

วารสารวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
SRINAKHARINWIROT ENGINEERING JOURNAL
ปีที่ 14 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม - เมษายน พ.ศ. 2562



ISSN 1905 - 4548

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เป็นวารสารในศูนย์ข้อมูลดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (Thai – Journal Citation Index Centre: TCI) กลุ่มที่ 1 พ.ศ. 2558-2562 เลขที่ ISSN 1905-4548 เพื่อเผยแพร่บทความวิจัยและบทความวิชาการ ด้านวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีวิศวกรรมเคมี วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมชีวการแพทย์ และสาขาใกล้เคียงอื่นๆ ทั้งในเชิงทฤษฎีและเชิงปฏิบัติ เป็นภาษาอังกฤษหรือภาษาไทยที่มีบทความภาษาอังกฤษ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ จึงกำหนดให้จัดทำโครงการจัดทำวารสารทางวิชาการขึ้น โดยจัดพิมพ์เป็นประจำทุกปี ปีละ 3 ฉบับ ฉบับที่ 1 ช่วงเดือนมกราคม – เมษายน ฉบับที่ 2 ช่วงเดือนพฤษภาคม – สิงหาคม และฉบับที่ 3 ช่วงเดือนกันยายน – ธันวาคม ซึ่งบทความที่ได้รับการตีพิมพ์ทุกบทความจะผ่านการทบทวนโดยผู้รู้เสมอ (peer review) โดยผู้ทรงคุณวุฒิสองคนในสาขาที่เกี่ยวข้องแบบอำพรางฝ่ายเดียว (single-blind) และสงวนสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พุทธศักราช 2521 จัดส่งและเผยแพร่แบบเอกสารพิมพ์ตามสถาบันการศึกษาทั่วประเทศ และเผยแพร่แบบออนไลน์

วัตถุประสงค์

เพื่อเป็นแหล่งรวบรวม เผยแพร่บทความวิจัย และบทความวิชาการทางด้านวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี ในสาขาวิศวกรรมเคมี วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมชีวการแพทย์ และสาขาใกล้เคียงอื่นๆ ทั้งในเชิงทฤษฎีและเชิงปฏิบัติ

เจ้าของ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

63 หมู่ 7 ตำบลอรัญญิก อำเภอบางบาล

จังหวัดนครนายก 26120

โทร. 0 2649 5000 ต่อ 27073

<http://eng.swu.ac.th> และ <http://ejournals.swu.ac.th/index.php/SwuENGj>

อีเมล journalengswu@gmail.com

พิมพ์ที่ ห้างหุ้นส่วนจำกัดล้านมีเดีย เซอร์วิส

91/2 หมู่ 4 เฟสเบสโต้ หมู่บ้านปิยมณีน

ต.บึงคำพร้อย อ.ลำลูกกา จ.ปทุมธานี 12150

โทร. 084 014 0041 หรือ 086 422 4298

E-mail: new.violet@hotmail.com



วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ที่ปรึกษากองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.เวศิน	ปิยรัตน์	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริพงษ์	ฉายสินธ์	รองคณบดีฝ่ายแผนและพัฒนา

รายนามคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ

ศาสตราจารย์ ดร.ทนงเกียรติ	เกียรติศิริโรจน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.อภิรัฐ	ศิริธราธิวัตร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์	เดชะอำไพ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์	อัครเอกผาลิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์	จำนงไทย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.ศราวุธ	ริมดุสิต	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ	โสภาแดง	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย	เปรมฤดีปรีชาชาญ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงพรรณ	ศฤงคารินทร์	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.สีรุ่ง	ปรีชานนท์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ ดร.อนันต์	มั่งวัฒนา	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต	ชาลิรักษ์ตระกูล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.พงศ์ชนัน	เหลืองไพบูลย์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.อริคม	ฤกษ์บุตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
รองศาสตราจารย์ ดร.เตือนใจ	สมบูรณ์วิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพันธ์	ยิ้มมัน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เจต	พรหมวงศ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.จารุวัตร	เจริญสุข	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.ฤดี	มาสุจันทร์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.วิจิตร	กิณเรศ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา	ทิพย์สุวรรณพร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.โกศล	โอฬารไพโรจน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริวรรณ	ศรีสรณ์	46/18 ซอยพหลโยธิน 51 แขวงอนุสาวรีย์ เขตบางเขน กรุงเทพมหานคร 10220

บรรณาธิการอำนวยการ

รองศาสตราจารย์ ดร.จันจิรา จับศิลป์

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กำพล วรดิษฐ์

กองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล	นาพล	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.นิลวรรณ	ชุ่มฤทธิ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.พิมพ์พันธุ์	เจริญพงษ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.สุนิติ	สุภาพ	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิพล	ธาราธิ์เศรษฐ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประชา	บุญยวานิชกุล	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงษ์	คงประเสริฐ	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาคภูมิ	ศรีรมรื่น	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันจิรา	จับศิลป์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
อาจารย์ ดร.สุธิตา	ทีปักษ์พันธุ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ศาสตราจารย์ ดร.ทนงเกียรติ	เกียรติศิริโรจน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.อภิรัฐ	ศิริธราธิวัตร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์	เดชะอำไพ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์	อัครเอกผาลิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์	จำนงไทย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.ศราวุธ	ริมดุสิต	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ	โสภณาแดง	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย	เปรมฤดีปรีชาชาญ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงพรรณ	ศฤงคารินทร์	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.สีรุ่ง	ปรีชานนท์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ ดร.อนันต์	มั่งวัฒนา	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.ขวลิต	ชาลิรักษ์ตระกูล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.พงศ์ชนัน	เหลื่องไพบูลย์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.อริคม	ฤกษ์บุตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
รองศาสตราจารย์ ดร.เตือนใจ	สมบูรณ์วิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพันธ์	ยิ้มมัน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เจต	พรหมวงศ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.จารุวัตร	เจริญสุข	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.ฤดี	มาสุจันทร์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.วิจิตร	กิมเรศ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา	ทิพย์สุวรรณพร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.โกศล	โอฬารไพโรจน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริวรรณ	ศรีสรณ์	46/18 ซอยพหลโยธิน 51 แขวงอนุสาวรีย์ เขตบางเขน กรุงเทพมหานคร 10220

ผู้ช่วยบรรณาธิการ

นางสาวยุพาพร ประไพย์

บทบรรณาธิการ

ปัจจุบันนี้เป็นที่พูดถึงกันมากกว่า ประเทศไทยกำลังเข้าสู่สังคมที่มีจำนวนคนชราเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่คนในวัยทำงานจะมีจำนวนน้อยลงอย่างขาดสมดุล สาเหตุเนื่องมาจากการลดลงของอัตราการเกิด ซึ่งคาดกันว่าจะส่งผลกระทบมากกว่าหนึ่งด้าน อันได้แก่ รัฐบาลเก็บภาษีได้ไม่เพียงพอกับภาระรายจ่ายที่เกิดขึ้นในการดูแลคนชรา และการลดลงของจำนวนผู้ต้องการศึกษาต่อในระดับอุดมศึกษาส่งผลทำให้หลักสูตรที่มีผู้สมัครเรียนน้อยอาจจะต้องปิดตัวลง แต่อย่างไรก็ตามกรอบมาตรฐานคุณวุฒิระดับอุดมศึกษาแห่งชาติและการประกันคุณภาพการศึกษาของประเทศไทย ได้มีการวางระบบและกลไกให้สถาบันอุดมศึกษามีแนวทางเปิดสอนหลักสูตรที่ตรงกับความต้องการของตลาดแรงงาน โดยจะต้องดำเนินการสำรวจความต้องการของทั้งนายจ้างและผู้เรียน เพื่อใช้ประกอบการทำหลักสูตร ซึ่งสอดคล้องกับรัฐบาลที่ได้มีการเน้นย้ำให้สถาบันอุดมศึกษาเปิดสอนหลักสูตรที่ตรงกับความต้องการของตลาดแรงงาน เพื่อให้บัณฑิตสามารถประกอบวิชาชีพได้

สำหรับการบริหารจัดการทรัพยากรคนอาจารย์ให้เปลี่ยนแปลงทันกับการเปลี่ยนแปลงของหลักสูตรและความต้องการของสังคมเป็นสิ่งที่ทำได้ยาก เพราะคนอาจารย์สำเร็จการศึกษามาด้วยการทำปริญญาโทในหัวข้อที่ต้องมีความลุ่มลึก ทำให้ขาดมิติความกว้างที่จะปรับเปลี่ยนหัวข้อการสอนตามการเปลี่ยนแปลงของหลักสูตรได้ ขณะเดียวกันก็ไม่สามารถแก้ไขปัญหาได้ด้วยการเปิดรับอาจารย์ใหม่ เพราะอายุการทำงานของคนอาจารย์แต่ละคนยาวนานเกินการเปลี่ยนแปลงของความต้องการของหลักสูตร การแก้ปัญหาแนวทางนี้ เมื่อเวลาผ่านไปไม่นาน ปัญหาความไม่สอดคล้องระหว่างคนอาจารย์ที่มีกับความต้องการของหลักสูตรก็จะวนกลับมาเกิดซ้ำอีก ไม่นับรวมภาระค่าใช้จ่ายที่ต้องแบกรับในการจ้างคนอาจารย์กลุ่มเดิมที่ไม่สามารถสอนในหลักสูตรที่เปลี่ยนแปลงไปได้ ซึ่งจะทำให้ต้นทุนค่าธรรมเนียมการศึกษาสูงโดยไม่จำเป็น เกิดความไม่มีประสิทธิภาพในการใช้งบประมาณที่ได้รับ

ดังนั้นหากคนอาจารย์มีความพยายามที่จะทำงานวิจัยในหัวข้อใหม่ๆ ที่ไม่ถนัด และสามารถปรับเปลี่ยนหัวข้อการสอนให้ตรงตามการเปลี่ยนแปลงของหลักสูตรได้ ผู้กำกับดูแลงานวิจัยของหน่วยงานต่างๆ จึงควรทำงานบูรณาการกับหลักสูตรและการเรียนการสอน เพื่อกำหนดเป้าหมายและขอบเขตของการสนับสนุนโครงการวิจัยในหน่วยงาน ให้นำไปสู่ความสามารถในการสอนหัวข้อที่ตรงกับหลักสูตรที่เปลี่ยนแปลงไปได้ อีกทั้งผลลัพธ์ของโครงการวิจัยได้อีกทางคือ การตีพิมพ์บทความวิจัย วารสารคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒที่ท่านถืออยู่นี้ จึงเป็นกลไกสำคัญในการผลักดันให้คนอาจารย์ทำวิจัย ซึ่งกองบรรณาธิการดูแลเป็นอย่างดีเสมอมา

สุดท้ายนี้ ขอแจ้งว่ากองบรรณาธิการได้ปรับแก้รูปแบบการเขียนเอกสารอ้างอิง ให้เป็นรูปแบบ IEEE ร้อยละร้อย เพื่อให้ผู้เขียนเตรียมต้นฉบับได้สะดวกขึ้น พร้อมให้ตัวอย่างอย่างครอบคลุม ท่านผู้เขียนที่เคยส่งบทความมาก่อน โปรดใช้รูปแบบ IEEE ในการเขียนเอกสารอ้างอิง

บทความวิจัย

การวิเคราะห์สมรรถนะเชิงความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นด้วยโครงข่ายประสาทเทียม Artificial Neural Network Analysis of the Thermal Performance of a Plate Heat Exchanger ธนายศ อริสริยวงศ์ สงกรานต์ วิริยะศาสตร์ ไพศาลนาผล	1
Optimal PIDA Controller Design for Maglev Vehicle Suspension System by Lévy-Flight Firefly Algorithm Sarot Hlangnamthip Deacha Puangdownreong	12
การเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตู้อบแห้งโดยการปรับมุมเอียงคล้อยตามแสงอาทิตย์ Thermal Efficiency Enhancement of Solar Dryer using Sun Tracking System ธีรพงศ์ บริรักษ์	23
การผสมผสานเทคนิค QFD และ FBS ในระเบียบวิธีการออกแบบสำหรับผลิตภัณฑ์เชิงวิศวกรรม กรณีศึกษา: อุปกรณ์จับยึดกระสอบพลาสติกสาน Combining QFD and FBS in a Design Methodology of Engineered Products: A Case Study of Woven Bag Clamping Devices ณัฐวุฒิ จันทร์ทอง ศิวายุ เฉลิมภาค	33
ปัจจัยที่ส่งผลต่อการตัดสินใจเลือกใช้บริการจัดส่งอาหารถึงที่โดยใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติกทวิ Factors Affecting Customers' Decision on Food Delivery Service: Binary Logistic Regression Approach คัทธริยา ชาญปริยวาทีวงศ์ สุธาทิพย์ ภูบัพผาพันธ์ รัฐพล ภูบัพผาพันธ์	44
Modified EP/sinfor Optimal Power Flow with Economic Dispatch Suppakarn Chansareewittaya	56
การศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ A study of the efficiency of a solar water heater สวัสต์ ภูมิสวัสต์ วิจิตรา ภูมิสวัสต์	67
รูปแบบของลิ้นเตาที่มีผลต่อพฤติกรรมการไหลของอากาศในเตาหุงต้มประสิทธิภาพสูง The Configuration of Grate Affect to the Behavior of Airflow in the High Efficiency Cooking Stove วัชรายุทธ ลำดวน นิรุต์ อ่อนสลุณ นำนพน พิพัฒน์ไพบูลย์	78

สารบัญ

บทความวิจัย (ต่อ)

- การวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์เพื่อหาสภาวะเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากไส้ปลา 88
Grey Relational Analysis for Optimal Condition of Biodiesel Production Process from Fish Entrails
อำนาจ คำบุญ วรพจน์ ศิริรักษ์ พีรวัตร ลือสีก เรืองฤทธิ์ ศิริรักษ์
- คุณสมบัติของบล็อกประสานที่ผสมเถ้าลอยและเถ้าก้นเตา 99
Properties of Interlocking Block Containing Fly Ash and Bottom Ash
อนุสรณ์ เดชบุรีรัมย์ กริสน์ ชัยมูล
- การปรับปรุงสมบัติของใบอ้อยด้วยกระบวนการทอรรีแฟกชันโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหลต่อเนื่อง 106
Improvement of Sugarcane Leaves Property by Torrefaction in a Continuous Tubular Flow Reactor
สถาพร สอนสุภาพ อติศักดิ์ ปัตติยะ

การวิเคราะห์สมรรถนะเชิงความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม

Artificial Neural Network Analysis of the Thermal Performance of a Plate Heat Exchanger

ธนยศ อริสริยวงศ์* สงกรานต์ วิริยะศาสตร์ และ ไพศาล นาพล

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

Tanayos Arisariyawong* Songkran Wiriyasart and Paisarn Naphon

Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University

*Corresponding author Email: Tanayos.Swu@gmail.com

(Received: December 14, 2018; Accepted: March 5, 2019)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน ในการทดลองกำหนดอุณหภูมิขาเข้าน้ำร้อนเฉลี่ย 40 - 50 องศาเซลเซียส อุณหภูมิขาเข้าน้ำเย็นเฉลี่ย 20 - 30 องศาเซลเซียส ใช้อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำร้อนเฉลี่ย 0.0273 - 0.0444 กิโลกรัมต่อวินาที และ อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำเย็นเฉลี่ย 0.0196 กิโลกรัมต่อวินาที การสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมจะใช้โครงสร้างที่มีหนึ่งชั้นซ่อน โดยสอนแบบจำลองให้เกิดการเรียนรู้ด้วยอัลกอริทึมต่างๆเพื่อหาค่าที่ดีที่สุด จากการทดลองพบว่าจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเท่ากับ 5 นิวรอน ด้วยอัลกอริทึมการเรียนรู้ Levenberg-Marquardt backpropagation learning เป็นโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่ดีที่สุด โดยให้ผลการทำนายที่มีค่า R ของค่าประสิทธิภาพและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเท่ากับ 0.99631 และ 0.98469 ตามลำดับ

คำสำคัญ: โครงข่ายประสาทเทียม สมรรถนะเชิงความร้อน อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น

ABSTRACT

This paper proposes the use of artificial neural network (ANN) for the effectiveness and overall heat transfer coefficient using water as working fluid. The experiments are performed using the average inlet hot water temperature between 40 – 50 °C, the average inlet cold water temperature between 20 – 30 °C, the average mass flow rate of hot water between 0.0273 - 0.0444 kg/s and the average mass flow rate of cold water is 0.0196 kg/s. For the ANN model, a single hidden layer structure is chosen and various learning algorithms are applied to adjust errors for obtaining the optimal ANN model. From the experimental results show that the 5 hidden neurons and Levenberg-Marquardt backpropagation learning algorithms is the optimal ANN model. The predicted results are verified with the experimental data and gives R for effectiveness and overall heat transfer coefficient are equal to 0.99631 and 0.98469, respectively.

Keyword: Artificial neural network, Thermal performance, Plate heat exchanger.

1. บทนำ

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น (Plate heat exchanger) คือ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่ดีมากเมื่อเทียบกับขนาดของตัวอุปกรณ์เอง [1] จึงมีการนำอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้มาใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมทางด้านเคมีและพลังงาน เป็นต้น [2] เนื่องจากความสำคัญของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นในอุตสาหกรรมจึงมีการวิจัยและทดลองเพื่อสร้างแบบจำลองและหาค่าตัวแปรต่างๆที่เหมาะสมในการใช้งานของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้ เช่น การทำนายความต้านทานการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากความสกปรก (Fouling resistance) ที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นด้วยการทดลอง [3-4] การหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน [5] การหาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรต่างๆภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นด้วยวิธีจำลองบนคอมพิวเตอร์ [6-7] และการสร้างแบบจำลองอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นด้วยวิธีตัวแปรสเตท [8] เป็นต้น ในการสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นโดยส่วนใหญ่จะใช้สมการการถ่ายเทความร้อน (Thermal transfer equation) และ สมการสมดุลความร้อน (Thermal balance equation) เป็นหลักในการหาแบบจำลอง [9-11] ซึ่งจากผลการทดลองจะพบว่าค่าตัวแปรที่ทำนายได้ยังไม่ถูกต้องแม่นยำนักเนื่องจากความซับซ้อนของกระบวนการถ่ายเทความร้อนทำให้กระบวนการมีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง อีกทั้งค่าพารามิเตอร์ที่นำมาใช้ในแบบจำลองก็เป็นค่าโดยประมาณเท่านั้น เพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นจึงมีการนำเทคนิคระบบอัจฉริยะ (Intelligent system) มาใช้ในการสร้างแบบจำลองของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เช่น การใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural

network, ANN) ในการประมาณค่าอุณหภูมิของน้ำมันหลังจากออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเชลล์และท่อ (Shell and tube heat exchanger) [12] ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าการใช้โครงข่ายประสาทเทียมสามารถให้ผลการประมาณค่าได้ดีกว่าแบบจำลองที่สร้างจากสมการการถ่ายเทความร้อน การนำโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้ในการทำนายสมรรถนะทางความร้อนของระบบทำความเย็นโดยใช้ข้อมูลจากผู้ผลิตมาทำให้โครงข่ายประสาทเทียมเรียนรู้ [13] จากผลการทดลองพบว่าสามารถทำนายสมรรถนะทางความร้อนของระบบทำความเย็นได้อย่างถูกต้อง การใช้วิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic algorithm - GA) เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวแปรในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น [14] ซึ่งวิธีเชิงพันธุกรรมจะเหมาะสำหรับการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดจากกลุ่มข้อมูลที่มีอยู่ในขณะที่โครงข่ายประสาทเทียมจะใช้ในการทำนายค่าที่จะเกิดขึ้นจากตัวแปรที่เกี่ยวข้อง การใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการทำนายค่าสมรรถนะทางความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อมี่ครีบ (Fin-tube heat exchanger) โดยเปรียบเทียบกับการทำนายโดยใช้แบบจำลองด้วยวิธีประมาณค่าแบบถดถอยไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear regression model) [15] จากการทดลองพบว่าโครงข่ายประสาทเทียมให้ผลการทำนายที่ดีกว่าเป็นอย่างมาก รวมถึงมีการนำโครงข่ายประสาทเทียมไปใช้วิเคราะห์ทางด้านความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดอื่นๆ [16-20] แต่จากงานวิจัยที่ผ่านมาจะพบว่ายังขาดข้อมูลของการนำโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้ในการสร้างแบบจำลองของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นเพื่อวิเคราะห์ค่าสมรรถนะทางความร้อน

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการวิเคราะห์ค่าสมรรถนะทางความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น เพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่แม่นยำและเป็นข้อมูลสำหรับการออกแบบ

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นต่อไปในอนาคตได้เป็นอย่างดี

2. ขุดทดลองและวิธีการทดลอง

ไดอะแกรมการทำงานของขุดทดลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1 โดยส่วนทำน้ำร้อนประกอบด้วยถังน้ำร้อนซึ่งน้ำถูกทำให้ร้อนด้วยฮีตเตอร์ (H2) และ ใช้ใบกวนเพื่อให้อุณหภูมิน้ำสม่ำเสมอ ควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วควบคุมการไหลแบบไฟฟ้า (CVL) และ วัดอัตราการไหลด้วยอุปกรณ์วัดอัตราการไหลแบบสนามแม่เหล็ก (F1) เมื่อ น้ำร้อนไหลผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นที่ใช้ทดลอง (PHE1) ซึ่งเป็นของบริษัท SWEP รุ่น B8 ก็จะไหลกลับมายังถังน้ำร้อนเดิม ส่วนทำน้ำเย็นประกอบด้วยถังน้ำเย็นที่ถูกทำให้เย็นด้วยการนำน้ำไปแลกเปลี่ยนความร้อนกับสารทำความเย็นที่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น (PHE2) และ ควบคุมอุณหภูมิของน้ำเย็นด้วยฮีตเตอร์ (H1) ควบคุมอัตราการไหลของน้ำเย็นด้วยแชนด์วาล์ว (HV2) และ ทำการวัดอัตราการไหลของน้ำเย็นด้วยโรตาริเตอร์ (F2) หลังจากน้ำเย็นไหลผ่านผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นที่ใช้ทดลอง (PHE1) ก็จะไหลกลับมายังถังน้ำเย็นเดิม มีการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลชนิด T บริเวณทางเข้าออกของน้ำร้อนและน้ำเย็น (T1 – T4) ที่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นที่ใช้ทดลอง (PHE1) โดยเก็บข้อมูลของอุณหภูมิทั้งหมดด้วยอุปกรณ์บันทึกข้อมูล (Data logger) ของบริษัท YOKOGAWA รุ่น MW100 ซึ่งมีความละเอียดในการอ่านอุณหภูมิ 0.1 องศาเซลเซียส และ ความแม่นยำในการวัดเท่ากับ $\pm(0.05\% \text{ of rdg} + 0.5^{\circ}\text{C})$ ส่วนลักษณะและคุณสมบัติของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นที่ใช้ทดลอง (PHE1) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2 และ ตารางที่ 1 ตามลำดับ

ในการทดลองกำหนดอุณหภูมิขาเข้าน้ำร้อนเฉลี่ยอยู่ที่ 40 - 50 องศาเซลเซียส อุณหภูมิขาเข้าน้ำเย็นเฉลี่ยอยู่ที่ 20 - 30 องศาเซลเซียส ใช้อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำร้อนเฉลี่ยอยู่ที่ 0.0273 - 0.0444 กิโลกรัมต่อวินาที และ อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำเย็นเฉลี่ยอยู่ที่ 0.0196

กิโลกรัมต่อวินาที โดยจะเก็บข้อมูลเมื่ออุณหภูมิขาออกของน้ำร้อนและน้ำเย็นเข้าสู่สภาวะคงตัว ส่วนรูปที่ 3 แสดงชุดทดลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นที่ใช้ทดลอง

คุณสมบัติ	ข้อมูล
จำนวนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน	30
ความยาวระหว่างช่องทางเข้าออก	278 mm
ความยาวสำหรับการถ่ายเทความร้อน	259 mm
ความกว้างของอุปกรณ์	72 mm
ช่องว่างระหว่างแผ่น	2 mm
ความหนาของแผ่น	0.4 mm
มุมเอียงของแผ่น (Chevron angle)	60°

3. การวิเคราะห์สมรรถนะเชิงความร้อน

สมรรถนะเชิงความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นในงานวิจัยนี้จะพิจารณาจากประสิทธิภาพ (Effectiveness) และ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall heat transfer coefficient) ซึ่งสามารถหาได้ดังนี้

3.1 ประสิทธิภาพ (Effectiveness)

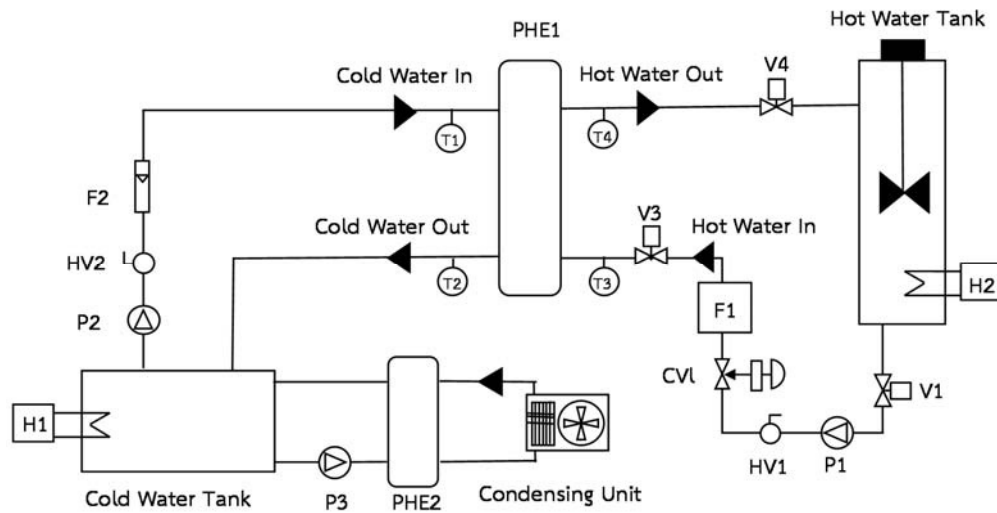
$$\varepsilon = \frac{Q_{avg}}{Q_{max}} \quad (1)$$

โดย

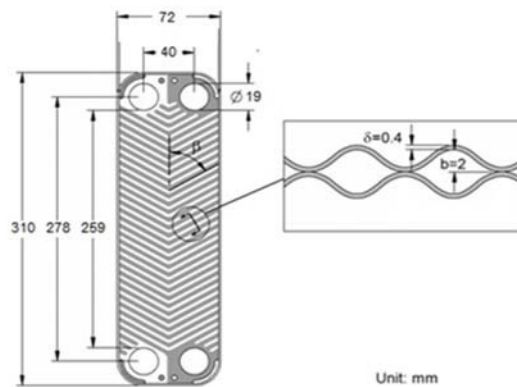
ε คือ ประสิทธิภาพ (Effectiveness)

Q_{avg} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยของน้ำร้อนและน้ำเย็น (W)

Q_{max} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด (W)



รูปที่ 1 ไดอะแกรมการทำงานของชุดทดลอง



รูปที่ 2 ลักษณะและขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นที่ใช้ทดลอง



รูปที่ 3 ชุดทดลองการวิเคราะห์สมรรถนะเชิงความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น

3.2 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall heat transfer coefficient)

$$\frac{1}{UA} = \frac{\Delta T_{LMTD}}{Q_{avg}} \quad (2)$$

โดย

UA คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม
(Overall heat transfer coefficient) ($W/^{\circ}C$)

ΔT_{LMTD} คือ ผลต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยแบบ
ลอการิทึม ($^{\circ}C$)

ในการทดลองจะใช้อุณหภูมิของน้ำที่ไหลเข้าออก
อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น ณ สภาวะคงตัว
($T_1 - T_4$) มาคำนวณหาค่าตัวแปรในสมการที่ 1 และ 2

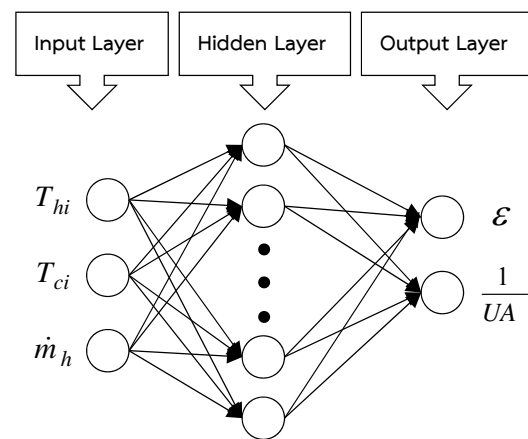
4. แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

จากสมการที่ 1 และ 2 รวมถึงเงื่อนไขการทดลองจะ
พบว่าประสิทธิภาพและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน
รวม จะขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิขาเข้าน้ำร้อน (T_{hi}) อุณหภูมิ
ขาเข้าน้ำเย็น (T_{ci}) และ อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำ
ร้อน ($\dot{m}_h$) ดังนั้นจะสามารถสร้างแบบจำลองโครงข่าย
ประสาทเทียมที่มีโครงสร้างหนึ่งชั้นซ่อนสำหรับทำนาย
สมรรถนะเชิงความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน
แบบแผ่นได้ดังรูปที่ 4 โดยกำหนดให้ฟังก์ชันถ่ายโอนในชั้น
ซ่อนเป็นฟังก์ชันแทนเจนต์ซิกมอยด์ (Tangent sigmoid
transfer function) และ ฟังก์ชันถ่ายโอนในชั้นขาออก
(Output Layer) เป็นฟังก์ชันเชิงเส้น (Linear transfer
function)

4.1 กระบวนการสร้างแบบจำลองโครงข่าย ประสาทเทียม

จากรูปที่ 4 ตัวแปรในชั้นขาเข้า (Input layer) ซึ่งมี
ข้อมูลจำนวน 3 ตัวแปร จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ
ข้อมูลสำหรับการเรียนรู้ (Training data) จำนวน 80
เปอร์เซ็นต์ของข้อมูลทั้งหมด และ ข้อมูลสำหรับการ
ทดสอบ (Testing data) จำนวน 20 เปอร์เซ็นต์ของข้อมูล
ทั้งหมด ส่วนการหาจำนวนนิวรอน (Neuron) ในชั้นซ่อน
(Hidden layer) ที่เหมาะสมจะทดลองโดยใช้วิธีเพิ่ม

จำนวนนิวรอนชั้นที่ละหนึ่งและปรับค่าน้ำหนัก (Weights)
โดยใช้อัลกอริทึมการเรียนรู้แบบแพร่กระจายกลับ
(Backpropagation learning) ต่อไปนี้ Levenberg-
Marquardt (LMB), Scaled conjugate gradient
(SCGB), Bayesian regulation (BRB) และ Resilient
(RB) [21] เพื่อเปรียบเทียบหาอัลกอริทึมที่ให้ผลการ
ทำนายดีที่สุด โดยแต่ละอัลกอริทึมจะทำซ้ำจำนวน 60
ครั้ง แล้วเลือกครั้งที่ให้ผลดีที่สุด



รูปที่ 4 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

4.2 การหาประสิทธิภาพของแบบจำลองโครงข่าย ประสาทเทียม

ประสิทธิภาพของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม
สามารถทำการประเมินโดยวัดจากค่าความผิดพลาดกำลัง
สองเฉลี่ย (Mean squared error: MSE) และ ค่า
สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient: R)
ดังต่อไปนี้ [21]

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2 \quad (3)$$

โดย

y_i คือ ค่าที่ได้จากการทดลอง

$\bar{y}_i$ คือ ค่าที่ได้จากการทำนาย

N คือ จำนวนข้อมูล

และ

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N \{(x_i - \bar{x}_i)(y_i - \bar{y}_i)\}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}_i)^2 \cdot \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2}} \quad (4)$$

โดย

x_i, y_i คือ ค่าของชุดข้อมูล
 $\bar{x}_i, \bar{y}_i$ คือ ค่าเฉลี่ยของชุดข้อมูล
 N คือ จำนวนข้อมูล

ซึ่งแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่ดีจะให้ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (MSE) ที่ต่ำ และ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) ใกล้เคียงหนึ่ง

5. ผลการทดลองและการวิเคราะห์

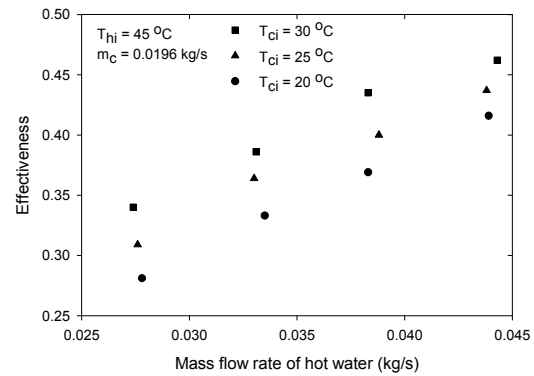
5.1 ผลการทดลองสมรรถนะเชิงความร้อน

เพื่อแสดงให้เห็นถึงผลกระทบของตัวแปรขาเข้าในแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมต่อสมรรถนะเชิงความร้อน จึงขอยกตัวอย่างผลการทดลองกรณีอุณหภูมิขาเข้าน้ำร้อนเฉลี่ย 45 องศาเซลเซียส อุณหภูมิขาเข้าน้ำเย็นเฉลี่ย 20 - 30 องศาเซลเซียส และ อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำเย็นเฉลี่ย 0.0196 กิโลกรัมต่อวินาที ดังรูปที่ 5-6 ซึ่งจะพบว่าประสิทธิภาพและการถ่ายเทความร้อนรวมจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลเชิงมวลของน้ำร้อนเพิ่มขึ้นและอุณหภูมิขาเข้าน้ำเย็นสูงขึ้น ส่วนผลการทดลองในกรณีอื่นๆก็ให้ผลไปในทำนองเดียวกัน

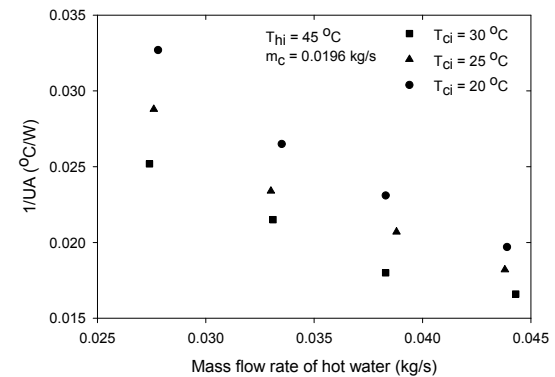
5.2 ผลการทดลองการหาแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

ผลการทดลองหาแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมที่สุดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7-8 ส่วนตารางที่

2 แสดงถึงประสิทธิภาพของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้อัลกอริทึมการเรียนรู้แบบต่างๆ เกณฑ์ในการเลือกแบบจำลองนั้นจะดูจากค่า MSE และ R ของข้อมูลสำหรับการเรียนรู้ (Training data) และ ข้อมูลสำหรับการทดสอบ (Testing data) ประกอบกัน



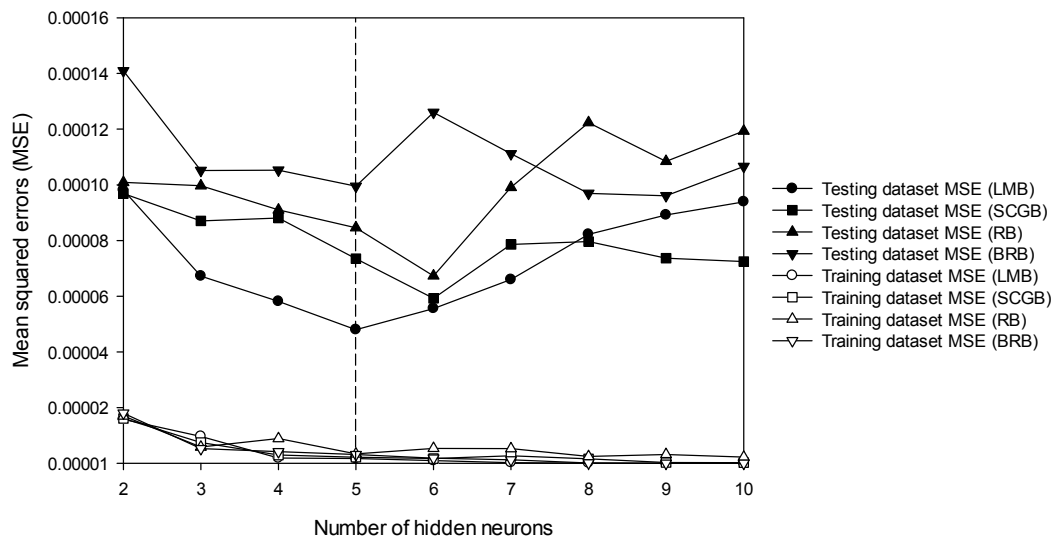
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำร้อน



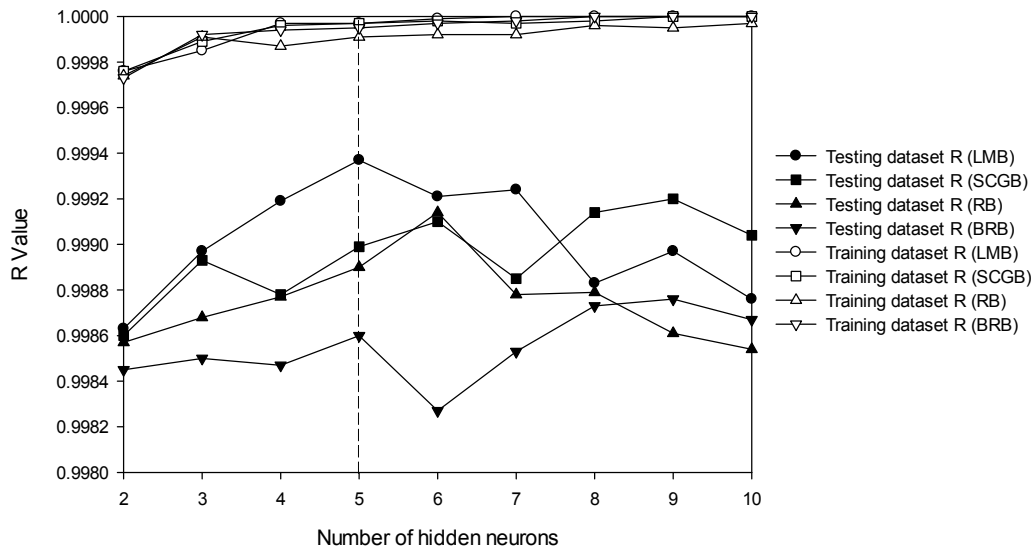
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างการถ่ายเทความร้อนรวมกับอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำร้อน

ตารางที่ 2 ประสิทธิภาพของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้อัลกอริทึมการเรียนรู้แบบต่างๆ

Training Algorithm	Number of Hidden Neurons	MSE (All)	MSE (Train)	MSE (Test)	R (All)	R (Train)	R (Test)
LMB	5	0.0000110	0.000001700	0.0000480	0.99984	0.99997	0.99937
SCGB	6	0.0000132	0.000001681	0.0000592	0.99980	0.99998	0.99910
RB	6	0.0000177	0.000005366	0.0000673	0.99974	0.99992	0.99914
BRB	9	0.0000179	0.000000019	0.0000892	0.99972	1.00000	0.99876



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (MSE) กับจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อน



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) กับจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อน

จากรูปที่ 7 จะพบว่าค่า MSE ของข้อมูลสำหรับการเรียนรู้ (Training data) ทุกอัลกอริทึมมีแนวโน้มลดลงเมื่อจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ค่า MSE ของข้อมูลสำหรับการทดสอบ (Testing data) ทุกอัลกอริทึมก็มีแนวโน้มลดลงเมื่อจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเพิ่มมากขึ้นแต่จะลดลงถึงจุดหนึ่งแล้วก็จะเพิ่มขึ้น สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะโครงข่ายประสาทเทียมเกิดการเรียนรู้เกินขอบสมควรถ (Overfitting) ซึ่งจะส่งผลให้การทำนายมีความผิดพลาดสูงเมื่อโครงข่ายประสาทเทียมรับข้อมูลที่ไม่เคยเรียนรู้มาก่อน ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดการเรียนรู้เกินขอบสมควรถ จึงเลือกจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนโดยดูจากค่า MSE ของข้อมูลสำหรับการทดสอบเป็นหลักแล้วเลือกจำนวนนิวรอนที่ให้ค่า MSE น้อยที่สุดจากทุกอัลกอริทึม ซึ่งจะพบว่าอัลกอริทึม LMB ที่มีจำนวนนิวรอนเท่ากับ 5 นั้นให้ค่า MSE น้อยที่สุด

จากรูปที่ 8 จะพบว่าค่า R ของข้อมูลสำหรับการเรียนรู้ (Training data) ทุกอัลกอริทึมมีแนวโน้มเข้าหาค่า 1 เมื่อจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ค่า R ของข้อมูลสำหรับการทดสอบ (Testing data) ทุกอัลกอริทึมก็มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อน

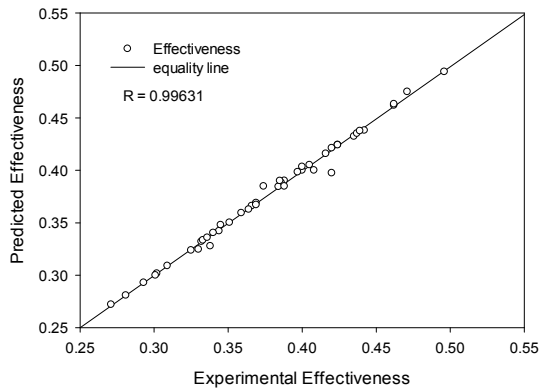
เพิ่มมากขึ้นแต่จะสูงขึ้นถึงจุดหนึ่งแล้วก็จะลดลง สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะโครงข่ายประสาทเทียมเกิดการเรียนรู้เกินขอบสมควรถ (Overfitting) เช่นเดียวกับกรณีค่า MSE ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดการเรียนรู้เกินขอบสมควรถ จึงเลือกจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนโดยดูจากค่า R ของข้อมูลสำหรับการทดสอบเป็นหลักแล้วเลือกจำนวนนิวรอนที่ให้ค่า R มากที่สุดจากทุกอัลกอริทึม ซึ่งจะพบว่าอัลกอริทึม LMB ที่มีจำนวนนิวรอนเท่ากับ 5 นั้นให้ค่า R มากที่สุด

ข้อมูลเชิงตัวเลขของค่า MSE และ R ในทุกอัลกอริทึมสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1 ซึ่งจะพบว่าอัลกอริทึมการเรียนรู้ที่เหมาะสมที่สุดของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมคือ LMB โดยใช้จำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเท่ากับ 5

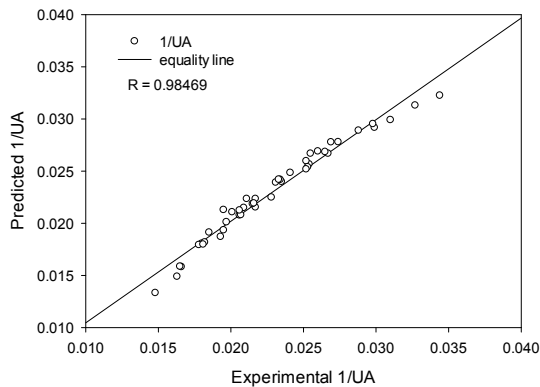
5.3 ผลการทำนายสมรรถนะเชิงความร้อน

เมื่อนำแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่สร้างขึ้นมาทำนายค่าสมรรถนะเชิงความร้อนจากข้อมูลการทดลองทั้งหมด ผลที่ได้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 9-10 โดยจะพบว่าค่า R ของการทำนายประสิทธิภาพมีค่าเท่ากับ 0.99631 และ ค่า R ของการทำนายสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมมีค่าเท่ากับ 0.98469 ซึ่งค่า R ที่

ได้มาทั้งหมดมีค่าใกล้เคียง 1 นั้นหมายความว่าผลการทำนายออกมาดีมาก



รูปที่ 9 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลองกับการทำนายด้วยโครงข่ายประสาทเทียม



รูปที่ 10 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่ได้จากการทดลองกับการทำนายด้วยโครงข่ายประสาทเทียม

6. สรุปผลการทดลอง

แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทำนายค่าประสิทธิภาพและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นที่มีโครงสร้างหนึ่งชั้นซ้อนคือแบบจำลองที่มีจำนวนนิวรอนในชั้นซ่อนเท่ากับ 5 และ ใช้อัลกอริทึมการเรี ย น รู้ Levenberg-Marquardt backpropagation learning โดยให้ค่า R ของค่าประสิทธิภาพและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเท่ากับ 0.99631 และ 0.98469

ตามลำดับ ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนที่ทำนายได้จากแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่สร้างขึ้นสามารถนำไปศึกษาพฤติกรรมของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นหรือใช้สำหรับเป็นข้อมูลในการออกแบบระบบแลกเปลี่ยนความร้อนได้เป็นอย่างดี

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประจำปี 2561

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Shuzhong Wang, Shijun Wang and Yuping Dong, "Dynamic properties modeling and simulation of plate heat exchanger based on MATLAB", Computer Simulation, vol. 21, no. 10, pp. 44-47, 2004.
- [2] B.R. Lamb, "Plate heat exchangers, a low cost route to heat recovery", J. Heat Recovery Syst, vol. 2, no. 3, pp. 247-255, 1982.
- [3] Zhiming Xu, Xiaoqiang Wen, Jiaoli Zheng, Jinsheng Guo and Xing Huang, "Cooling water fouling resistance prediction of plate heat exchanger based on partial least squares regression", Journal of Engineering Thermophysics, vol. 62, no. 6, pp. 1531-1536, 2011.
- [4] Guanmin Zhang, Guanqiu Li, Wei Li, Tao Huang and Yucheng Ren, "Experimental and theoretical investigations about particulate fouling in plate heat exchangers", Journal of Engineering Thermophysics, vol. 34, no. 9, pp. 1715-1718, 2013.
- [5] Ruiyun Zheng, Yongcheng Jiang and Xiumu Fang, "Analysis of relative heat transfer

- coefficient of plate heat exchangers under variable flow conditions”, *Heating Ventilating & Air Conditioning*, vol. 40, no. 10, pp. 85-88, 2010.
- [6] Jing Zhang, Yu Wen, Li Zhao and Deyu Li, Yi Wang, “Heat transfer and flow analysis and corrugation parameters optimization of the plate heat exchanger based on computational fluid dynamics numerical simulation”, *Journal of Mechanical Engineering*, vol. 51, no. 12, pp. 137-145, 2015.
- [7] Jing Wu, Meng Xia, Li Ye and Dong Han, “A numerical study and thermal resistance analysis of heat transfer enhancement in plate heat exchangers”, *Journal of Engineering Thermophysics*, vol. 33, no. 11, pp. 1963-1966, 2012.
- [8] Y. Wang, S. You, W. Zheng, H. Zhang, X. Zheng and Q. Miao, “State space model and robust control of plate heat exchanger for dynamic performance improvement”, *Appl. Therm. Eng.*, vol. 128, pp. 1588-1604, 2018.
- [9] Meizhong Shi, Zhongzheng Wang, *Principle and Design of Heat Exchangers*, Southeast University Press, 2009.
- [10] Jorge A.W.Gut, Renato Fernandes, José M. Pinto and Carmen C. Tadini, “Thermal model validation of plate heat exchangers with generalized configurations”, *Chemical Engineering Science*, vol. 59, no. 21, pp. 4591-4600, 2004.
- [11] Peng Ren, Yusheng Wu, “Optimal design for plate heat exchanger by particle swarm optimization”, *Energy Technology*, vol. 30, no. 5, pp. 270-272, 2009.
- [12] Xie G, Zeng M, Luo LQ, “Heat transfer analysis for shell-and-tube heat exchangers with experimental data by artificial neural network approach”, *Appl. Therm. Eng.*, vol. 27, pp. 1096-1104, 2007.
- [13] A. Pacheco-Vega, M. Sen and R.L. McClain, “Analysis of fin tube evaporator performance with limited experimental data using artificial neural networks”, in *Proc. ASME Heat Transfer Division*, 2000, pp. 95–101.
- [14] M. Mishra, P.K. Das, S. Sarangi, “Second law based optimisation of crossflow plate-fin heat exchanger design using genetic algorithm”, *Appl. Therm. Eng.*, vol. 29, pp. 2983–2989, 2009.
- [15] Tan CK, Ward J, Wilcox SJ and Payne R, “Artificial neural network modeling of the thermal performance of a compact heat exchanger”, *Appl. Therm. Eng.*, vol. 29, pp. 3609-3617, 2009.
- [16] M. Mohanraj, S. Jayaraj, C. Muraleedharan, “Applications of artificial neural networks for thermal analysis of heat exchangers - a review”, *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 90, pp. 150-172, 2015.
- [17] P. Naphon, T. Arisariyawong, “Heat transfer analysis using artificial neural networks of the spirally fluted tubes”, *J. Res. Appl. Mech. Eng.*, vol. 4, no. 2, pp. 135-147, 2016.
- [18] P. Naphon, T. Arisariyawong, T. Nualboonrueng, “Artificial Neural Network Analysis on the Heat Transfer and Friction Factor of the Double Tube with Spring

- Insert”, International Journal of Applied Engineering Research, vol. 11, no. 5, pp. 3542-3549, 2016.
- [19] P. Naphon, S. Wiriyaart, T. Arisariyawong, “Artificial neural network analysis the pulsating Nusselt number and friction factor of TiO₂/water nanofluids in the spirally coiled tube with magnetic field”, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 118, pp. 1152-1159, 2018.
- [20] P. Naphon, S. Wiriyaart, T. Arisariyawong, L. Nakharintr, “ANN, numerical and experimental analysis on the jet impingement nanofluids flow and heat transfer characteristics in the micro-channel heat sink”, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 131, pp. 329-340, 2019.
- [21] S. Haykin, “Neural networks, A Comprehensive Foundation”, New Jersey, 1994.

Optimal PIDA Controller Design for Maglev Vehicle Suspension System by Lévy-Flight Firefly Algorithm

Sarot Hlangnamthip¹ Deacha Puangdownreong^{2*}

¹Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering

Southeast Asia University, 19/1 Petchakasem Rd., Nongkhaem, Bangkok, 10160

²Department of Electrical Engineering, Graduate School

Southeast Asia University, 19/1 Petchakasem Rd., Nongkhaem, Bangkok, 10160

*Corresponding author: Email: deachap@sau.ac.th

(Received: October 25, 2018; Accepted: February 15, 2019)

ABSTRACT

In modern vehicles, intelligent suspension systems have been widely applied with complex control algorithms. The suspension design problem aims to achieve a good suspension providing a comfortable ride and good handling within a reasonable range of road-profile deflection. In this paper, the proportional-integral-derivative-accelerated (PIDA) controller design for the magnetically levitated (Maglev) vehicle suspension system by the Lévy-flight firefly algorithm (LFFA), one of the most powerful metaheuristic optimization searching techniques, is proposed. For comparison with LFFA-based design approach, the results obtained by the PIDA controller will be compared with those obtained by the PI, PD and PID controllers. Simulation results show that the LFFA can provide optimal PIDA controller for a given suspension system. The PIDA controller yielded very satisfactory response superior to PI, PD and PID, respectively.

Keyword: PIDA controller, Maglev vehicle, suspension system, Lévy-flight firefly algorithm, modern optimization.

1. Introduction

In modern vehicles, a suspension system plays an important and imperative role in increasing the ride comfort. The main purpose of a suspension system is to provide a comfortable ride and good handling within a reasonable range of deflection or irregularity of road profile [1-3]. For high-speed transport links in modern economies, the magnetically levitated (Maglev) vehicles have been widely used in many countries. There are two most effective suspension methods, i.e. electro-dynamic suspension (EDS) and electro-magnetic suspension (EMS) [4-6]. The former requires super-conducting materials to produce sufficient repulsive force to levitate a vehicle over a

conducting track, while the later employs the attractive forces of sets of electromagnets acting upwards to levitate the vehicle towards the tracks [7-8]. Generally, the suspension system of the Maglev vehicles can be controlled by PD/PID controllers. Based on the modern optimization, designing of PD/PID controllers for Maglev vehicle suspension system by some potential metaheuristic algorithms has been developed, for example, by using genetic algorithm (GA) [9], evolutionary algorithm (EA) [10] and particle swarm optimization (PSO) [11].

In control theory, the proportional-integral-derivative-accelerated (PIDA) controller was developed and proposed by Jung and Dorf in 1996 [12]. It possesses three arbitrary zeros and

one pole at origin. This leads the PIDA more benefit than the classical PID controller for higher-order plants. Designing of the PIDA controller by well-known metaheuristic algorithms has been launched, for instance, by GA [13], PSO [14], cuckoo search (CS) [15] and spider monkey optimization (SMO) [16].

By literature reviews, the firefly algorithm (FA) was firstly proposed in 2008 by Yang [17-18] based on the flashing behavior of fireflies and uniform distribution for randomly generating the feasible solutions. As one of the most efficient population-based metaheuristic algorithms, the FA was applied to almost every area of sciences and engineering, including power systems [19], image processing [20], antenna design [21], civil engineering [22], robotics [23], semantic web [24], chemistry [25], meteorology [26], wireless sensor networks [27], control engineering [28-29] and so forth.

In 2010, two years after the former version of the FA was initiated, the later version of FA named the Lévy-flight firefly algorithm (LFFA) was proposed by Yang [30]. The algorithm of LFFA was still based on the flashing behavior of fireflies, but Lévy-flight distribution is employed to randomly generate new solutions. The LFFA was tested against several nonlinear and multimodal standard test functions. Results obtained by the LFFA outperformed those by traditional algorithms including GA and PSO. The state-of-the-art and its applications of the LFFA have been reviewed and reported [31-32].

In this paper, the LFFA is applied to design an optimal PIDA controller for the Maglev vehicle suspension system. For comparison with LFFA-based design approach, the results obtained by the PIDA controller will be compared with those obtained by the PI, PD and PID controllers, respectively. After an introduction is provided in section 1, the remaining part of the paper is organized as

follows. Modeling of Maglev suspension system is described in section 2. The LFFA-based PIDA design problem formulation is performed in section 3. Results and discussions are illustrated in section 4. Conclusions are given in section 5.

2. Maglev Suspension Model

The cross-section of a general Maglev vehicle is shown in Fig. 1(a), while its equivalent one-dimensional vehicle model with two-degrees-of-freedom is represented in Fig. 1(b), consisting of two lumped masses m_p and m_s , two linear springs k_p and k_s , and two viscous dampings b_p and b_s , representing primary (chassis) and secondary (passenger cabin) suspensions, respectively [5-6].

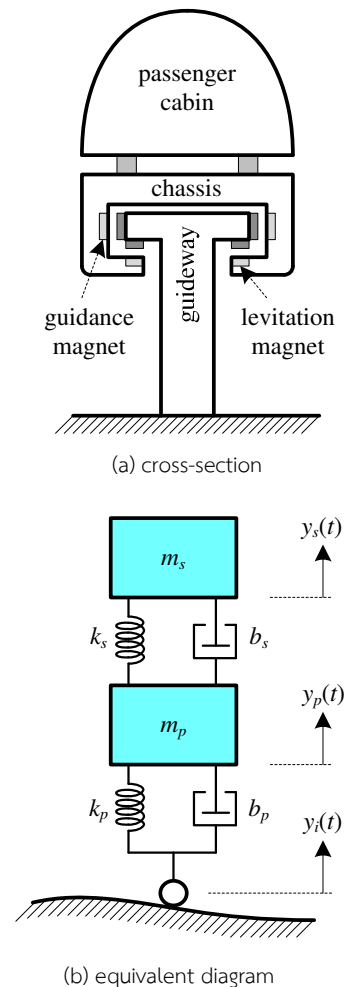


Fig. 1 Maglev vehicle suspension system

For the linear model, the equations of motion when the vehicle is at the equilibrium position are stated in (1) - (2).

$$m_p \ddot{y}_p + b_p (\dot{y}_p - \dot{y}_i) + k_p (y_p - y_i) - b_s (\dot{y}_s - \dot{y}_p) - k_s (y_s - y_p) = 0 \quad (1)$$

$$m_s \ddot{y}_s + b_s (\dot{y}_s - \dot{y}_p) + k_s (y_s - y_p) = 0 \quad (2)$$

From (1) and (2), the relation in (3) can be formulated, where y_p and y_s are positions of primary (chassis) and secondary (passenger cabin) suspensions, and y_i is disturbance from guideway irregularity.

$$m_p \ddot{y}_p + m_s \ddot{y}_s + b_p (\dot{y}_p - \dot{y}_i) + k_p (y_p - y_i) = 0 \quad (3)$$

The s -domain transfer functions of primary suspension $G_1(s)$ and secondary suspension $G_2(s)$ once considering guideway disturbance y_i as an input variable can be described in (4) and (5), respectively.

$$G_1(s) = \frac{Y_p(s)}{Y_i(s)} = \frac{\left(m_s b_p s^3 + (m_s k_p + b_s b_p) s^2 + (b_p k_s + b_s k_p) s + k_s k_p \right)}{\left(m_s m_p s^4 + [m_p b_s + m_s (b_p + b_s)] s^3 + [m_p k_s + m_s (k_p + k_s) + b_s b_p] s^2 + (b_p k_s + b_s k_p) s + k_s k_p \right)} \quad (4)$$

$$G_2(s) = \frac{Y_s(s)}{Y_i(s)} = \frac{(b_s b_p s^2 + (b_p k_s + b_s k_p) s + k_s k_p)}{\left(m_s m_p s^4 + [m_p b_s + m_s (b_p + b_s)] s^3 + [m_p k_s + m_s (k_p + k_s) + b_s b_p] s^2 + (b_p k_s + b_s k_p) s + k_s k_p \right)} \quad (5)$$

The Maglev vehicle suspension model can be represented by the block diagram as shown in Fig. 2.

3. LFFA-Based PIDA Design Problem

In this section, algorithms of the original FA and the LFFA are briefly reviewed. Then, the LFFA-based PIDA controller design approach is elaborately described.

3.1 FA Algorithm

The original firefly algorithm (FA) was firstly developed by Yang in 2008 by [17-18] based on the flashing behavior of fireflies. The flashing light of fireflies is produced by a process of bioluminescence to attract mating partners (communication) and to attract potential prey. The FA's algorithm is developed from three idealized rules:

- (i) fireflies are unisex so that one firefly will be attracted to other fireflies regardless of their sex;
- (ii) the attractiveness is proportional to the brightness, and they both decrease as their distance increases. Thus for any two flashing fireflies, the less brighter one will

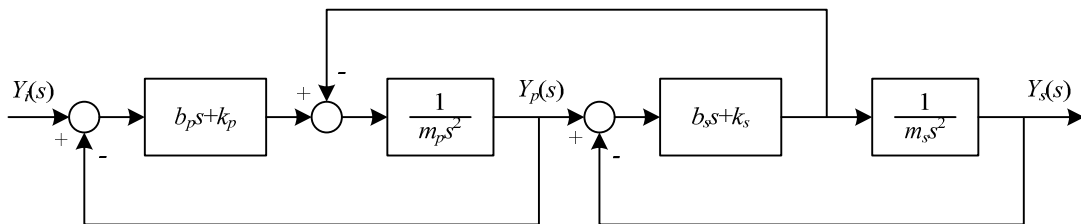


Fig. 2 Block diagram for two-degree-of-freedom Maglev vehicle model

move towards the brighter one. If there is no brighter one than a particular firefly, it will move randomly;

- (iii) the brightness of a firefly is determined by the landscape of the objective function.

Based on these rules, the FA's algorithm can be summarized by the pseudo code shown in Fig. 3.

In FA, there are two important issues: the variation of light intensity and formulation of the attractiveness. The attractiveness of a firefly is determined by its brightness which in turn is associated with the encoded objective function. Along the distance r , the light intensity I varies according to the inverse square law $I(r) = I_s/r^2$, where I_s is the intensity at the source. For a given medium with a fixed light absorption coefficient, the light intensity I varies with the distance r as stated in (6), where I_0 is the original light intensity.

```

Objective function  $f(\mathbf{x})$ ,  $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_d)^T$ 
Generate initial population of fireflies  $\mathbf{x}_i = (i = 1, 2, \dots, n)$ 
Light intensity  $I_i$  at  $\mathbf{x}_i$  is determined by  $f(\mathbf{x}_i)$ 
Define light absorption coefficient  $\gamma$ 
while ( $t < \text{Max\_Generation}$ )
  for  $i = 1 : n$  all  $n$  fireflies
    for  $j = 1 : i$  all  $n$  fireflies
      if ( $I_j > I_i$ )
        - Move firefly  $i$  towards  $j$  in  $d$ -dimension via
          uniformly distributed random
      end if
      - Attractiveness varies with distance  $r$  via  $\exp[-\gamma r]$ 
      - Evaluate new solutions and update light intensity
    end for  $j$ 
  end for  $i$ 
  - Rank the fireflies and find the current best  $\mathbf{x}^*$ 
end while
Report the best solution found

```

Fig. 3 Pseudo code of FA

$$I = I_0 e^{-\gamma r} \quad (6)$$

$$\beta = \beta_0 e^{-\gamma r^2} \quad (7)$$

$$r_{ij} = \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^d (x_{i,k} - x_{j,k})^2} \quad (8)$$

The attractiveness of a firefly observed by adjacent fireflies is proportional to the light intensity. This can define the variation of attractiveness β with the distance r as expressed in (7), where β_0 is the attractiveness at $r = 0$. From parametric studies, $\beta_0 = 1$ is suggested for most applications [17-18]. The scaling factor γ in (6) and (7) is defined as the light absorption coefficient. In addition in (6) and (7), the distance r_{ij} between any two fireflies i and j at their locations $\mathbf{x}_i$ and $\mathbf{x}_j$ can be calculated by the Cartesian distance as expressed in (8), where $x_{i,k}$ is the k^{th} component of the spatial coordinate $\mathbf{x}_i$ of i^{th} firefly.

For an original FA, the movement of a firefly i is attracted to another more attractive (brighter) firefly j is determined by (9), where α_t is the randomization parameter, and $\mathbf{e}_i$ is a vector of random numbers drawn from a Gaussian distribution or uniform distribution at time t [6]. In addition, α_t can be controlled during iterations as stated in (10), where α_0 is the initial randomness scaling factor, and δ is a cooling factor.

$$\mathbf{x}_i^{t+1} = \mathbf{x}_i^t + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (\mathbf{x}_j^t - \mathbf{x}_i^t) + \alpha_t \mathbf{e}_i^t \quad (9)$$

$$\alpha_t = \alpha_0 \delta^t, \quad (0 < \delta < 1) \quad (10)$$

3.2 LFFA Algorithm

The Lévy-flight firefly algorithm (LFFA), the modified version of the FA, was proposed by Yang in 2010 [30]. Movement of a firefly i is attracted to another more attractive (brighter) firefly j is determined by (11), where the second term is due to the attraction while the third term is randomization via Lévy flights with α being the randomization parameter. The product

$\oplus$ means entrywise multiplications. The $\text{sign}[\text{rand}-1/2]$ where $\text{rand} \in [0, 1]$ essentially provides a random sign or direction while the random step length is drawn from a Lévy distribution having an infinite variance with an infinite mean. From (11), a symbol $\text{Lévy}(\lambda)$ represents the Lévy distribution as expressed in (12). The step length s can be calculated by (13), where u and v stand for normal distribution as stated in (14). Standard deviations of u and v are also expressed in (15). The algorithms of the LFFA can be represented by the pseudo code shown in Fig. 4.

$$\mathbf{x}_i^{t+1} = \mathbf{x}_i^t + \beta_0 e^{-\eta_{ij}^2} (\mathbf{x}_j^t - \mathbf{x}_i^t) + \alpha \text{sign}\left[\text{rand} - \frac{1}{2}\right] \oplus \text{Lévy}(\lambda) \quad (11)$$

$$\text{Lévy} \approx u = t^{-\lambda}, \quad (1 < \lambda \leq 3) \quad (12)$$

$$s = \frac{u}{|v|^{1/\beta}} \quad (13)$$

$$u \approx N(0, \sigma_u^2), \quad v \approx N(0, \sigma_v^2) \quad (14)$$

$$\sigma_u = \left\{ \frac{\Gamma(1+\beta) \sin(\pi\beta/2)}{\Gamma[(1+\beta)/2] \beta 2^{(\beta-1)/2}} \right\}^{1/\beta}, \quad \sigma_v = 1 \quad (15)$$

```

Objective function  $f(\mathbf{x})$ ,  $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_d)^T$ 
Generate initial population of fireflies  $\mathbf{x}_i = (i = 1, 2, \dots, n)$ 
Light intensity  $I_i$  at  $\mathbf{x}_i$  is determined by  $f(\mathbf{x}_i)$ 
Define light absorption coefficient  $\gamma$ 
while ( $t < \text{Max\_Generation}$ )
  for  $i = 1 : n$  all  $n$  fireflies
    for  $j = 1 : i$  all  $n$  fireflies
      if ( $I_j > I_i$ )
        - Move firefly  $i$  towards  $j$  in  $d$ -dimension via Lévy-flight distributed random
      end if
      - Attractiveness varies with distance  $r$  via  $\exp[-\eta]$ 
      - Evaluate new solutions and update light intensity
    end for  $j$ 
  end for  $i$ 
  - Rank the fireflies and find the current best  $\mathbf{x}^*$ 
end while
Report the best solution found

```

Fig. 4 Pseudo code of LFFA

3.3 LFFA-Based PIDA Controller Design

Regarding to the modern optimization, the LFFA-based optimal PIDA controller design for the Maglev vehicle suspension system can be represented by the block diagram in Fig. 5. The s -domain transfer functions of secondary suspension $G_2(s)$ in (5) will be used as a plant model $G_p(s)$ in Fig. 5. The plant model parameters, i.e., masses m_p and m_s , stiffnesses k_p and k_s , and dampings b_p and b_s for primary and secondary suspensions, are summarized in Table 1 [33-34].

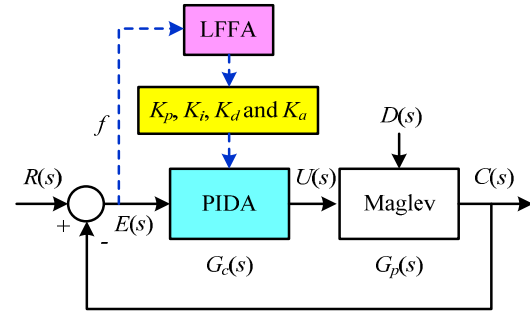


Fig. 5 LFFA-based PIDA design framework

Table 1 Maglev vehicle parameters

Parameters	Values
Primary suspension mass m_p	3.20×10^4 kg
Secondary suspension mass m_s	2.92×10^4 kg
Primary suspension damping b_p	1.13×10^6 N-s/m
Secondary suspension damping b_s	8.80×10^4 N-s/m
Primary suspension stiffness k_p	6.18×10^7 N/m
Secondary suspension stiffness k_s	7.37×10^5 N/m

The PI, PD, PID and PIDA controller models are stated in (16), (17), (18) and (19), respectively, where K_p is the proportional gain, K_i is the integral gain, K_d is the derivative gain and K_a is the accelerated gains. The sum-squared errors between reference position, r_j , and passenger cabin position, c_j , are set as the objective function $f(\cdot)$ stated in (20). As the constrained optimization, the time-domain response specification, consisting of the rise time (t_r), the maximum percent overshoot (M_p), the

settling time (t_s) and the steady-state error (e_{ss}), is defined as the constrained functions as expressed in (21). Referring to Fig. 5, $f(\cdot)$ in (20) will be minimized by the LFFA in order to search for the appropriate values of K_p , K_i , K_d and K_a within their corresponding search spaces in (21).

$$G_c(s)|_{PI} = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (16)$$

$$G_c(s)|_{PD} = K_p + K_d s \quad (17)$$

$$G_c(s)|_{PID} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (18)$$

$$G_c(s)|_{PIDA} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s + K_a s^2 \quad (19)$$

$$\text{Minimize } f(K_p, K_i, K_d, K_a) = \sum_{j=1}^N (r_j - c_j)^2 \quad (20)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Subject to } t_r \leq 0.05 \text{ sec,} \\ M_p \leq 10\%, \\ t_s \leq 0.10 \text{ sec,} \\ e_{ss} \leq 0.01\%, \\ 0 \leq K_p \leq 100, \\ 0 \leq K_i \leq 200, \\ 0 \leq K_d \leq 10, \\ 0 \leq K_a \leq 0.1 \end{array} \right\} \quad (21)$$

4. Results and Discussions

To design the PI, PD, PID and PIDA controllers for the Maglev vehicle suspension system, the LFFA algorithm was coded by MATLAB version 2018b (License No.#40637337). Search parameters of the LFFA are set according to Yang's recommendations [30], i.e. the numbers of fireflies $n = 30$, $\alpha_0 = 0.25$, $\beta_0 = 1$, $\lambda = 1.50$ and $\gamma = 1$. In this work, 50 trials are searched to obtain the optimal PI, PD, PID and PIDA controllers. For all cases, the maximum generation (Max_Generation) = 200 is set as the termination criteria for each search trial.

4.1 Case-I (PI Controller)

In case of PI controller design with the LFFA-based design approach, the values of K_d and K_a in (21) will be fixed at zero. When the search process terminated, the optimal PI controller for the Maglev vehicle suspension system is obtained by the LFFA as expressed in (22). Fig. 6 shows the convergent rates of the objective function $f(\cdot)$ over 50 trials of the PI controller designed by the LFFA. The step responses of the Maglev vehicle suspension system without and with PI controller are depicted in Fig. 7.

$$G_c(s)|_{PI} = 9.7012 + \frac{14.9844}{s} \quad (22)$$

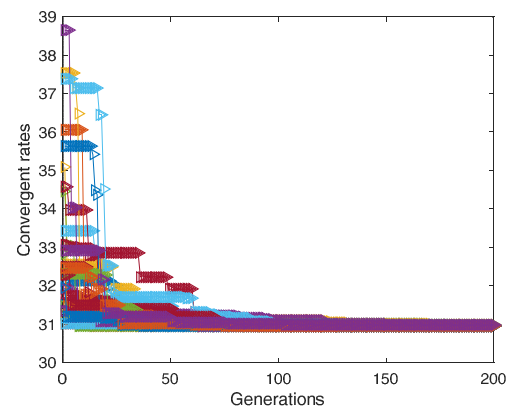


Fig. 6 Convergent rates of PI controller designed by LFFA

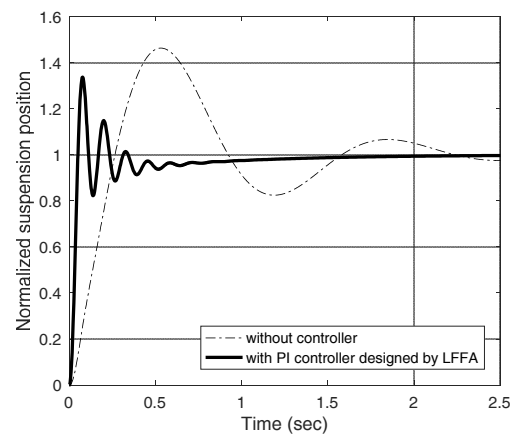


Fig. 7 Step responses of Maglev system without and with PI controller designed by LFFA

4.2 Case-II (PD Controller)

For the PD controller design with the LFFA-based design approach, the values of K_i and K_o in (21) will be fixed at zero. Once the search process stopped, the PD controller for the Maglev vehicle suspension system is optimized by the LFFA as stated in (23). The convergent rates of the objective function $f(\cdot)$ over 50 trials of the PD controller designed by the LFFA are plotted in Fig. 8. The step responses of the Maglev vehicle suspension system without and with PD controller are depicted in Fig. 9.

$$G_c(s)|_{PD} = 64.9937 + 3.0121s \quad (23)$$

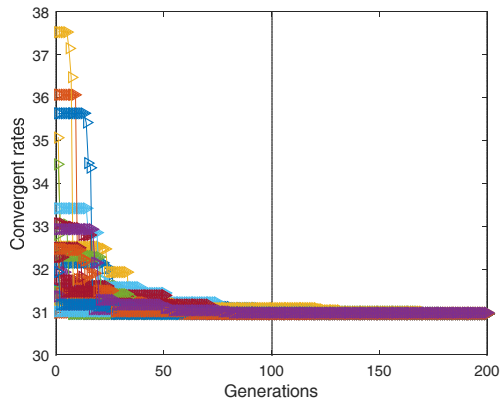


Fig. 8 Convergent rates of PD controller designed by LFFA

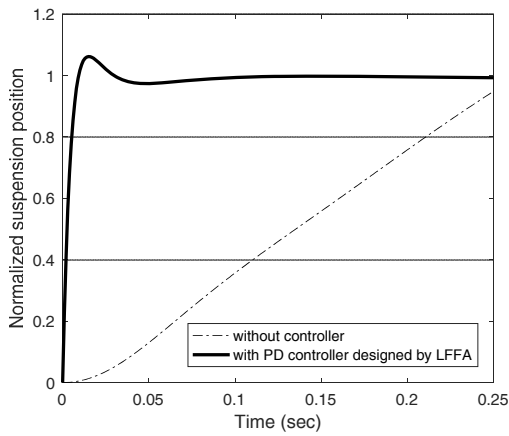


Fig. 9 Step responses of Maglev system without and with PD controller designed by LFFA

4.3 Case-III (PID Controller)

In case of PID controller design with the LFFA-based design approach, K_o in (21) is thus fixed at zero. When the search process stopped, the PID controller for the Maglev vehicle suspension system is optimized by the LFFA as stated in (24). The convergent rates of the objective function $f(\cdot)$ over 50 trials of the PID controller proceeded by the LFFA are plotted in Fig. 10. The step responses of the Maglev vehicle suspension system without and with PID controller are depicted in Fig. 11.

$$G_c(s)|_{PID} = 64.8045 + \frac{169.3762}{s} + 2.9871s \quad (24)$$

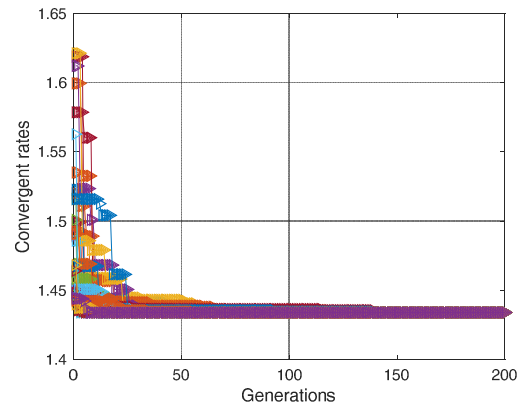


Fig. 10 Convergent rates of PID controller designed by LFFA

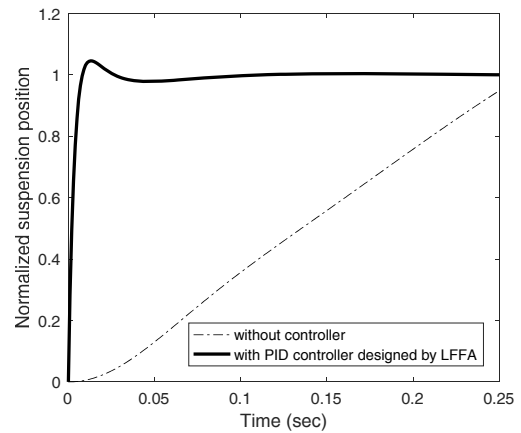


Fig. 11 Step responses of Maglev system without and with PID controller designed by LFFA

4.4 Case-IV (PIDA Controller)

Finally, for the PIDA controller design with the LFFA-based design approach, K_p , K_i , K_d and K_o are varied within their corresponding boundaries as given in (21). The optimal PIDA controller for the Maglev vehicle suspension system is obtained by the LFFA as stated in (25). The convergent rates of the PIDA controller design are plotted in Fig. 12. The step responses of the system without and with PIDA controller are depicted in Fig. 13.

$$G_c(s)|_{PIDA} = 65.1404 + \frac{179.1016}{s} + 5.7612s + 0.0002s^2 \quad (25)$$

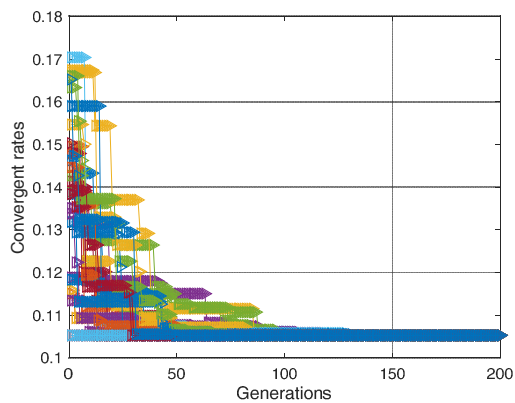


Fig. 12 Convergent rates of PIDA controller designed by LFFA

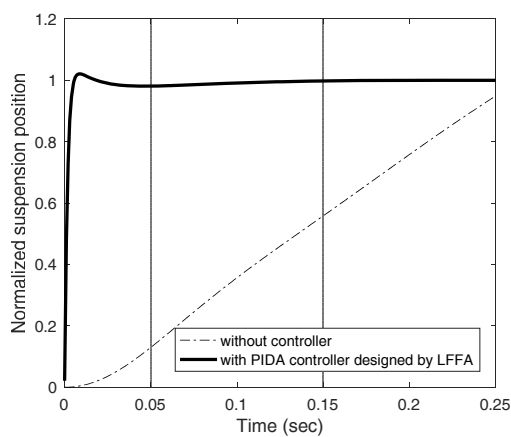


Fig. 13 Step responses of Maglev system without and with PIDA controller designed by LFFA

4.5 Result Comparison

All obtained results are summarized in Table 2. The step response of the Maglev vehicle suspension system without controller and with PI, PD, PID and PIDA controllers designed by the LFFA are depicted in Fig. 14. Referring to Table 2 and Fig. 14, it can be observed that the PI controller provides unacceptable response with slow and high overshoot and oscillation. The PD controller can improve transient responses, but it cannot eliminate the steady-state error of the system response. The PID can improve transient better than PD, and can eliminate the steady-state error as the PI. The PIDA outperforms PID controller in that it can improve transient response better than PID with faster and smoother, and can completely eliminate the steady-state error. The PIDA controller designed by the LFFA is optimal because the proposed objective function $f(\cdot)$ in (20) is completely minimized and the Maglev system response with the obtained PIDA corresponds to all preset constraint functions and search spaces in (21).

Fig. 15 shows the simulation results of the disturbance rejection of the Maglev system without and with PI, PD, PID and PIDA controller designed by LFFA. By comparison, it can be noticed that the effectiveness of the PIDA outperforms PI, PD and PID, respectively, due to the smallest and fastest disturbance rejection.

Table 2 Step-responses of Maglev suspension controlled systems

Controllers	Step-responses			
	t_r (sec.)	M_p (%)	t_s (sec.)	e_{ss} (%)
without	0.261	46.32	2.639	0.00
PI	0.049	33.72	1.162	0.00
PD	0.009	6.18	0.067	1.16
PID	0.008	4.54	0.055	0.00
PIDA	0.005	2.07	0.009	0.00

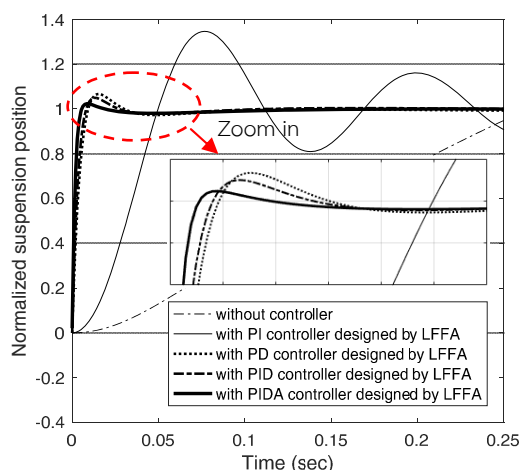


Fig. 14 Step responses of Maglev system without and with PI, PD, PID and PIDA controllers

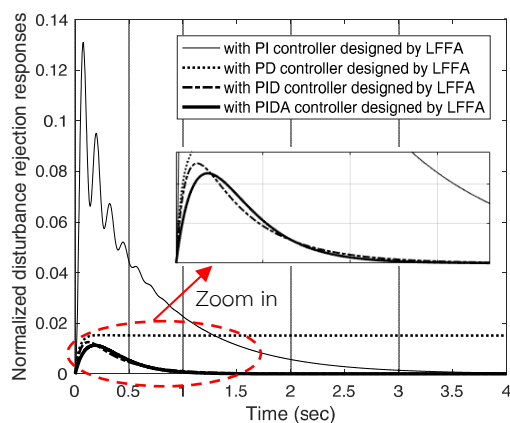


Fig. 15 Disturbance rejection responses of Maglev system without and with PI, PD, PID and PIDA controllers

5. Conclusions

Obtaining an optimal PIDA controller for Maglev vehicle suspension system based on the modern optimization design approach has been presented in this paper. As one of the most powerful metaheuristic algorithms, the LFFA has been applied to design an optimal PIDA controller for the given Maglev suspension system. With LFFA-based design approach, the results obtained by the PIDA controller have been compared with those obtained by the PI, PD and PID controllers. From Table 2 and Fig. 14, it can be investigated that the PI controller

provides unacceptable response with slow and high overshoot and oscillation. Although the PD controller could improve transient response, it cannot eliminate the steady-state error. The PID controller could improve transient better than PD, and can eliminate the steady-state error like PI controller. Among those controllers, the PIDA controller outperformed PI, PD and PID controllers, respectively. The PIDA could improve transient response with faster and smoother than others, and can completely eliminate the steady-state error of the Maglev suspension controlled system responses. With the LFFA-based, the effectiveness of the optimal PIDA over PI, PD and PID has been confirmed by the smoothest and fastest responses of both step response and disturbance rejection as depicted in Fig. 14 and 15.

6. References

- [1] R. S. Sharp and D. A. Crolla, "Road vehicle suspension system design - a review," *Vehicle Syst. Dynam.*, vol. 16, no. 3, pp. 167-192, 1987.
- [2] A. Shirahatt, P. S. S. Prasad, P. Panzade and M. M. Kulkarni, "Optimal design of passenger car suspension for ride and road holding," *J. Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng.*, vol. 30, no. 1, pp. 66-76, 2008.
- [3] J. S. Lin and I. Kanellakopoulos, "Nonlinear design of active suspensions," *IEEE Control Syst. Mag.*, vol. 17, no. 3, pp. 45-59, 1997.
- [4] D. S. Armstrong, "Magnet/rail systems - a critical review of the options," in *International Conference on Maglev Transport Now and for the Future*, St. John's Hotel, Solihull, UK., 1984, pp. 59-66.
- [5] V. Zakian, *Control Systems Design: A New Framework*, London Limited: pringer-Verlag, 2005.
- [6] Y. Cai, S. S. Chen and D. M. Rote, *Dynamics and Controls in Maglev Systems*, Argonne

- National Laboratory, U.S. department of Energy, 1992.
- [7] A. Butar and R. Sales, "Control for MagLev vehicles," *IEEE Control Syst.*, vol. 18, no. 4, pp. 18-25, 1998.
- [8] A. Charara, J. De Miras and B. Caron, "Nonlinear control of a magnetic levitation system without premagnetization," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 4, no. 5, pp. 513-523, 1996.
- [9] N. Katal and S. K. Singh, "Optimization of PID controller for quarter-car suspension system using genetic algorithm," *Int. J. Adv. Res. Comp. Eng. & Technol.*, vol. 1, no. 7, pp. 30-32, 2012.
- [10] A. A. Aldair and W. J. Wang, "Design of fractional order controller based on evolutionary algorithm for a full vehicle nonlinear active suspension system," *Int. J. Control & Autom.*, vol. 3, no. 4, pp. 33-46, 2010.
- [11] A. J. Qazi, C. W. De Silva, A. Khan and M. T. Khan, "Performance analysis of a semiactive suspension system with particle swarm optimization and fuzzy logic control," *Sci. World J.*, vol. 2014, pp. 1-12, 2014.
- [12] S. Jung and R. C. Dorf, "Analytic PIDA controller design technique for a third order system," in *IEEE Conference on Decision and Control*, Kobe, Japan, 1996, pp. 2513-2518.
- [13] S. Sornmuang and S. Sujitjorn, "GA-based PIDA control design optimization with an application to AC motor speed control," *Int. J. Math. & Comp. Simulat.*, vol. 3, no. 4, pp. 67-80, 2010.
- [14] D. Puangdownreong and S. Suwannarongsri, "Torsional resonance suppression via PIDA controller designed by the particle swarm optimization," in *The Annual International Conference Organized by Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, Krabi, Thailand, 2008, pp. 673-676.
- [15] A. Nawikavatan, T. Jitwang, C. Thammarat and D. Puangdownreong, "Application of cuckoo search to optimal PIDA controller design for three-tank liquid-level control system," in *International Conference on Engineering and Natural Science*, Sapporo, Hokkaido, Japan, 2018, pp. 51-59.
- [16] A. Sharma, H. Sharma, A. Bhargava and N. Sharma, "Optimal design of PIDA controller for induction motor using spider monkey optimization algorithm," *Int. J. Metaheuristics*, vol. 5, no. 3/4, pp. 278-290, 2016.
- [17] X. S. Yang, *Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms*, Luniver Press, 2008.
- [18] X. S. Yang, "Firefly algorithms for multimodal optimization, stochastic algorithms, foundations and Applications," *Lect. Notes Comp. Sci.*, vol. 5792, pp. 169-178, 2009.
- [19] B. Rampriya, K. Mahadevan and S. Kannan, "Unit commitment in deregulated power system using Lagrangian firefly algorithm," in *IEEE International Conference on Communication Control and Computing Technologies*, Nagercoil, Tamil Nadu, India, 2010, pp. 389-393.
- [20] T. Hassanzadeh, H. Vojodi and F. Mahmoudi, "Non-linear gray scale image enhancement based on firefly algorithm," in *The 2nd International Conference on Swarm, Evolutionary, and Memetic Computing*, Visakhapatnam, Andhra Pradesh, India, 2011, pp.174-181.
- [21] B. Basu and G. Mahanti, "Thinning of concentric two-ring circular array antenna using firefly algorithm," *Sci. Iran.*, vol. 19, no. 6, pp. 1802-1809, 2012.
- [22] S. Gholizadeh and H. Barati, "A comparative study of three metaheuristics for optimum design of trusses," *Int. J. Optim. Civil Eng.*, vol. 3, pp. 423-441, 2012.

- [23] S. Severin and J. Rossmann, "A comparison of different metaheuristic algorithms for optimizing blended PTP movements for industrial robots," in *International Conference on Intelligent Robotics and Applications*, Montreal, QC, Canada, 2012, pp. 321-330.
- [24] C. Pop, V. Chifu, I. Salomie, R. Baico, M. Dinsoreanu and G. Copil, "A hybrid firefly-inspired approach for optimal semantic web service composition," *Scalable Comp. Prac. & Exp.*, vol. 12, pp. 363-369, 2011.
- [25] S. E. Fateen, A. Bonilla-Petriciolet and G. P. Rangaiah, "Evaluation of covariance matrix adaptation evolution strategy, shuffled complex evolution and firefly algorithms for phase stability, phase equilibrium and chemical equilibrium problems," *Chem. Eng. Res. & Des.*, vol. 90, no. 12, pp. 2051-2071, 2012.
- [26] A. F. d. Santos, H. F. d. Campos Velho, E. F. Luz, S. R. Freitas, G. Grell and M. A. Gan, "Firefly optimization to determine the precipitation field on South America," *Inv. Prob. Sci. & Eng.*, vol. 21, no. 3, pp. 1-16, 2013.
- [27] M. Breza and J. McCann, "Lessons in implementing bio-inspired algorithms on wireless sensor networks," in *IEEE NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems*, Washington, DC., USA., 2008, pp. 271-276.
- [28] O. Abedinia, N. Amjady, K. Kiani and H. Shayanfar, "Fuzzy PID based on firefly algorithm: load frequency control in deregulated environment," in *The 2012 International Conference on Bioinformatics and Computational Biology*, Varna, Bulgaria, 2012, pp. 1-7.
- [29] D. Puangdownreong, S. Sumpunsri, M. Sukchum, C. Thammarat, S. Hlangnamthip and A. Nawikavatan, "FA-based optimal PIDA controller design for AVR system," in *The 2018 International Electrical Engineering Congress*, Krabi, Thailand, 2018, pp. 548-551.
- [30] X.-S. Yang, "Firefly algorithm, Lévy flights and global optimization," *Res. & Dev. Intell. Syst.*, vol. XXVI, pp. 209-218, 2010.
- [31] I. Fister, I. Fister Jr., X. S. Yang and J. Brest, "A comprehensive review of firefly algorithms," *Swarm. Evol. Comp.*, vol. 13, pp. 34-46, 2013.
- [32] I. Fister, X. S. Yang, D. Fister and I. Fister Jr., "Firefly algorithm: a brief review of the expanding literature," *Cuckoo Search and Firefly Algorithm*, vol. 347, pp. 347-360, 2014.
- [33] G. Bohn and H. Alscher, "The magnetic train transrapid 06," in *IEEE International Conference on Maglev and Linear Drives*, Piscataway, NJ., USA., 1986, pp. 233-242.
- [34] G. Bohn and G. Steinmetz, "The electromagnetic suspension system of the magnetic train 'Transrapid'," in *The 7th International Conference on Maglev Transport*, Tokyo, Japan, 1985, pp. 107-114.

การเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตู้อบแห้ง โดยการปรับมุมเอียงคล้อยตามแสงอาทิตย์ Thermal Efficiency Enhancement of Solar Dryer using Sun Tracking System

ธีรพงศ์ บรรีรักษ์

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย

200 ม.1 ถ.รังสิต – นครนายก ต.รังสิต อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

Theerapong Borirak

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Eastern Asia University

200 m.1 Rangsit - Nakornnayok, Rangsit, Thanyaburi, Pathumtani, 12110

E-mail: t_borirak@eau.ac.th

(Received: October 19, 2018; Accepted: April 12, 2019)

บทคัดย่อ

การถนอมอาหารโดยการตากแห้งเป็นการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ในการให้ความร้อนแก่ผลิตภัณฑ์ โดยการทำให้เกิดการระเหยน้ำภายในผลิตภัณฑ์ซึ่งประสิทธิภาพเชิงความร้อนของอุปกรณ์ในการตากแห้งขึ้นอยู่กับ การรับพลังงานแสงอาทิตย์เป็นหลัก จากการศึกษากระบวนการอบแห้งด้วยตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบตั้งอยู่กับที่โดยใช้ตู้ ขนาด กว้าง 45 cm ความยาว 108 cm และ ความสูง 38.5 cm และมีกระจกเอียงทำมุม 45° ใช้กล้วยน้ำว้า เป็น ผลิตภัณฑ์ในการทดสอบทำการติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในและภายนอกตู้อบแห้ง ใช้ระยะเวลา ในการตากแห้ง 8 ชั่วโมงต่อวันทำการทดลองตั้งแต่วันที่ 9.00 – 17.00 น.จากการทดลองใช้ระยะเวลารวม 24 ชั่วโมง ต่อ การอบ 1 ครั้ง สามารถอบได้ครั้งละ 144 ลูก น้ำหนักเริ่มต้นจากผลิตภัณฑ์ตัวอย่างเฉลี่ยที่ 46.93 g น้ำหนักสุดท้ายเฉลี่ย 23.41 g ความชื้นมาตรฐานเปียกในผลิตภัณฑ์เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 79.18% ความชื้นมาตรฐานเปียกสุดท้ายในผลิตภัณฑ์ลด เหลือ 29.3% อุณหภูมิเฉลี่ยภายในตู้อบมีค่าเท่ากับ 48.47°C

จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้นได้นำมาออกแบบวิธีการอบแห้งโดยให้ตู้อบแห้งคล้อยตามแสงอาทิตย์ ด้วยวิธีการให้แผงรับ ความร้อนสามารถเคลื่อนที่คล้อยตามดวงอาทิตย์ด้วยกลไกการหมุนส่งกำลังจากแม่แรงสะพานซึ่งขับเคลื่อนจากมอเตอร์ ไฟฟ้ากระแสตรง การเคลื่อนที่ของแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์จะปรับให้คล้อยตามดวงอาทิตย์ ครั้งละ 7.5° ต่อชั่วโมง จากการทดลองตู้อบแห้งแบบคล้อยตามแสงอาทิตย์ใช้เวลารวม 20.5 ชั่วโมงน้ำหนักเริ่มต้นจากผลิตภัณฑ์ตัวอย่างเฉลี่ยที่ 43.15 g น้ำหนักสุดท้ายเฉลี่ย 21.2 g ความชื้นมาตรฐานเปียกในผลิตภัณฑ์ลดลงเหลือ 24.8% อุณหภูมิเฉลี่ยภายในตู้อบ มีค่าเท่ากับ 52°C สามารถร่นระยะเวลาในการอบกล้วยน้ำว้าได้ 3.5 ชั่วโมง ต่อการอบแห้ง 1 ครั้ง

คำสำคัญ: ตู้อบแห้ง, เคลื่อนที่ตามแสงอาทิตย์, ความชื้นสัมพัทธ์, ความชื้นมาตรฐานเปียก

ABSTRACT

The solar dryer for food preservation from solar energy to heating the product for evaporate water the thermal efficiency of solar dryer cabinet up to solar energy. This paper concern the study of thermal efficiency of the bananas dryer by the solar drying cabinet size 45 cm x 108 cm x 38.5 cm. and 45° of the mirror angle installation thermometer and humidity meter inside and out side of solar dryer cabinet. The solar dryer cabinet can produce 144 pieces of bananas dryer each batch. It was found from the experiment that, in the duration of 9.00 am – 5.00 p.m. on a clear sky day, and all – day average temperature inside chamber was 46.93°C. The experiment was started from an initial moisture content of bananas of 79.18% wet basis were dried until a final moisture content equaled 29.3% wet basis.

For these data to design solar dryer cabinet with sun tracking by DC motor and scissor jack for rotate the solar dryer cabinet. The experiment was tilted conformable of sun light 7.5 degree/ hr. The experiment was dried until a final moisture content equaled 24.8% wet basis and all – day average temperature inside chamber was 52°C. The experiment can decrease time for dryer the bananas from 24 hr to 20.5 hr.

Keyword: Solar Dryer Cabinet, Sun Tracking, Relative Humidity, Wet basis

1. บทนำ

การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เป็นการใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์ในรูปความร้อนรูปแบบหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพไม่เสียค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงในระหว่างการใช้งานไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ลดปัญหาการปนเปื้อนจากฝุ่นละออง การรบกวนจากแมลง ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพดีขึ้น และยังช่วยลดระยะเวลาในการตากแห้งได้อีกด้วย นอกจากนี้ยังมีส่วนช่วยในการประหยัดสำหรับการอบแห้งที่ใช้พลังงานไฟฟ้า น้ำมันหรือแก๊สธรรมชาติได้เสริม จันทรฉาย และยุทธศักดิ์ บุญรอด [1] ได้ทำการทดลองหาประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอุโมงค์ลมที่ใช้กระจกปิด โดยใช้กล้วยน้ำว้าสุกจำนวน 35 – 55 กิโลกรัมเป็นผลิตภัณฑ์ในการอบแห้งจากการทดลองพบว่าอุณหภูมิของอากาศในห้องอบแห้งมีค่าระหว่าง 40 – 70 °C กล้วยน้ำว้าที่อบแห้งในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แห้งเร็วกว่าตากแดดธรรมดา 1 – 2 วัน

ประพันธ์พงษ์ สมศิลา และอำไพศักดิ์ ทิบุญมา [2] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนสมมูลต่อประสิทธิภาพการไหลเวียนของอากาศภายในเครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์ โดยมีปัจจัยที่ศึกษาคือ ขนาดของอัตราส่วนสมมูลระหว่างพื้นที่ทางเข้าออก และฟลักซ์ความร้อน นำมาวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการไหลเวียน

อากาศในเครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์ จากการศึกษาพบว่าหากอัตราส่วนสมมูลระหว่างพื้นที่เข้าและออกของอากาศและฟลักซ์ความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้การไหลเวียนอากาศภายในเครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้น

ธีระศักดิ์ หุดากร [3] ทำการศึกษาศรรณะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แผ่นราบแบบร่องตัวสำหรับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ โดยออกแบบให้ตัวเก็บรังสีมีลักษณะเป็นร่องวี โดยใช้อัตราการไหลอากาศเท่ากับ 0.04 กิโลกรัมต่อวินาที ใช้มะเขือเทศราชินีเชื่อมในการอบแห้ง ทำการอบแห้งครั้งละ 5 กิโลกรัมทดลองในช่วงเวลา 9.00 – 17.00 น. ในวันที่อากาศแจ่มใสเครื่องอบแห้งทำอุณหภูมิสูงสุดที่ 54.10°C ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีสูงสุดที่ 56.23% และมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องอบแห้งสูงสุดที่ 16.90% สามารถร่นระยะเวลาในการตากแดดธรรมดาจากเวลารวม 48 ชั่วโมงเหลือ 24 ชั่วโมง ความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์มีค่าเท่ากับ 40.30 เปอร์เซ็นต์ตามมาตรฐานเปียก

มันทนา รังสิโยภาส และนทีธินนท์ พงษ์พานิช [4] ได้ทำการศึกษาการอบแห้งแบบผสมผสานพลังงานแสงอาทิตย์แบบแอคทีฟสำหรับกล้วยสไลซ์ โดยศึกษาเงื่อนไขสภาวะอากาศที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งและประสิทธิภาพของเครื่องอบแห้งกล้วยสไลซ์ โดยให้มีแหล่งความร้อนผสมผสานกันระหว่างพลังงานไฟฟ้าและพลังงานแสงอาทิตย์ ใช้กล้วยน้ำว้าเป็นวัตถุดิบในการ

อบแห้งและติดตั้งพัดลมในระบบให้พาอากาศร้อนจากแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์ไหลผ่านขดลวดความร้อนก่อนไหลเข้าสู่ห้องอบแห้ง ผลการทดสอบที่ได้เมื่อความเร็วลมที่ทางเข้าเพิ่มขึ้นทำให้เวลาที่ใช้ในการอบและค่าความต้องการความร้อนจำเพาะลดลง รวมถึงทำให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงขึ้น

สำรวย ภูบาล และวลัยรัตน์ จันทรวงศ์ [5] ได้ทำการศึกษารอบแห้งหมึกกะตอยโดยใช้แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานความร้อนร่วม โดยศึกษาการอบแห้งปลาหมึกกะตอยและเปรียบเทียบระหว่างการตากแดดกลางแจ้งกับการตากในตู้อบที่มีอากาศร้อนจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบไหลผ่าน ทำการทดลองช่วง 8.00 – 17.00 น. ผลการวิจัยพบว่าหลังการตากแดดกลางแจ้งกับการตากในตู้อบผลิตภัณฑ์มีความชื้นเหลือ 170 และ 70 เปอร์เซ็นต์ มาตรฐานแห่งจากการศึกษาประสิทธิภาพการอบแห้งผลิตภัณฑ์เป็นรายชั่วโมงพบว่าประสิทธิภาพการอบแห้งลดลงเมื่อค่าความเข้มรังสีอาทิตย์สูงขึ้นแสดงว่าอัตราการอบแห้งมีค่าสม่ำเสมอ

จารุวัฒน์ เจริญจิต [6] ได้นำเสนอเทคโนโลยีการอบแห้งด้วยรังสีอาทิตย์ และแนวทางการพัฒนาในประเทศไทย พบว่าสามารถแบ่งตามวิธีการรับรังสีอาทิตย์ได้ 3 แบบ คือรับรังสีอาทิตย์โดยตรง, โดยอ้อมและแบบผสม มีลักษณะการหมุนเวียนอากาศภายใน 2 ลักษณะคือหมุนเวียนตามธรรมชาติและหมุนเวียนแบบบังคับ ปัจจัยหลักในการเพิ่มสมรรถนะการอบแห้งด้วยรังสีอาทิตย์คืออุณหภูมิ, ความเร็ว, และความชื้นของอากาศในระบบ รวมถึงการพัฒนาารอบแห้งที่มีความสม่ำเสมอ และเพิ่มระยะเวลาการอบแห้งที่ใช้ความร้อนจากรังสีอาทิตย์

การใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ไม่ใช่เพียงแค่การอบแห้งเพียงอย่างเดียว มีการพัฒนาเทคโนโลยีในการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ในรูปแบบของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งสามารถแบ่งตามลักษณะการติดตั้งได้ เป็น 2 แบบคือแบบติดตั้งกับที่และแบบเคลื่อนที่ตามแสงอาทิตย์ ซึ่ง ศศิวิมล ทรงไตร และคณะ[7] ทำการประเมินความคุ้มค่าในการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบมีระบบติดตามดวงอาทิตย์และแบบมุมรับแสงคงที่ในประเทศไทยซึ่งทำการเก็บข้อมูลเป็นระยะเวลา 1 ปี พบว่าระบบที่มีการติดตั้งแบบติดตามดวงอาทิตย์สามารถรับค่าพลังงานแสงอาทิตย์ได้มากกว่าแบบมุมรับแสงคงที่ 12.68% และมีค่าผลผลิตทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 15.39% ค่าสมรรถนะของระบบแบบติดตามดวงอาทิตย์มีค่ามากกว่าแบบมุมคงที่ 1.87% ซึ่งหากวิเคราะห์จากการเคลื่อนที่

ของดวงอาทิตย์ตามช่วงเวลาพบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มของรังสีอาทิตย์จึงมีการออกแบบให้มีการสร้างระบบขับเคลื่อนแผงโซลาร์เซลล์ตามแสงอาทิตย์อัตโนมัติ โดย สมภพ ผดุงพันธ์ [8] ได้ใช้ระบบไมโครคอนโทรลเลอร์สั่งงานให้ชุดควบคุมขับเคลื่อนให้โซลาร์เซลล์ผลจากการทดสอบสมรรถนะพบว่าแผงโซลาร์เซลล์ให้พลังงานเฉลี่ยสูงกว่าแบบวางคงที่ในแนวนอน 13% ศุภชัย กวินวุฒิกุล [9] ได้ทำการวิจัยการประยุกต์ใช้ระบบควบคุมโซลาร์เซลล์ชนิดอะเมอร์ฟัสซิลิคอนใช้กระจกเงาส่งสะท้อนแสงเพิ่มความเข้มแสงอาทิตย์ให้กับเซลล์โดยให้เคลื่อนที่ตามแสงอาทิตย์ เปรียบเทียบกับแผงโซลาร์เซลล์ชนิดเดียวกันที่ไม่เคลื่อนที่ พบว่าแผงโซลาร์เซลล์แบบเคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์สร้างแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 15.33% ทวีวัช วีระแก้ว [10] ได้ทำการวิจัยชุดขับเคลื่อนและควบคุมแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบเคลื่อนที่ 2 แกน เพื่อเปรียบเทียบพลังงานที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอยู่กับที่ โดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 6 W 12 VDC ผลการวิจัยพบว่าพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์แบบเคลื่อนที่ 2 แกน มีค่ามากกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอยู่กับที่ 38.17% กรรธรรม สติรกุล และอภิญญา บุญประกอบ [11] ได้ทำการพัฒนาระบบติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ต้นทุนต่ำ เพื่อการประยุกต์ใช้ในงานพลังงานทดแทน จากการทดสอบพบว่ามีค่าความแม่นยำมีความผิดพลาดไม่เกิน 2 องศา

จากแนวคิดในการที่จะพัฒนาตู้อบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ [6] และผลของการศึกษารอบแห้งที่ของแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์ [7] มาใช้กับแผงรับความร้อนของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์โดยให้เกิดการเคลื่อนที่คล้ายตามแสงอาทิตย์โดยใช้กลไกในการขับเคลื่อนอย่างง่ายจะทำให้ได้อุณหภูมิภายในตู้อบแห้งเพิ่มขึ้น ซึ่งจะสามารถร่นระยะเวลาตากผลิตภัณฑ์แห้งได้รวดเร็วกว่าการตากอบแห้งโดยตู้อบแห้งที่มีการติดตั้งกับที่

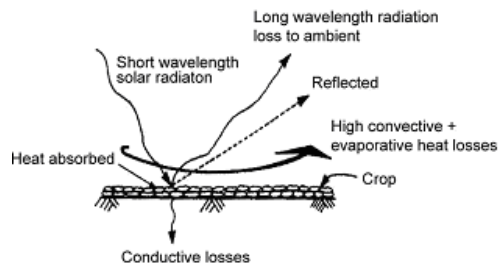
2. เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ [12]

ในปัจจุบันมีการแบ่งวิธีการอบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์สามารถได้ดังนี้

2.1 การตากแห้งโดยตรงโดยใช้แสงอาทิตย์

การตากแห้งโดยตรงโดยใช้แสงอาทิตย์ เป็นวิธีการถนอมอาหารขั้นพื้นฐานที่มีการใช้มานาน โดยการนำอาหารมาทำการตากแห้งโดยตรงซึ่งมีการสูญเสียผลผลิตเป็นอย่างมากเนื่องจากสาเหตุต่างๆเช่น หนู นก แมลง และจุลินทรีย์ นอกจากนี้ยังมีปัจจัยจากธรรมชาติที่ทำให้

ผลผลิตไม่ได้คุณภาพ เช่น ฝ่นหรือพายุ การอบแห้งด้วยวิธีนี้มีการปนเปื้อนด้วยสิ่งแปลกปลอม เช่น ฝ่นละออง สิ่งสกปรกแมลงและสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กจากปัจจัยดังกล่าวข้างต้นเป็นตัวแปรที่ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่เป็นไปตามมาตรฐานคุณภาพสากลและไม่สามารถจำหน่ายได้ในตลาดต่างประเทศ



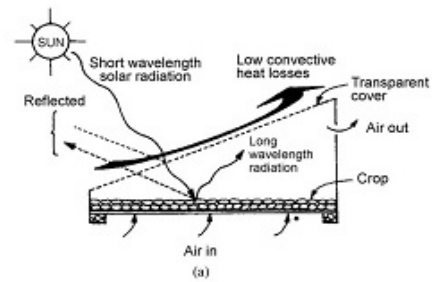
รูปที่ 1 การตากแห้งโดยใช้แสงอาทิตย์เปิด [13]

2.2 การอบแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบรับรังสีอาทิตย์โดยตรงและโดยอ้อม

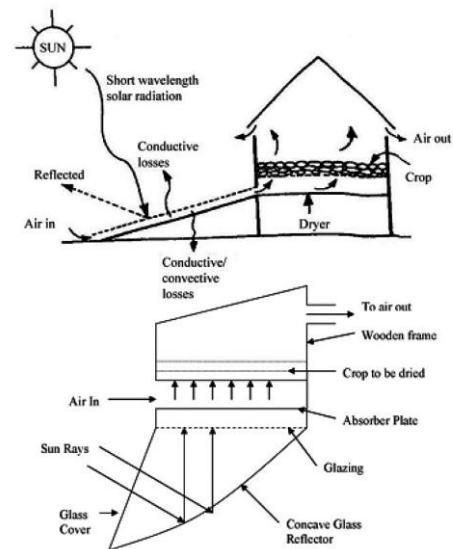
เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มความร้อนและคุณภาพของวัสดุอบแห้งให้แห้งเร็วขึ้นมีลักษณะปราศจากฝุ่นและแมลง ส่วนประกอบหลักที่สำคัญมี 2 ส่วน ได้แก่ ตัวตู้อบ และตัวรับรังสีอาทิตย์ เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบ่งเป็น 2 ชนิดคือแบบรับรังสีอาทิตย์โดยตรง และแบบรับรังสีโดยอ้อม

1.แบบรับรังสีโดยตรง รังสีอาทิตย์จะส่งผ่านวัสดุโปร่งแสงซึ่งทำหน้าที่ป้องกันการสูญเสียความร้อน อาจออกแบบโดยหลักการพาความร้อนตามธรรมชาติหรือออกแบบโดยใช้การพาความร้อนแบบบังคับซึ่งติดตั้งพัดลมเพื่อช่วยดูดอากาศร้อนให้ไหลผ่านผลิตภัณฑ์เพื่อให้แห้งเร็วขึ้น

2. เครื่องอบแห้งแบบรับรังสีอาทิตย์โดยอ้อม ออกแบบให้มีแผงรับรังสีอาทิตย์เพื่อเพิ่มความเข้มรังสีอาทิตย์ ทำให้อากาศที่อยู่ระหว่างผลิตภัณฑ์และตัวรับรังสีร้อนขึ้นจึงสามารถลดความชื้นออกได้เร็วขึ้น ผลิตภัณฑ์จะไม่ถูกแสงอาทิตย์โดยตรง อาจออกแบบโดยหลักการพาความร้อนตามธรรมชาติหรือออกแบบโดยใช้การพาความร้อนแบบบังคับซึ่งติดตั้งพัดลมเพื่อช่วยดูดอากาศร้อนให้ไหลผ่านผลิตภัณฑ์เพื่อให้แห้งเร็วขึ้น



รูปที่ 2 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบรับรังสีอาทิตย์โดยตรง [13]



รูปที่ 3 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบรับรังสีอาทิตย์อ้อม [14]

2.3 หลักการวัดความชื้นในผลิตภัณฑ์

การวัดความชื้นในผลิตภัณฑ์แสดงได้เป็น 2 รูปแบบคือ

1.ความชื้นมาตรฐานเปียก(Wet basis) คืออัตราส่วนน้ำหนักของน้ำในผลิตภัณฑ์ต่อน้ำหนักผลิตภัณฑ์ขึ้น โดยมีสมการดังนี้

$$M_w = \left[\frac{w-d}{w} \right] \times 100 \quad (1)$$

2.ความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry basis) คืออัตราส่วน น้ำหนักของน้ำในผลิตภัณฑ์ต่อน้ำหนักผลิตภัณฑ์แห้งโดยมีสามการดังนี้

$$M_d = \left[\frac{w-d}{d} \right] \times 100 \quad (2)$$

โดยที่ M_w คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก

M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง

w คือ น้ำหนักเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์

d คือ น้ำหนักผลิตภัณฑ์แห้ง

โดยทั่วไปการอบแห้งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงอัตราการอบแห้ง ซึ่งปริมาณความชื้นภายในวัสดุมีค่าสูงกว่าความชื้นวิกฤตที่ผิวของวัสดุมีน้ำอยู่มาก เมื่อความร้อนจากอากาศถ่ายเทไปยังวัสดุการถ่ายเทความร้อนและมวลจะเกิดขึ้นเฉพาะที่ผิวของวัสดุ ช่วงนี้อุณหภูมิผิวของวัสดุอบแห้งและอัตราการอบแห้งจะมีค่าคงที่ และช่วงอัตราการอบแห้งลดลงซึ่งปริมาณความชื้นภายในวัสดุมีค่าต่ำกว่าความชื้นวิกฤตเมื่อความร้อนจากอากาศถ่ายเทไปยังวัสดุ น้ำจะเคลื่อนที่จากภายในเนื้อวัสดุมาที่ผิวของวัสดุในลักษณะของเหลวหรือไอน้ำและน้ำที่ผิวของวัสดุในลักษณะของเหลวหรือไอน้ำและน้ำที่ผิวจึงจะระเหยไปกับอากาศ

ดังนั้นวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพในการอบแห้งจึงควรเพิ่มช่วงระยะเวลาในการถ่ายเทความร้อนจากอากาศไปยังมวลของวัสดุซึ่งจะทำให้สามารถเกิดการคายน้ำออกมาจากผลิตภัณฑ์ได้มากซึ่งในการตากแห้งโดยการรับพลังงานแสงอาทิตย์โดยตรงไม่สามารถรับพลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีได้เต็มที่เนื่องจากดวงอาทิตย์เคลื่อนที่ในแนววิถีโค้ง การทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ทำการตากแห้งได้รับความร้อนจากการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ในแนวทำมุมตั้งฉากตลอดเวลาจะสามารถทำให้อัตราการระเหยของน้ำได้มากขึ้น

3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

จากรูปที่ 4 แสดงการจัดวางอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองหาสมรรถนะของตู้อบแห้งคล้อยตามแสงอาทิตย์ซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วนอันได้แก่ 1) ตู้อบแห้งคล้อย

ตามแสงอาทิตย์ 2) ชุดเครื่องมือวัดที่ใช้ในการเก็บผลการทดสอบ 3) ชุดแผงโซลาร์เซลล์



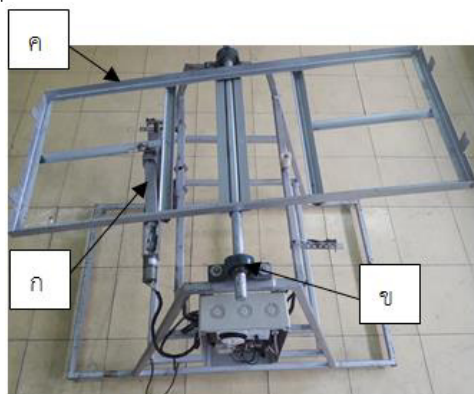
รูปที่ 4 การจัดวางอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองหาสมรรถนะของตู้อบแห้งคล้อยตามแสงอาทิตย์

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1) ตู้อบแห้งคล้อยตามแสงอาทิตย์

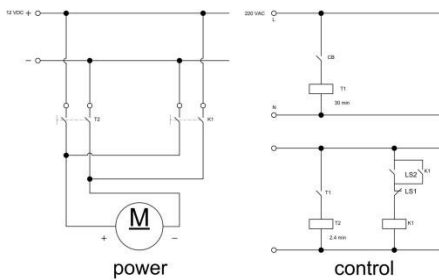
ตู้อบแห้งคล้อยตามแสงอาทิตย์แบบ 1 แนวแกน ทำจากอะลูมิเนียมมีขนาด กว้าง 45 cm ความยาว 108 cm และ ความสูง 38.5cm และมีกระจกใสรับแสงอาทิตย์หนา 4 mm. เอียงทำมุม 45°

จากการศึกษาการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ของค่าความเข้มรังสีอาทิตย์จะอยู่ในช่วงระยะเวลา 9.00 – 17.00 น.จึงออกแบบให้ตู้อบแห้งเอียงทำมุมรับกับดวงอาทิตย์ครั้งละ 7.5° ต่อชั่วโมง โดยใช้เครื่องตั้งเวลาเป็นตัวกำหนดให้ทำงานทุกๆ 15 นาที เวลาเฉลี่ยเพื่อจ่ายไฟให้มอเตอร์ได้เท่ากับ 1.8 นาทีต่อครั้ง ทำการหมุนเฟืองสะพานเพื่อยกตู้ให้เคลื่อนที่ และเมื่อตู้อบเคลื่อนที่ตามแสงอาทิตย์ตลอดทั้งวันจนครบตามที่ตั้งเวลาไว้จะกลับมายังจุดเริ่มต้น เพื่อรอรับแสงอาทิตย์ในวันถัดไป



รูปที่ 5 ชุดฐานวางและกลไกการยกตัวของชุดปรับมุมเอียง

จากรูปที่ 5 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ที่ชุดฐานและกลไกการยกตัวของชุดปรับมุมเอียง ซึ่งประกอบไปด้วยชุดแม่แรงยกและสกรูหมุน (ก) แบร็กรองรับจุดหมุน (ข) และฐานวางตุ้บแห้ง (ค) ซึ่งทั้งหมดถูกควบคุมการทำงานด้วยวงจรไฟฟ้าควบคุมระบบการหมุนที่ติดตั้งอยู่ในชุดตู้ควบคุมด้านใต้ฐานวางตุ้บแห้ง



รูปที่ 6 วงจรไฟฟ้าควบคุมระบบการหมุนของมอเตอร์ขับเคลื่อนปรับความเอียง

จากรูปที่ (6) แสดงวงจรที่ใช้ในการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงสำหรับหมุนชุดกลไกสำหรับปรับมุมเอียง

2) ชุดเครื่องมือวัดที่ใช้ในการเก็บผลการทดลอง

ในการเก็บบันทึกผลการทดลองใช้เครื่องมือวัดค่าตัวแปรต่าง ๆ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ตาชั่งดิจิตอลยี่ห้อ Zepper รุ่น EPS – 302 ค่าความละเอียด 0.01 g ใช้ตาชั่งดิจิตอลในการเก็บผลค่าน้ำหนักของกล้วยน้ำว้าก่อนและหลังจากการอบแห้ง ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ตาชั่งดิจิตอลยี่ห้อZepper รุ่น EPS – 302

2. การวัดอุณหภูมิภายในตุ้บแห้งคล้อยตามแสงอาทิตย์ใช้ ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ Fluke 325 ช่วงการวัด -10.0 °C to 400.0 °C ความละเอียด 0.1 °C ค่าความผิดพลาด 1 % ±8 digits ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ fluke 325

3. เครื่องวัดพลังงานแสงอาทิตย์ Lutron SPM1116 SD solar power meter วัดค่าพลังงานแสงอาทิตย์ช่วงการวัด 0.0 ถึง 2000.0 W/m² ดังรูปที่ 7

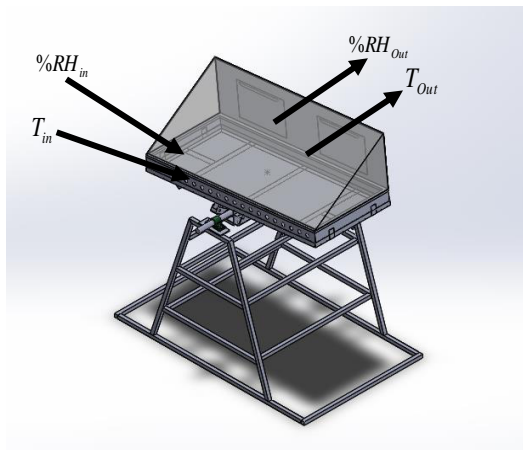


รูปที่ 9 เครื่องวัดพลังงานแสงอาทิตย์ Lutron SPM1116 SD solar power meter

4. เครื่องวัดความเร็วลมแบบใช้หลอดนำความร้อน Digicon DA 47 ย่านการวัดความเร็วลม 0.2 - 20.0 m/s และวัดอุณหภูมิ 0.0 - 50 °C ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 เครื่องวัดความเร็วลมแบบใช้หลอดนำความร้อน Digicon DA 47



รูปที่ 11 บริเวณที่ทำการเก็บผลการทดลองตู้อบแห้ง
คล้อยตามแสงอาทิตย์

3) ชุดแผงโซลาร์เซลล์

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด polycrystalline ขนาด 10 W จำนวน 4 แผง พร้อมชุดควบคุมการชาร์จและแบตเตอรี่

3.2 ตัวแปรที่ทำการศึกษาและเก็บผลการทดลองได้แก่

ตัวแปรต้น ได้แก่ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายนอกตู้ ค่าความเข้มของพลังงานแสงอาทิตย์ในแต่ละวัน ค่าน้ำหนักและความชื้นในผลิตภัณฑ์ก่อนอบแห้ง

ตัวแปรตาม ได้แก่ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในตู้ ค่าน้ำหนักและความชื้นในผลิตภัณฑ์หลังอบแห้ง

ตัวแปรควบคุม ได้แก่ องศาการเอียงของตู้และตำแหน่งการวางตู้ ความเร็วลมระบายความร้อนออกของตู้อบแห้ง

3.3 วิธีการทำการทดลอง

ในการทำการทดลองได้ทำการทดลองโดยใช้กล้วยน้ำว้าเป็นผลิตภัณฑ์ทดสอบและทำการทดสอบใน 2 กรณี ได้แก่การตากผลิตภัณฑ์ในตู้อบแห้งแบบติดตั้งอยู่กับที่ และการตากผลิตภัณฑ์ในตู้อบแห้งแบบคล้อยตามแสงอาทิตย์โดยมีวิธีการทำการทดลอง ดังนี้

1. นำกล้วยที่เตรียมมาปอกเปลือก และชั่งน้ำหนักก่อนเข้าตู้อบแห้ง ซึ่งจะได้น้ำหนักเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ (W) เพื่อแทนค่าในสมการที่ 1 และ 2 ต่อไป

2. นำกล้วยเรียงใส่ตู้อบแห้ง โดยทำการบรรจุทั้งหมดจำนวน 144 ลูกต่อครั้ง

3. วัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ทั้งภายในและภายนอกตู้ในช่วงเวลาต่างๆ ตลอดทั้งวัน ตั้งแต่เวลา 9.00 - 17.00 น. บันทึกค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ทุก 30 นาที

4. ทำการพลิกกลับกล้วยจำนวน 2 ครั้งต่อวันและชั่งน้ำหนักหลังทำการตากในแต่ละวัน

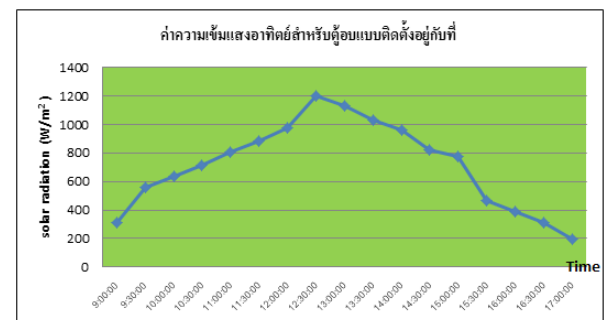
5. การหาค่าน้ำหนักผลิตภัณฑ์แห้งเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าปริมาณความชื้นมาตรฐานเปียกในผลิตภัณฑ์จะใช้เตาอบลมร้อน ดังรูปที่ 12 (Hot Air Oven) ที่สามารถปรับและควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ ในการทดสอบนี้ตั้งค่าอุณหภูมิของเตาอบลมร้อนไว้ที่ $103 \pm 5^\circ\text{C}$ ทำการอบแห้งเป็นเวลา 72 ชั่วโมง จากนั้นจะได้ค่าน้ำหนักผลิตภัณฑ์แห้ง (d) เพื่อแทนค่าในสมการที่ 1 และ 2 ต่อไป



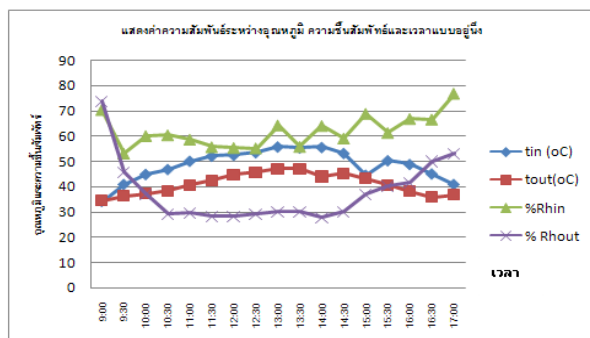
รูปที่ 12 เตาอบลมร้อน (Hot Air Oven)

4. ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 การตากผลิตภัณฑ์ในตู้อบแห้งแบบติดตั้งอยู่กับที่ ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 13 ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ที่ทำการตรวจวัดสำหรับการทดลองตู้อบแห้งแบบติดตั้งอยู่กับที่



รูปที่ 14 การทดลองตูอบแห้งแบบติดตั้งอยู่กับที่ช่วงเวลา 9.00 – 17.00 น.



รูปที่ 15 การทดลองตูอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบติดตั้งอยู่กับที่

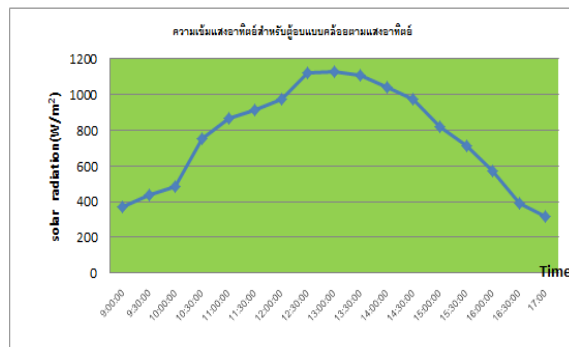
ช่วงเดือนที่ใช้ในการเก็บผลการทดลองเป็นช่วงเดือน ตุลาคม – กุมภาพันธ์ ซึ่งเป็นช่วงฤดูหนาวระยะเวลาของแสงแดดตามธรรมชาติจะมีช่วงเวลาให้แสงแดดน้อยกว่าฤดูร้อน และในแต่ละวันการทดสอบจะใช้ผลการทดลองต่อรอบที่มีช่วงระยะเวลาที่ห้องฟ้าแจ่มใสนำมาเปรียบเทียบกับ

จากรูปที่ 14 แสดงผลการทดลองตูอบแห้งแบบติดตั้งอยู่กับที่ สภาพท้องฟ้าแจ่มใสในวันที่ทดสอบ ทดสอบ 8 ชั่วโมงต่อวัน ช่วงเวลาดังตั้งเวลา 09.00 - 17.00 น.

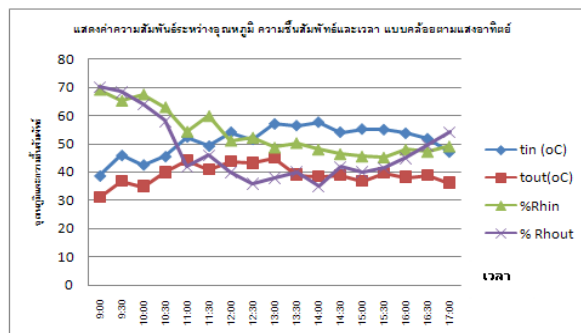
อุณหภูมิเริ่มต้นของอากาศภายนอกตูอบแห้งมีค่าเท่ากับ 34°C ค่าอุณหภูมิภายในตูอบแห้งมีค่าเริ่มต้นที่ 34.4°C เมื่อเวลาผ่านไปค่าอุณหภูมิภายนอกเพิ่มขึ้นถึงจุดสูงสุดที่ 42°C ที่เวลา 13.00 น. และอุณหภูมิภายในตูอบแห้งสูงสุดที่ 55.8°C อุณหภูมิภายนอกตูอบแห้งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 40.96°C อุณหภูมิภายในตูอบแห้งเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 48.47°C และค่าความเข้มของพลังงานแสงอาทิตย์มีค่าสูงสุดเท่ากับ 1200 W/m^2 และมีค่าความเข้มของพลังงานแสงอาทิตย์ตลอดทั้งวันเฉลี่ย 715.17 W/m^2 รายละเอียดดังรูปที่ 10 สำหรับความชื้นสัมพัทธ์ภายในตูอบแห้งมีค่าสูงสุดที่ 68.8% มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 61.83% และความชื้นสัมพัทธ์ภายนอกตู้เฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 37.56% โดยค่าอุณหภูมิภายในตู้มีปริมาณ

เพิ่มขึ้นตามค่าความเข้มของแสงอาทิตย์ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของธีระศักดิ์ หุดากร [3] กล่าวคืออุณหภูมิของตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีค่าสูงสุดเนื่องจากความเข้มรังสีอาทิตย์ในช่วงที่มีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์สูงสุดและเมื่อความเข้มของรังสีลดลงอุณหภูมิก็จะลดลงตาม

4.2 การผลิตถัสดำในตูอบแบบเคลื่อนที่ตามแสงอาทิตย์ ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 16 ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ที่ทำการตรวจวัดสำหรับการทดลองตูอบแห้งแบบเคลื่อนที่ตามแสงอาทิตย์



รูปที่ 17 ตัวอย่างการทดลองตูอบแห้งแบบเคลื่อนที่ตามแสงอาทิตย์ ช่วงเวลา 9.00 – 17.00 น.



รูปที่ 18 ถัสน้ำว่าที่ผ่านการอบแห้งด้วยตูอบแบบเคลื่อนที่ตามแสงอาทิตย์

จากรูปที่ 17 แสดงผลการทดลองดูอับแห้งแบบ คล้อยตามแสงอาทิตย์ สภาพท้องฟ้าแจ่มใสในวันที่ ทดสอบ ทดสอบ 8 ชั่วโมงต่อวัน ช่วงเวลาตั้งแต่เวลา 09.00 - 17.00 น. อุณหภูมิเริ่มต้นของอากาศภายนอก ดูอับแห้งมีค่าเท่ากับ 31°C ค่าอุณหภูมิภายในดูอับแห้งมี ค่าเริ่มต้นที่ 38.7°C เมื่อเวลาผ่านไปค่าอุณหภูมิภายนอก เพิ่มขึ้นถึงจุดสูงสุดที่ 43.9°C ที่เวลา 13.00 น. และ อุณหภูมิภายในดูอับแห้งสูงสุดที่ 57°C อุณหภูมิภายนอก ดูอับแห้งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 39.15°C อุณหภูมิภายในดูอับ แห้งเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 52°C และค่าความเข้มของพลังงาน แสงอาทิตย์มีค่าสูงสุดเท่ากับ 1130 W/m^2 และมีค่าความ เข้มของพลังงานแสงอาทิตย์ตลอดทั้งวันเฉลี่ย 764.47 W/m^2 รายละเอียดดังรูปที่ 13 สำหรับความชื้นสัมพัทธ์ ภายในดูอับแห้งมีค่าสูงสุดที่ 67.4% มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 53.5% และความชื้นสัมพัทธ์ภายนอกดูอับแห้งมีค่าเท่ากับ 47.6% โดยค่าอุณหภูมิภายในดูอับแห้งมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่า ความเข้มของแสงอาทิตย์ แต่สามารถรักษาอุณหภูมิ ภายในดูอับแห้งได้คงที่และสามารถสะสมความร้อนภายในได้ มากกว่าการตากแบบอยู่กลางแจ้งซึ่งแนวโน้มของผลการทดลอง เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการติดตั้งระบบติดตามดวงอาทิตย์จะ สามารถรับค่าพลังงานแสงอาทิตย์ได้มากกว่าแบบมุมรับ แสงคงที่

5. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาสมรรถนะของดูอับแห้งแบบปรับมุม เียงคล้อยตามแสงอาทิตย์ โดยใช้กล้วยน้ำว่าในการ อบแห้งพบว่าในช่วงเวลาทำการทดลอง 9.00 – 17.00 น. ในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส ช่วงเดือนที่ทำการทดสอบ ตุลาคม – กุมภาพันธ์ จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิภายในดูอับมี อุณหภูมิค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 52°C น้ำหนักเริ่มต้นจากผลิตภัณฑ์ ตัวอย่างเฉลี่ยที่ 43.15 g น้ำหนักสุดท้ายเฉลี่ย 21.2 g ความชื้นมาตรฐานเปียกในผลิตภัณฑ์ลดลงเหลือ 24.8% ในขณะที่ดูอับแห้งแบบติดตั้งอยู่กับที่มีค่าอุณหภูมิเฉลี่ย 48.47°C น้ำหนักเริ่มต้นจากผลิตภัณฑ์ตัวอย่างเฉลี่ยที่ 46.93 g น้ำหนักสุดท้ายเฉลี่ย 23.41 g ความชื้น มาตรฐานเปียกในผลิตภัณฑ์มีค่าเท่ากับ 79.18% ความชื้นมาตรฐานเปียกสุดท้ายในผลิตภัณฑ์ลดลงเหลือ 29.3% และเมื่อพิจารณาจากระยะเวลาในการอบแห้ง ผลิตภัณฑ์พบว่าการใช้ดูอับแห้งแบบคล้อยตาม แสงอาทิตย์ใช้เวลารวมทั้งหมด 20.5 ชั่วโมงสามารถร่น ระยะเวลาในการผลิตได้ 3.5 ชั่วโมง ซึ่งการตากแห้งโดย ดูอับแห้งแบบติดตั้งอยู่กับที่ใช้เวลารวม 24 ชั่วโมง

ดูอับแห้งแบบปรับมุมเียงคล้อยตามแสงอาทิตย์นี้ เป็นการนำดูอับแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบวางอยู่กับ ที่มาทำการติดตั้งชุดปรับมุมเียงให้รับพลังงาน แสงอาทิตย์โดยกลไกการปรับมุมเียงแบบแกนเดียวและ ใช้วัสดุที่สามารถจัดหาได้ภายในประเทศที่มีราคา ค่าใช้จ่ายในการสร้างต่ำโดยมีราคาค่าวัสดุและอุปกรณ์ที่ ใช้ในการสร้างไม่เกิน 5,000 บาท ซึ่งเหมาะสำหรับใช้ในการ แปรรูปผลผลิตทางการเกษตรในครัวเรือนหรือการ แปรรูปผลิตภัณฑ์สำหรับชุมชน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการ อบแห้งด้วยดูอับแห้งแบบปรับมุมเียงคล้อยตาม แสงอาทิตย์นี้มีคุณภาพและความสะอาดถูกสุขลักษณะ

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซียที่ให้การ สนับสนุนงานวิจัยซึ่งทำให้นักวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ขอขอบคุณนายศุภกร ธัญจงจรัสและนายสมชาย หากะวี ในการช่วยเก็บรวบรวมข้อมูลในการวิจัยนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] เสริม จันทรฉาย และยุทธศักดิ์ บุญรอด, “การ พัฒนาเครื่องอบแห้งผลไม้ด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ สำหรับประเทศไทย,” *การประชุมวิชาการเครือข่าย พลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 1*, ชลบุรี, 11-18/05/2548, 2548, 147-150.
- [2] ประพันธ์พงษ์ สมศิลา และอำไพศักดิ์ ทีบุญมา. “อิทธิพลของอัตราส่วนสมมูลต่อประสิทธิภาพการ ไหลเวียนอากาศภายในเครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์”. *วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ. ปีที่ 6 ฉบับที่ 2*: 46 – 55, 2556.
- [3] อีระศักดิ์ หุตากร, “การศึกษาสมรรถนะของตัวเก็บ รังสีอาทิตย์แผ่นราบร่องรูปตัววีสำหรับเครื่อง อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์,” *การประชุมวิชาการ เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23*, เชียงใหม่, 4-7/11/2552, 2552.
- [4] มณฑนา รังสิโยภาส และนันทิธินันท์ พงษ์พานิช, “การศึกษาการอบแห้งแบบผสมผสานพลังงาน แสงอาทิตย์แบบแอ็คทีฟสำหรับกล้วยสไลซ์,” *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล แห่งประเทศไทยครั้งที่ 27*, 16-18/10/2556, ชลบุรี, 2556.

- [5] สำรวย ภูบาล และวลัยรัตน์ จันทรวงศ์. “การออกแบบแผงปลาหมึกกะต๋อยโดยใช้แสงอาทิตย์เป็นพลังงานความร้อนร่วม”. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม. ปีที่ 11 ฉบับที่ 1: 78 – 87.,2558.
- [6] จารุวัฒน์ เจริญจิต. “เทคโนโลยีการอบแห้งด้วยรังสีอาทิตย์ และแนวทางพัฒนา”. วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยขอนแก่น. ปีที่ 10 ฉบับที่ 1: 110 – 124. 2555.
- [7] ศศิวิมล ทรงไตร และคณะ. “การประเมินสมรรถนะและความคุ้มค่าในการลงทุนติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบมีระบบติดตามดวงอาทิตย์และแบบมุมรับแสงคงที่ในประเทศไทย”. วิศวกรรมลาดกระบัง. ปีที่ 33 ฉบับที่ 1: 48 – 53. 2559.
- [8] สมภาพ ผดุงพันธ์. “เครื่องขับเคลื่อนแผงโซลาร์เซลล์ตามแสงอาทิตย์อัตโนมัติ”. วารสารมหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์. ปีที่ 7 ฉบับที่ 1: 81- 91. 2558.
- [9] ศุภชัย กวินวุฒิกุล. “การประยุกต์ใช้ระบบควบคุมแผงโซลาร์เซลล์ให้เคลื่อนที่ตามดวงอาทิตย์,” คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม. มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรบุรี. ปทุมธานี, รายงานโครงการวิจัย, 2551.
- [10] ทวีวัช วีระแก้ว, “การเปรียบเทียบแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบเคลื่อนที่แบบ 2 แกนโดยใช้หลักการความโน้มถ่วงที่สุกกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอยู่กับที่,”การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23, เชียงใหม่, 4-7/11/2552, 2552.
- [11] กรธรรม สติรกุล และ อภิญา บัญประกอบ. “การพัฒนาระบบติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ต้นทุนต่ำเพื่อการประยุกต์ใช้ในงานพลังงานทดแทน”. วารสารผลงานวิชาการ กรมวิทยาศาสตร์บริการ. ปีที่ 11 ฉบับที่ 2: 90 – 99. 2556.
- [12] วรณัฐ แจ่มสว่าง. พลังงานหมุนเวียน. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, (2553)
- [13] Sharma A, Vu Lan N. Solar energy drying systems: A Reviews Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2009; 13: 1185 - 210.
- [14] Goyal RK, Tiwari GN. Parametric study of a reverse flat plate absorber cabinet dryer: a new concept. Solar Energy. 1997; 60: 41– 8.

การผสานรวมเทคนิค QFD และ FBS ในระเบียบวิธีการออกแบบสำหรับผลิตภัณฑ์

เชิงวิศวกรรม กรณีศึกษา: อุปกรณ์จับยึดกระสอบพลาสติกสาน

Combining QFD and FBS in a Design Methodology of Engineered Products: A Case Study of Woven Bag Clamping Devices

ณัฐวุฒิ จันทรง^{1*} ศิวยาญ เฉลิมภาค¹

ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

Nattawut Janthong^{1*} Siwayu Chaloeiphak¹

Department of Production Engineering King Mongkut's University of Technology North Bangkok

1518 Pracharat 1 Road, Wongsawang, Bangsue, Bangkok 10800

*Corresponding author: Email: nattawut.j@eng.kmutnb.ac.th

(Received: October 19, 2018; Accepted: January 20, 2019)

บทคัดย่อ

การแก้ไขปรับปรุงแบบเป็นกิจกรรมที่มีความจำเป็นในกระบวนการออกแบบเชิงวิศวกรรมเพื่อให้ได้แบบผลิตภัณฑ์ที่เป็นที่ยอมรับ แต่อย่างไรก็ตาม กิจกรรมดังกล่าวก็ทำให้เกิดการสูญเสียทรัพยากร เพื่อลดความเสี่ยงต่อการเกิดข้อผิดพลาด งานวิจัยนี้จึงได้ประยุกต์เทคนิคการกระจายหน้าที่เชิงคุณภาพ (Quality Function Deployment : QFD) และ การออกแบบชิ้นส่วนตามฟังก์ชัน (Function - Behaviour - Structure : FBS) เพื่อพัฒนาขั้นตอนการออกแบบที่สามารถนำไปสู่การกำหนดปัญหาและข้อจำกัดของการออกแบบได้อย่างชัดเจนตั้งแต่ช่วงเริ่มต้นกระบวนการออกแบบ ผลจากการประยุกต์ใช้กับกรณีศึกษา การออกแบบอุปกรณ์จับยึดกระสอบพลาสติกสาน การแก้ไขปรับปรุงแบบผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นเพียง 1 ครั้ง หลังจากการทดสอบการใช้งานผลิตภัณฑ์ต้นแบบ และผลการนำอุปกรณ์ไปใช้เคลื่อนย้ายบรรจุภัณฑ์น้ำหนัก 50 กิโลกรัม ภายในคลังสินค้าพบว่าการปฏิบัติงานสามารถดำเนินการได้โดยใช้พนักงานเพียง 1 คน โดยไม่ต้องใช้แรงจากร่างกาย จากผลดังกล่าวทำให้สามารถลดได้ทั้งจำนวนแรงงานและอาการบาดเจ็บของพนักงาน

คำสำคัญ: การออกแบบเชิงวิศวกรรม การกระจายหน้าที่เชิงคุณภาพ การออกแบบชิ้นส่วนตามฟังก์ชัน

ABSTRACT

A redesign is a crucial activity in engineering design process in order to achieve good product designs. However, this leads to resource consume. In order to reducing risk in design process, this paper presents the application of Quality function deployment (QFD) and Function-Behaviour-Structure (FBS) techniques to develop a design methodology that can leading to clearly define design problems and constraints at the beginning of design process. An implementation to the case study showed that a design revision occurs only 1 time after the prototype test. The result of using the device to move the 50 kg weight package in the warehouse found that the operation can be carried out using only 1

employee without having to use force from the body. As a result, it can reduce both the number of workers and injuries of employees.

Keyword: Engineering Design, Quality function deployment, Functional-Behavior-Structure.

1. บทนำ

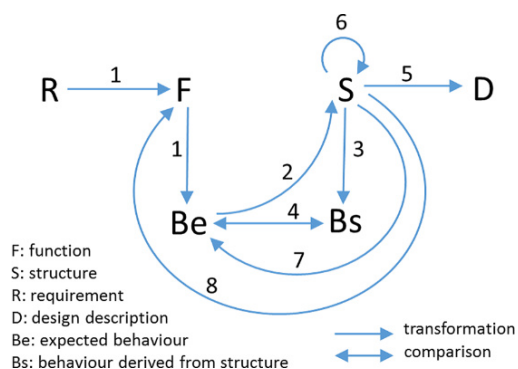
การออกแบบเป็นกิจกรรมหนึ่งที่มีความสำคัญต่อภาคอุตสาหกรรม ไม่ว่าจะเป็นการออกแบบผลิตภัณฑ์ การออกแบบกระบวนการผลิตและอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่ออำนวยความสะดวกต่อการปฏิบัติงาน เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตาม การออกแบบจำเป็นต้องอาศัยทั้งความคิดสร้างสรรค์และสายตาญาณควบคู่กันเพื่อค้นหาแนวทางที่เหมาะสมที่จะจัดการปัญหาได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งต้องอาศัยทั้งการส่งส่งองค์ความรู้และประสบการณ์จากการทำงานมาอย่างยาวนาน เนื่องจากการออกแบบเป็นงานที่ต้องใช้ทักษะและต้องผ่านการฝึกฝนทำซ้ำจนเกิดความชำนาญ ซึ่งเป็นคุณลักษณะสำคัญของการเป็นนักออกแบบอาชีพที่สามารถผลิตผลงานที่ดีที่สุด ด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นต้องพัฒนาแนวทางและระเบียบปฏิบัติที่ชัดเจน ปฏิบัติตามได้ง่ายเพื่อลดความเสี่ยงที่จะเกิดข้อผิดพลาดในระหว่างกระบวนการออกแบบ ซึ่งเป็นสาเหตุให้ต้องมีการแก้ไขซ้ำไปมาเป็นวัฏจักรทำให้เกิดความล่าช้าในการสร้างสรรค์ผลงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการออกแบบสิ่งประดิษฐ์เชิงวิศวกรรมที่มีความซับซ้อนซึ่งมีโอกาที่จะเกิดข้อผิดพลาดได้ง่าย โมเดลกระบวนการออกแบบจึงถูกพัฒนาขึ้นโดย [1], [2] จนในที่สุดได้มีการรวบรวมและประมวลเป็นมาตรฐานโดยสมาคมวิศวกรแห่งสหรัฐอเมริกา เรียกว่า มาตรฐานวิธีการออกแบบเชิงระบบของผลิตภัณฑ์และระบบทางวิศวกรรม [3] ซึ่งมีรูปแบบเป็นแผนภูมิการไหล (Flow chart) เพื่ออธิบายลำดับกิจกรรมการออกแบบ นอกจากนั้นยังมีการพัฒนาโมเดลอีกลักษณะหนึ่งที่มีแก่นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างข้อกำหนดและแนวคิดการออกแบบด้วยเมตริกซ์ [4], [5] ซึ่งได้รับการยอมรับและได้มีการประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรม แต่อย่างไรก็ตาม

ในแต่ละวิธีการถึงแม้จะมีแนวทางที่ชัดเจนแต่ก็ยังคงมีข้อจำกัดในด้านการสร้างแนวคิดในการออกแบบระดับขั้นส่วนย่อย เนื่องจากยังขาดแนวทางในการพิจารณาข้อจำกัดภายนอกจากความต้องการของลูกค้ารวมถึงข้อจำกัดภายในที่เกิดจากการส่งผ่านระหว่างกันในการออกแบบระดับขั้นส่วน [6] จึงเป็นเหตุผลให้ต้องมีการศึกษาเทคนิคต่าง ๆ เพื่อผสมผสานเข้าไปในแนวทางปฏิบัติด้านการออกแบบเพื่อให้เกิดการพิจารณาข้อจำกัดต่าง ๆ อย่างเป็นระบบในกระบวนการออกแบบ

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิธีการที่มีการประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในการแปลง “ความต้องการของลูกค้า” เป็น “คุณลักษณะทางวิศวกรรม” คือ วิธีการกระจายหน้าที่เชิงคุณภาพ (Quality function deployment : QFD) พัฒนาขึ้นโดย Akao [5] เพื่อให้ผลงานจากการดำเนินกิจกรรมการออกแบบตรงตามความต้องการหรือความคาดหวังของลูกค้า ทำให้สินค้าที่พัฒนาขึ้นประสบความสำเร็จในทางการตลาด ซึ่งคุณลักษณะทางวิศวกรรมที่กำหนดขึ้นจะถูกแปลงต่อไปเป็นฟังก์ชันต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์ที่จำเป็น และรายละเอียดของขั้นส่วนที่ต้องออกแบบ [7], [8], [9] โดยแสดงอยู่ในรูปแบบที่เรียกว่า “บ้านคุณภาพ (House of Quality : HOQ)” ซึ่งพบว่าวิธีการดังกล่าวนี้ยังขาดแนวทางการพิจารณาข้อจำกัดในการออกแบบที่เป็นรูปธรรม กล่าวคือ ไม่ได้มีการระบุหรือบ่งชี้ข้อจำกัดที่สัมพันธ์กับการทำงานของแต่ละฟังก์ชันอย่างชัดเจน ซึ่งอาจส่งผลให้การออกแบบขั้นส่วนไม่อยู่ภายใต้ขอบเขตข้อจำกัดการทำงานและสาเหตุให้ต้องทำการออกแบบหลาย ๆ ครั้ง เพื่อดำเนินการแก้ไขสำหรับนักออกแบบที่ขาดประสบการณ์ [10] จากการค้นพบในประเด็นดังกล่าว จึงได้ดำเนินการผสมผสานทฤษฎี

การวิเคราะห์ Function - Behaviour - Structure หรือเรียกโดยย่อว่า FBS พัฒนาโดย Gero [11] ซึ่งสามารถรองรับต่อการกำหนดข้อจำกัดการออกแบบในระดับชิ้นส่วน โดยรูปที่ 1 แสดงกระบวนการของโมเดล FBS เริ่มต้นด้วยการกำหนดฟังก์ชันการทำงานของชิ้นส่วน (Function) และกำหนดสมรรถนะเป้าหมาย (Expected Behaviour : Be) ของฟังก์ชันนั้น เปรียบได้กับการกำหนดคุณลักษณะทางวิศวกรรม ในขั้นตอนนี้อาจสามารถกำหนดข้อจำกัดการใช้งาน (Constraints : Cs) ควบคู่ไปกับสมรรถนะเป้าหมายเพื่อลดขอบเขตโครงสร้าง (Structure : S) หรือดีไซด์ทางเลือกที่เป็นไปได้ในการออกแบบ และเมื่อดีไซด์ทางเลือกถูกสร้างขึ้นจะมีการประเมินค่าสมรรถนะจริงของแต่ละดีไซด์ทางเลือก (Structure Behaviour : Bs) เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าสมรรถนะเป้าหมายที่กำหนด กระบวนการดังกล่าวนี้จะมีการวนซ้ำเป็นวัฏจักรจนกระทั่งได้ดีไซด์ชิ้นส่วนที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์และข้อจำกัดในการออกแบบ



รูปที่ 1 กรอบการทำงานภายใต้โมเดล FBS [12]

นอกจากนั้น Gero [13] ยังได้เสริมอีกว่าโมเดล FBS ที่พัฒนาขึ้นนี้จะทำให้นักออกแบบสามารถเข้าใจรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างฟังก์ชันการทำงานและชิ้นส่วนประกอบต่าง ๆ ที่ทำการออกแบบได้ดียิ่งขึ้นอีกด้วย

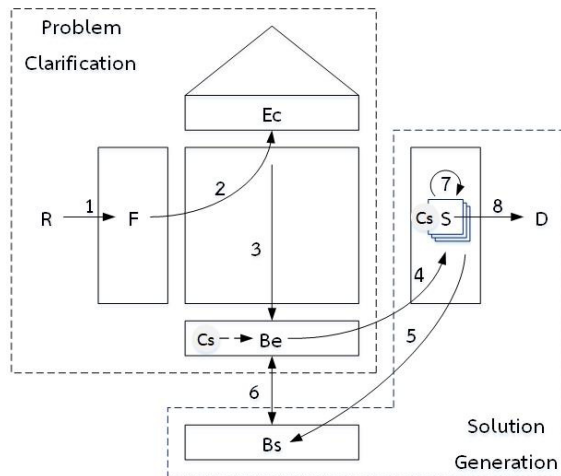
ดังนั้น เพื่อรองรับต่อการนำข้อจำกัดทั้งจากภายในและภายนอกเข้าสู่การพิจารณาในกระบวนการออกแบบ เทคนิค QFD และ FBS จึงถูกผสมผสานเข้าด้วยกันใน

การพัฒนาแนวทางให้นักออกแบบสามารถดำเนินกิจกรรมการออกแบบโดยไม่มองข้ามหรือละเลยการพิจารณาข้อจำกัดในระดับต่าง ๆ เพื่อลดความเสี่ยงต่อการเกิดข้อผิดพลาดและการสูญเสียทรัพยากรในกระบวนการสร้างสรรค์ผลงาน

3. เปรียบเทียบวิธีการออกแบบ

การดำเนินกิจกรรมการออกแบบก็เปรียบเสมือนกับกระบวนการแก้ไขปัญา ซึ่งมีองค์ประกอบ 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนของการทำความเข้าใจต่อปัญหาเพื่อให้วัตถุประสงค์ของการออกแบบต่าง ๆ มีความกระจ่างชัด (Problem clarification) และส่วนของการค้นหาแนวทางการออกแบบที่สามารถเป็นคำตอบให้กับโจทย์ปัญหาที่ได้รับนั้นได้ (Solution Generation) ซึ่งทั้ง 2 ส่วนดังกล่าวสามารถที่จะดำเนินการพัฒนาในแบบคู่ขนานกัน กล่าวคือ เมื่อนักออกแบบค้นพบแนวทางการออกแบบเบื้องต้นแล้ว จากนั้นก็ดำเนินการประเมินเทียบกับเกณฑ์กำหนดต่าง ๆ เพื่อตรวจสอบว่าแนวทางดังกล่าวอยู่ภายใต้เงื่อนไขกำหนดครบถ้วนหรือไม่ ในแต่ละครั้งของการทำตามกระบวนการนี้นักออกแบบจะพบช่องว่าง (Gap) หรือบางส่วนที่ยังไม่สอดคล้องกับข้อกำหนด นักออกแบบก็จะเริ่มออกแบบเพิ่มเติมไปเรื่อย ๆ จนในที่สุดก็จะได้ “แบบสุดท้าย” ที่สามารถตอบโจทย์ปัญหาได้ทั้งหมด ภายใต้กระบวนการดังกล่าวนี้สามารถทำให้มั่นใจได้ว่าการพัฒนาแนวคิดการออกแบบจะไม่ออกนอกกรอบของปัญหา

จากแนวคิดดังกล่าว เทคนิค QFD จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ในส่วนของการทำความเข้าใจปัญหา และเชื่อมโยงเข้ากับเทคนิค FBS ในส่วนของการพัฒนาแบบทางเลือกเพื่อตอบโจทย์ปัญหา ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 โมเดลการประยุกต์เทคนิค QFD และ FBS สำหรับกระบวนการออกแบบเชิงวิศวกรรม

ซึ่งแนวทางในการดำเนินกิจกรรมการออกแบบภายใต้กรอบแนวคิดดังกล่าว สามารถแบ่งออกเป็น 8 ขั้นตอน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 การแปลงความต้องการของลูกค้าเป็นหน้าที่และคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์หรือสิ่งที่ต้องการออกแบบ

การแปลงความต้องการของลูกค้า (ผู้บริโภค ผู้บริหาร ผู้ใช้ และผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย) เป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญมากที่สุดในกระบวนการออกแบบ เนื่องจากนักออกแบบมักได้รับข้อมูล “ความต้องการ (Need)” ที่ยังไม่ชัดเจนมากนักเมื่อรับโจทย์ครั้งแรก ดังนั้นสิ่งแรกที่ต้องดำเนินการคือการพยายามทำความเข้าใจว่าอะไรคือสิ่งที่ลูกค้าต้องการ และแปลงข้อมูลเหล่านั้นไปเป็นข้อกำหนดในการออกแบบ โดยแบ่งออกเป็น “หน้าที่และข้อจำกัดการใช้งานของผลิตภัณฑ์ (Product’s function and constraints)” และ “คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ (Product’s attribute)” ซึ่งเปรียบเสมือนเป็นการกำหนดวัตถุประสงค์และเป้าหมายของการออกแบบเพื่อให้ทุก ๆ ขั้นตอนของการออกแบบมีขอบเขตการดำเนินงานที่ชัดเจน

3.2 การกำหนดคุณลักษณะทางวิศวกรรม

การกำหนดคุณลักษณะทางวิศวกรรม (Engineering Characteristics) เป็นขั้นตอนที่นักออกแบบต้องพยายาม

คิดไตร่ตรองเพื่อค้นหาว่ามี พารามิเตอร์อะไรบ้างที่จะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ออกแบบมีคุณสมบัติและสามารถทำงานได้ตามหน้าที่ที่กำหนด และที่สำคัญอย่างยิ่ง คือ พารามิเตอร์ต่าง ๆ เหล่านั้นต้องสามารถวัดได้

3.3 การกำหนดค่าเป้าหมายคุณลักษณะทางวิศวกรรม

ในทุก ๆ พารามิเตอร์ของคุณลักษณะทางวิศวกรรม นักออกแบบต้องทำการศึกษาลักษณะที่คู่แข่ง หรือ ลักษณะการใช้งานผลิตภัณฑ์ที่กำหนด รวมถึงค่าความปลอดภัยในการใช้งาน (Safety factor) ต่าง ๆ เพื่อกำหนดเป็นค่าเป้าหมาย (Target) หรือ พฤติกรรมที่คาดหวัง (Expected behavior) ของการใช้งานผลิตภัณฑ์ถึงขั้นตอนนี้จะทำให้นักออกแบบเข้าใจถึง “วัตถุประสงค์ และ เป้าหมาย” ของการออกแบบได้อย่างชัดเจน

3.4 การสร้างสรรค์แบบทางเลือก

การสร้างแบบทางเลือกต่าง ๆ เปรียบเสมือนกับการต่อภาพจิ๊กซอร์ กล่าวคือ เป็นการสำรวจหรือค้นหาและเลือกแบบหรือหลักการทำงาน (Design principles) ที่สามารถทำให้เกิดกลไกการทำงานตามหน้าที่ที่กำหนดของแต่ละหน้าที่การทำงานย่อย (ฟังก์ชันย่อย) ของผลิตภัณฑ์ และเมื่อนักออกแบบทำการเลือกผสมผสานหลักการทำงานของแต่ละฟังก์ชันย่อยเหล่านั้น แบบผลิตภัณฑ์ทางเลือกต่าง ๆ ที่เป็นไปได้จะถูกพัฒนาขึ้นโดยขั้นตอนนี้จะอาศัยวิธีการสร้างแผนภูมิเมอร์โฟโรจิคอล (Morphological chart) เพื่อแสดงภาพความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันย่อยและหลักการทำงานต่าง ๆ ที่สามารถทำให้เกิดกลไกการทำงานของฟังก์ชันนั้น ๆ รวมถึงแบบผลิตภัณฑ์ทางเลือกต่าง ๆ ที่ได้จากการผสมผสานหลักการทำงานของฟังก์ชันต่าง ๆ ที่ละส่วน

3.5 การประเมินสมรรถนะแบบทางเลือก

แบบทางเลือกที่ถูกพัฒนาขึ้นจะถูกนำมาประเมินสมรรถนะคุณลักษณะทางวิศวกรรม ตามพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่กำหนด เพื่อให้ทราบค่าสมรรถนะจริง (Structure behavior) ซึ่งการประเมินในขั้นตอนนี้

สามารถทำได้โดยการคำนวณ หรือการใช้ซอฟต์แวร์ทางวิศวกรรม

3.6 การเปรียบเทียบสมรรถนะจริงกับสมรรถนะเป้าหมาย

ค่าสมรรถนะจริงของแต่ละแบบทางเลือกที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าพฤติกรรมที่คาดหวังหรือค่าเป้าหมายที่กำหนดขึ้นของแต่ละพารามิเตอร์ในคุณลักษณะทางวิศวกรรม แบบทางเลือกใดที่มีค่าสมรรถนะจริงต่ำกว่าค่าเป้าหมาย แบบทางเลือกเหล่านั้นจะถูกตัดออกจากระบบ เนื่องจากมีสมรรถนะทางเทคนิคที่ไม่สอดคล้องกับข้อกำหนดหรือความต้องการของลูกค้า ซึ่งถูกแปลงเป็นคุณลักษณะทางวิศวกรรม

3.7 การประเมินคัดเลือกแบบที่มีความเหมาะสมที่สุดระหว่างแบบทางเลือก

แบบทางเลือกทั้งหมดที่ผ่านกระบวนการคัดกรองด้วยข้อกำหนดคุณลักษณะทางวิศวกรรม จะถูกนำมาเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างกัน เพื่อตัดสินใจเลือกแบบทางเลือกที่ดีที่สุดจากทางเลือกทั้งหมดที่มี โดยใช้ “พุ่มเมตริกซ์ (Pugh matrix)” การประเมินจะเริ่มต้นด้วยการกำหนดทางเลือกใดทางเลือกหนึ่งขึ้นมาเป็น “ทางเลือกอ้างอิง (Datum)” เพื่อเปรียบเทียบกับทางเลือกอื่น ๆ ตามเกณฑ์การประเมินต่าง ๆ จากนั้นทำการเปรียบเทียบแบบทางเลือกกับแบบอ้างอิงตามลำดับเกณฑ์การประเมิน โดยพิจารณาว่าคุณสมบัติของทางเลือกนั้น “ดีกว่า (+1)” หรือ “แย่กว่า (-1)” หรือ “เทียบเท่ากับ (0)” แบบอ้างอิง และแบบทางเลือกใดที่มีคะแนนสูงสุดจะถูกพิจารณาว่าเป็นทางเลือกที่มีความเหมาะสมที่สุด

3.8 การจัดทำแบบรายละเอียด

แบบที่ได้รับการคัดเลือก จะถูกนำมาจัดทำเป็นแบบรายละเอียด เพื่อนำไปสู่การพัฒนาต้นแบบ โดยแบบรายละเอียดจะมีการกำหนดรูปร่าง ขนาด วัสดุที่ใช้ อย่างชัดเจน เพื่อส่งต่อให้กับทีมพัฒนาต้นแบบหรือส่วนงานผลิต เป็นผู้ดำเนินการสร้างต้นแบบต่อไป

4. กรณีศึกษา : การออกแบบอุปกรณ์จับยึดกระสอบพลาสติกสาน

การขนย้ายผลิตภัณฑ์ที่บรรจุในกระสอบพลาสติกสาน เช่น น้ำตาล เกลือ ปุ๋ย อาหารสัตว์ เป็นต้น โดยมีน้ำหนักบรรจุสูงสุด 50 กิโลกรัม ยังคงพบเห็นการใช้แรงงานคนอย่างน้อย 2-3 คน สำหรับการขนย้ายขึ้นและลงจากรถบรรทุก โดยเฉพาะอย่างยิ่งผู้ประกอบการขนาดเล็ก และขนาดเล็ก รวมถึงผู้จำหน่ายค้าปลีกในผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ดังกล่าว ดังแสดงในรูปที่ 3 และแน่นอนพนักงานมักเกิดอาการบาดเจ็บจากการปฏิบัติงานดังกล่าวซ้ำ ๆ ต่อเนื่องเป็นเวลานานอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้



รูปที่ 3 วิธีการลำเลียงกระสอบพลาสติกสาน

ถึงแม้ว่าปัจจุบันจะมีเครื่องทุ่นแรงหลากหลายประเภทที่มีการใช้อยู่โดยทั่วไปไม่ว่าจะเป็น รอก เคลน รถฟอร์คลิฟท์ เป็นต้น แต่พบว่าอุปกรณ์เหล่านั้นไม่สามารถยกย้ายผลิตภัณฑ์ที่บรรจุในกระสอบพลาสติกสานเป็นรายกระสอบโดยไม่ต้องอาศัยแรงงานในการยกขึ้นวางหรือแขวนไว้บนอุปกรณ์ต่าง ๆ เหล่านั้นได้ ซึ่งแตกต่างจากบรรจุภัณฑ์ที่เป็นกระสอบป่านที่สามารถใช้ตะขอเกี่ยวเพื่อพลิกกลับด้านหรือหิ้วได้ แต่สำหรับกระสอบพลาสติกสานแล้วการใช้วิธีการดังกล่าวจะทำให้ทั้งบรรจุภัณฑ์ และตัวสินค้าได้รับความเสียหายอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

ดังนั้นการออกแบบอุปกรณ์จับยึดกระสอบที่สามารถใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ต้นกำลังประเภทต่าง ๆ ในการยกย้ายดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นจึงเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อลดการใช้งานแรงงานคน ลดอาการบาดเจ็บ และเพิ่มรูปแบบการใช้งานอุปกรณ์ทุ่นแรงต่าง ๆ ในการยกย้าย

สินค้าที่บรรจุอยู่ในกระสอบพลาสติกสานเป็นรายกระสอบ ได้โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อตัวสินค้า

4.1 การแปลงความต้องการของลูกค้าเป็นหน้าที่ และคุณสมบัติของอุปกรณ์จับยึดกระสอบพลาสติกสาน

คำถามสำคัญของการออกแบบคือ ทำอย่างไรถึงจะสามารถใช้เครื่องทุ่นแรงที่มีอยู่ในการลำเลียงกระสอบพลาสติกสาน โดยเครื่องทุ่นแรงต่าง ๆ ประกอบด้วย รอก เคน รถโฟคลิฟท์ เป็นต้น ผลจากการศึกษาเบื้องต้นพบว่า ยังขาดอุปกรณ์ที่ใช้ในการจับยึดกระสอบพลาสติกพลาสติกสาน ที่ไม่ทำให้กระสอบเสียหาย เพื่อใช้ร่วมกับอุปกรณ์ดังกล่าว

ทีมออกแบบจึงได้ดำเนินการศึกษาในรายละเอียด เพื่อจัดทำข้อสรุป “หน้าที่และคุณสมบัติ” ของอุปกรณ์จับยึด ดังกล่าว ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 หน้าที่และคุณสมบัติของอุปกรณ์จับยึด

ความต้องการ		ข้อจำกัด
หน้าที่การทำงาน		
1	เกี่ยวแขวนกับรอกหรือเคน	ขนาดตะขอ
2	ยึดแน่นกับกระสอบขณะยก	ผิวกระสอบ
คุณสมบัติของอุปกรณ์		
1	ใช้งานง่าย	ใช้งานมือเดียว
2	น้ำหนักเบา	วัสดุ
3	ราคาไม่แพง	ต้นทุน

4.2 การกำหนดคุณลักษณะทางวิศวกรรมของอุปกรณ์

เมื่อทราบหน้าที่และคุณสมบัติของอุปกรณ์แล้วสิ่งที่ต้องดำเนินการต่อคือการกำหนดพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมการออกแบบ พร้อมทั้งระบุความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ และหน้าที่และคุณสมบัติของอุปกรณ์ ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้ต้องสามารถกำหนดวิธีการวัดผลเชิงปริมาณได้ โดยมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณลักษณะทางวิศวกรรมของอุปกรณ์

ความต้องการ		คุณลักษณะทางวิศวกรรม				
		ขนาดตะขอ	แรงบีบ	จำนวนชิ้นตอนการใช้	น้ำหนักอุปกรณ์	จำนวนชิ้นส่วน
หน้าที่	เกี่ยวตะขอเคน	×				
	ยึดกระสอบ		×			
คุณสมบัติ	ใช้งานง่าย	×		×		
	น้ำหนักเบา				×	×
	ราคาไม่แพง					×

4.3 การกำหนดค่าเป้าหมายคุณลักษณะทางวิศวกรรม

ค่าเป้าหมายจะได้มาจากการศึกษารายละเอียดของข้อจำกัดต่าง ๆ รวมถึงเป้าหมายการใช้งานของลูกค้า และแปลงออกมาเป็นค่าเป้าหมายเชิงวิศวกรรม ของแต่ละพารามิเตอร์ที่กำหนดขึ้น ซึ่งนอกจากการกำหนดค่าเป้าหมายแล้ว ในขั้นตอนนี้จะดำเนินการวิเคราะห์การมีผลกระทบซึ่งกันและกันระหว่างแต่ละพารามิเตอร์ เพื่อให้ทราบถึงข้อขัดแย้ง (Contradiction) ที่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นข้อจำกัดรูปแบบหนึ่งที่เกิดขึ้นในกระบวนการออกแบบ ดังแสดงในรูปที่ 4

4.4 การสร้างสรรค์แบบทางเลือก

การสร้างทางเลือกในการออกแบบ จะเริ่มจากการแบ่งหน้าที่ของอุปกรณ์ที่กำหนดขึ้นเป็นหน้าที่ย่อย เพื่อให้เกิดความง่ายต่อการค้นหาหลักการและแนวทางในการออกแบบ โดยหน้าที่ ด้านเกี่ยวแขวนกับรอก หรือ เคน สามารถแบ่งออกเป็น 2 หน้าที่ย่อย และหน้าที่ ด้านการยึดกระสอบให้แน่นสามารถแบ่งออกเป็น 4 หน้าที่ย่อย ซึ่งแนวทางการออกแบบเพื่อรองรับต่อหน้าที่ย่อยต่าง ๆ ได้แสดงไว้ในแผนภูมิเมอร์โฟโรจิคอล ดังแสดงในรูปที่ 5

ความต้องการ		คุณลักษณะทางวิศวกรรม				
		ขนาดตะขอ	แรงบีบ	จำนวนขั้นตอนการใช้	น้ำหนักอุปกรณ์	จำนวนชิ้นส่วน
หน้าที่	เกี่ยวตะขอเครน	x				
	ยึดกระสอบ		x			
คุณสมบัติ	ใช้งานง่าย	x		x		
	น้ำหนักเบา				x	x
	ราคาไม่แพง					x
เป้าหมาย		10	491	1	1000	10
หน่วยวัด		mm	N	step	g	pcs

รูปที่ 4 ค่าเป้าหมายและความสัมพันธ์ของ
คุณลักษณะเชิงวิศวกรรม

หน้าที่		ทางเลือกในการออกแบบ			
			a	b	c
เกี่ยว	เกี่ยวแขวน	1			
	ยึดกับกลไกหนีบ				
ยึดกระสอบให้แน่นขณะยกย้าย	ขยายแรงหนีบกระสอบ	2			
	สร้างแรงหนีบเบื้องต้น	3			
	หนีบกระสอบ	4			
	จับปลายกระสอบ	5			

รูปที่ 5 หลักการทางเลือกในการออกแบบอุปกรณ์

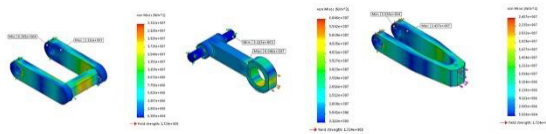
การสร้างสรรค์แบบทางเลือกสำหรับการออกแบบอุปกรณ์จับยึดพลาสติกสานดังกล่าว สามารถทำได้โดยการผสมผสานหลักการทางเลือกต่าง ๆ ของแต่ละหน้าที่ย่อย โดยผลจากการผสมผสานทางเลือกที่เป็นไปได้สำหรับกรณีศึกษานี้มีทั้งหมด 4 แบบทางเลือก ดังแสดงในรูปที่ 6

แบบทางเลือก		ส่วนผสมทางเลือก				
D1		1a	2a	3a	4a	5c
D2		1a	2a	3b	4a	5c
D3		1b	2a	3a	4a	5c
D4		1c	2a	3b	4a	5c

รูปที่ 6 แบบทางเลือกอุปกรณ์จัดยึดกระสอบพลาสติกสาน

4.5 การประเมินสมรรถนะแบบทางเลือก

ทุกแบบทางเลือกจะถูกนำมาประเมินสมรรถนะทางเพื่อค้นหาจุดในการปรับปรุง โดยเฉพาะอย่างยิ่งความแข็งแรงของแต่ละชิ้นส่วน โดยในกรณีศึกษานี้ ได้ใช้การวิเคราะห์เชิงวิศวกรรมเพื่อตรวจสอบจุดอ่อนของชิ้นส่วนและการตรวจสอบจุดอ่อนของชุดอุปกรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งผลการประเมินของแบบทางเลือกทั้ง 4 แบบมีความแข็งแรงเพียงพอต่อการรับแรง 491 N โดยไม่มีชิ้นส่วนใดเกิดการเสียรูป



รูปที่ 7 ตัวอย่างการประเมินสมรรถนะแบบทางเลือก

4.6 การเปรียบเทียบสมรรถนะจริงกับสมรรถนะเป้าหมาย

สมรรถนะเป้าหมายที่สำคัญสำหรับกรณีศึกษานี้คือความสามารถในการหนีบก้นน้ำหนักผลิตภัณฑ์ที่บรรจุในกระสอบพลาสติกสาน ซึ่งมีน้ำหนักสูงสุดคือ 50 กิโลกรัม ซึ่งสัมพันธ์กับการค่าพารามิเตอร์สำหรับคุณลักษณะทางวิศวกรรมคือค่าแรงบีบเป้าหมายต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 491 N ซึ่งผลจากการเปรียบเทียบได้แสดงไว้ในตารางที่ 3

จากผลการประเมินพบว่าในทุก ๆ แบบทางเลือกมีสมรรถนะที่สอดคล้องกับค่าเป้าหมาย และแต่ละแบบทางเลือกก็มีคุณลักษณะที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากกลไกหลักที่มีส่วนของการสร้างแรงเป็นรูปแบบเดียวกัน ส่วนที่แตกต่างกันเป็นเพียงชิ้นส่วนที่ทำหน้าที่แขวนเกี่ยวข้อต่อเท่านั้น

4.7 การประเมินคัดเลือกแบบ

แบบทางเลือกทั้ง 4 แบบ จะถูกนำมาเปรียบเทียบระหว่างกัน โดยใช้ความต้องการของลูกค้าซึ่งได้ถูกแปลงเป็นหน้าที่และคุณสมบัติของอุปกรณ์เป็นเกณฑ์ในการประเมิน เพื่อเลือกแบบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกรณีศึกษานี้ โดยใช้ “พุ่มเมตริกซ์” และกำหนดให้ “แบบ D1” เป็นแบบอ้างอิง เพื่อเปรียบเทียบกับแบบทางเลือก

อื่น ๆ คือ “แบบ D2” “แบบ D3” และ “แบบ D4” ผลการประเมินได้แสดงไว้ในตารางที่ 4

ตารางที่ 3 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะการออกแบบ

คุณลักษณะทางวิศวกรรม		ขนาดตะขอ	แรงบีบ	จำนวนชิ้นตอนใช้งาน	น้ำหนักอุปกรณ์	จำนวนชิ้นส่วนประกอบ
เป้าหมาย		≥	≥	=	≤	≤
		10	491	1	1000	10
		Mm	N	step	g	Pcs
แบบทางเลือก	D1	10	875	1	<600	10
	D2	10	875	1	<600	10
	D3	20	875	1	<600	10
	D4	20	875	1	<600	10

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบแบบทางเลือก

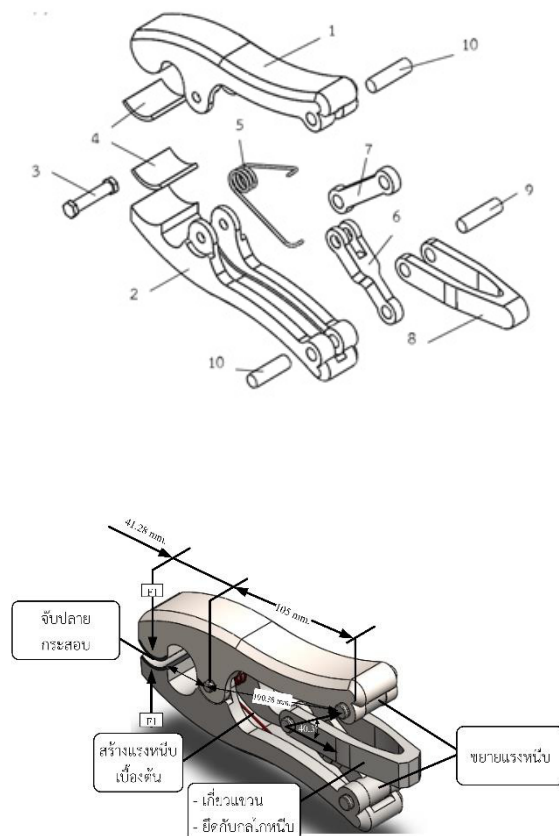
เกณฑ์การประเมิน		แบบทางเลือก			
		(Ref.)			
หน้าที่	เกี่ยวตะขอเครน	D1	D2	D3	D4
	ยึดกระสอบ	0	0	-1	0
คุณสมบัติ	ใช้งานง่าย	0	-1	0	-1
	น้ำหนักเบา	0	0	0	0
	ราคาไม่แพง	0	0	0	0
รวมคะแนน		0	-1	-1	-1

จากผลการเปรียบเทียบพบว่า “แบบ D1” ซึ่งถูกเลือกเป็นแบบอ้างอิง เป็นแบบที่มีความเหมาะสมที่สุดเมื่อเทียบกับแบบทางเลือกอื่น กล่าวคือ เมื่อพิจารณาด้านการเกี่ยวตะขอพบว่า “แบบ D3” มีจุดอ่อนด้านการควบคุมจุดศูนย์รวมของน้ำหนัก และเมื่อพิจารณาด้านการใช้งานง่าย พบว่า “แบบ D2” มีจุดอ่อนคือการเลือกใช้

สปริงตันในการสร้างแรงบีบ เนื่องจากเมื่อออกแรงบีบปากของอุปกรณ์จะเปิดได้ในขอบเขตที่จำกัดกว่าการเลือกใช้สปริงติด และ “แบบ D4” มีจุดอ่อนในลักษณะเดียวกันกับ “แบบ D2” และยังมีจุดอ่อนอีกประการคือเมื่อผู้ใช้งานต้องการเกี่ยวตะขอต้องใช้ในการเล็งตำแหน่ง ทำให้เกิดความสะดวกลดกว่าแบบอ้างอิง

4.8 การจัดทำแบบรายละเอียดเพื่อการผลิตต้นแบบ

ผลจากการประเมิน “แบบ D4” เป็นแบบที่ได้ถูกคัดเลือกให้เป็นแบบที่เหมาะสมที่สุด สำหรับกรณีศึกษาจึงได้ดำเนินการจัดทำแบบรายละเอียด โดยกำหนดรูปร่าง ขนาด วัสดุที่ใช้ อย่างชัดเจน รวมถึงจัดทำแบบภาพประกอบ เพื่ออธิบายตำแหน่งการประกอบของแต่ละชิ้นส่วน ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 แบบภาพประกอบอุปกรณ์จับยึดกระสอบ
พลาสติกสาน

โดยชิ้นส่วนหมายเลข 1 และ 2 เป็นชิ้นส่วนที่ใหญ่ที่สุด ผู้ออกแบบจึงเลือกใช้ วัสดุอลูมิเนียม 5086-H32 เพื่อให้มีน้ำหนักเบา ชิ้นส่วนหมายเลข 3, 5 และ 10 ถูกเลือกใช้เป็นชิ้นส่วนมาตรฐานที่สามารถหาซื้อได้ง่าย ชิ้นส่วนหมายเลข 4 เลือกใช้วัสดุแผ่นยาง เพื่อเพิ่มแรงเสียดทานหรือกันลื่นในขณะยก และชิ้นส่วนหมายเลข 6, 7 และ 8 เป็นชิ้นส่วนที่ทำหน้าที่ในการขยายแรงบีบในขณะยก ซึ่งต้องมีความทนทานสูง ผู้ออกแบบจึงเลือกใช้ วัสดุ AISI 316

4.9 การทดสอบการใช้งานอุปกรณ์ต้นแบบ

เมื่อดำเนินการจัดทำต้นแบบแล้วเสร็จ ได้นำอุปกรณ์ดังกล่าวไปทำการทดสอบการใช้งานจริง โดยการแขวนเข้ากับครนภายในโรงงาน ดังแสดงในรูปที่ 9 และสรุปผลการใช้งานอุปกรณ์ต้นแบบได้แสดงไว้ในตารางที่ 5



รูปที่ 9 การทดสอบการใช้งาน

ตารางที่ 5 สรุปผลการทดสอบอุปกรณ์

หัวข้อทดสอบ		ผลการทดสอบ	
		D1 (1 ชุด)	D1 (2 ชุด)
1	การยกน้ำหนัก 50 kg	✓	✓
2	ความง่ายต่อการใช้งาน	✓	✓
3	ความปลอดภัย	✗	✓

ผลจากการทดสอบพบว่าเมื่อพนักงานใช้อุปกรณ์เพียงชุดเดียวในการยกหัวกระสอบพลาสติกสาน นอกจากอุปกรณ์จะเป็นส่วนที่ต้องรับภาระงานแล้วปลายกระสอบเองก็จะเป็นอีกส่วนหนึ่งที่ต้องรับน้ำหนัก 50 กิโลกรัม ด้วยเช่นกัน ซึ่งอาจมีความเสี่ยงที่จะทำให้

ปลายกระสอบขาดและหลุดร่วงลงมาขณะเคลื่อนย้าย ดังนั้นจึงได้ทำการปรับปรุงแบบเพิ่มเติม โดยใช้หลักการเดียวกับไม้หนีบเสื้อ คือจัดทำแขนเกี่ยวกับอุปกรณ์หนีบจำนวน 2 ชุด เพื่อให้เกิดการกระจายภาระงานของปลายกระสอบ ซึ่งผลจากการทดสอบพบว่าสามารถลดความเสี่ยงต่อการขาดของกระสอบ แต่ต้องเพิ่มขั้นตอนการใช้งานจากการหนีบ 1 ครั้ง เป็นการหนีบเพิ่มขึ้น 2 ครั้ง (ยอมรับได้) และทำให้ต้นทุนของอุปกรณ์ดังกล่าวเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าอีกด้วย ในประเด็นด้านต้นทุนนี้อาจต้องมีการปรับปรุงการออกแบบอีกครั้งหนึ่ง

5. สรุป

ถึงแม้ว่าจะมีวิธีการออกแบบที่อธิบายขั้นตอนการดำเนินกิจกรรมอย่างเป็นระบบ แต่อย่างไรก็ตาม ก็ไม่ได้รับประกันว่าเมื่อดำเนินการตามขั้นตอนดังกล่าวแล้ว จะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีในครั้งเดียว ซึ่งเป็นลักษณะโดยธรรมชาติของกระบวนการออกแบบ ที่ต้องมีการทำซ้ำเพื่อแก้ไขและปรับปรุงจนกระทั่งได้ผลลัพธ์ที่เป็นที่ยอมรับ ซึ่งส่งผลให้เกิดการสูญเสียทรัพยากรเป็นจำนวนมากตามจำนวนครั้งของการทำซ้ำเพื่อแก้ไขข้อบกพร่อง ด้วยเหตุนี้จึงได้นำเสนอการประยุกต์ใช้เทคนิค QFD เชื่อมโยงกับเทคนิค FBS เพื่อพัฒนาเป็นขั้นตอนการออกแบบ ที่สามารถนำไปสู่การแปลความเพื่อกำหนดโจทย์ปัญหาและขอบเขตของการออกแบบได้อย่างชัดเจน กล่าวคือ การแปลงความต้องการเป็นหน้าที่และคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ และคุณลักษณะทางวิศวกรรม รวมทั้งมีการบ่งชี้ข้อจำกัดของการออกแบบไว้ตั้งแต่เริ่มต้นกระบวนการ ทำให้ความเสี่ยงในการเกิดข้อผิดพลาดลดลงและนำไปสู่การลดจำนวนการทำซ้ำกระบวนการออกแบบ

ผลการประยุกต์ใช้เทคนิคดังกล่าวกับกรณีศึกษา การออกแบบอุปกรณ์จับยึดกระสอบพลาสติกสาน พบว่านักออกแบบสามารถค้นพบจุดบกพร่องและสามารถค้นหาแนวทางการปรับปรุงแก้ไขได้อย่างรวดเร็ว และอุปกรณ์ที่ออกแบบสามารถใช้งานได้ตรงตามโจทย์ที่กำหนด ซึ่งข้อพบพร่องดังกล่าวเกิดขึ้นจาก 2 ปัจจัยหลักคือ การ

กำหนดค่าเป้าหมายของคุณลักษณะทางวิศวกรรมสามารถทำได้ชัดเจนเพียงแคในระดับของผลิตภัณฑ์นั้น ทำให้ขอบเขตการค้นหาแนวทางในการออกแบบในระดับชิ้นส่วนย่อยนั้นมีขอบเขตที่กว้าง และข้อจำกัดด้านวัสดุบรรจุภัณฑ์ไม่ได้แปลงเป็นพารามิเตอร์ของคุณลักษณะทางวิศวกรรมที่ชัดเจน ซึ่งจำเป็นต้องมีทำการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อกำหนดวิธีการในการแปลงข้อจำกัดเป็นคุณลักษณะทางวิศวกรรม รวมถึงกระจายค่าเป้าหมายไปสู่การออกแบบระดับชิ้นส่วน

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] M. J. French, “Conceptual Design for Engineers,” London, Springer, 1999
- [2] G. Pahl and W. Beitz, “Engineering Design,” London, Springer, 1999.
- [3] VDI, “VDI 2221- Systematic Approach to the Design of Technical Systems and Products”, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1993.
- [4] N. P. Suh, “The Principles of Design,” New York, Oxford University Press, 1990.
- [5] A. Yoji, “Development History of Quality Function Deployment,” the Customer Driven Approach to Quality Planning and Deployment. Minato, Tokyo: Asian Productivity Organization, 1994.
- [6] ศิกฤทธิ์ พรหมสุ้ย และ ณัฐวุฒิ จันทร์ทอง. “การประยุกต์ Axiomatic Design และเมทริกซ์ข้อจำกัดในกระบวนการออกแบบเชิงวิศวกรรม” วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. ปีที่ 12 (ฉบับที่ 2) : 1-10, 2560.
- [7] มณฑล ศาสนนันท์, “การออกแบบผลิตภัณฑ์เพื่อการสร้างสรรค์นวัตกรรมและวิศวกรรมยั่งยืน,” ปีที่ 10 (ฉบับที่ 2), 2550.

- [8] พงศกร ดำเกาะ, “การพัฒนาผลิตภัณฑ์โดยใช้เทคนิคการแปลงหน้าที่ทางคุณภาพ (QFD),” มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 2552.
- [9] E. S. Jaiswal, “ A Case Study on Quality Function Deployment (QFD) ,” Journal of Mechanical and Civil Engineering, vol. 3, no.6, pp. 27-35, 2012.
- [10] ณัฐฤติ จันทร์ทอง. “การลดความซับซ้อนในการออกแบบเชิงวิศวกรรม” วารสารมหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์. ปีที่4 (ฉบับที่ 1) : 84-99, 2555.
- [11] J. S. Gero, “Design Prototypes : A Knowledge Representation Schema for Design,” AI Magazine, vol. 11, no. 4, pp. 26-36, 1990.
- [12] C. Comotti, D. Regazzoni, C. Rizzi and A. Vitali, “Additive Manufacturing to Advance Functional Design: An Application in the Medical Field,” Journal of Computing and Information Science in Engineering, vol. 17, no. 3, 2017.
- [13] J. S. Gero and U. Kannengiesser, “ The situated function - Behaviour - structure framework,” Design Studies, vol. 25, no. 4, pp. 373-391, 2004.

ปัจจัยที่ส่งผลต่อการตัดสินใจเลือกใช้บริการจัดส่งอาหารถึงที่โดยใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติกทวิ

Factors Affecting Customers' Decision on Food Delivery Service: Binary Logistic Regression Approach

คัทรียา ชาญปริยวาทีวงศ์^{1*} สุธาทิพย์ ภูบุบผาพันธ์² รัฐพล ภูบุบผาพันธ์³

¹นักศึกษาปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่ง สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

²อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่ง สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

³ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่ง สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Kattreeya Chanpariyavatevong^{1*} Suthatip Pueboobpaphan² Rattaphol Pueboobpaphan³

¹Student, School of Transportation Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

²Lecturer, School of Transportation Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

³Assistant Professor, School of Transportation Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

*Corresponding author Email: kattreeya.cs@gmail.com

(Received: November 13, 2018; Accepted: May 30, 2019)

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการตัดสินใจเลือกใช้บริการจัดส่งอาหารถึงที่ โดยใช้แบบสอบถามเก็บข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างที่อาศัยอยู่ในเขตเมืองนครราชสีมาจำนวน 400 คน เพื่อรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับพฤติกรรมการเลือกใช้บริการ คุณลักษณะส่วนบุคคล และทัศนคติเกี่ยวกับบริการจัดส่งอาหารถึงที่ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติกทวิ (Binary Logistic Regression) โดยการนำเข้าตัวแปรแบบ Backward elimination ซึ่งผลการศึกษาพบว่าปัจจัยด้านประสบการณ์การใช้บริการ, การประหยัดเวลา, รูปลักษณ์ของอาหารที่ได้รับและค่าบริการจัดส่ง เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญอันดับแรกๆ ที่ผู้ประกอบการธุรกิจควรให้ความสำคัญในการปรับปรุงรูปแบบการบริการให้สามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าได้ และปัจจัยอีกกลุ่มหนึ่งที่มีผลต่อการตัดสินใจเลือกใช้บริการจัดส่งอาหารถึงที่ ได้แก่ ปัจจัยด้านสภาพอากาศ, สภาพจราจร, ความเสี่ยงการเกิดอุบัติเหตุ และอุปสรรคด้านที่จอดรถ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ผู้ประกอบการธุรกิจจัดส่งอาหารถึงที่อาจใช้เป็นข้อมูลเพิ่มเติมในการจัดทำกลยุทธ์หรือแผนการประชาสัมพันธ์เพื่อส่งเสริมการให้บริการเพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้าซึ่งจะส่งผลให้มีการกลับมาใช้บริการซ้ำและธุรกิจให้บริการจัดส่งอาหารถึงที่สามารถให้บริการได้อย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: จัดส่งถึงที่ บริการจัดส่งอาหารถึงที่ การวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติกทวิ

ABSTRACT

The objective of this research is to study factors affecting a decision whether or not to use food delivery service. A questionnaire was used to survey service usage behavior, socio- economic characteristics, as well as opinions toward various aspects of food delivery service from a sample of 400 respondents who live in Nakhon Ratchasima city area. Then Binary Logistics Regression was employed to analyze the data by using Backward elimination method. The results show that experience in using delivery service, travel time saving, appearance of the food received, and delivery cost are the most important factors that the service provider should pay attention in improving the service in order to meet customer expectation. The other factors that also affect a decision to use food delivery service are climate, traffic condition, risk of accident and parking obstacle. Service provider shall consider these factors in forming strategies or promotions of their service in order to meet customer expectation, resulting in a return of customers and hence moving toward a sustainable food delivery service.

Keyword: Delivery, Food delivery service, Binary Logistic Regression

1. บทนำ

ปัจจุบันวิถีชีวิตของคนเมืองเต็มไปด้วยความเร่งรีบ มีข้อจำกัดทางด้านเวลา ทำให้ไม่สามารถเดินทางไปซื้ออาหารเองได้ ประกอบกับถาดินทางไปเลือกซื้ออาหารเองก็อาจจะต้องเผชิญกับปัญหาต่างๆ มากมาย เช่น สภาพการจราจรที่ติดขัด หาทั๊กซี่หรือรถแท็กซี่ยาก สภาพอากาศที่ร้อนมาก หรือฝนตกหนัก เป็นต้น ด้วยเหตุผลเหล่านี้ทำให้บริการจัดส่งอาหารถึงที่สามารถตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคในยุคนี้ได้เป็นอย่างดี จากรายงานของศูนย์วิจัยกสิกรไทยระบุว่า ธุรกิจบริการจัดส่งอาหารถึงที่ในปี พ.ศ. 2560 มีแนวโน้มจะขยายตัวเพิ่มขึ้น คิดเป็นมูลค่าประมาณ 26,000 ล้านบาท ซึ่งเติบโตขึ้นร้อยละ 11-15 เมื่อเทียบกับปี พ.ศ. 2559 [1] จังหวัดนครราชสีมาเป็นเมืองขนาดใหญ่ มีประชากรพักอาศัยอาศัยค่อนข้างหนาแน่นและกระจายกระจายในเขตพื้นที่อำเภอเมืองปัจจุบันมีผู้ประกอบการได้เปิดดำเนินธุรกิจให้บริการจัดส่งอาหารถึงที่ผ่านช่องทางการสั่งซื้อผ่านเว็บไซต์หรือแอปพลิเคชันที่ให้บริการในลักษณะฝากซื้ออาหารจากร้านอาหารและเครื่องดื่มต่าง ๆ ในเขตเมืองนครราชสีมา

อย่างไรก็ตามเว็บไซต์หรือแอปพลิเคชันนั้นก็ยังไม่ได้ได้รับความนิยมมากนัก อาจสืบเนื่องจากเหตุผลหลายประการ เช่น ร้านอาหารที่เป็นที่นิยมหรือมีชื่อเสียงหลายร้านที่อยู่ในตัวเมืองหรือห้างสรรพสินค้ายังไม่ได้อยู่ในเว็บไซต์หรือแอปพลิเคชัน ทำให้ลูกค้าไม่สามารถฝากซื้ออาหารได้ บางร้านที่มีอยู่ในเว็บไซต์หรือแอปพลิเคชันก็มีเมนูไม่หลากหลายเท่ากับที่ไปซื้อที่ร้านเอง[2] ส่วนค่าบริการจัดส่งก็อาจจะส่งผลในการตัดสินใจในการใช้บริการจัดส่งอาหารถึงที่[3] กล่าวคือถ้าค่าจัดส่งแพงเกินไปก็จะส่งผลทำให้ผู้บริโภคเลือกที่จะเดินทางไปเลือกซื้ออาหารเองได้ นอกจากนี้คุณลักษณะส่วนบุคคลก็ยังเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลในการเลือกใช้บริการจัดส่งอาหารถึงที่[4] จากที่กล่าวมาทั้งหมดนั้นทำให้เกิดข้อคำถามว่ามีปัจจัยใดบ้างที่ผู้ประกอบการธุรกิจจัดส่งอาหารถึงที่ควรคำนึงถึงเพื่อสามารถตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคให้หันมาใช้บริการจัดส่งถึงที่ให้มากขึ้น และเพื่อรักษาลูกค้าเดิมให้คงใช้บริการจัดส่งอาหารถึงที่ต่อไป

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อการตัดสินใจเลือกใช้บริการจัดส่งอาหารถึงที่ในเขตเมืองนครราชสีมา ซึ่งผลของการศึกษานี้คาดว่าจะนำไปพัฒนาปรับปรุงการให้บริการให้สอดคล้องกับความต้องการของลูกค้า เพื่อการเติบโตของธุรกิจจัดส่งอาหารถึงที่อย่างยั่งยืนต่อไป

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษารั้วนี้ได้ทำการศึกษาค้นคว้าและรวบรวมข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับทฤษฎีพฤติกรรมของผู้บริโภค บริการจัดส่งสินค้าหรืออาหารถึงที่ โดยเรียบเรียงไว้ดังนี้

2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับพฤติกรรมของผู้บริโภค

พฤติกรรมของผู้บริโภค (Consumer Behavior) หมายถึงการแสดงออกของแต่ละบุคคลที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการใช้สินค้าและบริการ รวมทั้งกระบวนการในการตัดสินใจที่มีผลต่อการแสดงออก ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมของผู้บริโภคจะแบ่งออกเป็น 4 ประเภท [5] คือ

ปัจจัยทางวัฒนธรรม เป็นปัจจัยขั้นพื้นฐานในการกำหนดความต้องการและพฤติกรรมของมนุษย์ เช่น การศึกษา ความเชื่อ ยังรวมถึงพฤติกรรมส่วนใหญ่ที่ได้รับการยอมรับภายในสังคม

ปัจจัยทางสังคม เป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องในชีวิตประจำวันซึ่งมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมในการซื้อประกอบด้วย ครอบครัว บทบาท และสถานะของผู้ซื้อ

ปัจจัยส่วนบุคคล การตัดสินใจของผู้ซื้อจะได้รับอิทธิพลจากคุณสมบัติส่วนบุคคลต่าง ๆ เช่น อายุ อาชีพ สถานการณ์ทางเศรษฐกิจ การศึกษา รูปแบบการดำเนินชีวิต วัฏจักรชีวิตครอบครัว

ปัจจัยทางจิตวิทยา การเลือกซื้อของแต่ละบุคคลนั้นได้รับอิทธิพลจากปัจจัยทางจิตวิทยา ซึ่งเป็นปัจจัยในตัวผู้บริโภคที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมการซื้อและใช้สินค้าหรือ

บริการนั้น ปัจจัยทางจิตวิทยาประกอบด้วยการรับรู้ การรับรู้ ความเชื่อและเจตคติ บุคลิกภาพ รวมถึงแนวความคิดของตนเอง

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับบริการจัดส่งสินค้าหรืออาหารถึงที่

จากการศึกษาพฤติกรรมผู้บริโภคในกรุงเทพมหานครต่อการใช้บริการสั่งอาหารแบบจัดส่งถึงที่ผ่านเว็บไซต์หรือแอปพลิเคชัน พบว่าอาหารจำพวกจานด่วน (Fast food) ส่วนใหญ่จะมีร้านอยู่ในห้างสรรพสินค้าและเป็นแบรนด์ที่รู้จักกันดีนั้นจะมีการสั่งซื้อและให้จัดส่งมากที่สุดเมื่อเทียบกับร้านอาหารทั่วไป [2] และยังพบว่าปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลในการใช้บริการจัดส่งอาหารถึงที่ คือร้านอาหารนั้นต้องเป็นร้านอาหารแบรนด์ชั้นนำ เป็นที่รู้จักและเป็นที่นิยมในกลุ่มผู้บริโภค นอกจากนี้ผู้บริโภคยังคำนึงถึงความเร็วในการจัดส่งอีกด้วย [6, 7] สอดคล้องกับบทความที่ระบุว่าความเร็วหรือระยะเวลาในการจัดส่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการตัดสินใจเลือกใช้บริการสั่งซื้อสินค้าออนไลน์ เพราะถ้าเมื่อไหร่ที่ระยะเวลาในการจัดส่งนานเกินไปโดยถ้าเปรียบเทียบมูลค่าของเงินที่ต้องจ่ายให้กับค่าบริการจัดส่งแล้วไม่คุ้มกับเวลาที่ต้องรอ ผู้บริโภคก็จะไปเลือกซื้อสินค้าด้วยตนเอง [8] ส่วนสถานที่ให้ไปส่งอาหารนั้น พบว่าส่วนใหญ่มักจะให้ไปส่งที่พิกอาศัยหรือบ้าน ซึ่งมักเป็นอาหารมือหลักโดยเฉพาะมือกลางวัน อย่างไรก็ตามการใช้บริการจัดส่งอาหารถึงที่จำเป็นต้องมีความสามารถในการเข้าถึงเว็บไซต์หรือแอปพลิเคชัน ซึ่งถือได้ว่าเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการตัดสินใจเลือกใช้บริการจัดส่งอาหารถึงที่อีกด้วย และพบว่าความเต็มใจที่จะสั่งซื้อสินค้าออนไลน์ไม่ได้ขึ้นอยู่กับปัจจัยในเรื่อง เพศ อายุ รายได้ การศึกษา [9] ซึ่งไม่สอดคล้องกับการศึกษาเกี่ยวกับทัศนคติและพฤติกรรมของผู้บริโภคต่อการสั่งซื้อพิซซ่าที่บ้าน ในเขตกรุงเทพมหานคร พบว่า อายุ ระดับการศึกษาและรายได้ที่แตกต่างกันนั้นมีผลต่อการสั่งอาหารแบบจัดส่งถึงที่ [4] อย่างไรก็ตามจำนวนสมาชิกในครอบครัวก็ส่งผลต่อ

การตัดสินใจเลือกใช้บริการจัดส่งถึงที่ได้เช่นกัน เนื่องจากครอบครัวที่มีสมาชิกที่เป็นเด็กเล็กก็มักจะเลือกใช้บริการส่งถึงที่แทนที่จะต้องเดินทางไปซื้อเอง และค่าบริการจัดส่งอาหารถึงที่ก็ถือเป็นอีกปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงอีกด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยด้านบริการจัดส่งถึงที่ที่พบว่าผู้บริโภคที่สั่งซื้อสินค้าออนไลน์ส่วนใหญ่ไม่ต้องการจ่ายค่าบริการจัดส่งแพงขึ้นเพื่อให้ได้รับสินค้าเร็วขึ้น แต่เลือกที่จะรอโดยไม่ต้องจ่ายเงินค่าจัดส่งเพิ่ม [3] และยังมีการศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยในการตัดสินใจใช้บริการจัดส่งสินค้าจากร้านค้าปลีกที่ระบุว่า ผู้บริโภคส่วนใหญ่เลือกใช้บริการจัดส่งสินค้าเนื่องจากความสะดวกสบาย เหตุผลรองลงมาเป็นเรื่องของการประหยัดเวลาและความรวดเร็ว [10] อย่างไรก็ตามผู้บริโภคเองก็มีความกังวลเกี่ยวกับการสูญหายและความไม่สมบูรณ์ของสินค้าเช่นเดียวกันกับงานวิจัยที่ระบุว่าสภาพของสินค้าหรือผลิตภัณฑ์ที่ได้รับมีอิทธิพลต่อการตัดสินใจเลือกใช้บริการจัดส่งถึงที่อีกด้วย [11] จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่ามีปัจจัยหลายอย่างที่มีผลต่อพฤติกรรมการสั่งซื้อสินค้าออนไลน์และการจัดส่งอาหารถึงที่ ซึ่งสามารถสรุปเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้แก่ กลุ่มปัจจัยด้านคุณลักษณะส่วนบุคคล เช่น เพศ อายุ เป็นต้น กลุ่มปัจจัยด้านประเภทและลักษณะของตัวสินค้า เช่น อาหารแบรนด์ชั้นนำ และกลุ่มปัจจัยด้านบริการการจัดส่ง เช่น ระยะเวลาในการจัดส่ง ความสามารถในการเข้าถึงเว็บไซต์ ค่าบริการ ความน่าเชื่อถือ เป็นต้น

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติก

การวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติก หรือ Binary logistic regression มีการประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในงานวิจัยด้านต่างๆ อาทิเช่น ด้านการศึกษาพฤติกรรมและการตัดสินใจ [12] รวมถึงด้านการขนส่งก็มีการนำ Binary logistic regression มาประยุกต์ใช้ในการศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเลือกใช้บริการขนส่งสาธารณะรูปแบบต่างๆ

[13] อีกทั้งยังมีการประยุกต์ใช้ในการศึกษาความพึงพอใจในการเลือกใช้บริการต่างๆ เช่น ความพึงพอใจของผู้ขับขี่ต่อการตัดสินใจเลือกใช้บริการและสิ่งอำนวยความสะดวกภายในลานจอดรถเป็นต้น [14] และเนื่องจาก Binary logistic regression มีวิธีการวิเคราะห์และแปลผลที่ไม่ซับซ้อนและง่ายต่อการเข้าใจ [15] จึงส่งผลให้มีการประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายตามที่กล่าวมาในช่วงต้น

3. วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้ Binary logistic regression ในการวิเคราะห์หาปัจจัยที่ส่งผลในการตัดสินใจเลือกใช้บริการจัดส่งถึงที่ ซึ่งเป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม 1 ตัวและตัวแปรอิสระมากกว่า 1 ตัว โดยตัวแปรตามสามารถมีค่าได้เพียง 2 ค่า คือ 1 และ 0 ซึ่งจะแสดงถึงการเลือกหรือไม่เลือกใช้บริการ ส่วนตัวแปรอิสระที่ใช้ในการวิเคราะห์สามารถเป็นได้ทั้งตัวแปรเชิงปริมาณและตัวแปรเชิงคุณภาพ อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้ มีเงื่อนไขดังต่อไปนี้ [16]

1. ค่าความคลาดเคลื่อนของการสำรวจต้องเป็นอิสระจากกัน (Independence of errors)
2. ตัวแปรตามมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับฟังก์ชันลอจิตของตัวแปรอิสระแบบต่อเนื่อง
3. ตัวแปรอิสระไม่มีความสัมพันธ์กันหรือไม่เกิดปัญหา Multicollinearity
4. การวิเคราะห์ Binary logistic regression จะต้องใช้ขนาดตัวอย่าง n มากกว่าการวิเคราะห์การถดถอยแบบปกติ โดยจะใช้ขนาดตัวอย่าง $n \geq 30p$ โดยที่ p คือ จำนวนตัวแปรอิสระ

สำหรับการวิเคราะห์ Binary logistic regression ที่ค่าตัวแปรตาม หรือ y สามารถเป็นไปได้เพียง 2 ค่าคือ ไม่เกิดเหตุการณ์ ($y = 0$) หรือเกิดเหตุการณ์ ($y = 1$) มีความสัมพันธ์กับตัวแปรอิสระไม่อยู่ในรูปเชิงเส้น โดยมีโมเดลในการพยากรณ์ตามสมการที่ 1 ดังนี้

$$P_y = \frac{e^{\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_p x_p}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_p x_p}} \quad (1)$$

โดยที่ P_y = ความน่าจะเป็นของการเกิดเหตุการณ์ที่สนใจ

X_i = ตัวแปรอิสระ i

β_i = ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปร i

e = ค่าคงที่ ($e = 2.71828$)

การทดสอบความเหมาะสมของโมเดลด้วยค่า Goodness of fit สามารถทดสอบได้หลายวิธีแต่ในการศึกษานี้จะเลือกทดสอบด้วยวิธี Hosmer and Lemeshow test ซึ่งเป็นการทดสอบความเหมาะสมของโมเดลด้วยวิธีการทดสอบไคสแควร์โดยมีสมมติฐานในการทดสอบคือ

H_0 : โมเดลมีความเหมาะสมในการพยากรณ์

H_1 : โมเดลไม่มีความเหมาะสมในการพยากรณ์

หากค่าไคสแควร์ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่สามารถปฏิเสธ H_0 หมายถึง โมเดลมีความเหมาะสมในการพยากรณ์ นอกเหนือจากการทดสอบความเหมาะสมของโมเดลนั้นยังต้องมีการทดสอบ Omnibus test ซึ่งเป็นการทดสอบว่าการส่งผลของตัวแปรอิสระต่อตัวแปรตามโดยมีสมมติฐานในการทดสอบคือ

$H_0: \beta_i = 0, \text{ for all } i$

$H_1: \text{at least one } \beta_i \neq 0,$

หากค่า P-value หรือ ค่า Significant มีค่าต่ำกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนดจะหมายความว่าตัวแปรอิสระอย่างน้อย 1 ตัวแปรที่มีค่าไม่เท่ากับศูนย์หรือมีตัวแปรอิสระอย่างน้อย 1 ตัวแปรที่ส่งผลต่อตัวแปรตาม

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตามของการวิเคราะห์ Binary logistic regression ที่ไม่เป็นรูปเชิงเส้นจึงต้องมีการปรับให้ความสัมพันธ์อยู่ในรูปเชิงเส้นในรูปของ Odds ซึ่งหมายถึง อัตราส่วนระหว่างโอกาสที่จะเกิดเหตุการณ์ที่สนใจ ($y = 1$) และโอกาสที่จะไม่เกิดเหตุการณ์ที่สนใจ ($y = 0$) ดังแสดงในสมการที่ 2

$$\text{odds} = \frac{P_y}{Q_y} \quad \begin{matrix} \text{(โอกาสเกิดเหตุการณ์ที่สนใจ)} \\ \text{(โอกาสไม่เกิดเหตุการณ์ที่สนใจ)} \end{matrix} \quad (2)$$

และ Odds ratio จะหมายถึงอัตราส่วนของค่า Odds เปรียบเทียบกันระหว่าง 2 ค่าของตัวแปรอิสระ ซึ่งจะบ่งบอกถึงโอกาสในการเกิดเหตุการณ์ที่สนใจว่าเป็นกี่เท่าเมื่อเทียบระหว่างค่าของตัวแปรอิสระ 2 ค่า

ตัวอย่างเช่น Odds ratio ของการตัดสินใจเลือกใช้บริการจัดส่งอาหารถึงที่เป็นดังนี้

$$\text{odds} = \frac{\text{โอกาสที่จะเลือกใช้บริการจัดส่งอาหารถึงที่}}{\text{โอกาสที่จะไม่เลือกใช้บริการจัดส่งอาหารถึงที่}}$$

- ค่า Odds ratio มีค่าเท่ากับ 1 หมายความว่า โอกาสที่ลูกค้าจะตัดสินใจเลือกใช้บริการจัดส่งอาหารถึงที่และไม่ตัดสินใจเลือกใช้บริการมีโอกาสเกิดขึ้นเท่าๆ กัน
- ค่า Odds ratio มีค่ามากกว่า 1 หมายความว่า โอกาสที่ลูกค้าจะตัดสินใจเลือกใช้บริการจัดส่งอาหารถึงที่มากกว่าโอกาสที่จะไม่ตัดสินใจใช้บริการ
- ค่า Odds ratio มีค่าน้อยกว่า 1 หมายความว่า ลูกค้ามีโอกาสไม่ตัดสินใจเลือกใช้บริการจัดส่งอาหารถึงที่มากกว่าตัดสินใจเลือกใช้บริการ

3.1 การรวบรวมข้อมูล

แบบสอบถามใช้เป็นเครื่องมือในการเก็บข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างจำนวน 400 คน [17] ในพื้นที่ตลาดเซฟวันซึ่งเป็นตลาดเปิดตอนเย็นขนาดใหญ่แห่งหนึ่งในเขตอำเภอเมืองจังหวัดนครราชสีมา แบบสอบถามมีข้อความที่เกี่ยวกับข้อมูลส่วนบุคคลและปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อการตัดสินใจเลือกใช้บริการจัดส่งอาหารถึงที่รวมทั้งสิ้น 16 ปัจจัย อาทิเช่น ราคาการจัดส่งอาหาร คุณภาพของอาหารที่จะได้รับ การประหยัดเวลา เป็นต้น ข้อมูลที่ได้จากแบบสอบถามจะนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์ว่าปัจจัยใดบ้างจะส่งผลต่อการตัดสินใจเลือกใช้บริการจัดส่งอาหารถึงที่ต่อไป

3.2 การสร้างแบบจำลอง

ในการสร้างแบบจำลอง Binary logistic regression ในการศึกษานี้ได้พิจารณาให้การเลือกใช้หรือไม่เลือกใช้ บริการจัดส่งอาหารถึงที่เป็นตัวแปรตาม (Y) และได้ ทดลอง นำเข้าตัวแปรอิสระแบบ Backward elimination โดยนำตัวแปรอิสระทั้งหมดเข้าสู่สมการ พร้อมกัน จากนั้นพิจารณาตัวแปรอิสระที่อธิบายความ ผันแปรของตัวแปรตามได้น้อยที่สุดออกจากสมการ [18] ทำเช่นนี้จนกระทั่งเหลือตัวแปรอิสระที่มีนัยสำคัญ

โดยมีคำอธิบายของตัวแปรดังกล่าวดังแสดงไว้ในตาราง ที่ 1 ซึ่งตัวแปร P1 – P3 จะดำเนินการในรูปแบบของ Dummy variable ส่วนตัวแปร X1 – X7 แสดง ลักษณะความคิดเห็นใน 5 ระดับเริ่มตั้งแต่ไม่เห็นด้วย มากที่สุด (1) จนกระทั่งเห็นด้วยมากที่สุด (5) ใน ประเด็นต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการจัดส่งอาหารถึงที่ ซึ่ง สามารถพิจารณาให้ความแตกต่างระหว่างระดับมีค่า เท่า ๆ กันได้ [19] ตารางที่ 1 ตัวแปรตามและตัวแปร อิสระที่นำมาสร้างแบบจำลอง

ตารางที่ 1 ตัวแปรตามและตัวแปรอิสระที่นำมาสร้างแบบจำลอง

ตัวแปร	ชื่อตัวแปร	คำอธิบาย	
Y	การเลือกใช้บริการ	เลือกใช้บริการ = 1, ไม่เลือกใช้บริการ = 0	
P ₁	เพศ	เพศชาย = 1, เพศหญิง = 0	
P ₂	ใช้รถสาธารณะเพื่อซื้ออาหาร	ใช้รถสาธารณะ = 1, ไม่ใช้รถสาธารณะ = 0	
P ₃	ประสบการณ์การใช้บริการ	เคยใช้บริการ = 1, ไม่เคยใช้บริการ = 0	
X ₁	ประหยัดเวลา	ไม่เห็นด้วยมากที่สุด = 1, ไม่เห็นด้วย = 2, ไม่แน่ใจ = 3, เห็นด้วย = 4, เห็น ด้วยมากที่สุด = 5	ท่านคิดว่าการใช้บริการจัดส่งอาหารถึงที่ ช่วยประหยัดเวลาของท่าน
X ₂	สภาพอากาศ		ท่านคิดว่าสภาพอากาศที่ไม่เอื้ออำนวยมี ผลต่อการตัดสินใจเลือกใช้บริการจัดส่ง อาหารถึงที่ของท่าน
X ₃	สภาพจราจร		ท่านคิดว่าสภาพจราจรมีผลต่อการ ตัดสินใจเลือกใช้บริการจัดส่งอาหารถึงที่ ของท่าน
X ₄	ลดอุบัติเหตุ		ท่านคิดว่าการใช้บริการจัดส่งอาหารถึงที่ ช่วยลดโอกาสในการเกิดอุบัติเหตุต่อตัว ท่าน
X ₅	ที่จอดรถ		ท่านคิดว่าที่จอดรถที่ไม่เพียงพอมีผลต่อ การตัดสินใจเลือกใช้บริการจัดส่งอาหาร ถึงที่ของท่าน

ตารางที่ 1 ตัวแปรตามและตัวแปรอิสระที่นำมาสร้างแบบจำลอง(ต่อ)

X ₆	รูปลักษณะอาหาร		ท่านคิดว่าคุณภาพที่ได้รับ (เช่น ได้รับอาหารไม่ตรงตามคำสั่งซื้อ, อาหารเสียหายระหว่างการจัดส่ง) จากการบริการจัดส่งอาหารถึงที่ไม่ตรงตามความคาดหวังของท่าน
X ₇	ค่าบริการจัดส่ง		ท่านคิดว่าราคาค่าจัดส่งอาหารส่งผลต่อการตัดสินใจเลือกใช้บริการจัดส่งอาหารถึงที่ของท่าน

4. ผลการศึกษา

จากการเก็บรวบรวมข้อมูลจากผู้ตอบแบบสอบถามสามารถนำข้อมูลดังกล่าวมาวิเคราะห์สถิติเบื้องต้นดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่าร้อยละ 54 ของผู้ตอบแบบสอบถามเป็นเพศหญิงและร้อยละ 46 เป็นเพศชาย ซึ่งส่วนใหญ่มีสถานภาพโสดคิดเป็นร้อยละ 62 และสถานภาพสมรสคิดเป็นร้อยละ 38 ผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่มีช่วงอายุอยู่ระหว่าง 25-35 ปี คิดเป็นร้อยละ 34 รองลงมาเป็นอายุต่ำกว่า 25 ปี คิดเป็นร้อยละ 31 ในส่วนอาชีพของผู้ตอบแบบสอบถามมีการกระจายตัวไม่แตกต่างกันมากนัก คือ เป็นพนักงานบริษัทเอกชนและนักศึกษามีสัดส่วนที่ใกล้เคียงกันคือร้อยละ 26.80 และ 23.50 ตามลำดับ สำหรับจำนวนสมาชิกในครอบครัวนั้นพบว่าผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่มีจำนวนสมาชิก 4-5 คน คิด

เป็นร้อยละ 53 รองลงมาคือจำนวนสมาชิกน้อยกว่า 4 คน คิดเป็นร้อยละ 38 อย่างไรก็ตามในส่วนของการศึกษาพบว่าผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่ร้อยละ 61 มีระดับการศึกษาระดับปริญญาตรี ส่วนรายได้ของผู้ตอบแบบสอบถามพบว่าร้อยละ 53.50 มีรายได้ไม่เกิน 15,000 บาทต่อเดือน และรองลงมา มีรายได้ไม่เกิน 20,000 บาทต่อเดือนที่ร้อยละ 14.00 ในจำนวนผู้ตอบแบบสอบถามทั้งหมดมีผู้ที่เคยใช้บริการจัดส่งอาหารถึงที่มากถึงร้อยละ 54.00 ในจำนวนนี้ยังพบอีกว่าสัดส่วนของผู้ตอบแบบสอบถามที่อาศัยอยู่ในตำบลในเมืองมีมากถึงร้อยละ 34.75 และที่เหลือ 24 ตำบลในเขตพื้นที่อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมาคิดเป็นร้อยละ 65.25 และส่วนใหญ่ผู้ตอบแบบสอบถามมีความต้องการอยากใช้บริการจัดส่งอาหารถึงที่คิดเป็นร้อยละ 82.30

ตารางที่ 2 คุณลักษณะของผู้ตอบแบบสอบถามจำแนกตามตัวแปร

ตัวแปร		จำนวน (คน)	ร้อยละ
เพศ	ชาย	184	46.00
	หญิง	216	54.00

ตารางที่ 2 คุณลักษณะของผู้ตอบแบบสอบถามจำแนกตามตัวแปร(ต่อ)

อายุ	ต่ำกว่า 25 ปี	126	31.50
	25-35 ปี	136	34.00
	35-44 ปี	60	15.00
	45-54 ปี	56	14.00
	มากกว่า 55 ปี	22	5.50
อาชีพ	นักศึกษา	94	23.50
	ข้าราชการ	78	19.50
	พนักงานบริษัทเอกชน	107	26.80
	เจ้าของธุรกิจ	81	20.30
	พ่อบ้าน/แม่บ้าน	24	6.00
	อื่นๆ	16	4.00
สถานภาพ	โสด	248	62.00
	สมรส	152	38.00
จำนวนสมาชิกในครอบครัว	น้อยกว่า 4 คน	152	38.00
	4-5 คน	212	53.00
	มากกว่า 5 คน	36	9.00
ระดับการศึกษา	ต่ำกว่าปริญญาตรี	125	31.30
	ปริญญาตรี	244	61.00
	ปริญญาโท	29	7.30
	ปริญญาเอก	2	0.50
รายได้ต่อเดือน	ต่ำกว่า 10,000 บาท	112	28.00
	10,000-15,000 บาท	94	23.50
	15,001-20,000 บาท	56	14.00
	20,001-25,000 บาท	35	8.80
	มากกว่า 25,000 บาท	103	25.80
ประสบการณ์	เคย	216	54.00
	ไม่เคย	184	46.00
การเลือกใช้บริการ	เลือกใช้บริการ	329	82.30
	ไม่เลือกใช้บริการ	71	17.80

ตารางที่ 3 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วย Binary Logistic Regression ซึ่งผลการทดสอบ Hosmer and Lemeshow ของความเหมาะสมของแบบจำลอง พบว่า ค่าสถิติไคสแควร์เท่ากับ 14.208 ที่ P-value เท่ากับ

0.076 ซึ่งไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐาน H_0 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 อธิบายได้ว่าข้อมูลของการศึกษานี้สามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปแบบของสมการ Binary logistic regression ได้ และผลการทดสอบ Omnibus test พบว่า

P-value = 0.000 นั่นคือมีตัวแปรอิสระอย่างน้อย 1 ตัว
ที่ส่งผลต่อการตัดสินใจเลือกใช้บริการจัดส่งอาหารถึงที่

ในเขตตัวเมืองจังหวัดนครราชสีมาตารางที่ 3 ปัจจัยที่
ส่งผลต่อการตัดสินใจเลือกใช้บริการจัดส่งอาหารถึงที่

ตารางที่ 3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการตัดสินใจเลือกใช้บริการจัดส่งอาหารถึงที่

	ตัวแปร	B	S.E.	Wald	df	Sig.	Exp(B)
เพศ*	P ₁	0.510	0.309	2.713	1	0.100	1.665
รถสาธารณะ*	P ₂	2.077	1.094	3.603	1	0.058	7.983
ประสบการณ์การใช้บริการ**	P ₃	1.528	0.338	20.429	1	0.000	4.608
ประหยัดเวลา**	X ₁	0.402	0.174	5.356	1	0.021	1.494
สภาพอากาศ*	X ₂	-0.411	0.225	3.326	1	0.068	0.663
สภาพจราจร*	X ₃	0.292	0.167	3.069	1	0.080	1.339
ลดอุบัติเหตุ*	X ₄	0.268	0.159	2.842	1	0.092	1.307
ที่จอดรถ*	X ₅	0.341	0.182	3.503	1	0.061	1.407
รูปลักษณ์อาหาร**	X ₆	-0.451	0.181	6.222	1	0.013	0.637
ค่าจัดส่ง**	X ₇	0.418	0.187	4.974	1	0.026	1.518
	Constant	-4.348	1.159	14.087	1	0.000	0.013

**ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05, *ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.1

Hosmer and Lemeshow test: Chi-square = 14.208, df = 8, Sig. = 0.076

Omnibus test: Chi-square = 91.921, df = 1, Sig. = 0.000

จากตารางที่ 3 ตัวแปรอิสระหรือปัจจัยที่ส่งผลต่อการ
ตัดสินใจเลือกใช้บริการจัดส่งอาหารถึงที่ของผู้บริโภคใน
เขตเมืองจังหวัดนครราชสีมา มีจำนวน 10 ปัจจัย ซึ่ง
สามารถแสดงในรูปของสมการพยากรณ์ได้ดังนี้

P {โอกาสตัดสินใจเลือกใช้บริการจัดส่งอาหารถึงที่} = $\frac{1}{1+e^{-W}}$
โดยที่

$$W = -4.348 + 0.510P_1 + 2.077P_2 + 1.528P_3 + 0.402X_1 - 0.411X_2 + 0.292X_3 + 0.268X_4 + 0.341X_5 - 0.451X_6 + 0.418X_7$$

โดยแบ่งเป็นปัจจัยหลัก 4 ปัจจัยซึ่งมีนัยสำคัญทาง
สถิติที่ระดับ 0.05 ได้แก่ ประสบการณ์การใช้บริการ,
ประหยัดเวลา, รูปลักษณ์อาหารที่ได้รับ และ ค่าจัดส่ง
และเป็นปัจจัยรองจำนวน 6 ปัจจัยซึ่งมีนัยสำคัญทางสถิติ
ที่ระดับ 0.1 ได้แก่ เพศ, การใช้รถสาธารณะ, สภาพอากาศ,
สภาพจราจร, การลดอุบัติเหตุ และ ที่จอดรถ จากผลการ
วิเคราะห์สามารถอธิบายความหมายของแต่ละปัจจัยจาก

ค่า Odds Ratio ซึ่งสามารถดูได้จากตารางในคอลัมน์ของ
Exp(B) โดยจะทำการอธิบายผลกลุ่มปัจจัยหลักและกลุ่ม
ปัจจัยรองได้ผลดังต่อไปนี้

1. ผู้ที่มีประสบการณ์การใช้บริการจัดส่งอาหารถึงที่
 อาทิ เช่น KFC หรือ Pizza มีโอกาสเลือกใช้บริการมากถึง
 4.608 เท่าเมื่อเทียบกับคนที่ไม่เคยมีประสบการณ์ใช้
 บริการจัดส่งอาหารถึงที่ เนื่องจากคนที่มีประสบการณ์
 บริการจัดส่งถึงที่เห็นถึงความสะดวกสบายหรือคุ้นชินกับ
 การใช้บริการจัดส่งอาหารถึงที่ก็เป็นได้

2. เมื่อไหร่ก็ตามถ้าผู้บริโภคพิจารณาแล้วเห็นว่าการ
 ใช้บริการจัดส่งอาหารถึงที่ช่วยประหยัดเวลาเมื่อเทียบกับ
 ต้องไปซื้อเองก็จะมีโอกาสใช้บริการจัดส่งอาหารถึงที่มาก
 ขึ้น คิดเป็น 1.49 เท่า

3. สำหรับรูปลักษณ์ของอาหาร พบว่าถ้าอาหารที่
 ได้รับมีรูปลักษณ์ที่แตกต่างไปจากเดิมหรือแตกต่างไปจาก

รูปตัวอย่างที่ลงไว้บนเว็บไซต์และแอปพลิเคชัน ซึ่งความแตกต่างนั้นอาจเกิดได้จากการขนส่ง หรือการจัดใส่กล่องของทางร้านก็ตาม ก็จะส่งผลให้โอกาสที่จะเลือกใช้บริการจัดส่งอาหารถึงที่ลดลง 0.64 เท่า

4. ค่าบริการจัดส่ง หากค่าบริการจัดส่งมีความสมเหตุสมผลจะส่งผลทำให้ผู้บริโภคมีโอกาสเลือกใช้บริการจัดส่งอาหารถึงที่เพิ่มขึ้น 1.52 หรือสามารถอธิบายได้ว่าหากลูกค้ามองว่าค่าบริการจัดส่งแพงเกินไปผู้บริโภคก็จะไปรับประทานหรือซื้อเลือกซื้อด้วยตัวเอง ในทางกลับกันหากค่าบริการจัดส่งถูกลงอาจจะจูงใจให้ผู้บริโภคตัดสินใจเลือกใช้บริการจัดส่งอาหารถึงที่ได้ง่ายขึ้น

5. เพศชายมีโอกาสเลือกใช้บริการจัดส่งอาหารถึงที่เพิ่มขึ้น 1.67 เท่า เมื่อเทียบกับเพศหญิงซึ่งไม่สอดคล้องกับที่กล่าวว่าผู้บริโภคส่วนมากจะเป็นเพศหญิงและเพศหญิงมีโอกาสจะกลับมาใช้บริการซ้ำมากกว่าเพศชาย แต่อย่างไรก็ตามยังมีงานวิจัยที่พบว่าเพศไม่มีผลต่อการตัดสินใจเลือกใช้บริการจัดส่งถึงที่ [2, 9]

6. ถ้าปกติต้องเดินทางด้วยรถสาธารณะเพื่อไปซื้ออาหารเอง จะส่งผลให้มีโอกาสเลือกใช้บริการจัดส่งอาหารถึงที่ คิดเป็น 7.98 เท่า เมื่อเทียบกับเดินทางไปซื้ออาหารด้วยวิธีอื่น เช่น รถยนต์ส่วนบุคคล มอเตอร์ไซด์ เนื่องจากการใช้บริการจัดส่งอาหารถึงที่อาจช่วยเพิ่มความสะดวกสบายให้แก่ผู้บริโภคที่ไม่มีรถส่วนบุคคลและจำเป็นต้องเดินทางด้วยรถสาธารณะ

7. ความแปรปรวนของสภาพอากาศมีผลต่อการตัดสินใจเลือกใช้บริการจัดส่งอาหารถึงที่ลดลง 0.66 เท่า กล่าวคือหากช่วงดังกล่าวเป็นช่วงฤดูฝน มีพายุฝนฟ้าคะนอง หรือช่วงฤดูร้อนที่อากาศร้อนจัด ก็จะส่งผลทำให้ผู้บริโภคตัดสินใจเลือกใช้บริการจัดส่งอาหารถึงที่ลดลงด้วยเหตุผลบางประการ เช่น มีความกังวลเกี่ยวกับคุณภาพหรือรูปลักษณ์ของอาหารที่จะได้รับ เป็นต้น

8. สภาพจราจรในเมืองนครราชสีมาค่อนข้างติดขัด โดยเฉพาะในช่วงเวลาเร่งด่วนหรือในวันหยุด หรือแม้กระทั่งช่วงเวลาในวันจันทร์-ศุกร์ ส่งผลให้โอกาสจะเลือกใช้

บริการจัดส่งอาหารถึงที่เพิ่มขึ้น 1.34 เท่า ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมของผู้บริโภคในปัจจุบันที่จะอยู่บ้านมากขึ้นเพื่อหลีกเลี่ยงการจราจรที่ติดขัดบนท้องถนนและช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการเดินทาง [10, 11]

9. การตระหนักถึงโอกาสการเกิดอุบัติเหตุนี้ทำให้โอกาสการตัดสินใจเลือกใช้บริการจัดส่งอาหารถึงที่เพิ่มขึ้น 1.31 เท่า หรืออาจกล่าวได้ว่าความปลอดภัยในชีวิตเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ผู้บริโภคให้ความสำคัญ [10]

10. หากร้านอาหารหรือบริเวณใกล้เคียงมีพื้นที่สำหรับจอดรถได้ไม่เพียงพอต่อปริมาณลูกค้าหรือยากต่อการหาที่จอดรถ จะส่งผลให้โอกาสตัดสินใจเลือกใช้บริการจัดส่งอาหารถึงที่เพิ่มขึ้นจากเดิม 1.41 เท่า ซึ่งที่จอดรถเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่งโดยเฉพาะกับกลุ่มคนที่มีรถยนต์ส่วนบุคคล

5. สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้เกิดจากการเล็งเห็นถึงปัญหาการบริการจัดส่งอาหารถึงที่ในเขตตัวเมืองนครราชสีมาที่ยังไม่สามารถตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคได้อย่างเหมาะสม งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาเพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อการตัดสินใจเลือกใช้บริการจัดส่งอาหารถึงที่ จากการศึกษาในข้างต้นพบว่ามีปัจจัยทั้งหมด 10 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการตัดสินใจของผู้บริโภค ทั้งนี้ปัจจัยดังกล่าวสามารถใช้เป็นแนวทางให้กับผู้ประกอบการธุรกิจให้บริการจัดส่งอาหารถึงที่ที่สามารถพัฒนาและปรับปรุงการให้บริการเพื่อตอบสนองต่อลูกค้าได้อย่างตรงตามความต้องการและสามารถรักษารฐานลูกค้าเดิมให้คงใช้บริการอยู่ เพื่อความยั่งยืนของธุรกิจควรมีการปรับกลยุทธ์ทางการตลาดอยู่อย่างสม่ำเสมอ โดยจากผลการศึกษาพบว่าปัจจัยด้านประสิทธิภาพการให้บริการ, การประหยัดเวลา, รูปลักษณ์ของอาหารที่ได้รับและค่าบริการจัดส่ง เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญอันดับแรกๆ ที่ผู้ประกอบการธุรกิจควรให้ความสำคัญ โดยผู้บริโภคที่มีประสบการณ์ในการใช้บริการจัดส่งอาหารถึงที่มาก่อนมี

โอกาสให้บริการจัดส่งอาหารถึงที่มากกว่าผู้บริโภคที่ไม่เคยใช้บริการมาก่อน เพื่อเป็นการรักษาลูกค้าเดิมและจูงใจให้กลับมาใช้บริการซ้ำ ผู้ประกอบการควรคำนึงถึงความรวดเร็วในการจัดส่งอาหารเนื่องจากผู้บริโภคที่ตัดสินใจเลือกใช้บริการจัดส่งอาหารถึงที่เล็งเห็นว่าการบริการดังกล่าวจะสามารถช่วยให้ประหยัดเวลาได้มากกว่าการไปรับประทานหรือเลือกซื้ออาหารด้วยตนเอง ทั้งนี้รูปแบบของอาหารที่ได้รับและราคาค่าจัดส่งควรอยู่ในระดับที่เหมาะสมกัน ถ้าหากค่าบริการในการจัดส่งอาหารสูงแต่รูปแบบของสินค้าที่ได้รับอยู่ในลักษณะไม่ปกติหรือเสียหายระหว่างการจัดส่งก็อาจส่งผลให้ผู้บริโภคไม่กลับมาใช้บริการซ้ำอีกครั้ง นอกเหนือจากปัจจัยที่ได้กล่าวมาในช่วงต้นแล้วยังมีปัจจัยที่สำคัญรองลงมาอีกกลุ่มหนึ่งที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการเลือกใช้บริการจัดส่งอาหารถึงที่ ได้แก่ ปัจจัยด้านสภาพอากาศ สภาพจราจร ความเสี่ยงการเกิดอุบัติเหตุ และอุปสรรคด้านที่จอดรถซึ่งผู้ประกอบการธุรกิจจัดส่งอาหารถึงที่อาจใช้เป็นข้อมูลในการเพิ่มยอดขายโดยอาจจะมีการจัดกิจกรรมประชาสัมพันธ์และส่งเสริมการขายเพื่อจูงใจให้บริโภคใช้บริการ แต่ทั้งนี้ยังคงต้องรักษามาตรฐานในการบริการให้ดีสม่ำเสมอและคงที่เพื่อธุรกิจสามารถดำเนินไปได้อย่างยั่งยืน

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] ศูนย์วิจัยกสิกรไทย, "จับตาปี' 60 ส่งอาหารออนไลน์หนุนตลาด Delivery โตร้อยละ 11-15 สวนทางภาพรวมธุรกิจร้านอาหารที่เติบโตเพียงเล็กน้อย," *Kasikomthai Econ Analysis*, vol. 22, no. 2797, pp. 1-4, 2559.
- [2] ธนรัตน์ ศรีสำอางค์, เอก บุญเจือ, and วรณัย สายประเสริฐ, "พฤติกรรมผู้บริโภคในกรุงเทพมหานครต่อการใช้บริการสั่งอาหารแบบเดลิเวอรี่ผ่านเว็บไซต์," *วารสารบริหารธุรกิจมหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, vol. 1, no. 1, pp. 354-371, 2558.

- [3] M. Ghajargar, G. Zenezini, and T. Montanaro, "Home delivery services: innovations and emerging needs," (in English), *IFAC-Papersonline*, vol. 49, no. 12, pp. 1371-1376, 2016.
- [4] ศิริณ เจริญพินิจนันท์, "ทัศนคติและพฤติกรรมของผู้บริโภคต่อการสั่งซื้อ พืชชำ ทัศนคติแบบบริการส่งถึงบ้าน ในเขตกรุงเทพมหานคร," *บริหารธุรกิจมหาบัณฑิต, สาขาวิชาการตลาด, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, กรุงเทพมหานคร*, 2546.
- [5] ปวีศา ธรรมศรี, "แผนธุรกิจร้านปาลิกา คาเฟ่," *บริหารธุรกิจมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม, มหาวิทยาลัยกรุงเทพ, กรุงเทพมหานคร*, 2559.
- [6] สุพจน์ พานทอง, "การศึกษาความน่าจะเป็นไปได้ในการลงทุนธุรกิจร้านอาหารบริการถึงบ้านในเขตเทศบาลนครนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา," *บริหารธุรกิจมหาบัณฑิต, สาขาวิชาบริหารธุรกิจ, มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา, พระนครศรีอยุธยา*, 2548.
- [7] W. Szeto, R. Wong, and W. Yang, "Guiding vacant taxi drivers to demand locations by taxi-calling signals: A sequential binary logistic regression modeling approach and policy implications," *Transport Policy*, vol. 76, pp. 100-110, 2019.
- [8] M. -H. Hsiao, "Shopping mode choice: Physical store shopping versus e-shopping," (in English), *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 45, no. 1, pp. 86-95, 2009.
- [9] M. A. Morganosky and B. J. Cude, "Consumer response to online grocery

- shopping," (in English), *International Journal of Retail & Distribution Management*, vol. 28, no. 1, pp. 17-26, 2000.
- [10] อีรวิทย์ วราธรไพบูลย์ and อังคณา ศิริอำพันกุล, "ปัจจัยที่กำหนดการตัดสินใจใช้บริการสินค้าจากร้านค้าปลีก," *วารสารการจัดการภาครัฐและภาคเอกชน สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์*, vol. 22, no. 1, pp. 141-157, 2558.
- [11] A. Fairouz, "An investigation of factors influenceing consumers' intention to use online shopping : an empiracal study in south of Jordan " (in English), *Journal of internet banking and commerce*, vol. 21, no. 2, pp. 1-50, 2016.
- [12] D. Zhou, T. Shah, S. Ali, W. Ahmad, I. U. Din, and A. Ilyas, " Factors affecting household food security in rural northern hinterland of Pakistan," *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, vol. 18, no. 2, pp. 201-210, 2017.
- [13] R. Wong, W. Szeto, L. Yang, Y. Li, and S. Wong, "Public transport policy measures for improving elderly mobility," *Transport policy*, vol. 63, pp. 73-79, 2018.
- [14] P. van der Waerden, M. de Bruin, and A. N. R. da Silva, "Car drivers' knowledge and preferences regarding additional services at parking facilities," *Transportation research procedia*, vol. 25, pp. 4049-4057, 2017.
- [15] รวมพร สิทธิมงคล, มธุรีนิ นิลมงคล, ศรีณญา ภา ระเกษ, and ศุภัทธรา ราษฎร์ดุขดี, "การประยุกต์ใช้การวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติกในการศึกษาพฤติกรรมการกลั่นแกล้งกันบนโลกออนไลน์ของนักศึกษา," *Thai Journal of Science and Technology*, vol. 7, no. 1, สาขาวิชาคณิตศาสตร์และสถิติ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ pp. 1-12, 2561.
- [16] J. C. Stoltzfus, "Logistic regression: a brief primer," *Academic Emergency Medicine*, vol. 18, no. 10, pp. 1099-1104, 2011.
- [17] T. Yamane, *Statistics: an introductory analysis*. New York: Harper & Row, 1967.
- [18] ยุทธ ไกยวรรณ, "หลักการและการใช้การวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติกสำหรับการวิจัย," *วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย*, vol. 1, no. 4, pp. 1-12, 2555.
- [19] L. S. Meyers, G. Gamst, and A. J. Guarino, *Applied multivariate research: Design and interpretation*. Sage publications, 2016.

Modified EP/sin for Optimal Power Flow with Economic Dispatch

Suppakarn Chansareewittaya

School of Information Technology, Mae Fah Luang University, Muang, Chiang Rai, 57100

Email: suppakarn.cha@mfu.ac.th

(Received: October 19, 2018; Accepted: January 20, 2019)

ABSTRACT

In this paper, evolutionary programming is modified to improve optimal power flow and economic dispatch problem. The first improvement is to enhance the power transfer capability of power transactions between generators and load buses. The second improvement is to determine the ratio of max power transfer capability per economic dispatch. Both improvements are evaluated under optimal power flow concepts and optimal allocation of the unified power flow controller. Particular optimal allocation of unified power flow controller includes optimal location and parameter settings. This optimal allocation is determined by this modified evolutionary programming. The main of modifying is to place the value of sine function in the mutation method. The IEEE 30-bus test system is used as a test system. Test results show that the proposed method gives the optimal allocation of unified power flow controller which makes the better overall results of optimal power flow with economic dispatch than original evolutionary programming.

Keyword: Evolutionary programming, Optimal power flow, Economic dispatch, Optimization

1. Introduction

According to the increasing demand for electrical power, this demand increases every year. There are many choices to supply this demand. The standard choice is to build a new power plant. The other choice is the addition of a sub power plant or distributed generation into the power system. However, the interesting alternate choice is to improve the power transfer capability of the electrical system by using the FACT controller. The FACTS controllers are the well-known electronics based devices which have been improved that their installation can be enhanced the power transfer capability [1]-[5].

However, the optimal allocation of the FACTS controller must be considered [6]-[12]. The maximum benefits from the installation of FACTS controllers are to optimize for their optimal allocation. This optimal allocation means the optimal location and parameter setting of each FACTS controller [13]. In this paper, the unified power flow controller (UPFC) which is the one type of FACTS controller is used.

Moreover, after the UPFC is installed and the power transfer capability is enhanced [14]. The economic dispatch (ED) should be considered. The ED contains the operating cost of the electrical power system [15]-[16]. The aim of ED

solving is to reduce the fuel cost of all generators in the system to a minimum. In addition, the lowest fuel operating cost of the generator must provide enough electrical power to supply the load demand of the power system.

According to the above contents, the necessary thing is to find the optimal allocation of UPFC to response to these two improvements. In this paper, evolutionary programming (EP) is used to determine the allocation of UPFC. EP is one of the well-known heuristic method which has been proved that it can determine the optimal value for any complex optimization problem. However, the EP has chances to stick in the local area which gives the local answer. This is the disadvantage of EP.

In this paper, the EP is modified. The sine function is applied to EP. The specifics of using is to apply the value of sine function into the mutation method. The aim of this modifying is to take the EP step over from the local area. The IEEE 30-bus is used as a test system. The two objective problems are enhanced total transfer capability (TTC) and total transfer capability per ED, respectively. Both objective functions are operated with optimal power flow (OPF) concept [17]-[26]. Test results from EP with sine function are compared with the original EP.

2. Problem formulation

2.1. Total transfer capability (TTC)

TTC is defined as the capability of power transferring in the electrical power system. The electrical power, both real and reactive power will flow from the generators buses to load buses. According to the concept of optimal power flow

(OPF), the equality and inequality constraints of the generator, voltage, power flow are used [22]. In addition, the operation limit of UPFC is set and set as a static model [27]. The equation of TTC determining is represented by (1)[28]-[29].

$$\max F_1 = TTC = \sum_{i=1}^{ND} P_{Di} + \sum_{i=1}^{NL} P_{Li} \quad (1)$$

Subject to

$$P_{Gi} - P_{Di} + \sum_{k=1}^{n(i)} P_{Ui}(V_{Ui}, \alpha_{Ui}) - \sum_{j=1}^N V_i V_j Y_{ij} \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) = 0 \quad (2)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} + \sum_{k=1}^{n(i)} Q_{Ui}(V_{Ui}, \alpha_{Ui}) + \sum_{j=1}^N V_i V_j Y_{ij} \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) = 0 \quad (3)$$

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} \quad \forall i \in NG \quad (4)$$

$$Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max} \quad \forall i \in NG \quad (5)$$

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad \forall i \in N \quad (6)$$

$$V_j^{\min} \leq V_j \leq V_j^{\max} \quad \forall j \in N \quad (7)$$

$$V_{Ui}^{\min} \leq V_{Ui} \leq V_{Ui}^{\max} \quad (8)$$

$$\alpha_{Ui}^{\min} \leq \alpha_{Ui} \leq \alpha_{Ui}^{\max} \quad (9)$$

Where

P_{Gi} real power generation at the i th bus,

P_{Di} real power loads in the i th bus,

P_{Li} real power losses in the i th bus,
 $P_{Ui}(V_{Ui}, \alpha_{Ui})$ injected real power of UPFC at bus i ,

V_i voltage magnitude at the i th bus,

V_j voltage magnitude at the j th bus,

Y_{ij} the magnitude of the element in j th bus admittance matrix,

θ_{ij} the angle of the element in j th bus admittance matrix,

δ_i voltage angles of the i th bus,

δ_j voltage angles of the j th bus,

Q_{Gi} reactive power generation at the

	<i>i</i> th bus,
Q_{Di}	reactive power load at the <i>i</i> th bus,
$Q_{Ui}(V_{Ui}, \alpha_{Ui})$	injected reactive power of UPFC at bus <i>i</i> ,
$P_{Gi}^{\min}, P_{Gi}^{\max}$	the lower and upper limit of real the power generation at the <i>i</i> th bus,
$Q_{Gi}^{\min}, Q_{Gi}^{\max}$	the lower and upper limit of reactive power generation at the <i>i</i> th bus,
$V_i^{\min}, V_i^{\max}$	lower and upper limit of voltage magnitude at the <i>i</i> th bus,
$V_j^{\min}, V_j^{\max}$	lower and upper limit of voltage magnitude at the <i>j</i> th bus,
$V_{Ui}^{\min}, V_{Ui}^{\max}$	minimum and maximum voltage limits of UPFC at line <i>i</i> ,
$\alpha_{Ui}^{\min}, \alpha_{Ui}^{\max}$	minimum and maximum angle limits of UPFC at line <i>i</i> ,
<i>ND</i>	number of load buses,
<i>NL</i>	number of lines,
<i>N</i>	total number of buses,

This objective function is used in case1 of this paper.

2.2. Economic dispatch (ED)

The ED contains about the operating cost of electrical power system. The objective function of the ED is express in (10) [30]-[32].

$$ED = \sum_{i=1}^m F_i(P_i) = \sum_{i=1}^m (a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i) \quad (10)$$

Where

<i>ED</i>	the total operating cost of the generator,
F_i	the cost function of the <i>i</i> th generator,
P_i	the electrical power of the <i>i</i> th generator,
<i>m</i>	the number of generators in the electrical power system, and
$a_i, b_i \text{ and } c_i$	the cost coefficients of the <i>i</i> th generator.

2.3 TTC per ED

According to the real application, the performance of the electrical power system should not consider only the maximization of TTC or the minimization of fuel cost. The maximum TTC has the chance to give high or highest fuel costs which makes unprofitable. The minimum fuel cost has the chance to give too low TTC which cannot respond to the minimum requirement of TTC. Therefore, the minimum of ED should be indicated with maximum TTC in parallel. In this paper, the ratio of TTC and ED is set as another objective function in (11). The aim of this proposed is to maximize the objective function.

$$\max F_2 = \frac{F_1}{ED} \quad (11)$$

The unit of TTC is MW. The unit of ED, fuel cost is \$/h. Thus, the unit of the objective function is MWh/\$. The meaning is generated possible highest TTC in one hour per 1\$. This objective function names TTC/ED and can be called benefit ratio. This objective function is used as case2 in this paper.

3. Proposed method

3.1. Evolutionary programming

Evolutionary programming (EP) is developed by L. J. Fogel in 1960 in order to use simulated evolution as a learning process aiming to generate artificial intelligence [33]-[39]. EP is well-known. Many papers contain the using of EP for optimization problem in power system [40]-[45]. Moreover, EP is used as a global optimization algorithm [46]. The main concept of EP is inspired by the theory of evolution by means of natural selection. The process of EP starts with initializing individuals in the population. After the objective function is evaluated. The selection process is started to select the individual as parents for the mutation to generate the next generation which is called offspring. The flowchart of EP is shown in Fig. 1.

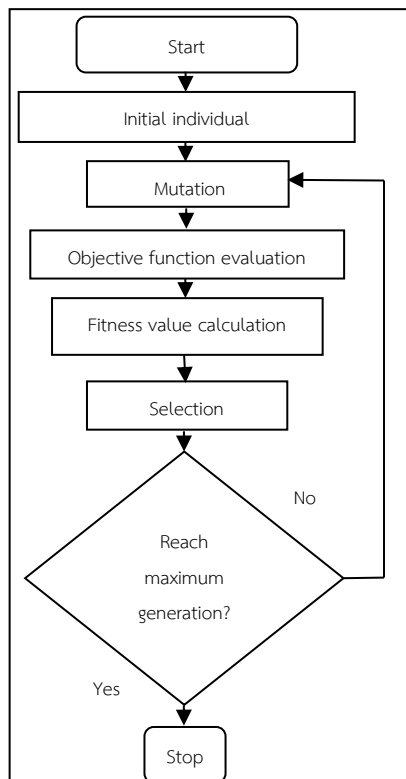


Fig 1. Flow chart of EP

The main components of the algorithm are briefly explained as follows.

The initial individual is initialized randomly using sets of uniform random number distribution ranging over the limitation of each control variable as (12).

$$x_i = x_i^{\min} + u(x_i^{\max} - x_i^{\min}) \quad (12)$$

Where

x_i value of the i th individual,
 $x_i^{\min}, x_i^{\max}$ minimum and maximum value of the i th individual, and
 u define between $[0,1]$.

The Gaussian mutation operator is used in the mutation method. A new offspring is computed by using as (13) and (14).

$$x'_{k,i} = x_{k,i} + N(0, \sigma_{k,i}^2) \quad (13)$$

$$\sigma_{k,i} = (x_i^{\max} - x_i^{\min}) \left(\frac{f_{\max} - f_k}{f_{\max}} + a^g \right) \quad (14)$$

Where

$x'_{k,i}$ value of the i th individual of the k th offspring individual,
 $x_{k,i}$ value of the i th individual of k th parent individual,
 $N(0, \sigma_{k,i}^2)$ Gaussian random number with a mean of zero and standard deviation of $\sigma_{k,i}$,
 $x_i^{\min}, x_i^{\max}$ the minimum and maximum value of the i th variables,
 f_k the fitness value of the k th individual,
 $f_{\max}$ the maximum fitness value of the parent population,
 a a positive constant which is less than one, and
 g the number of present iteration.

The fitness value will be given by using (15).

$$f_k = Kf * F \quad (15)$$

Where

f_k fitness value of k th individual,
and
 Kf set as 1.

The tournament scheme is used for selection method which can be computed from (16) and (17)

$$w_t = \begin{cases} 1 & \text{if } f_k > f_r \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

$$s_k = \sum_{t=1}^{Nt} w_t \quad (17)$$

Where

w_t the weight value of each opponent,

f_k the fitness value of the k th individual,

f_r the fitness of the r th opponent randomly selected from the combined population based on $r = \lfloor 2 * P * u + 1 \rfloor$,

$\lfloor x \rfloor$ the greatest integer less than or equal x ,

u uniform random in the interval $[0,1]$,

P population size,

s_k the total score of each k th individual, and

Nt the number of opponents.

3.2. Modified EP by using sine function

In this paper, EP is modified by placing sin value from sin wave function into the mutation process. This modified algorithm is named

modified EP/sin. The aim of this modified EP/sin is to step over local area. According to the $N(0, \sigma_{k,i}^2)$ of equation (13), the possible value is only positive. The parameter value is only increasing. The values from the sine function can be in positive and negative. This is the difference. And the meaning is valued from the sine function have more flexible. The parameter value of modified EP/sin can be increased and decreased up to the positive or negative values. This makes chances to step over the local area for optimal answers. The sine curve is shown in fig 2.

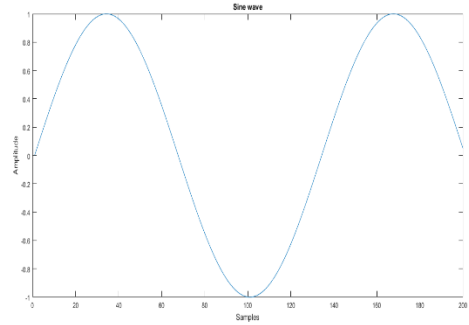


Fig 2. Sine curve

The mutation of modified EP/sin is (18).

$$x'_{k,i} = x_{k,i} + (\sin_{gen} \times N(0, \sigma_{k,i}^2)) \quad (18)$$

Where

$\sin_{gen}$ sine value of current iteration.

In addition, each individual contains system variables and parameters of UPFC. The real number is used for each variable. The k th individual is represented by a trial solution vector as (19).

$$V_k^T = [P_{Gi}, V_{Gi}, P_{Di}, Loc_i, PM_i] \quad (19)$$

Where

V_k^T trial vector of each individual,

P_{Gi} the real power of i th generator excluding generator of the slack bus,

V_{Gi} voltage magnitude of the i th generator,

P_{Di} the real power of load bus at bus i ,
 Loc_i locations of i th UPFC, and
 PM_i parameter of i th UPFC.

4. Case study and experimental results

The IEEE 30-bus test system is used to demonstrate optimal allocation of UPFC for simultaneously F_1 and F_2 objective functions. The individual number of EP is set to 30. The maximum iteration is set to 100. Each batch contents 10 runs to determine minimum, average, and maximum value. Base case TTC is 164.30 MW. The IEEE 30-bus test system is shown in Fig. 3 [47].

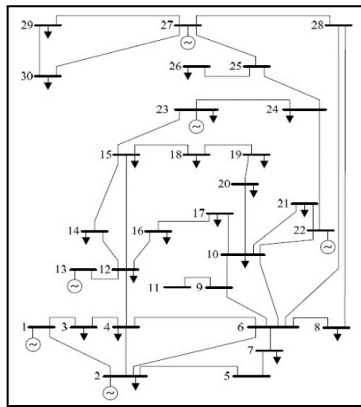


Fig.3 IEEE 30-bus test system

TABLE I Min, average, and max TTC from original EP with UPFC and modified EP/sin with UPFC

	Min TTC (MW)	Avg. TTC (MW)	Max TTC (MW)	STD (MW)
Original EP with UPFC	268.5700	278.5481	290.6410	7.5155
modified EP/sin with UPFC	302.0270	312.2820	324.6520	8.2302

The parameter of UPFC is A_u and V_u . A_u is the angle of UPFC. The V_u is the voltage per unit of voltage of UPFC. The optimal location of this result is line number 10. This line connects bus

The voltage and angle limits of UPFC are $0 \leq V_{ui} \leq 0.1$ pu. and $-\pi \leq \alpha_{ui} \leq \pi$ radian, respectively. The number of UPFC is 1. The individual number of original EP and modified EP/sin are set to 30. The maximum iteration is set to 200.

4.1 Case1: Maximize TTC

In this case, the F_1 objective function is applied. The TTC included losses is determined by using the Newton-Raphson method. The minimum, average, and maximum TTC with UPFC installation are higher than those from the original EP with UPFC installation. Modified EP/sin gives the maximum enhance TTC 97.59% from base case TTC. This modified EP/sin can push the value of each variable step over the local area which enhances maximum TTC. Moreover, the system can be operated without any violence. The minimum, average, and maximum TTC are shown in Table I.

number 6 and number 8. The radian of UPFC is 0.7428 radian. The voltage per unit of UPFC is 0.0118. The optimal allocation of UPFC for max TTC from modified EP/sin is shown in Table II.

TABLE II Optimal allocation of UPFC for max TTC from modified EP/sin

Location	Parameter	
Line 10	Au (rad)	Vu (pu.)
	0.7428	0.0118

4.2 Case2: Maximization TTC per ED

In this case, F_2 objective function is applied. The TTC included losses is determined by using the Newton-Raphson method. The fuel cost is calculated by using the real power of generator and generator co-efficient. The generator co-efficiency is shown in Table III [16].

TABLE III Generator co-efficiency of IEEE 30-bus system

Unit	a_i (\$/MWh) ²	b_i (\$/MWh)	c_i (\$/h)
1	0.0200	2.00	0
2	0.0175	1.75	0
3	0.0250	3.00	0
4	0.0625	1.00	0
5	0.0250	3.00	0
6	0.0083	3.25	0

The average and maximum TTC/ED from modified EP/sin with UPFC installation are higher than those from the original EP with UPFC installation in 0.90% and 2.8%, respectively. This result shows that the ability of modified EP/sin can determine the optimal allocation of UPFC which can improve TTC/ED without any violence. The minimum, average, and maximum TTC/ED are shown in Table IV.

TABLE IV Min, average, and max fuel cost from original EP with UPFC and modified EP/sin with UPFC

	Minimum TTC/ED (MWh/\$)	Average TTC/ED (MWh/\$)	Maximum TTC/ED (MWh/\$)	STD TTC/ED (MWh/\$)
Original EP with UPFC	0.199	0.218	0.243	0.185
modified EP/sin with UPFC	0.190	0.220	0.250	0.191

TTC and ED of modified EP/sin with UPFC installation are shown in Table V.

TABLE V TTC and ED of modified EP/sin with UPFC installation

TTC (MW)	ED (\$/h)
275.845	1105.507

The optimal location of this result is line number 10. This line connects bus number 6 and number 8. The radian of UPFC is 2.699 radian. The voltage per unit of UPFC is 0.0209. The optimal allocation of UPFC for max TTC from modified EP/sin is shown in Table VI.

TABLE VI Optimal allocation of UPFC for min fuel cost from modified EP/sin

Location	Parameter	
Line 10	Au (rad)	Vu (pu.)
	2.6999	0.0209

5. Conclusion

According to the contents, the original EP is modified by placing values from the sine function in the mutation method. This proposed method is used to determine the optimal allocation of UPFC to enhance TTC and maximize TTC/ED. Test results show that this modified EP/sin can determine the optimal allocation of UPFC which can enhance TTC to the maximum and maximize TTC/ED. These can be indicated that the using of modified EP/sin with the installation of UPFC will be profitable and worthwhile sustainable for the operating of the electrical power system.

6. References

- [1] IEEE Power Engineering Society, FACTS Applications, 1995.
- [2] N. G. Hingorani and L. Gyugyi, *Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*, New York: John Wiley & Sons, 1999.
- [3] FACTS Terms & Definitions Task Force of the FACTS Working Group of the DC and FACTS Subcommittee, "Proposed Terms and Definitions for Flexible AC Transmission System (FACTS)," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. (4), 1997.
- [4] Y. H. Song and Y. H. Johns, "Flexible AC Transmission System (FACTS)," *IEE Power and Energy Series* 30, 1999.
- [5] M. A. Abdel- Moamen and N. P. Padhy, "Optimal power flow incorporating FACTS devices-bibliography and survey," *Proc. IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, 2003.
- [6] S. Chansareewittaya, "Optimal Power Flow for Enhanced TTC with Optimal Number of SVC by using Improved Hybrid TSSA," *ECTI Trans. on Computer and Information Technology (ECTI-CIT)*, vol. 13, no. 1, pp. 9-20, 2019.
- [7] S. Chansareewittaya, "Optimal Allocation of Multi-type FACTS Controllers for Optimal Power Flow using Hybrid PSO/SA," *J. of Thai Interdisciplinary Research (JTIR)*, vol. 12, no. 6, pp. 15-21, 2017.
- [8] S. Chansareewittaya and P. Jirapong "Power transfer capability enhancement with optimal maximum number of facts controllers using evolutionary programming" , *Proc. IEEE IECON2011*, Melbourne, Australia, 2011.
- [9] C. H. Liang, C. Y. Chung, K. P. Wong, and X. Z. Duan, "Comparison and improvement of evolutionary programming techniques for power system optimal reactive power flow", *IEE Generation, Transmission and Distribution*, vol. 153(2), 2006.

- [10] N. A. B. Salim and J. Maika, "Optimal allocation of FACTS device to improve voltage profile and power loss using evolutionary programming technique," *Proc. IEEE Region10 Conference*, 2016.
- [11] T. S. Chung and G. Shaoyun, "Optimal power flow incorporating FACTS devices and power flow control constraints," *Proc. International Conference Power System Technology*, 1998.
- [12] Y. Xiao, Y. H. Song and Y. Z. Sun, "Power flow control approach to power systems with embedded FACTS devices," *IEEE Power Engineering Review*, vol. 22(7), pp.53 - 54, 2002.
- [13] J. A. Domínguez-Navarro, J. L. Bernal-Agustín, A. Díaz, D. RequenacEmilio, and P. Vargas, "Optimal parameters of FACTS devices in electric power systems applying evolutionary strategies," *International J. of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 29(1), pp. 83-90, Jan. 2007.
- [14] S. Chansareewittaya and P. Jirapong, "Power transfer capability enhancement with multitype FACTS controllers using hybrid particle swarm optimization," *Electrical Engineering*, vol. 97(2), pp. 119-127, 2015.
- [15] S. Chansareewittaya, "Hybrid MODE/TS for Environmental Dispatch and Economic Dispatch," *ECTI Trans. on Electrical Engineering, Electronics, and Communications (ECTI-EEC)*, vol. 17, no. 1, pp. 78-86, 2019.
- [16] S. Chansareewittaya, "Hybrid Differential Evolutionary/ Tabu Search for Economic Dispatch and Environmental Dispatch," *Proc. ECTI-CON2018*, Chiang Rai, Thailand, 2018.
- [17] G. C. Ejebe, J. G. Waight, S. N. Manuel, and W. F. Tinney, "Fast calculation of linear available transfer capability," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 15(3), 2000.
- [18] R. Jomthong, P. Jirapong, and S. Chansareewittaya, "Optimal choice and allocation of distributed generations using Evolutionary Programming", *Proc. CIGRE-AORC 2011*, Chiang Mai, Thailand, 2011.
- [19] H. W. Dommel and W. F. Tinney, "Optimal Power Flow Solutions," *IEEE Trans. on power apparatus and systems*, vol. PAS-87, no. 10, pp. 1866-1876, Oct. 1968.
- [20] O. Alsac and B. Stott, "Optimal power flow with steady-state security," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-93, issue 3, May 1974.
- [21] C. A. Canizares, "Power flow and transient stability models of FACTS controllers for voltage and angle stability studies", *Proc. IEEE/PES WM on Modeling, Simulation and Applications of FACTS Controllers in Angle and Voltage Stability Studies*, Singapore, 2000.
- [22] M. R. AlRashidi and M. E. El-Hawary, "Applications of computational intelligence techniques for solving the revived optimal power flow problem," *Electric Power Systems Research*, vol. 79(4), pp. 694-702, Apr. 2009.
- [23] G. C. Ejebe, "Available transfer capability calculations," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 13(4), Nov. 1998.
- [24] M. H. Gravener and C. Nwankpa, "Available transfer capability and first order sensitivity,"

- IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 14, May 1999.
- [25] Y. Ou and C. Singh, "Assessment of available transfer capability and margins," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 17, May 2002.
- [26] S. Chansareewittaya and P. Jirapong, "Power transfer capability enhancement with multitype FACTS controller using particle swarm optimization" , *Proc. IEEE TENCON2010*, Fukuoka, Japan, 2010.
- [27] S. Chansareewittaya and P. Jirapong "Total transfer capability enhancement with optimal number of UPFC using hybrid TSSA", *Proc. IEEE ECTI- CON2012*, Phetchaburi, Thailand, 2012.
- [28] A. J. Wood, and B.F. Wollenberg. *Power generation, operation, and control*. New York, USA: John Wiley & Sons Inc., 1996.
- [29] Y. R. Sood, "Evolutionary programming based optimal power flow and its validation for deregulated power system analysis," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol.29, no.1, pp.65-67, 2007.
- [30] S. Chansareewittaya, " Hybrid BA/ TS for Economic Dispatch Considering the Generator Constraint," *Proc. International Conference on Digital Arts, Media and Technology (ICDAMT)*, 2017.
- [31] F. Kreith and D. Y. Goswami, "Economics Methods," *Handbook of energy efficiency and renewable energy*, 1 ed., CRC Press, May 2007, pp.3-1 to 3-24.
- [32] H. Ren, D. Watts, Z. Mi, and J. Lu, "A review of FACTS' practical Consideration and Economic Evaluation," *Proc. Power and Energy Engineering Conference*, 2009.
- [33] K. Nelson, "Evolutionary Programming IV," *Proc. Fourth Annual Conference on Evolutionary Programming*, vol. 3(2), pp. 143-145, 1997.
- [34] L. J. Fogel, A. J. Owens, and M. J. Walsh, *Artificial Intelligence Thorough Simulated Evolution*. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester: U.K., 1966.
- [35] K. Y. Lee and A. E. Mohamed. *Modern Heuristics Optimization Techniques*. New York: John Wiley & Sons, 2008.
- [36] P. Andries, *Computational Intelligence: An Introduction*, Second Edition. New York, USA: John Wiley & Sons, 2007.
- [37] X. Yao, Y. Liu and G. Lin, "Evolutionary programming made faster," *IEEE Trans. on Evolutionary Computation*, vol. 3(2), pp.82-102, July 1999.
- [38] T. Back, U. Hammel, and H.P. Schwefel, "Evolutionary computation: comments on the history and current state," *IEEE Trans. on Evolutionary Computation*, pp. 3-17, April 1997.
- [39] E. G. Talbu, *Metaheuristics from design to implementation*. New Jersey, USA John Wiley & Sons Inc., 2009.
- [40] J. Yuryevich and K. P. Wong, "Evolutionary Programming Based Optimal Power Flow Algorithm," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 14(4), November 1999.
- [41] C. H. Lo et al. , "Parallel evolutionary programming for optimal power flow," *Proc. IEEE International conference on Electric Utility DRPT*, vol.1, pp.190-195, April 2004.
- [42] A. H. Mantawy, M.S. Al-Ghamdi, "A New Reactive Power Optimization

- Algorithm,” *Proc. Power Tech Conference2003*, 2003.
- [43] L. L. Lai. *Intelligent System Applications in Power Engineering: Evolutionary Programming and Neural Networks*. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester: U.K., 1998.
- [44] V. Miranda, D. Srinivasan, and L. M. Proenca, “ Evolutionary computation in power systems,” *International Journal of Electrical Power&Energy Systems*, pp.89-98, Feb. 1998,
- [45] Z. Ma,”Function optimization research based on Evolutionary Programming,” *Proc. IET International Conference on Information Science and Control Engineering2012*, 2012.
- [46] B. Vermeulen, B. T. Chie, S. H. Chen, and A. Pyka, “Evolutionary programming of product design policies. An agent-based model study,” *Proc. 21st Asia Pacific Symposium on Intelligent and Evolutionary Systems*, 2017.
- [47] Reliability Test System Task Force, “The IEEE reliability test system 1996,” *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 14(3), pp. 1010–1020, Aug. 1999.

การศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

A study of the efficiency of a solar water heater

สวัสต์ ภูมิสวัสต์^{1*} วิจิตรา ภูมิสวัสต์²

^{1,2}ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม 73140

Sawat Poomsawat^{1*} Wijitra Poomsawat²

^{1,2}Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen

Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus, Kamphaeng Saen, Nakhon Pathom 73140

*Corresponding author Email: fengswp@ku.ac.th

(Received: October 19, 2018; Accepted: January 20, 2019)

บทคัดย่อ

ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์รวมรายวันในประเทศไทยเฉลี่ยต่อปีมีค่า $18.2 \text{ MJ/m}^2\text{-day}$ พลังงานจากแสงอาทิตย์จำนวนนี้ซึ่งเป็นพลังงานสะอาด ควรนำไปใช้ประโยชน์เพื่อลดการใช้พลังงานจากแหล่งอื่น เช่น พลังงานจากฟอสซิล เป็นต้น วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ คือ การศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นเอง โดยเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ใช้แผงรับรังสีพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ มีส่วนประกอบหลักสองส่วน คือ แผงรับรังสีพลังงานแสงอาทิตย์และถังเก็บน้ำร้อน เครื่องทำความร้อนใช้หลักการเทอร์โมไซฟอน (thermosiphon) ในการไหลเวียนของน้ำระหว่างแผงรับรังสีแสงอาทิตย์กับถังเก็บน้ำร้อน แผงรับรังสีพลังงานแสงอาทิตย์มีขนาด 1×1 ตารางเมตร ทำมุมเอียง 30° องศา และส่วนของถังเก็บน้ำร้อนมีขนาด 50 ลิตร แผงรับรังสีพลังงานแสงอาทิตย์ประกอบด้วยท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $5/8$ นิ้ว จำนวน 9 ท่อ และแผ่นอลูมิเนียมทาสีดำ เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ใช้วัดอุณหภูมิที่ทางเข้าและทางออกของแผงรับรังสีพลังงานแสงอาทิตย์ และไพรานอมิเตอร์ใช้วัดความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ การเก็บข้อมูลอยู่ในช่วงเวลา 9.00 - 16.00 น. เป็นเวลา 5 วัน ในเดือนเมษายน ผลการทดสอบพบว่า ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์เฉลี่ยทั้งวันเท่ากับ 690 W/m^2 โดยมีค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์สูงสุด 993 W/m^2 ในวันที่ 5 ที่เวลา 11:45 น. อุณหภูมิน้ำในถังเฉลี่ยทั้งวันมีค่าสูงสุดเท่ากับ 50°C ที่เวลาประมาณ 13:00 น. โดยค่าเฉลี่ย 5 วันของค่าประสิทธิภาพสูงสุดในแต่ละวันมีค่า 55.8% และค่าเฉลี่ย 5 วันของค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพทั้งวันมีค่า 24.6%

คำสำคัญ: เครื่องทำน้ำร้อน, พลังงานแสงอาทิตย์, ตัวรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ, เทอร์โมไซฟอน

ABSTRACT

The average intensity of solar radiation in Thailand is $18.2 \text{ MJ/m}^2\text{-day}$. This amount of energy should be utilized to reduce the energy consumption from the other sources such as the fossil energy. The main objective of this research is to study the efficiency of a DIY solar water heater. The solar water heater has two main components: a flat plate collector and a storage tank. Thermosiphon principle is used for water circulation between the collector and the storage tank. The collector has $1 \times 1 \text{ m}^2$ area and consist of 9 copper tubes with a diameter of $5/8 \text{ in.}$ and a black aluminum plate. The storage tank has 50 liter volume. The thermocouples type K were used to measure the inlet and outlet temperature of water from the collector, and the water in the storage tank. Pyranometer was used to measure the intensity of solar radiation. The machine had been tested between 9:00-16:00 for 5 days in April. The results showed that the mean intensity of solar radiation was about 690 W/m^2 and its maximum was 993 W/m^2 at 11:45 on the fifth day. The maximum water temperature in the storage tank was 50°C at 13:00. The five days average of the maximum efficiency of each day was 55.8% and the five days average of the all day average efficiency was 24.6%

Keyword: Water heater, solar energy, flat plate solar collector, thermosiphon.

1. บทนำ

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นหนึ่งในพลังงานทดแทนที่มีศักยภาพสูง การใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพื่อลดปริมาณการใช้พลังงานจากแหล่งอื่น โดยเฉพาะพลังงานจากฟอสซิลซึ่งเป็นพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป นอกจากนี้พลังงานแสงอาทิตย์ยังเป็นพลังงานสะอาดที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อย [1] ประเทศไทยซึ่งตั้งอยู่ในบริเวณเส้นศูนย์สูตร ทำให้ได้รับพลังงานแสงอาทิตย์ตลอดทั้งปี โดยพบว่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์รวมรายวันเฉลี่ยต่อปี ทั้งประเทศมีค่า $18.2 \text{ MJ/m}^2\text{-day}$ [2]. แม้ว่าปัจจุบันมีการส่งเสริมการใช้พลังงานแสงอาทิตย์มากขึ้น แต่ปริมาณการใช้ยังถือว่าน้อยเมื่อเทียบกับพลังงานจากแหล่งอื่น การนำพลังงานแสงอาทิตย์มาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ด้านพลังงานแบ่งออกหลักๆเป็นสองประเภทคือ การนำไปประยุกต์ในการผลิตไฟฟ้าและความร้อน การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการทำความร้อนโดยตรงเป็นวิธีการหนึ่งซึ่งมีต้นทุนต่ำเมื่อเทียบกับการนำไปผลิตกระแสไฟฟ้า ปัจจุบันในครัวเรือนนิยมติดตั้งเครื่องทำน้ำร้อนหรือเครื่อง

ทำน้ำอุ่นเพื่อใช้สำหรับชำระล้าง เช่น อาบน้ำ ล้างภาชนะ ชักผ้า เป็นต้น โดยทั่วไปในเขตชุมชนในเทศบาลนคร มีอัตราการใช้น้ำเท่ากับ 250 ลิตรต่อคนต่อวัน [3] ซึ่งความต้องการในการใช้ประโยชน์จากน้ำร้อน มีอัตราการใช้น้ำโดยเฉลี่ยเท่ากับ 50 ลิตรต่อคนต่อวัน [4] ดังนั้นหากสามารถนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้กับเครื่องทำน้ำร้อน พลังงานแสงอาทิตย์ ก็จะเป็นทางเลือกหนึ่งที่ช่วยลดการใช้พลังงานในครัวเรือนลงได้

การศึกษาประสิทธิภาพของแผงรับรังสีของเครื่องทำน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์มีการศึกษาอย่างกว้างขวาง เช่น รุ่งทวี และสุรัชย์ [5] ศึกษาประสิทธิภาพของระบบผลิตน้ำร้อนก่อนนำไปใช้งาน เพื่อสามารถนำไปพัฒนาให้ระบบทำความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น โดยศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำ และความเข้มของแสง ต่อประสิทธิภาพของระบบทำความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ โดยระบบประกอบด้วยแผงรับรังสีพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นโค้งรูปพาราโบลิก มีพื้นที่รับแสง 2.24 m^2 และใช้กระจกเงาในการสะท้อน

แสง ท่อรวมแสงเป็นท่อสุญญากาศมีพื้นที่ 0.27 m^2 โดยควบคุมความเข้มของแสง อัตราการไหลของน้ำ และอุณหภูมิห้องทดลอง ผลการศึกษาพบว่าอัตราการไหลของน้ำและความเข้มของแสงมีผลต่ออุณหภูมิของน้ำ และประสิทธิภาพของระบบผลิตน้ำร้อน โดยอัตราการไหลของน้ำและความเข้มแสงเพิ่มขึ้นทำให้อุณหภูมิของน้ำที่ได้จากระบบและประสิทธิภาพของระบบเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยประสิทธิภาพของระบบอยู่ในช่วง 53-72% อุณหภูมิของน้ำที่ออกจากแผงรับรังสีพลังงานแสงอาทิตย์สูงสุดอยู่ในช่วง $50-78^\circ\text{C}$ ที่อัตราการไหลของน้ำอยู่ในช่วง $0.0083-0.02 \text{ kg/s}$ และที่ความเข้มแสงอยู่ในช่วง $607-1290 \text{ W/m}^2$ ตามลำดับ จักรพันธ์ และชังเซ็ง [6] ได้ทำการออกแบบเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นราบหมุนเวียนน้ำตามธรรมชาติ โดยใช้ถังเก็บน้ำขนาด 50 ลิตร พื้นที่รับแสง $1.2 \times 1.4 \text{ m}^2$ พบว่าประสิทธิภาพของแผงรับรังสีดวงอาทิตย์อยู่ระหว่าง 8.7-81.7%

นอกจากนี้การศึกษาประสิทธิภาพของระบบทำน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ ก็ได้มีการศึกษาเพิ่มเติมเนื่องจากประสิทธิภาพของระบบเป็นปัจจัยหลักที่ใช้ในการพิจารณาถึงความเป็นไปได้ในการนำระบบการทำน้ำร้อนจากแสงอาทิตย์มาใช้งานจริง เช่น นาถพงศ์และคณะ [7] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพแผงรับรังสีพลังงานแสงอาทิตย์ในการผลิตน้ำร้อน โดยการจำลองด้วยโปรแกรม EnergyPlus โดยอ้างอิงข้อมูลสถานะของจังหวัดสงขลาและกรุงเทพมหานคร พบว่าประสิทธิภาพของแผงรับรังสีอาทิตย์มีค่า 19-61% และ 29-56% ตามลำดับ โดยประสิทธิภาพของแผงรับรังสีพลังงานแสงอาทิตย์สูงสุดที่เวลา 12.00-13.00 น. รวมถึงงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ กับไฟฟ้า เช่น การใช้ปั๊มความร้อนกับใช้แผงรับรังสีพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ เช่น ศศิษา เรียมสุวรรณ [8] ศึกษาการเปรียบเทียบระบบทำน้ำร้อนแบบใช้ปั๊มความร้อนกับใช้แผงรับรังสีพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบสำหรับอาคารพักอาศัย โดยระบบทำน้ำ

ร้อนประกอบด้วยแผงรับรังสีพลังงานแสงอาทิตย์กับถังเก็บน้ำร้อนขนาด 150 ลิตร ในการทดสอบจะใช้ปั๊มความร้อนขนาดกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.78 kW และ 1.25 kW ส่วนแผงรับรังสีพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบขนาดพื้นที่รับแสง 2 m^2 จากการวิเคราะห์พบว่าปั๊มความร้อนมีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบมีค่าอยู่ในช่วง 4.2-5.5 โดยมีประสิทธิภาพของระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์อยู่ในช่วง 43.8-52.6 %

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น ระบบผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ กำลังเป็นที่น่าสนใจและมีการวิจัยเพื่อผลิตในเชิงพาณิชย์ เนื่องจากเป็นการลงทุนสร้างระบบเพียงครั้งเดียว แต่พลังงานความร้อนจะได้ไปล่าจากพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งต่างจากเครื่องทำน้ำร้อนจากไฟฟ้าทั่วไป ซึ่งจะต้องเสียค่าไฟฟ้าตลอดอายุการใช้งาน [9] นอกจากนั้นการใช้ระบบผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ ยังเป็นการใช้ประโยชน์จากพลังงานธรรมชาติ และไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นการค้นคว้าและวิจัยเรื่องการศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ จึงมีความจำเป็นเพื่อเพิ่มศักยภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ให้มีความสามารถเท่าเทียมเพื่อใช้ในการทดแทนกับระบบผลิตน้ำร้อนจากฮีทเตอร์ไฟฟ้าได้ต่อไปในอนาคต

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

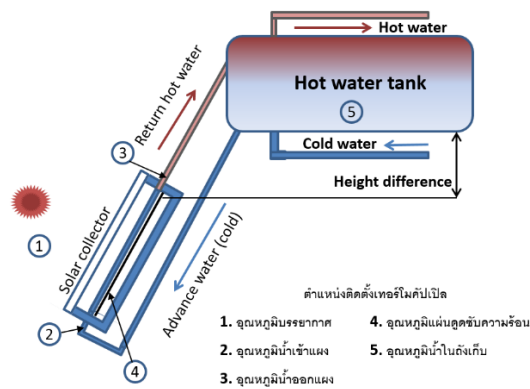
2.1 เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นชนิดแผ่นรับแสงแผ่นเรียบ (flat plate collector) ใช้หลักการหมุนเวียนของน้ำโดยธรรมชาติ แผงรับรังสีพลังงานแสงอาทิตย์ทำมุมเอียง 30° องศา กับแนวระดับ

2.1.1 หลักการทำงานของเครื่อง

หลักการทำงานของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ คือ เมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบบนที่แผงรับรังสีพลังงานแสงอาทิตย์ส่วนหนึ่งจะถูกสะท้อนกลับเนื่องจากกระจกที่ปิด แต่ส่วนใหญ่สามารถผ่านกระจกใสที่ปิดเข้ามากระทบบนแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ (solar collector) ทำให้แผ่นรับ

รังสีแสงอาทิตย์มีอุณหภูมิสูงขึ้น และส่งผ่านความร้อนไปสู่ท่อทองแดง ท่อทองแดงนอกจากได้รับความร้อนจากแผ่นดูดรังสีแล้วยังได้รับความร้อนจากรังสีอาทิตย์โดยตรงด้วย จากนั้นท่อทองแดงที่มีอุณหภูมิสูงจะถ่ายเทความร้อนไปยังน้ำในท่อด้วยการพาความร้อน โดยธรรมชาติ (natural convection) ในการหมุนเวียนน้ำไปยังถังเก็บน้ำ โดยไม่ต้องใช้ปั๊ม ด้วยหลักการของเทอร์โมไซฟอน (thermosiphon) [10] ซึ่งมีหลักการดังนี้คือ เมื่อน้ำที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นมีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้ลอยตัวสูงขึ้นสู่ถังเก็บซึ่งอยู่ที่ระดับสูงกว่า น้ำในถังเก็บที่อุณหภูมิต่ำไหลลงมาสู่แผงรับรังสีพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อพาความร้อนกลับไปเก็บที่ถัง ดังแสดงในรูปที่ 1

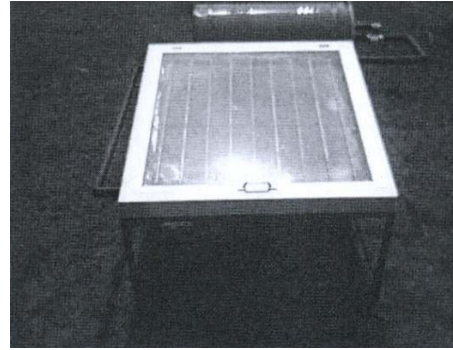


รูปที่ 1 แผนผังแสดงหลักการทำงานของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

2.1.2 ส่วนประกอบของเครื่อง

เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ (flat plate solar collector) ส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน ได้แก่ แผงรับรังสีพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบขนาด $1 \times 1 \text{ m}^2$ และถังเก็บน้ำร้อนขนาด 50 ลิตร แผงรับรังสีพลังงานแสงอาทิตย์มีพื้นที่รับแสงขนาด 1 ตารางเมตรประกอบด้วยท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $5/8$ นิ้ว จำนวน 9 ท่อ และแผ่นอลูมิเนียมทาสีดำ ถังเก็บน้ำหุ้มด้วยฉนวนใยแก้วเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน โดยมีงบประมาณในการ

สร้างทั้งหมด 6,500 บาท รูปเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นเองแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นชนิดแผ่นรับแสงแผ่นเรียบ

2.2 อุปกรณ์

การทดลองมีการติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิ เป็นเทอร์โมคัปเปิลชนิด K โดยติดตั้งที่ตำแหน่งทางเข้า-ทางออกจากแผงรับรังสีพลังงานแสงอาทิตย์ และใช้เทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิของน้ำในถังและอุณหภูมิแผ่นดูดซับรังสีความร้อน ดังแสดงในแผนผังรูปที่ 1 และติดตั้งไพแรนอมิเตอร์ที่แผงรับรังสีพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อวัดความเข้มรังสีแสงอาทิตย์

2.3 วิธีการทดลอง

เครื่องทำน้ำร้อนติดตั้งที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ตำบลกำแพงแสน อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม โดยหันด้านหน้าเอียง 30° องศาไปทางทิศใต้

การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนในเดือนเมษายน เก็บข้อมูลเป็นเวลา 5 วัน ตั้งแต่เวลา 9.00 - 16.00 น. โดยเก็บข้อมูลทุก 15 นาที ในการทดลองนี้ไม่มีการใช้น้ำจากถังเก็บน้ำ น้ำอยู่ในระบบจึงเป็นการไหลวนภายในไม่มีการเพิ่มเติมน้ำใหม่เข้าในระบบ

2.4 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของแผงรับรังสี พลังงานแสงอาทิตย์

ประสิทธิภาพของแผงรับรังสีพลังงานแสงอาทิตย์หา
ได้จากสมการ

$$\eta = \frac{q_U}{A_c I} \quad (1)$$

เมื่อ q_U คือค่าความร้อนที่น้ำได้รับจากแผงรับรังสี
แสงอาทิตย์ (J)

A_c คือพื้นที่แผงรับรังสีพลังงานแสงอาทิตย์
(m^2)

I คือ ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ (W/m^2)

ค่าความร้อนที่น้ำได้รับจากแผงรับรังสีพลังงาน
แสงอาทิตย์ q_U หาได้จากสมการ

$$q_U = \dot{m} c_p (T_o - T_i) \quad (2)$$

เมื่อ $\dot{m}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำในแผงรับ
รังสีพลังงานแสงอาทิตย์ (kg/s)

c_p คือ ค่าความร้อนจำเพาะ (specific heat)
ของน้ำ ($J/kg \text{ } ^\circ C$)

T_i คือ อุณหภูมิน้ำไหลเข้าแผงรับรังสีพลังงาน
แสงอาทิตย์ ($^\circ C$)

T_o คือ อุณหภูมิน้ำไหลออกแผงรับรังสีพลังงาน
แสงอาทิตย์ ($^\circ C$)

อัตราการไหลเชิงมวล ($\dot{m}$) จากเทอร์มิสโตน
ประมาณได้จากสมการ Zerrouki et al. (2002) [11]

$$\dot{m} = \rho g \beta \left(\frac{L_c \sin \theta}{2} + H \right) \left(\frac{\pi N d_c^4}{128 \mu L (1 + \phi)} \right) (T_o - T_i) \quad (3)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำ

β คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวจากอุณหภูมิ
(thermal expansion) ของน้ำ

L_c คือ ความยาวท่อในแผงรับรังสีพลังงาน
แสงอาทิตย์

θ คือ มุมเอียงของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์

H คือ ความต่างระดับระหว่างน้ำไหลเข้าและ
ออกถึงเก็บ

N คือ จำนวนท่อวางขนาน (riser)

d_c คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อในแผงรับ
รังสีแสงอาทิตย์หรือคอลเลคเตอร์
(collector)

ν คือ ความหนืดจลน์ (kinematic viscosity)
ของน้ำ

ϕ คือ อัตราส่วนการสูญเสียความดันในแผงรับ
รังสีพลังงานแสงอาทิตย์เทียบกับท่อที่ต่อกับ
กับแผงรับรังสีพลังงานแสงอาทิตย์

ดังสมการ

$$\phi = \frac{\Delta P_{ct}}{\Delta P_c} \quad (4)$$

เมื่อ ΔP_{ct} คือ การสูญเสียความดันในแผงรับรังสี
แสงอาทิตย์ (Pa)

ΔP_c คือ การสูญเสียความดันท่อต่อกับแผงรับ
รังสีแสงอาทิตย์ (Pa)

เมื่อการไหลในท่อเป็นการไหลแบบลามินาร์ (laminar) ค่า
ของ ϕ กำหนดโดยสมการ

$$\phi = N \frac{L_c}{L_{ct}} \left(\frac{d_c}{d_{ct}} \right)^4 \quad (5)$$

เมื่อ L_{ct} คือ ความยาวท่อที่ต่อกับแผงรับรังสี
พลังงานแสงอาทิตย์

d_{ct} คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อต่อกับ
แผงรับรังสีพลังงานแสงอาทิตย์

ค่าคงที่ใช้ในการคำนวณอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำ
กำหนดดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าคงที่ใช้ในการคำนวณ

พารามิเตอร์	ค่า	หน่วย
ρ	992	kg/m ³
β	3.85×10^{-4}	1/°C
ν	6.85×10^{-7}	m ² /s
θ	30°	degree
H	0.01	m
N	9	-
L_c	0.8	m
d_c	1.58×10^{-2}	m
L_{ct}	0.2	m
d_{ct}	1.58×10^{-2}	m

3. ผลการทดลอง

3.1 ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์และอุณหภูมิ

บรรยากาศ

ผลจากการวัดความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ตลอด 5 วัน
ตั้งแต่ช่วงเวลา 9:00-16:00 น. แสดงดังในรูปที่ 3 โดยค่า
ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์สูงสุดและเฉลี่ยแสดงในตารางที่
2 ค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ส่วนใหญ่มีลักษณะเดียวกัน
คือ ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์แปรผันตามเวลา โดยค่า
ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์สูงสุดในวันที่ 5 ของการทดลองที่
เวลา 11.45 น. โดยมีค่า 993 W/m² และความเข้มรังสี
แสงอาทิตย์มีค่าต่ำสุดในวันที่ 3 ของการทดลองที่เวลา
11:30 น. โดยมีค่า 243 W/m² ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์
ในวันที่ 3 ก่อนข้างแตกต่างจากวันอื่นอย่างเห็นได้ชัด
เนื่องจากในวันนี้มีเมฆปกคลุมเป็นช่วงๆ ทำให้ช่วงเวลา

ประมาณ 10:00 น. ถึง 14:00 น. ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์
แปรผันค่อนข้างสูง ไม่ได้ค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุดแล้ว
จึงค่อยๆ ลดลง โดยพบว่าเวลา 13.15 น. ความเข้มรังสี
แสงอาทิตย์มีค่าสูงสุด 857 W/m²

จากข้อมูลที่ได้สามารถคำนวณค่าความเข้มรังสี
แสงอาทิตย์โดยเฉลี่ยทั้งห้าวันตั้งแต่ช่วงเวลา 9:00-16:00
น. ได้เท่ากับ 690 W/m² เนื่องจากช่วงวันที่ทดสอบอยู่
ในช่วงฤดูร้อนซึ่งดวงอาทิตย์ส่องในแนวเกือบตั้งฉากกับ
พื้นที่ในช่วงเวลานี้และช่วงเวลากลางวันยาวนานกว่า
กลางคืน

ตารางที่ 2 ค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์สูงสุดและเฉลี่ย

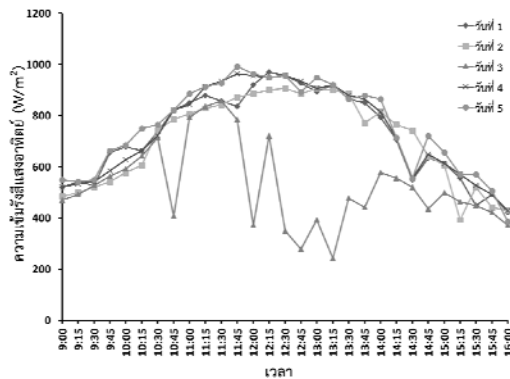
วันที่	ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ (W/m ²)	
	สูงสุด	เฉลี่ย
1	971	421
2	907	393
3	857	243
4	964	429
5	993	386
ค่าเฉลี่ย 5 วัน	940	690

ผลการวัดอุณหภูมิบรรยากาศแสดงดังรูปที่ 4 ผลการ
วัดอุณหภูมิสอดคล้องกับค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ คือ
อุณหภูมิบรรยากาศค่อยๆ สูงขึ้นตามรังสีแสงอาทิตย์ แต่
อุณหภูมิบรรยากาศสูงสุดในช่วงประมาณ 13:00 น.
ยกเว้นในวันที่ 3 ของการทดลองซึ่งอุณหภูมิบรรยากาศลด
ต่ำลงในช่วงเวลาประมาณ 13:00 น. ซึ่งเป็นผลมาจาก
ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ที่แปรผันและลดต่ำลงในช่วง
กลางวัน เนื่องจากมีเมฆปกคลุมเป็นช่วงๆ

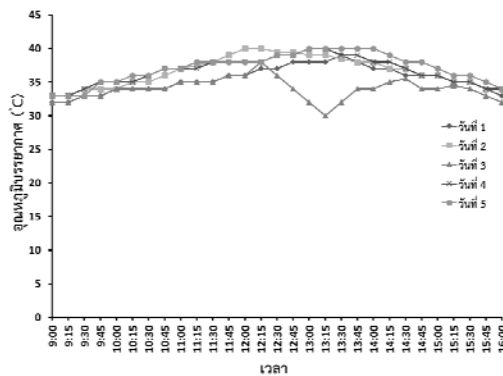
3.2 อุณหภูมิแผ่นดูดซับความร้อนจากแสงอาทิตย์

อุณหภูมิแผ่นดูดซับความร้อนมีการเปลี่ยนแปลงใน
ลักษณะเดียวกับค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ คือ อุณหภูมิ
แผ่นดูดซับความร้อนค่อยๆ สูงขึ้นตามรังสีดวงอาทิตย์ โดย
อุณหภูมิสูงสุดในช่วงเวลา 12.30-13.00 น. มีค่าระหว่าง

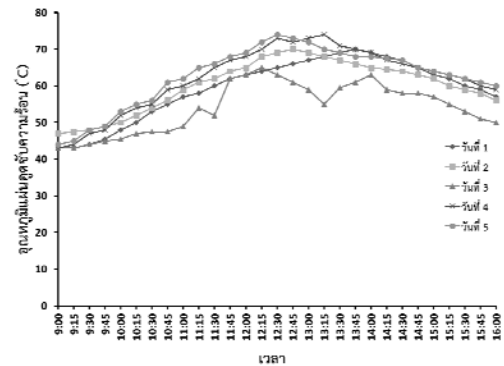
65-75 °C ยกเว้นในวันที่ 3 ซึ่งมีเมฆปกคลุมทำให้ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์มีค่าน้อย และส่งผลให้อุณหภูมิของแผ่นดูดซับความร้อนน้อยลงตามไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 3 ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 4 อุณหภูมิบรรยากาศที่เวลาต่างๆ

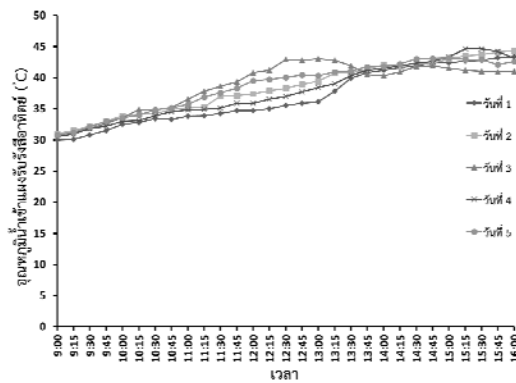


รูปที่ 5 อุณหภูมิของแผ่นดูดซับความร้อนที่เวลาต่างๆ

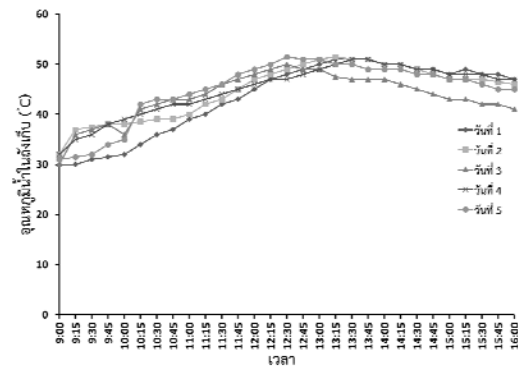
3.3 อุณหภูมิน้ำเข้าและอุณหภูมิน้ำออกแผงรับรังสีแสงอาทิตย์

อุณหภูมิน้ำเข้าและอุณหภูมิน้ำออกแผงรับรังสีแสงอาทิตย์แสดงดังรูปที่ 6 และ 7 ตามลำดับ เห็นได้ว่าอุณหภูมิน้ำเข้าแผงรับรังสีแสงอาทิตย์มีค่าประมาณ 30 °C ที่เวลา 9:00 น. และค่อยๆ สูงขึ้นเป็นประมาณ 40-45 °C ที่เวลา 16:00 น. โดยมีค่าเกือบจะคงที่ระหว่าง 15:00-16:00 น. สำหรับอุณหภูมิน้ำออกแผงรับรังสีแสงอาทิตย์มีค่าประมาณ 30-35 °C ที่เวลา 9:00 น. จากนั้นค่อยๆ สูงขึ้น โดยมีอุณหภูมิสูงขึ้นสูงสุดในช่วง 12:30-13:30 น. ซึ่งอุณหภูมิน้ำออกแผงรับรังสีแสงอาทิตย์มีค่าประมาณ 47-53 °C จากนั้นค่อยๆ ลดต่ำลงเล็กน้อย

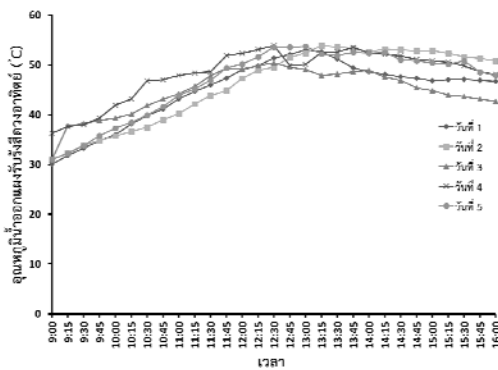
ผลต่างของอุณหภูมิน้ำที่เข้ากับน้ำที่ออกจากแผงรับรังสีพลังงานแสงอาทิตย์ แสดงดังรูปที่ 8 ความแตกต่างของอุณหภูมิมียาค่อยๆ สูงขึ้น มีค่าสูงสุดที่เวลาประมาณ 12:00-13:00 น. จากนั้นจึงค่อยๆ ลดลง โดยผลต่างอุณหภูมิสูงสุดที่วัดได้อยู่ที่ประมาณ 17 °C ในวันที่ 1 และ 4 ของการทดลอง ผลต่างอุณหภูมิในวันที่ 3 มีค่าต่ำสุด เนื่องจากความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ที่ลดต่ำลง ส่งผลให้อุณหภูมิของแผ่นดูดซับความร้อนน้อยลงและทำให้ผลต่างของอุณหภูมิน้ำที่เข้ากับน้ำที่ออกจากแผงรับรังสีพลังงานแสงอาทิตย์มีผลต่างน้อยลงตามไปด้วย



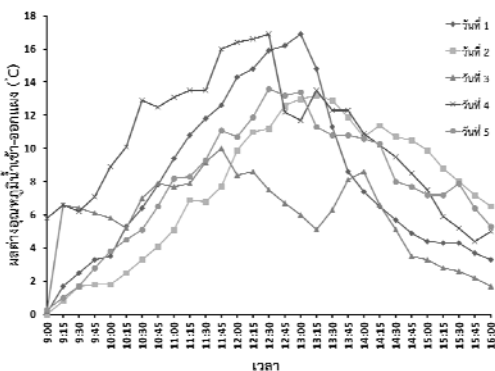
รูปที่ 6 อุณหภูมิน้ำเข้าแผงรับรังสีดวงอาทิตย์



รูปที่ 9 อุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อน



รูปที่ 7 อุณหภูมิน้ำออกจากแผงรับรังสีดวงอาทิตย์

รูปที่ 8 ความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำเข้าและออกแผงรับ
รังสีดวงอาทิตย์

3.4 อุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อน

อุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อนเมื่อเริ่มทดลองเวลา 9.00 น. อยู่ที่ 30 °C จากนั้นค่อยๆ สูงขึ้นโดยมีค่าสูงสุด 50 °C ที่เวลาประมาณ 13.00 น. ดังแสดงในรูปที่ 9 จากนั้นจึงค่อยๆ ลดต่ำลง เห็นได้ว่าอุณหภูมิน้ำในถังในการทดลองวัดที่ 3 มีค่าต่ำกว่าวันอื่นๆ เนื่องจากมีเมฆปกคลุม ทำให้ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ที่ได้รับน้อยกว่าวันอื่น

เมื่อเทียบเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นเองด้วยงบประมาณที่ค่อนข้างต่ำ กับเครื่องทำน้ำร้อนที่ผลิตเพื่อจำหน่าย ที่มีอุณหภูมิน้ำร้อนโดยทั่วไปในช่วง 50-55 °C จะพบว่าเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นเองมีศักยภาพในการพัฒนาเพื่อนำมาใช้งานจริง เนื่องจากมีช่วงอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับเครื่องทำน้ำร้อนที่ผลิตเพื่อจำหน่าย ซึ่งเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์มีอุณหภูมิของน้ำร้อนที่มีค่าเฉลี่ยต่ำสุดและสูงสุดในช่วง 40-47 °C ซึ่งเป็นช่วง 9.00-12.00น. และ 12.00-16.00 น. ตามลำดับ

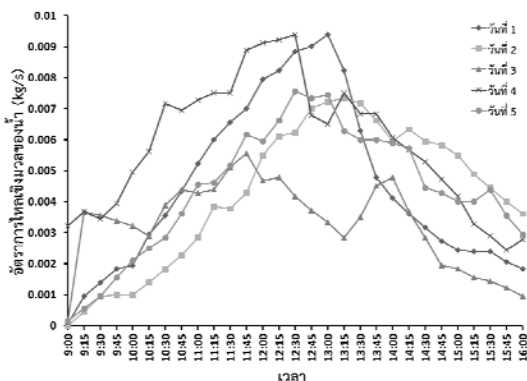
3.5 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบทำความร้อนจากแสงอาทิตย์

ผลลัพธ์จากการคำนวณอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำในระบบผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ แสดงดังรูปที่ 10 ในการคำนวณใช้ค่าสมบัติของน้ำที่อุณหภูมิ 40 °C ทำให้ได้อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำในระบบผลิตน้ำร้อน

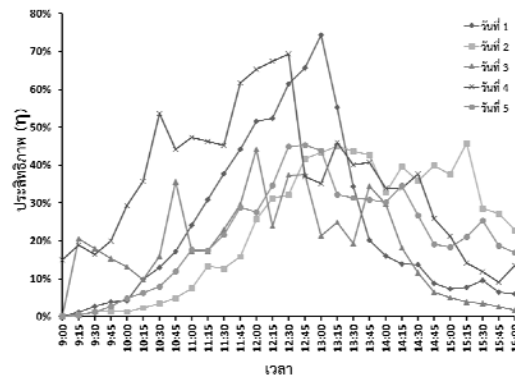
จากพลังงานแสงอาทิตย์แปรผันตามอุณหภูมิซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำในระบบผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์และเวลาที่ได้จึงมีลักษณะเดียวกับผลต่างของอุณหภูมิที่เข้ากับน้ำที่ออกจากรังสีพลังงานแสงอาทิตย์ และเวลา ดังที่อธิบายไว้ข้างต้นในหัวข้ออุณหภูมิที่เข้าและอุณหภูมิที่ออกจากรังสีแสงอาทิตย์

ผลการทดลองพบว่าอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำในระบบทำความร้อน และความเข้มของแสงอาทิตย์มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบผลิตน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์โดยเมื่ออัตราการไหลเชิงมวลของน้ำและความเข้มแสงเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพของระบบก็จะเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของรุ่งทวี และสุรัชย์ [11] โดยอัตราการไหลของน้ำมีค่าสูงสุดที่ 0.009 kg/s ที่เวลา 12.30 น. และทำให้มีค่าประสิทธิภาพสูงสุดของระบบคือ 74.3 % ในวันที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 11 และตารางที่ 3

ค่าประสิทธิภาพที่ช่วงเวลาต่างๆ แสดงดังรูปที่ 11 แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพแปรผันตามช่วงเวลา ซึ่งมีค่าค่อยๆสูงขึ้นในช่วงเช้าและมีค่าสูงสุดที่เวลาประมาณ 12:30 น. โดยค่าเฉลี่ย 5 วันของค่าประสิทธิภาพสูงสุดในแต่ละวันมีค่า 55.8% และค่าเฉลี่ย 5 วันของค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพทั้งวันมีค่า 24.6%



รูปที่ 10 อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำในระบบผลิตน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์



รูปที่ 11 ประสิทธิภาพของระบบทำความร้อนจากแสงอาทิตย์

ตารางที่ 3 ค่าประสิทธิภาพสูงสุดและเฉลี่ย

วันที่	ประสิทธิภาพ	
	สูงสุด	เฉลี่ย
1	74.3%	23.9%
2	45.8%	23.4%
3	44.1%	18.7%
4	69.3%	35.7%
5	45.4%	21.5%
ค่าเฉลี่ย 5 วัน	55.8%	24.6%

4. สรุปและวิจารณ์

การศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นเอง โดยใช้แผงรับรังสีพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ ประกอบด้วยส่วนประกอบหลักสองส่วน คือ แผงรับรังสีพลังงานแสงอาทิตย์และถังเก็บน้ำร้อน เครื่องทำความร้อนใช้หลักการเทอร์โมไซฟอนในการไหลเวียนน้ำระหว่างแผงรับรังสีพลังงานแสงอาทิตย์และถังเก็บน้ำร้อน แผงรับรังสีพลังงานแสงอาทิตย์มีขนาด 1x1 ตารางเมตร ทำมุมเอียง 30 องศาและส่วนเก็บน้ำร้อนมีขนาด 50 ลิตร ในการศึกษาครั้งนี้ ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์เฉลี่ยทั้งวันเท่ากับ 690 W/m² โดยมีค่าสูงสุด 993 W/m² ในวันที่ 5 ที่เวลาประมาณ 11.45 น.

จากการสร้างและทดสอบเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ แสดงให้เห็นว่าสามารถสร้างเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ได้ในต้นทุนที่ไม่สูงมาก (งบประมาณในการสร้างทั้งหมด 6,500 บาท) เมื่อเทียบกับเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการนำมาผลิตจริง และมีราคาที่ยาวในท้องตลาดโดยประมาณ 12,000 – 20,000 บาท สำหรับเครื่องทำน้ำร้อนขนาด 50 ลิตร ที่มีอุณหภูมิน้ำร้อน 50-55 °C เครื่องที่สร้างขึ้นอาศัยหลักการเทอร์โมไซฟอน ทำให้ไม่ต้องใช้ปั๊มจึงมีการทำงานที่ไม่ซับซ้อนและประหยัดพลังงาน อุณหภูมิสูงสุดที่ได้เท่ากับ 50 °C อยู่ในระดับที่สามารถนำไปใช้งานได้จริง ค่าเฉลี่ย 5 วันของค่าประสิทธิภาพสูงสุดในแต่ละวันมีค่า 55.8% และค่าเฉลี่ย 5 วันของค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพทั้งวันมีค่า 24.6% ในการทดลองไม่มีการนำน้ำออกจากถังเก็บไปใช้ทำให้ผลที่ได้แตกต่างจากการใช้งานจริงที่ต้องมีการนำน้ำออกไปใช้และเติมน้ำใหม่เข้ามาในระบบ ซึ่งเป็นประเด็นที่น่าสนใจในการศึกษาต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณนิสิตโครงการวิศวกรรมเครื่องกล และภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] K. H. Solangi, M. R. Islam, R. Saidur, N. A. Rahim and H. Fayazb, “A review on global solar energy policy,” *Renew. Sust. Energ. Rev.*, vol. 15, no. 4, pp. 2149-2163, 2011.
- [2] กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน และภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร. “แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์”, กันยายน 2542
- [3] วีระพล แต่สมบัติ, เจษฎา แก้วกัลยา, สุภาวดี แคลลา, อุทุมพร นิตยาคม, กิตติศักดิ์ โชติมณี และภัสรา รอดอ่อน. “โครงการศึกษาการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำของชาติอย่างมีประสิทธิภาพ และการจัดการ 25 กลุ่มน้ำสำคัญของประเทศ”, รายงานการศึกษาระดับสุดท้าย. สำนักนโยบายสาธารณะ สำนักงานสภาที่ปรึกษาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ. 59 หน้า. 2547.
- [4] มารุต บุรพา, ญัฐนี วรยศ, ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ และ สุริยนต์ ชมดี. “โมเดลอย่างง่ายของการทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์ที่ใช้ความร้อนเสริม”, วารสารคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง, ฉบับที่ 1, เล่มที่ 2, หน้า 15 – 23, 2551.
- [5] รุ่งทวี ผดากาล และ สุรัชย์ รดาการ. “การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบผลิตน้ำร้อน”. วิศวกรรมสาร มก., ฉบับที่ 70, หน้า 96-109, พฤศจิกายน 2552 - มกราคม 2553.
- [6] จักรพันธ์ พิรักษา และ ชังเชิง เลียงจินดาถาวร., “การศึกษาสมรรถนะของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดแผ่นราบแบบหมุนเวียนน้ำตามธรรมชาติ” วารสารวิชาการ ม.อบ., ฉบับที่ 2, หน้า 9-18, พฤษภาคม-สิงหาคม 2549.
- [7] นาถพงศ์ เสนีย์รัตนประยูร, จันทกานต์ ทวีกุล, ชูเกียรติ คุปตานนท์, และ ปัญญรักษ์ งามศรีตระกูล. “การศึกษาประสิทธิภาพแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์ในการผลิตน้ำร้อน โดยใช้โปรแกรม EnergyPlus” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 21., จังหวัดชลบุรี 17-19 ตุลาคม 2550., หน้า 1282-1287.
- [8] ศศิชา เรียมสุวรรณ. “การเปรียบเทียบระบบทำน้ำร้อนแบบใช้ปั๊มความร้อนกับใช้แผงรับรังสีพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบสำหรับอาคารพักอาศัย การเปรียบเทียบ ระบบทำน้ำร้อนแบบใช้ปั๊มความร้อนกับใช้แผงรับรังสีพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบสำหรับอาคารพักอาศัย” วิทยานิพนธ์ (วท.ม) เทคโนโลยีและการจัดการพลังงาน (สหสาขาวิชา). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554.

- [9] กองพัฒนาพลังงานทดแทน ฝ่ายแผนงานพัฒนา
โรงไฟฟ้า การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.
(2560). เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์
[Online]. Available:
http://www4.egat.co.th/re/egat_business/egat_heater/egat_heater.htm
- [10] L. Pastel and C. Watrguy. (2018, June 28).
Thermosiphon [Online]. Available:
<https://www.appropedia.org/Thermosiphon>
- [11] A. Zerrouki, A. Boumedien, and K. Bouhadeb
“The natural circulation solar water heater
model with linear temperature distribution.”
Renew. Energ. vol. 26, no. 4, pp.549-559,
2002.

รูปแบบของล้นเตาที่มีผลต่อพฤติกรรมการไหลของอากาศในเตาหุงต้มประสิทธิภาพสูง

The Configuration of Grate Affect to the Behavior of Airflow in the High Efficiency Cooking Stove

วัชรายุทธ ลำดวน* นิรุต อ่อนสรวง นำนพน พิพัฒน์ไพบูลย์

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

วิทยาเขตสกลนคร 199 ถ.พังโคน-วาริชภูมิ อำเภอพังโคน จังหวัดสกลนคร 47160

Watcharayut Lumdoun* Nirut Onsalung Namphon Pipatpaiboon

Department of Mechanical Engineering Faculty of Industry and Technology

Rajamangala University of Technology Isan Sakonnakhon Campus

199 Phangkhon-Waritchaphum Road, Phangkhon, Sakonnakhon, 47160

*Corresponding author Email: tammkung@hotmail.com

(Received: January 19, 2018; Accepted: April 20, 2019)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะของรูปแบบล้นเตาต่อพฤติกรรมการไหลของอากาศในเตาหุงต้มประสิทธิภาพสูง โดยใช้วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) ซึ่งได้ทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตต่างๆ เหมือนกับงานวิจัยต้นแบบ [11] จากการวิเคราะห์พบว่าผลการกระจายอุณหภูมิของอากาศในเตาหุงต้มประสิทธิภาพสูงสอดคล้องกับงานวิจัยต้นแบบ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 0.77% จากนั้นได้ทำการปรับเปลี่ยนรูปแบบล้นเตาได้แก่ จำนวนรูล้นเตา ความหนาล้นเตา และอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางรูล้นเตาบนต่อล่างที่แตกต่างกันรวม 27 รูปแบบ เพื่อทำการวิเคราะห์หารูปแบบล้นเตาที่ทำให้มีแนวโน้มการเผาไหม้ดีที่สุด โดยพิจารณาจากความเร็วเฉลี่ย กล่าวคือความเร็วของอากาศที่มีค่าต่ำ จะช่วยเพิ่มระยะเวลาในการคลุกเคล้าของอากาศกับเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้จึงทำให้การเผาไหม้ดีขึ้น และส่งผลให้แนวโน้มประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงตามไปด้วย จากการศึกษาพบว่าจำนวนรูล้นเตาที่ทำให้แนวโน้มการเผาไหม้ดีที่สุดคือ 44 รู ความหนาล้นเตา 30 มิลลิเมตร และมีอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางรูล้นเตาบนต่อล่าง 13:14 มิลลิเมตร

คำสำคัญ: ล้นเตา พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ พฤติกรรมการไหลของอากาศ เตาหุงต้มประสิทธิภาพสูง

ABSTRACT

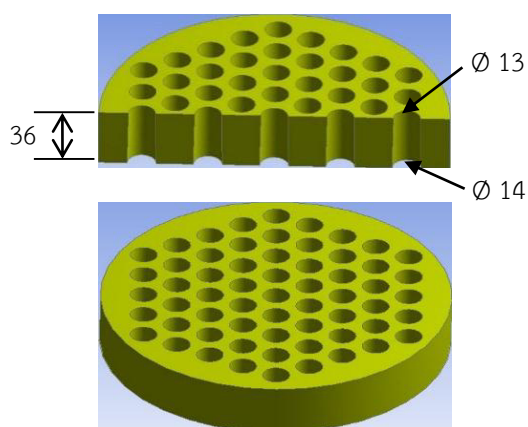
This research aims to study the configuration of grate affect to the behavior of airflow in the high efficiency cooking stove using computational fluid dynamics (CFD). This research defines the model mesh boundary condition from a previous study [11]. The analysis found that the temperature distribution is consistent with a previous study, by the mean error of 0.77%. Then make modify the configuration of grate such as number of holes, thickness and the diameter ratio of hole with different total 27 models to fine the best burning trend, based on the average speed. That is at low speed of airflow can improves times to mixing of air and fuel in the combustion chamber, thus burning up as a

result and have a good trend of high thermal efficiency. From this study found that the best burning trend can be said that the number of grate holes is 44, thickness of grate is 30 mm and the diameter ratio of hole is 13:14 mm.

Keyword: Grate, computational fluid dynamics, behavior of airflow, high efficiency cooking stove.

1. บทนำ

ลิ้นเตาหุงต้มประสิทธิภาพสูงที่ใช้ในปัจจุบันมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 156 มม.หนา 36 มม. และมีจำนวนรูลิ้นเตาทั้งหมด 61 รู ลักษณะเป็นรูปทรงกรวยคว่ำ มีอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางรูลิ้นเตาบนต่อล่าง 13:14 มม. มีลักษณะการวางกระจายบนลิ้นเตาเป็นรูปหกเหลี่ยม [1]–[3] แสดงดังรูปที่ 1 เพื่อช่วยรีด และเร่งความเร็วของอากาศให้ดีขึ้นจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าจำนวนรูลิ้นเตา 61 รู ค่อนข้างมีปัญหาในการผลิตเนื่องจากมีจำนวนรูที่มาก ทำให้เกิดความเสียหายระหว่างการผลิต ต้องอาศัยช่างที่มีความชำนาญจึงจะสามารถผลิตได้เร็ว และทันต่อความต้องการของผู้บริโภค ซึ่งปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดยการปรับลดจำนวนรูลิ้นเตาให้น้อยลง แต่ลักษณะการกระจายของรูลิ้นเตายังคงรูปแบบเดิม การหาประสิทธิภาพเตาทำได้โดยการทดลองจริง [4]–[5] ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่ค่อนข้างถูกต้องแม่นยำ แต่ใช้เวลาในการทดลองเป็นเวลานาน การวัดค่าความเร็ว และการสังเกตพฤติกรรมการไหลของอากาศภายในเตาทำได้ค่อนข้างลำบาก เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของเตา และเปลวไฟที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้



รูปที่ 1 ลิ้นเตาหุงต้มประสิทธิภาพสูง

ปัจจุบันจึงได้มีการนำเอาวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมาช่วยในการออกแบบ และวิเคราะห์เตาหุงต้มแบบต่างๆ [6]–[12] ซึ่งช่วยให้ลดระยะเวลาในการเก็บข้อมูลประหยัดค่าใช้จ่าย และให้ผลที่ค่อนข้างใกล้เคียงกับการทดลองจริง ซึ่งเป็นตัวช่วยหนึ่งในการทราบถึงพฤติกรรมการกระจายตัวของอุณหภูมิ และทิศทางการไหลของอากาศภายในเตาหุงต้มได้

มานะ [8]–[9] ได้จำลองการไหลของอากาศผ่านรูรังผึ้งเตาหุงต้มประสิทธิภาพสูงกรณีที่ไม่มีการเผาไหม้เชื้อเพลิง และไม่มีลักษณะที่ปากเตาด้านบนโดยใช้วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ จากการศึกษาพบว่าวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณให้ผลสอดคล้องกับการทดลอง และสามารถอธิบายพฤติกรรมการไหลของอากาศผ่านรูรังผึ้งเตาหุงต้มประสิทธิภาพสูงได้ Mana [10] ได้ทำการศึกษาการไหลเชิงตัวเลขของอากาศในเตาหุงต้มประสิทธิภาพสูงกรณีที่ไม่มีการเผาไหม้เชื้อเพลิงในเตาด้านบน ภายใต้เงื่อนไขการพาความร้อนแบบธรรมชาติ เพื่อเปรียบเทียบจำนวนรูรังผึ้ง 61, 44 และ 37 รู จากการศึกษาพบว่า จำนวนรูรังผึ้ง 44 รู มีแนวโน้มให้การเผาไหม้ดีที่สุด ธนรัฐ [11] (งานวิจัยต้นแบบ) ได้ทำนายพฤติกรรมการไหลของอากาศภายในเตาหุงต้มประสิทธิภาพสูงเมื่อมีการเผาไหม้เชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ และมีลักษณะที่ปากเตาด้านบน โดยใช้วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ซึ่งจากการศึกษาพบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิ และพฤติกรรมการไหลของอากาศเป็นไปตามกฎทางฟิสิกส์ และหลักความเป็นจริง และพบว่าวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ สามารถทำนายการไหลของอากาศผ่านรูรังผึ้งเตาหุงต้มประสิทธิภาพสูงกรณีมีการเผาไหม้เชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ และมีลักษณะที่ปากเตาด้านบนได้

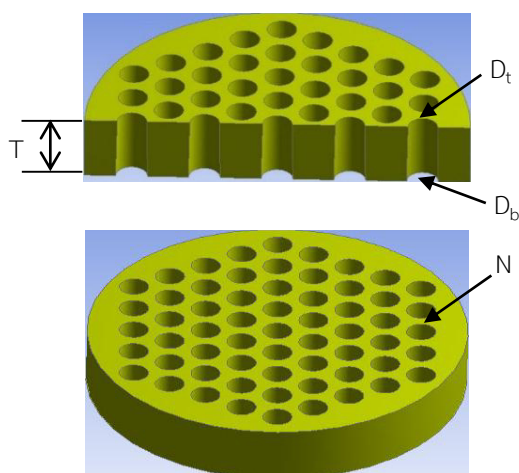
ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะใช้วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ มาช่วยวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลของ

อากาศในเตาหุงต้มประสิทธิภาพสูง โดยเริ่มจากการสร้างแบบจำลองที่มีขอบเขตการไหลของอากาศภายในเตาในรูปแบบจำลอง 3 มิติ (Model A1) ที่มีขนาดเท่ากับงานวิจัยต้นแบบ จากนั้นใช้โปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณประมวลผลตามเงื่อนไขขอบเขตของงานวิจัยต้นแบบ ซึ่งผลที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์ และเปรียบเทียบกัน หากพบว่าผลที่ได้จากแบบจำลองสอดคล้องกับงานวิจัยต้นแบบแล้ว จึงจะนำแบบจำลองดังกล่าวมาทำการปรับเปลี่ยนรูปแบบล้นเตา เพื่อหาแบบที่ทำให้เกิดแนวโน้มการเผาไหม้ที่ดีที่สุดต่อไป

2. วิธีดำเนินงานวิจัย

2.1 รูปแบบล้นเตา

การศึกษารูปแบบล้นเตาต่อพฤติกรรมกรรมการไหลของอากาศในเตาหุงต้มประสิทธิภาพสูงครั้งนี้ ได้มีการปรับเปลี่ยนรูปแบบล้นเตาได้แก่ จำนวนรูล้นเตา ความหนาล้นเตา และอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางรูล้นเตาบนต่อล่าง ที่แตกต่างกันรวม 27 รูปแบบ แสดงดังรูปที่ 2 และข้อมูลในตารางที่ 1 โดยล้นเตาดังกล่าวจะถูกปรับเปลี่ยนมาจากจำนวนรูล้นเตาสองแบบคือ 61, 44 และ 37 รู ซึ่งแต่ละแบบจะมีการเจาะรูที่มีลักษณะการจัดวางเป็นรูปหกเหลี่ยม โดยที่ Model A1 จะมีจำนวนรูล้นเตา ความหนาล้นเตา และอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางรูล้นเตาบนต่อล่าง เท่ากับงานวิจัยต้นแบบ [11]



รูปที่ 2 รูปแบบล้นเตาที่ปรับเปลี่ยน

ตารางที่ 1 รายละเอียดการปรับเปลี่ยนรูปแบบล้นเตา

No.	Model	N	T	$D_t : D_b$
1	A1	61	36	13 : 14
2	A2			13 : 15
3	A3			13 : 16
4	A4		33	13 : 14
5	A5			13 : 15
6	A6			13 : 16
7	A7		30	13 : 14
8	A8			13 : 15
9	A9			13 : 16
10	A10	44	36	13 : 14
11	A11			13 : 15
12	A12			13 : 16
13	A13		33	13 : 14
14	A14			13 : 15
15	A15			13 : 16
16	A16		30	13 : 14
17	A17			13 : 15
18	A18			13 : 16
19	A19	37	36	13 : 14
20	A20			13 : 15
21	A21			13 : 16
22	A22		33	13 : 14
23	A23			13 : 15
24	A24			13 : 16
25	A25		30	13 : 14
26	A26			13 : 15
27	A27			13 : 16

เมื่อ N คือ จำนวนรูล้นเตา

T คือ ความหนาล้นเตา, (มม.)

D_t คือ เส้นผ่านศูนย์กลางรูล้นเตาบน, (มม.)

D_b คือ เส้นผ่านศูนย์กลางรูล้นเตาล่าง, (มม.)

2.2 เงื่อนไขขอบเขต และตัวแปร

เงื่อนไขขอบเขต และค่าตัวแปรต่างๆ ที่กำหนดลงในโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ถูกนำมาจากงานวิจัยต้นแบบ [11] ดังแสดงในตารางที่ 2 จากการที่พฤติกรรมการไหลของอากาศภายในเตาเป็นการพาความร้อนแบบธรรมชาติ จึงไม่ได้กำหนดอัตราการไหลใดๆ เข้าไป เป็นเพียงการปล่อยให้อากาศไหลเข้าและออกอย่างอิสระอันเนื่องมาจากความดันที่เกิดขึ้น แสดงดังรูปที่ 3

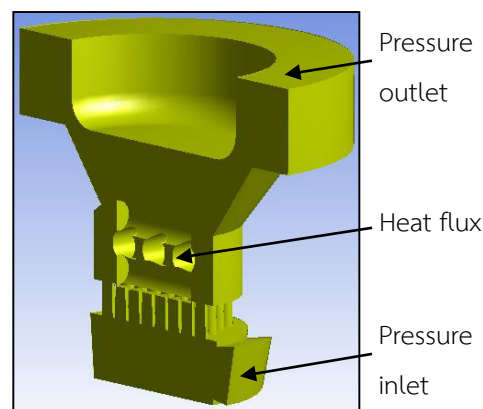
ในส่วนของค่าความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นจากการไหลของอากาศถูกกำหนดเป็นแบบ Realizable k-ε เนื่องจากลักษณะทางกายภาพภายในเตาหุงต้มค่อนข้างมีความซับซ้อน การไหลของอากาศจะเกิดการหมุนวนภายในเตา ซึ่งเงื่อนไขดังกล่าวได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อช่วยในการประมวลผลการไหลในลักษณะนี้ [8] และค่าการลู่เข้าของคำตอบของทุกสมการที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณในโปรแกรม มีค่าเท่ากับ 10^{-5} เนื่องจากต้องการให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลโดยที่ผลลัพธ์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 2 เงื่อนไขขอบเขตการประมวลผลทาง CFD

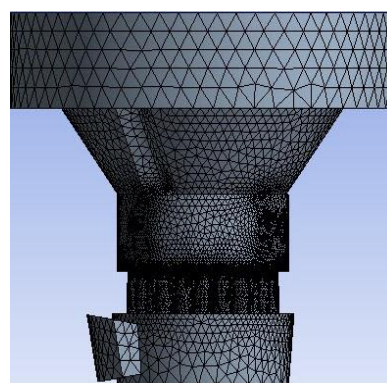
Condition	Value
Inlet boundary condition	Pressure inlet 101,325 Pa
Outlet boundary condition	Pressure outlet 101,325 Pa
Time	Steady state
Turbulence model	Realizable k-ε
Wall heat flux	230,732 W/m ²

2.3 ลักษณะกริดของแบบจำลอง

แบบจำลองเตาถูกสร้างขึ้นในรูปแบบ 3 มิติ โดยที่กริดมีลักษณะเป็นรูปทรงสามเหลี่ยม มีจำนวนของกริดประมาณ 1,900,000 cells และจากการตรวจสอบความเป็นอิสระของกริดดังกล่าวพบว่ามีความเหมาะสม ผลลัพธ์ที่ได้มีค่าความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อย แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 3 ขอบเขตพื้นที่



รูปที่ 4 ลักษณะของกริด

2.4 สมการที่เกี่ยวข้อง

การกำหนดค่าฟลักซ์ความร้อน จะใช้ค่าที่ได้จากงานวิจัยต้นแบบ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$H.F. = \frac{h \times m}{A \times t} \quad (1)$$

เมื่อ H.F. คือ ค่าฟลักซ์ความร้อน (W/m²)

h คือ ค่าความร้อนของถ่านไม้ (J/kg)

m คือ มวลของถ่านไม้ (kg)

A คือ พื้นที่ผิว (m²)

t คือ เวลา (s)

การพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อน (Percentage of error, P.E.) เมื่อเทียบผลจากงานวิจัยต้นแบบกับผลที่ได้จากแบบจำลอง (Model A1) หาได้จากสมการที่ (2)

$$P.E. = \frac{(CFD_{(Old)} - CFD_{(New)})}{(CFD_{(Old)})} \times 100\% \quad (2)$$

เมื่อ P.E. คือ ค่าความคลาดเคลื่อน

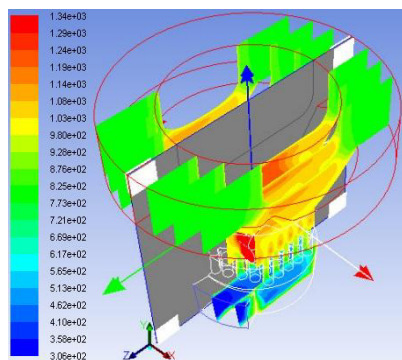
$CFD_{(Old)}$ คือ ข้อมูลจาก CFD เดิม

$CFD_{(New)}$ คือ ข้อมูลจาก CFD ใหม่

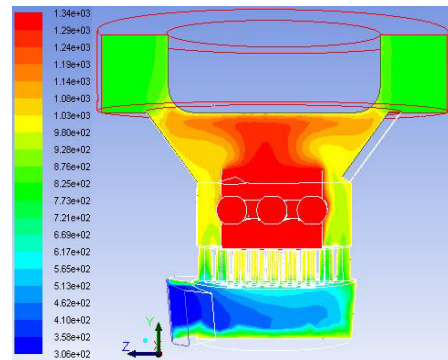
3. ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับงานวิจัยต้นแบบ

3.1 การกระจายตัวของอุณหภูมิ

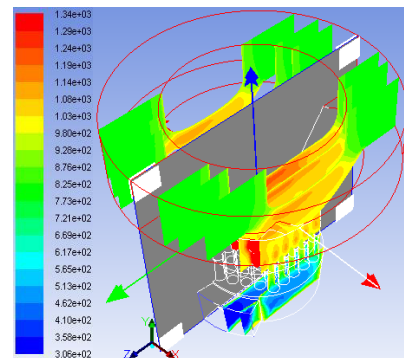
จากรูปที่ 5-6 แสดงการแบ่งแถบสีอุณหภูมิ (K) ตามระนาบ X และแสดงแถบสีอุณหภูมิ (K) ที่ระนาบ X=0 ของงานวิจัยต้นแบบ ตามลำดับ และจากรูปที่ 7-8 แสดงการแบ่งแถบสีอุณหภูมิ (K) ตามระนาบ X และแสดงแถบสีอุณหภูมิ (K) ที่ระนาบ X=0 ของ Model A1 ตามลำดับ พบว่ามีความสอดคล้องกันกล่าวคือ อุณหภูมิบริเวณใกล้ถ่านไม้เชื้อเพลิงจะมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งอื่นๆ เนื่องจากอยู่ใกล้ผิวของถ่านไม้เชื้อเพลิงที่มีการแผ่รังสีความร้อนออกมา ซึ่งอากาศโดยรอบยังได้รับผลของความร้อนนี้จากการพาความร้อน จึงทำให้มีอุณหภูมิที่สูงขึ้นเช่นเดียวกัน จากรูปที่ 9 และตารางที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิ และค่าความคลาดเคลื่อนที่ตำแหน่งต่างๆ ของงานวิจัยต้นแบบกับ Model A1 พบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยคิดเป็น 0.77%



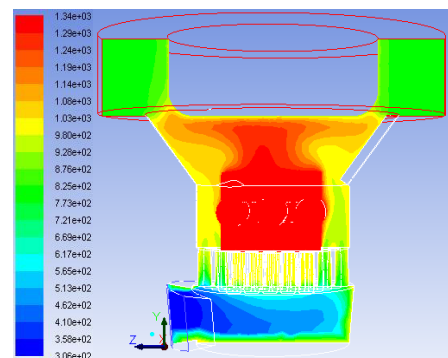
รูปที่ 5 แสดงการแบ่งแถบสีอุณหภูมิ (K) ตามระนาบ X ของงานวิจัยต้นแบบ [11]



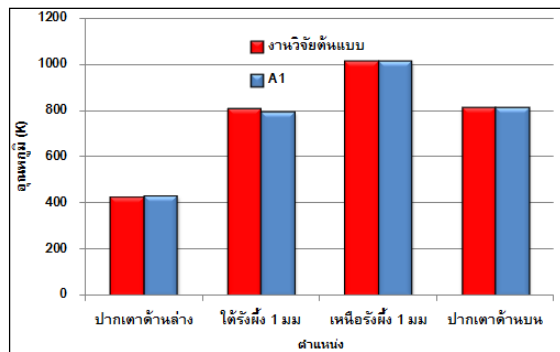
รูปที่ 6 แสดงแถบสีอุณหภูมิ (K) ที่ระนาบ X=0 ของงานวิจัยต้นแบบ [11]



รูปที่ 7 แสดงการแบ่งแถบสีอุณหภูมิ (K) ตามระนาบ X ของ Model A1



รูปที่ 8 แสดงแถบสีอุณหภูมิ (K) ที่ระนาบ X=0 ของ Model A1



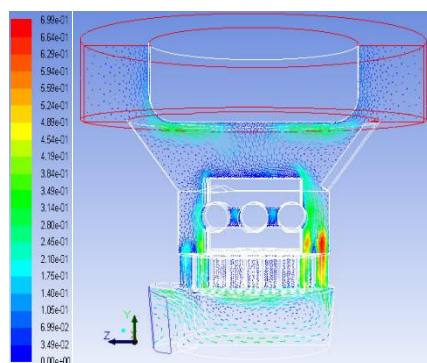
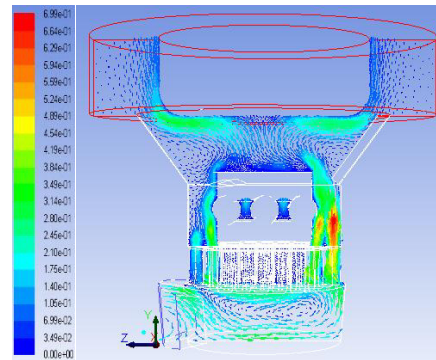
รูปที่ 9 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิ (K)

ตารางที่ 3 ค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิ

ตำแหน่ง	ค่าความคลาดเคลื่อน (%)
ปากเตาด้านล่าง	1.46
ใต้รังผึ้ง 1 มม.	1.41
เหนือรังผึ้ง 1 มม.	0.15
ปากเตาด้านบน	0.06

3.2 พฤติกรรมการไหลของอากาศ

จากรูปที่ 10 แสดงเวกเตอร์ความเร็ว (m/s) ที่ระนาบ $X=0$ ของงานวิจัยต้นแบบ และรูปที่ 11 แสดงเวกเตอร์ความเร็ว (m/s) ที่ระนาบ $X=0$ ของ Model A1 พบว่ามีความสอดคล้องกัน กล่าวคืออากาศจะไหลเข้าสู่ภายในเตา หุงต้มประสิทธิภาพสูงทางปากเตาด้านล่างในแนวนอนก่อนที่จะไหลชนกับผนังเตาด้านหลังซึ่งอยู่ตรงกันข้ามแล้วเคลื่อนที่ขึ้นตามแนวตั้งกระจายตัวผ่านรูล้นเตาไหลผ่านช่องว่างระหว่างถ่านไม้เชื้อเพลิง หลังจากนั้นจึงเคลื่อนที่ออกจากปากเตาด้านบน

รูปที่ 10 แสดงเวกเตอร์ความเร็ว (m/s) ที่ระนาบ $X=0$ ของงานวิจัยต้นแบบ [11]รูปที่ 11 แสดงเวกเตอร์ความเร็ว (m/s) ที่ระนาบ $X=0$ ของ Model A1

4. ผลการวิเคราะห์เมื่อปรับเปลี่ยนรูปแบบล้นเตา

4.1 การกระจายตัวของอุณหภูมิ

จากการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบผลของการกระจายตัวของอุณหภูมิของอากาศ เมื่อมีการปรับเปลี่ยนรูปแบบล้นเตา ซึ่งประกอบไปด้วย จำนวนรูล้นเตา ความหนาแน่นเตา และอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางรูล้นเตาบนต่อล่างที่แตกต่างกันรวม 27 รูปแบบ จากการศึกษาพบว่า การกระจายตัวของอุณหภูมิของอากาศที่ตำแหน่งต่างๆ มีความสอดคล้องซึ่งกันและกัน กล่าวคือ บริเวณปากเตาด้านล่างจะมีอุณหภูมิต่ำที่สุด ส่วนบริเวณใต้รังผึ้ง และปากเตาด้านบนจะมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นและมีค่าที่ใกล้เคียงกัน และบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงที่สุดคือ บริเวณเหนือรังผึ้ง ซึ่งเป็นไปตามหลักการการพาความร้อนแบบธรรมชาติ โดยที่ความร้อนจะมีการกระจายตัวขึ้นสู่ด้านบนโดยมีอากาศเป็นตัวกลาง ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 12 ซึ่งค่าที่ได้จะไม่เท่ากันทั้ง 27 รูปแบบ อันเป็นผลมาจากการปรับเปลี่ยนจำนวนรูล้นเตา ความหนาแน่นเตา และอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางรูล้นเตาบนต่อล่างของล้นเตา

จากรูปที่ 13 แสดงอุณหภูมิ (K) เฉลี่ยของ Model A1 ถึง A27 เมื่อวิเคราะห์แล้วพบว่ากลุ่มจำนวนรูล้นเตาที่ให้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสูงที่สุดคือจำนวนรูล้นเตา 37 รู รองลงมาคือจำนวนรูล้นเตา 44 รู และ 61 รู ตามลำดับ และเมื่อวิเคราะห์ความหนาแน่นเตาพบว่าความหนาแน่นเตาที่ให้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยสูงที่สุดคือ 33 มิลลิเมตร รองลงมาคือ 30 และ 36 มิลลิเมตร ตามลำดับ และเมื่อวิเคราะห์อัตราส่วน

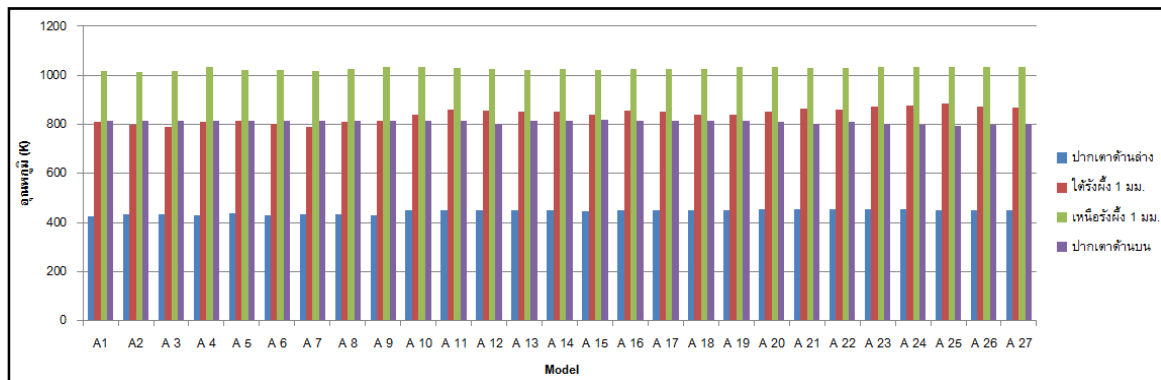
เส้นผ่านศูนย์กลางรูลึ้นเตาบนต่อล่างพบว่าค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางรูลึ้นเตาบนต่อล่างจะแปรผันไปตามจำนวนรูลึ้นเตา และความหนาของลึ้นเตา

4.2 พฤติกรรมการไหลของอากาศ

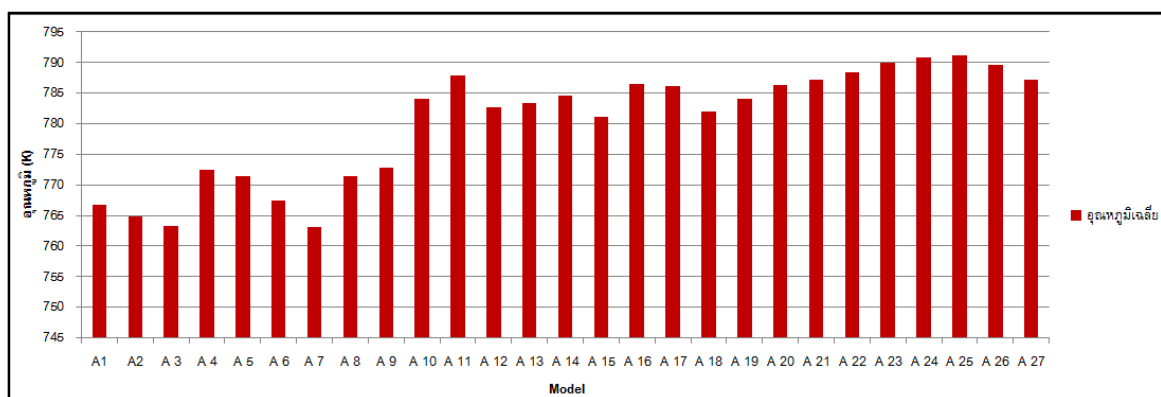
จากการศึกษาพบว่า การกระจายความเร็วของอากาศที่ตำแหน่งต่างๆ มีความสอดคล้องกันดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 14 ซึ่งจะมีค่าที่แตกต่างกันทั้ง 27 รูปแบบ เป็นผลมาจากการปรับเปลี่ยนจำนวนรูลึ้นเตา ความหนาของลึ้นเตา และอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางรูลึ้นเตาบนต่อล่าง

จากรูปที่ 15 แสดงความเร็ว (m/s) เฉลี่ยของ Model A1 ถึง A27 เมื่อทำการวิเคราะห์แล้วพบว่ากลุ่มจำนวนรู

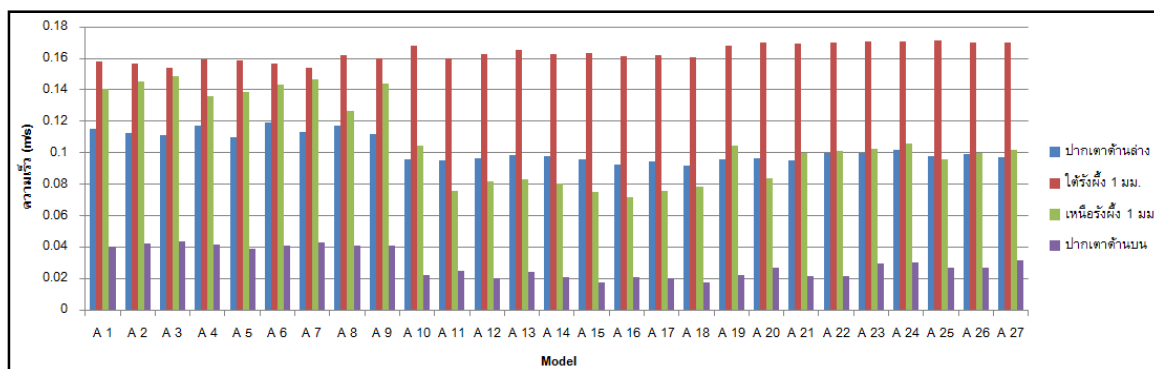
ลึ้นเตาที่ให้ค่าความเร็วเฉลี่ยสูงที่สุดคือจำนวนรูลึ้นเตา 61 รู รองลงมาคือจำนวนรูลึ้นเตา 37 รู และ 44 รู ตามลำดับ และเมื่อวิเคราะห์ความหนาของลึ้นเตา พบว่าความหนาที่ให้ค่าความเร็วของอากาศเฉลี่ยสูงสุดคือ 36 มิลลิเมตร รองลงมาคือ ความหนา 33 และ 30 มิลลิเมตร ตามลำดับ และเมื่อวิเคราะห์อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางรูลึ้นเตาบนต่อล่าง พบว่าอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางรูลึ้นเตาบนต่อล่างที่ให้ค่าความเร็วของอากาศเฉลี่ยสูงสุดคือ 13:15 มิลลิเมตร รองลงมาคือ 13:16 และ 13:14 มิลลิเมตร ตามลำดับ



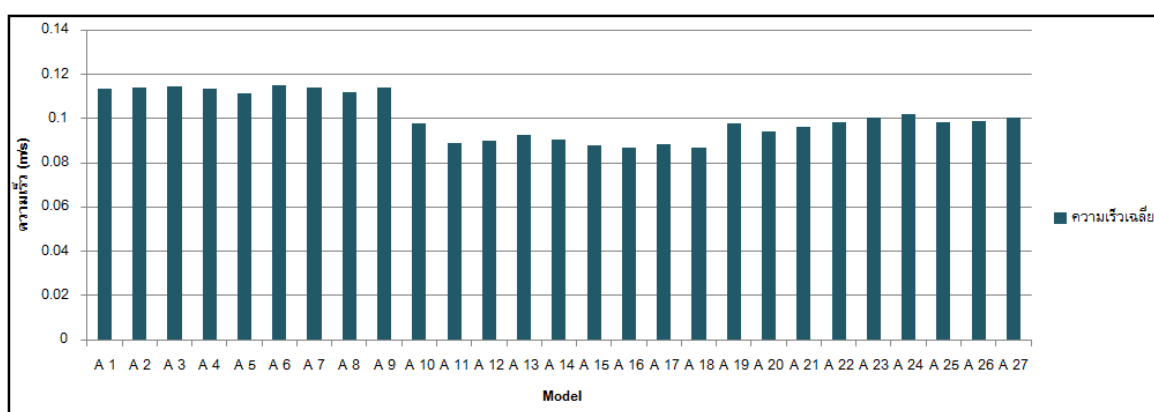
รูปที่ 12 แสดงอุณหภูมิ (K) ที่ตำแหน่งต่างๆ ของ Model A1–A27



รูปที่ 13 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ย (K) ของ Model A1–A27



รูปที่ 14 แสดงความเร็ว (m/s) ที่ตำแหน่งต่างๆ ของ Model A1-A27



รูปที่ 15 แสดงความเร็วเฉลี่ย (m/s) ของ Model A1-A27

5. สรุป

จากการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่สร้างขึ้น (Model A1) พบว่าผลการกระจายตัวของอุณหภูมิของอากาศในเตาหุงต้มประสิทธิภาพสูงมีความสอดคล้องกับงานวิจัยต้นแบบ [11] โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ 0.77%

จากผลการศึกษาในครั้งนี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ สัญชัย [6] ที่ได้พบว่าความเร็วของอากาศมีผลต่อการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงภายในเตา ซึ่งความเร็วของอากาศที่มีค่าต่ำ จะช่วยเพิ่มระยะเวลาในการคลุกเคล้าระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้จึงทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ดีขึ้น และมีแนวโน้มที่จะทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงขึ้นตามไปด้วย และยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ อภิสิทธิ์ [5] ที่ทำการทดลองปรับลดจำนวนรูล้นเตาให้มีจำนวนน้อยลง พบว่าล้นเตาจำนวน 44 รู ยังคงมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่สูงเมื่อเทียบกับแบบอื่น

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่ารูปแบบล้นเตาที่ทำให้แนวโน้มการเผาไหม้ดีที่สุด คือแบบ A16 มีจำนวนรูล้นเตา 44 รู ความหนาล้นเตา 30 มิลลิเมตร และมีอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางรูล้นเตาบนต่อล่าง 13:14 มิลลิเมตร เนื่องจากความเร็วเฉลี่ยของอากาศภายในเตามีค่าต่ำที่สุด

แนวทางในการดำเนินงานขั้นต่อไปจะทำการสร้างเตาหุงต้มประสิทธิภาพสูงทั้ง 27 รูปแบบ และทำการทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อน เพื่อนำผลที่ได้มาทำการวิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นกับค่าความเร็วเฉลี่ยของอากาศภายในเตาหุงต้มประสิทธิภาพสูงต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสกลนคร ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ และสถานที่สำหรับดำเนินการทดลอง ขอขอบคุณอาจารย์

มานะ วิชางาม ที่ให้ความช่วยเหลือข้อมูลทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ และงานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนวิจัยจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ประจำปีงบประมาณแผ่นดิน พ.ศ. 2559

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] คู่มือกระบวนการผลิตและการใช้งานเตาหุงต้มประสิทธิภาพสูง, กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงานร่วมกับมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2550.
- [2] Aroon Chomcham, "Improved biomass cooking stove for household use," Report submitted to the National Energy Administration, Ministry of Science, Technology and Energy, Bangkok, 1984.
- [3] ภาณุวันท์ คล้ายวงศ์วาลย์, "การทดสอบและปรับปรุงประสิทธิภาพเตาถ่าน," วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงาน. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2546.
- [4] อนุรักษ์ หอสูงเนิน และ รัชพล สันติวรกร, "การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเตาหุงต้มชนิดต่างๆ ที่ใช้ในครัวเรือน," *การประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ประจำปี 2553 ในหัวข้อการพัฒนาชนบทที่ยั่งยืน ครั้งที่ 2*, จังหวัดหนองคาย, 2553, หน้า 343-347.
- [5] อภิสิทธิ์ พรมดอน และ ธนรัฐ ศรีวีระกุล, "การทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาหุงต้มประสิทธิภาพสูงเมื่อจำนวนและอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางของรูรั้งผึ้งเปลี่ยนไป," *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26*, จังหวัดเชียงราย, 2555.
- [6] สัญชัย รำเพยพัต, "การจำลองเชิงตัวเลขการไหลของอากาศในเตาเผาไหม้ขานอ้อย," วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล. มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2547.
- [7] Burnham-Slipper, "Breeding a better stove: the use of computation fluid dynamics and genetic algorithms to optimize a wood burning stove for Eritrea," Ph.D.'s Thesis, The University of Nottingham, 2008.
- [8] มานะ วิชางาม และ ธนรัฐ ศรีวีระกุล, "การจำลองการไหลของอากาศผ่านรูรั้งผึ้งเตาหุงต้มประสิทธิภาพสูงโดยใช้โปรแกรม CFD," *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี*, ปีที่ 14, ฉบับที่ 2, หน้า 24-34, เมษายน-มิถุนายน 2555.
- [9] มานะ วิชางาม และ ธนรัฐ ศรีวีระกุล, "การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณกับการไหลของอากาศในเตาหุงต้มประสิทธิภาพสูง เมื่อเลือกใช้แบบจำลองการแผ่รังสีความร้อนที่ต่างกัน 2 รูปแบบ," *การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 8*, จังหวัดมหาสารคาม, 2555.
- [10] M. Wichangarm, T. Sriveerakul and S. Aphornratana, "Numerical simulation of airflow in the high efficiency cooking stove," *The 4th KCU International Engineering Conference 2012*, Khonkaen, Thailand, 2012 pp. 10-12.
- [11] ธนรัฐ ศรีวีระกุล, มานะ วิชางาม และ ณรงค์ศักดิ์ ปิยะไพร, "การทำนายพฤติกรรมการไหลของอากาศภายในเตาหุงต้มประสิทธิภาพสูง," *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 29*, จังหวัดนครราชสีมา, 2558, หน้า 619-626.
- [12] H. Ali and T. T. J. Wei, "CFD study of an improved biomass cookstove with reduced emission and improved heat transfer characteristics," *Journal of Clean Energy*

Technologies, vol. 5, no. 6, pp. 427-432,
November 2017.

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์เพื่อหาสภาวะเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับ กระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากไส้ปลา

Grey Relational Analysis for Optimal Condition of Biodiesel Production Process from Fish Entrails

อำนวย คำบุญ^{1*} วรพจน์ ศิริรักษ์¹ พีรวัตร ลือสัก¹ เรืองฤทธิ์ ศิริรักษ์²

¹ สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย, เชียงราย, 57120

² สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ สำนักวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยพะเยา, พะเยา, 56000

Amnoury Kumboon^{1*} Worapot Sirirak¹ Peerawat Luesak¹ Reungruthai Sirirak²

¹ Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology
Lanna Chiangrai, Chiangrai, 57120

² Department of Material Science, Faculty of Science, University of Phayao, Phayao, 56000

*Corresponding author E-mail: k_amnoury@hotmail.com

(Received: January 19, 2018; Accepted: April 20, 2019)

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะเงื่อนไขที่เหมาะสมของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันไส้ปลา โดยวิธีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ถูกนำมาใช้หาเงื่อนไขที่เหมาะสมแบบหลายวัตถุประสงค์ร่วมกัน เพื่อให้ได้น้ำมัน ไบโอดีเซลที่มีประสิทธิภาพเพียงพอสำหรับการนำไปใช้งานกับเครื่องยนต์ทางภาคเกษตร ในกระบวนการทดลองผลิตไบโอดีเซลใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน การสังเคราะห์ไบโอดีเซลมี 4 พารามิเตอร์ที่ถูกศึกษาประกอบด้วย อัตราส่วนผสม เมทานอลต่อโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเร็วรอบการกวน เวลาในการทำปฏิกิริยา และอุณหภูมิการทำปฏิกิริยา สำหรับผลตอบสนองที่ต้องการทราบคือ ปริมาณกรดไขมันอิสระ (FFA) ค่าเถ้าซัลเฟส และจุดวาบไฟ ผลการทดลองพบว่าค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลที่ส่วนผสมของ เมทานอล : โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ส่วนผสม 3.0:130 ความเร็วรอบการกวนที่ 500 รอบต่อนาที เวลาการทำปฏิกิริยาที่ 60 นาที และอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาที่ 60 °C ไบโอดีเซลจากเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดนี้แสดงค่าปริมาณ FFA เท่ากับ 1.60 mg KOH/g Oil เถ้าซัลเฟส เท่ากับ 0.11% m/m และจุดวาบไฟเท่ากับ 162 °C ผลที่ได้สอดคล้องกับระดับที่มาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงานกำหนด เมื่อทดลองใช้กับเครื่องยนต์ทางภาคเกษตรแล้วสามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่องโดยเครื่องยนต์ไม่เกิดการดับหรือเกิดการกระตุก

คำสำคัญ: ไบโอดีเซล พลังงานทางเลือก ความสัมพันธ์แบบเกรย์ ไส้ปลา ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

ABSTRACT

This research article aimed to investigate an optimal condition of biodiesel production from fish entrails oil. The grey relational analysis was used to find the suitable condition together with many objectives for efficient biodiesel sufficiently in agricultural engine application. Transesterification

reaction was applied in the biodiesel production experiment. The four factors of biodiesel synthesis were studied as follows; ratio of methanol to potassium hydroxide, stirring speed, reaction time and reaction temperature. The three responses were free fatty acid quantity (FFA), sulfated ash content and flash point. The results exhibited that the best condition of the biodiesel production is 3.0:130, 500 rpm, 60 minute and 60 °C for volume per weight ratio of methanol to potassium hydroxide, stirring speed, reaction time and reaction temperature, respectively. Hence, the biodiesel from this optimal condition showed 1.60 mg KOH/g Oil of FFA, 0.11% m/m of sulfated ash content and 162 °C of flash point. Moreover, these results were consistent with the special standard level of department of energy business. Therefore, the prepared biodiesel was applied in the agricultural engine after that the engine operated continuously with no shutdown or stumble.

Keyword: Biodiesel, alternative energy, grey relation, fish entrails oil, transesterification reaction

1. บทนำ

ประเทศไทยมีการนำเข้าพลังงาน คิดเป็นมูลค่าสูงถึง 816,563 ล้านบาท ทำให้ภาครัฐบาลมีนโยบายส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานทดแทนในประเทศเพิ่มมากขึ้น ในปี 2561 ประเทศไทยมีการใช้พลังงานทดแทน 9,680 พันตัน เทียบเท่าน้ำมันดิบเพิ่มขึ้น ร้อยละ 12.3 โดยเฉพาะการใช้เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นจากเดิมร้อยละ 2.48 [1] สอดคล้องกับในปัจจุบันน้ำมันมีราคาแพงขึ้น และมีปริมาณน้ำมันที่ลดลง ซึ่งนับวันจะมีความต้องการสูงขึ้นเรื่อย ๆ ตามสถานะเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมที่เจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ในปี พ.ศ. 2585 คาดว่าน้ำมันปิโตรเลียมจะหมดไปในการแสวงหาเชื้อเพลิงและพลังงานจากทรัพยากรแหล่งใหม่ที่มีอยู่เพื่อทดแทนน้ำมันปิโตรเลียม จากการส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนที่ผลิตได้ภายในประเทศ โดยเฉพาะไบโอดีเซล ได้รับการส่งเสริมให้มีการผลิตสูงถึง 120.94 ล้านลิตรต่อปี เพื่อการนำพลังงานไปใช้งานภายในประเทศ 4.03 ล้านลิตรต่อวัน [2] และมีการส่งเสริมให้หลาย ๆ ภาคส่วนโดยเฉพาะในระดับชุมชนที่มีการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล โดยผ่านกระบวนการทางเคมีที่เรียกว่า ปฏิกริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน หรือปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน [3-5] ซึ่งเป็นการปรับปรุงสมบัติของไบโอดีเซลด้วยสารเร่งปฏิกริยา เพื่อให้ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์และมีความรวดเร็วมากขึ้น [6] ซึ่งในอดีตมีรายงานว่าการใช้

ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันทำให้น้ำมันไบโอดีเซลมีความบริสุทธิ์ถึงร้อยละ 90-98 [4],[7-12] อย่างไรก็ตาม น้ำมันวัตถุดิบที่เป็นน้ำมันจากพืชและน้ำมันพืชที่ใช้แล้วมีจำนวนจำกัดและไม่เพียงพอสำหรับการผลิตไบโอดีเซลตามความต้องการและมีต้นทุนการผลิตไบโอดีเซลที่สูงขึ้นถึงร้อยละ 70-90 หากต้องปลูกพืชเพื่อการผลิตน้ำมันเพิ่มเติม [8],[13-15] การแสวงหาแหล่งวัตถุดิบสำหรับการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจึงเป็นปัญหาที่สำคัญ อย่างไรก็ตาม การใช้น้ำมันที่ได้จากไขมันสัตว์สามารถใช้ในการผลิตไบโอดีเซลได้และมีศักยภาพสูงเช่นเดียวกันกับน้ำมันพืช [16-19]

จังหวัดเชียงรายและจังหวัดใกล้เคียงมีการประกอบธุรกิจการผลิตปลาสดค่อนข้างมาก และมีส่วนที่ต้องทิ้งไปเป็นไส้ปลาและไขมันปลาซึ่งมีปริมาณไม่น้อยกว่าวันละ 500 กิโลกรัม การนำไส้ปลาที่ต้องทิ้งไปนี้มาสกัดน้ำมันสำหรับการผลิตเป็นน้ำมันไบโอดีเซล จึงเป็นอีกแนวทางที่สามารถสร้างมูลค่าให้กับไส้ปลาเหลือทิ้ง อีกทั้งจากการทบทวนวรรณกรรมยังไม่พบการศึกษาการใช้ไขมันจากไส้ปลาในการผลิตไบโอดีเซล จึงทำให้ไม่ทราบพารามิเตอร์ที่ควรใช้ในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลที่มีคุณภาพตามมาตรฐานกำหนด ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ที่ส่งผลต่อคุณภาพของน้ำมันไบโอดีเซลจากไส้ปลา

โดยใช้หลักการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ สำหรับการวิเคราะห์พารามิเตอร์แบบหลายผลตอบสนองร่วมกัน เพื่อให้ได้น้ำมันไบโอดีเซลที่มีคุณภาพตามมาตรฐานกำหนดสำหรับนำไปใช้กับเครื่องจักรกลการเกษตร

2. วิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้มีส่วนการดำเนินงาน 2 ส่วนหลัก ที่สำคัญ โดย ส่วนแรกเป็นกระบวนการสกัดน้ำมันออกจากไส้ปลา และการทำความสะอาดน้ำมันไส้ปลาที่ได้สำหรับการเตรียมน้ำมันวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองรายละเอียดการดำเนินงานกล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.1-2.2 ส่วนที่สอง เป็นกระบวนการทดลองผลิตไบโอดีเซลเพื่อให้ได้ค่าสภาวะที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ที่มีผลตอบสนองด้านค่ากรด ไชมันอิสระ แก๊ซลเฟสและจุดวาบไฟ ที่ดีที่สุดและอยู่ในระดับมาตรฐานกำหนด โดยในการผลิตรายละเอียดการดำเนินงานกล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.3 ต่อไป

2.1 กระบวนการสกัดน้ำมันจากไส้ปลา

กระบวนการที่ใช้ในการสกัดน้ำมันออกจากไส้ปลาใช้กระบวนการเจียวแห้ง (Dry rendering) เพื่อแยกน้ำมันออกมาจากเศษไส้ปลาโดยการบดเพื่อลดขนาดเนื้อเยื่อไขมัน แล้วให้ความร้อนโดยตรง ความร้อนทำให้ผนังเซลล์ถูกทำลายและปล่อยน้ำมันออกมา ในเนื้อเยื่อไขมันมีความชื้น และความชื้นจะช่วยให้การไล่ความชื้นออกมาจากวัตถุดิบทำให้สามารถแยกกากไส้และน้ำมันออกจากกันได้ง่ายโดยในการเจียวสกัดน้ำมันในกระทะแต่ละครั้งใช้เวลา 60 นาที ปริมาณไส้ปลาครั้งละ 20 กิโลกรัม ด้วยไฟระดับปานกลาง ซึ่งลักษณะของไส้ปลาและการเจียวดังรูปที่ 1 (ก)และ(ข) จากนั้นกรองแยกน้ำมันออกจากกากไส้ปลาจะได้น้ำมันไส้ปลาดังรูปที่ 1 (ค)



(ก) ลักษณะไส้ปลา (ข) การเจียวสกัดน้ำมัน (ค) น้ำมันไส้ปลา

รูปที่ 1 การสกัดน้ำมันไส้ปลา

อย่างไรก็ตามน้ำมันที่ได้ยังไม่สามารถนำไปผลิตเป็นไบโอดีเซลได้ เนื่องจากยังสกปรกและมีกลีเซอรไรด์ในน้ำมันมาก ดังนั้นต้องนำน้ำมันที่ได้ผ่านกระบวนการทำความสะอาดมากขึ้น ก่อนการสังเคราะห์ไบโอดีเซลต่อไป

2.2 กระบวนการทำความสะอาดน้ำมัน

กระบวนการทำความสะอาดน้ำมันแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนหลัก ๆ ประกอบด้วย ขั้นตอนการแยกกลีเซอรไรด์ ขั้นตอนการทำความสะอาดน้ำมันไส้ปลา เพื่อการนำไปเข้ากระบวนการผลิตเป็นไบโอดีเซล

2.2.1 การแยกกลีเซอรไรด์และกากไส้ปลา

การแยกกลีเซอรไรด์เป็นขั้นตอนเริ่มต้นด้วยการใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน โดยนำน้ำมันไส้ปลาวัตถุดิบจำนวน 10 ลิตร มาต้มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เมื่อครบตามระยะเวลาที่กำหนดแล้วเติมสารเร่งปฏิกิริยาลงไปในหม้อต้มโดยใช้เมทานอล (CH_3OH) ปริมาณ 1000 มิลลิลิตร และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ปริมาณ 60 กรัม แล้วต้มน้ำมันไส้ปลาด้วยเวลา 30 นาที แล้วปล่อยให้เย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้องทิ้งไว้ให้เกิดการตกตะกอนของกลีเซอรไรด์และสิ่งสกปรกอื่น ๆ จนเกิดการแยกชั้นดังรูปที่ 2 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วเทแยกน้ำมันออกจากกลีเซอรไรด์จากการแยกได้ปริมาณน้ำมันไส้ปลาประมาณ 80% และกลีเซอรไรด์ 20% แล้วทำซ้ำกระบวนการนี้จนกว่าได้ปริมาณน้ำมันไส้ปลาเพียงพอสำหรับการทดลอง แล้วนำน้ำมันไส้ปลาที่ได้มาทำความสะอาดต่อไป



รูปที่ 2 การแยกกลีเซอรไรด์ในน้ำมันไส้ปลา

2.2.2 การล้างทำความสะอาดน้ำมันไส้ปลา

เมื่อได้น้ำมันที่ผ่านการแยกกลีเซอรไรด์แล้วนำน้ำมันมาเข้ากระบวนการล้างทำความสะอาดน้ำมันไส้ปลาซึ่งมีอยู่ 2 ลำดับขั้นตอน ประกอบด้วย การทำความสะอาดด้วยการกวนและการทำความสะอาดด้วยการเป่าอากาศ ดังรูปที่ 3 โดยในขั้นตอนแรกเริ่มจากการล้างทำความสะอาดด้วยการกวน โดยการเติมน้ำมันผสมน้ำสะอาดอัตราส่วน 1:1 ลงในถังกวนแล้วกวนน้ำและน้ำมันให้แตกตัวรวมเข้าด้วยกันเป็นระยะเวลา 10 นาที โดยใช้ความเร็วรอบในการกวนที่ 300 รอบต่อนาที จากนั้นปล่อยทิ้งไว้ให้น้ำมันแยกชั้นออกจากกันในถังกวน



(ก) การกวน



(ข) การเป่าอากาศ

รูปที่ 3 กระบวนการทำความสะอาดน้ำมัน

โดยน้ำจะเป็นตัวช่วยให้ตะกอนที่เหลืออยู่แยกออกจากน้ำมัน ทำให้น้ำมันที่ได้มีความสะอาดขึ้นเพื่อเป็นกรดระยะเวลาในการตกตะกอนในน้ำมัน [18] ปล่อยน้ำออกจากถังกวน ทำซ้ำกระบวนการเดิมเพื่อให้น้ำมันสะอาดมากขึ้นจนครบ 3 ครั้ง นำน้ำมันที่ได้จากการล้างไป

ต้มที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เพื่อไล่น้ำออกจากน้ำมันแล้วทิ้งไว้ให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง ขั้นตอนที่สองการล้างทำความสะอาดด้วยการเป่าอากาศเข้าไปในถัง ด้วยการนำน้ำมันที่ได้จากขั้นตอนการล้างทำความสะอาดด้วยการกวนมาทำความสะอาดอีกครั้งด้วยอัตราส่วนน้ำกับน้ำมัน 1:1 เป่าอากาศเข้าไปในถังเป็นระยะเวลา 15 นาที เพื่อให้ น้ำและน้ำมันเกิดการแตกตัวผสมเข้ากันได้ดีมากขึ้น แล้วปล่อยทิ้งไว้ให้เกิดการแยกชั้นระหว่างน้ำกับน้ำมันแยกน้ำออกจากน้ำมัน นำน้ำมันที่ได้ไปต้มที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แล้วปล่อยให้เย็นลงอุณหภูมิห้อง จากนั้นนำน้ำมันวัตถุดิบตรวจวัดเบื้องต้นเฉพาะค่าที่ส่งผลต่อการผลิตไบโอดีเซล ได้แก่ เมทิลเอสเทอร์ (Methyl ester) ตรวจวัดตามมาตรฐาน EN 14103 มีค่าเฉลี่ย 97.8%wt และกรดไขมันอิสระ (Free Fatty acid : FFA) ตามมาตรฐาน ASTM D 664 มีค่าเฉลี่ย 8.6 mg KOH/g Oil ซึ่งทั้ง 2 ค่านี้เป็นค่าที่สูงเกินเกณฑ์มาตรฐานกำหนดนี้ และยังไม่สามารถนำไปใช้งานจึงต้องดำเนินการสังเคราะห์เป็นไบโอดีเซลเพื่อให้มีความบริสุทธิ์มากขึ้นต่อไป

2.3 การทดลองผลิตน้ำมันไบโอดีเซล

กระบวนการทดลองผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันไส้ปลาด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันชนิดเบสในการสังเคราะห์น้ำมันไบโอดีเซล โดยมีพารามิเตอร์คงที่ได้แก่ ปริมาณน้ำมันไส้ปลา 10 ลิตร สำหรับพารามิเตอร์แปรผันที่ศึกษาประกอบด้วย 4 พารามิเตอร์ ได้แก่ ส่วนผสมสารเร่งปฏิกิริยาระหว่างเมทานอลกับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ มี 3 อัตราส่วนผสม ความเร็วรอบในการกวน 3 ระดับ เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ระดับและอุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 3 ระดับ ซึ่งค่าระดับของพารามิเตอร์เหล่านี้กำหนดขึ้นจากการทบทวนวรรณกรรมและนำข้อมูลมาทำการทดลองผลิตลงถูกเพื่อกำหนดค่าระดับพารามิเตอร์สำหรับการออกแบบการทดลอง [18-19] ค่าระดับพารามิเตอร์แปรผันที่ศึกษาวิจัยนี้ดังตารางที่ 1 โดยส่วนผสมระหว่างเมทานอลต่อโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ แทนด้วยอักษร (A) และ ความเร็วรอบในการกวน แทนด้วยอักษร (B) เวลาในการทำปฏิกิริยาแทนด้วยอักษร (C)

และเวลาการทำปฏิกิริยาแทนด้วยอักษร (D) เมื่อกำหนดค่าระดับของพารามิเตอร์แล้วออกแบบการทดลอง

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์แปรผันและค่าระดับ

พารามิเตอร์แปรผัน	ค่าระดับ		
	1	2	3
ส่วนผสม เมทานอล (ลิตร) : โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์(กรัม) (A)	2.0:120	2.5:125	3.0:130
ความเร็วรอบในการกวน (รอบต่อนาที) (B)	300	400	500
เวลาในการทำปฏิกิริยา (นาท) (C)	50	60	70
อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา (องศาเซลเซียส) (D)	60	65	70

เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง Taguchi L9 มีจำนวนการทดลองทั้งหมดดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การทดลองแบบ Taguchi L9

ลำดับ	พารามิเตอร์			
	(A)	(B)	(C)	(D)
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

สำหรับผลตอบสนองที่ต้องการทราบพิจารณาจากซึ่งค่าที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของไบโอดีเซลจากการทบทวนวรรณกรรม ได้แก่ ค่าของปริมาณกรดไขมันอิสระ ค่าเถ้าซัลเฟส จุลวาทไฟ เป็นค่าที่มีผลกระทบต่อสมบัติไบโอดีเซลค่อนข้างมาก [5],[14],[17] จึงเลือก

ผลตอบสนองทั้ง 3 สำหรับการศึกษาวิจัยนี้ เมื่อได้น้ำมันจากการทดลองแล้วตรวจวัดผลค่าปริมาณ FFA ตามมาตรฐาน ASTM D664 การตรวจวัดจุลวาทไฟตามมาตรฐาน ASTM D93 และค่าเถ้าซัลเฟสตามมาตรฐาน ASTM D874 เมื่อได้ค่าผลตอบทั้งหมดตามตารางการทดลอง แต่เนื่องจากวิธีการ Taguchi มีข้อจำกัดในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เหมาะสมแบบหลายผลตอบรวมได้ ซึ่งการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์เป็นวิธีการที่ง่ายสำหรับการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแบบผลตอบหลายวัตถุประสงค์ร่วม สำหรับปัญหาที่มีผลตอบสนองหลายอย่าง ด้วยสมการที่ 1-7 [20] โดยการเปรียบเทียบอิทธิพลของพารามิเตอร์แต่ละตัวที่ระดับต่างๆ ที่ส่งผลต่อผลตอบสนองทั้งหมดในกระบวนการนั้น ๆ โดยมีเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์ (Grey relational grade) เป็นพารามิเตอร์ที่ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์เริ่มต้นจากการแปลงผลตอบสนองที่ได้จากการทดลองข้อมูลดิบให้มีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 โดยใช้สมการดังต่อไปนี้

$$x_i^*(k) = \frac{x_i^{(0)}(k) - \min_{all(i)} x_i^{(0)}(k)}{\max_{all(i)} x_i^{(0)}(k) - \min_{all(i)} x_i^{(0)}(k)} \quad (1)$$

$$x_i^*(k) = \frac{\max_{all(i)} x_i^{(0)}(k) - x_i^{(0)}(k)}{\max_{all(i)} x_i^{(0)}(k) - \min_{all(i)} x_i^{(0)}(k)} \quad (2)$$

เมื่อ $x_i^*(k)$ คือ การแปลงข้อมูลจากผลตอบสนองข้อมูลดิบลำดับที่ i จากการทดลอง k , $x_i^{(0)}(k)$ คือ ข้อมูลดิบของผลตอบสนองลำดับที่ i จากการทดลอง k , $\min_{all(i)} x_i^{(0)}(k)$ คือ ข้อมูลดิบที่เป็นของผลตอบสนองที่มีค่าน้อยที่สุดที่ได้จากการทดลอง k และ $\max_{all(i)} x_i^{(0)}(k)$ คือ ข้อมูลดิบของผลตอบสนองที่มีค่ามากที่สุด จากการทดลอง k โดยสมการที่ (1) ใช้ในการแปลงข้อมูล เมื่อกระบวนการหรือการทดลองนั้นต้องการผลตอบสนอง ในรูปแบบที่ยิ่งมีค่ามากยิ่งขึ้น (the larger-the-better) ส่วนสมการที่ (2) ใช้ในการแปลงข้อมูลเมื่อ

กระบวนการหรือ การทดลองนั้นต้องการผลตอบสนองในรูปแบบที่ยิ่งมีค่า น้อยยิ่งดี (the smaller-the-better) สำหรับในการศึกษานี้ ผลตอบสนองเป็น ปริมาณ FFA และค่าเซลล์เฟส ที่ต้องการให้มีค่าน้อยยิ่งดี จึงใช้สมการที่ 2 ส่วนผลตอบสนองจุดวาบไฟต้องการให้มีค่าอย่างมากยิ่ง ดีจึงใช้สมการที่ 1 สำหรับการแปลงข้อมูลดิบให้อยู่ในรูปแบบของเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์ เมื่อแปลงผลตอบสนองอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 แล้วจะนำค่าผลตอบสนองดังกล่าวมาคำนวณหา สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ (Grey relational coefficient) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ผลตอบสนองที่ได้จากการทดลองกับผลตอบสนองอ้างอิง โดยสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์แบบเกรย์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta \min + \xi \Delta \max}{\Delta_{0,i}(k) + \xi \Delta \max} \quad (3)$$

เมื่อ $\xi_i(k)$ คือ สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ของผลตอบสนองลำดับที่ i จากการทดลอง k , ξ คือ สัมประสิทธิ์ความแตกต่างซึ่งมีค่า 0-1 และ $\Delta \min$, $\Delta \max$, $\Delta_{0,i}(k)$ หาได้จากสมการที่ 4, 5 และ 6

$$\Delta \min = \min_{j \in i} \min_k |x_0^*(k) - x_j^*(k)| \quad (4)$$

$$\Delta \max = \max_{j \in i} \max_k |x_0^*(k) - x_j^*(k)| \quad (5)$$

$$\Delta_{0,j}(k) = |x_0^*(k) - x_i^*(k)| \quad (6)$$

เมื่อ $\Delta_{0,i}(k)$ คือ ผลต่างระหว่างผลตอบสนองอ้างอิง $x_0^*(k)$ กับผลตอบสนองจากการทดลอง $x_i^*(k)$ โดยที่เกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 7

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (7)$$

เมื่อ γ_i คือ เกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์ของผลตอบสนองลำดับที่ i ซึ่งได้จากค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ของผลตอบสนองลำดับที่ i จากจำนวน n การทดลอง ซึ่งเป็นการแปลงค่าเพื่อการวิเคราะห์ผลค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับผลตอบสนองหลายวัตถุประสงค์ร่วมกัน เพื่อสรุปผลการศึกษาวิจัย

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

เมื่อนำน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้จากการทดลองมาตรวจวัดค่าของผลตอบสนองทั้ง 3 เพื่อให้ทราบถึง ค่าของปริมาณ FFA ค่าค่าเซลล์เฟส และจุดวาบไฟ ผลจากการตรวจสอบแสดงดังตารางที่ 3 ที่ได้จากการทดลองแสดงให้เห็นว่า ที่การทดลองที่ 1 ปริมาณสัดส่วนผสมของเมทานอลต่อโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และความเร็วรอบในการกวนที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าระดับต่ำ มีแนวโน้มให้ค่าผลตอบสนองที่ไม่ดี เนื่องจากน้ำมันวัตถุดิบที่ได้ก่อนการผลิตไบโอดีเซลมีปริมาณเมทิลเอสเทอร์และปริมาณกรดไขมันอิสระที่สูง ซึ่งกรดไขมันอิสระที่มีอยู่ในน้ำมัน จะทำปฏิกิริยากับเมทานอลและเบสโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ส่งผลให้ปริมาณเบสตัวเร่งปฏิกิริยามีปริมาณลดลงไป อีกทั้งยังส่งผลให้เกิดสบู่และน้ำซึ่งเป็นอุปสรรคสำคัญในการเปลี่ยนน้ำมันวัตถุดิบให้เป็นไบโอดีเซลให้มีความบริสุทธิ์ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันได้น้อยกว่าการทดลองอื่น ๆ ที่มีเมทานอลต่อโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และความเร็วรอบในการกวนที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของค่าระดับพารามิเตอร์ทั้ง 4 พารามิเตอร์ มีแนวโน้มที่ทำให้ได้ค่าผลตอบสนองทั้ง 3 ผลตอบสนองที่ดีขึ้น โดยในการทดลองที่ 9 แสดงค่าผลตอบสนองทั้ง 3 ผลตอบสนองที่มีแนวโน้มดีกว่าการทดลองอื่น ๆ จากการเพิ่มปริมาณสัดส่วนผสมของเมทานอลต่อโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์และจำนวนรอบในการกวน ซึ่งคาดว่าพารามิเตอร์ทั้ง 2 เป็นพารามิเตอร์ที่อาจจะ ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าผลตอบสนองทั้ง 3 ผลตอบสนองสำหรับงานวิจัยนี้ อย่างไรก็ตามพารามิเตอร์

ตารางที่ 3 ผลการทดลองจากวิธีการ Taguchi L9 และการแปลงค่าลำดับความสัมพันธ์แบบเกรย์

ลำดับที่	ค่าผลตอบสนองจากการทดลอง			ค่าลำดับความสัมพันธ์แบบเกรย์		
	FFA (mg KOH/ g Oil)	กรดไขมัน (%) m/m	จุดวาบไฟ (°C)	FFA (0-1)	กรดไขมัน (0-1)	จุดวาบไฟ (0-1)
1	3.18	0.071	145	0.0000	0.0000	0.0000
2	3.10	0.062	148	0.0510	0.1500	0.1875
3	3.11	0.065	146	0.0446	0.1000	0.0625
4	2.97	0.042	151	0.1338	0.4833	0.3750
5	2.76	0.038	153	0.2675	0.5500	0.5000
6	2.67	0.043	152	0.3248	0.4667	0.4375
7	2.35	0.014	158	0.5287	0.9500	0.8125
8	2.03	0.011	161	0.7325	1.0000	1.0000
9	1.61	0.012	160	1.0000	0.9833	0.9375

ตารางที่ 4 สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์แบบเกรย์

ลำดับที่	ค่าลำดับความสัมพันธ์แบบเกรย์			สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์แบบเกรย์			เกรตความสัมพันธ์แบบเกรย์
	FFA (0-1)	กรดไขมัน (0-1)	จุดวาบไฟ (0-1)	FFA	กรดไขมัน	จุดวาบไฟ	
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.3333	0.3333	0.3333	0.3333
2	0.0510	0.1500	0.1875	0.3451	0.3704	0.3810	0.3654
3	0.0446	0.1000	0.0625	0.3435	0.3571	0.3478	0.3495
4	0.1338	0.4833	0.3750	0.3660	0.4918	0.4444	0.4340
5	0.2675	0.5500	0.5000	0.4057	0.5263	0.5000	0.4773
6	0.3248	0.4667	0.4375	0.4255	0.4839	0.4706	0.4599
7	0.5287	0.9500	0.8125	0.5148	0.9091	0.7273	0.7170
8	0.7325	1.0000	1.0000	0.6515	1.0000	1.0000	0.8838
9	1.0000	0.9833	0.9375	1.0000	0.9677	0.8889	0.9522

ด้านเวลาในการทำปฏิกิริยาและพารามิเตอร์ด้านอุณหภูมิ การทำปฏิกิริยาอยู่ในระดับ 2 และ ระดับ 1 มีค่าเท่ากับ 60 นาที และ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องงานวิจัยอื่น ๆ ที่กล่าวถึงเวลาการทำปฏิกิริยาที่ 60 นาที และเป็นช่วงอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาการสังเคราะห์ไบโอดีเซลที่เหมาะสม [8],[21-23] จึงทำ

ให้มีแนวโน้มลดค่าปริมาณของ FFA ค่ากรดไขมันลดลง และมีจุดวาบไฟที่สูงขึ้น จากนั้นแปลงค่าผลตอบสนองทั้งหมดให้อยู่ในรูปแบบ 0-1 ตามสมการที่ 1 และ 2 ค่าระดับที่เรียงลำดับดังตารางที่ 3 จากนั้นนำค่าระดับที่หาได้ในตารางที่ 3 มาหาค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์แบบเกรย์ตามสมการที่ 3 โดยกำหนดให้ค่า 5 เป็นน้ำหนัก

ของตัวแปรซึ่งในงานวิจัยนิยมส่วนใหญ่ใช้เท่ากับ 0.5 ดังนั้นในการให้น้ำหนักในงานวิจัยนี้เท่ากับ 0.5 เช่นกัน เนื่องจากได้ให้ความสำคัญกับผลตอบสนองทั้ง 3 ผลตอบสนองในระดับที่เท่า ๆ กันเมื่อได้ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์แล้ว นำค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์มาหาค่าเกรดความสัมพันธ์ตามสมการที่ 7 สำหรับการหาค่าระดับพารามิเตอร์ที่เหมาะสมซึ่งแสดงดังตารางที่ 4 เมื่อนำค่าเกรดความสัมพันธ์ที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยของเกรดความสัมพันธ์ของการทดลอง Taguchi L9 ในตารางที่ 2 เพื่อให้ได้ค่าเฉลี่ยของเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์ของแต่ละพารามิเตอร์และค่าระดับต่าง ๆ ในแต่ละการทดลองออกมาซึ่งสามารถหาค่าเฉลี่ยเกรดความสัมพันธ์ดังตัวอย่างการคำนวณดังนี้

$$\gamma(A) 1 = 0.33333 + 0.36546 + 0.34950 = 0.34943$$

$$\gamma(B) 1 = 0.33333 + 0.43407 + 0.71704 = 0.49481$$

สำหรับค่าเฉลี่ยเกรดความสัมพันธ์อื่น ๆ สามารถคำนวณหาได้ด้วยวิธีการเดียวกัน โดยค่าเฉลี่ยเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์ของแต่ละพารามิเตอร์ที่ระดับต่าง ๆ ดังตารางที่ 5 เมื่อได้ค่าเฉลี่ยเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์แล้วเลือกค่าเฉลี่ยเกรดความสัมพันธ์ที่มีค่ามากที่สุดของแต่ละพารามิเตอร์ ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองทั้ง 3 ผลตอบสนองมากที่สุดและค่าเฉลี่ยเกรดความสัมพันธ์ดังกล่าวที่ พารามิเตอร์ (A) และ (B) มีค่าอยู่ในระดับ 3 ส่วนพารามิเตอร์ (C) ที่ค่าอยู่ในระดับ 2 และพารามิเตอร์ (D) อยู่ในระดับ 1 โดยพารามิเตอร์ A มีค่าเฉลี่ยเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์ที่ 0.85102 เป็นค่ามากที่สุดแสดงว่าเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญมากที่สุดที่ส่งผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองทั้ง 3 ร่วมกันมากที่สุด กล่าวคือพารามิเตอร์ A มีการปรับเปลี่ยนค่าระดับไปเพียงเล็กน้อยทำให้ค่าของผลตอบสนองทั้ง 3 มีการแปรเปลี่ยนไปจากเดิม ทำให้แนวโน้มค่าประสิทธิภาพของไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นหรือลดลงค่อนข้างมาก จากผลตอบสนองอ้างอิง ดังนั้นพารามิเตอร์ A จึงจำเป็นต้องมีการควบคุมให้มีความเหมาะสมสำหรับ

การปรับเปลี่ยนค่าเมื่อต้องการให้ได้ผลตอบสนองเป็นไปตามความต้องการ สำหรับพารามิเตอร์ B C และ D แสดงค่าเฉลี่ยความสัมพันธ์แบบเกรย์ที่ใกล้เคียงกันมาก แสดงถึงพารามิเตอร์ทั้ง 3 พารามิเตอร์มีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองทั้ง 3 ร่วมกันที่ไม่แตกต่างกัน กล่าวคือเมื่อปรับเปลี่ยนค่าระดับของพารามิเตอร์ B หรือ C หรือ D จะส่งผลให้เกิดการแปรเปลี่ยนของค่าผลตอบสนองทั้ง 3 ร่วมกันในระดับที่แตกต่างจากผลตอบสนองอ้างอิงที่พอ ๆ กัน

ตารางที่ 5 ค่าเฉลี่ยเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์

ระดับ	พารามิเตอร์			
	(A)	(B)	(C)	(D)
1	0.34943	0.49481	0.55904	<u>0.58763</u>
2	0.45713	0.57554	<u>0.58391</u>	0.51416
3	<u>0.85102</u>	<u>0.58723</u>	0.51463	0.55580

อย่างไรก็ตามในการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ทั้ง B C และ D เป็นสิ่งที่จำเป็นต้องพิจารณาค่าให้สอดคล้องในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลเช่นกัน จึงจะทำให้ได้ค่าประสิทธิภาพที่เป็นไปตามความต้องการ ค่าเฉลี่ยเกรดความสัมพันธ์แบบเกรย์ของพารามิเตอร์ทั้ง 4 พารามิเตอร์นี้แสดงค่าระดับที่เหมาะสมถึงความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่ส่งผลให้ได้ค่าผลตอบสนองที่มีหลายวัตถุประสงค์ร่วมกันที่ดีที่สุด นั่นคือเงื่อนไข ส่วนผสม เมทานอล : โพรเพนไฮดรอกไซด์ ที่ส่วนผสม 3.0:130 ความเร็วรอบการกวนที่ 500 รอบต่อนาที เวลาการทำปฏิกิริยาที่ 60 นาที และอุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส จากนั้นนำเงื่อนไขดังกล่าวมาทดลองผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันใส่ปลาซ้ำอีกครั้งเพื่อยืนยันผลจากการทดลองซ้ำมีค่าปริมาณ FFA เท่ากับ 1.60 mg KOH/g Oil ค่าที่ได้มีค่าต่ำเช่นเดียวกับงานวิจัยที่ผ่านมา [24] แต่ยังไม่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงานที่กำหนดให้คุณภาพของไบโอดีเซลชุมชนต้องมีค่า FFA ไม่เกิน 0.8 mg KOH/g Oil ตามมาตรฐาน ASTM D664

แต่สำหรับค่าเถ้าซัลเฟสที่ได้มีค่า 0.011% m/m และจุดวาวไฟ 162°C ผลดังกล่าวสอดคล้องกับระดับมาตรฐานกรมธุรกิจพลังงานที่กำหนดให้ ค่าเถ้าซัลเฟสไม่เกิน 0.02% ตามมาตรฐาน ASTM D874 และจุดวาวไฟไม่ต่ำกว่า 120°C ตามมาตรฐาน ASTM D93

4. สรุปผลการทดลอง

ได้ปลาสามารถนำมาผลิตน้ำมันไบโอดีเซลได้โดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ด้วยเงื่อนไขของพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ที่มีส่วนผสมของ เมทานอล : โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ 3.0:130 ความเร็วรอบการกวนที่ 500 รอบต่อนาที และเวลาการทำปฏิกิริยาที่ 60 นาที และอุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส สามารถพัฒนาทำให้ได้น้ำมันไบโอดีเซลที่ดีได้ค่าของปริมาณ FFA ที่มีปริมาณต่ำการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงหรือฟองสบู่อุดขึ้นได้ต่ำ ทำให้การจุดติดและเผาไหม้ได้สมบูรณ์มากขึ้นแต่ก็ยังไม่ได้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานกำหนดสำหรับค่าเถ้าซัลเฟสและจุดวาวไฟ มีค่าเป็นไปตามมาตรฐานข้อกำหนดไบโอดีเซลของกรมธุรกิจพลังงาน จากทดลองใช้กับเครื่องยนต์ทางทะเลแล้วสามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่องโดยเครื่องยนต์ไม่เกิดการดับหรือเกิดการกระตุก อย่างไรก็ตามการพัฒนาใช้น้ำมันไบโอดีเซลจากปลาให้มีความบริสุทธิ์มากขึ้นควรมีการศึกษาพารามิเตอร์อื่น ๆ เพิ่มเติมดังเช่น การศึกษาเพื่อลดค่ากรดไขมันให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานกำหนด การเปรียบเทียบกระบวนการทำปฏิกิริยาสารผสมชนิดอื่นสำหรับการทำปฏิกิริยาที่ราคาประหยัดและไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม เป็นต้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย ที่สนับสนุนทุนวิจัยและวิสาหกิจชุมชนกลุ่มแม่บ้านปลาสามสองพี่น้องบ้านหนองหลวง ต.เวียงชัย อ.เวียงชัย จ.เชียงราย ที่อนุเคราะห์ให้ปลาสำหรับการศึกษาวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] กระทรวงพลังงาน. (2561, ตุลาคม 19). สถานการณ์พลังงานของประเทศไทย เดือน มกราคม-กันยายน พ.ศ. 2561. [Online]. Available: http://www.dede.go.th/download/state_61/front%20page_sep.pdf.
- [2] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2561, ธันวาคม 1). ข้อมูลการใช้ไบโอดีเซลประจำเดือน ปี 2561. [Online]. Available: http://www.dede.go.th/ewt_news.php?nid=47882&filename=Biodiesel.
- [3] H. Omidvarborna, A. Kumar and D. Kim, "NOx emissions from lowtemperature combustion of biodiesel," *Fuel Process Technol*, vol. 140, pp. 113-118, 2015.
- [4] W. Roschata, T. Siritanon, T. Kaewpuang, B. Yoosuk and V. Promarak, "Economical and green biodiesel production process using river snail shells-derived heterogeneous catalyst and co-solvent method", *Bioresource Technology*, vol. 209, pp. 343-350, 2016.
- [5] I. Atadashi Musa, "The effects of alcohol to oil molar ratios and the type of alcohol on biodiesel production using transesterification process". *Egyptian Journal of Petroleum*, vol. 25, no.11, pp. 21-31, 2016.
- [6] M. Babaki, M. Yousefi, Z. Habibi, M. Mohammadi and J. Brask, "Effect of water, organic solvent and adsorbent contents on production of biodiesel fuel from canola oil catalyzed by various lipases immobilized on epoxy-functionalized silica as low cost biocatalyst," *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, vol. 120, pp. 93-99, 2015.

- [7] รุ่งทิพย์ ชัยเดช, “การผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องจากน้ำมันทอดใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมเมทอกไซด์,” วิทยานิพนธ์ สาขาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา, 2557.
- [8] วุฒิชัย รสชาติ และ จาณียา ชันชะลี, “กระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบโดยใช้แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกหอยแครงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ประหยัดและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม,” *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี*, ปีที่ 20, ฉบับที่ 1, หน้า 94-106, 2561.
- [9] วุฒิชัย รสชาติ, เทอดเกียรติ แก้วพวง, บุญญวัฒน์ อยู่สุข, และ วินิช พรหมอารักษ์, “การผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันใช้แล้วที่อุณหภูมิห้องโดยใช้แคลเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา,” ใน *การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7*, 12-14 พฤศจิกายน 2557.
- [10] W. Asri Kawentar and A. Budiman, “Synthesis of Biodiesel from Second-Used Cooking Oil,” *Energy Procedia*, vol. 32, pp. 190-199, 2013.
- [11] N. Banerjee, R. Ramakrishnan and T. Jash, “Biodiesel production from used vegetable oil collected from shops selling fritters in Kolkata,” *Energy Procedia*, vol. 54, pp. 161 – 165, 2014.
- [12] ปัญญา มณีจักร์, “การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเบสแก่ร่วมกับถ่านกัมมันต์,” *การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยรังสิต ประจำปี 2558*, 28 มกราคม 2558.
- [13] M. Charoenchaitrakool and J. Thienmethangkoon, “Statistical optimization for biodiesel production from waste frying oil through two-step catalyzed process,” *Fuel Processing Technology*, vol. 92, no. 11, pp. 112-118, 2011.
- [14] J. Escobar, E. Lora, O. Venturini, E. Yanez, E. Castillo and O. Almazan, “Biofuels: Environment, technology and food security,” *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 16-17, pp. 1275-1287, 2009.
- [15] S. Martinez, R. Romero, R. Natividad and J. Gonzalez, “Optimization of biodiesel production from sunflower oil by transesterification using $\text{Na}_2\text{O}/\text{NaX}$ and methanol,” *Catalysis Today*, vol. 220, no. 222, pp. 12-20, 2014.
- [16] LLC for the National Biodiesel Board Centrec Consulting Group. (2014, September 10) “Biodiesel demand for animal fat and tallow generates an additional revenue stream for the livestock industry”. [Online]. Available: <https://biodiesel.org/docs/default-source/news---supporting-files/animal-fats-and-tallow-bd-demand-impact-report.pdf?sfvrsn=2>
- [17] M. da Cunha, L. Krause, M. Moraes, C. Faccini, R. Jacques, S. Almeida, M. Rodrigues and E. Caramão, “Beef tallow biodiesel produced in a pilot scale,” *Fuel Processing Technology*, vol. 90, no.14, pp. 570-575, 2009.
- [18] D. Leung, X. Wu and M. Leung, “A review on biodiesel production using catalyzed transesterification,” *Applied Energy*. Vol. 87 no. 14, pp. 1083-1095, 2010.
- [19] อูสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์, ชลาลัย จันทร์ยอด, ปัทมาพร อินทร์พรหม และ วัฒนฤดี อึ้งมงคลชัย, “การผลิตไบโอดีเซลจากไขมันวัวด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส,” *วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง*, เล่มที่ 25, ฉบับที่ 11, หน้า 89-98, 2559.

- [20] A. Acir , M. Emin Canlı, İ. Ata and R. Çakıroğlu,
“Parametric optimization of energy and exergy
analyses of a novel solar air heater with grey
relational analysis,” *Applied Thermal
Engineering*, vol. 122, pp. 330-338, 2017.
- [21] F. Ma, L. Clements and M. Hanna, “The
effects of catalyst, free fatty acids and water
on transesterification of beef tallow,”
Transactions of the ASAE, vol. 41, pp. 1261-
1264, 1998.
- [22] K. Thiruvengadaravi, J. Nandagopal, V. Sathya
Selva Bala , S. Dinesh Kirupha, P. Vijayalakshmi
and S. Sivanesan, “Kinetic study of the
esterification of free fatty acids in non-edible
Pongamia pinnata oil using acid catalyst,”
Indian Journal of Science and Technology,
vol. 2, pp. 20–24., 2009.
- [23] M. Berrios, J. Siles, M. Martin and A. Martin, “A
kinetic study of the esterification of free fatty
acids (FFA) in sunflower oil,” *Fuel*, vol. 86, pp.
2383–2388., 2007.
- [24] สุภกร บุญยืน , สมลักษณ์ เรืองสุทธินฤภาพ , จิรดา
สิงขรัตน์ และ นภัทร ทวีกาญจน์, “อิทธิพลของกรด
ไขมันอิสระ ต่อการผลิตไบโอดีเซล,” *วารสาร
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, เล่มที่ 18, ฉบับที่ 12,
หน้า 37-41, 2553.

คุณสมบัติของบล็อกประสานที่ผสมเถ้าลอยและเถ้าก้นเตา

Properties of Interlocking Block Containing Fly Ash and Bottom Ash

อนุสรณ์ เดชบุรีรัมย์¹ กริสน์ ชัยมูล^{1*}

¹หน่วยวิจัยทางด้านวิศวกรรมโครงสร้าง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อำเภอกันทรวิชัย จังหวัด
มหาสารคาม 44150

Anusorn Dechburum¹ Krit Chaimoon^{1*}

¹Structural Engineering Research Unit, Faculty of Engineering, Mahasarakham University,
Maha Sarakham, 44150, Thailand

*Corresponding author Email: k.chaimoon@msu.ac.th

(Received: January 19, 2018; Accepted: April 20, 2019)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้เถ้าลอยและเถ้าก้นเตาในการผลิตบล็อกประสานชนิดรับน้ำหนักโดยการแทนที่ปูนซีเมนต์และดินลูกรังตามลำดับที่ร้อยละ 0 5 10 15 20 และ 25 โดยน้ำหนัก สำหรับบล็อกที่ใช้อัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังเท่ากับ 1:7 โดยน้ำหนัก คุณสมบัติที่ทำการทดสอบประกอบด้วยกำลังอัดที่อายุ 14 28 และ 90 วัน การดูดซึมน้ำและหน่วยน้ำหนักที่อายุ 28 วัน จากผลการศึกษาพบว่า บล็อกประสานที่ผสมเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์และเถ้าก้นเตาแทนที่ดินลูกรังในปริมาณที่เหมาะสมมีคุณสมบัติเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนสำหรับอิฐบล็อกประสาน

คำสำคัญ: เถ้าก้นเตา กำลังอัด เถ้าลอย บล็อกประสาน การดูดซึมน้ำ

ABSTRACT

This research studied the use of fly ash and bottom ash in manufacturing of load-bearing interlocking block by replacing cement and laterite soil, respectively, at 0, 5, 10, 15, 20 and 25% by weight. This study used mixing ratio of cement to laterite soil of 1:7 by weight. The basic properties including compressive strengths (at 14, 28 and 90 days), water absorption (at 28 days), and unit weight (at 28 days) of the interlocking blocks were tested and determined. From the test results, it was found that interlocking blocks mixed with fly ash and bottom ash in appropriate proportions had the required properties complying with the Thai Community Product Standard for interlocking block.

Keyword: Bottom ash, compressive strength, fly ash, interlocking block, water absorption.

1. บทนำ

บล็อกประสานเป็นวัสดุก่อรูปแบบหนึ่งพัฒนาและวิจัยขึ้นโดยสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่ง

ประเทศไทย (วว.) และสามารถนำมาใช้ในการก่อสร้างอาคารที่พักอาศัยในระบบผนังรับน้ำหนักได้ โดยทั่วไปการผลิตบล็อกประสานจะมีส่วนผสมจากดินลูกรังบดละเอียด

ผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และน้ำในสัดส่วนที่เหมาะสม คลุกเคล้าจนเป็นเนื้อเดียวกันแล้วนำไปอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดซึ่งมีทั้งเครื่องอัดด้วยแรงงานคนและเครื่องอัดด้วยไฮดรอลิก แล้วบ่มด้วยความชื้นเพื่อให้บล็อกแข็งแรงเพียงพอต่อการใช้งาน คุณสมบัติของบล็อกประสานขึ้นอยู่กับอัตราส่วนผสมและส่วนผสมที่ใช้ [1] ตามมาตรฐาน มผช. 602/2547 [2] แบ่งบล็อกประสานออกเป็น 2 ชนิดคือ ชนิดรับน้ำหนักและชนิดไม่รับน้ำหนัก และคุณสมบัติหลักที่กำหนดในมาตรฐานคือ กำลังอัดและการดูดซึมน้ำ

เถ้าลอยและเถ้าก้นเตาเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการเผาถ่านหินเพื่อเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า เถ้าลอยมีขนาดอนุภาคเล็ก ความละเอียดสูง รูปร่างกลม และมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานที่นิยมนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในการผลิตคอนกรีต เนื่องจากช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตให้ดีขึ้นทั้งก่อนและหลังการแข็งตัว [3] ส่วนเถ้าก้นเตามีอนุภาคค่อนข้างหยาบและมีขนาดใกล้เคียงกับทรายทำให้สามารถนำมาใช้แทนที่ทรายได้ [4] สำหรับบล็อกประสานได้มีการศึกษาการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ในการผลิตบล็อกประสานชนิดไม่รับน้ำหนักพบว่า กำลังอัดของบล็อกลดลงตามปริมาณเถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น [5] สมพงษ์ และสุกษัย [6] ได้ศึกษาการใช้เถ้าแกลบและเถ้าลอยในการผลิตบล็อกประสานชนิดรับน้ำหนักสำหรับการปรับเสถียรภาพและหล่อแข็งภาคตะกอนโครเมียมพบว่า การใช้เถ้าแกลบและเถ้าลอยร้อยละ 30 และ 20 ดีที่สุดตามลำดับ ภาณุวัฒน์ และคณะ [7] ได้ใช้เถ้าลอยแทนที่ดินลูกรังพบว่า กำลังอัดของบล็อกประสานเพิ่มขึ้นมากกว่าร้อยละ 60 อย่างไรก็ตามยังไม่พบรายงานการศึกษาการใช้เถ้าลอยและเถ้าก้นเตาในการผลิตบล็อกประสาน งานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์และใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ดินลูกรังในการผลิตบล็อกประสานชนิดรับน้ำหนัก เนื่องจากปูนซีเมนต์และดินลูกรังเป็นวัสดุดิบที่มีต้นทุนสูงที่สุดและรองลงมาตามลำดับ ประกอบกับเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาก็มีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการแทนที่ดังกล่าว

2. การทดสอบ

เพื่อให้ได้อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์และใช้เถ้าก้นเตาแทนที่ดินลูกรัง การศึกษาได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ ส่วนแรกเป็นการหาลักษณะการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่เหมาะสมก่อน โดยที่ยังไม่มีการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าก้นเตา ส่วนที่สองเป็นการหาลักษณะการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าก้นเตาที่เหมาะสม โดยใช้อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษาส่วนแรกเป็นอัตราส่วนตั้งต้นสำหรับวัสดุ อัตราส่วนผสม และการเตรียมตัวอย่างทดสอบและวิธีการทดสอบที่ใช้ในการศึกษานี้มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1. วัสดุ

วัสดุหลักที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 ตามมาตรฐาน มอก. 15 เล่ม 1-2547 [8] ดินลูกรังบดละเอียดโดยร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (4.76 mm) เถ้าลอยและเถ้าก้นเตาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง องค์ประกอบหลักทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าลอยซึ่งวิเคราะห์โดยวิธีที่เรียกว่า x-ray fluorescence spectrometry (XRF) แสดงในตารางที่ 1 เถ้าลอยมีผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 61.7 มากกว่า 50 และมี CaO เท่ากับร้อยละ 25.4 มากกว่า 20 จึงจัดเป็นเถ้าลอยชั้นคุณภาพ F ตามมาตรฐาน ASTM C618 [9]

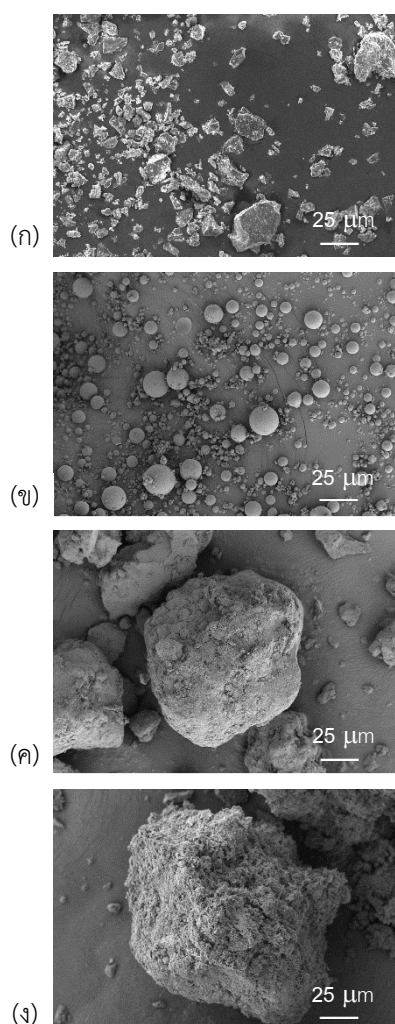
ตารางที่ 1 องค์ประกอบหลักทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าลอย

องค์ประกอบทางเคมี	วัสดุ	
	ปูนซีเมนต์	เถ้าลอย
SiO_2 (%)	17.5	26.9
Al_2O_3 (%)	4.1	11.2
Fe_2O_3 (%)	3.2	23.6
CaO (%)	62.4	25.4

ตารางที่ 1 องค์ประกอบหลักทางเคมีของปูนซีเมนต์และ
เถ้าลอย (ต่อ)

SO ₃ (%)	3.6	6.2
---------------------	-----	-----

ลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์ เถ้าลอย ดินลูกรัง
และเถ้าถ่านที่กำลังขยาย 500 เท่าจากกล้อง scanning
electron microscopy (SEM) แสดงในรูปที่ 1 จะเห็นได้
ว่าเถ้าลอยมีขนาดเล็กกว่าอนุภาคอื่นแต่ใกล้เคียงกับ
ปูนซีเมนต์และมีลักษณะกลมมน ในขณะที่เถ้าถ่านมี
อนุภาคนาขนาดใหญ่ที่สุดแต่ก็ใกล้เคียงกับดินลูกรังและมี
ลักษณะเป็นรูพรุนซึ่งไม่พบในอนุภาคอื่น



รูปที่ 1 ลักษณะอนุภาคที่กำลังขยาย 500 เท่า (ก)
ปูนซีเมนต์ (ข) เถ้าลอย (ค) ดินลูกรังบดละเอียด และ (ง)
เถ้าถ่าน

2.2. อัตราส่วนผสม

ในการศึกษานี้ใช้อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักระหว่าง
ปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรังเท่ากับ 1:7 ซึ่งเป็นอัตราส่วนผสมที่
นิยมใช้ในการผลิตบล็อกประสาน และพิจารณาการแทนที่
ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยและการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าถ่าน
โดยน้ำหนักที่ร้อยละ 0 5 10 15 20 และ 25
เท่ากัน ตารางที่ 2 และ 3 แสดงอัตราส่วนผสมสำหรับ
การศึกษาทั้งสองส่วนตามลำดับ ในหมายเหตุได้แสดง
สมมุติฐานที่ใช้ในการคำนวณน้ำหนักวัสดุซึ่งได้จาก
การศึกษาเบื้องต้น และเป็นผลกระทบโดยตรงจาก
ลักษณะอนุภาคของเถ้าถ่านที่มีขนาดใหญ่และมีรูพรุน
มากอันส่งผลต่อความหนาแน่นและการดูดซึมน้ำของเถ้า
ถ่าน

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักสำหรับการหาร้อย
ละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่เหมาะสม

ส่วนผสม	ปูนซีเมนต์	เถ้าลอย	ดินลูกรัง
1ก	1	0	7
2ก	0.95	0.05	7
3ก	0.90	0.10	7
4ก	0.85	0.15	7
5ก	0.80	0.20	7
6ก	0.75	0.25	7

หมายเหตุ สมมุติบล็อกมีความหนาแน่นไม่รวมน้ำ 1,800 kg/m³
และใช้น้ำร้อยละ 10 ของวัสดุอื่นทั้งหมด

ตารางที่ 3 อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักสำหรับการหาร้อย
ละการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าถ่านที่เหมาะสม

ส่วนผสม	ปูนซีเมนต์	เถ้าลอย	ดินลูกรัง	เถ้าถ่าน
1ข	*	*	7	0
2ข			6.65	0.35
3ข			6.30	0.70
4ข			5.95	1.05
5ข			5.60	1.40

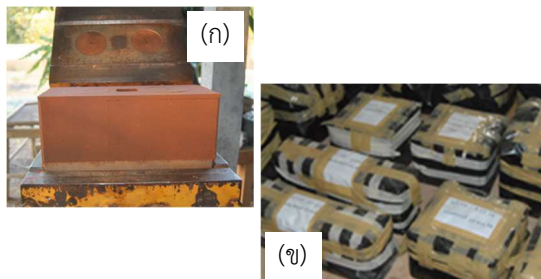
ตารางที่ 3 อัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักสำหรับการทำร้อยละการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้าที่เหมาะสม (ต่อ)

6ข			5.25	1.75
----	--	--	------	------

หมายเหตุ * เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษาส่วนแรก
ทั้งนี้สมมุติบล็อกมีความหนาแน่นไม่รวมน้ำ $1,600 \text{ kg/m}^3$ และใช้น้ำร้อยละ 14 ของวัสดุอื่นทั้งหมด

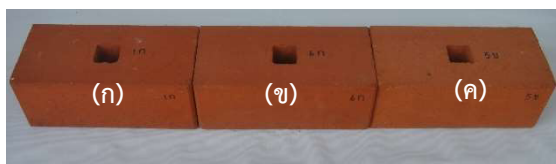
2.3. การเตรียมตัวอย่างทดสอบและวิธีทดสอบ

ตัวอย่างบล็อกประสานแบบตรงขนาดกว้าง 12.5 cm ยาว 25 cm และหนา 10 cm เตรียมโดยใช้เครื่องอัดบล็อกประสานแบบไฮดรอลิกดังแสดงในรูปที่ 2(ก) โดยผิวหน้าของบล็อกเรียบไม่มีรอยเพื่อให้เห็นต่อการทดสอบกำลังอัด แล้วผึ่งในที่ร่มเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงบ่มตัวอย่างโดยการพรมน้ำให้ทั่วแล้วหุ้มด้วยพลาสติกและเก็บในที่ร่มจนกว่าจะทำการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 2(ข)



รูปที่ 2 (ก) ตัวอย่างบล็อกประสาน (ข) การบ่มตัวอย่าง

รูปที่ 3 แสดงตัวอย่างของบล็อกทั้ง 3 แบบคือ ที่ไม่มีการผสมเถ้า ที่ผสมเถ้าลอยอย่างเดียว และที่ผสมทั้งเถ้าลอยและเถ้าก้นเตา จากการสังเกตสีของบล็อกพบว่าบล็อกทั้ง 3 แบบยังคงมีสีที่ใกล้เคียงกันคือสีส้มของดินลูกรัง



รูปที่ 3 (ก) บล็อกที่ไม่มีการผสมเถ้า (ข) บล็อกที่มีการผสมเถ้าลอยอย่างเดียว (ค) บล็อกที่มีการผสมทั้งเถ้าลอยและเถ้าก้นเตา

การทดสอบประกอบด้วย การทดสอบกำลังอัดที่อายุ 14 วัน 28 และ 90 วัน การดูซึมน้ำที่อายุ 28 วัน และหน่วยน้ำหนักที่อายุ 28 วัน การทดสอบกำลังอัดและการดูซึมน้ำทำตามมาตรฐาน มอก. 109-2517 [10] ตามที่กำหนดในมาตรฐาน มผช. 602/2547 [2] โดยกำลังอัดทดสอบด้วยตัวอย่างขนาดเต็มก้อน อย่างไรก็ตามไม่ได้มีการเคลือบผิวก่อนตัวอย่างก่อนทดสอบ เนื่องจากผิวหน้าตัวอย่างค่อนข้างเรียบ และทดสอบจำนวน 4 ตัวอย่างเพื่อหาค่าเฉลี่ยจากจำนวน 3 ตัวอย่างที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์การแปรปรวน (coefficient of variation, COV) น้อยที่สุด โดยค่า COV เท่ากับอัตราส่วนระหว่างส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานกับค่าเฉลี่ย

3. ผลการทดสอบและวิจารณ์ผล

3.1. ผลการทดสอบส่วนแรก

ผลการทดสอบกำลังอัดของบล็อกที่ใช้เฉพาะเถ้าลอยในการแทนที่ปูนซีเมนต์แสดงในตารางที่ 4 และรูปที่ 4

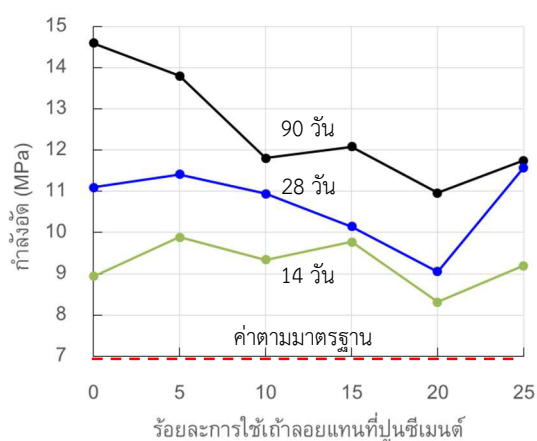
ตารางที่ 4 กำลังอัดเฉลี่ยของบล็อกที่ใช้เฉพาะเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์

ส่วนผสม	กำลังอัดเฉลี่ย (MPa)		
	ที่ 14 วัน	ที่ 28 วัน	ที่ 90 วัน
1ก	8.9 (1.2)	11.1 (2.0)	14.6 (1.7)
2ก	9.9 (1.6)	11.4 (2.7)	13.8 (2.0)
3ก	9.3 (1.7)	10.9 (1.7)	11.8 (1.6)
4ก	9.8 (3.0)	10.1 (0.8)	12.1 (1.9)
5ก	8.3 (3.3)	9.1 (1.4)	11.0 (3.0)
6ก	9.2 (0.7)	11.6 (0.2)	11.8 (3.9)

หมายเหตุ ค่าในวงเล็บเป็นค่า COV

ในตารางที่ 4 แสดงค่า COV อยู่ในช่วงร้อยละ 0.2 ถึง 3.9 บ่งบอกว่ากำลังอัดมีความแปรปรวนไม่มาก (มาตรฐาน ASTM C109-02 [11] ให้กำลังอัดของมอร์ต้ามีค่า COV ไม่เกินร้อยละ 4) จากรูปที่ 4 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยกับกำลัง

อัดของบล็อกไม่ได้มีแนวโน้มที่ชัดเจน อย่างไรก็ตามทุกอัตราส่วนมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นตามอายุของตัวอย่างและมีกำลังอัดมากกว่าค่าที่มาตรฐาน มผช. 602/2547 [2] กำหนดคือไม่น้อยกว่า 7 MPa ตั้งแต่อายุ 14 วันโดยมีกำลังอัดอยู่ในช่วง 8.3 ถึง 9.9 MPa ส่วนที่ 28 วันอยู่ในช่วง 9.1 ถึง 11.6 MPa และที่ 90 วันอยู่ในช่วง 11.0 ถึง 14.6 MPa ดังนั้นเมื่อพิจารณาในด้านความประหยัดการศึกษานี้จึงเลือกอัตราส่วนผสม 6ก ซึ่งใช้เถ้าลอยร้อยละ 25 เป็นอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดและใช้ในการศึกษาต่อไปในส่วนที่สอง ซึ่งเมื่อทดสอบการดูดซึมน้ำและหน่วยน้ำหนักก็พบว่าเป็นไปตามที่มาตรฐาน มผช. 602/2547 [2] กำหนด โดยมีหน่วยน้ำหนัก $1,968 \text{ kg/m}^3$ และการดูดซึมน้ำ 193 kg/m^3 (มาตรฐานกำหนดให้ไม่เกิน 224 kg/m^3 สำหรับบล็อกหน่วยน้ำหนักระหว่าง $1,924$ ถึง $2,000 \text{ kg/m}^3$) และเมื่อเทียบกับอัตราส่วนผสม 1ก ที่ไม่ใช่เถ้าลอยก็มีการดูดซึมน้ำที่ตื้นเขินคือมีค่าลดลงร้อยละ 6.9 โดยมีหน่วยน้ำหนักเพิ่มขึ้นเพียงร้อยละ 0.72



รูปที่ 4 กำลังอัดเฉลี่ยของบล็อกที่ใช้เฉพาะเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์

3.2. ผลการทดสอบส่วนที่สอง

ด้วยการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 25 ทุกส่วนผสมในส่วนที่สอง ผลการทดสอบกำลังอัดของบล็อกที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์และเถ้ากันเตาแทนที่ดินลูกรังแสดงในตารางที่ 5 และรูปที่ 5 สังเกตว่าอัตราส่วนผสม 6

ก และ 1ข แม้จะมีอัตราส่วนผสมของเถ้าเหมือนกันแต่ให้กำลังอัดต่างกันเนื่องจากการคำนวณส่วนผสมใช้สมมติฐานต่างกันตามหมายเหตุใต้ตารางที่ 2 และ 3 ตามลำดับ

ในตารางที่ 5 แสดงค่า COV อยู่ในช่วงร้อยละ 0.4 ถึง 4.7 กำลังอัดจึงมีความแปรปรวนมากกว่าผลการทดสอบในส่วนแรกเล็กน้อย แต่จากรูปที่ 5 พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการแทนที่ดินลูกรังด้วยเถ้ากันเตากับกำลังอัดของบล็อกมีแนวโน้มที่ค่อนข้างชัดเจนคือ กำลังอัดเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มเถ้ากันเตาจนถึงค่าสูงสุด โดยค่าสูงสุดเกิดขึ้นที่การใช้เถ้ากันเตาร้อยละ 20 หรือส่วนผสม 5ข ทุกอายุการทดสอบ และส่วนผสม 5ข ยังเป็นส่วนผสมเดียวที่ให้กำลังอัดมากกว่าที่มาตรฐานกำหนดตั้งแต่อายุ 14 วัน (ให้กำลังอัดที่อายุ 14 วัน 28 และ 90 เท่ากับ 7.0 9.0 และ 11.1 MPa ตามลำดับ) เมื่อทดสอบการดูดซึมน้ำและหน่วยน้ำหนักก็พบว่าเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด โดยมีหน่วยน้ำหนัก $1,766 \text{ kg/m}^3$ และการดูดซึมน้ำ 245 kg/m^3 (มาตรฐานกำหนดให้ไม่เกิน 256 kg/m^3 สำหรับบล็อกหน่วยน้ำหนักระหว่าง $1,761$ ถึง $1,840 \text{ kg/m}^3$) ในการศึกษาจึงเลือกอัตราส่วนผสม 5ข เป็นส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดเมื่อมีการใช้ทั้งสองเถ้า

ตารางที่ 5 กำลังอัดเฉลี่ยของบล็อกที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์และเถ้ากันเตาแทนที่ดินลูกรัง

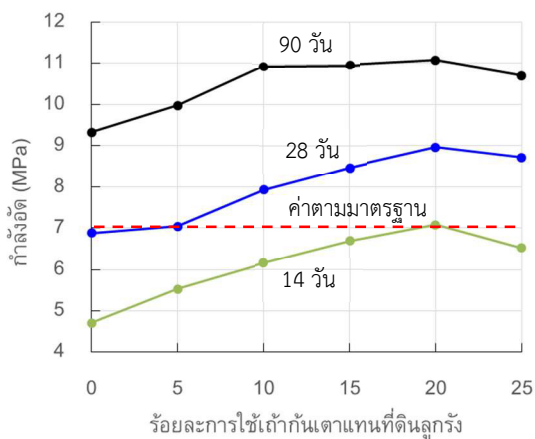
ส่วนผสม	กำลังอัดเฉลี่ย (MPa)		
	ที่ 14 วัน	ที่ 28 วัน	ที่ 90 วัน
1ข	4.7 (0.6)	6.9 (3.2)	9.3 (3.9)
2ข	5.5 (3.1)	7.0 (2.2)	10.0 (1.6)
3ข	6.2 (1.6)	7.9 (3.3)	10.9 (1.2)
4ข	6.7 (0.8)	8.5 (1.2)	11.0 (2.3)
5ข	7.0 (0.4)	9.0 (0.5)	11.1 (1.3)
6ข	6.5 (4.7)	8.7 (1.0)	10.7 (2.3)

หมายเหตุ ค่าในวงเล็บเป็นค่า COV

เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนผสม 5ข กับ 1ข ที่ไม่ใช่เถ้ากันเตาพบว่าการดูดซึมน้ำแย่งลงคือมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ

31.7 การที่บล็อกที่ผสมเถ้ากันเตามีการดูดน้ำมากขึ้นก็เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของเถ้ากันเตามีลักษณะค่อนข้างพรุนทำให้ดูดน้ำมากนั่นเอง

แม้จะไม่สามารถเปรียบเทียบอัตราส่วนผสม 5x กับ 6ก ได้โดยตรงเนื่องจากใช้สมมุติฐานต่างกันดังที่อธิบายไว้ข้างต้น แต่ถ้ามองในภาพรวมว่าอัตราส่วนผสม 6ก ซึ่งเป็นส่วนผสมที่เหมาะสมในกรณีที่ใช้เถ้าลอยอย่างเดียว และอัตราส่วนผสม 5x ซึ่งเป็นส่วนผสมที่เหมาะสมในกรณีที่ใช้ทั้งเถ้าลอยและเถ้ากันเตาพบว่า อัตราส่วนผสม 5x ให้บล็อกประสานที่มีหน่วยน้ำหนักลดลงร้อยละ 10.3 แต่มีการดูดซึมน้ำมากขึ้นร้อยละ 27.0 เมื่อเทียบกับอัตราส่วนผสม 6ก



รูปที่ 5 กำลังอัดเฉลี่ยของบล็อกที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์และเถ้ากันเตาแทนที่ดินลูกรัง

4. สรุปผล

จากการศึกษาการใช้เถ้าลอยและเถ้ากันเตาในการผลิตบล็อกประสานชนิดรับน้ำหนักตามมาตรฐาน มผช. 602/2547 [2] โดยใช้แทนที่ปูนซีเมนต์และดินลูกรังตามลำดับที่ร้อยละ 0 5 10 15 20 และ 25 สำหรับอัตราผสมระหว่างปูนซีเมนต์ต่อดินลูกรัง 1:7 สามารถสรุปผลได้ดังนี้

(1) กรณีใช้เถ้าลอยอย่างเดียว อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมคือ ใช้เถ้าลอยร้อยละ 25 ของปูนซีเมนต์ให้บล็อกที่มีกำลังอัดที่อายุ 14 28 และ 90 วันเท่ากับ 9.2

11.6 และ 11.8 MPa ตามลำดับ มีการดูดซึมน้ำเท่ากับ 193 kg/m^3 และมีหน่วยน้ำหนักเท่ากับ $1,968 \text{ kg/m}^3$

(2) กรณีใช้เถ้าลอยและเถ้ากันเตา อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมคือ ใช้เถ้าลอยร้อยละ 25 ของปูนซีเมนต์และเถ้ากันเตาร้อยละ 20 ของดินลูกรัง ให้บล็อกที่มีกำลังอัดที่อายุ 14 28 และ 90 วันเท่ากับ 7.0 9.0 และ 11.1 MPa ตามลำดับ มีการดูดซึมน้ำเท่ากับ 245 kg/m^3 และมีหน่วยน้ำหนักเท่ากับ $1,766 \text{ kg/m}^3$

เพื่อความมั่นใจในการใช้งานในระยะยาว ควรมีการศึกษาคุณสมบัติอื่นๆ ของบล็อกประสานที่ผสมเถ้าลอยและเถ้ากันเตาด้วย เช่น ความทนทาน และการนำความร้อน เป็นต้น

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากเงินอุดหนุนการวิจัยวิศวกรรมศาสตร์บริการ งบประมาณเงินรายได้ ประจำปี พ.ศ. 2558 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] วุฒินัย กกก้าแหง และพิชิต เจนบรรจง. *เอกสารประกอบการอบรม: การผลิตบล็อกประสานให้ได้คุณภาพ*. กรุงเทพฯ: ฝ่ายนวัตกรรมวัสดุ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, (2551).
- [2] กองบริหารมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. *มผช. 602 วัสดุบล็อกประสาน*. กรุงเทพฯ: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, (2547).
- [3] ปริญญา จินดาประเสริฐ. *เถ้าลอยในงานคอนกรีต*. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: สมาคมคอนกรีตไทย, (2547).
- [4] P. Onprom, K. Chaimoon and R. Cheerarot, "Influence of bottom ash replacements as fine aggregate on the property of cellular concrete with various foam contents,"

- Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2015, pp. 1-11, 2015.
- [5] สำเร็จ สารมาคม. *การประยุกต์ใช้เถ้าลอยในการผลิตบล็อกประสาน*. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, (2556).
- [6] สมพงษ์ หิรัญมาศสุวรรณ และ สุภชัย อิศรางกูร ณ อยุธยา. “การใช้เถ้าแกลบและเถ้าลอยเป็นวัสดุปอดโซลานสำหรับการปรับเสถียรและการหล่อแข็งภาคก่อนโครเมียมในรูปอิฐบล็อกประสานสำหรับใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง”. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*. 25(6): 1072-1082, 2560.
- [7] ภาณุวัฒน์ จ้อยกลัด นาซิม อารี และ คาเตียร์ ฮัสเซน. “สมรรถนะของอิฐกลวงที่สร้างจากเถ้าลอยซีเมนต์และทราย”. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.* 41(1): 97-113, 2561.
- [8] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. *มอก. 15 เล่ม 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เล่ม 1 ข้อกำหนดเกณฑ์คุณภาพ*. กรุงเทพฯ: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, (2547).
- [9] American Society for Testing and Materials, “ASTM C618: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete,” *ASTM International*, Philadelphia, USA, 2003.
- [10] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. *มอก. 109 วิธีชักตัวอย่างและการทดสอบวัสดุงานก่อซึ่งทำด้วยคอนกรีต*. กรุงเทพฯ: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, (2517).
- [11] American Society for Testing and Materials, “ASTM C109/ C109M: Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars,” *ASTM International*, Philadelphia, USA, 2002.

**การปรับปรุงสมบัติของใบอ้อยด้วยกระบวนการทอรรีแฟกชัน
โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหลต่อเนื่อง
Improvement of Sugarcane Leaves Property by Torrefaction
in a Continuous Tubular Flow Reactor**

สถาพร สอนสุภาพ¹ อติศักดิ์ ปัตติยะ^{2*}

¹นักศึกษาปริญญาโท ²รองศาสตราจารย์ หน่วยปฏิบัติการวิจัยพลังงานชีวภาพและทรัพยากรหมุนเวียน
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

Sathapon Sonsupap¹ Adisak Pattiya^{2*}

Bio-Energy and Renewable Resources Research Unit, Faculty of Engineering, Mahasarakham
University, Khamriang, Kantharawichai, Maha Sarakham, 44150

*Corresponding author: Email: adisak_pattiya@yahoo.com

(Received: January 19, 2018; Accepted: April 20, 2019)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการทอรรีแฟกชันของใบอ้อยในเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบท่อไหลแบบต่อเนื่องขนาดห้องทดลอง 600 กรัมต่อชั่วโมง มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงค่าความร้อนของชีวมวลโดยให้มีการสูญเสียมวลน้อยที่สุดและมุ่งให้มีการใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาต่ำที่สุด โดยมีการศึกษาผลของอุณหภูมิทอรรีแฟกชันที่ 260 280 และ 300 องศาเซลเซียส และระยะเวลาคงอยู่ของของแข็งที่ 1, 3 และ 5 นาที ต่อปริมาณผลได้เชิงมวลและเชิงพลังงาน ค่าความร้อนและค่าการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานของถ่านทอรรีไฟด์ ผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้ช่วงของตัวแปรที่ศึกษาดังกล่าว ปริมาณผลได้เชิงมวลของถ่านทอรรีไฟด์คือร้อยละ 68-89 โดยมวลฐานแห้ง ปริมาณผลได้เชิงพลังงานคือร้อยละ 84-95 ค่าความร้อนสูงของถ่านทอรรีไฟด์อยู่ในช่วง 19-21 MJ/kg เมื่อเทียบกับชีวมวลตั้งต้นที่มีค่าความร้อนสูงเพียง 17.5 MJ/kg ทำให้ค่าการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานมีค่าเป็น 1.06-1.21 โดยพบว่าสภาวะที่ทำให้ถ่านทอรรีไฟด์มีค่าความร้อนสูงที่สุดและมีค่าการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานสูงที่สุดคือที่ 280 องศาเซลเซียส และเวลาคงอยู่ของของแข็ง 5 นาที

คำสำคัญ: ใบอ้อย ทอรรีแฟกชัน อุณหภูมิ เวลาคงอยู่ของของแข็ง เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหลต่อเนื่อง

ABSTRACT

In this paper, torrefaction of sugarcane leaves was carried out in a lab-scale 600 g/h continuous flow pyrolysis reactor with an aim to improve the biomass heating value with minimum weight loss and minimum reaction time. The effects of torrefaction temperature (260, 280 and 300°C) and solid residence time (1, 3 and 5 min) were investigated to determine the mass and energy yields, the heating value and the energy densification of the torrefied biomass. The results show that, within the ranges of the parameters studied, the mass yields of 68-89 wt% on dry basis were obtained, corresponding to

the energy yields of 84- 95%. The higher heating values of the torrefied sugarcane leaves were in the range of 19-21 MJ/kg compared to 17.5 MJ/kg for the original biomass. This corresponds to the energy densification of 1.06- 1.21. The torrefaction conditions that gave the highest torrefied biomass heating value and energy densification were 280°C and 5 minutes.

Keyword: Sugarcane leaves, torrefaction, temperature, residence time, continuous tubular flow reactor.

1. บทนำ

ในปัจจุบันและที่ผ่านมามีการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นจำนวนมาก ผลจากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลทำให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศเพิ่มขึ้น ก่อให้เกิดภาวะโลกร้อนและสิ่งแวดล้อมเป็นพิษ วิธีหนึ่งในการแก้ไขปัญหาหรือช่วยบรรเทา คือ การสนับสนุนการใช้ชีวมวล ซึ่งทุกวันนี้มีการใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงอยู่ในหลายรูปแบบ โดยทั่วไปอาจนำมาใช้ในการเผาไหม้โดยตรง การนำมาอัดเม็ดเพื่อเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงาน หรือการปรับปรุงสมบัติด้วยกระบวนการทางความร้อน เช่น “กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis process)” ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 5 ระดับ คือ ไพโรไลซิสแบบเร็ว (Fast pyrolysis) ไพโรไลซิสแบบกลาง (Intermediate pyrolysis) ไพโรไลซิสแบบช้า (Slow pyrolysis) แก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) และทอร์รีแฟกชัน (Torrefaction) โดย 5 กระบวนการดังกล่าวมีความแตกต่างกันที่อุณหภูมิ อัตราการให้ความร้อน และเวลาคงอยู่ ตัวแปรเหล่านี้ส่งผลให้ปริมาณผลได้และสมบัติของผลิตภัณฑ์แตกต่างกัน [1]

กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วใช้อุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส เวลาคงอยู่ของไอน้ำประมาณ 2-3 วินาที [1] ปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นของเหลว ส่วนปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์ของแข็งและแก๊สเท่า ๆ กัน กระบวนการไพโรไลซิสแบบกลางใช้อุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส เวลาคงอยู่ของไอน้ำประมาณ 10-30 วินาที [1] ปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นของเหลว แต่น้อยกว่ากระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าหรือ

กระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) ใช้อุณหภูมิประมาณ 400 องศาเซลเซียส เวลาคงอยู่หลายชั่วโมงหรืออาจนานเป็นวัน [1] ปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์มีใกล้เคียงกันทั้งของแข็ง ของเหลว และแก๊ส แก๊สซิฟิเคชันใช้อุณหภูมิประมาณ 750-900 องศาเซลเซียส [1] ปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นแก๊ส ส่วนปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์ของแข็งและของเหลวเท่า ๆ กัน กระบวนการทอร์รีแฟกชันหรือเรียกว่า กระบวนการไพโรไลซิสแบบอ่อน (Mild pyrolysis) [2] ใช้อุณหภูมิประมาณ 200-300 องศาเซลเซียส เวลาคงอยู่ประมาณ 1-120 นาที ปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นของแข็ง รองลงมาเป็นของเหลวและมีแก๊สเล็กน้อย โดยผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งเรียกว่า ถ่านทอร์รีไฟด์ (Torrefied biomass) หากมีการปรับปรุงสมบัติของถ่านทอร์รีไฟด์มากพอ ถ่านสามารถมีค่าพลังงานความร้อนใกล้เคียงกับถ่านหินได้ และดีกว่าถ่านหินในแง่ของปริมาณกำมะถันและไนโตรเจน เนื่องจากชีวมวลมีปริมาณกำมะถันและไนโตรเจนน้อยมาก จึงเหมาะสำหรับนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านทอร์รีไฟด์และใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวภาพทดแทนถ่านหิน

สมบัติของถ่านทอร์รีไฟด์มีข้อดีหลายอย่าง เช่น ค่าความร้อน สัดส่วนของคาร์บอน [3, 4] การไม่ดูดความชื้นจากอากาศ [4-6] และความเปราะ โดยสมบัติของความเปราะของถ่านทอร์รีไฟด์ส่งผลให้สามารถบดอัดได้ง่าย จึงทำให้มีความหนาแน่นเชิงพลังงานสูงขึ้นและลดต้นทุนการขนส่งได้ ทั้งนี้ยังสามารถนำถ่านทอร์รีไฟด์ไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับโรงไฟฟ้าถ่านหินได้ [7]

การสำรวจในปี 2013 พบว่าทั่วโลกมีการปลูกอ้อยอยู่ที่ประมาณ 2 พันล้านตันต่อปี ประเทศไทยมีการปลูกอ้อยเป็นอันดับที่ 4 ของโลก รองจากประเทศบราซิล อินเดีย และจีน ประเทศไทยมีการปลูกอ้อยอยู่ประมาณ 1 ร้อยล้านตันต่อปี หรือคิดเป็นร้อยละ 5 ของทั่วโลก [8] อัตราส่วนของของเหลือใช้จากอ้อยต่ออ้อยคือ 0.302 [9] ดังนั้นของเหลือใช้จากอ้อยของทั่วโลกมีประมาณ 6 ร้อยล้านตันต่อปี ของเหลือใช้จากอ้อยแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ใบอ้อยและขานอ้อย ขานอ้อยมีการนำไปใช้งานโดยการนำไปเผาไหม้ให้ความร้อนกับหม้อต้มไอน้ำ แต่ก็ยังสามารถปรับปรุงได้ด้วยกระบวนการทอรรีแฟกชัน [10-14] เช่นงานวิจัยของ A. T. Conag และคณะ 2017 [10] ได้ทำการศึกษาโดยใช้ขานอ้อยเป็นวัตถุดิบด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ในแต่ละการทดลองใช้ชีวมวลประมาณ 9 กรัม ที่อุณหภูมิ 250-350 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เวลาคงอยู่ของของแข็ง 0-75 นาที ซึ่งเวลาคงอยู่ของของแข็งเริ่มจับเมื่อชีวมวลที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์มีอุณหภูมิถึงที่กำหนด ในกระบวนการใช้แก๊สออกซิเจนปริมาณร้อยละ 3 โดยปริมาตร การใช้แก๊สออกซิเจนปริมาณน้อยนี้ไม่ส่งผลต่อปริมาณผลได้ของถ่านทอรรีไฟต์อย่างมีนัยสำคัญ [15] ผลการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิ 250-350 องศาเซลเซียส เวลาคงอยู่ของของแข็งอย่างน้อย 60 นาที เป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการ ซึ่งได้ถ่านทอรรีไฟต์ที่มีความร้อนสูงประมาณ 26 MJ/kg แต่สำหรับการวิจัยที่ใช้ใบอ้อยเป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านทอรรีไฟต์นั้นมีเพียงงานวิจัยของ A. T. Conag และคณะ 2018 [16] ซึ่งทำการศึกษาโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ในแต่ละการทดลองใช้ชีวมวลประมาณ 17 กรัม ที่อุณหภูมิ 250-350 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เวลาคงอยู่ของของแข็ง 0-75 นาที เวลาคงอยู่ของของแข็งเริ่มจับเมื่อชีวมวลที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์มีอุณหภูมิถึงที่กำหนด ในกระบวนการใช้แก๊สออกซิเจนปริมาณร้อยละ 3 โดยปริมาตร การใช้แก๊สออกซิเจนปริมาณน้อยนี้ไม่ส่งผลต่อปริมาณผลได้ของถ่านทอรรีไฟต์อย่างมีนัยสำคัญ [15]

ผลการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เวลาคงอยู่ของของแข็งอย่างน้อย 45 นาที เป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งาน เนื่องจากใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ดังนั้นเวลาในการทดลองทั้งสิ้นตั้งแต่ที่อุณหภูมิ 300 ไปจนถึง 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 27 นาที เวลาคงอยู่ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส อีก 45 นาที รวมเป็น 72 นาที เพื่อผลิตถ่านทอรรีไฟต์ที่มีค่าความร้อนสูง 21.6 MJ/kg ปริมาณผลได้เชิงมวลของถ่านทอรรีไฟต์ร้อยละ 52 โดยน้ำหนักฐานแห้ง และมีปริมาณผลได้เชิงพลังงานของถ่านทอรรีไฟต์ร้อยละ 68 โดยน้ำหนักฐานแห้ง แสดงให้เห็นว่าใช้ระยะเวลาในการผลิตถ่านทอรรีไฟต์ค่อนข้างนาน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการป้อนชีวมวลแบบต่อเนื่อง โดยมีการอุ่นเตาปฏิกรณ์ให้ถึงอุณหภูมิไว้ล่วงหน้าก่อนที่จะป้อนชีวมวลเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ เพื่อให้กระบวนการทอรรีแฟกชันใช้เวลาคงอยู่ของของแข็งลดลง โดยมีการศึกษาที่ 1-5 นาที และอุณหภูมิที่ 260-300 องศาเซลเซียส

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1. วัตถุดิบ

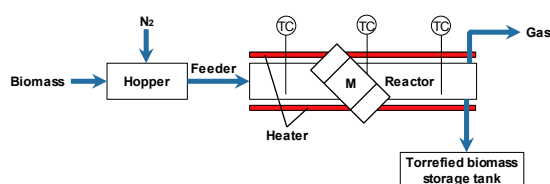
ชีวมวลที่ใช้ในการทดลองนี้ คือ ใบอ้อย ซึ่งได้มาจากโรงผลิตน้ำตาลในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ขั้นตอนการเตรียมชีวมวลเริ่มจากนำชีวมวลมาบดย่อยและคัดแยกขนาดให้ได้อนุภาคเล็กกว่า 6.5 มิลลิเมตร นำชีวมวลไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) ประกอบด้วย ความชื้น (Moisture) สารระเหย (Volatile) คาร์บอนคงที่ (Fixed carbon) และเถ้า (Ash) นอกจากนี้ยังนำชีวมวลมาวิเคราะห์เพื่อหาค่าความร้อนสูง (Higher heating value, HHV) ผลที่ได้แสดงดังตารางที่

ตารางที่ 1 สมบัติพื้นฐานของชีวมวลตั้งต้น

Proximate analysis (wt%)	
Moisture	4.9
Volatile	73.2
Fixed carbon	14.8
Ash	7.1
HHV (MJ/kg, ฐานแห้ง)	17.5

2.2. วิธีการทดลอง

วิธีการทดลองแสดงดังรูปที่ 1 เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้คือเครื่องปฏิกรณ์แบบไหลต่อเนื่องในท่อวางแนวนอน เริ่มดำเนินการทดลองโดยการเติมชีวมวล (Biomass) 300 กรัม ใส่ในถังป้อน (Hopper) จากนั้นชีวมวลถูกลำเลียงจากถังป้อนด้วยชุดลำเลียง (Feeder) เข้าไปยังท่อปฏิกรณ์ (Reactor) ชีวมวลที่อยู่ในท่อปฏิกรณ์นั้นเคลื่อนที่ได้โดยการสั่นของมอเตอร์สั่นและถูกผลักไปยังถังเก็บถ่านทอร์รีไฟด์ (Torrefied biomass storage tank) ขณะที่ชีวมวลเคลื่อนที่ภายในท่อปฏิกรณ์ ก็ได้รับความร้อนจากหลอดความร้อนที่ควบคุมด้วยชุดควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller, TC) ที่ควบคุมด้วยระบบ PID การควบคุมเวลาคงอยู่ของของแข็งสามารถทำได้โดยการปรับความถี่ของมอเตอร์สั่นที่อินเวอร์เตอร์ (Inverter) ในระหว่างกระบวนการไนโตรเจน (N_2) ถูกป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ที่ตำแหน่งถังป้อนด้วยอัตราการไหลที่ 4 ลิตรต่อนาที เพื่อนำพาไอไฟโรไลซิสออกจากท่อปฏิกรณ์ เนื่องจากการสะสมของไอไฟโรไลซิสในท่อปฏิกรณ์เป็นเวลานานอาจเกิดการควบแน่นภายในท่อปฏิกรณ์ได้ ผลิตภัณฑ์ของกระบวนการทอร์รีฟิเคชันที่ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ถ่านทอร์รีไฟด์ (Torrefied biomass) และ แก๊ส (Gas)



รูปที่ 1 แผนภาพการดำเนินการ

การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ใช้ อุณหภูมิ 260 280 และ 300 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลา คงอยู่ของของแข็งคงที่ที่ 3 นาที ส่วนที่ 2 ใช้เวลาคงอยู่ ของของแข็ง 1 3 และ 5 นาที โดยใช้อุณหภูมิคงที่ที่ 280 องศาเซลเซียส ในแต่ละการทดลองใช้อัตราป้อนชีวมวล 600 กรัมต่อชั่วโมง

2.3. การวิเคราะห์สมบัติของถ่านทอร์รีไฟด์

สมบัติของถ่านทอร์รีไฟด์ ได้แก่ การวิเคราะห์ แบบประมาณ การวิเคราะห์ค่าความร้อนสูง และการเพิ่ม ความหนาแน่นเชิงพลังงาน มีรายละเอียดการคำนวณและ วิธีการดังนี้

2.3.1. การวิเคราะห์แบบประมาณ

การวิเคราะห์แบบประมาณแบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ ความชื้น (Moisture content, M) วิเคราะห์ตาม มาตรฐาน ASTM E871-82 สารระเหย (Volatile matter, VM) วิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM E872-82 เถ้า (Ash) วิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM E1755-01 และคาร์บอนคงที่ (Fixed carbon, FC) คำนวณจากความ แตกต่างดังสมการ (1)

$$FC = 100 - M - VM - Ash \quad (1)$$

จากนั้นสารระเหย เถ้า และคาร์บอนคงที่ ที่ได้ จากการวิเคราะห์แบบประมาณมาแปลงหน่วยเป็นฐาน แห้ง ได้เป็นสารระเหยฐานแห้ง (VM_{db}) เถ้าฐานแห้ง (Ash_{db}) และคาร์บอนคงที่ฐานแห้ง (FC_{db}) ดังสมการ (2) ถึง (4)

$$VM_{db} = \frac{VM}{100 - M} \times 100\% \quad (2)$$

$$Ash_{db} = \frac{Ash}{100 - M} \times 100\% \quad (3)$$

$$FC_{db} = \frac{FC}{100 - M} \times 100\% \quad (4)$$

2.3.2. การวิเคราะห์ค่าความค่าความร้อนสูง

การวิเคราะห์ค่าความร้อนเริ่มจากการนำ ตัวอย่างไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส

เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำตัวอย่างมาหาค่าความร้อนโดยใช้เครื่อง Oxygen bomb calorimeter รุ่น Parr 1341 ค่าที่ได้เป็นค่าความร้อนสูงฐานแห้ง

2.3.3. ปริมาณผลได้เชิงมวลและเชิงพลังงาน

ปริมาณผลได้เชิงมวล (Mass yield, Y) และเชิงพลังงาน (Energy yield, EY) เป็นตัวแปรในการประเมินประสิทธิภาพกระบวนการผลิตของกระบวนการทอรรีแฟกชัน สามารถคำนวณได้ดังสมการ (5) และ (6)

$$Y_S = \frac{M_S}{M_B - M_{\text{water}}} \times 100\% \quad (5)$$

$$EY_S = Y_S \times \frac{HHV_S}{HHV_B} \quad (6)$$

โดยที่ $M_{\square}$ = มวลของถ่านทอรรีไฟต์, g

M_B = มวลของชีวมวลตั้งต้น, g

M_{water} = มวลของความชื้น, g

Y_S = ปริมาณผลได้เชิงมวลของถ่านทอรรีไฟต์ฐานแห้ง, wt%

EY_S = ปริมาณผลได้เชิงพลังงานของถ่านทอรรีไฟต์ฐานแห้ง, wt%

HHV_S = ค่าความร้อนสูงของถ่านทอรรีไฟต์ฐานแห้ง, MJ/kg

HHV_B = ค่าความร้อนสูงของชีวมวลตั้งต้นฐานแห้ง, MJ/kg

2.3.4. การเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงาน

การเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานของถ่านทอรรีไฟต์ (Energy densification, η) คือปริมาณผลได้เชิงพลังงานของถ่านทอรรีไฟต์ (EY_S) ต่อปริมาณผลได้เชิงมวลของถ่านทอรรีไฟต์ (Y_S) การเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานของถ่านทอรรีไฟต์อาจเรียกว่าจำนวนเท่าตัวของการเพิ่มค่าความร้อน สามารถคำนวณได้จากค่าความร้อนสูงของถ่านทอรรีไฟต์ (HHV_S) ต่อค่าความร้อนสูงของชีวมวลตั้งต้น (HHV_B) ดังสมการ (7)

$$\eta = \frac{EY_S}{Y_S} = \frac{HHV_S}{HHV_B} \quad (7)$$

3. ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการผลิตถ่านทอรรีไฟต์จากใบอ้อยในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหลต่อเนื่อง ผลการทดลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ผลผลิตจากกระบวนการ ปริมาณผลได้เชิงมวลและเชิงพลังงาน และสมบัติของถ่านทอรรีไฟต์ มีรายละเอียดดังนี้

3.1. ผลผลิตจากกระบวนการ

เมื่อใช้ใบอ้อยที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมดังรูปที่ 2 เป็นวัตถุดิบในกระบวนการทอรรีแฟกชัน ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ถ่านทอรรีไฟต์ และแก๊ส เมื่อนำใบอ้อยมาผ่านกระบวนการทอรรีแฟกชันได้ผลิตภัณฑ์คือถ่านทอรรีไฟต์ที่เป็นสีน้ำตาลเข้มถึงสีดำ ขึ้นอยู่กับความรุนแรงของการทำปฏิกิริยา กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิสูงและเวลาคงอยู่ของของแข็งนานทำให้สีของผลิตภัณฑ์เข้มขึ้นแสดงดังรูปที่ 3 และรูปที่ 4 ส่วนแก๊สนั้นมีสีขาวและมีกลิ่นฉุน



รูปที่ 2 ใบอ้อยตั้งต้น



(ก)



(ข)



(ค)

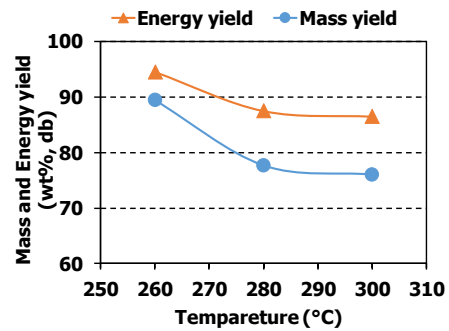
รูปที่ 3 ถ่านทอรรีไฟต์ที่อุณหภูมิ (ก) 260 (ข) 280 และ (ค) 300 องศาเซลเซียส โดยเวลาคงอยู่ของของแข็งคงที่ 3 นาที



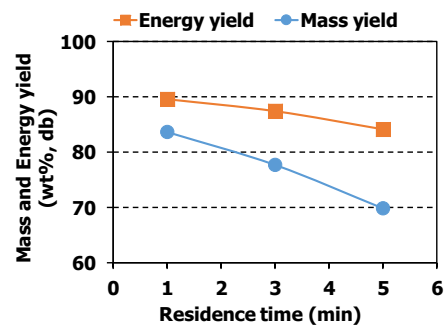
รูปที่ 4 ถ่านทอร์รีไฟด์ที่เวลาคงอยู่ของของแข็ง (ก) 1 (ข) 3 และ (ค) 5 นาที โดยอุณหภูมิคงที่ที่ 280 องศาเซลเซียส

3.2. ปริมาณผลได้เชิงมวลและเชิงพลังงาน

รูปที่ 5 แสดงให้เห็นถึงปริมาณผลได้เชิงมวลและเชิงพลังงานของถ่านทอร์รีไฟด์ ปริมาณผลได้เชิงมวลของถ่านทอร์รีไฟด์ร้อยละ 70-89 โดยน้ำหนักฐานแห้ง ขณะที่ปริมาณผลได้เชิงมวลของถ่านทอร์รีไฟด์ร้อยละ 84-94 ปริมาณผลได้เชิงมวลและเชิงพลังงานของถ่านทอร์รีไฟด์มีแนวโน้มลดลง การทดลองที่ใช้อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส และเวลาคงอยู่ของของแข็ง 3 นาที ให้ปริมาณผลได้เชิงมวลและเชิงพลังงานของถ่านทอร์รีไฟด์สูงสุด ขณะที่การทดลองที่ใช้อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส และเวลาคงอยู่ของของแข็ง 5 นาที มีปริมาณผลได้เชิงมวลและเชิงพลังงานของถ่านทอร์รีไฟด์ต่ำสุด ทั้งในกรณีที่เพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นที่เวลาคงอยู่ของของแข็งคงที่และเพิ่มเวลาคงอยู่ของของแข็งให้นานขึ้นที่อุณหภูมิคงที่ ผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ N. Doassans-Carrère และคณะ 2014 [17] ได้ใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบสั่นซึ่งเป็นเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง วัสดุที่ใช้คือไม้สับ ทำการศึกษาที่อุณหภูมิแตกต่างกันที่ 260 280 และ 300 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาคงอยู่ของของแข็งคงที่ที่ 30 นาที พบว่าให้ปริมาณผลได้เชิงมวลร้อยละ 72 64 และ 50 โดยน้ำหนัก และปริมาณผลได้เชิงพลังงานร้อยละ 89 80 และ 67 ตามลำดับ และยังได้ทำการศึกษาที่เวลาคงอยู่ของของแข็งต่างกันที่ 15 และ 30 นาที โดยใช้เวลาคงอยู่ของของแข็งคงที่ที่ 300 องศาเซลเซียส พบว่าให้ปริมาณผลได้เชิงมวลร้อยละ 59 และ 51 โดยน้ำหนัก และปริมาณผลได้เชิงพลังงานร้อยละ 78 และ 69 ตามลำดับ



(ก)



(ข)

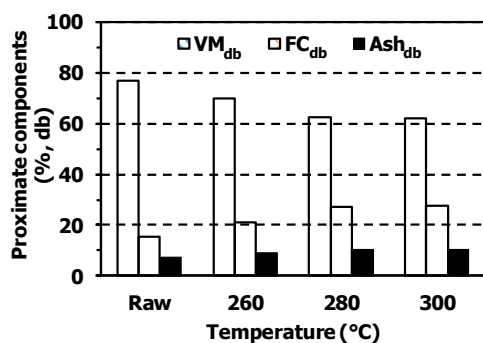
รูปที่ 5 ปริมาณผลได้เชิงมวลและเชิงพลังงานของถ่านทอร์รีไฟด์ (ก) ที่เวลาคงอยู่ของของแข็ง 3 นาที (ข) ที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส

3.3. สมบัติของถ่านทอร์รีไฟด์

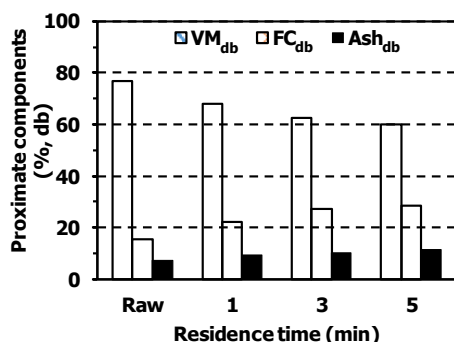
สมบัติของถ่านทอร์รีไฟด์แบ่งเป็น 3 ส่วน ได้แก่ การวิเคราะห์แบบประมาณ ค่าความร้อนสูง และการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงาน มีรายละเอียดดังนี้

การวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านทอร์รีไฟด์ประกอบด้วย สารระเหย คาร์บอนคงที่ และเถ้า แสดงดังรูปที่ 6 เมื่อเปรียบเทียบปริมาณสารระเหยของชีวมวลตั้งต้นกับถ่านทอร์รีไฟด์ เห็นได้ว่าปริมาณสารระเหยของถ่านทอร์รีไฟด์มีปริมาณลดลงทั้งในกรณีที่เพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นที่เวลาคงอยู่ของของแข็งเดียวกัน หรือแม้กระทั่งที่เวลาคงอยู่ของของแข็งนานขึ้นแต่อุณหภูมิคงที่ สาเหตุเกิดจากเอมิเซลลูโลสซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของสารระเหย เอมิเซลลูโลสเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 200 องศาเซลเซียส [18] การใช้อุณหภูมิที่สูงกว่า 200 องศาเซลเซียส และเวลาคงอยู่ของของแข็งนานทำให้เกิดการสลายตัวของเอมิเซลลูโลสได้มากขึ้น การที่ปริมาณสารระเหยลดลงนี้ส่งผล

ให้ปริมาณคาร์บอนคงที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นที่ต้องการสำหรับกระบวนการทอรรีไฟกซัน ส่วนถ่านมีปริมาณเท่าเดิมแต่มีสัดส่วนเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับชีวมวลตั้งต้น



(ก)



(ข)

รูปที่ 6 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของชีวมวลและถ่านทอรรีไฟด์ (ก) ที่เวลาคงอยู่ของของแข็ง 3 นาที (ข) ที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส

เมื่อนำถ่านทอรรีไฟด์มาวิเคราะห์ค่าความร้อนสูง ซึ่งเป็นสมบัติหลักที่ใช้ในการพิจารณาในการนำไปใช้ร่วมกับถ่านหินเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้าถ่านหิน [17] ค่าความร้อนสูงของถ่านทอรรีไฟด์แสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 18.5-21.1 MJ/kg ทั้งในกรณีที่เพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นที่เวลาคงอยู่ของของแข็งคงที่และเพิ่มเวลาคงอยู่ของของแข็งให้นานขึ้นที่อุณหภูมิคงที่ส่งผลให้ค่าความร้อนสูงของถ่านทอรรีไฟด์เพิ่มขึ้น สำหรับการทดลองที่ใช้อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส เวลาคงอยู่ของของแข็ง 5 นาที ถ่านทอรรีไฟด์ที่ได้มีค่าความร้อนสูงและปริมาณคาร์บอนคงที่สูงที่สุด ขณะที่การทดลองที่ใช้อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส เวลาคงอยู่ของของแข็ง 3 นาที ถ่านทอรรี-

ไฟด์ที่ได้มีค่าความร้อนสูงและปริมาณคาร์บอนคงที่ต่ำสุด นั้นแสดงให้เห็นว่าค่าความร้อนสูงของถ่านทอรรีไฟด์ยังมีค่าสูงหากปริมาณคาร์บอนคงที่สูง

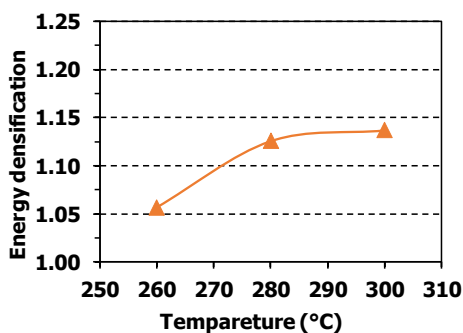
เมื่อพิจารณาค่าความร้อนสูงของถ่านทอรรีไฟด์ที่ได้จากการทดลองที่มีค่าสูงที่สุดเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ A. T. Conag และคณะ 2018 [16] ซึ่งใช้ใบอ้อยด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบกะที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เวลาคงอยู่ของของแข็ง 72 นาที ซึ่งเป็นสภาวะที่แนะนำสำหรับการนำไปใช้งาน ถ่านทอรรีไฟด์ค่าความร้อนสูง 21.6 MJ/kg เห็นได้ว่าค่าความร้อนสูงมีค่าใกล้เคียงกันกับงานวิจัยนี้แม้ว่าใช้อุณหภูมิและเวลาคงอยู่ของของแข็งน้อยกว่า นั้นหมายความว่า การใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหลต่อเนื่องนั้นสามารถลดได้ทั้งอุณหภูมิและเวลาคงอยู่ของของแข็งได้ หากพิจารณาที่เวลาคงอยู่ของของแข็งงานวิจัยนี้สามารถลดเวลาคงอยู่ของของแข็งได้จาก 72 เป็น 5 นาที หรือคิดเป็นประมาณ 14 เท่า

ตารางที่ 2 ค่าความร้อนสูงของถ่านทอรรีไฟด์

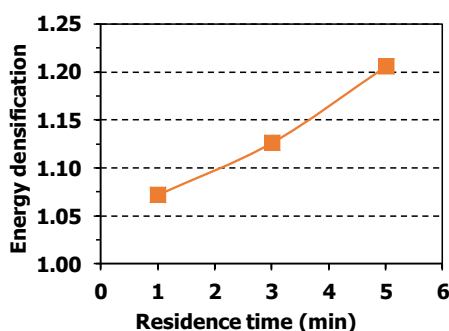
Temperature (°C)	Residence time (min)	HHV _s (MJ/kg, ฐานแห้ง)
260	3	18.5
280	3	19.7
300	3	19.9
280	1	18.7
280	5	21.1

ค่าความร้อนสูงของถ่านทอรรีไฟด์ถูกนำมาคำนวณเป็นการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานของถ่านทอรรีไฟด์ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 1.06-1.21 รูปที่ 7 (ก) แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิจาก 260 ถึง 280 องศาเซลเซียส ที่เวลาคงอยู่ของของแข็งคงที่ที่ 3 นาที การเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานของถ่านทอรรีไฟด์มีการเพิ่มขึ้นมากกว่าที่อุณหภูมิจาก 280 ถึง 300 องศาเซลเซียส นั้นหมายความว่า การใช้อุณหภูมิที่สูงกว่า 300 องศาเซลเซียส อาจทำให้การเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานของถ่านทอรรีไฟด์

เพิ่มขึ้นได้ไม่มากนัก เนื่องจากสังเกตจากลักษณะของเส้นกราฟกำลังเข้าสู่สภาวะคงที่ ส่วนรูปที่ 7 (ข) แสดงให้เห็นว่าเวลาคงอยู่ของของแข็งจาก 1 ถึง 5 นาที ที่อุณหภูมิคงที่ที่ 280 องศาเซลเซียส ส่งผลให้การเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานของถ่านทอร์รีไฟต์มีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง หากมีการเพิ่มเวลาคงอยู่ของของแข็งให้นานขึ้น อาจส่งผลให้การเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานของถ่านทอร์รีไฟต์สูงขึ้นกว่าการเพิ่มอุณหภูมิที่มากกว่า 300 องศาเซลเซียส หากพิจารณาแล้วทั้งในกรณีที่เพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นที่เวลาคงอยู่ของของแข็งคงที่และเพิ่มเวลาคงอยู่ของของแข็งให้นานขึ้นที่อุณหภูมิคงที่ส่งผลให้การเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานของถ่านทอร์รีไฟต์เพิ่มขึ้น ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าความร้อนสูงและปริมาณคาร์บอนคงที่ที่เพิ่มขึ้นด้วย



(ก)



(ข)

รูปที่ 7 การเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานของถ่านทอร์รีไฟต์ (ก) ที่เวลาคงอยู่ของของแข็ง 3 นาที (ข) ที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส

การทดลองที่ใช้อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส และเวลาคงอยู่ของของแข็ง 5 นาที มีการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานของถ่านทอร์รีไฟต์สูงสุดที่ 1.21 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ J. S. Tumulu และคณะ 2014 [17] ที่มีค่าเป็น 1.19 โดยใช้ไม้สับที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เวลาคงอยู่ของของแข็ง 30 นาที ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง อีกทั้งยังมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ D. A. Granados และคณะ 2014 [14] ที่มีค่าเป็น 1.26 โดยใช้ขานอ้อยที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส เวลาคงอยู่ของของแข็ง 204 นาที ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ แม้กระทั่งยังมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ A. T. Conag และคณะ 2018 [16] ที่มีค่าเป็น 1.23 โดยใช้ใบอ้อยที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เวลาคงอยู่ของของแข็ง 82 นาที ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ

จากข้อมูลข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหลต่อเนื่องในงานวิจัยนี้ สามารถผลิตถ่านทอร์รีไฟต์ที่มีการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานเทียบเคียงกับงานวิจัยที่ใช้เวลาคงอยู่ของของแข็งนาน ดังนั้นการใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหลต่อเนื่องมีโอกาพัฒนาต่อยอดเพื่อใช้ในระดับอุตสาหกรรมได้

4. สรุป

การผลิตถ่านทอร์รีไฟต์ด้วยกระบวนการทอร์รีแฟกชันโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหลต่อเนื่อง โดยใช้ใบอ้อยเป็นวัตถุดิบ ตัวแปรหลักของกระบวนการคืออุณหภูมิและเวลาคงอยู่ของของแข็ง จากการทดลองพบว่าทั้งการเพิ่มอุณหภูมิและเวลาคงอยู่ของของแข็งนั้น ส่งผลให้ถ่านทอร์รีไฟต์มีค่าความร้อนสูงเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังทำให้การเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานของถ่านทอร์รีไฟต์เพิ่มขึ้นด้วย สภาวะของกระบวนการที่ทำให้ได้ถ่านทอร์รีไฟต์มีค่าความร้อนสูงที่สุดที่ 21.1 MJ/kg และยังเป็นสภาวะที่ทำให้ได้ค่าการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานสูงสุดที่ 1.21 คือสภาวะที่ใช้อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส และเวลาคงอยู่ของของแข็ง 5 นาที ซึ่งสภาวะนี้ให้ปริมาณผลได้เชิงมวลของถ่านทอร์รีไฟต์ร้อยละ 70 และปริมาณผลได้เชิง

พลังงานของถ่านทอร์รีไฟด์ร้อยละ 84 โดยน้ำหนักฐานแห้ง เมื่อเปรียบเทียบการทดลองนี้กับงานวิจัยที่ผ่านมาที่ใช้ใบอ้อยเป็นวัตถุดิบเหมือนกัน หากพิจารณาที่ค่าความร้อนสูงเป็นหลักพบว่างานวิจัยนี้สามารถลดเวลาคงอยู่ของของแข็งได้จาก 72 เหลือแค่ 5 นาที หรือคิดเป็นประมาณ 14 เท่า ดังนั้นการใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหลต่อเนื่องมีความเป็นไปได้สำหรับนำไปพัฒนาต่อยอดเพื่อใช้ในระดับอุตสาหกรรมได้

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับงบประมาณสนับสนุนจากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ และทุนการศึกษาจากโครงการพัฒนาศักยภาพบุคคลากร STEM (Science, Technology, Engineering, and Mathematics) เพื่อการวิจัยและพัฒนาสำหรับภาคอุตสาหกรรม ประจำปี 2559 รหัสผู้รับทุน SCA-CO-2560-3624-TH

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. V. Bridgwater, "Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading," *Biomass Bioenergy*, vol. 38, pp. 68-94, March 2012.
- [2] M. J. Wang, Y. F. Huang, P. T. Chiueh, W. H. Kuan, and S. L. Lo, "Microwave-induced torrefaction of rice husk and sugarcane residues," *Energy*, vol. 37, no. 1, pp. 177-184, Dec. 2012.
- [3] B. N. Madanayake, S. Gan, C. Eastwick, and H. K. Ng, "Thermochemical and structural changes in *Jatropha curcas* seed cake during torrefaction for its use as coal co-firing feedstock," *Energy*, vol. 100, pp. 262-272, Feb. 2016.
- [4] M.-F. Li, C.-Z. Chen, X. Li, Y. Shen, J. Bian, and R.-C. Sun, "Torrefaction of bamboo under nitrogen atmosphere: Influence of temperature and time on the structure and properties of the solid product," *Fuel*, vol. 161, pp. 193-196, Sep. 2015.
- [5] M.-F. Li, X. Li, J. Bian, J.-K. Xu, S. Yang, and R.-C. Sun, "Influence of temperature on bamboo torrefaction under carbon dioxide atmosphere," *Ind. Crops Prod.*, vol. 76, pp. 149-157, Jul. 2015.
- [6] B. Acharya and A. Dutta, "Fuel property enhancement of lignocellulosic and nonlignocellulosic biomass through torrefaction," *Biomass Convers. Biorefinery*, journal article vol. 6, no. 2, pp. 139-149, Jun. 2016.
- [7] J. S. Tumuluru, C. T. Wright, J. R. Hess, and K. L. Kenney, "A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application," *Biofuels*, *Bioprod. Bioref.*, vol. 5, pp. 683-707, Jul. 2011.
- [8] FAO. (2018, 9 Oct.). Food and Agriculture Organization of the United Nations for a World without Hunger (FAOSTAT) [Online]. Available: www.fao.org
- [9] A. Pattiya, "Thermochemical Characterization of Agricultural Wastes from Thai Cassava Plantations," *Energy Sources*, vol. 33, no. 8, pp. 691-701, Feb. 2011.
- [10] A. T. Conag, J. E. R. Villahermosa, L. K. Cabatingan, and A. W. Go, "Energy densification of sugarcane bagasse through

- torrefaction under minimized oxidative atmosphere," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 5, no. 6, pp. 5411-5419, Oct. 2017.
- [11] D. Supramono, Y. M. Devina, and D. Tristantini, Effect of Heating Rate of Torrefaction of Sugarcane Bagasse on its Physical Characteristics (2015, no. 7). *IJTech*, 2015, p. 1084.
- [12] W.-H. Chen, S.-C. Ye, and H.-K. Sheen, "Hydrothermal carbonization of sugarcane bagasse via wet torrefaction in association with microwave heating," *Bioresour. Technol.*, vol. 118, pp. 195-203, May 2012.
- [13] W.-H. Chen, H.-J. Hsu, G. Kumar, W. M. Budzianowski, and H. C. Ong, "Predictions of biochar production and torrefaction performance from sugarcane bagasse using interpolation and regression analysis," *Bioresour. Technol.*, vol. 246, pp. 12-19, Aug. 2017.
- [14] D. A. Granados, R. A. Ruiz, L. Y. Vega, and F. Chejne, "Study of reactivity reduction in sugarcane bagasse as consequence of a torrefaction process," *Energy*, vol. 139, pp. 818-827, Aug. 2017.
- [15] Y. Joshi, M. Di Marcello, E. Krishnamurthy, and W. de Jong, "Packed-Bed Torrefaction of Bagasse under Inert and Oxygenated Atmospheres," *Energy & Fuels*, vol. 29, no. 8, pp. 5078-5087, Aug. 2015.
- [16] A. T. Conag, J. E. R. Villahermosa, L. K. Cabatingan, and A. W. Go, "Energy densification of sugarcane leaves through torrefaction under minimized oxidative atmosphere," *Energy Sustain. Dev.*, vol. 42, pp. 160-169, Dec. 2018.
- [17] N. Doassans-Carrère, S. Muller, and M. Mitzkat, "REVE — a new industrial technology for biomass torrefaction: pilot studies," *Fuel Process. Technol.*, vol. 126, pp. 155-162, May 2014.
- [18] A. Uslu, A. P. C. Faaij, and P. C. A. Bergman, "Pre-treatment technologies, and their effect on international bioenergy supply chain logistics. Techno-economic evaluation of torrefaction, fast pyrolysis and pelletisation," *Energy*, vol. 33, no. 8, pp. 1206-1223, Jun. 2008.

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิ (Reader)

ต้นฉบับบทความวิจัยที่ตีพิมพ์วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีที่ 14 ฉบับที่ 1 (เดือนมกราคม – เมษายน พ.ศ. 2562) ได้รับการตรวจสอบแก้ไขจากผู้ทรงคุณวุฒิดังรายนามต่อไปนี้

- | | |
|--|--|
| 1. รองศาสตราจารย์ ดร.สมิทธิ์ เอี่ยมสอาด | สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร |
| 2. รองศาสตราจารย์ ดร.วาทิต ภัคดี | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต |
| 3. อาจารย์นาวิ รุจิตามพ์ | ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 4. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภารัตน์ ขวัญอ่อน | สำนักวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี |
| 5. รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล นาผล | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 6. อาจารย์ ร้อยโท ดร.รัฐภูมิ วงษ์วิทย์ | ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 7. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กิตติพงษ์ กิมะพงษ์ | ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 8. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิไลดา หวังพานิช | ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 9. รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชัย ฤตวิรุฬห์ | ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยนเรศวร |
| 10. อาจารย์ ดร.ธนธิป สุ่มอัม | ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 11. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ ทิพजर | คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
เชียงใหม่ |
| 12. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนิต เรืองรุ่งชัยกุล | ภาควิชาเทคโนโลยีชนบท คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 13. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยยากร จันทร์สุวรรณ | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 14. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาคภูมิ ศรีมรินทร์ | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 15. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพล สกุลหลง | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา |
| 16. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิทธิพันธ์ ท่อแก้ว | ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 17. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.แก้กัณยา สุดประเสริฐ | สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงาน สิ่งแวดล้อมและวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิ (Reader)

ต้นฉบับบทความวิจัยที่ตีพิมพ์วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีที่ 14 ฉบับที่ 1 (เดือนมกราคม – เมษายน พ.ศ. 2562) ได้รับการตรวจสอบแก้ไขจากผู้ทรงคุณวุฒิดังรายนามต่อไปนี้

- | | | |
|-----|--|---|
| 18. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาณุวัฒน์ จ้อยกลัด | ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 19. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรีดา ไชยมหาวัน | สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยพะเยา |
| 20. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมมาส แก้วล้วน | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา |
| 21. | อาจารย์ ดร.จตุรงค์ แป้นพงษ์ | สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก |

คำแนะนำสำหรับผู้เขียนบทความลงตีพิมพ์
วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒจัดพิมพ์ปีละ 3 ฉบับ ฉบับที่ 1 ช่วงเดือนมกราคม – เมษายน ฉบับที่ 2 ช่วงเดือนพฤษภาคม – สิงหาคม และฉบับที่ 3 ช่วงเดือนกันยายน – ธันวาคม โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะให้เป็นการรวบรวมผลงานทางวิชาการและงานวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ซึ่งบทความที่ได้รับการตีพิมพ์ทุกบทความจะผ่านความการพิจารณาและความเห็นชอบจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาที่เกี่ยวข้องและสงวนสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พุทธศักราช 2521 จัดส่งและเผยแพร่ตามสถาบันการศึกษาทั่วประเทศ

1. การเตรียมต้นฉบับ

- 1) เป็นบทความวิจัย หรือบทความวิชาการ ที่มีความยาวไม่ควรน้อยกว่า 7 หน้า และไม่ควรเกิน 10 หน้า กระดาษ A4 พิมพ์ห่างจากขอบกระดาษด้านซ้าย 1.25 นิ้ว ด้านอื่น ๆ 1 นิ้ว
- 2) เป็นบทความที่ไม่ได้อยู่ระหว่างการพิจารณาตีพิมพ์ของสื่อสิ่งพิมพ์อื่นๆ และไม่เคยได้รับการตีพิมพ์ในวารสารใดๆ มาก่อน
- 3) ต้องไม่มีการละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่น ไม่มีการลอกเลียน หรือตัดทอนผลงานวิจัยของผู้อื่นโดยที่ไม่ได้รับอนุญาตและมีการอ้างอิงที่เหมาะสม
- 4) ชนิดและขนาดตัวอักษร ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษให้ใช้ตัวอักษร TH Sarabun New ซึ่งขนาดตัวอักษร มีรายละเอียดดังนี้
 - 6.1) ชื่อบทความ ใช้ตัวอักษรขนาด 18 pt. ตัวหนา
 - 6.2) ชื่อ-สกุลผู้เขียนบทความ ใช้ตัวอักษรขนาด 14 pt. ตัวปกติ
 - 6.3) หัวข้อหลัก ใช้ตัวอักษรขนาด 14 pt. ตัวหนา
 - 6.4) หัวข้อรอง ใช้ตัวอักษรขนาด 14 pt. ตัวเอียง
 - 6.5) เนื้อเรื่องในหัวข้อหลักและหัวข้อรอง ใช้ตัวอักษรขนาด 14 pt. ตัวปกติ
 - 6.6) เนื้อเรื่องในตาราง ใช้ตัวอักษรขนาด 14 pt. ตัวปกติ

รูปแบบการเขียนบทความ ควรมีหัวข้อเรียงตามลำดับดังต่อไปนี้

ชื่อเรื่อง ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ โดยมีข้อความที่กระชับ ได้ใจความ และบ่งบอกบทความได้อย่างชัดเจน

ชื่อผู้เขียน ให้ระบุชื่อ นามสกุล ตำแหน่ง หน่วยงานและที่อยู่ของผู้เขียนทุกคน โดยหากบทความเป็นภาษาไทยให้ระบุชื่อผู้เขียนเฉพาะภาษาไทยเท่านั้น

บทคัดย่อ บทคัดย่อต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ

คำสำคัญ (Keyword) คำสืบค้นที่เกี่ยวข้องกับบทความ ต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ

บทนำ กล่าวถึงความสำคัญของปัญหาและภูมิหลังของการวิจัย รวมไปถึงวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ตัวเนื้อหา อธิบายถึงอุปกรณ์ หรือวิธีการที่ใช้ในการวิจัย บรรยายผล และวิจารณ์ผล สามารถแตกออกเป็นหลายหัวข้อได้

สรุป บรรยายถึงบทสรุปของงานวิจัย

กิตติกรรมประกาศ ขอขอบคุณสนับสนุน หรือบุคคล (ถ้ามี)

เอกสารอ้างอิง ให้เขียนเอกสารอ้างอิงโดยใช้วิธีเรียงตามลำดับก่อนหลังที่พบในบทความ ในรูปแบบตัวเลขในวงเล็บเหลี่ยม สำหรับรูปแบบการพิมพ์รายการเอกสารอ้างอิง ใช้รูปแบบ IEEE ดังรายละเอียดและตัวอย่างในไฟล์แม่แบบ (template) ซึ่งดาวน์โหลดได้ที่ <http://eng.swu.ac.th/re.html>

2. วิธีการส่งบทความ

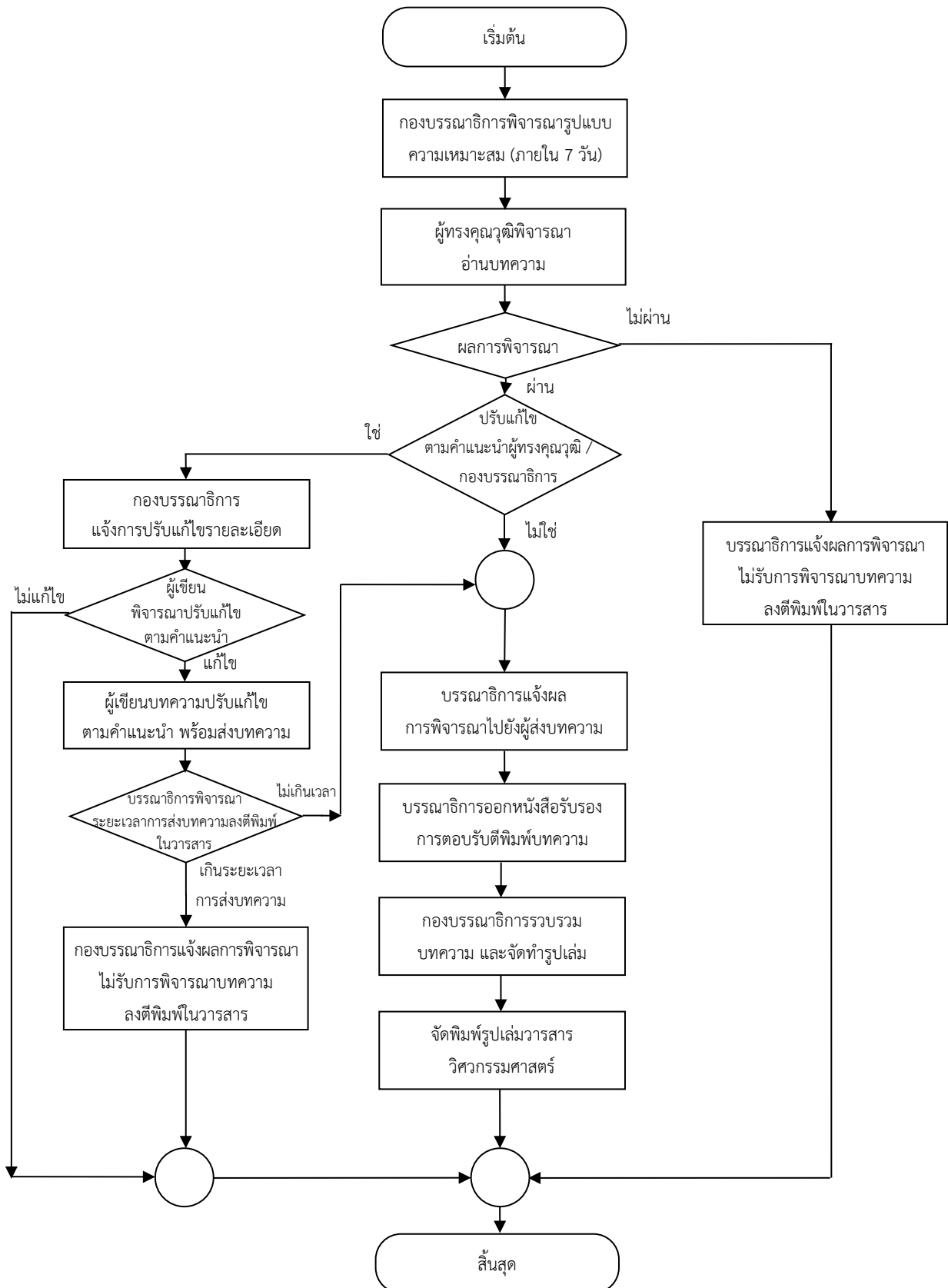
- 1) ส่งต้นฉบับบทความ ไฟล์ Microsoft Word และ pdf พร้อมแนบไฟล์สแกนแบบเสนอผลงานวิชาการเพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
- 2) ส่งไฟล์ต้นฉบับทางออนไลน์ที่
<https://www.tci-thaijo.org/index.php/sej/login>
หรือทางอีเมล JournalEngSWU@gmail.com
- 3) ดูข้อมูลวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒเพิ่มเติม และดาวน์โหลดแบบฟอร์มประกอบการส่งบทความ ได้ที่ <http://eng.swu.ac.th/re.html>

3. ขั้นตอนการประเมินบทความ

การประเมินบทความวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ มีขั้นตอนดังนี้

- 1) การทบทวนโดยผู้รู้เสมอกัน (peer review) โดยผู้ทรงคุณวุฒิตั้งน้อยสองคนในสาขาที่เกี่ยวข้องแบบอำพรางฝ่ายเดียว (single-blind)
- 2) การเขียนตอบข้อซักถามและการแก้ไขปรับปรุงต้นฉบับตามข้อคิดเห็น (comments) ของผู้ทรงคุณวุฒิ โดยผู้เขียน และการพิจารณาอีกครั้งโดยผู้ทรงคุณวุฒิคนเดิม หากผู้ทรงคุณวุฒิได้แจ้งความประสงค์ขอพิจารณาอีกครั้งไว้
- 3) การประชุมกองบรรณาธิการเพื่อพิจารณาผลการทบทวนโดยผู้รู้เสมอกันจากผู้ทรงคุณวุฒิ และการแก้ไขปรับปรุงต้นฉบับ เพื่อตัดสินใจว่าจะตอบรับหรือไม่ในขั้นสุดท้าย
- 4) สำหรับบทความที่ได้รับการตอบรับ กองบรรณาธิการจะพิจารณาความถูกต้องของรูปแบบเพื่อแจ้งผู้เขียนแก้ไข
- 5) บรรณาธิการออกหนังสือรับรองการเผยแพร่ให้ผู้เขียน และมอบวารสารให้ผู้เขียนทุกคนคนละ 1 เล่ม เมื่อตีพิมพ์เผยแพร่เป็นรูปเล่มแล้ว โดยมอบไว้กับผู้เขียนหลัก

ขั้นตอนการพิจารณาผลงานเพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารคณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ





**แบบเสนอผลงานวิชาการเพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ**

เรียน บรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ข้าพเจ้า ☐ นาย ☐ นาง ☐ นางสาว ☐ อื่น ๆ (โปรดระบุ)

ชื่อ - สกุล

(ภาษาอังกฤษ).....

ตำแหน่งทางวิชาการ (โปรดระบุ) ☐ ศาสตราจารย์ ☐ รองศาสตราจารย์ ☐ ผู้ช่วยศาสตราจารย์

☐ อื่น ๆ (โปรดระบุ).....

ที่อยู่และหมายเลขโทรศัพท์ (ที่ติดต่อได้).....

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

โทรสาร..... อีเมล.....

มีความประสงค์ขอส่งบทความ เรื่อง :

ชื่อผลงาน (ภาษาไทย)

ชื่อผลงาน (ภาษาอังกฤษ)

ประเภทของผลงานวิชาการ

☐ บทความรับเชิญ ☐ บทความวิจัย ☐ บทความวิชาการ

พร้อมกันนี้ ได้แนบเอกสาร ☐ ต้นฉบับบทความเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ในวารสาร จำนวน 3 ชุด
☐ แบบเสนอผลงานวิชาการ (JournalEngSWU-03) จำนวน 1 แผ่น
☐ ซีดีบันทึกข้อมูลการพิมพ์บทความในรูปแบบไฟล์ Microsoft Word จำนวน 1 แผ่น

ในกรณีที่ไม่สามารถติดต่อข้าพเจ้าได้ กองบรรณาธิการสามารถติดต่อบุคคลดังต่อไปนี้

ชื่อ - สกุล.....

โทรศัพท์..... โทรสาร

อีเมล..... มีความเกี่ยวข้องเป็น.....

ข้าพเจ้าขอรับรองว่าผลงานนี้ ☐ เป็นผลงานของข้าพเจ้าเพียงผู้เดียว
☐ เป็นผลงานของข้าพเจ้าและผู้ที่เกี่ยวข้องในผลงาน

ผลงานนี้ยังไม่เคยลงตีพิมพ์ในวารสารใดมาก่อน และจะไม่นำไปเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารอื่นๆ อีก นับจากวันที่ข้าพเจ้าได้ส่งผลงานต้นฉบับนี้มายังกองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ลายมือชื่อ.....

(.....)

เจ้าของผลงาน



คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

เลขที่ 63 หมู่ 7 ถนนรังสิต - นครนายก
อำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายก 26120

โทร 0 2649 5000 ต่อ 27560 27070

โทรสาร 0 3739 5527

<http://eng.swu.ac.th>

บทความวิจัย

- การวิเคราะห์สมรรถนะเชิงความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นด้วยโครงข่ายประสาทเทียม
Artificial Neural Network Analysis of the Thermal Performance of a Plate Heat Exchanger
โดย ธนยศ อริสริยวงศ์ สงกรานต์ วิริยะศาสตร์ ไพศาลนาผล
- Optimal PIDA Controller Design for Maglev Vehicle Suspension System by Lévy-Flight Firefly Algorithm
By Sarot Hlangnamthip Deacha Puangdownreong
- การเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตู้อบแห้งโดยการปรับมุมเอียงคล้อยตามแสงอาทิตย์
Thermal Efficiency Enhancement of Solar Dryer using Sun Tracking System
โดย ชีรพงศ์ บริรักษ์
- การผสมรวมเทคนิค QFD และ FBS ในระเบียบวิธีการออกแบบสำหรับผลิตภัณฑ์เชิงวิศวกรรม กรณีศึกษา: อุปกรณ์จับยึดกระสอบพลาสติกสาน
Combining QFD and FBS in a Design Methodology of Engineered Products: A Case Study of Woven Bag Clamping Devices
โดย ณัฐวุฒิ จันทร์ทอง ศิวายุ เฉลิมภาค
- ปัจจัยที่ส่งผลต่อการตัดสินใจเลือกใช้บริการจัดส่งอาหารถึงที่โดยใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติกทวิ
Factors Affecting Customers' Decision on Food Delivery Service: Binary Logistic Regression Approach
โดย ศัทธรีชา ชาญปริยวาทิวงศ์ สุราทิพย์ ภูบุบผาพันธ์ รัฐพล ภูบุบผาพันธ์
- Modified EP/sinfor Optimal Power Flow with Economic Dispatch
By Suppakarn Chansareewittaya
- การศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์
A study of the efficiency of a solar water heater
โดย สวัสดิ์ ภูมิสวัสดิ์ วิจิตรา ภูมิสวัสดิ์
- รูปแบบของลิ้นเตาที่มีผลต่อพฤติกรรมการไหลของอากาศในเตาหุงต้มประสิทธิภาพสูง
The Configuration of Grate Affect to the Behavior of Airflow in the High Efficiency Cooking Stove
โดย วุฒิชัยธ ล้ำดวน นิรุต อ่อนสูง นภาพน พิพัฒน์ไพบูลย์
- การวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเกรย์เพื่อหาสภาวะเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากไส้ปลา
Grey Relational Analysis for Optimal Condition of Biodiesel Production Process from Fish Entrails
โดย อำนวย คำบุญ วรพจน์ ศิริรักษ์ พีรวัตร ลือสัก เรืองฤทธิ์ ศิริรักษ์
- คุณสมบัติของบล็อกประสานที่ผสมเถ้าลอยและเถ้าก้นเตา
Properties of Interlocking Block Containing Fly Ash and Bottom Ash
โดย อนุสรณ์ เดชบุรัมย์ กริสน์ ชัยมูล
- การปรับปรุงสมบัติของใบอ้อยด้วยกระบวนการทอรีแฟกชันโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหลต่อเนื่อง
Improvement of Sugarcane Leaves Property by Torrefaction in a Continuous Tubular Flow Reactor
โดย สถาพร สอนสุภาพ อติศักดิ์ ปัตติยะ