



วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลัญบุรี

คณะกรรมการจัดทำวารสาร วิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลัญบุรี

คณะกรรมการที่ปรึกษา

อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลัญบุรี
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและวิจัย
คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

กองบรรณาธิการ

ศ.(พิเศษ) อัจฉราพร ไชยะสุต
ศ.ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ
รศ.ดร.สุธี อักษรกิตติ
รศ.ดร.เข้มชัย เหมะจันทน์
รศ.ดร.ศิริวรรณ ศรีสรณ์
รศ.ดร.กัณวรัช พลุปราชญ์
รศ.ดร.ธำรงรัตน์ มุ่งเจริญ
รศ.ณรงค์ บวบทอง
ผศ.ดร.สมเจตน์ พชรพันธ์
ผศ.ดร.ปฐมทัศน์ จิระเดชะ
ผศ.ดร.อังคณา พันธุ์หล่อ
ดร.ชัชวาลย์ สุรัสวดี
ผศ.ดร.ศิวกร อ่างทอง
รศ.ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์
ผศ.ดร.จักรี ศรีนนท์ฉัตร
ผศ.สมศักดิ์ แก่นทอง
ดร.สุนมาลย์ เนียมกลาง

166 ซ.อาคารสงเคราะห์ ถ.พิชัย เขตดุสิต กรุงเทพฯ 10300
ศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
คณะกรรมการบริหาร มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)
วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต
52/14 ถ.พหลโยธิน 45 แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลัญบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลัญบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลัญบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลัญบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลัญบุรี

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

ดร.ปรกษ สิริสุวัฒน์

เลขานุการ

นางสาวอมรรรัตน์ ยิ้มอยู่

ผู้ช่วยเลขานุการ

นายอัศชนะ คูเจริญไพบูลย์

ผู้ดูแลระบบงานเทคโนโลยีสารสนเทศ

นายพัฒนพงศ์ สุนันทพจน์



วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมณฑลชัยภูมิ

บรรณาธิการ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมณฑลชัยภูมิ ได้จัดทำวารสารทางวิชาการด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสืบเนื่องมาเป็นระยะเวลา 16 ปี โดยเปิดรับการตีพิมพ์บทความที่หลากหลายประเภท ทั้งทางด้านวิจัย สิ่งประดิษฐ์ และนวัตกรรมทางสาขาวิศวกรรมศาสตร์ ซึ่งรองรับ นักศึกษา คณาจารย์ นักวิจัย บุคลากรทั่วไป ทั้งภายในและภายนอกมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมณฑลชัยภูมิที่ต้องการตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานวิจัยและผลงานวิชาการให้เป็นที่รู้จักอย่างแพร่หลาย

กองบรรณาธิการขอขอบพระคุณคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความทางวิชาการ วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมณฑลชัยภูมิ ทุกท่าน ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์พิจารณาบทความอีกทั้งให้ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขเนื้อหาบทความต่างๆ ให้มีความถูกต้องและเป็นไปตามหลักวิชาการอย่างเสมอมา

และขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ขวลิต แสงสวัสดิ์ ที่ได้อุทิศตนเพื่อควบคุมดูแลการตีพิมพ์บทความวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมณฑลชัยภูมิ ให้มีคุณภาพและเป็นที่รู้จักอย่างกว้างขวางมาเป็นระยะเวลา 15 ปี จนถึงวาระเกษียณอายุราชการในปี พ.ศ. 2560

ทำนบกองบรรณาธิการ หวังเป็นอย่างยิ่งว่าวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมณฑลชัยภูมิ จะให้ความรู้ที่หลากหลายและเป็นประโยชน์ต่อผู้อ่านทุกท่าน โดยกองบรรณาธิการจะยังคงพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพการตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานวิจัยและวิชาการด้านวิศวกรรมศาสตร์ ให้มีความเข้มข้นยิ่งขึ้นไป

กองบรรณาธิการ

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิผู้พิจารณาบทความ

รศ.ดร.วันชัย ธิวัณชัย	คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.เข้มชัย เหมะจันทร์	คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.อุษา แสงวัฒนาโรจน์	คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.สิริวรรณ กิตติเนาวรัตน์	คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผศ.ดร.ชิดชนก มีใจเชื้อ	คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ผศ.ดร.ทวีชัย สำราญวานิช	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
ผศ.ดร.อาทิตย์ โสทรโยม	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม
รศ.ดร.จงจิตร ผลประเสริฐ	คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
ผศ.ดร.อังคณา พันธุ์หล่อ	วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต
รศ.วิชัย ฉัตรทิพวัฒน์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผศ.ดร.ธีระพงษ์ ว่องรัตนะไพศาล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผศ.ศิระ อัจฉริยวิริยะ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผศ.ดร.พนมกร ขาวทอง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร.อิสสรีย์ หาราชเจริญโรจน์	อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.บรรยงค์ รุ่งเรืองด้วยบุญ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
รศ.ดร.เจียรนัย เล็กอุทัย	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
รศ.ดร.กัมมวรัช พูลปราชญ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)
รศ.ดร.ศิริวรรณ ศรีสรณ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)
รศ.ดร.เวทิน ปิยรัตน์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)
ผศ.ดร.นำคุณ ศรีสนิท	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)
ผศ.ดร.ปฐมทัศน์ จิระเดชะ	สถาบันยุทธศาสตร์ทางปัญญาและวิจัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ดร.สาธิต พุทธิชัยมงคล	อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผศ.ดร.ปทุมทิพย์ ปราบพาล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ดร.ประเทืองทิพย์ ปานบำรุง	คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ศ.ดร.ก้องกิติ พุสสวัสดิ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
รศ.ดร.เพ็ญจิตร ศรีนพคุณ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
รศ.วัชรินทร์ วิทยกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
รศ.ดร.ดำรงรัตน์ มุ่งเจริญ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
ผศ.ดร.สมเจตน์ พิชรพันธ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
รศ.สิริ ชัยเสรี	คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
รศ.ดร.วรารุณ วุฒินิชย์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน
รศ.ดร.ธัญญา นิยมภา	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน
รศ.ดร.วิบูลย์ ชื่นแขก	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.ดร.สมิตร ส่งพิริยะกิจ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รศ.สมเกียรติ จงประสิทธิ์พร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ผศ.ดร.สมประสงค์ ภาษาประเทศ
ผศ.ดร.อภิชาติ สนธิสมบัติ
ผศ.ดร.สุนัน ปานสาคร
ผศ.ดร.จักรี ศรีนนท์ฉัตร
ผศ.ดร.สุรินทร์ แห่งมงาม
ผศ.ดร.จิรวัดน์ คชสาร
ผศ.ดร.อนันท์ วัลภา
ผศ.ดร.ไพฑูรย์ รักเหลือ
ผศ.ดร.ศุภวิทย์ ลวณะสกล
ผศ.ดร.พุทธพล ทองอินทร์ดำ
ผศ.ดร.บุญฤทธิ์ ประสาธแก้ว
ผศ.สุรัตน์ ตริยวนพงศ์
ผศ.ดร.จินดารัตน์ มณีเจริญ
ผศ.ดร.วีระศักดิ์ ละอองจันทร์
ผศ.ดร.มนูศักดิ์ จานทอง
ผศ.ดร.ปรัชญา เปรมปรามณีรัชต์
ผศ.ดร.ระพี กาญจนะ
ผศ.ดร.ศุภลลิตี พงศ์ศิวัสถ์
ดร.มาโนช รุจิการ
ดร.ฐนียา รังษีสุริยะชัย
ดร.จตุพล ตั้งปกาศิต
ดร.ฉัตรชัย ศุภพิทักษ์สกุล
ดร.กุลยา สาริชีวิน
ดร.บุญชัย ผึ้งไผ่งาม
อาจารย์วีระพงษ์ ครูส่ง
ผศ.ดร.เจริญ เจริญชัย
ดร.นิธิวัฒน์ ชูสกุล
ดร.สนธยา ทองอรุณศรี
ดร.นเรศ อินตะวงศ์
ผศ.ดร.เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย
รศ.ดร.ยุทธชัย บรรเทงจิตร
ดร.ประธาน วงศ์ศรีเวช
รศ.จิราภรณ์ เบญจประกายรัตน์

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

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

การประเมินสมรรถนะการทำงานของรถคืบอ้อย

Performance Evaluation of Sugarcane Grab Loader

รุ่งเรือง กาลศิริศิลป์¹ อิศราภรณ์ เนตรภักดี² จตุรงค์ ลังกาพินธุ์³
Roongruang.k@en.rmutt.ac.th¹, i.nadpakdee@gmail.com², Jaturong.L@en.rmutt.ac.th³

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยเรื่อง การทดสอบสมรรถนะและประสิทธิภาพการทำงานของรถคืบอ้อย มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบประเมินผล การทำงานของรถคืบอ้อยและวิเคราะห์ความเหมาะสมเชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม โดยรถคืบอ้อยที่ทดสอบในงานวิจัยนี้ เป็นชนิดติดตั้งบนรถแทรกเตอร์แบบคืบด้านหน้า คืบด้านหลัง และรถคืบอ้อยแบบสามล้อ ค่าชี้ผลการศึกษาได้แก่ ความสามารถในการคืบอ้อย อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง เปอร์เซ็นต์สิ่งเจือปนในอ้อย จุดคุ้มทุน และระยะเวลาในการคืนทุน ผลการศึกษาพบว่าความสามารถในการคืบอ้อยเฉลี่ยของรถคืบอ้อยแบบคืบด้านหน้า คืบด้านหลังและแบบสามล้อ มีค่าเท่ากับ 30, 32 และ 39 ตันต่อชั่วโมง ตามลำดับ อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงของรถคืบอ้อยแบบคืบด้านหน้า คืบด้านหลังและแบบสามล้อ มีค่าเท่ากับ 14.8, 10 และ 11 ลิตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ เปอร์เซ็นต์สิ่งเจือปนที่ติดไปกับอ้อย มีค่าเท่ากับ 4, 3 และ 3 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ความเหมาะสมเชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมพบว่า จุดคุ้มทุนของรถคืบอ้อยแบบคืบหน้า แบบคืบหลัง และแบบสามล้อ มีค่าเท่ากับ 1,959, 2,005 และ 9,425 ตันต่อปี ตามลำดับ ค่าใช้จ่ายในการทำงานของรถคืบอ้อยแบบคืบหน้า แบบคืบหลัง และแบบสามล้อ เท่ากับ 36, 29 และ 32 บาทต่อตัน ตามลำดับ พิจารณาชั่วโมงการทำงานของรถคืบอ้อยที่ 500 ชั่วโมงต่อปี รถคืบอ้อยแบบคืบหน้า คืบหลัง และแบบสามล้อ จะมีระยะเวลาในการคืนทุน เท่ากับ 0.95, 0.91 และ 4.1 ปี ตามลำดับ

คำสำคัญ: สมรรถนะการทำงาน รถคืบอ้อย เปอร์เซ็นต์สิ่งเจือปน

^{1,3} อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

² นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเครื่องจักรกลเกษตร ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ABSTRACT

Research project entitled performance evaluation of sugarcane grab loader was aimed to study the working capacity and economic analysis of the machine. Three types of sugar cane grab loader were used in this study namely, front end loader, rear end loader and three wheels self-propelled grab loader, respectively. The key performance indicator were working capacity, fuel consumption, percent of the contaminants, break-even point and payback period. Based on the test results the working capacity of the three type of machine was 30, 32 and 39 ton/hr, respectively and the fuel consumption was 14.8, 10 and 11 l/hr, respectively. The percent contaminants was found to be 4, 3 and 3, respectively. The economic analysis showed that the break-even point of the machine was 1959, 2005 and 9425 tons/year, respectively. The operation cost of the machine was 36, 29 and 32 Baht/ton, respectively. Considering the working hour per year of the machine as 500, the payback period of the three type of machine was found to be 0.95, 0.91 and 4.1 year, respectively.

Keywords: working capacity, sugarcane grab loader, percent of contaminants

1. บทนำ

อ้อยโรงงานเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย ใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมน้ำตาลเพื่อใช้บริโภคในประเทศและส่งออก เดือนกรกฎาคม ปี 2559 ไทยมีการบริโภคน้ำตาลในประเทศ 2.32 ล้านตัน ส่งออก 4.43 ล้านตัน (มกราคม-กรกฎาคม 2559) [1] มูลค่าการส่งออกน้ำตาลทราย 90,098 ล้านบาท [2] อ้อยโรงงานมีแหล่งเพาะปลูกในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคกลาง และภาคเหนือของประเทศไทย ปี 2558/59 มีเนื้อที่เก็บเกี่ยว 11.01 ล้านไร่ ผลผลิต 100.78 ล้านตัน โดยมีแหล่งเพาะปลูกหลักอยู่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มีเนื้อที่เก็บเกี่ยว 4.78 ล้านไร่ คิดเป็นร้อยละ 42.98 ของเนื้อที่เก็บเกี่ยวทั่วประเทศ ผลผลิต 40.27 ล้านตัน คิดเป็นร้อยละ 39.96 ของผลผลิตทั่วประเทศ [3] ซึ่งในปัจจุบันมีความต้องการแรงงานในการตัดอ้อยมาก และค่าแรงงานในการขนย้ายจากแปลงขึ้นรถบรรทุก มีราคาสูง ทำให้เกษตรกรนิยมมาใช้รถคืบอ้อยมากขึ้น

การใช้รถคืบอ้อยในประเทศไทยนับว่ามีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางเพื่อทดแทนแรงงานคนที่ต้องนำอ้อยจากแปลงขึ้นสู่ รถบรรทุกเข้าสู่โรงงานรถคืบอ้อยที่นิยมใช้ในประเทศแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ รถคืบอ้อยแบบสามล้อ (three wheel self-propelled grab loader) รถคืบอ้อยแบบคืบหน้า (front end loader) และรถคืบอ้อยแบบคืบหลัง (rear end loader) (รูปที่ 1-3) โดยรถคืบอ้อยแบบสามล้อจะทำงานได้สะดวกรวดเร็ว มีความคล่องตัวในการทำงาน รถคืบอ้อยแบบคืบหน้าเป็นรถคืบที่ใช้ติดตั้งเข้ากับรถแทรกเตอร์ที่มีขนาดตั้งแต่ 65 แรงม้าขึ้นไป โดยมีชุดน้ำหนักรถไว้ด้านหลังเพื่อให้เกิดความสมดุลขณะคืบอ้อยขึ้นรถบรรทุก รถคืบอ้อยแบบคืบหลังเป็นการดัดแปลงรถแทรกเตอร์เพื่อติดตั้งชุดคืบอ้อย ในขณะที่ทำการคืบอ้อยพนักงานขับจะหันหน้าไปทางท้ายรถทำให้ทัศนวิสัยในการทำงานดีขึ้น ข้อเสียของการใช้รถคืบอ้อยได้แก่ การปนของวัสดุประเภทดิน ทราย หิน และใบอ้อยติดไปกับอ้อย

โรงงานด้วย ซึ่งถ้าพนักงานควบคุมรถขาดประสบการณ์ในการคีบอ้อย และคนงานตัดอ้อยรวมกองของลำอ้อยน้อยเกินไป (น้อยกว่า 200 ลำต่อกอง) ก็จะทำให้มีดิน หิน ทราาย หรือใบอ้อยติดไปเป็นจำนวนมาก ปริมาณดิน หิน หรือทราาย ที่ติดไปกับอ้อยเนื่องจากการใช้รถคีบอ้อย ก่อให้เกิดปัญหาใน ขั้นตอนการผลิตน้ำตาลทรายของโรงงานผลิตน้ำตาลทราย ในหลายๆ โรงงานทำให้ต้องสูญเสียเวลาไปกับการซ่อมแซมเครื่องจักร ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้เพื่อทดสอบและประเมินผลการทำงานของรถคีบอ้อยตลอดจนประเมินความเหมาะสมเชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมของรถคีบอ้อยที่ผลิตในประเทศไทย



รูปที่ 1 รถคีบอ้อยแบบสามล้อ



รูปที่ 2 รถคีบอ้อยแบบคืบหน้า

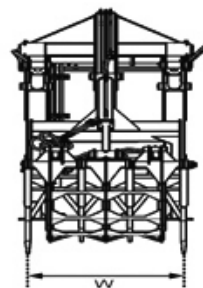


รูปที่ 3 รถคีบอ้อยแบบคืบหลัง

2. อุปกรณ์และวิธีการ

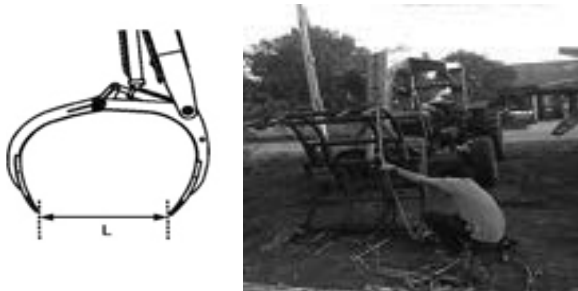
2.1 การวัดขนาดของรถคีบอ้อย

1. วัดส่วนประกอบสำคัญของเครื่องคีบอ้อย (แบบคืบหน้า) การวัดหน้ากว้างของปากคืบ ใช้ตลับเมตรวัดที่วัด ได้ละเอียด ไม่ต่ำกว่า 0.5 เซนติเมตร วัดระยะหน้ากว้างของปากคืบ โดยวัด ระยะจากขอบนอกของซี่คืบด้านซ้ายสุดจนไปถึงขอบนอกซี่คืบด้านขวาสุด ซึ่งตำแหน่งการวัดแสดงดัง รูปที่ 4



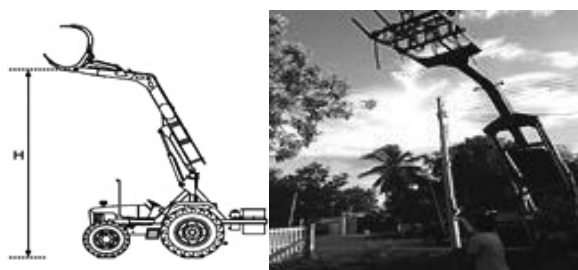
รูปที่ 4 วัดความกว้างของปากคืบ

2. การวัดระยะอ้าของปากคืบ อ้าปากคืบจนได้ระยะกว้างที่สุด ใช้ตลับเมตรที่วัดได้ละเอียด ไม่ต่ำกว่า 0.5 เซนติเมตร วัดระยะอ้าของปากคืบ โดยวัดระยะที่ไกลที่สุด ระหว่างปลายซี่ของปากคืบแต่ละข้างบนและล่าง ดังรูปที่ 5



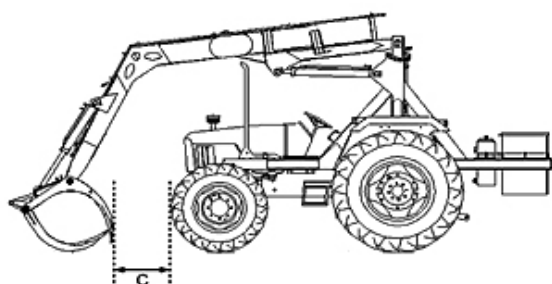
รูปที่ 5 วัดระยะอ้าของปากคืบ

3. การวัดระยะยกของแขนยก จอดเครื่องคืบอ้อยบนพื้นราบ ยกแขนยกจนกระทั่งได้ระยะยกสูงสุด ใช้ตลับเมตรวัดระยะของแขนยก โดยวัดจากจุดหมุนของปากคืบถึงจุดตั้งฉาก พื้นราบ ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 วัดระยะของแขนยก

4. การวัดระยะระหว่างปากคืบจนถึงล้อหน้า จอดเครื่องคืบอ้อยบนพื้นราบ ลดระดับแขนยกลงจนกระทั่งได้ระยะยกต่ำสุด ใช้ตลับเมตรวัดระยะยื่นของแขนยก โดยวัดจากส่วนหน้าสุดของรถแทรกเตอร์ถึงจุดหมุนปากคืบ รูปที่ 7



รูปที่ 7 วัดระยะยื่นของแขนยก

2.2 หาความสามารถในการคืบของปากคืบ

นำอ้อยซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 2.5 เซนติเมตร ความยาวไม่น้อยกว่า 2.5 เมตร คละกันจัดเรียงให้เป็นกองบนพื้นจำนวน 1 กอง ให้น้ำหนักลำอ้อยรวมทั้งกองไม่น้อยกว่า 500 กิโลกรัม ขับเคลื่อนเครื่องคืบอ้อยตามลักษณะการทำงานจริง คืบลำอ้อยจากกองที่เตรียมไว้ขึ้นซึ่งน้ำหนักลำอ้อยที่คืบได้ โดยใช้เครื่องชั่งที่ชั่งได้ละเอียดไม่ต่ำกว่า 1 กิโลกรัม ปฏิบัติซ้ำจำนวน 20 ครั้ง คำนวณหาค่าเฉลี่ยของน้ำหนักคืบ 20 ครั้ง

2.3 การวิเคราะห์หาสิ่งเจือปนในการคืบอ้อย

นำลำอ้อยซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 2.5 เซนติเมตร ความยาวไม่น้อยกว่า 2.5 เมตร คละกันจัดเป็นมัด จำนวน 1 มัด โดยที่น้ำหนักรวมของมัดลำอ้อยไม่น้อยกว่า 500 กิโลกรัม ขับเคลื่อนเครื่องคืบอ้อยตามลักษณะการทำงานจริง คืบอ้อยวางไว้บนผ้าใบทั้งหมด 3 กอง จากนั้นคืบอ้อยทั้ง 3 กองออกจากผ้าใบ ซึ่งน้ำหนักสิ่งเจือปนของแต่ละกอง คำนวณหาค่าเฉลี่ยสิ่งปนเปื้อนของทั้ง 3 กอง เพอร์เซ็นต์ความสะอาดของอ้อย สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1

$$Ps = \frac{Sc}{Sc + In} \times 100 \quad (1)$$

Ps = เพอร์เซ็นต์ความสะอาดของอ้อย (เปอร์เซ็นต์)

Sc = น้ำหนักอ้อยสะอาด (กิโลกรัม)

In = น้ำหนักสิ่งเจือปน เช่น ดิน ทราย เศษใบอ้อย (กิโลกรัม)

2.4 ทดสอบความสามารถในการทำงาน

นำลำอ้อยซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 2.5 เซนติเมตร ความยาวไม่น้อยกว่า 2.5 เมตร

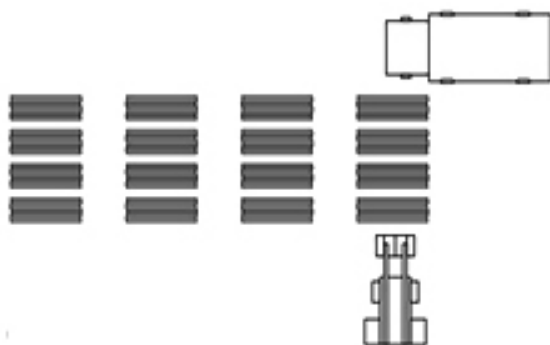
คละกัน จัดเป็นมัดจำนวน 1 มัด โดยที่น้ำหนักรวมของมัดล้าอ้อยไม่น้อยกว่า 500 กิโลกรัมขับเคลื่อนเครื่องคืบอ้อยตามลักษณะการทำงานจริงคืบกองอ้อยขึ้นรถบรรทุกทั้งหมด 4 กอง (รูปที่ 8) พร้อมกับจับเวลาทำซ้ำ จำนวน 3 รอบ คำนวณหาค่าเฉลี่ยในการคืบทั้งหมด 3 รอบ ความสามารถในการคืบ คำนวณได้จากสมการที่ 2

$$F_C = \frac{W}{T_A} \quad (2)$$

F_C = ความสามารถในการทำงาน (กก/ชม)

W = น้ำหนักอ้อยทั้งหมด (กก.)

T_A = เวลาในการทำงาน (ชม.)



รูปที่ 8 การคืบกองอ้อยตามลักษณะการทำงานจริง

2.5 วิเคราะห์ความเหมาะสมในการใช้งานเชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

วัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการทำงาน จุดคุ้มทุน และวิเคราะห์หาระยะเวลาในการคืนทุนของรถคืบอ้อย โดยมีวิธีการคำนวณดังนี้

1. ค่าเสื่อมราคา (Depreciation) คำนวณได้จากสมการที่ 3

$$D = \left(\frac{P - S}{L} \right) \quad (3)$$

D = ค่าเสื่อมราคา (บาท/ปี)

P = ราคาเครื่องจักร (บาท)

S = มูลค่าซาก (บาท)

L = อายุการใช้งาน (ปี)

2. ค่าดอกเบี้ย หรือค่าเสียโอกาสในการลงทุน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4

$$I = \left(\frac{P + S}{2} \right) \times i \quad (4)$$

I = ค่าดอกเบี้ย (บาท/ปี)

i = อัตราดอกเบี้ย (ทศนิยม)

3. ระยะเวลาในการคืนทุนของเครื่องจักร (Pay Back Period) เป็นการพิจารณาความคุ้มค่าในการลงทุนใช้เครื่องจักรในเชิงเวลาว่าจะได้รับผลตอบแทนคืนจากการลงทุนเทียบเท่ากับจำนวนเงินที่ลงทุนไปหาได้จากอัตราส่วนระหว่าง ราคาของเครื่องจักร ต่อ กำไรสุทธิเฉลี่ยต่อปีคำนวณได้จากสมการที่ 5

$$PBP = \left(\frac{P}{R} \right) \quad (5)$$

PBP = ระยะเวลาในการคืนทุน (ปี)

P = ราคาเครื่องจักร (บาท)

R = กำไรสุทธิต่อปี (บาท/ปี)

4. จุดคุ้มทุน (Break Even Point) เป็นการคำนวณหาชั่วโมงการทำงานที่เหมาะสมของรถคืบอ้อย ซึ่งจุดคุ้มทุนเป็นจุดที่ค่าใช้จ่ายในการทำงานของรถคืบอ้อยเท่ากับรายได้จากการรับจ้างทำงานของรถคืบอ้อย คำนวณได้จากสมการที่ 6

$$BEP = \left(\frac{F_C}{B - VC} \right) \quad (6)$$

BEP = จุดคุ้มทุน (ชม./ปี)
 F_C = ค่าใช้จ่ายคงที่ (บาท/ ปี)
 B = อัตราการรับจ้าง (บาท/ ชม)
 VC = ค่าใช้จ่ายผันแปร (บาท/ ชม)

3. ผลและการวิจารณ์

3.1 ผลการทดสอบการวัดขนาดของรถคืบอ้อย ดำเนินการทดสอบกับรถคืบอ้อยรุ่น FORD 6610 แบบคืบหน้า โดยทำการวัดระยะหน้ากว้างของปากคืบ (W) ระยะอ้าของปากคืบ (L) ระยะยกของแขนยก (H) ระยะระหว่างปากคืบ จนถึงล้อหน้า (C) แสดงผลใน ตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ขนาดของรถคืบอ้อยแบบคืบหน้า

รายการ	ผลการวัดระยะ (m)
ระยะหน้ากว้างของปากคืบ (W)	1.06
ระยะอ้าของปากคืบ (L)	1.5
ระยะยกของแขนยก (H)	5.3
ระยะระหว่างปากคืบจนถึงล้อหน้า (C)	1.35

การออกแบบระยะอ้าของปากคืบ (L) มีความสำคัญมาก การออกแบบระยะอ้าของปากคืบของรถคืบอ้อยที่เหมาะสม ไม่ควรน้อยกว่า 1 เมตร เพื่อให้หน้าหนักของอ้อยในการคืบแต่ละครั้งอยู่ในช่วงระหว่าง 700 – 800 กิโลกรัม เพื่อลดจำนวนครั้งของการคืบอ้อยขึ้นรถบรรทุก ซึ่งจะเป็นการช่วยลดปริมาณสิ่งเจือปนประเภท ดิน หิน และทรายที่จะติดไปกับอ้อยเข้าสู่กระบวนการผลิตในโรงงาน ซึ่งจะทำให้เครื่องจักรในกระบวนการผลิตเกิดการสึกหรอเร็วขึ้น และเป็นการช่วยลดปริมาณการสิ้นเปลือง

น้ำมันเชื้อเพลิงของรถคืบอ้อย ตลอดจนลดปัญหาการอัดแน่นของดิน (soil compaction) ที่เกิดขึ้นในแปลงอ้อยอันเนื่องมาจากจำนวนเที่ยวในการวิ่งของรถคืบอ้อยมากเกินไปจนความจำเป็น การออกแบบระยะยกของแขนยก (H) มีความสำคัญสำหรับการจัดเรียงอ้อยบนรถบรรทุก โดยปกติความสูงของกระบะสับล้อยสำหรับบรรทุกอ้อยประมาณ 3.5 เมตร ดังนั้นควรออกแบบระยะยกของแขนยก (H) ไม่น้อยกว่า 5 เมตร เพื่อความสะดวกในการจัดเรียงอ้อยบนรถสับล้อยซึ่งจะช่วยลดระยะเวลาในการทำงานของรถคืบอ้อยลงได้

3.2 การทดสอบความสามารถในการคืบของปากคืบ บันทึกน้ำหนักของอ้อยในแต่ละครั้งทำการทดสอบกับรถคืบอ้อยใช้กับรถแทรกเตอร์ FORD 6610 ดำเนินการทดสอบจำนวน 20 ครั้ง มีผลการทดสอบแสดงดัง ตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ความสามารถในการคืบและเวลาในการยกของรถคืบอ้อยแบบคืบหน้า

ข้อมูลต่างๆ	น้ำหนักของการคืบ (kg)	เวลาของการยก (s)
ค่าสูงสุด	810	22.2
ค่าต่ำสุด	643	15.1
ค่าเฉลี่ย	719.2	18.3
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	54.5	2.4

จากตาราง ผลการทดสอบ น้ำหนักยกอ้อยสูงสุดเท่ากับ 810 กิโลกรัม ค่าต่ำสุด 643 กิโลกรัม ค่าเฉลี่ยของน้ำหนักอ้อยในการ ยก 20 ครั้งมีค่าเท่ากับ 719.2 กิโลกรัม ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 54.5 กิโลกรัม

เวลาในการยกน้อยสุด 15.1 วินาที เวลาเฉลี่ยในการยก 20 ครั้งเท่ากับ 18.3 วินาที ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 2.4 วินาที

3.3 การทดสอบความสามารถในการทำงานของรถคืบ อ้อยแบบคืบหน้า

ดำเนินการทดสอบที่ ไร่อ้อยของ เกษตรกรในจังหวัดลพบุรี และจังหวัดราชบุรี โดยมีค่าชี้ผลในการศึกษาได้แก่ ความสามารถในการทำงาน อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง และเปอร์เซ็นต์สิ่งเจือปน ผลการทดสอบแสดงใน ตารางที่ 3- 5 และรูปที่ 9-11

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบสมรรถนะการทำงานของรถคืบอ้อยแบบคืบหน้า

รายการ	รายละเอียด
1. พันธุ์อ้อยที่ใช้ทดสอบ	อู่ทอง 10
2. รายละเอียดรถคืบอ้อย	FORD 6610 (คืบหน้าแบบ บวมคู่)
3. น้ำหนักอ้อยในการวิเคราะห์หาสิ่งเจือปนในการทดสอบ (กก.)	2000
4. ปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ (ลิตร/ตัน)	0.5
5. ความสามารถในการทำงาน (ตัน/ชม.)	30
6. ความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง (ลิตร/ชม.)	14.8
7. เปอร์เซนต์สิ่งเจือปน (%)	4

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบสมรรถนะการทำงานของรถคืบอ้อย (แบบคืบหลัง)

รายการ	รายละเอียด
1. พันธุ์อ้อยที่ใช้ทดสอบ	11 ลำปาง
2. รายละเอียดรถคืบอ้อย	FORD 6610 (คืบหลัง)
3. น้ำหนักอ้อยทั้งหมดในการทดสอบหาสิ่งเจือปน (กก.)	2000
4. ปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ (ลิตร/ตัน)	0.31
5. ความสามารถในการทำงาน (ตัน/ชม.)	32
6. ความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง (ลิตร/ชม.)	10
7. เปอร์เซนต์สิ่งเจือปน (%)	3

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบสมรรถนะการทำงานของรถคืบอ้อย (แบบสามล้อ)

รายการ	รายละเอียด
1. พันธุ์อ้อยที่ใช้ทดสอบ	11 ลำปาง
2. รายละเอียดรถคืบอ้อย	แบบสามล้อ
3. น้ำหนักอ้อยทั้งหมดในการทดสอบหาสิ่งเจือปน (กก.)	2000
4. ปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ (ลิตร/ตัน)	0.3
5. ความสามารถในการทำงาน (ตัน/ชม.)	39
6. ความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง (ลิตร/ชม.)	11
7. เปอร์เซนต์สิ่งเจือปน (%)	3



รูปที่ 9 การทดสอบการทำงานของรถคืบอ้อย
แบบคืบหน้า



รูปที่ 10 การทดสอบการทำงานของรถคืบอ้อย
แบบคืบหลัง



รูปที่ 11 การทดสอบการทำงานของรถคืบอ้อย
แบบสามล้อ

จากตารางผลการทดสอบความสามารถในการคืบอ้อย เฉลี่ยของรถคืบอ้อยแบบคืบหน้า มีค่าเท่ากับ 30 ตันต่อชั่วโมง ปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ 0.5 ลิตรต่อตัน หรือมีค่าเท่ากับ 14.8 ลิตรต่อชั่วโมง เปอร์เซ็นต์สิ่งเจือปนเท่ากับ 4 เปอร์เซ็นต์ ความสามารถในการคืบอ้อยเฉลี่ยของรถคืบอ้อยแบบคืบหลังมีค่าเท่ากับ 32 ตันต่อชั่วโมง ปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ 0.31 ลิตรต่อตัน หรือมีค่าเท่ากับ 10 ลิตรต่อชั่วโมง เปอร์เซ็นต์สิ่งเจือปนเท่ากับ 3 เปอร์เซ็นต์ ความสามารถในการคืบอ้อยเฉลี่ยของรถคืบอ้อยแบบสามล้อ มีค่าเท่ากับ 39 ตันต่อชั่วโมง ปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ 0.3 ลิตรต่อตัน หรือมีค่าเท่ากับ 11 ลิตรต่อชั่วโมง เปอร์เซ็นต์สิ่งเจือปนเท่ากับ 3 เปอร์เซ็นต์ จากข้อมูลดังกล่าวพบว่า เปอร์เซ็นต์สิ่งเจือปนได้แก่ เศษดินทราย ใบอ้อย และ เปลือกอ้อย เป็นต้น ถ้าปริมาณสิ่งเจือปนที่ติดไปกับรถบรรทุก ประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้โรงงานน้ำตาลต้องจ่ายเงินค่าสิ่งเจือปน ประมาณ 400-500 บาท ต่อหนึ่งคันรถบรรทุก และยิ่งก่อให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับเครื่องจักรในระบบการผลิตของโรงงานอีก ดังนั้นถ้าสามารถลดปริมาณสิ่งเจือปนที่ติดไปกับอ้อยได้ ก็จะสามารถช่วยโรงงานในการลดต้นทุนการผลิต และสามารถเพิ่มราคาในการรับซื้ออ้อยจากเกษตรกรได้ วิธีการจัดการในการช่วยลดปริมาณสิ่งเจือปนที่ติดไปกับอ้อย ได้แก่ เกษตรกรที่ตัดอ้อย เมื่อทำการตัดอ้อยแล้วควรรวมกองอ้อยสำหรับรถคืบอ้อยให้ได้ปริมาณที่เหมาะสมไม่น้อยเกินไป เพราะถ้าจำนวนลำต่อกองอ้อยน้อยเกินไป จะทำให้รถคืบต้องรวบรวมกองอ้อยหลายกองในการขึ้นอ้อยหนึ่งเที่ยว เป็นผลทำให้เพิ่มปริมาณสิ่งเจือปนที่ติดไปกับอ้อยมากขึ้น (จำนวนที่เหมาะสม 200 ลำ

ต่อกองอ้อย) โดยเฉลี่ย รถคืบอ้อย จะทำงานประมาณ วันละ 2 ชั่วโมง ซึ่งสามารถคืบอ้อยได้ประมาณ 60 ตัน ต่อวันสำหรับรถคืบอ้อยแบบคืบหน้า และทำงานได้ 64 ตันต่อวัน สำหรับรถคืบอ้อยแบบคืบหลัง สำหรับรถคืบอ้อยแบบสามล้อ จะสามารถทำงานได้ 78 ตันต่อวัน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบการทำงานกับแรงงานคนพบว่า แรงงานคนมีความสามารถในการนำอ้อยขึ้นรถบรรทุกอยู่ระหว่าง 0.61-0.72 ตันต่อคนต่อชั่วโมง หรือค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.69 ตัน/ชม. [4] ในขณะที่รถคืบอ้อยแบบคืบหน้า มีความสามารถในการขึ้นอ้อยได้ 30 ตัน/ชม. รถคืบอ้อยแบบคืบหลังมีความสามารถในการขึ้นอ้อย 32 ตัน/ชม. และรถคืบอ้อยแบบสามล้อมีความสามารถในการขึ้นอ้อย 39 ตัน/ชม. ซึ่งจะเห็นได้ว่า รถคืบอ้อยแบบคืบหน้า คืบหลัง และแบบสามล้อ มีความสามารถในการขึ้นอ้อย มากกว่าการใช้แรงงานคน ประมาณ 43, 46 และ 57 เท่าตามลำดับ ดังนั้นการใช้รถคืบอ้อยจึงมีความเหมาะสมและสามารถใช้ทดแทนแรงงานคนได้เป็นอย่างดี ผลการวิเคราะห์ความเหมาะสมเชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม [5] พบว่า จุดคุ้มทุนของรถคืบอ้อยแบบคืบหน้า แบบคืบหลัง และแบบสามล้อ มีค่าเท่ากับ 1,959, 2,005 และ 9,425 ตันต่อปี ตามลำดับ ค่าใช้จ่ายในการทำงานของรถคืบอ้อยแบบคืบหน้า แบบคืบหลัง และแบบสามล้อ เท่ากับ 36, 29 และ 32 บาทต่อตัน ตามลำดับ พิจารณาชั่วโมงการทำงานของรถคืบอ้อยที่ 500 ชั่วโมงต่อปี รถคืบอ้อยแบบคืบหน้า คืบหลัง และแบบสามล้อ จะมีระยะเวลาในการคืนทุน เท่ากับ 0.95, 0.91 และ 4.1 ปี รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 6-8 และรูปที่ 12-13

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์ความเหมาะสมการใช้งานเชิงเศรษฐศาสตร์ของรถคืบอ้อยแบบคืบหน้า

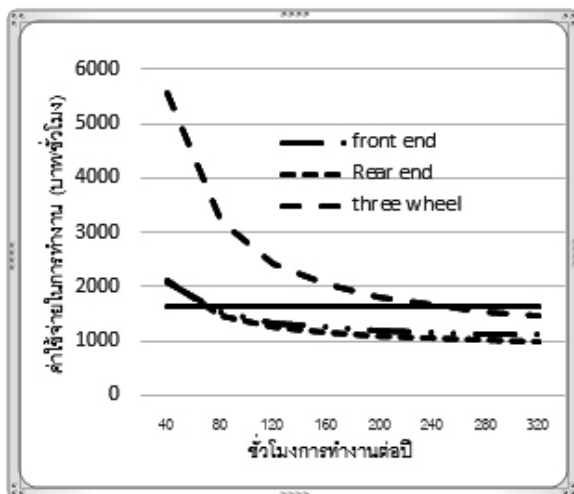
รายละเอียด		เครื่องคืบอ้อย
1. ราคาเครื่องคืบอ้อย (ไม่รวมราคาแทรกเตอร์)	(บาท)	300,000
2. อายุการใช้งาน	(ปี)	10
3. ชั่วโมงการใช้งานต่อปี	(ชั่วโมง/ ปี)	500
4. อัตราดอกเบี้ย 10%	(บาท/ ปี)	16,500
5. มูลค่าซาก (10% ของราคารถ)	(บาท)	30,000
6. ค่าเสื่อมราคา	(บาท/ ปี)	27,000
7. รวมค่าใช้จ่ายคงที่	(บาท/ ปี)	43,500
8. ค่าแรงงานพนักงานขับรถ	(บาท/ ชั่วโมง)	240
9. ค่าน้ำมันเชื้อเพลิง	(บาท/ ชั่วโมง)	370
10. ค่าน้ำมันหล่อลื่น 20% Fuel	(บาท/ ชั่วโมง)	74
11. ค่าซ่อมแซมและบำรุงรักษา	(บาท/ ชั่วโมง)	300
12. รวมค่าใช้จ่ายผันแปร	(บาท/ ชั่วโมง)	984
13. รวมค่าใช้จ่ายในการทำงานของรถคืบอ้อย	(บาท/ ตัน)	36
14. อัตราการรับจ้าง	(บาท/ ชั่วโมง)	1,650
15. จุดคุ้มทุน	(ชั่วโมง/ [ตัน])	65 [1959]
16. ระยะเวลาคืนทุน	(ปี)	0.95

ตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์ความเหมาะสมการใช้งาน
เชิงเศรษฐศาสตร์ของรถคิบบ้อยแบบคิบบหลัง

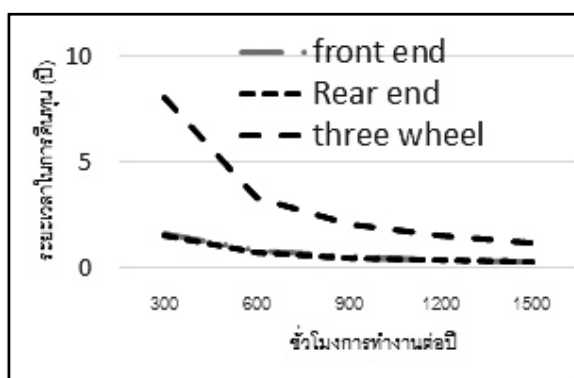
รายละเอียด		เครื่อง คิบบ้อย
1. ราคาเครื่องคิบบ้อย (ไม่รวมราคาแทรกเตอร์)	(บาท)	350,000
2. อายุการใช้งาน	(ปี)	10
3. ชั่วโมงการใช้งานต่อปี	(ชั่วโมง/ ปี)	500
4. อัตราดอกเบี้ย 10%	(บาท/ ปี)	19,250
5. มูลค่าซาก (10% ของราคารถ)	(บาท)	35,000
6. ค่าเสื่อมราคา	(บาท/ ปี)	31,500
7. รวมค่าใช้จ่ายคงที่	(บาท/ ปี)	50,750
8. ค่าแรงงานพนักงาน ขับรถ	(บาท/ ชั่วโมง)	240
9. ค่าน้ำมันเชื้อเพลิง	(บาท/ ชั่วโมง)	250
10. ค่าน้ำมันหล่อลื่น 20% Fuel	(บาท/ ชั่วโมง)	50
11. ค่าซ่อมแซมและ บำรุงรักษา	(บาท/ ชั่วโมง)	300
12. รวมค่าใช้จ่าย ผันแปร	(บาท/ ชั่วโมง)	840
13. รวมค่าใช้จ่าย ในการทำงานของ รถคิบบ้อย	(บาท/ ตัน)	29
14. อัตราการรับจ้าง	(บาท/ ชั่วโมง)	1,650
15. จุดคุ้มทุน	(ชั่วโมง) [ตัน]	63 [2005]
16. ระยะเวลาคืนทุน	(ปี)	0.91

ตารางที่ 8 ผลการวิเคราะห์ความเหมาะสมการใช้งาน
เชิงเศรษฐศาสตร์ของรถคิบบ้อยแบบสามล้อ

รายละเอียด		เครื่อง คิบบ้อย
1. ราคาเครื่องคิบบ้อย	(บาท)	1,300,000
2. อายุการใช้งาน	(ปี)	10
3. ชั่วโมงการใช้งาน ต่อปี	(ชั่วโมง/ ปี)	500
4. อัตราดอกเบี้ย 10%	(บาท/ ปี)	71,500
5. มูลค่าซาก (10% ของราคารถ)	(บาท)	130,000
6. ค่าเสื่อมราคา	(บาท/ ปี)	117,000
7. รวมค่าใช้จ่ายคงที่	(บาท/ ปี)	188,500
8. ค่าแรงงานพนักงาน ขับรถ	(บาท/ ชั่วโมง)	240
9. ค่าน้ำมันเชื้อเพลิง	(บาท/ ชั่วโมง)	275
10. ค่าน้ำมันหล่อลื่น 20% Fuel	(บาท/ ชั่วโมง)	55
11. ค่าซ่อมแซมและ บำรุงรักษา	(บาท/ ชั่วโมง)	300
12. รวมค่าใช้จ่าย ผันแปร	(บาท/ ชั่วโมง)	870
13. รวมค่าใช้จ่าย ในการทำงานของ รถคิบบ้อย	(บาท/ ตัน)	32
14. อัตราการรับจ้าง	(บาท/ ชั่วโมง)	1,650
15. จุดคุ้มทุน	(ชั่วโมง) [ตัน]	242 [9425]
16. ระยะเวลาคืนทุน	(ปี)	4.1



รูปที่ 12 ค่าใช้จ่ายในการทำงานของรถคิบบ้อย



รูปที่ 13 ระยะเวลาในการคืนทุนของรถคิบบ้อย

ระยะเวลาในการคืนทุนของรถคิบบ้อยสามารถลดเวลาในการคืนทุนได้ ถ้ารถคิบบ้อยสามารถทำงานได้ 900 ชั่วโมงต่อปี ดังนั้นระยะเวลาในการคืนทุนของรถคิบบ้อยทั้ง 3 รุ่น เท่ากับ 0.51, 0.49 และ 2.06 ปี ตามลำดับ และถ้ารถคิบบ้อยสามารถทำงานได้ 1500 ชั่วโมงต่อปี ระยะเวลาในการคืนทุนของรถคิบบ้อยทั้ง 3 รุ่น ได้แก่ รถคิบบ้อยแบบคิบบหน้า แบบคิบบหลัง และแบบสามล้อ จะลดลงเหลือ 0.31, 0.29 และ 1.18 ปี ตามลำดับ

4. สรุป

ผลการศึกษาสมรรถนะประสิทธิภาพของคิบบ้อย พบว่าความสามารถในการคิบบ้อยของรถคิบบแบบคิบบหน้า มีค่าเท่ากับ 30 ตันต่อชั่วโมง อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง 0.5 ลิตรต่อตัน หรือมีค่าเท่ากับ 14.8 ลิตรต่อชั่วโมง เพอร์เซ็นต์สิ่งเจือปนทั้งหมดเท่ากับ 4 เพอร์เซ็นต์ ความสามารถในการคิบบ้อยเฉลี่ยของรถคิบบ้อยแบบคิบบหลัง มีค่าเท่ากับ 32 ตันต่อชั่วโมง ปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ 0.31 ลิตรต่อตัน หรือมีค่าเท่ากับ 10 ลิตรต่อชั่วโมง เพอร์เซ็นต์สิ่งเจือปนเท่ากับ 3 เพอร์เซ็นต์ ความสามารถในการคิบบ้อยเฉลี่ยของรถคิบบ้อยแบบสามล้อ มีค่าเท่ากับ 39 ตันต่อชั่วโมง ปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ 0.3 ลิตรต่อตัน หรือมีค่าเท่ากับ 11 ลิตรต่อชั่วโมง เพอร์เซ็นต์สิ่งเจือปนเท่ากับ 3 เพอร์เซ็นต์

ผลการวิเคราะห์ความเหมาะสมเชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมพบว่า จุดคุ้มทุนของรถคิบบ้อยแบบคิบบหน้า แบบคิบบหลัง และแบบสามล้อ มีค่าเท่ากับ 1,959, 2,005 และ 9,425 ตันต่อปี ตามลำดับ ค่าใช้จ่ายในการทำงานของรถคิบบ้อยแบบคิบบหน้า แบบคิบบหลัง และแบบสามล้อ เท่ากับ 36, 29 และ 26 บาทต่อตัน ตามลำดับ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่สนับสนุนงบประมาณในการทำวิจัย ขอขอบคุณเกษตรกรเจ้าของรถคิบบ้อยและเจ้าของไร่อ้อย ในการเอื้อเฟื้อรถคิบบ้อยและสถานที่ในการทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย เรื่อง สรุปสถานการณ์การผลิต การบริโภค การส่งออกน้ำตาลทราย ประจำเดือน กรกฎาคม 2559. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <http://www.ocsb.go.th/th/cms/detail.php>
- [2] ศูนย์วิจัยเพื่ออุตสาหกรรมอาหาร เรื่อง อุตสาหกรรมอาหารไทย ปี 2558 และ แนวโน้มปี 2559. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : http://fic.nfi.or.th/foodindustry_quarterlySituation
- [3] สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย เรื่อง รายงานพื้นที่ปลูกอ้อยปีการผลิต 2558/59. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <http://www.ocsb.go.th/upload/OCSBActivity/fileupload/8071-2689.pdf>
- [4] พูลประเสริฐ ปิยะอนันต์ , บพิตร ตั้งวงศ์กิจ และ นิติ สายจันทร์. 2538. การศึกษาเปรียบเทียบการเก็บเกี่ยวอ้อย ด้วย แรงงานคนและเครื่องจักร ในจังหวัด กำแพงเพชร, ภาควิชาเกษตรกลวิธาน คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม ; [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <http://kucon.lib.ku.ac.th>
- [5] Hunt, D. 2001. Farm Power and Machinery Management. (10th Edition). Ames, Iowa, USA: Iowa State University Press.

การศึกษาปัจจัยในกระบวนการกลึงปอกผิวที่ส่งผลต่อปริมาณการใช้ไฟฟ้า

A Study of Turning Operation Factors Affecting Power Consumption

ศิวะ ไวทย์รุ่งโรจน์¹ อามินท์ หล้าวงศ์²
sivamjtech@gmail.com¹, aminlawong@hotmail.com²

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปริมาณการใช้ไฟฟ้าของมอเตอร์เครื่องกลึงในการตัดเฉือนชิ้นงานกับค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการกลึงปอกผิว เพื่อเป็นแนวทางในการลดปริมาณการใช้ไฟฟ้าซึ่งถือเป็นการอนุรักษ์พลังงานวิธีหนึ่ง จากการทดลองแบบ 2^{k-1} แฟกทอเรียลบางส่วนเพื่อเป็นการกรองเบื้องต้นกับปัจจัย 4 อย่าง ๆ ละ 2 ค่าระดับคือ ความเร็วรอบที่ 770 กับ 1,800 รอบต่อนาที อัตราป้อนที่ 0.15 กับ 0.35 มม. ต่อรอบ ระยะตัดเฉือนลึกที่ 1 กับ 3 มม. และมุมตัดเฉือนที่ 75 กับ 105 องศา แล้วหาค่าระดับที่เหมาะสมอีกครั้งด้วยการออกแบบโมเดลเชิงเส้นโดยนัยทั่วไป พบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อค่ากระแสไฟฟ้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% คือความเร็วรอบ และระยะตัดเฉือนลึก ซึ่งค่าระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยคือ 1,170 รอบต่อนาที และ 2 มม. ตามลำดับ

คำสำคัญ: การกลึงปอกผิว การออกแบบการทดลอง ปริมาณกระแสไฟฟ้า

¹อาจารย์ประจำสาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

²อาจารย์ประจำสาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

Abstract

The main purpose of this research is to study the power consumption of turning machine with key parameters in turning process, in order to, a guideline to reduce the power consumption as a one method of energy conversation. Firstly, two statistical analysis by using 2^{k-1} fractional factorial design is applied to screen four factors and two levels for each factor. There are Turning speed as 770 and 1,800 rpm., Feed rate as 0.15 and 0.35 mm., Depth of cut as 1 and 3 mm. and Approach angle as 75 and 105 degrees. Secondary, General Linear Model (GLM) is used to find out the suitable level of each parameter. and Finally, the result shows significant factors effect to power consumption with 95% confidence interval level are Turning speed and Depth of cut which the optimal level of each factor are 1,170 rpm. and 2 mm. respectively.

Keywords: turning process, design of experiment, power consumption

1. บทนำ

กระบวนการกลึงปอกเหล็กเพลามีผลลัพธ์ที่ต้องการคือความถูกต้องของขนาดและความละเอียดของผิวชิ้นงาน ปัจจัยที่สำคัญในกระบวนการผลิต ได้แก่ ความเร็วรอบ ความลึกของการกลึง อัตราป้อน และมุมตัด เป็นต้น สภาพปัญหาของงานกลึงปอกด้วยเครื่องกลึงแบบธรรมดาคือการตั้งค่าพารามิเตอร์ที่ไม่เหมาะสมของผู้ปฏิบัติงาน ในการกลึงปอกผิวเพื่อลดขนาดของชิ้นงานซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพผิวชิ้นงานอายุการใช้งานเครื่องมือตัดและต้นทุนค่ากระแสไฟฟ้า จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาหาค่าระดับของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าตอบสนองข้างต้นคือค่าความเรียบผิวที่สามารถยอมรับในงานกลึงพิจารณาพร้อมกับตัวชี้วัดที่สองคือปริมาณกระแสไฟที่ใช้ขั้วมอเตอร์ซึ่งเป็นต้นกำลังของเครื่องกลึงเนื่องจากการกลึงปอกผิวเป็นขั้นตอนที่เกิดแรงตัดเฉือนสูงหากตั้งค่าการกลึงปอกที่ไม่เหมาะสมอาจทำให้เกิดการใช้กระแสไฟที่มากเกินไปได้ แต่ค่าระดับที่เหมาะสมนั้นต้องไม่ส่งผลกระทบต่อรอบเวลา

ในการผลิตชิ้นงานด้วย ซึ่งผลสรุปจะสามารถใช้เป็นแนวทางในการอนุรักษ์พลังงานของกระบวนการกลึงปอกผิวได้

2. หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การกลึงปอกผิว

การกลึงเป็นการขึ้นรูปชิ้นงานในลักษณะทรงกระบอกเป็นหลัก โดยส่วนใหญ่ชิ้นงานหมุนรอบตัวเองแล้วมีดกลึงเคลื่อนที่เข้าหา ประกอบด้วยการกลึงปาดหน้า การกลึงปอก การกลึงเกลียว การกลึงเจาะร่อง เป็นต้น ซึ่งการกลึงปอกผิวนั้นเป็นการกลึงตามแนวยาวขนานกับชิ้นงานโดยชิ้นงานหมุนอยู่กับที่เพื่อเป็นการลดขนาดชิ้นงาน โดยมีพารามิเตอร์ที่สำคัญคือ ความเร็วรอบ ระยะตัดเฉือนลึก มุมตัดเฉือน และอัตราป้อน [1]

2.2 ความเร็วรอบการหมุนชิ้นงาน

ความเร็วรอบของเครื่องกลึงสามารถปรับสูงต่ำโดยใช้ชุดเกียร์ทดหลังจากมอเตอร์ส่งกำลังมา

ทางสายพาน จึงสรุปได้ว่าการเดินเครื่องจักรด้วยความเร็วรอบการหมุนใด ๆ ก็ตาม ความเร็วรอบของมอเตอร์ยังคงใช้เท่าเดิมเพราะใช้ชุดเกียร์ทดตั้งรูปที่ 1 ในการเปลี่ยนความเร็วเพลาลูกจับขึ้นงาน [2] ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของเพลาลูกจับขึ้นงานขณะเดินเครื่องแบบไม่มีภาระงาน จึงไม่ส่งผลต่ออัตราการกินกระแสไฟฟ้าเพราะมอเตอร์ยังหมุนด้วยความเร็วคงที่



รูปที่ 1 ชุดเกียร์ทดเปลี่ยนความเร็วรอบการหมุนหัวจับ

2.3 การหาความเร็วรอบและอัตราป้อน

ลักษณะความเร็วรอบการหมุนหัวจับและความเร็วตัดเฉือนแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ 1 [3]

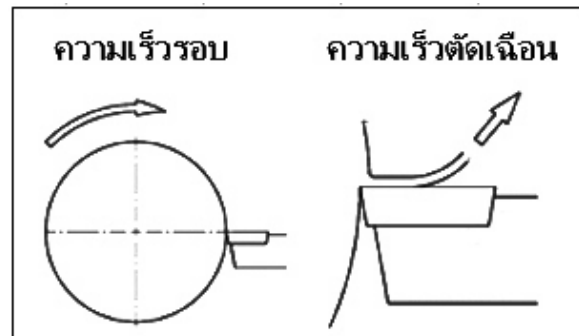
$$N = \frac{V_c \times 1000}{\pi \times D} \quad (1)$$

โดยที่ N คือ ความเร็วการหมุนหัวจับ, V_c คือ ความเร็วตัดเฉือนขึ้นงาน และ D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็ก

ค่าอัตราป้อน (Feed) ที่เหมาะสมในงานกลึงสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2 [3]

$$F_t = F_n \times N \quad (2)$$

โดยที่ F_t คือ อัตราเดินป้อนของโต๊ะงาน และ F_n คือ อัตราป้อนมีด (เป็นค่าคงที่ของมีดแต่ละชนิด)



รูปที่ 2 ลักษณะของความเร็วรอบและความเร็วตัดเฉือน

2.4 การทดลองแบบ 2^{k-1} แฟกทอเรียลบางส่วน

การออกแบบการทดลองเป็นเทคนิคที่ให้ความแม่นยำสูงโดยสามารถระบุออกมาเป็นค่าตัวเลขทางสถิติที่แสดงค่าระดับความสำคัญของตัวแปรที่ส่งผลต่อกระบวนการ กรณีทำการทดลองแบบแฟกทอเรียลบางส่วนซึ่งเป็นการทดลองไม่ครบและจะมีปรากฏการณ์หนึ่งเกิดขึ้นเสมอคือ อันตรกิริยาของคู่แฝดแฝง (aliases) แปลว่าปนกันหรือติดกันจนแยกไม่ออก ซึ่งส่งผลให้ค่า effect ที่ได้เป็นค่าที่ปนกัน จึงต้องแยกอันตรกิริยา โดยใช้หลักพิจารณาจากกฎคือ 1) ถ้าปัจจัยหลักเป็น aliases กับ 3 way interaction ขึ้นไปให้ถือว่า effect นั้นเป็นของปัจจัยหลัก 2) ถ้าปัจจัยร่วม (Interaction) เป็น Aliases กับ Interaction ที่มีจำนวนคู่ order

ไม่เท่ากัน ให้ถือว่า effect นั้นเป็นของ Interaction ที่มี order น้อยกว่า 3) ถ้าปัจจัยร่วมเป็น Aliases กับ Interaction ที่มีจำนวนคู่ order เท่ากัน ให้ตัดสินใจ ดังนี้ 3.1) ถ้ามีความรู้จากการแยก Aliases ของ ปัจจัยหลักเพียงพอก็สามารถแยกได้ 3.2) หากความรู้ เดิมไม่พอต้องทำการทดลองเพิ่มอีก 1 เท่าของการ ทดลองเดิมจึงสรุปผลการทดลองได้ [4]

3. ขั้นตอนการทดลอง

ทดสอบวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ st.37 แบบ เหล็กกลม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. ตัดยาว ท่อนละ 20 ซม. จำนวน 26 ท่อน เป็นชิ้นงานทดสอบ ร่วมกับมีดกลึงชนิดเหล็กกล้าความเร็วสูง (HSS) และ ใช้เครื่องกลึงขนาดมอเตอร์ 1 แรงม้า ไฟฟ้า 220 โวลต์ เป็นอุปกรณ์ทดสอบซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

3.1 คำนวณค่าความเร็วรอบ

คำนวณค่าความเร็วรอบการหมุนที่เหมาะสม ตามสมการที่ (1) จากค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ ชิ้นงานและค่าความเร็วตัดที่เหมาะสม โดยมีดกลึงที่ ใช้ทดสอบเป็นเหล็กกล้าความเร็วสูง (HSS) ประเภท คาร์บอนต่ำถึงกลาง ซึ่งมีข้อเสนอแนะจากผู้ผลิตมีดกลึง ควรใช้งานความเร็วตัดอยู่ระหว่าง 18-30 เมตรต่อ นาที โดยผลการคำนวณแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ความเร็วรอบจากการคำนวณ

ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที)	ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)
18	573
24	764
30	955

3.2 เลือกความเร็วรอบที่ทดสอบ

นำข้อมูลที่ได้จากการคำนวณตามตารางที่ 1 เทียบกับค่าความเร็วที่สามารถเลือกใช้งานได้จาก เครื่องจักรตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ความเร็วรอบใช้งาน

ลำดับที่	ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)
1	585
2	770
3	900
4	1,170
5	1,800

เลือกค่าความเร็วที่ใช้ทดสอบ 3 ค่าระดับคือ 770 กับ 1,170 รอบต่อนาที เพราะเป็นค่าระดับที่ใช้งาน ประจำแล้วยังใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้และ 1,800 รอบต่อนาที เพื่อเป็นการทดสอบมีดกลึงว่าสามารถ ทนต่อความเร็วรอบสูงเกินกว่าค่าแนะนำได้หรือไม่ หากไม่กระทบต่อคุณภาพและอุปกรณ์ตัดเฉือน จะ สามารถเพิ่มผลิตภาพได้เนื่องจากรอบเวลายางานสั้นลง

3.3 กำหนดค่าระดับของปัจจัยคงที่อื่น ๆ

งานวิจัยนี้ทดสอบปัจจัยคงที่ทั้งหมด 4 ปัจจัย คือ 1) ค่าความเร็วรอบที่ได้กำหนดไปแล้วนั้น ยังมี ปัจจัยอื่นที่ศึกษาร่วมด้วยคือ 2) ระยะตัดเฉือนลึก 3) มุมตัดเฉือน และ 4) อัตราป้อน โดยขั้นตอนนี้ จะกำหนดค่าระดับของปัจจัยคงที่ซึ่งต้องคำนึงถึง ความเหมาะสมต่อการปฏิบัติงานและค่าความเรียบ ผิวชิ้นงานกลึงร่วมด้วย โดยค่าระยะตัดเฉือนลึกเลือก ทดสอบ 3 ค่าระดับคือ 1, 2 และ 3 มม. ค่ามุมตัดเฉือน เลือกทดสอบ 3 ค่าระดับคือ 75, 90 และ 105 องศา

และค่าอัตราป้อนมีดเลือกทดสอบ 3 ค่าระดับคือ 0.15, 0.25 และ 0.35 มม.ต่อรอบ

3.4 กรองปัจจัยที่มีผลต่อค่ากระแสไฟ

ออกแบบการทดลองหาค่าระดับที่เหมาะสมจากปัจจัยทั้ง 4 ชนิดด้วยการทดลองแบบ 2^{4-1} แฟกทอเรียลบางส่วน เพื่อกรองหาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าตอบสนองคืออัตราการใช้กระแสไฟของมอเตอร์ ซึ่งใช้ค่าระดับสูงสุดและต่ำสุดของแต่ละปัจจัยในการทดลองเพื่อประหยัดเวลากับค่าใช้จ่าย จากนั้นทำการทดสอบในแต่ละการทดลองแบบสุ่ม โดยทำการกลิ้งชิ้นงานเป็นระยะ 10 ซม. แล้วบันทึกการใช้กระแสไฟฟ้าในขณะกลิ้งชิ้นงานด้วยแอมป์มิเตอร์แบบดิจิตอลดังรูปที่ 3 พร้อมทั้งผลกระทบข้างเคียงกับมิดกลิ้งและผิวชิ้นงาน แล้ววิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่ากระแสไฟด้วยโปรแกรมมินิแทปและนำข้อมูลไปทดลองขั้นต่อไป

3.5 วิเคราะห์ค่าระดับที่เหมาะสม

นำปัจจัยที่ส่งผลต่อค่ากระแสไฟฟ้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากขั้นตอนก่อนหน้า มาวิเคราะห์ต่อด้วยการทดลองแบบโมเดลเชิงเส้นโดยนัยทั่วไป เพื่อหาค่าระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย ซึ่งขั้นตอนนี้เป็นกระบวนการวิเคราะห์ทั้ง 3 ค่าระดับของปัจจัยเพื่อให้ทราบถึงปฏิสัมพันธ์เชิงลึกและผลกระทบที่เกิดขึ้นในการทดลองแล้วใช้เป็นแนวทางในการทำงานต่อไป โดยวิธีการทดสอบและการเก็บข้อมูลให้ทำเหมือนขั้นตอนที่ 3.4



รูปที่ 3 การวัดปริมาณกระแสไฟฟ้าด้วยแอมป์มิเตอร์

4. ผลการทดลอง

4.1 ผลการกรองปัจจัยเบื้องต้น

กรองปัจจัยทั้ง 4 อย่าง ด้วยการทดลองแบบ 2^{4-1} แฟกทอเรียลบางส่วน แล้ววิเคราะห์ผล โดยให้ $I = ABCD$ ดังในตารางที่ 3 ซึ่งกำหนดค่าระดับของปัจจัยดังนี้

A = ความเร็วรอบ (770 กับ 1,800)

B = ระยะตัดเฉือนลึก (1 กับ 3)

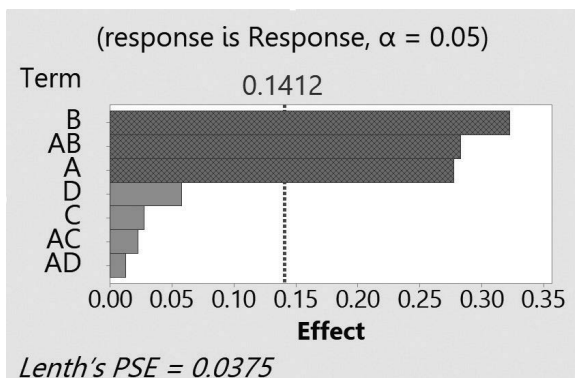
C = มุมตัดเฉือน (75 กับ 105)

D = อัตราป้อน (0.15 กับ 0.35)

ตารางที่ 3 การทดลอง 2^{4-1} แฟกทอเรียลบางส่วน

ปัจจัยทดลอง	ค่ากระแสไฟฟ้า (แอมป์)	ผลกระทบต่อ ชิ้นงานและ มีดกลึง
(1)	3.11	ไม่มี
ad	3.14	ไม่มี
bd	3.22	ไม่มี
ab	3.70	ไม่มี
cd	3.13	ไม่มี
ac	3.09	ไม่มี
bc	3.10	ไม่มี
abcd	3.74	ไม่มี

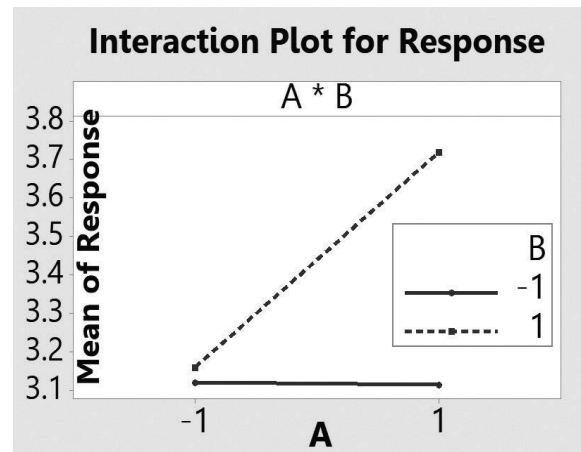
ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมมินิแทปแสดงให้เห็นว่าค่าผลกระทบของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่ากระแสไฟฟ้าด้วยกราฟ PARETO ดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่าปัจจัยร่วมระหว่างความเร็วรอบกับระยะตัดเฉือนลึก (AxB) เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อค่ากระแสไฟฟ้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ



รูปที่ 4 ผลกระทบของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่ากระแสไฟฟ้า

เมื่อวิเคราะห์ความมีอิทธิพลร่วมระหว่างความเร็วรอบกับระยะตัดเฉือนลึกดังแสดงในรูปที่ 5 สามารถ

สรุปได้ว่า หากระยะการตัดเฉือนลึกน้อย ค่าความเร็วรอบจะไม่ส่งผลต่อค่ากระแสไฟฟ้า แต่หากระยะการตัดเฉือนลึกมีค่ามาก ค่าความเร็วรอบที่สูงจะส่งผลต่อค่ากระแสไฟฟ้าให้มีค่าสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ



รูปที่ 5 แสดงปฏิสัมพันธ์ร่วมปัจจัย (AxB) ของปัจจัยความเร็วรอบ (A) กับระยะตัดเฉือนลึก (B)

4.2 ผลการหาค่าระดับที่เหมาะสม

ผลทดลองข้างต้นพบปัจจัยที่ส่งผลต่อค่ากระแสไฟฟ้าคือความเร็วรอบและระยะตัดเฉือนลึก ซึ่งวิเคราะห์เพิ่มด้วยการทดลองแบบโมเดลเชิงเส้นโดยนับทั่วไปและทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง ดังข้อมูลในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การทดลอง GLM Balance ANOVA

ความเร็วรอบ (A)	ระยะตัดลึก (B)	กระแสไฟ (แอมป์)
770	1	3.10
		3.10
770	2	3.12
		3.11

770	3	3.12
		3.12
1170	1	3.11
		3.10
1170	2	3.13
		3.11
1170	3	3.19
		3.20
1800	1	3.13
		3.12
1800	2	3.14
		3.23
1800	3	3.71
		3.72

จากการวิเคราะห์ผ่านโปรแกรมมินิแทปพบว่าปฏิสัมพันธ์ร่วมของปัจจัยความเร็วรอบกับระยะตัดเฉือนลึก เป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่ากระแสไฟฟ้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อ 95% โดยค่ากระแสไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปตามการทดลองมีผลมาจากความเร็วรอบและระยะตัดเฉือนลึกเท่ากับ 98.64% ตามรูปที่ 6

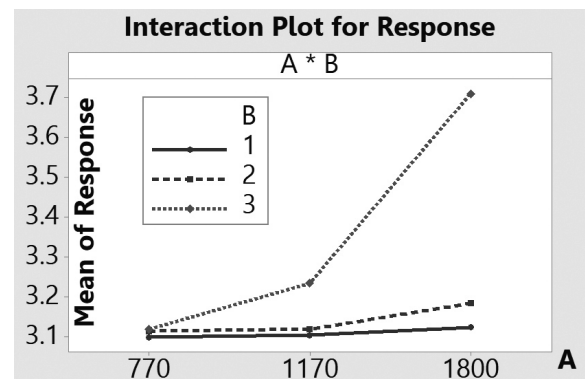
Factor	Type	Levels	Values
A	random	3	770, 1170, 1800
B	fixed	3	1, 2, 3

Analysis of Variance for Response					
Source	DF	SS	MS	F	P
A	2	0.188744	0.094372	1.59	0.311
B	2	0.193378	0.096689	1.62	0.304
A*B	4	0.238089	0.059522	119.04	0.000
Error	9	0.004500	0.000500		
Total	17	0.624711			

S = 0.0223607	R-Sq = 99.28%	R-Sq(adj) = 98.64%
---------------	---------------	--------------------

รูปที่ 6 วิเคราะห์ด้วยโปรแกรมมินิแทป

พิจารณารูปปฏิสัมพันธ์ร่วมของปัจจัยความเร็วรอบกับระยะตัดเฉือนลึกในรูปที่ 7 สรุปว่าระยะตัดเฉือนลึกที่ 1 และ 2 มม. สามารถใช้ร่วมกับความเร็วรอบได้ทั้ง 3 ระดับ แต่ระยะตัดเฉือนลึกที่ 3 มม. ไม่สามารถใช้ร่วมกับความเร็วรอบที่ 1,800 รอบต่อนาที เพราะจะทำให้เกิดการใช้กระแสไฟที่สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ 98.64% ตามรูปที่ 6



รูปที่ 7 แสดงปฏิสัมพันธ์ร่วมปัจจัย (AxB) ของความเร็วรอบ (A) กับระยะตัดเฉือนลึก (B) จากการวิเคราะห์ GLM

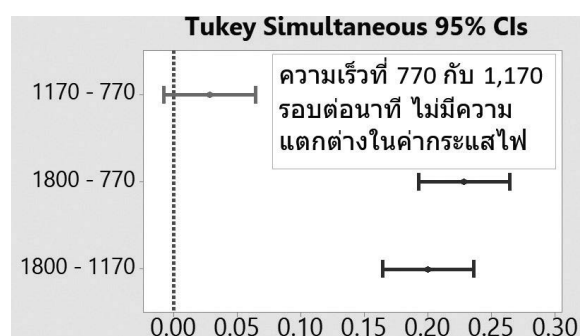
5. สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองในการกลึงปีกผิวนานกับปัจจัยทั้ง 4 อย่าง เพื่อศึกษาหาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณการใช้กระแสไฟฟ้าด้วยการออกแบบการทดลองโดยวิธี 2^{4-1} แฟกทอเรียลบางส่วน แล้วหาค่าระดับที่เหมาะสมของปัจจัยด้วยการทดลองแบบโมเดลเชิงเส้นโดยนัยทั่วไป ซึ่งจากผลการทดลองสรุปได้ว่า 1) ปัจจัยที่ไม่ส่งผลกระทบต่อค่ากระแสไฟฟ้าคือ มุมตัดเฉือนและอัตราป้อน 2) ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่ากระแสไฟฟ้าคือ ปฏิสัมพันธ์ร่วมของปัจจัยความเร็วรอบและระยะตัดเฉือนลึก 3) หากต้องการตัดเฉือนลึกที่ 3 มม. ไม่ควรเลือกใช้ความเร็วรอบ 1,800 รอบต่อนาที เนื่องจากจะส่งผลให้เกิดการใช้กระแส

ไฟฟ้าที่สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งควรเลือกใช้ความเร็วที่ 770 หรือ 1,170 รอบต่อนาทีแทน เนื่องจากใช้กระแสไฟฟ้าที่ต่ำกว่า 4) หากต้องการตัดเฉือนลึกที่ 1 หรือ 2 มม. สามารถเลือกใช้ความเร็วรอบได้ทั้ง 3 ค่าระดับคือ 770, 1,170 และ 1,800 รอบต่อนาที โดยไม่เกิดความแตกต่างของค่ากระแสไฟฟ้า

อภิปรายผล

จากผลสรุปข้างต้นพบว่าไม่ควรกำหนดใช้งานความเร็วรอบที่ 1,800 รอบต่อนาที เนื่องจากไม่สามารถใช้งานร่วมกับระยะตัดเฉือนลึกที่ 3 มม. เพราะส่งผลให้เกิดการใช้ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และเมื่อพิจารณาร่วมกับรูปที่ 8 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่ากระแสไฟฟ้าแบบคู่ เปรียบของปัจจัยความเร็วรอบพบว่า ที่ความเร็ว (1,170 กับ 770) ไม่มีความแตกต่างของปริมาณการใช้กระแสไฟฟ้าแต่ที่ความเร็วรอบ (1,800 กับ 770) และ (1,800 กับ 1,170) มีความแตกต่างกันในปริมาณการใช้กระแสไฟฟ้าทั้งสองคู่เปรียบ



รูปที่ 8 เปรียบเทียบความแตกต่างแบบคู่

จากเหตุผลดังกล่าวจึงสามารถพิจารณาเลือกระดับของปัจจัยได้ดังนี้ 1) ความเร็วรอบสามารถเลือกใช้

ที่ 770 หรือ 1,170 รอบต่อนาที โดยไม่เกิดความแตกต่างในด้านปริมาณการใช้กระแสไฟฟ้า 2) หากใช้ระยะตัดเฉือนลึกที่ 3 มม. ควรใช้ร่วมกับความเร็วรอบ 770 รอบต่อนาที เพราะจะส่งผลให้ปริมาณการใช้ไฟฟ้ามีแนวโน้มที่น้อยกว่าการใช้ระยะตัดเฉือนลึกที่ 3 มม. ร่วมกับความเร็วรอบ 1,170 รอบ อีกทั้งเป็นการลดการสึกหรอของมีดกลึงเนื่องจากความร้อนสะสม โดยไม่ต้องสูญเสียเวลางานในการถอดมีดกลึงออกไปลับคมใหม่ ซึ่งจากการศึกษาอิทธิพลของสภาวะการตัดเฉือนงานกลึงเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น (SKD11) ด้วยเม็ดมีดคาร์ไบด์เคลือบด้วยไททาเนียมที่มีผลต่อความขรุขระของพื้นผิวพบว่าความเร็วตัด อัตราป้อน และความลึกในการตัดเฉือนที่เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อการสึกหรอของเม็ดมีดกลึงเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดความร้อนสะสมที่ปลายมีดทำให้ความสามารถด้านการสึกหรอลดลง [5] 3) หากใช้ระยะตัดเฉือนลึกที่ 1 หรือ 2 มม. สามารถใช้ความเร็วได้ทั้ง 770 และ 1,170 รอบต่อนาที เพราะไม่มีความแตกต่างในด้านปริมาณการใช้ไฟฟ้า แต่หากใช้ที่ 1,170 รอบต่อนาที จะเป็นการช่วยให้รอบเวลายานสั้นลง 4) ปัจจัยที่ไม่ส่งผลกระทบต่อค่ากระแสไฟฟ้าคือ มุมตัดเฉือนสามารถใช้ที่ 90 องศาได้เพราะเป็นค่าที่ใช้งานประจำ (หรืออาจใช้ 75 กับ 105 องศาก็ได้) และอัตราป้อนสามารถใช้ที่ 0.35 มม. ต่อรอบเพราะจะช่วยให้รอบเวลายานสั้นลง แต่คงความละเอียดของงานอยู่ในระดับที่ยอมรับได้สำหรับงานกลึง แต่หากต้องการผิวละเอียดมากขึ้นให้ปรับใช้ที่ 0.15 หรือ 0.25 มม.ต่อรอบ

ข้อเสนอแนะ

ศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องอายุการใช้งานมีดกลึงจากการกำหนดเงื่อนไขการกลึงคือระยะตัดเฉือนลึก 3 มม. ร่วมกับความเร็วรอบ 770 รอบต่อนาที และ

ระยะตัดเฉือนลึก 2 มม. รวมกับความเร็วรอบ 1,170 รอบต่อนาที เพราะนอกเหนือจากปริมาณการใช้ กระแสไฟฟ้าซึ่งเป็นตัวชี้วัดในการทดลองแล้ว อายุการใช้งานมีดกลึงก็เป็นส่วนสำคัญหนึ่งในการปฏิบัติงานจริงเช่นเดียวกัน

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนด้านเครื่องกลึง เครื่องมือวัดกระแสไฟฟ้าและอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองจากสาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

เอกสารอ้างอิง

- [1] อัจฉรา เนียมเกลี้ยง, 2550. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความเรียบผิวในการกลึงเหล็ก S50C ด้วยมีดเซรามิค. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขา วิชาวิศวกรรมอุตสาหการ. มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [2] กิตติกร กรดแก้วและคณะ, 2557. การพัฒนา เครื่องกลึงระบบ 2 แกน โดยใช้คอมพิวเตอร์ควบคุม. ปริญญานิพนธ์ อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยี เครื่องกล. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ลานนาลำปาง.
- [3] www.designengineerlife.com. การคำนวณ หาค่าความเร็วรอบ Speed และอัตราป้อน Feed ของงานกลึง [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <http://www.designengineerlife.com/2015/08/speed-and-feed-for-turning.html> (10 มกราคม 2560).

- [4] ศรีไร จารุภิญโญ, 2553. เอกสารประกอบ รายวิชาการออกแบบการทดลอง(DOE). ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชมงคลธัญบุรี.
- [5] วสันต์ นาคเสนีย์, 2553. การศึกษาอิทธิพล ของสภาวะการตัดเฉือนงานกลึงเหล็กกล้า เครื่องมืองานเย็น (SKD11) ด้วยมีดมีด คาร์ไบด์เคลือบด้วยไททาเนียมที่มีผล ต่อความขรุขระของพื้นผิว. สาขาวิชา เทคโนโลยีอุตสาหกรรม การผลิต มหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง.

การศึกษาวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าว ในเขตจังหวัดสุพรรณบุรี

A Study of Water Footprint of Rice in Supanburi Province

อรวิกา ศรีทอง¹
onwika@vru.ac.th¹

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวที่ปลูกในเขตพื้นที่จังหวัดสุพรรณบุรีในช่วงปี พ.ศ. 2559 ในการวิจัยครั้งนี้ เก็บรวบรวมข้อมูลด้วยวิธีเทคนิคการวิจัยภาคสนาม นอกจากนี้ คำนวณหาค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์โดยใช้โปรแกรมคำนวณความต้องการน้ำเพื่อการปลูกข้าว (WAPF) ซึ่งทางผู้วิจัยได้ทำการเก็บข้อมูล โดยแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ข้อมูลปฐมภูมิ คือ ข้อมูลที่ได้จากการลงพื้นที่เก็บข้อมูลจากสถานที่จริง โดยการสัมภาษณ์ เกษตรกร จำนวน 35 คน ได้แก่ ข้อมูลพื้นที่เพาะปลูกข้าว ข้อมูลข้าว วิธีการเพาะปลูก ข้อมูลการเตรียมแปลง ปริมาณการใช้น้ำ และข้อมูลทุติยภูมิ คือ ข้อมูลที่ได้บันทึกไว้ในซอฟต์แวร์ ได้แก่ ข้อมูลปริมาณน้ำฝน ค่าปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (ET_o) และค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของข้าว (K_c) ผลการวิจัยสามารถอธิบายได้ดังนี้ เกษตรกรส่วนใหญ่ปลูกข้าวนาปีด้วยวิธีการนาหว่านน้ำตาม ซึ่งมีค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน(Wblue) มีค่าเท่ากับ 1,246.48 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว (Wgreen) มีค่าเท่ากับ 694.90 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทา (Wgrey) มีค่าเท่ากับ 877.16 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน และค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์โดยรวมของการปลูกข้าวเท่ากับ 2,818.53 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน และให้ผลผลิตเฉลี่ย 0.8 ตันต่อไร่ จากผลการวิจัยดังกล่าว ค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวในจังหวัดสุพรรณบุรี มีค่าแตกต่างจากข้าวในพื้นที่อื่น ซึ่งการวิจัยครั้งนี้ได้นำเสนอปัจจัยที่ทำให้ค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์มีค่าแตกต่าง และเสนอแนะแนวทางการลดปริมาณวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวในเขตพื้นที่จังหวัดสุพรรณบุรีด้วย

คำสำคัญ: วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ ข้าว สุพรรณบุรี

¹ อาจารย์ประจำสาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์

Abstract

The objective of this research was to assess the water footprint of rice in Supanburi province in year 2016. In this research, the data was collected by the field research technique. Moreover, the WAPF software was used to assess the water footprint. The researcher collected the data which were distinguished into two types. Primary data was the filed collection from interviewing the 35 farmers. These data consisted of the area of rice production, rice data, and the amount of fertilizers. Secondly, the secondary data was recorded within the software. These were the volume of rainfall, Reference Crop Evapotranspiration (Eto), and Crop Coefficient (Kc). The results indicated that the blue water footprint (Wblue) was 1,246.48 m³/ton, the green water footprint (Wgreen) was 694.9 m³/ton, the grey water footprint (Wgrey) was 877.16 m³/ton, and the total water footprint of rice was 2,818.53 m³/ton. Furthermore, the yield of rice was average 0.8 ton/rai. From above results, the water footprint of rice in Supanburi province differed from other areas. Therefore, this research had presented the factors that made the differences and suggested the ways to reduce the water footprint of rice in Supanburi province as well.

Keywords: water footprint, rice, Supanburi

1. บทนำ

ในปัจจุบัน หลายประเทศทั่วโลกกำลังประสบกับปัญหาสภาวะแวดล้อม ทั้งที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของธรรมชาติ เช่น ไฟป่า แผ่นดินไหว ภูเขาไฟระเบิด น้ำท่วม และเกิดจากการกระทำของมนุษย์ เช่น การขยายตัวของชุมชนเมือง การเพิ่มของประชากร และความรู้เท่าไม่ถึงการณ์

ปัญหาด้านทรัพยากรน้ำ นับเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่หลายประเทศได้ให้ความสำคัญ เนื่องจาก ปริมาณน้ำในโลกมีปริมาณมากกว่า 70 เพอร์เซ็นต์ของพื้นที่โลก แต่มีเพียงประมาณ 2.5 เพอร์เซ็นต์ที่เป็นน้ำจืดและมีน้อยกว่า 1 เพอร์เซ็นต์เท่านั้นที่สามารถนำมาใช้อุปโภคบริโภคได้ [1] ดังนั้น การบริหารจัดการทรัพยากรน้ำถือเป็นเรื่องสำคัญในการจัดการสิ่งแวดล้อมในระดับภูมิภาคและระดับ

สากล ในขณะนี้ ประเทศไทยกำลังเผชิญปัญหาเกี่ยวกับทรัพยากรน้ำอย่างต่อเนื่อง ไม่ว่าจะเป็นปัญหาน้ำเน่าเสีย ปัญหาอุทกภัย ปัญหาขาดแคลนน้ำ ซึ่งทางหน่วยงานต่างๆทั้งภาครัฐและภาคเอกชน ได้เล็งเห็นถึงความสำคัญในการแก้ไขปัญหาต่างๆ เหล่านี้ เช่น ในปี พ.ศ. 2560 ทางรัฐบาลได้บรรจุวาระการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ ในแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 12 (พ.ศ. 2560-2564) เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำทั้งระบบอย่างยั่งยืน

การวิจัยครั้งนี้ ได้นำหลักการวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ มาใช้เพื่อช่วยในการวางแผนบริหารจัดการทรัพยากรน้ำกล่าวคือ หลักการวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ หมายถึง การคำนวณหาปริมาณการใช้น้ำของกระบวนการผลิตสินค้าและองค์กร ในปัจจุบันได้ถูกนำมาใช้

อย่างกว้างขวางเพื่อช่วยในการวางแผนการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ ซึ่งการประเมินค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ จะช่วยให้ผู้ผลิตหรือองค์กรต่างๆ ทราบถึงข้อมูลปริมาณการใช้น้ำในแต่ละผลิตภัณฑ์หรือแต่ละกิจกรรมเพื่อวางแผนการจัดสรรน้ำและ วางแผนการใช้น้ำอย่างประหยัดและเหมาะสม และเป็นการสนับสนุนให้องค์กรมีการดำเนินงานอย่างยั่งยืน และในปัจจุบันสำนักงานรับรองมาตรฐานไอเอสโอได้จัดทำมาตรฐาน ISO14046: 2015, Environmental management -- Water footprint -- Principles, requirements and guidelines บรรจุอยู่ในอนุกรมมาตรฐานการจัดการสิ่งแวดล้อม ISO 14000 เพื่อเป็นแนวทางการจัดทำร่องรอยการใช้น้ำหรือวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ บนพื้นฐานการประเมินวงจรชีวิตผลิตภัณฑ์

จากผลการศึกษาของ Hoekstra และ Chapagain [2] ในช่วงปี พ.ศ. 2540 – 2544 ประเทศที่มีค่าเฉลี่ยของการใช้น้ำสูงสุด 5 อันดับแรก (คิดเป็นสัดส่วนต่อจำนวนประชากร) ได้แก่ สหรัฐอเมริกา อิตาลี ไทย ไนจีเรีย และรัสเซีย ตามลำดับ จากข้อมูลดังกล่าว การใช้น้ำของประเทศไทยเป็นอันดับ 3 ของโลกมีค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์เฉลี่ย 2,223 ลูกบาศก์เมตรต่อคนต่อปี รองจากประเทศสหรัฐอเมริกา และประเทศอิตาลีที่มีค่าเฉลี่ย 2,485 และ 2,332 ลูกบาศก์เมตรต่อคนต่อปี ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์เฉลี่ยต่อจำนวนประชากรของประเทศไทยมีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ยของโลกมากถึงร้อยละ 44 ซึ่งน้ำส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้ประโยชน์ในภาคอุตสาหกรรมเกษตร โดยเฉลี่ย 2,131 ลูกบาศก์เมตรต่อคนต่อปี คิดเป็นอัตราส่วนมากกว่าร้อยละ 95 ของค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์เฉลี่ยทั้งหมดของประเทศ นอกจากนี้ รายงานการวิจัยของ Hoekstra และ Mekonnen [3] ได้สนับสนุนว่า วอเตอร์ฟุตพริ้นท์

ของผู้บริโภคในโลก ซึ่งนับรวมจากการใช้น้ำทั้งทางตรงและทางอ้อม โดยประมาณ 3.8% ของวอเตอร์ฟุตพริ้นท์เกี่ยวข้องกับการใช้ในครัวเรือน 96.2% ของวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ที่ไม่สามารถมองเห็นเกี่ยวข้องกับการผลิตผลิตภัณฑ์ที่จำหน่ายในตลาด ซึ่งแบ่งออกเป็น 91.5% ของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร และ 4.7% เป็นผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

ข้าว นับเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย เนื่องจากเป็นอาหารหลักและสินค้าส่งออกที่สำคัญ มีการส่งออกข้าวไทย ในปี 2558 ปริมาณ 9,795,763 ตัน มีมูลค่า 155,912 ล้านบาท หรือประมาณ 4,613 ล้านเหรียญสหรัฐฯ [4] ในปี 2558 เขตภาคกลาง จังหวัดสุพรรณบุรีนับเป็นจังหวัดที่เนื้อที่เพาะปลูกมากที่สุดและให้ผลผลิตมากที่สุดคือ เนื้อที่เพาะปลูกข้าวจำนวน 1,077,052 ไร่ เนื้อที่เก็บเกี่ยว 631,710 ไร่ และให้ผลผลิตจำนวน 732,395 ตัน [5]

การประเมินค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวในประเทศไทยนั้นเป็นการประเมินค่าโดยรวมทั้งประเทศหรือบางเขตพื้นที่ ซึ่งจังหวัดสุพรรณบุรีเป็นเขตพื้นที่มีการเพาะปลูกข้าวมากเป็นอันดับต้นๆ ในเขตภาคกลาง แต่ยังไม่มีการดำเนินประเมินค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวที่เพาะปลูกในจังหวัด ทำให้การจัดสรรน้ำเพื่อการเพาะปลูกข้าวอาจไม่เพียงพอหรือขาดประสิทธิภาพ

ดังนั้น งานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวที่ปลูกในเขตพื้นที่จังหวัดสุพรรณบุรี เพื่อให้เกิดการจัดสรรน้ำได้อย่างเพียงพอและเกิดประสิทธิภาพสูงสุด

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์

แนวคิดวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ เริ่มคิดค้นโดย

ศาสตราจารย์ Hoekstra และคณะ ชาวเนเธอร์แลนด์ ในปี ค.ศ. 2002 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ หมายถึง ปริมาณน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตสินค้าและบริการทั้งทางตรงและทางอ้อม โดยคำนวณปริมาณน้ำจากผลรวมของทุกขั้นตอนตลอดห่วงโซ่ของการผลิตสินค้าและบริการ มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เมตรต่อปี หรือลูกบาศก์เมตรต่อคนต่อปี [6] ซึ่งวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

1) วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน (Blue Water Footprint, Wblue) หมายถึง ปริมาณน้ำบนผิวดินและน้ำใต้ดิน เช่น น้ำบาดาล น้ำชลประทาน ที่ถูกนำไปใช้

2) วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว (Green Water Footprint, Wgreen) หมายถึง ปริมาณน้ำฝนที่ถูกนำไปใช้

3) วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทา (Grey Water Footprint, Wgrey) หมายถึง ปริมาณน้ำสะอาดที่นำไปชะล้างน้ำเสียหรือบำบัดน้ำเสียให้เป็นน้ำดีตามค่ามาตรฐาน

ตัวอย่างค่าเฉลี่ยระดับโลกสำหรับการใช้น้ำในการผลิตสินค้าต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ เช่น ผลิตสมาร์ทโฟน 1 เครื่องใช้น้ำ 910 ลิตร ผลิตเสื้อยืดคอตัดตอน 1 ตัว ใช้น้ำ 2,500 ลิตร ผลิตยางรถยนต์ใหม่ 4 เส้น ใช้น้ำ 7,850 ลิตร ผลิตน้ำโคล่า 1 ขวด (500 มิลลิลิตร) ใช้น้ำ 175 ลิตร และผลิตขอสมะเขือเทศ 1 กิโลกรัม ใช้น้ำ 530 ลิตร [7]

การประเมินค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ในภาคเกษตรกรรมของ Mekonnen และ Hoekstra [8] อ้างถึงใน สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม [9] ได้แสดงวิธีการหาค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ทั้งหมดที่เกิดจากการเพาะปลูกพืชหรือต้นไม้ (Total water footprint of process of growing crop or tree, WF_{proc, crop}) ดังสมการต่อไปนี้

$$WF_{proc, crop} = WF_{proc, blue} + WF_{proc, green} + WF_{proc, grey} \quad (1)$$

$$WF_{proc, blue} = \frac{CWU_{blue}}{Y} \quad (2)$$

$$WF_{proc, green} = \frac{CWU_{green}}{Y} \quad (3)$$

$$WF_{proc, grey} = \frac{(\alpha \times AR) / (C_{max} - C_{natural})}{Y} \quad (4)$$

CWU คือ ปริมาณน้ำที่พืชใช้ (ลูกบาศก์เมตรต่อไร่)
AR คือ อัตราการใช้สารเคมีในพื้นที่เพาะปลูก (กิโลกรัมต่อไร่)

α คือ สัดส่วนการชะล้างสารพิษ

C_{max} คือ ความเข้มข้นมากที่สุดของสารพิษที่ยอมรับได้ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

$C_{natural}$ คือ ความเข้มข้นตามธรรมชาติของสารพิษ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

Y คือ ปริมาณผลผลิตต่อพื้นที่เพาะปลูก (ตันต่อไร่)

Hoekstra และ Chapagain [10] ได้วิจัยปริมาณค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของภาคเกษตรกรรม ซึ่งผลการวิจัยพบว่า กาแฟมีค่าเท่ากับ 17,373 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน มะกอกมีค่าเท่ากับ 4,393 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน มะพร้าวมีค่าเท่ากับ 2,545 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน ข้าวมีค่าเท่ากับ 2,291 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน ข้าวบาร์เลย์ มีค่าเท่ากับ 1,388 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน มันฝรั่งมีค่าเท่ากับ 255 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน และอ้อยมีค่าเท่ากับ 175 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน

2.2 การปลูกข้าวในจังหวัดสุพรรณบุรี

จากข้อมูลของสำนักงานเศรษฐกิจ [5] พบว่า จังหวัดสุพรรณบุรี ในเขตพื้นที่ทั้งหมด 10 อำเภอ มีเนื้อที่เพาะปลูกข้าว และผลผลิตดังตารางที่ 1 ดังนั้น

ในการวิจัยครั้งนี้ ทางผู้วิจัยได้เลือกพื้นที่สำหรับทำการวิจัย คือ อำเภอที่มีเนื้อที่ในการเพาะปลูกและให้ผลผลิตมากที่สุด 7 อำเภอ ได้แก่ อำเภอบางพลาม้า อำเภอเมืองสุพรรณบุรี อำเภอเดิมบางนางบวช อำเภอสองพี่น้อง อำเภออู่ทอง อำเภอศรีประจันต์ และอำเภอสามชูก ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ขั้วนาปี : เนื้อที่เพาะปลูกและผลผลิตรายอำเภอ จังหวัดสุพรรณบุรี ปีเพาะปลูก 2557 [5]

อำเภอ	เนื้อที่ เพาะปลูก (ไร่)	ผลผลิต (ตัน)
บางพลาม้า	204,110	154,919
เมืองสุพรรณบุรี	190,847	138,746
เดิมบางนางบวช	172,503	124,720
สองพี่น้อง	154,066	117,090
อู่ทอง	140,345	102,171
ศรีประจันต์	126,445	92,811
สามชุก	122,615	88,651
ดอนเจดีย์	97,651	76,571
หนองหญ้าไซ	96,705	64,986
ด่านช้าง	1,131	293

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ เป็นการวิจัยศึกษาเชิงสำรวจเฉพาะกรณี (Case Study) ซึ่งมีขั้นตอนการวิจัยตามหลักการของ Yin [11] โดยแบ่งเป็น 6 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นที่ 1 กำหนดคำถามการวิจัย ในการวิจัยครั้งนี้ได้กำหนดคำถามการวิจัย คือ ค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวในเขตจังหวัดสุพรรณบุรีคือเท่าใด

ขั้นที่ 2 เลือกกรณีศึกษา หาข้อมูลที่เกี่ยวข้องและวิธีวิเคราะห์ข้อมูล ในการวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาและการสำรวจในเขตพื้นที่ที่กำหนด ซึ่งผู้วิจัยได้กำหนดขอบเขตกรณีศึกษาดังนี้ คือ 1) เขตอำเภอที่มีการเพาะปลูกข้าวในจังหวัดสุพรรณบุรีและอยู่ในเขตชลประทานจำนวน 7 อำเภอ ได้แก่ อำเภอบางพลาม้า อำเภอเมืองสุพรรณบุรี อำเภอเดิมบางนางบวช อำเภอสองพี่น้อง อำเภออู่ทอง อำเภอศรีประจันต์ และอำเภอสามชุก 2) ศึกษาจากกลุ่มตัวอย่าง ซึ่งการคัดเลือกกลุ่มตัวอย่างในการวิจัยครั้งนี้ เป็นไปตามหลักของ Gosset [12] ดังที่กล่าวไว้ว่า จำนวนกลุ่มตัวอย่างขนาดเล็กที่สุดที่จะทำการวิเคราะห์ทดสอบใด ๆ คือจำนวน 30 คน ดังนั้นการวิจัยในครั้งนี้ จึงทำการเลือกศึกษาจากกลุ่มตัวอย่างจากเกษตรกรในเขตพื้นที่ 7 อำเภอ อำเภอละ 5 คน รวม 35 คน และทางผู้วิจัยได้ทำการเลือกกลุ่มตัวอย่างในเก็บข้อมูลด้วยวิธีการเลือกแบบตามสะดวก (Convenience Sampling) เนื่องจากงบประมาณและระยะเวลาที่จำกัด 3) ศึกษาโดยใช้ข้อมูลการเพาะปลูกในช่วงปี 2559 และ 4) ใช้ข้อมูลปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายเดือนในเขตจังหวัดสุพรรณบุรี, ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของข้าว (Crop Coefficient, Kc), ค่าปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง (Reference Crop Evapotranspiration, ETo) โดยใช้สูตร Penman Monteith [13] จากโปรแกรมคำนวณความต้องการน้ำเพื่อการปลูกข้าว (Water Allocation in Paddy Field, WAPF) เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปที่จัดทำขึ้นโดยกรมชลประทาน มีวัตถุประสงค์เพื่อช่วยในการคำนวณความต้องการน้ำของการเพาะปลูกข้าวในเขตชลประทาน ดังแสดงในรูปที่ 1

ขั้นที่ 3 การเตรียมเก็บข้อมูล ในขั้นตอนนี้ทางผู้วิจัยได้ทำการเตรียมเก็บข้อมูล โดยแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ประเภท เพื่อให้สามารถนำมาประเมินค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวได้ ดังต่อไปนี้

The screenshot shows a software interface for water allocation in paddy fields. It contains several sections with input fields and dropdown menus. Key sections include:

- Location:** Fields for district, province, and village.
- Crop Information:** Fields for crop type (e.g., rice), planting date, and harvest date.
- Water Requirements:** Fields for water depth, water volume, and water flow rate.
- Water Allocation:** Fields for allocated water volume and allocation date.
- Water Source:** Fields for water source type (e.g., river, canal) and source location.
- Water User:** Fields for user name and user address.
- Water Allocation History:** A table showing past allocations with columns for date, volume, and user.

รูปที่ 1 ตัวอย่างการคำนวณด้วยโปรแกรมคำนวณความต้องการน้ำเพื่อการปลูกข้าว

1) ข้อมูลปฐมภูมิ คือ ข้อมูลที่ได้จากการลงพื้นที่เก็บข้อมูลจากสถานที่จริง โดยการสัมภาษณ์เกษตรกรใน 7 อำเภอละ 5 คนจำนวนรวมทั้งสิ้น 35 คน ได้แก่ ข้อมูลพื้นที่เพาะปลูกข้าว ข้อมูลข้าว วิธีการเพาะปลูก ข้อมูลการเตรียมแปลง ข้อมูลคุณสมบัติของดินและปริมาณการใช้ปุ๋ย

2) ข้อมูลทุติยภูมิ คือ ข้อมูลที่ได้บันทึกไว้ในซอฟต์แวร์ ได้แก่ ข้อมูลปริมาณน้ำฝน ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของข้าวและค่าปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง โดยใช้สูตร Penman Monteith

ขั้นที่ 4 การเก็บข้อมูล ข้อมูลในการวิจัยครั้งนี้เริ่มเก็บบันทึกตั้งแต่เดือนมกราคม ถึงเดือนธันวาคม 2559

ขั้นที่ 5 ประเมินและวิเคราะห์ข้อมูล โดยใช้โปรแกรมคำนวณความต้องการน้ำเพื่อการปลูกข้าว (WAPF) ของกรมชลประทาน

ขั้นที่ 6 สรุปผลการวิจัยและจัดทำรายงาน

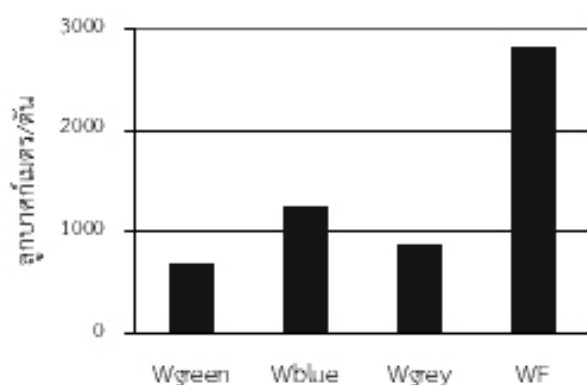
3. ผลการวิจัย

ผลการวิจัยพบว่า เกษตรกรส่วนใหญ่ในเขตพื้นที่จังหวัดสุพรรณบุรีนิยมปลูกข้าวนาปีด้วยวิธีการนาหว่านน้ำตมและนิยมใช้ปุ๋ยเคมีในการปลูกข้าวดังนั้น การคำนวณค่าวอเตอร์ฟุตพรีนท์สีเทา (W_{grey}) ในการวิจัยครั้งนี้กำหนดให้ค่า C_{max} เท่ากับ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยพิจารณาจากปริมาณของไนโตรเจน (N) ที่มีอยู่ในปุ๋ยที่เกษตรกรใช้ในการเพาะปลูก โดยใช้ค่ามาตรฐานตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 8 พ.ศ. 2537 [14] ซึ่งกำหนดให้มีค่าไนเตรต (NO_3) ในน้ำไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และกำหนดให้ค่า C_{nat} เท่ากับศูนย์เนื่องจากขาดข้อมูลที่เหมาะสม ตามหลักการของ Hoekstra และคณะ [15] ดังนั้น ผลการวิจัยพบว่าในแต่ละอำเภอมียาวอเตอร์ฟุตพรีนท์เฉลี่ยของการปลูกข้าว ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์เฉลี่ยของการปลูกข้าวในแต่ละอำเภอ

อำเภอ	W _{green} (m ³ /ton)	W _{blue} (m ³ /ton)	W _{grey} (m ³ /ton)	WF (m ³ /ton)	Yield (kg/rai)
บางปลาหม้	657.55	1,198.04	792.03	2,647.62	830.00
เมือง	741.70	1,304.59	1,017.13	3,063.42	730.00
เดิมบางนางบวช	767.15	1,358.33	849.82	2,975.30	730.00
สองพี่น้อง	558.89	1,165.41	771.64	2,495.95	900.00
อู่ทอง	566.00	1,117.69	1,028.92	2,712.61	960.00
ศรีประจันต์	789.19	1,226.29	811.12	2,826.60	750.00
สามชุก	783.82	1,355.02	869.42	3,008.25	700.00
เฉลี่ย	694.90	1,246.48	877.16	2,818.53	800.00

และมีค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์เฉลี่ยรวมทั้งจังหวัดดังนี้ วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน (W_{blue}) มีค่าเท่ากับ 1,246.48 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว (W_{green}) มีค่าเท่ากับ 694.9 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทา (W_{grey}) มีค่าเท่ากับ 877.16 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน และค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์โดยรวมของการปลูกข้าวเท่ากับ 2,818.53 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน ดังแสดงในรูปที่ 2 และให้ผลผลิตข้าวเฉลี่ย 0.8 ตันต่อไร่



รูปที่ 2 วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าว
ในจังหวัดสุพรรณบุรี

จากผลการวิจัยดังกล่าว ทางผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบการประเมินค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวในเขตพื้นที่อื่นๆ คือ การปลูกข้าวในประเทศไทย [16] การปลูกข้าวในเขตชลประทานโครงการโคกกระเทียมและพื้นที่ฝั่งซ้ายคลองชัยนาท-ป่าสัก [17] และการปลูกข้าวในเขตพื้นที่จังหวัดน่าน [18] ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ในเขตพื้นที่อื่นๆ

พื้นที่	W _{green} (m ³ /ton)	W _{blue} (m ³ /ton)	W _{grey} (m ³ /ton)	WF (m ³ /ton)	Yield (kg/rai)
สุพรรณบุรี	694.9	1,246.48	877.16	2,818.5	800
ประเทศไทย [16]	559	942	116	1,617	260
โคก กระเทียม [17]	438	438	438	438	438
น่าน [18]	1,470.33	-	788.49	2,258.82	747

ทำการเพาะปลูก และระยะเวลาที่ใช้ในการเพาะปลูก เป็นช่วงที่ในเขตพื้นที่จังหวัดสุพรรณบุรีมีปริมาณฝน จำนวนมาก ซึ่งส่งผลโดยตรงกับปริมาณค่า W_{green} ซึ่งเป็นปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ จึงส่งผลให้ค่า วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวสูงไปด้วย

ปัจจัยที่สอง คือ ปริมาณน้ำผิวดินที่มีปริมาณ สูง เนื่องจากจังหวัดสุพรรณบุรีซึ่งอยู่เขตในภาคกลาง มีลักษณะเป็นพื้นที่ราบลุ่ม มีแม่น้ำลำคลองจำนวนมาก และจังหวัดสุพรรณบุรีมีเขตชลประทานสุพรรณบุรี โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษา ส่งผลให้มีการขาด แคลนน้ำในการทำนาข้าว และส่งผลให้ปริมาณ W_{blue} มีปริมาณมากเพียงพอ และรวมถึงไม่มีการขาดแคลน น้ำผิวดินในการเพาะปลูกข้าวของเกษตรกร

ปัจจัยที่สาม คือ ปริมาณการใช้น้ำ เนื่องจาก ในปัจจุบัน การเพาะปลูกข้าวของเกษตรกรส่วนใหญ่ นิยมการใช้น้ำอย่างต่อเนื่องซึ่งส่งผลต่อสภาพดิน ทำให้ดินมีปริมาณอินทรีย์วัตถุน้อยลง ทำให้เกษตรกร ต้องมีการเพิ่มปริมาณการใช้น้ำอย่างต่อเนื่อง และ ส่งผลให้ปริมาณ W_{grey} ของการเพาะปลูกข้าวใน เขตจังหวัดสุพรรณบุรีมีปริมาณสูงมากเมื่อเทียบกับ ปริมาณที่วิจัยที่ผ่านมา [16-18]

ปัจจัยที่สี่ ปริมาณผลผลิตต่อไร่ เนื่องจาก ปริมาณผลผลิตต่อไร่ เป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ W_{green} , W_{blue} , W_{grey} ตามสมการ ถ้าปริมาณ ผลผลิตต่อไร่มีปริมาณสูงจะส่งผลให้ค่าปริมาณ วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ลดลง และในทางกลับกัน หาก ปริมาณผลผลิตต่อไร่มีปริมาณน้อยจะส่งผลให้ค่า วอเตอร์ฟุตพริ้นท์มีปริมาณมากด้วย

ปัจจัยที่ห้า คือ ปริมาณความร้อนในธรรมชาติ ซึ่งส่งผลค่า ET_o และ K_c ทำให้ข้าวต้องมีการใช้น้ำ เพิ่มมากกว่าปกติ ซึ่งหากค่า ET_o และ K_c มีปริมาณสูง จะส่งผลต่อค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ให้มีปริมาณสูง เช่นกัน

แนวทางการการลดปริมาณวอเตอร์ฟุตพริ้นท์ ในการเพาะปลูกข้าวในเขตพื้นที่จังหวัดสุพรรณบุรี สามารถทำได้หลายวิธี เช่น

1. จากผลการวิจัย พบว่าปริมาณ W_{grey} สามารถลดลงได้ โดยควรให้เกษตรกรลดปริมาณ การใช้น้ำที่เป็นสารเคมี โดยส่งเสริมให้มีการใช้น้ำ ชีวภาพ หรือใช้จุลินทรีย์ช่วยในการบำรุงดินให้พร้อม ในการปลูกข้าว เพื่อลดการใช้น้ำเคมี ซึ่งจะสามารถ ลดปริมาณ W_{grey} และส่งผลโดยรวมของวอเตอร์ ฟุตพริ้นท์ลดลง

2. ควรส่งเสริมให้เกษตรกรมีการใช้เมล็ด พันธุ์ข้าวที่มีความเหมาะสมกับพื้นที่ และให้ผลผลิต ที่มีปริมาณสูง ซึ่งค่าเฉลี่ยของผลผลิตของกลุ่มตัวอย่าง มีค่าประมาณ 800 กิโลกรัมต่อไร่ ซึ่งสามารถพัฒนา หรือส่งเสริมให้ชาวนามีผลผลิตข้าวมากกว่าใน ปัจจุบันได้

5. สรุป

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินค่า วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวที่ปลูกในเขตพื้นที่จังหวัด สุพรรณบุรี ในช่วงปี พ.ศ. 2559 โดยเก็บรวบรวม ข้อมูลโดยใช้เทคนิคการวิจัยภาพสนาม และคำนวณ หาค่า วอเตอร์ฟุตพริ้นท์โดยใช้โปรแกรมคำนวณ ความต้องการน้ำเพื่อการปลูกข้าว (WAPF) ซึ่งได้ผล การวิจัย ดังต่อไปนี้ ค่าวอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีน้ำเงิน (W_{blue}) มีค่าเท่ากับ 1,246.48 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเขียว(W_{green}) มีค่าเท่ากับ 694.9 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน วอเตอร์ฟุตพริ้นท์สีเทา (W_{grey}) มีค่าเท่ากับ 877.16 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน และค่า วอเตอร์ฟุต พริ้นท์โดยรวมของการปลูกข้าวเท่ากับ 2,818.53 ลูกบาศก์เมตรต่อตัน และให้ผลผลิตข้าว เฉลี่ย 0.8 ตันต่อไร่ ซึ่งจากผลการวิจัยที่ได้พบว่าค่า วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวในพื้นที่จังหวัดสุพรรณบุรี

มีค่าสูงกว่าพื้นที่อื่นๆ เนื่องมาจาก 5 ปัจจัยหลัก คือ สภาพภูมิอากาศ ปริมาณน้ำผิวดิน ปริมาณการใช้น้ำของเกษตรกร ปริมาณผลผลิตต่อไร่ และปริมาณความร้อนในธรรมชาติ นอกจากนี้ทางผู้วิจัยได้เสนอแนวทางการลดปริมาณมอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวในพื้นที่จังหวัดสุพรรณบุรี คือ การลดปริมาณการใช้น้ำของเกษตรกร และการใช้พันธุ์ข้าวที่มีความเหมาะสมกับพื้นที่ เพื่อให้ได้ผลผลิตที่มากขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

รายงานวิจัยฉบับนี้ ได้รับทุนอุดหนุนจากมหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ งบประมาณแผ่นดิน โดยผ่านสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

เอกสารอ้างอิง

- [1] University of Michigan., 2006. **Human appropriation of the world's fresh-water supply.**
- [2] Hoekstra A. Y. and Chapagain A. K., 2007. "Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern," **Water Resources Management.** 21: 35-48.
- [3] Hoekstra A. Y. and Mekonnen M. M., 2012. "The water footprint of humanity," **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America.** 109 : 3232-3237.
- [4] สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย, 2559. "สถิติการส่งออกข้าวของไทย," **ข่าวสมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย.** 2: 1.
- [5] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2558. **สถิติการเกษตรของประเทศไทย ปี 2558.** กรุงเทพฯ: สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร.
- [6] Chapagain A. K., Hoekstra A. Y., Savenije H. H. G., and Gautam R., 2006. "The water footprint of cotton consumption: An assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries," **Ecological Economics.** 60: 186-203.
- [7] Leahy S., 2014. **Your Water Footprint: The Shocking Facts about how Much Water We Use to Make Everyday Products: Firefly Books.**
- [8] Mekonnen M. M. and Hoekstra A. Y., 2011 "The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products", **Hydrology and Earth System Sciences.** 15: 1577-1600.
- [9] สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, 2557. **ร่องรอยการใช้น้ำหรือมอเตอร์ฟุตพริ้นท์.** [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <http://fic.nfi.or.th/waterfootprint/index.php/component/content/article/79-studybasic/75-footprint23> (31 พฤษภาคม 2560)
- [10] Hoekstra A. Y. and Chapagain A. K., 2008. **Globalization of Water: haring the Planet's Freshwater Resources.** Wiley.

- [11] Yin R. K., 2003. **Case Study Research: Design and Methods**. SAGE Publications.
- [12] Gosset W. S., 1908. "The Probable Error of a Mean," *Biometrika*. 6: 1-25.
- [13] Monteith J. L., 1965. "Evaporation and environment," *Symp Soc Exp Biol*. 19: 205-34.
- [14] ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 8 (พ.ศ. 2537), 2537. กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน. ราชกิจจานุเบกษา. เล่ม 111 ตอน16ง.
- [15] Hoekstra A. Y., Chapagain A., Martinez-Aldaya M., and Mekonnen M., 2011. **The water footprint assessment manual; setting the global standard**. Earthscan: London, UK.
- [16] Chapagain A. K. and Hoekstra A. Y., 2011. "The blue, green and grey water footprint of rice from production and consumption perspectives," *Ecological Economics*, 70 : 749-758.
- [17] อีระวัฒน์ ธรรมนิยม, 2555. **วอเตอร์ฟุตพริ้นท์ของข้าวในพื้นที่โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาโคกกระเทียม**. ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร.
- [18] Chatpanyacharoen W., Hungspreug N., Anurugsa B., and Taweasuk S. 2015. "Water Footprint Evaluation of *Oryza sativa* L. Tha Wang Pha District, Nan Province", *Thammasat International Journal of Science and Technology*. 20: 21 – 28.

การสร้างเครื่องย่อยทางปาล์มแบบใบตัดตั้งฉากกึ่งอัตโนมัติขนาดเล็ก

Construction of A Small Semi-automatic Orthogonal Cutting Blade Plam Chopper

ปราโมทย์ พูนนายม¹ ไพบูลย์ แยมเพื่อน² วรญา วัฒนจิตศิริ³ สุรัตน์ ตรัณวนพงศ์⁴ และกิตติพงษ์ กิมะพงศ์⁵
promote.p@en.rmutt.ac.th¹, paiboon.y@en.rmutt.ac.th², voraya.w@en.rmutt.ac.th³, surat.t@en.rmutt.
ac.th⁴, kittipong.k@en.rmutt.ac.th⁵

บทคัดย่อ

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชเศรษฐกิจสำคัญที่สามารถแก้ไขปัญหาการขาดแคลนพลังงานในประเทศไทยและมีพื้นที่เพาะปลูกและปริมาณการปลูกสูงทั่วทั้งประเทศ ด้วยเหตุนี้การบริหารจัดการพื้นที่การเพาะปลูกปาล์มจึงต้องมีการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพเพื่อให้ได้ปริมาณผลผลิตตามต้องการ กิ่งปาล์มที่ถูกตัดที่มีปริมาณสูงคือหนึ่งในปัญหาปัจจุบันที่ต้องการในการย่อยสลายและนำไปใช้ประโยชน์แต่เป็นไปได้ยากเนื่องจากเครื่องตัดย่อยที่มีขนาดใหญ่เคลื่อนที่เข้ามาในพื้นที่ปลูกปาล์มได้ลำบาก ด้วยเหตุผลดังกล่าวโครงการนี้มีจุดประสงค์ในการออกแบบและสร้างเครื่องย่อยทางปาล์มใบตัดตั้งฉากกึ่งอัตโนมัติขนาดเล็กที่สามารถเปลี่ยนแปลงตัวแปรการตัด เช่น ความเร็วรอบการหมุนของใบตัด จำนวนใบมีด ระยะช่องว่างการตัด และมุมของการเติมทางปาล์มเข้าสู่ใบตัด การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องทำได้โดยการชั่งน้ำหนักและวัดขนาดของเศษการตัดทางปาล์ม ผลการทดลองโดยสรุปมีดังต่อไปนี้ เครื่องตัดย่อยทางปาล์มที่ได้จากการออกแบบและสร้างขึ้นมีขนาดกว้าง 1000 มิลลิเมตร ยาว 1000 มิลลิเมตร สูง 1000 มิลลิเมตร ความเร็วรอบในการตัด 100-1000 รอบต่อนาที จำนวนใบมีด 2-6 ใบ ระยะการป้อน 0.5-3.0 มิลลิเมตร และมุมเอียงการป้อน 0-45 องศา ความเร็วรอบของงานตัดที่ให้เศษปริมาณสูงสุด 3,881 กรัมต่อนาที หนา 31.38 มิลลิเมตร คือความเร็วรอบในการตัด 1000 รอบต่อนาที ความหนาของรูปร่างเศษตัดที่ได้จากการทดลองมีค่าลดลงเมื่อความเร็วรอบของการตัดมีค่าเพิ่มขึ้น ความเร็วรอบการหมุนของงานตัดที่เพิ่มขึ้นส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มขึ้นของเศษการตัดทางปาล์ม

คำสำคัญ: ปาล์ม, เครื่องตัดปาล์ม, เศษการตัด,

^{1,2,3,4,5} อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Abstract

Palm is important crops that could solve an energy shortage problem in Thailand, had a high planting area and also had high volume grow in nationwide. Therefore, a management of a palm planting area should be effectively done for a required productive amount. High cutting palm branch amount was one of current problems that were required to degrade or utilize but it was difficult to operate because of a limit of a large cutting machine movement in a planting area. Such reasons, this project aimed to design and construct of a small semi-automatic orthogonal cutting blade that could adjust the cutting parameter such as a rotating speed of cutting blades, a cutting blade number, a cutting clearance and a palm feeding angle. The machine efficient test could be performed by a weight measurement and a dimension measurement of a palm cutting scrap. The summarized results are as follows. The dimension of the palm chopping machine that was designed and constructed was 1000 millimeters in width, 1000 millimeters in length and 1000 millimeters in high. The machine could operate under the rotating speed of 100-1000 rpm, the cutting blade of 2-6 blades, the feed distance of 0.5-3.0 millimeters and the tilted feed angle of 0-45 degrees. The cutting speed that produced a maximum chip production amount of 3,881 g/min and the average chip morphology of 31.38 millimeters in thickness, was 1000 rpm. The thickness of the cutting chip that were obtained in this experiment were decreased when the rotating speed of the cutting plate was increased. Furthermore, the increase of the rotating speed of the cutting plate directly affected to increase the palm chip production amount.

Keywords: plam, plam chopper, cutting scrap

1. บทนำ

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชน้ำมันชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญของโลก สำหรับประเทศไทยปาล์มเป็นพืชน้ำมันที่สำคัญของประเทศไทย ที่มีการขยายพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันเพิ่มขึ้น [1] เพื่อให้ได้ปริมาณน้ำมันปาล์มเพียงพอต่อความต้องการใช้ภายในประเทศ ด้านอุปโภคบริโภค และพลังงาน ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาประเทศไทยมีเนื้อที่ปลูกปาล์มน้ำมันมากกว่า 3 ล้านไร่ เนื้อที่ให้ผลผลิตมากกว่า 2.8 ล้านไร่ ผลผลิตมากกว่า 9 ล้านกิโลกรัม และเนื่องด้วยจากราคาน้ำมันพุ่งตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง

ทำให้รัฐบาลมีนโยบายส่งเสริมพื้นที่การปลูกปาล์มน้ำมันเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนในอนาคต [2]



รูปที่ 1 ทางปาล์มน้ำมันใบล่าง [3]

ในการจัดการสวนปาล์มน้ำมันเกษตรกรจะต้องตัดกิ่งปาล์มใบล่าง [3] ที่มีขนาดและรูปร่างดังรูปที่ 1 ที่รองรับทะลายปาล์มน้ำมันก่อนการเก็บเกี่ยว หรือโค่นต้นทิ้งเพื่อปลูกใหม่เมื่อต้นปาล์มน้ำมันมีอายุ 15 – 20 ปี โดยทั่วไปเกษตรกรจะเก็บเกี่ยวทะลายปาล์มน้ำมันทุกๆ 15-20 วัน เฉลี่ยแล้วทุกเดือนจะมีการตัดทางปาล์มน้ำมันออกอย่างน้อย 2 ทางปาล์มต่อต้น หรือคิดเป็น 44 ทางปาล์มต่อไร่ (อัตราปลูก 22 ต้นต่อไร่) [4] และกรณีที่เป็น สวนปาล์มปลูกใหม่ที่ยังไม่ได้ให้ผลผลิตจำเป็นต้องมีการตัดแต่งทางปาล์มน้ำมันปีละครั้งเกษตรกรส่วนใหญ่จะรวบรวมทางปาล์มน้ำมันที่ตัดจากต้นปาล์มมากองรวมกันในแนวร่องสวนปาล์มระหว่างต้นปาล์มน้ำมันดังรูปที่ 2 โดยทำการแบ่งออกเป็นหลายกอง แต่ละกองมีจำนวนเท่ากัน แล้วปล่อยให้ระยะเวลาทำการย่อยผสมลายกลายเป็นปุ๋ยบำรุงดินต้นปาล์ม ซึ่งใช้ระยะเวลาในการย่อยสลายยาวนานมากกว่า 1 ปี

เครื่องย่อยทางปาล์มเป็นเครื่องมือที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการย่อยทางปาล์มให้มีขนาดเล็กประมาณ 4-5 เซนติเมตร สามารถนำไปใช้ในการทำปุ๋ยบำรุงดิน ใช้เป็นอาหารสำหรับเลี้ยงสัตว์ได้ และทำให้ง่ายต่อการเคลื่อนย้ายออกจากพื้นที่เพาะปลูกได้ง่ายขึ้น [5, 6] ในอดีตเครื่องย่อยทางปาล์มถูกออกแบบให้ประกอบไปส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน คือ ส่วนแยกทางปาล์มและส่วนตัดย่อยทางปาล์มที่ออกแบบให้ใช้มีดตัดด้านข้างเพื่อการย่อยทางปาล์มอย่างไรก็ตามในอดีตเครื่องย่อยทางปาล์มมีขนาดใหญ่ไม่สะดวกในการเคลื่อนย้ายเข้าไปในร่องสวนปาล์ม นอกจากนั้นเครื่องย่อยทางปาล์มที่ได้มีข้อจำกัดที่ไม่สามารถย่อยทางปาล์มที่ถูกตัดออกจากต้นปาล์มที่มีระยะเวลาเกินกว่า 10 วัน เนื่องจากทางปาล์มที่มีระยะเวลายาวนานก่อให้เกิดการฟุ้งกระจายของเศษทางปาล์มและส่งผลต่อการลดอายุการใช้งานของใบมีดย่อยทางปาล์ม [6]



รูปที่ 2 ทางปาล์มน้ำมันร่อยย่อยสลาย [7]

การออกแบบและสร้างเครื่องย่อยทางปาล์มเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพระบบการย่อยทางปาล์ม คือ การออกแบบระบบการตัดอันประกอบด้วยรูปร่างใบตัด จำนวนใบตัดที่เหมาะสม และสมบัติทางกลของใบตัดที่ทนทาน จำเป็นต้องออกแบบและคำนวณหาอัตราส่วนการตัดต่อเนื่องต่อแรงกดอัดที่เหมาะสม ถ้าอัตราส่วนนี้มีค่าสูงจะทำให้เกิดแรงน้อยและลดการพังทลายของใบมีดในการตัดวัสดุ และค่าอัตราส่วนสามารถเปลี่ยนแปลงได้เมื่อมุมของปลายใบตัดเพิ่มขึ้น [8] ที่ผ่านมามีการศึกษาและพัฒนากระบวนการตัดเฉือนวัสดุที่น่าสนใจและใช้เป็นแนวคิดในการเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องย่อยทางปาล์มที่น่าสนใจดังนี้ ใบตัดที่มีความบางหรือมุมของใบตัดที่มีค่าน้อยซึ่งทำจากเหล็กกล้าคาร์บอน 1045 และ 1090 ที่ถูกทำการชุบแข็งด้วยขดลวดความร้อนและอบคืนไฟ อาจสามารถลดแรงในการตัดและง่ายต่อการย่อยวัสดุเนื่องจากความบางหรือมุมของใบมีดตัดย่อยที่มีค่าน้อยประกอบด้วยโครงสร้างจุลภาคที่มีความแข็ง คือ โครงสร้างมาเทนไซต์และโครงสร้าง

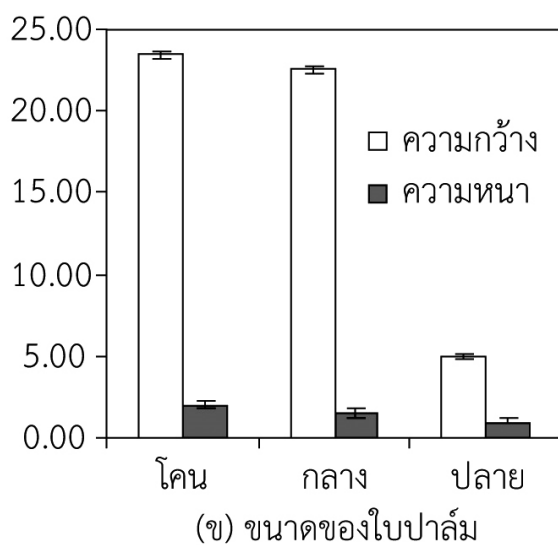
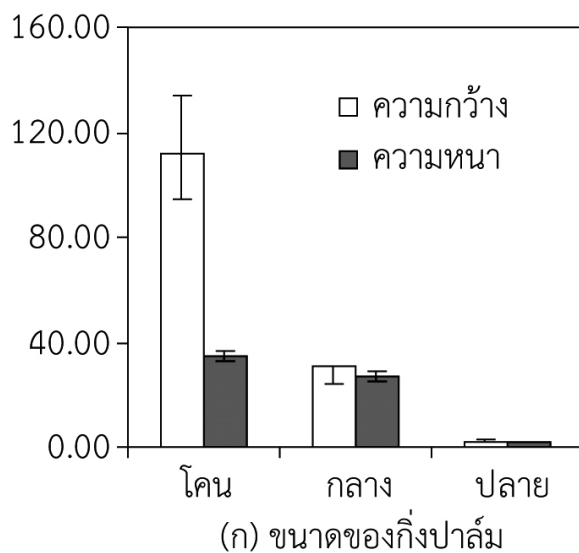
เบนไนท์ แต่เมื่อทำการทดสอบการสีกกร่อนโดยการ ตัดน้ำ ทราาย และแก้ว พบว่าใบมีดที่มีความบาง หรือมุมตัดน้อยทำให้เกิดการสีกกร่อนสูง [9] ใบมีด ที่มีอัตราการสีกกร่อนสูงสามารถป้องกันได้โดยการ เคลือบผิวคมใบมีดตัดด้วยผิวเคลือบชนิดต่างๆ ยกตัวอย่าง เช่น ผิวเคลือบอะลูมินา-ไททาเนียม ออกไซด์ หรือทังสเตนคาร์ไบด์-โคบอลท์ บนใบมีด เป็นต้น [10] หรือการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติทาง กลของใบมีดตัดที่ทำจากเหล็กกล้าต่างชนิดที่ผ่าน การชุบแข็งด้วยวิธีการต่างๆ ที่สามารถทำให้ใบมีด มีความแข็งในระดับเดียวกันกับใบมีดตัดที่นำเข้ามา จากต่างประเทศได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.5 [11] เมื่อนำวัสดุใบตัดไปใช้งานปัญหาหนึ่งที่เกิดขึ้น ในขั้นตอนการตัด คือ การเสื่อมสภาพของใบมีดตัด วัสดุต่างๆ เช่น การสีกกร่อนของคมตัดอาจมีสาเหตุ มาจากความร้อนที่เกิดขึ้นในขณะที่ทำการตัด ในขณะที่ ทำการตัดด้วยวัสดุ ความร้อนเนื่องจากการสัมผัส ระหว่างใบตัดและเนื้อวัสดุสามารถส่งผลโดยตรงต่อ การเสื่อมสภาพของวัสดุคมตัด ความร้อนที่เพิ่มขึ้นนี้ อาจเกิดขึ้นจากความเร็วรอบตัด ความต่อเนื่องของ การตัด ความลึกของการตัด และรูปร่างของเครื่อง มือตัด ตำแหน่งที่เกิดการสีกกร่อนสูงสุด คือ ตำแหน่ง ที่แสดงอุณหภูมิสูงสุด [12] เมื่อวัสดุคมตัดได้รับความร้อนและได้แรงกระทำซ้ำเป็นวัฏจักรทำให้เกิด ความล้าตัวของวัสดุคมตัดและส่งผลทำให้เกิดการสีก กร่อนได้ง่าย ด้วยเหตุนี้หากต้องการทำการลดการ สีกกร่อนการลดความร้อนและแรงกระทำต่อวัสดุ ใบมีดอาจสามารถส่งผลทำให้อายุการใช้งานของ ใบมีดเพิ่มขึ้นได้ [13]

ข้อมูลที่กล่าวมาข้างต้นคณะผู้วิจัยจึง มีแนวคิดในการสร้างเครื่องย่อยทางปาล์มที่มี ประสิทธิภาพในการย่อยทางปาล์ม และมีขนาดเล็ก สามารถเคลื่อนย้ายเข้าไปทุกตำแหน่งในสวนปาล์ม และเป็นเครื่องมือใบตัดที่มีความเหมาะสมที่ทำให้ เกิดการผลิตเศษที่ปริมาณสูงที่มีอายุการใช้งาน ยาวนานและก่อให้เกิดประโยชน์ต่อไป

2. การสร้างเครื่องย่อยทางปาล์มใบตัดตั้งฉาก

2.1 คุณลักษณะพื้นฐานทางปาล์ม

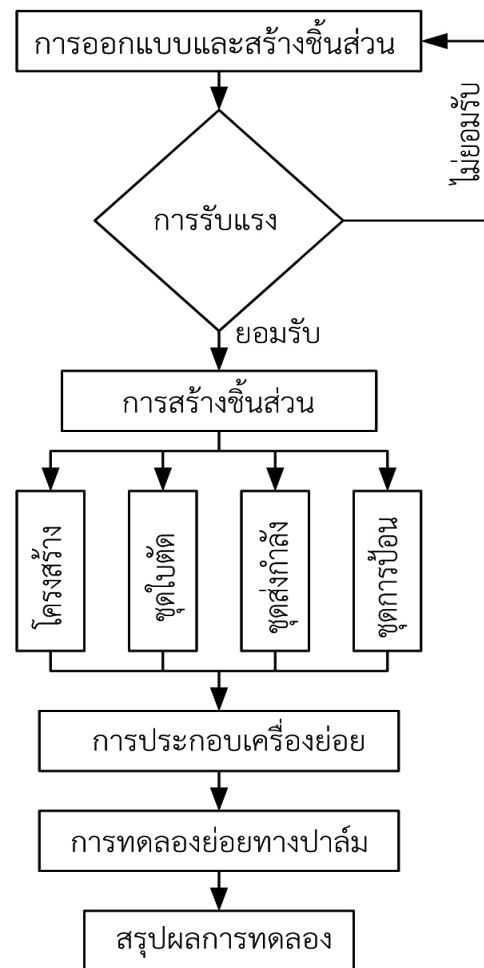
การเก็บข้อมูลทางปาล์มเพื่อใช้ประกอบ ในขั้นตอนการออกแบบเครื่องย่อยทางปาล์ม ให้ ทำงานตามที่ต้องการ การเก็บข้อมูลกระทำโดยการวัด ขนาดทางปาล์มจำนวน 50 กิ่งในพื้นที่กรณีตัวอย่าง พบว่าทางปาล์มมีน้ำหนักเฉลี่ย 3.55 กิโลกรัมต่อกิ่ง มีความยาวกิ่งปาล์มที่ตัดออกมาเฉลี่ย 3,761 มิลลิเมตร ความยาวใบปาล์มที่ตัดออกมาเฉลี่ย 971 มิลลิเมตร โคนกิ่งปาล์มมีความหนาเฉลี่ย 34.74 มิลลิเมตร กว้าง 111.91 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นส่วนที่มีความหนา มากที่สุดของทางปาล์ม ส่วนกลางกิ่งปาล์มมีความ หนาเฉลี่ย 27.19 มิลลิเมตร กว้าง 31.14 มิลลิเมตร และส่วนปลายของกิ่งปาล์มมีความหนาเฉลี่ย 2.16 มิลลิเมตร และกว้างประมาณ 2.10 มิลลิเมตร ดังรูป ที่ 3 (ก) ขณะที่ส่วนโคนใบปาล์มมีความหนาเฉลี่ย 34.74 มิลลิเมตร กว้าง 111.91 มิลลิเมตร ส่วนกลาง ใบปาล์มมีความหนาเฉลี่ย 27.19 มิลลิเมตร กว้าง 31.14 มิลลิเมตร และส่วนปลายของใบปาล์มมีความ หนาเฉลี่ย 2.16 มิลลิเมตร และกว้างประมาณ 2.10 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3 (ข)



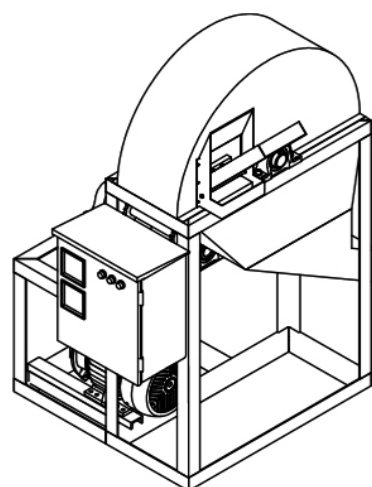
รูปที่ 3 ขนาดของทางปาล์ม

2.2 การสร้างชิ้นส่วนเครื่องย่อยทางปาล์มใบตัดตั้งฉาก

รูปที่ 4 แสดงแผนภาพการไหลขั้นตอนการออกแบบและสร้างเครื่องย่อยทางปาล์มใบตัดตั้งฉาก ซึ่งแบ่งส่วนประกอบสำคัญของเครื่องย่อยทางปาล์มออกเป็น 4 ส่วนประกอบด้วย (1) โครงสร้างเครื่อง (2) ชุดใบตัด (3) ชุดส่งกำลัง และ (4) ชุดการป้อนทางปาล์ม รูปร่างของเครื่องย่อยทางปาล์มที่ออกแบบมีลักษณะดังรูปที่ 5



รูปที่ 4 แผนการสร้างเครื่องย่อยทางปาล์มใบตัดตั้งฉาก



รูปที่ 5 การออกแบบเครื่องย่อยทางปาล์ม

โครงสร้างเครื่องย่อยทางปาล์มดังรูปที่ 6 เป็นส่วนที่รับน้ำหนักทั้งหมดของเครื่องผลิตจาก เหล็กกล้าคาร์บอน SS400 แบบฉากขนาด 50.00 มิลลิเมตร X 50.00 มิลลิเมตร X 0.50 มิลลิเมตร ขนาดของโครงสร้างเครื่องย่อยทางปาล์มนี้มีขนาด ประมาณ 1000.00 มิลลิเมตร x 800.00 มิลลิเมตร X 1000.00 มิลลิเมตร การประกอบโครงสร้างเครื่อง ใช้วิธีการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เพื่อความปลอดภัย

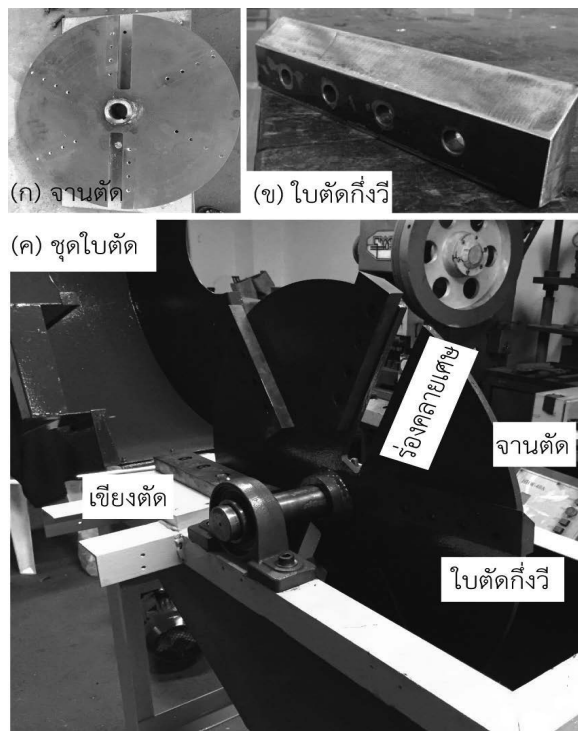


รูปที่ 6 โครงสร้างเครื่องย่อยทางปาล์มทำจาก เหล็กกล้าคาร์บอน SS400

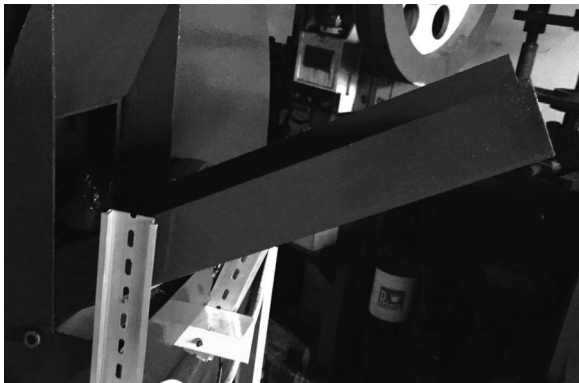
ชุดใบตัดประกอบด้วยชิ้นส่วนย่อย 3 ชิ้นส่วน คือ (ก) จานตัด (ข) ใบตัด และ (ค) เชียงตัด ในการทดลองนี้ทุกส่วนประกอบผลิตขึ้นจากเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 จานตัดเป็นชุดที่รับภาระทั้งหมดในการตัดทางปาล์มมีลักษณะเป็นวงกลม และสามารถเปลี่ยนใบตัดได้ 2-6 ใบ และมีช่องคายเศษปาล์มเพื่อให้คายปาล์มออกด้านตรงข้ามของตัด หรืออีกด้านของจานตัด จานตัดนี้ผลิตขึ้นจากเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 เป็นรูปแผ่นกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 570.00 มิลลิเมตร หนา 10.00 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 7 (ก)

ใบตัด (Cutting blade) ที่ออกแบบและสร้างใน เบื้องต้นมีลักษณะเป็นใบตัดแบบกึ่งวี (Single V blade) ดังรูปที่ 7 (ข) ใบตัดนี้ถูกติดตั้งบนตำแหน่ง จานตัดที่สามารถปรับเปลี่ยนใบตัดได้ 2-6 ใบ เชียงตัด ทำจากวัสดุชนิดเดียวกันกับใบตัด มีหน้าที่ในร่องกึ่ง ทางปาล์ม และรองรับกระแทกจากการตัดของใบตัด ถูกติดบนโครงสร้างเครื่องย่อยดังรูปที่ 7 (ค) เมื่อ ชิ้นส่วนทั้งหมดถูกผลิตเรียบร้อยแล้วจานตัดถูกประกอบ เข้ากับจานหมุน เพื่อส่งกำลัง และถูกนำไปประกอบ กับโครงสร้างของเครื่องตัดย่อยปาล์ม ลักษณะของ ชุดการตัดย่อยทางปาล์มมีลักษณะดังรูปที่ 7 (ค)

ชุดป้อนทางปาล์มสามารถปรับองศาได้ 0-45 องศา (0 องศา คือตำแหน่งที่ทางปาล์มตั้งฉาก กับใบตัด) เพื่อใช้ในการศึกษาเพื่อหาค่ามุมการป้อน ทางปาล์มที่เหมาะสมที่สุด ทำจากเหล็กแผ่นรีดร้อน SS400 จุดหมุนปรับองศาการป้อนใช้นอตยึดแน่น ดังรูปที่ 8



รูปที่ 7 ชุดใบจานตัดกับเพลาลูกกลิ้ง



รูปที่ 8 ชุดป้อนทางปาล์ม

ความเร็วรอบจริงของเครื่องตัดย่อยปาล์มที่ต้องต่อเข้ากับชุดส่งกำลังของรถไถขนาดเล็กกำลังไม่เกิน 50 แรงม้า การทดลองนี้จึงประยุกต์ใช้ชุดส่งกำลังประกอบไปด้วย มอเตอร์เกียร์ขนาด 3 แรงม้า 380 โวลต์ 2200 วัตต์ ช่วงของการปรับรอบการหมุนของความเร็วรอบที่ 200-1000 รอบต่อนาทีจำนวน 1 ตัว ซึ่งเป็นความเร็วรอบที่ได้จากรถไถขนาด 50 แรงม้า ขนาดเล็ก ที่สามารถเคลื่อนที่เข้าไปในพื้นที่สวนปาล์มได้อย่างสะดวกมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับรถไถที่มีขนาดใหญ่กว่า 50 แรงม้า ใช้ส่งกำลังจำนวน 2 เส้น เพียงจำนวน 2 ตัว เพลาเพื่อทำการทดรอบและลดภาระของโหลดที่กระทำต่อมอเตอร์ โดยทำการสวมเฟืองเข้าที่เพลารองจานตัด 1 ชิ้น ชุดเพลาที่ทำการถ่ายกำลัง 2 ชิ้น และเฟืองที่มอเตอร์ 1 ชิ้น ทำการร้อยโซ่ระหว่างเฟืองทั้งหมดและปรับระยะความตึงของโซ่ให้เหมาะสม และทำการติดชุดเซนเซอร์ตรวจจับความเร็วรอบ 1 ชุด เข้าไปด้านท้ายของเพลาที่ใช้ขับเคลื่อนเพื่อตรวจสอบความเร็วรอบในการทดลอง

การประเมินประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องย่อยทางปาล์มใบตัดแนวตั้งทำได้โดยการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพในการผลิตเศษย่อยทางปาล์มต่อชั่วโมงดังสมการที่ 1 โดยสูตรในการหาค่า

ประสิทธิภาพนี้เป็นรูปแบบเดียวกันกับสูตรในการหาค่าประสิทธิภาพในการแยกเนื้อตาลสุก [14] นอกจากนั้นเมื่อทำการย่อยทางปาล์มเสร็จแล้ว เศษของการย่อยจะถูกนำไปทำการการวัดขนาดมิติของเศษย่อยก้านปาล์มและใบปาล์มต่อไป

$$\text{ประสิทธิภาพการทำงาน} = \text{เศษปาล์ม} / \text{เวลาทำงาน} \quad (1)$$

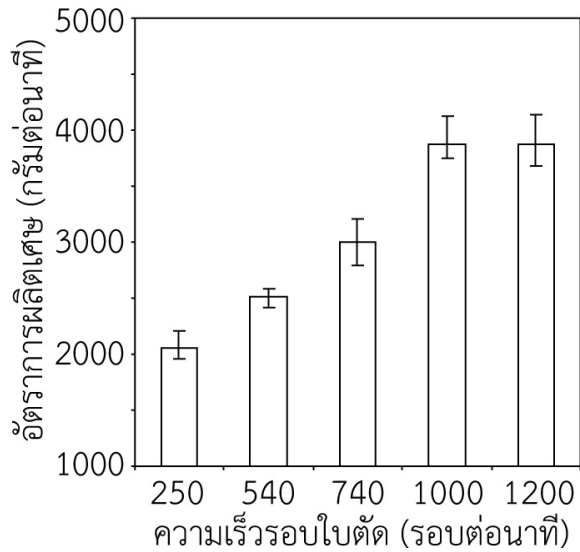
3. ผลการทดสอบเดินเครื่องย่อยทางปาล์มใบตัดตั้งฉาก

เครื่องตัดย่อยทางปาล์มที่ประกอบสมบูรณ์ดังที่ได้ออกแบบแล้วมีคุณลักษณะของเครื่องที่ประกอบดังนี้

- เครื่องตัดย่อยทางปาล์มขนาดกว้าง 1000.00 มิลลิเมตร ยาว 1000.00 มิลลิเมตร สูง 1000.00 มิลลิเมตร
- ความเร็วรอบในการตัด 100-1000 รอบต่อนาที
- จำนวนใบมีด 2-6 ใบ
- ระยะการป้อน 0.50-3.00 มิลลิเมตร
- มุมเอียงการป้อน 0-45 องศา

การทดลองตัดชิ้นงานด้วยเครื่องตัดย่อยทางปาล์มด้วยความเร็วรอบ 200-1000 รอบต่อนาที จำนวนใบมีด 2 ใบ มุมเอียงการป้อน 0 องศา หรือทางปาล์มถูกป้อนในแนวระนาบและตั้งฉากกับจานตัดที่กำลังหมุน การเติมทางปาล์มต่อเนื่องเป็นเวลา 30 นาที ปาล์มที่ใช้ในการย่อยเป็นปาล์มสดที่ตัดออกจากต้นปาล์มไม่เกิน 24 ชั่วโมง การตัดย่อยได้ทำการย่อยทางปาล์มต่อเนื่องเป็นเวลา 30 นาที ก่อนทำการชั่งน้ำหนักและคำนวณตามสมการที่ 1 ผลการตัดของทางปาล์มแสดงดังรูปที่ 9 ความเร็วรอบการตัดที่เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้เกิดเศษสูงขึ้น และได้ค่าสูงสุดที่ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที อย่างไรก็ตาม

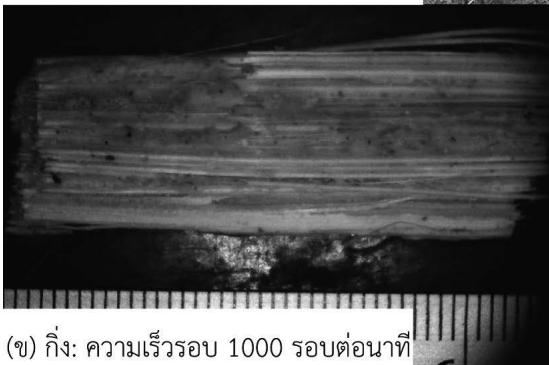
ปริมาณการผลิตเศษมีค่าค่อนข้างคงที่เมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นเป็น 1200 รอบต่อนาที



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบการตัดและอัตราการผลิตเศษ



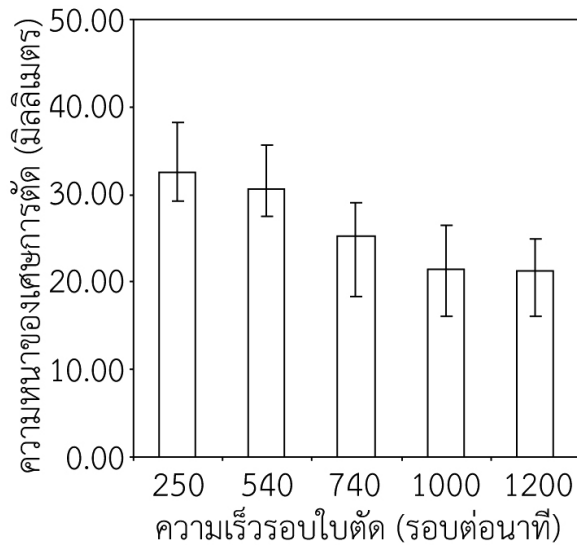
(ก) ใบ: ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที



(ข) กิ่ง: ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที

รูปที่ 10 เศษปาล์มที่ผ่านการตัด

เศษการตัดที่ได้จากการย่อยทางปาล์มแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ 1) เศษของใบปาล์มที่ผ่านการย่อยมีลักษณะเป็นเส้นใยยาวเดี่ยวพันเป็นก้อน ดังรูปที่ 10 (ก) และ 2) เศษของกิ่งปาล์มที่มีรูปร่างมีความยาวและกว้างดังรูปที่ 10 (ข) ในการวัดเศษทางปาล์มที่ผ่านการย่อยนั้นทำการวัดเฉพาะขนาดความหนาของกิ่งปาล์มเท่านั้น ผลการวัดพบว่าความเร็วรอบมีผลต่อขนาดความหนาของทางปาล์มที่ผ่านการย่อย ความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ขนาดความหนาของทางปาล์มที่ผ่านการย่อยลดลง ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเศษที่ผ่านการย่อยและความเร็วรอบการตัด

ปริมาณหรืออัตราการผลิตเศษสามารถเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเพิ่มความเร็วและแรงในการกดตัดเนื้อวัสดุ แรงและความเร็วในการตัดที่เพิ่มขึ้นสามารถส่งผลทำให้ปลายคมตัดสามารถกดลึกลงไป ในเนื้อวัสดุมากขึ้น [15] การเพิ่มแรงกดและความเร็วในการตัดวัสดุทำให้เกิดความร้อนเสียดทานระหว่างคมตัดและเนื้อวัสดุในปริมาณสูงขึ้น และส่งผลทำให้

วัสดุเกิดการอ่อนตัวและง่ายต่อการถูกตัดเฉือนออกจากก้อนวัสดุ แต่มักทำให้เกิดเศษการตัดที่มีความหนาสูง [12, 16] นอกจากนั้นอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นนี้ส่งผลทำให้ความคมของคมใบตัดลดลงและเกิดความร้อนของคมใบตัดขึ้นส่งผลทำให้อายุการใช้งานของใบตัดลดลงได้ [17] การพัฒนาเครื่องตัดย่อยทางปาล์มเพื่อทำให้เกิดการสึกหรอของใบตัดต่ำ และทำให้เกิดอัตราการผลิตเศษสูงในอนาคตอาจเกิดขึ้นได้จากการพิจารณาตัวแปรการตัดอื่นๆ เข้าประกอบ เช่น การเปลี่ยนแปลงรูปร่างใบตัด หรือการเปลี่ยนแปลงวัสดุใบตัดที่มีความสามารถในการนำความร้อนและความร้อนจำเพาะที่แตกต่าง [10, 12] หรือการเปลี่ยนแปลงมุมเอียงของการป้อนไม้เข้าสู่เครื่องตัดย่อยที่มีทิศทางเฉพาะ [18] การเปลี่ยนแปลงตัวแปรการตัดดังกล่าวอาจสามารถทำให้เกิดผลผลิตตามต้องการต่อไปในอนาคต

4. สรุปผลการดำเนินการ

การดำเนินการสร้างเครื่องตัดย่อยทางปาล์มขนาดเล็กแบบใบตัดตั้งถูกสร้างขึ้น โดยมีสรุปผลการดำเนินการดังนี้

- เครื่องตัดย่อยทางปาล์มที่ได้จากการออกแบบและสร้างขึ้นมีขนาดกว้าง 1000 มิลลิเมตร ยาว 1000 มิลลิเมตร สูง 1000 มิลลิเมตร ความเร็วรอบในการตัด 100-1000 รอบต่อนาที จำนวนใบมีด 2-6 ใบ ระยะการป้อน 0.5-3.0 มิลลิเมตร และมุมเอียงการป้อน 0-45 องศา
- ความเร็วรอบของงานตัดที่ให้เศษปริมาณสูงสุด 3,881 กรัมต่อนาที หนา 31.38 มิลลิเมตร คือความเร็วรอบในการตัด 1000 รอบต่อนาที
- ความหนาและความกว้างของรูปร่างเศษตัดที่ได้จากการทดลองมีค่าลดลงเมื่อความเร็วรอบของงานตัดมีค่าเพิ่มขึ้น

- ความเร็วรอบการหมุนของงานตัดที่เพิ่มขึ้นส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มขึ้นของเศษการตัดทางปาล์ม

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ประจำปี 2559

เอกสารอ้างอิง

- [1] น้ำอ้อย ศรีประสม และ ชีระ เอกสมทราเมษฐ์, 2551. “สหสัมพันธ์และอัตราพันธุกรรมของลักษณะทางลำต้นในระยะกล้าปาล์มน้ำมัน,” วารสารหาดใหญ่วิชาการ. 6-2, หน้า 109-115.
- [2] ประดิษฐ์ อาจชมพู วุฒิชัย สีเผือก และศิริศักดิ์ บริรักษ์ธรรกุล, 2556. “การพัฒนาการใช้ทางปาล์มน้ำมันเป็นแหล่งอาหารหยาบสำหรับโคพื้นเมือง,” การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ จ.กรุงเทพมหานคร. หน้า 79-86.
- [3] MGR Online. เร่งป้อนหมักทางปาล์มน้ำมัน ด้วยนวัตกรรมใหม่ จาก มจร. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก www.farmkaset.org (31 กรกฎาคม 2557)
- [4] ชีวิตเกษตรครบวงจร. ทางปาล์มน้ำมันใช้เลี้ยงสัตว์. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก www.farmkaset.org (20 พฤษภาคม 2557)
- [5] เอกรัตน์ โภคสวัสดิ์ และศุภเวทย์ สงคง, 2554. “เครื่องแยกย่อยใบปาล์มน้ำมันออกจากทางปาล์มเพื่อใช้เป็นอาหารสัตว์เคี้ยวเอื้อง,” การประชุมวิชาการ มอว. วิจัย ครั้งที่ 5, อุบลราชธานี, หน้า 226-234.

- [6] ชีวตเกษตรกรบวงจร. **การจัดการสวนปาล์ม** น้ำมัน. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก www.farmkaset.org (31 กรกฎาคม 2557)
- [7] บริษัท รักบ้านเกิด จำกัด. **วิธีลดต้นทุนอาหารแพะ**. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก www.rakbankerd.com (20 พฤษภาคม 2557)
- [8] Atkins, T. 2006. "Optimum blade configurations for the cutting of soft solids," **Engineering Fracture Mechanics**, 73, pp. 2523-2531.
- [9] Lau, K. H., Mei, D., Yeung, C. F. and Man, H. C. 2000. "Wear characteristics and mechanisms of a thin edge cutting blade," **Journal of Materials Processing Technology**, 102: 203-207.
- [10] Niranatlumpom, P., Sukhonket, C. and Nakgoenthong, J. 2013. "Wear resistant surface treatment of pulverizer blades," **Wear**, 302: 878-881.
- [11] ถนอม ลีตระกูล, 2555. "การพัฒนามีดตัดในรถตัดอ้อยเพื่อเปรียบเทียบค่าความแข็ง," การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรม-อุตสาหกรรม ประจำปี 2555, จ.เพชรบุรี, หน้า 1666-1670.
- [12] Horman, I., Busuladžić, I. and Azemović, E., "Temperature Influence on Wear Characteristics and Blunting of the Tool in Continuous Wood Cutting Process," **Procedia Engineering**, 69: 133-140.
- [13] Torres, H., Varga, M., Adam, K. and Badisch, E., 2013. "Wear phenomena in high temperature sheet shearing blades," **Wear**. 306: 10-16.
- [14] จตุรงค์ ลังกาพิมพ์ สุนัน ปานสาคร ภูรินทร์ อัครกุลธร สุกฤษฎ์ สร้อยแมน และ ศุภณัฐ สร้อยแมน, "การออกแบบและสร้างเครื่องแยกเนื้อตาลูก," **วารสารวิศวกรรมศาสตร์ราชมงคลัญบุรี**. 14: 47-54.
- [15] McCarthy, C.T., Annaidh, A.N., and Gilchrist, M.D., "On the sharpness of straight edge blades in cutting soft solids: Part II – Analysis of blade geometry," **Engineering Fracture Mechanics**. 77:437-451.
- [16] McCarthy, C.T., Hussey, M., and Gilchrist, M.D., 2007. "On the sharpness of straight edge blades in cutting soft solids: Part I – indentation experiments," **Engineering Fracture Mechanics**. 74: 2205-2224.
- [17] Shen, Z., Lu, L., Sun, J., Yang, F., Tang, Y., and Xie, Y., 2015. "Wear patterns and wear mechanisms of cutting tools used during the manufacturing of chopped carbon fiber," **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. 97:1-10.
- [18] Wegener, J.K. and Wegener, T., 2014. "Wood chipping with conical helical blades – Theoretical deliberations and practical experiments concerning the adjustment of chip length with a set pitch of the blade," **Biomass and Bioenergy**. 66: 151-158.

การออกแบบและพัฒนาเครื่องปอกเปลือกหอมแดงต้นแบบ
สำหรับวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม
Design and Development of Prototype Machine for Peeling Shallots
for Small to Medium Enterprises.

ไพฑูรย์ พูลสุขโข¹ สุทิวัส แววดี² กุณฑล ทองศรี³ และศิริชัย ต่อสกุล⁴
paitoon.po@en.rmutt.ac.th¹, suthiwat_w@mail.rmutt.ac.th², kunthon.t@en.rmutt.ac.th³,
sirichai.to@en.rmutt.ac.th⁴

บทคัดย่อ

เครื่องปอกหอมถูกออกแบบและสร้างขึ้นเพื่อลดเวลา ลดแรงงานในการปอกหอม ลดการระคายเคืองดวงตา และผิวหนังของแรงงาน สำหรับใช้ในวิสาหกิจขนาดกลาง และขนาดย่อม ที่แปรรูปหอมแดงจำหน่าย เครื่องต้นแบบประกอบไปด้วย โครงสร้างเครื่อง ตัวถังปอก ชุดจานขัดสี ชุดส่งกำลัง และระบบควบคุมการทำงาน โดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 0.5 แรงม้า เป็นเครื่องต้นกำลัง การทำงานของเครื่องเป็นแบบตระแกรง ลวดหมุนภายในถังปอกเพื่อให้ขัดสีกับเปลือกด้านนอกของหัวหอมแดง และทำให้หลุดออก การทดสอบการทำงานพบว่า เครื่องมีประสิทธิภาพการปอก 75.08 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วรอบชุดจานขัดสี 70 รอบต่อนาที และที่อัตราการป้อนครั้งละ 3 กิโลกรัม สามารถปอกหัวหอมแดงได้ 52 กิโลกรัมต่อวัน และในด้านเศรษฐศาสตร์ เครื่องปอกหอมต้นแบบเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจสำหรับการลงทุนในวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม

คำสำคัญ: หอมหัวแดง, เครื่องปอกหอม, ประสิทธิภาพการปอกหอม วิสาหกิจขนาดกลาง และขนาดย่อม

^{1,2,3,4} ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Abstract

Shallots peeling machine is designed and developed to reduce time, workforce, and irritation to eyes and skin of workers. It is used in small to medium enterprises that process shallots for sale. Prototype machine includes frame, peeling tank, polishing disc, force driving set and controlling system. Electrical Motor with 0.5 horse power serves as driving force. The machine works by using internal rotation of wired sieve to polish and remove outer skin of shallots. The test revealed that the machine is efficient enough to peel the shallots and the peeling efficiency was 75.08 % with rotational disc spinning at 70 rpm. At the feed rate of 3 kg of shallots per time. it can peel 52 kg/day of shallots. In term of economy, the prototype is an interesting alternative for investment in small to medium enterprise.

Keywords: shallots, shallots peeling machine, shallots peeling efficiency, small to medium enterprises

1. บทนำ

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

หอมแดงเป็นพืชที่มีลำต้นสั้นและฝังอยู่ใต้ดิน ขนาดสูงประมาณ 30 เซนติเมตร กาบใบพองออกเพื่อสะสมอาหาร ลักษณะเป็นช่อคล้ายร่ม ประกอบด้วยดอกย่อยจำนวนมาก กลีบดอกสีขาวอมม่วงมีกลีบดอก 6 กลีบ ออกดอกในช่วงฤดูร้อน [3]

หอมแดงเป็นพืชอีกชนิดที่มีการปลูกเป็นจำนวนมากในภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคเหนือ หอมแดง (*Allium ascalonicum*) เป็นพืชในวงศ์ Alliaceae [4] ซึ่งพันธุ์ของหอมแดงที่นิยมปลูกในบ้านเรา คือ 1. หอมแดงพันธุ์พื้นเมืองภาคเหนือ ทางภาคเหนือเรียก หอมบัว เป็นหอมแดงที่มีเปลือกนอกสีเหลืองปนส้มขนาดหัวปานกลางลักษณะกลมรี ใน 1 หัวแยกได้ 2-3 กลีบ กลิ่นไม่ฉุนจัด รสหวาน ระหว่างการเจริญเติบโตไม่มีดอกและเมล็ด เมื่อปลูก 1 หัวจะแตกกอให้หัวประมาณ 5-8 หัว ดังรูปที่ 1 อายุเมื่อหัวแก่เต็มที่ในฤดูหนาว 90 วัน และฤดูฝน 45 วัน ผลผลิตที่ได้ประมาณ 2000-3000 กิโลกรัม/ไร่ ขึ้นอยู่กับฤดูปลูกและการดูแลรักษา คุณภาพในการเก็บรักษาไม่ค่อยดี เพราะมีเปอร์เซ็นต์แห้งผ่อ และเน่าเสียหายมากถึง 60%



รูปที่ 1 ลักษณะทั่วไปของหอมแดง [5]

2. หอมแดงพันธุ์บางช้าง หรือหอมแดงศรีสะเกษ เป็นหอมแดง ที่มีเปลือกนอกสีม่วงปนแดง เปลือกหนา และเหนียว ขนาดหัวใหญ่ สม่ำเสมอ หัวมีลักษณะกลม ใน 1 หัว มี 1-2 กลีบ กลิ่นฉุนจัด มีรสหวาน ระหว่างการเจริญเติบโตจะสร้างดอกและเมล็ดมาก ซึ่งจะต้องหมั่นตรวจดูและเด็ดทิ้งให้หมด มิฉะนั้นจะทำให้ได้ขนาดหัวเล็กและจำนวนหัวน้อย โดยทั่วไปเมื่อปลูก 1 หัวจะแตกกอให้หัวประมาณ 8-10 หัว การแตกกอและลงหัวช้ากว่าหอมบั่วเล็กน้อย มีอายุเมื่อหัวแก่เต็มที่ในฤดูหนาว 100 วันขึ้นไป และฤดูฝน 45 วัน ให้ผลผลิตแตกต่างกันไปตามฤดูปลูกและการดูแลรักษาได้ประมาณ 1000-5000 กิโลกรัม/ไร่ คุณภาพในการเก็บรักษาดีกว่าหอมบั่ว [3] หอมแดงเป็นพืชที่มีประโยชน์ทางด้านสมุนไพรและมีสรรพคุณทางยา เช่น แก้อาการคัน แก้อบเห็ด ช่วยลดระดับคอเลสเตอรอลในเลือด [6] และยังเป็นพืชเศรษฐกิจอีกประเภทของไทย ในปี 2558 พบว่ามีผลผลิตสูงถึง 129,741 ตัน [7] ซึ่งการจำหน่ายหอมแดงในท้องตลาดจะมีราคาอยู่ระหว่าง 40 - 70 บาทต่อกิโลกรัม ขึ้นอยู่กับปริมาณหอมแดงในท้องตลาดด้วย และในบางปีเกษตรกรต้องประสบปัญหาจำนวนหอมแดงใน

ท้องตลาดมากเกินไปเกินความต้องการ ทำให้มีราคาตกต่ำ บางครั้งทำให้เกิดการเน่าเสีย เนื่องจากเกษตรกรไม่สามารถขายได้ ดังนั้นการแปรรูปหอมแดงเพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับเกษตรกร เช่น หอมเจียวจึงเป็นอีกทางเลือก กระบวนการผลิตหอมเจียวจะแบ่งออกเป็นสามขั้นตอนหลักๆ คือ การปอกหัวหอม การหั่นซอย และการเจียว ซึ่งปัจจุบันการปอกหัวหอมยังใช้แรงงานคน ในการปอกดังรูปที่ 2 ทำให้การปอกหัวหอมแดงใช้ระยะเวลานาน และมีกำลังการผลิตน้อย นอกจากนี้ยังทำให้เกิดการระคายเคืองดวงตา และผิวหนังได้ ทำให้กลุ่มธุรกิจขนาดเล็กไม่สามารถตอบสนองความต้องการของตลาดได้ และลดโอกาสในการแข่งขันอีกด้วย



รูปที่ 2 การปอกหัวหอม [8]

ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้จึงดำเนินการออกแบบและสร้างเครื่องปอกเปลือกหอมแดงแบบอัตโนมัติขึ้น เพื่อการพัฒนากระบวนการผลิตหอมเจียวให้มีคุณภาพ ลดเวลาในการปอกหัวหอมแดง และสามารถเพิ่มอัตราการผลิตให้กับอุตสาหกรรมอาหารและสามารถลดผลกระทบจากกระบวนการปอกหัวหอมแดง

2. วิธีการศึกษา

2.1 ศึกษาข้อมูลสำหรับการออกแบบ

หอมแดงเป็นพืชที่มีลำต้นอยู่ใต้ดิน เป็นไม้หัว มีลักษณะเป็นรูปไข่และพองโต และเรียกกันอีกอย่างว่า บัลบ์ (Bulb) เรียงกันเป็นชั้นๆ ที่มีเปลือกนอกสีม่วงปนแดงส่วนใหญ่ขนาดหัวหอมที่นำมาหั่นซอยเพื่อผลิตหอมเจียวจะมีขนาดอยู่ระหว่าง 2- 4.5 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3 และมีขนาดความหนาหลังการหั่นซอยอยู่ที่ 2 มิลลิเมตร ซึ่งขนาดความหนาของหอมซอยควรมีความสม่ำเสมอเนื่องจากเมื่อนำไปเจียวจะทำให้ได้หอมเจียวที่มีคุณภาพ นอกจากนี้อุณหภูมิในการทอดควรอยู่ระหว่าง 170 - 210 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3 ขนาดหัวหอมแดง

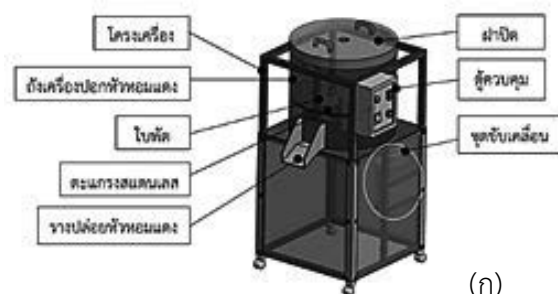
2.2 การออกแบบเครื่องต้นแบบ

ขนาดของหัวหอมแดงที่นิยมใช้ในการทำหอมเจียวจะมีขนาดอยู่ระหว่าง 2-3 เซนติเมตร ซึ่งถือว่าขนาดเล็กมากหากจะทำการจับยึดด้วยเครื่องจักรแล้วทำการปอกด้วยมีดหรือคมตัด และอาจจะมีกำลังการผลิตต่ำกว่าความต้องการ ดังนั้นการใช้มีดหรือคมตัดจึงไม่เหมาะสำหรับการปอกหัวหอมแดง การขัดสีเป็นอีกวิธีที่ใช้สำหรับการปอกผิววัตถุดิบ โดยเฉพาะวัตถุดิบที่มีขนาดและรูปร่างแตกต่างกัน

เครื่องปอกหัวหอมแดงได้ถูกออกแบบให้สามารถปอกหัวหอมแดงได้มากที่สุดครั้งละ 3 กิโลกรัม โดยใช้ถังที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอก ภายในถังมี

ตะแกรงสแตนเลสเป็นก้นถังและใช้ใบพัดที่ได้รับการออกแบบ มีมอเตอร์เป็นตัวส่งกำลังทำให้ใบพัดหมุนเป็นตัวกวาดหัวหอมแดงภายในถังให้หัวหอมแดงขัดสีกับตะแกรงสแตนเลสและใช้อินเวอร์เตอร์เป็นตัวควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ หลังจากที่ถูกปอกหัวหอมแดงเสร็จหัวหอมแดงจะถูกลำเลียงออกจากเครื่องผ่านทางรางปล่อยหัวหอมแดง

จากผลการศึกษาปัญหาและข้อมูลต่างๆ สำหรับการออกแบบเครื่องปอกหัวหอมแดง เพื่อใช้ในธุรกิจขนาดเล็กนั้น ซึ่งสามารถออกแบบส่วนประกอบหลักของเครื่องออกเป็น 5 ส่วนด้วยกัน ได้แก่ โครงสร้างเครื่อง ตัวถังปอก ชุดงานขัดสี ชุดส่งกำลัง และระบบควบคุมการทำงาน ดังรูปที่ 4 เนื่องจากเป็นเครื่องจักรที่ใช้สำหรับอาหาร ดังนั้นส่วนประกอบทั้งหมดที่สัมผัสกับหัวหอมโดยตรงจะใช้ สแตนเลส เกรด 304 ทั้งหมด



(ก)



(ข)

รูปที่ 4 (ก) ลักษณะของเครื่องปอกหัวหอมแดงที่ออกแบบ

(ข) เครื่องที่ปอกหอมแดงต้นแบบ

2.3 การทดลอง

วิธีการทดลองการทำงานของเครื่องโดยเริ่มจากการป้อนหัวหอมแดงที่ผ่านการตัดส่วนหัวและส่วนท้ายลงในถังปอก จากนั้นทำการเปิดเครื่องมอเตอร์ขนาด 0.5 ที่เป็นตัวต้นกำลัง จะขับใบพาที่อยู่ภายในถังทำให้หัวหอมเคลื่อนที่ไปบนตะแกรงขัดสีซึ่งผิวหรือเปลือกของหัวหอมที่สัมผัสกับตะแกรงจะหลุดออกเป็นเศษเล็กๆ



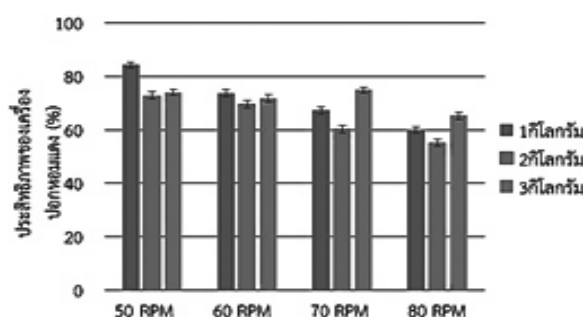
รูปที่ 5 หัวหอมแดงที่ผ่านการตัดส่วนหัวและส่วนท้าย

หลังจากการทดสอบเบื้องต้นและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เครื่องปอกเปลือกหอมแดงต้นแบบได้ถูกทดสอบและประเมินสมรรถนะในการทำงานรวมทั้งคุณภาพในการปอก โดยประเภทของหอมแดงที่ใช้ในการทดสอบ คือ หอมแดงไทย ที่มีขนาดอยู่ระหว่าง 30-40 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3 ก่อนการทดสอบหัวหอมจะถูกตัดส่วนหัวและส่วนท้ายออกเพื่อให้เปลือกด้านนอกสามารถหลุดออกได้ง่าย จากการทดสอบเบื้องต้นยังพบอีกว่าความเร็ว และปริมาณการป้อน มีผลต่อประสิทธิภาพการปอก โดยความเร็วสูงสุดที่ใช้ในการปอกไม่ควรเกิน 80 รอบต่อนาที เนื่องจากหัวหอมจะช้าและเกิดรอยแผล ขณะที่ปริมาณการป้อนหัวหอมในการปอกแต่ละครั้งไม่เกิน 3 กิโลกรัม ซึ่งเป็นปริมาณที่เหมาะสมกับขนาดเครื่องที่ออกแบบ ดังนั้นในการทดสอบจึงกำหนดความเร็ว

4 ระดับ ได้แก่ 50 60 70 และ 80 รอบต่อนาที โดยการทดสอบแต่ละตัวแปรความเร็วรอบจะป้อนปริมาณหัวหอม 1 2 และ 3 กิโลกรัม เพื่อหาประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องที่ดีที่สุด

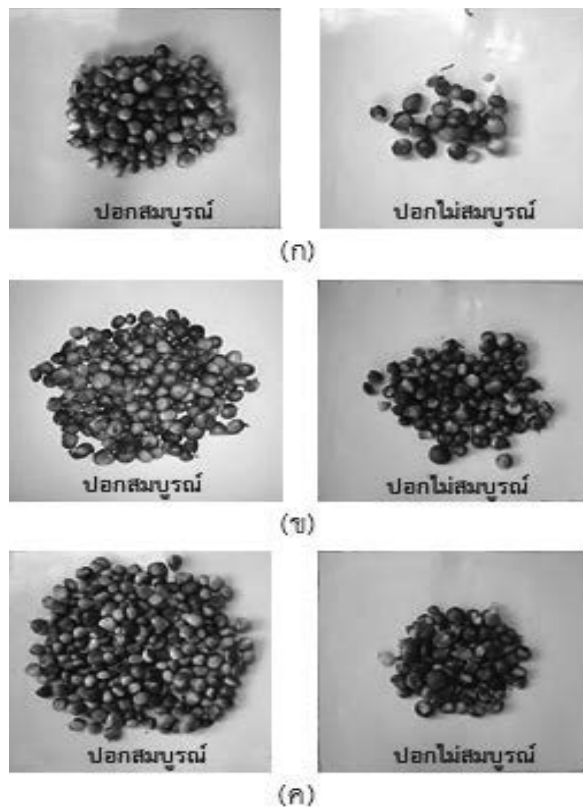
3 ผลการทดลอง

จากผลการทดสอบเครื่องปอกหอมต้นแบบภายใต้ตัวแปรที่แตกต่างกันนั้น พบว่าประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องมีความแตกต่างกัน ซึ่งการเพิ่มความเร็วยรอบของใบพาสามารถทำให้ประสิทธิภาพเครื่องเพิ่มขึ้น และลดลงก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของหัวหอมที่ป้อนลงในถังปอกดังรูปที่ 6 พบว่าน้ำหนักหัวหอมแดง 1 กิโลกรัม มีประสิทธิภาพที่หัวหอมแดงปอกดีกว่าน้ำหนักหัวหอมแดง 2 กิโลกรัม และน้ำหนักหัวหอมแดง 3 กิโลกรัม เนื่องจากน้ำหนักหัวหอมแดง 1 กิโลกรัม ทำให้หัวหอมแดงมีพื้นที่มากในการเหวี่ยงและขัดสีกับตะแกรงสแตนเลส ซึ่งน้ำหนักหัวหอมแดง 2 กิโลกรัม และ 3 กิโลกรัม มีพื้นที่น้อยในการเหวี่ยงและขัดสีกับตะแกรง สแตนเลส จึงทำให้มีหัวหอมแดงบางส่วนช้าและปอกออกไม่หมดในความเร็วรอบเท่ากัน และเมื่อเริ่มเพิ่มความเร็วยรอบขึ้นไปเรื่อยๆ ทำให้ประสิทธิภาพในการปอกหัวหอมลดลง แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มความเร็วยรอบสำหรับการปอกหัวหอม 3 กิโลกรัม ส่งผลให้ประสิทธิภาพการปอกเพิ่มขึ้น และมีค่าสูงสุดที่ความเร็วรอบ 70 รอบต่อนาที และลดลงเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นเป็น 80 รอบต่อนาที จากผลการทดลองความเร็วที่เหมาะสมสำหรับการปอกหัวหอม 1 กิโลกรัม คือ 50 รอบต่อนาที ซึ่งมีประสิทธิภาพการปอก 84.38% เช่นเดียวกันกับการปอกหัวหอม 2 กิโลกรัม โดยมีประสิทธิภาพการปอก 72.68% แต่อย่างไรก็ตามการปอกหัวหอม 3 กิโลกรัม มีความเร็วที่เหมาะสมอยู่ที่ 70 รอบต่อนาที โดยมีประสิทธิภาพการปอก 75.08% ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ประสิทธิภาพของเครื่องปอกหอมแดงต้นแบบ

รูปที่ 7 แสดงหัวหอมหลังการปอก จากความเร็วที่เหมาะสมสำหรับการปอกหัวหอม 1, 2 และ 3 กิโลกรัม ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน คือหัวหอมที่ปอกได้สมบูรณ์ และหัวหอมที่ยังมีเปลือกชั้นนอกติดอยู่ ซึ่งหัวหอมในส่วนนี้ต้องใช้คนในการตรวจสอบและปอกเปลือกส่วนที่เหลือออก เนื่องจากไม่สามารถนำไปปอกด้วยเครื่องได้ เพราะจะทำให้หัวหอมชำรุดเกินไป ซึ่งการปอกหัวหอมด้วยคนจะใช้เวลาประมาณ 20 นาที สำหรับหัวหอม 1 กิโลกรัม



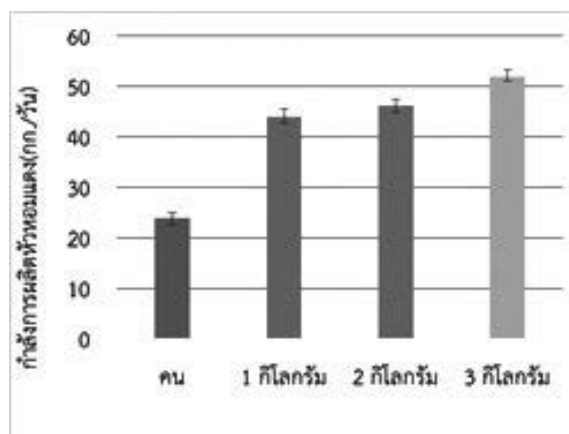
รูปที่ 7 ลักษณะหอมแดงที่ผ่านการปอกเปลือก

(ก) ประสิทธิภาพการปอกหอมแดง 1 กิโลกรัม

(ข) ประสิทธิภาพการปอกหอมแดง 2 กิโลกรัม

(ค) ประสิทธิภาพการปอกหอมแดง 3 กิโลกรัม

จากความเร็วที่เหมาะสมสำหรับการปอกหัวหอม พบว่ากำลังการผลิตของเครื่องขึ้นอยู่กับปริมาณการป้อนหัวหอม ดังรูปที่ 8 โดยที่ความเร็ว 50 รอบต่อนาที หากป้อนปริมาณหัวหอม 1 และ 2 กิโลกรัม เครื่องจะมีกำลังการผลิตที่ 44 และ 46.32 กิโลกรัมต่อวัน ตามลำดับ และที่ความเร็ว 70 รอบต่อนาที เมื่อป้อนปริมาณหัวหอม ครั้งละ 3 กิโลกรัม เครื่องจะมีกำลังการผลิตสูงถึง 52 กิโลกรัมต่อวัน จากกำลังการผลิตทั้ง 3 คำนวณ ตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทำงานของเครื่องปอกหัวหอมแดงคือ ความเร็วรอบของใบพา 70 รอบต่อนาที ที่ปริมาณการป้อน 3 กิโลกรัมต่อรอบการทำงาน เนื่องจากมีกำลังการผลิตสูงที่สุด และมากกว่าการทำงานด้วยคนถึง 28 กิโลกรัม



รูปที่ 8 การเปรียบเทียบการปอกหัวหอมแดงด้วยคน และ เครื่องปอกหัวหอมแดงในเวลา 8 ชั่วโมง

อย่างไรก็ดีการตัดสินใจการลงทุนในตัวเลือกต่างๆ จำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการวิเคราะห์หาจุดคุ้มทุน เพื่อเป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของต้นทุน รายได้ และผลกำไรที่ปริมาณการผลิตต่างๆ จากการวิเคราะห์เบื้องต้นพบว่าเครื่องปอกหอมต้นแบบมีราคา 75,000 บาท มีอายุการใช้งาน 5 ปี มูลค่าซาก 2,000 บาท ใช้คนควบคุม 1 คน (ค่าแรงงาน 300บาท/วัน) รายได้จากการผลิตสินค้าจากเครื่องปอกหอมต้นแบบ 130,000 บาทต่อปี อัตราค่าไฟฟ้า 2,500 บาทต่อปี และค่าเสียโอกาสของเงินทุน 12.62 เปอร์เซ็นต์ [9] ซึ่งสามารถคำนวณระยะเวลาคืนทุนของเครื่องปอกหอมต้นแบบได้ดังสมการที่ 1 [10]

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = -\text{ราคาเครื่อง} + \text{รายได้ต่อปี} (A/P, i, n) + \text{มูลค่าซาก} (A/F, i, n) + \text{ต้นทุนแปรผัน} + \text{ค่าแรงงานต่อปี} \quad (1)$$

เมื่อ $(A/P, i, n)$ คือ Capital recovery factor
 $(A/F, i, n)$ คือ Sinking Fund factor
 i คือ อัตราดอกเบี้ย
 n คือ อายุการใช้งาน

จากการคำนวณระยะเวลาคืนทุน ของเครื่องปอกหอมแดงต้นแบบ พบว่าระยะเวลาที่คุ้มทุน โดยการใช้เครื่องปอกหอมแดงต้นแบบ คือ 1.3 ปี ซึ่งถือว่าเป็นตัวเลือกที่ดีสำหรับการลงทุน เนื่องจากมีระยะเวลาคืนทุนต่ำกว่าอายุการใช้งานของเครื่องอยู่มาก

4. สรุปผลการทดลอง

จากการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องปอกหอมแดงโดยใช้ตัวชี้วัดผล คือเปอร์เซ็นต์การปอกหอม และกำลังการผลิต พบว่าเครื่องสามารถ

ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เปอร์เซ็นต์การปอกหอม และกำลังการผลิต พบว่าเครื่องสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 75.08 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วรอบในการปอก 70 รอบต่อนาที และที่อัตราการป้อนหัวหอมแดง 3 กิโลกรัม ซึ่งสามารถปอกหัวหอมแดงได้ถึง 52 กิโลกรัมต่อวัน จากการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ ระหว่างการทำงานด้วยเครื่องปอกหอมต้นแบบกับการทำงานด้วยคนเพียงอย่างเดียว พบว่าการทำงานด้วยเครื่องปอกหอมต้นแบบเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจสำหรับการลงทุน

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก RMUTT financial budget in fiscal in 2016 ที่ได้ให้งบประมาณสนับสนุนโครงการวิจัย และขอขอบคุณภาคีวิชาชีพวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ให้การสนับสนุนในด้านต่างๆ จนโครงการวิจัยนี้ประสบผลสำเร็จในการดำเนินงานเป็นอย่างดี ทางผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] ช่าว สสว. รับมอบนโยบายส่งเสริม SMEs พร้อมเดินหน้านานปี 2559. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <http://www.sme.go.th/th/index.php/news1/1015-smes-2559> (5 มกราคม 2560).
- [2] สำนักงานส่งเสริมวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม (สสว.), 2559. รายงานสถานการณ์ วิสาหกิจขนาดกลาง และขนาดย่อม ปี 2559

- [3] คลังความรู้การวิจัยการเกษตรเพื่อการ
พัฒนาประเทศระดับภูมิภาค ภาคเหนือ
องค์ความรู้หอมแดง [ออนไลน์] เข้าถึง
ได้จาก : <http://www.arda.or.th/kasetinfo/north/plant/shallot.html>
(15 มกราคม 2560)
- [4] Smith, C., Lombard, KA., Peffley, EB.
andLiu,W., 2003. **Genetic Analysis
of Quercetin in onion** (*Allium cepa*
L.). The Texus Journal of Agricul-
tureand Natural Resource. No. 16.
pp. 24-28
- [5] newsupdate หอมแดง..ยาดีกันครัว มากด้วย
คุณค่า [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : http://newsupdate.thaiautocars.com/2016/02/blog-post_677.html (15
มกราคม 2560)
- [6] สุกัญญา เดชอดิศัย, 2553. **บทความสมุนไพร
เรื่องของหอม**. ภาควิชาเภสัชเวชและ
เภสัชพฤกษศาสตร์ คณะเภสัชศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา
- [7] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. **ข้อมูลการ
ผลิตสินค้าการเกษตร 2558**. [ออนไลน์]
เข้าถึงได้จาก : <http://www.oae.go.th>.
(5 มกราคม 2560).
- [8] lakkathaifood. **เคล็ดลับการปลูกหอม**.
[ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: [http://](http://lekkathaifood.blogspot.com/2011/11/) [http://](http://lekkathaifood.blogspot.com/2011/11/)
(15 มกราคม 2560).
- [9] MRR ธนาคารกสิกรไทย **อัตราดอกเบี้ยเงินให้
สินเชื่อ** [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : [http://](http://www.kasikornbank.com/TH/RatesAndFees/Lending/Pages/Lending.aspx)
www.kasikornbank.com/TH/RatesAndFees/Lending/Pages/Lending.aspx 18/10/2559 (25 มกราคม 2560)
- [10] ไพบุลย์ แยมเฟื่อน. 2548. **เศรษฐศาสตร์
วิศวกรรม**. พิมพ์ครั้งที่ 1. ซีเอ็ดดูเคชั่น:
กรุงเทพฯ. 308 หน้า

จลนพลศาสตร์ของการกำจัดสาหร่ายด้วยกระบวนการโฟโตแคทาลิติก

Kinetic of Algae Removal by Photocatalytic Process

ธรรมศักดิ์ โรจน์วิรุฬห์¹ สัณญา สิริวิทยาปกรณ² อรวรรณ โรจน์วิรุฬห์³ ศิวกร อ่างทอง⁴ กชกร สุรเนาวรัตน์⁵
และณัฐพล ขาวสวน⁶

thammasak@rmutt.ac.th¹, fengsys@ku.ac.th², orawan_r@rmutt.ac.th³, sivakorn.a@en.rmutt.ac.th⁴,
fengkos@ku.ac.th⁵, natthaphon_not@hotmail.com⁶

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายและจลนพลศาสตร์ของการกำจัดสาหร่าย 2 ชนิด ได้แก่ *Microcystis aeruginosa* TISTR 8305 และ *Oscillatoria obscura* TISTR 8245 ด้วยกระบวนการโฟโตแคทาลิติกร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 แบบฟิล์มร่วมกับแหล่งกำเนิดแสง UVA-LED ที่มีความเข้มแสงต่ำเพียง $12 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายด้วยกระบวนการดังกล่าวมีประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดสาหร่าย *M. aeruginosa* TISTR 8305 และ *O. obscura* TISTR 8245 เท่ากับ 83.31% และ 73.87% ตามลำดับ ที่ความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายเริ่มต้น 10^2 cells/mL โดยใช้ระยะเวลาในกระบวนการโฟโตแคทาลิติก เท่ากับ 180 min และเมื่อทำการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตแคทาลิติกในการกำจัดสาหร่ายทั้ง 2 ชนิด พบว่า จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาที่เหมาะสมกับกระบวนการเป็นไปตามรูปแบบสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง โดยค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งสูงสุดเท่ากับ 0.0099 min^{-1} และ 0.0074 min^{-1} ที่ความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายเริ่มต้น 10^2 cells/mL สำหรับ *M. aeruginosa* TISTR 8305 และ *O. obscura* TISTR 8245 ตามลำดับ

คำสำคัญ: โทริฟิเคชัน โฟโตออกซิเดชัน โซล-เจล ระบบผลิตน้ำประปา

^{1,3} อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

^{2,5} อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

⁴ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

⁶ นักวิชาการการศึกษา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Abstract

The objectives of this research are to study the removal efficiency and kinetics of *Microcystis aeruginosa* TISTR 8305 and *Oscillatoria obscura* TISTR 8245 by photocatalytic process with TiO_2 thin films photocatalyst under low intensity UVA-LED light sources of $12 \mu\text{W}/\text{cm}^2$. The results of algae removal by photocatalytic process showed that the highest removal efficiency for *M. aeruginosa* TISTR 8305 and *O. obscura* TISTR 8245 was 83.31% and 73.87%, respectively for initial cell density of 10^2 cells/mL at 180 minutes. Finally, the kinetics of photocatalytic process for algae removal could be explained by the first-order reaction equation. The first-order reaction rate constants in the photocatalytic process were 0.0099 min^{-1} and 0.0074 min^{-1} with initial cell density of 10^2 cells/mL for *M. aeruginosa* TISTR 8305 and *O. obscura* TISTR 8245, respectively.

Keywords: eutrophication, photooxidation, sol-gel, water supply

1. บทนำ

การเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของสาหร่ายในแหล่งน้ำเป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในวงกว้าง ไม่ว่าจะเป็นการส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศทางน้ำทำให้เกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) โดยปรากฏการณ์ดังกล่าวมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงออกซิเจน

ละลายในน้ำในช่วงเวลากลางวันและกลางคืนทำให้เกิดผลกระทบต่อการทำงานของสิ่งมีชีวิตต่างๆ ที่อาศัยในแหล่งน้ำเป็นสาเหตุของการสูญพันธุ์ การอพยพย้ายถิ่นของสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ ส่งผลให้ความหลากหลายทางชีวภาพในระบบนิเวศทางน้ำลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าสาหร่ายบางประเภทที่สามารถผลิตสารพิษ ซึ่งส่งผลกระทบต่อสภาพการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตในระบบนิเวศทางน้ำเช่นเดียวกัน [1, 2] ในแง่ผลกระทบต่อกระบวนการผลิตน้ำประปา ปัญหาการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของสาหร่ายซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำดิบที่ใช้ในระบบผลิตน้ำประปาในหลายๆ พื้นที่ในประเทศไทย โดยพบว่าความ

หนาแน่นสาหร่ายในแหล่งน้ำดิบมีค่าสูงเกินกว่าเกณฑ์เฝ้าระวังของการประปานครหลวง [3] สาเหตุเนื่องมาจากการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของสาหร่ายหลายชนิด เช่น *M. aeruginosa*, *Cylindrospermopsis raciborskii*, *Anabaena* sp. และ *Oscillatoria* sp. เป็นต้น [4-6]

การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นสาหร่ายในแหล่งน้ำดิบนอกจากจะทำให้เกิดสีและกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ในน้ำดิบ ยังส่งผลกระทบต่อระบบผลิตน้ำประปา (Conventional water treatment) โดยทำให้ประสิทธิภาพในกระบวนการก่อก้อน (Coagulation) และกระบวนการรวมตะกอน (Flocculation) ทำให้สิ้นเปลืองสารเคมีในการกำจัด รวมทั้งหากมีการตกค้างของสารเคมีที่เป็นอันตรายในกระบวนการผลิตอาจเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดปัญหาด้านสุขภาพได้ นอกจากนี้สาหร่ายยังเป็นสาเหตุทำให้ประสิทธิภาพในกระบวนการกรองลดลงเนื่องจากสาหร่ายติดค้างในช่องว่างของชั้นกรองเป็นสาเหตุให้ระบบการกรองเกิดการอุดตัน และ

อายุการใช้งานลดลง รวมทั้งสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาระบบ และทำให้ต้นทุนการผลิตน้ำประปาสูงขึ้น [7, 8]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีที่มีศักยภาพในการลดและกำจัดการสะสมของสาหร่าย 2 ชนิด ได้แก่ *M. aeruginosa* TISTR 8305 และ *O. obscura* TISTR 8245 รวมทั้งจลนพลศาสตร์ในการกำจัดสาหร่ายที่เป็นสาเหตุของปัญหาดังกล่าวข้างต้น โดยใช้กระบวนการโฟโตแคทาลิติก เป็นกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advance Oxidation Processes, AOPs) กระบวนการดังกล่าวเป็นกระบวนการทางเคมีฟิสิกส์ที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสี สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ กลิ่นในวัสดุต่างๆ รวมทั้งจุลินทรีย์และเชื้อโรคที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย และในอากาศ กระบวนการดังกล่าวจะใช้แสงอัลตราไวโอเลตร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ซึ่งมีคุณสมบัติต่างๆ ได้แก่ มีศักยภาพสูง ไม่เป็นพิษ อายุการใช้งานที่ยาวนาน สามารถนำมาใช้ซ้ำได้และราคาไม่แพง [9, 10] รวมทั้งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานกับงานต่างๆ ทางด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมได้เป็นอย่างดี

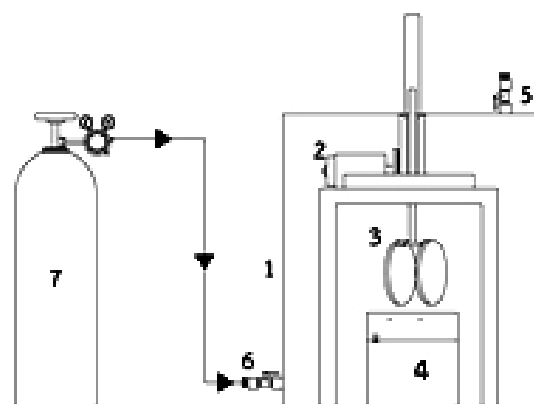
2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 แบบฟิล์มบาง

วิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 แบบฟิล์มบางโดยวิธีโซลเจล ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถเตรียมได้จากสารตั้งต้นไทเทเนียมเตตระไฮโดรพรอพอกไซด์ ($\text{C}_{12}\text{H}_{28}\text{O}_4\text{Ti}$, TTIP) ผสมกับสารละลายไอโซพรพานอล ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$) ในอัตราส่วนโดยปริมาตรเท่ากับ 1:15 และปรับ pH ให้มีค่าอยู่ในช่วง 2-3 โดยใช้กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (HCl) กวนผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันและไล่ฟองอากาศใน

ภาชนะผสมด้วยแก๊สไนโตรเจน ปิดฝาภาชนะแล้วทิ้งไว้เป็นเวลา 1 hr ทำการเก็บที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 24 hr [11, 12]

ทั้งนี้ขั้นตอนในการเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาฟิล์มบางที่เตรียมขึ้นลงบน Petri dish สามารถทำได้โดยวิธีจุ่มเคลือบผิว (Dip coating) ในอุปกรณ์เคลือบผิวดังรูปที่ 1 โดยทำการเคลือบผิวจำนวน 5 ชั้น ทั้งนี้หลังจากการจุ่มเคลือบในแต่ละชั้นของการเคลือบผิวแล้วจะนำ Petri dish ไปอบที่อุณหภูมิต่างๆ 100, 200, 250, 350 และ 500°C นาน 1 hr ตามลำดับ



1. ตู้อุปกรณ์เคลือบผิว
2. มอเตอร์ไฟฟ้า
3. Petri dish
4. ภาชนะบรรจุสารเคลือบ
5. วาล์วทางออก N_2
6. วาล์วทางเข้า N_2
7. ถัง N_2

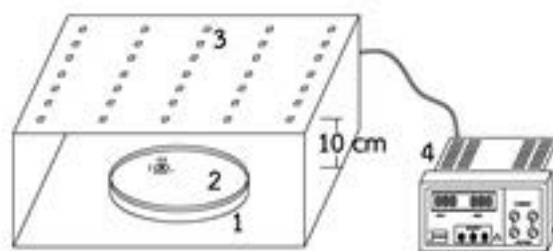
รูปที่ 1 อุปกรณ์เคลือบผิวตัวเร่งปฏิกิริยา

2.2 การวิเคราะห์ลักษณะกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 แบบฟิล์มบางที่ทำการศึกษาในพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ลักษณะพื้นผิว ขนาดอนุภาค ความขรุขระเฉลี่ยพื้นที่ผิวปรากฏ และขนาดช่องว่างแถบพลังงาน สำหรับรายละเอียดของวิธีวิเคราะห์ และอุปกรณ์ในการวิเคราะห์ แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ วิธีวิเคราะห์และอุปกรณ์

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์/อุปกรณ์
ลักษณะพื้นผิว	AFM/Asylum Research MFP-3DBIO
ขนาดอนุภาค พื้นที่ผิวปรากฏ ความขรุขระเฉลี่ย	Software/ Gwyddion V.2.22
ขนาดช่องว่าง แถบพลังงาน	UV-Vis spectrometer/ Lambda 650 Perkin Elmer



1. Petri dish เคลือบ TiO_2
2. สาหร่ายที่เตรียมในอาหาร BG 11
3. หลอด UVA-LED
4. แหล่งจ่ายไฟฟ้า

รูปที่ 2 ถึงปฏิบัติการทดสอบกระบวนการโฟโตแคทาลิติก

2.3 การหาประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย

ทำการเพาะเลี้ยงสาหร่าย *M. aeruginosa* TISTR 8305 และ *O. obscura* TISTR 8245 จากศูนย์จุลินทรีย์ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย เพาะเลี้ยงในอาหารสูตร BG-11 ในขวดรูปชมพู่ ให้แสงสลับกับไม่ให้แสงเป็นเวลา 12 hr ระดับ ความเข้มแสง 3,000 lux ที่อุณหภูมิ 28°C โดยให้มีจำนวนความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายเริ่มต้นอยู่ในช่วงค่า 10^2 , 10^4 , 10^6 และ 10^8 cells/mL ในอาหารสูตร BG-11

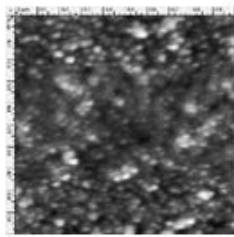
สำหรับการทดลองหาประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย โดยสาหร่ายที่เตรียมขึ้นซึ่งมีความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายเริ่มต้นที่เตรียมไว้เติมลงใน Petri dish ที่เคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 แบบฟิล์มบาง ปริมาตร 30 mL และทำการให้แสงจากแหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ตจากหลอด UVA-LED ที่มีพลังงานต่ำโดยมีความเข้มแสงเฉลี่ยเท่ากับ $12 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ สำหรับชุดถึงปฏิบัติการสำหรับทดลองดังแสดงในรูปที่ 2

หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงจำนวนเซลล์ของสาหร่าย ที่เวลาต่างๆ 10, 30, 60, 120, 150 และ 180 min ตามลำดับ โดยใช้วิธีการนำเซลล์สาหร่ายมาแยกให้ออกจากกันเป็นเซลล์เดี่ยวๆ ด้วยเครื่องอัลตราโซนิก ยี่ห้อ GT Sonic รุ่น GT-2227QTS แล้วนำมานับจำนวนเซลล์โดยใช้ Haemocytometer และทำการนับจำนวนเซลล์ต่อหน่วยปริมาตรด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง Olympus รุ่น CX 22 ทั้งนี้การหาค่าประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่ายจะทดลองเปรียบเทียบกับชุดควบคุม 1 และ 2 ในสถานะที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 แบบฟิล์มบางแต่ไม่มีการให้แสง และสถานะควบคุมที่มีการเจริญเติบโตในอาหารสูตร BG-11 ตามลำดับ เพื่อใช้เปรียบเทียบกับผลการทดลองในชุดทดลอง

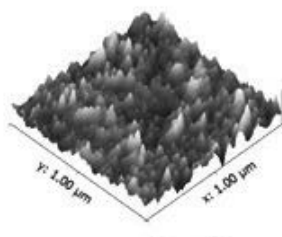
3. ผลการทดลองและวิจารณ์

3.1 ลักษณะกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

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



ก. ภาพถ่าย 2D



ข. ภาพถ่าย 3D

รูปที่ 3 ลักษณะพื้นผิวทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

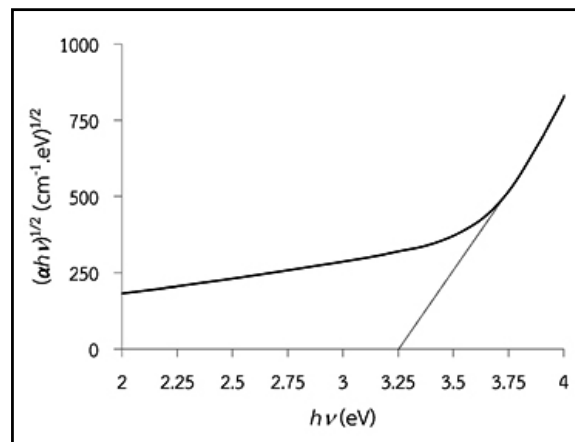
จากผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 แบบฟิล์มบางด้วยอุปกรณ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถเคลือบและยึดเกาะอยู่บนพื้นผิวตัวกลาง และอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยามีการกระจายตัวอยู่อย่างสม่ำเสมอทั่วบริเวณพื้นผิวของตัวกลาง โดยสามารถวิเคราะห์หาขนาดอนุภาค ความขรุขระเฉลี่ย (RMS) และพื้นที่ผิวปรากฏของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 แบบฟิล์มบางได้โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิว Gwyddion version 2.22 ในส่วนของขนาดช่องว่างแถบพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 แบบฟิล์มบางสามารถวิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ UV-Vis spectrometer รุ่น Lambda 650 Perkin Elmer และนำมาวิเคราะห์ด้วยสมการการถดถอยเชิงเส้นและนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^{1/2}$ กับ $h\nu$ ดังสมการที่ 1

$$(\alpha h\nu)^{1/2} = A(h\nu - E_{bg}) \quad (1)$$

โดย

- α = สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (cm^{-1})
 $h\nu$ = พลังงานโฟตอน (eV)
 A = ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับวัสดุ
 E_{bg} = ขนาดช่องว่างแถบพลังงาน (eV)

จากสมการที่ 1 สามารถประมาณค่าขนาดช่องว่างแถบพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 แบบฟิล์มบางได้ด้วยวิธี Tauc plot โดยการลากเส้นสัมผัสกราฟดังกล่าวและตัดแกน $(\alpha h\nu) = 0$ [13, 14] ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^{1/2}$ กับ $h\nu$

ทั้งนี้ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 แบบฟิล์มบางแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ขนาดอนุภาค พื้นที่ผิวปรากฏและค่าความขรุขระเฉลี่ย (RMS) ของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2

พารามิเตอร์	TiO_2 แบบฟิล์มบาง
ขนาดอนุภาค (nm)	30-70
พื้นที่ผิวปรากฏ (μm^2)	1.02
RMS (nm)	1.52
ขนาดช่องว่างแถบพลังงาน (eV)	3.25

จากตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 แบบฟิล์ม พบว่า มี

ขนาดอนุภาคของ TiO_2 มีค่าอยู่ในช่วง 30-70 nm โดยมีพื้นที่ผิวปรากฏภายใต้พื้นที่ผิวพื้นที่ที่ทำการเคลือบผิวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาฟิล์มบางขนาด $1 \mu\text{m}^2$ เท่ากับ $1.02 \mu\text{m}^2$ ค่าความขรุขระเฉลี่ย เท่ากับ 1.52 nm รวมทั้งมีขนาดช่องว่างแถบพลังงาน เท่ากับ 3.25 eV ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพดังกล่าวข้างต้นแสดงให้เห็นว่า สามารถเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 แบบฟิล์มบางที่มีขนาดอนุภาคในระดับนาโนได้ ซึ่งลักษณะของฟิล์มตัวเร่งปฏิกิริยา มีความขรุขระต่ำเนื่องจากการอนุภาคของ TiO_2 ที่เคลือบอยู่บนพื้นผิวมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และมีขนาดใกล้เคียงกัน โดยมีพื้นที่ผิวปรากฏเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่ผิวของตัวกลาง เท่ากับ 1.02 เท่า ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความเหมาะสมในทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นเพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตแคทาลิติก เนื่องจากอนุภาค TiO_2 มีขนาดที่เหมาะสมสำหรับการดูดกลืนคลื่นแสงอัลตราไวโอเล็ต และมีความสามารถในการกระเจิงแสงที่ดี ประกอบกับขนาดช่องว่างแถบพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นมีค่าเท่ากับ 3.25 eV ส่งผลให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่จากแถบเวเลนซ์ไปยังแถบการนำได้ดีขึ้น เนื่องจากขนาดช่องว่างแถบพลังงานดังกล่าวเป็นค่าที่อยู่ในช่วงที่ส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาตอบสนองต่อแสงในช่วงความยาวคลื่นในช่วงอัลตราไวโอเล็ตได้ ทำให้อิเล็กตรอนในแถบเวเลนซ์ (Valance band) ถูกกระตุ้นไปสู่แถบกระตุ้นหรือแถบการนำ (Conduction band) และลดอัตราการเกิดรีคอมบิเนชันของอิเล็กตรอนซึ่งเป็นกลไกหลักต่อการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคทาลิติก [15, 16]

3.2 ประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย

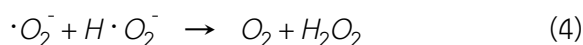
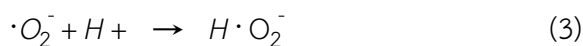
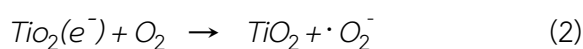
ผลการหาประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย ทั้ง 2 ชนิด ได้แก่ *M. aeruginosa* TISTR 8305 และ

O. obscura TISTR 8245 ที่มีความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายเริ่มต้นอยู่ในช่วงค่า 10^2 , 10^4 , 10^6 และ 10^8 cells/mL ในอาหาร BG-11 ด้วยกระบวนการโฟโตคะตะลิติกแสดงให้เห็นว่า กระบวนการดังกล่าวส่งผลให้ความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายทั้ง 2 ชนิด มีจำนวนลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเวลาผ่านไป โดยจำนวนสาหร่ายลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะทดลองที่เกิดกระบวนการโฟโตแคทาลิติกในเวลาที่ยาวขึ้น ซึ่งผลการหาประสิทธิภาพการกำจัดสาหร่าย *M. aeruginosa* TISTR 8305 ที่มีความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายเริ่มต้นดังกล่าวข้างต้นด้วยกระบวนการโฟโตแคทาลิติก มีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุด เท่ากับ 83.31%, 59.84%, 34.09% และ 15.17% ตามลำดับ ที่เวลา 180 min และสำหรับประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่าย *O. obscura* TISTR 8245 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุด เท่ากับ 73.87%, 53.28%, 27.22% และ 14.18% ตามลำดับ ที่เวลา 180 min ในขณะที่การทดลองในชุดควบคุม 1 และ 2 พบว่า การทดลองในชุดควบคุมทั้ง 2 ชุด ไม่พบการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของสาหร่ายอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเวลาผ่านไป

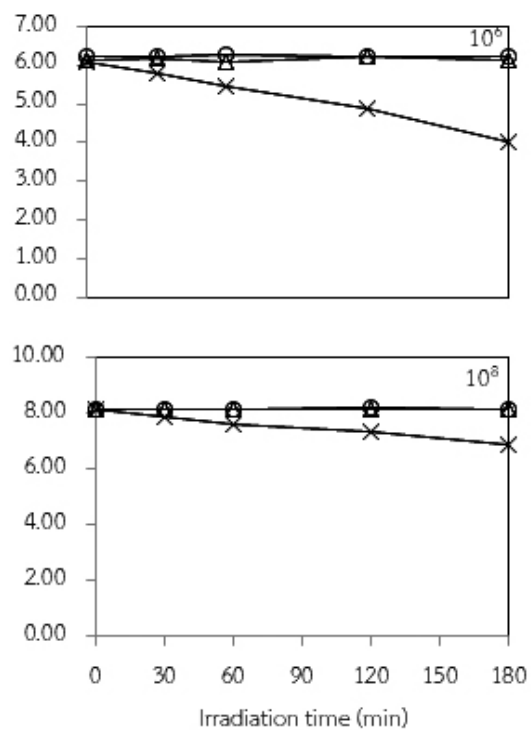
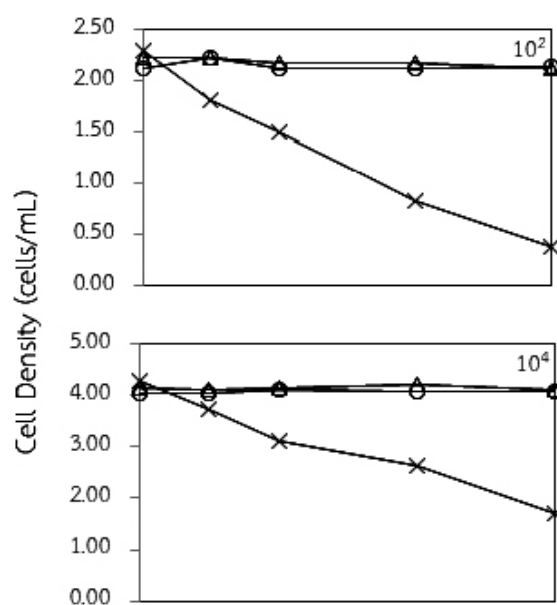
สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสาหร่าย *M. aeruginosa* TISTR 8305 และ *O. obscura* TISTR 8245 ที่เวลาใดๆ ภายใต้สภาวะทดลองที่เกิดกระบวนการโฟโตแคทาลิติกและชุดควบคุม 2 ชุด แสดงดังรูปที่ 5 และรูปที่ 6 ตามลำดับ

จากรูปที่ 5 และ 6 ผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายทั้ง 2 ชนิดที่มีจำนวนลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งการลดลงของความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายเกี่ยวข้องกับกลไกที่เกิดขึ้นในกระบวนการโฟโตแคทาลิติกแม้ว่าจะใช้แหล่งพลังงานจากแหล่งกำเนิดแสง UVA-LED ซึ่งมีพลังงานเพียง $12 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ซึ่งส่งผลให้เกิด

ผลกระทบต่อเซลล์สาหร่ายโดยกลไกดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากเนื่องจากอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยา TiO_2 เมื่อได้รับแสงที่มีพลังงานมากกว่าช่องว่างแถบพลังงานจะสามารถกระตุ้นอิเล็กตรอนให้หลุดออกจากแถบเวเลนซ์ (valance band) ไปสู่แถบการกระตุ้น (conduction band) ทำให้เกิดโฮล (hole) ที่แถบเวเลนซ์ ซึ่งผลของการที่อิเล็กตรอนหลุดออกไปทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ ดังแสดงในสมการที่ 2-5 [17, 18]

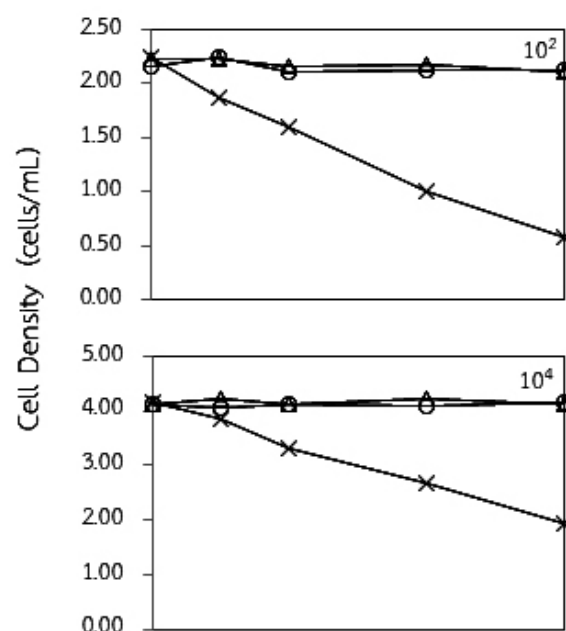


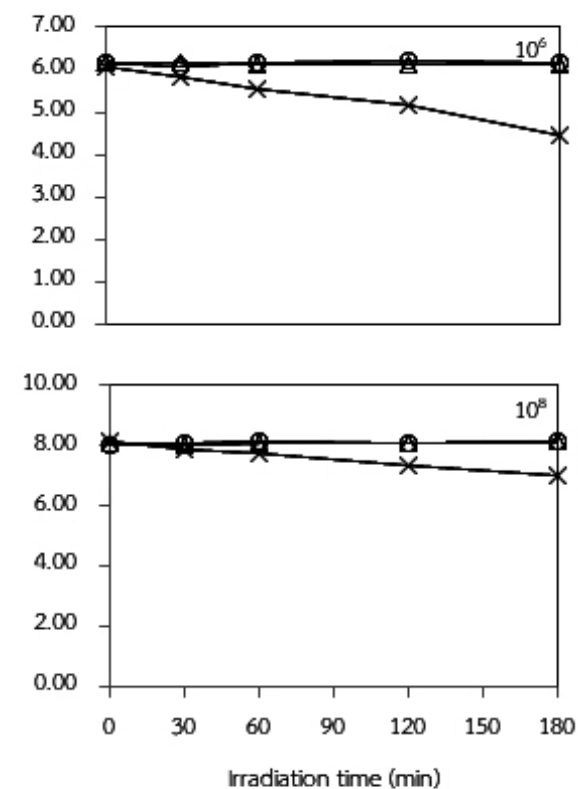
ผลจากปฏิกิริยาลูกโซ่ดังกล่าวทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรงในรูปแบบต่างๆ ได้แก่ hydroxyl radicals ($\cdot\text{OH}$) และ superoxide radicals ($\cdot\text{O}_2^-$) [19] ซึ่งทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับผนังเซลล์และไขมันในเยื่อหุ้มเซลล์ทำให้เกิดความเป็นพิษและเป็นอันตรายต่อเซลล์สาหร่ายได้ส่งผลให้ความหนาแน่นของสาหร่ายลดลง [18-21]



X ชุดทดลอง Δ ชุดควบคุม 1 O ชุดควบคุม 2

รูปที่ 5 อิทธิพลของความหนาแน่นของเซลล์สาหร่าย *M. aeruginosa* TISTR 8305 ต่อการกำจัดด้วยกระบวนการโฟโตแคทาลิติก





× ชุดทดลอง Δ ชุดควบคุม 1 ○ ชุดควบคุม 2

รูปที่ 6 อิทธิพลของความหนาแน่นของเซลล์สาหร่าย *O. obscura* TISTR 8245 ต่อการกำจัดด้วย กระบวนการโฟโตแคทาลิติก

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 5 และ 6 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของระหว่างความหนาแน่นของสาหร่ายเริ่มต้นกับเวลา ซึ่งชี้ให้เห็นว่าความหนาแน่นของสาหร่ายเริ่มต้นทั้ง 2 ชนิด มีผลโดยตรงกับประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่าย ซึ่งเป็นผลมาจากเกิดปัจจัยจำกัดของปฏิกิริยาจากความหนาแน่นของสาหร่ายเริ่มต้นที่มีค่าสูงขึ้นซึ่งส่งผลต่อกระบวนการโฟโตแคทาลิติกที่ทำให้เกิด $\cdot\text{OH}$ และ $\cdot\text{O}_2^-$ ในปริมาณเท่าเดิมเนื่องจากมีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาคงเดิมส่งผลให้ความหนาแน่นของสาหร่ายที่ถูกกำจัดมีปริมาณที่ลดลง [20, 22]

3.3 จลนพลศาสตร์ของกระบวนการโฟโตแคทาลิติก

ในการหาจลนพลศาสตร์ของการกำจัดสาหร่ายทั้ง 2 ชนิดด้วยปฏิกิริยาโฟโตแคทาลิติกสามารถนำสมการ ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งมาประยุกต์ใช้เพื่ออธิบาย ดังสมการที่ 6

$$\frac{dC}{dt} = -k_1 C \quad (6)$$

ทั้งนี้สมการที่ 6 สามารถอินทิเกรตและสามารถนำมาจัดรูปสมการใหม่ให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นได้ ดังสมการที่ 7 [23, 24]

$$\ln\left(\frac{C_0}{C}\right) = k_1 t \quad (7)$$

โดย

$\frac{dC}{dt}$ = อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เวลาใดๆ (cells/mL-min)

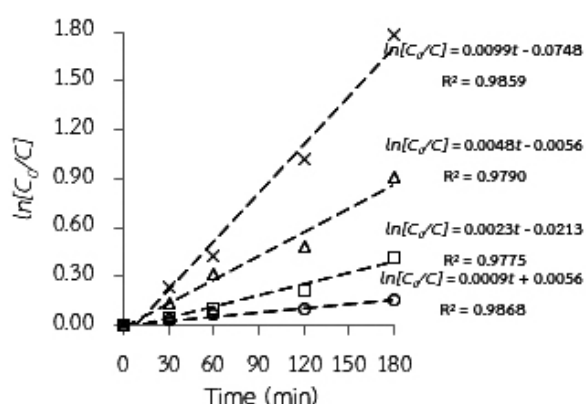
C_0 = ความหนาแน่นสาหร่ายที่เวลาเริ่มต้น (cells/mL)

C = ความหนาแน่นสาหร่ายที่เวลาใดๆ (cells/mL)

t = เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา (min)

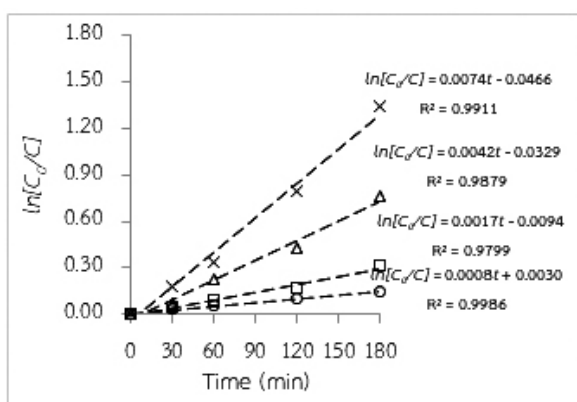
k_1 = ค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (min⁻¹)

ทั้งนี้ในการเปรียบเทียบอัตราการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดสาหร่ายทั้ง 2 ชนิดด้วยกระบวนการดังกล่าวพบว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาในการกำจัดสาหร่ายมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายเริ่มต้นมีค่าเท่ากันโดยพิจารณาจากค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการโฟโตแคทาลิติกในการกำจัดสาหร่ายทั้ง 2 ชนิด ดังแสดงในรูปที่ 7 และ 8



× $C_0 = 10^2$ Δ $C_0 = 10^4$ □ $C_0 = 10^6$ ○ $C_0 = 10^8$

รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(C_0/C)$ สำหรับสาหร่าย *M. aeruginosa* TISTR 8305 กับเวลา



× $C_0 = 10^2$ Δ $C_0 = 10^4$ □ $C_0 = 10^6$ ○ $C_0 = 10^8$

รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(C_0/C)$ สำหรับสาหร่าย *O. obscura* TISTR 8245 กับเวลา

ผลการหาจลนพลศาสตร์ของการกำจัดสาหร่ายทั้ง 2 ชนิด โดยใช้สมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งในการอธิบาย แสดงให้เห็นถึงปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายเริ่มต้นซึ่งมีผลโดยตรงกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการโฟโตแคทาลิติก โดยเมื่อความหนาแน่นของเซลล์

สาหร่ายเริ่มต้นมีค่าสูงส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยามีค่าน้อยกว่าในกรณีที่ความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายเริ่มต้นมีค่าต่ำ ซึ่งสามารถสังเกตได้จากค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการดังกล่าว เป็นผลสืบเนื่องจากความหนาแน่นเริ่มต้นของเซลล์สาหร่ายที่มีปริมาณมากเพิ่มมากขึ้น

เมื่อพิจารณาความสามารถในการกำจัดสาหร่ายในส่วนของสาหร่ายทั้ง 2 ชนิด ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ากระบวนการโฟโตแคทาลิติกสามารถกำจัดสาหร่าย *M. aeruginosa* TISTR 8305 ได้ดีกว่า *O. obscura* TISTR 8245 โดยพิจารณาจากค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาในการกำจัดสาหร่ายสูงสุดเท่ากับ 0.0099 min^{-1} และ 0.0074 min^{-1} สำหรับ *aeruginosa* TISTR 8305 และ *O. obscura* TISTR 8245 ตามลำดับ ที่ความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายเริ่มต้น 10^2 cells/mL ซึ่งเป็นผลมาจากลักษณะทางกายภาพของเซลล์ที่มีความแตกต่างกันโดย *M. aeruginosa* TISTR 8305 มีรูปร่างเซลล์ลักษณะกลม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง $5-6 \mu\text{m}$ ในขณะที่ *O. obscura* TISTR 8245 มีรูปร่างเซลล์เป็นสายยาวมีความกว้างประมาณ $3.5 \mu\text{m}$ และความยาวประมาณ $125 \mu\text{m}$ [25]

4. สรุป

ผลจากการทดลองในการศึกษาการกำจัดสาหร่ายด้วยกระบวนการโฟโตแคทาลิติกแสดงให้เห็นว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาฟิล์มบางที่เตรียมขึ้นมีศักยภาพและมีความเหมาะสมสำหรับใช้ในกระบวนการโฟโตแคทาลิติกแม้จะใช้แหล่งกำเนิดแสงที่มีความเข้มแสงเพียง เพียง $12 \mu\text{W/cm}^2$ โดยสภาวะที่เหมาะสมที่ส่งผลให้เกิดการกำจัดสาหร่ายได้สูงสุด คือ สภาวะที่มีความหนาแน่นของสาหร่ายเริ่มต้น 10^2 ซึ่งมีค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาสูงสุดผลการ

ทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่ากระบวนการโฟโตแคทาไลติกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาฟิล์มบางที่เตรียมขึ้นสามารถลดความหนาแน่นของเซลล์สาหร่ายได้อย่างเห็นได้ชัด

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้การสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อพัฒนาเชิงพื้นที่ ประจำปี พ.ศ. 2560 ซึ่งทำให้สามารถดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ได้อย่างสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Jacobs Loraine C.V., Peralta-Zamora P., Campos F. R., and Pontarolo R., 2013. "Photocatalytic Degradation of Microcystin-LR In Aqueous Solutions", **Chemosphere**. 90, 4: 1552-1557.
- [2] Tugaoen H.O., Garcia-Segura S., Hristovski K., and Westerhoff P., 2017. "Challenges in Photocatalytic Reduction of Nitrate As a Water Treatment Technology", **Science of The Total Environment**. 599: 1524-1551.
- [3] การประปานครหลวง, 2559. "รายงานประจำปี 2559 การประปาฯนครหลวง": 49.
- [4] สิริแพ พงษ์สวัสดิ์, สุทธวรรณ สุพรรณ, and วลีวรรณ แผงประเสริฐ, 2556. "การศึกษาประสิทธิภาพและผลกระทบของการใช้สารคอปเปอร์ซัลเฟตในการกำจัดสาหร่ายพิษในแหล่งน้ำของกองทัพอากาศที่ตั้งดอนเมือง", **วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา**. 18, 1: 153-156.
- [5] Pongswa S., Chaosuan N., and Kapphima W., 2017. "Removal of Harmful Blue-green Algae *Microcystis* spp. Using Agicultural and Aquacultural Waste", **Science and Technology RMUTT Journal**. 7, 1 (2017): 43-57.
- [6] Bai F., Liu R., Yang Y., Ran X., Shi J., and Wu Z., 2014. "Dissolved Organic Phosphorus Use by the Invasive Freshwater Diazotroph Cyanobacterium, *Cylindrospermopsis Raciborskii*", **Harmful Algae**. 39: 112-120.
- [7] Schoen M.E., Xue X., Wood A., Hawkins T.R., Garland J., and Ashbolt N.J., 2017. "Cost, Energy, Global Warming, Eutrophication and Local Human Health Impacts of Community Water and Sanitation Service Options", **Water Research**. 109: 186-195.
- [8] Olsen B.K., Chislock M.F., and Wilson A.E., 2016. "Eutrophication Mediates a Common Off-flavor Compound, 2-Methylisoborneol, In a Drinking Water Reservoir", **Water Research**. 92: 228-234.
- [9] Marien Cédric B. D., Cottineau T., Robert D., and Drogui P., 2016. "TiO₂ Nano-tube Arrays: Influence of Tube Length on the Photocatalytic Degradation of Paraquat", **Applied Catalysis B: Environmental**. 194: 1-6.

- [10] Khaki M.R.D., Shafeeyan M.S., Raman A.A.A., and Daud W.M.A.W., 2017. "Application of Doped Photocatalysts for Organic Pollutant Degradation - a Review", **Journal of Environmental Management**. 198: 78-94.
- [11] Rojviroon T., Laobuthee A., and Sirivithayapakorn S., 2012. "Photocatalytic Activity of Toluene under UV-LED Light with TiO_2 Thin Films", **International Journal of Photoenergy**. 2012: 8.
- [12] Rojviroon T., Rojviroon O., and Sirivithayapakorn S., 2016. "Photocatalytic Decolourisation of Dyes Using TiO_2 Thin Film Photocatalysts", **Surface Engineering**. 32, 8: 562-569.
- [13] Mir F.A., 2014. "Transparent Wide Band Gap Crystals Follow Indirect Allowed Transition and Bipolaron Hopping Mechanism", **Results in Physics**. 4: 103-104.
- [14] Zimnyakov D.A., Sevrugin A.V., Yuvchenko S.A., Fedorov F.S., Tretyachenko E.V., Vikulova M.A., et al., 2016. "Data on Energy-Band-gap Characteristics of Composite Nanoparticles Obtained by Modification of the Amorphous Potassium Polytitanate In Aqueous Solutions of Transition Metal Salts", **Data in Brief**. 7: 1383-1388.
- [15] Bogatu C., Perniu D., Sau C., Iorga O., Cosnita M., and Duta A., 2017. "Ultrasound Assisted Sol-Gel TiO_2 Powders and Thin Films for Photocatalytic Removal of Toxic Pollutants", **Ceramics International**. 43, 11: 7963-7969.
- [16] Ola O. and Maroto-Valer M.M., 2015. "Review of Material Design and Reactor Engineering on TiO_2 Photocatalysis for CO_2 Reduction", **Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews**. 24:16-42.
- [17] Srinivasan C. and Somasundaram N., 2003. "Bactericidal and Detoxification Effects of Irradiated Semiconductor Catalyst, TiO_2 ", **Current Science**. 85, 10: 1431-1438.
- [18] Martinez T., Bertron A., Escadeillas G., and Ringot E., 2014. "Algal Growth Inhibition on Cement Mortar: Efficiency of Water Repellent and Photocatalytic Treatments under UV/VIS Illumination", **International Biodeterioration & Biodegradation**. 89: 115-125.
- [19] Bai M., Zhang Z., Xue X., Yang X., Hua L., and Fan D., 2010. "Killing Effects of Hydroxyl Radical on Algae and Bacteria in Ship's Ballast Water and on Their Cell Morphology", **Plasma Chemistry and Plasma Processing**. 30, 6: 831-840.

- [20] David M. Metzler, Minghua Li, Ayca Erdem, and C. P. Huang, 2011. "Responses of algae to photocatalytic nano-TiO₂ particles with an emphasis on the effect of particle size", **Chemical Engineering Journal**. 170, 2: 538-546.
- [21] Rodríguez-González V., Alfaro S.O., Torres-Martínez L.M., Cho S.H., and Lee S.W., 2010. "Silver-TiO₂ Nanocomposites: Synthesis and Harmful Algae Bloom Uv-Photoelimination", **Applied Catalysis B: Environmental**. 98, 3: 229-234.
- [22] Mehrotra K., Yablonsky G.S., and Ray A.K., 2003. "Kinetic Studies of Photocatalytic Degradation in a TiO₂ Slurry System: Distinguishing Working Regimes and Determining Rate Dependences", **Industrial & Engineering Chemistry Research**. 42, 11: 2273-2281.
- [23] Guo Z., Guo A., Guo Q., Rui M., Zhao Y., Zhang H., et al., 2017. "Decomposition of Dexamethasone by Gamma Irradiation: Kinetics, Degradation Mechanisms and Impact on Algae Growth", **Chemical Engineering Journal**. 307: 722-728.
- [24] Ma Q., Ren J., Huang H., Wang S., Wang X., and Fan Z., 2012. "Kinetic and Mechanistic Study of Microcystin-LR Degradation by Nitrous Acid under Ultraviolet Irradiation", **Journal of Hazardous Materials**. 215: 75-82.
- [25] Whitton B.A. and Potts M. 2007. **The Ecology of Cyanobacteria: Their Diversity in Time and Space**: Springer Netherlands.

รถสองล้อควบคุมการทรงตัวด้วยหลักการ Inverted Pendulum Two-Wheeled Self-Balancing Vehicle based on Inverted Pendulum Mechanism

ธนพงษ์ นพวงศ์ ณ อยุธยา¹ และ ไพฑูรย์ รักเหลือ²
tanapong.n@en.rmutt.ac.th¹, paitoon_r@rmutt.ac.th²

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอรถสองล้อควบคุมการทรงตัวด้วยหลักการ Inverted Pendulum ที่มีความไวและเสถียรภาพสูงโดยใช้การตรวจจับแบบไดนามิกหรือ Gyroscope เพื่อวัดความเอียงในกรณีรถเคลื่อนที่ร่วมกับตัวตรวจวัดความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงหรือ Accelerometer และการวัดความเอียงแบบอยู่กับที่ (Static Sensing) ตามลำดับ ตัวตรวจจับความเอียงทั้งสองตัวนี้ของรถถูกควบคุมผ่านบอร์ด Arduino โดยบอร์ด Arduino รับข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความเอียงของรถจากทั้ง RATE Gyroscope และ Accelerometer เพื่อนำค่าสัญญาณมาวิเคราะห์เพื่อไปสั่งการทำงานของมอเตอร์เพื่อรักษาการทรงตัวแบบสมดุลและการเคลื่อนที่ของรถสองล้อต้นแบบ ในส่วนของกระบวนการทดสอบค่าสัญญาณเอาต์พุตของ RATE Gyroscope มีผลที่แปรผันตรงแบบเชิงเส้นกับค่าความเร็วเชิงมุม ส่วนผลการการทดสอบค่าสัญญาณเอาต์พุตจาก Accelerometer จะเปรียบเทียบกับความเอียงของตัวรถสองล้อซึ่งสัญญาณเอาต์พุตดังกล่าวมีความแปรผันตรงกับมุมเอียงของรถสองล้อแบบไม่เป็นเชิงเส้น ในทางปฏิบัติได้นำรถสองล้อต้นแบบมาทำการทดสอบการทรงตัวเมื่อไม่มีแรงภายนอกกระทำ รถสองล้อต้นแบบตั้งอยู่ในตำแหน่งการทรงตัวที่สมดุล เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำทำให้รถสองล้อต้นแบบเกิดการเอียงขึ้นจากแนวสมดุลทำให้ตัวตรวจจับความเอียงทั้งสองตัวส่งสัญญาณเอาต์พุตที่เปลี่ยนแปลงไปมายังบอร์ด Arduino เพื่อไปสั่งการขับเคลื่อนให้ล้อของรถยนต์สองล้อต้นแบบให้กลับมาอยู่ตำแหน่งสมดุลเหมือนเดิม รถสองล้อควบคุมการทรงตัวด้วยหลักการ Inverted Pendulum นี้มีราคาต่ำกว่ารายการละเอียดน้อยกว่าและน้ำหนักเบากว่ารถยนต์สองล้อที่มีขายเชิงธุรกิจทั่วไปและยังเหมาะกับการนำไปใช้เป็นพาหนะส่วนบุคคลในปัจจุบันได้ด้วย

คำสำคัญ: รถยนต์สองล้อ Inverted Pendulum บอร์ด Arduino Gyroscope Accelerometer

^{1,2} อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Abstract

This article presents Two-wheeled self-balancing vehicle based on inverted pendulum, which has high sensitivity and stability using dynamic sensor, gyroscope, and static sensor, accelerometer to determine tilt angle of moving situation and staying situation, respectively. Both tilt angle sensors of proposed vehicle are controlled via Arduino board. The Arduino board gets a changing tilt angle of two-wheeled self-balancing vehicle from RATE Gyroscope and Accelerometer in order to analyse signal to drive motor for self-balancing and movement of proposed vehicle. In term of measurement procedure, the measured output signal results of RATE Gyroscope is linearly direct variation with angular velocity. Furthermore, the accelerometer's output signal results is non-linearly direct variation compared with tilt angle of two-wheeled self-balancing vehicle. Practically, the proposed two-wheeled vehicle is examined balancing test depending on external force. When the external force is not exist, proposed two-wheeled self-balancing vehicle stays still at balance position. In other way, when the proposed vehicle is executed by the external force execute, the proposed vehicle becomes tilt from balancing axis cause both sensors detect tilt angle and sent the output signal to Arduino board to drive motor of proposed two-wheeled vehicle for being balancing position again. Finally, Two-wheeled self-balancing vehicle based on inverted pendulum offer low-cost, low-profiles and light-weight alternatives to commercially two-wheeled vehicle and also suitable use as a personal vehicle presently.

Keywords: Two-Wheeled Vehicle, Inverted Pendulum, Arduino Board, Gyroscope, and Accelerometer

1. บทนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการทรงตัวของวัตถุได้มีการพัฒนามากยิ่งขึ้นและถูกนำมาใช้ประโยชน์มากมาย เช่น สิ่งปลูกสร้างในอาคารบ้านเรือน หุ่นยนต์ในงานอุตสาหกรรม และยานพาหนะ เป็นต้น โดยเริ่มแรกในปี ค.ศ. 1990 ดีน คาเมน (Dean Kamen) นักประดิษฐ์ได้มีการเริ่มความคิดที่จะสร้างระบบขนส่งส่วนบุคคลแบบใหม่ที่มีชื่อว่า Segway Human Transporter (Segway HT) [1] ซึ่งเป็นยานพาหนะที่มีสองล้อวางขนานในแนวเดียวกันแต่ละล้อ

ขับเคลื่อนแยกกันอย่างอิสระ แต่สิ่งที่สำคัญมากคือส่วนที่ทำให้ยานพาหนะสมดุลได้ทั้งในกรณีที่มีหรือไม่มีคนขับซึ่งการควบคุมสมดุลนี้ทำได้โดยการตรวจสอบสัญญาณป้อนกลับจากเซ็นเซอร์วัดมุมเอียงและไจโรสโคป (Gyroscope) ส่งสัญญาณมายังตัวควบคุม ซึ่งต่อมาเป็นเดอ ลาสัน (Bender Larson) [2] ได้ทำการพัฒนาหุ่นรักษาสมดุลที่มีน้ำหนักเบาและสามารถประกอบและดัดแปลงได้ง่าย โดยใช้ไจโรสโคปร่วมกับข้อมูลที่ได้รับจากเซ็นเซอร์วัดความเร่งสองแกนเพื่อที่ได้ข้อมูลที่แม่นยำและ

เที่ยงตรง ต่อมาได้มีการพัฒนาให้มีเสถียรภาพในการควบคุมมากขึ้น [3] ซึ่งใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 8 บิต ที่มีตัวควบคุมแบบพีดี (PD Controller) รับสัญญาณป้อนกลับจากไจโรสโคปแบบเปียโซอีเล็กทริก มอเตอร์จะถูกควบคุมโดยสัญญาณการมอดูเลตความกว้างพัลส์ (Pulse Width Modulation: PWM) ส่วนในงานวิจัยของ เดวิด แอนเดอร์สัน (David P. Anderson) [4] ที่มีชื่อว่า nBot Balancing Robot เป็นหุ่นยนต์ต้นแบบขับเคลื่อนสองล้อแบบสมดุลที่ใช้หลักการอินเวอร์ทแพนดูลัม (Inverted Pendulum) ที่มีความไวและเสถียรภาพมากขึ้น ซึ่งใช้การทำงานร่วมกันของ Gyroscope กับ Accelerometer วัดมุมเอียงเป็นองศาเพื่อป้อนให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ HC11 ได้โดยตรงซึ่งไม่ต้องเสียเวลาในการคำนวณค่ามุม ซึ่งประมวลผลโดยใช้การป้อนกลับแบบสัดส่วนร่วมกับอนุพันธ์

ระบบ Inverted Pendulum เป็นระบบหนึ่ง ที่เข้ามามีบทบาทและใช้งานอย่างแพร่หลายในเทคโนโลยีการทรงตัวของรถสองล้อ โดยมีหลักการทำงานคือการรักษาก้าน Pendulum ให้อยู่ตำแหน่งตั้งฉากกับแกนหรือแกน Pendulum เพื่อรักษาสมดุล โดยบทความของ Grasser [5] ได้นำเสนอพาหนะที่รักษาสมดุลของผู้ขับขี่บนรถ 2 ล้อที่อยู่บนแกนเดียวกันโดยใช้ระบบ Inverted Pendulum โดยใช้การประมวลผลจาก Gyroscope และตัวเข้ารหัสอินครีเมนทัล (Incremental Encoder) ส่วนในการวัดความเอียงได้มีการนำเสนอการใช้ Gyroscope และ Accelerometer เป็นเซนเซอร์แบบไดนามิก (Dynamic Sensing) และเซนเซอร์แบบสถิติก (Static Sensing) ตามลำดับ [6] เพื่อเสถียรภาพในการทรงตัว

จากงานวิจัยที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าระบบ Inverted Pendulum เป็นอีกระบบหนึ่งที่ถูกใช้

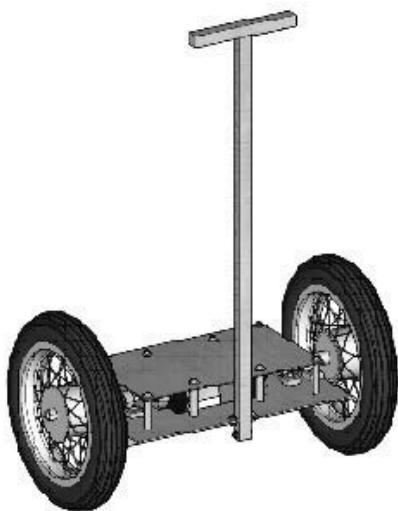
ในการรักษาสมดุลของหุ่นยนต์ 2 ล้อได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้นำหลักการรักษาสมดุลของระบบ Inverted Pendulum มาประยุกต์ใช้กับการทรงตัวและการเคลื่อนที่ของรถต้นแบบ ซึ่งหลักการทำงานของอุปกรณ์และส่วนประกอบของตัวรถต้นแบบจะถูกอธิบายในหัวข้อต่อไป ส่วนหัวข้อที่ 3 และ 4 กล่าวถึงขั้นตอนการวัดทดสอบ และการวัดสัญญาณขาออกของแต่ละอุปกรณ์และเสถียรภาพการทรงตัวของตัวรถ ตามลำดับ

2. การออกแบบ อุปกรณ์และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงการออกแบบซึ่งจะแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ การออกแบบทางกลศาสตร์ การออกแบบทางอิเล็กทรอนิกส์ และการออกแบบทางซอฟต์แวร์ รวมถึงหลักการทำงานของอุปกรณ์ที่ใช้ในการรักษาสมดุลไม่ว่าจะเป็นหลักการ Inverted Pendulum ตัว Gyroscope และตัว Accelerometer เป็นต้น

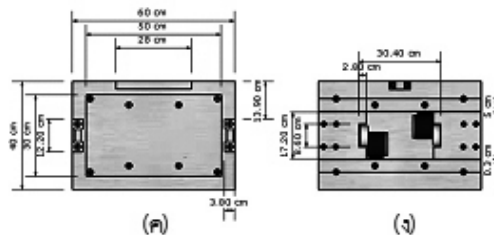
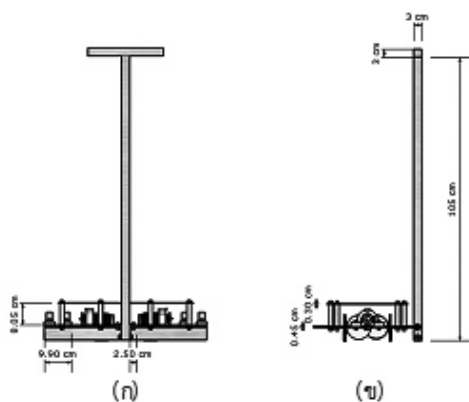
2.1 การออกแบบทางกลศาสตร์

การออกแบบทางกลศาสตร์เป็นส่วนที่สำคัญมากส่วนหนึ่งโดยต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายๆด้าน อีกทั้งต้องอยู่ภายใต้กฎตามหลักการทางฟิสิกส์ โครงสร้างส่วนใหญ่ของรถต้นแบบจะทำจากอลูมิเนียมเพื่อความเบาของตัวรถเสริมความแข็งแรงด้วยคานเหล็กและสามารถรองรับน้ำหนักของผู้ขับขี่ รวมไปถึงน้ำหนักของตัวรถด้วย โครงสร้างของรถสองล้อควบคุมการทรงตัวด้วยหลักการ Inverted Pendulum ใช้โปรแกรม Sketch Up 8 และ Auto Cad 2012 เพื่อช่วยในการการออกแบบ โครงสร้างจริงทำได้ง่ายขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้าง 3 มิติ แบบไอโซเมตริก
ของรถสองล้อต้นแบบ

ส่วนรูปที่ 2 แสดงรายละเอียดขนาดโครงสร้างในแบบ
ภาพถ่ายแต่ละด้านของรถสองล้อต้นแบบ ส่วนระบบ
การขับเคลื่อนใช้มอเตอร์ไฟฟ้าแบบทดเกียร์ขนาด
350 W 24 VDC สามารถรับน้ำหนักได้สูงสุด 200 kg
มีอัตราทดเกียร์ 1:5 มีความเร็วสูงสุด 500 รอบ
ต่อนาที ในการเลือกขนาดมอเตอร์นี้ได้คำนึงถึงเพื่อให้
สอดคล้องกับน้ำหนักทั้งหมดตัวรถรวมทั้งน้ำหนัก
ของผู้ขับขี่ ส่วนอัตราทดเกียร์ช่วยในการเพิ่มแรง
ขับเคลื่อน ซึ่งมอเตอร์ถือได้ว่าเป็นส่วนที่สำคัญมาก
ในการขับเคลื่อนและการทรงตัวของรถสองล้อควบคุม
การทรงตัวด้วยหลักการ Inverted Pendulum



รูปที่ 2 ภาพฉาย 2 มิติของรถสองล้อต้นแบบที่เป็น
(ก)

ภาพด้านหน้า (ข) ภาพด้านข้าง (ค)

ภาพด้านบน และ (ง) ภาพด้านล่าง

2.2 การออกแบบทางอิเล็กทรอนิกส์

ส่วนประกอบอิเล็กทรอนิกส์ของรถสองล้อ
ควบคุมการทรงตัวด้วยหลักการ Inverted Pendu-
lum โปรแกรมถูกออกแบบโดยใช้โปรแกรม Protel
99 SE [7] ซึ่งในส่วนวงอิเล็กทรอนิกส์ของรถสองล้อ
ควบคุมการทรงตัวด้วยหลักการ Inverted Pendu-
lum แบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก คือ ส่วนไมโครคอน
โทรลเลอร์ (Microcontroller Board) ส่วนขับเคลื่อน
มอเตอร์ (Drive Motor Board) และส่วนเซนเซอร์
ความสมดุล (Balancing Sensor Board)

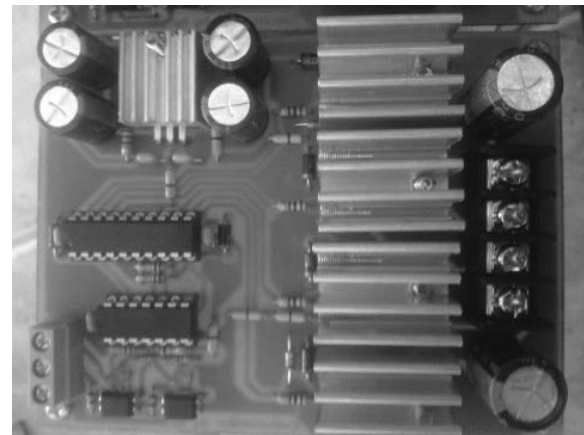
2.2.1 ส่วนไมโครคอนโทรลเลอร์ (Micro- controller Board)

สำหรับวงจรควบคุมรถสองล้อควบคุม
การทรงตัวด้วยหลักการ Inverted Pendulum
เป็นส่วนอิเล็กทรอนิกส์สำคัญส่วนหนึ่งที่ใช้ควบคุม
การทำงานของรถสองล้อต้นแบบไม่ว่าจะเป็นการ
รับข้อมูลจากเซนเซอร์การทรงตัวด้วยระบบสมดุล
รวมถึงการให้ข้อมูลสัญญาณ เพื่อที่จะไปขับเคลื่อน
ให้รถเคลื่อนที่หรือทรงตัวได้ตามที่ต้องการ ซึ่งใช้บอร์ด
ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino รุ่น Fino 328 ของ
บริษัท Micro Tech ซึ่งเป็นบอร์ดที่สามารถนำมา
พัฒนาได้อย่างอิสระเช่นเดียวกับบอร์ด I/O พื้นฐาน
รวมทั้งพัฒนาการโต้ตอบแบบสแตนด์อโลนหรือ

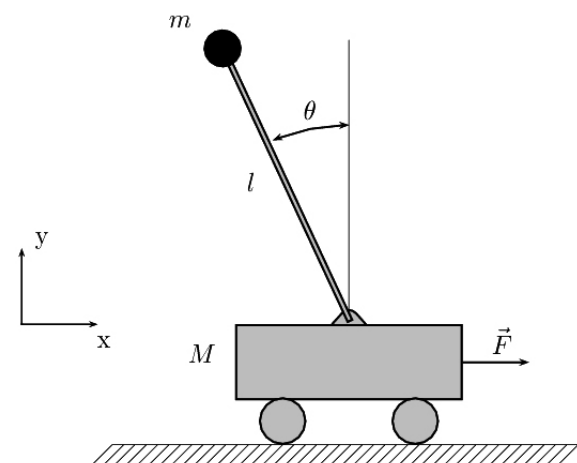
เชื่อมต่อกับซอฟต์แวร์บนคอมพิวเตอร์ได้ ใช้ไดรฟ์ FT232RL เป็นช่องทางอินเทอร์เฟซสัญญาณกับคอมพิวเตอร์

2.2.2 ส่วนขับเคลื่อนมอเตอร์ (Drive Motor Board)

วงจรส่วนนี้เป็นส่วนที่ต้องออกแบบให้เหมาะสมเพื่อที่จะขับเคลื่อนให้พอกับความต้องการของมอเตอร์ 350 W ที่ใช้งานในการเคลื่อนที่รถสองล้อควบคุมการทรงตัวด้วยหลักการ Inverted Pendulum ซึ่งทางผู้วิจัยได้เลือกใช้ไอซีชนิด Full H-Bridge เบอร์ HIP4080AIPZ ของบริษัท Intersil [8] ที่สามารถกำหนดค่าการขับเคลื่อนได้ทั้งแบบ Inverting และ Non-Inverting นอกจากนี้ไอซี HIP4080AIPZ รุ่นนี้สามารถทำการเปรียบเทียบข้อมูลอย่างแม่นยำเพื่ออำนวยความสะดวกในกระบวนการ Hysteresis ยิ่งไปกว่านั้นไอซี HIP4080AIPZ ไม่เพียงถูกใช้ในการขับมอเตอร์แปลงแรงไฟฟ้าขนาดกลางแต่ยังสามารถถูกนำมาใช้ในการผลักดันประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์แบบขั้นให้สูงขึ้นด้วย ซึ่งรูปที่ 3 แสดงวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์โดยใช้ไอซี HIP4080AIPZ



รูปที่ 3 วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์โดยใช้ไอซี HIP4080AIPZ



รูปที่ 4 Free Body Diagram of representation of mobile inverted pendulum [9]

2.2.3 ส่วนเซนเซอร์ความสมดุล (Balancing Sensor Board)

ส่วนนี้จะเริ่มต้นด้วยการอธิบายหลักการการรักษาสมดุลของรถสองล้อควบคุมการทรงตัวด้วยหลักการ Inverted Pendulum ดังรูปที่ 4

ซึ่งจะเห็นได้ว่าเพื่อให้ก้าน Pendulum ที่มีลูกตุ้มอยู่ที่ปลายเพื่อความสามารถในการทรงตัวสามารถหมุนได้อย่างอิสระในระนาบเดียวโดยการเชื่อมต่อกับตัวรถที่จุดต่อหมุนได้ เมื่อก้าน Pendulum เกิดการเอียงหรือหมุนไปในทิศทางใดนั้นตัวรถก็จะเคลื่อนที่ไปในทิศทางนั้นในระยะเวลาที่เหมาะสมเพื่อที่จะประคองก้าน Pendulum ไม่ให้เอียงมากเกินไปจนล้มและเพื่อรักษาสมดุลในการทรงตัวของรถ ซึ่ง

ระบบ Pendulum เป็นระบบที่มีจุดสมดุลอยู่รอบแกนหมุนด้วยกันสองจุดคือจุดที่ Pendulum ตั้งตรงในแนวดิ่งและจุดที่ Pendulum ห้อยตัวลงในแนวดิ่ง แต่จุดเสถียรภาพในกรณีไม่มีตัวควบคุมนั้นมีเพียงจุดเดียว คือ จุดที่แกนห้อยตัวลงในแนวดิ่งเท่านั้น การทำให้ Pendulum สามารถตั้งตรงในแนวดิ่งได้ขึ้นอยู่กับ การใส่ตัวควบคุมที่เหมาะสมเข้าไปในระบบซึ่งมีอยู่หลายวิธี โดยตัวควบคุมดังกล่าวเป็นได้ทั้งแบบเชิงเส้นหรือแบบไม่เชิงเส้นขึ้นอยู่กับความต้องการและความเหมาะสมในการใช้งาน

พิจารณาตามรูปที่ 4 จะสามารถหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Inverted Pendulum โดยใช้สมการกลศาสตร์แบบลากรางจ์ (Lagrange's equations) [9] เพื่ออำนวยความสะดวกในการตั้งสมมติฐานว่าระบบเคลื่อนที่ในระนาบ XY เพียงอย่างเดียวเท่านั้น โดยการตั้งสมมติฐานนี้จะไม่ทำให้สูญเสียความเป็นรูปทั่วไปของระบบการเคลื่อนที่สองมิติ โดยตัวแปรต่าง ๆ จะอ้างอิงจากรูปที่ 4 คือ $\theta(t)$ เป็นฟังก์ชันของมุมของก้าน Pendulum ทำกับแนวดิ่งฉากกับพื้นโลกที่แปรผันตามเวลา โดยที่ก้าน Pendulum มีความยาว l ที่มีแรง F จากภายนอกกระทำในทิศแกน X และมีแรงโน้มถ่วงของโลกกระทำในแนวแกน Y ซึ่งกำหนดให้ $x(t)$ เป็นฟังก์ชันของระยะทางของรถในแนวแกน X ที่แปรผันตามเวลา จากสมการกลศาสตร์แบบลากรางจ์ของระบบ [9] จะได้

$$L = T - V \quad (1)$$

เมื่อ T คือ พลังงานจลน์ของระบบ มีค่าเท่ากับ $\frac{1}{2}Mv_1^2 + \frac{1}{2}mv_2^2$ และ V คือ พลังงานศักย์ของระบบ เมื่อแทนค่าลงสมการที่ 1 จะได้

$$L = \frac{1}{2}Mv_1^2 + \frac{1}{2}mv_2^2 - mgl\cos\theta \quad (2)$$

โดย v_1 และ v_2 คือ ความเร็วของตัวรถและความเร็วที่จุดศูนย์กลางมวลของมวลบนก้าน Pendulum ซึ่งสามารถเขียน v_1 และ v_2 ในรูปของ x และ θ ได้ดังนี้

$$v_1^2 = \left(\frac{dx}{dt}\right)^2 = \dot{x}^2 \quad (3)$$

$$v_2^2 = \left(\frac{d}{dt}(x - l\sin\theta)\right)^2 + \left(\frac{d}{dt}(x - l\cos\theta)\right)^2 \quad (4)$$

ทำการลดรูปสมการที่ 4 จะได้เป็น

$$v_2^2 = \dot{x}^2 - 2l\dot{x}\dot{\theta}\cos\theta + l^2\dot{\theta}^2 \quad (5)$$

แทนสมการที่ 3 และ สมการที่ 5 ลงในสมการที่ 2 จะได้สมการลากรางจ์ใหม่เป็น

$$L = \frac{1}{2}(M+m)\dot{x}^2 - ml\dot{x}\dot{\theta}\cos\theta + \frac{1}{2}l^2\dot{\theta}^2 - mgl\cos\theta \quad (6)$$

เมื่อพิจารณาจากสมการการเคลื่อนที่ดังต่อไปนี้

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} - \frac{\partial L}{\partial x} = F \quad (7)$$

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} - \frac{\partial L}{\partial \theta} = 0 \quad (8)$$

เมื่อแทนสมการที่ 6 ลงสมการที่ 7 และสมการที่ 8 จะได้

$$(M+m)\ddot{x} - ml\ddot{\theta}\cos\theta + ml\dot{\theta}^2\sin\theta = F \quad (9)$$

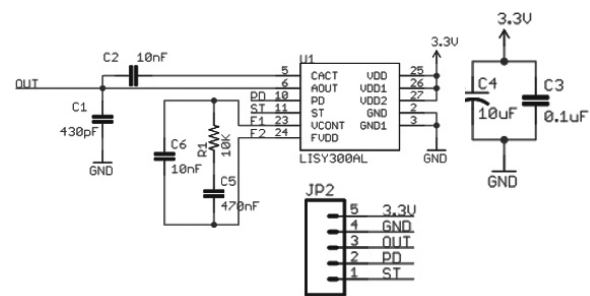
$$l\ddot{\theta} - g\sin\theta = \ddot{x}\cos\theta \quad (10)$$

จากสมการข้างต้นจะเห็นได้ว่าเป็นสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งยากที่จะไปออกแบบตัวควบคุมในทางปฏิบัติผู้วิจัยส่วนใหญ่นิยมแปลงสมการไม่เป็นเชิงเส้นให้เป็นสมการเชิงเส้นก่อนโดยการสมมติว่าก้าน Pendulum แกว่งอยู่ในขนาดมุมที่เล็กมาก ๆ จนเข้าใกล้ศูนย์ เพื่อง่ายต่อการออกแบบตัวควบคุมและง่ายต่อการอธิบายพฤติกรรมของระบบ ซึ่งในงานวิจัยนี้การควบคุมการทรงตัวด้วยระบบสมมูลแบบ Inverted Pendulum จะใช้เซ็นเซอร์วัดความเอียงสองชนิดคือ Rate Gyroscope และ Accelerometer เป็นตัวควบคุมการทำงาน Inverted Pendulum

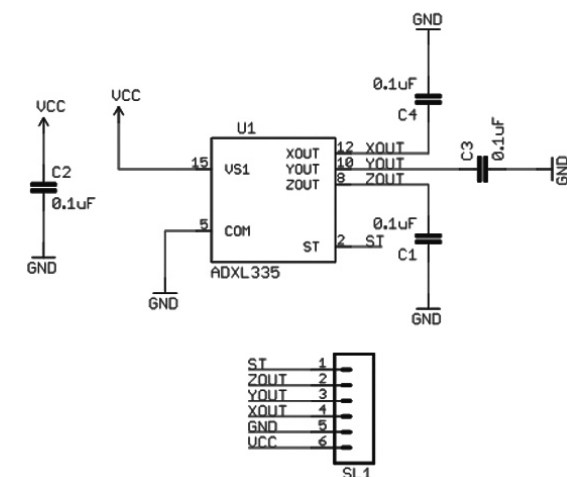
สำหรับ Rate Gyroscope เป็นอุปกรณ์แบบ Dynamic Sensing ที่สามารถตรวจจับความเอียงได้อย่างรวดเร็วเหมาะสำหรับการเคลื่อนที่เชิงมุมที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาแต่มีข้อเสียที่เรียกว่าค่าความผิดพลาด Drift หรือ การเลื่อนออกจากจุดเซตโดยรบกวนลือความคุมการทรงตัวด้วยหลักการ Inverted Pendulum นี้ใช้ Rate Gyroscope รุ่น LISY300AL [10] โดยข้อมูลที่ออกจาก Rate Gyroscope อยู่ในรูปความเร็วเชิงมุมจำเป็นต้องแปลงเป็นความเอียงในรูปขององศา โดยการอินทิเกรตความเร็วเชิงมุม ซึ่งแรงสั่นสะเทือนจากโครงสร้างจะถูกปรับปรุงโดยวงจรขับที่อยู่ในวงจรป้อนกลับของสัญญาณป้อนกลับของสัญญาณตรวจจับจากนั้นกรองสัญญาณปรากฏเป็นสัญญาณอนาล็อกที่เอาต์พุต โดยการต่อพินของ Rate Gyroscope ถูกแสดงดังรูปที่ 5

ส่วนเซ็นเซอร์วัดความเอียงอีกตัวหนึ่งที่ถูกใช้เพื่อควบคุม Pendulum คือ Accelerometer เป็นอุปกรณ์วัดความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง ซึ่งต้องทำการแปลงเป็นมุมเอียงผ่านการใช้ฟังก์ชัน $\arcsin$ โดย Accelerometer มีข้อดี คือ สามารถบอกความเอียงได้อย่างแม่นยำเมื่อรอกอยู่นิ่งเท่านั้น หรือ

เรียกว่าเป็นอุปกรณ์ Static Sensing ซึ่งต่างจาก Gyroscope ที่เป็นแบบ Dynamic Sensing แต่มีความไวในการตรวจจับที่ต่ำมากทำให้ได้เอาต์พุตที่มีความคลาดเคลื่อนได้เมื่อ Accelerometer ไม่อยู่นิ่งกับที่ ซึ่ง Accelerometer ที่ถูกใช้ในงานวิจัยนี้คือรุ่น ADXL335 [11] ที่มีขนาดเล็ก บางและใช้พลังงานต่ำ มีแกนทั้งหมดสามแกน โดยสัญญาณเอาต์พุตของ Accelerometer ออกมาในรูปแบบแรงดันไฟฟ้าจำกัดจากรูปที่ 6 เป็นการต่อใช้งานของตัว Accelerometer โดยใช้ตัวเก็บประจุ C4 C3 และ C1 ต่อเข้ากับขา XOUT YOUT และ ZOUT ตามลำดับ โดยสามารถเลือกแบนด์วิดท์ให้เหมาะสมกับการใช้งานช่วง 0.5 Hz ถึง 1600 Hz สำหรับแกน X และ Y ส่วนแกน Z สามารถเลือกใช้ในช่วง 0.5 Hz – 550 Hz



รูปที่ 5 การต่อพินของ Rate Gyroscope



รูปที่ 6 การตั้งค่าและฟังก์ชันของขาแต่ละขาของ Accelerometer

2.3 การออกแบบทางซอฟต์แวร์

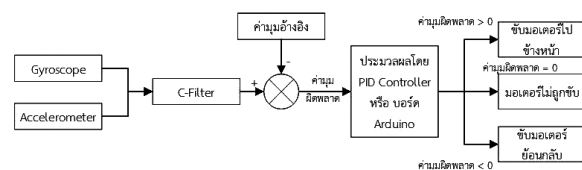
รูปที่ 7 แสดงระบบควบคุมรถสองล้อควบคุมการทรงตัวด้วยหลักการ Inverted Pendulum เป็นระบบป้อนกลับแบบลบแบบ PID Control โดยค่าที่ป้อนกลับเป็นมุมองศาจากเซนเซอร์วัดความเอียง ซึ่งค่ามุมเอียงที่ป้อนกลับมาจะถูกลบออกจากค่ามุมอ้างอิง (Reference angle) ได้เอาท์พุทความผิดพลาดออกมาเป็นมุมผิดพลาด (Error angle) ป้อนเข้าไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อทำการประมวลผลแล้วส่งออกไปยังภาคขับเคลื่อนมอเตอร์ (Drive motor) เพื่อให้มอเตอร์หมุนไปยังตำแหน่งที่ตัวรถเกิดมุมผิดพลาดน้อยที่สุด ดังนั้นจะเห็นได้ว่าเมื่อรถเอียงไปจากค่าเริ่มต้นมากขึ้นจะทำให้เกิดมุมผิดพลาดมากขึ้นเช่นกัน ระบบจะสมดุลได้ก็ต่อเมื่อมุมผิดพลาดเป็นศูนย์หรือมุมของตัวรถมีค่าเท่ากับมุมเริ่มต้นนั่นเอง โดยกระบวนการทำงานของบอร์ด Arduino จะมีขั้นตอนตามกระบวนการในรูปที่ 8 ระบบควบคุมจะรับค่ามุมมาจาก Gyroscope และ Accelerometer เป็นค่าควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์เพื่อการทรงตัวของรถสองล้อต้นแบบ

3. ขั้นตอนการทดสอบและวัดผลการทำงาน

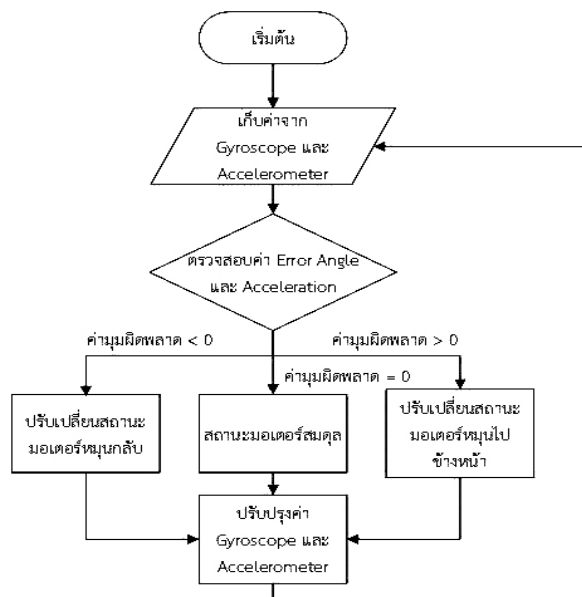
ส่วนนี้จะกล่าวถึงการวัดทดสอบพื้นฐานของสัญญาณเอาท์พุทของตัวตรวจจับความเอียงทั้ง Gyroscope และ Accelerometer รวมทั้งได้ทำการทดสอบทางปฏิบัติด้านความสามารถการรักษาสถิตของรถสองล้อที่ควบคุมการทรงตัวด้วยหลักการ Inverted Pendulum ในกรณีแรกเป็นกรณีที่ไม่มีแรงกระทำจากภายนอกและอีกกรณีหนึ่งคือเมื่อมีแรงกระทำจากภายนอก โดยส่วนนี้จะถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วนข้างต้นดังนี้

3.1 การทดสอบสัญญาณเอาท์พุทของ Gyroscope

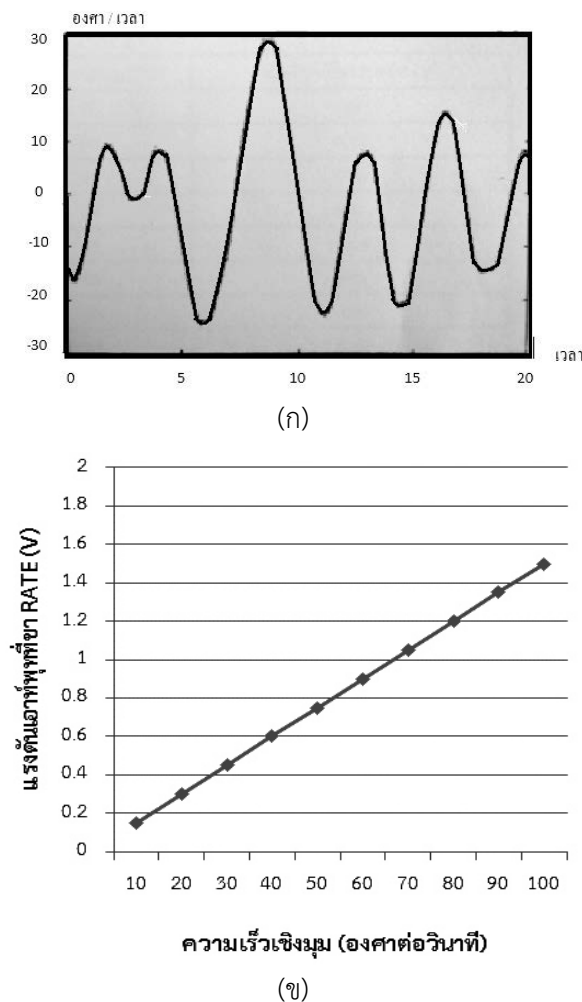
รูปที่ 9 (ก) แสดงผลตอบสนองทางเวลาของอัตราเร็วเชิงมุมของรถสองล้อ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อเวลาผ่านไปอัตราเร็วเชิงมุมมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง สัญญาณเอาท์พุทที่ขา RATE ของ Gyroscope จะได้ออกมาในรูปแบบแรงดัน จึงต้องแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิตอลด้วยบอร์ด Arduino Fino328 เพื่อนำไปประมวลผลข้อมูลจากรูปที่ 9 (ข) แสดงค่าแรงดันของสัญญาณเอาท์พุทเทียบกับความเร็วเชิงมุมเห็นได้ว่าความเร็วเชิงมุมกับค่าแรงดันเอาท์พุทของ Gyroscope จะแปรผันตรงในรูปแบบเชิงเส้น



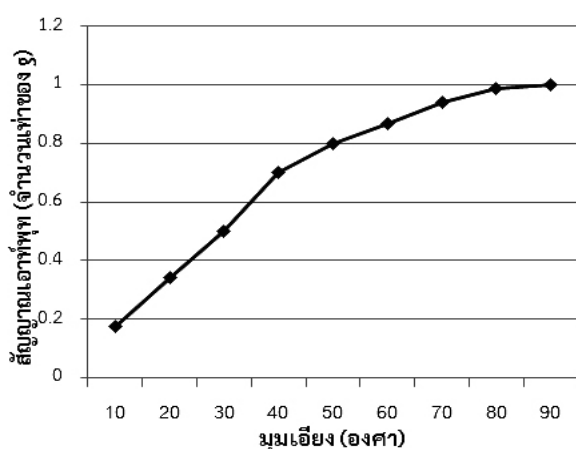
รูปที่ 7 ระบบควบคุมรถสองล้อที่ควบคุมการทรงตัวด้วยหลักการ Inverted Pendulum



รูปที่ 8 กระบวนการทำงานของโปรแกรมการควบคุมการทรงตัวของรถสองล้อต้นแบบ



รูปที่ 9 ผลการวัด (ก) ผลตอบสนองอัตราเร็วเชิงมุมกับเวลา และ (ข) สัญญาณเอาต์พุตของ Gyroscope



รูปที่ 10 สัญญาณเอาต์พุตที่ขา Xout หรือ Yout ของ Accelerometer เทียบกับมุมเอียงของรถ

3.2 การทดสอบสัญญาณเอาต์พุตของ Accelerometer

Accelerometer จะถูกวัดสัญญาณเอาต์พุตที่ขา Xout หรือ Yout ซึ่งข้อมูลออกมาจาก ADXL335 จะเป็นลักษณะ PWM อยู่ในรูปของจำนวนเท่าของค่า g (อัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก) โดยค่า g จะแปรผกผันไปตามความกว้างของ duty cycle จำเป็นต้องให้บอร์ด Arduino ทำการรับข้อมูลในโหมดดิจิตอลเพื่อง่ายต่อการนำไปประมวลผลต่อไป ข้อมูลสัญญาณที่ได้จากการทดสอบถูกแสดงในรูปที่ 10 เปรียบเทียบกับค่ามุมเอียงที่เพิ่มขึ้น จากกราฟการเปรียบเทียบจะเห็นได้ว่าค่ามุมเอียงที่เพิ่มขึ้นกับค่าสัญญาณเอาต์พุตมีการแปรผันแบบไม่เป็นเชิงเส้น

3.3 การทดสอบความสามารถในการรักษาสมดุล

ในการทดสอบการรักษาสมดุลและการทรงตัวของรถสองล้อที่ควบคุมการทรงตัวด้วยหลักการ Inverted Pendulum เริ่มต้นรถสองล้อต้นแบบอยู่ในสภาวะการทรงตัวสมดุลซึ่งรถสองล้อต้นแบบจะตั้งตรงโดยอาศัยหลักการทางกลศาสตร์สมดุลดังรูปที่ 11 (ก) เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำทำให้รถสองล้อเกิดมุมเอียงขึ้นจะทำให้เซนเซอร์ส่งข้อมูลไปยังระบบควบคุมและสั่งการให้มอเตอร์ขับเคลื่อนให้รถกลับมาทรงตัวในสภาวะสมดุลอีกครั้ง ดังรูปที่ 11 (ข) และ 11 (ค) ตามลำดับ

4. สรุปผล

รถสองล้อควบคุมการทรงตัวด้วยหลักการ Inverted Pendulum เป็นพาหนะส่วนบุคคลที่มีความไวและเสถียรภาพมากขึ้นซึ่งทำงานร่วมกับ Gyroscope และ Accelerometer ที่ใช้ตัวควบคุมการทำงานเป็นบอร์ด Arduino โดยผลการทดสอบ

สัญญาณเอาร์ทพุทของ RATE Gyroscope เปรียบเทียบกับความเร็วเชิงมุมจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงแบบแปรผันตรงโดยมีความเป็นเชิงเส้น สำหรับสัญญาณเอาร์ทพุทของ Accelerometer จะแปรผันตรงแบบไม่เป็นเชิงเส้นกับมุมเอียงของรถสองล้อที่เพิ่มขึ้น ผลการทดสอบการรักษาสสมดุลและการทรงตัวของรถสองล้อเป็นไปด้วยดีกล่าวคือเมื่อไม่มีแรงภายนอกมากระทำรถสองล้อต้นแบบจะตั้งตรงโดยอาศัยหลักการทางกลศาสตร์ แต่เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำจนทำให้รถเอียงจากแนวสมดุลจนทำให้เซนเซอร์ส่งข้อมูลไปยังบอร์ดควบคุมไปสั่งการให้มอเตอร์ทำการหมุนเพื่อให้รถกลับเข้าสู่ตำแหน่งการทรงตัวที่สมดุลอีกครั้ง โดยรถสองล้อควบคุมการทรงตัวด้วยหลักการ Inverted Pendulum มีความเหมาะสมอย่างมากในการนำไปใช้ในการขนส่งส่วนบุคคลในยุคปัจจุบัน รวมทั้งราคาต่อหน่วยถูกกว่ารถสองล้อที่มีขายทั่วไปในท้องตลาดอีกด้วย



(ค)

รูปที่ 11 การทดสอบสภาวะการทรงตัวของรถสองล้อต้นแบบ (ก) สภาวะเริ่มต้น (ข) สภาวะมีแรงภายนอกกระทำและล้อทำการรักษาสสมดุล และ (ค) สภาวะเข้าสู่สภาวะสมดุลอีกครั้ง

5. กิตติกรรมประกาศ

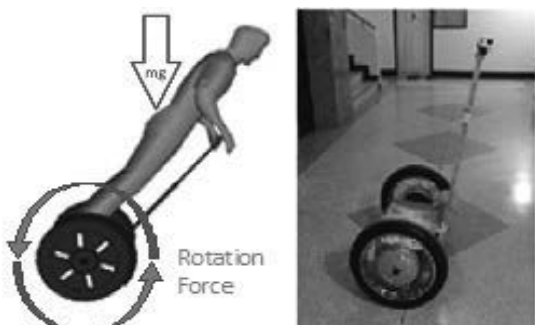
ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่สนับสนุนวัสดุอุปกรณ์และสถานที่ในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Deka products limited partnership, "Personal mobility vehicles and methods," US Patent No. US620223 0B1, 2001.
- [2] Larson, T. (2005), "Balancing robot project - bender," Last accessed October 2005. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <http://www.tedlarson.com/robots/balancingbot.htm>
- [3] Blackwell, T. (2005), "How to build a self balancing scooter," Last accessed October 2005. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <http://tlb.org/scooter.html>



(ก)



(ข)

- [4] David P. Anderson, “nBot Revision 6,” Last accessed September 2013. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <http://www.geology.smu.edu/~dpa-www/robo/nbot/>
- [5] Grasser, F., D’Arrigo, A., Colombi, S. and Rufer, A., “JOE: A Mobile, Inverted Pendulum”, Vol. 49, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002.
- [6] A.-J. Baerveldt and R. Klang , “A low-cost and low-weight attitude estimation system for an autonomous helicopter,” Intelligent Engineering Systems conference, Sept. 1997.
- [7] เอกชัย กองเงิน, “การออกแบบแผ่นวงจรพิมพ์ ด้วย Protel 99 SE,” โรงเรียนแสงทอง อีเล็กทรอนิกส์, 2546.
- [8] Intersil, “IC HIP4080AIPZ datasheet,” Intersil Cooperation, [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <https://www.verical.com/data-sheet/intersil-gate-and-power-driver-hip4080aipz-112229.pdf>
- [9] A. M. Bloch, D. E. Chang, N. E. Leonard, J. E. Marsden, “Controlled Lagrangians and the Stabilization of Mechanical Systems II: Potential Shaping,” IEEE TRANS. ON AUTO. CONTROL, VOL. 46, NO. 10, OCTOBER, 2001, 1556–1571
- [10] STMicroelectronics co.Ltd., Rate Gyroscope LISY300AL datasheet, 2008. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/LISY300AL.pdf>
- [11] Analog Devices, Inc., Accelerometer ADXL 335 datasheet, 2009 [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/SMD/adxl335.pdf>

Influence of Harmonics Voltage on MOSA Current Extraction Methods

Chorphaka Plaengraphan¹ and Nutthaphong Tanthanuch²
may_bp_7047@hotmail.com¹, tanthanuch1@engr.tu.ac.th²

Abstract

The most common monitoring method of metal–oxide surge arrester is based on leakage current measurement, particularly, the component of resistive leakage current. Nowadays, there are several analytical methods used to extract the resistive leakage current. These analytical methods need both current and voltage signals. However, in fact, electrical system voltage contains harmonics and because of these harmonics, it may affect the accuracy of resistive leakage current extraction methods in different ways. The calculated results may be in error or incorrect. It can lead to erroneous evaluation or fault assessment. This paper compares the extracted results both amplitude and signal between three different methods; improve compensation method, harmonic analysis method and current orthogonality method. The results have showed that voltage harmonics not affect resistive leakage current amplitude. However, they have an effect on current waveforms. The waveshapes obtained from different methods are not the same. Current orthogonality method gives the most accurate results because its algorithm calculates current on all frequencies and includes non-linear behavior of metal oxide material.

Keywords: metal–oxide surge arrester, resistive leakage current, resistive leakage current extraction methods, harmonics voltage

¹ Programmes of Innovative Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University, Pathum Thani

² Department of Electrical and Computer Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University, Pathum Thani

1. Introduction

All high voltage equipment is vitally important in power system so they should be monitored and protected. Metal-oxide surge arrester (MOSA) is one of a significant protective device used to protect other electrical apparatus from surge voltage. Nevertheless, metal-oxide surge arrester is subjected to the environment conditions and overvoltage when it has been used and these may result in degradation [1]. Thus, performance monitoring and evaluation of metal-oxide surge arresters is needed. Several off-line and on-line monitoring methods used to detect and assess surge arrester's conditions such as V-I characteristic curve analysis [2], visual inspection, thermal image, and partial discharge test [3]. Typically, the most common method is based on the measurement of leakage current. As leakage current, especially, the resistive leakage current, is well known that it is directly related to the degree of surge arrester's deterioration [4].

The total leakage current is given from two components: resistive current and capacitive current. Various analytical methods such as improve compensation method, harmonic analysis method and current orthogonality method used to extract the resistive leakage current from the total leakage current. These methods need both current and voltage signals. In

fact, electrical system voltage contains other frequency components (3^{rd} , 5^{th} , 7^{th} , etc). These harmonics have an effect on total leakage current which is used as an indicator to assess MOSA's condition [5, 6]. Moreover, as the different methods have dissimilar algorithms to decompose resistive leakage current, voltage harmonics have great influence on the extraction methods in different ways. The calculated results may be different or inaccurate and in the end it can lead to the wrong assessment of surge arrester condition.

This paper attempts to clarify the influence of harmonics voltage on resistive leakage current extraction methods and offer guidance for choosing the extraction method which is suitable for the measured data, different conditions or limitation of each algorithm.

2. Current Extraction Method

In this paper, total leakage current was extracted by three analytical methods consist of improve compensation method, harmonic analysis method and current orthogonality method [7, 8].

2.1 Improve Compensation Method (ICM)

Voltage and total leakage current of surge arrester were extracted to DC and each harmonic component as following,

$$v_t(t) = V_0 + \sum_{k=1}^{\infty} V_k \sin(k\omega t + \alpha_k) \quad (1)$$

$$i_t(t) = I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} I_k \sin(k\omega t + \beta_k) \quad (2)$$

where

V_0 is DC component of voltage (V)

I_0 is DC component of leakage current (A)

V_k is k harmonic peak value of voltage (V)

I_k is k harmonic peak value of leakage current (A)

α_k is phase angle of voltage (rad)

β_k is phase angle of leakage current (rad)

ω is angular frequency (rad/s)

The capacitive and resistive leakage current can be calculated by (3) and (4),

$$i_{c,k}(t) = G_k V_{sf,k}(t) \quad (3)$$

$$i_{r,k}(t) = i_{t,k}(t) - G_k V_{sf,k}(t) \quad (4)$$

The constant G_k is the compensating coefficient of k harmonic and its value is assumed that is equal to a multiply of a constant obtained from fundamental frequency (G_1) which can be obtained by solving (5),

$$\int_0^T [V_{sf,k}(t)(i_{t,k}(t) - G_k V_{sf,k}(t))] dt = 0 \quad (5)$$

where

$V_{sf,k}(t)$ is k harmonic of voltage that 90° phase shift with respect to $V_k(t)$

$i_{r,k}(t)$ is k harmonic of resistive leakage current

$i_{c,k}(t)$ is k harmonic of capacitive leakage current

$i_{t,k}(t)$ is k harmonic of total leakage current

2.2 Harmonic Analysis Method (HAM)

Referred to voltage and leakage current that applied to MOSA, the equations of both signals can be presented by (1) and (2). In addition, this method suggests that resistive leakage current is in-phase with terminal voltage and capacitive leakage current leads terminal voltage by 90 degree which are represented, respectively, as

$$i_c(t) = \sum_{k=1}^{\infty} I_{c,k} \cos(k\omega t + \alpha_k) \quad (6)$$

$$i_r(t) = I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} I_{r,k} \sin(k\omega t + \alpha_k) \quad (7)$$

The total leakage current can be given as,

$$i_t(t) = I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} I_{r,k} \sin(k\omega t + \alpha_k) + \sum_{k=1}^{\infty} I_{c,k} \cos(k\omega t + \alpha_k) \quad (8)$$

where

$I_{r,k}$ is harmonic peak value of resistive leakage current

$I_{c,k}$ is k harmonic peak value of capacitive leakage current

From (8), multiplying both sides by $\sin(k\omega t + \alpha_k)$ and integrating over a period, the peak resistive leakage current is obtained by,

$$I_{r_k} = I_k [\cos(\beta_k) \cos(\alpha_k) + \sin(\beta_k) \sin(\alpha_k)] \quad (9)$$

Then multiplying both sides of (8) again by $\cos(k\omega t + \alpha_k)$ and integrating over a period, the peak capacitive leakage current is written as,

$$I_{c_k} = I_k [\sin(\beta_k) \cos(\alpha_k) + \cos(\beta_k) \sin(\alpha_k)] \quad (10)$$

2.3 Current Orthogonality Method (COM)

This method is based on the orthogonality between resistive leakage current and capacitive leakage current. Assume i'_c is equal to the capacitive leakage current when a capacitor is equal to one Farad, and then it can be expressed as follows,

$$i'_c(t) = \frac{i_c(t)}{C} = \frac{dV_t(t)}{dt} \quad (11)$$

Integrating the product of leakage currents $i_t(t)$ and i'_c over one period of the voltage signal, we get

$$B = \int_0^T i'_c(t) i_t(t) dt \quad (12)$$

From (11), (12) and orthogonal property between resistive and capacitive leakage current, then (12) becomes,

$$B = \int_0^T i'_c(t) (i_r(t) + C i'_c(t)) dt = C \int_0^T i'_c(t)^2 dt \quad (13)$$

Then the capacitance of MOSA (C) is expressed as

$$C = \frac{\int_0^T i'_c(t) i_t(t) dt}{\int_0^T i'_c(t)^2 dt} \quad (14)$$

Additionally, $i'_c(t)$ is equal to the differential of the voltage signal $V(t)$ and it can be expressed as (15)

$$i'_c(t) = \sum_{k=1}^{\infty} k\omega V_k \sin(k\omega t + \alpha_k + \frac{\pi}{2}) \quad (15)$$

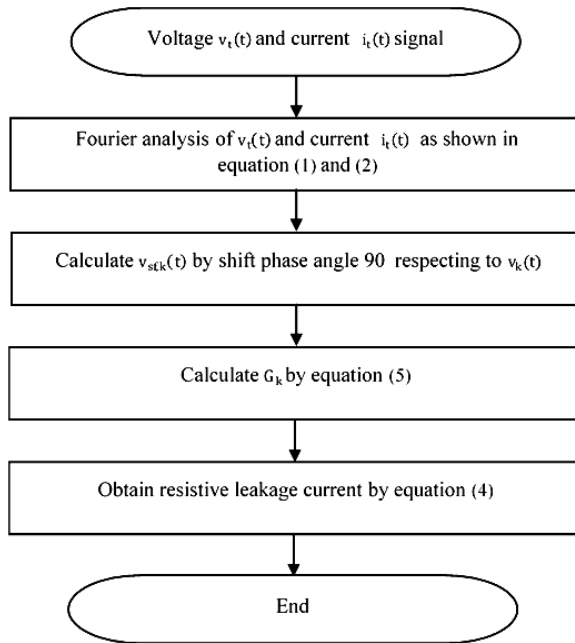
Therefore, the resistive leakage current is gotten as the following

$$i_r(t) = i_t(t) - C i'_c(t) \quad (16)$$

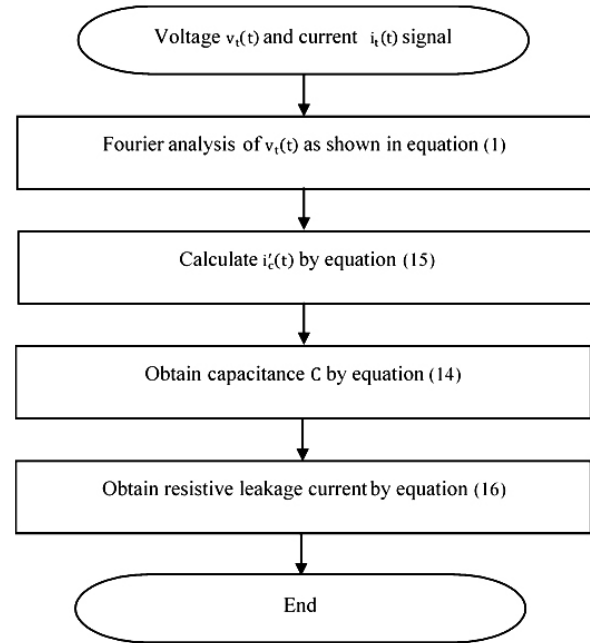
From the methods that are mentioned above, the calculation procedure of each method is presented in Figure 1.

3. Experiment

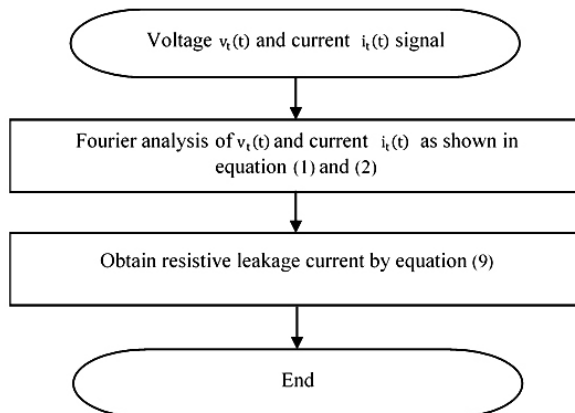
The experiment was set up and performed for measuring leakage current of surge arrester. Figure 2 shows the experiment setting up which consists of power supply, low voltage transformer, high voltage transformer, current limiting and surge arrester. In



(a) Improve Compensation Method (ICM)



(c) Current Orthogonality Method (COM)



(b) Harmonic Analysis Method (HAM)

Figure 1 Flowchart for resistive leakage current extraction

addition, two important signals are measured. Leakage current was measured by using a shunt resistor and applied voltage using a capacitive voltage divider. Both signals were directly captured and shown on a digital storage oscilloscope.

The voltage source that used in this experiment is divided into two types: non-harmonic source and harmonic source. Non-harmonic source generates pure sinusoidal voltage and harmonic source generates voltage waveform which has harmonics. Moreover, the test objects used in this work are arresters equipped in Thailand's electrical distribution system.

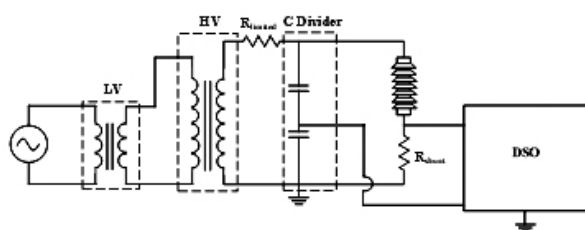


Figure 2 Experiment setting up

To investigate the effect of harmonics voltage on current extraction methods, measured leakage current and voltage were extracted by using three analysis methods: Improve compensation method, Harmonic analysis method and Current orthogonality method. All results are compared with tested current. Eventually, the magnitude and waveform of extracted leakage current results were considered.

4. Results

4.1 Non-harmonic voltage source

After extracting tested voltage by Fourier analysis, its spectrum is shown in Figure 3. It can be clearly seen that main component of voltage is the fundamental component. Other harmonic orders are not significant and their values are less than 1%.

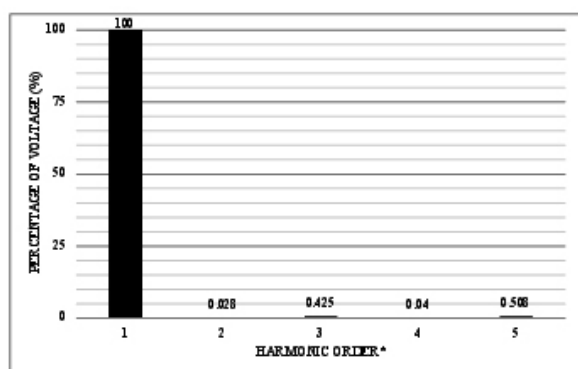


Figure 3 Voltage spectrum of non-harmonic voltage source

* 1st or fundamental frequency is equal to 50 Hz

The leakage current was extracted by the analytical methods that are mentioned above. Example results of leakage current obtained from surge arrester used in 22 kV distribution system are presented in table 1.

Table 1 the leakage current in case of non-harmonic voltage source

$I_{t_measurement} = 0.224718 \text{ mA}$			
Extraction Methods			
Leakage Current (mA) *	ICM	HAM	COM
I_t	0.224549	0.224549	0.224718
I_r	0.150069	0.150069	0.150413
I_c	0.167027	0.167038	0.168839

* Magnitude in root mean square

From table 1, the magnitudes of resistive, capacitive, and total leakage current from each method were not different. The variation is less than $1.812 \mu\text{A}$. In addition, their waveforms were quite the same. The examples of extracted current are shown in Figure 4 to 6.

However, due to very small harmonic as shown in Figure 3, they affect leakage current calculation process. This results in non-smooth waveforms.

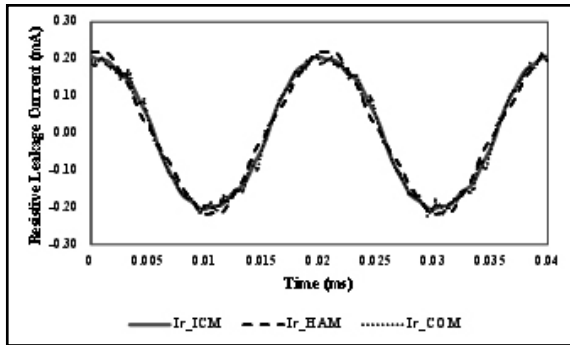


Figure 4 Resistive leakage current waveform in case of non-harmonic source

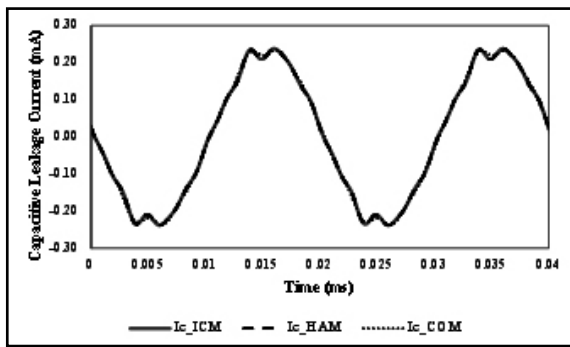


Figure 5 Capacitive leakage current waveform in case of non-harmonic source

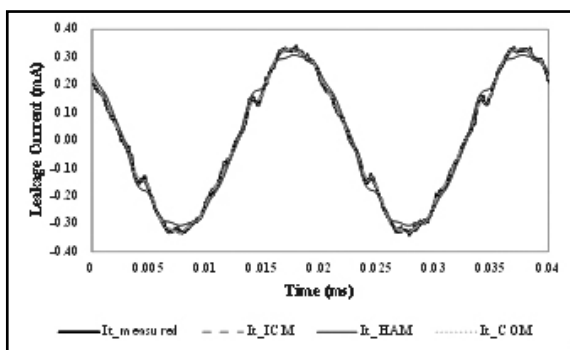


Figure 6 Leakage current waveform in case of non-harmonic source

In case of non-harmonic source, resistive leakage current calculated by three analytical methods is mostly obtained from fundamental frequency. Hence, the equation of resistive leakage current is reduced to the same form which comprises amplitude and cosine of current.

4.2 Harmonic voltage source

Voltage that was applied across surge arrester has harmonics and its spectrum obtained from Fourier analysis is shown in Figure 7.

From Figure 7, there are two important harmonic orders which are the fundamental and third harmonics with the percentage of 100 and 10, respectively.

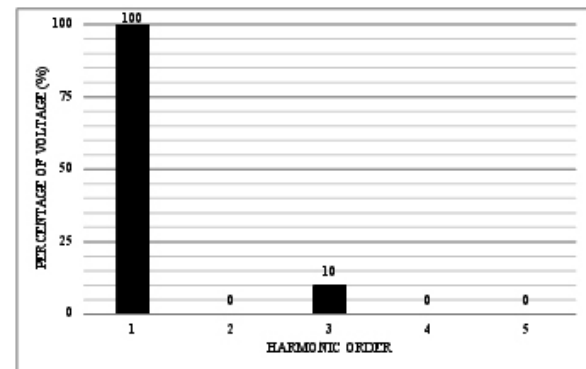


Figure 7 Voltage spectrum of harmonic voltage source

Considering the extracted current in table 2, it presents the magnitude of leakage current obtained from surge arrester for 11 kV distribution system.

Table 2 leakage current in case of harmonic voltage source

$I_{t_measurement} = 0.187306 \text{ mA}$			
Extraction Methods			
Leakage Current (mA) *	ICM	HAM	COM
I_t	0.187227	0.187227	0.187306
I_r	0.074362	0.074362	0.078019
I_c	0.171826	0.171827	0.170278

Although the magnitude of resistive, capacitive, and total leakage current were still in the same order, the waveforms which acquired by three methods were totally different. Extracted current waveforms are shown in Figure 8 to 10.

From Figure 8, resistive leakage current's waveshapes gained by each method were different. Although the waveforms are different, the value of important characteristics such as period and phase are the same.

With regarding to HAM, resistive leakage current calculated by eq. (9) just computes only current component which is in-phase with voltage.

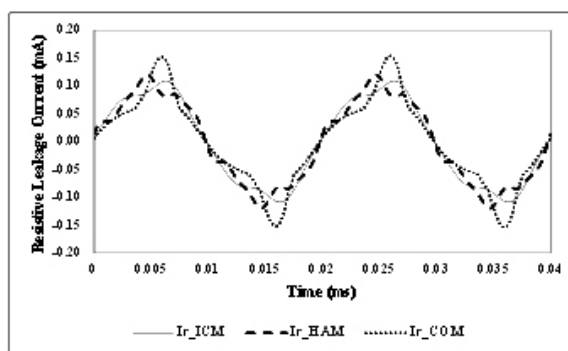


Figure 8 Resistive leakage current waveform in case of harmonic source

In contrast, resistive leakage current's calculation by ICM needs to compute value of capacitive leakage current first. It can be seen from eq. (4) that capacitive leakage current depends on compensating coefficient and voltage signal. According to eq. (5), the compensating coefficient (G_k) has many values and their values depend on frequency. Additionally, resistive leakage current of COM is calculated by using eq. (16) which depends on voltage and the actual capacitance (C). This capacitance has only one value and its value is computed from leakage current of every frequency. Eventually, these different algorithms result in different results.

Considering Figure 9, capacitive current waveforms acquired by ICM and COM are nearly identical. There is a little different. On the other hand, HAM provided totally different waveform. To compare the total leakage current waveforms, resistive and capacitive leakage current were

combined. Comparison between calculated and tested current waveforms is shown in Figure 10.

From Figure 10, it is obviously seen that HAM has highest distortion. Thus, HAM is not suitable for leakage current analysis when system voltage contains harmonics. When consider between COM and ICM, in the power system frequency, the value of capacitance is believed that is not a frequency-dependent.

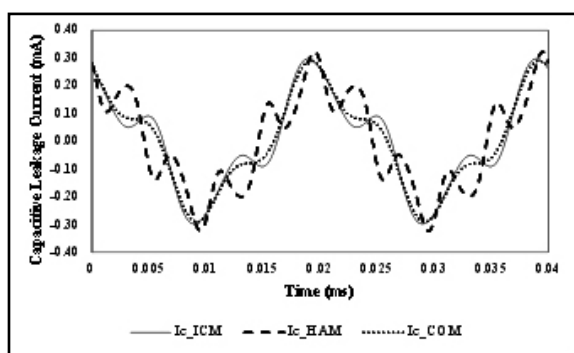


Figure 9 Capacitive leakage current waveform in case of harmonic source

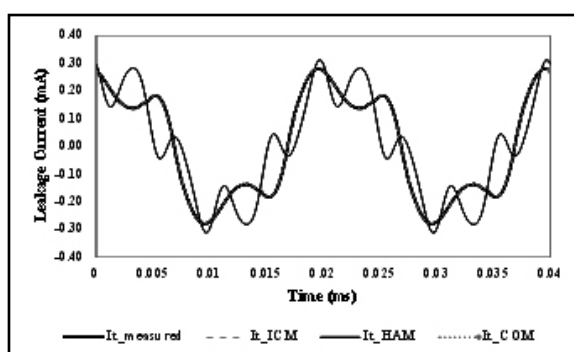


Figure 10 Leakage current waveform in case of harmonic source

Therefore, COM would be recommended on this condition. Furthermore, in fact, harmonic has always existed in electrical power system and the element of MOSA has a highly non-linear voltage-current characteristic. This non-linear behavior will generate more harmonics than found in voltage signal. However, extracted current calculated by COM always includes the effect of nonlinear relationship between voltage and leakage current. Consequently, COM is the most suitable for current extraction on voltage harmonics source.

5. Conclusion

From the extracted results, in case of non-harmonic voltage source, the results are clearly showed that although leakage current was extracted by different algorithms, there are no difference between magnitude and waveform. Thus, all extracted methods can be used on this condition. By contrast, current waveforms have distortion when voltage source compose of harmonics. From the results, HAM is not suitable for voltage source included harmonics.

We suggest that HAM is the most suitable method using for current extraction in case of non-harmonic source because this method has less complexity and calculation process. It is appropriate for a system which is limited by processor speed and less memory size. In contrast, COM would be

recommended when it calculates in case of harmonic source because its algorithm calculates current on all frequencies and includes non-linear behavior of metal oxide material. However, COM is complex computational procedure. It requires high performance devices.

Finally, it would be better to develop computing program or analyzing system which can select appropriate method on different conditions based on the quantity level of harmonic contents.

6. Acknowledgement

This work is supported by the department of electrical and computer engineering, faculty of Engineering, Thammasat university.

References

- [1] Muhammad Amin, Salman Amin and Muhammad Ali, "Monitoring of leakage current for composite insulators and electrical devices," **Adv.Mater.Sci.** 21 : 75-89.
- [2] C. Heinrich and V. Hinrichsen, 2001. "Diagnostics and monitoring of metal-oxide surge arresters in high - voltage networks - comparison of existing and newly developed procedures", **IEEE Trans. Power Deliver.** 16: 138-143.
- [3] Kuffel E., Zaengl W. and Kuffel J., 2000. High voltage engineering fundamentals. 2nd ed. Oxford: Newnes.
- [4] J. Lundquist, L. Stenström, A. Schei and B. Hansen, 1990. "New method for measurement of the resistive leakage currents of metal-oxide surge arresters in service," **IEEE Trans. Power Del.** 5, 4: 1811-1822.
- [5] Hanxin Zhu and M.R. Raghuveer, 1999. "Influence of harmonics in system voltage on metal oxide surge arrester diagnostics," **Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena:** 542-545.
- [6] S.N. Fernando and M.R. Raghuveer, 2000. "Technique to examine the influence of voltage harmonics on leakage current based MOSA diagnostic indicator," **Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena:** 596-599.
- [7] C. Plaengraphan and N. Tanthanuch, 2015. "The development of leakage current measurement system for high voltage equipment," **The 4th International Symposium on Engineering, Energy and Environments:** 135-141.
- [8] Zhi-niu Xu, Li-juan Zhao, Ao Ding and Fang-cheng Lü, 2013. "A current orthogonality method to extract resistive leakage current of MOSA," **IEEE Transactions on Power Delivery.** 28, 1: 93-101.

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

ขวลิต แสงสวัสดิ์¹ สมชัย หิรัญโรตม² และอภิชาติ สนิธิสมบัติ³
sangswasd@rmutt.ac.th¹, somchai.h@en.rmutt.ac.th², apichart.s@en.rmutt.ac.th³

บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวเกี่ยวกับรูปแบบและวิธีการส่งบทความเพื่อเสนอต่อกองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ราชมนคลัญบุรี ผู้ส่งบทความจะต้องยึดรูปแบบตามบทความนี้อย่างเคร่งครัด บทความใดที่มีรูปแบบไม่ถูกต้อง จะถูกส่งคืนและไม่พิจารณาอีก บทความต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ แต่ละภาษาควรมีเพียงย่อหน้าเดียว และความยาวไม่เกิน 25 บรรทัด

คำสำคัญ: วิธีการส่งบทความ รูปแบบบทความ ขนาดตัวอักษร รูปแบบตัวอักษร การเว้นบรรทัด

Abstract

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

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

¹ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมีและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลัญบุรี

² อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลัญบุรี

³ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมสิ่งทอ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลัญบุรี

1. ข้อกำหนดทั่วไป

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

2. คำแนะนำในการเขียนและพิมพ์

2.1 คำแนะนำทั่วไป

บทความที่เสนอจะต้องพิมพ์เป็นภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษ ตามรูปแบบที่กำหนด ซึ่งพร้อมที่จะนำไปถ่ายเพลท เพื่อพิมพ์ออฟเซตได้ทันที

การพิมพ์ให้พิมพ์ลงบนกระดาษ A4 โดยพิมพ์เป็นสองคอลัมน์ตามรูปแบบบทความนี้ ขนาดของคอลัมน์เป็นไปตามที่กำหนด จะต้องพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์เลเซอร์ที่มีความละเอียดไม่น้อยกว่า 300 dpi.

ให้พิมพ์โดยไม่เว้นบรรทัด เมื่อจะขึ้นหัวข้อใหม่ ให้เว้นบรรทัด 1 บรรทัด และจะต้องพิมพ์ให้เต็มคอลัมน์ก่อนที่จะขึ้นคอลัมน์ใหม่ หรือขึ้นหน้าใหม่ ห้ามเว้นที่เหลือไว้ว่างเปล่า

การลำดับหัวข้อในส่วนของเนื้อเรื่องนี้ ให้ใส่เลขกำกับโดยให้บทนำเป็นหัวข้อหมายเลข 1 และหากมีการแบ่งหัวข้อย่อย ก็ใช้เลขระบบทศนิยมกับหัวข้อย่อย เช่น 2.1 เป็นต้น

ให้ใส่เลขเรียงลำดับหน้าด้วยดินสอไว้ที่มุมขวาบนของกระดาษทุกหน้า

2.2 ขนาดตัวอักษรและการเว้นระยะ

พิมพ์บทความภาษาไทยด้วยตัวอักษรรูปแบบ “TH SarabunPSK”

ชื่อเรื่องบทความให้ใช้ตัวอักษรขนาด 20

พอยน์ ตัวเข้ม

ชื่อผู้เขียน สถาบันให้ใช้ตัวอักษรขนาด 16

พอยน์ ตัวปกติ

ชื่อหัวข้อย่อยให้ใช้ตัวอักษรขนาด 16 พอยน์

ตัวเข้ม

บทความย่อและเนื้อความต่างๆ ให้ใช้ตัวอักษรขนาด 16 พอยน์ ตัวปกติ

สมการต่างๆ ให้ใช้ตัวอักษรขนาด 16 พอยน์ หรือตัวอักษร TH SarabunPSK 16 พอยน์

การเว้นระยะบรรทัดห่างในแนวตั้งแบบ exactly 20 พอยน์

ให้จัดเนื้อเรื่องในแต่ละบรรทัดเรียงชิดซ้ายและขวาอย่างสวยงาม

2.3 ชื่อเรื่อง ชื่อผู้แต่ง และชื่อหัวข้อ

การพิมพ์ชื่อเรื่อง ให้วางตำแหน่งกลางหน้ากระดาษแบบคอลัมน์เดียว

ชื่อผู้เขียน และ อีเมล ให้พิมพ์ไว้ใต้ชื่อเรื่องและอยู่กลางหน้ากระดาษแบบคอลัมน์เดียว

ไม่ต้องระบุตำแหน่งวิชาการ หรือสถานะของนักศึกษาใดๆ ทั้งสิ้น

ชื่อหัวข้อย่อยต่างๆ ให้วางตำแหน่งชิดขอบซ้าย

2.4 การจัดทำรูปภาพ

รูปภาพจะต้องมีความกว้างไม่เกิน 81 มม. เพื่อให้ลงในหนึ่งคอลัมน์ได้ หรือกรณีจำเป็นจริงๆ เพื่อรักษารายละเอียดในภาพ อาจยอมให้กว้างได้เต็มหน้ากระดาษ (กว้าง 168 มม.)

ตัวอักษรทั้งหมดในภาพจะต้องมีขนาดใหญ่สามารถอ่านได้สะดวก และต้องไม่เล็กกว่าตัวอักษรในเนื้อเรื่อง

รูปภาพทุกรูปจะต้องมีหมายเลข และคำบรรยายใต้ภาพ หมายเลขและคำบรรยายรวมกันแล้วควรมีความยาวไม่เกิน 2 บรรทัด

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

รูปลายเส้นจะต้องเป็นเส้นหมึกดำ ส่วนรูปถ่ายควรจะเป็นรูปขาวดำที่มีความคมชัด รูปสีอนุโลมให้ใช้ได้รูปภาพควรมีรายละเอียดเท่าที่จำเป็นเท่านั้น เช่น ภาพถ่ายรูปคลื่นจากออสซิลโลสโคปที่ปรากฏให้เป็นเฉพาะจอภาพเป็นต้น และเพื่อความสวยงามให้เว้นบรรทัดเหนือรูปภาพ 1 บรรทัดและเว้นใต้คำบรรยาย 1 บรรทัด

2.5 การเขียนสมการ

สมการทุกสมการจะต้องมีหมายเลขกำกับอยู่ภายในวงเล็บและเรียงลำดับที่ถูกต้อง ควรใช้ตัวพหุคูณเช่นเอียงแสดงถึงพารามิเตอร์หรือตัวแปรในสมการ ตำแหน่งของหมายเลขสมการจะต้องอยู่ชิดขอบด้านขวาของคอลัมน์ เว้นหนึ่งบรรทัดก่อนเขียนสมการ และเว้นหนึ่งบรรทัดหลังเขียนสมการ จัดให้สมการอยู่ตรงกลางคอลัมน์ ดังตัวอย่างนี้

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

เริ่มเขียนคำอธิบายตั้งแต่บรรทัดนี้

2.6 การจัดการทำตาราง

ตัวอักษรในตารางจะต้องไม่เล็กกว่าตัวอักษรในเนื้อเรื่อง ควรตีเส้นกรอบตารางด้วยหมึกดำให้ชัดเจน

ตารางทุกตารางจะต้องมีหมายเลข และคำบรรยายกำกับเหนือตาราง หมายเลขกำกับและ

คำบรรยายนี้รวมกันแล้วควรมีความยาวไม่เกิน 2 บรรทัด คำบรรยายเหนือตารางห้ามใช้คำว่า “แสดง” เช่นเดียวกับกรณีรูปภาพ

เพื่อความสวยงามให้เว้นบรรทัดเหนือตาราง 1 บรรทัด และเว้นบรรทัดใต้คำบรรยายรูปภาพ 1 บรรทัด

2.7 การอ้างอิงและเอกสารอ้างอิง

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

2.8 ความยาวของบทความ

เมื่อรวมทุกส่วนแล้ว แต่ละบทความมีความยาวดังนี้ บทความทั่วไปมีความยาว 10 หน้า กระดาษ A4 บทความรับเชิญมีความยาวไม่เกิน 12 หน้ากระดาษ A4

3. กรณียบทความภาษาอังกฤษ

ผู้พิมพ์บทความเป็นภาษาอังกฤษ กรุณาดูคำแนะนำ วิธีการพิมพ์บทความภาษาอังกฤษที่แนบมาด้วย

4. การส่งบทความ

ผู้เขียนสามารถส่งต้นฉบับ ทางเว็บไซต์ออนไลน์ ของวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมนคง วิทยุบุรี www.engineer.rmutt.ac.th/journal/ (เลือกเมนู Online Submission) หรือ เข้าสู่ระบบโดยตรงผ่านทาง <http://www.enclm.rmutt.ac.th/enjournal/> โดยต้องทำการลงทะเบียนเพื่อสมัครสมาชิกวารสารและนำส่งวารสารต้นฉบับ ในรูปแบบ “Word ไฟล์” อีกทั้งต้องส่ง “แบบฟอร์มการส่ง

บทความทางวิชาการ เพื่อลงตีพิมพ์ในวารสาร วิศวกรรมศาสตร์ ราชชมงคลธัญบุรี” มายัง อีเมล enjournal@en.rmutt.ac.th หรือ จัดส่งไปรษณีย์ มายัง “กองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชชมงคลธัญบุรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ธัญบุรี 39 หมู่ 1 ถ.รังสิต-นครนายก ต.คลองหลวง อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110” จึงจะถือว่า การส่ง วารสารนั้นเสร็จสมบูรณ์ หากขั้นตอนการนำส่ง วารสารทั้ง 2 ขั้นตอน คือ การส่งวารสารทางเว็บไซต์ ออนไลน์ และการนำส่งแบบฟอร์มการส่งบทความ มายังอีเมล enjournal@en.rmutt.ac.th ไม่ครบถ้วน ทั้ง 2 ขั้นตอน บทความนั้นจะถูกส่งคืน และไม่สามารถ ผ่านการพิจารณาได้

5.สรุป

ผู้เขียนบทความกรุณาตรวจสอบบทความ อย่างรอบคอบโดยใช้เวลาอย่างเพียงพอก่อนส่งให้ คณะกรรมการพิจารณา จะทำให้บทความของท่าน มีคุณภาพสูงและผ่านการพิจารณาง่ายขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้เขียนบทความทุกท่านที่ให้ความร่วมมือรักษาระเบียบการเขียนบทความอย่างเคร่งครัด

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์. พลังงานทดแทน. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <http://dede.go.th/dede/index.php> (30 มีนาคม 2552).
- [2] ฉวีวรรณ รมยานนท์, 2545. เขียนแบบ เทคนิค 2. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น.

- [3] ถาวร รัตนพรประดิษฐ์, 2551. ศึกษาความเป็นไปได้ของการเมอร์เซอร์ไรส์กางเกงเปรียบเทียบกับ การเมอร์เซอร์ไรส์ผืนผ้าเดนิม. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชาสิ่งทอ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [4] ส.วงศ์ศรีตระกูล, 2552. “วช.หนุนแม่ใจ สร้างฟาร์มกังหันลมผลิตไฟฟ้าในเขตภาคเหนือตอนล่าง,” *Engineering Today*. 7,75 (มีนาคม) : 51-56.

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

Chavalit Sangswasd¹, Somchai Hiranvarodom², and Apichart Sonthisombat³
sangswasd@rmutt.ac.th¹, somchai.h@en.rmutt.ac.th², apichart.s@en.rmutt.ac.th³

Abstract

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

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

1. General Introduction

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

2. Style and format

2.1 General

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

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

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

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

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

2.2 Title Block

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

2.3 Headings and Subheadings

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

2.4 Equations

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

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

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

3. References

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

4. Illustrations

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

5. Submission of Your Manuscripts

Please submit the manuscripts on the website of JOURNAL OF ENGINEERING, RMUTT www.engineer.rmutt.ac.th/journal/ (Select Online Submission menu) or direct way by the website of <http://www.engcm.rmutt.ac.th/enjournal/>. After that you have to register to be a member of Journal of Engineering, RMUTT and submit the manuscripts by “Word file”. Moreover, you have to send the technical article form for publishing on this journal back to “enjournal@en.rmutt.ac.th” or by mail to “Publication department of Journal of Engineering, RMUTT, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Rangsit – Nakhonnayok Rd. Klong 6, Thanyaburi, Pathumthani, Thailand 12110”. If not completed on 2 steps such as submission online and send back the technical article form to enjournal@en.rmutt.ac.th.

ac.th or Publication department address, your articles will be rejected and cannot be considered.

[5] Wikipedia. Technology. [Online] Available : <http://Wikipedia.org> (30 March 2009).

6. Conclusions

Your paper should be carefully checked.

7. Acknowledgment

Thank you for your good cooperation.

References

- [1] Crawford, R.J. 2005. **Plastics Engineering**. 3rd ed. Oxford : Elsevier Butterworth-Heinemann.
- [2] Samuel Forest, 2008 “Micromorphic Approach for Gradient Elasticity Viscoplasticity, and Damage,” **Journal of Engineering Mechanics**. 135, 3 (March) : 117-131.
- [3] Somjate Patcharaphun, 2008. “Numerical and Experimental validation of Skin and Core Material Distribution in Sandwich Injection Moldings” **Journal of Research in Engineering and Technology**. 5, 4 (October - December) : 433-444.
- [4] Thaworn Rattanaphornpradit, 2551. Feasibility Study of Mercerized Denim Garmen Versus Mercerized Denim Fabric. Master of Art's Thesis. Rajamangala University of Technology Thamyaburi



สมาชิกเลขที่

ใบสมัครสมาชิกวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏบรีย

วันที่สมัคร

ข้าพเจ้า นาย/นาง/นางสาว สกุล อาชีพ

ที่อยู่ (สำหรับจัดส่งวารสาร) เลขที่ ถนน แขวง/ตำบล

เขต/อำเภอ จังหวัด รหัสไปรษณีย์

โทรศัพท์..... โทรสาร e-mail

มีความประสงค์สมัครเป็นสมาชิก

อัตราค่าสมาชิก

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏบรีย ปี 1 ปี 2 ฉบับ 120 บาท (สำหรับบุคคลทั่วไป)

80 บาท (สำหรับนักศึกษา)

ต่ออายุสมาชิก ปี

1 ปี 2 ฉบับ 120 บาท (สำหรับบุคคลทั่วไป)

80 บาท (สำหรับนักศึกษา)

พร้อมกันนี้ได้ส่งค่าสมาชิก จำนวน บาท

จำนวนเงินตัวอักษร

ชำระเงินโดยวิธี

ธนาคติ ส่งจ่าย

ตัวแลกเงินไปรษณีย์ ส่งจ่าย

โอนเงินเข้าบัญชีธนาคาร..... ชื่อบัญชี เลขที่บัญชี

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

พร้อมเขียน ชื่อ - นามสกุล และหมายเลขสมาชิก (ถ้ามี)

2. นักศึกษาที่สมัครทางไปรษณีย์ กรุณาส่งสำเนาบัตรประจำตัวนักศึกษาแนบมาด้วย

ลงชื่อ ผู้สมัคร

(.....)

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏบรีย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชภัฏบรีย

39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

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

**แบบฟอร์มการส่งบทความทางวิชาการ
เพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมนกคณบุรี**

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

ชื่อ-สกุล

(ภาษาอังกฤษ)

ตำแหน่งทางวิชาการ (โปรดระบุ) ☐ ศาสตราจารย์ ☐ รองศาสตราจารย์ ☐ ผู้ช่วยศาสตราจารย์

อื่นๆ (โปรดระบุ)

ที่อยู่ (ที่ติดต่ได้)

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

โทรสาร.....อีเมล.....

มีความประสงค์ขอส่งบทความ เรื่อง:

ชื่อบทความ (ภาษาไทย)

ชื่อบทความ (ภาษาอังกฤษ)

การตรวจสอบ

☐ ทำการลงทะเบียน และ ส่งวารสารต้นฉบับใน เว็บไซต์

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

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

วันที่ ส่งวารสารต้นฉบับ เข้าสู่ระบบออนไลน์

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า บทความนี้เป็นผลงานของข้าพเจ้าและผู้ร่วมงานตามชื่อที่ระบุไว้ในบทความจริง และบทความนี้ไม่เคยลงตีพิมพ์ในวารสารใดมาก่อน และข้าพเจ้าจะไม่นำส่งบทความนี้ไปพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารอื่นภายใน 60 วัน นับจากวันที่ข้าพเจ้าส่งบทความ

ลงนาม.....

(.....)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

TECHNICAL ARTICLE FORM
FOR PUBLISHING ON JOURNAL OF ENGINEERING, RMUTT

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

Name-Surnames.....

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

Others (Please specify).....

Address (for Contact).....

.....

.....

Office Phone NumberMobile Phone Number.....

Fax Number.....E-mail.....

Name of Article:.....

.....

.....

Submission Checklist ☐ Already register and submit the manuscripts on

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

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

The days of Online Submission

I promise this article belongs to me and co-authors as the name indicated in the article. In addition, this article has not been previously published on another journal. Furthermore, I will not submit this article on another journal within 60 days from the day of my submission on the JOURNAL OF ENGINEERING, RMUTT.

Sign.....

(.....)

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