



วารสารวิชาการ พลังงาน ทดแทน สู่ชุมชน

ปีที่ 3 ฉบับที่ 3 เดือนกันยายน-ธันวาคม 2563

J-REC

JOURNAL OF
RENEWABLE ENERGY
FOR COMMUNITY

ISSN 2630-0273

ISSN 2773-8639 (online)

J-REC BY TRECA

วารสารวิชาการ
**พลังงานทดแทน
สู่ชุมชน**

J-REC

JOURNAL OF RENEWABLE ENERGY
FOR COMMUNITY

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเป็นเอกสารเผยแพร่ผลงานวิชาการและงานวิจัยทางด้านพลังงานทดแทนในเครือข่ายพลังงานของประเทศไทย
2. เพื่อเป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนความรู้ทั้งภาคทฤษฎีและภาคปฏิบัติ และงานวิชาการใหม่ๆ ด้านพลังงานทดแทนระหว่างนักวิจัยและผู้ใช้งานในทั้งภาครัฐและเอกชน
3. เพื่อส่งเสริมสนับสนุนให้คณาจารย์ บุคลากรทางการศึกษา นิสิต นักศึกษา และผู้สนใจ ทำผลงานทางด้านพลังงานทดแทนที่เป็นประโยชน์ต่อสังคมและประเทศชาติ
4. เพื่อเป็นเอกสารรวบรวมรายงานวิจัยและบทความทางวิชาการที่มีคุณภาพและมีคุณค่าทางด้านพลังงานทดแทนสู่การใช้งานจริงเพื่อความยั่งยืนทางด้านพลังงานของประเทศ



เจ้าของและลิขสิทธิ์ สมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย
ที่ตั้งสมาคมฯ ศูนย์วิจัยและบริการด้านพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
39 ม.1 ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110
โทร. 0-2549-3497 www.reca.or.th/jrec

วารสารวิชาการพลังงานทดแทนสู่ชุมชน

พิมพ์ออกเผยแพร่ 3 ฉบับต่อปี ตั้งแต่ เดือนมกราคม-เมษายน พฤษภาคม-สิงหาคม และ กันยายน-ธันวาคม
ติดต่อขอรับเป็นสมาชิกได้โดยตรงที่ สมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย

พิมพ์ที่บริษัท ทริปเพิ้ล กรุป จำกัด

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

วัตถุประสงค์สมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชน แห่งประเทศไทย

- ส่งเสริมความร่วมมือ ทางด้านวิชาการระหว่างภาครัฐและภาคประชาชน ในด้านพลังงานทดแทน การอนุรักษ์พลังงานและ สิ่งแวดล้อมเพื่อชุมชนต่างๆในประเทศไทย
- จัดหาทุน เพื่อสนับสนุนการศึกษา วิจัย ฝึกอบรม การดำเนินโครงการด้านพลังงานทดแทน ให้กับภาครัฐและภาคประชาชน
- ไม่ดำเนินการ ส่งเสริมและพัฒนากิจกรรมใดๆ ที่มุ่งไปสู่การดำเนินงานทางการเมือง
- ไม่ดำเนินการ ให้มีการกระทำการอันผิดต่อขนบธรรมเนียมและจารีตประเพณีที่ดีของสังคมไทย

หลักการและเหตุผล

ในปัจจุบันทั่วโลกต้องเผชิญกับปัญหาด้านพลังงานที่รุนแรงกว่าในอดีตมากอันเนื่องมาจากความต้องการใช้พลังงานและราคาพลังงานเชื้อเพลิงที่มีการปรับตัวอยู่ในระดับสูงอย่างต่อเนื่อง ผลกระทบที่สำคัญจากปัญหาดังกล่าวคือความมั่นคง ทางด้านการจัดหาพลังงาน ขณะเดียวกันการใช้พลังงานที่สูงขึ้นก็ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจนเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก (Green House Effects) ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลกอย่างรุนแรง ดังนั้นเพื่อแก้ไขปัญหาด้านพลังงานดังกล่าว จึงได้มีแนวคิดในการส่งเสริมและสนับสนุนให้มีการใช้พลังงานหมุนเวียนกันมากขึ้น โดยเฉพาะพลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่มีการนำมาใช้เป็นระยะเวลายาวนาน ไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม (Green & Clean Energy) อีกทั้งยังสามารถนำมาใช้ได้อย่างไม่มีวันหมดสิ้น

จุดมุ่งหมายสำคัญ

การทำงานกันทั้งส่วนภาครัฐและประชาชนในการใช้พลังงานทดแทน การอนุรักษ์พลังงานและใส่ใจต่อสิ่งแวดล้อมของชุมชนในประเทศไทย ตลอดจนการศึกษาวิจัย ดำเนินการหาเทคโนโลยีที่เหมาะสมต่างๆ มาใช้เป็นพลังงานทดแทนเพื่อความเหมาะสมและให้เกิดความยั่งยืนของชุมชนและประชาชนในประเทศไทย

วารสารวิชาการพลังงานทดแทนสู่ชุมชน JOURNAL OF RENEWABLE ENERGY FOR COMMUNITY

คณะกรรมการจัดทำวารสาร วิชาการพลังงานทดแทนสู่ชุมชน

คณะกรรมการที่ปรึกษา

อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.ทงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์
ศาสตราจารย์ ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช

คณะผู้ก่อตั้งวารสารวิชาการพลังงานทดแทนสู่ชุมชน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิรัช โยชนรินทร์
ศาสตราจารย์ ดร.ทงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์
ศาสตราจารย์ ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช
รองศาสตราจารย์ ดร.อิสริยา หรรษาจรรยาโรจน์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญเรือง มะรังศรี
นาย มนต์รี ชาลีเครือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรี ศรีนนท์ฉัตร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วราวุธ อริยวิริยะนันท์
รองศาสตราจารย์ ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง
พลโท กฤตภาส คงคาพิสุทธ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนิท เรืองรุ่งชัยกุล
พลอากาศโทเอกราช ขาติชัย
นายวิชัย เพ็ชรทองคำ
นายวิสูตร ยังพลจันทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญฤทธิ์ ประสาทแก้ว
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อำนาจ เรืองวารี
อาจารย์สมควร แววดี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย มณีวรรณ
ดร.วรจิตต์ เศรษฐพรศักดิ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จอมภพ แววดี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ปรีชา ศรีประภาคาร
ดร.อำพล อาภาธนากร
ดร.ภาสวรรณ วัชรดำรงศักดิ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิสิษฐ์ มณีโชติ
หม่อมหลวงลือศักดิ์ จักรพันธ์
นายพิเนตร พรสวรรค์
นายสุกิต แก้วศรีสด

นายกสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย
ที่ปรึกษาสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย
ที่ปรึกษาสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย
ที่ปรึกษาสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย
ที่ปรึกษาสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย
เลขานุการสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย
กรรมการสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย
กรรมการสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย
กรรมการสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย
กรรมการสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย
กรรมการสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย
กรรมการสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย
กรรมการสมาคมฯ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
กรรมการสมาคมฯ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
กรรมการสมาคมฯ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
กรรมการสมาคมฯ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
กรรมการและประชาสัมพันธ์สมาคมฯ
อุปนายกภาคใต้
อุปนายกภาคตะวันออกเฉียงเหนือ
อุปนายกภาคกลาง
อุปนายกภาคเหนือตอนบน
อุปนายกภาคเหนือตอนล่าง
อุปนายกภาคตะวันออก
ปฎิคมสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย
นายทะเบียนสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย
และสมาชิกสามัญสมาคมพลังงานทดแทน
สู่ชุมชนแห่งประเทศไทย

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เริงวุฒิ ชูเมือง
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ มาริณา มะห์นิ
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุรเชษฐ์ เพชรห้วยลึก
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธวัฒน์ชัย เทพนวล
 ผู้ช่วยเลขานุการฯ นันทพันธ์ นภัทรานันท์
 ดร.พลกฤษณ์ คล้ายวิตภัทร
 ดร.รวมพร นิคม
 ดร.โชคชัย เหมือนมาศ
 รองศาสตราจารย์ ดร.สมรักษ์ เกิดสุวรรณ
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติ นิลผึ้ง
 ดร.ธวัชชัย วงศ์ช่าง
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จารุวัฒน์ เจริญจิต
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ บัญญัติ นิยมवास
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติ ศุภลักษณ์ปัญญา
 ดร.อาริษา โสภากจารย์
 ดร.สายใจ แก้วอ่อน
 รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย เทพา
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พัฒนะ รักความสุข
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิระ สายศร
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธเนศ ไชยชนะ
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชูรัตน์ ธารารักษ์
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นัฐวุฒิ ดุษฎี
 รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล นามผล
 ดร.สมมาส แก้วล้วน
 รองศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา ภูริระวินิชกุล
 ดร.เกียรติศักดิ์ เสงี่ยม
 ดร.วาริช วีระพันธ์
 รองศาสตราจารย์ ดร.วรเชษฐ์ ภิรมย์ภักดี
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุษาวดี ตันติวรานุรักษ์
 รองศาสตราจารย์ ดร.วรรณุช แจ้งสว่าง
 ดร.วรจิตต์ เศรษฐพรค์
 ดร. สุรัชย์ ฌรรุจันทรศรี

 ดร.ชยานนท์ สวัสดิ์นันทนาท

 ดร.หทัยทิพย์ สิ้นธยา

 ดร.ณัฐยา ตันตรานนท์

 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรพันธ์ ดั่งทองสุข
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อชิตพล ศศิธรานุวัฒน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ
 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ
 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ
 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ
 วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ
 วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ
 วิศวกรรมพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ
 วิศวกรรมพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
 คณะอุตสาหกรรมมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
 วิทยาลัยรัตภูมิ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
 คณะพลังงานวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
 คณะพลังงานวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
 วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.ชุมพร
 วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้
 วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้
 วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้
 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
 เทคโนโลยีการจัดการอุตสาหกรรมมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
 วิศวกรรมเครื่องกลคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
 ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
 คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
 พลังงานและสิ่งแวดล้อมชุมชน มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่
 วิทยาลัยพัฒนาเศรษฐกิจและเทคโนโลยีชุมชนแห่งเอเชีย
 มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่
 วิทยาลัยพัฒนาเศรษฐกิจและเทคโนโลยีชุมชนแห่งเอเชีย
 มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่
 วิทยาลัยพัฒนาเศรษฐกิจและเทคโนโลยีชุมชนแห่งเอเชีย
 มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่
 วิทยาลัยพัฒนาเศรษฐกิจและเทคโนโลยีชุมชนแห่งเอเชีย
 มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่
 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
 มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ

บทบรรณาธิการ

วารสารวิชาการพลังงานทดแทนสู่ชุมชนเป็นงานวิชาการโดยความร่วมมือของเครือข่ายสมาชิกสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย (TRECA) ซึ่งเป็นฉบับที่ 3 ของปีที่ 3 วารสารฉบับนี้เป็นเนื้อหาของบทความทางวิชาการที่มุ่งสร้างผลงานที่เด่นทางด้านการวิจัยและมุ่งสู่การใช้งานจริง ซึ่งได้รวบรวมความรู้ทางวิชาการที่สามารถถ่ายทอดให้แก่สังคม ทางด้านพลังงานทดแทนในสาขาต่างๆ เพื่อให้วารสารนี้เป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนวิชาการและแนวความคิดในแวดวงวิชาการทั้งผู้วิจัยและผู้อ่านอันเป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่งในการสร้างผลงานทางวิชาการสู่ชุมชนและสังคม โดยดำรงไว้ซึ่งความเป็นตัวตนทางวิชาการของผู้เขียนและวัตถุประสงค์ของสมาคมฯ ที่ทรงคุณค่าบทความในวารสารฉบับนี้มีจำนวนทั้งสิ้น 10 บทความ ซึ่งในแต่ละบทความมีความเป็นไปได้ในทิศทางเดียวกันของรูปแบบพลังงานทดแทนต่างๆ ครอบคลุมกระบวนการในการวิจัยและการศึกษาสู่ภาคการใช้งาน ผู้อ่านจะได้รับความรู้ที่หลากหลายจากการอ่านวารสารฉบับนี้ ในแนวทางที่จะจุดประกายความคิดหรือการต่อยอดความคิดทางด้านพลังงานทดแทนสาขาต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการอ่านอย่างวิพากษ์และตั้งคำถาม เพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนในทางวิชาการอย่างสร้างสรรค์อันจะช่วยให้ความรู้และความคิดเดิมถูกแพร่ขยายออกไปได้อย่างกว้างขวาง อีกทั้งให้วารสารฉบับนี้เป็นแหล่งความรู้ในทุกระดับภาคส่วนของทุกคนในสังคมไทย โดยไม่ยึดติดตนเองและอยู่กับความรู้ความคิดเพียงบางมุมบางด้านเท่านั้น ทั้งนี้เพื่อให้ผู้เขียนและผู้อ่านมีความเป็นตัวตนทางวิชาการที่พร้อมจะพัฒนาตนเองอยู่เสมออย่างไม่หยุดนิ่งและท้ายที่สุดแล้วความรู้ความคิดที่ถูกต่อขยายออกไปนั้น ก็จะนำไปสู่การปรับเปลี่ยนกระบวนการทัศนทางความคิดของสังคมและชุมชนอย่างกว้างขวางอันจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางวิชาการของสังคมเพื่อความยั่งยืนของประเทศชาติกองบรรณาธิการขอขอบพระคุณคณะทำงานทุกท่าน คณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความวิชาการ และทุกภาคส่วนที่ได้สละเวลาอันมีค่าอ่านบทความ เพื่อความถูกต้องทางวิชาการและเป็นวารสารที่ดีต่อการพัฒนาประเทศ ทั้งนี้หากผู้อ่านมีความประสงค์จะตีพิมพ์บทความสามารถขอความกรุณาโปรดจัดเตรียมต้นฉบับให้เป็นไปตามรูปแบบของวารสารและส่งบทความทางออนไลน์ที่ www.reca.or.th เพื่อการพิจารณาและตีพิมพ์ในวารสารฉบับต่อไป

กองบรรณาธิการ



สารบัญ

นวัตกรรมด้านพลังงาน

การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในเครื่องอุ่นอากาศพลังแสงอาทิตย์	10
ด้วยแผ่นดูดซับความร้อนแบบครีบบสามเหลี่ยม	
ผลของอุณหภูมิร่วมที่มีต่อสมรรถนะทางความร้อนของปั๊มความร้อนแบบแคสเคด	18
เมื่อใช้สารผสมแบบซีโอทรอปิกสำหรับการทำความร้อนและความเย็นพร้อมกัน	
การออกแบบและสร้างหุ่นยนต์ชุดเจาะทางการเกษตรโดยใช้พลังงานทดแทน	26
การพัฒนาเครื่องอบแห้งเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบประหยัดพลังงาน	33

เชื้อเพลิงและความร้อนชุมชน

อัตราส่วนผสมสูงสุดของน้ำมันไพโรไลซิสเพื่อให้ได้มาตรฐานน้ำมันดีเซลของไทย	39
การประเมินทางเลือกในการใช้ประโยชน์โครงการก๊าซชีวภาพจากฟาร์มสุกร :	46
กรณีศึกษา ชุมชนหนองตาด อำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์	
รูปแบบการผลิตที่เหมาะสมต่อการผลิตเชื้อเพลิงชีวอัดแท่งจากมูลช้าง	52
ผลกระทบการปนเปื้อนอากาศที่มีผลต่อสมรรถนะและคุณสมบัติ	59
ถ่านชีวภาพเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง	

การออกแบบและจำลองการทำงานด้านพลังงาน

การศึกษาแบบจำลองความชื้นสมดุลไอโซเทอมของปลาตาก	66
--	----

สิ่งแวดล้อมเพื่อชุมชน

การวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านชีวภาพจากแกลบและซังข้าวโพดเพื่อปรับปรุงดิน	74
--	----

การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในเครื่องอุ่นอากาศพลังแสงอาทิตย์ด้วยแผ่นดูดซับความร้อน แบบครีบบสามเหลี่ยม Heat transfer augmentation in solar air heat with triangular-rib roughness on absorber plate

ภาณุวัฒน์ หุ่นพงษ์¹, พงษ์เจต พรหมวงศ์², พัทธ์ชัย พร้อมไธสง³, จิตกร กนกนัยการ⁴ และ สมพล สุกุลหลง^{5*}

¹ แขนงเทคโนโลยีเครื่องกล สาขาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี 321 ถนนนารายณ์มหาราช ตำบลทะเลชุบศร อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี 15000

² สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ซอยฉลองกรุง 1 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

³ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร 140 ถนนเชื่อมสัมพันธ์
เขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร 10530

⁴ สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกลและยานยนต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้า
พระนครเหนือ วิทยาเขตระยอง 19 หมู่ 11 ตำบลหนองละลอก อำเภอบ้านค่าย จังหวัดระยอง 21120

⁵ กลุ่มวิจัยระบบพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขต
ศรีราชา 199 หมู่ 6 ถนนสุขุมวิท ตำบลทุ่งสุขลา อำเภอสัตหีบ จังหวัดชลบุรี 20230

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอผลการทดลองการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและสมรรถนะเชิงความร้อนของเครื่องอุ่นอากาศพลังแสงอาทิตย์ด้วยการใช้แผ่นดูดซับความร้อนแบบครีบบสามเหลี่ยมและเปรียบเทียบกับแผ่นดูดซับความร้อนแบบดั้งเดิมหรือผิวเรียบ โดยครีบบสามเหลี่ยมบนแผ่นดูดซับความร้อนมีความสูง 4 ค่า คือ $b = 3, 6, 9$ และ 12 mm และระยะพิทช์ $P = 30$ mm อากาศที่ไหลผ่านท่ออุ่นอากาศพลังแสงอาทิตย์อยู่ในช่วงเลขเรย์โนลด์ระหว่าง 5200 ถึง 23,500 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้แผ่นดูดซับความร้อนแบบครีบบสามเหลี่ยมการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานสูงกว่าท่อผิวเรียบเป็นอย่างมาก ครีบบที่มีความสูง 12 mm มีค่าการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานสูงสุดตามด้วยครีบบที่มีความสูง $9, 6$ และ 3 mm ตามลำดับ โดยมีการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าแผ่นดูดซับความร้อนผิวเรียบ 3.3 เท่า ขณะที่ความเสียดทานมีค่าสูงกว่าแผ่นดูดซับความร้อนผิวเรียบ 15.7 เท่า เมื่อเปรียบเทียบในเชิงสมรรถนะพบว่าสมรรถนะเชิงความร้อนกรณีใช้แผ่นดูดซับความร้อนแบบครีบบให้ค่าสูงกว่าแผ่นดูดซับความร้อนผิวเรียบ

คำสำคัญ: การถ่ายเทความร้อน เครื่องอุ่นอากาศพลังแสงอาทิตย์ แผ่นดูดซับความร้อน สมรรถนะเชิงความร้อน

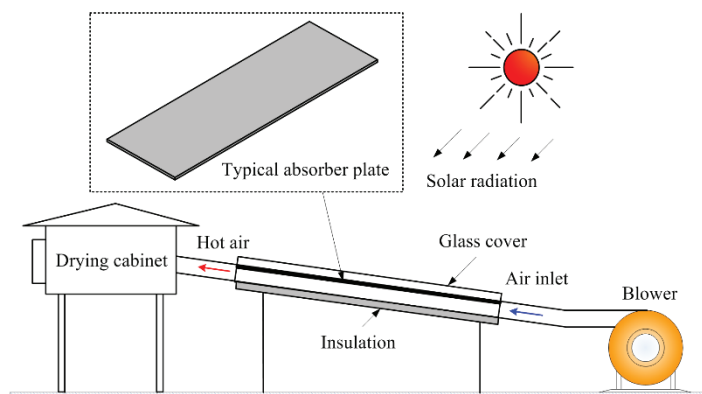
บทนำ

พลังงานหมุนเวียน เช่น พลังงานน้ำ พลังงานลม และพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นพลังงานที่มีอยู่อย่างไม่จำกัดบนโลก ต่างจากพลังงานฟอสซิลที่เริ่มลดลงเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของประชากร ความต้องการทางด้านพลังงานรวมทั้งความสะดวกสบายของมนุษย์ ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีการนำพลังงานหมุนเวียนมาใช้ให้เกินประโยชน์สูงสุดเพื่อทดแทนพลังงาน

*Corresponding author E-mail: sfengsps@src.ku.ac.th, sompol@eng.src.ku.ac.th

ฟอสซิลที่เริ่มลดลง พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานหมุนเวียนชนิดหนึ่งที่สามารถปราศจากมลพิษและมีอยู่อย่างไม่จำกัดบนโลกโดยสามารถนำมาผลิตกระแสไฟฟ้ารวมทั้งอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรได้อีกด้วย

เครื่องอุ่นอากาศพลังแสงอาทิตย์ (solar air heater) เป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่มีการดึงความร้อนจากแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ เช่น การบ่มผลไม้ การอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร เป็นต้น ซึ่งส่วนที่สำคัญในการดูดซับแสงอาทิตย์คือแผ่นดูดซับความร้อน (absorber plate) อย่างไรก็ตามแผ่นดูดซับความร้อนของเครื่องอุ่นอากาศพลังแสงอาทิตย์แบบดั้งเดิมให้ค่าการถ่ายเทความร้อนค่อนข้างต่ำเนื่องจากเป็นแผ่นเรียบ ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 เครื่องอุ่นอากาศพลังแสงอาทิตย์แบบดั้งเดิม

ดังนั้นจึงมีการพัฒนาแผ่นดูดซับความร้อนอย่างต่อเนื่องเพื่อเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนรวมทั้งสมรรถนะให้แก่เครื่องอุ่นอากาศพลังแสงอาทิตย์ด้วยการติดตั้งอุปกรณ์สร้างความปั่นป่วน เช่น ครีบริบ ร่อง ปีก และแผ่นกั้น เป็นต้น โดย Singh et al. [1] ทำการทดลองโดยใช้แผ่นดูดซับความร้อนแบบครีบริบรูปตัววีแยกตัวเพื่อเพิ่มถ่ายเทความร้อนของอุ่นอากาศพลังแสงอาทิตย์ ผลการทดลองพบว่า การติดตั้งครีบริบรูปตัววีแยกตัวบนแผ่นดูดซับความร้อน มีค่าการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานเพิ่มสูงขึ้น 3.04 และ 3.11 เท่า เมื่อเทียบกับแผ่นดูดซับความร้อนแบบดั้งเดิมหรือท่อผิวเรียบ ต่อมา Zhou and Ye [2] ศึกษาเชิงทดลองเกี่ยวกับคุณลักษณะทางความร้อนและการไหลกรณีติดตั้งปีกสี่เหลี่ยมคางหมูผิวโค้งที่บนแผ่นดูดซับความร้อน ผลการทดลองพบว่า ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุดพบที่การจัดวางปีกที่มีมุมปะทะสูง Tamna et al. [3] ทำการศึกษาเชิงทดลองร่วมกับการวิเคราะห์เชิงตัวเลขกรณีติดตั้งแผ่นกั้นรูปตัววีบนแผ่นดูดซับความร้อนภายในท่ออุ่นอากาศพลังแสงอาทิตย์เพื่อเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนรวมทั้งสมรรถนะเชิงความร้อน จากงานวิจัยพบว่า การติดตั้งแผ่นกั้นบนแผ่นดูดซับความร้อนด้านเดียวให้ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุดและผลการทดลองมีแนวโน้มที่สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลข Kumar and Kim [4] ทำการวิเคราะห์เชิงตัวเลขกรณีติดตั้งครีบริบรูปตัววีต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนภายในเครื่องอุ่นอากาศพลังแสงอาทิตย์ ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขพบว่า การจัดวางครีบริบรูปตัววีที่มีสัดส่วนความกว้างเท่ากับ 6 ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุด Jin et al. [5] ศึกษาเชิงตัวเลขของพฤติกรรมการไหลและการถ่ายเทความร้อนในเครื่องอุ่นอากาศพลังแสงอาทิตย์ด้วยการติดตั้งครีบริบรูปตัววีต่อเนื่องบนแผ่นดูดซับความร้อน พบว่า การติดตั้งครีบริบที่มีมุมปะทะ 45° ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุด Pandey et al. [6] ทำการทดลองเพื่อเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนโดยใช้แผ่นดูดซับความร้อนชนิดผิวโค้งแบบเว้าช่วง ผลการทดลองพบว่า การใช้แผ่นดูดซับความร้อนผิวโค้งแบบเว้าช่วงให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานสูงกว่าแผ่นดูดซับความร้อนแบบธรรมดาถึง 5.85 และ 4.96 เท่า ตามลำดับ Skullong et al. [7] ศึกษาการถ่ายเทความร้อนและการต้านทานการไหลภายในท่ออุ่นอากาศพลังแสงอาทิตย์โดยใช้แผ่นดูดซับความร้อนชนิดร่องผสมปีกพญานาค จากการทดลองพบว่า แผ่นดูดซับความร้อนชนิดร่องผสมปีกพญานาคให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าการใช้แผ่นดูดซับความร้อนผิวเรียบถึง 6 เท่า

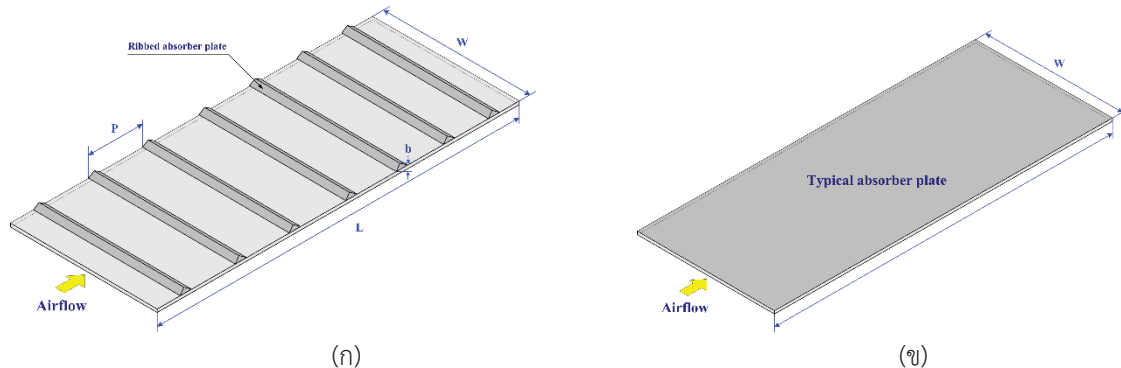
จากงานวิจัยในอดีตทั้งงานทางด้านการทดลองรวมทั้งการวิเคราะห์เชิงตัวเลขแสดงให้เห็นว่าการติดตั้งครีบริบบนแผ่นดูดซับความร้อนช่วยเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนรวมทั้งสมรรถนะเชิงความร้อนให้แก่เครื่องอุ่นอากาศพลัง

แสงอาทิตย์ได้เป็นอย่างดี ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการพัฒนาแผ่นดูดซับความร้อนแบบครีป (ribbed absorber plate) รูปทรงสามเหลี่ยมเพื่อเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนรวมทั้งสมรรถนะเชิงความร้อนของเครื่องอุ่นอากาศพลังแสงอาทิตย์ และทำการเปรียบเทียบกับแผ่นดูดซับความร้อนแบบดั้งเดิมหรือแผ่นดูดซับความร้อนผิวเรียบ (typical absorber plate) โดยใช้แผ่นฮีตเตอร์จำลองเป็นพลังงานแสงอาทิตย์และจ่ายความร้อนให้แก่แผ่นดูดซับความร้อนในสภาวะฟลักซ์ความร้อนคงที่ (Constant heat flux) การทดลองใช้อากาศเป็นของไหลทดสอบในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนที่มีค่าเลขเรย์โนลด์ส์ (Reynolds number, Re) ระหว่าง 5200 ถึง 23,500

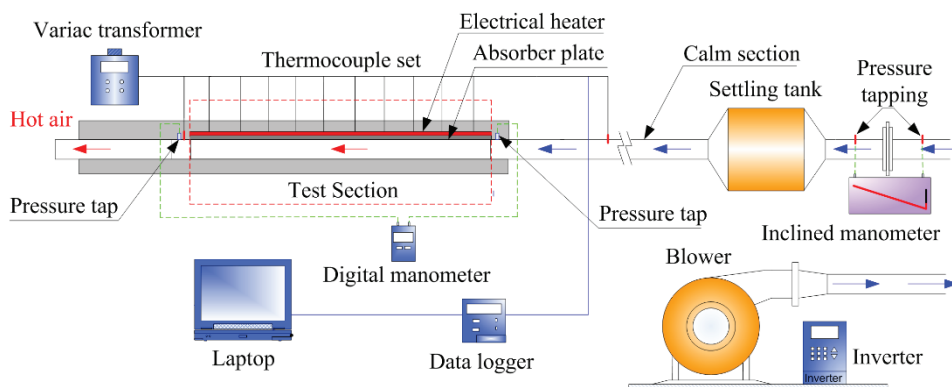
วิธีการวิจัย

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

แผ่นดูดซับความร้อนแบบครีปรูปทรงสามเหลี่ยมความยาว (L) 420 มิลลิเมตร กว้าง (W) 300 มิลลิเมตร และสูง (H) 30 มิลลิเมตร โดยครีปสามเหลี่ยมมีความสูง 3 ค่า คือ $b = 3, 6, 9$ และ 12 มิลลิเมตร และระยะพิทช์ $P = 30$ มิลลิเมตร แสดงดังภาพที่ 2 แผ่นดูดซับความร้อนถูกให้ความร้อนด้วยแผ่นฮีตเตอร์ไฟฟ้าขนาด 2000 วัตต์ (จำลองเป็นพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์) และมีการหุ้มฉนวนอย่างดีเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนออกสู่บรรยากาศภายนอก อุปกรณ์ชุดทดลองเครื่องอุ่นอากาศพลังแสงอาทิตย์แสดงดังภาพที่ 3 ซึ่งประกอบด้วยพัดลมเป็นตัวขับเคลื่อนอากาศเข้าสู่ส่วนทดสอบที่มีแผ่นดูดซับความร้อนแบบครีปรูปทรงสามเหลี่ยมและแผ่นดูดซับความร้อนผิวเรียบ โดยเทอร์โมคัปเปิลชนิด T (T-type thermocouple) จำนวน 12 ตัว ทำหน้าที่วัดอุณหภูมิผิวแผ่นดูดซับความร้อนและอีก 2 ตัว ทำหน้าที่วัดอุณหภูมิทางเข้าและทางออกส่วนทดสอบ โดยอุณหภูมิทั้งหมดจะส่งสัญญาณไปยัง Data Logger รุ่น FLUKE 2680A และประมวลผลมายังเครื่องคอมพิวเตอร์ ขณะที่ดิจิตอลมานอมิเตอร์ถูกนำมาใช้ในการวัดค่าความดันตกคร่อมส่วนทดสอบ ค่าความแม่นยำของเครื่องมือและอุปกรณ์การวัดแสดงรายละเอียดในเอกสารอ้างอิง [3,7]



ภาพที่ 2 (ก) แผ่นดูดซับความร้อนแบบครีปรูปทรงสามเหลี่ยมและ (ข) แผ่นดูดซับความร้อนผิวเรียบ



ภาพที่ 3 เครื่องอุ่นอากาศพลังแสงอาทิตย์

การวิเคราะห์

การวิเคราะห์ค่าการถ่ายเทความร้อน การสูญเสียความดัน และสมรรถนะเชิงความร้อนของเครื่องอุ่นอากาศพลังแสงอาทิตย์แสดงดังนี้

สมดุลความร้อนระหว่างความร้อนที่อากาศได้รับ (Q_{air}) และการพาความร้อน (Q_{conv}) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$Q_{air} = Q_{conv} \quad (1)$$

ดังนั้นสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย (h) หาได้จาก

$$h = \frac{\dot{m}C_p(T_o - T_i)}{A(\tilde{T}_w - T_b)} \quad (2)$$

เมื่อ $T_b = (T_o + T_i)/2$ และ $\tilde{T}_w = \sum T_w / 12$

เลขนัสเซิลต์เฉลี่ย (Nu) หาได้จาก

$$Nu = hD_h / k \quad (3)$$

การไหลของอากาศแสดงในเทอมของเลขเรย์โนลด์ซึ่งขึ้นอยู่กับเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (D_h) สามารถหาได้ดังนี้

$$Re = UD_h / \nu \quad (4)$$

ตัวประกอบเสียดทาน (f) หาได้จาก

$$f = \frac{2}{(L/D_h)} \frac{\Delta P}{\rho U^2} \quad (5)$$

A คือ พื้นที่การถ่ายเทความร้อนโดยการพาของแผ่นดูดซับความร้อน

C_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ

T_o คือ อุณหภูมิทางออก

T_i คือ อุณหภูมิทางเข้า

$\tilde{T}_w$ คือ อุณหภูมิผิวเฉลี่ยของแผ่นดูดซับความร้อน

$\dot{m}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ

U คือ ความเร็วเฉลี่ยของอากาศ

ν คือ ความหนืดเชิงจลน์ของอากาศ

สมรรถนะเชิงความร้อน (Thermal enhancement factor, TEF) จากเอกสารอ้างอิง [1–7] ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$TEF = \left(\frac{Nu}{Nu_0} \right) \left(\frac{f}{f_0} \right)^{-1/3} \quad (6)$$

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

การทดสอบแผ่นดูดซับความร้อนผิวเรียบ

เพื่อความถูกต้องในการทดลอง การตรวจสอบแผ่นดูดซับความร้อนผิวเรียบจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง ดังนั้นก่อนติดตั้งครีบบนแผ่นดูดซับความร้อนจึงมีการตรวจสอบแผ่นดูดซับความร้อนผิวเรียบโดยเปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter สำหรับค่าการถ่ายเทความร้อน และสหสัมพันธ์ของ Blasius สำหรับค่าตัวประกอบเสียดทาน จากเอกสารอ้างอิง [8] โดยสหสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงดังสมการที่ (7) และ (8) ตามลำดับ

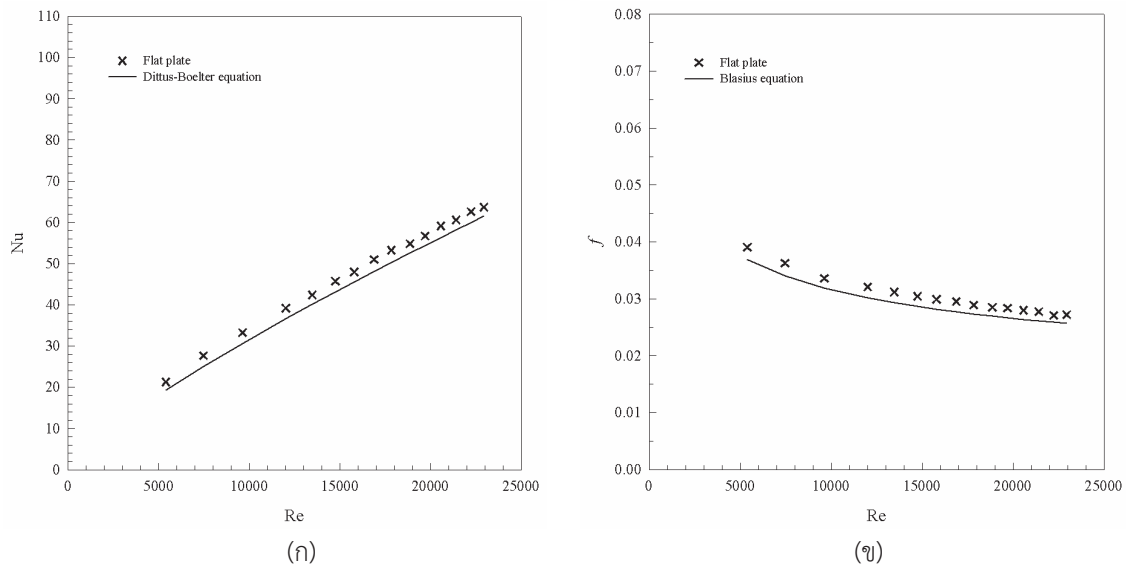
สหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (7)$$

สหสัมพันธ์ของ Blasius

$$f = 0.316 Re^{-0.25} \quad (8)$$

รูปที่ 4 (ก) และ (ข) แสดงการเปรียบเทียบค่า Nu และ f ระหว่างผลการทดลองกรณีแผ่นดูดซับความร้อนผิวเรียบเรียบกับสหสัมพันธ์จากสมการที่ (7) และ (8) ตามลำดับ จากผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบกับสหสัมพันธ์ พบว่า ค่า Nu มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย เท่ากับ 7.6% ขณะที่ f มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 8.3% โดยผลการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับสหสัมพันธ์ ดังนั้นจึงสามารถติดตั้งครีบบนแผ่นดูดซับความร้อนและทำการทดลองแผ่นดูดซับความร้อนแบบครีบบต่อไป

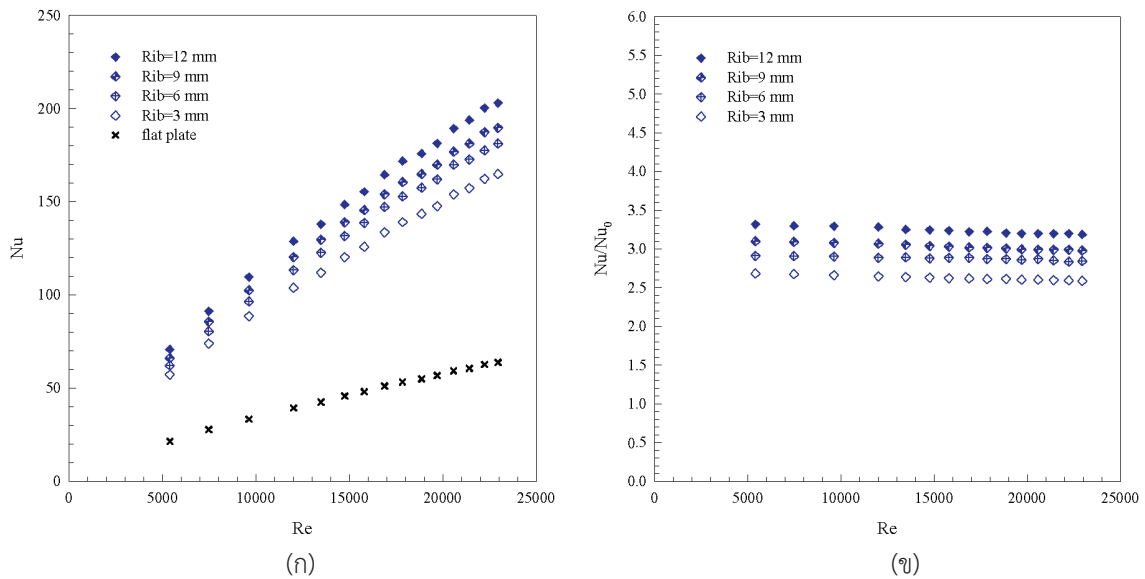


ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) Nu และ (ข) f กับ Re กรณีแผ่นดูดซับความร้อนผิวเรียบ

การถ่ายเทความร้อน

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการถ่ายเทความร้อนในพจน์ Nu กับการไหลในพจน์ Re แสดงดังภาพที่ 5 (ก) จากการทดลองพบว่า ค่า Nu เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของค่า Re การใช้แผ่นดูดซับความร้อนแบบครีบบความสูง 12 mm ให้ค่า Nu สูงสุดตามด้วยความสูง 9, 6 และ 3 mm ตามลำดับ เนื่องจากแผ่นดูดซับความร้อนแบบครีบบความสูง 12 mm มีพื้นที่การถ่ายเทความร้อนมากกว่าครีบบความสูงอื่นๆ ทำให้สามารถเพิ่มระดับความปั่นป่วนและขัดขวางการพัฒนาชั้นขอบเขตความร้อน (thermal boundary layer) บนแผ่นดูดซับความร้อนได้ดีส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น เมื่อทำการเปรียบเทียบกับแผ่นดูดซับความร้อนผิวเรียบพบว่าการใช้แผ่นดูดซับความร้อนแบบครีบบให้ค่า Nu สูงกว่าถึง 2.6–3.3 เท่า

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซิลท์กรณีใช้แผ่นดูดซับความร้อนแบบครีบบต่อเลขนัสเซิลท์ของแผ่นดูดซับความร้อนผิวเรียบ (Nu/Nu_0) กับค่า Re แสดงดังภาพที่ 5 (ข) โดยพบว่าค่า Nu/Nu_0 มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อค่า Re เพิ่มขึ้น แผ่นดูดซับความร้อนแบบครีบบสามารถช่วยเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนได้เป็นอย่างดี โดยกรณีครีบบ ความสูง 12, 9, 6 และ 3 mm มีค่า Nu/Nu_0 เฉลี่ยเท่ากับ 3.2, 3.0, 2.9 และ 2.7 ตามลำดับ



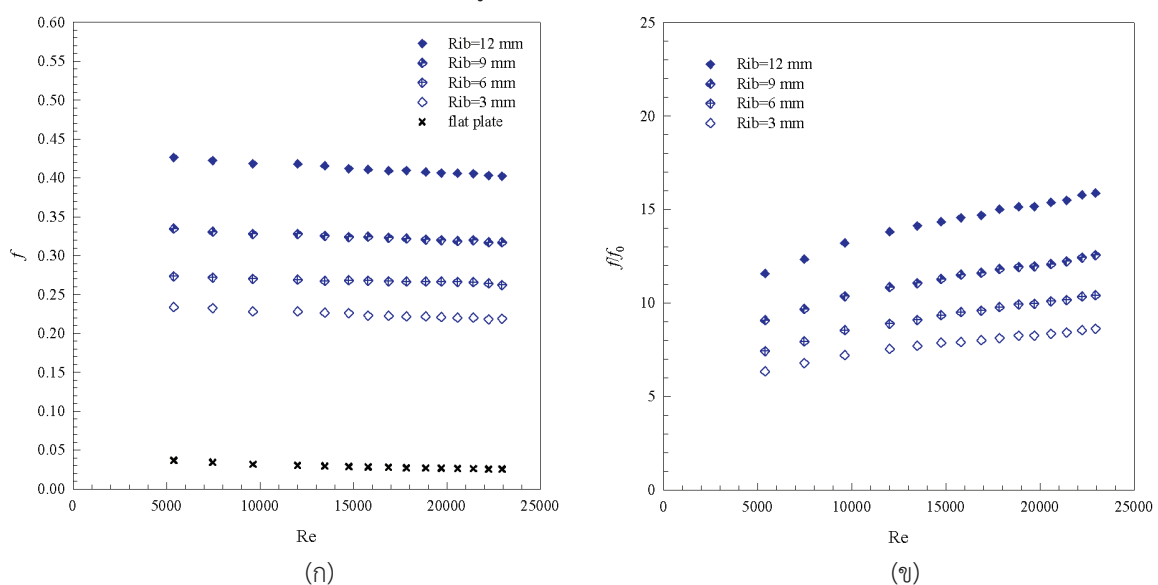
ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) Nu และ (ข) Nu/Nu₀ กับ Re

ความเสียดทาน

การต้านทานการไหลของอากาศที่ไหลผ่านแผ่นดูดซับความร้อนแสดงในพจน์ของตัวประกอบเสียดทาน (f) และ อัตราส่วนตัวประกอบเสียดทาน (f/f_0)

ภาพที่ 6 (ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า f กับ Re จากภาพแสดงให้เห็นถึงความเสียดทานที่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับแผ่นดูดซับความร้อนผิวเรียบเนื่องจากการใช้แผ่นดูดซับความร้อนแบบครีบบีมีพื้นที่ในการขัดขวางการไหลของของไหลมาก ทำให้ของไหลเพิ่มระดับความปั่นป่วนและก่อให้เกิดความเสียดทานสูงขึ้นโดยเฉพาะครีบบีที่มีความสูง 12 mm การใช้แผ่นดูดซับความร้อนแบบครีบบีมีค่า f สูงกว่าแผ่นดูดซับความร้อนผิวเรียบ 6.3–15.7 เท่า ซึ่งกรณีครีบบีความสูง 12 mm มีค่า f สูงสุด ตามด้วยครีบบีความสูง 9, 6 และ 3 mm ตามลำดับ

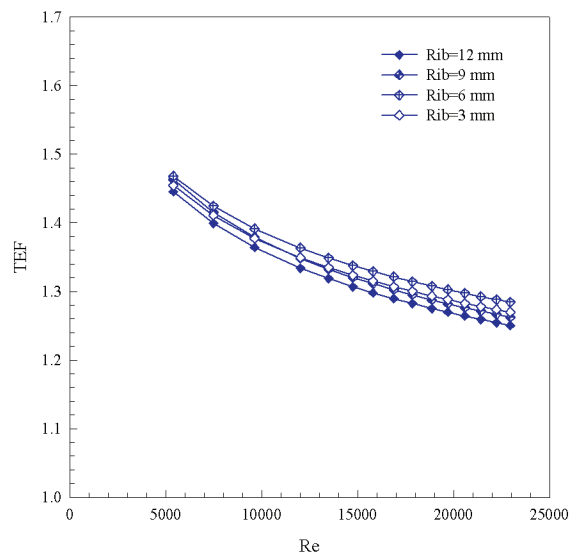
ภาพที่ 6 (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทานกรณีแผ่นดูดซับความร้อนแบบครีบบีต่อตัวประกอบเสียดทานของแผ่นดูดซับความร้อนผิวเรียบ (f/f_0) พบว่า เมื่อค่า Re เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า f/f_0 เพิ่มขึ้นตาม โดย f/f_0 มีค่าเฉลี่ย 14.4, 11.3, 9.4 และ 7.9 สำหรับกรณีครีบบีความสูง 12, 9, 6 และ 3 mm ตามลำดับ



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) f และ (ข) f/f_0 กับ Re

สมรรถนะเชิงความร้อน

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการประเมินผลสมรรถนะของเครื่องอุ่นอากาศพลังแสงอาทิตย์คือสมรรถนะเชิงความร้อน (Thermal Enhancement Factor, TEF) จากสมการที่ (6) และความสัมพันธ์ระหว่าง TEF กับ Re แสดงดังภาพที่ 7 โดยพบว่าค่า TEF มีแนวโน้มลดลงเมื่อค่า Re เพิ่มขึ้น การใช้แผ่นดูดซับความร้อนแบบครีบบีค่า TEF อยู่ในช่วง 1.26–1.45, 1.27–1.47, 1.31–1.49 และ 1.29–1.48 สำหรับกรณีครีบความสูง 12, 9, 6 และ 3 mm ตามลำดับ การใช้แผ่นดูดซับความร้อนแบบครีบความสูง 6 mm มีค่า TEF สูงสุดเท่ากับ 1.49 อย่างไรก็ตามแม้ว่าแผ่นดูดซับความร้อนแบบครีบความสูง 6 mm ไม่ได้ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุดก็ตามแต่ค่าตัวประกอบเสียดทานก็มีค่าไม่สูงมากด้วยเช่นกัน เมื่อนำมาคำนวณหาค่าสมรรถนะของเครื่องอุ่นอากาศพลังแสงอาทิตย์ (สมการที่ 6) ส่งผลให้แผ่นดูดซับความร้อนแบบครีบที่มีความสูง 6 mm มีค่า TEF สูงสุดสำหรับกรณีทดสอบนี้



ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง TEF กับ Re

สรุปผลการวิจัย

การศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและสมรรถนะเชิงความร้อนของเครื่องอุ่นอากาศพลังแสงอาทิตย์ด้วยการใช้แผ่นดูดซับความร้อนแบบครีบบีสามเหลี่ยมต่อการถ่ายเทความร้อน ความเสียดทาน และสมรรถนะเชิงความร้อนของเครื่องอุ่นอากาศพลังแสงอาทิตย์ในช่วงการไหลปั่นป่วนที่ค่า $Re = 5200-23,500$ พบว่าการใช้แผ่นดูดซับความร้อนแบบครีบช่วยเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าแผ่นดูดซับความร้อนผิวเรียบถึง 3.3 เท่า โดยแผ่นดูดซับความร้อนแบบครีบความสูง 12 mm ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานสูงสุด ขณะที่ค่าสมรรถนะเชิงความร้อนสูงสุดในกรณีทดสอบพบที่กรณีแผ่นดูดซับความร้อนแบบครีบความสูง 6 mm โดยมีค่าเท่ากับ 1.49

เอกสารอ้างอิง

- [1] Singh, S., Chander, S., Saini, J.S. (2011). Heat transfer and friction factor correlations of solar air heater ducts artificially roughened with discrete V-down ribs, *Energy*, vol. 36, 2011, pp. 5053–5064.
- [2] Zhou, G.B., Ye, Q.L. (2012). Experimental investigations of thermal and flow characteristics of curved trapezoidal winglet type vortex generators, *Applied Thermal Engineering*, vol. 37, pp. 241–248.
- [3] Tamna, S., Skullong, S., Thianpong, C., Promvongse, P. (2014). Heat transfer behaviors in a solar air heater channel with multiple V-baffle vortex generators, *Solar Energy*, vol. 110, pp. 720–735.

- [4] Kumar, A., Kim, M.H. (2015). Effect of roughness width ratios in discrete multi V-rib with staggered rib roughness on overall thermal performance of solar air channel, *Solar Energy*, vol. 119, pp. 399–414.
- [5] Jin, D., Zhang, M., Wang, P., Xu, S. (2015). Numerical investigation of heat transfer and fluid flow in a solar air heater duct with multi V-shaped ribs on the absorber plate, *Energy*, vol. 89, 2015, pp. 178–190.
- [6] Pandey, N.K., Bajpai, V.K., Varun. (2016). Experimental investigation of heat transfer augmentation using multiple arcs with gap on absorber plate of solar air heater, *Solar Energy*, vol. 134, pp. 314–326.
- [7] Skullong, S., Promvong, P., Thianpong, C., Pimsarn, M. (2016). Thermal performance in solar air heater channel with combined wavy-groove and perforated-delta wing vortex generators, *Applied Thermal Engineering*, vol. 100, pp. 611–620.
- [8] Incropera, F.P., Dewitt, P.D., Bergman, T.L., Lavine, A.S. (2012). *Foundations of Heat Transfer*, sixth ed., John-Wiley & Sons Inc.

ผลของอุณหภูมิร่วมที่มีต่อสมรรถนะทางความร้อนของปั๊มความร้อนแบบแคสเคด
เมื่อใช้สารผสมแบบซีโอโทรปิกสำหรับการทำความร้อนและความเย็นพร้อมกัน

Effect of Intermediate Temperature on Thermal Performance of Cascade Heat
Pump with Zeotropic Mixtures for Simultaneous Heating and Cooling

ปริญญ์ พงษ์สาระนันท์กุล¹ และ อรรถกร อาสนคำ^{2*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50200

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50200

บทคัดย่อ

การทำความร้อนและความเย็นพร้อมกันในกรณีที่มีผลต่างอุณหภูมิทางด้านร้อนและด้านเย็นมีค่าสูง ปั๊มความร้อนแบบวงจรเดียวอาจไม่สามารถทำงานได้หรือมีสมรรถนะต่ำ ปั๊มความร้อนแบบแคสเคดจึงถูกนำมาใช้เพื่อยังคงค่าสมรรถนะให้มีค่าสูง งานวิจัยนี้ใช้สารทำงานเป็นสารผสมแบบซีโอโทรปิก ซึ่งเลือกจากสารเดี่ยวมาผสมกันที่สัดส่วนต่าง ๆ ให้เหมาะสมกับอุณหภูมิการใช้งาน ความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และความปลอดภัย สารผสมแบบซีโอโทรปิกจะช่วยลดสภาพย้อนกลับไม่ได้ ทำให้ระบบมีการใช้พลังงานลดลง โดยงานวิจัยนี้จะพิจารณาผลของอุณหภูมิร่วม ที่มีต่อปั๊มความร้อนแบบแคสเคดที่ทำงานในช่วงอุณหภูมิไอวาโปเรเตอร์และคอนเดนเซอร์ 2 °C และ 80 °C ตามลำดับ ข้อมูลสมบัติของสารทำงานนำมาจากโปรแกรม REFPROP

ผลการศึกษาพบว่า สำหรับสารผสมนั้นอุณหภูมิร่วมที่เหมาะสมอยู่ที่ $n \times \frac{T_{cond,HS} + T_{evap,LS}}{2}$ โดย n มีค่าอยู่ระหว่าง 0.8-0.9 แทนที่จะเป็นค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิไอวาโปเรเตอร์และคอนเดนเซอร์เช่นเดียวกับกรณีของสารเดี่ยว เมื่อพิจารณาจากความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัยในการใช้งาน พบว่าคู่สารที่ควรนำมาใช้ในงานวงจรอุณหภูมิสูงคือ R1233zd/R152a ในสัดส่วน 0.5/0.5 ทำงานร่วมกับคู่สารในวงจรอุณหภูมิต่ำ R134a/R32 ในสัดส่วน 0.3/0.7 ซึ่งจะให้ค่า COP การทำความร้อนและความเย็นพร้อมกันสูงสุดคือ 7.38

คำสำคัญ : ปั๊มความร้อนแบบแคสเคด, สารผสมแบบซีโอโทรปิก, การทำความร้อนและความเย็น, อุณหภูมิร่วม

บทนำ

ในปัจจุบันมีการนำปั๊มความร้อนมาใช้เพื่อทำความร้อนและความเย็นพร้อมกัน ทำให้สมรรถนะในภาพรวมมีค่าสูงขึ้น ปั๊มความร้อนสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายด้าน เช่น ด้านเกษตรกรรมสำหรับการอบแห้งและการทำความเย็นผลผลิตทางการเกษตร เป็นต้น แต่การทำความร้อนและความเย็นพร้อมกันนั้น ในบางเงื่อนไขจะมีผลต่างอุณหภูมิสูง ซึ่งการใช้ปั๊มความร้อนแบบวงจรเดียวจะมีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำงาน (COP) ต่ำ [1] ดังนั้นจะต้องใช้ปั๊มความร้อนแบบแคสเคด ซึ่งจะมีสองวงจร ได้แก่ วงจรอุณหภูมิสูง (High Stage cycle, HS) และวงจรอุณหภูมิต่ำ (Low Stage cycle, LS) มาเชื่อมเข้าด้วยกันโดยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนร่วม (Intermediate heat exchanger) ซึ่งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนร่วมนี้จะทำหน้าที่เป็นไอวาโปเรเตอร์และคอนเดนเซอร์ให้กับ HS และ LS ตามลำดับ

*Corresponding author: Tel.: 092-4590550. E-mail address: at.kham88@gmail.com

ปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะการทำงานของปั๊มความร้อนอยู่หลายอย่างด้วยกัน ได้แก่ สารทำงาน โดยสารทำงานจะทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการนำความร้อนและความเย็นไปสู่แหล่งที่ต้องการ สำหรับปั๊มความร้อนแบบแคสเคดนั้น จำเป็นต้องเลือกสารทำงานที่มีความเหมาะสมต่อทั้ง HS และ LS โดยในการพิจารณาสารทำงานจะพิจารณาถึง ความปลอดภัยของสารทำงาน (Safety group) ความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมจากค่า ODP และ GWP งานวิจัยที่ผ่านมา ได้มีการเลือกใช้สารทำงานสำหรับ HS และ LS ของปั๊มความร้อนแบบแคสเคด เช่น J. Sarkar et al. 2015 [2] นำปั๊มความร้อนแบบแคสเคดมาใช้สำหรับทำความเย็น โดยใช้ NH_3 สำหรับ HS และ Propylene สำหรับ LS ซึ่งสามารถทำความเย็นที่อุณหภูมิ -40°C อุณหภูมิคอนเดนเซอร์ 40°C โดยมี COP ในการทำความเย็น 1.71 Z. Sun et al 2016 [3] ได้ทดสอบการนำปั๊มความร้อนแบบแคสเคดมาใช้ในระบบทำความเย็นที่อุณหภูมิ -40°C โดยมีอุณหภูมิคอนเดนเซอร์ 40°C ซึ่งใช้ R404A สำหรับ HS และใช้ R23, R41 สำหรับ LS พบว่ามี COP ในการทำความเย็น 1.51 และ 1.47 ตามลำดับ จะเห็นว่าสารทำงานที่มีใช้ในปั๊มความร้อนส่วนมากนั้นเป็นสารทำงานแบบสารเดี่ยว ซึ่งพบวก่อให้เกิดสภาพการ ย้อนกลับไม่ได้ (Irreversibility) ขณะที่แลกเปลี่ยนความร้อนในอีวาโปเรเตอร์และคอนเดนเซอร์ส่งผลให้ความต้องการงาน ที่ปั๊มความร้อนมีค่าสูง จึงได้มีการพัฒนาสารทำงานที่ช่วยลดสภาพการย้อนกลับไม่ได้ นั่นคือการใช้สารทำงานเป็นสารผสม แบบซีโอโทรอิก ซึ่งเป็นกาารนำสารทำงานแบบเดี่ยวที่มีจุดเดือดต่างกันมาจับคู่กันเป็นสารผสม โดยการทำงานจะมีการ เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารระหว่างการเปลี่ยนสถานะ ทำให้อุณหภูมิแตกต่างที่แลกเปลี่ยนความร้อนในอีวาโปเรเตอร์ และคอนเดนเซอร์มีค่าลดลง ส่งผลให้งานที่ใช้ในวัฏจักรลดลง [4]

ปัจจัยต่อมาที่มีผลต่อสมรรถนะการทำงานของปั๊มความร้อนแบบแคสเคดคืออุณหภูมิร่วม (Intermediate Temperature) ซึ่งสามารถกำหนดให้เป็นอุณหภูมิอีวาโปเรเตอร์ของ HS หรืออุณหภูมิคอนเดนเซอร์ของ LS อย่างใดอย่างหนึ่ง โดยงานวิจัยนี้กำหนดให้เป็นอุณหภูมิคอนเดนเซอร์ของ LS โดยอุณหภูมิร่วมต้องเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมจึงจะได้สมรรถนะการทำงานที่ดี ตามทฤษฎีการใช้สารเดี่ยวในปั๊มความร้อนแบบแคสเคดนั้น จะกำหนดอุณหภูมิร่วมให้เป็นค่าเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิคอนเดนเซอร์ของ HS และอุณหภูมิอีวาโปเรเตอร์ของ LS [5] โดยงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาผลของอุณหภูมิร่วมในปั๊มความร้อนแบบแคสเคดเมื่อใช้สารเดี่ยวเป็นสารทำงาน เช่น A. H. Tarrad 2017 [6] ใช้ปั๊มความร้อนแบบแคสเคดทำความร้อนที่อุณหภูมิ 70°C อุณหภูมิอีวาโปเรเตอร์ -2°C พบว่าที่อุณหภูมิร่วมในช่วง $33-37^\circ\text{C}$ ทำให้ระบบมี COP การทำความร้อนสูงสุดที่ประมาณ 2.8 เทียบกับที่อุณหภูมิร่วม 29°C ซึ่งมี COP ในการทำความร้อน 2.2 C.O. Suong and A. Asanakham 2019 [7] ได้เลือกสารเดี่ยวชนิดต่าง ๆ มาใช้ในปั๊มความร้อนแบบแคสเคดเพื่อทำความร้อนและความเย็นพร้อมกันที่ 80°C และ 2°C ตามลำดับ พบว่าการใช้ R601/R600a ที่อุณหภูมิร่วมเป็น 42°C ทำให้เกิด COP ในการทำความร้อนและความเย็นสูงสุดที่ 6.36 แต่หากอุณหภูมิร่วมเป็น 30°C หรือ 50°C จะทำให้ COP ลดลงเหลือประมาณ 6.24

จากงานวิจัยที่ผ่านมาจะเห็นว่า เมื่อใช้สารเดี่ยวในปั๊มความร้อนแบบแคสเคด อุณหภูมิร่วมที่ทำให้ระบบมีสมรรถนะการทำงานสูงสุดจะเกิดขึ้นใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิคอนเดนเซอร์ของ HS และอุณหภูมิอีวาโปเรเตอร์ของ LS แต่การใช้สารผสมนั้นยังไม่มีรายงานในการหาอุณหภูมิร่วมที่ทำให้เกิดสมรรถนะสูงสุด ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะหาผลของ อุณหภูมิร่วมที่มีต่อสมรรถนะการทำงานและความเย็นพร้อมกันของปั๊มความร้อนแบบแคสเคดเมื่อใช้สารผสมแบบซี โอโทรอิกที่สัดส่วนผสมต่าง ๆ โดยเลือกสารจากอุณหภูมิการใช้งาน ความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และความปลอดภัย

2. วิธีการวิจัย

2.1 การเลือกสารทำงาน

งานวิจัยนี้ได้เลือกสารเดี่ยวต่าง ๆ โดยใช้สารที่จุดเดือดสูงกับ HS และจุดเดือดต่ำกับ LS เพื่อที่จะนำมาผสมกันเป็นสารผสมแบบซีโอโทรอิกสำหรับทำความร้อนและความเย็นพร้อมกัน โดยมีสมบัติของสารทำงานแสดงตามตารางที่ 1

2.2 ระบบปั๊มความร้อนแบบแคสเคด

ปั๊มความร้อนแบบแคสเคดแสดงดังภาพที่ 1 ประกอบด้วย HS และ LS มาต่อเชื่อมกันโดยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนร่วม (Intermediate Heat exchanger) เพื่อทำความร้อนและความเย็นพร้อม ๆ กัน โดยมีอุณหภูมิคอนเดนเซอร์ของ HS อยู่ที่ 80 °C และอุณหภูมิอีวาโปเรเตอร์ของ LS อยู่ที่ 2 °C ซึ่ง HS จะต่อเข้ากับถังเก็บน้ำร้อน ส่วน LS จะต่อเข้ากับถังเก็บน้ำเย็น สารทำงานจะไหลผ่านอีวาโปเรเตอร์ของ LS เพื่อดึงความร้อนจากน้ำที่ถังเก็บน้ำเย็นทำให้น้ำมีอุณหภูมิต่ำลงและใน

ตารางที่ 1 สมบัติของสารทำงานที่ใช้ในงานวิจัยนี้ [8]

Refrigerant	Normal Boiling Point (°C)	Critical Temperature (°C)	ODP	GWP	Safety Group
R245fa (HS)	15.1	154.0	0	1050	B1
R1233zd (HS)	27.7	165.6	0	20	A1
R601 (HS)	36.1	196.6	0	≈20	A3
R600 (HS)	-0.5	152.0	0	≈20	A3
R134a (LS)	-26.1	101.1	0	1370	A1
R32 (LS)	-51.7	78.1	0	716	A2L
R143a (LS)	-47.2	72.7	0	4180	A2L
R600a (LS)	-11.7	134.7	0	≈20	A3

ODP คือ Ozone Depletion Potential (ค่าแสดงระดับการทำลายโอโซน)

GWP คือ Global Warming Potential (ค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน)

Safety Group คือ ตัวชี้วัดความปลอดภัยของสารทำงาน เช่น A แสดงถึงการไม่ติดไฟ 1 แสดงถึงความเป็นพิษต่ำ

ขณะเดียวกันสารทำงานจะถ่ายเทความร้อนให้กับสารทำงานใน HS ที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนร่วม และ ถ่ายเทความร้อนผ่านคอนเดนเซอร์ของ HS ให้แก่น้ำในถังเก็บน้ำร้อนทำให้น้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้นและถูกเก็บไว้ในถังเก็บน้ำร้อนเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป โดยอุณหภูมิร่วมมีความสำคัญต่อปั๊มความร้อนแบบแคสเคดคือ เมื่ออุณหภูมิร่วมเป็น อุณหภูมิที่เหมาะสม จะส่งผลให้ระบบมีประสิทธิภาพสูง แต่หากเลือกอุณหภูมิร่วมผิด จะทำให้สมรรถนะของระบบลดลง 1.1 แบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของปั๊มความร้อนแบบแคสเคด ในการหาสมรรถนะการทำงานของปั๊มความร้อนนั้น มีสมมุติฐานดังนี้

ระบบดำเนินการภายใต้ Steady condition ประสิทธิภาพ Compressor เป็นแบบไอเซนทรอปิก กระบวนการขยายตัวเป็นแบบ Throttling process ไม่คิด Pressure drop และความร้อนสูญเสียที่อีวาโปเรเตอร์ คอนเดนเซอร์และอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน สารทำความเย็นเข้าคอมเพรสเซอร์และขาออกคอนเดนเซอร์อยู่ในสภาวะอิ่มตัว สภาวะต่าง ๆ ของสารทำงานของปั๊มความร้อน แบบแคสเคด สามารถแสดงใน T-s diagram ได้ดังภาพที่ 2

T-s diagram ในรูปที่ 2 แสดงการทำงานของปั๊มความร้อนแบบแคสเคดเมื่อใช้สารผสมแบบ Zeotropic โดย DT คือ อุณหภูมิแตกต่างระหว่างอีวาโปเรเตอร์ของ HS และคอนเดนเซอร์ของ LS โดยในการหาผลของอุณหภูมิร่วมที่มีต่อสมรรถนะของปั๊มความร้อนแบบแคสเคดนั้น ขึ้นอยู่กับตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้

กำลังงานที่ Compressor ของ HS สามารถหาได้จาก

$$\dot{W}_{\text{comp,HS}} = \dot{m}_{\text{R,HS}}(h_{1'} - h_{4'}) \quad (1)$$

กำลังงานที่ Compressor ของ LS สามารถหาได้จาก

$$\dot{W}_{\text{comp,LS}} = \dot{m}_{\text{R,LS}}(h_1 - h_4) \quad (2)$$

อัตราการร้อนที่คอนเดนเซอร์ของ HS หาได้จาก

$$\dot{Q}_{\text{cond,HS}} = \dot{m}_{\text{R,HS}}(h_{1'} - h_{2'}) \quad (3)$$

อัตราการร้อนที่อีวาโปเรเตอร์ของ LS หาได้จาก

$$\dot{Q}_{\text{evap,LS}} = \dot{m}_{\text{R,LS}}(h_4 - h_3) \quad (4)$$

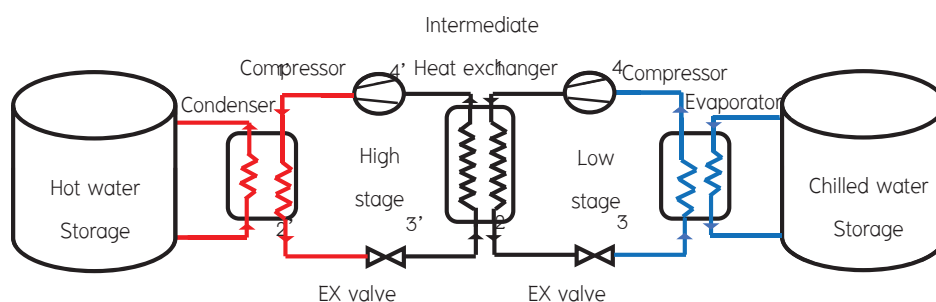
เมื่อ $\dot{m}_{\text{R}}$ คือ อัตราการไหลของสารทำงาน

สมรรถนะการทำความร้อนของปั๊มความร้อน หาได้จาก

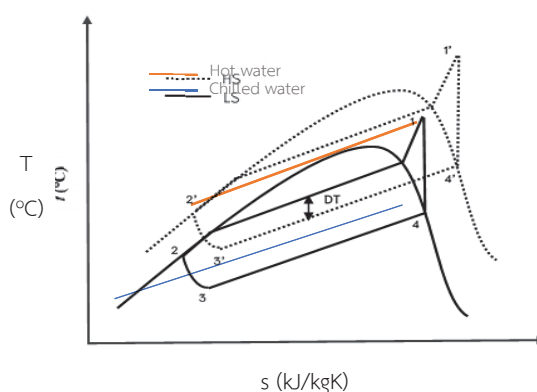
$$\text{COP}_{\text{heating}} = \frac{\dot{Q}_{\text{cond,HS}}}{\dot{W}_{\text{comp,HS}}} \quad (5)$$

สมรรถนะการทำความเย็นของปั๊มความร้อน หาได้จาก

$$\text{COP}_{\text{cooling}} = \frac{\dot{Q}_{\text{evap,LS}}}{\dot{W}_{\text{comp,LS}}} \quad (6)$$



ภาพที่ 1 แผนภาพการทำงานของปั๊มความร้อนแบบแคสเคดสำหรับทำความร้อนและความเย็นพร้อมกัน



ภาพที่ 2 สภาวะของสารทำงานของปั๊มความร้อนแบบแคสเคดใช้ทำความร้อนและความเย็นพร้อม ๆ กัน ใน T-s diagram

สมรรถนะรวมเมื่อมีการทำความร้อนและความเย็นพร้อมกัน หาได้จาก

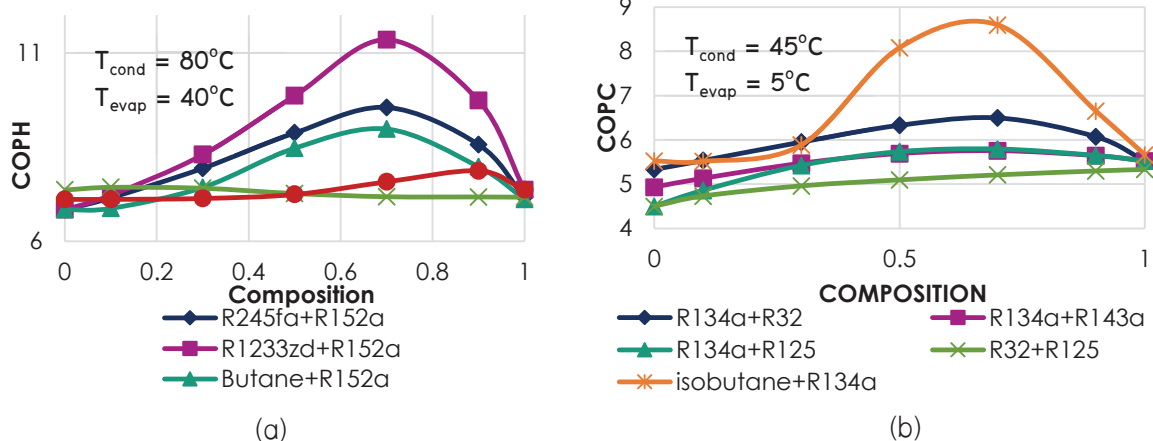
$$COP_{total} = \frac{\dot{Q}_{cond,HS} + \dot{Q}_{evap,LS}}{\dot{W}_{comp,HS} + \dot{W}_{comp,LS}} \quad (7)$$

ในการหาอุณหภูมิร่วมซึ่งเป็นอุณหภูมิคอนเดนเซอร์ของ LS จะกำหนดให้ DT มีค่า 5 °C และทำการเปลี่ยนค่าอุณหภูมิร่วม เพื่อหาผลของอุณหภูมิร่วมที่ทำให้ค่าสมรรถนะรวมของระบบมีค่าสูง

สำหรับการคำนวณหาสมรรถนะการทำงานของปั๊มความร้อนนั้นจะใช้โปรแกรม REFPROP 9.1 และจากการทดสอบโดยใช้สารเดี่ยว พบว่าค่า COP ที่คำนวณได้จากสมการข้างต้นสอดคล้องกับงานวิจัยของ C. O. Suong and A. Asanakham 2019 [7] ในกรณีของปั๊มความร้อนแบบแคสเคดที่ผลิตความร้อนและความเย็นพร้อมกัน และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Z. Sagia and C. Rakopoulos 2016 [9] ในกรณีของปั๊มความร้อนวงจรเดียวที่ใช้สารผสมเพื่อทำความเย็นเพียงอย่างเดียว

3. ผลการวิจัยและและอภิปรายผลการวิจัย

การศึกษาได้นำสารผสมแบบซีโอโทรปิกที่เลือกไว้มาทดสอบที่สัดส่วนตั้งแต่ 0.0-1.0 เพื่อหาว่าที่สัดส่วนใด จะทำให้ระบบมีค่า COP สูง

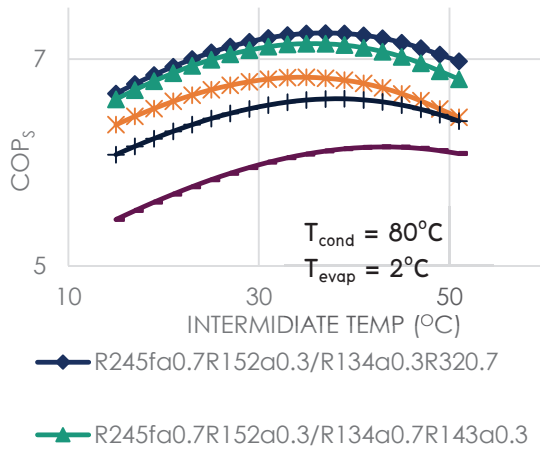


ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะการทำงานกับสารผสมแบบซีโอโทรปิกที่สัดส่วนต่าง ๆ ซึ่งสัดส่วนที่แสดงคือ สัดส่วนของสารชนิดแรก โดย (a) เป็นของ HS และ (b) เป็นของ LS

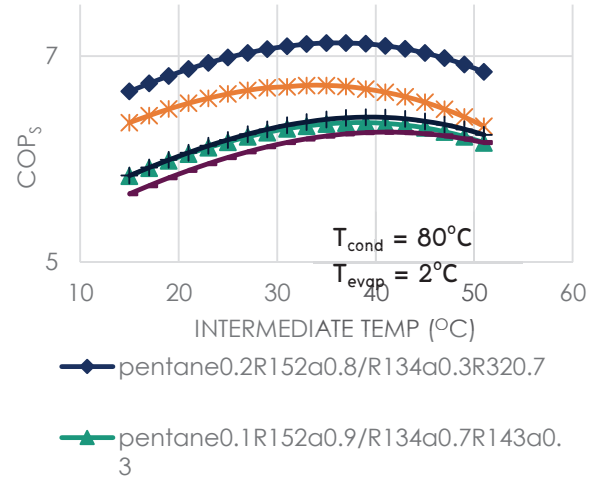
ภาพที่ 3 (a) เป็นการนำสารทำงานที่ใช้ในวงจรอุณหภูมิสูงมาทดสอบหาสัดส่วนสารผสมที่มีต่อสมรรถนะการทำความร้อน โดยกำหนดให้ทำความร้อนที่ 80 °C และมีอุณหภูมิไอวาโปเรเตอร์อยู่ที่ 40 °C จากรูปจะเห็นว่าสารผสมส่วนใหญ่จะมีค่า COP ในการทำความร้อนสูงกว่าการใช้สารเดี่ยว โดยในแต่ละสารผสมนั้นก็จะมีสัดส่วนที่ทำให้เกิดสมรรถนะการทำความร้อนสูงสุดแตกต่างกัน เช่น R245fa ผสมกับ R152a มี COP สูงสุดที่สัดส่วน 0.7 ต่อ 0.3 ส่วน R1233zd ผสมกับ Butane มี COP สูงสุดที่สัดส่วน 0.9 ต่อ 0.1 เป็นต้น แต่การผสมบางสัดส่วนก็ให้ COP ต่ำกว่าการใช้สารเดี่ยว เช่น R245fa ผสมกับ R125 ที่สัดส่วน 0.7 ต่อ 0.3 จะมี COP ต่ำกว่าการใช้สารเดี่ยว R245fa

ภาพที่ 3 (b) เป็นการนำสารทำงานที่ใช้ในวงจรอุณหภูมิต่ำมาทดสอบเพื่อหาผลของสัดส่วนสารผสมที่มีต่อสมรรถนะการทำความเย็น โดยกำหนดให้ทำความเย็นที่ 5 °C และมีอุณหภูมิคอนเดนเซอร์อยู่ที่ 45 °C จากรูปจะเห็นว่าเมื่อผสมสารทำงานแล้วจะทำให้สมรรถนะการทำความเย็นของระบบสูงขึ้นกว่าการใช้สารเดี่ยวและในแต่ละสารผสมนั้นก็จะมีสัดส่วนที่ทำให้เกิดสมรรถนะการทำความเย็นสูงสุดแตกต่างกันเช่นเดียวกับ ยกเว้นการผสมระหว่าง R32 และ R125 พบว่าการใช้สารเดี่ยว R32 ทำให้เกิดสมรรถนะการทำความเย็นสูงกว่าการใช้สารผสม

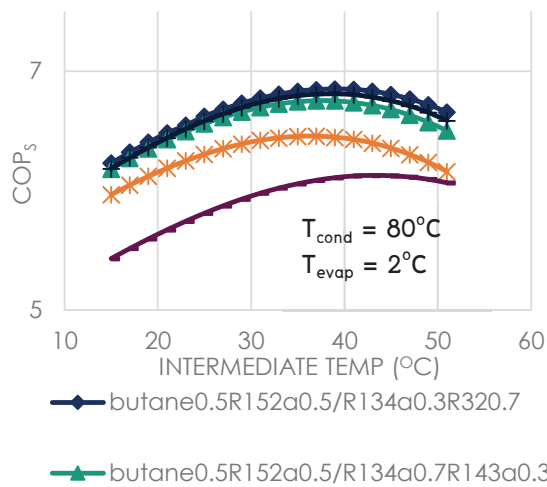
การนำสารผสมมาใช้ในปั๊มความร้อนแบบแคสเคด จะเลือกสัดส่วนที่ให้ค่า COP เข้าใกล้ค่าสูงสุดทั้งในฝั่ง HS และ LS ทั้งนี้ต้องพิจารณาถึงอุณหภูมิของของไหลขณะที่ไหลในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนร่วม โดยในการแลกเปลี่ยนความร้อนต้องไม่เกิดการตัดผ่าน (Cross over) ระหว่างอุณหภูมิกระแสน้ำร้อนและกระแสน้ำเย็น



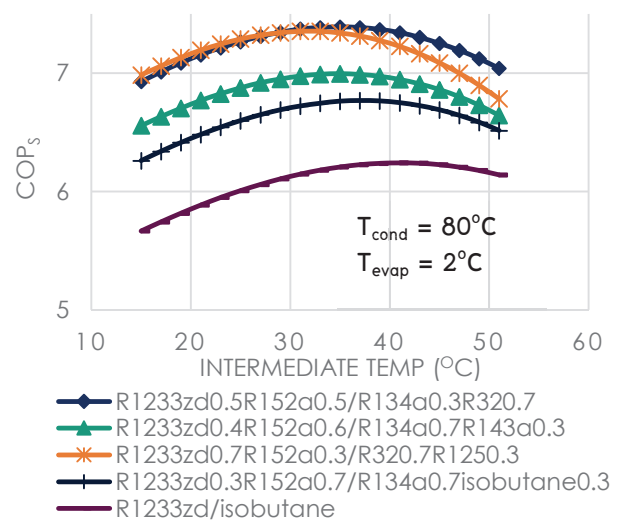
(a)



(b)



(c)



(d)

ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะการทำความร้อนและความเย็นพร้อมกันของปั๊มความร้อนแบบแคสเคดกับอุณหภูมิร่วมเมื่อใช้สารผสมต่าง ๆ โดยสารทำงานหลักใน HS คือ (a) R245fa (b) Pentane (c) Butane (d) R1233zd

ภาพที่ 5 เป็นการนำป้อนความร้อนแบบแคสเคดมาใช้สำหรับทำความร้อนและความเย็นพร้อม ๆ กัน โดยกำหนดให้มีอุณหภูมิไอวาโปเรเตอร์และคอนเดนเซอร์อยู่ที่ 2°C และ 80°C ตามลำดับ ทั้งนี้จะมีการเปลี่ยนค่าอุณหภูมิร่วมที่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อหาสมรรถนะการทำความร้อนและความเย็นของระบบ จากรูปจะเห็นว่าทั้งการใช้สารเดี่ยวและสารผสมนั้น สมรรถนะของระบบจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิร่วมไปเรื่อย ๆ จนเมื่อถึงอุณหภูมิร่วมจุดหนึ่งที่ทำให้ระบบเกิดสมรรถนะสูงสุด สมรรถนะจะมีค่าลดลงในขณะที่อุณหภูมิร่วมเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้สารเดี่ยวจะมีสมรรถนะสูงสุดเมื่ออุณหภูมิร่วมมีค่าเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิไอวาโปเรเตอร์และคอนเดนเซอร์ ซึ่งในที่นี้จะมีค่าประมาณ 39-41°C โดยสารเดี่ยวที่ทำให้เกิดสมรรถนะในการทำความร้อนและความเย็นสูงสุดคือ Pentane/Isobutane ซึ่งมี COP การทำความร้อนและความเย็นพร้อมกันเป็น 6.26 ที่อุณหภูมิร่วม 41 °C ส่วนการใช้สารผสมนั้นส่วนมากจะมีสมรรถนะสูงสุดที่อุณหภูมิร่วมเป็น $n \times \frac{T_{\text{cond,HS}} + T_{\text{evap,LS}}}{2}$ โดย n มีค่าอยู่ระหว่าง 0.8-0.9 ซึ่งพบว่าคู่สารผสมที่ทำให้ระบบมีสมรรถนะสูงสุดคือ R245fa/R152a ในสัดส่วน 0.7/0.3 สำหรับวงจรอุณหภูมิสูง ทำงานร่วมกับ R134a/R32 ในสัดส่วน 0.3/0.7 หรือ R134a/R143a ในสัดส่วน 0.7/0.3 สำหรับวงจรอุณหภูมิต่ำ Pentane/R152a ในสัดส่วน 0.2/0.8 สำหรับวงจรอุณหภูมิสูง ทำงานร่วมกับ R134a/R32 ในสัดส่วน 0.3/0.7 สำหรับวงจรอุณหภูมิต่ำ R1233zd/R152a ในสัดส่วน 0.5/0.5 สำหรับวงจรอุณหภูมิสูง ทำงานร่วมกับ R134a/R32 ในสัดส่วน 0.3/0.7 หรือ R32/R125 ในสัดส่วน 0.3/0.7 สำหรับวงจรอุณหภูมิต่ำ

4. สรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้ได้นำเสนอผลของอุณหภูมิร่วมที่ต่อสมรรถนะการทำความร้อนและความเย็นพร้อม ๆ กันของปั๊มความร้อนแบบแคสเคดเมื่อใช้สารผสมแบบซีโอโทรปิกโดยกำหนดให้อุณหภูมิไอวาโปเรเตอร์และคอนเดนเซอร์เป็น 2°C และ 80°C ตามลำดับเพื่อพิจารณาหาสารทำงานที่ทำให้ปั๊มความร้อนมีสมรรถนะสูง เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และมีความปลอดภัยในการใช้งาน โดยมีสรุปผลการศึกษาดังนี้

- (1) อุณหภูมิร่วมที่ทำให้ระบบมีสมรรถนะสูงสุดของการใช้สารเดี่ยวและสารผสมนั้นแตกต่างกัน โดยสารเดี่ยวส่วนมากจะมีสมรรถนะสูงสุดที่อุณหภูมิร่วมประมาณ 39-41°C สารผสมส่วนมากจะมีสมรรถนะสูงสุดที่อุณหภูมิร่วมประมาณ 35-39°C
- (2) อุณหภูมิร่วมที่เหมาะสมต่อการใช้สารผสมอยู่ที่ $n \times \frac{T_{\text{cond,HS}} + T_{\text{evap,LS}}}{2}$ โดย n มีค่าอยู่ระหว่าง 0.8-0.9
- (3) การใช้สารผสมทำให้ระบบมีสมรรถนะการทำงานมากกว่าสารเดี่ยว ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ L. Zhao et al. 2014 [4]
- (4) เมื่อพิจารณาจากความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัยในการใช้งาน พบว่าคู่สารที่ควรนำมาใช้ในวงจรอุณหภูมิสูงคือ R1233zd/R152a ในสัดส่วน 0.5/0.5 ทำงานร่วมกับคู่สารในวงจรอุณหภูมิต่ำ R134a/R32 ในสัดส่วน 0.3/0.7 ซึ่งจะให้ COP การทำความร้อนและความเย็นพร้อมกันสูงสุดคือ 7.38

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จได้โดยได้รับความช่วยเหลือจาก ศ.ดร.ทงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ ซึ่งคอยให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษา และตรวจสอบข้อผิดพลาดต่าง ๆ ตลอดจนช่วยเหลืองานวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์ และขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ในการเอื้อเฟื้อการใช้สถานที่และสนับสนุนงานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Boahen et al. (2016). “Technology Review of Cascade Heat Pump Systems”, Proceedings of the 8th Asian Conference on Refrigeration and Air Conditioning, ACRA2016. May 15-17, 2016, Taipei, Taiwan
- [2] J. Sarkar et al. (2015). “Suitable natural refrigerants pairs for cascade refrigeration system based on minimum heat exchanger size”, Proceedings of the 23rd National Heat and Mass Transfer Conference and 1st International ISHMT-ASTFE Heat and Mass Transfer Conference, IHMTC2015. 17-20 December, 2015, Thiruvananthapuram, India
- [3] Z. Sun *et al.* (2016). “Comparative analysis of thermodynamic performance of a cascade refrigeration system for refrigerant couples R41/R404A and R23/R404A”, *Appl. Energy*, vol. 184, pp. 19–25, 2016.
- [4] L. Zhao et al. (2014). “A thermodynamic analysis of an auto-cascade heat pump cycle for heating application in cold regions”, *Energy Build.*, vol. 82, pp. 621–631, 2014.
- [5] S. Boahen and J. M. Choi. (2017). “Research trend of cascade heat pumps”, *Sci. China Technol. Sci.*, vol. 60, pp. 1597–1615, 2017.
- [6] A. H. Tarrad. (2017). “Thermodynamic Evaluation for Intermediate Temperature Optimization in Low Temperature Heat Source Cascade Heat Pump Technology”, *Asian Journal of Engineering and Technology*, vol.05, pp 126-139, 2017.
- [7] C. O. Suong and A. Asanakham. (2019). “Selection of Cascade Heat Pump Refrigerant Couple for Simultaneous Heating and Cooling”, Proceedings of the 15th Conference on Energy Network of Thailand, 21-24 May 2019, Nakhon Ratchasima, Thailand
- [8] J. M. Calm and G. C. Hourahan. (1999). “Physical, safety, and environmental data for refrigerants”, *HPAC Heating, Piping, Air Cond.*, vol. 71, no. 8, pp. 27–29, 1999.
- [9] Z. Sagia and C. Rakopoulos. (2016). “Alternative refrigerants for the heat pump of a ground source heat pump system”, *Appl. Therm. Eng.*, vol. 100, pp. 768–774, 2016.

การออกแบบและสร้างหุ่นยนต์ขุดเจาะทางการเกษตรโดยใช้พลังงานทดแทน Design and making of agricultural drilling robots using renewable energy

จักรี วิษัยระหัด^{1*} รุ่งตะวัน วิวัฒนาศิริกุล² พงษ์ภูมิ อดมอริยทรัพย์² วรเชษฐ์ แสงสีดา² ศรัณยู เหลาพา² ณัฐภูมิ ทองหล่อ³
และศิริวัฒน์ โพธิ์เวชกุล⁴

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต โครงการจัดตั้งคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ
อำเภอเมือง จังหวัดชัยภูมิ 36000

² สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล โครงการจัดตั้งคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ
อำเภอเมือง จังหวัดชัยภูมิ 36000

³ คลินิกเทคโนโลยี สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ อำเภอเมือง จังหวัดชัยภูมิ 36000

⁴ มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ อำเภอเมือง จังหวัดชัยภูมิ 36000

บทคัดย่อ

ปัจจุบันการใช้พลังงานทดแทนเป็นกระแสที่กำลังเป็นที่นิยมและถูกกล่าวถึงมากในวงกว้าง เนื่องจากการจะหมดไปของพลังงานจากฟอสซิล (น้ำมันเชื้อเพลิง) คณะผู้วิจัยจึงได้ทำการออกแบบและสร้างหุ่นยนต์ขุดเจาะทางการเกษตรโดยใช้กระบวนการในการออกแบบทางวิศวกรรม 6 ขั้นตอน และหลักการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่ 6 อย่าง โดยมีเงื่อนไขให้นำพลังงานทางเลือกหรือพลังงานทดแทนมาใช้ในการเคลื่อนที่และขุดเจาะ โดยคำนึงถึงความปลอดภัยของผู้ใช้งานเป็นหลัก ข้อสรุปในการออกแบบของคณะผู้วิจัยตัดสินใจเลือกการขุดเจาะแบบสว่านเนื่องจากหุ่นยนต์จะมีขนาดเล็ก สามารถขนย้ายได้ง่าย ส่วนการใช้พลังงานทดแทนนั้น ได้เลือกให้ชุดขับเคลื่อนใช้พลังงานไฟฟ้า แต่ชุดขุดเจาะต้องใช้แรงบิดสูงจึงเลือกใช้เครื่องยนต์เบนซินที่สามารถใช้น้ำมันแก๊สโซฮอล์ได้ สำหรับการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ได้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมระยะไกลผ่านรีโมทคอนโทรลเพื่อความปลอดภัยของผู้ใช้งาน โดยใช้แบตเตอรี่แรงดัน 12 โวลต์ 12 แอมแปร์ชั่วโมง จำนวน 2 ชุด ขับมอเตอร์ไฟฟ้าสำหรับการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ การขึ้นลงของชุดขุดเจาะและการควบคุมคันเร่งเครื่องยนต์ชุดขุดเจาะ ผลการทดสอบปรากฏว่าหุ่นยนต์สามารถขุดเจาะหลุมสำหรับการเกษตร โดยหลุมมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 300 มิลลิเมตร ลึก 250 มิลลิเมตร อัตราในการขุดเจาะอยู่ที่ 2 นาทีต่อหลุม อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของเครื่องขุดเจาะ 30 หลุมต่อลิตร และหุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้ระยะทาง 2 กิโลเมตร ต่อการชาร์จไฟฟ้า 1 ครั้ง โดยงานวิจัยนี้สามารถต่อยอดปรับปรุงเพิ่มความลึกของหลุมและขนาดความกว้างของหลุมได้

คำสำคัญ: การออกแบบทางวิศวกรรม หุ่นยนต์ขุดเจาะทางการเกษตร พลังงานทดแทน

บทนำ

กระบวนการออกแบบทางวิศวกรรม ซึ่งมีขั้นตอนประกอบด้วย การชี้ชัดปัญหา (Problem Identification) การนำเสนอแนวคิดขั้นต้น (Preliminary Ideas) การคัดกรอง (Refinement) การวิเคราะห์ (Analysis) การตัดสินใจ (Decision) การจัดทำแบบสั่งงานและบทสรุปลักษณะ (Implementation) [1] นอกจากจะใช้ในการออกแบบผลิตภัณฑ์หรือออกแบบระบบทางวิศวกรรมที่ใช้พลังงานหลักแล้ว การออกแบบผลิตภัณฑ์ทางด้านวิศวกรรมที่ใช้พลังงานทางเลือกหรือพลังงานทดแทนก็จำเป็นต้องใช้กระบวนการออกแบบทางวิศวกรรมด้วยเช่นกัน หลักการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่ได้นั้น ผลิตภัณฑ์

* Corresponding author: Tel.: 081-2662056 E-mail address: jakreew@cpru.ac.th

จะต้องใช้งานได้ดี (Functional) ผลิตได้ง่าย (Well manufacturing) บรรจุหีบห่อได้ดีหรือส่งมอบให้ลูกค้าได้ง่าย (Well packaging) มีความแข็งแรงทนทาน (Durable) ซ่อมบำรุงได้ง่าย (Maintainable) และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (Resource efficient) [2]

ปัจจุบันการใช้พลังงานทดแทนเป็นกระแสที่กำลังเป็นที่นิยมและถูกกล่าวถึงมากในวงกว้าง เนื่องจากการจะหมดไปของพลังงานจากฟอสซิล (น้ำมันเชื้อเพลิง) พลังงานทดแทน [3] คือ พลังงานธรรมชาติประเภทใช้ไม่หมดสามารถหมุนเวียนมาใช้เป็นประจำวัน เช่น พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานก๊าซชีวภาพ หรือพลังงานคลื่น และอื่น ๆ ซึ่งสามารถนำมาใช้แทนพลังงานธรรมชาติประเภทใช้แล้วหมดเปลือง ซึ่งใช้กันอยู่ในปัจจุบัน เช่น ฟืน ถ่านไม้ ถ่านหิน น้ำมันเชื้อเพลิง แร่ธาตุหรือก๊าซธรรมชาติ สามารถแบ่งตามแหล่งที่ได้มา เป็น 2 ประเภท คือ พลังงานทดแทนจากแหล่งที่ใช้แล้วหมดไป อาจเรียกว่า พลังงานสิ้นเปลือง ได้แก่ ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ นิวเคลียร์ หินน้ำมัน และทรายน้ำมัน เป็นต้น และพลังงานทดแทนอีกประเภทหนึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่ใช้แล้วสามารถหมุนเวียนมาใช้ได้อีก เรียกว่า พลังงานหมุนเวียน ได้แก่ แสงอาทิตย์ ลม ชีวมวล น้ำ และไฮโดรเจน เป็นต้น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานชีวมวล พลังงานแก๊สชีวภาพ พลังงานนิวเคลียร์ พลังงานน้ำ หรือพลังงานอื่นๆ เช่น ไบโอดีเซล แก๊สโซฮอล์ ดีโซฮอล์ NGV พลังงานไฮโดรเจน พลังงานใต้พิภพ ล้วนเป็นพลังงานทดแทนที่สามารถเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อการส่งพลังงานไปในระยะไกลตามสายส่ง ซึ่งเป็นผลดีต่อผู้ใช้พลังงาน [4]

งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างหุ่นยนต์ชุดเจาะทางการเกษตรโดยใช้กระบวนการในการออกแบบทางวิศวกรรม 6 ขั้นตอน และหลักการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่ดี 6 อย่าง โดยพิจารณาให้นำพลังงานทางเลือกหรือพลังงานทดแทนมาใช้ในการขับเคลื่อนและชุดเจาะทางการเกษตรโดยคำนึงถึงความปลอดภัยของผู้ใช้งานเป็นหลัก

วิธีการวิจัย

กระบวนการในการวิจัยนี้ประกอบด้วย การออกแบบ การสร้าง และการทดสอบหุ่นยนต์ชุดเจาะทางการเกษตรโดยใช้พลังงานทดแทน รายละเอียดดังนี้

1. การออกแบบ

1.1 โดยใช้กระบวนการในการออกแบบทางวิศวกรรม 6 ขั้นตอน ประกอบด้วย

- (1) การชี้ชัดปัญหา (Problem Identification)
- (2) การนำเสนอแนวคิดขั้นตอน (Preliminary Ideas)
- (3) การคัดกรอง (Refinement)
- (4) การวิเคราะห์ (Analysis)
- (5) การตัดสินใจ (Decision)
- (6) การจัดทำแบบสั่งงานและบทสรุปลักษณะ (Implementation)

1.2 โดยใช้หลักการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่ดี 6 อย่าง ได้แก่

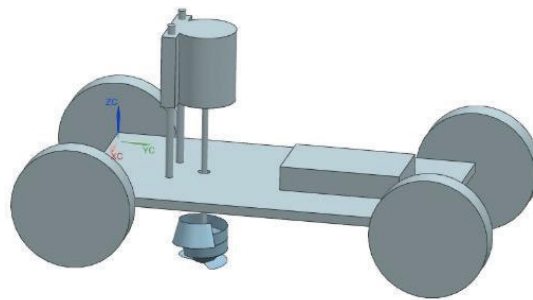
- (1) ผลิตภัณฑ์จะต้องใช้งานได้ดี (Functional)
- (2) ผลิตได้ง่าย (Well manufacturing)
- (3) บรรจุหีบห่อได้ดีหรือส่งมอบให้ลูกค้าได้ง่าย (Well packaging)
- (4) มีความแข็งแรงทนทาน (Durable)
- (5) ซ่อมบำรุงได้ง่าย (Maintainable)
- (6) เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (Resource efficient)

1.3 การเลือกใช้พลังงานทดแทนมาใช้ในการขับเคลื่อนและชุดเจาะทางการเกษตร

2. การสร้าง ได้แก่ ขั้นตอนและวิธีการในการสร้างหุ่นยนต์ชุดเจาะทางการเกษตร
3. การทดสอบ ได้แก่
 - 3.1 ทดสอบการควบคุมและอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานขณะขับเคลื่อนและขณะชุดเจาะ
 - 3.2 ทดสอบความสามารถในการชุดเจาะ ประกอบด้วย ขนาดของหลุมที่สามารถชุดเจาะได้และอัตราการชุดเจาะ

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบโดยคณะผู้วิจัยได้มีการประชุมปรึกษาหารือและได้แนวคิดในการออกแบบโครงสร้างหุ่นยนต์ชุดเจาะทางการเกษตรโดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (CAD 3-D Modeling) เพื่อให้สามารถบันทึกข้อมูลและปรับเปลี่ยนแบบได้อย่างรวดเร็ว ผู้ร่วมวิจัยสามารถมองเห็นแบบทางวิศวกรรมได้หลายมุมมอง [5] ใช้หลักการทางวิศวกรรมเครื่องมือ [6] และเทคโนโลยีซีเอ็นซี [7] มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบ คำนึงถึงความปลอดภัยของผู้ใช้งานโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมระยะไกล [8] ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แบบทางวิศวกรรม 3 มิติ ของโครงสร้างหุ่นยนต์ชุดเจาะทางการเกษตร (แบบร่าง)

คณะผู้วิจัยได้ทำการชี้ชัดปัญหาโดยกำหนดให้หุ่นยนต์ชุดเจาะทางการเกษตรสามารถชุดเจาะหลุมสำหรับปลูกต้นไม้ได้โดยใช้พลังงานทดแทน จึงได้ทำการระดมความคิดเพื่อเสนอแนวคิดขั้นตอนในการชุดเจาะว่าจะใช้แบบใด ระหว่างการชุดเจาะด้วยปั๊มก็คล้ายรถแบคโฮกับการเจาะคล้ายสว่าน ได้มีการคัดกรองและวิเคราะห์จากข้อจำกัดด้านงบประมาณ ระยะเวลาในการสร้างและการขนย้ายหุ่นยนต์ชุดเจาะทางการเกษตร จึงตัดสินใจเลือกการชุดเจาะแบบสว่านเนื่องจากหุ่นยนต์ชุดเจาะทางการเกษตรจะมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา สามารถขนย้ายขึ้นบนรถกระบะบรรทุกได้ ส่วนการใช้พลังงานทดแทนนั้น ได้เลือกให้ชุดขับเคลื่อนใช้พลังงานไฟฟ้าเนื่องจากสามารถใช้พลังงานทดแทนมาผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ แต่ชุดชุดเจาะต้องใช้แรงบิดสูง จึงเลือกใช้ชุดชุดเจาะแบบเครื่องยนต์เบนซิน แต่สามารถใช้พลังงานทดแทนได้คือสามารถใช้น้ำมันแก๊สโซฮอล์ได้ จึงได้บทสรุปการออกแบบตามที่กล่าวข้างต้น และได้ดำเนินการสร้างหุ่นยนต์ชุดเจาะทางการเกษตรแล้วเสร็จตามภาพที่ 2

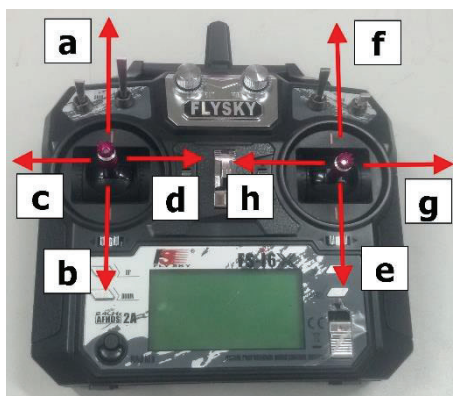


ภาพที่ 2 โครงสร้างหุ่นยนต์ชุดเจาะเพื่อการเกษตร (โครงสร้างจริง)

จากนั้นจึงได้สร้างหุ่นยนต์ชุดเจาะเพื่อการเกษตรขนาด กว้าง 1,050 มิลลิเมตร ยาว 1,050 มิลลิเมตร สูง 1,500 มิลลิเมตร โดยใช้เหล็กกล่องขนาด 1.5*3 นิ้ว เป็นโครงหุ่นยนต์ สำหรับการเคลื่อนที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมแสดงดังรูปที่ 3 โดยใช้แบตเตอรี่แรงดัน 12 โวลต์ 12 แอมป์ชั่วโมง จำนวน 2 ชุด แบ่งการควบคุมรีโมทคอนโทรลเป็น 8 ช่องคือ เดินหน้า ถอยหลัง เลี้ยวซ้าย เลี้ยวขวา ชุดชุดเจาะดินกดลง ชุดชุดเจาะดินยกขึ้น แรงคันเร่งเครื่องเจาะ เบาคันเร่งเครื่องเจาะ ตามภาพที่ 4

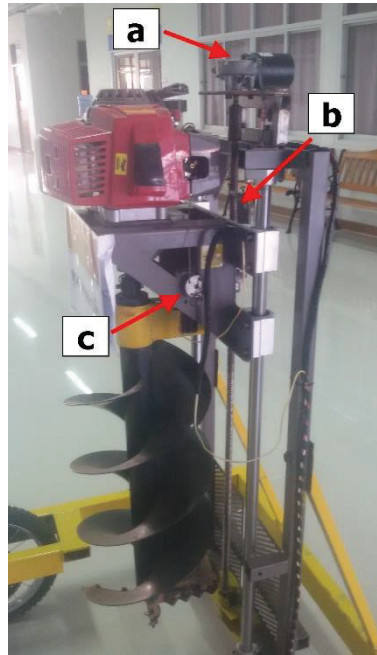


ภาพที่ 3 ชุดควบคุมแบบไมโครคอนโทรลเลอร์และแบตเตอรี่



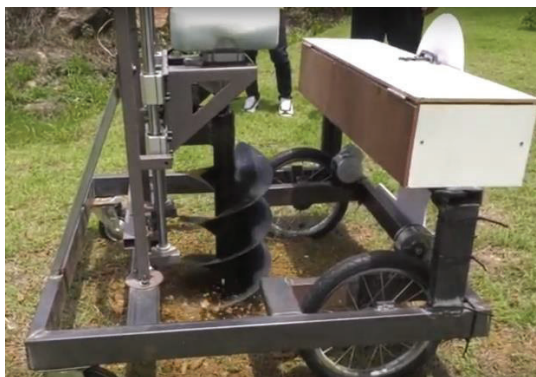
ภาพที่ 4 รีโมทคอนโทรล (a) เดินหน้า (b) ถอยหลัง (c) เลี้ยวซ้าย (d) เลี้ยวขวา (e) ชุดชุดเจาะดินกดลง (f) ชุดชุดเจาะดินยกขึ้น (g) แรงคันเร่งเครื่องเจาะ (h) เบาคันเร่งเครื่องเจาะ

มอเตอร์ไฟฟ้าจำนวน 4 ชุด ถูกควบคุมโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ แบ่งเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าสำหรับการเคลื่อนที่ล้อซ้าย 1 ชุด ล้อขวา 1 ชุด มอเตอร์ไฟฟ้าสำหรับควบคุมการขึ้นลงของชุดชุดเจาะ 1 ชุด และมอเตอร์ไฟฟ้าสำหรับควบคุมคันเร่งเครื่องยนต์ชุดชุดเจาะ 1 ชุด โดยมอเตอร์ควบคุมการขึ้นลงของชุดชุดเจาะจะยึดอยู่กับบอลสกรูซึ่งนิยมใช้ในชุดขับเคลื่อนของเครื่องจักรกลซีเอ็นซี [7] เนื่องจากการสัมผัสระหว่างเกลียวกับลูกปืน ทำให้ลดแรงบิด มอเตอร์ขับไม่ต้องใช้แรงบิดมาก ดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ชุดควบคุมเครื่องชุดเจาะ (a) มอเตอร์ไฟฟ้าสำหรับควบคุมการขึ้นลงของชุดชุดเจาะ (b) บอลสกรู (c) มอเตอร์ไฟฟ้าสำหรับควบคุมคันเร่งเครื่องยนต์ชุดชุดเจาะ

จากการทดลองใช้หุ่นยนต์ชุดเจาะทางการเกษตร ปรากฏว่าหุ่นยนต์ใช้งานได้ดี ผลผลิตได้ง่ายเนื่องจากใช้เครื่องมือช่างพื้นฐานในการผลิต เช่น เครื่องตัดเหล็ก เครื่องเชื่อมเหล็ก สว่าน เครื่องเจียร เป็นต้น หุ่นยนต์มีความแข็งแรงทนทาน ซ่อมบำรุงได้ง่ายเนื่องจากโครงสร้างเป็นแบบโปร่ง และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยสามารถชุดเจาะหลุมสำหรับปลูกต้นไม้หรือทำการเกษตร โดยหลุมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 300 มิลลิเมตร หลุมลึก 250 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 6 หลุมเหมาะสำหรับปลูกเบียร์ ต้นไม้ขนาดเล็ก อัตราในการชุดเจาะอยู่ที่ 2 นาทีต่อหลุม อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของเครื่องชุดเจาะ 30 หลุมต่อลิตร และหุ่นยนต์สามารถขับเคลื่อนได้ระยะทาง 2 กิโลเมตร ต่อการชาร์จไฟฟ้า 1 ครั้ง โดยงานวิจัยนี้สามารถต่อยอดปรับปรุงเพิ่มเติมได้ เช่น สามารถปรับปรุงเพิ่มความลึกของหลุมได้โดยการเชื่อมเพิ่มความยาวใบสว่านเจาะดิน สามารถปรับปรุงเพิ่มขนาดความกว้างของหลุมได้โดยการตัดแปลงเพิ่มชุดเลื่อน (Slide) ซ้าย-ขวา บริเวณฐานยึดชุดชุดเจาะโดย 1 หลุมชุดเจาะ 2 ครั้ง ซ้าย 1 ครั้ง ขวา 1 ครั้ง ก็จะสามารถเพิ่มขนาดหลุมได้ ทั้งนี้ ได้นำหุ่นยนต์ชุดเจาะทางการเกษตร ไปทดลองชุดเจาะหลุมสำหรับปลูกต้นไม้ ในงานวันวิสาขบูชาและวันต้นไม้แห่งชาติ ประจำปี 2562 ณ มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 6 การทดสอบการขุดเจาะหลุมเพื่อการเกษตร



ภาพที่ 7 ร่วมงานวันวิสาขบูชาและวันต้นไม้แห่งชาติ ประจำปี 2562

ณ มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างหุ่นยนต์ขุดเจาะทางการเกษตรโดยใช้กระบวนการในการออกแบบทางวิศวกรรม 6 ขั้นตอน และหลักการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่ 6 อย่าง โดยมีเงื่อนไขให้นำพลังงานทางเลือกหรือพลังงานทดแทนมาใช้ในการเคลื่อนที่และขุดเจาะทางการเกษตรโดยคำนึงถึงความปลอดภัยของผู้ใช้งานเป็นหลัก ข้อเสนอในการออกแบบของคณะผู้วิจัยตัดสินใจเลือกการขุดเจาะแบบสว่านเนื่องจากหุ่นยนต์จะมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา สามารถขนย้ายได้ง่าย ส่วนการใช้พลังงานทดแทนนั้น ได้เลือกให้ชุดขับเคลื่อนใช้พลังงานไฟฟ้าเนื่องจากสามารถใช้พลังงานทดแทนมาผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ แต่ชุดขุดเจาะต้องใช้แรงบิดสูงจึงเลือกใช้เครื่องยนต์เบนซิน แต่สามารถใช้พลังงานทดแทนได้คือสามารถใช้น้ำมันแก๊สโซฮอล์ได้ สำหรับการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ได้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมระยะไกลผ่านรีโมทคอนโทรลเพื่อความปลอดภัยของผู้ใช้งาน โดยใช้แบตเตอรี่แรงดัน 12 โวลต์ 12 แอมแปร์ชั่วโมง จำนวน 2 ชุด ชุดมอเตอร์ไฟฟ้าสำหรับการเคลื่อนที่ล้อซ้าย 1 ชุด ล้อขวา 1 ชุด มอเตอร์ไฟฟ้าสำหรับควบคุมการขึ้นลงของชุดขุดเจาะ 1 ชุด และมอเตอร์ไฟฟ้าสำหรับควบคุมคันเร่งเครื่องยนต์ชุดขุดเจาะ 1 ชุด ผลการทดสอบหุ่นยนต์สามารถขุดเจาะหลุมสำหรับปลูกต้นไม้หรือทำการเกษตร โดยหลุมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 300 มิลลิเมตร ลึก 250 มิลลิเมตร อัตราในการขุดเจาะอยู่ที่ 2 นาทีต่อหลุม อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของเครื่องขุดเจาะ 30 หลุมต่อลิตร และหุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้ระยะทาง 2 กิโลเมตร ต่อการชาร์จไฟฟ้า 1 ครั้ง

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิสำหรับการสนับสนุนงบประมาณ ขอขอบคุณโครงการจัดตั้งคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ สำหรับการสนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] จักรี วิชัยระหัต.(2560) เอกสารประกอบการสอนรายวิชาการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบและผลิต. มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ.
- [2] S. Kalpakjian and S. R. Schmid.(2001) Manufacturing Engineering and Technology. Pearson Education India.
- [3] ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. พลังงานทดแทน. สืบค้นเมื่อ 24 กันยายน 2562, จาก <http://www.thailandenergyeducation.com/assets/media/A004.pdf>.
- [4] ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. พลังงานไฟฟ้า. สืบค้นเมื่อ 24 กันยายน 2562, จาก <http://www.thailandenergyeducation.com/assets/media/A003.pdf>.
- [5] Zeid I.(2005) Mastering CAD/CAM. McGrawHill.
- [6] ยงยุทธ เสริมสุธีธนวัฒน์.(2556) หลักวิศวกรรมเครื่องมือเบื้องต้น การออกแบบจิก ฟิกซ์เจอร์และเกจตรวจสอบ. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.
- [7] Industrial Center.(2009) Computer Numerical control. The Hong Kong Polytechnic University.
- [8] Alan G. Smith. (2011) Introduction to Arduino: A piece of cake!. access on Sep24, 2019, <https://www.introtoarduino.com/downloads/IntroArduinoBook.pdf>.

การพัฒนาเครื่องอบแห้งเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบประหยัดพลังงาน

The Development of Energy Saving Noodle Dryer

ปฎิพัทธ์ อนุอมพงษ์ชาติ¹ ศิววัฒน์ กมลคุณานนท์² ปัญจพล ไทยปิยะ³ พงศ์เทพ กุลชาติชัย¹ และภคมน ปินตานา^{4*}

¹ สาขาวิศวกรรมการจัดการพลังงาน คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์ อุดรดิตถ์ 53000

² สาขาวิศวกรรมบริหารงานก่อสร้าง คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์ อุดรดิตถ์ 53000

³ สาขาเทคโนโลยีไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์ อุดรดิตถ์ 53000

⁴ สาขาวิศวกรรมการอนุรักษ์พลังงาน วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290

บทคัดย่อ

เส้นก๋วยเตี๋ยวเป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์ด้านอาหารหลักของเอเชียที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก และแพร่กระจายนิยมรับประทานในหลายประเทศ สำหรับกระบวนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวกระบวนการที่สำคัญกระบวนการหนึ่งคือการทำแห้ง ตู้อบแห้งแผ่นก๋วยเตี๋ยวแบบเดิมเป็นลักษณะแขวนซี่ แล้วอบด้วยลมร้อน โดยเครื่องแบบเดิมนี้มีการพลังงานในการผลิตเป็นจำนวนมาก สิ้นเปลืองเวลา ค่าใช้จ่าย และยังก่อให้เกิดปัญหาการเสียหายของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นจึงได้มีการออกแบบและพัฒนาเครื่องอบแห้งเส้นก๋วยเตี๋ยวโดยการเปลี่ยนรูปแบบการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนจากไอน้ำ เป็นการอบด้วยลมร้อนจากระบบฮีทปั๊ม โดยใช้ประโยชน์ส่วนความร้อนจากฮีทปั๊มให้การเพิ่มอุณหภูมิอากาศป้อนให้กับตู้อบและนำฝั่งความเย็นช่วยลดความชื้นอากาศก่อนเข้าเครื่องอบ ภายในประกอบด้วยพัดลมและฮีทเตอร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการลดความชื้น โดยเครื่องอบแห้งนี้สามารถลดความชื้นเส้นก๋วยเตี๋ยวที่ผ่านกระบวนการหนึ่งด้วยไอน้ำที่มีความชื้นช่วงเริ่มต้น 65-72 เปอร์เซ็นต์ เหลือประมาณ 38-45 เปอร์เซ็นต์ โดยลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่มีการบิดเป็นริ้วบริเวณด้านข้างแผ่นก๋วยเตี๋ยว และสีของผลิตภัณฑ์ไม่แตกต่างกับการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งเดิมของทางบริษัท อัตราการใช้ไฟฟ้าของทั้งระบบ คือ ระบบฮีทปั๊ม ระบบฮีทเตอร์ ระบบขับเคลื่อนและระบบพัดลม ใช้ไฟฟ้าทั้งหมด 547 บาทต่อวันต่อไลน์การผลิต ซึ่งสามารถลดค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้าได้กว่า 80 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ: เครื่องอบแห้งระบบฮีทปั๊ม การอบแห้งเส้นก๋วยเตี๋ยว ระบบฮีทปั๊ม

บทนำ

เส้นก๋วยเตี๋ยวเป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์ด้านอาหารหลักของเอเชียที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก และแพร่กระจายนิยมรับประทานในหลายประเทศ โดยเส้นก๋วยเตี๋ยวผลิตจากแป้งข้าวเจ้าเป็นหลัก ซึ่งกระบวนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวของ มีกระบวนการไม่เพื่ออบข้าวเจ้าให้เป็นน้ำแล้วนำมาตีแผ่เป็นแผ่นใหญ่แล้วจึงเข้าสู่กระบวนการทำแห้ง ฝั่งเพื่อรอการตัดขึ้นรูปและอบแห้งอีกครั้ง ก่อนบรรจุลงในบรรจุภัณฑ์เพื่อเตรียมสู่การจำหน่ายต่อไป [1] สำหรับกระบวนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวกระบวนการที่สำคัญกระบวนการหนึ่งคือการทำแห้ง ตู้อบแห้งแผ่นก๋วยเตี๋ยวแบบเดิมเป็นลักษณะแขวนซี่ แล้วอบด้วยลมร้อนซึ่งเป็นเทคโนโลยีการทำก๋วยเตี๋ยวแบบดั้งเดิม เครื่องอบแห้งขนาดใหญ่ความยาว 24 เมตร สูง 6 เมตร ใช้พลังงานความร้อนของไอน้ำจากบอยเลอร์ อากาศร้อนที่ซึบได้มาจากการเปิดพัดลมขนาด 1 แรงม้า จำนวน 10 ตัวต่อตู้อบ เป่าลมผ่านแผงคอยล์ร้อนที่ใช้ความร้อนจากไอน้ำ เพื่อเป่าให้เส้นก๋วยเตี๋ยวแห้งพอที่จะเข้าสู่กระบวนการผลิตขั้นต่อไป ซึ่งกระบวนการเป่าด้วยแรงลมนี้ส่งผลให้ขอบซ้ายขวาของแผ่นก๋วยเตี๋ยวแห้งและบิดตัว ซึ่งท้ายที่สุดต้องคัดทิ้งเพราะไม่สามารถนำไปบรรจุ เพื่อส่งขายได้ ซึ่งส่วนนี้มีประมาณ 30-40 เปอร์เซ็นต์

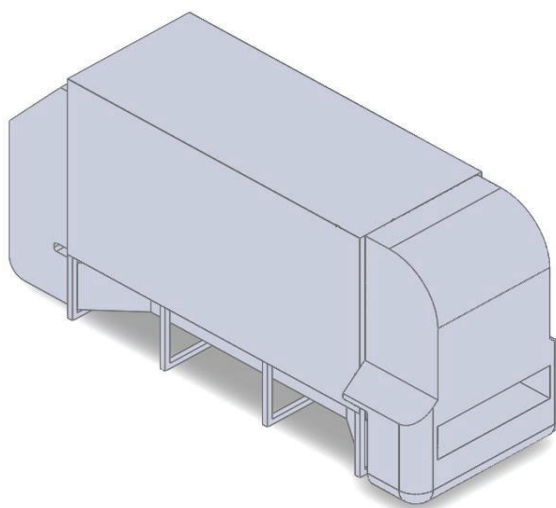
* Corresponding author: Tel.: 098-6196155. E-mail address: p.pintana@gmail.com

ดังนั้นผู้วิจัยและสถานประกอบการ บริษัท ไทย เอเซียไรซ์โปรดักส์ จำกัด จึงได้หาแนวทางในการลดความสูญเสียจากกระบวนการผลิต รวมถึงเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวร่วมกัน ซึ่งแนวคิดของการออกแบบและพัฒนาเครื่องอบแห้งเส้นก๋วยเตี๋ยว คือเปลี่ยนรูปแบบการอบแห้งโดยใช้ลมร้อนจากไอน้ำ เป็นการอบด้วยลมร้อนจากระบบฮีทปั๊ม โดยใช้ประโยชน์ส่วนที่เกิดความเย็นที่ได้จากระบบฮีทปั๊มไปใช้ผลิตน้ำเย็นใช้ในระบบแลกเปลี่ยนความร้อน (Evaporator) เพื่อให้ลมร้อนที่มีความชื้นสูงจากห้องอบผ่านแผงคอยด์เย็นนี้และทำให้ไอน้ำที่มากับลมร้อนกลั่นตัวเป็นน้ำ (Condensed water) ที่แผงดังกล่าวจึงเป็นการลดความชื้นของลมขาออกเข้าสู่ห้องอบแห้ง จากนั้นลมที่ผ่านการลดความชื้นแล้วจะไหลผ่านไปแลกเปลี่ยนความร้อนกับสารทำความเย็นที่แผงคอยด์ร้อน (Condenser) เพื่อให้ได้เป็นลมแห้งที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ 40 - 45 °C [2] [3] [4] แล้วจึงนำลมอุ่นแห้งที่ได้ไปใช้ลดความชื้นในตู้อบแผ่นก๋วยเตี๋ยวต่อไป การหมุนเวียนลมภายในตู้อบผ่านชั้นสายพานแผ่นก๋วยเตี๋ยวออกแบบให้ใช้พัดลมเป่าอากาศ โดยลมสามารถผ่านแผ่นเส้นก๋วยเตี๋ยวได้ทุกชั้นชั้นสายพาน เพื่อพาความชื้นออกออกจากเส้นก๋วยเตี๋ยว ปรับเปลี่ยนการขับเคลื่อนภายในตู้อบจากการใช้มอเตอร์ขับเคลื่อนโซ่ที่มีน้ำหนักมากและต้องใช้จารบีในการหล่อลื่นซึ่งทำให้เกิดปัญหาแผ่นก๋วยเตี๋ยวเปื้อน ไปเป็นระบบสายพานตาข่ายเทฟลอน ซึ่งควบคุมคุณภาพการผลิตได้ดีกว่าและทำให้ไม่เกิดการหย่อนของแผ่นก๋วยเตี๋ยว ทำให้ได้แผ่นที่เรียบเสมอกันทั้งแผ่น ลดการสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการแตกหัก รวมถึงการออกแบบที่พยายามลดขนาดของตู้อบ และออกแบบให้ง่ายต่อการบำรุงรักษา ต่อไป

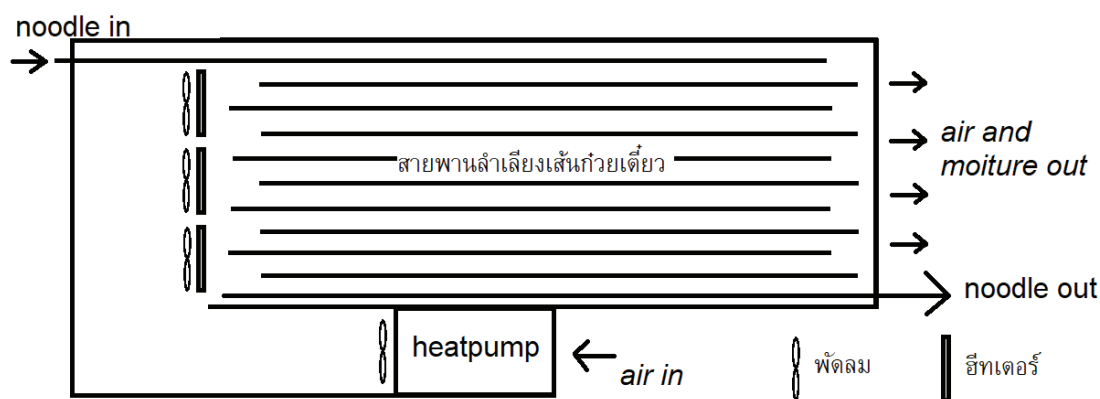
วิธีการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการพัฒนาเครื่องอบแห้งร่วมกับภาคเอกชน โดยเริ่มจากการศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการลดความชื้นของเส้นก๋วยเตี๋ยว ศึกษาสภาพปัญหาเบื้องต้นของการอบแห้งเส้นก๋วยเตี๋ยวในปัจจุบัน เก็บข้อมูลสำคัญ เพื่อหาแนวทางออกแบบและพัฒนาเครื่องอบแห้งเส้นก๋วยเตี๋ยวในเบื้องต้นร่วมกับผู้ประกอบการ ศึกษาข้อมูลวัสดุอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในส่วน of โครงสร้างหลัก ระบบสายพานลำเลียง ชุดอุปกรณ์ขับเคลื่อนสายพาน ระบบฮีทปั๊ม ระบบแลกเปลี่ยนความร้อน ระบบกระจายและควบคุมความเร็วลม และระบบควบคุมอัตโนมัติ รวมทั้งศึกษาและเก็บข้อมูลค่าความชื้นวัตถุดิบเริ่มต้น ค่าความชื้นผลิตภัณฑ์ และข้อมูลคุณสมบัติผลิตภัณฑ์ด้านอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

ออกแบบเครื่องอบแห้งเส้นก๋วยเตี๋ยว มีลักษณะแสดงดังภาพที่ 1 ซึ่งมีขนาดกว้าง 1 เมตร สูง 6 เมตร แบ่งชั้นสายพานลำเลียงเส้นก๋วยเตี๋ยวจำนวน 11 ชั้น รวมระยะทางที่เส้นก๋วยเตี๋ยวเคลื่อนที่ทั้งหมด 11 เมตร ใช้ระบบฮีทปั๊มด้านความเย็นในการลดความชื้นอากาศขาเข้า แล้วใช้อากาศแห้งไปผ่านคอยล์ร้อนเพื่อให้มีอุณหภูมิตามต้องการประมาณ 40-45 องศาเซลเซียส ติดตั้งพัดลมอุตสาหกรรม บริเวณด้านหน้าสายพานเพื่อเพิ่มความเร็วลมภายในห้องอบ และเพิ่มชุดลดอุณหภูมิขนาด 6,000 วัตต์ (2,000 วัตต์ จำนวน 3 ตัว) สำหรับเพิ่มอุณหภูมิของอากาศแห้งที่ออกจากระบบฮีทปั๊ม ให้มีอุณหภูมิถึงประมาณ 50 องศาเซลเซียส ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์แสดงดังภาพที่ 2 ดำเนินการทดสอบการทำงานของเครื่องอบแห้งด้วยการเดินระบบร่วมกับไลน์การผลิตจริง ตรวจวัดค่าอุณหภูมิความเร็วลม และวิเคราะห์ผลผลิตผลิตภัณฑ์เส้นก๋วยเตี๋ยวที่ได้จากการอบแห้ง ด้วยการหาค่าความชื้นและวิเคราะห์ด้วยผู้เชี่ยวชาญของสถานประกอบการ



ภาพที่ 1 โครงสร้างของเครื่องอบแห้งเส้นก๋วยเตี๋ยว



ภาพที่ 2 ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์และการทำงานของเครื่องอบแห้ง

โดยการหาปริมาณความชื้นจะบอกในรูปของเปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีวิธีบอกอยู่ 2 แบบ คือแบบมาตรฐานเปียก (Wet-basis) แบบมาตรฐานแห้ง (Dry-basis) [5] โดยที่ความชื้นมาตรฐานเปียก และความชื้นมาตรฐานแห้ง เขียนในรูปสมการดังสมการตามลำดับ

$$M_w = \frac{W - d}{W} \quad (1)$$

$$M_d = \frac{W - d}{d} \quad (2)$$

เมื่อ M_w คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก, เปอร์เซ็นต์
 M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง, เปอร์เซ็นต์
 W คือ มวลของวัสดุ, กิโลกรัม
 d คือ มวลของวัสดุแห้ง, กิโลกรัม

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

เครื่องอบแห้งเส้นก๋วยเตี๋ยวแบบประหยัดพลังงานได้รับการออกแบบและสร้างมีลักษณะดังภาพที่ 3 (ก) ส่วนระบบฮีทปั๊มมีลักษณะ ดังแสดงในภาพที่ 3 (ข) โดยระบบฮีทปั๊มสามารถลดความชื้นของอากาศภายนอกเครื่องอบจากประมาณ 56 เปอร์เซ็นต์ ณ อุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส ให้ความชื้นอากาศเหลือต่ำกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ และสามารถทำให้อากาศหลังออกจากฮีทปั๊มมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงกว่า 49 องศาเซลเซียส ความเร็วอากาศหลังผ่านฮีทปั๊มคือ 1.1 เมตรต่อวินาที ดังแสดงในภาพที่ 4 โดยอากาศเมื่อเคลื่อนตัวผ่านส่วนโค้งของเครื่องอบเพื่อเข้าสู่บริเวณโซนอบแห้งที่สายพานลำเลียง จะมีอุณหภูมิลดลงเนื่องจากเครื่องอบไม่ได้ติดฉนวนกันความร้อนออก ในขณะที่เดียวกันจากการเสียดทานด้วยผนังและอุปกรณ์ต่าง ๆ จะทำให้ความเร็วอากาศลดลงด้วย ดังนั้นเมื่ออากาศผ่านพัดลมและขดลวดความร้อนที่ได้ติดตั้งไว้ ก็จะสามารถเพิ่มความเร็วมวลและอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงที่การอบแห้งเส้นก๋วยเตี๋ยวต้องการนั่นคือ อุณหภูมิประมาณ 45-50 องศาเซลเซียส ความเร็วมวลเฉลี่ยประมาณ 1 เมตรต่อวินาที ตลอดช่วงของการอบแห้งภายในตู้อบ

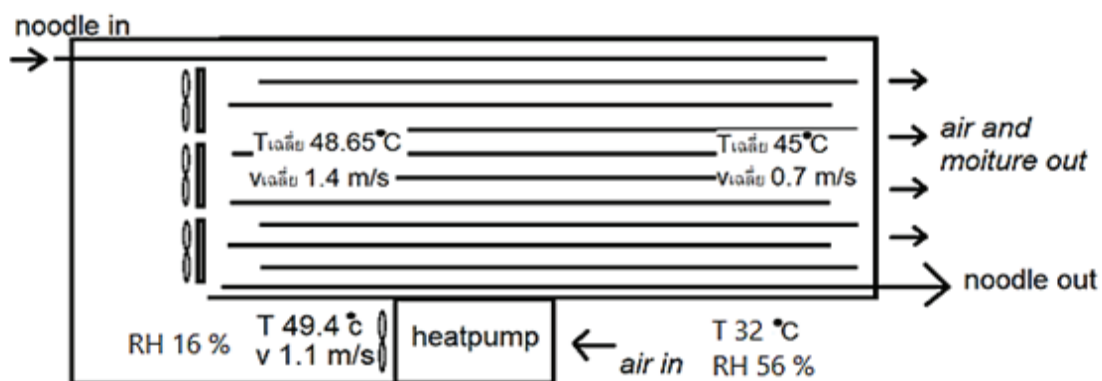


(ก)



(ข)

ภาพที่ 3 (ก) โครงสร้างและระบบลำเลียงของเครื่องอบแห้ง (ข) ระบบฮีทปั๊ม



ภาพที่ 4 ผลสภาวะการทดสอบเครื่องอบแห้งเส้นก๋วยเตี๋ยว

ความชื้นเส้นก๋วยเตี๋ยวเมื่อผ่านการลดความชื้นในตู้อบที่เวลา 11 นาที (อัตราการเคลื่อนที่ของสายพานคือ 1 เมตรต่อนาที) จากความชื้นเริ่มต้น 65-72 %db เหลือความชื้นเส้นก๋วยเตี๋ยว 38-45%db ลักษณะเบื้องต้นแสดงดังภาพที่ 5 (ก) พบว่าเส้นก๋วยเตี๋ยวที่ได้จากกระบวนการอบแห้งเส้นก๋วยเตี๋ยวไม่แห้งกรอบจนแตกหักและไม่เป็นริ้ว อีกทั้งเมื่อตรวจสอบเบื้องต้นโดยเจ้าหน้าที่ ดังแสดงในภาพที่ 5 (ข) พบว่ามีคุณภาพใกล้เคียงกับเส้นก๋วยเตี๋ยวที่ผ่านกระบวนการอบและ Aging ปกติ (กระบวนการบ่มเส้นก๋วยเตี๋ยว) ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า เครื่องอบแห้งตัวใหม่นี้สามารถนำไปพัฒนาต่อเพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิต ที่สามารถลดระยะเวลา การใช้พลังงาน รวมถึงเพิ่มคุณภาพคือป้องกันการเกิดเชื้อราของผลิตภัณฑ์ได้ด้วย



(ก)

(ข)

ภาพที่ 5 (ก) การตรวจสอบคุณภาพของเส้นก๋วยเตี๋ยว (ข) เส้นก๋วยเตี๋ยวที่ผ่านการอบแห้ง

คำนวณอัตราการใช้ไฟฟ้าของทั้งระบบ คือ ระบบไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส แรงดันไฟฟ้า 380 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ จ่ายให้กับชุดมอเตอร์ขับเคลื่อนสายพาน ระบบฮีตปั๊มในส่วนของการคอมเพรสเซอร์ ระบบฮีตเตอร์ และระบบพัดลมอุตสาหกรรม รวมทั้งระบบไฟฟ้า 1 เฟส แรงดัน 220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ ใช้ไฟฟ้าทั้งหมด 547 บาทต่อวันต่อไลน์การผลิต ลดลงจากเดิมที่มีการใช้ไฟฟ้าประมาณ 3,600 บาทต่อวันต่อไลน์การผลิต

สรุปผลการวิจัย

การพัฒนาเครื่องอบแห้งเส้นก๋วยเตี๋ยว โดยเปลี่ยนแปลงกระบวนการอบด้วยลมร้อนจากไอน้ำเป็นระบบฮีตปั๊ม ใช้หลักการอุ่นอากาศป้อนโดยคอยล์ร้อนให้กับตู้อบและใช้ความเย็นด้านคอยล์เย็นช่วยควบแน่นความชื้นในอากาศเป็นการลดความชื้นอากาศก่อนเข้าเครื่องอบ อุปกรณ์ภายในประกอบด้วยพัดลมและฮีตเตอร์เพื่อเพิ่มความเร็วลมและอุณหภูมิของอากาศ ผลการทดสอบเครื่องอบแห้งนี้พบว่าสามารถลดความชื้นเส้นก๋วยเตี๋ยวจากความชื้นช่วงเริ่มต้น 65-72 เปอร์เซ็นต์ เหลือประมาณ 38-45 เปอร์เซ็นต์ พิจารณาคูณสมบัติผลิตภัณฑ์พบว่าโดยรวมมีคุณภาพดีขึ้น อัตราการใช้ไฟฟ้าของทั้งระบบ เมื่อคำนวณแล้วสามารถลดค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้าได้กว่า 80 เปอร์เซ็นต์จากเครื่องเดิม

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากอุทยานวิทยาศาสตร์ภาคเหนือ (จังหวัดเชียงใหม่) ประจำปีงบประมาณ 2561 ผ่านทางอุทยานวิทยาศาสตร์ภาคเหนือ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์ และขอขอบคุณสถานประกอบการ บริษัท ไทยเอเชียไรซ์ โปรดักส์ จำกัด ที่ให้ความเอื้อเอื้อให้การให้ข้อมูลและผู้ร่วมวิจัย รวมทั้งมหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์และมหาวิทยาลัยแม่โจ้ที่สนับสนุนเวลาในการทำวิจัยให้กับคณะผู้วิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] อรอนงค์ นัยวิกุล. (2540). “ข้าวสาลี: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร”. พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.
- [2] สุทธิศักดิ์ ภัทรสถาพรกุล. (2543). “การพัฒนาเครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อน”. วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน จ.นครปฐม. 123 น.
- [3] Prasertsan, S., P. Sean-saby, P. Ngamsritrakul and G. Prateepchaikul. (1996). **Heat pump dryer Part1: Simulation of the model**. Int. J. Energy Res. 20: 1067-1079.
- [4] Prasertsan, S., P. Sean-saby, P. Ngamsritrakul and G. Prateepchaikul. (1997). **Heat pump dryer Part2: Results of Simulation**. Int. J. Energy Res. 21: 1-20.
- [5] จักรมาส เลหาวิช สุพรรณ ยั่งยืน เขตพงษ์ เชี่ยวชาญวัฒนา และทิวานันท์ แก้วสอนดี. (2560). “คู่มือองค์ความรู้ การจัดการความรู้และขยายผลเทคโนโลยีเครื่องอบแห้งแบบถังทรงกระบอกหมุนด้วยรังสีอินฟราเรดร่วมกับลมร้อน ปลอ่ยทิ้งแบบเคลื่อนย้ายได้”. สืบค้นเมื่อ 28 กันยายน 2562, จาก <http://www.thai-explore.net>

อัตราส่วนผสมสูงสุดของน้ำมันไพโรไลซิสเพื่อให้ได้มาตรฐานน้ำมันดีเซลของไทย Maximum Blended Ratio of Pyrolysis Oil for Thai Commercial Diesel Standard

อรปวิณ แสงเนตร* และประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ²

¹ สาขาเทคโนโลยีและการจัดการพลังงาน บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร 10332

² ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร 10332

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาอัตราส่วนน้ำมันไพโรไลซิสในน้ำมันดีเซลมีคุณภาพตามเกณฑ์มาตรฐานที่กรมธุรกิจพลังงานประกาศกำหนด และเพื่อศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้นของการผสมน้ำมันไพโรไลซิสในน้ำมันดีเซลหมุนเร็ว โดยจากการทดสอบตามมาตรฐาน American Society for Testing and Materials (ASTM) จำนวน 6 รายการทดสอบ ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ (ASTM D4052) ความหนืด (ASTM D445) จุดไหลเท (ASTM D97) กำมะถัน (ASTM D5453) จุดวาบไฟ (ASTM D93) และการกลั่น (ASTM D86) พบว่าน้ำมันไพโรไลซิสตัวอย่างที่ 1 (1PO) ที่อัตราส่วนน้ำมันไพโรไลซิสมากกว่าร้อยละ 10 โดยปริมาตร แต่ไม่เกินร้อยละ 20 โดยปริมาตร ค่าการทดสอบผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพทุกรายการทดสอบ ส่วนน้ำมันไพโรไลซิสตัวอย่างที่ 2 (2PO) ที่อัตราส่วนน้ำมันไพโรไลซิสน้อยกว่าร้อยละ 10 โดยปริมาตร พบว่าไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพ 1 รายการทดสอบ คือค่ากำมะถันที่ตรวจได้ร้อยละ 0.018 โดยน้ำหนัก เกณฑ์มาตรฐานกำหนดให้ไม่สูงกว่าร้อยละ 0.005 โดยน้ำหนัก และจากการศึกษาอัตราส่วนผสมน้ำมันไพโรไลซิสปริมาณมากที่สุดในน้ำดีเซล ที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพสำหรับน้ำมันดีเซลหมุนเร็วตามประกาศกรมธุรกิจพลังงาน โดยใช้ น้ำมันไพโรไลซิสตัวอย่างที่ 1 (1PO) พบว่าน้ำมันไพโรไลซิสสามารถผสมในน้ำมันดีเซลได้สูงสุดที่อัตราส่วนน้ำมันไพโรไลซิสร้อยละ 18 โดยปริมาตร โดยมีคุณสมบัติผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพทั้ง 6 รายการทดสอบ ได้แก่ ค่าความถ่วงจำเพาะ 0.84 เกณฑ์มาตรฐานกำหนดให้ค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ในช่วง 0.81-0.87 ค่าความหนืด 3.1 เซนติสโตกส์ เกณฑ์มาตรฐานกำหนดให้ค่าความหนืดอยู่ในช่วง 1.8-4.1 เซนติสโตกส์ ค่าจุดไหลเท 9 องศาเซลเซียส เกณฑ์มาตรฐานกำหนดให้ไม่สูงกว่า 10 องศาเซลเซียส ค่ากำมะถันร้อยละ 0.005 โดยน้ำหนัก เกณฑ์มาตรฐานกำหนดให้ไม่สูงกว่าร้อยละ 0.005 โดยน้ำหนัก ค่าจุดวาบไฟ 52 องศาเซลเซียส เกณฑ์มาตรฐานกำหนดให้ไม่ต่ำกว่า 52 องศาเซลเซียส และค่าอุณหภูมิของส่วนที่กลั่นได้ที่อัตราการระเหยร้อยละ 90 โดยปริมาตร 355 องศาเซลเซียส เกณฑ์มาตรฐานกำหนดให้ไม่สูงกว่า 357 องศาเซลเซียส และเมื่อวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้นในการผสมน้ำมันไพโรไลซิสในน้ำมันดีเซลโดยเปรียบเทียบราคา ณ โรงกลั่นของน้ำมันดีเซลและราคา ณ โรงกลั่นของน้ำมันดีเซลที่มีอัตราส่วนผสมน้ำมันไพโรไลซิสร้อยละ 18 โดยปริมาตร พบว่าราคา ณ โรงกลั่นของน้ำมันดีเซลที่มีอัตราส่วนผสมน้ำมันไพโรไลซิสต่ำกว่าราคา ณ โรงกลั่นของน้ำมันดีเซลเฉลี่ยอยู่ที่ 0.19 บาท/ลิตร ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ในการผลักดันให้น้ำมันไพโรไลซิสเป็นเชื้อเพลิงจากพลังงานทดแทนในภาคขนส่งต่อไป

คำสำคัญ: น้ำมันไพโรไลซิส คุณภาพน้ำมันเชื้อเพลิง

* Corresponding author: Tel.: 080-0589-678. E-mail address: little.gift00@gmail.com

บทนำ

ประเทศไทยมีการจัดหาน้ำมันดิบเฉลี่ยอยู่ที่ระดับ 1,015 พันบาร์เรลต่อวัน การนำเข้าน้ำมันดิบคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 84 ของการจัดหาทั้งหมด โดยมีปริมาณการใช้น้ำมันดิบเฉลี่ย 22,664 ล้านลิตรต่อปี ซึ่งมาจากการนำเข้า 828.9 ล้านลิตรต่อปี เมื่อพิจารณาปริมาณการใช้น้ำมันดิบเฉลี่ยตลอด 5 ปีที่ผ่านมา มีแนวโน้มปริมาณการใช้เพิ่มขึ้นทุกปี ในปี พ.ศ.2559 การใช้น้ำมันดิบเพิ่มขึ้นร้อยละ 3.3 ส่วนการนำเข้าน้ำมันดิบเพิ่มขึ้นจากปีก่อนหน้าเกือบ 6 เท่าตัว[1] ในสถานการณ์ที่ประเทศไทยมีความต้องการใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้น แต่การจัดหาน้ำมันดิบในประเทศมีปริมาณจำกัด การจัดหาพลังงานรูปแบบใหม่เพื่อให้เพียงพอและเสริมสร้างความมั่นคงทางพลังงานจึงเป็นสิ่งจำเป็นและมีความสำคัญ

ในปัจจุบันประเทศไทยมีการส่งเสริมการใช้ไบโอดีเซลในภาคขนส่ง โดยใช้ไบโอดีเซล (บี100) เป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันดีเซลในอัตราร้อยละ 6.6-7 โดยปริมาตร และกระทรวงพลังงานยังได้ดำเนินโครงการศึกษาการเพิ่มอัตราส่วนผสมไบโอดีเซลในเครื่องยนต์ดีเซลหมุนเร็ว โดยจากการศึกษาพบว่าเครื่องยนต์ดีเซลขนาดใหญ่สามารถใช้น้ำมันดีเซลหมุนเร็วที่มีอัตราส่วนผสมของไบโอดีเซลในอัตราส่วนสูงสุดร้อยละ 20 โดยปริมาตร[2] ตลอดจนได้ระบุให้น้ำมันดีเซลหมุนเร็วที่มีอัตราส่วนผสมของไบโอดีเซลในอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยปริมาตร (บี10) และอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยปริมาตร (บี20) เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงที่สามารถจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ได้สำหรับรถยนต์ที่ผู้ผลิตให้การรับรอง นอกจากนี้ไบโอดีเซลแล้ว กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน ยังให้การสนับสนุนการศึกษาความเป็นไปได้ และความเหมาะสมของการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากขยะพลาสติกด้วยกระบวนการไพโรไลซิส เพื่อทดแทนการใช้น้ำมันฟอสซิลและเตรียมความพร้อมในการจัดหาน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับประเทศไทยอีกด้วย[3] โดยระบุไว้ในแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ.2558-2579 ให้น้ำมันไพโรไลซิสเป็นเชื้อเพลิงจากพลังงานทดแทนในภาคขนส่ง[4]

กระบวนการไพโรไลซิส เป็นกระบวนการแตกตัวหรือแตกสลายของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาว โดยใช้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 400-800 องศาเซลเซียส ในสภาวะปราศจากออกซิเจน โดยทั่วไปผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบ่งออกเป็น 3 ชนิดตามสถานะ คือ ก๊าซ ของเหลว และของแข็ง ผลิตภัณฑ์หลักของกระบวนการไพโรไลซิส คือ ผลิตภัณฑ์ของเหลวหรือที่เรียกว่าน้ำมันไพโรไลซิส โดยอัตราส่วนและคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสโดยตรงซึ่งไม่ได้ผ่านกระบวนการกลั่นหรือกระบวนการปรับปรุงคุณภาพ มีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ชนิดของวัตถุดิบ ชนิดเตาปฏิกรณ์ และสภาวะที่ใช้ในการไพโรไลซิส เป็นต้น[5]

การผสมน้ำมันไพโรไลซิสในน้ำมันดีเซลจึงเป็นวิธีหนึ่งในการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันไพโรไลซิสเพื่อให้สามารถใช้ในเชิงพาณิชย์ได้ โดยการศึกษาอัตราส่วนน้ำมันไพโรไลซิสในน้ำมันดีเซลเปรียบเทียบกับเกณฑ์คุณภาพมาตรฐานน้ำมันดีเซลสำหรับเครื่องยนต์รอบต่ำในประเทศไทย งานวิจัยก่อนหน้านี้ได้มีการศึกษาการไพโรไลซิสพลาสติกประเภทโพลีเอทิลีนที่อุณหภูมิเฉลี่ย 600-700 องศาเซลเซียส น้ำมันไพโรไลซิสที่ได้มีความถ่วงจำเพาะ 0.789 ค่าความหนืด 5.92 เซนติสโตกส์ตามเกณฑ์คุณภาพมาตรฐาน ค่าจุดวาบไฟต่ำกว่า 27 องศาเซลเซียสซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์คุณภาพมาตรฐาน วิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำมันไพโรไลซิสผสมน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนน้ำมันไพโรไลซิสร้อยละ 5 10 15 และ 20 โดยปริมาตร โดยใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐาน American Society for Testing and Materials (ASTM) เมื่ออัตราส่วนน้ำมันไพโรไลซิสเพิ่มขึ้น ค่าความถ่วงจำเพาะและค่าจุดวาบไฟของน้ำมันผสมลดลงในขณะที่ค่าความหนืดสูงขึ้น คุณสมบัติทั้ง 3 รายการทดสอบของน้ำมันไพโรไลซิสผสมน้ำมันดีเซลผ่านเกณฑ์คุณภาพมาตรฐานในทุกอัตราส่วน[6] งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาอัตราส่วนน้ำมันไพโรไลซิสในน้ำมันดีเซลที่เหมาะสม โดยทดสอบคุณสมบัติเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำมันดีเซลหมุนเร็วตามประกาศกรมธุรกิจพลังงาน เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล พ.ศ.2562 เพื่อผลักดันให้น้ำมันไพโรไลซิสเป็นเชื้อเพลิงจากพลังงานทดแทนในภาคขนส่งได้

วิธีการวิจัย

ตัวอย่างน้ำมันไฟโรไลซิสจากขยะพลาสติกจำนวน 2 ตัวอย่าง ได้แก่ น้ำมันไฟโรไลซิสตัวอย่างที่ 1 (1PO) ใช้วัตถุดิบเป็นขยะพลาสติกจากหลุมฝังกลบ ซึ่งประกอบไปด้วยพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนและพอลิโพรพิลีน แหล่งที่มาจากศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานชีวมวล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดสระบุรี และน้ำมันไฟโรไลซิสตัวอย่างที่ 2 (2PO) ใช้วัตถุดิบผสมหลายชนิด ได้แก่ พลาสติกชนิดพอลิเอทิลีน พลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีน ยาง และน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว แหล่งที่มาจากบริษัท จีอาร์ดี เทค จำกัด และตัวอย่างน้ำมันดีเซลหมุนเร็ว (ADO) จำนวน 1 ตัวอย่าง จากห้องปฏิบัติการทดสอบคุณภาพน้ำมันเชื้อเพลิง กรมธุรกิจพลังงาน โดยทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีตามรายการทดสอบที่เกี่ยวข้อง ด้วยเครื่องมือที่รองรับวิธีทดสอบตามมาตรฐานในห้องปฏิบัติการทดสอบคุณภาพน้ำมันเชื้อเพลิง ได้แก่ ค่าความถ่วงจำเพาะ ตามวิธีทดสอบมาตรฐาน ASTM D4052 โดย Density Meter ยี่ห้อ Anton Parr รุ่น DMA4500M ค่าความหนืด ตามวิธีทดสอบมาตรฐาน ASTM D445 โดย Viscosity Meter ยี่ห้อ Cannon รุ่น CAV2100 ค่าจุดไหลเท ตามวิธีทดสอบมาตรฐาน ASTM D97 โดย Cloud and Pour point Apparatus ยี่ห้อ Stanhope-Seta รุ่น 93531-7V ค่ากำมะถัน ตามวิธีทดสอบมาตรฐาน ASTM D5453 โดย Elemental Analyzer ยี่ห้อ Antek รุ่น MultiTek ค่าจุดวาบไฟ ตามวิธีทดสอบมาตรฐาน ASTM D93 โดย Flash Point Analyzer ยี่ห้อ Petrotest รุ่น PM4 และค่าการกลั่น ตามวิธีทดสอบมาตรฐาน ASTM D86 โดย Automatic Distillation ยี่ห้อ PAC รุ่น OptiDist โดยนำตัวอย่างน้ำมันไฟโรไลซิสทั้ง 2 ตัวอย่างมาเปรียบเทียบกับค่าการทดสอบและค่าตามเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพสำหรับน้ำมันดีเซลของประกาศกรมธุรกิจพลังงาน[7] ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สรุปวิธีทดสอบและเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา เทียบตามเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพของประกาศกรมธุรกิจพลังงาน

รายการทดสอบ	งานวิจัยใช้ศึกษา		ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน	
	วิธีทดสอบ	เครื่องมือทดสอบ	วิธีทดสอบ	อัตราสูงต่ำ
ความถ่วงจำเพาะ ณ อุณหภูมิ 15.6/15.6 องศาเซลเซียส	ASTM D4052	Density Meter ยี่ห้อ Anton Parr รุ่น DMA4500M	ASTM D1298	ไม่ต่ำกว่า 0.81 และไม่สูงกว่า 0.87
ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (เซนติสโตกส์)	ASTM D445	Viscosity Meter ยี่ห้อ Cannon รุ่น CAV2100	ASTM D445	ไม่ต่ำกว่า 1.8 และไม่สูงกว่า 4.1
จุดไหลเท (องศาเซลเซียส)	ASTM D97	Cloud and Pour point Apparatus ยี่ห้อ Stanhope-Seta รุ่น 93531-7V	ASTM D97	ไม่สูงกว่า 10
กำมะถัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ASTM D5453	Elemental Analyzer ยี่ห้อ Antek รุ่น MultiTek	ASTM D2622	ไม่สูงกว่า 0.005
จุดวาบไฟ (องศาเซลเซียส)	ASTM D93	Flash Point Analyzer ยี่ห้อ Petrotest รุ่น PM4	ASTM D93	ไม่ต่ำกว่า 52
การกลั่น อุณหภูมิของส่วนที่กลั่นได้โดยปริมาตรในอัตรา ร้อยละเก้าสิบ (องศาเซลเซียส)	ASTM D86	Automatic Distillation ยี่ห้อ PAC รุ่น OptiDist	ASTM D86	ไม่สูงกว่า 357

การทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของน้ำมันไฟโรไลซิสและน้ำมันดีเซลดำเนินการทดสอบจำนวน 4 รายการ ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ ความหนืด กำมะถัน และจุดวาบไฟ สำหรับการศึกษาอัตราส่วนของน้ำมันไฟโรไลซิสทั้ง 2 ตัวอย่าง ในน้ำมันดีเซล ดำเนินการทดสอบในช่วงอัตราส่วนร้อยละ 10 20 30 40 และ 50 โดยปริมาตร จากนั้นเลือกอัตราส่วนน้ำมันไฟโรไลซิสข้างต้นที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพทุกรายการทดสอบ เพื่อศึกษาอัตราส่วนน้ำมันไฟโรไลซิสผสมสูงสุด

ในน้ำมันดีเซล โดยเพิ่มอัตราส่วนร้อยละ 1 โดยปริมาตร และดำเนินการทดสอบจำนวน 6 รายการ ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ ความหนืด จุดไหลเท กำมะถัน จุดวาบไฟ และการกลั่น

สำหรับการศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้นในการผสมน้ำมันไฟโรไลซิสในน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนน้ำมันไฟโรไลซิสปริมาณมากที่สุดที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ด้วยการเปรียบเทียบราคา ณ โรงกลั่นของน้ำมันดีเซลและราคา ณ โรงกลั่นของน้ำมันดีเซลที่มีอัตราส่วนผสมน้ำมันไฟโรไลซิส โดยใช้ข้อมูลราคา ณ โรงกลั่นของน้ำมันดีเซลและราคาอ้างอิงไปโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน ประจำเดือนมกราคม พ.ศ.2562 ที่สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงานเผยแพร่[8] ทั้งนี้กำหนดให้ราคาอ้างอิงน้ำมันเตาชนิดที่ 1 แทนราคาน้ำมันไฟโรไลซิสสำหรับการคำนวณราคาอ้างอิงหน้าโรงกลั่นของน้ำมันดีเซลที่มีอัตราส่วนผสมน้ำมันไฟโรไลซิส ตามสมการที่ 1 ดังนี้

$$\text{ราคา ณ โรงกลั่น} = [(1 - x - y)(\text{MOPS} + \text{พรีเมียม})] + [x(\text{B100})] + [y(\text{PO})] \quad (1)$$

กำหนดให้	x	คือ ร้อยละ 6.8 โดยปริมาตรไปโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ในน้ำมันดีเซลหมุนเร็ว
	y	คือ ร้อยละโดยปริมาตรน้ำมันไฟโรไลซิสในน้ำมันดีเซลหมุนเร็ว
	MOPS + พรีเมียม	คือ ราคาน้ำมันดีเซลหมุนเร็วอ้างอิงราคากลางของตลาดภูมิภาคเอเชียรวมค่าขนส่ง
	B100	คือ ราคาอ้างอิงไปโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน
	PO	คือ ราคาไฟโรไลซิสโดยใช้ราคาอ้างอิงน้ำมันเตาชนิดที่ 1

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

การทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นจำนวน 4 รายการทดสอบ ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ ความหนืด กำมะถัน และจุดวาบไฟของน้ำมันไฟโรไลซิสจำนวน 2 ตัวอย่าง เปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล พบว่าค่าความถ่วงจำเพาะ ค่าความหนืด และค่าจุดวาบไฟของน้ำมันไฟโรไลซิสทั้งสองตัวอย่างมีค่าต่ำกว่าน้ำมันดีเซล โดยที่ค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำมันไฟโรไลซิสตัวอย่างที่ 1 และ 2 มีค่า 0.80 และ 0.82 ตามลำดับ ต่ำกว่าค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำมันดีเซล 0.85 ค่าความหนืดของน้ำมันไฟโรไลซิสตัวอย่างที่ 1 และ 2 มีค่า 2.9 และ 2.6 เซนติสต็อกซ์ ตามลำดับ ต่ำกว่าค่าความหนืดของน้ำมันดีเซล 3.2 เซนติสต็อกซ์ ค่าจุดวาบไฟของน้ำมันไฟโรไลซิสตัวอย่างที่ 1 และ 2 มีค่า 31 และต่ำกว่า 25 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ต่ำกว่าค่าจุดวาบไฟของน้ำมันดีเซล 63 องศาเซลเซียส ในขณะที่ค่ากำมะถันของน้ำมันไฟโรไลซิสทั้งสองตัวอย่างสูงกว่าน้ำมันดีเซล โดยที่ค่ากำมะถันของน้ำมันไฟโรไลซิสตัวอย่างที่ 1 และ 2 มีค่าร้อยละ 0.012 และ 0.114 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ สูงกว่าค่ากำมะถันของน้ำมันดีเซลร้อยละ 0.004 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังพบว่าค่าจุดไหลเทของน้ำมันไฟโรไลซิสตัวอย่างที่ 1 มีค่า 24 องศาเซลเซียส สูงกว่าจุดไหลเทของน้ำมันดีเซล 0 องศาเซลเซียส แต่ค่าจุดไหลเทของน้ำมันไฟโรไลซิสตัวอย่างที่ 2 มีค่า -27 องศาเซลเซียส ต่ำกว่าจุดไหลเทของน้ำมันดีเซล

การทดสอบคุณสมบัติของน้ำมันไฟโรไลซิสผสมน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนน้ำมันไฟโรไลซิสร้อยละ 10 20 30 40 และ 50 โดยปริมาตร จำนวน 6 รายการทดสอบ ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ ความหนืด จุดไหลเท กำมะถัน จุดวาบไฟ และการกลั่น ผลการทดสอบสำหรับน้ำมันไฟโรไลซิสตัวอย่างที่ 1 (1PO) พบว่าเมื่ออัตราส่วนน้ำมันไฟโรไลซิสเพิ่มขึ้น ค่าความถ่วงจำเพาะ ค่าความหนืด และค่าจุดวาบไฟของน้ำมันผสมลดลง ในขณะที่ค่าจุดไหลเท ค่ากำมะถันและค่าอุณหภูมิของส่วนที่กลั่นได้ที่อัตราการระเหยร้อยละ 90 โดยปริมาตรของน้ำมันผสมสูงขึ้น ทั้งนี้ น้ำมันไฟโรไลซิสผสมน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนน้ำมันไฟโรไลซิสร้อยละ 20 โดยปริมาตร มีค่าจุดไหลเทและค่ากำมะถันสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพ อย่างไรก็ตามน้ำมันไฟโรไลซิสผสมน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนน้ำมันไฟโรไลซิสร้อยละ 10 โดยปริมาตร มีคุณสมบัติผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพทั้ง 6 รายการทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบคุณสมบัติน้ำมันผสมระหว่างน้ำมันไฟโรไลซิสตัวอย่างที่ 1 และน้ำมันดีเซล

รายการทดสอบ	อัตราสูงต่ำ	1PO10	1PO20	1PO30	1PO40	1PO50
ความถ่วงจำเพาะ	ไม่ต่ำกว่า 0.81 และไม่สูงกว่า 0.87	0.84	0.84	0.83	0.83	0.83
ความหนืด (เซนติสโตกส์)	ไม่ต่ำกว่า 1.8 และไม่สูงกว่า 4.1	3.2	3.1	3.1	3.1	3.1
จุดไหลเท (องศาเซลเซียส)	ไม่สูงกว่า 10	6	12	15	15	18
กำมะถัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า 0.005	0.005	0.006	0.007	0.008	0.008
จุดวาบไฟ (องศาเซลเซียส)	ไม่ต่ำกว่า 52	56	52	47	43	41
อุณหภูมิของส่วนที่กลั่นได้โดยปริมาตร ในอัตราร้อยละเก้าสิบ (องศาเซลเซียส)	ไม่สูงกว่า 357	354.1	356.6	359.4	361.9	365.5

สำหรับน้ำมันไฟโรไลซิสตัวอย่างที่ 2 (2PO) ผลการทดสอบพบว่าเมื่ออัตราส่วนน้ำมันไฟโรไลซิสเพิ่มขึ้นค่าความถ่วงจำเพาะ ค่าความหนืด ค่าจุดวาบไฟ และค่าจุดไหลเทของน้ำมันผสมลดลง ในขณะที่ค่ากำมะถันและค่าอุณหภูมิของส่วนที่กลั่นได้ ที่อัตราการระเหยร้อยละ 90 โดยปริมาตรของน้ำมันผสมสูงขึ้น ทั้งนี้ น้ำมันไฟโรไลซิสผสมน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนน้ำมันไฟโรไลซิสร้อยละ 10 โดยปริมาตร มีคุณสมบัติไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพสำหรับน้ำมันดีเซลหมุนเร็วตามประกาศกรมธุรกิจพลังงาน 1 รายการทดสอบ โดยที่มีค่ากำมะถันร้อยละ 0.018 โดยน้ำหนัก เกณฑ์มาตรฐานกำหนดให้ไม่สูงกว่าร้อยละ 0.005 โดยน้ำหนัก และผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพ 5 รายการทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบคุณสมบัติน้ำมันผสมระหว่างน้ำมันไฟโรไลซิสตัวอย่างที่ 2 และน้ำมันดีเซล

รายการทดสอบ	อัตราสูงต่ำ	2PO10	2PO20	2PO30	2PO40	2PO50
ความถ่วงจำเพาะ	ไม่ต่ำกว่า 0.81 และไม่สูงกว่า 0.87	0.84	0.84	0.84	0.83	0.83
ความหนืด (เซนติสโตกส์)	ไม่ต่ำกว่า 1.8 และไม่สูงกว่า 4.1	3.2	3.1	3.0	3.0	3.0
จุดไหลเท (องศาเซลเซียส)	ไม่สูงกว่า 10	-3	-3	-6	-6	-12
กำมะถัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า 0.005	0.018	0.032	0.037	0.065	0.079
จุดวาบไฟ (องศาเซลเซียส)	ไม่ต่ำกว่า 52	53	44	38	32	28
อุณหภูมิของส่วนที่กลั่นได้โดยปริมาตร ในอัตราร้อยละเก้าสิบ (องศาเซลเซียส)	ไม่สูงกว่า 357	352.9	354.0	356.4	356.8	357.9

จากผลการทดสอบคุณสมบัติของน้ำมันไฟโรไลซิสผสมน้ำมันดีเซลข้างต้น แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนน้ำมันไฟโรไลซิสตัวอย่างที่ 1 ที่สามารถผสมในน้ำมันดีเซลหมุนเร็วและผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพ คืออัตราส่วนมากกว่าร้อยละ 10 โดยปริมาตรแต่ไม่เกินร้อยละ 20 โดยปริมาตร ส่วนอัตราส่วนน้ำมันไฟโรไลซิสตัวอย่างที่ 2 ที่สามารถผสมในน้ำมันดีเซลหมุนเร็วและผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพ คืออัตราส่วนน้อยกว่าร้อยละ 10 โดยปริมาตร ผู้วิจัยเลือกน้ำมันไฟโรไลซิสตัวอย่างที่ 1 ผสมน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนน้ำมันไฟโรไลซิสร้อยละ 10 โดยปริมาตรแต่ไม่เกินร้อยละ 20 โดยปริมาตร เพื่อศึกษาอัตราส่วนน้ำมันไฟโรไลซิสปริมาณมากที่สุดที่สามารถผสมในน้ำมันดีเซลและผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพ โดยทำการศึกษาอัตราส่วนน้ำมันไฟโรไลซิสเพิ่มขึ้นร้อยละ 1 โดยปริมาตร ที่อัตราส่วนน้ำมันไฟโรไลซิส

ร้อยละ 11 12 13 14 15 16 17 18 และ 19 โดยปริมาตร จากการทดสอบพบว่าน้ำมันไฟโรไลซิสผสมน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนน้ำมันไฟโรไลซิสร้อยละ 18 โดยปริมาตร มีคุณสมบัติผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพสำหรับน้ำมันดีเซลหมุนเร็วตามประกาศกรมธุรกิจพลังงานทั้ง 6 รายการ โดยที่มีค่าความถ่วงจำเพาะ 0.84 เกณฑ์มาตรฐานกำหนดให้ค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ในช่วง 0.81-0.87 ค่าความหนืด 3.1 เซนติสโตกส์ เกณฑ์มาตรฐานกำหนดให้ค่าความหนืดอยู่ในช่วง 1.8-4.1 เซนติสโตกส์ ค่าจุดไหลเท 9 องศาเซลเซียส เกณฑ์มาตรฐานกำหนดให้ไม่สูงกว่า 10 องศาเซลเซียส ค่ากำมะถันร้อยละ 0.005 โดยน้ำหนัก เกณฑ์มาตรฐานกำหนดให้ไม่สูงกว่าร้อยละ 0.005 โดยน้ำหนัก ค่าจุดวาบไฟ 52 องศาเซลเซียส เกณฑ์มาตรฐานกำหนดให้ไม่ต่ำกว่า 52 องศาเซลเซียส และค่าอุณหภูมิของส่วนที่กลั่นได้ ที่อัตราการระเหยร้อยละ 90 โดยปริมาตร 355 องศาเซลเซียส เกณฑ์มาตรฐานกำหนดให้ไม่สูงกว่า 357 องศาเซลเซียส นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบปริมาณความร้อนของน้ำมันดีเซลและน้ำมันดีเซลที่มีอัตราส่วนผสมน้ำมันไฟโรไลซิสร้อยละ 18 โดยปริมาตร ดังแสดงในตารางที่ 4 พบว่ามีปริมาณความร้อนใกล้เคียงกันอยู่ที่ 10,691 แคลอรีต่อกรัม และ 10,701 แคลอรีต่อกรัม ตามลำดับ

ตารางที่ 4 ผลการศึกษาอัตราส่วนน้ำมันไฟโรไลซิสปริมาณมากที่สุดที่สามารถผสมในน้ำมันดีเซล

รายการทดสอบ	1PO11	1PO12	1PO13	1PO14	1PO15	1PO16	1PO17	1PO18	1PO19
ความถ่วงจำเพาะ	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84
ความหนืด (เซนติสโตกส์)	3.2	3.2	3.2	3.2	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1
จุดไหลเท (องศาเซลเซียส)	6	6	6	6	9	9	9	9	12
กำมะถัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
จุดวาบไฟ (องศาเซลเซียส)	56	56	55	55	54	54	54	52	52
อุณหภูมิของส่วนที่กลั่นได้									
โดยปริมาตรในอัตราร้อยละ	354.0	354.8	355.0	354.8	355.3	356.0	355.7	355.4	356.2
เก๊าสีบ (องศาเซลเซียส)									

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาคุณสมบัติของอัตราส่วนน้ำมันไฟโรไลซิสในน้ำมันดีเซลตามประกาศกรมธุรกิจพลังงานเรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล พ.ศ.2562 พบว่าอัตราส่วนน้ำมันไฟโรไลซิสตัวอย่างที่ 1 (1PO) ที่สามารถผสมในน้ำมันดีเซลหมุนเร็วและผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพ คืออัตราส่วนมากกว่าร้อยละ 10 โดยปริมาตร แต่ไม่เกินร้อยละ 20 โดยปริมาตร ส่วนอัตราส่วนน้ำมันไฟโรไลซิสตัวอย่างที่ 2 (2PO) ที่สามารถผสมในน้ำมันดีเซลหมุนเร็วและผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพ คืออัตราส่วนน้อยกว่าร้อยละ 10 โดยปริมาตร อัตราส่วนน้ำมันไฟโรไลซิสที่ผสมใน 2 ตัวอย่างแตกต่างกันตามวัตถุดิบตั้งต้นที่ใช้ในกระบวนการไฟโรไลซิส โดยน้ำมันไฟโรไลซิสตัวอย่างที่ 1 ใช้วัตถุดิบเป็นขยะพลาสติกจากหลุมฝังกลบ ซึ่งประกอบไปด้วยพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนและพอลิโพรพิลีน ส่วนน้ำมันไฟโรไลซิสตัวอย่างที่ 2 ใช้วัตถุดิบผสมหลายชนิด ได้แก่ พลาสติกชนิดพอลิเอทิลีน พลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีน ยาง และน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว วัตถุดิบที่ต่างกันดังกล่าวส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำมันผสม ทำให้น้ำมันดีเซลผสมน้ำมันไฟโรไลซิสตัวอย่างที่ 2 มีค่ากำมะถันสูง เมื่อทำการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันไฟโรไลซิสตัวอย่างที่ 2 ที่ผสมน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนน้ำมันไฟโรไลซิสร้อยละ 10 โดยปริมาตร (2PO10) ด้วยถ่านกัมมันต์ในอัตราส่วนถ่านต่อน้ำมัน 2 ต่อ 5 เป็นเวลา 36 ชั่วโมง พบว่าค่ากำมะถันไม่เปลี่ยนแปลง และการศึกษาอัตราส่วนผสมน้ำมันไฟโรไลซิสปริมาณมากที่สุดในน้ำดีเซลที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพสำหรับน้ำมันดีเซลหมุนเร็วตามประกาศกรมธุรกิจพลังงาน โดยใช้ น้ำมันไฟโรไลซิสตัวอย่างที่ 1 (1PO) โดยการศึกษา

อัตราส่วนน้ำมันไฟโรไลซิสเพิ่มขึ้นร้อยละ 1 โดยปริมาตร ที่อัตราส่วนน้ำมันไฟโรไลซิสร้อยละ 11 12 13 14 15 16 17 18 และ 19 โดยปริมาตร พบว่าน้ำมันไฟโรไลซิสผสมน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนน้ำมันไฟโรไลซิสร้อยละ 18 โดยปริมาตร มีคุณสมบัติผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพสำหรับน้ำมันดีเซลหมุนเร็วตามประกาศกรมธุรกิจพลังงานทั้ง 6 รายการทดสอบเมื่อวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้นในการผสมน้ำมันไฟโรไลซิสในน้ำมันดีเซล โดยเปรียบเทียบราคา ณ โรงกลั่นของน้ำมันดีเซลและราคา ณ โรงกลั่นของน้ำมันดีเซลที่มีอัตราส่วนผสมน้ำมันไฟโรไลซิสร้อยละ 18 โดยปริมาตร พบว่าราคา ณ โรงกลั่นของน้ำมันดีเซลที่มีอัตราส่วนผสมน้ำมันไฟโรไลซิสต่ำกว่าราคา ณ โรงกลั่นของน้ำมันดีเซลเฉลี่ยอยู่ที่ 0.19 บาท/ลิตร ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ในการผลักดันให้น้ำมันไฟโรไลซิสเป็นเชื้อเพลิงจากพลังงานทดแทนในภาคขนส่งต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ได้รับความอนุเคราะห์ตัวอย่างน้ำมันไฟโรไลซิสจากศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานชีวมวล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดสระบุรี และบริษัท จีอาร์ดี เทค จำกัด และได้รับความอนุเคราะห์ตัวอย่างน้ำมันดีเซลหมุนเร็ว เครื่องมือทดสอบคุณภาพน้ำมันเชื้อเพลิงจากห้องปฏิบัติการทดสอบคุณภาพน้ำมันเชื้อเพลิง กรมธุรกิจพลังงาน

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2560). รายงานสถิติพลังงานของประเทศไทย 2560. นครปฐม : บริษัท ชัน แพนเคจจิ้ง (2014) จำกัด
- [2] บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน). (2557) โครงการศึกษาการใช้้ำมันดีเซลหมุนเร็วที่มีส่วนผสมของไบโอดีเซลในอัตราส่วนร้อยละ 20 ในรถบรรทุกขนาดใหญ่โดยวิธีการทดสอบภาคสนาม.
- [3] มหาวิทยาลัยมหาสารคาม. (2560). โครงการศึกษาความเป็นไปได้และความเหมาะสมของการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงสังเคราะห์ (Biomass to Liquid: BTL) จากชีวมวลด้วยวิธี Fast Pyrolysis. กรุงเทพฯ : กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน
- [4] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2558). แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก ปี พ.ศ.2558-2579.
- [5] กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. เทคโนโลยีการผลิตพลังงาน/เชื้อเพลิงจากขยะพลาสติก. โครงการส่งเสริมการใช้เทคโนโลยีการนำวัสดุเหลือใช้และกากของเสียมาใช้ประโยชน์. 1-11.
- [6] วราคม วงศ์ชัย. (2557). ผลกระทบของอัตราส่วนผสมน้ำมันไฟโรไลซิสและน้ำมันดีเซลต่อสมรรถนะและก๊าซไอเสียของเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม. 10 (2), 72-84.
- [7] กรมธุรกิจพลังงาน. (2562). ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล ปี พ.ศ. 2562.
- [8] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน. โครงสร้างราคาน้ำมัน สืบค้นเมื่อ 1 มกราคม-4 กุมภาพันธ์ 2562, จาก <http://www.eppo.go.th/index.php/th/petroleum/price/structure-oil-price>.

การประเมินทางเลือกในการใช้ประโยชน์โครงการก๊าซชีวภาพจากฟาร์มสุกร :

กรณีศึกษา ชุมชนหนองตาด อำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์

Alternative Assessment for using biogas from pig farms

case study of Nhongtad Village in Burirum province

สุวิทย์ พลจันทร์* และ สุทัศน์ รัตนเกื้อกังวาน

สาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการพลังงาน บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร 10330

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อจัดลำดับทางเลือกที่เหมาะสมในการนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์ของชุมชน ประกอบด้วย 3 แนวทาง คือ 1) นำไปเป็นเชื้อเพลิงแทนก๊าซหุงต้ม (LPG) ในครัวเรือน 2) นำไปผลิตไฟฟ้าเพื่อสูบน้ำให้กับระบบประปาของชุมชนฯ 3) เป็นเชื้อเพลิงให้กับเครื่องยนต์สูบน้ำทดแทนน้ำมันดีเซลให้กับระบบประปาของชุมชนฯ

ได้ทำการรวบรวมข้อมูลในชุมชนเทศบาลตำบลหนองตาด อำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์ ชุมชนหนองตาด จากพื้นที่ หมู่ที่ 1,3,14,21 และ 22 มีผู้เข้าร่วมโครงการจำนวน 298 ครัวเรือน ทำการศึกษา ค่าใช้จ่ายในการลงทุนเริ่มต้นโครงการ (Capital Expenditures ; CAPEX) และค่าใช้จ่ายในการดำเนินโครงการ (Operating expenses ; OPEX) เพื่อหาต้นทุนของโครงการ, ศึกษาผลประโยชน์จากการดำเนินโครงการ คือผลประโยชน์ที่จับต้องได้ (Tangible) พบว่าแนวทางที่1 นำไปเป็นเชื้อเพลิงแทนก๊าซ LPG ในครัวเรือน ช่วยประหยัดค่าเชื้อเพลิง LPG 3,058,667.88 บาท/ปี (คิดราคา LPG 24 บาท/กก.) ได้กำไรจากการขายปุ๋ย 252,000.00 บาท/ปี และลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกมูลค่า 33,689.99บาท/ปี แนวทางที่2 นำไปผลิตไฟฟ้าเพื่อสูบน้ำให้กับระบบประปาของชุมชนฯช่วยประหยัดค่าไฟฟ้า 1,329,856 บาท/ปี (คิดค่าไฟฟ้า 4 บาท/กิโลวัตต์ชั่วโมง) ได้กำไรจากการขายปุ๋ย 252,000.00 บาท/ปี และลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกมูลค่า 19,571.52 บาท/ปี แนวทางที่3 นำไปเป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันดีเซล ให้กับระบบประปาของชุมชนฯ ช่วยประหยัดค่าน้ำมันดีเซล 4,739,272.89 บาท/ปี (คิดราคาน้ำมันดีเซล 28.51 บาท/ลิตร) ได้กำไรจากการขายปุ๋ย 252,000.00 บาท/ปี และลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกมูลค่า 38,222.76 บาท/ปีและ ผลประโยชน์ที่จับต้องไม่ได้ (Intangible) ของโครงการ ได้แก่ 1) สร้างรายได้ในชุมชน 3,329,042.25 บาท/ปี, 2) ลดปัญหาด้านสุขภาพของคนและสัตว์เลี้ยง มูลค่า 1,948,227.09 บาท/ปี, 3) ลดปัญหาด้านสังคม มูลค่า 9,823,132.54 บาท/ปี, หาค่าอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน [Benefit/Cost] Ratio (B/C) ของแต่ละทางเลือก จัดลำดับทางเลือกที่เหมาะสมในการนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์ของชุมชน เสนอแนะแนวทางการตัดสินใจเลือกรูปแบบที่เหมาะสมในการนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์สูงสุดในชุมชน

ผลการวิจัยพบว่า แนวทางที่เหมาะสมในการนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์ของชุมชน เรียงลำดับจากมากไปน้อย คือ แนวทางที่3 อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน [Benefit/Cost] Ratio (B/C) = 13.48 สูงที่สุด รองลงมาคือ แนวทางที่2 อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน [Benefit/Cost] Ratio (B/C) =10.55 และ แนวทางที่1 อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน [Benefit/Cost] Ratio (B/C) = 9.70 เป็นอันดับสุดท้าย โดยในการทำวิจัยได้คิดอัตราคิดลด 7% ระยะเวลาดำเนินโครงการ 15 ปี

คำสำคัญ: การประเมินทางเลือกในการใช้ประโยชน์โครงการก๊าซชีวภาพจากฟาร์มสุกร

* Corresponding author: Tel.: 098-2688005. E-mail address: Suwit.ppon@gmail.com

บทนำ

การเลี้ยงสุกรจัดเป็นกิจกรรมทางการเกษตรที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจ สังคมและสิ่งแวดล้อมของประเทศ เพราะนอกจากจะเลี้ยงเพื่อผลิตเป็นอาหารเลี้ยงประชากรภายในประเทศแล้วยังมีจำนวนเหลือเพียงพอที่จะส่งออกไปจำหน่ายต่างประเทศ ทำให้เกษตรกรมีการปรับปรุงและพัฒนาด้านการผลิตในเชิงการค้ามากขึ้นเพื่อเพิ่มศักยภาพในการแข่งขันและสนองความต้องการของตลาด แต่นอกเหนือจากผลผลิตที่ได้มากขึ้นแล้ว ปัญหาอย่างหนึ่งที่เกิดขึ้นตามมาก็คือ ปัญหาด้านสภาวะแวดล้อมอันเนื่องมาจากมูลสัตว์และของเสียต่าง ๆ แม้ว่าบางฟาร์มจะมีการเก็บกวาดออกจากพื้นที่คอกหรือนำของเสียที่เกิดขึ้นไปใช้ประโยชน์แล้วก็ตาม แต่ยังคงมีบางส่วนตกค้างอยู่บริเวณพื้นคอกเมื่อมีการฉีกล้างคอก ทำให้น้ำเสียที่เกิดขึ้นมีปริมาณความสกปรกสูง เมื่อระบายลงสู่แหล่งน้ำจะทำให้แหล่งน้ำเสื่อมโทรมได้ รวมไปถึงปัญหากลิ่นเหม็น ปัญหาขยะ และปัญหาของพาหะนำโรคที่เกิดจากการเลี้ยงสุกรอีกด้วย [1]

ฟาร์มสุกรเป็นแหล่งกำเนิดมลพิษ 2 ประเภท ได้แก่ น้ำเสียและของเสีย โดย

1. น้ำเสีย จากฟาร์มสุกร ส่วนใหญ่จะเกิดจากการล้างทำความสะอาดคอกและโรงเรือนสุกร ซึ่งผู้เลี้ยงมักจะทำการฉีกล้างทุกวัน
2. ของเสีย ประกอบด้วย มูลสุกร และของเสียที่เป็นของแข็งอื่น ดังนี้
 - 2.1) มูลสุกร ประกอบด้วยกากอาหารที่ย่อยไม่ได้ ซึ่งในมูลสุกรจะประกอบด้วยน้ำ 65-85% อินทรีย์วัตถุ 10-20% และอนินทรีย์วัตถุ 10% โดยอายุน้ำหนักของสุกรมีผลต่อปริมาณของสิ่งขับถ่ายด้วย
 - 2.2) ของเสียที่เป็นของแข็งอื่น นอกจากมูลสุกรแล้วในกระบวนการผลิตสุกร เช่น การให้อาหาร รก และซากสุกรที่ตาย เป็นต้น

แนวทางการจัดการปัญหามลพิษ (น้ำเสียและกลิ่น) จากการเลี้ยงสุกรนอกเหนือจาก การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสะอาดในการจัดการมลพิษ การจัดการสิ่งแวดล้อมภายในฟาร์ม แล้ว การใช้ระบบบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่เหมาะสมที่มีการนำมาประยุกต์ใช้ โดยผลพลอยได้ คือ ได้ก๊าซชีวภาพจากการหมักแบบไร้อากาศ มาใช้ประโยชน์ในด้านพลังงาน

ในปี 2554 กระทรวงพลังงาน โดย สำนักงานพลังงานจังหวัดพัทลุงได้ดำเนินโครงการพัฒนาการใช้ก๊าซชีวภาพจากมูลสุกรในตำบลแพรงหา อำเภอควนขนุน จังหวัดพัทลุง ผลักดันและสนับสนุนโครงการดังกล่าวเป็นต้นแบบ ตำบลปลอด LPG หรือ หมู่บ้านก๊าซชีวภาพ (Biogas Town) เป็นแห่งแรกของประเทศไทย จากจำนวนสุกรพ่อ-แม่พันธุ์ 484 ตัว สุกรขุน 10,195 ตัว ของจำนวน 14 ฟาร์มที่เข้าร่วมโครงการในตำบลแพรงหา สามารถที่จะผลิตก๊าซชีวภาพได้ ประมาณ 1,170 ลบ.ม./วัน สามารถนำไปทดแทน LPG ได้ประมาณ 538 กก./วัน (คิดเป็นมูลค่า 11,298 บาท/วัน คิดจากราคา LPG 21 บาท/กก.) ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้แต่ละฟาร์ม จ่ายให้กับชุมชนสามารถนำก๊าซชีวภาพที่ได้ไปใช้ในการหุงต้ม

อย่างไรก็ตามการศึกษารูปแบบการนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์ในด้านพลังงาน นอกเหนือจากใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อหุงต้มในภาคครัวเรือนแล้ว ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในการนำไปประโยชน์ของชุมชนให้มากยิ่งขึ้นโดย กรณีศึกษาชุมชนตำบลหนองตาต อำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์ เช่นการผลิตไฟฟ้าเพื่อสูบน้ำ หรือเป็นเชื้อเพลิงให้กับเครื่องยนต์สันดาปภายในเพื่อสูบน้ำให้กับระบบประปาของชุมชน เพื่อประโยชน์ของชุมชนให้มากยิ่งขึ้น งานวิจัยนี้ต้องการศึกษารูปแบบการนำก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ไปใช้ประโยชน์ในชุมชนใน 3 รูปแบบ คือ

- 1) นำไปเป็นเชื้อเพลิงแทนก๊าซ LPG ในครัวเรือน
- 2) นำไปผลิตไฟฟ้าเพื่อสูบน้ำให้กับระบบประปาของชุมชนฯ
- 3) เป็นเชื้อเพลิงให้กับเครื่องยนต์สูบน้ำทดแทนการใช้น้ำมันดีเซล กับระบบประปาของชุมชนฯ

เพื่อเปรียบเทียบและจัดลำดับความสำคัญในการเลือกรูปแบบการนำก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากฟาร์มสุกรไปใช้ประโยชน์ในชุมชน

วิธีการวิจัย

(1) ใช้ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาศักยภาพวัตถุดิบเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ (มูลสุกร) เทคโนโลยีที่เหมาะสม และแนวทางการบริหารจัดการด้านพลังงานการใช้ก๊าซชีวภาพ กรณีศึกษา เทศบาลตำบลหนองดาด อำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์ [2] กำลังการผลิตก๊าซชีวภาพในชุมชนที่เข้าร่วมโครงการ 3 ฟาร์มที่เข้าร่วมโครงการ

- ระบบผลิตก๊าซชีวภาพ 3 ฟาร์ม รวม	1500	ลบ.ม.
- ปริมาณน้ำเสีย 3 ฟาร์ม รวมเฉลี่ย	128.25	ลบ.ม./วัน
- ผลิตก๊าซชีวภาพ 3 ฟาร์ม รวมเฉลี่ย	759.05	ลบ.ม./วัน
- ผลิตปุ๋ย 3 ฟาร์ม รวมเฉลี่ย	0.53	ตัน/วัน

(2) ข้อมูลการศึกษาเป็นข้อมูลทุติยภูมิซึ่งได้จากการศึกษารวบรวมจากแหล่งต่าง ๆ เช่น รวบรวมข้อมูลระบบฐานข้อมูลออนไลน์ หน่วยงานราชการ และอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น ปริมาณการเลี้ยงสุกร ลักษณะการประกอบอาชีพ จำนวนประชากร การใช้เชื้อเพลิงก๊าซหุงต้ม การใช้น้ำประปา ที่มีการสำรวจแหล่งผลิตวัตถุดิบก๊าซชีวภาพในชุมชน ได้แก่ ฟาร์มสุกรในชุมชนหนองดาด อำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์ ข้อมูลด้านการใช้พลังงาน ผู้เข้าร่วมทำประชาคมจากพื้นที่หมู่ที่ 1,3,14,21 และ 22 จำนวน 298 ครัวเรือน

(3) รวบรวมข้อมูลระบบฐานข้อมูลออนไลน์ หน่วยงานราชการ และอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง ที่การสำรวจลักษณะทางกายภาพภายในชุมชน รูปแบบเหมาะสมในการนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์ เปรียบเทียบวิเคราะห์ ต้นทุนและผลประโยชน์ที่เกิดขึ้นทั้งทางตรงและทางอ้อมของโครงการ

(4) ค่าใช้จ่ายเริ่มต้น (Capital Expenditures ; CAPEX) ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดสมมติฐานอ้างอิงจากงานวิจัยโครงการสนับสนุนการลงทุนเทคโนโลยีพลังงานงานทดแทนในภาคอุตสาหกรรม ของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน อัตราการสนับสนุนงบประมาณโครงการ ร้อยละ 30 สำหรับระบบผลิตบ่อตั้งแต่ 500 ลบ.ม. ขึ้นไป

(5) การผลิตก๊าซชีวภาพจากฟาร์มปศุสัตว์ มีหลายชนิด เช่น โค สุกร สัตว์ปีก ข้าง กระบือ แต่งานวิจัยนี้คัดเลือกเฉพาะมูลสุกรเท่านั้น เนื่องจากในพื้นที่การศึกษามีฟาร์มสุกรที่มีศักยภาพ นอกจากนั้น มูลสุกรยังมีองค์ประกอบที่เป็นไฟเบอร์น้อย ไม่เกิดการอุดตันในระยะยาวของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ และง่ายต่อการรวบรวม

(6) เทคโนโลยีการหมักก๊าซชีวภาพ งานวิจัยนี้ได้คัดเลือกเฉพาะบ่อหมักแบบราง (Channel Digestion) เท่านั้น เนื่องจาก เหมาะสมกับน้ำเสียจากฟาร์มสุกร ซึ่งมีองค์ประกอบของตะกอนแขวนลอยที่ต้องดึงตะกอนออกที่ผ่านการย่อยสมบูรณ์เพื่อป้องกันการสะสมตะกอนในระบบมากเกินไป เทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพไม่ยุ่งยาก ซับซ้อน ประชาชนในชุมชนและครัวเรือนสามารถดำเนินการควบคุมกระบวนการผลิตได้เอง

(7) การวิเคราะห์ทางการเงิน โดยพิจารณาจากดัชนีชี้ อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน (B/C ratio), แบบอัตราคิดลด (Discount Rate) 7% ไม่คำนึงถึงอัตราเงินเฟ้อ ระยะเวลาดำเนินโครงการ 15 ปี

(8) มูลค่าของเงินเปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังสมการ (1)

$$P = F \left(\frac{1}{(1+i)^n} \right) \quad (1)$$

เมื่อ P คือ มูลค่าเงินปัจจุบัน ; F คือ มูลค่าเงินในอนาคต ; i คือ อัตราคิดลด (Discount Rate)

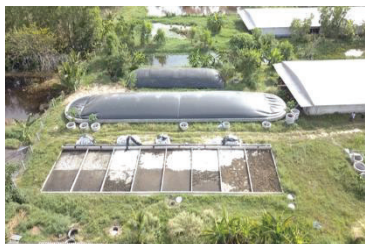
n คือ จำนวนปี หรือรอบของการเปลี่ยนแปลง อัตราคิดลด (Discount Rate)

(9) ผลประโยชน์ของโครงการต่อต้นทุน ดังสมการ (2) ผลประโยชน์ที่จับต้องได้ (Tangible) ได้แก่ 1) ผลประโยชน์ที่เกิดขึ้นทางด้านพลังงาน, 2) รายได้จากการขายปุ๋ยที่เหลือจากการใช้ในพื้นที่เกษตรของชุมชน [2] และผลประโยชน์ที่จับต้องไม่ได้ (Intangible) ของโครงการ ได้แก่ 1) ลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก 2) สร้างรายได้ในชุมชน 3) ลดปัญหาด้านสุขภาพของคนและสัตว์เลี้ยง 4) ลดปัญหาด้านสังคม

$$B/C = \frac{\sum_{j=1}^n X_j \left(\frac{1}{(1+i)^j} \right)}{CAPEX_0 + \sum_{j=1}^n Y_j \left(\frac{1}{(1+i)^j} \right)} \quad (2)$$

เมื่อ B/C คือ อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน (Benefit/Cost) Ratio ; n คือ อายุโครงการ (ปี) ; j คือ เวลาที่ผ่านไปของโครงการ (ปี) ; CAPEX₀ คือ ค่าใช้จ่ายในการลงทุนเริ่มต้นโครงการ ; i คือ อัตราคิดลด (Discount Rate) ; X_j คือ ผลประโยชน์ที่เกิดขึ้นในปีที่ j ; Y_j คือ ค่าใช้จ่ายในการดำเนินโครงการ (OPEX) ในปีที่ j

10) พื้นที่ดำเนินโครงการ



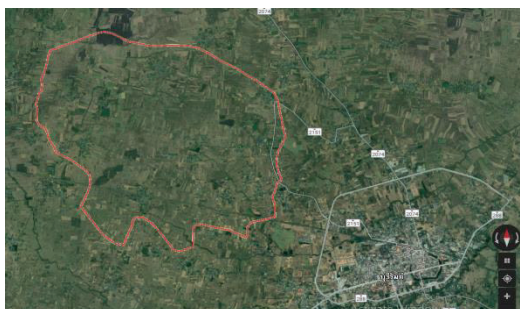
พรวิเชียรฟาร์ม
บ่อขนาด 600 ลบ.ม.



เสถียรฟาร์ม
บ่อขนาด 600 ลบ.ม.



นงนุชฟาร์ม
บ่อขนาด 300 ลบ.ม.



พื้นที่ศึกษาของโครงการ ตำบลหนองตาด อำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์
ห่างจากตัวจังหวัด ประมาณ 7 กิโลเมตร

ขั้นตอนการวิจัยและดำเนินงาน

ขั้นตอนที่ 1 รวบรวมข้อมูลที่มีการสำรวจแหล่งผลิตวัตถุดิบก๊าซชีวภาพในชุมชน ได้แก่ ฟาร์มสุกรในชุมชน และคำนวณศักยภาพก๊าซที่ผลิตได้ ในชุมชนตำบลหนองตาด อำเภอเมือง จังหวัดบุรีรัมย์

ขั้นตอนที่ 2 ศึกษากระบวนการผลิตของแต่ละทางเลือก

ขั้นตอนที่ 3 ศึกษา ค่าใช้จ่ายในการลงทุนเริ่มต้นโครงการ (Capital Expenditures ; CAPEX) และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการโครงการ (Operating expenses ; OPEX) เพื่อหาต้นทุนของโครงการ

ขั้นตอนที่ 4 ศึกษาผลประโยชน์จากการดำเนินโครงการ คือผลประโยชน์ที่จับต้องได้ (Tangible) และผลประโยชน์ที่จับต้องไม่ได้ (Intangible) ของโครงการ

ขั้นตอนที่ 5 หาค่าอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน [Benefit/Cost] Ratio (B/C) ของแต่ละทางเลือก จัดลำดับทางเลือกที่เหมาะสมในการนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์ของชุมชน

ขั้นตอนที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะแนวทางการตัดสินใจเลือกรูปแบบที่เหมาะสมในการนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์สูงสุดในชุมชน

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

สร้างงานสร้างอาชีพในท้องถิ่น 3,329,042.25 บาท/ปี ในการดำเนินโครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งในการส่งเสริมการจัดการของเสียในฟาร์มสุกร ทำให้เกิดการเลี้ยงสุกรที่ได้มาตรฐานควบคุมการปล่อยน้ำเสียลงสู่สิ่งแวดล้อมและการบังคับใช้กฎหมาย เกิดระบบการเลี้ยงสุกรที่ได้มาตรฐานสามารถสร้างรายได้จากการเลี้ยงสุกรขุนแบบซื้อลูกสุกร เฉลี่ย 2,336.17 บาท/ตัว(สุกรขนาด 100 กก.)/ปี [3] คิดจำนวนสุกรขุน ยืนคอก 30 % (ของจำนวนสุกรเมื่อเลี้ยงเต็มระบบ 4,750 ตัว) หรือ 1,425 ตัว ลดปัญหาด้านสุขภาพของคนและสัตว์เลี้ยง ระบบการเลี้ยงสุกรที่มีประสิทธิภาพ การที่จะป้องกันโรคระบาดสำหรับฟาร์มสุกรได้อย่างยั่งยืนนั้น จำเป็นที่จะต้องมี ระบบการเลี้ยงที่เป็นมาตรฐานและมีประสิทธิภาพในการป้องกันโรค ซึ่งทำให้ภาครัฐประหยัดค่าใช้จ่ายในการดูแลสุขภาพของของประชาชน มีคุณภาพชีวิตที่ดี โดยหากเกิดโรคระบาดในการเลี้ยงสุกร เช่นโรคคอตีบแอฟริกา จะทำให้เกิดความเสียหายอย่างน้อย 1,948,227.09 บาท กรณีที่เกิดความเสียหาย 30% คิดจำนวนสุกรขุน ยืนคอก 30 % (ของจำนวนสุกรเมื่อเลี้ยงเต็มระบบ 4,750 ตัว) หรือ 1,425 ตัว [4] ทั้งนี้ยังไม่รวมถึงงบประมาณภาครัฐทางด้านสาธารณสุขที่ต้องจัดเตรียมทั้งอุปกรณ์ทางการแพทย์และบุคลากร ซึ่งอาจจะประเมินค่าไม่ได้

ลดปัญหาด้านสังคม ในอดีตที่ผ่านมา ปัญหาความขัดแย้งระหว่างชุมชนกับฟาร์ม อันเนื่องมาจากปัญหาการส่งกลิ่นเหม็นรบกวน [5] ซึ่งการดำเนินโครงการนี้ทำให้เกิดการอยู่ร่วมกันได้ระหว่างฟาร์มสุกรและชุมชน ซึ่งการประเมินค่าความเสียหายอาจมองในมิติของการเสียโอกาสในการสร้างรายได้ 3,329,042.25 บาท/ปี [3] และการยกเลิกกิจการ ซึ่งมูลค่าความเสียหายกว่า 6,494,090.29 บาท [4] คิดที่จำนวนสุกร 1,425 ตัว ดังนั้น มูลค่าความเสียหายในมิติค่าเสียโอกาสและค่าการสูญเสียจากการล้มเลิกกิจการรวม 9,823,132.54 บาท_ทั้งนี้ยังไม่รวมถึงผลกระทบทางด้านสังคมอื่น ๆ เช่น ปัญหาการว่างงานในชุมชน นำไปสู่ปัญหาการอพยพออกจากชุมชนนอกฤดูการเกษตรไปทำงานในเมืองหลวง พื้นที่การเกษตรถูกปล่อยทิ้งร้างสูญเสียโอกาสในการสร้างงานในชุมชน ซึ่งอาจจะประเมินค่าไม่ได้

ลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก อันเนื่องมาจากก๊าซ มีเทน (CH_4) ที่เกิดขึ้น ทั้งในน้ำเสียประมาณ 120,000 ลิตร/วัน (1 หน่วยปศุสัตว์ เกิดน้ำเสีย 200 ลิตร/วัน พพ.,2554) โดยเกิดเป็น มีเทน (CH_4) ประมาณ 759 ลบ.ม./วัน แนวทางที่1 นำไปเป็นเชื้อเพลิงแทนก๊าซ LPG ในครัวเรือน ลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกมูลค่า 33,689.99บาท/ปี แนวทางที่2 นำไปผลิตไฟฟ้าเพื่อสูบน้ำให้กับระบบประปาของชุมชนช่วยประหยัดค่าไฟฟ้า ลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกมูลค่า 19,571.52 บาท/ปี แนวทางที่3 นำไปเป็นเชื้อเพลิงแทนน้ำมันดีเซลให้กับระบบประปาของชุมชนลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกมูลค่า 38,222.76 บาท/ปี [6]

ลดการนำเข้าเชื้อเพลิงฟอสซิล

ภาครัฐไม่ต้องอุดหนุนการนำเข้า LPG หากคิดเฉพาะ 1204 ครัวเรือนในชุมชนหนองตาด 385,261.60 บาท/ปี เป็นอย่างน้อย [7] ในชุมชนหนองตาด มีการสูบน้ำเข้าระบบประปา ต้องใช้น้ำมันดีเซลในเครื่องสูบน้ำ ปีละประมาณ 8,018.24 ลิตร [2] นั้นหมายความว่าชุมชนหนองตาด ต้องใช้น้ำมันดีเซลคิดเป็นมูลค่า 180,240 บาท ช่วยภาครัฐไม่ต้องนำเข้าน้ำมันดิบ 153,553.29 บาท/ปี

การใช้ไฟฟ้า ในการสูบน้ำเข้าระบบประปาของชุมชนหนองตาด ถึงแม้ว่าปกติจะใช้น้ำมันดีเซลในเครื่องสูบน้ำ แต่ถ้าหากเปลี่ยนมาใช้ไฟฟ้าที่จ่ายมาจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าประมาณ ปีละ 81,117.85 กิโลวัตต์ชั่วโมง นั้นหมายความว่า ในกิจกรรมการสูบน้ำของชุมชนหนองตาดหากใช้ไฟฟ้า ช่วยภาครัฐประหยัดในการนำเข้าเชื้อเพลิงฟอสซิล 185,798.32 บาท/ปี

สรุปผลการวิจัย

ตารางที่ 1 แสดงต้นทุนและผลประโยชน์ที่เกิดขึ้นในการดำเนินโครงการในแต่ละแนวทาง

แนวทาง ที่	แนวทางการใช้ประโยชน์	CAPEX (บาท)	OPEX (บาท/ปี)	Tangible benefit (บาท/ปี)	Intangible benefit (บาท/ปี)	B/C
1	นำไปเป็นเชื้อเพลิงแทนก๊าซ LPG ในครัวเรือน	7,763,000.17	266,556.17	2,024,657.61	9,490,948.11	9.70
2	นำไปผลิตไฟฟ้าเพื่อสูบน้ำ ให้กับระบบประปาของ ชุมชนฯ	5,034,799.00	310,446.79	967,392.71	9,360,330.98	10.55
3	เป็นเชื้อเพลิงให้กับ เครื่องยนต์สูบน้ำทดแทน น้ำมันดีเซลให้กับระบบ ประปาของชุมชนฯ	4,705,799.00	293,630.97	3,052,440.08	9,352,017.62	13.48

สรุป แนวทางที่เหมาะสมในการนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์ของชุมชน เรียงลำดับจากมากไปน้อย คือ แนวทางที่3 (B/C=13.48) สูงที่สุด รองลงมาคือ แนวทางที่2 (B/C=10.55) และ แนวทางที่1 (B/C=9.70) เป็นอันดับสุดท้าย

การทำวิจัยนี้เพื่อเปรียบเทียบและจัดลำดับความสำคัญในการเลือกรูปแบบที่เหมาะสมในการนำก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากฟาร์มสุกรไปใช้ประโยชน์ในชุมชนโดยคำนึงถึงผลประโยชน์ของโครงการต่อต้นทุน ผลประโยชน์ที่จับต้องได้ (Tangible) ได้แก่ 1) ผลประหยัดที่เกิดขึ้นทางด้านพลังงาน, 2) รายได้จากการขายปุ๋ยที่เหลือจากการใช้ในพื้นที่เกษตรของชุมชน [2] และผลประโยชน์ที่จับต้องไม่ได้ (Intangible) ของโครงการ ได้แก่ 1) ลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก 2) สร้างรายได้ในชุมชน 3) ลดปัญหาด้านสุขภาพของคนและสัตว์เลี้ยง 4) ลดปัญหาด้านสังคมในแง่ของการอยู่ร่วมกันระหว่างชุมชนกับฟาร์มสุกร ซึ่งอาจจะมีลักษณะเฉพาะตามบริบทของชุมชนตำบลหนองตาต อ.เมือง จ.บุรีรัมย์ ทั้งนี้ยังไม่รวมถึงผลกระทบทางด้านสังคมอื่น ๆ เช่น ปัญหาการว่างงานในชุมชน นำไปสู่ปัญหาการอพยพออกจากชุมชนนอกฤดูการเกษตรไปทำงานในเมืองหลวง พื้นที่การเกษตรถูกปล่อยทิ้งรกร้างสูญเสียโอกาสในการสร้างงานในชุมชน ซึ่งอาจจะประเมินค่าไม่ได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] คู่มือวิธีการหรือเทคโนโลยีที่เหมาะสมสำหรับการเลี้ยงสุกรประเภท ค. สำนักจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ ; 2556
- [2] โครงการ Biogas Network (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ,2562)
- [3] ศุภกร พรหมดวงดี และ นงลักษณ์ สุพรรณไชยมาตย์ ; การจัดการธุรกิจการเลี้ยงสุกรรายย่อย กรณีศึกษาในพื้นที่ตำบลดินดำ อำเภอภูเวียง จังหวัดขอนแก่น,ขอนแก่นเกษตร 43 ฉบับพิเศษ 1 (2558)
- [4] กรมปศุสัตว์ ; <http://www.dld.go.th/th/index.php/th/newsflash/341-news-hotissue/19051-hotissu25620409-1> สืบค้นเมื่อ 27 พ.ค. 62)
- [5] (ศิริชัช ตะตองใจ ; Local Administration Journal ,2011)
- [6] โครงการลดก๊าซเรือนกระจกภาคสมัครใจตามมาตรฐานของประเทศไทย (Thailand Voluntary Emission Reduction Program:T-VER); อบก., <https://sdthailand.com/2018/11/carboncredit/> สืบค้นเมื่อ 19 พ.ค.62)
- [7] (บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) ; <http://www.pttplc.com> สืบค้นเมื่อ 20 พ.ค. 2562)

รูปแบบการผลิตที่เหมาะสมต่อการผลิตเชื้อเพลิงชีวอัดแท่งจากมูลช้าง

Suitable process for producing the elephant dung green fuel briquette

อาทิตยา มาอินแก้ว¹ และสุรัชย์ ญรัฐ จันทร์ศรี^{1*}

¹สาขาพลังงานและสิ่งแวดล้อมชุมชน วิทยาลัยพัฒนาเศรษฐกิจและเทคโนโลยีชุมชนแห่งเอเชีย

มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50300

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหารูปแบบที่เหมาะสมต่อการผลิตเชื้อเพลิงชีวอัดแท่งจากมูลช้าง เริ่มจากการนำมูลช้างตากแห้งซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตเชื้อเพลิงชีวอัดแท่งบดและร่อนด้วยตะแกรงจนมูลช้างมีขนาดอนุภาคเท่ากับ 10, 20, 30, 40 และ 50 Mesh แล้วนำผงมูลช้างแต่ละขนาดมาผสมกับตัวประสาน 3 รูปแบบ คือ รูปแบบที่ 1 การผสมมูลช้างกับแป้งมันสำปะหลังและน้ำอุณหภูมิห้อง ในการกำหนดอัตราส่วน 4 : 1 : 0.25 รูปแบบที่ 2 ดำเนินการเช่นเดียวกับรูปแบบที่ทั้งชนิดวัตถุดิบ และอัตราส่วนการผลิต แต่เปลี่ยนจากน้ำอุณหภูมิห้องเป็นน้ำร้อน และรูปแบบที่ 3 การนำมูลช้างผสมแป้งเปียกในอัตราส่วน 4 : 1 ส่วนผสมทั้ง 3 รูปแบบถูกผสมให้เข้ากัน ใส่ลงในกระบอกสูบที่มีความยาว 25 cm และเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm อัดด้วยไฮดรอลิกที่แรงดัน 70 kg/cm² ผลการศึกษาพบว่า รูปแบบที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงชีวอัดแท่งจากมูลช้างนั้นต้องใช้แป้งมันและน้ำอุณหภูมิห้องเป็นตัวประสาน เนื่องจากตัวประสานนี้สามารถใช้ได้กับมูลช้างที่มีขนาดตั้งแต่ 10-50 Mesh เชื้อเพลิงชีวอัดแท่งจากมูลช้างที่ได้มีลักษณะเป็นแท่ง ส่วนผสมประสานกันดี ไม่มีรอยร้าว แท่งเชื้อเพลิงมีระยะยึดตามแนวยาวต่ำสุดประมาณ 0.1 cm และมีความหนาแน่นสูงสุดประมาณ $7.98 \times 10^{-4} \text{ kg/cm}^3$

คำสำคัญ: เชื้อเพลิงชีวอัดแท่ง มูลช้าง แป้งมันสำปะหลัง

* Corresponding author: Tel.: 082-5351987. E-mail address: jansrisnar@gmail.com

บทนำ

ปัจจุบันได้มีการนำมูลช้างส่วนใหญ่ได้นำมาใช้ประโยชน์ในรูปของการผลิตเป็นกระดาศามูลช้าง [1] และการทำปุ๋ยหมัก [2] ดังแสดงในภาพที่ 1 นอกจากนั้นยังได้มีการนำมูลช้างเป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพ (Biogas) เช่น โครงการการพัฒนาแก๊สชีวภาพจากมูลช้างเพื่อการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมในชุมชนพื้นที่ต้นน้ำเป็นการประเมินศักยภาพโดยศูนย์อนุรักษ์ช้างไทย จังหวัดลำปาง [3] พบว่า มูลช้างเมื่อนำมูลช้างมาผสมกับน้ำในอัตราส่วน 1:3 สามารถผลิตเป็นก๊าซชีวภาพได้ โดยสามารถผลิตแก๊สได้ 0.06 ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัมมูลสด แต่ด้วยลักษณะทางกายภาพของมูลช้างจึงไม่สามารถดำเนินการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลช้างได้อย่างเป็นรูปธรรม การทบทวนวรรณกรรมยังไม่พบงานวิจัยใดศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงแข็ง (Solid biofuel) จากมูลช้างในรูป Refuse-Derived Fuel 5 (RDF-5) เป็นการนำเชื้อเพลิงขยะส่วนที่เผาไหม้ได้มาผ่านกระบวนการอัดแท่ง [4] ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งที่จะดำเนินการศึกษารูปแบบที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงเขียวอัดแท่งจากมูลช้าง (Elephant dung green fuel briquette)



ภาพที่ 1 การผลิตกระดาศาจากมูลช้างและการการทำปุ๋ยหมัก

วิธีการวิจัย

1. การผลิตเชื้อเพลิงเขียวอัดแท่งจากมูลช้าง

การผลิตเชื้อเพลิงเขียวอัดแท่งจากมูลช้างมีกระบวนการดังแสดงในภาพที่ 2 เริ่มต้นจากการนำมูลช้างสดตากแดดตามธรรมชาติเป็นเวลา 5-7 วันเพื่อไล่ความชื้น จากนั้นนำมูลช้างแห้งบดด้วยเครื่องบดชนิดใบมีดที่จำหน่ายตามท้องตลาดและร่อนด้วยตะแกรงที่มีขนาด 10, 20, 30, 40 และ 50 Mesh ผงมูลช้างที่ได้ถูกนำไปผลิตเป็นเชื้อเพลิงเขียวอัดแท่งโดยใช้ส่วนผสม 3 รูปแบบ คือ รูปแบบที่ 1 นำผงมูลช้างแต่ละขนาดผสมกับแป้งมันสำปะหลังและน้ำอุณหภูมิห้อง ในอัตราส่วน 4 : 1 : 0.25 และรูปแบบที่ 2 ดำเนินการเช่นเดียวกับรูปแบบที่ 1 แต่เปลี่ยนจากน้ำอุณหภูมิห้องเป็นน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 80 – 85°C ส่วนรูปแบบที่ 3 นำผงมูลช้างแต่ละขนาดผสมกับแป้งเปียก ส่วนผสมทั้ง 3 รูปแบบถูกบรรจุในกระบอกอัดขนาดความยาว 25 cm เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm ดังแสดงในภาพที่ 3 แล้วอัดด้วยเครื่องอัดแบบไฮดรอลิกที่แรงดัน 70 kg/cm² เชื้อเพลิงเขียวอัดแท่งที่ได้นำไปฝังลมจนแห้งและวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ

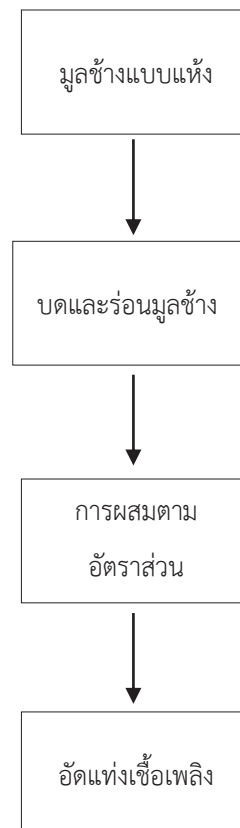
2. การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ

2.1 ลักษณะภายนอก

ลักษณะภายนอกของเชื้อเพลิงชีวอัดแท่งจากมูลช้างหลังอัดต้องมีการจับตัวเป็นก้อน เนื้อประสานกันดีมีความแข็งแรง ไม่เปราะ และไม่แตกหักง่าย [5]

2.2 การยี้ดและหดตัว

ความชื้นมีผลต่อการยี้ดและหดตัวของแท่งเชื้อเพลิง ถ้าหากมีความชื้นมากเกินไปเมื่อแท่งเชื้อเพลิงได้รับความร้อนจะขยายตัวทำให้แท่งเชื้อเพลิงแตกร่วน แต่ถ้าหากว่าความชื้นน้อยเกินไปทำให้ส่วนผสมร่วนเกาะกันเป็นแท่งได้ยาก [6] การยี้ดและหดตัวตามแนวยาวตรวจสอบโดยเครื่องมือวัดเวอร์เนียรทุก 7 วันเป็นระยะเวลา 3 สัปดาห์



ภาพที่ 2 ขั้นตอนในการผลิตเชื้อเพลิงชีวอัดแท่งจากมูลช้าง



ภาพที่ 3 เครื่องอัดแบบไฮดรอลิกและกระบอกอัด

2.3 ความหนาแน่น

เชื้อเพลิงชีวอัดแท่งจากมูลได้รับการทดสอบความหนาแน่น (Density) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างมวลของเชื้อเพลิงอัดแท่งต่อปริมาตรของเชื้อเพลิงอัดแท่ง มีหน่วยเป็น กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m^3) [7] ดังแสดงในสมการที่

1

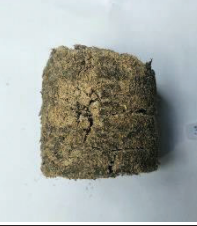
$$\rho = \frac{m}{v} \quad (1)$$

เมื่อ	ρ	คือ ค่าความหนาแน่นความหนาแน่นของถ่านอัดแท่งมีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/cm^3)
	m	คือ มวลของเชื้อเพลิงอัดแท่งมีหน่วยเป็นกิโลกรัม (kg)
	v	คือ ปริมาตรของเชื้อเพลิงอัดแท่ง มีหน่วยเป็น ลูกบาศก์เมตร (cm^3)

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

1. ลักษณะภายนอก

เชื้อเพลิงชีวอัดแท่งจากมูลช้างที่ผลิตจากส่วนผสมทั้ง 3 รูปแบบ มีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกันดังแสดงในภาพที่ 4 เชื้อเพลิงชีวอัดแท่งจากมูลช้างที่ผลิตจากมูลช้างขนาด 10, 20, 30, 40 และ 50 Mesh โดยใช้แยมันสำปะหลังและน้ำอุณหภูมิห้องเป็นตัวประสาน มีลักษณะเนื้อประสานกันดี ผิวด้านนอกไม่มีรอยร้าว แต่พบรอยแตกร้าวเล็กน้อยในแท่งเชื้อเพลิงที่ใช้มูลช้างขนาด 30 40 และ 50 Mesh ซึ่งการใช้แยมันผสมน้ำอุณหภูมิห้องเป็นตัวประสานนั้น สอดคล้องกับงานวิจัยของกิตติพงษ์ ลาหลน [8] ที่ศึกษาการผลิตถ่านอัดแท่งจากเหง้ามันสำปะหลังเมื่อใช้น้ำและแยมันเป็นตัวประสาน เมื่อปรับเปลี่ยนตัวประสานเป็นแยมันสำปะหลังและน้ำร้อน แท่งเชื้อเพลิงชีวที่ได้เกิดรอยแตกร้าวมากขึ้นและบางแท่งแตกร่วน ซึ่งไม่สอดคล้องกับงานวิจัยของอภิรักษ์ สวัสดิ์กิจ และคณะ [9] ที่ผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากขี้เถ้าแกลบผสมกับขี้ข้าวโพดและกะลามะพร้าวโดยใช้แยมันและน้ำร้อนเป็นตัวประสาน สำหรับแท่งเชื้อเพลิงที่ใช้แยมันเป็นตัวประสานนั้นแตกร่วน การผลิตเชื้อเพลิงชีวอัดแท่งจากมูลช้างที่ใช้แยมันเป็นตัวประสานได้ผลแตกต่างจากงานวิจัยการผลิตถ่านอัดแท่งโดยใช้ผงถ่านเปลือกเมล็ดกาแฟผสมกับแยมันของนฤภัทร์ ตั้งมันคงวรกุล และพัชรี ปริดาสุริยะชัย [10]

ขนาดมูลช้าง : แปะมันสำปะหลัง : น้ำอุณภูมิห้อง				
				
10 Mesh	20 Mesh	30 Mesh	40 Mesh	50 Mesh
ขนาดมูลช้าง : แปะมันสำปะหลัง : น้ำร้อน				
				
10 Mesh	20 Mesh	30 Mesh	40 Mesh	50 Mesh
ขนาดมูลช้าง : แปะเปียก				
				
10 Mesh	20 Mesh	30 Mesh	40 Mesh	50 Mesh

ภาพที่ 4 แสดงลักษณะทางกายภาพของเชื้อเพลิงชีวอัดแท่งจากมูลช้าง

การศึกษาลักษณะภายนอกของแท่งเชื้อเพลิงพบว่าการผลิตเชื้อเพลิงชีวอัดแท่งจากมูลช้างโดยใช้ตัวแปะมันสำปะหลัง และน้ำอุณภูมิห้องเป็นตัวประสานทำให้เกิดความเสียหายในการผลิตน้อยที่สุด การศึกษาการยืดและหดตัวและความหนาแน่นจึงศึกษาเฉพาะแท่งเชื้อเพลิงที่ใช้แปะมันสำปะหลังและน้ำอุณภูมิห้องเป็นตัวประสานเท่านั้น

2. การยืดและหดตัว

การศึกษากการยืดและหดตัวตามแนวยาวของเชื้อเพลิงชีวอัดแท่งจากมูลช้างที่ใช้แปะมันสำปะหลังและน้ำเป็นตัวประสาน ผลจากการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่า เชื้อเพลิงอัดแท่งที่ใช้มูลช้างขนาด 10-50 Mesh ใช้ตัวประสานแปะมันสำปะหลังและน้ำอุณภูมิห้อง หลังจากครบ 3 สัปดาห์ยืดตัวตามแนวยาวเพิ่มขึ้น 1.5, 0.6, 0.4, 0.1 และ 0.2 cm คิดเป็นร้อยละ 26.79, 10.91, 6.67, 2.04 และ 4.35 ตามลำดับ อัตราส่วนของมูลช้างที่ใช้แปะมันสำปะหลังและน้ำเป็นตัวประสานเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ใช้มูลช้างขนาด 40 Mesh คิดเป็นร้อยละ 2.04 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของกัมมณี แสงสุข [11] การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากเศษเยื่อไม้ ชี้อเลื้อย และด้าย เมื่อตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 14 วัน แท่งเชื้อเพลิงมีร้อยละการขยายตัวด้านความยาว อยู่ระหว่างร้อยละ 0.77 – 3.79 เนื่องจากความชื้นมีผลการยืดและหดตัวของแท่งเชื้อเพลิง [6]

ตารางที่ 1 การยืดและหดตัวของเชือกพอลิเอทิลีนที่เชื่อมจากมุลข้างที่ใช้แบ่งมันสำปะหลังและน้ำเป็นตัวประสาน

ขนาดของมุลข้าง	ระยะยืดและหดตัวตามแนวยาว (cm)			
	เริ่มต้น	สัปดาห์ที่ 1	สัปดาห์ที่ 2	สัปดาห์ที่ 3
10 Mesh	5.6	6.8	7.1	7.1
20 Mesh	5.5	5.7	6.1	6.1
30 Mesh	6.0	6.1	6.4	6.4
40 Mesh	4.9	4.9	5.0	5.0
50 Mesh	4.6	4.7	4.8	4.8

3. ความหนาแน่น

ความหนาแน่นของเชือกพอลิเอทิลีนที่เชื่อมจากมุลข้างที่คงรูป ผลจากการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่า อัตราส่วนมุลข้างต่อแบ่งมันสำปะหลังและน้ำที่อุณหภูมิห้อง ขนาดมุลข้าง 10, 20, 30, 40 และ 50 Mesh มีความหนาแน่น 4.96×10^{-4} , 7.04×10^{-4} , 6.50×10^{-4} , 7.98×10^{-4} , 7.40×10^{-4} kg/cm³ ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งตามมาตรฐาน DIN EN 51731 เชือกพอลิเอทิลีนที่ผลิตได้ต้องมีความหนาแน่นมากกว่า 1×10^{-4} kg/cm³ [12] แสดงว่า เชือกพอลิเอทิลีนที่เชื่อมจากมุลข้างที่ผลิตได้มีความหนาแน่นเป็นไปตามมาตรฐาน DIN EN 51731 นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของอนุวัตร ศรีนวล และอัมพัทธ์ ชัยนาวา ที่ผลิตเชือกพอลิเอทิลีนที่เชื่อมจากใบสนประดิพัทธ์ผสมถ่านลิกไนต์ซึ่งมีความหนาแน่น 7.80×10^{-4} ซึ่งมีการอัดแท่งของเชือกพอลิเอทิลีนได้ดีและเป็นไปตามมาตรฐาน [13]

ตารางที่ 2 ความหนาแน่นของเชือกพอลิเอทิลีนที่เชื่อมจากมุลข้างที่ใช้แบ่งมันสำปะหลังและน้ำเป็นตัวประสาน

อัตราส่วนและขนาดของมุลข้าง	ความหนาแน่น (kg/cm ³)
10 Mesh	4.96×10^{-4}
20 Mesh	7.04×10^{-4}
30 Mesh	6.50×10^{-4}
40 Mesh	7.98×10^{-4}
50 Mesh	7.40×10^{-4}

สรุปผลการวิจัย

การผลิตเชือกพอลิเอทิลีนที่เชื่อมจากมุลข้างโดยใช้ตัวประสานเป็นแบ่งมันและน้ำอุณหภูมิห้องที่อัตราส่วน 4:1:0.25 อัดด้วยแรงดันที่ 70 kg/cm² ด้วยเครื่องอัดแบบไฮดรอลิก เป็นรูปแบบที่เหมาะสมต่อการผลิตเชือกพอลิเอทิลีนที่เชื่อมจากมุลข้างที่มีขนาด 10 - 50 Mesh เนื่องจากเชือกพอลิเอทิลีนที่ผลิตได้มีลักษณะทางกายภาพที่ได้รับความเสียหายน้อยที่สุด การยืดและหดตัวระหว่าง 0.1–1.5 cm และมีความหนาแน่นระหว่าง 4.96×10^{-4} – 7.98×10^{-4} kg/cm³

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณวิทยาลัยพัฒนาเศรษฐกิจและเทคโนโลยีชุมชนแห่งเอเชีย มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ ที่สนับสนุนพื้นที่ และเครื่องมือในการดำเนินงานวิจัย และปวงช้างในตำบลกุดช้าง อำเภอมะเณร จังหวัดเชียงใหม่ที่สนับสนุนมุลข้างในการทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] มยุรี เรืองสมบัติ. (2549). การศึกษาและพัฒนาผลิตภัณฑ์จากกระดาษมูลช้าง สำหรับศูนย์อนุรักษ์ช้างไทย. คุรุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต เทคโนโลยีผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.
- [2] อังพจน์ บุญเรือง และสมชาย ศิริพันธ์. (2558). ปุ๋ยหมักจากมูลช้างเอเชีย. หลักสูตรชีววิทยาเชิงอนุรักษ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [3] พงษ์ศักดิ์ อยู่มั่น. (2559). การพัฒนาเครื่องอัดแท่งถ่านในรูปแบบเกลียวอัดเย้นสำหรับเชื้อเพลิงชีวมวล จากเศษวัสดุเหลือใช้ในระบบการผลิตกาแฟชุมชน และการหาคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงจากผลิตภัณฑ์ถ่านอัดแท่ง. วารสารวิชาการ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี. 9(1), 34-48.
- [4] รุ่งนภา จุลศักดิ์ และวรรณ โปธาเจริญ. (2561). การผลิตเชื้อเพลิงแข็งจากเศษใบไม้ (อาร์ตอเฟ 5) เพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทน. วิทยาลัยพัฒนาศรีวิไลและเทคโนโลยีชุมชนแห่งเอเชีย มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่.
- [5] วัชรภรณ์ ยุบลเขต, ดาริวรรณ เศรษฐีธรรม. (2560). เปรียบเทียบคุณสมบัติของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากขยะเศษใบไม้ที่ได้จากการอัดด้วยเครื่องอัดและอัดด้วยมือ. สารานุกรมสุขศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาสังแวดล้อม คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- [6] กานต์ วิรุณพันธ์, ธนารักษ์ สายเปลี่ยน และ ภาณุภูมิ ใจชมพู. (2560). การผลิตเชื้อเพลิงถ่านอัดแท่งจากเศษวัสดุเหลือใช้ในการผลิตข้าวหอม. สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก.
- [7] ฤชฎา นามวงศ์ และมงคล คธาพันธ์. (2560). การออกแบบและพัฒนาเครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิงจากใบเสเดาแห้งร่วมกับขี้เลื่อยเผา. หน่วยวิจัยพลังงานทดแทน คณะวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาลัยเทคโนโลยีพนมวันท์.
- [8] กิตติพงษ์ ลาลุน. (2554). การศึกษาและพัฒนาเครื่องผลิตถ่านอัดแท่งจากเหง้ามันสำปะหลัง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตรและอาหาร). บัณฑิตวิทยาลัย : มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- [9] อภิรักษ์ สวัสดิ์กิจ, ทิพย์ คุณาพรวิวัฒน์, พิสุทธิ รัตนแสนวงษ์, จักรพันธ์ กัณหา และวรรณ พันธ์. (2551). การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากขี้เถ้าแกลบผสมขี้ข้าวโพดและกะลามะพร้าวด้วยเทคนิคเอ็กซ์ทรูชันโดยใช้แปรงเปิกเป็นตัวประสาน. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม กรุงเทพฯ.
- [10] นฤภัทร์ ตั้งมั่นคงวรกุล และพัชรี ปรีดาสุริยะชัย. (2558). การศึกษาการกักเก็บและกักขามาใช้ประโยชน์ในรูปเชื้อเพลิงอัดแท่ง. สำนักนวัตกรรมการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- [11] กัณณณิ แสงสุข. (2559). การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากเศษเยื่อไม้ ขี้เลื่อย และค้าย. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา) บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [12] อนันต์ มีมนต์, ศุภเอก ประมูลมาก และจิราวัฒน์ ใจอยู่. (2558). อิทธิพลของขนาดผลอนุภาคเศษพืชเหลือใช้จากงานเกษตรกรรมสำหรับอัดขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [13] อนุวัตร ศรีนวล และอัมวัลย์ ชัยนาวา. (2561). การศึกษาเชื้อเพลิงอัดแท่งจากใบสนประดิพัทธ์ผสมถ่านหินลิกไนต์. สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา.

ผลกระทบการป้อนอากาศที่มีผลต่อสมรรถนะและคุณสมบัติถ่านชีวภาพเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง

Effect of Air Feeding on Performance and Biochar Properties on High Efficiency Biomass Stove

นิกราน หอมดวง^{1*} พันธวัฒน์ ไชยวรรณ² ภูนิชต์ สายแก้ว¹ กิตติกร สาสุจิตต์¹ นงเยาว์ เต๊ะจ๊ะใหม่¹ ชูรัตน์ ธารารัตน์¹
เสริมสุข บัวเจริญ¹ ยิ่งรักษ์ อรรถเวชกุลและณัฐวุฒิ ดุษฎี

¹วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ 63 ต.หนองหาร อ.สันทราย จ.เชียงใหม่ 50290

²ฝ่ายพัฒนาพื้นที่เพื่อเกษตรและชุมชน สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ 155 หมู่ 2 ต.แม่เหียะ
อ.เมือง จ. เชียงใหม่ 50100

บทคัดย่อ

วิถีชีวิตเกษตรกรหรือชุมชนในปัจจุบันมีความต้องการแหล่งพลังงานความร้อนและถ่านชีวภาพ สำหรับการใช้เป็นแหล่งพลังงานในการประกอบอาหารและงานทางด้านเกษตรอินทรีย์ งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาและวิเคราะห์ผลของสมรรถนะของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงที่สามารถผลิตทั้งพลังงานความร้อนและถ่านชีวภาพพร้อมกัน เพื่อรองรับการนำไปใช้งานให้กับชุมชนในอนาคต เตาที่นำมาทดลองเป็นเตาที่ถูกออกแบบให้มีประสิทธิภาพความร้อนสูง (High thermal efficiency) ขณะเดียวกันก็สามารถผลิตถ่านชีวภาพ (Bio-char) ได้อีกทาง พื้นฐานการออกแบบเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงใช้หลักการเผาไหม้ตรง ลักษณะห้องเผาไหม้เป็นรูปทรงกรวย เจาะรูป้อนอากาศรอบห้องเผาไหม้ 64 รู ป้อนอากาศด้วยพัดลมขนาด 300 W จำนวน 3 ทิศทาง คือด้านล่างของเตา ตรงกลางเตาส่วนหัวเตา ควบคุมอัตราการไหลอากาศโดยใช้วาล์วควบคุม ใช้ขั้วข้าวโพดเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ตรงและใช้เศษไม้ลำไยผลิตถ่านชีวภาพด้วยกระบวนการไพโรไลซิส ผลการทดลองพบว่า เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงสามารถทำงานได้ดีที่การป้อนอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้แบบทางเดียว (การทดลองที่ 5) โดยอุณหภูมิเตามีความเสถียรสูงและให้ประสิทธิภาพความร้อนสูงสุด 24.61% ถ่านชีวภาพที่ได้จากการทดสอบมีค่าความร้อนเฉลี่ยสูงสุด 28,950 kJ/kg ค่าการแปรรูปเพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานสูงสุด 5.19% ในภาพรวมเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงสามารถนำไปเผยแพร่และส่งเสริมให้กับเกษตรกรและชุมชนได้

คำสำคัญ: เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง ถ่านชีวภาพ พลังงานความร้อน กระบวนการไพโรไลซิส



เชื้อเพลิงและความร้อนชุมชน
(Fuel and Heat for Communities)

* Corresponding author: Tel.: 084-1773632 E-mail address: nigranghd@gmail.com

บทนำ

เกษตรกรรมเป็นอาชีพพื้นฐานและเป็นอาชีพหลักของคนไทยปัจจุบันมีผู้ทำงานภาคการเกษตรรวมคิดเป็น 70 % ของบุคคลมีภาระงานทำทั่วประเทศจากทั้งหมด 38.37 ล้านคน [1] การเพาะปลูกของเกษตรกรปัจจุบันมีการส่งเสริมและสนับสนุนให้มีการลดใช้สารเคมีลงและพยายามปรับแนวทางการเพาะปลูกให้เป็นอินทรีย์ ผลจากการลดการใช้สารเคมีส่งผลให้เกษตรกรจำเป็นต้องพึ่งสารอินทรีย์จากธรรมชาติในการเพาะปลูกหรือการกำจัดแมลงศัตรูพืช การใช้ถ่านชีวภาพสำหรับการเพาะปลูกเป็นอีกแนวทางที่เริ่มมีการส่งเสริมให้กับเกษตรกร การใช้ถ่านชีวภาพจะทำให้พืชมีการเจริญเติบโตที่ดีกว่าการไม่ใช้ เนื่องจากช่องว่างหรือรูพรุนของถ่านจะเป็นแหล่งที่อยู่ของจุลินทรีย์ที่มีประโยชน์ต่อพืชและทำให้พืชเจริญเติบโตได้ดีกว่า [2] และเป็นช่องทางส่งเสริมการลดการใช้ปุ๋ยเคมีลงได้ ถ่านชีวภาพที่ดีต้องมีความเป็นรูพรุนสูงซึ่งจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและระยะเวลาในกระบวนการไพโรไลซิส [3] และชนิดของชีวมวลที่ใช้เป็นต้น ในขณะที่อีกด้านความเป็นอยู่ของเกษตรกรหรือชุมชนในชนบท ยังคงมีการนำเอาเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น เศษไม้และซังข้าวโพด เป็นต้น มาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการประกอบอาหาร การใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงส่งผลให้ลดค่าใช้จ่ายจากการใช้แก๊สหุงต้ม เตาที่ชุมชนใช้ส่วนใหญ่ได้แก่ เตาอั้งโล่ หรือเตาชีวมวลทั่วไป ปกติประสิทธิภาพความร้อนจะค่อนข้างต่ำโดยเฉลี่ยอยู่ในช่วง 10-16% เท่านั้น [4] อย่างไรก็ตามชุมชนหรือเกษตรกรส่วนใหญ่ก็ยังคงใช้เตาชีวมวลในการประกอบอาหารเหมือนเดิม จากข้อดีของการใช้ถ่านชีวภาพจากวัสดุชีวมวลในชุมชนและความจำเป็นในการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลทดแทนแก๊สหุงต้ม ศูนย์การเรียนรู้การพัฒนาที่ดิน ตามแนวเศรษฐกิจพอเพียง คุรุประทุม สุริยา อำเภอมะนัง จังหวัดเชียงใหม่และสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ จึงมีแนวคิดการพัฒนาเตาชีวมวลที่มีอยู่ให้มีประสิทธิภาพความร้อนเพิ่มสูงขึ้น เน้นความสามารถในการใช้งาน 2 ด้าน โดยนำความร้อนจากการสูญเสียในการเผาไหม้มาใช้ประโยชน์ในการผลิตถ่านชีวภาพ ในขณะที่พลังงานความร้อนสำหรับการหุงต้มยังคงประสิทธิภาพเท่าเดิมหรือสูงกว่าจึงเป็นที่มาของการศึกษาวิจัย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นในผลของการปรับอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่มีผลต่อสมรรถนะของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง ทั้งในด้านประสิทธิภาพความร้อน อุณหภูมิและคุณสมบัติของถ่านชีวภาพ ผลการประเมินที่ได้จากงานวิจัยจะเป็นแนวทางในการนำไปขยายผลให้ชุมชนหรือเกษตรกรได้นำเอาไปใช้งานต่อไปในอนาคต

วิธีการวิจัย

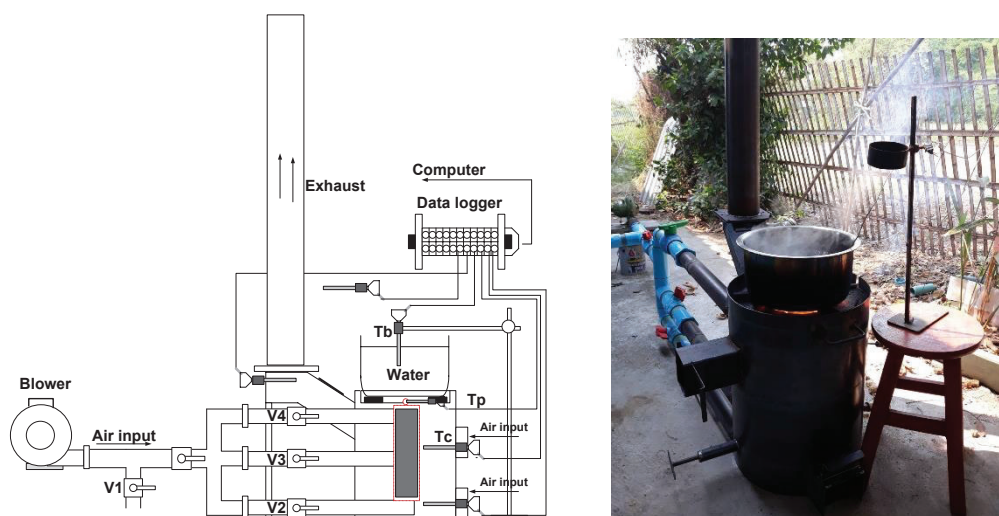
เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง

เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงมีส่วนประกอบ 3 ส่วน ดังภาพที่ 1 คือ ส่วนด้านล่าง ส่วนห้องเผาไหม้และส่วนหัวเตา ส่วนด้านล่างเป็นห้องปล่อยขี้เถ้าและป้อนอากาศ ส่วนห้องเผาไหม้มีลักษณะเป็นแบบทรงกรวย เนื่องจากการลดการกระจายตัวเชื้อเพลิงและพื้นที่การถ่ายเทความร้อน มีท่อป้อนอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้ เจาะรูป้อนอากาศ 64 รู ตรงกลางห้องเผาไหม้มีชุดผลิตถ่านชีวภาพ ใช้ความร้อนจากห้องเผาไหม้ให้ความร้อนกับชีวมวลในสภาวะไร้ออกซิเจน ซึ่งเป็นท่อโลหะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.5 cm สูง 40 cm ด้านบนกระบอกมีท่อไพโรไลซิสแก๊สเพื่อระบายแก๊สจากการผลิตถ่านชีวภาพกลับเข้าสู่เตา ส่วนด้านล่างมีฝาปิดแบบหลวมๆ สำหรับการใส่เศษไม้ลำไย ระหว่างการทำงานไพโรไลซิสแก๊สบางส่วนสามารถปล่อยเข้าสู่ห้องเผาไหม้ได้โดยตรง อุณหภูมิที่ให้ความร้อนกับกระบวนการไพโรไลซิสเฉลี่ย 450-600 °C ส่วนด้านบนเตาชีวมวลมีช่องป้อนอากาศอยู่รอบ ๆ หัวเตาเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ซ้ำ ด้านล่างของหัวเตามีช่องป้อนซังข้าวโพดและเป็นช่องระบายควันของเตาโดยต่อเชื่อมเป็นปล่องที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.7 cm ยาว 1.5 m ส่วนการป้อนอากาศใช้พัดลมขนาด 300W ป้อนและปรับปริมาณอากาศให้กับด้านล่างเตา ห้องเผาไหม้และส่วนหัวเตา

เชื้อเพลิงชีวมวลและเชื้อเพลิงผลิตถ่านชีวภาพ

เชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้สำหรับการผลิตความร้อนด้วยวิธีการต้มน้ำคือซังข้าวโพด โดยซังข้าวโพดที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยอยู่ในช่วง 2-3 cm และมีความยาวในช่วง 3-7 cm ความหนาแน่นเฉลี่ย 250 kg/m³ และมีความชื้น

เฉลี่ย 8% และมีความร้อนเฉลี่ย 14.1 MJ/kg ส่วนเศษไม้ลำไยที่ใช้ผลิตถ่านชีวภาพใช้เศษไม้ที่มีขนาดใกล้เคียงกับท่อนคือ ขนาดมากกว่า 4-7 cm ยาวประมาณ 35 cm ความหนาแน่นเฉลี่ย 481.62 kg/m³ และมีความชื้นเฉลี่ยไม่เกิน 17% และค่าความร้อนเฉลี่ย 14.1 MJ/kg [5]



ภาพที่ 1 ไดอะแกรมและรูปภาพการทดสอบสมรรถนะของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง

วิธีการทดลองเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง

การทดลองเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงแบ่งการทดสอบเป็น 5 กรณี ดังตารางที่ 1 โดย V1 หมายถึง วาล์วควบคุมลมรวม ส่วน V2 หมายถึง วาล์วควบคุมลมป้อนด้านล่างเตา V3 หมายถึง วาล์วควบคุมลมป้อนห้องเผาไหม้ สุดท้าย V4 หมายถึงวาล์วควบคุมลมป้อนระบบเผาไหม้ซ้ำหรือส่วนหัวเตา การทดสอบใช้วิธีการต้มน้ำ (Water Boiling Test: WBT) [6] โดยทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบเตาชีวมวล ซึ่งในการต้มน้ำแต่ละครั้งใช้น้ำ 7 kg ควบคุมอัตราการป้อนซึ่งข้าวโพดและอากาศที่ 6 kg/h และ 20 m³/h ส่วนการวัดอุณหภูมิเตาจะทำการวัด 3 จุด คืออุณหภูมิห้องเผาไหม้ อุณหภูมิภายในกระบอกผลิตถ่านชีวภาพและอุณหภูมิน้ำที่ต้ม การวัดใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด Type K ทำงานร่วมกับเครื่องบันทึกอุณหภูมิที่ต่อร่วมกับเครื่องคอมพิวเตอร์ เครื่องซึ่งน้ำหนักซึ่งข้าวโพดและเศษไม้ใช้เครื่องชั่งแบบดิจิตอลชนิด 3 ตำแหน่ง วัดน้ำหนักได้สูงสุด 15 kg มีความละเอียดการวัด 0.5 g ส่วนการวิเคราะห์ค่าความร้อนถ่านชีวภาพวัดได้จากเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ รุ่น ART.2060/2070 ความจุ 300 ml ทดลองตามมาตรฐาน ASTM D2105 การประเมินสมรรถนะของเตาชีวมวล ประสิทธิภาพความร้อน อุณหภูมิภายในเตา ค่าความร้อนถ่านชีวภาพและการแปรรูปเพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงาน โดยทดสอบทั้งหมดตัวอย่างละ 3 ซ้ำ ทุกการทดลอง ประสิทธิภาพความร้อนเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงคำนวณได้จากอัตราส่วนของพลังงานที่นำไปใช้ประโยชน์ (Q_{useful}) ต่อพลังงานที่ป้อนเข้าเตาชีวมวล (Q_{input}) ประสิทธิภาพความร้อนของเตาชีวมวล ประสิทธิภาพการผลิตถ่านชีวภาพและการวิเคราะห์การแปรรูปเพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงาน (Energy Recovery) หาได้จากสมการที่ 1 2 และ 3 [5]

$$\eta_B = \frac{[m_{w,1} \times C_{p,w} (T_{w,B} - T_{w,i})] + [m_{w,2} \times h_{fg}]}{m_{\text{fuel}} \times LHV} \quad (1)$$

$$\eta_{\text{Biochar}} = \frac{m_{\text{bi}} \times LHV_{\text{biochar}}}{m_{\text{fuel}} \times LHV} \quad (2)$$

$$ER = \frac{(Q_{useful}) + m_{bi} \times LHV_{biochar}}{m_{fuel} \times LHV} \quad (3)$$

เมื่อ $m_{w,1}$ คือมวลของน้ำทั้งหมด, kg $m_{w,2}$ คือมวลของน้ำที่ระเหย, kg $C_{p,w}$ คือความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ, kJ/kg K h_{fg} คือความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ, kJ/kg $T_{w,B}$ คืออุณหภูมิจุดเดือดของน้ำ, °C $T_{w,i}$ คือ อุณหภูมิน้ำเริ่มต้น, °C m_{fuel} คือ มวลของเชื้อเพลิงที่ใช้ทั้งหมด, kg LHV คือ ค่าความร้อนเชื้อเพลิงชีวมวล, kJ/kg และ $LHV_{biochar}$ คือ ค่าความร้อนถ่านชีวภาพ, kJ/kg

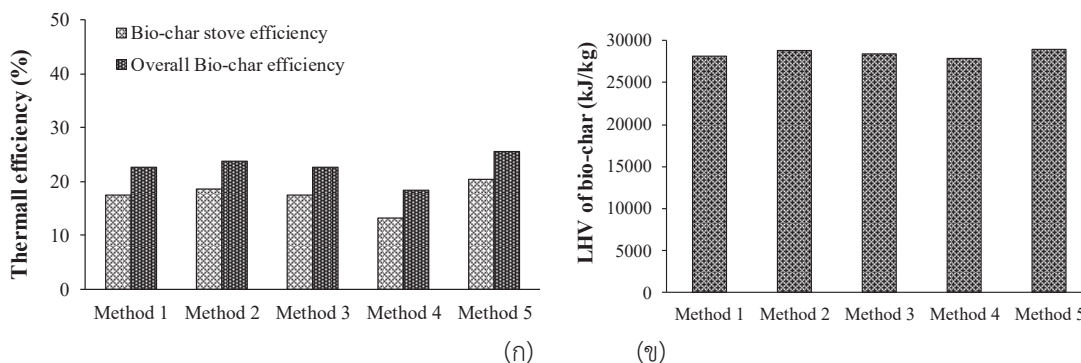
ตารางที่ 1 ลักษณะการปรับวาล์วเพื่อป้อนอากาศเข้าสู่เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง

Method/Valve opening	V1	V2	V3	V4
Method 1	Close	Open	Open	Close
Method 2	Open 45°	Open	Open	Close
Method 3	Close	Close	Open	Close
Method 4	Open 1/2	Close	Open	Close
Method 5	Open 45°	Close	Open	Close

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

ประสิทธิภาพความร้อนเตาชีวมวลและค่าความร้อนถ่านชีวภาพ

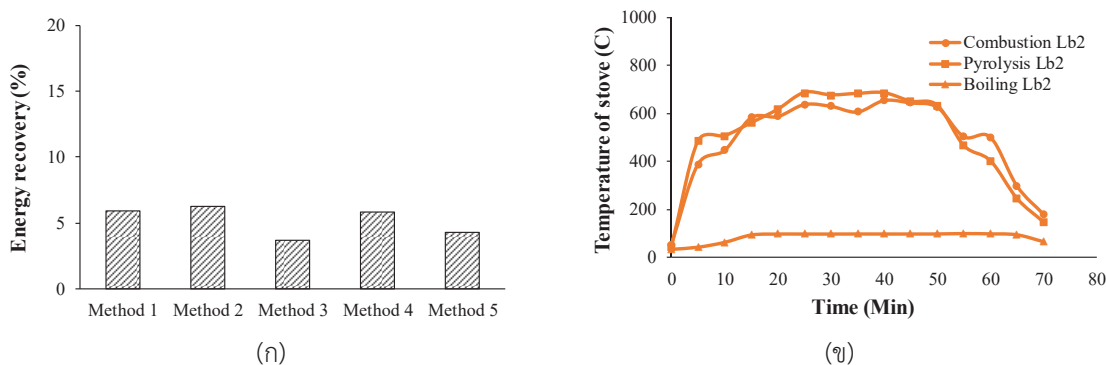
ภาพที่ 2 (ก) แสดงการวิเคราะห์ประสิทธิภาพความร้อนของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง โดยในแถบสีเข้มจะแสดงประสิทธิภาพความร้อนรวมของเตาผลิตถ่านไปโอชาร์ ซึ่งคือการผลิตความร้อนที่เกิดจากเตาชีวมวลโดยตรงและการนำเอาพลังงานความร้อนที่สูญเสียมาเพิ่มให้กับถ่านชีวภาพ ผลการวิเคราะห์พบว่า การทดลองในเงื่อนไขที่ 5 ให้ประสิทธิภาพความร้อนรวมสูงสุด 24.61% โดยแบ่งเป็นประสิทธิภาพความร้อนที่ใช้ในการต้มน้ำ 20.32% และพลังงานความร้อนที่เพิ่มให้กับถ่านชีวภาพ 4.29% การปรับอากาศเข้าสู่เตาชีวมวลทั้ง 5 รูปแบบ อธิบายได้ว่าการเพิ่มอากาศเข้าสู่เตาชีวมวลมากเกินไป (V1 = Close) ส่งผลให้ปริมาณลมเข้าสู่เตาสูงเกินไปส่งผลให้ความร้อนบางส่วนมีการสูญเสียออกไปทางปล่องควัน [5] ในขณะเดียวกันในส่วนของการเพิ่มอากาศเข้าสู่เตาต่ำเกินไป (V1 = Open 1/2) ก็ส่งผลให้ระหว่างการเผาไหม้ชีวมวลมีปริมาณอากาศไม่เพียงพอ โดยปกติแล้วการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งจำเป็นต้องเพิ่มอากาศส่วนเกินซึ่งส่วนหนึ่งจะแปรผันตามขนาดเชื้อเพลิงที่ใช้เผา [8] ในส่วนของลักษณะการป้อนอากาศ การป้อนอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้เพียงอย่างเดียว โดยไม่มีการป้อนอากาศด้านล่างและด้านบนให้ประสิทธิภาพความร้อนสูงสุด ซึ่งอธิบายได้ว่าการป้อนอากาศทางด้านล่างน่าจะส่งผลให้ทิศทางของลมในห้องเผาไหม้เกิดการเปลี่ยนแปลงทำให้ความสามารถในการเป็นผลของการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งลดลง อย่างไรก็ตามถ้าเทียบประสิทธิภาพความร้อนของการทดลองที่ 5 กับ 2 พบว่ามีค่าเฉลี่ยค่อนข้างใกล้เคียงกัน ในส่วนการวิเคราะห์ค่าความร้อนถ่านชีวภาพแสดงภาพที่ 2 (ข) การทดลองผลิตถ่านชีวภาพต่อครั้งใช้เวลาในกระบวนการไพโรไลซิสประมาณ 30 - 40 min ผลการศึกษาพบว่า การทดลองเงื่อนไขที่ 5 ให้ค่าความร้อนสูงสุด 28,950 kJ/kg ส่วนการทดลองที่ 4 ให้ค่าความร้อนต่ำสุด 27,960 kJ/kg การเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนถ่านชีวภาพเกิดจากเตาชีวมวลมีการเผาไหม้ที่ดี มีประสิทธิภาพความร้อนสูงส่งผลให้อุณหภูมิเตาและอุณหภูมิในกระบอกผลิตถ่านชีวภาพเพิ่มสูงขึ้นและทำให้ค่าความร้อนเพิ่มสูงตาม อย่างไรก็ตามค่าความร้อนที่เพิ่มขึ้นของถ่านชีวภาพจะแปรผันกับมวลของถ่านที่ลดลง [9] เมื่อนำเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงเปรียบเทียบกับเตาชีวมวลเมื่อใช้เชื้อเพลิงซังข้าวโพดอัดเม็ดและถ่านซังข้าวโพดอัดแท่ง เตาชีวมวลที่ใช้ทั่วไปให้ประสิทธิภาพความร้อนเฉลี่ย 15.30% และ 16.27% ซึ่งจะเห็นได้ว่าการนำเอาเตาประสิทธิภาพสูงจะให้พลังงานความร้อนที่สูงกว่าและช่วยประหยัดเชื้อเพลิงดีกว่าการใช้เตาชีวมวลทั่วไป [10]



ภาพที่ 2 ประสิทธิภาพความร้อนและค่าความร้อนถ่านชีวภาพจากเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง

การวิเคราะห์อุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาและ Energy Recovery

ภาพที่ 3 (ก) และ (ข) แสดงการวิเคราะห์ Energy Recovery ของการทดลองเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงและอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ (Tc) และอุณหภูมิภายในห้องผลิตถ่านชีวภาพ (Tp) และอุณหภูมิการต้มน้ำ (Tb) ภายใต้สภาวะการป้อนอากาศที่การทดลองที่ 2 พบว่า การเปิดวาล์วป้อนอากาศ ($V1 = \text{Open } 45^\circ$) ระบายลมทิ้งเล็กน้อยและการเปิดวาล์วอากาศเข้าสู่ด้านล่างเตาและห้องเผาไหม้พร้อมกันของวิธีการป้อนอากาศของการทดลองที่ 2 ให้ค่าการแปรรูปเพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานสูงสุด 6.22 % การเพิ่มความอัตราการป้อนอากาศด้านล่างเตาจะส่งผลให้อุณหภูมิภายในห้องผลิตถ่านชีวภาพลดลงและทำให้น้ำหนักถ่านเพิ่มสูงขึ้นและทำให้ค่าการแปรรูปเพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานสูงสุด เมื่อเทียบกับการทดลองอื่น ๆ ในด้านของอุณหภูมิของห้องเผาไหม้และห้องผลิตถ่านชีวภาพทุกการทดลองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ภาพที่ 3 (ข) อุณหภูมิภายในชุดผลิตถ่านสูงกว่าอุณหภูมิเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงเล็กน้อย โดยเฉลี่ยมีอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 600°C ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความร้อนของถ่านเพิ่มสูงขึ้นและทำให้ Energy Recovery เพิ่มขึ้นตามการต้มน้ำอุณหภูมิที่เดือดที่อุณหภูมิ $97-98^\circ\text{C}$ ระยะเวลาการเริ่มเดือดน้ำประมาณ 15 นาที

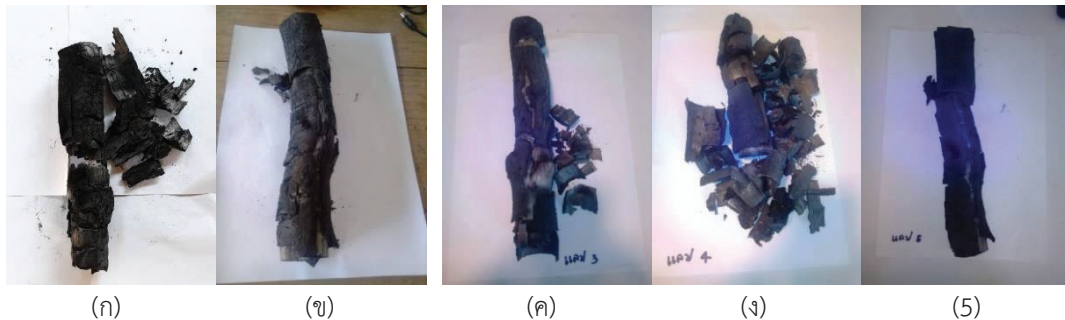


ภาพที่ 3 Energy Recovery และการวิเคราะห์อุณหภูมิของการป้อนอากาศการทดลองที่ 2

การวิเคราะห์ลักษณะถ่านชีวภาพ

ภาพที่ 4 (ก) ถึง (จ) แสดงลักษณะของถ่านชีวภาพที่ผลิตได้ ภายใต้เงื่อนไขการทดลองของการปรับอัตราการป้อนอากาศเข้าสู่เตาการทดลองที่ 1-5 พบว่าถ่านชีวภาพหลังจากได้รับความร้อนด้วยกระบวนการไพโรไลซิสจะมีลักษณะคงรูปเป็นแท่งได้ อย่างไรก็ตามในภาพอาจมีการแตกออกเนื่องจากเกิดการเคลื่อนย้าย ลักษณะทางกายภาพของถ่านจะมีลักษณะเป็นสีดำสนิท น้ำหนักเบา เนื่องจากการให้อุณหภูมิที่สูงมาก ภาพรวมน้ำหนักถ่านที่ได้จะลดลงเฉลี่ย 69% หรืออยู่ในช่วง 54.9-74% เทียบกับน้ำหนักเริ่มต้น [9] การลดลงของน้ำหนักถ่านจะขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัยคือ อุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ใน

กระบวนการไพโรไลซิส โดยทั่วไปอุณหภูมิที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 400-700 °C การใช้อุณหภูมิและระยะเวลาเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้สัดส่วน สารระเหย ความชื้นและมวลรวมชีวมวลลงในขณะที่ปริมาณคาร์บอน เถ้าและความเป็นรูปพรุนในเนื้อถ่านเพิ่มสูงขึ้น [11]



ภาพที่ 4 การวิเคราะห์ลักษณะถ่านชีวภาพจากเตาประสิทธิภาพสูง

สรุปผลการวิจัย

เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงสามารถผลิตความร้อนและถ่านชีวภาพได้พร้อมกัน เมื่อใช้ขี้ังข้าวโพดเป็นเชื้อเพลิง และใช้ไม้ลำไยผลิตถ่านชีวภาพ การใช้เทคนิคการป้อนอากาศที่การทดลองที่ 5 ให้ประสิทธิภาพความร้อนด้วยวิธีการต้มน้ำ รวมมีค่าเฉลี่ยสูงสุด 24.61% ระบบและการทำงานมีความเสถียร ระยะเวลาในการต้มน้ำเดือดเฉลี่ย ไม่เกิน 15 min ค่าความร้อนถ่านชีวภาพสูงสุดที่ได้จากสภาวะการป้อนอากาศที่เหมาะสมเท่ากับ 28,950 kJ/kg การใช้วิธีการทดลองที่ 2 ให้ค่าการแปรรูปเพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานสูงสุด 6.22 % การผลิตถ่านชีวภาพที่อุณหภูมิการเผาไหม้เฉลี่ย 600 °C น้ำหนักของถ่านลดลงเฉลี่ยอยู่ในช่วง 54.9-74% และในภาพรวมการนำไปใช้งานเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงสามารถนำไปส่งเสริมและเผยแพร่ให้กับเกษตรกรหรือชุมชนได้ โดยมีประสิทธิภาพความร้อนที่สูงกว่าเตาชีวมวลทั่วไปและยังสามารถผลิตถ่านชีวภาพทางการเกษตรได้อีกทาง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน ศูนย์วิจัยพลังงาน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ในการศึกษาและขอบคุณสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติที่สนับสนุนงบประมาณงานวิจัยและขอแนะนำการทำงานวิจัยและสุดท้ายขอขอบคุณ ศูนย์การเรียนรู้การพัฒนาที่ดิน ตามแนวเศรษฐกิจพอเพียง ครูประทุม สุริยา ต.สันป่ายาง อ.แม่แตง จ.เชียงใหม่ ที่สนับสนุนแนวคิดเริ่มต้นในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานสถิติแห่งชาติ (2561) สรุปผลการสำรวจภาวะการมีงานทำของประชากร เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2561 สืบค้นเมื่อ 25 กันยายน 2562, จาก <http://www.thaiheartweb.com>.
- [2] Tag, A. T. Duman, G. Ucar, S. and Yanika, J. (2016). Effects of feedstock type and pyrolysis temperature on potential applications of biochar. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2016(120), 200-206.
- [3] Papuga, S.V. Gvero, P.M. and Vukic L.M. (2016). Temperature and time influence on the waste plastics pyrolysis in the fixed bed reactor. *Thermal Science* 20 (00), 154-154.
- [4] สหทัยา ทองสาร บงกช ประสิทธิ์ วิกานต์ วันสูงเนิน และธัญญานุช แรงเขตกรรม (2015) การเปรียบเทียบการใช้

ฉนวนกันความร้อนสำหรับเตาแก๊สชีวมวลโดยใช้วัตถุดิบที่หาง่ายในชุมชน, *Naresuan University Journal: Science and Technology*. 23 (2), 66–78.

- [5] นิกราน หอมดวง พันธวัฒน์ ไชยวรรณ กิตติกร สาสุจิตต์ และณัฐภูมิ ดุษฎี (2562) การประเมินสมรรถนะเตาชีวมวลไฮบริดสำหรับการผลิตพลังงานความร้อนและถ่านชีวภาพ การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 15 วันที่ 21-24 พฤษภาคม 2562 จังหวัดนครราชสีมา
- [6] Bailis R., Ogle D., MacCarty N., Still D., Edwards R., and Smith K., (2007). The Water boiling Test Version 3.0: Cookstove Emissions and Efficiency in a Controlled laboratory. Household Energy and Health programme, Shell Foundation, United Kingdom.
- [7] Sivakumar, A. (2015). Performance analysis and excess air optimization in fuel combustion of 210 MW boiler. *International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology*. 8 (1), 261-267.
- [8] Srinivasa Rao, K.V.N. Venkat Reddy, G. (2008). Effect of secondary air injection on the combustion efficiency of sawdust in a fluidized bed combustor. *Braz. J. Chem. Eng.* 25 (1), 129-141.
- [9] Homdoun, N. Sasujit, K. Uttharuan, J. Wongsiriamnuay, T. And Tippayawong, N. (2019) Influence of torrefaction temperature and time on the yields and properties of torrefied biomass. *Engineering and Applied Science Research*. 46 (2), 170-175.
- [10] ชูเดช เกตุชูรัตน์ ประภัสสร รัตนไพบุลย์ ชูรัตน์ ธารารักษ์ ณัฐภูมิ ดุษฎี และ นิกราน หอมดวง (2562) สมรรถนะเตาชีวมวลระดับครัวเรือนเมื่อใช้ชีวมวลอัดเม็ดและอัดแท่งเป็นเชื้อเพลิง การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 15 วันที่ 21-24 พฤษภาคม 2562 จังหวัดนครราชสีมา
- [11] Sun, J. He, F. Pan, Y. Zhang Z. (2017). Effects of pyrolysis temperature and residence time on physicochemical properties of different biochar types. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science*. 67 (1), 12–22.

การศึกษาแบบจำลองความชื้นสมดุลไอโซเทอมของปลาดุก

The Equilibrium Moisture Isotherm Mathematical Models of Walking Catfish

จิราภรณ์ แก้วเดียว^{1*} ชูรัตน์ ธารารักษ์¹ นิกราน หอมดวง¹ ณัฐวุฒิ ดุษฎี¹ และศิรินุช จินดารักษ์²

¹ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ตำบลหนองหาร อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290

² ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ตำบลท่าโพธิ์ อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000

บทคัดย่อ

ความชื้นสมดุลเป็นตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบเครื่องอบแห้ง โดยทั่วไปการศึกษาความชื้นสมดุลที่นิยมใช้จะเป็นแบบเชิงสถิตย์ (static equilibrium moisture content) ในการศึกษาความชื้นสมดุลไอโซเทอมของปลาดุกที่อุณหภูมิ 40, 50, 60 และ 70 °C โดยวิธีเชิงสถิตย์ในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 0.1 - 0.9 ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 5 รูปแบบ ได้แก่ Modified Halsey, Modified Oswin, Modified Mujica, Modified Chung & Pfof และ Modified Henderson การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของความชื้นสมดุลด้วยการนำผลการทดลองมาวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้นแบบกำลังสองน้อยที่สุด ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวพบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Modified Mujica สามารถอธิบายผลการทดลองได้ดีที่สุดตามความสัมพันธ์คือ $Meq = 1/[(0.0021T + 0.0555) - (6.7445 \times 10^{-6}T + 9.3986 \times 10^{-5})RH]$ ซึ่งมีค่า R^2 สูงที่สุด เท่ากับ 0.9910 โดยมีค่า SEE และ RMSE ต่ำที่สุด ได้แก่ 0.1763 และ 0.0124 ตามลำดับ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุลดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในการทำนายค่าความชื้นสมดุลของวัสดุได้อย่างถูกต้อง

คำสำคัญ: ปลาดุก, ความชื้นสมดุลไอโซเทอม, แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

บทนำ

ปลาดุกมีชื่อสามัญว่า Walking Catfish เป็นปลาหนังน้ำจืดในสกุล Clarias ปลาดุกจัดเป็นสัตว์น้ำเศรษฐกิจที่มีความสำคัญในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจภาคการประมงของประเทศไทย จากสถิติของผลผลิตสัตว์น้ำจืดในปี พ.ศ.2559 ผลผลิตปลาดุกมีปริมาณ 102,444 ตัน คิดเป็นร้อยละ 26.85 ของปริมาณการผลิตทั้งหมดมีมูลค่า 4,843.57 ล้านบาท [1] ประเทศไทยติดอยู่อันดับต้นๆ ของผู้ส่งออกสินค้าประมงมาตั้งแต่ปี พ.ศ.2541 ผลิตภัณฑ์ปลาที่ทำการส่งออกนั้นเกิดมาจากกระบวนการแปรรูปปลาซึ่งเป็นการเพิ่มมูลค่าภายหลังการเพาะเลี้ยง โดยผลิตภัณฑ์จากการแปรรูปปลามีหลากหลายรูปแบบเช่น ปลาแช่แข็ง ปลาปรุงแต่ง ปลารมควัน น้ำพริก และปลาแห้ง เป็นต้น การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์เป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่ถูกนำมาใช้เพื่อช่วยถนอมอาหาร และเก็บรักษาผลผลิตทางการเกษตร อีกทั้งยังช่วยในการเพิ่มมูลค่าของผลผลิตอีกด้วย ตัวแปรสำคัญในการศึกษากระบวนการอบแห้งได้แก่ ความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content, EMC หรือ M_e) โดยเป็นค่าปริมาณความชื้นของวัสดุที่ต่ำที่สุดเท่าที่จะสามารถทำให้น้ำระเหยออกจากวัสดุได้ ณ ความชื้น และอุณหภูมิของอากาศแวดล้อมในขณะนั้น เนื่องจากความแตกต่างระหว่างความชื้นของวัสดุ ณ เวลาใดเวลาหนึ่งขณะอบแห้งกับความชื้นสมดุลของวัสดุเป็นตัวบ่งชี้ถึงความเป็นไปได้ที่จะทำให้ความชื้นมีการถ่ายเทจากวัสดุออกไปสู่อากาศที่อยู่แวดล้อมในขณะนั้นได้ [2]

* Corresponding author: Tel.: 083-2081982. E-mail address: Jiraporn.Kaewdiew@gmail.com

ไอโซเทอมความชื้น (Moisture sorption isotherms) คือ ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุลของวัสดุ และความชื้นสัมพัทธ์สมดุลของอากาศ (Equilibrium relative humidity, ERH, of air) ณ อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง หากทำการทดลองหาค่าความชื้นสมดุลของวัสดุที่เปียกในภาชนะปิดสนิทที่มีความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศสูงมาก (ค่า RH เริ่มต้นใกล้เคียงหนึ่ง) จะได้ค่า EMC สูงมาก เมื่อทดลองในสภาวะอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำลงจะได้ค่า EMC ลดลงตาม และเมื่อทดลองในสภาวะอากาศที่มีความชื้นเพียงเล็กน้อย (ค่า RH ใกล้เคียงศูนย์) จะส่งผลให้มีค่า EMC ใกล้เคียงศูนย์ ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุลของวัสดุ และความชื้นสัมพัทธ์สมดุลของอากาศที่กำลังลดลงเรียกว่า ไอโซเทอมการคายความชื้น (Desorption isotherms) ในทางตรงกันข้าม หากทำการทดลองหาค่าความชื้นสมดุลของวัสดุที่แห้งในภาชนะปิดสนิทโดยมีความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศต่ำ (ค่า RH เริ่มต้นใกล้เคียงศูนย์) จะได้ค่า EMC ใกล้เคียงศูนย์ เมื่อทดลองในสภาวะอากาศที่มีความชื้นสูงขึ้นจะได้ค่า EMC สูงขึ้นตาม และเมื่อทดลองในอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูงมาก (ค่า RH ใกล้เคียงหนึ่ง) ค่า EMC ก็จะสูงมากด้วย ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุลของวัสดุ และความชื้นสัมพัทธ์สมดุลของอากาศที่เพิ่มขึ้นเรียกว่า ไอโซเทอมการดูดความชื้น (Adsorption isotherms) [3]

จุฑารัตน์ และคณะ (2557) ศึกษาแนวทางการอบแห้งปลาข้าวสารแทนการทอดด้วยน้ำมัน และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเอมพิริคัล เมื่อนำผลการทดลองมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบไม่เชิงเส้นผลการทดลองพบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page อธิบายจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งปลาข้าวสารจากการทดลองอบแห้งด้วยลมร้อน และรังสีอินฟราเรดได้ดีที่สุด [4]

Ponwiboon et al. (2017) ศึกษาแบบจำลองความชื้นสมดุลไอโซเทอมของปลานิลด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 5 รูปแบบได้แก่ Modified Halsey, Modified Oswin, Modified Henderson, Modified Chung & Pfoest และ Mujica model จากผลการศึกษาพบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Page มีความเหมาะสมในการอธิบายจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งปลานิลได้ดีที่สุด โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวสามารถนำไปใช้ทำนายหาค่าความชื้นของวัสดุทดสอบ ณ เวลาใดๆ ในกระบวนการอบแห้งได้อย่างถูกต้อง [5]

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุลที่สามารถอธิบายผลการทดลองสำหรับการอบแห้งปลาได้ดีที่สุดเพื่อนำไปใช้ทำนายค่าความชื้น ณ เวลาใดๆ นอกจากนี้ค่าความชื้นสมดุลยังเป็นตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบเครื่องอบแห้งอีกด้วย โดยค่าความชื้นสมดุลขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ [6]

วิธีการวิจัย

การหาความชื้นสมดุลของวัสดุมีหลักการคือ ปล่อยให้วัสดุสัมผัสกับอากาศจนความชื้นของวัสดุไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา การหาความชื้นสมดุลผู้วิจัยเลือกใช้วิธีเชิงสถิต (Static desiccator isotherm method) ซึ่งเป็นวิธีการปล่อยให้วัสดุสัมผัสอากาศในขณะที่ไม่มีมีการเคลื่อนที่ของอากาศ โดยทำการทดลองในภาชนะปิดที่ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิของอากาศให้คงที่ ซึ่งใช้สารละลายเกลืออิ่มตัวในการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศส่วนอุณหภูมิของอากาศจะถูกควบคุมด้วยตู้อบ [2] โดยปลาตากที่ใช้เป็นวัสดุทดสอบนั้นมีความชื้นเริ่มต้น 20%db ซึ่งค่าความชื้นเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลองทำการหาโดยการอบแห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 103 °C เป็นเวลา 72 h

ขั้นตอนการออกแบบเครื่องอบแห้งผู้วิจัยได้ทำการออกแบบให้สามารถทำการอบแห้งปลาตากได้ในช่วงอุณหภูมิ 40–70 °C ดังนั้นการศึกษาค่าความชื้นสมดุลไอโซเทอมของปลาตากจึงทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 50 60 และ 70 °C โดยวิธีเชิงสถิต ในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 0.1-0.9 เตรียมตัวอย่างปลาตากที่น้ำหนักเฉลี่ยเท่าๆ กัน แล้วนำไปวางบนตะแกรงภายในขวดแก้วปิดสนิทซึ่งบรรจุสารละลายเกลืออิ่มตัว 5 ชนิด คือ LiCl, $MgCl_2 \cdot 6H_2O$, NaCl, $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ และ KNO_3 ชนิดละ 3 ขวด ซึ่งจะหาค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 1 จากนั้นนำขวดแก้วเข้าตู้อบโดย

ควบคุมอุณหภูมิที่ 40 50 60 และ 70 °C ตามลำดับ และระหว่างการทดลองตัวอย่างของขึ้นปลาจะถูกนำออกมาข้างทุกๆ 24 h จนกระทั่งไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง จึงนำขึ้นปลาไปหาค่าความชื้นด้วยตู้อบที่อุณหภูมิ 103 °C เป็นเวลา 72 h

ตารางที่ 1 ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) ของสารละลายเกลืออิ่มตัว [6]

Temperature (°C)	Relative humidity (decimal)				
	LiCl	MgCl ₂ ·6H ₂ O	Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	NaCl	KNO ₃
40	0.1121	0.3160	0.4842	0.7468	0.8903
50	0.1110	0.3054	0.4630	0.7443	0.8478
60	0.1095	0.2926	0.4544	0.7450	0.8478
70	0.1080	0.2770	0.3940	0.8478	0.8478

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุล

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุล นิยมนำทฤษฎีทางเทอร์โมไดนามิกส์มาอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นสมดุลของวัสดุกับอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในรูปของสมการหรือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยแบบจำลองทางทฤษฎีไม่สามารถอธิบายความสัมพันธ์นั้นได้อย่างถูกต้องตลอดช่วงอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ แบบจำลองที่สร้างขึ้นจากการทดลองให้ความถูกต้องมากกว่าแบบจำลองทางทฤษฎี และกึ่งทฤษฎี โดยรูปแบบของสมการทางคณิตศาสตร์ที่นิยมใช้มีอยู่ 5 รูปแบบ คือ

1. สมการ Modified Halsey

รูปแบบสมการ Modified Halsey [7] แสดงความสัมพันธ์ของความชื้นสมดุลในวัสดุกับค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศ และอุณหภูมิดังนี้

$$M_{eq} = \left[\frac{\ln(RH) \times R(T+273)}{-C_1} \right]^{\frac{1}{C_2}} \quad (1)$$

เมื่อ

RH	คือ	ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ	เศษส่วน
M _{eq}	คือ	ความชื้นสมดุลของวัสดุ	%db
R	คือ	ค่าคงที่สากลของก๊าซ = 8.314	kJ/kg K
T	คือ	อุณหภูมิอากาศ	°C
C ₁ , C ₂ , C ₃	คือ	ค่าคงที่ของการอบแห้ง	

2. สมการ Modified Oswin

รูปแบบสมการ Modified Oswin [8] แสดงความสัมพันธ์ของความชื้นสมดุลในวัสดุกับค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศ ดังนี้

$$M_{eq} = (C_1 + C_2 T) \left(\frac{RH}{1-RH} \right)^{C_3} \quad (2)$$

3. สมการ Modified Chung & Pfof

รูปแบบสมการ Modified Chung & Pfof [9] แสดงความสัมพันธ์ของความชื้นสมมูลในวัสดุเกษตรกับค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศ และอุณหภูมิดังนี้

$$M_{eq} = -\frac{1}{C_2} \ln(C_1) + \frac{1}{C_2} \ln[-R(T+273)\ln(RH)] \quad (3)$$

4. สมการ Modified Henderson

รูปแบบสมการ Modified Henderson [10] แสดงความสัมพันธ์ของความชื้นสมมูลในวัสดุเกษตรกับค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศ และอุณหภูมิ ดังนี้

$$M_{eq} = \left[\frac{\ln(1 - RH)}{-C_1 \times (T+273)} \right]^{\frac{1}{C_2}} \quad (4)$$

5. สมการ Modified Mujica

รูปแบบสมการ Modified Mujica [11] แสดงความสัมพันธ์ของความชื้นสมมูลในวัสดุเกษตรกับค่าความชื้นสัมพัทธ์อากาศ และอุณหภูมิ ดังนี้

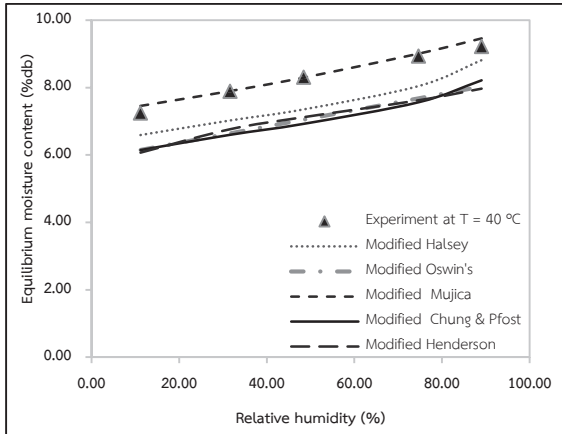
$$M_{eq} = \frac{1}{((C_1 T + C_2) - (C_3 T + C_4) RH)} \quad (5)$$

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

ในการวิเคราะห์ค่าความชื้นสมมูลไอโซเทอมของปลาดุก และนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของความชื้นสมมูล 5 รูปแบบ ได้แก่ Modified Halsey, Modified Oswin, Modified Mujica, Modified Chung & Pfof และ Modified Henderson มาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ในการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของความชื้นสมมูลด้วยโปรแกรม SigmaPlot 10.0 จะนำผลการทดลองมาวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้นแบบกำลังสองน้อยที่สุด ทำการเปรียบเทียบสมการต่างๆ โดยใช้ค่า Coefficient of determination (R^2), Standard Error of Estimate (SEE) และค่า Root mean square error (RMSE) สำหรับการพิจารณาสมการที่มีค่า R^2 สูงสุด มีค่า SEE และ RMSE ต่ำที่สุด สามารถอธิบายผลการทดลองได้ดีที่สุด [3] [4] ผลการทดลองหาความชื้นสมมูลของปลาดุกแห้ง ที่ความชื้น 20%db ภายใต้ที่อุณหภูมิ 40, 50, 60 และ 70 °C ดังแสดงในภาพที่ 1 ถึง 4 พบว่า ที่อุณหภูมิเดียวกันค่าความชื้นสมมูลจะขึ้นอยู่กับค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ โดยค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ต่ำจะส่งผลให้ค่าความชื้นสมมูลของปลาดุกมีปริมาณต่ำ ในขณะที่หากค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมีค่าสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าความชื้นสมมูลของปลาดุกสูงขึ้นตาม เมื่อทำการพิจารณาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อความชื้นสมมูลของปลาดุกพบว่า ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเดียวกันหากอุณหภูมิมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าความชื้นสมมูลของปลาดุกจะมีค่าลดลง [2] [12] ซึ่งเป็นผลมาจากสภาวะการกระตุ้นที่สูงขึ้นเนื่องจากโมเลกุลของน้ำที่อุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดการลดลงของแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของน้ำ

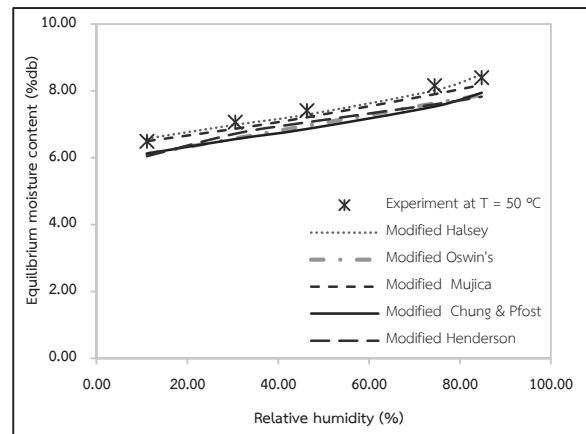
เมื่อทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าความชื้นสมมูลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้ง 5 รูปแบบกับค่าความชื้นสมมูลจากการทดลอง โดยค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2 และ 3 จากผลการศึกษาพบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมมูล Modified Mujica สามารถอธิบายผลการทดลองได้ดีที่สุด

ตามความสัมพันธ์คือ $M_{eq} = 1 / [(0.0021T + 0.0555) - (6.7445 \times 10^{-6}T + 9.3986 \times 10^{-5})RH]$ มีค่า R^2 สูงที่สุด ได้แก่ 0.9910 โดยมีค่า SEE และ RMSE ต่ำที่สุด ได้แก่ 0.1763 และ 0.0124 ซึ่งมีความเหมาะสมในการทำนายค่าความชื้นสมดุลของปลาตุ๋กที่อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ สอดคล้องกับการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา [5] ผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าความชื้นสมดุลที่ได้จากการทดลอง และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Modified Mujica สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 5



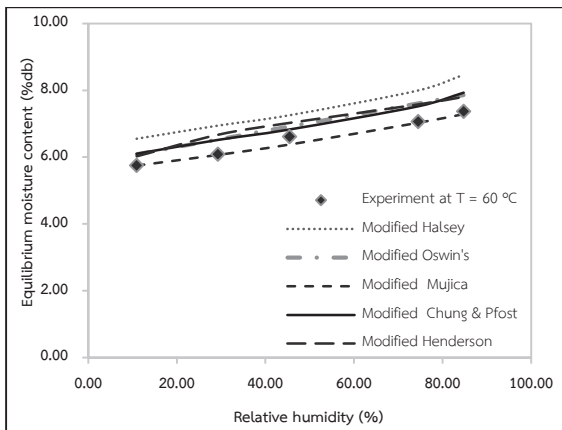
ภาพที่ 1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุลเทียบ

กับผลการทดลองที่อุณหภูมิ 40 °C



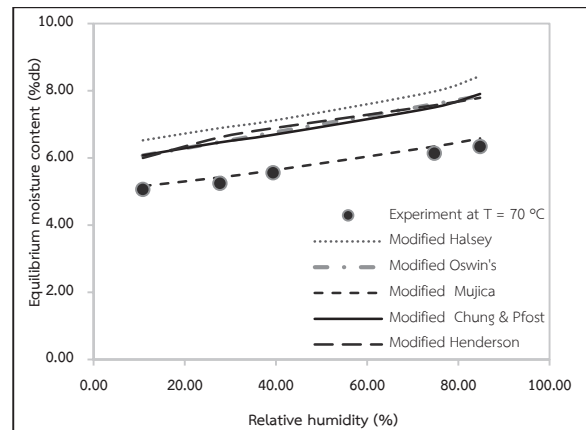
ภาพที่ 2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุลเทียบ

กับผลการทดลองที่อุณหภูมิ 50 °C



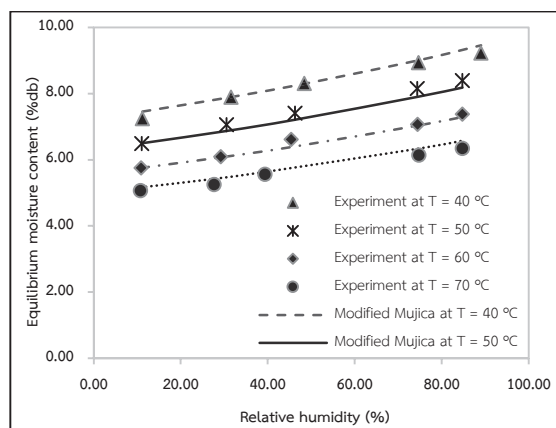
ภาพที่ 3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุลเทียบ

กับผลการทดลองที่อุณหภูมิ 60 °C



ภาพที่ 4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุลเทียบ

กับผลการทดลองที่อุณหภูมิ 70 °C



ภาพที่ 5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุล Modified Mujica เทียบกับผลการทดลอง

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุล

ค่าพารามิเตอร์	Modified Halsey	Modified Oswin's	Modified Mujica	Modified Chung & Pfof	Modified Henderson
C_1	6.4686×10^{-9}	2.6215	0.0021	3.5179×10^7	13.5580
C_2	-10.1171	-0.0196	0.0555	-141.9563	3.3314
C_3	-	-0.2285	6.7445×10^{-6}	-	-
C_4	-	-	9.3986×10^{-5}	-	-
R^2	0.6122	0.7075	0.9910	0.6791	0.5132
SEE	1.3699	0.9022	0.1763	1.1147	3.3096
RSME	0.5480	0.3458	0.0124	0.4459	1.3238

ตารางที่ 3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุล

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	รูปแบบสมการไอโซเทอมของการอบแห้งปาลูด
Modified Halsey	$M_{eq} = \left[\frac{\ln(RH) \times R(T+273)}{-6.4686 \times 10^{-9}} \right]^{\frac{1}{-10.1171}}$
Modified Oswin	$M_{eq} = (2.6215 - 0.0196T) \left(\frac{RH}{1-RH} \right)^{-0.2285}$
Modified Mujica	$M_{eq} = \frac{1}{((0.0021T+0.0555)-(6.7445 \times 10^{-6}T+9.3986 \times 10^{-5})RH)}$
Modified Chung & Pfof	$M_{eq} = -\frac{1}{-141.9563} \ln(3.5179 \times 10^7) + \frac{1}{-141.9563} \ln[-R(T+273) \ln(RH)]$
Modified Henderson	$M_{eq} = \left[\frac{\ln(1-RH)}{-13.5580 \times (T+273)} \right]^{\frac{1}{3.3314}}$

สรุปผลการวิจัย

การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความชื้นสมดุลของปลาตากพบว่า ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อค่าความชื้นสมดุลในวัสดุทดสอบได้แก่ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ และอุณหภูมิ เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่มีผลต่อความชื้นสมดุลของปลาตากพบว่า ที่อุณหภูมิเดียวกันหากค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ต่ำจะส่งผลให้ค่าความชื้นสมดุลของปลาตากมีปริมาณต่ำ ในขณะที่อุณหภูมิเดียวกันหากค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมีค่าสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าความชื้นสมดุลของปลาตากสูงขึ้นตาม เมื่อทำการพิจารณาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อความชื้นสมดุลของปลาตากพบว่า ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเดียวกันหากอุณหภูมิมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าความชื้นสมดุลของปลาตากจะมีค่าลดลง โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Modified Mujica สามารถอธิบายผลการทดลองได้ดีที่สุด โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในการทำนายค่าความชื้น ณ เวลาใดๆ ในกระบวนการอบแห้งปลาตากได้อย่างถูกต้อง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัยจากวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ "โครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงาน ในกลุ่มประเทศอาเซียนในระดับบัณฑิตศึกษา"

ขอขอบคุณวิภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ให้การสนับสนุนการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณ "ทุนอุดหนุนการวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปี 2561"

เอกสารอ้างอิง

- [1] กลุ่มวิจัยและวิเคราะห์สถิติการประมง. 2555. **แผนแม่บทการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำของประเทศไทย (ฉบับร่าง) ปี พ.ศ.2555-2559.**
- [2] มารินา มะหนิ, อรรวิ เกียรติไพศาลโสภณ และอุษาวดี ต้นติวานุรักษ์. 2558. **ความชื้นสมดุลไอโซเทอมของข้าว.** วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ ฉบับพิเศษจากงานประชุมวิชาการระดับชาติมหาวิทยาลัยทักษิณ ครั้งที่ 25,18(3), 215-220.
- [3] ชนันท์ ราชภูนิม และสุนทร สืบคำ. 2555. **การทำไอโซเทอมความชื้นของวัสดุที่แลกเปลี่ยนความชื้นได้ดี.** วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย, 18(1), 43-51.
- [4] จุฑารัตน์ ทะสระระ, สุวรรณ ฐิระวณิชกุล และยุทธนา ฐิระวณิชกุล. 2557. **แนวทางการพัฒนาปลาข้าวสารกรอบด้วยการอบแห้งลมร้อนและรังสีอินฟราเรด.** วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา, 19(1), 1-10.
- [5] Ponwiboon, N. and Rojanakorn, T. 2017. **Desorption isotherms and drying characteristics of Nile tilapia fish sheet.** International Food Research Journal, 24(3), 1292-1300.
- [6] Bala, B.K. 1997. **Drying and storage of cereal grains.** Oxford and IBH Publishing Co, PVT.Ltd, New Belhi302.
- [7] Halsey, G. 1948. **Physical adsorption on non-uniform surface.** Chemical Physics, 16(931).
- [8] Oswin, C.R. 1946. **The kinetic package life III, The Isotherm.** Chemical Technology and Biotechnology, (London), 64(419).
- [9] Chung, D.S. and Pfoest, H.B. 1967. **Adsorption and desorption of water vapor by cereal grains and their product.** ASAE, 10(549-557).
- [10] Henderson, S.M. 1952. **A basic concept of equilibrium.** Agricultural Engineering,33(29-31).

- [11] Comaposada, J., Gou, P., Pakowski, Z. & Arnau, J. 2000. **Desorption isotherms for pork meat at different NaCl contents and temperatures.** Drying Technology, 13(3), 723-746.
- [12] Chen, C.C. & Tao, C.T. 1994. **Effective factors on equilibrium relative humidity of agricultural products.** Journal of Agricultural Research China, 43(1), 93-112.

การวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านชีวภาพจากแกลบและซังข้าวโพดเพื่อปรับปรุงดิน

Analysis of Biochar Properties from Rice Husk and Corn Cob for Soil Improvement

ประภัสสร รัตนไพบูลย์¹ นิกราน หอมดวง^{1*} ณัฐวุฒิ ดุษฎี¹ ภคมน ปินตานา และชูรัตน์ ธารารักษ์¹

¹ สาขาวิศวกรรมพลังงานทดแทน วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290

บทคัดย่อ

ถ่านชีวภาพมีประโยชน์ต่อการปรับปรุงดินสำหรับการเพาะปลูก ดังนั้นงานวิจัยจึงมีวัตถุประสงค์วิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านชีวภาพด้วยการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 500 °C ระยะเวลา 60 min ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่ 5 L/min โดยใช้เครื่องผลิตถ่านชีวภาพแบบนำร่อง (Pilot Scale) โดยใช้ชีวมวลแกลบ และซังข้าวโพด ผลการศึกษาพบว่า ถ่านชีวภาพมีคาร์บอนเพิ่มสูงขึ้นโดยคิดเป็น 25.16-37.54% และให้ค่าความร้อนของถ่านชีวภาพแกลบและซังข้าวโพดเพิ่มสูงขึ้นคือ 18.32 และ 24.85 MJ/kg ตามลำดับ การวิเคราะห์โครงสร้างความเป็นรูพรุนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ถ่านชีวภาพมีความเป็นรูพรุนเพิ่มสูงขึ้น โดยมีพื้นที่ผิวอยู่ในช่วง 7.16.11-8.20 m²/g ปริมาตรรูพรุนอยู่ในช่วง 0.0052-0.0091 cm³/g และความกว้างของรูพรุนอยู่ในช่วง 67.30-65.02 Å เมื่อนำถ่านชีวภาพมาใช้กับดินส่งผลให้ดินมีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการเพาะปลูกมากขึ้น โดยมีค่า pH อยู่ในช่วง 7.03-7.08 ค่าสภาพการนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง 30.87-31.14 µS/cm และความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกอยู่ในช่วง 44.99-51.22 cmol/kg

คำสำคัญ: ถ่านชีวภาพ ชีวมวล แกลบ ซังข้าวโพด

บทนำ

ดินเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญในการเพาะปลูกสำหรับอาชีพเกษตรกรรมของคนไทย โดยประเทศไทยมีพื้นที่ในการเพาะปลูกทั้งหมด 149.25 ล้านไร่ และการเกษตรกรรมเป็นอาชีพที่สร้างรายได้หลักให้กับประเทศ มีมูลค่าในการส่งออก 8,085,563 ล้านบาท ในปี พ.ศ. 2561 [1] ปัจจุบันประเทศไทยประสบปัญหาดินเสื่อมคุณภาพ เนื่องจากการใช้สารเคมีและการกำจัดวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่เป็นชีวมวลภายหลังการเก็บเกี่ยวด้วยการเผาในที่โล่งแจ้ง นอกจากส่งผลให้ดินเสื่อมสภาพแล้วยังก่อให้เกิดปัญหาหมอกควันซึ่งเป็นมลพิษทางอากาศและสิ่งแวดล้อม ด้วยปัญหาดังกล่าวจึงต้องมีการพัฒนาปรับปรุงและบำรุงดิน การใช้ถ่านชีวภาพเพื่อปรับปรุงคุณภาพดินเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวาง [2] ถ่านชีวภาพเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแยกสลายทางความร้อนที่เรียกว่า ไพโรไลซิส ด้วยกระบวนการทางความร้อนในการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยปราศจากอากาศหรือมีปริมาณอากาศอย่างจำกัด [3] ถ่านชีวภาพที่ได้จะมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบประกอบหลัก ซึ่งมีคุณสมบัติความเป็นรูพรุนสูง สามารถกักเก็บคาร์บอนไว้ในดินได้นาน เป็นแหล่งกักเก็บอาหาร ความชื้น และเป็นแหล่งที่อยู่อาศัยของจุลินทรีย์ที่ช่วยย่อยอาหารให้แก่พืชทำให้ดินมีความอุดมสมบูรณ์ [4] นอกจากนี้ถ่านชีวภาพยังมีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการนำมาใช้ในรูปแบบพลังงาน เพราะมีค่าความร้อนที่สูงกว่าถ่านไม้ทั่วไป ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการผลิตถ่านและวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านชีวภาพ ได้แก่ แกลบ และซังข้าวโพด ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 500 °C ระยะเวลา 60 min ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมต่อการผลิตถ่านชีวภาพเนื่องจากเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสย่อยสลายได้สมบูรณ์ได้องค์ประกอบของคาร์บอนสูง [5] เหมาะแก่การใช้งาน

* Corresponding author: Tel.: 084-1773632 E-mail: nigranghd@gmail.com

ในด้านปรับปรุงคุณภาพของดินสำหรับเพาะปลูกและช่วยลดปัญหาทางด้านหมอกควัน โดยทำการศึกษาในส่วนของคุณสมบัติทางเคมี และคุณสมบัติทางด้านการเกษตรของถ่านชีวภาพที่มีผลต่อการปรับปรุงดิน

วิธีการวิจัย

เครื่องมือในการผลิตถ่านชีวภาพ

การทดสอบผลิตถ่านชีวภาพด้วยกระบวนการไพโรไลซิส โดยใช้เครื่องผลิตถ่านชีวภาพแบบนำร่อง (Pilot Scale) ซึ่งเป็นเครื่องมือผลิตถ่านชีวภาพในห้องปฏิบัติการ สามารถใส่ชีวมวลได้ 3 kg ใช้ก๊าซหุงต้มเป็นแหล่งความร้อน ซึ่งในกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพจากชีวมวลจะได้รับความร้อนพร้อมทั้งเกิดการหมุนของห้องเผาไหม้ซึ่งมีมอเตอร์ขนาด 0.75 hp แรงดันไฟฟ้า 220 V อัตราการหมุน 1,430 rpm วัดอุณหภูมิห้องเผาไหม้ด้วย Data Logger โดยใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด k พร้อมทั้งมีการป้อนก๊าซไนโตรเจนเข้าสู่ห้องเผาไหม้มีอัตราการไหลของก๊าซเฉลี่ย 5 L/min

วิธีการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ใช้แกลบ และซังข้าวโพดเป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านชีวภาพ โดยนำชีวมวลทั้ง 2 ชนิด ลดความชื้นอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 °C และบดย่อยให้ได้ขนาด 3 mm จากนั้นนำไปทดสอบกับเครื่องมือผลิตถ่านชีวภาพที่อุณหภูมิไพโรไลซิส คือ 500 °C เป็นระยะเวลา 60 min โดยใช้ก๊าซไนโตรเจนไหลเวียนในกระบวนการ แล้วนำถ่านชีวภาพที่ได้ไปทดสอบคุณสมบัติทางเคมีด้วยการวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate analysis) ค่าความร้อน (High heating value: HHV) และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ความเป็นรูพรุน (Porosity) และวิเคราะห์ทางการเกษตรประกอบด้วย ความเป็นกรดต่าง (pH) สภาพการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity: EC) และความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation exchange capacity: C.E.C)

การวิเคราะห์คุณสมบัติถ่านชีวภาพ

การวิเคราะห์คุณสมบัติถ่านชีวภาพทางเคมี ด้วยการวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate analysis) ตามมาตรฐาน ASTM D 3172-3175 ค่าความร้อน (High heating value: HHV) ตามมาตรฐาน ASTM D 5865 และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ การศึกษาโครงสร้างความเป็นรูพรุนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) ที่สถาบันบริการตรวจสอบคุณภาพและมาตรฐานผลิตภัณฑ์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ การวิเคราะห์ปริมาณรูพรุนและพื้นที่ผิวรูพรุนและด้วย (The Brunauer, Emmett and Teller: BET) ที่สำนักวิจัยและบริการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี สำหรับการวิเคราะห์คุณสมบัติทางการเกษตรได้ทำการวิเคราะห์ให้น้ำถ่านชีวภาพผสมกับดินในอัตราส่วน 1,000 kg/ไร่คลุกเคล้าให้เข้ากับดิน [6] ซึ่งเป็นอัตราส่วนสำหรับในการปลูกพืช การวิเคราะห์ประกอบด้วย ความเป็นกรดต่าง (pH) และสภาพการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity: EC) ด้วยเครื่อง multi-parameter analysis โดยใช้อัตราส่วนดิน:น้ำ คือ 1:10 และความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation exchange capacity: C.E.C) [7]

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

คุณสมบัติทางเคมีของถ่านชีวภาพ

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีโดยวิธีการวิเคราะห์โดยประมาณของถ่านชีวภาพ พบว่าแกลบและซังข้าวโพดมีค่าความชื้นอยู่ในช่วง 6.38 ± 0.05 - $11.45 \pm 0.16\%$ สารระเหยมีค่าอยู่ในช่วง 83.23 ± 2.19 - $69.58 \pm 2.28\%$ ถ้าอยู่ในช่วง 2.40 ± 0.66 - $17.92 \pm 0.36\%$ และคาร์บอนคงตัวอยู่ในช่วง 2.91 ± 2.66 - $6.12 \pm 2.01\%$ ผลของการเพิ่มอุณหภูมิไพโรไลซิสส่งผลให้ถ่านชีวภาพแกลบและซังข้าวโพดมีค่าความชื้น สารระเหยลดลง ทั้งนี้เกิดจากการระเหยน้ำภายในชีวมวล และ

สลายตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ในทางตรงกันข้ามสัดส่วนของเถ้าและคาร์บอนคงตัวเพิ่มสูงขึ้น [5] การเพิ่มขึ้นของคาร์บอนคงตัวนี้ส่งผลให้ค่าความร้อนและความเป็นรุกรานของถ่านชีวภาพเพิ่มสูงขึ้นเฉลี่ยอยู่ในช่วง 18.34-32.15% [8] ดังตารางที่ 1 สำหรับการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของชีวมวลและถ่านชีวภาพ พบว่าถ่านชีวภาพแกลบและซังข้าวโพดมีคาร์บอนเพิ่มขึ้นคือ $52.59 \pm 0.13\%$ และ $71.41 \pm 0.11\%$ ตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณออกซิเจนของถ่านชีวภาพแกลบและซังข้าวโพดมีปริมาณลดลงอยู่ที่ $7.45 \pm 0.22\%$ และ $10.26 \pm 0.09\%$ ตามลำดับ ดังตารางที่ 2 เนื่องจาก การสลายตัวของสารลิกนินในชีวมวล ซึ่งการเพิ่มขึ้นของคาร์บอนจะขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวล [9] ดังตารางที่ 2 สังเกตได้ว่าซังข้าวโพดมีคาร์บอนสูงกว่าแกลบ ส่งผลให้ถ่านชีวภาพซังข้าวโพดมีคาร์บอนสูงกว่าถ่านชีวภาพแกลบ

ตารางที่ 1 การวิเคราะห์โดยประมาณและค่าความร้อนของชีวมวล และถ่านชีวภาพ

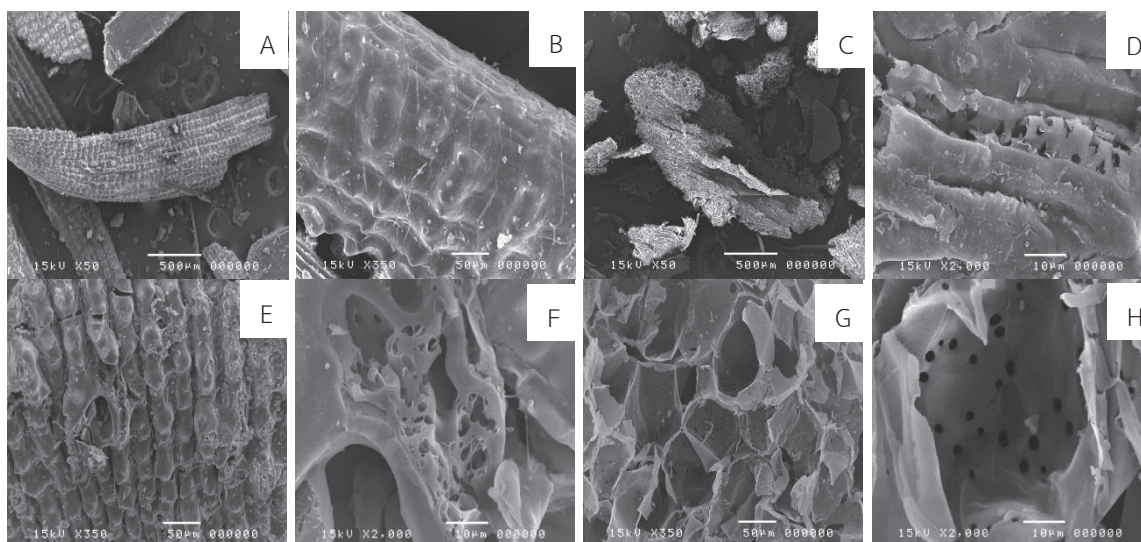
Proximate analysis	แกลบ	ซังข้าวโพด	ถ่านชีวภาพแกลบ	ถ่านชีวภาพซังข้าวโพด
ความชื้น (%)	6.38 ± 0.05	11.45 ± 0.16	0.20 ± 0.04	1.78 ± 0.10
สารระเหย (%)	69.58 ± 2.28	83.23 ± 2.19	29.87 ± 2.52	33.05 ± 0.52
เถ้า (%)	17.92 ± 0.36	2.40 ± 0.66	37.63 ± 0.65	16.13 ± 2.06
คาร์บอนคงตัว (%)	6.12 ± 2.01	2.91 ± 2.66	32.30 ± 2.84	19.04 ± 1.98
ค่าความร้อน (MJ/kg)	14.96 ± 33.00	16.86 ± 35.00	18.32 ± 62	24.85 ± 426

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุของชีวมวล และถ่านชีวภาพ

Ultimate analysis	แกลบ	ซังข้าวโพด	ถ่านชีวภาพแกลบ	ถ่านชีวภาพซังข้าวโพด
คาร์บอน (%)	39.36 ± 0.17	44.76 ± 0.47	52.59 ± 0.13	71.41 ± 0.11
ออกซิเจน (%)	38.53 ± 0.49	43.99 ± 0.41	7.45 ± 0.22	10.26 ± 0.09
ไนโตรเจน (%)	0.35 ± 0.00	0.52 ± 0.00	0.49 ± 0.12	0.85 ± 0.02
ไฮโดรเจน (%)	5.29 ± 0.02	5.89 ± 0.02	2.21 ± 0.05	3.06 ± 0.01
ซัลเฟอร์ (%)	0.03 ± 0.00	0.04 ± 0.00	0.02 ± 0.00	0.03 ± 0.00

ความเป็นรุกรานของถ่านชีวภาพ

การศึกษาลักษณะโครงสร้างความเป็นรุกรานของถ่านชีวภาพ พบว่าชีวมวลทั้ง 2 ชนิดมีลักษณะโครงสร้างพื้นผิวที่แตกต่างกัน ดังภาพที่ 1 (A), (B), (C) และ (D) เมื่อทำการไพโรไลซิสถ่านชีวภาพแกลบและซังข้าวโพดมีความเป็นรุกรานสูงขึ้น ดังภาพที่ 1 (E), (F), (G) และ (H) ซึ่งเกิดจากการการหลุดออกของสารระเหย ทำให้มีโครงสร้างคาร์บอนเสถียรเพิ่มสูงขึ้น [10] ซึ่งรุกรานนี้แสดงให้เห็นถึงความสามารถการดูดซับ และการควบคุมการปล่อยแร่ธาตุรวมถึงน้ำในดินได้ดี [11] จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET พบว่าถ่านชีวภาพแกลบและซังข้าวโพดมีพื้นที่ผิว $7.16.11$ และ $8.20 \text{ m}^2/\text{g}$ ตามลำดับ ปริมาตรรุกราน 0.0052 และ $0.0091 \text{ cm}^3/\text{g}$ ตามลำดับ และความกว้างของรุกรานคือ 67.30 และ $65.02 \text{ \AA}$ ตามลำดับ



ภาพที่ 1 ลักษณะโครงสร้างรูพรุนของชีวมวลและถ่านชีวภาพ (A) แกลบกำลังขยาย 50X (B) แกลบกำลังขยาย 350X (C) ชังข้าวโพดกำลังขยาย 50X (D) ชังข้าวโพดกำลังขยาย 2,000X (E) ถ่านชีวภาพแกลบกำลังขยาย 350X (F) ถ่านชีวภาพแกลบกำลังขยาย 2,000X (G) ถ่านชีวภาพชังข้าวโพดกำลังขยาย 350X (H) ถ่านชีวภาพชังข้าวโพดกำลังขยาย 2,000X

คุณสมบัติทางการเกษตร

การวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านชีวภาพเมื่อนำมาใช้กับดิน ดังตารางที่ 3 พบว่า pH ของดินมีความเป็นกลาง ยิ่งขึ้นโดยดินผสมถ่านชีวภาพแกลบและชังข้าวโพดมีค่า pH เฉลี่ยอยู่ที่ 7.03 ± 0.06 และ 7.08 ± 0.01 ตามลำดับ ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมของต่อการทำงานของจุลินทรีย์ในดินซึ่งมีค่า pH อยู่ประมาณ 7 [12] ในขณะที่สภาพการนำไฟฟ้าซึ่งบ่งบอกถึงระดับความเค็มของดินมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยอยู่ในช่วง 30.87 ± 1.31 - 31.14 ± 0.23 ($\mu\text{S}/\text{cm}$) ซึ่งเกิดจากการคาร์บอนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดเกลืออัลคาไลในถ่านชีวภาพเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้สภาพการนำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น [13] ซึ่งเป็นช่วงระดับความเค็มที่ต่ำไม่เกิน $4,000 \mu\text{S}/\text{cm}$ ซึ่งไม่มีผลกระทบต่อการใช้พืช [14] สำหรับความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกบ่งบอกถึงความอุดมสมบูรณ์ของดิน พบว่าการผสมดินกับถ่านชีวภาพแกลบและชังข้าวโพดส่งผลให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกเพิ่มสูงขึ้น 51.22 ± 4.23 และ $44.99 \pm 1.15 \text{ cmol/kg}$ ตามลำดับ ซึ่งเกิดจากสัดส่วนถ่านชีวภาพเพิ่มสูงขึ้นซึ่งส่งผลให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกสูงตามไปด้วย [15] โดยการเพิ่มขึ้นของความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกนี้ส่งผลให้ถ่านชีวภาพทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและน้ำในดินเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน กระตุ้นให้เกิดการจับตัวของเม็ดดิน และช่วยให้พืชสามารถจับธาตุอาหารจากดินได้ดีขึ้น [16]

ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางการเกษตรของดินและถ่านชีวภาพ

เงื่อนไข	pH	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	C.E.C (cmol/kg)
ดิน	6.76 ± 0.02	29.47 ± 0.50	27.74 ± 16.17
ถ่านชีวภาพแกลบ	9.27 ± 0.06	270.00 ± 23.58	178.71 ± 10.41
ถ่านชีวภาพชังข้าวโพด	8.59 ± 0.04	$1,340.00 \pm 10.00$	123.17 ± 2.86
ดินผสมถ่านชีวภาพแกลบ	7.03 ± 0.06	30.87 ± 1.31	51.22 ± 4.23
ดินผสมถ่านชีวภาพชังข้าวโพด	7.08 ± 0.01	31.14 ± 0.23	44.99 ± 1.15

สรุปผลการวิจัย

ถ่านชีวภาพจากการไพโรไลซิสมีคาร์บอนเพิ่มสูงขึ้น 25.16-37.54% ซึ่งนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนและความเป็นรุกรานของถ่านชีวภาพที่เป็นคุณสมบัติสำคัญในการปรับปรุงคุณภาพของดิน ถ่านชีวภาพมีพื้นที่ผิวอยู่ในช่วง 7.16-11-8.20 m²/g ปริมาตรรูพรุนอยู่ในช่วง 0.0052-0.0091 cm³/g และความกว้างของรูพรุนอยู่ในช่วง 67.30-65.02 Å เมื่อนำถ่านชีวภาพมาใช้กับดินส่งผลให้ดินมีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการเพาะปลูกมากขึ้น โดยมีค่า pH อยู่ในช่วง 7.03-7.08 ค่าสภาพการนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง 30.87-31.14 μS/cm และความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกอยู่ในช่วง 44.99-51.22 cmol/kg

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ศูนย์วิจัยพลังงาน/ศูนย์ความเป็นเลิศด้านวิศวกรรมพลังงาน สิ่งแวดล้อมและภัยพิบัติหมอกควัน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่สนับสนุนอุปกรณ์เครื่องมือ และสถานที่ในการวิจัย ขอขอบคุณโครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางพลังงานทดแทน ในกลุ่มประเทศอาเซียนในระดับบัณฑิตศึกษา บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยแม่โจ้ กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) กระทรวงพลังงาน และสำนักคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ภายใต้โครงการไทย-จีน ที่สนับสนุนงบประมาณในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] ศูนย์สารสนเทศการเกษตร. (2562). สถิติการค้าสินค้าเกษตรไทยกับต่างประเทศ ปี 2561. สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (กระทรวงเกษตรและสหกรณ์)
- [2] Simon Shackley, Saran Sohi, Stuart Haszeldine, David Manning and Ondrej Masek. (2009). Biochar, reducing and removing CO₂ while improving soils: A significant and sustainable response to climate.
- [3] เบญจพร เครือเทศน์ไชย. 2557. การวิเคราะห์พารามิเตอร์และต้นทุนการผลิตถ่านชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมมหาบัณฑิต เชียงใหม่ : มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [4] ทิวา ดันสถิตย์, สุธรรม โรจนเมฆา และธนากร เทพวงษ์. 2559. การผลิตไบโอชาร์จากตอซังและฟางข้าวเพื่อการอุ้มน้ำในดิน. การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ครั้งที่ 1. 1, (401-410).
- [5] Xin Jiat Lee, Lai Yee Lee, Suyin Gan, Suchithra Thangalazhy-Gopakumar and Hoon Kiat Ng. 2017. Biochar Potential Evaluation of Palm Oil Wastes Through Slow Pyrolysis: Thermochemical Characterization and Pyrolytic Kinetic Studies. Bioresource Technology. 2017(236), 155-163.
- [6] เกศศิริพันธ์ แสงมณี, จิตรยา จารุจิตร และพิชญ์ชัย ทองนวรรณ์. (2560). การศึกษาชนิดและอัตราส่วนของถ่านชีวภาพต่อสมบัติของดิน การเจริญเติบโต ผลผลิต และคุณภาพกระเจี๊ยบเขียวที่ปลูกในพื้นที่เปรี้ยวจัด. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. (มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร)
- [7] จำเป็น อ่อนทอง. 2545. คู่มือ การวิเคราะห์ดินและพืช. ภาควิชาธรณีศาสตร์ คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [8] Frederik Ronsse, Sven Van Hecke, Dane Dickinson and Wolter Prins. 2013. Production and Characterization of Slow Pyrolysis Biochar: Influence of Feedstock Type and Pyrolysis.

- Conditions. **GLOBAL CHANGE BIOLOGY BIOENERGY**. 2013(5), 104-115.
- [9] Yan Yue, Qimei Lin, Yunqing Xu, Guitong Li and Xiaorong Zhao. 2017. Slow Pyrolysis as a Measure for Rapidly Treating Cow Manure and The Biochar Characteristics. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**. 2017(124), 355-361.
- [10] B. Purevsuren, B. Avid, B. Tesche and YA. Davaajav. 2003. A Biochar from Casein and Its Properties. **JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE**. 38(2003), 2347-2351.
- [11] Estela M. C. C. Batista, Juliana Shultz, TassyaT. S. Matos, Mayara R. Fornari, Thuany M. Ferreira, Bruno Szpoganicz, RiltonA. de Freitas and Antonio S. Mangrich. 2018. Effect of Surface and Porosity of Biochar on Water Holding Capacity Aiming Indirectly at Preservation of The Amazon Biome. **SCIENTIFIC REPORTS**. 2018(8), 1-9.
- [12] Johannes Lehmann, Matthias C. Rillig, Janice Thies, Caroline A. Masiello, William C. Hockaday and David Crowley. 2011. Biochar Effects on Soil Biota-A Review. **Soil Biology & Biochemistry**. 43(2011), 1812-1836.
- [13] Tasneem Shah, Sara and Zahir Shah. 2017. Soil Respiration, pH and EC as Influenced by Biochar. **Soil Environ**. 36(1), 77-83.
- [14] นันทรัตน์ ศุภกานี. 2558. **การจัดการดินและปุ๋ยสำหรับพืชสวน**. สถาบันวิจัยพืชสวน กรมวิชาการเกษตร
- [15] Asli Toptas Tag, Gozde Duman, Suat Ucar and Jale Yanik. 2016. Effects of feedstock type and pyrolysis temperature on potential applications of biochar. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**. 2016(120), 200-206.
- [16] เสาวคนธ์ เหมวงษ์. 2556. ถ่านชีวภาพ: การกักเก็บคาร์บอน และความอุดมสมบูรณ์ของดิน. **วารสารเกษตรพระจอมเกล้า**. 31(1), 104-113.



วารสารวิชาการ
**พลังงานทดแทน
สู่ชุมชน**



J-REC

JOURNAL OF RENEWABLE ENERGY
FOR COMMUNITY

สมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110 อีเมล : treca.2012@gmail.com โทร : 02 549 3497