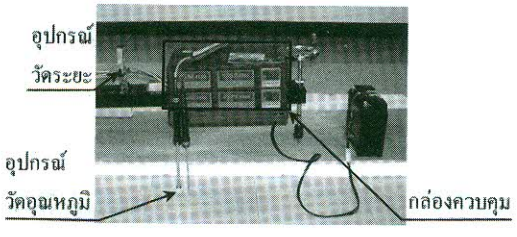
4.1 อุปกรณ์ส่วนควบสำหรับเครื่องมือเบนเคลแมนบีม

จากการออกแบบอุปกรณ์ส่วนควบสำหรับเครื่องมือเบนเคลแมนบีมเชิงพาณิชย์ ได้สร้างชุดอุปกรณ์ส่วนควบดังแสดงรูปที่ 3 และรูปที่ 4 โดยติดตั้งเซนเซอร์ที่ปลายคานด้านสั้นแทนนาฬิกาวัดค่า (dial gauge) และติดตั้งเซนเซอร์วัดค่าการทรุดตัวที่ปลายคานด้านยาวอีก 3 ตำแหน่งโดยใช้รางอะลูมิเนียม เนื่องจากมีน้ำหนักเบา ขึ้นรูปง่าย และยังทนทานต่อการเกิดสนิม ซึ่งได้ออกแบบให้มีช่องว่างสำหรับการ

ปรับระยะในช่วงใกล้น้ำหนักกระทำได้ 70 ซม. และสามารถติดตั้งเซนเซอร์ในตำแหน่งรัศมีที่ไกลขึ้นได้ ทั้งนี้รายละเอียดของอุปกรณ์ส่วนควบส่วนต่างที่สำคัญมีดังนี้



รูปที่ 3 การติดตั้งอุปกรณ์ส่วนควบสำหรับเครื่องมือเบนเคลแมนบีมเชิงพาณิชย์



รูปที่ 4 รายละเอียดของอุปกรณ์ส่วนควบที่ติดตั้งในเครื่องมือเบนเคลแมนบีมเชิงพาณิชย์

4.1.1 อุปกรณ์วัดระยะแบบเส้นตรง

ใช้อุปกรณ์วัดระยะแบบเส้นตรงสำหรับวัดค่าการยุบตัวของผิวทาง ซึ่งหลักการทำงานของอุปกรณ์นั้นอาศัยหลักการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า โดยสามารถวัดระยะได้สูงสุด 50 มม. มีความละเอียดในการวัดในระดับ 0.01 มม. และมีค่าความผิดพลาดจากการวัดในระดับ ±0.1% และยังสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิ -60°C ถึง 150°C ซึ่งเพียงพอสำหรับการนำไปใช้งานในสนามของถนนแอสฟัลต์คอนกรีต

4.1.2 อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ

มีการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ 2 ชนิดคือ อุปกรณ์วัดอุณหภูมิของบนพื้นผิว (surface probe) ซึ่งมีลักษณะของส่วนปลายเป็นแถบโลหะ เพื่อใช้ในการแตะสัมผัสสำหรับวัดอุณหภูมิที่ผิว โดยสามารถวัดอุณหภูมิระหว่าง -50°C ถึง 400°C และมีค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิอยู่ที่ ±2.2°C และอีกชนิดคือ อุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่กึ่งกลางชั้นแอสฟัลต์คอนกรีต (piercing probe) โดยมีลักษณะเป็นปลายแหลมเพื่อใช้ในการสอดเข้าไปในรูที่เจาะจากผิวทางเพื่อวัดอุณหภูมิภายในของชั้นทาง โดยสามารถวัดอุณหภูมิระหว่าง -50°C ถึง 600°C และมีค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิอยู่ที่ ±2.2 °C ซึ่งช่วงของการวัดและค่าความละเอียดของอุปกรณ์วัดอุณหภูมิมีความเหมาะสมเพียงพอต่อการนำไปใช้งานวัดค่าการยุบตัวของถนนแอสฟัลต์คอนกรีตภายใต้น้ำหนักบรรทุกจากเพลามาตรฐาน

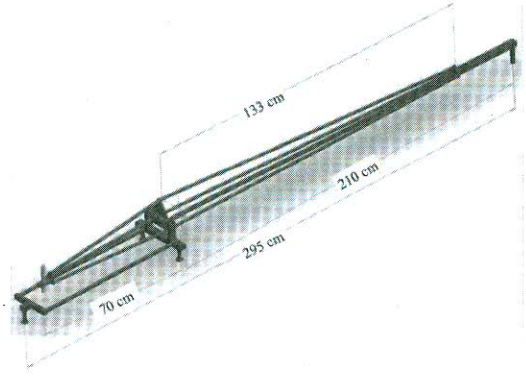
4.1.3 กล่องควบคุม (control box)

กล่องควบคุมทำหน้าที่รวบรวมข้อมูลการวัดของอุปกรณ์ทั้งหมด และแสดงผลหรือส่งออกข้อมูลในแบบดิจิทัล (ตัวเลข) เพื่อลดความผิดพลาดในการอ่านค่าด้วยตาเปล่าจากนาฬิกาวัดแบบเดิม โดยมีการรับข้อมูลทั้งจากอุปกรณ์วัดระยะแบบเส้นตรงและอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ แสดงผลและส่งต่อข้อมูลแบบไร้สายไปยังคอมพิวเตอร์ กล่องควบคุมมีขนาด 19×31×13 ซม. ซึ่งภายในจะประกอบด้วยหน้าจอแสดงผลจากอุปกรณ์วัดระยะแบบเส้นตรง หน้าจอแสดงค่าอุณหภูมิ อุปกรณ์

แปลงสัญญาณจากหน้าจอแสดงผล อุปกรณ์ส่งสัญญาณแบบไร้สาย และอุปกรณ์แปลงกระแสไฟฟ้า ดังรูปที่ 4 โดยหลักการทำงานเริ่มจากการกดทับจุดทดสอบบนถนนด้วยรถบรรทุกที่มีขนาดน้ำหนักเพลามาตรฐาน 18,000 ปอนด์ จากนั้นทำการวัดค่าการยุบตัวและอุณหภูมิของผิวทาง ข้อมูลวัดจะถูกส่งไปยังหน้าจอเพื่อแสดงผล หน้าจอแสดงผลแต่ละตัวจะส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์แปลงสัญญาณเพื่อรวมข้อมูลและแปลงสัญญาณผ่านอุปกรณ์ส่งสัญญาณแบบไร้สายไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์พกพาเพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ความแข็งแรงของชั้นทางต่อไป

4.2 โครงเครื่องมือเบนเคลแมนบีมกึ่งอัตโนมัติต้นแบบ

เครื่องมือเบนเคลแมนบีมแบบกึ่งอัตโนมัติต้นแบบเป็นเครื่องมือที่มีการออกแบบและสร้างขึ้นใหม่ โดยเริ่มจากกระบวนการออกแบบที่ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบดังแสดงในรูปที่ 5 และมีการปรับขนาดและรูปทรงให้เหมาะสมกับวัสดุที่เลือกใช้ โดยในเบื้องต้นเลือกใช้เหล็กเป็นวัสดุหลักในการสร้างเครื่องมือ โดยขนาดความยาวของคานส่วนหน้าและคานส่วนหลังมีความยาว 210 ซม. และ 70 ซม. ตามลำดับ และเมื่อเทียบเป็นอัตราส่วนมีค่าเท่ากับ 3:1 จากนั้นได้มีการสร้างเครื่องมือขึ้นตามที่ได้ออกแบบไว้ โดยเลือกใช้ท่อเหล็กขนาด 1/2 นิ้ว เป็นวัสดุหลักในการสร้างชุดเครื่องมือและมีการปรับเปลี่ยนวัสดุบางส่วนเป็นอะลูมิเนียมเพื่อความทนทานในการใช้งาน ลดน้ำหนักเครื่องมือ และสะดวกต่อการขึ้นรูป ซึ่งรูปที่ 6 แสดงเครื่องมือเบนเคลแมนบีมแบบกึ่งอัตโนมัติต้นแบบที่มีการประกอบแล้วเสร็จ พร้อมทั้งมีการติดตั้งรางเลื่อนสำหรับติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าการยุบตัวที่ออกแบบขึ้นใหม่ให้เหมาะสมกับเครื่องมือต้นแบบโดยเฉพาะ ทั้งนี้รางเลื่อนที่ได้ทำการติดตั้งมาพร้อมนี้ สามารถใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ส่วนควบได้เป็นอย่างดี โดยรางเลื่อนทำจากอะลูมิเนียมขนาด 6.0×1.2 ซม. ซึ่งใช้ประกอบกันทั้งหมด 6 ชิ้น โดยมีความยาวต่างกัน ซึ่งแต่ละชิ้นมีการเจาะทะลุและเซาะร่องทำเป็นรางเลื่อนและมีการติดแถบวัดระยะเพื่อบอกระยะห่างของอุปกรณ์วัดค่าการยุบตัว จากนั้นยึดส่วนประกอบของรางเลื่อนทั้งหมดเข้าไว้ด้วยกันโดยใช้สลักเกลียว และเมื่อประกอบเครื่องมือทั้งหมดเสร็จแล้วจะมีขนาด 17.5×295.0×33.0 ซม.



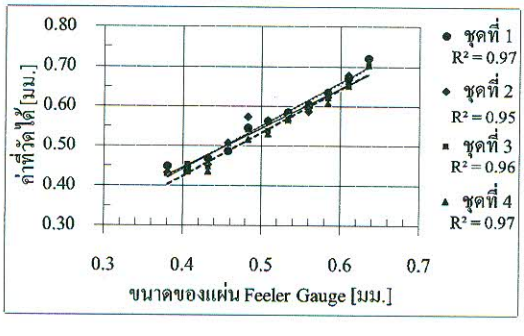
รูปที่ 5 ขนาดและลักษณะของโครงเครื่องมือต้นแบบ

รูปที่ 6 โครงเครื่องมือต้นแบบที่สร้างแล้วเสร็จ

4.3 ผลการสอบเทียบเครื่องมือเบนเคลแมนบีม

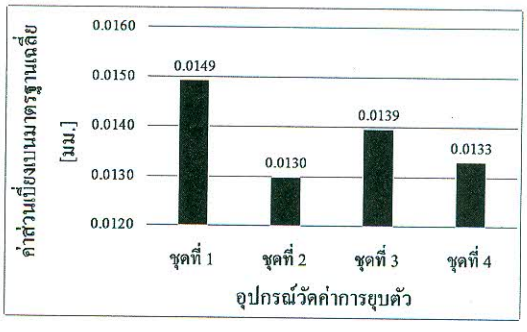
4.3.1 ผลการสอบเทียบความถูกต้องและเที่ยงตรงของเซนเซอร์วัดค่าการยุบตัวแบบแยกอิสระ

ในการทดสอบความถูกต้องของเซนเซอร์วัดค่าการยุบตัวทั้ง 4 ชุด แบบแยกอิสระในระบบตำแหน่งหลัก คือ ติดตั้งชุดที่ 1 เชื่อมต่อกับปลายคานด้านสั้น (สะท้อนการยุบตัวจากปลายด้านยาว) ชุดที่ 2, 3 และ 4 ติดตั้งห่างปลายคานด้านยาว 200, 300 และ 900 มม. ตามลำดับ ทำการทดสอบแบบแยกอิสระโดยสอดแผ่น Feeler Gauge ที่ปลายเซนเซอร์แต่ละตัว แผ่นทดสอบมีความหนาแตกต่างกัน 11 แผ่น ตั้งแต่ขนาด 0.381 ถึง 0.635 มม. โดยทดสอบซ้ำ 10 ครั้ง พบว่าค่าที่วัดได้มีค่าแตกต่างจากค่าความหนาของแผ่น Feeler Gauge เพียงเล็กน้อย และเมื่อทำการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นดังรูปที่ 7 พบว่าค่า R^2 ของเซนเซอร์ทั้ง 4 ชุด มีค่ามากกว่า 0.95 ซึ่งเป็นค่าความสอดคล้องที่อยู่ในเกณฑ์ดีมาก



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาของแผ่น Feeler gauge และค่าที่วัดได้จากอุปกรณ์วัดค่าการยุบตัว

จากนั้นนำผลทดสอบมาวิเคราะห์ความเที่ยงตรงของเซนเซอร์ในเทอมของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ได้ผลดังรูปที่ 8 พบว่าเซนเซอร์ชุดที่ 1 มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมากที่สุด 0.0149 มม. ในขณะที่ชุดที่ 2 มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยที่สุด เท่ากับ 0.0130 มม. โดยเฉลี่ยของเซนเซอร์ทั้ง 4 ชุด เท่ากับ 13.78 ไมครอน



รูปที่ 8 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอุปกรณ์วัดค่าการยุบตัวแต่ละชุด

4.3.2 ผลการทดสอบความเที่ยงตรงของเซนเซอร์วัดค่าการยุบตัวแบบโดยรวม

ทำการทดสอบความเที่ยงตรงของเซนเซอร์วัดค่าการแอ่นตัวแบบโดยรวม โดยปรับตำแหน่งระยะของเซนเซอร์วัดค่าการยุบตัวที่แตกต่างกันต่างกัน 4 ระบบคือ

(ระบบหลัก)

ระบบที่ 1. ที่ระยะ 0, 200, 300 และ 900 มม.

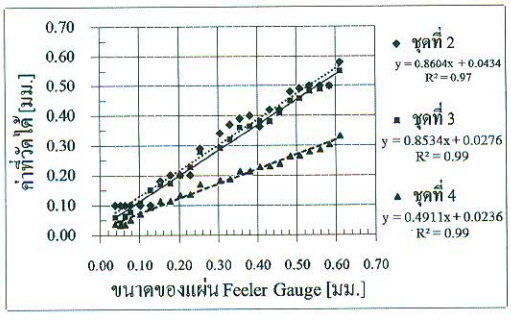
ระบบที่ 2. ที่ระยะ 0, 200, 300 และ 600 มม.

ระบบที่ 3. ที่ระยะ 0, 150, 300 และ 600 มม.

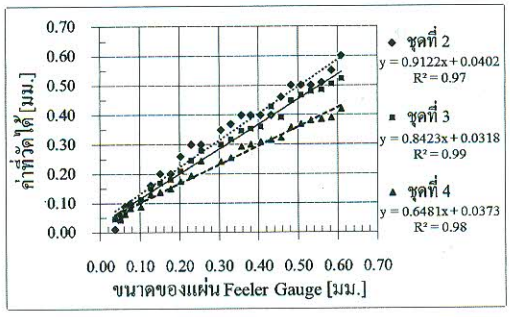
ระบบที่ 4. ที่ระยะ 0, 150, 300 และ 450 มม.

ทำการทดสอบเพื่อจำลองการทรุดตัวจากน้ำหนักกระทำที่ปลายคานด้านยาว

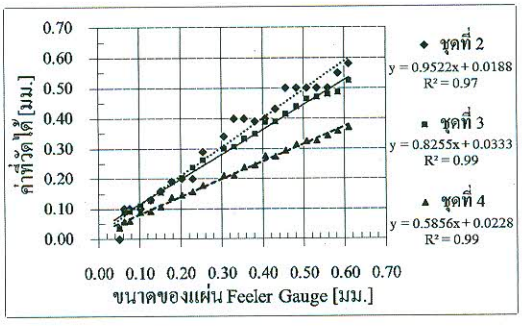
และวัดค่าด้วยเซนเซอร์ทุกชุดแบบโดยรวม โดยใช้ Feeler Gauge 24 แผ่น ความหนาตั้งแต่ 0.038 ถึง 0.610 มม. สอดเฉพาะบริเวณใต้ปลายคานด้านหน้าสุด และดึง Feeler Gauge ออก ทำการบันทึกค่าเซนเซอร์ชุดที่ 2, 3 และ 4 เนื่องจากเป็นชุดที่ได้รับอิทธิพลจากการการเปลี่ยนแปลงระดับของคานแข็ง (rigid beam) ทดสอบซ้ำ 10 ครั้ง ผลที่ได้นำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความหนาของ Feeler Gauge และค่าที่อ่านได้แต่ละตำแหน่งของอุปกรณ์วัดค่าการยุบตัวดังรูปที่ 9 ถึงรูปที่ 12 ซึ่งพบว่า ค่าความชันของสมการจะแปรผกผันกับระยะห่างของอุปกรณ์ที่วัดจากปลายคานด้านหน้าสุดเนื่องจากค่าการเคลื่อนที่มากขึ้น โดยเซนเซอร์ทั้ง 3 ชุดล้วนมีค่า R^2 มีค่ามากกว่า 0.95 ซึ่งเป็นระดับความเที่ยงตรงในเกณฑ์ดีมาก



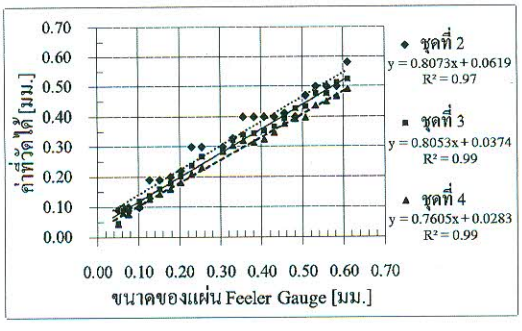
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของ Feeler Gauge และค่าที่วัดได้จากการปรับระยะระบบที่ 1



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของ Feeler Gauge และค่าที่วัดได้จากการปรับระยะระบบที่ 2

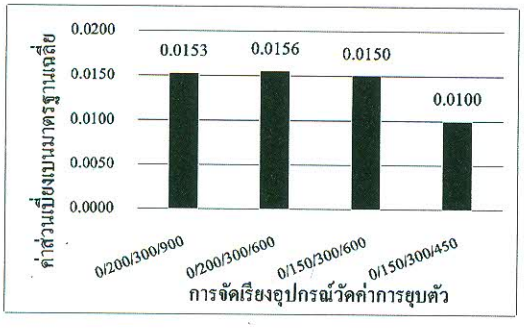


รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของ Feeler Gauge และค่าที่วัดได้จากการปรับระยะระบบที่ 3



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของ Feeler Gauge และค่าที่วัดได้จากการปรับระยะระบบที่ 4

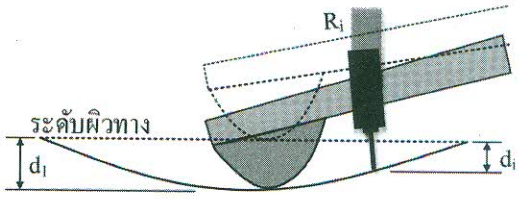
โดยจากการทดสอบทั้ง 4 ระบบ พบว่าค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่เกิดขึ้นมีค่าใกล้เคียงกันโดยมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยประมาณ 15 ไมครอน ดังรูปที่ 13 โดยในการปรับระยะห่างของเซนเซอร์วัดค่าการยุบตัวตามแบบที่ 4 มีความคลาดเคลื่อนน้อยสุดคือ มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยเท่ากับ 10 ไมครอน



รูปที่ 13 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยของการปรับระยะห่างเซนเซอร์วัดค่าการยุบตัวแต่ละแบบ

4.4.3 การคำนวณหาค่าการยุบตัวของผิวทาง

ค่าการยุบตัวของผิวทางที่อ่านได้จากเครื่องมือทดสอบเครื่องมือเบนเคลแมนบีมแบบกึ่งอัตโนมัติจะต้องนำมาปรับแก้ค่าการยุบตัวก่อน ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ค่าการยุบที่ปลายคานเนื่องจากสัดส่วนของความยาวคาน และค่าการยุบตัวที่ตำแหน่งตามแนวรัศมีเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระดับของคานแข็งตามการยุบตัวของผิวทางดังรูปที่ 14 ดังนั้นค่าการยุบตัวของผิวที่เกิดขึ้นหลังจากการปรับแก้สามารถคำนวณได้ดังนี้



รูปที่ 14 ลักษณะการแอ่นตัวของผิวทางขณะทดสอบ

ค่าการยุบที่ปลายคาน

$$d_1 = R_1 \times f_{BB} \qquad (1)$$

โดยที่

d_1 คือ ค่าการยุบที่ปลายคาน

R_1 คือ ค่าอ่านจากอุปกรณ์วัดการยุบตัวชุดที่ 1

f_{BB} คือ ค่าปรับแก้สัดส่วนของความยาวคานของแต่ละเครื่อง ซึ่งในกรณีของเครื่องนี้จากงานวิจัยที่ผ่านมา ที่ได้ทำการทดสอบไว้พบว่ามีค่าเท่ากับ 4.130 [1]

ค่าการยุบตัวที่ตำแหน่งตามแนวรัศมี

$$d_i = R_i - y_i \qquad (2)$$

โดยที่

d_i คือ ค่าการยุบที่ตำแหน่งอุปกรณ์ชุดที่ i

R_i คือ ค่าอ่านได้จากอุปกรณ์วัดการยุบตัวชุดที่ i

y_i คือ ค่าปรับแก้จากสมการถดถอยเชิงเส้นของอุปกรณ์ชุดที่ i โดยแทนค่า x_1 (ในพจน์ y_1) ด้วยค่า d_1

ตัวอย่างการคำนวณค่าการยุบตัวของผิวทาง โดยสมมุติว่าทำการทดสอบในสนามด้วยระบบที่ 1 อ่านค่าการยุบตัวที่ตำแหน่งปลายคานและที่ระยะ 200 มม. จากปลายคานได้ 0.36

และ 2.29 ตามลำดับ สามารถคำนวณค่าการยุบตัวได้ดังนี้

จากการวัดค่าการยุบตัวด้วยระบบที่ 1 ได้สมการถดถอยเชิงเส้นสำหรับคำนวณค่าการยุบตัวที่ระยะ 200 มม. หรือในชุดที่ 2 จากรูปที่ 9 คือ

$$y_2 = 0.8604x + 0.0434$$

ดังนั้นค่าการยุบตัวที่ปลายคาน

$$d_1 = R_1 \times BB_1 = 0.36 \times 4.130 = 1.49 \text{ มม.}$$

และค่าการยุบตัวที่ระยะ 200 มม. จากปลายคาน

$$\begin{aligned} d_2 &= R_2 - y_2 \\ &= 2.29 - (0.8604 \times 1.49 + 0.0434) \\ &= 0.97 \text{ มม.} \end{aligned}$$

ดังนั้นค่าการยุบตัวของผิวทางที่ปลายคานและที่ระยะ 200 มม. จากปลายคาน คือ 1.49 มม. และ 0.97 มม. ตามลำดับ

ทั้งนี้จากสมการที่ (1) และ (2) เป็นเพียงสมการเส้นตรงอย่างง่าย ดังนั้นการปรับแก้ค่าที่วัดได้จากระบบเซนเซอร์ที่ตำแหน่งออฟเซ็ตตามแนวรัศมีทุกตำแหน่งจึงสามารถทำได้โดยการเขียนในโปรแกรมคำนวณแบบ spreadsheet ทั่วไปไว้ในเครื่องคอมพิวเตอร์พกพาที่ใช้รับข้อมูลในการทดสอบนั้น

5. สรุป

จากการพัฒนาเครื่องมือต้นแบบทดสอบการแอ่นตัวของถนนลาดยางแบบกึ่งอัตโนมัติโดยใช้เครื่องเบนเคลแมนบีมที่หน่วยงานหลักเลิกใช้ไปแล้วเป็นฐานของการพัฒนา เนื่องจากตอบโจทย์ของการจัดหาเครื่องมือโดยใช้งบประมาณน้อย และยังคงสามารถใช้งานได้ดีกับถนนลาดยางในท้องถิ่นที่มีปริมาณจราจรน้อย โดยได้มีการสร้างชุดอุปกรณ์ส่วนควบสำหรับติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าการยุบตัวเพิ่มเติม เพื่อพัฒนาให้เครื่องมือเบนเคลแมนบีมแบบดั้งเดิมสามารถอ่านค่าได้หลายตำแหน่งและมีความละเอียดถูกต้องสูงขึ้น และมีการวิจัยพัฒนาสร้างโครงเครื่องมือต้นแบบที่เหมาะสมสอดคล้องกับชุดอุปกรณ์ส่วนควบดังกล่าวให้มากที่สุด ซึ่งจากการวิเคราะห์ผลทดสอบที่ได้จากเครื่องมือต้นแบบทำให้สามารถสรุปได้ดังนี้

1) เครื่องมือต้นแบบมีความละเอียดถูกต้องโดยรวมค่อนข้างดี โดย R^2 จากการสอบเทียบมีค่ามากกว่า 0.95 และมีความคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ยน้อยกว่า 13.75 ไมครอน

2) ความละเอียดถูกต้องของเซนเซอร์วัดค่าการยุบตัวในกรณีเปลี่ยนระยะวัดค่าออฟเซ็ตตามแนวรัศมีอยู่ในเกณฑ์พอใช้ โดยจากการทดสอบจาก 4 ระบบ พบว่ามีความเบี่ยงเบนมาตรฐานโดยเฉลี่ยประมาณ 15 ไมครอน

3) การหาค่าการแอ่นตัวประสิทธิผลของโครงสร้างผิวทางจากผลทดสอบของเครื่องมือต้นแบบสามารถใช้ระบบสมการเชิงเส้นอย่างง่ายที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ และสามารถปรับใช้ได้โดยง่ายด้วยโปรแกรมคำนวณแบบ spreadsheet ทั่วไป

4) ทีมวิจัยสามารถพัฒนาโครงเครื่องมือต้นแบบพร้อมชุดอุปกรณ์ส่วนควบประกอบอิเล็กทรอนิกส์ที่มีประสิทธิภาพในการวัดอุณหภูมิผิวและกึ่งกลางความหนา รวมทั้งอ่านค่าการยุบตัวของถนนลาดยางสูงกว่าเครื่องมือเบนเคลแมนบีมเชิงพาณิชย์ทั่วไปด้วยต้นทุนโดยประมาณ 300,000 บาท/เครื่อง

ทั้งนี้ทีมนักวิจัยยังมุ่งหวังที่จะให้มีการศึกษาวิจัยต่อยอดเพื่อพัฒนาเครื่องมือต้นมือเบนเคลแมนบีมกึ่งอัตโนมัติต้นแบบนี้ให้เกิดผลประโยชน์อย่างเป็นรูปธรรม คือการนำไปใช้ในการประเมินกำลังรับน้ำหนักของถนนลาดยางในท้องถิ่นที่เปิดใช้บริการแล้ว รวมทั้งการนำไปประยุกต์ใช้ในสถานการณ์ต่าง ๆ ที่เอื้ออำนวย เช่น ใช้ควบคุมคุณภาพการก่อสร้าง เป็นต้น จึงได้ทำการทดสอบเครื่องมือเบนเคลแมนบีมกึ่งอัตโนมัติบนโครงสร้างถนนลาดยางจริง และพัฒนากระบวนการวิเคราะห์ผลทดสอบ ทั้งนี้ผลการศึกษาวิจัยต่อยอดนี้จะได้นำเสนอในบทความวิจัยในอนาคตอันใกล้นี้

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี (มทร.ธัญบุรี) และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ให้การสนับสนุนโครงการวิจัย “เครื่องมือต้นแบบทดสอบการแอ่นตัวของถนนลาดยางแบบกึ่งอัตโนมัติ” ด้วยงบประมาณแผ่นดินประจำปี พ.ศ. 2556

เอกสารอ้างอิง

[1] พุทธพล ทองอินทร์ดำ, นิรชร นกแก้ว: **การพัฒนาระบบตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักของถนนลาดยางในท้องถิ่นโดยวิธีตรง,** รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2554.

[2] พุทธพล ทองอินทร์ดำ: **วิศวกรรมงานทางแบบบูรณาการในการประเมินสภาพถนนลาดยางไทยแบบมีชีวิต.** วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม ปีที่ 14 ฉบับที่ 1, หน้า 43-56, 2556

[3] ดิเรก ลาวัณย์ศิริ และธรรมมา เจียรธรา-วานิช. **การเปรียบเทียบการออกแบบเสริมผิวทางแบบยืดหยุ่นที่ได้จากเครื่องมือ Benkelman Beam และ Falling Weight Deflectometer.** วารสาร มก. ฉบับที่ 57, หน้า 46-59. 2549.

[4] สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง: เอกสารสำหรับผู้เข้าอบรมการทดสอบแบบไม่ทำลาย: กรมทางหลวง, กระทรวงคมนาคม, กรุงเทพมหานคร,

[5] P. Thongindam, **Enhancement of Backcalculation Techniques for Assessing Flexible Pavement Layer Moduli Using Genetic Algorithms. Dissertation,** Got-

tfried Wilhelm Leibniz Unversity of Hannover, Germany, 2009

[6] D. R. Jundhare, K. C. Khare, and R. K. Jain. **Development Correlation between Benkelman Beam Deflection and Falling Weight Deflectometer for Conventional Whitetopping Overly.** Journal of Basic and Applied Scientific Research, pp. 8725-8731. 2012.

[7] D. R. Jundhare, K. C. Khare, and R. K. Jain. **Use of Benkelman Beams for Measuring LTE in Whitetopping An Alternative Tool to FWD Test. Springer-Verlag.** pp. 203-207. 2012.

ผลกระทบของความละเอียดของวัสดุ ต่อค่าการอัดตัวและปฏิกิริยาปอซโซลานของแรงดึงคอนกรีต

Effect of the Fineness of Material on Packing Effect and Pozzolanic Reaction of Concrete Tensile

ชยณัฐ หุตะจิตต์[1] และ จตุพล ตั้งปกาศิต[2]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงผลกระทบของความละเอียดของวัสดุต่อค่าการอัดตัวและปฏิกิริยาปอซโซลานของแรงดึงคอนกรีต โดยใช้วัสดุแทนที่ปูนซีเมนต์ 3 ชนิด คือตะกอนประปา ทรายแม่น้ำ และเถ้าถ่านหิน โดยนำมาบดให้มี 3 ขนาด คือมีขนาดน้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 5, 13.5 และ 22.5 ตามลำดับ นำไปใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ ในอัตราร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และทดสอบแรงดึงที่อายุ 7, 28 และ 60 วัน ตามลำดับ โดยวิธีทดสอบแรงดึงโดยตรง ผลการทดลองพบว่าขนาดของอนุภาคที่ต่างกัน 3 ขนาด โดยที่ขนาดเล็กสุดจะให้ค่าแรงดึงสูงกว่าขนาดที่ใหญ่กว่า เนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละที่เท่ากันแต่มีขนาดของความละเอียดแตกต่างกัน ทำให้ค่าแรงดึงที่เกิดจากการที่อนุภาคขนาดเล็กจะแทรกอยู่ในช่องว่างของมอร์ต้าร์ มีการจัดเรียงตัวที่เหมาะสมมากกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ ส่งผลให้ค่าแรงดึงที่เกิดจากอนุภาคขนาดเล็กมีค่ามากกว่าค่าแรงดึงที่เกิดจากอนุภาคขนาดใหญ่ สำหรับการใช้เถ้าถ่านหินที่มีขนาดเล็กจะให้ผลของปฏิกิริยาปอซโซลานต่อค่าแรงดึงสูงกว่าการใช้เถ้าถ่านหินขนาดใหญ่ และการแทนที่มากขึ้นมีผลต่อปฏิกิริยาปอซโซลานที่ลดลง เนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินที่มากขึ้น ทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดน้อยลง มีผลทำให้การทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและปฏิกิริยาปอซโซลานลดลงด้วย ส่งผลให้ค่าแรงดึงจากปฏิกิริยาปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 มีค่ามากกว่าร้อยละ 20

คำสำคัญ: การอัดตัวของอนุภาค ปฏิกิริยาปอซโซลาน แรงดึงโดยตรง

[1] นักศึกษาปริญญาโทวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

[2] อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Abstract

The results showed that the particle size of 3 different sizes, where smallest size to the tension of the concrete directly above the larger size. Due to the replacement of cement. Or sludg Percent in the same size but with different resolution. Cause tension caused by the small particles to be inserted in the gap of Mortar. A more appropriate arrangement of particles larger than. Resulting tension caused by small particles is greater than the tension caused by larger particles. And the use of fly ash with hibiscus smaller than the result of the pozzolanic reaction force of the concrete directly above the fly ash bigger. And replace more and more the result of pozzolanic reaction is reduced. Due to the replacement of cement with fly ash increased. Reduce the amount of cement The results showed that the reaction Hydration and pozzolanic reaction reduced. Tension resulting from reactive pozzolan cement replacement of 10 percent is greater than 20 percent. Reduce the amount of cement The results showed that the reaction Hydration and pozzolanic reaction reduced. As a result, the difference between the tension of concrete using fly ash, crushed concrete, cement, sand, crushed to replace 10 percent greater than the difference between the fly ash to replace cement grinding mill with 20 percent sand.

Keywords: Packing Effect, Pozzolanic Reaction, Direct Tensile

1. บทนำ

ในปัจจุบันได้มีการนำวัสดุเหลือทิ้งจากภาคอุตสาหกรรมมาใช้ในอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ โดยเฉพาะการนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีตมีผลทำให้คอนกรีตมีต้นทุนที่ถูกลง อีกทั้งยังมีคุณสมบัติดีขึ้น ซึ่งเถ้าถ่านหินเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมการผลิตกระแสไฟฟ้าที่นำมาใช้ในการผลิตคอนกรีตเป็นจำนวนมาก เนื่องจากมีปริมาณมากและมีผลดีต่อการนำมาใช้ในคอนกรีต

ตะกอนประปาก็เป็นวัสดุเหลือทิ้งที่ได้มาจากขบวนการผลิตน้ำประปา ซึ่งก็เป็นปัญหาในการกำจัด โดยทางการประปาต้องเสียค่าใช้จ่ายในการขนทิ้งและหาสถานที่ทิ้ง แต่จากการที่ตะกอนน้ำประปามีลักษณะของอนุภาคที่ละเอียดก็น่าจะนำมาใช้ในงานคอนกรีตได้ โดยใช้เป็นตัวเติมแทรกที่ส่งผลต่อกำลังอัดที่ดีขึ้น [1-3]

เมื่อพิจารณาถึงกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมวัสดุเหลือทิ้ง จะประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก คือด้านปฏิกิริยาเคมีที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลาน และด้านกายภาพซึ่งก็คือการอัดตัวของอนุภาคที่เกิดจากการจัดเรียงตัวที่เหมาะสมของอนุภาควัสดุที่มีขนาดเล็กและแทรกอยู่ในช่องว่างของมอร์ต้าร์ การจัดเรียงตัวของอนุภาคที่เหมาะสมนี้มีผลทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้น เป็นผลทำให้กำลังอัดสูงขึ้นโดยไม่ต้องอาศัยปฏิกิริยาทางเคมี ดังเช่นในกรณีปฏิกิริยาไฮเดรชั่นหรือปฏิกิริยาปอซโซลาน [4]

ซึ่งกำลังอัดและแรงดึงของคอนกรีตก็เป็นส่วนสำคัญโดยเฉพาะแรงดึง ที่ผ่านมามีผลงานวิจัยน้อยมากเมื่อเทียบกับผลงานวิจัยที่เกี่ยวกับแรงอัด แต่จากงานวิจัยยังไม่มีการศึกษาถึงผลกระทบของการใช้วัสดุละเอียดต่อคุณสมบัติในการรับแรงดึงของคอนกรีตโดยตรง ซึ่งงานวิจัยนี้จะศึกษาถึงการนำตะกอนประปามาใช้ในคอนกรีต โดยทำการเปรียบเทียบโดยการทดสอบค่าแรงดึงโดยตรงของคอนกรีตกับการใช้ทรายแม่น้ำบดที่เป็นวัสดุเฉื่อย และเถ้าถ่านหินที่เป็นวัสดุปอซโซลาน

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของความละเอียดวัสดุ ตะกอนประปา ทรายบด และเถ้าถ่านหิน แทนที่ปูนซิเมนต์ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสานต่อค่าแรงดึงโดยตรงของคอนกรีต

2.2 เพื่อเปรียบเทียบค่าแรงดึงโดยตรงของคอนกรีตที่ใช้ตะกอนประปา ทรายบด และเถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่อายุ 7, 28 และ 60 วัน

2.3 เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของขนาดอนุภาคที่ต่างกันต่อการอัดตัวของอนุภาคและปฏิกิริยาปอซโซลานของแรงดึงโดยตรงในคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยตะกอนประปา ทรายบด และเถ้าถ่านหินอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

3. การเตรียมตัวอย่างและวิธีการทดสอบ

วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, หินขนาด ½ - ¾ นิ้ว, ทรายแม่น้ำล้างสะอาด, ตะกอนประปาจากโรงผลิตน้ำประปาบางเขน กรุงเทพฯ และเถ้าถ่านหินจากโรงผลิตไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง

อัตราส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้สำหรับการหล่อคอนกรีตตัวอย่างเพื่อทดสอบแรงดึงโดยตรงมีรายละเอียดส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมคอนกรีตตัวอย่าง

ตัวอย่าง	C (Kg.)	FA (Kg.)	SP (Kg.)	Sl (Kg.)
C	327.0	-	-	-
C-5-FA10	294.3	32.7	-	-
C-13.5-FA10		32.7	-	-
C-22.5-FA10		32.7	-	-
C-5-SP10		-	32.7	-
C-13.5-SP10		-	32.7	-
C-22.5-SP10		-	32.7	-
C-5-Sl 10		-	-	32.7
C-13.5-Sl 10		-	-	32.7
C-22.5-Sl 10		-	-	32.7
C-5-FA20	261.6	65.4	-	-
C-13.5-FA20		65.4	-	-
C-22.5-FA20		65.4	-	-
C-5-SP20		-	65.4	-
C-13.5-SP20		-	65.4	-
C-22.5-SP20		-	65.4	-
C-5-Sl 20		-	-	65.4
C-13.5-Sl 20		-	-	65.4
C-22.5-Sl 20		-	-	65.4
Rock	1134.0	Kg.	W/C	0.6
Sand	785.0	Kg.	Slump (cm.)	7 ± 2.5
Water	180.0	Kg.		

สัญลักษณ์

C หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

FA หมายถึง เถ้าถ่านหิน

SP หมายถึง ทรายบด

Sl หมายถึง ตะกอนประปา

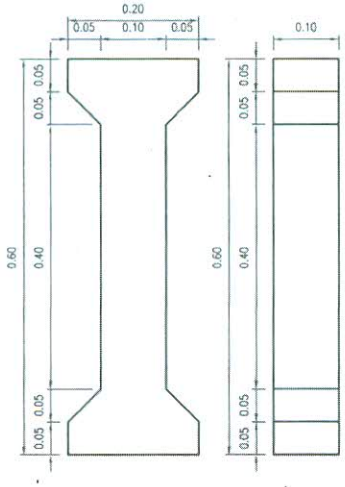
5, 13.5, 22.5 หมายถึง ขนาดน้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 5, 13.5 และ 22.5 10, 20 หมายถึง ปริมาณแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

นำตะกอนประปา, ทรายแม่น้ำ และเถ้าถ่านหิน มาทำการบดให้มีขนาดแตกต่างกัน 3 ขนาดคือมีขนาดน้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 5, 13.5 และ 22.5 ตามลำดับ โดยที่น้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 13.5 เป็นค่าน้ำหนักค้างบนตะแกรงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ส่วนน้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 22.5 เป็นค่าน้ำหนักค้างบนตะแกรงของเถ้าถ่านหินที่มาจากโรงผลิตไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง หลังจากที่บดได้ขนาดแล้วมาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน แยกเป็นแต่ละขนาดตามอัตราส่วน ทำการผสมและหล่อคอนกรีตตัวอย่างตามตารางที่ 1 ทำการถอดแบบออกเมื่อคอนกรีตอายุครบ 24 ชั่วโมง แล้วบ่มด้วยน้ำ ทำการทดสอบแรงดึงโดยตรงของคอนกรีตตัวอย่างเมื่ออายุครบ 7 วัน, 28 วัน และ 60 วัน

3.1 วิธีการทดสอบ

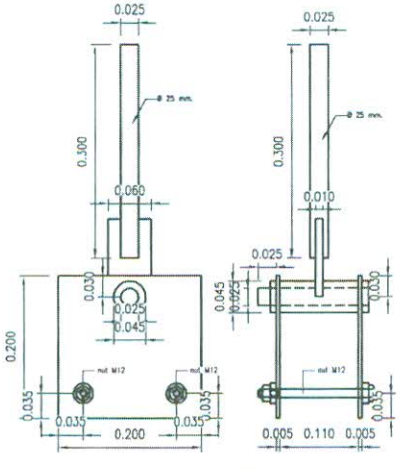
3.1.1 นำตัวอย่างที่อายุครบกำหนดตามวันทดสอบมาผึ่งให้แห้ง จากนั้นทำการวัดขนาดและชั่งน้ำหนักจดบันทึกค่าไว้ ก่อนทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงโดยตรง

3.1.2 รูปแบบของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 1

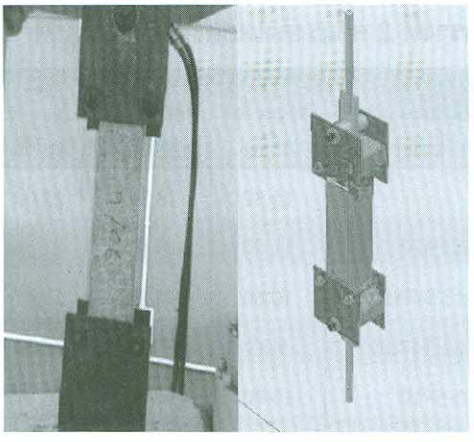


รูปที่ 1 รูปแบบของตัวอย่างคอนกรีต

3.1.3 รูปหัวยึดตัวอย่างคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยจุดยึดบนและล่างเป็นแบบจุดยึดหมุน และการติดตั้งตัวอย่างเข้ากับเครื่องทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 2 รูปหัวยึดตัวอย่างคอนกรีต



รูปที่ 3 รูปการติดตั้งตัวอย่างทดสอบ

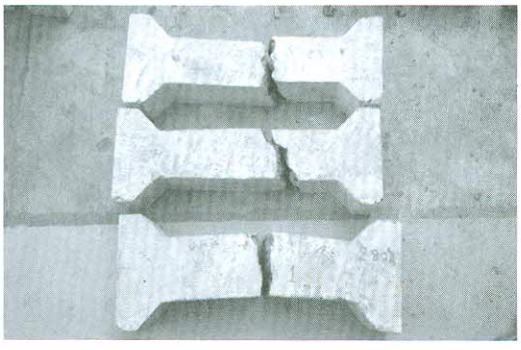
4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

4.1 ค่าการทดสอบแรงดึงโดยตรงของตัวอย่างคอนกรีต

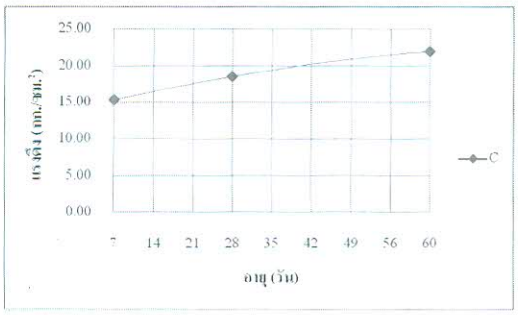
จากการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตรูปตัวไอ เมื่อทำการทดสอบแรงดึงโดยตรงของคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 4 และผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 2 พบว่า ค่าแรงดึงโดยตรงของตัวอย่างคอนกรีต C มีค่าเท่ากับ 15.32 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 7 วัน, เพิ่มเป็น 18.59 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 28 วัน และเพิ่มเป็น 22.04 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 60 วัน ดังแสดงในรูปที่ 5

ตารางที่ 2 ค่าแรงดึงโดยตรงของคอนกรีต

ค่าแรงดึงโดยตรงของคอนกรีต (กก./ซม.^{2})			
ตัวอย่าง	7 วัน	28 วัน	60 วัน
C	15.32	18.59	22.04
C-5-FA10	11.20	16.42	21.32
C-13.5-FA10	10.64	14.25	19.47
C-22.5-FA10	9.85	13.85	18.34
C-5-SP10	10.70	14.98	18.67
C-13.5-SP10	10.34	13.20	16.98
C-22.5-SP10	9.83	13.06	16.04
C-5-Sl 10	9.15	12.81	14.76
C-13.5-Sl 10	8.64	12.34	14.08
C-22.5-Sl 10	8.55	11.66	13.74
C-5-FA20	11.02	15.09	18.91
C-13.5-FA20	10.31	13.80	17.41
C-22.5-FA20	9.50	12.78	15.59
C-5-SP20	10.85	14.51	17.99
C-13.5-SP20	10.16	13.30	16.55
C-22.5-SP20	9.34	12.36	14.78
C-5-Sl 20	9.45	11.49	13.91
C-13.5-Sl 20	8.81	10.51	13.13
C-22.5-Sl 20	8.68	10.17	11.97



รูปที่ 4 รูปคอนกรีตตัวอย่างที่ทดสอบแล้ว

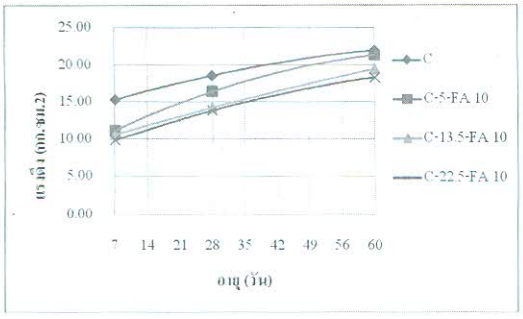


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงกับอายุคอนกรีต

จะเห็นได้ว่าค่าแรงดึงของตัวอย่างคอนกรีตมีการเพิ่มขึ้นตามอายุของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นตามอายุที่เพิ่มขึ้น

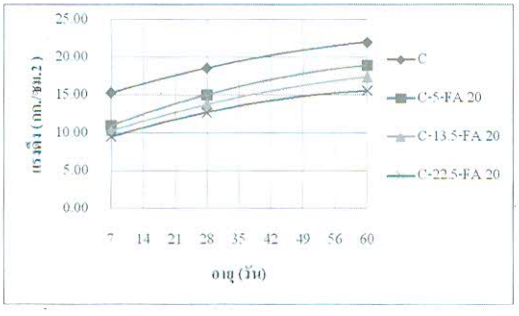
ผลของการใช้เถ้าถ่านหินที่มีขนาดน้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 5, 13.5 และ 22.5 ของตัวอย่าง C-5-FA10, C-13.5-FA10 และ C-22.5-FA10 ตามลำดับ โดยเมื่อใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ในปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 พบว่าค่าแรงดึงของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินขนาดเล็กที่สุด C-5-FA10 มีค่าแรงดึงมากที่สุด และการใช้เถ้าถ่านหินขนาดใหญ่ที่สุด C-22.5-FA10 จะให้ค่าแรงดึงน้อยที่สุด

แต่เนื่องจากค่าแรงดึงของคอนกรีตจะมีค่าประมาณร้อยละ 10 ของกำลังอัด ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ากำลังอัดจะขึ้นอยู่กับขนาดของเถ้าถ่านหินที่ใช้ [4-5] โดยเถ้าถ่านหินขนาดเล็กจะให้ค่ากำลังอัดที่สูงกว่า ซึ่งหมายความว่าค่าแรงดึงของคอนกรีตก็จะมากขึ้นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 6



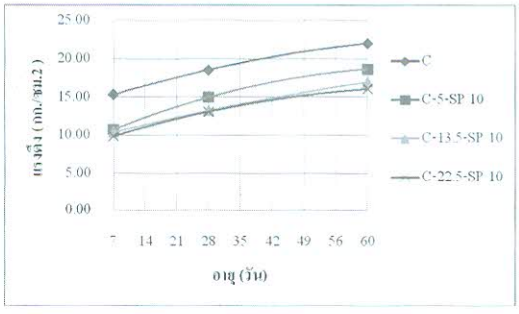
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงกับอายุคอนกรีต (เถ้าถ่านหินแทนที่ร้อยละ 10)

สำหรับตัวอย่าง C-5-FA20, C-13.5-FA20 และ C-22.5-FA20 ที่ใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ในปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 จะพบว่ามีทิศทางไปในทางเดียวกับตัวอย่าง C-5-FA10, C-13.5-FA10 และ C-22.5-FA10 โดยจะมีค่าแรงดึงมากขึ้นตามขนาดของเถ้าถ่านหินที่เล็กลง แต่จะมีแรงดึงที่น้อยกว่าตัวอย่าง C-5-FA10, C-13.5-FA10 และ C-22.5-FA10 ที่มีขนาดน้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 7



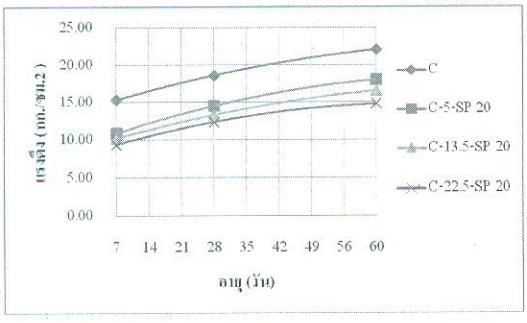
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงกับอายุคอนกรีต (เถ้าถ่านหินแทนที่ร้อยละ 20)

ผลของการใช้ทรายบดที่มีขนาดน้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 5, 13.5 และ 22.5 ของตัวอย่าง C-5-SP10, C-13.5-SP10 และ C-22.5-SP10 ตามลำดับ โดยเมื่อใช้การแทนที่ทรายบดในปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 ของตัวอย่าง C-5-SP10, C-13.5-SP10 และ C-22.5-SP10 พบว่าที่อายุ 7 วัน ค่าแรงดึงของตัวอย่างคอนกรีตมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ที่อายุ 60 วัน ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทรายบดขนาดเล็กที่สุด C-5-SP10 มีค่าแรงดึงมากที่สุด และการใช้ทรายบดขนาดใหญ่ C-22.5-SP10 จะให้ค่าแรงดึงน้อยที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 8



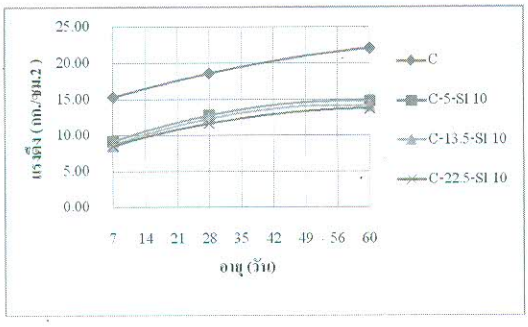
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงกับอายุคอนกรีต (ทรายบดแทนที่ร้อยละ 10)

และสำหรับตัวอย่างคอนกรีต C-5-SP20, C-13.5-SP20 และ C-22.5-SP20 ที่ใช้ทรายบดแทนที่ในปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 จะพบว่าที่อายุ 7 วันค่าแรงดึงของตัวอย่างคอนกรีตมีค่าใกล้เคียงกับตัวอย่าง C-5-SP10, C-13.5-SP10 และ C-22.5-SP10 คือมีค่าประมาณ 10 กก./ซม.^{2} แต่ที่อายุ 60 วันค่าแรงดึงของตัวอย่างคอนกรีต C-5-SP20 มีค่าเท่ากับ 17.99 กก./ซม.^{2}, C-13.5-SP20 มีค่าเท่ากับ 16.55 กก./ซม.^{2} และ C-22.5-SP20 มีค่าเท่ากับ 14.78 กก./ซม.^{2} จะมีค่าแรงดึงน้อยกว่าตัวอย่างคอนกรีต C-5-SP10 มีค่าเท่ากับ 18.34 กก./ซม.^{2}, C-13.5-SP10 มีค่าเท่ากับ 16.98 กก./ซม.^{2} และ C-22.5-SP10 มีค่าเท่ากับ 16.04 กก./ซม.^{2} ดังแสดงในรูปที่ 9



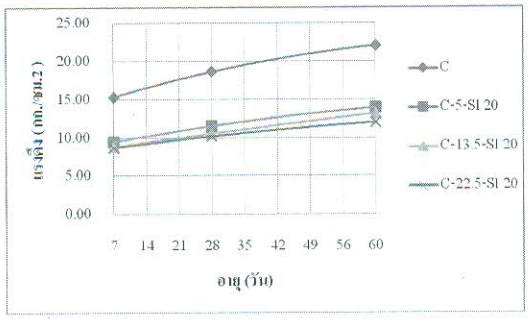
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงกับอายุคอนกรีต (ทรายบดแทนที่ร้อยละ 20)

ผลของการใช้ตะกอนประปาบดที่มีขนาดน้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 5, 13.5 และ 22.5 ของตัวอย่าง C-5-Sl 10, C-13.55-Sl 10 และ C-22.5-Sl 10 ตามลำดับ โดยเมื่อใช้การแทนที่ตะกอนประปาบดในปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 ของตัวอย่าง C-5-Sl 10, C-13.55-Sl 10 และ C-22.5-Sl 10 พบว่าค่าแรงดึงของตัวอย่างคอนกรีตมีค่าใกล้เคียงกันที่อายุ 7, 28 และ 60 วัน โดยตัวอย่างคอนกรีต C-5-Sl 10 มีค่าแรงดึงมากที่สุด และ C-22.5-Sl 10 มีค่าแรงดึงน้อยที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงกับอายุคอนกรีต (ตะกอนประปาแทนที่ร้อยละ 10)

และสำหรับตัวอย่างคอนกรีต C-5-Sl 20, C-13.5-Sl 20 และ C-22.5-Sl 20 ที่ใช้ตะกอนประปาบดแทนที่ในปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 พบว่าที่อายุ 7 วันค่าแรงดึงของตัวอย่างคอนกรีต C-5-Sl 20, C-13.5-Sl 20 และ C-22.5-Sl 20 กับตัวอย่างคอนกรีต C-5-Sl 10, C-13.55-Sl 10 และ C-22.5-Sl 10 มีค่าแรงดึงของตัวอย่างคอนกรีตใกล้เคียงกัน คือมีค่าประมาณ 9 กก./ซม.^{2} แต่ที่อายุ 60 วันค่าแรงดึงของตัวอย่างคอนกรีต C-5-Sl 20, C-13.5-Sl 20 และ C-22.5-Sl 20 มีค่าแรงดึงน้อยกว่าตัวอย่างคอนกรีต C-5-Sl 10, C-13.55-Sl 10 และ C-22.5-Sl 10 ที่มีขนาดน้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงกับอายุคอนกรีต (ตะกอนประปาแทนที่ร้อยละ 20)

4.2 ผลของขนาดอนุภาคต่อค่าแรงดึงโดยตรงของคอนกรีต

จากผลของการใช้ทรายบดที่มีขนาดน้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 13.5 ที่มีขนาดเท่ากับปูนซีเมนต์ ของตัวอย่างคอนกรีต C-13.5-SP10 พบว่าค่าแรงดึงโดยตรงของตัวอย่างคอนกรีตที่อายุ 7 วัน, 28 วัน และ

60 วัน ของตัวอย่าง C-13.5-SP10 มีค่าแรงดึงน้อยกว่าตัวอย่างคอนกรีต C-5-SP10 เท่ากับ -0.36 กก./ซม.^{2}, -1.78 กก./ซม.^{2} และ -1.69 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ แต่มีค่าแรงดึงมากกว่าตัวอย่างคอนกรีต C-22.5-SP10 เท่ากับ 0.51 กก./ซม.^{2} , 0.14 กก./ซม.^{2} และ 0.94 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ ซึ่งการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยทรายแม่น้ำบดของตัวอย่างคอนกรีต C-13.5-SP10 มีขนาดน้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 13.5 ทำให้ไม่มีผลกระทบกับแรงดึงเนื่องจากมีขนาดเท่ากับปูนซีเมนต์ เปรียบเทียบกับตัวอย่างคอนกรีต C-5-SP10 ที่มีขนาดน้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 5 ซึ่งมีขนาดของความละเอียดเล็กกว่า แทนที่ในปริมาณร้อยละที่เท่ากันมีผลทำให้ได้ค่าแรงดึงที่มากกว่า ในทางกลับกัน ตัวอย่างคอนกรีต C-22.5-SP10 ที่มีขนาดน้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 22.5 ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าแทนที่ในปริมาณร้อยละที่เท่ากันมีผลทำให้ได้ค่าแรงดึงที่น้อยกว่า เนื่องจากการที่อนุภาคขนาดเล็กจะแทรกอยู่ช่องว่างของมอร์ต้าร์ มีการจัดเรียงตัวที่เหมาะสมทำให้คอนกรีตมีกำลังมากขึ้น

งานวิจัยที่เคยศึกษาถึงผลกระทบของขนาดอนุภาคที่มีผลต่อกำลังอัด [6] พบว่ากำลังอัดที่เกิดจากการอัดตัวของอนุภาคจะขึ้นอยู่กับความละเอียดของทรายแม่น้ำบด หากทรายแม่น้ำบดมีความละเอียดสูงกว่าปูนซีเมนต์จะให้กำลังอัดเนื่องจากการอัดตัวสูงขึ้น ในทางตรงกันข้ามการใช้ทรายแม่น้ำบดที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าปูนซีเมนต์ทำให้กำลังอัดเนื่องจากการอัดตัวต่ำลง ซึ่งค่ากำลังอัดจะส่งผลต่อค่าแรงดึงในคอนกรีตด้วย โดยผลต่างของค่าแรงดึงเนื่องจากขนาดอนุภาคที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 3

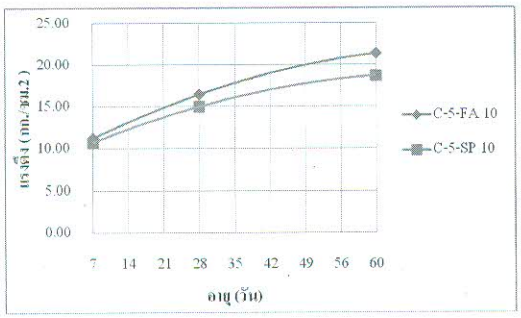
ตารางที่ 3 ผลของขนาดอนุภาคต่อค่าแรงดึงโดยตรงของคอนกรีต

ผลของขนาดอนุภาคต่อค่าแรงดึงโดยตรงของคอนกรีต (กก./ซม.^{2})			
ตัวอย่าง	7 วัน	28 วัน	60 วัน
C-5-SP10 - C-13.5-SP10	-0.36	-1.78	-1.69
C-13.5-SP10 - C-22.5-SP10	0.51	0.14	0.94
C-5-SP20 - C-13.5-SP20	-0.69	-1.21	-1.44
C-13.5-SP20 - C-22.5-SP20	0.82	0.94	1.77

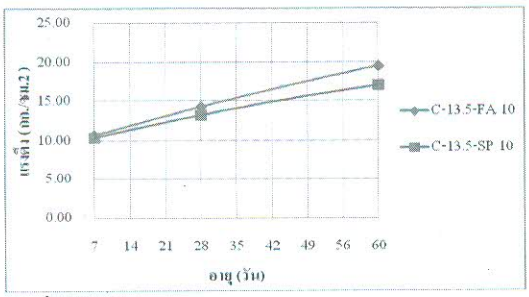
เมื่อพิจารณาตัวอย่างคอนกรีต C-5-SP20, C-13.5-SP20 และ C-22.5-SP20 เห็นได้ว่ามีทิศทางไปในทางเดียวกับตัวอย่าง C-5-SP10, C-13.5-SP10 และ C-22.5-SP10 โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยทรายแม่น้ำบดในปริมาณร้อยละ 20 ทำให้ค่าผลต่างของค่าแรงดึงมากขึ้นเพราะการแทนที่มากขึ้นทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์น้อยลง เนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย ทรายแม่น้ำบด หรือเถ้าถ่านหิน หรือตะกอนประปาบด ในปริมาณร้อยละที่เท่ากันแต่มีขนาดของความละเอียดแตกต่างกันทำให้ค่าแรงดึงที่เกิดจากการที่อนุภาคขนาดเล็กจะแทรกอยู่ช่องว่างของมอร์ต้าร์ มีการจัดเรียงตัวที่เหมาะสมมากกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าส่งผลให้ค่าแรงดึงที่เกิดจากอนุภาคขนาดเล็กมีค่ามากกว่าค่าแรงดึงที่เกิดจากอนุภาคขนาดใหญ่กว่า

4.3 ผลของปฏิกิริยาปอซโซลานและการแทนที่ต่อค่าแรงดึงโดยตรงของคอนกรีต

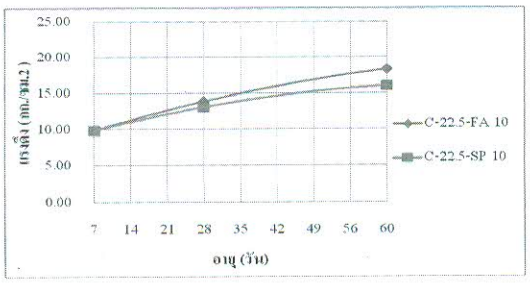
เมื่อนำค่าแรงดึงโดยตรงของตัวอย่างคอนกรีตที่ผสม FA, SP และ Sl ที่มีขนาดน้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 5, 13.5 และ 22.5 โดยเมื่อใช้การแทนที่ในปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 พบว่าที่อายุ 7 วันค่าแรงดึงของตัวอย่างคอนกรีตที่มีส่วนผสม FA มีค่ามากที่สุดส่วน SP และ Sl จะมีค่าแรงดึงลดลงมาตามลำดับ แต่จะมีค่าแรงดึงต่างกันไม่มากนัก ซึ่งแตกต่างจากตัวอย่างคอนกรีตที่อายุ 60 วัน ตัวอย่างคอนกรีตที่มีส่วนผสม FA, SP และ Sl จะให้ค่าแรงดึงที่แตกต่างกันมาก ดังแสดงในรูปที่ 12, 13 และ 14



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงกับอายุคอนกรีต (ขนาดค้างตระแกรง 5% แทนที่ร้อยละ 10)

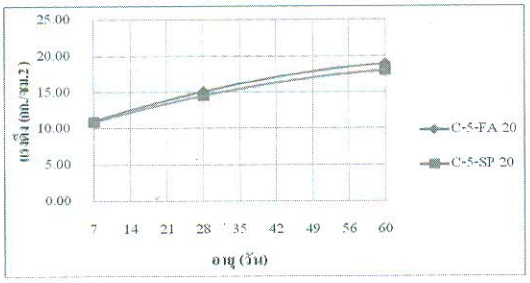


รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงกับอายุคอนกรีต (ขนาดค้างตระแกรง 13.5% แทนที่ร้อยละ 10)

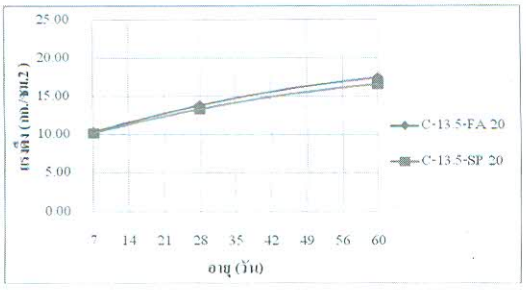


รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงกับอายุคอนกรีต (ขนาดค้างตระแกรง 22.5% แทนที่ร้อยละ 10)

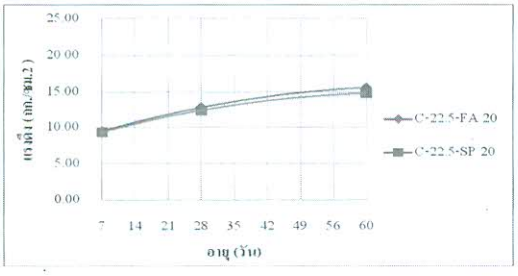
สำหรับตัวอย่างคอนกรีต FA, SP และ Sl ที่มีขนาดน้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 5, 13.5 และ 22.5 โดยเมื่อใช้การแทนที่ในปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 พบว่ามีทิศทางไปในทางเดียวกับตัวอย่างคอนกรีต FA, SP และ Sl ที่ใช้การแทนที่ในปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 แต่จะให้ค่าแรงดึงที่น้อยกว่าการแทนที่ในปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 ที่มีขนาดน้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากัน เนื่องจากการใช้ FA, SP และ Sl แทนที่ปูนซีเมนต์มากกว่ามีผลทำให้ค่าแรงดึงลดน้อยลง ดังแสดงในรูปที่ 15, 16 และ 17



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงกับอายุคอนกรีต (ขนาดค้างตระแกรง 5% แทนที่ร้อยละ 20)



รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงกับอายุคอนกรีต (ขนาดค้างตระแกรง 13.5% แทนที่ร้อยละ 20)



รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงกับอายุคอนกรีต (ขนาดค้างตระแกรง 22.5% แทนที่ร้อยละ 20)

เมื่อนำค่าแรงดึงของตัวอย่างคอนกรีต FA เป็นวัสดุปอซโซลานเทียบกับ SP เป็นวัสดุที่ไม่มีปฏิกิริยาปอซโซลานเนื่องจากความเป็นผลึก[5] ที่มีขนาดน้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 5, 13.5 และ 22.5 ซึ่งผลต่างของค่าแรงดึงที่เกิดขึ้นก็คือผลของปฏิกิริยาปอซโซลานต่อค่าแรงดึงโดยตรงของคอนกรีต

ค่าแรงดึงของตัวอย่างคอนกรีต C-5-FA10 มีค่าเท่ากับ 11.20 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 7 วัน เพิ่มเป็น 16.42 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 28 วัน และเพิ่มเป็น 21.32 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 60 วัน กับ C-5-SP10 มีค่าเท่ากับ 10.70 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 7 วัน เพิ่มเป็น 14.98 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 28 วัน และเพิ่มเป็น 18.67 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 60 วัน ซึ่งจะมีค่าแรงดึงปฏิกิริยาปอซโซลานของตัวอย่างคอนกรีต C-5-FA10 มีค่าเท่ากับ 0.50 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 7 วัน เพิ่มเป็น 1.44 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 28 วัน และเพิ่มเป็น 2.65 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 60 วัน ดังแสดงในตารางที่ 4

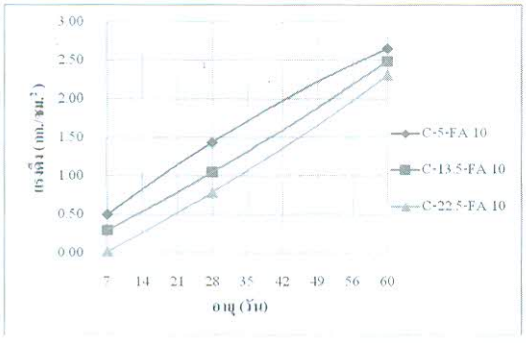
และค่าแรงดึงของตัวอย่างคอนกรีต C-13.5-FA10 มีค่าเท่ากับ 10.64 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 7 วัน เพิ่มเป็น 14.25 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 28 วัน และเพิ่มเป็น 19.47 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 60 วัน กับ C-13.5-SP10 มีค่าเท่ากับ 10.34 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 7 วัน เพิ่มเป็น 13.20 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 28 วัน และเพิ่มเป็น 16.98 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 60 วัน ซึ่งจะมีค่าแรงดึงของปฏิกิริยาปอซโซลานของตัวอย่างคอนกรีต C-13.5-FA10 มีค่าเท่ากับ 0.30 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 7 วัน เพิ่มเป็น 1.05 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 28 วัน และเพิ่มเป็น 2.49 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 60 วัน ดังแสดงในตารางที่ 4

และค่าแรงดึงของตัวอย่างคอนกรีต C-22.5-FA10 มีค่าเท่ากับ 9.85 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 7 วัน เพิ่มเป็น 13.85 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 28 วันและเพิ่มเป็น 18.34 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 60 วัน กับ C-22.5-SP10 มีค่าเท่ากับ 9.83 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 7 วัน เพิ่มเป็น 13.06 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 28 วัน และเพิ่มเป็น 16.04 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 60 วัน ซึ่งจะมีค่าแรงดึงของปฏิกิริยาปอซโซลานของตัวอย่างคอนกรีต C-22.5-FA10 มีค่าเท่ากับ 0.02 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 7 วัน เพิ่มเป็น 0.79 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 28 วันและเพิ่มเป็น 2.30 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 60 วัน ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าแรงดึงของปฏิกิริยาปอซโซลาน

ผลของปฏิกิริยาปอซโซลานต่อค่าแรงดึงโดยตรงของคอนกรีต (กก./ซม.^{2})			
ตัวอย่าง	7 วัน	28 วัน	60 วัน
C-5-FA10 - C-5-SP10	0.5	1.44	2.65
C-13.5-FA10 - C-13.5-SP10	0.3	1.05	2.49
C-22.5-FA10 - C-22.5-SP10	0.02	0.79	2.3
C-5-FA20 - C-5-SP20	0.17	0.58	0.92
C-13.5-FA20 - C-13.5-SP20	0.15	0.5	0.86
C-22.5-FA20 - C-22.5-SP20	0.16	0.42	0.81

ค่าแรงดึงที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานของตัวอย่างคอนกรีต C-5-FA10 กับ C-5-SP10, C-13.5-FA10 กับ C-13.5-SP10 และ C-22.5-FA10 กับ C-22.5-SP10 แสดงในรูปที่ 18



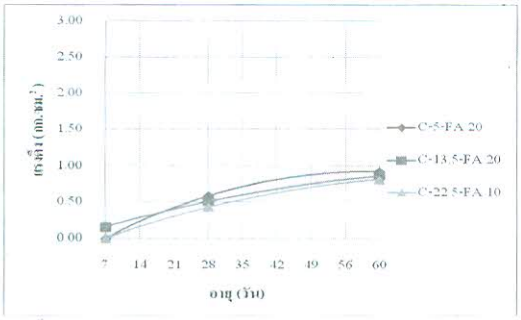
รูปที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงของปฏิกิริยาปอซโซลานกับอายุคอนกรีต (แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10)

และค่าแรงดึงของตัวอย่างคอนกรีต C-5-FA20 มีค่าเท่ากับ 11.02 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 7 วัน เพิ่มเป็น 15.09 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 28 วัน และเพิ่มเป็น 18.91 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 60 วัน กับ C-5-SP20 มีค่าเท่ากับ 10.85 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 7 วัน เพิ่มเป็น 14.51 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 28 วัน และเพิ่มเป็น 17.99 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 60 วัน ซึ่งจะมีค่าแรงดึงของปฏิกิริยาปอซโซลานของตัวอย่างคอนกรีต C-5-FA20 มีค่าเท่ากับ 0.17 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 7 วัน เพิ่มเป็น 0.58 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 28 วัน และเพิ่มเป็น 0.92 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 60 วัน ดังแสดงในตารางที่ 4

และค่าแรงดึงของตัวอย่างคอนกรีต C-13.5-FA20 มีค่าเท่ากับ 10.31 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 7 วันเพิ่มเป็น 13.80 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 28 วัน และเพิ่มเป็น 17.41 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 60 วัน กับ C-13.5-SP20 มีค่าเท่ากับ 10.16 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 7 วันเพิ่มเป็น 13.30 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 28 วัน และเพิ่มเป็น 16.55 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 60 วัน ซึ่งจะมีค่าแรงดึงของปฏิกิริยาปอซโซลานของตัวอย่างคอนกรีต C-13.5-FA20 มีค่าเท่ากับ 0.15 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 7 วันเพิ่มเป็น 0.50 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 28 วัน และเพิ่มเป็น 0.86 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 60 วัน ดังแสดงในตารางที่ 4

และค่าแรงดึงของตัวอย่างคอนกรีต C-22.5-FA20 มีค่าเท่ากับ 9.50 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 7 วัน เพิ่มเป็น 12.78 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 28 วันและเพิ่มเป็น 15.59 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 60 วัน กับ C-22.5-SP20 มีค่าเท่ากับ 9.34 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 7 วัน เพิ่มเป็น 12.36 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 28 วัน และเพิ่มเป็น 14.78 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 60 วัน ซึ่งจะมีค่าแรงดึงของปฏิกิริยาปอซโซลานของตัวอย่างคอนกรีต C-22.5-FA20 มีค่าเท่ากับ 0.16 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 7 วัน เพิ่มเป็น 0.42 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 28 วัน และเพิ่มเป็น 0.81 กก./ซม.^{2} ที่อายุ 60 วัน ดังแสดงในตารางที่ 4

ค่าแรงดึงที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานของตัวอย่างคอนกรีต C-5-FA20 กับ C-5-SP20, C-13.5-FA20 กับ C-13.5-SP20 และ C-22.5-FA20 กับ C-22.5-SP20 ดังแสดงในรูปที่ 19



รูปที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงของปฏิกิริยาปอซโซลานกับอายุคอนกรีต (แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20)

จากผลต่างของปฏิกิริยาปอซโซลานต่อค่าแรงดึงโดยตรงของคอนกรีต จะเห็นได้ว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินที่มากขึ้น ทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดน้อยลง มีผลทำให้การทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและปฏิกิริยาปอซโซลานลดลงด้วย ส่งผลให้ความแตกต่างระหว่างค่าแรงดึงโดยตรงของคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินบดกับคอนกรีตที่ใช้ทรายบดที่แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 มีค่ามากกว่าผลต่างของเถ้าถ่านหินบดกับทรายบดที่แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20

5. สรุป

จากการวิจัยผลกระทบของการใช้ตะกอนประปา ทรายบด และเถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ ต่อค่าการอัดตัวของอนุภาคและปฏิกิริยาปอซโซลานของค่าแรงดึงโดยตรงของคอนกรีต สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

5.1 ผลของขนาดอนุภาคต่อค่าการทดสอบแรงดึงโดยตรงของคอนกรีต

ขนาดของอนุภาคที่ต่างกัน 3 ขนาดคือ ขนาดน้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 5, 13.5 และ 22.5 โดยที่ขนาดที่เล็กที่สุดจะให้ค่าแรงดึงโดยตรงของคอนกรีตสูงกว่าขนาดที่ใหญ่กว่า

5.2 ผลของปฏิกิริยาปอซโซลานและปริมาณแทนที่ต่อการทดสอบค่าแรงดึงโดยตรง

การใช้เถ้าถ่านหินที่มีขนากเล็กกว่าจะให้ผลของปฏิกิริยาปอซโซลานต่อค่าแรงดึงโดยตรงของคอนกรีตสูงกว่าการใช้เถ้าถ่านหินขนาดใหญ่กว่า และการแทนที่มากขึ้นผลของปฏิกิริยาปอซโซลานก็ลดลง

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องทดสอบแรงดึง และอาจารย์ ดร.จตุพล ตั้งปกาศิต ที่แนะนำและให้ข้อมูลที่เกี่ยวกับงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] วศิน ดินกาหมีน, วิษณุ ชูกลิ่น, สุวัชชัย ละใบยูโซ๊ะ, อนุพงศ์ ผาตะพงษ์, 2555. **การนำตะกอนจากระบบผลิตน้ำประปามาใช้เป็นส่วนผสมในการทำคอนกรีตกำลังสูงที่อายุต้น สำหรับงานคอนกรีตหล่อสำเร็จรูป.** ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต ภาควิชา

วิศวกรรมโยธา. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

[2] ธวัชชัย พลรักษ์, ศรายุทธ เที่ยงแท้, รณชัย รุกขวัฒน์, ฐิติกร แก้วประชา, 2556. **การนำตะกอนจากระบบผลิตน้ำประปามาใช้เป็นส่วนผสมในการทำคอนกรีตกำลังสูงสำหรับงานคอนกรีตสำเร็จรูป.** ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

[3] กีร์ติกร อินทรักษ์, ณัฐวุฒิ หมู่ใหญ่, นัฐพงศ์หลสุวรรณ, ปฐมพงษ์ โสภา, 2556. **การนำตะกอนประปามาใช้เป็นส่วนผสมคอนกรีตหล่อสำเร็จรูป.** ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.

[4] เรืองรุชดิ์ ชีระโรจน์, จตุพล ตั้งปกาศิต,รศ. ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ไกรวุฒิเกียรติโกมล, 2546. **"ผลกระทบของขนาดอนุภาคเถ้าถ่านหินแม่เมาะต่อดัชนีกำลังมอร์ต้าร์,"** วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ.ปีที่. 26, ฉบับที่. 3, : 295 – 310.

[5] จตุพล ตั้งปกาศิต, แสวง ทรงหมู่, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ไกรวุฒิ เกียรติโกมล, 2548 **"การศึกษาค่าดัชนีกำลังของมอร์ต้าร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นการอัดตัวของอนุภาค และปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน,"** วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ., ปีที่. 28,ฉบับที่. 4, : 465 – 476.

[6] จตุพล ตั้งปกาศิต, แสวง ทรงหมู่, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ไกรวุฒิ เกียรติโกมล, 2546 **"การศึกษาผลกระทบของการอัดตัวของอนุภาคต่อค่าดัชนีกำลังของมอร์ต้าร์ตามมาตราฐาน ASTM C 618 โดยใช้ทรายแม่น้ำบดละเอียด,"**วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ., ปีที่. 30, ฉบับที่. 1, : 141 – 151.

วงจรกรองความถี่ไบควอดราติกโหมดกระแสแบบสามอินพุต หนึ่งเอาต์พุตโดยใช้วงจร MCDTA ตัวเดียว

Current-Mode Universal Biquadratic with Three-Input Single-Output Using a Single MCDTA

กุลเศขร์ ขวามา[1] และ มนตรี คำเงิน[2]

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวงจรความถี่ไบควอดราติกโหมดกระแสแบบสามอินพุตและหนึ่งเอาต์พุต ที่ปรับค่าความถี่ได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้วงจร MCDTA หนึ่งวงจรและตัวเก็บประจุแบบต่อลงกราวด์สองตัว โครงสร้างที่นำเสนอสามารถสร้างตัวกรองความถี่แบบผ่านต่ำ ผ่านแถบ ผ่านสูง แถบหยุด และผ่านทุกความถี่ ใช้ตัวเก็บประจุแบบต่อลงกราวด์ในการสร้างการกรองทั้งห้าแบบ ไม่ต้องการความสมพงษ์กันของค่าอุปกรณ์และไม่ต้องการสัญญาณอินพุตแบบลบ ปรับค่าความถี่ได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ และ ค่าความไวของอุปกรณ์แอ็กทีฟและพาสซีฟต่อความถี่มีค่าต่ำ ผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE สามารถยืนยันทฤษฎีที่นำเสนอ

คำสำคัญ: วงจรไบควอดราติก วงจรโหมดกระแส วงจร MCDTA

Abstract

This paper presents a new electronically tunable current-mode universal biquadratic filter with three inputs and single output employing only a single modified current differencing transcondutance amplifier and two grounded capacitors. The proposed filter provides realization of low-pass, band-pass, high-pass, band-stop, and all-pass current responses; employment of grounded capacitors; no requirement with the component-matching conditions and the inverting-type input signals to realize specific filtering; electronic control of the natural frequency and low active and passive sensitivities. Simulation results using PSPICE are given to confirm the presented theory

Key words: Biquadratic filter, current-mode circuit, MCDTA

[1] นักศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

[2] อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1. บทนำ

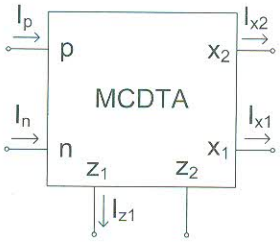
เมื่อเร็ว ๆ นี้ ได้มีการนำเสนอวงจรแอ็กทีฟชนิดใหม่ที่มีชื่อเรียกว่าวงจร Current Differencing Transconductance Amplifier (CDTA) [1] วงจรนี้ได้รวมเอาข้อดีของวงจร Current Differencing Buffered Amplifier (CDBA) เช่น มีอินพุตเป็นสัญญาณกระแสความแตกต่าง [2] และวงจรขยายทรานส์คอนดักแตนซ์ (Transconductance Amplifier: TA) [3] รวมเข้าไว้ด้วยกัน ดังนั้นจึงเป็นวงจรที่เหมาะสำหรับนำมาออกแบบวงจรแอนะล็อกโหมดกระแสที่ปรับค่าฟังก์ชันต่าง ๆ ได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ วงจรกรองความถี่ไบควอดราติกหลายหน้าที่เป็นวงจรกรองความถี่อันดับที่สองที่สามารถสร้างการกรองได้ทั้งห้าแบบ คือ แบบผ่านต่ำ ผ่านแถบ ผ่านสูง แถบหยุด และผ่านทุกความถี่ ที่สามารถประยุกต์ใช้งานได้ในวงจรเฟสล็อกลูป วงจรมอดูเลเตอร์ และดีมอดูเลเตอร์ในระบบโทรศัพท์บ้าน ตัวแยกเสียงสูง เสียงกลางและเสียงต่ำในระบบเครื่องเสียง [4] ในขณะที่วงจรกรองความถี่แบบแอ็กทีฟที่ใช้ตัวเก็บประจุแบบต่อลงกราวด์จะเหมาะกับการทำไปสร้างเป็นวงจรรวม [5] วงจร CDTA สามารถใช้สำหรับนำมาออกแบบวงจรกรองความถี่โหมดกระแสที่สามารถปรับค่าความถี่ได้เพราะที่ภาคเอาต์พุตเป็นวงจรทรานส์คอนดักแตนซ์ ดังนั้นที่ผ่านมาจึงมีวงจรกรองความถี่ที่ใช้วงจร CDTA เป็นวงจรพื้นฐานนำเสนอหลายวงจรใน [6]-[12] แต่อย่างไรก็ตาม วงจรกรองความถี่หลายหน้าที่ที่นำเสนอใน [6]-[12] ใช้วงจร CDTA มากกว่าหนึ่งวงจร เมื่อเร็วๆ นี้วงจร CDTA ได้ถูกพัฒนาต่ออีกครั้งโดยใช้ชื่อเรียกว่าวงจร Modified Current Differencing Transconductance amplifier (MCDTA) [13] วงจร MCDTA ได้เพิ่มวงจร TA และวงจรสะท้อนเข้าไปในวงจร CDTA แบบเดิม ดังนั้นวงจร MCDTA หนึ่งวงจรจะมีวงจร TA สองวงจร แต่ละวงจร TA ในวงจร MCDTA จะควบคุมได้อิสระจากกัน ที่ผ่านมามีวงจรกรองความถี่ที่ใช้วงจร MCDTA เป็นวงจรพื้นฐานนำเสนอใน [13]-[14] แต่วงจรดังกล่าวเป็นวงจรกรองแบบอินพุตเดียวสามเอาต์พุตจึงสามารถสร้างการกรองความถี่ได้เพียงสามแบบถ้าเปรียบเทียบกับวงจรกรองความถี่แบบหนึ่งอินพุตและหลายเอาต์พุต วงจรกรองความถี่แบบหลายอินพุตสามารถสร้างการกรองได้ครบห้าแบบได้ง่ายกว่า นอกจากนี้การสร้างการกรองแบบกลับขั้วสามารถทำได้ง่ายกว่าเพียงกลับขั้วสัญญาณอินพุตเท่านั้นโดยไม่ต้องปรับเปลี่ยนลักษณะของวงจรแต่อย่างใด ยิ่งไปกว่านั้นวงจรแบบหลายอินพุตยังสามารถสร้างการกรองโดยไม่ต้องการความสมพงษ์กันของค่าอุปกรณ์ และใช้อุปกรณ์แอ็กทีฟจำนวนน้อยอีกด้วย

ดังนั้น บทความนี้นำเสนอวงจรกรองความถี่ไบควอดราติกโหมดกระแสแบบสามอินพุตและหนึ่งเอาต์พุตโดยใช้วงจร MCDTA หนึ่งวงจรและตัวเก็บประจุแบบต่อลงกราวด์อย่างละสองตัว วงจรที่นำเสนอสามารถสร้างตัวกรองความถี่ได้ครบทั้งห้าแบบ คือ แบบผ่านต่ำ

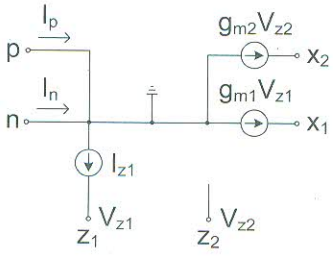
ผ่านแถบ ผ่านสูง แถบหยุด และ ผ่านทุกความถี่ เมื่อทำการเชื่อมต่ออินพุตอย่างเหมาะสม การสร้างการกรองทั้งห้าแบบไม่ต้องการความสมพงษ์กันของค่าอุปกรณ์ ค่าความถี่ของวงจรสามารถปรับค่าได้ด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ วงจรที่นำเสนอถูกจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE

2. วงจรที่นำเสนอ

สัญลักษณ์ทางไฟฟ้าและวงจรเสมือนของวงจร MCDTA แสดงได้ดังรูปที่ 1 ความสัมพันธ์ของขั้วต่าง ๆ ของวงจร MCDTA แสดงได้ดังนี้

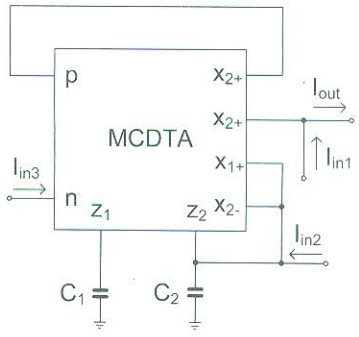


(ก)



(ข)

รูปที่ 1 วงจร MCDTA (ก) สัญลักษณ์ (ข) วงจรเสมือน



รูปที่ 2 วงจรกรองความถี่ที่นำเสนอ

$$\left.\begin{aligned} V_p &= V_n = 0 \\ I_{z1} &= I_p - I_n \\ I_{x1} &= g_{m1}V_{z1} \\ I_{x2} &= g_{m2}V_{z2} \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

โดยที่ g_{m1} และ g_{m2} คือค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ของวงจร MCDTA จากสมการจะเห็นได้ว่า g_{m2} เป็นค่าทรานส์คอนดักแตนซ์ที่ควบคุมได้อิสระจาก g_{m1} ซึ่งคุณสมบัตินี้ทำให้วงจร MCDTA แตกต่างจากวงจร CDTA ทั่วไป

วงจรกรองความถี่โหมดกระแสที่นำเสนอแสดงได้ดังรูปที่ 2 จากรูปวงจรประกอบด้วยวงจร MCDTA หนึ่งวงจรและตัวเก็บประจุแบบต่อลงกราวด์สองตัว จะเห็นได้ว่าการใช้ตัวเก็บประจุแบบต่อลงกราวด์ทำให้วงจรเหมาะกับการนำไปสร้างเป็นวงจรรวม [5] เมื่อใช้คุณสมบัติของวงจร MCDTA และทฤษฎีโนดโวลท์เตจ กระแส Iout ของวงจรสามารถเขียนได้คือ

$$I_{out} = \frac{\left(s^2 + \frac{g_{m2}}{C_2} + \frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}\right)I_{in3} + \left(\frac{g_{m2}}{C_2}s\right)I_{in2} + \left(\frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}\right)I_{in1}}{\left(s^2 + \frac{g_{m2}}{C_2} + \frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}\right)} \quad (2)$$

จากสมการ (2) ตัวกรองแบบผ่านต่ำ (low-pass filter: LP) ตัวกรองแบบผ่านแถบ (band-pass filter: BP) ตัวกรองแบบผ่านสูง (high-pass filter: HP) ตัวกรองแบบแถบหยุด (band-stop filter: BS) และตัวกรองแบบผ่านทุกความถี่ (all-pass filter: AP) สามารถสร้างได้ตามเงื่อนไขต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

(1) ตัวกรองแบบ LP เมื่อ $I_{in2} = I_{in1} = 0$ และ $I_{in3} = I_{in}$

(2) ตัวกรองแบบ BP เมื่อ $I_{in1} = I_{in3} = 0$ และ $I_{in2} = I_{in}$

(3) ตัวกรองแบบ HP เมื่อ $I_{in1} = I_{in2} = I_{in3} = I_{in}$

(4) ตัวกรองแบบ BS เมื่อ $I_{in1} = I_{in2} = I_{in}$ และ $I_{in3} = 0$

(5) ตัวกรองแบบ AP เมื่อ $I_{in1} = 2_{Iin2} = I_{in}$ และ $I_{in3} = 0$

ดังนั้นวงจรกรองความถี่ในรูปที่ 2 สามารถสร้างการกรองได้ทั้งห้าแบบในวงจรเดียว เมื่อทำการป้อนสัญญาณอินพุตอย่างเหมาะสม ค่าพารามิเตอร์ ω_o และ Q ของตัวกรองความถี่ทั้งหมด สามารถกำหนดได้คือ

$$\omega_o = \sqrt{\frac{g_{m1} g_{m2}}{C_1 C_2}} \tag{3}$$

$$Q = \sqrt{\frac{g_{m2} C_1}{g_{m1} C_2}} \tag{4}$$

วงจร MCDTA ที่สร้างจากซีมอส แสดงได้ดังรูปที่ 3 จากรูปถ้าสมมติว่าทรานซิสเตอร์ M_9 และ M_{10} มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกประการ ค่า g_{m1} สามารถกำหนดได้คือ

$$g_{m1} = \sqrt{\mu C_{ox} (W/L) I_{b1}} \tag{5}$$

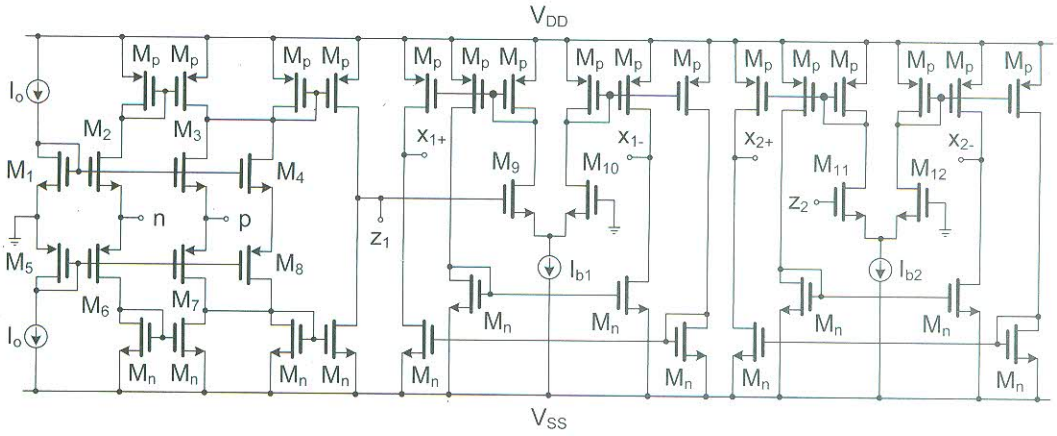
และถ้าสมมติให้ทรานซิสเตอร์ M_{11} และ M_{12} มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกประการ ค่า g_{m2} สามารถกำหนดได้คือ

$$g_{m2} = \sqrt{\mu C_{ox} (W/L) I_{b2}} \tag{6}$$

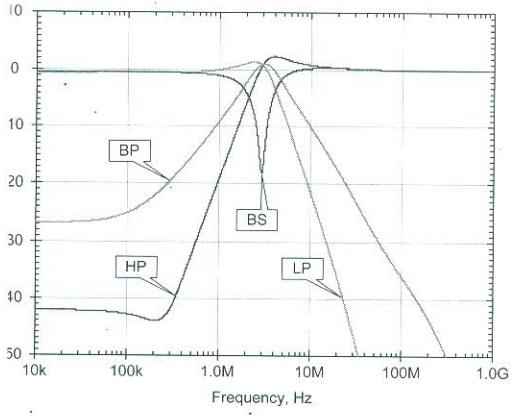
โดยที่ μ คือค่าสภาพคล่องตัวของพาหะ C_{ox} คือค่าตัวเก็บประจุที่ขาเกตต่อหน่วยพื้นที่ I_{b1} และ I_{b2} คือกระแสไบอัสภายนอก ดังนั้นจาก (5) และ (6) ค่า g_{m1} และ g_{m2} สามารถปรับค่าได้ด้วยกระแส I_{b1} และ I_{b2} ตามลำดับ

4. การจำลองการทำงาน

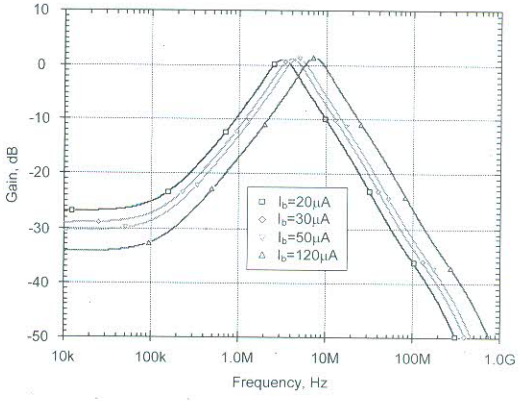
วงจรกรองความถี่ที่นำเสนอจะถูกจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSPICE ทรานซิสเตอร์ nMOS และ pMOS ของวงจรในรูปที่ 3 จะถูกออกแบบโดยใช้เทคโนโลยีซีมอส TSMC ขนาด 0.25 μm [15] อัตราส่วน W/L ของทรานซิสเตอร์ในวงจร MCDTA กำหนดค่าดังนี้ W/L=2μm/0.5μm สำหรับ M_1-M_4 W/L=7μm/0.5μm สำหรับ M_5-M_8 W/L = 5μm/0.5μm สำหรับ M_9-M_{12} และ M_p ทุกตัว W/L = 15μm/0.5μm สำหรับ M_n ทุกตัว ใช้แหล่งจ่ายเท่ากับ ±1.5 V และ กระแสไบอัส I_o = 50μA ตัวอย่างการออกแบบ กำหนดค่า C_1 = C_2 = 10 pF รูปที่ 4 แสดงผลตอบสนองความถี่แบบ LP BP HP และ BS ที่ได้จากการจำลองการทำงานของวงจรที่นำเสนอเมื่อกำหนดค่ากระแส I_{b1} = I_{b2} = 50 μA จากรูป ค่าความถี่ f_o ที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 5.24 MHz และในกรณีนี้วงจรใช้กำลังงานรวมเท่ากับ 2.5 mW



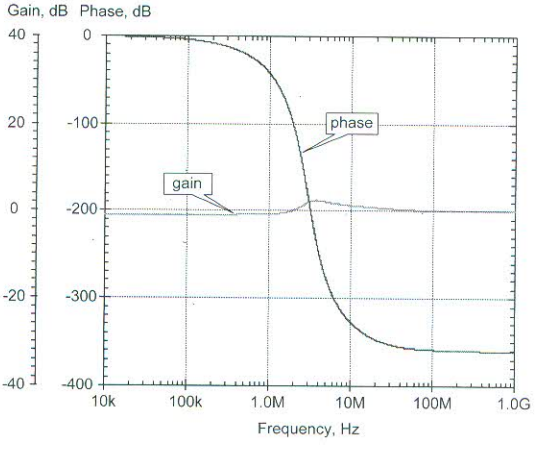
รูปที่ 3 วงจร MCDTA ที่สร้างจากมอสทรานซิสเตอร์



รูปที่ 4 ผลตอบสนองความถี่แบบ LP BP HP และ BS

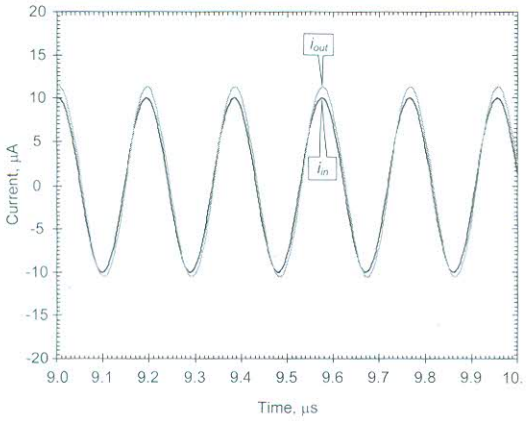


รูปที่ 6 การเปลี่ยนค่า ω_o ด้วยกระแสไบอัส I_b

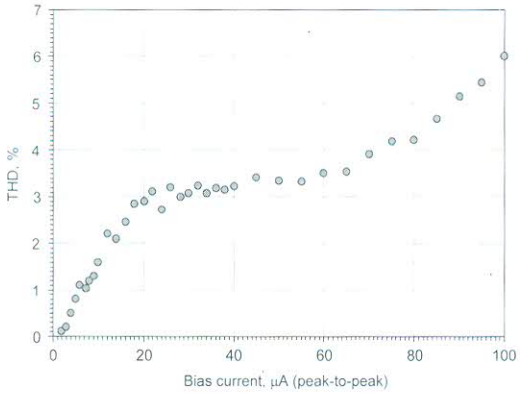


รูปที่ 5 ผลตอบสนองทางเฟสและความถี่ของ AP

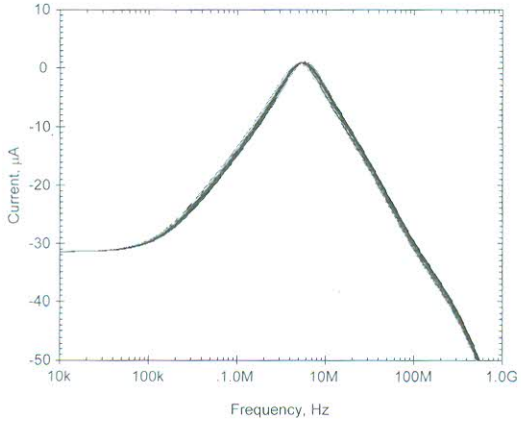
รูปที่ 5 แสดงการตอบสนองทางขนาดและเฟสของการตอบสนองแบบ AP ที่ความถี่ f_o เท่ากับ 5.24 MHz จากรูปที่ 4 และ 5 สามารถแสดงได้ว่าวงจรกรองความถี่ที่นำเสนอสามารถสร้างการกรองความถี่ได้ห้าแบบในวงจรเดียว



รูปที่ 7 รูปคลื่นสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของ BP ที่ความถี่ 5.24 MHz ขนาด 20 μA_{p-p}



รูปที่ 8 ค่า THD ของ BP ที่ความถี่ 5.24 MHz เมื่อเปลี่ยนขนาดสัญญาณอินพุตเป็นค่าต่าง ๆ



รูปที่ 9 ผลตอบสนองแบบ BP เมื่อจำลองการทำงานแบบ Monte Carlo เมื่อ C_1 และ C_2 เปลี่ยนแปลง 10%

รูปที่ 6 แสดงผลตอบสนองความถี่ของการกรองแบบ BP เมื่อเปลี่ยนกระแส I_b (i.e., $I_b = I_{b1} = I_{b2}$) มีค่าเป็น 20 30 50 และ 120 μA รูปที่ 7 แสดงสัญญาณรูปคลื่นซายน์ของสัญญาณทางเอาต์พุตและอินพุตของ BP เมื่อป้อนอินพุตความถี่ 5.24 MHz ขนาด 20 μA_{p-p} จากรูปค่า THD วัดได้มีค่าเท่ากับ 2.81% รูปที่ 8 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ THD ของการกรองความถี่แบบ BP เมื่อป้อนอินพุตความถี่เท่ากับ 5.24 MHz และเปลี่ยนขนาดของสัญญาณเป็นค่าต่าง ๆ ในกรณีนี้กำหนด $I_{b1} = I_{b2} = 50$ μA และ $C_1 = C_2 = 10$ pF จากรูปเมื่อขนาดของสัญญาณมีค่าเท่ากับ 90 μA_{p-p} ค่า THD มีค่าประมาณ 5.13 % ค่า THD จะมีค่าต่ำกว่านี้ถ้าทดสอบที่ความถี่ต่ำกว่า รูปที่ 9 แสดงผลตอบสนองของ BP เมื่อจำลองการทำงานแบบ Monte Carlo เมื่อกำหนดค่า C_1 และ C_2 มีการเปลี่ยนแปลง 10 เปอร์เซ็นต์ และกำหนดให้ทำการจำลองซ้ำเป็นจำนวน 100 ครั้ง ผลการจำลองนี้สามารถแสดงได้ว่าวงจรกรองความถี่ที่นำเสนอจะสามารถทำงานได้เมื่อนำไปสร้างเป็นวงจรจริง

5. สรุป

บทความนี้นำเสนอวงจรกรองความถี่โหมดกระแสแบบสามอินพุตและหนึ่งเอาต์พุตที่สามารถปรับค่าความถี่ด้วยกระแสไบอัส วงจรที่นำเสนอใช้วงจร MCDTA หนึ่งวงจรและตัวเก็บประจุแบบต่อลงกราวด์สองตัว วงจรที่นำเสนอมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้ (1) ใช้ตัวเก็บประจุแบบต่อลงกราวด์ซึ่งทำให้เหมาะกับการนำไปสร้างเป็น

วงจรรวม (2) สามารถสร้างการกรองความถี่ได้ห้าแบบในวงจรเดียวคือ แบบผ่านต่ำ แบบผ่านแถบ แบบผ่านสูง แบบแถบหยุด และแบบผ่านทุกความถี่ โดยไม่ต้องการคุณสมบัติความสมพงษ์กันของค่าอุปกรณ์และไม่ต้องการสัญญาณอินพุตแบบกลับขั้วสัญญาณ (3) ค่าความไวของอุปกรณ์แอ็กทีฟและพาสซีฟต่อความถี่มีค่าต่ำ โครงสร้างที่นำเสนอถูกตรวจสอบการทำงานโดยโปรแกรม PSPICE

6. เอกสารอ้างอิง

[1] D. Biolek, **"CDTA-building block for current-mode analog signal processing,"** in Proceedings of 16th European Conference on Circuits Theory and Design (ECCTD'03), Poland, 2003, pp. 397-400.

[2] C. Acar, S. Ozoguz, **"A new versatile building block: current differencing buffered amplifier suitable for analog signal-processing filters,"** Microelectronics Journal, vol. 30, pp. 157-160, 1999.

[3] E. Sanchez-Sinencio, J. Ramirez-Angulo, B. Linares-Barranco, A. Rodriguez-Vazquez, **"Operational transconductance amplifier-based nonlinear function syntheses,"** IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 24, pp. 1579-1586, 1989.

[4] S. Nikoloudis, C. Psychalinos, **"Multiple input single output universal biquad filter with current feed-back operational amplifiers,"** Circuits System and Signal Processing, vol. 29, pp. 1167-1180, 2010.

[5] M. Bhusan, R. W. Newcomb, **"Grounding of capacitors in integrated circuits,"** Electronics Letters, vol. 3, pp. 148-149, 1967.

[6] D. Biolek, E. Hancioglu, A. U. Keskin, **"High-performance current differencing transconductance amplifier and its application in precision current-mode rectification,"** International Journal of Electronics and Communications, vol. 62, pp. 92-96, 2008.

[7] W. Jaikla, M. Siripruchyaun, D. Biolek, V. Biolkova, **"High-outputimpedance current-mode multiphase sinusoidal oscillator employing current differencing transconductance amplifier-based all-pass filters,"** International Journal of Electronics, vol. 97, pp. 811-826, 2010.

[8] M. Kumngern, P. Lamun, K. Dejhan, **"Current-mode quadrature oscillator using current differ-**

encing transconductance amplifiers," International Journal of Electronics, vol. 99, pp. 971-986, 2012.

[9] A. U. Keskin, D. Biolek, E. Hancioglu, V. Biolkova, **"Current-mode KHN filter employing current differencing transconductance amplifiers,"** International Journal of Electronics and Communications, vol. 60, pp. 443-446, 2006.

[10] A. U. Keskin, D. Biolek, **"Current mode quadrature oscillator using current differencing transconductance amplifiers (CDTA),"** IEE Proceeding of Circuits, Devices and Systems, vol. 153, pp. 214-218, 2006.

[11] W. Tangsrirat, T. Dumawipata, W.Surakampontorn, **"Multiple-input single-output current-mode multifunction filter using current differencing transconductance amplifiers,"** International Journal of Electronics and Communications, vol. 61, pp. 206-214, 2007.

[12] N. A. Shah, M. Quadri, S. Z. Iqbal, **"Three input one output current-mode cascadable universal filter employing CDTAs,"** Journal of Active and Passive Electronic Devices, vol. 4, pp. 347-352, 2009.

[13] Y. Li, **"A modified CDTA (MCDTA) and its applications: designing current-mode sixth-order elliptic band-pass filter,"** Circuits, Systems, and Signal Processing, vol. 30, pp. 1383-1390, 2011.

[14] Y. Li, **"Current-mode sixth-order elliptic bandpass filter using MCDTAs,"** Radioengineering, vol. 20, pp. 645-649, 2011.

[15] P. Prommee, K. Chattrakun, **"CMOS WTA maximum and minimum circuits with their applications to analog switch and rectifiers,"** Microelectronics Journal, vol. 42, pp. 52-62, 2011.

Characteristics and Properties of Paper Mulberry Yarns

S. Chonsakorn[1] K. Piromthamsiri[2] and C. Sirikasemlert[3]

Abstract

The objective of this research was to determine the characteristics and physical properties of paper mulberry yarns spun by different methods. The materials used for this study were the inner barks of paper mulberry trees (Broussonetia papyrifera (L.) Vent.), between 6 to 12 months old. The paper mulberry yarns were spun by the modified hemp spinning method using 2, 4 and 6 mm strips and the modified cotton spinning method using 3.5, 5 and 6.5 cm fibers. The yarns produced were tested for physical properties according to the American Society of Testing Materials (ASTM) standards. It was found that the modified hemp spinning methods produced much smoother yarns, but they were still uneven in texture and classified as grade C. In contrast, the modified cotton spinning methods produced fuzzy and rough yarns, more uneven in texture and classified as below grade D. The paper mulberry yarns spun by different methods statistically had different yarn count, yarn twist, yarn breaking strength and yarn elongation at the .01 level. The yarn spun by the modified hemp spinning method using 6 mm strips had the highest yarn count, breaking strength and elongation, while the yarn spun by the modified cotton spinning method using 3.5 cm fibers had the highest yarn twist.

Keywords: Paper mulberry, Fiber, Yarn, Physical properties, Modified hemp spinning, Modified cotton spinning

[1] Doctoral Degree Student, Program in Tropical Agriculture, Faculty of Agriculture, Kasetsart University

[2] Department of Home Economics, Faculty of Agriculture, Kasetsart University

[3] Department of Technical Promotion, Thailand Textile Institute

1. Introduction

Paper mulberry (Broussonetia papyrifera (L.) Vent.) is a traditional ornamental deciduous large shrub or tree with a round crown up to 50 feet (15 m) in height and boles up to 2 feet (0.6 m) in diameter. Paper mulberry often appears as shrub-forming thickets from root sprouts [1]. The twigs are hairy reddish brown, and the bark is tan and smooth to moderately furrowed. The wood is soft and brittle with conical buds [2]. The bast from paper mulberry is a widely applied traditional raw material for small scale paper mills in Southeast Asia, mainly Thailand, Myanmar, Vietnam, South China, Taiwan, Korea and Japan [3]. It is the main raw material for handmade paper in Thailand [4]. Saa, or the popular name given to the paper mulberry tree, is a coarse, strong, rigid material and has a natural based fiber. Paper mulberry (kouzo) has also been used to make Japanese paper, but cultivation of the paper mulberry has been decreasing. Likewise, paper mulberry can be used for producing paper yarn [5]. The paper mulberry bark should be an excellent raw material for long-stable fiber [6]. The fiber is unique, long and very strong. It is the best choice for many to be used for making high quality paper. The treatment of paper mulberry bark, with crude pectinase, suggests the application of pectinases in producing high quality fiber [7]. The paper mulberry branch bark is a potential source of pectin with different degrees of esterification [8]. In primary study [9], the characteristics and physical properties of the paper mulberry fiber were found as follows:

1) The fibers were in clusters with an average diameter of 10 micrometers and had rounded cross-section with lumen and uneven texture and node.

2) The average length of single fibers was 10.20 mm. and therefore classified as short fiber, while that of the bundle fibers was 42.27 mm and classified as extra-long fiber. The average density of single fibers was 0.95 tex, whereas that of the bundle fibers was 13.04 tex. The average moisture content of the single fibers was 8.14% and that of the bundle fibers was 10.66%. The average tenacity of the single fibers was 4.85 cN/tex and that of the bundle fibers was 15.90 cN/tex. The average elongation of the single fibers was 4.50% and that of the bundle fibers was 11.21%. In this study, the paper mulberry yarns

were experimentally produced and the characteristics and physical properties of the yarns were examined, to educate and encourage the utilization of paper mulberry fiber for an environmental friendly and sustainable use for natural textiles.

2. Objective

To determine the characteristics and physical properties of the paper mulberry yarns spun by different methods

3. Research methodology

3.1 Materials

The materials used for this study were eighteen kilograms of paper mulberry (Broussonetia papyrifera (L.) Vent.) inner barks, between 6 and 12 months old, from the Mea Fah Luang Foundation, in Chiangrai province (Figure 1).

Figure 1 The paper mulberry barks used for this study

3.2 Methods

3.2.1 Preparation of the Paper Mulberry Barks

The preparation of the paper mulberry barks was carried out in three steps.

1) The cortex or barks were removed by hand decortication.

2) The cortex was scraped to remove most of the outer barks from the woody stem, the parenchyma in the bast layer and some of the gums and pectins.

3) The barks were washed 2 to 3 times in water; then the barks were completely dried out.

3.2.2 Preparation of the paper mulberry fibers for yarn spinning

The inner barks were divided into two parts. Both were used for the developed two different hand spinning methods: the modified hemp spinning method and the modified cotton spinning method.

1) Preparation of the paper mulberry bundle fibers for the modified hemp spinning method: The inner barks were separated into strips in three width sizes; 2 mm, 4 mm and 6 mm, as shown in Figure 2.

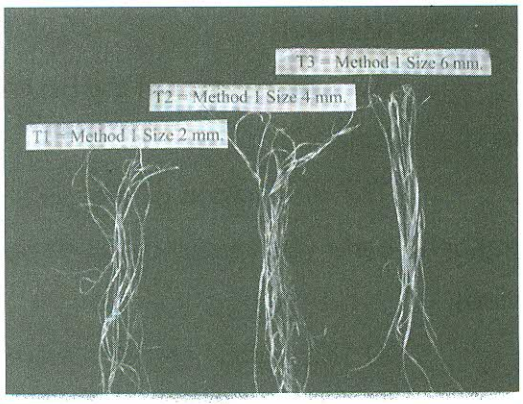


Figure 2 The paper mulberry strips in three sizes width for the modified hemp spinning method

2) Preparation of the paper mulberry fibers for the modified cotton spinning method: First the inner barks in three sizes length; 3.5 cm, 5 cm and 6.5 cm, were cut off and separated into bundle fibers (approximately 13 tex) by hand, as shown in Figure 3.

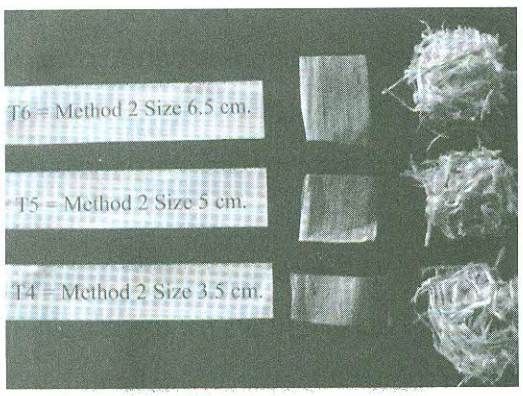


Figure 3 The paper mulberry fibers in three sizes length for the modified cotton spinning method

3.2.3 Spinning of the Paper Mulberry Yarns

1) The modified hemp spinning method (MH):

This spinning method was developed by modifying the hemp spinning method widely used in the Northern part of Thailand. This method was tested using three sizes of paper mulberry bark strips: 2 mm, 4 mm, and 6 mm. The process consisted of four steps as follows:

a) The bark strips were pounded for three hours to further soften and affine the strips and remove lignin.

b) The bark strips were joined to make continuous fiber strips using the Northern Thai traditional hand method for hemp (twisting).

c) The fiber strips were hand spun to make continuous yarn.

d) The yarn was boiled to remove lignin, finish and soften the yarn.

2) The modified cotton spinning method (MC):

This spinning method was modified from the traditional hand spinning method of cotton yarn, which is widely used in the Northeast of Thailand. This method was tested using three fiber

lengths: 3.5 cm, 5 cm and 6.5 cm. The process consisted of three steps as follows:

a) Fibers were cleaned or scotched in water to soften and increase the fineness of the bundle fibers.

b) Bundle fibers were rolled to make a long strand of a sliver using the Northeast Thai traditional hand method for cotton.

c) Fibers were spun to form a yarn by a combination of drawing or drafting and twisting the prepared strands of fiber. A spinning wheel was used to mechanize the spinning process, and the rollers were used to draft the fiber bundle and rotate the spindle.

3.2.4 Testing of the Paper Mulberry Yarns

The characteristics and physical properties of the paper mulberry yarns were determined according to the ASTM standard testing methods [10] as follows:

1) Yarn count was tested according to the ASTM D1059-01 Standard Test Method for Yarn Number Based Short-Length Specimens.

2) Yarn twist was tested according to the ASTM D1423 - 02 Standard Test Method for Twist in Yarn by Direct-Counting.

3) Yarn appearance was determined using an electron microscope and according to the ASTM D2255-02 Standard Test Method for Grading Spun Yarns for Appearance.

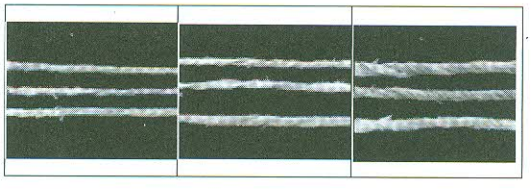
4) Yarn breaking strength and elongation were tested using an Instron Tensile Tester according to the ASTM D 2256-02 Standard Test Method for Tensile Properties of Yarns by the Single-Strand Method.

4. Research findings and discussions

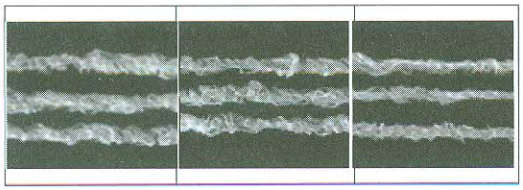
4.1 The Characteristics of the Paper Mulberry Yarns

Six yarns obtained from two spinning methods were investigated in two aspects of characteristics as follows:

4.1.1 The longitudinal view of the paper mulberry yarns



(a) (b) (c)

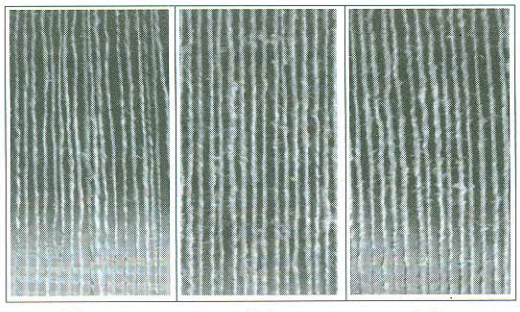


(d) (e) (f)

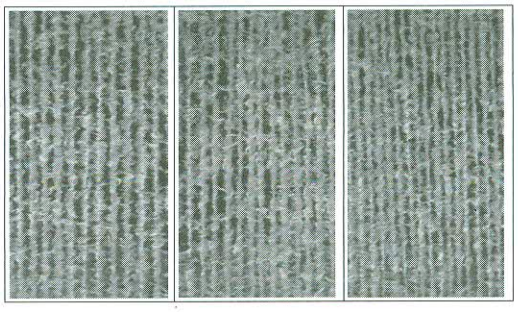
Figure 4 Longitudinal view of the yarn spun by different methods: (a) modified hemp (MH) with 2 mm strips, (b) modified hemp (MH) with 4 mm strips, (c) modified hemp (MH) with 6 mm strips, (d) modified cotton (MC) with 3.5 cm fibers, (e) modified cotton (MC) with 5 cm fibers, and (f) modified cotton (MC) with 6.5 cm fibers.

Figure 4 shows that the MH method could produce much smoother yarns than the MC method, therefore, the MH method should be more suitable for producing warp yarns. In contrast, the yarns produced from the MC method had a more fuzzy and rough texture. They looked like novelty yarns, therefore, the MC method should be more suitable for producing filling yarns.

4.1.2 The evenness of the paper mulberry yarn



(a) (b) (c)



(d) (e) (f)

Figure 5 The evenness of the paper mulberry yarns spun by different methods: (a) modified hemp (MH) with 2 mm strips, (b) modified hemp (MH) with 4 mm strips, (c) modified hemp (MH) with 6 mm strips, (d) modified cotton (MC) with 3.5 cm fibers, (e) modified cotton (MC) with 5 cm fibers and (f) modified cotton (MC) with 6.5 cm fibers.

Figure 5 shows that the paper mulberry yarns spun by the MH methods, (a), (b) and (c) were uneven in texture, which could be classified as grade C level, whereas the yarns spun by the MC methods, (d), (e) and (f) were more fuzzy and uneven in texture. As a result, they were classified as below grade D level. The paper mulberry yarns had some texture. Therefore, it might be suitable for household fabrics.

4.2 Physical Properties of the Paper Mulberry Yarns

The study investigated the following aspects of the yarn's physical properties:

yarn count, yarn twist, yarn breaking strength and elongation. The ASTM standard test methods were used. The results are shown in Table 1 - 4 as follows:

4.2.1 Yarn count

Table 1 Means of yarn count of the paper mulberry yarns produced by different spinning methods.

Yarn Spinning Methods	Yarn Count (tex)	
	$\overline{X}$	S.D.
MH with 6 mm strips	1683.88[a]	13.44
MH with 4 mm strips	1310.14[b]	10.52
MC with 3.5 cm fibers	1271.70[bc]	4.96
MC with 5 cm fibers	1150.68[c]	16.90
MC with 6.5 cm fibers	1022.78[d]	18.12
MH with 2 mm strips	963.48[d]	14.00

Different alphabets indicate statistical difference at the .05 level

From Table 1, the data show that the yarn spun by MH method with 6 mm strips was the heaviest followed by the yarn spun by the MH method with 4 mm strips. Meanwhile, the yarn spun by the MH method with 2 mm strips was the smallest. All of the paper mulberry yarns produced, however, were classified as heavy yarns [11]. Therefore, those yarns can be used for home textiles such as floor covering fabrics. In a further study, it would be interesting to experiment with smaller yarns. The six different methods tended to produce yarns with different counts. Variation analysis of the means yarn count revealed that different spinning methods resulted in different yarn count at the .01 level.

The result of Least Significant Ranges (LSR) analysis to measure the mean difference of yarn count of the yarns spun by different methods showed that the count of the yarn spun by the MH method with 6 mm strips was statistically higher than those of the others at the .05 level. The count of the yarn spun by the MH method with 4 mm strips was statistically higher than those of the yarns spun by the MC methods with 5 and 6.5 cm fibers and that of the yarn spun by the MH method with 2 mm strips at the .05 level. The count of the yarns spun by the MC methods with 3.5 cm and 5 cm fibers were statistically higher than that of the yarn spun by the MC method with 6.5 cm fibers and that of the yarn spun by the MH method with 2 mm strips at the .05 level.

4.2.2 Yarn twist

Table 2 Means of yarn twist of the paper mulberry yarns produced by different spinning methods

Yarn Spinning Methods	Yarn Twist (turns/inch)	
	$\overline{X}$	S.D.
MC with 3.5 cm fibers	10.80[a]	.84
MC with 5 cm fibers	9.80[b]	.84
MC with 6.5 cm fibers	8.80[c]	.45
MH with 2 mm strips	5.60[d]	.89
MH with 6 mm strips	5.00[d]	.71
MH with 4 mm strips	4.60[d]	.55

Different alphabets indicate statistical difference at the .05 level

From Table 2, the data show that the yarn spun by the MC method with 3.5 cm fibers had the highest yarn twist followed by the yarn spun by the MC method with 5 cm fibers. In contrast, the yarn spun by the MH method with 4 mm strips had the lowest yarn twist. All yarns were classified as low twist ones. Therefore they should be used for home textiles such as certain and upholstery fabric. The six different methods tended to produce yarns with different twist. Variation analysis of the means yarn twist revealed that different spinning methods resulted in different yarn twist at the .01 level.

The result of Least Significant Ranges (LSR) analysis to measure the mean difference of yarn twist of the yarns spun by different methods indicated that the MC method with 3.5 cm fibers produced the highest yarn twist and was statistically higher than the others at the .05 level. The twist of the yarn spun by the MC method with 5 cm fibers was statistically higher than that of the yarn spun by the MC method with 6.5 cm fibers, and those of the yarns spun by the MH methods with 2 mm strips, 6 mm strips and 4 mm strips at the .05 level. The twist of the yarn spun by the MC method with 6.5 cm fibers was statistically higher than those of the yarns spun by the MH methods with 2 mm strips, 6 mm strips and 4 mm strips at the .05 level.

4.2.3 Yarn breaking strength

Table 3 Means of yarn breaking strength of the paper mulberry yarns produced by different spinning methods

Yarn Spinning Methods	Yarn Breaking Strength (cN/tex)	
	$\overline{X}$	S.D.
MH with 6 mm strips	551.06[a]	12.67
MH with 4 mm strips	352.71[b]	5.52
MH with 2 mm strips	264.22[c]	17.40
MC with 5 cm fibers	83.44[d]	11.64
MC with 6.5 cm fibers	66.39[de]	8.62
MC with 3.5 cm fibers	36.14[e]	6.90

Different alphabets indicate statistical difference at the .05

From Table 3, the data show that the paper mulberry yarn spun by the MH method with 6 mm strips had the highest breaking strength followed by the yarn spun by the MH method with 4 mm strips. On the other hand, the paper mulberry yarn spun by the MC method with 3.5 cm fibers had the lowest breaking strength. The yarns spun by the MH methods had higher breaking strength than the yarns spun by the MC methods because the MH method utilized long fiber spinning, whereas the MC method utilized short fiber spinning. These different spinning methods resulted in different breaking strength of the yarn. Therefore, those yarns can be used for technical textiles such as reinforce fabric for construction and home textiles such as floor covering and upholstery fabrics. On the other hand, the paper mulberry yarns spun by the MC methods had low breaking strength, therefore they should be used for home textiles. The six different methods tended to produce yarns with different breaking strength. Variation analysis of the means yarn breaking strength revealed that different spinning methods resulted in different yarn breaking strength at the .01 level.

The result of Least Significant Ranges (LSR) analysis to measure the mean difference of breaking strength of the yarns spun by different methods revealed that breaking strength of the yarn spun by the MH method with 6 mm strips was statistically higher than the others at the .05 level. The breaking strength of the yarn spun by the MH method with 4 mm strips was statistically higher than those of the yarns spun by the MH method with 2 mm strips, and the MC methods with 5 cm fibers, 6.5 cm fibers and 3.5 cm fibers at the .05 level. The breaking strength of the yarns spun by the MH method with 2 mm strips was statistically higher than those of the yarns spun by the MC methods with 5 cm fibers, 6.5 cm fibers and 3.5 cm fibers at the .05 level. The yarn spun by the MC method with 5 cm fibers was statistically higher than that of the yarn spun by the MC methods with 3.5 cm fibers at the .05 level.

4.2.4 Yarn elongation

Table 4 Means of yarn elongation of the paper mulberry yarns spun by different spinning methods.

Yarn Spinning Methods	Yarn Elongation (%)	
	$\overline{X}$	S.D.
MH with 6 mm strips	25.36[a]	.40
MC with 5 cm fibers	19.41[b]	.70
MC with 6.5 cm fibers	17.80[c]	.91
MH with 4 mm strips	17.07[c]	.89
MC with 3.5 cm fibers	14.05[d]	.91
MH with 2 mm strips	13.33[d]	.63

Different alphabets indicate statistical difference at the .05 level

From Table 4, the data show that the yarn spun by the MH method with 6 mm strips had the highest elongation followed by the yarn spun by the MC method with 5 cm fibers. Meanwhile, the yarn spun by the MH method with 2 mm strips had the lowest elongation. In terms of yarn elongation. These yarns should be used for home textiles such as interior decoration and upholstery fabrics. The jute fibers is also a bast fiber. Their properties are hairy and generally rough. It is used for making gunny bags and cords [12]. The six different methods tended to produce yarns with different elongation. Variation analysis of the means yarn elongation revealed that different spinning methods resulted in different yarn elongation at the .01 level. The result of Least Significant Ranges (LSR) analysis to measure the mean difference of yarn elongation of the yarns spun by different methods revealed that elongation of the yarn spun by the MH method with 6 mm strips was statistically higher than those of the others at the .05 level. The elongation of the yarn spun by the MC method with 5 cm fibers was statistically higher than those of the yarns spun by the MC method with 6.5 cm fibers, the MH method with 4 mm strips, the MC method with 3.5 cm fibers and the MH method with 2 mm strips at the .05 level. The elongation of the yarns spun by the MC method with 6.5 cm fibers and the MH method with 4 mm strips were statistically higher than those of the yarns spun by the MC method with 3.5 cm fibers and the MH method with 2 mm strips at the .05 level.

5. Conclusions

In this research, it was found that the paper mulberry fibers could be spun into yarns by the two methods developed: the modified hemp spinning method (MH) and the modified cotton

spinning method (MC). As a result, the MH methods could produce much smoother yarns than the MC methods. In contrast, the yarns spun by the MC methods were more fuzzy and rough. Most of the MH methods produced the yarns with higher breaking strength while the yarns spun by the MC methods had higher yarn twist. Moreover, the yarns spun by different methods statistically had different yarn count, yarn twist, yarn breaking strength and yarn elongation at the .01 level. From this research, it could be concluded that more value can be added to paper mulberry production. Consequently, it could be concluded that based on the characteristics and properties of the produced paper mulberry yarns, they could be used for producing the home textile and technical textile products.

6. Recommendations

The paper mulberry fiber could be spun into yarns by hand spinning methods that were fuzzy and heavy in size. They should be used for home textiles. Therefore, in a further study, it would be interesting to investigate the yarn spinning with a spinning machine used in the textile industry.

The materials used for this study were the inner barks of paper mulberry between 6 to 12 months old. The yarns obtained were coarse and strong. Therefore, in a further study, it would be interesting to study the younger paper mulberry tree in order to make finer and softer yarns.

7. Acknowledgment

I would like to gratefully thank Rajamangala University of Technology Thanyaburi for supporting the scholarship in this research and Mae Fah Luang Foundation for providing materials.

8. References

[1] Whistler, W.A. and C.R. Elevitch. **Paper mulberry.** [online] Available: http://traditionaltree.org (April 03, 2007).

[2] Cong, X., H. Wen and Z. Riu. 2006. **The Wood Characteristic and Pulping Performance of Plantation Paper Mulberry.** China Pulp & Paper. 09: 1.

[3] Punsuvon, V. and Y.Kobayashi. n.d. Steam Explosion Pulping Paper Mulberry Bast. **The Research Project for Higher Utilization of Forestry and Agricultural Plant Materials in Thailand (HUFA),** Kasetsart Agricultural and Agro-industrial Product Improvement Institute (KAPI), Kasetsart University, Bangkok, Thailand.

[4] Ujjin, S., S. Niyom, S. Supawadee, S. Prisnar and V. Haruthaithanasan. 2000. Postharvest Technology of Paper Mulberry Bark, pp. 57-67. **In Proceeding of the 38th Kasetsart University Annual conference,** 1-4 February 2000, Kasetsart University, Bangkok Thailand.

[5] Taylor, M.A. 1997. **Technology of Textile Properties. 3rd ed. Forbes Publications Ltd.,** London, England.

[6] Lei, J., L. Sheng, K. YANG, Z. Yi and Z. Chun. 2007. **Analyses on Chemical Composition Fiber Morphology and Pulping Properties of Broussonetia papyrifera Bark Produced in Dry-hot Valley of the Jinshajiang River.** Advanced Materials Research. 68-69: 357-360.

[7] Sittidilokratna, C., S.Suthirawut, L. Chitradon, V. Punsuvon, P. Vaithanomsat and P. Siriacha. 2007. **Screening of Pectinase Producing Bacteria and Their Efficiency in Biopulping of Paper Mulberry Bark. Science Asia.** 33: 131-135.

[8] Liu ,L., J. Cao, J. Huang, Y. Cai and J. Yao. 2010. **Extraction of pectins with different degrees of esterification from mulberry branch bark.** Bioresource Technology. 101: 3268–3273.

[9] Chonsakorn S. 2014. **Characteristics and Properties of Paper Mulberry Yarn and Fabric. Doctor of Philosophy (Tropical Agriculture) Thesis.** Kasetsart University

[10] ASTM International. 2005. **Standard Test Methods for Testing and Materials. ASTM Standards Book of Standard.** vol. 07.01: D 76-D 4391.

[11] Collier, B.J. and H.H. Epps. 1999. **Textile Testing and Analysis. Merrill, an imprint of Prentice Hall, Inc.,** New Jersey, U.S.A.

[12] Home Science. **Function of Clothing and Household Uses of Fabrics.** [online] Available : http://nios.ac.in (22 November 2015).

Equalization of Chrominance Gain Distortion Using Bernstein Polynomials

Kanok Janchitrapongvej[1] Chaipichit Cumpim[1] Pongpan Rattanathanawan[1]
and Virote Pirajnanchai[2]

Abstract

This paper describes the design of linear chrominance gain slope equalizer for correcting the distortions in the video signal as they pass through the system under test. By the used of Fourier series, it is shown that the linear gain slop equalizer can be used to correct the linear chrominance gain inequality of the color subcarrier frequency at 4.43 MHz. As the results, it is seen that the proposed gain slope equalizer with linear phase characteristic whose amplitude characteristic has a linear rise or a steep drop in the color video frequency region. The approximated transfer function of linear gain slope is based on Bernstein polynomials. In addition, the composite modulated 20T sine squared pulse was chosen to investigate the performance of the proposed gain slope equalizer. Moreover, Mikhailov's criteria for stability test is considered.

Keywords: Bernstein Polynomials, Linear Chrominance Gain, Modulated 20T Sine-Squared Pulse, Mikhailov's criteria.

[1] Department of Industrial Management Technology, Faculty of Science and Technology, Southeast Bangkok College. Bangkok

[2] Department of Electronics and Telecommunication, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi. Pathumthani

1. Introduction

The linear distortion in a color video waveform transmission is best investigated by considering the distortion of the composite modulated 20T sine-squared pulse [1,2]. As it is known, the performance of transmission systems of a color television picture quality is usually evaluated by means of amplitude and phase or group delay characteristics. In case of distorted transmission through the system under test, observation using oscilloscope can be used to measure the lower baseline of modulated 20T sine squared pulse are sufficient to determine the two distortions both gain and delay distortions.

In this paper, we focus on the equalization of linear chrominance gain distortion only. In the previous literature [3], a uniform distributed RC line (URC) was applied to analog amplitude equalizer. The used of URC has low sensitivity characteristic and can be fabricated in large scale integrated circuit. Unfortunately, the drawback of URC is its nonlinear phase characteristic which will cause the deteriorate of video signal. Hence, the insertion of group delay equalizer is needed.

In this paper, the design of linear chrominance gain slope equalizer based on Bernstein polynomial [4] is introduced. The proposed method can adjust both low gain and high inequalities at color sub-carrier 4.43 MHz without degrading the phase or group delay characteristic. Moreover, the paper introduced Mikhailov's criteria [5] for stability consideration.

The paper is organized as follows. In section 2, we describe the frequency response of chrominance gain slope and the calculated modulated sine squared response using Fourier series is presented in section 3. Section 4 describes the approximation of gain slope equalizer based on Bernstein polynomials. Section 5 describes the stability test and finally, the conclusion is given in section 6.

2. Frequency Response of Chrominance Gain Slope

In this section, the linear chrominance gain slope can be used to enhanced or compressed at color subcarrier 4.43 MHz in PAL system.

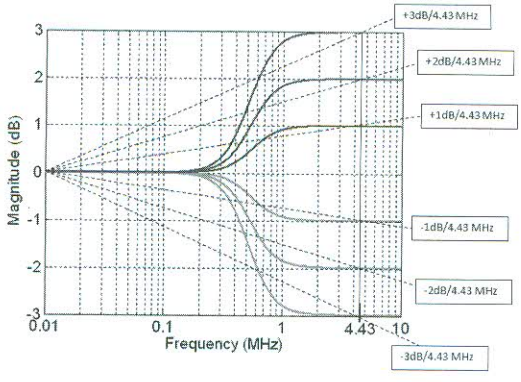


Fig.1. Amplitude distortion of transmission system.

Fig 1. shows the amplitude distortions occurred in the transmission system. Herein, the solid line and dash line shows the ideal and approximated linear gain slope of the high gain and low gain distortions of the chrominance signal respectively.

The amplitude gain slope equalizer is best suited in the vicinity within 3dB at 4.43 MHz.

3. Calculated modulated sine squared response of gain slope equalizer

The standard of composite modulated 20T sine-squared test pulse is given in Eq. (1)-(3) and it is illustrated in Fig. 2.

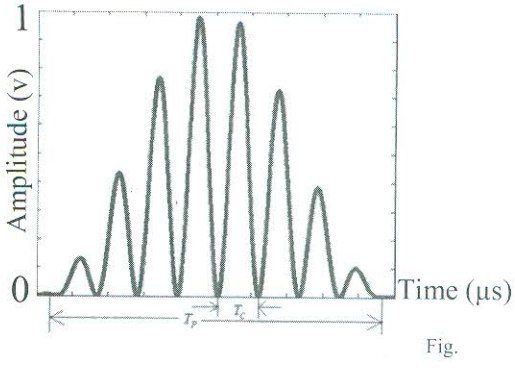


Fig. 2. Detail of 20T sine squared test signal

$$f_i(t) = 0.5\left[g(t) + g(t)\sin(\omega_c t)\right] \quad (1)$$

Where $g(t) = \sin^2\left(\frac{\pi t}{T_p}\right) \qquad |t| \le \frac{T_p}{2}$ (2)

Substitute Eq. (2) into Eq. (1) yields,

$$0.25\left[\{1-\cos(at)\} + \{1-\cos(at)\}\sin(\omega_c t)\right] \quad (3)$$

where

$$a = \frac{2\pi}{T_p}, \quad c = \frac{2\pi}{T_c}$$

T_c = 0.2257 μs, T_p = 4 μs

The output response of gain slope equalizer $f_o(t)$ is given as follows.

$$f_o(t) = \frac{a_o F_o}{2} + \sum_{k=1}^{N_{max}} F_k\left[a_k\cos(k\omega t) + b_k\sin(k\omega t)\right] \quad (4)$$

$$a_k = \frac{2}{T_p}\int_o^{T_p} f_i(t)\cos(k\omega_p t)\,dt$$

$$b_k = \frac{2}{T_p}\int_o^{T_p} f_i(t)\sin(k\omega_p t)\,dt \quad (5)$$

where $N_{max} = \frac{4}{0.2257} \simeq 18$

F_k : discrete gain slope

where $F_k = 10^{2.257\times10^{-5}\alpha k}$

And α is the desired gain at 4.43 MHz. The Fourier coefficient is obtained as follows;

$$a_k = \frac{1}{2T_p}\left[\begin{array}{l} \dfrac{\sin(akT_p)}{ak} - \dfrac{\left[\cos\{(c+ak)T_p\}\right]-1}{2(c+ak)} \\ + \dfrac{\left[\cos\{(c+ak)T_p\}\right]-1}{2(c+ak)} - \dfrac{\sin(1+k)aT_p}{2(1+k)a} \\ - \dfrac{\sin(k-1)aT_p}{2(k-1)a} + \dfrac{\left[\cos\{(1+k)a+c\}T_p\right]-1}{4(1+k)a+c} \\ - \dfrac{\left[\cos\{(1+k)a-c\}T_p\right]-1}{4(1+k)a-c} \\ + \dfrac{\left[\cos\{(k-1)a+c\}T_p\right]-1}{4(k-1)a+c} \\ - \dfrac{\left[\cos\{(1-k)a+c\}T_p\right]-1}{4(1-k)a+c} \end{array}\right]$$

where $\frac{a_0}{2} = 0.25$

$$b_k = \frac{1}{2T_p}\left[\begin{array}{l} \dfrac{1-\cos(akT_p)}{ak} + \dfrac{\left[\cos\{(1+ak)T_p\}\right]-1}{2(c+ak)} \\ + \dfrac{\left[\cos\{(k+1)aT_p\}\right]-1}{2(k-1)a} - \dfrac{\sin(c+ka)T_p}{2(c+ak)} \\ + \dfrac{\sin\{(k+1)a-c\}T_p}{4\{(k+1)a-c\}} - \dfrac{\left[\sin\{(1-K)a+c\}T_p\right]}{4(1+k)a+c} \\ - \dfrac{\left[\sin\{(k+1)a+c\}T_p\right]-1}{4(1+k)a-c} \\ + \dfrac{\left[\cos\{(k-1)a+c\}T_p\right]-1}{4(k-1)a+c} \\ - \dfrac{\left[\cos\{(1-K)a+c\}T_p\right]}{4(k-1)a+c} \end{array}\right] \quad (6)$$

Substituting Eq. (6) into Eq. (4), thus the output response is plotted in Fig. 3.

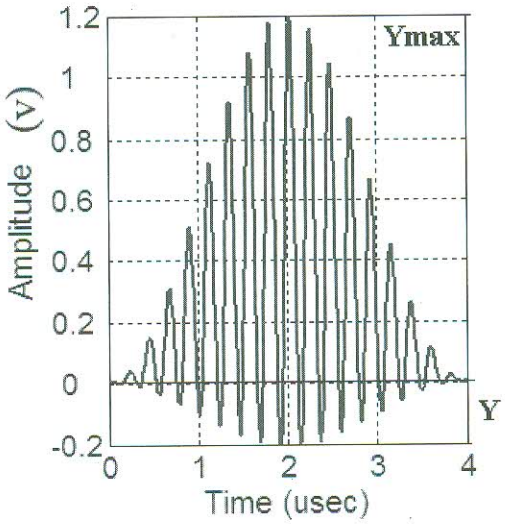


Fig. 3. The calculated output response with

α = +1dB

4. Chrominance Gain Slope Equalized

The Bernstein polynomial of nth order is given by [4].

$$(f;x) = \sum_{i=0}^{n} f\left(\frac{i}{n}\right)\binom{n}{i} x^i (1-x)^{n-i} \quad (7)$$

where f (x) is defined in the interval (0, 1). For where $\binom{n}{i} = \frac{n!}{i!(n-i)!}$

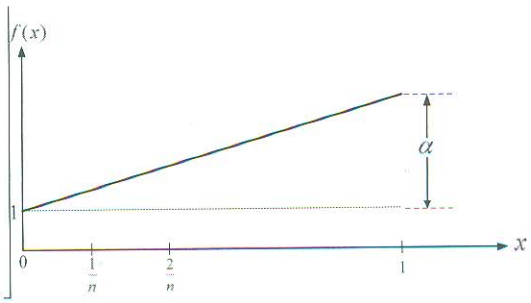


Fig. 4 Gain slop function

Considering the approximation of desired functions as shown in Fig. 4. The gain slope function can be approximated by using the Bernstein polynomials as follows

$$T_n(f;x) = \frac{1}{B_n(f;x)} = 1 + \alpha x \tag{8}$$

From Eq. (7) by means of Bernstein polynomials. We get

$$B_n(f;x) = \sum_{i=0}^{n} f\left(1+\alpha\frac{i}{n}\right)^{-1}\binom{n}{i}x^i(1-x)^{n-i} \tag{9}$$

From Eq. (9) using interval conversion [0, 1] transforms [0 ∞]to given as follows.

$$x = \frac{\Omega^2}{1+\Omega^2} \tag{10}$$

Hence, Eq. (9) can be rewritten as

$$B_n(f;x) = \sum_{i=0}^{n} f\left(1+\alpha\frac{i}{n}\right)^{-1}\binom{n}{i}\frac{\Omega^{2i}}{\left(1+\Omega^2\right)^n} \tag{11}$$

Herein, we choose the desired chrominance gain slope at +1dB where and the transfer function is 4th order. After some manipulation, the transfer function is obtained as follows

$$T(\Omega^2) = \frac{\Omega^8 + 4\Omega^6 + 6\Omega^4 + 4\Omega^2 + 1}{0.9\Omega^8 + 4.3\Omega^6 + 6.36\Omega^4 + 4.1\Omega^2 + 1} \tag{12}$$

The magnitude squared gain slope function from Eq. (12) in terms of s-domain is given by

$$T(-s^2) = \frac{1.125s^8 - 4.44s^6 + 6.66s^4 - 4.44s^2 + 1.112}{s^8 - 4.13s^6 + 7.06s^4 - 4.33s^2 + 1.112} \tag{13}$$

For the stability of the equalizer, we selected the poles on the left half side of s-plane. The gain slope equalizer transfer function is given by

$$T(s) = \frac{1.125\left(s^4 + 4s^3 + 6s^2 + 4s + 1\right)}{\left(s^2 + 0.832s + 1.966\right)\left(s^2 + 0.4402s + 0.5376\right)} \tag{14}$$

From Eq. (14), the magnitude and phase characteristics of high gain of the gain slope response of +1dB are plotted in Fig. 4 and Fig. 5 respectively.

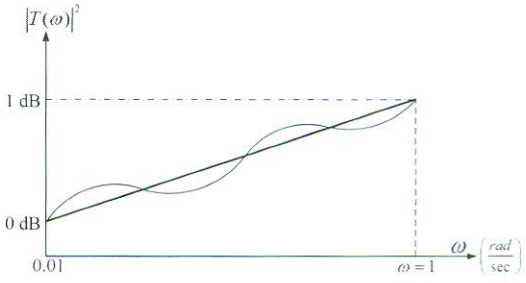


Fig. 5. Magnitude characteristics of the gain slope

In short, the proposed chrominance gain slope equalizer is efficient to correct the chrominance gain distortion without degrade its phase characteristics. It is seen that its phase difference has small partial phase variation in the specific frequency range.

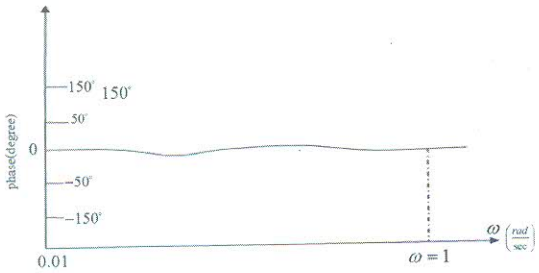


Fig. 6. Phase characteristics of the gain slope equalizer.

5. Stability consideration

It is easily seen that Bernstein polynomial given Eq. (15):

$$B_{k,n}(x) = \binom{n}{k} x^k (1-x)^{n-k} \qquad (15)$$

This function is non-negative over and interval $x \in (0,1)$. A recursive form of Bernstein polynomials can be written as

$$B_{k,n}(x) = \{(1-x)B_{k,n-1}(x)\} + \{(x)B_{k-1,n-1}(x)\} \qquad (16)$$

By induction, all Bernstein polynomials are non-negative for $0 \le x \le 1$. Hence, the poles of the proposed transfer function are lied on the left half of s-plane. The system is stable.

Other test conditions for checking the stability is the Mikhailov's criterion. Mikhailov stability criterion stable that an nth order polynomials be defined as

$$D(s) = a_0 + a_1 s + a_2 s^2 + \ldots + a_k s^k + a_n s^n \qquad (17)$$

where a_k are all positive real number. Substituting s = jω and separating into real and imaginary parts. Thus, Eq. (17) can be rewritten as

$$D(j\omega) = (a_0 + a_2\omega^2 + a_4\omega^4 + \ldots) + j(a_1\omega - a_3\omega^3 + \ldots)$$
$$D(j\omega) = u(\omega) + jv(\omega) \qquad (18)$$

The curve obtained as ω varies from 0 to ∞ with u (ω) as abscissa and are ordinate is called Mikhailov frequency characteristic of the polynomials D(jω). If D(jω) is stable, according to Mikhailov frequency characteristic starts from the real at ω = 0 and intersects the imaginary and real axis alternatively in the anticlockwise direction as ω is increased. Thus, the contour is encircle around the origin of D(jω). For example, the design gain slope equalizer is +1dB the denominator of the 4th order transfer function is given as

$$D(s) = s^4 + 1.2722s^3 + 2.8698s^2 + 1.3126s + 1.0569 \qquad (19)$$

and $$D(j\omega) = u(\omega) + jv(\omega) \qquad (20)$$

where $u(\omega) = 1.0569 - 2.8698\omega^2 + \omega^4$
$v(\omega) = 1.3126\omega - 1.2722\omega^3$

From Eq. (19) Mikhailov's hodograph is plotted in Fig. 7. Thus the proposed equalizer is stable.

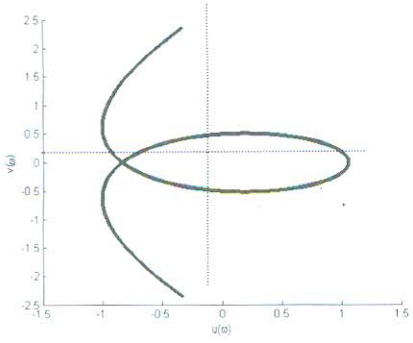


Fig. 7. Stability test of the given chrominance gain slope equalizer.

6. Conclusions

In section 3 shown that the linear chrominance gain can be applied to equalize the low gain and high gain at color sub-carrier 4.43 MHz in the vicinity with +1dB. Herein, the composite modulated 20T sine squared test signal in use for testing the performance by means of Fourier series technique.

The proposed gain slope chrominance equalizer is applied to enhance and compress of linear chrominance gain distortion by using Bernstein polynomials without degrading the delay characteristic. A realization of the proposed equalizer is stable, according to Mikhailov's criterion. The Mikhailov's criterion detail is given in section 5.

7. Acknowledgment

The authors acknowledge the support of Assistant Professor Dr. Wallaya Chupradist Vice President of Southeast Bangkok College for providing the atmosphere conductive to research.

References

[1] C. A. SIOCOS, **"Chrominance-to-Luminance Ratio and Timing Measurements in Color Television", IEEE Trans.** On Broadcasting, Vol. BC-14, 1988, pp. 1-4.

[2] P. WOLF, **"Modification of the Pulse-and-bar Test Signal with Special Reference to Application in Color Television",** Journal of the SMPTE, Vol. 75, 1966, pp. 15-19.

[3] K. Janchitrapongvej et al, **"Capacitive Double Layers Uniformly Distributed RC Line and Its Applications to Active Filters",** IEEE Region 10 International Conference TENCON, Vol. 2, 2000, pp. 23-25.

[4] G. G. Lorentz, **"Bernstein polynomials",** University of Toronto Press, 1953.

[5] V L. Pekař and R. Prokop, **"Stabilization of a Delayed System by a Proportional Controller"**, International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences, Vol. 4, Issue 4, 2010, pp. 282-290.