

วารสารวิชาการ

# พลังงาน ทดแทน สู่ชุมชน

ปีที่ 2 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม-เมษายน 2562



## J-REC

JOURNAL OF  
RENEWABLE ENERGY  
FOR COMMUNITY

ISSN 2630-0273

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 และผู้สนใจทำผลงานทางด้านพลังงานทดแทนที่เป็นประโยชน์ต่อสังคมและประเทศชาติ
4. เพื่อเป็นเอกสารรวบรวมรายงานวิจัยและบทความทางวิชาการที่มีคุณภาพและมีคุณค่าทางด้านพลังงานทดแทนสู่การปฏิบัติงานจริงเพื่อความยั่งยืนทางด้านพลังงานของประเทศไทย



เจ้าของและลิขสิทธิ์ สมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย  
ที่ตั้งสมาคมฯ ศูนย์วิจัยและบริการด้านพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
39 ม.1 ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110  
โทร. 0-2549-3497 [www.reca.or.th](http://www.reca.or.th)

### วารสารวิชาการพลังงานทดแทนสู่ชุมชน

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

### พิมพ์ที่บริษัท ทริปเฟิล กรุ๊ป จำกัด

95 ถ.แจ้งวัฒนะ ซ.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.อิสสระีย์ ทรรษาจรรยาโรจน์  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญเรือง มะรังศรี  
นาย มนตรี ซาลีเครือ  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรี ศรีนนท์ฉัตร  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วราภรณ์ อริยวิริยะนันท์  
รองศาสตราจารย์ ดร.บุญยั้ง ปลั่งกลาง  
พลโท กฤตภาส คงคาพิสุทธ์  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนิต เรืองรุ่งชัยกุล  
พลอากาศโทเอกราช ซาติชัย  
นายวิชัย เพ็ชรทองคำ  
นายวิสูตร ยังพลพันธ์  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญณัฏฐ์ ประสาทแก้ว  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อำนาจ เรืองวารี  
อาจารย์สมควร แหวดี  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย มณีวรรณ  
ดร.วรจิตต์ เศรษฐพรศักดิ์  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จอมภพ แหวศักดิ์  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ปรีชา ศรีประภาคาร  
ดร.อำพล อาภาธนากร  
ดร.ภาสวรรณ วิชรดำรงค์ศักดิ์  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิสิษฐ์ มณีโชติ  
หม่อมหลวงลือศักดิ์ จักรพันธ์  
นายพิเนตร พรสวรรค์  
นายสุภิตเดช แก้วศรีสด

นายกสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย  
ที่ปรึกษาสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย  
ที่ปรึกษาสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย  
ที่ปรึกษาสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย  
ที่ปรึกษาสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย  
เลขาธิการสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย  
กรรมการสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย  
กรรมการสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย  
กรรมการสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย  
กรรมการสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย  
กรรมการสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย  
กรรมการสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย  
กรรมการสมาคมฯ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
กรรมการสมาคมฯ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
กรรมการสมาคมฯ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
กรรมการสมาคมฯ มหาวิทยาลัยนเรศวร  
กรรมการและประชาสัมพันธ์สมาคมฯ  
อุปนายกภาคใต้  
อุปนายกภาคตะวันออกเฉียงเหนือ  
อุปนายกภาคกลาง  
อุปนายกภาคเหนือตอนบน  
อุปนายกภาคเหนือตอนล่าง  
อุปนายกภาคตะวันออก  
ปฏิคมสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย  
นายทะเบียนสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย  
และสมาชิกสามัญสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย



## รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เริงวุฒิ ชูเมือง  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ มาริณา มะหนิ  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุรเชษฐ์ เพชรห้วยลึก  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย เทพนวล  
ผู้ช่วยเลขานุการดร. นันทพันธ์ นภัทรานันท์  
ดร.พลกฤษณ์ คล้ายวิวัฒน์  
ดร.รวมพร นิคม  
ดร.โชคชัย เหมือนมาศ  
รองศาสตราจารย์ ดร.สมรักษ์ เกิดสุวรรณ  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติ นิลฝั่ง  
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.ณัฐวุฒิ ดุษฎี  
รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล นามผล  
ดร.สมมาส แก้วล้วน  
รองศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา ภิระวัฒน์กุล  
ดร.เกียรติศักดิ์ เส็งช่วย  
ดร.วาริช วีระพันธ์  
รองศาสตราจารย์ ดร.วรเชษฐ์ ภิรมย์ภักดี  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุษาวดี ตันติวรานุรักษ์  
รองศาสตราจารย์ ดร.วรรณุช แจ้งสว่าง  
ดร.วรจิตต์ เศรษฐพรรค  
ดร. สุรชัย ณัฐจันทร์ศรี  
ดร.ชยานนท์ สวัสดิ์นฤนาท  
ดร.หทัยทิพย์ สินธูยา  
ดร.ณัฐยา ตันตราพันธ์  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรพันธ์ ดั่งทองสุข  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อชิตพล ศศิธรานวัฒน์

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

วารสารวิชาการพลังงานทดแทนสู่ชุมชนโดยเน้นงานวิชาการความร่วมมือของเครือข่ายสมาชิกสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย (TRECA) ซึ่งฉบับแรกของปีที่ 2 วารสารฉบับนี้เป็นเนื้อหาของบทความทางวิชาการที่มุ่งสร้างผลงานที่เด่นทางด้าน การวิจัยและมุ่งสู่การใช้งานจริง ซึ่งได้รวบรวมความรู้ทางวิชาการที่สามารถถ่ายทอดให้แก่สังคม ทางด้านพลังงานทดแทนในสาขาต่างๆ เพื่อให้วารสารนี้เป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนวิชาการและแนวความคิดในแวดวงวิชาการทั้งผู้วิจัยและผู้อ่านอันเป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่งในการสร้างผลงานทางวิชาการสู่ชุมชนและสังคม โดยดำรงไว้ซึ่งความเป็นตัวตนทางวิชาการของผู้เขียนและวัตถุประสงค์ของสมาคมฯ ที่ทรงคุณค่าบทความในวารสารฉบับนี้มีจำนวนทั้งสิ้น 10 บทความ ซึ่งในแต่ละบทความมีความเป็นไปได้ในทิศทางเดียวกันของรูปแบบพลังงานทดแทนต่างๆ ครอบคลุมกระบวนการในการวิจัยและการศึกษาสู่ภาคการใช้งาน ผู้อ่านจะได้รับความรู้ที่หลากหลายจากการอ่านวารสารฉบับนี้ ในแนวทางที่จะจุดประกายความคิดหรือการต่อยอดความคิดทางด้านพลังงานทดแทนสาขาต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการอ่านอย่างวิพากษ์และตั้งคำถาม เพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนในทางวิชาการอย่างสร้างสรรค์อันจะช่วยให้ความรู้และความคิดเดิมถูกแพร่ขยายออกไปได้อย่างกว้างขวาง อีกทั้งให้วารสารฉบับนี้เป็นแหล่งความรู้ในทุกระดับภาคส่วนของทุกคนในสังคมไทย โดยไม่ยึดติดตนเองและอยู่กับความรู้ความคิดเพียงบางมุมบางด้านเท่านั้น ทั้งนี้เพื่อให้ผู้เขียนและผู้อ่านมีความเป็นตัวตนทางวิชาการที่พร้อมจะพัฒนาตนเองอยู่เสมออย่างไม่หยุดนิ่งและทำดีที่สุดแล้ว ความรู้ความคิดที่ถูกต่อขยายออกไปนั้น ก็จะนำไปสู่การปรับเปลี่ยนกระบวนการทัศนทางความคิดของสังคมและชุมชนอย่างกว้างขวางอันจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางวิชาการของสังคมเพื่อความยั่งยืนของประเทศชาติกองบรรณาธิการขอขอบพระคุณคณะทำงานทุกท่าน คณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความวิชาการ และทุกภาคส่วนที่ได้สละเวลาอันมีค่าอ่านบทความ เพื่อความถูกต้องทางวิชาการ และเป็นวารสารที่ดีต่อการพัฒนาประเทศ ทั้งนี้หากผู้อ่านมีความประสงค์จะตีพิมพ์บทความสามารถขอความกรุณาโปรดจัดเตรียมต้นฉบับให้เป็นไปตามรูปแบบของวารสารและส่งบทความทางออนไลน์ที่ [www.reca.or.th](http://www.reca.or.th) เพื่อการพิจารณาและตีพิมพ์ในวารสารฉบับต่อไป

กองบรรณาธิการ





# สารบัญ

## เชื้อเพลิงและความร้อนชุมชน

การดูดซับน้ำมันด้วยวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร .....	10
และการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากตัวดูดซับน้ำมัน	
การศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง .....	17
จากมูลฝอยติดเชื้อของโรงพยาบาล	
การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพจากมูลไก่ไข่ .....	24

## สิ่งแวดล้อมเพื่อชุมชน

การเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมของทางเลือกการจัดการกากกาแฟ: .....	29
กรณีศึกษา การเผาโดยตรงและผลิตไบโอดีเซล	
อิทธิพลของค่าความเป็นกรดและด่างต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษผักเหลือทิ้ง .....	35

## การออกแบบและจำลองการทำงานด้านพลังงาน

การศึกษาแบบจำลองในการคำนวณหาอายุเชิงเศรษฐกิจของสถานีไฟฟ้าแรงสูง .....	40
โดยพิจารณาตามรูปแบบการจัดวางบัสบาร์ กรณีศึกษาสถานีไฟฟ้า 115/22 kV	
การออกแบบเส้นโค้งความเร็วเพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้า .....	53
ของรถไฟใต้ดินสายสีน้ำเงินในประเทศไทย	

## นวัตกรรมด้านพลังงาน

การเปรียบเทียบการลดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สชีวภาพ .....	59
โดยใช้แคลเซียมออกไซด์และซีเมนต์	
การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพระดับชุมชนด้วยจุลินทรีย์ .....	66
การออกแบบและพัฒนาระบบพลังงานแสงอาทิตย์แบบเคลื่อนย้าย .....	72
สำหรับการสูบน้ำเพื่อการเกษตร	

## การดูดซับน้ำมันด้วยวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากตัวดูดซับน้ำมัน

### The adsorption of oil by agricultural waste and the briquette production from adsorbent

เขมนิจจารีย์ สาริพันธ์\*

สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี ลพบุรี 15000

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำมันของดอกธูปฤาษี ชานอ้อยและผักตบชวา และผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากวัสดุที่สามารถดูดซับน้ำมันได้ดี โดยมีการแปรผันอัตราส่วนของวัสดุที่ดูดซับน้ำมันได้ดีต่อถ่านไม้เป็น 50:50 40:60 30:70 20:80 และ 90:10 โดยใช้กากน้ำตาล 10 เปอร์เซ็นต์เป็นตัวประสาน ผลจากการศึกษา พบว่าน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านการดูดซับด้วยดอกธูปฤาษี ผักตบชวาและชานอ้อย มีค่าน้ำมันและไขมันลดลงจาก 50 มิลลิกรัม ต่อลิตรเป็น 0.24 2.15 และ 10.83 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อคำนวณประสิทธิภาพการดูดซับของวัสดุทั้งสามชนิดพบว่า ดอกธูปฤาษีมีประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำมันมากที่สุดเท่ากับ 99.54 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือผักตบชวามีประสิทธิภาพการดูดซับ 95.56 เปอร์เซ็นต์ และชานอ้อยมีประสิทธิภาพการดูดซับ 78.14 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมในการนำไปใช้งานของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากถ่านและดอกธูปฤาษี ดูดซับน้ำมันคือ อัตราส่วนถ่านต่อดอกธูปฤาษีดูดซับน้ำมัน 50:50 40:60 และ 30:70 ซึ่งมีค่าดัชนีแตกร่วน และค่าพลังงานความร้อนเท่ากับ 0.95-1.00 และ 5207.23- 6866.67 แคลอรีต่อกรัม ส่วนคุณลักษณะอื่นๆ ของแท่งเชื้อเพลิง คือ ความชื้นเท่ากับ 1.25-1.36% ปริมาณเถ้าเท่ากับ 20.59-27.68% สารระเหยเท่ากับ 69.03-77.99% และคาร์บอน คงตัว 3.02-4.35%

**คำสำคัญ:** เชื้อเพลิงอัดแท่ง วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร น้ำมัน การดูดซับ

\*Corresponding author: Tel.: 083-0953057. E-mail address: fangkum.a@gmail.com

#### บทนำ

น้ำมันและไขมันซึ่งพบในน้ำเสียชุมชนที่มาจากอาหารมีปริมาณร้อยละ 10 ของสารอินทรีย์ทั้งหมด [1] โดยน้ำมันและไขมันในน้ำเสียนี้ออกให้เกิดมลพิษทางน้ำและเป็นอุปสรรคต่อการสังเคราะห์แสงของพืชน้ำ ซึ่งเป็นผู้ผลิตในระบบนิเวศ ทำให้พืชน้ำสังเคราะห์แสงได้น้อยลง และน้ำมันและไขมันนี้จะขัดขวางการแลกเปลี่ยนออกซิเจนระหว่างอากาศลงสู่ทำให้การดำรงชีวิตของสัตว์น้ำได้รับผลกระทบ [2] การบำบัดหรือแยกน้ำมันและไขมันออกจากน้ำเสียสามารถทำได้โดยวิธีการดูดซับซึ่งเป็นวิธีที่สามารถดำเนินการได้ง่าย อุปกรณ์น้อย ไม่ต้องการควบคุมระบบ [2] นอกจากนี้จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามีชีวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตรหลายชนิดที่นำมาใช้เป็นตัวดูดซับได้ เช่น ดอกธูปฤาษี [3] ผักตบชวา [4-5] ชานอ้อย [2] ฟางข้าว ลำต้นข้าวโพด ชี้อ้อย [6] เนื่องจากวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้

มีลักษณะโครงสร้างเป็นรูปพวงที่เกิดจากท่อลำเลียงต่างๆ ทำให้เกิดการดูดซับได้มากแตกต่างกันไปตามลักษณะโครงสร้างของชีวมวล การดูดซับน้ำมันและไขมันโดยชีวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตรจะเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับชีวมวลเหลือทิ้งดังกล่าวและลดปัญหาน้ำเสียได้อีกทางหนึ่ง นอกจากนี้การนำชีวมวลที่ดูดซับน้ำมันและไขมันแล้วมาอัดเป็นแท่งเชื้อเพลิงจะทำให้ได้พลังงานใช้ทดแทนไม้ฟืนหรือถ่าน ซึ่งเป็นการตอบสนองต่อนโยบายของรัฐบาลที่มีการส่งเสริมและสนับสนุนให้มีการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพและพลังงานชีวภาพโดยรัฐบาลได้กำหนดเป้าหมายเพิ่มสัดส่วนการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพที่ร้อยละ 25 ของความต้องการเชื้อเพลิงในภาคขนส่งทั้งประเทศภายในปี 2579 [7] และช่วยลดปัญหาของเสียที่เกิดขึ้นจากการดูดซับได้ ซึ่งมีงานวิจัยของจอมภพและคณะ (2555) [8] ได้มีการศึกษาการทำเชื้อเพลิงอัดแท่งจากแกลบผสมกับกลีเซอรินพบว่าได้ค่าพลังงานความร้อน 3585-3916 แคลอรีต่อกรัม ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาการดูดซับน้ำมันโดยใช้ ดอกธูปฤาษี ขานอ้อยและผักตบชวา ซึ่งเป็นชีวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตร และศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากวัสดุที่สามารถดูดซับน้ำมันได้ดีเพื่อนำไปใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิงในชุมชน

## วิธีการวิจัย

### 1. วิธีการเตรียมวัสดุดูดซับ

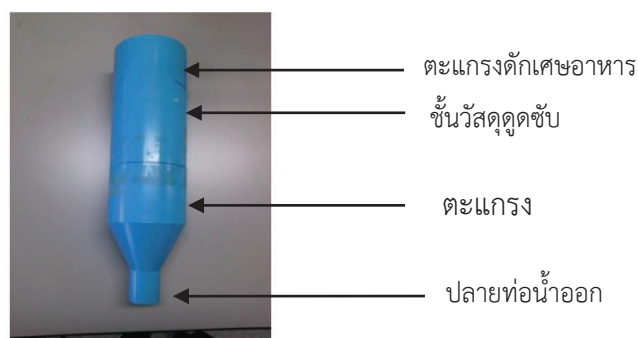
นำขานอ้อย ผักตบชวาและดอกธูปฤาษีปริมาณอย่างละ 20 กรัม มาล้างให้สะอาดด้วยน้ำกลั่นเพื่อกำจัดฝุ่นและสิ่งปนเปื้อนออก จากนั้นนำไปตากแห้งและอบที่ 103-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง บรรจุลงในถุงพลาสติกและปิดปากถุงให้แน่นเพื่อป้องกันความชื้น

### 2. วิธีการเตรียมอุปกรณ์กรองน้ำมันและไขมัน

ตัดท่อพีวีซีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 2.5 นิ้ว ยาว 6 นิ้ว หุ้มตะแกรงที่ปลายข้อต่อท่อน้ำ ใช้กาวติดข้อต่อท่อน้ำเข้าด้วยกันกับท่อพีวีซีและท่อพีวีซีรูปกรวย ใส่วัสดุดูดซับลงในท่อน้ำและปิดด้วยตะแกรงดักเศษอาหารด้านบน ซึ่งตะแกรงดักเศษอาหารสามารถถอดออกได้ เพื่อเปลี่ยนวัสดุดูดซับ ลักษณะของอุปกรณ์กรองน้ำมันและไขมันแสดงในภาพที่ 1

### 3. วิธีการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์โดยในน้ำ 1 ลิตร จะประกอบด้วยน้ำมัน 50 มิลลิลิตร แป้งมันสำปะหลัง 2 มิลลิกรัม และน้ำตาล 2 มิลลิกรัม ผสมให้เข้ากัน แล้วปรับค่าความเป็นกรดต่างของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมแล้วให้เป็น 7 ด้วย 6M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> และ 1 M NaOH



ภาพที่ 1 อุปกรณ์กรองน้ำมันและไขมัน

#### 4. วิธีการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ

นำตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมไว้แล้วปริมาตร 2 ลิตร มาเทผ่านอุปกรณ์กรองน้ำมันและไขมันที่มีชีวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นวัสดุดูดซับได้แก่ ดอกธูปฤาษี ขานอ้อยและผักตบชวา ปริมาณอย่างละ 20 กรัม เมื่อน้ำตัวอย่างอุปกรณ์กรองแล้วให้เทน้ำตัวอย่างผ่านตัวกรองซ้ำอีกทั้งหมด 7 ครั้ง จึงเก็บตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านตัวดูดซับไปวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันและไขมันโดยวิเคราะห์ด้วยวิธีพาร์ทิชัน -ซึ่งน้ำหนักและคำนวณหาประสิทธิภาพในการดูดซับ [2] ตามสมการ 1

$$\text{ประสิทธิภาพการดูดซับน้ำมันและไขมัน (\%)} = \{(C_i - C_{ef}) / C_i\} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ  $C_i$  = ความเข้มข้นของน้ำมันเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$C_{ef}$  = ความเข้มข้นของน้ำมันที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

#### 5. วิธีศึกษาการผลิตแ่งเชื้อเพลิงจากตัวดูดซับที่ดีที่สุด

นำตัวอย่างที่ดูดซับน้ำมันและไขมันได้ดีมาผลิตเชื้อเพลิงอัดแ่งโดยผสมตัวดูดซับที่ผ่านการดูดซับน้ำมันที่ดีที่สุดกับผงถ่านในอัตราของถ่านและตัวดูดซับที่ต่างกัน ได้แก่ 50:50 40:60 30:70 20:80 10:90 และ 0:100 คลุกเคล้าส่วนผสมให้เข้ากันตามอัตราส่วน แล้วผสมตัวประสานคือ กากน้ำตาล ในอัตราส่วน 10 ต่อ 1 หรือ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นำไปอัดให้เป็นแ่งด้วยเครื่องอัดแ่งแบบใช้มือ ใส่ความชื้นออกจากแ่งเชื้อเพลิงโดยอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ทำการวิเคราะห์ค่าพลังงานความร้อน ความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย และปริมาณคาร์บอนคงตัวของเชื้อเพลิงอัดแ่งตามมาตรฐาน ASTM วิเคราะห์ค่าดัชนีแตกกร่วนโดยนำถ่านอัดแ่งประมาณ 100 กรัม ใส่ถุงพลาสติกแล้วปล่อยจากที่สูง 180 เซนติเมตร ชั่งน้ำหนักถ่านอัดแ่งที่เหลือจากการร่อนผ่านตะแกรงขนาด 20 มิลลิเมตร แล้วคำนวณหาอัตราดัชนีแตกกร่วนจากสูตร  $R = W_b/W_a$  เมื่อ  $W_a$  คือน้ำหนักถ่านก่อนปล่อยจากที่สูง  $W_b$  คือน้ำหนักถ่านที่เหลือจากการร่อนหลังปล่อยจากที่สูง

### ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

#### 1. ประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำมันของดอกธูปฤาษี ขานอ้อยและผักตบชวา

การดูดซับน้ำมันด้วยชีวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตร ทำการศึกษาโดยมีการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำเสียชุมชน น้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้น มีปริมาณน้ำมันและไขมัน เท่ากับ 48.64-52.29 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อปรับค่าความเป็นกรดต่างของน้ำเสียสังเคราะห์เป็น 7 แล้วเทน้ำเสียสังเคราะห์ผ่านอุปกรณ์ทดลองดูดซับน้ำมันโดยมีดอกธูปฤาษี ผักตบชวา และ ขานอ้อย ปริมาณ 20 กรัม เป็นวัสดุดูดซับ (ภาพที่ 2) ผลจากการทดลองพบว่า น้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านการดูดซับด้วยดอกธูปฤาษี ผักตบชวาและขานอ้อย มีค่าน้ำมันและไขมันลดลงจาก 48.64-52.29 เป็น 0.24 2.15 และ 10.83 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อกำหนดประสิทธิภาพการดูดซับของวัสดุดูดซับทั้งสามชนิดพบว่า ดอกธูปฤาษีมีประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำมันมากที่สุดเท่ากับ 99.54 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแตกต่างจากตัวดูดซับอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ รองลงมาคือผักตบชวา มีประสิทธิภาพการดูดซับ 95.56 เปอร์เซ็นต์ และขานอ้อยมีประสิทธิภาพการดูดซับ 78.14 เปอร์เซ็นต์ (ตารางที่ 1) จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าดอกธูปฤาษีมีประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำมันได้มากกว่า ผักตบชวา และขานอ้อย เนื่องจากโครงสร้างของดอกธูปฤาษี มีลักษณะเป็นเส้นใยฝอย ทำให้มีพื้นที่ผิวมากและอนุภาคของน้ำไม่ยึดเกาะ [9] จึงทำให้มีการดูดซับน้ำมันได้ดี ส่วนขานอ้อยมีประสิทธิภาพในการดูดซับ

ได้น้อยกว่าเนื่องจากลักษณะโครงสร้างของชานอ้อยที่มีเส้นใยขนาดใหญ่ยาวและหยาบมีช่องขนาดใหญ่ [10] ทำให้ออกุภาคน้ำยัดเกาะได้ง่าย ปริมาณน้ำมันและไขมันหลังดูดซับด้วยชานอ้อยจึงไม่ผ่านค่ามาตรฐานน้ำทิ้งชุมชน โดยกรมควบคุมมลพิษกำหนดค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากชุมชนไว้ดังนี้ ค่าน้ำมันและไขมันมีค่าไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของรุ่งทิพย์และคณะ (2553) [3] ซึ่งใช้ดอกธูปฤาษีสกัดกำจัดน้ำมันออกจากน้ำเสียโรงอาหารพบว่างานวิจัยนี้มีประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันมากกว่า ทั้งนี้เนื่องจากใช้ปริมาณของดอกธูปฤาษีมากกว่าจึงทำให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำมันสูง และยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jansi Rani และคณะ (2014) [5] ที่ทำการศึกษาการดูดซับน้ำมันด้วยผักตบชวา ซึ่งพบว่าการดูดซับของตัวดูดซับจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับและความไม่ชอบน้ำทำให้วัสดุที่มีพื้นที่ผิวมากและไม่ชอบน้ำจะทำให้สามารถดูดซับได้ดี



ดอกธูปฤาษี

ชานอ้อย

ผักตบชวา

ภาพที่ 2 ชีวมวลทางการเกษตรที่ใช้ศึกษาดูดซับน้ำมันและไขมัน

ตารางที่ 1 ปริมาณน้ำมันก่อน-หลังการดูดซับและประสิทธิภาพการดูดซับน้ำมันของดอกธูปฤาษี ผักตบชวา ชานอ้อย

ตัวดูดซับ	ปริมาณน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ประสิทธิภาพ (%)
	ก่อนดูดซับ	หลังดูดซับ	
ดอกธูปฤาษี	52.29	0.24	99.54 <sup>a</sup> ± 0.01
ผักตบชวา	48.64	2.15	95.56 <sup>b</sup> ± 0.41
ชานอ้อย	49.55	10.83	78.14 <sup>c</sup> ± 1.94

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษในระหว่างแถวที่แตกต่างกันแสดงความแตกต่างกันเมื่อทดสอบแบบ DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

## 2. การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากดอกธูปฤาษีที่ดูดซับน้ำมัน

การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากดอกธูปฤาษีที่ดูดซับน้ำมันจะทำการอัดแท่งโดยมีการผสมดอกธูปฤาษีที่ดูดซับน้ำมันกับผงถ่านไม้ในอัตราส่วน 50:50 40:60 30:70 20:80 และ 90:10 โดยใช้กากน้ำตาล 10 เปอร์เซ็นต์เป็นตัวประสาน หลังจากอัดแท่งแล้วพบว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งสามารถขึ้นรูปได้โดยเชื้อเพลิงอัดแท่งที่มีปริมาณดอกธูปฤาษีที่ดูดซับน้ำมันไม่เกินร้อยละ 70 จะสามารถคงรูปได้ หากมีปริมาณดอกธูปฤาษีมากกว่าร้อยละ 70 ขึ้นไป เชื้อเพลิงอัดแท่งสามารถขึ้นรูปได้แต่จะมีลักษณะอ่อนนุ่ม และไม่คงรูป (ภาพที่ 3) นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่ออัตราส่วนของดอกธูปฤาษีเพิ่มขึ้นส่งผลให้คุณสมบัติของเชื้อเพลิง ได้แก่ ความชื้น สารระเหย และค่าพลังงานความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อทำการเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงอัดแท่งจากถ่านไม้ร้อยละ 100 กับเชื้อเพลิงอัดแท่งที่มีการผสมดอกธูปฤาษีที่ดูดซับน้ำมันจะเห็นได้ว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งที่มีดอกธูปฤาษีดูดซับไขมันมีค่าพลังงานความร้อน (5207.23-6866.67 แคลอรีต่อกรัม) มากกว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งจากถ่านไม้ (2636.63 แคลอรีต่อกรัม) ประมาณ 2-3 เท่า ทั้งนี้เนื่องจากน้ำมันที่ถูกดูดซับในดอกธูปฤาษีมีค่าพลังงาน

ค่อนข้างสูงจึงส่งผลให้ค่าพลังงานของเชื้อเพลิงอัดแท่งที่มีดอกธูปฤๅษีดูดซับน้ำมันสูงตามไปด้วย เมื่อทดสอบความแตกต่างของค่าพลังงานความร้อนด้วยวิธี DMRT พบว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งที่มีอัตราส่วนถ่านต่อดอกธูปฤๅษีดูดซับไขมัน 30:70 20:80 และ 10:90 มีค่าพลังงานความร้อนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ แต่อัตราส่วนดังกล่าวให้ค่าพลังงานความร้อนมากกว่าอัตราส่วน 40:60 50:50 และ 100:0 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ผลของงานวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ สุธีรา (2557) [11] ซึ่งใช้กากไขมันเป็นตัวประสานถ่านไม่ย่างพาราแล้วพบว่ากากไขมันช่วยทำให้ค่าพลังงานความร้อนเพิ่มขึ้น ถ่านติดไฟเร็วขึ้นและทำให้น้ำเดือดได้เร็ว อัตราส่วนที่เหมาะสมในการนำไปใช้งานของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากถ่านและดอกธูปฤๅษีดูดซับน้ำมันคือ อัตราส่วนถ่านต่อดอกธูปฤๅษีดูดซับน้ำมัน 50:50 40:60 และ 30:70 เนื่องจากมีค่าพลังงานความร้อนเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนและคุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงอื่นๆ ที่ใกล้เคียงมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มีความชื้นต่ำ เชื้อเพลิงอัดแท่งสามารถขึ้นรูปและคงรูปได้



100:0 50:50 40:60 30:70 20:80 10:90

ภาพที่ 3 เชื้อเพลิงอัดแท่งจากดอกธูปฤๅษีดูดซับน้ำมันผสมผงถ่านและเชื้อเพลิงอัดแท่งจากถ่าน

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากถ่าน และถ่านกับดอกธูปฤๅษีที่ดูดซับน้ำมัน

อัตราส่วน ถ่าน: ตัวดูดซับ	ความชื้น (%)	เถ้า (%)	สารระเหย (%)	คาร์บอนคงตัว (%)	ดัชนีแตกร่วน	พลังงานความร้อน (แคลอรีต่อกรัม)
100:0	1.31±0.12	58.4±1.58	36.18±4.29	4.27	0.55±0.15	2636.63±33.92 <sup>c</sup>
50:50	1.25±0.05	27.68±2.64	69.03±1.52	3.02	0.99±0.01	5207.23±188.67 <sup>b</sup>
40:60	1.36±0.43	21.27±0.52	73.55±5.11	4.35	0.95±0.03	5388.8±501.27 <sup>b</sup>
30:70	1.34±0.06	20.59±6.21	77.99±2.85	4.28	1.00±0.00	6866.67±621.65 <sup>a</sup>
20:80	0.71±0.15	11.21±1.51	84.16±0.46	3.92	0.99±0.00	7014.9±178.40 <sup>a</sup>
10:90	1.32±0.10	7.58±0.71	87.09±1.31	4.00	0.99±0.00	7196.27±417.00 <sup>a</sup>

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษในระหว่างแถวที่ต่างกันแสดงความแตกต่างกันเมื่อทดสอบแบบ DMRT ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

### สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำมันของดอกธูปฤๅษี ชานอ้อยและผักตบชวา และศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากวัสดุที่สามารถดูดซับน้ำมันได้ดี ผลการศึกษาพบว่า ดอกธูปฤๅษีมีประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำมันมากที่สุดเท่ากับ 99.54 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือผักตบชวามีประสิทธิภาพการดูดซับ 95.56 เปอร์เซ็นต์ และชานอ้อยมีประสิทธิภาพการดูดซับ 78.14 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดอกธูปฤๅษีที่ดูดซับน้ำมันนำมาผลิตเป็นแท่งเชื้อเพลิงโดยมีการผสมผงถ่านไม่กับดอกธูปฤๅษีที่ดูดซับน้ำมันในอัตราส่วน 50:50 40:60 30:70 20:80 และ 90:10 มีกาน้ำตาล

10 เปอร์เซ็นต์เป็นตัวประสาน หลังจากอัดแท่งแล้วพบว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งสามารถขึ้นรูปได้โดยเชื้อเพลิงอัดแท่งที่มีปริมาณดอกธูปฤๅษีที่ดูดซับน้ำมันไม่เกินร้อยละ 70 จะสามารถคงรูปได้ หากมีปริมาณดอกธูปฤๅษีมากกว่าร้อยละ 70 ขึ้นไป เชื้อเพลิงอัดแท่งสามารถขึ้นรูปได้แต่จะมีลักษณะอ่อนนุ่ม และไม่คงรูป ค่าพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงอัดแท่งที่มีดอกธูปฤๅษีดูดซับไขมันมีค่าพลังงานความร้อน (5207.23-6866.67 แคลอรีต่อกรัม) มากกว่าเชื้อเพลิงอัดแท่งจากถ่านไม้ (2636.63 แคลอรีต่อกรัม) ประมาณ 2-3 เท่า อัตราส่วนที่เหมาะสมในการนำเชื้อเพลิงอัดแท่งจากถ่านและดอกธูปฤๅษีดูดซับน้ำมันไปใช้งานคือ อัตราส่วนถ่านต่อดอกธูปฤๅษีดูดซับน้ำมัน 50:50 40:60 และ 30:70 เนื่องจากมีค่าพลังงานความร้อนเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (5000 แคลอรีต่อกรัม) และคุณสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงอื่นๆ ที่ใกล้เคียงมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนเช่น มีความชื้นต่ำ และสามารถขึ้นรูปและคงรูปได้

### กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี ที่สนับสนุนทุนการวิจัยของบุคลากร มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี ประจำปีการศึกษา 2561

### เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมควบคุมมลพิษ. (2545). **น้ำเสียชุมชนและระบบบำบัดน้ำเสีย**. สืบค้น กันยายน 22, 2559, จาก [www.pcd.go.th/public/Publications/print\\_water.cfm?task=wt](http://www.pcd.go.th/public/Publications/print_water.cfm?task=wt).
- [2] อรทัย วิเศษรัตน์, รินรดี งามสมบัติ, ปานใจ สือประเสริฐสิทธิ์, และจิตติมา ประสารอะเอ. (2554). **การดูดซับน้ำมันโดยใช้ขานอ้อยและขานอ้อยปรับสภาพ**. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.
- [3] รุ่งทิพย์ ลำดวล จินดาวัลย์ วิบูลย์อุทัย และเชาวยุทธ พรพิมลเทพ. (2553). **ประสิทธิภาพการบำบัดออกจากน้ำเสียโรงอาหารโดยใช้ดอกฤๅษีใบแคบ**. *วารสารการจัดการสิ่งแวดล้อม*. 6(1), 42-51.
- [4] Khan, E., Virojnaqud, W., and Ratpukdi, T. (2004). Use of biomass sorbents for oil removal from gas station runoff. *Chemosphere*. 57(1), 681-689.
- [5] Jansi Rani, M., Murugan, M., Subramaniam, P. and Subramanian, E. (2014). A study on water hyacinth *Eichhornia crassipes* as oil sorbent. *Journal of Applied and Natural Science* 6 (1): 134-138.
- [6] Lin, H., Wang, Z.T., Wang, H., and Zhu, Y.T. (2012). The study of oil absorption of natural biomass materials. *Journal of Functional Materials*. 43(17), 2412-2415.
- [7] กระทรวงพลังงาน. (2558). **แผนปฏิบัติการพัฒนาพลังงานทดแทนฯ ตามกรอบแผนแม่บทพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558 - 2579**. สืบค้น มิถุนายน 22, 2559, จาก [www.dede.go.th/download/files/AEDP%20Action%20Plan\\_Final.pdf](http://www.dede.go.th/download/files/AEDP%20Action%20Plan_Final.pdf)
- [8] จอมภพ แวศักดิ์, พงษ์ศักดิ์ จิตตบุตร, ยุทธนา ฐิระวิชย์กุล และกำพล ประทีปชัยกุล. (2555). **คุณลักษณะของแท่งเชื้อเพลิงแกลบผสมกลีเซอริน**. *วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ*. 15(1), 24-32.
- [9] วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง. (2556). **ดอกธูปฤๅษีวัชพืชกำจัดคราบน้ำมัน**. สืบค้น กันยายน 22, 2559, จาก [www.nano.kmitl.ac.th/index.php/reser/360](http://www.nano.kmitl.ac.th/index.php/reser/360).



- [10] ดุษฎี สุริยพรรณพงศ์, สุจิมน ต้นวิเชียร, จิตติมา มานะกิจ และดวงรัฐน์ ชูวิสิกุล. (2557). การสกัดและประเมินคุณลักษณะของเซลลูโลสจากขานอ้อย ผักตบชวา และดอกธูปฤาษี. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- [11] สุธีรา สุนทรารักษ์. (2557). การใช้ประโยชน์กากไขมันในบ่อคักไขมันอย่างง่ายจากร้านอาหารร่วมกับเศษกระดาษและเศษใบไม้เพื่อการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 30 (1), 1-10.

## การศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งจากมูลฝอยติดเชื้อของโรงพยาบาล Feasibility Study of RDF-5 Production from Infectious Hospital Waste

พรเมธี คำพิทร์ เสริมสุข บัวเจริญ และธเนศ ไชยชนะ\*

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290

### บทคัดย่อ

จากข้อมูลของจังหวัดเชียงใหม่ พบว่ามีปริมาณขยะติดเชื้อรวม 1,124 kg/วัน หรือ 410.26 ตัน/ปี ซึ่งประกอบด้วยขยะกลุ่มผ้า กระดาษ ยางและพลาสติก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำขยะติดเชื้อมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง RDF - 5 โดยการปรับอัตราส่วนผสมของขยะชนิดต่าง ๆ และทำการอัดแท่งโดยใช้กากน้ำตาลเป็นตัวประสาน จากนั้นทำการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี ผลการศึกษาพบว่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งมีค่าสูงสุดที่อัตราส่วนตัวประสานที่ 30% โดยมวล และอัตราส่วน 1:3:1 (กลุ่มผ้า กลุ่มกระดาษ และ กลุ่มยางและพลาสติก) ปริมาณสารระเหยมีค่ามากที่สุดคือ 82.34% ปริมาณคาร์บอนมากที่สุด 8.91% และค่าความร้อน มีค่าสูงสุดเท่ากับ 5,246 kcal/kg ที่ปริมาณตัวประสานกากน้ำตาล 10%โดยมวล ศักยภาพพลังงานรวมของขยะมูลฝอย ติดเชื้อของจังหวัดเชียงใหม่มีค่าเท่ากับ 10,382.33 GJ/ปี หรือ 595.58 MJ/เตียง/วัน

**คำสำคัญ :** มูลฝอยติดเชื้อ, เชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง (RDF-5), ตัวประสาน

\*Corresponding author: Tel.: 081-5306768. E-mail address: Tanatecha@hotmail.com

### บทนำ

ปัจจุบันโรงพยาบาลต่างๆ ต้องประสบปัญหาเกี่ยวกับการจัดการขยะติดเชื้อโดยจากรายงานของ กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุขพบว่า ปัจจุบันประเทศไทยมีสถานพยาบาล ซึ่งได้แก่ โรงพยาบาล ศูนย์บริการ สาธารณสุข โรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล สถานีอนามัย คลินิก ทั้งนี้จัดเป็นของภาครัฐและเอกชนจำนวนมากกว่า 25,000 แห่ง ซึ่งมีจำนวนเตียงประมาณ 130,000 เตียง จากข้อมูลการศึกษาของ กรมควบคุมมลพิษ คาดการณ์ว่าในปัจจุบันมีอัตราการเกิดมูลฝอยติดเชื้อเฉลี่ย 0.26-0.65 kg/เตียง/วัน และมีอัตราเพิ่มขึ้นปีละประมาณ 5.5% โดยในปี พ.ศ. 2549 มีปริมาณมูลฝอยติดเชื้อจากสถานพยาบาลทั้งของรัฐและเอกชนประมาณ 37,000 ตันต่อปี เป็นมูลฝอยติดเชื้อที่เกิดขึ้นในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑลประมาณ 34% ที่เหลือเกิดขึ้นในสถานพยาบาลในส่วนภูมิภาคอีกประมาณ 66%

[1] ภาพที่ 1 แสดงสัญลักษณ์ขยะติดเชื้อโดยสามารถแบ่งขยะติดเชื้อได้เป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

กลุ่มที่ 1 ประเภททั่วไป ประกอบด้วย สำลี ผ้าก๊อช ผ้าพันแผล ผ้าเย็บแผล ผ้าพลาสติก กระดาษชำระ ยาง/พลาสติก ถุงมือยาง ชุดให้สารน้ำเกลือแร่และเลือด (พลาสติก) กระบอกฉีดยาพลาสติกมีสัดส่วน 92.32% - 95.66% ของมูลฝอยติดเชื้อทั้งหมด

กลุ่มที่ 2 ประเภทโลหะ ประกอบด้วย เข็มฉีดยา ไบมีด ของมีคม มีสัดส่วน 2.82% - 4.84% ของมูลฝอยติดเชื้อทั้งหมด

- กลุ่มที่ 3 ประเภทแก้ว ประกอบด้วย ขวดแก้ว กระบอกฉีดยา (แก้ว) จานแก้วเพาะเลี้ยงเชื้อ แผ่นกระจก แผ่นกรอบกระจก มีสัดส่วน 1.52% - 2.84% ของมูลฝอยติดเชื้อทั้งหมด



ภาพที่ 1 ขยะติดเชื้อ [2]

ปัจจุบันจึงมีการนำเทคโนโลยีการทำลายเชื้อโรคด้วยไอน้ำซึ่งเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่ใช้บำบัดมูลฝอยติดเชื้อให้ปลอดภัยต่อเชื้อโรค ซึ่งต้องควบคุมความดันร่วมกับอุณหภูมิ และระยะเวลาที่จำเป็นที่เหมาะสมเพื่อการทำลายหรือฆ่าเชื้อโรคในมูลฝอยติดเชื้อที่มีประสิทธิภาพ ข้อดีของการทำลายเชื้อโรคด้วยไอน้ำ

- ปริมาตรของมูลฝอยลดลงพลาสติกบางชนิดไม่เปลี่ยนแปลงสภาพ
- ดัชนีทางชีววิทยา เพื่อตรวจสอบคุณภาพการฆ่าเชื้อ ทดสอบได้ง่าย
- ดำเนินการง่าย เป็นเทคโนโลยีที่สะดวกที่ใช้ในสถานพยาบาล
- สามารถกำจัดสิ่งปนเปื้อนในมูลฝอยสถานพยาบาลและเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัดมูลฝอย

ห้องปฏิบัติการ

- ไม่ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ [3-5]

จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการนำเทคโนโลยีการทำลายเชื้อโรคด้วยไอน้ำมาใช้บำบัดมูลฝอยติดเชื้อแทนการเผาก็จะเกิดขยะในลักษณะตามกลุ่มของขยะติดเชื้อที่เกิดขึ้นแต่กลายเป็นขยะที่ปลอดภัย ซึ่งก็จะกลายเป็นขยะทั่วไป และต้องทำการกำจัดตามแบบของการกำจัดขยะทั่วไป เช่น การเผา การย่อยสลายหรือฝังกลบ เป็นต้น [6] ทั้งนี้เมื่อพิจารณาจากขยะทั้ง 3 กลุ่มข้างต้นพบว่าขยะกลุ่มที่ 1 ประกอบด้วย สำลี ผ้าก๊อช ผ้าพันแผล ฝือก พลาสติก กระดาษชำระ ยาง/พลาสติก ถูมือยาง ชุดให้สารน้ำเกลือแร่และเลือด (พลาสติก) กระบอกฉีดยาพลาสติก อีกทั้งยังมีสัดส่วนสูง 92.32% - 95.66% โดยมวลของมูลฝอยติดเชื้อทั้งหมด ซึ่งขยะเหล่านี้สามารถนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง RDF-5 ได้ และเมื่อคิดจากสัดส่วนของการเกิดขยะในกลุ่มนี้ก็มีปริมาณ 0.2-0.6 kg/เตียง/วัน เมื่อพิจารณาโรงพยาบาลขนาดกลางที่มีจำนวนเตียง 200 เตียง ก็จะพบว่ามีศักยภาพด้านปริมาณของขยะประมาณ 100 kg/วัน (3 ตัน/เดือน) [7]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีเป้าประสงค์เพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง (RDF-5) โดยใช้ขยะในกลุ่มที่ 1 ของมูลฝอยติดเชื้อจากโรงพยาบาลในการผลิต และทำการประเมินศักยภาพทางด้านปริมาณและพลังงานของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง (RDF-5) ที่ผลิตได้

### วิธีการวิจัย

- จัดหาวัสดุขยะสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง (RDF-5)
- แยกขยะเป็นกลุ่มตามลักษณะ ซึ่งประกอบด้วย สำลี ผ้าก๊อช ผ้าพันแผล ฝือก พลาสติก กระดาษชำระ ยาง/พลาสติก ถูมือยาง ชุดให้สารน้ำเกลือแร่และเลือด (พลาสติก) กระบอกฉีดยาพลาสติก
- ย่อยขยะในแต่ละกลุ่มให้มีขนาดเล็กกว่า 2 นิ้ว (RDF-3 Fluff RDF) ด้วยเครื่องย่อยเชิงกล
- ผสมขยะในแต่ละกลุ่มในสัดส่วนต่างๆ ประกอบด้วย ผ้า กระดาษ ยางและพลาสติก ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สัดส่วนของการผสมขยะ

สัดส่วนการผสม (โดยมวล)	RDF-5						
	RDF-5-1	RDF-5-2	RDF-5-3	RDF-5-4	RDF-5-5	RDF-5-6	RDF-5-7
กลุ่มผ้า	1	1	1	1	1	2	3
กลุ่มกระดาษ	1	1	1	2	3	1	1
กลุ่มยางและพลาสติก	1	2	3	1	1	1	1

- ผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง (RDF-5) โดยใช้มูลฝอยติดเชื้อ โดยกระบวนการอัดเย็นมีเส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกอัด 6.5 cm และกระบวนการอัดด้วยเครื่องอัดแบบไฮดรอลิก ใช้กากน้ำตาลเป็นตัวประสานดังแสดงดังภาพที่ 2
- ทดสอบสมบัติต่างของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง (RDF-5) โดยใช้มูลฝอยติดเชื้อ ประกอบด้วยความหนาแน่นองค์ประกอบเชิงปริมาณ (Proximate Analysis) องค์ประกอบธาตุ (Ultimate Analysis) และ ค่า Heat Value
- ประเมินศักยภาพทางด้านปริมาณและพลังงานของมูลฝอยติดเชื้อของโรงพยาบาลในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่



ภาพที่ 2 การผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง (RDF-5)

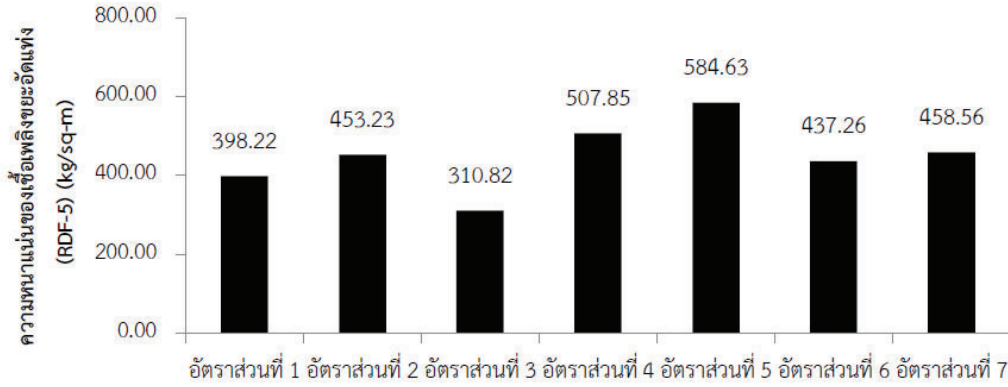
### ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

#### ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง RDF – 5

จากการทดลองหาตัวประสานที่เหมาะสมในการผลิตขยะเชื้อเพลิงอัดแท่งคือ กากน้ำตาล จึงทำการทดลองหาอัตราส่วนที่เหมาะสม โดยผสมขยะในสัดส่วนแต่ละกลุ่ม (กลุ่มผ้า กลุ่มกระดาษ กลุ่มยางและพลาสติก) ในปริมาณเท่ากัน โดยใช้อัตราส่วนในตารางที่ 1 ตารางแสดงอัตราส่วนของการผสมขยะในกลุ่มต่างๆ โดยกำหนดอัตราส่วนของตัวประสานที่เป็นกากน้ำตาลในอัตราส่วนคงที่ คือ 30%โดยมวล และใช้แรงในการอัดคงที่ (ครั้งนี้ไม่สามารถทราบค่าของแรงอัดได้ เนื่องจากไม่มีเครื่องมือวัด ผู้วิจัยใช้วิธีการกำหนดระยะของการอัดให้มีค่าคงที่และตั้งสมมติฐานว่าแรงอัดที่เกิดขึ้นมีค่าคงที่) จากนั้นทำการวัดขนาดและชั่งน้ำหนักหามวลและทำการคำนวณค่าความหนาแน่น โดยความหนาแน่นสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 1 และผลจากการคำนวณแสดงดังภาพที่ 3

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

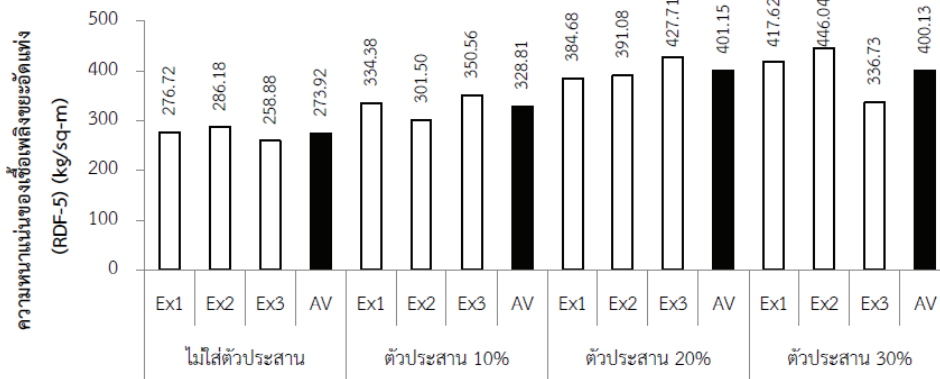
ทั้งนี้พบว่าอัตราส่วนที่ 5 ซึ่งประกอบด้วยกลุ่มผ้า 1 ส่วน กลุ่มกระดาษ 3 ส่วน และกลุ่มยางและพลาสติก 1 ส่วน มีความหนาแน่นสูงที่สุดโดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 584.63 kg/m<sup>3</sup> ดังนั้นในการพิจารณาในส่วนของอัตราส่วนผสมของตัวประสานจะใช้อัตราส่วนที่ 5 ในการดำเนินการต่อไป



ภาพที่ 3 กราฟแสดงความหนาแน่นของขยะติดเชื้อในอัตราส่วนตัวประสาน 30% โดยมวล อัตราส่วนที่เหมาะสมของตัวประสานในการผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง RDF - 5

จากการทดลองที่ผ่านมาทำให้ทราบความหนาแน่นของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง พบว่าอัตราส่วนที่มีความหนาแน่นมากที่สุดคืออัตราส่วนที่ 5 โดยมีอัตราส่วนของขยะคือ 1:3:1 (กลุ่มผ้า กลุ่มกระดาษ และกลุ่มยางและพลาสติก) ดังนั้นในการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของตัวประสานจึงใช้อัตราส่วนที่ 5 ในการดำเนินการโดยการปรับอัตราส่วนตัวประสานเป็น 20%โดยมวล 10%โดยมวล และไม่มีตัวประสานและทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ผลที่ได้แสดงในภาพที่ 4

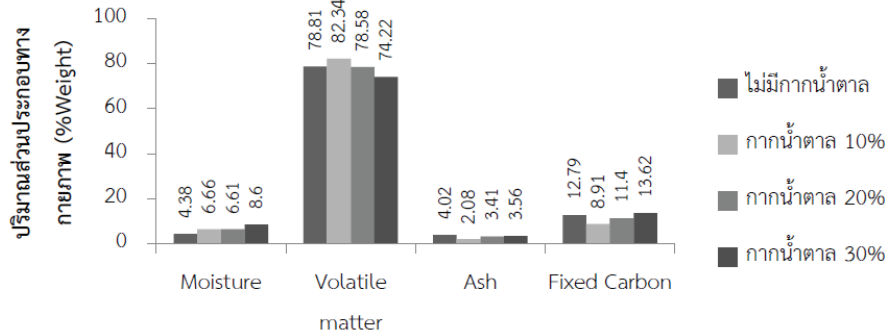
จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนตัวประสาน 20%โดยมวล มีความหนาแน่นมากที่สุดโดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 401.15 kg/m<sup>3</sup> รองลงมาคืออัตราส่วนตัวประสาน 30%โดยมวล มีความหนาแน่น 400.13 kg/m<sup>3</sup> อัตราส่วนตัวประสาน 10%โดยมวล มีความหนาแน่น 328.81 kg/m<sup>3</sup> และไม่มีตัวประสานมีความหนาแน่นน้อยที่สุด 273.92 kg/m<sup>3</sup>



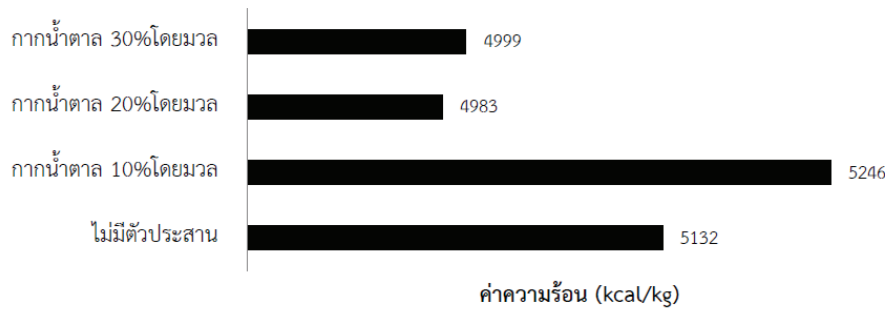
ภาพที่ 4 กราฟแสดงความหนาแน่นของขยะติดเชื้อที่อัตราส่วนตัวประสานแตกต่างกัน

### คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง (RDF-5)

ทำการทดลองผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง RDF-5 โดยใช้เครื่องอัดแท่งแบบอัดเย็นที่อัตราส่วนของกลุ่มผ้า กลุ่มกระดาษและกลุ่มยางและพลาสติก อัตราส่วนคือ 1:3:1 และใช้กากน้ำตาลในสัดส่วนไม่มีตัวประสาน ตัวประสานกากน้ำตาล 10% 20% และ 30% โดยน้ำหนักของวัสดุ โดยทำการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ณ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ในการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงปริมาณ (Proximate Analysis) ได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณเถ้า และปริมาณคาร์บอน โดยใช้เครื่องมือ Macro TGA, TGA 701, LECO, USAวิธีการทดสอบอ้างอิง WI-RES-Macro TGA-001 และ In-house method based on ASTM D7582-15 มีค่าการแสดงผลการทดสอบดังภาพที่ 5 และค่าความร้อนที่ได้จากการทดสอบแสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 5 ปริมาณส่วนประกอบทางกายภาพของเชื้อเพลิงอัดแท่ง RDF-5



ภาพที่ 6 ค่าความร้อนของของเชื้อเพลิงอัดแท่ง RDF-5

### การประเมินศักยภาพทางด้านพลังงานของมูลฝอยติดเชื้อจากโรงพยาบาลในพื้นที่ จังหวัดเชียงใหม่

เมื่อได้ค่าความร้อนจากการทดสอบเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งจากมูลฝอยติดเชื้อจากโรงพยาบาล ได้ทำการประเมินศักยภาพพลังงานจากมูลฝอยติดเชื้อในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ โดยพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่มีโรงพยาบาลในสังกัดกระทรวงสาธารณสุขทั้งหมด 24 แห่ง พบว่าโรงพยาบาลมีการกำจัดมูลฝอยติดเชื้อแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือโรงพยาบาลกำจัดเอง และโรงพยาบาลให้บริษัทเอกชนที่รับกำจัดดำเนินการ จากการศึกษาการเก็บรวบรวมปริมาณขยะของกฎกระทรวงว่าด้วยการกำจัดมูลฝอยติดเชื้อ พ.ศ. 2556 พบว่า สถานบริการสาธารณสุขขนาดใหญ่และขนาดกลาง (โรงพยาบาลชุมชน) ส่วนใหญ่มีการเก็บข้อมูลปริมาณมูลฝอยติดเชื้ออย่างเป็นระบบ แต่สถานบริการขนาดเล็ก เช่น โรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล คลินิก และสถานพยาบาลสัตว์ ไม่มีการเก็บรวบรวมข้อมูลของมูลฝอยติดเชื้อ จึงเป็นสาเหตุให้ข้อมูลของมูลฝอยติดเชื้อไม่ได้อยู่ในระบบเป็นจำนวนหนึ่ง จากข้อมูลตารางที่ 2 ศักยภาพทางด้านพลังงานของมูลฝอยติดเชื้อจากโรงพยาบาลในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ พบว่า มีอัตราการเกิดขยะ 410.26 ตัน/ปี โดยมีศักยภาพพลังงานรวมเท่ากับ 10,382.33 GJ/ปี หรือ 595.58 MJ/เตียง/วัน

จากการศึกษาพบว่าโรงพยาบาลดอยหล่อมีศักยภาพได้ปริมาณมากที่สุดคือ 91.25 ตัน/ปี โดยมีศักยภาพ 210.89 MJ/เตียง/วัน หรือคิดเป็น 2,309.24 GJ/ปี และโรงพยาบาลหางดงได้ปริมาณน้อยที่สุดคือ 1.46 ตัน/ปี โดยมีศักยภาพ 10.12 MJ/เตียง/วัน หรือคิดเป็น 36.95 GJ/ปี

ตารางที่ 2 ศักยภาพทางด้านพลังงานของมูลฝอยติดเชื้อจากโรงพยาบาลในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่

โรงพยาบาล	จำนวน เตียง	อัตราการ เกิดขยะ (ตัน/ปี)	ศักยภาพ พลังงาน (GJ/ปี)	โรงพยาบาล	จำนวน เตียง	อัตราการ เกิดขยะ (ตัน/ปี)	ศักยภาพ พลังงาน (GJ/ปี)
โรงพยาบาลสันป่าตอง	120	40.15	1,016.06	โรงพยาบาลอมก๋อย	30	3.65	92.37
โรงพยาบาลสันกำแพง	30	13.14	332.53	โรงพยาบาลสารภี	30	4.74	120.08
โรงพยาบาลแม่วาง	30	26.64	674.30	โรงพยาบาลเวียงแหง	30	5.84	147.79
โรงพยาบาลแม่ออน	30	1.82	46.18	โรงพยาบาลเชียงดาว	60	18.25	461.85
โรงพยาบาลดอยเต่า	30	10.95	277.11	โรงพยาบาลดอยสะเก็ด	60	29.2	738.96
โรงพยาบาลจอมทอง	210	32.85	831.33	โรงพยาบาลแม่แตง	60	12.78	323.29
โรงพยาบาลสันทราย	30	4.74	120.08	โรงพยาบาลแม่เมาะ	60	19.71	498.80
โรงพยาบาลหางดง	10	1.46	36.95	โรงพยาบาลฮอด	60	10.95	277.11
โรงพยาบาลฝาง	198	43.8	1,108.43	โรงพยาบาลดอยหล่อ	30	91.25	2,309.24
โรงพยาบาลสะเมิง	30	9.12	230.92	โรงพยาบาลพร้าว	60	29.2	738.96
<b>รวม</b>	<b>1,198</b>	<b>410.26</b>	<b>10,382.33</b>	<b>เฉลี่ย</b>	<b>59.90</b>	<b>20.51</b>	<b>1,038.23</b>

หมายเหตุ : ข้อมูลปี พ.ศ. 2556

### สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง (RDF-5) โดยใช้ขยะในกลุ่มที่ 1 ของมูลฝอยติดเชื้อจากโรงพยาบาลในการผลิต และทำการประเมินศักยภาพทางด้านปริมาณและพลังงานของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง (RDF-5) ที่ผลิตได้ ซึ่งสามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

- จังหวัดเชียงใหม่มีปริมาณมูลฝอยติดเชื้อรวม 1,124 kg/วัน หรือคิดเป็น 410.26 ตันต่อปี โดยมีอัตราการเกิดขยะติดเชื้อคิดเป็น 1.18 kg/เตียง/วัน
- เมื่อพิจารณาที่ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง (RDF-5) พบว่าอัตราส่วนตัวประสานที่เหมาะสมที่ 30%โดยมวล
- อัตราส่วนของมูลฝอยติดเชื้อที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง (RDF-5) คือ อัตราส่วน 1:3:1 (กลุ่มผ้า กลุ่มกระดาษ และกลุ่มยางและพลาสติก)
- องค์ประกอบเชิงปริมาณของตัวประสาน 10%โดยมวลมีค่าของปริมาณสารระเหย (Volatile matter) มากที่สุดคือ 82.34% และมีค่าของปริมาณคาร์บอน (Fixed Carbon) 8.91% ซึ่งเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งมีค่าของปริมาณสารระเหยและปริมาณคาร์บอนสูงยังมีประสิทธิภาพสูง
- ค่าความร้อน (N.H.V.) ของเชื้อเพลิงขยะอัดแท่ง (RDF-5) มีค่าสูงสุดเท่ากับ 5,246 kcal/kg ที่อัตราส่วนตัวประสาน 10%โดยมวลและที่อัตราส่วนขยะ 1:3:1
- ศักยภาพพลังงานรวมของขยะมูลฝอยติดเชื้อของจังหวัดเชียงใหม่มีค่าเท่ากับ 10,382.33 GJ/ปี หรือ 595.58 MJ/เตียง/วัน

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธเนศ ไชยชนะ ที่ให้ความปรึกษา ข้อเสนอแนะ แนวคิด ช่วยเหลือ และ แก้ไข ข้อบกพร่องต่างๆ ขอขอบคุณศูนย์วิจัยพลังงานและวิทยาลัยพลังงานทดแทน ที่อำนวยความสะดวกและเอื้อเฟื้อ สถานที่เครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ ในการวิจัยครั้งนี้ สุดท้ายขอขอบคุณผู้ที่เกี่ยวข้องในการวิจัย “การศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดแท่งจากมูลฝอยติดเชื้อของโรงพยาบาล” ทุกท่านที่ให้การช่วยเหลือจนสามารถดำเนินโครงการ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

## เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข, 2555, แนวทางในการจัดการมูลฝอยติดเชื้อโดยเทคโนโลยีการทาลายเชื้อด้วย ไออน้ำ ณ แหล่งกำเนิด
- [2] [http://nwnt.prd.go.th/centerweb/News/NewsDetail?NT01\\_NewsID=WNSOC5905290010006](http://nwnt.prd.go.th/centerweb/News/NewsDetail?NT01_NewsID=WNSOC5905290010006) สืบค้น เมื่อ 12 มกราคม 2560
- [3] เขมจิรา สายวงศ์เปี้ย, น้าฝน เอกตาแสง, 2560, ระบบการจัดการมูลฝอยติดเชื้อในจังหวัดลาปาง, คณะสาธารณสุขศาสตร์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, การประชุมวิชาการระบบสุขภาพชุมชนระดับชาติ ครั้งที่ 1
- [4] การประชุมเชิงปฏิบัติการ, 2557, การจัดการมูลฝอยติดเชื้อภาคเหนือประจำปี 2557, กระทรวงสาธารณสุข, กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม
- [5] ศูนย์อนามัยที่ 5 ราชบุรี, โปรแกรมกากับการขนส่งมูลฝอยติดเชื้อ, <http://apps.hpc.go.th/waste/>, สืบค้นเมื่อ 4 กันยายน 2560
- [6] ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2552, การศึกษาแนวทางการบริหารจัดการขยะชุมชน เพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทนแบบครบวงจร (ระดับชุมชน) , รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์
- [7] กรมควบคุมมลพิษ, 2556, สรุปลักษณะการณ์มลพิษของประเทศไทยปี 2556, กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม



## การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพจากมูลไก่ไข่

### Removal of hydrogen sulfide in biogas from laying hens manure

ศรุตวิงศ์ บุญคง<sup>1\*</sup> ชัยพฤกษ์ หงษ์รัตตพร<sup>1</sup> สว่าง กุลวงษ์<sup>1</sup> สุธาสิณี ครุฑชกะ<sup>1</sup> และสมิง ศรีกา<sup>2</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาสัตวศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย จังหวัดเลย 42000

<sup>2</sup>คลินิกเทคโนโลยี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย จังหวัดเลย 42000

#### บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพแบบถุ่หมักพีวีซีจากมูลไก่ไข่ วางแผนการวิจัยแบบสุ่มสมบูรณ์ ใช้บ่อก๊าซชีวภาพแบบถุ่หมักพีวีซีขนาด 8 ลูกบาศก์เมตร จำนวน 5 บ่อ นำมูลไก่ไข่ ผสมน้ำในบ่อเดิมโดยใช้สัดส่วน 1:1 โดยปริมาตร (ขนาด 20 ลิตร) ทำการเติมทุกวันเป็นเวลา 28 วัน ใช้ตัวดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 4 กลุ่ม คือ กลุ่มควบคุม (ไม่ใช้ตัวดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์) ถ่าน ผอยเหล็ก และเม็ดเคลือบสารเคมี เก็บข้อมูลก๊าซ ประกอบด้วย มีเทน (CH<sub>4</sub>) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ออกซิเจน (O<sub>2</sub>) BAL (ก๊าซอื่นๆ) และไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H<sub>2</sub>S) โดยใช้เครื่อง BIOGAS 5000

ผลการวิจัยพบว่าองค์ประกอบของก๊าซมีเทน คาร์บอนไดออกไซด์ และออกซิเจน จากมูลไก่ไข่ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ( $p>0.05$ ) โดยมีเทนมีค่าร้อยละ 62.8, 66.0, 66.4 และ 65.2 ตามลำดับ คาร์บอนไดออกไซด์มีค่าร้อยละ 28.1, 28.3, 27.9 และ 28.7 ตามลำดับ ออกซิเจนมีค่าร้อยละ 1.2, 1.4, 1.4 และ 1.4 ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามการวัดปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ พบว่า T4 มีการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ดีที่สุด รองลงมาคือ T3 และ T2 มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p<0.01$ ) มีค่าเท่ากับ 86.8, 598.0, และ 602.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ดังนั้นจากการวิจัยนี้สรุปได้ว่าเม็ดเคลือบสารเคมีเป็นตัวดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ดีที่สุด สามารถช่วยลดการกัดกร่อนโลหะและลดก๊าซพิษได้

**คำสำคัญ:** ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ก๊าซชีวภาพ มูลไก่ไข่

\*Corresponding author: Tel.: 088-3093875. E-mail address: Sarutty\_21@hotmail.com

#### บทนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการผลิตก๊าซชีวภาพกำลังได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง เนื่องจากการลดลงของปริมาณเชื้อเพลิงของโลก ทำให้ทุกประเทศให้ความสนใจกับการผลิตพลังงานทดแทนโดยใช้วัตถุดิบที่มีอยู่ภายในประเทศ เพื่อผลิตพลังงานมาใช้ทดแทนพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม จึงมีของเสียและวัสดุต่างๆ จากภาคเกษตรกรรมอยู่ทั่วไป เช่น มูลสัตว์ หรือพืชต่างๆ การผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหล่านี้จึงมีความเหมาะสมสำหรับประเทศไทย [1]

การเลี้ยงสัตว์ในประเทศไทยได้ขยายตัวอย่างรวดเร็ว มีทั้งระบบการเลี้ยงแบบฟาร์ม ขนาดใหญ่ ขนาดกลาง และระบบการเลี้ยงแบบ รายย่อย ปัจจุบันการเลี้ยงสัตว์กระจายอยู่ตามชนบททุกแห่งหน โดยเฉพาะการเลี้ยงแบบรายย่อย ซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในพื้นที่ของชุมชน ส่งผลให้เกิดมลภาวะทางสิ่งแวดล้อมทั้งภายในบริเวณฟาร์ม พื้นที่เลี้ยงสัตว์และชุมชนใกล้เคียงเป็นอย่างมาก เช่น ปัญหามลภาวะของกลิ่น เน่าเสีย แมลงวัน และพาหะนำโรคต่างๆ เป็นต้น โดยทั้งสองส่วนของมูลและปัสสาวะที่ขับถ่ายออกจากตัวสัตว์ ทางฟาร์ม หรือผู้ประกอบการจำเป็นต้องกำจัดทิ้งออกไป ทำให้มีค่าใช้จ่าย

เพิ่มขึ้น การกำจัดสิ่งปฏิกูล (มูลและปัสสาวะ) จากสัตว์เหล่านี้ หากใช้วิธีการที่เหมาะสมจะช่วยลดปัญหาหมอกควันที่กล่าวมาข้างต้นได้ดี การกำจัดมูลและปัสสาวะจากสัตว์ด้วยระบบก๊าซชีวภาพ ถือว่าเป็นวิธีที่เหมาะสม สามารถใช้ได้ทั้งฟาร์มขนาดใหญ่และฟาร์มเกษตรกรรายย่อยตามชุมชนต่างๆ นอกจากนี้ภายหลังการบำบัด ยังได้ก๊าซมีเทน และกากตะกอน ซึ่งเป็นผลพลอยได้ โดยก๊าซมีเทน ที่ได้ นั้น สามารถนำไปใช้เป็นพลังงานสำหรับการหุงต้ม การให้ความร้อน เป็นพลังงานมอเตอร์ หรือกิจกรรมอื่นๆ ภายในครัวเรือนได้ ส่วนกากตะกอนที่เกิดขึ้นจะสามารถนำไปผลิตเป็นปุ๋ยอินทรีย์ได้อย่างมีคุณภาพ อย่างไรก็ตามการทำบ่อก๊าซชีวภาพอย่างง่าย สำหรับเกษตรกรรายย่อย โดยประยุกต์ใช้วัสดุ อุปกรณ์ ที่ทำได้ง่ายในท้องถิ่นมาใช้ในการจัดทำบ่อสำหรับกักเก็บมูลและก๊าซ บ่อหมักก๊าซชีวภาพขนาด 8 ลูกบาศก์เมตร มีความเหมาะสมกับครัวเรือนเกษตรกรที่เลี้ยงสัตว์แบบเศรษฐกิจพอเพียง เลี้ยงแบบรายย่อย เช่น เลี้ยงสุกร 10-20 ตัว โคกระบือ 5-20 ตัว ไก่เนื้อ 3-5 ตัว หรือสัตว์ปีก 150-200 ตัว การหมักดังกล่าวสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้วันละประมาณ 2-3 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งเพียงพอต่อการใช้หุงต้ม โดยสามารถทดแทนก๊าซ LPG ได้ไม่น้อยกว่าเดือนละ 1 ถัง หรือประมาณ 300-400 บาท หรือเท่ากับปีละ 3,600-4,800 บาทต่อ ครัวเรือน นอกจากนี้ ยังได้กากตะกอน ที่ผ่านการย่อยสลายแล้ว มาใช้เป็นปุ๋ยอินทรีย์อีกด้วย

การเลี้ยงไก่ ถือว่ามีความสำคัญเกี่ยวกับการผลิตอาหารเป็นสำคัญ ซึ่งเป็นสิ่งที่ทุกคนจะต้องบริโภคไม่ว่าจะเป็นไข่ไก่ หรือเนื้อไก่ ซึ่งเป็นอาหารที่มีราคาถูกมีประโยชน์และมีคุณค่าทางโภชนาการสามารถหาซื้อได้ง่าย ในการเลี้ยงไก่สิ่งที่ปัญหาและอุปสรรคในการผลิตที่สำคัญคือ การจัดการของเสียที่เกิดขึ้นจากไก่ หรือมูลไก่ โดยไก่ส่วนใหญ่จะเลี้ยงไก่ไว้ในกรงมูลไก่ที่เกิดขึ้นจะกองอยู่และเกิดการสะสม หากไม่มีการโกยทิ้งหรือปล่อยสะสมไว้เกิน 4 วัน จะทำให้ก๊าซแอมโมเนียในมูลไก่อะเหวยออกมากและส่งผลกระทบต่อไก่ที่เลี้ยงไว้ [2] ถ้านำมูลไก่ไปใช้เพื่อเป็นอาหารของปลาก็จะประสบปัญหาน้ำในบ่อปลาเน่าเสียได้ง่าย สำหรับการขายมูลไก่เพื่อนำไปทำปุ๋ยต้องนำไปตากแห้งก่อน ซึ่งถ้าเป็นหน้าฝนก็จะประสบปัญหาเพราะไม่สามารถตากแห้งได้ และยังก่อให้เกิดปัญหาผลกระทบในเรื่องของกลิ่นในช่วงระหว่างการหมักหรือตากแห้งได้ ซึ่งเมื่อคิดกับราคาปุ๋ยหมักที่ขายได้อาจจะไม่คุ้มค่า เพราะระหว่างการตากมูลไก่อะเหวยส่งผลกระทบต่อเรื่องของการเชื้อโรค และพาหะนำเชื้อโรค เนื่องจากในกระบวนการตากมีแมลงวันมาเกาะ ทำให้มีแมลงวันเพิ่มมากขึ้น ปัจจุบันมีการแก้ไขปัญหาดังกล่าวในฟาร์มไก่โดยจะทำการเก็บกวาดมูลสัตว์ในบริเวณโรงเรือนออกให้หมดทุกวัน และนำไปใช้ประโยชน์อื่นๆต่อไป เช่น การเลี้ยงปลา เพาะเห็ดหรือผลิตไส้เดือน ใช้เป็นปุ๋ยสำหรับพืช ใช้เลี้ยงไรแดง และการนำมาผลิตเป็นก๊าซชีวภาพที่สามารถนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนได้ เป็นต้น ดังนั้นการนำไปผลิตเป็นก๊าซชีวภาพจะเป็นการเพิ่มมูลค่ามากยิ่งขึ้น เป็นการสร้างรายได้ให้กับเกษตรกร ก่อให้เกิดประโยชน์ต่อประชาชนและต่อสิ่งแวดล้อมเพื่อเป็นการอนุรักษ์พลังงานด้วยอีกทางหนึ่ง แต่อย่างไรก็ตามองค์ประกอบของก๊าซนั้น จะประกอบด้วย มีเทนร้อยละ 60-70 ที่เหลือเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ หรือ ก๊าซไข่เน่า (ก๊าซพิษ) ก๊าซไนโตรเจน (N<sub>2</sub>) และไอน้ำ ซึ่งเมื่อไฮโดรเจนซัลไฟด์รวมไอน้ำจะเป็นกรดซัลฟูริกหรือกรดกำมะถัน มีฤทธิ์กัดกร่อนโลหะ ทำให้เตาหรือเครื่องยนต์เป็นสนิมและผุกร่อนได้ นอกจากนี้ยังเป็นอันตรายต่อสุขภาพหากสูดดมเป็นเวลานานๆ การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากก๊าซชีวภาพจึงมีความจำเป็น ดังนั้นในงานวิจัยครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการใช้ชุดดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยระบบการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลไก่ไข่

## วิธีการวิจัย

### การวางแผนการวิจัย

การวิจัยนี้วางแผนการวิจัยแบบสุ่มสมบูรณ์ ใช้บ่อก๊าซชีวภาพแบบถูหมักพีวีซีขนาด 8 ลูกบาศก์เมตร นำมูลไก่ไข่ผสมน้ำในบ่อเติมโดยใช้สัดส่วน 1:1 โดยปริมาตร [3] (ขนาด 20 ลิตร) ทำการเติมทุกวันเป็นเวลา 28 วัน โดยใช้ตัวดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 4 กลุ่ม จำนวน 5 บ่อ โดยบันทึกข้อมูลทุก 30 นาที จำนวนบ่อละ 3 ครั้งต่อกลุ่ม เก็บข้อมูลก๊าซโดยใช้เครื่อง BIOGAS 5000 บันทึกข้อมูลจากทั้ง 5 บ่อ โดยใช้ตัวดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 4 กลุ่ม ดังนี้

- T 1 กลุ่มควบคุม (ไม่ใช้ตัวดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์)
- T 2 ใช้ถ่านเป็นตัวดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์
- T 3 ใช้ฟอยเหล็กเป็นตัวดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์
- T 4 ใช้เม็ดเคลือบสารเคมีเป็นตัวดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

#### การเตรียมวัสดุดูดซับ

1. การเตรียมถ่านจากไม้มะขาม คัดขนาดให้มีขนาดใกล้เคียงกัน แล้วนำไปตากแดดให้แห้ง
2. การเตรียมฟอยเหล็ก (เศษฟอยเหล็กจากโรงกลึง) นำฟอยเหล็กมาวางไว้ในสภาพที่มีอากาศปล่อยไว้จนเกิดสนิม
3. ผสมทรายกับปูน ผสมน้ำพอน้ำเม็ดได้ นำส่วนผสมลงในหลุมลาดเพาะกล้าแบบกรวย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ลึก 1 เซนติเมตร ใช้หลอดกาแฟ เจาะรูตรงกลาง ทิ้งให้ปูนแข็งตัว 1-2 วัน จากนั้นเตรียมสารละลาย  $FeCl_3$  จำนวน 162 กรัม ละลายในน้ำ 1 ลิตร และเตรียมสารละลาย  $NaOH$  จำนวน 120 กรัม ละลายในน้ำ 1 ลิตร แช่เม็ดดูดซับในสารละลาย  $FeCl_3$  นาน 20-30 นาที จากนั้นนำเม็ดที่ได้ไปแช่ในสารละลาย  $NaOH$  นาน 20-30 นาที (250 เม็ด) จากนั้นนำไปผึ่งลมให้แห้ง

#### การเตรียมคอลัมน์

การเตรียมคอลัมน์สำหรับการบรรจุวัสดุในการดูดซับ โดยใช้ท่อพีวีซีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 2 นิ้ว ความยาว 50 เซนติเมตร โดยทำการติดตั้งหัวก๊อกพีวีซีขนาด 4 หุน บริเวณด้านบนตรงกลางของท่อเพื่อทำเป็นทางก๊าซเข้า และบริเวณด้านล่างติดตั้งก๊อกทองเหลืองเหมือนด้านบนเพื่อทำเป็นบริเวณส่งผ่านก๊าซตัวอย่างเข้าเครื่อง BIOGAS 5000 เพื่อตรวจวิเคราะห์

#### การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

ข้อมูลที่ได้จากการวิจัยจะนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) ตามแผนการวิจัยแบบสุ่มสมบูรณ์ และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้วิธี Duncan's New Multiple Test โดยใช้โปรแกรม SAS [4]



ภาพที่ 1 พื้นที่ศึกษาของโครงการ ฟาร์มเกษตรกรผู้เลี้ยงไก่ไข่ อ.วังสะพุง จ.เลย

### ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

ผลการศึกษาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพแบบถุงหมักพีวีซีจากมูลไก่ โดยใช้ตัวดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 4 กลุ่ม (T1, T2, T3 และ T4) พบว่าองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพจากมูลไก่ประกอบด้วย มีเทน คาร์บอนไดออกไซด์ ออกซิเจน ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ( $p>0.05$ ) โดยมีเทน มีค่าร้อยละ 62.8, 66.0, 66.4 และ 65.2 ตามลำดับ คาร์บอนไดออกไซด์ มีค่าร้อยละ 28.1, 28.3, 27.9 และ 28.7 ตามลำดับ ออกซิเจน มีค่าร้อยละ 1.2, 1.4, 1.4 และ 1.4 ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามการวัดปริมาณ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ พบว่า T1 มีค่ามากที่สุดรองลงมาคือ T2, T3, และ T4 ตามลำดับ มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p<0.01$ ) มีค่าเท่ากับ 1004.8, 602.0, 598.0 และ 86.8 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการใช้เม็ดเคลือบสารเคมีเป็นตัวดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์สามารถดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ดีที่สุด ดังแสดงใน ตารางที่ 1

ตารางที่ 1 The composition of biogas by different adsorbent materials

Parameter	T1	T2	T3	T4	SEM
CH <sub>4</sub> (%)	62.8	66.0	66.4	65.2	1.2
CO <sub>2</sub> (%)	28.1	28.3	27.9	28.7	0.4
O <sub>2</sub> (%)	1.2	1.4	1.4	1.4	0.08
BAL (other gas)	7.9 <sup>a</sup>	4.3 <sup>c</sup>	4.3 <sup>c</sup>	4.7 <sup>b</sup>	0.01
H <sub>2</sub> S (ppm)	1004.8 <sup>a</sup>	602.0 <sup>b</sup>	598.0 <sup>b</sup>	86.8 <sup>c</sup>	10.5

<sup>a,b,c</sup> Value on the same row under each main effect with different superscripts differ significantly ( $P<0.01$ )

จากการศึกษาของ วงศ์วิวรรธ ฐนุศิลป์ และ สุนันทา เลาวัญศิริ [5] ได้ศึกษาการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยใช้วัสดุดูดซับที่ต่างกัน ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ (AC) ซักสิ่งเหล็กปรับสภาพ (FH) ซักสิ่งเหล็กไม่ปรับสภาพ (FA) และ ถ่านกัมมันต์ร่วมกับซักสิ่งเหล็กไม่ปรับสภาพ (AF) โดยใช้ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จากระบบก๊าซชีวภาพแบบ Anaerobic Covered Lagoon พบว่าก๊าซชีวภาพจากระบบก๊าซชีวภาพแบบ Anaerobic Covered Lagoon ที่วัดได้ก่อนตัวกลางวัสดุดูดซับ AC, FH, FA และ AF ประกอบด้วย ก๊าซมีเทนร้อยละ 42.60, 44.10, 44.70 และ 43.70 ตามลำดับ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 54.80, 54.50, 54.70 และ 55.50 ตามลำดับ ก๊าซออกซิเจน 0.00 และ ก๊าซอื่น ๆ ร้อยละ 0.06, 01.40, 06.00 และ 0.809 ตามลำดับ และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1,334, 1,403, 1,205 และ 1,080 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยใช้ตัวกลาง AC, FH, FA และ AF พบว่าก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ก่อนดูดซับด้วยตัวกลาง มีค่าเท่ากับ 1,334, 1,403, 1,205 และ 1,082 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยเมื่อก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ผ่านการกำจัดโดยใช้วัสดุดูดซับพบว่าความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ลดลงเหลือเท่ากับ 937.5, 1,187.4, 358.8 และ 610.7 มิลลิกรัมต่อลิตร ของวัสดุดูดซับ AC, FH, FA และ AF ตามลำดับ โดยประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ เท่ากับร้อยละ 29.72, 15.37, 70.22 และ 43.61 ของวัสดุดูดซับ AC, FH, FA และ AF ตามลำดับ วัสดุดูดซับ FA มีประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงสุด ณ สภาวะคงที่ เนื่องจาก FA เป็นสนิมที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ [6] เป็นสารประกอบระหว่างเหล็กกับออกซิเจน เกิดเป็นไฮดรตเพอริกออกไซด์ เมื่อรวมตัวกับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ เกิดเป็นสารประกอบเหล็กซัลเฟต จึงทำให้เกิดกระบวนการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ของวัสดุดูดซับ FA มีประสิทธิภาพมากที่สุด ประสิทธิภาพในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์รองลงมาคือ AF ซึ่งเป็นการใช้วัสดุดูดซับ AC ร่วมกับ FA ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ลดลง ประสิทธิภาพในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ลำดับที่สามคือ AC เนื่องจากช่วงแรก AC จะมีความสามารถในการกำจัดที่ดี แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไป

ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จะสูงขึ้นและความสามารถในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ของ AC จะถึงจุดอิ่มตัวเร็ว ประสิทธิภาพในการดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ลำดับที่สี่คือ FH เนื่องจาก FH มีการปรับสภาพด้วยกรดเพื่อที่จะเร่งปฏิกิริยาให้เกิดสนิม โดยกรด HCl ความเข้มข้นร้อยละ 15 เนื่องจากกรดมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ไม่ค่อยดี โดยการนำเอาวัสดุที่ใช้เป็นตัวกลางในการดูดซับควรคำนึงถึงราคาต้นทุนของวัสดุดูดซับด้วย ดังนั้น FA เหมาะสมที่สุดในการนำมาใช้ประโยชน์ในการดูดซับก๊าซ แต่อย่างไรก็ตามการใช้คอลัมน์สำหรับการบรรจุวัสดุในการดูดซับ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร ความยาววัสดุดูดซับ 10 เซนติเมตร ซึ่งมีขนาดเล็กอาจส่งผลให้การดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เข้าสู่จุดอิ่มตัวได้เร็ว ดังนั้นจากการวิจัยนี้จึงได้ปรับให้มีขนาดของคอลัมน์มีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้การดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ผลดียิ่งขึ้น

### สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาผลของการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพจากมูลไก่ไข่ พบว่าการใช้เม็ดเคลือบสารเคมีเป็นตัวดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ได้ผลดีที่สุด แต่อย่างไรก็ตามการใช้ถ่านและฝอยเหล็กก็สามารถลดปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้เช่นกัน หากได้งายในท้องถิ่น สามารถนำมาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์และมีความเหมาะสมในการใช้ก๊าซชีวภาพระดับครัวเรือนได้

### กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณสำนักงานปลัดกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เครือข่ายวิจัยภูมิภาค: ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (วช.) ที่สนับสนุนงบประมาณในการวิจัยในครั้งนี้ คลินิกเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย สำหรับอุปกรณ์ในการทำงานวิจัย และมหาวิทยาลัยราชภัฏเลย สำหรับงบประมาณสนับสนุนในการนำเสนอผลงานวิจัย

### เอกสารอ้างอิง

- [1] สุพล บ่อคุ้ม และ สมศักดิ์ พิทักษ์นรินทร์. (2557). “อัตราการบรรทุกระบบอินทรีย์ของการหมักแบบไร้อากาศสองขั้นตอนต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ จากมูลเป็ดรายปากช่อง1”. **ประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ครั้งที่ 15**. วันที่ 28 มีนาคม 2557 ณ วิทยาลัยการปกครองท้องถิ่น : มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- [2] สิริชัย แยมแบน. (2554). การผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลไก่ไข่ด้วยระบบบ่อหมักรางของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [3] เพชรรัตน์ ใจบุญ. (2558). การผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลสัตว์ร่วมกับหญ้าข้าวนก. **การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทยครั้งที่ 8**. วันที่ 4-6 พฤศจิกายน 2558. ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [4] SAS Institute Inc. (2001). **SAS System (Release 8.2)**, Cary, NC. USA.
- [5] วงศ์วิวรรธ ฐนุศิลป์ และ สุนันทา เลาว์ณย์ศิริ. (2555) การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จากก๊าซชีวภาพโดยใช้ถ่านกัมมันต์และเหล็ก. **การประชุมวิชาการแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 9**. วันที่ 6-7 ธันวาคม 2555 ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน.
- [6] สมชัย อัครทิวา. (2546). **ความรู้พื้นฐานวิศวกรรมของปฏิกิริยาเชิงเร่ง**. สำนักพิมพ์ท็อป. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, เคมีวิทยา เล่ม 2 : หลักทฤษฎีและสมบัติของสสาร.

## การเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมของทางเลือกการจัดการกากกาแฟ: กรณีศึกษา การเผาโดยตรงและผลิตไบโอดีเซล

### Comparison of Environmental Impact of Spent Coffee Ground Residue Management Options: Case Study of Direct Combustion and Biodiesel Production

ภาณุวัฒน์ อุส่าห์เพียร<sup>1\*</sup> และณัฐพงศ์ ตันติวิวัฒน์พันธ์<sup>2</sup>

<sup>1</sup> วิทยาลัยพลังงานและสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืนรัตนโกสินทร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์  
นครปฐม 73170

<sup>2</sup> ศูนย์ความเป็นเลิศการจัดการของเสียอันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

#### บทคัดย่อ

การพัฒนาอย่างรวดเร็วของอุตสาหกรรมผลิตกาแฟในประเทศไทย ทำให้เกิดกากกาแฟซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตเพิ่มสูงขึ้นเป็นเงาตามตัว ทำให้เป็นอุปสรรคของการพัฒนาอุตสาหกรรมผลิตกาแฟได้ในอนาคต แนวทางการจัดการกากกาแฟในปัจจุบันมีอยู่ด้วยกันหลายแนวทาง ไม่ว่าจะเป็นการฝังกลบ การเผาเพื่อเป็นพลังงานโดยตรง หรือการสกัดน้ำมันเพื่อมาผลิตไบโอดีเซล ซึ่งผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของแต่ละแนวทางการจัดการมีความแตกต่างกัน ดังนั้น เพื่อคำนึงถึงผลกระทบสิ่งแวดล้อมให้เกิดขึ้นน้อยที่สุด งานวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อ ประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมของวิธีการเผาโดยตรงเปรียบเทียบกับการนำไปสกัดน้ำมันเพื่อผลิตเป็นน้ำมันไบโอดีเซล โดยใช้หลักการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment) ผลกระทบสิ่งแวดล้อมในแต่ละแนวทางการจัดการจะถูกประเมินด้วยวิธีการ IMPACT 2002+ ผลลัพธ์ที่ได้บ่งชี้ว่า ผลกระทบทางด้านระบบทางเดินหายใจ (Respiratory Inorganic) ผลกระทบด้านฝนกรด (Aquatic Acidification) และผลกระทบภาวะโลกร้อน (Global Warming) ของการนำไปกากกาแฟผลิตเป็นไบโอดีเซลน้อยกว่า เมื่อเทียบกับการนำกากกาแฟไปเผาโดยตรง ร้อยละ 93.38, 86.84, และ 20.74 ตามลำดับ นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาแหล่งที่มาการเกิดผลกระทบของการผลิตไบโอดีเซล พบว่า แหล่งที่ก่อให้เกิดผลกระทบทั้งสามมากที่สุด เกิดจากการผลิตไฟฟ้า ที่ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ส่วนของใช้เอกชนั้น มีความโดดเด่นในการก่อให้เกิดผลกระทบระบบทางเดินหายใจ และภาวะโลกร้อน จากผลการประเมินดังกล่าวสรุปได้ว่า การเลือกสกัดน้ำมันมาผลิตเป็นไบโอดีเซล ก่อให้เกิดผลกระทบสิ่งแวดล้อมทางด้าน ระบบทางด้านหายใจ ด้านฝนกรด และด้านภาวะโลกร้อน น้อยกว่าการนำไปเผาโดยตรง อย่างไรก็ตาม ในอนาคตผู้วิจัยแนะนำว่าควรคำนึงผลกระทบทางด้านต้นทุนการผลิตด้วย ซึ่งเป็นอีกตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการตัดสินใจเลือกแนวทางการจัดการกากกาแฟ

**คำสำคัญ:** กากกาแฟ การประเมินวัฏจักรชีวิต ไบโอดีเซล ภาวะโลกร้อน

\*Corresponding author: Tel.: 02-4416000 ext.1051. E-mail address: pamuwat.usa@rmutr.ac.th

#### บทนำ

ตลาดกาแฟโลกรวมทั้งตลาดภายในประเทศไทยในช่วง 5 ปีที่ผ่านมา มีการขยายตัวอย่างต่อเนื่อง สำหรับประเทศไทยโรงงานแปรรูปเมล็ดกาแฟมีความต้องการเมล็ดกาแฟเพิ่มมากขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 6.5 ต่อปี [1-2] นอกจากนี้ การเปิด AEC ตลาดกาแฟสำเร็จรูปจะมีการเติบโตเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ผลของการพัฒนาอย่างรวดเร็วของอุตสาหกรรมกาแฟ ทำให้กากของเสียจากอุตสาหกรรมผลิตกาแฟเพิ่มขึ้นเป็นเงาตามตัวและกลายเป็นอุปสรรคปัญหาต่อ

การพัฒนาอุตสาหกรรมกาแปของประเทศไทยได้ [3] โดยทั่วไปตามโรงงานอุตสาหกรรมผลิตกาแป กากกาแปที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิต จะถูกนำไปเผาเพื่อทำลาย หรือเผาเพื่อนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่ การเผาเพื่อนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่ ถือเป็นวิธีการที่นิยมมากที่สุด เพราะนอกจากจะสามารถกำจัดกากกาแปได้แล้วยังสามารถทดแทนการใช้เชื้อเพลิงของอุตสาหกรรมได้ด้วย อย่างไรก็ตาม การเผาโดยตรง อาจทำให้ได้พลังงานกลับมาได้ไม่มากเท่าที่ควร และทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณมาก โดยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซที่ก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global warming) ซึ่งเป็นประเด็นที่นานาชาติกำลังรณรงค์เพื่อลดผลกระทบดังกล่าว นอกจากนี้ การเผา ยังมีโอกาสในการปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NOx) และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>) ที่สามารถส่งผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ได้ หากไม่มีอุปกรณ์บำบัดมลพิษก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมที่สี่พอ [4]

การจัดการของเสีย กากกาแป นอกจากวิธีการเผาโดยตรงแล้ว สามารถนำไปจัดการด้วยวิธีการอื่นๆ เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการใช้กากของเสียเป็นเชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ยกตัวอย่างเช่น การนำไปทำเป็นส่วนผสมน้ำมันไบโอดีเซล [5] การทำแท่งเชื้อเพลิง [6] เป็นต้น ดังนั้น เพื่อคำนึงถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่น้อยที่สุดต่อการนำกากกาแปไปใช้ประโยชน์ด้านพลังงาน งานวิจัยนี้จึงทำการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมของวิธีการเผาโดยตรง เปรียบเทียบกับการนำไปใช้เป็นส่วนผสมน้ำมันไบโอดีเซล โดยใช้หลักการประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment) ผลที่ได้จากงานวิจัยคาดว่าจะสามารถใช้เป็นแนวทางในการพิจารณาวิธีการจัดการกากกาแป ในอนาคต รวมถึงเป็นข้อมูลเบื้องต้นให้กับผู้ที่เกี่ยวข้องในการตัดสินใจเลือกวิธีการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการจัดการกากกาแปไปใช้ประโยชน์ในรูปแบบพลังงาน

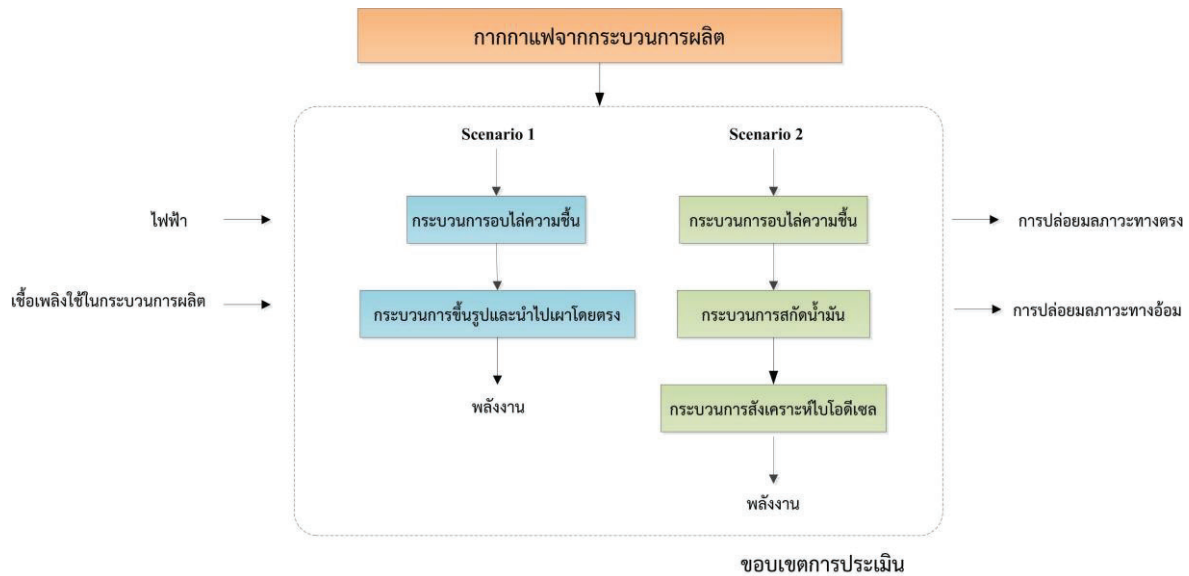
## วิธีการวิจัย

ตามมาตรฐาน ISO 14040:2006 วิธีการประเมินวัฏจักรชีวิตจะแบ่งออกเป็น 4 ส่วนหลัก ได้แก่ (1) การตั้งเป้าหมายและขอบเขตการศึกษา (2) การวิเคราะห์บัญชีมวลสารขาเข้า-ขาออก (3) การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม และ (4) การแปลผล

(1) การตั้งเป้าหมายและขอบเขตการศึกษา ในการศึกษานี้ การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิต มีวัตถุประสงค์เพื่อบ่งชี้ทางเลือกที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุดในการนำกากกาแปไปใช้ประโยชน์ในรูปแบบพลังงาน

**หน่วยเทียบ (Functional Unit)** สำหรับการพิจารณาผลกระทบในแต่ละทางเลือก จะพิจารณาอ้างอิงกับ 1 ตันกากกาแปที่นำไปใช้ประโยชน์ โดยข้อมูลการปลดปล่อยมลภาวะต่าง ๆ การใช้พลังงานและสารเคมี จะอ้างอิงกับหน่วยเทียบนี้

**ขอบเขตการประเมิน (System boundary)** การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมจะมีขอบเขตเริ่มตั้งแต่การนำของเสียกากกาแปมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงประเภทต่าง ๆ ตามที่ได้แสดงในภาพที่ 1 การปลดปล่อยผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการก่อสร้างสิ่งปลูกสร้างจะไม่ถูกพิจารณาในการศึกษานี้



ภาพที่ 1 ขอบเขตการประเมินในงานวิจัยนี้

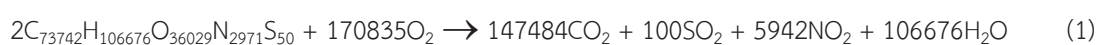
(2) การจัดทำบัญชีรายการมวลสาร องค์ประกอบของกากกาแฟ ถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่อง CHNS/O elemental analyzer ค่าความร้อน (Heating Value) ถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 1 ข้อมูลอ้างอิงต่างๆ จะพิจารณาจากฐานข้อมูลในประเทศเป็นอันดับแรก กรณีไม่มีข้อมูลอ้างอิงในประเทศ ฐานข้อมูล Ecoinvent v3.0 จะถูกใช้แทนที่

ตารางที่ 1 การวิเคราะห์องค์ประกอบกากกาแฟ

การวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้น (Proximate Analysis)	
ความชื้น (%)	8.38
สารระเหยง่าย (%)	75.98
ถ่านคงตัว (%)	18.25
ค่าความร้อน (cal/g)	4417
การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบกากกาแฟ (Ultimate Analysis)	
คาร์บอน (%C)	51.74
ไฮโดรเจน (%H)	6.29
ออกซิเจน (%O)	33.68
ไนโตรเจน (%N)	2.43
ซัลเฟอร์ (%S)	0.09
เถ้า (%Ash)	5.77

#### การวิเคราะห์ทางเลือกการนำกากกาแฟเป็นพลังงาน (Scenario analysis)

การเผาโดยตรง (Scenario 1) สำหรับทางเลือกนี้ กากกาแฟจะถูกนำไปอบไล่ความชื้น จากนั้นนำไปขึ้นรูปเป็นรูปทรงกระบอกโดยมีตัวประสานเป็นกาวแป้งมันสำปะหลัง เมื่อขึ้นรูปแล้วนำไปเผาให้ความร้อนโดยตรง ในการประเมินผลกระทบที่เกิดจากการเผาไหม้ ก๊าซต่างๆ จะถูกประเมินจากสมการสโตยชิโอเมตริก ดังสมการที่ 1



การนำกากกาแฟผลิตเป็นไบโอดีเซล (Scenario 2) สำหรับทางเลือกนี้ กากกาแฟจะถูกนำไปสกัดน้ำมันออกด้วยตัวทำละลายเฮกเซน สกัดที่อุณหภูมิ 60 °C ด้วยความเร็ว 150 rpm เป็นเวลา 2 h ใน water bath shaker น้ำมัน



ที่สกัดออกมาได้จะถูกนำไปตรวจสอบหาค่าความเป็นกรดในน้ำมัน ส่วนตัวกากกาแฟหลังกระบวนการสกัดจะถูกตรวจสอบหาปริมาณน้ำมันคงเหลือโดยเครื่องสกัดแบบ Soxhlet จากนั้นน้ำมันที่ได้จะถูกนำไปผ่านกระบวนการสังเคราะห์ไบโอดีเซล (2-step transesterification) ไบโอดีเซลที่ผลิตได้จะถูกตรวจสอบคุณสมบัติตามมาตรฐาน ASTM standard คือ ความหนืดที่ 40 °C และความเป็นกรด รวมถึงปริมาณน้ำในไบโอดีเซล โดยใช้เครื่อง KF titration และค่าความร้อน โดยเครื่อง Bomb calorimeter

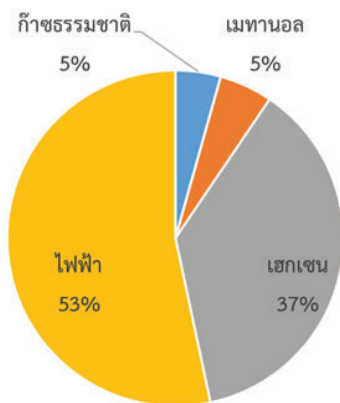
(3) การวิเคราะห์ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การวิเคราะห์ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมแต่ละแนวทางการนำกากกาแฟไปใช้ประโยชน์ จะถูกคำนวณผลกระทบในระดับค่า Midpoint และค่า Damage โดยใช้กระบวนการวิธีการของ IMPACT 2002+ version 2.01 [7] ซึ่งผู้วิจัยเลือกใช้วิธีการนี้เนื่องจากเป็นวิธีที่มีความสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัย ผลกระทบทั้งหมดที่ประเมินจากวิธีการนี้จะประกอบด้วย 17 midpoint อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้จะเลือกศึกษาเฉพาะผลกระทบศักยภาพการทำให้โลกร้อน (Global Warming Potential: GWP) การเกิดความเป็นกรดของแหล่งน้ำ (Aquatic Acidification) และผลกระทบของระบบทางเดินหายใจ (Respiratory Inorganic)

(4) การแปลผล (Interpretation) ผลลัพธ์จากการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากทั้งสองทางเลือกจะถูกแปลผลและนำมาเปรียบเทียบเพื่อเป็นแนวทางในการนำกากกาแฟไปใช้ประโยชน์ในอนาคต

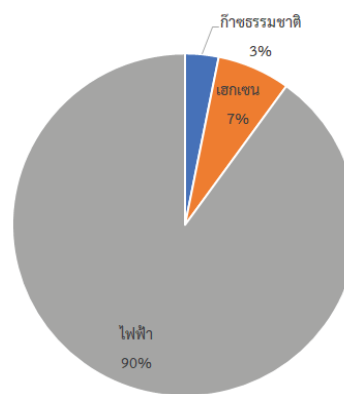
### ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาผลกระทบ 3 กลุ่ม ได้แก่ ส่งผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจ (Respiratory inorganics) ฝนกรด (Aquatic acidification) และภาวะโลกร้อน (Global warming) ผลการประเมินแต่ละผลกระทบแสดงได้ดังนี้

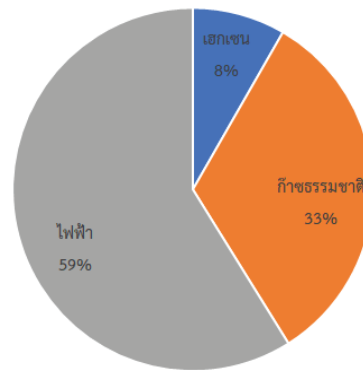
ผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจ (Respiratory inorganics) ผลกระทบด้านนี้จะเกี่ยวข้องกับการปล่อยก๊าซที่ระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ เช่น ก๊าซแอมโมเนีย (NH<sub>3</sub>) ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO<sub>2</sub>) เป็นต้น ซึ่งในกรณีของการนำไปเผาโดยตรง ร้อยละ 100 จะเกิดจากการเผาไหม้ ส่วนในกรณีของการนำไปทำเป็นไบโอดีเซลสามารถแสดงดังภาพที่ 2(ก) ส่วนใหญ่ผลกระทบ Respiratory inorganic เกิดจากไฟฟ้า (ร้อยละ 53) รองลงมา ได้แก่ เฮกเซน (ร้อยละ 37) ก๊าซธรรมชาติ (ร้อยละ 5) และเมทานอล (ร้อยละ 5)



(ก) Respiratory inorganic



(ข) Aquatic acidification



(ค) Global warming

ภาพที่ 2 แหล่งการเกิดผลกระทบจากการผลิตไบโอดีเซลจากกากกาแฟ

**ผลกระทบด้านฝนกรด (Aquatic Acidification)** ผลกระทบด้านนี้เกี่ยวข้องโดยตรงกับการปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ไนโตรเจนออกไซด์ แอมโมเนีย ซึ่งส่วนใหญ่เป็นผลกระทบที่เกิดจากกระบวนการผลิตไฟฟ้าซึ่งมีการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ ดังแสดงในภาพที่ 2 (ข) รองลงมาได้แก่ เฮกเซน (ร้อยละ 7) และก๊าซธรรมชาติ (ร้อยละ 3) ตามลำดับ ในส่วนของการเผาโดยตรงนั้น ผลกระทบด้านนี้จะขึ้นตรงกับองค์ประกอบซัลเฟอร์ที่ตรวจพบในกากกาแฟ

**ผลกระทบด้านภาวะโลกร้อน (Global Warming)** ผลการประเมินภาวะโลกร้อน เกี่ยวข้องโดยตรงกับกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิง จากภาพที่ 3(ค) พบว่า แหล่งที่ก่อให้เกิดภาวะโลกร้อนจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ได้แก่ การผลิตไฟฟ้า ร้อยละ 59 รองลงมาได้แก่ ก๊าซธรรมชาติ (ร้อยละ 33%) และเฮกเซน (ร้อยละ 8%) ตามลำดับ

ผลการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการนำของเสียจากกากกาแฟไปใช้ประโยชน์ในรูปแบบพลังงาน 2 ทางเลือก คือ (1) การนำกากกาแฟไปเผาเป็นเชื้อเพลิงโดยตรง และ (2) การสกัดน้ำมันจากกากกาแฟแล้วนำไปผลิตเป็นไบโอดีเซล ผลการประเมินแสดงดังตารางที่ 2

**ตารางที่ 2** ผลการประเมินขั้นตอนการกำหนดบทบาท (Characterization) แต่ละผลกระทบของการนำกากกาแฟไปใช้ประโยชน์

กลุ่มผลกระทบ	เผาโดยตรง	ไบโอดีเซล	หน่วย
Respiratory inorganics	0.0110	0.0007	kg PM2.5 eq
Aquatic acidification	0.0614	0.0081	kg SO <sub>2</sub> eq
Global warming	2.0138	1.5960	kg CO <sub>2</sub> eq

จากตารางที่ 2 สังเกตได้ว่า การนำกากกาแฟไปเผาโดยตรง ส่งผลกระทบต่อทางด้านทางเดินหายใจ (Respiratory inorganics) ฝนกรด (Aquatic acidification) และภาวะโลกร้อน (Global warming) มากกว่า การนำไปผลิตเป็นไบโอดีเซล ทั้งนี้เนื่องจากการนำไปเผาโดยตรงไม่ได้มีกระบวนการปรับสภาพเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนออกก่อน จึงทำให้สารบางประเภท เช่น ซัลเฟอร์ ไนโตรเจน เมื่อเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้แล้ว เกิดเป็นสารมลพิษออกมา ได้แก่ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>) ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NOx) เป็นต้น ในขณะที่กระบวนการผลิตไบโอดีเซล จะต้องมีการสกัดน้ำมันด้วยสารละลายเฮกเซนออกก่อน จากนั้นจึงทำการแยกน้ำมันออกจากสารละลาย ทำให้น้ำมันที่ได้มีสิ่งเจือปนน้อยกว่าวิธีการเผาโดยตรง การนำไบโอดีเซลจากกากกาแฟไปเผาไหม้จึงก่อให้เกิดผลกระทบน้อยกว่า

### สรุปผลการวิจัย

การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการนำกากกาแฟไปใช้ประโยชน์ในรูปแบบพลังงาน 2 ทางเลือก ได้แก่ ทางเลือกที่ (1) เผาเป็นพลังงานโดยตรง และ (2) สกัดน้ำมันเพื่อนำมาทำไบโอดีเซล พบว่า ผลกระทบสิ่งแวดล้อม

ทางด้านระบบทางเดินหายใจ ด้านฝนกรด และด้านภาวะโลกร้อน ของการนำไปผลิตเป็นไบโอดีเซล มีผลกระทบน้อยกว่าการนำไปเผาเป็นพลังงานโดยตรง ร้อยละ 93.38, 86.84, และ 20.74 ตามลำดับ ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้อาจกล่าวได้ว่า การสกัดน้ำมันกากกาแฟเพื่อผลิตเป็นไบโอดีเซล เป็นทางเลือกที่ดีกว่าการนำไปเผาโดยตรง อย่างไรก็ตาม ในการดำเนินงานจริงในรูปแบบธุรกิจ ควรจะต้องศึกษาต้นทุนซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญในการลงทุนเพิ่มเติม รวมถึงผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมกลุ่มอื่น ๆ ที่ไม่ได้ศึกษาในงานวิจัยนี้ เช่น ผลกระทบของสารก่อมะเร็ง (Carcinogen) และผลกระทบของการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ เป็นต้น

### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนอุดหนุนวิจัย งบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ ๒๕๖๑ ในโครงการวิจัยเรื่อง “การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมด้วยหลักการประเมินวัฏจักรชีวิตทางเลือกการจัดการกากกาแฟในประเทศไทย” ผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) มา ณ โอกาสนี้

### เอกสารอ้างอิง

- [1] คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. (2560). ยุทธศาสตร์กาแฟ ปี 2560 – 2564. สืบค้นเมื่อ 25 กันยายน 2561 , จาก <http://www.natres.psu.ac.th/Department/PlantScience/RoC-R/newsletter.html>
- [2] กองข้อมูลธุรกิจ กรมพัฒนาธุรกิจการค้า (2560). ธุรกิจขายส่งกาแฟ ชา โกโก้. สืบค้นเมื่อ 20 กันยายน 2561, จาก [www.dbd.go.th/download/document\\_file/Statistic/2559/T26/T26\\_201612.pdf](http://www.dbd.go.th/download/document_file/Statistic/2559/T26/T26_201612.pdf)
- [3] พิชัย เอี้ยวเล็ก และกฤษ สมนึก (2558). “การใช้ประโยชน์จากกากกาแฟเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงเหลวและเชื้อเพลิงแข็ง”, ในการประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทยครั้งที่ 8 วันที่ 4-6 พฤศจิกายน 2558 ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี. ปทุมธานี : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
- [4] นฤภัทร ตั้งมันคงวรกุล และพัชรี ปริดาสุริยะชัย (2558). การศึกษากากกาแฟและกากชามาใช้ประโยชน์ในรูปแบบเชื้อเพลิงอัดแท่ง. วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี). 7 (13), 15-26.
- [5] Tuntiwiwattanapun, N., Usapein, P., & Tongcumpou, C. (2017). The energy usage and environmental impact assessment of spent coffee grounds biodiesel production by an in-situ transesterification process. Energy for Sustainable Development, 40, 50-58.
- [6] พงษ์ศักดิ์ อยู่มัน (2559). การพัฒนาเครื่องอัดแท่งถ่านในรูปแบบเกลียวอัดเย็นสำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลจากเศษวัสดุเหลือใช้ในกระบวนการผลิตกาแฟชุมชนและการหาคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงจากผลิตภัณฑ์ถ่านอัดแท่ง. วารสารวิชาการ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง. 9 (1), 34-48.
- [7] Humbert S et al (2012) IMPACT 2002?: User guide, in draft for version Q2.21 (version adapted by Quantis). Quantis sustainability counts

## อิทธิพลของค่าความเป็นกรดและด่างต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษผักเหลือทิ้ง Effect of pH on biogas production of vegetable scraps

ปนัดดา เมฆโต<sup>1</sup> ตูลา มุกทั้ง<sup>1</sup> และฐิติพร เจาะจง<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม พิษณุโลก 65000

### บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของค่าความเป็นกรดและด่างต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษผักเหลือทิ้ง โดยใช้อัตราส่วนของเศษผักกาดขาวต่อจุลินทรีย์ เท่ากับ 80:20 g/mg หมักในขวดรูปชมพู่ขนาด 1,000 ml ระยะเวลาการหมัก 15 วัน โดย ในการทดลองได้ปรับค่า pH ออกเป็น 3 ค่า ได้แก่ 6.5, 7.0 และ 7.5 เพื่อศึกษาอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ ปริมาณการเกิดก๊าซมีเทน (CH<sub>4</sub>) โดยทำการวัดอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นโดยใช้หลักการแทนที่น้ำ และใช้เครื่องวัดก๊าซชีวภาพรุ่น GFM416 วัดปริมาณก๊าซมีเทนจากผลการทดลองพบว่าค่า pH 7.5 มีการเกิดก๊าซชีวภาพสูงสุด เท่ากับ 1,558.50 ml และมีปริมาณก๊าซมีเทน เท่ากับ 53.95% ซึ่งจุลินทรีย์สามารถเจริญเติบโตได้ดีในช่วงค่า pH 7.5 จึงทำให้มีประสิทธิภาพในกระบวนการย่อยสลายอินทรีย์เพื่อผลิตอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นสูงสุด

**คำสำคัญ:** ก๊าซชีวภาพ, ค่าความเป็นกรดและด่าง, จุลินทรีย์

\*Corresponding author: Tel.: 099-2492917. E-mail address: titiporn\_ant@psru.ac.th

### บทนำ

การเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากร และการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจและสังคมอย่างรวดเร็วในปัจจุบัน ก่อให้เกิดปัญหามลพิษในด้านต่างๆ โดยเฉพาะปัญหาขยะจากการอุปโภคบริโภคที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในทุกๆวัน จึงเป็นปัญหาที่สำคัญในการจัดการกับขยะและของเสียเหล่านี้ วิธีการกำจัดขยะของเสียที่นิยมใช้คือ การเทกองกลางแจ้ง การฝังกลบ การเผา และการหมักเป็นปุ๋ยหรือวัสดุปรับปรุงดิน ซึ่งแต่ละวิธีจะประสบกับปัญหาที่แตกต่างกัน เช่น การเทกองกลางแจ้งบนพื้นให้เกิดการย่อยสลายตามธรรมชาตินั้น จะทำให้เกิดกลิ่นเหม็น เป็นแหล่งสะสมของเชื้อโรค รวมทั้งก่อให้เกิดความรำคาญต่อประชาชนที่พักอาศัยอยู่บริเวณใกล้เคียงด้วย ส่วนการฝังกลบต้องใช้พื้นที่ในการฝังกลบมาก เกิดการปนเปื้อนของน้ำชะขยะลงสู่แหล่งน้ำใต้ดิน และอาจถูกต่อต้านจากประชาชนในพื้นที่นั้นได้ ส่วนการเผาโดยใช้เตาเผาต้องเสียค่าใช้จ่ายสูง ไม่ว่าจะเป็นค่าก่อสร้างและค่าดูแลซ่อมบำรุง นอกจากนี้ยังก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศที่เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์อีกด้วย และการหมักเป็นปุ๋ยหรือวัสดุปรับปรุงดินหรือที่เรียกว่าปุ๋ยหมักนั้น พบว่าผลผลิตที่ได้อยู่ในอัตราที่ต่ำไม่คุ้มทุนและไม่เป็นที่นิยมมากนัก หลายประเทศจึงหาวิธีการกำจัดขยะหรือหาแหล่งพลังงานอื่นเพื่อใช้แทนการเทกองกลางแจ้ง การฝังกลบ การเผา และการหมักเป็นปุ๋ยหรือวัสดุปรับปรุงดิน ซึ่งวิธีการกำจัดขยะที่ได้รับความนิยม ได้แก่ การหมักขยะของเสียหรือการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยที่การผลิตก๊าซชีวภาพนั้นได้รับความนิยมอย่างกว้างขวาง เพราะในการผลิตก๊าซชีวภาพนอกจากจะได้พลังงานแล้วยังสามารถลดปริมาณของเสียลงได้อีกด้วย

ก๊าซชีวภาพเริ่มมีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายในแถบชนบทของหลายประเทศ ซึ่งได้มาจากการหมักขยะของเสียชนิดต่างๆ เช่น เปลือกกล้วย เปลือกสับปะรด มูลวัว ขยะจากบ้านเรือน ผักผลไม้ เป็นต้น ในประเทศไทย พบว่าขยะ

ในของเสียจากเทศบาลประกอบด้วยปริมาณผักเหลือทิ้งอยู่ 25.75 % ที่เหลือเป็นกระดาษ แก้ว พลาสติก โลหะ ไม้ และอื่นๆ [1] โดยเศษผักเหลือทิ้งส่วนใหญ่มาจากร้านอาหารเป็นจำนวนมาก รองลงมาเป็นร้านอาหาร และการประกอบอาหารในครัวเรือน จึงมีความน่าสนใจที่จะนำเศษผักเหลือทิ้งเหล่านี้มาผลิตเป็นก๊าซชีวภาพโดยวิธีการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนในการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยมีปัจจัยอย่างหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงคือ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ซึ่งจะมีผลต่อการทำงานของจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน จุลินทรีย์แต่ละชนิดจึงมีช่วงค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตที่แตกต่างกัน [2] จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาค่าความเป็นกรด - ด่าง ที่มีผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียของกองขยะทั่วไปและขยะอินทรีย์ พบว่า ค่าความเป็นกรด - ด่าง ที่มีผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพที่ดีที่สุด คือค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 7.5 [3] ดังนั้นในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่างที่มีผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพจากเศษผักเหลือทิ้ง เพื่อหาค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่มีความเหมาะสมต่อการเกิดก๊าซชีวภาพสูงสุด

## วิธีการวิจัย

### 1. วัสดุและอุปกรณ์ในการทดลอง

วัสดุและอุปกรณ์	
1. เศษผักกาดขาว	2. มูลวัว
3. ตู้อบ	4. ถ้วยครุชเชิล
5. โถดูดความชื้น	6. เครื่องชั่งดิจิตอล
7. ปีกเกอร์	8. เครื่องปั่น
9. กระบอกตวง	10. เครื่องพีเอชมิเตอร์
11. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (ความเข้มข้น 2 โมลาร์)	12. เครื่องวัดก๊าซชีวภาพรุ่น GFM416
13. ชุดถังหมักขนาด 1,000 มิลลิลิตร	

### 2. ขั้นตอนการเตรียมจุลินทรีย์และเศษผักกาดขาวบดละเอียด

2.1 เตรียมจุลินทรีย์ โดยนำมูลวัวผสมกับน้ำในอัตราส่วน 1:1 แล้วนำไปหมักเป็นเวลา 5-7 วัน

2.2 เตรียมผักกาดขาวบดละเอียด โดยการนำผักกาดขาวมาบดให้ละเอียด

### 3. ขั้นตอนการวิเคราะห์หาปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) ของตัวอย่างจุลินทรีย์กับเศษผักกาดขาวที่บดละเอียดก่อนผสม

3.1 นำถ้วยครุชเชิลกับเม็ดซิลิกาเจลไปอบที่อุณหภูมิ 103-105°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พักทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วชั่งน้ำหนักนำตัวอย่างจุลินทรีย์กับเศษผักกาดขาวที่บดละเอียด ปริมาณ 1 กรัม ใส่ในถ้วยครุชเชิล แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 103-105°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พักทิ้งไว้ให้เย็นชั่งน้ำหนัก แล้วบันทึกค่า เพื่อนำไปคำนวณหาค่า %TS จากสมการที่ 1

$$\%TS = \frac{A-B}{C} \times 100 \quad (1)$$

โดย TS คือ ปริมาณของแข็งทั้งหมด (mg/L)

A คือ น้ำหนักของตัวอย่างและถ้วยระเหย (mg)

B คือ น้ำหนักของถ้วยระเหย (mg)

C คือ ปริมาณน้ำตัวอย่างที่ใช้ (mg)

#### 4. ขั้นตอนการหมักและตรวจวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

4.1 นำเศษผักกาดขาวกับจุลินทรีย์บดละเอียดผสมกันในอัตราส่วน 80:20 g/mg โดยใช้ปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) 15 % ของขนาดขวดรูปชมพู่ 1,000 ml ใช้ผักกาดขาวบดละเอียด ปริมาณ 328.2 g ร่วมกับจุลินทรีย์ ปริมาณ 252.1 g จากนั้นผสมเข้าด้วยกัน แล้วนำน้ำเปล่าผสมจนถึง 1,000 ml ของบีกเกอร์

4.2 กำหนดค่า pH ของเศษผักกาดขาวบดละเอียดกับจุลินทรีย์ในชุดที่ 1, 2 และ 3 โดยกำหนดค่า pH เท่ากับ 6.5, 7.0, และ 7.5 ตามลำดับ โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 โมลาร์ เพื่อปรับค่า pH และใช้เครื่องพีเอชมิเตอร์วัดค่า pH ส่วนชุดที่ 4 ไม่ต้องปรับค่า pH

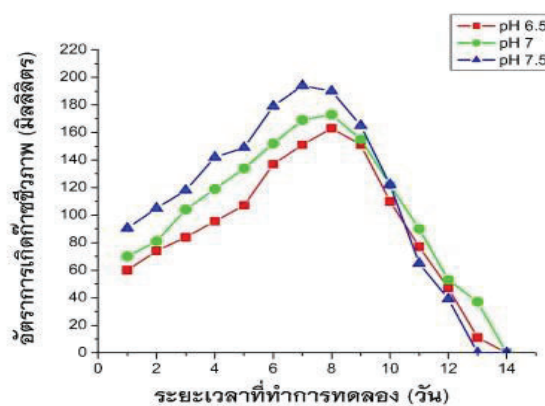
4.3 เติลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 1,000 ml ปิดปากขวดให้สนิทและนำสายยางต่อระหว่างขวดหมักกับถังก๊าซเพื่อวัดปริมาณก๊าซชีวภาพในแต่ละวัน

#### 5. ขั้นตอนการเก็บผลอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพและปริมาณมีเทน

5.1 ทำการเก็บก๊าซชีวภาพโดยใช้หลักการแทนที่น้ำ นำน้ำที่ได้นี้ในแต่ละวันใส่กระบอกตวง และเก็บปริมาณก๊าซมีเทนด้วยเครื่องชีวภาพรุ่น GFM416 แล้วจดบันทึกข้อมูลทุกวัน

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

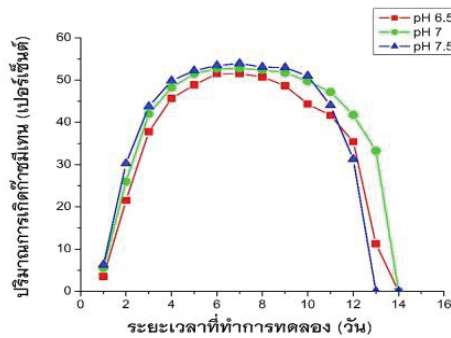
จากภาพที่ 1 พบว่าที่ pH 6.5 มีค่าอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพมากขึ้นเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นจนมีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพมากที่สุดเท่ากับ 163.00 ml ในวันที่ 8 ของการทดลอง และหลังจากนั้นอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพลดลงอย่างต่อเนื่องจนไม่มีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นในวันที่ 14 ซึ่งอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมที่ได้เท่ากับ 1,267.50 ml การทดลองค่า pH 7.0 มีค่าอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพมากขึ้นเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นจนมีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพมากที่สุดเท่ากับ 173.00 ml ในวันที่ 8 ของการทดลอง และหลังจากนั้นอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพลดลงอย่างต่อเนื่องจนไม่มีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นในวันที่ 14 ซึ่งอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมที่ได้เท่ากับ 1,459.00 ml และการทดลองค่า pH 7.5 มีค่าอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพมากขึ้นเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นจนมีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพมากที่สุดเท่ากับ 194.00 ml ในวันที่ 7 ของการทดลอง และหลังจากนั้นอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพลดลงอย่างต่อเนื่องจนไม่มีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นในวันที่ 13 ซึ่งอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมที่ได้เท่ากับ 1,558.50 ml ในการทดลองพบว่าค่า pH ทั้ง 3 ค่า มีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงแรกของการทดลองเนื่องจากในช่วงแรกมีปริมาณสารอินทรีย์มากในการย่อยสลายของจุลินทรีย์ ทำให้จุลินทรีย์ผลิตก๊าซชีวภาพได้ดีในช่วงแรกหลังจากวันที่ 7 และ 8 อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพลดลงอย่างต่อเนื่องจนไม่มีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพเกิดขึ้น เนื่องจากในระบบสารอินทรีย์มีปริมาณลดลงทำให้จุลินทรีย์ไม่มีสารอาหารในการเจริญเติบโตเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ [3]



ภาพที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบค่า pH ที่มีผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ

จากการเปรียบเทียบผลการทดลองพบว่า ที่ค่า pH 7.5 มีค่าอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุด เท่ากับ 1,558.50 ml เนื่องจากก๊าซชีวภาพจะถูกผลิตได้ดี เมื่อมีความเป็นกรด-ด่างอยู่ในระดับต่างอ่อนๆ กล่าวคือมีความเป็นกรด-ด่างประมาณ 7.5 มีความเหมาะสมในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ จึงทำให้มีประสิทธิภาพในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นสูงสุด และจุลินทรีย์ในกระบวนการสร้างมีเทน ไม่ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของระดับค่า pH ต่ำกว่า 6.0 หรือมากกว่า 8.0 จุลินทรีย์กลุ่มนี้อาจจะเกิดการช็อกหยุดการเจริญเติบโตชั่วคราวทำให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายลดลง [5, 6]

จากภาพที่ 2 พบว่าค่า pH ทั้ง 3 ค่า มีปริมาณก๊าซมีเทน ( $CH_4$ ) เกิดในวันแรกมีปริมาณเพียงเล็กน้อยเท่ากับ 3.50% 5.50% 6.25 % ตามลำดับ เนื่องจากในช่วงแรกการย่อยสลายสารอินทรีย์อยู่ในกระบวนการของ ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) อะซิโดเจเนซิส (Acidogenesis) และอะซิโตเจเนซิส (Acetogenesis) ที่มีจุลินทรีย์สร้างกรดในการย่อยสลายสารอินทรีย์ทำให้เกิด กรดอะซิติก กรดโพรไพโอนิก กรดวาเลอริก กรดแลคติก และไฮโดรเจน เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้ และปริมาณก๊าซมีเทน ( $CH_4$ ) มีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อมีค่า pH ที่เพิ่มสูงขึ้น [7] ในช่วงระยะเวลาในวันที่ 7 การทดลองค่า pH 6.5 มีค่าปริมาณก๊าซมีเทน ( $CH_4$ ) เท่ากับ 51.50 % การทดลองค่า pH 7.0 มีค่าปริมาณก๊าซมีเทน ( $CH_4$ ) เท่ากับ 52.75 % และการทดลองค่า pH 7.5 มีค่าปริมาณก๊าซมีเทน ( $CH_4$ ) เท่ากับ 53.95 % ตามลำดับ



ภาพที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบค่า pH ที่ทำให้เกิดปริมาณก๊าซมีเทน

จากการเปรียบเทียบผลการทดลองพบว่า ที่ค่า pH 7.5 มีค่าปริมาณก๊าซมีเทน ( $CH_4$ ) เกิดขึ้นสูงสุด เท่ากับ 53.95 % เนื่องจากในกระบวนการสร้างก๊าซมีเทน จะย่อยสลาย กรดอะซิติก กรดโพรไพโอนิก กรดวาเลอริก กรดแลคติก และไฮโดรเจน ที่ได้จากกระบวนการสร้างกรด จุลินทรีย์ที่เป็นตัวสร้างมีเทนเจริญเติบโตได้ช้าและสภาพแวดล้อมมีผลต่อการเจริญเติบโตค่อนข้างมาก โดยเฉพาะค่า pH ต่ำกว่า 6 ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของ จุลินทรีย์สร้างมีเทนสามารถเจริญเติบโตได้ดีอยู่ในระดับต่างอ่อนๆ กล่าวคือมีความเป็นกรด-ด่างประมาณ 7.5 [7] นอกจากนี้จุลินทรีย์สร้างมีเทนต้องการสารอาหารที่โครงสร้างไม่ซับซ้อนในการดำรงชีพ ดังนั้นการเติบโตของจุลินทรีย์ที่เป็นตัวสร้างมีเทนจึงขึ้นอยู่กับการทำงานของจุลินทรีย์ในขั้นตอนไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) และการสร้างกรด โดยจุลินทรีย์ทุกกลุ่มต้องทำงานอย่างสัมพันธ์กัน [2]

### สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองอิทธิพลของค่าความเป็นกรด-ด่าง ต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษผักเหลือทิ้ง พบว่าค่า pH 7.5 มีการเกิดก๊าซชีวภาพสูงสุด โดยมีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพสะสม เท่ากับ 1,558.50 ml และมีปริมาณก๊าซมีเทน เท่ากับ 53.95 % ซึ่งจุลินทรีย์สามารถเจริญเติบโตได้ดีในช่วงค่า pH 7.5 จึงทำให้มีประสิทธิภาพในกระบวนการย่อยสลายอินทรีย์เพื่อผลิตอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นสูงสุด

## เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทน ฯ .สถานการณ์เศษขยะปัจจุบันในประเทศไทย. (2557).จาก :[http://www.dede.go.th/dede/index.php?option=com\\_content&view=article&id=1841:2010-09-22-07-02-07&catid=128](http://www.dede.go.th/dede/index.php?option=com_content&view=article&id=1841:2010-09-22-07-02-07&catid=128) (วันที่สืบค้นข้อมูล 18 กรกฎาคม 2557).
- [2] กรมโรงงานอุตสาหกรรม.(2553). คู่มือการปฏิบัติงานเกี่ยวกับการออกแบบการผลิต การควบคุมคุณภาพและการใช้ก๊าซชีวภาพ (Biogas). สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม.
- [3] ตรีภูมิกัดดี เสนานิคม. (2553). การศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียจากกองขยะ. สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- [4] กลิ่นปทุม ปัญญาปิง. (2555). ศักยภาพการย่อยสลายให้ก๊าซมีเทนของก้านและใบไม้หลายชนิด สาขาวิศวกรรมศาสตร์ สิ่งแวดล้อม. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่.
- [5] Margarita Andreas Dareioti, AikateriniloannisVavouraki, Michael Kornaros. (2014). Effect of pH on the anaerobic acidogenesis of agroindustrial wastewaters for maximization of biohydrogen production: A lab-scale evaluation using batch test. *Bioresource Technology*. 162. 218-227.
- [6] ชัยวานี จิใจ, ชัยรัตน์ ศิริพัธนะ. (2559). การผลิตก๊าซชีวภาพโดยกระบวนการหมักร่วมระหว่างมูลไก่กับน้ำเสียจากกระบวนการผลิตขนมจีน. คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร : มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา
- [7] พัชรี อินธนู, จิตติยา แทนคำ. (2560). การย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศของสารอินทรีย์ประเภทเศษอาหารเข้มข้นในกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพ. *วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร*. (11)(1) , 92-101.



การศึกษาแบบจำลองในการคำนวณหาอายุเชิงเศรษฐกิจของสถานีไฟฟ้าแรงสูง โดยพิจารณาตาม  
รูปแบบการจัดวางบัสบาร์ กรณีศึกษาสถานีไฟฟ้า 115/22 kV  
ECONOMIC LIFE MODEL DETERMINATION FOR SUBSTATION CONSTRUCTION  
CONSIDERING BUS BAR ARRANGEMENT CASE STUDY 115/22 kV SUBSTATION

กรวิชัย ตั้งชีวะสมบัติ<sup>1</sup> สุทัศน์ รัตนเกื้อกังวาน<sup>2\*</sup>

Korawit Thangcheewasombut<sup>1</sup> and Suthas Ratanakuakangwan<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการพลังงาน บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

<sup>2</sup>ศูนย์ทดสอบทางวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

korawit.t@gmail.com.<sup>1</sup>,rsuthas@yahoo.com<sup>2</sup>

### บทคัดย่อ

พลังงานไฟฟ้าเป็นปัจจัยพื้นฐานในการดำรงชีวิต จากความต้องการพลังงานไฟฟ้าภายในประเทศไทยที่มีอัตรา  
การขยายตัวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลทำให้ระบบไฟฟ้าโดยรวมต้องมีการเสริมสร้างและพัฒนาความน่าเชื่อถือให้  
สามารถรองรับกับความต้องการทั้งหมดที่จะเกิดขึ้นได้ จึงจำเป็นต้องมีการก่อสร้างสถานีไฟฟ้าย่อยเพิ่มขึ้นเพื่อรองรับให้  
เพียงพอ สถานีไฟฟ้าย่อยเป็นส่วนหนึ่งของระบบไฟฟ้าที่มีความสำคัญอย่างมาก เพราะเป็นจุดเชื่อมโยงของระบบไฟฟ้า  
และจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่ผู้ใช้ไฟฟ้าโดยในการก่อสร้างมีปัจจัยที่ควรพิจารณา ได้แก่ มูลค่าการลงทุน มูลค่าการ  
ดำเนินการและบำรุงรักษา รูปแบบการจัดเรียงบัสบาร์ที่จะมีผลต่ออัตราการเกิดมูลค่าความเสียหายอันเกิดจากไฟฟ้าดับ  
เป็นต้น นอกเหนือจากนี้ยังมีปัจจัยทางด้านสภาพเศรษฐกิจของประเทศที่ใช้พิจารณามูลค่าทางการเงินด้วย

งานศึกษาวิจัยนี้ได้วิเคราะห์สถานีไฟฟ้าย่อยกรณีตัวอย่าง เพื่อใช้เป็นต้นแบบของแบบจำลองในการคำนวณหา  
อายุเชิงเศรษฐกิจของสถานีไฟฟ้าย่อย และเปรียบเทียบการจัดเรียงบัสบาร์ 7 รูปแบบ ได้แก่ Single bus, Single bus  
with sectionalized, Main and transfer bus, Breaker and a half bus, Ring bus, Double bus with transfer,  
Double bus single breaker และ Double bus double breaker เป็นต้น และคำนวณหาค่าการลงทุนที่เหมาะสม  
โดยทฤษฎีเชิงเศรษฐศาสตร์ตามแนวคิดการคำนวณค่าใช้จ่ายตลอดอายุ (Life Cycle Cost: LCC)

**คำสำคัญ:** สถานีไฟฟ้าย่อย การคำนวณค่าใช้จ่ายตลอดอายุ ความน่าเชื่อถือระบบไฟฟ้า

\*Corresponding author: E-mail address: rsuthas@yahoo.com

## บทนำ

พลังงานไฟฟ้านั้นเป็นสิ่งจำเป็นในการดำรงชีวิตประจำวันและยังเป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญในการขับเคลื่อนทางเศรษฐกิจ ในปัจจุบันพบว่ามีข้อมูลเชิงสถิติของความต้องการกำลังไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น สอดคล้องกับกระทรวงพลังงานที่ได้มีการกำหนดแผนพัฒนากำลังการผลิตไฟฟ้า (Power Development Plan: PDP) ของประเทศไทยปี พ.ศ. 2558 – 2579 [1] โดยมีการเปรียบเทียบค่าพยากรณ์ความต้องการกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในประเทศ ดังตารางที่ 1 เห็นได้ว่าตั้งแต่ปี 2555-2557 มีความต้องการกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นต่อเนื่องมาตลอด และตามที่สำนักงานนโยบายและแผนพลังงานที่ได้มีการประกาศแผนงานพัฒนาระบบไฟฟ้าในภาพรวมของประเทศเพื่อรองรับการเข้าสู่ประชาคมเศรษฐกิจอาเซียน (ASEAN Community) [2] เพื่อให้หน่วยงานที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับระบบไฟฟ้าเตรียมรองรับบูรณาการแผนงานพัฒนาระบบไฟฟ้าในภาพรวมของประเทศไทย โดยการเสริมสร้างและพัฒนาปรับปรุงความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้าทั้งในระบบของตัวเองและในส่วนที่ต้องประสานระหว่างกันแต่ละหน่วยงานอันได้แก่ การไฟฟ้าฝ่ายผลิต (กฟผ.) การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) และ การไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) ซึ่งเป็นหน่วยงานที่มีหน้าที่รับผิดชอบและเกี่ยวข้องกับระบบผลิต ระบบส่ง และระบบจำหน่าย ได้ให้ความสำคัญยิ่งกับการก้าวเข้าสู่ประชาคมเศรษฐกิจอาเซียนของประเทศไทยในส่วนของ กฟผ. กฟภ. และกฟน. ได้มีแผนสร้างความน่าเชื่อถือโดยการเปลี่ยนระบบการเดินสายไฟฟ้าของระบบจำหน่ายในเขตกรุงเทพมหานครเป็นเดินสายใต้ดินในท่อร้อยสายหรืออุโมงค์ และเพื่อช่วยลดความเสี่ยงอันตรายต่อชีวิตและทรัพย์สินด้วย

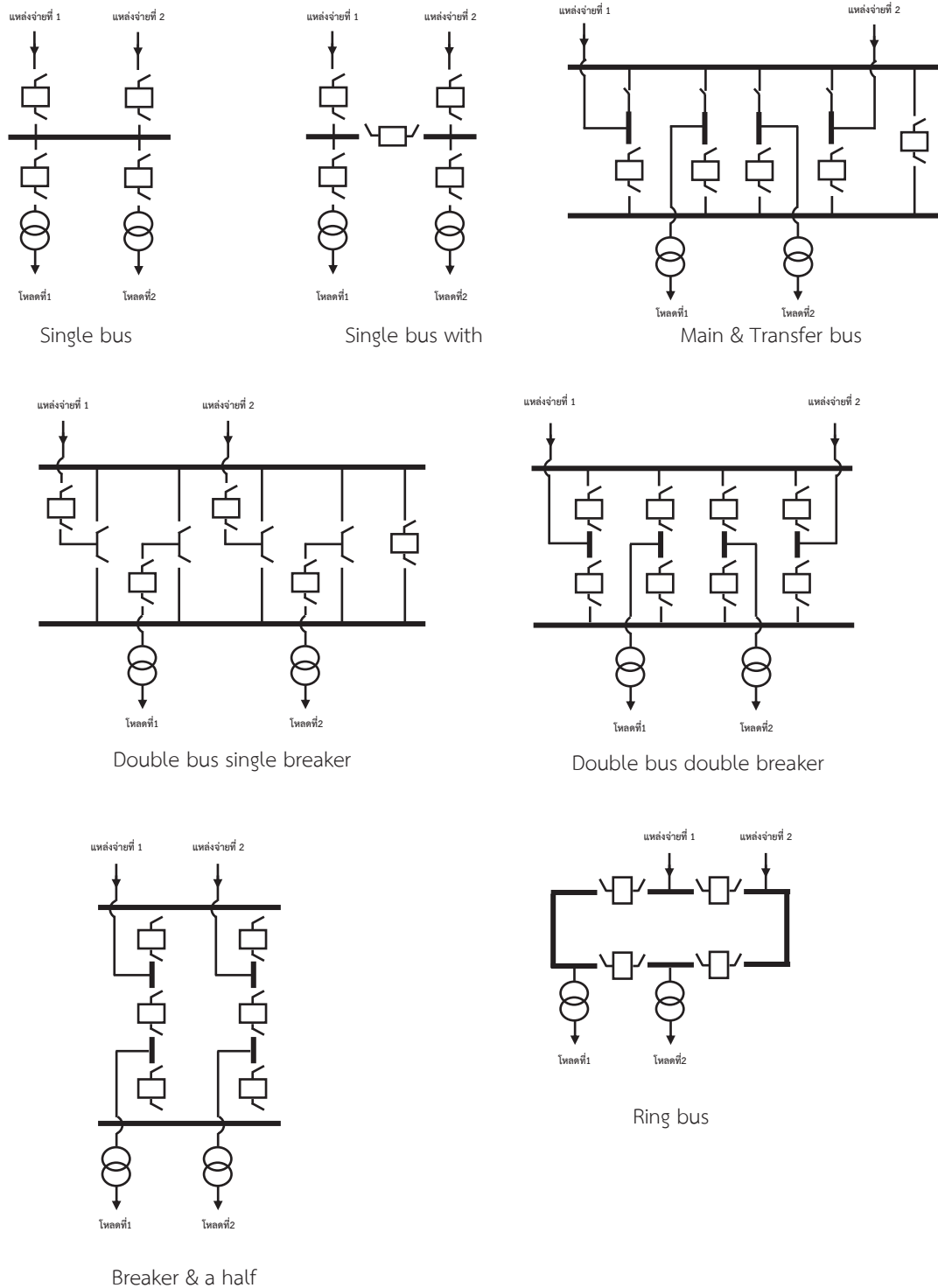
ในส่วนของสถานีไฟฟ้าแรงสูง กฟผ. กฟภ. และกฟน. ได้มีการพัฒนาสถานีไฟฟ้าแรงสูงในเขตนครหลวงทั้งแบบ AIS และ GIS หากจุดจ่ายไฟฟ้าเกิดการขัดข้องจนไม่สามารถจ่ายไฟฟ้าให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าหรือกับระบบได้ จึงมีแผนพัฒนาปรับปรุงสถานีไฟฟ้าแรงสูงเดิมและพิจารณารูปแบบการก่อสร้างสถานีไฟฟ้าแห่งใหม่เพิ่ม เพื่อให้มีความน่าเชื่อถือและยืดหยุ่นของระบบให้สามารถจ่ายไฟฟ้าโดยไม่มีปัญหาหรือมีโอกาสเกิดความขัดข้องลดลง ทั้งนี้รวมถึงนโยบายภาครัฐบาลที่ได้มีการสนับสนุนรับซื้อไฟฟ้าจากภาคเอกชนทั้งพลังงานหลักและพลังงานหมุนเวียนเข้ามา ทำให้การเชื่อมโยงระบบจำหน่ายมีความซับซ้อนมากกว่าในอดีต ทั้งโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม IPP โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม SPP โรงไฟฟ้าพลังงานทางเลือก เช่นโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โรงไฟฟ้าพลังงานลม โรงไฟฟ้าพลังงานชีวมวล เป็นต้น จะได้เห็นได้ว่ามีตัวแปรหลายอย่างของระบบไฟฟ้าในปัจจุบันเปลี่ยนแปลงไป จึงควรต้องมีการศึกษาและวิเคราะห์ปรับปรุงระบบไฟฟ้าให้มีความน่าเชื่อถือและประสิทธิภาพที่ดีขึ้น รวมถึงพิจารณาต้นทุนทั้งในส่วนของมูลค่าการก่อสร้าง มูลค่าการดำเนินงานและบำรุงรักษาเหมาะสม และมูลค่าความเสี่ยง ให้เกิดคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ด้วย

ตารางที่ 1 สถิติและพยากรณ์ความต้องการไฟฟ้าสำหรับจัดทำแผน PDP (PDP 2015: กรณีฐาน)

ปี	พลังไฟฟ้าสูงสุด			พลังงานไฟฟ้า			โหลด แฟกเตอร์	โหลด แฟกเตอร์
	เมกะวัตต์	เพิ่ม		ล้านหน่วย	เพิ่ม			
		เมกะวัตต์	%		ล้านหน่วย	%		
ค่าจริง Net: Generation								
2555	26,418.3	2,310	9.58	175,925.10	15,109	9.4	75.81	33.34
2556	27,084.50	666	2.52	177,543.80	1,619	0.92	74.63	32.88
2557	27,633.50	549	2.03	182,882.6	5,339	3.01	75.34	33.17
ค่าพยากรณ์ Net: Generation								
2558	29,051	1,418	5.13	190,285	7,403	4.05	74.77	33.11
2559	30,218	1,167	4.02	197,891	7,605	4	74.76	32.98
2560	31,385	1,167	3.86	205,649	7,758	3.92	74.8	32.75
2561	32,429	1,045	3.33	212,515	6,867	3.34	74.81	32.46
2562	33,635	1,206	3.72	220,503	7,987	3.76	74.84	32.35
2563	34,808	1,173	3.49	229,238	7,736	3.51	74.85	32.09
2564	35,775	967	2.78	234,654	6,416	2.81	74.88	31.67
2565	36,776	1,001	2.8	241,273	6,619	2.82	74.89	31.29
2566	37,740	964	2.62	247,671	6,398	2.65	74.92	30.88
2567	38,750	1,010	2.68	254,334	6,663	2.69	74.93	30.48
2568	39,752	1,002	2.59	260,764	6,430	2.53	74.88	30.04
2569	40,791	1,039	2.61	267,629	6,865	2.63	74.9	29.67
2570	41,693	903	2.21	273,440	5,812	2.17	74.87	29.16
2571	42,681	988	2.37	279,939	6,499	2.38	74.87	28.74
2572	43,489	807	1.89	285,384	5,445	1.95	74.91	28.26
2573	44,424	935	2.15	291,519	6,135	2.15	74.91	27.82
2574	45,438	1,013	2.28	298,234	6,715	2.3	74.93	27.41
2575	46,296	858	1.89	303,856	5,622	1.89	74.92	26.9
2576	47,025	729	1.58	309,021	5,164	1.7	75.02	26.36
2577	47,854	829	1.76	314,465	5,444	1.76	75.02	25.84
2578	48,713	859	1.79	320,114	5,649	1.8	75.02	25.35
2579	49,655	942	1.93	326,119	6,005	1.88	74.97	24.88
<b>อัตราเพิ่มเฉลี่ย</b>								
2555-2559		1,390	4.62		7,934	4.24		33.09
2560-2564		1,111	3.43		7,353	3.47		32.24
2565-2569		1,003	2.66		6,595	2.66		30.44
2570-2574		929	2.18		6,121	2.19		28.24
2575-2579		843	1.79		5,577	1.8		25.83
2557-2579		1,001	2.67		6,511	2.68		29.04

หมายเหตุ แผนพัฒนากำลังการผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2558 – 2579 (PDP2015)

30 มิถุนายน 2558



ภาพที่ 1 การจัดเรียงบัสบาร์ของสถานีไฟฟ้าย่อย

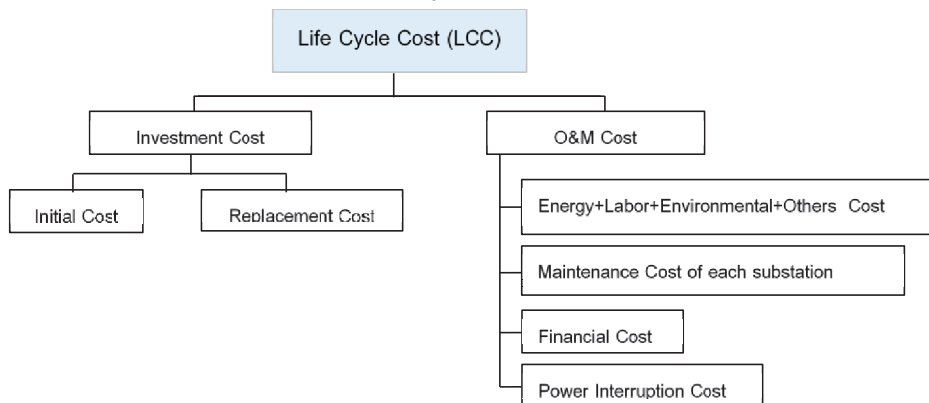
สถานีไฟฟ้าแรงสูงนั้นเป็นส่วนประกอบหนึ่งที่สำคัญต่อระบบไฟฟ้า เพราะเป็นจุดเชื่อมโยงของระบบไฟฟ้า และจุดจ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่ผู้ใช้ไฟฟ้า ดังนั้นการล้มเหลว (Failure) หรือ การเกิดเหตุขัดข้อง (Outage) ของอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าย่อยสามารถส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าได้ ในการออกแบบสถานีไฟฟ้าแรงสูง เริ่มจากแผนภาพเส้นเดี่ยว (Single-line diagram) โดยอ้างอิงจากสถานีไฟฟ้าย่อยต้นแบบ มีการจัดวางอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในสถานีไฟฟ้าแรงสูง โดยประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลัก ได้แก่ ระบบตัดตอน (Switching) ระบบควบคุมและป้องกัน (Control and

protection) และระบบวัด (Metering) ซึ่งปัจจัยที่สำคัญของการออกแบบระบบไฟฟ้าแรงสูงคือการเลือกรูปแบบการจัดเรียงบัสบาร์ภายในสถานีไฟฟ้าแรงสูง ได้แก่ Single bus, Single bus with sectionalized, Main and transfer bus, Breaker and a half bus, Ring bus, Double bus single breaker และ Double bus double breaker แสดงดังภาพที่ 1[3-5] เนื่องจากการจัดเรียงบัสบาร์แต่ละรูปแบบมีทั้งข้อดี ข้อเสีย ข้อจำกัด และค่าใช้จ่ายในการลงทุนที่แตกต่างกันไป การเลือกรูปแบบการจัดเรียงบัสบาร์ที่เหมาะสมจึงมีผลต่อความน่าเชื่อถือของสถานีไฟฟ้าแรงสูงในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า รวมถึงมีผลกับแต่ละรูปแบบ

ปัจจุบันรูปแบบการจัดเรียงบัสบาร์สถานีไฟฟ้าย่อยในประเทศไทยมีหลายรูปแบบ ซึ่งได้มีการกำหนดแนวทางการเลือกรูปแบบการจัดเรียงบัสบาร์ของสถานีไฟฟ้าย่อยโดยพิจารณาจากระดับแรงดันไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าย่อยและความสำคัญของสถานีไฟฟ้าย่อย เช่น สถานีไฟฟ้าย่อยที่เป็นจุดเชื่อมต่อที่สำคัญในระบบ และสถานีไฟฟ้าย่อยในแหล่งท่องเที่ยว โดยมากเลือกรูปแบบการจัดเรียงบัสบาร์แบบ Breaker and a Half และ Double bus double breaker เท่านั้น แต่ด้วยเทคโนโลยีและมูลค่าในปัจจุบัน อาจจะไม่เพียงพอจึงต้องพิจารณาในประเด็นอื่น ๆ ได้แก่

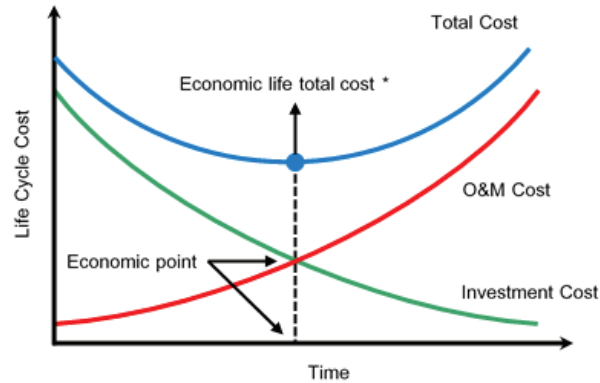
1. มูลค่าการลงทุน
2. มูลค่าจากการมูลค่าในการดำเนินงานและบำรุงรักษา
3. การวิเคราะห์มูลค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ เช่น มูลค่าความเสียหายอันเกิดจากไฟฟ้าดับ และการคำนวณค่าใช้จ่ายตลอดอายุ (Life cycle costs หรือ LCC)

ในการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ การคำนวณค่าใช้จ่ายตลอดอายุ (LCC) อ้างอิงตามการศึกษาวิจัย [6-11] มีความสำคัญต่อการตัดสินใจการลงทุนอย่างยิ่ง เนื่องจากค่าใช้จ่ายตลอดอายุจะสะท้อนค่าใช้จ่ายในการลงทุนต่าง ๆ เช่น ค่าอุปกรณ์ ค่าใช้จ่ายในการใช้งานและการบำรุงรักษา และมูลค่าความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับ



ภาพที่ 2 แสดงรูปแบบการคำนวณ Life cycle cost analysis

งานวิจัยนี้ได้ใช้ข้อมูลโครงการก่อสร้างสถานีไฟฟ้าแรงสูงแห่งหนึ่งเป็นกรณีตัวอย่าง เพื่อนำมาวิเคราะห์หาต้นทุนการลงทุน (Investment Cost) ต้นทุนการดำเนินการ (Operation & Maintenance Cost) ต้นทุนการเงิน (Finance Cost) และมูลค่าความเสียหายอันเกิดไฟฟ้าดับ (Power Interruption Cost) โดยใช้ทฤษฎี Life Cycle Cost (LCC) แสดงดังภาพที่ 2 เป็นเครื่องมือสำหรับเปรียบเทียบต้นทุนของสถานีไฟฟ้าแรงสูงในแต่ละรูปแบบและมูลค่าความเสียหายอันเกิดจากไฟฟ้าดับของสถานีไฟฟ้าแรงสูงที่ส่งผลกระทบต่อทางด้านเสถียรภาพและความน่าเชื่อถือในระบบไฟฟ้ารวมและใช้จำนวนครั้งของดัชนีเกิดไฟฟ้าดับเป็นตัวชี้วัด นำมา plot graph เพื่อวิเคราะห์หาอายุเชิงเศรษฐกิจแสดงดังภาพที่ 3 แสดงได้จุด Economic point หรือจุดที่มูลค่าการลงทุนเท่ากับมูลค่าการบำรุงรักษาดังนั้นเพื่อลดจำนวนการเกิดความเสียหายอันเกิดจากไฟฟ้าดับดังกล่าวขึ้น จึงนำไปสู่การพิจารณารูปแบบการจัดวางบัสบาร์และต้นทุนการลงทุนมาเป็นปัจจัยสำคัญในการออกแบบ



ภาพที่ 3 กราฟเปรียบเทียบต้นทุนเพื่อหาอายุเชิงเศรษฐกิจ

ด้วยเป้าหมายข้างต้นทางผู้วิจัยจึงมีแผนวิเคราะห์ต้นทุนการลงทุนตลอดอายุโครงการ ในรูปแบบการจัดวางบัสบาร์ต่าง ๆ เพื่อนำมาใช้เป็นแบบจำลองและแนวทางการตัดสินใจการบริหารจัดการต้นทุนสำหรับการลงทุนโครงการสถานีไฟฟ้าแรงสูงในอนาคตได้อย่างเหมาะสม

การศึกษาวิจัยนี้จะวิเคราะห์สถานีไฟฟ้าย่อยแบบใช้ฉนวนอากาศ (AIS) ทั้งหมด 7 รูปแบบ ได้แก่ 1.Single bus system 2.Single bus with sectionalized system 3.Main & transfer system 4.Double bus single breaker system 5.Double bus double breaker system 6.Breaker & a half system และ 7.Ring bus system

### วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาหลักการหาต้นทุนการลงทุนตลอดอายุโครงการโดยใช้หลักการเชิงเศรษฐกิจ
2. เพื่อศึกษาแบบจำลองในการคำนวณหาอายุเชิงเศรษฐกิจของสถานีไฟฟ้าแรงสูงโดยพิจารณาตามรูปแบบการจัดวางบัสบาร์

### ขอบเขตการวิจัย

1. ข้อมูลทำการศึกษารูปแบบการจัดวางบัสบาร์ที่มีในประเทศไทยอันได้แก่ การไฟฟ้าฝ่ายผลิต การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค การไฟฟ้านครหลวง และบริษัทเอกชนที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำมาคำนวณหาต้นทุนการลงทุนในแต่ละรูปแบบ
2. การศึกษาวิจัยนี้ได้ใช้สถานีไฟฟ้าย่อยจังหวัดระยอง เป็นต้นแบบการวิเคราะห์ และกำหนดอายุเชิงเศรษฐกิจของสถานีไฟฟ้าย่อย อัตราการค่าซ่อมบำรุงรักษาและดัชนีค่าความเสียหายอันเกิดจากไฟฟ้าดับ [4]
3. วิเคราะห์ต้นทุนการลงทุนและความคุ้มค่าการก่อสร้างสถานีไฟฟ้าแรงสูง 115 kV ตามรูปแบบการจัดวางบัสบาร์โดยใช้ทฤษฎีต้นทุนตลอดช่วงอายุ (Life Cycle Cost, LCC)
4. พิจารณาการจัดเรียงบัสบาร์ในรูปแบบมาตรฐาน 7 แบบ ได้แก่ Single bus, Single bus with sectionalized, Main and transfer bus, Breaker and a half bus, Ring bus, Double bus with transfer, Double bus single breaker และ Double bus double breaker เป็นต้น
5. พิจารณามูลค่ารูปแบบจัดเรียงบัสบาร์ต่าง ๆ จากอุปกรณ์หลักภายในสถานีไฟฟ้าย่อย 3อุปกรณ์ ประกอบด้วย เซอร์คิตเบรกเกอร์ บัสบาร์ และหม้อแปลง เป็นต้น

การศึกษาวิจัยนี้จะวิเคราะห์สถานีไฟฟ้าย่อยแบบใช้ฉนวนอากาศ (AIS) ทั้งหมด 7รูปแบบ ได้แก่ 1.Single bus system, 2.Single bus with sectionalized system, 3.Main & transfer system, 4.Double bus single breaker system, 5.Double bus double breaker system, 6.Breaker & a half system, 7.Ring bus system

### วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาต้นทุนและการก่อสร้างสถานีไฟฟ้าแรงสูง 115 kV ต้นทุนการลงทุน (Investment Cost) ต้นทุนการดำเนินการ (Operation & Maintenance Cost) ต้นทุนการเงิน (Finance Cost) และมูลค่าความเสียหายอันเกิดไฟฟ้าดับ (Power Interruption Cost)
2. ศึกษารูปแบบการจัดเรียงบัสบาร์ และข้อมูลสถิติการเกิดความผิดปกติของทางไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้าแรงสูง 115/22 kV ในแต่ละรูปแบบการจัดเรียงบัสบาร์

อ้างอิงจากการศึกษาวิจัย ไชยยศ มิตรเชื้อชาติ เรื่อง การประเมินความเชื่อถือได้ของสถานีไฟฟ้าย่อยร่วมกับการพิจารณาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ [4] ได้ใช้ทฤษฎีวิธีการจำลองเหตุการณ์แบบมอนติคาร์โล (Monte Carlo) และวิธีการวิเคราะห์แบบมินิมัลคัตเซต (Minimal cut set method) โดยนำข้อดีของทั้ง 2 วิธีมาใช้ร่วมกัน เพื่อประเมินความน่าเชื่อถือได้ของสถานีไฟฟ้าแต่ละรูปแบบและนำมาคำนวณมูลค่าความเสียหายอันเกิดจากไฟฟ้าดับตามลำดับตารางที่ 2 เพื่อนำไปหามูลค่าความเสียหายอันเกิดจากไฟฟ้าดับ (Interruption Cost)

ตารางที่ 2 ค่าความน่าเชื่อถือได้ของรูปแบบการจัดเรียงบัสบาร์แต่ละรูปแบบ

เหตุการณ์การล้มเหลว	LOLF (ครั้ง/ปี)	LOLD (ครั้ง/ปี)	LOLP (ครั้ง/ปี)
Single bus	3.1333	28.1323	88.1468
Sectionalized single bus	3.1235	28.1835	88.0311
Main and transfer bus	2.1375	26.2140	56.0340
Breaker and a half	1.1193	35.7624	40.0289
Ring bus	2.1201	26.4281	56.0302
Double bus double breaker	1.1567	34.6196	40.0445
Double bus single breaker	2.1123	34.1034	72.0366

3. วิเคราะห์หาต้นทุนตลอดช่วงอายุจากทฤษฎี Life Cycle Cost (LCC) จากสถานีต้นแบบ และประยุกต์กับรูปแบบการจัดวางบัสบาร์แบบอื่น ๆ ที่พิจารณา

คำนวณหาต้นทุนตลอดช่วงอายุของรูปแบบการจัดเรียงบัสบาร์ทั้ง 7 รูปแบบ ซึ่งกล่าวในเบื้องต้น ได้แก่ Single bus, Single bus with sectionalized, Main and transfer bus, Breaker and a half bus, Ring bus, Double bus single breaker และ Double bus double breaker สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$LCC = C_I + (C_{O\&m} + C_I) \quad (1)$$

เมื่อ LCC = ต้นทุนตลอดช่วงอายุ  
 = ค่าใช้จ่ายในการลงทุน (Investment Cost)  
 = ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและบำรุงรักษาต่อปี (Operation & Maintenance Cost)  
 $C_I$  = ค่าใช้จ่ายมูลค่าความเสียหายอันเกิดจากไฟฟ้าดับ (Power Interruption Cost)

ทั้งนี้ผู้ศึกษาวิจัยได้กำหนดขอบเขตสำหรับการคำนวณ ได้แก่

1. หม้อแปลงไฟฟ้ามีขนาด 50 MVA
2. จำนวน Feeder ของสถานีไฟฟ้ามีทั้งหมด 4 Feeders  
(หม้อแปลง 2 Feeders สายส่ง 2 Feeders)
3. ไม่คำนึงถึงมูลค่าที่ดิน เนื่องจากเป็นตัวแปรที่ไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับตำแหน่ง

### การคำนวณหาค่าใช้จ่ายในการลงทุน (Investment Cost; $C_i$ )

กำหนดให้สถานีไฟฟ้าแรงสูงที่จังหวัดระยองมีรูปแบบการจัดเรียงบัสบาร์แบบ Sectionalized single bus เป็นต้นแบบสำหรับการประมาณมูลค่าการลงทุนรวมของการจัดเรียงบัสบาร์ทั้ง 7 รูปแบบ

เนื่องจากมูลค่าการลงทุนแต่ละรูปแบบ จะพิจารณาที่จำนวนอุปกรณ์ที่แตกต่างกันไปตามแต่ละรูปแบบ ดังนั้นผู้ศึกษาวิจัยจึงได้กำหนดให้พิจารณาสอดคล้องตามจำนวนอุปกรณ์หลักได้แก่ 1.หม้อแปลง (Transformer) 2.เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit Breaker) 3.สวิตช์ตัดตอน (Disconnected Switch) และ 4.บัสบาร์ (Bus bar) ได้มูลค่าการลงทุนดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ตารางแสดงมูลค่าการลงทุนการจัดเรียงบัสบาร์แต่ละรูปแบบ

Arrangement	TR.	Circuit Breaker	Disconnected Switch	Busbar	Total cost( $C_i$ )
Single bus	2	4	8	1	THB 107,510,000
Sectionalized single bus	2	5	10	1	THB 109,110,000
Main and transfer bus	2	5	10	2	THB 109,238,265
Breaker and a half	2	6	12	2	THB 110,838,265
Ring bus	2	4	8	-	THB 107,725,020
Double bus double breaker	2	8	16	2	THB 114,038,265
Double bus single breaker	2	5	18	2	THB 112,038,265

คำนวณหาเงินรายงวดที่ผู้กู้ชำระคืนให้กับผู้ให้กู้ตอนปลายงวด (PMT) ของทุก ๆ ตลอดอายุ 30 ปี จากสมการ

$$PMT = PV \times \frac{i}{1-(1+i)^{-n}} \quad (2)$$

เมื่อ	PMT	=	ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและบำรุงรักษาต่อปี (Operation & Maintenance Cost)
	PV	=	ค่าใช้จ่ายในการลงทุน (Investment Cost)
	$i$	=	อัตราคิดลด
	$n$	=	ปีที่พิจารณา (ถึงปีที่ 30 ตามอายุสถานีไฟฟ้าแรงสูงที่กำหนด)



การคำนวณค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและบำรุงรักษาแต่ละปี (Operation & Maintenance Cost Investment Cost;  $C_{O\&m}$ )

การศึกษาวิจัย ไชยยศ มิตรเชื้อชาติเรื่องการประเมินความเชื่อถือได้ของสถานีไฟฟ้าย่อยร่วมกับการพิจารณาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์[5] กำหนดมูลค่าการบำรุงรักษามีค่าประมาณ 2-5 % ของมูลค่าการลงทุนทั้งหมด เนื่องจากโดยปกติมูลค่าการบำรุงรักษาจะเกี่ยวเนื่องกับค่าแรงมาตรฐานและเวลานั้น ๆ ที่เปลี่ยนแปลงไปตามสภาพเศรษฐกิจของประเทศ การพิจารณาจากร้อยละของมูลค่าการลงทุนทั้งหมดจึงมีความเหมาะสมมากกว่าสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$C_{O\&m} = C_I \times \text{ร้อยละค่าo\&m} \text{ เทียบกับมูลค่าการลงทุน} \times (1 + \text{อัตราเงินเฟ้อ})^{n-1} \quad (3)$$

เมื่อ  $C_{O\&m}$  = ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและบำรุงรักษาต่อปี (Operation & Maintenance Cost)  
 $C_I$  = ค่าใช้จ่ายในการลงทุน (Investment Cost)  
 $n$  = ปีที่พิจารณา (ถึงปีที่ 30 ตามอายุสถานีไฟฟ้าแรงสูงที่กำหนด)  
 กำหนดให้

มูลค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและบำรุงรักษาต่อปีให้มีค่าเป็น ร้อยละ 3  
 อัตราเงินเฟ้อ อ้างอิงจากรายงานนโยบายการเงินธนาคารแห่งประเทศไทยประมาณการ  
 อัตราเงินเฟ้อทั่วไปปี 2562 [12] ให้มีค่าเป็นร้อยละ 1.2

การคำนวณมูลค่าความเสียหายอันเกิดจากไฟฟ้าดับ (Power Interruption Cost;  $C_{Interruption}$ )

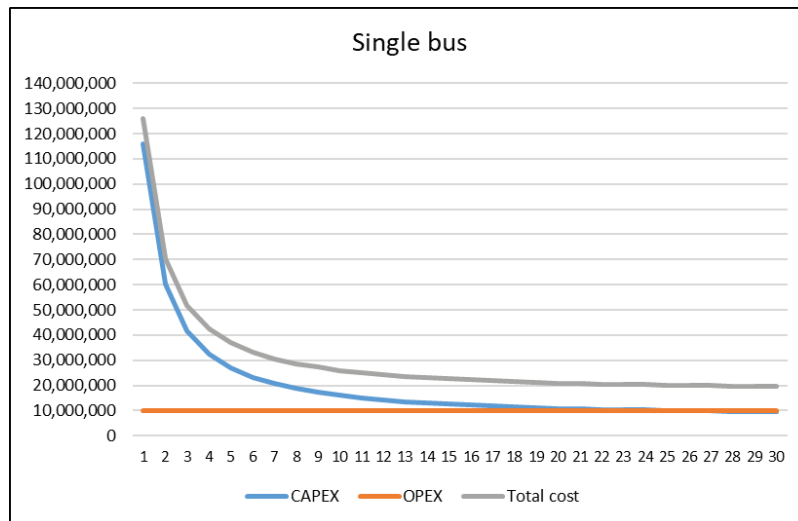
$$C_{Interruption} = LOLP \times MVA_{Expect} \times 1,000 \times \text{Power factor} \times Cost_{\text{กฟภ.}} \quad (4)$$

เมื่อ  $C_{Interruption}$  = ค่าใช้จ่ายมูลค่าความเสียหายอันเกิดจากไฟฟ้าดับ (Power Interruption Cost)  
 LOLP = ความน่าจะเป็นที่ระบบจะเกิดความล้มเหลว (Loss of load probability) จากตารางที่ 2  
 $MVA_{Expect}$  = ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่หายขณะระบบเกิดความล้มเหลว (MVA) อ้างอิงตามขนาดของหม้อแปลง 50 x 2 MVA โดยปกติแล้วการจ่ายไฟฟ้าของหม้อแปลงจะอยู่ที่ 20% ของพิกัด เท่ากับ 40 x 2 MVA สมมติว่าระบบเกิดความล้มเหลว 1 unit หม้อแปลงอีกตัวจะยังสามารถจ่ายไฟฟ้าได้ที่ 50 MVA ดังนั้นปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่หายไปจะเท่ากับ 30 MVA  
 Power factor = ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า อ้างอิงตามการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค 0.85

$$\text{Cost}_{\text{กฟภ.}} = \text{ราคาไฟฟ้า กฟภ. (บาท/kWh) อ้างอิงตามอัตราค่าไฟฟ้า TOU ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) 2560 พิกัด 22 kV ขึ้นไปเฉลี่ยประมาณ 3.00 บาท/kWh}$$

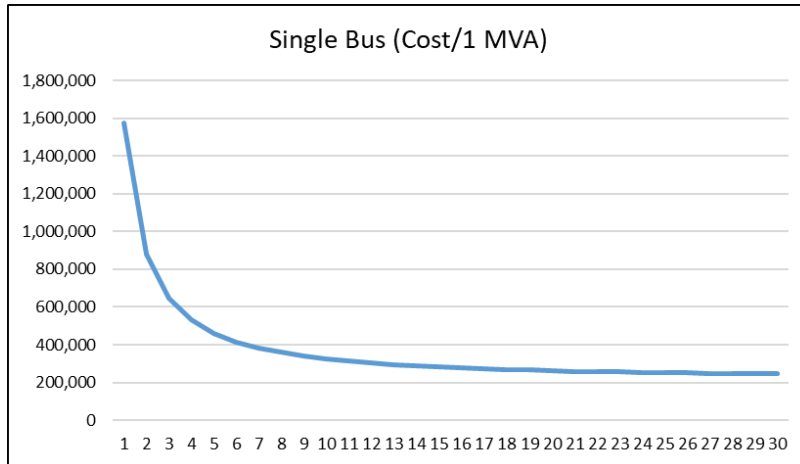
1. ออกแบบรูปแบบจำลองสำหรับการหาค่า Life Cycle Cost (LCC) ตามรูปแบบการจัดวางบัสบาร์เพื่อคำนวณหาอายุเชิงเศรษฐกิจของสถานีไฟฟ้าย่อยแต่ละแบบ
2. วิเคราะห์และประเมินผลจากการศึกษามูลค่าการลงทุนการก่อสร้างสถานีไฟฟ้าย่อยแต่ละแบบ

ในการวิเคราะห์จะใช้ข้อมูลที่คำนวณมาจากข้อ 3 และ 4 มา เข้าสู่ตรินโปรแกรม Excel และ Plot Graph ของมูลค่าในการลงทุน (CAPEX) มูลค่าในการดำเนินการและมูลค่าบำรุงรักษา (OPEX) และหา Total Cost จากจุดตัดระหว่าง CAPEX และ OPEX ตามแนวแกนเวลา (year) จะสามารถหาได้ว่า Life Cycle Cost มีค่าเท่าใดตามทฤษฎีเชิงเศรษฐกิจที่ได้กล่าวไปในข้างต้น เพื่อวิเคราะห์ผลการวิจัยแต่ละรูปแบบ แสดงตัวอย่างดังภาพที่ 3 จะเห็นได้ว่ากราฟ CAPEX และ OPEX ตัดกันที่ปีที่ 25-26 นั่นคือจุด Economic point หรืออายุเชิงเศรษฐกิจของรูปแบบ single bus



ภาพที่ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์มูลค่าการลงทุน LCC ของรูปแบบ Single bus

และนำมาหาค่าการลงทุนต่อหน่วยการผลิตที่ 80% ของ พิกัดตามอายุเชิงเศรษฐกิจได้ดังภาพที่ 4 เป็นการหามูลค่าการลงทุนต่อหน่วยของรูปแบบการจัดเรียงบัสบาร์นั้น ๆ เพื่อวิเคราะห์ว่ารูปแบบใดมีต้นทุนตลอดช่วงอายุต่อปีนั้นต่ำที่สุด จะทำให้สามารถตัดสินใจการลงทุนที่เหมาะสมในสภาพเศรษฐกิจของประเทศ ณ เวลานั้นได้ ทั้งนี้เพื่อเป็นเงื่อนไขหนึ่งในการพิจารณาการลงทุนก่อสร้างสถานีไฟฟ้าแรงสูง ที่ต้องมีเพิ่มมากขึ้นในอนาคตตามแผนรองรับความต้องการกำลังไฟฟ้าที่มีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง



ภาพที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์มูลค่าการลงทุน LCC ของรูปแบบ Single bus

### ผลการวิจัยและอภิปราย

ประเมินผลการวิเคราะห์และทดสอบหาอายุเชิงเศรษฐกิจของสถานีไฟฟ้าแรงสูง เมื่อกำหนดให้อายุของสถานีไฟฟ้าย่อยเท่ากับ 30ปี และใช้ทฤษฎีต้นทุนตลอดวงจรชีวิตของโครงการ (Life cycle cost analysis: LCC) ในการวิเคราะห์และประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ โดยใช้สถานีไฟฟ้าย่อยที่จังหวัดระยองเป็นต้นแบบของรูปแบบจำลอง โดยประเมินจากต้นทุนการลงทุน (Investment Cost) ต้นทุนการดำเนินการ (Operation & Maintenance Cost) ต้นทุนการเงิน (Finance Cost) และมูลค่าความเสียหายอันเกิดไฟฟ้าดับ (Power Interruption Cost) แสดงการหาอายุเชิงเศรษฐกิจได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 อายุเชิงเศรษฐกิจของรูปแบบการจัดวางบัสบาร์แต่ละรูปแบบที่อายุ 30 ปี

Arrangement	Life Cycle Cost (LCC) @30 years
Single bus	26
Sectionalized single bus	26
Main and transfer bus	invaluable
Breaker and a half	invaluable
Ring bus	invaluable
Double bus double breaker	invaluable
Double bus single breaker	invaluable

และสามารถหามูลค่าการลงทุนต่อหน่วยการผลิต Single bus และ Sectionalized single bus ณ ปีที่ 26 และหามูลค่าการลงทุนต่อหน่วยการผลิต Main and transfer bus, Breaker and a half bus, Ring bus, Double bus single breaker และ Double bus double breaker ณ ปีที่ 30 ได้ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แสดงมูลค่าการลงทุนต่อหน่วยของรูปแบบการจัดเรียงบัสบาร์แต่ละรูปแบบ

Arrangement	Cost/year/1MW
Single bus (LCC 26 y)	250,151.71
Sectionalized single bus (26 y)	252,509.47
Main and transfer bus (30 y)	217,288.57
Breaker and a half (30 y)	204,381.47
Ring bus (30 y)	215,017.16
Double bus double breaker (30 y)	209,191.96
Double bus single breaker (30 y)	236,787.17

## สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาวิจัยฉบับนี้เป็นการศึกษารูปแบบจำอายุเชิงเศรษฐกิจตลอดช่วงอายุของสถานีไฟฟ้าย่อยโดยวิเคราะห์จากสถานีไฟฟ้าย่อยต้นแบบที่จังหวัดระยอง โดยใช้ทฤษฎีต้นทุนตลอดวงจรชีวิตของโครงการ (Life cycle cost analysis: LCC) เพื่ออายุเชิงเศรษฐกิจและมูลค่าการลงทุนที่เหมาะสม ซึ่งสามารถหาอายุเชิงเศรษฐกิจของสถานีไฟฟ้าย่อยได้ในรูปแบบ Single Bus และ Sectionalized single bus คือ 26 ปี ส่วนรูปแบบอื่นไม่สามารถหาอายุเชิงเศรษฐกิจตามอายุที่กำหนด 30 ปีได้ เนื่องจากมูลค่าการดำเนินการและบำรุงรักษาและมูลค่าความเสียหายอันเกิดจากไฟฟ้าดับในปีที่ 30 ยังมีค่าน้อยกว่ามูลค่าการลงทุนอยู่ จึงสามารถใช้สถานีไฟฟ้าอีก 5 รูปแบบได้ต่อในเชิงเศรษฐกิจความคุ้มค่าได้แก่ Main and transfer bus, Breaker and a half bus, Ring bus, Double bus single breaker และ Double bus double breaker เป็นต้น

ถึงแม้ว่าจะไม่สามารถหาอายุเชิงเศรษฐกิจได้ แต่ใช้ค่าการลงทุนต่อหน่วยการผลิตเพื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์รูปแบบการจัดเรียงบัสบาร์ในสถานีไฟฟ้าย่อย ทำให้สามารถระบุรูปแบบที่เหมาะสมที่สุดตามมูลค่าการลงทุนได้ คือ รูปแบบการจัดเรียงแบบ Breaker and a half และ Double bus double breaker ตามลำดับ ในกรณีที่ดินสถานีไฟฟ้าแรงสูงเกินกว่า 30 ปี

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คณาจารย์ ที่ปรึกษา โดยเฉพาะอาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ สุทัศน์ รัตนแก้ว กังวาน เป็นอย่างสูงที่ช่วยให้ความรู้ ช่วยเหลือ ให้คำแนะนำต่าง ๆ อย่างดี ตลอดระยะเวลาในการทำวิจัยนี้ ให้สำเร็จ ลุล่วงด้วยดี ขอขอบพระคุณ ประธานกรรมการ และคณะกรรมการสอบสวนนิพนธ์ทุกท่านที่เสียสละเวลาในการสอบสวนนิพนธ์นี้ และขอขอบพระคุณ สถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยบัณฑิตวิทยาลัย และภาควิชาเทคโนโลยี และการจัดการพลังงาน คณาจารย์ บุคลากร เพื่อน พี่ และรุ่นน้อง รวมถึงผู้เชี่ยวชาญเฉพาะทางที่ช่วยในการนี้จบสำเร็จ ลุล่วงอย่างดี

## เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน 30 มิถุนายน 2558. แผนพัฒนากำลังการผลิตไฟฟ้า (Power Development Plan: P2558 - 2579DP) ของประเทศไทยปี 2558 - 2579.
- [2] ประกาศสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน 1 มีนาคม 2559. แผนงานพัฒนาระบบไฟฟ้าในภาพรวมของประเทศเพื่อรองรับการเข้าสู่ประชาคมเศรษฐกิจอาเซียน (AEC)
- [3] คำผุย สุทธิสมบัติ. (2540). การออกแบบสถานีรับจ่ายไฟฟ้านอกอาคาร 115/22 kV ที่ปากซัน จังหวัดบอริคำไซ สาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [4] ไชยยศ มิตรเชื้อชาติ. (2555). การประเมินความเชื่อถือได้ของสถานีไฟฟ้าย่อยร่วมกับการพิจารณาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [5] นवल สุดเขต. (2556). การกำหนดแผนการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดโดยพิจารณาความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [6] Tik Son Wong, Student Member IEEE, Jose Lopez-Roldan, Senior Member, IEEE, Tapan Saha, Senior Member, IEEE. (2015). Development of a Life Cycle Cost Estimating Tool to Compare GIS and AIS Substation Projects. 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting.

- [7] Douglas D. Gransberg, (2015). **Major Equipment Life-cycle Cost Analysis**. Minnesota Department of Transportation Research Services & Library: Principal Investigator Institute for Transportation Iowa State University.
- [8] JunLi Zhang, Jun Xu, SuHua Qiao, Qi Wu. (). The Application of Life Cycle Cost Theory to The Substation Design. State grid shanghai shinan electric power Supply Company.
- [9] Ingo Jeromin, Gerd Balzer, Technische Universität Darmstadt, Jürgen Backes, Richard Huber, EnBW Regional AG Stuttgart (2009). Life Cycle Cost Analysis of transmission and distribution systems. 2009 IEEE Bucharest Power Tech Conference, June 28th - July 2nd, Bucharest, Romania.z
- [10] Martin Hinow, ETH Zurich Switzerland, Mark Waldron, National Grid UK, Dr.Lorenz Muller, ABB Switzerland. (2008). Substation Life Cycle Cost Management Supported By Stochastic Optimization Algorithm. CIGRE 2008
- [11] Martin Hinow, Martin Mevissen. (2011). Substation Maintenance Strategy Adaptation for Life-Cycle Cost Reduction Using Genetic Algorithm. IEEE Transaction on power delivery, Vol. 26, No. 1, JANUARY 2011.
- [12] ธนาคารแห่งประเทศไทย มิถุนายน 2561. รายงานนโยบายการเงิน

## การออกแบบเส้นโค้งความเร็วเพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้าของรถไฟฟ้าใต้ดินสายสีน้ำเงิน ในประเทศไทย

### Design Speed Profile for Reducing Energy Consumption of the Bangkok MRT Blue Line

กันตินันท์ สกฤไพศาล ธีระพงษ์ บุญรักษา และบุญเรือง มะรังศรี\*

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา 30000

#### บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาการออกแบบเส้นโค้งความเร็วของรถไฟฟ้าใต้ดินในประเทศไทย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดการใช้พลังงานในการเคลื่อนที่ในช่วงเวลาที่มีความหนาแน่นของผู้โดยสารต่ำหรือช่วงเวลาไม่เร่งด่วน (Off-Peak Hours) การออกแบบเส้นโค้งความเร็วถูกออกแบบโดยการใช่วิธีการหาค่าเหมาะสมแบบฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization : PSO) ในการหาค่าความเร็วสูงสุดที่เหมาะสมในแต่ละช่วงของสถานี โดยไม่คำนึงถึงตารางเวลาการเดินทาง เนื่องจากการปรับความเร็วของรถไฟฟ้านั้นส่งผลกระทบต่อตารางเวลาของรถไฟฟ้าย่อยตรงและการสร้างตารางเดินรถใหม่นั้นถือว่ามีความซับซ้อนอย่างมาก กรณีศึกษาของบทความนี้ใช้เส้นทางและข้อมูลทางภูมิศาสตร์ของรถไฟฟ้าใต้ดินสายสีน้ำเงิน ดังนั้นพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่และเส้นโค้งความเร็วที่ได้จากการหาค่าที่เหมาะสมจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าเดิมที่ได้จากข้อมูลทางเทคนิคของเส้นทางที่ศึกษา ผลลัพธ์ของบทความนี้แสดงถึงการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลื่อนที่ใน 1 รอบการวิ่งให้บริการ ซึ่งการออกแบบเส้นโค้งความเร็วใหม่สามารถลดการใช้พลังงานรวมได้ถึง 180 kWh ต่อรอบการวิ่งให้บริการ

**คำสำคัญ:** ออกแบบเส้นโค้งความเร็ว รถไฟฟ้าใต้ดิน วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบฝูงอนุภาค

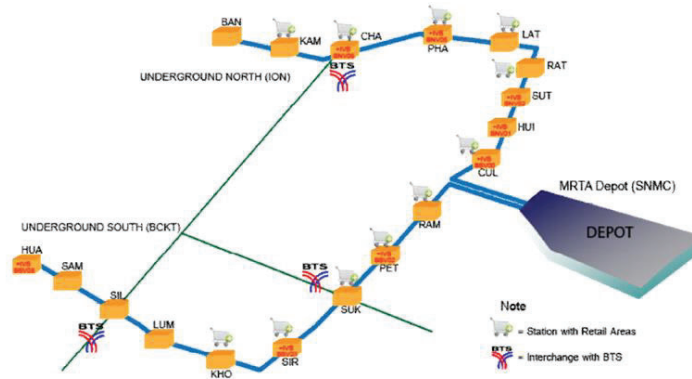
\*Corresponding author: Tel.: 089-7177065. E-mail address: bmshivee@sut.ac.th

#### บทนำ

ในปัจจุบันระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในประเทศไทยกำลังขยายออกให้ครอบคลุมทั่วกรุงเทพฯและปริมณฑล ซึ่งสามารถเคลื่อนย้ายประชาชนได้จำนวนมากและทำให้การเดินทางมีความสะดวกมากยิ่งขึ้น แต่ต้องแลกกับการรับภาระค่าใช้จ่ายด้านพลังงานอย่างมหาศาล ดังนั้นการลดการใช้พลังงานในช่วงเวลาที่ความหนาแน่นของผู้โดยสารต่ำจึงเป็นทางเลือกที่ดีทางเลือกหนึ่ง แต่วิธีการนี้มีข้อเสียคือส่งผลกระทบต่อตารางเวลาเดินทาง

การออกแบบเส้นโค้งความเร็วของรถไฟฟ้าที่เหมาะสมในช่วงเวลาที่มีความหนาแน่นของผู้โดยสารต่ำต้องเป็นไปตามมาตรฐานการเดินรถไฟฟ้าของรถไฟฟ้ามหานครที่กำหนดไว้ว่า ความเร็วเฉลี่ยของรถไฟฟ้าต้องไม่ต่ำกว่า 35 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และการเดินทางระหว่างสถานีต้องต่ำกว่า 5 นาที ดังนั้นจากข้อมูลของมาตรฐานจึงถูกนำมากำหนดเป็นข้อจำกัดในการสร้างเส้นโค้งความเร็วและใช้เส้นทางสายสีน้ำเงินซึ่งมีระยะทางรวม 20 กิโลเมตร สถานีขนส่งผู้โดยสาร 18 สถานีและพิจารณาการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าแบบเดินรถขบวนเดียว เส้นทางของสายสีน้ำเงินถูกแสดงในภาพที่ 1

วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคเป็นวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่ใช้งานง่ายและเป็นที่ยอมรับ ในปัจจุบันวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคถูกนำมาใช้แก้ปัญหาในระบบรถไฟฟ้าอยู่บ่อยครั้งในงานวิจัย ซึ่งวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคเป็นวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่ใช้งานง่ายและเป็นที่ยอมรับ ในปัจจุบันวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคถูกนำมาใช้แก้ปัญหาในระบบรถไฟฟ้าอยู่บ่อยครั้งดังเช่นงานวิจัย [1] ได้จำลองหาพลังงานที่ต่ำที่สุดในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค ซึ่งผลลัพธ์ได้แสดงถึงการลดการใช้พลังงานที่มีค่าตั้งแต่ 3 % - 14 % ต่อมาได้นำมาประยุกต์ใช้ในการในการปรับปรุง โดยวิธีการสร้างเส้นโค้งความเร็วขึ้นมาใหม่เพื่อลดการใช้พลังงานสามารถลดการใช้พลังงานได้สูงที่สุดถึง 25 % ดังเช่นงานวิจัยดังต่อไปนี้ [2] ได้นำเสนอโมเดลและวิธีการในการสร้างเส้นโค้งความเร็วที่เหมาะสมของรถไฟฟ้าเพื่อที่จะลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในการเดินทางระหว่างสถานีขนส่งผู้โดยสาร โดยการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าไปยังสถานีต่าง ๆ เพื่อพัฒนากลยุทธ์ที่ใช้ในการขับรถไฟฟ้า โดยกลยุทธ์ในการขับรถไฟฟ้าที่ถูกพัฒนาขึ้นสามารถลดการใช้พลังงานได้ถึง 21%, [3] ได้นำเสนอวิธีการที่สามารถลดการใช้พลังงานและค่าใช้จ่ายด้านพลังงานของรถไฟฟ้าโดยการสร้างเส้นโค้งความเร็วใหม่โดยใช้เวลาและตัวบ่งชี้ความสบายในการเดินทางของผู้โดยสารเป็นเงื่อนไขซึ่งผลลัพธ์จากการออกแบบเส้นโค้งความเร็วเพียงอย่างเดียวสามารถลดการใช้พลังงานได้ถึง 25% และ [4] ได้สร้างเส้นโค้งความเร็วที่เหมาะสมที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าโดยมีเงื่อนไขในการลดการใช้พลังงานด้วยวิธีการขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม โดยผลลัพธ์ของการจำลองระบบรถไฟฟ้า ได้แสดงถึงการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าและการลดความผันผวนของแรงดันไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้า เป็นต้น



ภาพที่ 1 เส้นทางเดินรถของรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงิน

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

แบบจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ากระแสตรง

การเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าสามารถจำแนกออกเป็น 4 โหมดการทำงานได้แก่ โหมดเร่งความเร็ว โหมดคงค่าความเร็ว โหมดชะลอความเร็ว และโหมดเบรก โดยแต่ละโหมดการทำงาน พลังงานที่ใช้ในแต่ละโหมดการทำงานนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณด้านพลวัตของรถไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วย แรงฉุดลากของหัวรถจักร แรงต้านทานการวิ่ง แรงต้านทานทางโค้งและแรงต้านทานการวิ่งขึ้น-ลงเนิน ซึ่งเป็นไปตามกฎการเคลื่อนที่ของนิวตันข้อที่ 2

แรงต้านทานการวิ่ง ในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าประกอบด้วย แรงลากทางพลศาสตร์และแรงเสียดทานของการเคลื่อนที่ ซึ่งทิศทางของแรงตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า โดยนิยมจัดให้อยู่ในรูปของสมการเดวี (Davis Equation)

แรงเสียดทานการเคลื่อนที่ผ่านทางโค้ง มีสาเหตุมาจาก ขอบนอกของวงล้อที่ทำหน้าที่เกาะรางรถไฟเกิดแรงเสียดทานจากการไถลและล้อด้านนอกหมุนเร็วกว่าล้อด้านในจึงทำให้เกิดการสลิปเป็นเหตุให้แรงเสียดทานจากการไถลเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปแล้วแรงเสียดทานทางโค้ง ถูกคำนวณด้วยสมการ Roeckl's formula

แรงต้านทานการวิ่งขึ้น-ลงเนิน โดยทั่วไปเส้นทางเดินรถของรถไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงระดับความสูงตามสถานีขนส่งผู้โดยสารที่ถูกสร้างขึ้น การพิจารณาแรงต้านทานจากการวิ่งขึ้น-ลงเนิน โดยปกติถูกกำหนดให้อยู่ในรูปแบบการคำนวณอย่างง่ายโดยการสมมติให้รถไฟฟ้าทั้งขบวนเป็นมวลจุดเดียว

การคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่รถไฟฟ้าใช้ในการเคลื่อนที่ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้บนรถไฟฟ้าถูกแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ พลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนรถไฟฟ้าและพลังงานที่ใช้ในอุปกรณ์อำนวยความสะดวก ที่ถูกใช้ในระบบแสงสว่าง เครื่องปรับอากาศ พัดลมระบายความร้อน ระบบติดต่อสื่อสาร โดยการคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมดเกิดจากผลรวมของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนรถไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในอุปกรณ์อำนวยความสะดวกดังสมการที่ 8 โดยพลังงานที่ใช้ในอุปกรณ์อำนวยความสะดวกจะมีค่าคงที่ ส่วนพลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนไฟฟฟ้านั้นจะแปรผันตามความเร็วและแรงฉุดลากของหัวรถจักรโดยประสิทธิภาพของชุดขับเคลื่อนมีผลต่อแรงฉุดลากของหัวรถจักร[5]-[6]

วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค

การสร้างเส้นโค้งความเร็วใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค ซึ่งสร้างขึ้นโดยคุณ Kennedy และ Eberhart ในปี พ.ศ.2538 โดยมีแรงบรรดาลใจมาจากการสังเกตการเคลื่อนไหวของกลุ่มสัตว์เช่นฝูงนก ที่มีลักษณะการเคลื่อนที่สอดคล้องกันในเวลาที่ออกหาอาหาร ดังนั้นการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาคคือการใช้ฝูงอนุภาคจำนวนมากเคลื่อนที่ไปบนพื้นที่ที่ต้องการค้นหาเพื่อค้นหาคำตอบที่ดีที่สุด [7] โดยที่การออกแบบเส้นโค้งความเร็วมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์และข้อจำกัดดังสมการที่ (1)-(7)

$$\text{ฟังก์ชันวัตถุประสงค์} \quad \text{Minimum} \quad E = \int P_t(v, s) \, ds \quad (1)$$

ข้อจำกัด

$$s(0) = 0; \quad (2)$$

$$s(t) = L \quad (3)$$

$$a \leq 1.2 \, m/s^2 \quad (4)$$

$$0 \leq v(s) \leq \text{speed limit}(s) \quad (5)$$

$$\text{Trip time} < 300 \, s \quad (6)$$

$$\text{Average speed} > 40 \, \text{km/hr.} \quad (7)$$

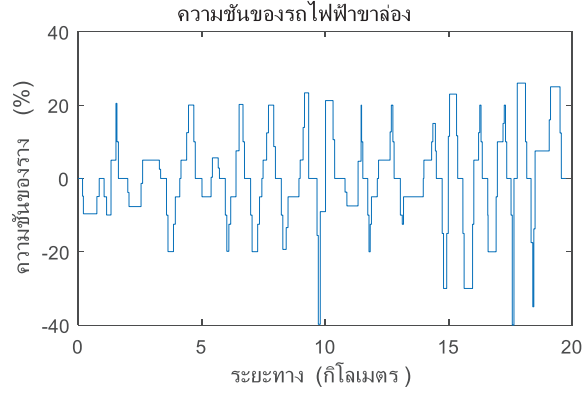
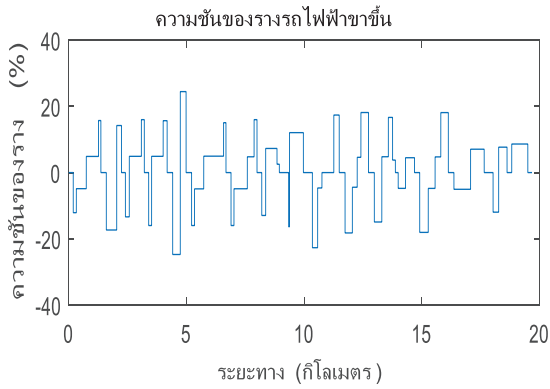
### วิธีการจำลองของระบบ

ข้อมูลที่น่ามาใช้ในการสร้างระบบและจำลองผลลัพธ์นั้นประกอบด้วย ความชันของรางรถไฟฟ้า รัศมีความโค้งของรางรถไฟฟ้า และข้อมูลของขบวนรถไฟฟ้าที่ให้บริการในปัจจุบัน การใช้พลังงานไฟฟ้าของรถไฟฟ้าในการเคลื่อนที่ตลอดสายทั้งขาขึ้น(จากสถานีหัวลำโพงไปสถานีบางซื่อ) และขาล่อง (จากสถานีบางซื่อไปสถานีหัวลำโพง) ดังแสดงในภาพที่ 3-5 และตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อมูลของขบวนรถไฟฟ้า

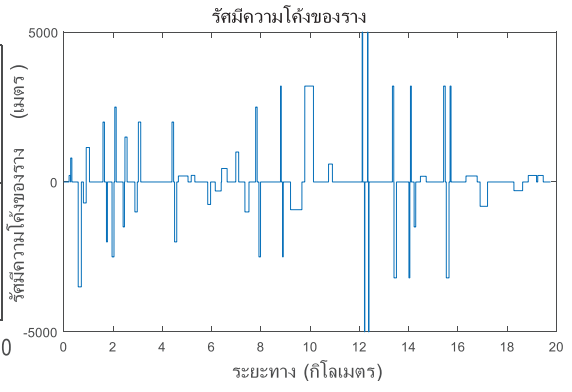
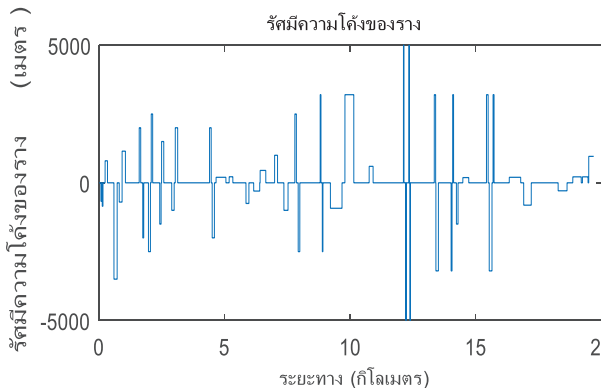
หัวข้อ	ค่า	หน่วย
น้ำหนัก	160	Ton
อัตราเร่งและอัตราเบรกสูงสุด	1.2, 1.2	m/s <sup>2</sup>
ความเร็วสูงสุด	80	Km/hr.
Davis constant a,b,c	3.52, 30.56, 2.28	





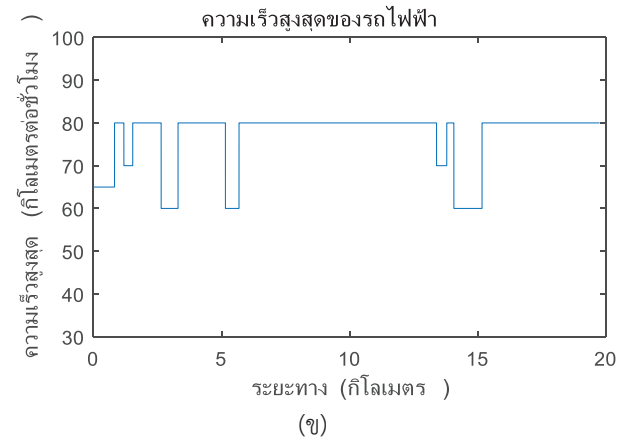
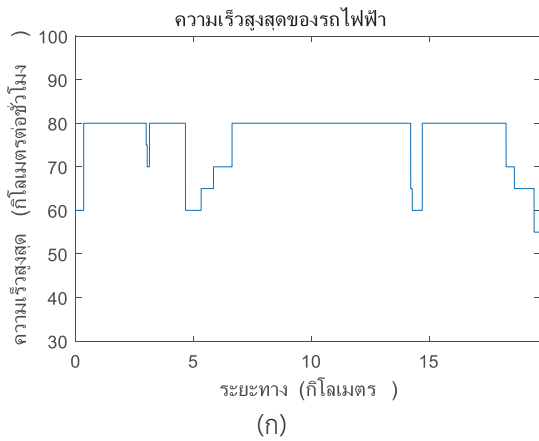
(ก) (ข)

ภาพที่ 2 (ก) ความชันของแรงดันไฟฟ้าเส้นทางขาขึ้น (ข) ความชันของแรงดันไฟฟ้าเส้นทางขาล่อง



(ก) (ข)

ภาพที่ 3 (ก) รัศมีความโค้งของแรงดันไฟฟ้าเส้นทางขาขึ้น (ข) รัศมีความโค้งของแรงดันไฟฟ้าเส้นทางขาล่อง



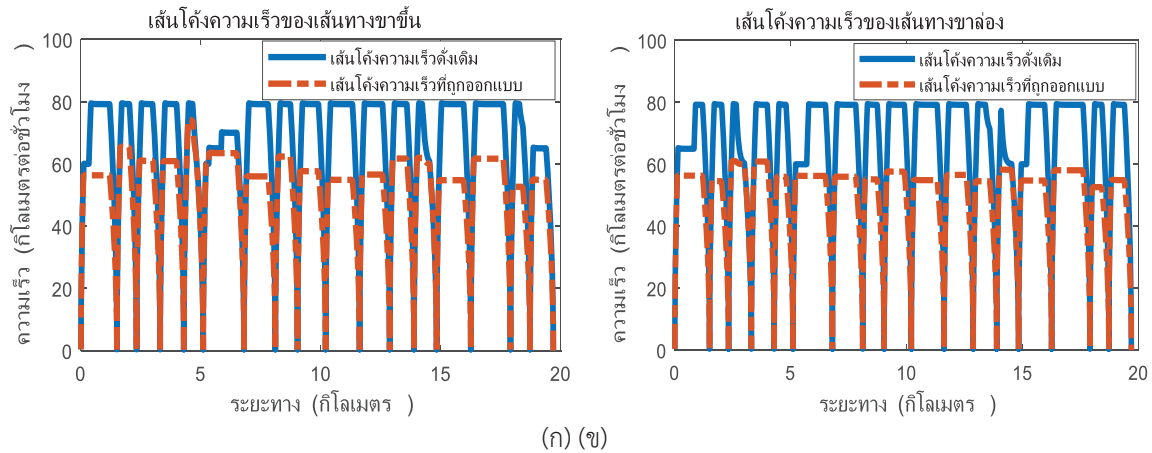
ภาพที่ 4 (ก) ความเร็วสูงสุดของแรงดันไฟฟ้าเส้นทางขาขึ้น (ข) ความความเร็วสูงสุดของแรงดันไฟฟ้าเส้นทางขาล่อง

### ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

จากข้อมูลทางภูมิศาสตร์ ข้อจำกัดของรถไฟฟ้าและข้อมูลจากตารางที่ 1 สามารถนำมาสร้างระบบจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB 2016a ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองแสดงเป็นเส้นโค้งความเร็วซึ่งถูกแยกออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ เส้นโค้งความเร็วดั้งเดิมและเส้นโค้งความเร็วที่ถูกออกแบบขึ้นมาใหม่

เส้นโค้งความเร็วดั้งเดิมที่ถูกจำลองขึ้นมาถูกกำหนดให้รถไฟฟ้าวิ่งด้วยความเร็วสูงสุด โดยมีข้อกำหนดคือ แรงบิดที่ใช้ในช่วงการเร่งความเร็วจะต้องไม่เกินค่าความเร่งสูงสุดและเส้นทางที่ใช้ในการเคลื่อนที่มี 2 เส้นทาง คือ เส้นทางขาขึ้นและเส้นทางขาล่อง มีรูปแบบของเส้นโค้งความเร็วดังภาพที่ 5 (ก)-(ข) (เส้นทึบ)

เส้นโค้งความเร็วที่ถูกออกแบบใหม่เหมาะสมสำหรับช่วงเวลาไม่เร่งด่วนเท่านั้น ซึ่งการออกแบบเส้นโค้งความเร็วเป็นการปรับลดความเร็วสูงสุดของรถไฟฟ้าลงมา โดยที่รถไฟฟ้าต้องสามารถให้บริการตามมาตรฐานที่กำหนดเอาไว้ ผลการจำลองการเส้นโค้งความเร็วที่ออกแบบขึ้นมาใหม่มีรูปแบบของเส้นโค้งความเร็วภาพรูปที่ 5 (ก)-(ข) (เส้นประ)



ภาพที่ 5 (ก) การเปรียบเทียบเส้นโค้งความเร็วดั้งเดิมกับเส้นโค้งความเร็วที่ถูกออกแบบส่วนของขาขึ้น  
(ข) การเปรียบเทียบเส้นโค้งความเร็วที่ดั้งเดิมกับเส้นโค้งความเร็วที่ถูกออกแบบส่วนของขาล่อง

**ตารางที่ 2** การใช้พลังงานของรถไฟฟ้าหลังจากการใช้เส้นโค้งความเร็วที่ออกแบบใหม่

เส้นทาง	พลังงานที่ใช้ (kWh)	ระยะเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ (minutes)
ขาขึ้น (สถานีหัวลำโพงไปสถานีบางซื่อ)	190	22
ขาล่อง(สถานีบางซื่อไปสถานีหัวลำโพง)	184	22

**ตารางที่ 3** การใช้พลังงานของรถไฟฟ้าหลังจากการใช้เส้นโค้งความเร็วที่ออกแบบใหม่

เส้นทาง	พลังงานที่ใช้ (kWh)	ระยะเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ (minutes)
ขาขึ้น (สถานีหัวลำโพงไปสถานีบางซื่อ)	119	30
ขาล่อง(สถานีบางซื่อไปสถานีหัวลำโพง)	121	28

ผลจากการปรับความเร็วส่งผลให้มีระยะเวลาในการเดินทางรวมสูงขึ้น 16 นาทีต่อรอบ โดยเวลาที่ใช้ในการเดินทางเฉลี่ยของแต่ละสถานีที่เพิ่มขึ้นสถานีละ 55 วินาที แต่สามารถลดการใช้พลังงานรวมของการเดินทางในแต่ละรอบได้ถึง 137 kWh ต่อรอบการวิ่งให้บริการ ซึ่งหลังจากปรับปรุงเส้นโค้งความเร็วแล้ว ความเร็วเฉลี่ยของรถไฟฟ้ามีค่า 35 km/hrs. และเวลาในการเคลื่อนที่ระหว่างสถานีไม่เกิน 300 วินาที

**สรุปผลการวิจัย**

จากปัญหาด้านค่าใช้จ่ายด้านพลังงานของรถไฟฟ้าใต้ดินในปัจจุบัน การสร้างเส้นโค้งความเร็วที่สอดคล้องกับช่วงเวลาต่างๆของการให้บริการถือเป็นวิธีการที่เหมาะสมและไม่เสียค่าใช้จ่ายในด้านการติดตั้งอุปกรณ์เสริม และยังช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานต่อเดือนอีกด้วย จากผลการทดลองปรับความเร็วแสดงให้เห็นถึงข้อดีและข้อเสียที่เกิดขึ้น โดยข้อดีที่เกิดขึ้นคือสามารถช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้จำนวนมากหากพิจารณาการเดินทางรถไฟฟ้าแบบหลาย

ขบวน แต่ข้อเสียของวิธีการนี้คือ ผู้โดยสารต้องใช้เวลาในการเดินทางมากขึ้นจึงทำให้เส้นโค้งความเร็วที่ถูกออกแบบขึ้นมาใหม่สามารถใช้ได้ในเวลาที่ไม่เร่งด่วนเท่านั้น และมีผลกระทบต่อตารางเวลาเดินรถจำเป็นต้องสร้างตารางเดินรถในช่วงเวลาไม่เร่งด่วนขึ้นมาใหม่เพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลงรูปแบบในการเดินทางของรถไฟฟ้าหรืออาจจะต้องเพิ่มจำนวนรถที่ให้บริการในช่วงเวลาไม่เร่งด่วนเพื่อลดเวลารอคอยของผู้โดยสารให้เหมาะสมกับวิถีชีวิตคนกรุงเทพฯ

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญเรือง มะรังศรี ที่ให้คำปรึกษาพร้อมชี้แนะแนวทางในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นตลอดการดำเนินการวิจัย

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Fernandez-Rodriguez, A., Fernandez-Cardador, A., Cucala, A. P., Dominguez, M., & Gonsalves, T. (2015). Design of Robust and Energy-Efficient ATO Speed Profiles of Metropolitan Lines Considering Train Load Variations and Delays. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*,16(4), 2061-2071. doi:10.1109/tits.2015.2391831
- [2] Martinis, V. D., & Gallo, M. (2013). Models and Methods to Optimise Train Speed Profiles with and without Energy Recovery Systems: A Suburban Test Case. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*,87, 222-233.
- [3] Domínguez, M., Fernández, A., Cucala, A. P., & Lukaszewicz, P. (2011). Optimal design of metro automatic train operation speed profiles for reducing energy consumption. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*
- [4] Su, S., Tang, T., & Wang, Y. (2016). Evaluation of Strategies to Reducing Traction Energy Consumption of Metro Systems Using an Optimal Train Control Simulation Model. *Energies*
- [5] Mongkoldee, K., Leeton, U., & Kulworawanichpong, T. (2016). Single train movement modelling and simulation with rail potential consideration. *2016 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*.
- [6] Sumpavakup, C., Suwannakijborihan, S., Ratniyomchai, T., & Kulworawanichpong, T. (2018). Peak Demand Cutting Strategy with an On-Board Energy Storage System in Mass Rapid Transit. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering*.
- [7] N. (2016, April 18). [Algorithm]Particle Swarm Optimization. Retrieved from <https://www.algorithm-tut.com/particleswarmoptimization/>

## การเปรียบเทียบการลดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สชีวภาพโดยใช้แคลเซียมออกไซด์และขี้เถ้า Comparison of decreased carbon dioxide in biogas using calcium oxide and ash

ธวัลรัตน์ ฝิโลทัยสิทธิ์<sup>1</sup> และรัตนชัย ไพรินทร์<sup>2</sup>

<sup>1</sup> สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
126 ถนนประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร 10140

<sup>2</sup> สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวเคมี คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
49 ซอยเทียนทะเล 25 ถนนบางขุนเทียน-ชายทะเล แขวงท่าข้าม เขตบางขุนเทียน กรุงเทพฯ 10150

### บทคัดย่อ

แก๊สชีวภาพมีองค์ประกอบหลักคือแก๊สมีเทนร้อยละ 60 และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 40 เมื่อนำแก๊สชีวภาพไปใช้งาน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีผลทำให้ค่าความร้อนที่ได้มีค่าต่ำลง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะลดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สชีวภาพโดยการใส่ขี้เถ้าเปรียบเทียบกับสารเคมีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) โดยใส่ขี้เถ้าที่นำมาใช้ได้มาจากการเผาฟางข้าวเนื่องจากเป็นวัสดุเหลือทิ้ง หาได้ง่ายและมีปริมาณขี้เถ้าสูงหลังจากเผาในงานวิจัยนี้ได้ทำการหมักมูลโคน้ำหนัก 550 กรัมในถังหมักปริมาตร 6 ลิตรเป็นระยะเวลา 45 วัน ไม่มีการเติมสารอินทรีย์เข้าสู่ถังหมัก (Batch Fermentation) โดยปรับ pH เริ่มต้นเท่ากับ 10 ด้วยสารละลาย NaOH เพื่อให้มีสภาพเป็นเบส ซึ่งเป็นสถานะที่จุลินทรีย์จะปล่อยเอนไซม์เพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ให้เป็นอาหารเตรียมแคลเซียมออกไซด์จำนวน 50 กรัมละลายในน้ำ 550 มิลลิลิตร (9%W/V) และใส่ขี้เถ้าจากการเผาฟางข้าวจำนวน 50 กรัมละลายในน้ำ 550 มิลลิลิตร (9%W/V) ใส่ลงในถังเก็บแก๊สชีวภาพเพื่อลดสัดส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อทำการหมักถึงระยะเวลา 45 วัน นำแคลเซียมออกไซด์และขี้เถ้าจากฟางข้าวไปเผาโดยมีอุณหภูมิการเผาประมาณ 700 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 20 นาทีเพื่อไล่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แล้วจะได้แคลเซียมออกไซด์กลับมาและเป็นการไล่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออก จากนั้นนำแคลเซียมออกไซด์และขี้เถ้าที่ได้จากการเผานำกลับมาลดสัดส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อีกครั้งผลการทดลองพบว่า แก๊สชีวภาพที่ไม่ได้มีการลดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเฉลี่ยสัดส่วนมีเทนเท่ากับ 65.58% คิดเป็นค่าความร้อนประมาณ 23.5 MJ/m<sup>3</sup> แต่เมื่อทำการลดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้แคลเซียมออกไซด์และขี้เถ้ามีค่าเฉลี่ยสัดส่วนมีเทนเท่ากับ 85.89%, 89.36% ตามลำดับ เมื่อทำการเผาแคลเซียมออกไซด์และขี้เถ้าเพื่อไล่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แล้วนำกลับมาลดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อีกครั้งมีค่าเฉลี่ยสัดส่วนมีเทนเท่ากับ 78.12%, 80.41% ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าขี้เถ้าจากการเผาฟางข้าวสามารถลดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีกว่าแคลเซียมออกไซด์เนื่องจากขี้เถ้าซึ่งมีออกไซด์ของโลหะต่างๆไปละลายน้ำ สารประกอบออกไซด์เหล่านั้นจะกลายเป็นสารประกอบไฮดรอกไซด์ เมื่อละลายน้ำจะได้สารละลายเบสสามารถทำปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเฉลี่ยสัดส่วนมีเทนเพิ่มขึ้นประมาณ 15-20% คิดเป็นค่าความร้อนที่เพิ่มขึ้นในแก๊สชีวภาพประมาณ 6-8 MJ/m<sup>3</sup> ดังนั้นเมื่อลดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และมีปริมาณแก๊สมีเทนที่สูงขึ้นถึง 90% จะทำให้แก๊สชีวภาพมีค่าความร้อนที่สูงขึ้นถึง 32 MJ/m<sup>3</sup> ซึ่งสามารถนำไปผลิตเป็นแก๊สไบโอมิเทนอัดเพื่อใช้ในรถยนต์ต่อไปได้

**คำสำคัญ:** การลดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์/ มูลโค/ ฟางข้าว/ แคลเซียมออกไซด์/ ขี้เถ้า

\*Corresponding author: Tel.: 084-6998-269. E-mail address: tawanrat.palothaisit@kmutt.ac.th

## บทนำ

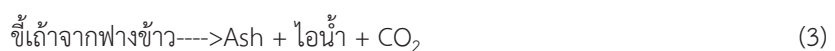
แก๊สชีวภาพ (Biogas) เป็นพลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy) ชนิดหนึ่งที่สามารถดำเนินการผลิตและใช้เป็นพลังงานทดแทนพลังงานจากฟอสซิลได้ โดยมีการส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานทดแทนมากขึ้น ตามแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558-2579[1] การเลี้ยงสัตว์ทำให้มีของเสียเป็นจำนวนมาก มูลโคถือเป็นของเสียที่สามารถนำไปผลิตแก๊สชีวภาพได้ดีซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อปริมาณการเกิดแก๊สชีวภาพและการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ เมื่อนำของเสียมาผ่านกระบวนการหมักในสภาวะไร้ออกซิเจน (Anaerobic Digestion) ด้วยแบคทีเรียหลายชนิดซึ่งจะทำให้เกิดแก๊สชีวภาพโดยผ่านกระบวนการหมัก 4 ขั้นตอน[2] คือ (1) Hydrolysis สารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลใหญ่ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน จะถูกแบคทีเรียย่อยสลายให้กลายเป็นสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลเล็ก (2-3) Acidogenesis and Acetogenesis สารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลเล็กซึ่งเป็นสารผลิตภัณฑ์ของการย่อยในขั้นตอนแรก จะถูกเปลี่ยนให้เป็นกรดอินทรีย์ชนิดโมเลกุลเล็ก เช่น กรดอะซิติก (Acetic Acid) และกรดโพรไพโอนิก (Propionic Acid) โดยแบคทีเรียสร้างกรด ซึ่งกรดที่เกิดขึ้นมากที่สุดคือ กรดอะซิติก คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนเกิดขึ้นในขั้นตอนนี้อีกด้วย (4) Methanogenesis ในกระบวนการสร้างแก๊สมีเทน จะสร้างจากกรดอะซิติก แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) และแก๊สไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) ที่ได้จากกระบวนการสร้างกรด โดยแบคทีเรียสร้างมีเทน ซึ่งการสร้างแก๊สมีเทนแบ่งเป็น 2 แบบ แบบแรกจะเกิดจากการเปลี่ยนกรดอะซิติกเป็นแก๊สมีเทน โดยคิดเป็นร้อยละ 70 และแบบที่สองเกิดจากการรวมตัวกันของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจน กลายเป็นแก๊สมีเทน คิดเป็นร้อยละ 30 โดยการหมักทุกอย่างจะได้แก๊สชีวภาพที่มีองค์ประกอบ ได้แก่ แก๊สมีเทน (CH<sub>4</sub>) ประมาณ 50-75 เปอร์เซ็นต์ และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ประมาณ 25-50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งปัญหาของแก๊สชีวภาพนั้นเกิดจากการที่มีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) เป็นส่วนผสมของแก๊สชีวภาพส่งผลทำให้ค่าความร้อน (Heating Value) ต่ำลงและยังส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลง โดยแก๊สชีวภาพจำนวน 1 ลูกบาศก์เมตร จะได้ค่าความร้อนเท่ากับ 21.5 MJ/m<sup>3</sup>[3] สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อทดแทนพลังงานฟอสซิลโดยเทียบเท่ากับ แก๊สหุงต้ม (LPG) 0.46 กิโลกรัม น้ำมันเบนซิน 0.67 ลิตร น้ำมันเตา 0.55 ลิตร พลังงานไฟฟ้า 1.40 กิโลวัตต์-ชั่วโมง[4] ดังนั้นจึงเป็นที่มาของงานวิจัยคือการลดสัดส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สชีวภาพลง โดยการใช้แคลเซียมออกไซด์และซีเถ้าจากการเผาฟางข้าว เนื่องจากแคลเซียมออกไซด์มีลักษณะเป็นผงสีขาว มีฤทธิ์เป็นด่างแก่ pH 14 สามารถทำปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดังสมการที่ (1)



อีกทั้งฟางข้าวถือเป็นของเหลือทิ้งจากการเก็บเกี่ยวจากเมล็ดข้าวออกไปแล้วทำการเผาฟางข้าวทิ้ง เมื่อเผาฟางข้าวจะได้สารระเหย 74.4% ถ่านคงตัว 18.3% เถ้า 7.3% และค่าความร้อนประมาณ 18,000 kJ/kg[4] ทำให้มีปริมาณซีเถ้าเป็นจำนวนมากโดยจะมีส่วนประกอบด้วยแร่ธาตุต่างๆอีกมากมีฤทธิ์เป็นด่างสามารถทำปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ และเมื่อใช้แคลเซียมออกไซด์ในการลดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แล้วสามารถนำแคลเซียมออกไซด์ไปเผาเพื่อไล่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออก (Reuse) ดังสมการ (2)



แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะสลายตัวออกที่อุณหภูมิประมาณ 800-900 องศาเซลเซียสเมื่อทำการใช้ซีเถ้าในการลดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แล้วจึงนำซีเถ้าไปเผาดังสมการ (3) สำหรับการเผาฟางข้าว



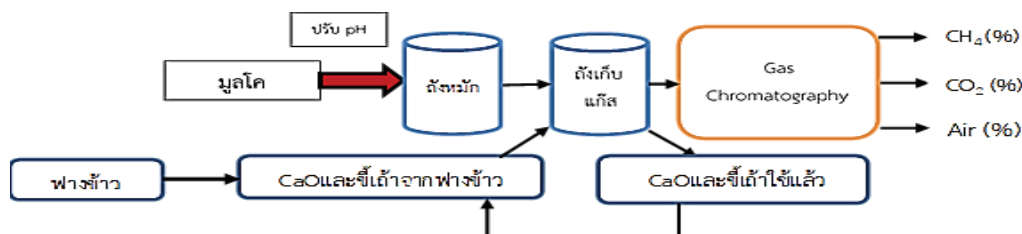
โดยซีเถ้ามีองค์ประกอบของซิลิกาไดออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) เป็นส่วนใหญ่ในการเผาซีเถ้า ดังนั้นจึงเป็นการเผาเพียงแต่ไล่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำที่ซีเถ้าได้ดูดซับเอาไว้ก่อนไม่สามารถทำลายโมเลกุลของซิลิกาไดออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) ได้ เนื่องจากซิลิกาไดออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) มีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิประมาณ 1,700 องศาเซลเซียส[5] เมื่อนำซีเถ้าไปทำการ

เผาแล้วนำกลับมาใช้ในการลดปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ สาเหตุที่ทำแบบนี้เนื่องจากสามารถใช้ความร้อนที่ได้จากการเผาฟางข้าวมาใช้ประโยชน์และสามารถนำชี้เถ้ากลับมาใช้ประโยชน์ได้อีก สำหรับในการลดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารละลายแบบวิวิธภัณฑ์เป็นแคลเซียมออกไซด์และชี้เถ้ามีข้อดีคือสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยการนำไปเผาโดยแก๊สชีวภาพที่ผ่านการลดสัดส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หรือปรับปรุงคุณภาพแล้ว หากมีปริมาณแก๊สมีเทนมากกว่า 90% สามารถนำไปอัดเป็นแก๊สเรียกว่า CBG (Compressed Biomethane Gas) เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในรถยนต์ต่อไปได้

## วิธีการวิจัย

### การเตรียมถังหมักแก๊สชีวภาพและถังเก็บแก๊ส

ใช้ถังหมักในการหมักมูลโคสด จำนวน 550 กรัม ผสมกับน้ำประมาณ 5 ลิตร เพื่อให้ได้ปริมาตรการหมัก 5.5 ลิตร วัดค่า pH ของน้ำหมักก่อนการทดลอง ซึ่งส่วนมากจะได้ค่า pH ต่ำกว่า 7 จากนั้นทำการปรับค่า pH เริ่มต้นให้เท่ากับ 10 ด้วยสารละลาย NaOH เพื่อให้ น้ำหมักมีสภาพเป็นเบสและทำให้ pH เริ่มต้นมีค่าเท่ากับตลอดการทดลอง ซึ่งเป็นสภาวะที่จุลินทรีย์จะปล่อยเอนไซม์เพื่อสลายสารอินทรีย์เพื่อใช้เป็นอาหารได้ดี ทำการทดลองโดยหมักแบบกะ (Batch Fermentation) ไม่มีการเติมสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบ เป็นระยะเวลา 45 วัน ส่วนถังเก็บแก๊ส ใช้วิธีการแทนที่น้ำ โดยถังเก็บมีขนาด 550 cm<sup>3</sup> เตรียมแคลเซียมออกไซด์จำนวน 50 กรัมละลายในน้ำ 550 มิลลิตร (9%W/V) และชี้เถ้าจากฟางข้าวจำนวน 50 กรัมละลายในน้ำ 550 มิลลิตร (9%W/V) เพื่อปรับลดสัดส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อทำการหมักถึงระยะเวลา 45 วัน นำแคลเซียมออกไซด์และชี้เถ้าจากฟางข้าวไปเผาเพื่อไล่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ดังสมการ (2) จะเห็นได้ว่าหลังจากเผาแล้วจะได้แคลเซียมออกไซด์กลับมา จากนั้นนำแคลเซียมออกไซด์และชี้เถ้าที่ได้จากการเผานำกลับมาใช้ในการลดสัดส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อีกครั้งพร้อมตรวจวัดสัดส่วนของแก๊สชีวภาพด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography) ดังตัวอย่างในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แนวคิดในการดำเนินงานวิจัย

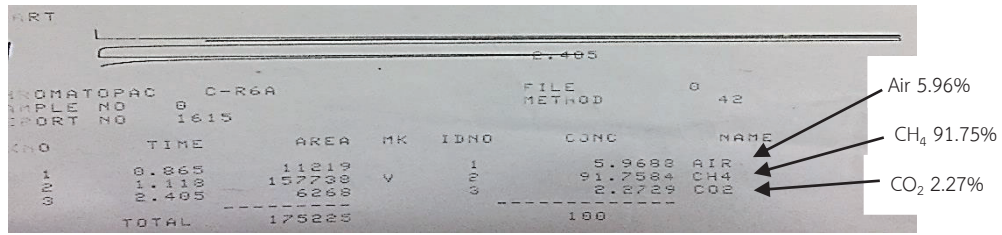
### ศึกษาการเผาฟางข้าวเพื่อหาปริมาณชี้เถ้า

เตรียมชี้เถ้าจากฟางข้าวโดยใช้ฟางข้าวในการเผา 1000 กรัม เผาที่อุณหภูมิประมาณ 700 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 20 นาที จากนั้นคำนวณหาปริมาณชี้เถ้าดังสมการ (4)

$$\left(\frac{\text{น้ำหนักชี้เถ้า}}{\text{น้ำหนักฟางข้าว}}\right) \times 100 \quad (4)$$

### ศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเกิดแก๊สชีวภาพจากมูลโค

ทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการทดลอง ได้แก่ ค่า pH ระยะเวลาในการหมัก อุณหภูมิ [6-7] วัดปริมาณแก๊สชีวภาพที่ได้นำไปตรวจวัดหาค่าเปอร์เซ็นต์มีเทน และวิเคราะห์สัดส่วนของแก๊สมีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นด้วย เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography) ซึ่งใช้คอลัมน์ แบบ Active Carbon 30/60 SS ขนาดคอลัมน์ 3 mm I.D. x 2m คอลัมน์มีอุณหภูมิเท่ากับ 100 องศาเซลเซียส แก๊สตัวพา (Carrier Gas) ที่ใช้คือ แก๊สฮีเลียม ดังตัวอย่างในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ตัวอย่างโครมาโทแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์โดยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

**ศึกษาค่า pH ของสารละลายแคลเซียมออกไซด์และซีเถ้าจากฟางข้าวในการลดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์**

เตรียมสารละลายแคลเซียมออกไซด์และซีเถ้า โดยทำการศึกษา pH ที่มีผลต่อการทดลอง เมื่อละลายแคลเซียมออกไซด์ลงในน้ำจะได้สารละลายแคลเซียมออกไซด์ ซึ่งไม่เป็นเนื้อเดียวกัน สารละลายจะมีความขุ่น เมื่อทิ้งไว้ช่วงหนึ่งสารละลายจะตกตะกอนที่ก้นถังเมื่อละลายซีเถ้าลงในน้ำจะได้น้ำซีเถ้า ซึ่งไม่เป็นเนื้อเดียวกัน สารละลายจะมีสีน้ำตาลขุ่น เมื่อทิ้งไว้ช่วงระยะเวลาหนึ่งสารละลายจะตกตะกอนที่ก้นถังและคำนวณหาปริมาณของคาร์บอนที่ถูกกำจัดจากการเผาแสดงดังสมการ (5)

$$\text{Carbonate content (\%wt.)} = \frac{\frac{\text{wt.loss}}{M_{CO_2}} \times M_{CaCO_3}}{\text{initial wt. of the sample}} \times 100 \quad (5)$$

**ศึกษาสัดส่วนแก๊สมีเทนโดยการนำแคลเซียมออกไซด์และซีเถ้าจากฟางข้าวกลับมาใช้ลดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์**

จากงานวิจัยของศิวรินทร์[8] ในงานวิจัยนี้จึงเลือก แคลเซียมออกไซด์จำนวน 50 กรัมและซีเถ้าจำนวน 50 กรัมละลายในน้ำ 550 มิลลิลิตรในการศึกษาการนำแคลเซียมออกไซด์และซีเถ้ากลับมาใช้ซ้ำในการลดปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และทำการศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการทดลองในการนำแคลเซียมออกไซด์และซีเถ้าจากฟางข้าวกลับมาใช้ซ้ำในการลดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

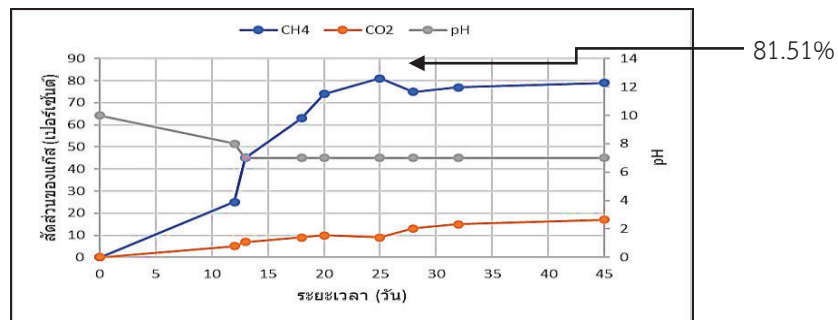
**ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย**

**ผลศึกษาการเผาฟางข้าวเพื่อหาปริมาณซีเถ้า**

หลังจากนำฟางข้าว 1000 กรัม เผาที่อุณหภูมิประมาณ 700 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 20 นาที จะได้ปริมาณซีเถ้า 250 กรัม คิดเป็น 25%

**ผลการศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเกิดแก๊สชีวภาพจากมูลโค**

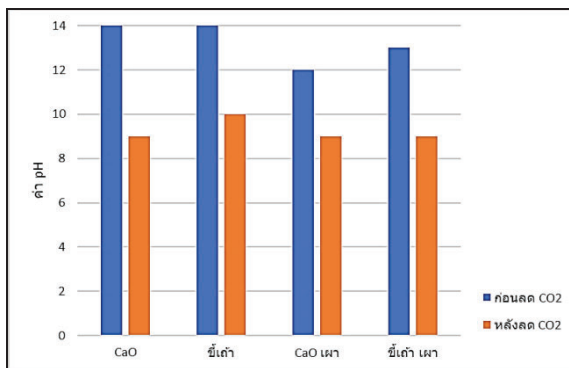
ที่สภาวะปกติ พบว่า การหมักมูลโคสามารถผลิตแก๊สชีวภาพโดยมี pH เริ่มต้นเท่ากับ 7 และปรับ pH เพื่อให้ให้น้ำหมักมีสภาพเป็นเบสเป็นสภาวะที่จุลินทรีย์จะปล่อยเอนไซม์เพื่อสลายสารอินทรีย์เพื่อใช้เป็นอาหารได้ดี มีปริมาณแก๊สมีเทนเฉลี่ย 65.58% ซึ่งมีแก๊สมีเทนสูงสุดใน วันที่ 22 ของการหมักเท่ากับ 81.51% มีค่า pH เฉลี่ยในการหมัก คือ 7.1 อุณหภูมิในการหมักเฉลี่ย คือ 31 องศาเซลเซียส โดยมีระยะเวลาในการหมัก 45 วันดังภาพที่ 3



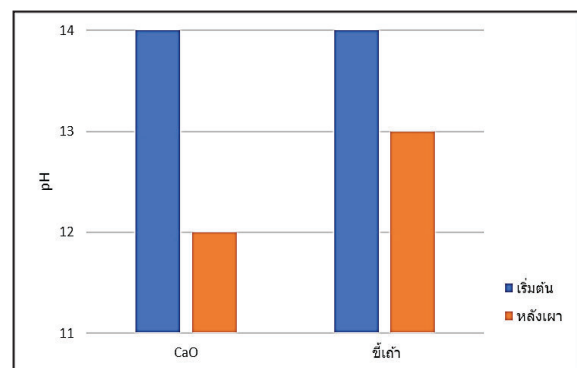
ภาพที่ 3 อัตราการเกิดแก๊สชีวภาพในการหมักมูลโคที่สภาวะปกติ

### ผลการศึกษาค่า pH ของสารละลายแคลเซียมออกไซด์และซีเถ้าจากฟางข้าวในการลดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

เมื่อเตรียมแคลเซียมออกไซด์จำนวน 50 กรัมละลายในน้ำ 550 มิลลิลิตร และซีเถ้าจำนวน 50 กรัมละลายในน้ำ 550 มิลลิลิตรในถังเก็บแก๊ส โดยอาศัยหลักการของการแทนที่น้ำของแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้น pH เริ่มต้นของแคลเซียมออกไซด์และซีเถ้าเท่ากับ 14 เมื่อทำการลดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นระยะเวลา 25 วัน pH ของแคลเซียมออกไซด์และซีเถ้าลดลงเหลือ 9 และ 10 ตามลำดับ เนื่องจากแคลเซียมออกไซด์และซีเถ้าได้ดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความเป็นกรดเอาไว้ทำให้มี pH ลดลง หลังจากนั้นทำการเผาแคลเซียมออกไซด์เพื่อไล่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออก มีปริมาณคาร์บอนเนตที่ถูกกำจัดในแคลเซียมออกไซด์ 50.90% และเผาซีเถ้าด้วยฟางข้าวเพื่อไล่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกทำให้มี pH ของแคลเซียมออกไซด์และซีเถ้าเพิ่มขึ้นเป็น 12 และ 13 ตามลำดับ จากผลข้างต้น pH หลังจากการเผามีค่าต่ำกว่า pH เริ่มต้น แสดงว่าการเผาสามารถไล่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกไปได้ไม่หมด ทำให้แคลเซียมออกไซด์และซีเถ้าบางส่วนอยู่ในรูปของเกลือคาร์บอนเนตจากนั้นนำแคลเซียมออกไซด์และซีเถ้าที่ผ่านการเผามาทำการลดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อีกครั้งเป็นระยะเวลา 25 วัน ค่า pH ของแคลเซียมออกไซด์และซีเถ้าลดลงเหลือเท่ากับ 9 หมายความว่าที่แคลเซียมออกไซด์และซีเถ้ายังคงดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้อยู่แต่ประสิทธิภาพน้อยลงกว่าครั้งแรก ทำให้มี pH ลดลงดังภาพที่ 4(ก) โดยแคลเซียมออกไซด์และซีเถ้ามี pH เริ่มต้นเท่ากับ 14 และเมื่อนำแคลเซียมออกไซด์และซีเถ้าไปเผา pH ลดลงเหลือ 12 และ 13 ตามลำดับ เนื่องจากมีการเผาที่อุณหภูมิต่ำและเวลาในการเผาสั้นเกินไป ทำให้มี pH ต่ำกว่า pH เริ่มต้น ดังภาพที่ 4 (ข)



(ก)



(ข)

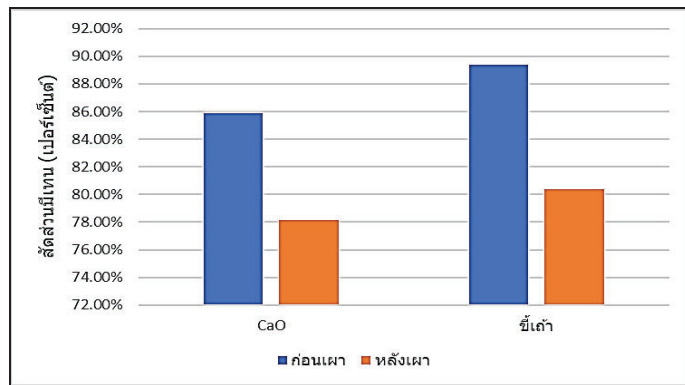
ภาพที่ 4 ก. pH ของสารละลายแคลเซียมออกไซด์และซีเถ้าจากฟางข้าวในการลดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ข. pH ของสารละลายแคลเซียมออกไซด์และซีเถ้าจากฟางข้าวเริ่มต้นและหลังเผา

### ผลการศึกษาสัดส่วนแก๊สมีเทนโดยการนำแคลเซียมออกไซด์และซีเถ้าจากฟางข้าวกลับมาใช้ลดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

เริ่มทำการลดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในวันที่ 20 หลังจากการหมักและทำการลดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นระยะเวลา 25 วัน เริ่มตั้งแต่การหมัก 45 วันใช้แคลเซียมออกไซด์จำนวน 50 กรัมละลายในน้ำ 550 มิลลิลิตรในถังเก็บแก๊ส โดยอาศัยหลักการของการแทนที่น้ำของแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้น แก๊สมีเทนเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 81.90% หลังจากทำการลดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีสัดส่วนแก๊สมีเทนเฉลี่ย 85.89% เพิ่มขึ้นประมาณ 4.65% เมื่อเทียบกับมีเทนเริ่มต้นเนื่องจากสารละลายแคลเซียมออกไซด์ทำปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะได้แคลเซียมคาร์บอนเนต ดังนั้นแก๊สที่อยู่ในถังเก็บแก๊สจะมีสัดส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงและมีแก๊สมีเทนเพิ่มขึ้น และเมื่อนำแคลเซียมออกไซด์ที่ใช้แล้วไปทำการเผาเพื่อไล่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดูดซับไว้แล้วนำกลับมาใช้ลดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อีกครั้งโดยมีแก๊สมีเทนเริ่มต้นเท่ากับ 75.72% พบว่ามีความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์น้อยกว่าการใช้แคลเซียมออกไซด์ในครั้งแรก ทำให้มีสัดส่วนแก๊สมีเทนเฉลี่ย 78.12% เพิ่มขึ้นประมาณ 3.70% เมื่อเทียบกับมีเทนเริ่มต้นและเมื่อใช้ซีเถ้าจำนวน 50 กรัม



ละลายในน้ำ 550 มิลลิลิตรในถังเก็บแก๊ส โดยอาศัยหลักการของการแทนที่น้ำของแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นในถังเก็บแก๊ส แก๊สมีเทนเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 80.81% หลังจากทำการลดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีสัดส่วนแก๊สมีเทนเฉลี่ย 89.36% เพิ่มขึ้นประมาณ 9.57%เมื่อเทียบกับมีเทนเริ่มต้นเนื่องจากเมื่อนำซีเถ้าซึ่งมีออกไซด์ของโลหะต่างๆไปละลายน้ำ สารประกอบออกไซด์เหล่านั้นจะกลายเป็นสารประกอบไฮดรอกไซด์ เมื่อละลายน้ำจะได้สารละลายเบสสามารถทำปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และเมื่อนำซีเถ้าที่ผ่านการเผาเพื่อไล่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดูดซับไว้กลับมาใช้ลดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อีกครั้ง แก๊สมีเทนเริ่มต้นเท่ากับ 76.72%พบว่ามีความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์น้อยกว่าการใช้ซีเถ้าในครั้งแรก ทำให้มีสัดส่วนแก๊สมีเทนเฉลี่ย 80.41%เพิ่มขึ้นประมาณ 4.59%เมื่อเทียบกับมีเทนเริ่มต้น เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการนำแคลเซียมออกไซด์และซีเถ้ากลับมาใช้อีกครั้งพบว่า ซีเถ้ามีความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากกว่าแคลเซียมออกไซด์แต่แคลเซียมออกไซด์มีประสิทธิภาพในการนำกลับมาใช้ดีกว่าซีเถ้าเพราะความสามารถในดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง 0.95% ในขณะที่ความสามารถในดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของซีเถ้าลดลง 4.97%เมื่อเทียบกับครั้งแรก ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 เปรียบเทียบค่าสัดส่วนมีเทนเฉลี่ยระหว่างแคลเซียมออกไซด์และซีเถ้า

### สรุปผลการวิจัย

แก๊สชีวภาพที่ไม่ได้มีการลดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเฉลี่ยสัดส่วนมีเทนเท่ากับ 65.58% คิดเป็นค่าความร้อนประมาณ 23.5MJ/m<sup>3</sup> การนำแคลเซียมออกไซด์และซีเถ้ามาลดปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ครั้งแรกพบว่ามีค่าเฉลี่ยของสัดส่วนแก๊สมีเทน 85.89%, 89.36% ตามลำดับซึ่งพบว่า ซีเถ้าจากฟางข้าวมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าแคลเซียมออกไซด์ในการลดปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อนำแคลเซียมออกไซด์มาเผาเพื่อไล่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ มีปริมาณคาร์บอนที่ถูกกำจัดในแคลเซียมออกไซด์ 50.90%และนำซีเถ้าจากฟางข้าวมาเผาเพื่อไล่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แล้วนำมาลดปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ครั้งที่สองมีค่าเฉลี่ยสัดส่วนมีเทน 78.12%, 80.41% ตามลำดับแต่ถ้าคิดในเชิงการนำกลับมาใช้พบว่าแคลเซียมออกไซด์มีประสิทธิภาพในการนำกลับมาใช้ดีกว่า โดยหลังจากการลดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แล้วมีค่าเฉลี่ยสัดส่วนมีเทนเพิ่มขึ้นประมาณ 15-20% คิดเป็นค่าความร้อนที่เพิ่มขึ้นในแก๊สชีวภาพประมาณ 6-8 MJ และเมื่อมีปริมาณแก๊สมีเทนที่สูงขึ้นถึง 90% จะสามารถนำไปผลิตเป็นแก๊สไปโม่มีเทนอัดเพื่อใช้ในรถยนต์ต่อไปได้

### กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้ทำการวิจัยขอขอบคุณ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่สนับสนุนงบประมาณเพื่อทำการวิจัยแก่คณะผู้ทำการวิจัย ขอขอบคุณคณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี และสถาบันพัฒนาและฝึกอบรมโรงงานต้นแบบ วิทยาเขตบางขุนเทียน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องมือในการทำการวิจัย

## ข้อเสนอแนะ

ควรศึกษาถึงอุณหภูมิ, ระยะเวลาในการเผา ค่า pH ที่มีผลกระทบต่อ การนำแคลเซียมออกไซด์และซีเฝ้า กลับมาใช้ซ้ำในการลดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สชีวภาพและสีของแคลเซียมออกไซด์หลังการเผา

## เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2559). แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงาน ทางเลือก พ.ศ. 2558 - 2579 (AEDP2015).สืบค้นเมื่อ 13 สิงหาคม 2561, จาก <http://www.eppo.go.th/index.php/th/plan-policy/tieb/aedp>.
- [2] ทฤษฎีเบื้องต้นของระบบแก๊สชีวภาพ.สืบค้นเมื่อ 13 สิงหาคม 2561, จาก <http://www.fristweb.net/handsite/biogas/teasdee.html>
- [3] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานกระทรวงพลังงาน. (2557). แก๊สชีวภาพความเป็นมาของโครงการ. สืบค้นเมื่อ 13 สิงหาคม 2561, จาก [http://biogas.dede.go.th/biogas/web\\_biogas/](http://biogas.dede.go.th/biogas/web_biogas/)
- [4] มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.2555. การใช้ประโยชน์จากฟางข้าว:กรณีศึกษาบรรจุภัณฑ์ สำหรับผลผลิตทางการ เกษตร.สืบค้นเมื่อ 13 สิงหาคม 2561, จาก <http://sutir.sut.ac.th:8080/sutir/bitstream/123456789/5684/1/Fulltext.pdf>
- [5] ซิลิกา (silica/SiO<sub>2</sub>) และประโยชน์ซิลิกา. สืบค้นเมื่อ 13 สิงหาคม 2561, จาก <http://www.siamchemi.com/ซิลิกา>
- [6] Deublein, D. and Steinhauser A. (2008).General aspects of the recovery of biomass in the future, Biogas from Waste and Renewable Resources. WILEY-VCH Verlag GmbH&Co. KGaA, Weinheim, Germany, P. 112,118.
- [7] Nghiem, L. Nguyen, T. Manassa, P. Fitzgerald, S. Dawson, M. and Vierboom, S. (2014).Co-digestion of sewage sludge and crude glycerol for on-demand biogas production. International Biodeterioration & Biodegradation, Vol.95, 160-166.
- [8] ศิวรินทร์จิวรรณ. (2560). การปรับปรุงคุณภาพแก๊สชีวภาพโดยการลดปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในการหมัก มูลโค, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงาน สิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

## การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพระดับชุมชนด้วยจุลินทรีย์

สาณท ทองสุจริตพันธ์<sup>1\*</sup> วิสูตร ยังพลจันทร์<sup>1</sup> และพรชัย ใจสม<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ทีมพัฒนาพลังงานเพื่อสังคมฝ่ายกิจการเพื่อสังคม บริษัท ปตท.จำกัด (มหาชน)

<sup>2</sup>ตำบลสันทราย อำเภอรั่ว จังหวัดเชียงใหม่

### บทคัดย่อ

เนื่องด้วยชุมชนตำบลสันทราย หมู่บ้านสันฮกฟ้า เป็นชุมชนที่เข้าร่วมโครงการนวัตกรรมระบบผลิตและส่งจ่าย ก๊าซชีวภาพจากฟาร์มสุกรสำหรับชุมชน เมื่อปี 2560 ร่วมกับ บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) และมหาวิทยาลัยราชภัฏวชิราวุฒวิทยาลัย โดยมีการจัดตั้งศูนย์การเรียนรู้เพื่อส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนและลดมลภาวะทางกลิ่นที่เกิดขึ้นจากมูลสุกร โครงการดังกล่าวได้ประสบความสำเร็จในการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยบ่อ Fix Dome 100 ลูกบาศก์เมตร สามารถส่งจ่ายก๊าซชีวภาพได้รวมทั้งสิ้น 40 หลังคาเรือน

ในปี 2561 ทางตำบลสันทราย ร่วมกับ บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) และสำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ (NIA) จึงมีโครงการวิจัยเชิงปฏิบัติการในเรื่องการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากฟาร์มสุกร โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดสายพันธุ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อเพิ่มปริมาณก๊าซชีวภาพส่งจ่ายไปใช้ยังหมู่บ้านท่ามะเถียง 60 หลังคาเรือน ซึ่งเป็นหมู่บ้านที่อยู่ใกล้เคียงกับหมู่บ้านสันฮกฟ้า โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อเพิ่มอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพให้เพียงพอต่อการใช้งานรวมทั้งสิ้น 100 ครัวเรือน ทำให้ชุมชนสามารถลดการใช้ก๊าซแอลพีจีได้ 9,108 กิโลกรัมต่อปี อีกทั้งยังสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ 109.27 tCO<sub>2</sub>e อีกด้วย

งานวิจัยนี้ เป็นการใช้จุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดสายพันธุ์จากมหาวิทยาลัยแม่โจ้[1]ที่ผ่านการแยกเป็นไอโซเลตต่างๆก่อนจะนำเอาเชื้อไอโซเลตที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ (S5-2) มาใช้เติมในบ่อหมักของฟาร์มหมูกลุ่มใจ หมู่บ้านสันฮกฟ้า ตำบลสันทราย เพื่อเพิ่มอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ในกระบวนการหมักซึ่งจะส่งผลให้เกิดก๊าซชีวภาพที่เพิ่มขึ้น ในงานวิจัยนี้ จะทำการตรวจวัดอัตราการเกิดก๊าซและประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย โดยทำการตรวจวัดค่า pH, BOD<sub>5</sub>, COD, TKN, TSS, VSS, Alkalinity และ VFA ตามมาตรฐาน (Standard Methods for the examination of Waste Water, APHA, AWWA&WEF, 22<sup>nd</sup> edition, 2012) โดยทำการวัดทั้งก่อนเติมและหลังเติมจุลินทรีย์เข้าสู่ระบบ จากผลการทดลองพบว่า หลังจากเติมจุลินทรีย์เข้าสู่ระบบ ด้วยอัตรา 50 ลิตรต่อวัน จะสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศได้ 9.4 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งส่งผลให้อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพที่เพิ่มขึ้น ถึง 48.5 เปอร์เซ็นต์

**คำสำคัญ:** ก๊าซชีวภาพ ฟาร์มสุกร จุลินทรีย์

\*Corresponding author: Tel.: 087-7990462. E-mail address: sanot.t@pttplc.com

### บทนำ

เนื่องจากประเทศไทยในยุคปัจจุบัน มีการเพิ่มขึ้นของประชากรอย่างต่อเนื่อง อีกทั้งยังมีการเจริญเติบโตด้าน เศรษฐกิจอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้มีการใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด จากสถานการณ์การใช้พลังงานของประเทศไทย พบว่าประเทศไทยมีการใช้พลังงานในช่วง 4 เดือนแรกของปี พ.ศ.2561 มีปริมาณ 28,853พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ

ซึ่งเพิ่มขึ้นจากช่วงเดียวกันของปี พ.ศ.2560 ร้อยละ 8.0 คิดเป็นมูลค่ากว่า 431,784 ล้านบาทโดยมีการใช้ก๊าซธรรมชาติ ร้อยละ 6.6 ของการใช้พลังงานทั้งหมด [3] ทั้งนี้ทรัพยากรด้านพลังงานนั้นมีปริมาณจำกัด หากมีการใช้งานอย่างต่อเนื่อง ตามการเจริญเติบโตทางด้านเศรษฐกิจ อาจทำให้ประเทศไทยในอนาคตประสบปัญหาด้านการขาดแคลนพลังงานในที่สุด

โดยในปัจจุบันประเทศไทยให้ความสำคัญกับการพัฒนาพลังงานทดแทนในหลากหลายรูปแบบ ภายใต้หลักการ เปลี่ยนวัตถุดิบที่เหลือใช้หรือของเสียเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมควบคู่กับการผลิตเป็นพลังงานทดแทนในรูปแบบต่างๆ หนึ่งในรูปแบบที่น่าสนใจและมีการใช้กันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ กระบวนการหมักของของเสียแบบไร้อากาศเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งปัจจุบันกระบวนการดังกล่าวนิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ อาทิเช่น โรงงานผลิตน้ำมัน ปาล์ม โรงงานสุรา เป็นต้น โดยนำก๊าซชีวภาพที่ได้จากการหมักไปใช้ในการปั่นไฟเพื่อใช้ในโรงงานหรือขายให้กับ การไฟฟ้า ในขณะที่เดียวกันเจ้าของฟาร์มปศุสัตว์ในประเทศไทยเริ่มนิยมใช้กระบวนการหมักแบบไร้อากาศเพื่อใช้ประโยชน์ใน ชุมชนเพิ่มมากขึ้นโดยปัจจุบัน หมู่บ้านสันฮกฟ้า ตำบลสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ มีการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลสุกรเพื่อ ส่งจ่ายก๊าซให้กับครัวเรือนใช้งานเป็นเชื้อเพลิงความร้อนแทนก๊าซ LPG แล้วรวมทั้งสิ้น 40 ครัวเรือน โดยบ่อก๊าซชีวภาพ ในหมู่บ้านสันฮกฟ้า มีขนาด 100 ลูกบาศก์เมตร

ตามที่บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) (ปตท.) มีหน้าที่รับผิดชอบในฐานะองค์กรที่สร้างความมั่นคงทางด้าน พลังงานให้กับประเทศด้วยการส่งเสริมและพัฒนาชุมชนให้สามารถพึ่งตนเองด้านพลังงานทดแทน ตลอดจนขยายผลสู่ ชุมชนและสังคมทั่วประเทศ โดยได้รับมอบหมายในการทำหน้าที่ส่งเสริมและพัฒนาชุมชนต้นแบบที่มีระบบการจัด การพลังงาน โดยประชาชนมีส่วนร่วมทั้งนี้ ทาง ปตท. ได้เล็งเห็นถึงความสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตก๊าซ ชีวภาพของบ่อก๊าซชีวภาพโดยใช้จุลินทรีย์แบบไร้อากาศที่ผ่านการคัดสายพันธุ์ เพื่อเพิ่มปริมาณก๊าซชีวภาพให้รองรับการ ใช้งานของชุมชน

ดังนั้นในการศึกษานี้ได้ทำการทดลองโดยการเติมเชื้อจุลินทรีย์ไร้อากาศแบบคัดสายพันธุ์ลงในบ่อหมักก๊าซ ชีวภาพแบบ Fix Dome ที่ฟาร์มไม่คุมใจ หมู่บ้านสันฮกฟ้า เพื่อให้สามารถรองรับการใช้งานของหมู่บ้านท่ามะเกลือที่ อยู่ในบริเวณใกล้เคียงให้เพิ่มมากขึ้นอีก 60 ครัวเรือน โดยทำการติดตามผลอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพและอัตราการย่อย สลายของเชื้อจุลินทรีย์ซึ่งเป็นการวิจัยเชิงปฏิบัติการร่วมกับชุมชนสามารถใช้ก๊าซชีวภาพควบคู่ไปกับการทำการวิจัย

#### วัตถุประสงค์ในการดำเนินงานวิจัย

1. เพื่อเพิ่มปริมาณก๊าซชีวภาพจากฟาร์มสุกร ด้วยจุลินทรีย์ไร้อากาศแบบคัดสายพันธุ์
2. เพื่อเป็นต้นแบบในการพัฒนาระบบก๊าซชีวภาพจากฟาร์มสุกระดับชุมชน
3. เพื่อลดค่าใช้จ่ายให้กับครัวเรือน ที่ขยายระบบก๊าซชีวภาพ

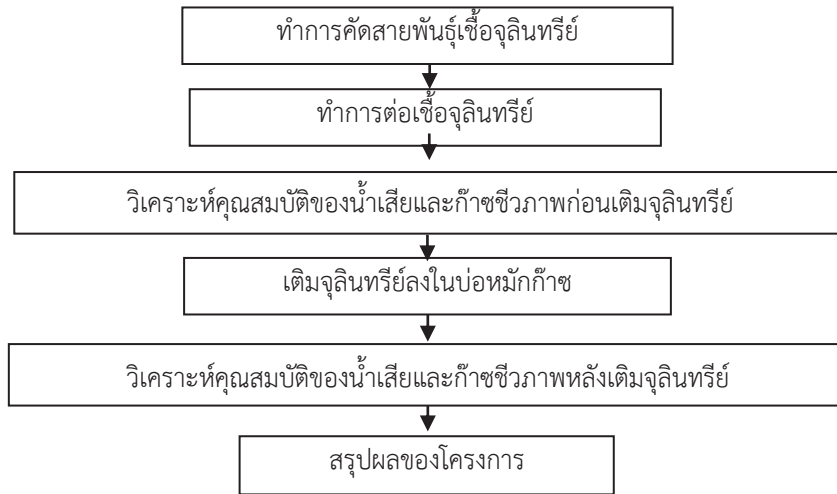
#### ขอบเขตในการดำเนินงานวิจัย

1. ใช้เชื้อจุลินทรีย์คัดสายพันธุ์ในการเพิ่มอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ
2. วิเคราะห์ประสิทธิภาพการย่อยสลายของเชื้อจุลินทรีย์ โดยมีพารามิเตอร์ pH, MLSS, MLVSS, COD, BOD<sub>5</sub>,

VFA และ Alkalinity

## วิธีการวิจัย

### 1. แผนการดำเนินงาน



ภาพที่ 1 ภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน

### 2. การเตรียมเชื้อจุลินทรีย์แบบคัดสายพันธุ์

#### 2.1 การคัดเชื้อจุลินทรีย์แบบไร้อากาศ

จากงานวิจัยของ ดร.ฐปณ ชื่นบาน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เรื่อง การคัดเลือกและผลิตจุลินทรีย์ไม้ออกซิเจนแบบเม็ดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกรแบบไม่ใช้ออกซิเจนนั้น เป็นจุลินทรีย์ที่นำมาคัดสายพันธุ์และทำให้บริสุทธิ์ โดยการคัดแยกเพียงเชื้อจุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียได้ดีทั้งสิ้น 4 ไอโซเลต อันได้แก่ S5-2, S5-3, S5-7.2 และ BP1-7 โดยจุลินทรีย์ทั้ง 4 ไอโซเลตดังกล่าวมีความสามารถในการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศทั้งสิ้น แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 2 อัตราการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์

ไอโซเลต	เวลาที่มีอัตราการเจริญเติบโตสูงสุด (ชั่วโมง)
S5-2	22
S5-3	26
S5-7.1	32
BP1-7	22

โดยจากงานวิจัยพบว่า เชื้อจุลินทรีย์ S5-2 มีอัตราในการเจริญเติบโตสูงที่สุดที่วันที่ 21 ซึ่งสามารถ เชื้อกลุ่มดังกล่าวมีความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้สูงถึง 82 เปอร์เซ็นต์นี้ โดยสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงสุดที่ 721.3 ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งที่ระเหยได้ [1] ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ในการเพิ่มปริมาณของก๊าซชีวภาพให้เพียงพอต่อการใช้งาน

#### 2.2 การต่อเชื้อจุลินทรีย์

หลังจากที่ได้เชื้อที่ผ่านการคัดสายพันธุ์แบบเข้มข้นเรียบร้อยแล้ว ก่อนจะทำการเติมลงสู่บ่อหมักก๊าซชีวภาพที่ฟาร์มไข่มุกสมใจหมู่บ้านสันฮกฟ้าจำเป็นต้องมีการต่อเชื้อจุลินทรีย์หรือกระตุ้นให้เชื้อจุลินทรีย์เกิดการดำเนินงานที่มีประสิทธิภาพ ในงานวิจัยนี้จะใช้กากน้ำตาลและน้ำตาลทรายเป็นแหล่งคาร์บอน (C-Source) เนื่องจากเป็นจุลินทรีย์ที่ใช้

คาร์บอนในการเจริญเติบโต (Heterotroph) และปุ๋ยไนโตรเจนเป็นแหล่งไนโตรเจน (N-Source) โดยการเติมให้มี COD:N เท่ากับ 100:2.2 [4] เพื่อให้ปริมาณธาตุอาหารมีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ซึ่งมีส่วนผสม ได้แก่ น้ำสะอาด จุลินทรีย์กากน้ำตาลน้ำตาลทราย และ ปุ๋ยไนโตรเจน (46-0-0) ละมีขั้นตอนดังนี้



ภาพที่ 2 แผนภาพแสดงการต่อเชื้อจุลินทรีย์

### 3. การเติมเชื้อจุลินทรีย์

หลังจากทำการคำนวณการบรรทุกสารอินทรีย์ของระบบและจัดเตรียมวัสดุอุปกรณ์เป็นที่เรียบร้อยแล้ว จึงทำการนำเชื้อจุลินทรีย์ที่ผ่านการกระตุ้นไปเติมลงในบ่อหมักก๊าซชีวภาพ โดยมีแผนการเติมในช่วงต้น เดือนของเดือน พฤษภาคม กรกฎาคม และกันยายน โดยเว้นระยะเวลาในการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์เป็นเวลา 1 เดือน อีกทั้งยังเป็นการเก็บตัวอย่างวิเคราะห์น้ำเสีย ประเมินผลการทดสอบ และสังเกตการณ์ทำงานของระบบ โดยแผนการเติมจุลินทรีย์และวิเคราะห์ผล แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แผนการดำเนินงาน

กิจกรรมที่จะปฏิบัติ	ช่วงเวลาในการดำเนินโครงการ (เดือน/สัปดาห์)																											
	พ.ค.				มิ.ย.				ก.ค.				ส.ค.				ก.ย.				ต.ค.							
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4				
1.การเติมเชื้อจุลินทรีย์	■				■				■				■				■				■				■			
2.จุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบ		■	■	■		■	■	■		■	■	■		■	■	■		■	■	■		■	■	■		■	■	■
3.เก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์น้ำเสีย																												
4.ประเมินประสิทธิภาพการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์																												

การเติมเชื้อจุลินทรีย์ในทุกต้นเดือนนั้น จะทำการเติมครั้งละ 200 ลิตร โดย แบ่งเป็น 5 วัน โดยเติม 20, 30, 50 และ 100 ลิตร ตามลำดับอย่างไรก็ตาม การเติมจุลินทรีย์จะเติมควบคู่กับการเติมมูลสุกรในสภาวะปกติ และมีการเปิดให้หมู่บ้านสันฮกฟ้าใช้ก๊าซชีวภาพตามปกติอีกด้วย ดังนั้น การดำเนินการจำเป็นต้องดูแลอย่างใกล้ชิดเพื่อไม่ให้ส่งผลกระทบต่อการใช้งานก๊าซชีวภาพของหมู่บ้าน

#### 4. การตรวจวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของระบบ

ในงานวิจัยนี้ จะทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบ โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือการวิเคราะห์อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพและการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำเสียภายใต้มาตรฐาน Standard Methods for the examination of Waste Water, APHA, AWWA&WEF, 22<sup>nd</sup> edition, 2012 โดยมีพารามิเตอร์ได้แก่ pH, BOD<sub>5</sub>, CODTKN, VSS, TSS, VFA และ Alkalinity

#### ผลการวิจัย

ในการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพนั้น แบ่งออกเป็น 3 ระยะ ตามช่วงเวลาที่กำหนด (ตารางที่ 2) โดยมีผลการทดลองดังต่อไปนี้

**การทดลองระยะที่ 1 (พ.ค – มิ.ย)** การทดลองระยะแรกนั้น หลังจากมีการเติมจุลินทรีย์ลงในบ่อหมักก๊าซชีวภาพที่ฟาร์มไข่มุกสมใจพบว่า บ่อเก็บก๊าซชีวภาพมีปริมาณก๊าซลดลงอย่างเห็นได้ชัด (แสดงดังภาพที่ 2)



(ก)



(ข)

**ภาพที่ 3** ก. บ่อเก็บก๊าซก่อนการเติมเชื้อ ข. บ่อเก็บก๊าซหลังการเติมเชื้อ

โดยบริเวณบ่อตั้งกากตะกอน มีปริมาณกากตะกอนที่น้อยลงอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้ทางทีมงานจึงได้ทำการเก็บน้ำไปวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุที่แท้จริงของการลดลงของก๊าซชีวภาพ และได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 2

**ตารางที่ 3** ผลการตรวจวัดน้ำเสียของการทดลองระยะที่ 1[5]

ตัวอย่างน้ำ	pH	COD (mg/L)	BOD <sub>5</sub> (mg/L)	TSS (mg/L)
น้ำเข้า	7.91	10,800	9,000	8,920
น้ำออก	8.05	8,400	7,500	3,500

จากผลการทดลองระยะที่ 1 จะเห็นได้ว่าระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัด COD อยู่ที่ 22.2 เปอร์เซ็นต์ และมีตะกอนสะสมอยู่ในระบบ 60.8 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งหากมีการดึงกากตะกอนออกจากระบบที่ไม่สม่ำเสมอหรือในปริมาณที่ไม่มากพอ ก็อาจทำให้เกิดการอุดตัน และส่งผลต่อระยะเวลาพักของน้ำเสียได้ ในช่วงเวลาปกติบ่อหมักของฟาร์มไข่มุกสมใจ ซึ่งจะมีระยะเวลาในการย่อยสลายของจุลินทรีย์อยู่ประมาณ 18 วัน ดังนั้นหากเกิดตะกอนสะสมในบ่อ จะส่งผลให้ปริมาตรของการเก็บน้ำในบ่อลดลงและส่งผลกระทบต่อระยะเวลาของน้ำที่อยู่ในบ่อลดลงตามไปด้วย จุลินทรีย์จึงมีเวลาในการย่อยสลายไม่เพียงพอนั่นเอง ทั้งนี้ปัญหาที่เกิดขึ้นได้ทำการแก้ไขก่อนทำการทดลองในระยะที่ 2 โดยการดูดตะกอนออกจากระบบติดต่อกันเป็นเวลา 2อาทิตย์ และจึงเริ่มทดลองในระยะที่ 2 ต่อไป

#### การทดลองระยะที่ 2 และ 3 (ก.ค – ต.ค)

หลังจากทราบสาเหตุปัญหาในการทดลองระยะที่ 1 ทางทีมงานจึงได้ทำการแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยการดูดตะกอนในเดือนกรกฎาคมเพื่อเพิ่มปริมาตรในการกักเก็บน้ำเสียและสังเกตการพบว่า ปริมาณก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นบริเวณบ่อเก็บก๊าซชีวภาพอย่างเห็นได้ชัด โดยมีการเก็บตัวอย่างน้ำเสียเพื่อทำการตรวจวัดก่อนการเติมเชื้อเข้าสู่ระบบ ดังตารางที่ 4

จากผลการวิเคราะห์น้ำเสียก่อนการเติมจุลินทรีย์ (ตารางที่ 4) พบว่า หลังจากแก้ไขปัญหาการสะสมตะกอนเรียบร้อยแล้ว ระบบมีประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียอยู่ที่ 88.7 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่า VFA เท่ากับ 314mg/L, Alkalinity

อยู่ที่ 2,030 mg/L และ VFA/Alkalinity เท่ากับ 0.15 ซึ่งมีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตและย่อยสลายของ จุลินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน [6] นอกจากนี้ ยังมีการตรวจวัดอัตราการเกิดก๊าซก่อนการเติมเชื้อจุลินทรีย์เข้าสู่ระบบ โดย ก่อนการเติมเชื้อมีอัตราการเกิดก๊าซอยู่ที่ 46.35 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน[7]

จากผลการวิเคราะห์น้ำเสียหลังการเติมเชื้อจุลินทรีย์ (ตารางที่ 5) พบว่า หลังเติมเชื้อจุลินทรีย์แบบคัดสายพันธุ์ เรียบร้อยแล้ว ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจากเดิม 98.1 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสอดคล้องกับอัตราการเกิด Gas เพิ่มขึ้นเป็น 68.83 ลูกบาศก์เมตรต่อวันหรือคิดเป็น 48.5 เปอร์เซ็นต์[7] โดยมีค่า VFA เท่ากับ 160mg/L, Alkalinity อยู่ที่ 1,790 mg/L และ VFA/Alkalinity เท่ากับ 0.09

ตารางที่ 4 ผลการตรวจวัดน้ำเสียของการทดลองระยะที่ 2 และ 3 (ก่อนการเติมเชื้อจุลินทรีย์) [5]

สถานะ	ตัวอย่างน้ำ	pH	COD (mg/L)	BOD <sub>5</sub> (mg/L)	TSS (mg/L)
ก่อนเติมจุลินทรีย์	น้ำเข้า	6.7	6,568	2,768	4,970
	น้ำออก	7.00	743	117	636
หลังเติมเชื้อจุลินทรีย์	น้ำเข้า	6.9	33,348	6,500	20,510
	น้ำออก	6.9	645	140	545

### สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองพบว่า จุลินทรีย์ S5-2 ที่ผ่านการคัดสายพันธุ์ สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนได้ 9.4 เปอร์เซ็นต์ซึ่งส่งผลให้อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพที่เพิ่มขึ้น ถึง 48.5 เปอร์เซ็นต์ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อพารามิเตอร์ในระบบ จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดสายพันธุ์นั้นสามารถทำงานร่วมกับ จุลินทรีย์จากมูลสุกรตามธรรมชาติ และเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพอย่างไรก็ตาม เนื่องจากการวิจัยในเชิงปฏิบัติการที่มีการทดสอบในฟาร์มหมูและมีการใช้งานก๊าซชีวภาพของหมู่บ้านสันฮอกฟ้าอย่างต่อเนื่อง จึงขึ้นอยู่กับปัจจัยควบคุมและสภาพแวดล้อมต่างๆ อาทิเช่น การตั้งกากตะกอนออกจากระบบ ปริมาณมูลสุกรที่เข้าระบบ เป็นต้น ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้นอกจากจะเป็นการทดสอบการเพิ่มประสิทธิภาพของจุลินทรีย์ S5-2 แล้ว ยังเป็นการชี้ให้เห็นถึงผลกระทบของการสะสมของกากตะกอนในระบบที่มากจนเกินไปและวิธีการแก้ไขปัญหาดังกล่าว เพื่อเป็นกรณีศึกษาให้กับผู้ประกอบการและชุมชนต่อไป

### เอกสารอ้างอิง

- [1] นายธูปณัฐชนัน และคณะ. (2550). การคัดเลือกและผลิตจุลินทรีย์ไม่ใช้ออกซิเจนแบบเม็ดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกรแบบไม่ใช้ออกซิเจน. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต. เชียงใหม่. มหาวิทยาลัยแม่โจ้ สืบค้นเมื่อวันที่ 18 เมษายน 2561, จาก <http://www.energy.mju.ac.th>
- [2] E.W. Rice, R.B. Baird, A.D. Eaton, L.S. Clesceri. (2012). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22nd Edition. สืบค้นเมื่อวันที่ 12 มิถุนายน 2561
- [3] กรมพัฒนาพลังงานทดแทน (กระทรวงพลังงาน). (2561). สถานการณ์ของพลังงานในประเทศไทยเดือน มกราคม-เมษายน 2561 สืบค้นเมื่อวันที่ 23 สิงหาคม 2561 จาก <http://www.dede.go.th/>
- [4] สำนักวิจัยค้นคว้าพลังงาน (กระทรวงพลังงาน). (2553). การผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียฟาร์มปศุสัตว์และโรงงานอุตสาหกรรม สืบค้นเมื่อวันที่ 26 กรกฎาคม 2561 จาก <http://www.dede.go.th/>
- [5] สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์. (2561). รายงานผลการทดสอบน้ำเสีย. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- [6] สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย (กระทรวงอุตสาหกรรม). (2553). คู่มือการปฏิบัติงานเกี่ยวกับการออกแบบการผลิตการควบคุมคุณภาพและการใช้ก๊าซชีวภาพ สืบค้นเมื่อวันที่ 26 กรกฎาคม 2561 จาก [www.industry.go.th/](http://www.industry.go.th/)
- [7] สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์. (2561). รายงานผลการตรวจวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่



## การออกแบบและพัฒนาระบบพลังงานแสงอาทิตย์แบบเคลื่อนย้ายสำหรับการสูบน้ำเพื่อการเกษตร Design and development of Solar Pumping Mobile Unit for Agriculture

กิตติ อภิชัยไพบุลย์\* วรรัตน์ กรอิสรานุกุล และธนิต เรืองรุ่งชัยกุล  
สาขาวิชาเทคโนโลยีเพื่อการพัฒนายั่งยืน คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ศูนย์รังสิต  
99 หมู่ 18 ถนนพหลโยธิน ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12121

### บทคัดย่อ

การศึกษานี้จัดทำขึ้นเพื่อการออกแบบและพัฒนาระบบพลังงานแสงอาทิตย์แบบเคลื่อนย้ายสำหรับการสูบน้ำเพื่อการเกษตรโดยออกแบบสำหรับปั๊มขนาดไม่ต่ำกว่า 3 แรงม้าใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 250 วัตต์ จำนวน 10 แผง ต่ออนุกรมกัน เป็นระบบที่ไม่ใช้แบตเตอรี่ มีอินเวอร์เตอร์แปลงไฟฟ้ากระแสตรงแรงดัน 360 โวลต์ เป็นไฟฟ้ากระแสสลับแรงดัน 220 โวลต์ 3 เฟส สามารถพับเก็บหลังจากการใช้งานได้เพื่อสะดวกในการเคลื่อนย้ายการทดสอบเบื้องต้นโดยการสูบน้ำที่ระดับความสูง 2 เมตรพบว่ามิตอัตราการไหลของน้ำเฉลี่ย 7.07 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง ประสิทธิภาพของระบบฯเปรียบเทียบกับกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งเฉลี่ยร้อยละ 60 ประสิทธิภาพของระบบฯเปรียบเทียบกับความเข้มแสงอาทิตย์เฉลี่ยร้อยละ 11 การประเมินความพึงพอใจของการใช้งานระบบพลังงานแสงอาทิตย์แบบเคลื่อนย้ายสำหรับการสูบน้ำเพื่อการเกษตรพบว่า โครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์และระบบควบคุมมีรูปแบบที่ไม่ซับซ้อนสามารถนำไปต่อยอดใช้งานได้ง่าย ต่อพ่วงไปใช้งานสะดวก โดยมีสิ่งที่ควรพัฒนาคือ ขนาดของรถพ่วง น้ำหนักและขนาดของปั๊มสูบน้ำให้มีขนาดเล็กกว่าตัวต้นแบบณ ปัจจุบัน

**คำสำคัญ:** ระบบสูบน้ำพลังงานแสงอาทิตย์เคลื่อนย้าย

\*Corresponding author: Tel.: 0957726593. E-mail address: lmojojol13@gmail.com

### บทนำ

น้ำเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับการทำการเกษตร ซึ่งปกติพื้นที่การเกษตรอยู่ห่างไกลออกไปจากชุมชน ทำให้ไม่มีสายไฟฟ้าเข้ามาถึง[1] ส่วนใหญ่จึงต้องอาศัยเครื่องสูบน้ำที่ใช้พลังงานของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิง ทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการสูบน้ำสูง เกษตรกรจึงเริ่มนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้เพื่อการสูบน้ำมากขึ้น กล่าวคือ มีการใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (ซึ่งมีราคาถูกลงมากในปัจจุบัน) ผลิตกระแสไฟฟ้าส่งไปยังมอเตอร์เพื่อให้เครื่องสูบน้ำสามารถทำงานได้ อย่างไรก็ตามการติดตั้งใช้งานแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไว้ในแปลงเกษตรที่ห่างไกล ทำให้เกิดความกังวลต่อความเสียหายหรือเกิดการสูญหายได้

ดังนั้นเพื่อเป็นการนำน้ำจากแหล่งน้ำในพื้นที่มาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดสำหรับการเกษตร จึงเป็นที่มาของการออกแบบและพัฒนาระบบพลังงานแสงอาทิตย์แบบเคลื่อนย้ายสำหรับการสูบน้ำเพื่อการเกษตร เพื่อเป็นต้นแบบให้เกษตรกรสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ตามต้องการสะดวกต่อการใช้งานในหลายพื้นที่ อีกทั้งป้องกันการสูญหายของอุปกรณ์สูบน้ำ ก่อให้เกิดประโยชน์แก่ชุมชน เกษตรกรสามารถทำการเกษตรได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถสร้างงานสร้างอาชีพเสริม สร้างเวทีแลกเปลี่ยนเรียนรู้ และขยายผลให้กับชุมชนในพื้นที่อื่น ๆ ได้ต่อไป

## วิธีการวิจัย

การออกแบบและพัฒนาระบบพลังงานแสงอาทิตย์แบบเคลื่อนย้ายสำหรับการสูบน้ำเพื่อการเกษตร นี้ แบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ช่วง ดังนี้

### 1) การเก็บรวบรวมข้อมูลระบบพลังงานแสงอาทิตย์แบบเคลื่อนย้าย

โดยศึกษาข้อมูลเบื้องต้นของต้นแบบระบบพลังงานแสงอาทิตย์แบบเคลื่อนย้ายที่มีในประเทศไทยและต่างประเทศ

### 2) หลักการออกแบบระบบพลังงานแสงอาทิตย์แบบเคลื่อนย้ายสำหรับสูบน้ำเพื่อการเกษตร

การออกแบบนี้คำนึงถึงการนำไปประยุกต์ใช้ของเกษตรกรสามารถนำไปใช้งานได้ง่าย มีหลักการดังต่อไปนี้

- 1) สามารถบรรทุกของ เช่น อุปกรณ์ทำการเกษตร อุปกรณ์สำหรับสูบน้ำ
- 2) โครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไม่ซับซ้อนใช้งานสะดวก สามารถนำไปขยายผลต่อยอดได้
- 3 ระบบควบคุมของระบบสูบน้ำใช้งานง่าย ไม่ยุ่งยากสำหรับเกษตรกร

### 3) ทดสอบระบบพลังงานแสงอาทิตย์แบบเคลื่อนย้ายสำหรับการสูบน้ำเพื่อการเกษตร

#### 3.1 ทดสอบการสูบน้ำเบื้องต้นที่ระดับความสูง 2 เมตร

โดยเก็บค่าอัตราการไหลของน้ำจากเครื่องวัดอัตราการไหลความเข้มของแสงอาทิตย์มาวิเคราะห์และนำมาแสดงในรูปแบบกราฟ

#### 3.2 การคำนวณประสิทธิภาพ

3.2.1 ค่ารวมประสิทธิภาพของระบบฯเปรียบเทียบกับกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้ง

$$= \text{กำลังไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบ} / \text{กำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้ง}$$

3.2.2 ค่ารวมประสิทธิภาพของระบบฯเปรียบเทียบกับความเข้มแสงอาทิตย์

$$= (\text{กำลังไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบ} / \text{พื้นที่ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้ง}) / \text{ความเข้มแสงอาทิตย์ขณะทดสอบ}$$

#### 3.3 แบบประเมินความพึงพอใจของการใช้งานระบบพลังงานแสงอาทิตย์แบบเคลื่อนย้ายสำหรับการสูบน้ำเพื่อการเกษตร

ใช้แบบสอบถามในการประเมินเพื่อให้คะแนนความพึงพอใจ โดยให้กลุ่มตัวอย่างทำการทดลองใช้งานจริง ได้แก่ความสะดวกในการต่อรถพ่วงไปใช้งาน การกางและเก็บแผงเซลล์แสงอาทิตย์ น้ำหนักและขนาดของปั๊มสูบน้ำ(หอยโข่ง) ในการเคลื่อนย้ายใช้งาน การใช้งานระบบควบคุม รวมถึงได้สอบถามถึงความพึงพอใจต่อขนาดของชุดอุปกรณ์รถพ่วง โครงสร้างที่ใช้รองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อนำไปประยุกต์ต่อยอดใช้งาน เป็นต้น

## ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

### 1. การศึกษาต้นแบบระบบพลังงานแสงอาทิตย์แบบเคลื่อนย้าย

จากการศึกษาต้นแบบระบบพลังงานแสงอาทิตย์แบบเคลื่อนย้ายทั้งในและนอกประเทศ มีข้อมูลดังนี้

1.1 ระบบสูบน้ำพลังงานแสงอาทิตย์บนรถพ่วง 4 ล้อเคลื่อนที่ ดำเนินการโดย สำนักงานจังหวัดน่านกระทรวงพลังงาน ลักษณะการใช้งานเป็นการกางแผงฯเปิดออกทางด้านข้างขนาดกำลังไฟฟ้ารวม 1,600 วัตต์ดังภาพที่ 1



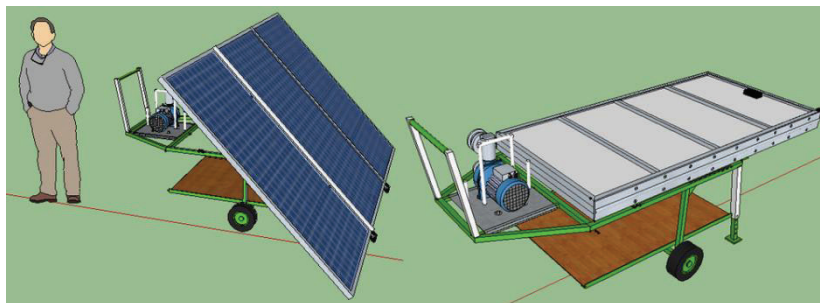
ภาพที่ 1 ระบบสูบน้ำพลังงานแสงอาทิตย์บนรถพ่วง 4 ล้อเคลื่อนที่

1.2 ระบบชลประทานแบบเคลื่อนย้าย (First Mobile Solar Cell Irrigation System) ขนาดกำลังไฟฟ้ารวม 3.2 กิโลวัตต์ สามารถสูบน้ำได้ลึกมากกว่า 150 เมตร ดำเนินการโดย Mr. NenadLihtar [2] ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ระบบชลประทานแบบเคลื่อนย้าย

1.3 เครื่องสูบน้ำแบบพกพาพลังงานแสงอาทิตย์ออกแบบโดย Mr. balázsgabornagy ขนาดกำลังไฟฟ้ารวม 900 วัตต์ ใช้กับปั๊มขนาด 750 วัตต์ โดยอัตราสูบน้ำอยู่ที่ 0.45 ลูกบาศก์ต่อวินาที [3] ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 เครื่องสูบน้ำแบบพกพาพลังงานแสงอาทิตย์

## 2. การออกแบบระบบพลังงานแสงอาทิตย์แบบเคลื่อนย้ายสำหรับสูบน้ำเพื่อการเกษตร

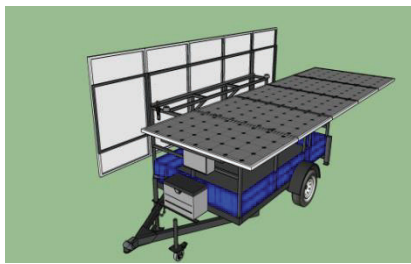
ระบบนี้ใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์โดยตรง ประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 250 วัตต์จำนวน 10 แผง ต่ออนุกรมกัน เพื่อใช้กับขนาดปั๊มไม่ต่ำกว่า 3 แรงม้าให้สามารถทำงานได้ โดยใช้อินเวอร์เตอร์แบบปรับความถี่ตามความเข้มแสงอาทิตย์เพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสตรงจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ แรงดัน 360 โวลต์ เป็นไฟฟ้ากระแสสลับแรงดัน 220 โวลต์ 3 เฟส โครงสร้างรองรับแผงฯ มีความกว้าง 1.8 เมตร ความยาว 2.9 เมตร (ภาพที่ 4-ก) เพื่อให้สะดวกต่อการเคลื่อนย้ายและใช้งาน โดยแบ่งออกเป็นฝั่งละ 5 แผง (ภาพที่ 4-ข) สามารถพับเก็บแผงฯ ไว้ด้านข้าง หลังจากการใช้งาน (ภาพที่ 4-ค) ระบบควบคุมใช้งานได้ง่ายไม่ซับซ้อน ดังภาพที่ 4-ง

## 3. การทดสอบระบบพลังงานแสงอาทิตย์แบบเคลื่อนย้ายสำหรับการสูบน้ำเพื่อการเกษตร

ทำการทดสอบเบื้องต้นโดยวัดความเข้มแสงอาทิตย์ขณะทดสอบสูบน้ำด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบเคลื่อนย้าย โดยวัดอัตราการไหลของน้ำที่ได้ ซึ่งใช้ปั๊มสูบน้ำแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางหรือปั๊มหอยโข่ง (Centrifugal Pump) (ภาพที่ 5-

ก) ขับด้วยมอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า 3 เฟส โดยทดสอบสูบน้ำที่ระดับความสูง 2 เมตร เป็นเวลา 3 วันตั้งแต่ 9.00 น. ถึง 16.00 น. (ภาพที่ 5-ข) นำค่าความเข้มแสงอาทิตย์ขณะทดสอบ และค่าอัตราการไหลของน้ำที่ระดับความสูง 2 เมตร ที่บันทึกมาวิเคราะห์ผลเฉลี่ย ซึ่งได้ผลดังภาพที่ 6

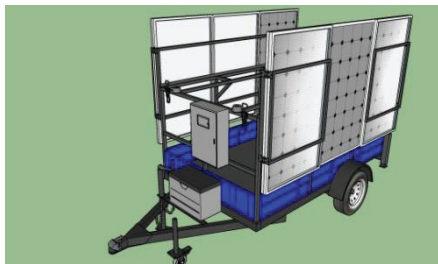
จากกราฟพบว่าอัตราการไหลของน้ำแปรผันตรงกับความเข้มแสงอาทิตย์ กล่าวคือ เมื่อความเข้มแสงอาทิตย์สูง จะทำให้อัตราการไหลของน้ำที่สูบได้เพิ่มขึ้น แต่ถ้าความเข้มแสงอาทิตย์น้อยจะทำให้อัตราการไหลของน้ำที่สูบได้ลดลง ตาม ไปด้วยโดยมีอัตราการไหลเฉลี่ยประมาณ 7.07 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง และประสิทธิภาพของระบบฯเปรียบเทียบกับกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งเฉลี่ยร้อยละ 60 ดังตารางที่ 1



(ก)



(ข)



(ค)

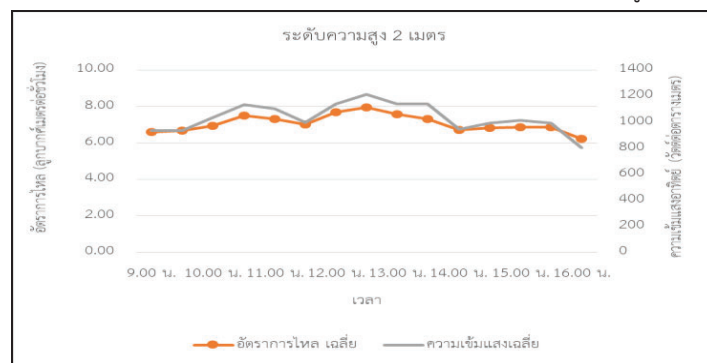


(ง)

ภาพที่ 4 ระบบพลังงานแสงอาทิตย์แบบเคลื่อนย้ายสำหรับสูบน้ำเพื่อการเกษตร



ภาพที่ 5 การทดสอบระบบพลังงานแสงอาทิตย์แบบเคลื่อนย้ายสำหรับการสูบน้ำเพื่อการเกษตร



ภาพที่ 6 กราฟเฉลี่ยความเข้มแสงอาทิตย์และอัตราการไหลของน้ำที่ระดับความสูง 2 เมตร



ภาพที่ 7 ประเมินความพึงพอใจของการใช้งานระบบพลังงานแสงอาทิตย์แบบเคลื่อนย้ายสำหรับการสูบน้ำเพื่อการเกษตร

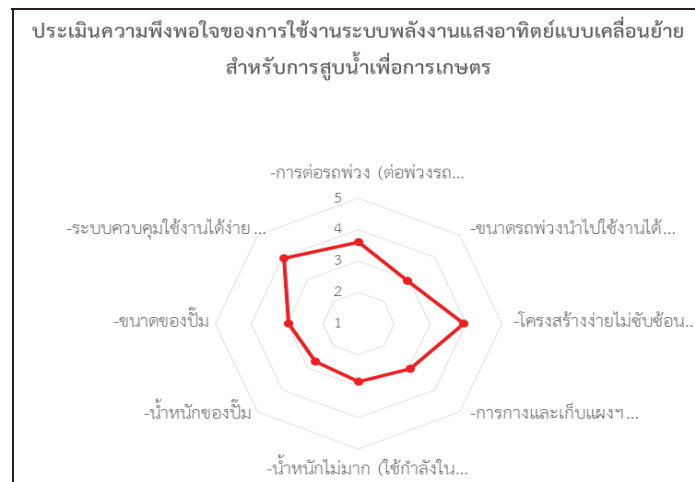
ตารางที่ 1 ประสิทธิภาพของระบบพลังงานแสงอาทิตย์แบบเคลื่อนย้ายสำหรับการสูบน้ำเพื่อการเกษตร

เวลา	กระแสไฟฟ้า (A)	แรงดันไฟฟ้า (V)	กำลังไฟฟ้า (W)	กำลังไฟฟ้าต่อพื้นที่ (W/m <sup>2</sup> )	ความเข้มแสงอาทิตย์ (W/m <sup>2</sup> )	ประสิทธิภาพของระบบเปรียบเทียบกับกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ติดตั้ง (%)	ประสิทธิภาพของระบบเปรียบเทียบกับความเข้มแสงอาทิตย์ (%)
9:00 น.	55	292	1,606	97	823	64	12
9:30 น.	54	292	1,577	96	820	63	12
10:00 น.	55	292	1,606	97	829	64	12
10:30 น.	55	292	1,606	97	907	64	11
11:00 น.	55	292	1,606	97	964	64	10
11:30 น.	54	292	1,577	96	1,010	63	9
12:00 น.	55	293	1,612	97	1,022	64	10
12:30 น.	53	292	1,548	94	1,013	62	9
13:00 น.	54	292	1,577	96	1,000	63	10
13:30 น.	52	292	1,518	92	945	61	10
14:00 น.	5	292	1,480	88	878	58	10
14:30 น.	48	292	1,402	85	772	56	11
15:00 น.	46	292	1,343	81	725	54	11
15:30 น.	44	292	1,285	78	671	51	12
16:00 น.	42	292	1,226	74	613	49	12
				เฉลี่ย		60	11

นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ทำแบบประเมินความพึงพอใจของการใช้งานระบบพลังงานแสงอาทิตย์แบบเคลื่อนย้ายสำหรับการสูบน้ำเพื่อการเกษตรกับกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 20 คน (ภาพที่ 7) ซึ่งได้ผลประเมิน ดังตารางที่ 2 และภาพที่ 8

ตารางที่ 2 ความพึงพอใจของการใช้งานระบบพลังงานแสงอาทิตย์แบบเคลื่อนย้ายสำหรับการสูบน้ำเพื่อการเกษตร

คะแนนความพึงพอใจ	น้อยที่สุด (1)	น้อย (2)	ปานกลาง (3)	มาก (4)	มากที่สุด (5)
<b>ตัวรถพ่วงพลังงานแสงอาทิตย์</b>					
-การต่อรถพ่วง (ต่อพ่วงรถกระบะ ไปใช้งาน) สะดวก	2	0	6	8	4
-ขนาดรถพ่วงนำไปใช้งาน ได้สะดวก	3	6	3	5	3
<b>แผงเซลล์แสงอาทิตย์</b>					
-โครงสร้างง่าย ไม่ซับซ้อน (สามารถนำไปทำเองได้)	1	0	6	5	8
-การกางและเก็บแผงสามารถทำคนเดียวได้สะดวก	6	2	2	5	5
-น้ำหนักไม่มาก (ใช้กำลังในการยกแผง)	5	3	6	2	4
<b>บ่อบสูบน้ำ (หอยโข่ง)</b>					
การเคลื่อนย้ายใช้งานสามารถทำคนเดียวได้					
-น้ำหนักของบ่อบ	3	6	6	4	1
-ขนาดของบ่อบ	0	8	7	3	2
<b>ระบบควบคุม</b>					
-ระบบควบคุมใช้งานได้ง่าย ไม่ซับซ้อน	0	0	8	5	7



ภาพที่ 8 กราฟความพึงพอใจการใช้งานระบบพลังงานแสงอาทิตย์แบบเคลื่อนย้ายสำหรับการสูบน้ำเพื่อการเกษตร

การทดสอบความพึงพอใจพบว่าจากคะแนนเต็ม 5 คะแนน ได้คะแนนดังนี้

- การต่อรถพ่วงได้ค่าเฉลี่ย 3.6 คะแนน สามารถต่อพ่วงรถกระบะหรือรถไถ ได้สะดวก
- ขนาดรถพ่วงได้ค่าเฉลี่ย 3 คะแนน มีพื้นที่สำหรับใส่อุปกรณ์ได้เยอะแต่ถ้าสามารถลดขนาดของรถพ่วงให้เล็กกว่านี้ จะนำไปใช้งานในพื้นที่ขนาดเล็กได้ดีกว่าขนาดตัวรถต้นแบบปัจจุบัน
- โครงสร้างรองรับแผง ได้ค่าเฉลี่ย 4 คะแนน ผู้ทดสอบสามารถทำความเข้าใจได้ง่ายนำไปทำและใช้งานเองได้โดยไม่ยุ่งยาก
- การกางและเก็บแผงฯ ได้ค่าเฉลี่ย 3.1 คะแนน สามารถกางและเก็บได้โดยสามารถทำงานเพียงคนเดียวได้สะดวก
- น้ำหนักของการยกแผงฯใช้งาน ได้ค่าเฉลี่ย 2.9 คะแนน ต้องออกแรงยกหรือใช้กำลังในการยกมากโดยผู้ทดสอบมีข้อเสนอแนะให้ใช้ระบบไฮดรอลิคช่วยในการพัฒนาต่อยอด
- น้ำหนักของบิ๊ม ได้ค่าเฉลี่ย 2.7 คะแนน บิ๊มมีน้ำหนักมากเคลื่อนย้ายเพียงคนเดียวได้ลำบาก
- ขนาดของบิ๊มได้ค่าเฉลี่ย 3 คะแนน บิ๊มมีขนาดใหญ่เกินไป มีคำแนะนำว่าควรมีขนาดที่เล็กกว่าโดยประสิทธิภาพการทำงานใกล้เคียงกับตัวต้นแบบ
- ระบบควบคุม ได้ค่าเฉลี่ย 4 คะแนน ระบบควบคุมใช้งานง่ายไม่ซับซ้อน ใช้งานเช่นเดียวกับเครื่องสูบน้ำไฟฟ้าทั่วไป

### สรุปผลการวิจัย

ระบบพลังงานแสงอาทิตย์แบบเคลื่อนย้ายสำหรับการสูบน้ำเพื่อการเกษตรหลังการทดสอบการสูบน้ำมีอัตราการไหลที่ระดับความสูง 2 เมตรเฉลี่ยที่ 7.07 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมงประสิทธิภาพของระบบฯเปรียบเทียบกับกำลังไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งเฉลี่ยร้อยละ 60 ประสิทธิภาพของระบบฯเปรียบเทียบกับความเข้มแสงอาทิตย์เฉลี่ยร้อยละ 11 และการประเมินความพึงพอใจการใช้งานระบบพลังงานแสงอาทิตย์แบบเคลื่อนย้ายสำหรับการสูบน้ำเพื่อการเกษตรพบว่า โครงสร้างรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์และระบบควบคุมมีรูปแบบที่ไม่ซับซ้อนสามารถนำไปต่อยอดได้ต่อพ่วงไปใช้งานสะดวก โดยมีสิ่งที่ควรพัฒนาต่อคือ ขนาดของรถพ่วง น้ำหนักและขนาดของบิ๊มสูบน้ำ ควรออกแบบให้มีขนาดเล็กกว่าตัวต้นแบบ ณ ปัจจุบัน

### กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ สาขาวิชาเทคโนโลยีเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทดสอบและขอขอบคุณ มูลนิธิพลังที่ยั่งยืน ที่ให้ทุนสนับสนุนในการสร้างระบบสูบน้ำพลังงานแสงอาทิตย์แบบเคลื่อนย้ายและให้ยืมเครื่องมือในการตรวจวัดอัตราการไหลในการทำงานวิจัย

### เอกสารอ้างอิง

- [1] ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมพลังงานแสงอาทิตย์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์. (ม.ป.ป.). ระบบสูบน้ำพลังงานแสงอาทิตย์ สืบค้นเมื่อ 4 เมษายน 2560, จาก <http://www.sugarzone.in.th/know/know5.asp>.
- [2] NenadLihtar. (2015.). **First mobile solar cell irrigation system** สืบค้นเมื่อ 28 กันยายน 2560, จาก <https://www.linkedin.com/pulse/first-mobile-solar-cell-irrigation-system-nenad-lihtar>
- [3] BalázsGábor Nagy. (2013). **Solar Panel Powered Portable Water Pump** สืบค้นเมื่อ 28 กันยายน 2560, จาก <https://www.jovoto.com/projects/greenpeacechallenge/ideas/31347?page=1>

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