

- ◆ การพัฒนาฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งมันแกวเพื่อประยุกต์ใช้เป็นถุงเพาะชำ
ภาวณีย์ เทียมดี และ กวินนา สุขสำราญ
- ◆ การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูของถ่านเปลือกส้มโอที่เตรียมจากการเผาแบบเตาลาน
พัชรนันท์ จันทร์พลอย กฤติยาภรณ์ หลวงดี และ นภารัตน์ จิวาลักษณ์
- ◆ ผลกระทบและส่วนผสมที่เหมาะสมของผงเปลือกมังคุดสำหรับแบบหล่อทรายขึ้น
อนุวิทย์ สนศิริ อัญชลี อินคำปา นพดล อ่ำดี และ ธนภัทร มะณีแสง
- ◆ การลดการดูดซับน้ำมันในผลิตภัณฑ์หั่วทอดด้วยเทคโนโลยีสนามไฟฟ้า
ชิดชนก มากจันทร์
- ◆ ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของกลุ่มบัก
สุรัชนา ดาทอง และ สุธิรา มณีฉาย
- ◆ ผลของปริมาณน้ำตาล กรดซิตริก และเพคติน ที่มีต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์มัลเบอร์รี่แผ่น
ปิยะนุช รสเครือ และ มลิวรรณ กิจชัยเจริญ
- ◆ การศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของเตาแก๊สแรงดันต่ำแบบเวอร์ติคอลพอร์ตด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
อนิรุตต์ มัทธจักร์ ญัตติกิจ ชะนะกุล มานะ วิฆาณาม ธนรัฐ ศรีวีระกุล บงกช จันทมาส
เสฏฐวรรธ สุจิตตภักต์กุล และ สุทธิศักดิ์ พงศ์ธนาพานิช
- ◆ การอบแห้งพริกด้วยเครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำที่เสริมการทำงานด้วยเครื่องอุ่นอากาศเทอร์โมอิเล็กทริก
พชร ว่องไพศาลกิจ กระวี ตรีอำรรค และ เทวรัตน์ ตรีอำรรค
- ◆ การศึกษาเชิงเปรียบเทียบระหว่างโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบซับคริติคัล โรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบซูเปอร์คริติคัล
และโรงไฟฟ้าแรงดันไฮโดรเจนแบบไตรแลทเทอร์รัลสำหรับแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิ 210-250 องศาเซลเซียส
ธงชัย เทียมทัต และ อาทิตย์ คุณศรีสุข
- ◆ การจำลองโรงไฟฟ้าพลังลมแบบหลังคาเอียงขนาด 500 กิโลวัตต์ ที่ใช้ความร้อนทิ้งจากอุตสาหกรรม
บัณฑิต จันทรสว่าง และ อาทิตย์ คุณศรีสุข
- ◆ การทดสอบสมรรถนะของเครื่องขยายไอแบบสโครลสำหรับโรงไฟฟ้าไออาร์ซีขนาด 1 กิโลวัตต์
ธนิต หินไเลิศ และ อาทิตย์ คุณศรีสุข
- ◆ กาวหลอมร้อนจากยางธรรมชาติ
ศิวโรฒ บุญราศรี
- ◆ Effect of Pre-treatment on Quality of Cassava Chips
Prawta Chantaro Parisut Chalermchaiwat and Thepkunya Harnsilawat
- ◆ การจำลองพฤติกรรมการเผาไหม้ของเตาประหยัดแก๊ส S-10 ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
ภัทราวรรณ ชิมชม อนิรุตต์ มัทธจักร์ มานะ วิฆาณาม ธนรัฐ ศรีวีระกุล และ เสฏฐวรรธ สุจิตตภักต์กุล
- ◆ การศึกษาสมรรถนะของโรงไฟฟ้าไตรแลทเทอร์รัล ซับคริติคัล ไออาร์ซี และ ซูเปอร์คริติคัล ไออาร์ซี โดยใช้แหล่งความร้อนใต้พิภพ
เป็นแหล่งพลังงาน
อนุกุล โมงปรานีต และ อาทิตย์ คุณศรีสุข
- ◆ The Development of Waste Heat Energy Conversion Device to Generate Electricity through Thermoelectric
Generator (TEG) Apply to LPG Cookstove
Ditthaphat Tanpradit

วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร

RMUTP RESEARCH JOURNAL

ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์สุภัทรา โกไศยกานนท์
รักษาราชการแทนอธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์เฟื่องฟ้า เมฆเกรียงไกร
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ วิจัยและบริการวิชาการ

บรรณาธิการ

ดร.ประกอบ ชาติภักต์

กองบรรณาธิการ จากหน่วยงานภายนอก

ศาสตราจารย์ ดร.ทงเกียรติ	เกียรติศิริโรจน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.สัมพันธ์	ฤทธิเดช	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ศาสตราจารย์ ดร.สมชาย	วงศ์วิเศษ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.สุชัยวีร์	สุวรรณสวัสดิ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ศาสตราจารย์ ดร.อรรถกร	เก่งพล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.สันติ	แมนศิริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ศาสตราจารย์ ดร.ทรงศักดิ์	เพ็ชรมิตร	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.สายประสิทธิ์	เกิดนิยม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.ทวีชัย	อมรศักดิ์ชัย	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.รัตติก	ยัมนิษฐ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.ธงชัย	พองสมุทร	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

กองบรรณาธิการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รุ่งอรุณ พรเจริญ	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กัลทิมา เข้าวชาญชัยกุล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ว่าที่เรือตรี ดร.ทรงวุฒิ มงคลเลิศมณี	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัตนพล มงคลรัตนาสี
ดร.วรลักษณ์ ปัญญาธิพิงค์	ดร.ชลกร อุดมรักษาสกุล
ดร.สิงห์แก้ว ปือกเท้ง	ดร.วราพร ทองจีน
นางสาวเจนจิรา บ.ป.สูงเนิน	นางสาวพัชรนันท์ ยั่งรววิเชียร

**รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิผู้ประเมินบทความ (Peer Review) ประจำปี
ปีที่ 14 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม - มิถุนายน 2563**

รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติพงศ์ บุญโหล่ง	มหาวิทยาลัยบูรพา
รองศาสตราจารย์ ดร.จิรารัตน์ อนันตกุล	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ ดร.เฉลิม เรืองวิริยะชัย	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.ธงชัย ฟองสมุทร	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.รังสิณี ไสธวิทย์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ ขจรชีพพันธุ์งาม	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.อิศเรศ ฐชกัลยา	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์สมชาย กฤตพลวิวัฒน์	มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์สุวิข ศิริวัฒนโยธิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกรียงไกร อัสวมาศบันลือ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไชยา คำคำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ รัตนเดช	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ติณกร ภูวดิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธงชัย พุ่มทองศิริ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญลือ สวัสดิ์มงคล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพลินทิพย์ ภูทองกิ่ง	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภัทรา ผาสอน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มานนท์ สุขละมัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มานพ พิพัฒน์หัตถกุล	สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยศธนา คุณาทร	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา พิมลศิริผล	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาทร ลาภเจริญสุข	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วลัยรัตน์ จันทรพานนท์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรารัตน์ มหาศรานนท์	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุเชษฐ์ สมุหเสนีโต	มหาวิทยาลัยศิลปากร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิวัฒน์ มุตตามระ	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อมรรัตน์ แก้วประดับ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร.ไมตรี พลสงคราม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

สารบัญ

วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร

ปีที่ 14 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม - มิถุนายน 2563 ISSN 1906-0432

	หน้า
บทความวิจัย:	
การพัฒนาฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งมันแกวเพื่อประยุกต์ใช้เป็นถุงเพาะชำ ภาวิณี เทียมดี และ กวินนา สุขสำราญ	1
การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูของถ่านเปลือกส้มโอที่เตรียมจากการเผาแบบเตาลาน พัชรนันท์ จันทรพลอย กฤติยาภรณ์ หลวงดี และ นภารัตน์ จิวาลักษณ์	15
ผลกระทบและส่วนผสมที่เหมาะสมของผงเปลือกมังคุดสำหรับแบบหล่อทรายขึ้น อนุวิทย์ สนศิริ อัญชลี อินคำปา นพดล อ่ำดี และ ธนภัทร มะณีแสง	26
การลดการดูดซับน้ำมันในผลิตภัณฑ์หั่วทอดด้วยเทคโนโลยีสนามไฟฟ้า ชิดชนก มากจันทร์	37
ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของกลุ่มบก สุรัชนา ดาทอง และ สุธิรา มณีฉาย	48
ผลของปริมาณน้ำตาล กรดซิตริก และเพคติน ที่มีต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์มัลเบอร์รี่แผ่น ปิยะนุช รสเครือ และ มลิวรรณ กิจชัยเจริญ	58
การศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของเตาแก๊สแรงดันต่ำแบบเวอร์ติคอลพอร์ตด้วยวิธีพลศาสตร์ ของไหลเชิงคำนวณ อนิรุตต์ มัทธจักร์ ฤนต์กิจ ชะนะกุล มานะ วิชางาม ธนรัฐ ศรีวีระกุล บงกช จันทมาส เสฏฐวรรธ สุจริตภวตสกุล และ สุทธิศักดิ์ พงศ์ธนาพานิช	70
การอบแห้งพริกด้วยเครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำที่เสริมการทำงานด้วยเครื่องอุ่นอากาศเทอร์โมอิเล็กทริก พชร ว่องไพศาลกิจ กระวี ตรีอำนาจ และ เทวรัตน์ ตรีอำนาจ	82
การศึกษาเชิงเปรียบเทียบระหว่างโรงไฟฟ้าโออาร์ซีแบบซับคริติคัล โรงไฟฟ้าโออาร์ซี แบบซูเปอร์คริติคัล และโรงไฟฟ้าแรงดันไซเคิลแบบไตรแลทเทอร์รัลสำหรับ แหล่งความร้อนที่อุณหภูมิ 210-250 องศาเซลเซียส ธงชัย เทียมทัต และ อาทิตย์ คุณศรีสุข	97
การจำลองโรงไฟฟ้าปล่องลมแบบหลังคาเอียงขนาด 500 กิโลวัตต์ ที่ใช้ความร้อน ทิ้งจากอุตสาหกรรม บัณฑิต จันทรสว่าง และ อาทิตย์ คุณศรีสุข	114

สารบัญ

วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร

ปีที่ 14 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม - มิถุนายน 2563 ISSN 1906-0432

	หน้า
การทดสอบสมรรถนะของเครื่องขยายไอแบบสโครลสำหรับโรงไฟฟ้าไออาร์ซีขนาด 1 กิโลวัตต์ ธนิต หินไธเลิศ และ อาทิตย์ คุณศรีสุข	130
กาวหลอมร้อนจากยางธรรมชาติ ศิวโรฒ บุญราศรี	144
Effect of Pre-treatment on Quality of Cassava Chips Prawta Chantaro Parisut Chalermchaiwat and Thepkunya Harnsilawat	154
การจำลองพฤติกรรมการเผาไหม้ของเตาประหยัดแก๊ส S-10 ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ภัทรารรรณ ชิมชม อนิรุตต์ มัทธจักร์ มานะ วิชางาม จรรย์รัฐ ศรีวิระกุล และ เสฏฐวรธ สัจจิตภวัตสกุล	165
การศึกษาสมรรถนะของโรงไฟฟ้าไตรแลทเทอร์รัล ชัปคริตีคัล โออาร์ซี และซูเปอร์คริตีคัล โออาร์ซี โดยใช้แหล่งความร้อนใต้พิภพเป็นแหล่งพลังงาน อนุกุล โหม่งปราณีต และ อาทิตย์ คุณศรีสุข	177
The Development of Waste Heat Energy Conversion Device to Generate Electricity through Thermoelectric Generator (TEG) Apply to LPG Cookstove Ditthaphat Tanpradit	193

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การพัฒนาฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งมันแกวเพื่อประยุกต์ใช้เป็นถุงเพาะชำ

ภาวิณี เทียมดี* และ กวินนา สุขสำราญ

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

321 ถนนนารายณ์มหาราช ตำบลทะเลชุบศร อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี 15000

รับบทความ 15 กันยายน 2562 แก้ไขบทความ 23 มกราคม 2563 ตอบรับบทความ 30 เมษายน 2563

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการผลิตผลิตภัณฑ์ฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งมันแกว ประยุกต์ใช้เป็นถุงเพาะชำย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เตรียมฟิล์มโดยการละลายแป้งมันแกวในน้ำให้มีความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และศึกษาผลของปริมาณกลีเซอรอล 6 ระดับ คือ ร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักของแป้ง ขึ้นรูปแผ่นฟิล์มโดยการทำแห้งที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังการอบแห้งนำฟิล์มที่ได้มาวิเคราะห์สมบัติ ได้แก่ ค่าความหนา อัตราการซึมผ่านไอน้ำ การละลาย ค่าแอสคิวติของน้ำ (a_w) ด้านทานแรงดึงขาด ร้อยละการยืดตัว ค่าด้านทานแรงเฉาะ และศึกษาการย่อยสลายของแผ่นฟิล์ม พบว่าแผ่นฟิล์มมีความหนาอยู่ในช่วง 0.16-0.28 มิลลิเมตร ค่า a_w ของแผ่นฟิล์มอยู่ระหว่าง 0.36-0.49 อัตราการซึมผ่านไอน้ำ การละลายน้ำ และความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นตามปริมาณกลีเซอรอลที่เพิ่มสูงขึ้น ส่วนค่าการด้านทานแรงดึงและค่าด้านทานแรงเฉาะของฟิล์มแป้งมันแกวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณกลีเซอรอลลดลง ผลทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังในดินลึกประมาณ 8-10 เซนติเมตร พบว่าฟิล์มสามารถย่อยสลายได้ร้อยละ 100 ในระยะเวลา 12 สัปดาห์ โดยฟิล์มแป้งมันแกวที่ผสมกลีเซอรอลร้อยละ 40 มีผลการทดสอบโดยรวมดีที่สุด

คำสำคัญ : แป้งมันแกว; ฟิล์มย่อยสลายได้; กลีเซอรอล; พลาสติกชีวภาพ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 6213 6336, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: pawinee.t169@gmail.com

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Development of a Biodegradable Film from Jicama Starch (*Pachyrhizus erosus* (L.) Urban) for Plant Bag Application

Pawinee Theamdee* and Kawinna Sooksamran

Faculty of Science and Technology, Thepsatri Rajabhat University
321 Naraimaharat Road, Thale Chupson, Muang District, Lopburi 15000

Received 15 September 2019; Revised 23 January 2020; Accepted 30 April 2020

Abstract

This research aimed to study the production of a biodegradable film from Jicama starch (*Pachyrhizus erosus* (L.) Urban) for plant bag application. The film was prepared by dissolving Jicama starch in water to the concentration of 5 wt%. To study the effect of the glycerol content, the glycerol was added at 6 levels; 0, 10, 20, 30, 40, 50 and 60 wt%. The film was casted in a mold and dried at 60 °C for 24 h. After drying, properties of films; thickness, water activity (a_w), solubility, tensile strength (TS), elongation (%E), puncture strength and the degradation of the films were evaluated. The thickness of the films was in the range of 0.16-0.28 mm. The a_w of films ranged from 0.36-0.49. The water vapor permeability, water solubility, and flexibility of the film increased with the increasing of glycerol content. Tensile and puncture strength of the starch films tended to increase when the glycerol content decreased. After the films were buried under the ground (8-10 cm depth) for 12 weeks, they were degraded by 100%. The Jicama starch film with 40 wt% glycerol showed the best overall properties.

Keywords : Jicama Starch; Biodegradable Film; Glycerol; Plasticizer

* Corresponding Author. Tel.: +668 6213 6336, E-mail Address: pawinee.t169@gmail.com

1. บทนำ

ทุกวันนี้ปัญหาเรื่องการจัดการขยะถือเป็นหนึ่งปัญหาที่สำคัญระดับโลก โดยเฉพาะขยะพลาสติกได้เข้ามามีบทบาทในการดำรงชีวิตของมนุษย์เป็นอย่างมาก อีกทั้งปริมาณการใช้พลาสติกของแต่ละปีจะมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยส่วนใหญ่แล้วพลาสติกนั้นเกิดการย่อยสลายในธรรมชาติได้ยาก และใช้เวลานานมากในการย่อยสลาย ดังนั้นการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ที่ได้จากผลผลิตทางการเกษตร สามารถช่วยลดปัญหาขยะพลาสติกได้ วัสดุธรรมชาติที่นำมาผลิตเป็นพลาสติกชีวภาพนั้นมีหลายชนิด เช่น พอลิแซ็กคาไรด์ [1], [2] ไขมัน [3] และโปรตีน [4], [5] เป็นต้น ซึ่งนิยมใช้แบ่งในการนำมาผลิตเป็นพลาสติกชีวภาพมากที่สุด เนื่องจากแป้งมีราคาถูก หาได้ง่ายตามท้องถิ่น และสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ

มันแกว (*Pachyrhizus erosus* (L.) Urbar) เป็นพืชที่เพาะปลูกมากในตำบลโคกสูง จังหวัดลพบุรี ไม่เป็นพิษ ราคาถูก เป็นคาร์โบไฮเดรต โดยมีปริมาณอะไมโลสประมาณร้อยละ 23 รวมถึงยังมีพอลิแซ็กคาไรด์ชนิดอื่นๆ เช่น เพคติน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส เป็นต้น [6] สามารถพองตัวได้ เมื่อละลายน้ำมีความเข้มข้นและเกิดเป็นฟิล์ม ดังนั้น จึงมีความเป็นไปได้ในการนำมาผลิตเป็นฟิล์มย่อยสลาย แต่อย่างไรก็ตามพลาสติกที่ผลิตจากแป้งนั้นมีความเปราะและยืดหยุ่นต่ำยากต่อการนำไปขึ้นรูปใช้งาน [7] ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีการเติมพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) เช่น กลีเซอรอล (Glycerol) [8] และซอร์บิทอล (Sorbitol) [9] ซึ่งกลีเซอรอลมีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นพลาสติกไซเซอร์ในฟิล์มแป้งธรรมชาติ เนื่องจากกลีเซอรอลมีคุณสมบัติชอบน้ำ และช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นของฟิล์มจากแป้งได้ โดยสมบัติด้านความยืดหยุ่น ความสามารถในการละลายน้ำจะแปรผันตามปริมาณของพลาสติกไซเซอร์ที่ใช้ [10]

ปัจจุบันมีการคิดค้นผลิตบรรจุภัณฑ์จากพลาสติกย่อยสลายได้ เช่น ผลิตถ้วย แก้ว จาน [11] เป็นส่วนใหญ่และผู้วิจัยได้เห็นว่า การเพาะปลูกทางการเกษตรมีการใช้ถุงเพาะชำกันเป็นจำนวนมากเมื่อนำต้นไม้ไปปลูกลงในกระถาง ถุงเพาะชำก็จะถูกทิ้งกลายเป็นขยะ ซึ่งการปลูกพืชเพาะชำในถุงพลาสติกสีดำทั่วไป เกษตรกรจำเป็นต้องดึงต้นกล้าออกจากถุงก่อนนำไปลงดิน ถ้าไม่ทำอย่างระมัดระวังรากมักจะขาด เมื่อนำไปปลูกลงดิน ต้นไม้จะชงักการเจริญเติบโตได้ แต่ถ้าใช้ถุงเพาะชำที่ทำมาจากพลาสติกย่อยสลายได้ เกษตรกรไม่ต้องดึงต้นกล้าออกจากถุงเพาะชำ สามารถนำถุงเพาะชำไปฝังลงดินได้เลย และที่สำคัญจุลินทรีย์ในดินยังช่วยย่อยสลายถุงเพาะชำให้กลายเป็นปุ๋ยบำรุงพืชได้อีกด้วย

ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยในครั้งนี้ เพื่อศึกษาการผลิตฟิล์มฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งมันแกว และศึกษาผลของปริมาณกลีเซอรอลในการทำหน้าที่เป็น พลาสติกไซเซอร์ ต่อสมบัติทางกายภาพเคมี และทางกล รวมถึงศึกษาการย่อยสลายของแผ่นฟิล์มจากแป้งมันแกว และความเป็นไปได้ในการขึ้นรูปถุงเพาะชำย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 การเตรียมแป้งมันแกว

หัวมันแกว ได้รับความอนุเคราะห์จากเกษตรกรตำบล เกาะแก้ว อำเภอบึงสามพัน จังหวัด ลพบุรี นำหัวมันแกว ทำความสะอาดและปอกเปลือกออก หั่นมันแกวเป็นชิ้นบาง ๆ แล้วนำไปปั่นละเอียดกับน้ำ (อัตราส่วน 1:2 โดยน้ำหนัก) ด้วยเครื่องปั่นผสมไฟฟ้า (Sharp, EM-ICE 2, ประเทศไทย) นำไปปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 3,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ล้างด้วยน้ำกลั่น 2 รอบ นำแป้งที่ได้ไปอบให้แห้งด้วยตู้อบลมร้อน (Memmert, UN 110, ประเทศเยอรมัน) ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง บดแป้งที่แห้งแล้วให้ละเอียดและ

ร้อนผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช และเก็บแบ่งที่ได้ใน โถดูดความชื้นที่มีความชื้นสัมพัทธ์ภายในเท่ากับ $35 \pm 2\%$ RH ที่อุณหภูมิห้องเท่ากับ 28 ± 2 องศาเซลเซียส [12]

2.2 การเตรียมฟิล์มจากแป้งมันแกว

เตรียมฟิล์มแป้งมันแกว โดยเตรียมละลายแป้ง ให้มีความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยมวลต่อปริมาตร กวน ผสมพร้อมกับการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เติมกลีเซอรอลที่ความเข้มข้น 7 ระดับ คือ ร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักของแป้ง กวนผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน นาน 5-10 นาที ขึ้นรูปโดยเทสารละลายน้ำแป้งลงบน ภาชนะฟรอนขนาด $36 \times 26 \times 1.5$ เซนติเมตร ปล่อยให้แห้ง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง หรือแห้งสนิท จากนั้นลอกแผ่นฟิล์มให้เป็นแผ่น และเก็บไว้ในโถดูดความชื้น เพื่อเตรียมวิเคราะห์สมบัติทางเคมีทางกายภาพ และทางกล [13]

2.3 การศึกษาสมบัติของแผ่นฟิล์ม

2.3.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพความหนา (Thickness)

วัดความหนาของฟิล์มแป้งมันแกว ด้วยเครื่องไมโครมิเตอร์ (Mitutoyo, ญี่ปุ่น) โดยทำการวัดแผ่นฟิล์มตำแหน่งต่าง ๆ กัน 5 ตำแหน่ง แล้วหาค่าเฉลี่ย โดยแต่ละตัวอย่างทำการทดสอบ 3 ซ้ำ

ค่าความสว่าง (Lightness)

วัดค่าความสว่างของฟิล์มแป้งมันแกว โดยใช้เครื่องวัดสี (Hunter Lab, Color Flex Z2, ญี่ปุ่น) แสดงเป็นค่า L^* (ความสว่าง 0 หมายถึงสีดำ และ 100 หมายถึงสีขาว) โดยแต่ละตัวอย่างทำการทดสอบ 3 ซ้ำ [14]

2.3.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี การละลายน้ำ (Water Solubility)

ทดสอบการละลายน้ำดัดแปลงจากวิธีของ M. L. Sanyang et al. [15] โดยนำแผ่นฟิล์มขนาด 20×20 มิลลิเมตร (แผ่นฟิล์มตัวอย่าง 1 แผ่นจะสุ่มตัดที่ตำแหน่งต่าง ๆ มา 3 ชิ้น) นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนัก (W_1) แล้วนำไปละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร กวนด้วยแท่งกวนแม่เหล็ก (Magnetic Stirrer) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง กรองผ่านกระดาษกรอง Whatman No.4 ที่ชั่งน้ำหนักเรียบร้อยแล้ว (a_1) จากนั้นนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 25 นาที ชั่งน้ำหนักของกระดาษกรอง (a_2) บันทึกผลและคำนวณดังสมการที่ 1 ดังนี้

$$\% \text{Water solubility} = \frac{W_1 - (a_2 - a_1)}{W_1} \times 100 \quad (1)$$

โดยที่

W_1 = น้ำหนักของแผ่นฟิล์ม (กรัม)

a_1 = น้ำหนักของกระดาษกรองก่อนอบ (กรัม)

a_2 = น้ำหนักของกระดาษกรองหลังอบ (กรัม)

ค่าแอกติวิตีของน้ำ (Water activity, a_w)

วัดค่าแอกติวิตีของน้ำ (a_w) ด้วยเครื่องวัดค่า a_w (Aqualab Model Series 4, Decagon Device inc, ประเทศสหรัฐอเมริกา) เป็นค่าความชื้นที่มีผลต่ออัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ทำผลิตภัณฑ์เสื่อมคุณภาพ โดยแต่ละตัวอย่างทำการทดสอบ 3 ซ้ำ

อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Water Vapor Permeability, WVP)

อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ ดัดแปลงจากวิธีของ P. Cazon et al. [16] ตัดแผ่นฟิล์มตัวอย่างเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 เซนติเมตร ใส่ซิลิกาเจล (Silica Gel) ที่ผ่านการอบแห้งในถ้วยทดสอบ

อลูมิเนียมเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.5 เซนติเมตร สูง 3.2 เซนติเมตร วางแผ่นฟิล์มบนถ้วยทดสอบ ปิดผนึกด้วย พาราฟิน บันทึกน้ำหนักที่เวลา 0 ชั่วโมง นำถ้วย ทดสอบใส่ในโถควบคุมความชื้นที่ร้อยละ 75 RH ที่ อุณหภูมิห้อง (30 ± 2 องศาเซลเซียส) จากนั้นบันทึก น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงทุกๆ 1 ชั่วโมง เป็นเวลา 6 ชั่วโมง นำค่าที่ได้คำนวณหาค่าดังสมการที่ 2

$$WVP = \frac{WVTR \times t}{\Delta P} \times 100 \quad (2)$$

โดยที่

WVTR = ความชันของกราฟความสัมพันธ์ ระหว่าง น้ำหนักที่สูญเสียไปกับเวลา (กรัม/ตาราง เมตร/ชั่วโมง) ต่อพื้นที่ของฟิล์มที่ไอน้ำผ่าน (ตารางเมตร)

t = ความหนาของแผ่นฟิล์ม (มิลลิเมตร)

ΔP = ความดันไอน้ำอิ่มตัว (ปาสคาล)

2.3.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกล การต้านทาน แรงดึง ร้อยละการยืดตัว และการต้านทานแรง เเจาะ (Tensile, % Elongation and Puncture Strength)

วิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Texture Analyser (Stable Microsystems, TA-XT2, ประเทศอังกฤษ) ใช้หัววัดแบบ Tensile Grip ซึ่งมีระยะห่างเริ่มต้น ระหว่าง Grip เท่ากับ 50 มิลลิเมตร และมีอัตราในการ ดึงยืดแผ่นฟิล์ม 0.2 มิลลิเมตรต่อวินาที ตัดตัวอย่างฟิล์ม ให้มีความกว้าง 25 มิลลิเมตร และยาว 100 มิลลิเมตร ส่วนทดสอบการต้านทานแรงเจาะ ใช้หัววัด HDP/TPB Tortilla/Pastry Burst Rig ตัดตัวอย่างฟิล์มให้มีความ กว้าง 6 นิ้ว และยาว 6 นิ้ว โดยทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ [17], [18]

2.3.4 การย่อยสลายของแผ่นฟิล์มแป้งมันแกว

ตัดแผ่นฟิล์มแป้งมันแกวผสมกลีเซอรอลทุก

อัตราส่วนให้มีขนาดกว้าง 20 มิลลิเมตร และยาว 50 มิลลิเมตร นำมาชั่งน้ำหนัก โดยแต่ละตัวอย่างทำการ ทดสอบ 3 ซ้ำ จากนั้นนำไปฝังลงในดิน ลักษณะเป็น ดินร่วน ทำการฝังในกระถางเพาะชำ โดยนำดินบรรจุใน ถังเพาะชำขนาด 17.5×46.5 เซนติเมตร และฝังแผ่น ฟิล์มให้มีความลึกประมาณ 8-10 เซนติเมตร เป็นเวลา 12 สัปดาห์ วางในที่ร่ม ไม่มีการให้น้ำ และความชื้น เริ่มต้นของดินเท่ากับร้อยละ 22 โดยน้ำหนัก ชั่งน้ำหนัก แผ่นฟิล์มทุกสัปดาห์ บันทึกผลการทดลองและคำนวณ การย่อยสลายของแผ่นฟิล์มแป้งมันแกวดังสมการที่ 3 [19] โดยมีแผ่นฟิล์มพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีน (PE) เป็นชุดควบคุม

$$\% \text{ การย่อยสลายของแผ่นฟิล์ม} = \frac{A-B}{A} \times 100 \quad (3)$$

โดยที่

A = น้ำหนักของแผ่นฟิล์มเริ่มต้น (กรัม)

B = น้ำหนักของแผ่นฟิล์มหลังการย่อยสลาย (กรัม)

2.3.5 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

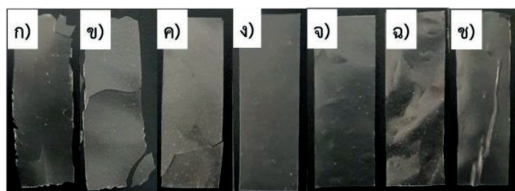
การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติประมวลผลด้วย โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS 16.0 (SPSS Inc., สหรัฐอเมริกา) และเปรียบเทียบความแปรปรวนของ ค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test ที่ ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 สมบัติทางกายภาพ

จากรูปที่ 1 การสังเกตด้วยตาเปล่า พบว่า แผ่นฟิล์มแป้งมันแกวที่มีกลีเซอรอลในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10 และ 20 (รูปที่ 1ก-1ค) มีลักษณะเปราะ และ แตกหักง่าย ในขณะที่แผ่นฟิล์มแป้งมันแกวที่มีอัตรา ส่วนของกลีเซอรอลร้อยละ 30 และ 40 (รูปที่ 1ง-1จ) มีลักษณะโปร่งใส ผิวเรียบ ค่อนข้างมัน สามารถขึ้น รูปได้ดี ส่วนแผ่นฟิล์มแป้งมันแกวที่มีอัตราส่วนของ

กลีเซอรอลร้อยละ 50-60 (รูปที่ 1ฉ-1ข) ลักษณะผิวไม่ค่อยเรียบ เหนียว และขาดง่าย พบว่ากลีเซอรอลมีผลทำให้แผ่นฟิล์มมีความยืดหยุ่นมากขึ้น เนื่องจากกลีเซอรอล (Hydrophilic Plasticizer) มีหมู่ไฮดรอกซิล (OH) ที่ชอบน้ำ เข้าไปแทรกกระหว่างสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ เพิ่มช่องว่างระหว่างโมเลกุล ทำให้แรงระหว่างโมเลกุลของแป้งอ่อนตัวลง โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ได้มากขึ้น จึงสามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มได้โดยไม่แข็งจนเปราะ เมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นฟิล์มที่ไม่ได้ใส่กลีเซอรอลซึ่งมีลักษณะแข็งกรอบ และแตกง่าย [20]



รูปที่ 1 ลักษณะภายนอกแผ่นฟิล์มแป้งมันแกวที่มีอัตราส่วนกลีเซอรอลร้อยละ 0 ก), 10 ข), 20 ค), 30 ง), 40 จ), 50 ฉ) และ 60 ข)

แผ่นฟิล์มแป้งมันแกวที่เตรียมได้มีค่าความหนาดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งแผ่นฟิล์มมีความหนาอยู่ในช่วง 0.16-0.28 มิลลิเมตร พบว่าความหนาของแผ่นฟิล์มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณกลีเซอรอล ($p \leq 0.05$) เนื่องจากกลีเซอรอลแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่โมเลกุล อะไมโลสในแป้งทำให้ความหนาของแผ่นฟิล์มโดยรวมเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ S.Santacruz et al. [21]

ความใสของแผ่นฟิล์มสามารถวิเคราะห์ได้จากค่าสี L^* ซึ่งแสดงถึงค่าความสว่าง โดยพบว่าค่าความสว่างของแผ่นฟิล์มแป้งมันแกวที่ผสมกลีเซอรอลร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 มีค่าความสว่างอยู่ในช่วง 23-29 ซึ่งมีแนวโน้มมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณกลีเซอรอล แสดงให้เห็นว่าแผ่นฟิล์มแป้งมีความใสมากขึ้น เนื่องจากกลีเซอรอลเข้าไปแทรกกระหว่างสายโซ่โมเลกุลแป้ง ลดการคืนตัวของสายโซ่ ความเป็นผลึกของแป้งจึงลดลง มีความเป็นอสัณฐานมากขึ้น ทำให้แผ่นฟิล์มแป้งมันแกวมีค่าความสว่างเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณกลีเซอรอลมากขึ้น

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพของแผ่นฟิล์มแป้งมันแกว

ปริมาณ กลีเซอรอล (%)	ความหนา	ความสว่าง L^*	ค่าแอดคิวิตีของน้ำ (a_w)	ค่าการละลาย (%)
0	0.16±0.01 ^c	23.25±1.83 ^c	0.36±0.01 ^e	12.88±0.18 ^e
10	0.19±0.01 ^{bc}	24.10±3.29 ^c	0.37±0.01 ^e	16.59±0.63 ^d
20	0.21±0.03 ^{abc}	25.16±0.60 ^{bc}	0.39±0.01 ^d	22.04±0.19 ^c
30	0.22±0.02 ^{abc}	26.51±1.89 ^{abc}	0.41±0.01 ^c	23.27±1.24 ^c
40	0.26±0.01 ^{ab}	26.55±2.46 ^{abc}	0.43±0.01 ^b	23.53±0.22 ^{bc}
50	0.27±0.02 ^a	28.16±0.88 ^{ab}	0.44±0.01 ^b	25.27±1.52 ^b
60	0.28±0.01 ^a	28.97±0.97 ^a	0.49±0.01 ^a	31.57±1.61 ^a

หมายเหตุ a-e ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวดิ่ง มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

3.2 สมบัติทางเคมี

ค่าแอกติวิตีของน้ำ (a_w) ของฟิล์มมีค่าอยู่ระหว่าง 0.36-0.49 ($p \leq 0.05$) ซึ่งมีค่าต่ำกว่า 0.60 แสดงให้เห็นว่าแผ่นฟิล์มแป้งมันแกวผสมกลีเซอรอลไม่อยู่ในช่วงที่จุลินทรีย์สามารถเจริญเติบโตได้ [22]

การละลายน้ำของแผ่นฟิล์มแป้งมันแกวมีค่าสูงขึ้นเมื่อผสมกลีเซอรอลในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากกลีเซอรอลเป็นสารประเภทโพลีออล (Polyol) ที่ชอบน้ำ ละลายน้ำได้ดี [23] ส่งผลให้แผ่นฟิล์มแป้งมันแกวผสมกลีเซอรอลร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 มีค่าการละลายน้ำเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ ($p \leq 0.05$)

เมื่อทำการศึกษาอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (WVP) ของแผ่นฟิล์มแป้งมันแกวที่ผสมกลีเซอรอลร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 ตามลำดับ ดังตารางที่ 2 พบว่ามีค่า WVP เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณกลีเซอรอลสูงขึ้น ตามลำดับ แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากกลีเซอรอลจะเข้าไปแทรกตัวระหว่างโมเลกุลของแป้ง ทำให้เกิดช่องว่างขึ้น ไอน้ำสามารถผ่านแผ่นฟิล์มได้มากขึ้น อีกทั้งกลีเซอรอลมีคุณสมบัติดูดความชื้นสูง (Hygroscopic) [24] ฟิล์มแป้งมันแกวจึงดูดซับไอน้ำเข้าไปในแผ่นฟิล์มมากขึ้น ส่งผลให้อัตราการซึม

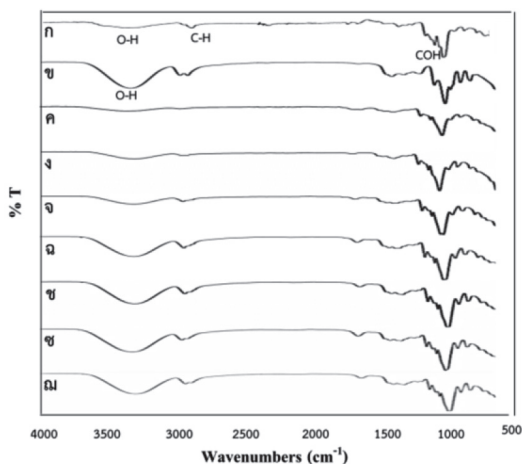
ผ่านไอน้ำของแผ่นฟิล์มเพิ่มขึ้น [25] การวิเคราะห์ห้อัตราการซึมผ่านของไอน้ำไม่ได้ทำการทดสอบฟิล์มแป้งมันแกวที่ผสมกลีเซอรอลร้อยละ 0, 10 และ 20

เนื่องจากแผ่นฟิล์มมีความเปราะ และแตกหักง่าย จึงไม่สามารถทดสอบด้วยวิธีนี้ได้ อย่างไรก็ตามจากผลดังกล่าว เมื่อทำการเปรียบเทียบฟิล์มจากพลาสติก PE พบว่าฟิล์มแป้งมันแกวมีค่าการละลายน้ำและอัตราการซึมผ่านไอน้ำมากกว่า แต่เมื่อเทียบกับฟิล์มที่ทำจากแป้งมันสำปะหลังและฟิล์มแป้งข้าวโพดมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก [26] ซึ่งการซึมผ่านของไอน้ำได้ดีจะสามารถช่วยลดการช้ำของน้ำและอาจช่วยให้รากพืชหายใจได้ดีขึ้น และอาจช่วยลดการเกิดรากเน่าได้ ซึ่งต่างจากถั่ว

พลาสติก PE ที่ต้องเจาะรูเพื่อระบายน้ำเนื่องจากน้ำและอากาศไม่สามารถซึมผ่านได้

ตารางที่ 2 ค่าอัตราการซึมผ่านไอน้ำ (WVTR) ของแผ่นฟิล์มแป้งมันแกว

ปริมาณกลีเซอรอล (%)	อัตราการซึมผ่านไอน้ำ กรัม/(ตรม.กิ.โลปาสคาล.ชม.)
0	-
10	-
20	-
30	190.32±3.62 ^d
40	319.93±4.21 ^c
50	337.11±3.87 ^b
60	466.56±4.65 ^a



รูปที่ 2 สเปกตรัม FT-IR ของ แป้งมันแกว ก), กลีเซอรอล ข), แผ่นฟิล์มแป้งมันแกวที่มีอัตราส่วนกลีเซอรอลร้อยละ 0 ค), 10 ง), 20 จ), 30 ฉ), 40 ช), 50 ซ) และ 60 ฅ)

จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) (Frontier PerkinElmer บริษัท Perkin-Elmer ประเทศสหรัฐอเมริกา) ผลการศึกษาแสดงเป็น

สเปกตรัมของแป้งมันแกว (รูปที่ 2ก), กลีเซอรอล (รูปที่ 2ข) แผ่นฟิล์มแป้งมันแกวที่มีกลีเซอรอลร้อยละ 0 (รูปที่ 2ค), 10 (รูปที่ 2ง) 20 (รูปที่ 2จ), 30 (รูปที่ 2ฉ), 40 (รูปที่ 2ช), 50 (รูปที่ 2ซ) และ 60 (รูปที่ 2ฅ) สเปกตรัม FT-IR แสดงให้เห็นว่าแป้งมันแกวมียุคที่เลขคลื่น 3300 cm^{-1} (O-H stretching), 2900 cm^{-1} (C-H stretching), 1600 cm^{-1} (C-O stretching), 1000 และ 850 cm^{-1} (C-O-C stretching) และ 990 และ 920 cm^{-1} (COH bending) [25] และพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนกลีเซอรอลมากขึ้นที่เลขคลื่น 3300 cm^{-1} (O-H stretching) ทำให้ค่าการดูดกลืนของหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลมีค่ามากขึ้น [27]

3.3 สมบัติทางกล

ผลการทดสอบสมบัติทางกลของฟิล์มแป้งมันแกวที่มีกลีเซอรอลร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 ดังตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่ากลีเซอรอลส่งผลให้แผ่นฟิล์มแป้งมันแกวอ่อนนุ่มขึ้น ($p \leq 0.05$) เนื่องจากการผสมกลีเซอรอลร้อยละ 60 ในแผ่นฟิล์มมีค่าการต้านทานแรงดึง (TS) ต่ำที่สุด พบว่าเมื่อปริมาณกลีเซอรอลมากขึ้น มีค่าต้านทานการดึงขาดลดลงเนื่องจากกลีเซอรอล ซึ่งจะไปทำให้แรงยึดระหว่างสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ที่อยู่ใกล้กันอ่อนลง โมเลกุลแป้งเคลื่อนที่ได้เพิ่มขึ้น แต่การลดความแข็งแรงของพันธะทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงมีค่าต่ำลงตามไปด้วย [28], [29] ในขณะที่ร้อยละการยึดตัวของฟิล์มเพิ่มขึ้นตามปริมาณกลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้น ($p \leq 0.05$) เนื่องจากกลีเซอรอลลดความเป็นผลึกของฟิล์มแป้งเพิ่มความยืดหยุ่นทำให้ฟิล์มมีการยึดตัวเพิ่มขึ้น [30]

ค่าความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนของฟิล์มแป้งมันแกวที่มีกลีเซอรอลร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 ดังตารางที่ 3 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกลีเซอรอลค่าต้านทานแรงเฉือนลดลงตามลำดับ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากผลของกลีเซอรอลเป็นสารเพิ่มความยืดหยุ่นเข้าไปแทรกจับพันธะระหว่างสายโซ่โมเลกุล

ของแป้ง จึงทำให้ความแข็งแรงของฟิล์มลดลงส่งผลให้ความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนของแผ่นฟิล์มแป้งมันแกวลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ S. Mali et al. [31] และเมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติทางกลของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก [32] และเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพลาสติก PE ซึ่งมีค่าต่ำกว่า [33]

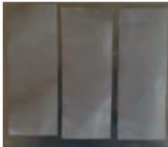
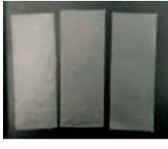
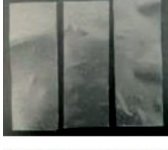
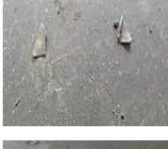
ตารางที่ 3 สมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มแป้งมันแกว

ปริมาณ กลีเซอรอล (%)	ค่าต้านทานแรง ดึงขาด (N/mm)	Elongation (%)	ค่าต้านทาน แรงเฉือน (N/mm)
0	14.56±0.45 ^a	2.72±0.25 ^s	81.45±0.36 ^a
10	9.23±0.23 ^b	9.12±0.45 ^f	75.56±0.66 ^b
20	8.89±0.54 ^b	14.67±0.38 ^e	67.43±0.58 ^c
30	6.76±0.78 ^c	17.56±1.27 ^d	43.52±0.85 ^d
40	4.54±0.25 ^d	25.78±2.35 ^c	33.67±0.52 ^e
50	1.59±0.11 ^e	31.22±2.52 ^b	28.68±0.92 ^f
60	0.30±0.05 ^f	34.59±0.25 ^a	21.54±0.75 ^g

3.4 ศึกษาอัตราการย่อยสลายของแผ่นฟิล์ม

จากการทดสอบการย่อยสลายโดยธรรมชาติของแผ่นฟิล์มที่ฝังดินเป็นเวลา 12 สัปดาห์ ดังตารางที่ 4 พบว่าแผ่นฟิล์มแป้งมันแกวผสมกลีเซอรอลร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 มีการย่อยสลายได้ร้อยละ 58.93, 67.85, 68.56, 83.01, 92.85, 98.25 และ 100 ตามลำดับ พบว่าแผ่นฟิล์มย่อยสลายได้มากขึ้นเมื่อปริมาณกลีเซอรอลมากขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากแป้งเป็นโมเลกุลชีวภาพจึงย่อยสลายได้ง่าย รวมทั้งกลีเซอรอลเป็นโมเลกุลที่ชอบน้ำสามารถดูดความชื้นได้มาก ประกอบกับจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในดินจึงช่วยให้แผ่นฟิล์มย่อยสลายได้ดียิ่งขึ้น [34] ในขณะที่ฟิล์มพลาสติกพอลิเอทิลีน (ชุดควบคุม) ไม่เกิดการย่อยสลาย

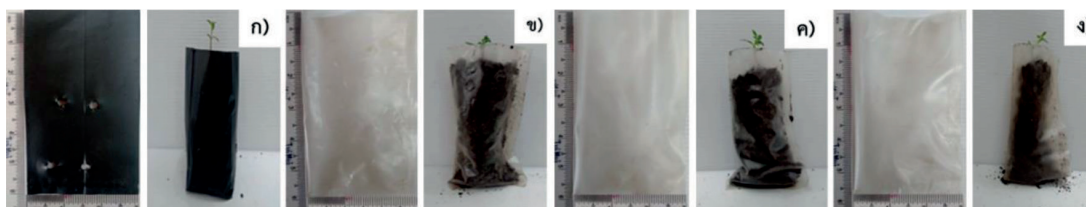
ตารางที่ 4 การย่อยสลายของแผ่นฟิล์มแป้งมันแกว

ตัวอย่าง	ลักษณะทางกายภาพ		ร้อยละของการย่อยสลาย
	ก่อนการย่อยสลาย	หลังการย่อยสลาย	
พลาสติกพอลิเอทิลีน (ชุดควบคุม)			0.00
แป้งมันแกว ผสมกลีเซอรอลร้อยละ 0			58.93±5.53
แป้งมันแกว ผสมกลีเซอรอลร้อยละ 10			67.85±3.65
แป้งมันแกว ผสมกลีเซอรอลร้อยละ 20			68.56±2.52
แป้งมันแกว ผสมกลีเซอรอลร้อยละ 30			83.01±9.74
แป้งมันแกว ผสมกลีเซอรอลร้อยละ 40			92.85±6.94
แป้งมันแกว ผสมกลีเซอรอลร้อยละ 50			98.25±1.55
แป้งมันแกว ผสมกลีเซอรอลร้อยละ 60			100

จากที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น แผ่นฟิล์มที่ผสมอัตราส่วนกลีเซอรอลร้อยละ 0, 10 และ 20 แผ่นฟิล์มที่ได้นั้นมีลักษณะเปราะ แตกง่าย ส่วนอัตราส่วนกลีเซอรอลร้อยละ 60 ลักษณะผิวไม่ค่อยเรียบ และขาดง่าย ไม่สามารถขึ้นรูปได้ ซึ่งอัตราส่วนกลีเซอรอลร้อยละ 30, 40 และ 50 สามารถขึ้นรูปได้ดีที่ขนาดกว้าง 3 เซนติเมตร และ ยาว 6 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3ข, 3ค และ 3ง ตามลำดับ ใช้เครื่องรีดปิดผนึกโดยชุดควบคุม (Control) เป็น ถุงเพาะชำพลาสติกพอลิเอทิลีน นำถุงเพาะชำมาทดลองปลูกพืช พืชที่ใช้ปลูกในงานวิจัยนี้คือดาวเรืองพันธุ์แซมบ้า เนื่องจากเกษตรกรในจังหวัด

ลพบุรีนิยมปลูกเพื่อสร้างรายได้ พบว่าถุงเพาะชำที่ทำมาจากแป้งมันแกวที่ผสมอัตราส่วนกลีเซอรอลร้อยละ 30, 40 และ 50 มีการเจริญเติบโตที่ดีไม่ต่างกับพืชที่ปลูกด้วยถุงเพาะชำพลาสติกพอลิเอทิลีน ดังตารางที่ 5

จากการทดลองดังกล่าวเป็นประโยชน์ให้กับเกษตรกร ผู้ประกอบการร้านขายต้นไม้ นำไปปลูกพืชเพื่อลดขยะพลาสติก เพราะสามารถนำถุงเพาะชำดังกล่าวไปปลูกพร้อมกับต้นกล้าในแปลงปลูกได้ทันทีโดยไม่ต้องฉีกถุง จึงไม่กระทบกระเทือนต่อระบบรากของพืช และสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติภายในดินกลายเป็นปุ๋ยบำรุงดินได้อีกด้วย



รูปที่ 3 ลักษณะถุงเพาะชำทางพาณิชย์ ก) ใส่น้ำสำหรับนำไปปลูกจริง และถุงเพาะชำที่ทำจากฟิล์มแป้งมันแกวผสมกลีเซอรอลร้อยละ 30 ข), 40 ค) และ 50 ง)

ตารางที่ 5 การเจริญเติบโตของต้นดาวเรือง

ตัวอย่าง	การเจริญเติบโตของดาวเรือง						
	สัปดาห์ที่ 0	สัปดาห์ที่ 1	สัปดาห์ที่ 2	สัปดาห์ที่ 3	สัปดาห์ที่ 4	สัปดาห์ที่ 6	สัปดาห์ที่ 8
พลาสติก พอลิเอทิลีน							
แป้งมันแกวผสม กลีเซอรอล ร้อยละ 30							
แป้งมันแกวผสม กลีเซอรอล ร้อยละ 40							
แป้งมันแกวผสม กลีเซอรอล ร้อยละ 50							

4. สรุป

จากการศึกษาการผลิตฟิล์มย่อยสลายได้จากแป้งมันแกว พบว่าการเติมกลีเซอรอลสามารถช่วยเพิ่มความยืดหยุ่น และอัตราการซึมผ่านไอน้ำการละลายน้ำให้กับแผ่นฟิล์ม ส่วนสมบัติทางกล พบว่าค่าต้านทานแรงดึงขาดและค่าต้านทานแรงเจาะลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณกลีเซอรอลมากขึ้น จากการศึกษาการย่อยสลายของแผ่นฟิล์มจากแป้งมันแกวที่ผสมกลีเซอรอลร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 มีการย่อยสลายได้ร้อยละ 58-100 ภายใน 12 สัปดาห์ เมื่อนำแผ่นฟิล์มแป้งมันแกวมารับขึ้นรูปเป็นถุงเพาะชำ พบว่าแผ่นฟิล์มแป้งมันแกวที่ผสมอัตราส่วนกลีเซอรอลร้อยละ 30, 40 และ 50 สามารถขึ้นรูปถุงเพาะชำได้ดี เมื่อนำไปศึกษาการเพาะปลูกดาวเรืองพันธุ์แซมบ้า พบว่าดาวเรืองที่ปลูกโดยใช้ถุงเพาะชำจากแป้งมันแกว มีการเจริญเติบโตที่ดี ไม่ต่างกับดาวเรืองที่ปลูกด้วยถุงเพาะชำพลาสติกพอลิเอทิลีน ดังนั้นฟิล์มแป้งมันแกวที่ผสมกลีเซอรอลร้อยละ 40 มีผลการทดสอบโดยรวมดีที่สุด จึงสามารถนำฟิล์มแป้งมันแกวไปประยุกต์ใช้กับผลิตผลทางการเกษตรชนิดอื่น ๆ ต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับงบประมาณสนับสนุนการดำเนินงานวิจัยจากมหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี สถาบันวิจัยและพัฒนา ประจำปีงบประมาณ 2562

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] R. Colussi, V. Z. Pinto, S. L. M. E. Halal, B. Biduski, L. Prietto, D. D. Castilhos, E. R. Zavareze and R. G. Dias, "Acetylated rice starches films with different levels of amylose: Mechanical, water vapor barrier, thermal, and biodegradability properties," *Food Chemistry*, vol. 221, pp. 1614–1620, Apr. 2017.
- [2] A. R. Hernández, A. A. Saguilán, G. R. Meza and J. C. Ahumada, "Multi-objective optimization of process conditions in the manufacturing of banana (*Musa paradisiaca* L.) starch/natural rubber films," *Carbohydrate Polymers*, vol. 157, pp. 1125–1133, Oct. 2017.
- [3] S. Sahraee, J. M. Milani, B. Ghanbarzadeh and H. Hamishehkar, "Effect of corn oil on physical, thermal, and antifungal properties of gelatin-based nanocomposite films containing nano chitin," *LWT - Food Science and Technology*, vol. 76, pp. 33-39, Oct. 2017.
- [4] Z. Yu, L. Sun, W. Wang, W. Zeng, A. Mustapha and M. Lin, "Soy protein-based films incorporated with cellulose nanocrystals and pine needle extract for active packaging," *Industrial Crops & Products*, vol. 112, pp. 412-419, Dec. 2017.
- [5] R. Kumar, G. Ghoshal and M. Goyal, "Synthesis and functional properties of gelatin/CA–starch composite film: excellent food packaging material," *Journal of Food Science and Technology*, vol. 56, no. 4, pp. 1954–1965, Apr. 2019.
- [6] A. M. R. Pen, M.G.C. Renard, L. Wicker and J. C. C. Esquivel, "Advances and perspectives of *Pachyrhizus* spp. In food science and biotechnology," *Trends in Food Science & Technology*, vol. 29, pp. 44-54, Jan. 2013.
- [7] V. Bátori, M. Lundin, D. Åkesson, P. R. Lennartsson, M. J. Taherzadeh and

- A. Zamani, "The effect of glycerol, sugar, and maleic anhydride on pectin-cellulose thin films prepared from orange waste," *Polymers*, vol. 11, pp. 392–405, Feb. 2019.
- [8] K. Chantawee and S. A. Riyajan, "Effect of glycerol on the physical properties of carboxylated styrenebutadiene rubber/cassava starch blend films," *Journal of Polymers and the Environment*, vol. 27, pp. 50–60, Oct. 2019.
- [9] M. I. J. Ibrahim, S. M. Sapuan, E. S. Zainudina and M.Y.M. Zuhri, "Physical, thermal, morphological, and tensile properties of cornstarch-based films as affected by different plasticizers," *International Journal of Food Properties*, vol. 22, no. 4, pp. 925–941, Apr. 2019.
- [10] B. C. Maniglia, L. Tessaro, A. P. Ramos and D. R. T. Blácido, "Which plasticizer is suitable for films based on babassu starch isolated by different methods?," *Food Hydrocolloids*, vol. 89, pp. 143–152, Oct. 2019.
- [11] Z. Wu, J. Wu, T. Peng, Y. Li, D. Lin, B. Xing, C. Li, Y. Yang, L. Yang, L. Zhang, R. Ma, W. Wu, X. Lv, J. Dai and G. Han, "Preparation and application of starch/polyvinyl alcohol/citric acid ternary blend antimicrobial functional food packaging films," *Polymers*, vol. 9, no. 12, p. 102, Mar. 2017.
- [12] P. Theamdee and J. Rueangrung, "The effect of glycerol content on physical and mechanical properties of the biodegradable film from sweet potato flour for plastic plant bag application," *Journal of science and technology ubon ratchathani university*, vol. 21, no. 3, pp. 14–24, Dec. 2019.
- [13] A. Edhirej, S. M. Sapuan, M. Jawaidd and N. I. Zahari, "Preparation and characterization of cassava bagasse reinforced thermoplastic cassava starch," *Fibers and Polymers*, vol. 18, no. 1, pp. 162–171, Dec. 2017.
- [14] C. L. Luchese, N. Sperotto, J. C. Spada and I. C. Tessaro, "Effect of blueberry agro-industrial waste addition to corn starch-based films for the production of a pH-indicator film," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 104, pp. 11–18, May 2017.
- [15] M. L. Sanyang, S. M. Sapuan, M. Jawaidd, M. R. Ishak and J. Sahari, "Development and characterization of sugar palm starch and poly (lactic acid) bilayer films," *Carbohydrate Polymers*, vol. 146, pp. 36–45, Mar. 2016.
- [16] P. Cazon, G. Velazquez, J. A. Ramírez and M. Vazquez, "Polysaccharide-based films and coatings for food packaging: A review," *Food Hydrocolloids*, vol. 68, pp. 136–148, Sep. 2017.
- [17] S. Acosta, A. Chiralt, P. Santamarina, J. Rosello, C. G. Martínez and M. Chafer, "Antifungal films based on starch-gelatin blend, containing essential oils," *Food Hydrocolloids*, vol. 61, pp. 233–240, May 2016.

- [18] S. Mali, G. T. Bersaneti, J. Mantovan and A. Magri, "Edible films based on cassava starch and fructooligosaccharides produced by *Bacillus subtilis* natto CCT 7712," *Carbohydrate Polymers*, vol. 151, pp. 1132–1138, Jun. 2016.
- [19] D. M. Nguyen, T. V. V. Do, A. C. Grillet, H. H. Thuc and C. N. H. Thuc, "Biodegradability of polymer film based on low density polyethylene and cassava starch," *International Biodeterioration & Biodegradation*, vol. 115, pp. 257–265, Sep. 2016.
- [20] M. Dick, T. M. H. Costa, A. Gomaa, M. Subirade, A. O. Rios and S. H. Flôres, "Edible film production from chia seed mucilage: Effect of glycerol concentration on its physicochemical and mechanical properties," *Carbohydrate Polymers*, vol. 130, pp. 198–205, May 2015.
- [21] S. Santacruz, C. Rivadeneira and M. Castro, "Edible films based on starch and chitosan. Effect of starch source and concentration, plasticizer, surfactant's hydrophobic tail and mechanical treatment," *Food Hydrocolloids*, vol. 49, pp. 89–94, Mar. 2015.
- [22] S. P. Veiga, "Sucrose and inverted sugar as plasticizer effect on cassava starch-gelatin film mechanical properties hydrophilicity and water activity," *Food Chemistry*, vol. 103, no. 2, pp. 255–262, Oct. 2007.
- [23] C. M. Jaramillo, O. O. Yepes, C. Bernal and L. Famá, "Active and smart biodegradable packaging based on starch and natural extracts," *Carbohydrate Polymers*, vol. 176, pp. 187–194, Aug. 2017.
- [24] D. P. Hernandez, C. M. Jaramillo, A. L. Cordoba and S. Goyanes, "Edible cassava starch films carrying rosemary antioxidant extracts for potential use as active food packaging," *Food Hydrocolloids*, vol. 63, pp. 488–495, Sep. 2017.
- [25] M. L. Sanyang, S. M. Sapuan, M. Jawaid, M. R. Ishak and J. Sahari, "Effect of plasticizer type and concentration on tensile, thermal and barrier properties of biodegradable films based on sugar palm (*Arenga pinnata*) starch," *Polymers*, vol. 7, pp. 1106–1124, Jun. 2015.
- [26] C. L. Luchese, J. C. Spada and I. C. Tessaro, "Starch content affects physicochemical properties of corn and cassava starch-based films," *Industrial Crop & Products*, vol. 109, pp. 619–626, Sep. 2017.
- [27] J. Seo, G. M. Raghavendra, J. Jung and D. kim, "Step-reduced synthesis of starch-silver nanoparticles," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 80, pp. 126–128, Jan. 2016.
- [28] S. Mali, C. P. B. Melo, M. V. E Grossmann, F. Yamashita, E. Y. Youssef and L. H. Antônia, "Effect of manufacturing process and xanthan gum addition on the properties of cassava starch films," *Journal Polymer Environment*, vol. 19, pp. 739–749, Jun. 2011.
- [29] C. C. Tadini, A. C. Souza, G. E. O. Goto,

- J. A. Mainardi and A. C. V. Coelho, "Cassava starch composite films incorporated with cinnamon essential oil: Antimicrobial activity, microstructure, mechanical and barrier properties," *LWT - Food Science and Technology*, vol. 54, pp. 346-352, Jun. 2013.
- [30] S. H. Flôres, M. Dick, T. M. H. Costa, A. Gomaa, M. Subirade and A.O. Rios, "Edible film production from chia seed mucilage: Effect of glycerol concentration on its physicochemical and mechanical properties," *Carbohydrate Polymers*, vol. 130, pp. 98-205, May 2015.
- [31] S. Mali, L. S. Sakanaka, F. Yamashita and M. V. E. Grossmann, "Water sorption and mechanical properties of cassava starch films and their relation to plasticizing effect," *Carbohydrate Polymers*, vol. 60, no.3, pp. 283-289, May 2005.
- [32] V. D. Alves, S. Mali, A. Beleia and M. V. E. Grossmann, "Effect of glycerol and amylose enrichment on cassava starch film properties," *Journal of Food Engineering*, vol. 78, pp. 941-946, Feb. 2006.
- [33] A. Shebani, A. Klash, R. Elhabishi, S. Abdsalam, H. Elbreki and W. Elhrari, "The influence of LDPE content on the mechanical properties of HDPE/LDPE blends," *Research & Development in Material Science*, vol. 7, no. 5, pp. 791-797, Aug. 2018.
- [34] M. Babaee, M. Jonoobi, Y. Hamzeh and A. Ashori, "Biodegradability and mechanical properties of reinforced starch nanocomposites using cellulose nanofibers," *Carbohydrate Polymers*, vol. 132, pp. 1-8, Jun. 2015.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูของถ่านเปลือกส้มโอที่เตรียม จากการเผาแบบเตาลาน

พัชรนันท์ จันทรพลอย* กฤติยาภรณ์ หลวงดี และ นภารัตน์ จิวาลักษณ์

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่

202 ถนนช้างเผือก ตำบลช้างเผือก อำเภอเมืองเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50300

รับบทความ 12 ธันวาคม 2562 แก้ไขบทความ 18 มีนาคม 2563 ตอรับบทความ 30 เมษายน 2563

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูของถ่านเปลือกส้มโอที่เตรียมได้จากการเผาแบบเตาลาน ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับที่อุณหภูมิห้อง ได้แก่ ระยะเวลาในการดูดซับ และความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเมทิลีนบลู จากการศึกษาคurve ของระยะเวลาในการดูดซับ พบว่า การดูดซับเกิดขึ้นเร็วในช่วงแรก และเริ่มคงที่ที่เวลาการดูดซับ 24 ชั่วโมง และเมื่อศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเมทิลีนบลู พบว่า การเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นมีผลทำให้ตัวดูดซับเกิดการดูดซับสีย้อมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นมากกว่า 600 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า การดูดซับสีย้อมของตัวดูดซับเพิ่มขึ้นน้อยมาก การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ พบว่า ข้อมูลจากการทดลองมีความสอดคล้องกับแบบจำลองสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม และไอโซเทอมการดูดซับเป็นไปตามแบบจำลองแลงเมียร์ เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว โดยมีความสามารถในการดูดซับสูงสุด 166.67 มิลลิกรัมต่อกรัมของถ่านเปลือกส้มโอ นอกจากนี้ได้ศึกษาการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูของถ่านเปลือกส้มโอเทียบกับวัสดุดูดซับชนิดอื่นๆ ที่สภาวะเดียวกัน พบว่า ถ่านเปลือกส้มโอมีความสามารถในการดูดซับสูงกว่าเปลือกส้มโอแห้งซึ่งไม่ผ่านการดัดแปร อีกทั้งยังมีความสามารถในการดูดซับสูงกว่าถ่านถ่านต้นลำไย ถ่านอัดแท่ง กะลามะพร้าว ถ่านต้นลิ้นจี่ และถ่านต้นมะขาม ตามลำดับ

คำสำคัญ : ถ่านเปลือกส้มโอ; การเผาแบบเตาลาน; การดูดซับ; สีย้อมเมทิลีนบลู

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 1469 3892, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: patcharanan@g.cmru.ac.th

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Methylene Blue Adsorption Using Pomelo Peels Charcoal Prepared by Traditional Charcoal Burning

Patcharanan Junploy* Krittiyaporn Loungdee and Naparat Jiwalak

Faculty of Science and Technology, Chiang Mai Rajabhat University

202 Chang pheuk Road, Chang Phueak Sub-district, Mueang Chiang Mai District, Chiang Mai, 50300, Thailand

Received 12 December 2019; Revised 18 March 2020; Accepted 30 April 2020

Abstract

The pomelo peels charcoal was successfully prepared by traditional charcoal burning and its adsorption of methylene blue was investigated. The influences of methylene blue adsorption including contact time and methylene blue initial concentration were studied at room temperature. The adsorption rate initially increased rapidly until 24 h and 600 mg/L of methylene blue initial concentration. The further increase in contact time and methylene blue initial concentration did not significantly increase the adsorption due to it reached equilibrium. Kinetic of adsorption were investigated, that the pseudo-second order model best described adsorption kinetic data. The adsorption isotherms were evaluated and the data correlated with Langmuir adsorption model with the maximum adsorption capacity was found to be 166.67 mg/g. The adsorption of pomelo peel charcoal was studied comparing to other adsorbents at the same experimental conditions. The results showed higher adsorption of pomelo peel charcoal than dried pomelo peel, longan wood charcoal, coconut shell charcoal, litchi wood charcoal and tamarind wood charcoal, respectively.

Keywords : Pomelo Peels Charcoal; Traditional Charcoal Burning; Adsorption; Methylene Blue

* Corresponding Author. Tel.: +668 1469 3892, E-mail Address: patcharanan@g.cmru.ac.th

1. บทนำ

ปัญหามลพิษทางน้ำเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่มีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มจำนวนประชากรส่งผลให้มีการขยายตัวด้านอุตสาหกรรม มีการเพิ่มปริมาณการผลิตสินค้าและในอุตสาหกรรม เช่น การผลิตสิ่งทอ พอกหนัง กระดาษ อาหาร และการพิมพ์ เป็นต้น อุตสาหกรรมเหล่านี้ จำเป็นต้องใช้น้ำในกระบวนการผลิตที่มักมีสีย้อมหลายชนิดตกค้างอยู่ในน้ำทิ้งปริมาณมากและย่อยสลายได้ยาก เนื่องจากเป็นสารประกอบที่มีโครงสร้างซับซ้อนและเสถียร [1], [2] การปนเปื้อนของสีย้อมในแหล่งน้ำส่งผลให้น้ำมีสารเคมีสะสม มีความต้องการออกซิเจนทางเคมี (Chemical Oxygen Demand, COD) และค่าความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมี (Biochemical Oxygen Demand, BOD) สูงอีกด้วย บ่งบอกถึงความต้องการในการใช้ออกซิเจนของสารเคมีและจุลินทรีย์เพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำมีค่าสูง แหล่งน้ำจึงขาดออกซิเจนและเน่าเสีย นอกจากนี้ ยังส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศน้ำ เนื่องจากตัวสีย้อมสามารถดูดกลืนแสงได้ ทำให้พืชน้ำขาดแสงสว่างในการสังเคราะห์แสง ส่งผลกระทบต่อห่วงโซ่อาหาร และทัศนียภาพแย่ลง อีกทั้งยังทำให้เกิดการระคายเคือง เกิดการกลายพันธุ์ของสัตว์ในแหล่งน้ำได้ [3], [4]

การบำบัดสีย้อมในปัจจุบันมีหลายเทคนิค [5] ได้แก่ การสร้างตะกอน (Coagulation) ซึ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัดที่ดีแต่มีการใช้สารเคมีปริมาณมาก อีกทั้งยังต้องมีค่าใช้จ่ายและขั้นตอนในการบำบัดตะกอนที่เกิดขึ้นด้วย [6] การแยกด้วยไฟฟ้า (Electrolysis) มีประสิทธิภาพดีแต่ต้องมีการบำรุงรักษาเครื่องมืออย่างต่อเนื่องและอาจต้องมีการกำจัดไอออนของโลหะที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้า ที่ตกค้างในน้ำทิ้งด้วย [7] กระบวนการโอโซนเนชัน (Ozonation) มีประสิทธิภาพสูงและใช้เวลาในการกำจัดสีย้อม แต่เป็นเทคนิคที่มีค่าใช้จ่ายสูงในการติดตั้งและการผลิตแก๊สโอโซน [8] การใช้จุลินทรีย์ในการบำบัด (Biological Treatment) เป็น

วิธีที่ใช้ต้นทุนต่ำไม่ซับซ้อน แต่ก็ไม่สามารถบำบัดสีย้อมได้ทุกชนิด อีกทั้งสีย้อมชนิดนี้มีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ [6] และการดูดซับ (Adsorption) เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพสูง ไม่ทำให้เกิดการตกค้างของสารเคมีในแหล่งน้ำหลังจากการบำบัด วัสดุดูดซับสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ง่ายในการนำไปประยุกต์ใช้ และต้นทุนต่ำ [9], [10] ดังนั้นการเตรียมวัสดุดูดซับจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่มีประสิทธิภาพดีในการดูดซับถือเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ เพราะหาได้ง่าย ราคาถูก และช่วยลดปริมาณขยะในชุมชน อีกด้วย

ส้มโอถือเป็นไม้ผลเศรษฐกิจของไทย จากข้อมูลผลผลิตส้มโอที่เกษตรกรเก็บเกี่ยวได้ระหว่างปี พุทธศักราช 2557 ถึง 2561 มีปริมาณอยู่ในช่วง 109,351 ถึง 147,672 ตันต่อปี [11] ส้มโอเป็นผลไม้ที่ได้รับความนิยมของผู้บริโภค เนื่องจากเนื้อส้มโอมีรสชาติหวานอร่อยจึงนิยมนำมาบริโภค ส่วนของเปลือกส้มโอแบ่งออกเป็นสองชั้น โดยเปลือกชั้นนอก (Flavedo) มีสีเขียว มีต่อมน้ำมันหอมระเหยกระจายอยู่เป็นจำนวนมาก ส่วนเปลือกชั้นใน (Albedo) มีเส้นใยคาร์โบไฮเดรตหนา ประกอบไปด้วย เซลลูโลส (Cellulose) เพกทิน (Pectin) และเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) [12] ซึ่งเปลือกส้มโอปริมาณมากมักถูกทิ้งให้เป็นขยะมูลฝอย ส่งกลิ่นเหม็น ผู้วิจัยจึงได้สนใจนำเปลือกส้มโอมาดัดแปรเป็นถ่านด้วยวิธีการเผาแบบเตาถ่าน โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณการดูดซับ ได้แก่ ระยะเวลาการดูดซับและความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม รวมถึงจลนพลศาสตร์และไอโซเทอมการดูดซับ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาปริมาณการดูดซับของถ่านเปลือกส้มโอเทียบกับเปลือกส้มโอแห้งและถ่านจากวัสดุบางชนิด

2. ระเบียบวิธีวิจัย

เปลือกส้มโอที่ใช้ในงานวิจัยมาจากส้มโอพันธุ์ทองดี ได้คัดเลือกผลส้มโอที่แก่เต็มที่เหมาะสมในการบริโภคและปลูกในพื้นที่จังหวัดเชียงราย ในการศึกษา

การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูของถ่านเปลือกส้มโอ ใช้สีย้อมเมทิลีนบลูเกรดวิเคราะห์ จากบริษัท BDH Chemicals ผลิตจากประเทศอังกฤษ ขั้นตอนการดูดซับใช้เครื่องเขย่า (Shaker) จากบริษัท Biotek รุ่น NB-1015 ผลิตจากสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี จากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูหลังการดูดซับ ด้วยเครื่องอัลตราไวโอเลตวิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS Spectrophotometer) ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น UV-1601 ผลิตจากประเทศญี่ปุ่น โดยคำนวณค่าปริมาณการดูดซับของตัวดูดซับที่สภาวะต่างๆ จากกราฟมาตรฐานของค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นต่างๆ

2.1 การเตรียมถ่านจากเปลือกส้มโอจากการ

เผาแบบเตาลาน

นำเปลือกส้มโอมาตัดให้ได้ขนาด 15x15 เซนติเมตร แล้วนำไปตากแดด 2-3 วัน จากนั้นเปลือกส้มโอแห้งวางลงในหลุมขนาด 40x40x30 เซนติเมตร ที่รองก้นหลุมด้วยแกลบหนาประมาณ 15 เซนติเมตร จากนั้นกลบด้วยแกลบให้เต็มหลุม จุดไฟเผาเป็นเวลา 24 ชั่วโมงจะได้ถ่านเปลือกส้มโอ จากนั้นให้ล้างเอาขี้เถ้าออก แล้วตากแดดให้แห้ง และนำมาบดละเอียดด้วยโม่ร่อนบดสาร และร่อนให้ได้ขนาดน้อยกว่า 45 ไมครอน

2.2 การศึกษาการดูดซับของถ่านเปลือกส้มโอ

สร้างกราฟมาตรฐานของค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้นต่างๆ เพื่อนำไปหาปริมาณการดูดซับ ในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ ระยะเวลาการดูดซับ และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู

2.2.1 การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู ($C_{16}H_{18}ClN_3S$)

วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู ความเข้มข้น 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร ด้วยเครื่องอัลตราไวโอเลตวิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ แล้วนำข้อมูลที่ได้ไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลูกับค่าการดูดกลืนแสง

2.2.2 การศึกษาระยะเวลาในการดูดซับ

ชั่งผงถ่านเปลือกส้มโอ 0.1 กรัม ใส่ลงในปิอกเกอร์ ปิเปตสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิตร จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 4, 8, 12, 16, 20, 24, 36 และ 48 ชั่วโมง ตามลำดับ ทำการทดลอง 3 ซ้ำ นำสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูหลังการปั่นกวนไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องอัลตราไวโอเลตวิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร จากนั้นนำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ไปคำนวณหาความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลูที่เหลือหลังจากการดูดซับโดยใช้กราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู เพื่อนำมาคำนวณหาปริมาณการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูของผงถ่านเปลือกส้มโอที่เวลาต่างๆ

2.2.3 การศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเมทิลีนบลู

ชั่งผงถ่านเปลือกส้มโอ 0.1 กรัม ใส่ลงในปิอกเกอร์ ปิเปตสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู ปริมาตร 50 มิลลิตร ความเข้มข้น 100, 200, 300, 400, 500, 600, 800, 900 และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำการทดลอง 3 ซ้ำ นำสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูหลังการปั่นกวนไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องอัลตราไวโอเลตวิสิเบิล สเปกโตรโฟโต

มิเตอร์ จากนั้นนำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ไปคำนวณหาความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลูที่เหลือหลังจากการดูดซับโดยใช้กราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู เพื่อนำมาคำนวณหาปริมาณการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูของถ่านเปลือกส้มโอที่ความเข้มข้นต่างๆ

2.3 การศึกษาการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูของถ่านเปลือกส้มโอกับเปลือกส้มโอแห้งและถ่านจากวัสดุอื่นๆ

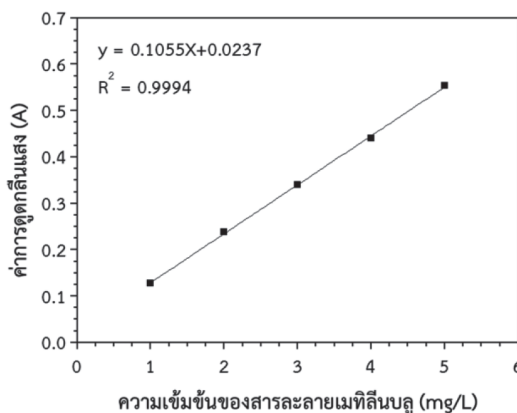
วัสดุดูดซับที่ทำการศึกษา มีทั้งหมด 6 ชนิด ได้แก่ เปลือกส้มโอแห้ง ถ่านเปลือกส้มโอ ถ่านต้นลำไย ถ่านอัดแท่งกะลามะพร้าว ถ่านต้นลิ้นจี่ และถ่านต้นมะขาม ทำการทดลองโดยนำวัสดุดูดซับมาบดละเอียดด้วยโกรนบดสาร และร่อนให้ได้ขนาดน้อยกว่า 45 ไมครอน จากนั้นชั่งผงวัสดุดูดซับ 0.1 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ ปีเปตสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู ความเข้มข้น 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิตร จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำการทดลอง 3 ซ้ำ นำสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูหลังการปั่นกวนไปวัดค่าการดูดกลืนแสง จากนั้นนำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ไปคำนวณหาความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลูที่เหลือหลังจากการดูดซับโดยใช้กราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู เพื่อนำมาคำนวณหาปริมาณการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูของวัสดุแต่ละชนิด

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

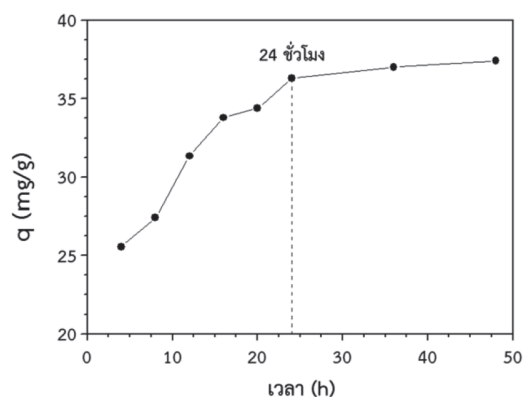
3.1 กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู

จากการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูมาตรฐาน ความเข้มข้น 1 ถึง 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร พบว่า ความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงและความ

เข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลู แสดงดังรูปที่ 1 สอดคล้องกับสมการเส้นตรง $y = 0.1055x + 0.0237$ และมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.9994



รูปที่ 1 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูมาตรฐาน ที่ความเข้มข้นต่างๆ



รูปที่ 2 ปริมาณการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูของถ่านเปลือกส้มโอที่ระยะเวลาในการดูดซับต่างๆ ภายใต้สภาวะความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

3.2 อิทธิพลของเวลาและอุณหภูมิต่อการดูดซับของถ่านเปลือกส้มโอ

การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูที่ระยะเวลาการดูดซับ 4, 8, 12, 16, 20, 24, 36 และ 48 ชั่วโมง ผลการดูดซับแสดงในรูปที่ 2 พบว่า เมื่อเพิ่มระยะเวลา

ในการดูดซับ ปริมาณการดูดซับจะเร็วในช่วงแรก เนื่องจากความเข้มข้นของสีย้อมในสารละลายและปริมาณสีย้อมบนตัวดูดซับมีค่าต่างกันมาก ทำให้การแพร่ของสีย้อมไปยังตำแหน่งดูดซับ (Adsorbed Sites) เกิดขึ้นได้เร็ว จากนั้นการดูดซับจะเริ่มช้าลง และเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง ปริมาณการดูดซับจะเริ่มคงที่ เนื่องจากมีการดูดซับสูงสุดบนตำแหน่งดูดซับของถ่านเปลือกส้มโอ และการดูดซับเริ่มเข้าสู่สมดุล โดยมีอัตราการเกาะและหลุดออกของสีย้อมบนผิวของตัวดูดซับเท่ากัน โดยระยะเวลาไม่มีผลกระทบใดๆ ต่อระบบ [13], [14]

การศึกษากลไกการดูดซับของถ่านเปลือกส้มโอ ซึ่งเป็นการถ่ายโอนมวลสารระหว่างสีย้อมเมทิลีนบลู และถ่านเปลือกส้มโอ นิยมอธิบายด้วยแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first-order) และปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo-second-order) สมการแสดงในสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ ดังนี้ [14]-[16]

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad (1)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (2)$$

โดยที่

q_e คือ ความสามารถในการดูดซับที่ภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

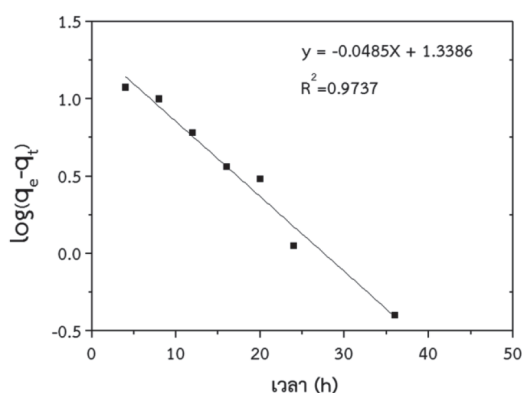
q_t คือ ความสามารถในการดูดซับ ณ เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

t คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (ชั่วโมง)

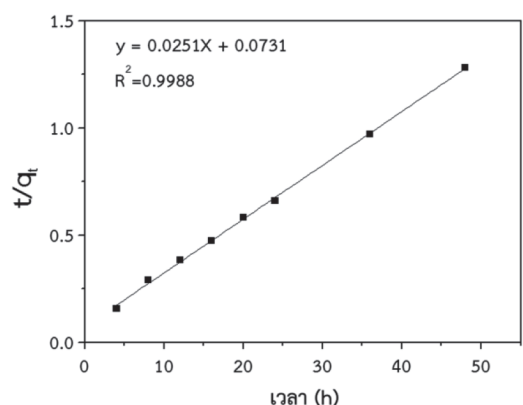
k_1 และ k_2 คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (ต่อชั่วโมง) และค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่สอง (กรัมต่อมิลลิกรัม-ชั่วโมง) ตามลำดับ

เมื่อนำข้อมูลมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(q_e - q_t)$ เวลา (t) และกราฟความสัมพันธ์

ระหว่างกับ t/q_t เวลา (t) ได้ดังรูปที่ 3(ก) และ 3(ข) ตามลำดับ พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของแบบจำลองของสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียมมีความเป็นเส้นตรงมากกว่าค่าดังกล่าวของแบบจำลองของสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม ดังนั้นอัตราเร็วปฏิกิริยาการดูดซับจึงสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม และสามารถนำมาคำนวณค่าต่างๆ แสดงในตารางที่ 1



(ก) กราฟแสดงความสัมพันธ์ตามสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม



(ข) กราฟแสดงความสัมพันธ์ตามสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

รูปที่ 3 กราฟแสดงจลนพลศาสตร์การดูดซับ

ตารางที่ 1 ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาและอันดับการเกิดปฏิกิริยา

ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม		
q_e (mg/g)	k_1 (h ⁻¹)	R^2
21.8072	0.1117	0.9737
ปฏิกิริยาอันดับสองเทียม		
q_e (mg/g)	k_2 (g/mg.h)	R^2
39.8248	0.0086	0.9988

3.3 อิทธิพลของความเข้มข้นและไอโซเทอมการดูดซับของถ่านเปลือกส้มโอ

ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมและตำแหน่งดูดซับ (Adsorbed Sites) ของวัสดุดูดซับ โดยผลการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู ความเข้มข้น 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ของถ่านเปลือกส้มโอ แสดงในรูปที่ 4(ก) พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูจะทำได้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นเป็นการเพิ่มความแตกต่างระหว่างปริมาณของสีย้อมบนตัวดูดซับกับสารละลาย จะช่วยเพิ่มแรงขับเคลื่อนให้เกิดการถ่ายเทมวลสารและการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลสีย้อมและตำแหน่งดูดซับของวัสดุดูดซับ [13], [16] จากนั้นปริมาณการดูดซับเริ่มคงที่ที่ความเข้มข้น 600 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีปริมาณการดูดซับ 120.93 มิลลิกรัมต่อกรัมของถ่านเปลือกส้มโอ นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้นำข้อมูลดังกล่าวไปคำนวณหาร้อยละการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูของถ่านเปลือกส้มโอ ในสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้นต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4(ข) พบว่าสารละลายสีย้อมที่มีความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร มีร้อยละการดูดซับสีย้อมมากที่สุด ถึงร้อยละ 66.25 ของปริมาณสีย้อมเริ่มต้น อย่างไรก็ตามผู้วิจัยได้เลือกใช้สารละลาย

เมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 600 มิลลิกรัมต่อลิตรเพื่อศึกษาในหัวข้อถัดไป เนื่องจากที่ความเข้มข้นดังกล่าวให้ปริมาณการดูดซับสีย้อมต่อน้ำหนักของถ่านเปลือกส้มโอสูงสุด

เมื่อนำข้อมูลไปศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ โดยหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสีย้อมเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับกับความเข้มข้นของสีย้อมเมทิลีนบลูที่เหลืออยู่ที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิคงที่ เพื่อหาไอโซเทอมที่เหมาะสมและใช้อธิบายลักษณะการดูดซับของถ่านเปลือกส้มโอ โดยแบบจำลองไอโซเทอมที่นิยมใช้ได้แก่แบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับแบบแลงเมียร์ ดังแสดงในสมการที่ (3) [14], [15], [17]

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{bq_m} + \frac{C_e}{q_m} \quad (3)$$

โดยที่

q_e คือ ความสามารถในการดูดซับที่ภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

b คือ ค่าคงที่แลงเมียร์ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

q_m คือ ปริมาณสูงสุดที่สามารถดูดซับแบบชั้นเดียว (มิลลิกรัมต่อกรัม)

และแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช ดังแสดงในสมการที่ (4) [14], [15], [17]

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad (4)$$

โดยที่

q_e คือ ความสามารถในการดูดซับที่ภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

K_F คือ ค่าคงที่ฟรุนดลิช (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$\frac{1}{n}$ คือ ปัจจัยที่แสดงความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน

C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

เมื่อจำลองการดูดซับเป็นแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิช ได้กราฟดังรูปที่ 5(ก) และ 5(ข) ตามลำดับ และสามารถหาตัวแปรต่างๆ ได้ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2 และหากพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) พบว่าค่า R^2 จากแบบจำลองแลงเมียร์ เท่ากับ 0.9724 ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่า R^2 จากแบบจำลองฟรุนดลิช แสดงว่าการดูดซับของถ่านเปลือกส้มโอมีความสอดคล้องกับแบบจำลองของแลงเมียร์มากกว่าฟรุนดลิช การดูดซับตามแบบจำลองของแลงเมียร์เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียวที่มีความสม่ำเสมอ มีโมเลกุลที่ถูกดูดซับและตำแหน่งที่เกิดการดูดซับที่แน่นอน การสร้างพันธะระหว่างสารที่ถูกดูดซับบนตำแหน่งบนวัสดุดูดซับใช้พลังงานเท่ากัน ไม่มีแรงกระทำต่อกันและไม่มีการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารที่ถูกดูดซับข้างเคียง [18] จากการคำนวณมีการดูดซับสูงสุด (q_m) เท่ากับ 166.67 มิลลิกรัมต่อกรัม และเมื่อพิจารณาลักษณะของการดูดซับด้วยค่าคงที่การแยกตัว (Separation Factor, R_L) ถ้า $R_L > 1$ การดูดซับไม่ดี (Unfavorable), $R_L = 1$ การดูดซับเป็นเส้นตรง (Linear), $0 < R_L < 1$ การดูดซับดี (Favorable) และ $R_L = 0$ การดูดซับเกิดการผันกลับได้ (Irreversible) โดยค่า R_L สามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ (5) [14, 17-18]

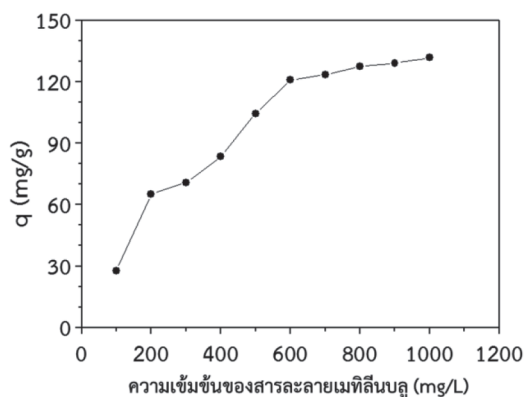
$$R_L = \frac{1}{1 + bC_0} \quad (5)$$

โดยที่

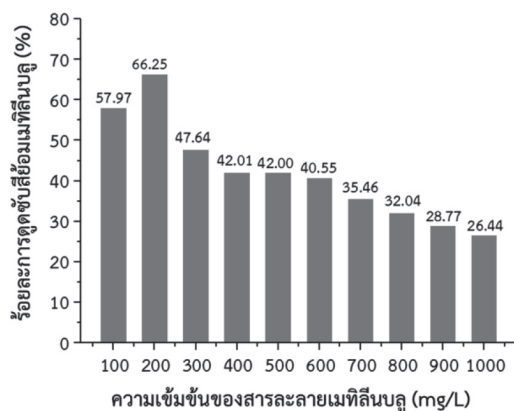
b คือ ค่าคงที่แลงเมียร์ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

จากการคำนวณได้ R_L อยู่ในช่วง 0.1471 ถึง 0.6329 ซึ่ง $0 < R_L < 1$ แสดงว่า ถ่านเปลือกส้มโอมีการดูดซับดี (Favorable) ในช่วงความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูที่ทำการศึกษา

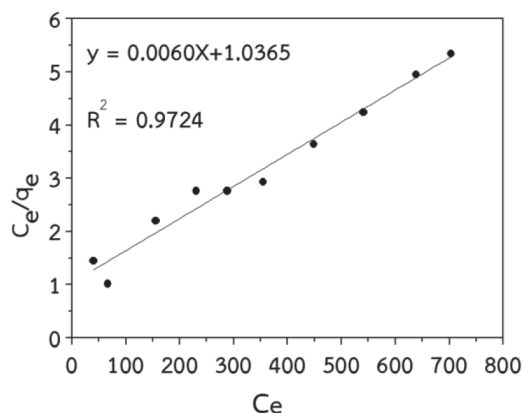


(ก) ความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู

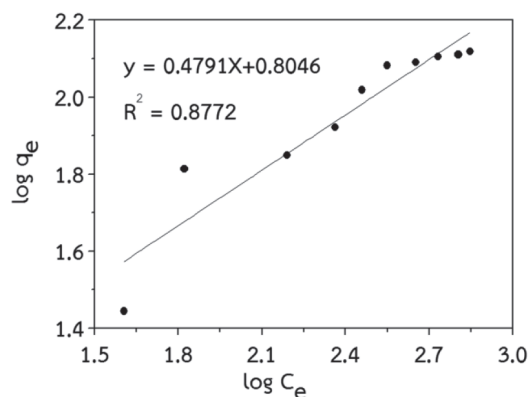


(ข) ร้อยละการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู

รูปที่ 4 การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูของถ่านเปลือกส้มโอในสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลู ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่าง ๆ กัน ภายใต้ระยะเวลาในการดูดซับ 24 ชั่วโมง



(ก) แลงเมียร์ไอโซเทอม



(ข) ฟรอนดลิชไอโซเทอม

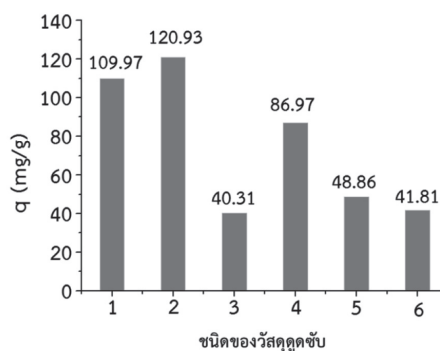
รูปที่ 5 ไอโซเทอมการดูดซับของถ่านเปลือกส้มโอ

ตารางที่ 2 ค่าคงที่ของการดูดซับแบบแลงเมียร์และฟรอนดลิช

แบบจำลองแลงเมียร์		
b (L/mg)	q _m (mg/g)	R ²
0.0058	166.67	0.9724
แบบจำลองฟรอนดลิช		
K _F (mg/g)	1/n	R ²
6.368	0.479	0.8772

3.4 การเปรียบเทียบการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูของถ่านเปลือกส้มโอกับตัวดูดซับชนิดอื่น

จากการศึกษาการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูของวัสดุหลายชนิด ได้แก่ เปลือกส้มโอแห้ง (แทนด้วยหมายเลข 1) ถ่านเปลือกส้มโอ (แทนด้วยหมายเลข 2) ถ่านต้นลำไย (แทนด้วยหมายเลข 3) ถ่านอัดแท่งกะลามะพร้าว (แทนด้วยหมายเลข 4) ถ่านต้นลิ้นจี่ (แทนด้วยหมายเลข 5) และถ่านต้นมะขาม (แทนด้วยหมายเลข 6) พบว่ามีความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 109.97, 120.93, 40.31, 86.97, 48.86 และ 41.86 มิลลิกรัมต่อกรัมของตัวดูดซับ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 6 บ่งบอกได้ว่า การดัดแปรเปลือกส้มโอจะได้ถ่านจากเปลือกส้มโอที่มีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้นเมื่อเทียบกับเปลือกส้มโอที่ไม่ผ่านการดัดแปร และมีประสิทธิภาพสูงกว่าถ่านจากวัสดุอื่นๆ แต่อย่างไรก็ตาม ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูของถ่านเปลือกส้มโอมีค่าน้อยกว่าเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ทางการค้าและถ่านกัมมันต์ที่เตรียมด้วยวิธีการกระตุ้นด้วยวิธีต่างๆ [19]-[21]



รูปที่ 6 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูของวัสดุต่างๆ ได้แก่ เปลือกส้มโอแห้ง (แทนด้วยหมายเลข 1) ถ่านเปลือกส้มโอ (แทนด้วยหมายเลข 2) ถ่านต้นลำไย (แทนด้วยหมายเลข 3) ถ่านอัดแท่งกะลามะพร้าว (แทนด้วยหมายเลข 4) ถ่านต้นลิ้นจี่ (แทนด้วยหมายเลข 5) และถ่านต้นมะขาม (แทนด้วยหมายเลข 6)

4. สรุป

ถ่านเปลือกส้มโอที่เตรียมได้จากวิธีการเผาแบบเตาถ่าน มีความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมทิลินบลูต่อกรัมของถ่านสูงสุด คือ 120.93 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่ระยะเวลาและความเข้มข้นของสารละลาย เท่ากับ 24 ชั่วโมง และ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จลนพลศาสตร์ของการดูดซับสอดคล้องกับสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม และไอโซเทอมของการดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองแลงเมียร์ ลักษณะการดูดซับบนพื้นผิวถ่านเปลือกส้มโอเป็นแบบขั้นเดียว โดยมีค่าปริมาณสูงสุดที่สามารถดูดซับแบบขั้นเดียว เท่ากับ 166.67 มิลลิกรัมต่อกรัม จากการศึกษาความสามารถในการดูดซับเทียบกับเปลือกส้มโอแห้งและถ่านจากวัสดุอื่น พบว่า ถ่านเปลือกส้มโอ มีความสามารถในการดูดซับสูงกว่า เปลือกส้มโอแห้ง ถ่านอัดแท่งกะลามะพร้าว ถ่านต้นลิ้นจี่ ถ่านต้นมะขาม และถ่านต้นลำไย ตามลำดับ

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ สำหรับอุปกรณ์ สารเคมี และสถานที่วิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] X. Liu, Z. Ni, C. Xie, R. Wang and R. Guo, "Controlled synthesis and selective adsorption properties of Pr_2CuO_4 nanosheets: a discussion of mechanism," *Nanoscale Research Letters*, vol. 13, no. 268, pp. 1-11, 2018.
- [2] K. K. Upadhyay, A. C. Pandey and J. Manzoor, "Impact of dyes on the chemistry of water and its implications: a review," *Bio Bulletin*, vol. 3, no. 1, pp. 1-7, 2017.
- [3] W. Sarakarnkosol, "Pollution and the dangers of waste water from dyeing clothes," *Environment Journal*, vol. 21, no. 1, pp. 7-14, 2017.
- [4] Z. Wang, M. Xue, K. Huang and Z. Liu, "Textile Dyeing Wastewater Treatment," in *Advances in Treating Textile Effluent*, P. Hauser, Ed. China: InTech, 2011, pp. 91-116.
- [5] E. A. S. Almaamary, S. R. S. Abdullah, H. A. Hasan, R. A. Ab. Rahim and M. Idris, "Treatment of methylene blue in wastewater using *Scirpus grossus*," *Malaysian Journal of Analytical Sciences*, vol. 21, no. 1, pp. 182-187, 2017.
- [6] J. Thuanthong, "Removal of reactive dye wastewater by chemical coagulation," M.S. thesis, Dept. Environ. Eng., Chulalongkorn Univ., Bangkok, Thailand, 2010.
- [7] P. Jitto, T. Chaikratang and W. Nakbanpote, "Silk textile wastewater treatment by electrocoagulation process," *Journal of Research Unit on Science, Technology and Environment for Learning*, vol. 7, no. 2, pp. 228-239, 2016.
- [8] T. Kritsanapuk and C. Jarusutthirak, "Decolorization of Synthetic Dyeing Wastewater by Catalytic Ozonation," in *Proceeding of The 54th Kasetsart University Annual Conference*, Thailand, 2016, pp. 1107-1114.
- [9] R. Srimoon, "Dyes treatment in wastewater using adsorption processes," *KKU Science*

- Journal*, vol. 44, no. 3, pp. 419-434, 2016.
- [10] M. Kaykhaii, M. Sasani and S. Marghzar, "Removal of dyes from the environment by adsorption process," *Chemical and Materials Engineering*, vol. 6, no. 2, pp. 31-35, 2018.
- [11] Ministry of Agriculture and Cooperatives. (2019, October). Agricultural Production. [Online]. Available: <http://www.agriinfo.doae.go.th>
- [12] O. I. Aruoma, B. Landes, D. Ramful-Baboolall, E. Bourdon, V. Neergheen-Bhujun, K-H. Wagner and T. Bahorun, "Functional benefits of citrus fruits in the management of diabetes," *Preventive Medicine*, vol. 54, Supplement, pp. S12-S16, 2012.
- [13] M. Fatiha and B. Belkacem, "Adsorption of methylene blue from aqueous solutions using natural clay," *Journal of Materials and Environmental Science*, vol. 7, no. 1, pp. 285-292, 2016.
- [14] C. Umpuch and S. Sakaew, "Removal of methyl orange from aqueous solutions by adsorption using chitosan intercalated montmorillonite," *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, vol. 35, no. 4, pp. 451-459, 2013.
- [15] N. Jiwalak, S. Rattanaphani, J.B. Bremner and V. Rattanaphani, "Equilibrium and kinetic modeling of the adsorption of indigo carmine onto silk," *Fibers and Polymers*, vol. 11, no. 4, pp. 572-579, 2010.
- [16] U. Gecgel, O. Uner, G. Gokara and Y. Bayrak, "Adsorption of cationic dyes on activated carbon obtained from waste *Elaeagnus* stone," *Adsorption Science & Technology*, vol. 34, no. 9-10, pp. 512-525, 2016.
- [17] K. A. Kareem, "Removal and recovery of methylene blue dye from aqueous solution using *Avena fatua* seed husk," *Ibn Al-Haitham Journal for Pure and Applied Science*, vol. 29, no. 3, pp. 179-194, 2016.
- [18] R. Saadi, Z. Saadi, R. Fazaeli and N. E. Fard, "Monolayer and multilayer adsorption isotherm models for sorption from aqueous media," *Korean Journal of Chemical Engineering*, vol. 32, no. 5, pp. 787-799, 2015.
- [19] A. Ritthichai and S. Muncharoen, "Dye removal of textile wastewaters using crab shell activated carbon," *Burapha Science Journal*, vol. 19, no. 1, pp. 131-140, 2014.
- [20] S. Rattanapan and P. Kongsune, "Methylene blue adsorption onto activated charcoal prepared from mangosteen peel," *Thaksin University Journal*, vol. 21, no. 2, pp. 51-59, 2018.
- [21] K. Yothawong, L. Singngao, and W. Pongpatrakant, "Preparation of activated carbon from macadamia nut shells by sodium chloride," in *Proceeding of The 1st Loei Rajabhat University Annual Conference*, Thailand, 2019, pp. 35-44.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

ผลกระทบและส่วนผสมที่เหมาะสมของผงเปลือกมังคุดสำหรับ แบบหล่อทรายขึ้น

อนุวิทย์ สนศิริ^{1*} อัญชลี อินคำปา ² นพดล อำดี³ และ ธนภัทร มะณีแสง⁴

^{1,2} คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

³ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง

⁴ คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์

^{1,2} 2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120

³ 46 หมู่ 3 ตำบลจอมบึง อำเภोजอมบึง จังหวัดราชบุรี 70150

⁴ 83 หมู่ 11 ถนนสระบุรี-หล่มสัก ตำบลสะเดียง อำเภอเมือง จังหวัดเพชรบูรณ์ 67000

รับบทความ 30 สิงหาคม 2561 แก้ไขบทความ 20 เมษายน 2563 ตอรับบทความ 30 เมษายน 2563

บทคัดย่อ

งานหล่อโลหะด้วยแบบหล่อทรายขึ้น มีความจำเป็นต่อการขับเคลื่อนอุตสาหกรรมการผลิต ที่ต้องใช้ทรัพยากรธรรมชาติและสารเคมีเป็นองค์ประกอบ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลกระทบส่วนผสมที่เหมาะสมของผงเปลือกมังคุดที่มีต่อแบบหล่อทรายขึ้น โดยมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ส่วนผสมของแบบหล่อทรายขึ้น ประกอบด้วยทรายธรรมชาติ เบนโทไนต์ ผงเปลือกมังคุด และน้ำ ที่มีผลต่อสมบัติของแบบหล่อทรายในสถานะทรายขึ้น (Green sand) โดยวิธีการทดลอง เริ่มจากการศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง ของวัสดุตามธรรมชาติที่ส่งผลต่อแบบหล่อทราย และวางแผนออกแบบการทดลอง โดยใช้โปรแกรมออกแบบการทดลองสำเร็จรูป ฉบับทดลอง ในการออกแบบการทดลอง และวิเคราะห์ผล ซึ่งผลการทดลองพบว่าผงเปลือกมังคุดส่งผลต่อการเพิ่มคุณสมบัติ ค่าความแข็งแรงทางอัด และค่าความแข็งแรงของแบบหล่อทรายสูงขึ้น แต่ไม่เพิ่มค่าความสามารถในการปล่อยอากาศซึมผ่านมากนัก โดยอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด ประกอบด้วยส่วนผสมของทรายที่ใช้งานหล่อแล้วร้อยละ 90 เบนโทไนต์ร้อยละ 7 น้ำร้อยละ 1 และผงเปลือกมังคุดร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ซึ่งทำให้ได้ค่าของความแข็งแรงทางอัดแบบหล่อทรายขึ้น ความสามารถในการปล่อยอากาศผ่าน และค่าความแข็งแรงของแบบหล่อทรายแบบหล่อทรายขึ้น เท่ากับ 0.71 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร, 47.36 และ 94.06 Scale-B ตามลำดับ

คำสำคัญ : แบบหล่อทรายขึ้น; ผงเปลือกมังคุด; ออกแบบการทดลอง; การผลิต

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 0507 2223, ไลน์ไอดี: a.sonsiri@gmail.com

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Effect and Optimal Variable of Mangosteen Peel Powder for Green Sand Mold

Anuwit Sonsiri^{1*} Unchalee Inkampa² Noppadon Amdee³ and
Thanapat Maneesaeng⁴

^{1,2} Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Krungthep

³ Faculty of Industrial Technology, Muban Chombung Rajabhat University

⁴ Faculty of Manufacturing Technology, Phetchabun Rajabhat University

^{1,2} 2 Nanglinchi Road, Tungmahamek, Sathorn, Bangkok 10120

³ 46 Moo 3 Chombung Sub-district, Chombung District, Ratchaburi 70150

⁴ 83 Moo 11 Saraburi-Lomsak Road, Sadiang Sub-district, Mueang District, Phetchabun 67000

Received 30 August 2018; Revised 20 April 2020; Accepted 30 April 2020

Abstract

Metal casting with Green sand mold is essential for participation in the manufacturing industry that requires natural resources and chemicals as an element. This research studied the effects of the right mix of mangosteen shell powder on green sand mold. The objective is to study and analyze the mixture of moist sand formations consisting of natural sand, bentonite, mangosteen shell powder and water affecting the properties of green sand mold by experiment method. Starting from studying relevant information of natural materials that affect sand mold and planning experimental design by using the experimental design program for the trial version in the experimental design and analyze results. The results showed that mangosteen peel powder had an effect on the properties Compression strength and higher hardness of sand mold but does not increase the ability to release a lot of air permeability The optimum blend ratio was composed of 90% reused sand, 7% bentonite, 1% water and 2% mangosteen powder by weight air permeability. The hardness of the sand casting was 0.71 kg/cm², 47.36 and 94.06 Scale B respectively.

Keywords : Green Sand Mold; Mangosteen Peel Powder; Experimental Design; Manufacturing

** Corresponding Author. Tel.: +668 0507 2223, E-mail Address: a.sonsiri@gmail.com*

1. บทนำ

ปัจจุบันสามารถกล่าวได้ว่า งานอุตสาหกรรมมีส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดการพัฒนาความเป็นอยู่ของมนุษย์ ในส่วนของการผลิตเครื่องจักร และสิ่งอำนวยความสะดวกต่าง ๆ มีงานหลากหลายประเภท อุตสาหกรรม โดยอุตสาหกรรมงานหล่อจัดเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่สนับสนุนการผลิต เป็นเสมือนแหล่งวัตถุดิบให้กับงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์ อุตสาหกรรมก่อสร้าง เป็นต้น [1], [2] โดยมีกรรมวิธีการหล่อมากมายหลายวิธี ซึ่งกรรมวิธีการหล่อโลหะจากแบบหล่อทรายเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการผลิต โดยประเภทของแบบหล่อทรายที่นิยมใช้มากที่สุด คือ แบบหล่อทรายแบบทรายขึ้น เพราะมีต้นทุนในการทำแบบหล่อที่ไม่สูงมากนัก และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้เร็วกว่าแบบหล่อทรายแบบอื่น ๆ ส่วนผสมแบบหล่อทรายแบบทรายขึ้น ประกอบด้วย ทรายธรรมชาติ เบนโทไนด์ น้ำ และส่วนผสมอื่น เช่น เด็กซ์ทรีน ผงถ่านหิน และเรซิน เป็นต้น [3]

จากการที่มีผู้ศึกษาไว้ว่า นอกจากตัวประสานในแบบหล่อทรายที่ใช้เบนโทไนด์แล้ว ยังมีการศึกษาตัวประสานอื่น ๆ อีก โดย A.P.I. Popoola [4] เปรียบเทียบสมบัติทางกลของแบบหล่อทรายโดยใช้กากน้ำตาล แป้งมันสำปะหลัง และกัมอารบิกที่สกัดจากน้ำยางธรรมชาติ แม้ว่ากัมอารบิกจากน้ำยางธรรมชาติรับแรงอัดขณะขึ้นได้ต่ำกว่าแป้งมันสำปะหลังก็ตาม จากงานวิจัยข้างต้นนี้ แสดงให้เห็นว่ากัมอารบิกนั้นเมื่อนำมาผสมแล้วมีผลต่อแบบหล่อทราย [4] ในส่วนของตัวประสาน กัมอารบิกเป็นสารประกอบธรรมชาติชนิดหนึ่งที่อยู่ในกลุ่มสารไฮโดรคอลลอยด์ (Hydrocolloids) โดยได้น้ำยางที่ ไหลออกมาจากฝัก และผิวเปลือกของลำต้นของพืชในกลุ่มアカเซีย (Acacia) [5] ซึ่งอาจมีความเป็นไปได้ว่าพืชที่มียางตามธรรมชาติประเภทอื่นสามารถนำมาใช้เป็นสารประกอบในการทำแบบหล่อทราย ได้เช่นเดียวกัน เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ที่มีการทำเกษตรกรรมทั่ว

ทุกภูมิภาค และมังคุดเป็นผลผลิตทางการเกษตร ในภาคตะวันออกของประเทศไทยที่ส่วนใหญ่นิยมปลูกมังคุด [6] ซึ่งมังคุดเป็นผลไม้ที่มียางที่เปลือกมากพอสมควร อีกทั้งช่วงฤดูฝนของทุกปีมังคุดจะมีราคาถูกหาได้ง่ายในประเทศไทย [7] เบนโทไนด์ราคากิโลกรัมละ 150 บาท [8] ซึ่งเปลือกมังคุดบดผงกิโลกรัมละ 60 บาท ผู้ทำวิจัยพิจารณาแล้ว เห็นว่าเปลือกมังคุดสามารถนำมาตากแห้งและบดเป็นผงละเอียด ใช้เป็นสารประกอบในการทำแบบหล่อทรายขึ้นได้ สารที่มีอยู่ในเปลือกมังคุดส่วนใหญ่เป็นสารที่อยู่ในกลุ่มของ Phenolics ยกตัวอย่างเช่น Xanthones. (Quinones), (Flavonoids) มีประสิทธิภาพในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ รวมถึงเป็นสารเกาะยึด (Cementing Agent) ที่มีมากในเปลือกมังคุดใช้สำหรับผลิตกาวยึด เช่น การใช้โปรแอนโทไซยานินดินแทนนิน แทนสารฟีนอลสังเคราะห์ในการผลิตไม้อัด [9] การจะทราบว่าส่วนผสมจากผงเปลือกมังคุด สามารถนำมาใช้เพิ่มคุณสมบัติของแบบหล่อทรายขึ้น ได้หรือไม่นั้นต้องมีการทดสอบและการหาส่วนผสมที่เหมาะสมของทรายขึ้น ซึ่งต้องมีการออกแบบการทดลองส่วนผสมระหว่าง ทรายธรรมชาติ เบนโทไนด์ น้ำ และสารเติมพิเศษ [10], [11] ในส่วนของการออกแบบการทดลองโดยใช้วิธี Taguchi's Method ในการหาค่าความเหมาะสมของแบบหล่อทราย เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เหล็กหล่อที่มีคุณภาพดีที่สุดตัวชี้วัด หรือสมบัติที่นำมาศึกษาคุณภาพของแบบหล่อทรายที่ใช้ในการทดลองคือความแข็งแรงขณะเป่าขึ้น การปล่อย ซึมอากาศและความแข็งของแบบหล่อ [12] ศึกษาหาค่าความเหมาะสมของแบบหล่อ ทรายโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Rotatable Design (CCRD) สมบัติที่ถูกนำมาประเมินหาค่าความเหมาะสม ได้แก่ ความหนาแน่นรวมความสามารถในการกดอัด การปล่อยซึมอากาศและแรงอัด [13]

จากการศึกษางานวิจัยดังกล่าวจะเห็นได้ว่าวิธีการออกแบบการทดลองสามารถนำมาควบคุมและ

หาค่าความเหมาะสมของสมบัติแบบหล่อทราย ได้
อย่างไรก็ตามเทคนิค การออกแบบการทดลองดังกล่าว
เป็นเพียงการศึกษาหาค่าความเหมาะสมของแบบหล่อ
ทรายของแต่ละปัจจัยที่กำหนดในแต่ละกระบวนการ
สำหรับงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยใช้ผงเปลือกมังคุดเป็นสาร
เติมพิเศษ โดยการนำแบบหล่อทรายขึ้นที่ให้เป็นแบบ
ตัวอย่าง มาทดสอบสมบัติทางกล ได้แก่ ความสามารถ
รับแรงอัด (Greensand Compressive Strength,
GCS) ความแข็งของแบบหล่อทราย (Hardness, Hard.)
และความสามารถในการปล่อยอากาศซึมผ่าน
(Permeability, Perm.) โดยการทดลองแบบหล่อ
ทรายขึ้น ใช้วิธีการออกแบบการทดลองด้วยเครื่องมือ
และโปรแกรมทางด้านวิศวกรรม เพื่อใช้ในการหาผล
กระทบและส่วนผสมที่เหมาะสมของแบบหล่อทรายขึ้น
โดยใช้คุณสมบัติทางกลของแบบหล่อทราย ได้แก่
ความสามารถรับแรงอัดขณะขึ้น ความสามารถในการ
ปล่อยอากาศซึมผ่าน และค่าความแข็งของแบบหล่อ
ทรายขณะขึ้น เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด

2. ระเบียบวิธีวิจัย

ศึกษาและวิเคราะห์ส่วนผสมของแบบหล่อทราย
ที่มีส่วนผสมประกอบด้วย ทรายเก่า เบนโทไนต์ ผง
เปลือกมังคุด และน้ำ ที่มีผลต่อสมบัติทางกลของแบบ
หล่อทราย ในขณะที่เป็นที่เป็นทรายขึ้น (Green Sand)
โดยทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง ตามขั้นตอนดังนี้
วิเคราะห์รูปแบบของสมการถดถอยที่เหมาะสมของ
การออกแบบการทดลอง, ตรวจสอบความเพียงพอใน
รูปแบบของสมการถดถอย วิเคราะห์หาอัตราส่วนผสม
ที่เหมาะสมทำให้คุณสมบัติทางกลของแท่งทดสอบ
สำหรับแบบหล่อทรายขึ้นได้ตามมาตรฐาน

2.1 การเตรียมตัวอย่างแบบหล่อทรายขึ้น

ส่วนผสมที่ใช้ในการสร้างแบบหล่อทรายที่นำไป
ใช้ในการทดลองทรายใช้งานหล่อแล้ว (Reuse Sand)
เบนโทไนต์ (Bentonite) น้ำ (Water) และผงเปลือก

มังคุด (Mangosteen Peel Powder) ดังแสดงใน
รูปที่ 1



รูปที่ 1 ผงเปลือกมังคุด
(Mangosteen Peel Powder)

ตารางที่ 1 ส่วนผสมและข้อจำกัดของส่วนผสมที่นำไป
ใช้ในการออกแบบการทดลอง

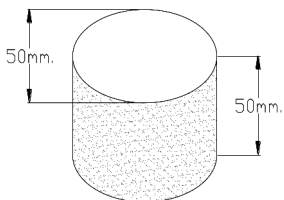
ส่วนผสม	สัญลักษณ์	ข้อจำกัด	
		ค่าต่ำ (% โดยน้ำหนัก)	ค่าสูง (% โดยน้ำหนัก)
ทรายใช้งาน หล่อแล้ว	-	90	90
เบนโทไนต์	A	3	7
น้ำ	B	1	5
ผงเปลือก มังคุด	C	0	5

ดำเนินการทดสอบสมบัติทางกล คือ ความ
สามารถรับแรงอัดขณะขึ้น ความสามารถในการปล่อย
ซึมอากาศผ่าน และค่าความแข็งของแบบหล่อทรายขึ้น
โดยใช้ขึ้นตัวอย่างและเครื่องมือทดสอบตามมาตรฐาน
ของสมาคม A.F.S.(American Foundry' men
Society) [14] ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ทรายผ่านการ
ใช้งานหล่อมีปริมาณร้อยละ 90 โดยน้ำหนักเพราะเป็น
ส่วนผสมหลักของการทำแบบหล่อทรายขึ้นในขณะที่
เดียวกันได้นำเอาส่วนผสมอีก 3 ส่วนผสม มาทำการ
ทดลองตามวิธีการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม
แบบ D-optimal ซึ่งเป็นการออกแบบการทดลองแบบ

ส่วนผสมแบบมีข้อจำกัด ข้อจำกัดของแต่ละส่วนผสม ที่ทำการศึกษาในหน่วยร้อยละ (%) โดยน้ำหนัก ดังใน ตารางที่ 1 และพิจารณาการทดสอบความแข็งแรงทางอัดของแบบหล่อทรายที่เหมาะสมมากที่สุด

2.2 แนวทางการทดสอบ

ดำเนินการทดสอบแบบหล่อทรายขึ้นขณะขึ้นที่ผสมผงเปลือกมังกัด ตามที่ออกแบบการทดลองไว้ โดยแต่ละส่วนจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ลักษณะ คือ การทดสอบความแข็งแรงของแบบหล่อทราย, การทดสอบความแข็งแรงทางอัดของแบบหล่อทราย โดยใช้เครื่อง Universal Sand Strength และการทดสอบอัตราไหลผ่านแบบหล่อทรายใช้เครื่อง Electric Permeability Meter ในการทดสอบดัชนีชี้วัด โดยใช้ปริมาณอากาศภายใต้ความดันอากาศคงที่ ที่สามารถไหลผ่านขึ้นงานได้ [14], [15] โดยสร้างแท่งทดสอบ (Specimen) ลักษณะทรงกระบอกตัน ตามมาตรฐาน ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ขนาดแท่งทดสอบทรายขึ้น (Specimen)

3. ผลการศึกษาและการอภิปรายผล

ผลการทดสอบสมบัติของแบบหล่อทรายขึ้นตามแผนการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมโดยแต่ละตัวอย่างการทดสอบจะทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ยดังตารางที่ 2 แล้วนำมาวิเคราะห์เลือกรูปแบบจำลองการถดถอยทางสถิติของความแข็งแรงทางอัดแบบหล่อทรายขึ้น ความสามารถในการปล่อยอากาศซึมผ่าน และค่าความแข็งแรงของแบบหล่อทรายขึ้น โดยใช้โปรแกรมออกแบบการทดลองสำเร็จรูป ฉบับทดลอง

ซึ่งแสดงในตารางที่ 3 รูปแบบทางสถิติของค่าความแข็งแรงของแบบหล่อทรายขึ้น ความสามารถปล่อยอากาศซึมผ่าน และ ความแข็งแรงทางอัดแบบหล่อทรายขึ้น มีความเหมาะสมในรูปแบบเชิงเส้นตรง (Linear Model) รูปแบบเชิงเส้นโค้ง Quadratic Model) และรูปแบบเชิงเส้นโค้ง ตามลำดับ โดยมีค่า p-value ของแต่ละรูปแบบน้อยกว่า 0.05 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ารูปแบบจำลองของสมการถดถอยที่ได้มีความเหมาะสมสำหรับข้อมูลและสามารถยอมรับรูปแบบสมการถดถอยนั้นได้ในขณะเดียวกันค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (R^2) และค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนดปรับแล้ว ($R^2_{Adj.}$) ของแต่ละรูปแบบมีค่าสูงใกล้เคียง 1 ซึ่งเป็นการยืนยันให้เห็นว่าสมการถดถอยสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณส่วนผสมของส่วนผสมทั้งสามชนิด และสมบัติทางกลของแบบหล่อทรายขึ้นได้อย่างเหมาะสม

ตารางที่ 2 ผลทดสอบสมบัติทางกลของแบบหล่อทราย

ส่วนผสมที่	A	B	C	Hard. Scale-B	Perm.	GCS. kg/cm ²
1	3.92	3.91	2.17	87.78	55.33	0.57
2	5.92	2.91	1.17	90.22	63.67	0.58
3	5.00	5.00	0.00	88.11	51.00	0.49
4	3.92	2.41	3.67	88.89	54.67	0.63
5	3.00	2.00	5.00	92.33	44.33	0.6
6	5.92	1.91	2.17	92.22	61.00	0.66
7	7.00	1.00	2.00	95.33	44.67	0.7
8	4.83	2.84	2.33	91.67	71.00	0.68
9	4.42	1.91	3.67	92.78	44.33	0.67
10	4.00	1.00	5.00	92.56	33.67	0.62
11	4.92	3.91	1.17	90.22	62.00	0.54
12	3.00	5.00	2.00	87.56	56.67	0.63
13	7.00	3.00	0.00	89.89	67.33	0.54

รูปที่ 3, 4 และ 5 เป็นกราฟ Trace ของผลตอบสนอง ซึ่งสามารถนำมาวิเคราะห์แต่ละส่วนผสมว่ามีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของแบบหล่อทรายหรือไม่ โดยพิจารณาจากแนวโน้มของเส้นกราฟ ถ้าเส้นกราฟของส่วนผสมใดมีลักษณะเป็นเส้นตรงหรือเส้นโค้ง แสดงว่าส่วนผสมนั้นมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางกลของแบบหล่อทราย รูปที่ 3 พบว่าเบนโทไนต์ (A) มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นทำให้ความแข็งแรงของแบบหล่อทรายขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้นตาม ตรงข้ามกับปริมาณของน้ำ (B) มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นทำให้ความแข็งแรงของแบบหล่อทรายขึ้นมีค่าลดลง ในขณะที่ผงเปลือกมังคุด (C) ในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นทำให้ความแข็งแรงของแบบหล่อทรายขึ้นเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อยนัก เมื่อต้องการความแข็งแรงของแบบหล่อทรายขึ้นมีค่าสูง เบนโทไนต์ (A) และผงเปลือกมังคุด (C) อยู่ในปริมาณสูง ในขณะที่ปริมาณของน้ำ (B) อยู่ในปริมาณที่ต่ำ ในรูปที่ 4 เห็นได้ว่าปริมาณของน้ำ (B) มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นทำให้ความสามารถปล่อยอากาศซึมผ่านเพิ่มขึ้น และลดลงเมื่อมีปริมาณที่มากเกินไป แต่ตรงกันข้ามกับผงเปลือกมังคุด (C) ที่เมื่อมีปริมาณมากขึ้นจะทำให้อัตราการปล่อยอากาศซึมผ่านลดลง สำหรับเบนโทไนต์ (A) แม้จะมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นแต่ก็ไม่ทำให้ความสามารถปล่อยอากาศซึมผ่านเปลี่ยนแปลงมากนัก เมื่อต้องการความสามารถปล่อยอากาศซึมผ่านมีค่าสูง ปริมาณของน้ำ (B) เบนโทไนต์ (A) อยู่ในปริมาณสูง ในขณะที่ผงเปลือกมังคุด (C) อยู่ในปริมาณที่ต่ำ ในรูปที่ 5 เห็นได้ว่าปริมาณของน้ำ (B) ที่มีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นค่าความสามารถในการรับแรงอัดของแบบหล่อทรายขึ้นมีค่าต่ำลง แต่ตรงกันข้ามกับผงเปลือกมังคุด (C) มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นทำให้ค่าความสามารถในการรับแรงอัดของแบบหล่อทรายขึ้นมีค่าสูงขึ้น สำหรับเบนโทไนต์ (A) ไม่ได้ส่งผลต่อความสามารถในการรับแรงอัดของแบบหล่อทรายขึ้นมากนัก เมื่อต้องการค่าความสามารถในการรับแรงอัดของแบบหล่อทรายขึ้นมีค่าสูง ปริมาณของปริมาณของน้ำ (B) มีปริมาณต่ำ ในขณะที่

ผงเปลือกมังคุด (C) และเบนโทไนต์ (A) มีปริมาณสูง จากรายงานดังกล่าวข้างต้น แสดงให้เห็นว่าผงเปลือกมังคุดมีคุณสมบัติที่ส่งผลดีต่อค่าความแข็งแรงของหล่อทรายขึ้น ความสามารถทนแรงกดอัด และความสามารถในการปล่อยอากาศซึมผ่านในแบบหล่อทรายขึ้น ถ้าหากใส่ในปริมาณที่เหมาะสม แต่ถ้าหากมีปริมาณผงเปลือกมังคุดมากเกินไป จะทำให้ความสามารถทนแรงกดอัดได้มากขึ้น ความสามารถในการปล่อยอากาศซึมผ่านในชั้นลดลง ซึ่งเกิดจากสารแทนนินที่มีความเป็นกาวเหนียวเกาะยึดเม็ดทราย

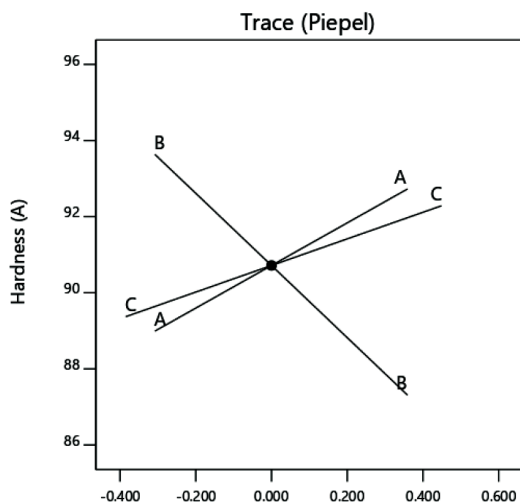
ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของความแข็งแรงทางอัดแบบหล่อทรายขึ้น ความสามารถในการปล่อยอากาศซึมผ่าน และค่าความแข็งแรงของแบบหล่อทรายขึ้น

สมบัติทางกลของแบบหล่อทราย	สมการถดถอย	R ²	R ² _{Adj.}
ค่าความแข็งแรงของแบบหล่อทรายขึ้น	= 9.63302A	0.78	0.74
	+ 7.89351B		
	+ 9.34576C		
ความสามารถปล่อยอากาศซึมผ่าน	= 3.86536A	0.85	0.74
	- 9.66262B		
	- 3.90851C		
	+ 3.25096AB		
	+ 0.408994AC		
ความแข็งแรงทางอัดแบบหล่อทรายขึ้น	+ 4.65101BC	0.86	0.76
	= 0.076368A		
	+ 0.074206B		
	+ 0.008031C		
	- 0.010857AB		
	+ 0.010089AC		
	+ 0.009848BC		

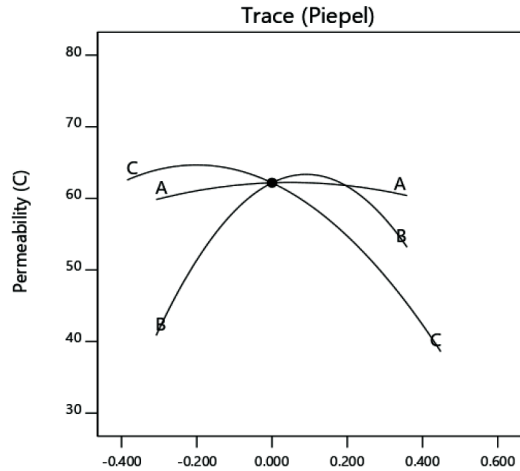
เมื่อนำสมการถดถอยในตารางที่ 3 มาสร้างกราฟเส้นโครงร่างพื้นผิวตอบสนอง (Contour Plot) ของความแข็งแรงทางอัดแบบหล่อทรายขึ้น ความสามารถ

ปล่อยอากาศซึมผ่าน และค่าความแข็งของแบบหล่อทรายขึ้น ซึ่งแสดงดังรูปที่ 6, 7 และ 8 ตามลำดับ จากการวิเคราะห์พบว่า เมื่อผงเปลือกมังคุดอยู่ในระดับสูง ในขณะที่น้ำอยู่ในระดับต่ำ ทำให้ความแข็งแรงทางอัด และค่าความแข็งของแบบหล่อทรายขึ้นมีค่าสูงขึ้น ส่วนผสมที่มีเบนโทไนต์และผงเปลือกมังคุดอยู่ในระดับต่ำ ในขณะที่น้ำอยู่ในระดับสูง ทำให้ความสามารถปล่อยอากาศซึมผ่านมีค่าสูงขึ้น

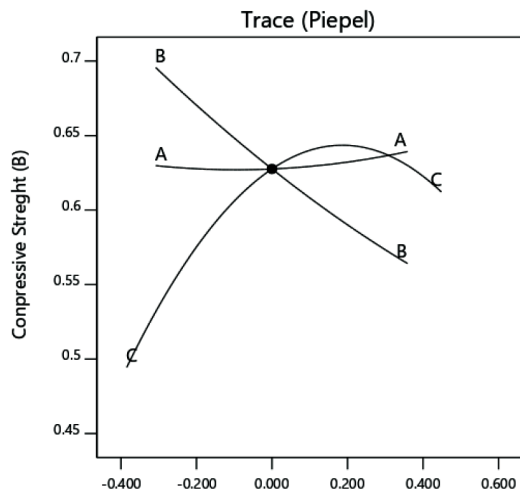
เมื่อนำผลการทดลองในตารางที่ 3 มาสร้างกราฟเส้นโครงร่างพื้นผิวตอบสนอง (Contour Plot) ของความแข็งแรงทางอัดแบบหล่อทรายขึ้น ความสามารถปล่อยอากาศซึมผ่าน และค่าความแข็งของแบบหล่อทรายขึ้น ซึ่งแสดงดังรูปที่ 6, 7 และ 8 ตามลำดับ จากการวิเคราะห์พบว่า เมื่อผงเปลือกมังคุดอยู่ในระดับสูง ในขณะที่น้ำอยู่ในระดับต่ำ ทำให้ความแข็งแรงทางอัด และค่าความแข็งของแบบหล่อทรายขึ้นมีค่าสูงขึ้น ส่วนผสมที่มีเบนโทไนต์และผงเปลือกมังคุดอยู่ในระดับต่ำ ในขณะที่น้ำอยู่ในระดับสูง ทำให้ความสามารถปล่อยอากาศซึมผ่านมีค่าสูงขึ้น



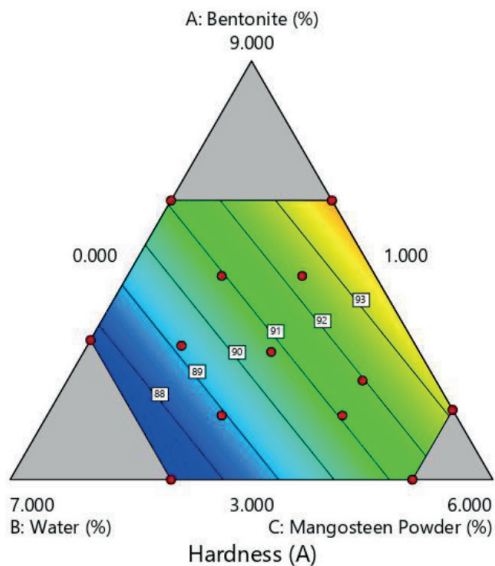
รูปที่ 3 กราฟ Trace ของค่าความแข็งของแบบหล่อทรายในขึ้น



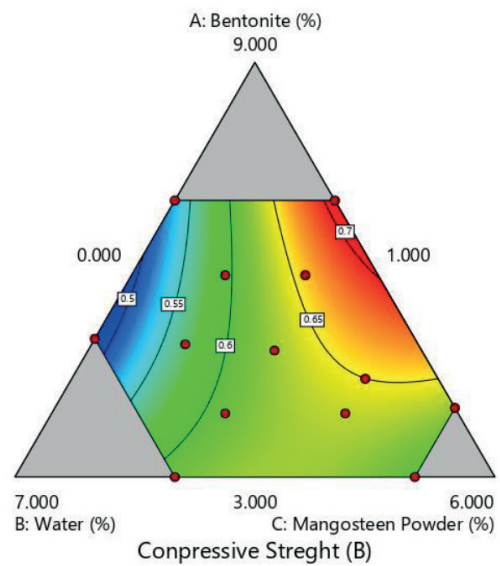
รูปที่ 4 กราฟ Trace ของความสามารถในการปล่อยอากาศซึมผ่านในขึ้น



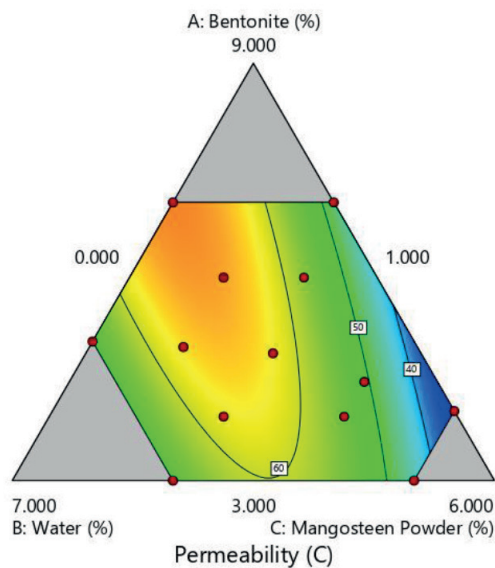
รูปที่ 5 กราฟ Trace ของความสามารถในการรับแรงอัดในขึ้น



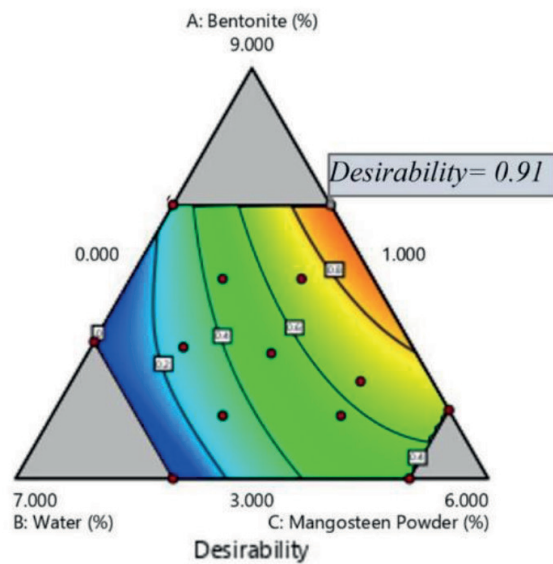
รูปที่ 6 เส้นโครงร่างของค่าความแข็งของ
แบบหล่อทรายขึ้น



รูปที่ 8 เส้นโครงร่างความแข็งแรงทางอัดแบบหล่อ
ทรายขึ้น



รูปที่ 7 เส้นโครงร่างความสามารถในการปล่อย
อากาศซึมผ่านในขึ้น



รูปที่ 9 เส้นโครงร่างของสมบัติแบบหล่อทรายขึ้น
ที่เหมาะสม

การวิเคราะห์ฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability, Des.) กำหนดให้ค่าความแข็งแรงของแบบหล่อทรายขึ้นความสามารถปล่อยอากาศซึมผ่านและความแข็งแรงทางอัดแบบหล่อทรายขึ้นมีค่าสูงที่สุด พบว่าส่วนผสมที่มีค่าความพึงพอใจมากที่สุด เท่ากับ 0.91 แสดงดังรูปที่ 9 คือ เบนโทไนต์ร้อยละ 7 น้ำร้อยละ 1 และผงเปลือกมุ้งร้อยละ 2 ซึ่งการหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดโดยให้ผลตอบสนองของความแข็งแรงทางอัดแบบหล่อทรายขึ้น ความสามารถในการปล่อยอากาศซึมผ่าน และค่าความแข็งแรงของแบบหล่อทรายขึ้นมีค่าผลตอบสนองที่เหมาะสมที่สุดร่วมกัน โดยการใช้เทคนิคการซ้อนทับกันของกราฟเส้นโครงร่างของผลตอบสนองแต่ละตัวมาวางซ้อนทับกัน (Overlay Plot) โดยกำหนดเงื่อนไขของค่าความแข็งแรงทางอัดแบบหล่อทรายขึ้นที่อยู่ในช่วง ประมาณ 0.65–0.95 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ค่าความสามารถในการปล่อยอากาศซึมผ่านอยู่ในช่วง 30–70 และค่าความแข็งแรงของแบบหล่อทรายขึ้นอยู่ในช่วง 70–90 Scale B ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานของแบบหล่อทรายที่ใช้สำหรับขึ้นงานหล่อทั่วไป [12] จากการวิเคราะห์พบว่า อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ระดับของส่วนผสมที่มี เบนโทไนต์ (A) ร้อยละ 7, น้ำ (B) ร้อยละ 1 และผงเปลือกมุ้ง (C) ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ซึ่งทำให้ได้ค่าความแข็งแรงทางอัดแบบหล่อทรายขึ้นประมาณ 0.71 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ค่าความสามารถในการปล่อยอากาศซึมผ่าน 47.36 และค่าความแข็งแรงของแบบหล่อทรายขึ้น 94.02 Scale B

ตารางที่ 4 แสดงเป้าหมายในการวิเคราะห์หาค่าตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับคุณสมบัติของแบบหล่อทรายขึ้น

No	A	B	C	Hard.	Perm	GSC.	Des.
1	7.00	1.00	2.00	94.02	0.71	47.36	0.91
2	3.50	1.50	5.00	0.61	38.60	47.36	0.60

4. สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม และการวิเคราะห์ผลทางสถิติเพื่อหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของแบบหล่อทรายขึ้น ทำให้สมบัติของแบบหล่อทรายขึ้นตรงตามความต้องการ โดยส่วนผสมของแบบหล่อทรายที่ทำการทดลองคือ ทรายที่ใช้งานแล้ว มีส่วนผสมที่ร้อยละ 90 โดยน้ำหนัก ในขณะเดียวกันใช้ส่วนผสมที่ประกอบด้วย เบนโทไนต์ น้ำ และผงเปลือกมุ้ง โดยมีเงื่อนไขข้อจำกัดอยู่ในหน่วยเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก คือ $3 < A < 7$, $1 < B < 5$ และ $0 < C < 5$ โดยที่ A, B และ C คือ เบนโทไนต์ น้ำ และผงเปลือกมุ้ง ตามลำดับ สมบัติของแบบหล่อทรายขึ้นที่ถูกนำมาประเมินหาส่วนผสมที่เหมาะสมของแบบหล่อทราย ได้แก่ ความแข็งแรงทางอัดแบบหล่อทรายขึ้น ความสามารถในการปล่อยซึมอากาศผ่าน และค่าความแข็งแรงของแบบหล่อทรายแบบหล่อทรายขึ้น ผลการวิเคราะห์พบว่า อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดประกอบด้วยส่วนผสมของทรายที่ใช้แล้ว ร้อยละ 90 เบนโทไนต์ร้อยละ 7 น้ำร้อยละ 1 และผงเปลือกมุ้งร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ซึ่งทำให้ได้ค่าของความแข็งแรงทางอัดแบบหล่อทรายขึ้น ความสามารถในการปล่อยซึมอากาศผ่าน และค่าความแข็งแรงของแบบหล่อทรายแบบหล่อทรายขึ้นที่ได้เท่ากับ 0.71 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร, 47.36 และ 94.02 Scale-B ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานของแบบหล่อทรายขึ้นที่ใช้ได้ผลสำหรับขึ้นงานหล่อทั่วไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ประณุต พรหมลักษณ์ หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ให้การสนับสนุนด้านทักษะการทำแบบหล่อทรายขึ้น และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ สำหรับการเอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือ อุปกรณ์ในการทำวิจัย มา ณ โอกาสนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Beeley, *Foundry technology*, 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001.
- [2] P.L. Jain, *Principles of foundry technology*, 5th ed. Tata McGraw-Hill Education, 2014.
- [3] R. Khuengpukheiw and Ch. Saikaew, "Effect of Molding Sand Compositions on Molding Sand Properties and Cast Iron Products," *KKU Research Journal*, vol. 15, no. 4, pp. 45-61, 2015.
- [4] A.P.I. Popoola, "Effect of molasses, cassava starch, and Arabic gum on mechanical strength of foundry core," *Journal of scientific and industrial research*, vol. 70, no. 12, pp. 1029-1032, Dec. 2011.
- [5] A. Islam, et al., "A review of recent developments on the regulatory, structural and functional aspects of gum Arabic," *Food Hydrocolloids*, vol. 11, no. 4, pp. 493-505, 1997.
- [6] C. Bhawat, "Factors affecting strategic marketing decisions in agriculture: a study of fruit farmers in Thailand," Ph.D. dissertation, Massey University, New Zealand, 2017.
- [7] P. Sirintorn, "(peels) Mangosteen" Department of Pharmaceutical Chemistry and Pharmacognosy faculty of Pharmaceutical Science, Naresuan University, Thailand, 2015.
- [8] Development Economic Review, vol.12 Department of Primary Industrial and mines. Ministry of industry. Thailand, 2016.
- [9] B. Pensuriya, *Tannin from leaves of guava, sugar apple, Mangosteen and mangosteen peels for silk natural mordant*, Bangkok: Kasetsart University Press, 2014.
- [10] Ch. Saikaew, and S. Wiengwiset, "Optimization of molding sand composition for quality improvement of iron castings," *Applied Clay Science*, vol. 67-68, pp. 26-31, Oct. 2012.
- [11] Ch. Saikaew, S. Wiengwiset and A. Sriboonruang, "Improving the properties of sand molds in the iron casting industry using mixture experiments," *KKU Research Journal*, vol. 16, no. 2, pp. 169-178, 2011.
- [12] S. Guharaja, A. Noorul Haq and K.M. Karuppannan, "Optimization of green sand casting process parameters by using Taguchi's method," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 30, no. 11-12, pp. 1040-1048, Feb. 2006.
- [13] R.R. Kundu and B.N. Lahiri, "Study and statistical modelling of green sand mold properties using RSM," *International Journal of Materials and Product Technology*, vol. 31, no. 2/3/4, pp. 143-158, Apr. 2008.
- [14] American Foundry Society, *Mold & Core Test Handbook*, 4th ed., North Penny Lane Schaumburg, 2015.

- [15] W. Meethom and Ch. Rujthinnakit
“Determining mixture components
of sand mold by using mixture design of
experiment: case study iron fitting
industry,” *RMUTP Research Journal*,
vol. 9, no. 2, pp. 74-84, Sep. 2015.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การลดการดูดซับน้ำมันในผลิตภัณฑ์หัวทอดด้วยเทคโนโลยี สนามไฟฟ้า

ชิดชนก มากจันทร์*

คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
450 ถนนสุพรรณบุรี-ชัยนาท ตำบลย่านยาว อำเภอสามชุก จังหวัดสุพรรณบุรี 72130

รับบทความ 13 มิถุนายน 2562 แก้ไขบทความ 23 เมษายน 2563 ตอรับบทความ 30 เมษายน 2563

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสนามไฟฟ้าร่วมกับกระบวนการทอดในผลิตภัณฑ์หัวจันทอดเพื่อลดปริมาณการดูดซับน้ำมัน ซึ่งสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองมีค่า 1-3 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร สร้างโดยใช้แรงดันสูงกระแสตรง 1,066 – 3,200 โวลต์ ที่จ่ายให้กับอิเล็กโทรดแบบสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอและไม่สม่ำเสมอที่มีฉนวนกันการเบรกดาวน ทำการวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์ของความสัมพันธ์ของการดูดซับน้ำมันของผลิตภัณฑ์หัวจันทอดเนื่องจากความชื้นมีผลต่อการดูดซับน้ำมันโดยตรง จากผลการทดลองพบว่า ค่าสนามไฟฟ้าที่มีผลต่อการลดความชื้นหัวจันทอดที่ดีที่สุดคือ สนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอที่สร้างจากแรงดันสูงกระแสตรง 3,200 โวลต์ ที่ค่าสนามไฟฟ้า 3 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร ที่ค่าเฉลี่ยผลต่างความชื้นที่ 0.6 กรัม จึงเลือกใช้สนามไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่สม่ำเสมอที่ 3 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร ในการทดลองร่วมกับกระบวนการทอดในผลิตภัณฑ์หัวจันทอด เพื่อลดการดูดซับน้ำมัน โดยทำการทอดที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที พบว่าสามารถลดการดูดซับน้ำมันได้ดีที่สุดร้อยละ 17.93 เมื่อเปรียบเทียบกับหัวจันทอดที่ไม่ผ่านสนามไฟฟ้า

คำสำคัญ : สนามไฟฟ้า; การดูดซับน้ำมัน; หัว; การทอด

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +666 4936 6398, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: chidchanok306@gmail.com

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Reduction of Oil Absorption in Chinese Water Chestnut Fry Product with Electric Field Technology

Chidchanok Markjan*

Faculty of Industrial Education, Rajamangala University of Technology Suvarnabumi
450 Suphanburi-Chainart Road, Yan Yao Sub-district, Sam Chuk District, Suphanburi Province 72130

Received 13 June 2019; Revised 23 April 2020; Accepted 30 April 2020

Abstract

This research is studying of an electric field combine with a frying process in a Chinese water chestnut product for reducing oil absorb. An electric field that is used in an experiment will have a stress from 1-3 kV/cm. This will be generated by using a direct current high Voltage from 1,066 to 3,200 V. which is distributed to an electrode in an uniform and non-uniform of an electric field. This will have a dielectric barrier discharge. There is an analysis for finding a relationship of a moisture on absorbing oil of a Chinese water chestnut fried product due to a moisture has an effect on absorbing oil directly. From an experimental result, this is found that the best electric field stress which will have an effect on reducing a moisture of a Chinese water chestnut is an non-uniform electric field form that is created from a direct current high voltage at 3,200 V. and this will have an electric field stress at 3 kV/cm. This will have an average of a difference of a moisture at 0.6 g. This will select to use a direct current non-uniform electric field at 3 kV/cm. In an experiment combine with a fried process in a Chinese water chestnuts fried product, this is done for reducing of absorbing oil. By this will fry at the temperature of 180°C for 5 minutes. This is found that this can reduce an absorbing of oil best at 17.93% when this has compared to a Chinese water chestnuts fried that hasn't passed an electric field.

Keywords : Electric Field; Oil Absorb; Chinese Water Chestnut; Frying

* Corresponding Author. Tel.: +66 6 4936 6398, E-mail Address: chidchanok306@gmail.com

1. บทนำ

แห้วจีน (Chinese Water Chestnut) เป็นแห้วที่นิยมปลูกและรับประทานมากที่สุดในประเทศไทย เนื่องจากมีหัวขนาดใหญ่ สีขาว และมีรสชาติหวาน สามารถแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลากหลาย แห้วจีนจึงถือเป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศไทย เนื่องจากมีคุณสมบัติและมีคุณค่าทางด้านโภชนาการ โดยในปี 2561 พบว่าปริมาณการปลูกแห้วประมาณ 2,000-5,000 ไร่ ให้ผลผลิต 4.5-6 ตันต่อไร่ ราคารับซื้อคิดเป็นมูลค่าแห้วดิบต่อไร่ 42,666.67 บาท/ไร่/ฤดูกาล หรือคิดเป็นมูลค่าโดยรวมประมาณ 85 ล้านบาท [1] เนื่องจากแห้วจีนให้ผลผลิตในปริมาณที่สูง และมีสถานะสินค้าแห้วจีนล้นตลาดในช่วงเดือนพฤศจิกายน-ธันวาคม ของทุกปีจากสถานะสินค้าแห้วจีนล้นตลาดทำให้เกิดสถานะราคาตกต่ำ เพื่อเป็นการลดปัญหาจากสถานะล้นตลาดของแห้วจีน จึงได้มีการนำแห้วจีนมาแปรรูปในรูปแบบต่างๆ เพื่อเพิ่มมูลค่า [2] เช่น การพัฒนาผลิตภัณฑ์แห้วทอดกรอบปรุงรสเพื่อศึกษาผลิตภัณฑ์แห้วทอดกรอบปรุงรสโดยการนำแห้วดิบมาหั่นด้วยเครื่องหั่น ในรูปแบบแนวขวางของผลซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทอดแห้ว คือ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที จะให้คุณภาพทางด้าน สี กลิ่น รสชาติ ดีที่สุด [3] การศึกษาองค์ประกอบทางเคมี และสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งพลาร์ และสตาร์ช จากแห้วจีน [4] การพัฒนาผลิตภัณฑ์แห้วทอดแบบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ด้วยวิธีการเตรียมแห้วก่อนทอด 3 วิธีคือ ต้ม นึ่ง และเชื่อม พบว่าค่าร้อยละความชื้น มีแนวโน้มลดลงถ้าเวลาในการทอดเพิ่มขึ้น แต่การทอดที่สถานะสุญญากาศจะก่อให้เกิดการหดตัวของเนื้อผลิตภัณฑ์ [5] จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่าสามารถสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับผลิตภัณฑ์แห้วจีนด้วยการแปรรูปได้หลากหลายรูปแบบรวมถึงกระบวนการอบแห้ง การต้ม การเชื่อม และรวมถึงการทอด เนื่องจากการแปรรูปอาหารด้านกระบวนการทอดยังคงได้รับความนิยมบริโภคกันอย่าง

แพร่หลายในปัจจุบันเนื่องจากลักษณะเนื้อสัมผัส กลิ่น และรสชาติที่ดี ถึงแม้ว่าการบริโภคอาหารทอดจะส่งผลเสียต่อสุขภาพ เนื่องจากการบริโภคน้ำมันในปริมาณที่มากขึ้นเกินความต้องการ และด้วยกระแสการใส่ใจสุขภาพของผู้บริโภคกันมากขึ้น จึงทำให้เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีการแปรรูปมาใช้พัฒนากระบวนการผลิตเพื่อเป็นทางเลือกใหม่ให้กับผู้บริโภค เช่น การวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการแปรรูปทุเรียนทอดชนิดเฟรนฟราย โดยทำการทอดที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ขึ้นไป ส่งผลให้การดูดซับน้ำมันของผลิตภัณฑ์มีค่าลดลง อีกทั้งปริมาณการดูดซับน้ำมันยังขึ้นกับปริมาณความชื้นที่สูญเสียขณะทอด โดยปริมาณการดูดซับน้ำมันเพิ่มขึ้นเมื่อสูญเสียความชื้นขณะทอดเพิ่มขึ้นแต่วิธีนี้ไม่ได้มีการลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ก่อนทอด ซึ่งหากผลิตภัณฑ์มีความชื้นสูงอาจส่งผลให้ปริมาณการดูดซับน้ำมันของผลิตภัณฑ์สูงตามไปด้วย [6] การศึกษาของสนามไฟฟ้าแบบพัลส์ต่อโครงสร้างและคุณภาพในการทอดของมันเทศ ซึ่งวิธีนี้พบว่าสนามไฟฟ้าที่ 1.2 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร สามารถลดการดูดซับน้ำมันในเนื้อมันเทศได้ร้อยละ 20 และสนามไฟฟ้ายังสามารถช่วยลดอุณหภูมิที่ใช้ทอด และลดระยะเวลาในการทอดลงได้ [7] การศึกษาผลของสนามไฟฟ้าแบบพัลส์ต่อคุณสมบัติการดูดซับน้ำมันของมันฝรั่งทอด ซึ่งวิธีนี้พบว่าที่ค่าสนามไฟฟ้า 0.75 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร สามารถลดปริมาณการดูดซับน้ำมันได้มากที่สุด โดยผลของ ความชื้น และ น้ำหนักที่สูญเสียขณะทอดไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ และสนามไฟฟ้าสามารถลดความเป็นสื่อน้ำตาลของมันฝรั่งได้ [8] ผลของเวลาในการนึ่งต่อคุณภาพและการดูดซับน้ำมันของข้าวเกรียบจากแป้งมันสำปะหลัง แต่วิธีนี้กระบวนการนึ่งก่อให้เกิดเจลาตินเซชัน ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของแป้งและน้ำส่งผลต่อการพองตัวของผลิตภัณฑ์ [9]

จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ในการศึกษาเทคนิคสนามไฟฟ้ากระแสตรงแบบสม่ำเสมอและไม่สม่ำเสมอร่วมกับกระบวนการทอดในแห้วจีน เพื่อลดปริมาณ

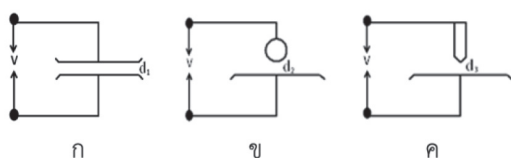
น้ำมันในหัวทอดและก่อให้เกิดความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในกระบวนการแปรรูปหัวจิ้นมากที่สุด เพื่อพัฒนาและแปรรูปผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรรูปแบบใหม่เพื่อการส่งออก และเป็นการนำผลผลิตทางการเกษตรในท้องถิ่นไทยมาใช้ให้เกิดประโยชน์ เพื่อเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจในท้องถิ่น และในเชิงอุตสาหกรรมอาหารอันนำไปสู่การยกระดับการส่งออกสินค้าอุตสาหกรรมเกษตรของประเทศไทยต่อไปในอนาคต

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 หลักการที่ใช้ในการออกแบบ

2.1.1 สนามไฟฟ้า [10]

สนามไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ และสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ซึ่งสนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย และสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง โดยลักษณะรูปแบบของสนามไฟฟ้านั้นจะขึ้นอยู่กับรูปทรงทางเรขาคณิตของอิเล็กโทรด โดยมีตัวแปรที่ใช้บ่งบอกลักษณะสนามไฟฟ้าคือ ค่าองค์ประกอบสนามไฟฟ้า หรือค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้า (Field Utilization Factor) ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ก) สนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ

ข) สนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย

ค) สนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอสูง

2.1.2 สนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ [10]

สนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอจะถูกสร้างจากอิเล็กโทรดแบบ ระนาบ-ระนาบ โดยความเข้มของสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอทุก ๆ จุดในช่องระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองจะมีค่าเท่ากัน ซึ่งจะสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ (1)

$$E_{\max} = E = \frac{V}{d \times \eta^*} \quad (1)$$

โดยที่

E = ความเครียดสนามไฟฟ้าที่จุดใด ๆ ระหว่างอิเล็กโทรด (V/cm)

V = แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าระหว่างอิเล็กโทรด (V)

d = ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (cm)

η^* = แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า (Field Utilization Factor)

$E_{\max}$ = ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด (V/m)

2.1.3 พลังงานพันธะ (Bond Energy)

พลังงานที่ใช้เพื่อสลายพันธะที่ยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมภายในโมเลกุล โดยโมเลกุลของน้ำมีพลังงานพันธะเท่ากับ 498.7 กิโลจูลต่อโมล

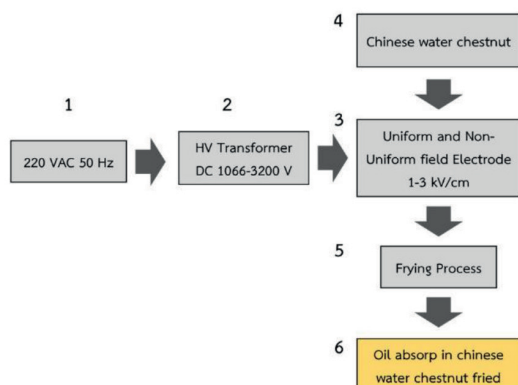
ตารางที่ 1 พลังงานพันธะของโมเลกุล [11], [12]

Bond	kJ/mol
H-O	428
H-OH	498.7
H-OCH ₂ CH ₃	436
H-OC ₆ H ₅	368
H-OCH ₃	436.8
H-OC(CH ₃) ₃	439
H-ONO	327.6

2.1 ขั้นตอนการวิจัย

2.1.1 ไตอะแกรมการทดลอง

รูปที่ 2 ลำดับขั้นตอนโดยรวมของการทดลอง หมายเลข 1 คือ แหล่งจ่ายแรงดันเมื่อจ่ายแรงดันกระแสสลับ 220 โวลต์, 50 เฮิร์ต ให้กับหม้อแปลงแรงดันสูงกระแสตรงในหมายเลข 2 ซึ่งจะแปลงเป็น

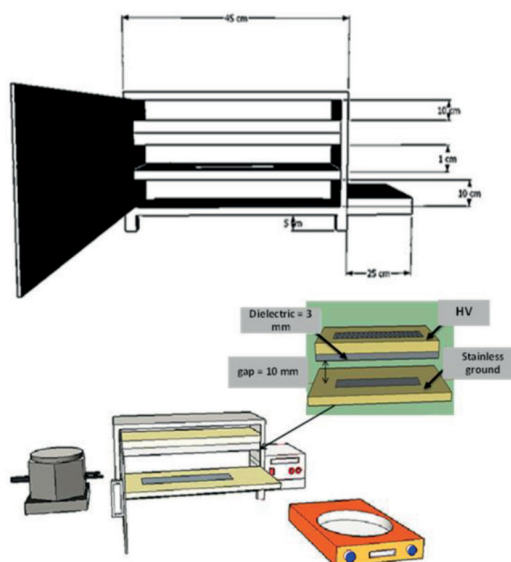


รูปที่ 2 ไดอะแกรมการทดลอง

แรงดันสูงตั้งแต่ 1,066-3,200 โวลต์ ให้กับชุดอิเล็กโทรดเพื่อสร้างสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอและแบบไม่สม่ำเสมอที่ความเครียดสนามไฟฟ้าตั้งแต่ 1-3 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร ในหมายเลข 3 จากนั้นนำหัวจีน ในหมายเลขที่ 4 ผ่านสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอและแบบไม่สม่ำเสมอภายในชุดอิเล็กโทรด และนำมาผ่านกระบวนการทอดในหมายเลข 5 และทำการวัดผลของการดูดซับน้ำมันของผลิตภัณฑ์แล้วทดสอบด้วยวิธีการทดสอบ AOAC (2016) ในหมายเลข 6

2.1.2 การกำหนดขนาดของชุดอิเล็กโทรด

จากรูปที่ 3 อิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดลอง โดยตัวนำไฟฟ้าชุดที่ 1 เป็นแผ่นสแตนเลสที่ใช้ในการสร้างสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอและ ตัวนำไฟฟ้าชุดที่ 2 เป็นเส้นลวดเพื่อใช้ในการสร้างสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอ ส่วนถัดมาคือฉนวนอะคริลิกหนา 3 มิลลิเมตรป้องกันการเกิดประกายไฟในช่องว่างอากาศ และฉนวนอากาศหนา 10 มิลลิเมตรใช้สำหรับจัดวางหัวจีนเพื่อให้สัมผัสกับสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอและแบบไม่สม่ำเสมอภายในชุดอิเล็กโทรดโดยไม่ซ้อนทับกัน ส่วนสุดท้ายคือกราวด์เป็นแผ่นสแตนเลส

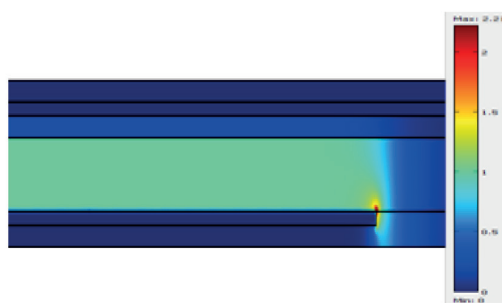


รูปที่ 3 อิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดลอง

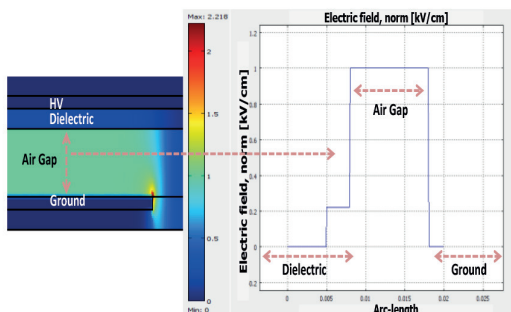
2.1.3 การวิเคราะห์ค่าแรงดันและสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบแรงดันสูงกระแสสลับที่ใช้ในการสร้างสนามไฟฟ้า 1-3 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร

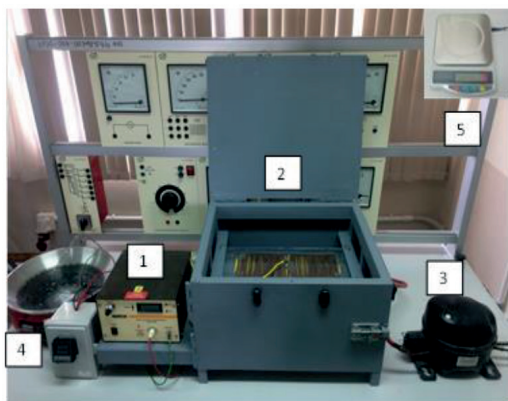
Electric Field (kV/cm)	High Voltage (V)
1	1066
2	2133
3	3200



รูปที่ 4 การกระจายสนามไฟฟ้าโดยโปรแกรม FEM



รูปที่ 5 ความเครียดสนามไฟฟ้าในช่องว่างอากาศ



รูปที่ 6 การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

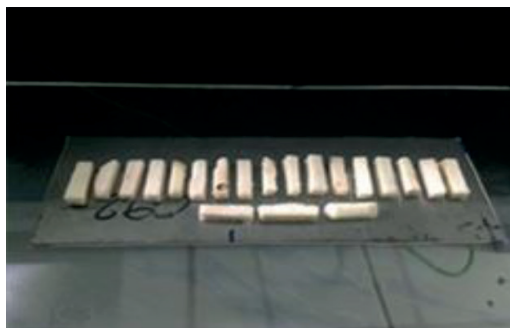
จากรูปที่ 4 แสดงการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอในช่องว่างอากาศภายในชุดอิเล็กโทรดด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method; FEM) โดยจะทำการแบ่งขอบเขตเนื้อที่ของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ

จากรูปที่ 5 ตัวอย่างการจำลองค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่ 1 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตรในช่องว่างอากาศโดยแกนนอนคือ ระยะความโค้ง และแกนตั้งคือ ค่าความเครียดสนามไฟฟ้า และเมื่อทำการป้อนค่าแรงดันสูงที่ 1,066 โวลต์ ดังตารางที่ 2, ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของผลเฉลยที่ 4.5 และค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของผลเฉลยที่ 1 ส่งผลให้ค่าสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอในช่องว่างอากาศภายในชุดอิเล็กโทรดมีค่าเท่ากับ 1 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร ซึ่งเป็นไปตามผลการเปรียบเทียบแรงดันสูงกระแสตรงที่ใช้ในการสร้างสนามไฟฟ้า ดังตารางที่ 2

จากรูปที่ 6 แสดงอุปกรณ์ชุดทดสอบสนามไฟฟ้าในการลดความชื้นหัวจิ้นร่วมกับกระบวนการทอดประกอบด้วยหมายเลข 1 หม้อแปลงแรงดันสูง กระแสตรงโดยแรงดันสูงที่สร้างขึ้นจะถูกจ่ายให้กับชุดอิเล็กโทรดแบบสม่ำเสมอและแบบไม่สม่ำเสมอในการลดความชื้นหัวจิ้นในหมายเลข 2 และคอมเพลกซ์เซอร์ ทำการกลั่นความชื้นออกจากระบบในหมายเลข 3 และนำหัวจิ้นที่ผ่านสนามไฟฟ้ามาทอดด้วยกระแสไฟฟ้าควบคุมอุณหภูมิน้ำมันด้วยเซนเซอร์ควบคุมอุณหภูมิในหมายเลข 4 ทำการชั่งน้ำหนักหัวจิ้นหลังผ่านการทอดด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด $0.0001 \text{ g} \pm 3\%$ ในหมายเลข 5

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

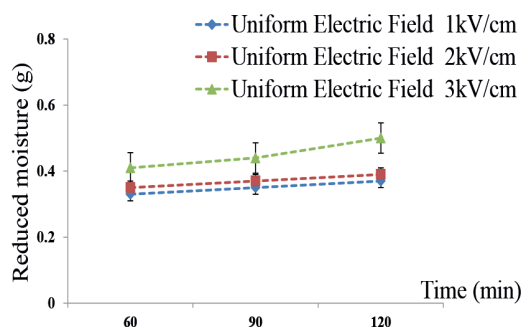
ค่าสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองคือ 1, 2 และ 3 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร ที่เวลา 60, 90 และ 120 นาที เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด $0.0001 \text{ g} \pm 3\%$ จากนั้นนำหัวจิ้นที่ผ่านสนามไฟฟ้ามาพร้อมกับกระบวนการทอดที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที โดยทุกการทดลองทำการทดลองจำนวน 5 ซ้ำ หาค่าเฉลี่ย และทำการวัดผลการดูดซับน้ำมันด้วยวิธีการทดสอบ AOAC (2016)



รูปที่ 7 ตัวอย่างหัวจิ้นที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3 ผลของสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอแรงดัน
สูงกระแสตรง 1-3 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร
ระยะเวลาในการลดความชื้น 60, 90 และ
120 นาที ต่อความชื้นน้ำหนักแห้งเงินเฉลี่ย
คงที่ ที่ 20 กรัม

ระยะเวลา ในการลด ความชื้น (นาที)	ค่าเฉลี่ยผลต่างความชื้น (กรัม)			S.D.
	1kV/cm	2kV/cm	3kV/cm	
60	0.33	0.35	0.41	0.02
90	0.35	0.37	0.44	0.02
120	0.37	0.39	0.5	0.05

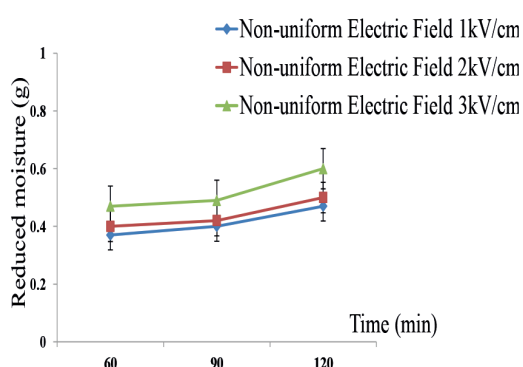


รูปที่ 8 ผลต่างความชื้นด้วยสนามไฟฟ้าแบบ
สม่ำเสมอกระแสตรงในเวลา 60, 90 และ 120 นาที

สนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอกระแสตรง 3 กิโล
โวลต์ต่อเซนติเมตร ที่เวลา 120 นาที มีค่าเฉลี่ยผล
ต่างของความชื้นที่ 0.5 กรัม

ตารางที่ 4 ผลของสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอแรงดัน
สูงกระแสตรง 1-3 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร
ระยะเวลาในการลดความชื้น 60, 90 และ
120 นาที ต่อความชื้นน้ำหนักแห้งเงินเฉลี่ย
คงที่ ที่ 20 กรัม

ระยะเวลา ในการลด ความชื้น (นาที)	ค่าเฉลี่ยผลต่างความชื้น (กรัม)			S.D.
	1kV/cm	2kV/cm	3kV/cm	
60	0.37	0.4	0.47	0.05
90	0.4	0.42	0.5	0.05
120	0.45	0.48	0.6	0.07

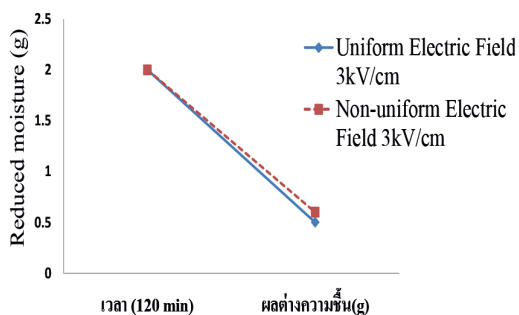


รูปที่ 9 ผลต่างความชื้นด้วยสนามไฟฟ้าแบบไม่
สม่ำเสมอกระแสตรงในเวลา 60, 90 และ 120 นาที

จากรูปที่ 9 สนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอ
กระแสตรง 3 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร ที่เวลา 120 นาที
มีค่าเฉลี่ยผลต่างของความชื้นมากที่สุดคือ 0.6 กรัม

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบผลต่างความชื้นที่ดีที่สุดในค่าสนามไฟฟ้า 3 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร แบบสม่ำเสมอและไม่สม่ำเสมอกระแสดตรง

ค่าสนามไฟฟ้า 3kV/cm	เวลา (นาท)	ผลต่างความชื้น (กรัม)
แบบสม่ำเสมอ	120	0.5
แบบไม่สม่ำเสมอ	120	0.6

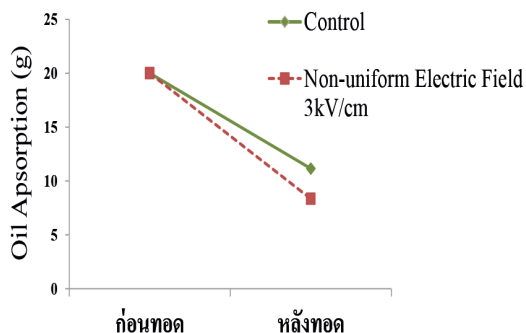


รูปที่ 10 เปรียบเทียบผลต่างความชื้นด้วยสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอและไม่สม่ำเสมอกระแสดตรงที่ 3 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร ที่เวลา 120 นาที

จากรูปที่ 10 ที่ค่าสนามไฟฟ้า 3 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร สนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอกระแสดตรงมีผลต่างความชื้นดีกว่าสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอร้อยละ 20 เนื่องจากที่ค่าพลังงานเท่ากันลักษณะสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอมีความเครียดสนามไฟฟ้าภายในชุดอิเล็กโทรดที่มากกว่าจึงส่งผลให้สามารถลดความชื้นในผลิตภัณฑ์ได้มากกว่า

ตารางที่ 6 ผลของค่าสนามไฟฟ้า 3 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร แบบไม่สม่ำเสมอกระแสดตรงที่ระยะเวลา 120 นาที ร่วมกับกระบวนการทอด 5 นาที น้ำหนักแห้งเงินเฉลี่ยคงที่ที่ 20 กรัม

กระบวนการทอด	ค่าน้ำหนักก่อน ทอดตั้งต้น (กรัม)	ค่าเฉลี่ยน้ำหนัก หลังทอด (กรัม)
ไม่ผ่านสนามไฟฟ้า	20	11.15
ผ่านสนามไฟฟ้า แบบไม่สม่ำเสมอ กระแสดตรงที่ 3kV/cm	20	8.35

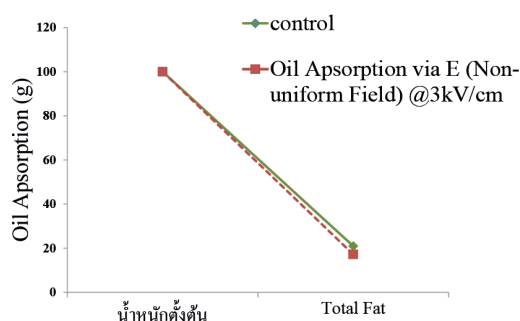


รูปที่ 11 น้ำหนักแห้งเงินก่อน-หลังทอดเมื่อผ่านสนามไฟฟ้าร่วมกับกระบวนการทอด

สรุปผลการทดลองแห้งเงินที่ผ่านการลดความชื้นด้วยสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอ 3 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร หลังจากร่วมกับกระบวนการทอดที่ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที มีค่าเฉลี่ยน้ำหนักหลังทอดน้อยกว่าเมื่อเทียบกับแห้งเงินที่ไม่ผ่านสนามไฟฟ้าคิดเป็นร้อยละ 25.11

ตารางที่ 7 ผลการดูดซับน้ำมันในผลิตภัณฑ์หัวจิ้น

ทอด	ค่าน้ำหนัก ตั้งต้น (กรัม)	ค่าเฉลี่ยผลการดูด ซับน้ำมัน (กรัม)
ไม่ผ่านสนามไฟฟ้า	100	20.97
ผ่านสนามไฟฟ้า แบบไม่สม่ำเสมอ กระแสตรงที่ 3kV/cm	100	17.21



รูปที่ 12 ผลการดูดซับน้ำมันในผลิตภัณฑ์หัวจิ้นทอด

จากรูปที่ 12 หัวจิ้นที่ผ่านการลดความชื้นด้วยสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอ 3 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร หลังจากร่วมกับกระบวนการทอดที่ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที มีผลการดูดซับน้ำมันเมื่อเทียบกับหัวจิ้นที่ไม่ผ่านสนามไฟฟ้าน้อยกว่าคิดเป็นร้อยละ 17.93 จากผลการทดลองสรุปได้ว่าหัวจิ้นที่ผ่านการลดความชื้นด้วยสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอ 3 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร มีอัตราการดูดซับน้ำมันหลังจากการทอดน้อยกว่าหัวจิ้นที่ไม่ผ่านสนามไฟฟ้า

จากการศึกษาที่ค่าสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอและไม่สม่ำเสมอกระแสตรง 3 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร ที่เวลา 120 นาที สนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอมีผลต่าง ความชื้นในเนื้อหามากกว่าสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ เนื่องจากลักษณะของสนามไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับรูปทรงทางเรขาคณิตของอิเล็กโทรด ซึ่งลักษณะสนามไฟฟ้า

แบบไม่สม่ำเสมอจะใช้แรงดันที่ง่ายให้กับชุดอิเล็กโทรดน้อยแต่มีความเครียดสนามไฟฟ้ามากกว่าแบบสม่ำเสมอ จึงมีการใช้พลังงานที่น้อยกว่า [10] โดยหากผลิตภัณฑ์เมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า โมเลกุลของความชื้นภายในผลิตภัณฑ์จะเคลื่อนที่ตามทิศทางที่เป็นขั้วบวกหรือลบในแนวตั้งฉากภายใต้สนามไฟฟ้าในชุดอิเล็กโทรดซึ่งเป็นไปตามหลักการพื้นฐานของทฤษฎีสถานไฟฟ้าโดยโมเลกุลความชื้นที่บริเวณผิวของผลิตภัณฑ์เมื่อได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าจะระเหยออกและส่งผลให้ความชื้นในผลิตภัณฑ์ลดลง ซึ่งเป็นไปตามหลักการลดความชื้นด้วยสนามไฟฟ้า [8], [13] และเมื่อนำหัวที่ผ่านสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอมา ร่วมกับกระบวนการทอดพบว่าสามารถลดการดูดซับน้ำมันในหัวทอดได้ถึงร้อยละ 17.93 เมื่อเทียบกับหัวที่ไม่ผ่านสนามไฟฟ้า ทั้งนี้อาจเป็นเพราะระหว่างกระบวนการทอดความร้อนจะทำให้ไขมันในผลิตภัณฑ์ระเหยกลายเป็นไอและพยายามออกมาที่ผิวของผลิตภัณฑ์จึงทำให้เกิดช่องว่างขึ้นภายในผลิตภัณฑ์ ในขณะเดียวกันน้ำมันจะเข้าไปแทนที่ปริมาณน้ำที่ระเหยออกและแทนที่ช่องว่างภายในผลิตภัณฑ์ทำให้ปริมาณน้ำมันเพิ่มขึ้นและมีความชื้นลดลง โดยผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นสูงจะทำให้เกิดช่องว่างในผลิตภัณฑ์และดูดซับน้ำมันได้มากกว่าผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นต่ำก่อนนำไปทอดซึ่งเป็นไปตามหลักการของกระบวนการทอดในผลิตภัณฑ์ [14], [15]

4. สรุป

ผลของค่าเฉลี่ยผลต่างความชื้นหัวจิ้นด้วยสนามไฟฟ้าก่อนนำไปทอด พบว่าลักษณะสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอ ที่ค่าสนามไฟฟ้า 3 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร ที่ระยะเวลา 120 นาที มีค่าเฉลี่ยผลต่างความชื้นของหัวจิ้นมากที่สุดคือ 0.6 กรัม และเมื่อเปรียบเทียบกับหัวจิ้นที่ผ่านสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอพบว่าหัวจิ้นที่ผ่านสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอมีค่าเฉลี่ยผลต่างความชื้นหัวจิ้นที่ดีกว่า

สนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอคิดเป็นร้อยละ 20 และเมื่อนำหัวจิ้นที่ผ่านการลดความชื้นด้วยเทคนิคสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอกระแสตรงที่ 3 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร ที่ระยะเวลา 120 นาที่ ร่วมกับกระบวนการทอดที่ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที่ พบว่าหัวจิ้นที่ผ่านกระบวนการลดความชื้นด้วยสนามไฟฟ้า มีผลการดูดซับน้ำมันที่น้อยกว่าหัวจิ้นทอดที่ไม่ผ่านสนามไฟฟ้าคิดเป็นร้อยละ 17.93

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะกรรมการศาสตราจารย์สุพจน์พรหมบุรี และภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อำนวยความสะดวกในการใช้อุปกรณ์ในการทำวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] W. Nakmai, S. Kaewkerd and B. Nirasok, "Analysis of cost and return of truffle growing in Amphoe Si Prachan. Suphanburi Province," in *Proceeding of the 9th Hatyai National and International Conference*, 2018, pp. 516-526.
- [2] Department of International Trade Promotion (DITP), "Agricultural product processing in Vietnam," *AEC Business Support Center, Report Publication*, pp. 1-18, Sep. 2018.
- [3] Ch. Chatrarasanam, S. Kosum and A. Charernchai, "The Development of Seasoned Water Chestnut Chips Product," *Acad. J. Kalasin Rajabhat University*, vol. 2, no. 1, pp. 54-63, Jun. 2012.
- [4] P. Rujirapisit, *Chemical Composition and Physico-Chemical Properties of chinese water chestnut (Eleocharisdulcis Trin.) Flour and Starch*, Bangkok: University of the Thai Chamber of Commerce, 2006.
- [5] K. Tengpongsathon, Ch. Trasinchai, T. Jongyingjaroen and U. Sukjaroen, *Product development of chinese water chesnut chip by vacuum frying*, Bangkok: King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Central library, 2013.
- [6] P. Limpisathian, A. Pisanwacharin P. Wisarnthanon, N. Photasin and Ch. Tinawong, *Research and Development of French Fry Durian Processing Technology*, Bangkok: Postharvest and Processing Research and Development division, 2006.
- [7] T. Liu, E. Dodds, S.Y. Leong, G.T. Eyres, D.J. Burritt and I. Oey, "Effect of pulsed electric fields on the structure and frying quality of "kumara" sweet potato tubers," *Innovative food Science and Engineering Technologies*, vol. 39, pp. 197-208, Feb. 2016.
- [8] A. Ignat, L. Manzocco, N. P. Brunton, M. C. Nicoli and J. G. Lyng, "The effect of pulsed electric field pre-treatments prior to deep-fat frying on quality aspects of potato fries," *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, vol. 29, pp. 65-69, May 2015.
- [9] S. Rattanapan and Ch. Inprasit, "Effect of Steaming Time on Qualities of Tapioca Crackers (Khaowgriab)," *Journal of*

- Science and Technology*, vol. 26, no. 3, pp. 532-543, 2018.
- [10] E. Kuffel, W. S. Zaengl and J. Kuffel, *High-voltage engineering : fundamentals*, 2nd ed, Butterworth-Heinemann published, 2000.
- [11] S. Leejongpermpoon and S. Potivejkul, "A study effect of electric field to reduce emission gas from the gasoline cars," in *Proceeding of The 33rd Electrical Engineering Conference (EECON - 33)*, Chiang Mai, Thailand, 2010, pp. 305 -308.
- [12] J. A. Robinson, M. A. Bergougnou, W. L. Cairns, G. S. P. Castle, and I. I. Inculet, "Breakdown of air over a water surface stressed by a perpendicular alternating electric field," in *Conference Record of 1998 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Third IAS Annual Meeting (Cat. No.98CH36242)*, St. Louis, MO, USA, 1998, vol. 3, pp. 1820–1827.
- [13] Ch. Markjan, S. Leejongpermpoon and Ch. Boonreung, "A Study of Effect of DC and AC Electric Field to Reduce Moisture Content of Macadamia In-Shell Nuts," *RMUTSB Academic Journal*, vol. 7, no. 1, pp.52-62, 2019.
- [14] G.R. Moreira, M.E. Castell-Perez and M.A. Berrufet, *Deep - Fat Frying*, Aspen Publishers, Inc., Gaithersburg, Maryland, 1999.
- [15] R. Rattanathammawat, Th. Suwonsichon, P. Chompreeda, K. Sriroth and V. Haruthaithanasan, "Effect of moisture content of half-snacks and frying time on physicochemical properties of taro flour snack," in *Proceeding of 41th Kasetsart University Annaul Conference: Agro-Industry*, Bangkok, Thailand, 2003, pp. 45-52.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของกลุ่มบก

สุรัชนา ดาทอง และ สุธีรา มณีฉาย*

ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

รับบทความ 2 ธันวาคม 2562 แก้ไขบทความ 28 เมษายน 2563 ตอรับบทความ 30 เมษายน 2563

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระจากกลุ่มบก โดยนำใบ ดอก และกิ่งมาสกัดด้วยวิธีการสกัดแบบต่อเนื่องโดยใช้เครื่องสกัดแบบซอกหักเล็ก เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ใช้ตัวทำละลาย 3 ชนิด ได้แก่ เอทานอล ไดคลอโรมีเทน และเอทิลอะซิเตต การศึกษาพบว่าใบมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงสุด ซึ่งใบที่สกัดด้วยเอทานอลมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิก (157.13 ± 0.32 มิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อกรัมสารสกัดและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH (IC_{50} 1.49 ± 0.02 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) ABTS (IC_{50} 0.84 ± 0.01 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) สูงสุด ผลของตัวทำละลายพบว่าสารสกัดเอทานอลมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและปริมาณสารประกอบฟีนอลิกสูงสุด สำหรับปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์ เอทิลอะซิเตตให้ปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์สูงสุด ซึ่งปริมาณสารประกอบฟีนอลิกจะมีความสัมพันธ์กับฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์ไม่มีความสัมพันธ์กับฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ

คำสำคัญ กลุ่มบก; ปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์; ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก; ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +669 632 4549, อีเมล: suthira.m@msu.ac.th

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Antioxidant Activities of *Crateva adansonii* DC. subsp. *trifoliata* (Roxb) Jacobs

Suratchana Dathong and Suthira Maneechai*

Faculty of Science, Mahasarakham University

Khamriang Sub-district, Kantarawichai District, Mahasarakham 44150

Received 2 December 2019; Revised 28 April 2020; Accepted 30 April 2020

Abstract

The aim of this research was determine total phenolic content, total flavonoid content and antioxidant activity by DPPH and ABTS assay from leaves, flower and stem of *Crateva adansonii* DC. subsp. *trifoliata* (Roxb) Jacobs that was extracted by Soxhlet method using ethanol, dichloromethane and ethyl acetate as solvent. Leaves extract showed the highest total phenolic content and antioxidant activity. Ethanolic leaf extract showed the highest total phenolic content (157.13±0.32 mg GAE/g extract) and antioxidant activity by DPPH assay (53.64±3.78% (IC₅₀ = 1.49±0.02 mg/ml)) and ABTS assay (76.51±0.97% (IC₅₀ = 0.84±0.01 mg/ml)). When we considering solvent effect found that ethanolic extract showed the highest total phenolic content and antioxidant activity. Total flavonoid content, ethyl acetate extract showed the highest total flavonoid content. Total phenolic content significantly correlated with antioxidant activity.

Keywords : *Crateva adansonii* DC. subsp. *trifoliata* (Roxb) Jacobs; Total Flavonoid Content; Total Phenolic Content; Antioxidant Activity

* Corresponding Author. Tel.: +669 632 4549, E-mail Address: suthira.m@msu.ac.th

1. บทนำ

อนุมูลอิสระคืออะตอมหรือโมเลกุลที่มีอิเล็กตรอนโดดเดี่ยวหรือไม่ครบคู่อยู่ในวงรอบของอะตอมจัดเป็นโมเลกุลที่ไม่เสถียร ต้องไปแย่งจับกับอิเล็กตรอนของโมเลกุลอื่น และว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี ส่งผลต่อการทำลายโมเลกุลอื่นๆ ต่อเนื่องกันเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ อนุมูลอิสระมีแหล่งกำเนิดทั้งจากปัจจัยภายในและภายนอกร่างกาย โดยปกติอนุมูลอิสระเกิดขึ้นโดยปฏิกิริยาในร่างกายอยู่แล้วและมีระบบกำจัดอนุมูลอิสระออกไป แต่ร่างกายได้รับสารอนุมูลอิสระจากปัจจัยภายนอกมากขึ้นไปเช่น รังสียูวี คาร์บอนไฟเบอร์ มลพิษต่างๆ อาจส่งผลเสียต่อสุขภาพ ซึ่งปัจจุบันแสงแดดและมลภาวะส่งผลให้มีอนุมูลอิสระเพิ่มมากขึ้น อนุมูลอิสระเป็นสาเหตุและทำให้เกิดความเสี่ยงในการเกิดโรค มะเร็งโรคหัวใจ โรคหลอดเลือดหัวใจอุดตัน และยังมีบทบาทสำคัญในการเกิดริ้วรอยก่อนวัยด้วย [1]

สารต้านอนุมูลอิสระมี 2 กลุ่มคือ สารต้านอนุมูลอิสระสังเคราะห์และสารต้านอนุมูลอิสระจากธรรมชาติ สารต้านอนุมูลอิสระที่ได้จากธรรมชาติเป็นสารประกอบกลุ่มโพลีฟีนอล แคโรทีนอยด์และฟลาโวนอยด์ เป็นต้น ซึ่งสามารถพบได้ในพืช ผัก และผลไม้ สารประกอบฟลาโวนอยด์ จัดอยู่ในกลุ่มสารประกอบฟีนอลิก ประเภทโพลีฟีนอล สูตรโครงสร้างเป็นวงแหวนแอโรมาติก แบบ C6-C3-C6 ส่วนใหญ่มักพบอยู่ร่วมกับน้ำตาล ในรูปของสารประกอบไกลโคไซด์ โดยสารประกอบกลุ่มโพลีฟีนอลมีสรรพคุณหลายด้าน เช่น ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ฤทธิ์ต้านมะเร็ง ฤทธิ์ต้านการอักเสบ โรคหัวใจและระบบไหลเวียนของโลหิต [2] โดยกลุ่มบก (*Crateva adansonii* DC. subsp. *trifoliata* (Roxb.) Jacobs) เป็นพืชที่อยู่ในวงศ์ Capparaceae กลุ่มบก พบว่าพืชในสกุลนี้หลายชนิดมีการนำไปใช้เป็นพืชสมุนไพรและมีการศึกษาฤทธิ์ทางชีวภาพที่สำคัญ เช่น การศึกษาสารพฤกษเคมีและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ *Crataeva magna* Lour DC [3], [4] นอกจากนี้ยังมีการศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระจาก

เปลือกต้น *Crateva adansonii* DC. [5] และมีการศึกษาสารพฤกษเคมี ความเป็นพิษจากเปลือกและใบของต้น *C. adansonii* DC. [6] พบสาร Lupeol ที่แยกจากใบ สารนี้สามารถต้านอนุมูลอิสระได้ดี [7] และสารสกัดจากใบสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ได้ [8] นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยการศึกษาสารพฤกษเคมีและฤทธิ์ยับยั้งเซลล์มะเร็งจากสารสกัด *Crateva nurvala* พบว่ามีฤทธิ์ต้านการเจริญของเซลล์มะเร็งตับได้ดี [9] และสารสกัดจากเปลือก *Crateva religiosa* พบว่ามีฤทธิ์ยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ [10] จะเห็นได้ว่าพืชในสกุลนี้มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและฤทธิ์อื่นๆที่ดี แต่ยังไม่มีการศึกษาสารสกัดจากกลุ่มบก ดังนั้นงานวิจัยในครั้งนี้ จะทำการศึกษาสารประกอบฟีนอลิก สารประกอบฟลาโวนอยด์และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ เพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการเพิ่มคุณค่าของพืชสมุนไพรไทยให้มากขึ้น สามารถนำมาพัฒนาและประยุกต์ใช้ทางด้านอื่นๆ ต่อไป

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 ตัวอย่างพืชและวิธีเตรียมสารสกัด

เก็บตัวอย่างกลุ่มบกจากเขตพื้นที่จังหวัดสุรินทร์ ตรวจเอกลักษณ์ด้วยรูปวิธานและเก็บตัวอย่างพรรณไม้แห้งไว้ที่ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม (หมายเลข MSUT_7072) นำส่วนต่างๆ ของกลุ่มบกซึ่งได้แก่ใบ ดอก และกิ่ง มาทำเป็นชิ้นเล็กแล้วทำให้แห้งโดยการตากแดดและอบในตู้อบลมร้อนอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จนตัวอย่างแห้งสนิท จากนั้นนำมาบดโดยใช้เครื่องบดแบบหยาบ ซึ่งตัวอย่างพืช 50 กรัม การเตรียมสารสกัดโดยใช้เครื่องสกัดแบบซอท์กเลท ซึ่งเป็นการสกัดแบบต่อเนื่อง ใช้ตัวทำละลาย 3 ชนิด ได้แก่ เอทานอล เอทิลอะซิเตต และไดคลอโรมีเทน ทำการสกัดเป็นเวลา 4 ชั่วโมง กรองและระเหยตัวทำละลายและหาปริมาณร้อยละของสารสกัด (% yield) ดังสูตร

$$\text{ผลผลิตร้อยละ} = \frac{\text{ผลผลิตจริง}}{\text{ผลผลิตตามทฤษฎี}} \times 100 \quad (1)$$

2.2 การวิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบฟีนอลิก (Total Phenolic Content)

การวิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกใช้วิธี Folin-Ciocalteu [11] ทำได้โดยการผสมสารสกัด 400 ไมโครลิตร กับสารละลาย Na_2CO_3 1.6 มิลลิลิตร (เตรียมได้จาก Na_2CO_3 7.5% ในน้ำ DI) เติมน้ำ Folin-Ciocalteu 2 มิลลิลิตร (เจือจาง 10 เท่าในน้ำ DI) แล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 765 นาโนเมตร โดยใช้เครื่อง Spectrophotometer ทำตัวอย่างละ 3 ซ้ำ ใช้กรดแกลลิกเป็นสารมาตรฐาน นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณสารประกอบฟีนอลิก โดยเทียบกับกราฟมาตรฐานของกรดแกลลิก แสดงผลในหน่วย มิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อกรัมสารสกัด

2.3 การวิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์ (Total Flavonoid Content)

การวิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์ใช้วิธี Aluminium Chloride Colorimetric [12] ทำได้โดยผสมสารละลายสกัดความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร กับ 95% เอทานอล ปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร แล้วเติม 10% Aluminium Chloride ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันและเติม 1 โมลาร์ Potassium Acetate ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตรสุดท้าย 5 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 415 นาโนเมตร โดยใช้เครื่อง Spectrophotometer ทำตัวอย่างละ 3 ซ้ำ ใช้เคอร์ซีตินสารมาตรฐาน นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์โดยเทียบ

กับกราฟมาตรฐานของเคอร์ซีติน แสดงผลในหน่วย มิลลิกรัมสมมูลของเคอร์ซีตินต่อกรัมสารสกัด

2.4 การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH Assay

เตรียมสารละลาย DPPH ความเข้มข้น 100 ไมโครโมลาร์ ในสารละลายเมทานอล นำสารละลาย DPPH ปริมาตร 180 ไมโครลิตร และสารสกัดปริมาตร 20 ไมโครลิตร จากนั้นผสมให้เข้ากันโดยให้ปริมาตรสุดท้ายเท่ากับ 200 ไมโครลิตร บ่มสารละลายในที่มืด อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 20 นาที นำสารละลายมาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร ใช้เมทานอลเป็น Blank [13]

ใช้วิตามินซีเป็นสารมาตรฐาน (ความเข้มข้น 0.0625 – 0.00195 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) บันทึกผลค่าการดูดกลืนแสงและคำนวณหาค่า % inhibition จากสมการ

$$\% \text{ inhibition} = [(A_B - A_E)/A_B] \times 100 \quad (2)$$

โดยที่

A_B คือ ค่าดูดกลืนแสงของ blank และ A_E ค่าดูดกลืนแสงของสารสกัด

ABTS Assay

เตรียมสารละลาย ABTS•+ ได้จากการนำ ABTS ละลายด้วยน้ำ DI ให้ได้ความเข้มข้น 7 มิลลิโมลาร์ แล้วนำสารละลาย ABTS มาผสมกับสารละลาย 2.45 มิลลิโมลาร์ $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ ในอัตราส่วนสารละลาย ABTS 1 ส่วนต่อ $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 2 ส่วน นำไปตั้งไว้ในที่มืดที่สภาวะอุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 12-16 ชั่วโมง จากนั้นนำสารละลาย ABTS•+ มาเจือจางด้วยเอทานอลและนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 734 นาโนเมตร ให้ได้ค่าการดูดกลืนแสงเท่ากับ 0.7 ± 0.02

นำสารละลาย ABTS•+ ปริมาตร 280 ไมโครลิตร และสารสกัดตัวอย่างปริมาตร 20 ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากัน บ่มสารละลายในที่มืดที่สภาวะอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 นาที แล้วนำสารละลายมาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 743 นาโนเมตร และใช้เอทานอลเป็น Blank [14]

ใช้วิตามินซีเป็นสารมาตรฐาน (ความเข้มข้น 0.125 – 0.003906 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) บันทึกผลค่าการดูดกลืนแสงและคำนวณค่า % Inhibition

การวิเคราะห์ข้อมูลจะใช้สถิติพื้นฐาน ได้แก่ การหาค่าเฉลี่ย (%) การหาค่าเฉลี่ย (x) การหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ด้วยโปรแกรมไมโครซอฟต์เอ็กเซล (Microsoft Excel) การวิเคราะห์ความแปรปรวน

3.2 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก

การศึกษาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกมีกรดแกลลิกเป็นสารมาตรฐาน คำนวณหาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกโดยเทียบกับกราฟมาตรฐานของกรดแกลลิก โดยคำนวณได้จากกราฟมาตรฐานกรดแกลลิก ($Y=0.016x+0.0186$; $r^2=0.999$) จากผลการทดลองในตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างพืชที่สกัดด้วยเอทานอลมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกสูงที่สุด พืชที่สกัดด้วยไดคลอโรมีเทนมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสารสกัดจากใบ ดอก และกิ่ง พบว่าสารสกัดจากใบมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกที่มากที่สุด รองลงมาคือสารสกัดจากกิ่ง และสารสกัดจากดอกมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกต่ำที่สุด

ตารางที่ 1 ปริมาณของสารสกัดที่ได้จากการสกัดด้วยตัวทำละลาย 3 ชนิด

ส่วนของพืช	ปริมาณสารสกัด					
	เอทานอล		ไดคลอโรมีเทน		เอทิลอะซิเตต	
	น้ำหนักสารสกัด (กรัม)	ร้อยละน้ำหนักสุทธิ	น้ำหนักสารสกัด (กรัม)	ร้อยละน้ำหนักสุทธิ	น้ำหนักสารสกัด (กรัม)	ร้อยละน้ำหนักสุทธิ
ใบ	4.50±0.07	9.01±0.15	1.71±0.29	3.43±0.58	1.51±0.06	3.02±0.12
ดอก	8.14±0.36	16.29±0.72	1.45±0.03	2.90±0.05	0.98±0.13	1.97±0.25
กิ่ง	1.14±0.11	2.27±0.23	0.30±0.01	0.60±0.01	0.30±0.03	0.60±0.07

ของค่าเฉลี่ยใช้การวิเคราะห์ One-way ANOVA และคำนวณค่าสหสัมพันธ์ (Correlation) ใช้ด้วยโปรแกรม SPSS

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ปริมาณสารสกัดจากส่วนต่างๆ ของกุ่มบก

การหาปริมาณร้อยละน้ำหนักสุทธิของสารสกัดพบว่า ส่วนของดอกที่สกัดด้วยเอทานอลมีปริมาณร้อยละน้ำหนักสุทธิต่ำที่สุดคือ 16.29±0.72% เมื่อพิจารณาจากทั้ง 3 ตัวทำละลายพบว่า เอทานอลให้ปริมาณร้อยละน้ำหนักสุทธิต่ำที่สุด รองลงมาคือ ไดคลอโรมีเทน และเอทิลอะซิเตตตามลำดับ (ตารางที่ 1)

3.3 ปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์

การหาปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์โดยเทียบกับกราฟมาตรฐานของเคอร์ซีติน คำนวณได้จากกราฟมาตรฐานของเคอร์ซีติน ($Y=0.0125x+0.0007$; $r^2=0.999$) จากผลการทดลองในตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างใบที่สกัดด้วยเอทิลอะซิเตตมีปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์สูงที่สุด เท่ากับ 112.71±0.54 mg QE/g extract แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างพืชที่สกัดด้วยเอทิลอะซิเตตมีปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์สูงที่สุด พืชที่สกัดด้วยเอทานอลมีปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์ต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสารสกัด

จากใบ ดอก และกิ่ง พบว่าสารสกัดจากใบมีปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์มากที่สุด รองลงมาคือสารสกัด

จากกิ่ง และสารสกัดจากดอกมีปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์ต่ำที่สุด

ตารางที่ 2 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์จากส่วนต่างๆของพืชในตัวทำละลายที่แตกต่างกัน

ส่วนของพืช	ตัวทำละลาย	Total phenolic Content (มิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อกรัม สารสกัด)	Total Flavonoid Content (มิลลิกรัมสมมูลของเคอร์ซีตินต่อกรัม สารสกัด)
ใบ	เอทานอล	157.13±0.32 ⁱ	32.99±0.42 ^c
	ไดคลอโรมีเทน	35.75±0.31 ^b	87.00±0.39 ^e
	เอทิลอะซิเตต	40.12±0.31 ^d	112.71±0.54 ⁱ
ดอก	เอทานอล	62.85±0.44 ^f	25.91±0.23 ^b
	ไดคลอโรมีเทน	24.07±0.29 ^a	85.82±0.39 ^d
	เอทิลอะซิเตต	38.72±0.23 ^c	89.53±0.24 ^f
กิ่ง	เอทานอล	81.49±0.30 ^h	6.97±0.41 ^a
	ไดคลอโรมีเทน	43.89±0.14 ^g	106.01±0.92 ^h
	เอทิลอะซิเตต	69.62±0.30 ^e	102.46±0.24 ^g

หมายเหตุ : แสดงค่าเป็น Mean±SD , n=3

: ตัวอักษร a, b, c, d, e, f, g, h และ i ที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

3.4ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่ทดสอบด้วยวิธี DPPH

การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH ใช้สารสกัดความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ถ้าสารสกัดมีร้อยละการยับยั้งอนุมูลอิสระมากกว่า 50% จะนำมาหาค่า IC₅₀ (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) ใช้วิตามินซีเป็นสารมาตรฐาน แสดงผลในตารางที่ 3 ผลการทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH พบว่าสารสกัดจากใบที่สกัดด้วยเอทานอลมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระดีที่สุด ร้อยละการยับยั้งอนุมูลอิสระ เท่ากับ 53.64±3.78% (IC₅₀ เท่ากับ 1.49±0.02 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) รองลงมาคือ สารสกัดจากดอกและกิ่งที่สกัดด้วยเอทานอล (ร้อยละการยับยั้งอนุมูลอิสระ เท่ากับ 18.02±1.56% และ 17.06±1.29% ตามลำดับ) โดยสารที่สกัดจากใบด้วยเอทิลอะซิเตตและสารที่สกัดจากดอกด้วยไดคลอโร

มีเทนมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระต่ำที่สุด สารมาตรฐานวิตามินซีมีค่า IC₅₀ เท่ากับ 0.05±0.00 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร โดยเมื่อนำปริมาณสารประกอบฟีนอลิกกับฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่ทดสอบด้วยวิธี DPPH มาหาค่าสหสัมพันธ์ พบว่ามีความสัมพันธ์กันในทางบวกโดยมีค่า Correlation Coefficient (r) เท่ากับ 0.969

3.5ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่ทดสอบด้วยวิธี ABTS

การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ABTS ใช้สารสกัดความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ถ้าสารสกัดมีร้อยละการยับยั้งอนุมูลอิสระมากกว่า 50% จะนำมาหาค่า IC₅₀ (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) ใช้วิตามินซีเป็นสารมาตรฐาน แสดงผลในตารางที่ 3 ผลการทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ABTS พบว่าสารสกัดจาก

ใบที่สกัดด้วยเอทานอลมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระดีที่สุด มีร้อยละการยับยั้งอนุมูลอิสระ เท่ากับ $76.51 \pm 0.97\%$ (IC_{50} เท่ากับ 0.84 ± 0.01 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) รองลงมาคือ สารสกัดจากกิ่งและดอกที่สกัดด้วยเอทานอล (ร้อยละการยับยั้งอนุมูลอิสระ เท่ากับ $40.19 \pm 0.99\%$ และ $31.76 \pm 1.21\%$ ตามลำดับ) สารสกัดจากกิ่ง ใบ และดอกที่สกัดด้วยไดคลอโรมีเทนมีฤทธิ์ต้านอนุมูล

อิสระต่ำที่สุด สารมาตรฐานวิตามินซีมีค่า IC_{50} เท่ากับ 0.06 ± 0.00 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร เมื่อนำปริมาณสารประกอบฟีนอลิกกับฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่ทดสอบด้วยวิธี ABTS มาหาค่าสหสัมพันธ์ พบว่ามีความสัมพันธ์กันในทางบวกโดยมีค่า Correlation Coefficient (r) เท่ากับ 0.961

ตารางที่ 3 ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดที่ทดสอบด้วยวิธี DPPH และ ABTS

ส่วนของพืช	ตัวทำละลาย	DPPH		ABTS	
		ร้อยละการยับยั้งอนุมูลอิสระ	IC_{50} (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)	ร้อยละการยับยั้งอนุมูลอิสระ (%)	IC_{50} (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)
ใบ	เอทานอล	53.64 ± 3.78^f	1.49 ± 0.02	76.51 ± 0.97^a	0.84 ± 0.01
	ไดคลอโรมีเทน	$2.92 \pm 0.33^{a,b}$	-	9.25 ± 1.32^a	-
	เอทิลอะซิเตต	1.84 ± 0.69^a	-	$18.91 \pm 1.34^{c,d}$	-
ดอก	เอทานอล	18.01 ± 1.56^e	-	31.76 ± 1.21^e	-
	ไดคลอโรมีเทน	1.16 ± 0.44^a	-	8.79 ± 0.80^a	-
	เอทิลอะซิเตต	$4.79 \pm 0.42^{b,c}$	-	20.03 ± 1.00^d	-
กิ่ง	เอทานอล	17.06 ± 1.29^e	-	40.19 ± 0.99^f	-
	ไดคลอโรมีเทน	$6.15 \pm 0.75^{c,d}$	-	11.87 ± 0.74^b	-
	เอทิลอะซิเตต	7.51 ± 0.89^d	-	18.00 ± 0.56^c	-
วิตามินซี			0.05 ± 0.00		0.06 ± 0.00

หมายเหตุ : ค่าเป็น Mean $\pm$ SD , n=5

: ตัวอักษร a, b, c, d, e, f และ g ที่แตกต่างกันในแนวนอง แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากตารางที่ 3 จะเห็นว่าฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่ทดสอบด้วยวิธี DPPH และ ABTS มีความสอดคล้องกับปริมาณสารประกอบฟีนอลิก พบว่ามีความสัมพันธ์กันในทางบวกโดยมีค่า Correlation Coefficient (r) เท่ากับ 0.969 และ 0.961 ตามลำดับ ($p=0.000$) สำหรับสารประกอบฟลาโวนอยด์ไม่มีความสัมพันธ์กับฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่ทดสอบด้วยทั้ง 2 วิธี พบว่ามีความสัมพันธ์กันในทางลบโดยมีค่า Correlation Coefficient (r) เท่ากับ -0.651 และ -0.704 ตามลำดับ

4. สรุปและอภิปรายผล

สารสกัดเอทานอลให้ปริมาณร้อยละน้ำหนักรสชาติของสารสกัดมากที่สุดรองลงมาคือ ไดคลอโรมีเทน และเอทิลอะซิเตต ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าสารสกัดจากกลุ่มบวบส่วนใหญ่เป็นสารประกอบที่มีขี้้วและเมื่อนำมาหาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกพบว่าสารสกัดเอทานอลก็ให้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกสูงที่สุดเช่นเดียวกัน เนื่องจากสารประกอบฟีนอลิกมีความสามารถในการละลายสูงในตัวทำละลายที่มีขี้้ว

[15] ส่งผลให้สารสกัดเอทานอลซึ่งเป็นตัวทำละลายที่มีความเป็นขั้วสูงมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกในสารสกัดมาก ส่วนปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์พบในสารสกัดเอทิลอะซิเตตมากที่สุด รองลงมาคือ ไดคลอโรมีเทนและเอทานอลตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยการศึกษาปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์ใน *Lippia multiflora* โดยใช้ตัวทำละลาย 4 ชนิดคือ เฮกเซน ไดคลอโรมีเทน เอทิลอะซิเตต และเอทานอลพบว่าสารสกัดเอทิลอะซิเตตให้ปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์มากที่สุด (71.17 ± 0.2 มิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อกรัมสารสกัด) ไดคลอโรมีเทนและเอทานอลให้ปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์ค่อนข้างต่ำและใกล้เคียงกัน [16]

การหาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกในส่วนใบดอก และกิ่งของกลุ่มพืชที่สกัดด้วยเอทานอล ไดคลอโรมีเทน และเอทิลอะซิเตตพบว่าสารสกัดจากใบมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกสูงที่สุด รองลงมาคือกิ่งและดอกตามลำดับ การหาปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์ในส่วนใบ ดอกและกิ่งของกลุ่มพืชที่สกัดด้วยเอทานอล ไดคลอโรมีเทน และเอทิลอะซิเตตพบว่าสารสกัดจากกิ่งมีปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์สูงที่สุด รองลงมาคือใบและดอกตามลำดับ โดยสารสกัดทั้ง 9 ตัวอย่างถือว่าปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกจะมีความสัมพันธ์กับฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์ไม่มีความสัมพันธ์กับฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยการศึกษาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและฤทธิ์ยับยั้งเอนไซม์ไทโรซิเนสของสารสกัดเมทานอลจากดอกถั่วแระและดอกส้มป่อย

พบว่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวมมีความสัมพันธ์กับฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน [17]

ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าสารสกัดจากกลุ่มภูมิฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่ต่ำ สอดคล้องกับการศึกษาสารสกัดจากเปลือกต้นและใบของ *Crateva adansonii* ที่สกัดด้วยเมทานอลมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระต่ำกว่าสารมาตรฐานอย่างมีนัยสำคัญ [5]-[8] และเมื่อพิจารณาสารฟลักซ์เคมีที่เป็นองค์ประกอบพืชสกุล *Crateva* พบว่ามีสารกลุ่มของอัลคาลอยด์และเทอร์พีนอยด์เป็นองค์ประกอบมากกว่าสารประกอบฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ [4]-[10] ซึ่งพืชที่อยู่ในวงศ์เดียวกันมักจะมีสารฟลักซ์เคมีที่เป็นองค์ประกอบคล้ายๆ กัน จึงมีความเป็นไปได้ที่กลุ่มพืชจะมีสารสำคัญในกลุ่มอัลคาลอยด์และเทอร์พีนอยด์มากกว่าสารประกอบฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ ซึ่งอัลคาลอยด์และเทอร์พีนอยด์จะมีความความสัมพันธ์กับฤทธิ์ต้านมะเร็งและต้านเนื้องอกมากกว่าฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ [18] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ศึกษาสารสำคัญจาก *Crateva adansonii* คือสาร Lupeol เป็นสารกลุ่มเทอร์พีนอยด์ที่แยกจากใบ พบว่าสารนี้สามารถยับยั้งเซลล์มะเร็งต่างๆ ได้ดี [7], [19], [20] ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับฤทธิ์ต้านมะเร็งและต้านเนื้องอกของสารสกัดจากกลุ่มพืชเพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในเรื่องฤทธิ์ทางชีวภาพของกลุ่มพืชต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ ศูนย์เครื่องมือกลาง มหาวิทยาลัยมหาสารคามและมหาวิทยาลัยมหาสารคามที่ให้การสนับสนุนสถานที่และอุปกรณ์ในการวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] B. N. Ames, M. K. Shigenaga and T. M. Hagen, "Oxidants, antioxidants and the degenerative diseases of aging," in *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, pp. 7915-7922, 2015.
- [2] T. Wang, Q. Li and K. Bi, "Bioactive flavonoids in medicinal plants: structure, activity and biological fate," *Asian Journal of Pharmaceutical Sciences*, vol. 13, no. 1, pp. 12-23, 2018.
- [3] R. Meera and S. Venkataraman, "Characterization and Evaluation of Antioxidant Activity of *Crataeva magna* Lour (DC)," *Journal of Global Pharma Technology*, vol. 9, no. 9, pp. 1-7, 2017.
- [4] J. Abirami, G. Jothi and P. Brindha, "Microscopic, physicochemical and phytochemical screening of *Crataeva magna* (LOUR) DC. (LEAF)," *International Journal of Current Pharmaceutical Research*, vol. 9, no. 5, pp. 201-204, 2017.
- [5] N. E. Udeh and S. O. Onoja, "Analgesic and free radical scavenging activities of hydromethanolic extract of *Crataeva adansonii* stem bark," *Journal of Intercultural Ethnopharmacology*, vol. 4, no. 3, pp. 224-227, 2015.
- [6] T. N. Amos, L. Bashir, S. E. Saba, M. A. Saba, B. M. Mohammed, I. H. Abdulsalam and G. J. Josiah, "Phytochemicals and Acute Toxicity Profile of Aqueous and Methanolic Extracts of *Crataeva adansonii* Leaves in Swiss Albino Rats," *Asian Journal of Biochemistry*, vol. 10, no. 4, pp. 173-179, 2015.
- [7] M. K. Tchimine, C. O. Nwaehujor, M. Ezenwali, C. C. Okoli and M. M. Iwu, "Free Radical Scavenging Activity of Lupeol Isolated from the Methanol Leaf Extract of *Crataeva adansonii* Oliv. (Capparidaceae)," *International Journal of Pharmacognosy and Phytochemical Research*, vol. 8, no. 3, pp. 419-426, 2016.
- [8] C. O. Ajanaku, J. O. Echeme, R. C. Mordi, O. O. Ajani, J. A. O. Olugbuyiro, T. F. Owoeye, O. S. Taiwo and J. U. Ataboh, "Phytochemical Screening and Antimicrobial Studies of *Crataeva adansonii* Leaf Extract," *Covenant Journal of Physics & Life Sciences (CJPL)*, vol. 4, no. 2, pp. 35-41, 2016.
- [9] S. N. Hade, P. A. Joshi, H. H. Pilley, V. P. Wadegaonkar and P. A. Wadegaonkar, "Evaluation of *Crataeva nurvala* extracts as antioxidant, antiproteolytic and cytotoxic against hepato-carcinoma and mouse melanoma cell lines," *Journal of Applied Pharmaceutical Science*, vol. 6, no. 9, pp. 189-196, 2016.
- [10] N. A. Wagay, N. A. Khan and S. P. Rothe, "Profiling of secondary metabolites and antimicrobial activity of *Crataeva religiosa* G. Forst. Bark - A rare medicinal plant of Maharashtra India," *International Journal of Biosciences*, vol. 10, no. 5, pp. 343-354, 2017.
- [11] S. Dudonne, X. Vitrac, P. Coutiere, M. Woillez and J. M. Merillon, "Comparative

- study of antioxidant properties and Total phenolic content of 30 plant extract of industrial interest using DPPH, ABTS, FRAP, SOD and ORAC assays,” *Journal of agricultural and food chemistry*, vol. 57, no. 5, pp. 1768-1774, 2009.
- [12] C.Prommuak, W.De-Eknamkul and A.Shotipruk, “Extraction of flavonoids and carotenoids from Thai silk waste and antioxidant activity of extracts,” *Separation and Purification Technology*, vol. 62, no. 2, pp. 444-448, 2008.
- [13] K.Likhitwitayawuid, C.Klongsiriwet, V. Jongbunprasert and B. Sritularak, “Flavones with free radical scavenging activity from *Goniiothalamus tenuifolius*,” *Archives of Pharmacol Research*, vol. 29, no. 3, pp. 199-202, 2006.
- [14] B. Payet, J. Smadja and A. S. C Sing, “Assessment of Antioxidant Activity of Cane Brown Sugars by ABTS and DPPH Radical Scavenging Assays: Determination of Their Polyphenolic and Volatile Constituents,” *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 53, no. 26, pp. 4-9, 2005.
- [15] M. S. Mohsen and S. M. A. Ammar, “Total phenolic contents and antioxidant activity of corn tassel extracts,” *Food Chemistry*, vol. 112, no. 3, pp. 595-598, 2009.
- [16] C. M. Dabire, R. K. Bationo, A. Hema, R. C. H. Nebie, E. Pale, S. P. Dhanabal and M. Nacro, “Total phenolics content, flavonoids profiling and antioxidant activity of *Lippia multiflora* leaves extracts from Burkina Faso,” *Asian Journal of Plant Science and Research*, vol. 5, no. 5, pp. 28-33, 2015.
- [17] S. Maneechai and P. Rinthong, “Total phenolic and total flavonoid contents, free radical scavenging activity and tyrosinase inhibitory potential from the methanolic extracts of *Cajanus cajan* (L.) Millsp. And *Acacia concinna* (Willd.) DC. Flowers,” *KKU Science Journal*, vol. 44, no. 1, pp. 142-152, 2016.
- [18] S. Madla and P. Graidist, “Several Alkaloids Derived from Plants and Their Underlying Molecular Mechanisms of Action in the Fight Against Cancer,” *Songklanagarind Medical Journal*, vol. 35, no. 1, pp. 83-94, 2017.
- [19] S. Rauth, S. Ray, S. Bhattacharyya, D. G. Mehrotra, N. Alam, G. Mondal, P. Nath, B. Roy, J. Biswasa and N. Murmu, “Lupeol evokes anticancer effects in oral squamous cell carcinoma by inhibiting oncogenic EGER pathway,” *Molecular and Cellular Biochemistry*, vol. 417, no. 1, pp. 97-110, 2016.
- [20] P. Daisy, R. Anita and C. Ignatius, “In vitro evaluation of anticancer potentials of lupeol isolated from *Elephantopus scaber* L. on MCF-7 cell line,” *Journal of Advanced Pharmaceutical Technology and Research*, vol. 5, no. 4, pp. 179-184, 2014.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

ผลของปริมาณน้ำตาล กรดซิตริก และเพคติน ที่มีต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ มัลเบอร์รี่แผ่น

ปิยะนุช รสเครือ* และ มลิวรรณ กิจชัยเจริญ

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา น่าน

59 หมู่ 13 ต.ฝ่ายแก้ว อ.ภูเพียง จ.น่าน 55000

รับบทความ 26 พฤษภาคม 2562 แก้ไขบทความ 29 เมษายน 2563 ตอรับบทความ 30 เมษายน 2563

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอัตราส่วนระหว่างเนื้อมัลเบอร์รี่ต่อน้ำที่เหมาะสมในการผลิตผลิตภัณฑ์มัลเบอร์รี่แผ่น ที่ระดับ 70:30, 60:40, 50:50, 40:60 และ 30:70 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ นำอัตราส่วนระหว่างเนื้อมัลเบอร์รี่ต่อน้ำที่เหมาะสม มาศึกษาสูตรที่เหมาะสมในการผลิตผลิตภัณฑ์มัลเบอร์รี่แผ่น วางแผนการทดลองแบบผสม (Mixture design) กำหนดปัจจัยที่ทำการศึกษแบบไม่กำหนดช่วง (Simplex centroid design) 3 ปัจจัย คือ ปริมาณน้ำตาล (ร้อยละ 0-100 หรือ 0-50 กรัม) ปริมาณกรดซิตริก (ร้อยละ 0-100 หรือ 0-5 กรัม) และปริมาณเพคติน (ร้อยละ 0-100 หรือ 0-3 กรัม) เท่ากับร้อยละ 100 โดยกำหนดส่วนผสมอื่นปริมาณคงที่ ทำการวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติและสร้างสมการถดถอยด้วยพื้นผิวตอบสนอง (Mixture Response Surface Models) ผลจากการทดลองพบว่า อัตราส่วนระหว่างเนื้อมัลเบอร์รี่ต่อน้ำที่ อัตราส่วน 70:30 มีค่าแรงยึดเหนี่ยว (Adhesiveness Force) และค่าความเหนียวความหยุ่นตัว (Gumminess) สูงที่สุด เมื่อนำมาศึกษาสูตรที่เหมาะสมจากอิทธิพล 3 ปัจจัย พบว่า ทั้ง 3 ปัจจัยมีผลต่อค่า A_w ลักษณะเนื้อสัมผัส และคะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์มัลเบอร์รี่แผ่น เมื่อพิจารณาจากการซ้อนทับของกราฟคอนทัวร์ (Contour Plot) ของคะแนนความชอบทางประสาทสัมผัสที่มีคะแนนสูงกว่า 5.5 พบว่าสูตรที่เหมาะสมของมัลเบอร์รี่แผ่น คือ ปริมาณน้ำตาลช่วงร้อยละ 40-70 ปริมาณกรดซิตริกช่วงร้อยละ 0-5 และปริมาณเพคตินช่วงร้อยละ 30-55 ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนการยอมรับต่อผลิตภัณฑ์ในระดับคะแนน 6.3 และจากผลการวิเคราะห์คุณภาพผลิตภัณฑ์มัลเบอร์รี่ต้นแบบ พบว่า ผลิตภัณฑ์มีค่า A_w 0.49 มีค่าแรงยึดเหนี่ยว (Adhesiveness Force) ประมาณ 945.11 g.sec. ความสามารถในการเกาะตัว (Cohesiveness) ประมาณ 0.85 และค่าความเหนียวความหยุ่นตัว (Gumminess) ประมาณ 452.12 นิวตัน

คำสำคัญ : ผลไม้แผ่น; มัลเบอร์รี่; ค่าวอเตอร์แอกทีวิตี; การวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 2165 8141, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: piyanuch_ros@hotmail.com

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Effects of Sugar, Citric Acid and Pectin Content on Quality of Mulberry Fruit Leather Product

Piyanuch Roskhrua* and Maliwan Kitchaicharoen

Faculty of Science and Agricultural Technology, Rajamangala University of Technology Lanna Nan,
59 Moo 13 Phai-Keaw Sub-district, Phuphieng District, Nan Province 55000

Received 26 May 2019; Revised 29 April 2020; Accepted 30 April 2020

Abstract

The objective of this study was to investigate the optimal formulation of mulberry fruit leather product when varying the weight ratio of mulberry fruit: water as 70:30, 60:40, 50:50, 40:60 and 30:70. Three factors were then determined by simplex centroid design; sugar (0-100% or 0-50 grams), citric acid (0-100% or 0-5 grams) and pectin (0-100% or 0-3 grams), which the sum of them equivalent to 100% while other ingredients remained constant. Analysis of the data was performed using ANOVA and Mixture Response Surface Models. The results indicated that the highest adhesiveness force and gumminess of mulberry fruit leather product were founded when the weight ratio of mulberry fruit to water was 70:30. The amount of sugar, acid and pectin had effects on water activity (A_w), texture profile and sensory score of overall liking of product. From contour plot, the predictive models were obtained by plotting the contour line of all sensory attributes with acceptable score greater than 5.5 and thus the optimization area was selected. After overlapping contour plots, an optimal formulation obtained was composed of 40-70% sugar, 0-5% citric acid and 30-55% pectin. The sensory score of overall liking of product using a 9-point hedonic scale was 6.3. The water activity (A_w), adhesiveness force, cohesiveness and gumminess of the prototype mulberry fruit leather product was 4.9, 945.11 g. sec., 0.85 N and 452.12 N., respectively.

Keywords : Fruit Leather; Mulberry Fruit; Water Activity; Response Surface Methodology

* Corresponding Author. Tel.: +668 2165 8141, E-mail Address: piyanuch_ros@hotmail.com

1. บทนำ

ผลหม่อน หรือ ผลมัลเบอร์รี่ มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Morus alba* เป็นพืชที่ปลูกในหลายประเทศ โดยใบมัลเบอร์รี่เป็นแหล่งที่สำคัญของอาหารสำหรับตัวไหม (*Bombyx Mori*) ส่วนผลมัลเบอร์รี่ (Mulberry Fruit) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการปลูกมัลเบอร์รี่เพื่อเลี้ยงไหม มีลักษณะผลแบบผลรวม ผลมัลเบอร์รี่สุกมีลักษณะอวบน้ำ มีสัดส่วนความเปรี้ยวและหวานสมดุลกัน เป็นผลไม้ อีกชนิดหนึ่งที่มีสารแอนโทไซยานิน (Anthocyanin) สารประกอบเคออสติน ซึ่งเป็นรงควัตถุที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) และผลมัลเบอร์รี่สุกมีสารอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการที่สำคัญ เช่น คาร์โบไฮเดรต 21.35 กรัม/100 กรัม เหล็ก 43.48 มิลลิกรัม/100 กรัม วิตามินบีหนึ่ง 50.65 มิลลิกรัม/100 กรัม และวิตามิน บีหก 390.10 มิลลิกรัม/100 กรัม เป็นต้น [1]

ผลไม้แผ่น (Fruit Leather) เป็นผลิตภัณฑ์จากผลไม้ที่ผ่านกระบวนการสกัดเอาเนื้อผลไม้ และอบแห้งจนมี ความชื้นต่ำถึงปานกลาง ค่าปริมาณน้ำอิสระ (Water Activity; A_w) ประมาณ 0.5-0.7 [2], [3] สามารถเก็บได้นานที่อุณหภูมิห้อง คุณภาพของผลิตภัณฑ์ขึ้นกับคุณภาพของวัตถุดิบเริ่มต้น กระบวนการต่าง ๆ ในขณะแปรรูป และสภาวะการเก็บรักษาก่อนบริโภค คำว่า “Fruit Leather, Fruit Sheet, Fruit Bar” หรือ “Fruit Slab” เป็นคำศัพท์ที่ใช้เรียกผลิตภัณฑ์ผลไม้แผ่นที่มีความหนาแตกต่างกัน [3] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (2532) กำหนดมาตรฐานผลไม้แห้งไว้ดังนี้ ความชื้นไม่เกินร้อยละ 18 ของน้ำหนักตัวอย่างแห้ง น้ำตาลทั้งหมดไม่ต่ำกว่าร้อยละ 65 จุลินทรีย์ทั้งหมดไม่เกิน 1×10^2 โคโลนี/กรัมตัวอย่าง ยีสต์และราไม่เกิน 1×10^4 โคโลนี/กรัมตัวอย่าง

ผลไม้ที่นิยมทำผลไม้แผ่น ได้แก่ แอปเปิ้ล ท้อ กล้วย เชอร์รี่ องุ่น แพร่ สาลี่ บัวย สับปะรด แบลค-เคอแรนท์ พลัม พ룬 ราสเบอร์รี่ สตรอเบอร์รี่ มะม่วง

ฝรั่ง มะละกอ ขนุน มะเขือเทศ ส้มจีน (Tangerine) พุทรา พุเรียน ชิคุ (Ciku) [4]-[8] นอกจากนี้ผักชนิดต่าง ๆ ถั่ว มันเทศ ก็นิยมเช่นกัน [9] จะเห็นได้ว่า ผลผลไม้ส่วนใหญ่สามารถนำมาผลิตผลิตภัณฑ์ผลไม้แผ่นได้ ดังนั้นจากกระบวนการผลิตน้ำมัลเบอร์รี่ มีส่วนของเนื้อมัลเบอร์รี่เหลือทิ้ง ซึ่งทางโรงงานจะนำบางส่วนมาผลิตเป็น มัลเบอร์รี่กวนหรือหย แต่เนื่องจากส่วนเหลือทิ้งของเนื้อผลไม้มีมาก จึงสามารถนำมาเป็นวัตถุดิบในการทำผลิตภัณฑ์มัลเบอร์รี่แผ่นได้เป็นอย่างดี และสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานการผลิตผลไม้แผ่นชนิดอื่น ๆ ได้ต่อไป ดังนั้นงานวิจัยนี้สนใจศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างเนื้อมัลเบอร์รี่ต่อน้ำในการผลิตมัลเบอร์รี่แผ่น และศึกษาอิทธิพลของน้ำตาล กรดซิตริก และเพคติน ที่มีต่อคุณภาพมัลเบอร์รี่แผ่น เพื่อให้ได้สูตรที่เหมาะสมต่อผลิตภัณฑ์มัลเบอร์รี่แผ่น

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างเนื้อมัลเบอร์รี่ต่อน้ำในการผลิตมัลเบอร์รี่แผ่น

ศึกษาอัตราส่วนระหว่างเนื้อมัลเบอร์รี่ต่อน้ำในการผลิตมัลเบอร์รี่แผ่น ที่ระดับ 70:30, 60:40, 50:50, 40:60 และ 30:70 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ โดยมีส่วนทั้งหมด ดังตารางที่ 1 การเตรียมมัลเบอร์รี่แผ่นเริ่มจากการปั่นผสมเนื้อมัลเบอร์รี่กับน้ำด้วยเครื่องปั่นไฟฟ้า (BE-127A, OTTO, บริษัท ออโตโต้ คิงส์กลาส จำกัด, ประเทศไทย) ให้ละเอียด ด้วยความเร็ว 2,000 รอบต่อนาที นาน 2 นาที จากนั้นเติมส่วนผสมที่เหลือทั้งหมดแล้วนำไปตั้งไฟที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที แล้วเทลงถาด ขนาด 12×12 นิ้ว น้ำหนักต่อถาด 250 กรัม อบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน (TD 10, Since OFM 1997, บริษัท โอนเนอร์ ฟู้ดส์ แมชชีนเนอร์ จำกัด, ประเทศไทย) ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส นาน 7 ชั่วโมง [10] หรือจนให้มีความวอเตอร์แอคติวิตี (A_w) ต่ำกว่า 0.6 [3]

ตารางที่ 1 ส่วนผสมการผลิตมัลเบอร์รี่แผ่น

ส่วนผสม (กรัม)	อัตราส่วนระหว่างเนื้อผลไม้ต่อน้ำ (w/w)				
	70:30	60:40	50:50	40:60	30:70
เนื้อมัลเบอร์รี่	231	198	165	132	99
น้ำสะอาด	99	132	165	198	231
แบะแซ	50	50	50	50	50
กลีเซอรอล	45	45	45	45	45
เกลือ	2	2	2	2	2
มอลโตเดกซ์ตริน	30	30	30	30	30
น้ำตาล	40	40	40	40	40
กรดซิตริก	3	3	3	3	3
เพคติน	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5

วัดค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ ($^{\circ}$ Brix) ค่า pH (BPA121-7.5, Mettler Toledo, ประเทศสวิตเซอร์แลนด์) ค่าวอเตอร์แอกทีวิตี (A_w , 4TE, Aqua lab, USA) และคุณภาพเนื้อสัมผัสด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Brookfield CT3, Brookfield Engineering Laboratories, Inc. USD) บันทึกค่าแรงยึดเหนี่ยว (Adhesiveness Force) ค่าความแข็ง (Hardness, N) ความสามารถในการเกาะตัว (Cohesiveness) และค่าความเหนียวความหยุ่นตัว (Gumminess) โดยเลือกอัตราส่วนระหว่างเนื้อมัลเบอร์รี่ต่อน้ำที่มีค่าค่าแรงยึดเหนี่ยว (Adhesiveness Force) และค่าความเหนียวความหยุ่นตัว (Gumminess) สูงที่สุดมาศึกษาสูตรที่เหมาะสมในการผลิตผลิตภัณฑ์มัลเบอร์รี่แผ่นต่อไป

2.2 ศึกษาอิทธิพลของน้ำตาล กรดซิตริก และเพคติน ที่มีต่อคุณภาพมัลเบอร์รี่แผ่น

นำสูตรที่อัตราส่วนระหว่างเนื้อมัลเบอร์รี่ต่อน้ำที่คัดเลือกจากข้อ 2.1 มาศึกษาสูตรที่เหมาะสมจากอิทธิพลของปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ปริมาณน้ำตาล (ร้อยละ 0-100 หรือ 0-50 กรัม) ปริมาณกรดซิตริก (ร้อยละ 0-100 หรือ 0-5 กรัม)

และปริมาณเพคติน (ร้อยละ 0-100 หรือ 0-3 กรัม) ใช้แผนการทดลองแบบ Mixture Design ออกแบบการทดลองแบบ Simplex Centroid Design แบบ 3 ปัจจัย สิ่งทดลองแสดงดังตารางที่ 2 โดยมีส่วนผสมอื่นคงที่ ได้แก่ เนื้อมัลเบอร์รี่ 231 กรัม น้ำ 99 กรัม แบะแซ 50 กรัม กลีเซอรอล 45 กรัม มอลโตเดกซ์ตริน 30 กรัม และเกลือ 2 กรัม ตามลำดับ ขั้นตอนการเตรียมตามวิธีการข้อ 2.1

วัดค่าวอเตอร์แอกทีวิตี (A_w , 4TE, Aqua lab, USA) ตรวจสอบคุณภาพเนื้อสัมผัสด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Brookfield CT3, Brookfield Engineering Laboratories, Inc. USD) ทำการบันทึกค่าแรงยึดเหนี่ยว (Adhesiveness Force) ค่าความแข็ง (Hardness, N) ความสามารถในการเกาะตัว (Cohesiveness) และค่าความเหนียวความหยุ่นตัว (Gumminess) และทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัสโดยให้คะแนนความชอบแบบ 9-Points Hedonic Scale เพื่อให้ได้สูตรที่เหมาะสมต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์มัลเบอร์รี่แผ่น

ค่าคุณภาพที่ได้จะนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของตัวแปรแต่ละตัว (Analysis of Variance; ANOVA) ทำการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น $\alpha = 0.05$ ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้สมการเชิงเส้น (Linear Model) ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ คือ $Y_i = \beta_{1x_1} + \beta_{2x_2} + \beta_{3x_3}$ ทั้งนี้กำหนดให้ Y_i คือคุณภาพทางเนื้อสัมผัส และ ประสาทสัมผัส และ X_i คือ ปริมาณร้อยละของส่วนผสม ได้แก่ X_1 คือ ปริมาณของน้ำตาล X_2 คือ ปริมาณของกรด X_3 คือ ปริมาณของเพคติน จากนั้นคัดเลือกสูตรที่เหมาะสมโดยสร้างกราฟ Contour Plot ของค่าทางเนื้อสัมผัสและความชอบทางประสาทสัมผัสโดยเลือกพื้นที่ที่มีคะแนนความชอบของแต่ละคุณลักษณะที่มีคะแนนความชอบมากกว่า 5.5

ตารางที่ 2 สิ่งทดลองที่ใช้พัฒนาสูตรผลิตภัณฑ์
มัลเบอร์รี่แผ่น

สิ่งทดลอง	น้ำตาล (X ₁)	กรด (X ₂)	เพคติน (X ₃)	น้ำตาล (g)	กรด (g)	เพคติน (g)
1	1.0	0	0	50	0	0
2	0	1.0	0	0	5	0
3	0	0	1.0	0	0	3
4	0.5	0.5	0	25	2.50	0
5	0.5	0	0.5	25	0	1.50
6	0	0.5	0.5	0	2.50	1.50
7	0.333	0.333	0.333	16.60	1.66	1
8	0.333	0.333	0.333	16.60	1.66	1
9	0.333	0.333	0.333	16.60	1.66	1

2.3 วิเคราะห์คุณภาพผลิตภัณฑ์มัลเบอร์รี่แผ่น ต้นแบบ

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีตามวิธีการของ A.O.A.C. (2005) วัดค่าสีของผลิตภัณฑ์โดยใช้เครื่องวัดสี Spectrophotometer (ค่าสีตามระบบ CIE L*a*b* CIE (1986) ใช้แหล่งกำเนิดแสง D65 ค่าที่วัดได้แก่ ค่าสี L* (ค่าความสว่างมีค่า 0 – 100 โดย 0 หมายถึง วัตถุที่มีความสว่างสีดำ, 100 หมายถึงวัตถุที่มีความสว่างสีขาว), a* (+ หมายถึง วัตถุมีสีออกแดง, - หมายถึง วัตถุมีสีออกสีเขียว) และ b* (+หมายถึง วัตถุที่มีสีเหลือง, - หมายถึงวัตถุที่มีสีออกสีน้ำเงิน) วัดค่า A_w และวัดแรงดึงด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Texture Analyzer) บันทึกค่าแรงยึดเหนี่ยว (Adhesiveness Force) ค่าความแข็ง (Hardness, N) ความสามารถในการเกาะตัว (Cohesiveness) และ ค่าความเหนียว ความหยุ่นตัว (Gumminess) ผลิตภัณฑ์มัลเบอร์รี่แผ่นต้นแบบ

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 อัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างเนื้อมัลเบอร์รี่

ต่อน้ำในการผลิตมัลเบอร์รี่แผ่น

อัตราส่วนระหว่างเนื้อมัลเบอร์รี่ต่อน้ำที่ใช้ในการผลิตมัลเบอร์รี่แผ่นมีผลต่อปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (°Brix) ค่า pH ค่าวอเตอร์แอคติวิตี (A_w) คุณภาพเนื้อสัมผัส และคะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัสอย่าง มีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05) ดังตารางที่ 3 โดยพบว่า ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ ค่า pH และค่า A_w มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนเนื้อมัลเบอร์รี่มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากในงานวิจัยใช้มัลเบอร์รี่ผลสุก (สีม่วงดำ ร้อยละ 100) มีรสชาติหวาน ทำให้สูตรที่ใส่มัลเบอร์รี่มากจึงมีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้สูง ค่า pH สูงขึ้นเล็กน้อย โดยมัลเบอร์รี่แผ่นที่มีส่วนของเนื้อมัลเบอร์รี่ในอัตราส่วน 70:30 มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ ค่า pH และ ค่า A_w สูงที่สุด และเมื่อปริมาณเนื้อมัลเบอร์รี่ลดลง ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ ค่า pH และ ค่า A_w มีแนวโน้มลดลง ส่วนคุณภาพเนื้อสัมผัสมัลเบอร์รี่แผ่น พบว่า ค่าแรงยึดเหนี่ยวของเจล (Adhesiveness), ความแข็งแรงของโครงสร้างเจล (Hardness), ความสามารถในการรวมตัวกัน (Cohesiveness) และค่าความเหนียวความหยุ่นตัว (Gumminess) มีค่าสูงสุดที่อัตราส่วน 70:30 โดยน้ำหนัก รองลงมา อัตราส่วน 60:40, 50:50, 40:60 และ 30:70 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มเนื้อมัลเบอร์รี่มากขึ้น ทำให้เพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างเจล (Hardness) แรงยึดเหนี่ยวของเจล (Adhesiveness) และความสามารถในการรวมตัวกัน (Cohesiveness) ดีขึ้น เนื่องจากเนื้อมัลเบอร์รี่มีเพคตินโดยธรรมชาติที่ช่วยให้เกิดการอุ้มน้ำและเป็นเจล และเนื้อมัลเบอร์รี่ช่วยเพิ่มส่วนของเส้นใยเกาะกันเป็นแผ่นแน่นขึ้นหลังการอบแห้ง โดยลักษณะเนื้อสัมผัส ความยืดหยุ่น เป็นเจล เกิดจากสมดุลขององค์ประกอบที่สำคัญ ได้แก่ ปริมาณน้ำตาล กรดซิตริก และเพคติน ที่มีผลต่อความสมบูรณ์ด้านความต่อเนื่อง (Continuity) และความแข็งแรง (Rigidity)

ของโครงสร้างเจล [11]-[13] ดังนั้นจากค่าแรงยึดเหนี่ยว (Cohesiveness) และค่าความเหนียวความหยุ่นตัวของเจล (Adhesiveness), ความแข็งแรงของโครง (Gumminess) ของอัตราส่วน 70:30 มีค่าสูงสุดจึงเลือกสร้างเจล (Hardness), ความสามารถในการรวมตัวกัน ใช้ศึกษาสูตรที่เหมาะสมต่อไป

ตารางที่ 3 ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ ($^{\circ}\text{Brix}$) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) วัดค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ (A_w) และคุณภาพเนื้อสัมผัสของมัลเบอร์รี่แผ่น

คุณลักษณะ	อัตราส่วนระหว่างเนื้อผลไม้ต่อน้ำ (w/w)				
	70:30	60:40	50:50	40:60	30:70
ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ ($^{\circ}\text{Brix}$)	48.70 ^a ±1.02	47.50 ^b ±0.95	46.90 ^{bc} ±1.00	46.50 ^c ±0.89	44.20 ^d ±0.92
pH	2.99 ^a ±0.07	2.98 ^a ±0.06	2.90 ^{ab} ±0.11	2.93 ^a ±0.04	2.85 ^b ±0.08
Water activity (A_w)	0.55 ^a ±0.08	0.53 ^a ±0.05	0.48 ^b ±0.06	0.50 ^{ab} ±0.04	0.47 ^b ±0.04
คุณภาพเนื้อสัมผัส					
- Adhesiveness (g.sec.)	773.76 ^a ±23.62	300.55 ^d ±12.91	462.43 ^c ±22.65	515.17 ^b ±21.20	294.02 ^e ±19.26
- Hardness (N)	457.31 ^a ±18.23	374.65 ^b ±11.56	292.93 ^c ±13.28	270.93 ^d ±16.02	247.37 ^e ±10.26
- Cohesiveness	0.91 ^a ±0.04	0.87 ^b ±0.08	0.89 ^{ab} ±0.07	0.90 ^a ±0.06	0.86 ^b ±0.05
- Gumminess (N)	416.15 ^a ±15.89	325.94 ^b ±12.22	260.71 ^c ±11.25	246.54 ^c ±12.36	212.74 ^c ±13.14

หมายเหตุ ตัวอักษร a-c ในแนวนอน หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางที่ 4 ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ (A_w) และลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์มัลเบอร์รี่แผ่น

สิ่งทดลอง	ปริมาณน้ำตาล (X1)	ปริมาณกรด (X2)	ปริมาณเพคติน (X3)	water activity (A_w)	ลักษณะเนื้อสัมผัส			
					Adhesiveness (g.sec.)	Hardness (N)	Cohesiveness	Gumminess (N)
1	1.0	0	0	0.59±0.02	945.11±18.26	562.56±11.26	0.85±0.06	452.12±14.26
2	0	1.0	0	0.55±0.03	652.23±12.25	452.69±13.22	0.91±0.08	491.89±13.15
3	0	0	1.0	0.49±0.05	792.45±13.11	483.11±15.13	0.99±0.06	679.56±20.11
4	0.5	0.5	0	0.51±0.04	859.23±10.59	498.45±14.65	0.81±0.05	458.56±18.69
5	0.5	0	0.5	0.57±0.02	892.25±15.12	426.87±15.89	0.84±0.04	598.45±17.59
6	0	0.5	0.5	0.58±0.03	738.22±11.89	504.78±16.48	0.75±0.03	549.68±16.57
7	0.333	0.333	0.333	0.46±0.01	773.76±23.62	457.31±18.23	0.91±0.04	416.15±15.89
8	0.333	0.333	0.333	0.48±0.04	801.59±16.58	472.65±18.49	0.90±0.06	448.59±14.26
9	0.333	0.333	0.333	0.50±0.05	789.58±15.78	466.56±13.57	0.87±0.05	428.48±13.45

3.2 อิทธิพลของน้ำตาล กรดซิตริก และ เพคตินที่มีต่อคุณภาพ��ลเบอร์รี่แผ่น

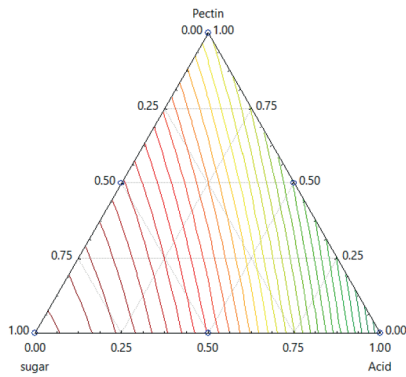
��ลเบอร์รี่แผ่นทั้ง 9 สิ่งทดลองให้ ค่า A_w และ ลักษณะเนื้อสัมผัสที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดย ค่า A_w ของผลิตภัณฑ์��ลเบอร์รี่แผ่นอยู่ในช่วง 0.46-0.59 ซึ่งจัดเป็นอาหารที่มีความชื้นต่ำคือมีค่า A_w ต่ำกว่า 0.6 ซึ่งเป็นช่วงที่จุลินทรีย์ประเภทเชื้อราไม่สามารถเจริญได้ [13] โดยสิ่งทดลองที่ 1 สัดส่วนของน้ำตาลต่อกรดต่อเพคติน เท่ากับ 1.0: 0: 0 มีค่าเฉลี่ยของแรงยึดเหนี่ยวของเจล (Adhesiveness) และความแข็งแรงของโครงสร้างเจล (Hardness) มากที่สุด และสิ่งทดลองที่ 3 สัดส่วนของน้ำตาลต่อกรดต่อเพคตินเท่ากับ 0: 0: 1.0 แต่มีความสามารถในการเกาะตัว (Cohesiveness) และค่าความเหนียวความหยุ่นตัว (Gumminess) มากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับ

อัตราส่วนของส่วนเพคตินที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับสิ่งทดลองอื่นๆ ผลิตภัณฑ์จึงมีลักษณะเกาะตัวดี และมีความยืดหยุ่น ดังตารางที่ 4 ซึ่งเพคตินทำหน้าที่เป็นสารเกิดเจล (Gelling Agents) แล้วยังเป็น สารเพิ่มความข้นหนืด (Thickener) สารที่ดูดซับน้ำ (Water binder) ทำให้เนื้อสัมผัสมีลักษณะข้นหนืดและยืดหยุ่นมากขึ้น [11], [12]

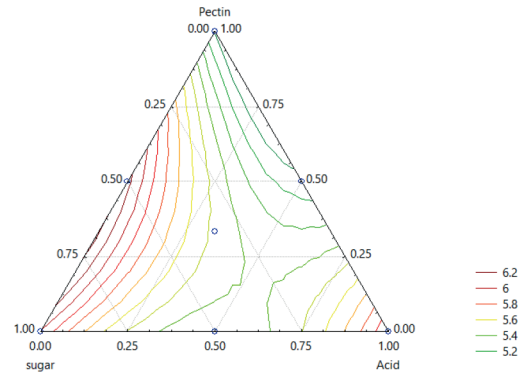
คะแนนความชอบทางประสาทสัมผัส พบว่าคะแนนความชอบคุณลักษณะด้านสี รสชาติ ลักษณะปรากฏ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมของสิ่งทดลองที่ 5 สัดส่วนของน้ำตาลต่อกรดต่อเพคตินเท่ากับ 0.5: 0: 0.5 มีคะแนนความชอบด้านสี กลิ่น รสชาติ และความชอบโดยรวมสูงที่สุด ซึ่งเท่ากับ 6.0, 6.9, 6.1 และ 6.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 5 คะแนนความชอบต่อผลิตภัณฑ์��ลเบอร์รี่แผ่น

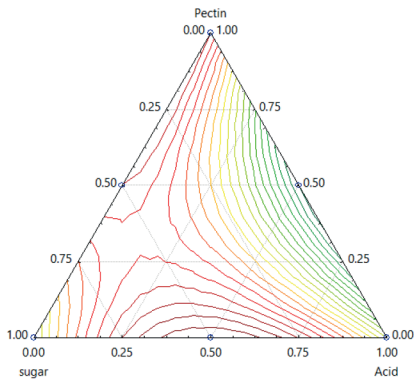
สิ่งทดลอง	ปริมาณน้ำตาล (X1)	ปริมาณกรด (X2)	ปริมาณเพคติน (X3)	คะแนนความชอบทางประสาทสัมผัส					
				สี	กลิ่น	รสชาติ	ลักษณะปรากฏ	เนื้อสัมผัส	ความชอบโดยรวม
1	1.0	0	0	6.1±0.2	6.7±0.2	6.0±0.2	5.1±0.1	5.8±0.1	6.2±0.1
2	0	1.0	0	6.2±0.1	6.5±0.1	6.0±0.3	5.1±0.1	5.5±0.1	6.2±0.1
3	0	0	1.0	6.3±0.1	6.8±0.1	5.1±0.3	5.3±0.2	6.2±0.1	6.1±0.2
4	0.5	0.5	0	6.1±0.2	6.5±0.2	5.3±0.1	5.4±0.2	6.1±0.2	6.0±0.1
5	0.5	0	0.5	6.0±0.1	6.9±0.2	6.1±0.1	5.3±0.1	6.0±0.1	6.4±0.1
6	0	0.5	0.5	6.4±0.2	6.7±0.1	5.1±0.2	4.9±0.1	5.3±0.1	5.9±0.2
7	0.333	0.333	0.333	6.0±0.3	6.0±0.3	5.5±0.1	5.2±0.1	5.7±0.1	6.2±0.2
8	0.333	0.333	0.333	6.1±0.1	6.2±0.3	5.4±0.2	5.5±0.2	5.8±0.1	6.3±0.1
9	0.333	0.333	0.333	6.2±0.1	5.1±0.2	5.6±0.2	5.1±0.2	6.0±0.1	6.2±0.1



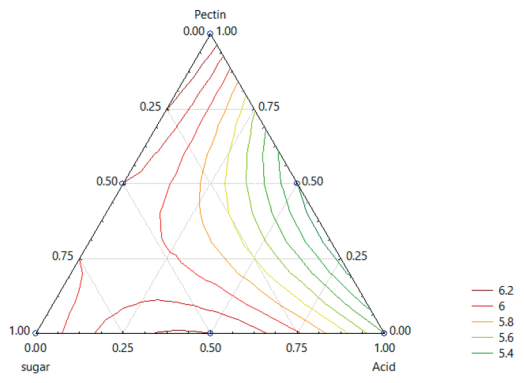
(ก) Adhesiveness



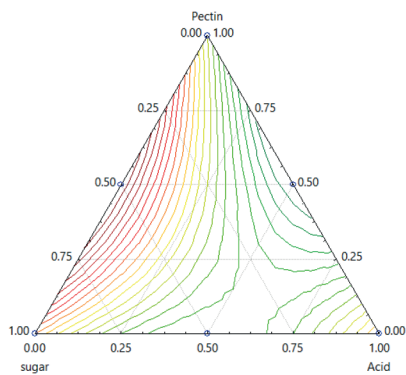
(ข) Taste



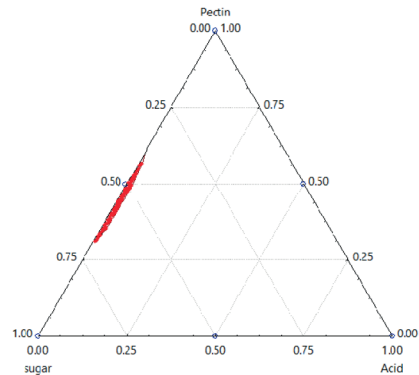
(ค) Appearance



(ง) Texture



(จ) Overall liking



(ฉ) Optimum overlapping

รูปที่ 1 Contour Plot ของแรงยึดเหนี่ยวของเจล รสชาติ ลักษณะปรากฏ ลักษณะเนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมของมัลเบอร์รี่แผ่น

ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ คุณภาพด้านเนื้อสัมผัส และความชอบทางประสาทสัมผัสของมัลเบอร์รี่แผ่น เมื่อนำมาวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยวิธี Response Surface Methodology (RSM) สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้สมการเชิงเส้น (Linear model) เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าคุณภาพทางประสาทสัมผัสกับปัจจัยที่ทำการศึกษา คือ ปริมาณน้ำตาล (X_1) ปริมาณกรด (X_2) และปริมาณเพคติน (X_3) ผลดังแสดงตารางที่ 6 เมื่อนำสมการรีเกรสชันของค่าแรงยึดเหนี่ยวของเจล และคะแนนการทดสอบความชอบทางประสาทสัมผัสจาก ตารางที่ 6 มาสร้างกราฟคอนทัวร์ (Contour Plot) โดยพิจารณาเฉพาะคุณลักษณะ

ด้านรสชาติ ลักษณะปรากฏ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ดังรูปที่ 1 (ก)-(จ) จากนั้นนำกราฟซ้อนทับกันเพื่อหาพื้นที่ในการคัดเลือกสูตรที่เหมาะสม ดังรูปที่ 1 (ฉ) และทำการเลือกพื้นที่ที่มีคะแนนความชอบมากกว่า 5.5 (ชอบเล็กน้อย) เป็นเกณฑ์ในการคัดเลือกพื้นที่ที่เหมาะสมพบว่า ความเหมาะสมของปริมาณน้ำตาล กรดซิตริก และเพคติน ในสูตรมัลเบอร์รี่แผ่นพื้นฐาน โดยมีปริมาณน้ำตาลอยู่ในช่วงร้อยละ 40-70 ปริมาณกรดซิตริกอยู่ใน ช่วงร้อยละ 0-5 และปริมาณเพคตินอยู่ในช่วงร้อยละ 30-55 ซึ่งได้สมการรีเกรสชันที่ได้สามารถใช้เพื่อทำนายความสัมพันธ์ของส่วนผสมต่อลักษณะคุณภาพที่ต้องการได้ [14]

ตารางที่ 6 สมการรีเกรสชันของแรงยึดเหนี่ยวของเจล รสชาติ ลักษณะปรากฏ ลักษณะเนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมของมัลเบอร์รี่แผ่น

Dependent variable ; y	Predictive Model	R ²
แรงยึดเหนี่ยวของเจล (Adhesiveness)	$= 975.97 * x_1 + 680.06 * x_2 + 725.44 * x_3$	0.93
รสชาติ (Taste)	$= 5.7 * x_1 + 5.7 * x_2 + 4.9 * x_3$	0.90
ลักษณะปรากฏ (Appearance)	$= 5.28 * x_1 + 5.12 * x_2 + 5.24 * x_3$	0.90
ลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture)	$= 5.01 * x_1 + 4.57 * x_2 + 4.69 * x_3$	0.91
ความชอบโดยรวม (Overall liking)	$= 5.15 * x_1 + 4.99 * x_2 + 5.13 * x_3$	0.88

หมายเหตุ x_1 = ปริมาณน้ำตาล x_2 = ปริมาณกรด x_3 = ปริมาณเพคติน

ตารางที่ 7 ค่าวอเตอร์แอกทีวิตี (A_w) ค่าสี ลักษณะเนื้อสัมผัส และองค์ประกอบทางเคมีของมัลเบอร์รี่แผ่น

คุณภาพ	มัลเบอร์รี่แผ่น
ค่าวอเตอร์แอกทีวิตี (A_w)	0.49
ค่าสี	
L*	30.4
a*	-1.4
b*	+11.2
คุณภาพเนื้อสัมผัส	
Adhesiveness (g.sec.)	945.11±18.26
Hardness (N)	562.56±11.21
Cohesiveness	0.85±0.02
Gumminess (N)	452.12±14.26
องค์ประกอบทางเคมี	
ความชื้น (g/100g)	9.35
เถ้า (g/100g)	1.79
ไขมัน (g/100g)	1.08
โปรตีน (g/100g)	1.82
คาร์โบไฮเดรต (g/100g)	85.96
น้ำตาล (g/100g)	35.45
โซเดียม (g/kg)	3.42

3.3 คุณภาพทางกายภาพและองค์ประกอบเคมีของผลิตภัณฑ์มัลเบอร์รี่แผ่นต้นแบบขั้นสุดท้าย

ผลิตภัณฑ์มัลเบอร์รี่แผ่นต้นแบบที่ได้มีคุณภาพมีค่าสีอยู่ในโทนสีม่วงเข้มอมแดง ลักษณะเนื้อสัมผัสมีแรงยืดเหนียวของเจล เหนียว หย่นตัวดี และองค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์มัลเบอร์รี่แผ่นต้นแบบที่ได้จากการทดลอง พบว่า มีน้ำตาลสูง ช่วยให้ค่า

A_w เท่ากับ 0.49 ดังตารางที่ 7 ซึ่งมัลเบอร์รี่แผ่นจัดว่าเป็นอาหารแห้ง ที่ให้พลังงานสูง หรือเป็นอาหารที่มีค่าปริมาณน้ำอิสระต่ำ (Low Water Activity Food) มี A_w น้อยกว่า 0.6 มีความชื้น (Moisture Content) น้อย (ต่ำกว่าร้อยละ 15) เพื่อป้องกันและควบคุมจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเสื่อมเสีย ทั้ง รา ยีสต์ และแบคทีเรีย [9] ดังนั้นมัลเบอร์รี่แผ่นสามารถเก็บไว้ได้นานที่อุณหภูมิห้อง โดยไม่เน่าเสีย ไม่ต้องแช่เย็น แต่ทั้งนี้ควรเก็บในที่แห้ง เพื่อรักษาคุณภาพและต้องเก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสม และควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity) ให้ต่ำเพื่อป้องกันการดูดน้ำกลับ

4. สรุป

การผลิตผลิตภัณฑ์มัลเบอร์รี่แผ่นใช้ผลมัลเบอร์รี่ที่มีระยะผลสุก (สีม่วงร้อยละ 100) เพื่อให้มีรสหวานธรรมชาติโดยใช้ในอัตราส่วนเนื้อมัลเบอร์รี่ต่อน้ำ 70:30 โดยน้ำหนัก ซึ่งได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความสามารถในการยืดเกาะดี และจากการศึกษาสูตรที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์มัลเบอร์รี่แผ่น พบว่า สูตรที่ได้รับการยอมรับจากผู้บริโภค มีสัดส่วนของปริมาณน้ำตาลอยู่ในช่วงร้อยละ 40-70 ปริมาณกรดซิตริกอยู่ใน ช่วงร้อยละ 0-5 และปริมาณ เพคตินอยู่ในช่วงร้อยละ 30-55 ของน้ำหนักส่วนผสมรวม 46.5 กรัม โดยมีค่าวอเตอร์แอกทีวิตี 0.49 ปริมาณความชื้นร้อยละ 9.35 โดยน้ำหนัก ซึ่งถือว่าเป็นผลิตภัณฑ์อาหารแห้ง โดยสูตรที่เหมาะสมจากงานวิจัยในครั้งนี้น่าจะเป็นแนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ผลไม้ไทยชนิดแผ่นต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยและช่วยสนับสนุนให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] S.Ercisli and E.Orhan, "Chemical composition of white (*Morus alba*), red (*Morus rubra*) and black (*Morus nigra*) mulberry fruits," *Food Chemistry*, vol. 103, no. 4, pp. 1380–1384, Jan. 2007.
- [2] S.Kaya and T.Kahyaoglu, "Thermodynamic properties and sorption equilibrium of pestil (grape leather)," *Journal of Food Engineering*, vol. 71, no. 2, pp. 200–207, Nov. 2005.
- [3] C. Raab and N. Oehler, "Making Dried Fruit Leather," Fact Sheet 232, Oregon State University Extension Service, Tillamook, Ore, USA, May 2000.
- [4] A.L. Moyls, "Drying of Apple Purees," *Journal of Food Science*, vol. 46, no. 3, pp. 939–942, May 1981.
- [5] N. A. Quintero Ruiz, S. M. Demarchi, J. F. Massolo, L. M. Rodoni and S. A. Giner, "Evaluation of quality during storage of apple leather," *LWT*, vol. 47, no. 2, pp. 485–492, Jul. 2012.
- [6] R. Kumar, R. T. Patil and G. Mondal, "Development and evaluation of blended papaya leather," *Acta Horticulturae*, vol. 851, pp. 565–570, Jan. 2010.
- [7] S. O. Babalola, O. A. Ashaye, A. O. Babalola and J. O. Aina. "Effect of cold temperature storage on quality attributes of pawpaw and guava leathers," *African Journal of Biotechnology*, vol. 1, no. 2, pp. 61–63, Dec. 2002.
- [8] Y. B. C. Man, I. Jaswir, S. Yusof, J. Selamat and H. Sugisawa, "Effect of different dryers and drying conditions on acceptability and physicochemical characteristics of durian leather," *Journal of Food Processing and Preservation*, vol. 21, no. 5, pp. 425–441, Nov. 1997.
- [9] S.Saencom, N.Chiewchan and S. Devahastin, "Production of dried ivy gourd sheet as a health snack," *Food and Bioproducts Processing*, vol. 89, no. 4, pp. 414–421, Oct. 2011.
- [10] S. Hematurin, P. Songsri, B. Suriarn and K. Lertrat, "The development of natural mao leather product," *Khon Kaen Agriculture Journal*, vol. 42, Suppl. 4, pp. 112–117, 2014.
- [11] L. Diamante, S. Li, Q. Xu and J. Busch, "Effects of Apple Juice Concentrate, Blackcurrant Concentrate and Pectin Levels on Selected Qualities of Apple-Blackcurrant Fruit Leather," *Foods*, vol. 2, no. 3, pp. 430–443, Sep. 2013.
- [12] C. Phimpfarian, A. Jangchud, K. Jangchud, N. Therdthai, W. Prinyawiwatkul and H. K. No, "Physicochemical characteristics and sensory optimisation of pineapple leather snack as affected by glucose syrup and pectin concentrations: Machine-formed pineapple leathers," *International Journal of Food Science & Technology*, vol. 46, no. 5, pp. 972–981, May 2011.
- [13] H. Singh Gujral and S. Singh Brar, "Effect of Hydrocolloids on the Dehydration Kinetics, Color, and Texture of Mango

- Leather,” *International Journal of Food Properties*, vol. 6, no. 2, pp. 269–279, Jan. 2003.
- [14] M. M. I. Chowdhury, B. K. Bala, and M. A. Haque, “Mathematical modeling of thin-layer drying of jackfruit leather,” *Journal of Food Processing and Preservation*, vol. 35, no. 6, pp. 797–805, Dec. 2011.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของเตาแก๊สแรงดันต่ำ แบบเวอร์ติคอลพอร์ตด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

อนิรุตต์ มัทธจักร^{1*} ถนัดกิจ ชะนะกุล¹ มานะ วิชางาม¹ ธนรัฐ ศรีวีระกุล¹
บงกช จันทมาส¹ เสฏฐวรรธ สุจริตภวัตสกุล² และ สุทธิศักดิ์ พงศ์ธนาพาณิช³

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

² ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (MTEC)

³ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

¹ 85 ถนนโชคชัย-เดชอุดม ตำบลเมืองศรีไค อำเภวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี 34190

² 114 อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย ถนนพหลโยธิน ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

³ 1518 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

รับบทความ 9 กรกฎาคม 2562 แก้ไขบทความ 29 เมษายน 2563 ตอรับบทความ 30 เมษายน 2563

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของเตาแก๊สแรงดันต่ำแบบเวอร์ติคอลพอร์ต โดยใช้วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) ซึ่งแบบจำลองถูกสร้างขึ้นโดยใช้โปรแกรม Fluent 6.3 โดยได้ทำการศึกษาและสร้างขอบเขตพื้นที่ของแบบจำลองในลักษณะ 3 มิติ (3D - Model) ที่มีขนาดเท่ากับเตาที่ใช้งานจริง ซึ่งผลที่ได้จากแบบจำลองจะถูกยืนยันผลด้วยการทดลองจากการวัดอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ รอบหัวเตาและภาชนะ นอกจากนี้ยังศึกษาเปรียบเทียบผลการจำลองระหว่าง เตาแก๊สแบบเวอร์ติคอลพอร์ตแบบดั้งเดิม (Conventional Burner) ซึ่งมีมุมเอียงเท่ากับ 90 องศา และมุมเอียงเท่ากับ 90 องศา (CB-S90I90) และเตาแก๊สแบบเวอร์ติคอลพอร์ตที่มีเปลวไฟแบบหมุนวน (Swirl Burner, SB) ที่มีมุมเอียงและมุมเอียงของรูหัวเตาแก๊สต่างกัน 2 รูปแบบคือ เตา SB-S90I13 และเตา SB-S30I90 จากการศึกษา พบว่าอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองของเตา CB-S90I90 มีอุณหภูมิใกล้เคียงกับการทดลอง โดยมีค่าคลาดเคลื่อนสูงสุดไม่เกินร้อยละ 9 และจากแบบจำลอง พบว่า เตา SB-S90I13 มีอุณหภูมิและ Heat Flux สูงกว่าเตา CB-S90I90 โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1,445 เคลวิน และ 5,291 วัตต์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เตา SB-S90I13 มีพฤติกรรมเผาไหม้และการถ่ายเทความร้อนสู่ภาชนะที่ดีกว่าเตา CB-S90I90 จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตา SB-S90I13 ดีกว่าเตา CB-S90I90 และโดยคิดเป็นร้อยละของการประหยัดเท่ากับ 6.93

คำสำคัญ : พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ; เตาแก๊สแบบเวอร์ติคอลพอร์ต; การไหลแบบหมุนวน; พฤติกรรมเผาไหม้

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +66 4535 3309, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: anirut.m@ubu.ac.th

<http://journal.rmutp.ac.th/>

A Study on Influence of Swirl Angle of Burner Port on Behavior of Heat Transfer to a Vessel of High-pressure Cooking Stove by Computational Fluid Dynamics

Anirut Matthujak^{1*} Thanatkit Chanakul¹ Mana Wichangarm¹
Thanarath Sriveerakul¹ Bongkot Chanthamas¹ Sedthawatt Sucharitpwatskul²
and Sutthisuk Phongthanapanich³

¹ Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University

² National Metal and Materials Technology Center, National Science and Technology Development Agency

³ College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

¹ 85 Chokchai-Det Udom Rd., Mueang Si Khai Sub-district, Warin Chamrap District, Ubon Ratchathani 34190

² 114 Thailand Science Park, Phahonyothin Road, Khlong Nueng, Khlong Luang, Pathum Thani 12120

³ 1518 Pracharat 1 Road, Wongsawang Sub-district, Bang Sue District, Bangkok 10800

Received 9 July 2019; Revised 29 April 2020; Accepted 30 April 2020

Abstract

The objective of this research is to study the combustion characteristic of a low-pressure vertical port burner using computational fluid dynamics (CFD). The simulation model was created using Fluent 6.3 in 3D-model of the same size of the burner. The CFD results were verified by measuring the temperature around the burner head and a vessel. Moreover, the results of conventional vertical port burner, having the swirl angle of 90° and the inclination angle of 90° (CB-S90I90) and two swirl port burners (SB), being SB-S90I13 and SB-S30I90, were compared. The temperatures obtained from CFD and experiments were similar, which the error was less than 9%. From the CFD's results, the temperature and heat flux of the SB-S90I13 burner were higher than those of the CB-S90I90 burner. The maximum temperature and heat flux of SB-S90I13 burner were 1,445 K and 5,291 W/m², respectively. It was implied that the combustion characteristic and heat transfer to the vessel of SB-S90I13 burner was better than that of CB-S90I90 burner. It was resulted that the thermal efficiency of SB-S90I13 burner was better than that of CB-S90I90 burner, which was the percentage energy saving of 6.93%.

Keywords : CFD; Vertical Port Burner; Swirling Flow; Combustion Characteristics

* Corresponding Author. Tel.: +6645 353 309, E-mail: anirut.m@ubu.ac.th

1. บทนำ

ในปัจจุบันทั่วโลกประสบปัญหาสถานการณ์วิกฤติด้านพลังงาน เนื่องจากพลังงานที่ใช้มีปริมาณน้อยลง และจะหมดลงในเวลาอันใกล้หากไม่มีการพบแหล่งพลังงานใหม่ นอกจากนี้ ราคาของพลังงานยังสูงค่าเพิ่มสูงขึ้นอีกด้วย ดังนั้น จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่าหรือใช้พลังงานให้มีประสิทธิภาพที่สุด ซึ่งเป็นการลดการใช้พลังงานนั่นเอง นอกจากนี้ปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม ปัญหามลพิษก็เป็นอีกปัญหาหนึ่งที่ทั่วโลกให้ความสนใจ และเป็นปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการใช้พลังงานโดยตรงซึ่งเกิดจากการปลดปล่อย ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) หรือที่เรียกกันทั่วไปว่า ก๊าซเรือนกระจก เป็นจำนวนมาก ซึ่งเป็นก๊าซที่เป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง ไม่ว่าจะเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลหรือเชื้อเพลิงปิโตรเลียม โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่เป็นผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมซึ่งมีการใช้อย่างกว้างขวาง เป็นสาเหตุหลักของการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ดังนั้น หากใช้พลังงานให้มีประสิทธิภาพ นอกจากจะสามารถลดปัญหาด้านวิกฤตพลังงานแล้วยังช่วยลดปัญหาโลกร้อนที่ประสบอยู่ในปัจจุบันอีกด้วย [1]

จากการจัดหาและความต้องการการใช้แก๊ส LPG ของประเทศไทยในปี 2556-2560 [1] พบว่า ภาคครัวเรือนมีการใช้ LPG สูงที่สุดคิดเป็นร้อยละ 35 ของปริมาณการใช้ทั้งหมดในประเทศ รองลงมาคือ ภาคปิโตรเลียมร้อยละ 32 ภาคการขนส่งร้อยละ 22 และภาคอุตสาหกรรมร้อยละ 10 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า ภาคครัวเรือนเป็นภาคส่วนที่ใช้แก๊ส LPG ในอัตราส่วนที่มีแนวโน้มสูงขึ้นทุก ๆ ปี ดังนั้น หากต้องการลดการใช้แก๊ส LPG ในประเทศไทย ภาคครัวเรือนจึงควรได้รับความสนใจก่อนเป็นอันดับแรก ซึ่งหากสามารถลดการใช้แก๊ส LPG ในภาคครัวเรือนได้ จะช่วยให้ประเทศไทยลดการนำเข้าแก๊ส LPG และลดการใช้แก๊ส LPG ได้ ภาคครัวเรือนเป็นภาคส่วนที่ต้องใช้แก๊ส LPG ในเตาแก๊สหุงต้มเพื่อประกอบอาหาร

แต่เนื่องจากลักษณะของเปลวไฟของเตาแก๊สหุงต้มที่ใช้เป็นแบบพุ่งชน (Impinging Flame Jet) ซึ่งจะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนที่สูง [2] ดังนั้น ต้องใช้ปริมาณ LPG ค่อนข้างมาก แต่เตาแก๊สหุงต้มที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันนั้นมีการเผาไหม้ในลักษณะเปิด จึงไม่สามารถนำความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้มาใช้ประโยชน์ได้อย่างเต็มที่ เพราะการถ่ายเทความร้อนจากเปลวไฟไปยังภาชนะถูกจำกัดโดยการพาความร้อน (Convection) เป็นส่วนใหญ่ ทั้งยังมีการสูญเสียความร้อนเป็นจำนวนมากไปกับแก๊สไอเสียโดยการพาความร้อน (Convection) และสูญเสียความพลังงาน ความร้อนของเปลวไฟจากการแผ่รังสีความร้อน (Radiation) อีกด้วย จึงทำให้เตาแก๊สหุงต้มที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดไม่เกินร้อยละ 35 [3] ซึ่งถือว่ายังไม่สูงเท่าที่ควร

ดังนั้น จึงมีงานวิจัยเพื่อศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สหุงต้มอย่างต่อเนื่อง โดยใน ค.ศ.1996 S. Jugjai และ S. Sanitjai [4] ได้ปรับปรุงปรับปรุงเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สหุงต้มโดยอาศัยหลักหมุนเวียนความร้อน (Preheat) แต่เนื่องจากเตาแก๊สที่มีอยู่นั้นเป็นหัวเตาขนาดเล็ก ต่อมา พ.ศ. 2544 N. Rungsimuntuchat [5] จึงได้ขยายขนาดเตาที่ใหญ่ขึ้นโดยใช้กับเตาขนาด KB-10 ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพความร้อนได้ร้อยละ 12 จากงานวิจัยที่ผ่านมา [3] - [5] พบว่ามีความสนใจในการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สแรงดันสูง ซึ่งเป็นหัวเตาที่ใช้แก๊สสูงกว่า 5.79 กิโลวัตต์ [5] หรือตามท้องตลาดเรียกว่า เตาหัวฟู หรือ เตา KB ซึ่งเป็นเตาแก๊สที่มีใหญ่กว่าเตาแก๊สหุงต้มที่ใช้ในครัวเรือน เช่น เตาแก๊ส KB-5, KB-7, KB-8 และ KB-10 โดยมีขนาดหัวเตา 5, 7, 8 และ 10 นิ้ว ตามลำดับ เท่านั้น

ต่อมา พ.ศ. 2558 Ch. Prakobdee et al. [6] ได้ทำการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนแบบเวอร์ติคอลพอร์ต ดังแสดงใน

รูปที่ 1 ซึ่งเป็นเตาแก๊สชนิดแรงดันต่ำโดยมีปริมาณการใช้แก๊ส LPG สูงสุดเพียง 5.78 กิโลวัตต์ ซึ่งมีการดัดแปลงหัวเตาจากแบบเดิมแบบเวอร์ติคอลพอร์ต (Conventional Burner) ซึ่งมีมุมเอียง (Swirl Angle, S) เท่ากับ 90 องศา และมุมเงย (Inclination Angle, I) เท่ากับ 90 องศา (CB-S90I90) ให้เป็นแบบหมุนวน (Swirl Burner, SB) โดยที่มีมุมเงยและมุมเอียงของหัวเตาแก๊สต่างกัน 2 รูปแบบคือ เตา SB-S90I13 และเตา SB-S30I90 จากการศึกษา พบว่า สามารถเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาจากแบบเดิมร้อยละ 54.2 เป็นร้อยละ 62 โดยคิดเป็นอัตราการประหยัด (Energy Saving) เท่ากับร้อยละ 14 แต่เนื่องจากข้อจำกัดในการทดลองจึงไม่สามารถอธิบายสาเหตุของการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่เกิดจากการปรับเปลี่ยนลักษณะหัวเตาให้เป็น SB ได้



รูปที่ 1 เตาแก๊สหัวต้มแบบเวอร์ติคอลพอร์ต

ในปี พ.ศ. 2559 M. Wichangarm et al. [7] ได้ ทำการศึกษาพฤติกรรมการไหลของของไหลในเตาแก๊สแรงดันสูงแบบประหยัดพลังงานกรณีที่ไม่มีการเผาไหม้ ด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) ซึ่งพบว่าความเร็วที่ได้จาก CFD มีความสอดคล้องกันกับการทดลองโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 9 และพบว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถอธิบายพฤติกรรมการไหลของของไหลในเตาแก๊สแรงดันสูงแบบประหยัดพลังงานได้เป็นอย่างดี ต่อมา พ.ศ. 2560 M. Wichangarm et al. [8], [9] ได้นำ อัตราการไหลเชิงมวล (Mass Flow Rate) และ สัดส่วนเชิงมวล

(Mass Fraction) ของ โพรเพน บิวเทน ไนโตรเจน และออกซิเจน ที่ได้จากการศึกษาในปี พ.ศ.2559 [7] มากำหนดเป็นข้อมูลเริ่มต้นของแบบจำลองที่มีการเผาไหม้กรณีที่ไม่มีการเผาไหม้ที่ปากเตาด้านบนโดยทำการจำลองด้วย CFD แบบ 3 มิติ ทั้งแบบ Full Model และแบบ Periodic Model พบว่า อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของเตาแก๊สประหยัดพลังงานที่ได้จากการจำลองทั้ง 2 แบบ มีความสอดคล้องกับการทดลอง โดยแบบ Full Model และแบบ Periodic Model มีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 5.86 และร้อยละ 5.46 ตามลำดับ นอกจากนี้ ยังพบว่า ผลจากแบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถอธิบายพฤติกรรมการเผาไหม้ของเตาแก๊สประหยัดพลังงานได้เป็นอย่างดี ต่อมา พ.ศ. 2561 M. Wichangarm et al. [10] และ A. Matthujak et al. [11] ได้ทำการศึกษาต่อเนื่องโดยทำการจำลองกรณีที่มีลักษณะที่ปากเตาด้านบน พบว่า อุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดีกับการทดลองโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 5.75 และยังพบว่า การไหลแบบหมุนวนมีผลต่อการถ่ายความร้อนสู่ภาชนะรวมถึงสามารถอธิบายผลของการถ่ายเทความร้อนไปยังภาชนะได้อีกด้วย

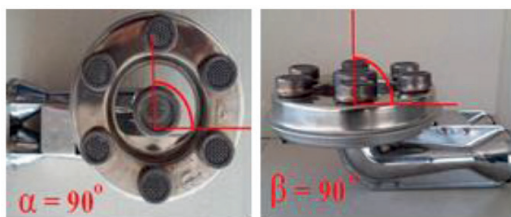
จากนั้นในปี พ.ศ. 2560 T. Chanakul et al. [12] จึงมีแนวคิดในการนำเอา CFD มาประยุกต์ใช้เพื่ออธิบายถึงพฤติกรรมการไหลของเตาแก๊สแรงดันต่ำแบบเวอร์ติคอลพอร์ต (Vertical Port Burner) โดยใช้อักษรย่อเป็น CB-S90I90 จากการศึกษาพบว่า ความเร็วที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของเตา CB-S90I90 ที่ได้จากการจำลองมีความสอดคล้องกันกับการทดลองโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 3 และยังพบว่า CFD สามารถอธิบายพฤติกรรมการไหลของเตา CB-S90I90 ได้ แต่การศึกษานี้ยังไม่ได้อธิบายถึงพฤติกรรมการเผาไหม้ที่เกิดขึ้น

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของเตาแก๊สแรงดันต่ำแบบเวอร์ติคอลพอร์ต (Vertical Port Burner) ด้วย CFD โดยเป็นการศึกษา

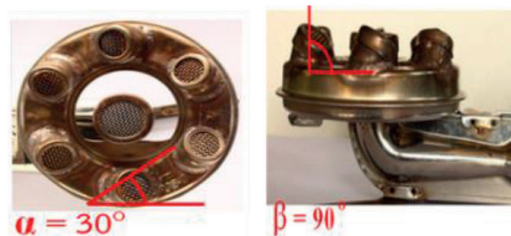
ต่อเนื่องจากงานวิจัยของ T. Chanakul et al. [12] นอกจากนี้ยังทำการศึกษาศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของเตาเวอร์ติคอลพอร์ตที่มีการไหลแบบหมุนวน (Swirling Burner, SB) เปรียบเทียบกับหัวเตาแบบดั้งเดิม อีกด้วย

2. เปรียบวิธีวิจัย

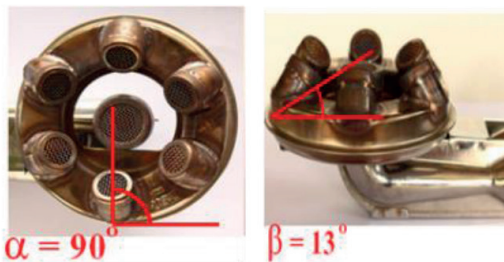
งานวิจัยนี้เป็นการจำลองพฤติกรรมเผาไหม้ของเตาแก๊สแรงดันต่ำแบบเวอร์ติคอลพอร์ต รวมถึงทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองของเตา CB-S90I90 ซึ่งมีมุมเอียง (Swirl Angle, S or α) เท่ากับ 90 องศา และมุมเงย (Inclination Angle, I or β) เท่ากับ 90 องศา (CB-S90I90) กับเตาแก๊สแบบเวอร์ติคอลพอร์ตที่มีเปลวไฟแบบหมุนวน (Swirl Burner, SB) ที่มีมุมเงยและมุมเอียงของรูหัวเตาแก๊สต่างกัน 2 รูปแบบ คือเตา SB-S90I13 และเตา SB-S30I90 ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งเป็นลักษณะหัวเตาที่ให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดจากงานวิจัยของ Ch. Prakobdee et al. [6]



ค) เตา CB-S90I90



ข) เตา CB-S90I90

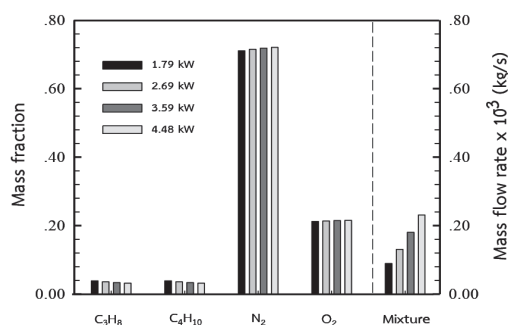


ค) เตา CB-S90I90

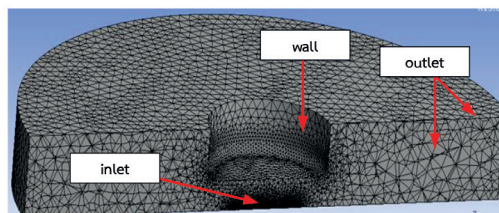
รูปที่ 2 ลักษณะเตา

2.1 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

ในการศึกษาครั้งนี้จะนำค่า Mass Flow Rate และ Mass Fraction ของ โพรเพน บิวเทน ไนโตรเจน และออกซิเจน ที่นำมากำหนดเป็นเงื่อนไขขอบเขตของการศึกษาครั้งนี้ ได้มาจากการจำลองของ T. Chanakul et al. [12] ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 อัตราการไหลเชิงมวล (Mass Flow Rate) และอัตราส่วนเชิงมวล (Mass Fraction) ของส่วนประกอบในท่อผสมด้านใน ที่ Firing Rate (Fr) ต่าง ๆ [12]



รูปที่ 4 Grid ของหัวเตาที่ใช้ในการศึกษา

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ใช้การจำลอง CFD แบบจำลอง 3 มิติ โดยพิจารณาการไหลแบบคงที่ (Steady State) และมีการเผาไหม้โดยใช้ Fluent 6.3 กริดที่ใช้ในการคำนวณจะสร้างโดย GAMBIT สำหรับขอบเขตพื้นที่และกริดที่ใช้ในการคำนวณ แสดงดังรูปที่ 4 ซึ่งกริดที่ใช้ในการศึกษาค้นคว้านี้เป็นกริดรูปทรงสามเหลี่ยมสี่ด้าน (Tetrahedral Grid)

การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต คือ การกำหนดค่าของความเร็ว อุณหภูมิ และอัตราการป้อนเชื้อเพลิง โดยนำค่า Mass Fraction ดังแสดงในรูปที่ 2 [12] มากำหนดเงื่อนไขขอบเขต โดยการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตมีความสำคัญต่อความถูกต้องของผลการคำนวณเป็นอย่างมาก โดยจะต้องกำหนดให้ถูกต้องตามหลักความเป็นจริง โดยเงื่อนไขในการจำลองจะแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการจำลอง CFD

Condition	Pattern
Solver	Pressure base
Inlet boundary condition	Mass flow rate of mixture (kg/s) Mass fraction of C_3H_8 , C_4H_{10} , O_2 , N_2
Outlet boundary condition	Pressure outlet (Air gage pressure outlet = 0 Pa)
Time	Steady state
Near-wall treatment method	Standard wall function
Turbulence model	Standard K-ε model
Other	Species transport Eddy dissipation combustion model Discrete ordinates (DO) Model

โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณในการศึกษานี้ประกอบไปด้วย

สมการอนุรักษ์มวล

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

สมการอนุรักษ์พลังงาน

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} + \epsilon \sigma (T_s^4 - T_s^\infty) \\ = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q'' \end{aligned} \quad (2)$$

โดยที่

$q'' = \dot{W}_A \Delta H$ คือ พลังงานที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีต่อหน่วยปริมาตรของของไหล

$\alpha = \frac{k}{\rho c}$ คือ ค่าสภาพการแพร่กระจายความร้อนของวัสดุ

k คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

ρ คือ ความหนาแน่น

c คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะสมการอนุรักษ์โมเมนตัม

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} \\ = - \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

สมการอนุรักษ์มวลย่อย

$$\rho u \frac{\partial Y_A}{\partial x} + \rho v \frac{\partial Y_A}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \rho D_A \frac{\partial Y_A}{\partial y} + \dot{W}_A'' \quad (4)$$

สมการการเผาไหม้

โดยแบบจำลองการเผาไหม้ที่ใช้ในการศึกษาคือ สมการการเผาไหม้แบบ Eddy Dissipation Combustion Model ใช้ร่วมกับการแผ่รังสีความร้อน (Radiation Model) แบบ Discrete Ordinates (DO) Model

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{w,i} A \rho \frac{\varepsilon}{k} \min_R \frac{Y_R}{v'_{R,r} M_{w,R}}$$

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{w,i} A B \rho \frac{\varepsilon}{k} \frac{\sum_p Y_p}{\sum_j^N v''_{j,r} M_{w,j}} \quad (5)$$

โดยที่

R คือ อัตราโมลาร์ของ Arrhenius

v' คือ สัมประสิทธิ์อัตราของสารตั้งต้น

M คือ มวลโมเลกุล

ρ คือ ความหนาแน่น

K คือ พลังงานจลน์แบบปั่นป่วน

ε คือ อัตราการกระจายตัว

v'' คือ สัมประสิทธิ์อัตราของสารผลิตภัณฑ์

A คือ ค่าคงที่ในการทดลองเท่ากับ 4.0

B คือ ค่าคงที่ในการทดลองเท่ากับ 0.5

Y คือ เศษส่วนมวล (Mass Fraction)

$$\nabla \cdot (I(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s}) + (a + \sigma_s) I(\vec{r}, \vec{s})$$

$$= an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s}, \vec{s}') d\Omega' \quad (6)$$

โดยที่

I คือ Radiation Intensity (แปรผันตามตำแหน่งและทิศทาง)

$\vec{r}$ คือ ตำแหน่งเวกเตอร์

$\vec{s}$ คือ ทิศทางของเวกเตอร์ในระบบพิกัดแกน

$\vec{s}'$ คือ การกระจายตัวของเวกเตอร์ในระบบพิกัดแกน

a คือ สัมประสิทธิ์การดูดซับ

σ_s คือ สัมประสิทธิ์การกระจายตัว

n คือ ดัชนีการหักเหแสง

T คือ อุณหภูมิ

Φ คือ Phase Function

Ω' คือ Solid Angle

สมการการคำนวณหาค่า Heat Flux

ในการแสดงผลจากการเผาไหม้ของหัวเตาในแบบต่างๆ จะแสดงผลจากการเปรียบเทียบ Heat Flux โดยคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$q_{\text{flux}} = \frac{q_{\text{total}}}{A_{\text{total}}} = \frac{q_{\text{bottompot}} + q_{\text{sidepot}}}{A_{\text{total}}} \quad (7)$$

โดยที่

$$q_{\text{bottompot}} = \frac{kA(T_1 - T_2)}{\Delta x} + \varepsilon \sigma A [T_1^4 - T_2^4]$$

$$q_{\text{sidepot}} = 2\pi Lk \left[\frac{(T_{\text{in}} - T_{\text{out}})}{\ln(r_{\text{in}} - r_{\text{out}})} \right] \quad (8)$$

โดยที่

q_{flux} คือ Heat Flux, วัตต์ต่อตารางเมตร

q_{total} คือ ค่าการถ่ายเทความร้อนทั้งหมด, วัตต์

$q_{\text{bottom pot}}$ คือ การถ่ายเทความร้อนบริเวณก้นหม้อ, วัตต์

$q_{\text{side pot}}$ คือ การถ่ายเทความร้อนบริเวณด้านข้างหม้อ, วัตต์

A_{total} คือ ผลรวมพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของหม้อ, ตารางเมตร

A คือ พื้นที่หน้าตัด, ตารางเมตร

Δx คือ ความหนาของผนังหม้อ, เมตร

L คือ ความสูงของระดับน้ำในหม้อ, เมตร

ε คือ ค่าการแผ่รังสีความร้อนของวัสดุ

σ คือ ค่าคงที่ของสเตฟาน, $W/m^2 \cdot K^4$

T คือ อุณหภูมิ, เคลวิน

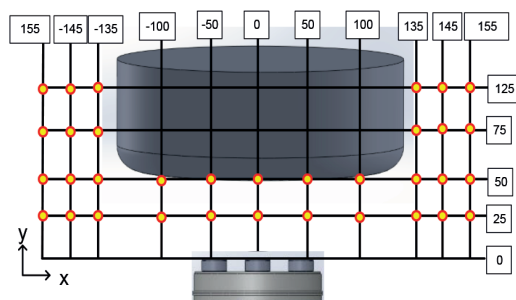
r คือ รัศมีของหม้อ, เมตร

k คือ ค่าการนำความร้อนของวัสดุ, วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน

การคำนวณและการประมวลผลของแบบจำลองการเผาไหม้ กำหนดโดยเงื่อนไขการรู้เข้าคำตอบ (Convergence Criteria) เท่ากับ 10^{-12} เมื่อการทำนาย

ผลของค่าตอบสู่ค่า Convergence Criteria จนกระทั่งมีการทำนายซ้ำค่าเดิมที่เกิดขึ้น ถือว่าสามารถนำผลที่ได้มาใช้วิเคราะห์การเผาไหม้ได้

ในการทดลองจะทำการบันทึกอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามรูปที่ 5 ด้วย Data Logger ที่มีค่าความถูกต้อง ± 1 เคลวิน ต่อเข้ากับ Type - K Thermocouple โดยทำการทดลอง 3 ครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ย โดยทำเริ่มจากการบรรจุปริมาณน้ำให้มีระดับความสูงเท่ากับแบบจำลอง (75 มิลลิเมตร) จากนั้นทำการต้มน้ำจนมีอุณหภูมิ 363 เคลวิน แล้วจึงทำการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ดังรูป

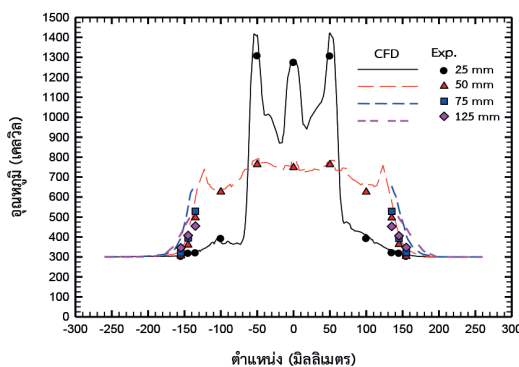


รูปที่ 5 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิในการเผาไหม้
(หน่วย: มิลลิเมตร)

3. ผลการคำนวณและการวิเคราะห์

รูปที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิเปลวไฟที่ได้จาก CFD และการทดลองของเตา CB-S90I90 ที่ Firing Rate (Fr คือ ผลคูณระหว่างอัตราการไหลของ LPG กับค่าความร้อนของ LPG) เท่ากับ 4.48 กิโลวัตต์ จากผลจาก CFD พบว่า ที่ความสูงจากหัวเตา 25 มิลลิเมตร (แนวแกน y) ที่ ตำแหน่ง ± 50 มิลลิเมตร (แนวแกน x) เป็นจุดที่มีอุณหภูมิสูงที่สุด โดยมีอุณหภูมิเท่ากับ 1,304 เคลวิน เนื่องจากเป็นจุดที่ได้รับความร้อนโดยตรงจากเปลวไฟของหัวเตาด้านนอก และ ตำแหน่ง 0 มิลลิเมตร จะมีอุณหภูมิสูงรองลงมา โดยมีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 1,288 เคลวิน เนื่องจากเป็นจุดที่ได้รับความร้อนจากเปลวไฟของหัวเตาด้านใน

ส่วน ตำแหน่ง ± 100 มิลลิเมตร จะไม่ได้รับความร้อนจากเปลวไฟโดยตรงทำให้ตำแหน่งนี้มีอุณหภูมิตดลงอย่างมากโดยมีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 430 เคลวิน และ ที่ ตำแหน่ง ± 135 มิลลิเมตร, ± 145 มิลลิเมตร และ ± 150 มิลลิเมตร มีอุณหภูมิตดลงตามลำดับโดยที่ ตำแหน่ง ± 135 มิลลิเมตร เป็นจุดที่มีอุณหภูมิสูงที่สุด โดยมีอุณหภูมิเท่ากับ 656 เคลวิน

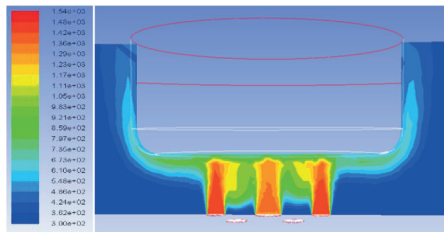


รูปที่ 6 การเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิเปลวไฟ
ที่ได้จาก CFD และการทดลองของเตา CB-S90I90
ที่ 4.48 กิโลวัตต์

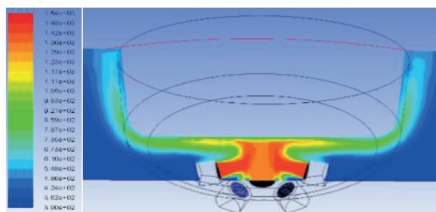
จากการพิจารณาในแนวรัศมีของเตา (แนวแกน x) พบว่า ที่ตำแหน่ง 0, ± 50 , ± 100 , ± 135 และ ± 150 มิลลิเมตร อุณหภูมิสูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 1,288, 1304, 655, 656 และ 320 เคลวิน ตามลำดับ และเมื่อระยะห่างของหัวเตาในแนวแกนกับก้นหม้อ (แนวแกน y) เพิ่มขึ้น อุณหภูมิจะมีค่าลดลงโดยมีอุณหภูมิสูงที่สุดที่ตำแหน่ง ± 50 มิลลิเมตร ซึ่งมีอุณหภูมิเท่ากับ 1,304, 763, 340 และ 320 เคลวิน ที่ตำแหน่งความสูง (แนวแกน) 25, 50, 75 และ 125 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยผลของอุณหภูมิจากการจำลองเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองแล้วมีค่าที่ใกล้เคียงกันโดยมีค่าความเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 9

รูปที่ 7 แสดงแถบสีอุณหภูมิที่ระนาบกึ่งกลางหัวเตาของเตา CB-S90I90, SB-S90I13 และ SB-S30I90 ตามลำดับ พบว่า เตา CB-S90I90 มีลักษณะของ

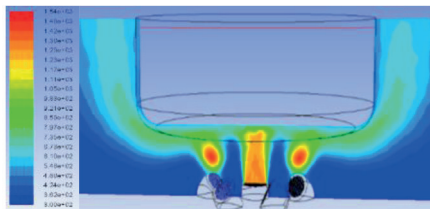
เปลวไฟพุ่งขึ้นชนกับผนังหม้อโดยที่เปลวไฟของแต่ละรูทางออกจะแยกกันพุ่งชนกันหม้อด้านล่างดังแสดงในรูปที่ 7 ก) ซึ่งมีความแตกต่างกับหัวเตา SB-S90I13 และ SB-S30I90 โดยที่เตา SB-S90I13 มีลักษณะของเปลวไฟพุ่งขึ้นโดยที่เปลวไฟที่บริเวณทางออกของท่อผสมด้านนอกจะพุ่งเข้าชนกับเปลวไฟของท่อผสมด้านในดังแสดงในรูปที่ 7 ข) ซึ่งเป็นผลมาจากผลของ $\beta = 13$ องศา จากลักษณะของการพุ่งชนกันของเปลวไฟทำให้เปลวไฟที่พุ่งชนกันหม้อมีขนาดใหญ่ขึ้นและพุ่งเข้าหาบริเวณจุดกึ่งกลางของหม้อ ในส่วนของเตา SB-S30I90 มีลักษณะของเปลวไฟของท่อผสมด้านในจะพุ่งขึ้นชนกับผนังหม้อด้านล่างบริเวณกึ่งกลางของหม้อดังแสดงในรูปที่ 7 ค) ส่วนเปลวไฟที่ทางออกของท่อผสมด้านนอกจะพุ่งชนผนังหม้อด้านล่างในลักษณะของการหมุนวน เนื่องจาก $\alpha = 30$ องศา



ก) CB-S90I90

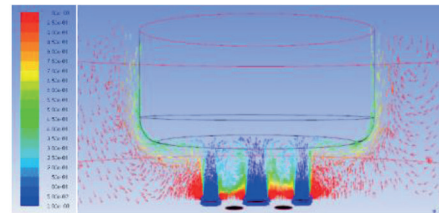


ข) SB-S90I13

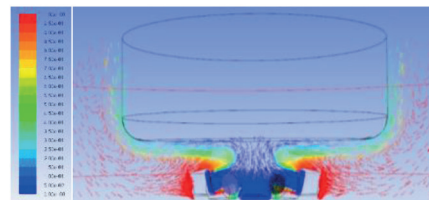


ค) SB-S90I90

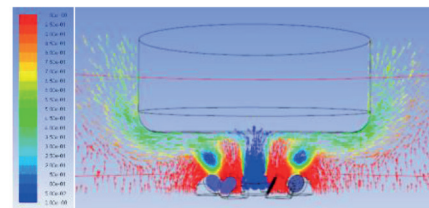
รูปที่ 7 แถบสีอุณหภูมิที่ระนาบกึ่งกลางหัวเตา



ก) CB-S90I90



ข) SB-S90I13

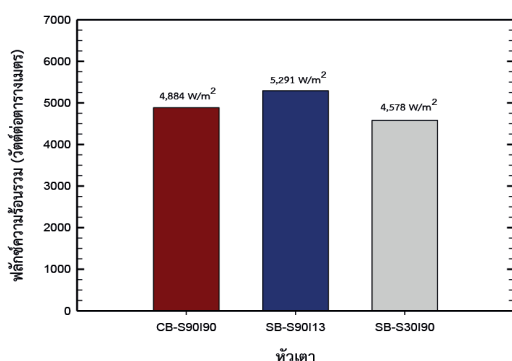


ค) SB-S30I90

รูปที่ 8 เวกเตอร์ความเร็วที่ระนาบกึ่งกลางหัวเตา

รูปที่ 8 แสดงเวกเตอร์ความเร็วที่ระนาบกึ่งกลางหัวเตาของเตา CB-S90I90, SB-S90I13 และ SB-S30I90 ตามลำดับ พบว่า ลักษณะการเหนี่ยวนำอากาศของเตา CB-S90I90 มีการเหนี่ยวนำอากาศในลักษณะแยกกันระหว่างท่อผสมด้านนอกกับท่อผสมด้านใน และมีการเหนี่ยวนำอากาศส่วนมากจากด้านล่างของเตาเพื่อไหลเข้ามาทำการเผาไหม้ดังแสดงในรูปที่ 8ก) ซึ่งจะแตกต่างกับเตา SB-S90I13 ที่มีการพุ่งชนกันของเปลวไฟ เนื่องจากผลของ $\beta = 13$ องศา จึงทำให้เตา SB-S90I13 มีการเหนี่ยวนำอากาศจากบริเวณด้านข้างของหัวเตามากกว่าบริเวณด้านล่างของหัวเตาก่อนที่จะพุ่งชนกันหม้อ ซึ่งจากผลของการพุ่งชนกันของเปลวไฟทำให้การเหนี่ยวนำอากาศบริเวณด้านล่างของหัวเตามีพื้นที่ในการเหนี่ยวนำน้อยลง และเป็นผลให้บริเวณด้านล่างของหัวเตา มีการพุ่งลงของอากาศอีกด้วย ดังแสดง

ในรูปที่ 8ข) ในส่วนของเตา SB-S30I90 มีการเหนี่ยวนำอากาศในลักษณะแยกกันระหว่างท่อผสมด้านนอกกับท่อผสมด้านในเช่นเดียวกับเตา CB-S90I90 และมีการเหนี่ยวนำอากาศส่วนมากจากด้านล่างของหัวเตาเข้ามาทำการเผาไหม้ ดังแสดงในรูปที่ 8 ค) โดยลักษณะการเหนี่ยวนำอากาศส่วนที่สอง (Secondary Air) จากบริเวณรอบหัวเตา และบริเวณด้านข้างของหม้อเข้ามาทำการเผาไหม้ของหัวเตาแต่ละชนิดมีลักษณะที่แตกต่างกัน ซึ่งเกิดจากจากผลของ β และ α ที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 8 ก), 8 ข) และ 8 ค)



รูปที่ 9 การเปรียบเทียบฟลักซ์ความร้อนรวม (Total Heat Flux) บริเวณหม้อของหัวเตาแบบต่าง ๆ ที่ 4.48 กิโลวัตต์

รูปที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบฟลักซ์ความร้อนรวม (Total Heat Flux) บริเวณหม้อของหัวเตาแบบต่าง ๆ ที่ 4.48 กิโลวัตต์ พบว่า เตา SB-S90I13 มี Heat flux สูงที่สุด รองลงมาคือเตา CB-S90I90 และ SB-S30I90 ตามลำดับ โดยมี Heat Flux เท่ากับ 5,291 วัตต์ต่อตารางเมตร, 4,884 วัตต์ต่อตารางเมตร และ 4,578 วัตต์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิการเผาไหม้ของหัวเตา SB-S90I13 ที่มีค่าสูงที่สุด จากการเปรียบเทียบ Heat Flux จึงสรุปได้ว่าเตาแบบ SB-S90I13 ให้ Heat Flux สูงที่สุดโดยสูงขึ้นร้อยละ 7.69 เมื่อเปรียบเทียบกับเตา CB-S90I90 ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการวิจัยที่ผ่านมาของ Ch.

Prakobdee et al. [6] ซึ่งพบว่าเตา SB-S90I13 มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงขึ้น โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน (% Energy saving) เท่ากับร้อยละ 6.93

4. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาการจำลองพฤติกรรมเผาไหม้ของเตาแก๊สแรงดันต่ำแบบเวอร์ติคอลลพอร์ทโดยใช้วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณพบว่า

1. เตา CB-S90I90 ให้ผลของอุณหภูมิจากการจำลองใกล้เคียงกับผลการทดลองโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดไม่เกินร้อยละ 9

2. CFD สามารถอธิบายพฤติกรรมการเผาไหม้ของเตาแก๊สแรงดันต่ำแบบเวอร์ติคอลลพอร์ทได้เป็นอย่างดีชัดเจน โดยลักษณะของหัวเตาที่แตกต่างกันจะทำให้มีพฤติกรรมการไหลและการเผาไหม้ที่แตกต่างกัน

3. เตา SB-S90I13 ให้อุณหภูมิในการเผาไหม้สูงที่สุด รองลงมาคือ เตา CB-S90I90 และ SB-S30I90 โดยมีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 1,304 เคลวิน, 1,445 เคลวิน และ 1,288 เคลวิน ตามลำดับ

4. เตา SB-S90I13 ที่ให้ค่า Heat flux สูงที่สุด รองลงมาคือ CB-S90I90 และ SB-S30I90 โดยมี Heat Flux เท่ากับ 5,291 วัตต์ต่อตารางเมตร, 4,884 วัตต์ต่อตารางเมตร และ 4,578 วัตต์ต่อตารางเมตร ตามลำดับสอดคล้องกับอุณหภูมิการเผาไหม้ของแต่ละหัวเตา โดยเตา SB-S90I13 มี Heat Flux สูงกว่า CB-S90I90 คิดเป็นร้อยละ 7.69 ซึ่งสอดคล้องกับประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตา SB-S90I13 ที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับเตา CB-S90I90 [6] โดยคิดเป็นอัตราการประหยัด (Energy Saving) เท่ากับร้อยละ 6.93

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้ทุนสนับสนุน

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Energy Policy and Planning Office. (2018). Energy Information. [Online]. Available: <http://www.eppo.go.th>
- [2] L.L. Dong, C.S. Cheung and C.W. Leung, “Heat Transfer from an Impinging Premixed Butane/Air Slot Flame Jets,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 45, no. 5, pp. 979 – 992, Feb. 2002.
- [3] U. Makmool, S. Jugjai, S. Tia, P. Vallikul and B. Fungtammasan, “Performance and analysis by particle image velocimetry (PIV) of cooker-top burners in Thailand,” *Energy*, vol. 32, no. 10, pp. 1986 – 1995, 2007.
- [4] S. Jugjai and S. Sanitjai, “Parametric Studies of Thermal Efficiency in a Proposed Porous Radiant Recirculated Burner (PRRB): A Design Concept for the Future Burner,” *International Energy Journal*, vol. 18, no. 2, pp. 97–111, Dec. 1996.
- [5] N. Rungsimuntuchat, “Application of Porous Medium for Energy Saving in Gas Cooker,” M. Eng thesis, Department of Mechanical Engineering, King Mongkut’s University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand, 2011.
- [6] Ch. Prakobdee, A. Matthujak and B. Bunphet, “Thermal Efficiency Improvement of Vertical Port Cooking Burner Using Swirling Flow,” in *Proceeding of the 29th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand*, Department of Mechanical Engineering, Office of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, 2015, Paper no. AEC-22.
- [7] M. Wichangarm, A. Matthujak, T. Sriveerakul and S. Sucharitpwatskul, “Simulation of flow characteristics in an energy-saving high-pressure gas stove,” in *Proceeding of the 29th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand*, Prince of Songkla University, Songkhla, Thailand, 2016. Paper no. CST0027.
- [8] M. Wichangarm, A. Matthujak, T. Sriveerakul, S. Sucharitpwatskul, and S. Phongthanapanich, “Simulation Study of LPG Cooking Burner,” *International Journal of Engineering & Technology*, vol. 7, no. 3.7, pp. 142-144, Jul. 2018.
- [9] M. Wichangarm, A. Matthujak, T. Sriveerakul and S. Sucharitpwatskul, “Simulation on combustion characteristics of an energy-saving gas stove using Computational fluid dynamics,” in *Proceeding of the 31st Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand*, Srinakharinwirot University, Nakhon Nayok Province, Thailand, 2017, Paper no. CST21.
- [10] M. Wichangarm, A. Matthujak, T. Sriveerakul and S. Sucharitpwatskul, “Influence of whirling flow on combustion behavior of high pressure gas stove by computational fluid dynamics,” in *Proceeding of the 32nd Conference of Mechanical*

- Engineering Network of Thailand*, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan, Mukdahan, Thailand, 2018, Paper no. AEC-01.
- [11] A. Matthujak, M. Wichangarm, T. Sriveerakul and S. Sucharitpwatskul, "Study of the influence of a high-pressure rotary gas stove on heat transfer behavior into a container by computational fluid dynamics," in *Proceeding of 14th Conference on Energy Network of Thailand (E-NETT 2019)*, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi and Suranaree University of Technology, Rayong, Thailand, 2018, Paper no. ECE-0005.
- [12] T. Chanakul, A. Matthujak, M. Wichangarm, T. Sriveerakul and S. Sucharitpwatskul, "The study of the flow behavior of household gas stove by vertical port using computational fluid dynamics," in *Proceeding of the 31st Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand*, Srinakharinwirot University, Nakhon Nayok Province, Thailand, 2017, Paper no. CST15.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การอบแห้งพริกด้วยเครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำที่เสริมการทำงานด้วยเครื่องอุ่นอากาศเทอร์โมอิเล็กทริก

พชร ว่องไพศาลกิจ กระวี ตรีอำนาจ* และ เทวรัตน์ ตรีอำนาจ

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

รับบทความ 30 มกราคม 2563 แก้ไขบทความ 20 เมษายน 2563 ตอรับบทความ 5 พฤษภาคม 2563

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก รุ่น TEC12710 เป็นเครื่องปรับสภาวะอากาศที่ทำหน้าที่อุ่นและลดความชื้นอากาศขึ้นต้นสำหรับเครื่องอบแห้งพริกชี้หูแดงด้วยคุณสมบัติการผลิตความร้อนและความเย็นที่เกิดขึ้นทั้งสองด้านของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกจากการใช้พลังงานไฟฟ้า เพื่อนำมาลดความชื้นและอุ่นอากาศก่อนนำไปให้ความร้อนด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพื่อให้ได้อุณหภูมิอากาศอบแห้งตามต้องการ ในการทดสอบการทำงานของเครื่องด้วยการอบแห้งพริกชี้หูแดงสระหว่างการใช้เครื่องปรับสภาวะอากาศร่วมกับฮีตเตอร์และการใช้ฮีตเตอร์อย่างเดียว เปรียบเทียบผลกับการตากแห้งพริกชี้หูแดงด้วยแสงแดดตามธรรมชาติ พบว่าเครื่องปรับสภาวะอากาศสามารถควบคุมความชื้นในอากาศโดยมีอัตราการควบแน่นสูงที่สุด 0.083 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ที่ด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก และสามารถอุ่นอากาศให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นได้ประมาณ 10 องศาเซลเซียส ที่ด้านร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริก ในด้านการทดสอบการอบแห้งพริกชี้หูแดงสดด้วยเครื่องอบแห้งที่สร้างขึ้น พบว่าสามารถลดความชื้นพริกชี้หูแดงลงได้เหลือเพียงร้อยละ 10 มาตรฐานเปียก โดยที่สีของพริกชี้หูแดงเปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการตากแดดตามธรรมชาติ และการใช้เครื่องปรับสภาวะอากาศกับฮีตเตอร์ไฟฟ้ามีอัตราการอบแห้งและอัตราการระเหยน้ำจำเพาะสูงกว่าการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว โดยที่มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำกว่าอีกทั้งยังใช้พลังงานน้อยกว่า 14 เมกกะจูล และสามารถอบแห้งได้รวดเร็วกว่าถึง 10 ชั่วโมง

คำสำคัญ : เครื่องอบแห้ง; เทอร์โมอิเล็กทริก; พริก

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 6515 7035, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: krawee@sut.ac.th

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Drying of Chilli with Thermoelectric Air Preheater Assisted Low Temperature Dryer

Patchara Wongpaisarnkit Krawee Treeamnuk* and Tawarat Treeamnuk

Institute of Engineering, Suranaree University of Technology
111 University Avenue, Suranaree, Mueang, Nakhon Ratchasima, 30000

Received 30 January 2020; Revised 20 April 2020; Accepted 5 May 2020

Abstract

This research objective was to apply thermoelectric module model TEC12710 as a preheater and dehumidifier for red chilies dryer. The heat side and cool side of Thermoelectric module affected by supplied electricity were used to produces the low humidity and warm air in preheater before charging to the main electric heater of dryer. Fresh red chilies were selected as a sample in the prototype testing during the use of preheater assisted main heater and using only main heater. The test results are compared with the sample dried under the natural sun drying. The experimental results show that the preheater can condense the moisture in air with the highest MER of $0.083 \text{ kg}_{\text{water}} \text{ h}^{-1}$ at cold side of thermoelectric module and can heat the air up in 10°C of temperature with hot side of thermoelectric module. The final moisture content of sample is only 10%wb with the slightly changed in color when compared with the sample from sun drying. The using of preheater with main heater gives a higher specific moisture extraction rate, lower specific energy consumption, 14 MJ energy used and can dry faster than 10 h when compared with the using of only main heater.

Keywords : Dryer; Thermoelectric Module; Chilli

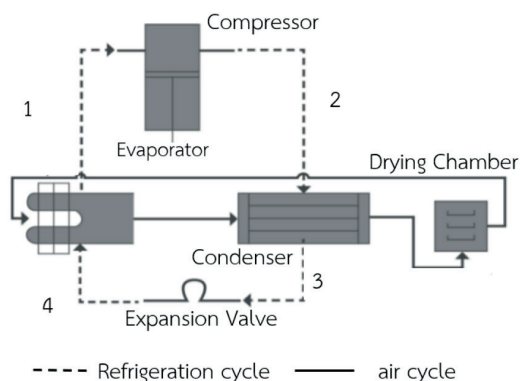
* Corresponding Author. Tel.: +668 6515 7035, E-mail Address: krawee@sut.ac.th

1. บทนำ

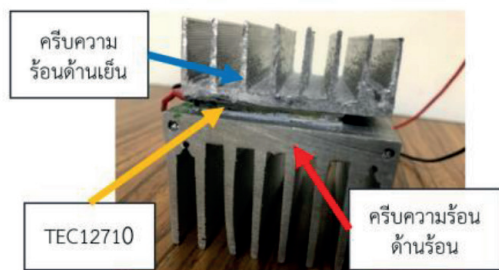
การอบแห้งเป็นกระบวนการหลังการเก็บเกี่ยว เพื่อเก็บรักษาผลผลิตทางเกษตร โดยที่ยังสามารถคง สารอาหารไว้ได้ [1] โดยอาศัยวิธีการจัดการความชื้น ออกจากผลผลิตทางเกษตร เนื่องจากความชื้นเป็น แหล่งสะสมของเชื้อโรคและจุลินทรีย์ที่ทำลายผลผลิต ให้เกิดการเสียหายได้ในภายหลัง การอบแห้งผลผลิต ทางเกษตรแบ่งเป็น 2 วิธี [2] ได้แก่การตากแดดตาม ธรรมชาติ (Natural Sun Drying) และการใช้เครื่อง อบแห้งเชิงกล (Mechanical Dryer) ถึงแม้ว่า การตากแห้งด้วยแสงแดดจะมีการลงทุนต่ำ ทำได้ง่าย แต่ต้องอาศัยช่วงเวลาที่แดดจัดซึ่งไม่สามารถควบคุม กระบวนการได้ ปัจจุบันการใช้เครื่องอบแห้งได้รับความนิยมมากขึ้นเพราะสามารถอบแห้งได้โดยไม่ต้อง คำนึงถึงสภาพอากาศ นอกจากนี้ถ้าควบคุมการอบแห้ง ที่อุณหภูมิต่ำและไม่สัมผัสกับแสงแดดโดยตรงเป็นเวลาด นานจะสามารถรักษาคุณภาพทั้งด้านคุณค่าทางอาหาร และสีของผลผลิตให้คงเดิมหรือเปลี่ยนแปลงไปเพียง เล็กน้อย ส่งผลต่ออิทธิพลการเลือกซื้อของผู้บริโภค [3] การอบแห้งด้วยอุณหภูมิต่ำยังเหมาะสำหรับนำไปอบ แห้งผลผลิตบางชนิดที่มีความทนทานต่อความร้อนต่ำ ดังเช่นพืชสมุนไพร หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งอุณหภูมิ ต่ำอาศัยการผลิตอากาศอบแห้งที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ ทำได้โดยการลดความชื้น หรือเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ อากาศอบแห้ง ซึ่งปั๊มความร้อนแบบอัดไอสามารถทำได้ ทั้งการลดความชื้น และการเพิ่มอุณหภูมิ [4]

ปั๊มความร้อนแบบอัดไอ [5] อาศัยการใช้สาร ทำความเย็นที่ไหลเวียนภายในระบบช่วยดึงความร้อน ออกจากอากาศ ด้วยการเปลี่ยนแปลงความดันของสาร ทำความเย็น โดยมีอุปกรณ์ในระบบทำหน้าที่เปลี่ยน ความดันของสารทำความเย็นดังกล่าว และแลกเปลี่ยน ความร้อนระหว่างสารทำความเย็นกับอากาศ ในการ ประยุกต์ใช้กับเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนเพื่อ สร้างสภาวะอากาศให้เหมาะสมกับการอบแห้ง จะ บังคับให้อากาศไหลภายในห้องอบแห้งแบบระบบปิด

(เส้นเติมในรูปที่ 1) อากาศจะถูกดูดกลืนความร้อน จนอุณหภูมิลดลง และเกิดการควบแน่นของไอน้ำใน อากาศที่ Evaporator หลังจากนั้นอากาศจะถูกบังคับ ให้ไหลผ่าน Condenser เพื่อรับความร้อนจากสาร ทำความเย็น (เส้นปะในรูปที่ 1) จนมีอุณหภูมิสูงขึ้นและ ไหลเข้าสู่ห้องอบแห้ง (Drying Chamber) ต่อไปอย่าง เป็นวัฏจักร T. Madhiyanon et al. [6] ได้ทำการอบ แห้งมะละกอเชื่อมด้วยเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนพบ ว่าสามารถคงคุณภาพด้านสีของมะละกอเชื่อมได้ดี จากรายงานของ U. Auaprakul et al. [7] ได้ทำการ อบแห้งผักตบชวาด้วยเครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนใช้ เวลา 4 ชั่วโมง ซึ่งถ้านำไปตากแดดต้องใช้เวลาราว 4 วัน อีกทั้งยังมีค่าสมรรถนะ (COP) สูงถึง 4.5–5.3 นอกจากนี้ T. Mamoto et al. [8] ได้ทำการสร้าง เครื่องอบแห้งปั๊มความร้อนเพื่ออบแห้งพริกชี้หนู แดง สามารถลดปริมาณความชื้นของพริกจากร้อยละ 80 มาตรฐานเปียก ให้มีความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 10 มาตรฐานเปียก โดยใช้ระยะเวลาเพียง 45 ชั่วโมง



รูปที่ 1 แบบจำลองระบบการทำงานของ เครื่องอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนระบบอัดไอ [9]



รูปที่ 2 การติดตั้งครีความร้อนบนแผ่นเทอร์โม อิเล็กทริก

แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric Module หรือ TEC Module) เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่มีขนาดเล็ก (ขนาด 4x4x0.4 ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังรูปที่ 2) เมื่อได้รับพลังงานไฟฟ้าจะดูดกลืนความร้อนจากสิ่งแวดล้อมจนทำให้ด้านเย็นของแผ่นมีอุณหภูมิต่ำลง ในขณะที่ด้านตรงข้ามของแผ่นจะพยายามถ่ายเทความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อมจนเกิดเป็นด้านร้อนขึ้น

เทอร์โมอิเล็กทริกถูกนำไปประยุกต์ได้หลากหลาย R. He et al. [10] นำเทอร์โมอิเล็กทริก รุ่น TEC12706 ไปสร้างกล่องแช่เย็นสำหรับอุปกรณ์ทางการแพทย์สามารถลดอุณหภูมิถึง 19.01 องศาเซลเซียสด้วยการใช้พลังงาน 6 โวลต์ H. Al-Madhhachi et al. [11] ได้นำอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก รุ่น GM250-49-45-35 ไปทำการทดสอบพบว่าแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกด้านเย็นมีความสามารถในการลดอุณหภูมิแก่อากาศลงถึง 20 องศาเซลเซียส อีกทั้งยังเกิดการควบแน่นไอน้ำจากอากาศได้ 28.5 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง โดยติดตั้งครีความร้อนทั้งสองด้านของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก ทำการระบายความร้อนออกจากแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกทำให้เกิดความเย็นขึ้นอีกด้านของแผ่นซึ่งสามารถเกิดการควบแน่นของน้ำจากอากาศที่ไหลผ่านได้ นอกจากนี้ P. Wongpaisarnkit et al. [12] ได้ทำการทดสอบให้อากาศไหลผ่านแผ่นเทอร์โม

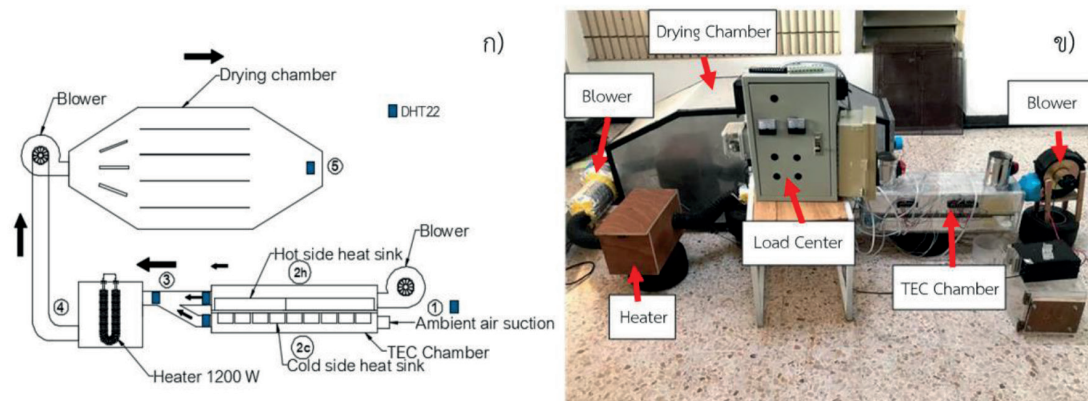
อิเล็กทริกที่ติดตั้งครีความร้อนด้วยอัตราไหลอากาศด้านร้อน 0.0229 กิโลกรัมต่อวินาที และด้านเย็น 0.0089 กิโลกรัมต่อวินาที ทำการจ่ายพลังงานไฟฟ้าแก่ TEC12710 ขนาด 6 โวลต์ 3.5 แอมป์ พบว่าเกิดการควบแน่นของไอน้ำในอากาศที่ด้านเย็นของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก โดยมีอัตราการควบแน่นของความชื้นในอากาศได้ 0.016 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และพบว่าจะต้องระบายความร้อนออกจากด้านร้อนให้รวดเร็วเพียงพอระบบจึงจะทำงานได้ดีและต่อเนื่องจะเห็นได้ว่าอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกนี้สามารถสร้างความร้อนและทำความเย็นซึ่งเป็นหน้าที่ที่สำคัญของปั๊มความร้อนระบบอัดไอในเครื่องอบแห้ง

จากหลักการทำงานของเครื่องอบแห้งอุณหภูมิต่ำแบบปั๊มความร้อนและการทำงานของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะประยุกต์ใช้แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกด้านเย็นในการควบแน่นไอน้ำในอากาศเพื่อลดความชื้นของอากาศอบแห้งและใช้ความร้อนจากด้านร้อนช่วยในการอุ่นอากาศอบแห้งขึ้นต้นให้กับระบบอบแห้งแบบอุณหภูมิต่ำแบบใช้อีเตอร์ไฟฟ้า ทั้งนี้คาดว่าจะสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในเครื่องอบแห้งลงได้ และช่วยทำให้เครื่องอบแห้งแบบใหม่มีขนาดเล็กลง ลดการทำงานที่ซับซ้อนของระบบทำความเย็นแบบอัดไอและไม่ต้องใช้สารทำงานที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม โดยที่ยังคงได้ผลิตภัณฑ์หลังอบแห้งที่มีคุณภาพดีเช่นเดิม

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 ต้นแบบเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้น

ต้นแบบมีห้องอบแห้งขนาด 216 ลิตร และประยุกต์ใช้แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกมาช่วยลดความชื้นในอากาศและช่วยอุ่นอากาศขึ้นต้นดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 เครื่องอบแห้งติดตั้งเครื่องปรับสภาวะอากาศร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า

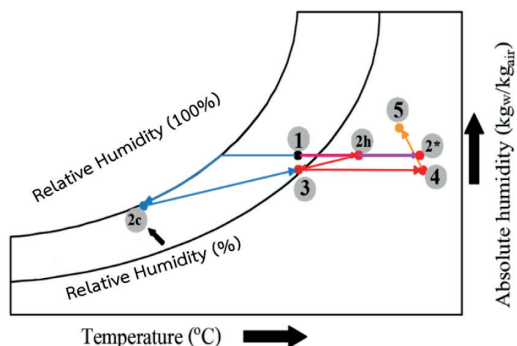
ก) ไดอะแกรม ข) ภาพแสดงเครื่องต้นแบบ

ทำการติดตั้งแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก รุ่น TEC12710 (ขนาด 4x4x0.4 ลูกบาศก์เซนติเมตร ผลิตจากบริษัท Hebei I.T. Co.,Ltd, Shanghai) ในเครื่องปรับสภาวะอากาศ (TEC Chamber) ก่อนเข้าห้องอบแห้ง (Drying Chamber) ทั้งหมด 12 ตัว จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้แก่เทอร์โมอิเล็กทริกที่ 6 โวลต์ 3.5 แอมป์ ต่อ 1 ตัว ทำการแบ่งอากาศที่ไหลเข้าเครื่องอบแห้งออกเป็นสองส่วน โดยแยกไหลผ่านด้านร้อนและด้านเย็นของ TEC12710 ที่ติดตั้งไว้ทั้งด้านร้อนและด้านเย็น โดยด้านร้อนมีขนาดความกว้าง 6.6 เซนติเมตร ความยาว 6.6 เซนติเมตร และความสูง 4.0 เซนติเมตร ส่วนครึ่งความร้อนด้านเย็นนั้นมีขนาดความกว้าง 5.3 เซนติเมตร, ความยาว 5.3 เซนติเมตร และความสูง 2.0 เซนติเมตร ครึ่งความร้อนฝั่งร้อนมีขนาดใหญ่กว่าฝั่งเย็น เนื่องจากต้องการให้ระบายความร้อนออกได้อย่างรวดเร็ว ทำการควบคุมอัตราการไหลผ่านของอากาศด้านร้อนและด้านเย็นให้คงที่ที่ 0.023 กิโลกรัมต่อวินาที และ 0.0058 กิโลกรัมต่อวินาที ตามลำดับ จากนั้นอากาศทั้งสองส่วนจะมาผสมรวมกันด้วยอัตราส่วนผสมอากาศร้อนต่ออากาศเย็น 4:1 [4] ทั้งนี้เพื่อให้อากาศหลังผสมมีอุณหภูมิ

ต่ำเกินไป หลังจากนั้นอากาศที่ผสมแล้วจะไหลผ่านฮีตเตอร์ไฟฟ้าขนาด 1,200 วัตต์ ก่อนเข้าห้องอบแห้งควบคุมอุณหภูมิด้วยเทอร์โมสตัตอิเล็กทรอนิกส์ยี่ห้อ Linking รุ่น LT400 สำหรับเปิด-ปิด การทำงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพื่อควบคุมให้อุณหภูมิในห้องอบแห้งคงที่ที่ 54 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ไม่สูงจนเกินไปเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดผลกระทบจากความร้อนต่อคุณภาพของวัสดุทดสอบการอบแห้ง ทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิและความชื้นรุ่น DHT 22 ยี่ห้อ Shenzhen ทั้งหมด 5 จุด และทำการบันทึกค่าอุณหภูมิและความชื้นด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino รุ่น UNO R3 ทุก ๆ 5 นาที โดยได้ทำการสร้างเครื่องอบแห้งซึ่งมีรายละเอียดการติดตั้งเครื่องอบแห้งด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกแบบไดอะแกรมแสดงดังรูปที่ 3 ก) และภาพถ่ายเครื่องต้นแบบแสดงดังรูปที่ 3 ข)

2.2 คุณสมบัติของอากาศในระบบ

อากาศอบแห้งในเครื่องอบแห้งต้นแบบที่ติดตั้งเครื่องปรับสภาวะของอากาศ มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของอากาศตามกระบวนการบนแผนภูมิ Psychrometric Chart (รูปที่ 4) ดังนี้



รูปที่ 4 Psychrometric Chart แสดงสถานะของอากาศแต่ละตำแหน่งในระบบ

จากรูปที่ 4 และรูปที่ 3 อากาศสิ่งแวดล้อมภายนอก (ตำแหน่งที่ 1) ถูกป้อนเข้าสู่ระบบให้ไหลผ่านครีบริมาณร้อนด้านร้อนของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก (ตำแหน่ง 2h) ด้วยเครื่องเป่าลมไฟฟ้าแบบปรับอัตราการไหลอากาศได้ กระบวนการจาก 1 ถึง 2h นี้เป็นการเพิ่มความร้อนแบบอัตราส่วนความชื้นคงที่ ทางด้านล่างอากาศจากสิ่งแวดล้อมจะถูกดูดเข้าสู่ระบบและไหลผ่านครีบริมาณร้อนด้านเย็นของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก (ตำแหน่ง 2c) เนื่องจากเกิดความดันลดในท่อจากผลของอากาศที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงในท่อช่วงตำแหน่ง 2h ถึง 3 ประกอบกับการติดตั้งเครื่องเป่าลมตัวที่ 2 เพื่อใช้ส่งลมเข้าห้องอบแห้งอีกด้วย ที่ปลายทางเข้ามีการติดตั้งกันเพื่อควบคุมอัตราการไหลเข้าจากตำแหน่ง 1 ถึง 2c ให้มีค่าตามต้องการ กระบวนการจาก 1 จนกระทั่งผ่าน 2c เป็นการลดอุณหภูมิอากาศจนถึงจุดควบแน่นของไอน้ำในอากาศ ทำให้ความชื้นในอากาศเปลี่ยนสถานะเป็นหยดของเหลวและแยกตัวออกจากอากาศ จากนั้นอากาศจากตำแหน่ง 2h และ 2c ไหลเข้าผสมกันที่ตำแหน่ง 3 เกิดเป็นอากาศที่มีอุณหภูมิสูงและความชื้นต่ำ ก่อนที่จะไหลผ่านฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพื่ออุ่นอากาศหรือเพิ่มอุณหภูมิแบบความชื้นคงที่ อากาศที่ได้แสดงดังตำแหน่ง 4 ตามค่าอุณหภูมิที่ต้องการ อากาศที่ได้จะถูกป้อนเข้าสู่ห้องอบแห้งก่อนจะไหลออกจากระบบที่ตำแหน่ง 5 กระบวนการจาก

4 ถึง 5 จึงเป็นการเพิ่มความชื้นเข้าสู่อากาศที่อุณหภูมิกระเปาะเปียกคงที่ สำหรับระบบที่ตัดอุปกรณ์ปรับสถานะอากาศขั้นต้นออกจะเป็นดังกระบวนการ 1 – 2* – 5 บน Psychrometric Chart ซึ่งอากาศที่ 2* มีความชื้นสูงกว่าตำแหน่ง 4 ในรูปที่ 4

2.3 การทดสอบและประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งต้นแบบ

เลือกพริกชี้หนูแดงเป็นวัสดุทดสอบการอบแห้งเนื่องจากสีเปลี่ยนจากการอบแห้งได้ง่าย บรรจุพริกชี้หนูแดงในห้องอบแห้งครั้งละประมาณ 3.5 กิโลกรัม อัตราการไหลของอากาศอบแห้งในระบบเท่ากับ 0.01 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที และอุณหภูมิของห้องอบแห้งเท่ากับ 54 องศาเซลเซียส แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 แบบ แบบละ 3 ชั่วโมง คือ 1) การทดสอบอบแห้งแบบเปิดการทำงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว และ 2) การทดสอบการอบแห้งแบบใช้อุปกรณ์ปรับสถานะอากาศขั้นต้นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกพร้อมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า ระหว่างการอบแห้งทำการชั่งน้ำหนักของพริกชี้หนูแดงเพื่อบันทึกน้ำหนักที่ลดลงทุก ๆ 60 นาที จนกระทั่งน้ำหนักของพริกชี้หนูแดงมีค่าลดลงน้อยมาก (น้อยกว่า 0.01 กรัมภายใน 4 ชั่วโมง บันทึกค่าอุณหภูมิและความชื้นของตำแหน่งที่ 1 ถึง 5 ตามรูปที่ 3 และบันทึกการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบด้วยมิเตอร์กิโลวัตต์ชั่วโมง เมื่อสิ้นสุดการทดลองได้นำตัวอย่างพริกชี้หนูแดงไปเข้าตู้อบลมร้อนยี่ห้อ France Etuves รุ่น XU058 จนกระทั่งไม่หลงเหลือความชื้นในตัวอย่างเพื่อหาค่าน้ำหนักแห้งสำหรับการใช้ในการคำนวณหาปริมาณความชื้นในแต่ละช่วงเวลาทำการทดสอบอบแห้งตั้งแต่เริ่มต้นอบแห้งจนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการดังสมการที่ 1 และ 2 [13]

$$MC_w = \frac{m - m_d}{m} \quad (1)$$

$$MC_d = \frac{m - m_d}{m_d} \quad (2)$$

โดยที่

MC_w = ปริมาณความชื้นมาตรฐานเปียก

MC_d = ปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้ง

m = น้ำหนักของวัสดุขึ้น, กิโลกรัม

m_d = น้ำหนักของวัสดุแห้ง, กิโลกรัม

ทำการคำนวณค่าสมรรถนะ 2 ช่วง คือช่วงที่ความชื้นของพริกชี้หนูแดงมีค่าเป็นร้อยละ 14 มาตรฐานเปียก (ปริมาณความชื้นของพริกชี้หนูที่ทำการอบแห้งทางธรรมชาติจนเข้าสู่สมดุล) [14] และช่วงสิ้นสุดการทดลอง ประเมินด้วยกราฟแสดงความสัมพันธ์ของการอบแห้ง อัตราการอบแห้งเฉลี่ยภายในระยะเวลาการทดลอง อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ อัตราการควบแน่น และความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ [4] สามารถแสดงได้ด้วยสมการ (3), (4), (5) และ (6) ดังนี้

$$DR = \frac{m_i - m_f}{t} \quad (3)$$

$$SMER = \frac{m_i - m_f}{p_c} \quad (4)$$

$$MER = \dot{m}_c (H_{in} - H_{out}) \quad (5)$$

$$SEC = \frac{3.6P_c}{m_i - m_f} \quad (6)$$

โดยที่

DR = อัตราการอบแห้ง, กิโลกรัมต่อชั่วโมง

$SMER$ = อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ, กิโลกรัมต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง

MER = อัตราการควบแน่น, กิโลกรัมต่อชั่วโมง

SEC = ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ, เมกกะจูลต่อกิโลกรัม

m_i = น้ำหนักก่อนการอบแห้ง, กิโลกรัม

m_f = น้ำหนักหลังการอบแห้ง, กิโลกรัม

$\dot{m}_c$ = อัตราการไหลอากาศฝั่งเย็น, กิโลกรัมต่อชั่วโมง

H_{in} = ความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศก่อนผ่านเทอร์โมอิเล็กทริกฝั่งเย็น, กรัมต่อกิโลกรัม

H_{out} = ความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศหลังผ่านเทอร์โมอิเล็กทริกฝั่งเย็น, กรัมต่อกิโลกรัม

t = ระยะเวลาในการอบแห้ง, ชั่วโมง

P_c = พลังงานไฟฟ้าที่ใช้, กิโลวัตต์ชั่วโมง

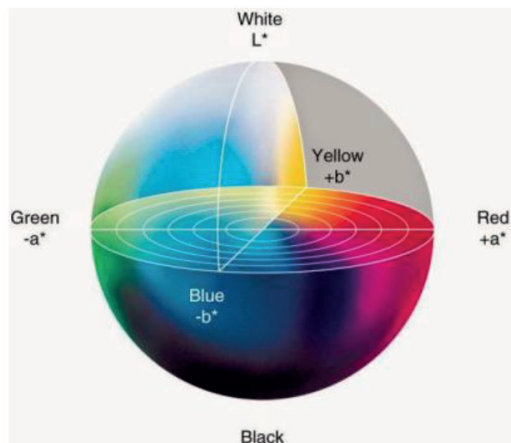
จากนั้นจึงทำการเปรียบเทียบคุณภาพด้านสีของตัวอย่างพริกชี้หนูแดงที่ได้จากการทดสอบทั้ง 2 แบบ กับพริกชี้หนูแดงตากแห้งด้วยแสงแดด ด้วยการสังเกตการเปลี่ยนแปลงของสีผลและก้านของพริกชี้หนูแดงตัวอย่าง

2.3 การตรวจสอบคุณภาพหลังการอบแห้ง

ในส่วนของการวัดคุณภาพหลังการอบแห้งของพริกชี้หนูแดงได้ทำการเปรียบเทียบคุณภาพของสีผลของตัวอย่างพริกชี้หนูแดง ก่อนอบแห้งและหลังการอบแห้ง เปรียบเทียบระหว่างการอบแห้งเครื่องอบแห้งที่สร้างขึ้นที่การทดลองเปิด และไม่เปิดเครื่องปรับอากาศกับการตากแห้งด้วยวิธีทางธรรมชาติด้วยเครื่องวัดสียี่ห้อ HunterLab รุ่น Color/Quest XE ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 เครื่องวัดสี



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ของตัวแปรของค่าสี (L^* , a^* และ b^*)

ในการวัดสีใช้หลักการของการดูดกลืนแสงของสาร โดยทำการฉายแสงขาว หรือแสงที่อยู่ในช่วงรังสียูวีไปยังโมเลกุลของวัสดุตัวอย่าง ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นคือ อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสงจนเกิดการเปลี่ยนสถานะไปสู่ระดับชั้นพลังงานที่สูงขึ้น [15] การวัดค่าสีได้แสดงออกมาในตัวของหน่วยสีซึ่งได้แบ่งออกเป็น L^* , a^* และ b^* โดยในส่วนของสีของแต่ละค่าตัวแปรหน่วยสีนั้นได้มีสีที่แตกต่างกันออกไปซึ่งมีการถึงแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรดังรูปที่ 6

จากการนำตัวอย่างไปทำการวัดค่าสี ค่าตัวแปรค่าสีที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดสีนั้น สามารถนำไปคำนวณเพื่อเปรียบเทียบค่าความต่างของสีของวัสดุทดสอบที่ต้องการได้ โดยทำการใช้ค่าตัวแปรของสีทั้ง L^* , a^* และ b^* ที่ได้จากการวัดสีระหว่างตัวอย่าง 2 ตัวอย่างที่ต้องการทราบความแตกต่างเพื่อนำมาคำนวณหาค่าความต่างของสี (ΔE) ด้วยสมการที่ (7)

$$\Delta E = \sqrt{(L_2^* - L_1^*)^2 + (a_2^* - a_1^*)^2 + (b_2^* - b_1^*)^2} \quad (7)$$

โดยที่

ΔE = ความต่างของสีระหว่างตัวอย่างที่ทำการเปรียบเทียบ

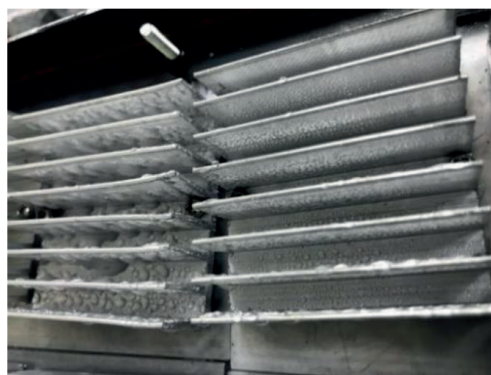
L_1^*, a_1^*, b_1^* = ค่าสีในหน่วย CIELAB ของตัวอย่างวัดสีที่ 1

L_2^*, a_2^*, b_2^* = ค่าสีในหน่วย CIELAB ของตัวอย่างวัดสีที่ 2

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ความสามารถของเครื่องปรับสภาวะอากาศ

ผลของการใช้โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกในเครื่องปรับสภาวะอากาศ เมื่อตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นของอากาศตำแหน่งที่ 1-5 จาก Psychrometric Chart พบว่าครีบริบความร้อนด้านเย็นของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถควบคุมความชื้นออกจากอากาศได้ในอัตรา 0.083 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ดังตารางที่ 1 และเกิดเป็นหยดน้ำเกาะบริเวณครีบริบความร้อนของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกด้านเย็นดังรูปที่ (7) สำหรับการอุ่นอากาศขึ้นต้นด้วยครีบริบความร้อนด้านร้อนของโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกพบว่าสามารถเพิ่มอุณหภูมิอากาศได้ประมาณ 10 องศาเซลเซียส และผลการอุ่นอากาศนี้ทำให้ RH ของอากาศก่อนเข้าสู่ฮีตเตอร์มีค่าเท่ากับร้อยละ 48.1 ค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของอากาศก่อนเข้า (Air Input) และภายหลังผ่านครีบริบความร้อนด้านเย็นและด้านร้อนแล้วแสดงดัง ตารางที่ 1

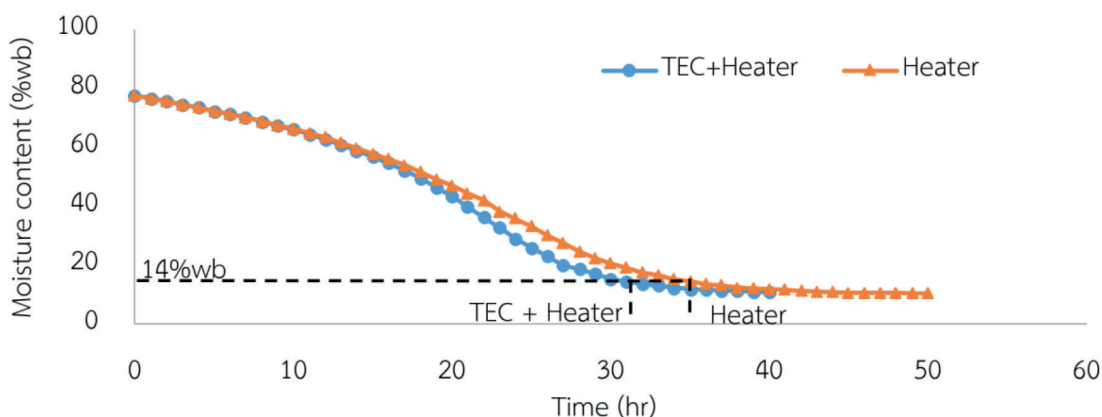


รูปที่ 7 ความชื้นควบแน่นที่เกิดขึ้นบนครีบริบความร้อนที่ติดกับด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก

ตารางที่ 1 สภาวะของอากาศเมื่อผ่านตู้เทอร์โมอิเล็กทริก

Air input (Position 1)	Temp (°C)	23.4
	RH (%)	77
	Abs humidity (H_{in}) ($\frac{g_{water}}{kg_{air}}$)	13.988
Passed TEC's cool side (Position2c)	Temp (°C)	23
	RH (%)	57
	Abs humidity (H_{out}) ($\frac{g_{water}}{kg_{air}}$)	10.032
Passed TEC's hot side (Position2h)	Temp (°C)	33.1
	RH (%)	48.1

หมายเหตุ อัตราไหล่อากาศด้านร้อน 0.023 กิโลกรัมต่อวินาที อัตราไหล่อากาศด้านเย็น 0.0058 กิโลกรัมต่อวินาที



รูปที่ 8 เปรียบเทียบปริมาณความชื้นของพริกชี้หนูแดงด้วยเครื่องอบแห้งต้นแบบทั้งสองระบบ

3.2 สมรรถนะของเครื่องอบแห้งต้นแบบ

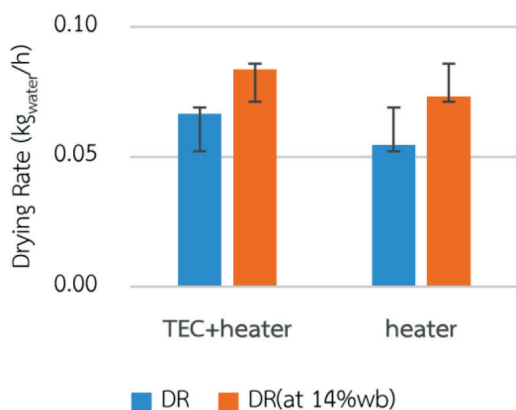
3.2.1 พฤติกรรมการอบแห้ง

เมื่อทำการหาปริมาณความชื้นของพริกชี้หนูแดงในแต่ละชั่วโมงที่ทำการอบแห้งของทั้ง 2 ระบบมาเทียบกันได้ดังรูปที่ 8 ซึ่งได้แสดงปริมาณความชื้นมาตรฐานเปียกในแต่ละชั่วโมงของการอบแห้งของทั้งสองระบบพบว่าค่าปริมาณความชื้นมีแนวโน้มลดลง การอบแห้งที่อุณหภูมิ 54 องศาเซลเซียส สามารถลดความชื้นให้ต่ำกว่าความชื้นของพริกชี้หนูแดงที่ทำการอบแห้งด้วยวิธีทางธรรมชาติที่ร้อยละ 14 ความชื้นมาตรฐานเปียก

โดยระบบที่มีการเปิดใช้เครื่องปรับสภาวะอากาศร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า เริ่มมีอัตราส่วนความชื้นลดลงแตกต่างกับ ระบบที่ใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวอย่างสังเกตเห็นได้ในชั่วโมงที่ 10 ของการอบแห้ง โดยระบบที่มีเครื่องปรับสภาวะอากาศสามารถอบแห้งจนกระทั่งน้ำหนักตัวอย่างคงที่ด้วยเวลา 40 ชั่วโมงซึ่งใช้เวลาต่ำกว่าระบบที่ใช้เพียงฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวถึง 10 ชั่วโมงเนื่องจากระบบดังกล่าวสามารถควบคุมความชื้นออกทำให้อากาศอบแห้งมีความชื้นต่ำซึ่งมีผลต่อการอบแห้ง นอกจากนี้ในการนำไปใช้งานจริงไม่

จำเป็นต้องอบแห้งจนกระทั่งน้ำหนักคงที่สามารถหยุดการอบแห้งเมื่อวัสดุอบแห้งมีความชื้นต่ำกว่าสมดุลในสภาวะของสิ่งแวดล้อม (ความชื้นของพริกชี้หนูแดงที่ร้อยละ 14 มาตรฐานเปียก) เนื่องจากประหยัดพลังงานและประหยัดเวลา

3.2.2 อัตราการอบแห้ง



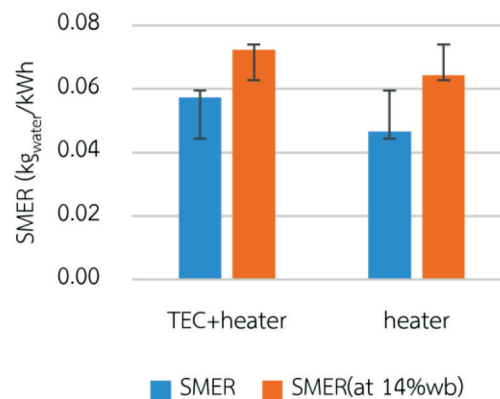
รูปที่ 9 อัตราการอบแห้งของพริกชี้หนูแดง

จากรูปที่ 9 พบว่าระบบที่มีการเปิดใช้เครื่องปรับอากาศร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า มีความสามารถในการลดความชื้นได้ 0.0665 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ซึ่งสูงกว่าระบบที่ใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวมีค่าอยู่ที่ 0.0546 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เช่นเดียวกันในกรณีที่ทำการศึกษาการอบแห้งที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 14 มาตรฐานเปียก ความสามารถในการลดความชื้นของระบบเปิดใช้เครื่องปรับอากาศร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้ามีค่าเป็น 0.0837 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และระบบที่ใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวมีค่าอัตราการอบแห้งที่ 0.0733 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

3.2.3 อัตราการระเหยน้ำจำเพาะ

อัตราการระเหยความชื้นออกจากพริกชี้หนูแดงต่อพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ 1 หน่วย (กิโลวัตต์ชั่วโมง)

แสดงดังรูปที่ 10 พบว่าระบบที่มีการเปิดใช้เครื่องปรับอากาศร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้ามีอัตราการระเหยน้ำจำเพาะ 0.0574 กิโลกรัมต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง ซึ่งสูงกว่าระบบที่ใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวที่มีค่า 0.0466 กิโลกรัมต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง



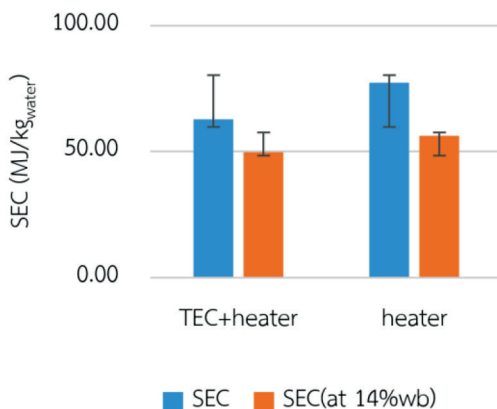
รูปที่ 10 อัตราการระเหยน้ำจำเพาะของพริกชี้หนูแดง

เนื่องจากระยะเวลาในการอบแห้งที่สั้นกว่าทำให้ใช้พลังงานในการอบแห้งน้อยกว่าและส่งผลต่อค่าอัตราการระเหยน้ำจำเพาะอีกทั้งการอุ่นอากาศก่อนด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกยังส่งผลให้ลดภาระการทำงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้าทำให้ประหยัดพลังงานมากกว่า แม้กระทั่งการสิ้นสุดการทดลองที่ร้อยละ 14 มาตรฐานเปียก ค่าอัตราการระเหยน้ำจำเพาะของระบบเปิดใช้เครื่องปรับอากาศร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าซึ่งมีค่า 0.0723 กิโลกรัมต่อกิโลวัตต์ชั่วโมงยังสูงกว่าของระบบที่ใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวโดยมีค่า 0.0644 กิโลกรัมต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง

3.2.4 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะแสดงถึงพลังงานที่ใช้สำหรับการระเหยความชื้นออกจากพริกชี้หนูแดง 1 กิโลกรัม พบว่าทั้งสองระบบนั้นมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะสูง (รูปที่ 11) เนื่องจากพริกชี้หนูแดงเป็นผลผลิตที่ลดความชื้นได้ค่อนข้าง

ยากเนื่องจากผิวของพริกชี้หนูแดงมีสารเคลือบอยู่ตามธรรมชาติเพื่อช่วยรักษาความชื้นภายในเอาไว้ อีกทั้งปริมาณความชื้นของพริกชี้หนูแดงสดมีค่าสูงถึงประมาณร้อยละ 80 มาตรฐานเปียก [8] จึงต้องใช้พลังงานอย่างต่อเนื่องสะสมเป็นเวลานานในการระเหยความชื้นออกจากผลพริกชี้หนูแดง ประกอบกับเครื่อง



รูปที่ 11 ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการอบแห้งพริกชี้หนูแดง

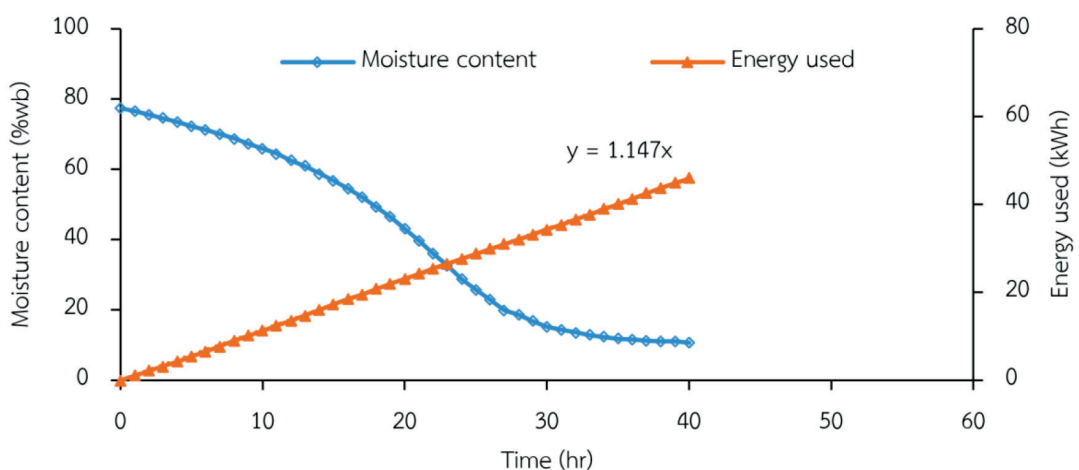
อบแห้งต้นแบบที่พัฒนาขึ้นเป็นระบบเปิดคือ นำอากาศจากภายนอกเข้ามาอุ่นอากาศใหม่ไม่มีการนำอากาศ

ภายในหมุนเวียนมาใช้ ส่งผลให้ต้องการพลังงานในการอบแห้งสูงตามไปด้วย

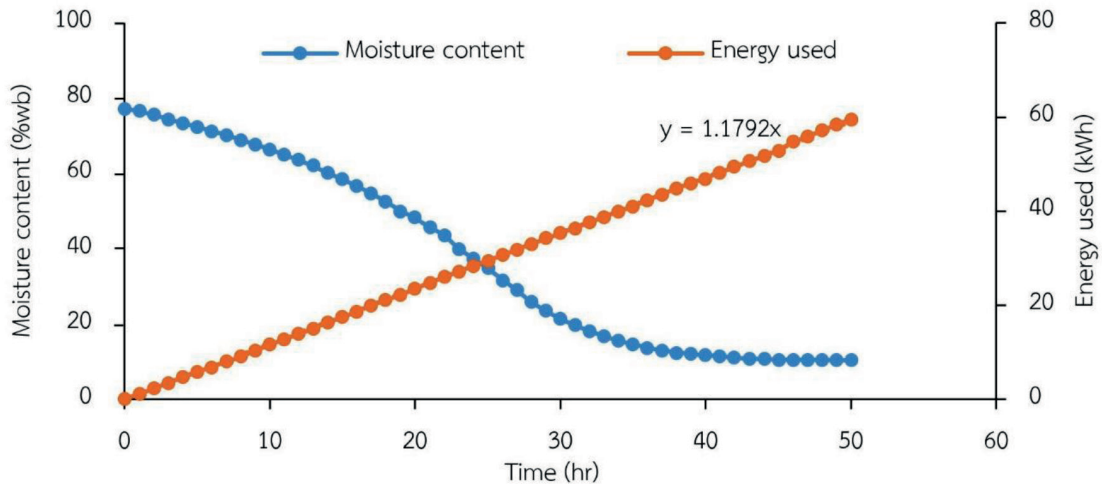
เมื่อเปรียบเทียบกันทั้งสองระบบพบว่าระบบที่มีการเปิดใช้เครื่องปรับอากาศมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะอยู่ที่ 62.89 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งต่ำกว่าระบบที่ใช้ฮีตเตอร์เพียงอย่างเดียวที่มีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะอยู่ที่ 77.47 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม เช่นเดียวกันกับกรณีที่ยืดการอบแห้งที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 14 มาตรฐานเปียก ระบบที่ใช้เครื่องปรับอากาศมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะอยู่ที่ 49.82 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งต่ำกว่าระบบที่ใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ที่ 56.24 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม ทั้งนี้สอดคล้องกับค่าอัตราการระเหยน้ำจำเพาะของการอบแห้งดังที่ได้อภิปรายผลไว้

ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่มีค่าค่อนข้างสูงนั้นสามารถอธิบายด้วยกราฟแสดงความสัมพันธ์ของความชื้นลดลงเปรียบเทียบกับพลังงานสะสมในแต่ละชั่วโมงที่ใช้ในการอบแห้งพริกชี้หนูแดงด้วยเครื่อง

อบแห้งระบบปรับอากาศร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า



รูปที่ 12 กราฟเปรียบเทียบการลดลงของความชื้นและพลังงานที่ใช้ในแต่ละชั่วโมงในการอบแห้งสำหรับเครื่องอบแห้งต้นแบบที่เปิดการทำงานของเครื่องปรับอากาศร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า



รูปที่ 13 กราฟเปรียบเทียบการลดลงของความชื้นและพลังงานที่ใช้ในแต่ละชั่วโมงในการอบแห้ง สำหรับเครื่องอบแห้งต้นแบบที่เปิดการทำงานของฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว

และระบบใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวซึ่งใช้ระยะเวลา (40 และ 50 ชั่วโมง ตามลำดับ) แสดงดังรูปที่ 12 และรูปที่ 13 พลังงานที่เพิ่มขึ้นต่อชั่วโมงทั้ง 2 ระบบ แตกต่างกันโดยระบบที่ติดตั้งเครื่องปรับอากาศสูงกว่าเล็กน้อยแสดงให้เห็นว่าพลังงานที่ใช้สำหรับเทอร์โมอิเล็กทริกต่ำมากเมื่อเทียบกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า แต่สามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งได้ถึง 10 ชั่วโมง ส่งผลให้สามารถประหยัดพลังงานมากกว่าและใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่าอีกด้วย

3.3 คุณภาพสีของพริกชี้หนูแดงหลังการอบแห้ง

ตัวอย่างพริกชี้หนูแดงจากการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งเมื่อเปิดการทำงานของเครื่องปรับอากาศรวมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า (รูปที่ 14 ข) และฮีตเตอร์ไฟฟ้าอย่างเดียว (รูปที่ 14 ค) เปรียบเทียบกับพริกชี้หนูแดงสด (รูปที่ 14 ก) และพริกชี้หนูตากแห้ง (รูปที่ 14 ง) พบว่าพริกชี้หนูแดงที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งทั้งสองแบบ ผลพริกชี้หนูแดงแห้งยังคงมีผิวค่อนข้างแดง ก้านพริกชี้หนูแดงยังคงมีสีเขียวไม่แตกต่างกับก้านของตัวอย่างพริกชี้หนูแดงสด เมื่อเทียบกับ

พริกชี้หนูแดงตากแห้งด้วยแสงแดดพบว่าเปลี่ยนเป็นสีแดงอ่อนลงเล็กน้อย ส่วนก้านพริกชี้หนูแดงมีสีเขียว



ก)

ข)



ค)

ง)

รูปที่ 14 ก) พริกชี้หนูแดงสด ข) พริกชี้หนูแดงที่อบแห้งด้วยระบบปรับอากาศเบื้องต้นร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า ค) พริกชี้หนูแดงที่อบแห้งโดยการเปิดฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว ง) พริกชี้หนูแดงตากแห้งด้วยวิธีทางธรรมชาติ

ตารางที่ 2 ตัวแปรค่าสีของผล/ก้านพริกชี้หนูแดงสดและผ่านการอบแห้งในแต่ละกรรมวิธี

ลำดับที่	วิธีการ/เครื่องมือ	วิเคราะห์สี		
		เครื่อง Hunter Lab Color/Quest XE		
		L*	a*	b*
1	ก้านพริก วิธีที่1 TEC	49.52	-1.84	27.98
2	ก้านพริก วิธีที่2 heater	48.37	-0.86	28.6
3	ก้านพริก ตากแดด	49.84	2.86	26.89
4	ก้านพริกสด	32.41	-2.41	22.69
5	ผลพริก วิธีที่1 TEC	33.73	30.39	32.35
6	ผลพริก วิธีที่2 heater	33.97	29.4	30.79
7	ผลพริก ตากแดด	30.66	28.66	29.02
8	ผลพริกสด	27.67	36.16	38.22

- หมายเหตุ
1. ค่า L* (+) แสดงถึงความสว่าง
 2. ค่า a* (+) แสดงถึงความเป็นสีแดง
 3. ค่า a* (-) แสดงถึงความเป็นสีเขียว
 4. ค่า b* (+) แสดงถึงความเป็นสีเหลือง
 5. ค่า b* (-) แสดงถึงความเป็นสีน้ำเงิน

ตารางที่ 3 ผลของการเปรียบเทียบค่าสีของผลและก้านของพริกชี้หนูแดงเมื่อนำไปทำให้แห้งด้วยวิธีที่แตกต่างกัน

การเปรียบเทียบ	delta E	
	ผลพริกชี้หนูแดง	ก้านพริกชี้หนูแดง
พริกสด - ระบบติดตั้งเครื่องปรับอากาศ	10.22	17.91
พริกสด - ระบบฮีตเตอร์เพียงอย่างเดียว	11.85	17.08
พริกสด - ตากแห้ง	12.24	18.68

จางลงอย่างชัดเจน ทั้งนี้เพราะเครื่องอบแห้งที่ใช้ทั้งสองแบบเป็นการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำเพียง 54 องศาเซลเซียส อีกทั้งเป็นการอบแห้งแบบต่อเนื่องผลผลิตจึงสัมผัสกับอากาศร้อนด้วยเวลาที่น้อยกว่าการตากแห้งที่ใช้เวลานานถึง 5 วัน สีของพริกชี้หนูแดงจึงเปลี่ยนแปลงไปน้อยกว่า และผลพริกแห้งชี้หนูแดงทั้ง 3 แบบแสดงดังรูปที่ 14 เมื่อนำตัวอย่างพริกชี้หนูแดงจากการทดลอง

ไปทำการวัดค่าสีผลที่ได้แสดงในตารางที่ 2 ผลที่วัดได้นำไปหาค่าความเปลี่ยนแปลงไปของสีพริกชี้หนูแดงด้วยวิธีการอบแห้งพริกชี้หนูแดงแต่ละกรรมวิธีได้ผลดังตารางที่ 3 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของสีเมื่อนำพริกชี้หนูแดงไปทำการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งและตากแห้งวิธีทางธรรมชาติเมื่อเปรียบเทียบกับผลพริกชี้หนูแดงสด พบว่าค่าสีมีการเปลี่ยนแปลง

เล็กน้อย โดยสำหรับผลพริกชี้หนูแดงระบบที่ติดตั้งเครื่องปรับอากาศมีการเปลี่ยนไปของสีน้อยที่สุดและผลพริกชี้หนูแดงจากการตากแห้งมีการเปลี่ยนแปลงสูงที่สุด ส่วนการเปลี่ยนแปลงสีของก้านพริกชี้หนูแดงระบบที่ใช้ฮีตเตอร์เพียงอย่างเดียวมีการเปลี่ยนแปลงสีของก้านพริกชี้หนูแดงน้อยที่สุดและก้านพริกชี้หนูแดงที่นำไปตากแห้งมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดเช่นกัน

4. สรุป

การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งที่ติดตั้งเครื่องปรับอากาศสามารถลดความชื้นของอากาศก่อนผ่านฮีตเตอร์ไฟฟ้าได้ โดยในการทดสอบพบว่าอากาศที่ถูกแบ่งให้ไหลผ่านด้านร้อนสามารถเพิ่มอุณหภูมิได้ 10 องศาเซลเซียส ส่วนอากาศที่ผ่านด้านเย็นสามารถลดความชื้นด้วยอัตราการควบแน่นสูงสุดที่ 0.083 กิโลกรัมต่อชั่วโมง การทดสอบอบแห้งพริกชี้หนูแดง พบว่าพริกชี้หนูแดงที่ทำการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งสามารถลดอัตราส่วนความชื้นได้ต่ำกว่าการตากแห้งตามธรรมชาติ อีกทั้งการทำงานของเครื่องอบแห้งทั้ง 2 ระบบนั้นยังใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่าการตากแห้ง พริกชี้หนูแดงอบแห้งที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงสีแดงเพียงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับการอบแห้งธรรมชาติที่มีสีค่อนข้างคล้ำ แต่ในการอบแห้งไม่จำเป็นต้องอบแห้งให้มีปริมาณความชื้นต่ำที่สุดโดยสามารถอบแห้งพริกชี้หนูแดงจนปริมาณความชื้นมีค่าร้อยละ 14 มาตรฐานเปียก ซึ่งประหยัดเวลาและพลังงาน โดยการเปรียบเทียบระบบที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 14 พบว่าระบบที่ใช้เครื่องปรับอากาศเทอร์โมอิเล็กทริกคร่อมนั้นใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่า มีอัตราการอบแห้งสูงกว่า อัตราการระเหยความชื้นจากพริกชี้หนูแดงสูงกว่า และมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำกว่าแบบใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ที่สนับสนุนทุนวิจัยและสถานที่ในการทำวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Harmony House Foods, Inc. (2014, June 30). *Do Dehydrated Vegetables Lose Nutritional Value?*. [Online]. Available: <http://www.harmonyhousefoods.com/blog-nutritional-value-dehydrated-veggies>
- [2] S. Janjai, *Solar drying technology*, 1st ed. Nakhon Prathom: Silpakorn University, 2017.
- [3] T. Siripunkul, "Consumer needs for instant dehydrated – mixed vegetable products in Mueang District, Chiang Mai Province," Independent Study, Chiang Mai University, Chiang Mai, Thailand, 2007
- [4] T. Tipyavimol, "Maintaining quality of instant dried vegetable by heat pump drying technique," Research report. Nakhon Ratchasima, Suranaree University of Technology, Thailand, 2010
- [5] Aemarine. (2012, January 28). Vapor Compression System. [Online]. Available: <http://refrigerations.blogspot.com/2012/01/vapor-compression-system.html>
- [6] T. Madhiyanon, S. Soponronnarit and T. Swasdisevi, "Industrial – Scale heat pump drying," *Kasetsart J. (Nat. Sci)*, vol. 33, pp. 461-473, 1999.
- [7] U. Auprakul, J. Khonrang and P. Duangnakhorn, "Water Hyacinth Drying by Heat Pump," *The Golden Teak: Science and Technology*, years 2, vol. 1, pp. 35-40, 2015.

- [8] T. Marnoto, E. Sulistyowati, Mahereni and M. Syahri, "The Characteristic of Heat Pump Dehumidifier Drier in Drying of Red Chili (*Capsium annum L.*)," *International Journal of Science and Engineer*, vol. 3, no. 1, pp. 22-25, 2012.
- [9] T. Kivevele and Z. Huan, "A review on opportunities for the development of heat pump drying systems in South Africa," *S Afr J Sci*, vol. 110, no. 5/6, pp. 1-11, 2013.
- [10] R. He, H. Zhong, Y. Cai, D. Liu and F. Zhao, "Theoretical and Experimental Investigations of Thermoelectric Refrigeration Box Used for Medical Service," *Procedia Engineering*, vol. 205, pp. 1215-1222, 2017.
- [11] H. Al-Madhhachi and G. Min, "Effective use of thermoelectric module for developing efficient thermoelectric water distillation system," *Energy Conversion and Management*, vol. 133, pp. 14-19, 2017.
- [12] P. Wongpaisarnkit, K. Treeamnuk and T. Treeamnuk, "Thermal performance evaluation of thermoelectric module," in *Proceeding of 8th International Conference On Advances In Mechanical, Aeronautical and Production Techniques (MAPT2018)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2018, pp. 25-29.
- [13] A. Chakraverty and R. P. Singh, *Postharvest Technology: Cereals, Pulses, Fruits and Vegetables*, Enfield (NH), USA, 2001.
- [14] S. Kaleemullah and R. Kailappan, "Moisture Sorption Isotherms of Red Chillies," *Biosystems Engineering*, vol 88, issue 1, pp. 95-104, 2004.
- [15] H. Wang, J. Peng, C. Xie, Y. Bao and Y. He, "Fruit Quality Evaluation Using Spectroscopy Technology: A Review," *Sensors*, vol. 15, pp. 11889-11927, 2015.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การศึกษาเชิงเปรียบเทียบระหว่างโรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบซับคริติคัล โรงไฟฟ้าไออาร์ซีแบบซูเปอร์คริติคัล และโรงไฟฟ้าแรงดันไฮดรอลิก แบบไตรแลทเทอร์รัลสำหรับแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิ 210-250 องศาเซลเซียส

ธงชัย เทียมทัต และ อาทิตย์ คุณศรีสุข*

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

รับบทความ 21 มิถุนายน 2562 แก้ไขบทความ 28 เมษายน 2563 ตอบรับบทความ 5 พฤษภาคม 2563

บทคัดย่อ

การศึกษาประสิทธิภาพของระบบวัฏจักรไออาร์ซีแบบซับคริติคัล วัฏจักรไออาร์ซีแบบซูเปอร์คริติคัล และวัฏจักรไออาร์ซีแบบไตรแลทเทอร์รัล ของอุณหภูมิแหล่งความร้อนระหว่าง 210–250 องศาเซลเซียส โดยทำการศึกษาและเปรียบเทียบ ด้วยการนำงานที่แตกต่างกันออกไป โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป MATLAB และใช้ฐานข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณจาก NIST REFPROP และทำการเปรียบเทียบผลการจำลองกับงานวิจัยอื่นเพื่อทำการเปรียบเทียบ โดยการหาจุดที่ได้งานสูงที่สุดจะทำการจำลองที่กระบวนการ Golden-section search โดยทำการศึกษาผลของงานสุทธิสูงสุดของระบบ ขนาดของอุปกรณ์ ความดันที่ Condenser และ อัตราการขยายตัวของสารทำงานที่ Expander ผลการจำลองพบว่างานสุทธิสูงสุดเท่ากับ 141.72 กิโลวัตต์ จะเป็นการจำลองที่ใช้เป็นวัฏจักรไออาร์ซีแบบซูเปอร์คริติคัล ใช้สารทำงานเป็น R141b โดยมีอุณหภูมิแหล่งความร้อนเท่ากับ 250 องศาเซลเซียส โดยมีประสิทธิภาพเท่ากับร้อยละ 16.25 และเมื่อทำการจำลองวัฏจักรไออาร์ซีแบบซับคริติคัล โดยใช้แหล่งความร้อนเดียวกัน พบว่าเมื่อใช้ Pentane เป็นสารทำงานนั้นจะสามารถให้งานได้สูงสุดที่ 133.40 กิโลวัตต์ และประสิทธิภาพเท่ากับร้อยละ 15.70 นอกจากนี้งานสุทธิสูงสุดได้เท่ากับ 133.82 กิโลวัตต์ ประสิทธิภาพเท่ากับร้อยละ 14.90 ใช้สารทำงานเป็น R141b เป็นจำลองวัฏจักรไออาร์ซีแบบไตรแลทเทอร์รัล จากการจำลอง Off-design การปรับอัตราการไหลสารทำงานที่เหมาะสม สามารถช่วยขจัดความเสี่ยงให้เพิ่มมากขึ้นได้

คำสำคัญ : วัฏจักรไออาร์ซีแบบซับคริติคัล; วัฏจักรไออาร์ซีแบบซูเปอร์คริติคัล; วัฏจักรแรงดันแบบไตรแลทเทอร์รัล; การจำลองเมื่อสภาวะเปลี่ยนแปลง; การเลือกสารทำงาน

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +66 4422 4410, ไลน์ไอดีอิเล็กทรอนิกส์: atit@sut.ac.th

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Comparative Investigation of a Subcritical ORC, Supercritical ORC, and Trilateral Rankine Cycle Power Plant for a Heat Source Temperature of 210-250°C

Thongchai Taemtat and Atit Koonsrisuk*

Institute of engineering School of mechanical engineering Suranaree university
111 University Rd., Suranari Subdistrict, Mueang Nakhon Ratchasima District, Nakhon Ratchasima
30000 Thailand

Received 21 June 2019; Revised 28 April 2020; Accepted 5 May 2020

Abstract

The performance investigations of subcritical ORC, supercritical ORC, and trilateral Rankine cycle (TLC) power plants with the heat source temperatures of 210-250°C were conducted and compared in this study. Several working fluids were evaluated. A MATLAB code was developed and used in this study. The thermodynamic properties of the working fluids were calculated by using NIST REFPROP program. The justification of the code was validated with a result taken from the literature. The optimal operating conditions were searched using the golden-section technique. The maximum net output power of 141.72 kW was obtained when using the supercritical ORC plant with R141b as its working fluid and the heat source temperature was at 250°C. The corresponding cycle efficiency was 16.25%. When using the subcritical plant at the same heat source temperature, the maximum net output power of 133.40 kW and cycle efficiency of 15.70% are obtained when pentane is used as the working fluid. Furthermore, the net output power of 133.82 kW and cycle efficiency of 14.90% are obtained when using R141b as the working fluid in the TLC power plant. According to the off-design simulations, an appropriate adjustment of the working fluid flow rate can mitigate the variation of the net output power.

Keywords : Subcritical ORC; Supercritical ORC; Trilateral Rankine Cycle; Off-design Simulation; Working Fluid Selection

* Corresponding Author. Tel.: +66 4422 4410, E-mail Address: atit@sut.ac.th

1. บทนำ

โดยทั่วไปการผลิตไฟฟ้าจะผลิตจากการใช้พลังงานฟอสซิล อาทิ น้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ เป็นพลังงานแหล่งความร้อนที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้า [1] ซึ่งในประเทศไทยมีการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ถ่านหินมากถึงร้อยละ 19 จากจำนวนการผลิตทั้งหมดในปี พ.ศ. 2556 ซึ่งการทำการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ถ่านหินนั้นจะทำให้เกิดมลพิษทางอากาศสูงไม่ว่าจะเป็น Sulfur Dioxide ที่ทำลายชั้นบรรยากาศหรือการเกิดฝนกรด [2] ซึ่งเป็นอันตรายต่อสภาพแวดล้อมและมนุษย์ [3]

ปัจจุบันมีการนำวัฏจักรหนึ่งมาใช้ในการผลิตไฟฟ้าโดยใช้แหล่งความร้อนจากความร้อนทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์ (Waste Heat Recovery) เป็นแหล่งความร้อนที่ให้พลังงานในวัฏจักร คือวัฏจักรโออาร์ซี (Organic Rankine Cycle) มักจะใช้สารทำงานที่เป็นสารทำความเย็นที่มีจุดเดือดไม่สูง อาทิ R410a และ R407c เป็นต้น [4] ซึ่งเป็นการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยไม่สร้างมลพิษมากนัก [5]

ทั้งนี้ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีพลังงานความร้อนทิ้งคิดเป็นร้อยละ 65.3 โดยข้อมูลรายงานพลังงานทดแทนของประเทศไทยปี พ.ศ. 2558 จากพลังงานทิ้งทั้งหมดที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยเป็นพลังงานจากพลังงานแสงอาทิตย์ ชีวมวล ก๊าซชีวภาพ และขยะ [6] โดยพลังงานดังกล่าวสามารถนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนเพื่อให้พลังงานความร้อนกับวัฏจักรโออาร์ซีเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า

ปัจจุบันได้มีการศึกษาวัฏจักรโออาร์ซีแบบ Supercritical อาทิ ผลการศึกษาของวัฏจักรโออาร์ซี [7] ได้ทำการจำลองโดยใช้พลังงานความร้อนจากแหล่งความร้อนทิ้งที่มาจาก Rankine Cycle ที่ช่วงอุณหภูมิ 350–500 เคลวิน ในการจำลอง ผลที่ได้คือได้รับพลังงานสูงสุดที่ 220 กิโลวัตต์ และการศึกษาของ H. Yağlı et al. [8] ได้ทำการศึกษาวัฏจักรโออาร์ซีแบบ Supercritical ที่ใช้ก๊าซชีวภาพให้เป็นพลังงานความร้อนกับระบบโดยผลที่ได้คือได้พลังงาน

สูงสุดที่ 81.52 กิโลวัตต์ อีกทั้งจากการศึกษาได้ทำการศึกษาวัฏจักรโออาร์ซีแบบ Supercritical โดยใช้แหล่งความร้อนจาก Linear Fresnel Reflector Solar Concentrator เพื่อให้พลังงานความร้อนที่อุณหภูมิระหว่าง 150–350 องศาเซลเซียส กับระบบ โดยผลการศึกษาพบว่าได้พลังงานสูงสุดที่ 190.5 กิโลวัตต์ [9]

นอกจากวัฏจักรโออาร์ซีแบบ Supercritical แล้วยังมีแบบ Subcritical อีกด้วย อาทิ การศึกษาการใช้สารทำงาน R1234ze ที่อุณหภูมิแหล่งความร้อน 100–200 องศาเซลเซียส โดยผลการทดลอง พลังงานไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 85 กิโลวัตต์ [10] มีการศึกษาการนำความร้อนทิ้งจากการคั่วกาแฟโดยความร้อนทิ้งมีอุณหภูมิเท่ากับ 120 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาพบว่าพลังงานที่ได้เท่ากับ 26.6 กิโลวัตต์ โดยใช้สารทำงาน R227ea [11] และการศึกษาการนำความร้อนทิ้งจากเครื่องยนต์มาใช้ในการผลิตไฟฟ้าโดยผลของการศึกษาแสดงว่าสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงสุดเท่ากับ 2.56 กิโลวัตต์ สำหรับเครื่องยนต์ที่มีกำลังเบรค เท่ากับ 93 กิโลวัตต์ [12]

นอกจากนี้ยังมีอีกแบบที่เรียกว่า Trilateral ORC ซึ่งในการศึกษาของ [13] ได้ทำการจำลองการใช้ Trilateral ORC ที่แหล่งความร้อนเท่ากับ 120 องศาเซลเซียส ได้งานสุทธิสูงสุดเท่ากับ 2.3 เมกกะวัตต์ โดยใช้ Isobutane เป็นสารทำงาน ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับร้อยละ 8.16

ในสภาพการทำงานจริงนั้นไม่สามารถบังคับให้สภาพแวดล้อม และแหล่งความร้อนคงที่ตามที่ได้ออกแบบไว้ได้ เนื่องจากสภาพแหล่งความร้อน และสภาพแวดล้อมสามารถเปลี่ยนแปลงได้ ซึ่งเป็นผลให้ระบบไม่สามารถทำงานได้ตามเดิม ดังนั้น ระบบควรจะสามารถปรับได้ตามสภาพแหล่งทั้งความร้อน และแหล่งความร้อนเพื่อรักษาให้งานที่ระบบเท่าเดิม โดยจะเรียกกระบวนการดังกล่าวว่า Off-design โดยการออกแบบดังกล่าวมีการศึกษา เช่น A. Benato et al.

[14] ได้แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงของแหล่งความร้อนแปรผันตรงต่อพลังงานที่วัฏจักรสามารถทำได้ โดยถ้าพลังงานความร้อนของแหล่งความร้อนเพิ่มขึ้นจะทำให้พลังงานที่ได้จากวัฏจักรเพิ่มสูงขึ้น และการศึกษาของ Y. Cao และ Y. Dai [15] ได้แสดงว่าการที่พลังงานแหล่งความร้อนสูงขึ้นรวมถึงอุณหภูมิสภาพแวดล้อมสูงขึ้นจะทำให้ได้งานเพิ่มมากขึ้น

จากที่ได้กล่าวมาจะเห็นได้ว่า การนำความร้อนทิ้งที่มีอยู่แล้วสามารถนำมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้ ซึ่งเป็นการใช้พลังงานที่มีอยู่อย่างจำกัดให้เกิดความคุ้มค่า และเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดต่อการนำไปสร้างระบบจริง จึงทำให้การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการนำพลังงานความร้อนทิ้งที่อุณหภูมิช่วง 210–250 องศาเซลเซียส กลับมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดของการใช้พลังงานและการปรับแปลงค่าในระบบวัฏจักรโออาร์ซีและเมื่อเกิดการการแปรผันของความร้อนที่ให้กับระบบและสภาพอากาศเพื่อให้ได้พลังงานสุทธิใกล้เคียงกับค่าที่ได้ออกแบบไว้

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 รายการสัญลักษณ์

$\dot{W}$	= อัตรางานในระบบ (kW)
Q	= อัตราถ่ายเทความร้อนในระบบ (kW)
h	= ค่า Enthalpy ของสารทำงาน (kJ/kg)
$\dot{m}$	= อัตราการไหล (kg/s)
T	= อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$, K)
UA	= อัตราที่บ่งบอกถึงขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (kW/K)
C_{min}	= ผลคูณที่น้อยที่สุดของ $\dot{m}$ และ C_p ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (kW/K)

ΔT_{pp} = ผลต่างของอุณหภูมิที่น้อยที่สุดระหว่างสารทำงานกับแหล่งความร้อน หรือแหล่งทิ้งความร้อน ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ($^{\circ}\text{C}$, K)

η_{isen} = ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิก

η_{th} = ประสิทธิภาพเชิงความร้อน

hs = แหล่งความร้อน

cf = แหล่งทิ้งความร้อน

wf = สารทำงานของระบบ

cond. = Condenser ของระบบ

evap. = Evaporator ของระบบ

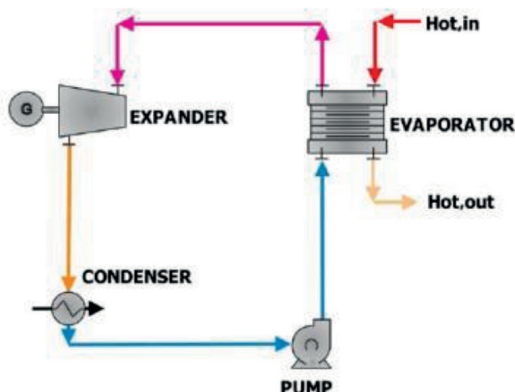
tur. = Turbine หรือ Expander ของระบบ

2.2 การเลือกสารทำงาน

ในการจำลองระบบจะมีการใช้หลักการเลือกสารทำงานที่เหมาะสมกับอุณหภูมิที่ 210, 230 และ 250 องศาเซลเซียส ในการเลือกสารทำงานของวัฏจักรโออาร์ซีแบบ Subcritical โดยหลักการเลือกสารทำงานที่ใช้จะเลือกโดยให้มีอุณหภูมิวิกฤตเท่ากับอุณหภูมิแหล่งความร้อน [16] และโดยหลักการเลือกสารทำงานที่ใช้กับระบบแบบวัฏจักรโออาร์ซีแบบ Supercritical จะเลือกให้สารทำงานมีอุณหภูมิวิกฤตต่ำกว่าอุณหภูมิแหล่งความร้อน 30–50 องศาเซลเซียส ตามการแนะนำของการศึกษาของ J. Hærvig et al. [17] และในส่วนของการศึกษาของ Trilateral ORC ยังไม่มีเกณฑ์ในการเลือกสารทำงาน โดยจะทำการหาเกณฑ์การเลือกสารทำงานจากการจำลอง

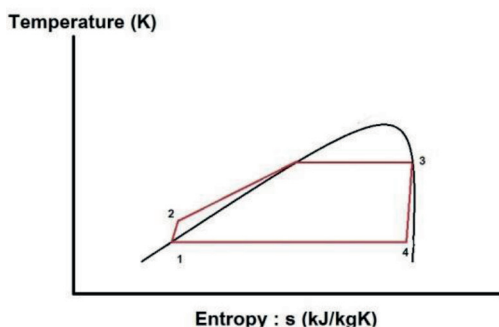
2.3 การจำลองระบบ

การจำลองระบบประกอบไปด้วย 3 ระบบ คือระบบของวัฏจักรโออาร์ซีแบบ Subcritical, Supercritical และ Trilateral โดยอุปกรณ์ทางความร้อนที่ใช้ในวัฏจักรเป็นดังรูปที่ 1

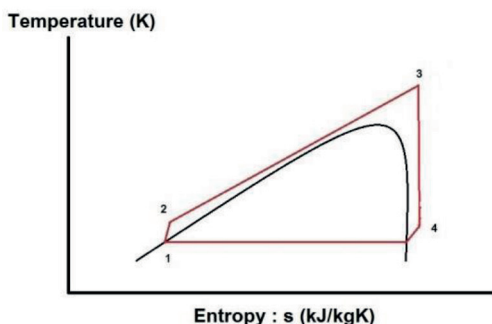


รูปที่ 1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองวัฏจักรโออาร์ซี Subcritical, Supercritical และ Trilateral [14]

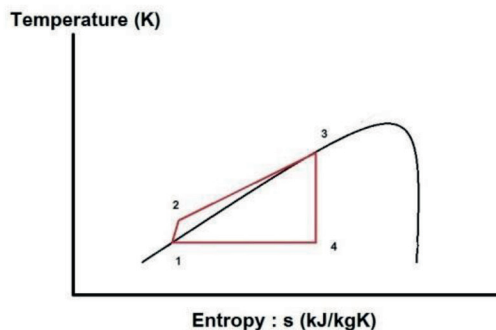
โดยลักษณะของ T-s Diagram ของระบบ Subcritical, Supercritical และ Trilateral เป็นดังรูปที่ 2, 3 และ 4



รูปที่ 2 T-s Diagram การจำลองวัฏจักรโออาร์ซี Subcritical



รูปที่ 3 T-s Diagram การจำลองวัฏจักรโออาร์ซี Supercritical



รูปที่ 4 T-s Diagram การจำลองวัฏจักรโออาร์ซี Trilateral ORC

ระบบวัฏจักรโออาร์ซี T-s Diagram จากรูปที่ 2, 3, 4 และอุปกรณ์ทางความร้อนดังรูปที่ 1

กระบวนการ 1 ถึง 2 เป็นกระบวนการที่ Pump เพิ่มแรงดันให้กับสารทำงาน

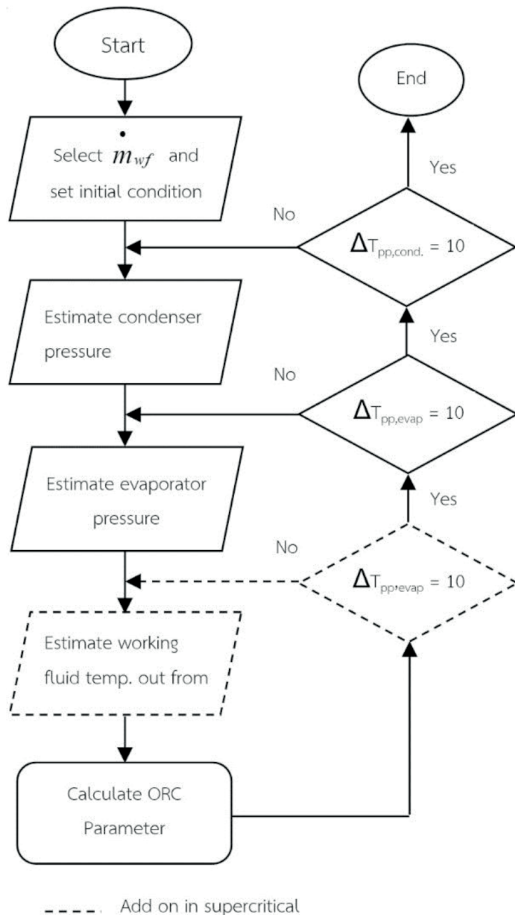
กระบวนการ 2 ถึง 3 เป็นกระบวนการที่สารทำงานได้รับ พลังงานความร้อนจากแหล่งความร้อนที่ Evaporator

กระบวนการ 3 ถึง 4 เป็นกระบวนการที่ Expander ลดความดันและนำงานออกมาจากสารทำงาน

กระบวนการ 4 ถึง 1 เป็นกระบวนการที่สารทำงานนำความร้อนทิ้งที่ Condenser

การจำลองวัฏจักรโออาร์ซีจะทำการกำหนดแหล่งความร้อนที่เป็นน้ำมีอุณหภูมิเท่ากับ 210, 230 และ 250 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหลเท่ากับ 1 กิโลกรัมต่อวินาที และให้อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส และเมื่อทำการหล่อเย็นแล้วมีอุณหภูมิเท่ากับ 40 องศาเซลเซียส โดยจะทำการหาทางสูงที่สุดที่ Pinch Point Temperature, ΔT_{pp} เท่ากับ 10 องศาเซลเซียส, $\eta_{isen, pump} = 0.75$ และ $\eta_{isen, tur} = 0.80$ ดังที่ J. Radulovic และ N. I. B. Castaneda [18] ได้แนะนำ โดยกระบวนการจำลองออกแบบระบบวัฏจักรโออาร์ซีจะใช้เวลาพัฒนาโปรแกรม MATLAB ในการจำลอง กระบวนการจำลองแสดงด้วยผังงาน ดังรูปที่ 5

จากรูปที่ 5 จะเป็นการจำลองวัฏจักรโออาร์ซี โดยการจำลองนั้นจะต้องทำการกำหนดค่าขอบเขตของคำตอบไม่ว่าจะเป็นความดันที่ Condenser และ Evaporator รวมถึงอุณหภูมิของสารทำงานที่ออกจาก Evaporator ด้วย แล้วใช้กระบวนการ Golden Section Search Method ในการหาคำตอบแล้วตรวจสอบว่า ΔT_{pp} ของแต่ละอุปกรณ์นั้นมีค่าใกล้เคียง 10 องศาเซลเซียส หรือไม่ ถ้าใกล้เคียงก็คือคำตอบในแต่ละอัตราการไหลของสารทำงานมาเพื่อหาทางานสูงสุดที่ได้ในแต่ละสารทำงาน และเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนชนิด Counter Flow



รูปที่ 5 ผังงานการจำลอง Design

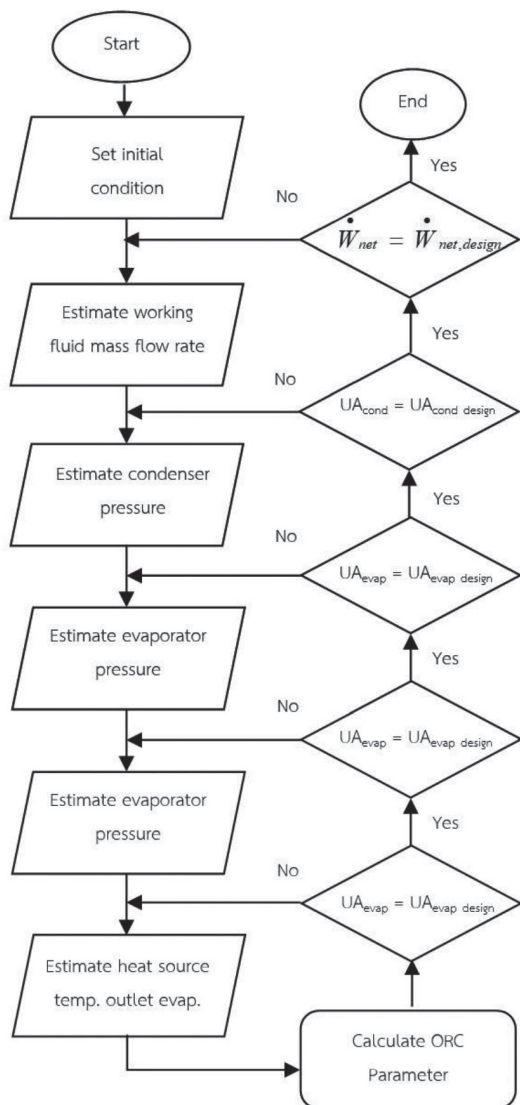
การออกแบบจะเป็นการออกแบบเพื่อนำแหล่งความร้อนที่ 210, 230 และ 250 องศาเซลเซียส ไปใช้ในการผลิตพลังงานโดยทำการกำหนดค่า Pinch Point Temperature ในแต่ละอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเท่ากับ 10 องศาเซลเซียส และกำหนดให้อุณหภูมิสารหล่อเย็นเพิ่มขึ้นเท่ากับ 10 องศาเซลเซียส หลังจากได้รับความร้อน โดยกำหนดให้แหล่งความร้อนเป็นน้ำที่มีความดันเท่ากับ 10 เมกะปาสคาล และอัตราการไหลเท่ากับ 1 กิโลกรัมต่อวินาที

2.4 การจำลองระบบ Off-design

กระบวนการทำ Off-design ทำการเลือกสารที่ทำงานที่น่าสนใจจากการใช้งานจริงแล้วทำการจำลองให้สภาพแวดล้อมและอุณหภูมิของแหล่งความร้อนเปลี่ยนแปลงไปที่อุณหภูมิของแหล่งความร้อนเปลี่ยนแปลง ± 5 องศาเซลเซียส และให้อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น ± 3 องศาเซลเซียส โดยให้ค่าที่ได้จากวัฏจักรมีค่าเท่าเดิมจากค่าที่ได้ออกแบบไว้คือ UA ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน แล้วให้ค่าความดันที่ Condenser, ความดันที่ Evaporator, อุณหภูมิของสารทำงานที่ออกจาก Evaporator, Pinch Point Temperature และค่าอื่นๆปรับเปลี่ยนไป โดยกระบวนการจำลอง Off-design ระบบวัฏจักรโออาร์ซีจะใช้โปรแกรม MATLAB ในการจำลอง กระบวนการจำลองจะเป็นไปดังผังงาน ดังรูปที่ 6

จากรูปที่ 6 จะเป็นการจำลองวัฏจักรโออาร์ซี โดยต้องการให้ใช้ค่าตัวแปรที่ UA ของระบบเหมือนกับที่ทำการออกแบบไว้โดยจะทำการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิของสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิแหล่งความร้อน และอุณหภูมิแหล่งทิ้งความร้อนเปลี่ยนแปลงไป โดยให้ระบบทำการปรับตัวเองเพื่อให้ได้งานที่เท่าเดิม โดยเริ่มต้นจะทำการจำลองระบบว่าเมื่อเกิดสภาวะ Off-design จะส่งผลอย่างไรต่อระบบโดยกำหนดค่าเริ่มต้น เช่น ค่า UA ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน อัตราการไหลของสารทำงาน และสารหล่อเย็น

เป็นต้นแล้วทำการหาค่างานที่ได้จากระบบแล้วศึกษาผลกระทบ ต่อมาจะทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของระบบเพื่อให้ได้งานเท่ากับค่างานที่ได้ออกแบบ



รูปที่ 6 ผังงานการจำลอง Off-design

2.5 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

สมการทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่ใช้ในการจำลองแสดงดังสมการที่ (1)-(10)

2.5.1 สมการที่ใช้ในการจำลอง

ORC cycle

กระบวนการที่เกิดที่ Pump

$$\dot{W}_{in} = \dot{m}_{wf}(h_2 - h_1) \quad (kW) \quad (1)$$

กระบวนการที่เกิดที่ Evaporator

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}_{wf}(h_3 - h_2) \quad (kW) \quad (2)$$

กระบวนการที่เกิดที่ Expander

$$\dot{W}_{out} = \dot{m}_{wf}(h_3 - h_4) \quad (kW) \quad (3)$$

กระบวนการที่เกิดที่ Condenser

$$\dot{Q}_{out} = \dot{m}_{wf}(h_4 - h_1) \quad (kW) \quad (4)$$

งานสุทธิของระบบ

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{out} - \dot{W}_{in} \quad (kW) \quad (5)$$

Heat exchanger UA

Log mean temperature difference method

$$UA = \frac{\dot{Q}}{\Delta T_{lm}} \quad \left(\frac{kW}{K} \right) \quad (6)$$

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{h,in} - T_{c,out}) - (T_{h,out} - T_{c,in})}{\log \frac{(T_{h,in} - T_{c,out})}{(T_{h,out} - T_{c,in})}} \quad (K) \quad (7)$$

Thermal efficiency

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{in}} \times 100\% \quad (\%) \quad (8)$$

Isentropic efficiency

$$\eta_{isen,pump} = \frac{h_2 - h_1}{h_{2s} - h_1} \quad (9)$$

$$\eta_{isen,tur} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}} \quad (10)$$

2.5.2 สารทำงานที่ใช้ในการจำลองของวัฏจักรโออาร์ซี

ค่าของอุณหภูมิและความดันจุดวิกฤตของสารทำงานที่ใช้ในการจำลองระบบวัฏจักรโออาร์ซีแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อุณหภูมิและความดันจุดวิกฤตของสารทำงานจากโปรแกรม NIST REFPROP [19]

Name	T _{critical} (°C)	P _{critical} (MPa)
Octane	296.17	2.50
Benzene	288.87	4.91
Cyclohexane	280.45	4.08
Heptane	266.98	2.74
Cyclopentane	238.57	4.57
Isohexane	224.55	3.04
R113	214.06	3.39
R141b	204.35	4.21
Pentane	196.55	3.37
Isopentane	187.20	3.38
R245ca	174.35	3.94
RE245fa2	171.63	3.43
R245fa	154.00	3.65
Isobutane	134.66	3.63

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 Validation

จากการจำลองการทำงานของวัฏจักรโออาร์ซี จะทำการจำลองเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นโดยเปรียบเทียบกับวัฏจักรโออาร์ซีที่มีขนาด 1 เมกกะวัตต์ [20] ผลจำลองระบบของ ORC ในส่วนของแบบ Supercritical Subcritical และ Trilateral โดยทำการเปรียบเทียบกับค่าที่นำมาเปรียบเทียบ ได้ผลดังตารางที่ 2, 3 และ 4

ตารางที่ 2 ผลการเปรียบเทียบ Supercritical ORC

Parameter	[20]	Result value	Error (%)
Supercritical ORC			
T ₄ (°C)	127.85	133.61	1.44
T ₆ (°C)	121.14	125.07	1.00
T ₈ (°C)	75.79	75.50	0.08
η _{th} (%)	18.63	18.96	1.77

ตารางที่ 3 ผลการเปรียบเทียบ Subcritical ORC

Parameter	[20]	Result value	Error (%)
Subcritical ORC			
T ₄ (°C)	123.26	122.88	0.10
T ₆ (°C)	135.55	133.97	0.39
T ₈ (°C)	75.2	75.88	0.05
η _{th} (%)	17.27	17.06	1.22

ตารางที่ 4 ผลการเปรียบเทียบ Trilateral ORC

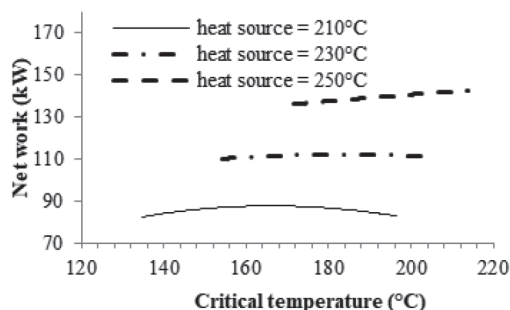
Parameter	[20]	Result value	Error (%)
Trilateral ORC			
T_4 (°C)	85.00	85.00	0.00
T_6 (°C)	97.38	97.32	0.02
T_8 (°C)	75.00	75.00	0.00
η_{th} (%)	19.79	19.79	0.01

จากตารางที่ 2, 3 และ 4 พบว่าการจำลอง Supercritical ORC มีค่าคลาดเคลื่อนสูงที่สุดร้อยละ 1.77 ต่ำสุดที่ร้อยละ 0.08 ในส่วนของ Subcritical ORC มีค่าคลาดเคลื่อนสูงที่สุดร้อยละ 1.22 ต่ำสุดที่ร้อยละ 0.05 และ Trilateral ORC มีค่าคลาดเคลื่อนสูงที่สุดร้อยละ 0.02 ต่ำสุดที่ร้อยละ 0.00

3.2 Design

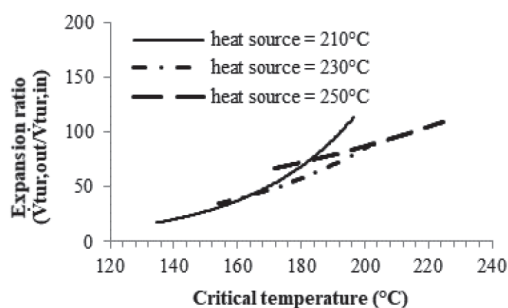
3.2.1 การจำลอง Supercritical ORC

ผลของการจำลอง Supercritical ORC ที่อุณหภูมิเท่ากันได้ผลดังรูปที่ 7, 8 และ 9

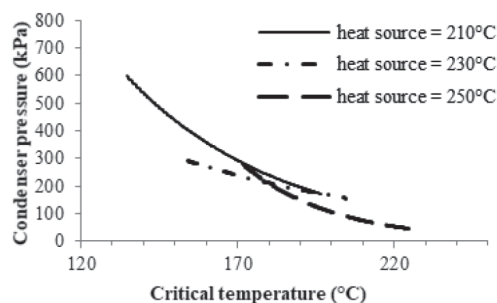


รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างงานสุทธิและอุณหภูมิวิกฤตของสารทำงาน Supercritical ORC

จากผลการจำลองพบว่าสารทำงานที่มีอุณหภูมิวิกฤตต่ำกว่าแหล่งความร้อนเท่ากับ 40-50 องศาเซลเซียส จะสามารถให้งานสุทธิสูงที่สุดในช่วงอุณหภูมิแหล่งความร้อนระหว่าง 210-250 องศาเซลเซียส และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ J. Haervig et al. [17] เห็นได้ว่ามีความใกล้เคียงกันโดยจะได้อยู่ในช่วง 30 องศาเซลเซียส ถึง 50 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 7



รูปที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขยายตัวของสารทำงานใน Expander และอุณหภูมิวิกฤตของสารทำงาน Supercritical ORC



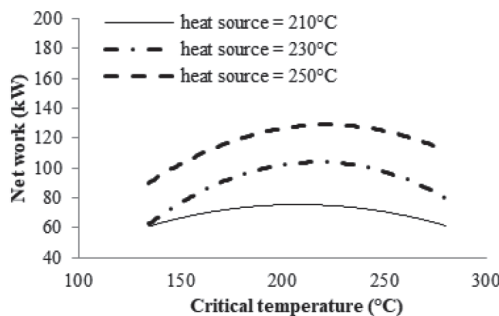
รูปที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่ Condenser และอุณหภูมิวิกฤตของสารทำงาน Supercritical ORC

โดยเมื่อพิจารณาการขยายตัวดังรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้สารทำงานที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงขึ้นจะทำให้ อัตราการขยายตัวของสารทำงานหลังออกจาก Expander นั้นมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งส่งผลให้ขนาดของ Expander มีขนาดใหญ่ตามไปด้วยและเมื่อพิจารณาความดันที่ Condenser นั้น จากรูปที่

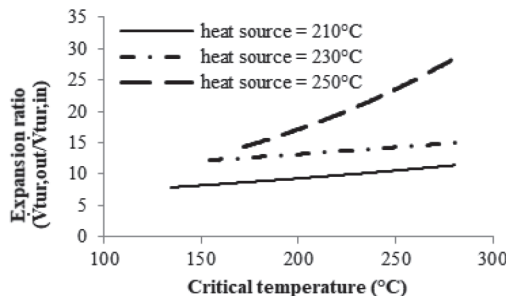
9 จะเห็นได้ว่าไม่ควรใช้สารทำงานที่ทำให้อุณหภูมิวิกฤตที่ทำให้ค่าความดัน Condenser ต่ำกว่าความดันบรรยากาศเพราะอาจจะมีโอกาสที่อากาศรั่วเข้าไปผสมกับสารทำงานได้

3.2.2 การจำลอง Subcritical ORC

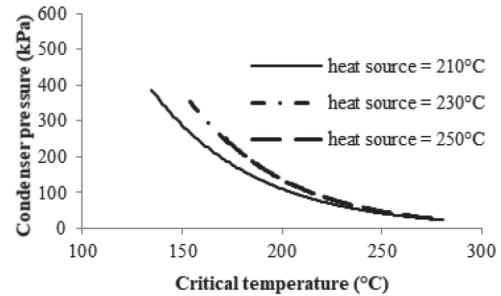
ผลของการจำลอง Supercritical ORC ได้ผลดังรูปที่ 10, 11 และ 12



รูปที่ 10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างงานสุทธิและอุณหภูมิวิกฤตของสารทำงานที่ใช้ในการจำลอง Supercritical ORC



รูปที่ 11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายตัวของสารทำงานใน Expander และอุณหภูมิวิกฤตของสารทำงานที่ใช้ในการจำลอง Supercritical ORC

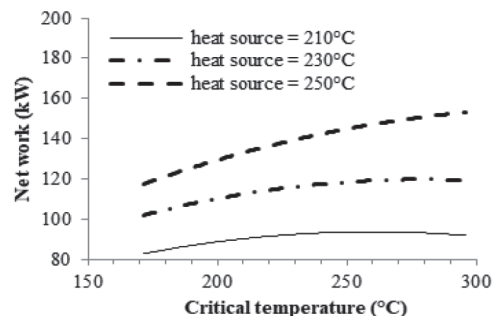


รูปที่ 12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่ Condenser และอุณหภูมิวิกฤตของสารทำงานที่ใช้ในการจำลอง Supercritical ORC

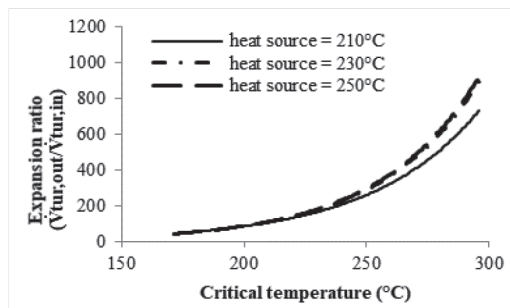
จากผลการจำลองวัฏจักรโออาร์ซีแบบ Subcritical ดังรูปที่ 10, 11 และ 12 จากแนวโน้มของงานสุทธิต่ออุณหภูมิวิกฤตจะเห็นว่าทางเลือกสารทำงานโดยให้อุณหภูมิวิกฤตมีค่าประมาณอุณหภูมิแหล่งความร้อน ถึงน้อยกว่าอุณหภูมิแหล่งความร้อน 40 องศาเซลเซียส จะได้งานสุทธิสูงสุด และเมื่อพิจารณาถึงอัตราการขยายตัวและความดันของ Condenser จะมีแนวโน้มเช่นเดียวกันจำลองวัฏจักรโออาร์ซีแบบ Supercritical

4.2.3 การจำลอง Trilateral ORC

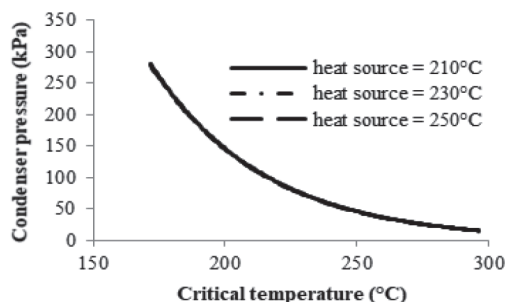
ผลของการจำลอง Trilateral ORC ได้ผลดังรูปที่ 13, 14 และ 15



รูปที่ 13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างงานสุทธิและอุณหภูมิวิกฤตของสารทำงานที่ใช้ในการจำลอง Trilateral ORC



รูปที่ 14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตรา
การขยายตัวของสารทำงานใน Expander และ
อุณหภูมิวิกฤตของสารทำงานที่ใช้ในการจำลอง
Trilateral ORC



รูปที่ 15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดัน
ที่ Condenser และอุณหภูมิวิกฤตของสารทำงาน
ที่ใช้ในการจำลอง Trilateral ORC

จากผลของการจำลองจำลองวัฏจักรโออาร์ซีแบบ Trilateral จะเห็นได้ว่ายังสารทำงานมีอุณหภูมิวิกฤตสูงจะทำให้งานสุทธิที่ได้สูงขึ้นสูงตามด้วยดังรูปที่ 13 และดังรูปที่ 14 และ 15 แนวโน้มของการขยายตัวของสารทำงานมีแนวโน้มเช่นเดียวกับการจำลองวัฏจักรโออาร์ซีแบบ Supercritical และ Subcritical

โดยเกณฑ์การเลือกสารทำงานโดยใช้อุณหภูมิวิกฤตของสารทำงานโดยพิจารณาอัตราการขยายตัวของสารทำงานที่ Expander และ ความดันที่ Condenser ไม่ต่ำกว่าความดันบรรยากาศจะเห็นได้ว่าควรเลือกสารทำงานที่มีอุณหภูมิวิกฤตระหว่าง 180-210 องศาเซลเซียส สำหรับแหล่งความร้อนที่ 210-250 องศาเซลเซียส

โดยการจำลองเปรียบเทียบโดยใช้น้ำเป็นสารทำงานพบว่าการใช้ น้ำเป็นสารทำงานจะทำให้อัตราการขยายตัวใน Expander มีค่าสูงมากเนื่องจากมีอุณหภูมิวิกฤตสูงเมื่อเทียบกับสารทำงานที่เป็นสารทำความเย็นโดยมีค่าเท่ากับ 373.74 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 14 จะเห็นได้ว่าอัตราการขยายตัวจะสูงเมื่ออุณหภูมิวิกฤตของสารทำงานสูง

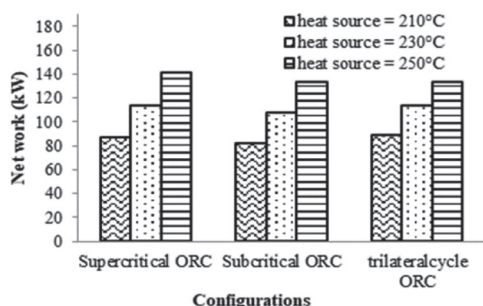
3.3 สารจำลองที่เหมาะสมสำหรับที่อุณหภูมิ แหล่งความร้อน 210-250°C

จากผลของการจำลองวัฏจักรโออาร์ซีแบบ Supercritical, Subcritical และ Trilateral เมื่อทำการพิจารณาสารทำงานที่เหมาะสมได้ผลดังตารางที่ 5

ผลของการจำลองเมื่อนำสารทำงานที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากงานสุทธิสูงสุด ขนาดของอุปกรณ์ทางความร้อนดังตารางที่ 5 แล้วเมื่อนำมาเปรียบเทียบผลของงานสุทธิที่ได้ในแต่ละอุณหภูมิแหล่งความร้อน UA และอัตราการขยายตัวของสารทำงานใน Expander ได้ผลดังรูปที่ 16, 17, 18 และ 19

ตารางที่ 5 สารที่เหมาะสมในการจำลองวัฏจักรโออาร์ซีที่อุณหภูมิแหล่งความร้อนเท่ากับ 210-250°C

Type	T_{hs} (°C)	(kg/s)	Working fluid	$T_{critical}$ (°C)
Sup.	210	3.00	R245fa	154.00
	230	3.00	R245ca	174.35
	250	3.60	R141b	204.35
Sub.	210	2.60	RE245fa2	171.63
	230	3.00	R245ca	174.35
	250	1.60	Pentane	196.55
TLC.	210	1.60	Isopentane	187.20
	230	1.80	Pentane	196.55
	250	4.20	R141b	204.35

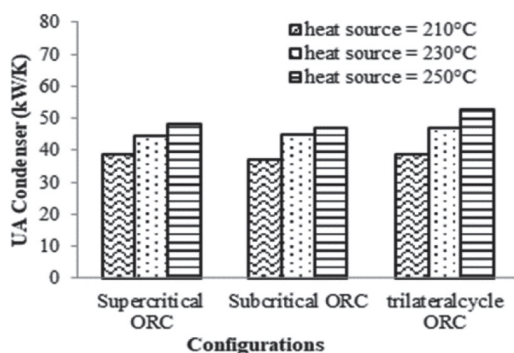
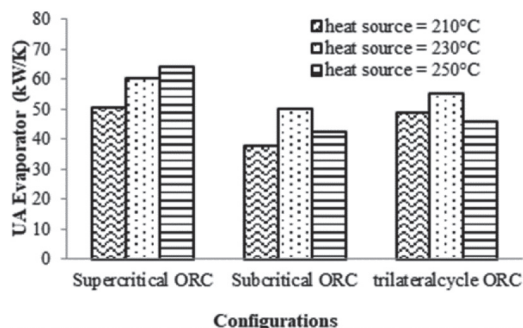


รูปที่ 16 งานสุทธิของการจำลองแต่ละอุณหภูมิ

จากผลการจำลองพบว่า การจำลองวัฏจักรโออาร์ซีแบบ Supercritical ได้งานสุทธิสูงสุดเมื่อเทียบกับในช่วงอุณหภูมิเดียวกันดังรูปที่ 16 โดยงานสุทธิที่ได้คือ 141.72 กิโลวัตต์ สารทำงาน R141b ที่อุณหภูมิแหล่งความร้อนเท่ากับ 250 องศาเซลเซียส

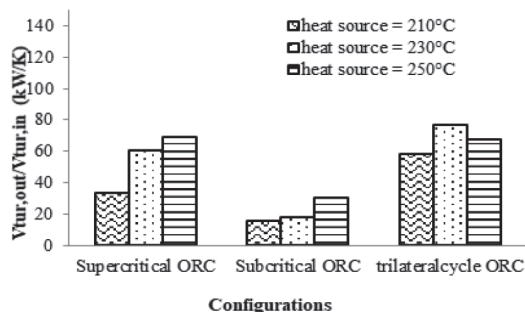
นอกจากนี้ในส่วนของการจำลองวัฏจักรโออาร์ซีแบบ Subcritical ได้งานสุทธิสูงสุดดังรูปที่ 16 โดยงานสุทธิที่ได้คือ 133.40 กิโลวัตต์ สารทำงาน Pentane ที่อุณหภูมิแหล่งความร้อนเท่ากับ 250 องศาเซลเซียส

ในส่วนของการจำลองวัฏจักรโออาร์ซีแบบ Trilateral ได้งานสุทธิสูงสุดดังรูปที่ 16 โดยงานสุทธิที่ได้คือ 133.82 กิโลวัตต์ สารทำงาน R141b ที่อุณหภูมิแหล่งความร้อนเท่ากับ 250 องศาเซลเซียส

รูปที่ 17 UA_{condenser} ของการจำลองแต่ละอุณหภูมิรูปที่ 18 UA_{evaporator} ของการจำลองแต่ละอุณหภูมิ

จากผลของการจำลองเมื่อพิจารณาสารทำงานที่เหมาะสมของอุณหภูมิแหล่งความร้อนในช่วง 210 – 250 องศาเซลเซียส พบว่า ขนาดของ Heat Exchanger Evaporator (UA) นั้นที่การจำลองแบบ Supercritical จะมีขนาดใหญ่ที่สุดและรองลงมาจะเป็น Trilateral และ Subcritical ตามลำดับ เนื่องจากตัว Supercritical จะเป็นการเพิ่มอุณหภูมิซึ่งต้องสูงกว่าจุดวิกฤตของสารทำงาน ทำให้ค่า UA สูง แต่เมื่อเทียบกับ Trilateral แล้วอุณหภูมิสูงสุดของสารทำงานจะต่ำกว่าจุดวิกฤตของสารทำงาน ทำให้ UA จะต่ำกว่า Supercritical และในส่วนของ Subcritical จะเป็นมีส่วนของการเปลี่ยน Phase ไม่เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ทำให้ค่า UA น้อยที่สุด

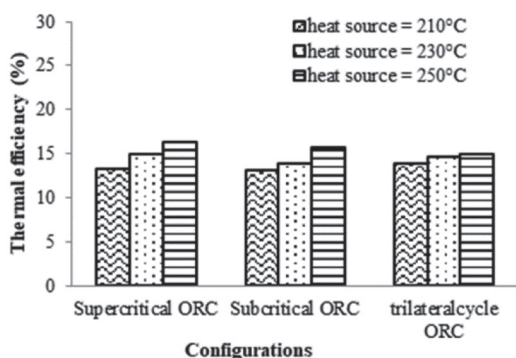
ในส่วนของคุณค่า Heat Exchanger Condenser (UA) นั้นพบว่าในการจำลองสูงที่สุดจะเป็นของ Trilateral รองลงมาจะเป็น Supercritical และ Subcritical ตามลำดับ ดังรูปที่ 17 และ 18 โดยขนาดของ UA ขึ้นอยู่กับชนิดของสารทำงานด้วย



รูปที่ 19 อัตราการขยายตัวของสารทำงาน
Expander ของการจำลองแต่ละอุณหภูมิ

จากการจำลองดังรูปที่ 19 พบว่าอัตราการขยายตัวของสารทำงานจากการจำลองวัฏจักรโออาร์ซีแบบ Trilateral จะมีการขยายตัวสูงที่สุด รองลงมาเป็น Supercritical และ Subcritical ตามลำดับ เพราะว่าการจำลองแบบ Trilateral จะเป็น Phase ภายใน Expander จากจุดที่สารทำงานเป็น Liquid Phase เป็น Mixture Phase ดังรูปที่ 4 ส่วน Subcritical และ Supercritical จะไม่เกิดการเปลี่ยน Phase ใน Expander

โดยรูปที่ 20 พบว่ายิ่งแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูงจะทำให้ประสิทธิภาพยิ่งสูงตามไปด้วย และจากผลการจำลองพบว่า การจำลองวัฏจักรโออาร์ซีแบบ Supercritical จะได้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงที่สุดที่ร้อยละ 16.25



รูปที่ 20 Thermal Efficiency ของการจำลอง
แต่ละอุณหภูมิ

3.4 Off-design

Off-design เป็นการจำลองเพื่อดูการทำงานของระบบเมื่อแหล่งความร้อนและแหล่งทิ้งความร้อนเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยทำการจำลองให้แหล่งอุณหภูมิความร้อนสามารถเปลี่ยนแปลงได้ ± 5 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแหล่งทิ้งความร้อนเปลี่ยนแปลงได้ ± 3 องศาเซลเซียส โดยกรณีที่เกิดขึ้นแสดงดังตารางที่ 6 และขนาดอุปกรณ์เท่าเดิม

ตารางที่ 6 กรณีที่เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแหล่ง
ความร้อนและแหล่งทิ้งความร้อน

CASE	T_{hs}	T_{cf}
1		$T_{cf} - 3$
2	$T_{hs} - 5$	T_{cf}
3		$T_{cf} + 3$
4		$T_{cf} - 3$
5	T_{hs}	T_{cf}
6		$T_{cf} + 3$
7		$T_{cf} - 3$
8	$T_{hs} + 5$	T_{cf}
9		$T_{cf} + 3$

เมื่อพิจารณาแหล่งความร้อนที่ 250 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อนและอุณหภูมิแหล่งทิ้งความร้อนเปลี่ยนแปลงไปโดยผลการจำลองโดยพิจารณาสุทธิได้ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ผลของงานสุทธิเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ แหล่งความร้อนและแหล่งทิ้งความร้อน เปลี่ยนแปลง

Case	Tri.	Sub.	Sup.
$\dot{W}_{net}$ (kW)			
1	132.62	132.00	141.68
2	128.01	127.65	136.33
3	123.60	123.46	131.95
4	139.07	135.93	148.86
5	133.80	133.40	141.72
6	128.85	128.02	139.81
7	144.69	143.37	156.67
8	139.78	136.40	152.04
9	135.29	132.33	147.08

ผลการจำลองดังตารางที่ 4 จะได้ว่า กรณีที่ 1, 2, 3 และ 6 ของการจำลองโออาร์ซีแบบ Trilateral ที่อัตราการไหลสารทำงานกับ 4.2 กิโลกรัมต่อวินาที และ Supercritical อัตราการไหลสารทำงานกับ 3.6 กิโลกรัมต่อวินาที จะให้งานสุทธิที่ต่ำกว่าค่าที่ได้ทำการออกแบบ (กรณีที่ 5) แต่การจำลองแบบ Subcritical ที่อัตราการไหลสารทำงานเท่ากับ 1.6 กิโลกรัมต่อวินาที จะมีกรณีที่ 9 ด้วยที่ไม่สามารถให้งานสุทธิได้เท่ากับ ค่าที่ได้ออกแบบไว้ จะเห็นได้ว่าเมื่อความร้อนของแหล่ง ความร้อนลดลงรวมถึงอุณหภูมิแหล่งความร้อนเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ได้งานสุทธิต่ำลง

โดยถ้าต้องการให้กรณีที่ 9 ได้งานที่สุทธิลดลงได้ งานกลับมาเท่าเดิม โดยจะทำการปรับค่าอัตราการไหล ของสารทำงาน เช่นของการจำลองแบบโออาร์ซีแบบ Trilateral เพื่อให้ได้ค่างานสุทธิเพิ่มมากขึ้นในส่วน ของกรณีที่ 9 ไม่สามารถสร้างงานสุทธิได้เท่ากับค่าที่ได้ ออกแบบไว้ โดยได้ผลดังตารางที่ 8 และ 9

ตารางที่ 8 ผลของความแตกต่างของ Enthalpy ของ สารทำงานที่ผ่าน Evaporator เมื่อปรับ อัตราการไหลของสารทำงานของกรณี การจำลองวัฏจักรโออาร์ซีแบบ Trilateral

CASE	Δh_{23} (kJ/kgK)		
	(kg/s)	Adjust.	At 4.20 kg/s
1	4.09	215.91	210.82
2	3.49	238.87	207.88
3	3.27	245.37	205.05
6	3.81	228.01	212.24

โดยจากผลของการจำลองพบว่าเมื่อทำการลด อัตราการไหลของสารทำงาน ช่วยให้สามารถผลิตงาน สุทธิได้มากยิ่งขึ้น เนื่องจากสารทำงานจะมีโอกาสได้ รับพลังงานมากยิ่งขึ้นเมื่อผ่าน Evaporator เนื่องจาก ไหลช้าลง ทำให้ผลต่างของ Enthalpy เพิ่มมากขึ้น ในส่วนของสารทำงานที่ไหลผ่าน Evaporator จึงทำ ให้ได้งานเพิ่มมากขึ้น ดังตารางที่ 9 ซึ่งการอัตราส่วน ลดลงของอัตราการไหลของสารทำงานน้อยกว่า อัตราส่วนการเพิ่มของ Δh จึงทำให้งานสุทธิเพิ่มสูงขึ้น ดังสมการที่ 3

ตารางที่ 9 ผลของงานสุทธิเมื่อปรับอัตราการไหล ของสารทำงานของกรณีการจำลองวัฏจักร โออาร์ซีแบบ Trilateral

CASE	$\dot{W}_{net}$ (kW)	$\dot{m}_{wf}$ (kg/s)	$\dot{W}_{net, increase}$ (kW)
1	133.85	4.09	1.23
2	133.84	3.49	5.82
3	130.24	3.27	6.65
6	133.84	3.81	4.98

นอกจากนี้พบว่า การปรับอัตราการไหลของสารทำงานสามารถเพิ่มงานสุทธิได้แต่ยังไม่เพียงพอเพื่อให้ งานสุทธิเท่ากับค่าที่ได้ออกแบบไว้ อาจจะต้องทำการปรับค่าอื่น ๆ ที่ส่งผลต่อค่างานสุทธิ ดังตารางที่ 9

อย่างไรก็ตาม ระบบที่จะสามารถรองรับระบบ Off-design อุปกรณ์ที่สำคัญคือ Variable Speed Pump เพื่อให้สามารถรองรับการปรับอัตราการไหล และความดันในระบบ อีกทั้งการปรับอัตราการไหล ของสารทำงานให้ลดลงเล็กน้อยเพียงใด จะขึ้นอยู่กับ ชนิดของสารทำงานและสภาวะการทำงานที่แตกต่าง กันออกไป

4. สรุป

จากผลของการจำลองวัฏจักรโออาร์ซีผลคือการ เลือกสารทำงานของการจำลองที่อุณหภูมิ 210–250 องศาเซลเซียส ถ้าเป็นกรณีของการจำลองวัฏจักร โออาร์ซี Supercritical ควรเลือกสารทำงานที่อุณหภูมิ วิกฤตต่ำกว่าแหล่งความร้อนเท่ากับ 40–50 องศาเซลเซียส ในส่วนของการจำลอง Subcritical เลือก สารทำงานโดยให้อุณหภูมิวิกฤตมีค่าประมาณอุณหภูมิ แหล่งความร้อน ถึ้นน้อยกว่าอุณหภูมิแหล่งความร้อน 40 องศาเซลเซียส และการจำลองแบบ Trilateral ควรเลือกสารทำงานที่มีอุณหภูมิวิกฤตระหว่าง 180–210 องศาเซลเซียส

ในการจำลองนั้นพบว่า การจำลองที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ได้งานสุทธิสูงที่สุดในการจำลองแต่ละ แบบโดยการจำลองแบบวัฏจักรโออาร์ซี Supercritical ได้งานสุทธิเท่ากับ 141.72 กิโลวัตต์ จากสารทำงาน R141b มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับร้อยละ 16.25 และในส่วนของการจำลองแบบวัฏจักรโออาร์ซี Subcritical ได้งานสุทธิเท่ากับ 133.40 กิโลวัตต์ จาก สารทำงาน Pentane มีประสิทธิภาพเชิงความร้อน เท่ากับร้อยละ 15.70 และ Trilateral ได้งานสุทธิ 133.82 กิโลวัตต์ จากสารทำงาน R141b

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิของแหล่งความร้อนรวม ถึงแหล่งทิ้งความร้อนเปลี่ยนแปลงไปจะส่งผลต่องาน โดยในกรณีที่อุณหภูมิแหล่งความร้อนลดลงและกรณี ที่อุณหภูมิแหล่งทิ้งความร้อนเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ได้ งานสุทธิลดลง โดยจากการจำลองเปลี่ยนค่าอัตราการ ไหลของสารทำงานเพื่อให้ได้งานสุทธิเพิ่มขึ้นให้ใกล้เคียงค่าที่ได้ออกแบบไว้ พบว่าในการทดลองจำลองใน อุณหภูมิแหล่งความร้อนเท่ากับ 250 องศาเซลเซียส สามารถเพิ่มงานได้สูงที่สุดเท่ากับ 6.65 กิโลวัตต์ จำลอง เป็นวัฏจักรโออาร์ซีแบบ Trilateral

จากการศึกษาระบบโรงไฟฟ้าสำหรับอุณหภูมิ 210–250 องศาเซลเซียส อาจจะเป็นแนวทางหนึ่งเพื่อ นำระบบนี้ไปใช้ในการสร้างโรงไฟฟ้าเพื่อใช้ในการนำ ความร้อนเหลือทิ้งที่มีอุณหภูมิในช่วงดังกล่าวมาใช้เพื่อ ให้เกิดประโยชน์ทางพลังงานสูงที่สุด

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความอนุเคราะห์ทุนในการทำงานวิจัยสำเร็จจุลลง ไปด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] D. Neshumayev, L. Rummel, A. Konist, A. Ots and T. Parve, “Power plant fuelconsumption rate during load cycling,” *Applied Energy*, vol. 224, pp. 124–135, Aug. 2018.
- [2] C. Rewlay-Ngoen, S. Papong and S. Sampattagul, “The NPP and Social Asset Impacts of Acidification from Coal-fired Power Plant in Thailand,” *Energy Procedia*, vol. 52, pp. 234–241, 2014.
- [3] S. N. Sinha and P. K. Nag, “Air Pollution from Solid Fuels,” in *Encyclopedia of Environmental Health*, Elsevier, 2011,

- pp. 46–52.
- [4] L. Palagi, A. Pesyridis, E. Sciubba and L. Tocci, “Machine Learning for the prediction of the dynamic behavior of a small scale ORC system,” *Energy*, vol. 166, pp. 72–82, Jan. 2019.
- [5] A. T. Hoang, “Waste heat recovery from diesel engines based on Organic Rankine Cycle,” *Applied Energy*, vol. 231, pp. 138–166, Dec. 2018.
- [6] Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Ministry of Energy, Renewable Energy Outlook: Thailand, 2017.
- [7] A. Firth, B. Zhang and A. Yang, “Quantification of global waste heat and its environmental effects,” *Applied Energy*, vol. 235, pp. 1314–1334, Feb. 2019.
- [8] H. Yağlı, Y. Koç, A. Koç, A. Görgülü and A. Tandiroğlu, “Parametric optimization and exergetic analysis comparison of subcritical and supercritical organic Rankine cycle (ORC) for biogas fuelled combined heat and power (CHP) engine exhaust gas waste heat,” *Energy*, vol. 111, pp. 923–932, Sep. 2016,
- [9] G. Xu, G. Song, X. Zhu, W. Gao, H. Li and Y. Quan, “Performance evaluation of a direct vapor generation supercritical ORC system driven by linear Fresnel reflector solar concentrator,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 80, pp. 196–204, 2015.
- [10] J. Li, Q. Liu, Z. Ge, Y. Duan and Z. Yang, “Thermodynamic performance analyses and optimization of subcritical and transcritical organic Rankine cycles using R1234ze(E) for 100–200 °C heat sources,” *Energy Conversion and Management*, vol. 149, pp. 140–154, Oct. 2017.
- [11] A. M. Pantaleo, J. Fordham, O. A. Oyewunmi and C. N. Markides, “Intermittent waste heat recovery via ORC in coffee torrefaction,” *Energy Procedia*, vol. 142, pp. 1714–1720, Dec. 2017.
- [12] R. Cipollone, D. D. Battista and F. Bettoja, “Performances of an ORC power unit for Waste Heat Recovery on Heavy Duty Engine,” *Energy Procedia*, vol. 129, pp. 770–777, 2017.
- [13] M. Yari, A. Mehr, V. Zare, S. Mahmoudi and M. Rosen, “Exergoeconomic comparison of TLC (trilateral Rankine cycle), ORC (organic Rankine cycle) and Kalina cycle using a low grade heat source,” *Energy*, vol. 83, pp. 712–722, Apr. 2015.
- [14] A. Benato, A. Stoppato, A. Mirandola and M. D. Medico, “Design and Off-Design Analysis of an ORC Coupled with a Micro-Gas Turbine,” *Energy Procedia*, vol. 129, pp. 551–558, 2017.
- [15] Y. Cao and Y. Dai, “Comparative analysis on off-design performance of a gas turbine and ORC combined cycle under different operation approaches,” *Energy Conversion and Management*, vol. 135, pp. 84–100, 2017.

- [16] C. He, C. Liu, H. Gao, H. Xie, Y. Li, S. Wu and J. Xu, "The optimal evaporation temperature and working fluids for subcritical organic Rankine cycle," *Energy*, vol. 38, no. 1, pp. 136–143, 2012.
- [17] J. Hærvig, K. Sørensen and T. Condra, "Guidelines for optimal selection of working fluid for an organic Rankine cycle in relation to waste heat recovery," *Energy*, vol. 96, pp. 592–602, 2016.
- [18] J. Radulovic and N. I. B. Castaneda, "On the potential of zeotropic mixtures in supercritical ORC powered by geothermal energy source," *Energy Conversion and Management*, vol. 88, pp. 365–371, 2014.
- [19] E. W. Lemmon, M. L. Huber and M. O. McLinden, "NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP, Version 9.1, National Institute of Standards and Technology, 2013.
- [20] J. Fischer, "Comparison of trilateral cycles and organic Rankine cycles," *Energy*, vol. 36, no. 10, pp. 6208–6219, Oct. 2011.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การจำลองโรงไฟฟ้าปล่องลมแดดแบบหลังคาเอียงขนาด 500 กิโลวัตต์ ที่ใช้ความร้อนทิ้งจากอุตสาหกรรม

บัณฑิต จันทรสว่าง* และ อาทิตย์ คุณศรีสุข

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

รับบทความ 7 มกราคม 2563 แก้ไขบทความ 30 เมษายน 2563 ตอรับบทความ 5 พฤษภาคม 2563

บทคัดย่อ

โรงไฟฟ้าปล่องลมแดด (Solar Chimney Power Plant, SCPP) ถูกนำเสนอให้เป็นโรงไฟฟ้าทางเลือกใหม่ ซึ่งงานวิจัยโดยทั่วไปนำเสนอว่าในเชิงพาณิชย์ถ้าต้องการสร้างควรจะมีกำลังสูงประมาณ 1 กิโลเมตร ทำให้ก่อสร้างได้ยากและมีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างสูง โรงไฟฟ้าปล่องลมแดดแบบหลังคาเอียง (Sloped Solar Chimney Power Plant, SSCPP) มีลักษณะเด่นคือ หลังคาปล่องที่มีความเอียงจะส่งผลให้ระบบสามารถใช้ปล่องที่สั้นกว่า SCPP ซึ่งทำให้ค่าใช้จ่ายในการลงทุนต่ำเมื่อเทียบกับ SCPP นอกจากนี้ จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าความร้อนทิ้งจากอุตสาหกรรมในประเทศไทยยังมีศักยภาพพอที่จะนำไปใช้ประโยชน์ งานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อออกแบบโรงไฟฟ้าปล่องลมแดดแบบหลังคาเอียงที่ใช้ความร้อนทิ้งจากอุตสาหกรรม (Sloped Solar Chimney Power Plant Powered by Industrial Waste Heat, SSCPP-WH) โดยแบบจำลองถูกทำ validation เทียบกับข้อมูลการทดลอง จากนั้นหาขนาดของโรงไฟฟ้าที่ทำให้ LCOE (Levelized Cost of Electricity) มีค่าต่ำที่สุด พบว่า LCOE ต่ำสุดประมาณ 0.14 ดอลลาร์สหรัฐต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง มีระยะเวลาคืนทุนประมาณ 11 ปี ประสิทธิภาพของระบบประมาณร้อยละ 1.3 และประสิทธิภาพของหลังคาปล่องร้อยละ 36 โดยที่ SSCPP-WH มีพื้นที่หลังคาปล่อง 49,000 ตารางเมตร ความสูงปล่อง 45 เมตร อัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดการไหลที่ทางเข้าหลังคาปล่องต่อทางออกหลังคาปล่อง (AR12) เท่ากับ 14 และความร้อนทิ้งที่ระบบได้รับเท่ากับ 10 เมกกะวัตต์ นอกจากนี้ยังพบว่า ระยะเวลาคืนทุนของ SSCPP ต่ำกว่า SSCPP-WH ในบางกรณี เพื่อให้แน่ใจว่า SSCPP-WH มีระยะเวลาคืนทุนต่ำกว่า SSCPP ความร้อนทิ้งที่ระบบได้รับต่อความร้อนที่ระบบได้รับจากแสงอาทิตย์ต้องมีค่ามากกว่า 0.34

คำสำคัญ : โรงไฟฟ้าปล่องลมแดด; หลังคาปล่องเอียง; พลังงานแสงอาทิตย์; การนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +669 8584 0996, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: chansawang@hotmail.co.th

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Simulation of a 500 kW Sloped Solar Chimney Power Plant Powered by Industrial Waste Heat

Bandit Chansawang* and Atit Koonsrisuk

School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology
111 University Avenue, Suranaree, Muang, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

Received 7 January 2020; Revised 30 April 2020; Accepted 5 May 2020

Abstract

The solar chimney power plant (SCPP) has been proposed as a promising alternative power plant. According to the literature, the chimney for commercial-scale SCPPs should be about 1 km high. The construction of these tall chimneys is very challenging and the construction cost is enormous. The sloped solar chimney power plant (SSCPP) is a variation of the SCPP. One of the SSCPP's prominent feature is that its collector is sloped, and then its chimney can be shorter than that of the SCPP. This leads to a lower investment cost of SSCPPs compared with that of SCPPs. Also, previous studies show that the industrial waste heat potential of Thailand is considerable and should be investigated. As a result, this study developed a mathematical model for designing a sloped solar chimney power plant powered by industrial waste heat (SSCPP-WH). The model was justified by validation using experimental data. Then several SSCPPs with different geometrical dimensions were simulated to determine a proper dimension that has the lowest levelized cost of electricity (LCOE). It was found that the LCOE is about 0.14 USD/kWh, the payback period is about 11 years, system efficiency of 1.3% and collector efficiency of 36%. for an SSCPP-WH with a collector area of 49,000 m², chimney height of 45m, flow area ratio between solar collector inlet and solar collector outlet (AR₁₂) of 14 and waste heat of 10 MW. It was also found that the payback period of SSCPP with no supplied waste heat is lower than that of some SSCPP-WHs. To make sure that the payback period for the SSCPP-WH is faster than that of SSCPP with no waste heat, a ratio of the supplied waste heat to the absorbed solar energy of the SSCPP-WH must be greater than 0.34.

Keywords : Solar Chimney Power Plant; Sloped Collector; Solar Energy; Waste Heat Recovery

* Corresponding Author. Tel.: +669 8584 0996, E-mail Address: chansawang@hotmail.co.th

1. บทนำ

โรงไฟฟ้าปล่องลมแดด มีส่วนประกอบหลักอยู่ 3 ส่วนคือ หลังคารับแดด ปล่อง และกังหันลม แสดงดังรูปที่ 1 โดยมีหลักการทำงานคือ หลังคารับแดด (Collector) มีหน้าที่รับรังสีจากดวงอาทิตย์ ส่งผลให้ได้หลังคารับแดดเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก ทำให้อากาศภายในหลังคารับแดดมีอุณหภูมิสูงขึ้น ความหนาแน่นอากาศจึงลดลง อากาศจึงลอยตัวสูงขึ้นและไหลออกทางปล่อง (Chimney) เกิดลมภายในระบบหมุนกังหันลม (Turbine) ที่ต่อเข้ากับเจนเนอเรเตอร์ ได้พลังงานไฟฟ้าออกมา โรงไฟฟ้าปล่องลมแดดเป็นโรงไฟฟ้าที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และง่ายต่อการจัดการเมื่อเทียบกับโรงไฟฟ้าถ่านหิน อย่างไรก็ตาม โรงไฟฟ้าชนิดนี้มีประสิทธิภาพต่ำ และปล่องต้องสูงมากหากต้องการผลิตไฟฟ้าในระดับเมกะวัตต์ [1]

โรงไฟฟ้าปล่องลมแดดถูกนำเสนอโดย Schlaich ในปี ค.ศ. 1968 จากนั้นในปี 1980 ได้มีการสร้างโรงไฟฟ้าขึ้นที่ประเทศสเปน โดยมีความสูงปล่อง 194.6 เมตร รัศมีปล่อง 5.08 เมตร รัศมีหลังคารับแดด 122 เมตร และความสูงเฉลี่ยของหลังคารับแดด 1.85 เมตร ซึ่งสามารถสร้างกำลังไฟฟ้าได้ 50 กิโลวัตต์ [2]

ลักษณะโรงไฟฟ้าปล่องลมแดดที่อธิบายข้างต้น อาจเรียกว่า โรงไฟฟ้าปล่องลมแดดที่มีรูปทรงแบบทั่วไป (Conventional Solar Chimney Power Plant, CSCPP) และเนื่องจาก CSCPP มีประสิทธิภาพต่ำจึงมีงานวิจัยเพื่อเพิ่มกำลังการผลิตของ CSCPP เช่น A. Zandian และ M. Ashjaee [3] ได้นำเสนอการออกแบบและจำลองสำหรับ CSCPP ที่ทำหน้าที่เป็นหอคอยเย็นแบบธรรมชาติ (Hybrid Cooling Tower Solar Chimney, HCTSC) สำหรับโรงไฟฟ้าขนาด 250 เมกะวัตต์ พบว่าเมื่อติดตั้ง HCTSC จะทำให้โรงไฟฟ้ามีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.37 สำหรับ Z. Zou และ S. He [4] ได้จำลอง HCTSC พบว่า เมื่อระบบรับความร้อนทั้งจาก Condenser ของโรงไฟฟ้า จะทำให้กังหันลมผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากกว่า

กรณีที่ระบบไม่ได้รับความร้อนทั้งประมาณ 20 เท่า และยังพบอีกว่าความร้อนจากแสงอาทิตย์มีอิทธิพลต่อสมรรถนะของระบบน้อยเมื่อเทียบกับความร้อนที่ได้จาก Condenser ของโรงไฟฟ้า

CSCPP มีข้อจำกัด คือ ต้องสร้างปล่องสูงทำให้มีอุปสรรคในการก่อสร้าง นอกจากนี้ ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างปล่องคิดเป็นร้อยละ 25 ของค่าใช้จ่ายในการสร้างทั้งระบบ [5] จึงมีงานวิจัยโรงไฟฟ้าปล่องลมแดดเพื่อลดความสูงปล่อง ดังนี้ E. Bilgen และ J. Rheault [6] ได้ออกแบบปล่องลมแดดสำหรับภูมิประเทศที่มีละติจูดสูง โดยมีรูปทรงดังรูปที่ 2 หรืออาจเรียกว่า โรงไฟฟ้าปล่องลมแดดแบบหลังคารับแดดเอียง (Sloped Solar Chimney Power Plant, SSCPP) โดยพื้นที่หลังคาเท่ากับ 950,000 ตารางเมตร กำลังไฟฟ้า 5 เมกะวัตต์ พบว่ากรณีที่มีการเอียง Collector สำหรับการติดตั้งบนเนินเขา สามารถทำให้ปล่องมีขนาดสั้นลงได้เมื่อเทียบกับ CSCPP และประสิทธิภาพระบบน้อยกว่าร้อยละ 0.5 และ F. Cao et al. [7] ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และออกแบบ SSCPP ที่มีขนาดเพียงพอสำหรับผลิตไฟฟ้า 5 เมกะวัตต์ โดยจำลองภายใต้สภาพอากาศเมืองหลานโจว ประเทศจีน พบว่าตัวแปรที่สำคัญของ SSCPP มีแนวโน้มที่คล้ายกัน และค่อนข้างคงที่ตลอดทั้งปี A. Koonsrisuk [8] ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการประเมินสมรรถนะของ SSCPP ในส่วนของการทดลองสำหรับ SSCPP S. Kalash et al. [9] ทำการทดลองเพื่อศึกษาสมรรถนะของ SSCPP ตลอดทั้งปี พบว่า การเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิบรรยากาศ ส่งอิทธิพลโดยตรงต่อผลต่างระหว่างอุณหภูมิของอากาศที่ออกจากหลังคารับแดดกับอุณหภูมิบรรยากาศ

SSCPP มีข้อดีหลายประการจึงมีงานวิจัยที่ทำการเปรียบเทียบระหว่าง CSCPP กับ SSCPP A. Koonsrisuk [10] ได้เปรียบเทียบสมรรถนะทางเทอร์โมไดนามิกส์ระหว่าง CSCPP กับ SSCPP พบว่าสมรรถนะ

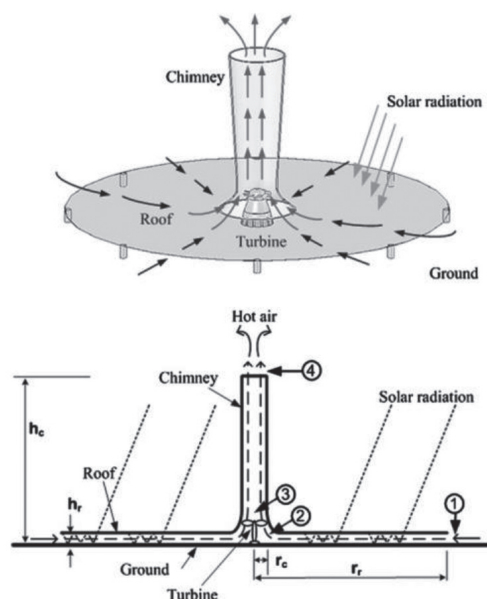
ของ SSCPP ดีกว่า CSCPP พร้อมทั้งแสดงขนาดพื้นที่ของหลังคาที่ติดตั้งที่ดีที่สุด และระบุว่าประสิทธิภาพสูงขึ้นเมื่อความสูงของระบบสูงขึ้นทั้ง CSCPP และ SSCPP F. Cao et al. [11] เปรียบเทียบและวิเคราะห์สมรรถนะของ CSCPP และ SSCPP ภายใต้ภูมิประเทศของเมืองหลานโจว ประเทศจีน พบว่า SSCPP ที่มีมุมเอียงของหลังคาติดตั้ง 60 องศา พื้นที่หลังคาติดตั้ง 950,000 ตารางเมตร จะได้กำลังจากกังหันลมสูงสุดและสูงกว่า CSCPP ทั้งนี้ประสิทธิภาพของระบบประมาณร้อยละ 0.8 ด้านค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง X. Zhou et al. [12] ระบุว่า SSCPP จะมีค่าใช้จ่ายในการสร้างปล่องประหยัดกว่า CSCPP แต่จะมีค่าใช้จ่ายในการสร้าง Collector เยี่ยงสูงกว่า CSCPP รวมทั้งค่าใช้จ่ายในการปรับระดับพื้นผิวที่ไม่สม่ำเสมอของภูเขาในกรณีสร้างด้านข้างภูเขา T. P. Fluri et al. [13] วิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์สำหรับ CSCPP ที่มีกำลังการผลิต 100 เมกะวัตต์ และมีขนาดตาม J. Schlaich et al. [14] จากการวิเคราะห์พบว่า ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับปล่องประกอบด้วยค่าใช้จ่ายในการสร้างผนังปล่องร้อยละ 80 ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับรากฐานร้อยละ 14 และค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับ Stiffener ร้อยละ 6 และยังระบุว่า LCOE ของระบบเท่ากับ 0.27 ยูโรต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง

ในส่วนมุมเอียงของหลังคาติดตั้งที่เหมาะสมสำหรับ SSCPP E. Bilgen และ J. Rheault [6] แนะนำว่า หากพิจารณารังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบหลังคาติดตั้งมากที่สุด มุมเอียงควรจะมีค่าน้อยกว่าละติจูดของภูมิประเทศประมาณ 5–7 องศา E. P. Sakonidou et al. [15] ระบุว่าหากพิจารณาอัตราการไหลของอากาศในระบบที่มีค่าสูงสุด มุมเอียงของหลังคาติดตั้งควรจะมีค่ามากกว่าละติจูดของภูมิประเทศประมาณ 20–25 องศา ซึ่งข้อมูลของสองงานวิจัยข้างต้นมีแนวโน้มสอดคล้องกับงานวิจัยของ F. Cao et al. [11] ที่พบว่า หากพิจารณาการได้รับรังสีดวงอาทิตย์ของหลังคาติดตั้งมากที่สุดมุมเอียงควรจะมีค่าน้อยกว่าละติจูดของภูมิประเทศประมาณ 2–8 องศา และ

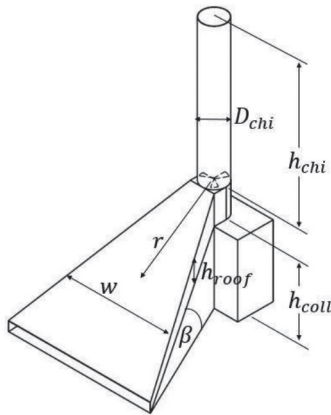
ถ้าพิจารณากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มากที่สุด มุมเอียงของหลังคาติดตั้งควรมีค่ามากกว่าละติจูดของภูมิประเทศประมาณ 25–38 องศา

จากข้อมูลข้างต้น พบว่า SSCPP มีข้อดีที่สำคัญคือ ความสูงปล่องต่ำมากเมื่อเทียบกับ CSCPP และ SCPP จะมีสมรรถนะดีขึ้นถ้ามีการนำความร้อนทิ้งมาใช้ประโยชน์ อีกทั้งระบบมีขั้นตอนการผลิตกระแสไฟฟ้าไม่ซับซ้อน และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้อุตสาหกรรมในประเทศไทยยังมีความร้อนทิ้งที่มีศักยภาพในการนำมาใช้ประโยชน์ [16]

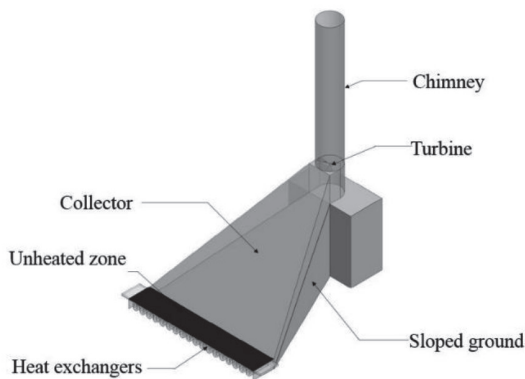
งานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้ปล่องลมแบบหลังคาเอียงขนาด 500 กิโลวัตต์ ที่ใช้ความร้อนทิ้งจากอุตสาหกรรมร่วมกับความร้อนที่ได้รับจากแสงแดด แสดงดังรูปที่ 3 โดยมีแนวคิดที่จะลดความสูงปล่อง พร้อมทั้งวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์เพื่อหา Dimension ที่เหมาะสม ผลที่คาดว่าจะได้รับ คือ มีเทคโนโลยีทางเลือกในการสร้างโรงผลิตไฟฟ้าขนาด 500 กิโลวัตต์



รูปที่ 1 แผนภาพโรงไฟฟ้าปล่องลมแบบทั่วไป (CSCPP) [8]



รูปที่ 2 แผนภาพโรงไฟฟ้าปล่องลมแดด
แบบหลังคาเอียง (SSCPP)



รูปที่ 3 แผนภาพโรงไฟฟ้าปล่องลมแดด
แบบหลังคาเอียงที่ใช้ความร้อนทั้ง
จากอุตสาหกรรม (SSCPP-WH)

2. แบบจำลองคณิตศาสตร์

2.1 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

เมื่อพิจารณารูปที่ 3 อุณหภูมิของอากาศที่ออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$T_1 = T_a + \frac{Q}{\dot{m}c_p} \quad (1)$$

โดยที่ Q คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสู่อากาศที่ไหลผ่าน และกำหนดให้ตำแหน่งทางเข้าหลังคารับแดด (ทางออกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน) ทางออกหลังคารับแดด ทางออกของกังหันลม และ ทางออกปล่อง คือ Subscripts '1', '2', '3' และ '4' ตามลำดับ หรือสามารถดูจากรูปที่ 1

เมื่ออากาศไหลผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะเกิดการสูญเสียความดัน ดังนั้นความดันของอากาศตำแหน่งที่ 1 สามารถคำนวณได้ดังนี้ [4]

$$p_1 = p_a - K \frac{1}{2} \rho_a V_a^2 \quad (2)$$

โดยที่ K คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียความดันของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยอ้างอิงมาจาก Z. Zou และ S. He [4] ซึ่งเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Fin Tube

2.2 รังสีดวงอาทิตย์ที่แผ่ลงบนผิวเอียง

ข้อมูลเกี่ยวกับค่ารังสีดวงอาทิตย์ของภูมิภาคประเทศเป็นค่ารังสีดวงอาทิตย์ที่แผ่ลงบนผิวนราบ แต่งานวิจัยนี้มีการเอียงหลังคารับแดด จึงต้องมีแบบจำลองที่ใช้ปรับค่ารังสีที่แผ่ลงบนผิวนราบเป็นค่ารังสีที่แผ่ลงบนผิวเอียง ดังนี้ [17]

รังสีดวงอาทิตย์ที่แผ่ลงบนผิวนราบประกอบไปด้วย Beam Radiation และ Diffuse Radiation ดังนี้

$$I_{hor} = I_b + I_d \quad (3)$$

ในส่วนของรังสีที่แผ่ลงบนผิวเอียงประกอบไปด้วย Beam Radiation, Diffuse Radiation และ Reflect Radiation ดังนี้

$$I_t = I_{t,b} + I_{t,d} + I_{t,r} \quad (4)$$

เมื่อ $I_{t,b}$, $I_{t,d}$ และ $I_{t,r}$ สามารถคำนวณได้จาก

$$I_{t,b} = I_b R_b \quad (5)$$

$$I_{t,d} = I_d R_d \quad (6)$$

$$I_{t,r} = \rho_g I_{hor} R_r \quad (7)$$

ซึ่งรายละเอียดของการคำนวณหา I_b และ I_d สามารถพบได้ใน [17] และค่า R_b , R_d และ R_r คือ อัตราส่วนระหว่างรังสีดวงอาทิตย์ที่แผ่ลงบนพื้นเอียงต่อรังสีดวงอาทิตย์ที่แผ่ลงบนพื้นราบ ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$R_b = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\varphi - \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta} \quad (8)$$

$$R_d = \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad (9)$$

$$R_r = \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (10)$$

โดยที่ β คือ มุมเอียงของพื้นดินดังรูปที่ 2 δ , φ และ ω คือ Declination Angle ละติจูดของภูมิประเทศ และ Hour Angle ตามลำดับ

เมื่อแทนสมการที่ (5) – (7) ลงในสมการที่ (4) จะได้สมการที่ใช้ในการคำนวณหาค่ารังสีที่แผ่ลงบนผิวเอียงดังนี้

$$I_t = (I_{hor} - I_d) R_b + I_d \frac{1 + \cos \beta}{2} + \rho_g I_{hor} \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (11)$$

2.3 หลังคาปรับแดด

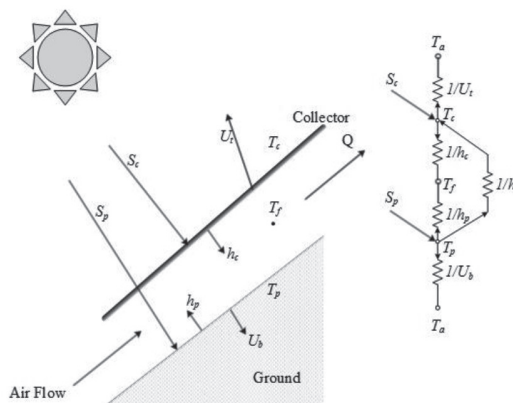
งานวิจัยที่สร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์เกี่ยวกับโรงไฟฟ้าปล่องลมแดด ส่วนใหญ่จะกำหนดให้ประสิทธิภาพหลังคาปรับแดดเป็นค่าคงที่ แต่งานวิจัยนี้ต้องการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับทำนายประสิทธิภาพหลังคาปรับแดด ซึ่งจะทำให้แบบจำลองมีความสมจริงมากยิ่งขึ้น การสร้างแบบจำลองจะพิจารณาความร้อนที่หลังคาปรับแดดได้รับจากดวงอาทิตย์ และความร้อนที่หลังคาปรับแดดสูญเสีย

ความร้อนที่หลังคาได้รับจากดวงอาทิตย์ก็คือค่ารังสีที่แผ่ลงบนพื้นเอียงในหัวข้อที่ 2.2 จากนั้นจำลองเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนสำหรับหลังคาปรับแดดและพื้นดิน ซึ่งค่ารังสีที่ถูกดูดซับโดยพื้นผิวหลังคาปรับแดดและพื้นผิวดินคำนวณโดยใช้แบบจำลองอย่างง่ายดังนี้ [18]

$$S_c = \alpha_c I_t \quad (12)$$

$$S_p = (\tau_c \alpha_p) I_t \quad (13)$$

โดยที่ S_c และ S_p คือ รังสีที่ถูกดูดซับโดยหลังคาและพื้นดิน ตามลำดับ



รูปที่ 4 แผนภาพสมดุลความร้อนของหลังคาปรับแดด

รูปที่ 4 คือแผนภาพและการสมดุลความร้อนของหลังคาปรับแดด เมื่อพิจารณาจะได้สมการสมดุลความร้อนสำหรับหลังคา คือ

$$S_c + U_t(T_a - T_c) + h_r(T_p - T_c) + h_c(T_f - T_c) = 0 \quad (14)$$

สมการสมดุลความร้อนสำหรับพื้นดิน คือ

$$S_p + U_b(T_a - T_p) + h_r(T_c - T_p) + h_p(T_f - T_p) = 0 \quad (15)$$

และความร้อนที่ระบบสามารถใช้ได้คำนวณได้ดังนี้

$$h_c(T_c - T_f) + h_p(T_p - T_f) = q'' \quad (16)$$

โดยที่

$$T_f = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (17)$$

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเหนือหลังคา
รับแดดสามารถคำนวณได้ดังนี้ [19]

$$U_t = 2.8 + 3V \quad (18)$$

โดยที่ V คือ ความเร็วลมของภูมิประเทศ

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างหลังคา
กับพื้นดิน คำนวณได้จาก [19]

$$h_r = \frac{\sigma(T_c^2 + T_p^2)(T_c + T_p)}{\frac{1}{\varepsilon_c} + \frac{1}{\varepsilon_p} - 1} \quad (19)$$

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากหลังคา
สู่อากาศใต้หลังคาคำนวณได้ดังนี้ [19]

$$h_c = \frac{Nu_c k_f}{L} \quad (20)$$

โดยที่

$$Nu_c = 0.14(Ra_c)^{\frac{1}{3}} \quad (21)$$

และ

$$Ra_c = \frac{g\beta(T_f - T_c)L^3}{\nu\alpha} \quad (22)$$

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากพื้นดิน
ใต้หลังคาสู่อากาศใต้หลังคาคำนวณได้ดังนี้ [19]

$$h_p = \frac{Nu_p k_f}{L} \quad (23)$$

โดยที่

$$Nu_p = 0.15(Ra_p)^{\frac{1}{3}} \quad (24)$$

และ

$$Ra_p = \frac{g\beta(T_f - T_p)L^3}{\nu\alpha} \quad (25)$$

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากพื้นดิน
ใต้หลังคาลงสู่ดิน [20] คือ

$$U_b = \frac{2b}{\sqrt{\pi t}} \quad (26)$$

โดยที่ $b = \sqrt{k\rho c_p}$ และ t คือเวลาในรอบวัน

สำหรับการจำลองเกี่ยวกับปล่องลมแตกแบบ
หลังคาเอียงจะใช้แบบจำลองของ A. Koonsrisuk
[10] ซึ่งทำนายความดัน และอุณหภูมิ ตำแหน่งที่ 1
และ 2 ดังนี้

$$p_2 = p_1 - \frac{1}{2}(\rho_1 + \rho_2)gh_{coll} - \frac{\dot{m}^2}{2\rho_1} \left(\frac{1}{A_2^2} - \frac{1}{A_1^2} \right) + \frac{\dot{m}q''}{\rho_1 c_p T_1} \int_1^2 \frac{dA_{coll}}{A^2} \quad (27)$$

$$T_2 = T_1 - \frac{\dot{m}^2}{2c_p \rho_1^2} \left(\frac{1}{A_2^2} - \frac{1}{A_1^2} \right) - \frac{gh_{coll}}{c_p} + \frac{q'' A_{coll}}{\dot{m} c_p} \quad (28)$$

2.4 Junction Box

ในกรณีของการทำ Validation ข้อมูลสำหรับ
การทำ Validation มาจากผลการทดลองสำหรับ
SSCCP ที่ไม่มีการติดตั้งกังหันเพื่อกำเนิดกระแสไฟฟ้า
[9] ดังนั้นความดันตำแหน่งที่ 3 จึงใช้ Bernoulli's
Equation ในการทำนาย ซึ่งจัดรูปได้ดังนี้

$$p_3 = p_2 - \frac{1}{2}(\rho_2 + \rho_3)gh_{23} - \left(\frac{\dot{m}^2}{2\rho_3 A_3^2} - \frac{\dot{m}^2}{2\rho_2 A_2^2} \right) \quad (29)$$

และอุณหภูมิของอากาศตำแหน่งที่ 3 คำนวณโดยใช้สมการสมดุลพลังงานสามารถจัดรูปได้ดังนี้

$$\dot{m}c_p(T_2 - T_3) = U_j A_j \left(\frac{T_2 + T_3}{2} - T_a \right) \quad (30)$$

โดยที่ $U_j = U_i$ และกำหนดให้ $(T_2 + T_3)/2$ คือ อุณหภูมิที่ผิวของ Junction Box

อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้ จำลองเกี่ยวกับ SSCPP ที่มีกำลังการผลิตขนาด 500 กิโลวัตต์ การทำนายความดันและอุณหภูมิตำแหน่งที่ 3 จึงใช้สมการที่ผ่านการทำ Validation มาแล้วในงานวิจัยของ A. Koonsrisuk [10] ดังนี้

$$\dot{W}_{ext} = \frac{\dot{m}}{(\rho_2 + \rho_3)/2} (p_2 - p_3) \quad (31)$$

$$T_3 = T_2 \left(\frac{p_3}{p_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (32)$$

2.5 ปล่อง

ผลต่างความดันและอุณหภูมิ ระหว่างตำแหน่งทางเข้ากับทางออกปล่องสามารถคำนวณได้ดังนี้ [21]

$$p_3 = p_4 + \frac{1}{2}(\rho_3 + \rho_4)gh_{chi} + \left(\frac{\dot{m}}{2\rho_3} \right)^2 \left(\frac{1}{A_4^2} - \frac{1}{A_3^2} \right) \quad (33)$$

โดยที่

$$p_4 = p_a \left(1 - \frac{g}{c_p T_a} (h_{chi} + h_{roof,2} + h_{coll}) \right)^{\frac{c_p}{R}} \quad (34)$$

$$T_4 = T_3 - \frac{\dot{m}^2}{2c_p \rho_3^2} \left(\frac{1}{A_4^2} - \frac{1}{A_3^2} \right) - \frac{g}{c_p} h_{chi} \quad (35)$$

โดยความหนาแน่นตำแหน่งต่าง ๆ สามารถหาได้จากกฎของก๊าซอุดมคติ

$$\rho_1 = \frac{p_1}{RT_1} \quad (36)$$

$$\rho_2 = \frac{p_2}{RT_2} \quad (37)$$

$$\rho_3 = \frac{p_3}{RT_3} \quad (38)$$

$$\rho_4 = \frac{p_4}{RT_4} \quad (39)$$

2.6 ประสิทธิภาพหลังคาร์บเดต

ประสิทธิภาพหลังคาร์บเดตสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\eta_{coll} = \frac{q''}{I_t} \quad (40)$$

2.7 ประสิทธิภาพระบบ

ประสิทธิภาพระบบสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\eta_{system} = \frac{W_{ext}}{I_t A_{coll} + Q} \quad (41)$$

3. วิธีการจำลอง

ในการศึกษาจะเป็นการจำลองเพื่อหาแนวทางในการลดความสูงปล่อง พร้อมทั้งศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ส่วนแรกของการจำลองเป็นการหาค่ารังสีดวงอาทิตย์ที่แผ่ลงบนพื้นเอียงโดยใช้สมการที่ (3) – (11) และหาค่าพลังงานที่หลังคาและพื้นดิน

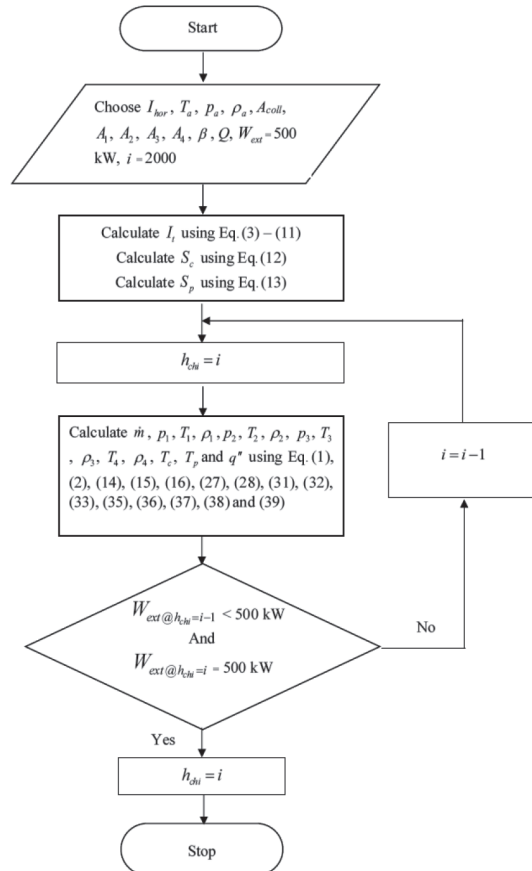
ได้รับจากรังสีดวงอาทิตย์โดยใช้สมการที่ (12) และ (13) ตามลำดับ ถัดจากนั้นแก้สมการที่ (1), (2), (14), (15), (16), (27), (28), (31), (32), (33), (35), (36), (37), (38) และ (39) โดยใช้วิธี Newton – Raphson Method ซึ่งมีตัวแปรที่ไม่ทราบค่าคือ $p_1, T_1, p_2, T_2, p_3, T_3, p_4, T_4, T_c, T_p, \dot{m}$ และ q'' เมื่อกำหนดให้ $\dot{W}_{ext} = 500$ กิโลวัตต์ โดย Flowchart ของกระบวนการจำลองแสดงดังรูปที่ 5 และจำลองภายใต้เงื่อนไขสภาพอากาศของอำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา ที่มีค่ารังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยตลอดปีเท่ากับ 622.92 วัตต์ต่อตารางเมตร [22] และอุณหภูมิบรรยากาศ 28 องศาเซลเซียส [23] นอกจากนี้ ในการจำลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อความสูงปล่องสำหรับสร้างกำลังไฟฟ้า 500 กิโลวัตต์ ได้กำหนดให้ Geometry Baseline มีพื้นที่รับแดดเท่ากับ 40,000 ตารางเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางปล่อง 20 เมตร และมุมเอียงพื้นดิน 45 องศา

4. ผลการจำลองและการอภิปราย

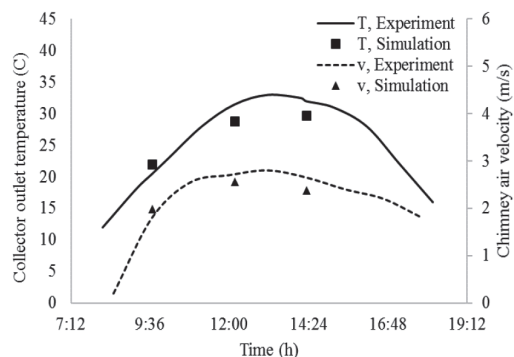
4.1 Model Validation

ในหัวข้อนี้เป็นการทำ Validation เทียบกับผลการทดลองจากงานวิจัยของ S. Kalash et al. [9] ซึ่งทำการทดลองที่เมือง Damascus ประเทศ Syria ณ วันที่ 15 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2555 ซึ่งเป็นฤดูหนาวของภูมิภาค โดยตัวแปรที่ทำการเปรียบเทียบก็คืออุณหภูมิของอากาศที่ออกจากหลังคารับแดด และความเร็วของอากาศทางเข้าปล่อง ผลการทำ Validation พบว่า แบบจำลองคณิตศาสตร์มีความคลาดเคลื่อนจากผลการทดลองประมาณร้อยละ 10 แสดงดังรูปที่ 6 ซึ่งความคลาดเคลื่อนอาจเกิดจากการจำลองใช้ความเร็วลมเฉลี่ยตลอดทั้งเดือน ของเมือง Damascus ทำให้ผลลัพธ์คลาดเคลื่อนจากผลการทดลอง ขณะที่ผลการทดลองเป็นข้อมูลที่แท้จริง ณ เวลาที่ทำการทดลอง ดังนั้นหากต้องการให้ผลการจำลองใกล้เคียงกับผลการทดลองมากยิ่งขึ้น ควรมีข้อมูลความเร็วลม

ณ เวลาที่เก็บข้อมูลการทดลองของเมือง Damascus ซึ่งในวารสารที่ใช้อ้างอิงไม่ได้ระบุ



รูปที่ 5 แผนภาพขั้นตอนการจำลอง

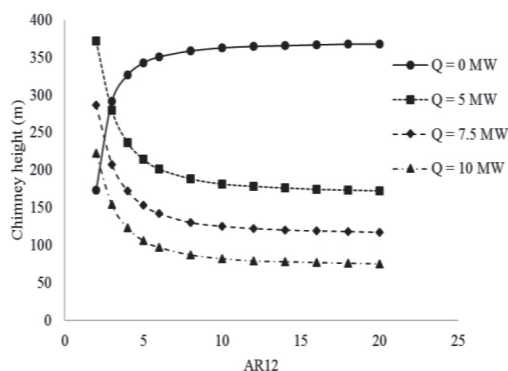


รูปที่ 6 การเปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศที่ออกจากหลังคารับแดดและความเร็วลมที่ฐานปล่องระหว่างผลการจำลองกับข้อมูลจากการทดลอง

4.2 สมรรถนะของ SSCPP และ SSCPP-WH

4.2.1 อิทธิพลของ AR12

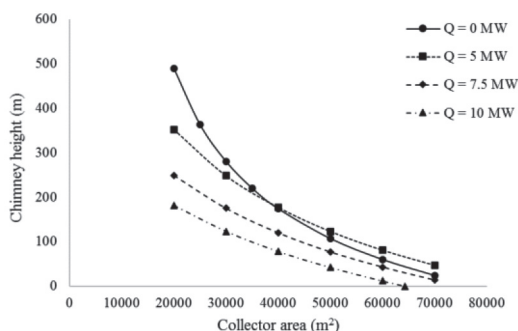
ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดการไหลที่ทางเข้าหลังคารับแดดต่อทางออกหลังคารับแดด (AR12) แสดงดังรูปที่ 7 โดยกำหนดให้มุมเอียงของพื้นเส้นผ่านศูนย์กลางปล่อง และพื้นที่ที่หลังคารับแดดมีค่าเท่ากับ 45 องศา 20 เมตร และ 40,000 ตารางเมตร ตามลำดับ พบว่า เมื่อ AR12 มีค่าเพิ่มขึ้น SSCPP ($Q = 0$ เมกกะวัตต์) จะใช้ปล่องที่มีความสูงเพิ่มขึ้น และเมื่อ AR12 เท่ากับ 2 ระบบจะใช้ปล่องสั้นที่สุด เกิดจากการสูญเสียความดันอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดการไหลดังพจน์ที่ 3 ฝ่ายขวาของสมการที่ (27) อย่างไรก็ตาม สำหรับ SSCPP ไม่สามารถใช้ค่า $AR12 = 1$ ได้ เนื่องมาจากการกำหนดค่าดังกล่าวจะส่งผลให้ m มีค่าสูงมาก ทำให้ $T_2 - T_1$ มีค่าติดลบ [8] ในส่วนของ SSCPP-WH ($Q = 5, 7.5$ และ 10 เมกกะวัตต์) จะใช้ปล่องที่มีความสูงลดลง เนื่องจากทางเข้ามีพื้นที่หน้าตัดกว้างขึ้นทำให้ความเร็วของอากาศลดลง ความดันสูญเสียที่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจึงมีค่าลดลง แต่ทั้งสองกรณีระบบจะใช้ความสูงปล่องค่อนข้างคงที่เมื่อ AR12 มีค่าตั้งแต่ 14 ขึ้นไป ดังนั้น ในหัวข้อถัดไป SSCPP และ SSCPP-WH จึงใช้ค่า AR12 เท่ากับ 2 และ 14 ตามลำดับ



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงปล่องกับ AR12 สำหรับระบบที่ได้รับความร้อนทั้งค่าต่าง ๆ

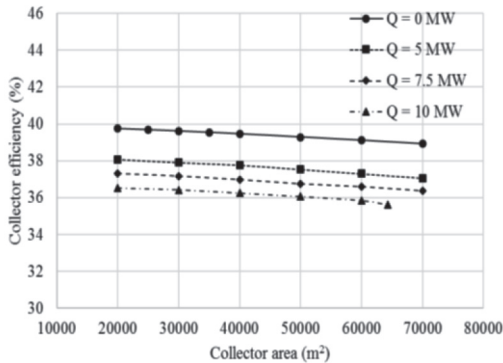
4.2.2 อิทธิพลของ A_{coll}

ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของพื้นที่หลังคารับแดด แสดงดังรูปที่ 8 กำหนดให้มุมเอียงของพื้นและเส้นผ่านศูนย์กลางปล่องมีค่าเท่ากับ 45 องศา และ 20 เมตร ตามลำดับ และ AR12 ของ SSCPP และ SSCPP-WH มีค่าเท่ากับ 2 และ 14 ตามลำดับ จากผลการจำลองพบว่า เมื่อเพิ่มพื้นที่หลังคารับแดดส่งผลให้ระบบสามารถใช้ปล่องที่มีความสูงลดลง เนื่องมาจากระบบได้รับพลังงานจากแสงแดดมากขึ้น อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ยังพบอีกว่า เมื่อปริมาณความร้อนที่เข้าสู่ระบบมากขึ้น ระบบสามารถใช้ปล่องที่มีความสูงลดลงได้เช่นกัน นอกจากนี้จะเห็นว่าบางเงื่อนไขไม่จำเป็นต้องใช้ปล่อง และหากเพิ่มพื้นที่หลังคารับแดดมากขึ้นจะสามารถลดการจ่ายความร้อนทิ้ง และลดความเอียงของพื้นได้



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงปล่องกับพื้นที่หลังคารับแดด สำหรับระบบที่ได้รับความร้อนทั้งค่าต่าง ๆ

จากขนาดของระบบในรูปที่ 8 เมื่อนำมาหาประสิทธิภาพหลังคาแดดจะได้ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ประสิทธิภาพหลังคาร์บแดด

จากรูปที่ 9 พบว่าประสิทธิภาพหลังคาร์บแดดลดลงเมื่อเพิ่มพื้นที่หลังคาร์บแดด เนื่องมาจากพื้นที่การถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นระบบจึงมีโอกาสสูญเสียความร้อนมากขึ้น นอกจากนี้จะเห็นว่า ประสิทธิภาพหลังคาร์บแดดลดลงเมื่อความร้อนทั้งที่ระบบได้รับเพิ่มขึ้น เนื่องจากระบบมีอุณหภูมิสูงขึ้นจากการแลกเปลี่ยนความร้อนที่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนก่อนแล้ว อากาศจึงรับความร้อนจากแสงแดดได้ลดลง ประสิทธิภาพของหลังคาร์บแดดสำหรับระบบที่ไม่นำความร้อนทั้งมาใช้งานมีค่าประมาณร้อยละ 40 ซึ่งมีค่าต่ำกว่างานวิจัยของ E. Bilgen และ J. Rheault [6], A. Koonsrisuk [8] และ X. Zhou et al. [12] ที่กำหนดประสิทธิภาพหลังคาร์บแดดเท่ากับร้อยละ 56

4.3 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์

การหาค่าใช้จ่ายในการลงทุน จะพิจารณาโดยใช้ขนาดของโรงไฟฟ้าที่มีกำลังการผลิต 500 กิโลวัตต์ ในรูปที่ 8 ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นส่วนหลัก (ความสูงปล่อง และ พื้นที่หลังคาร์บแดด) โดยปริมาณวัสดุและสามารถประเมินได้ดังนี้

ปริมาณเหล็กที่ใช้ก่อสร้างหลังคาร์บแดดต่อพื้นที่หลังคาดคิดเป็น 18.1 กิโลกรัมต่อตารางเมตร [24]

ปริมาณคอนกรีตเสริมเหล็กสำหรับสร้างผนังด้านข้างหลังคาร์บแดด ประเมินโดยกำหนดให้ผนังมีความหนา 0.3 เมตร

ปริมาณคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้สร้างปล่อง ประเมินจากความหนาผนังปล่องโดยให้ค่าเท่ากับ 0.3 เมตร ในกรณีปล่องสูงไม่เกิน 450 เมตร สำหรับปล่องที่สูงเกิน 450 เมตร ความยาว 450 เมตร นับจากปลายปล่องคิดความหนาผนังปล่องเป็น 0.3 เมตร ส่วนเกินให้เพิ่มความหนาเป็นแบบเชิงเส้นโดยที่ทุก ๆ 1 เมตร ความหนาต้องเพิ่มขึ้นจากเดิม 1.2545 มิลลิเมตร จนถึงฐานปล่อง [14]

ตารางที่ 1 แสดงราคาต่อหน่วยของวัสดุและอุปกรณ์แต่ละชนิด ในส่วนของค่าขนส่งและรายละเอียดอื่น ๆ สามารถประเมินได้ดังนี้

ค่าก่อสร้างปล่องหลังคาร์บแดดและค่าขนส่งคิดเป็นร้อยละ 100, 25 และ 5 ของราคาวัสดุทั้งหมดตามลำดับ

ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับฐานรากปล่องและ Circumferential Stiffener คิดเป็นร้อยละ 17.5 และ 7.5 ของราคาวัสดุที่ใช้สร้างปล่อง [13]

ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับ PCU (Power Conversion Unit) กำหนดให้มีค่าประมาณ 600 ดอลลาร์สหรัฐต่อกิโลวัตต์

จากข้อมูลข้างต้นสามารถนำมาสร้างเป็นสมการเพื่อหาค่าใช้จ่ายการลงทุนของแต่ละส่วนดังนี้

ค่าใช้จ่ายสำหรับหลังคาร์บแดด คือ

$$C_{coll} = 1.3(A_{coll}C_{glass} + 18.1A_{coll}C_{steel} + V_{wall,coll}C_{RCC}) \quad (42)$$

เมื่อ V_{wall} คือ ปริมาตรของผนังคอนกรีต

ค่าใช้จ่ายสำหรับปล่อง คือ

$$C_{chi} = 2.3V_{wall,chi}C_{RCC} \quad (43)$$

เมื่อ V_{chi} คือ ปริมาตรผนังปล่องคอนกรีต และค่าใช้จ่ายทั้งหมดของระบบคำนวณได้ดังนี้

$$C_{total} = 1.3(A_{coll}C_{glass} + 18.1A_{coll}C_{steel} + V_{wall,coll}C_{RCC}) + 2.3V_{wall,chi}C_{RCC} + \frac{W_{ext}C_{PCU}}{1000} + 0.03811Q \quad (44)$$

ตารางที่ 1 ราคาวัสดุและอุปกรณ์

Subject/Component	Prices	Unit
Glass	0.482	USD/m ²
Steel	0.558	USD/kg
Reinforced concrete	133	USD/m ³
PCU	600	USD/kW
Heat exchanger	38.11	USD/kW

ถัดจากนั้น เมื่อทราบค่าใช้จ่ายทั้งหมดแล้วก็สามารถคำนวณหาค่า Levelized Cost of Electricity (LCOE) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างค่าใช้จ่ายทั้งหมดของโครงการแบบรายปี กับ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อปีของโรงไฟฟ้า โดยค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับค่าดำเนินการและค่าซ่อมบำรุงตลอดอายุโครงการ 25 ปี คำนวณได้ดังนี้ [13]

$$P_{OM} = \frac{A_i}{f-i} \left[\left(\frac{1+f}{1+i} \right)^N - 1 \right] \quad (45)$$

โดยที่ A_i คือ ค่าดำเนินการและค่าซ่อมบำรุงในปีแรก

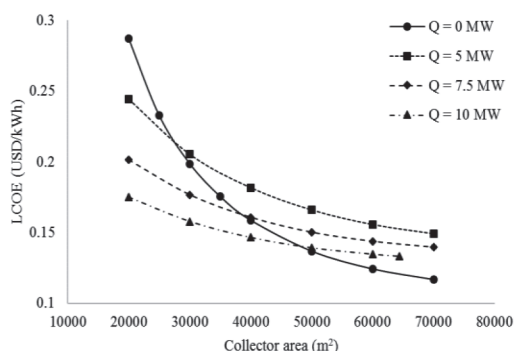
ถัดจากนั้น คำนวณหาเงินลงทุนรายปีของค่าซ่อมบำรุงรวมกับค่าใช้จ่ายในการลงทุน ดังนี้

$$A = (C_{total} + P_{OM}) \left[\frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \right] \quad (46)$$

และกำหนดให้ระยะเวลาการทำงานของโรงไฟฟ้าเท่ากับ 2,920 ชั่วโมงต่อปี (8 ชั่วโมงต่อวัน) จะได้

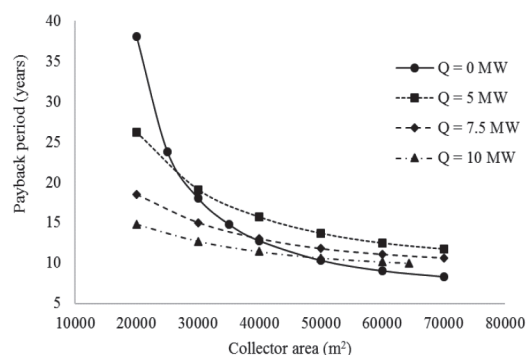
$$LCOE = \frac{A}{APO} \quad (47)$$

โดยที่ APO คือ หน่วยไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละปี



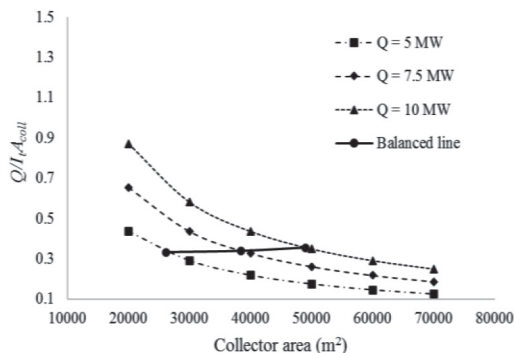
รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่าง LCOE กับพื้นที่หลังคาจับแดด สำหรับระบบที่ได้รับความร้อนทั้งค่าต่าง ๆ

จากรูปที่ 10 พบว่า LCOE มีค่าลดลงเมื่อพื้นที่หลังคาจับแดดและความร้อนทั้งที่ระบบได้รับมีค่ามากขึ้น และเมื่อนำไปหารระยะเวลาคืนทุนโดยกำหนดราคาขายไฟฟ้าต่อหน่วยเท่ากับ 0.189 ดอลลาร์สหรัฐต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง ซึ่งเป็นค่าไฟฟ้าที่รัฐรับซื้อจากผู้ผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งแหล่งผลิตในสามจังหวัดชายแดนภาคใต้ จะได้ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาคืนทุนกับพื้นที่หลังคาจับแดด สำหรับระบบที่ได้รับความร้อนทั้งค่าต่าง ๆ

จากรูปที่ 11 พบว่าระยะเวลาคืนทุนลดลงเมื่อพื้นที่หลังคารับแดดมากขึ้น นอกจากนี้ เมื่อนำข้อมูลในรูปที่ 11 มาหาค่าอัตราส่วนระหว่างปริมาณความร้อนที่รับต่อปริมาณความร้อนจากดวงอาทิตย์จะได้ดังรูปที่ 12 ซึ่งเมื่อพิจารณาจุดตัดกันของเส้นกราฟระหว่างเส้นของ $Q = 0$ เมกกะวัตต์ กับเส้นอื่น ๆ ในรูปที่ 11 พบว่าจุดดังกล่าวจะมีอัตราส่วนระหว่างปริมาณความร้อนที่รับต่อปริมาณความร้อนจากดวงอาทิตย์ใกล้เคียงกัน ซึ่งหมายความว่า ถ้าต้องการใช้ SSCPP ที่มีการนำความร้อนทิ้งมาใช้งาน ระบบต้องมีความร้อนทิ้งมากกว่า 0.34 เท่าของปริมาณความร้อนจากดวงอาทิตย์ จึงจะมีระยะเวลาคืนทุนที่ต่ำกว่าระบบที่ไม่นำความร้อนทิ้งมาใช้



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่าง Q/A_{coll} กับพื้นที่หลังคารับแดด สำหรับระบบที่ได้รับความร้อนทิ้งค่าต่างๆ

5. สรุป

งานวิจัยนี้ทำการออกแบบโรงไฟฟ้าพลังลมแบบหลังคารับแดดเอียงขนาด 500 กิโลวัตต์ ที่ใช้ประโยชน์จากความร้อนทิ้ง โดยใช้สมการคณิตศาสตร์ในการจำลอง จากผลการจำลองสามารถสรุปได้ดังนี้

การศึกษาอิทธิพลการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่าง พื้นที่หน้าตัดการไหลที่ทางเข้าหลังคารับแดดต่อ ทางออกหลังคารับแดด (AR12) พบว่า โรงไฟฟ้าพลังลมแบบหลังคาเอียงกรณีที่ไม่มีการนำความร้อนทิ้งมาใช้งานและมีการนำความร้อนทิ้งมาใช้งาน ควรจะมีค่า AR12 เท่ากับ 2 และ 14 ตามลำดับ การศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หลังคารับแดดพบว่า ความสูงปล่องสามารถลดลงได้ เมื่อพื้นที่หลังคารับแดดและความร้อนทิ้งที่ระบบได้รับมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า ประสิทธิภาพของหลังคารับแดดสำหรับระบบที่นำความร้อนทิ้งมาใช้งานมีค่าประมาณร้อยละ 36 -38 และประสิทธิภาพหลังคารับแดดจะมีค่าลดลง เมื่อพื้นที่หลังคารับแดดและปริมาณความร้อนทิ้งที่ได้รับเพิ่มขึ้น

โรงไฟฟ้าพลังลมแบบหลังคาเอียงที่นำความร้อนทิ้งมาใช้งาน ควรจะมีอัตราส่วนระหว่างความร้อนทิ้งที่รับต่อความร้อนจากรังสีดวงอาทิตย์มากกว่า 0.34 จึงจะมีระยะเวลาคืนทุนมากกว่าระบบที่ไม่นำความร้อนทิ้งมาใช้งาน

ระบบที่ได้รับความร้อนทิ้ง 10 เมกกะวัตต์ มีพื้นที่หลังคารับแดดเท่ากับ 49,000 ตารางเมตร ความสูงปล่องเท่ากับ 45 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางปล่องที่ฐาน 20 เมตร มุมเอียงพื้นดิน 45 องศา AR12 เท่ากับ 14 ระบบจะมีประสิทธิภาพประมาณร้อยละ 1.3 และค่า LCOE ประมาณ 0.14 ดอลลาร์สหรัฐต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง ซึ่งเมื่อเทียบกับอัตราค่าไฟฟ้าของรัฐสำหรับแหล่งผลิตที่ถูกติดตั้งในสามจังหวัดชายแดนภาคใต้ เท่ากับ 0.189 ดอลลาร์สหรัฐต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง พบว่า ระบบสามารถสร้างกำไรได้ โดยมีระยะเวลาคืนทุนประมาณ 11 ปี

Nomenclature			
A	flow area (m^2)	φ	latitude
A_{coll}	roof area (m^2)	ρ	density (kg/m^3)
C	cost (USD), cost per unit (USD/unit)	ρ_g	ground reflectance
c_p	specific heat capacity at constant pressure ($\text{J}/\text{kg K}$)	τ	transmissivity
D	diameter (m)	ν	kinematic viscosity (m^2/s)
g	gravitational acceleration (m/s^2)	ω	sunset angle
h	heat transfer coefficient ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$), height (m)	γ	specific heat ratio
I	solar irradiation (W/m^2)	Subscripts	
k	thermal conductivity (W/mk)	1	position at collector inlet
L	collector length (m)	2	position at collector outlet
$\dot{m}$	mass flow rate, kg/s	3	position at chimney inlet
Nu	Nusselt number	4	position at chimney outlet
p	pressure (Pa)	b	bottom, beam radiation
q''	available heat (W/m^2)	chi	chimney
Q	industrial waste heat (MW)	$coll$	collector
R	ideal gas constant ($\text{J}/\text{kg K}$)	d	diffuse radiation
Ra	Rayleigh number	f	fluid
r	radius (m), collector length (m)	c	collector cover
S	absorbed solar radiation (W/m^2)	hor	horizontal
T	absolute temperature (K)	j	Junction box
t	thickness (m)	p	heat shortage layer
U	heat transfer coefficient ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	r	reflect radiation, reduction
V	velocity (m/s)	t	title, top
$\dot{W}_{\text{ext}}$	power extracted by turbine (W)		
Greek symbols			
α	absorptivity, thermal diffusivity		
β	sloped angle, expansion coefficient ($1/\text{K}$)		
ε	emittance		
δ	declination angle		
η	efficiency		

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ที่สนับสนุนทุนวิจัยและสถานที่ในการทำวิจัยครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] EnviroMission Limited. (2017, December 6). Solar Chimney Power Plant. [Online]. Available: <http://www.enviromission.com.au>
- [2] W. Haaf, "Solar Chimneys: Part II: Preliminary Test Results from the Manzanares Pilot Plant," *International Journal of Solar Energy*, vol. 2, no. 2, pp. 141-161, Jan. 1984.
- [3] A. Zandian and M. Ashjaee, "The thermal efficiency improvement of a steam Rankine cycle by innovative design of a hybrid cooling tower and a solar chimney concept," *Renewable Energy*, vol. 51, pp. 465-473, Mar. 2013.
- [4] Z. Zou and S. He, "Modeling and characteristics analysis of hybrid cooling-tower-solar-chimney system," *Energy Conversion and Management*, vol. 95, pp. 59-68, May 2015.
- [5] A. Mourtada, A.N. Arkahdan and Y.M. Karout, "Solar chimney electricity from the sun," in *2012 International Conference on Renewable Energies for Developing Countries (REDEC)*, Beirut, Lebanon, Nov. 2012, pp. 1-8.
- [6] E. Bilgen and J. Rheault, "Solar chimney power plants for high latitudes," *Solar Energy*, vol. 79, no. 5, pp. 449-458, Nov. 2005.
- [7] F. Cao, L. Zhao and L. Guo, "Simulation of a sloped solar chimney power plant in Lanzhou," *Energy Conversion and Management*, vol. 52, no. 6, pp. 2360-2366, Jun. 2011.
- [8] Koonsrisuk A, "Mathematical modeling of sloped solar chimney power plants," *Energy*, vol. 47, no. 1, pp. 582-589, Nov. 2012.
- [9] S. Kalash, W. Naimeh and S. Ajib, "Experimental investigation of the solar collector temperature field of a sloped solar updraft power plant prototype," *Solar Energy*, vol. 98, pp. 70-77, Dec. 2013.
- [10] A. Koonsrisuk, "Comparison of conventional solar chimney power plants and sloped solar chimney power plants using second law analysis," *Solar Energy*, vol. 98, pp. 78-84, Dec. 2013.
- [11] F. Cao, L. Zhao, H. Li and L. Guo, "Performance analysis of conventional and sloped solar chimney power plants in China," *Applied Thermal Engineering*, vol. 50, no. 1, pp. 582-592, Jan. 2013.
- [12] X. Zhou, S. Yuan and M.A. dos S. Bernardes, Sloped-collector solar updraft tower power plant performance," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 66, pp. 798-807, Nov. 2013.
- [13] T. P. Fluri, J. P. Pretorius, C. V. Dyk, T. V. Backström D. G. Kröger and G. P. A. G. V. Zijl, "Cost analysis of solar chimney power plants," *Solar Energy*, vol. 83, no. 2, pp. 246-256, Feb. 2009.
- [14] J. Schlaich, R. Bergemann, W. Schiel and G. Weinrebe, "Sustainable Electricity Generation with Solar Updraft Towers," *Structural Engineering International*,

- vol. 14, no. 3, pp. 225–229, Aug. 2004.
- [15] E. P. Sakonidou, T. D. Karapantsios, A. I. Balouktsis and D. Chassapis, “Modeling of the optimum tilt of a solar chimney for maximum air flow,” *Solar Energy*, vol. 82, no. 1, pp. 80–94, Jan. 2008.
- [16] *Waste Heat Recovery Guide*, EnConLab. EnConLab, Bangkok, King Mongkut’s University of Technology Thonburi, 2017.
- [17] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar engineering of thermal processes*, Hoboken: John Wiley, 2013.
- [18] M. -H. Huang, L. Chen, Y. -L. He, J. -J. Cao and W. -Q. Tao, “A two-dimensional simulation method of the solar chimney power plant with a new radiation model for the collector,” *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 85, pp. 100-106, Jul. 2017.
- [19] N. Pasumarthi and S. A. Sherif, “Experimental and theoretical performance of a demonstration solar chimney model- Part I: Mathematical model development,” *International Journal of Energy Research*, vol. 22, no. 3, pp. 277–288, 1998.
- [20] M. A. dos S. Bernardes, A. Voß and G. Weinrebe, “Thermal and technical analyses of solar chimneys,” *Solar Energy*, vol. 75, no. 6, pp. 511–524, Dec. 2003.
- [21] A. Koonsrisuk and T. Chitsomboon, “Effects of flow area changes on the potential of solar chimney power plants,” *Energy*, vol. 51, pp. 400–406, Mar. 2013.
- [22] Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Ministry of Energy, Total radiation potential (Solar power from measurements), 2017.
- [23] The average temperature in each month of each province. (2017, December 7). [Online]. Available: <http://www.e-report.energy.go.th/weather.html>
- [24] F. Cao, H. Li, L. Zhao and L. Guo, “Economic analysis of solar chimney power plants in Northwest China,” *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 5, no. 2, p. 021406, Mar. 2013.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การทดสอบสมรรถนะของเครื่องขยายไอแบบสโครล สำหรับโรงไฟฟ้าโออาร์ซีขนาด 1 กิโลวัตต์

ธนิต หินไเลิศ และ อาทิตย์ คุณศรีสุข*

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
111 ถนนมหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

รับบทความ 5 มกราคม 2563 แก้ไขบทความ 1 พฤษภาคม 2563 ตอรับบทความ 5 พฤษภาคม 2563

บทคัดย่อ

โรงไฟฟ้าโออาร์ซีเป็นเทคโนโลยีที่ใช้ผลิตไฟฟ้าจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม หากโรงไฟฟ้าประเภทนี้มีขนาดเล็กจะมีราคาลงทุนสูงจนไม่คุ้มค่าในการลงทุนเชิงพาณิชย์ คอมเพรสเซอร์ประเภทสโครลเป็นอุปกรณ์ที่ถูกผลิตและนำไปใช้งานเป็นจำนวนมากในงานประเภททำความเย็นและปรับอากาศและมีความน่าเชื่อถือ ดังนั้น การนำคอมเพรสเซอร์ประเภทสโครลมาใช้งานในลักษณะตรงกันข้ามเป็นเครื่องขยายไอจะช่วยลดราคาต้นทุนของโรงไฟฟ้าโออาร์ซีขนาดเล็กให้ต่ำลงได้ ในงานวิจัยนี้จึงเลือกคอมเพรสเซอร์ประเภทสโครลที่ใช้ในระบบปรับอากาศรถยนต์ที่ถูกผลิตขึ้นในไทย 2 ตัว มาดัดแปลงเป็นเครื่องขยายไอสำหรับโรงไฟฟ้าโออาร์ซีขนาด 1 กิโลวัตต์ โดยได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะของคอมเพรสเซอร์ทั้ง 2 ตัวโดยใช้อุณหภูมิแหล่งความร้อน 100-150 องศาเซลเซียส โดยพบว่า กำลังงานกลรวมที่เครื่องขยายไอตัวใหญ่ (110 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อรอบ) สร้างได้มากกว่าตัวเล็ก (85.7 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อรอบ) ร้อยละ 18-35 และให้ประสิทธิภาพไอเซ็นทรอปิก และกำลังงานกลที่ร้อยละ 37-76 และ 806-1,926 วัตต์ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังศึกษาอิทธิพลของการติดวาล์วก้นกลับ และเปรียบเทียบสมรรถนะของกรณีที่ไม่ติดวาล์ว พบว่าหลังจากติดวาล์วก้นกลับ ประสิทธิภาพไอเซ็นทรอปิกของเครื่องขยายไอเพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 18 ในขณะที่กำลังงานกลรวมลดลงร้อยละ 4-22

คำสำคัญ : โรงไฟฟ้าโออาร์ซี; คอมเพรสเซอร์ชนิดสโครล; ขนาดปริมาตรกวาด; วาล์วก้นกลับ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +66 4422 4411, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: atit.sut@gmail.com

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Experimental Testing of Scroll Expander Performance for a 1 kW ORC Power Plant

Thanit Hinlailoed and Atit Koonsrisuk*

School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology
111 University Avenue Muang, Nakhon Ratchasima 30000

Received 5 January 2020; Revised 1 May 2020; Accepted 5 May 2020

Abstract

The ORC power plant is a promising technology to generate electricity from low-temperature heat sources. However, implementation of the ORC for low capacity electricity generation is unattractive at the commercial level. Scroll compressors are massively produced to be used in refrigeration and air-conditioning applications. Using a scroll compressor in reverse, as an expander, can reduce the investment cost of low-capacity ORC power plants. In this study, 2 scroll compressors that are available in the automotive air-conditioning market of Thailand were modified and used as the expander of a 1 kW ORC power plant. The performances of these 2 scrolls were compared and the plant performance was investigated. A heat source temperature from 100°C to 150°C was supplied to the plant. It was found that the gross power is higher by 18-35% for the larger expander (110 cc/rev) than for the smaller expander (85.7 cc/rev). The larger one provides the isentropic efficiency of 37-76% and the gross power of 806-1,926 W. In addition, the effects of check valve installation were examined and compared with those of the tests without check valve installation. It was revealed that the isentropic efficiency increases by 18% while the gross power decreases by 4-22% when the check valve was installed.

Keywords : ORC Power Plant; Scroll Compressor; Swept Volume; Check Valve

* Corresponding Author. Tel.: +66 4422 4411, E-mail Address: atit.sut@gmail.com

1. บทนำ

โรงไฟฟ้า ORC เป็นเทคโนโลยีผลิตไฟฟ้าจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำที่นำเชื้อถือในประเทศไทยมีการใช้โรงไฟฟ้า ORC กับแหล่งความร้อนจากการเผาชีวมวล ขยะ และความร้อนใต้พิภพ กระจายอยู่ทั่วประเทศ [1] อย่างไรก็ตาม หากโรงไฟฟ้าชนิดนี้มีขนาดเล็กกว่า 50 กิโลวัตต์ จะลงทุนต่อหน่วยไฟฟ้าที่ผลิตได้จะมีค่าสูงจนไม่คุ้มค่าที่จะลงทุน [2] หนึ่งในอุปกรณ์ที่มีราคาสูงคือส่วน Turbine ซึ่งมีสัดส่วนประมาณร้อยละ 25-40 ของงบลงทุน [3]

มีงานวิจัยจำนวนหนึ่งได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำคอมเพรสเซอร์ (Compressor) รถยนต์มาดัดแปลงเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่คล้าย Turbine คือสร้างกำลังงานกลจากการเคลื่อนตัวของสารทำงาน โดยทำให้แรงดันลดลงไปด้วยในขณะเดียวกัน ซึ่งเรียกว่าเครื่องขยายไอหรือ Expander ซึ่งการดัดแปลงนั้นทำได้ง่าย และประเภทของ Compressor ที่นำมาดัดแปลงแล้วได้ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าสูงมักเป็นประเภท Scroll Compressor [4]-[7] ซึ่งมีราคาถูกกว่า Turbine ที่ผลิตมาสำหรับโรงไฟฟ้า ORC โดยเฉพาะประมาณ 20 เท่า [8]

T. Saitoh et al. [4] ได้ศึกษาเกี่ยวกับ Scroll Expander ที่ดัดแปลงมาจาก Compressor รถยนต์สำหรับโรงไฟฟ้า ORC ที่ใช้กับแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ 140 องศาเซลเซียส พบว่าได้ประสิทธิภาพโรงไฟฟ้าร้อยละ 6.5-7.5 และได้ประสิทธิภาพ Expander ร้อยละ 65 โดยเมื่อเปรียบเทียบกับงานที่ใช้ Turbine แบบซื้อสำเร็จรูปของ G.B. Abadi et al. [9] ที่ใช้แหล่งความร้อน อุณหภูมิ 80-120 องศาเซลเซียส พบว่าได้ประสิทธิภาพโรงไฟฟ้าและ Turbine ที่ร้อยละ 6-7 และร้อยละ 60-70 ตามลำดับ จะเห็นว่า Expander ที่ดัดแปลงจาก Compressor รถยนต์ มีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกับ Turbine สำเร็จรูป

อย่างไรก็ตาม Expander ที่ดัดแปลงมาจาก Compressor รถยนต์ไม่ได้ออกแบบมาสำหรับ

โรงไฟฟ้าโดยเฉพาะ จึงยังไม่ทราบเงื่อนไขการใช้งานที่ทำให้ได้ประสิทธิภาพสูงตั้งแต่แรก ก่อนนำไปใช้งานจึงต้องทดสอบหาอิทธิพลต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อสมรรถนะของ Expander เพื่อหาเงื่อนไขการใช้งานที่เหมาะสมก่อน

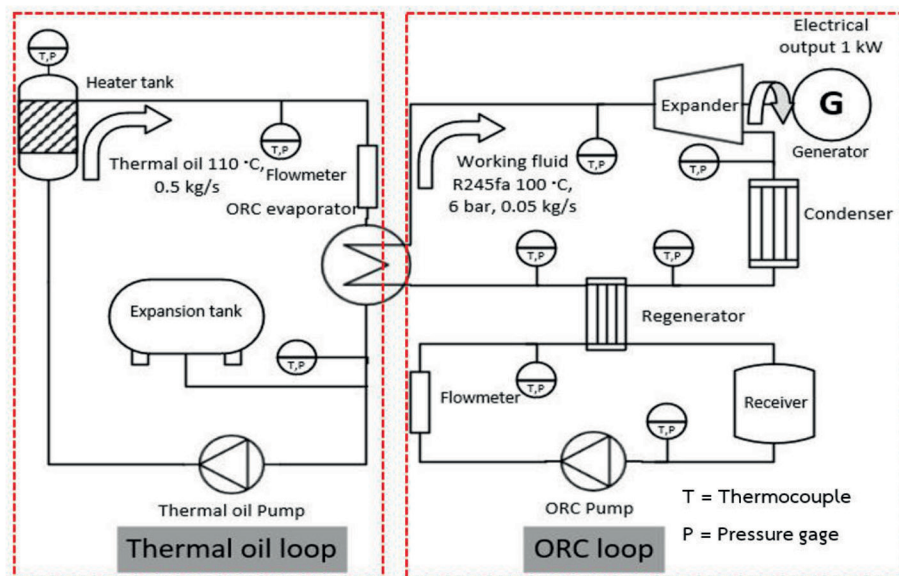
C. Liu et al. [7] ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิแหล่งความร้อนในช่วง 90-150 องศาเซลเซียส และอิทธิพลของโหลดทางไฟฟ้าต่อคอม Expander พบว่าประสิทธิภาพของ Expander แปรผกผันกับอุณหภูมิแหล่งความร้อน โดย Expander มีประสิทธิภาพสูงสุดที่ร้อยละ 43 นอกจากนี้ ประสิทธิภาพ Expander จะแปรผกผันกับโหลด และโรงไฟฟ้าให้กำลังไฟฟ้าสุทธิสูงสุดที่ 700 วัตต์

P. Ginies et al. [10] ได้ศึกษาอิทธิพลของ Scroll Compressor แบบที่ติดและไม่ติด Check Valve พบว่าการติดเพิ่ม Check Valve ทำให้ Operating Pressure Ratio ใกล้เคียงกับ Design Pressure Ratio และยังช่วยลดภาระโหลดทางกลของ Compressor ในตอนเริ่มทำงานได้ร้อยละ 20 เนื่องจาก Check Valve นี้ช่วยลดแรงดันกระชากในระบบ และเพิ่มความนุ่มนวลในการทำงานของ Compressor ได้

นอกจากนี้ H. Xi et al. [11] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของขนาด Expander ต่อสมรรถนะของโรงไฟฟ้าขนาด 1 กิโลวัตต์ โดยได้ทดสอบ Scroll Expander ที่ดัดแปลงมาจาก Compressor รถยนต์ 2 ขนาด ได้แก่ตัวที่มีปริมาตรกวาด เท่ากับ 66 และ 86 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อรอบ พบว่าตัวที่มีขนาดใหญ่กว่า ให้ประสิทธิภาพโรงไฟฟ้าที่สูงขึ้นร้อยละ 2.5 แต่ให้ประสิทธิภาพของ Expander ที่ต่ำลงประมาณร้อยละ 20

เพื่อต่อยอดจากงานวิจัยที่กล่าวมาจึงนำไปสู่จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อทดสอบสมรรถนะของ Scroll Expander สำหรับโรงไฟฟ้า ORC โดยศึกษาอิทธิพลของ Scroll Expander 2 ขนาด ได้แก่ 85.7 และ 110 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อรอบ อีกทั้งศึกษาอิทธิพลของการติดตั้ง Check Valve โดยใช้โรงไฟฟ้า

ORC ขนาด 1 กิโลวัตต์ เป็นชุดทดสอบ ภายใต้เงื่อนไข
อุณหภูมิของแหล่งความร้อน 100-150 องศาเซลเซียส
และใช้ R245fa เป็นสารทำงาน



รูปที่ 1 แผนผังชุดทดลอง Thermal Oil Loop และ ORC Loop

2. ชุดทดสอบ

ในการศึกษาจะใช้โรงไฟฟ้า ORC เพื่อทดสอบ Scroll Expander ดังต่อไปนี้

2.1 โรงไฟฟ้า

จากรูปที่ 1 ชุดทดลองที่ใช้ในการทดสอบ Scroll Expander จะประกอบด้วยอุปกรณ์ชุดโรงไฟฟ้า ORC (ORC Loop) ชุดแหล่งความร้อนจำลอง (Thermal Oil Loop) ซึ่งจะประกอบไปด้วย อุปกรณ์หลักในผัง ORC Loop จะประกอบด้วย

1. ORC Pump ทำหน้าที่ปั๊มสารทำงานให้เคลื่อนที่ในระบบโรงไฟฟ้า
2. Evaporator ทำหน้าที่รับความร้อนและเปลี่ยนสถานะของสารทำงาน R245fa ในโรงไฟฟ้าจากของเหลวให้กลายเป็นไอ

3. Scroll Expander ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ดัดแปลงมาจาก Compressor รอยนต์ ทำหน้าที่สกัดกำลังออกจากสารทำงานและเปลี่ยนเป็นกำลังงานกล

4. Condenser มีหน้าที่ทิ้งความร้อนเพื่อให้สารทำงานเกิดการควบแน่นจากไอน้ำสู่ของเหลว

5. Receiver เพื่อใช้ในการเก็บสารทำงานในสถานะของเหลว และช่วยรักษาเสถียรภาพในการทำงานของปั๊ม ไม่ให้สารทำงานขาดตอน

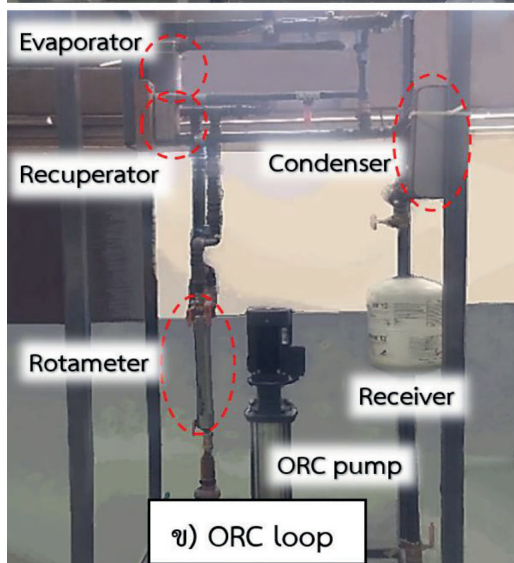
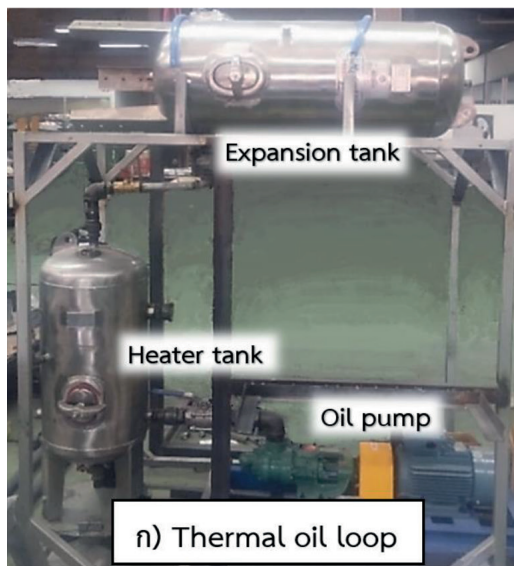
6. Regenerator ใช้สำหรับช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้าโดยนำความร้อนของสารทำงานที่ยังร้อนอยู่หลังจากออกจาก Expander มาอุ่นสารทำงานให้ร้อนระดับหนึ่งก่อนเข้า Evaporator

ในชุด Thermal Oil Loop ที่ทำหน้าที่จำลองแหล่งความร้อนของโรงไฟฟ้า มีรายละเอียดดังนี้

1. Thermal Oil Pump ทำหน้าที่ขับเคลื่อนน้ำมันร้อน (Thermal Oil) ซึ่งเป็นตัวกลางพาความร้อน

2. Heater Tank มีหน้าที่ให้ความร้อนแก่ Thermal Oil ด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้าขนาด 20 กิโลวัตต์

3. Expansion Tank ทำหน้าที่เก็บสำรอง และเป็นพื้นที่ให้ Thermal Oil ขยายตัวเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งชุดทดลองที่สร้างจะมีลักษณะตามรูปที่ 2



รูปที่ 2 ก) ORC Loop และ ข) Thermal Oil Loop

2.2 เครื่องมือวัดคุณสมบัติต่างๆของโรงไฟฟ้า

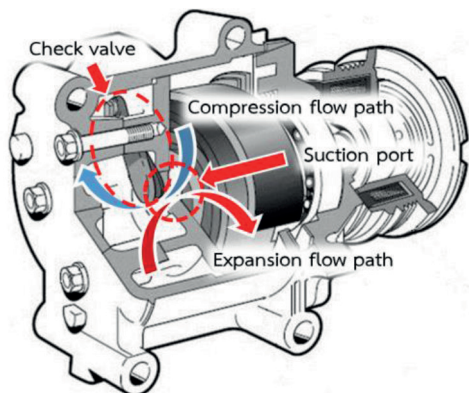
ในการศึกษานี้ผู้วิจัยได้ติดตั้งเครื่องมือวัดสำหรับวัด อุณหภูมิ ความดัน อัตราการไหล แรงบิด ความเร็วรอบ และกำลังไฟฟ้า โดยระบุไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รายละเอียดทางเทคนิคของเครื่องมือวัด

Parameter	Description	Range, Accuracy
Thermocouple	Type T	-40-350 $\pm$ 0.5°C
Pressure gage	Bourdon tube	0-25 bar $\pm$ 1% Read, $\pm$ 0.1 bar
Flowmeter	Rotameter	0-52 L/h, $\pm$ 4% Read, $\pm$ 0.5 L/h
Torque meter	Strain gage	0-10 N-m, $\pm$ 0.2% Full scale
Tachometer	Laser pointer	2-9999.9 rpm $\pm$ 0.05%, $\pm$ 0.1 rpm
Clamp meter	True RMS multimeter	DC Voltage: 0-600 A $\pm$ 1.5% Read, $\pm$ 5 digits DC Current: 0-600 V $\pm$ 1% Read, $\pm$ 5 digits DC Power: 0-100 kW $\pm$ 1.5% Read, $\pm$ 5 digits

2.3 การดัดแปลง Scroll Expander

ในการศึกษานี้ได้เลือก Expander จำนวน 2 รุ่น ได้แก่ยี่ห้อ Sanden รุ่น TRSA09 และ TRSA11 ซึ่งมีขนาด 85.7 และ 110 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อรอบ โดยเหตุที่เลือกเนื่องจากมีงานวิจัยที่เคยศึกษา [6] และพบว่าประสิทธิภาพดี อีกทั้งยี่ห้อนี้มีโรงงานผลิตในประเทศไทย และใช้งานในรถยนต์หลายรุ่น (Honda Civic ปี 2000, CRV ปี 2003) จึงง่ายต่อการหาข้อมูล



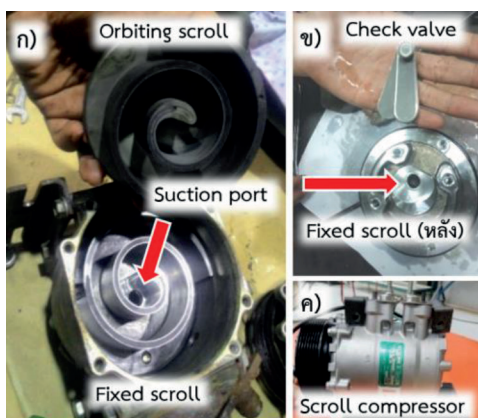
รูปที่ 3 ทิศทางการไหลของสารทำงาน ภายใน Scroll Expander

ในการดัดแปลง Compressor ให้ทำหน้าที่ Expander ต้องสลับเส้นทางเข้า-ออกของสารทำงาน ดังรูปที่ 3 กล่าวคือ

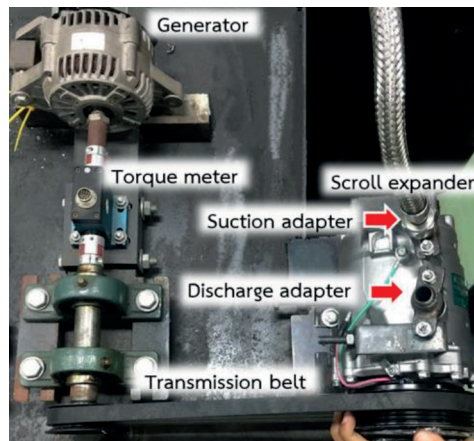
- สารทำงานไหลเข้าที่ช่องออกของ Compressor
- ขยายตัวภายในช่องระหว่าง Orbiting กับ Fixed Scrolls ทำให้ได้งานออกมา

- สารทำงานไหลออกที่ช่องเข้าของ Compressor

จากรูปที่ 3 พบว่ามี Check Valve ขวางอยู่ที่บริเวณ Suction Port เพื่อให้สารทำงานไหลย้อนกลับได้ต้องถอด Check Valve ออกดังรูปที่ 4 ข) โดยเมื่อถอดออกแล้ว สารทำงานจะสามารถไหลเข้าไปใน Suction Port เพื่อขยายตัวใน Expander ได้



รูปที่ 4 ก) ภายในของห้องสารทำงาน ข) ตำแหน่งติดตั้ง Check Valve ค) ภายนอกของ Expander



รูปที่ 5 การต่อ Expander เข้ากับ Generator ด้วยระบบส่งกำลังแบบสายพาน

2.4 ชุดส่งกำลัง

เพื่อให้ชุดทดสอบสามารถถอดเปลี่ยน Expander ที่นำมาทดลองได้ จึงต้องทำการออกแบบให้ฐานวาง Expander ยึดด้วยสกรู และระบบส่งกำลังแบบสายพานที่ปรับความตึงได้ ทำให้สามารถนำ Expander หลาย ๆ แบบไปติดตั้งได้ สำหรับคุณสมบัติของ Expander, Evaporator, Condenser และ ORC Pump จะระบุไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของอุปกรณ์และสารทำงาน

Modified scroll expander		
Model	TRSA09	TRSA11
Swept Volume (cc/rev)	85.7	110
Pulley diameter (mm)	106	110
Lubricant	Sanden SP-10	
Pressure ratio	6	
O-ring seal material	Polyurethane	
Transmission ratio	2:1	
Evaporator & condenser		
Model	KAORI K50S	
Type of heat exchanger	Blaze plate	
Heat transfer area (m ²)	1.275	
Capacity Range (kW)	17.58	

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของอุปกรณ์และสารทำงาน (ต่อ)

ORC pump	
Model	Grundfos CR 1S-33
Type of pump	Multi-stage centrifugal
Max. Pressure (m)	173
Max. Flowrate (m ³ /h)	150
Motor power (kW)	1
Driving system	Variable Speed Drive
O-ring seal material	EPDM
Working fluid	
ASHRAE number	HFC-R245fa
Type of working fluid	Isentropic fluid
Critical temperature (°C)	154.01
Critical pressure (MPa)	3.651
Liquid density (kg/m ³)	1338
ASHRAE safety class	B1
GWP	1030
ODP	0

2.5 วิธีการทดลอง

ในการศึกษาครั้งนี้ จะศึกษาอิทธิพลของ 4 ตัวแปร ได้แก่ อุณหภูมิแหล่งความร้อนขาเข้า ความถี่การป้อนกระแสไฟฟ้าของ ORC Pump ขนาดของ Expander และอิทธิพลของการติดตั้ง Check Valve โดยใช้ R245fa เป็นสารทำงาน โดยการทดลองจะแบ่งเป็น 2 ตอนดังนี้

ตอนที่ 1 ทำปรับอุณหภูมิแหล่งความร้อน 3 ค่า ได้แก่ 100, 130 และ 150 องศาเซลเซียส ปรับความถี่การป้อนกระแสจาก Inverter เข้าสู่ Pump 3 ค่า ประกอบด้วย 40, 45 และ 50 เฮิร์ตซ์ ซึ่งความเร็วรอบของ Pump และอัตราการใช้ของสารทำงาน แปรผันตรงกับอัตราการใช้ และปรับขนาด Expander 2 ขนาด ได้แก่ 85.7 และ 110 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อรอบ จากนั้นเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้ ได้แก่ ประสิทธิภาพ

Isentropic และ กำลังงานกล เพื่อเลือก Expander ตัวที่มีค่าดังกล่าวสูงกว่าไปทดลองในตอนที่ 2

ตอนที่ 2 นำ Expander ตัวที่ดีกว่าจากตอนที่ 1 มาศึกษาอิทธิพลของการติดตั้งอุปกรณ์ Check Valve ดังรูปที่ 6 โดยจะติดตั้ง 2 แบบได้แก่ 1. ติดที่ Suction Adapter ก่อนเข้าสู่ Expander และ 2. ติดที่ Discharge Adapter หลังออกจาก Expander (ดังรูปที่ 4) และทำการปรับอุณหภูมิแหล่งความร้อน และความถี่ Pump อย่างละ 3 ค่าเหมือนตอนที่ 1 และนำผลลัพธ์มาเปรียบเทียบกัน



รูปที่ 6 Check Valve Assembly

2.6 ตัวแปรบ่งชี้สมรรถนะ

สำหรับตัวแปรที่ใช้ในการบ่งชี้สมรรถนะของโรงไฟฟ้าจะได้มีการนิยามไว้เป็นสมการดังต่อไปนี้ การหาค่ากำลังงานกลรวมนั้นหาได้จากสมการที่ (1)

$$P_{gross} = \frac{2\pi \times N_{gen} \times \tau_{gen}}{60} \quad (1)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} P_{gross} &= \text{กำลังงานกล (W)} \\ N_{gen} &= \text{ความเร็วรอบการหมุนของ Generator ที่ต่อพ่วงกับ Expander (rpm)} \\ \tau_{gen} &= \text{ทอร์กของเพลาชับ Generator (N-m)} \end{aligned}$$

การคำนวณกำลังงานสุทธิเป็นไปตามสมการที่ (2)

$$P_{net} = P_{gross} - P_{pump} \quad (2)$$

โดยที่

P_{pump} = กำลังงานที่ Pump ใช้ (W)

ประสิทธิภาพ Isentropic ของ Expander หาได้จากสมการที่ (3)

$$\eta_{isen,exp} = \frac{h_{exp,in} - h_{exp,out}}{h_{exp,in} - h_{s,exp,out}} \times 100 \quad (3)$$

โดยที่

$h_{exp,in}$ = Enthalpy ของสารทำงานก่อนเข้า Expander (kJ/kg)

$h_{exp,out}$ = Enthalpy ของสารทำงานหลังออก Expander (kJ/kg)

$h_{s,exp,out}$ = Enthalpy ของสารทำงานหลังออก Expander เมื่อกระบวนการอัดตัวเป็นแบบ Isentropic Expansion (kJ/kg)

ตารางที่ 3 ผลการจำลองทั้งหมดที่ศึกษา

Variations	$T_{heatsource}$ (°C)	Pump frequency (Hz)	P_{gross} (W)	P_{net} (W)	Q_{in} (W)	$h_{isen,exp}$ (%)	$h_{isen,pump}$ (%)
85.7cc, w/o	100	40	493	25	4,354	33.7	6.5
		45	794	124	5,632	35.0	13.3
		50*	761*	-170*	4,672*	15.1*	16.9*
	130	40	632	184	4,880	61.3	8.2
		45	902	244	6,898	44.7	9.8
		50	1,423	540	8,333	38.4	17.1
	150	40	708	240	5,776	71.1	7.3
		45	1,097	439	5,779	56.1	8.4
		50	1,593	706	10,530	55.7	15.2
110cc, w/o	100	40	1,034	578	11,612	37.3	8.7
		45	1,165	525	9,838	42.9	10.4
		50*	806*	-91*	4,180*	14.9*	3.5*
	130	40	806	370	5,935	64.5	5.5
		45	1,314	674	7,453	58.4	8.7
		50	1,740	874	11,650	41.1	15.8
	150	40	870	538	6,763	76.8	7.2
		45	1,450	812	9,229	64.5	12.0
		50	1,926	1,048	11,749	49.4	26.8

ตารางที่ 3 ผลการจำลองทั้งหมดที่ศึกษา (ต่อ)

Variations	T _{heatsource} (°C)	Pump frequency (Hz)	P _{gross} (W)	P _{net} (W)	Q _{in} (W)	h _{isen,exp} (%)	h _{isen,pump} (%)
110cc, Before	130	40	681	271	5,811	85.2	8.3
		45	1,261	670	6,971	68.1	10.3
		50	1,442	646	8,809	46.5	21.2
	150	40	716	288	6,227	92.9	9.0
		45	1,245	628	8,151	74.0	9.6
		50	1,762	865	9,811	63.3	15.7
110cc, After	130	40	753	321	4,823	73.1	7.7
		45	1,100	419	6,518	53.4	10.6
		50	1,636	744	11,109	48.0	20.2
	150	40	737	307	6,243	91.6	11.2
		45	1,126	475	7,517	75.3	8.2
		50	1,651	959	13,455	58.5	14.4

* สารทำงานที่ไหลผ่าน Expander มีสถานะเป็นของเหลว ทำให้กำลังงานกลที่ Expander สร้างได้น้อยมาก ผลการทดลองส่วนนี้จะไม่ถูกหยิบไปพล็อตกราฟ

ประสิทธิภาพ Isentropic ของ Pump คำนวณโดยใช้สมการที่ (4)

$$\eta_{isen,pump} = \frac{h_{s,pump,out} - h_{pump,in}}{h_{pump,out} - h_{pump,in}} \times 100 \quad (4)$$

โดยที่

$h_{pump,in}$ = Enthalpy ของสารทำงานก่อนเข้า ORC Pump (kJ/kg)

$h_{pump,out}$ = Enthalpy ของสารทำงานหลังออก ORC Pump (kJ/kg)

$h_{s,pump,out}$ = Enthalpy ของสารทำงานหลังออก ORC Pump เมื่อกระบวนการขยายตัวเป็นแบบ Isentropic Compression (kJ/kg)

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

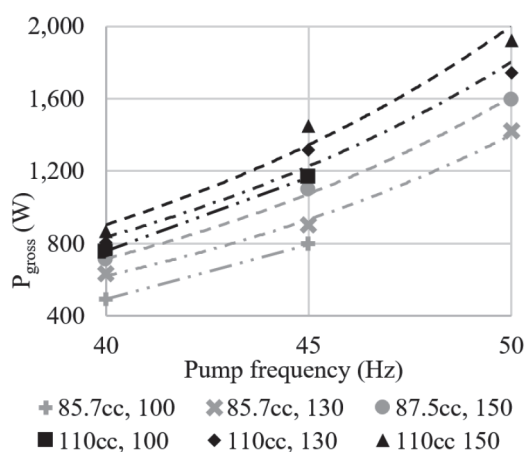
จากการทดลองทั้ง 2 ตอนจะนำไปสู่ผลลัพธ์ 2 ส่วน ได้แก่ อิทธิพลของ Expander และอิทธิพลของการติด Check Valve โดยแสดงผลการทดลองทั้งหมดไว้ในตารางที่ 3 และนำผลที่ได้มาพล็อตเป็นกราฟสำหรับวิเคราะห์ซึ่งแบ่งเป็น 2 ส่วนดังนี้

3.1 อิทธิพลของขนาด Expander

จากการทดลองในตอนที่ 1 เมื่อนำข้อมูลที่ได้ไปพล็อตกราฟ จะได้ผลการทดลองดังรูปที่ 7-10

จากรูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของกำลังไฟฟ้าที่ส่งให้กับ Pump ในแกน X กำลังงานกลรวมที่โรงไฟฟ้า ORC ผลิตได้ในแกน Y พบว่าเมื่อความถี่

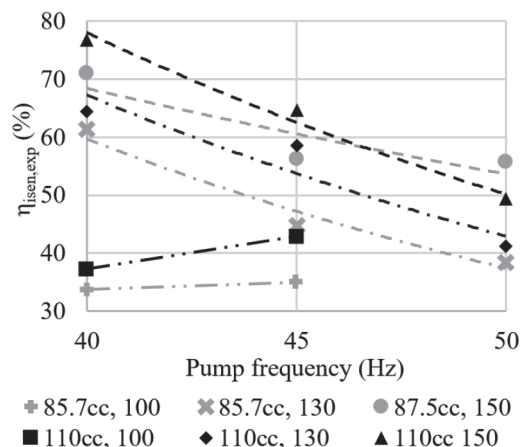
ในการจ่ายไฟให้ Pump มากขึ้นนั้น ทำให้ความเร็วรอบและอัตราการไหลของ Pump สูงขึ้น ส่งผลให้รอบการหมุนและแรงบิดที่ Expander สูงขึ้น จากสมการที่ (1) จึงทำให้กำลังงานกลรวมเพิ่มขึ้น โดยพบว่ายิ่งอุณหภูมิสูง กำลังงานที่ได้ก็ยิ่งสูง และพบอีกว่า 110 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อรอบ จะให้กำลังงานมากกว่าขนาด 85.7 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อรอบ เฉลี่ยร้อยละ 17 กล่าวคือ ยิ่งอุณหภูมิของแหล่งความร้อนและอัตราการไหลของสารทำงานเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้กำลังงานกลเพิ่มขึ้นเช่นกัน



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ของกำลังงานกลรวมกับอุณหภูมิแหล่งความร้อน และความเร็ว Pump

จากรูปที่ 8 ประสิทธิภาพ Isentropic ของ Expander พบว่า Expander ทั้ง 2 ตัวนี้มีค่าประสิทธิภาพแปรผันตามอุณหภูมิและแปรผกผันกับความเร็วที่จ่ายให้ Pump

เมื่อความเร็วมาก อัตราการไหลของสารทำงานในระบบจะมากขึ้น เมื่ออุณหภูมิของแหล่งความร้อนต่ำจะส่งผลให้สารทำงานที่ไหลมานั้นแลกเปลี่ยนความร้อนที่ Evaporator ได้ไม่เพียงพอต่อการเปลี่ยนเฟสเป็นไอ ส่งผลให้สถานะของสารทำงานก่อนเข้า Expander เป็น Mixture ซึ่งความสามารถในการขยายตัวของสาร

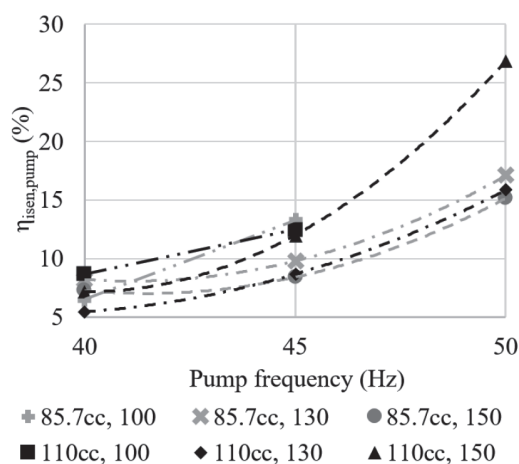


รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพ Isentropic ของ Expander กับอุณหภูมิแหล่งความร้อน และความเร็ว Pump

ทำงานในสถานะ Mixture จะไม่ดีเท่าสถานะ Vapor จึงทำให้ประสิทธิภาพ Isentropic มีค่าลดลง โดยปัญหานี้จะเกิดมากขึ้นในกรณีอุณหภูมิแหล่งความร้อน 100 องศาเซลเซียส ซึ่งที่ความเร็ว 50 เฮิร์ตซ์ ที่อัตราการไหลสูงสุด สารทำงานขณะเข้า Expander จะอยู่ในสถานะของเหลวเกือบทั้งหมด ทำให้ไม่สามารถใช้งาน Expander ได้อย่างมีประสิทธิภาพในช่วงดังกล่าว ซึ่งสามารถดูเพิ่มเติมได้ในตารางที่ 3 ในช่วงอุณหภูมิและความเร็วดังกล่าว

จากงานวิจัยที่ทดสอบ Expander ที่ประเภทเดียวกัน พบว่าประสิทธิภาพ Isentropic อยู่ในช่วงร้อยละ 22-65 [4]-[7] จากงานวิจัยนี้พบว่าได้ผลลัพธ์ที่ร้อยละ 34-77 ซึ่งสูงกว่า และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับงานที่ใช้ Turbine ซึ่งสำเร็จที่มีราคาสูง (มีค่าที่ร้อยละ 60-70 [9]) พบว่ามีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน โดยเหตุผลเกิดด้วยปัจจัยต่าง ๆ เช่น การออกแบบระบบท่อที่เลือกใช้ diameter ใหญ่กว่า (ใช้ท่อ ขนาด 1 นิ้วโดยเฉลี่ย) เมื่อเทียบกับงานของ H. Xi et al. [11] พบว่าใช้ Copper Tube ขนาด 0.5 นิ้ว โดยขนาดท่อที่ใหญ่จะส่งผลต่อ Pressure Loss ในระบบที่น้อยลง และมีการเติมน้ำมัน Compressor เข้าไปร้อยละ 5 ของ

มวลสารทำงาน ซึ่งช่วยหล่อลื่นให้ Scroll Expander อีกปัจจัยที่ส่งผลคือการสูญเสียความร้อนสู่บรรยากาศ ที่ผนังของ Expander เนื่องด้วยใน Expander มีวัสดุ O-ring Seal ที่ทำมาจาก Polyurethane ซึ่งทนอุณหภูมิได้ประมาณ 160 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันการเสียหายของ Seal ดังกล่าวระหว่างทดลองจึงให้ Scroll Expander ได้ระบายความร้อนระหว่างการทำงานโดยเลี้ยงการหมุนวน เหมือนสภาพการใช้งานปกติเมื่อเป็น Compressor

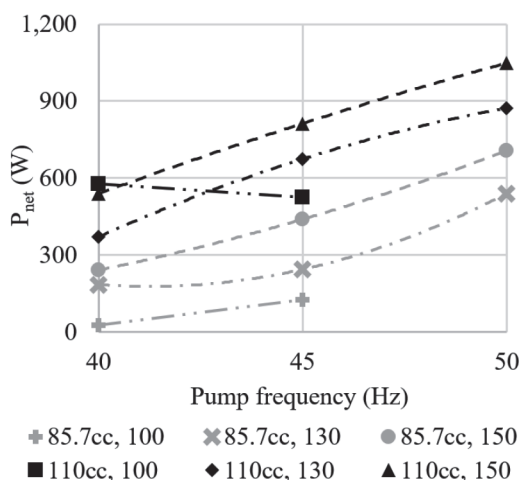


รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพ Isentropic ของ Pump กับอุณหภูมิแหล่งความร้อน และความเร็ว Pump

จากรูปที่ 9 พบว่า Pump จะมีประสิทธิภาพสูงเมื่อทำงานที่ความเร็วสูงและอุณหภูมิสูง สาเหตุเนื่องจาก Pump ตัวนี้มี Design Head ที่ 173 เมตร หรือประมาณ 17 บาร์ (ดังตารางที่ 2) และในย่านการทดสอบของงานวิจัยนี้อยู่ที่ 4-11 บาร์ ซึ่งพบว่าความดันจะมากขึ้นตามความเร็วที่จ่ายให้ Pump เมื่อความดันที่ใช้ทดสอบมีค่าเข้าใกล้ค่า Design จึงทำให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และพบว่าค่าประสิทธิภาพสูงสุดที่ทำได้อยู่ที่ร้อยละ 26.8 ที่เงื่อนไข 50 เฮิร์ตซ์ 110 ลูกบาศก์เซนติเมตร, 150 องศาเซลเซียส ซึ่ง Pump

สร้างความดันได้ 11 บาร์ ซึ่งเป็นค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับการทดลองอื่นทั้งหมด

ในการศึกษาเชิงตัวเลขของงานวิจัย [12], [13] นิยมใช้ประสิทธิภาพ Isentropic เป็นค่าที่คงที่ แต่จากรูปที่ 8 และ 9 จะเห็นว่าประสิทธิภาพของ Isentropic ของ Expander และ Pump เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ เช่นจากรูปที่ 8 ประสิทธิภาพ Isentropic ของ Expander ที่เมื่อความเร็วเปลี่ยนจาก 40 เฮิร์ตซ์ เป็น 50 เฮิร์ตซ์ มีค่าประสิทธิภาพลดลงเฉลี่ยถึงร้อยละ 20 ดังนั้นการใช้สมมติฐานว่าประสิทธิภาพ Isentropic ทั้งของ Pump หรือ Expander เป็นค่าคงที่ในการจำลองเชิงตัวเลขควรใช้งานอย่างระมัดระวัง



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ของกำลังงานสุทธิกับอุณหภูมิ แหล่งความร้อน และความเร็ว Pump

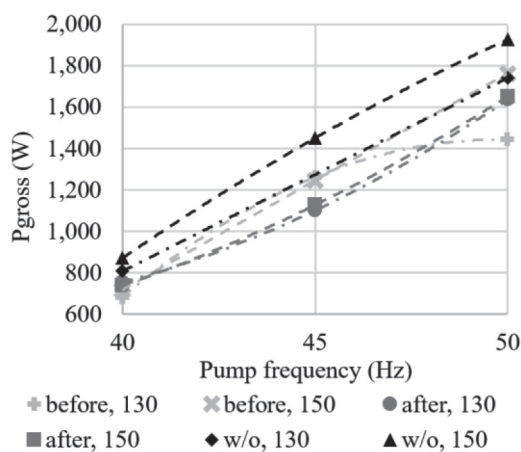
จากรูปที่ 10 จะเห็นว่ากำลังงานสุทธิที่ได้มีแนวโน้มคล้ายกับกำลังงานกลรวมรูปที่ 8 คือมีค่าเพิ่มแปรผันตามอุณหภูมิแหล่งความร้อนและความเร็ว Pump ที่เพิ่มขึ้น เนื่องด้วย Pump ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นเมื่อใช้งานที่ความเร็วสูงดังรูปที่ 10 และพบว่ามีชุดข้อมูลที่ผิดปกติ คือที่อุณหภูมิ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งเกิดจากปัญหาสารทำงานเป็นของเหลวก่อนเข้า Expander

3.2 อิทธิพลของการติดตั้ง Check Valve

จากการทดลองในตอนต้นที่ 2 จะได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 11, 12 และตารางที่ 4

จากรูปที่ 11 ความสัมพันธ์ของกำลังงานกลที่ได้จาก Expander พบว่าได้กำลังงานกลที่ได้จากทั้ง 3 รูปแบบเรียงจากมากไปน้อยเรียงได้ดังนี้ 1. ไม่ติด Check Valve ได้กำลังมากที่สุดที่ 806-1,926 วัตต์, 2. ติดก่อนเข้า Expander ซึ่งน้อยกว่าไม่ติดร้อยละ 4-17.8 และ 3. ติดหลังออก Expander ได้น้อยกว่าไม่ติดร้อยละ 6-22.3

เหตุผลที่ กำลังงานกลลดลงเนื่องจาก Check Valve เพิ่ม Pressure Loss ในระบบท่อ จึงเกิดการสูญเสียพลังงานของสารทำงานมากขึ้น จากตารางที่ 3 พบว่า Pressure Loss ที่เกิดระหว่างท่อหลังออกจาก Pump ถึงทางเข้า Expander

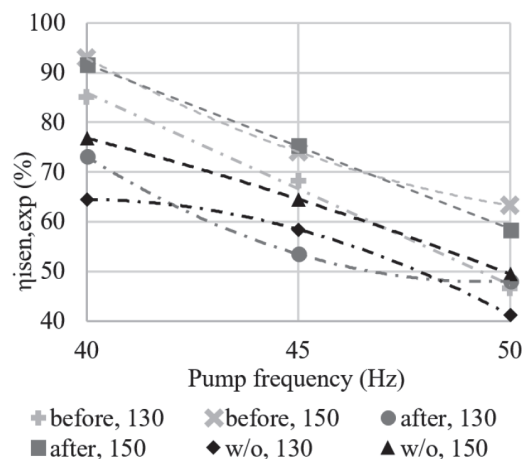


รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ของกำลังงานกลรวมกับ อุณหภูมิแหล่งความร้อน และความถี่ Pump

ในกรณีติด Check Valve จะมีอยู่ในช่วง 0.2-1 บาร์ ในขณะที่กรณีไม่ติดอยู่ที่ 0.2-0.8 บาร์ ซึ่งมีการสูญเสียความดันน้อยกว่าอย่างมีนัยสำคัญ

ผลที่ทำให้การติด Check Valve หลัง Expander ได้กำลังน้อยกว่าแบบติดก่อนเป็นเพราะการติดก่อนเข้านั้นมีสภาพใกล้เคียงตำแหน่งเดิมที่ Check Valve

เคยอยู่ดังรูปที่ 3 และ 4 ทำให้ปริมาณของสารทำงานที่อยู่ในห้องต่าง ๆ ในตัวเรือน Expander นั้นใกล้เคียงสภาพเดิมตอนเป็น Compressor ส่งผลให้กำลังงานกลที่ผลิตได้มีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกรณีติดหลังออก Expander เฉลี่ยร้อยละ 1.3



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพ Isentropic ของ Expander กับอุณหภูมิแหล่งความร้อน และ ความถี่ Pump

จากรูปที่ 12 ประสิทธิภาพ Isentropic ของ Expander พบว่าสามารถเรียงลำดับประสิทธิภาพที่ได้จากทั้ง 3 แบบจากมากไปน้อยได้ดังนี้ 1. ติดก่อนเข้า Expander ซึ่งมากกว่าแบบไม่ติดร้อยละ 13-51, 2. ติดหลังจากออกจาก Expander ซึ่งได้มากกว่าแบบไม่ติดเฉลี่ยร้อยละ 9.1 และ 3. แบบไม่ติดได้ต่ำสุดตามลำดับสาเหตุที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากการติด Check Valve ทำให้ Pressure Ratio ตกคร่อม Expander มีค่าเข้าใกล้ค่า Design Pressure Ratio ซึ่งเท่ากับ 6 (ดังตารางที่ 2) พบว่าการที่ติด Check Valve ก่อน Expander ที่ 150 องศาเซลเซียส ได้ประสิทธิภาพ Isentropic สูงสุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความถี่ Pump ต่ำ ๆ ที่ 40 เฮิร์ตซ์ เนื่องจากมี Pressure Ratio ใกล้เคียง 6 และ Vapor Quality สูงเนื่องจากสารทำงานที่อัตราการไหลต่ำได้รับความร้อนจาก Evaporator อย่างเต็มที่

4. สรุป

จากการศึกษาอิทธิพลของการปรับความถี่ Pump อิทธิพลของอุณหภูมิแหล่งความร้อน พบว่า กำลังงานกลที่โรงไฟฟ้าสร้างได้แปรผันตามความถี่ Pump และอุณหภูมิของแหล่งความร้อนที่เพิ่มขึ้น เป็นไปตามกฎเทอร์โมไดนามิกส์ แต่ประสิทธิภาพ Isentropic ของ Expander กลับมีแนวโน้มที่แปรผกผันกับความถี่ Pump ที่มากขึ้น เนื่องด้วยปัญหาเรื่องสถานะของสารทำงานที่เป็น Mixture

จากการศึกษาอิทธิพลของขนาด Expander ทั้ง 2 ขนาดพบว่า Expander ขนาด 110 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อรอบ มีประสิทธิภาพ Isentropic อยู่ในช่วงร้อยละ 37-76 มีกำลังงานกลรวมและสุทธิอยู่ในช่วง 806-1,926 วัตต์ และ 370-1,048 วัตต์

ในขณะเดียวกัน ที่ Expander ขนาด 85.7 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อรอบ มีประสิทธิภาพ Isentropic อยู่ในช่วงร้อยละ 34-71 มีกำลังงานกลรวมและสุทธิอยู่ในช่วง 493-1,593 วัตต์ และ 25-706 วัตต์ จะเห็นว่า Expander ที่มีขนาดใหญ่กว่ามีสามารถสร้างกำลังงานกลได้สูงกว่าที่ร้อยละ 18-35

จากนั้นได้นำ Expander ขนาด 110 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อรอบ มาศึกษาอิทธิพลของการติดตั้ง Check Valve พบว่าการติดตั้ง Check Valve ก่อนเข้าสู่ Expander ได้ประสิทธิภาพ Isentropic อยู่ในช่วงร้อยละ 47-93 ได้กำลังงานกลรวมในช่วง 681-1,762 วัตต์และการติดตั้ง Check Valve หลังออกจาก Expander ได้ประสิทธิภาพ Isentropic อยู่ในช่วงร้อยละ 48-92 ได้กำลังงานกลรวมในช่วง 737-1,651 วัตต์ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบทั้ง 2 กรณี เข้ากับกรณีที่ไม่ได้ติดตั้ง พบว่าการติดตั้ง Check Valve ให้ประสิทธิภาพ Isentropic ของ Expander ที่สูงขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 18 ในขณะที่กำลังงานกลรวมลดลงร้อยละ 4-22 สาเหตุเนื่องจากการติดตั้ง Check Valve ทำให้เกิดความดันสูญเสียจึงทำให้กำลังงานที่ได้ลดลง

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ เงินอุดหนุนการวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี รหัสโครงการ SUT7-707-59-12-18 ที่ให้ทุนสนับสนุน และเจ้าหน้าที่ส่วนอาคารเครื่องมือที่ช่วยเหลือ และให้คำแนะนำงานวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วง

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Department of Alternative Energy Development and Efficiency. (2017, September 26). Annual Report 2016 (ISSN: 1686-5170). [Online]. Available: <http://webkc.dede.go.th/testmax/node/3420>
- [2] V. Songngaam. (2019, June 13). Organic Rankine Cycle-ORC (KMT ed.). [Online]. Available: http://www.ecct-th.org/acf/virat_s_Organic%20Rankine%20Cycle%20edit%20KMT.pdf
- [3] P. Garg, M. S. Orosz and P. Kumar, "Thermo-economic evaluation of ORCs for various working fluids," *Applied Thermal Engineering*, vol. 109, pp. 841-853, 2016.
- [4] T. Saitoh, N. Yamada and S.-I. Wakashima, "Solar Rankine Cycle System Using Scroll Expander," *Journal of Environment and Engineering*, vol. 2, no. 4, pp. 708-719, 2007.
- [5] D. Manolakos, G. Kosmadakis, S. Kyritsis and G. Papadakis, "Identification of behaviour and evaluation of performance of small scale, low-temperature Organic Rankine Cycle system coupled with a RO desalination unit," *Energy*, vol. 34, no. 6, pp. 767-774, Jun. 2009.

- [6] B. Twomey, "Analysis of Low Temperature Organic Rankine Cycles for Solar Applications," Ph.D. dissertation, Dept. Mechanical Eng., Univ. of Queensland, Brisbane, Australia, 2015.
- [7] C. Liu, S. Wang, C. Zhang, Q. Li, X. Xu and E. Huo, "Experimental study of micro-scale organic Rankine cycle system based on scroll expander," *Energy*, vol. 188, p. 115930, Dec. 2019.
- [8] Air square. (2016, May 16). E15H022A-SH datasheet (R7 10.05.18). [Online]. Available: <https://airsquared.com/wp-content/uploads/2015/05/e15h022a-sh.pdf>
- [9] G. B. Abadi, E. Yun and K. C. Kim, "Experimental study of a 1 kW organic Rankine cycle with a zeotropic mixture of R245fa/R134a," *Energy*, vol. 93, pp. 2363–2373, Dec. 2015.
- [10] P. Ginies, C. Ancel and D. Gross, "Scroll compressors and intermediate valve ports," in *Proceedings of Seventh International Conference on Compressors and their Systems 2011*, City University London, England, 2011, pp. 477–488.
- [11] H. Xi, M.-J. Li, H.-H. Zhang and Y.-L. He, "Experimental studies of organic Rankine cycle systems using scroll expanders with different suction volumes," *Journal of Cleaner Production*, vol. 218, pp. 241–249, 2019.
- [12] C. He, C. Liu, H. Gao, H. Xie, Y. Li, S. Wu and J. Xu, "The optimal evaporation temperature and working fluids for subcritical organic Rankine cycle," *Energy*, vol. 38, no. 1, pp. 136–143, 2012.
- [13] J. Li, Q. Liu, Z. Ge, Y. Duan and Z. Yang, "Thermodynamic performance analyses and optimization of subcritical and transcritical organic Rankine cycles using R1234ze(E) for 100–200 °C heat sources," *Energy Conversion and Management*, vol. 149, pp. 140–154, 2017.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

กาวหลอมร้อนจากยางธรรมชาติ

ศิวโรฒ บุญราศรี*

คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้

63 หมู่ 4 ถนนเชียงใหม่-พร้าว ตำบลหนองหาร อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290

รับบทความ 1 สิงหาคม 2562 แก้ไขบทความ 29 เมษายน 2563 ตอรับบทความ 13 พฤษภาคม 2563

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการทำกาวหลอมร้อนจากยางธรรมชาติ (ยางแท่ง STR 20) เพื่อปรับปรุงสมบัติการยึดติดและการหลอมตัวของกาวหลอมร้อนจากยางธรรมชาติให้ดีขึ้นเพื่อให้ได้สูตรกาวที่เหมาะสมทำการทดลองโดยแปรปริมาณเอธิลีนไวนิลอะซิเตต ซีฟ้งพาราฟิน และปิโตรเลียมเรซินเป็น 25, 50, 100, 125 และ 150 phr (ส่วนในยาง 100 ส่วน) พบว่าสูตรกาวที่ดีที่สุดประกอบด้วย ยางแท่ง STR 20 100 phr ซีฟ้งพาราฟิน 25 phr เอธิลีนไวนิลอะซิเตต 150 phr ปิโตรเลียมเรซิน 150 phr สำหรับกระบวนการทำกาวหลอมร้อน เริ่มต้นจากควบคุมให้อุณหภูมิของซีฟ้งพาราฟินอยู่ที่ 160–170 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นตัดยาง STR 20 เป็นชิ้นเล็ก ๆ แล้วค่อย ๆ เติมยางลงไปนึ่งซีฟ้งพาราฟินที่หลอมเหลวจนยางละลายหมด แล้วเติมปิโตรเลียมเรซินและเอธิลีนไวนิลอะซิเตต ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นอุณหภูมิห้อง จากการทดสอบกาวหลอมร้อนพบว่า กาวที่ได้มีลักษณะสีน้ำตาล มีความแข็งและผิวเรียบดี ไม่มีกลิ่นรบกวน มีค่าความหนืด 514 ± 14 เซนติพอยส์ ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส มีค่าความต้านทานแรงเฉือน 82.5 ± 1.4 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว มีค่าความต้านทานการหลุดลอก 2.06 ± 0.02 กิโลนิวตันต่อเมตร

คำสำคัญ : ยางธรรมชาติ; กาวหลอมร้อน

* ผู้นิพนธ์ป ระสานงาน โทร: +669 0519 4926, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: siwarote.b@mju.ac.th

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Hot-melt Adhesive Production from Natural Rubber

Siwarote Boonrasri*

Faculty of Engineering and Agro-industry, Maejo University

63 Moo 4 Chiangmai-Phrao Road, Nong Han Subdistrict, San Sai District, Chiang Mai Province 50290

Received 1 August 2019; Revised 29 April 2020; Accepted 13 May 2020

Abstract

The purpose of this research was to study hot-melt adhesives from natural rubber (Standard Thai Rubber 20, STR 20). In order to improve the adhesion and melting properties of hot-melt adhesive to get the best glue formula from STR 20, the ethylene vinyl acetate content (EVA), paraffin wax (Wax) and petroleum resin (Resin) were varied from 25, 50, 100, 125 and 150 phr (Part Per Hundred Rubber). It was found that the best adhesive formulas consisted of 100 phr of STR 20, 25 phr of wax, 150 phr of EVA and 150 phr of resin. For preparing hot-melt adhesive, first, the wax was heated and maintained at 160-170 °C, then cut the STR 20 into small pieces and slowly added the rubber into the melted wax until the rubber was completely melted. And then added resin and EVA and cooled to room temperature, finally, the results show that hot-melt adhesive was dark brown, hard and odorless, smooth texture and easy to melt with 514 ± 14 centipoises of Viscosity at 150 °C, 82.49 ± 1.4 lbf/in² of shear strength and 2.06 ± 0.02 kN/m of cleavage peel strength.

Keywords : Natural Rubber; Hot-melt Adhesive

* Corresponding Author. Tel.: +669 0519 6962, E-mail Address: siwarote.b@mju.ac.th

1. บทนำ

งานวิจัยเกี่ยวกับกาวยางธรรมชาติมีอยู่หลายเรื่องแต่ส่วนใหญ่เป็นกาวชนิดที่มีน้ำเป็นตัวกลาง หรือใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ มักมีปัญหาในการแห้งช้า ดังนั้นหากต้องการให้กาวแห้งเร็วควรเปลี่ยนจากกาวที่ใช้ตัวทำละลายเป็นกาวหลอมร้อน ผู้วิจัยคิดว่าการทำกาวหลอมร้อนจากยางธรรมชาติจะทำให้ยางธรรมชาติมีการใช้งานที่หลากหลายมากขึ้น

กาวหลอมร้อน (Hot-melt Adhesive) เป็นกาวที่ใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลว (Melting Point) และเกิดการติดประสานกับวัสดุเมื่อเย็นลง และกลายเป็นของแข็ง ต่างกับกาวชนิดอื่นที่เกิดการติดประสานหรือกลายเป็นของแข็ง เมื่อตัวทำละลาย (Solvent) หรือน้ำระเหยออกไป ดังนั้นกาวหลอมร้อนจึงไม่มีตัวทำละลาย และเป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) มีจุดหลอมเหลวในช่วง 65-180 องศาเซลเซียส สามารถติดกับพื้นผิวที่ไม่เป็นรูพรุน เช่น โลหะได้ดี ใช้เวลาน้อยและสามารถใช้กับเครื่องจักรแบบอัตโนมัติทำให้ประหยัดเงินและเวลา ใช้ในงานรวมเล่มหนังสือ รวมกระดาษ บรรจุภัณฑ์ ดัดรองเท้า การยึดติดกระดาษกับแผ่นอลูมิเนียมฟลอยด์ [1], [2]

สูตรกาวหลอมร้อนมีหลายสูตรขึ้นอยู่กับผู้ผลิต แต่ก็มีส่วนประกอบหลัก ๆ อยู่ 4 ชนิด คือ เอทิลีน ไวนิลอะซิเตต (Ethylene Vinyl Acetate, EVA) สารเพิ่มความเหนียวติด (Tackifying Resin) สารตัวเติมลดต้นทุน (Fillers) สารป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องจากออกซิเจน (Antioxidant) ตัวอย่างสูตรกาวจะใช้น้ำหนักรวมทั้งหมดเป็นร้อยละ 100 โดยใช้สัดส่วนดังนี้ EVA (Elvax 260) ร้อยละ 10, EVA (Elvax 250) ร้อยละ 35, Tackifying resin ร้อยละ 30, แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate, CaCO_3) ร้อยละ 24.8 และ Antioxidant 0.2% [1], [3] สารเพิ่มความเหนียวติดเป็นสารที่สำคัญในการทำกาว [4], [5] ตัวอย่างสารเพิ่มความเหนียวติด เช่น คูมาโรนเรซิน ปีโตรเลียมเรซิน (Petroresin 120) และโรซิน (Rosin)

ยางธรรมชาตินิยมใช้ทำเป็นกาว Pressure-sensitive เนื่องจากมีสมบัติความเหนียวติดกันที่ดี [6]-[8] นอกจากนี้ ขี้ผึ้งพาราฟิน (Paraffin Wax) เป็นสารที่ช่วยปรับความหนืดของกาวได้และทำให้กาวเช็ดตัวเร็วขึ้น [9] EVA มีโครงสร้างเป็นแบบโคพอลิเมอร์ไม่เป็นระเบียบ (Random Copolymer) เนื่องจากสารชนิดนี้เกิดจากการรวมมอนอเมอร์ 2 ชนิด คือ เอทิลีนมอนอเมอร์กับไวนิลอะซิเตตมอนอเมอร์ EVA เป็นพอลิเมอร์หลักในการทำกาวหลอมร้อน ซึ่งมีหลายเกรด เช่น Elvax 150, Elvax 210, Elvax 220, Elvax 250 และ Elvax 260 เป็นต้น แคลเซียมคาร์บอเนตใช้เป็นสารตัวเติมลดต้นทุนและเพิ่มความแข็งแรงของเนื้อกาว [1], [10]

ในการทำวิจัยกาวหลอมร้อนจากยางธรรมชาตินี้ใช้อย่างแท่ง STR 20 จากการทดลองเบื้องต้นพบว่ายาง STR 20 ไม่สามารถหลอมละลายได้ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส และมีความหนืดสูง ประมาณ 80 Mooney Unit (MU) ไม่เหมาะที่จะนำมาทำเป็นกาวหลอมร้อน จำเป็นต้องนำยางธรรมชาติมาบดเป็นเวลา 9 นาที ความหนืดลดลงประมาณ 55 MU การบดยางทำให้น้ำหนักโมเลกุลลดลงความหนืดลดลง และเติมน้ำมันพาราฟินและสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตลงไปเพื่อทำให้โมเลกุลห่างจากกันจะได้หลอมตัวได้ง่ายขึ้น น้ำมันทำให้ความหนืดลดลง โดยน้ำมันละลายอยู่หรือปนอยู่ในโมเลกุล ทำให้ง่ายเคลื่อนไหวได้ง่ายขึ้น การเติมน้ำมัน 50 phr ทำให้ความหนืดลดลงประมาณ 45 MU [11]-[13] สำหรับการทดลองนี้ได้ปรับปรุงสมบัติการยึดติดและการหลอมตัวของกาวหลอมร้อนจากยางธรรมชาติให้ดีขึ้น ทำการทดลองโดยแปรปริมาณเอทิลีนไวนิลอะซิเตต ขี้ผึ้งพาราฟิน และปีโตรเลียมเรซินเป็น 25, 50, 100, 125 และ 150 phr แล้วนำไปทดสอบความต้านทานแรงฉีก (Shear Strength) ความต้านทานการหลุดลอก (Cleavage Peel Strength) ความหนืด (Viscosity) และเปรียบเทียบสมบัติกับกาว Hot-melt ทางการค้า

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 วัสดุ

เอทิลีนไวนิลอะซิเตต (Ethylene Vinyl Acetate, EVA) เกรด Elvax 220 มีปริมาณไวนิลอะซิเตตประมาณร้อยละ 28 มีจุดหลอมเหลวที่ 70 องศาเซลเซียส มีความแข็ง 50 Shore A จำหน่ายโดยบริษัทหุบองด์ ประเทศไทย ขี้ผึ้งพาราฟิน (Paraffin Wax หรือ Wax) ปีโตรเรซิน เกรด 120 (Petroresin 120 หรือ Resin ทำหน้าที่เป็น Tackifying Resin) แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate, CaCO_3) น้ำมันพาราฟิน (Paraffin Oil หรือ Oil) และยางแท่ง STR 20 จำหน่ายโดยบริษัท ซีม่อนยางพารา จำกัด

2.2 การเตรียมกาว Hot-melt

สูตรกาวที่ใช้ในการทดลองมีส่วนผสมดังนี้ ยางแท่ง STR 20, Wax, Resin, และ EVA ในการทดลองแปรปริมาณสารเป็น 25, 50, 75, 100, 125 และ 150 phr (ส่วนในยาง 100 ส่วน) ตามสูตรกำหนดให้ยางแท่ง STR 20 เป็น 100 ส่วน สารเคมีตัวอื่น ๆ ที่เติมเป็นปริมาณส่วนในยาง 100 ส่วน (Part Per Hundred Rubber, phr)

การศึกษผลของการเพิ่มปริมาณของ EVA ต่อสมบัติการหลอมร้อน โดยแปรปริมาณ EVA เป็น 25, 50, 75, 100, 125 และ 150 phr โดยกำหนดให้ Wax และ Resin คงที่ที่ 25 phr ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สูตรกาวหลอมร้อนโดยแปรปริมาณ EVA

สารเคมี	สูตรที่ น้ำหนักแห้ง (phr)					
	1	2	3	4	5	6
STR 20	100	100	100	100	100	100
Oil	50	50	50	50	50	50
CaCO_3	50	50	50	50	50	50
Wax	25	25	25	25	25	25
Resin	25	25	25	25	25	25
EVA	25	50	75	100	125	150

ศึกษาผลของการเพิ่มปริมาณ Wax ต่อสมบัติการหลอมร้อนโดยแปรปริมาณ Wax เป็น 25, 50, 75, 100, 125 และ 150 phr โดยกำหนดให้ Resin คงที่ที่ 25 phr และ EVA คงที่ที่ 150 phr ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สูตรกาวหลอมร้อนโดยแปรปริมาณ Wax

สารเคมี	สูตรที่ น้ำหนักแห้ง (phr)					
	1	2	3	4	5	6
STR 20	100	100	100	100	100	100
Oil	50	50	50	50	50	50
CaCO_3	50	50	50	50	50	50
Wax	25	50	75	100	125	150
Resin	25	25	25	25	25	25
EVA	150	150	150	150	150	150

ศึกษาผลของการเพิ่มปริมาณ Resin ต่อสมบัติการหลอมร้อน โดยแปรปริมาณ Resin 25, 50, 75, 100, 125 และ 150 phr โดยกำหนดให้ Wax คงที่ที่ 25 phr และ EVA คงที่ที่ 150 phr ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สูตรกาวหลอมร้อนโดยแปรปริมาณ Resin

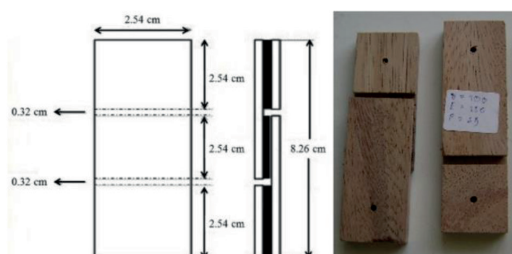
สารเคมี	สูตรที่ น้ำหนักแห้ง (phr)					
	1	2	3	4	5	6
STR 20	100	100	100	100	100	100
Oil	50	50	50	50	50	50
CaCO_3	50	50	50	50	50	50
Wax	25	25	25	25	25	25
Resin	25	50	75	100	125	150
EVA	150	150	150	150	150	150

ขั้นตอนการผสมกาวหลอมร้อน เริ่มต้นโดยการผสมยาง STR 20 กับน้ำมันพาราฟินและแคลเซียมคาร์บอเนตในเครื่องบดยางสองลูกกลิ้งเป็นเวลา 9 นาที

รีดเป็นแผ่น หลังจากนั้นตัดยาง STR 20 ชิ้นเล็ก ๆ ขนาดประมาณ 0.5×0.5 เซนติเมตร เพื่อลดเวลาการละลายของยางใน Wax ให้อุ่นหมุม Wax ที่ 160-170 องศาเซลเซียส ปริมาณ Wax ดังตารางที่ 2 ค่อย ๆ เติมนยางลงไปจนยางละลายหมด เติมน Resin ปริมาณ Resin ดังตารางที่ 3 เติมน EVA ปริมาณ EVA ดังตารางที่ 1 ปลอ่ยทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง นำไปสังเกตลักษณะทั่วไป นำกาวที่ได้ไปทดสอบความต้านทานแรงเฉือน (Shear Strength) ความต้านทานการหลุดลอก (Cleavage Peel Strength) ความหนืด (Viscosity)

2.3 การทดสอบความต้านทานแรงเฉือน (Shear Strength)

เตรียมแผ่นไม้อัดตามมาตรฐานกำหนดสองแผ่น ดังรูปที่ 1 นำกาวตัวอย่างที่ได้มาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ติดกับไม้ ตามมาตรฐาน ASTM D2339 ตั้งทิ้งไว้ 1 วัน ที่อุณหภูมิห้องให้กาวเซตตัวแล้วนำไปทดสอบสมบัติ ในการทดสอบแต่ละครั้งใช้ชิ้นตัวอย่าง 3 ชิ้น ใช้เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine) ยี่ห้อ LLOYD รุ่น LR 10K ตั้งค่าความเร็วการดึงขึ้นทดสอบที่ 12.70 มิลลิเมตรต่อนาที

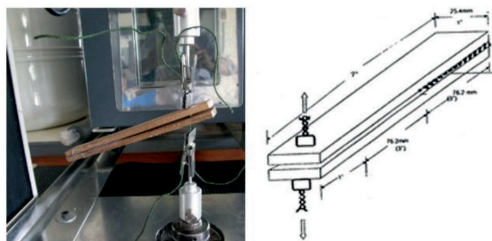


รูปที่ 1 ลักษณะชิ้นทดสอบความต้านทานแรงเฉือน

2.4 การทดสอบความต้านทานการหลุดลอก (Cleavage Peel Strength)

เตรียมแผ่นไม้อัดตามมาตรฐานกำหนดสองแผ่น ดังรูปที่ 2 นำกาวตัวอย่างที่ได้มาให้อุ่นหมุมที่ 60 องศาเซลเซียส ติดกับไม้ ตามมาตรฐาน ASTM D3807 ตั้งทิ้ง

ไว้ 1 วัน ที่อุณหภูมิห้องให้กาวเซตตัวแล้วนำไปทดสอบสมบัติ ในการทดสอบแต่ละครั้งใช้ชิ้นตัวอย่าง 3 ชิ้น ใช้เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal Testing Machine) ยี่ห้อ LLOYD รุ่น LR 10K ตั้งค่าความเร็วการดึงขึ้นทดสอบที่ 12.70 มิลลิเมตรต่อนาที



รูปที่ 2 ลักษณะชิ้นทดสอบความต้านทานการหลุดลอก

2.5 การทดสอบความหนืด (Viscosity)

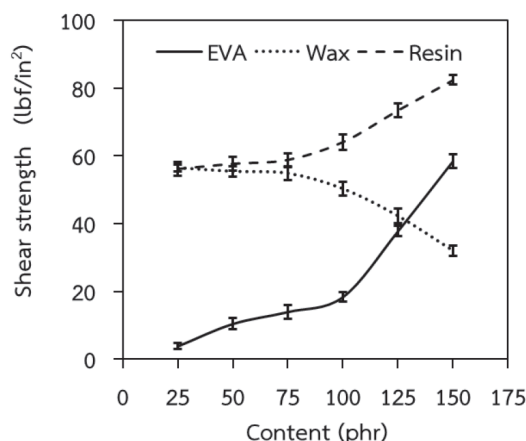
นำยางกาวหลอมร้อนที่เตรียมมา 100 กรัม มาวัดความหนืดด้วยเครื่องวัดความหนืดของของเหลว Brook Field รุ่น LVDV-III Ultra RY78173 เลือกแกนหมุนที่เหมาะสมเบอร์ 4 เลือกความเร็วที่ 60 รอบต่อนาที นำกาวหลอมร้อนใส่บีกเกอร์ และทำให้หลอมเหลวที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส นำบีกเกอร์วางใต้แกนหมุนแล้วเดินเครื่อง อ่านค่าที่ได้บนหน้าปัดเครื่อง บันทึกผล

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 ผลของสมบัติความต้านทานแรงเฉือน (Shear Strength) ของกาว Hot-melt

ผลสมบัติความต้านทานแรงเฉือน (Shear Strength) โดยการแปรปริมาณสาร EVA, Wax และ Resin เป็น 25, 50, 75, 100, 125, 150 และ 175 จากรูปที่ 3 ปริมาณ EVA มีผลต่อค่าความต้านทานแรงเฉือนคือ เมื่อปริมาณ EVA เพิ่มขึ้นค่าความต้านทานแรงเฉือนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แสดงว่า EVA ทำให้กาวมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากยาง STR 20

เป็นยางที่ไม่มีขั้ว (Non-polar) แต่ EVA มีขั้วสูง (Polar) เพราะมีหมู่ไวนิลอะซีเตต ทำให้สามารถยึดติดกับไม้ ซึ่งมีขั้วได้ดี [14], [15] ที่ปริมาณ EVA 150 phr ทำให้กาวมีความต้านทานแรงฉีกสูงสุด คือ 58.5 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จึงกำหนดให้ EVA คงที่ที่ 150 phr ซึ่งเป็นปริมาณที่ดีที่สุด ถ้าใช้ปริมาณมากกว่านี้ทำให้สมบัติกาวอาจจะดีขึ้น แต่จะทำให้ปริมาณการใช้ยางซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักลดลง และได้ทดลองแปรปริมาณ Wax ต่อไป



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ของปริมาณ EVA, Wax และ Resin กับค่าความต้านทานแรงฉีก

เมื่อปริมาณ Wax เพิ่มขึ้นค่าความต้านทานแรงฉีกมีแนวโน้มลดลง แสดงว่า Wax ทำให้กาวมีความแข็งแรงลดลง และที่ปริมาณ Wax 25 phr ทำให้กาวมีความต้านทานแรงฉีกสูงสุด คือ 56.43 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จึงกำหนดให้ EVA คงที่ที่ 150 phr และปริมาณ Wax คงที่ที่ 25 phr ซึ่งเป็นปริมาณที่ดีที่สุด ถ้าใช้น้อยกว่านี้ทำให้การหลอมตัวของกาวไม่ดี ได้ทดลองแปรปริมาณ Resin ต่อไป

เมื่อปริมาณ Resin เพิ่มขึ้นค่าความต้านทานแรงฉีกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แสดงว่า Resin ทำให้กาว

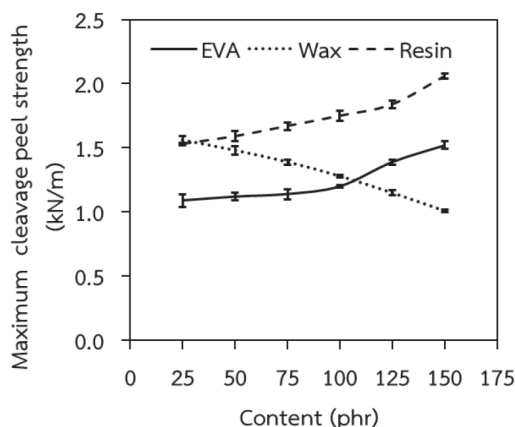
มีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น และที่ปริมาณ Resin 150 phr ทำให้กาวมีความต้านทานแรงฉีกสูงสุด คือ 82.49 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เปรียบเทียบกาวทางการค้า มีค่าความต้านทานแรงฉีก ที่ 98.09 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ถ้าใช้ปริมาณมากกว่านี้ทำให้สมบัติกาวอาจจะดีขึ้น แต่จะทำให้ปริมาณการใช้ยางซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักลดลง นอกจากนี้ Resin ช่วยเพิ่มความเข้ากันของยางกับ EVA โดยมีความเร็วในการละลายเพิ่มขึ้น และลดความหนืดของของผสมลง สอดคล้องกับการทดลองของ Y. J. Park และ H. J. Kim [2] พบว่า Resin หรือสาร Tackifier จะทำให้กาวหลอมร้อนมีความแข็งแรงมากขึ้นเพิ่มความเหนียวติด และช่วยลดความหนืดของกาวหลอมร้อนได้ [2] ดังนั้นสูตรที่เหมาะสม คือ EVA 150 phr, Wax 25 phr และ Resin 150 phr

3.2 ผลของสมบัติความต้านทานการหลุดลอก (Cleavage Peel Strength) ของกาว Hot-melt

จากรูปที่ 4 ปริมาณ EVA มีผลต่อค่าความต้านทานการหลุดลอก คือ เมื่อปริมาณ EVA เพิ่มขึ้นค่าความต้านทานการหลุดลอก มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย สอดคล้องกับค่าความต้านทานแรงฉีก

เมื่อปริมาณ Wax เพิ่มขึ้นค่าความต้านทานการหลุดลอก มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย สอดคล้องกับค่าความต้านทานแรงฉีก

เมื่อปริมาณ Resin เพิ่มขึ้นค่าความต้านทานการหลุดลอก มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แสดงว่า Resin ทำให้กาวมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเทียบสูตรกาวที่เตรียมขึ้นกับกาวทางการค้า พบว่า มีสมบัติความต้านทานการหลุดลอก สูตรกาวหลอมร้อน ที่มีปริมาณ Resin 150 phr มีความต้านทานการหลุดลอก 2.06 กิโลนิวตันต่อเมตร มีค่าใกล้เคียงกับกาวทางการค้า มีค่าความต้านทานการหลุดลอก 2.33 กิโลนิวตันต่อเมตร



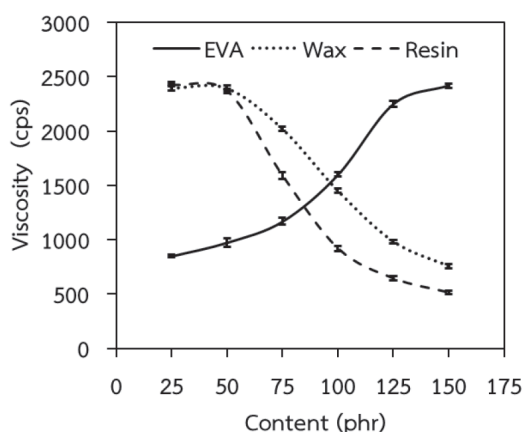
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ของปริมาณ EVA, Wax และ Resin กับค่าความต้านทานการหลุดลอก

3.3 สมบัติด้านความหนืด (Viscosity) ของ กาว Hot-melt

จากรูปที่ 5 พบว่าปริมาณ EVA มีผลต่อค่าความหนืดคือ เมื่อปริมาณ EVA เพิ่มขึ้นค่าความหนืดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจาก EVA เกรด Elvax 220 เป็นเกรดที่มีความหนืดสูงจากการวัดด้วยเครื่องได้ค่าความหนืดสูงเกิน 3,000 cps เมื่อผสมในกาวทำให้กาวมีความหนืดสูงขึ้นตามปริมาณที่ผสมลงไป ปริมาณ EVA ที่เหมาะสมในสูตรกาว คือ 150 phr ถ้าใส่น้อยกว่านี้กาวที่ได้จะนิ่มมากเกินไปที่อุณหภูมิห้อง ถ้าใช้ EVA ปริมาณมากกว่านี้ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น ต้องปรับปรุงให้กาวมีความหนืดลดลงโดยการเติม Wax หรือ Resin

เมื่อปริมาณ Wax เพิ่มขึ้นค่าความหนืดมีแนวโน้มลดลงเนื่องจาก Wax เป็นสารที่มีความหนืด 59 cps เมื่อผสมในกาวหลอมร้อนจะทำให้กาวมีความหนืดต่ำลงตามปริมาณที่ผสมลงไป โดยทั่วไปปริมาณ Wax เพิ่มทำให้ความหนืดของพอลิเมอร์ลดลง [9], [16] เนื่องจาก Wax มีขนาดโมเลกุลที่เล็กกว่าพอลิเมอร์ ปริมาณ Wax ที่เหมาะสมในสูตรกาว คือ 25 phr ถ้าใส่ในปริมาณมากกว่านี้ทำให้สมบัติกาวไม่ดี ถ้าใส่น้อยกว่านี้ทำให้การหลอมตัวของกาวไม่ดี

เมื่อปริมาณ Resin เพิ่มขึ้นค่าความหนืดมีแนวโน้มลดลง เนื่องจาก Resin เป็นสารที่มีความหนืดที่ 62 cps เมื่อผสมในกาวจะทำให้กาวมีความหนืดลดลงตามปริมาณที่ผสมลงไป เมื่อเปรียบเทียบสูตรกาวหลอมร้อนที่เตรียมขึ้นเองกับกาวทางการค้าพบว่า สูตรกาวหลอมร้อน ที่มีปริมาณ EVA 150 phr, Wax 25 phr และ Resin 150 phr มีค่าความหนืด ที่ 514 cps มีค่าใกล้เคียงกับกาวทางการค้า มีค่าความหนืดที่ 668 cps ถ้าใช้ Resin ปริมาณมากกว่านี้ค่าความหนืดเริ่มคงที่



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ของปริมาณ EVA, Wax และ Resin กับค่าความหนืด

3.4 เปรียบเทียบกับกาว Hot-melt ทางการค้า

สูตรกาวหลอมร้อนจากยางธรรมชาติที่ดีประกอบด้วยยางแท่ง STR 20 100 phr, น้ำมันพาราฟิน 50 phr, แคลเซียมคาร์บอเนต 50 phr, Wax 25 phr, Resin 150 phr และ EVA 150 phr เนื่องจากการทดลองเบื้องต้นพบว่าแท่ง STR 20 ไม่สามารถหลอมละลายได้ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส แม้ใช้เวลา 1 ชั่วโมง และแท่ง STR 20 มีความหนืดสูงประมาณ 80 MU ไม่เหมาะที่จะนำมาทำเป็นกาวหลอมร้อน วิธีแก้ปัญหโดยการเติมน้ำมันพาราฟินเพื่อให้ยาง

นิ่มลง ผลของน้ำมันต่อสมบัติของยาง น้ำมันทำให้ความหนืดลดลง โดยน้ำมันละลายอยู่หรือปนอยู่ในโมเลกุลทำให้โมเลกุลยางเคลื่อนไหวได้ง่าย [11]-[13] ถ้าใช้น้ำมันพาราฟินน้อยกว่า 50 phr จะทำให้ยางละลายได้ช้าที่อุณหภูมิ 160–170 องศาเซลเซียส หรือไม่ละลายเลย น้ำมันที่ใช้ในการทดลองนี้กำหนดให้คงที่ 50 phr ถ้าใส่มากเกินไปจะทำให้สมบัติการไม่ติด ถ้าใส่ในปริมาณน้อยก็ทำให้ยางไม่สามารถละลาย

แคลเซียมคาร์บอเนตใส่เพื่อลดต้นทุนปริมาณที่ใส่ลงไป 50 phr ถ้าใส่ในปริมาณมากกว่านี้ทำให้สมบัติการเหนียวติดไม่ดี

EVA ทำให้การแข็งขึ้นและเพิ่มความเหนียวติดจากการทดลอง EVA ที่เหมาะสมอยู่ในคือ 150 phr โดยให้สมบัติความต้านแรงฉีกแต่ความหนืดยังสูง จึงได้ทำการปรับปรุงโดยใช้ Wax และ Resin

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบสมบัติการหลอมร้อนจากยางธรรมชาติ และกาวทางการค้า

การทดสอบ	สูตรกาว	
	การหลอมร้อนจากยาง STR 20	กาวหลอมร้อนทางการค้า
ลักษณะทั่วไป	เป็นแท่งแข็ง	เป็นแท่งแข็ง
พื้นผิว	ผิวเรียบ	ผิวเรียบ
สี	สีน้ำตาลแก่	สีขาว
กลิ่น	ไม่มีกลิ่นรบกวน	ไม่มีกลิ่นรบกวน
สภาพการหลอมเหลว	หลอมเหลวได้ดีในช่วงตั้งแต่อุณหภูมิ 85 -110°C	หลอมเหลวได้ดีในช่วงตั้งแต่อุณหภูมิ 85 -110°C
ความหนืด (cps)	514	668
ความต้านทานแรงฉีก (lbf/in ²)	82.49	98.08
ความต้านทานการลอกหลุด (kN/m)	2.06	2.33

Wax ใช้เพื่อให้ยางละลาย ทำให้การมีความแข็งแรงการหลอมได้ง่าย Wax ทำให้ความหนืดลดลงแต่สมบัติที่ได้ไม่ดี จึงเลือกใช้ Wax ที่ 25 phr นอกจากนี้ Wax ยังสามารถช่วยป้องกันการเสื่อมสภาพของยาง STR 20 จากโอโซนได้ [17], [18]

Resin ทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความเหนียวติด (Tackifier) ใช้เพิ่มความเหนียวติดของกาว เพิ่มความแข็งแรงของกาว และทำให้การหลอมได้ง่ายยิ่งขึ้น Resin ทำให้กาวที่ได้มีความหนืดลดลงและสมบัติการยึดติดของกาวดีขึ้นจึงเลือกใช้ Resin ที่ 150 phr นอกจากนี้ Resin อาจจะทำให้ยาง STR 20 กับ EVA เข้ากันได้ดีขึ้นเพราะว่าปิโตรเลียมเรซิน (Resin) มีส่วนที่เป็นอลิฟาติกซึ่งไม่มีขั้วสามารถเข้ากับยาง STR 20 ได้ดี และมีส่วนที่เป็นอะโรมาติกที่มีขั้วซึ่งสามารถเข้ากับ EVA ได้ดี [4], [5]

เมื่อนำกาวหลอมร้อนจากการทดลอง และ กาวหลอมร้อนทางการค้ามาทดลองเปรียบเทียบสมบัติแสดงดังตารางที่ 4 ซึ่งกาวที่เตรียมได้มีความต้านทานแรงฉีกและความต้านทานการลอกหลุด ต่ำกว่ากาวทางการค้าเล็กน้อย เนื่องจากยาง STR 20 เป็นยางที่ไม่มีขั้ว (Non-polar) ทำให้การยึดติดของยาง STR 20 กับไม้ซึ่งมีขั้วไม่ค่อยดี แต่กาวหลอมร้อนทางการค้ามีส่วนที่เป็น EVA เพียงอย่างเดียวซึ่ง EVA มีขั้วสูง (Polar) เพราะมีหมู่ไวนิลอะซีเตต ทำให้สามารถยึดติดกับไม้ซึ่งมีขั้วได้ดี [14], [15] แต่การมียาง STR 20 อาจจะทำให้กาวหลอมร้อนยึดติดกับพลาสติกที่ไม่มีขั้วได้ดี เช่น พลาสติกพีพี และพลาสติกพีอี เป็นต้น

ราคากาวกาวหลอมร้อนที่ขายในปัจจุบันราคาประมาณ 200 บาทต่อกิโลกรัม การคิดราคากาวหลอมร้อนจากยางธรรมชาติเบื้องต้น แสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ราคาของสารแต่ละชนิด

ส่วนประกอบ	น้ำหนัก (กก.)	ราคาต่อหน่วย (บาท/กก.)	ราคาแต่ละองค์ประกอบ
STR 20	100	60	6,000
Oil	50	38	1,900
CaCO ₃	50	18	900
Wax	25	20	500
Resin	150	35	5,250
EVA	150	70	10,500
รวม	525	-	25,050

จากตารางจะเห็นว่าราคากาวหลอมร้อนจากยางธรรมชาติ ราคาประมาณ $25,050/525 = 48$ บาทต่อกิโลกรัม ต้นทุนผันแปรอื่น ๆ ในการผลิตกาวจากยางธรรมชาติประมาณ 52 บาท ทำให้ต้นทุนรวม เท่ากับ $48+52 = 100$ บาทต่อกิโลกรัม ถ้าคิดราคาขายกิโลกรัมละ 150 บาท ดังนั้นกำไรกิโลกรัมละ $150-100 = 50$ บาทต่อกิโลกรัม ไม่สามารถประเมินราคาต้นทุนของกาวทางการค้าได้เนื่องจากไม่ทราบส่วนประกอบของสูตรกาว

4. สรุป

ความต้านทานแรงเฉือนเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ EVA และ Resin ความต้านทานแรงเฉือนลดลงตามปริมาณของ Wax ความต้านทานการลอกหลุดเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ EVA และ Resin ความต้านทานการลอกหลุดตามปริมาณของ Wax ความหนืดเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ EVA ความหนืดลดลงตามปริมาณของ Wax และ Resin

สูตรกาวหลอมร้อนจากยางธรรมชาติที่ดีประกอบด้วยยางแท่ง STR 20 100 phr, น้ำมันพาราฟิน 50 phr, แคลเซียมคาร์บอเนต 50 phr, Wax 25 phr, Resin 150 phr และ EVA 150 phr

กระบวนการผลิตกาวหลอมร้อนจากยางธรรมชาติ ผสมยาง STR 20 กับน้ำมันพาราฟินและแคลเซียมคาร์บอเนตในเครื่องบดอย่างสองลูกกลิ้ง หลังจากนั้นตัดยาง STR 20 ชิ้นเล็ก ๆ ให้อุ่นหุ้ม Wax ที่ 160-170 องศาเซลเซียส ค่อย ๆ เติมยางลงไปจนยางละลายหมด เติม Resin และ เติม EVA ปล่อยทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ได้เป็นกาว hot-melt จากยางธรรมชาติ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Pizzi and K. L. Mittal, *Handbook of Adhesive Technology, Revised and Expanded*, Taylor & Francis, 2003.
- [2] Y. J. Park and H. J. Kim, "Hot-melt adhesive properties of EVA/aromatic hydrocarbon resin blend," *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 23, no. 5, pp. 383-392, 2003.
- [3] Y. J. Park, H. S. Joo, H. J. Kim and Y. K. , "Adhesion and rheological properties of EVA-based hot-melt adhesives," *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 26, no. 8, pp. 571-576, 2006.
- [4] H. H. Shih and G. R. Hamed, "Peel adhesion and viscoelasticity of poly (ethylene-co-vinyl acetate)-based hot melt adhesives. I. The effect of tackifier compatibility," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 63, no. 3, pp. 323-331, 1997.
- [5] M. L. Barrueso-Martínez, T. P. Ferrándiz-Gómez, C. M. Cepeda-Jiménez, J. Sepulcre-Guilabert and J. M. Martín-

- Martínez, "Influence of the vinyl acetate content and the tackifier nature on the rheological, thermal, and adhesion properties of EVA adhesives," *J. Adhes. Sci. Technol.*, vol. 15, no. 2, pp. 243-263, 2001.
- [6] B. T. Poh, P. G. Lee and S. C. Chuah, "Adhesion property of epoxidized natural rubber (ENR)-based adhesives containing calcium carbonate," *Express Polym. Lett.*, vol. 2, no. 6, pp. 398-403, 2008.
- [7] B. T. Poh and Y. Y. Chang, "Viscosity and peel strength of SMR 10-based pressure-sensitive adhesives," *Polym. Plast. Technol. Eng.*, vol. 45, no. 11, pp. 1251-1256, 2006.
- [8] B. T. Poh and C. L. Chee, "Effect of coumarone-indene resin on adhesion property of SMR 20-based pressure-sensitive adhesives," *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*, vol. 56, no. 3, pp. 247-255, 2007.
- [9] J. P. Kalish et al., "An analysis of the role of wax in hot melt adhesives," *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 60, pp. 63-68, 2015.
- [10] L. L. Li and J. L. White, "Rheological behavior of highly filled epdm compounds with calcium carbonate, carbon black, silica and zinc oxide," *Rubber Chem. Technol.*, vol. 69, no. 4, pp. 628-636, 1996.
- [11] R. F. Grossman, *The Mixing of Rubber*, Springer Netherlands, 2012.
- [12] Z. S. Petrović, J. Milić, M. Ionescu and J. R. Halladay, "EPDM rubber plasticized with polymeric soybean oil of different molecular weights," *Rubber Chem. Technol.*, vol. 90, no. 4, pp. 667-682, 2017.
- [13] Z. S. Petrović, M. Ionescu, J. Milić and J. R. Halladay, "Soybean oil plasticizers as replacement of petroleum oil in rubber," *Rubber Chem. Technol.*, vol. 86, no. 2, pp. 233-249, 2013.
- [14] P. Jansen and B. G. Soares, "Effect of compatibilizer and curing system on the thermal degradation of natural rubber/EVA copolymer blends," *Polym. Degradation Stab.*, vol. 52, no. 1, pp. 95-99, 1996.
- [15] A. Sasikala and A. Kala, "Thermal Stability and Mechanical Strength Analysis of EVA and Blend of EVA with Natural Rubber," *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, no. 2, Part 3, pp. 8862-8867, 2018.
- [16] H. H. Kim and S.-J. Lee, "Effect of crumb rubber on viscosity of rubberized asphalt binders containing wax additives," *Con. Build. Mat.*, vol. 95, pp. 65-73, 2015.
- [17] D S.-S. Choi, S.-H. Im, J.-H. Park and J. S. Kim, "Analysis of wax solubility of rubber vulcanizates using wax solution in toluene and molten wax," *Polym. Test.*, vol. 28, no. 7, pp. 696-701, 2009.
- [18] A. Dorigato, M. V. Ciampolillo, A. Cataldi, M. Bersani and A. Pegoretti, "Polyethylene wax/epdm blends as shape-stabilized phase change materials for thermal energy storage," *Rubber Chem. Technol.*, vol. 90, no. 3, pp. 575-584, 2017.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Effect of Pre-treatment on Quality of Cassava Chips

Prawta Chantaro^{1*} Parisut Chalermchaiwat² and Thepkunya Harnsilawat³

¹ Food Science and Technology Program, Faculty of Science and Technology, Surat Thani Rajabhat University

² Food and Nutrition Program, Department of Home Economics, Faculty of Agriculture Kasetsart University

³ Department of Product Development, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University

¹ 272 Surat-Nasan Rd., Muang, Surat Thani, Thailand 84100

^{2,3} 50 Ngam Wong Wan Rd., Chatuchak, Bangkok, Thailand 10900

Received 20 November 2019; Revised 6 May 2020; Accepted 13 May 2020

Abstract

This research was to look at cassava root as an alternative raw material for snack chip production. However, cassava chips showed higher hardness compared to potato chips. The aim was to study the effect of pre-treatment on the physical, chemical and sensorial characteristics of cassava chips. Fresh cassava slices (1 mm thickness) were soaked in sodium bicarbonate (NaHCO_3) solution at different concentrations (un-soaked, 0, 1 and 2% w/w) for 5 min. Then, cassava slices were fried in palm oil at 160°C for 4 min and were seasoned with paprika powder before being baked at 180°C for 10 min. The chemical, physical and sensorial qualities were investigated. The results revealed that the bulk density of cassava chips decreased significantly from 0.496 to 0.401 g/cm³ when fresh cassava slices were soaked in 2% NaHCO_3 . The breaking force of cassava chips also decreased from 558.97 to 231.50 g whereas fat content increased from 22.85 to 30.69% when soaked in 2% NaHCO_3 . Increasing the concentration of NaHCO_3 decreased the lightness (L^*) of cassava chips. Pre-treatment did not have a significant effect on the sensory scores of cassava chips.

Keywords : Cassava Chips; Pre-treatment; Frying; Quality

* Corresponding Author. Tel.: +667 791 3333 ext. 1260, E-mail Address: prawta.cha@gmail.com

1. Introduction

Thailand's snack market was 36 billion baht in 2018 and its growing rate within the snack market was 6% [1]. The five main segments of snacks in Thailand include extruded snacks (35%), potato chips (30%), prawn crackers (10%), dry peas and nuts (10%) and others (15%). Potato chips were the fastest growing segment of all [1], [2]. Mazurek et al. [3] also reported that the most popular chip products were potato chips.

Cassava (*Manihot esculenta*) is the third largest source of food carbohydrates for humans [4] and it is one of Thailand's most important economic crops. Thailand was the world's largest cassava exporter with a production of 33 million tons in 2016, which is 67% of the global market [5]. Cassava roots are very rich in starch and contain small amounts of calcium, phosphorus and vitamin C [6]. In 2017, Thailand produced 107,103 tons of fresh potatoes whereas demand for fresh potato as a raw material for producing potato-based products was about 150,000 tons [7]. As a result, Thailand has been imported potatoes from China, Canada and Germany for use in its food industry.

Moreover, the price per kilogram of cassava root is much cheaper than potatoes; namely about 10 times cheaper. The aim of this research was to look at cassava root as an alternative raw material for the production of snack chips. However, the cassava chips showed a

higher hardness value when compared with potato chips. Therefore, the objective was to study the effect of pre-treatment on the qualities of cassava chips. The pre-treatment methods consisted of soaking in water and sodium bicarbonate (NaHCO_3) solutions. NaHCO_3 increased the volume expansion of extruded black beans [8] and enhanced the texture, density and expansion ratio of puffed corn-fish snack [9]. There were a few prior studies on the effects of processing cassava chips [10], [11], and there were several previous research studies which looked at the effects of processing potato chips [12] – [17], banana [18], carrot [19] and cereal products [20].

2. Materials and Methods

2.1 Materials

Fresh cassava roots, palm oil (Morakot, Thailand) and seasoning powder (i-chef, Thailand) were purchased from a local market in Surat Thani Province, Thailand. Fresh cassava roots were kept at 4°C prior to processing.

2.2 Pre-treatments for Producing Cassava Chips

Cassava roots were peeled and then washed with tap water. Further, cassava roots were sliced to a thickness of 1 mm. These slices were soaked in sodium bicarbonate (NaHCO_3) solution at various concentrations (0, 1 and 2% w/w) for 5 min. The ratio of cassava to NaHCO_3 solution was 1:3. The excess

water was wiped away with a clean cloth. The pre-treatment cassava slices were fried in palm oil at 160°C for 4 min with the cassava to palm ratio being 1:10. Then, cassava chips were seasoned with paprika powder (the ratio of cassava chips to paprika powder was 100:2) and baked at 180°C for 10 min in an oven. Finally, the cassava chips were cooled

and kept in a plastic bag until their quality analysis. The detailed protocol employed for producing cassava chips is shown in **Fig. 1**.

2.3 Chemical Analysis

Moisture content: The moisture content of cassava chips was measured following the method of AOAC [21]. Briefly, ground samples (3 g) were dried to a constant weight in a hot air oven (Redline, Binder, German) at 105°C. The moisture content was calculated from the weight difference between the original and dried samples.

Fat content: The total fat content of the cassava chips was extracted with petroleum ether for 4 h in a Soxtec auto extraction unit (2050 Soxtec Tecator, Denmark) and gravimetrically determined.

2.4 Physical Analysis

Bulk density: The bulk density of the cassava chips was calculated by dividing the weight (g) by the volume of the samples (cm³).

Water activity (a_w): Ground samples were placed in a cup and water activity (a_w) was measured by using a water activity meter (CH-8303, Rotronic, Switzerland).

Color measurement: The color of the samples was measured in the L^* , a^* and b^* mode of CIE (angle 10°, illuminant D65) by using a color meter (CR-400, Konica Minolta, Japan).

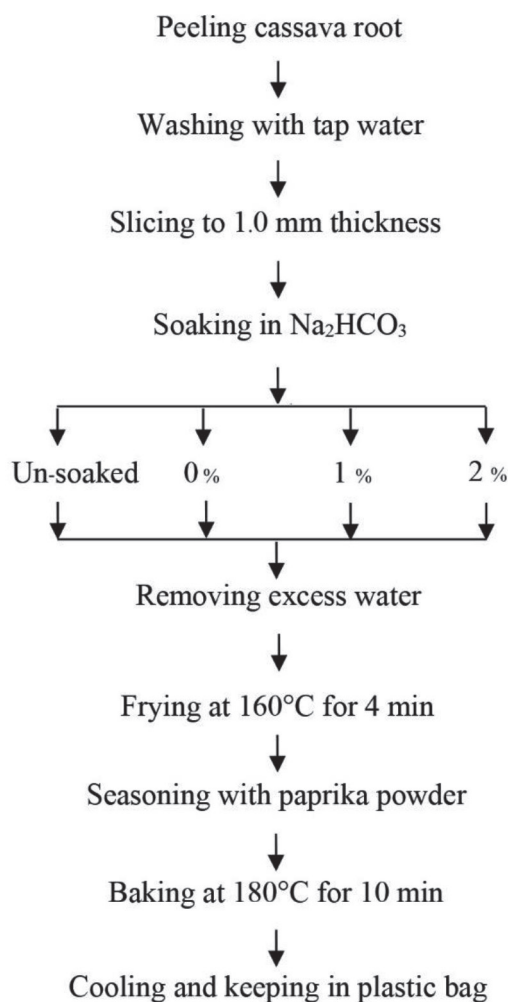


Fig. 1 Flow chart indicating the protocol involved in producing cassava chips

Texture measurement: A texture analyzer (CT3, Brookfield, Germany) was used to determine the breaking force of cassava chips. The samples were placed on a modified TA-TPB fixture and a knife edge (60 mm width) probe, moving at a speed of 0.5 mm/s over a distance of 10 mm, was used to break the cassava chips. The breaking force was expressed in grams-force.

2.5 Sensory Analysis

The 9-point hedonic scale was used to evaluate the acceptability of the cassava chips. Fifty untrained panelists made up of students at Surat Thani Rajabhat University were asked to rate their liking of quality attributes including appearance, flavor, crispness, taste and overall liking of each sample (1 = dislike extremely, 5 = neither dislike nor like and 9 = like extremely).

2.6 Statistical Analysis

The experiments were conducted in triplicate. The results were reported as mean values with standard deviations. Analysis of variance (ANOVA) and Duncan's New Multiple's Range Test (DMRT) were used to determine statistically significant differences of treatment parameters ($p < 0.05$) using the SPSS V.21 statistical software package.

3. Results and Discussion

3.1 Chemical Qualities

The effect of pre-treatment on

moisture content and water activity (a_w) of cassava chips are shown in **Table 1**. Fresh cassava slices were soaked in sodium bicarbonate (NaHCO_3) solution at various concentrations (0, 1 and 2% w/w) for 5 min. The pre-treatment cassava slices were fried in palm oil at 160°C for 4 min and baked at 180°C for 10 min. The concentration of NaHCO_3 solution used did not exceed 2% because it would have affected the taste of the cassava chips. The results revealed that moisture content in cassava chips are significantly different ($p < 0.05$) with soaking fresh cassava slices in 2% NaHCO_3 solution. The moisture content of cassava chips ranged from 0.96 – 1.42%.

The total fat contents of cassava chips as affected by the pre-treatment method are shown in **Table 1**. The results showed that soaking fresh cassava slices in a higher concentration of NaHCO_3 resulted in higher fat content. The total fat content in cassava chips increased from 22.85% to 30.69% (Wet Basis) when increasing the concentration of NaHCO_3 to 2%. Normally, the mean oil contents of potato chips and tortilla chips are 37.5 and 23.4 g/100 g sample, respectively [22]. Mazurek et al. [3] also reported that commercial chips with a fat level reaching 30 – 40% dominate the market. The key factors affecting oil absorption in fried products include the frying process, product characteristics and oil quality [23]. Soaking cassava slices in water and

NaHCO₃ solution prior to frying increases fat content in cassava chips due to surface wetting [24]. Higher initial moisture content leads to an increase in oil uptake in cassava chips, similar to that found in tortilla chips [25]. Oil replaces the water that has evaporated during the frying process. The water-replacement mechanism is described as follows. When the food is exposed to frying temperatures, water evaporates rapidly, the outer surface becomes dry and crust forms. Moisture within the fried product is converted to steam, creating a positive pressure gradient. The steam escapes through cracks, defects, open capillaries and channels in both the cellular structure and membranes. As the process progresses, oil adheres to the food, entering the large voids, product imperfections and crevices left by the changes in structure due to frying and water evaporation [23]. In addition, product porosity plays a significant role in the oil uptake of fried products. NaHCO₃ plays a role in leavening agents increasing oil uptake of fried products due to the formation of gas cells that fill with oil during frying [26]. Then, the increase of NaHCO₃ concentration causes an increase in fat content of cassava chips. Generally, three mechanisms have been proposed to explain the complex process of oil uptake during deep-fat frying. These include water replacement, cooling-phase effect and surface-active agents [23].

Table 1 Effect of pre-treatment method on moisture content and fat content of cassava chips

Pre-treatment	Moisture content (%)	Fat content (%)
Control	1.09 ± 0.13 ^b	22.85 ± 0.93 ^d
Water	1.01 ± 0.08 ^b	24.32 ± 0.97 ^c
1% NaHCO ₃	0.96 ± 0.04 ^b	28.59 ± 1.50 ^b
2% NaHCO ₃	1.42 ± 0.11 ^a	30.69 ± 1.24 ^a

Different letters in the same column indicate that values are significantly different from one another (p<0.05)

3.2 Physical Qualities

Water activity (a_w) in cassava chips was not significantly different among different the various pre-treatment methods, and instead corresponded largely to moisture content. The a_w of cassava chips is in the range of 0.126 - 0.142 (**Table 2**).

Bulk density and hardness of cassava chips as affected by pre-treatment are shown in **Table 2**. Bulk density of cassava chips was calculated by dividing the weight by the volume of cassava chips. Soaking fresh cassava slices in water and NaHCO₃ solution prior to frying caused a decrease of bulk density in cassava chips. The results revealed that the volume of cassava chips increased due to the formation of internal air bubbles. The formation of gas cells in cassava chips was derived from the combination of water pressure and the leavening agent properties of NaHCO₃ during the frying process. However, increasing NaHCO₃

concentration from 1 to 2% did not affect the bulk density of cassava chips ($0.401\text{-}0.402\text{ g/cm}^3$) because frying oil was free to move in to the gas cells of cassava chips during frying. Regardless, both the volume and weight of chips rose simultaneously.

The hardness of cassava chips was evaluated and expressed in breaking force as it relates to the crispness of cassava chips. The hardness of cassava chips without pre-treatment was 558.57 g. Soaking fresh cassava slices in water and NaHCO_3 prior to frying yielded a lower hardness value. The hardness of cassava chips decreased from 558.57 to 231.50 g when soaking fresh cassava slices in 2%

NaHCO_3 . Water and NaHCO_3 influenced the hardness of cassava chips due to the formation of air bubbles in cassava chips during frying relating to decrease in bulk density of cassava chips. The air cells corresponded to brittleness in cassava chips, with more air cells leading to easier fracturing.

Color (L^* , a^* and b^*) of cassava chips as affected by the pre-treatment method is shown in **Table 3**. The pre-treatment method significantly affected the lightness (L^*) and redness (a^*) of cassava chips. Soaking fresh cassava slices in water prior to frying resulted in a significant increase in the L^* value of

Table 2 Effect of pre-treatment method on water activity, bulk density and breaking force of cassava chips

Pre-treatment	Water activity (a_w)	Bulk density (g/cm^3)	Hardness (g)
Control	0.132 ± 0.010^a	0.496 ± 0.08^a	558.57 ± 86.42^a
Water	0.131 ± 0.020^a	0.399 ± 0.05^b	298.87 ± 63.56^b
1% NaHCO_3	0.126 ± 0.033^a	0.402 ± 0.07^b	239.80 ± 54.71^b
2% NaHCO_3	0.142 ± 0.017^a	0.401 ± 0.04^b	231.50 ± 36.55^b

Different letters in the same column indicate that values are significantly different from one another ($p < 0.05$)

Table 3 Effect of pre-treatment method on color (L^* , a^* and b^*) of cassava chips

Pre-treatment	L^*	a^*	b^*
Control	53.79 ± 0.60^c	2.73 ± 0.43^a	23.17 ± 1.67^a
Water	59.19 ± 1.11^a	1.69 ± 0.42^{bc}	21.23 ± 1.25^a
1% NaHCO_3	57.27 ± 2.20^b	1.82 ± 0.42^b	21.70 ± 1.51^a
2% NaHCO_3	54.14 ± 2.11^c	1.44 ± 0.18^c	22.82 ± 3.03^a

Different letters in the same column indicate that values are significantly different from one another ($p < 0.05$)

cassava chips whereas the a^* value decreased significantly ($p < 0.05$). The greenness (b^*) of the cassava chips was not affected by pre-treatment ($p \geq 0.05$). Soaking in water increased the lightness of cassava chips due to a reduction of the non-enzymatic browning reaction of fried products in which sugar is leached out and plays an important role in color formation during frying [27]. Santis et al. [28] have found that blanching, and both water and NaCl soaking all produce paler potato chips. Many additional factors might affect the color of the fried products such as frying time, oil temperature, oil type, pre-treatment method, storage conditions, and the variety and maturity of the raw materials [28]. An increase in lightness is related to a decrease of redness in cassava chips.

However, the increase in the concentration of NaHCO_3 used to soak fresh cassava slices prior frying led to a decrease in the L^* value of cassava chips (**Table 4**) indicating increased darkness of the chips

3.3 Sensory Qualities

The effect of the method of pre-treatment on panelists' sensory scores for cassava chips are shown in **Table 4**. The liking scores of all attributes

(appearance, crispness, flavor, taste and overall liking) for cassava chips showed no significant differences ($p \geq 0.05$) among treatment. The liking score of cassava chips in appearance, crispness, flavor, taste and overall liking are in the ranges of 7.07 - 7.47, 7.07 - 7.97, 7.03 - 7.43, 7.00 - 7.87 and 7.47 - 7.93, respectively. The sensory scores of all attributes ranged from 7.00 - 8.00, indicating that panelists liked cassava chips moderately to very much. In this experiment, NaHCO_3 could be used at a concentration no higher than 2% to pre-treat fresh cassava slices because it affected the taste of cassava chips. Although, using NaHCO_3 solution could reduce the hardness of cassava chips, the sensory quality of chips with and without pre-treatment didn't change significantly.

Pearson's correlation coefficients (r) were analyzed to quantify the relationship between pre-treatment method and liking score in cassava chips (**Table 5**). Pre-treatment method revealed significant negative correlations with liking score of crispness and taste. The liking scores of all attributes (appearance, crispness, flavor and taste) were significantly positive correlations with overall liking scores.

Table 4 Effect of pre-treatment method on liking scores in cassava chips

Pre-treatment	Appearance ^{ns}	Crispness ^{ns}	Flavor ^{ns}	Taste ^{ns}	Overall liking ^{ns}
Control	7.07 ± 1.51	7.97 ± 1.03	7.43 ± 1.41 ^a	7.87 ± 1.10 ^a	7.93 ± 1.11 ^a
Water	7.07 ± 1.31	7.57 ± 1.22	7.30 ± 1.11 ^a	7.50 ± 1.33 ^a	7.63 ± 1.18 ^a
1% NaHCO ₃	7.47 ± 1.20	7.07 ± 1.64	7.03 ± 1.35 ^a	7.00 ± 1.55 ^a	7.50 ± 1.22 ^a
2% NaHCO ₃	7.47 ± 1.20	7.37 ± 1.47	7.14 ± 1.33 ^a	7.03 ± 1.47 ^a	7.47 ± 1.31 ^a

^{ns} indicate that values in the same column are not significantly different (p≥0.05)

Table 5 Pearson's correlation coefficients between pre-treatment method and liking scores in cassava chips

Attributes	Pre-treatment	Appearance	Flavor	Crispness	Taste
Appearance	0.137				
Flavor	-0.101	0.625*			
Crispness	-0.187*	0.391*	0.543*		
Taste	-0.240*	0.452*	0.566*	0.666*	
Overall liking	-0.142	0.631*	0.747*	0.691*	0.833*

* p<0.05 (two-tailed)

4. Conclusion

The pre-treatment had a significant effect on the qualities of cassava chips. Soaking cassava slices in water and sodium bicarbonate solution prior to frying increased moisture and fat content in cassava chips. The bulk density and hardness of cassava chips decreased with pre-treatment. However, pre-treatment did not change significantly on sensory quality of the cassava chips.

5. Acknowledgement

The authors wish to express their gratitude to Surat Thani Rajabhat University for the research grant used in this study.

6. References

- [1] The Nelson Company. (2018, May). Snack Market. [Online]. Available: [http:// www.brandage.com/article/6943/](http://www.brandage.com/article/6943/)
- [2] Berli Jucker Public Company Limited. (2013, July). Progressive Report. [Online]. Available: <http://www.slide share.net/purithem/bjc-ppt>
- [3] S. Mazurek, R. Szostak and A. Kita, "Application of infrared reflection and Raman spectroscopy for quantitative determination of fat in potato chips," *Journal of Molecular Structure*, vol. 1126, pp. 213-218, 2016.

- [4] C. Fauquet and D. Fargette, "African cassava mosaic virus: etiology, epidemiology, and control," *Plant Disease*, vol. 74, pp. 404-411, 1990.
- [5] Thailand board of investment, "Leading the world in cassava production," *Thailand Investment Review*, vol. 27, no. 9, pp. 3-4, 2017.
- [6] United States Department of Agriculture (USDA), Agricultural Research Service. (2016, May). National Nutrient Database for Standard Reference Release 28. [Online]. Available: <http://ndb.nal.usda.gov/ndb/foods/show/2907>
- [7] Brand Buffet. (2018). Lays-chips-sustainability. [Online]. Available: <http://www.brandbuffet.in.th/2018/12/lays-chips-sustainability/>
- [8] J.D.J. Berrios, D. Wood, L.C. Whitehand and J. Pan, "Sodium bicarbonate and the microstructure, expansion and color of extruded black beans," *Journal of Food Processing and Preservation*, vol. 28, pp. 321-335, 2004.
- [9] H.R. Shahmohammadi, J. Bakar, R.A. Rahman and N.M. Adzhan, "Studying the effects of nucleating agents on texture modification of puffed corn-fish snack," *Journal of Food Science*, vol. 79, pp. 178-183, 2014.
- [10] A.B. Ahza, T.I. Fidiena and S. Suryatman, "Physical, sensorial and chemical characteristics of simulated chips of cassava (*Manihot esculenta* Crantz): Rice (*Oryza sativa* L.) mix.," *Procedia Food Science*, vol. 3, pp. 82-95, 2015.
- [11] P. Garcia-Segovia, A.M. Urbano-Ramos, S. Fiszman and J. Martinez-Monzo, "Effect of processing conditions on the quality of vacuum fried cassava chips (*Manihot esculenta* Crantz)," *LWT-Food Science and Technology*, vol. 69, pp. 515-521, 2016.
- [12] A. Kita, G. Lisinska and G. Gołubowska, "The effects of oils and frying temperatures on the texture and fat content of potato crisps," *Food Chemistry*, vol. 102, pp. 1-5, 2007.
- [13] F. Pedreschi, S. Mariotti, K. Granby and J. Risum, "Acrylamide reduction in potato chips by using commercial asparaginase in combination with conventional blanching," *LWT-Food Science and Technology*, vol. 44, pp. 1473-1476, 2011.
- [14] X. Hua, K. Wang, R. Yang, J. Kang and H. Yang, "Edible coatings from sunflower head pectin to reduce lipid uptake in fried potato chips," *LWT-Food Science and Technology*, vol. 62, pp. 1220-1225, 2015.
- [15] Y. Su, W. Zhang, B. Adhikari and Z. Yang, "Application of novel microwave-assisted vacuum frying to reduce the oil uptake and improve the quality of potato chips," *LWT-*

- Food Science and Technology*, vol. 73, pp. 490-497, 2016.
- [16] L. Yu, J. Li, S. Ding, F. Hang and L. Fan, "Effect of guar gum with glycerol coating on the properties and oil absorption of fried potato chips," *Food Hydrocolloids*, vol. 54, pp. 211-219, 2016.
- [17] F. Bouaziz, M. Koubaa, M. Neifar, S. Zouari-Ellouzi, S. Besbes, F. Chaari, A. Kamoun, M. Chaabouni, S.E. Chaabouni and R.E. Ghorbel, "Feasibility of using almond gum as coating agent to improve the quality of fried potato chips: Evaluation of sensorial properties," *LWT-Food Science and Technology*, vol. 65, pp. 800-807, 2016.
- [18] R. Sothornvit, "Edible coating and post-frying centrifuge step effect on quality of vacuum fried banana chips," *Journal of Food Engineering*, vol. 107, pp. 319-325, 2011.
- [19] N. Akdeniz, S. Sahin and G. Sumnu, "Functionality of batters containing different gums for deep-fat frying of carrot slices," *Journal of Food Engineering*, vol. 75, pp. 522-526, 2006.
- [20] S. Albert and G.S. Mittal, "Comparative evaluation of edible coatings to reduce fat uptake in a deep-fried cereal product," *Food Research International*, vol. 35, pp. 445-458, 2002.
- [21] AOAC, *Official Methods of Analysis of Association of Official Analytical Chemists*, 18th ed. Washington, DC: The Association of official analytical chemist, 2010.
- [22] K.H. Wagner and I. Elmadfa, "Chemical and Biological Modulations of Frying Fats – Impact on Fried Food," in *Frying of Food*, D. Boskou and I. Elmadfa, Ed. Boca Raton: CRC Press, 2011, pp. 251-264.
- [23] D. Dana and S. Saguy, "Review: Mechanism of oil uptake during deep-fat frying and the surfactant effect-theory and myth," *Advance Colloid Interface Science*, vol. 128, pp. 267-272, 2006.
- [24] F. Pedreschi, P. Moyano, K. Kaack and K. Granby, "Color changes and acrylamide formation in fried potato slices," *Food Research International*, vol. 38, pp. 1-9, 2005.
- [25] R.G. Morcira, X. Sun and Y. Chen, "Factors affecting oil uptake in tortilla chips in deep-fat frying," *Journal of Food Engineering*, vol. 31, pp. 485-498, 1997.
- [26] E. Llorca, I. Hernando, I. Perez-Munuera, S.M. Fiszman and M.A. Lluch, "Effect of frying on the microstructure of frozen batter coated squid rings," *European Food Research and Technology*, vol. 213, pp. 448-455, 2001.

- [27] F. Pedreschi, P. Moyano, K. Kaack and K. Granby, "Color changes and acrylamide formation in fried potato slices," *Food Research International*, vol. 38, pp. 1-9, 2005.
- [28] N. Santis, F. Mendoza, P. Moyano, F. Pedreschi and P. Dejmek, "Soaking in a NaCl solution produce paler potato chips," *LWT-Food Science and Technology*, vol. 40, pp. 307-312, 2007.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การจำลองพฤติกรรมการเผาไหม้ของเตาประหยัดแก๊ส S-10 ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

ภัทราวรรณ ชิมชม¹ อนิรุตต์ มัทธจักร^{1*} มานะ วิชางาม¹ ธนรัฐ ศรีวีระกุล¹
และ เสฏฐวรธ สัจจิตภวัตสกุล²

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

² ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (MTEC)

¹ 85 ถนนโชคชัย-เดชอุดม ตำบลเมืองศรีโค อำเภวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี 34190

² 114 อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย ถนนพหลโยธิน ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

รับบทความ 8 กรกฎาคม 2562 แก้ไขบทความ 8 พฤษภาคม 2563 ตอรับบทความ 13 พฤษภาคม 2563

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของเตาประหยัดแก๊ส S-10 ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) ในการสร้างแบบจำลองใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Fluent 6.3 เพื่อสร้างแบบจำลอง 3 มิติ (3D Model) ที่มีขนาดเท่ากับเตาจริง โดยทำการศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของเตาที่ความดันแก๊สแอลพีจีเท่ากับ 4 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ซึ่งพฤติกรรมการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นจะถูกแสดงผลในรูปของเวกเตอร์ความเร็วและแถบสีอุณหภูมิ การจำลองจะถูกยืนยันผลกับการทดลองด้วยการวัดความเร็วของของไหลและอุณหภูมิการเผาไหม้รอบภาชนะ จากการศึกษา พบว่า ความเร็วของของไหลและการกระจายตัวของอุณหภูมิการเผาไหม้ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของเตา ที่ได้จากแบบจำลองและการทดลองมีค่าความสอดคล้องกันโดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 10.35 และ 11.87 เมื่อเทียบผลความเร็วและอุณหภูมิกับการทดลองตามลำดับ แบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถอธิบายพฤติกรรมการไหลและการเผาไหม้ของเตาประหยัดแก๊ส S-10 ได้อย่างชัดเจน นอกจากนี้จากผลการจำลองจะแสดงให้เห็นว่า สามารถใช้แบบจำลองดังกล่าวนี้ไปประยุกต์ใช้เพื่อออกแบบและปรับปรุงประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาประหยัดแก๊ส S-10 ให้สูงขึ้นต่อไปได้ในอนาคต

คำสำคัญ : พฤติกรรมการเผาไหม้; เตาประหยัดแก๊ส S-10; พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +66 4535 3309, อีเมล: anirut.m@ubu.ac.th

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Simulation on Combustion Behavior of Gas-saving Burner S-10 by Computational Fluid Dynamics

Phattharawan Chimchom¹ Anirut Matthujak^{1*} Mana Wichangarm¹

Thanarath Sriveerakul¹ and Sedthawatt Sucharitpwatskul²

¹ Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University

² National Metal and Materials Technology Center, National Science and Technology Development Agency

¹ 85 Chokchai-Det Udom Rd., Mueang Si Khai Sub-district, Warin Chamrap District, Ubon Ratchathani 34190

² 114 Thailand Science Park, Phahonyothin Road, Khlong Nueng, Khlong Luang, Pathum Thani 12120

Received 8 July 2019; Revised 8 May 2020; Accepted 13 May 2020

Abstract

The objective of this research is to study the combustion behavior of a gas-saving burner S-10 using computational fluid dynamics (CFD). The simulation model was created using Fluent 6.3 in 3D-model of the same size of the burner. LPG pressure of 4 psi was released for this study. The combustion behavior was shown in temperature contour and velocity vector. The CFD results were verified by measuring the temperature around the burner head with a vessel. From the study, it was found that the CFD's results of flow velocity and combustion temperature distributions were validated with the experimental values. The CFD's result errors were less than 10.35% and 11.87%, comparing with the velocity and temperature measurement, respectively. The fluid flow and combustion behaviors can be described by this CFD model. Moreover, the CFD model of the gas-saving burner S-10 can be applied to improve the thermal efficiency of the burner in the future.

Keywords : Combustion Behavior; Gas-saving Burner S-10; CFD

* Corresponding Author. Tel.: +66 4535 3309, E-mail Address: anirut.m@ubu.ac.th

1. บทนำ

จากสถานการณ์ในปัจจุบันทั่วโลกประสบปัญหาวิกฤตการณ์ด้านพลังงาน เนื่องจากพลังงานที่ใช้มีปริมาณลดลงและราคาพลังงานยังมีมูลค่าเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการใช้พลังงานให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด จากสถิติการใช้พลังงานของกระทรวงพลังงาน [1] พบว่า ประเทศไทยมีการใช้เชื้อเพลิงปิโตรเลียมเหลวหรือแก๊สแอลพีจี (Liquefied Petroleum Gas, LPG) อย่างกว้างขวาง ซึ่งแก๊สแอลพีจีเป็นส่วนผสมของโพรเพน (Propane) และบิวเทน (Butane) หรือเป็นอย่างใดอย่างหนึ่ง เนื่องจากแก๊สแอลพีจีมีค่าความร้อนสูง เป็นเชื้อเพลิงสะอาดเผาไหม้ได้สมบูรณ์และสะดวกต่อการใช้งาน จึงเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในครัวเรือน ร้านอาหาร อุตสาหกรรม รถยนต์ และอื่น ๆ โดยภาคครัวเรือนจะเป็นภาคส่วนที่มีปริมาณการใช้แก๊สแอลพีจีสูงเป็นอันดับหนึ่งหรือสองของทุก ๆ ปี ซึ่งจะถูกนำไปใช้ในเตาแก๊สหุงต้มเพื่อเปลี่ยนค่าความร้อนของเชื้อเพลิงให้กลายเป็นพลังงานความร้อนในรูปแบบของเปลวไฟ แต่เนื่องจากลักษณะของเปลวไฟของเตาแก๊สหุงต้มที่ใช้เป็นแบบพุ่งชน (Impinging Flame Jet) ซึ่งจะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนที่สูง และต้องใช้ปริมาณแก๊สแอลพีจีค่อนข้างมาก [2] แต่ด้วยลักษณะของเปลวไฟที่ให้ความร้อนแก่ภาชนะเป็นลักษณะเปิดสู่บรรยากาศ จึงทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนเป็นจำนวนมาก ทำให้ไม่สามารถนำความร้อนมาใช้ประโยชน์ได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ อีกทั้งยังมีการสูญเสียความร้อนเป็นจำนวนมากไปกับแก๊สไอเสียโดยการพาความร้อน (Convection) และสูญเสียพลังงานความร้อนของเปลวไฟจากการแผ่รังสีความร้อน (Radiation) อีกด้วย ทำให้เตาแก๊สหุงต้มที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal Efficiency, η_{th}) ที่ค่อนข้างต่ำเฉลี่ยร้อยละ 35 [3] ดังนั้นที่ผ่านมามีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนอย่างแพร่หลาย

โดยในปี ค.ศ. 1989 A. Tamir et al. [4] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาหุงต้มที่ใช้แก๊สธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง โดยการปรับปรุงจากหัวเตาแก๊สแบบทั่วไป (Conventional Burner, CB) ให้เป็นหัวเตาแก๊สแบบหมุนวน (Swirl Burner, SB) ซึ่งพบว่า เตา SB ที่ให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดจะมีลักษณะเฉพาะคือ มุมม้วน (Inclination Angle, β) เท่ากับ 26 องศา และมุมเอียง (Swirl Angle, α) เท่ากับ 15 องศา โดยประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตา SB เพิ่มขึ้นร้อยละ 6 ซึ่งเป็นผลจากการหมุนวนของเปลวไฟ โดยแรงเฉื่อยจะส่งเสริมปัจจัยบวกต่าง ๆ คือระยะเวลาในการผสมของเชื้อเพลิงและอากาศ เวลาในการสัมผัสของเปลวไฟกับภาชนะ และการดึงดูดอากาศส่วนที่สอง (Secondary Air) เพิ่มขึ้น

ค.ศ. 1996 S. Jugjai et al. [5] ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนใน Porous Radiant Recirculated Burner (PRRB) มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนให้มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพิ่มขึ้น โดยการทำให้มีการหมุนเวียนของพลังงานความร้อนจากไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ นำกลับมาอุ่นอากาศก่อนที่จะเข้าไปผสมกับเชื้อเพลิงภายในห้องเผาไหม้ (Preheat) จากการทดลอง พบว่าการอุ่นอากาศปฐมภูมิ (Primary Air) ทำให้เตา PRRB มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่าการอุ่นอากาศทุติยภูมิ (Secondary Air) ส่งผลให้เตาแก๊สแบบ PRRB มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่าเตาแก๊สที่ใช้กันทั่วไป

ค.ศ. 2007 U. Makmool et al. [6] ศึกษาเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนชนิดแรงดันต่ำที่ใช้ในประเทศไทยตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 2312-2549 เป็นเตาแรงดันต่ำมีปริมาณการใช้แก๊สสูงสุดของแต่ละหัวเตาไม่เกิน 0.42 กิโลกรัมต่อชั่วโมง (kg/hr) หรือ 5.78 กิโลวัตต์ (kW) โดยทำการศึกษาด้วยวิธี Particle Image Velocimetry (PIV) เพื่อประเมินประสิทธิภาพเชิงความร้อนและวัดการปล่อย

แก๊ส CO พบว่า รูปแบบการจัดวางอุปกรณ์ การไหลของเปลวไฟเหมือนกันและปล่อยแก๊ส CO ในอัตราใกล้เคียงกัน (80–120 ส่วนในล้านส่วน (ppm)) แต่จะต่างกันที่ประสิทธิภาพเชิงความร้อน

ในปี ค.ศ. 2014 P. Boggavarapu et al. [7] ทำการศึกษาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของหัวเตาแก๊สด้วย CFD ร่วมกับการทดลอง โดยใช้เชื้อเพลิง คือ Liquefied Petroleum Gas (LPG) และ Piped Natural Gas (PNG) ในรูปแบบ 3 มิติ รูปแบบการไหลแบบ Steady State และการถ่ายเทความร้อนที่ผิวหม้อเกิดจากการเผาไหม้ที่เตาแก๊ส ซึ่งจะอธิบายเกี่ยวกับการไหลและการถ่ายเทความร้อน ในการศึกษาได้มีการดัดแปลงโดยเพิ่ม Circular Insert และ Radiant Sheet ที่บริเวณรอบ ๆ หัวเตาแก๊ส ซึ่งจากการทำนายด้วย CFD ของหัวเตาที่มีการดัดแปลงพบว่า ที่อัตราการไหลของ LPG สูงสุด ประสิทธิภาพเชิงความร้อนจะเพิ่มขึ้นร้อยละ 4.9 ส่วนผลการทำนายของ PNG พบว่าอุณหภูมิจะลดลงเนื่องจากพลังงานของเชื้อเพลิงผสมกับอากาศน้อยกว่า จากผลการทดลอง พบว่า แบบจำลองสามารถนำมาปรับปรุงประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สได้

ปี พ.ศ. 2556 N. Piyaprai et al. [8] ได้นำวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) ในรูปแบบการไหลแบบปั่นป่วน k-ε ชนิด RNG คำนวณร่วมกับแบบจำลอง Species Transport แบบไม่มีปฏิกิริยาการเผาไหม้ มาช่วยศึกษาคุณลักษณะและพฤติกรรมการไหลผสมของอากาศและแก๊สเชื้อเพลิงภายในหัวเตา KB-5 ที่ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของแก๊สเชื้อเพลิงต่างกันจนได้ผลเป็นที่น่าพอใจ นอกจากนี้ยัง พบว่าผลการทำนายค่าการเหนี่ยวนำอากาศส่วนแรกใกล้เคียงกับผลจากการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากแบบจำลองกับผลการคำนวณจากสมการเชิงความร้อน มีความสอดคล้องกัน

อย่างไรก็ตามจากการศึกษาที่ผ่านมา พบว่าการพัฒนาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาในด้านการทดลอง ถึงแม้ว่าจะมีการศึกษาด้วยวิธี CFD บ้างแล้วก็ตาม แต่เตาแก๊สที่ทำการศึกษาส่วนใหญ่จะเป็นเตาแก๊ส KB-5 เท่านั้น ถึงแม้ว่าจะมีการศึกษาเตาแก๊ส KB-8 และ KB-10 แต่การศึกษาวิจัยทั้งหมดที่ผ่านมาเป็นการศึกษาในด้านการทดลองเท่านั้น นอกจากนี้เตา KB-8 และ KB-10 ยังมีการคิดค้นรูปแบบเตาแก๊สที่มีลักษณะคล้ายกับเตา KB-10 ซึ่งเรียกว่า เตาประหยัดแก๊ส S-10 [9] ดังแสดงในรูปที่ 1 และจากการศึกษาเบื้องต้น พบว่า เตาประหยัดแก๊ส S-10 มีการเผาไหม้ที่รุนแรงกว่าเตา KB-10 ทั่วไป โดยมีลักษณะเปลวไฟที่ดี ไม่มีเขม่า แสดงถึงการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ถึงแม้ว่าจะเป็นเตาที่มีลักษณะการเผาไหม้ที่ดีก็ตาม แต่ยังไม่มีการวิจัยใดที่ทำการศึกษาพฤติกรรม การเผาไหม้ของเตาประหยัดแก๊ส S-10 ดังกล่าวเลย

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของเตาประหยัดแก๊ส S-10 ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณร่วมกับการทดลอง เพื่ออธิบายพฤติกรรมการไหลและการเผาของเตาประหยัดแก๊ส S-10 เพื่อนำไปสู่การพัฒนาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาต่อไปในอนาคต



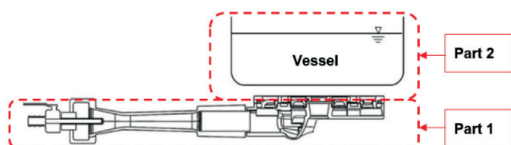
รูปที่ 1 เตาประหยัดแก๊ส S-10 [9]

2. ระเบียบวิธีวิจัย

ในงานวิจัยนี้แบ่งการศึกษออกเป็น 2 วิธี คือ การจำลองด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณและการทดลอง โดยมีขั้นตอนดังนี้

2.1 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

การจำลองด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของการศึกษานี้แบ่งขอบเขตการศึกษาเป็น 2 ส่วน (Part) คือ ส่วนที่ 1 (Part 1) เป็นการจำลองพฤติกรรมการไหลของของไหลภายในเตา กรณีไม่มีการเผาไหม้ และส่วนที่ 2 (Part 2) เป็นการจำลองพฤติกรรมการเผาไหม้ ดังแสดงในรูปที่ 2 ในการวิเคราะห์ ประมวลผล และแสดงผล ของการจำลอง Part 1 และ Part 2 จะใช้ FLUENT 6.3 โดยขั้นตอนก่อนการวิเคราะห์ ประมวลผล และแสดงผลนั้นจะทำการสร้างขอบเขตพื้นที่ กริด กำหนดเงื่อนไขขอบเขต และค่าตัวแปรต่าง ๆ กับการไหลของของไหลในส่วนที่ 1 และส่วนที่ 2 ที่แตกต่างกัน



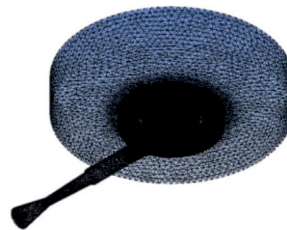
รูปที่ 2 บริเวณที่ใช้ในการศึกษาของแบบจำลองพฤติกรรมเผาไหม้ของเตาทั้ง 2 ส่วน

2.1.1 การจำลองในส่วนที่ 1 (Part1) กรณีไม่มีการเผาไหม้ (Cold Test Simulation)

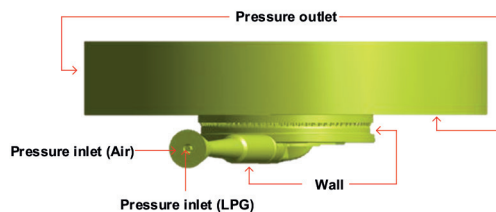
การจำลองของ Part 1 มีจุดประสงค์คือ เพื่อยืนยันผลของความเร็วที่ตำแหน่งต่าง ๆ จาก CFD และการทดลองและเพื่อนำผล Mass Fraction ของ C_3H_8 , C_4H_{10} , N_2 และ O_2 และ Mass Flow Rate ของ Mixture (air + LPG) ที่ได้จาก Part 1 บริเวณทางออกของรูหัวเตาไปกำหนดเป็น Inlet Data ของการจำลองใน Part 2

การจำลองในส่วนที่ 1 เริ่มจากการสร้างขอบเขตพื้นที่ของอากาศภายในเตาประหยัดแก๊ส S-10 ด้วยแบบจำลองในลักษณะ 3 มิติ (3D-model) ที่มีขนาดเท่ากับเตาจริง จากการศึกษาจำนวนกริดที่เหมาะสม (Grid Independent) โดยมีความละเอียดที่แตกต่างของจำนวน กริด ดังนี้ 9,497,524 Elements, 7,358,371 Elements, 4,535,482 Elements, 2,739,332 Elements และ 1,635,074 Elements

และเมื่อเปรียบเทียบผลของแบบจำลองกับการทดลองพบว่า มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 9.02, 9.24, 9.33, 10.28 และ 11.06 ตามลำดับ รูปแบบกริดเป็นรูปทรงสามเหลี่ยมสี่ด้าน (Tetrahedral Grid) จากการศึกษาจำนวนกริดที่เหมาะสมจะเลือกใช้กริดขนาด 4,535,482 Elements ดังแสดงในรูปที่ 3ก)



ก) กริดที่ใช้ในการศึกษา (Mesh)



ข) เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions)

รูปที่ 3 กริดที่ใช้ในการศึกษา และเงื่อนไขขอบเขตการคำนวณส่วนที่ 1 (Part1)

สำหรับเงื่อนไขขอบเขตของส่วนที่ 1 กำหนดให้ทางเข้าในส่วนของ LPG กำหนดเป็น Pressure Inlet (LPG) คือ 4 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) เท่ากับความดันที่ใช้ในการทดลอง ส่วนบริเวณ Primary Air และบริเวณ Secondary Air กำหนดเป็น Pressure Inlet (Air) ปากเตาด้านบนกำหนดเป็น Pressure Outlet และบริเวณหัวเตากำหนดเป็น Wall แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG K-ε วิเคราะห์ร่วมกับ Species Transport Model ซึ่งเป็นการไหลแบบผสมและไม่มีการทำปฏิกิริยากัน และไม่มีการเผาไหม้ กำหนดอัตราส่วนโพรเพน:บิวเทน เป็น 70:30 [9] และพิจารณาการไหลแบบคงที่ (Steady State) สำหรับเงื่อนไขการคำนวณของ CFD แสดงในรูปที่ 3 ข) และตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เงื่อนไขขอบเขตการคำนวณส่วนที่ 1

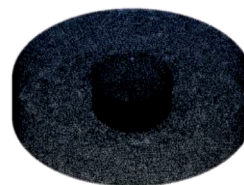
BOUNDARY CONDITION	MODEL
INLET BOUNDARY CONDITION	AIR GAUGE PRESSURE INLET = 0 Pa
	LPG GAUGE PRESSURE INLET = 4 psi
OUTLET BOUNDARY CONDITION	PRESSURE OUTLET (AIR GAUGE, PRESSURE OUTLET = 0 Pa)
SOLVER	PRESSURE BASE
TIME	STEADY STATE
NEAR-WALL TREATMENT METHOD	STANDARD WALL FUNCTION
TURBULENCE MODEL	RNG K-ε MODEL
OTHER	SPECIES TRANSPORT
PROPANE: BUTANE	70 : 30

2.1.2 การจำลองในส่วนที่ 2 (Part2) กรณีมีการเผาไหม้ (Hot Test Simulation)

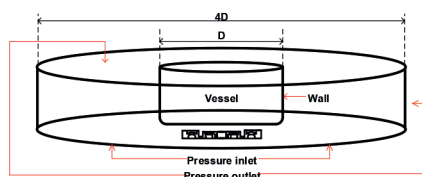
การจำลองของส่วนที่ 2 มีจุดประสงค์คือ เพื่อยืนยันผลของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ จาก CFD กับ การทดลอง

การจำลอง Part 2 เริ่มจากการสร้างขอบเขตพื้นที่ของอากาศรอบ ๆ หัวเตาประหยัดแก๊ส S-10 และหม้อของแบบจำลองในลักษณะ 3 มิติ (3D - Model) ที่มีขนาดเท่ากับเตาจริง จากการศึกษาจำนวนกริดที่เหมาะสม (Grid Independent) โดยมีความละเอียดที่แตก ต่างของจำนวน กริด ดังนี้ 5,846,432 Elements, 4,138,935 Elements, 2,965,681 Elements, 1,857,495 Elements และ 998,482 Elements และเมื่อเปรียบเทียบผลของแบบจำลองกับการทดลอง พบว่า มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 11.01, 11.19, 11.25, 12.38 และ 13.06 ตามลำดับ รูปแบบกริดเป็นรูปทรงสามเหลี่ยม

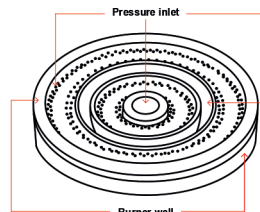
สี่ด้าน (Tetrahedral Grid) จากการศึกษาจำนวนกริดที่เหมาะสมจะเลือกใช้กริดขนาด 2,965,681 elements ดังแสดงในรูปที่ 4 ก)



ก) Mesh



ข) Boundary Conditions



ค) Burner head

รูปที่ 4 กริดที่ใช้ในการศึกษา และเงื่อนไขขอบเขตการคำนวณ Part 2

สำหรับเงื่อนไขขอบเขตของส่วนที่ 2 กำหนดให้ขอบเขตของอากาศรอบ ๆ หัวเตาเป็น Pressure Outlet หม้อเหนือหัวเตามีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (D) 450 มิลลิเมตร (หม้อเบอร์ 45) และมีความสูงเท่ากับระดับน้ำในหม้อที่ใช้ในการทดลองคือ 210 มิลลิเมตร กำหนดให้ผนังหม้อมีอุณหภูมิคงที่เท่ากับ 395 เคลวิน เนื่องจากงานนี้เป็นงานที่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้ซึ่งจะมีการกระจายอุณหภูมิที่บริเวณหัวเตาระยะที่ห่างจากหม้อจึงสำคัญ งานวิจัยนี้กำหนดระยะห่างจากผนังหม้อเท่ากับ 4D แสดงรูปที่ 4 ข) สำหรับผนังของ

ห้เตากำหนดเป็น Wall และกำหนดรูห้เตาเป็น Mass Flow Inlet ซึ่ง Mass Fraction ของ C_3H_8 , C_4H_{10} , N_2 และ O_2 และ Mass Flow Rate ของ LPG ได้จาก ผลการคำนวณ CFD ของ Part 1 สำหรับเงื่อนไข การคำนวณของ CFD ทำการกำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขต จากงานวิจัยของ Boggavarapu และคณะ [7] แสดง ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เงื่อนไขขอบเขตการคำนวณส่วนที่ 2

BOUNDARY CONDITION	MODEL
INLET BOUNDARY CNDITION	MASS FLOW INLET (Part 1)
	MASS FRACTION OF C_3H_8 , C_4H_{10} , N_2 and O_2 (Part 1)
OUTLET BOUNDARY CONDITION	PRESSURE OUTLET (AIR GAUGE, PRESSURE OUTLET = 0 Pa)
SOLVER	PRESSURE BASE
TIME	STEADY STATE
NEAR-WALL TREATMENT METHOD	STANDARD WALL FUNCTION
TURBULENCE MODEL	STANDARD K-ε MODEL
RADIATION MODEL	DISCRETE ORDINATES (DO) RADIATION MODEL
COMBUSTION MODEL	EDDY DISSIPATION MODEL

โดยทั่วไปสมการที่เกี่ยวข้องในการแก้ปัญหาคา
ไหลของของไหลจะประกอบด้วย สมการอนุรักษ์มวล
(Mass-conservation Equation), สมการอนุรักษ์
พลังงาน (Energy Conservation Equation), และ
สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum Conservation
Equation) ในการคำนวณ ดังนี้

1. สมการอนุรักษ์มวล

ในกรณีไหลอยู่ในสภาวะคงที่ $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

โดยที่

ρ คือ ความหนาแน่น

u คือ ความเร็วของของไหลในแนวแกน x

v คือ ความเร็วของของไหลในแนวแกน y

w คือ ความเร็วของของไหลในแนวแกน z

2. สมการอนุรักษ์พลังงาน

ในกรณีสภาวะคงที่ $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$

$$\begin{aligned} u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} + \sigma(T_s^4 - T_s^\infty) \\ = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q'' \end{aligned} \quad (2)$$

โดยที่

$q'' = \dot{W}_A \Delta H$ คือ พลังงานที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีต่อ
หน่วยปริมาตรของของไหล

$\alpha = \frac{k}{\rho c}$ คือ ค่าสภาพการแพร่กระจายความร้อน
ของวัสดุ

$\sigma(T_s^4 - T_s^\infty)$ คือ สมการการแผ่รังสีความร้อน

3. สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

ในกรณีสภาวะคงที่ $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$

$$\begin{aligned} \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} \\ = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right) \end{aligned} \quad (3)$$

โดยที่

ρ คือ ความหนาแน่น

u คือ ความเร็วของของไหลในแนวแกน x

v คือ ความเร็วของของไหลในแนวแกน y

w คือ ความเร็วของของไหลในแนวแกน z

4. สมการอนุรักษ์มวลย่อย

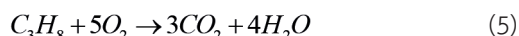
เนื่องจากการถ่ายเทพลังงานและการถ่ายโอนมวลที่มีความคล้ายกัน ดังนั้นด้วยวิธีการเดียวกันกับการหาสมการอนุรักษ์พลังงาน, สมการอนุรักษ์มวลย่อยดังสมการที่ 4

$$\rho u \frac{\partial Y_A}{\partial x} + \rho v \frac{\partial Y_A}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \rho D_A \frac{\partial Y_A}{\partial y} + \dot{W}_A^m \quad (4)$$

5. สมการปฏิกิริยาการเผาไหม้

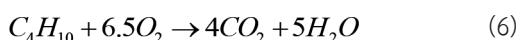
รูปแบบปฏิกิริยาเคมีสำหรับการเผาไหม้ที่มีสารประกอบของโพรเพน (Propane) และ สารประกอบบิวเทน (Butane) ดังต่อไปนี้

สารประกอบโพรเพน (Propane)



$$R_1 = \frac{d[C_3H_8]}{dt} = -8.6 \times 10^{11} \exp \left[\frac{-30}{R_u T} \right] [C_3H_{10}]^{0.15} [O_2]^{1.65}$$

สารประกอบบิวเทน (Butane)

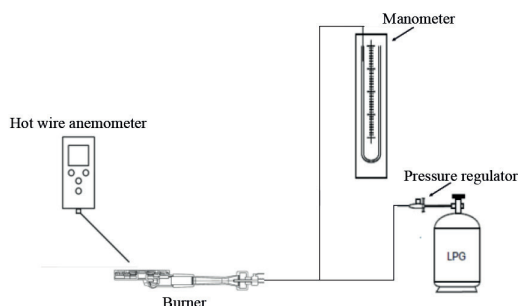


$$R_1 = \frac{d[C_4H_{10}]}{dt} = -7.4 \times 10^{11} \exp \left[\frac{-30}{R_u T} \right] [C_4H_{10}]^{0.15} [O_2]^{1.60}$$

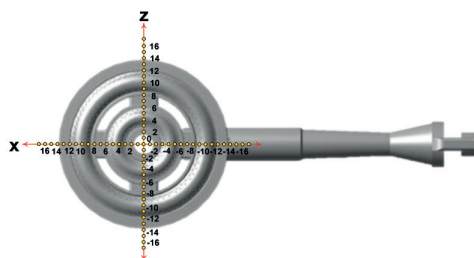
2.2 การทดลอง

2.2.1 การวัดความเร็วของของไหล

การวัดความเร็วของของไหลโดยไม่มีการเผาไหม้ทำได้โดยใช้เครื่องวัดความเร็วแบบ Hot-wire Anemometer ยี่ห้อ Testo-435 โดยมีความคลาดเคลื่อน 0.03 เมตรต่อวินาที หรือร้อยละ 5 ของค่าที่อ่านได้ ในการทดลองเริ่มโดยการเปิดแก๊สที่ความดัน 4 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว โดยที่ไม่มีการจุดติดไฟและวัดความเร็วของของไหลที่ตำแหน่งต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยทำการวัด 3 ซ้ำ และนำผลที่ได้เปรียบเทียบกับผลการจำลองในส่วนที่ 1



ก)



ข)

รูปที่ 5 ก) แผนผังชุดทดลองการวัดความเร็วของของไหล ข) ตำแหน่งวัดความเร็วของของไหล (หน่วย: เซนติเมตร)

2.2.2 การวัดอุณหภูมิ

ก่อนการทดสอบต้องจุดเตาแก๊สโดยเปิดลิ้นควบคุมแก๊สที่ตำแหน่งเปลวไฟสูงสุดเป็นเวลา 15 นาที เพื่อจัดตั้งที่เคลือบหรือตกแต่งเตา ซึ่งอาจมีผลกระทบต่อ การทดสอบ จากนั้นตั้งเตาไว้ให้เย็นลงจนมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้องแล้วจึงนำไปทดสอบ ดังนี้

1. ติดตั้งวัสดุและอุปกรณ์ที่จำเป็นเพื่อใช้ในการทดสอบ เช่น ฐานรองภาชนะ, เตา S-10, ถังแก๊สแอลพีจี (LPG), ภาชนะ (หม้อเบอร์ 45) ดังแสดงในรูปที่ 6ก)

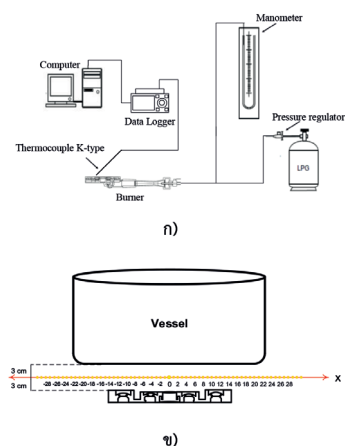
2. ชั่งน้ำหนักของน้ำเพื่อใช้ในการทดลองให้น้ำหนัก 30.6 กิโลกรัม ใส่ในภาชนะพร้อมทั้งวัดอุณหภูมิของน้ำก่อนนำไปต้ม

3. ปรับอัตราการป้อนแก๊สแอลพีจีที่ความดัน 4 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ที่ใช้ในการศึกษา

4. ต้มน้ำจนกระทั่งน้ำมีอุณหภูมิสูงประมาณ 90 องศาเซลเซียส

5. ทำการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 6 ข) โดยใช้ Thermocouple K-type ซึ่งมีความคลาดเคลื่อน ± 1.1 องศาเซลเซียส หรือร้อยละ 0.4 ของค่าที่อ่านได้ ในการวัดอุณหภูมิ และใช้ Data Logger ในการบันทึกข้อมูล

6. นำผลที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองในส่วนที่ 2



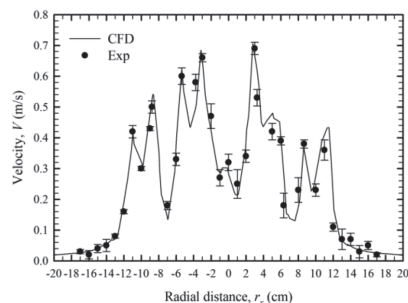
รูปที่ 6 ก) แผนผังชุดทดลองการวัดอุณหภูมิ

ข) ตำแหน่งในการวัดอุณหภูมิ (หน่วย: เซนติเมตร)

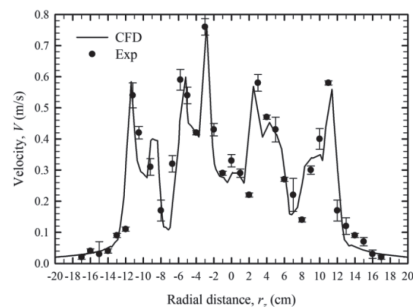
3. ผลจากการศึกษา

3.1 การเปรียบเทียบความเร็วของของไหลบริเวณรูทางออกหัวเตา

รูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบความเร็วของของไหลที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในแนวแกน x และ z (ดังในรูปที่ 5ข) พบว่า ความเร็วบริเวณใกล้กับขอบด้านข้างของเตาทั้งหัวเตาด้านในและด้านนอกจะมีค่าค่อนข้างต่ำ และความเร็วค่อย ๆ เพิ่มขึ้นบริเวณที่ใกล้รูทางออกหัวเตา ความเร็วเฉลี่ยสูงสุดจะอยู่บริเวณรูทางออกทางด้านในสุดของเตาโดยมีความเร็วสูงสุดเท่ากับ 0.72 เมตรต่อวินาที, 0.76 เมตรต่อวินาที ในแนวแกน x และ z ตามลำดับ ในขณะที่ความเร็วสูงสุดที่ได้จากการทดลองมีค่าเท่ากับ 0.7 เมตรต่อวินาที และ 0.76 เมตรต่อวินาที ในแนวแกน x และ z ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า ความเร็วของของไหลที่ได้จากแบบจำลองมีความสอดคล้องกับผลการทดลอง โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยไม่เกินร้อยละ 8.31 และ 10.35 ในแนวแกน x และ z ตามลำดับ

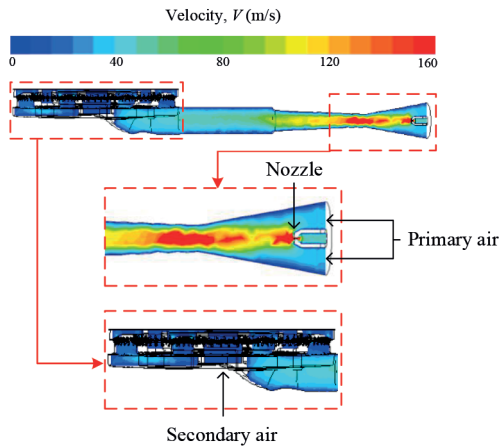


ก) แกน X

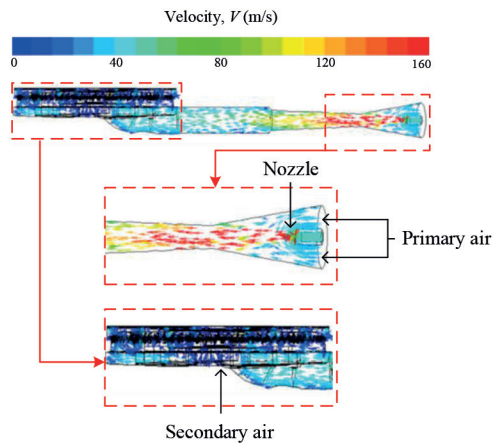


ก) แกน Y

รูปที่ 7 การเปรียบเทียบความเร็วของของไหลที่ตำแหน่งต่าง ๆ



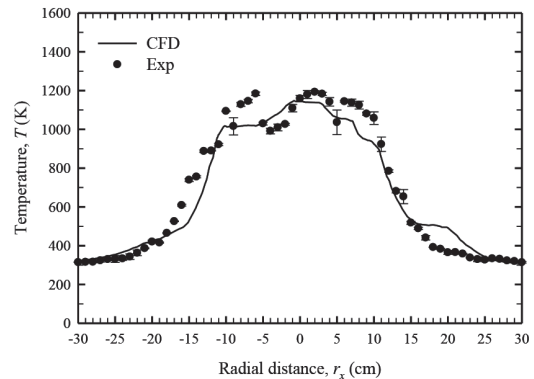
รูปที่ 8 แถบสีแสดงความเร็วที่ระนาบกึ่งกลางเตา



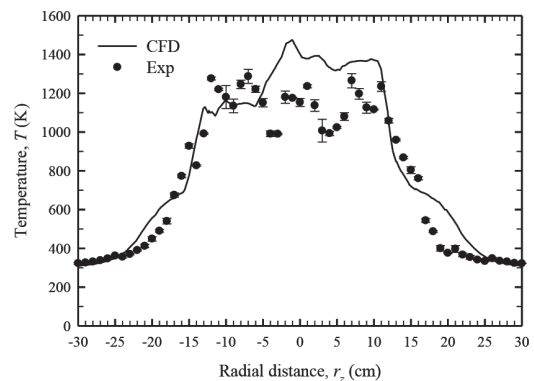
รูปที่ 9 เวกเตอร์แสดงความเร็วที่ระนาบกึ่งกลางเตา

รูปที่ 8 และรูปที่ 9 แสดงแถบสีและเวกเตอร์ความเร็วที่ระนาบกึ่งกลางเตา ตามลำดับ พบว่า การกระจายตัวของความเร็วที่ตำแหน่งต่าง ๆ โดยบริเวณหัวฉีดมีความเร็วสูงกว่าตำแหน่งอื่น ๆ เนื่องจากแก๊สแอลพีจีถูกปล่อยจากถังแก๊สด้วยแรงดันสูงผ่านหัวฉีด จึงทำให้เกิดความเร็วสูงบริเวณหัวฉีด (Nozzle) ซึ่งมีความเร็วเท่ากับ 161.31 เมตรต่อวินาที จากนั้นก็จะเหนี่ยวนำอากาศบริเวณ Primary Air เข้ามาผสมในท่อผสมก่อนเพื่อใช้ในการกระบวนการเผาไหม้ และบริเวณห้องเผาไหม้ยังมีช่องสำหรับ Secondary Air เพื่อช่วยเพิ่มอากาศในกระบวนการเผาไหม้ให้ดียิ่งขึ้น

3.2 การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ



ก) แกน X

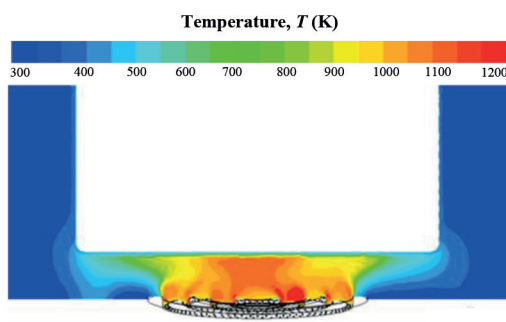


รูปที่ 10 การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ

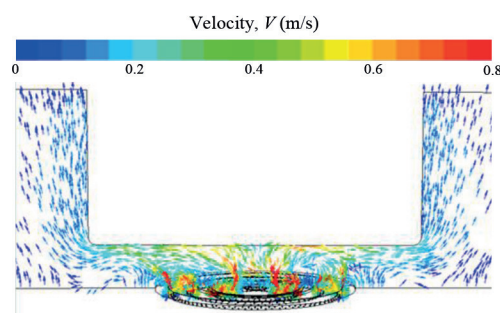
รูปที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในแนวแกน x และ z (ดังในรูปที่ 6 ก)) พบว่า การกระจายตัวของอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองมีความสอดคล้องกับการทดลองจริง โดยอุณหภูมิบริเวณหัวเตาค่อนข้างจะใกล้เคียงกัน และค่อย ๆ ลดลงตามระยะทางที่ออกห่างจากหัวเตาโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยไม่เกินร้อยละ 10.63 และ 11.87 ในแนวแกน x และ z ตามลำดับ

รูปที่ 11 แสดงแถบสีแสดงอุณหภูมิที่ระนาบกึ่งกลางเตา พบว่า การกระจายตัวของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ จากผลของแบบจำลอง โดยมีอุณหภูมิ

สูงจะอยู่บริเวณหัวเตาและค่อย ๆ ลดลงตามระยะห่างจากหัวเตา โดยอุณหภูมิสูงสุดจาก CFD มีค่าเท่ากับ 1,438.3 เคลวิน และ 1,395.05 เคลวิน ในขณะที่อุณหภูมิสูงสุดที่ได้จากการทดลองที่ตำแหน่งใกล้เคียงกันมีค่าเท่ากับ 1333.2 เคลวิน และ 1,317.1 เคลวิน ในแนวแกน x และ z ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 11 แพลตแสดงอุณหภูมิที่ระนาบกึ่งกลางเตา



รูปที่ 12 เวกเตอร์แสดงความเร็วที่ระนาบกึ่งกลางเตา

รูปที่ 12 แสดงเวกเตอร์แสดงความเร็วที่ระนาบกึ่งกลางเตา พบว่า ของผสมของแก๊สแอลพีจีและอากาศที่ไหลออกจากรูของหัวเตา จะมีความเร็วสูงสุดเท่ากับ 0.76 เมตรต่อวินาที โดยของผสมดังกล่าวจะเกิดการเผาไหม้และจะดึงอากาศส่วนที่สอง (Secondary Air) เข้ามาช่วยในการเผาไหม้ในบริเวณหัวเตา ซึ่งเป็นการส่วนให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์มากขึ้น นอกจากนี้จะพบการเกิด Vortex ที่บริเวณหัวเตา ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าการเกิด Vortex จะช่วยส่งเสริมการเผาไหม้

ให้เกิดการเผาไหม้ที่รุนแรงซึ่งสอดคล้องกับการเผาไหม้ที่รุนแรงของเตาประหยัดแก๊ส S-10 นอกจากนี้ Vortex จะยังช่วยส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนไปยังภาชนะอีกด้วย

4. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาพฤติกรรมของการเผาไหม้ของเตาประหยัดแก๊ส S-10 ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณร่วมกับการทดลอง ที่ความดัน 4 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว สามารถสรุปได้ดังนี้

1. จากการยืนยันผลการจำลองพบว่า แบบจำลองมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยไม่เกินร้อยละ 10.35 เมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วที่ได้จากการทดลอง และมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยไม่เกินร้อยละ 11.87 เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ได้จากการทดลอง

2. แบบจำลองสามารถใช้ในการอธิบายพฤติกรรมของไหลและการเผาไหม้ของเตาประหยัดแก๊ส S-10 ได้อย่างชัดเจน

3. แบบจำลองของเตาประหยัดแก๊ส S-10 สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อออกแบบและปรับปรุงประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาประหยัดแก๊ส S-10 ให้สูงขึ้นต่อไปได้ในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ นายณัฐพล ชูจิตร, นายพิทยาธ กาลพัฒน์, นายธนาธิป ทองเปราะ นักศึกษาปีที่ 4 ของห้องปฏิบัติการการประยุกต์ใช้ลำเจ็ทและการเผาไหม้ ที่ช่วยดำเนินงานวิจัย และขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี และโครงการยกระดับสมรรถนะนักวิจัยไทยเพื่อสร้างขีดความสามารถในการแข่งขัน มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ประจำปีงบประมาณ 2562 ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Energy Policy and Planning office (EPPO) Ministry of Energy. (2018). Energy statistics of Thailand 2018. [Online]. Available: <https://goo.gl/GCGy2G>
- [2] L.L. Dong, C.S. Cheung and C.W. Leung, "Heat Transfer from an Impinging Premixed Butane/Air Slot Flame Jets," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 45, no. 5, pp. 979 – 992, Feb. 2002.
- [3] W. Trewetaskson, "Efficiency Improvement of LPG Domestic Cooking Stove," M.S. thesis, Dept. Chemical. Eng., King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand, pp. 1-92, 1998.
- [4] A. Tamir, I. Elperin and S. Yotzer, "Performance Characteristics of a Gas Burner with a Swirling Central Flame," *Energy*, vol. 14, no. 7, pp. 373–382, 1989.
- [5] S. Jugjai and S. Sanitjai, "Parametric Studies of Thermal Efficiency in a Proposed Porous Radiant Recirculated Burner (PRRB): A Design Concept for the Future Burner," *International Energy Journal*, vol. 18, no. 2, pp. 97–111, Dec. 1996.
- [6] U. Makmool, S. Jugjai, S. Tia, P. Vallikul and B. Fungtammasan, "Performance and analysis by particle image velocimetry (PIV) of cooker-top burners in Thailand," *Energy*, vol. 32, no. 10, pp. 1986 – 1995, 2007.
- [7] P. Boggavarapu, B. Ray and R. V. Ravikrishna, "Thermal Efficiency of LPG and PNG-fired burners: Experimental and numerical studies," *Fuel*, vol. 166, pp. 709 – 715, 2014.
- [8] N. Piyaprai, T. Sriveerakul and A. Namkhat, "CFD Simulation for Air-Fuel Gas Mixing Flow in Mixing Tube of a KB-5 Cooking Burner," in *Proceeding of 27th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand*, Chon Buri, Thailand, 2013, Paper no. CST-2032.
- [9] PTT Public Company Limited. (2012). What is natural gas?. [Online]. Available: <https://goo.gl/2mrw7S>

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การศึกษาสมรรถนะของโรงไฟฟ้าไตรแลทเทอร์รัล ซับคริติคัล โออาร์ซี และซูเปอร์คริติคัล โออาร์ซี โดยใช้แหล่งความร้อนใต้พิภพ เป็นแหล่งพลังงาน

อนุกูล โมงปราณีต* และ อาทิตย์ คุณศรีสุข

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
111 ถ.มหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง นครราชสีมา 30000

รับบทความ 5 กรกฎาคม 2562 แก้ไขบทความ 12 พฤษภาคม 2563 ตอรับบทความ 18 พฤษภาคม 2563

บทคัดย่อ

การศึกษานี้ได้จำลองกระบวนการทำงานของโรงไฟฟ้าที่แตกต่างกัน 3 แบบ คือ ไตรแลทเทอร์รัล (TLC) โออาร์ซี ต่ำกว่าจุดวิกฤต (Subcritical Organic Rankine Cycle, ORC) และ โออาร์ซี สูงกว่าจุดวิกฤต (Supercritical ORC) โดยใช้แหล่งความร้อนใต้พิภพเป็นแหล่งพลังงาน มีอัตราการไหล 1 กิโลกรัมต่อวินาที และมีอุณหภูมิเท่ากับ 100, 110 และ 120 องศาเซลเซียส โดยใช้สารทำงานในการจำลองทั้งหมด 27 สารทำงาน พบว่า โรงไฟฟ้า Subcritical ORC ให้งานสุทธิสูงสุดเท่ากับ 4.78 และ 7.74 กิโลวัตต์ จากสารทำงาน RC318 ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100 และ 110 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ในขณะที่สาร R227ea ให้งานสุทธิสูงสุดเท่ากับ 11.85 กิโลวัตต์ ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส งานสุทธิสูงสุดของโรงไฟฟ้า Supercritical ORC เท่ากับ 5.64 และ 9.16 กิโลวัตต์ จากสารทำงาน R218 ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100 และ 110 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ในขณะเดียวกัน ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ได้งานสุทธิเท่ากับ 12.88 กิโลวัตต์ จากสารทำงาน R143a นอกจากนี้ งานสุทธิสูงสุดที่ได้จากโรงไฟฟ้า TLC จากการใช้สารทำงานเอเพน มีค่าเท่ากับ 7.96, 12.27 และ 17.38 กิโลวัตต์ ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100, 110 และ 120 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

คำสำคัญ : โรงไฟฟ้าโออาร์ซี; ความร้อนใต้พิภพ; ซับคริติคัล; ซูเปอร์คริติคัล; ไตรแลทเทอร์รัล

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 5996 9714, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: mongpraneet38@gmail.com

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Performance Investigate of Trilateral, Subcritical and Supercritical Organic Rankine Cycle Driven by Geothermal Heat Source

Anugul Mongpraneet* and Atit Koonsrisuk

School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology
111 University Road, Muang, Nakhon Ratchasima 30000

Received 5 July 2019; Revised 12 May 2020; Accepted 18 May 2020

Abstract

This study investigates three different types of power plant include a trilateral cycle (TLC), subcritical organic Rankine cycle (ORC), and supercritical ORC power plant driven by geothermal heat source with mass flow rate 1 kg/s and temperature of 100°C, 110°C and 120°C. with 27 substances were examined as the working fluid of the power plant. While the net power output of 4.78 kW and 7.74 kW is obtained from the subcritical ORC with RC318 as its working fluid when the heat source temperature are at 100°C and 110°C, respectively. Meanwhile, the net power output of 11.85 kW is obtained from the subcritical ORC with R227ea as its working fluid when the heat source temperature is at 120°C. The net power output of 5.64 kW and 9.16 kW are obtained from the supercritical ORC with R218 as its working fluid when the heat source temperature are at 100°C and 110°C, respectively. Meanwhile, the net power output of 12.88 kW is obtained from the supercritical ORC with R143a as its working fluid when the heat source temperature is at 120°C. Furthermore, the net power output of 7.96 kW, 12.27 kW, and 17.38 kW are obtained from the TLC plant with heptane as its working fluid when the heat source temperature are at 100°C, 110°C, and 120°C, respectively.

Keywords : Organic Rankine Cycle; Geothermal; Subcritical; Supercritical; Trilateral

* Corresponding Author. Tel.: +668 5996 9714, E-mail Address: mongpraneet38@gmail.com

1. บทนำ

สถานการณ์ความต้องการของพลังงานของโลกในปัจจุบันมีความต้องการมากขึ้น รวมทั้งการคำนึงถึงผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมของโลกและต้นทุนของราคาพลังงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลังงานที่เป็นเชื้อเพลิงฟอสซิล ผลกระทบของการใช้เชื้อเพลิงดังกล่าวจึงมีการกระตุ้นให้มีการค้นคว้าเทคโนโลยีที่สามารถใช้พลังงานทางเลือกเป็นแหล่งพลังงาน แทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล หนึ่งในเทคโนโลยีที่น่าสนใจ และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมคือ Organic Rankine Cycle (ORC) ที่สามารถใช้แหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำมาใช้ผลิตไฟฟ้าได้ เช่น ความร้อนใต้พิภพ แสงแดด เชื้อเพลิงชีวมวล และ ความร้อนเหลือทิ้ง เป็นต้น [1], [2] อีกทั้งเป็นเทคโนโลยีที่มีการใช้งานจริงและมีจำหน่ายในต่างประเทศ เช่น ประเทศสหรัฐอเมริกา มีบริษัท Ormat, Pratt & Whitney ในประเทศอิตาลี มีบริษัท Turboden, Exergy เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีนักวิจัยจำนวนมากที่ได้ศึกษาวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีโรงไฟฟ้า ORC ที่ใช้แหล่งความร้อนใต้พิภพเป็นแหล่งพลังงาน Z. Guzovic et al. [3], [4] ได้พิจารณาหาความเป็นไปได้ในการใช้พลังงานความร้อนใต้พิภพในประเทศโครเอเชียเพื่อนำมาใช้ในการผลิตไฟฟ้า จากการศึกษา ได้มีการเสนอโรงไฟฟ้า ORC และ Kalina Cycle เปรียบเทียบสมรรถนะ ของโรงไฟฟ้าทั้งสองแบบพบว่า โรงไฟฟ้า ORC กับโรงไฟฟ้า Kalina Cycle มีประสิทธิภาพตามกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ เท่ากับร้อยละ 13.5 และ 12.8 มีกำลังงานสุทธิ 2,225.5 และ 2,101.4 กิโลวัตต์ ตามลำดับ และโรงไฟฟ้า ORC กับโรงไฟฟ้า Kalina Cycle มีประสิทธิภาพตามกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์มากกว่า โรงไฟฟ้า Kalina Cycle เท่ากับร้อยละ 14.1 และ 10.6 มีประสิทธิภาพตามกฎข้อที่สอง เท่ากับร้อยละ 52 และ 44 กำลังงานสุทธิ 5,270 และ 3,949 กิโลวัตต์ ตามลำดับ M. Yari. [5], [6] ได้ศึกษาทั้งสมรรถนะตามกฎข้อที่ 1 และ 2 ทางเทอร์โมไดนามิกส์ของ

โรงไฟฟ้า ORC โดยใช้แหล่งความร้อนใต้พิภพเป็นแหล่งพลังงานและใช้สารทำงานประเภทแห้ง (Dry Fluid) ผลที่ได้พบว่าสารทำงาน R123 จะให้ประสิทธิภาพสูง

นอกจากนี้มีการศึกษาเปรียบเทียบโรงไฟฟ้า ORC ที่มีกระบวนการในระบบต่างกันที่เรียกว่า Subcritical ORC, Transcritical หรือ Supercritical ORC และ Trilateral K. Braimakis et al. [7] ได้ศึกษาการจำลองระบบ Subcritical ORC กับ Supercritical ORC โดยใช้ความร้อนทิ้งที่มีอุณหภูมิ 150–300 องศาเซลเซียส เป็นแหล่งพลังงาน และเปรียบเทียบการใช้สารทำงานที่เป็นแบบผสมและไม่ผสม จากผลการศึกษาพบว่า การใช้สารของผสมช่วยให้สมรรถนะของระบบเพิ่มขึ้น ทั้งใน Subcritical ORC และ Supercritical ORC เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพตามกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์พบว่า สารผสมให้ประสิทธิภาพสูงกว่าสารที่ไม่ผสม และการใช้สารผสมระหว่าง Pentane กับ Propane ในระบบ Supercritical ORC ให้ประสิทธิภาพตามกฎข้อที่สองสูงเกินกว่า ร้อยละ 60 C. Vetter et al. [8] ได้ศึกษาการจำลองเปรียบเทียบระบบ Subcritical ORC กับ Supercritical ORC โดยใช้แหล่งความร้อนใต้พิภพเป็นแหล่งพลังงาน ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 150 องศาเซลเซียส เพื่อหาทางสุทธิและประสิทธิภาพสูงสุด โดยใช้สารทำงาน Propane และ CO₂ เปรียบเทียบกับโรงไฟฟ้าที่ใช้สารทำงาน Isopentane จากผลการศึกษาพบว่า สารทำงาน Propane ที่ใช้ในระบบ Supercritical ORC ให้สมรรถนะงานสุทธิสูงสุดเท่ากับ 36.8 กิโลจูลต่อกิโลกรัม และมีประสิทธิภาพทางความร้อนเท่ากับ ร้อยละ 10.1 ซึ่งได้งานสูงกว่าระบบ Subcritical ORC ที่ใช้สารทำงาน Isopentane ประมาณร้อยละ 30 ในขณะที่ระบบ Supercritical ORC ที่ใช้สารทำงาน CO₂ ให้สมรรถนะงานสุทธิสูงสุดเท่ากับ 25.6 กิโลจูลต่อกิโลกรัม และมีประสิทธิภาพทางความร้อนเท่ากับ ร้อยละ 8 นอกจากนี้ยังมีการเปรียบเทียบ ระบบ ORC กับ Trilateral

D. Tiwari et al. [9] ได้ศึกษาระบบการวิเคราะห์ทางด้าน Energy และ Exergy ของโรงไฟฟ้า ORC และมีการเปรียบเทียบกับระบบ Trilateral ซึ่งใช้สารทำงานทั้งหมด 5 ชนิดได้แก่ R1234yf, R134a, R245fa, Ethanol และ Isopentane โดยใช้สารทำงาน R1234yf เป็นสารทำงานหลัก ซึ่งเป็นสารที่ N. Yamada et al. [10] ได้ทำการศึกษาแล้วพบว่าให้สมรรถนะสูงเมื่อใช้แหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำและปานกลาง D. Tiwari et al. [9] จึงใช้ R1234yf เปรียบเทียบกับสารข้างต้น จากผลการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพ Exergetic ของสารทำงาน R1234yf เท่ากับร้อยละ 9 ใกล้เคียงกับสาร R134a ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 10 ในระบบ ORC และเมื่อจำลองในระบบ trilateral พบว่า ประสิทธิภาพ Exergetic ของสารทำงาน R1234yf เท่ากับร้อยละ 40

สำหรับประเทศไทยมีแหล่งความร้อนใต้พิภพเป็นจำนวนมากโดยเฉพาะทางภาคเหนือ ซึ่งมีการขุดเจาะสำรวจแหล่งความร้อนใต้พิภพเพื่อนำมาใช้ผลิตไฟฟ้าซึ่งมีอุณหภูมิความร้อนในช่วง 100–120 องศาเซลเซียส [11] ในงานวิจัยนี้จึงพิจารณาใช้ช่วงอุณหภูมิดังกล่าวในการจำลองโรงไฟฟ้าทั้ง 3 ประเภท ประกอบด้วย Subcritical ORC, Supercritical ORC และ TLC เพื่อเปรียบเทียบงานสุทธิสูงสุดของแต่ละระบบที่จะผลิตได้ พร้อมทั้งค่าสมรรถนะอื่นๆ และศึกษาสารทำงานที่จะให้งานสุทธิสูงสุดในช่วงแหล่งความร้อนดังกล่าว

2. รายละเอียดของระบบที่ทำการศึกษา

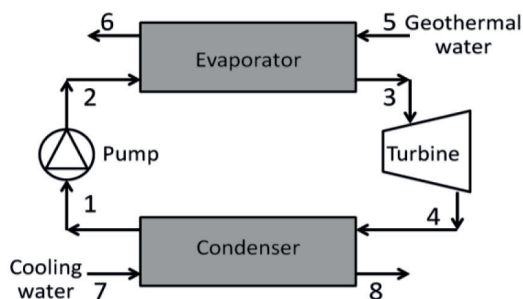
ในการศึกษานี้จำลองระบบทั้งหมด 3 แบบ ได้แก่ Subcritical ORC, Supercritical ORC และ TLC และใช้แหล่งความร้อนใต้พิภพเป็นแหล่งพลังงานซึ่งอยู่ในรูปของน้ำร้อน ในระบบมีส่วนประกอบดังแสดงในรูปที่ 1 ของโรงไฟฟ้าทั้ง 3 แบบ ประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลัก 4 ส่วนคือ Pump Evaporator Condenser และ Turbine ในแต่ละระบบมีกระบวนการทำงานดังแสดงในรูปที่ 2

1-2 กระบวนการเพิ่มความดันและสูบน้ำสารทำงานเข้าไปยังเครื่องระเหยโดยปั๊ม (Pump)

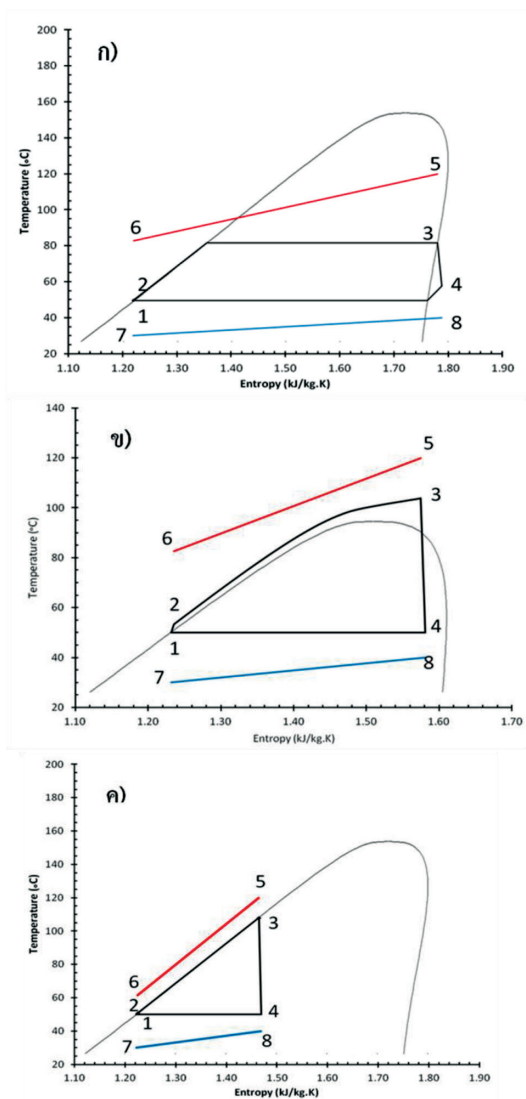
2-3 กระบวนการให้ความร้อนกับสารทำงานในเครื่องระเหย (Evaporator) โดยน้ำร้อน

3-4 กระบวนการสารทำงานขยายตัวในกังหัน (Turbine) จะทำงาน

4-1 กระบวนการดูดซับความร้อนสารทำงานให้เกิดการกลั่นตัวในเครื่องควบแน่น (Condenser) โดยน้ำหล่อเย็น



รูปที่ 1 ส่วนประกอบของ Subcritical ORC, Supercritical ORC และ TLC



รูปที่ 2 แผนภาพ อุณหภูมิ-เอนโทรปี

ก) Subcritical ORC

ข) Supercritical ORC และ ค) TLC

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษานี้ได้มีการจำลองระบบ ORC 3 แบบได้แก่ Subcritical ORC, Supercritical ORC และ TLC ซึ่งมีกระบวนการในวัฏจักรดังแสดงในรูปที่ 1 - 2 ตามลำดับ และมีสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าต่าง ๆ ดังนี้

เมื่อพิจารณาพลังงานความร้อนในเครื่องระเหย และเครื่องควบแน่นของแหล่งความร้อนและแหล่งที่ ความร้อน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1 และ 2 ของโรงไฟฟ้าทั้ง 3 แบบ

$$\dot{Q}_{hs} = \dot{m}_{hf} C_{p_{hf}} (T_5 - T_6) \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{cf} = \dot{m}_{cf} C_{p_{cf}} (T_8 - T_7) \quad (2)$$

โดยที่

$\dot{Q}$ = พลังงานความร้อน (วัตต์)

$\dot{m}$ = อัตราการไหล (กิโลกรัมต่อวินาที)

C_p = ความร้อนจำเพาะ (จูลต่อกิโลกรัม องศาเซลเซียส)

T = อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

hf = น้ำร้อน (Hot Water)

cf = น้ำหล่อเย็น (Cooling Water Fluid)

สำหรับพลังงานความร้อนที่สารทำงานได้รับ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3 และ 4

$$\dot{Q}_{evap} = \dot{m}_{wf} (h_3 - h_2) \quad (3)$$

$$\dot{Q}_{cond} = \dot{m}_{wf} (h_4 - h_1) \quad (4)$$

โดยที่

h = เอนทาลปี (จูลต่อกิโลกรัม)

$evap$ = เครื่องระเหย (Evaporator)

$cond$ = เครื่องควบแน่น (Condenser)

wf = สารทำงาน (Working Fluid)

พลังงานที่ให้แก่ปั๊ม และงานที่ได้จาก กังหัน ของ โรงไฟฟ้าทั้ง 3 แบบ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 7 และ 8

$$\eta_{i,pump} = (h_{2s} - h_1) / (h_2 - h_1) \quad (5)$$

$$\eta_{i,turb} = (h_3 - h_4) / (h_3 - h_{4s}) \quad (6)$$

$$\dot{W}_{pump} = \dot{m}_{wf}(h_2 - h_1) \quad (7)$$

$$\dot{W}_{turb} = \dot{m}_{wf}(h_3 - h_4) \quad (8)$$

โดยที่

$\eta_{i,pump}$ = ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของปั๊ม

$\eta_{i,turb}$ = ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของกังหัน

$\dot{W}_{pump}$ = งานของปั๊ม (วัตต์)

$\dot{W}_{turb}$ = งานของกังหัน (วัตต์)

งานสุทธิที่ระบบจะผลิตได้ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 9 และประสิทธิภาพทางความร้อนคำนวณได้จากสมการที่ 10

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{turb} - \dot{W}_{pump} \quad (9)$$

$$\eta_{th} = \dot{W}_{net} / \dot{Q}_{in} \quad (10)$$

โดยที่

$\dot{W}_{net}$ = งานสุทธิ (วัตต์)

η_{th} = ประสิทธิภาพทางความร้อน

อัตราส่วนการไหลเชิงปริมาตร (VFR) คำนวณได้จากสมการที่ 13

$$\dot{V}_3 = \dot{m}_{wf} \times 10^3 / \rho_3 \quad (11)$$

$$\dot{V}_4 = \dot{m}_{wf} \times 10^3 / \rho_4 \quad (12)$$

$$VFR = \dot{V}_4 / \dot{V}_3 \quad (13)$$

โดยที่

$\dot{V}_3$ = อัตราการไหลเชิงปริมาตร (ลิตรต่อวินาที)

$\dot{V}_4$ = ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

VFR = อัตราส่วนการไหลเชิงปริมาตร

ขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการ 14

$$\dot{Q} = UA\Delta T_{LM} \quad (14)$$

$$\Delta T_{LM} = \frac{(T_{hot,in} - T_{cold,out}) - (T_{hot,out} - T_{cold,in})}{\log((T_{hot,in} - T_{cold,out}) / (T_{hot,out} - T_{cold,in}))} \quad (15)$$

โดยที่

U = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (วัตต์ต่อตารางเมตรองศาเซลเซียส)

A = พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน (ตารางเมตร)

ΔT_{LM} = ความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยแบบล็อก (องศาเซลเซียส)

ในการศึกษานี้ได้ใช้ตัวแปร UA เป็นตัวแทนขนาดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และ VFR เป็นตัวแทนขนาดของกังหัน (Turbine)

4. การเลือกสารทำงาน

ในการเลือกสารทำงาน จะพิจารณาจากอุณหภูมิวิกฤตของสารทำงาน อุณหภูมิของแหล่งความร้อน และกระบวนการของโรงไฟฟ้าที่ได้ทำการศึกษา ซึ่งแบ่งเป็น 3 ระบบได้แก่ Subcritical ORC, Supercritical ORC และ TLC แต่ละระบบจะมีกระบวนการภายในแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2 สำหรับการเลือกสารทำงานที่ใช้จำลองในระบบ Subcritical ORC จะพิจารณาเลือกสารทำงานที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงกว่าแหล่งความร้อน และต่ำกว่าแหล่งความร้อนประมาณ 15 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ได้ศึกษาการเลือกสารทำงานเพื่อให้ได้งานสุทธิสูงสุด โดยการจำลองสารทำงานหลายชนิด เช่น C. He et al. [12] ศึกษาสารทำงานที่ใช้สำหรับ Subcritical ORC ซึ่งมีแหล่งความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส โดยเลือกสารทำงานกว่า 20 ชนิดมาจำลองและเปรียบเทียบผลพบว่า สารทำงานที่มีอุณหภูมิวิกฤตใกล้เคียงกับอุณหภูมิแหล่งความร้อนโดยส่วนใหญ่จะให้งานสุทธิสูง ซึ่งในงานวิจัยที่นำเสนอนี้ ได้เลือกสารทำงานที่มีอุณหภูมิวิกฤตใกล้กับอุณหภูมิแหล่งความร้อนด้วย

เช่น R134a, R227ea ไกล่แหล่งความร้อน 100 องศาเซลเซียส R12, R1234ze ไกล่แหล่งความร้อน 115 องศาเซลเซียส R124 ไกล่แหล่งความร้อน 120 องศาเซลเซียส และสารทำงานอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 1

ในส่วนของการเลือกสารทำงานที่ใช้กับระบบ Supercritical ORC จะเลือกสารทำงานที่มีอุณหภูมิวิกฤตต่ำกว่าอุณหภูมิแหล่งความร้อนเพื่อให้มั่นใจว่าอุณหภูมิและความดันของสารทำงานที่ออกจากเครื่องระเหย ณ จุดที่ 3 ในรูปที่ 2 ข) จะสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตของสารทำงาน นอกจากนี้ยังมีผลการศึกษาของ J. Haervig et al. [13] ได้ศึกษาสารทำงานที่ใช้ในระบบพบว่าสารทำงานที่ให้งานสุทธิสูงจะต้องมีอุณหภูมิวิกฤตน้อยกว่าอุณหภูมิของแหล่งความร้อนในช่วง 30–50 องศาเซลเซียส สารทำงานที่ใช้สำหรับการศึกษานี้ได้เลือกสารทำงานที่มีอุณหภูมิทั้งในช่วงและนอกช่วงอุณหภูมิดังกล่าว

นอกจากนี้สารทำงานที่เลือกใช้ในระบบ TLC ได้พิจารณาเลือกสารทำงานที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงกว่าอุณหภูมิแหล่งความร้อนเพื่อหลีกเลี่ยงโอกาสที่จะเกิดกระบวนการที่เป็น Supercritical ORC ซึ่งสารทำงานที่เลือกใช้ของทั้ง 3 ระบบแสดงในตารางที่ 1 ทั้งนี้สารทำงานที่เลือกใช้จำลองในการศึกษานี้ไม่ได้พิจารณาถึงความเป็นอันตรายและความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม หากแต่พิจารณาถึงสมรรถนะของระบบที่ได้จากการจำลองจากสารแต่ละชนิด

5. การตรวจสอบความถูกต้อง

ในการศึกษานี้เป็นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหางานสุทธิสูงสุดและค่าสมรรถนะของโรงไฟฟ้า ดังนั้นเพื่อให้แบบจำลองที่สร้างขึ้นมีความน่าเชื่อถือจึงมีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง โดยใช้ข้อมูลและผลการจำลองของโรงไฟฟ้า ORC ของ J. Fischer [14] ซึ่งได้ทำการจำลอง ORC ที่เป็น Subcritical ORC และ Supercritical ORC และ TLC โดยใช้สารทำงานในระบบ คือ Cyclopentane

ตารางที่ 1 สารทำงานที่ใช้ในการจำลอง

	Substance	P _{critical} (kPa)	T _{critical} (°C)	Type
subcritical ORC	R1216	3149.5	85.75	Dry
	R1234yf	3382.2	94.7	Isentropic
	R22	4990	96.15	Wet
	Propane	4251.2	96.74	Isentropic
	R134a	4059.3	101.06	Wet
	R227ea	2925	101.75	Dry
	R1234ze	3634.9	109.36	Isentropic
	R12	4136.1	111.97	Isentropic
	R152a	4516.8	113.26	Wet
	RC318	2777.5	115.23	Dry
	R124	3624.3	122.28	Isentropic
	R236fa	3200	124.92	Dry
	RE245cb2	2886.4	133.66	Dry
	Isobutane	3629	134.66	Dry
supercritical ORC	R142b	4055	137.11	Isentropic
	R236ea	3420	139.29	Dry
	R114	3257	145.68	Isentropic
	R245fa	3651	154.01	Dry
	R125	3617.7	66.18	Isentropic
	R218	2640	71.87	Isentropic
	R143a	3761	72.71	Wet
	R32	5782	78	Wet
	R1216	3149.5	85.78	Dry
	R1234yf	3382.2	95	Isentropic
trilateral cycle (TLC)	R1234ze	3634.9	109.36	Isentropic
	R236fa	3200	124.92	Dry
	R245fa	3651	154.01	Dry
	Isopentane	3378	187.2	Dry
	R141b	4212	204.35	Isentropic
	Cyclopentane	4571.2	238.12	Dry
	Heptane	2736	266.98	Dry

สำหรับระบบ Subcritical และ Supercritical ORC ส่วน TLC ใช้สารทำงานเป็นน้ำ ได้ผลดังตารางที่ 2 จะเห็นว่าโรงไฟฟ้าที่มีค่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุดคือ Subcritical ORC มีค่า Volume Flow Rate (V_3) คลาดเคลื่อนร้อยละ 4.19 ซึ่งเกิดจากการใช้โปรแกรมคำนวณคุณสมบัติของสารทำงานต่างกัน จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนดังกล่าว ทั้งนี้ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นมีค่าไม่เกินร้อยละ 5 ซึ่งสามารถยอมรับได้ จึงนำแบบจำลองที่สร้างขึ้นไปใช้งานต่อเพื่อจำลองเปรียบเทียบสมรรถนะของโรงไฟฟ้าทั้งสามแบบ ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

6. หลักการและวิธีการวิจัย

ในการศึกษานี้ได้พิจารณาแหล่งความร้อนคือ ความร้อนใต้พิภพ ที่อยู่ในรูปของน้ำร้อน โดยแหล่งความร้อนจะใช้อุณหภูมิ 100, 110 และ 120 องศาเซลเซียส มีอัตราการไหล 1 กิโลกรัมต่อวินาที และข้อมูลที่จำเป็นในการจำลองของโรงไฟฟ้าทั้ง 3 แบบ แสดงในตารางที่ 3

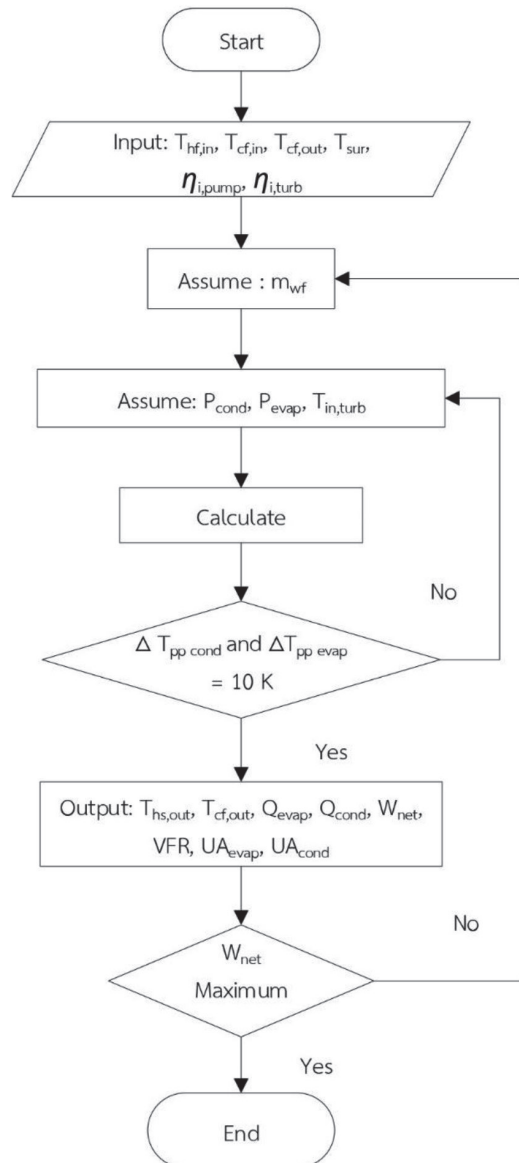
ในการจำลองได้ใช้โปรแกรม MATLAB และใช้ระเบียบวิธีการ Golden Section Search Method เพื่อหาค่างานสุทธิสูงสุดในระบบ ORC และ TLC ทั้ง 3 แบบ ร่วมกับโปรแกรม NIST REFPROP เพื่อคำนวณหาคุณสมบัติของสารทำงานที่จำเป็นต่อการคำนวณค่าสมรรถนะของระบบ ซึ่งกระบวนการจำลองแสดงในรูปที่ 3

ตารางที่ 2 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเปรียบเทียบกับผลจำลองของ J. Fischer [14]

Parameters	Subcritical ORC			Supercritical ORC			TLC		
	J. Fischer [14]	present study	% difference	J. Fischer [14]	present study	% difference	J. Fischer [14]	present study	% difference
T_1 (K)	358.15	358.35	0.06	358.15	358.35	0.06	358.15	358.15	0.00
T_{2s} (K)	380.27	379.98	0.08	384.29	386.64	0.61	-	-	-
T_3 (K)	489.00	489.19	0.04	529.00	529.00	0.00	590	589.99	0.00
T_4 (K)	396.41	396.03	0.10	401.00	404.04	0.76	358.15	358.15	0.00
T_{4s} (K)	370.63	370.75	0.03	372.88	372.35	0.14	-	-	-
V_3 (l/s)	121.00	115.93	4.19	51.00	51.33	0.65	7	7	0.00
V_4 (l/s)	1937.00	1967.10	1.55	1778.00	1799.60	1.21	4993	4993.4	0.01
T_6 (K)	408.70	407.12	0.39	394.29	394.35	0.02	370.53	370.47	0.02
T_8 (K)	348.15	349.03	0.25	348.94	348.94	0.00	348.15	348.15	0.00
η_{th}	0.1727	0.1709	1.04	0.1863	0.1864	0.05	0.1979	0.1979	0.00
ξ	0.8895	0.8725	1.91	0.844	0.8432	0.09	0.8732	0.8733	0.01
ξp	0.3316	0.3237	2.38	0.3782	0.3782	0.00	0.4435	0.4435	0.00

ตารางที่ 3 เงื่อนไขควบคุมสำหรับค่าในการจำลอง

Parameter	Symbol	Value
Hot water inlet temperature (°C)	T_5	100-120
Hot water mass flow rate (kg/s)	$\dot{m}_{hf}$	1
Hot water pressure (kPa)	P_5	300
Cooling water inlet temperature (°C)	T_7	30
Cooling water outlet temperature (°C)	T_8	$T_7 + 10$
Cooling water pressure (kPa)	P_7	300
Pinch point temperature difference (K)	ΔT_{pp}	10
Isentropic efficiency of pump	$\eta_{i,pump}$	0.65
Isentropic efficiency of turbine	$\eta_{i,turb}$	0.85



รูปที่ 3 แผนผังกระบวนการคำนวณคณิตศาสตร์

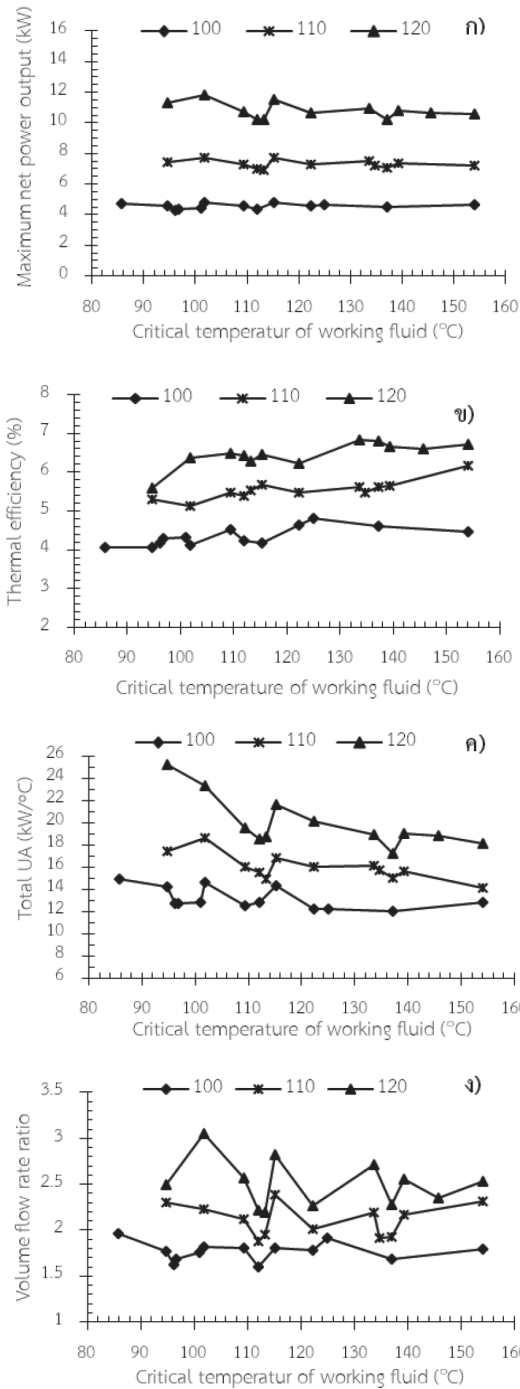
7. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

7.1 ผลการจำลอง Subcritical ORC

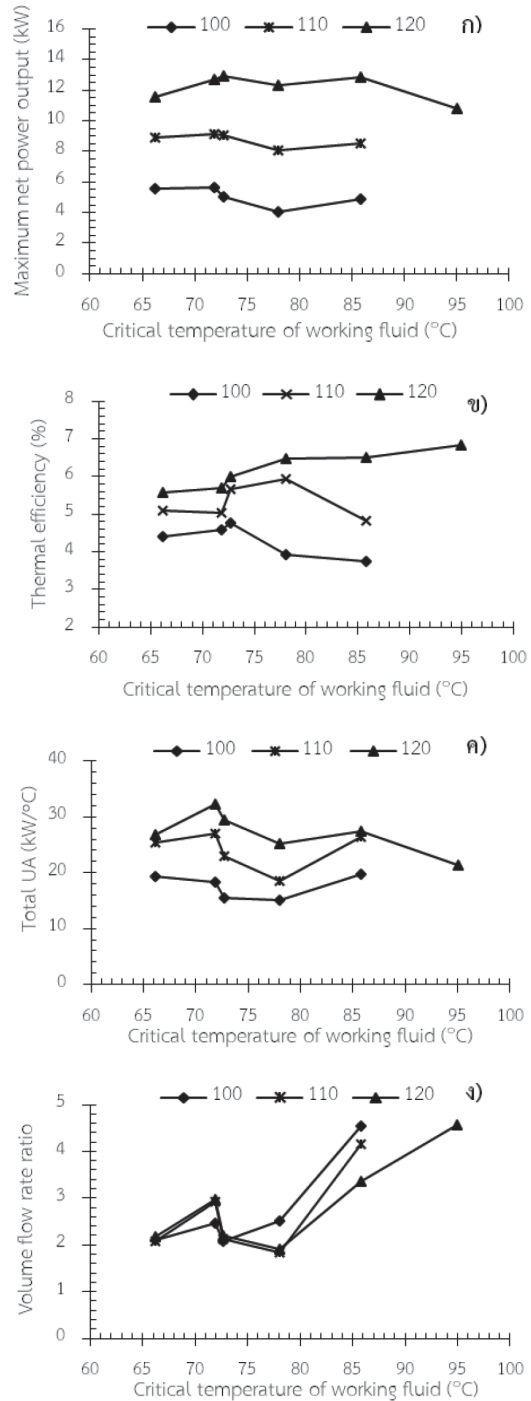
จากการจำลองของระบบ Subcritical ORC ซึ่งได้พิจารณาเลือกสารทำงานที่มีอุณหภูมิวิกฤตใกล้เคียงและไม่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิแหล่งความร้อนซึ่งมีอุณหภูมิในช่วง 85–154 องศาเซลเซียส มี 18 สารทำงาน ดังแสดงในตารางที่ 1 จากผลการจำลองพบว่า อุณหภูมิวิกฤตของสารทำงานมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของงานสุทธิน้อย พิจารณาผลได้จากรูปที่ 4 ก) โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ค่างานสุทธิสูงสุดของแต่ละสารทำงาน ค่อนข้างคงที่ และจะเห็นได้ว่า เมื่อแหล่งความร้อนมีอุณหภูมิสูงขึ้นการเปลี่ยนแปลงของงานสุทธิจะเห็นได้ชัดเจนขึ้น ซึ่งพบว่า สารทำงานที่ให้งานสูงสุดที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100–110 องศาเซลเซียส คือ RC318 และที่ 120 องศาเซลเซียส คือ R227ea งานสุทธิสูงสุดที่ได้คือ 4.78, 7.74 และ 11.85 กิโลวัตต์ตามลำดับ ทั้งนี้ค่าเฉลี่ยงานสุทธิของแต่ละอุณหภูมิแหล่งความร้อนมีค่าเท่ากับ 4.56, 7.32 และ 10.81 กิโลวัตต์ ตามลำดับ

นอกจากนี้ยังพบว่าสารทำงานที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงประสิทธิภาพทางความร้อนจะสูงตาม และยังพบว่า สารทำงานที่ให้งานสุทธิสูง จะส่งผลให้ค่า UA ในรูปที่ 4 ค) สูงตาม ส่วนค่า VFR ในรูปที่ 4 ง) ค่ามีการกระจาย

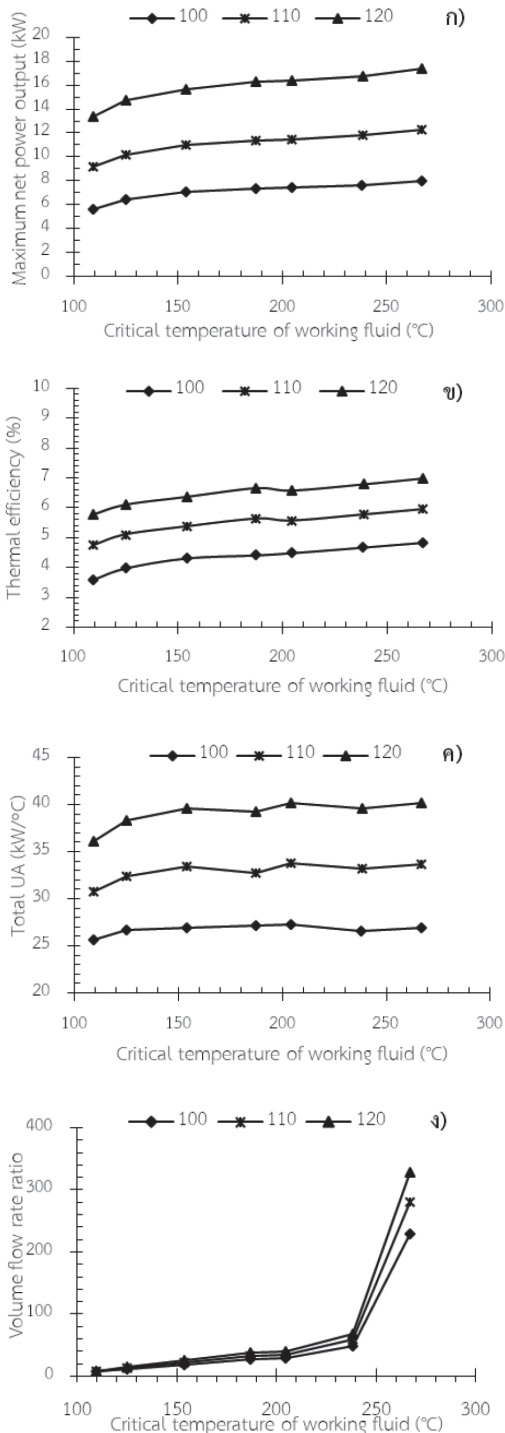
ไม่มีแนวโน้ม ซึ่งหากพิจารณา ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เนื่องจากเห็นได้ชัด จะเห็นว่าสารทำงานที่มี Critical Temperature 101.75 องศาเซลเซียส (R227ea), 115.23 องศาเซลเซียส (RC318), 139.29 องศาเซลเซียส (R236ea), 133.66 องศาเซลเซียส (RE245cb2) และ 154.01 องศาเซลเซียส (R245fa) ซึ่งล้วนเป็นสารทำงานประเภท Dry Fluid (จากตารางที่ 1) จะมีค่า VFR สูง เมื่อสารทำงานที่ออกจากเครื่องกังหัน สารทำงานจะยังมีสถานะเป็นไอร้อนยิ่งยวด (Superheated Vapor) ความหนาแน่นสารทำงานจะมีค่าน้อย จึงทำให้ปริมาตรจำเพาะ (Specific Volume) มีค่ามาก ส่งผลให้เมื่อนำไปพิจารณาตามสมการที่ (13) ทำให้อัตราส่วนการไหลเชิงปริมาตร (VFR) มีค่าสูงตาม ในขณะที่เดียวกัน จุดที่มี VFR น้อย เช่น ที่อุณหภูมิวิกฤตของสารทำงานเท่ากับ 111.97 องศาเซลเซียส (R12), 113.26 องศาเซลเซียส (R152a), 122.28 องศาเซลเซียส (R124), 137.11 องศาเซลเซียส (R142b), 145.68 องศาเซลเซียส (R114), ซึ่งเป็นสารทำงานประเภท Wet และ Isentropic Fluid ซึ่งสารทำงาน 2 ประเภทนี้ เมื่อสารทำงานออกจากกังหัน มีโอกาสที่จะเกิดการกลั่นตัว หรือเป็นของผสมระหว่างไอกับของเหลว ทำให้มีความหนาแน่นสารทำงานสูงกว่า สารที่มีสถานะไอร้อนยิ่งยวด จึงส่งผลให้ VFR มีค่าน้อยกว่าสารทำงานประเภท Dry Fluid



รูปที่ 4 สมรรถนะของ subcritical ORC
เทียบกับอุณหภูมิวิกฤตการทำงาน ก) net power
ข) efficiency ค) total UA และ ง) VFR



รูปที่ 5 สมรรถนะของ supercritical ORC
เทียบกับอุณหภูมิวิกฤตการทำงาน ก) net power
ข) efficiency ค) total UA และ ง) VFR



รูปที่ 6 สมรรถนะของ TLC เทียบกับอุณหภูมิวิกฤติ
 สารทำงาน ก) net power ข) efficiency
 ค) total UA และ ง) VFR

ทั้งนี้ จะเห็นว่า จุดที่มีอุณหภูมิวิกฤติสูงสุด 154.01 องศาเซลเซียส คือสาร R245fa มีค่างานสุทธิใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.62, 7.21 และ 10.58 กิโลวัตต์ ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100, 110 และ 120 องศาเซลเซียส ตามลำดับ อีกทั้งประสิทธิภาพสูงเมื่อเทียบกับสารอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 4 ข) และที่น่าสนใจคือค่า UA และ VFR ไม่สูงเมื่อเทียบกับสารอื่น ซึ่งเป็นสารทำงานที่น่าสนใจ

7.2 ผลการจำลอง Supercritical ORC

สารทำงานที่ใช้ในการจำลองมี 6 ชนิดมีอุณหภูมิวิกฤติของสารอยู่ในช่วง 66–95 องศาเซลเซียส จากผลการศึกษาแสดงในรูปที่ 5 ก) พบว่าสารทำงาน ที่ให้งานสุทธิสูงสุด คือ R218 มีอุณหภูมิวิกฤติเท่ากับ 71.87 องศาเซลเซียส ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100–110 องศาเซลเซียส ผลิตงานสุทธิได้สูงสุดเท่ากับ 5.64 และ 9.16 กิโลวัตต์ ตามลำดับ ส่วนที่แหล่งความร้อน 120 องศาเซลเซียส คือ R143a มีอุณหภูมิวิกฤติเท่ากับ 72.7 องศาเซลเซียส ได้งานสุทธิสูงสุดเท่ากับ 12.88 กิโลวัตต์ ที่แหล่งความร้อน 100, 110 และ 120 องศาเซลเซียส มีค่างานสุทธิเฉลี่ยเท่ากับ 5.03 8.74 และ 12.32 กิโลวัตต์ ตามลำดับ และพบว่างานสุทธิจะมีค่าสูงเมื่ออุณหภูมิวิกฤติของสารทำงานต่ำกว่าอุณหภูมิของแหล่งความร้อนในช่วง 30–50 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส จะพบว่าที่อุณหภูมิวิกฤติสารทำงาน 66.18 องศาเซลเซียส (R125) และ 95 องศาเซลเซียส (R1234yf) ซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิแหล่งความร้อน 53.82 และ 25 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จะพบว่า งานสุทธิที่ได้จะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับสารทำงานอื่น และในรูป 5 ข) พบว่าสารทำงานที่ให้งานสุทธิสูงส่วนใหญ่จะมีประสิทธิภาพสูง นอกจากนี้ค่า UA และ VFR ที่แสดงในรูปที่ 5 ค) และ 5 ง) อุณหภูมิวิกฤติเท่ากับ 78 องศาเซลเซียส คือ R32 เป็นสารทำงานที่น่าสนใจ เนื่องจาก มีค่า UA และ VFR ต่ำอาจจะทำให้ต้นทุนหรือราคาอุปกรณ์ต่ำเมื่อใช้กับแหล่ง

ความร้อน 110 องศาเซลเซียส ขึ้นไป แต่ให้ผลลัพธ์ไม่ดี ทั้งในส่วนของการสูญเสียและประสิทธิภาพ เมื่อใช้ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำกว่า 110 องศาเซลเซียส

7.3 ผลการจำลอง Trilateral Cycle (TLC)

จากผลการจำลองในระบบ TLC ใช้สารทำงาน 7 ชนิดมีอุณหภูมิในช่วง 109–266 องศาเซลเซียส พบว่า ยิ่งใช้สารทำงานที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงจะทำให้ได้งานสุทธิและประสิทธิภาพเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 6 ก) และ 6 ข) ในการจำลองโรงไฟฟ้า TLC สารที่ให้น้ำงานสุทธิสูงสุดคือ Heptane มีอุณหภูมิวิกฤตเท่ากับ 266.98 องศาเซลเซียส ทั้ง 3 แหล่งอุณหภูมิความร้อน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 7.96, 12.27 และ 17.38 กิโลวัตต์ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าขนาดค่า UA มีค่าค่อนข้างคงที่ เมื่อใช้สารทำงานที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงกว่า 125 องศาเซลเซียส ของทั้ง 3 แหล่งความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 6 ค) จากผลการศึกษาพบว่าสารทำงานที่มีอุณหภูมิวิกฤตตั้งแต่ 125 องศาเซลเซียส ขึ้นไปมีศักยภาพในการลดอุณหภูมิของแหล่งความร้อนได้ใกล้เคียงกัน จึงอาจจะเป็นหนึ่งในเหตุผลที่ทำให้ค่า UA ของสารทำงานแต่ละชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน

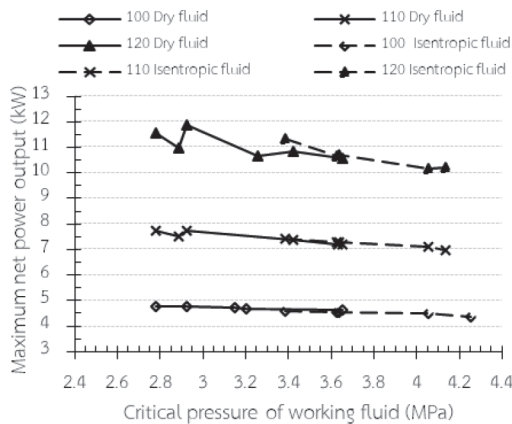
จากผลการศึกษาของตัวแปรที่บ่งบอกถึงขนาดของกังหันคือ VFR พบว่าการใช้สารทำงานจำลองในระบบ TLC ที่แหล่งความร้อน 100, 110 และ 120 องศาเซลเซียส ยิ่งใช้สารทำงานที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงค่า VFR จะเพิ่มสูงขึ้นตามโดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่อใช้สารทำงานที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงกว่า 200 องศาเซลเซียส จะพบว่ามีค่า VFR เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 6 ง) พฤติกรรมดังกล่าวเกิดจากสารทำงานที่นำมาจำลองที่มีอุณหภูมิและความดันวิกฤต 266.98 องศาเซลเซียส 2736 กิโลปาสกาล (Heptane) ซึ่งมีความดันการทำงานที่ทางออกของกังหัน เท่ากับ 18.87 กิโลปาสกาล มีค่าต่ำกว่าความดันบรรยากาศทำให้ค่าปริมาตรจำเพาะของสารทำงานเมื่อออกจากกังหัน จึงมีค่าสูงส่งผลให้ค่า VFR เพิ่มขึ้นอย่างมาก ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบกับสารที่มีค่า

VFR ต่ำ เช่น R1234ze มีอุณหภูมิและความดันวิกฤต 109.36 องศาเซลเซียส 3634.9 กิโลปาสกาล พบว่ามีความดันที่ทางออกกังหันเท่ากับ 997 กิโลปาสกาล ทำให้มีค่าปริมาตรจำเพาะต่ำกว่าสารทำงาน Heptane ค่า VFR จึงมีค่าน้อยกว่า

การใช้สารทำงาน Heptane นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของแต่ละโรงไฟฟ้าที่ได้ศึกษาจะพบว่า โรงไฟฟ้าที่ให้น้ำงานสุทธิสูงสุด ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100, 110 และ 120 องศาเซลเซียส คือ โรงไฟฟ้า TCL รองลงมาคือ Supercritical ORC และน้อยสุดคือ Subcritical ORC ประสิทธิภาพโดยรวมของ โรงไฟฟ้า Subcritical ORC และ Supercritical ORC มีค่าใกล้เคียงกันเมื่อเทียบที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิเท่ากัน ในขณะที่ TLC จะให้ประสิทธิภาพสูงสุด และเมื่อเทียบขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนหรือค่า UA ของโรงไฟฟ้าแต่ละประเภทพบว่า TLC มีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับอีกสองโรงไฟฟ้า เนื่องจากกระบวนการภายในของโรงไฟฟ้า TLC จะเกิดปรากฏการณ์หรือพฤติกรรมที่เรียกว่า Thermal Match คือเส้นอุณหภูมิของแหล่งความร้อนอยู่ใกล้กับเส้นอุณหภูมิของสารทำงานตลอดทั้งเส้น ดังแสดงในรูปที่ 2 ค) ทำให้ระบบมีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนได้มากขึ้น ซึ่งหมายถึงอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะมีขนาดใหญ่ ในขณะที่เดียวกัน Thermal Match เกิดในโรงไฟฟ้า Supercritical ORC ได้น้อยกว่าโรงไฟฟ้า TLC ดังแสดงในรูปที่ 2 ข) และมีค่า UA น้อยกว่าหรืออุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะมีขนาดเล็กกว่า TLC และในโรงไฟฟ้า Subcritical ORC จะเกิด Thermal Match น้อยสุดเมื่อเทียบกับ TLC และ Supercritical ORC จึงทำให้ค่า UA ของ Supercritical ORC มีค่าน้อยสุดในจำนวนโรงไฟฟ้าที่ได้ทำการจำลอง

จากที่ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบงานสูงสุดและสมรรถนะของโรงไฟฟ้าแต่ละประเภทที่มีการใช้สารทำงานแต่ละชนิด ในการศึกษาครั้งนี้ยังพบประเด็นเพิ่มเติมของการเลือกสารทำงานที่ใช้ในโรงไฟฟ้า Subcritical

ORC เมื่อใช้แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100, 110 และ 120 องศาเซลเซียส พบว่าสารทำงานประเภท Dry Fluid และ Isentropic Fluid ที่มีความดันวิกฤตของสารต่ำ ส่วนใหญ่จะให้งานสุทธิสูง ดังแสดงในรูปที่ 7 ทั้งนี้ปัจจัยในการเลือกสารทำงานให้ได้งานสุทธิสูงมีหลายปัจจัยสำหรับการใช้ความดันวิกฤตและประเภทของสารทำงานเป็นเพียงปัจจัยหนึ่งที่พบจากการศึกษา ซึ่งยังต้องอาศัยอุณหภูมิวิกฤต และตัวแปรอื่นในการเลือก เพื่อให้ได้สารทำงานที่ให้งานสุทธิสูงและเหมาะสมกับอุณหภูมิของแหล่งความร้อน



รูปที่ 7 กราฟสัมพันธ์งานสุทธิสูงสุดเทียบกับความดันวิกฤตของสารทำงาน

8. สรุปผล

ในการศึกษาครั้งนี้ ได้ศึกษาโรงไฟฟ้า 3 ประเภท ได้แก่ Subcritical ORC, Supercritical ORC และ TLC เพื่อเปรียบเทียบงานสูงสุดและสมรรถนะของโรงไฟฟ้าแต่ละประเภท และมีสารทำงานที่ใช้จำลองในการศึกษานี้ทั้งหมด 27 ชนิด โดยใช้แหล่งความร้อนได้พิภพเป็นแหล่งพลังงาน ที่มีอุณหภูมิ 100, 110 และ 120 องศาเซลเซียส มีอัตราการไหลเท่ากับ 1 กิโลกรัมต่อวินาที จากผลการศึกษสามารถสรุปผลได้ดังนี้

8.1 Subcritical ORC

เมื่อพิจารณาถึงงานสุทธิสูงสุดพบว่าสาร RC318 เป็นสารที่น่าสนใจ ซึ่งในช่วงแหล่งความร้อน 100 และ 110 องศาเซลเซียส ให้งานสุทธิสูงสุดเท่ากับ 4.78 กิโลวัตต์ 7.74 กิโลวัตต์ ตามลำดับ และที่ 120 องศาเซลเซียส สารที่ให้งานสูงสุด คือ R227ea เท่ากับ 11.85 กิโลวัตต์ ทั้งนี้การเลือกสารทำงานที่ใช้เกณฑ์ที่ว่าหากต้องการงานสุทธิสูงให้เลือกสารทำงานที่มีอุณหภูมิวิกฤตของสารใกล้เคียงกับอุณหภูมิของแหล่งความร้อน ซึ่งอาจจะไม่ได้ผลต่อช่วงอุณหภูมิแหล่งความร้อนที่ 100–120 องศาเซลเซียส จากผลที่ได้พบว่าในช่วงอุณหภูมิแหล่งความร้อน 100–120 องศาเซลเซียส ไม่ว่าอุณหภูมิวิกฤตของสารทำงานจะมากหรือน้อย งานสุทธิสูงสุดที่ได้ของแต่ละสารต่างกันไม่มาก โดยเฉพาะที่แหล่งความร้อน 100 องศาเซลเซียส นอกจากนี้สารทำงานที่น่าสนใจสำหรับ Subcritical ORC คือ R245fa เนื่องจากมีงานสุทธิสูง มีขนาดของ UA และ VFR อยู่ในระดับกลาง อีกทั้งมีประสิทธิภาพทางความร้อนสูงสำหรับการใช้งานในช่วงแหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100–120 องศาเซลเซียส

8.2 Supercritical ORC

จากหลักการเลือกสารทำงานให้มีอุณหภูมิวิกฤตต่ำกว่าแหล่งความร้อนในช่วง 30–50 องศาเซลเซียส ผลการจำลองที่ได้พบว่า สารทำงานให้งานสุทธิสูงในช่วงสารทำงานที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิของแหล่งความร้อนดังที่กล่าวไว้ข้างต้น ซึ่งสารที่ให้งานสูงสุด คือ R218 มีอุณหภูมิวิกฤต 71.87 องศาเซลเซียส ที่แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100–110 องศาเซลเซียส ผลิตรงานได้สูงสุดเท่ากับ 5.64 และ 9.16 กิโลวัตต์ ตามลำดับ ส่วนแหล่งความร้อนที่ 120 องศาเซลเซียส คือ R143a มีอุณหภูมิวิกฤต 72.7 องศาเซลเซียส ให้งานสูงสุดเท่ากับ 12.88 กิโลวัตต์

8.3 Trilateral Cycle (TLC)

จากผลการจำลองพบว่ายิ่งสารทำงานมีอุณหภูมิวิกฤตสูง งานสุทธิจะสูงขึ้นตาม ซึ่งพบว่าสารทำงาน heptane ให้งานสูงสุดทุกแหล่งความร้อน มีค่าเท่ากับ 7.96, 12.27 และ 17.38 กิโลวัตต์ ตามลำดับ ทั้งนี้หากพิจารณาถึงค่าสมรรถนะอื่นๆ จะพบว่าประสิทธิภาพ และ ค่า UA เพิ่มขึ้นสูงขึ้นตาม โดยเฉพาะอย่างยิ่ง VFR มีค่าสูงมากอาจจะทำให้กังหันมีขนาดใหญ่มากเมื่อเทียบกับการใช้สารทำงานชนิดอื่น

8.4 การเลือกสารทำงาน สำหรับ Subcritical ORC

จากการจำลองสารทำงานหลายชนิดพบว่า สารทำงานประเภท Dry Fluid และ Isentropic Fluid ที่ใช้แหล่งความร้อนอุณหภูมิ 100–120 องศาเซลเซียส สารที่มีความดันวิกฤตต่ำโดยส่วนใหญ่จะให้งานสุทธิมีค่าสูง นอกจากนี้การเลือกงานสุทธิสูงสุดอาจจะไม่ใช่ทางเลือกที่เหมาะสม หากจะต้องพิจารณาเกี่ยวกับค่าอื่นประกอบเช่น ค่า UA ที่บ่งบอกถึงขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และ VFR ที่บอกถึงขนาดของกังหัน ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับราคาของอุปกรณ์และงบประมาณในการลงทุน ที่จะต้องพิจารณาถึงความคุ้มค่าและระยะเวลาคืนทุน เป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึง ซึ่งในงานวิจัยถัดไปจะได้นำไปศึกษาต่อ

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Rahbar, S. Mahmoud, R.K. Al-Dadah, N. Moazami, and S.A. Mirhadizadeh, "Review of organic Rankine cycle for small-scale applications," *Energy Conversion and Management*, vol. 134, pp. 135–155, 2017.
- [2] S. Quoilin, M.V.D. Broek, S. Declaye, P. Dewallef and V. Lemort, "Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 22, pp. 168–186, 2013.
- [3] Z. Guzovic, B. Majcen and S. Cvetkovic, "Possibilities of electricity generation in the Republic of Croatia from medium-temperature- geothermal sources," *Applied Energy*, vol. 98, pp. 404–414, 2010.
- [4] Z. Guzovic, D. Loncar and N. Ferdelji, "Possibilities of electricity generation in the Republic of Croatia by means of geothermal energy," *Energy*, vol. 35, pp. 3429–3440, 2010.
- [5] M. Yari, "Performance analysis of the different organic Rankine cycles (ORCs) using dry fluids," *International Journal of Exergy*, vol. 6, no. 3, pp. 323–342, 2009.
- [6] M. Yari, "Exergetic analysis of various types geothermal power plants," *Renewable Energy*, vol. 35, no. 1, pp. 112–121, 2010.
- [7] K. Braimakis, M. Preißinger, D. Brüggemann, S. Karellas and K. Panopoulos, "Low grade waste heat recovery with subcritical and supercritical Organic Rankine Cycle based on natural refrigerants and their binary mixtures," *Energy*, vol. 88, pp. 80–92, 2015.
- [8] C. Vetter, H. J. Wiemer and D. Kuhn, "Comparison of sub- and supercritical Organic Rankine Cycles for power generation from low-temperature/low-enthalpy geothermal wells considering specific net power output and efficiency,"

- Applied Thermal Engineering*, vol. 51, no. 1-2, pp. 871-879, 2013.
- [9] D. Tiwari, A. Arora, N. A. Ansari and A. F. Sherwani, "Energy and Exergy Analysis of Organic Rankine Cycle Using Alternative Working Fluids," *IOSR - Journal of Mechanical and Civil Engineering*, vol. 12, no. 1, pp. 85-92, 2015.
- [10] N. Yamada, M. N. Mohamad and T. T. Kien, "Study on thermal efficiency of low to medium temperature organic Rankine cycles using HFO - 1234yf," *Renewable Energy*, vol. 41, pp. 368-375, 2012.
- [11] C. Lertsatitthanakorn, "Development of geothermal energy in Thailand," *KKU Engineering Journal*, Vol. 33 no .6, 577 – 586, Nov – Dec 2006.
- [12] C. He, C. Liu, H. Gao, H. Xie, Y. Li, S. Wu and J. Xu, "The optimal evaporation temperature and working fluids for subcritical organic Rankine cycle," *Energy*, vol. 38, no. 1, pp. 136-143, 2012.
- [13] J. Haervig, K. Sorensen and T.J. Condra, "Guidelines for optimal selection of working fluid for an organic Rankine cycle in relation to waste heat recovery," *Energy*, vol. 96, pp. 592-602, 2016.
- [14] J. Fischer, "Comparison of trilateral cycles and organic Rankine cycles," *Energy*, vol. 36, no. 10, pp. 6208-6219, 2011.

<http://journal.rmutp.ac.th/>

The Development of Waste Heat Energy Conversion Device to Generate Electricity through Thermoelectric Generator (TEG) Apply to LPG Cookstove

Ditthaphat Tanpradit*

Division of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology
Krungthep
2, Nang Lin Chee Road, Thungmahamek, Sathorn, Bangkok, Thailand 10120

Received 28 November 2019; Revised 13 May 2020; Accepted 18 May 2020

Abstract

This research aims to develop the waste heat energy conversion device to generate electricity through a thermoelectric generator (TEG) which is called "CHEU". This device is applied to the LPG cookstove that serves as a waste heat source. The thermoelectric generator with 4 modules in series connection is used to convert heat energy to electricity. The present research shows a modification of the CHEU based on two concepts as follows: (1) re-design the structure for heat transfer improvement, and (2) select the high capability of TEG to support a high temperature from a heat source as a result of (1). In this study, the modified CHEU is called "MCHEU". A heat-load condition is set as the gas pressure of LPG, which varies in a range of 0.1 - 0.6 kg/cm², and the throttle valve is fixed approximately at 40% of a fully opened throttle, while the air entrainment is fully opened throttle. Also, the water-cooling system is used for heat dissipation. Base on the performance evaluation of MCHEU, the interesting results are drawn as follows: 1) the maximum temperature difference is on an average value of 278.5°C at a maximum heat load condition, while a maximum voltage, current, and power are on an average value of 18.83 V, 5.67 A, and 107 W, respectively. 2) The temperature difference of MCHEU is higher than that of CHEU with an average value of 50%. 3) The output power obtained by MCHEU is higher than that of CHEU with an average value of 52% and takes less time about 40% for fully charging a battery (12V 7.5Ah). Nevertheless, MCHEU usage does not affect the thermal efficiency of a cookstove. 4) The efficiency of an energy conversion obtained by MCHEU is 20%, which is higher than that of CHEU about 2%.

Keywords: Thermoelectric; Energy Conversion; Waste Heat Energy

* *Corresponding Author. Tel.: +668 8368 0368, E-mail Address: ditthaphat.t@mail.rmutk.ac.th*

1. Introduction

The domestic cooking stove is still necessarily used for cooking food that is the one-fourth factor for human life. Typically, there are many utilizations for using the cookstove namely households, food businesses or food industries, etc. The liquefied petroleum gas or LPG served as a fuel is used for many domestic cookstoves. According to the information on the energy consumption of LPG gas from 2010-2018 [1], [2], the LPG usage continuously increased. Now, it is the third-highest used fuel beside diesel and gasoline. As a result, the price of LPG increases yearly in Thailand. In general, the efficiency of LPG cookstove is just only in a range of 20–50% [3], and the rest is the heat loss into the surrounding. These energy losses are a high proportion when compared with the useful energy. Hence, it is an important problem for researchers who are interested in improving the efficiency of a gas stove with a friendly environment.

To obtain high efficiency and energy saving, the gas stove has been continuously developed by many researchers. Until now, the efficiency of the cooking stove is about 50–70% [4]–[6]. Unfortunately, the development of cookstove is limited by some reasons such as heat flow characteristics around the hot side and the cold side of the TEG. Therefore, the waste heat recovery (WHR) is additionally considered as a way to improve efficiency. The WHR is

divided into two categories. Firstly, the waste heat recovery is used for increasing the efficiency of a furnace or gas stove [5], [6]. Secondly, the waste heat energy is converted to electricity through a device that is called the thermoelectric generator (TEG). D. Champier et al. [7] studied the thermoelectric power generation from biomass cookstoves. The results showed that the water-cooling system provided higher efficiency than air-cooled units. In addition, the biomass burner could produce approximately 7 W of power, of which 1 watt supplies power to electronic devices. The remainder was charged into the battery for a 2 W LED bulb of the lighting system, and 1 watt of a fan to feed the air into the furnace to increase combustion efficiency. R. Sakdanuphab and A. Sakulkalavek [8] studied the design of a waste heat recovery unit with a thermoelectric generator. The purpose of this paper was to study the influence of high temperature and the volume of water on the power generation and water temperature. The results showed that the high temperature was more significant than the volume of water. The efficiency of the WHR was higher than 80% due to the improvement of the thermal contact between the heat exchanger tube and the aluminum block. It also showed that the thermal efficiency was reduced by 5% when the WHR installed. A. Montecucco et al. [9] studied the use of 4 thermoelectric modules with Bi_2Te_3 material that were applied to the solid fuel furnace for

charging batteries. The results showed that the heat power of 600 W could be converted to the electric power by 27 W for a 2-hour combustion period, and the thermoelectric efficiency was about 5 percent. M.J. Deasy et al. [10] studied electricity production from a biomass stove with a Bi_2Te_3 thermoelectric module using the Maximum Power Point Tracking (MPPT) control system and passive liquid cooling thermosyphon. The results showed that the maximum power output from a biomass stove integrated with a thermoelectric was approximately 5.8 W. The electricity was stable at the condition of 5 V via USB port for charging mobile phones, light bulbs, and an electrical energy storage device. Also, the result met the average power output that was higher than 4 W and this was enough to charge low-power electrical devices. S. Hemhiran and D. Tanpradit [11] studied the production of electricity from waste heat of the gas stove using a thermoelectric generator. The condition at gas pressure was in a range of 0.1 to 0.6 kg/cm^2 and the air entrainment was kept constant throughout the test. The results showed that the maximum power output was approximately 53.3 W at the gas pressure of 0.6 kg/cm^2 , with the high and low temperature of the thermoelectric at 250.5°C and 65.5°C respectively. The efficiency of the TEG and the conversion efficiency were 5.3% and 18% respectively. In addition, when

the electrical load was applied to a 12 V, 7 W of LED lamp at a gas pressure of 0.3 kg/cm^2 , the temperature difference of thermoelectric was about 135°C which could operate the LED lamp.

In the literature review above, the thermoelectric generator was mostly used for a biomass stove. However, so far there have been few studies of using the TEG for a household gas stove, which is mainly used for the food industry. Therefore, this research focuses on the improvement of a waste heat energy conversion device to generate electricity through the TEG applied to a household gas stove, which the KB-5 cookstove is used without any modification. In this study, the waste heat energy conversion device of S. Hemhiran and D. Tanpradit [11] is adopted. The structure of the device is modified by re-design for an expected rate of heat transfer enhancement to obtain effective conversion into electrical power. The present study not only investigates the characteristic of the modified CHEU (MCHEU) but also compares energy results with those obtained from the original CHEU.

2. Research Methodology

This section explains research methodology and the basic of thermoelectric, principle, mathematical model, materials and experimental setup and procedure, which are in the sub-section, are introduced as follows:

2.1 Basic of Thermoelectric Generator

The thermoelectric generator (TEG) device is a conversion device based on Seebeck's effect, which is composed of one or more thermoelectric couple. The simplest TEG consists of a thermocouple, comprising a pair of P-type and N-type thermoelements or legs connected electrically in series and thermally in parallel. The TEG device will generate DC electricity as long as there is a temperature gradient between its sides. When the temperature difference ($\Delta T = T_h - T_c$) across the TEG device increases, the more electrical output power will be generated as shown in **Fig. 1**.

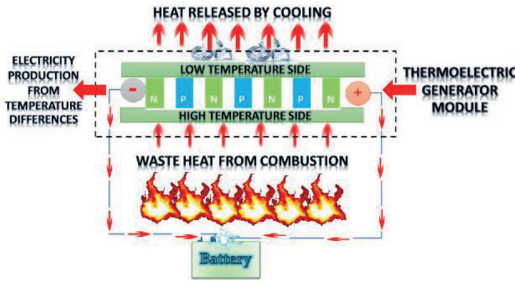


Fig. 1 Thermoelectric Principle

2.2 Mathematical Model

In this section, mathematical models are formed to analyze the thermal efficiency, heat transfer, a cooling system, an electrical power, and energy balance for the TEG gas stove application.

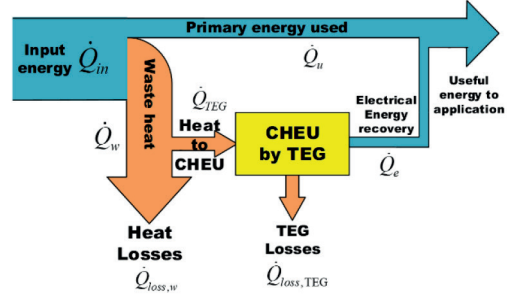


Fig. 2 Sankey diagram for TEG stove

2.2.1 Thermal Efficiency of Cookstove

As shown in **Fig. 2**, the energy balance is started by equation (1),

$$\dot{Q}_{in} = \dot{Q}_{out} = \dot{Q}_u + \dot{Q}_w \quad (1)$$

where $\dot{Q}_{in}$ is the heat energy input that can be carried out by equation (2),

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}_f \times LHV \quad (2)$$

The primary useful heat ($\dot{Q}_u$) is useful energy rate defined as equation (3),

$$\dot{Q}_u = \dot{m}_{wt} c_{p,w} (\Delta T) + \dot{m}_{vp} h_{fg} \quad (3)$$

and is the primary loss of cooking stove. Then, the thermal efficiency of the gas stove can be calculated by equation (4),

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m}_{wt} c_{p,w} (\Delta T) + \dot{m}_{vp} h_{fg}}{\dot{m}_f LHV} \quad (4)$$

Here, $\dot{m}_{wt}$ is the rate of water (kg/s), c_p is the heat capacity of water (kJ/kg°C), ΔT is the temperature change of water (°C), $\dot{m}_{vp}$ is the rate of steam (kg/s), h_{fg} is the latent heat of water (kJ/kg), $\dot{m}_f$

is the mass of LPG fuel (kg) and LHV is the low heating value (kJ/kg).

2.2.2 Heat Transfer of TEG

When η_{th} is known already, $\dot{Q}_w$ is defined by equation (5) and (6).

$$\dot{Q}_w = \dot{Q}_{in}(1 - \eta_{th}) \quad (5)$$

$$\dot{Q}_w = \dot{Q}_{TEG} + \dot{Q}_{loss,w} \quad (6)$$

It is the waste heat from combustion. The term $\dot{Q}_{TEG}$ is the partial waste heat energy transferring to the TEG module, and $\dot{Q}_e$ is the electrical energy. The relation between $\dot{Q}_{TEG}$ and $\dot{Q}_e$ can be identified by equation (7), and it is equivalent to the heat transfer from heat source to heat sink, which can be expressed by equation (8) and is shown in Fig. 3.

$$\dot{Q}_{TEG} = \dot{Q}_e + \dot{Q}_{loss,TEG} \quad (7)$$

$$\dot{Q}_{TEG} = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,5}}{\left[\frac{1}{h_1 A_1} + \frac{\Delta X_A}{k_A A_2} + \frac{\Delta X_B}{k_B A_3} + \frac{\Delta X_C}{k_C A_4} + \frac{\Delta X_D}{k_D A_5} + \frac{1}{nh_5(A_b + \eta A_{fin})} \right]} \quad (8)$$

where k is the heat conduction coefficient on each material, h_1 and h_5 are the convection coefficient at positions 1 and 5, respectively, ΔX is the thickness of each material. The water-cooling flow through the low-temperature side of the TEG is used for this study because of the high heat transfer rate [7]-[11]. The rate of cooling $\dot{Q}_{cool}$ can be expressed by equation (9).

$$\dot{Q}_{cool} = \dot{m}_{wc} c_{p,w} (T_{wo} - T_{wi}) \quad (9)$$

where $\dot{m}_{wc}$ is the rate of water cooling, T_{wo} and T_{wi} are the outlet and inlet of water cooling, respectively.

2.2.3 Thermoelectric Capability

The property of the TEG is very important to identify the performances and characteristics of the TEG. Two parameters, i.e. 1) Seebeck's coefficient and 2) the equivalent thermal conductance (K), are used in this study as shown in equation (10) and (11), respectively.

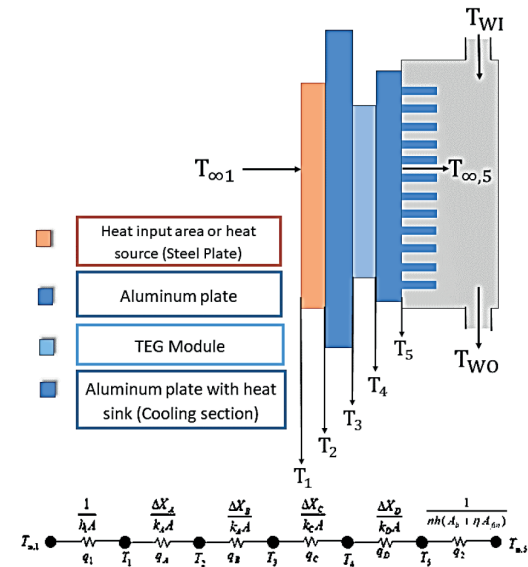


Fig. 3 Heat transfer model for analysis

$$S = \frac{V}{\Delta T} \quad (10)$$

$$K = \frac{2kAN}{l} \quad (11)$$

The heat flow from the exhaust is absorbed at the hot junction (Q_h), whereas the cold junction (Q_c) is released to the cooling system. They can be seen as equation (12) and (13), respectively. [12]

$$\dot{Q}_h = N(SIT_h + K(\Delta T) - 0.5I^2R) \quad (12)$$

$$\dot{Q}_c = N(SIT_c + K(\Delta T) + 0.5I^2R) \quad (13)$$

where A is the cross-sectional area of the each leg, V is the voltage output, ΔT is the temperature difference across the TEG, k is the conductivity of material, N is the amount of the TEG modules and l is the length of P-N type, I is the electric current, and R is the electric internal resistance. The efficiency of the TEG or thermoelectric conversion efficiency (η_{TEG}) can be calculated by equation (14).

$$\eta_{TEG} = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{Q}_h} \quad (14)$$

The electric power can be calculated and is then compared with the measured result as equation (15) for validation.

$$\dot{Q}_e = VI = \dot{Q}_h - \dot{Q}_c \quad (15)$$

2.2.4 Energy Balance Equation

The heat balance equation of the system can be simplified by equation (1) – (7), as seen in equation (16), which the total heat loss of the system arises from the main heat loss $\dot{Q}_{loss,w}$ and the loss

of the TEG module $\dot{Q}_{loss,TEG}$. Therefore, it reveals that the electrical power $\dot{Q}_e$ can be determined, if the term of $\dot{Q}_{in}$, $\dot{Q}_u$, $\dot{Q}_{loss,TEG}$, $\dot{Q}_{loss,w}$ are known by solving equation (2), (3), (6) and (15), respectively.

$$\dot{Q}_{in} = \dot{Q}_u + \dot{Q}_e + \dot{Q}_{loss,TEG} + \dot{Q}_{loss,w} \quad (16)$$

2.3 Material & Experimental Setup and Procedure

The concept design for the modified converting heat to electricity unit (MCHEU) is discussed in this part. Also, the materials used for structure, the water-cooling system, and the experimental setup and procedure are presented.

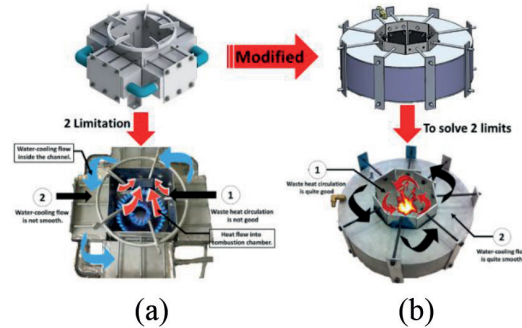


Fig. 4 The problems of (a) original CHEU and (b) modified CHEU

2.3.1 Concept Design of MCHEU

In previous research [11], the converting heat to electricity unit (CHEU), as shown in **Fig. 4(a)**, could produce some electricity from the waste heat of a cookstove. However, the CHEU encounters some limitations of the heat flow characteristics around the hot side

and the cold side of the TEG as also shown in Fig. 4(a). Hence, the concept of re-design for the modified converting heat to electricity unit (MCHEU), as shown in Fig. 4(b), is introduced to overcome these limitations. The basic idea for the structural design of the MCHEU is expected to be a circular shape because a circular shape is outstanding for the circulated heat flow, as depicted in Fig. 5. The area of the total internal surface of MCHEU is 0.0525 m^2 which is more than that of the CHEU about 2 times. The cross-sectional area of the water-cooling system is $90 \text{ mm} \times 90 \text{ mm}$, and there are two holes for a water inlet at the top and an outlet at the bottom. There are some baffles between the water inlet and outlet holes to ensure that the water can flow throughout all heat sinks. The 4 modules of the TEG are sequentially mounted on each plate that is a rectangular area with 60



Fig. 5 Design for MCHEU prototype

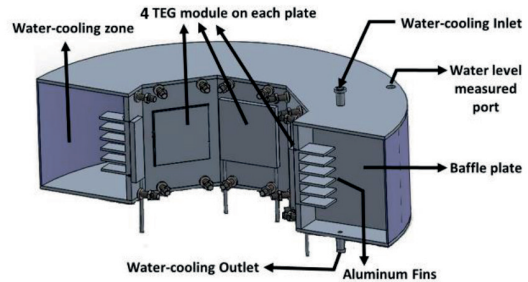


Fig. 6 MCHEU Structure

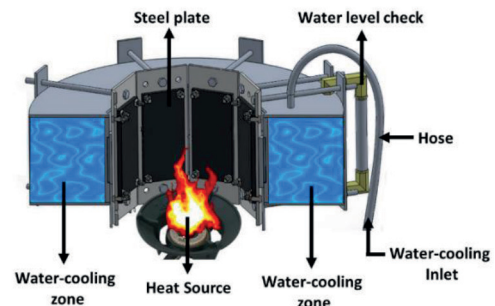


Fig. 7 MCHEU Structure & components

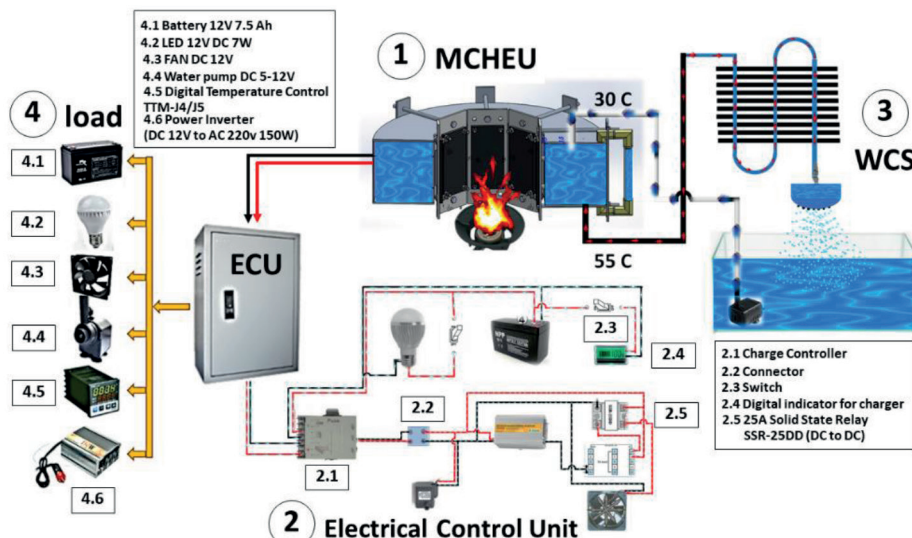


Fig. 8 Apparatus and components Installation

mm $\times$ 100 mm, as shown in **Fig. 6**. The 50 mm $\times$ 100 mm steel plate with a thickness of 5 mm is used for covering the TEG to prevent an overheated TEG at the hot section, as shown in **Fig. 7**. Otherwise, the TEG will be dramatically deteriorated.

2.3.2 Experimental Setup

A KB-5 LPG gas stove equipped with three main units is used to experiment. At first, The MCHEU works as a waste heat energy harvester. The 4 TEG modules, which are connected in the series because of promoting the current flow dominantly [12]-[13], are embedded inside the surface of MCHEU. The main parameters of the TEG are listed in **Table 1**. All TEG modules are attached to the k-type thermocouple for temperature measurement at hot and cold sides. The accuracy is $\pm 2^\circ\text{C}$ in a range of $350 - 600^\circ\text{C}$ and is also combined to the data logger of the Yokogawa MV2040 series to monitor and record data. (Please check this sentence again)

Table 1 TEG's performance of CHEU and MCHEU

No	List of specification	Original CHEU	Modified CHEU
1	Thermoelectric generator (4 modules)	TEG-241-1.4-1.2 (7W 11.5V 1.25A 7 Ω)	TEG-241-60B (19.7W 14.4V 2.9A 2.5 Ω)
2	Material in module	Bi_2Te_3	Bi_2Te_3
3	Maximum temperature at hot side, ($^\circ\text{C}$)	250	400
4	Seebeck's coefficient, (V/ $^\circ\text{C}$)	0.068	0.053
5	Heat conductivity, (W/ m°C)	1.26	1.30
6	Internal resistance (Test), Ω	7	2.5
7	Size (W $\times$ L $\times$ H), mm	54.4 $\times$ 54.4 $\times$ 4	56 $\times$ 56 $\times$ 4

Secondly, all electrical wires on the TEG are connected to the digital multimeter of Kyoritsu model 1009 for measurement and are also combined with the electrical

control unit (ECU). The ECU is composed of the electrical charge controller and the electric power distribution. The electricity distributes to the load via connectors such as a 12 V and 7.5 Ah battery, a 12 V and 7 W LED, a 12 V fan DC, a 12 V water pump DC, a digital temperature control TTM J4-J5 and a power inverter (12VDC to 220VAC 150W). Thirdly, instead of the air-cooling system, the water-cooling system (WCS) is used with MCHEU because it can provide higher heat transfer rates [7]-[11]. This system consists of a 23-liter tank, a 5-V water pump operating at 3.9 L/min, and a hose for water flow. All devices can be seen in **Fig. 8**.

2.3.3 Procedure

Firstly, the LPG fuel tank with a regulator is placed on the digital weight to measure fuel consumption during the test. The tank contains 23 liters of water that is combined with the small cooling tower. **Fig. 9** illustrates all equipment and devices that are installed for experiments. They must be precisely checked for availability, then switching on the ECU. Later, the 3 liters of water is supplied by a pump into the pot, which places onto the MCHEU. All data for the initial condition such as the water temperature in the tank (WCS) and weight of the LPG tank before the test are measured and recorded. Then, the regulator is adjusted to 0.1 kg/cm^2 , while the throttle valve for primary airflow is fully opened by

following the condition as listed in **Table 2**. The gas pressure is varied in the range of $0.1 - 0.6 \text{ kg/cm}^2$ that serves as a heat load because this condition can produce a high temperature under the TEG specification. During the water boiling, the temperature on both sides of the TEG and the electrical parameters are recorded by the data logger until it approaches steadily for 20 minutes. When the first condition is finished, it continues to the next condition according to **Table 2**.

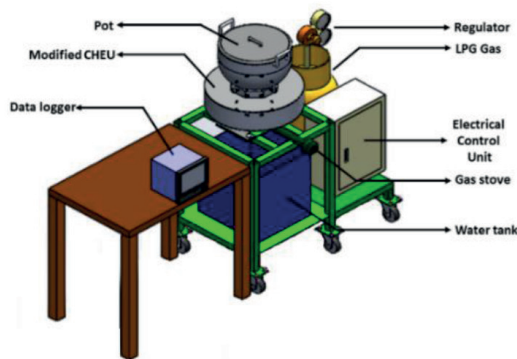


Fig. 9 Equipment installation

Table 2 The condition for TEG test

No	List	Conditions
1	LPG Gas stove	KB-5
2	Gas pressure (kg/cm ²)	0.1 – 0.6
3	Position of valve for air combustion	Full throttle
4	Position of valve for fuel controlling	40% of full
5	Cooling system	Water-cooling
6	Water quantity (L)	3.0
7	Boiling time (min)	20

3. Results and Discussion

The temperature characteristics of the TEG and the electric voltage, current, and power are discussed. Also, the

comparative study between the CHEU and MCHEU is investigated. **Fig. 10** shows clearly that the hot-side temperature of the TEG increases proportionally with the gas pressure because more fuel combustion causes the increase in the combustion temperature, while the cold side of the TEG is controlled by the water-cooling system. As a result, the temperature differences increase with the gas pressure in which the maximum temperature differences are 269.8°C and 278.5°C at 0.5 kg/cm^2 and 0.6 kg/cm^2 , respectively. Because of the limitation of the TEG property, the temperature at the hot side of the TEG must be prevented by the steel plate to keep the temperature lower than 400°C . Consequently, the temperature differences at the gas pressure of 0.5 kg/cm^2 and 0.6 kg/cm^2 are slightly different. **Figs. 11 and 12** show the average electric voltage and current outputs that are plotted against the temperature difference of the TEG at variant gas pressure. The results show that when the temperature difference increases, the electric voltage, and current output almost linearly increase [11], [12]. In fact, the Seebeck effect of the TEG reveals the constant of the Seebeck coefficient, which is shown by its slope of the result. This is approximately 0.0668 V/C to relate linearity between them, then temperature difference, and the electric output is almost linear.

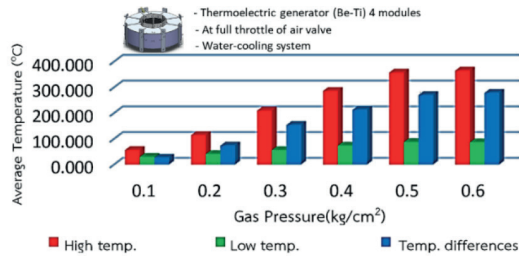


Fig. 10 Average temperature of TEG

Figs. 11 and 12 also indicate that the highest voltage output is 18.80 VDC at the maximum temperature difference of 278.50°C with 0.6 kg/cm² of the gas pressure, whereas the maximum current output is 5.70 A at the same condition. The effect from those results can be integrated by Fig. 13, which reveals the electric power.

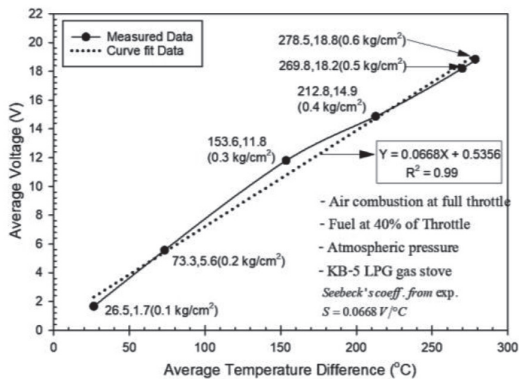


Fig. 11 Electric voltage of TEG

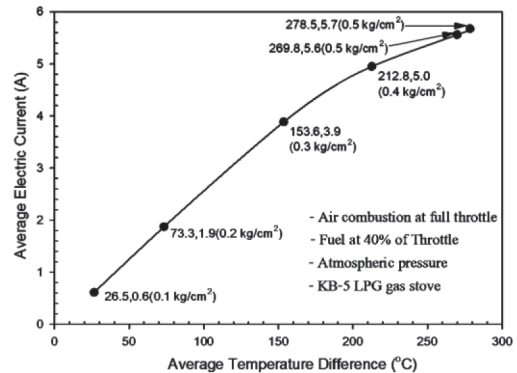


Fig. 12 Electric current of TEG

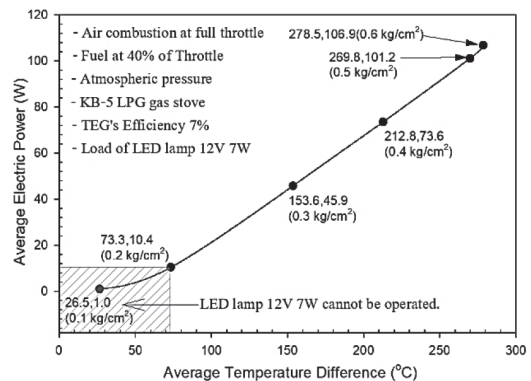


Fig. 13 Electric power of TEG

It shows the maximum power is approximately 106.90 W. This result corresponds to the result reported by [11] and [14]. Furthermore, a 12 V and 7 W LED lamp can be operated over 70°C of the temperature difference [12]. In the present study, the TEG provides a 7% average efficiency, approximately which also agrees with the efficiency reported by [11], [12].

Fig. 14 shows the validation of the computed TEG's output power which is done by comparing it with the measurement and calculation. Clearly, the trend of the measured result agrees

with the calculated result. However, the calculated result is lower than the measured result, on an average value, about 20%. This error occurs due to the inaccuracy of a measured Seebeck coefficient ($0.0668 \text{ V}/^\circ\text{C}$). In addition, the Seebeck coefficient is further studied in the case of 0.85, which is very close to the experimental result.

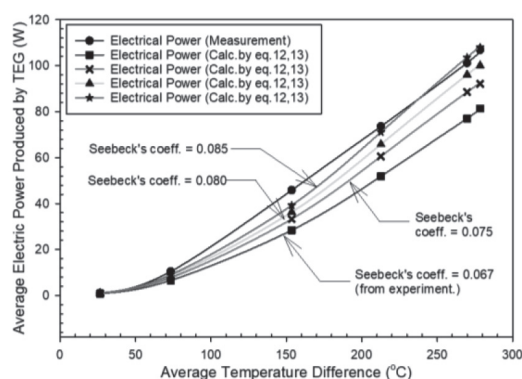


Fig. 14 Validation of power output.

Fig. 15 presents the thermal efficiency of the gas stove with and without MCHEU. One can see that the thermal efficiency with and without MCHEU is 27.5% and 27.8% on average, respectively. It is insignificantly different,

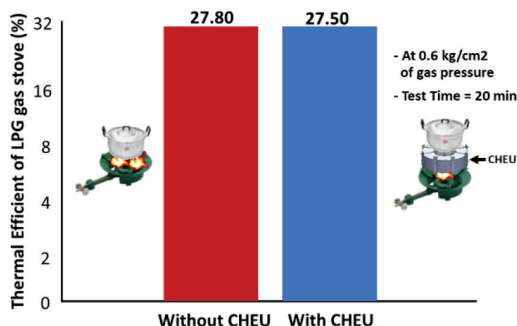


Fig. 15 Thermal efficiency of gas stove

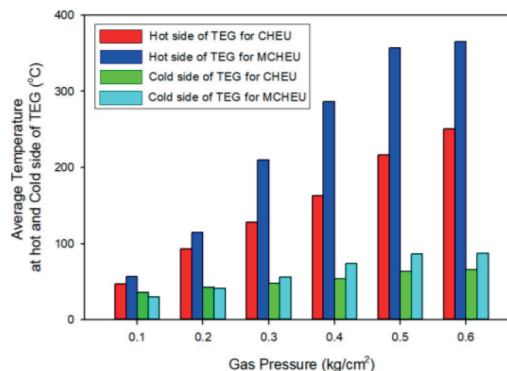


Fig. 16 Temperature at hot and cold side

only 0.3% [8] and [11]. Thus, it indicates that the cookstove can be integrated by MCHEU without reducing efficiency.

The comparative results between MCHEU and CHEU can be seen in **Figs. 16 - 21**. **Fig. 16** shows the hot and cold side temperatures of the TEG with CHEU and MCHEU against the gas pressure. Obviously, the temperature at the hot side of MCHEU is much higher than that of CHEU. This may be explained by the fact that the MCHEU is improved by re-designing the structure for a turbulent flow enhancement of the exhaust gas, while the control of the temperature at the cold side is attempted by the water-cooling system. The results indicate that the highest temperature at the hot side of MCHEU and CHEU is 364.71°C and 250.50°C , respectively, at the maximum heat load. Next, **Figs. 17, 18, and 19** compare the results of the open-circuit voltage, the electric current (Short-circuit), and the output power with the CHEU and the MCHEU against with the temperature difference.

They show that at the highest heat load, MCHEU can provide the maximum of the electric voltage (Open-circuit), the current (Short-circuit), and the power output of are 18.8V, 5.7A, and 107W, respectively. Meanwhile, 38.8V, 1.4A, and 58.1W are given by CHEU. **Fig. 17** also indicates that the open-circuit voltage of CHEU is higher than that of MCHEU approximately 2 times. This is because the Seebeck's coefficient of the CHEU is higher. In contrast, the current of MCHEU is higher than that of CHEU about 4 times, as seen in **Fig. 18**. This is because of the high capability of TEG's specification.

However, although the voltage output of MCHEU is lower, the power output of MCHEU is higher about 2 times, as shown in **Fig. 19**. Namely, the output power obtained by MCHEU is higher than that by CHEU approximately 50%. This is because the temperature difference of the TEG is increased by a modified structure to improve the heat transfer. Moreover, a high capability of

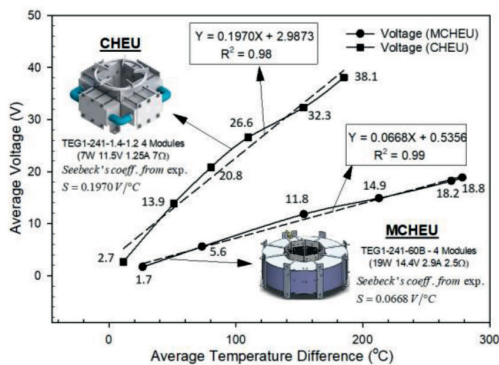


Fig. 17 Voltage (Open Circuit) of TEG

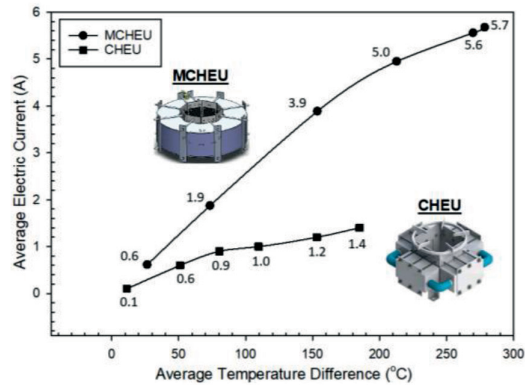


Fig. 18 Current (Short Circuit) of TEG

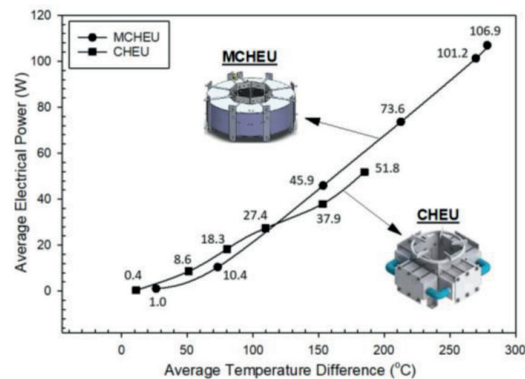


Fig. 19 Electric power of TEG

the TEG is used to withstand the high temperature from the exhaust gas. Also, a LED lamp (12VDC 7W) can be operated by both CHEU and MCHEU at the same condition but MCHEU can produce more power than CHEU.

Fig. 20 presents the battery-charging time between CHEU and MCHEU. The result shows that the battery (12V 7.5Ah) is charged by MCHEU and CHEU at the rate of 0.37 V/hr and 0.16 V/hr, respectively. Hence, the charging time of MCHEU and CHEU can be estimated for 4.5 hours and 7.8 hours at a full-charged

battery. It means that the battery can be charged up faster by MCHEU. As a result, the electric current flowing from MCHEU into the battery increases with an increasing duty cycle as the duty cycle is further increased [15].

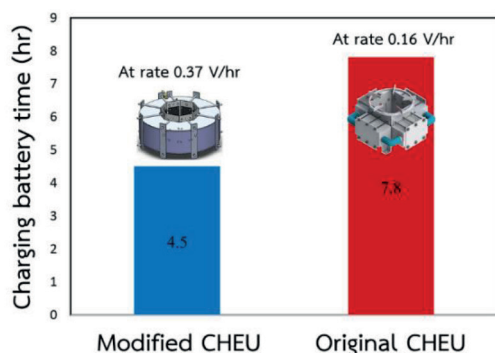


Fig. 20 Battery charging time

To complete the comparison, the energy-saving provided by the gas stove with CHEU and MCHEU is presented in **Fig. 21**.

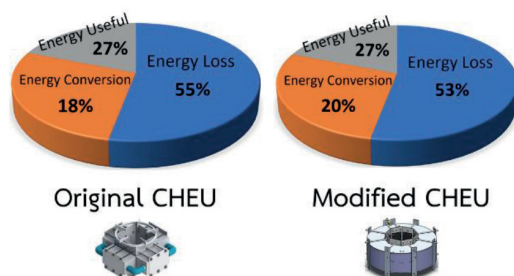


Fig. 21 Energy saving aspect

The pie charts are divided into three parts, namely, the useful energy, the energy conversion (Electricity), and the energy loss. It is clear that the gas stove with MCHEU and CHEU can recovery the electricity by approximately 20%

and 18%, respectively. Also, energy loss decreases by 2%. This means that the waste heat can be converted to the electricity increasingly by the gas cooking stove with MCHEU. Also, the gas cooking stove with MCHEU can operate with being more friendly environment. and the use of MCHEU does not affect the thermal efficiency of the gas stove.

4. Conclusion and Suggestion

This work emphasizes the importance of developing the waste heat energy conversion device to generate some electricity through a TEG. Through analysis and discussion, the performances of the MCHEU are investigated and compared with those of the original CHEU as concluded in **Table 3**.

Table 3 Comparison between CHEU and MCHEU

No	List for comparison	Original CHEU results	Modified CHEU result	Differences
1	Temperature differences of TEG (Range)	11.2 – 185 °C	26.5 – 278.5 °C	↑ 15.3 – 93.5 °C
2	Maximum Power produced by TEG	51.79 W	107 W	↑ 55.13 W
3	Charging battery time at full (12 V 7.5 Ah of battery capacity)	7.8 hr (at rate 0.16 V/h)	4.5 hr (at rate 0.37 V/h)	↓ 3.3 hr
4	Thermal efficiency of gas stove	27.8 %	27.5 %	↓ 0.3 %
5	TEG efficiency	5.3 %	7 %	↑ 1.7 %
6	Conversion efficiency heat to electricity	18 %	20 %	↑ 2 %

The interesting results are summarized as follows:

1) The maximum temperature difference of MCHEU is on an average value of 278.5°C at a maximum heat load condition, thereby obtaining the maximum voltage, current, and power are 18.83 V, 5.67 A, and 107 W respectively.

2) On average, the temperature difference of MCHEU is 50% higher

than that of CHEU. 3) The output power obtained by MCHEU is higher than that of CHEU with an average value of 52%, and takes less time about 40% for fully-charging a battery (12 V, 7.5 Ah). Nevertheless, MCHEU usage does not affect the thermal efficiency of the gas cooking stove. 4) The efficiency of an energy conversion obtained by MCHEU is 20%, which is higher than those of CHEU about 2%.

5. Acknowledgement

This research was supported by the Rajamangala University of Technology Krungthep. The author would like to thank Dr. Prasert Prapamonthon, Department of Aeronautical Engineering, International Academy of Aviation Industry, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang for his useful suggestion.

6. References

- [1] Energy Policy and Planning Office, Ministry of Energy. (2562). Annual Energy Statistics Report. [Online]. Available: www.eppo.go.th
- [2] National Statistical Office, Thailand. (2562). Energy Statistics. [Online]. Available: www.nso.go.th
- [3] P. Agarwal, A. Anand and R. Gupta, "Performance Analysis of Conventional LPG Cooking Stove," *International Journal on Applied Bioengineering*, vol. 9, no. 1, pp. 15–19, Jan. 2015.
- [4] E. O. B. Ogedengbe and F. D. Ajibade, "Improved Burner Efficiency and Fuel Consumption in Domestic Cooking Appliances," *Energy and Policy Research*, vol. 4, no. 1, pp. 29–35, Jan. 2017.
- [5] S. Jugjai and N. Rungsimuntuchart, "High Efficiency Heat-recirculating Domestic Gas Burners," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 26, pp. 581–592, 2002.
- [6] S. -S. Hou and C. -H. Chou, "Parametric Study of High-Efficiency and Low-Emission Gas Burners," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2013, pp. 1–7, 2013.
- [7] D. Champier, J.P. Bedecarrats, M. Rivaletto and F. Strub, "Thermoelectric power generation from biomass cook stoves," *Energy*, vol. 35, no. 2, pp. 935–942, Feb. 2010.
- [8] R. Sakdanuphab and A. Sakulkalavek, "Design, empirical modelling and analysis of a waste-heat recovery system coupled to a traditional cooking stove," *Energy Conversion and Management*, vol. 139, pp. 182–193, May 2017.
- [9] A. Montecucco, J. Siviter and A.R. Knox, "Combined heat and power system for stoves with thermoelectric generators," *Applied Energy*, vol. 135, pp. 1336–1342, Jan. 2017.
- [10] M.J. Deasy, S.M. O'Shaughnessy, L. Archer and A.J. Robinson,

- “Electricity generation from biomass cookstove with MPPT power management and passive liquid cooling,” *Energy for Sustainable Development*, vol. 43, pp. 162–172, Apr. 2018.
- [11] S. Hemhirun and D. Tanpradit, “Power Generation from Heat Loss of Gas Stove by Thermoelectric Generator Unit,” *RMUTP Research Journal*, vol. 12, no. 1, pp. 92–101, Jan.-Jun. 2018.
- [12] D. Enescu, “Thermoelectric Energy Harvesting: Basic Principles and Applications,” in *Green Energy Advances*, D. Enescu, Ed. Intech Open, 2019.
- [13] F. M. Siddiqui and V.K. Maurya, “Study of TEG When Connected in Series and Parallel Combinations Along With a DC-DC Converter,” *Vivechan International Journal of Research*, vol. 8, no. 1, pp. 76–86, 2017.
- [14] I. Osmani, Md. M. Haque, Md. A. Hossain, Md. M. Haque, and H. K. Bhuiyan, “Fabrication of a biomass stove and conversion of electricity from waste heat using TEG,” in *Proceedings of the 1st International Conference on Mechanical Engineering and Applied Science (ICMEAS 2017)*, Dhaka, Bangladesh, 2017, p. 020050.
- [15] C. E. Kinsella, S. M. O’Shaughnessy, M. J. Deasy, M. Duffy and A. J. Robinson, “Battery charging considerations in small scale electricity generation from a thermoelectric module,” *Applied Energy*, vol. 114, pp. 80–90, Feb. 2014.

วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร

RMUTP RESEARCH JOURNAL

วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร เป็นวารสารสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่และถ่ายทอดผลงานวิจัยและผลงานวิชาการทั้งภายในและภายนอกมหาวิทยาลัย ซึ่งอยู่ในฐานข้อมูลของศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (Thai Journal Citation Index Centre, TCI Centre) กำหนดการตีพิมพ์เผยแพร่ ปีละ 2 ฉบับ (ราย 6 เดือน) ฉบับที่ 1 มกราคม-มิถุนายน และฉบับที่ 2 กรกฎาคม-ธันวาคม โดยรับพิจารณาบทความทั้งที่เป็นภาษาไทยและภาษาอังกฤษ โดยมีกรอบของวารสารที่ครอบคลุมในสาขาวิชาต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี วิทยาศาสตร์ประยุกต์ และวิศวกรรมศาสตร์ ทั้งนี้บทความดังกล่าวผู้เขียนต้องไม่เสนอบทความฉบับเดียวกันกับที่เคยตีพิมพ์ในวารสารอื่นมาก่อน เว้นแต่ผ่านการเรียบเรียงและเพิ่มเนื้อหาใหม่ บทความแต่ละบทความต้องผ่านการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิที่ตรงตามสาขาของบทความนั้นอย่างน้อย 2 ท่าน และผู้ทรงคุณวุฒิต้องมาจากหน่วยงานที่ต่างกันกับผู้เขียน อีกทั้งชุดผู้ทรงคุณวุฒิที่ประเมินบทความเดียวกันนั้นจะต้องมาจากหน่วยงานที่ต่างกันด้วย ซึ่งจัดประเภทของการ Peer Review เป็นแบบ Double Blinded หมายถึงผู้ทรงคุณวุฒิจะไม่ทราบชื่อผู้เขียน และผู้เขียนจะไม่ทราบชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ

1. ประเภทของบทความที่ตีพิมพ์

1.1 บทความวิจัย (Research article) เป็นบทความที่ได้จากงานวิจัย มีเนื้อหาสำคัญที่อธิบายถึงระเบียบวิธีวิจัย ผลการทดลอง การวิเคราะห์ผล และการสรุปผลที่ชัดเจน

1.2 บทความวิชาการ (Academic article) เป็นบทความที่มีลักษณะดังนี้

1. Literature review เป็นบทความจากการทบทวนเอกสาร ซึ่งเป็นผลมาจากการวิจัยหลายๆ ครั้ง ถือเป็นบทความที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง
2. Technical paper เป็นบทความนำเสนอกระบวนการในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ การทดสอบภาคสนาม รวมไปถึงเทคนิคการวิเคราะห์ใหม่ๆ
3. Professional practice เป็นบทความที่มาจากประสบการณ์ หรือความชำนาญของผู้เขียน
4. Policy paper เป็นบทความเกี่ยวกับนโยบายด้านต่างๆ ของหน่วยงาน

2. ส่วนประกอบของบทความแต่ละประเภท

2.1 บทความวิจัย

ก. ส่วนปก ให้แยกออกเป็น 2 หน้า โดยปกหน้าแรกเป็นภาษาไทย และปกหน้าที่สองเป็นภาษาอังกฤษ โดยแต่ละปกหน้าต้องจบในหน้าหนึ่งของตัวเอง ประกอบด้วย

1. ชื่อบทความ (Title) ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ควรสั้นกะทัดรัด ชี้ถึงเป้าหมายหลักของการวิจัย
2. ชื่อผู้เขียนทุกท่าน (Authors) ให้ระบุเฉพาะชื่อ และ นามสกุล โดยไม่ต้องมีคำนำหน้านาม
3. หน่วยงาน/สังกัด และที่อยู่ สำหรับการติดต่อทางไปรษณีย์ ของผู้เขียนทุกท่าน
4. ตัวเลขยก ให้เขียนไว้บนนามสกุล เพื่อระบุว่าเป็นตำแหน่งทางวิชาการและที่อยู่ของผู้เขียนท่านใด

5. **บทคัดย่อ (Abstract) ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ** ควรสั้นตรงประเด็น ครอบคลุมสาระสำคัญของ การศึกษา ได้แก่ วัตถุประสงค์ วิธีการ ผลและการวิจารณ์ เป็นต้น
6. **คำสำคัญ (Keywords) ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ** เป็นการกำหนดคำสำคัญที่สามารถนำไปใช้ เป็นคำสืบค้นในระบบฐานข้อมูล ประมาณ 3-5 คำ
7. **ผู้นิพนธ์ประสานงาน (Corresponding Author)** ให้ทำเครื่องหมาย * ไว้บนนามสกุล และระบุ หมายเลขโทรศัพท์ และไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (E-mail)

ข. ส่วนเนื้อหา ประกอบด้วย

1. **บทนำ (Introduction)** เป็นส่วนของความสำคัญและมูลเหตุที่นำไปสู่การวิจัย พร้อมวัตถุประสงค์ และการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง
2. **ระเบียบวิธีวิจัย (Research Methodology) หรือ วิธีการทดลอง (Experimental Methods)** เป็นการอธิบายวิธีการดำเนินการวิจัย การทดลอง อุปกรณ์ เครื่องมือ การติดตั้งและการวัดค่าต่างๆ
3. **ผลการทดลองและวิจารณ์ผล หรือ ผลการศึกษาและอภิปรายผล (Results and Discussion)** ควรเสนอผลอย่างชัดเจน ตรงประเด็น เป็นผลที่ค้นพบโดยลำดับตามหัวข้อที่ศึกษาพร้อมการวิจารณ์ ผล
4. **สรุป (Conclusion)** สรุปสาระสำคัญที่ได้จากการศึกษา
5. **กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements)** เป็นการระบุแหล่งทุนสนับสนุนการวิจัย (ถ้ามี) และการ ระบุหน่วยงานหรือบุคคลที่ให้การสนับสนุน ช่วยเหลือการทำวิจัย
6. **เอกสารอ้างอิง (References)** ต้องใช้ตามแบบที่วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร กำหนด อย่างเคร่งครัดและเขียนเอกสารอ้างอิง เฉพาะเอกสารที่นำมาอ้างอิงในเนื้อหาเท่านั้น

2.2 บทความวิชาการ

ก. ส่วนปก มีส่วนประกอบเหมือนบทความวิจัย

ข. ส่วนเนื้อหา ประกอบด้วย

1. **บทนำ (Introduction)** เป็นส่วนของที่มาและมูลเหตุของการเขียนบทความ
2. **ผลการศึกษา/ผลการดำเนินการ (Results)** เป็นการเสนอผลอย่างชัดเจน ตามประเด็นโดยลำดับตาม หัวข้อที่ศึกษาหรือดำเนินการ
3. **สรุป (Conclusion)** สรุปสาระสำคัญที่ได้จากการศึกษา
4. **กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements)** เป็นการระบุแหล่งทุนสนับสนุนการวิจัย (ถ้ามี) และการ ระบุหน่วยงานหรือบุคคลที่ให้การสนับสนุน ช่วยเหลือการทำวิจัย
5. **เอกสารอ้างอิง (References)** ใช้รูปแบบที่วารสารฯ กำหนดอย่างเคร่งครัดและเขียนอ้างอิงเฉพาะ เอกสารที่ปรากฏในบทความเท่านั้น

3. รูปแบบการพิมพ์บทความ

ให้ใช้ไฟล์รูปแบบบทความ (Template Form) ซึ่งสามารถดาวน์โหลดได้จาก <http://journal.rmutp.ac.th/> โดยไฟล์รูปแบบบทความมีการตั้งค่าหน้ากระดาษแล้ว ดังนี้

รายการ	บทความภาษาไทย	บทความภาษาอังกฤษ
ระยะขอบ	ขอบบน (Top Margin) 2.50 ซม. ขอบล่าง (Bottom Margin) 2.00 ซม. ขอบซ้าย (Left Margin) 2.00 ซม. ขอบขวา (Right Margin) 2.00 ซม.	ขอบบน (Top Margin) 2.50 ซม. ขอบล่าง (Bottom Margin) 2.00 ซม. ขอบซ้าย (Left Margin) 2.00 ซม. ขอบขวา (Right Margin) 2.00 ซม.
ขนาดกระดาษ	ขนาดกระดาษ A4 (กำหนดเอง) ความกว้าง 19 ซม. ความสูง 27 ซม.	ขนาดกระดาษ A4 (กำหนดเอง) ความกว้าง 19 ซม. ความสูง 27 ซม.
เค้าโครง	หัวกระดาษและท้ายกระดาษ เลือกหน้า คู่และหน้าคี่ต่างกัน หน้าแรกต่างกัน จาก ขอบหัวกระดาษ และ ท้ายกระดาษ ตั้ง ค่า 1.25	หัวกระดาษและท้ายกระดาษ เลือกหน้า คู่และหน้าคี่ต่างกัน หน้าแรกต่างกัน จาก ขอบหัวกระดาษ และ ท้ายกระดาษ ตั้ง ค่า 1.25
รูปแบบตัวอักษร	TH SarabunPSK	Times New Roman
หมายเลขหน้า	ตำแหน่ง ด้านบน ไม่แสดงหมายเลขหน้าในหน้าแรก หน้าคี่ ใส่หมายเลขหน้า ตำแหน่งบนขวา หน้าคู่ ใส่หมายเลขหน้า ตำแหน่งบนซ้าย ขนาดตัวอักษร 14	ตำแหน่ง ด้านบน ไม่แสดงหมายเลขหน้าในหน้าแรก หน้าคี่ ใส่หมายเลขหน้า ตำแหน่งบนขวา หน้าคู่ ใส่หมายเลขหน้า ตำแหน่งบนซ้าย ขนาดตัวอักษร 14
การย่อหน้า	ส่วนปก ย่อ 1.00 ซม. ส่วนเนื้อหา ย่อ 1.00 ซม.	ส่วนปก ย่อ 1.00 ซม. ส่วนเนื้อหา ย่อ 1.00 ซม.
จำนวนหน้าทั้งหมด	8-12 หน้า	8-12 หน้า
ชื่อวารสาร (ภาษาไทย)	อยู่ตำแหน่งกึ่งกลางของหัวกระดาษ หน้า คู่ ขนาดตัวอักษร 14 (ตัวหนา เอียง) “วารสารวิชาการและวิจัย มทร. พระนคร ปีที่ x ฉบับที่ x...xxxx- xxxx.,xxx”	อยู่ตำแหน่งกึ่งกลางของหัวกระดาษ หน้า คู่ ขนาดตัวอักษร 14 (ตัวหนา เอียง) “วารสารวิชาการและวิจัย มทร. พระนคร ปีที่ x ฉบับที่ x...xxxx- xxxx.,xxx”
ชื่อวารสาร (ภาษาอังกฤษ)	อยู่ตำแหน่งกึ่งกลางของหัวกระดาษ หน้า คี่ ขนาดตัวอักษร 14 (ตัวหนา) “RMUTP Research Journal, Vol. ..., No.,xxxx-xxxx.,xxx”	อยู่ตำแหน่งกึ่งกลางของหัวกระดาษ หน้า คี่ ขนาดตัวอักษร 14 (ตัวหนา) “RMUTP Research Journal, Vol. ..., No.,xxxx-xxxx.,xxx”

รายการ	บทความภาษาไทย	บทความภาษาอังกฤษ
การพิมพ์ส่วนปก	พิมพ์เต็มหน้ากระดาษ (พิมพ์ 1 คอลัมน์)	พิมพ์เต็มหน้ากระดาษ (พิมพ์ 1 คอลัมน์)
การพิมพ์ส่วนเนื้อหา	พิมพ์ 2 คอลัมน์ แต่ละคอลัมน์กว้าง 7.1 ซม. ระยะห่างระหว่างคอลัมน์ 0.8 ซม.	พิมพ์ 2 คอลัมน์ แต่ละคอลัมน์กว้าง 7.1 ซม. ระยะห่างระหว่างคอลัมน์ 0.8 ซม.
ชื่อบทความ	ทั้งชื่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษพิมพ์ด้วย TH SarabunPSK ขนาด 22 ตัวตรงหนา จัดชิดขอบซ้ายหน้ากระดาษ	ชื่อภาษาอังกฤษ พิมพ์ด้วย Times New Roman ขนาด 16 ตัวตรงหนา จัดชิดขอบซ้ายหน้ากระดาษ
ชื่อผู้เขียน	ทั้งชื่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษ พิมพ์ด้วย TH SarabunPSK ขนาด 18 ตัวตรงไม่หนา จัดชิดขอบซ้ายหน้ากระดาษ	ชื่อภาษาอังกฤษ พิมพ์ด้วย Times New Roman ขนาด 12 ตัวตรง ไม่หนา จัดชิดขอบซ้ายหน้ากระดาษ
ตัวเลขยกบนนามสกุล	ขนาดตัวอักษรเท่ากับชื่อและนามสกุล แต่ทำเป็นตัวยก	ขนาดตัวอักษรเท่ากับชื่อและนามสกุล แต่ทำเป็นตัวยก
หน่วยงาน/สังกัด และที่อยู่	ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ พิมพ์ด้วย TH SarabunPSK ขนาดตัวอักษร 14	พิมพ์ด้วย Times New Roman ขนาดตัวอักษร 11
ชื่อบทคัดย่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษ	พิมพ์ด้วย TH SarabunPSK ขนาด 20 (ตัวตรงหนา) จัดชิดขอบซ้ายหน้ากระดาษ	พิมพ์ด้วย Times New Roman ขนาด 14 (ตัวตรงหนา) จัดชิดขอบซ้ายหน้ากระดาษ
เนื้อหาบทคัดย่อภาษาไทยและภาษาอังกฤษ	พิมพ์ด้วย TH SarabunPSK ขนาดตัวอักษร 14	พิมพ์ด้วย Times New Roman ขนาดตัวอักษร 12
ชื่อคำสำคัญ	ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ด้วย TH SarabunPSK ขนาด 14 (ตัวหนา)	ภาษาอังกฤษ ด้วย Times New Roman ขนาด 12 (ตัวหนา)
คำสำคัญ	ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ขนาดตัวอักษร 14 ตัวตรง บาง ใส่เครื่องหมาย Semicolon (;) ระหว่างคำ	ด้วย Times New Roman ขนาด 12 ตัวตรง บาง ใส่เครื่องหมาย Semicolon (;) ระหว่างคำ
ชื่อผู้สนับสนุนประสานงาน หมายเลขโทรศัพท์ และไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์	ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ด้วย TH SarabunPSK ขนาด 13 (ตัวเอียง หนา)	ด้วย Times New Roman ขนาด 10 (ตัวเอียง หนา)

รายการ	บทความภาษาไทย	บทความภาษาอังกฤษ
ชื่อหัวเรื่องใหญ่	พิมพ์ด้วย TH SarabunPSK ขนาด 18 (ตัวตรง หนา) จัดชิดซ้าย ประกอบด้วย 1.บทนำ 2.วิธีการทดลอง หรือ วิธีการศึกษา 3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลหรือ ผลการศึกษาและอภิปรายผล 4. สรุป 5. กิตติกรรมประกาศ และ 6. เอกสารอ้างอิง	พิมพ์ด้วย Times New Roman ขนาด 14 (ตัวตรง หนา) จัดชิดซ้าย ประกอบด้วย 1.Introduction 2. Research Methodology 3. Results and Discussion 4. Conclusion 5. Acknowledgement and 6. References
ชื่อหัวเรื่องรอง	TH SarabunPSK ขนาด 16 (ตัวตรง หนา) จัดชิดซ้าย	Times New Roman ขนาด 12 (ตัวตรง หนา) จัดชิดซ้าย
ชื่อหัวเรื่องย่อย	TH SarabunPSK ขนาด 14 (ตัวตรง หนา) จัดชิดซ้าย	Times New Roman ขนาด 12 (ตัวตรง หนา) จัดชิดซ้าย
เนื้อหาบทความ	TH SarabunPSK ขนาด 14	Times New Roman ขนาด 12
ชื่อตาราง	TH SarabunPSK 14 ตัวบาง แต่เฉพาะคำว่า “ ตารางที่ ” ต้องเป็นตัวหนา จัดชิดขอบซ้าย	Times New Roman 12 ตัวบาง แต่เฉพาะคำว่า “ Table 1 ” ต้องเป็นตัวหนา จัดชิดขอบซ้าย
ชื่อรูป	TH SarabunPSK 14 ตัวบาง แต่เฉพาะคำว่า “ รูปที่ ” ต้องเป็นตัวหนา จัดกึ่งกลางคอลัมน์	Times New Roman 12 ตัวบาง แต่เฉพาะคำว่า “ Fig.1. ” ต้องเป็นตัวหนา จัดกึ่งกลางคอลัมน์
สมการ	ใช้โปรแกรม MathType ด้วยรูปแบบอักษร Times New Roman ขนาด 12 สัญลักษณ์หรือตัวแปรที่เขียนในสมการจะต้องมีรูปแบบเดียวกันกับสัญลักษณ์หรือตัวแปรที่อยู่ในคำอธิบายหรือในเนื้อหา และให้จัดชิดขอบซ้ายสุดเสมอ ส่วนเลขบอกลำดับสมการ ให้เขียนลำดับเลขใส่ในวงเล็บและจัดชิดขวาสุด	ใช้โปรแกรม MathType ด้วยรูปแบบอักษร Times New Roman ขนาด 12 สัญลักษณ์หรือตัวแปรที่เขียนในสมการจะต้องมีรูปแบบเดียวกันกับสัญลักษณ์หรือตัวแปรที่อยู่ในคำอธิบายหรือในเนื้อหา และให้จัดชิดขอบซ้ายสุดเสมอ ส่วนเลขบอกลำดับสมการ ให้เขียนลำดับเลขใส่ในวงเล็บและจัดชิดขวาสุด
คำอธิบายตัวแปรจากสมการ	ใช้โปรแกรม MathType ด้วยรูปแบบอักษร Times New Roman ขนาด 12 จัดชิดขอบซ้ายสุด เครื่องหมาย “=” ของตัวแปรในแต่ละบรรทัดต้องตรงกันในแนวดิ่ง	ใช้โปรแกรม MathType ด้วยรูปแบบอักษร Times New Roman ขนาด 12 จัดชิดขอบซ้ายสุด เครื่องหมาย “=” ของตัวแปรในแต่ละบรรทัดต้องตรงกันในแนวดิ่ง

รายการ	บทความภาษาไทย	บทความภาษาอังกฤษ
เนื้อหาในตาราง / แผนภูมิ	TH SarabanPSK 12 ตัวบาง	Times New Roman 10 ตัวบาง
การอ้างอิงในเนื้อเรื่อง และการอ้างอิงท้าย เรื่อง	ให้ดูจากข้อที่ 5. การอ้างอิง	ให้ดูจากข้อที่ 5. การอ้างอิง

4. การส่งต้นฉบับบทความ

การส่งต้นฉบับบทความ ผู้เขียนสามารถส่งบทความออนไลน์ ได้ที่ <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/RMUTP/index> หรือสอบถามข้อมูลได้ที่ กองบรรณาธิการวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร 399 ถนนสามเสน แขวงวชิรพยาบาล เขตดุสิต กรุงเทพฯ 10300 โทรศัพท์ 0 2665 3777 ต่อ 6645 โทรสาร 0 2665 3860

5. จริยธรรม บทบาท และหน้าที่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จัดทำวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ภายใต้หลักธรรมาภิบาลและเคร่งครัดในด้านจริยธรรม บทบาท และหน้าที่ต่อสังคมอย่างแท้จริง มีการ แต่งตั้งกองบรรณาธิการภายในและภายนอกโดยผู้บริหารสูงสุดของมหาวิทยาลัย กำหนดหน้าที่และความรับผิดชอบอย่างชัดเจน สามารถปฏิบัติงานได้อย่างโปร่งใสและมีความเป็นอิสระในการพัฒนาวารสารให้ก้าวหน้าและมีคุณภาพ การจัดทำวารสารเป็นการเชื่อมต่อบุคคลหรือกลุ่มบุคคล 3 ส่วน ประกอบด้วย 1) ผู้เขียน 2) บรรณาธิการ และกองบรรณาธิการวารสาร และ 3) ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ ภายใต้การตรวจสอบ คุณภาพวารสารโดยศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (TCI) ทั้งนี้เพื่อให้วารสารมีคุณภาพเป็นไปตามหลักสากล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จึงได้กำหนดจริยธรรม บทบาท และหน้าที่ของผู้เขียน บรรณาธิการ และกองบรรณาธิการวารสาร และผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ ไว้ดังต่อไปนี้

5.1 จริยธรรม บทบาท และหน้าที่ของผู้เขียน

5.1.1 บทความที่ผู้เขียนยื่นเข้ามายังวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร เพื่อให้พิจารณานั้น จะต้องไม่ไปยื่นต่อวารสารอื่นใดในคราวหรือเวลาเดียวกัน เว้นแต่ไม่ผ่านการพิจารณาและได้รับเอกสารยืนยันผลการพิจารณาจากกองบรรณาธิการแล้ว จึงจะสามารถดำเนินการยื่นต่อวารสารอื่นใดได้

5.1.2 ผู้เขียนต้องไม่ทำการคัดลอกผลงานทางวิชาการของผู้เขียนอื่น และไม่ตีพิมพ์ซ้ำผลงานของตนเอง (Self-Plagiarism) ไม่คัดลอกผลงานของตนเอง สำหรับข้อมูลอื่นใดของผู้เขียนอื่นที่ผู้เขียนนำมาใช้ในบทความจะต้องทำการเขียนอ้างอิงในส่วนของเนื้อหาและอ้างอิงส่วนท้ายให้ถูกต้องตามหลักวิชาการ

5.1.3 ผู้เขียนจะต้องนำเสนอผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง การวิเคราะห์ หรือการคำนวณอย่างตรงไปตรงมา ไม่บิดเบือนข้อมูล (Fabrication or Misrepresentation) จากความเป็นจริงและไม่สร้างหลักฐานเท็จเพื่อรองรับผลลัพธ์ของตนเอง

5.1.4 ผู้เขียนจำเป็นต้องกล่าวคำขอบคุณบุคคลหรือหน่วยงานไว้ในกิตติกรรมประกาศ หากผู้เขียนได้รับทุนวิจัยความอนุเคราะห์ด้านเครื่องมือ เครื่องจักร อุปกรณ์ หรือช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ เพื่อให้ได้มาซึ่งความสำเร็จของบทความฉบับนั้น ๆ

5.1.5 วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ไม่อนุญาตให้เพิ่มเติมบุคคลอื่นใดที่ไม่มีส่วนเกี่ยวข้องเข้ามามีชื่ออยู่ในบทความ เช่น ไม่มีส่วนร่วมในการทำวิจัย หรือไม่มีส่วนร่วมในการเขียนบทความนั้น ๆ โดยผู้เขียนทุกท่านที่มีชื่อในบทความจะต้องมีส่วนร่วมรับผิดชอบ

5.2 จริยธรรม บทบาท และหน้าที่ของบรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสาร

5.2.1 บรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร มีบทบาทและหน้าที่ในการพิจารณาบทความเบื้องต้นก่อนรับเข้าสู่กระบวนการของวารสาร ประกอบด้วย การพิจารณาเนื้อหาบทความกับกรอบของวารสาร การพิจารณารูปแบบการเขียนบทความ การพิจารณาความเข้มข้นของบทความ การลักลอกผลงานทางวิชาการ การเลือกและกำหนดผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ และพิจารณาคุณภาพโดยรวมของบทความก่อนเข้าสู่กระบวนการประเมินบทความต่อไป

5.2.2 บรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสารต้องพิจารณาบทความเบื้องต้นบนพื้นฐานคุณธรรมและจริยธรรม โดยไม่เอนเอียงหรือใช้ความรู้สึกส่วนตัวพิจารณาบทความนั้น ต้องไม่มีอคติต่อผู้เขียนหรือต่อหน่วยงานของผู้เขียน

5.2.3 บรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสารต้องกำหนดหรือเลือกผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความที่มีความเชี่ยวชาญตรงตามสาขาของบทความนั้น ๆ โดยผู้ทรงคุณวุฒิที่กำหนดนั้นจะต้องไม่มาจากหน่วยงานเดียวกันกับผู้เขียน และผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความทุกท่านที่ประเมินบทความเดียวกันจะต้องไม่มาจากหน่วยงานเดียวกันด้วย ทั้งนี้เพื่อป้องกันผลประโยชน์ทับซ้อนที่อาจเกิดขึ้น

5.2.4 บรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสารต้องเก็บรักษาความลับเกี่ยวกับผู้เขียนและผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ ไม่ให้ทราบข้อมูลซึ่งกันและกัน หมายความว่า ผู้ทรงคุณวุฒิที่เป็นผู้ประเมินบทความจะต้องไม่ทราบชื่อผู้เขียนและชื่อหน่วยงาน และผู้เขียนจะต้องไม่ทราบชื่อและหน่วยงานผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ (ประเภทของ Peer Review เป็นแบบ Double Blinded) เพื่อป้องกันปัญหาความขัดแย้งที่อาจเกิดขึ้นได้

5.2.5 บรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ต้องไม่ตีพิมพ์บทความของตนเองลงในวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ที่กำกับดูแลอยู่โดยไม่มีข้อยกเว้น

5.2.6 บรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ต้องไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อนใด ๆ อันไม่ชอบธรรมและผิดหลักจริยธรรมกับผู้เขียน และกับผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ โดยต้องไม่มีการเรียกรับผลประโยชน์ใด ๆ ทั้งสิ้น

5.2.7 บรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสารต้องควบคุมและกำกับกระบวนการต่าง ๆ ของวารสารอย่างตรงไปตรงมา ไม่เข้าข้างผู้เขียนใด หรือให้ความช่วยเหลือที่ไม่ถูกต้อง ผิดหลักคุณธรรม จริยธรรม และมาตรฐานวิชาการ

5.2.8 บรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มีหน้าที่ต้องให้ความร่วมมือ ควบคุมและกำกับให้วารสารมีความถูกต้องและมีคุณภาพเป็นไปตามที่ศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทยกำหนดตามมาตรฐาน

5.3 จริยธรรม บทบาท และหน้าที่ของผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ

5.3.1 ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความมีหน้าที่ประเมินบทความในด้านต่าง ๆ ตามรูปแบบที่วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร กำหนดด้วยความเข้มข้นและให้ข้อเสนอแนะหรือเหตุผลเชิงวิชาการอันเป็นประโยชน์ต่อผู้เขียน

5.3.2 ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความต้องประเมินบทความที่ได้รับมอบหมายจากบรรณาธิการและกองบรรณาธิการวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร ให้แล้วเสร็จในช่วงระยะเวลาที่กำหนด เพื่อประโยชน์สูงสุดของผู้เขียนบทความ

5.3.3 ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความต้องพิจารณาบทความที่ได้รับจากบรรณาธิการหรือกองบรรณาธิการถึงความเชี่ยวชาญของตนเองกับเนื้อหาในบทความ หากเห็นว่าบทความที่ได้รับมีเนื้อหาไม่ตรงตามความเชี่ยวชาญที่แท้จริงจะต้องแจ้งกองบรรณาธิการวารสารให้รับทราบโดยเร็วและปฏิเสธการประเมิน

5.3.4 ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความต้องมีหลักจริยธรรมในการประเมินบทความ ไม่เอนเอียงหรือมีอคติต่อ เนื้อหาบทความ ต้องไม่ใช้ความคิดเห็นส่วนตัวที่ไม่เป็นไปตามหลักทฤษฎีเชิงวิชาการ ปราศจากหลักฐานที่น่าเชื่อถือได้มาเป็นเกณฑ์ในการตัดสินบทความนั้น ๆ

5.3.5 ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความต้องเก็บรักษาความลับ ด้วยการไม่เปิดเผยข้อมูลเนื้อหาในบทความของผู้เขียนแก่บุคคลอื่นใดในช่วงระยะเวลาของการประเมินบทความนั้น

6. การอ้างอิง

การอ้างอิงในบทความวิจัยและบทความวิชาการสำหรับวารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กำหนดการอ้างอิงให้เป็นไปตามรูปแบบ IEEE (อ้างอิงจาก <https://www.ieee.org/documents/ieeecitationref.pdf> หรือที่ http://www.ieee.org/documents/style_manual.pdf) โดยต้องเขียนเป็นภาษาอังกฤษเท่านั้น หากบทความที่อ้างอิงมาจากบทความภาษาไทย ต้องแปลเป็นภาษาอังกฤษให้ถูกต้อง สำหรับการใส่อ้างอิงในเนื้อเรื่อง (In-text citations) ให้ใช้เครื่องหมาย [_] โดยมีตัวอย่างการเขียน เช่น [1] หรือ [2] หรือ [1], [2] หรือ [1], [3]-[8] หรือ [1]-[3] หรือ [9], [10], [15], [16] หากมีการอ้างอิงซ้ำบทความเดิมให้ใช้หมายเลขเดิม

ในกรณีมีการอ้างอิงในเนื้อหาด้วยการกำหนดชื่อผู้แต่งบทความให้เขียนตามตัวอย่าง ดังนี้ K. S. Karukanan [1] หรือ L. A. Hoi and S. D. Woo [2] หรือ P. A. Abarwale et al. [3]

ในส่วนของการอ้างอิงส่วนท้าย (Reference List) จะต้องเรียงตามลำดับบทความที่เขียนอ้างอิงในเนื้อเรื่อง ซึ่งจำแนกรูปแบบการเขียนอ้างอิงส่วนท้ายได้ดังต่อไปนี้

1) การอ้างอิงจากบทความในวารสาร (Journal Articles)

รูปแบบ: [1] Author, "Title of Article," *Title of Journal*, Volume, Issue, Pages. Year.

ตัวอย่าง:

- [1] H. Li, Z. Huang, L. Cheng, S. Kong and S. Liu, "Structure and dielectric properties of novel low temperature co-fired Bi₂O₃-RE₂O₃-MoO₃ (RE=Pr, Nd, Sm, and Yb) based microwave ceramics," *Ceramics International Journal*, vol. 43, no. 5, pp. 4570-4575, Apr. 2017.

2) การอ้างอิงจากการนำเสนอผลงานในการประชุมทางวิชาการ (Conference Technical Articles)

รูปแบบ: [1] Author, "Title of paper," in *Title of Conference*, Conference date, Editor, Ed. Location: Publisher, Year, Pages.

ตัวอย่าง:

- [2] T. Fedushchak, M. Uimin, S. Zhuravkov and A. Vosmerikov, "Nanopowder hydrogenation catalysts of diesel fraction components," in *Proceeding of 7th International Forum on Strategic Technology (IFOST)*, Tomsk Polytechnic University Tomsk, Russia, 2012, pp. 1–4.
- [3] W. Herz, M. Süßer, A. Ulbricht and F. Wüchner, "The operation experience with the dual cooling system of the polo coil (two phase-supercritical He)," in *Proceedings of the Sixteenth International Cryogenic Engineering Conference/International Cryogenic Materials Conference*, Germany, 1997, pp. 469–472.

3) การอ้างอิงจากหนังสือ (Books)

รูปแบบ: [1] Author. *Title of Book*, Editor, ed. Location: Publisher, Year, Pages.

ตัวอย่าง:

- [4] R. C. Hibbeler, *Mechanics of Materials*, 9th ed. Boston: Pearson, 2013.
- [5] R. M. Burton, B. Obel and G. DeSanctis, *Organizational Design: A Step-by-Step Approach*, 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 2011.

4) การอ้างอิงจากบทในหนังสือ

รูปแบบ: [1] J. K. Author, "Title of chapter in the book," in *Title of His Published Book*, xth ed. City of Publisher, Country if not USA: Abbrev. of Publisher, year, ch. x, sec. x, pp. xxx–xxx.

ตัวอย่าง:

- [6] L. Stein, "Random patterns," in *Computers and You*, J. S. Brake, Ed. New York: Wiley, 1994, pp. 55-70.
- [7] R. L. Myer, "Parametric oscillators and nonlinear materials," in *Nonlinear Optics*, vol. 4, P. G. Harper and B. S. Wherret, 1st ed. San Francisco, CA: Academic, 1977, pp. 47-160.

5) การอ้างอิงจากวิทยานิพนธ์ (Theses and Dissertations)

รูปแบบ:

- [1] J. K. Author, "Title of dissertation," Ph.D. dissertation, Abbrev. Dept., Abbrev. Univ., City of Univ., Abbrev. State, year.
- [2] J. K. Author, "Title of thesis," M.S. thesis, Abbrev. Dept., Abbrev. Univ., City of Univ., Abbrev. State, year.

ตัวอย่าง:

Research Articles

- ◆ Development of a Biodegradable Film from Jicama Starch (*Pachyrhizus erosus* (L.) Urban) for Plant Bag Application
Pawinee Theamdee and Kawinna Sooksamran
- ◆ Methylene Blue Adsorption Using Pomelo Peels Charcoal Prepared by Traditional Charcoal Burning
Patcharanan Junploy Krittayaporn Loungdee and Naparat Jiwalak
- ◆ Effect and Optimal Variable of Mangosteen Peel Powder for Green Sand Mold
Anuwit Sonsiri Unchalee Inkampa Noppadon Amdee and Thanapat Maneesaeng
- ◆ Reduction of Oil Absorption in Chinese Water Chestnut Fry Product with Electric Field Technology
Chidchanok Markjan
- ◆ Antioxidant Activities of *Crateva adansonii* DC. subsp. *trifoliata* (Roxb) Jacobs
Suratchana Dathong and Suthira Maneechai
- ◆ Effects of Sugar, Citric Acid and Pectin Content on Quality of Mulberry Fruit Leather Product
Piyanuch Roskhrua and Maliwan Kitchaicharoen
- ◆ A Study on Influence of Swirl Angle of Burner Port on Behavior of Heat Transfer to a Vessel of High-pressure Cooking Stove by Computational Fluid Dynamics
Anirut Matthujak Thanatkit Chanakul Mana Wichangarm Thanarath Sriveerakul
Bongkot Chanthamas Sedthawatt Sucharitpwatskul and Sutthisuk Phongthanapanich
- ◆ Drying of Chilli with Thermoelectric Air Preheater Assisted Low Temperature Dryer
Patchara Wongpaisarnkit Krawee Treeamnuk and Tawarat Treeamnuk
- ◆ Comparative Investigation of a Subcritical ORC, Supercritical ORC, and Trilateral Rankine Cycle Power Plant for a Heat Source Temperature of 210-250°C
Thongchai Taemtat and Atit Koonsrisuk
- ◆ Simulation of a 500 kW Sloped Solar Chimney Power Plant Powered by Industrial Waste Heat
Bandit Chansawang and Atit Koonsrisuk
- ◆ Experimental Testing of Scroll Expander Performance for a 1 kW ORC Power Plant
Thanit Hinlailoed and Atit Koonsrisuk
- ◆ Hot-melt Adhesive Production from Natural Rubber
Siwarote Boonrasri
- ◆ Effect of Pre-treatment on Quality of Cassava Chips
Prawta Chantaro Parisut Chalerchaiwat and Thepkunya Harnsilawat
- ◆ Simulation on Combustion Behavior of Gas-saving Burner S-10 by Computational Fluid Dynamics
Phattharawan Chimchom Anirut Matthujak Mana Wichangarm Thanarath Sriveerakul and Sedthawatt Sucharitpwatskul
- ◆ Performance Investigate of Trilateral, Subcritical and Supercritical Organic Rankine Cycle Driven by Geothermal Heat Source
Anugul Mongpraneet and Atit Koonsrisuk
- ◆ The Development of Waste Heat Energy Conversion Device to Generate Electricity through Thermoelectric Generator (TEG) Apply to LPG Cookstove
Ditthaphat Tanpradit