

วารสารวิชาการ  
**พลังงาน  
ทดแทน  
สู่ชุมชน**

ปีที่ 2 ฉบับที่ 2 เดือนพฤษภาคม-สิงหาคม 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 ทริปเพิ้ล กรุป 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 ซาดิชัย  
นายวิชัย เพ็ชรทองคำ  
นายวิสูตร ยังพลพันธ์  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญญฤทธิ์ ประสาทแก้ว  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อำนาจ เรืองวารี  
อาจารย์สมควร แววดี  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย มณีวรรณ  
ดร.วรจิตต์ เศรษฐพรศักดิ์  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จอมภพ แววศักดิ์  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ปรีชา ศรีประภาคาร  
ดร.อำพล อาภาธนากร  
ดร.ภาสวรรณ วิชรดำรงค์ศักดิ์  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิสิษฐ์ มณีโชติ  
หม่อมหลวงลือศักดิ์ จักรพันธ์  
นายพิเนตร พรสวรรค์  
นายสุภิตเดช แก้วศรีสด

นายกสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย  
ที่ปรึกษามาตรฐานพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย  
ที่ปรึกษามาตรฐานพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย  
ที่ปรึกษามาตรฐานพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย  
ที่ปรึกษามาตรฐานพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย  
เลขาธิการสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย  
กรรมการสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย  
กรรมการสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย  
กรรมการสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย  
กรรมการสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย  
กรรมการสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย  
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 คล้ายวิตภัทร  
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 โสภากาจารย์  
ดร.สายใจ แก้วอ่อน  
รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย เทพา  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พัฒนะ รักความสุข  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิระ สายศร  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนะศ ไชยชนะ  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชูรัตน์ ธารารักษ์  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ ดุษฎี  
รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล นามผล  
ดร.สมมาส แก้วล้วน  
รองศาสตราจารย์ ดร.ยุพธนา ภิระวัฒน์กุล  
ดร.เกียรติศักดิ์ เส็งช่วย  
ดร.วาริช วีระพันธ์  
รองศาสตราจารย์ ดร.วรเชษฐ์ ภิรมย์ภักดี  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุษาวดี ตันติวรานุรักษ์  
รองศาสตราจารย์ ดร.วรรณุช แจ้งสว่าง  
ดร.วรจิตต์ เศรษฐพรศรี  
ดร. สุรชัย ฌรัฐจันท์ศรี  
ดร.ชยานนท์ สวัสดิ์นฤพาน  
ดร.หทัยทิพย์ สินธูยา  
ดร.ณัฐยา ตันตรานนท์  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรพันธ์ ดั่งทองสุข  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อชิตพล ศศิธรานูวัฒน์

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

## บทบรรณาธิการ

วารสารวิชาการพลังงานทดแทนสู่ชุมชนเป็นงานวิชาการโดยความร่วมมือของเครือข่ายสมาชิกสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย (TRECA) ซึ่งเป็นฉบับที่ 2 ของปีที่ 2 วารสารฉบับนี้เป็นเนื้อหาของบทความทางวิชาการที่มุ่งสร้างผลงานที่เด่นทางด้านการศึกษาวิจัยและมุ่งสู่การใช้งานจริง ซึ่งได้รวบรวมความรู้ทางวิชาการที่สามารถถ่ายทอดให้แก่สังคม ทางด้านพลังงานทดแทนในสาขาต่างๆ เพื่อให้วารสารนี้เป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนวิชาการและแนวความคิดในแวดวงวิชาการทั้งผู้วิจัยและผู้อ่านอันเป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่งในการสร้างผลงานทางวิชาการสู่ชุมชนและสังคม โดยดำรงไว้ซึ่งความเป็นตัวตนทางวิชาการของผู้เขียนและวัตถุประสงค์ของสมาคมฯ ที่ทรงคุณค่าบทความในวารสารฉบับนี้มีจำนวนทั้งสิ้น 10 บทความ ซึ่งในแต่ละบทความมีความเป็นไปได้ในทิศทางเดียวกันของรูปแบบพลังงานทดแทนต่างๆ ครอบคลุมกระบวนการในการวิจัยและการศึกษาสู่ภาคการใช้งาน ผู้อ่านจะได้รับความรู้ที่หลากหลายจากการอ่านวารสารฉบับนี้ ในแนวทางที่จะจุดประกายความคิดหรือการต่อยอดความคิดทางด้านพลังงานทดแทนสาขาต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการอ่านอย่างวิพากษ์และตั้งคำถาม เพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนในทางวิชาการอย่างสร้างสรรค์อันจะช่วยให้ความรู้และความคิดเดิมถูกแพร่ขยายออกไปได้อย่างกว้างขวาง อีกทั้งให้วารสารฉบับนี้เป็นแหล่งความรู้ในทุกระดับภาคส่วนของทุกคนในสังคมไทย โดยไม่ยึดติดตนเองและอยู่กับความรู้ความคิดเพียงบางมุมบางด้านเท่านั้น ทั้งนี้เพื่อให้ผู้เขียนและผู้อ่านมีความเป็นตัวตนทางวิชาการที่พร้อมจะพัฒนาตนเองอยู่เสมออย่างไม่หยุดนิ่งและทำดีที่สุดแล้ว ความรู้ความคิดที่ถูกต่อขยายออกไปนั้น ก็จะนำไปสู่การปรับเปลี่ยนกระบวนการทางความคิดของสังคมและชุมชนอย่างกว้างขวางอันจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางวิชาการของสังคมเพื่อความยั่งยืนของประเทศชาติกองบรรณาธิการขอขอบพระคุณคณะทำงานทุกท่าน คณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความวิชาการ และทุกภาคส่วนที่ได้สละเวลาอันมีค่าอ่านบทความ เพื่อความถูกต้องทางวิชาการ และเป็นวารสารที่ดีต่อการพัฒนาประเทศ ทั้งนี้หากผู้อ่านมีความประสงค์จะตีพิมพ์บทความสามารถขอความกรุณาโปรดจัดเตรียมต้นฉบับให้เป็นไปตามรูปแบบของวารสารและส่งบทความทางออนไลน์ที่ [www.reca.or.th](http://www.reca.or.th) เพื่อการพิจารณาและตีพิมพ์ในวารสารฉบับต่อไป

กองบรรณาธิการ





# สารบัญ

## เชื้อเพลิงและความร้อนชุมชน

อิทธิพลวัสดุประสานธรรมชาติที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของชีวมวลอัดแท่ง .....	10
การศึกษาการผลิตถ่านแท่งจากกะลามะพร้าวผสมขาน้อยและใบเตย .....	16
การผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากผักตบชวาร่วมกับขุยมะพร้าว .....	21

## สิ่งแวดล้อมเพื่อชุมชน

ผลของอาหารเสริมต่อการผลิตไบโอไฮโดรเจนจากกล้วยหอม .....	28
โดยจุลินทรีย์ในน้ำเสียจากถังปฏิกรณ์	
การปลดปล่อยเสียงและแผนที่เส้นเสียงเท่าของฟาร์มกังหันลมขนาด .....	36
กำลังการผลิตติดตั้ง 80 เมกกะวัตต์	

## นวัตกรรมด้านพลังงาน

การศึกษาผลการผลิตแก๊สชีวภาพจากการหมักผสมระหว่างมูลโคหมัก .....	43
ร่วมกับเปลือกหัวหอมโดยใช้ถังหมักแบบกลิ้งในแนวตั้ง	
การวิเคราะห์หมูมปะทะและการไหลวนบนผิวใบพัดกังหันลมแนวแกนนอน .....	51
การศึกษาผลกระทบของมุมเอียงของเสาต่อประสิทธิภาพการทำงาน .....	59
ของกังหันลมขนาดเล็กแบบชนิดทุ่นลอยน้ำ	
การศึกษาและเปรียบเทียบการอบแห้งสมุนไพรด้วยระบบสุญญากาศ .....	71
ร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกลและอากาศร้อน	
นวัตกรรมโรงเรือนเพาะปลูกพืชไร่ดิน ระบบทำความเย็นสารละลายธาตุอาหาร .....	78
ด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกส์ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์	

## อิทธิพลวัสดุประสานธรรมชาติที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของชีวมวลอัดแท่ง Influent of natural binder on physical properties of biomass briquettes

บุญยาพร แสนพรหม<sup>1</sup> นิกราน หอมดวง<sup>1\*</sup> นัฐพร ไชยญาติ<sup>1</sup> ธเนศ ไชยชนะ<sup>1</sup> กิตติกร สาสุจิตต์<sup>1</sup> และเสมอขวัญ ตันติกุล<sup>2</sup>

<sup>1</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290

<sup>2</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290

### บทคัดย่อ

ศักยภาพชีวมวลในประเทศไทยมีสูง ในขณะที่การผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งมีต้นทุนที่สูงเช่นกัน จึงส่งผลให้ไม่เกิดการใช้อย่างแพร่หลายในชุมชน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาชนิดของวัสดุประสานธรรมชาติที่มีต่อคุณสมบัติเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งและต้นทุนการผลิต โดยใช้เศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ประกอบด้วยทางใบปาล์ม (PL) ทางมะพร้าว (CL) และต้นถั่วเหลือง (ST) เป็นตัวประสานธรรมชาติ ใช้อัตราส่วนต่อชีวมวลหลัก 60%, 40% และ 20% โดยน้ำหนักและใช้เครื่องอัดแท่งแบบเกลียว ศึกษาวิเคราะห์การขึ้นรูปชีวมวลอัดแท่ง คุณสมบัติทางกายภาพที่จำเป็นต่อการใช้งานและต้นทุนการผลิตชีวมวลอัดแท่ง ส่วนคุณสมบัติทางกายภาพได้วิเคราะห์ค่าความหนาแน่น ความต้านทานแรงกด ดัชนีการแตกร่วน ความต้านทานน้ำ สุดท้ายวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต และพบว่าวัสดุประสานทั้งสามชนิดส่งผลให้ชีวมวลอัดแท่งที่ได้มีสมบัติทางกายภาพใกล้เคียงกับเกณฑ์มาตรฐานเกือบทุกอัตราส่วน โดยเชื้อเพลิงอัดแท่งแบบ BQ1 มีคุณสมบัติเหมาะสมที่สุด มีความหนาแน่น ดัชนีการแตกร่วน ความต้านทานการอัดและความต้านทานน้ำเฉลี่ย 995.27 kg/m<sup>3</sup>, 98.64%, 8.57 MPa และ 90.61% ตามลำดับ โดยมีต้นทุนเฉลี่ย 4.207 บาท/กิโลกรัม ในขณะที่ต้นทุนการผลิตของชีวมวลอัดแท่งแบบใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นตัวประสานที่สัดส่วน 20 % มีต้นทุนสูงกว่าถึง 35%

**คำสำคัญ:** ชีวมวลอัดแท่ง วัสดุประสานธรรมชาติ วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ต้นทุนการผลิต

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

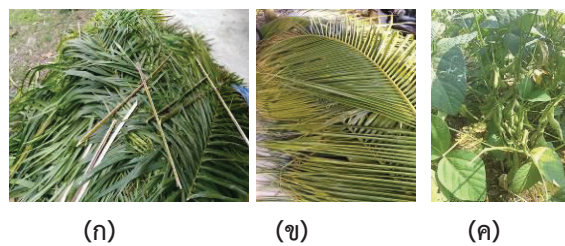
### บทนำ

การแปลงสภาพชีวมวลเพื่อนำมาใช้เป็นพลังงานด้วยกระบวนการเพิ่มความหนาแน่นด้วยการอัดแบบเย็น (Cold press process) เป็นวิธีที่นิยมใช้กันอยู่ทั่วไป เนื่องจากเป็นกรรมวิธีขึ้นรูปที่ง่าย ใช้พลังงานและความดันในการอัดต่ำ เทคโนโลยีที่นำมาผลิตก็มีราคาไม่สูง สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ชุมชน แต่มีปัญหาในเรื่องของตัวประสาน (Binder) ซึ่งส่วนใหญ่มักจะใช้นิยมนำแป้งมันสำปะหลังเป็นตัวประสานในอัตราส่วนที่ค่อนข้างสูง ทำให้ต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งสูงมี ดังนั้นหากสามารถลดการใช้ตัวประสานลงให้ได้มากที่สุด ก็มีความเป็นไปได้ที่ชุมชนจะมีการใช้เชื้อเพลิงอัดแท่งเพิ่มสูงขึ้นและอาจส่งผลถึงภาคอุตสาหกรรม การลดการใช้ตัวประสานหรือการเปลี่ยนตัวประสานจากแป้งมันมาใช้ตัวประสานจากวัสดุธรรมชาติจึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งของการลดต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งได้ [1] งานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาต่อยอดการใช้วัสดุประสานธรรมชาติมาใช้งาน ผลการศึกษาพบว่ามีความเป็นไปได้ค่อนข้างสูงเนื่องจากชีวมวลทั้งสามชนิดมีเส้นใยและลิกนินในปริมาณสูง [2] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจในการในการนำเอาชีวมวลที่มีลักษณะดังกล่าวมาทดสอบวิจัยเป็นตัวประสานการผลิตชีวมวลอัดแท่งจากไม้ ซึ่งผลที่ได้น่าจะมีส่วนช่วยในการลดต้นทุนการผลิตชีวมวลอัดแท่งลงได้และมีความเป็นไปได้ในการขยายผลสู่ชุมชนต่อไปในอนาคต

## วิธีการวิจัย

### ชีวมวลหลัก วัสดุประสานธรรมชาติและการเตรียม

ชีวมวลหลักสำหรับงานวิจัย คือ เศษไม้ จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในพื้นที่ จ.เชียงใหม่ โดยนำเข้าเครื่องย่อยลดขนาดให้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร ในส่วนของวัสดุประสานธรรมชาติที่ใช้ทั้งหมด 3 ชนิด ได้แก่ ทางใบปาล์ม ทางมะพร้าว ต้นถั่วเหลือง ดังในภาพที่ 1 ทางใบปาล์มและทางมะพร้าวรวบรวมจากศูนย์วิจัยพลังงานมหาวิทยาลัยแม่โจ้ ต้นถั่วเหลืองรวบรวมจากแปลงเกษตรกรของบริษัทลานนาเกษตรอุตสาหกรรม วัสดุประสานทั้งสามชนิดนำมาเข้ากระบวนการลดขนาดด้วยเครื่องย่อยปุ๋ยพืชสด นำไปตากแดดเพื่อลดความชื้น เมื่อวัสดุประสานธรรมชาติเริ่มแห้งนำไปร่อนคัดขนาดให้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง  $\leq 1$  มิลลิเมตร เก็บไว้ในที่อากาศแห้ง และทำการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธีการProximate โดยมีรายละเอียดองค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 1



ภาพที่ 1 วัสดุประสานธรรมชาติ

(ก) ทางใบปาล์ม (PL) (ข) ทางมะพร้าว (CL) (ค) ต้นถั่วเหลือง (ST)

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลหลักและวัสดุประสาน

Biomass	Wood	Palm	Coconut	Soybean	Cassava
Moisture (%)	6.35	13.12	1.24	2.16	1.05
Volatile (%)	75.4	65.91	71.12	77.30	59.83
Fixed carbon (%)	16.95	16.44	25.02	17.57	38.60
Ash (%)	1.3	4.53	1.90	1.70	0.52
HHV (MJ/kg)	17.78	20.24	17.34	17.43	15.00
Density (kg/m <sup>3</sup> )	132.6	114.26	118.6	127.87	127.32

### อุปกรณ์และเครื่องมือการทดลอง

เครื่องอัดแท่งชีวมวลเป็นเครื่องอัดแบบเกลียวรูปกรวย อาศัยการทำงานโดยใช้ต้นกำลังขับเคลื่อนเป็นมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสสลับ 3 เฟส ขนาด 5 แรงม้า รอบการทำงาน 1,750 รอบ/นาที ส่งกำลังด้วยสายพาน 3 เส้นไปยังชุดเฟืองทดและสกรูอัด เกลียวอัดมีระยะพิทช์ 4.5 เซนติเมตร มีความยาว 45 เซนติเมตร แท่งเชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้มีลักษณะเป็นทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ยาว 25 เซนติเมตร ด้านเครื่องมือวัดอุณหภูมิใช้เครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด รุ่น AIT-42R สามารถวัดอุณหภูมิในช่วง -35–630 องศาเซลเซียส เครื่องวัดความชื้นชีวมวลใช้เครื่องวัดรุ่น MD7822 วัดความชื้นได้ในช่วง 2–30% การวัดน้ำหนักชีวมวลใช้เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัล ยี่ห้อ CST รุ่น CDR-30 พิกัดกำลัง 30 กก. การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงอัดแท่งทั้งหมดประกอบด้วย ความหนาแน่น ความต้านทานการอัด ดัชนีการแตกร่วนและความต้านทานน้ำ รายละเอียดการวัดและวิเคราะห์สอดคล้องกับมาตรฐานการทดสอบ ASTM [3-6]

## ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

### 1. การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ

การวิเคราะห์การขึ้นรูปและลักษณะของชีวมวลอัดแท่งโดยใช้วัสดุประสานธรรมชาติทั้งสามชนิดนั้น จะใช้วิธีโดยการสังเกตผิว พื้นที่หน้าตัด ความแข็งแรง คงทน ของแท่งเชื้อเพลิง เมื่อทำการอัดหาคงรูปตามขนาดที่ต้องการได้ แสดงว่ามีความสามารถในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งได้ แม้ทำการเคลื่อนย้ายก็ยังคงรูปไว้ไม่เกิดการเสียหายสภาพของเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ได้จากการทดลองแสดงตารางที่ 2 และภาพที่ 2 ผลการทดลองพบว่าชนิดชีวมวลอัดแท่งแต่ละตัวประสานธรรมชาติในทุกอัตราส่วนเกาะตัวเป็นเนื้อเดียวกันค่อนข้างดี BQ3-BQ5 และ BQ8 ผิวค่อนข้างเรียบดี BQ3 และ BQ5 ผิวค่อนข้างมันวาว

ตารางที่ 2 ลักษณะทางกายภาพของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งเมื่อใช้วัสดุประสานธรรมชาติ

อัตราส่วน	ลักษณะทางกายภาพของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่ง
W100% : PL60% : C10% (BQ1)	แท่งเชื้อเพลิงเกาะตัวเป็นเนื้อเดียวกันดี ผิวขรุขระ มีรอยร้าวเล็กน้อย
W100% : PL40% : C10% (BQ2)	แท่งเชื้อเพลิงเกาะตัวเป็นเนื้อเดียวกันดี ผิวขรุขระเล็กน้อย แข็งแรง
W100% : PL20% : C10% (BQ3)	แท่งเชื้อเพลิงเกาะตัวเป็นเนื้อเดียวกันดี ผิวเรียบ แข็งแรง
W100% : CL60% : C10% (BQ4)	แท่งเชื้อเพลิงเกาะตัวเป็นเนื้อเดียวกันดี ผิวเรียบ แข็งแรง มีรอยเล็กน้อย
W100% : CL40% : C10% (BQ5)	แท่งเชื้อเพลิงเกาะตัวเป็นเนื้อเดียวกันดี ผิวเรียบ แข็งแรง
W100% : CL20% : C10% (BQ6)	แท่งเชื้อเพลิงเกาะตัวเป็นเนื้อเดียวกันดี ผิวขรุขระ มีรอยแตกเล็กน้อย
W100% : ST60% : C10% (BQ7)	แท่งเชื้อเพลิงเกาะตัวเป็นเนื้อเดียวกันดี ผิวเรียบ แข็งแรงมีรอยเล็กน้อย
W100% : ST40% : C10% (BQ8)	แท่งเชื้อเพลิงเกาะตัวเป็นเนื้อเดียวกันดี ผิวเรียบ มีรอยแตกเล็กน้อย
W100% : ST20% : C10% (BQ9)	แท่งเชื้อเพลิงเกาะตัวเป็นเนื้อเดียวกันดี ผิวขรุขระ มีรอยเล็กน้อย แข็งแรง

หมายเหตุ : w: PL: C คือ เศษไม้ผสมทางใบปาล์มผสมแป้งมันสำปะหลัง w: CL: C คือ เศษไม้ผสมทางมะพร้าวผสมแป้งมันสำปะหลัง

w: ST: C คือ เศษไม้ผสมต้นถั่วเหลืองผสมแป้งมันสำปะหลัง



ภาพที่ 2 เชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่ผลิตได้

BQ1 – BQ3 ชีวมวลอัดแท่งใช้ทางใบปาล์มเป็นตัวประสาน 60%,40%,20% ตามลำดับ

BQ4 – BQ6 ชีวมวลอัดแท่งใช้ทางมะพร้าวเป็นตัวประสาน 60%,40%,20% ตามลำดับ

BQ7 – BQ9 ชีวมวลอัดแท่งใช้ต้นถั่วเหลืองเป็นตัวประสาน 60%,40%,20% ตามลำดับ

### 2.การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของชีวมวลอัดแท่ง

#### 2.1 การวิเคราะห์ความหนาแน่น

การผลิตชีวมวลอัดแท่งโดยใช้วัสดุธรรมชาติเป็นตัวประสาน เชื้อเพลิงอัดแท่ง BQ1–BQ3 มีความหนาแน่นเฉลี่ยตั้งแต่ 817.98–985.34 kg/m<sup>3</sup> แท่งเชื้อเพลิง BQ4–BQ6 มีความหนาแน่นเฉลี่ย 785.07–841.49 kg/m<sup>3</sup> ส่วนแท่งเชื้อเพลิง BQ7–BQ9 มีความหนาแน่นเฉลี่ย 803.42–860.83 kg/m<sup>3</sup> ดังแสดงในภาพที่ 3(ก) เชื้อเพลิงอัดแท่งทั้งหมดผ่าน

เกณฑ์มาตรฐานตามคุณสมบัติเชื้อเพลิงอัดแท่ง [7] การใช้ทางใบปาล์มเป็นตัวประสานมีค่าความหนาแน่นเชื้อเพลิงอัดแท่งเฉลี่ยสูงสุด ทั้งนี้เนื่องจากทางใบปาล์ม มีปริมาณลิกนินและเส้นใยสูง อีกทั้งอุณหภูมิในการขึ้นรูปมีอิทธิพลต่อความหนาแน่นเป็นอย่างมาก [8] ทำให้ลิกนินเกิดการอ่อนตัวและทำหน้าที่ประสานเนื้อวัตถุดิบเข้าด้วยกัน ส่งผลให้เนื้อของชีวมวลเกาะกันได้ดี ส่วนไฟเบอร์จะประกอบด้วย เส้นใยที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ ในส่วนที่สามารถละลายน้ำได้จะไปเพิ่มความหนืด ซึ่งจะช่วยให้เนื้อชีวมวลยึดเกาะกันได้ดีและเป็นผลดีต่อการอัดขึ้นรูปเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่ง [9]

## 2.2 การวิเคราะห์ดัชนีการแตกร่วน

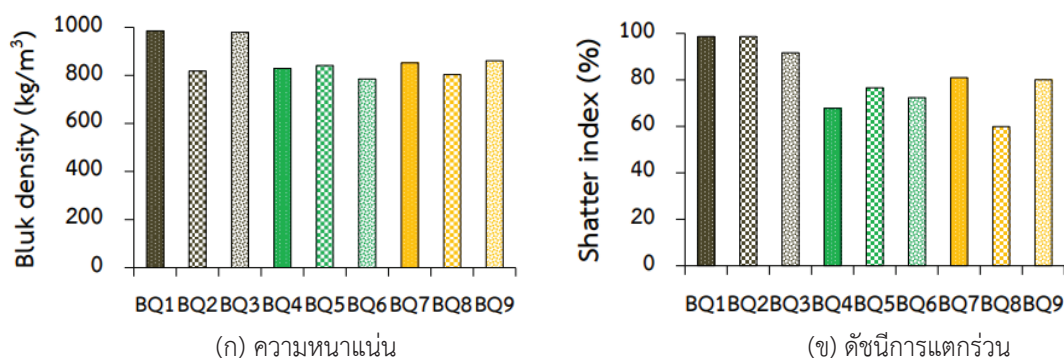
ดัชนีการแตกร่วนเป็นคุณสมบัติทางกายภาพของชีวมวลอัดแท่งแสดงถึงความเหมาะสมในการนำไปใช้งานจริง ซึ่งจะส่งผลต่อความทนทาน การแตกร่วน ในการขนส่ง โดยค่ามาตรฐานอยู่ระหว่าง 90%–99% [10] ผลการทดสอบพบว่า แท่งเชื้อเพลิง BQ1–BQ3 เป็นแท่งเชื้อเพลิงที่ใช้ทางใบปาล์มเป็นตัวประสานมีดัชนีการแตกร่วนเฉลี่ย 91.67–98.65% เมื่อสัดส่วนตัวประสานเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ค่าดัชนีการแตกร่วนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย ในขณะที่แท่งเชื้อเพลิงที่ใช้ทางมะพร้าวและต้นกล้วย BQ4–BQ9 มีดัชนีการแตกร่วนต่ำกว่าเพียงเล็กน้อย ดังภาพที่ 3(ข) ซึ่งจะสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิงอัดแท่ง ทั้งนี้เชื้อเพลิงอัดแท่งที่มีค่าดัชนีการแตกร่วนอยู่ในระหว่าง 50–100% แสดงว่ามีคุณสมบัติเหมาะสมที่จะนำไปใช้งาน เนื่องจากค่าที่มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่ามีการจับตัวกันอย่างดี ทำให้มีการแตกร่วนน้อย [11]

## 2.3 การวิเคราะห์ความต้านทานแรงกดอัด

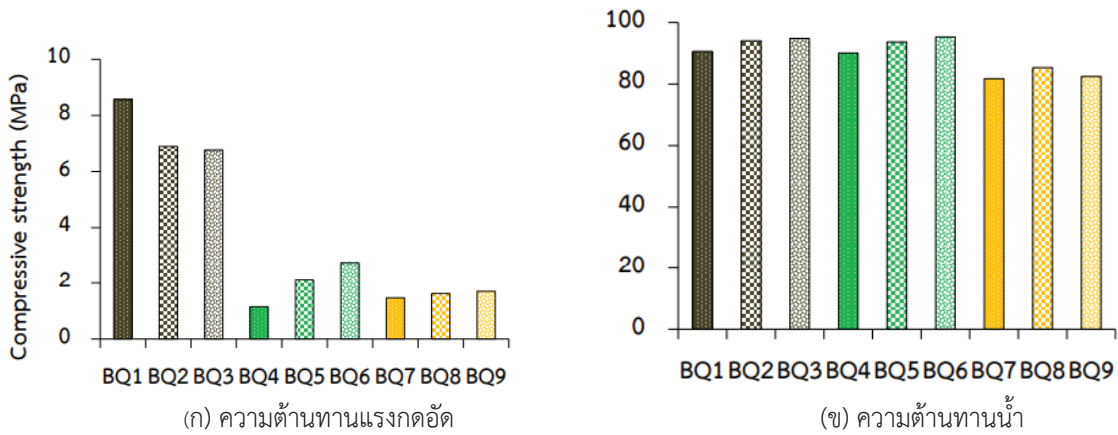
ภาพที่ 5 แสดงความต้านทานแรงกดอัดของชีวมวลทั้ง 3 ชนิด พบว่า BQ1 มีค่าสูงสุดอยู่ที่ 8.57 MPa แท่งที่มีความต้านทานแรงกดอัดน้อยที่สุดคือ BQ4 อยู่ที่ 1.15 MPa ดังแสดงในภาพที่ 4(ก) โดยแท่งอื่น ๆ มีความต้านทานแรงกดอัดที่ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องมาจากแท่งที่ใช้ทางมะพร้าวและต้นกล้วยเป็นตัวประสาน อาจจะใช้เวลาในการตากแดดนานกว่าทำให้ชีวมวลเกิดความเปราะ ทำให้ทนแรงกดได้น้อยกว่า ซึ่งแรงกดอัดที่ได้ก่อนเชื้อเพลิงอัดแท่งจะเกิดการแตกหักจะต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 0.375 MPa [12] ทั้งนี้ความแข็งแรงของพันธะที่ยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคของแท่งเชื้อเพลิงจะส่งผลให้สามารถต้านทานแรงกดอัดได้ดี

## 2.4 การวิเคราะห์ความต้านทานน้ำ

ความต้านทานน้ำนั้นจะเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการดูดซับน้ำหรือมีความชื้นสูง ผลการทดสอบพบว่าเชื้อเพลิงอัดแท่ง BQ4–BQ6 มีค่าความต้านทานน้ำสูงสุดสูงสุด รองลงมาคือแท่ง BQ1–BQ3, BQ7–BQ9 ตามลำดับ โดยมีค่าเฉลี่ย 95.29 %, 94.74% และ 85.33% ดังภาพที่ 4(ข) หากค่าความต้านทานน้ำต่ำเชื้อเพลิงก็จะเสียหาย ไม่คงรูปเดิม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความพรุนของชีวมวลที่ใช้เป็นตัวประสาน เช่นต้นกล้วยที่มีความพรุนมากส่งผลทำให้การต้านทานน้ำต่ำ อีกทั้งเนื่องจากอัตราส่วนที่มากเกินไปทำให้ชีวมวลหลักและตัวประสานธรรมชาติยึดเกาะกันไม่ได้ไม่เตาที่ควร นอกจากนี้อาจเกิดจากแรงที่กดให้เครื่องในกระบวนการผลิต



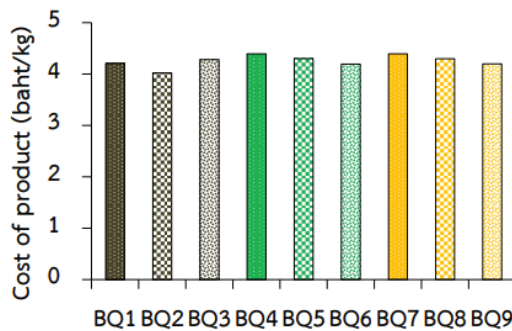
ภาพที่ 3 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงอัดแท่ง



ภาพที่ 4 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่ง

### 3. การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง

ต้นทุนการผลิตของชีวมวลอัดแท่งโดยใช้วัสดุประสานธรรมชาติเป็นตัวช่วยในการลดการใช้แ่งมันสำปะหลังพบว่า ชีวมวลอัดแท่งที่ใช้ทางใบปาล์ม BQ1-BQ3 มีต้นทุนอยู่ที่ 4.021-4.280 บาท/กิโลกรัม ชีวมวลอัดแท่งที่ใช้ทางมะพร้าว BQ-BQ6 มีต้นทุนการผลิตที่ 4.194-4.393 บาท/กิโลกรัม และชีวมวลอัดแท่งที่ใช้ต้นกล้วย BQ-BQ9 มีต้นทุนการผลิตอยู่ที่ 4.197-4.394 บาท/กิโลกรัม ดังภาพที่ 5 ในภาพรวมต้นทุนการผลิตชีวมวลอัดแท่งของแต่ละชนิดนั้นมีต้นทุนที่ใกล้เคียงกัน เมื่อเราเปรียบเทียบเชื้อเพลิงอัดแท่งเมื่อใช้เศษไม้ผสมแ่งมันสำปะหลัง 20% เพียงอย่างเดียวพบว่าต้นทุนการผลิตอยู่ที่ 6.737 บาท/กิโลกรัม ซึ่งเราจะเห็นว่าต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งเมื่อใช้ตัวประสานแ่งมันสำปะหลังค่อนข้างสูง เมื่อลดการใช้แ่งมันลง 50% จากเดิมและใช้ตัวประสานธรรมชาติช่วยในการขึ้นรูปก็จะสามารถลดต้นทุนในการผลิตลงได้



ภาพที่ 5 ต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง

### สรุปผลการวิจัย

ชีวมวลอัดแท่งเมื่อใช้ตัวประสานธรรมชาติที่ผลิตได้นั้นมีลักษณะทางกายภาพ โดยรวมมีความแข็งแรง ผิวเรียบเนียน มีรูปร่างตามที่ต้องการ มีบางอัตราส่วนเท่านั้นที่มีความขรุขระ และมีรอยร้าวเพียงเล็กน้อย

การใช้ตัวประสานธรรมชาติทั้งสามชนิดมีสมบัติทางกายภาพใกล้เคียงกับเกณฑ์มาตรฐาน อยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้ ทุกอัตราส่วน สามารถนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งเพื่อนำไปใช้งานได้

การใช้วัสดุประสานธรรมชาติสามารถลดต้นทุนการผลิตได้ถึง 2 บาท อีกทั้งยังสามารถส่งเสริมการใช้ชีวมวลอัดแท่งในระดับชุมชนและครัวเรือน สร้างมูลค่าให้แก่เศษไม้ที่เหลือใช้ และนำไปประยุกต์ใช้กับเศษวัสดุเหลือทิ้งชนิดอื่นๆ ได้ สอดคล้องกับนโยบายแผนพัฒนาพลังงานทดแทนของรัฐบาล

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณการสนับสนุนทุนวิจัยจากโครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทน ในกลุ่มประเทศอาเซียนในระดับบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยแม่โจ้

ขอขอบพระคุณกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน โครงการวิจัยเพื่อขอรับทุนอุดหนุนการวิจัยแก่นักศึกษาระดับอุดมศึกษาประจำปีงบประมาณ 2561

ขอขอบพระคุณการสนับสนุนชีวมวล จากบริษัท ลานนาเกษตรอุตสาหกรรม จำกัด

## เอกสารอ้างอิง

- [1] นิพนธ์ ต้นไพบูลย์กุล และธรรพร บุศย์น้ำเพชร. (2559).ลักษณะการขึ้นรูปและตัวประสานที่แตกต่างกันต่อสมบัติของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากผักตบชวา. Veridian E-Journal (สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี).3(6).86-100
- [2] ธนาพล ต้นดีสัตย์กุล, สุริฉาย พงษ์เกษม, ปรีชญ์วิณ ภูหญา และภาณุวัฒน์ ไถ่บ้านกวย. (2558). พลังงานทดแทนชุมชน จากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งจากทางมะพร้าว. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 23 (3), 418-431
- [3] ASTM Standard. D3173. 1997. Standard test method for moisture in the analysis sample. U.S.A.
- [4] ASTM Standard. D3175. 1997. Standard test method for volatile matter in the analysis sample. U.S.A. sample. U.S.A. calorimeter. U.S.A.
- [5] ASTM Standard. D3174. 1997. Standard test method for ash in the analysis sample. U.S.A.
- [6] ASTM Standard. D3177. 1997. Standard test method for gross calorific value by the bomb
- [7] นฤภัทร ตั้งมันคงวรกุล. (2557). การผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากวัสดุเหลือใช้ในอุตสาหกรรมการเกษตรและครัวเรือน. วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี). 6 (11), 66-77
- [8] Jaya Shankar Tumuluru, Christopher T. Wright, J. Richard Hess and Kevin L. Kenney. (2011). A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application†. Biofuel bio products & bio refining.5.683-707
- [9] Rukayya I. Muazu and Julia A. Stegemann. (2015). Effects of operating variables on durability of fuel briquettes from rice husks and corn cobs. Fuel Processing Technology. 133. 137 – 145.
- [10] อัจฉรา อัครจุฑิกลชัย, ชลันดา เสมสายัณห์, นัฐพร ประภักดิ์, ณัฐริดา เปี่ยมสุวรรณศิริ และ นิภาวรรณ ชูชาติ. (2554). “การนำเปลือกทุเรียนและเปลือกมังคุดมาใช้ประโยชน์ในรูปเชื้อเพลิงอัดแท่ง”, ในการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. ครั้งที่ 49 .162 – 168.
- [11] นิพนธ์ ต้นไพบูลย์กุล และธรรพร บุศย์น้ำเพชร. (2559).ลักษณะการขึ้นรูปและตัวประสานที่แตกต่างกันต่อสมบัติของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากผักตบชวา. Veridian E-Journal (สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี).3(6).86-100 [12] S.R. Richard. (1990). “Physical testing of fuel briquette”.Fuel processing technology. 25(2).89-100



## การศึกษาการผลิตถ่านแท่งจากกะลามะพร้าวผสมขานอ้อยและใบเตย Study of briquette production from coconut shell mixed sugarcane bagasses and pandanus leaves

ศิริวรรณ เทพา และศตพล มุ่งค้ำกลาง\*

สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี ลพบุรี 15000

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการผลิตถ่านอัดแท่งจากกะลามะพร้าวผสมขานอ้อยและใบเตย โดยใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นตัวประสาน อัตราส่วนของผงถ่านกะลามะพร้าวต่อขานอ้อยหรือใบเตยที่ทำการศึกษาคือ 9:1 8:2 7:3 6:4 และ 5:5 ทำการอัดแท่งด้วยวิธีการอัดเย็น ทดสอบความชื้น สารระเหย ปริมาณเถ้า คาร์บอนคงตัวและค่าความร้อนตามมาตรฐาน ASTM ผลการศึกษาพบว่า ถ่านกะลามะพร้าวผสมขานอ้อยที่มีค่าคุณสมบัติของเชื้อเพลิงผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนคือ อัตราส่วนของผงถ่านกะลามะพร้าวต่อขานอ้อยเท่ากับ 9:1 ซึ่งมีปริมาณความชื้น สารระเหย ปริมาณเถ้า คาร์บอนคงตัวและค่าความร้อน เท่ากับ 0.10 2.40 11.06 86.30 เปอร์เซ็นต์ และ 5,173.58 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ส่วนถ่านอัดแท่งจากกะลามะพร้าวผสมใบเตยพบว่า ทุกอัตราส่วนคุณสมบัติของเชื้อเพลิงผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน โดยอัตราส่วนของผงถ่านกะลามะพร้าวต่อใบเตยที่ 8:2 ให้ค่าพลังงานความร้อนสูงสุด คือ 5,692.67 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม

**คำสำคัญ:** ถ่านอัดแท่ง กะลามะพร้าว ขานอ้อย ใบเตย

\*Corresponding author: Tel.: 092-5094651. E-mail address: satapon.m@gmail.com

### บทนำ

พลังงานเป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญต่อการพัฒนาในทุกมิติ ไม่ว่าจะเป็นมิติทางเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม ทุกวันนี้พลังงานได้เข้ามามีส่วนหนึ่งของชีวิตทั้งทางตรงและทางอ้อม เช่น การคมนาคมขนส่ง อุตสาหกรรม และใช้ในครัวเรือน การขยายตัวทางเศรษฐกิจและการเพิ่มขึ้นของประชากร นับเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดวิกฤตการณ์ขาดแคลนพลังงาน จากการคาดการณ์ความต้องการพลังงานโลกในอนาคตของเอ็กซอนโมบิล [1] จะมีความแตกต่างกันในแต่ละภูมิภาค ในปี ค.ศ. 2040 จะเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 30 เมื่อเทียบกับปี ค.ศ. 2010 สถานการณ์พลังงานของประเทศไทย พบว่าในปี พ.ศ. 2560 มีการใช้พลังงานขั้นต้นเพิ่มขึ้น ร้อยละ 2.4 เนื่องจากภาวะเศรษฐกิจที่เริ่มดีขึ้น [2] จากสถานการณ์ที่กล่าวมา ประกอบกับนโยบายภาครัฐที่ต้องการพัฒนาพลังงานทดแทน ตามแนวทางการทำงานตามแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ.2558-2579 ที่มีเป้าหมายให้สัดส่วนการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนเป็นร้อยละ 20 ของปริมาณความต้องการพลังงานไฟฟ้ารวมสุทธิ และมีเป้าหมายการผลิตความร้อนจากพลังงานทดแทน ประเภทชีวมวลเพิ่มขึ้นจาก 5,144 ktoe ในสิ้นปี พ.ศ.2557 เป็น 22,100 ktoe ในปี พ.ศ. 2579 [3] ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาการนำวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร ซึ่งหลังจากการเก็บเกี่ยวพืช จะมีเศษวัสดุเหลือใช้ทางเกษตรเป็นจำนวนมากมาพัฒนาเป็นพลังงาน เพื่อทดแทนเชื้อเพลิงจากฟอสซิล โดยใช้ผงถ่านจากกะลามะพร้าว ซึ่งมีคุณสมบัติที่ติดไฟได้ง่าย อยู่ได้นาน และให้ค่าความร้อนสูง [4] มีค่าความร้อนถึง 7,760 แคลอรีต่อกรัม (แห้ง) [5] มาเป็น

ส่วนประกอบหลักผสมกับวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ได้แก่ ขานอ้อยและใบเตย ซึ่งมีมากในชุมชนก่อนอัดให้เป็นแท่งเชื้อเพลิงในอัตราส่วนที่แตกต่างกันออกไป

### วิธีการวิจัย

**ขั้นตอนการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของถ่านกะลามะพร้าวผสมใบเตย และถ่านกะลามะพร้าวผสมขานอ้อยอัดแท่ง**

นำกะลามะพร้าว ใบเตยและขานอ้อย ตากแดด เผากะลามะพร้าวจนเป็นถ่าน นำถ่านกะลามะพร้าว ใบเตยและขานอ้อย เข้าเครื่องบด ผสมผงถ่านกะลามะพร้าวและผงใบเตย ตามอัตราส่วนดังนี้ อัตราส่วนน้ำหนักถ่านกะลามะพร้าวต่อใบเตย 9:1 8:2 7:3 6:4 และ 5:5 โดยใช้แ่งมันสำปะหลังเป็นตัวประสาน นำผงถ่านกะลามะพร้าวผสมกับผงขานอ้อย ตามอัตราส่วนดังนี้ อัตราส่วนน้ำหนักถ่านกะลามะพร้าวต่อขานอ้อย 9:1 8:2 7:3 6:4 และ 5:5 โดยใช้แ่งมันสำปะหลังเป็นตัวประสาน นำส่วนผสมที่ได้เข้าเครื่องอัดแท่งแบบใช้แรงคน (ภาพที่ 1) โดยใช้แรงงานจากคนเดิมในการอัดแท่งทุกครั้ง เพื่อให้เป็นถ่านอัดแท่งที่มีความหนาแน่นเท่ากันและนำถ่านที่ได้ขนาดความยาว 12 เซนติเมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร ไปตากให้แห้ง นำถ่านที่ได้มาวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี

**วิเคราะห์คุณสมบัติด้านกายภาพและเคมีของถ่านกะลามะพร้าวผสมใบเตย และถ่านกะลามะพร้าวผสมขานอ้อยอัดแท่ง**

ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านอัดแท่งโดยวิเคราะห์ความชื้น (% Moisture) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D3173 วิเคราะห์ปริมาณเถ้า (% Ash) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D3174 วิเคราะห์การหาปริมาณสารระเหย (% Volatile Matter) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D3175 วิเคราะห์การหาปริมาณคาร์บอนคงตัว (% Fixed Carbon) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D3172 และวิเคราะห์การหาค่าความร้อน (% Heating Value) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D5865

### ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

**ผลการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของถ่านกะลามะพร้าวผสมใบเตย และถ่านกะลามะพร้าวผสมขานอ้อยอัดแท่ง**

ถ่านอัดแท่งจากกะลามะพร้าวผสมขานอ้อยและถ่านอัดแท่งจากกะลามะพร้าวผสมใบเตยที่อัตราส่วน 9:1 8:2 7:3 6:4 และ 5:5 เมื่อทำการอัดแท่งด้วยเครื่องอัดแท่งแบบใช้แรงคน พบว่าถ่านอัดแท่งสามารถขึ้นรูปเป็นแท่งได้ดี (ภาพที่ 2) เมื่อวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของถ่านอัดแท่ง ได้แก่ ความชื้น สารระเหย เถ้า คาร์บอนคงตัว และค่าพลังงานความร้อนของถ่านอัดแท่ง ผลการทดลองพบว่าถ่านอัดแท่งจากกะลามะพร้าวผสมขานอ้อยมีปริมาณความชื้นอยู่ในช่วง 0.04-0.1 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณสารระเหยอยู่ในช่วง 1.53-2.40 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณเถ้าอยู่ในช่วง 8.27-12.46 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนคงตัวอยู่ในช่วง 85.47-89.31 เปอร์เซ็นต์ และค่าพลังงานความร้อนอยู่ในช่วง 4,710.80 - 5,173.58 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม (ตารางที่ 1) จากข้อมูลดังกล่าวจะเห็นได้ว่า ถ่านอัดแท่งจากกะลามะพร้าวผสมขานอ้อยทุกอัตราส่วนมีปริมาณความชื้น สารระเหย เถ้า และคาร์บอนคงตัว เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ( ) กล่าวคือมีปริมาณความชื้นต่ำกว่า 8 เปอร์เซ็นต์ ถ่านอัดแท่งที่มีปริมาณความชื้นต่ำจะมีความเหมาะสมในการใช้เป็นเชื้อเพลิง เชื้อเพลิงที่ได้มีค่าพลังงานความร้อนสูง [6,7] ปริมาณเถ้าต่ำกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ หากถ่านอัดแท่งมีปริมาณเถ้ามากเกินไปจะก่อให้เกิดปัญหาในการเผาไหม้และการกำจัดเถ้า [6] ปริมาณสารระเหยต่ำกว่า 25 เปอร์เซ็นต์ ถ่านอัดแท่งที่มีปริมาณสารระเหยต่ำเมื่อนำไปเผาไหม้จะมีปริมาณควันไฟน้อย ทำให้ไม่ระคายเคืองตา [8] ปริมาณคาร์บอนคงตัวไม่ต่ำกว่า 75 เปอร์เซ็นต์ ถ่านอัดแท่งที่มีคาร์บอนคงตัวสูงจะส่งผลให้เชื้อเพลิงมีคุณภาพดี ส่วนค่าพลังงานความร้อนของถ่านอัดแท่งจากกะลามะพร้าวผสมขานอ้อยที่มีค่าเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน

(มากกว่า 5000 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม) มีเพียงอัตราส่วนเดียวคืออัตราส่วน 9:1 ซึ่งมีค่าความร้อนเท่ากับ 5,173.58 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ดังนั้นอัตราส่วนของถ่านอัดแท่งจากกะลามะพร้าวผสมขานอ้อยที่เหมาะสมในการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านเชื้อเพลิงคือ อัตราส่วน 9:1



ภาพที่ 1 เครื่องอัดแท่งแบบใช้แรงคน



ภาพที่ 2 ถ่านอัดแท่งจากกะลามะพร้าวผสมใบเตยและขานอ้อย

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของถ่านกะลามะพร้าวผสมขานอ้อย

อัตราส่วน (ถ่าน กะลามะพร้าว:ขาน อ้อย)	ค่าความร้อน (Kcal/kg)	ความชื้น (%)	สารระเหย (%)	เถ้า (%)	คาร์บอนคงตัว (%)
9:1	5,173.58	0.10	2.40	11.06	86.30
8:2	4,882.15	0.04	1.53	12.40	86.01
7:3	4,881.26	0.05	2.34	12.46	85.47
6:4	4,975.44	0.05	2.36	10.13	87.43
5:5	4,710.80	0.07	2.34	8.27	89.31

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของถ่านอัดแท่งจากกะลามะพร้าวผสมไบโอดีป พบว่าถ่านอัดแท่งมีปริมาณความชื้นอยู่ในช่วง 0.06-0.08 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณสารระเหยอยู่ในช่วง 2.51-2.81 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณเถ้าอยู่ในช่วง 3.33-6.52 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนคงตัวอยู่ในช่วง 90.57-93.72 เปอร์เซ็นต์ และค่าพลังงานความร้อนอยู่ในช่วง 5,176.76- 5,692.67 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม (ตารางที่ 2) จากผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านอัดแท่งดังกล่าว จะเห็นได้ว่าถ่านอัดแท่งจากกะลามะพร้าวผสมไบโอดีปในทุกอัตราส่วนมีคุณสมบัติเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน กำหนด เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านอัดแท่งจากกะลามะพร้าวผสมขานอ้อยและถ่านอัดแท่งจากกะลามะพร้าวผสมไบโอดีป จะเห็นได้ว่าถ่านอัดแท่งจากกะลามะพร้าวมีแนวโน้มของสารระเหยที่มากกว่าเนื่องจากองค์ประกอบของไบโอดีปมีสารระเหยซึ่งให้กลิ่นหอม [9] ถ่านอัดแท่งจากกะลามะพร้าวผสมไบโอดีปมีปริมาณเถ้าน้อยกว่าถ่านอัดแท่งจากกะลามะพร้าวผสมขานอ้อย ส่งผลให้คาร์บอนคงตัวและค่าพลังงานความร้อนของถ่านอัดแท่งจากกะลามะพร้าวผสมไบโอดีปมีค่าสูงกว่า ถ่านอัดแท่งจากกะลามะพร้าวผสมขานอ้อย เมื่อเปรียบเทียบค่าพลังงานความร้อนที่ได้กับงานวิจัยอื่นพบว่า ค่าพลังงานความร้อนของถ่านอัดแท่งจากงานวิจัยนี้มีค่าต่ำกว่างานวิจัยของสำนักวิจัยและพัฒนาการป่าไม้ แต่มีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของศิริชัย (2560) [10] และศตพล (2558) [11] ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากกะลามะพร้าวที่มีสายพันธุ์และแหล่งที่มาต่างกันจะให้ค่าพลังงานความร้อนต่างกัน

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของถ่านกะลามะพร้าวผสมไบโอดีป

อัตราส่วน(ถ่าน กะลามะพร้าว: ไบโอดีป)	ค่าความร้อน (Kcal/kg)	ความชื้น (%)	สารระเหย (%)	เถ้า (%)	คาร์บอนคงตัว (%)
9:1	5,665.70	0.08	2.81	6.52	90.57
8:2	5,692.67	0.06	2.51	3.70	93.72
7:3	5,228.21	0.06	2.80	4.04	93.07
6:4	5,313.67	0.08	2.75	3.33	93.82
5:5	5,176.76	0.08	2.61	4.41	92.88

ตารางที่ 3 พลังงานความร้อนของถ่านอัดแท่งจากกะลามะพร้าว

วัตถุดิบ	อัตราส่วนของ ผสม	ค่าความร้อน (Kcal/kg)	อ้างอิง
กะลามะพร้าวผสมกากมะพร้าว กะลามะพร้าว	6 : 4 -	~6,000 7,760	[10]
กะลามะพร้าวผสมฟางข้าว	9 : 1	6,186.06	[11]
กะลามะพร้าวผสมไบโอดีป	8 : 2	5,692.67	งานวิจัยนี้
กะลามะพร้าวผสมขานอ้อย	9 : 1	5,173.58	งานวิจัยนี้

### สรุปผลการวิจัย

จากการผลิตและศึกษาคุณสมบัติของถ่านอัดแท่งจากกะลามะพร้าวผสมขานอ้อยและไบโอดีปในอัตราส่วน 9:1 8:2 7:3 6:4 และ 5:5 โดยน้ำหนัก เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนถ่านอัดแท่งแล้วจะเห็นได้ว่า ถ่านอัดแท่งที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานได้แก่ ถ่านอัดแท่งจากกะลามะพร้าวผสมขานอ้อยอัตราส่วน 9:1 ถ่านอัดแท่งจากกะลามะพร้าวผสมไบโอดีปในอัตราส่วน 9:1 8:2 7:3 6:4 และ 5:5 จึงสรุปได้ว่าขานอ้อยและไบโอดีปเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่สามารถนำมาผสมกับกะลามะพร้าวแล้วผลิตเป็นถ่านอัดแท่งใช้สำหรับหุงต้มในครัวเรือนได้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] เอ็กซอนโมบิล. (2555). 2012 แนวโน้มพลังงานโลก-ภาพรวมถึงปี 2040. แปลและเรียบเรียงโดยฝ่ายกิจกรรมองค์กรและรัฐกิจสัมพันธ์ บริษัท เอสโซ่ (ประเทศไทย) จำกัด มหาชน
- [2] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน 2561 . สถานการณ์พลังงานไทยเดือน ม.ค.-ก.ค. ปี 2561. สืบค้นเมื่อ 5 ตุลาคม 2561 จาก [www.eppo.go.th/images/Energy-Statistics/energyinformation/Energy.../00All.pptx](http://www.eppo.go.th/images/Energy-Statistics/energyinformation/Energy.../00All.pptx).
- [3] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2558). แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558-2579. กรุงเทพฯ: กระทรวงพลังงาน
- [4] บุญรัก ลาตสูงเนิน และ ฐนสพล ปรีชาญาณ. (มปก.). การผลิตถ่านกะลามะพร้าวและน้ำส้มควันไม้จากเตาเผาถ่านแบบเคลื่อนที่ได้. สืบค้นเมื่อ 27 กันยายน 2561 จาก [arit.mcr.u.ac.th/ab\\_abstrac/fileUpload/0088.pdf](http://arit.mcr.u.ac.th/ab_abstrac/fileUpload/0088.pdf).
- [5] สำนักวิจัยและพัฒนาการป่าไม้. (2561). คู่มือค่าความร้อนของไม้และถ่าน. สืบค้นเมื่อวันที่ 5 ตุลาคม 2561 จาก <http://forprod.forest.go.th/forprod/woodenergy/PDF/public/7.%20%E0%B8%84%E0%B8%B9%E0%B9%88%E0%B8%A1%E0%B8%B7%E0%B8%AD%E0%B8%84%E0%B9%88%E0%B8%B2%E0%B8%84%E0%B8%A7%E0%B8%B2%E0%B8%A1%E0%B8%A3%E0%B9%89%E0%B8%AD%E0%B8%99%E0%B8%82%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B9%84%E0%B8%A1%E0%B9%89%E0%B9%81%E0%B8%A5%E0%B8%B0%E0%B8%96%E0%B9%88%E0%B8%B2%E0%B8%99.pdf>.
- [6] ลดาวัลย์ วัฒนะจีระ ณรงค์ศักดิ์ ลาปิ่น วิภาวดี ชัชวาล และอานันท์ ธัญญเจริญ. (2559). การพัฒนาก้อนเชื้อเพลิงชีวมวลจากเศษฟางข้าวผสมเศษลำไยเหลือทิ้ง. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. 39 (2), 239-255.
- [7] ชลดา ไร่ขาม ยุทธพันธ์ คำวัน ปภากร จันทะวงศ์ฤทธิ และศิริทรัพย์ แก้วม่วง. (2560). ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนกากน้ำตาลที่มีผลต่อคุณสมบัติของเชื้อเพลิงอัดแท่งที่มาจากเปลือกมังคุดและเปลือกเงาะ. วารสารวิชาการ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์. 9 (10), 79-90.
- [8] อติเทพ เดชมา เขมนิจจารีย์ สาริพันธ์ ประนิตดา เพ็งจิว และ ศตพล มุ่งค้ำกลาง. (2559). “การศึกษาค่าพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากเปลือกยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด”. ใน งานประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยราชภัฏกลุ่มศรีอยุธยา ครั้งที่ 7, วันที่ 7-8 กรกฎาคม 2559.
- [9] นิศานันท์ ตามกาล ณีฐฐา เลหากุลจิตต์ และอรพิน เกิดชูชื่น. (2558). คุณสมบัติทางกายภาพและสารหอมระเหยของใบเตยหอม (*Pandanus amaryllifolius* Roxb.) สกัดด้วยน้ำ. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร. 46 (3), 145-148.
- [10] ศิริชัย ต่อสกุล กุณฑล ทองศรี และจงบกล สุภารัตน์. (2560). “การพัฒนาถ่านอัดแท่งจากกากมะพร้าวเป็นพลังงานทดแทน”, ใน การประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติ มหาวิทยาลัยศรีปทุม ครั้งที่ 12 ประจำปี 2560. หน้า 1381-1386.
- [11] ศตพล มุ่งค้ำกลาง. (2559). การหาประสิทธิภาพของแท่งเชื้อเพลิงจากถ่านกะลามะพร้าวและวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในการประกอบอาหาร. วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม : เทปสตรี I-TECH. 11(1), 59-67.

## การผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากผักตบชวาร่วมกับขุยมะพร้าว

### Pellet Production from Water Hyacinth Combined with Coconut Dust

จิราภรณ์ แก้วเดียว<sup>1</sup> จุฑารัตน์ นวนทัต<sup>2</sup> และศิรินุช จินดารักษ์<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ตำบลหนองหาร อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290

<sup>2</sup> ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ตำบลท่าโพธิ์ อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000

#### บทคัดย่อ

การศึกษาขั้นตอนการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด และศึกษาคุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากผักตบชวาร่วมกับขุยมะพร้าว โดยการกำหนดค่าความชื้นที่จะทำการอัดเม็ดคือ 30 %wb ที่อัตราส่วน 5:5 6:4 7:3 8:2 และ 9:1 จากการศึกษาพบว่า เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากผักตบชวาร่วมกับขุยมะพร้าวที่อัตราส่วน 5:5 นั้นมีค่าความร้อนที่ตีที่สุดคือ 3,955.79 kcal/kg โดยมีปริมาณคาร์บอนคงตัว ปริมาณสารระเหย ปริมาณเถ้า และความชื้นสุดท้ายหลังจากการอัดเม็ด ได้แก่ 9.05 %, 74.33 %, 7.94 % และ 8.68 % ตามลำดับ และมีสมบัติทางกายภาพของเม็ดเชื้อเพลิงดังนี้มีควมยาว 33.27 mm เส้นผ่านศูนย์กลาง 6.02 mm และมีความหนาแน่นรวม 606.63 kg/m<sup>3</sup>

**คำสำคัญ:** เชื้อเพลิงอัดเม็ด ผักตบชวา ขุยมะพร้าว

\*Corresponding author: Tel.: 083-2081982. E-mail address: forever\_nidnoi@hotmail.co.th

#### บทนำ

ประเทศไทยกำลังประสบกับปัญหาการแพร่กระจายของผักตบชวาที่มีอยู่เป็นจำนวนมาก โดยการแพร่กระจายของผักตบชวาในแหล่งน้ำมักก่อให้เกิดความเสียหายต่อแม่น้ำ คูคลอง และระบบนิเวศในประเทศไทย [1,2] ผักตบชวามีการสะสมมวลชีวภาพได้สูงถึง 20 กรัมน้ำหนักแห้งต่อตารางเมตรต่อวัน โดยผักตบชวาสามารถเจริญเติบโต และขยายพันธุ์ให้มวลชีวภาพสูงถึง 40,580 กรัมน้ำหนักสดต่อตารางเมตร ในระยะเวลา 1 ปี ผักตบชวาสามารถเจริญเติบโตให้มวลชีวภาพสูงมากประมาณ 717 ตันน้ำหนักแห้งต่อไร่ จึงเป็นปัญหาต่อการสัญจรทางน้ำ และสถานะแวดล้อมทำให้ทวีความรุนแรงจนเป็นปัญหาระดับประเทศ ซึ่งในปัจจุบันรัฐบาลต้องสูญเสียงบประมาณสำหรับการกำจัดผักตบชวาเป็นอย่างมากแต่ก็ยังไม่สามารถกำจัดให้หมดสิ้น ในประเทศไทยผักตบชวาจะเจริญเติบโตสูงสุดในช่วงเดือนเมษายน และมีการเจริญเติบโตต่ำสุดในช่วงเดือนมกราคม

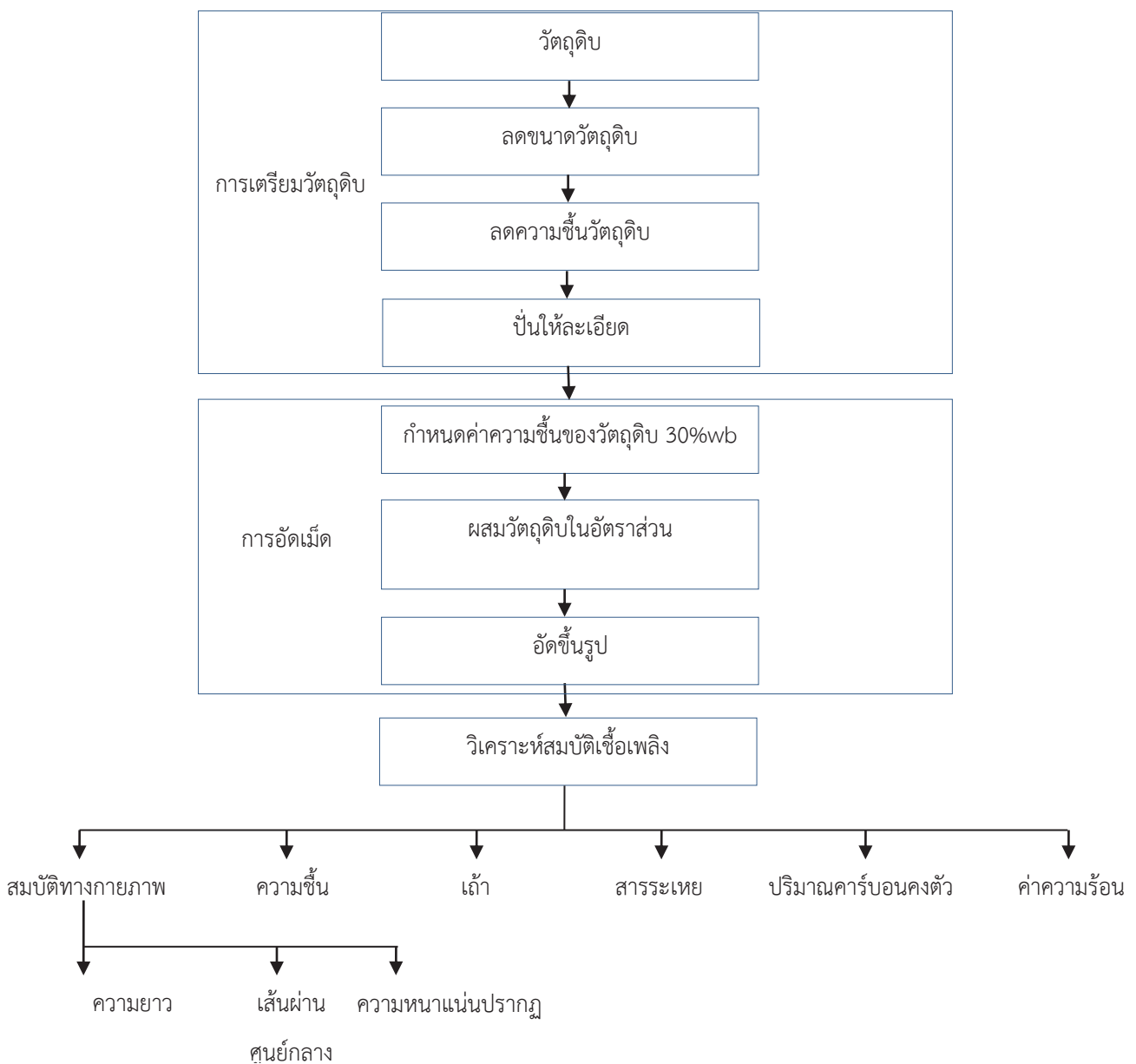
การนำผักตบชวามาใช้ประโยชน์เป็นอีกแนวทางหนึ่งสำหรับการจัดสรรปริมาณผักตบชวาที่มีอยู่ให้มีปริมาณที่ลดน้อยลง อาทิเช่น ใช้ทำหัตถกรรมเครื่องจักรสาน ผลิตปุ๋ยชีวภาพ ใช้เป็นอาหารสัตว์ เป็นต้น นอกจากนี้การนำผักตบชวามาผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดเป็นแนวทางหนึ่งที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับผักตบชวา อีกทั้งยังถือได้ว่าเป็นแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงที่สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนพลังงานฟอสซิล และลดต้นทุนด้านพลังงานได้ สำหรับโรงไฟฟ้าชีวมวลอัดเม็ดมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยให้ความร้อนกับหม้อต้มไอน้ำ และใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม เช่น เครื่องปั้นดินเผา เป็นต้น [3]

จากปัญหาข้างต้นสำหรับงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาขั้นตอนการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด และศึกษาคุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากผักตบชวา เนื่องจากผักตบชวามีค่าพลังงานความร้อนที่ต่ำคือ 3,010 kcal/kg ทางผู้วิจัยจึงได้ศึกษาการนำขุยมะพร้าวมาเป็นส่วนผสมร่วมกับผักตบชวา โดยขุยมะพร้าวเป็น

ส่วนประกอบของเปลือกมะพร้าวหลังจากการนำเปลือกมะพร้าวไปป่นเพื่อนำเส้นใยไปใช้ประโยชน์จะมีขุยมะพร้าวที่ยังไม่มีการนำไปใช้ประโยชน์เกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก และมีค่าความร้อนสูงคือ 4,380 kcal/kg [4] ดังนั้นขุยมะพร้าวจึงเป็นวัสดุที่มีความเหมาะสมสำหรับการนำมาเป็นส่วนผสมร่วมกับผักตบชวาเพื่อเป็นการเพิ่มค่าความร้อนให้กับเชื้อเพลิงอัดเม็ดให้มีค่าความร้อน 3,500 kcal/kg ส่งผลให้ค่าความร้อนผ่านมาตรฐานคุณสมบัติทางเชื้อเพลิง [4]

### วิธีการวิจัย

การศึกษากระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากผักตบชวาร่วมกับขุยมะพร้าว ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากผักตบชวาที่มีการกำหนดความชื้นของส่วนผสม คือ 30 %wb โดยวิธีการทดลองสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักๆ คือ ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ ขั้นตอนการอัดเม็ดเชื้อเพลิง และขั้นตอนการวิเคราะห์คุณสมบัติของเชื้อเพลิง โดยจะทำการพิจารณาถึง สมบัติทางกายภาพ ปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณเถ้า ค่าความร้อน และค่าคาร์บอนคงตัว ซึ่งขั้นตอนการดำเนินการทดลองสามารถได้ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แผนภาพขั้นตอนการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด

## 1. การเตรียมวัตถุดิบ

ในงานวิจัยนี้จะทำการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากผักตบชวาร่วมกับขุยมะพร้าว โดยความชื้นเริ่มต้นที่เหมาะสม และมีผลต่อการอัดเม็ดคือ 25-30 %wb [5] ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ความชื้นเริ่มต้น 30 %wb ทำการผสมผักตบชวาที่ปั่นละเอียดร่วมกับขุยมะพร้าวที่อัตราส่วน 5:5 6:4 7:3 8:2 และ 9:1 โดยน้ำหนักเพื่อให้ผักตบชวาเป็นวัตถุดิบหลัก

## 2. ขั้นตอนการอัดเม็ดเชื้อเพลิง

ป้อนตัวอย่างวัตถุดิบที่เราเตรียมไว้เข้าเครื่องอัดเม็ดเชื้อเพลิง (Pellet machine) ที่ใช้เป็นเครื่องอัดเม็ดชนิดอัดร้อน รุ่น MK1229 กำลังไฟฟ้าที่ใช้ 11 kW และมีกำลังการในการผลิต 200-250 kg/hr. ก่อนที่จะอัดเม็ดเชื้อเพลิงต้องมีการอุ่นเครื่องให้ร้อนพร้อมใช้งานที่อุณหภูมิประมาณ 70 °C โดยการใส่ข้าวผสมกับน้ำมันป้อนเข้าสู่เครื่องอัดเม็ดอย่างต่อเนื่อง เมื่ออุณหภูมิของเครื่องอัดเม็ดถึง 70 °C ก็นำวัตถุดิบที่เตรียมไว้ป้อนใส่เข้าไปในเครื่องอัดเม็ดเชื้อเพลิง ทำวนซ้ำประมาณ 2-3 ครั้ง จนกระทั่งได้ความยาวของเม็ดเชื้อเพลิงที่ต้องการในระหว่างการอัดเม็ดเชื้อเพลิงจะต้องมีการตรวจสอบอุณหภูมิของเครื่องอัดเม็ดให้ไม่เกิน 75 °C ในกรณีที่อุณหภูมิเครื่องอัดเม็ดเกิน 70 °C ให้หยุดการป้อนเชื้อเพลิงเพื่อพักเครื่องให้อุณหภูมิของเครื่องอัดเม็ดพร้อมใช้งานคือ 70 °C



ภาพที่ 2 เครื่องอัดเม็ดเชื้อเพลิง

## 3. ขั้นตอนการวิเคราะห์สมบัติความเป็นเชื้อเพลิง

เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ได้นำไปวิเคราะห์หาสมบัติทางด้านเชื้อเพลิง โดยวิเคราะห์หาปริมาณต่างๆ ดังนี้

**3.1 ปริมาณความชื้น (Moisture content)** โดยใช้มาตรฐาน ASTM D-3173 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น โดยอบที่อุณหภูมิ 103 °C เป็นเวลา 72 hr. จากนั้นคำนวณหาค่าปริมาณความชื้นด้วยสมการ (1)

$$M_w = \frac{w_1 - w_2}{w_1} \times 100\% \quad (1)$$

เมื่อ  $M_w$  = ร้อยละของปริมาณความชื้น  
 $w_1$  = น้ำหนักของเชื้อเพลิงก่อนอบ (g)  
 $w_2$  = น้ำหนักของเชื้อเพลิงหลังอบ (g)

**3.2 ปริมาณเถ้า (Ash content)** โดยใช้มาตรฐาน ASTM-D3174 การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า โดยเผาที่อุณหภูมิ 500 °C แล้วค่อยๆ เพิ่มอุณหภูมิเป็น 700-750 °C เป็นระยะเวลา 2 hr. ชั่งน้ำหนักสุดท้าย แล้วคำนวณหาปริมาณเถ้าด้วยสมการ (2)

$$\text{Ash} = \frac{w_4}{w_3} \times 100\% \quad (2)$$

เมื่อ Ash = ร้อยละของปริมาณเถ้า  
 $w_3$  = น้ำหนักของเชื้อเพลิงก่อนเผา (g)  
 $w_4$  = น้ำหนักของเชื้อเพลิงหลังเผา (g)



3.3 ปริมาณสารระเหย (Volatile matter) โดยใช้มาตรฐาน ASTM D-3175:ISO 562 การวิเคราะห์ปริมาณสารระเหย โดยนำมาเผาที่อุณหภูมิ 950 °C เป็นระยะเวลา 7 min แล้วทำการคำนวณหาปริมาณสารระเหยด้วยสมการ(3)

$$V_m = \left[ \frac{w_3 - w_4}{w_3} \times 100 \right] - M \quad (3)$$

เมื่อ

$V_m$  = ร้อยละของปริมาณสารระเหย

$M_w$  = ร้อยละปริมาณความชื้น

$w_3$  = น้ำหนักของเชื้อเพลิงก่อนเผา (g)

$w_4$  = น้ำหนักของเชื้อเพลิงหลังเผา (g)

3.4 ค่าความร้อน (Heating value) การวิเคราะห์ค่าความร้อนด้วย Bomb Calorimeter เป็นการเผาไหม้แบบสมบูรณ์โดยสถาบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

3.5 ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) โดยใช้มาตรฐาน ASTM D3172 ปริมาณคาร์บอนคงตัวเป็นส่วนที่เสถียรของโครงสร้างชีวมวล ซึ่งส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วยธาตุคาร์บอน ปริมาณคาร์บอนคงตัวคำนวณได้จากผลต่างดังสมการต่อไปนี้

$$\text{ร้อยละคาร์บอนคงตัว} = 100 - [(\%M_w) + (\%V_m) + (\%Ash)] \quad (4)$$

เมื่อ

$M_w$  = ร้อยละของปริมาณความชื้น

$V_m$  = ร้อยละของปริมาณสารระเหย

Ash = ร้อยละของปริมาณเถ้า

3.6 ค่าความหนาแน่นปรากฏ (Bulk density) ความหนาแน่นรวมทำได้โดยการเตรียมภาชนะที่ทราบปริมาตรที่แน่นอน บรรจุวัสดุลงไปจนเต็มแล้วนำไปชั่ง คำนวณได้จากน้ำหนักของวัสดุต่อหน่วยปริมาตรจากสมการดังต่อไปนี้

$$\rho_{\text{รวม}} = \frac{m}{v} \quad (5)$$

เมื่อ

$\rho_{\text{รวม}}$  = ความหนาแน่นรวมของวัสดุ (kg/m<sup>3</sup>)

$m$  = มวลรวมของวัสดุ (kg)

$v$  = ปริมาตรรวมของวัสดุ (m<sup>3</sup>)

### ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของการอัดเม็ดเชื้อเพลิงของผักตบชวาผสมกับขุยมะพร้าว ซึ่งในการศึกษานี้จะกำหนดให้ความชื้นของเม็ดเชื้อเพลิง 30 %wb โดยอัตราส่วนผสมของผักตบชวาต่อขุยมะพร้าวคือ 5:5 6:4 7:3 8:2 และ 9:1 จากนั้นนำเม็ดเชื้อเพลิงที่ได้ไปทดสอบหาค่าความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย และค่าความร้อนของเม็ดเชื้อเพลิง ซึ่งทำการวิเคราะห์ด้วยมาตรฐาน American Society for Testing and Materials (3172-3175) โดยในการวิเคราะห์ผลการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน

1. วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของเชื้อเพลิงอัดเม็ด ได้แก่ ความยาว เส้นผ่านศูนย์กลางของเชื้อเพลิง และความหนาแน่นปรากฏ
2. วิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของเชื้อเพลิงอัดเม็ด ได้แก่ ค่าความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว และค่าความร้อนของเม็ดเชื้อเพลิง

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากผักตบชวาผสมร่วมกับขุยมะพร้าว สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1 ดังต่อไปนี้

**ตารางที่ 1** คุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากผักตบชวาผสมร่วมกับขุยมะพร้าว

คุณสมบัติของเชื้อเพลิง	ค่ามาตรฐานเชื้อเพลิง ชีวมวลอัดเม็ดสำหรับ ประเทศไทย	อัตราส่วนโดยน้ำหนัก				
		5:5	6:4	7:3	8:2	9:1
ความยาวของเชื้อเพลิง (mm)	31.50 – 40.00 mm	33.27	32.34	34.14	33.48	32.91
เส้นผ่านศูนย์กลางของเชื้อเพลิง (mm)	6 – 12 mm	6.02	6.02	6.01	6.01	6.01
ความหนาแน่นปรากฏ (Bluk density, kg/m <sup>3</sup> )	ไม่น้อยกว่า 600 kg/m <sup>3</sup>	606.63	617.80	749.90	822.60	882.00
ปริมาณความชื้น (Moisture content, %)	น้อยกว่าร้อยละ 10 ของ น้ำหนัก	8.68	9.99	11.42	11.63	11.85
ปริมาณเถ้า (Ash content, %)	น้อยกว่าร้อยละ 20 ของ น้ำหนัก	7.94	9.12	8.04	9.01	12.71
ปริมาณสารระเหย (Volatile matter, %)	-	74.33	73.95	73.24	78.33	73.76
ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon, %)	-	9.05	6.94	7.30	1.03	1.68
ค่าความร้อน (Heating value, kcal/kg)	ไม่น้อยกว่า 3,500 kcal/kg	3,955.79	3,681.58	3,688.55	3,661.61	3,678.22

จากการวิเคราะห์คุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากผักตบชวาผสมร่วมกับขุยมะพร้าวที่อัตราส่วน 5:5 6:4 7:3 8:2 และ 9:1 ดังตารางที่ 1 ข้างต้น เมื่อทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงกับค่ามาตรฐานเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดสำหรับประเทศไทยพบว่า ในทุกๆ อัตราส่วนมีค่าความยาว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเชื้อเพลิง ความหนาแน่นปรากฏ ปริมาณเถ้า และค่าความร้อนที่ผ่านค่ามาตรฐานเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด เมื่อพิจารณาถึงค่าความชื้นหลังจากอัดเม็ดเชื้อเพลิงของผักตบชวาผสมร่วมกับขุยมะพร้าวแล้ว พบว่าในอัตราส่วนที่ 5:5 และ 6:4 นั้นผ่านค่ามาตรฐาน คือไม่เกินร้อยละ 10 ของน้ำหนัก ซึ่งมีปริมาณความชื้นร้อยละ 8.68 และ 9.99 %wb ตามลำดับ ซึ่งในอัตราส่วนที่เหลือคือ 7:3 8:2 และ 9:1 จะเห็นได้ว่าค่าความชื้นนั้นเกินกว่าร้อยละ 10 มาตรฐานเปียก เพื่อให้ผ่านค่ามาตรฐานสามารถนำมาอบแห้งหรือตากกลางแจ้งเพื่อลดความชื้นได้ เมื่อพิจารณาถึงการใช้ประโยชน์ให้มากที่สุดพบว่า ที่อัตราส่วน 5:5 มีค่าความร้อนสูงที่สุดคือ 3,955.79 kcal/kg มีความเหมาะสมสำหรับการนำมาผลิตเป็นเม็ดเชื้อเพลิงที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ในภาคอุตสาหกรรมต่อไป

### สรุปผลการวิจัย

การศึกษาขั้นตอนการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ด และศึกษาคุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงของเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากผักตบชวาผสมร่วมกับขุยมะพร้าว โดยการกำหนดค่าความชื้นที่จะทำการอัดเม็ดคือ 30 %wb ที่อัตราส่วน 5:5 6:4 7:3 8:2 และ 9:1 จากการวิเคราะห์คุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงเมื่อทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติความเป็นเชื้อเพลิงกับค่ามาตรฐานเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดสำหรับประเทศไทยพบว่า ในทุกๆ อัตราส่วนมีค่าความยาว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเชื้อเพลิง ความหนาแน่นรวม ปริมาณเถ้า และค่าความร้อนที่ผ่านค่ามาตรฐานเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด เมื่อพิจารณา

ถึงค่าความชื้นหลังจากอัดเม็ดเม็ดเชื้อเพลิงของผักตบชวาพร้อมกับขุยมะพร้าวแล้วพบว่า ในอัตราส่วนที่ 5:5 และ 6:4 นั้น ผ่านค่ามาตรฐานคือ ไม่เกินร้อยละ 10 ของน้ำหนัก

จากการศึกษาความเหมาะสมสำหรับการนำมาผลิตเป็นเม็ดเชื้อเพลิงพบว่า เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากผักตบชวา ร่วมกับขุยมะพร้าวที่อัตราส่วน 5:5 นั้นมีค่าความร้อนสูงที่สุดคือ 3,955.79 kcal/kg โดยมีปริมาณคาร์บอนคงตัว ปริมาณสารระเหย ปริมาณเถ้า และค่าความชื้นสุดท้ายหลังจากการอัดเม็ด ได้แก่ 9.05 %, 74.33 %, 7.94 % และ 8.68 % ตามลำดับ และมีสมบัติทางกายภาพของเม็ดเชื้อเพลิงดังนี้ มีความยาว 33.27 mm เส้นผ่านศูนย์กลาง 6.02 mm และ มีความหนาแน่นรวม 606.63 kg/m<sup>3</sup> ซึ่งสามารถเตรียมวัตถุดิบที่ใช้ในการอัดเม็ดคือ

1. ผักตบชวาสดที่ความชื้นเริ่มต้น 87.39 %wb น้ำหนัก 3,621.59 kg แล้วตากแห้งให้เหลือความชื้น 30 %wb จะมีน้ำหนัก 651.89 kg

2. ขุยมะพร้าวที่น้ำหนัก 508.15 kg ที่ความชื้นเริ่มต้น 10.28 %wb และเตรียมน้ำปริมาณ 143.74 kg เพื่อ ผสมกับขุยมะพร้าว เพื่อให้ได้ความชื้นเริ่มต้น 30 %wb จากนั้นนำวัตถุดิบทั้งสองเข้าสู่กระบวนการอัดเม็ดเชื้อเพลิงต่อไป

### กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาค้นคว้าด้วยตนเองในครั้งนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจากภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ให้การสนับสนุนการทำวิจัยในครั้งนี้

### เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานเลขาธิการผู้แทนราษฎร ISBN 2287-0520. (ม.ป.ป.). เชื้อเพลิงอัดแท่งผลผลิตจากผักตบชวาขยะวัชพืช. เอกสารวิชาการอิเล็กทรอนิกส์, ดาวโหลดเอกสารออนไลน์จาก <http://www.parliament.go.th/library>.
- [2] สุพรรณณ ยั่งยืน และ จักรมาส เลหาวิช. (2552). การหาสัดส่วนที่เหมาะสมต่อเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งแบบรีดเย็น. วารสารมหาวิทยาลัยมหาสารคาม. ปีที่ 32 ฉบับที่ 5 กันยายน-ตุลาคม 653-658.
- [3] นิพนธ์ ต้นไพบูลย์กุล และธรรพร บุศย์น้ำเพชร. (2559). ลักษณะการขึ้นรูปและตัวประสานที่แตกต่างกันต่อสมบัติของเชื้อเพลิงที่ผลิตจากผักตบชวา. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, ปีที่ 3 ฉบับที่ 6 เดือน พฤศจิกายน-ธันวาคม 2559.
- [4] นาดยา เจริญสุข และธนภฤต ภัทรเกษวิทย์. (2558). การออกแบบระบบหมุนเวียนความร้อนที่ส่งผลต่อปฏิกิริยาเผาไหม้ในกระบวนการรีดักชันสำหรับเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบไหลลง. สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะ วิศวกรรมศาสตร์ และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรวิทยาดอนเมือง.
- [5] ณัฐจิรา อินมนต์, ศิริสุข จินดารักษ์ และบริสุทธิ์ จันทร์วงศ์ไพศาล. (2560). การผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากผักตบชวา. การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 13, 31 พฤษภาคม – 2 มิถุนายน 2560 ณ โรงแรมดิเอ็มเพรส เชียงใหม่.
- [6] สังเวศ เสวกวิหारी. (2555). ศักยภาพด้านพลังงานของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากเปลือกมังคุด. รายงานวิจัย ฉบับสมบูรณ์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.
- [7] สำรวม โกศลานันท์. (2553). การศึกษาอัตราส่วนผสมของเชื้อเพลิงจากกากไขมันและกากของกากไขมันกับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร. ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [8] ศุภชัย ธรรมศิริทรัพย์และผู้ช่วยศาสตราจารย์ภูมิพัฒน์ ภาชนะ. (2558). การศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากหญ้าเนเปียร์. ชลบุรี: คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา.

- [9] อามานี สามะ นูร์ซีลา และนู้ และโรสลีนา จาราแวง. (2560). การพัฒนาถ่านอัดแท่งจากผักตบชวา. คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา. ราชภัฏวิชาการ 2560 : รายงานการนำเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ ด้านวิทยาศาสตร์ และสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช, หน้า 187-196.

ผลของอาหารเสริมต่อการผลิตไบโอไฮโดรเจนจากกล้วยหอมโดยจุลินทรีย์ในน้ำเสียจากถังปฏิกรณ์  
Effect of Endo-nutrients on Bio-hydrogen Production from Cavendish Banana  
by Microbial Consortium in Bioreactor Effluent

โสภี พันอินทร์<sup>1</sup> ชยานนท์ สวัสดิ์ดิโนนาท<sup>1</sup> พสุ ปรามอกข์ชน<sup>1,2</sup> และหทัยทิพย์ สิ้นธญา<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> สาขาวิชาพลังงานและสิ่งแวดล้อมชุมชน วิทยาลัยพัฒนาเศรษฐกิจและเทคโนโลยีชุมชนแห่งเอเชีย มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ 50180

<sup>2</sup> ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ 50180

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการเติมอาหารเสริมในการผลิตไบโอไฮโดรเจนโดยการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่เตรียมโดยการหมักจากกล้วยหอมกับจุลินทรีย์จากถังปฏิกรณ์ ทำการทดลองโดยการผสมน้ำเสียจากถังปฏิกรณ์กับกล้วยหอมปั่นในอัตราส่วน 1:1 (w/w) โดยปรับค่าความเป็นกรดต่างเริ่มต้นให้มีค่าเท่ากับ 5.5 นำไปทำปฏิกิริยาในเครื่องเขย่าสารควบคุมอุณหภูมิ 35 °C ที่ความเร็วรอบ 150 rpm เป็นเวลา 103 ชั่วโมง จากผลการทดลองแสดงว่ากระบวนการหมักที่ไม่มีการเติมอาหารเสริมสามารถผลิตก๊าซสะสมได้น้อยกว่ากระบวนการหมักที่มีการเติมอาหารเสริม แต่กระบวนการหมักที่ไม่มีการเติมอาหารเสริมสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้มากกว่า โดยพบว่ามีค่าเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนสูงสุดเท่ากับ 34.83% (47.39 mlH<sub>2</sub>) และเทียบเท่าค่าความร้อนสูง (HHV) เท่ากับ 0.56 kJ และพบว่าหลังจากกระบวนการผลิตไฮโดรเจนมีประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี (COD<sub>removed</sub>) เท่ากับ 19.64%

**คำสำคัญ:** กล้วยหอม อาหารเสริม น้ำเสียจากถังปฏิกรณ์ การย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน

\*Corresponding author: Tel.: 093-2840993. E-mail address: hathaithip\_nin@cmru.ac.th

## บทนำ

ในปัจจุบันการศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนเป็นที่สนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากก๊าซไฮโดรเจนเป็นพลังงานสะอาด ให้พลังงานที่สูงประมาณ 33.3-39.4 kWh/kg โดยเมื่อเทียบกับพลังงานเชื้อเพลิงอื่น เช่น การขนส่งด้วยเครื่องยนต์เบนซิน พบว่าเครื่องยนต์ที่ใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจนสามารถทำงานได้ประสิทธิภาพสูงสุด 65% ในขณะที่เครื่องยนต์ที่ขับเคลื่อนด้วยเชื้อเพลิงเบนซินสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดเพียงแค่ 25% เท่านั้น [1] ก๊าซไฮโดรเจนเป็นพลังงานทางเลือกที่สามารถใช้ทดแทนพลังงานฟอสซิล โดยกระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ กระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยใช้ไฟฟ้าเคมี (Electrochemical processes) กระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยใช้อุณหภูมิสูง (Thermal processes) กระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยกระบวนการหมักแบบใช้แสง (Photo fermentation) และกระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยวิธีทางชีวภาพแบบไม่ใช้แสง (Dark fermentation) ซึ่งกระบวนการแบบไม่ใช้แสงนี้เป็นกระบวนการที่นิยมเป็นอย่างมากในการผลิตก๊าซไฮโดรเจน เนื่องจากเป็นวิธีการผลิตที่ไม่ซับซ้อน ใช้ต้นทุนต่ำ สามารถควบคุมระบบการหมักได้ง่าย [2] วิธีการหมักทางชีวภาพแบบไม่ใช้แสงเกิดขึ้นจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไม่ใช้ออกซิเจน โดยเป็นการทำงานของจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งทำให้เกิดกรดอินทรีย์และก๊าซไฮโดรเจนขึ้น [3-4] ระบบการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนมีประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีของเสียอินทรีย์ โดยปริมาณค่าซีโอดีของวัตถุดิบมีผลต่ออัตราการผลิตก๊าซไปโอไฮโดรเจน นอกจากนี้ยังสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้จากพืชประเภทชีวมวล เช่น เศษเหลือใช้ทางการเกษตร กากอุตสาหกรรม และน้ำเสีย โดยประเทศไทยในปี พ.ศ. 2560 มีปัญหาเรื่องกลิ่นเหม็นล้นตลาด ซึ่งทางรัฐบาลช่วยเหลือรับซื้อในจำนวนจำกัดทำให้ราคาตกต่ำ [5] ส่งผลให้มีจำนวนกล้วยหอมตกค้างรอการกำจัดทิ้งเป็นจำนวนมาก บางส่วนถูกนำไปเป็นอาหารสัตว์ ทั้งนี้ กล้วยเป็นของเสียเหลือทิ้งที่มีน้ำตาลและเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตไฮโดรเจนโดยวิธีการทางชีวภาพ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากกล้วยหอม โดยทำการเปรียบเทียบความเหมาะสมระหว่างน้ำเสียจากถังปฏิกรณ์ที่เติมอาหารเสริมและไม่เติมอาหารเสริม ซึ่งหัวเชื้อจากน้ำเสียเป็นแหล่งของจุลินทรีย์กลุ่มผสมที่สามารถผลิตไฮโดรเจนได้มีผลต่อกิจกรรมของเอนไซม์ไฮโดรจีเนสและวิธีการผลิตไฮโดรเจนโดยจุลินทรีย์ [6] งานวิจัยนี้ นอกจากจะได้พลังงานไฮโดรเจนที่เป็นพลังงานสะอาดแล้วยังช่วยลดปัญหาจากขยะอินทรีย์ที่มาจากกล้วยหอมได้อีกทางหนึ่งด้วย โดยสามารถนำมาต่อยอดในประเทศไทยเพื่อให้สอดคล้องกับแผนพัฒนาพลังงานทดแทน: AEDP 2015 ซึ่งเป็นการพัฒนาเพื่อผลิตพลังงานทดแทนที่เหมาะสม โดยพิจารณาถึงประโยชน์ทางด้านสังคม และสิ่งแวดล้อมของชุมชน [7]

## วิธีการวิจัย

การวิจัยนี้มีการเตรียมวัตถุดิบ การเตรียมหัวเชื้อจุลินทรีย์ การเตรียมอาหารเสริม การทดลองเพื่อผลิตก๊าซไฮโดรเจนและการวิเคราะห์ข้อมูล ดังต่อไปนี้

### วัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัย

การเตรียมกล้วยหอมโดยทำการหั่นเป็นชิ้นเล็กประมาณ 2-3 cm แล้วนำไปปั่นให้ละเอียดผสมกับน้ำกลั่นในอัตราส่วน กล้วยหอม 400 g ต่อ น้ำ 400 g ทำการปั่นด้วยเครื่องปั่นเป็นเวลา 30 sec โดยกล้วยหอมที่ผ่านการปั่นใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตไปโอไฮโดรเจน ทำการเก็บตัวอย่างสารละลายของเหลวของกล้วยหอมที่ผ่านการปรับสภาพเพื่อนำมาวิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลทั้งหมดด้วยวิธี Phenol-sulfuric acid [8] และส่วนที่เหลือได้จัดเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 °C เพื่อป้องกันการเน่าเสีย

### การเตรียมหัวเชื้อ

หัวเชื้อจุลินทรีย์ คือ น้ำเสียจากถังปฏิกรณ์ (Waste from bioreactor) ซึ่งเป็นน้ำทิ้งขาออกจากกระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากระบบถังปฏิกรณ์ CSTR โดยน้ำเสียจากถังปฏิกรณ์ไม่ต้องผ่านการปรับสภาพหัวเชื้อ เนื่องจากเป็น

เชื้อที่ผลิตก๊าซไฮโดรเจน จากนั้นนำหัวเชื้อมาทำการปรับความเป็นกรดต่างเป็น 5.5 เติมก๊าซอาร์กอนเพื่อไล่ออกซิเจนออกจากหัวเชื้อและปิดฝาขวดดูแรน เพื่อทำการเลี้ยงในสภาพไร้อากาศและเป็นกระตุ้นเชื้อจุลินทรีย์โดยนำไปไว้ที่อุณหภูมิ 35 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ก่อนนำไปใช้เป็นหัวเชื้อในการหมักร่วมกับกล้วยหอมเพื่อผลิตไบโอไฮโดรเจน

#### การเตรียมอาหารเสริม

เตรียมอาหารเสริมสำหรับการผลิตไบโอไฮโดรเจนโดยชั่ง  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$  5240 mg,  $\text{K}_2\text{PO}_4$  125 mg,  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  100 mg,  $\text{MnSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  15 mg,  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  25 mg,  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  5 mg,  $\text{CoCl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  0.125 mg, และ  $\text{NaHCO}_3$  6720 mg ละลายในน้ำกลั่น DI ผสมให้เข้ากันแล้วปรับปริมาตรเป็น 1 L โดยมีการเติมอาหารเสริมจากปริมาตรในการหมักจริง 70 mL ต่อ 0.07 mL ของอาหารเสริม [9]

#### การผลิตไบโอไฮโดรเจนจากกล้วยหอม

งานวิจัยนี้ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อประเมินศักยภาพทางการผลิตไบโอไฮโดรเจนจากกล้วยหอมร่วมกับหัวเชื้อจุลินทรีย์น้ำเสียถึงปฏิกรณ์ โดยการทำการทดลองแบบแบทช์ในขวดแก้วขนาด 235 ml โดยเติมกล้วย (35 g) และหัวเชื้อ (35 g) ในอัตราส่วน 1:1 (w/w) และเติมอาหารเสริมในอัตราส่วน 1 mL/L โดยมีการหมัก 2 แบบ เพื่อทำการเปรียบเทียบ ได้แก่ (กล้วยหอม + น้ำเสียจากถังปฏิกรณ์) และ (กล้วยหอม + น้ำเสียจากถังปฏิกรณ์ + อาหารเสริม) ทำการปรับ pH เริ่มต้นให้มีค่าเท่ากับ 5.5 ด้วย 1N HCl หรือ 1N NaOH ทำการไล่อากาศภายในขวดออกด้วยการเติมก๊าซอาร์กอนเข้าไปแทนที่ขวดละ 5 นาที เพื่อให้ขวดอยู่ในสภาวะไร้ออกซิเจน ปิดฝาขวดทดลองด้วยจุกยางแล้วปิดด้วยอะลูมิเนียมแคปนำไปตั้งไว้ที่อุณหภูมิ 35 °C ในเครื่อง Orbital shaker incubator ความเร็วในการกวน 150 rpm เป็นเวลา 103 ชั่วโมง ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ติดตามผลการทดลอง โดยวัดปริมาตรของก๊าซทั้งหมดที่เกิดขึ้น โดยใช้หลอดชนิดยาแล้ววิเคราะห์หาความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นด้วยเครื่อง Gas chromatography (GC) นำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณไฮโดรเจนสะสมโดยใช้สมการ Mass balance equation รายงานผลแสดงในหน่วย mL/L [10]

#### วิธีการวิเคราะห์

การวิเคราะห์องค์ประกอบแก๊ส โดยแก๊สโครมาโตกราฟี ชนิดตัวตรวจวัดค่าการนำความร้อน (GC-TCD) โดยอุณหภูมิการฉีดสาร ตัวตรวจวัด และคอลัมน์ เท่ากับ 40 °C, 40 °C และ  $28 \pm 1$  °C ตามลำดับ ก๊าซอาร์กอนถูกใช้เป็นก๊าซพาที่ความดัน 2 bar ส่วนสำหรับปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) ถูกกำหนดโดยผลิตภัณฑ์สด โดยนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ส่วนของแข็งที่ระเหยได้ (VS) ได้จากการหาน้ำหนักตัวอย่างแห้งที่อุณหภูมิ 550 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง สำหรับการวิเคราะห์ตัวอย่างการผลิตก๊าซไบโอไฮโดรเจนประกอบด้วย ปริมาณออกซิเจนที่สารเคมีใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (Chemical oxygen demand, COD) ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (Total sugar) และวัดค่าความเป็นกรด - ด่าง ก่อน-หลังการผลิตไบโอไฮโดรเจน นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาค่า pH, TS, VS, COD ของวัตถุดิบในขวดหมัก %COD<sub>removed</sub> ดังสมการที่ 1 [11]

$$\% \text{COD}_{\text{removal}} = \frac{\text{COD}_i - \text{COD}_f}{\text{COD}_i} \times 100 \quad (1)$$

โดยที่  $\text{COD}_i$  และ  $\text{COD}_f$  คือค่าซีโอดีก่อนและหลังการผลิตก๊าซไบโอไฮโดรเจนตามลำดับ

### ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

ก่อนการทำการหมักก๊าซไฮโดรเจนโดยวิธีทางชีวภาพแบบไม่ใช้แสง ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบคุณสมบัติของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตก๊าซไบโอไฮโดรเจน ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยผลการทดสอบ พบว่า ค่าผลของซีโอดีทั้งหมด (T-COD) ของหัวเชื้อน้ำเสียจากถังปฏิกรณ์มีค่า 33.7 g/L จากการเลือกใช้น้ำเสียจากถังปฏิกรณ์กับกล้วยหอมเป็นวัตถุดิบหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน นอกจากนี้ยัง พบว่า กล้วยหอมมีปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (Total sugar) มีค่าเท่ากับ 16.8 g/L มีค่าสูงเมื่อเทียบกับการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากเปลือกสับปะรดที่มีปริมาณน้ำตาลทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 9.8 g/L [12] โดย

ค่าพีเอช (pH) ของกล้วยหอมและน้ำเสียจากถังปฏิกรณ์มีค่าเท่ากับ 4.16 และ 4.88 ตามลำดับ ซึ่งค่าพีเอชวัตถุดิบค่อนข้างต่ำในการผลิตก๊าซไบโอไฮโดรเจน จึงจำเป็นต้องปรับค่าพีเอชเริ่มต้นให้มีค่าเท่ากับ 5.5 เนื่องจากเหมาะสมในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Karen T. ที่สามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงสุดเมื่อใช้ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 5.5 [13]

ตารางที่ 1 การทดสอบคุณสมบัติของวัตถุดิบที่ใช้ในการหมักก๊าซไบโอไฮโดรเจน

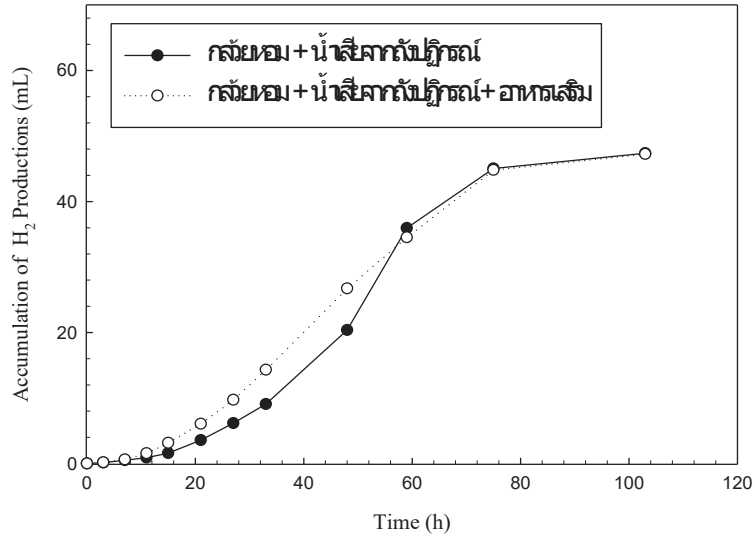
วัตถุดิบ	pH	T-COD (g/L)	Total sugar (g/L)	NH <sub>3</sub> - N (mg/L)	TS (g/L)	VS (g/L)
กล้วยหอม	4.16	48.21	16.8	0.34	12.53	33.4
น้ำเสียจากถังปฏิกรณ์	4.88	33.7	25.0	283.67	1.45	2.02

ตารางที่ 2 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าซีโอดี ความเข้มข้นของน้ำตาลทั้งหมด ก่อนและหลังการผลิตก๊าซไบโอไฮโดรเจน ผลการทดลองพบว่า หลังการผลิตก๊าซไบโอไฮโดรเจน ปริมาณน้ำตาลลดลง เนื่องจากในระหว่างการหมักจุลินทรีย์ได้ใช้น้ำตาลที่มีอยู่ในกล้วยหอมมาใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งเป็นกระบวนการในขั้นตอนของอะซิโตเจเนซิส (Acetogenesis) คือ การเปลี่ยนกรดไขมันระเหยง่ายให้เป็นกรดอะซิติก หรือ เกลืออะซิเตต โดยการทำงานของอะซิโตจิเนกแบคทีเรีย (Acetogenic bacteria) ที่มาจากหัวเชื้อน้ำเสียจากถังปฏิกรณ์ เป็นปฏิกิริยาสำคัญในการไม่ให้เกิดการสะสมของกรดไขมันระเหย และก๊าซไฮโดรเจน ในปริมาณมากพอที่สามารถยับยั้งปฏิกิริยาขั้นต่อไป เมื่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสิ้นสุด จะทำให้ปริมาณน้ำตาลในระบบลดลง และจากความสัมพันธ์ดังกล่าว แสดงให้เห็นได้ว่า จุลินทรีย์ใช้น้ำตาลเพิ่มมากขึ้นเพื่อนำไปผลิตก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น นอกจากนี้พบว่า น้ำตาลบางส่วนไม่ได้ถูกนำไปสร้างก๊าซไฮโดรเจนเพียงอย่างเดียว แต่ถูกนำไปสร้างเป็นผลิตภัณฑ์อื่น ซึ่งน้ำเสียเป็นแหล่งของจุลินทรีย์กลุ่มผสมที่สามารถผลิตไฮโดรเจนได้ นอกจากนี้น้ำเสียยังมีจำพวกจุลินทรีย์ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยความร้อน ซึ่งสามารถเปลี่ยนจุลินทรีย์ที่มีสารอินทรีย์ให้เป็นก๊าซไฮโดรเจนได้ ทั้งนี้ยังพบว่าจุลินทรีย์กลุ่ม *Clostridium* sp. ในจุลินทรีย์กลุ่มนี้มีความสามารถในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ [14]

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ค่าซีโอดี และความเข้มข้นของน้ำตาลทั้งหมด ก่อนและหลังการผลิตก๊าซไบโอไฮโดรเจน

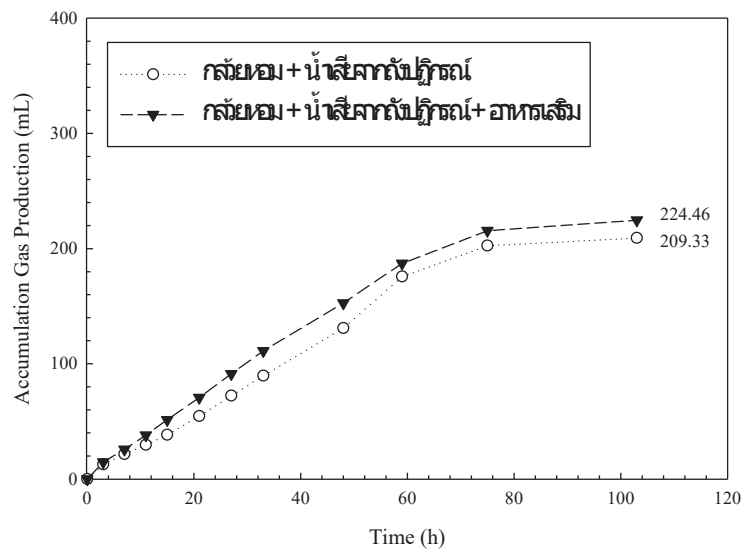
ตัวอย่าง	COD <sub>i</sub> (mg/L)	COD <sub>f</sub> (mg/L)	COD <sub>removed</sub> (%)	ปริมาณน้ำตาล ก่อนการหมัก (g/L)	ปริมาณน้ำตาล หลังการหมัก (g/L)
กล้วยหอม+น้ำเสียจากถังปฏิกรณ์	48.29	38.81	19.64	8.07	1.15
กล้วยหอม+น้ำเสียจากถังปฏิกรณ์+อาหารเสริม	40.83	33.73	17.40	8.03	1.18



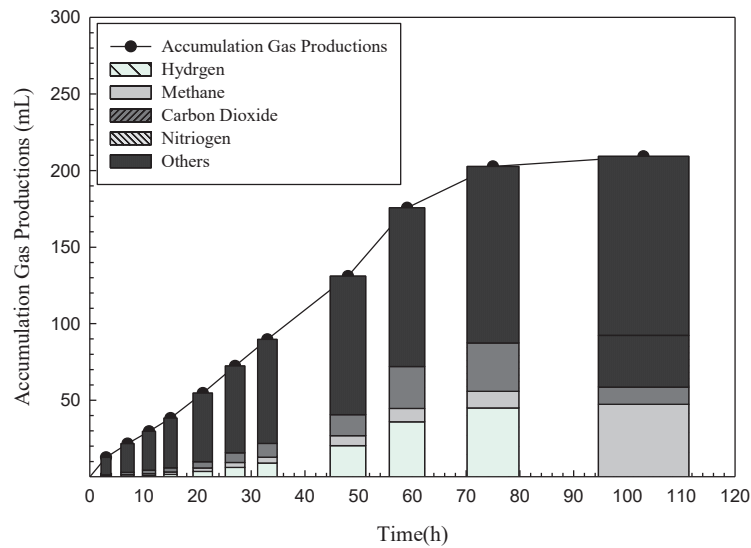


ภาพที่ 1 ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนจากการหมักสลัดกับน้ำเสียจากถังปฏิกิริยาที่มีการเติมอาหารเสริม และไม่เติมอาหารเสริม

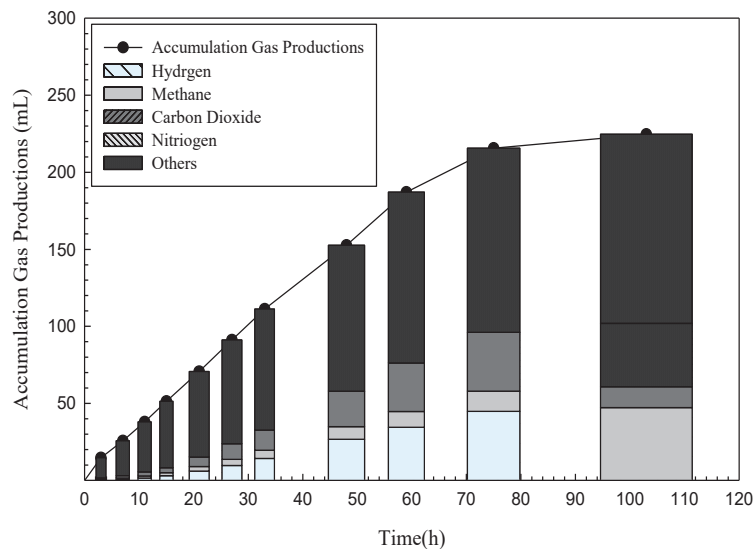
จากการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากสลัดหมักร่วมกับน้ำเสียจากถังปฏิกิริยา พบว่า ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจากการหมักแบบไม่เติมอาหารเสริมมีค่าใกล้เคียงกันกับการหมักแบบเติมอาหารเสริม โดยมีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 47.39 และ 47.26 H<sub>2</sub>ml ตามลำดับ ดังแสดงภาพที่ 1 การหมักสลัดหมักกับน้ำเสีย ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี และความเข้มข้นของน้ำตาลทั้งหมดในการทดลองที่ไม่มีอาหารเสริมสูงกว่ามีอาหารเสริม ซึ่งมีผลต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจน โดยการหมักแบบไม่มีการเติมอาหารเสริมและแบบมีการเติมอาหารเสริมมีค่าความเข้มข้นของปริมาณก๊าซไฮโดรเจน เท่ากับ 34.83 กับ 29.82% ตามลำดับ และค่า COD<sub>removed</sub> มีค่าเท่ากับ 19.64 กับ 17.40% ตามลำดับ โดยการเติมอาหารเสริมส่งผลให้ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดมีค่าต่ำกว่าแบบไม่เติมอาหารเสริมจาก 8.07 ลดลงเป็น 8.03 g/L ดังแสดงตารางที่ 2 ทั้งนี้การผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากสลัดหมักโดยใช้น้ำเสียจากถังปฏิกิริยาที่มีปริมาณซีโอดีเริ่มต้นมีค่าน้อย และเป็นระบบการหมักแบบแบคทีเรีย ทำให้ความสามารถผลิตก๊าซที่เกิดจากการหมักใช้ระยะเวลาสั้นอยู่ที่ 103 ชั่วโมง แต่ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนมีค่าคงที่



ภาพที่ 2 ปริมาณก๊าซสะสมไปโอไฮโดรเจนของการหมักสลัดหมักร่วมกับน้ำเสียจากถังปฏิกิริยา



ก (1)



ก (2)

ภาพที่ 3 ปริมาณก๊าซสะสม และองค์ประกอบแก๊สที่เกิดจากกระบวนการหมักกล้วยหอม

ก (1) ไม่มี การเติมอาหารเสริม

ก (2) เติมอาหารเสริม

จากการศึกษาปริมาณก๊าซสะสม และองค์ประกอบแก๊สที่เกิดจากกระบวนการหมักกล้วยหอม โดยทำการเปรียบเทียบผลของการเติมอาหารเสริมกับไม่มี การเติมอาหารเสริม พบว่า การหมักโดยการเติมอาหารเสริมและการหมักโดยไม่เติมอาหารเสริมสามารถผลิตก๊าซสะสมเท่ากับ 224.46 และ 209.33 ml ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 2 ซึ่งแบบการไม่มีเติมอาหารเสริมทำให้ผลิตก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซไนโตรเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซอื่นๆ มีค่าเท่ากับ 47.39 11.28 33.67 และ 116.99 ml ตามลำดับ ส่วนแบบเติมอาหารเสริม มีเท่ากับ 47.26 13.60 41.04 และ 122.77 ml ตามลำดับ ซึ่งอาหารเสริมที่เติมไม่สามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงขึ้น แต่ถูกนำไปสร้างเป็นผลิตภัณฑ์อื่นร่วมด้วย เช่น กรดไขมันระเหยง่าย แอลกอฮอล์ เป็นต้น ดังแสดงในภาพที่ 3 โดยการหมักโดยไม่เติมอาหารเสริม และเติมอาหารเสริม มีค่าความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจน 34.83% (47.39 H<sub>2</sub>ml) และ 29.82% (47.26 H<sub>2</sub>ml) ตามลำดับ และเทียบเท่า

ค่าความร้อนสูง (HHV) เท่ากับ 0.56 kJ อ้างอิงจากประสิทธิภาพการแปลงพลังงานคำนวณจากความหนาแน่นและค่าความร้อนของก๊าซ  $H_2$  ได้แก่  $0.09 \text{ kg/m}^3$  และ  $143 \text{ kJ/g}$  ตามลำดับ [15]

### สรุปผลการวิจัย

จากการหมักกล้วยหอมร่วมกับหัวเชื้อน้ำเสียจากถังปฏิกรณ์เพื่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจน พบว่าการเติมอาหารเสริมสามารถช่วยเพิ่มการผลิตก๊าซสะสม แต่สำหรับการผลิตไบโอไฮโดรเจนนั้น การหมักแบบไม่มีการเติมอาหารเสริมและแบบมีการเติมอาหารเสริมมีค่าความเข้มข้นของปริมาณก๊าซไฮโดรเจน เท่ากับ 34.83 กับ 29.82% ตามลำดับ และ ค่า  $COD_{removed}$  มีค่าเท่ากับ 19.64 กับ 17.40% ตามลำดับ ซึ่งจากเติมอาหารเสริมทำให้สร้างกรดไขมันระเหยง่ายขึ้น โดยค่ากรดไขมันระเหยที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความเป็นกรดต่างลดลงแล้วมีผลยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ผลิตไฮโดรเจน เปลี่ยนเป็นสร้างก๊าซอื่น ๆ แทนการสร้างก๊าซไฮโดรเจน ทั้งนี้การเติมอาหารเสริมไม่มีผลต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจน เพิ่มขึ้นเมื่อใช้หัวเชื้อเป็นน้ำเสียจากถังปฏิกรณ์ สุดท้ายนี้วัตถุดิบที่ได้จากกล้วยหอมมีความเป็นไปได้และมีศักยภาพใน การผลิตก๊าซไบโอไฮโดรเจน โดยการทดลองเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการศึกษา ซึ่งจำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อเพิ่ม การผลิตก๊าซไฮโดรเจน ให้ได้ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนเพียงพอต่อการใช้ประโยชน์ และสามารถประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย และวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรได้ดี จึงมีความเป็นไปได้ที่จะพัฒนาสู่ระดับปฏิบัติการและระดับอุตสาหกรรม

### เอกสารอ้างอิง

- [1] P. P. Edwards, V. L. Kuznetsov, W. I. David, and N. P. Brandon, (2008). Hydrogen and fuel cells: towards a sustainable energy future. *Energy policy*. 36, 4356-4362.
- [2] D. Das and T. N. Veziroglu, (2008). Advances in biological hydrogen production processes. *International journal of hydrogen energy*. 33, 6046-6057.
- [3] A. Ghimire, L. Frunzo, F. Pirozzi, E. Trably, R. Escudie, P. N. Lens, *et al.*, (2015). A review on dark fermentative biohydrogen production from organic biomass: process parameters and use of by-products. *Applied Energy*. 144, 73-95.
- [4] S. R. B. Baldursson, (2006). BioHydrogen: bioprospecting: thermophilic hydrogen producing anaerobes in Icelandic hot-springs.
- [5] ไพศาล กะกุลพิมพ์, (2560) การจัดการผลิตและการตลาดกล้วยหอมทองของสมาชิกกลุ่มวิสาหกิจชุมชนกล้วยหอมทองวังหลวง อำเภอเฝ้าไร่ จังหวัดหนองคาย. *Journal of Graduate School of Commerce-Burapha Review*. 12, 45-56.
- [6] S. V. Mohan, V. L. Babu, and P. Sarma, (2007). Anaerobic biohydrogen production from dairy wastewater treatment in sequencing batch reactor (AnSBR): effect of organic loading rate. *Enzyme and Microbial Technology*. 41, 506-515.
- [7] โฆษิตกิตติ วงศ์ดวงฤดี, (2017). พลังงานคลื่นในประเทศไทย: นโยบาย และความเหมาะสมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า. *Srinakharinwirot Engineering Journal*. 11.
- [8] M. R. Rover, P. A. Johnston, B. P. Lamsal, and R. C. Brown. (2013). Total water-soluble sugars quantification in bio-oil using the phenol-sulfuric acid assay. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 104, 194-201.

- [9] C. Y. Lin and C. H. Lay, (2005). A nutrient formulation for fermentative hydrogen production using anaerobic sewage sludge microflora. *International Journal of Hydrogen Energy*. 30, 285-292.
- [10] Y. Zhang and J. Shen, (2006). Effect of temperature and iron concentration on the growth and hydrogen production of mixed bacteria. *International Journal of Hydrogen Energy*. 31, 441-446.
- [11] M. Hassan, W. Ding, J. Bi, E. Mehryar, Z. A. A. Talha, and H. Huang, (2016). Methane enhancement through oxidative cleavage and alkali solubilization pre-treatments for corn stover with anaerobic activated sludge. *Bioresource technology*. 200, 405-412.
- [12] เหมนิจจารีย์ สารีพันธ์, (2017). ผลของค่าความเป็นกรด-ด่าง เริ่มต้นที่มีต่อการผลิตไฮโดรเจนจากเปลือกสับปะรดโดยกลุ่มจุลินทรีย์ในมูลวัว. *Research Journal Phranakhon Rajabhat: Science and Technology*. 12, 13-23.
- [13] K. Trchounian and A. Trchounian, (2013). *Escherichia coli* hydrogenase 4 (hyf) and hydrogenase 2(hyb) contribution in H<sub>2</sub> production during mixed carbon (glucose and glycerol) fermentation at pH 7.5 and pH 5.5, *International Journal of Hydrogen Energy*.38, 3921-3929.
- [14] D. Girija, K. Deepa, F. Xavier, I. Antony, and P. Shidhi, (2013). Analysis of cow dung microbiota-a metagenomic approach.
- [15] G. Peixoto, J. L. R. Pantoja-Filho, J. A. B. Agnelli, M. Barboza, and M. Zaiat, (2012). Hydrogen and methane production, energy recovery, and organic matter removal from effluents in a two-stage fermentative process, *Applied biochemistry and biotechnology*. 168, 651-671.

การปลดปล่อยเสียงและแผนที่เส้นเสียงเท่าของฟาร์มกังหันลมขนาด  
กำลังการผลิตติดตั้ง 80 เมกกะวัตต์  
Noise Emission and Noise Contour Map of Wind Farm  
80 MW installed capacity

สมพล ชิวมงคลกานต์<sup>1\*</sup> ชนะ จันทร์ฉ่ำ<sup>2</sup> และจอมภพ แววศ์ศักดิ์<sup>3</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ พัทลุง 93210

<sup>2</sup>ศูนย์วิจัยพลังงานและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ พัทลุง 93210

<sup>3</sup>สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ พัทลุง 93210

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการปลดปล่อยเสียงของฟาร์มกังหันลมขนาดกำลังการผลิตติดตั้ง 80 เมกกะวัตต์ในพื้นที่อำเภอชัยใหญ่ของจังหวัดชัยภูมิโดยอาศัยการจำลองแบบเสียงที่ปลดปล่อยออกมาจากกังหันลมขนาดใหญ่และแบบจำลองการแผ่กระจายของเสียงภายใต้การลดทอนเนื่องจากอิทธิพลของสภาพแวดล้อมเชิงพื้นที่เพื่อทำนายระดับความดังของเสียงที่ระดับพื้นดินและจัดทำแผนที่เสียงเท่า (Noise Contour Map) ราย 6 เดือนตั้งแต่มกราคม-มิถุนายน 2560 และทำการตรวจวัดเสียงดังรบกวนระหว่างวันที่ 22 - 25 มิถุนายน 2560 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตลอดระยะเวลา 3 วันต่อเนื่องพบว่า การปลดปล่อยเสียงจากแหล่งกำเนิดของเครื่องกังหันลมผลิตไฟฟ้า ขนาดกำลังการผลิตติดตั้ง 80 เมกกะวัตต์ มีการปลดปล่อยเสียงดังออกมาบริเวณโคนเสาของกังหันลม (Tower) (WTG 01- WTG 32) มีค่าอยู่ระหว่าง 47.71 - 48.80 dB(A) แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าผลการทำงานของกังหันลมในพื้นที่ของโรงไฟฟ้า ไม่มีผลกระทบต่อและก่อให้เกิดมลพิษทางเสียง โดยใช้ข้อมูลลมจากเสาวัดลมที่ครอบคลุมระยะเวลา 6 เดือน พบว่าระดับความดังของเสียงที่ระดับพื้นดิน (Ground Level) ที่ระยะไม่เกิน 100 เมตร มีค่าอยู่ในช่วง 46-50 dB(A) นอกจากนี้ เมื่อระยะห่างจากแหล่งกำเนิดเสียงกังหันลมเพิ่มมากขึ้น (100-500 เมตร) ระดับความดังของเสียงมีค่าอยู่ในช่วง 41-46 dB(A) โดยที่ระยะห่างจากต้นกังหันลมเกินกว่า 1 กิโลเมตร ระดับความดังของเสียงจะมีค่าลดลงน้อยกว่า 40 dB(A) ซึ่งอาจจะได้รับผลกระทบจากเสียงเนื่องจากเสียงแวดล้อม (Ambient Noise) อื่นๆ

**คำสำคัญ:** มลพิษทางเสียง ฟาร์มกังหันลม การจำลองแบบ

\*Corresponding author: Tel.: 093-5803501. E-mailaddress: dung\_ding19@hotmail.com

### บทนำ

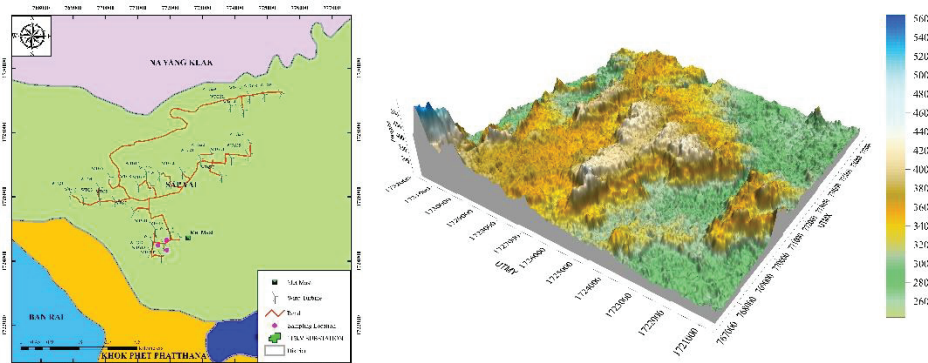
การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมในรูปแบบของฟาร์มกังหันลมขนาดใหญ่กำลังได้รับความนิยมทั่วโลก [1] และในประเทศไทย ปัจจุบันมีการติดตั้งฟาร์มกังหันลมขนาดใหญ่ทั้งในรูปแบบของผู้ผลิตไฟฟ้าย่อย (Very Small Power Producer: VSPP) ที่มีกำลังการผลิตติดตั้งไม่เกิน 10 เมกกะวัตต์ และรูปแบบของผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็ก (Small Power Producer: SPP) ที่มีกำลังการผลิตติดตั้งไม่เกิน 90 เมกกะวัตต์ โดยการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าอาจจะส่งผลกระทบต่อทางด้านสิ่งแวดล้อม เช่น การปลดปล่อยมลพิษทางเสียง ทัศนียภาพและการมองเห็น การใช้ประโยชน์ที่ดิน และเงากระพริบ เป็นต้น แต่การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมถือเป็นแหล่งพลังงานสะอาด (Green Energy) และมีความยั่งยืนใน

ด้านพลังงานเนื่องจากเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่ไม่สิ้นสุด [2] โดยพลังงานลมเป็นแหล่งพลังงานที่มีอัตราการใช้เติบโตที่สุดในบรรดาพลังงานหมุนเวียนด้วยกันทั่วโลกการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าอาจจะส่งผลกระทบต่อทางด้านสิ่งแวดล้อมเนื่องจากการทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้าทำให้เกิดเสียงดังจากสองแหล่ง เริ่มจากระบบกลไก (Gearbox/Generator) และการหมุนของใบกังหัน [4] ประเทศไทยมีการเจริญเติบโตของฟาร์มกังหันลมที่เพิ่มขึ้นเกือบทุกภูมิภาค อาทิเช่นในภาคใต้ และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ถึงแม้ว่าการผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานลมซึ่งเป็นพลังงานทดแทนที่สะอาด มีการหมุนเวียนอยู่ตลอดเวลาโดยไม่จำกัด (Renewable Energy) ไม่มีการปล่อยก๊าซ CO<sub>2</sub> และก๊าซพิษอื่นๆ เหมือนกับการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานฟอสซิล การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมไม่มีผลกระทบต่อด้านคุณภาพอากาศที่เคยส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของประชาชนโดยรอบโรงไฟฟ้า ทำให้เกิดการยอมรับในการพัฒนาโครงการในหลายๆ พื้นที่ อย่างไรก็ตาม การดำเนินการผลิตไฟฟ้าพลังงานลมขนาดใหญ่ในลักษณะที่มีกังหันลมหลายตัวในพื้นที่เดียวกันหรือเรียกว่า “ฟาร์มกังหันลม” (Wind farm) ก็อาจส่งผลกระทบต่อทางด้านสิ่งแวดล้อมได้ โดยเฉพาะผลกระทบในช่วงการดำเนินการ ดังนั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่ผู้ตัดสินใจลงทุนจะต้องพิจารณาถึงผลกระทบดังกล่าวที่อาจเกิดขึ้นในช่วงการดำเนินการเพื่อป้องกันและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่อาจส่งผลกระทบต่อชุมชนในพื้นที่โดยรอบและชุมชนใกล้เคียงเพื่อให้เกิดการอยู่ร่วมกันได้อย่างยั่งยืน จึงต้องมีการทดสอบหรือตรวจวัดค่าเพื่อยืนยันว่าผลที่ได้นั้นไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยรอบของฟาร์มกังหันลม

## วิธีการวิจัย

### 1.พื้นที่ศึกษา

ที่ตั้งของโรงไฟฟ้าฟาร์มพลังงานลม ที่ตำบลชับใหญ่ อำเภอลำทะเมนชัย จังหวัดชัยภูมิ บนพื้นที่ประมาณ 35 ไร่ โดยแบ่งเป็นพื้นที่ติดตั้งกังหันลม 32 ไร่ และสถานีไฟฟ้าย่อย 3 ไร่ แสดงดังภาพที่ 1 โดยทำการจำทำแผนที่เสียงเท่า (Noise Contour Map) ราย 6 เดือนตั้งแต่ มกราคม-มิถุนายน 2560 และทำการติดตั้งอุปกรณ์ด้วยวัดเสียงจริงภายในฟาร์มกังหันลมขนาดกำลังการผลิตติดตั้ง 80 MW



ภาพที่ 1 พื้นที่ศึกษาของโครงการภายในขอบเขต 20x20 ตารางกิโลเมตร (km<sup>2</sup>) และลักษณะภูมิประเทศ 3 มิติบริเวณพื้นที่ศึกษาของโครงการ

### 2.การวิเคราะห์แหล่งทรัพยากรลม

ใช้การวิเคราะห์แหล่งทรัพยากรลมได้อาศัยแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในโปรแกรม WindSim แบบจำลองนี้มีความสามารถในการคำนวณการไหลแบบปั่นป่วนที่อยู่ใกล้พื้นผิวของภูมิประเทศ โดยการแก้สมการนาเวียร์-สโตกส์ ภายใต้สมมติฐานของของไหลแบบอัดตัวไม่ได้ ความปั่นป่วนจะถูกนำมาพิจารณาโดยแบบจำลองการแก้สมการ Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) และความแตกต่างของความปั่นป่วนที่นำมาใช้ในการศึกษานี้โดยใช้ค่า  $k - \epsilon$  ของค่ามาตรฐานจากรูปแบบคงที่

### 3.การวิเคราะห์แผนที่เส้นเสียง

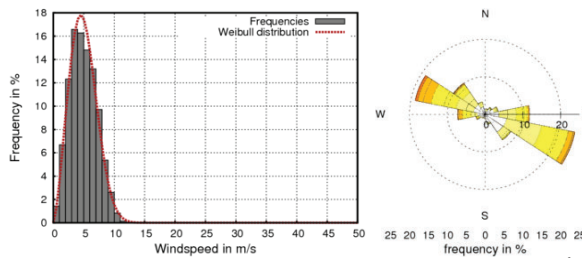
นอกจากนี้ การจัดทำแผนที่เส้นเสียงเท่าจะอาศัยแบบจำลองการดูดกลืนเสียง (NoiseAbsorption Model) จากบรรยากาศโดยรอบในพื้นที่ศึกษาของโครงการ ซึ่งอาศัยโปรแกรมสำเร็จรูปWindFarmer V.4.2.2 ร่วมกับข้อมูลนำเข้า ได้แก่ ข้อมูลคุณลักษณะการปลดปล่อยเสียงของกังหันลมที่ระดับอัตราเร็วลมต่างๆ จากผู้ผลิตกังหันลมผลิตไฟฟ้า ข้อมูลอัตราเร็วลมเชิงพื้นที่ระดับจุลภาค (ความแยกชัด 50 m) ที่ระดับความสูงศูนย์กลางส่วนหมุน (Hub Height) ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินของกรมพัฒนาที่ดิน พ.ศ. 2557 และโปรแกรมการวิเคราะห์ภูมิสารสนเทศ สำหรับการจัดทำแผนที่เส้นเสียงเท่า (Noise Contour Mapping)

### ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

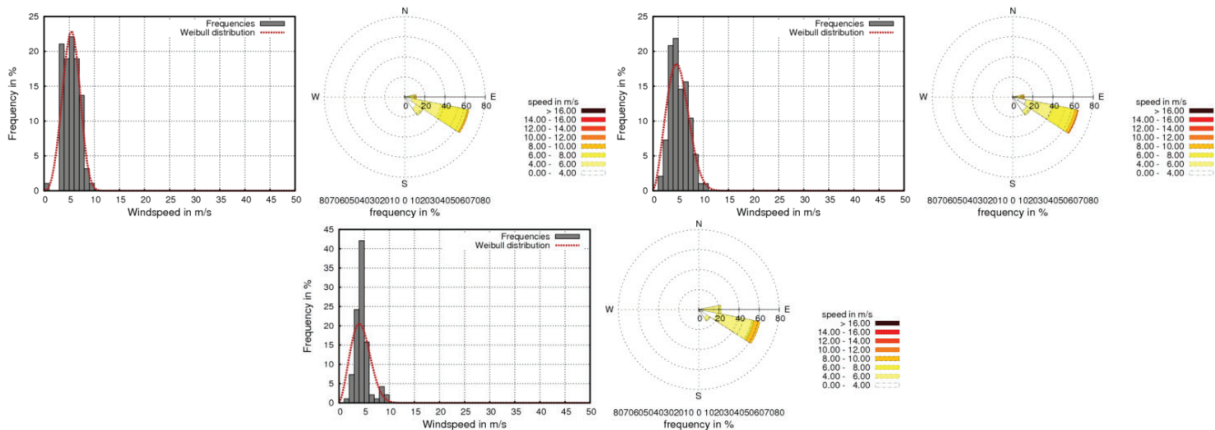
ในการวิเคราะห์การปลดปล่อยเสียงอันเนื่องมาจากการทำงานของโรงไฟฟ้าพลังงานลมในพื้นที่ศึกษาภายในขอบเขต 20x20 กิโลเมตร แสดงดังภาพที่ 1 จำเป็นต้องอาศัยข้อมูลลมภูมิอากาศลมตรวจวัดอย่างน้อย 1 ปี โดยการวิเคราะห์การแจกแจงไวบูลล์ (Weibull Distribution) และผังลม (Wind Rose) แสดงดังภาพที่ 2-3 สำหรับเป็นข้อมูลนำเข้าให้กับกรจำลองแบบการปลดปล่อยเสียง ส่วนข้อมูลที่น่ามาวิเคราะห์ราย 6 เดือน แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตำแหน่งเสาวัดลมเสมือนในพื้นที่ศึกษาของโครงการ

Climatology name	representative period	Measurement height (m)	Average wind speed (m/s)
Met Mast	01/01/2017 00:00 - 30/06/2017 23:45	120.00	4.94

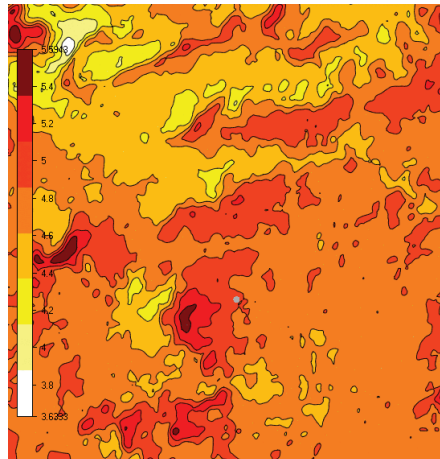


ภาพที่ 3 ภูมิอากาศลมที่ระดับความสูง 120 เมตร (AGL) ของพื้นที่ศึกษาของโครงการ

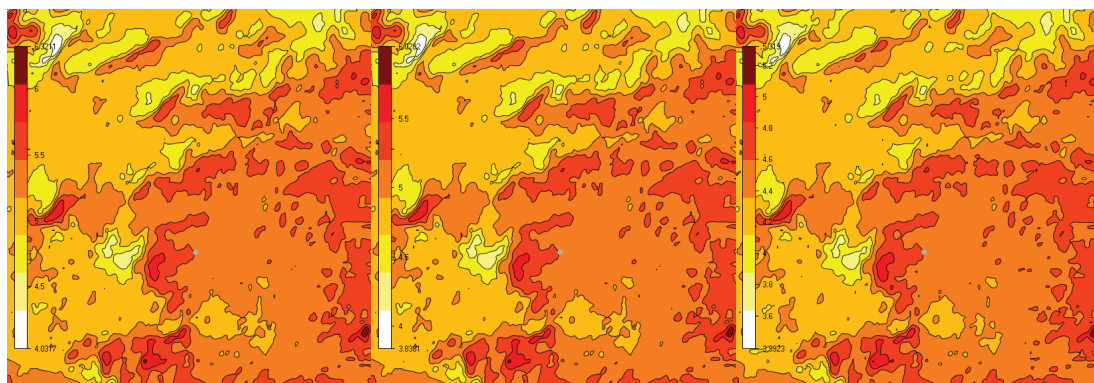


ภาพที่ 4 ภูมิอากาศลมที่ระดับความสูง 120 เมตร (AGL) วันที่ 22-24มิถุนายน 2560

การแจกแจงโวลต์บุลต์ดังกล่าวถูกนำไปสร้างแผนที่แหล่งทรัพยากรลมที่ระดับความสูง 120 เมตร โดยอาศัยข้อมูลลมที่ระดับความสูง 120 เมตร (AGL) จากเสาวัดลมเสมือนดังกล่าว ในพื้นที่โดยรอบ 20X20 ตารางกิโลเมตร โดยอาศัยแบบจำลองการไหลของลมในระดับจุลภาคแบบพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics: CFD) ซึ่งครอบคลุมพื้นที่การติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าทั้งหมดจำนวน 32 ต้น โดยทำการวิเคราะห์แบบ Single Mast Calculation และมีแผนที่ลมระดับจุลภาคที่ความแยกชัด 50 เมตรแสดงดังภาพที่ 4-5



ภาพที่ 4 แผนที่ทรัพยากรลมที่ระดับความสูง 120 เมตร เหนือระดับพื้นดิน  
ขนาดพื้นที่ 20X20 ตารางกิโลเมตร ในพื้นที่ศึกษาของโครงการ

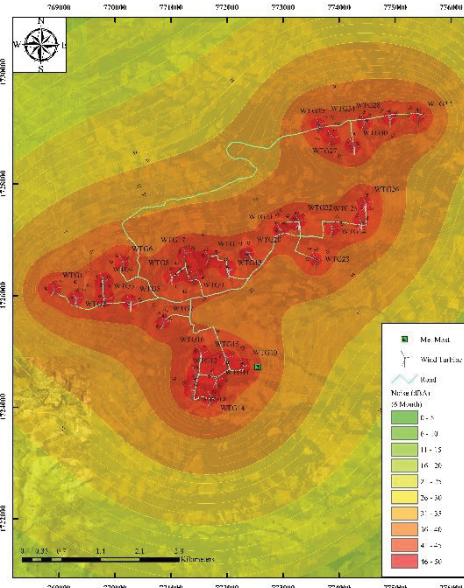


ภาพที่ 5 แผนที่ทรัพยากรลมที่ระดับความสูง 120 เมตร เหนือระดับพื้นดิน  
ขนาดพื้นที่ 20X20 ตารางกิโลเมตร เมื่อวันที่ 22-24 มิถุนายน 2560

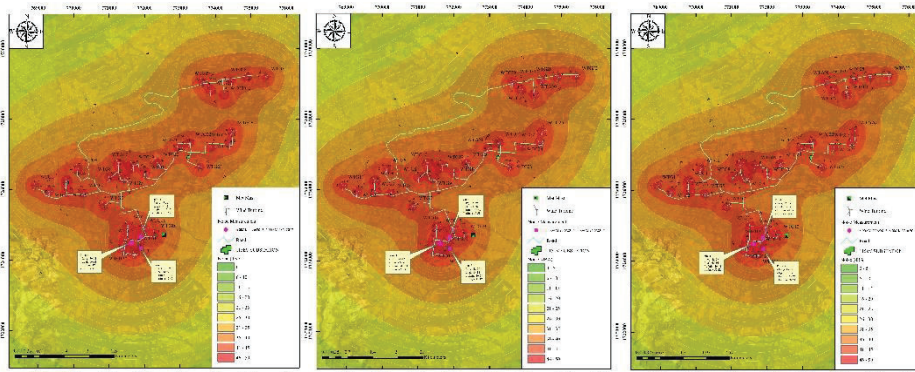
ผลการวิเคราะห์การปลดปล่อยเสียงจากการแหล่งกำเนิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกังหันลม ขนาดกำลังการผลิตติดตั้ง 80 เมกะวัตต์ และขนาดกำลังการผลิตติดตั้งต้นละ 2.5 เมกะวัตต์ ภายใต้ทรัพยากรลมจากแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณซึ่งทำนายอัตราเร็วลมเชิงพื้นที่ที่ออกมาในรูปแบบของแผนที่ลมระดับจุลภาคโดยใช้ข้อมูลสถิติลมที่ได้ดำเนินการตรวจวัดจากเสาวัดลมในพื้นที่ศึกษา ซึ่งมีอัตราเร็วลมเฉลี่ยรายปีอยู่ในช่วง 3.63-5.59 เมตร/วินาที เมื่อนำข้อมูลดังกล่าวเข้าสู่แบบจำลองการปลดปล่อยเสียง โดยการเดินทางของคลื่นเสียงและการดูดกลืนจากสภาพแวดล้อมของโปรแกรม Wind Farmer พบว่า การปลดปล่อยเสียงจากแหล่งกำเนิดของเครื่องกังหันลมผลิตไฟฟ้า ขนาดกำลังการผลิตติดตั้ง 80 เมกะวัตต์ มีการปลดปล่อยเสียงดังออกมาบริเวณโคนเสาของกังหันลม (Tower) (WTG



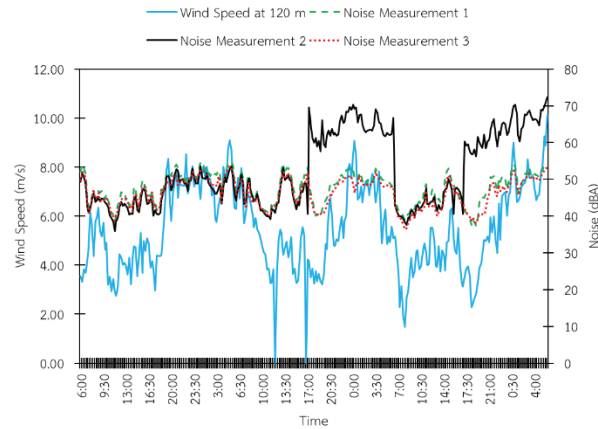
01- WTG 32) มีค่าอยู่ระหว่าง 47.71 – 48.80 dB(A)และเมื่อพิจารณาระยะทางที่ห่างจากบริเวณโคนเสาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกังหันลมพบว่า ความดังของเสียงมีค่าลดลงและแปรผกผันกับระยะทางอย่างชัดเจนจากงานวิจัยฟาร์มกังหันลมที่ตั้งอยู่ในภาคใต้ของอิตาลีได้รับการจำลองโดยใช้ข้อมูลแหล่งเดียวสำหรับแต่ละกังหันใช้คุณสมบัติทางเรขาคณิตและเสียงมีการจำลองหลายอย่างที่แสดงให้เห็นว่าระดับเสียงในสภาวะความเร็วลมโดยเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 55 dB(A)ในบริเวณใกล้เคียงกับกังหันและลดลงตามระยะทาง ของพื้นที่ความเร็วลมสูงประมาณ 10-11 เมตร/วินาที[5]จะเห็นได้ว่าการทำงานของกังหันทั่วไปจะปลดปล่อยแสงใต้โคนกังหันลมอยู่ในช่วง 50 dB(A)ในระยะ 100 เมตร



ภาพที่ 6 ระดับความดังของเสียงบริเวณพื้นที่ศึกษาของโครงการ ณ ระดับพื้นดินของระยะเวลา 6 เดือน



ภาพที่ 7 ระดับความดังของเสียงบริเวณพื้นที่ศึกษาของโครงการ ณ ระดับพื้นดิน วันที่ 22-25 มิถุนายน 2560



ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความดังของเสียงกับอัตราเร็วความเร็วของลม ระหว่างวันที่ 22 - 25 มิถุนายน 2560

จากผลการวิเคราะห์แผนที่เส้นเสียงเท่า (Noise Contour Map) โดยพิจารณาข้อมูลผลการตรวจวัดคุณภาพเสียงระหว่างวันที่ 22 - 25 มิถุนายน 2560 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตลอดระยะเวลา 3 วันต่อเนื่องดังภาพที่ 8 สรุปผลการศึกษาได้ว่าแนวโน้มของผลการปลดปล่อยเสียง (Noise Emission) ไปในทิศทางเดียวกัน เนื่องจากเป็นช่วงระยะเวลาในการตรวจวัดคุณภาพเสียงใกล้เคียงกันจากผลการตรวจวัดคุณภาพเสียงจะเห็นได้ว่าเมื่ออัตราเร็วลมมีค่าเพิ่มสูงขึ้น การปลดปล่อยเสียงจากการทำงานของกังหันลมก็จะเพิ่มสูงขึ้นตามและเมื่ออัตราเร็วลมมีค่าลดลง การปลดปล่อยเสียงของกังหันลมก็มีค่าลดลงเช่นเดียวกัน ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นหรือการลดลงของการปลดปล่อยของเสียงเนื่องจากการทำงานของกังหันลมไม่ได้สัมพันธ์กันแบบเชิงเส้นเนื่องจากมีองค์ประกอบอื่นๆ เข้ามาเกี่ยวข้องนั่นคือสภาพพื้นที่โดยรอบของตำแหน่งจุดวัดทิศทางของลมและอื่นๆ

### สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิเคราะห์ระดับความดังของเสียงบริเวณพื้นที่ศึกษา แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าผลการทำงานของกังหันลมในพื้นที่ ไม่มีผลกระทบและก่อให้เกิดมลพิษทางเสียง โดยใช้ข้อมูลลมจากเสาวัดลมที่ครอบคลุมระยะเวลา 6 เดือน พบว่าระดับความดังของเสียงที่ระดับพื้นดิน (Ground Level) ที่ระยะไม่เกิน 100 เมตร มีค่าอยู่ในช่วง 46-50 dB(A) นอกจากนี้ เมื่อระยะห่างจากแหล่งกำเนิดเสียงกังหันลมเพิ่มมากขึ้น (100-500 เมตร) ระดับความดังของเสียงมีค่าอยู่ในช่วง 41-46 dB(A) โดยที่ระยะห่างจากต้นกังหันลมเกินกว่า 1 กิโลเมตร ระดับความดังของเสียงจะมีค่าลดลงน้อยกว่า 40 dB(A) ซึ่งอาจจะได้รับผลกระทบจากเสียงเนื่องจากเสียงแวดล้อม (Ambient Noise) อื่นๆ

### กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานลม-แสงอาทิตย์ ศูนย์วิจัยพลังงานและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ (วิทยาเขตพัทลุง) สำหรับการเอื้อเฟื้ออุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับการและบริษัท ชัยภูมิ วินด์ฟาร์ม จำกัด สำหรับการเอื้อเฟื้อข้อมูลในการวิจัยศึกษา

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Global Wind Energy Council. (2016). Global Wind Report Annual Market Update.
- [2] ทรงกฤษณ์ ประภักดี. (2553). กังหันลมผลิตไฟฟ้า: มุมมองด้านสิ่งแวดล้อม. วารสารสิ่งแวดล้อม ปีที่ 13 เล่มที่ 3.
- [3] คณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน. (2560). ระบบฐานข้อมูล SPP/VSP.

<http://www.erc.or.th/ERCSP/default.aspx?x=0&muid=23&prid=41> สืบค้นเมื่อ 25 เมษายน 2560.

- [4] Arkadiusz R., (2016). ISO9613-2 as a guideline for noise mapping of wind turbines, modelling vs measurements. CNOSSOS-EU vs ISO9613-2 for noise mapping of wind turbine. INTER-NOISE 2016. Hamburg.
- [5] Ruggiero A., Quartieri J., Guarnaccia C., and Hloch S. (2015). Noise Pollution Analysis of Wind Turbines in Rural Areas. *Int. J. Environ. Res.*, 9(4):1277-1286
- [6] Punch J., Pabst D. (2010). Wind turbine noise: what audiologists should know. *Audiology Today*. 22, 20-31.
- [7] Bakker, R.H. Pedersen, E. van den Berg, G.P. Stewart, R.E. Lok, W. Bouma, J. (2012). Effects of wind turbine sound on health and psychological distress. *Sci. Total Environ.* 425, 42–51.
- [8] Knopper, L.D. Ollson, C.A. (2011). Health effects and wind turbines: A review of the literature. *Environmental Health*, Open Access, <http://www.ehjournal.net/content/10/1/78>, doi: 10.1186/1476-069X-10-78. [9] Mihăilă, J. M.; Bigan, C.; Panduru, V. (2014). Mathematical modelling of noise mapping at wind turbine farms. *Applied Sciences* . 2014, Vol. 16, p48-55. 8p.

## การศึกษาผลการผลิตแก๊สชีวภาพจากการหมักผสมระหว่างมูลโคหมักร่วมกับเปลือกหัวหอมโดยใช้ถังหมักแบบกลิ้งในแนวตั้ง

### Study biogas production from co-digestion of cow dung and onion peel by using vertical rolling tank

ชัยยุทธ ไชยงาม<sup>1\*</sup> รัตนชัย ไพรินทร์<sup>2</sup> และณัฐธาดา ยปนนันท์<sup>1</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

หัวหอมได้ถูกนำมาใช้ปรุงเป็นอาหารในประเทศไทยเป็นจำนวนมาก เปลือกหัวหอมที่ปลอกออกมาจะเป็นขยะที่ต้องนำไปกำจัด ส่วนถังหมักแก๊สชีวภาพที่ใช้กันทั่วไปเป็นการหมักแบบนิ่ง (Batch) ทำให้เกิดแก๊สมีเทนได้ช้า ส่วนถังที่ติดตั้งมีใบกวนมีปัญหาการรั่วซึมของถังหมัก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ 1.การกำจัดเปลือกหัวหอมโดยนำไปหมักผลิตแก๊สชีวภาพร่วมกับมูลโค 2.ออกแบบถังหมักที่เป็นถังกลิ้งในแนวตั้งด้วยมือ งานวิจัยเริ่มจากการหมักร่วมระหว่างมูลโคกับเปลือกหัวหอมจะหมักแบบนิ่ง (Batch) ที่อัตราส่วน 1:1, 1:2 และ 1:3 ใช้ถังหมักขนาด 6 ลิตร จากนั้นจะใช้อัตราส่วนที่ดีที่สุดมาใช้ในถังกลิ้งขนาด 30 ลิตร การกลิ้งในแนวตั้งด้วยมือแบบกลับไปได้แบ่งเวลาการกลิ้งถึงเป็นเวลา 1 นาที, 3 นาที และ 5 นาที/ 1 ครั้ง/วัน ถังหมักที่กลิ้ง 1 นาที/ 2 ครั้ง/วัน และถังหมักแบบไม่มีการกลิ้ง ศึกษาปัจจัยการเกิดแก๊สชีวภาพได้แก่ ระยะเวลาการหมัก, ค่า pH, อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมและ เปอร์เซ็นต์มีเทนผลของการทดลองถังหมักแบบนิ่ง (Batch) ที่อัตราส่วน 1:1, 1:2 และ 1:3 เกิดแก๊สมีเทน 79.66%, 22.51% และ 29.22% ตามลำดับ ดังนั้นอัตราส่วนที่เหมาะสมคือ 1:1 เพราะปริมาณแก๊สมีเทนมากที่สุดได้ขยายผลนำมาหมักในถังหมักขนาด 30 ลิตร เวลาการหมัก 36 วันผลการทดลองพบว่า ถังกลิ้ง 1 ครั้ง/วันเป็นเวลา 1 นาที, 3 นาที และ 5 นาที เกิดแก๊สมีเทนเฉลี่ย 70.14%, 70.29% และ 71.06% ปริมาณแก๊สชีวภาพที่มีเทน 55% รวม 21132.60 ml, 40446.00 ml และ 31390.80 ml ตามลำดับ ถังหมัก 1 นาที/ 2 ครั้ง/วัน ได้แก๊สมีเทน 53.30% ปริมาณแก๊สชีวภาพรวม 22825.60 ml ถังหมัก แบบไม่มีการกลิ้งได้แก๊สมีเทน 41.59% ปริมาณแก๊สชีวภาพรวม 21598.40 ml ช่วงเวลาที่เหมาะสมในการกลิ้งคือที่เวลา 3 นาที/ 1 ครั้ง/วัน ได้ปริมาณการเกิดแก๊สชีวภาพและเกิดแก๊สมีเทนใช้งานได้ ซึ่งเกิดปริมาณแก๊สมีเทนน้อยกว่าการกลิ้ง เวลา 5 นาที/ 1 ครั้ง/วัน แต่ใช้เวลาการกลิ้งที่น้อยกว่าทำให้ใช้พลังงานน้อยลงระยะเวลาที่เกิดแก๊สมีเทนเร็วกว่าถังแบบ ไม่กลิ้ง 14 วัน พลังงานที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นการเจียวหอมที่แก๊สมีเทน 70.80% คิดเป็นค่าความร้อน 24.81 MJ/m<sup>3</sup> หรือเทียบเท่ากับพลังงานไฟฟ้า 1.4 kwh

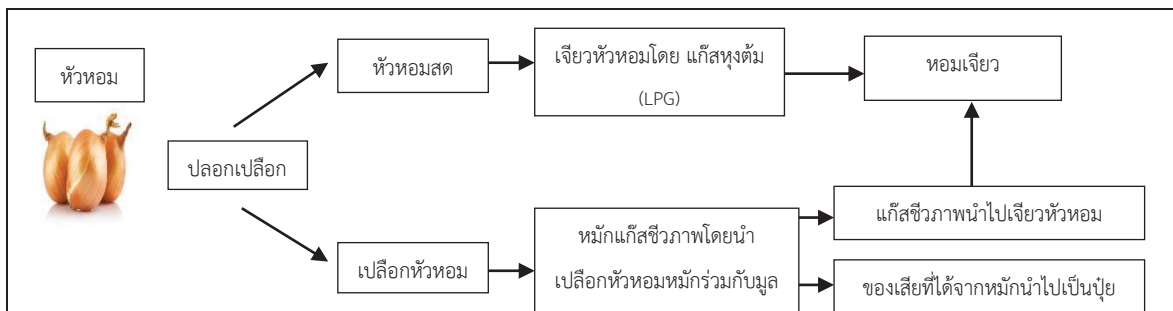
**คำสำคัญ:** เปลือกหัวหอม มูลโคถังกลิ้งในแนวตั้งด้วยมือระยะเวลาและจำนวนครั้งในการกลิ้งปริมาณแก๊สมีเทน

\*Corresponding author: Tel.: 090-9933-733. E-mail address: chaiyut.ch@mail.kmutt.ac.th

## บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมซึ่งมีการเลี้ยงสัตว์และปลูกพืชทางการเกษตรเป็นจำนวนมากปัจจุบันประเทศไทยมีปริมาณการเลี้ยงโคเนื้อและโคนมจำนวน 4,876,228 ตัว และ 584,327 ตัว ตามลำดับ (ข้อมูลเกษตรกร/ปศุสัตว์ปีงบประมาณพ.ศ. 2560) [1] เนื่องจากโคได้มีการขับถ่ายของเสียออกจากตัวมีปริมาณที่มากมูลโคที่กองทิ้งไว้เป็น สาเหตุที่ทำให้เกิดแก๊สมีเทนซึ่งเกิดเป็นแก๊สเรือนกระจกตั้งนั้นหากมีการนำของเสียจากมูลโคมาเป็นวัตถุดิบในการผลิต แก๊สชีวภาพก็จะสามารถจัดการของเสียที่เกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพและได้พลังงานทดแทนได้ใช้วิธีการปลูกหัวหอม ใหญ่ได้มีการเพาะปลูกในประเทศไทยมีปริมาณในปี 2560 มีเนื้อที่ 9,861 ไร่และมีผลผลิต 42,677 ตัน/ปี [2] ได้นำหัว หอมมาทำการแปรรูปมาเป็นอาหารด้วยปลอกเปลือกออกแล้วนำหัวหอมไปเจียวโดยใช้พลังงานจากแก๊สหุงต้ม(LPG) เพื่อนำมาประกอบอาหารทำให้เปลือกหัวหอมเป็นขยะโดยประมาณจากการปลอกเปลือกหัว 1 ลูกจะ ได้ปริมาณเปลือก หอมที่น้อยกว่า 1% ของน้ำหนักหัวหอม ถ้าคิดที่ปริมาณเปลือกหัวหอมร้อยละ 1% จะได้ปริมาณเปลือกหัวหอม 426.67 ตัน/ปี ซึ่งของเสียจากการเกษตรนั้นก่อให้เกิดปัญหากลิ่นเหม็นเป็นแหล่งเพาะพันธุ์เชื้อโรค และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเปลือกหัวหอมที่ปลอกออกมาจะเป็นขยะที่ต้องนำไปกำจัดจึงได้นำมาหมักแก๊สชีวภาพ ร่วมกับมูลโคถึงหมักทั่วไปเป็นแบบนิ่ง (Batch) ทำให้เกิดแก๊สชีวภาพได้ช้า ส่วนถังที่ติดตั้งมีใบกวนมีปัญหาการรั่วซึมของถังหมักทำให้มีอากาศเข้าไปภายในถังหมักทำให้ไม่เป็นการหมักแบบไร้อากาศจึงได้มีแนวคิดที่จะเปลี่ยนจากการติดใบกวนมาเป็นการกลิ้งในแนวตั้งด้วยมืองานวิจัยนี้ได้ศึกษาปัจจัยการเกิดแก๊สชีวภาพที่มีผลต่อกระบวนการหมักในสภาวะแบบไม่มีออกซิเจนคืออุณหภูมิ, ค่าpH,อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N Ratio) และการกวน [3] แนวคิดของงานวิจัยนี้ดัง ภาพที่ 1

การเคลื่อนที่แบบการกลิ้ง (Rolling Motion, without slipping) หรือการหมุนรอบแกนที่เคลื่อนที่การเคลื่อนที่แบบกลิ้งคือการเคลื่อนที่โดยวัตถุจะมีการหมุน (Rotation) และมีการเคลื่อนที่ (translation) ไปพร้อมๆกันแต่ไม่ใช่การไถลตัวอย่างเช่นล้อรถจักรยานล้อยนต์เป็นต้น [4] การกลิ้งลงไปและกลับในงานวิจัยนี้ได้แนวคิดมาจากเครื่องซักผ้าที่หมุนไปและกลับเพื่อทำให้เสื้อผ้าสะอาดซึ่งมีเฟืองตัวเล็กนี้จะขับเฟืองตามให้หมุนและบนเฟืองตามหมุนไปจะทำให้แกนต่อเคลื่อนที่กลับไปกลับมา [5] และการหมุนไปและกลับทำให้การคลุกเคล้าได้มากขึ้นถ้าการหมุนไปในทิศทางเดียวที่จะให้สารในถังเข้ากันแต่จะทำให้แยกชั้นกันมากกว่าเหมือนกับเครื่องหมุนเหวี่ยงที่ทำหน้าที่แยกชั้นของสารทำให้เลือกวิธีการกลิ้งไปและกลับเพื่อที่จะเพิ่มปริมาณแก๊สชีวภาพและลดเวลาการเกิดแก๊สชีวภาพให้สั้นลง



ภาพที่ 1 วิธีการแปรรูปเปลือกหัวหอมและแนวคิดของงานวิจัยนี้

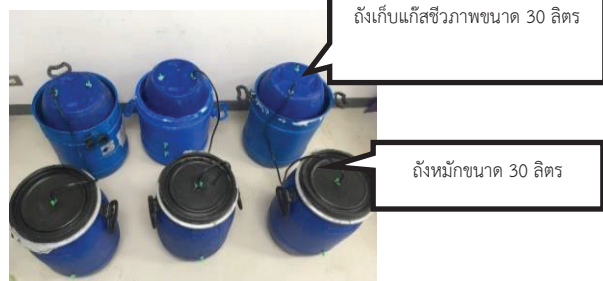
## วิธีการวิจัย

### การเตรียมถังหมักแก๊สชีวภาพและถังเก็บแก๊ส

ใช้ถังหมักในงานวิจัยมี 2 แบบ คือ แบบที่ 1 ถังหมักขนาด 6 ลิตร โดยใช้ถังเก็บแก๊สชีวภาพมีขนาด 550 มิลลิลิตรดังภาพที่ 2(ก) สำหรับการหมักแบบนิ่ง (Batch)ถังหมักแบบที่ 1 ใช้หมักเพื่อหาอัตราส่วนของการหมักร่วมระหว่างมูลโคกับเปลือกหัวหอมที่เหมาะสมแบ่งอัตราส่วนผสมคือ 1:1, 1:2 และ 1:3โดยที่ใช้เปลือกหัวหอมมากกว่ามูลโค เพื่อที่จะเพิ่มปริมาณของเปลือกหัวหอมในการหมักให้มากขึ้นกำจัดเปลือกหัวหอมที่เป็นขยะได้ส่วนถังหมักแบบที่ 2 คือ ถังหมักขนาด 30 ลิตร โดยใช้ถังเก็บแก๊สชีวภาพขนาด 30 ลิตรใช้สำหรับถังกักในแนวตั้งด้วยมือดังภาพที่ 2(ข)ได้นำอัตราส่วนที่ 1:1 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่เกิดแก๊สมีเทนได้ดีที่สุดเพื่อนำถังไปกักในแนวตั้งแบบไปกลับโดยเริ่มจากการปรับสภาพทำโดยการวัดค่า pH ของน้ำหมักก่อนการทดลอง ซึ่งส่วนมากจะได้ค่า pH ต่ำกว่า 7 เพราะว่าเปลือกหัวหอมมีค่าความเป็นกรด จากนั้นทำการปรับค่า pH เริ่มต้นให้เท่ากับ 10 เพื่อให้ น้ำหมักมีสภาพเป็นเบสและค่า pH เริ่มต้นเท่าๆกันตลอดทุกๆการทดลอง ซึ่งเป็นสภาวะที่จุลินทรีย์จะปล่อยเอนไซม์เพื่อสลายสารอินทรีย์เพื่อใช้เป็นอาหารได้ดี โดยการใช้ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ซึ่งเป็นสารที่ละลายน้ำได้ดี มีราคาถูก และมีความเป็นเบสแก่ในการปรับสภาพ ทำการทดลองโดยหมักแบบกะ (Batch Fermentation) ไม่มีการเติมสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบ เป็นระยะเวลา 45-60 วัน [6] แสดงดังภาพที่ 3ได้มีการตรวจวัดค่าด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography) ซึ่งใช้คอลัมน์แบบ Active Carbon 30/60 SS ขนาดคอลัมน์ 3 mm I.D. x 2m คอลัมน์มีอุณหภูมิเท่ากับ 100 องศาเซลเซียสแก๊สตัวพา (Carrier Gas) ที่ใช้ในการทดลองนี้คือแก๊สฮีเลียมวิธีการวัดปริมาณแก๊สชีวภาพโดยการแทนน้ำคิดจากปริมาตรจากความสูงของถังเก็บแก๊สมีการวัดทุกวันและเอาแก๊สออกเพื่อให้มีการผลิตแก๊สใหม่เพื่อวัดวันต่อวันปริมาณแก๊สชีวภาพที่ได้ต้องนำไปตรวจวัดหาค่าเปอร์เซ็นต์มีเทนและเปอร์เซ็นต์คาร์บอนไดออกไซด์ได้แสดงตัวอย่างโครมาโทแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์โดยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ดังภาพที่4

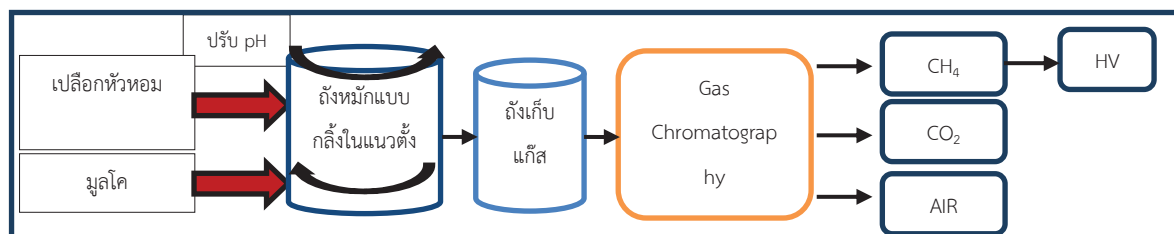


(ก)

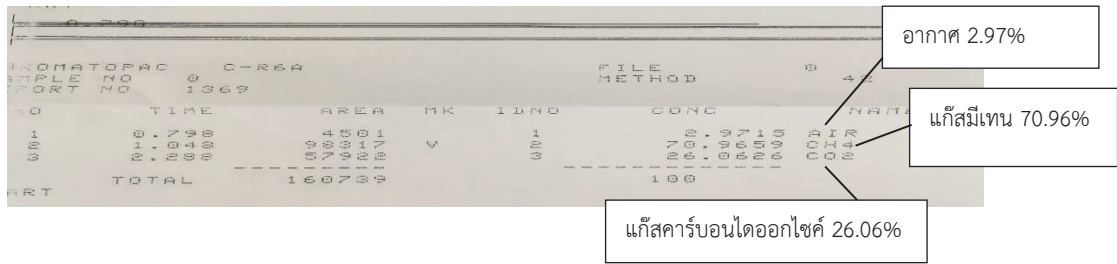


(ข)

ภาพที่ 2 ก. ถังหมักขนาด 6 ลิตรถังเก็บแก๊สขนาด 550 มิลลิลิตร ข. ถังหมักขนาด 30 ลิตร ถังเก็บแก๊สขนาด 30 ลิตร



ภาพที่ 3 วิธีการทำการหมักในถังหมักแบบกักและการวิเคราะห์ผล



ภาพที่ 4 ตัวอย่างโครมาโทแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์โดยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

### การออกแบบและประกอบเครื่องกลิ้งถังในแนวตั้งหมุนแบบไปและกลับ

การออกแบบได้แนวคิดมาจากเครื่องซักผ้าโดยมีการกลิ้งถังในแนวตั้งโดยที่เครื่องซักผ้าใช้มอเตอร์ในการกลิ้งแต่ งานวิจัยนี้ไม่ต้องการให้ใช้พลังงานจากไฟฟ้าในการกลิ้งถังจึงได้เปลี่ยนมาใช้พลังงานโดยใช้กลิ้งด้วยมือ อุปกรณ์ที่ใช้ในการประกอบตัวเครื่องกลิ้งถังในแนวตั้งหาได้จากอุปกรณ์ทางการเกษตร ได้แก่ 1. มู่เล่ 2. ตี๊กตา ลูกปืนท่อสูบน้ำ 3. สายพาน 4. เฟลากับลูกปืน 6. เหล็กฉาก(Angle Bars) ขนาด 1-1/2 นิ้ว หลักการกลิ้งแบบไปและกลับโดยใช้เวลาการกลิ้งเป็นตัวกำหนด ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 เครื่องกลิ้งถังในแนวตั้ง

### ศึกษาระยะเวลาการกลิ้งและจำนวนครั้งในการกลิ้งต่อวัน

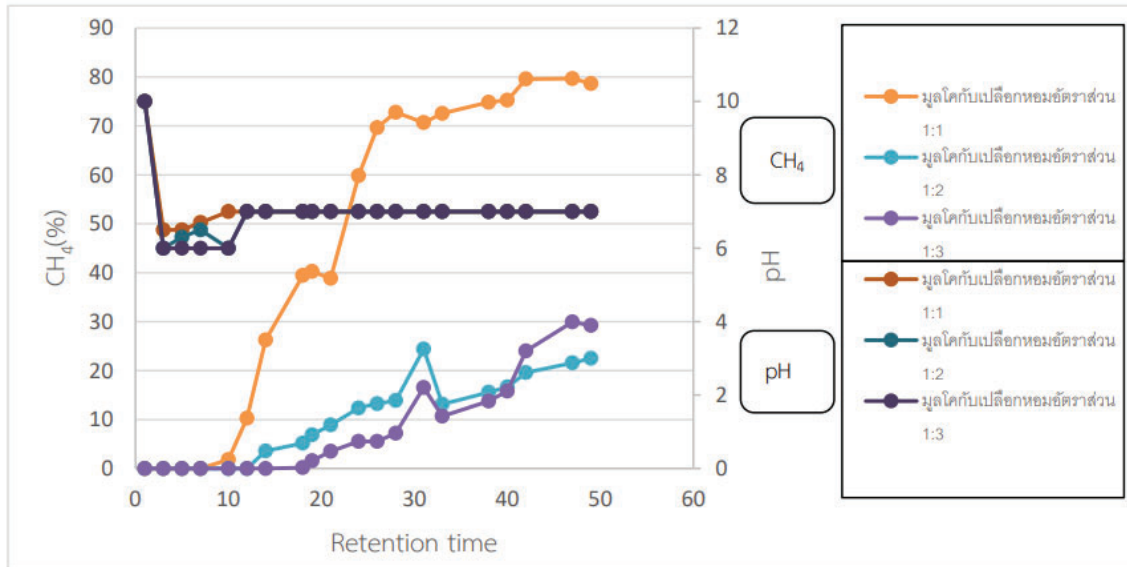
ทำการหมักมูลโคร่วมกับเปลือกหัวหอมอัตราส่วนที่ 1:1 การปรับ pH เท่ากับ 10 ดังที่ใช้ในการหมักคือถังขนาด 30 ลิตร และถังเก็บแก๊สซีภาพถังที่ใช้ 30 ลิตร เช่นกัน โดยที่งานวิจัยนี้ได้กำหนดเวลาในการกลิ้งไป-กลับครั้งละ 30 วินาที แล้วกลิ้งกลับโดยทันที รวมกลิ้งไปกลับจะใช้เวลา 1 นาที ในการกลิ้งถังในแนวตั้งการทดลองแบ่งออกเป็น 5 ทดลองเพื่อหาระยะเวลาการกลิ้งและจำนวนครั้งในการกลิ้งต่อวัน ดังที่ 1 คือ กลิ้งระยะเวลา 1 นาที/ 1 ครั้ง/วัน ดังที่ 2 คือ กลิ้งระยะเวลา 3 นาที/ 1 ครั้ง/วัน ดังที่ 3 คือ กลิ้งระยะเวลา 5 นาที/ 1 ครั้ง/วัน ดังที่ 4 คือ กลิ้งระยะเวลา 1 นาที/ 2 ครั้ง/วัน ดังที่ 5 ไม่มีการกลิ้งถัง เพื่อมาเปรียบเทียบเพื่อหาความเหมาะสมในการผลิตแก๊สชีวภาพ งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการทดลอง ได้แก่ ค่า pH ระยะเวลาในการหมัก อุณหภูมิ และวิเคราะห์สัดส่วนของแก๊สมีเทน และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography)

### ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

ผลของการเปรียบเทียบของถังหมักอัตราส่วนการหมักระหว่างมูลโคกับเปลือกหัวหอมที่ 1:1, 1:2, 1:3

จากการทดลองอัตราส่วนที่เกิดมีเทนมากที่สุดคืออัตราส่วนที่ 1:1 เกิดแก๊สมีเทนสูงสุดที่ 79% และเวลาที่เกิดแก๊สที่เกิน 50% เร็วกว่าที่อัตราส่วน 1:2 และ 1:3 จึงเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมในการหมักร่วมระหว่างมูลโคกับเปลือก

หัวหอม ผลพบว่าเกิดการเกิดแก๊สมีเทนเกิดจากมูลโคเพราะมีค่า C/N ratio ที่เหมาะสมซึ่งอยู่ในช่วง 10-30 โดย C/N Ratio มีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์มากกว่า เปลือกหัวหอมนั้นไม่สามารถเกิดแก๊สมีเทนได้มากตามที่ต้องการใช้งานได้ เนื่องจากเปลือกหัวหอมมีค่า pH 5-6 [7] ในการหมักครั้งแรกได้ทำการปรับ pH เท่ากับ 10 และต้องทำการปรับค่า pH ขึ้นเท่ากับ 7-8 หลังจาก 12 วัน ค่า pH จะเท่ากับ 7 คงที่ตลอดตั้งในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 การเกิดแก๊สมีเทนและการวัดค่า pH

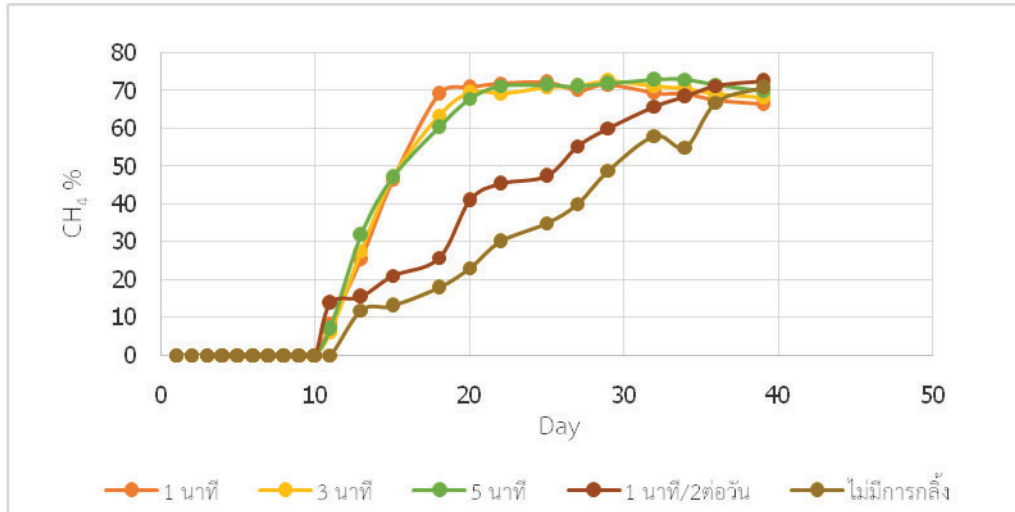
#### ผลของระยะเวลาการก่อกำและจำนวนครั้งในการก่อกำต่อวัน

การทดลองถังหมักที่มีการก่อกำนั้นแบ่งออก 5 แบบ แบบที่ 1 ใช้เวลาในการก่อกำ 1 นาที/ 1 ครั้ง/วันแบบที่ 2 ใช้เวลาในการก่อกำ 3 นาที/ 1 ครั้ง/วันแบบที่ 3 ใช้เวลาในการก่อกำ 5 นาที/ 1 ครั้ง/วัน แบบที่ 4 ใช้เวลาในการก่อกำ 1 นาที/ 2 ครั้ง/วัน แบบที่ 5 ไม่มีการก่อกำ ผลที่ได้จากการทดลองช่วงระยะเวลาหลัง 10 วันแก๊สมีเทนเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องแล้วมีแนวโน้มจะสูงขึ้นเรื่อยๆ ระยะเวลาในการก่อกำถึงหมัก แบบที่ 1, 2 และ 3 เกิดมีเทนที่ใกล้เคียง ใช้เวลาในการก่อกำนานแปลว่าต้องใช้พลังงานในการก่อกำมากขึ้น แบบที่ 5 การเกิดแก๊สมีเทนไม่สูง จำนวนครั้งในการก่อกำมีผลต่อการผลิตแก๊สชีวภาพ จากการทดลองการก่อกำ 1 ครั้ง/วันระยะเวลาเกิดแก๊สมีเทน 55% ที่ 9 วัน เร็วกว่าการก่อกำ 2 ครั้ง/วัน เพราะการก่อกำมากไปทำให้อาหารของจุลินทรีย์หมดและเกิดแก๊สชีวภาพน้อยลงส่วนถึงหมักแบบไม่ก่อกำมีผลต่อการเกิดแก๊สมีเทนใช้เวลานานกว่าถึงหมักแบบก่อกำในแนวตั้งด้วยมือ ถึงก่อกำทำให้เกิดแก๊สมีเทน 55% ที่ 18 วัน ถึงไม่ก่อกำใช้เวลา 32 วัน ถึงที่มีการก่อกำเกิดแก๊สมีเทนและมีแก๊สชีวภาพที่ใช้งานได้เร็วกว่า 14 วัน ดังภาพที่ 7 และถึงในแบบที่ 2 ได้ค่าแก๊สมีเทนเฉลี่ย 70.80% และได้ค่าแก๊สชีวภาพรวม 40446 ml ทำให้การคลุกเคำกันได้ดีมากขึ้นใช้พลังงานในการก่อกำไม่มาก เกินไป ได้เก็บผลการทดลองเปรียบเทียบกับ แบบที่ 1 แบบที่ 3 แบบที่ 4 และ แบบที่ 5 ระยะเวลาในการหมักที่ 36 วัน ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงค่าถังแบบที่ 2 เปรียบเทียบแก๊สมีเทนเฉลี่ยและปริมาณแก๊สชีวภาพรวม ถึงแบบที่ 1, 3, 4 และ 5

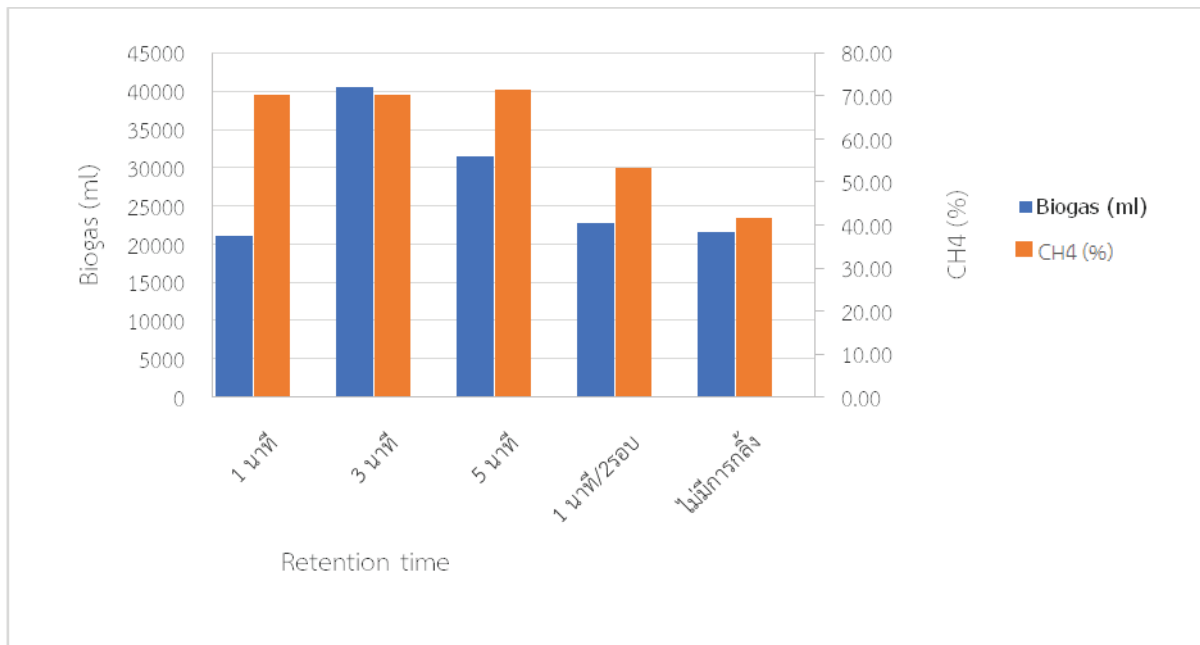
Condition	CH <sub>4</sub> (%)	Total biogas (ml)
3 นาที/ 1 ครั้ง/วัน(แบบที่ 2)	70.29	40446.00
5 นาที/ 1 ครั้ง/วัน (แบบที่ 3)	71.06	31390.80
1 นาที/ 1 ครั้ง/วัน(แบบที่ 1)	70.14	21132.60
1 นาที/ 2 ครั้ง/วัน (แบบที่ 4)	53.30	22825.60
ไม่มีก่อกำ(แบบที่ 5)	41.59	21598.40





ภาพที่ 7 ปริมาณแก๊สมีเทนที่ตรวจวิเคราะห์หลังจากการหมัก 36 วัน

ผลการทดลองได้เก็บค่าปริมาณแก๊สชีวภาพที่มีเทน 55% ของการหมักแต่ละถัง ถังกัล้งแบบที่ 1, 2 และ 3 เก็บค่าปริมาณแก๊สชีวภาพวันที่ 18 ถังหมักแบบที่ 4 เก็บค่าปริมาณแก๊สชีวภาพวันที่ 27 ถังหมักแบบที่ 5 เก็บค่าปริมาณแก๊สชีวภาพวันที่ 32 เมื่อเปรียบเทียบกับถังกัล้งแบบที่ 2 จึงเหมาะกับการนำไปใช้งานเพราะมีค่าเฉลี่ยมีเทนและปริมาณแก๊สชีวภาพรวมสูงดังภาพที่ 8 ระยะเวลาในการหมัก 36 วันเท่ากันการกัล้งถึงทำให้คลุกเคล้าตะกอน น้ำ และ สารอินทรีย์ เป็นส่วนที่สำคัญอีกส่วน เพราะจะทำให้แบคทีเรียสัมผัสกับสารอินทรีย์ได้อย่างทั่วถึง และยังส่งผลให้อุณหภูมิภายในระบบกระจายอย่างทั่วถึง ทำให้แบคทีเรีย(Mesophilic) กับอาหารคลุกเคล้ากันทำให้แบคทีเรียทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพขึ้น ส่งผลให้เกิดแก๊สชีวภาพเร็วขึ้นและมากขึ้นถึงหมักที่ไม่มีการกัล้งอุณหภูมิภายในถังจะสูงตรงกลางถัง



ภาพที่ 8 ปริมาณแก๊สชีวภาพรวมและแก๊สมีเทนวันที่ 36 วันในการหมัก

### สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองการหมักร่วมระหว่างเปลือกหัวหอมกับมูลโคแบ่งอัตราส่วนคือ 1:1, 1:2 และ 1:3 ที่เหมาะสมที่สุดอัตราส่วน 1:1 ได้แก๊สมีเทน 79% มากที่สุด ถ้าปริมาณเปลือกหัวหอมมากกว่าทำให้เป็นกรดมากเกินไป ทำให้เกิดแก๊สได้น้อยจึงนำอัตราส่วน 1:1 หมักในถัง 30 ลิตรโดยมีการก่อกิ่งในแนวตั้งด้วยใช้มือแบบก่อกิ่งไปกลับ จะทำให้แบคทีเรีย (Mesophilic) กับอาหารคลุกเคล้ากันทำให้แบคทีเรียทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพขึ้น ส่งผลให้การเกิดแก๊สชีวภาพเร็วขึ้นและมากขึ้น ในการก่อกิ่งที่ 1 นาที่, 3นาที่, 5นาที่/ 1 ครั้ง/วัน, 1นาที่/ 2 ครั้ง/วันและ ไม่มีการก่อกิ่ง ผลของการหมักวันที่ 36 วัน เกิดแก๊สมีเทนเฉลี่ย 70.14%, 70.29%, 71.06%, 53.30% และ 41.59% ปริมาณแก๊สชีวภาพที่มีมีเทน 55% รวม 21132.60 ml, 40446 ml, 31390.80 ml, 22825.60 ml และ 21598.40 ml ตามลำดับ จำนวนครั้งในการก่อกิ่งในแนวตั้งแบบก่อกิ่งไปกลับที่เหมาะสมคือ 3 นาที่/ 1 ครั้ง/วันถึงที่มีการก่อกิ่งทำให้เกิดแก๊สมีเทนเร็วกว่า 14 วัน เมื่อเปรียบเทียบกับถังไม่ก่อกิ่ง และมีปริมาณแก๊สชีวภาพที่มากกว่า แก๊สมีเทนที่ 70.29% คิดเป็นค่าความร้อน 24.81 MJ/m<sup>3</sup> เทียบเท่ากับพลังงานไฟฟ้า 1.4 kwh สามารถนำไปใช้แทนพลังงานด้านเชื้อเพลิงเช่น การเผาไหม้โดยตรง (Direct combustion) ทดแทนแก๊สหุงต้ม (LPG) ในกระบวนการเจียวหอมหรือการเผาไหม้ภายใน (Indirect combustion) ทดแทนน้ำมันเบนซินหรือดีเซลในเครื่องยนต์สันดาปภายใน

### กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้ทำการวิจัยขอขอบคุณคณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีที่สนับสนุนงบประมาณเพื่อทำการวิจัยแก่คณะผู้ทำการวิจัยขอขอบคุณคณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยีและสถาบันพัฒนาและฝึกอบรมโรงงานต้นแบบวิทยาเขตบางขุนเทียนมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องมือในการทำการวิจัย

### ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ พบว่าซึ่งมีปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นส่วนประกอบอยู่ในแก๊สชีวภาพ จึงมีแนวคิดที่จะแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สมีเทน โดยใช้หลักการแยกแก๊สโดยอาศัยน้ำหนักมวลโมเลกุลของแก๊สที่ต่างกัน จึงมีความสนใจที่นำแก๊สชีวภาพใส่ในท่อตรงยาวและปล่อยให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สมีเทนแยกออกจากกันโดยธรรมชาติ

### เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมปศุสัตว์กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. ข้อมูลเกษตรกรผู้เลี้ยงสัตว์ระดับประเทศปี 2560.สืบค้นเมื่อ 11 กุมภาพันธ์ 2561, จาก <http://ict.dld.go.th/th2/index.php/th/report/447-report-thailand-livestock/report-servey2558-1/870-report-survey58-1>.
- [2] สถิติการเกษตรของประเทศไทย.2559. จำนวนการปลูกหัวหอม.สืบค้นเมื่อ 18 กุมภาพันธ์ 2560, จาก <http://www.oae.go.th>.
- [3] เครือข่ายความร่วมมือเพื่อการถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่ชุมชนกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. เอกสารประกอบการอบรมแก๊สชีวภาพ.สืบค้นเมื่อ 16 กุมภาพันธ์ 2561, จาก <http://www.clinictech.most.go.th/online/techlist/attachFile/20111261832311.pdf>.
- [4] การเคลื่อนที่แบบหมุน. สืบค้นเมื่อ 18 กุมภาพันธ์ 2561, จาก [http://elearning.tu.ac.th/sc133/doc\\_download/number11-12\\_250749.pdf](http://elearning.tu.ac.th/sc133/doc_download/number11-12_250749.pdf).

- [5] ทิตววรรณเลิศลักษณ์.สิ่งประดิษฐ์ทางฟิสิกส์ตอนเครื่องซักผ้าสืบค้นเมื่อ 27 กุมภาพันธ์2561, จาก <http://www.scimath.org/lesson-physics/item/7284-2017-06-14-14-03-19>.
- [6] Zheng, Y., Pan, Z., and Zhang, R.,(2009), “Overview of Biomass Pretreatment for Cellulosic Ethanol Production”, International Journal of Agricultural and Biological Engineering, Vol.2, No.3, pp.51-68.
- [7] Rowena T. Romano, Ruihong Zhang,(2008),"Anaerobic digestion of onion residuals using a mesophilic anaerobic phased solids Digester”, Bio resource Technology,Vol.35, No.0, pp. 4174-4179.

## การวิเคราะห์มุมปะทะและการไหลวนบนผิวใบพัดกังหันลมแนวแกนนอน Analysis of angle of attack and circulation on the HAWT blade surface

ดิฉันทน์ พงษ์ม<sup>1\*</sup> จิระศักดิ์ พุกดำ<sup>2</sup> และวิทยา แก้วสุริยวงศ์<sup>1</sup>

<sup>1</sup>วิทยาลัยพลังงานและสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืนรัตนโกสินทร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ 73170

<sup>2</sup>คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการออกแบบ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ 73170

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีความพยายามในการศึกษามุมปะทะและการไหลวนบนผิวใบพัดกังหันลมแนวแกนนอนในขณะที่ใบพัดหมุน กังหันลมแนวแกนนอนที่นำมาทดสอบมีเส้นผ่านศูนย์กลางโรเตอร์ 2.4 เมตร และมีจำนวนใบพัด 3 ใบ ใบพัดแต่ละใบจะประกอบไปด้วยแพนอากาศ 4 ชนิด คือ DU91-W2-250 DU93-W-210 NACA63-618 และ NACA63-215 รายละเอียดของความเร็วลมจะวัดด้วย Laser Doppler Velocimetry (LDV) ภายในอุโมงค์ลม หลังจากได้รายละเอียดของความเร็วลมบนพื้นผิวของใบพัดกังหันลมสามารถนำไปหาค่ามุมปะทะและการไหลวนบนผิวใบพัดกังหันลม ผลการศึกษาของงานวิจัยนี้พบว่ามุมปะทะที่ความเร็วปลายใบต่ำจะมีค่าสูงกว่ามุมปะทะที่ความเร็วปลายใบเหมาะสม เมื่อทำการเปรียบเทียบกับทฤษฎี BEM จะพบว่าค่ามุมปะทะใกล้เคียงกันในช่วงกลางใบถึงปลายใบ ส่วนบริเวณโคนใบพัดมีความแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากความซับซ้อนของการไหลแบบปั่นป่วนบริเวณโคนใบพัดซึ่งทฤษฎี BEM ไม่อาจที่คำนวณได้ การคำนวณการหมุนวนบนผิวใบพัดกังหันลมในแนวแกนใบให้ผลลัพธ์คือจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แต่จะตกลงอย่างรวดเร็วบริเวณปลายใบเนื่องจากการก่อตัวของกระแสลมวนที่ปลายใบพัด

**คำสำคัญ:** กังหันลมแนวแกนนอน มุมปะทะ การไหลวน อากาศพลศาสตร์

**Keywords:** Horizontal axis wind turbine, Angle of attack, Circulation, Aerodynamic

\*Corresponding author: Tel.: 094-5734464. E-mail address: Tinnapob.phe@rmutr.ac.th

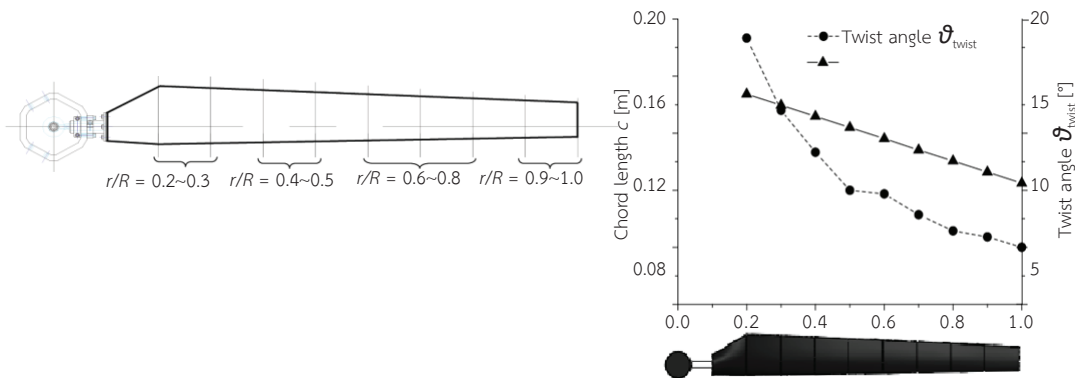
## บทนำ

ในอดีตพลังงานในการขับเคลื่อนด้านอุตสาหกรรมของแต่ละประเทศขึ้นอยู่กับพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นหลัก แต่ปัจจุบันได้มีการนำพลังงานทดแทนจากธรรมชาติมาใช้ทดแทนพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลกันอย่างแพร่หลายอันเนื่องมาจากผลเสียจากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล อาทิเช่น ปัญหาปรากฏการณ์โลกร้อน ปัญหามลพิษ และปัญหาการขาดแคลนเชื้อเพลิง เป็นต้น ประเทศไทยได้มีนโยบายนำพลังงานทดแทนมาใช้ประโยชน์กันมากขึ้น ยกตัวอย่างเช่น แผนพัฒนาพลังงานทดแทน 15 ปี พ.ศ. 2551-2565 ประเทศไทยมีเป้าหมายการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายโดยการเพิ่มพลังงานทดแทนให้ถึง 20% ภายในปี พ.ศ. 2565 ซึ่งต้องการพลังงานจากลมถึง 800 เมกะวัตต์ [1] ปัจจุบันประเทศไทยยังไม่สามารถผลิตพลังงานขั้นสุดท้ายจากพลังงานลมได้ไม่ถึงครึ่งหนึ่งที่ต้องการ สำหรับงานวิจัยนี้จึงเป็นหนึ่งในการวิจัยเพื่อค้นคว้าเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกังหันลมและนำผลการศึกษาไปต่อยอดในการทำงานกังหันลมที่เหมาะสมกับประเทศไทย โดยปกติกังหันลมแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทด้วยกันก็คือ กังหันลมแนวแกนนอน (Horizontal Axis Wind Turbine, HAWT) และกังหันลมแนวแกนตั้ง (Vertical Axis Wind Turbine, VAWT) [2] การศึกษาเกี่ยวกับพลังงานลมในประเทศไทยในปัจจุบันได้มีการศึกษาเกี่ยวกับพลังงานลมอย่างจริงจังที่ศูนย์วิจัยและบริการด้านพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ได้ทำการพัฒนาและสาธิตต้นแบบเทคโนโลยีกังหันลมผลิตไฟฟ้าความเร็วต่ำ ผลการวิจัยทำให้ประเทศไทยได้ต้นแบบกังหันลมแนวแกนนอนในการผลิตไฟฟ้าขนาด 5 กิโลวัตต์ ที่เหมาะกับการผลิตไฟฟ้าที่ความเร็วลมเฉลี่ย 3-4 เมตรต่อวินาที [3] และ นอกจากนี้ยังมีโครงการวิจัยพัฒนากังหันลมผลิตไฟฟ้าแบบขนาด 50 กิโลวัตต์ การทดสอบพบว่ากังหันลมเริ่มผลิตไฟฟ้าที่ความเร็วลม 2.5 เมตรต่อวินาที และได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด 50 กิโลวัตต์ ที่ความเร็วลม 10.5 เมตรต่อวินาที ซึ่งจะได้กังหันลมที่มีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าได้ 30 เปอร์เซ็นต์ของกำลังสูงสุดสำหรับลมเฉลี่ยในประเทศไทย [4] การศึกษาเกี่ยวกับพลังงานลมในประเทศไทยต่างประเทศสำหรับกังหันลมแนวแกนนอนมีงานวิจัยที่โดดเด่น คือการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการไหลของอากาศโดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า LDV (Laser Doppler velocimetry) [5-7] การวิจัยพบว่ากระแสลมที่กระทำกับใบพัดกังหันลมประกอบไปด้วยความเร็ว 3 ทิศทางอันได้แก่ Axial velocity, Tangential velocity, และ Span-wise velocity นอกจากนี้การทดสอบยังค้นพบว่า ความเร็วในแนวแกนใบ หรือ Span-wise velocity เกิดจากแรงหนีศูนย์กลางขณะที่ใบพัดกังหันลมหมุน อย่างไรก็ตามได้มีนักวิจัยพยายามพัฒนาโรเตอร์ของกังหันลมโดยการศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงกระแสลม เปรียบเทียบกับการคำนวณทางด้านตัวเลขโดยใช้ทฤษฎี Blade Element Momentum (BEM) ผลการทดสอบและการคำนวณทางด้านตัวเลขมีความแตกต่างกันเนื่องจากความซับซ้อนของความเร็วลัพท์ 3 มิติที่เกิดจากการหมุนของใบพัด [8] สำหรับงานวิจัยนี้จะนำข้อมูลและพฤติกรรมการไหลของอากาศที่ตรวจวัดได้จาก Laser Doppler velocimetry มาวิเคราะห์มุมปะทะและการไหลวนบนผิวใบพัดกังหันลมว่ามีพฤติกรรมอย่างไรตามตลอดแนวแกนใบจากบริเวณโคนใบถึงปลายใบ

## อุปกรณ์และวิธีการทดสอบ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นกังหันลมแนวแกนนอน (Horizontal Axis Wind Turbine, HAWT) ชนิดแบบ 3 ใบพัด โรเตอร์ของกังหันลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 1 ในแต่ละใบพัดจะประกอบไปด้วยแพนอากาศ 4 ชนิด (DU91-W2-250 DU93-W-210 NACA63-618 และ NACA63-215) แพนอากาศทั้ง 4 ชนิดทำมาจากโพลียูรีเทน รูปร่างของใบพัดออกแบบใช้ทฤษฎี Blade Element Momentum (BEM) ตัวใบพัดมีการบิดและเรียวกที่ละนิดจนถึงปลายใบ ตำแหน่งของโคนใบพัดเริ่มต้นที่ตำแหน่ง  $r/R = 0.1$  แพนอากาศทั้ง 4 ชนิดจะวางตำแหน่งตามแกนแกนใบพัด ตำแหน่งของแพนอากาศซึ่งเริ่มต้นที่ตำแหน่ง  $r/R = 0.2$  โดยตำแหน่ง  $r/R = 0.2 - 0.3$  ใช้ DU91-W2-250  $r/R = 0.4 - 0.5$  ใช้ DU93 W-210  $r/R = 0.6 - 0.8$  ใช้ NACA63-618 และ  $r/R = 0.9 - 1.0$  ใช้ NACA63-215

ตามลำดับ การกระจายมุมบิดและความยาวคอร์ดของใบพัดจะเห็นว่าลักษณะของใบพัดที่ใกล้โคนจะมีมุมบิดมากและมีขนาดความยาวคอร์ดมากด้วย มุมบิดของใบพัดจะค่อยๆ บิดน้อยลงและค่อยๆ ลดความยาวคอร์ดลงทำให้ใบพัดมีลักษณะเรียวปลาย



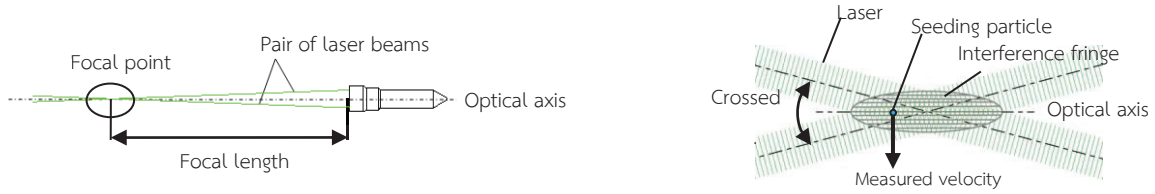
ภาพที่ 1 ตำแหน่งของแพนอากาศ และการกระจายมุมบิดและความยาวคอร์ด

ภาพที่ 2 แสดงลักษณะภายนอกและภายในของอุโมงค์ลมที่ใช้ในการทดสอบ อุโมงค์ลมเป็นชนิดไหลวน (Circular Wind Tunnel) ของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยมิเอะ ประเทศญี่ปุ่น บริเวณด้านในอุโมงค์ลมจะมีพื้นที่ทดสอบซึ่งเป็นลักษณะเปิดโล่ง ช่องทางออกของกระแสลมมีลักษณะเป็นวงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.6 เมตร และช่องทางเข้ากระแสลมมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด กว้าง 4.5 เมตร x ยาว 4.5 เมตร อุโมงค์ลมใช้พัดลมกำลัง 400 กิโลวัตต์ในการผลิตกระแสลมโดยสามารถปรับความเร็วกระแสลมได้สูงสุดถึง 30 เมตรต่อวินาที โรเตอร์ถึงช่องทางออกของกระแสลมมีระยะ 1.8 เมตร ความเร็วสามารถวัดค่าได้ด้วยท่อปีโตต์ งานวิจัยในครั้งนี้ใช้กระแสลมคงที่ 7 เมตรต่อวินาที ความเข้มข้นของความปั่นป่วนน้อยกว่า 0.5% การหมุนของใบพัดควบคุมด้วยเซอร์โวมอเตอร์



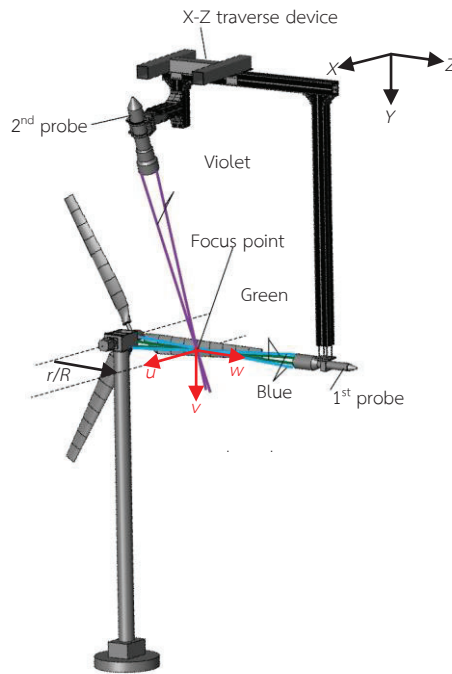
ภาพที่ 2 แสดงภายนอกและภายในอุโมงค์ลม

สำหรับเครื่องมือที่ใช้วัดความเร็วลมในอุโมงค์ลมจะใช้ Laser Doppler Velocimetry (LDV) ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดความเร็วของลมชนิดหนึ่งที่ใช้ประโยชน์ธรรมชาติที่เรียกว่าปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ (Doppler effect) ข้อดีของการวัดความเร็วด้วย LDV คือระบบสามารถสร้างปริมาตรที่ใช้ในการวัดความเร็ว (Measuring volume) โดยการตัดกันของเลเซอร์สองเส้นที่ความยาวคลื่นเท่ากัน (Pair of laser beams) ที่ตำแหน่งโฟกัส (Focal length) ซึ่งระบบ LDV จะไม่มีการรบกวนการไหลในปริมาตรของ Measuring volume ในขณะที่วัด นอกจากนี้ อุณหภูมิ ความดัน และข้อจำกัดทางกายภาพ ไม่สามารถส่งผลกระทบต่อ การวัดด้วยวิธี LDV การสร้างปริมาตรการวัดและลักษณะของปริมาตรการวัดแสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 การสร้างปริมาตรวัดความเร็วของเทคนิค LDV

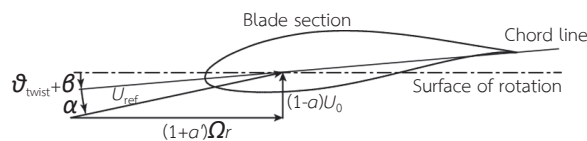
สำหรับระบบ LDV ที่จะใช้ในการวัดส่วนประกอบความเร็ว (Velocity components) ในแกน X Y และ Z บริเวณผิวของใบพัดนั้นต้องใช้หัวเลเซอร์ LDV 2 หัวติดตั้งในแนวแกนนอนและแนวแกนตั้งดังภาพที่ 4 งานวิจัยนี้เพื่อที่จะสามารถวัดส่วนประกอบความเร็วใน 3 แกนพร้อมๆ กันจึงประยุกต์ใช้หัวเลเซอร์ 2 หัวพร้อมกับใช้คู่ของแสงเลเซอร์ 3 คู่ ในการหาส่วนประกอบความเร็วในแต่ละแกนหัวเลเซอร์จะติดตั้งบนอุปกรณ์ที่สามารถเคลื่อนที่ได้ในระนาบ X-Z มุมหมุนของโรเตอร์ (Azimuth angle) สามารถตรวจวัดได้อย่างแม่นยำโดยใช้ single reset pulse



ภาพที่ 4 กังหันลมและตำแหน่งการวางหัวเลเซอร์

### ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

ในหัวข้อนี้การคำนวณมุมปะทะทั้งจากวิธีการทดสอบจาก LDV และการคำนวณจากทฤษฎี BEM จะนำมาเปรียบเทียบกับที่สภาวะความเร็วปลายใบต่ำ ( $\lambda = 3.7$ ) และสภาวะความเร็วปลายใบเหมาะสม ( $\lambda = 5.2$ ) ซึ่งเป็นสภาวะความเร็วปลายใบที่กังหันลมให้ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานสูงสุด คือ 0.43 ภาพที่ 4 แสดงแผนภาพภาคตัดขวางใบพัด จากรูปจะเห็นความสัมพันธ์ระหว่างมุมปะทะและสามเหลี่ยมความเร็ว (Velocity triangle)



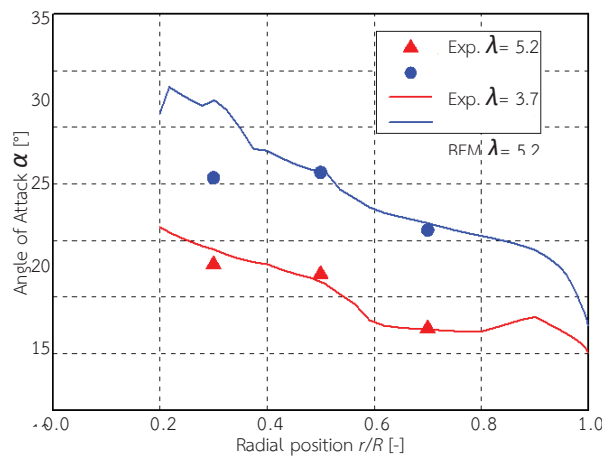
ภาพที่ 4 แผนภาพความเร็ว

มุมปะทะ  $\alpha$  สามารถหาจากสมการ

$$\alpha = \tan^{-1} \left[ \frac{(1-a)U_0}{(1+a')\Omega r} \right] - (\theta_{\text{twist}} + \beta) \quad (1)$$

เมื่อ  $\alpha$  = มุมปะทะ [°]  $\theta_{\text{twist}}$  = มุมบิดของใบพัดที่ตำแหน่งใดๆ [°]  
 $\beta$  = มุมพิตช์ (= -2) [°]  $a$  = Axial induced factor [-]  
 $a'$  = Tangential induced factor [-]  $\Omega$  = ความเร็วเชิงมุม (1/s)  
 $r$  = รัศมี [m]  $U_0$  = กระแสลมหลัก (= 7) [m/s]

ภาพที่ 5 แสดงมุมปะทะจากข้อมูลการวัดโดย LDV ที่ระยะ  $r/R = 0.3$  0.5 และ 0.7 และมุมปะทะจากทฤษฎี BEM ที่ระยะ  $0.2 < r/R < 1.0$  จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่ามุมปะทะในสภาวะทำงานที่ความเร็วปลายใบต่ำ ( $\lambda = 3.7$ ) จะมีค่าสูงกว่าความเร็วปลายใบเหมาะสม ( $\lambda = 5.2$ ) เนื่องจากมุมปะทะที่สูงทำให้เกิดการหมุนเวียนของอากาศบนผิวใบพัดเป็นวงกลม (Vortex) ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์ป้ออย่างรุนแรงในสภาวะนี้ เมื่อพิจารณามุมปะทะที่ระยะ  $r/R = 0.5$  และ 0.7 เกือบจะมีค่าเท่ากับการคำนวณจากทฤษฎี BEM ซึ่งเราสามารถบอกได้ว่าทฤษฎี BEM สามารถพยากรณ์มุมปะทะได้อย่างคร่าวๆ จากช่วงกลางใบพัดถึงปลายใบพัด ระยะ  $r/R = 0.3$  ทฤษฎี BEM ไม่สามารถคำนวณได้ถูกต้องเนื่องจากการไหลแบบซับซ้อนของความเร็วลัพท์ 3 มิติของสภาวะการหมุนจริงของกังหันลม และบริเวณโคนใบจะมีผลกระทบจากแรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal force) โดยมีผลต่อกระแสลมในทิศทางแนวกางใบพัด (Span-wise direction) ซึ่งทฤษฎี BEM สามารถคำนวณความเร็วลัพท์ได้เพียง 2 มิติเท่านั้น



ภาพที่ 5 มุมปะทะ

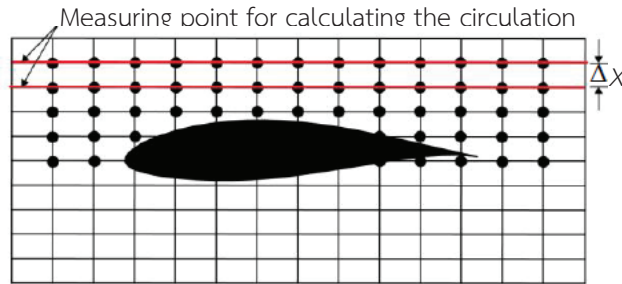
การไหลบนบนผิวใบพัดกังหันลมสามารถคำนวณได้จากสมการความเร็วเหนี่ยวนำดังสมการที่ 2

$$\Gamma = 2\pi \left( \frac{\partial(1/\Delta v)}{\partial x} \right)^{-1} \quad (2)$$



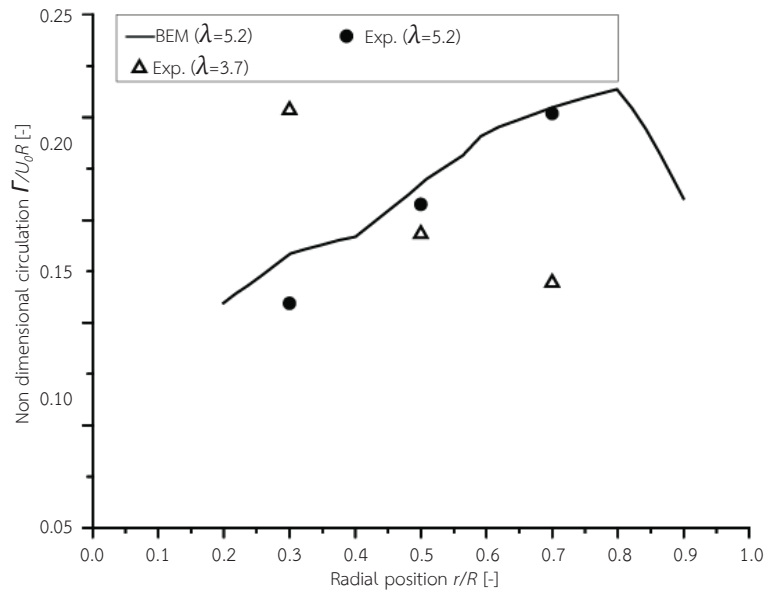
เมื่อ  $\Gamma$  = การไหลวนบนผิวใบพัด [ $m/s^2$ ]  $v$  = ความเร็วสัมผัสเหนี่ยวนำ [ $m/s$ ]  
 $X$  = ตำแหน่งในระยะแนวแกน  $X$  [ $m$ ]

ในการคำนวณการไหลวนบนผิวใบพัดจะใช้ข้อมูลจากการวัดความเร็วลมจาก LDV โดยการคำนวณจะต้องตั้งพื้นที่ควบคุม (Control volume) ดังภาพที่ 6 จุดสีดำในรูปแสดงถึงตำแหน่งการวัดจาก LDV ส่วนเส้นสีแดงแสดงถึงตำแหน่งการวัดที่ใช้ในการคำนวณซึ่งเมื่อแทนค่าในสมการที่ 2 จะได้ผลของการคำนวณการไหลวนบนผิวใบพัดได้ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 6 การตั้งพื้นที่ควบคุมในการคำนวณการไหลวนบนผิวใบพัดกึ่งหันลม

จากภาพที่ 7 จะเห็นได้ว่าการทำนายการไหลวนบนผิวใบพัดที่สภาวะความเร็วปลายใบเหมาะสม ( $\lambda=5.2$ ) ด้วยทฤษฎี BEM จะมีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆตามแนวแกนใบจนถึงที่ระยะ  $r/R = 0.8$  จากนั้นจะลดลง ซึ่งเหตุผลของปรากฏการณ์นี้คือการก่อตัวของกระแสวนที่ปลายใบพัด การคำนวณการไหลวนบนผิวใบพัดที่สภาวะความเร็วปลายใบเหมาะสม ( $\lambda=5.2$ ) จากข้อมูลจาก LDV จะพบว่าค่าของการไหลวนบนผิวใบพัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใกล้ปลายใบพัด สำหรับในกรณีการคำนวณการไหลวนบนผิวใบพัดที่สภาวะความเร็วปลายใบต่ำ ( $\lambda=3.7$ ) จากข้อมูลจาก LDV จะพบว่าจะมีลักษณะคล้ายๆกับกรณีความเร็วปลายใบเหมาะสมแต่มีค่าต่ำกว่บริเวณ  $r/R = 0.3$  เหตุผลที่ตำแหน่ง  $r/R = 0.5$  และ  $r/R = 0.7$  มีค่าการไหลวนบนผิวใบพัดต่ำก็เพราะการที่มีมุมปะทะที่สูงทำให้เกิดการลดลงของแรงยกและเพิ่มแรงต้านทำให้เกิดปรากฏการณ์บ๊อ (Stall) ส่วนเหตุผลที่  $r/R = 0.3$  มีค่าที่สูงสำหรับสภาวะความเร็วปลายใบต่ำ ( $\lambda=3.7$ ) ข้อสันนิษฐานน่าจะมาจากรูปร่างใบพัดที่หนาพร้อมทั้งมีชายปีกหน้าที่ยึดที่อและมีการมีกระแสไหลในแนวแกนใบจากอิทธิพลของแรงหนีศูนย์กลางในตำแหน่งนี้ทำให้ช่วยลดการแยกชั้นขอบเขตของอากาศดังนั้นอาจทำให้ปรากฏการณ์บ๊อ (Stall) ไม่เกิดขึ้นในตำแหน่งนี้จึงมีค่าการไหลวนบนพื้นผิวใบพัดสูง



ภาพที่ 7 การไหลวนบนผิวใบพัดกังหันลมตามแนวแกนใบ

### สรุปผลการวิจัย

จากการวิเคราะห์ข้อมูลจากผลการทดสอบในอุโมงค์ลมพบว่าใบพัดต้นแบบให้ผลสรุปดังนี้

1. มุมปะทะที่สภาวะความเร็วปลายใบต่ำจะมีค่ามุมปะทะที่สูงเนื่องจากปรากฏการณ์ป้อนส่งผลให้กระแสลมบนพื้นผิวใบพัดมีความปั่นป่วนในทิศทางการไหลและกระแสลมไม่ยึดติดกับผิวใบพัดและไหลออกจากผิวใบพัด
2. การไหลวนบนผิวใบพัดในสภาวะความเร็วปลายใบที่เหมาะสมมีค่าที่สูงกว่าสภาวะความเร็วปลายใบต่ำ
3. การไหลวนบนผิวใบพัดจะลดลงอย่างรวดเร็วบริเวณปลายใบเนื่องจากการก่อตัวของกระแสลมที่ปลายใบพัด
4. ทฤษฎี BEM สามารถทำนายตัวแปรทางอากาศพลศาสตร์ได้คร่าวๆบริเวณกลางใบพัดถึงปลายใบพัด

### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ขอแสดงความขอบคุณ Prof. Dr. Takao Maeda หัวหน้าห้องวิจัย Fluid Engineering for Energy and Environment Laboratory แห่ง Mie University เป็นอย่างสูงที่เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาในการทำวิจัยนี้ และขอแสดงความขอบคุณบุคลากรและเจ้าหน้าที่ของทางห้องวิจัยที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการทำวิจัยครั้งนี้

### เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2560). แผนพัฒนาพลังงานทดแทน 15 ปี (พ.ศ. 2551 - 2566). กรุงเทพฯ: กระทรวงพลังงาน.
- [1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2560). สถานการณ์พลังงานของประเทศไทย มกราคม - มีนาคม 2560. กรุงเทพฯ: กระทรวงพลังงาน.
- [3] วิรัชย์ โธมรินทร์ (2551). รายงานการศึกษาวินิจฉัยพัฒนาสถิติต้นแบบเทคโนโลยีกังหันลมผลิตไฟฟ้าความเร็วต่ำ. คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ

- [4] วิรัชย์ โยชนรินทร์ (2552). รายงานโครงการวิจัยเพื่อพัฒนากังหันลมผลิตไฟฟ้าต้นแบบขนาด 50 กิโลวัตต์. คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยอัญบุรี
- [5] Phengpom, T., Kamada, Y., Maeda, T., Matsuno, T., Sugimoto, N. (2016). Analysis of Wind Turbine Pressure Distribution and 3D Flows Visualization on Rotating Condition. *Journal of Engineering (IOSRJEN)*. 6(2), 18-30.
- [6] Phengpom, T., Kamada, Y., Maeda, T., Murata, J., Nishimura, S., and Matsuno, T.(2015). Experimental investigation of the three-dimensional flow field in the vicinity of a rotating blade. *Journal of Fluid Science and Technology*. 10 (2), Paper No.15-00313, 16 pages.
- [7] Phengpom, T., Kamada, Y., Maeda, T., Murata, J., Nishimura, S., and Matsuno, T. (2015). Study on Blade Surface Flow around Wind Turbine by Using LDV Measurements. *Journal of Thermal Science*. 24 (2)' 131-139.
- [8] Ronsten, G. (1992). Static pressure measurements on a rotating and a non-rotating 2.375 m wind turbine blade. Comparison with 2D calculations. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 39 (1), 105–118.

## การศึกษาผลกระทบของมุมเอียงของเสาต่อประสิทธิภาพการทำงานของกังหันลมขนาดเล็กแบบชนิด ทุ่นลอยน้ำ

Study on the effect of angle of tower inclination on the performance of a small  
floating wind turbines.

วงศ์กร วิเศษสังจา<sup>1\*</sup> วิรัชย์ โธมรินทร์<sup>1</sup> และเดชา อินทร์โทโส<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ศูนย์วิจัยและบริการด้านพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 12110

<sup>2</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 12110

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอการศึกษาผลกระทบของมุมเอียงต่อประสิทธิภาพของกังหันลมของเสาบนทุ่นลอยน้ำ (float tower) ขนาดใบกังหันมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 84 เซนติเมตร โดยเป็นการทดสอบภายในอุโมงค์และสมการเชิงทฤษฎีของกังหันลม ซึ่งมีตัวแปรที่สำคัญที่นำมาศึกษา คือองศาของการเอียงตัวของเสากังหันเนื่องจากการลอยอยู่ในน้ำนั้นทำให้กังหันลมไม่มีเสถียรภาพ และจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพโดยตรง และจะนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองของเสาแบบยึดตรึง (fixed tower) ซึ่งทดสอบโดย ศูนย์วิจัยและบริการด้านพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางของใบกังหันที่เท่ากัน ซึ่งในการทดสอบนั้นได้ทำการทดสอบด้วยความเร็วลมตั้งแต่ 1.7 – 6 เมตรต่อวินาทีและจะหาค่าเฉลี่ยของความเร็วลมที่ 5 เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นความเร็วลมเฉลี่ยในเมืองไทย โดยหาค่าเฉลี่ยด้วยการทำการทดลอง 10 ครั้ง ผลจากการศึกษาพบว่า เสาแบบทุ่นลอยน้ำนั้นมีค่าเฉลี่ยองศาการเอียงอยู่ที่ 5 องศา และมีรอบต่อนาทีจำนวนเฉลี่ย 1192 รอบ โดยที่มีความเร็วของใบพัดกังหันเฉลี่ยที่ 124.84 rad/s และโมเมนตัมเฉลี่ยที่ 0.119 Nm ซึ่งมีค่าเฉลี่ยมากกว่าเสาแบบยึดตรึง ซึ่งมีค่าเฉลี่ยของรอบต่อนาทีที่ 1032 และความเร็วของใบพัดกังหันเฉลี่ยที่ 108.14 rad/s แต่มีค่าเฉลี่ยโมเมนตัมมากกว่าที่ 0.28 Nm

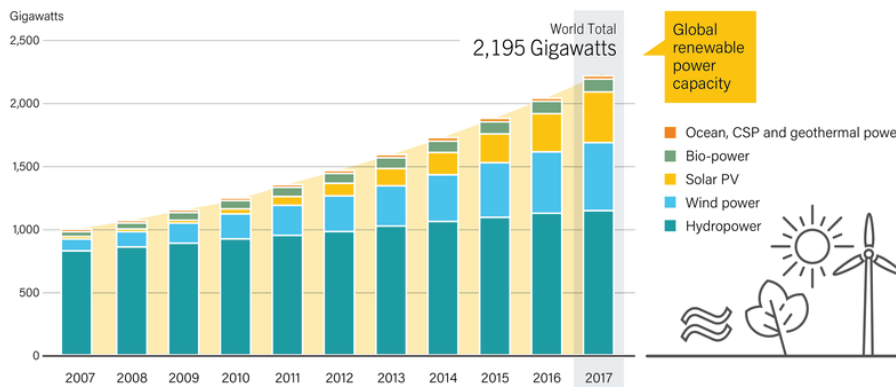
**คำสำคัญ:** กังหันลมลอยน้ำ พลังงานทดแทน กังหันลมขนาดเล็ก

Key Words: Floating wind turbine, Renewable energy, Small wind turbine

\*Corresponding author: Tel.: 074-609600. E-mail address: anurak@tsu.ac.th

## บทนำ

เชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นแหล่งพลังงานหลักในการผลิตพลังงานมากกว่าร้อยละ 80 ของการใช้พลังงานทั่วโลกซึ่งทำให้เกิดความเสียหายที่สำคัญต่อสิ่งแวดล้อมโดยมลพิษและนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ดังนั้นแหล่งพลังงานธรรมชาติที่เรียกว่าพลังงานหมุนเวียนจึงเป็นแหล่งพลังงานทดแทนซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่ไม่จำกัด เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและคุ้มค่า ตามรายงานของ Renewable Energy Policy Network for the 21<sup>st</sup> Century (REN21) 2017 เทคโนโลยีพลังงานทดแทนเช่นพลังงานลมพลังงานแสงอาทิตย์ ชีวมวล น้ำ และพลังงานความร้อนใต้พิภพ ผลิตไฟฟ้าได้ประมาณ 26.5% หรือ 2,195 GW ปี พ. ศ. 2560 ดังแสดงในภาพที่ 1 ซึ่งผลิตพลังงานลม 539 GW และการผลิตพลังงานลมนอกชายฝั่งที่ 18.8 GW [1] กังหันลมที่ติดตั้งทั่วโลกสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าเพียงพอสำหรับการใช้ไฟฟ้าทั่วโลกมากกว่า 5% อีกทั้งพลังงานลมได้รับเลือกให้เป็นยุทธศาสตร์ด้านพลังงานในอนาคตแทนที่จะเป็นเชื้อเพลิงฟอสซิลและพลังงานนิวเคลียร์ในหลายประเทศ [2]



ภาพที่ 1 กำลังการผลิตพลังงานทดแทนทั่วโลกระหว่างปี 2007-2017 [1]

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเสาแบบท่อนลอยน้ำสำหรับกังหันลมขนาดเล็ก โดยที่จะใช้ความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างเสาแบบท่อนลอยน้ำและเสาแบบยึดตอจากงานวิจัยเดิมของศูนย์พลังงาน มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม โดยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบที่เท่ากัน

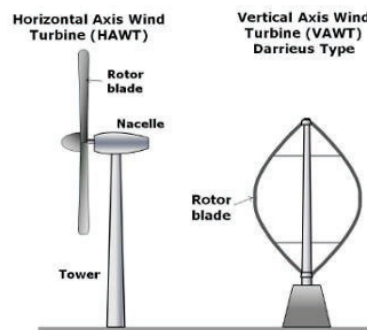
## พลังงานลม

พลังงานลมสามารถสร้างกระแสไฟฟ้าได้โดยใช้กังหันลมเพื่อแปลงพลังงานจลน์ของลมเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าลมพัดผ่านใบพัดสร้างแรงยกซึ่งทำให้ใบพัดหมุน ใบพัดเชื่อมต่อกับเพลลาขับซึ่งจะเปลี่ยนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า จุดตั้งฟาร์มกังหันลมที่ดีที่สุดอยู่ที่ยอดเนินเรียบ ภูเขากลม ชายฝั่ง และช่องว่างภูเขาที่เปรียบเสมือนอุโมงค์ลม[3] ในภาพที่ 2 ความเร็วลมเฉลี่ยของ ประเทศไทยอยู่ที่ประมาณ 4-5 เมตรต่อวินาที โดยมีความเร็วเริ่มต้นในการผลิตไฟฟ้าอยู่ที่ 3-4 เมตรต่อวินาทีและกำลังผลิตไฟฟ้าสูงสุดที่ 12 เมตรต่อวินาที ซึ่ง เหมาะสำหรับกังหันลมขนาดเล็ก ในปี พ. ศ. 2560 กำลังการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมทั้งหมดของไทยอยู่ที่ 627 เมกะวัตต์ [4]

		THAILAND WIND POWER CLASSES										
Elevation		1.1	1.2	1.3	1.4	2	3	4	5	6	7	
10 m	m/s	0	2.8	3.6	4.0	4.4	5.1	5.6	6.0	6.4	7.0	9.4
	W/m <sup>2</sup>	0	25	50	75	100	150	200	250	300	400	1,000
30 m	m/s	0	3.3	4.1	4.7	5.2	5.9	6.5	7.0	7.4	8.2	11.0
	W/m <sup>2</sup>	0	40	80	120	160	240	320	400	480	640	1,600
50 m	m/s	0	3.6	4.4	5.1	5.6	6.4	7.0	7.5	8.0	8.8	11.9
	W/m <sup>2</sup>	0	50	100	150	200	300	400	500	600	800	2,000

ภาพที่ 2 ประเภทพลังงานลมของประเทศไทย [5]

กังหันลมมี 2 ประเภท ได้แก่ กังหันลมแนวนอน (Horizontal Axis Wind Turbines) และกังหันลมแกนแนวตั้ง (Vertical Axis Wind Turbines) ดังแสดงในรูปที่ 3 การใช้งานที่อยู่อาศัยต้องใช้กำลังไฟฟ้า ประมาณ 400 วัตต์ ถึง 100 กิโลวัตต์ขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ด้านไฟฟ้า [6]



ภาพที่ 3 ประเภทกังหันลม [6]

### กังหันลมลอยน้ำ

กังหันลมนอกชายฝั่งมีการพัฒนาเพื่อให้กังหันลมได้รับพลังงานมากที่สุด เนื่องจากพื้นผิวมหาสมุทรเรียบและไม่มีสิ่งกีดขวางดังนั้นความเร็วลมจะสูงมาก อย่างไรก็ตามในความคิดที่มากขึ้นในมหาสมุทรกังหันลมลอยอาจมีต้นทุนทางเศรษฐกิจและต้นทุนการติดตั้งต่ำกว่าโครงสร้างแบบฝังโครงสร้างใต้พื้นทะเล [7] และยังคงมีความท้าทายที่สำคัญบางอย่างเนื่องจากการออกแบบกังหันลมแบบลอยน้ำจะมีความซับซ้อนมากในการบำรุงรักษา จะมีราคาแพงและลำบากเนื่องจากต้องใช้เฮลิคอปเตอร์หรือเรือเพื่อขนส่งช่างเทคนิคและอุปกรณ์สำหรับการบำรุงรักษา นอกจากนี้จะมีการสูญเสียพลังงานในสายส่งเนื่องจากระยะทางของท่อนลอยน้ำห่างไกลจากสายส่ง [8] เนื่องจากสายส่งมีระยะทางไกลจากชายฝั่งดังนั้นการใช้ประโยชน์ของกังหันลมลอยน้ำนั้นสามารถผลิตไฟฟ้าเพื่อใช้ภายในเกาะ และสามารถผลิตไฟฟ้าใช้สำหรับแท่นขุดเจาะต่างๆกลางทะเล อีกทั้งยังสามารถผลิตไฟฟ้าให้สำหรับระบบกรองน้ำจากทะเล และยังสามารถเป็นสถานีชาร์จไฟฟ้ากลางทะเลสำหรับเรือประมงและเรือสำรวจทางทะเล

ในปัจจุบันมีกังหันลมลอยอยู่หลายตัวในระยะการปฏิบัติงานและระยะการพัฒนา ประการแรก WindFloat ได้รับการพัฒนาโดยบริษัท Principle Power ด้วยการออกแบบแพลตฟอร์มชนิด spar-submersible มีต้นแบบแรกๆที่เรียกว่า WF1 ซึ่งมีกำลังการผลิต 2 เมกะวัตต์ ในปี 2554 ซึ่งอยู่ห่างจากชายฝั่ง Agucadoura 5 กิโลเมตร ในประเทศโปรตุเกส และในอนาคต WindFloat รุ่นถัดไปจะได้รับการพัฒนาขึ้นโดยคำนึงถึงขนาดและสมรรถนะสูงสุดถึง 5-8 เมกะวัตต์ [16] ประการที่สองมหาวิทยาลัย Maine ได้รับการติดตั้งต้นแบบ VoltturnUS 1: 8 ซึ่งเป็นรูปกังหันขนาด 1: 8 ของกังหันลมขนาด 6 เมกะวัตต์ที่มีการออกแบบแพลตฟอร์มชนิด spar-submersible และได้กลายเป็นกังหันลมลอยน้ำอันแรกในอเมริกาที่ผลิตไฟฟ้าผ่านสายส่งใต้น้ำไปยัง Central Maine Power ในปี 2013 [9] ประการที่สาม บริษัท Statoil ได้เปิดตัวโครงการ Hywind ในปี พ. ศ. 2560 ซึ่งเป็นฟาร์มกังหันลมแบบลอยตัวแห่งแรกในประเทศสกอตแลนด์ที่มี

รูปแบบชนิด spar-buoy ฟาร์มตั้งอยู่ใน North Sea ประมาณ 30 กิโลเมตร จากชายฝั่งสกอตแลนด์ นอกจากนี้โครงการประกอบด้วยกังหันลมขนาด 6 เมกกะวัตต์จำนวน 5 ต้น และมีขนาดกำลังการผลิตรวม 30 เมกกะวัตต์เพื่อรองรับการใช้ไฟฟ้าจำนวน 20,000 คริวเรือน [10]

ฐานรากที่ลอยตัวจะต้องทำงานในสภาพอากาศแปรปรวน แพลตฟอรม์นี้จะได้รับการออกแบบมาเพื่อต่อต้านการเปลี่ยนแปลงแบบไดนามิกและโหลดหลากหลายประเภท ฐานรากที่ลอยน้ำสำหรับกังหันลมลอยน้ำมีจำนวน 3 ประเภท คือ spar-buoy, spar-submersible และ tension leg platform ดังแสดงในภาพที่ 4



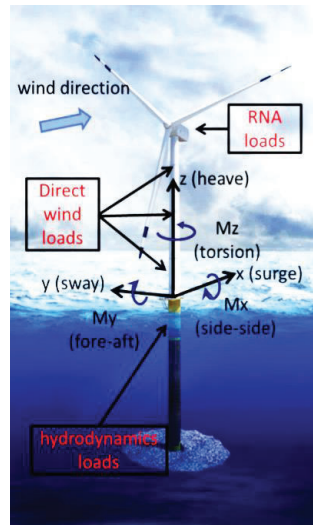
ภาพที่ 4 แนวความคิดพื้นฐานของกังหันลมลอยน้ำ [11]

Spar buoy เป็นรูปทรงกระบอกที่มีที่ถ่วงน้ำหนักเพื่อความมั่นคงแพลตฟอร์ม ความมั่นคงจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากศูนย์กลางของแรงโน้มถ่วงต่ำกว่าจุดศูนย์กลางของการลอยตัวในมหาสมุทร นอกจากนี้เพื่อเพิ่มศูนย์กลางการลอยตัวส่วนบนของโครงสร้างเบาว่าส่วนล่างของโครงสร้าง เนื่องจาก spar buoy เป็นแพลตฟอร์มแบบกระบอกสูบ ดังนั้นจึงง่ายต่อการสร้างและความมั่นคง อย่างไรก็ตามเนื่องจากโครงสร้างขนาดใหญ่ อาจทำให้เกิดปัญหาระหว่างการขนส่งและติดตั้ง นอกจากนี้แพลตฟอร์มเหล่านี้สามารถใช้งานได้ที่ความลึกของมหาสมุทรมากกว่า 100 เมตร [12]

Spar submersible เป็นแพลตฟอร์มที่มีการลอยตัวที่มั่นคงแบบกึ่งลอยกึ่งจมอยู่บริเวณพื้นผิวมหาสมุทร และทอดสมออยู่กับกันทะเล โครงสร้างขนาดใหญ่และหนักเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับความมั่นคง และเมื่อการกระทำของการดึงมีค่าต่ำ จะช่วยปรับปรุงการใช้ประโยชน์ที่หลากหลายและง่ายต่อการติดตั้ง [12]

Tension leg platform เป็นโครงสร้างกึ่งลอยตัว และความมั่นคงจะเกิดขึ้นจากความตึงของสายเอ็นของสมอที่ยึดกับกันทะเล ดังนั้นจึงทำให้โครงสร้างมีขนาดเล็กและเบา อย่างไรก็ตามระบบสายเอ็นและระบบยึดจะได้รับความเค้นมากขึ้นเนื่องจากการออกแบบโครงสร้าง แพลตฟอรม์นี้มีโอกาสมีความยากลำบากระหว่างการติดตั้ง และอาจได้รับอันตรายจากการปฏิบัติงานหากสายเอ็นไม่ทำงาน [12]

## ชนิดของแรงที่กระทำสำหรับกังหันลมลอยน้ำ



ภาพที่ 5 แรงที่กระทำสำหรับกังหันลมลอยน้ำ [13]

### แรงน้ำหนักบรรทุกทุกจร (Live load)

- แรงพลศาสตร์ (Aerodynamic loads) จาก Rotor nacelle assembly (RNA) คือกำลัง และต้นกำเนิดของโมเมนต์ของใบพัดและถูกส่งผ่านทางตัวขับเคลื่อนยนต์และแผ่นโลหะของฐานของเครื่องยนต์
  - แรงที่เกิดขึ้นเป็นระยะ (Periodic loads) จะเกิดจากความไม่สมดุลของโครงสร้างและความปั่นป่วนของกระแสลมและน้ำ
  - แรงของการปฏิบัติงานตามปกติ (Normal operational loads)
- แรงลาก (Drag loads) จากการกระทำโดยตรงของลมบนเสาและการไหลของลมหมุนวนที่อาจเกิดขึ้น
- แรงเฉื่อย (Inertial loads) เกี่ยวข้องกับการสั่นสะเทือนของระบบ (เช่น เนื่องจากความเร่งของมวล RNA) โดยสภาพแวดล้อมของลมปั่นป่วนและแรงเฉื่อย โดยคุณสมบัติของแรงเฉื่อยและโครงสร้างแบบพลศาสตร์ของโรเตอร์แบบหมุนและการสั่นของโครงสร้างพื้นฐาน เฉพาะในกรณีของโครงสร้างพื้นฐานแบบลอยน้ำ
- แรงมาจากการติดตั้ง (Loads from installation methods) เช่น การยก การคว่ำ และการซ่อมบำรุงรักษา (รวมถึงความเป็นไปได้ในการลงจอดเครื่องบินสำหรับซ่อมบำรุง)
- แรงอุทกพลศาสตร์ (Hydrodynamic loads) ในส่วนของเสา เช่น คลื่น กระแสน้ำ และแรงน้ำแข็ง
- แรงแผ่นดินไหว (Seismic loads)
- แรงจากผลกระทบ (Loads from impacts) เช่น จากการเดินเรือ การควบคุมยานพาหนะต่างๆ การจอดเครื่องบินสำหรับซ่อมบำรุง
- แรงจากการดำเนินการของอุปกรณ์ควบคุมการทำงานและการควบคุม (Loads from actuation of operation and control devices) เช่น ชุดลูกปืนหมุนสายหาลม เบรก กลไกการควบคุมแรงบิด

### แรงน้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead loads)

- แรงโน้มถ่วง (Gravitational loads) รวมถึงน้ำหนักตัวของโครงสร้างและน้ำหนักของเสา



**ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบกำลังการผลิตของกังหันลม**

สมการของกำลังในการผลิตของพลังงานลมสามารถอธิบายได้ดังนี้:

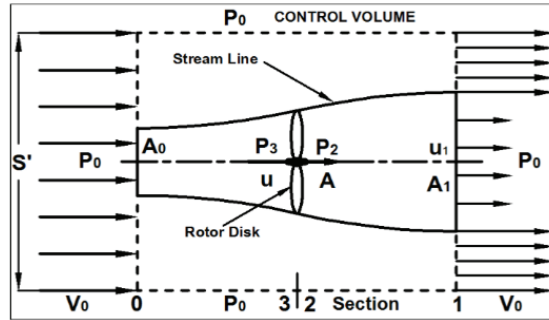
$$P_w = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p \quad (1)$$

เมื่อ  $\rho$  = ความหนาแน่นของอากาศ ( $1.225 \text{ kg/m}^3$ )

$A$  = พื้นที่กวาด ( $\text{m}^2$ )

$V$  = ความเร็วลม ( $\text{m/s}$ )

$C_p$  = สัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลม



ภาพที่ 6 หลักการของทฤษฎี Momentum Theory [15]

ทฤษฎีการวิเคราะห์โดยใช้หลักการของ Momentum Theory นั้น ในเบื้องต้นจะต้องทำการตั้งสมมุติฐาน (Assumption) ขึ้นมาก่อน ดังนี้

1. ลมที่พัดเข้ามาวิเคราะห์จะต้องมีการไหลที่สม่ำเสมอต่อเนื่อง (Steady, Homogeneous Wind Flow)
2. ไม่มีสิ่งกีดขวางการไหลของทางเข้าและทางออกของอุโมงค์ที่ใช้ในการทดสอบ (No Obstruction to Wind Flow Either Upstream or Downstream)
3. การเคลื่อนที่ของลมไม่มีการปั่นป่วนที่ตัวใบกังหันลม (Uniform Flow Velocity at Rotor)
4. ลมที่ไหลเข้ามาวิเคราะห์ต้องคิดว่าเป็นของไหลที่อัดตัวไม่ได้ (Incompressible Wind Flow) จึงไม่มีผลในเรื่องของอุณหภูมิ (Temperature Effect) มากเกี่ยวข้องในการวิเคราะห์

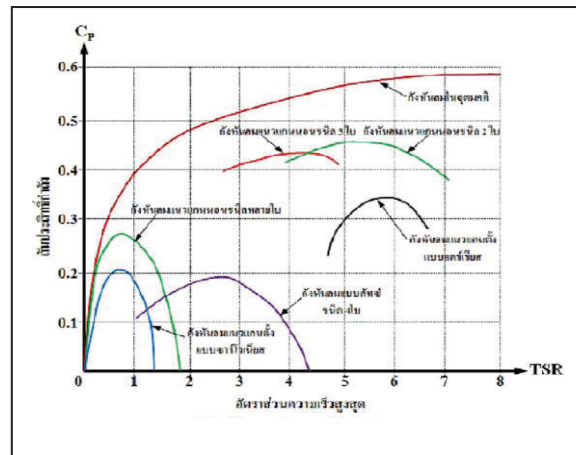
วิเคราะห์ภาพที่ 6 มีตัวแปรใดบ้างที่จำเป็นต้องใช้ในการวิเคราะห์กังหันลมทุก ๆ ชนิด ตัวแปรต่าง ๆ ที่จำเป็นต้องทราบคือ  $S'$  เท่ากับพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดที่เราใช้อยู่ในขอบเขตของการวิเคราะห์ปริมาตรทั้งหมดของระบบ (Control Volume) ในการวิเคราะห์ทฤษฎีของ Momentum นั้นเราสมมุติว่าความหนาแน่นของอากาศที่ อุณหภูมิห้องค่าความหนาแน่นเท่ากับ  $1.225 \text{ kg/m}^3$  และจากกฎของการไหลแบบต่อเนื่อง (Continuity Equation) นั้น การไหลต้องเท่ากันทั้งระบบ นั่นคือ  $Q = A \cdot V$  จะได้  $V_0 A_0 = u A = U_1 A_1$  และจากกฎของเบอร์นูลลี โดยวิเคราะห์ในส่วนของความดันอย่างเดียวตั้งแต่ส่วน ที่ 0 ถึงส่วนที่ 3 และจากส่วนที่ 2 ถึงส่วนที่ 1 ของภาพที่ 6

ทฤษฎีการออกแบบใบกังหันลม โดยใช้ Momentum Theory ในการศึกษาพลังงานจากลมที่สูตรการคำนวณที่จำเป็นต้องใช้โดยทั่วไป ในการคำนวณหาประสิทธิภาพของกังหันลม โดยใช้ทฤษฎี ของหลักการที่เรียกว่า Momentum Theory โดยศึกษารายละเอียดของการวิเคราะห์ตามหลักการ ซึ่งในการออกแบบใบกังหันลมผลิตไฟฟ้านั้นใบกังหันลมผลิตไฟฟ้าย่อมมีความสำคัญเป็น อย่างยิ่งในการคัดเลือกขนาดที่เหมาะสมต่อการทำงานของทั้งระบบกังหันลมผลิตไฟฟ้า ซึ่งหากการออกแบบมีความผิดพลาดสูง ก็ย่อมทำให้การทำงานของกังหันลมผลิตไฟฟ้าผิดพลาดและอาจเกิดการเสียหายตามมาได้ The Betz's limit,  $C_p$  เป็นฟังก์ชันที่ไม่เป็นเชิงเส้นหมายถึงประสิทธิภาพของพลังงานกลที่ดึงออกมาจากพลังงานลม ค่าสัมประสิทธิ์กำลังขึ้นอยู่กับตัวแปรสองตัวแปรคืออัตราส่วนความเร็วปลาย (Tip speed ratio) และ Pitch angle ซึ่ง หมายถึงมุมของใบมีดตามแกนเส้นแวง [15]

สมการ Tip speed ratio (TSR) สามารถเขียนได้ดังต่อไปนี้

$$TSR = \frac{U}{V} = \frac{\Omega R}{V} = \frac{2\pi NR}{V60} \quad (2)$$

เมื่อ  $U$  = ความเร็วสัมพัทธ์ (m/s)  $V$  = ความเร็วลม (m/s)  $\Omega$  = ความเร็วของใบพัดกังหัน (rad/s)  $N$  = ความเร็วรอบของกังหันลม (rpm)  $R$  = รัศมีของใบพัดกังหัน (m) ค่าเฉลี่ยของ  $C_p$  สำหรับกังหันความเร็วสูงจะอยู่ที่ประมาณ 0.4 - 0.5 และสำหรับกังหันความเร็วต่ำอยู่ที่ 0.2 - 0.4<sup>[15]</sup> ค่าของอัตราส่วนความเร็วปลายที่เกี่ยวกับประสิทธิภาพของพลังงานโรเตอร์สามารถแสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ค่าสัมประสิทธิ์พลังงานทั่วไปของประเภทโรเตอร์ที่ต่างกันเมื่อเทียบกับอัตราส่วนความเร็วปลาย

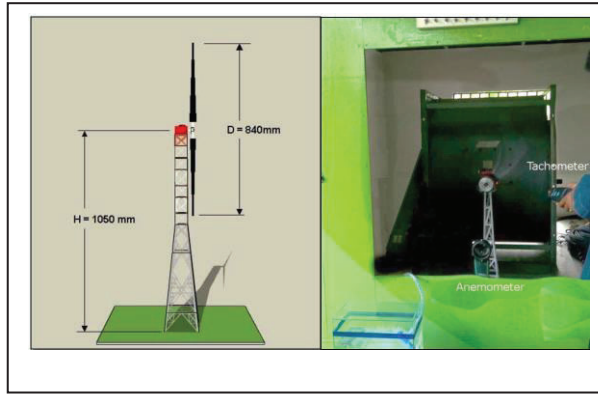
การออกแบบเพลาลมโมเมนต์บิด (Torque) เป็นส่วนที่สำคัญที่ทำให้เกิดความเค้นเฉือนขึ้นเพลลา ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด และกำลัง เพลลาทำหน้าที่ถ่ายเทกำลังจากส่วนหนึ่งไปยังอีกส่วนหนึ่ง กำลัง คืออัตราการทำงาน ดังนั้นกำลังที่เกิดจากแรงบิด หรือโมเมนต์บิด

$$\tau = \frac{P}{\Omega} \quad (3)$$

เมื่อ  $\tau$  = โมเมนต์บิด (Nm)  $P$  = กำลังงาน (W)  $\Omega$  = ความเร็วเชิงมุมของใบกังหัน (rad/s)

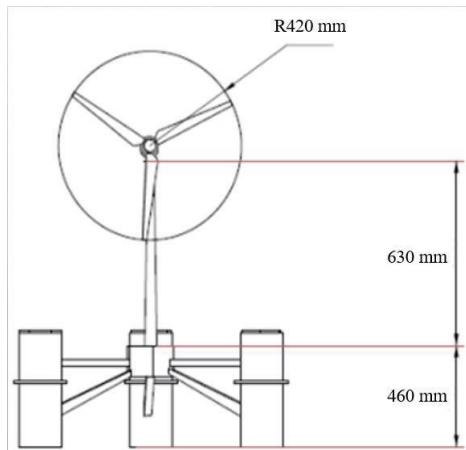
### วิธีการวิจัย

ในการดำเนินการวิจัยได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพด้านพลศาสตร์ของเสาบนท่อนลอยน้ำ ขนานเส้นผ่านศูนย์กลางใบ 84 เซนติเมตร เพื่อนำไปเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านพลศาสตร์กับเสาแบบยึดตรึงที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบเท่ากัน ดังในภาพที่ 8 งานวิจัยนี้ทดลองในอุโมงค์ลมที่ ศูนย์วิจัยพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ดังแสดงในภาพที่ 8 และจะนำงานวิจัยกังหันลมบนท่อนของศูนย์พลังงานมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยนี้



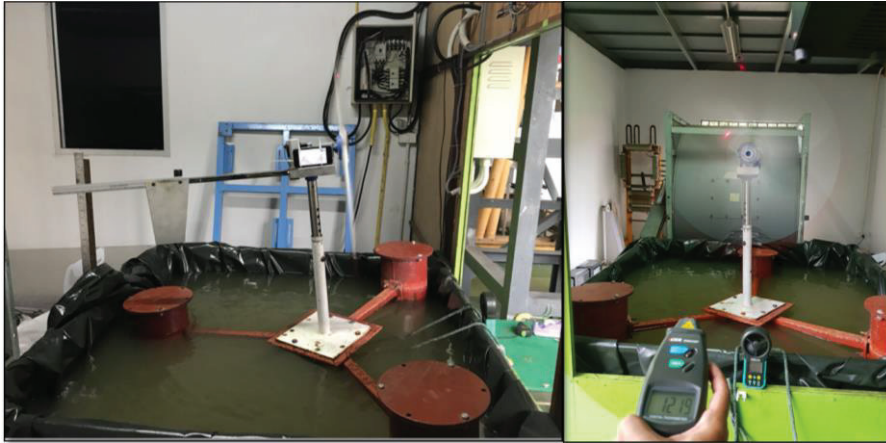
ภาพที่ 8 งานวิจัยเสาแบบยึดตรึง ของศูนย์วิจัยพลังงาน มทร.ธัญบุรี (ซ้าย) และการทดลองในอุโมงค์ลม ขวา

จากวิจัยในภาพที่ 8 มีการทดลองสามครั้งเพื่อวัดการหมุนใบพัดโดยใช้ความเร็วลมที่ต่างกันเพื่อวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ค่าความเร็วเริ่มต้น ค่ารอบต่อนาทีของกังหันลม ค่าอัตราส่วนความเร็วสูงสุด และความเร็วเชิงมุม อัตราส่วนความเร็วปลายได้มาจากการใช้สูตรการคำนวณหาพลังงานลมชั้นพื้นฐานโดยมีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะเท่ากับ 0.35



ภาพที่ 9 ขนาดของเสابนทุ่นลอยน้ำ

การวิจัยจะวัดค่าความเร็วลมที่ 5 เมตรต่อวินาที เป็นจำนวน 10 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยของค่าประสิทธิภาพต่างๆ เนื่องจากลมในประเทศไทยเป็นลมเฉลี่ยที่ 4-5 เมตรต่อวินาที ดังนั้นจึงไม่มีความจำเป็นในการวัดลมค่าที่สูง ในการวิจัยนี้ ได้ใช้เครื่องวัดความเร็วรอบ เครื่องวัดความเร็วลมและตัววัดองศาการเอียงของเสابนทุ่นลอยน้ำ ดังในภาพ 12 เพื่อให้ได้ค่ารอบต่อนาทีของกังหันลมในความเร็วต่างๆ ค่าองศาการเอียง และค่าอัตราส่วนความเร็วสูงสุด เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าของเสาแบบยึดตรึง โดยที่ไม่พิจารณาค่าของแรงคลื่นที่มีกระทบต่อทุ่นลอยน้ำ สมการเชิงทฤษฎีที่จะนำมาคำนวณประสิทธิภาพของเสابนทุ่นลอยน้ำคือ สมการผลิตพลังงานของกังหัน สมการค่าอัตราส่วนความเร็วสูงสุด และสมการการออกแบบเพลลาโมเมนต์บิด



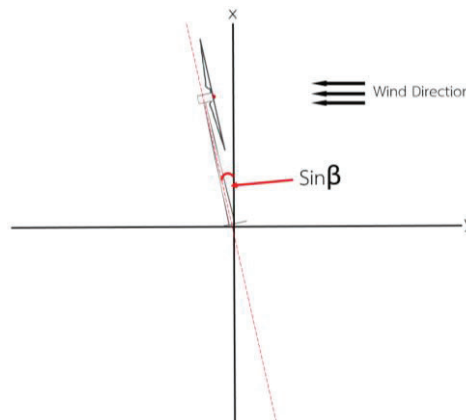
ภาพที่ 10 การทดสอบจริงในอุโมงค์ลมและการวัดค่าจากอุโมงค์ลม  
สมการเชิงทฤษฎีของเสابนทุ่นลอยน้ำที่นำมาใช้เพื่อเก็บข้อมูล มีดังนี้

$$P_w = \frac{1}{2} \rho AV^3 C_p \sin\beta \quad (4)$$

เมื่อ  $\rho$  = ความหนาแน่นของอากาศ ( $1.225 \text{ kg/m}^3$ )  $A$  = พื้นที่กวาด ( $\text{m}^2$ ) =  $\pi \times 0.42^2 = 0.55417 \text{ m}^2$

$V$  = ความเร็วลม ( $\text{m/s}$ )  $C_p$  = สัมประสิทธิ์กำลังของกังหันลม = 0.35  $\sin\beta$  = มุมเอียงของเสابนทุ่นลอยน้ำ

สมมุติฐานว่าเมื่อกังหันตั้งฉากกับแกน  $y$  เท่ากับ  $\sin 90^\circ$  มีค่าเท่ากับ 1 เป็นค่าเริ่มต้น ดังนั้นเมื่อกังหันเอียงค่า  $\sin\beta$  จึงมีค่าเพิ่มขึ้นจากมุมเอียงของกังหันเท่ากับ  $\sin\beta$  + มุมเอียงของเสา ดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 สมมุติฐานของการเกิดมุมเอียงของกังหันลมลอยน้ำ

### ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

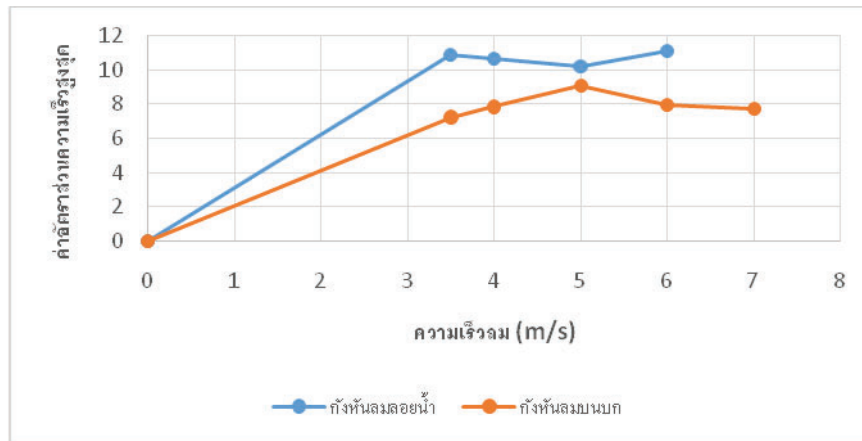
จากผลการทดสอบโดยอุโมงค์ลมโดยตั้งค่าความเร็วลมเริ่มต้นที่ 1.7 เมตรต่อวินาที ถึง 6.0 เมตรต่อวินาที และได้ค่าตัวแปรต่างๆ ดังที่แสดงในตารางที่ 1 และ 2

ตารางที่ 1 แสดงค่าเร็วลมต่อค่าตัวแปรต่างๆ ของเสาบนท่อนลอยน้ำ

ความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)	รอบต่อนาที (rpm)	องศามุมเอียง (องศา)	ความเร็วเชิงมุม (rad/s)	ค่าอัตราส่วน ความเร็วสูงสุด
1.7	378	1	39.27	9.70
2.0	418	1	43.77	9.19
2.5	592	2	62.00	10.42
3.0	685	2	71.73	10.04
3.5	867	3	90.79	10.90
4.0	970	3	101.58	10.67
4.5	1097	4	114.88	10.72
5.0	1192	5	124.82	10.49
5.5	1340	7	140.32	10.72
6.0	1512	10	158.34	11.09

ตารางที่ 2 แสดงความเร็วลมต่อค่าพลังงานที่ผลิตได้จากเสาแบบยึดตึงและเสาบนท่อนลอยน้ำ

ความเร็วลม ข (เมตรต่อวินาที)	พลังงานลมเสาแบบยึดตึง ( $C_p=0.35$ ) (Watt)	พลังงานลมเสาบนท่อนลอยน้ำ ( $C_p=0.35$ )*(องศา) (Watt)
1.7	0.58	0.58
2.0	0.95	0.95
2.5	1.86	1.86
3.0	3.21	3.21
3.5	5.10	5.10
4.0	7.60	7.58
4.5	10.82	10.79
5.0	14.85	14.80
5.5	19.76	19.61
6.0	25.66	25.27



ภาพที่ 12 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างความเร็วลม กับค่า ความเร็วปลายใบกังหันสองชนิด

เนื่องจากประเทศไทยมีแรงลมเฉลี่ยที่ 4-5 เมตรต่อวินาที ดังนั้นการทดสอบค่าของเสาบนทุ่นลอยน้ำจึงได้ดำเนินการต่อเพื่อหาค่าตัวแปรจากเสาบนทุ่นลอยน้ำจากความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที เพื่อเปรียบเทียบกับเสาแบบยึดตริงดังในตารางที่ 3 และ 4

ตารางที่ 3 แสดงค่าตัวแปรที่เกิดขึ้นจากความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที ของเสาบนทุ่นลอยน้ำ

ครั้งที่	รอบต่อนาที (rpm)	ความเร็วของใบพัดกังหัน (rad/s)	โมเมนต์บิด (Nm)	องศาหมุนเอียง (องศา)
1	1160	121.47	0.122	5
2	1126	117.91	0.126	5
3	1292	135.30	0.109	5
4	1148	120.22	0.123	5
5	1164	121.89	0.121	5
6	1230	128.81	0.115	5
7	1180	123.57	0.120	5
8	1154	120.85	0.122	5
9	1294	135.51	0.109	5
10	1173	122.84	0.120	5
ค่าเฉลี่ย	1192	124.84	0.119	5

ตารางที่ 4 แสดงค่าตัวแปรที่เกิดขึ้นจากความเร็วลม 5 เมตรต่อวินาที ของเสาแบบยึดตริง

ครั้งที่	รอบต่อนาที (rpm)	ความเร็วของใบพัดกังหัน (rad/s)	โมเมนต์บิด (Nm)
1	1033	108.18	0.28
2	1040	108.91	0.28
3	1025	107.34	0.28
ค่าเฉลี่ย	1033	108.14	0.28

## สรุปผลการวิจัย

ผลจากการศึกษาและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการทำงานของเสาบนท่อนลอยน้ำ โดยมีการเปรียบเทียบกับผลการศึกษาของเสาแบบยึดตึตรงที่มีขนาดเท่ากันของ ศูนย์วิจัยพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี พบว่าเสาบนท่อนลอยน้ำมีค่ารอบต่อนาทีและค่าอัตราส่วนความเร็วสูงสุดมากกว่าเสาแบบยึดตึตรง โดยเฉพาะที่ค่าความเร็วลมที่ 5 เมตรต่อวินาที ที่เป็นค่าเฉลี่ยของแรงลมในประเทศไทย โดยที่ค่าเฉลี่ยของค่ารอบต่อนาทีนั้นมีค่า 1192 rpm และมีค่าความเร็วของใบพัดกังหันที่ 124.84 rad/s ซึ่งมีค่าสูงกว่ากังหันลมบนบกที่มีค่ารอบต่อนาทีที่ 1033 rpm และค่าความเร็วของกังหันที่ 108.14 rad/s อย่างไรก็ตามค่าพลังงานที่ผลิตได้ของเสาบนท่อนลอยน้ำนั้นมีค่าคล้ายคลึงกับเสาแบบยึดตึตรง เนื่องจากค่าตัวแปรของมุมเอียงของเสานั้นไม่มากพอที่จะทำให้ประสิทธิภาพของเสาบนท่อนลอยน้ำลดลง

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ท่านคณาจารย์จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เพื่อสนับสนุนและ ให้ความรู้ และให้คำปรึกษาสำหรับบทความนี้ นอกจากนี้ขอขอบคุณศูนย์วิจัยและบริการด้านพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ใน การจัดหาห้องปฏิบัติการเพื่อใช้ในการดำเนินการทดลอง

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Renewable Energy Network for the 21<sup>st</sup> Century (REN21). (2018). Renewables 2018 Global Status Report
- [2] World Wind Energy Association (WWEA). (2017). Wind Power Capacity Reaches 539 GW, 52,6 GW Added in 2017
- [3] Lehr, J. H. and Keeley, J. W, (2016). Alternative Energy and Shale Gas Encyclopedia. New Jersey, Wiley.
- [4] Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Ministry of Energy, Thailand (2018). สัดส่วนการใช้พลังงานทดแทน (Percentage of Alternative Energy Consumption)
- [5] The Department of Alternative Energy Development (DEDE). (2017). Wind power and its potential in Thailand
- [6] Coherent Application Threads. (2018). Types of Wind Turbines
- [7] American Bureau of Shipping (ABS). (2012). Floating Wind Turbines
- [8] PMI Underwater Cable Solutions. (2016). Pros and Cons of Floating Platforms in Marine Renewable Energy
- [9] Principle Power. (2015). WindFloat [12] The University of Maine. (2013). VoltumUS 1:8
- [10] National Geographic. (2017). Watch The World's First Floating Wind Farm Ride The Wave
- [11] International Renewable Energy Agency (IRENA). (2016). Floating Foundations: A Game Changer for Offshore Wind Power
- [12] Carbon Trust. (2015). Floating Offshore Wind: Market & Technology Review
- [13] Ng, C. and Ran, L. (2016). Offshore Wind Farms Technologies, Design and Operation. Woodhead Publishing, 285-287.
- [14] Cao, H. (2011). Aerodynamics Analysis of Small Horizontal Axis Wind Turbine Blades by Using 2D and 3D CFD Modelling.
- [15] ผศ.ดร. วิรัชย์ โยชนรินทร์. (2017) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, วิศวกรรมกังหันลม. 123-142 สืบค้นเมื่อ 25 กันยายน 2561.
- [16] Principle Power. (2015) WindFloat

การศึกษาและเปรียบเทียบการอบแห้งสมุนไพรด้วยระบบสุญญากาศร่วมกับ  
รังสีอินฟราเรดไกลและอากาศร้อน  
Study and Comparison Herb Drying Using Vacuum combined  
Far Infrared Radiation and Hot Air

ศรีมา แจ้คำ<sup>1\*</sup> กิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์<sup>1</sup> จิรวัดน์ สิตรานนท์<sup>1</sup> และทัศนีย์ สุวรรณทัต<sup>2</sup>

<sup>1</sup> สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก 20110

<sup>2</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก  
20110

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาเปรียบเทียบการอบแห้งสมุนไพรด้วยเครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกลและอากาศร้อน โดยสมุนไพรที่ทำการอบแห้ง คือ ข่าแห้งบางประมาณ 2-3 mm และใบมะกรูด ควบคุมความดันสุญญากาศ 5 kPa และ 15 kPa อุณหภูมิควบคุมภายในห้องอบ 45°C และ 55°C สำหรับการอบแห้งแบบลมร้อนควบคุมอุณหภูมิที่ 45°C และ 55°C เช่นกัน โดยทำการอบแห้งข่าและใบมะกรูดที่มีความชื้นเริ่มต้น 820%d.b. และ 170%d.b. ตามลำดับ จนได้ความชื้นสุดท้ายประมาณ 5%d.b. คุณภาพของสมุนไพรที่นำมาใช้ประเมินคือ คุณภาพสี และปริมาณน้ำมันหอมระเหย จากการทดลองพบว่าการอบแห้งสมุนไพรที่ความดัน 5 kPa อุณหภูมิควบคุม 55°C ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับการอบแห้งแบบลมร้อน ผลของความดันและอุณหภูมิมีต่อการอบแห้งที่ความดันต่ำและอุณหภูมิสูงเป็นผลให้เวลาในการอบแห้งลดลง ระบบสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดจึงมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการใช้อากาศร้อนที่ความดันบรรยากาศ สำหรับสภาวะที่เหมาะสมนั้นผลิตภัณฑ์จะต้องมีรูปร่างและคุณภาพด้านสีที่ดีที่สุดก่อน เนื่องจากเป็นสิ่งสำคัญในการตัดสินใจของผู้บริโภค การอบแห้งข่าที่สภาวะความดัน 15 kPa อุณหภูมิควบคุม 55°C และการอบแห้งใบมะกรูดที่สภาวะความดัน 15 kPa อุณหภูมิควบคุม 45°C จะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและสีน้อยที่สุด เมื่อนำข่าและใบมะกรูดมาสกัดหาปริมาณน้ำมันหอมระเหย ได้น้ำมันหอมระเหยประมาณ 0.0928 % และ 0.7849 %โดยมวล ตามลำดับ และผลของเวลาที่ใช้ในการอบแห้งต่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยยังพบอีกว่าถ้าเวลาที่ใช้ในการอบแห้งนานขึ้น ปริมาณน้ำมันหอมระเหยของสมุนไพรจะลดลง

**คำสำคัญ:** สุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล สมุนไพร อากาศร้อน

\*Corresponding author: Tel.: 096-7432241. E-mail address: srima\_j@hotmail.com

### บทนำ

ข่าและมะกรูด นอกจากจะเป็นเครื่องเทศที่นิยมบริโภคกันเป็นประจำแล้ว ยังถือว่าเป็นสมุนไพรพื้นบ้านที่อยู่คู่กับคนไทยมาอย่างยาวนาน ข่ามีสรรพคุณทางยา คือ ช่วยบรรเทาอาการปวดตามข้อ บรรเทาอาการปวดหลอดเลือด อักเสบ บรรเทาอาการปวดท้อง ท้องร่วง ข่าเชื่อมืด ช่วยย่อยอาหาร บรรเทาอาการท้องอืดท้องเฟ้อ บรรเทาอาการของโรคผิวหนัง กลาก เกื้อหนุน แก้มพิษ และบรรเทาอาการปวดฟัน สำหรับมะกรูดมีสรรพคุณทางยา คือ ผิวผลสดและผลแห้ง สามารถแก้ลมหน้ามืด แก้วเวียน บำรุงหัวใจ ขับลมลำไส้ ขับระดู ผลมีรสเปรี้ยวแก้ไอ ขับเสมหะ แก้น้ำลาย



เหนียว ฟอกโลหิต รากมีรสเย็นจัดแก้พิษฝ้ายใน แก้เสมหะ แก้ลมจุกเสียด น้ำมะกรูดมีรสเปรี้ยวแก้เสมหะ ใช้ตองยา เป็นยาฟอกโลหิตสำหรับสตรี ใบมีรสหอมแก้อ้อ แก้อาเจียนเป็นคลื่น แก้ช้ำใน และดับกลิ่นคาว เป็นต้น

ในปัจจุบัน ความจำเป็นของการแปรรูปสินค้าทางการเกษตร มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการพัฒนาเกษตรกรรม ของไทย เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าของสินค้าเกษตรต่างๆที่มีอยู่ในประเทศ ให้สามารถส่งออกสู่ตลาดโลก เกษตรกรส่วนใหญ่ทำการเก็บรักษาผลผลิตที่ได้ด้วยการตากแดด ซึ่งถือเป็นวิธีที่ง่ายและต้นทุนต่ำที่สุด แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นคือ ผลผลิตทางการเกษตรที่ไม่สะอาด และอาจมีการปนเปื้อนของฝุ่นและแบคทีเรีย อีกทั้งต้องใช้เวลาในการตากเพื่อลดความชื้น นานหลายวัน เนื่องจากไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิ และความชื้นของรังสีอาทิตย์ได้ อีกทั้งในช่วงกลางคืนหรือในช่วงฤดูฝน ก็เป็นอุปสรรคส่งผลให้ไม่สามารถแปรรูปผลผลิตได้ เป็นผลทำให้ผลผลิตเกิดความเสียหาย ดังนั้นเครื่องอบแห้งจึงมีบทบาทสำคัญในการแปรรูปสมุนไพร โดยสามารถรักษาคุณภาพของสมุนไพรด้วยการควบคุมอุณหภูมิที่เหมาะสม และลดระยะเวลาในการอบแห้ง ทำให้คุณภาพของสมุนไพรในด้านสี ปริมาณน้ำมันหอมระเหย สารออกฤทธิ์ที่เป็นสรรพคุณทางยา ยังคงเหมือนเดิม รวมทั้งลดการปนเปื้อนของจุลินทรีย์

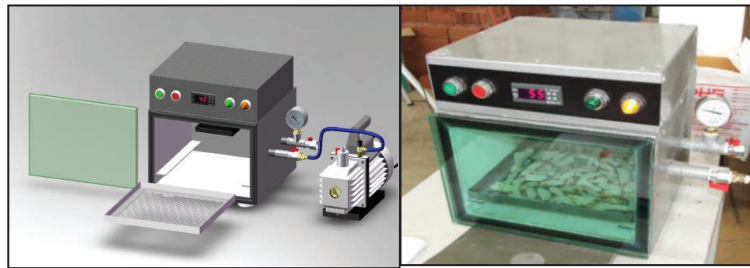
สิทธิชัย และคณะ [1] ได้ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งเห็ดหอม ด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรด รวมทั้งหาค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ โดยอบแห้งเห็ดหอมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 4 - 5 cm จากผลการทดลอง พบว่าที่ 70 °C และความดันสัมบูรณ์ 10 kPa สามารถอบแห้งเห็ดหอมได้เร็วที่สุดโดยใช้เวลาในการอบแห้งประมาณ 250 นาที และมีค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 9.09 kWh/kg และปริมาณน้ำอิสระหลังอบแห้งทุกเงื่อนไขการทดลองมีค่าน้อยกว่า 0.6 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานอาหารแห้ง อ้าไพศักดิ์ และศักดิ์ชัย[2] ได้ทำการอบแห้งขิง ด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด ผลจากการศึกษาพบว่า เมื่อลดความดันสัมบูรณ์หรือเพิ่มอุณหภูมิของการอบแห้ง จะมีผลทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะจะลดลง เพชรรัตน์ และคณะ [3] ได้ศึกษาการนำรังสีอินฟราเรดไกลเข้ามาช่วยในการอบแห้งเนื้อลำไยด้วยลมร้อน และปั๊มความร้อน จากผลการทดลองพบว่า การนำรังสีอินฟราเรดไกลเข้ามาใช้ร่วมกับการอบแห้งเนื้อลำไยด้วยลมร้อนหรือปั๊มความร้อน ช่วยเพิ่มอัตราการอบแห้งให้มากขึ้น และลดเวลาในการอบแห้งลง[5] ได้ทดลองเปรียบเทียบอบแห้งหัวหอมส่วนใบ ด้วยอินฟราเรดไกลภายใต้สภาวะสุญญากาศ กับการอบแห้งด้วยอินฟราเรดไกลร่วมกับลมร้อน จากการทดลองพบว่า อัตราการอบแห้งจะเพิ่มขึ้น เมื่อกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้หลอดอินฟราเรดเพิ่มขึ้น หรือความดันในห้องอบ แห้งลดลง รวมถึงการอบแห้งด้วยอินฟราเรดไกลภายใต้สภาวะสุญญากาศจะใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่ากรณีการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดไกลร่วมกับลมร้อนนอกจากนี้ ยังพบว่าเมื่อกำลังไฟฟ้า ป้อนให้หลอดอินฟราเรดมีค่าน้อยๆ หัวหอมที่อบแห้งด้วยอินฟราเรดไกล ภายใต้สภาวะสุญญากาศจะมีศักยภาพในการคืนตัวมากกว่า แม้จะหดตัวมากกว่ากรณีอบแห้งด้วย รังสีอินฟราเรดไกลร่วมกับลมร้อน [6] ได้ศึกษาการอบแห้งขึ้นกล้วยหอม โดยใช้รังสีไมโครเวฟร่วมกับสภาวะสุญญากาศที่ความดัน จากการทดลองพบว่า การใช้รังสีไมโครเวฟในการอบแห้งนั้นสามารถช่วยลดเวลาในการอบแห้งได้เป็นอย่างดี และถ้าหากลดความดันลงเรื่อยๆ ก็จะช่วยลดเวลาในการอบแห้งลงตามลำดับ ศรีมา แจ้คำ [4] ได้ศึกษาการอบแห้งผลไม้และสมุนไพรโดยใช้ปั๊มความร้อนร่วมอินฟราเรดไกล จากการทดลองพบว่า สามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งได้อย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับการใช้ปั๊มความร้อนเพียงอย่างเดียว และการใช้อินฟราเรดไกลไม่มีผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบพัฒนาและศึกษาเปรียบเทียบการอบแห้งสมุนไพรด้วยเครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกลและอากาศร้อน เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด ทั้งด้านระยะเวลาการอบแห้ง มาตรฐานด้านสี และน้ำมันหอมระเหย โดยทำการศึกษาในกรณีของข่าและใบมะกรูดเป็นสมุนไพรตัวอย่างเพื่อประยุกต์ใช้ในพืชสมุนไพรชนิดอื่นต่อไป

## วิธีการวิจัย

การทดลองการอบแห้งนี้ใช้ตัวอย่างสมุนไพรในการทดลองคือ ข่าหั่นบางความหนา 2-3 มิลลิเมตร และใบมะกรูด โดยทำการทดลองที่สภาวะดังนี้ คือ (1) ความดัน 15 kPa อุณหภูมิ 45°C (2) ความดัน 15 kPa อุณหภูมิ 55°C (3) ความดัน 5 kPa อุณหภูมิ 45°C (4) ความดัน 5 kPa อุณหภูมิ 55°C (5) อากาศร้อน 45°C และ (6) อากาศร้อน 55°C ทำการทดลองโดยหั่นข่าหนาประมาณ 2-3 มม.สำหรับใบมะกรูดเด็ดก้านออกให้เหลือแต่ใบ และให้นำบางส่วนเข้าไปอบแห้งในตู้อบแห้งแบบลมร้อน เพื่อเป็นข้อมูลในการความค่าความของผลิตภัณฑ์ จากนั้นนำผลิตภัณฑ์เข้าไปในตู้อบแห้งพร้อมทำการเปิดเครื่องแล้วตั้งค่าการทดลองตามสภาวะต่างๆ ที่กำหนด ทำการบันทึกน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ ทุกๆ 30 นาที เมื่อได้ความชื้นสุดท้ายตามที่กำหนด ก็ปิดเครื่องอบแห้ง แล้วบันทึกน้ำหนักหลังการอบแห้งไว้

เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลองมีดังนี้ (1) เครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล ประกอบด้วยปั๊มสุญญากาศ (liquid ring) ขนาดมอเตอร์ 1/3 HP ทำความดันได้ถึง 10 Pa (วัดจากความดันศูนย์สัมบูรณ์) ซึ่งมีอัตราการทำสุญญากาศได้มากกว่าขอบเขตในการศึกษา อัตราการไหลที่ 6 m<sup>3</sup>/hr ภายในมีแท่งรังสีอินฟราเรดขนาด 250 W จำนวน 1 แท่ง ยี่ห้อ infrapara รุ่น EL-2-250, 220 V, 380°C, 122x122x55 mm พร้อมด้วยอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิและความดันดังภาพที่ 1 (2) เครื่องชั่งแบบดิจิทัล รับน้ำหนักได้สูงสุด 2,100 กรัม และอ่านค่าได้ละเอียด 0.01 กรัม และ (3) ตู้อบลมร้อน (Hot-air Oven) สำหรับหาความชื้นของผลิตภัณฑ์

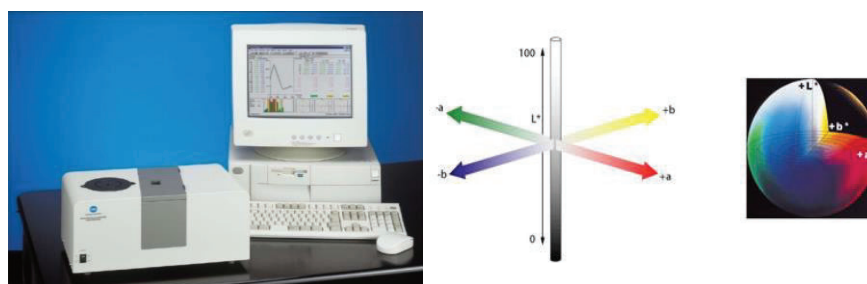


ภาพที่ 1 เครื่องอบแห้งระบบสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล

การทดสอบคุณภาพด้านสี ทดสอบสีด้วยเครื่อง Spectrophotometer ยี่ห้อ KONICA MINOLTA รุ่น CM-3500d เป็นการทดสอบสีแบบ L,a,b โดยจะนำค่าความแตกต่างของสีผลิตภัณฑ์ก่อนการอบแห้งและหลังจากอบแห้งมาเปรียบเทียบกับ เพื่อดูว่าผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งที่สภาวะใดมีค่า DE น้อยที่สุด ซึ่งจะถือว่าเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีค่าสีใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ก่อนอบแห้งมากที่สุด โดยใช้แสง daylight ที่ 6,500 k ในการวัดสี ดังภาพที่ 2

$$DE = \sqrt{DL^2 + Da^2 + Db^2} \quad (1)$$

โดยที่ DE คือ ความแตกต่างกันของสี, DLคือ ความแตกต่างของความสว่าง, Da คือความแตกต่างของความ เป็นสีแดงถึงเขียว และ Db คือความแตกต่างของความ เป็นสีเหลืองถึงน้ำเงิน



ภาพที่ 2 เครื่อง Spectrophotometer ยี่ห้อ KONICA MINOLTA รุ่น CM-3500d และแกนบอกสี

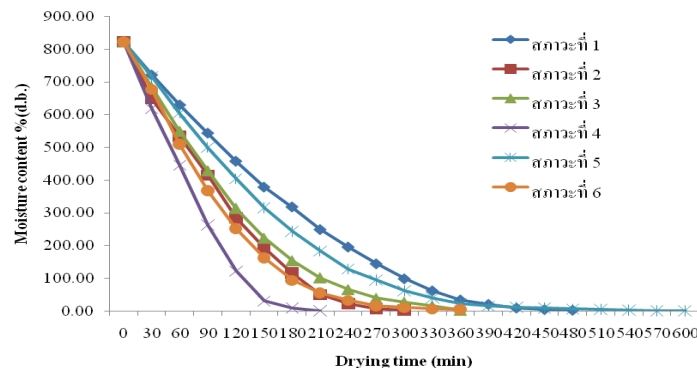
การทดสอบหาปริมาณน้ำมันหอมระเหย ทำการสกัดน้ำมันหอมระเหย ด้วยวิธีการกลั่นไอน้ำ ทำได้โดยการให้ไอน้ำผ่านพืชสมุนไพรที่ต้องการสกัดที่อยู่ในหม้อกลั่น น้ำมันระเหยจะถูกสกัดออกมาพร้อมกับไอน้ำซึ่งจะผ่านไปตามท่อและถูกทำให้เย็นเก็บไว้ในขวด น้ำมันระเหยจะแยกตัวออกจากน้ำทำให้แยกออกได้ง่าย ได้น้ำมันหอมระเหยและน้ำสมุนไพร ดังภาพที่ 3 แล้วนำน้ำมันหอมระเหยที่สกัดได้ ไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งดิจิตอลความละเอียดสูง ยี่ห้อ Sartorius รุ่น CP224S



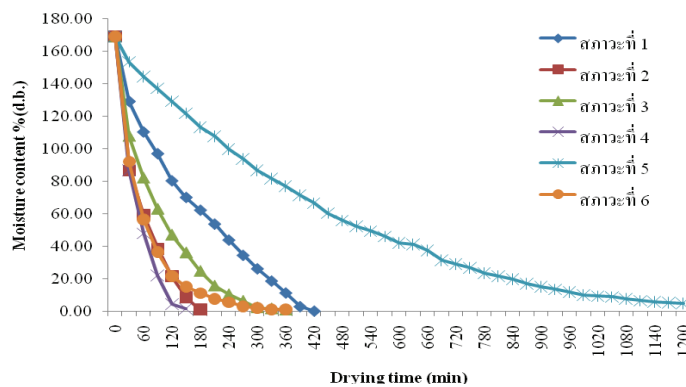
ภาพที่ 3 การสกัดน้ำมันหอมระเหยด้วยวิธีการกลั่นไอน้ำ

### ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาเปรียบเทียบ การอบแห้งสมุนไพรกรณีของข่าและใบมะกรูด ด้วยเทคนิคการแผ่รังสีอินฟราเรดไกลภายใต้สภาวะความดันสุญญากาศกับอากาศร้อนในสภาวะต่างๆดังได้กล่าวไว้ข้างต้น โดยจะทำการศึกษาอัตราการอบแห้ง คุณภาพด้านสีและปริมาณน้ำมันหอมระเหยเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์ก่อนอบแห้งและหลังจากการอบแห้ง



ภาพที่ 4 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งข่าในสภาวะต่างๆ



ภาพที่ 5 เปรียบเทียบอัตราการอบแห้งใบมะกรูดในสภาวะต่างๆ

จากภาพที่ 4 และ 5 ผลที่ได้สอดคล้องกันคือ ที่สภาวะสุญญากาศต่ำที่สุดและอุณหภูมิสูงสุด จะให้อัตราการลดลงของความชื้นสูงสุด ในสภาวะที่ 4 ซึ่งอบแห้งภายใต้สภาวะความดัน 5 kPa และอุณหภูมิ 55°C ใช้เวลาในการอบแห้งสั้นที่สุดน้ำที่ผิวของสมุนไพรจะระเหยออกไปอย่างรวดเร็ว เนื่องจากสภาวะสุญญากาศ น้ำจะดูดความร้อนในเนื้อสมุนไพรเป็นความร้อนแฝงในการระเหยน้ำ ทำให้อุณหภูมิในเนื้อสมุนไพรลดลง น้ำที่ยังคงมีอยู่ในเนื้อสมุนไพรจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิจุดเดือดของน้ำที่สภาวะสุญญากาศโดยที่ความดันสุญญากาศ 15 kPa และ 5 kPa น้ำจะมีจุดเดือดอยู่ที่ 55°C และ 35°C ตามลำดับ ทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นในช่วงเริ่มต้นมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อสมุนไพรมีอุณหภูมิสูงขึ้น จนถึงจุดเดือดของน้ำที่สภาวะสุญญากาศนั้นๆ น้ำในสมุนไพรก็จะเดือดพล่าน และระเหยเป็นไอออกมาอย่างรวดเร็ว ดังนั้นการอบแห้งที่ความดันต่ำ (5 kPa) จึงทำให้เกิดการเดือดพล่านของน้ำในสมุนไพร และเกิดความดันไอของไอน้ำสูงทำให้น้ำแพร่ออกจากเนื้อสมุนไพรได้มาก ส่วนสภาวะที่ 5 และ 6 ซึ่งเป็นการอบแห้งด้วยอากาศร้อนในสภาวะบรรยากาศ การลดลงของความชื้นจะค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับอุณหภูมิเดียวกัน โดยเฉพาะสภาวะที่ 5 ซึ่งอบแห้งด้วยอากาศร้อน 45°C จะใช้เวลาในการอบแห้งยาวนานที่สุดทั้งข้าวและใบมะกรูด โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นเริ่มต้นต่ำอย่างใบมะกรูด เส้นกราฟที่ได้ค่อนข้างชัดเจนมากในภาพที่ 5

แต่อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมที่สุด จำเป็นต้องนำผลของการเปลี่ยนรูปร่างและคุณภาพของสีมาใช้ในการตัดสินใจ เนื่องจากผลิตภัณฑ์ต้องอยู่ในเกณฑ์ที่ดีที่สุดก่อน แล้วนำมาวิเคราะห์ร่วมกับอัตราการอบแห้ง สีของสมุนไพรก่อนและหลังทำการอบแห้ง จะทำการทดสอบสีด้วยเครื่อง Spectrophotometer ยี่ห้อ KONICA MINOLTA รุ่น CM-3500d โดยเครื่องจะแสดงผลเป็นค่าสี L,a,b และนำค่าที่ได้มาหาค่าความแตกต่างของสี (DE) ดังแสดงผลในตารางที่ 1 สำหรับปริมาณน้ำมันหอมระเหยของสมุนไพรก่อนและหลังทำการอบแห้ง ทำการสกัดน้ำมันหอมระเหยด้วยเครื่องสกัดแบบไอน้ำ โดยน้ำมันหอมระเหยที่สกัดได้จะนำไปซึ่งน้ำหนักและคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 1 คุณภาพด้านสีของสมุนไพร

ชนิด	สภาวะ	L	a	b	DE
ข้าว	ข้าสด	68.87	1.57	17.41	-
	1	68.30	5.70	21.02	5.51
	2	71.44	4.54	19.28	4.35
	3	67.56	6.85	20.00	6.03
	4	68.01	6.80	19.44	5.68
	5	70.00	5.89	19.75	5.04
	6	69.58	5.34	19.58	4.41
มะกรูด	ใบมะกรูดสด	41.32	-9.33	24.99	-
	1	42.39	-7.56	24.47	2.13
	2	46.23	-3.82	24.76	7.38
	3	43.74	-7.86	23.23	3.33
	4	46.08	-4.57	26.01	6.81
	5	45.36	-5.28	22.07	6.42
	6	42.29	0.76	22.87	10.36

จากผลการทดสอบคุณภาพของตามตารางที่ 1 กำหนดให้สีของสมุนไพรหลังอบแห้งที่ดีที่สุด คือเมื่ออบแห้งแล้วมีความแตกต่างของสีของสมุนไพรก่อนอบแห้งน้อยที่สุด (DE) ซึ่งข้าวที่อบแห้งด้วยระบบสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกลแล้วค่า DE มีค่าน้อยที่สุดคือสภาวะที่ 2 ที่ความดัน 15 kPa อุณหภูมิ 55°C มีค่า DE เท่ากับ 4.35 และรูปร่างเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด ซึ่งจะเห็นได้ว่าสภาวะการอบแห้งที่เป็นสุญญากาศมากเกินไปที่ 5 kPa ทำให้อุณหภูมิที่ใช้ในการอบสูงกว่าจุดเดือดทำให้อุณหภูมิรูปร่างและสีของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลง และระยะเวลาในการอบที่ยาวนานก็เป็นผลให้สี

เปลี่ยนแปลงได้เช่นกัน สำหรับการอบแห้งแบบลมร้อน DE มีค่าน้อยที่สุดคือสภาวะที่ 6 อุณหภูมิ 55°C มีค่า DE เท่ากับ 4.41 ซึ่งให้ค่าความแตกต่างที่น้อยกว่าสภาวะที่ 5 อุณหภูมิ 45°C แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาในการอบแห้งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของผลิตภัณฑ์ในความชื้นสุดท้ายที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากสภาวะที่ 5 ใช้เวลาในการอบแห้งยาวนานกว่า สำหรับใบมะกรูดค่อนข้างจะไวต่ออุณหภูมิในการอบแห้งค่อนข้างมาก จะเห็นว่าการใช้อุณหภูมิสูงในทุกสภาวะจะทำให้สีเปลี่ยนค่อนข้างชัดเจน และสภาวะการอบแห้งที่เป็นสุญญากาศมากขึ้นไปที่ 5 kPa ทำให้อุณหภูมิที่ใช้ในการอบสูงกว่าจุดเดือดทำให้รูปร่างและสีของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลงได้เช่นเดียวกับข้าว สภาวะที่ดีที่สุดคือสภาวะที่ 1 สำหรับลมร้อน สภาวะที่ดีที่สุดคือสภาวะที่ 5 จากนั้นได้นำสภาวะที่ดีที่สุดของการอบแบบสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกลและของลมร้อนไปทำการทดสอบหาปริมาณน้ำมันหอมระเหย

ตารางที่ 2 ปริมาณน้ำมันหอมระเหยของสมุนไพร

ชนิด	สภาวะ	ปริมาณน้ำมันหอมระเหย (%โดยมวล)
ข้าว	ข้าวสด	0.2811
	2	0.0927
	6	0.0928
มะกรูด	ใบมะกรูดสด	0.7971
	1	0.7849
	5	0.6213

จากตารางที่ 2 จะเห็นว่าน้ำมันหอมระเหยที่ได้จากข้าวที่ผ่านการอบแห้งทั้งสองแบบ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่ปริมาณค่อนข้างจะต่างกันมากกับข้าวสด สำหรับใบมะกรูดการอบแห้งแบบสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกลให้ผลที่ดีกว่าการอบแห้งแบบลมร้อน ทั้งนี้เนื่องจากระยะเวลาในการอบแห้งสภาวะที่ 5 ค่อนข้างยาวนานกว่าจึงทำให้ปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่ได้ลดลงด้วย อย่างไรก็ตามเมื่อเทียบกับใบมะกรูดสดก็ยังถือว่าแตกต่างกันน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวสด



ภาพที่ 6 ผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งทั้ง 6 สภาวะ(เรียงจากซ้ายไปขวาตามลำดับ)

### สรุปผลการวิจัย

การอบแห้งสมุนไพรด้วยเครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกลเมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งแบบลมร้อน สรุปได้ว่าผลของความดันและอุณหภูมิมีผลโดยตรงกับอัตราและเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ที่ความดันสุญญากาศที่ต่ำและอุณหภูมิการอบแห้งที่สูง จะใช้เวลาในการอบแห้งสั้นที่สุด สำหรับการอบแห้งข้าวสภาวะที่ดีที่สุดคือ 15 kPa และอุณหภูมิ 55°C ทั้งอัตราการอบแห้งและการเปลี่ยนแปลงของสี แต่โดยเฉลี่ยแล้วสีอยู่ในเกณฑ์ที่ใกล้เคียงกัน

เนื่องจากตัวผลิตภัณฑ์มีสีที่ค่อนข้างจะเข้มอยู่แล้ว ส่วนผลของการสกัดน้ำมันหอมระเหยถือว่าแตกต่างกันน้อยมากอย่างไม่มีความสำคัญในการอบทั้งสองแบบ แต่ค่อนข้างต่างกันมากเมื่อเทียบกับข้าสด

สำหรับการอบแห้งใบมะกรูด ในส่วนผลการเปลี่ยนแปลงของสีพบว่าอุณหภูมิที่สูงจะทำให้การมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน เนื่องจากเป็นพืชใบเขียว การลดความดันสุญญากาศมากเกินไปถึงแม้จะทำให้อัตราการอบแห้งสูงแต่ก็ทำให้ผลิตภัณฑ์เสียรูปร่างและมีการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพสี ส่วนน้ำมันหอมระเหยจะลดลงตามอุณหภูมิที่สูงและระยะเวลาในการอบแห้งที่ยาวนานเช่นกัน การอบแห้งใบมะกรูด สภาวะที่ 15 kPa และอุณหภูมิ 45°C ถือว่าเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด คุณภาพของผลิตภัณฑ์อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้เมื่อเทียบกับการอบแห้งแบบลมร้อนและสภาวะอื่นๆ

### เอกสารอ้างอิง

- [1] สิทธิชัย รุ่งสว่าง, ศรีมา แจ้คำ, ณรงค์ อึ้งกิมบัว และ กิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์. (2559). การอบแห้งเห็ดหอมด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรด. การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 12. พิษณุโลก มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- [2] อำไพศักดิ์ ทีบุญมา และ ศักชัย จงจำ. (2553). การอบแห้งขิงด้วยเทคนิคสุญญากาศร่วมกับอินฟราเรด. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา, 15(2): 76-86.
- [3] เพชรรัตน์ ใจบุญ, อติศักดิ์ นาถกรณกุล, และสมชาติ โสภณรณฤทธิ์. (2550). การศึกษาเปรียบเทียบการอบแห้งลำไยด้วยเทคนิคต่างๆ, การประชุมวิชาการด้านพลังงานสิ่งแวดล้อม และวัสดุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร.
- [4] ศรีมา แจ้คำ. (2546). การอบแห้งผลไม้และสมุนไพรโดยใช้ป้มความร้อน ร่วมกับอินฟราเรดไกล.วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. กรุงเทพมหานคร.
- [5] Mongpraneet, S., Abe, T., & Tsurusaki, T. (2002). Accelerated drying of welsh onion by far-infrared radiation under vacuum condition. Journal of food engineering, 55: 147-156.
- [6] Nidhal, M., & Mohammed, F. (2002). Microwave vacuum drying of banana slices. Drying Technology. 20(10): 2055–2066.

## นวัตกรรมโรงเรือนเพาะปลูกพืชไร้ดิน ระบบทำความเย็นสารละลายธาตุอาหาร ด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกส์ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์

### Innovation of Soilless Culture Greenhouse Thermoelectric Refrigeration System for Nutrient Solution Using Solar Energy

ธีรพจน์ แบนเนียน<sup>1\*</sup> วีระชาติ จริตงาม<sup>1</sup> ธีรายุ ปิ่นทอง<sup>2</sup> โกเมน หมายมัน<sup>2</sup> และปิยลาภ มานะกิจ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าเครื่องกลการผลิต มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์

<sup>2</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนานวัตกรรมการโรงเรือนเพาะปลูกพืชไร้ดิน ระบบทำความเย็นสารละลายธาตุอาหาร ด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกส์ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ โดยออกแบบและสร้างโรงเรือน ติดตั้งระบบพลังงานแสงอาทิตย์ ขนาด 500 W สำหรับจ่ายพลังงานให้กับเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ทำให้ประหยัดพลังงานไฟฟ้า เท่ากับ 56.853 kWh/เดือน การทดลองเปรียบเทียบอุณหภูมิสารละลายธาตุอาหารของชุดทดลอง A และ ชุดทดลอง B สำหรับปลูกผักสลัดกรีนโอ๊ค โดยชุดทดลอง A เป็นระบบควบคุมอุณหภูมิน้ำด้วยชุดทำความเย็นโดยใช้เทอร์โมอิเล็กทริก ที่อุณหภูมิ 20-25 องศาเซลเซียส ชุดทดลอง B เป็นระบบที่ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิน้ำ พบว่าชุดทดลอง A มีอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 24.65 องศาเซลเซียส ชุดทดลอง B มีอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 29.43 องศาเซลเซียส การเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของพืช โดยการเก็บข้อมูลความสูงทรงพุ่ม ความกว้างทรงพุ่ม และความยาวราก ตามช่วงอายุของผักสลัดระหว่างที่ผักสลัดอายุ 24 – 45 วัน พบว่าผลการทดสอบชุดทดลอง A มีแนวโน้มการเจริญเติบโตที่ดีกว่า ชุดทดลอง B เนื่องจากอุณหภูมิสารละลายธาตุอาหารและความชื้นสัมพัทธ์มีผลต่อการเจริญเติบโต

**คำสำคัญ:** พืชไร้ดิน เทอร์โมอิเล็กทริกส์ พลังงานแสงอาทิตย์

\*Corresponding author: Tel.: 081-7071306. E-mail address: t.tru@hotmail.com

#### บทนำ

เกษตรกร จังหวัดนครสวรรค์ ประชากรส่วนใหญ่ประกอบอาชีพทำไร่ผัก เนื่องจากอาศัยอยู่ริมฝั่งแม่น้ำเจ้าพระยา โดยมีพื้นที่เพาะปลูกประมาณ 4,490 ไร่ [1] เพื่อขายส่ง การเพาะปลูกมีการใช้สารเคมีและยาฆ่าแมลงในการทำสวน ซึ่งมีผลเสียต่อผู้บริโภคและตัวเกษตรกร การปลูกพืชไร้ดิน จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับการแนะนำให้เกษตรกรได้ศึกษา เพื่อยกระดับผลผลิตทางการเกษตร ในขณะที่กระแสของการบริโภคผักปลอดสารพิษกำลังได้รับความนิยมในสังคม จึงเป็นช่องทางการเพิ่มรายได้ให้กับชุมชนอีกทางหนึ่ง ดิเรก ทองอร่าม [2] ได้กล่าวว่า การปลูกพืชไร้ดินคือ วิธีการปลูกพืชเลียนแบบการปลูกพืชบนดินโดยไม่ใช้ดินเป็นวัสดุปลูก แต่เป็นการปลูกพืชในสารละลายที่มีธาตุอาหารครบถ้วน โดยให้รากพืชสัมผัสกับสารอาหารโดยตรง การปลูกในโรงเรือนที่สามารถควบคุมสภาวะแวดล้อมให้เป็นไปตามที่พืช ผัก ผลไม้ ที่ปลูกต้องการ จะช่วยควบคุมอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ให้มีสภาวะพอเหมาะแก่การเจริญเติบโตของพืชได้ จะทำให้สามารถเพาะปลูกพืช ผัก ผลไม้ ได้อย่างมีคุณภาพและมีปริมาณตามที่ต้องการในครัวเรือน

เพื่อเป็นการแก้ปัญหาการใช้สารเคมี ยาฆ่าแมลงและเพิ่มประสิทธิภาพในการปลูกพืชแบบไร้ดิน ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะทำการพัฒนานวัตกรรมการเรือนเพาะปลูกพืชไร้ดิน ระบบทำความเย็นสารละลายธาตุอาหาร ด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกส์ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งได้นำเทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริกส์เข้ามาใช้ทำความเย็นสารละลายธาตุอาหารแทนการใช้ระบบอัดไอ เพื่อให้สอดคล้องกับการประหยัดพลังงานในปัจจุบัน และสามารถควบคุมปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชให้เหมาะสมกับชนิดของพืชที่ทำการปลูก คือ สามารถควบคุมปริมาณของธาตุอาหารให้เหมาะสม ควบคุมอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และค่าความเป็นกรด-ด่าง ป้องกันเชื้อโรคที่จะเกิดขึ้นในโรงเรือน เพื่อส่งเสริมให้เกษตรกรหันมาผลิตพืชผักปลอดสารพิษ บริโภคในครัวเรือนและเป็นทางเลือกในการดำเนินการเชิงธุรกิจจำหน่ายในจังหวัดหรือส่งออกต่อไป

### วิธีการวิจัย

1. ศึกษาปัญหาและประสิทธิภาพโรงเรือนเพาะปลูกพืชไร้ดิน ที่ทำอยู่ในปัจจุบันและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อเลือกรูปแบบที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุด
2. การออกแบบโรงเรือนเพาะปลูกพืชไร้ดิน ระบบทำความเย็นสารละลายธาตุอาหาร ด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกส์ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ประกอบด้วย

#### 2.1 การออกแบบคำนวณหาขนาดเทอร์โมอิเล็กทริกส์

การถ่ายเทความร้อนที่ด้านเย็น (Heat Pumped at cold Surface,  $Q_c$ ) คำนวณได้จาก [3],[6]

$$Q_c = (\alpha I T_c - 0.5 I^2 R - K_t \Delta T) \quad (1)$$

เมื่อ  $Q_c$  คือ การทำความเย็นที่ด้านเย็น (W)

$\alpha$  คือ สัมประสิทธิ์ของซีเบ็ค ( $0.0444 \text{ VK}^{-1}$ )

$I$  คือ กระแสไฟฟ้า (A)

$T_c$  คือ อุณหภูมิด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก (K)

$R$  คือ ความต้านทานไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริก ( $2.545 \Omega$ )

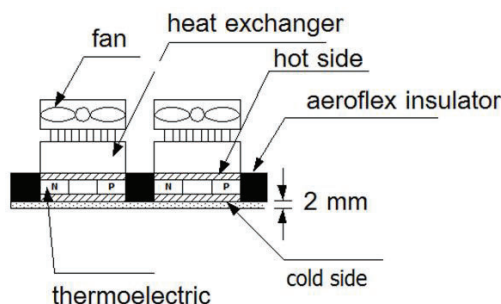
$K_t$  คือ ค่าสภาพนำความร้อนของเทอร์โมอิเล็กทริก ( $0.495 \text{ WK}^{-1}$ )

$\Delta T$  คือ ผลต่างระหว่างอุณหภูมิด้านร้อนและอุณหภูมิด้านเย็น (K)

ประสิทธิภาพในการทำความเย็น (COP) คำนวณได้จาก [3], [6]

$$\text{COP} = \frac{Q_c}{P_{in}} \quad (2)$$

เมื่อ  $P_{in}$  คือ กำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้เทอร์โมอิเล็กทริก (W)



ภาพที่ 1 การออกแบบติดตั้งเทอร์โมอิเล็กทริกส์ [3]



## 2.2 การออกแบบคำนวณหาขนาดเซลล์แสงอาทิตย์

ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถคำนวณได้จาก [9]

$$\eta_A = \frac{E_A}{H_i A_c}$$

เมื่อ  $\eta_A$  คือ ประสิทธิภาพพลังงานแสงอาทิตย์

$E_A$  คือ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ (kWp)

$H_i$  คือ พลังงานแสงอาทิตย์ที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับ (kWh/m<sup>2</sup>)

$A_c$  คือ พื้นที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (m<sup>2</sup>)

พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ สามารถคำนวณได้จาก [9]

$$Y_A = \frac{E_A}{P_o}$$

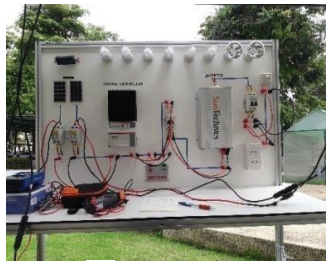
เมื่อ  $Y_A$  คือ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ (kWh/kWp)

$P_o$  คือ กำลังการผลิตติดตั้ง (Wp)

## 3. การสร้างโรงเรือนเพาะปลูกพืชไร้ดิน ระบบทำความเย็นสารละลายธาตุอาหาร ด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกส์ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ แสดงดังภาพที่ 2



(ก) แผงเซลล์แสงอาทิตย์



(ข) ชุดระบบควบคุมแบตเตอรี่



(ค) เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล



(ง) โรงเรือนเพาะปลูกพืชไร้ดิน



(จ) รางน้ำเพาะปลูกพืช



(ข) ชุดควบคุมระบบจ่ายไฟฟ้า

ภาพที่ 2 ส่วนประกอบโรงเรือนเพาะปลูกพืชไร้ดิน

### ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

#### 1. การตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์

จากการทดสอบวัดแรงดันและกระแส ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชาร์ตเจอร์ แบตเตอรี่และเทอร์โมอิเล็กทริก เวลา 09.00 น. ถึง 17.00 น. โดยจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับเทอร์โมอิเล็กทริก พบว่า อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า 1 ชั่วโมง เท่ากับ 0.18951 kWh คิดเป็นพลังงานที่ประหยัด 1 เดือน เท่ากับ 56.853 kWh แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์

เวลา	แผงเซลล์แสงอาทิตย์		ชาร์ตเจอร์		แบตเตอรี่		เทอร์โมอิเล็กทริก		
	แรงดัน (V)	กระแส (A)	แรงดัน (V)	กระแส (A)	แรงดัน (V)	กระแส (Ah)	แรงดัน (V)	กระแส (A)	กำลังไฟฟ้า (kWh)
09.00	15.69	7.21	12.7	4.6	12.5	45	12.4	1.4	0.01736
10.00	19.59	9.21	13.0	5.3	12.5	45	12.7	1.5	0.01905
11.00	24.68	11.73	13.1	5.4	12.7	45	13.1	1.5	0.01965
12.00	32.66	13.21	13.8	5.4	12.9	45	13.4	1.6	0.02144
13.00	28.33	12.66	13.5	5.4	12.8	45	13.3	1.6	0.02128
14.00	21.32	8.42	13.2	5.3	12.7	45	13.3	1.6	0.02128
15.00	15.12	7.41	12.6	5.3	12.4	45	12.8	1.5	0.01920
16.00	13.45	6.12	12.1	5.4	12.4	45	12.3	1.5	0.01845
17.00	10.73	5.81	11.5	4.9	12.0	45	12.9	1.4	0.01806
อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า 1 ชั่วโมง									0.18951
อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า 10 ชั่วโมง 1 วัน									1.8951
อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า 10 ชั่วโมง 30 วัน									56.853

## 2. การทดสอบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

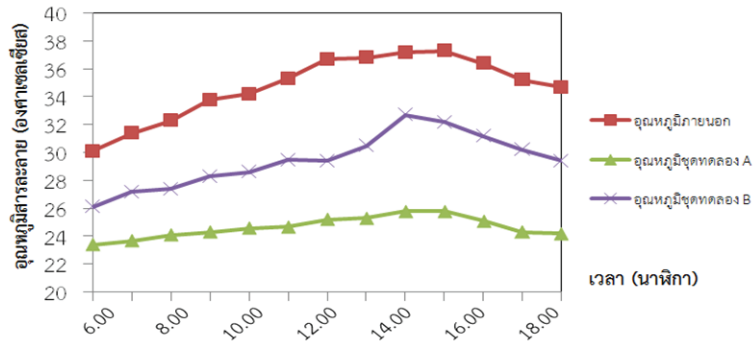
การทดสอบเทอร์โมอิเล็กทริก พบว่า ที่เวลา 25-30 นาที อุณหภูมิเริ่มคงที่ การเพิ่มอุณหภูมิของน้ำร้อน มีค่าเฉลี่ย 89.63 องศาเซลเซียส การลดอุณหภูมิของน้ำเย็น มีค่าเฉลี่ย 4.22 องศาเซลเซียส ผลต่างระหว่างอุณหภูมิด้านร้อนและอุณหภูมิด้านเย็น มีค่าเฉลี่ย 85.41 องศาเซลเซียส และค่าประสิทธิภาพในการทำ ความเย็น (COP) มีค่าเฉลี่ย 0.40 โดยกำลังไฟฟ้าที่วัดได้ มีค่าเฉลี่ย 17.24 วัตต์ [7-8] แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การทดสอบเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

Time (min)	V (V)	I (A)	P (W)	T <sub>Hot</sub> (°C)	T <sub>Cold</sub> (°C)	ΔT (°C)	COP
10	12.29	1.4	17.21	87.57	3.98	83.59	0.40
15	12.30	1.4	17.22	89.17	4.45	84.72	0.40
20	12.41	1.4	17.38	94.10	4.78	89.32	0.39
25	12.41	1.4	17.38	94.08	4.75	89.33	0.39
30	12.41	1.4	17.38	94.09	4.76	89.33	0.39
ค่าเฉลี่ย	12.31	1.4	17.24	89.63	4.22	85.41	0.40

## 3. การเปรียบเทียบอุณหภูมิสารละลายธาตุอาหารของชุดทดลอง A และ ชุดทดลอง B

โดยชุดทดลอง A เป็นระบบควบคุมอุณหภูมิน้ำด้วยชุดทำความเย็นโดยใช้เทอร์โมอิเล็กทริก สำหรับปลูกผักสลัดกรีนไอค ที่อุณหภูมิ 20-25 องศาเซลเซียส ชุดทดลอง B เป็นระบบที่ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิ น้ำ โดยทำการเก็บผลของอุณหภูมิตั้งแต่ 06.00 นาฬิกา ถึง 18.00 นาฬิกา พบว่าอุณหภูมิภายนอกเฉลี่ยมีค่าอยู่ที่ 34.72 องศาเซลเซียส ชุดทดลอง A มีอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 24.65 องศาเซลเซียส ชุดทดลอง B มีอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 29.43 องศาเซลเซียส แสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 เปรียบเทียบอุณหภูมิสารละลายของชุดทดลอง A และชุดทดลอง B

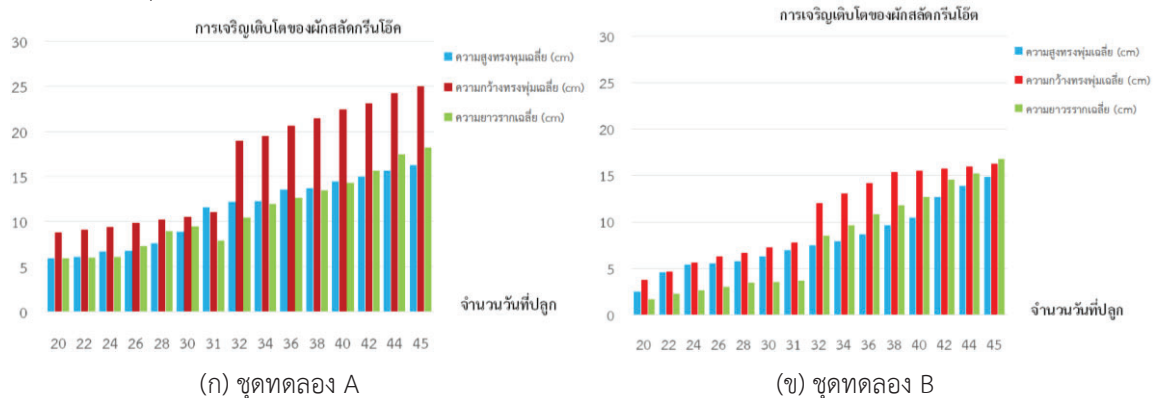
#### 4. การเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของผักสลัดกรีนโอ๊คของชุดทดลอง A และชุดทดลอง B

โดยการเก็บข้อมูลความสูงทรงพุ่ม ความกว้างทรงพุ่ม และความยาวราก ตามช่วงอายุของผักสลัดระหว่างที่ผักสลัดอายุ 24 – 45 วัน และบันทึกข้อมูลการเจริญเติบโตแต่ละช่วงอายุของผักสลัด เพื่อให้เห็นถึงความแตกต่างของความเจริญเติบโตของผักสลัดกรีนโอ๊คระหว่างชุดทดลอง A และ ชุดทดลอง B แสดงดังตารางที่ 3

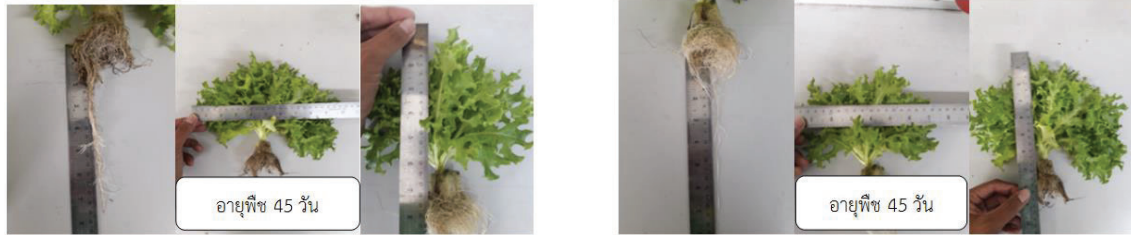
ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของผักสลัดกรีนโอ๊คของชุดทดลอง A และชุดทดลอง B

อายุพืช (วัน)	วัน/เดือน/ปี	ชุดทดลอง A			ชุดทดลอง B		
		ความสูงทรงพุ่มเฉลี่ย (cm)	ความกว้างทรงพุ่มเฉลี่ย (cm)	ความยาวรากเฉลี่ย (cm)	ความสูงทรงพุ่มเฉลี่ย (cm)	ความกว้างทรงพุ่มเฉลี่ย (cm)	ความยาวรากเฉลี่ย (cm)
24	10/เม.ย./61	6.73	9.41	6.13	5.41	5.58	2.66
31	17/เม.ย./61	11.58	11.08	7.91	6.91	7.75	3.66
38	24/เม.ย./61	13.75	21.51	13.5	9.61	15.33	11.75
45	1/พ.ค./61	16.25	25.01	18.25	14.82	16.25	16.75

การเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของผักสลัดกรีนโอ๊ค ที่อายุ 45 วัน ชุดทดลอง A ความสูงทรงพุ่มเฉลี่ย 16.25 เซนติเมตร ความกว้างทรงพุ่มเฉลี่ย 25.01 เซนติเมตร และความยาวรากเฉลี่ย 18.25 เซนติเมตร ชุดทดลอง B ความสูงทรงพุ่มเฉลี่ย 14.82 เซนติเมตร ความกว้างทรงพุ่มเฉลี่ย 16.25 เซนติเมตร และความยาวรากเฉลี่ย 16.75 เซนติเมตร จะเห็นได้ว่าผักสลัดกรีนโอ๊คของชุดทดลอง A มีอัตราการเจริญเติบโตดีกว่าชุดทดลอง B เนื่องจากการควบคุมอุณหภูมิสารละลายธาตุอาหาร [4-5] แสดงดังภาพที่ 4 และภาพที่ 5



ภาพที่ 4 กราฟเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของผักสลัดกรีนโอ๊คของชุดทดลอง A และชุดทดลอง B



(ก) ชุดทดลอง A

(ข) ชุดทดลอง B

ภาพที่ 5 ภาพเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของผักสลัดกรีนโอ๊คของชุดทดลอง A และชุดทดลอง B

## 5. ประเมินทางเศรษฐศาสตร์ของระบบโรงเรือนเพาะปลูกพืชไร้ดิน

จากการวิเคราะห์ความเหมาะสมและความเป็นไปได้ ในการลงทุนสร้างโรงเรือนเพาะปลูกพืชไร้ดิน ระบบทำความเย็นสารละลายธาตุอาหาร ด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกส์ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ พิจารณาค่า NPV B/C Ratio และ IRR พบว่ามีความเหมาะสมในการลงทุน ถ้าพิจารณาราคาขายโดยทั่วไปของผักไร้ดินที่ 45-50 บาท จะมีจุดคุ้มทุนที่ 4-5 ปี ถ้าสามารถแบ่งจำหน่ายปลีกได้ ในราคารวมถึงกิโลกรัมละ 65 บาท ก็จะมีระยะเวลาคืนทุนเพียง 3-4 ปี ดังนั้นการทำตลาดเพื่อให้ได้ราคาขายสูงเป็นสิ่งสำคัญในการดำเนินธุรกิจนี้และจะต้องมีการบริหารจัดการต้นทุน เช่น เรียนรู้การผสมปุ๋ยน้ำเองโดยไม่ใช้ปุ๋ยน้ำสำเร็จรูป เป็นต้น

### สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาและออกแบบสร้างโรงเรือนเพาะปลูกพืชไร้ดิน ระบบทำความเย็นสารละลายธาตุอาหาร ด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกส์ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ พบว่าพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ขนาด 500 W สามารถจ่ายให้กับเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ทำให้ประหยัดพลังงานไฟฟ้า เท่ากับ 56.853 kWh/เดือน การทดลองเปรียบเทียบอุณหภูมิสารละลายธาตุอาหารของชุดทดลอง A และ ชุดทดลอง B สำหรับปลูกผักสลัดกรีนโอ๊ค โดยชุดทดลอง A เป็นระบบควบคุมอุณหภูมิน้ำด้วยชุดทำความเย็นโดยใช้เทอร์โมอิเล็กทริก ที่อุณหภูมิ 20-25 องศาเซลเซียส ชุดทดลอง B เป็นระบบที่ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิน้ำ พบว่าชุดทดลอง A มีอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 24.65 องศาเซลเซียส ชุดทดลอง B มีอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 29.43 องศาเซลเซียส การเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของพืช โดยการเก็บข้อมูลความสูงทรงพุ่ม ความกว้างทรงพุ่ม และความยาวราก ตามช่วงอายุของผักสลัดระหว่างที่ผักสลัดอายุ 24 – 45 วัน พบว่าผลการทดสอบชุดทดลอง A มีแนวโน้มการเจริญเติบโตที่ดีกว่า ชุดทดลอง B เนื่องจากอุณหภูมิสารละลายธาตุอาหารและความชื้นสัมพัทธ์มีผลต่อการเจริญเติบโต

จากผลงานวิจัยพบว่าโรงเรือนเพาะปลูกพืชไร้ดิน โดยรักษาอุณหภูมิสารละลายธาตุอาหารให้อยู่สภาวะที่เหมาะสม ส่งผลต่ออัตราการผลิตของพืช สอดคล้องกับข้อมูลของ [2] โรงเรือนต้นแบบมีส่วนสำคัญในการช่วยลดอุณหภูมิภายในโรงเรือนและทำให้ผลผลิตดีกว่าโรงเรือนทั่วไปเนื่องจากอุณหภูมิสารละลายธาตุอาหารและความชื้นมีผลต่อการเจริญเติบโต สอดคล้องกับข้อมูลของ [9] เมื่อติดตั้งพลังงานแสงอาทิตย์ เข้าไปในระบบจะส่งผลให้การใช้พลังงานไฟฟ้าในการเพาะปลูกพืชลดลง โดยสามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้ประมาณ 62% ทำให้ต้นทุนการเพาะปลูกพืชลดลงและมีระยะเวลาในการคืนทุนเท่ากับ 5 ปี ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัย ควรศึกษาเกี่ยวกับตัวแปร ด้านแสงกับการเจริญเติบโตของพืชและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างลักษณะของพืช

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนานวัตกรรมโรงเรือนเพาะปลูกพืชไร้ดิน ระบบทำความเย็นสารละลายธาตุอาหาร ด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกส์ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นโครงการที่จัดทำขึ้นโดยได้รับการสนับสนุนจากเงินงบประมาณประจำปี พ.ศ.2561 จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ โครงการวิจัยนี้ดำเนินการและสำเร็จไปได้ด้วยดี คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำงานวิจัยในครั้งนี้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] กลุ่มเกษตรกร. (2561). พื้นที่เพาะปลูกพืชไร้. นครสวรรค์: สำนักงานเกษตร จังหวัดนครสวรรค์.
- [2] ดิเรก ทองอร่าม. (2550). การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน: กลไกการจัดการการผลิตและเทคโนโลยีการผลิตเชิงธุรกิจในประเทศไทย. (พิมพ์ครั้งที่ 3). กรุงเทพฯ : พิมพ์ดีการพิมพ์.
- [3] ทศวรรษ สีตะวัน. (2558). เทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริก. ครั้งที่ 1 กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [4] ธนากร น้ำหอมจันทร์ และ อติกร เสรีพัฒนานนท์. (2557). ระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในโรงเรือน
- [5] เพาะปลูกพืชไร้ดิน แบบทำความเย็นด้วยวิธีการระเหยของน้ำร่วมกับสเปรย์ละอองน้ำแบบอัตโนมัติ โดยใช้ระบบควบคุมเชิงตรรกะแบบโปรแกรมได้. วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย, 8(1), 98-111 [5] อภิรัฐ ปิ่นทอง. (2553). เอกสารอบรมการปลูกพืชไร้ดิน. ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, ปทุมธานี
- [6] Amir, Y.F. and Aliakbar, A. (2014). Analysis of a symbiotic thermoelectric system for power generation and liquid preheating. Applied Thermal Engineering, Vol. 71, pp. 501-507.
- [7] Benlloch-Gonzalez, M., Quintero, J.M., Suarez, M. P., Sanchez-Lucas, R., Fernandez-Escobar, R. et al., (2016). Effect of moderate high temperature on the vegetative growth and potassium allocation in olive plants. J Plant Physiol 207 : 22-29.
- [8] Del Sagrado, J., J. A. Sánchez, F. Rodríguez and M. Berenguel, (2016). Bayesian networks for greenhouse temperature control. Journal of Applied Logic 17 : 25-35.
- [9] Ntinas, G. K., Koukounaras, A. and Kotsopoulos, T., (2015). Effect of energy saving solar sleeves on characteristics of hydroponic tomatoes grown in a greenhouse. Scientia Horticulturae 194 : 126-133.

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